

信息融合，暂态稳定评估

ABSTRACT

Energy Management System plays a more and more important role in modern grid control center. However practical requests demand EMS performing more analysis under various state beyond normal state. Technology of communication and computer enable more plentiful and accurate data to be sent to control center via a faster and more flexible means. Thus, more computer decision support results can be achieved at the control center based on the newly delivered data. In this environment, this paper presents a notion of constructing a decision support system for grid dispatch center, plus fault handling and some dynamic analysis function to EMS. More AI techniques are used in the dispatch decision support system to provide better decision results to the dispatchers. Considering security and stability of grid as the primary goal, the paper presents some methods on building the system, especially on fault handling and transient stability assessment.

Ontology is used to ensure open characteristics to the decision support system. Through building field ontology for power system dispatch analysis, software modules can share more knowledge and implement more effective communication beyond pure data. Thus, software has more clear structure and behaves better characteristics of openness.

To reuse existing EMS resource and be able to run automatically, the system is constructed with a Multi-Agent type architecture. The paper describes the structure and running logic of single agent, communication means among agents, structure and function of environment that agents live in, as well as the perceiving means of agents in environment. Through modeling of environment and single agent, the ability of automatically run is achieved.

As to fault handling, a reasoning framework for power system restoration is built with Petri-Net technique and is used in searching for restoration plan. In this framework, all structures and behaviors of elements in the restoration process are described with unified language, and the framework has some advantages on modeling concurrency, resource limiting and collision, as well as advantages of faster searching speed than Expert System. Another advantage of this framework is it decreases the complexity of model by object-oriented technique when handling large-scale system.

In dynamic analysis, a new data mining method combining machine learning and information fusion is proposed to use the plentiful data acquired from on-line record and off-line simulation about transient stability. The new method can be used a fast algorithm for

on-line transient stability assessment. The difficulty of input feature selection in traditional machine learning is solved in the new method. The method can makes use of multiple data as well as data from WAMS and behave some complement advantages to traditional TSA based on precise models. The calculating speed of this method can satisfy on-line application demand. So it provides a new way for on-line TSA.

KEY WORDS: decision support system, ontology, multi-agent system, Petri-Net, power system restoration, support vector machine, information fusion, transient stability assessment.

声 明

本人郑重声明：此处所提交的博士学位论文《电网调度决策支持系统的研究》，是本人在华北电力大学攻读博士学位期间，在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名： 马 骞 日 期： 2005.6.16

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名： 马 骞
日 期： 2005.6.16

导师签名： 杨以海
日 期： 2005.6.16

第一章 绪论

1.1 调度决策支持系统的研究背景

在今天的电力系统中,能量管理系统 (EMS, Energy Management System)^[1]已经成为辅助运行人员监视、分析电网运行状态,做出各种操作决策的必备工具。无论是大区级、省级还是地区级的电网调度中心,几乎都形成了基于自动化数据采集的电网分析与监控系统,为电网分析和监控所配备的各种分析软件已多达 40 余种^[2]。这些都极大提高了运行人员对于电网的认识水平和监控能力,为实现安全、经济、可靠的供电做出重大贡献。EMS 将电力系统的调度由经验型提升至分析型。

然而,现有的 EMS 功能能够满足电力系统调度运行人员的全部需要了么?如果有新的应用需求,我们应该从哪些方面着手进行研究?解决新问题的难点在哪里?从 EMS 所服务的电网调度部门实际应用需求出发,不难回答以上问题。

EMS 给我们带来了丰富的测量数据和监控手段,极大方便了我们正确掌握系统运行状态,预防系统故障而快速做出决策;但其负面作用则是增加了调度运行人员的监视工作量,尤其表现在电网发生故障时,现有 EMS 系统在系统故障发生后会将所有报警信息不加处理地提供运行人员,会有数以万计的数据涌入调度控制中心,并且还经常会伴随误报警的现象。这样大量的数据呈现在调度员面前,只能是增加他们的紧张感和工作负担,甚至可能会延误调度员及时做出正确的故障处理决策^[1]。另一方面,我们还应看到,现有的 EMS 系统仅仅是针对电网运行的正常状态分析而设计的,对于大区电网而言,缺少其最为关心的在线的稳定监视与评估功能,使得电网不得不运行于保守的输电水平之下,影响了设备供电潜力的发挥^[3-5]。

对于 EMS 的第一个不足,正确的做法应该是让计算机自动收集和处理电网故障时产生的报警数据,由计算机代替人类调度员执行故障诊断任务和故障后的恢复控制方案生成工作。这是完全可能的,原因有二:一是计算机执行故障诊断的数据源已经较为充足。无论是人类调度员,还是在线运行负责监控电网运行的计算机软件,诊断故障都要依靠所收集到的报警信息,传统的 SCADA 系统无法传输丰富的保护、自动装置等二次设备的动作信息,这些数据在现场处理时多数是由调度员打电话询问变电站值班人员而获取的,因而阻碍了由计算机执行故障诊断任务,没有故障诊断做基础,故障恢复控制方案也无法由计算机完成。通信技术的飞速发展改善了这一状况,现在电力系统的变电站内、变电站到调度中心之间都大量架设了光纤网络,构成了电力系统专用的高速广域信息网络^[6],变电站综合自动化将变电站内部的二次信息有效整合到了站内的监控系统之中^[7],故障信息系统则将这些信息以分层、交互的方式传输到了调度控制中心^[8,9],使

第一章 绪论

1.1 调度决策支持系统的研究背景

在今天的电力系统中,能量管理系统 (EMS, Energy Management System)^[1]已经成为辅助运行人员监视、分析电网运行状态,做出各种操作决策的必备工具。无论是大区级、省级还是地区级的电网调度中心,几乎都形成了基于自动化数据采集的电网分析与监控系统,为电网分析和监控所配备的各种分析软件已多达 40 余种^[2]。这些都极大提高了运行人员对于电网的认识水平和监控能力,为实现安全、经济、可靠的供电做出重大贡献。EMS 将电力系统的调度由经验型提升至分析型。

然而,现有的 EMS 功能能够满足电力系统调度运行人员的全部需要了么?如果有新的应用需求,我们应该从哪些方面着手进行研究?解决新问题的难点在哪里?从 EMS 所服务的电网调度部门实际应用需求出发,不难回答以上问题。

EMS 给我们带来了丰富的测量数据和监控手段,极大方便了我们正确掌握系统运行状态,预防系统故障而快速做出决策;但其负面作用则是增加了调度运行人员的监视工作量,尤其表现在电网发生故障时,现有 EMS 系统在系统故障发生后会将所有报警信息不加处理地提供运行人员,会有数以万计的数据涌入调度控制中心,并且还经常会伴随误报警的现象。这样大量的数据呈现在调度员面前,只能是增加他们的紧张感和工作负担,甚至可能会延误调度员及时做出正确的故障处理决策^[1]。另一方面,我们还应看到,现有的 EMS 系统仅仅是针对电网运行的正常状态分析而设计的,对于大区电网而言,缺少其最为关心的在线的稳定监视与评估功能,使得电网不得不运行于保守的输电水平之下,影响了设备供电潜力的发挥^[3-5]。

对于 EMS 的第一个不足,正确的做法应该是让计算机自动收集和处理电网故障时产生的报警数据,由计算机代替人类调度员执行故障诊断任务和故障后的恢复控制方案生成工作。这是完全可能的,原因有二:一是计算机执行故障诊断的数据源已经较为充足。无论是人类调度员,还是在线运行负责监控电网运行的计算机软件,诊断故障都要依靠所收集到的报警信息,传统的 SCADA 系统无法传输丰富的保护、自动装置等二次设备的动作信息,这些数据在现场处理时多数是由调度员打电话询问变电站值班人员而获取的,因而阻碍了由计算机执行故障诊断任务,没有故障诊断做基础,故障恢复控制方案也无法由计算机完成。通信技术的飞速发展改善了这一状况,现在电力系统的变电站内、变电站到调度中心之间都大量架设了光纤网络,构成了电力系统专用的高速广域信息网络^[6],变电站综合自动化将变电站内部的二次信息有效整合到了站内的监控系统之中^[7],故障信息系统则将这些信息以分层、交互的方式传输到了调度控制中心^[8,9],使

调度控制中心可以获取任意感兴趣的二次信息。计算机执行故障诊断的数据源已不再是技术上的障碍。第二个原因是人工智能技术的发展为计算机执行故障诊断和故障恢复工作提供了更为精确、快速的求解策略, 尽管电力系统中故障诊断和故障恢复的计算机求解还未达到成熟, 但智能技术的发展已经使我们可以预见这一问题能够得到解决。在诸如柔性加工制造、航空航天等工业系统中, 计算机执行故障诊断已经取得了成功应用。利用人工智能技术来处理电力系统故障诊断与故障恢复问题的时机已经成熟。

对于将 EMS 应用范围扩展至动态分析, 完成在线的动态安全分析(DSA, Dynamic Security Analysis), 也早已有相关研究的报导。Chiang 等人研究了在线运行的暂态稳定分析软件^[10], 薛禹胜等也研究了在线运行的稳定分析软件^[11], 这两种方法代表了当前暂态稳定在线分析的两大主要流派。将这些动态分析功能整合到 EMS 中构成动态 EMS 也已成为广泛研究的课题^[12-16]。而为动态 EMS 发展注入活力的新契机中, 最有影响的要算是广域测量系统(WAMS, Wide Area Measurement System)的出现。利用 GPS 全球定位系统, 可以精确的测量出电力系统中各节点的相角。这一反映电网全局特性, 并且是反映电网动态过程的状态量的获取, 为电网分析计算提供了重要的直接依据^[17]。

综上, 将现有 EMS 的应用范围拓展到正常稳态以外的应用范围, 以解决日益突出的安全稳定问题和快速故障处理问题, 是当前的一项重要研究课题。EMS 能处理电网的不同运行状态后, 我们可以说, 系统具备了决策功能, 因此可以称之为“电网调度决策支持系统”(Grid Dispatching Decision Support System)。它将计算机技术尤其是人工智能技术应用于求解电力系统问题, 主要目标是协助调度员完成调度任务, 为调度员提供电网调度操作相关的决策支持。形象的说, 调度决策支持系统就是调度员身边的“软件机器人助手”, 将调度员从繁重、紧张的工作中解脱出来, 并使电网运行于安全、经济相结合的优化状态。因此, 从应用意义上说, 这种软件机器人的目标, 是能够将调度从现在的分析型提升至智能型。

1.2 调度决策支持系统的研究内容

1.2.1 对调度决策支持系统的定义

同 EMS 一样, 电网调度决策支持系统也是一个整体性的概念, 对它的研究应从多个方面入手。

在确定具体的研究问题之前, 我们先对调度决策支持系统的定义加以探讨。如前所述, 调度决策支持系统的目标是实现“智能型”调度, 那么仿照上世纪 50 年代图灵给智能所作的定义方式, 我们也可以给调度决策支持系统做如下满足可操作要求、无歧义的定义。

图灵给智能所做的定义方式如下^[18]: 一台机器和一个人处在同样的房子(环境)中, 另有一个提问者待在一间与上面不同的房子中。当提问者提出问题时, 房间里的机器和

调度控制中心可以获取任意感兴趣的二次信息。计算机执行故障诊断的数据源已不再是技术上的障碍。第二个原因是人工智能技术的发展为计算机执行故障诊断和故障恢复工作提供了更为精确、快速的求解策略, 尽管电力系统中故障诊断和故障恢复的计算机求解还未达到成熟, 但智能技术的发展已经使我们可以预见这一问题能够得到解决。在诸如柔性加工制造、航空航天等工业系统中, 计算机执行故障诊断已经取得了成功应用。利用人工智能技术来处理电力系统故障诊断与故障恢复问题的时机已经成熟。

对于将 EMS 应用范围扩展至动态分析, 完成在线的动态安全分析(DSA, Dynamic Security Analysis), 也早已有相关研究的报导。Chiang 等人研究了在线运行的暂态稳定分析软件^[10], 薛禹胜等也研究了在线运行的稳定分析软件^[11], 这两种方法代表了当前暂态稳定在线分析的两大主要流派。将这些动态分析功能整合到 EMS 中构成动态 EMS 也已成为广泛研究的课题^[12-16]。而为动态 EMS 发展注入活力的新契机中, 最有影响的要算是广域测量系统(WAMS, Wide Area Measurement System)的出现。利用 GPS 全球定位系统, 可以精确的测量出电力系统中各节点的相角。这一反映电网全局特性, 并且是反映电网动态过程的状态量的获取, 为电网分析计算提供了重要的直接依据^[17]。

综上, 将现有 EMS 的应用范围拓展到正常稳态以外的应用范围, 以解决日益突出的安全稳定问题和快速故障处理问题, 是当前的一项重要研究课题。EMS 能处理电网的不同运行状态后, 我们可以说, 系统具备了决策功能, 因此可以称之为“电网调度决策支持系统”(Grid Dispatching Decision Support System)。它将计算机技术尤其是人工智能技术应用于求解电力系统问题, 主要目标是协助调度员完成调度任务, 为调度员提供电网调度操作相关的决策支持。形象的说, 调度决策支持系统就是调度员身边的“软件机器人助手”, 将调度员从繁重、紧张的工作中解脱出来, 并使电网运行于安全、经济相结合的优化状态。因此, 从应用意义上说, 这种软件机器人的目标, 是能够将调度从现在的分析型提升至智能型。

1.2 调度决策支持系统的研究内容

1.2.1 对调度决策支持系统的定义

同 EMS 一样, 电网调度决策支持系统也是一个整体性的概念, 对它的研究应从多个方面入手。

在确定具体的研究问题之前, 我们先对调度决策支持系统的定义加以探讨。如前所述, 调度决策支持系统的目标是实现“智能型”调度, 那么仿照上世纪 50 年代图灵给智能所作的定义方式, 我们也可以给调度决策支持系统做如下满足可操作要求、无歧义的定义。

图灵给智能所做的定义方式如下^[18]: 一台机器和一个人处在同样的房子(环境)中, 另有一个提问者待在一间与上面不同的房子中。当提问者提出问题, 房间里的机器和

调度控制中心可以获取任意感兴趣的二次信息。计算机执行故障诊断的数据源已不再是技术上的障碍。第二个原因是人工智能技术的发展为计算机执行故障诊断和故障恢复工作提供了更为精确、快速的求解策略, 尽管电力系统中故障诊断和故障恢复的计算机求解还未达到成熟, 但智能技术的发展已经使我们可以预见这一问题能够得到解决。在诸如柔性加工制造、航空航天等工业系统中, 计算机执行故障诊断已经取得了成功应用。利用人工智能技术来处理电力系统故障诊断与故障恢复问题的时机已经成熟。

对于将 EMS 应用范围扩展至动态分析, 完成在线的动态安全分析(DSA, Dynamic Security Analysis), 也早已有相关研究的报导。Chiang 等人研究了在线运行的暂态稳定分析软件^[10], 薛禹胜等也研究了在线运行的稳定分析软件^[11], 这两种方法代表了当前暂态稳定在线分析的两大主要流派。将这些动态分析功能整合到 EMS 中构成动态 EMS 也已成为广泛研究的课题^[12-16]。而为动态 EMS 发展注入活力的新契机中, 最有影响的要算是广域测量系统(WAMS, Wide Area Measurement System)的出现。利用 GPS 全球定位系统, 可以精确的测量出电力系统中各节点的相角。这一反映电网全局特性, 并且是反映电网动态过程的状态量的获取, 为电网分析计算提供了重要的直接依据^[17]。

综上, 将现有 EMS 的应用范围拓展到正常稳态以外的应用范围, 以解决日益突出的安全稳定问题和快速故障处理问题, 是当前的一项重要研究课题。EMS 能处理电网的不同运行状态后, 我们可以说, 系统具备了决策功能, 因此可以称之为“电网调度决策支持系统”(Grid Dispatching Decision Support System)。它将计算机技术尤其是人工智能技术应用于求解电力系统问题, 主要目标是协助调度员完成调度任务, 为调度员提供电网调度操作相关的决策支持。形象的说, 调度决策支持系统就是调度员身边的“软件机器人助手”, 将调度员从繁重、紧张的工作中解脱出来, 并使电网运行于安全、经济相结合的优化状态。因此, 从应用意义上说, 这种软件机器人的目标, 是能够将调度从现在的分析型提升至智能型。

1.2 调度决策支持系统的研究内容

1.2.1 对调度决策支持系统的定义

同 EMS 一样, 电网调度决策支持系统也是一个整体性的概念, 对它的研究应从多个方面入手。

在确定具体的研究问题之前, 我们先对调度决策支持系统的定义加以探讨。如前所述, 调度决策支持系统的目标是实现“智能型”调度, 那么仿照上世纪 50 年代图灵给智能所作的定义方式, 我们也可以给调度决策支持系统做如下满足可操作要求、无歧义的定义。

图灵给智能所做的定义方式如下^[18]: 一台机器和一个人处在同样的房子(环境)中, 另有一个提问者待在一间与上面不同的房子中。当提问者提出问题, 房间里的机器和

人分别做回答，如果提问者不能分辨哪个是人的回答，哪个是机器的回答，我们就认为机器有了智能。

相应的，对最理想的电网调度决策支持系统——“智能型调度系统”做如下定义：让调度决策支持系统即“机器人调度员”，和人类调度员在同样的环境中单独做决策，再将二者进行对比，如果我们不能判断哪个决策是由“机器人调度员”所做出的，哪个是由人类调度员做出的，就可以说是实现了“智能型”调度，实现了理想意义下的电网调度决策支持系统。

这是一个相当有挑战性的定义，给出这个定义的目的并不是要尝试不断对被研究系统做永无休止的对比测试，因为同人工智能的研究原则一样，研究电网运行和控制的本质远比重复性的模拟、复制人的处理过程重要。与列出一个长长的、并且可能存在争议的“机器人能力”清单的定义方式相比，这种定义无疑是可操作的，并且是没有歧义的，这是一个纯粹理论意义上的定义。

尽管我们的理论定义中不对调度决策支持系统做“功能枚举”式的定义，但列出一个可实现的清单作为我们第一步要实现的“系统外观”还是有必要的。这个功能清单应在现有应用条件许可或可预计将来的现场应用条件许可的条件下给出：

(1) 系统可以对电网正常运行状态做安全和经济性能评估，给出使电网运行于安全、经济、优质相结合的方式下的决策结果；

(2) 系统在电网发生故障时，可以自动收集各种报警信息，执行故障诊断。在通信允许的场合，主动获取未能上送到控制中心的与诊断相关的故障信息，以提高诊断准确度与结果的可信性。诊断结束后，给出处理故障所需的故障恢复方案及相关的故障操作指导；

(3) 如果是大区域电网，系统还应具备在线的稳定监控能力，给出电网当前运行点在稳定域中所处的位置和下一时刻的发展趋势，对于会造成系统失去稳定性的扰动，给出能够使系统维持稳定运行的控制策略；

(4) 在电网各种操作任务到来时，给出满足各级应用需求的调度操作票或变电站操作票。

这个功能清单实际上就是电网调度运行人员（包括调度员和方式、保护等部门的所有人员）的职责清单，这可能是一个有争议的清单，因为没有一项功能已经被完全实现，即使交给人类调度员处理，也有某些功能无法被以 100% 的正确率完成。

我们暂且放下对定义的争论，转而研究在现有 EMS 基础上还需做哪些工作，才能使 EMS 向调度决策支持系统的目标进化。

1.2.2 软件的体系结构与设计模式

软件体系结构^[19]对于一个大型应用软件的重要性已为人们公认，调度决策支持系统

人分别做回答，如果提问者不能分辨哪个是人的回答，哪个是机器的回答，我们就认为机器有了智能。

相应的，对最理想的电网调度决策支持系统——“智能型调度系统”做如下定义：让调度决策支持系统即“机器人调度员”，和人类调度员在同样的环境中单独做决策，再将二者进行对比，如果我们不能判断哪个决策是由“机器人调度员”所做出的，哪个是由人类调度员做出的，就可以说是实现了“智能型”调度，实现了理想意义下的电网调度决策支持系统。

这是一个相当有挑战性的定义，给出这个定义的目的并不是要尝试不断对被研究系统做永无休止的对比测试，因为同人工智能的研究原则一样，研究电网运行和控制的本质远比重复性的模拟、复制人的处理过程重要。与列出一个长长的、并且可能存在争议的“机器人能力”清单的定义方式相比，这种定义无疑是可操作的，并且是没有歧义的，这是一个纯粹理论意义上的定义。

尽管我们的理论定义中不对调度决策支持系统做“功能枚举”式的定义，但列出一个可实现的清单作为我们第一步要实现的“系统外观”还是有必要的。这个功能清单应在现有应用条件许可或可预计将来的现场应用条件许可的条件下给出：

(1) 系统可以对电网正常运行状态做安全和经济性能评估，给出使电网运行于安全、经济、优质相结合的方式下的决策结果；

(2) 系统在电网发生故障时，可以自动收集各种报警信息，执行故障诊断。在通信允许的场合，主动获取未能上送到控制中心的与诊断相关的故障信息，以提高诊断准确度与结果的可信性。诊断结束后，给出处理故障所需的故障恢复方案及相关的故障操作指导；

(3) 如果是大区域电网，系统还应具备在线的稳定监控能力，给出电网当前运行点在稳定域中所处的位置和下一时刻的发展趋势，对于会造成系统失去稳定性的扰动，给出能够使系统维持稳定运行的控制策略；

(4) 在电网各种操作任务到来时，给出满足各级应用需求的调度操作票或变电站操作票。

这个功能清单实际上就是电网调度运行人员（包括调度员和方式、保护等部门的所有人员）的职责清单，这可能是一个有争议的清单，因为没有一项功能已经被完全实现，即使交给人类调度员处理，也有某些功能无法被以 100% 的正确率完成。

我们暂且放下对定义的争论，转而研究在现有 EMS 基础上还需做哪些工作，才能使 EMS 向调度决策支持系统的目标进化。

1.2.2 软件的体系结构与设计模式

软件体系结构^[19]对于一个大型应用软件的重要性已为人们公认，调度决策支持系统

是比现有 EMS 规模更大、功能更复杂的应用软件，必须具有好的体系结构做为其实现的基础。软件体系结构是指软件在设计构成上的基本的、可供设计选择的形态和总体结构，它定义的是软件的局部和总体计算部件的构成，以及这些部件之间的相互作用关系。研究软件体系结构的目的是在于使设计的系统具备复用性、扩展性，减小软件的开发成本和开发周期，增强软件对于不断发展、变更的需求的适应能力，从而赋予软件更强大的生命力。设计模式可以被归纳为广义的软件体系结构范畴之中，它描述了在特定场景下解决一般设计问题的类和相互通信的对象，从而使得设计经验、设计方案可以被成功复用。设计模式是更抽象层次上的软件复用^[20]。

对电网调度决策支持系统软件，现有 EMS 的体系结构不能确保系统良好运行。即使是最为简单的地区电网应用环境中，也必须在现有 EMS 基础上加入故障诊断、故障恢复和操作指导三个应用软件模块，而在数据源层面则需要将故障信息系统的数据库以合理的通信方式和存储方式接入后台。粗略统计的结果是，接入故障信息后的综合数据平台中的数据项将比原有的来自于 SCADA 的数据量和数据结构均多出一倍左右。更应该注意的是，故障信息不同于常规的四遥数据，它通常仅在电网发生故障时才需要，而电网发生故障时涌入调度控制中心的数据是海量的，应付这种突发的数据传输、将不同属性的数据分层次传输和存储，就显得异常重要。这些都应在设计软件的体系结构时就予以充分考虑。可以说，设计符合新的应用环境和需求的综合数据、通信支撑平台，是实现电网调度决策支持系统的首要环节。在 EMS 和决策支持系统 DSS 中，最核心的是数据库系统，应用软件以数据库为核心构成^[2,21]。只有从系统的角度仔细设计数据库，不同的应用软件才能联成有机的 EMS 整体，并适应电力系统的业务扩展和软件功能的扩展，提高生命力。

同时，电网调度决策支持系统还是一个面向过程的分析决策系统，而传统的 EMS 则主要针对电网中的一个断面进行分析。这种面向过程的分析不仅体现于各个分析计算模块的内部，如状态估计、潮流计算、安全分析、故障诊断等，更需要整合这些功能各异而又相互合作的计算模块，并对这些计算模块实行优先级和计算顺序的控制。当系统中引入动态分析软件后，这个过程和逻辑将变得十分复杂而又重要，计算功能整合的效果对软件运行质量的影响会比各个软件模块中所包含的计算本身对系统质量的影响还要大。现有 EMS 的进程控制显然无法满足这些要求。这在软件体系结构设计中，被归纳入行为型设计模式的范畴之中。

1.2.3 相关的标准化工作

在对 EMS 的不断深入研究和实践过程中，开发人员已经充分意识到“开放系统”的深远意义。只有实现了开放系统，才能做到信息资源的高度共享、硬件资源的重复利用，才能使软件具有更广泛的应用范围和适应能力。

是比现有 EMS 规模更大、功能更复杂的应用软件，必须具有好的体系结构做为其实现的基础。软件体系结构是指软件在设计构成上的基本的、可供设计选择的形态和总体结构，它定义的是软件的局部和总体计算部件的构成，以及这些部件之间的相互作用关系。研究软件体系结构的目的是在于使设计的系统具备复用性、扩展性，减小软件的开发成本和开发周期，增强软件对于不断发展、变更的需求的适应能力，从而赋予软件更强大的生命力。设计模式可以被归纳为广义的软件体系结构范畴之中，它描述了在特定场景下解决一般设计问题的类和相互通信的对象，从而使得设计经验、设计方案可以被成功复用。设计模式是更抽象层次上的软件复用^[20]。

对电网调度决策支持系统软件，现有 EMS 的体系结构不能确保系统良好运行。即使是最为简单的地区电网应用环境中，也必须在现有 EMS 基础上加入故障诊断、故障恢复和操作指导三个应用软件模块，而在数据源层面则需要将故障信息系统的数据以合理的通信方式和存储方式接入后台。粗略统计的结果是，接入故障信息后的综合数据平台中的数据项将比原有的来自于 SCADA 的数据量和数据结构均多出一倍左右。更应该注意的是，故障信息不同于常规的四遥数据，它通常仅在电网发生故障时才需要，而电网发生故障时涌入调度控制中心的数据是海量的，应付这种突发的数据传输、将不同属性的数据分层次传输和存储，就显得异常重要。这些都应在设计软件的体系结构时就予以充分考虑。可以说，设计符合新的应用环境和需求的综合数据、通信支撑平台，是实现电网调度决策支持系统的首要环节。在 EMS 和决策支持系统 DSS 中，最核心的是数据库系统，应用软件以数据库为核心构成^[2,21]。只有从系统的角度仔细设计数据库，不同的应用软件才能联成有机的 EMS 整体，并适应电力系统的业务扩展和软件功能的扩展，提高生命力。

同时，电网调度决策支持系统还是一个面向过程的分析决策系统，而传统的 EMS 则主要针对电网中的一个断面进行分析。这种面向过程的分析不仅体现于各个分析计算模块的内部，如状态估计、潮流计算、安全分析、故障诊断等，更需要整合这些功能各异而又相互合作的计算模块，并对这些计算模块实行优先级和计算顺序的控制。当系统中引入动态分析软件后，这个过程和逻辑将变得十分复杂而又重要，计算功能整合的效果对软件运行质量的影响会比各个软件模块中所包含的计算本身对系统质量的影响还要大。现有 EMS 的进程控制显然无法满足这些要求。这在软件体系结构设计中，被归纳入行为型设计模式的范畴之中。

1.2.3 相关的标准化工作

在对 EMS 的不断深入研究和实践过程中，开发人员已经充分意识到“开放系统”的深远意义。只有实现了开放系统，才能做到信息资源的高度共享、硬件资源的重复利用，才能使软件具有更广泛的应用范围和适应能力。

开放的软件系统,简单说就是使用户的应用程序能在不同厂家生产的平台上运行,实现多厂家系统间的集成和资源共享,这就要求所有厂家和用户都要遵循与应用有关的模型标准和接口标准。因为即使对于同一个问题进行分析建模,不同的厂家、不同的应用系统也会使用不同的数据结构和数据接口,而数据结构是软件算法的基础,这就造成了不同厂家所开发的应用软件无法移植、无法互相通信、无法共享计算结果,严重限制了软件的应用场合和功能扩展。

对于一般性的应用而言,至少需要解决操作系统、用户界面、数据库和网络通信等四个方面的接口标准问题,才能构成开放式平台^[2]。对 EMS 应用领域而言,更注重的是领域数据模型和访问接口的标准化工作。为此,IEC 组织 TC 57(第 57 技术委员会)WORK GROUP13(第 13 工作组)制定了与 EMS 专业相关的 CIM(Common Information Model,公共信息模型)和 CIS(Common Interface Specification,公共访问接口)标准,即通常所说的 61970 标准^[22],该标准的制定使 EMS 的应用软件组件化、开放化,降低了系统集成的成本,保护了用户资源。61970 标准中的 CIM 部分给出了一个用来描述控制中心 EMS API(Application Program Interface,应用程序接口)问题的参考模型,包括基本网络应用和用于能量计划、检修、财务、SCADA 等方面的数据类型定义;CIS 部分则给出了面向不同应用需求和性能指标的数据访问接口,CIS 部分很多尚处于准备阶段。

CIM 中所定义到的数据基本限于电力系统的稳态分析应用范围之内,而对于二次设备的数据模型和电网动态过程的数据模型定义较少,这对现有 EMS 应用并不造成很大限制,但对于调度决策支持系统而言却是个制约因素。因此,要想将调度决策支持系统做成具有分布性、可移植性、互操作性的开放系统,一个很重要的工作就是尽快制定有关电网二次数据和动态数据的模型,并使所有应用构建于该统一模型基础之上。模型标准的制定是一个漫长的过程,需要全体电力系统软件开发工作者共同努力来完成。

1.2.4 电力系统的故障处理

现有的 EMS 系统中由于受到采集数据的限制,通常不具备故障处理功能。而在故障发生时,海量数据涌入调度控制中心后将增加调度员的工作压力和紧张感,在这种情况下要求调度员能够快速、准确的判断故障并做出最优的恢复决策是困难的。合理的做法是将此时的故障数据搜集、报警信息处理、故障诊断、故障恢复方案生成等一系列工作都交由计算机去完成,这样能大大减轻调度员工作的压力,并能通过计算机具有的精确逻辑推理、快速计算、不受情绪影响等优势将专家经验不受时间、空间限制的方式充分发挥出来。

故障处理可以分为两个阶段:故障诊断和故障恢复。计算机完成故障诊断要以 SCADA 数据和故障信息系统的数据共同做为基础,采用各种人工智能的推理策略求解故障诊断任务,诊断的结果中应包括故障的元件、故障造成的开关、保护动作、对开关、

开放的软件系统,简单说就是使用户的应用程序能在不同厂家生产的平台上运行,实现多厂家系统间的集成和资源共享,这就要求所有厂家和用户都要遵循与应用有关的模型标准和接口标准。因为即使对于同一个问题进行分析建模,不同的厂家、不同的应用系统也会使用不同的数据结构和数据接口,而数据结构是软件算法的基础,这就造成了不同厂家所开发的应用软件无法移植、无法互相通信、无法共享计算结果,严重限制了软件的应用场合和功能扩展。

对于一般性的应用而言,至少需要解决操作系统、用户界面、数据库和网络通信等四个方面的接口标准问题,才能构成开放式平台^[2]。对 EMS 应用领域而言,更注重的是领域数据模型和访问接口的标准化工作。为此,IEC 组织 TC 57 (第 57 技术委员会) WORK GROUP13(第 13 工作组)制定了与 EMS 专业相关的 CIM(Common Information Model, 公共信息模型)和 CIS(Common Interface Specification, 公共访问接口)标准,即通常所说的 61970 标准^[22],该标准的制定使 EMS 的应用软件组件化、开放化,降低了系统集成的成本,保护了用户资源。61970 标准中的 CIM 部分给出了一个用来描述控制中心 EMS API(Application Program Interface, 应用程序接口)问题的参考模型,包括基本网络应用和用于能量计划、检修、财务、SCADA 等方面的数据类型定义;CIS 部分则给出了面向不同应用需求和性能指标的数据访问接口,CIS 部分很多尚处于准备阶段。

CIM 中所定义到的数据基本限于电力系统的稳态分析应用范围之内,而对于二次设备的数据模型和电网动态过程的数据模型定义较少,这对现有 EMS 应用并不造成很大限制,但对于调度决策支持系统而言却是个制约因素。因此,要想将调度决策支持系统做成具有分布性、可移植性、互操作性的开放系统,一个很重要的工作就是尽快制定有关电网二次数据和动态数据的模型,并使所有应用构建于该统一模型基础之上。模型标准的制定是一个漫长的过程,需要全体电力系统软件开发工作者共同努力来完成。

1.2.4 电力系统的故障处理

现有的 EMS 系统中由于受到采集数据的限制,通常不具备故障处理功能。而在故障发生时,海量数据涌入调度控制中心后将增加调度员的工作压力和紧张感,在这种情况下要求调度员能够快速、准确的判断故障并做出最优的恢复决策是困难的。合理的做法是将此时的故障数据搜集、报警信息处理、故障诊断、故障恢复方案生成等一系列工作都交由计算机去完成,这样能大大减轻调度员工作的压力,并能通过计算机具有的精确逻辑推理、快速计算、不受情绪影响等优势将专家经验不受时间、空间限制的方式充分发挥出来。

故障处理可以分为两个阶段:故障诊断和故障恢复。计算机完成故障诊断要以 SCADA 数据和故障信息系统的数据共同做为基础,采用各种人工智能的推理策略求解故障诊断任务,诊断的结果中应包括故障的元件、故障造成的开关、保护动作、对开关、

保护动作正确与否的评价、故障恢复时元件是否可用等几方面。诊断结果可能是确定性的,也可能是不确定性的,这要依据诊断软件所能采集到的数据的充分程度而定。以往计算机执行故障诊断在现场应用效果不好的一个主要原因就是受到了采集的数据的限制。现在,在投入了故障信息系统的地区和变电站综合自动化程度较高的地区,调度中心已经可以收集到绝大多数变电站的二次数据,这为计算机实现故障诊断提供了极好的基础条件,使得研究电网调度决策支持系统成为可能。

故障诊断的计算机处理必将导致故障恢复的计算机处理。另外,由于现在电力系统的安全可靠性越来越高,复杂故障已经很少出现,调度员处理这类复杂故障的经验也就常常被局限于来自仿真系统,这时集成了专家经验的计算机故障处理软件就体现出了更显著的优越性。故障恢复的目的是在电力系统发生故障以后,尽快重新建立一个稳定的、损失负荷最小的系统,是一个典型的多阶段、多目标、连续离散混合事件的决策问题。故障严重程度、电网规模、恢复操作的不可预见性等,都会对故障恢复决策造成影响。一般而言,在地区电网中,故障均被局限于本地,全系统的稳定性不会受到过大影响,因此主要考虑尽快给失电负荷恢复供电,在新的供电方式下系统的损耗尽量小等目标^[23]。而在大电网故障的情况下,首先要考虑保持系统的稳定性,在能够维持现有系统稳定运行的基础上,尽快重构一个损失负荷最小的统一供电网络^[24,25]。不同的目标决定了对不同规模的电网故障恢复所采用的模型与算法均有所区别。

软件对故障的处理结果,反映了整个决策系统智能行为的水平。

1.2.5 电力系统动态分析与控制算法

电力系统动态分析与控制的重要性在我国正面临的西电东送、全国联网以及电力市场的新环境下显得越发重要。2003年9月以后,三峡第一期发电工程相继投运。东北电网、华北电网、华中电网和川渝电网第一次互联,构成的交流系统地跨14个省、市、自治区,装机容量超过1.4亿千瓦,南北距离超过4600千米,使我国的互联电力系统成为世界上少有的超大规模同步交流系统之一。系统越来越庞大,运行方式越来越复杂,保证系统安全可靠运行的难度也越来越大,使电网的安全稳定问题越来越突出^[26-28]。在现代大电网中,各区域、各部分互相联系、互相影响,如果电网结构不完善,缺少必要的安全措施,一个局部的小扰动或异常运行如果对其监控、处理不当,也可能引起全系统的连锁反应,甚至造成大面积的系统瓦解,对人民生活及国民经济造成灾难性损失。在这方面,美国、俄罗斯、加拿大、欧洲、日本等国家和地区都曾遭受过大停电事故^[29,30]。我国虽然没有发生过大的稳定破坏事故,但因稳定破坏所造成的经济损失也是相当惊人的,安徽、湖北、河北、广东等电网均发生过多次功率振荡^[31-33],对系统稳定及电力系统设备造成严重威胁。

统计表明,电力系统大停电事故多数是单一故障处理不当导致故障蔓延而造成的

保护动作正确与否的评价、故障恢复时元件是否可用等几方面。诊断结果可能是确定性的,也可能是不确定性的,这要依据诊断软件所能采集到的数据的充分程度而定。以往计算机执行故障诊断在现场应用效果不好的一个主要原因就是受到了采集的数据的限制。现在,在投入了故障信息系统的地区和变电站综合自动化程度较高的地区,调度中心已经可以收集到绝大多数变电站的二次数据,这为计算机实现故障诊断提供了极好的基础条件,使得研究电网调度决策支持系统成为可能。

故障诊断的计算机处理必将导致故障恢复的计算机处理。另外,由于现在电力系统的安全可靠性越来越高,复杂故障已经很少出现,调度员处理这类复杂故障的经验也就常常被局限于来自仿真系统,这时集成了专家经验的计算机故障处理软件就体现出了更显著的优越性。故障恢复的目的是在电力系统发生故障以后,尽快重新建立一个稳定的、损失负荷最小的系统,是一个典型的多阶段、多目标、连续离散混合事件的决策问题。故障严重程度、电网规模、恢复操作的不可预见性等,都会对故障恢复决策造成影响。一般而言,在地区电网中,故障均被局限于本地,全系统的稳定性不会受到过大影响,因此主要考虑尽快给失电负荷恢复供电,在新的供电方式下系统的损耗尽量小等目标^[23]。而在大电网故障的情况下,首先要考虑保持系统的稳定性,在能够维持现有系统稳定运行的基础上,尽快重构一个损失负荷最小的统一供电网络^[24,25]。不同的目标决定了对不同规模的电网故障恢复所采用的模型与算法均有所区别。

软件对故障的处理结果,反映了整个决策系统智能行为的水平。

1.2.5 电力系统动态分析与控制算法

电力系统动态分析与控制的重要性在我国正面临的西电东送、全国联网以及电力市场的新环境下显得越发重要。2003年9月以后,三峡第一期发电工程相继投运。东北电网、华北电网、华中电网和川渝电网第一次互联,构成的交流系统地跨14个省、市、自治区,装机容量超过1.4亿千瓦,南北距离超过4600千米,使我国的互联电力系统成为世界上少有的超大规模同步交流系统之一。系统越来越庞大,运行方式越来越复杂,保证系统安全可靠运行的难度也越来越大,使电网的安全稳定问题越来越突出^[26-28]。在现代大电网中,各区域、各部分互相联系、互相影响,如果电网结构不完善,缺少必要的安全措施,一个局部的小扰动或异常运行如果对其监控、处理不当,也可能引起全系统的连锁反应,甚至造成大面积的系统瓦解,对人民生活及国民经济造成灾难性损失。在这方面,美国、俄罗斯、加拿大、欧洲、日本等国家和地区都曾遭受过大停电事故^[29,30]。我国虽然没有发生过大的稳定破坏事故,但因稳定破坏所造成的经济损失也是相当惊人的,安徽、湖北、河北、广东等电网均发生过多次功率振荡^[31-33],对系统稳定及电力系统设备造成严重威胁。

统计表明,电力系统大停电事故多数是单一故障处理不当导致故障蔓延而造成的

[27,28], 因此在线的动态分析与决策就显得更加重要。按照在线分析的要求, 可以大体将电力系统的动态过程分为快过程和慢过程。快过程是指功角稳定、速度极快的电压稳定等在几秒范围内就能波及到全网、影响到全网安全稳定运行的动态过程。快过程发展迅速、后果严重, 必须及时处理。在现有条件下, 对快过程只能采取由离线决策表演变而来的“在线决策、实时匹配”的方法。慢过程包括除暂态稳定、快速电压稳定外系统的其他动态变化过程。包括: 动态稳定过程, 一般电压稳定过程, 频率稳定过程, 低频振荡过程, 以及线路等设备接近运行极限造成的端部和全线路发热、弧垂不断增大的过程等。慢过程是造成故障扩大和蔓延的主要因素, 必须有效加以处理。对慢过程可以采取仿真技术进行实时决策, 并实施实时控制。

电网调度决策支持系统在动态处理方面的目标就是将应对电网慢过程的预防控制和处理电网快过程的紧急控制措施有机结合在一起, 保证系统安全稳定运行。应该看到, 直到目前为止, 还没有一套完整的电力系统动态分析软件, 能对电网当前运行状态的各种安全指标进行分析、评价, 电力系统动态安全域的研究工作也正在进行中。因此这方面还有很多的工作要做。

1.2.6 人工智能技术的更深介入

相比于 EMS, 电网调度决策支持系统的一个重要特征就是它面对复杂多变的电力系统, 表现出一定的智能行为, 可以自主运行, 自主分析、决策。决策能力是电网调度决策支持系统区别于现有 EMS 的最明显特征, 在电力系统调度这样复杂的环境中, 系统必须具备一定的智能才有可能做出正确的决策。电力系统故障处理是典型的难以建立精确计算模型的问题, 只能通过人工智能方法求解。而在动态分析与控制方面, 智能算法同样显现出与传统分析算法互补的优势, 将二者结合可能会产生对动态分析与控制问题的新的解决途径。因此, 需要更广泛的将人工智能技术引入电力系统分析中, 与传统电力系统分析计算有机结合, 优势互补, 更好的分析和控制电力系统的运行。

从上世纪 70 年代开始, 以构建智能体 Agent 为核心, 人工智能知识得到了结构和思想上的统一, 并在此框架下取得了巨大的成功。计算机“深蓝(Dark Blue)”战胜了国际象棋的世界冠军, 计算机控制的机器人可以在火星上进行样本采集甚至自身系统故障的排除工作, 计算机视觉系统经过训练可以驾驶汽车沿车道行进穿越美国行程 2850 英里……这一系列的现实向我们展示了计算机处理实际问题的能力。

到目前为止, 人工智能在电力系统中的应用形式仍以基于知识的问题求解系统为主。这主要是因为电力系统在国民经济中占有特殊重要的地位, 因而对新算法的要求十分苛刻, 算法必须具有足够的鲁棒性和明确的解释机制才能在实际应用中被接受, 因而人工神经网络(ANN, Artificial Neural Network)等方法虽具有一系列显著优点, 但由于缺乏清晰的解释机制而仍停留在理论研究和实验室仿真阶段。基于知识的问题求解系统近

[27,28], 因此在线的动态分析与决策就显得更加重要。按照在线分析的要求, 可以大体将电力系统的动态过程分为快过程和慢过程。快过程是指功角稳定、速度极快的电压稳定等在几秒范围内就能波及到全网、影响到全网安全稳定运行的动态过程。快过程发展迅速、后果严重, 必须及时处理。在现有条件下, 对快过程只能采取由离线决策表演变而来的“在线决策、实时匹配”的方法。慢过程包括除暂态稳定、快速电压稳定外系统的其他动态变化过程。包括: 动态稳定过程, 一般电压稳定过程, 频率稳定过程, 低频振荡过程, 以及线路等设备接近运行极限造成的端部和全线路发热、弧垂不断增大的过程等。慢过程是造成故障扩大和蔓延的主要因素, 必须有效加以处理。对慢过程可以采取仿真技术进行实时决策, 并实施实时控制。

电网调度决策支持系统在动态处理方面的目标就是将应对电网慢过程的预防控制和处理电网快过程的紧急控制措施有机结合在一起, 保证系统安全稳定运行。应该看到, 直到目前为止, 还没有一套完整的电力系统动态分析软件, 能对电网当前运行状态的各种安全指标进行分析、评价, 电力系统动态安全域的研究工作也正在进行中。因此这方面还有很多的工作要做。

1.2.6 人工智能技术的更深介入

相比于 EMS, 电网调度决策支持系统的一个重要特征就是它面对复杂多变的电力系统, 表现出一定的智能行为, 可以自主运行, 自主分析、决策。决策能力是电网调度决策支持系统区别于现有 EMS 的最明显特征, 在电力系统调度这样复杂的环境中, 系统必须具备一定的智能才有可能做出正确的决策。电力系统故障处理是典型的难以建立精确计算模型的问题, 只能通过人工智能方法求解。而在动态分析与控制方面, 智能算法同样显现出与传统分析算法互补的优势, 将二者结合可能会产生对动态分析与控制问题的新的解决途径。因此, 需要更广泛的将人工智能技术引入电力系统分析中, 与传统电力系统分析计算有机结合, 优势互补, 更好的分析和控制电力系统的运行。

从上世纪 70 年代开始, 以构建智能体 Agent 为核心, 人工智能知识得到了结构和思想上的统一, 并在此框架下取得了巨大的成功。计算机“深蓝(Dark Blue)”战胜了国际象棋的世界冠军, 计算机控制的机器人可以在火星上进行样本采集甚至自身系统故障的排除工作, 计算机视觉系统经过训练可以驾驶汽车沿车道行进穿越美国行程 2850 英里……这一系列的现实向我们展示了计算机处理实际问题的能力。

到目前为止, 人工智能在电力系统中的应用形式仍以基于知识的问题求解系统为主。这主要是因为电力系统在国民经济中占有特殊重要的地位, 因而对新算法的要求十分苛刻, 算法必须具有足够的鲁棒性和明确的解释机制才能在实际应用中被接受, 因而人工神经网络(ANN, Artificial Neural Network)等方法虽具有一系列显著优点, 但由于缺乏清晰的解释机制而仍停留在理论研究和实验室仿真阶段。基于知识的问题求解系统近

年来也得到了飞速的发展,其结构形式和推理机制具有了更为丰富的表现形式,计算速度方面也较初期提高了几个数量级。并且,以多智能体集成为代表的群体智能研究也取得了重大进展。这些都为将智能技术应用于现代决策支持系统打下良好的基础。基于知识的智能决策支持系统能有效地为半结构化和非结构化的问题提供决策,扩大了决策支持系统的处理范围,具有更大的应用价值。

人工智能的另一大分枝——连接论方法,其典型代表为人工神经网络和支持向量机(SVM, Support Vector Machine),在机器学习、数据挖掘方面表现出良好的性能,并且在电力系统的问题求解中已得到理论上的充分重视和研究,显示出相对于传统基于模型的算法的巨大优势。但由于前段所述的原因,未能取得实际上的更多应用。但近年来对电力系统运行所积累下的数据进行有针对性的数据挖掘和机器学习的要求已日益紧迫,因此以 ANN 和 SVM 为代表的机器学习方法有望在电力系统数据挖掘、知识发现等方面取得实际应用。

1.3 国内外研究现状

相对于调度决策支持系统这个整体概念而言,我们更容易把握的是对这个问题的分解认识。首先是软件系统的体系结构,其次是完成各个分析任务的计算子模块,包括:稳态分析计算、故障处理、动态安全分析与控制(DSA&C)、电网操作指导(操作票)、调度员仿真培训系统 DTS(操作员培训系统 OTS),等等。如果以 EMS 为基础进行扩展研究去实现调度决策支持系统,那么重点就要从新软件系统的体系结构、EMS 中暂时没有的故障处理和动态分析等几个方面入手。下面仅就电网调度决策支持系统的研究历史及其体系结构、电力系统故障处理、暂态稳定分析等几个方面,简要叙述国内外发展状况。

1.3.1 电网调度决策支持系统的研究历史及其体系结构

历史上曾出现过多种和调度决策支持系统结构和功能相近或相包含的系统,研究的主要目的也都是解决在线的电力系统安全稳定控制和在线的计算机辅助故障处理,但其名称并不统一。

EMS 可以看成是电网调度决策支持系统(或者以上任何一种综合系统)的初级阶段,它是伴随着电力系统自动化技术的不断发展而发展的。自动化技术沿着元件—局部—子系统—管理系统的道路发展,可从理论上将其划分为 3 个阶段:60 年代以前是处在经典理论阶段;到了 70 年代,注入了控制论和系统工程思想,形成了以计算机为基础的现代理论阶段;90 年代以后由于电力市场的提出而融入了经济理论,达到了电力市场理论阶段。达到市场理论阶段后,新的问题不断涌现,如市场中可能出现一些不确定性行为使系统运行方式严重偏离计划、系统中功率波动变得更加频繁等,都造成了经济性

年来也得到了飞速的发展,其结构形式和推理机制具有了更为丰富的表现形式,计算速度方面也较初期提高了几个数量级。并且,以多智能体集成为代表的群体智能研究也取得了重大进展。这些都为将智能技术应用于现代决策支持系统打下良好的基础。基于知识的智能决策支持系统能有效地为半结构化和非结构化的问题提供决策,扩大了决策支持系统的处理范围,具有更大的应用价值。

人工智能的另一大分枝——连接论方法,其典型代表为人工神经网络和支持向量机(SVM, Support Vector Machine),在机器学习、数据挖掘方面表现出良好的性能,并且在电力系统的问题求解中已得到理论上的充分重视和研究,显示出相对于传统基于模型的算法的巨大优势。但由于前段所述的原因,未能取得实际上的更多应用。但近年来对电力系统运行所积累下的数据进行有针对性的数据挖掘和机器学习的要求已日益紧迫,因此以 ANN 和 SVM 为代表的机器学习方法有望在电力系统数据挖掘、知识发现等方面取得实际应用。

1.3 国内外研究现状

相对于调度决策支持系统这个整体概念而言,我们更容易把握的是对这个问题的分解认识。首先是软件系统的体系结构,其次是完成各个分析任务的计算子模块,包括:稳态分析计算、故障处理、动态安全分析与控制(DSA&C)、电网操作指导(操作票)、调度员仿真培训系统 DTS(操作员培训系统 OTS),等等。如果以 EMS 为基础进行扩展研究去实现调度决策支持系统,那么重点就要从新软件系统的体系结构、EMS 中暂时没有的故障处理和动态分析等几个方面入手。下面仅就电网调度决策支持系统的研究历史及其体系结构、电力系统故障处理、暂态稳定分析等几个方面,简要叙述国内外发展状况。

1.3.1 电网调度决策支持系统的研究历史及其体系结构

历史上曾出现过多种和调度决策支持系统结构和功能相近或相包含的系统,研究的主要目的也都是解决在线的电力系统安全稳定控制和在线的计算机辅助故障处理,但其名称并不统一。

EMS 可以看成是电网调度决策支持系统(或者以上任何一种综合系统)的初级阶段,它是伴随着电力系统自动化技术的不断发展而发展的。自动化技术沿着元件—局部—子系统—管理系统的道路发展,可从理论上将其划分为 3 个阶段:60 年代以前是处在经典理论阶段;到了 70 年代,注入了控制论和系统工程思想,形成了以计算机为基础的现代理论阶段;90 年代以后由于电力市场的提出而融入了经济理论,达到了电力市场理论阶段。达到市场理论阶段后,新的问题不断涌现,如市场中可能出现一些不确定性行为使系统运行方式严重偏离计划、系统中功率波动变得更加频繁等,都造成了经济性

年来也得到了飞速的发展,其结构形式和推理机制具有了更为丰富的表现形式,计算速度方面也较初期提高了几个数量级。并且,以多智能体集成为代表的群体智能研究也取得了重大进展。这些都为将智能技术应用于现代决策支持系统打下良好的基础。基于知识的智能决策支持系统能有效地为半结构化和非结构化的问题提供决策,扩大了决策支持系统的处理范围,具有更大的应用价值。

人工智能的另一大分枝——连接论方法,其典型代表为人工神经网络和支持向量机(SVM, Support Vector Machine),在机器学习、数据挖掘方面表现出良好的性能,并且在电力系统的问题求解中已得到理论上的充分重视和研究,显示出相对于传统基于模型的算法的巨大优势。但由于前段所述的原因,未能取得实际上的更多应用。但近年来对电力系统运行所积累下的数据进行有针对性的数据挖掘和机器学习的要求已日益紧迫,因此以 ANN 和 SVM 为代表的机器学习方法有望在电力系统数据挖掘、知识发现等方面取得实际应用。

1.3 国内外研究现状

相对于调度决策支持系统这个整体概念而言,我们更容易把握的是对这个问题的分解认识。首先是软件系统的体系结构,其次是完成各个分析任务的计算子模块,包括:稳态分析计算、故障处理、动态安全分析与控制(DSA&C)、电网操作指导(操作票)、调度员仿真培训系统 DTS(操作员培训系统 OTS),等等。如果以 EMS 为基础进行扩展研究去实现调度决策支持系统,那么重点就要从新软件系统的体系结构、EMS 中暂时没有的故障处理和动态分析等几个方面入手。下面仅就电网调度决策支持系统的研究历史及其体系结构、电力系统故障处理、暂态稳定分析等几个方面,简要叙述国内外发展状况。

1.3.1 电网调度决策支持系统的研究历史及其体系结构

历史上曾出现过多种和调度决策支持系统结构和功能相近或相包含的系统,研究的主要目的也都是解决在线的电力系统安全稳定控制和在线的计算机辅助故障处理,但其名称并不统一。

EMS 可以看成是电网调度决策支持系统(或者以上任何一种综合系统)的初级阶段,它是伴随着电力系统自动化技术的不断发展而发展的。自动化技术沿着元件—局部—子系统—管理系统的道路发展,可从理论上将其划分为 3 个阶段:60 年代以前是处在经典理论阶段;到了 70 年代,注入了控制论和系统工程思想,形成了以计算机为基础的现代理论阶段;90 年代以后由于电力市场的提出而融入了经济理论,达到了电力市场理论阶段。达到市场理论阶段后,新的问题不断涌现,如市场中可能出现一些不确定性行为使系统运行方式严重偏离计划、系统中功率波动变得更加频繁等,都造成了经济性

能的追求影响到了安全性的结果。同时,系统变得更为开放,系统间传输各种数据变得更加频繁,软件组件的增删日益增多,这些都对 EMS 的结构及功能产生了影响。

90 年代初期,太平洋煤气电力公司 PG&E 在不同硬件平台不同数据库、不同用户界面和不同通信协议的各种自动化系统基础之上,建立了一个称之为“拱顶”(Overarching)的电网运行综合支持系统(Integrated Support System),在提高电网运行的调度效率和管理水平方面取得了明显的效果。但这是个侧重于管理和离线分析的系统^[34]。而最早全面论述建立电力系统自动型调度决策系统的文献是文[16],由现代能量控制中心的创始人 Dy-Liacco 发表于 1997 年。文中仅论述了关于建立自动型调度(Automatic Operator)系统的设想,主要目的是为了解决电力系统的紧急控制问题。文中建议将包括动态安全分析、自动学习、操作员仿真培训等在内的多个软件整合于一体,并使其自动运行,实时监测电网状态,以实现紧急控制的目的。在线运行的 AO 每 15 分钟执行一次计算,计算采用模式识别和决策树方法不间断地产生训练集,以模拟人类调度员对电力系统的运行情况的在线监测和自动学习。最后,通过不断的学习,AO 将逐渐变成有经验的调度员。但该文中没有叙述如何考虑自动实现电网的故障处理。文[12-15]也将动态分析功能纳入 EMS 应用范围的研究,并构建了各自的体系结构。文[35]则提出了建立电力系统综合防御体系的概念,提出了电力系统脆弱性的定义与分析途径。在系统脆弱性分析的基础上,提出了建立电力系统战略防御体系的设想,将所有电力系统分析控制相关的问题均纳入一个统一框架之内,构成分层、分布式的多智能体型决策控制系统,各个子系统具有就地决策功能,这样全网就成为一个自愈式电网(Self-healing Grid)。这个框架中包括了调度、规划、市场交易等多个相关联的环节,是一个比调度决策支持系统还要庞大的统一分析环境。文[36]中提出的数字电力系统(DPS, Digital Power System)概念也是一个大的体系,它为我们描绘了一幅信息技术全面应用于电力系统后的美好画卷。DPS 首要的问题是解决电力系统中的安全与经济运行,因此从这个意义上讲,调度决策支持系统算是 DPS 在电网调度中的具体实现。DPS 不是一次性建成的,其发展路线是“逐步发展,步步可用”。文[3]在更细致的层次上提出了现代能量控制中心的概念。重点探讨了控制中心在信息化、智能化、集成化和自动化等方面的变革展望,包括:基于信息理论对电力系统中的信息流进行分析,重建真实的电力系统原貌,改善电力系统的运行;对现有控制中心的数据库进行进一步集成,建立成控制中心的数据仓库并进行数据挖掘,用于控制中心的决策支持;研究并利用各种智能化处理方法用于生成调度决策,建立机器调度员,智能的对电力系统中出现的问题作出迅速反映;对电力系统中的常规操作和异常、事故处理的操作,如日前交易、实时交易、电压无功控制、紧急控制策略表刷新等,实现更高级别的自动化。通过上述途径,可以使控制中心由单一注重安全发展为安全与经济协调、由全局集中控制发展到分层分布控制、由离线分析计算发展到在线实时计算、由开环控制发展到闭环控制、由在线稳态分析和控制发展到在线暂态

分析和控制的高级控制中心。

以上这些系统虽然叫法各异,但同调度决策支持系统有很多共同之处:都是想建立一个计算机主导的分析系统,监控电力系统,使之保持安全稳定运行。

除应用系统的功能外,结构是广为关注的一个焦点问题。结构是大型应用软件的基础,因此对新环境下的各种综合分析系统的研究首先应从结构开始。为适应新环境下更为多变的运行方式和更为频繁的系统间数据交互,很多研究者提出了新的 EMS 的结构模式,其中尤以使用 Agent 技术的研究最为广泛。文[37]指出未来的 EMS 将具有异构性(不同节点上使用的是不同的操作系统、通信协议)、分布性(集中式的控制中心甚至可能会消失)、开放性(软件组件可以灵活增减)、动态性(环境将是持续变化的)的特点,因此建议在 EMS 中应用面向用户的 Agent 技术以及中介 Agent 技术解决软件频繁变化的问题。在系统中由面向用户的 Agent 控制应用程序的运行,根据用户的变更产生或去除系统中的 Agent 个体;当系统中有 Agent 间需要交互时,将交互请求发送给中介 Agent,中介 Agent 负责实现 Agent 间的合作。但文中并未对 Agent 的具体实现做进一步阐述。文[38]则在定义了电网调度管理的多智能体模型的基础上,给出了各个 Agent 个体间完成协作的合作算法。合作算法包括目标识别、目标分解、任务分配等几个阶段,求解是基于黑板结构进行的。文[39]为电力市场下的 EMS 构建了两层的软件体系结构:市场运作系统(MOS)和电力调度系统(PSOS)。对前者,采用基于统一知识库的结构,在统一数据库环境中实现交易和其他电子商务业务;对后者,应采用客户-服务器的分布式结构,并通过中间件衔接客户和服务器间的服务请求。

目前对于下一代 EMS 的功能和结构都存在着很多不同的看法,对于这些设想,科学的态度是沿着“逐步发展,步步可用”的路线前进,逐步尝试将新功能和新技术应用于实际系统。

1.3.2 电网故障处理的研究现状

电网故障诊断和故障恢复的计算机算法最早在上世纪 80 年代被提出,是专家系统最早应用于电力系统的入手点,也是集中应用人工智能技术较多的问题领域。

在故障处理方面,日本学者首先将专家系统用于开关操作方案的制定和选择并获得成功^[40]。近年来将故障处理功能作为电网在线分析系统的一个组成部分,并与现有 EMS 的稳态分析功能有机结合的工作也广泛展开^[41-44]。文[41][42]提出用基于知识的系统(KBR, Knowledge Based Reasoning System)求解电力系统故障诊断问题,这类方法直到现在仍然是求解电力系统故障诊断问题的主流。利用 KBR 系统求解故障诊断的通常做法是基于产生式规则的系统,即把保护、断路器的动作逻辑以及运行人员的诊断经验用规则表示出来,形成故障诊断专家系统的知识库,进而根据报警信息对知识库进行推理,获得故障诊断的结论。输电网络中保护的逻辑以及保护与断路器之间的关系易于用

分析和控制的高级控制中心。

以上这些系统虽然叫法各异,但同调度决策支持系统有很多共同之处:都是想建立一个计算机主导的分析系统,监控电力系统,使之保持安全稳定运行。

除应用系统的功能外,结构是广为关注的一个焦点问题。结构是大型应用软件的基础,因此对新环境下的各种综合分析系统的研究首先应从结构开始。为适应新环境下更为多变的运行方式和更为频繁的系统间数据交互,很多研究者提出了新的 EMS 的结构模式,其中尤以使用 Agent 技术的研究最为广泛。文[37]指出未来的 EMS 将具有异构性(不同节点上使用的是不同的操作系统、通信协议)、分布性(集中式的控制中心甚至可能会消失)、开放性(软件组件可以灵活增减)、动态性(环境将是持续变化的)的特点,因此建议在 EMS 中应用面向用户的 Agent 技术以及中介 Agent 技术解决软件频繁变化的问题。在系统中由面向用户的 Agent 控制应用程序的运行,根据用户的变更产生或去除系统中的 Agent 个体;当系统中有 Agent 间需要交互时,将交互请求发送给中介 Agent,中介 Agent 负责实现 Agent 间的合作。但文中并未对 Agent 的具体实现做进一步阐述。文[38]则在定义了电网调度管理的多智能体模型的基础上,给出了各个 Agent 个体间完成协作的合作算法。合作算法包括目标识别、目标分解、任务分配等几个阶段,求解是基于黑板结构进行的。文[39]为电力市场下的 EMS 构建了两层的软件体系结构:市场运作系统(MOS)和电力调度系统(PSOS)。对前者,采用基于统一知识库的结构,在统一数据库环境中实现交易和其他电子商务业务;对后者,应采用客户-服务器的分布式结构,并通过中间件衔接客户和服务器间的服务请求。

目前对于下一代 EMS 的功能和结构都存在着很多不同的看法,对于这些设想,科学的态度是沿着“逐步发展,步步可用”的路线前进,逐步尝试将新功能和新技术应用于实际系统。

1.3.2 电网故障处理的研究现状

电网故障诊断和故障恢复的计算机算法最早在上世纪 80 年代被提出,是专家系统最早应用于电力系统的入手点,也是集中应用人工智能技术较多的问题领域。

在故障处理方面,日本学者首先将专家系统用于开关操作方案的制定和选择并获得成功^[40]。近年来将故障处理功能作为电网在线分析系统的一个组成部分,并与现有 EMS 的稳态分析功能有机结合的工作也广泛展开^[41-44]。文[41][42]提出用基于知识的系统(KBR, Knowledge Based Reasoning System)求解电力系统故障诊断问题,这类方法直到现在仍然是求解电力系统故障诊断问题的主流。利用 KBR 系统求解故障诊断的通常做法是基于产生式规则的系统,即把保护、断路器的动作逻辑以及运行人员的诊断经验用规则表示出来,形成故障诊断专家系统的知识库,进而根据报警信息对知识库进行推理,获得故障诊断的结论。输电网络中保护的逻辑以及保护与断路器之间的关系易于用

直观的、模块化的规则表示出来；基于产生式规则的专家系统允许增加、删除或修改一些规则，以确保诊断系统的实时性和有效性；能够在一定程度上解决不确定性问题；能够给出符合人类语言习惯的结论并具有相应的解释能力等。文[41]提出基于元件的动作逻辑建立一个在线的仿真系统来模拟系统中出现各种故障时的开关、保护动作情况，将此仿真系统与调度员培训系统结合，调度员可以在此系统上执行故障诊断和后面的恢复处理工作，借此来提高调度员诊断、处理故障的水平。文[42]基于来自 SOE 的数据，采用逻辑推理结合复合假设、可信度评价的方法实现了故障诊断。文[45]则提出了基于“虚拟保护”的思想利用故障录波数据进行故障诊断的方法。“虚拟保护”就是用纯软件的方式模拟保护的硬件动作原理，借此可以避免一些人为造成的干扰因素。“虚拟保护”的缺点在于仅能对一些具有确定动作原理的保护进行经典算法的模拟，因而模拟中无法体现各型号保护自身所具有的一些独有特点。文[24]和[25]分别就大电网故障恢复问题进行了一般恢复原则方面的叙述。文[25]提出应将各种电力系统分析软件同故障恢复专家系统有机结合，构建一个混合推理的专家系统。这是一种很有代表性的做法，能够将人的经验通过专家系统的规则体现到恢复决策中。文[43],[44]是较为典型的用 KBR 系统求解故障恢复问题的方法。文[46-48]使用了另外形式的 KBR 系统求解故障恢复问题。文[46,47]利用 Petri 网分别利用 Petri 网求解了输电网和配电网的故障恢复问题，Petri 网本质上也是一种基于知识的问题求解系统，只是表现形式与普通的问题求解系统如专家系统等有所不同。Petri 网具有描述并发、资源限制、冲突等方面优点而在故障恢复中体现出优势。但文[46,47]中所使用的普通 Petri 网无法避免对大系统建模时遇到的“组合爆炸”问题而受到限制。文[48]叙述了基于案例匹配的故障恢复方法，事先存储一定数量的故障恢复方案，并建立索引，在线应用时，匹配与目前系统实际情形最相近的案例，在此基础上对恢复方案进行小范围修改，即可得到当前故障的恢复策略。优点是在线应用速度快，并且系统的案例库是可扩展的，用案例扩展的方式突破了专家知识获取困难的瓶颈，但其缺点是对于大型网络和复杂故障，往往匹配不到足够相似的已有案例，使得系统失去有效性；并且，案例近似程度估算也是一个带有主观因素和不确定性的问题，有待进一步研究。利用各种形式的 KBR 系统进行故障诊断和恢复的优点是求解过程可以清晰解释，结果明确，缺点是自适应能力较差。

除 KBR 系统外，ANN、优化、Fuzzy 集、Rough 集等方法也被广泛应用于故障诊断和恢复中。ANN 在故障处理中的应用仍限于故障诊断，优化在诊断和恢复中都有应用，Fuzzy 集、Rough 集的应用通常是与其他方法结合使用，以发挥各自的一些优势。与专家系统相比，人工神经网络最大的特点是采用神经元及它们之间的有向权重连接来隐含处理问题的知识，并具有一定程度的学习能力，表现为在确定了 ANN 的基本结构后，运用学习算法对训练样本进行训练，可以实现知识的自我组织；在学习完成之后，ANN 还具有一定的泛化能力；另一方面，即使输入信号带有一定的干扰噪声，仍能给

出正确的输出结果。ANN 的缺点在于训练时需要准备大量的样本、训练速度较慢、外推能力较差,以及无法对诊断结果给出清晰可靠的解释^[49-52]。以遗传算法为代表的优化算法在故障诊断中也得到了广泛应用。从诊断结果应该能够尽可能解释所有报警信息的角度考虑,故障诊断问题可以等价的转化为根据报警信息估计故障点的数学模型,借此可以得到一个优化函数,从而将输电网络故障诊断问题转化为 0-1 整数规划问题^[53]。遗传算法从优化的角度出发基本上可以解决故障诊断问题,尤其是在复故障或存在保护、断路器误动作的情况下,能够给出全局最优或局部最优的多个可能的诊断结果。应用中的主要问题是如何建立合理的输电网络故障诊断数学模型,以及由于不同的交叉和变异算子对结果的影响比较大,如何确定最优的交叉和变异算子及相应的参数也有待进一步研究。优化算法还常被用于配电网的故障恢复中,这是由输电网和配电网的故障恢复的目标不同造成的。输电网的故障恢复首先要保证系统的安全稳定运行,而配电网则具有相对放松的安全要求,它的目标通常是损失的负荷量最小、操作的开关最少、恢复后的网损最小等。因此配电网故障恢复可以通过建立相应的适应度函数也转化为优化问题求解^[54]。模糊集和粗糙集的方法作为较为有效的辅助分析方法常被与其他方法,如 ES、ANN 等结合应用,以提高原有算法的灵活性或计算速度等性能^[55-57]。当在专家系统中融入模糊理论后,由精确推理变为近似推理,在相当程度上增强了专家系统的容错性。粗糙集常被用于筛选报警信息以及和 ANN 结合应用时对训练样本的预处理工作,粗糙集能在一定程度上减小推理的工作空间从而提高计算速度。除此之外,文[58]提出了基于信息理论中信息损失最小原理的故障诊断方法,为故障诊断问题提供了一个全新的分析途径。目前对于大电网的故障恢复问题,研究方法仍以各种形式的基于 KBR 系统(如专家系统、Petri 网方法, CBR 法等)为主。

1.3.3 暂态稳定分析的研究现状

在线的系统动态行为分析包括很多内容,如暂态稳定、电压稳定、中长期的动态稳定、小扰动稳定等,要将动态分析功能纳入 EMS,需要分步骤进行。其中,暂态稳定分析是进行这项工作的重要基础。

电力系统暂态稳定分析方法主要有两类:一是基于模型的精确求解算法,二是利用各种人工智能技术将暂态稳定分析转化为模式识别类问题求解。在基于模型的方法中,又分为时域仿真法(Time Domain Simulation)或逐步积分法(SBS, Step-by-Step Integration)、直接法以及将二者混合使用的混合法。利用人工智能技术进行暂态稳定分析的工作多数集中在 ANN 和 SVM 上。

时域仿真法最大的优点是对电力系统模型具有很强的适应性,即它可适应电力系统各元件精确的数学模型,可以计及各种扰动类型和调节器,适用于大规模电力系统;同时时域仿真法可给出丰富的信息,如系统各种变量的时间响应曲线。它的计算结果准确、

出正确的输出结果。ANN 的缺点在于训练时需要准备大量的样本、训练速度较慢、外推能力较差,以及无法对诊断结果给出清晰可靠的解释^[49-52]。以遗传算法为代表的优化算法在故障诊断中也得到了广泛应用。从诊断结果应该能够尽可能解释所有报警信息的角度考虑,故障诊断问题可以等价的转化为根据报警信息估计故障点的数学模型,借此可以得到一个优化函数,从而将输电网络故障诊断问题转化为 0-1 整数规划问题^[53]。遗传算法从优化的角度出发基本上可以解决故障诊断问题,尤其是在复故障或存在保护、断路器误动作的情况下,能够给出全局最优或局部最优的多个可能的诊断结果。应用中的主要问题是如何建立合理的输电网络故障诊断数学模型,以及由于不同的交叉和变异算子对结果的影响比较大,如何确定最优的交叉和变异算子及相应的参数也有待进一步研究。优化算法还常被用于配电网的故障恢复中,这是由输电网和配电网的故障恢复的目标不同造成的。输电网的故障恢复首先要保证系统的安全稳定运行,而配电网则具有相对放松的安全要求,它的目标通常是损失的负荷量最小、操作的开关最少、恢复后的网损最小等。因此配电网故障恢复可以通过建立相应的适应度函数也转化为优化问题求解^[54]。模糊集和粗糙集的方法作为较为有效的辅助分析方法常被与其他方法,如 ES、ANN 等结合应用,以提高原有算法的灵活性或计算速度等性能^[55-57]。当在专家系统中融入模糊理论后,由精确推理变为近似推理,在相当程度上增强了专家系统的容错性。粗糙集常被用于筛选报警信息以及和 ANN 结合应用时对训练样本的预处理工作,粗糙集能在一定程度上减小推理的工作空间从而提高计算速度。除此之外,文[58]提出了基于信息理论中信息损失最小原理的故障诊断方法,为故障诊断问题提供了一个全新的分析途径。目前对于大电网的故障恢复问题,研究方法仍以各种形式的基于 KBR 系统(如专家系统、Petri 网方法, CBR 法等)为主。

1.3.3 暂态稳定分析的研究现状

在线的系统动态行为分析包括很多内容,如暂态稳定、电压稳定、中长期的动态稳定、小扰动稳定等,要将动态分析功能纳入 EMS,需要分步骤进行。其中,暂态稳定分析是进行这项工作的重要基础。

电力系统暂态稳定分析方法主要有两类:一是基于模型的精确求解算法,二是利用各种人工智能技术将暂态稳定分析转化为模式识别类问题求解。在基于模型的方法中,又分为时域仿真法(Time Domain Simulation)或逐步积分法(SBS, Step-by-Step Integration)、直接法以及将二者混合使用的混合法。利用人工智能技术进行暂态稳定分析的工作多数集中在 ANN 和 SVM 上。

时域仿真法最大的优点是对电力系统模型具有很强的适应性,即它可适应电力系统各元件精确的数学模型,可以计及各种扰动类型和调节器,适用于大规模电力系统;同时时域仿真法可给出丰富的信息,如系统各种变量的时间响应曲线。它的计算结果准确、

可靠,因此时域仿真法仍然是电力系统暂态稳定分析的最主要工具。但时域仿真法也存在一定的缺点,如计算速度慢,在确定系统的临界切除时间时必须反复试凑,只能得出在特定扰动下系统稳定与否的定性结论,而不能给出系统定量的稳定裕度。因此无法对系统暂态稳定进行定量评价,无法对事故严重性进行排队。所以大多用于电力系统的离线暂稳分析。不过计算机硬件的发展和并行计算技术的深入研究与应用,使得对于大电网的实时仿真甚至超实时仿真成为可能。文[59]系统性的进行了在机群并行系统上对大规模电力系统实现机电暂态过程实时仿真算法的研究,采用了优化的边界表法提高了并行计算的效率,并通过调整子网间联络系统的处理方式、故障处理局部化、降维网络方程的构造和线性方程组并行处理等多种技术降低了并行计算的通信量和计算量,初步实现了大规模电力系统机电暂态过程的全数字式实时和超实时仿真,表现出极大的应用前景。

直接法(或称能量函数法)是以 Lyapunov 稳定理论为基础,从能量角度对系统进行暂态稳定分析。直接法并不显式的通过时域积分来求电力系统的微分代数方程来分析稳定问题,而是通过故障后系统中的暂态剩余能量与系统当前的极限暂态能量相比较得出失稳与否的结论。暂态能量函数描述了系统在故障期间和故障后的暂态能量,包括动能和势能(严格的还包括耗散能量),在故障阶段形成并显著增长;在故障清除后动能开始减小而势能增加。若系统能吸收剩余动能则稳定;反之,则不稳定。与时域仿真法相比,直接法具有计算速度快,可给出系统的稳定程度指标,快速确定暂稳极限等优点。但直接法也存在以下缺点:一是模型比较简单。大多采用发电机二阶经典模型,负荷采用恒阻抗负荷,如果使用了复杂模型,那么直接法所要求的自治系统的应用条件就被严重破坏,从而使算法失去意义,要考虑复杂模型就要使用修正的直接法。二是分析结果过于保守,而改进的算法有时又会偏于乐观。因此,直接法不能完全代替时域仿真,但可以作为它的补充,这就是所谓的混合法。混合法应用于在线的动态安全分析时,利用直接法对预想事故集进行严重性排队,筛选出稳定度较差的事故,再对排在前面的严重事故进行时域仿真计算,从而既能保证结果精度,又能显著加快计算速度。

直接法是通过系统在扰动结束后的暂态能量与临界能量相比较直接确定受扰后系统的暂态稳定性的。它主要包括三个基本步骤:(1)根据电力系统的模型及结构定义一个反映系统稳定性的 Lyapunov 能量函数;(2)根据扰动过程及最终扰动后的网络结构,确定对应于该故障的 Lyapunov 函数临界值 V_{cr} ;(3)在故障轨迹上寻找 $V_t=V_{cr}$ 的点所对应的时刻就是在该故障下的临界切除时间。如果已知故障切除时间,可以求出在该时间下的能量函数值 V_{cl} ,若 $V_{cl}<V_{cr}$ 则认为系统稳定;反之则不稳定,并可以 $V_{cr}-V_{cl}$ 作为暂态稳定裕度。因此,应用 Lyapunov 直接法解决电力系统暂态稳定分析必须解决两个问题:一是如何构造适当的 Lyapunov 函数;二是如何确定该函数的临界值。

最早的提出应用 Lyapunov 函数解决电力系统暂态稳定的是美国 Magnusson^[60],之

后 Aylett^[61]在 1958 年提出了多机系统的能量函数, 1966 年 Gless^[62]和 El-Abiad^[63]提出不计电网中转移电导的 Lyapunov 函数, 这是直接法的早期应用阶段。在求取 V_{cr} 方面, 1979 年 Athay 等人提出的相关不稳定平衡点 RUEP (Relevant Unstable Equilibrium Point)^{[64][65]}概念是一次飞跃, 他指出决定暂态稳定性的临界能量 V_{cr} 应是故障和故障后网络结构相关的 UEP 的能量函数值。从而使直接法在克服保守性方面取得重大进展。另一个显著进展是 1978 年 Kakimoto 提出的势能界面法 (PEBS, Potential Energy Boundary Surface)^[66], 该方法从事故后的稳定平衡点开始, 沿着持续故障轨迹寻找系统势能的第一个最大值, 以此作为系统的临界能量。避免了求取 UEP, 使速度大大加快。但势能界面是用持续故障轨迹代替临界故障轨迹, 仅当两者相差不大时 PEBS 法才能得到较好的分析结果。1991 年, Chiang 和 Wu 等人提出了基于稳定域边界的主导不稳定平衡点法, 即 BCU 法 (Boundary of Stability Region based on Controlling Unstable Equilibrium Point Method)^[67]。它利用原始系统的梯度系统的主导不稳定平衡点去寻找原始系统的主导不稳定平衡点, 再利用原始系统的常值能量曲面去局部近似原始系统的稳定边界。BCU 法是 PEBS 和主导不稳定平衡点法的结合, 是迄今为止在理论上最为严格的直接法。但由于在系统的稳定流形上, CUEP 处的能量最小, 稳定流形上的任意一点的能量大于恒值能量曲面, 持续故障轨迹必然是先穿过该能量面, 然后再与稳定流形相交。因此, BCU 仍然具有无法克服的保守性。

1988 年, 我国学者薛禹胜等人提出了扩展等面积准则 (EEAC, Extended Equal Area Criteria)^[68], 指出电力系统在受到扰动后, 发电机会分为两群, 然后用各自的局部惯量中心 (PCOI) 等效为两机, 再进一步等值为单机无穷大系统 (OMIB), 在 OMIB 中利用等面积准则进行稳定判断和决策。EEAC 的优点是速度非常快, 它不仅能够提供稳定裕度的量化信息, 而且能够识别临界失稳机群, 从而进行稳定控制的决策。其难点和关键是临界机群 (CC) 的识别。EEAC 的误差来源于一个非常强的假设, 即群内的发电机必须都是同调的。当此假设不能满足时, 误差较大。为此对该方法进行了完善, 陆续提出动态 EEAC (Dynamic EEAC)^[69]和集成 EEAC (Integrated EEAC)^[70], 采用分段技术对故障期间和故障后的 OMIB 系统参数进行多步刷新, 较好地提高了精度。

通过以上方法, 已经可以较为精确的求取在特定运行工况和故障下电力系统的暂态稳定性。但在给定的运行方式下, 不同的故障导致不同的稳定结果, 确定系统在给定运行方式下的稳定域仍是一个应深入研究的问题。

基于 AI 求解暂态稳定问题的方法出现较晚, 近年来对电力系统在线获取的多种测量数据的应用和数据挖掘工作开始受到重视, AI 方法在这些问题的处理方面具有明显的优势。

电力系统的仿真数据及系统中各种装置所采集的实测数据中隐含着极有价值的关于电力系统各种失稳模式、发展规律及内在的联系的知识, 这些信息对电网调度人员来

说具有极其重要的参考价值。可以通过 AI 中的机器学习算法,如 ANN、SVM 等对这些数据进行智能分析,不需建立系统的数学模型,直接从样本中寻求状态参数与稳定性或稳定指标间的映射关系,去发现其中所蕴含的系统运行规律。对暂态稳定问题而言,一方面可以找出目标电网的安全稳定规律、构建安全稳定实时预测模型、构建安全稳定规则模型、将安全稳定结果可视化;另一方面所构造的安全稳定实时预测模型在计算速度和应用灵活性方面显示出较传统算法的更大优势。

文[71]利用各种系统运行状态下功角轨迹数据离线制定决策树,同时利用 PMU 在线测量功角数据,经过简单计算,然后查表判断暂态稳定性。其思想实质是多级分类、分级查询,以提高查询判断速度。文[72]提出使用神经网络决策树来代替常规的决策树,其分类指标为 PMU 提供的系统各发电机的功角、各个节点电压相角的同步数据和系统各发电机的机械功率等。文[73]利用 PMU 在故障切除后 8 个周波内的测量数据作为输入,使用模糊技术和神经网络的方法来判断系统暂态稳定。文[74]提出了一种基于模糊聚类的径向基神经网络暂态稳定分析方法,其所利用的数据源为 PMU 提供的故障后各发电机的同步功角信息的简单运算,作为神经网络的输入,网络的输出是系统的稳定性分类。文[75]采用了和文[72]相似的方法,但将 ANN 改为了 SVM,这样能解决训练中全局最优问题和小样本训练下的推广能力的问题。文[76]系统性的提出了将数据挖掘技术应用于暂态稳定分析的全过程建模。首先利用最小割的概念对电网络进行了划分,以划分后的每个区域作为一个节点代替直接采用节点数据作为输入特征的做法,以解决“维数灾”问题;对数据集,则采用了聚类的方法减小单位数据集的样本容量,采用了主成分分析对数据集进行降维处理并辅以遗传算法对主成分分析的特征进行选择;在降维、约简的数据集上采用关联分类法定量揭示了系统稳定性与其影响因素间的类关联规则。

将基于模型的方法和基于 AI 的方法相结合,能更好的发挥各自的优势所在,是一个值得研究的方向。

1.4 本文的主要工作

建立电网调度决策支持系统是一个庞大的系统工程,在充分利用现有应用系统资源的基础上,应该采取“逐步实现、稳步前进”的技术路线,选择需求最为迫切、实用条件最为充分的问题逐步开展研究工作。基于此,目前研究工作的重点应定位于基于现有 EMS 基础,对其进行适当的改造,在稳态分析功能已趋于完善的情况下,加入故障处理功能和在线动态分析功能,将分析工作的重点放在安全监测和故障处理上。

这样我们面临以下主要问题:如何从软件体系结构层面保证电网调度决策支持系统能够自主运行、自主决策?故障诊断和故障恢复功能应如何加入?欲实现动态分析与控制的在线决策,研究应按照什么顺序、什么层次进行,才能做到“逐步实现、稳步前进”?

说具有极其重要的参考价值。可以通过 AI 中的机器学习算法,如 ANN、SVM 等对这些数据进行智能分析,不需建立系统的数学模型,直接从样本中寻求状态参数与稳定性或稳定指标间的映射关系,去发现其中所蕴含的系统运行规律。对暂态稳定问题而言,一方面可以找出目标电网的安全稳定规律、构建安全稳定实时预测模型、构建安全稳定规则模型、将安全稳定结果可视化;另一方面所构造的安全稳定实时预测模型在计算速度和应用灵活性方面显示出较传统算法的更大优势。

文[71]利用各种系统运行状态下功角轨迹数据离线制定决策树,同时利用 PMU 在线测量功角数据,经过简单计算,然后查表判断暂态稳定性。其思想实质是多级分类、分级查询,以提高查询判断速度。文[72]提出使用神经网络决策树来代替常规的决策树,其分类指标为 PMU 提供的系统各发电机的功角、各个节点电压相角的同步数据和系统各发电机的机械功率等。文[73]利用 PMU 在故障切除后 8 个周波内的测量数据作为输入,使用模糊技术和神经网络的方法来判断系统暂态稳定。文[74]提出了一种基于模糊聚类的径向基神经网络暂态稳定分析方法,其所利用的数据源为 PMU 提供的故障后各发电机的同步功角信息的简单运算,作为神经网络的输入,网络的输出是系统的稳定性分类。文[75]采用了和文[72]相似的方法,但将 ANN 改为了 SVM,这样能解决训练中全局最优问题和小样本训练下的推广能力的问题。文[76]系统性的提出了将数据挖掘技术应用于暂态稳定分析的全过程建模。首先利用最小割的概念对电网络进行了划分,以划分后的每个区域作为一个节点代替直接采用节点数据作为输入特征的做法,以解决“维数灾”问题;对数据集,则采用了聚类的方法减小单位数据集的样本容量,采用了主成分分析对数据集进行降维处理并辅以遗传算法对主成分分析的特征进行选择;在降维、约简的数据集上采用关联分类法定量揭示了系统稳定性与其影响因素间的类关联规则。

将基于模型的方法和基于 AI 的方法相结合,能更好的发挥各自的优势所在,是一个值得研究的方向。

1.4 本文的主要工作

建立电网调度决策支持系统是一个庞大的系统工程,在充分利用现有应用系统资源的基础上,应该采取“逐步实现、稳步前进”的技术路线,选择需求最为迫切、实用条件最为充分的问题逐步开展研究工作。基于此,目前研究工作的重点应定位于基于现有 EMS 基础,对其进行适当的改造,在稳态分析功能已趋于完善的情况下,加入故障处理功能和在线动态分析功能,将分析工作的重点放在安全监测和故障处理上。

这样我们面临以下主要问题:如何从软件体系结构层面保证电网调度决策支持系统能够自主运行、自主决策?故障诊断和故障恢复功能应如何加入?欲实现动态分析与控制的在线决策,研究应按照什么顺序、什么层次进行,才能做到“逐步实现、稳步前进”?

从解决上述问题入手, 本文以现有 EMS 系统和当前电网监测水平为基础, 提出了为电网调度提供故障处理和暂态稳定分析方面的决策支持的若干分析方法。方法可以为在现有 EMS 基础上构建电网调度决策支持系统提供理论和实际参考。主要工作如下:

(1) 为使系统具有开放性, 系统部件间具有更好的交互性能, 将本体论引入电力系统分析, 从软件设计层面出发, 提出了建立电力系统分析领域本体的方法来解决互联软件之间的数据、知识共享问题, 为实现复杂交互打下坚实基础。本体论的建立使应用软件和系统间能进行比数据共享更高级别的知识共享与知识交互, 使大型互联软件有了更为清晰和开放的结构作为基础;

(2) 在软件体系结构层面, 考虑到充分利用现有 EMS 的资源, 本文为调度决策支持系统构建了多智能体型的体系结构, 实现了对多智能体环境的描述与建模, 赋予了环境中的 Agent 个体感知环境的能力和合作完成任务的能力, 从而使对象进化为 Agent, 以解决在线自主运行和软件协调计算的问题;

(3) 在故障处理方面, 考虑到故障诊断功能在具备了较为充足的数据源以后基本可以满足实际应用需求, 而距离实际要求的指标较远的是对故障恢复的研究, 因此建立了一个基于对象 Petri 网技术的电网故障恢复的推理机制, 用于电网故障恢复的方案搜索。Petri 网推理比专家系统具有更快的搜索效率、更好的图形建模能力和处理并发的能力, 能以更清晰的形式对多种知识表示进行有效整合; 对象 Petri 网推理则在对大系统建模中, 降低了建模和求解的复杂度, 有效解决了普通 Petri 网建模中遇到的“组合爆炸”问题;

(4) 在动态分析与控制方面, 由于现有的基础研究工作的限制, 使得研究快速的暂态稳定算法成为实施在线的动态分析与控制的紧迫问题。WAMS 提供的相角测量数据给研究这一问题提供了新途径, 再加上电力系统运行积累的大量暂态稳定有关的运行记录 and 方式记录, 为进行数据挖掘准备了充足的可用资源, 基于这些考虑, 本文构造了一种基于机器学习与信息融合技术的暂态稳定评估算法, 能够有效利用多种测量信息以及现有的大量在线记录、离线仿真数据, 进行暂态稳定的评估, 方法具有极快的计算速度, 因而可做为控制中心在暂态稳定分析方面的决策分析的基础, 与传统的基于模型的算法形成优势互补。

第二章 基于本体论的多智能体型电网调度决策支持系统

2.1 引言

如前所述, 调度决策支持系统比 EMS 更为复杂的在线运行的大型软件系统, 表现在它不仅以 SCADA 系统作为数据平台, 还要将故障信息系统的信息有序接入, 以此二者共同作为基础执行分析决策 (将来要扩展至动态应用, 还要包括来自于 PMU 的实时相量测量数据), 并且所做的决策不再仅限于稳态分析, 而是包括了故障诊断及故障后的恢复决策, 将来还要包括处理电网动态快过程、慢过程的在线动态决策。对此软件系统, 在现今应用条件下, 如下两方面的要求是至关重要的:

(1) 系统必须具有良好的开放性。开放性表现为互操作性和良好的升级扩展性, 系统内部以及系统与其他系统之间, 要能实现灵活高效的数据交互。稳态分析功能的互操作性在一定程度上通过 IEC61970 标准得到解决, 其他分析功能的互操作性也必须以标准化的数据作基础。良好的升级扩展性则需要由良好的软件体系结构来提供; 使用软件体系结构或领域体系结构的设计可以使重用不仅体现在代码设计和测试阶段 (代码设计和测试仅仅占整个软件开发周期的 10~20%), 更使重用和自动化体现在设计、维护、升级等软件开发的各个阶段。

(2) 具有自主行为动作特性和协调计算能力。在线运行的软件系统将不可避免的会遇到一些超出设计以外的运行情形, 这时, 软件应能够根据自身已有的知识, 经过分析对新环境做出正确的响应; 不同的软件模块间也要进行更频繁的交互。在这种要求下, 我们自然想到使用面向 Agent 的软件结构, 而面向 Agent 的软件和面向 Object 的软件最大的区别就是前者具有自主行动和主动思考能力。如何描述和实现这种主动思考、主动行动能力便成为我们要重点探索和解决的问题。软件不具备主动思考能力的原因可以理解为: 软件对外界环境的刺激感知程度不够, 只能被动的接收最简单、原始的刺激 (调用) 才动作, 那么, 如果我们给软件赋予环境感知能力, 不就实现了软件的主动思考能力了吗? 这仅是我们形象思考的结果, 具体的, 落实到程序设计角度, 就是建立新的软件体系结构, 在新的体系结构中体现软件对外界环境的感知能力。现有的软件体系结构设计重点在于三方面: 构成系统的部件或合成的部件; 允许由部件合成系统 (非原始部件) 的合成规则; 为系统提供语义的行为规则。可以看出, 这种设计思想中所有的部件被同等对待, 没有明确定义在 Agent 理论中很重要的环境、个体两个概念, 我们就从这里入手, 引入环境的描述和建模, 以及 Agent 个体对于环境的感知的描述与建模。

本章就是围绕实现上述两方面的系统特性而展开的。全章以调度决策支持系统软件的体系结构为核心展开: 首先, 通过引入本体论 (Ontology), 对应用领域中的 “数据”

第二章 基于本体论的多智能体型电网调度决策支持系统

2.1 引言

如前所述, 调度决策支持系统比 EMS 更为复杂的在线运行的大型软件系统, 表现在它不仅以 SCADA 系统作为数据平台, 还要将故障信息系统的数据库有序接入, 以此二者共同作为基础执行分析决策 (将来要扩展至动态应用, 还要包括来自于 PMU 的实时相量测量数据), 并且所做的决策不再仅限于稳态分析, 而是包括了故障诊断及故障后的恢复决策, 将来还要包括处理电网动态快过程、慢过程的在线动态决策。对此软件系统, 在现今应用条件下, 如下两方面的要求是至关重要的:

(1) 系统必须具有良好的开放性。开放性表现为互操作性和良好的升级扩展性, 系统内部以及系统与其他系统之间, 要能实现灵活高效的数据交互。稳态分析功能的互操作性在一定程度上通过 IEC61970 标准得到解决, 其他分析功能的互操作性也必须以标准化的数据作基础。良好的升级扩展性则需要由良好的软件体系结构来提供; 使用软件体系结构或领域体系结构的设计可以使重用不仅体现在代码设计和测试阶段 (代码设计和测试仅仅占整个软件开发周期的 10~20%), 更使重用和自动化体现在设计、维护、升级等软件开发的各个阶段。

(2) 具有自主行为动作特性和协调计算能力。在线运行的软件系统将不可避免的会遇到一些超出设计以外的运行情形, 这时, 软件应能够根据自身已有的知识, 经过分析对新环境做出正确的响应; 不同的软件模块间也要进行更频繁的交互。在这种要求下, 我们自然想到使用面向 Agent 的软件结构, 而面向 Agent 的软件和面向 Object 的软件最大的区别就是前者具有自主行动和主动思考能力。如何描述和实现这种主动思考、主动行动能力便成为我们要重点探索和解决的问题。软件不具备主动思考能力的原因可以理解为: 软件对外界环境的刺激感知程度不够, 只能被动的接收最简单、原始的刺激 (调用) 才动作, 那么, 如果我们给软件赋予环境感知能力, 不就实现了软件的主动思考能力了吗? 这仅是我们形象思考的结果, 具体的, 落实到程序设计角度, 就是建立新的软件体系结构, 在新的体系结构中体现软件对外界环境的感知能力。现有的软件体系结构设计重点在于三方面: 构成系统的部件或合成的部件; 允许由部件合成系统 (非原始部件) 的合成规则; 为系统提供语义的行为规则。可以看出, 这种设计思想中所有的部件被同等对待, 没有明确定义在 Agent 理论中很重要的环境、个体两个概念, 我们就从这里入手, 引入环境的描述和建模, 以及 Agent 个体对于环境的感知的描述与建模。

本章就是围绕实现上述两方面的系统特性而展开的。全章以调度决策支持系统软件的体系结构为核心展开: 首先, 通过引入本体论 (Ontology), 对应用领域中的 “数据”

和更高一级的“知识”进行无歧义的、形式化的概念定义来进一步提高软件模块间的数据共享与数据交互的效率。所定义的概念不仅局限于数据层面，还延伸到知识层面，进一步提高了共享与交互的质量。作为对数据的更高级表现形式，知识在更抽象、更深入的层次上描述客观世界，如果某一领域（如电力系统分析）内的“知识”也能象“数据”一样做到标准化、无二义性，则领域内的交互效率和质量将大大提高。第二，将多智能体技术应用到软件设计中，从软件体系结构层面描述了从对象(Object)到智能体(Agent)的进化，以及 Agent 个体在环境中的感知的建模，从而构建成复杂多智能体型软件系统。

2.2 软件体系结构基础

软件体系结构^[19](Software Architecture)对于一个大型应用软件的重要性已为人们公认，可以说，体系结构决定着软件的质量和生命力。对于象 EMS、调度决策支持系统这样的大型、持续发展型应用软件而言，研究能满足其功能要求、变化特点的体系结构是首要的任务。设计不完善的软件体系结构所带来的，将是繁重的重复开发工作，伴随着后期维护、功能扩展而来的一个相当庞大、甚至可以说是臃肿的数据库系统，以及一个令人望而生畏的类和结构体的仓库。这种臃肿积累到一定程度，软件生命即行中止。

软件体系结构的概念最早出现于 20 世纪 80 年代，但真正引起关注和重视是在 90 年代面向对象技术广泛使用之后。几种有代表性的观点主要来自于这一时期^[19]，通过对软件体系结构研究历史的回顾，可以更好的把握当前的研究重点和方向。

1992 年，贝尔实验室的 Dewayne Perry 和 Alex Wolf 给出如下的定义：软件体系结构由具有特定形式的体系结构元素（elements）或设计元素构成，包括处理元素、数据元素和连接元素三类。内涵的进一步扩大包括了模块之间的控制关系。Perry 将软件体系结构视为软件开发中的第一类重要的设计对象。1993 年，David Garlan 和 Mary Shaw 在此基础上进一步强调整体结构的概念，提出：软件体系结构是设计过程的一个层次，它处理那些超越算法和数据结构的设计，研究整体结构设计和描述方法。体系结构还包括大体组织结构、全局控制结构、通信和同步以及数据存取的协议、设计元素的功能、物理分布和合成、设计方案的选择、评估和实现等。随后 Bass 等人于 1994 年在关于软件品质属性研究中提出：体系结构设计至少可包括应用领域的功能分割、系统结构、结构的领域功能分配的三个方面。Hayes-Roth 在 ARPA 的特定软件体系报告中指出：软件体系结构是由功能构件组成的抽象系统的说明，它是按照功能构件的行为、界面和构件之间的相互作用进行描述的。1995 年，Garlan 和 Perry 修正他们原先的定义为：软件体系结构包括系统构件的结构、构件的相互关系、以及控制构件设计演化的原则和指导三个方面。Soni、Nord 和 Hofmeister 在研究了工业应用中有影响的一些流行结构后提出：软件体系结构至少有四个从不同方向描述系统的实例化结构：①设计元素和它们之间的关系；②两个正交的功能分解和分层结构；③反应系统动态性能的执行结构；④描述源

和更高一级的“知识”进行无歧义的、形式化的概念定义来进一步提高软件模块间的数据共享与数据交互的效率。所定义的概念不仅局限于数据层面，还延伸到知识层面，进一步提高了共享与交互的质量。作为对数据的更高级表现形式，知识在更抽象、更深入的层次上描述客观世界，如果某一领域（如电力系统分析）内的“知识”也能象“数据”一样做到标准化、无二义性，则领域内的交互效率和质量将大大提高。第二，将多智能体技术应用到软件设计中，从软件体系结构层面描述了从对象(Object)到智能体(Agent)的进化，以及 Agent 个体在环境中的感知的建模，从而构建成复杂多智能体型软件系统。

2.2 软件体系结构基础

软件体系结构^[19](Software Architecture)对于一个大型应用软件的重要性已为人们公认，可以说，体系结构决定着软件的质量和生命力。对于象 EMS、调度决策支持系统这样的大型、持续发展型应用软件而言，研究能满足其功能要求、变化特点的体系结构是首要的任务。设计不完善的软件体系结构所带来的，将是繁重的重复开发工作，伴随着后期维护、功能扩展而来的一个相当庞大、甚至可以说是臃肿的数据库系统，以及一个令人望而生畏的类和结构体的仓库。这种臃肿积累到一定程度，软件生命即行中止。

软件体系结构的概念最早出现于 20 世纪 80 年代，但真正引起关注和重视是在 90 年代面向对象技术广泛使用之后。几种有代表性的观点主要来自于这一时期^[19]，通过对软件体系结构研究历史的回顾，可以更好的把握当前的研究重点和方向。

1992 年，贝尔实验室的 Dewayne Perry 和 Alex Wolf 给出如下的定义：软件体系结构由具有特定形式的体系结构元素（elements）或设计元素构成，包括处理元素、数据元素和连接元素三类。内涵的进一步扩大包括了模块之间的控制关系。Perry 将软件体系结构视为软件开发中的第一类重要的设计对象。1993 年，David Garlan 和 Mary Shaw 在此基础上进一步强调整体结构的概念，提出：软件体系结构是设计过程的一个层次，它处理那些超越算法和数据结构的设计，研究整体结构设计和描述方法。体系结构还包括大体组织结构、全局控制结构、通信和同步以及数据存取的协议、设计元素的功能、物理分布和合成、设计方案的选择、评估和实现等。随后 Bass 等人于 1994 年在关于软件品质属性研究中提出：体系结构设计至少可包括应用领域的功能分割、系统结构、结构的领域功能分配的三个方面。Hayes-Roth 在 ARPA 的特定软件体系报告中指出：软件体系结构是由功能构件组成的抽象系统的说明，它是按照功能构件的行为、界面和构件之间的相互作用进行描述的。1995 年，Garlan 和 Perry 修正他们原先的定义为：软件体系结构包括系统构件的结构、构件的相互关系、以及控制构件设计演化的原则和指导三个方面。Soni、Nord 和 Hofmeister 在研究了工业应用中有影响的一些流行结构后提出：软件体系结构至少有四个从不同方向描述系统的实例化结构：①设计元素和它们之间的关系；②两个正交的功能分解和分层结构；③反应系统动态性能的执行结构；④描述源

代码、二进制和库的组织的代码结构。著名学者卡耐基梅隆大学的 Mary Shaw 对已有观点加以总结后指出：①所有观点都认为软件体系结构包括部件、部件之间的联系，以及系统构造、方式、约束、语义、分析、属性、原理和系统需求；②框架观点同结构观点有相似之处，但更强调整个系统的连续性。框架常针对特定领域的问题，这包括 CORBA 及其系统结构模型等；③动态模型强调系统的行为特性；动态可指系统的总体配置的建立、变化；④进程模式强调部件动态调度关系，这说明体系结构是进程描述的结果。

可见，从不同角度出發，研究者对软件体系结构的定义不同，没有形成标准、一致的认识，这种现象本身说明体系结构研究仍然处在发展的初级阶段。目前对软件体系结构在如下几个方面得到较统一的认识：

(1) 体系结构是关于软件的系统继承层次上的组成和行为的，是设计过程中不可缺少的一个阶段，对复杂软件的后期设计活动起着重要的决定作用；

(2) 体系结构是由软部件和部件之间的联系组成，软部件又有它自身的体系结构；

(3) 部件的描述有三个方面：计算功能、结构特性、其他特性。计算功能是指部件实现的整体功能。结构特性描述于其他部件的组织 and 联系方法，这是体系结构中最重要内容。其他特性描述了部件的执行效率、处理能力、环境要求和整体特性等方面的要求；

(4) 目前没有哪个关于软件体系结构的描述可以说是完整的。关于什么是部件、什么是部件之间的联系并没有明确界定。软部件可以是对象、库、产品、组建、数据库或其他更加广泛的概念。

体系结构研究中很重要的一方面是设计模式 (Design Pattern) 的研究。设计模式是软件设计阶段对软件开发经验的形式化总结，它通过对构成客观世界的不同功能、行为的抽象元素的建模，使得对不同领域的软件设计问题可以使用同样的“模板”进行，将这些从“模板”上生成的“模式(Pattern)”进行有机组合，就能表现不同应用问题的实际模型。设计模式最早是由 Erich Gamma 等人作为总结软件设计、特别是面向对象设计的实践和经验而提出的^[20]。在几十年软件设计的研究和工程实践中，设计人员和程序员积累了大量的实际经验，发现并提出了大量在众多应用中普遍存在的软件结构和结构关系。他们在不同的领域中获得应用，成为了处理特定问题的高效和成熟的设计模板，成为“模式”，针对特定设计问题采用这些模式要比重新设计和调试好得多。经过一次次的重用，形成了结构相对稳定、并具有一定变化适应性的设计模式。在软件设计中，这些模式起到了诸如建筑学中砖、瓦、各种门窗和各式楼梯等所起的作用。因而设计模式又被称为是“可复用的面向对象软件的基础”。

至今已经提出的设计模式分三个类型^[20]：

(1) 构造型模式。构造型模式抽象了实例化过程，他们帮助一个系统独立于如何创建、组合和表示它的那些对象。当系统演化为更多的依赖于对象复合而不是类继承，构造型模式变得更为重要。构造型模式主要包括了诸如抽象工厂 (Abstract Facotry)、单

例 (Singleton)、原型 (Prototype)、构造器 (Builder) 等典型模式。

(2) 结构型模式。结构型模式涉及到如何组合类以及对象以获得更大的结构。结构型类模式典型的是采用继承机制来组合接口, 而结构型对象模式则是对对象进行组合, 从而实现新功能。典型的结构型模式包括适配器 (Adapter)、桥接 (Bridge)、代理 (Proxy)、模型—视图—控制 (MVC, Model-View-Controller) 等。

(3) 行为型模式。行为型模式涉及到算法和对象间职责的分配, 即不仅描述对象或类的模式, 还描述他们之间的通信模式。这使得我们的注意力从控制流转到对象间的联系方式上来。行为类模式使用继承机制在类间分派行为, 而行为对象模式使用对象复合实现对象间的相互协作和了解对方。典型的行为型模式有: 责任链 (Chain Of Responsibility)、解释器 (Interpreter)、迭代器 (Iterator)、协调器 (Mediator)、观察者 (Observer)、发送—接受者 (Forwarder-Receiver)、客户—分遣—服务器 (Client-Dispatcher-Server) 等。

设计模式是建立在结构化和面向对象这些良好软件开发的原则上的, 他们通过重用软件实践中的经验规范了系统的构成结构, 加快了软件的设计和实施, 为保证软件的质量提供了可靠稳定的基础。

从软件结构设计意义上讲, EMS、调度决策支持系统等一类软件对体系结构的要求可以概括为如下两方面:

(1) 系统中的基本元素。基本元素中包括负责实现应用功能的电网分析计算模块 PAS、负责实现人机交互的人机界面 MMI、负责实现底层数据通信的通信服务单元 CSU、负责实现本系统内部数据交互及网络行为监控的系统维护单元等。在这一层面上, 调度决策支持系统与 EMS 相比, 在电网分析计算模块 PAS 中添加了负责故障处理和动态分析的计算单元, 以及在通信服务单元 CSU 中增加了与故障信息系统、相量测量系统间接口的服务单元。

(2) 以上各种基本元素间的连接关系。在这一层面上, 调度决策支持系统与 EMS 相比, 复杂度增加最多的是电网分析计算模块 PAS 内部各元素间的连接关系, 处理范围的扩大导致软件对进程调度的要求提高: 各 PAS 模块的进程优先级更加重要, 各进程间的互联调用更加频繁从而以合作的方式完成更复杂的分析任务。

因此, 在现有 EMS 基础上, 对调度决策支持系统的研究应首先从体系结构层面上解决 PAS 模块间的优先级调度和互联调用问题。同时, 对于调度决策支持系统软件, 就前面所提到的两点系统特性——开放性和自主运行特性——而言, 直接使用现有的软件体系结构还存在以下两方面问题: 一是如何在接口层面上使系统具有互操作性和更高的交互效率; 二是如何实现系统的自主运行功能。本章通过如下途径解决这两个问题: 一、通过引入本体论方法, 从软件设计角度出发, 定义应用领域中的一些无歧义的、形式化的概念, 构成领域知识库, 使系统内部各模块间的交互, 以及系统和外部系统间的交互基于统一的标准化环境进行, 这样做能大大提高软件模块间的数据共享与数据交互的效

率。本体论是关于客观世界的无二义性的规范化概念说明,只有以这种无二义性的概念作为个体间交互的基础,个体间、系统间、组织间以及软件模块间才能够实现准确的信息交互与共享;二、将多 Agent 建模方法引入软件体系结构中,赋予系统自主运行、模块间协调计算的能力。

2.3 本体论基础

2.3.1 本体论定义及研究历史

在交互的环境中,一套为大家公认的一致、无二义性的知识表示方法是至关重要的,因为这就是该环境中的智能体的知识库,智能体的行为以及智能体间的交互都要以该知识库做为语义基础。知识库的抽象层次、表示方式和覆盖范围,决定了智能体的智能水平的级别。然而,在一个复杂的领域中,想找到这样一种为大家公认的一致、无二义性的词汇表(知识库)并不是很容易的事。本体论(Ontology)就是这样一门关于对某一系统或整个的客观世界进行概念的形式化定义、概念间的关系的形式化定义以及对被研究系统做明确描述的科学。它应用于计算机科学中体现为一种知识表示方法,即用统一、规范化的形式对客观世界或领域范围内的事务进行形式化刻画,以保证在此本体论的基础上,所有参与交互的个体间能无二义性的共享与交互知识。这种统一、规范化的概念模型对于复杂环境中的交互而言是至关重要的,因为来自于不同背景的个体间往往对同一表达会产生不同的理解,反过来对同一理解又会有不同的表达,这就给交互带来障碍。这种理解差异是个体本质造成的,因此个体间欲进行交互就必须基于一个能在语义和知识层次上无二义性描述客观世界的概念模型,无二义性的知识才是可以被共享使用的。这种概念模型就是本体论模型,相应的建模方法称为本体论方法。

从历史上看,哲学家们最早遭受这种个体理解差异造成的交互障碍的困惑^[77]。因而本体论最早被作为一个哲学上的概念提出,并且成为各个哲学分支的理论基础,其它哲学问题都是围绕着建设、应用或怀疑、反对本体论而展开的^[78]。从本体论的发展进程看,它把围绕概念建模中最重要的系词“是”以及含有“是”的种种“存在”作为范畴,通过逻辑的方法构造出一套先验原理体系。“是”是西方哲学中最抽象,最普遍的范畴,存在和本质是“是”的两个基本规定性。

在自然科学领域,本体论首先被引入人工智能界,在1991年由Neches^[79]等人提出。他们把本体论定义为“给出构成相关领域词汇的基本术语和关系,以及利用这些术语和关系构成的规定这些词汇外延的规则的定义”(An Ontology defines the basic terms and relations comprising the vocabulary of a topic area as well as the rules for combining terms and relations to define extensions to the vocabulary)。1993年,Gruber给出了本体论的一个最为流行的定义^[80],即“本体论是概念模型的明确的规范说明”。目前最为精确的定义是由Studer等人给出的,即“本体论是共享概念模型的明确的形式化规范说明”^[81]。这

率。本体论是关于客观世界的无二义性的规范化概念说明,只有以这种无二义性的概念作为个体间交互的基础,个体间、系统间、组织间以及软件模块间才能够实现准确的信息交互与共享;二、将多 Agent 建模方法引入软件体系结构中,赋予系统自主运行、模块间协调计算的能力。

2.3 本体论基础

2.3.1 本体论定义及研究历史

在交互的环境中,一套为大家公认的一致、无二义性的知识表示方法是至关重要的,因为这就是该环境中的智能体的知识库,智能体的行为以及智能体间的交互都要以该知识库做为语义基础。知识库的抽象层次、表示方式和覆盖范围,决定了智能体的智能水平的级别。然而,在一个复杂的领域中,想找到这样一种为大家公认的一致、无二义性的词汇表(知识库)并不是很容易的事。本体论(Ontology)就是这样一门关于对某一系统或整个的客观世界进行概念的形式化定义、概念间的关系的形式化定义以及对被研究系统做明确描述的科学。它应用于计算机科学中体现为一种知识表示方法,即用统一、规范化的形式对客观世界或领域范围内的事务进行形式化刻画,以保证在此本体论的基础上,所有参与交互的个体间能无二义性的共享与交互知识。这种统一、规范化的概念模型对于复杂环境中的交互而言是至关重要的,因为来自于不同背景的个体间往往对同一表达会产生不同的理解,反过来对同一理解又会有不同的表达,这就给交互带来障碍。这种理解差异是个体本质造成的,因此个体间欲进行交互就必须基于一个能在语义和知识层次上无二义性描述客观世界的概念模型,无二义性的知识才是可以被共享使用的。这种概念模型就是本体论模型,相应的建模方法称为本体论方法。

从历史上看,哲学家们最早遭受这种个体理解差异造成的交互障碍的困惑^[77]。因而本体论最早被作为一个哲学上的概念提出,并且成为各个哲学分支的理论基础,其它哲学问题都是围绕着建设、应用或怀疑、反对本体论而展开的^[78]。从本体论的发展进程看,它把围绕概念建模中最重要的系词“是”以及含有“是”的种种“存在”作为范畴,通过逻辑的方法构造出一套先验原理体系。“是”是西方哲学中最抽象,最普遍的范畴,存在和本质是“是”的两个基本规定性。

在自然科学领域,本体论首先被引入人工智能界,在1991年由Neches^[79]等人提出。他们把本体论定义为“给出构成相关领域词汇的基本术语和关系,以及利用这些术语和关系构成的规定这些词汇外延的规则的定义”(An Ontology defines the basic terms and relations comprising the vocabulary of a topic area as well as the rules for combining terms and relations to define extensions to the vocabulary)。1993年,Gruber给出了本体论的一个最为流行的定义^[80],即“本体论是概念模型的明确的规范说明”。目前最为精确的定义是由Studer等人给出的,即“本体论是共享概念模型的明确的形式化规范说明”^[81]。这

率。本体论是关于客观世界的无二义性的规范化概念说明,只有以这种无二义性的概念作为个体间交互的基础,个体间、系统间、组织间以及软件模块间才能够实现准确的信息交互与共享;二、将多 Agent 建模方法引入软件体系结构中,赋予系统自主运行、模块间协调计算的能力。

2.3 本体论基础

2.3.1 本体论定义及研究历史

在交互的环境中,一套为大家公认的一致、无二义性的知识表示方法是至关重要的,因为这就是该环境中的智能体的知识库,智能体的行为以及智能体间的交互都要以该知识库做为语义基础。知识库的抽象层次、表示方式和覆盖范围,决定了智能体的智能水平的级别。然而,在一个复杂的领域中,想找到这样一种为大家公认的一致、无二义性的词汇表(知识库)并不是很容易的事。本体论(Ontology)就是这样一门关于对某一系统或整个的客观世界进行概念的形式化定义、概念间的关系的形式化定义以及对被研究系统做明确描述的科学。它应用于计算机科学中体现为一种知识表示方法,即用统一、规范化的形式对客观世界或领域范围内的事务进行形式化刻画,以保证在此本体论的基础上,所有参与交互的个体间能无二义性的共享与交互知识。这种统一、规范化的概念模型对于复杂环境中的交互而言是至关重要的,因为来自于不同背景的个体间往往对同一表达会产生不同的理解,反过来对同一理解又会有不同的表达,这就给交互带来障碍。这种理解差异是个体本质造成的,因此个体间欲进行交互就必须基于一个能在语义和知识层次上无二义性描述客观世界的概念模型,无二义性的知识才是可以被共享使用的。这种概念模型就是本体论模型,相应的建模方法称为本体论方法。

从历史上看,哲学家们最早遭受这种个体理解差异造成的交互障碍的困惑^[77]。因而本体论最早被作为一个哲学上的概念提出,并且成为各个哲学分支的理论基础,其它哲学问题都是围绕着建设、应用或怀疑、反对本体论而展开的^[78]。从本体论的发展进程看,它把围绕概念建模中最重要的系词“是”以及含有“是”的种种“存在”作为范畴,通过逻辑的方法构造出一套先验原理体系。“是”是西方哲学中最抽象,最普遍的范畴,存在和本质是“是”的两个基本规定性。

在自然科学领域,本体论首先被引入人工智能界,在1991年由Neches^[79]等人提出。他们把本体论定义为“给出构成相关领域词汇的基本术语和关系,以及利用这些术语和关系构成的规定这些词汇外延的规则的定义”(An Ontology defines the basic terms and relations comprising the vocabulary of a topic area as well as the rules for combining terms and relations to define extensions to the vocabulary)。1993年,Gruber给出了本体论的一个最为流行的定义^[80],即“本体论是概念模型的明确的规范说明”。目前最为精确的定义是由Studer等人给出的,即“本体论是共享概念模型的明确的形式化规范说明”^[81]。这

包含 4 层含义: 概念模型(conceptualization)、明确(explicit)、形式化(formal)和共享(share)。

“概念模型”指通过抽象出客观世界中一些现象的相关概念而得到的模型。概念模型所表现的含义独立于具体的环境状态。“明确”指所使用的概念及使用这些概念的约束都有明确的定义。“形式化”指 Ontology 是计算机可读的(即能被计算机处理)。“共享”指 Ontology 中体现的是共同认可的知识, 反映的是相关领域中公认的概念集, 即 Ontology 针对的是团体的共识而非个体认识。Ontology 的目标是捕获相关领域的知识, 提供对该领域知识的共同理解, 确定该领域内共同认可的词汇, 并从不同层次的形式化模式上给出这些词汇(术语)和词汇间相互关系的明确定义。

本体论中的概念模型可以定义为^[82]:

$$C = \langle D, W, R \rangle.$$

其中 D 是一个领域, W 是该领域中相关的事务状态(state of affairs)的集合, R 是领域空间 $\langle D, W \rangle$ 上概念关系(conceptual relation)的集合。

对于一个具体的应用领域而言, 领域中的术语、术语的定义以及术语之间的语义网络构成一个领域本体 (ontology, 词首字母大写为本体论方法, 词首字母小写为针对某一专门领域所建立的领域本体)。

要建立一个领域的本体, 通常的做法是采用自上而下的策略, 先基础性地给出构成该领域知识的一些抽象概念以及这些概念间的关系, 做为上位本体 (或称为类型本体)。而后对这些抽象概念进行逐层深入的概念划分, 逐步填充下位本体, 使本体所定义的细节程度能够满足应用要求。领域本体中的概念必须在领域内得到公认, 并且必须是不存在二义性理解的知识。由于领域知识的不断发展, 领域本体也不可能一次性建完, 随着对领域认识的不断深入, 领域本体中的概念将逐渐丰富。应该看到, 任何领域本体的建立都是一项庞大的工程, 需要对领域中繁多的知识及知识表示形式进行明确的规范说明, 消除对概念的理解差异。

应指出, 并非领域中的所有概念都能被纳入本体, 因为领域知识中总存在一些不确定性和领域悖论, 这些不确定性是客观存在的, 对这些不确定性知识, 不应纳入本体建模范围之内。

2.3.2 本体论的应用

自从 20 世纪 90 年代本体论被引入计算机科学领域以来, 理论和应用方面的研究取得了多项进展^[83-87]。具体的, 在知识工程、数据库设计和集成、信息检索和提取、软件需求分析、面向对象技术和基于 Agent 的系统设计等领域中, 本体论均发挥了重要作用。下面着重叙述本体论在软件设计分析、构件重用与知识共享中的应用, 这些因素在设计调度决策支持系统中占有极其重要的地位。

(1) 在面向对象软件分析与设计中的应用。

本体是领域概念的显示表示。根据本体论的思想, 某个领域的本体就是关于该领域

包含 4 层含义: 概念模型(conceptualization)、明确(explicit)、形式化(formal)和共享(share)。

“概念模型”指通过抽象出客观世界中一些现象的相关概念而得到的模型。概念模型所表现的含义独立于具体的环境状态。“明确”指所使用的概念及使用这些概念的约束都有明确的定义。“形式化”指 Ontology 是计算机可读的(即能被计算机处理)。“共享”指 Ontology 中体现的是共同认可的知识, 反映的是相关领域中公认的概念集, 即 Ontology 针对的是团体的共识而非个体认识。Ontology 的目标是捕获相关领域的知识, 提供对该领域知识的共同理解, 确定该领域内共同认可的词汇, 并从不同层次的形式化模式上给出这些词汇(术语)和词汇间相互关系的明确定义。

本体论中的概念模型可以定义为^[82]:

$$C = \langle D, W, R \rangle.$$

其中 D 是一个领域, W 是该领域中相关的事务状态(state of affairs)的集合, R 是领域空间 $\langle D, W \rangle$ 上概念关系(conceptual relation)的集合。

对于一个具体的应用领域而言, 领域中的术语、术语的定义以及术语之间的语义网络构成一个领域本体 (ontology, 词首字母大写为本体论方法, 词首字母小写为针对某一专门领域所建立的领域本体)。

要建立一个领域的本体, 通常的做法是采用自上而下的策略, 先基础性地给出构成该领域知识的一些抽象概念以及这些概念间的关系, 做为上位本体 (或称为类型本体)。而后对这些抽象概念进行逐层深入的概念划分, 逐步填充下位本体, 使本体所定义的细节程度能够满足应用要求。领域本体中的概念必须在领域内得到公认, 并且必须是不存在二义性理解的知识。由于领域知识的不断发展, 领域本体也不可能一次性建完, 随着对领域认识的不断深入, 领域本体中的概念将逐渐丰富。应该看到, 任何领域本体的建立都是一项庞大的工程, 需要对领域中繁多的知识及知识表示形式进行明确的规范说明, 消除对概念的理解差异。

应指出, 并非领域中的所有概念都能被纳入本体, 因为领域知识中总存在一些不确定性和领域悖论, 这些不确定性是客观存在的, 对这些不确定性知识, 不应纳入本体建模范围之内。

2.3.2 本体论的应用

自从 20 世纪 90 年代本体论被引入计算机科学领域以来, 理论和应用方面的研究取得了多项进展^[83-87]。具体的, 在知识工程、数据库设计和集成、信息检索和提取、软件需求分析、面向对象技术和基于 Agent 的系统设计等领域中, 本体论均发挥了重要作用。下面着重叙述本体论在软件设计分析、构件重用与知识共享中的应用, 这些因素在设计调度决策支持系统中占有极其重要的地位。

(1) 在面向对象软件分析与设计中的应用。

本体是领域概念的显示表示。根据本体论的思想, 某个领域的本体就是关于该领域

的一个公认的概念集，其中的概念含有公认的语义，这些语义通过概念之间的各种关联来体现。本体通过它的概念集及其所处的上下文来刻画概念的内涵。由此可见，本体强调相关领域的本质概念，同时也强调这些本质概念之间的关联。在面向对象分析中，使用本体的思想和本体描述现实世界的方法，可以将对象之间的各种关系用形式语言充分刻画出来。UML 建模方法即是本体论方法在软件建模领域中的具体表现。

(2) 在软件构件重用中的应用。

基于构件的软件开发技术，旨在通过重用技术，提高软件的开发效率，避免一些不必要的重复劳动。一方面，通过基于本体的分类与检索机制，能够在有序的数据库中对各种可重用的软件构件和相关信息实行存储和检索。本体在这里相当于在用户和软件构件库之间建立的中介层，通过这个借助领域本体建立的中介层达到用户对软件构件的组织与管理的目的，从而提高了软件的开发效率。另一方面，基于领域本体建立的软件构架，可以达到体系结构层复用软件的效果，进一步提高了软件开发的效率。

(3) 在知识共享与交互中的应用。

本体论保证了不同的应用系统对同一领域内的知识不存在二义性的理解。不存在二义性的知识是可以被共享使用的^[79]。基于本体的知识共享要求所有应用系统对领域知识的理解是在领域 ontology 的环境中进行的，或者是通过翻译器（而翻译器不能脱离领域 ontology 进行语义翻译）来进行知识共享，同时，领域事实知识的表达也是在领域 ontology 上进行的，这两方面使得应用系统可以不通过翻译或最多通过复杂度为 $O(n)$ 的翻译实现知识共享，而不依据 Ontology 所进行的翻译工作其复杂度是 $O(n^2)$ 的。

2.3.3 本体的形式化

无论是关于不同领域中都会出现的通用概念（诸如时间、行动、信度等）建模的本体工程^[88]，还是关于一个具体领域内（如电力系统调度分析）的共享知识模型的领域本体，通过对相关知识的解析所建立起的本体必须经过形式化才能为计算机所识别和使用。本体对应用领域的无二义性，也必须经过形式化工作后才能体现。本体形式化程度越高，越有利于计算机进行自动处理。

目前在本体形式化建模方面影响最大的是 Perez 等人提出的按分类法来组织的方法。他归纳出 Ontology 包含 5 个基本的建模元语(Modeling Primitive)^[89]。这些元语分别为：类(classes)，关系(relations)，函数(functions)，公理(axioms)和实例(instances)。通常也把 classes 写成 concepts。

(1) 类的含义很广泛，可以指任何事物，如工作描述、功能、行为、策略和推理过程等等。电力系统中的物理实体（如变电站、变压器），以及各种分析计算（如潮流计算、状态估计）等，均可以由类元语描述。

(2) 关系代表了在领域中概念之间的交互作用。形式上定义为 n 维笛卡儿乘积的子集： $R: C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n$ 。如：子类关系(subclassOf)。在电力系统中，变电站和变电站

的一个公认的概念集，其中的概念含有公认的语义，这些语义通过概念之间的各种关联来体现。本体通过它的概念集及其所处的上下文来刻画概念的内涵。由此可见，本体强调相关领域的本质概念，同时也强调这些本质概念之间的关联。在面向对象分析中，使用本体的思想和本体描述现实世界的方法，可以将对象之间的各种关系用形式语言充分刻画出来。UML 建模方法即是本体论方法在软件建模领域中的具体表现。

(2) 在软件构件重用中的应用。

基于构件的软件开发技术，旨在通过重用技术，提高软件的开发效率，避免一些不必要的重复劳动。一方面，通过基于本体的分类与检索机制，能够在有序的数据库中对各种可重用的软件构件和相关信息实行存储和检索。本体在这里相当于在用户和软件构件库之间建立的中介层，通过这个借助领域本体建立的中介层达到用户对软件构件的组织与管理的目的，从而提高了软件的开发效率。另一方面，基于领域本体建立的软件构架，可以达到体系结构层复用软件的效果，进一步提高了软件开发的效率。

(3) 在知识共享与交互中的应用。

本体论保证了不同的应用系统对同一领域内的知识不存在二义性的理解。不存在二义性的知识是可以被共享使用的^[79]。基于本体的知识共享要求所有应用系统对领域知识的理解是在领域 ontology 的环境中进行的，或者是通过翻译器（而翻译器不能脱离领域 ontology 进行语义翻译）来进行知识共享，同时，领域事实知识的表达也是在领域 ontology 上进行的，这两方面使得应用系统可以不通过翻译或最多通过复杂度为 $O(n)$ 的翻译实现知识共享，而不依据 Ontology 所进行的翻译工作其复杂度是 $O(n^2)$ 的。

2.3.3 本体的形式化

无论是关于不同领域中都会出现的通用概念（诸如时间、行动、信度等）建模的本体工程^[88]，还是关于一个具体领域内（如电力系统调度分析）的共享知识模型的领域本体，通过对相关知识的解析所建立起的本体必须经过形式化才能为计算机所识别和使用。本体对应用领域的无二义性，也必须经过形式化工作后才能体现。本体形式化程度越高，越有利于计算机进行自动处理。

目前在本体形式化建模方面影响最大的是 Perez 等人提出的按分类法来组织的方法。他归纳出 Ontology 包含 5 个基本的建模元语(Modeling Primitive)^[89]。这些元语分别为：类(classes)，关系(relations)，函数(functions)，公理(axioms)和实例(instances)。通常也把 classes 写成 concepts。

(1) 类的含义很广泛，可以指任何事物，如工作描述、功能、行为、策略和推理过程等等。电力系统中的物理实体（如变电站、变压器），以及各种分析计算（如潮流计算、状态估计）等，均可以由类元语描述。

(2) 关系代表了在领域中概念之间的交互作用。形式上定义为 n 维笛卡儿乘积的子集： $R: C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n$ 。如：子类关系(subclassOf)。在电力系统中，变电站和变电站

中的各种设备,就构成了一对多的包含关系。

(3) 函数是一类特殊的关系。在这种关系中前 $n-1$ 个元素可以惟一决定第 n 个元素。形式化的定义如下: $F: C_1 \times C_2 \times \cdots \times C_{n-1} \rightarrow C_n$ 。例如 MotherOf 关系就是一个函数,其中 MotherOf(x, y)表示 y 是 x 的母亲,显然 x 可以惟一确定他的母亲 y 。

(4) 公理代表永真断言,比如概念乙属于概念甲的范围。

(5) 实例代表元素。

在具体的建模工作中,并不一定给出 Perez 等所给出的本体建模元语的全部。根据应用领域的不同,建模的重点将有所不同,可以侧重对于概念和关系的建模,也可以侧重对于函数和公理的建模。一般来说,在本体的形式化工作中,任何领域 ontology 都必须给出该领域内的一些基础词汇的非形式化定义,然后在这些基础词汇的基础上形式化定义出更多的词汇,同时用形式化的理论来进一步刻画这些词汇间的关系^[90]。而在实现知识共享和知识重用的软件设计中,对基础词汇(包括基础实体和实体基础关系)的理解一般都固化在程序中,而对于其他可形式化表示的知识,可以以规则的形式存放在系统的知识库中。系统可以在理解了基础词汇的前提下,根据其形式定义和一些形式化的理论,通过知识推理来理解这一部分知识,并用它解释领域内发生的事实知识。

Ontology 的具体表示已经有多种描述语言可以实现,如基于一阶逻辑的 Ontolingua^[91]、Protégé^[92]、Loom^[93]等。XML 作为一种自描述型的资源描述语言,具有扩展性、灵活性,容易使用和解析,因而适合交互环境的信息传输和共享^[94]。XML 能够提供一定的语义,但这种语义必须和 Ontology 结合使用,才能满足语义的无二义性传输。由于 XML 语言的优越性,已经出现了基于 XML 语法的 Ontology 描述语言。如 SHOE、OML、XOL 等。在这些基于 XML 的 Ontology 描述语言中,Ontology 中的术语均是作为 XML 的 DTD (Data Type Definition, 数据类型定义)定义的基本词汇工作的,针对这些词汇开发相应的“解析器”,作为中介翻译软件,即可实现不同模块和组织间的知识交换与共享。而目前广泛使用的面向对象的知识表示,事实上是基于框架知识表示法发展而来的,每个类都具有不同的属性,以框架表示;取不同属性值就是各种实例。

目前人们从不同的形式化程度对各个领域设计了本体,其中以自然语言处理领域的 WordNet^[95]、Framenet^[96]、SENSUS^[97]、规划管理领域的 GUM^[98]和 Mikrokmos^[99]为代表。

值得注意的两点:第一,我们并不会真的对领域中的所有事务都写出完整的描述,一是因为真的这样作的话,那么可能永远也无法完成建模工作。我们会留出一些占位符以利于将来的知识都能填入。二是因为本体是要重复使用的,抽象程度越高的本体越有利于复用,细节程度越高,虽然更有利于一次性使用,但却给今后复用带来困难。第二,所有的概念描述都有例外的情形,这些代表不确定性的知识不被纳入本体建模范围之内。

2.4 建立电力系统调度分析领域本体

2.4.1 电力系统调度分析领域本体划分

将本体论方法引入电力系统中的工作尚不多见,在欧盟共同资助的 KACTUS project 中包括了电力系统的 ontology 构建工作^[100],此工作是在 IEC61970CIM (Common Information Model) 模型提出之前进行的,故研究成果没有与 IEC 的标准化工作相结合。由 IEC 组织所发布的广为应用的 61970CIM 模型可以看成是基础层面上的本体定义,它给出了电力系统中 EMS 应用领域内“数据”层面上的概念说明,通过对“数据”的定义实现了 EMS 应用范围内的各种事务描述。IEC61970CIM 模型的重要性到今天已经成为不争的事实,可以说,没有 IEC61970CIM 模型,就没有今天蓬勃发展的 EMS 应用软件,没有今天 EMS 系统中数据平台与高级应用软件 PAS 间的解耦。通过 IEC61970CIM 模型,各厂家开发的应用软件和平台间才有可能实现互操作和无缝联接。这些都以事实说明了建立领域本体工作的重要性。

电力系统调度分析领域的本体论要覆盖比 IEC61970CIM 模型更广的范围,即不仅从“数据”层面上给出各种概念的形式化定义,还要从领域“知识”层面给出反映领域抽象模型的概念定义。

下面从调度决策支持系统软件设计的层面出发,分析构成该软件结构模型的各要素。

我们定义电力系统中六种最基本的概念作为类型本体:认知主体本体、物理实体本体、数据本体、状态本体、事件本体和操作本体。对概念及关系的语义说明如下:

(1) 认知主体本体(Cognitive ontology)。定义为电力系统中智能主体对于电力系统的所有分析活动。电力系统中天然存在两种客体,电网物理实体和电网操作者。由于电网操作者对于实际系统的感知与控制功能体现为一系列认知过程,因而在电力系统分析领域的本体中,用认知主体代替了电网操作者,作为一个基本的类型本体,参与全系统的交互活动。在现有智能软件水平下可以看成是软件模块,如我们通常所使用的状态估计、安全分析、经济分析、稳定计算等。

(2) 物理实体本体(Physical Entity ontology)。定义为电力系统中的所有用于传输电能量的设备,监测、控制、保护传输设备的设备,以及上述各种设备间的连接拓扑。具体的,就是我们通常所说的一次设备、二次设备以及各种计量设备。

(3) 操作本体(Operation ontology)。定义为认知主体对电力系统物理实体所进行的所有实际动作的集合。如检修,投入、退出运行,开断各种设备元件、增减发电机出力等。通过各种操作,认知主体实现对物理实体的控制,使系统运行于所期望的状态。

(4) 数据本体(Data ontology)。定义为认知主体所感知到的所有反应电网物理实体的量值。包括测量量值(四遥量、暂态量、故障量、追忆量、经济量等)、实验记录量值(主要是实验数据)铭牌值(各种设备的参数)、高级数据(主要指通过各种分析后

2.4 建立电力系统调度分析领域本体

2.4.1 电力系统调度分析领域本体划分

将本体论方法引入电力系统中的工作尚不多见,在欧盟共同资助的 KACTUS project 中包括了电力系统的 ontology 构建工作^[100],此工作是在 IEC61970CIM (Common Information Model) 模型提出之前进行的,故研究成果没有与 IEC 的标准化工作相结合。由 IEC 组织所发布的广为应用的 61970CIM 模型可以看成是基础层面上的本体定义,它给出了电力系统中 EMS 应用领域内“数据”层面上的概念说明,通过对“数据”的定义实现了 EMS 应用范围内的各种事务描述。IEC61970CIM 模型的重要性到今天已经成为不争的事实,可以说,没有 IEC61970CIM 模型,就没有今天蓬勃发展的 EMS 应用软件,没有今天 EMS 系统中数据平台与高级应用软件 PAS 间的解耦。通过 IEC61970CIM 模型,各厂家开发的应用软件和平台间才有可能实现互操作和无缝联接。这些都以事实说明了建立领域本体工作的重要性。

电力系统调度分析领域的本体论要覆盖比 IEC61970CIM 模型更广的范围,即不仅从“数据”层面上给出各种概念的形式化定义,还要从领域“知识”层面给出反映领域抽象模型的概念定义。

下面从调度决策支持系统软件设计的层面出发,分析构成该软件结构模型的各要素。

我们定义电力系统中六种最基本的概念作为类型本体:认知主体本体、物理实体本体、数据本体、状态本体、事件本体和操作本体。对概念及关系的语义说明如下:

(1) 认知主体本体(Cognitive ontology)。定义为电力系统中智能主体对于电力系统的所有分析活动。电力系统中天然存在两种客体,电网物理实体和电网操作者。由于电网操作者对于实际系统的感知与控制功能体现为一系列认知过程,因而在电力系统分析领域的本体中,用认知主体代替了电网操作者,作为一个基本的类型本体,参与全系统的交互活动。在现有智能软件水平下可以看成是软件模块,如我们通常所使用的状态估计、安全分析、经济分析、稳定计算等。

(2) 物理实体本体(Physical Entity ontology)。定义为电力系统中的所有用于传输电能量的设备,监测、控制、保护传输设备的设备,以及上述各种设备间的连接拓扑。具体的,就是我们通常所说的一次设备、二次设备以及各种计量设备。

(3) 操作本体(Operation ontology)。定义为认知主体对电力系统物理实体所进行的所有实际动作的集合。如检修,投入、退出运行,开断各种设备元件、增减发电机出力等。通过各种操作,认知主体实现对物理实体的控制,使系统运行于所期望的状态。

(4) 数据本体(Data ontology)。定义为认知主体所感知到的所有反应电网物理实体的量值。包括测量量值(四遥量、暂态量、故障量、追忆量、经济量等)、实验记录量值(主要是实验数据)铭牌值(各种设备的参数)、高级数据(主要指通过各种分析后

所得出的结果数据)等。电网拓扑连接也作为数据本体的内容。数据本体是联系认知主体和物理实体的枢纽,是智能认知主体工作的基础。

(5) 状态本体(State ontology)。定义为电力系统当前运行的方式的概括,是将数据实体分类化后的结果。每种状态对应一个基本的状态描述知识库,库中定义了该种状态的数据本体的约束逻辑,即状态本体是在环境认识层面对数据本体的抽象。

(6) 事件本体(Event ontology)。定义为系统中所发生的各种引起状态变化的“时空片断”的各个方面,主要体现为电力系统中的各种扰动,如故障的发生、异常的出现等。一般化的事件定义^[88]为由某个“时空片断”——多维时空宇宙的一部分——的各个方面所构成,因而电力系统中的“故障”这一事件将由带有时标的报警数据体现。由于事件可能是一个发生在多个时空点上的复杂事件,即在时空宇宙中具有不规则形状,因而事件可以再分解为“子事件”。如电力系统的故障是一个复杂事件,它可以分解为多个带有时标顺序的报警数据,而后者则是简单事件。事件表征状态的改变,是在环境感知层面对数据本体的抽象。

上述六种本体的交互作用构成调度决策支持系统软件的所有行为活动的集合:认知主体对于物理实体的认识通过各种数据实现,数据是实体的表现,被用来描述实体的状态和行为。将数据进行概括,就得到系统实体的各种状态。状态是对数据的概括,所有状态的并集就是数据集合的全集。期望状态就是我们控制电力系统要成为的目标。认知主体改变电力系统的关系表现为操作,操作使得电力系统的状态发生改变,使之趋向于我们的期望所在。电力系统中将发生一些事件(也由数据描述),它们也改变实体的状态,但这往往是我们所不希望的,对于每一种事件,我们都对此做出分析,进而得出一个决策,通过操作作用于系统,使系统趋向于我们所期望的状态。

根据以上论述,电力系统本体的基本组成以及各类型间的关系,可表示为图 2-1 所示。

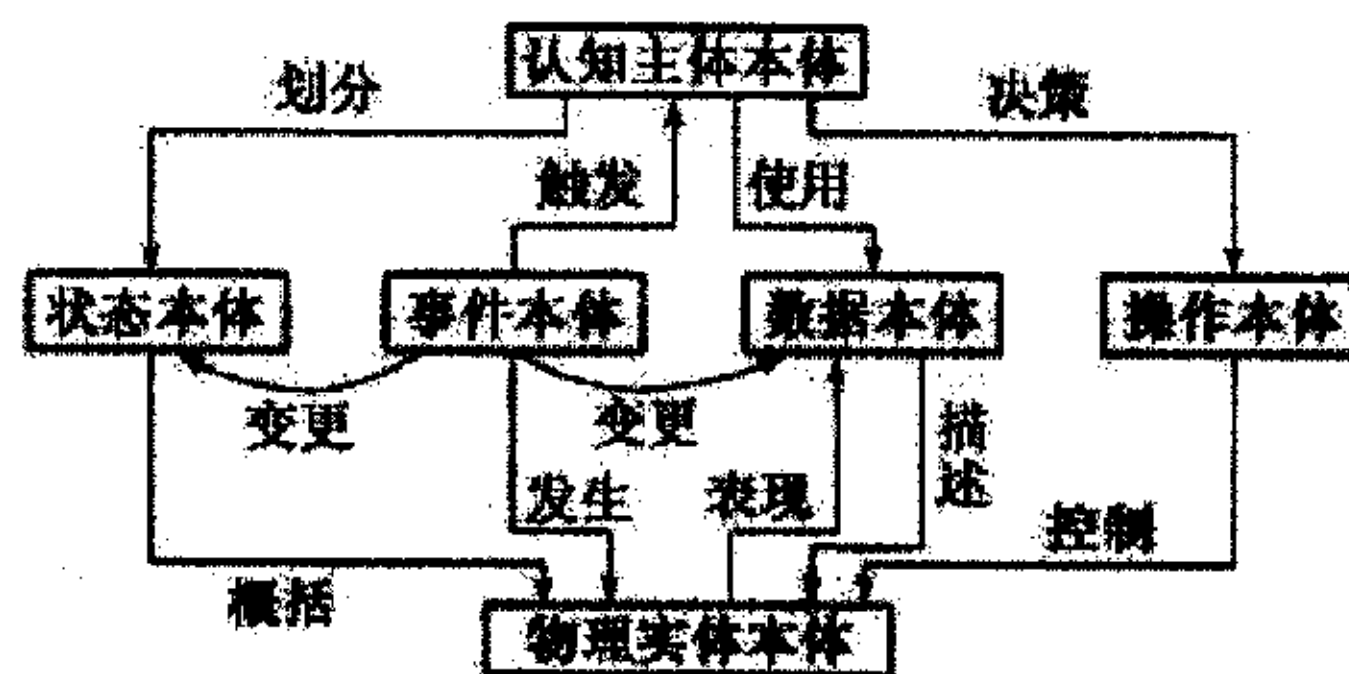


图 2-1 电力系统调度分析中的概念及概念间的关系

Fig. 2-1 concepts and their relations in power system dispatching analysis ontology.

之所以把状态列为单独的一类本体,是因为它从最直观的角度刻画了系统,是人的经验与智慧的集中体现,把这种经验知识形式化,将大大简化计算机推理。经典的关于

状态方面的阐述是 Dy-Liacco 将电力系统运行状态分为正常状态、紧急状态、恢复状态,三种基本状态间的转换对应着不同的控制过程^[101,102]。对于状态的定义曾一度是电力系统学术界研究的热点,多次国际会议、多篇文章都专门探讨对于电力系统状态的合理划分^[102-109]。后面将详细论述状态本体的划分。对于事件与状态的感知与处理,体现了认知主体的智能化水平。

下面重点介绍数据本体和状态本体,因为这二者是整个概念体系中的核心:数据本体是领域知识库的基础,所有分析均以此为基础展开讨论;而状态本体则是关系到 EMS 功能扩展的关键因素。即,现有 EMS 软件模块都是在稳态分析中使用的,欲将 EMS 功能扩展至故障处理和动态应用,首先要对状态进行定义,让计算机能够识别系统所处的状态。同时,状态也是多智能体环境中联系智能体与环境的关键因素。

2.4.2 数据本体与 IEC61970CIM 模型

数据本体反映的是认知主体本体对于物理实体本体的度量,或者说是物理实体在数字世界中的复本,因此数据本体应包括类结构模型和属性访问接口两部分。对于当前 EMS 分析范围内的实体而言,IEC61970 系列标准已翔实的定义了该范围内的绝大部分数据模型与部分数据访问接口。在对概念建模的意义上,CIM 模型相当于 EMS 应用领域内的数据本体的定义。

IEC61970 系列标准^[22]是由 IEC TC57 工作组提出的与 EMS 专业相关的 CIM 和 CIS (Common Interface Specification) 标准,分为导则、术语、CIM 和两种级别的 CIS 共 5 个部分。CIM 定义了覆盖各个应用的面向对象的电力系统模型,是 IEC 61970 标准的关键部分,CIS 是访问接口,目前尚处于不断修改中,还未提出最终稿。CIM 分为 3 个部分,301 是 CIM 的基本部分,302 是 CIM 用于能量计划、检修和财务的部分,303 是 CIM 用于 SCADA 的部分(这里的 SCADA 应用与我们当前系统的 SCADA 的含义不完全一样)。

CIM 由包组成,包是将相关模型元件人为分组的方法,每一个包都是一组类的集合,每个类包括类的属性和与此类有关系的类,CIM 模型中的包相当于是数据本体中位于类图根部的超类,等价于上位本体。301 包括 Core, Topology, Wires, Outage, Protection, Meas, LoadModel, Generation 和 Domain 共 9 个包。核心包(Core)定义了厂站类 Substation、电压等级类 VoltageLevel 等许多应用公用的模型;拓扑包(Topology)定义连接节点 ConnectivityNode 和拓扑岛 TopologicalIsland 等拓扑关系模型;电线包(Wires)定义断路器 Breaker、隔离刀闸 Disconnecter 等网络分析应用需要的模型;停运包(Outage)建立了当前及计划网络结构的信息模型;保护包(Protection)建立了用于培训仿真的保护设备的模型;量测包(Meas)定义了各应用之间交换变化测量数据如测点 Measurement 和限值 Limitset 等描述;负荷模型包(LoadModel)定义了负荷预测用的负荷模型;发电包(Generation)分成生产包(Production)和发电动态特性包(GenerationDynamics)两个子包,

状态方面的阐述是 Dy-Liacco 将电力系统运行状态分为正常状态、紧急状态、恢复状态, 三种基本状态间的转换对应着不同的控制过程^[101,102]。对于状态的定义曾一度是电力系统学术界研究的热点, 多次国际会议、多篇文章都专门探讨对于电力系统状态的合理划分^[102-109]。后面将详细论述状态本体的划分。对于事件与状态的感知与处理, 体现了认知主体的智能化水平。

下面重点介绍数据本体和状态本体, 因为这二者是整个概念体系中的核心: 数据本体是领域知识库的基础, 所有分析均以此为基础展开讨论; 而状态本体则是关系到 EMS 功能扩展的关键因素。即, 现有 EMS 软件模块都是在稳态分析中使用的, 欲将 EMS 功能扩展至故障处理和动态应用, 首先要对状态进行定义, 让计算机能够识别系统所处的状态。同时, 状态也是多智能体环境中联系智能体与环境的关键因素。

2.4.2 数据本体与 IEC61970CIM 模型

数据本体反映的是认知主体本体对于物理实体本体的度量, 或者说是物理实体在数字世界中的复本, 因此数据本体应包括类结构模型和属性访问接口两部分。对于当前 EMS 分析范围内的实体而言, IEC61970 系列标准已翔实的定义了该范围内的绝大部分数据模型与部分数据访问接口。在对概念建模的意义上, CIM 模型相当于 EMS 应用领域内的数据本体的定义。

IEC61970 系列标准^[22]是由 IEC TC57 工作组提出的与 EMS 专业相关的 CIM 和 CIS (Common Interface Specification) 标准, 分为导则、术语、CIM 和两种级别的 CIS 共 5 个部分。CIM 定义了覆盖各个应用的面向对象的电力系统模型, 是 IEC 61970 标准的关键部分, CIS 是访问接口, 目前尚处于不断修改中, 还未提出最终稿。CIM 分为 3 个部分, 301 是 CIM 的基本部分, 302 是 CIM 用于能量计划、检修和财务的部分, 303 是 CIM 用于 SCADA 的部分 (这里的 SCADA 应用与我们当前系统的 SCADA 的含义不完全一样)。

CIM 由包组成, 包是将相关模型元件人为分组的方法, 每一个包都是一组类的集合, 每个类包括类的属性和与此类有关系的类, CIM 模型中的包相当于是数据本体中位于类图根部的超类, 等价于上位本体。301 包括 Core, Topology, Wires, Outage, Protection, Meas, LoadModel, Generation 和 Domain 共 9 个包。核心包(Core)定义了厂站类 Substation、电压等级类 VoltageLevel 等许多应用公用的模型; 拓扑包(Topology)定义连接节点 ConnectivityNode 和拓扑岛 TopologicalIsland 等拓扑关系模型; 电线包(Wires)定义断路器 Breaker、隔离刀闸 Disconnecter 等网络分析应用需要的模型; 停运包(Outage)建立了当前及计划网络结构的信息模型; 保护包(Protection)建立了用于培训仿真的保护设备的模型; 量测包(Meas)定义了各应用之间交换变化测量数据如测点 Measurement 和限值 Limitset 等描述; 负荷模型包(LoadModel)定义了负荷预测用的负荷模型; 发电包(Generation)分成生产包(Production)和发电动态特性包(GenerationDynamics)两个子包,

前者定义了用于 AGC 等应用的发电机模型, 后者定义了用于 DTS 的原动机和锅炉等模型; 域包(Domain)是量与单位的数据字典, 定义了可能被其他任何包中任何类使用的属性(特性)的数据类型。每个包都可以用 UML 图表示, 如 Core 包的 UML 图如图 2-2 所示。

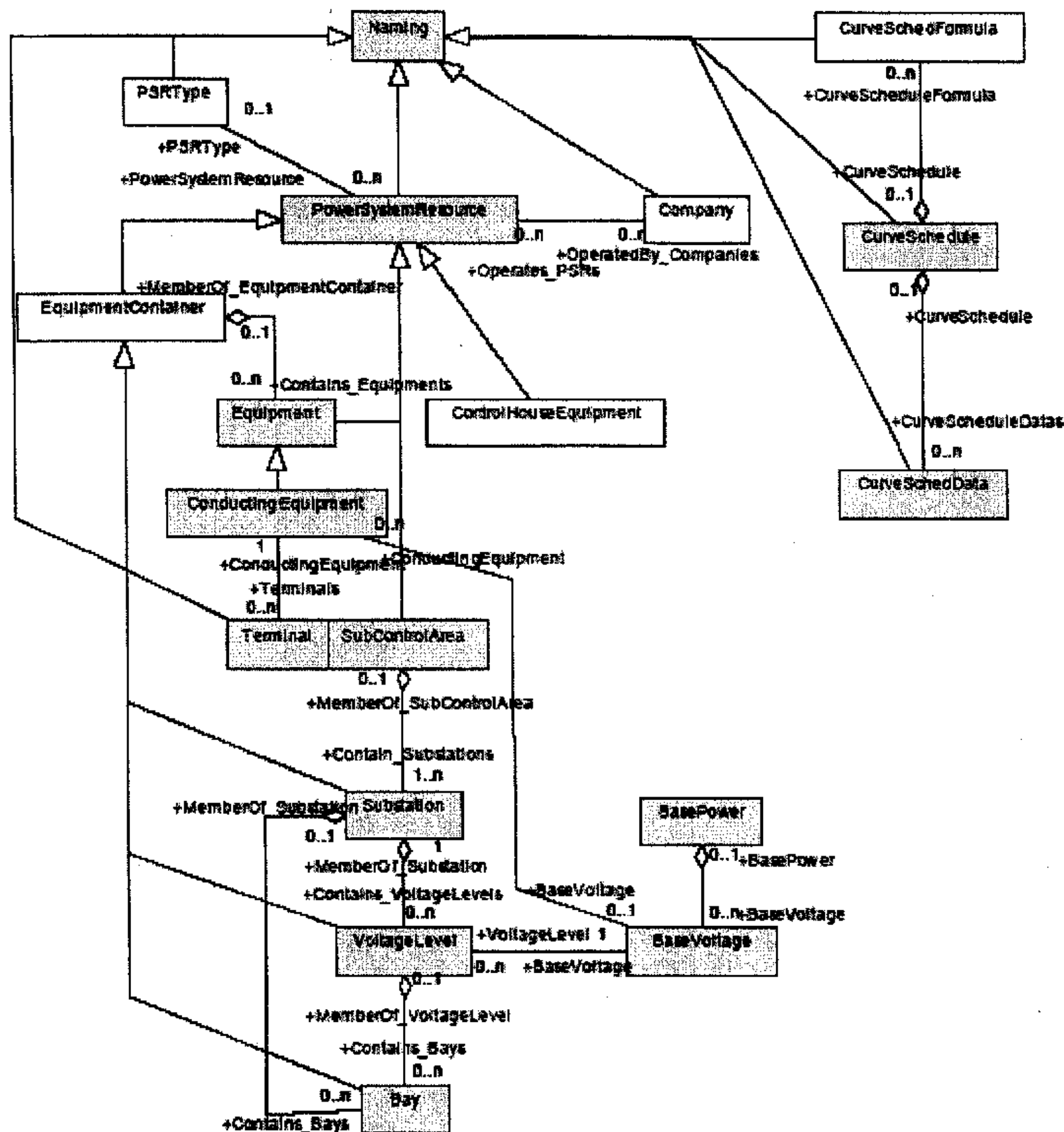


图 2-2 用 UML 描述的 CIM 模型中的 Core 包

Fig.2-2 Core package in CIM described with UML.

CIS 分两个级别: 级别 1 仅对接口做一般性描述, 不涉及具体的计算机技术, 401 是 CIS 的总体框架说明, 402 之后与原来的计划的目录变化较大, 其余的内容包括非实时数据的访问、实时数据的访问、历史数据的访问, 其他的 CIS 还包括互操作实验的成果即模型交换(模型合并、更新等), 以及针对各个应用的 CIS; 级别 2 将 CIS 映射到 CORBA 和 XML 等具体的计算机技术, 501 是 CIM 模型从 UML 转换成 XML RDF 格式, 用于模型的语法校验, 502 是 CDA 映射到 CORBA, 503 是互操作实验的 CIM XML 数据交换格式。

61970 中对于保护数据的定义并不充分, 仅对过流保护、重合闸和同期检查继电器做了简单定义, 更详细的定义尚在讨论中。因此, 对于电网调度决策支持系统而言, 仅使用 CIM 模型作为数据本体是不够的, 还要对保护数据和动态过程涉及到的数据进行形式化定义。其中保护数据模型在另一个系列的标准 IEC61850-7^[110]中有所表述, 但各厂家对于 61580 的理解还存在分歧, 该标准仍处在不断修订之中。

从 IEC61970CIM 和 61850-7 的发展过程可以得出, 标准数据模型的定义不能做封闭式的研究, 也不是一次能完成的, 正确的做法是由相关研究机构组成专门的数据模型定义研究小组, 吸取各家之长, 在保证无二义性、又留出扩展性的原则下逐步完成数据模型的定义工作。

作者所在的研究组在地区电网中实践了调度决策支持系统, 在该软件系统中没有涉及到动态相关的数据, 对于保护数据的定义, 采用了面向设备类型与面向故障诊断需求相结合的定义方式, 即先按设备类型建立了对应的类和类属性定义, 然后按照故障诊断需求的数据属性再次生成基于前面定义的表的视图。这是一种较为粗略的形式, 对保护信息描述的抽象程度不够, 有待改进。

2.4.3 状态本体及相关研究

对于状态本体, 将该本体引入, 并单独作为一类型本体的原因在于状态是划分系统运行的最有效手段。对于状态的深入研究可以追溯到上世纪 60 年代, 研究的高潮在 70~80 年代, IEEE、CIGRE 等组织曾经召开过多次专门的国际会议探讨对于电力系统的状态划分问题, 并形成了几种广为使用的状态划分方式。这种状态划分的引入, 极大方便了我们对于系统的分析和认识。

几种较有影响力的状态划分的定义分别叙述如下:

(1) Dy-Liacco 在文[102]中给出的定义, 文章发表于 1967 年, 这是最早关于电力系统运行状态划分的系统论述。这项状态划分的工作的目的是为克里夫兰电力照明公司 (CEI, Cleveland Electric Illuminating Company) 规划一个能提高系统运行可靠性的集中式的自动监控系统, 也就是我们今天的能量管理系统。

表 2-1 Dy-Liacco 对状态做的定义划分

Table 2-1 definition of state given by Dy-Liacco.

	直接控制	优化控制	适应性控制
预防性状态 (正常状态)	1. 负荷频率控制; 2. 涡轮机调速控制; 3. 发电机电压控制; 4. 变压器分接头控制; 5. 电容器投切控制;	1. 机组组合; 2. 经济交换功率决策; 3. 发电经济调度; 4. 系统电压控制;	1. 调节器、保护整定变化; 2. 机组组合; 3. 约束值控制; 4. 底层逻辑; 5. 短期负荷预测; 6. 联络线潮流模型; 7. 系统可靠性评估; 8. 稳定性分析; 9. 惩罚因子计算; 10. 系统电压控制; 11. 故障定位; 12. 开关操作; 13. 其他人为干预;

61970 中对于保护数据的定义并不充分, 仅对过流保护、重合闸和同期检查继电器做了简单定义, 更详细的定义尚在讨论中。因此, 对于电网调度决策支持系统而言, 仅使用 CIM 模型作为数据本体是不够的, 还要对保护数据和动态过程涉及到的数据进行形式化定义。其中保护数据模型在另一个系列的标准 IEC61850-7^[110]中有所表述, 但各厂家对于 61580 的理解还存在分歧, 该标准仍处在不断修订之中。

从 IEC61970CIM 和 61850-7 的发展过程可以得出, 标准数据模型的定义不能做封闭式的研究, 也不是一次能完成的, 正确的做法是由相关研究机构组成专门的数据模型定义研究小组, 吸取各家之长, 在保证无二义性、又留出扩展性的原则下逐步完成数据模型的定义工作。

作者所在的研究组在地区电网中实践了调度决策支持系统, 在该软件系统中没有涉及到动态相关的数据, 对于保护数据的定义, 采用了面向设备类型与面向故障诊断需求相结合的定義方式, 即先按设备类型建立了对应的类和类属性定义, 然后按照故障诊断需求的数据属性再次生成基于前面定义的表的视图。这是一种较为粗略的形式, 对保护信息描述的抽象程度不够, 有待改进。

2.4.3 状态本体及相关研究

对于状态本体, 将该本体引入, 并单独作为一类型本体的原因在于状态是划分系统运行的最有效手段。对于状态的深入研究可以追溯到上世纪 60 年代, 研究的高潮在 70~80 年代, IEEE、CIGRE 等组织曾经召开过多次专门的国际会议探讨对于电力系统的状态划分问题, 并形成了几种广为使用的状态划分方式。这种状态划分的引入, 极大方便了我们对于系统的分析和认识。

几种较有影响力的状态划分的定义分别叙述如下:

(1) Dy-Liacco 在文[102]中给出的定义, 文章发表于 1967 年, 这是最早关于电力系统运行状态划分的系统论述。这项状态划分的工作的目的是为克里夫兰电力照明公司 (CEI, Cleveland Electric Illuminating Company) 规划一个能提高系统运行可靠性的集中式的自动监控系统, 也就是我们今天的能量管理系统。

表 2-1 Dy-Liacco 对状态做的定义划分

Table 2-1 definition of state given by Dy-Liacco.

	直接控制	优化控制	适应性控制
预防性状态 (正常状态)	1. 负荷频率控制; 2. 涡轮机调速控制; 3. 发电机电压控制; 4. 变压器分接头控制; 5. 电容器投切控制;	1. 机组组合; 2. 经济交换功率决策; 3. 发电经济调度; 4. 系统电压控制;	1. 调节器、保护整定变化; 2. 机组组合; 3. 约束值控制; 4. 底层逻辑; 5. 短期负荷预测; 6. 联络线潮流模型; 7. 系统可靠性评估; 8. 稳定性分析; 9. 惩罚因子计算; 10. 系统电压控制; 11. 故障定位; 12. 开关操作; 13. 其他人为干预;

紧急状态	1.故障清除、重合闸； 2.切负荷；3.切机；4.自动开断；5.失步跳闸； 6.系统解列；	1. 最大化负荷控制；	1.约束值；2.底层逻辑；3.联络线潮流；
恢复状态	1.自动馈线恢复；2.自动负荷转移；	1.动态恢复过程；	1.约束值；2.底层逻辑；3.联络线潮流模型；4.负荷预测；

(2) John Zaborszky 等人在文[103]中给出的定义。这是在 Dy-Liacco 的定义基础上进行的更详细的状态划分，更接近于形式化的定义方式。该定义工作的目的是确定系统在发生异常或故障以后，系统在不同等级的状态下应如何实施紧急控制。

表 2-2 John Zaborszky 等人对状态做的定义划分

Table 2-2 Definition of state given by John Zaborszky etc.

	决策级别	定义	控制级别
正常状态	级别 0: 正常	运行条件及约束均为预定范围内的正常；	1.负荷、发电的监视与估计；2.状态估计；3.系统负荷状况和安全性的监视；4.经济调度或最优潮流；5.机组组合；6.AGC；7.负荷管理；
警戒状态	级别 1: 伴随有结构破坏的正常状态	系统是安全的，可行的，仅仅是由于在承受预想范围内的故障或扰动而造成系统结构发生变化；	与级别 0 相同，等式及不等式约束方程均满足，但是，网络结构的进一步改变，其后果必须加以评估，如果需要，还需实施补偿；
	级别 2: 正常但带有安全破坏的状态	系统由于发生了预想范围内的严重故障而无法保持当前运行状态；	可用的算法将包括那些适用于级别 0 的。但为恢复安全性，经济调度和负荷管理的算法将可能被替代为：1.用直流网络控制网络的负荷潮流；2.修正线路计划、负荷调度等；3.投入新的电源或其他设备；
紧急状态	级别 3: 稳定危机期（大约 25 周波，最多 3~5 秒）	持续发展中的系统动态过程，如不采取紧急控制措施系统运行状态将遭到破坏	1.（方案 1）就地结构控制或保护以切除故障元件，局部控制动作以保证单一机组的稳定；2.（方案 2）利用直流网络、投入制动电阻、切负荷等来增强系统稳定性；3.（方案 3）当系统整体不能被保证时，通过大规模负荷转移和网络重构使系统脱离最不利的状态

	级别 4: 过渡危机期(0.5~60 秒, 最多可达 5~10 分钟)	一个正在进行中的过程, 由于发展过程非常短暂, 因而需要紧急手段以保证系统具有足够的强度以应对后面的操作与运行	1.AGC 型的频率降低; 2.利用旋转备用或冷备用; 3.快速启动的涡轮机等特殊措施; 4.从相邻区域获得功率支援; 5.利用设备能提供的短时间过载运行能力; 6.降压运行等特殊手段; 7.第一阶段结构控制: 如增加新的发电机组、将检修设备重新投入或切除负荷等; 8.第二阶段结构控制: 形成岛;
恢复状态	级别 5: 系统整体性危机期(1~60 分钟, 最多数小时)	系统失去整体性, 有解列发生	1.恢复如上级别 4 中所述的岛的活性; 2.将岛重联为一体; 3.恢复负荷等。

(3) Lester H. Fink、Kjell Carlsen 等人在文[106]中给出的定义。同上两种定义相比, Fink 等人还给出了导致状态间转移的一些典型原因。

表 2-3 Fink 等人对状态做的定义划分

Table 2-3 Definition of state given by Fink etc.

运行状态	变化要素	原因	控制手段
正常状态			同(1)
警戒状态	安全级别降低	1 供电边界减小; 2 功率传送边界减小; 3 扰动可能性增加;	预防性控制, 以恢复充足的储备边界; 发电功率转移(经济调度)、增加备用、联络线重新计划、无人值守变电站的值守、降压运行;
紧急状态	不等式约束破坏	可能的原因: 误操作、短期或永久失去一台主设备; 潜在跳闸: 内在的电或机械动作失败、保护或控制设备的误动作、外部事件如雷击、飞机坠毁等;	立即消除设备过载的手段: 快速清除、快关汽门、动态制动、励磁控制、直流调制控制、负荷控制、电容器投切, 以及警戒状态中的所有控制措施;
极端状态(瓦解状态)	失去系统整体性;	可能的原因: 失去联络线导致的系统解列为不可控的岛, 岛内无法提供负荷所需功率; 潜在跳闸: 极限运行状态下的联络线过负荷时间过长、保护的误动作、	能避免使全系统瓦解的控制动作; 上述所有, 再加上切负荷、控制岛的运行;

		紧急状态下的后续扰动:	
恢复 状态			矫正控制: 通过机组重启或同步、负荷恢复供电、区域间再同步等手段重建一个功能完备的系统。

以上几种划分方法各有优缺点, 可以看出所有的划分都是以 Dy-Liacco 的工作为基础展开进行的, Fink 和 Zaborszky 给出的划分更侧重于系统变化的动态过程, 并考虑了不同动态过程间的演变原因及各状态下层次式的控制措施。但这些划分方式的缺点在于不是形式化的, 因而无法为计算机所识别, 要想真正将状态分析的优势体现出来, 必须对其进行形式化, 让计算机去处理这些状态的识别, 并且根据不同状态, 得出应该采取的操作以完成指定的分析和控制任务。

最接近于形式化的是 Zaborszky 给出的定义, 考虑到对状态做的定义要适合于 EMS 中使用, 我们在 Zaborszky 定义的基础上稍作改动如下: 将紧急状态中的级别 3 和级别 4 分别改为针对电网快过程稳定性和慢过程动态安全性的评估结果。即, 定义级别 3 为暂态稳定和快速的电压稳定危机期, 如果不采取措施, 系统将在数秒内失去暂态稳定(由于现在联网范围的日益扩大, 暂态稳定的失稳期限要比原来有所延长)或快速的电压稳定; 定义级别 4 为电网中其他所有在数十秒到数小时范围内能对系统安全造成破坏的慢过程危险期, 慢过程包括除暂态稳定、快速电压稳定外系统的其他动态变化过程, 包括: 动态稳定过程, 一般电压稳定过程, 低频振荡过程, 以及线路等设备接近运行极限造成的端部和全线路发热、弧垂不断增大的过程等。做此改动的原因在于电网的快过程危机期目前而言是更难被集成到统一的 EMS 环境中解决的, 而慢过程虽然也会对系统造成严重的安全破坏, 但由于时间允许, 因此相对较容易也应当在集中式的 EMS 环境中加以分析和控制。数次大停电事故均是对慢过程的处理不利而导致系统最终失去整体运行能力的。

上面给出的是状态划分图中最靠近根部的几种状态定义, 即上位本体。在实际系统中, 还应根据具体需要对上述状态做更详细的子状态划分, 才能满足不同层次上的应用要求。状态划分越细致, 对系统的运行细节掌握就越多。

与状态研究紧密相连的是对不同状态下的控制措施的研究, 即上文的表 1~3 中的控制措施, 属于操作本体范畴。其中最复杂的是紧急状态下系统的控制措施。CIGRE 32 研究小组 (System Operation) 总结了已达成共识的用于处理各种特定目标的紧急控制(包括快过程和慢过程)措施^[107], 如下表所示。

表 2-4 CIGRE Group 32 总结的紧急控制措施

Fig.2-4 Emergency control means summarized by CIGRE Group 32

控制动作	控制的目标
------	-------

		全系统或部分系统的发电、负荷平衡	防止网络中的热稳定过负荷	防止失去稳定性				隔离健康系统，维持其整体性能	增加恢复能力
				稳态	暂态		电压		
					非周期的	振荡的			
负荷侧控制	i)通过降低电压减负荷	√√	√						
	ii) 通过开断减负荷	√√	√		√	√			
发电侧控制	i)减出力（不断开关）	√	√√		√√	√√			
	ii)切断开关	√	√√		√	√√			
	iii) 隔离至辅助设备						√	√√	
	iv) 汽门或励磁反馈				√√	√√			
	v)动态制动				√√				
	vi) 快速汽门控制				√√				
	vii)快速励磁				√√	√			
	viii)旁路汽门控制							√	
	ix) 抽水蓄能模式	√√	√		√	√			
	x)负荷处的辅助燃气轮机	√					√	√√	
	xi) 负荷处的水轮机及主要的燃气轮机	√√						√√	
网络侧控制	i)快速自动重合		√		√√			√√	
	ii) 慢速自动重合		√√					√√	
	iii) 串连电容器投入				√√				
	iv)分割网络						√√	√	

注：图中的√√和√分别表示该状态下实现特定目标的首要 and 次要控制手段。

经过 20 余年的发展，在线控制措施已经比原来有了更为丰富的内容，但上表给出的仍不失为常规的控制手段的良好总结，可以为我们的在线实施预防、紧急控制提供有效的决策依据。

2.4.4 电力系统调度分析本体的形式化

形式化工作的重点是数据、状态和事件本体的形式化。因为物理实体本体的建模已反映于数据本体中；认知本体在软件系统中就是负责完成各种分析功能的软件模块，操作本体是对分析后给出的对物理实体的控制，就现状而言，对这两种本体不存在二义性的理解。

(1) 数据本体的形式化

数据本体是对物理实体本体的形式化描述，从而做为物理实体本体的数字复本参与建模。

数据本体建模以 IEC61970CIM 模型为基础，对于模型中已包括的数据类，直接采用其定义和接口访问格式；对 IEC61970CIM 模型中未包括的，尽量参照已有的标准，如 IEC61850-7 对保护类的描述，在此基础上继承子类或扩充新类。IEC61970CIM 模型中的数据均是以 XML 格式描述的，作为一种自描述型的资源描述语言，XML 可以描述丰富的语义。下面是用 XML 格式描述的 61970CIM 模型中的设备端点 Terminal 的一个实例：

```
<cim:Terminal rdf:ID="16289892_1101 甲刀闸_16">
  <cim:Naming.name>1101 甲刀闸_16</cim:Naming.name>
  <cim:Terminal.ConductingEquipment rdf:resource="#933756_1101 甲刀
  闸"/>
  <cim:Terminal.ConnectivityNode rdf:resource="#2216440_16"/>
</cim:Terminal>
```

(2) 状态本体的形式化

对状态进行形式化定义，从便于计算机应用角度讲，最方便的是定义树形状态图，将状态划分为多个互斥的子状态，子状态间具有特定的属性，取不同的属性值表示位于状态树上的不同位置，各种状态之间是彼此互斥的。最详细的状态是位于叶节点上的状态。

基于上述分析，对状态做形式化定义如下：

- i) 正常状态不做更多定义。
- ii) 对于非正常的各种运行状态，定义如下的属性，根据属性值确定当前系统处于何种状态：

{扰动后系统是否具有整体运行能力；扰动后系统是否具有快过程的暂态稳定运行

注：图中的√√和√分别表示该状态下实现特定目标的首要 and 次要控制手段。

经过 20 余年的发展，在线控制措施已经比原来有了更为丰富的内容，但上表给出的仍不失为常规的控制手段的良好总结，可以为我们的在线实施预防、紧急控制提供有效的决策依据。

2.4.4 电力系统调度分析本体的形式化

形式化工作的重点是数据、状态和事件本体的形式化。因为物理实体本体的建模已反映于数据本体中；认知本体在软件系统中就是负责完成各种分析功能的软件模块，操作本体是对分析后给出的对物理实体的控制，就现状而言，对这两种本体不存在二义性的理解。

(1) 数据本体的形式化

数据本体是对物理实体本体的形式化描述，从而做为物理实体本体的数字复本参与建模。

数据本体建模以 IEC61970CIM 模型为基础，对于模型中已包括的数据类，直接采用其定义和接口访问格式；对 IEC61970CIM 模型中未包括的，尽量参照已有的标准，如 IEC61850-7 对保护类的描述，在此基础上继承子类或扩充新类。IEC61970CIM 模型中的数据均是以 XML 格式描述的，作为一种自描述型的资源描述语言，XML 可以描述丰富的语义。下面是用 XML 格式描述的 61970CIM 模型中的设备端点 Terminal 的一个实例：

```
<cim:Terminal rdf:ID="16289892_1101 甲刀闸_16">
  <cim:Naming.name>1101 甲刀闸_16</cim:Naming.name>
  <cim:Terminal.ConductingEquipment rdf:resource="#933756_1101 甲刀
  闸"/>
  <cim:Terminal.ConnectivityNode rdf:resource="#2216440_16"/>
</cim:Terminal>
```

(2) 状态本体的形式化

对状态进行形式化定义，从便于计算机应用角度讲，最方便的是定义树形状态图，将状态划分为多个互斥的子状态，子状态间具有特定的属性，取不同的属性值表示位于状态树上的不同位置，各种状态之间是彼此互斥的。最详细的状态是位于叶节点上的状态。

基于上述分析，对状态做形式化定义如下：

- i) 正常状态不做更多定义。
- ii) 对于非正常的各种运行状态，定义如下的属性，根据属性值确定当前系统处于何种状态：

{扰动后系统是否具有整体运行能力；扰动后系统是否具有快过程的暂态稳定运行

能力; 扰动后系统是否具有慢过程的稳定运行能力; 扰动后系统是否满足静态安全约束}

degree 5: (0,*,*,*)——系统失去整体运行能力

degree 3: (1,0,*,*)——快过程危险期

degree 4: (1,1,0,*)——慢过程危险期

degree 2: (1,1,1,0)——第二级警戒状态

degree 1: (1,1,1,1)——第一级警戒状态

其中的*表示取任意值。

这里的整体运行能力可以由故障诊断及拓扑分析结果给出; 暂态稳定运行能力可以由暂稳分析给出; 慢过程稳定运行能力可以由动态稳定、电压稳定、小扰动分析等给出; 是否满足安全约束可以由静态安全分析结果给出。

这种形式定义的状态划分可用如下树形图 2-3 描述。

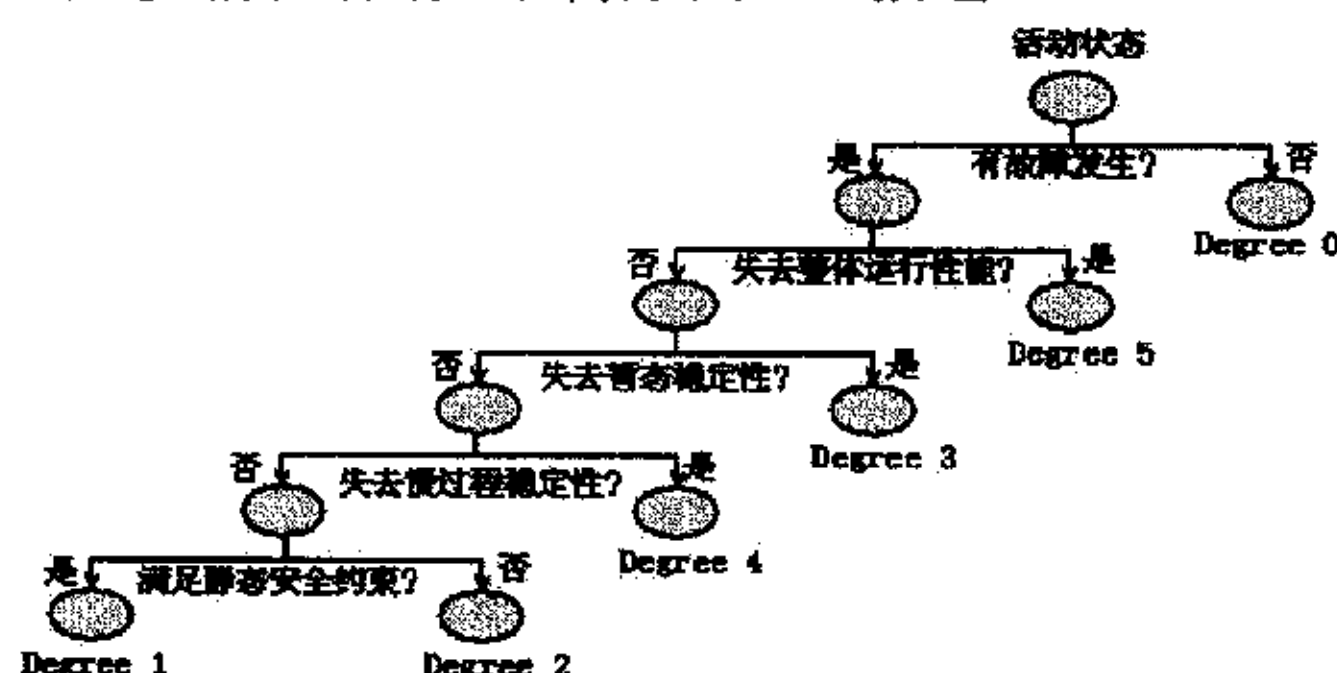


图 2-3. 按 5 个级别划分的状态本体的树形表示

Fig. 2-3 Tree graph of State ontology defined as five degrees.

(3) 事件本体的形式化。

事件本体所起的作用是触发当前状态下相应的智能体动作, 以消除不利于系统维持正常运行的事件后果。事件是对从单个智能体感知环境的角度对数据的综合, 反应当前数据变化是否应当触发智能体的相应动作。

每个事件除包括最基本的时间标签外, 还需包括事件其他属性的声明, 因此可采用关系模型描述事件本体, 事件通常具有多个属性, 因而描述事件本体的模型为一对多模型。其具体形式为:

事件名称 (事件对象, 事件时间, 事件属性 1, 事件属性 2, ……事件属性 n)。

同状态本体一样, 我们不可能也没有必要对所有事件给出全面定义, 在集中式的调度决策支持系统环境中, 最为关心的重要事件是如下几类:

i) 有故障发生迫使有元件退出。事件对象为故障元件, 结果既可能为确定性的故障元件(Definite Fault), 也可能是非确定性故障元件(ProbableFault);

ii) 各种稳定性的丧失。包括暂态稳定性、动态稳定性、非周期失稳、电压失稳、低频振荡失稳等; 事件对象为失去稳定性的元件, 事件属性为失稳的特征量 (如低频振荡的频率、衰减因子等);

iii) 系统整体运行能力的丧失。通常是指系统解列为数个孤立电气岛; 事件对象为

被解列的厂站（联络线）；

iv) 正常频率偏差；频率的偏差量作为事件属性；

v) 正常电压越限、电压合格率降低；越限量或电压合格率作为事件属性；

vi) 发电和负荷的平衡破坏；功率失配量作为事件属性；

vii) 热稳定过负荷；过负荷元件为事件对象，过负荷程度作为事件属性；

viii) 静态安全约束越限。即为对当前网络进行 N-1 安全分析后给出的危险性故障元件；潜在的危险故障为事件对象，而故障后的过载元件及过载量为事件属性；

ix) 负荷超出计划值。即当前网络中的负荷值与预测负荷值间的差值高于阈值，偏差值作为事件属性。

可见，上述事件并不能从 SCADA 数据或其他途径采集到的数据直接获得，均需要经过特定的分析方能确定。

对于事件的定义和分类方式同样反映出智能体智能行为的水平。事件描述着运行状态间的转化关系。对电网中发生的事故加以总结，整理形成典型事件，发展成为事件识别机制，则对于防止由于连锁故障而引发的大停电，是很有实用价值的。

（4）认知本体

由于事件既是认知本体的驱动引擎，反过来又需要由特定的分析后方能确定事件的发生和属性值，因此将认知本体也分为两类：评价类和调节类。评价类认知本体指与状态识别、事件识别有关的认知本体，而调节类则负责处理状态的变化和产生的事件，将针对特定状态和特定事件的分析结果作为决策提交。

i) 评价类：按照其生存状态可分为正常类、故障类和全局类：正常类包括潮流、状态估计、安全分析；正常类仅在 degree0~2 中起作用；故障类包括暂稳分析、动稳分析、电压稳定分析、小扰动分析；故障类仅在 degree3~5 中起作用；全局类包括拓扑分析、故障诊断；全局类在所有过程中都起作用。

ii) 调节类：AGC、经济调度、机组组合、无功优化、系统电压控制、安全校正（网络重构）、针对故障后的快过程的紧急控制（针对快过程的紧急控制由于发展过程太快，暂时无法在 EMS 中考虑对其加以协调）、针对故障后的慢过程的紧急控制、为恢复系统整体性能和负荷的故障恢复控制。

下面两幅表是各调节类认知本体与状态、事件之间的对应关系。

表 2-5 各状态下对应的调节类认知本体

Table 2-5 Enumeration of adjust type cognitive ontology in different state.

状态 S	状态中生存的调节类 R
Degree 0	AGC、经济调度、机组组合、无功优化、系统电压控制、安全校正（网络重构）；
Degree 1	AGC、经济调度、机组组合、无功优化、系统电压控制、安全校正（网络重构）；
Degree 2	AGC、经济调度、机组组合、系统电压控制、安全校正（网络重构）；
Degree 3	**

Degree 4	针对故障后的慢过程的紧急控制;
Degree 5	为恢复系统整体性能和负荷的故障恢复控制;

注: *: 可能被替代为利用直流网络、修正线路计划、负荷调度、投入新电源或其他设备进行的调整潮流;

** : Degree 3 的所有调节和控制由于受过程短和计算速度、通信速度的制约, 目前不能被集成于 EMS 系统及任何集中决策的系统中, 只能实施独立的控制。

表 2-6 所有调节类认知本体的生存状态及驱动事件

Table 2-6 Adjust type cognitive ontology and their corresponding state & event.

调节类 R	生存状态	驱动事件
AGC	Degree 0~2	正常频率偏差;
经济调度、机组组合	Degree 0~2	负荷超出计划值;
无功优化	Degree 0~2	正常电压越限;
系统电压控制	Degree 0~2	正常电压越限;
安全校正 (网络重构)	Degree 0~2	静态安全约束越限;
针对故障后的快过程的紧急控制	Degree 3	快过程稳定性的丧失
针对故障后的慢过程的紧急控制	Degree 4	慢过程稳定性的丧失
为恢复系统整体性能和负荷的故障恢复控制	Degree 5	有故障发生

(5) 操作本体。

如前所述, 由于对操作不存在二义性的理解, 故不必再重新进行严格的形式化定义。操作本体中的概念可以直接取为表 1~4 中给出的所有控制相关的元素。

(6) 形式化本体在软件交互中的应用

形式化后的本体是可以被计算机处理并在软件模块间交互的。当某一软件模块向外部发布一个串数据时, 如可能为下面形式的数据流“1110”, 如果不以领域 ontology 为语义基础进行发布, 则其他软件模块将无法识别该发布的内容, 被发布的内容变成了无任何意义的比特流, 或其他软件模块可能按照自己默认的数据接收方式对该更新进行处理, 造成理解错误。

要想为数据流赋予明确的意义, 使该数据流能在不同的软件模块间交互, 需要两个条件: 一是为数据流加入语义标签, 二是语义标签要以领域 ontology 做基本词汇表。条件一是将数据流与其所表征的实体关联起来, 条件二使该关联具有惟一性, 因此也就保证了无二义性。加入语义标签以后的数据流变成 (XML 格式):

<状态>

<整体运行能力>1</整体运行能力>

<快过程稳定性>1</快过程稳定性>

```

    <慢过程稳定性>1</慢过程稳定性>
    <静态安全性约束>0</静态安全性>
  </状态>

```

由前面建立的状态本体定义可知，上面的数据流表示软件向外部发布状态信息，通知当前系统状态为 degree2（第二级警戒状态），所有接收此发布的软件也能按照状态本体的定义正确解析此数据流。

按照这种方式，本体以语义标签的形式出现在数据表示和更高一层次的知识表示中，承载数据与其表征的实体间的关联，并由领域内本体的确定性保证了数据交互的无二义性，为复杂系统中软件模块间的交互打下良好的基础。

2.5 基于本体论的 MAS 型软件结构

建立电力系统分析领域本体的目的是为调度决策支持软件系统提供统一规范的共享和交互环境，使系统具有良好的通信能力和互操作性。调度决策支持系统的另一特性——自主运行能力则通过建立多智能体型的软件结构予以实现。智能体的最显著特点就是能够自行根据对环境的感知决定自身的行为动作，以及同其他智能体实现交互以合作完成某一任务。需要指出的是，多智能体型的软件系统是建立在前面构建的领域本体基础上的。相反，智能体如果拥有各自独立、不统一的知识库，则他们间的交互将不得不借助于复杂度为 $O(n^2)$ 的翻译软件进行，从而变得低效、复杂。

2.5.1 Agent 及多智能体系统简介

2.5.1.1 对 Agent 的研究历史

Agent 是一个来自于人工智能的概念，agent 一词来源于拉丁语 agere，意为“去做”，因而 Agent 最初是指某种能够行动的东西。然而后来的变化却超出了最初的定义范围。一方面，人们期待着计算机智能体有其他区别于简单“程序”的属性，诸如自主控制的操作、感知环境、持续能力、适应变化，以及有能力承担其他智能体的目标；另一方面，人们希望通过计算机智能体途径实现人类思维求解问题的过程，进而创立一种精确而且可检验的人类思维工作方式理论。直到现在，Agent 仍是一个正在发展的崭新领域，很多定义和观点尚无定论，仍处在争论和探讨之中。

Agent 理论和技术的迅速发展，不仅是人们意识到应该将现有人工智能各个领域的研究成果集成为一个具有智能行为概念的“人”，并将其作为人工智能的基本研究对象方面，更重要的是人们意识到人类智能的本质，乃是一种社会性的智能，因而多智能体系统也应该成为人工智能研究的基本对象。从对智能体的研究发展到对多智能体系统的研究，代表人工智能的发展过程经历了一个标志性的跨越^[111]。

除理论上能够更好的描述一些问题外，Agent 理论和实践迅速发展的动力还来源于

```

    <慢过程稳定性>1</慢过程稳定性>
    <静态安全性约束>0</静态安全性>
  </状态>

```

由前面建立的状态本体定义可知，上面的数据流表示软件向外部发布状态信息，通知当前系统状态为 degree2（第二级警戒状态），所有接收此发布的软件也能按照状态本体的定义正确解析此数据流。

按照这种方式，本体以语义标签的形式出现在数据表示和更高一层次的知识表示中，承载数据与其表征的实体间的关联，并由领域内本体的确定性保证了数据交互的无二义性，为复杂系统中软件模块间的交互打下良好的基础。

2.5 基于本体论的 MAS 型软件结构

建立电力系统分析领域本体的目的是为调度决策支持软件系统提供统一规范的共享和交互环境，使系统具有良好的通信能力和互操作性。调度决策支持系统的另一特性——自主运行能力则通过建立多智能体型的软件结构予以实现。智能体的最显著特点就是能够自行根据对环境的感知决定自身的行为动作，以及同其他智能体实现交互以合作完成某一任务。需要指出的是，多智能体型的软件系统是建立在前面构建的领域本体基础上的。相反，智能体如果拥有各自独立、不统一的知识库，则他们间的交互将不得不借助于复杂度为 $O(n^2)$ 的翻译软件进行，从而变得低效、复杂。

2.5.1 Agent 及多智能体系统简介

2.5.1.1 对 Agent 的研究历史

Agent 是一个来自于人工智能的概念，agent 一词来源于拉丁语 agere，意为“去做”，因而 Agent 最初是指某种能够行动的东西。然而后来的变化却超出了最初的定义范围。一方面，人们期待着计算机智能体有其他区别于简单“程序”的属性，诸如自主控制的操作、感知环境、持续能力、适应变化，以及有能力承担其他智能体的目标；另一方面，人们希望通过计算机智能体途径实现人类思维求解问题的过程，进而创立一种精确而且可检验的人类思维工作方式理论。直到现在，Agent 仍是一个正在发展的崭新领域，很多定义和观点尚无定论，仍处在争论和探讨之中。

Agent 理论和技术的迅速发展，不仅是人们意识到应该将现有人工智能各个领域的研究成果集成为一个具有智能行为概念的“人”，并将其作为人工智能的基本研究对象方面，更重要的是人们意识到人类智能的本质，乃是一种社会性的智能，因而多智能体系统也应该成为人工智能研究的基本对象。从对智能体的研究发展到对多智能体系统的研究，代表人工智能的发展过程经历了一个标志性的跨越^[111]。

除理论上能够更好的描述一些问题外，Agent 理论和实践迅速发展的动力还来源于

```

    <慢过程稳定性>1</慢过程稳定性>
    <静态安全性约束>0</静态安全性>
  </状态>

```

由前面建立的状态本体定义可知，上面的数据流表示软件向外部发布状态信息，通知当前系统状态为 degree2（第二级警戒状态），所有接收此发布的软件也能按照状态本体的定义正确解析此数据流。

按照这种方式，本体以语义标签的形式出现在数据表示和更高一层次的知识表示中，承载数据与其表征的实体间的关联，并由领域内本体的确定性保证了数据交互的无二义性，为复杂系统中软件模块间的交互打下良好的基础。

2.5 基于本体论的 MAS 型软件结构

建立电力系统分析领域本体的目的是为调度决策支持软件系统提供统一规范的共享和交互环境，使系统具有良好的通信能力和互操作性。调度决策支持系统的另一特性——自主运行能力则通过建立多智能体型的软件结构予以实现。智能体的最显著特点就是能够自行根据对环境的感知决定自身的行为动作，以及同其他智能体实现交互以合作完成某一任务。需要指出的是，多智能体型的软件系统是建立在前面构建的领域本体基础上的。相反，智能体如果拥有各自独立、不统一的知识库，则他们间的交互将不得不借助于复杂度为 $O(n^2)$ 的翻译软件进行，从而变得低效、复杂。

2.5.1 Agent 及多智能体系统简介

2.5.1.1 对 Agent 的研究历史

Agent 是一个来自于人工智能的概念，agent 一词来源于拉丁语 agere，意为“去做”，因而 Agent 最初是指某种能够行动的东西。然而后来的变化却超出了最初的定义范围。一方面，人们期待着计算机智能体有其他区别于简单“程序”的属性，诸如自主控制的操作、感知环境、持续能力、适应变化，以及有能力承担其他智能体的目标；另一方面，人们希望通过计算机智能体途径实现人类思维求解问题的过程，进而创立一种精确而且可检验的人类思维工作方式理论。直到现在，Agent 仍是一个正在发展的崭新领域，很多定义和观点尚无定论，仍处在争论和探讨之中。

Agent 理论和技术的迅速发展，不仅是人们意识到应该将现有人工智能各个领域的研究成果集成为一个具有智能行为概念的“人”，并将其作为人工智能的基本研究对象方面，更重要的是人们意识到人类智能的本质，乃是一种社会性的智能，因而多智能体系统也应该成为人工智能研究的基本对象。从对智能体的研究发展到对多智能体系统的研究，代表人工智能的发展过程经历了一个标志性的跨越^[111]。

除理论上能够更好的描述一些问题外，Agent 理论和实践迅速发展的动力还来源于

网络技术的飞速发展,尤其是 Internet 和 Web 的广泛普及与增加,信息资源的增长使得用户自然想到通过一种能自主帮助用户整理海量数据的代理者,在他们的帮助下用户就可以只关心他们最感兴趣的信息。而以智能体技术为基础实现的问题求解风范则在分散环境中表现出并发性、分布协调性、交互性等优点,大大方便了提高分布式系统求解的效率与鲁棒性。

2.5.1.2 Agent 研究基础

首先讨论 Agent 具有的属性。Wooldridge 和 Jennings 在总结了前人对智能体的研究以后,给出了一个得到较多认同的定义^[112]: An agent is an encapsulated computer system that is situated in some environment and that is capable of flexible, autonomous action in that environment in order to meet its design objectives. 他们认为智能体的属性可以从广义和狭义两个方面去理解。

从广义角度讲,只要软件或硬件系统具有了自治性、社会协作性和对环境的反应能力,就可以被称为是一个智能体。在这种定义下,最简单的主体就是具有上述特性的一个计算机进程。这个进程简单到只需要具有特定的动作逻辑,能够与别的智能体交换信息。Minsky 从多智能体的群体智能角度指出^[113]: 这些进程我们称之为智能体,尽管他们本身只会做一些简单的事,但当我们用特定的方法将这些智能体组成一个社会(society)时,就产生了真正的智能。

从狭义角度讲,智能体除了具有上面这些特性外,还应具备通常人类的心智状态方面的特性,如信念、意图、承诺等。最著名的是 Bratman 从行为意图角度给出的智能体信念—意图—承诺模型^[114]。然而智能体的强概念仍处于理论研究阶段,智能体的问题求解能力和智能体的心智状态间的关系尚未得到充分的建立。

Agent 还具有其他特性,如移动性、学习性、具备规划能力等,这些特性随着具体 Agent 应用场合的不同而有所增减。

在了解了 Agent 具备的属性后,有必要将 Agent 与当前编程中常见的“对象”概念作一比较。Agent 是比对象粒度更大、智能性更高、具有更大自主性的实体,二者具有一些共同点。比如,对象和 Agent 都具有内部状态,对象间的消息传递对应于 Agent 间的合作请求,只不过 Agent 间的消息类型常用具有一定语义的言语动作如通知、请求、承诺等完成。

Agent 和对象二者间也存在区别。最显著的区别是与对象相比,Agent 包含更强的自治性概念,即 Agent 自行决定其动作方式和与环境中其他 Agent 间的合作,而对象则只能被动接收消息动作。第二个区别在于,Agent 与对象相比,具有更清晰和灵活的行为能力,这是通过 Agent 建模时就已将行为型设计模式包含进自身动作逻辑而体现出来的,而对对象而言,行为模式往往与对象间是独立的两部分。第三个区别在于 Agent 具有很灵活的与其他 Agent 合作的能力,对象间的这种合作仅限于预定的组织内进行。

2.5.1.3 多智能体系统

Agent 一个显著的优点是它的社会协作性，这需要建立多智能体系统予以体现。多智能体系统本质上是一种分布式问题求解系统，它提供了一种通过组织与协商以弥补个体处理和获取信息能力有限的有效方法，但它要求系统中每个 Agent 及 Agent 间的交互具有自组织能力（如推理、规划、学习等）。文[115]中提供了很多关于多智能体设计的思想与原则。多智能体系统中主要应处理以下几方面问题：

（1）多智能体的体系结构。体系结构是指 Agent 间共享和交互信息的方式，它影响信息的存储方式和 Agent 间的通信方式。

（2）多智能体间的协作。良好的协作应该是在较少次数的交互和学习后系统快速趋向总体一致性。

（3）多智能体间的通信。通信包括两个方面：一是底层通信机制的构造，二是 Agent 间的通信元语构造。

（4）冲突消解。冲突是多智能体系统中必然会出现的现象，可采用回溯、协商或设置专门的消解冲突 Agent 来完成。

2.5.1.4 Agent 系统中的环境

Agent 系统中，除单个的 Agent 外，还必须考虑对环境的建模。环境中蕴含了 Agent 要执行的任务和智能体将得到的感知信息序列。Agent 在任何给定时刻的行动将取决于到哪个时刻为止该 Agent 的整个感知序列。环境是复杂的，即使是 Agent 具有完全的理性，也不代表 Agent 对环境是全知的，不能保证该 Agent 所作出的行动是完美的。理性只是期望性能的最大化，而完美则要求实际性能的最大化，这是不可能的。因此，我们对环境建模的细致程度和精确程度，影响了 Agent 的设计和实现，对环境的约束越多，设计的问题就越容易。在多智能体系统中，环境还担负另外一个作用——承载智能体间的信息交互。Agent 间的合作可以通过两种方式完成，一是 Agent 间直接交互，所有 Agent 都具备和其他 Agent 互相理解和通信的能力，这对每个 Agent 个体而言显然是个重担，因为这种通信方式下，通信和翻译的复杂度是 $O(n^2)$ 的；另一种方式就是所有 Agent 都将自身请求发送给环境，同时又接受来自于环境中的其他 Agent 的请求，同样能达到协作的结果。显然这种方式下翻译的复杂度降低为 $O(n)$ ，这是通常被采用的一种方式，交互复杂度降低的代价是环境的负担加重了，因而这种通信方式下的环境维护显得更为重要。此外，环境还应具备开放性特征，以便于同其他系统交互信息。

2.5.2 基于本体的 MAS 型调度决策支持系统

将 Agent 技术引入软件建模中，首要的问题仍是确定系统在各个层次上的体系结构^[116]。按照 Gaia 模型^[117]，在系统分析层面上，工作主要包括确定系统中的个体和定义个体间的交互关系。这一工作已在前面构建电力系统分析领域本体时完成。在系统设计层

2.5.1.3 多智能体系统

Agent 一个显著的优点是它的社会协作性, 这需要建立多智能体系统予以体现。多智能体系统本质上是一种分布式问题求解系统, 它提供了一种通过组织与协商以弥补个体处理和获取信息能力有限的有效方法, 但它要求系统中每个 Agent 及 Agent 间的交互具有自组织能力(如推理、规划、学习等)。文[115]中提供了很多关于多智能体设计的思想与原则。多智能体系统中主要应处理以下几方面问题:

(1) 多智能体的体系结构。体系结构是指 Agent 间共享和交互信息的方式, 它影响信息的存储方式和 Agent 间的通信方式。

(2) 多智能体间的协作。良好的协作应该是在较少次数的交互和学习后系统快速趋向总体一致性。

(3) 多智能体间的通信。通信包括两个方面: 一是底层通信机制的构造, 二是 Agent 间的通信元语构造。

(4) 冲突消解。冲突是多智能体系统中必然会出现的现象, 可采用回溯、协商或设置专门的消解冲突 Agent 来完成。

2.5.1.4 Agent 系统中的环境

Agent 系统中, 除单个的 Agent 外, 还必须考虑对环境的建模。环境中蕴含了 Agent 要执行的任务和智能体将得到的感知信息序列。Agent 在任何给定时刻的行动将取决于到哪个时刻为止该 Agent 的整个感知序列。环境是复杂的, 即使是 Agent 具有完全的理性, 也不代表 Agent 对环境是全知的, 不能保证该 Agent 所作出的行动是完美的。理性只是期望性能的最大化, 而完美则要求实际性能的最大化, 这是不可能的。因此, 我们对环境建模的细致程度和精确程度, 影响了 Agent 的设计和实现, 对环境的约束越多, 设计的问题就越容易。在多智能体系统中, 环境还担负另外一个作用——承载智能体间的信息交互。Agent 间的合作可以通过两种方式完成, 一是 Agent 间直接交互, 所有 Agent 都具备和其他 Agent 互相理解和通信的能力, 这对每个 Agent 个体而言显然是个重担, 因为这种通信方式下, 通信和翻译的复杂度是 $O(n^2)$ 的; 另一种方式就是所有 Agent 都将自身请求发送给环境, 同时又接受来自于环境中的其他 Agent 的请求, 同样能达到协作的结果。显然这种方式下翻译的复杂度降低为 $O(n)$, 这是通常被采用的一种方式, 交互复杂度降低的代价是环境的负担加重了, 因而这种通信方式下的环境维护显得更为重要。此外, 环境还应具备开放性特征, 以便于同其他系统交互信息。

2.5.2 基于本体的 MAS 型调度决策支持系统

将 Agent 技术引入软件建模中, 首要的问题仍是确定系统在各个层次上的体系结构^[116]。按照 Gaia 模型^[117], 在系统分析层面上, 工作主要包括确定系统中的个体和定义个体间的交互关系。这一工作已在前面构建电力系统分析领域本体时完成。在系统设计层

面上, 工作包括定义和实现 Agent 系统实际的结构。在这一层面上, 现有软件的很多设计模式可以引申为对 Agent 适用。

基于开放性系统的设计原则, 我们所建立的调度决策支持软件系统将置于统一的领域环境之中, 即系统所有基本元素的定义与元素的定义元语和动作元语都是前面所建立的电力系统分析领域本体范畴之中的。后面可以看出, 在基于本体的基础上, Agent 个体具有简洁和标准的形式, 各 Agent 个体间的交互也变得清晰而高效。

2.5.2.1 调度决策支持系统中的 Agent 个体

这里仅论述有关调度决策支持系统中负责进行网络分析的各个 Agent 个体, 完成其余功能的 Agent 个体, 如通信 Agent、人机交互 Agent, 不再此讨论范围之内。

基于上面所建立的电力系统分析领域本体, 网络分析级的 Agent 个体即为认知本体中的成员。从外部特性来看, 调度决策支持系统的基本 Agent 个体 A 可由如下四元组来描述:

$$A = \langle S, E, D, O \rangle$$

这里 S 为 Agent 的生存环境所对应的状态, $S \subseteq \{\text{StateOntology}\}$; E 为激活 Agent 的事件, $E \subseteq \{\text{EventOntology}\}$; D 为 Agent 活动过程中所使用的数据, $D \subseteq \{\text{DataOntology}\}$; O 为 Agent 活动结束后所作出的决策, $O \subseteq \{\text{Operation Ontology}\}$ 。

对评价类认知本体, 按照图 2-3 给出的树形状态描述方式, 可以将评价类认知本体作为状态识别 Agent, 以层次化方式工作, 同一层次内部的各 Agent 个体可以执行并发计算。每个状态识别 Agent 识别自己所认识的状态, 逐层识别状态, 扩展详细状态至下一层的节点, 其他状态识别 Agent 根据发布的状态决定自身是否应该启动分析计算, 系统在任意时刻只能处于一种状态, 因此每个承担分析计算的状态识别 Agent 或者启动, 或者闭锁, 不会造成死锁或冲突。这样, 所有状态识别 Agent 就可以协调工作于统一的环境中, 针对系统当前状态进行分析计算。

调节类 Agent 的活动过程可以描述为: 初始状态下, 所有评价类 Agent 动作, 确定当前系统所处的状态 S 以及系统中的事件 E, 将评价结果发布给环境; 以后每当环境中的数据发生变化时, 评价类 Agent 就执行计算以更新系统的状态 S 和系统中的事件 E。当环境状态变为与调节类 Agent 的生存状态 S 相一致时, 该调节类 Agent 开始感知环境中出现的事件, 当检测到有 $e \in E$ 时, Agent 被激活, 活动结束后 Agent 将自身动作结果以决策形式提交给环境, 更新环境。

由于调度决策支持系统所处的是时变环境, 因此不可能对所有数据变化都给予实时的准确分析。当系统处于正常运行状态时, 如果只是系统中的遥测数据和非开关变位类遥信数据发生变化, 那么系统就仍将处于正常状态 degree 0 或一级警戒状态 degree 1 之中, 因此这时可以忽略某些发生变化的数据, 而以某种方式 (如定时、设定某些遥测值的限值) 来抽取感兴趣的数据变化, 才启动各评价类 Agent。当有开关变位数据产生时,

首先由故障诊断 Agent 分析该开关变位数据是否为故障产生, 如果不是, 则系统仍处于 degree 0~degree 1 之中, 各 Agent 启动原则同上; 如果该开关变位确实是由故障产生, 则一方面由故障诊断 Agent 继续收集遥信、遥测以及各种二次装置产生的数据准确诊断故障性质, 另一方面故障诊断 Agent 同时向环境发布更新的系统状态, 将系统状态置于故障后状态(degree1~degree5), 由此, 相应的其他评价类 Agent 开始执行计算, 将各自计算所得结果, 即上面对于状态所作的形式化定义中的几个属性值, 发布给环境, 更新系统状态。评价类 Agent 计算结束, 更新系统状态和发布事件结束之后, 调节类 Agent 根据当前系统状态和事件, 执行各自的分析计算, 给出针对当前状态和事件的调节措施, 即操作决策。

2.5.2.2 MAS 型软件系统的领域环境

在 MAS 系统中, Agent 个体间的交互可以由两种方式完成, 一是个体间直接交互, 二是通过统一的环境实现交互。第二种交互方式下, Agent 个体不需要了解它周围其他 Agent 个体的接口细节, 因而更符合开放系统的设计原则, 在调度决策支持系统中更宜采用。

这种模式的 MAS 系统包括两部分: 生存于环境中的 Agent 个体与领域环境, 系统结构如图 2-4 所示。

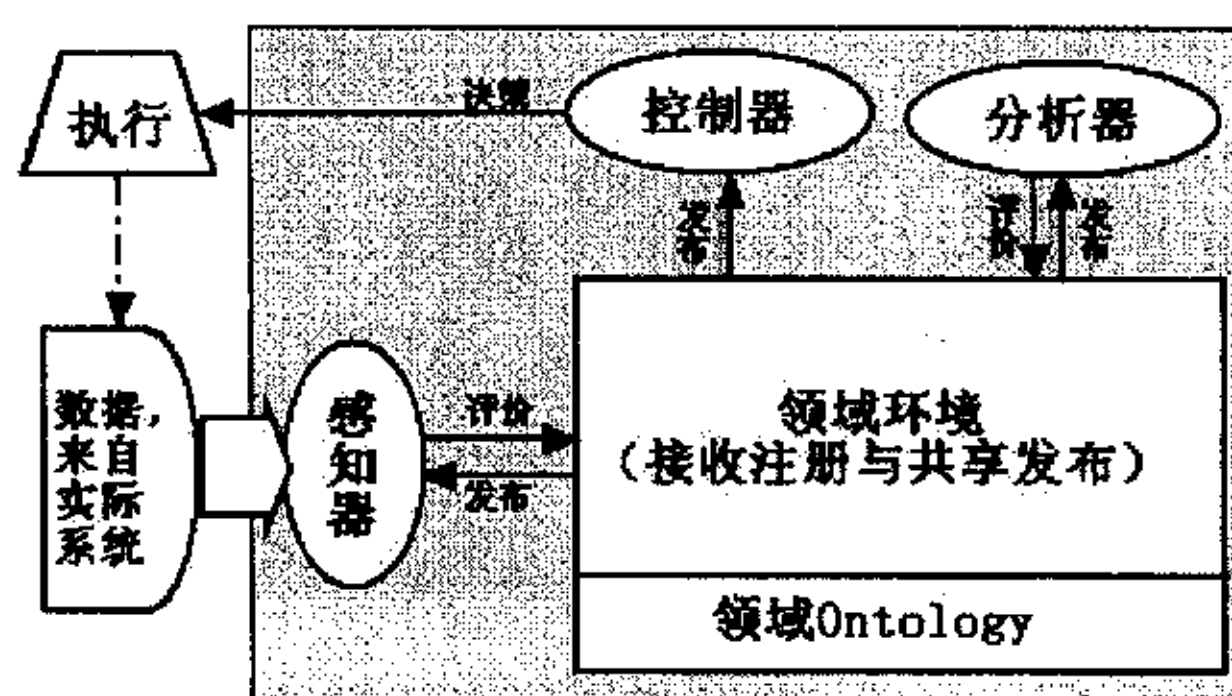


图 2-4 基于 Ontology 的 Multi-Agent 软件体系结构

Fig.2-4 Ontology-based Multi-Agent software architecture

图中, 领域环境构成 Agent 个体的生存环境; 感知器、控制器和分析器都是此环境中生存的 Agent 个体, 感知器为简单的反应型, 保证信息的快速处理, 分析器和控制器的结构较为复杂, 处理复杂的目标和分析过程。在领域环境中, Agent 间的交互不是直接进行的, 而是通过各个 Agent 和环境间的交互间接完成的。所有交互都要基于统一的领域 ontology 实现。

在多智能体系统中, 领域环境主要负责处理系统当前的 S 与发生的 E, 以及通过协调各 Agent 个体实现协作。功能如下:

- (1) 初始化时接受 S 与 E 定义的注册;
- (2) 系统处于不断变化的活动状态时, 收集各 Agent 评估后传来的 S 与 E, 更新 S,

发布 E;

(3) 收集各个 Agent 发来的服务申请, 规划分析转化成原子服务序列, 到能处理此服务的 Agent 处请求服务, 以实现 Agent 个体间的协作。

行为型设计模式是 MAS 型软件系统的一个重要问题。MAS 系统同一般的面向对象系统一样, 需要同时使用多种设计模式以实现自身工作, 在调度决策支持系统中, 最主要的是完成不同运行状态下 Agent 个体间的运行逻辑控制与协作控制, 因此应使用中介者和观察者对象行为模式。具体的, 系统内部的动作与交互方式为:

(1) 初始化时, 所有的 Agent 向环境提交注册其自身相关的 S 与 E;

(2) 各个 Agent 在环境符合自己的生存状态 S 时开始感知 E, 并将自身对于环境的评价结果以本体中定义的概念形式发送给环境;

(3) 环境将接收到的来自各个 Agent 的评价发布给环境中其它相应的 Agent, 发布对象由之前的注册决定;

(4) 各个 Agent 根据接收到的发布和自身的执行逻辑确定各自的动作方式。同时将更新后的评价结果再次发送给环境, 循环工作。

相比较于 Agent 个体间直接交互的结构而言, 基于统一领域环境 (领域 Ontology) 的软件系统具有如下优点: 一是用知识交互 (S、E 和 O, 以及部分的 D) 取代了原有的数据交互, 提高了交互效率; 二是所有的软件模块都只和环境进行交互, 将交互复杂度由 $O(n^2)$ 降低到 $O(n)$, 使得各软件模块的设计逻辑变得清晰简捷, 更好的体现了自主特性, 为实现软件的“即插即用”打下基础。

2.6 地区电网调度决策支持系统的 MAS 型设计

该系统是为地调的调度员提供在线的辅助决策支持的软件系统, 不必考虑动态分析, 因此仅包括用于稳态分析和故障分析的软件功能, 即拓扑分析、状态估计、潮流计算、静态安全分析、无功优化、负荷预测、故障诊断、故障恢复、故障操作指导、调度操作票等。

软件系统的建立过程如下:

(1) 定义领域本体。

由于本系统是为地区电网调度服务, 因此, 对状态 S 的定义与前面所述有所不同, 地区电网的状态 S 要简单得多, 基于使用方便的考虑, 在实际的软件系统中采用了树形结构的状态定义, 如图 2-5 所示。树形结构的好处是可以方便的通过属性值的变化反应系统在各个运行状态间的转移, 同时各个 Agent 个体各自的活动状态也不必再使用多种状态并集的方式, 而是表现为 Agent 个体生存于不同层次的树形图的节点上, Agent 动作结束后, 通过对状态各个属性值的重新评估和修改, 可以将状态扩展至树的下一级节点; 当状态扩展至下一节点时, 后继的 Agent 被激活。比如, 故障诊断 Agent 和拓扑分

发布 E;

(3) 收集各个 Agent 发来的服务申请, 规划分析转化成原子服务序列, 到能处理此服务的 Agent 处请求服务, 以实现 Agent 个体间的协作。

行为型设计模式是 MAS 型软件系统的一个重要问题。MAS 系统同一般的面向对象系统一样, 需要同时使用多种设计模式以实现自身工作, 在调度决策支持系统中, 最主要的是完成不同运行状态下 Agent 个体间的运行逻辑控制与协作控制, 因此应使用中介者和观察者对象行为模式。具体的, 系统内部的动作与交互方式为:

(1) 初始化时, 所有的 Agent 向环境提交注册其自身相关的 S 与 E;

(2) 各个 Agent 在环境符合自己的生存状态 S 时开始感知 E, 并将自身对于环境的评价结果以本体中定义的概念形式发送给环境;

(3) 环境将接收到的来自各个 Agent 的评价发布给环境中其它相应的 Agent, 发布对象由之前的注册决定;

(4) 各个 Agent 根据接收到的发布和自身的执行逻辑确定各自的动作方式。同时将更新后的评价结果再次发送给环境, 循环工作。

相比较于 Agent 个体间直接交互的结构而言, 基于统一领域环境 (领域 Ontology) 的软件系统具有如下优点: 一是用知识交互 (S、E 和 O, 以及部分的 D) 取代了原有的数据交互, 提高了交互效率; 二是所有的软件模块都只和环境进行交互, 将交互复杂度由 $O(n^2)$ 降低到 $O(n)$, 使得各软件模块的设计逻辑变得清晰简捷, 更好的体现了自主特性, 为实现软件的“即插即用”打下基础。

2.6 地区电网调度决策支持系统的 MAS 型设计

该系统是为地调的调度员提供在线的辅助决策支持的软件系统, 不必考虑动态分析, 因此仅包括用于稳态分析和故障分析的软件功能, 即拓扑分析、状态估计、潮流计算、静态安全分析、无功优化、负荷预测、故障诊断、故障恢复、故障操作指导、调度操作票等。

软件系统的建立过程如下:

(1) 定义领域本体。

由于本系统是为地区电网调度服务, 因此, 对状态 S 的定义与前面所述有所不同, 地区电网的状态 S 要简单得多, 基于使用方便的考虑, 在实际的软件系统中采用了树形结构的状态定义, 如图 2-5 所示。树形结构的好处是可以方便的通过属性值的变化反应系统在各个运行状态间的转移, 同时各个 Agent 个体各自的活动状态也不必再使用多种状态并集的方式, 而是表现为 Agent 个体生存于不同层次的树形图的节点上, Agent 动作结束后, 通过对状态各个属性值的重新评估和修改, 可以将状态扩展至树的下一级节点; 当状态扩展至下一节点时, 后继的 Agent 被激活。比如, 故障诊断 Agent 和拓扑分

析 Agent 的生存状态就是树的根节点“活动状态(LiveState)”，而潮流计算、状态估计、负荷预测、静态安全分析的生存状态就是第二层中的“正常状态(Normal)”。这种树形状态表示法仅对于简单的状态空间划分有效，当系统扩展至动态应用领域，即考虑前面所述的 degree0~degree6 的全部过程后，树的结构会变得过于庞大而失去优势。但树形结构的状态表示和属性值描述的状态表示对 Agent 的动作逻辑没有影响。

对于事件本体 E，本系统中也有特定的考虑。本系统中 E 本体的定义应反映地调调度员关心的主要问题。由于该软件系统是利用 SCADA 采集来的数据和部分远传的保护数据进行分析的，所作的分析限于前面叙述的 9 个软件模块功能范围之内，故本体的定义中包括两种事件：一是能够反映到远动系统和故障信息系统中的事项，如开关变位、遥测越限、保护信号变位、产生报警信号等简单事件，简单事件是为单个 Agent 的动作逻辑描述清晰而定义的；二是上述 9 个软件模块间需要协调工作的服务请求事件，服务请求事件是为描述 Agent 个体间的合作请求而定义的。

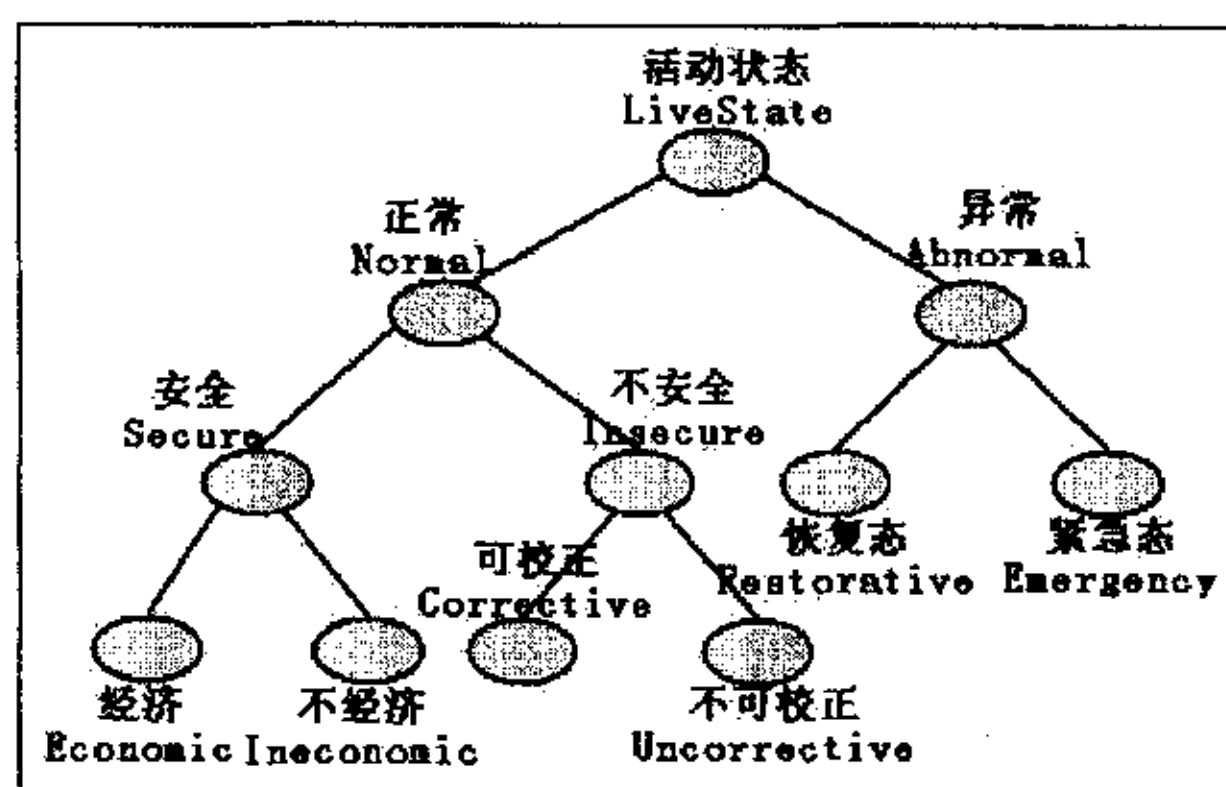


图 2-5 地区电网调度决策支持系统的状态树

Fig.2-5 State Tree of Regional Grid Dispatch Decision Support System

事件仍采用关系模型定义，形式为：

事件名称（事件对象，事件时间，属性值 1，属性值 2，……属性值 n）

简单事件的属性值为事件自身包含的各种属性，服务请求事件的属性值包含服务的全过程信息，其基本要素为：请求者 Agent 名称；服务 Agent 名称；服务内容。在地区电网调度决策支持系统中，服务内容分为变更通知、订购、请求调用三种。变更通知常用于一方 Agent 通知另一方 Agent 向环境获取更新数据，但两个 Agent 间不直接交互，而是以环境作为中介完成；订购指一方 Agent 对环境中的某些数据感兴趣，则向环境注册以在这些数据发生变化时获取到更新后的数据；请求调用指一方 Agent 需要另一方 Agent 执行计算以获取特定数据，结束后通常需要服务提供方 Agent 向被服务方 Agent 发布变更通知。三种服务经常是伴随使用的。

（2）定义领域环境中的 Agent 个体。

将 Agent 个体定义为前述的 EMS 及故障处理应用的各子模块，即拓扑分析、潮流计算、状态估计、安全分析、无功优化、负荷预测、故障诊断、故障恢复和故障操作指

导等。为使各软件模块具有自主运行能力，需要定义 Agent 个体的生存环境状态和驱动事件，以便其能够自主运行、感知环境变化。

以决策支持系统中的静态安全分析软件为例，改进的主要工作分为如下几步：

首先定义安全分析软件的生存环境在状态树中所处的节点。安全分析软件生存的节点为 Normal 节点，安全分析执行结束后，安全分析软件将扩展系统的状态节点至下一层，Secure 节点或 Insecure 节点。

其次定义安全分析软件的驱动事件。其驱动事件为

$\text{CHANGE}(\text{BREAKER}) \vee \text{OVERRUN}(\text{BUS}) \vee \text{TIME}(\text{TIMER}) \supset \text{STARTUP}(\text{SA})$

解释为当有开关正常变位（非事故变位）或某母线负荷超过预设值或定时器时间到时，安全分析软件启动计算。

Agent 型软件模块的执行过程和输出结果同原有软件模块相同，没有区别。

采用上述方法封装 Agent 的好处是对原有的软件模块所作的修改工作非常少。

（3）定义与实现领域环境。

领域环境扮演协调与中介的角色，本软件系统中领域环境主要负责在各个 Agent 个体间共享 S 与发布 E，以及通过规划分析，协调各个 Agent 个体所提交的服务请求，将其转化为原子服务，以完成需要在 Agent 间交互的复杂任务。领域环境将及时更新表征电力系统运行状态的 S，并在有感兴趣的 E 发生时，与各个 Agent 个体通信。

领域环境包括了如下功能：通信服务、服务请求协调、状态发布、注册/观察器、转换器。

（1）通信服务。通信行为被集中到一个类中，对于每一个 Agent 个体，领域环境定义一个与之通信的接口。

（2）服务请求协调。在处理复杂任务时，多个 Agent 间的服务请求间可能会有冲突或重叠，这时由领域环境对服务请求目标进行规划分析，转化成无冲突的原子服务动作序列，交给能提供相应服务的 Agent 个体处理。至于是否由领域环境实现对发送者和接收者解耦，则应视工作环境而作不同的设计。本系统中基于一个发送者可以有多个接收者的考虑，采用了发送者—接收者绑定方式。服务请求协调的行为模式结构图如下。

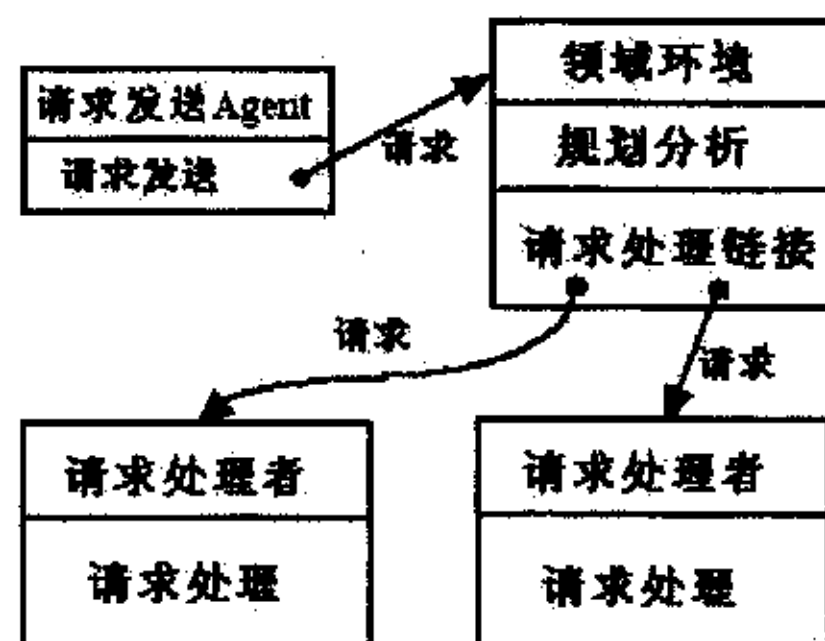


图 2-6 责任链

Fig.2-6 Chain of Responsibility.

(3) 状态发布。由环境反映出的系统状态变化是通过对象的属性值改变实现的。当环境的状态发生变化后,所有依赖于状态的 Agent 个体都应得到通知并采取相应的更新行为。在实现中采用了注册/观察器行为模式,其结构如图 7 所示。

(4) 注册/观察器。该注册/观察器的作用是实现订购服务,只是该服务仅是对特定的 Agent 个体完成,而非全局式发布。订购服务用以满足 Agent 个体对某些数据的特定需求。同状态发布一样,其行为模式采用仍是注册/观察器结构。

(5) 不同的 Agent 个体间对信息的处理格式会有所不同,不同信息格式之间的转换需求也是由领域环境完成的。通常 EMS 系统需要和第三方的软件模块个体交互,这时转换器是必需的。

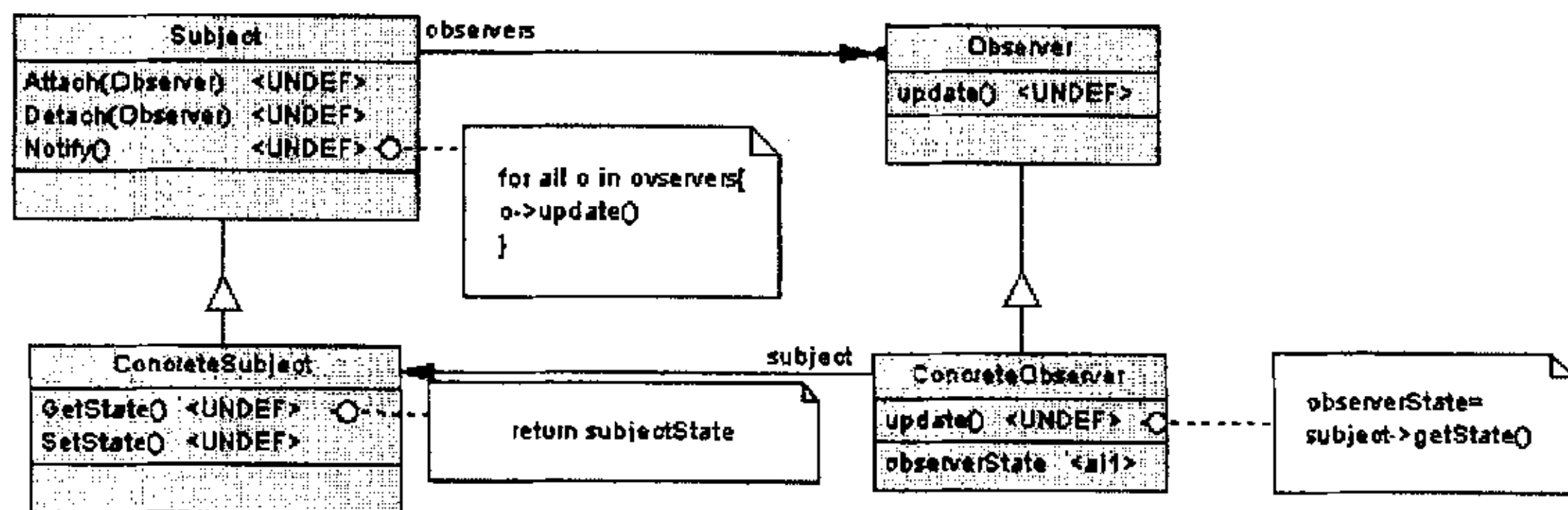


图 2-7 注册/观察器

Fig.2-7 Observer.

可见,领域环境的复杂度随 Agent 个体的复杂度增加而增加,减小环境中 Agent 个体的耦合度也是以将交互协议封装进领域环境为代价实现的,从而领域环境的维护显得异常重要。

因为对于在线运行的 EMS 系统及其扩展系统,不允许出现决策不确定的情形,故本系统设计成了一种基于规划的集中式群体决策方案。决策结果等价于基于知识库推理的专家系统,但有效改善了专家系统知识库升级扩展困难的问题。对本系统而言,知识库的升级被分割成若干子问题,通过对于状态的进一步划分、定义更复杂的事件、定义 Agent 个体的生存状态与动作逻辑等三方面完成扩展,通过状态的层次划分和事件的独立性,达到了扩展工作与现有系统的解耦。

2.7 本章总结

电网调度决策支持系统是典型的互联软件系统,其设计结构和设计模式影响到整个软件的质量。我们从智能软件构建的基础层面出发,构建了面向电力系统分析领域软件互联的本体,并在此基础上设计了基于本体论的 MAS 型电力系统软件体系结构,使软件在结构上具有更好的开放性和交互性。该本体将一些经验性知识引入本体,简化了工

(3) 状态发布。由环境反映出的系统状态变化是通过对象的属性值改变实现的。当环境的状态发生变化后,所有依赖于状态的 Agent 个体都应得到通知并采取相应的更新行为。在实现中采用了注册/观察器行为模式,其结构如图 7 所示。

(4) 注册/观察器。该注册/观察器的作用是实现订购服务,只是该服务仅是对特定的 Agent 个体完成,而非全局式发布。订购服务用以满足 Agent 个体对某些数据的特定需求。同状态发布一样,其行为模式采用仍是注册/观察器结构。

(5) 不同的 Agent 个体间对信息的处理格式会有所不同,不同信息格式之间的转换需求也是由领域环境完成的。通常 EMS 系统需要和第三方的软件模块个体交互,这时转换器是必需的。

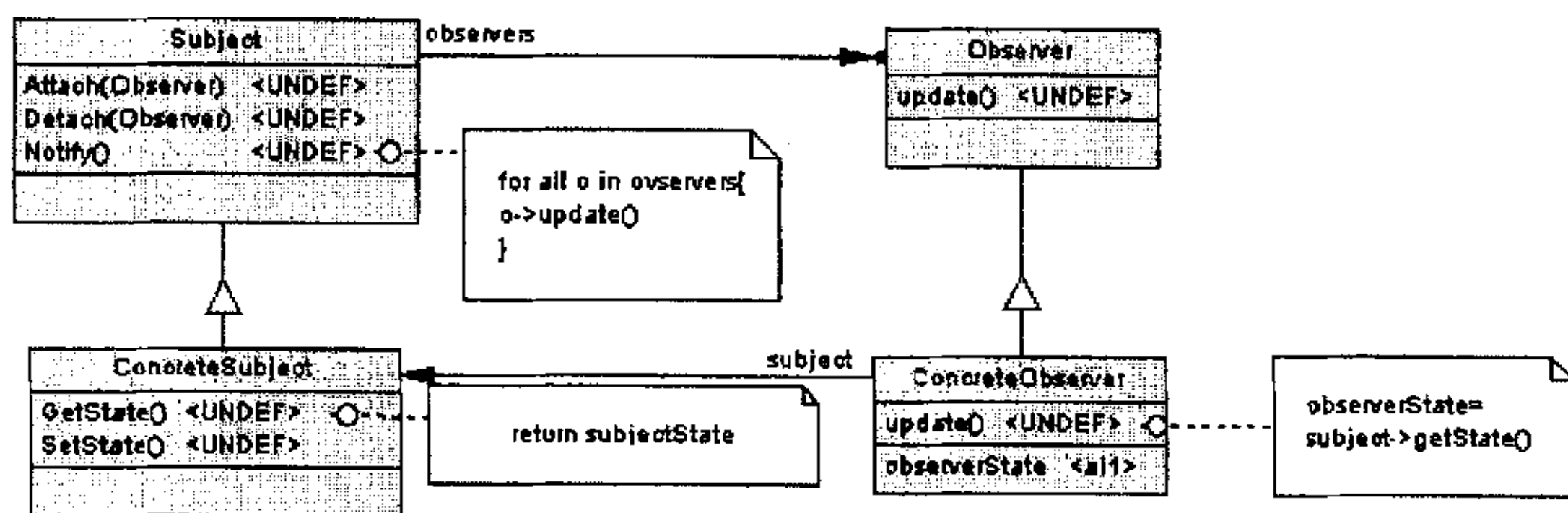


图 2-7 注册/观察器

Fig.2-7 Observer.

可见,领域环境的复杂度随 Agent 个体的复杂度增加而增加,减小环境中 Agent 个体的耦合度也是以将交互协议封装进领域环境为代价实现的,从而领域环境的维护显得异常重要。

因为对于在线运行的 EMS 系统及其扩展系统,不允许出现决策不确定的情形,故本系统设计成了一种基于规划的集中式群体决策方案。决策结果等价于基于知识库推理的专家系统,但有效改善了专家系统知识库升级扩展困难的问题。对本系统而言,知识库的升级被分割成若干子问题,通过对于状态的进一步划分、定义更复杂的事件、定义 Agent 个体的生存状态与动作逻辑等三方面完成扩展,通过状态的层次划分和事件的独立性,达到了扩展工作与现有系统的解耦。

2.7 本章总结

电网调度决策支持系统是典型的互联软件系统,其设计结构和设计模式影响到整个软件的质量。我们从智能软件构建的基础层面出发,构建了面向电力系统分析领域软件互联的本体,并在此基础上设计了基于本体论的 MAS 型电力系统软件体系结构,使软件在结构上具有更好的开放性和交互性。该本体将一些经验性知识引入本体,简化了工

作于本体上的软件的设计逻辑,增强了软件同外界的交互能力,是计算智能的一个突出体现。尤其是 S 和 E 本体的引入,简化了复杂交互系统中软件个体的结构,并增强了软件个体的交互性能。

本章包括如下内容:

(1) 将本体论引入电力系统软件分析与设计,以 IEC61970CIM 模型为基础,建立了电力系统调度分析中的类型本体框架,该本体框架可以描述电力系统调度分析所有活动,以此做为调度决策支持系统软件的统一知识库。该领域本体以 IEC61970CIM 模型为基础,并扩展了对状态、事件两种本体的定义和形式化,使应用软件和系统间能进行更高级别和抽象概念的互联与信息共享,在数据标准化的基础上,进一步实现了应用间的知识表示的统一,具有了更好的开放性和交互效率。本体论的引入,能在很大程度上使软件设计也像建筑设计般变得模式化。这是实现开放性的重要途径。

(2) 将 Agent 思想引入软件结构设计和行为型模式设计,以满足电网调度决策支持系统软件的在线自主运行要求。通过对环境的建模解决了各软件模块在统一环境中共享知识、协作计算的问题。建立了以本体为基础的 MAS 型软件体系结构,实现了对环境的描述与建模,通过对原有软件系统中的对象进行行为模式定义,赋予对象个体以感知环境的能力和合作完成任务的能力,从而使对象进化为具有自主行为特性的 Agent,解决了软件模块在线自主运行和协调计算的问题;基于统一的领域环境所设计的 Agent 交互方式具有高效的交互效率和清晰的结构,并且具有很好的扩展性,使得软件朝向“即插即用”迈出了一步。

(3) 以地区电网调度决策支持系统为例,叙述了基于本体构建电力系统中的 MAS 型软件的方法, MAS 型软件能更好的实现在线自主运行能力和不同软件模块间协调计算的能力。

而应指出的是,领域本体的建立不是一次性能完成的,本体是不断变化以适应领域知识更新的。建立和应用本体的合理做法也应是从各个具体的应用范围出发,在取得成功的本体基础上不断扩充,使其在对现有领域知识充分理解的基础上覆盖更大的概念范围。本文所设计的领域本体仅是从软件结构设计层面出发,为解决软件个体的交互行为而设计的,体现了在电力系统调度分析软件交互这一领域的专家知识。本文所设计的 Agent 间的协作方式是基于全局规划分析进行的,因而缺少一定的灵活性,如果要应付在实时环境下可能出现的一些设计以外的不确定性问题,还需要对 Agent 合作方式加以改进。因此,进一步的工作应包括:

- (1) 研究复杂应用场合的状态、事件定义及其形式化;
- (2) 改善 Agent 合作算法,加强对实时计算环境下不确定性决策的研究。

第三章 基于 Petri 网的电力系统故障恢复方法

3.1 引言

电力系统故障处理包括故障诊断与故障恢复两部分，是电网调度决策支持系统的一个重要内容。故障处理软件的准确度和有效性，标志着整个决策支持系统智能化水平的高低。故障诊断是故障恢复的基础，虽然受限于目前通信系统的容量、速度等因素，故障相关的二次装置动作的详细信息无法实时传送到调度端，但当电网度过了一些较快的暂态过程后，即进入一个变化缓慢的过渡过程，此过程的时间范围已经足够二次装置动作的详细信息由变电站端上传到调度端，并在调度端完成故障诊断任务及基于诊断结果的故障恢复。

多年来困扰故障诊断在现场推广应用的重要原因在于无法取得充足的故障信息，有了足够的故障信息做基础，目前研究得到的多种诊断算法均可以实现准确的故障元件定位与开关保护动作评价。与之相比，故障恢复在实用化方面仍存在更多的问题。实现计算机故障恢复的难点在于故障恢复问题是典型的离散、连续混合事件过程，并且在实现过程中要包括多种分析计算的结果，因而所建立起来的软件系统是一个大型软件系统，难于维护、扩展和灵活考虑启发知识。

故障恢复软件主要包括两大方面：恢复方案生成时用的推理机制与校验方案时用的仿真算法。首先，计算机根据当前电网所处的故障后状态和需要达到的目标状态，应用推理机制生成若干组恢复方案，通过这些组恢复方案都可以使系统转化至目标状态；而后，对这些组恢复方案进行校验和评估，以除去那些违反电网约束条件的“伪方案”，并在合理方案中根据评估指标进行方案优劣的比较，选出最优的一组做为最终采用的方案。

本章重点解决推理机制的问题。推理机制是故障恢复软件的基础和关键，对推理机制的要求是：（1）有较高的推理效率，尤其是对大系统搜索时；（2）能够方便的加入多种约束条件和评估指标，以便在推理过程中就去除一些“伪方案”；（3）既能使用严格的数学约束，又能使用逻辑形式的启发性知识；（4）推理规则有层次化，易于维护和扩展。

目前故障恢复中常用的推理机制为专家系统。基于专家系统的推理虽然具有很好的适应能力和知识表示能力，但搜索的效率很低，并且知识库的扩充和维护都很困难。针对这一问题，本章提出了一种基于 Petri 网的推理机制，它具有比专家系统更好的求解效率和表达能力，能很好的将离散、连续事件统一建模，扩展了专家系统的应用范围。将这种推理机制应用于解决电力系统故障恢复问题，得到了一种直观、表达能力好、扩展性好的推理方法。虽然方法从本质上仍是一种基于知识推理

第三章 基于 Petri 网的电力系统故障恢复方法

3.1 引言

电力系统故障处理包括故障诊断与故障恢复两部分，是电网调度决策支持系统的一个重要内容。故障处理软件的准确度和有效性，标志着整个决策支持系统智能化水平的高低。故障诊断是故障恢复的基础，虽然受限于目前通信系统的容量、速度等因素，故障相关的二次装置动作的详细信息无法实时传送到调度端，但当电网度过了一些较快的暂态过程后，即进入一个变化缓慢的过渡过程，此过程的时间范围已经足够二次装置动作的详细信息由变电站端上传到调度端，并在调度端完成故障诊断任务及基于诊断结果的故障恢复。

多年来困扰故障诊断在现场推广应用的重要原因在于无法取得充足的故障信息，有了足够的故障信息做基础，目前研究得到的多种诊断算法均可以实现准确的故障元件定位与开关保护动作评价。与之相比，故障恢复在实用化方面仍存在更多的问题。实现计算机故障恢复的难点在于故障恢复问题是典型的离散、连续混合事件过程，并且在实现过程中要包括多种分析计算的结果，因而所建立起来的软件系统是一个大型软件系统，难于维护、扩展和灵活考虑启发知识。

故障恢复软件主要包括两大方面：恢复方案生成时用的推理机制与校验方案时用的仿真算法。首先，计算机根据当前电网所处的故障后状态和需要达到的目标状态，应用推理机制生成若干组恢复方案，通过这些组恢复方案都可以使系统转化至目标状态；而后，对这些组恢复方案进行校验和评估，以除去那些违反电网约束条件的“伪方案”，并在合理方案中根据评估指标进行方案优劣的比较，选出最优的一组做为最终采用的方案。

本章重点解决推理机制的问题。推理机制是故障恢复软件的基础和关键，对推理机制的要求是：（1）有较高的推理效率，尤其是对大系统搜索时；（2）能够方便的加入多种约束条件和评估指标，以便在推理过程中就去除一些“伪方案”；（3）既能使用严格的数学约束，又能使用逻辑形式的启发性知识；（4）推理规则有层次化，易于维护和扩展。

目前故障恢复中常用的推理机制为专家系统。基于专家系统的推理虽然具有很好的适应能力和知识表示能力，但搜索的效率很低，并且知识库的扩充和维护都很困难。针对这一问题，本章提出了一种基于 Petri 网的推理机制，它具有比专家系统更好的求解效率和表达能力，能很好的将离散、连续事件统一建模，扩展了专家系统的应用范围。将这种推理机制应用于解决电力系统故障恢复问题，得到了一种直观、表达能力好、扩展性好的推理方法。虽然方法从本质上仍是一种基于知识推理

(KBR)的问题求解方法,但它具有很多专家系统不具备的优势,后面将逐一分析这种优势的体现。

3.2 故障恢复研究回顾

电力系统故障恢复在现场具有极其重要的意义,已有多篇文章专门论述了电力系统故障恢复的目标、指导思想、恢复策略、注意事项等^[118-136]。在建立计算机求解故障恢复问题的模型和算法之前,有必要对这些知识进行总结,因为这构成了计算机故障恢复软件的规则库。

3.2.1 故障恢复的目标

电力系统发生大的故障后首要的任务是重建一个稳定的可供电系统,其次才是恢复所有失电的负荷。在此过程中,所有的操作要满足以下原则:

(1) 安全。安全原则是占第一位的。操作应尽量避免出现稳态过负荷,避免对两端相角差相差过大的线路进行并列,以防止设备受到热损坏;在对轻负荷长线路、地下电缆线路、变压器等设备做充电或切断操作时,应通过合适的配合手段避免出现过电压,稳态、暂态以及谐波过电压都可能造成设备的损坏^[127,133-135];

(2) 满足约束。无论对于有功功率还是对于无功功率,都要保证当前系统中的负荷水平与发电机出力能力平衡,因为对处于恢复过程中的系统而言,尤其是对于被解列的孤岛而言,过大的负荷水平会造成频率的大幅度下降和电压的大范围波动,从而可能再次危及系统安全。通常的做法是将投入负荷后造成的频率下降限制在小于 0.5Hz 的范围之内^[118,121,137,138],并使投入负荷或长线路后网络中不出现各种形式的过电压和电压失稳^[118,138-141]。另一方面,要避免对系统做频繁的投切设备操作,在系统没有达到足够的容量之前,过于频繁的投切会造成系统的电压或频率波动过大;

(3) 负荷损失最小化^[118,119,134,137,142]。在满足安全和约束的前提下,应尽量优先恢复大容量机组;使损失的负荷电量最小,即在恢复负荷供电阶段优先选择大的负荷恢复供电。但这一选择通常仅在配电网中可用,因为配电网的安全问题并不严重;对于输电网络而言,恢复负荷的顺序仍是优先恢复特别重要的负荷和优先恢复对系统安全不会造成影响的负荷。

3.2.2 故障恢复的步骤

故障恢复大体可以分为如下几个步骤:

(1) 评价系统状态。根据故障后果,将系统分为一般性故障(仅失去部分负荷)、失去稳定(电压失稳、频率失稳、功角失稳)、解列(部分系统从主系统上

(KBR)的问题求解方法,但它具有很多专家系统不具备的优势,后面将逐一分析这种优势的体现。

3.2 故障恢复研究回顾

电力系统故障恢复在现场具有极其重要的意义,已有多篇文章专门论述了电力系统故障恢复的目标、指导思想、恢复策略、注意事项等^[118-136]。在建立计算机求解故障恢复问题的模型和算法之前,有必要对这些知识进行总结,因为这构成了计算机故障恢复软件的规则库。

3.2.1 故障恢复的目标

电力系统发生大的故障后首要的任务是重建一个稳定的可供电系统,其次才是恢复所有失电的负荷。在此过程中,所有的操作要满足以下原则:

(1) 安全。安全原则是占第一位的。操作应尽量避免出现稳态过负荷,避免对两端相角差相差过大的线路进行并列,以防止设备受到热损坏;在对轻负荷长线路、地下电缆线路、变压器等设备做充电或切断操作时,应通过合适的配合手段避免出现过电压,稳态、暂态以及谐波过电压都可能造成设备的损坏^[127,133-135];

(2) 满足约束。无论对于有功功率还是对于无功功率,都要保证当前系统中的负荷水平与发电机出力能力平衡,因为对处于恢复过程中的系统而言,尤其是对于被解列的孤岛而言,过大的负荷水平会造成频率的大幅度下降和电压的大范围波动,从而可能再次危及系统安全。通常的做法是将投入负荷后造成的频率下降限制在小于 0.5Hz 的范围之内^[118,121,137,138],并使投入负荷或长线路后网络中不出现各种形式的过电压和电压失稳^[118,138-141]。另一方面,要避免对系统做频繁的投切设备操作,在系统没有达到足够的容量之前,过于频繁的投切会造成系统的电压或频率波动过大;

(3) 负荷损失最小化^[118,119,134,137,142]。在满足安全和约束的前提下,应尽量优先恢复大容量机组;使损失的负荷电量最小,即在恢复负荷供电阶段优先选择大的负荷恢复供电。但这一选择通常仅在配电网中可用,因为配电网的安全问题并不严重;对于输电网络而言,恢复负荷的顺序仍是优先恢复特别重要的负荷和优先恢复对系统安全不会造成影响的负荷。

3.2.2 故障恢复的步骤

故障恢复大体可以分为如下几个步骤:

(1) 评价系统状态。根据故障后果,将系统分为一般性故障(仅失去部分负荷)、失去稳定(电压失稳、频率失稳、功角失稳)、解列(部分系统从主系统上

(KBR)的问题求解方法,但它具有很多专家系统不具备的优势,后面将逐一分析这种优势的体现。

3.2 故障恢复研究回顾

电力系统故障恢复在现场具有极其重要的意义,已有多篇文章专门论述了电力系统故障恢复的目标、指导思想、恢复策略、注意事项等^[118-136]。在建立计算机求解故障恢复问题的模型和算法之前,有必要对这些知识进行总结,因为这构成了计算机故障恢复软件的规则库。

3.2.1 故障恢复的目标

电力系统发生大的故障后首要的任务是重建一个稳定的可供电系统,其次才是恢复所有失电的负荷。在此过程中,所有的操作要满足以下原则:

(1) 安全。安全原则是占第一位的。操作应尽量避免出现稳态过负荷,避免对两端相角差相差过大的线路进行并列,以防止设备受到热损坏;在对轻负荷长线路、地下电缆线路、变压器等设备做充电或切断操作时,应通过合适的配合手段避免出现过电压,稳态、暂态以及谐波过电压都可能造成设备的损坏^[127,133-135];

(2) 满足约束。无论对于有功功率还是对于无功功率,都要保证当前系统中的负荷水平与发电机出力能力平衡,因为对处于恢复过程中的系统而言,尤其是对于被解列的孤岛而言,过大的负荷水平会造成频率的大幅度下降和电压的大范围波动,从而可能再次危及系统安全。通常的做法是将投入负荷后造成的频率下降限制在小于 0.5Hz 的范围之内^[118,121,137,138],并使投入负荷或长线路后网络中不出现各种形式的过电压和电压失稳^[118,138-141]。另一方面,要避免对系统做频繁的投切设备操作,在系统没有达到足够的容量之前,过于频繁的投切会造成系统的电压或频率波动过大;

(3) 负荷损失最小化^[118,119,134,137,142]。在满足安全和约束的前提下,应尽量优先恢复大容量机组;使损失的负荷电量最小,即在恢复负荷供电阶段优先选择大的负荷恢复供电。但这一选择通常仅在配电网中可用,因为配电网的安全问题并不严重;对于输电网络而言,恢复负荷的顺序仍是优先恢复特别重要的负荷和优先恢复对系统安全不会造成影响的负荷。

3.2.2 故障恢复的步骤

故障恢复大体可以分为如下几个步骤:

(1) 评价系统状态。根据故障后果,将系统分为一般性故障(仅失去部分负荷)、失去稳定(电压失稳、频率失稳、功角失稳)、解列(部分系统从主系统上

解列)、系统全停等几个等级^[119]。对每个等级,故障恢复的目标和指导思想不尽相同:一般性故障可直接通过转移供电路径等方式恢复失电的供电;对失去稳定的系统,应立即采用各种紧急控制措施以限制事故的扩大和蔓延至系统其余部分,待系统进入稳定运行状态后恢复系统运行方式至正常方式;在解列情况下,由于被解列的子系统承受进一步扰动冲击的能力有限,应尽快将被解列系统重新连至主系统;系统全停状态下,遵循上面所述的安全、约束、损失最小的原则进行恢复工作;

(2) 故障恢复的准备工作^[121,133,134,143]。在进行具体的恢复操作之前,首先要进行隔离故障元件、解除部分保护和自动装置、跳闸发电机的投入准备、消除电压越限等工作,以确保故障不再扩大,后继的恢复工作可以顺利进行;

(3) 恢复方案的执行。这一步是恢复工作的主体,也是本章工作的重点。在此过程中要考虑前面所述的各种约束和目标,针对故障后系统所处的不同阶段,选择操作序列恢复系统至正常状态。系统发生的最严重故障是系统全停,该故障等级对应的恢复方案的一般处理过程为^[25]:

- i) 启动备用电源、准备黑启动的机组和电源;
- ii) 准备供电路径以供建立稳定的子系统;
- iii) 将稳定的子系统连接至主系统或将相邻的子系统连接成较大的子系统,以增强耐冲击能力;
- iv) 待所有的子系统均被连至主系统,或子系统具备足够的容量和强度承载负荷时,给失电负荷恢复送电;
- v) 其他后续工作,如启动和投入其他机组和线路作为备用电源和路径,增强系统稳定性。

系统全停是一类罕见的严峻故障,恢复过程和方案复杂、多样,难以给出通用化的结论。在制定恢复方案过程中,还必须配合多种计算机辅助分析工具,评估、选择可行的操作措施^[127,128]。其他等级的故障恢复工作也具有相似特点。故障恢复方案的制定工作,就是在建立的尽可能通用的原则框架之下,整合多种电网分析软件的计算结果,使其完成恢复方案制定这一整体性目标。

3.2.3 故障恢复问题的计算机求解方法

电力系统故障恢复问题是典型的离散、连续混合事件过程,难以建立计算机辅助求解模型,因而经常采用专家系统和知识推理系统来解决。专家系统首次被应用到电力系统就是 Sakaguchi 和 Matsumoto 用来处理开关操作方案的制定和选择,并获得成功^[144]。

利用专家系统进行故障恢复就是,通过将故障恢复的过程分解并形式化为一条一条的规则,构成基于规则的产生式系统(通常是转化为一阶谓词推理系统),并实施规则匹配、置换绑定等逻辑推理方法,得到从故障后状态到目标状态的操作序

解列)、系统全停等几个等级^[119]。对每个等级,故障恢复的目标和指导思想不尽相同:一般性故障可直接通过转移供电路径等方式恢复失电的供电;对失去稳定的系统,应立即采用各种紧急控制措施以限制事故的扩大和蔓延至系统其余部分,待系统进入稳定运行状态后恢复系统运行方式至正常方式;在解列情况下,由于被解列的子系统承受进一步扰动冲击的能力有限,应尽快将被解列系统重新连至主系统;系统全停状态下,遵循上面所述的安全、约束、损失最小的原则进行恢复工作;

(2) 故障恢复的准备工作^[121,133,134,143]。在进行具体的恢复操作之前,首先要进行隔离故障元件、解除部分保护和自动装置、跳闸发电机的投入准备、消除电压越限等工作,以确保故障不再扩大,后继的恢复工作可以顺利进行;

(3) 恢复方案的执行。这一步是恢复工作的主体,也是本章工作的重点。在此过程中要考虑前面所述的各种约束和目标,针对故障后系统所处的不同阶段,选择操作序列恢复系统至正常状态。系统发生的最严重故障是系统全停,该故障等级对应的恢复方案的一般处理过程为^[25]:

- i) 启动备用电源、准备黑启动的机组和电源;
- ii) 准备供电路径以供建立稳定的子系统;
- iii) 将稳定的子系统连接至主系统或将相邻的子系统连接成较大的子系统,以增强耐冲击能力;
- iv) 待所有的子系统均被连至主系统,或子系统具备足够的容量和强度承载负荷时,给失电负荷恢复送电;
- v) 其他后续工作,如启动和投入其他机组和线路作为备用电源和路径,增强系统稳定性。

系统全停是一类罕见的严峻故障,恢复过程和方案复杂、多样,难以给出通用化的结论。在制定恢复方案过程中,还必须配合多种计算机辅助分析工具,评估、选择可行的操作措施^[127,128]。其他等级的故障恢复工作也具有相似特点。故障恢复方案的制定工作,就是在建立的尽可能通用的原则框架之下,整合多种电网分析软件的计算结果,使其完成恢复方案制定这一整体性目标。

3.2.3 故障恢复问题的计算机求解方法

电力系统故障恢复问题是典型的离散、连续混合事件过程,难以建立计算机辅助求解模型,因而经常采用专家系统和知识推理系统来解决。专家系统首次被应用到电力系统就是 Sakaguchi 和 Matsumoto 用来处理开关操作方案的制定和选择,并获得成功^[144]。

利用专家系统进行故障恢复就是,通过将故障恢复的过程分解并形式化为一条一条的规则,构成基于规则的产生式系统(通常是转化为一阶谓词推理系统),并实施规则匹配、置换绑定等逻辑推理方法,得到从故障后状态到目标状态的操作序

列,即故障恢复策略。但由于问题本身包含的知识因素太多,这种专家系统中的规则与条件数量都很大,难以维护,给实用化带来困难。

以专家系统为基础可以派生出多种其他形式的知识推理方法,如案例推理、规划推理、Petri 网方法等,在不同程度上改进了专家系统中的一些缺点,提高了求解效率和知识库的可维护性。

Petri 网^[145-148]是近年来研究较多的一类方法。Petri 网是一种离散事件系统建模工具,它采用统一的语言描述系统结构和行为,适合于描述以有规则行为为特征的系统。Petri 网具有可以描述并发行为、资源有限限制、冲突等现象的优势,已取得多方面的实际应用^[146-156],如面向对象的软件建模、柔性制造系统的调度与控制、通信协议建模与仿真等。

Petri 网中有两种基本的建模元素:库所(place)和变迁(transition),库所描述的是系统的状态,变迁描述的是系统状态间的变化和转移关系,一个变迁将系统由输入库所所表征的状态改变至由输出库所所表征的状态。因此,所有基于一阶谓词的知识表示系统可以等价的转化为 Petri 网系统。在产生式系统中,当规则前件为真时,把它的规则前件当作 Petri 网的输入库所,规则尾(即结论)当作网的输出库所,这样,产生式规则库就可连接成一个复杂的 Petri 网。在 Petri 网中,库所的标志为 1 则表示该库所所表示的谓词为真,推理从这里可以被激发和继续。这样,用 Petri 网方法可以将逻辑推理看作一个变迁序列,由激发方式连接前一个变迁和后继变迁。

基于 Petri 网的方法进行故障恢复处理实际上就是将前面提到的专家知识转化成以 Petri 网表示,辅以 Petri 网相关的分析方法对故障恢复问题进行求解,二者从本质上讲是相同的。但通过后文分析可以看出,Petri 网的运行过程是同规划系统一样在规划空间进行的,因而 Petri 网方法的求解效率比专家系统高得多。

但 Petri 网系统的缺点也很明显,最主要的就是建模时面临的“状态组合爆炸”问题^[160-162],即在建模时要枚举出系统的所有可能状态并研究状态间的转化关系,使得网络的规模随着系统的维数的升高呈指数级增长,从而使系统分析难度大大增加。解决“状态组合爆炸”问题的方法中最有代表性的是上世纪 90 年代提出的面向对象 Petri 网技术^[157,158]。面向对象 Petri 网集中了 Petri 网技术和面向对象技术二者的优势,利用类的概念,将系统中相同类型的实例表示为类的托肯(token,详细意义见后文叙述),类实例的变化只表现为托肯值的变化和数量的增减。这样既有效表征了系统的状态、变化等动态行为特性,又实现了在不同层次上对问题的抽象和封装,可以在任意层次模拟和考察系统的结构。

本文将面向对象的 Petri 网技术应用于电力系统故障恢复,做为软件的推理机,得到了一种形式简洁、扩展性好、层次性好、分析方便的恢复方案生成方法。

本章侧重于推理机的研究。方案校验是故障恢复问题的另一个非常重要的内容,主要包括:恢复初期黑启动时机组的自励磁问题、空载线路的合闸过电压问题、

黑启动初期低频振荡问题、恢复过程中频率和电压的控制、初步恢复后系统的稳定问题。这些仿真校验非常重要，需配合特定的仿真程序进行。仿真校验的内容独立于推理机制，已经超出了本文的研究范围，不在这里重点讨论。

3.3 基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复技术

Petri 网最早由 C. A. Petri 博士于 1962 年在他的博士论文中提出^[159]。初衷在于采用一网络方式来描述计算机系统和通信系统内事件之间的因果关系。由于该网络方式具有严格的理论基础和处理并发进程、因果推理等动态行为的能力而受到重视。80 年代初 Petri 网开始被应用到工程领域，取得了多方面的实际应用并取得良好效果。

3.3.1 基本 Petri 网的定义^[156,160]

Petri 网是用来表征系统状态以及状态间的转移关系的一种网图^[160]，一个完整的 Petri 网由表征系统结构特性的 Petri 网结构 PNS(Petri Net Structure)和表征系统动态过程的触发规则组成。

一个基本 Petri 网的结构 PNS(Petri-Net Structure)由库所(Place)、变迁(Transition)、输入函数(Input function)与输出函数(Output function)四要素组成。其中的库所节点是静态的，其作用是记录构成系统的诸个体以及系统本身的状态，并且库所可以被赋予若干个标记，称为托肯(token)，托肯标志着系统当前的状态，托肯在库所中的转移就代表系统的状态发生了变化；变迁节点是动态的，它代表系统中发生的事件，决定着系统中状态改变的规则；输入和输出函数将事件和状态转移联系起来，将指定个数的托肯从输入库所传递到输出库所，函数的值就是被传递的托肯的个数。通常 PN 的结构用有向图表示：库所以圆表示，变迁以长方形或粗实线段表示，若从库所 p 到变迁 t 的输入函数取值为非负整数 w ，记为 $I(p,t)=w$ ，则用从 p 到 t 的以有向弧并旁注 w 表示。

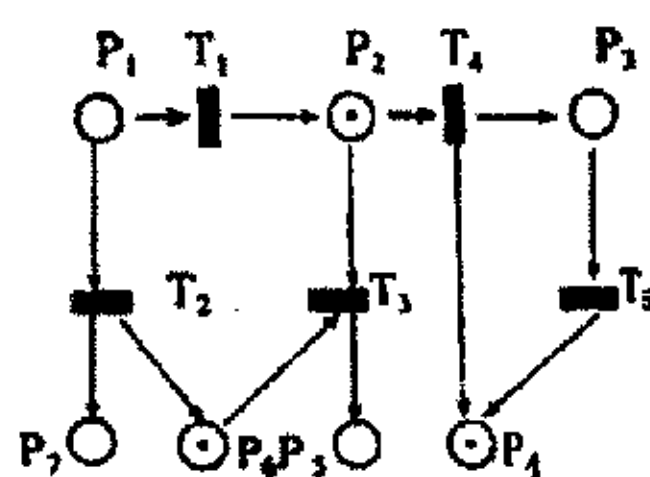


图 3-1 基本 Petri 网示意图

Fig 3-1 Demonstration of basic Petri Net.

Petri 网结构的正规定义如下。

定义 1：Petri 网的结构。一个基本 Petri 网的结构 PNS 是一个四元组

黑启动初期低频振荡问题、恢复过程中频率和电压的控制、初步恢复后系统的稳定问题。这些仿真校验非常重要，需配合特定的仿真程序进行。仿真校验的内容独立于推理机制，已经超出了本文的研究范围，不在这里重点讨论。

3.3 基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复技术

Petri 网最早由 C. A. Petri 博士于 1962 年在他的博士论文中提出^[159]。初衷在于采用一网络方式来描述计算机系统和通信系统内事件之间的因果关系。由于该网络方式具有严格的理论基础和处理并发进程、因果推理等动态行为的能力而受到重视。80 年代初 Petri 网开始被应用到工程领域，取得了多方面的实际应用并取得良好效果。

3.3.1 基本 Petri 网的定义^[156,160]

Petri 网是用来表征系统状态以及状态间的转移关系的一种网图^[160]，一个完整的 Petri 网由表征系统结构特性的 Petri 网结构 PNS(Petri Net Structure)和表征系统动态过程的触发规则组成。

一个基本 Petri 网的结构 PNS(Petri-Net Structure)由库所(Place)、变迁(Transition)、输入函数(Input function)与输出函数(Output function)四要素组成。其中的库所节点是静态的，其作用是记录构成系统的诸个体以及系统本身的状态，并且库所可以被赋予若干个标记，称为托肯(token)，托肯标志着系统当前的状态，托肯在库所中的转移就代表系统的状态发生了变化；变迁节点是动态的，它代表系统中发生的事件，决定着系统中状态改变的规则；输入和输出函数将事件和状态转移联系起来，将指定个数的托肯从输入库所传递到输出库所，函数的值就是被传递的托肯的个数。通常 PN 的结构用有向图表示：库所以圆表示，变迁以长方形或粗实线段表示，若从库所 p 到变迁 t 的输入函数取值为非负整数 w ，记为 $I(p,t)=w$ ，则用从 p 到 t 的以有向弧并旁注 w 表示。

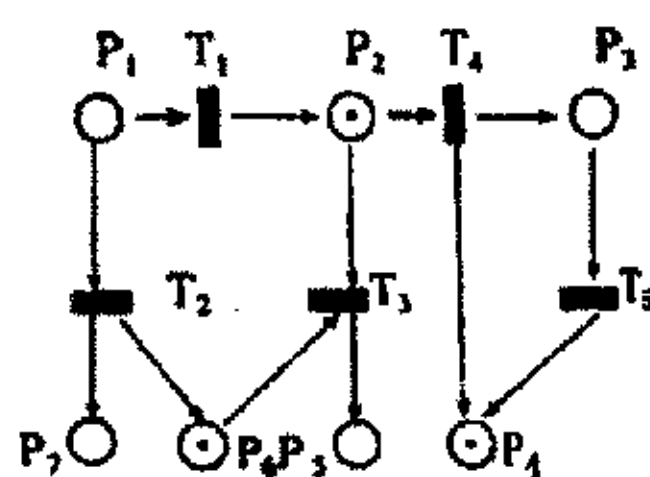


图 3-1 基本 Petri 网示意图

Fig 3-1 Demonstration of basic Petri Net.

Petri 网结构的正规定义如下。

定义 1：Petri 网的结构。一个基本 Petri 网的结构 PNS 是一个四元组

黑启动初期低频振荡问题、恢复过程中频率和电压的控制、初步恢复后系统的稳定问题。这些仿真校验非常重要，需配合特定的仿真程序进行。仿真校验的内容独立于推理机制，已经超出了本文的研究范围，不在这里重点讨论。

3.3 基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复技术

Petri 网最早由 C. A. Petri 博士于 1962 年在他的博士论文中提出^[159]。初衷在于采用一网络方式来描述计算机系统和通信系统内事件之间的因果关系。由于该网络方式具有严格的理论基础和处理并发进程、因果推理等动态行为的能力而受到重视。80 年代初 Petri 网开始被应用到工程领域，取得了多方面的实际应用并取得良好效果。

3.3.1 基本 Petri 网的定义^[156,160]

Petri 网是用来表征系统状态以及状态间的转移关系的一种网图^[160]，一个完整的 Petri 网由表征系统结构特性的 Petri 网结构 PNS(Petri Net Structure)和表征系统动态过程的触发规则组成。

一个基本 Petri 网的结构 PNS(Petri-Net Structure)由库所(Place)、变迁(Transition)、输入函数(Input function)与输出函数(Output function)四要素组成。其中的库所节点是静态的，其作用是记录构成系统的诸个体以及系统本身的状态，并且库所可以被赋予若干个标记，称为托肯(token)，托肯标志着系统当前的状态，托肯在库所中的转移就代表系统的状态发生了变化；变迁节点是动态的，它代表系统中发生的事件，决定着系统中状态改变的规则；输入和输出函数将事件和状态转移联系起来，将指定个数的托肯从输入库所传递到输出库所，函数的值就是被传递的托肯的个数。通常 PN 的结构用有向图表示：库所以圆表示，变迁以长方形或粗实线段表示，若从库所 p 到变迁 t 的输入函数取值为非负整数 w ，记为 $I(p,t)=w$ ，则用从 p 到 t 的以有向弧并旁注 w 表示。

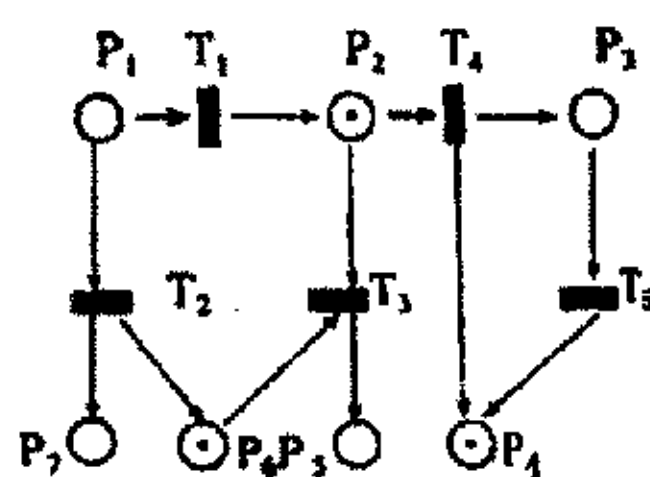


图 3-1 基本 Petri 网示意图

Fig 3-1 Demonstration of basic Petri Net.

Petri 网结构的正规定义如下。

定义 1：Petri 网的结构。一个基本 Petri 网的结构 PNS 是一个四元组

$PNS = \langle P, T, I, O \rangle$ 。 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ($n \geq 0$) 是库所节点的有限集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ ($m \geq 0$) 是变迁节点的有限集合; 库所集合和变迁集合不相交, 即 $P \cap T = \Phi$ 。 $I: T \rightarrow P^\infty$ 为输入函数, $O: T \rightarrow P^\infty$ 为输出函数, 输入函数和输出函数分别描述库所和变迁之间的连接函数关系。 I 与 O 均可表示为 $n \times m$ 非负整数矩阵, O 与 I 之差 $C = O - I$ 称为关联矩阵。通常, 用 $\bullet t$ 表示 t 的所有输入库所的集合, $|\bullet t|$ 表示 t 的输入库所的个数, 相应的用 $\bullet p$ 与 $p^\bullet$ 表示库所 p 的输入与输出变迁, 它们的个数为 $|\bullet p|$ 与 $|p^\bullet|$ 。

系统的某一确定状态在 Petri 网中用 Petri 网的标识表示, 称为标识 PN(PNT, Petri-Net Token)。

定义 2: 标识 PN。标识 PN 为一 5 要元: $PNT = \{PNS, m\} = \{P, T, I, O, m_0\}$ 其中:

(1) $PNS = \{P, T, I, O\}$ 为 PN 结构, 它由定义 1 确定;

(2) $m: P \rightarrow N$ 为标识 PN 的标识, 它为一列向量, 其第 i 个元素表示第 i 个库所中的托肯数目; 特别的, m_0 为初始标识, 表示离散事件系统 DES 的初始状态。

可见, Petri 网可被看成一个由点 v 和有向的边 e 构成的有向图 $G = (V, E)$, 其中, $V = P \cup T$, $E = I \cup O$ 。

结构描述的是 Petri 网的静态特性, Petri 网是用来描述离散事件系统的动态模型, 其动态特性由 Petri 网的运行规则描述。Petri 网的运行规则可以形象的描述为: 只有所有前提条件都得以满足的事件才能发生, 事件的结果是“消耗”这些前提状态, 同时改变与该事件有关的局部状态(结果状态)。所消耗的前提状态及其次数通过变迁的输入函数来定义, 并以从输入库所中移去相应数量的托肯来表示, 所产生的结果状态及其次数由输出函数确定, 并用输出库所中增加的托肯表示。

PN 的运行规则正规定义如下。

定义 3: 一变迁在标识 m 下使能, iff: $\forall p \in \bullet t: m(p) \geq I(p, t)$; 在标识 m 下使能的变迁 t 的点火(firing)将产生新标识 m' : $\forall p \in P: m'(p) = m(p) - I(p, t) + O(p, t)$ 。

此外, 变迁还可以引入守护函数, 只有当该变迁的守护函数为真时, 变迁才被激发。

只要网中至少有一个变迁是使能的, 点火就可以继续下去, 当出现没有一个变迁是使能的情况是, 运行停止。Petri 网的运行将产生两个序列: 标识序列($m_0, m_1, m_2, \dots$)和点火的变迁序列($t_0, t_1, t_2, \dots$)。

从定义和活动过程可见, Petri 网具有如下优点: 用统一的语言描述系统结构和行为; 适合于描述以有规则行为为特征的系统; 网系统可以描述并发行为、资源有限限制、冲突等现象。

3.3.2 基本 Petri 网的性能

作为数学工具, Petri 网具有一些性质, 表征着被模拟系统的实际静态与动态特征。系统的特性又可以分为行为特性(与特定初始状态有关的特性)与结构特性(与初始状态无关, 即在所有初始状态下都具有的特性)。Petri 网最主要的性能包括可达性、有界性、安全性、活性。

可达性: 若从初始表示 m_0 开始继发一个变迁序列产生表示 m_r , 则称 m_r 是从 m_0 可达的。

在电力系统故障恢复问题中, 可达性表示系统从当前状态可以经过若干控制操作达到目标状态。

有界性: 给定 $PN=(P,T,I,O,m_0)$, 对于库所 $p \in P$, 若任意 $m \in R(m_0): m(p) \leq k$, 则称 p 是 k 有界的, 此处 k 为正整数; 若 PN 的所有库所都是 k 有界的, 则 PN 是 k 有界的。

有界的 PN 才是安全的。对于实际系统中的问题, 安全限度反映于 k 值中。通常库所是被描述系统中的资源, 确保这些存放区是否溢出或资源的容量是否溢出是非常重要的。当库所用于描述一操作时, 该库所的安全性还能够确保不会重复启动某一正在进行的操作。

活性: 对于一变迁 $t \in T$, 在任意标识 $m \in R$ 下, 若存在某一变迁序列 t_r , 该变迁序列的点火使得词变迁 t 使能, 则称该变迁是活的。若一个 PN 的所有变迁都是活的, 则该 PN 是活的。

死变迁与锁死从反面描述 PN 的活性。若存在 $m \in R$, 不存在从 m 开始的变迁序列, 该序列的点火使得 t 使能, 则变迁 t 为死变迁。若存在 $m \in R$, 在此 m 下无任何变迁使能, 则称 PN 包含一锁死, 该标识为死标识(Dead marking)。

实际系统中的锁死代表不合理的资源分配或全部资源的耗尽。在电力系统故障恢复的 Petri 网模拟中, 若出现锁死, 则表示当前恢复方案无法继续, 失败。

基本 Petri 网的性能可由不变量法、可达树法等给出。

3.3.3 面向对象的 Petri 网

基本 Petri 网的缺点很明显: 在分析系统性能之前需要列举出系统所有可能的状态, 并研究这些状态间的转化关系, 这就导致网络的规模随着系统的增加而呈指数级上升。因此网络分解技术在 Petri 网应用于大规模问题求解时非常重要。最有效的网络分解技术之一就是面向对象技术与 Petri 网技术结合, 即面向对象的 Petri 网技术, 最早于 1993 年由 Lee 等人提出^[157,158]。它将系统中相同类型的实例表示为类的托肯, 用托肯值的变化和数量的增减来反映类实例的变化, 通过在不同层次上对类进行抽象和封装, 以层次化思想减小了网络规模, 这样既有效表征了系统的状态、

3.3.2 基本 Petri 网的性能

作为数学工具, Petri 网具有一些性质, 表征着被模拟系统的实际静态与动态特征。系统的特性又可以分为行为特性(与特定初始状态有关的特性)与结构特性(与初始状态无关, 即在所有初始状态下都具有的特性)。Petri 网最主要的性能包括可达性、有界性、安全性、活性。

可达性: 若从初始表示 m_0 开始继发一个变迁序列产生表示 m_r , 则称 m_r 是从 m_0 可达的。

在电力系统故障恢复问题中, 可达性表示系统从当前状态可以经过若干控制操作达到目标状态。

有界性: 给定 $PN=(P,T,I,O,m_0)$, 对于库所 $p \in P$, 若任意 $m \in R(m_0): m(p) \leq k$, 则称 p 是 k 有界的, 此处 k 为正整数; 若 PN 的所有库所都是 k 有界的, 则 PN 是 k 有界的。

有界的 PN 才是安全的。对于实际系统中的问题, 安全限度反映于 k 值中。通常库所是被描述系统中的资源, 确保这些存放区是否溢出或资源的容量是否溢出是非常重要的。当库所用于描述一操作时, 该库所的安全性还能够确保不会重复启动某一正在进行的操作。

活性: 对于一变迁 $t \in T$, 在任意标识 $m \in R$ 下, 若存在某一变迁序列 t_r , 该变迁序列的点火使得词变迁 t 使能, 则称该变迁是活的。若一个 PN 的所有变迁都是活的, 则该 PN 是活的。

死变迁与锁死从反面描述 PN 的活性。若存在 $m \in R$, 不存在从 m 开始的变迁序列, 该序列的点火使得 t 使能, 则变迁 t 为死变迁。若存在 $m \in R$, 在此 m 下无任何变迁使能, 则称 PN 包含一锁死, 该标识为死标识(Dead marking)。

实际系统中的锁死代表不合理的资源分配或全部资源的耗尽。在电力系统故障恢复的 Petri 网模拟中, 若出现锁死, 则表示当前恢复方案无法继续, 失败。

基本 Petri 网的性能可由不变量法、可达树法等给出。

3.3.3 面向对象的 Petri 网

基本 Petri 网的缺点很明显: 在分析系统性能之前需要列举出系统所有可能的状态, 并研究这些状态间的转化关系, 这就导致网络的规模随着系统的增加而呈指数级上升。因此网络分解技术在 Petri 网应用于大规模问题求解时非常重要。最有效的网络分解技术之一就是面向对象技术与 Petri 网技术结合, 即面向对象的 Petri 网技术, 最早于 1993 年由 Lee 等人提出^[157,158]。它将系统中相同类型的实例表示为类的托肯, 用托肯值的变化和数量的增减来反映类实例的变化, 通过在不同层次上对类进行抽象和封装, 以层次化思想减小了网络规模, 这样既有效表征了系统的状态、

变化等动态行为特性，又可以在不同层次模拟和考察系统的结构。

对象 Petri 网是在彩色 Petri 网(CPN, Coloured Petri Net)的基础上定义的。CPN 是一种高级 Petri 网，比基本 PN 具有更强的表现能力，库所可以具有自己的数据类型，以描述更复杂的状态^[161,162]。这就如同给库所着了各种色彩一样而将不同的托肯区分开。

定义 4: 彩色 Petri 网 CPN。CPN 是一有向图，它表示为一 5 要元 $CPN = \{P, T, C, I, O\}$ 这里：

P 与 T 为库所与变迁集合，定义与基本 PN 相同；

C 是与库所和变迁关联的色彩集合，具体的：

库所的色彩集合： $C(p_i) = \{a_{i,1}, \dots, a_{i,u_i}\}$, $u_i = |C(p_i)|$, $i=1,2,\dots,n$

变迁的色彩集合： $C(t_j) = \{b_{j,1}, \dots, b_{j,v_j}\}$, $v_j = |C(t_j)|$, $j=1,2,\dots,n$

$I(p,t)$ 是从库所 p 到变迁 t 的输入映射： $C(p) \times C(t) \rightarrow N$ (非负整数)，对应着从 p 到 t 的着色有向弧；

$O(p,t)$ 是从变迁 t 到库所 p 的输出映射： $C(t) \times C(p) \rightarrow N$ (非负整数)，对应着从 t 到 p 的着色有向弧。

色彩为 $a_{i,h}$ 的库所 p_i 到色彩为 $b_{j,k}$ 的变迁 t_j 的输入弧表示为标量 $I(a_{i,h}, b_{j,k})$ ，类似的，输出弧表示为 $O(a_{i,h}, b_{j,k})$ 。

首先对面向对象的 Petri 网作一形式上的简介。面向对象的 Petri 网由两个层次组成：对象的 Petri 网(OPN, Object Petri Net)和对象之间的信息传递关系网(MPRN, Message Passing Relation Net)。对象的 Petri 网是描述单个对象的有色 Petri 网模型，确定了对象的活动引起的内部状态的变化。对象之间的信息传递关系网是描述系统中对象之间的信息传递关系，确定了整体的活动引起的系统状态变化。

在图形中，对象的边界常用方框表示封装与抽象，对象内部为描述本对象行为的 CPN，对象的外部接口部分由“消息队”(用椭圆表示，其作用类似于库所)、“门”(用粗线表示，其作用类似于变迁)以及它们之间的流关系(用弧线表示)给出。各对象内部分别可以有若干实例，用托肯表示，各托肯所处的库所表示各自的当前状态。下图是一个简单的对象构成的系统的 Petri 网模型。

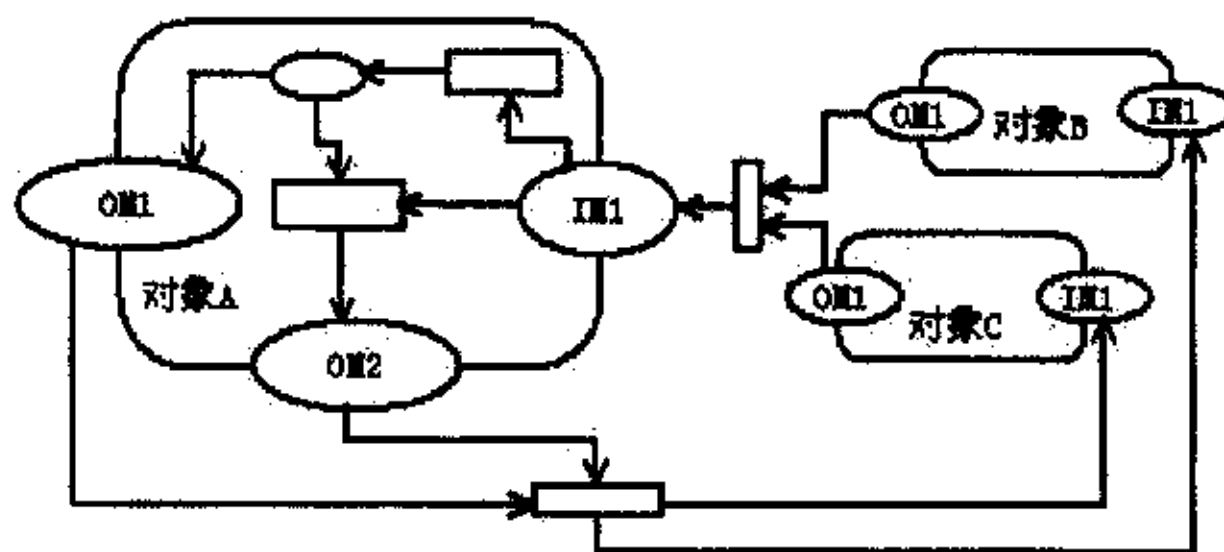


图 3-2 对象 Petri 网示例图

fig. 3-2 Demonstration Figure of OPN

面向对象的 Petri 网正规的形式化定义为^[156]：

定义 5: 对象的 Petri 网 OPN。对象 Ob_i 的 OPN 用下列七要元表示为:

$$Ob_i = \{SP_i, AT_i, IM_i, OM_i, I_i, O_i, C_i\}$$

这里, Ob_i ——系统的第 i 个对象;

SP_i —— Ob_i 的状态库所有有限集合;

AT_i —— Ob_i 的活动变迁有限集合;

IM_i —— Ob_i 的输入信息库所的有限集合;

OM_i —— Ob_i 的输出信息库所的有限集合;

$C(SP_i)$ —— Ob_i 的状态库所的色彩集合;

$C(IM_i)$ —— Ob_i 的输入库所的色彩集合;

$C(OM_i)$ —— Ob_i 的输出库所的色彩集合;

$C(AT_i)$ —— Ob_i 的活动变迁的色彩集合;

$I_i(P, T)$ ——从库所 P 到变迁 T 的输入映射函数: $C(P) \times C(T) \rightarrow N$ (非负整数), 对应着从 P 到 T 的彩色有向弧, 这里 $P = SP_i \cup IM_i$, $T = AT_i$, $I_i(P, T)$ 为矩阵;

$O_i(P, T)$ ——从变迁 T 到库所 P 的输出映射函数: $C(T) \times C(P) \rightarrow N$ (非负整数), 对应着从 P 到 T 的彩色有向弧, 这里 $P = SP_i \cup OM_i$, $T = AT_i$, $O_i(P, T)$ 为矩阵。

对象的 OPN 实际上就是 CPN, 其激发规则与 CPN 完全相同。

定义 6: 信息传递关系网。

对象 Ob_i (信息发送者) 至对象 Ob_j (信息接受者) ($i \neq j$) 的信息传递关系网正规的表示为:

$$R_{ij} = \{OM_i, g_{ij}, IM_j, C(OM_i), C(IM_j), C(g_{ij}), I_{ij}, O_{ij}\}$$

这里 OM_i —— Ob_i 的输出信息库所的有限集合;

IM_j —— Ob_j 的输入信息库所的有限集合;

g_{ij} ——信息传递门的有限集合;

$C(OM_i)$ —— Ob_i 的输出库所的色彩集合;

$C(IM_j)$ —— Ob_j 的输入库所的色彩集合;

$C(g_{ij})$ —— g_{ij} 的色彩集合;

$I_{ij}(OM_i, g_{ij})$ ——从输出信息库所 OM_i 到门 g_{ij} 的输入映射函数, 即 $C(OM_i) \times C(g_{ij}) \rightarrow N$ (非负整数) 对应着从 OM_i 到 g_{ij} 的彩色有向弧;

$O_{ij}(IM_j, g_{ij})$ ——从门 g_{ij} 到输入信息库所 IM_j 的输出映射函数, 即 $C(g_{ij}) \times C(IM_j) \rightarrow N$ (非负整数) 对应着从 g_{ij} 到 IM_j 的彩色有向弧。

在面向对象 Petri 网中, 首先要对系统中的实体进行类别划分, 并定义实体间信息传递关系。把具有共同属性的对象分为一类, 对象是类中的实例, 对象代表着实际系统中的实体, 每个对象有自己的数据和任务, 根据接收到的通讯信息(消息)来完成相应的任务。为了使每个对象尽可能相互独立, 通常采用将同步制约条件从每个对象内部分离出来的做法, 使得对象内部行为描述与外部通讯接口的分析分开处

理，从而提高封装性和可重用性。

3.3.4 基于对象 Petri 网的电力系统故障恢复

利用 Petri 网建模，首先确定系统中所有可能的状态和操作，将每种操作和状态用输入和输出弧连接起来。而后分析网的行为特性和结构特性。网的性能分析可以通过三种方法完成：一是采用图分析的方法，分析在给定的初始标识下，系统中的冲突、锁死等情形；二是通过各种网论的方法（如可达树法、不变量法等）分析系统的安全性、可达性等性能指标，基于网论的方法通常只对基本 Petri 网和具有简单数据类型的 CPN 适用；三是通过计算机仿真，分析任意复杂程度的 Petri 网系统的性能。对于故障恢复问题，涉及到的数据类型已超出了网论方法所能分析的范围，故只能采取图分析的方法或计算机仿真的方法分析系统性能。

3.3.4.1 系统基本要素分析

基于对象 Petri 网建模分析步骤为：

- (1) 对象划分。确定构成系统的对象单元；
- (2) 系统中对象间的信息传递。确定系统中对象之间的信息传递关系，信息在对象间的传递构成了系统的动态行为；
- (3) 对象内部的活动变迁。对象内部的事件变迁触发导致对象自身的状态发生变化。

下面按此步骤进行故障恢复问题的建模。

(1) 对象划分。

将故障恢复过程中系统的元件按照状态分为三种对象：活岛、死岛和主系统。岛的定义和 IEC61970CIM 中的定义稍有不同：本文中对岛的拓扑分析被局限在属于“网络的母线”一级。具体的，就是拓扑分析只进行到发电厂出口处的升压母线、变电站负荷变压器的降压母线，发电厂中连至同一升压母线的所有机组被看成是隶属于该母线所在的岛，同理变电站中连至同一负荷变压器的降压母线的负荷也被看成是隶属于该母线所在的岛。这样定义的原因在于，在由发电机、输电网络、负荷构成的电力系统模型中，故障后网络的恢复控制所重点处理的是输电网络这一级，而输电网络的“边界”就是这两类母线。

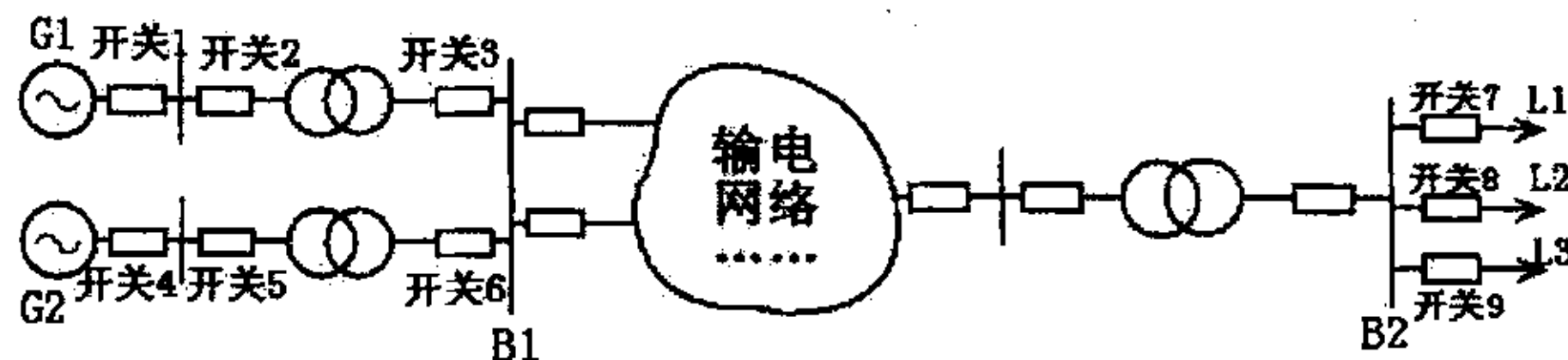


图 3-3 示例网络

fig.3-3 Demonstration Network Diagram.

理，从而提高封装性和可重用性。

3.3.4 基于对象 Petri 网的电力系统故障恢复

利用 Petri 网建模，首先确定系统中所有可能的状态和操作，将每种操作和状态用输入和输出弧连接起来。而后分析网的行为特性和结构特性。网的性能分析可以通过三种方法完成：一是采用图分析的方法，分析在给定的初始标识下，系统中的冲突、锁死等情形；二是通过各种网论的方法（如可达树法、不变量法等）分析系统的安全性、可达性等性能指标，基于网论的方法通常只对基本 Petri 网和具有简单数据类型的 CPN 适用；三是通过计算机仿真，分析任意复杂程度的 Petri 网系统的性能。对于故障恢复问题，涉及到的数据类型已超出了网论方法所能分析的范围，故只能采取图分析的方法或计算机仿真的方法分析系统性能。

3.3.4.1 系统基本要素分析

基于对象 Petri 网建模分析步骤为：

- （1）对象划分。确定构成系统的对象单元；
- （2）系统中对象间的信息传递。确定系统中对象之间的信息传递关系，信息在对象间的传递构成了系统的动态行为；
- （3）对象内部的活动变迁。对象内部的事件变迁触发导致对象自身的状态发生变化。

下面按此步骤进行故障恢复问题的建模。

（1）对象划分。

将故障恢复过程中系统的元件按照状态分为三种对象：活岛、死岛和主系统。岛的定义和 IEC61970CIM 中的定义稍有不同：本文中对岛的拓扑分析被局限在属于“网络的母线”一级。具体的，就是拓扑分析只进行到发电厂出口处的升压母线、变电站负荷变压器的降压母线，发电厂中连至同一升压母线的所有机组被看成是隶属于该母线所在的岛，同理变电站中连至同一负荷变压器的降压母线的负荷也被看成是隶属于该母线所在的岛。这样定义的原因在于，在由发电机、输电网络、负荷构成的电力系统模型中，故障后网络的恢复控制所重点处理的是输电网络这一级，而输电网络的“边界”就是这两类母线。

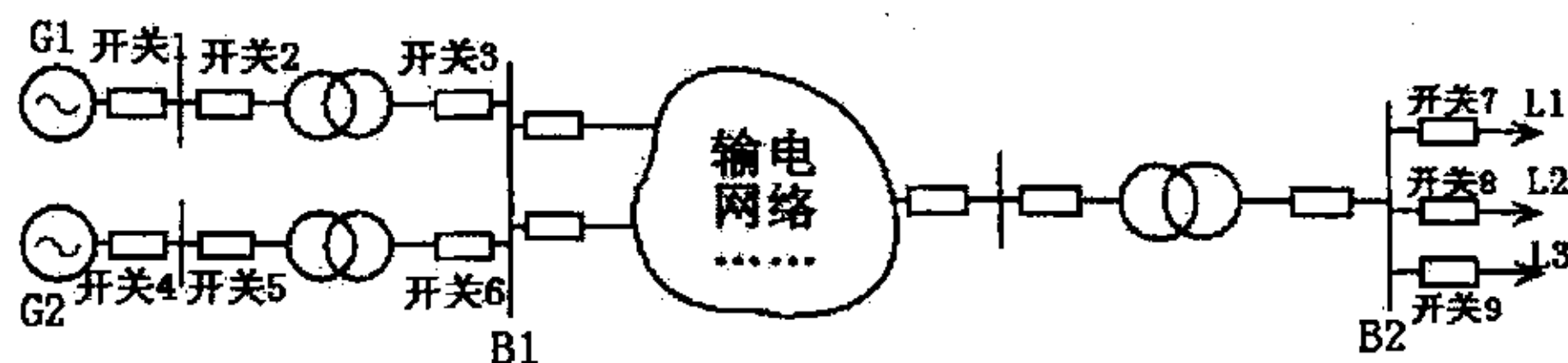


图 3-3 示例网络

fig.3-3 Demonstration Network Diagram.

在上面图中，无论开关 1~6 的状态是断开还是闭合，G1 和 G2 都属于 B1 岛，无论开关 7~9 状态是断开还是闭合，负荷 L1~L3 都属于 B2 岛。

在此基础上，定义具有岛内有活跃电源的、或虽无活跃电源但有黑启动机组的为活岛，岛内既无活跃电源又没有黑启动机组的为死岛。区分为活岛和死岛的原因在于活岛和死岛的操作策略不同。主系统是一类特殊的活岛，指理想状态下的无穷大系统，引入的目的是为了描述可以提供功率支援的外部系统对当前被恢复系统的影响和支持作用，以及确定恢复过程的终止——故障恢复的最终目标就是将所有元件都连至主系统。后面可以看出，分为活岛和死岛还可以使恢复过程更直观，简化对恢复过程的描述。

活岛具有如下库所及其数据类型，以表征活岛的当前状态。

表 3-1 活岛的库所及数据类型说明

Table 3-1 Place type and data type of live island.

库所	库所含义	数据类型	数据类型声明及注释
BlackA vailable	岛内黑启动机组 已作好启动准备	UnitBL ist	color UnitBList= list of UnitB; //黑启动机组链表; color UnitB= union Index: string + pg: float; //黑启动机组，为索引和有功出力组成的联合体;
GAvaila ble	岛内每条母线可 以对外提供的支 援功率	pglist	color pglist = list of pgBus; //每条母线所能提供的有功功率; color pgBus= union pg: float + busIndex: string; //功率值、母线名称（索引）;
LToStar t	待启动的负荷	LoadLi st	color loadlist = list of Load; //负荷链表; color Load = union Index:string + pl: float; //负荷，为索引和负荷值的联合体;
GToSta rt	待启动的发电机	UnitLis t	color Unitlist = list of Unit; //机组链表; color Unit = union unitb: UnitB + pneed: float; //一般机组，为黑启动机组和启动时所需的支援有功的联合体;
Stable	岛内已稳定，可以 和外部系统互联	BOOL	活岛是否可以互联的数据类型，布尔型

需要说明的是，第一，为简单起见，只列出了机组容量的有功部分，如需考虑无功，只需将所有的实数 pg 改为复功率 $pg+jqg$ 即可；第二，为计入拓扑守护函数作用，实际上需要将 $GAvailable$ 的类型扩展为 $GSet$ 型以记录所有的拓扑节点信息：

color $GSet$ = union Index: String + pg : float + $BusList$: list of $BusNode$; //索引、有功值、母线链表所构成的联合体。

`color BusNode= union topoNode:TopoNode + load: Load+ unit: Unit; //母线节点，定义为拓扑节点和与其相连的发电机和负荷的联合体`拓扑节点定义同 61970 CIM 模型。

数据类型的扩展仅影响模型的复杂度，不影响系统的结构及行为过程。为叙述清晰起见，本文中采用了简化的 `Gavailable` 类型。

主系统与活岛相比，少了 `Stable` 库所，因为主系统是描述外部系统的，一方面通常认为外部系统是足够稳定的；另一方面，外部系统的稳定性程度很难在系统内给予评估。

死岛的库所类型很简单，只有 `LToStart`、`GToStart` 和 `ConnectAvailable`。前二者意义同活岛，`ConnectAvailable` 库所意为死岛内部故障已隔离完毕，可以由外部其他岛或主系统给其充电。`ConnectAvailable` 库所数据类型为 `CBOOL`：

`color CBOOL = union pneedmin: float + connectAvailable: BOOL; //给岛充电所需的最小充电功率，和当前岛是否准备好和外部岛相连的联合体。`

(2) 系统中对象间的信息传递。

故障恢复问题中，对象间的信息传递的物理意义是通过各种操作，实现系统状态的转移，并最终进入正常状态。恢复过程中所要进行的操作分为对一次设备的操作和对二次设备的操作，对一次设备的操作是恢复方案的主体，对保护、自动装置等的处理工作是为成功进行一次设备的操作而进行的，因此对保护等二次设备操作的模拟是隶属于对一次设备操作模拟的层次之内的。本章对设备操作的建模仅限于恢复过程中一次设备的操作，未包括对保护、自动装置等的处理。

故障恢复问题中，对象间的行为可以抽象概括为：活岛给死岛充电、活岛之间互联、将活岛连接至主系统、主系统给死岛充电。这四种操作可以概括故障恢复过程的所有作用在上述三种对象间的操作。表 3-2 为与这四种操作相关联的前置和后置状态。

基于表 3-2 可以得到形式化的信息传递前后的因果作用关系，详细表述在后面结合图形建模给出。

表 3-2 对象间的消息传递关系

Table 3-2. Message passing relations among objects.

编码	操作	前置状态	后置状态
1	活岛给死岛充电	死岛已经作好恢复前的准备工作； 活岛对外界所能提供的支援功率大于死岛充电功率；	该死岛对象消失，岛内所有元件加入活岛；
2	活岛之间互联	两个活岛的稳定性均以足够和外系统相连；	变成一个新的活岛，包含了原来两个岛的元件；
3	将活岛连接至主系	该活岛稳定性已足够和外系统相	该活岛对象消失；

	统	连;	
4	主系统给死岛充电	死岛已经作好恢复前的准备工作;	该死岛对象消失, 岛内所有元件加入主系统;

(3) 对象内部的活动变迁。

活岛。岛内黑启动机组启动; 岛内机组启动, 增加有功出力; 岛内增加负荷, 恢复负荷供电; 岛内线路互联重构, 改善岛的稳定性能。与其相关联的前置和后置状态如下。

表 3-3 活岛对象内部的活动变迁

Table 3-3 Transition of live island object.

编码	操作	前置状态	后置状态
1	岛内黑启动机组启动;	黑启动机组已作好启动前的准备工作	岛对外能够提供的功率支援增加
2	岛内机组启动, 增加有功出力;	岛内可支援功率足够启动机组	岛对外能够提供的功率支援增加; 可启动的发电机组减 1;
3	岛内增加负荷, 恢复负荷供电;	岛内可支援功率足够恢复负荷	岛对外能够提供的功率支援减少; 待恢复负荷数目减 1;
4	岛内线路互联重构, 改善岛的稳定性能等;	岛内可支援功率足够改变网络结构	活岛稳定性已足够和外系统相连;

主系统。主系统是活岛的子类, 继承活岛的所有操作, 自身无其他特殊操作。

死岛。故障区一定是在死岛中, 对死岛能进行的操作也就仅限于隔离故障 *SeperateFault*, 为连接至活岛作好准备工作。 *SeperateFault* 变迁的结果为将 *ConnectAvailable* 库所的值由 FALSE 变为 TRUE, *pneedmin* 不变, 托肯个数不变。对死岛还设置了一个为提高搜索效率而增加的变迁: *ExpandIsland* (死岛扩展)。该变迁仅对那些岛内有急需启动的发电机组的死岛设置, 变迁仅仅按照拓扑连接关系向外扩展若干层 (以经过一条线路为一层), 修改相应的 *pneedmin* 数值, 以增加待启动的发电机组的“可见性”, 使黑启动机组所在的岛能更容易“看见”它。一般而言, 从黑启动机组至需要恢复的机组间的电气联系不会超过 6 条输电线路, 因此, 限制 *ExpandIsland* 变迁中向外扩展的层数为 3 层, 即可使拓扑连接的搜索效率大大提高。

以下是进一步的建模工作。

(4) 守护函数的定义: 由于岛间的连接和岛内操作均需要根据网络拓扑确定相应的开关, 所以为变迁设置了一个守护函数, 只有当守护函数为真时, 变迁才能被激发。守护函数的原理是分析当前变迁所连接的库所间是否存在开关拓扑连接, 是则为真, 否则为假, 不激发变迁。守护函数用双重尖括号标注于变迁附近。

(5) 变迁的输入和输出。需要作两方面的工作: 一是根据实际物理过程确定

每个变迁的输入与输出，二是对于无界变迁，通过引入互补弧使之转化成安全变迁，后面将给出一个例子。输入和输出标注于相应弧的附近。

(6) 为 Petri 网赋时。由于电力系统故障恢复是一个异步的离散事件动态过程，因此需要在触发每个变迁之前对系统同步化，以确保全局资源的唯一性。在上面的模型中，变迁的结果对应着最终的恢复操作，而变迁的守护函数是采用当前系统中的资源比较完成的，因此对每一变迁赋予一时间标志，即采用赋时变迁 Petri 网，变迁的时间标志取值为该变迁所对应的恢复操作的时间。使用赋时变迁 Petri 网的系统其触发与非赋时 Petri 网有所不同：变迁触发产生的新托肯要在延时变迁所具有的标志时间以后方才到达新库所。

至此，初步的建模工作已完成。需要说明的是，面向对象 Petri 网给出的是层次化的离散事件系统模型，不同详细程度的建模可以隐藏在对象内部。只要对象的接口不发生变化，无论其内部模型的详细程度如何，均不影响系统模型的结构和行为。比如，在 StartL 变迁中，实际上包含了若干子过程：给母线充电、给主变充电、解除备自投、试合开关等。这些操作的结果不对岛的其他状态产生影响（除非操作失败），即层次内部模型的更改不影响接口，因此在上面所建的模型没有考虑到恢复过程中最基本的开关操作层次。

3.3.4.2 图形建模

根据以上分析，得到对象图及对象间的消息传递关系图如图 3-4 至 3-6 所示。由于死岛的对象图和主系统的对象图均较简单，主系统给死岛充电的过程与活岛给死岛充电过程类似，没有一一列出。以下重点介绍结构和行为较复杂的活岛对象图、活岛间的互联 MPRN 图、活岛和死岛连接的 MPRN 图。

(1) 活岛对象内部库所、状态图。

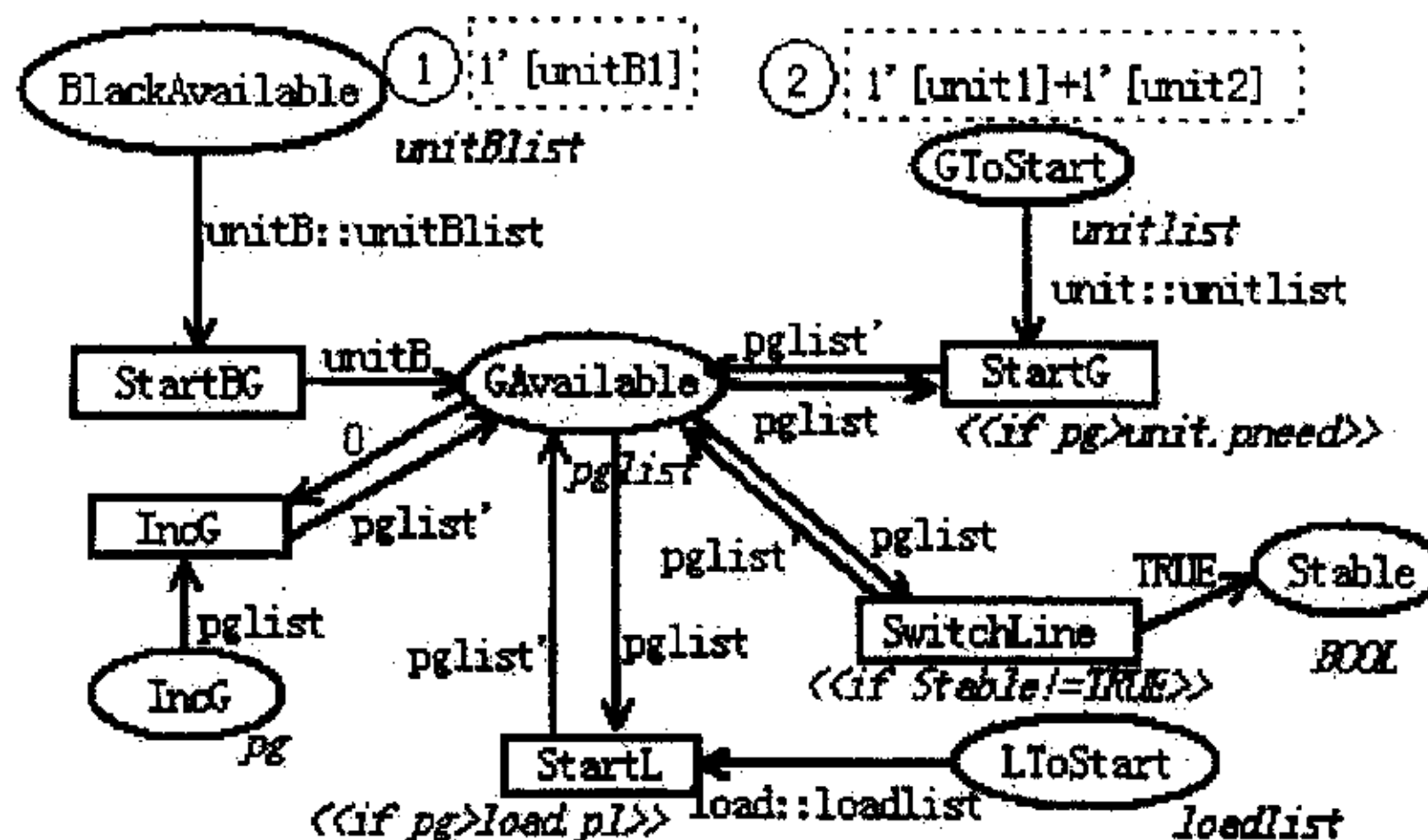


图 3-4 活岛内部库所、变迁图

fig. 3-4 Figure of Place and Transition in Live Island.

在上面的图中，椭圆代表库所；方框代表变迁；斜体字是库所的类型；①、②

代表库所的托肯个数；虚线框内的内容为托肯取值；双尖括号内为守护函数；::作用符表示每次从链表中取出一个元素。以下同。表 3-1 已经叙述了各库所的含义和色彩定义，下面结合恢复过程对图中库所做进一步解释：

BlackAvailable: 岛内的黑启动机组启动的准备工作就绪。该状态通常为系统全停后的初始状态。该库所具有类型 *unitBlist*。该类型定义为岛内所有黑启动发电机的索引和机组容量的链表；

GAvailable: 岛内机组已启动，可以为负荷提供功率支持，可以为其他死岛提供充电和电源支持。该库所具有类型 *pg*；

LtoStart: 岛内有负荷需要恢复供电。该库所具有类型 *LoadList*，记录的是所有待恢复的负荷的索引和功率值；

GtoStart: 岛内有发电机可以启动，提供功率支持。该库所类型为 *UnitList*，记录的是所有待恢复的发电机的索引和功率值；*UnitList* 的基本单元 *unit* 和 *UnitBList* 的基本单元 *UnitB* 间的差别在于前者多了一项启动所需的最小功率支持项 *pneedmin*；

Stable: 子系统已经稳定，可以和其他活岛或主系统互联，类型 *BOOL*；

IncG: 专门为将对象输入和输出接口解耦封装而引入的辅助库所，表示需对当前的 *GAvailable* 库所的 *pg* 数据进行调整。

结合输入输出函数，对图中变迁的进一步解释：

StartBG: 启动黑启动机组。该变迁从 *BlackAvailable* 中取走 *UnitBList* 链表中的第一个元素，加入 *GAvailable* 中，将其余元素返回给 *BlackAvailable*，即每次启动一台黑启动发电机。经过变迁，*BlackAvailable* 的托肯数量不变，而 *GAvailable* 的托肯数量每次加 1，后面可以看到，*GAvailable* 中的托肯在其他变迁中都不增加，故最终结果中 *GAvailable* 中的托肯数量应该为该岛中所有黑启动机组的数量。通常黑启动机组在每个岛内只有一台，即 *GAvailable* 中托肯数最终将为 1；

StartG: 启动一般机组，区别于启动黑启动机组的是，一般机组的启动需要从系统提供大小为 *pneed* 的有功支持才能启动；该变迁前后 *GAvailable* 中的托肯数量不变；每次从 *GtoStart* 中取走一个托肯，直到取走所有托肯，表示所有发电机都被启动；发电机启动后岛内母线可支援功率数值改变；

StartL: 给负荷恢复供电；每次从 *LtoStart* 中取走一个托肯，直到取走所有托肯，表示所有负荷均被恢复供电；负荷恢复后岛内母线可支援功率数值改变；

IncG: 辅助变迁；从 *GAvailable* 库所至 *IncG* 变迁的弧就是为使 *GAvailable* 库所中的托肯总数不变，从而保证系统有界而引入的辅助弧。

SwitchLine: 通过对岛内线路互联、开断、转移负荷等操作使岛稳定或改变岛内潮流分布，使本岛可以和其他岛或主系统互联。该变迁具有守护函数 *Stable!=TRUE*，意为当岛的稳定性不够与外系统互联时才能激发；或者当 *Stable* 库

所的值未知时也将被激发。岛内线路操作后岛内母线可支援功率数值改变。

(2) 死岛和主系统的对象图。

死岛的对象图较简单，主系统的对象图类似于活岛，不再一一列出。

(3) 活岛和死岛间的消息传递关系图。

将整个 LiveIsland 和 DeadIsland 各自作为一个对象考虑（岛的索引为母线），考察它们之间的信息传递。只有一个变迁 ConnectDeadIsland 联系。输入为死岛的最小充电功率、岛内的发电机集合、负荷集合。每次变迁从 IslandConnectAvailable 中取走一个托肯，但从 GToStart 和 LToStart 中取走所有的托肯，加到活岛的相应库所。变迁具有两个守护函数：<<pg>pneedmin>>意为当活岛所能提供的有功功率支援大于死岛充电所需有功功率时才被激发；<<Connect available>>是一个评估结果，意为只有当互联不会造成过载和稳定问题时，变迁才被激发。

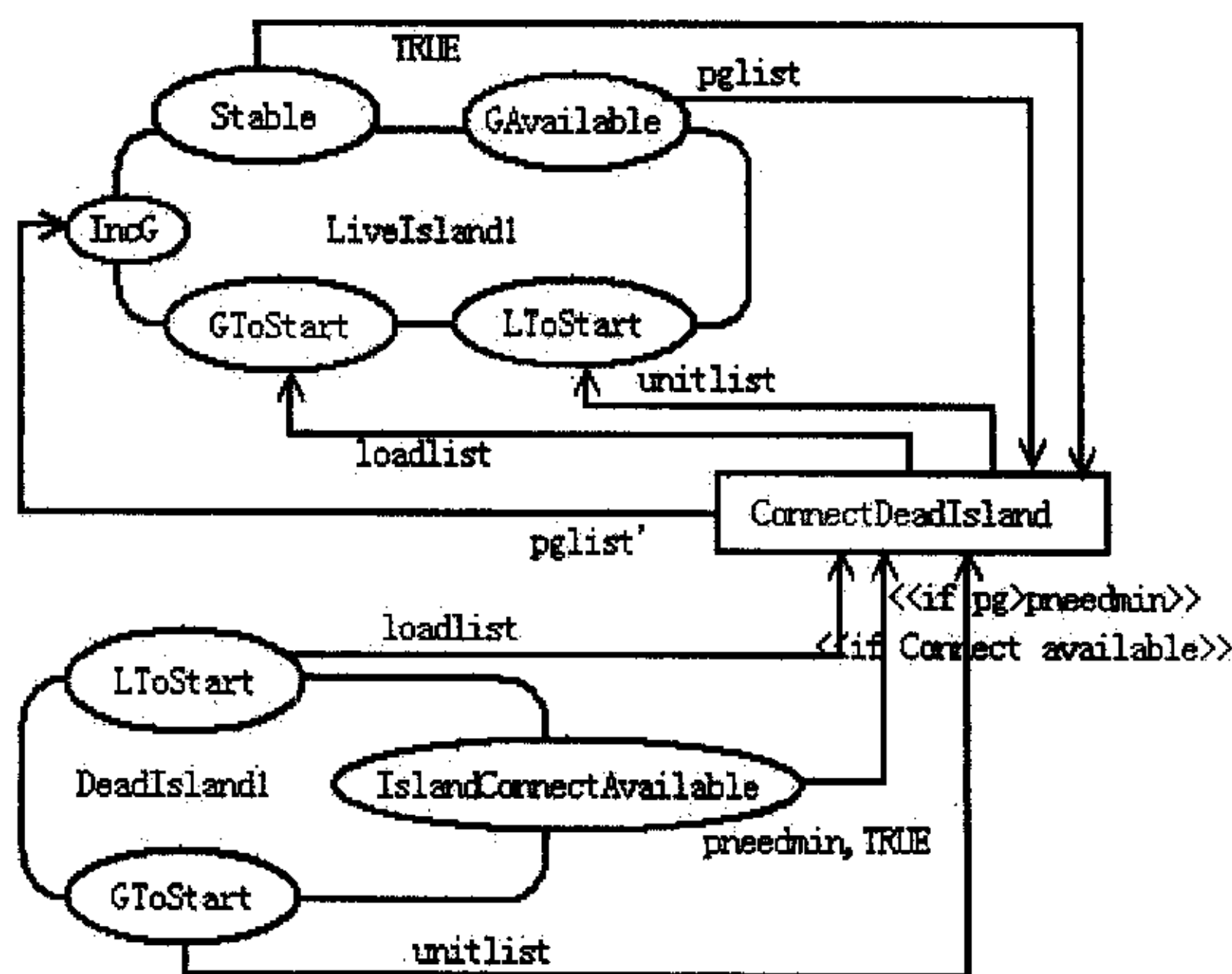


图 3-5 活岛和死岛对象的 MPRN: 活岛给死岛充电

fig. 3-5 MPRN of Live Island and Dead Island: Electrifying Dead Island from Live Island.

(4) 活岛间的消息传递关系图。

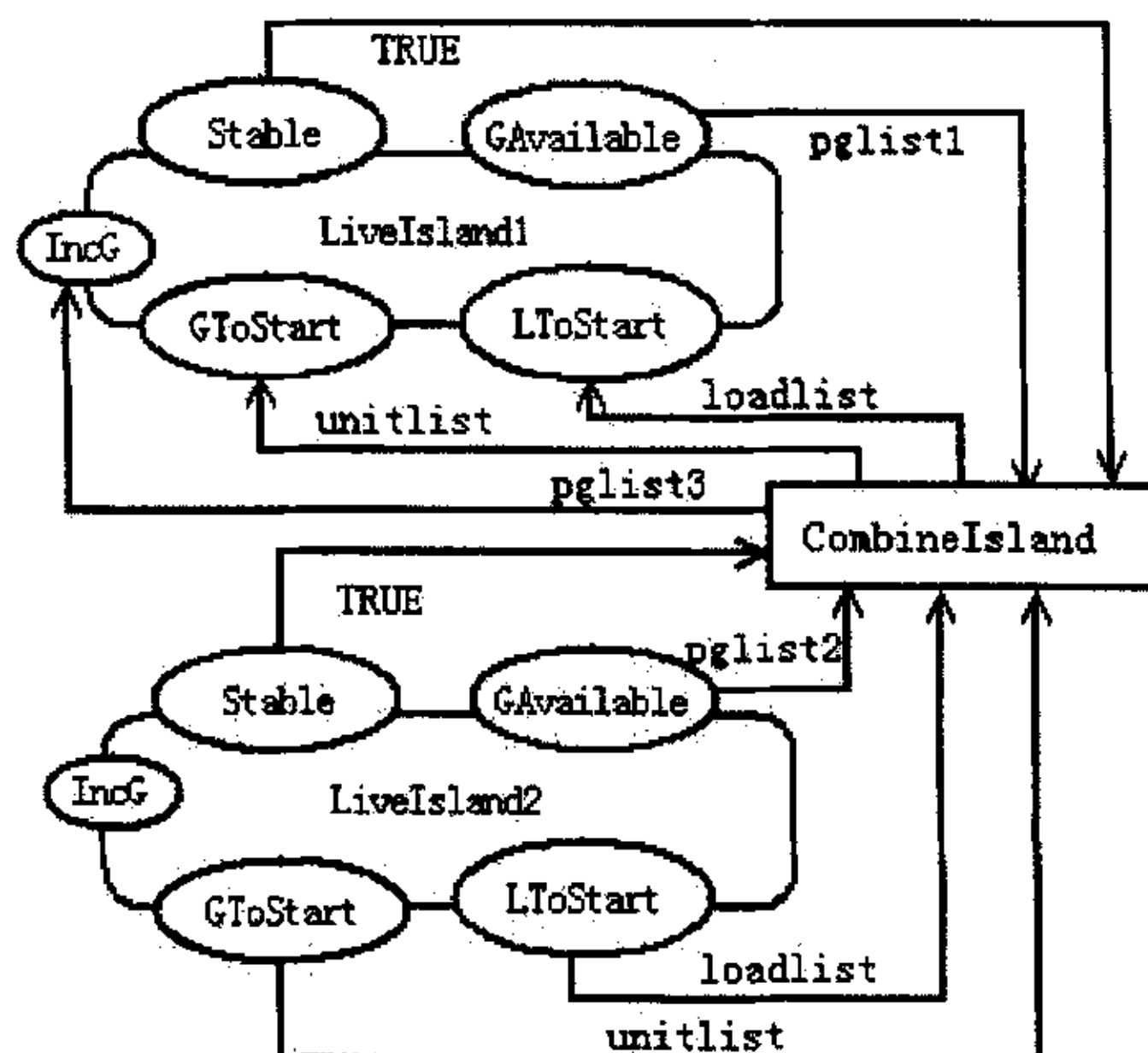


图 3-6 活岛对象间的 MPRN: 将两个活岛互联为一个活岛

fig. 3-6 MPRN of Live Island: Combining Two Live Islands into One

合并两个活岛的变迁为 CombineIsland。当两个岛的 Stable 都为 TRUE 时，可以触发该变迁，结果为取走第二个活岛的 GAvailable 的一个托肯和 GToStart、LToStart 中的所有托肯，将第二个岛的 GAvailable 的 pglist 加入第一个岛的 GAvailable 中，GToStart、LToStart 加入第一个岛的 GToStart、LToStart 中，第一个岛的母线可支援功率改变。

(5) 主系统给死岛充电的过程与活岛给死岛充电的过程相似。

3.3.4.3 冲突消解及死锁探测

冲突消解。当有多个变迁同时被满足而现有资源又无法触发所有变迁时，需要确定优先级顺序，以保证在资源有限的情形下系统正常工作。冲突可以从系统模型图中清楚看出。在下图中，事件 $t_1, t_2 \in T$ 在标识 M 有冲突。

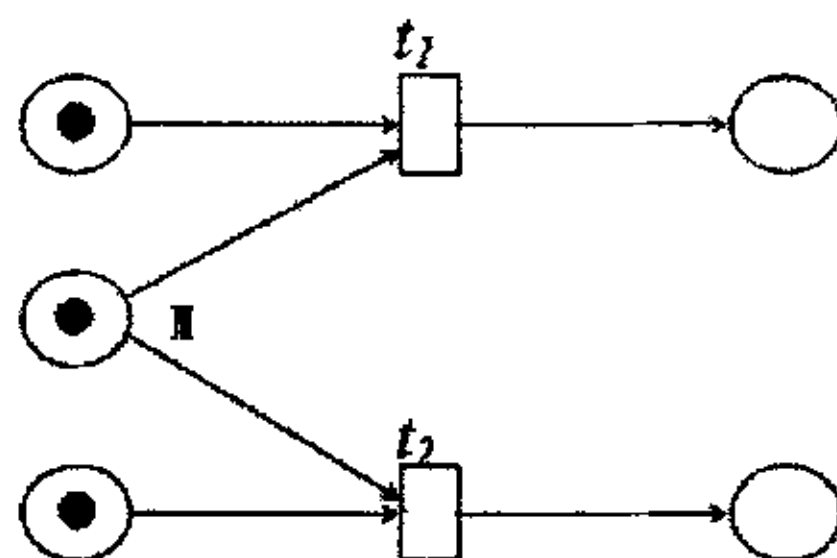


图 3-7 会产生冲突的变迁

fig 3-7 Transitions that may cause collision.

对活岛而言，GAvailable 库所存在上述类型的冲突，反映了实际系统在恢复进程中的多种操作选择。

第二种冲突来自于 Petri 网的色彩。在每一库所内部,存在多个托肯,均可以被激发时,需要确定托肯的继发顺序。仍以活岛为例,库所是 *list* 型的,都包含了冲突。而在对象间的消息传递关系图中可以看出,对象的各个实例间彼此是同构的,故对象间的激发也同样形成冲突。在 ConnectDeadIaland 变迁和 CombineIsland 变迁中都要进行冲突消解。

消解冲突的最有效方法是制定变迁触发和托肯激发的优先级。根据实际要求,一般消解冲突的原则应使系统总的停电损失电量最小,在不考虑每一步恢复操作所花费的时间时,退化为使系统总的停电损失功率最小。确定变迁触发优先级的工作实际就是对恢复过程进行寻优。当面临多种操作可供选择时,严格的做法是结合仿真分析软件确定最合理的操作。在仿真分析工具及资源受到限制的情形中,可以用经验做为启发知识指导操作策略的选择顺序。具体的,对每一冲突进行如下策略的消解:

i) GAvailable 库所中的冲突。意为此时岛内具有较为充足的可支援功率,在发电机并网、负荷并网、岛内网络互联重构增强稳定性、给死岛充电、连至主系统等操作中择优选取,这是冲突最复杂之处。按照 4.2.2 节中所述的故障恢复的一般原则,应优先恢复机组的出力,其次构建稳定的网络而后再给负荷恢复供电。因此制定 GAvailable 库所中各变迁的优先级顺序由高到低的次序为:发电机并网、给有待启动机组的死岛充电(此类变迁内部如仍有冲突,优先激发同一电压等级中的变迁,以减少操作过程中电压变化的次数)、连至主系统、重要负荷并网、给一般死岛充电、岛内网络互联重构、负荷并网;

ii) BlackAvailable 库所中的冲突。属于色彩取值间的冲突,意为此时有多台黑启动机组可供启动。此冲突不常见,因为通常一个岛内仅有一台黑启动机组。同样根据 4.2.2 节中所述原则,优先选择启动快的、容量大的机组;

iii) GToStart 库所和 LToStart 库所中的冲突。同样属于色彩取值间的冲突,意为有多台机组可以被启动、有多处负荷可以被恢复供电。负荷和发电机构成功率消耗和产生的平衡体,因此二者在故障恢复过程中应该是伴随进行的,这在恢复进程中是一个极为重要的协调过程。已有多篇文献专门论述如何合理选择故障恢复过程中的负荷与发电机的伴随恢复的^[134,137,141,163,164]。本文中采用了简化的处理顺序,在满足约束发电机或负荷启动后引起的频率波动小于 2.5%时^[134],恢复顺序的优先级由高到低依次为:启动容量大的发电机、调节性能好的发电机、启动重要负荷、容量大的负荷、其他发电机、其他负荷;

iv) CombineIsland 变迁中的冲突。该冲突发生在对象间,意为此时有多处联络线可以将活岛互联,根据构建稳定网络优先的原则,优先对电气距离近的岛进行互联,这样易于构建稳定网络;其次考虑互联那些电压等级高、在网络中连接元件个数多、容量大的岛,因为这样的岛是处于网络中的枢纽位置;

v) ConnectDeadIsland 变迁中的冲突。该冲突也是发生在对象间，意为此时有多个与活岛相邻的死岛可以被充电，同样，根据构建稳定网络优先的原则，在允许的条件下，优先给那些电压等级高、在网络中连接元件个数多、容量大的岛充电。

死锁探测与解锁。如果没有变迁能被满足，系统将停在该状态。如果这个状态不是恢复的目标状态，就成为了一个死锁。死锁分析需对每一种色彩进行，并且在带有守护函数的 Petri 网系统中总有死锁存在的可能。因此对本系统，仅能对特定的初始标识进行死锁探测。本文随后结合实例具体说明。

系统中出现锁死时，表明当前变迁序列是失败路径，应采取解锁策略重新激发变迁。最常用的解锁策略是记忆回溯策略。具体说，就是引入恢复过程记忆，如果探测到系统出现死锁，则向前回溯数次变迁，回溯可能会沿着几条并发的序列同时进行，直到出现冲突变迁，改为激发冲突中下一个优先级的变迁，这样重复进行，只要真实系统存在恢复方案，就总可以找到解决死锁问题的变迁序列。

由于回溯可能会沿着几条并发的序列同时进行，这时需要确定回溯路径的优先级。本系统中的锁死肯定出现于守护函数，处理方法如下：

(1) 优先处理网络中出现评估结果约束型守护函数锁死 ($\ll if\ Connect\ Available \gg$ 和 $\ll if\ Stable \neq TRUE \gg$ 两类) 的情形，因为这表示当前系统中岛的稳定程度不足，根据 4.2.2 节中所述的一般恢复原则，应优先提高网络的稳定程度。方法是沿着被锁死的变迁所连接的活岛向上回溯，找出冲突变迁，改为触发下一优先级的变迁；

(2) 当网络中没有评估结果约束型守护函数锁死出现时，锁死的变迁均为实值比较型守护函数锁死 (型如 $\ll pg \gg p_{needmin} \gg$)。这时，找出网络中所有实值比较型的守护函数锁死，记录所有的差值并选出最大者，沿着此变迁向上回溯，找到冲突变迁，改为触发下一优先级的变迁。

3.3.4.4 算法步骤

(1) 评估系统故障后的状态，根据系统解列情形确定活岛、死岛两类对象的实例，即托肯个数及取值；由此得到系统初始标识；

(2) 点火，激发变迁序列，直到没有变迁能被激发；

(3) 判断没有变迁能被激发的状态是锁死状态，还是最终的恢复目标。如果是前者，采用解锁策略重新激发，如果不能被解锁，则表示过程失败；如果是后者，则按照点火次序，记录下变迁序列，得到最终的恢复策略。恢复策略中可以包含并发操作；

(4) 恢复 Petri 网至初始标识，再次点火，不同于 (2) 的是，在产生冲突的库所中，不再激发优先级最高的变迁，而是激发下一优先级的变迁，重新产生变迁序列，直至结束，就生成了一种不同于前面的恢复方案；

(5) 重复 (4) 的过程，生成指定个数的恢复方案，或遍历尽所有的变迁序列，

找到所有的恢复方案；

(6) 对上面生成的恢复方案进行校验，滤掉不符合约束条件的伪方案；

(7) 对剩余方案进行指标评估，找出最好的恢复方案。

(6) 和 (7) 两步与所生成方案时所采用的推理机形式无关，因此本章未进行详细论述。

本文给出的对象及系统模型没有考虑到恢复操作所需要花费的时间因素，这可以通过给 Petri 网变迁赋予时标得到的变迁赋时 Petri 网实现，并将相应的冲突消解改为基于电量而非功率进行的即可。扩展工作不影响模型复杂度和有效性。

3.3.5 算法性能分析

基于对象 Petri 网的故障恢复算法具有高于一般专家系统的求解速度。恢复过程中，在生成每一个变迁的搜索方案时，由于只在目标空间搜索，而不是在状态空间搜索，因而变迁激发过程具有和规划系统相同的求解速度^[160]；由于在搜索过程中考虑了并发，因而相当于所设计的规划系统中考虑了采取偏序规划策略^[88]；冲突消解和死锁回溯时，相当于根据事先制订的规则消解，因此是等同于带有启发式的深度优先的求解速度的；但是，考虑 Petri 网本身能够模拟系统中出现的并发现象，因此在多线程机制的仿真系统上，基于 Petri 网进行故障恢复求解的系统具有介于偏序规划系统和深度优先搜索的专家系统之间的求解速度。

同专家系统方法相比，利用基于对象 Petri 网的方法解决故障恢复问题具有以下优势：

- (1) Petri 网的图形化描述使复杂的恢复过程的描述更加直观；
- (2) Petri 网具有同规划系统相当的求解效率，高于产生式专家系统；
- (3) 故障恢复问题通常表现出并发特性，Petri 网具有处理并发问题的能力；
- (4) Petri 网可以方便的分析系统在特定初始条件下的可达性、安全性、冲突等问题，这些反映着实际恢复过程所遇到的各种资源限制；
- (5) 对大系统，建模和求解的复杂度被大大降低。

3.4 算例分析

以某地区实际系统为例（图 3-8），说明基于 OPN 技术的故障恢复过程。

找到所有的恢复方案；

(6) 对上面生成的恢复方案进行校验，滤掉不符合约束条件的伪方案；

(7) 对剩余方案进行指标评估，找出最好的恢复方案。

(6) 和 (7) 两步与所生成方案时所采用的推理机形式无关，因此本章未进行详细论述。

本文给出的对象及系统模型没有考虑到恢复操作所需要花费的时间因素，这可以通过给 Petri 网变迁赋予时标得到的变迁赋时 Petri 网实现，并将相应的冲突消解改为基于电量而非功率进行的即可。扩展工作不影响模型复杂度和有效性。

3.3.5 算法性能分析

基于对象 Petri 网的故障恢复算法具有高于一般专家系统的求解速度。恢复过程中，在生成每一个变迁的搜索方案时，由于只在目标空间搜索，而不是在状态空间搜索，因而变迁激发过程具有和规划系统相同的求解速度^[160]；由于在搜索过程中考虑了并发，因而相当于所设计的规划系统中考虑了采取偏序规划策略^[88]；冲突消解和死锁回溯时，相当于根据事先制订的规则消解，因此是等同于带有启发式的深度优先的求解速度的；但是，考虑 Petri 网本身能够模拟系统中出现的并发现象，因此在多线程机制的仿真系统上，基于 Petri 网进行故障恢复求解的系统具有介于偏序规划系统和深度优先搜索的专家系统之间的求解速度。

同专家系统方法相比，利用基于对象 Petri 网的方法解决故障恢复问题具有以下优势：

- (1) Petri 网的图形化描述使复杂的恢复过程的描述更加直观；
- (2) Petri 网具有同规划系统相当的求解效率，高于产生式专家系统；
- (3) 故障恢复问题通常表现出并发特性，Petri 网具有处理并发问题的能力；
- (4) Petri 网可以方便的分析系统在特定初始条件下的可达性、安全性、冲突等问题，这些反映着实际恢复过程所遇到的各种资源限制；
- (5) 对大系统，建模和求解的复杂度被大大降低。

3.4 算例分析

以某地区实际系统为例（图 3-8），说明基于 OPN 技术的故障恢复过程。

找到所有的恢复方案；

(6) 对上面生成的恢复方案进行校验，滤掉不符合约束条件的伪方案；

(7) 对剩余方案进行指标评估，找出最好的恢复方案。

(6) 和 (7) 两步与所生成方案时所采用的推理机形式无关，因此本章未进行详细论述。

本文给出的对象及系统模型没有考虑到恢复操作所需要花费的时间因素，这可以通过给 Petri 网变迁赋予时标得到的变迁赋时 Petri 网实现，并将相应的冲突消解改为基于电量而非功率进行的即可。扩展工作不影响模型复杂度和有效性。

3.3.5 算法性能分析

基于对象 Petri 网的故障恢复算法具有高于一般专家系统的求解速度。恢复过程中，在生成每一个变迁的搜索方案时，由于只在目标空间搜索，而不是在状态空间搜索，因而变迁激发过程具有和规划系统相同的求解速度^[160]；由于在搜索过程中考虑了并发，因而相当于所设计的规划系统中考虑了采取偏序规划策略^[88]；冲突消解和死锁回溯时，相当于根据事先制订的规则消解，因此是等同于带有启发式的深度优先的求解速度的；但是，考虑 Petri 网本身能够模拟系统中出现的并发现象，因此在多线程机制的仿真系统上，基于 Petri 网进行故障恢复求解的系统具有介于偏序规划系统和深度优先搜索的专家系统之间的求解速度。

同专家系统方法相比，利用基于对象 Petri 网的方法解决故障恢复问题具有以下优势：

- (1) Petri 网的图形化描述使复杂的恢复过程的描述更加直观；
- (2) Petri 网具有同规划系统相当的求解效率，高于产生式专家系统；
- (3) 故障恢复问题通常表现出并发特性，Petri 网具有处理并发问题的能力；
- (4) Petri 网可以方便的分析系统在特定初始条件下的可达性、安全性、冲突等问题，这些反映着实际恢复过程所遇到的各种资源限制；
- (5) 对大系统，建模和求解的复杂度被大大降低。

3.4 算例分析

以某地区实际系统为例（图 3-8），说明基于 OPN 技术的故障恢复过程。

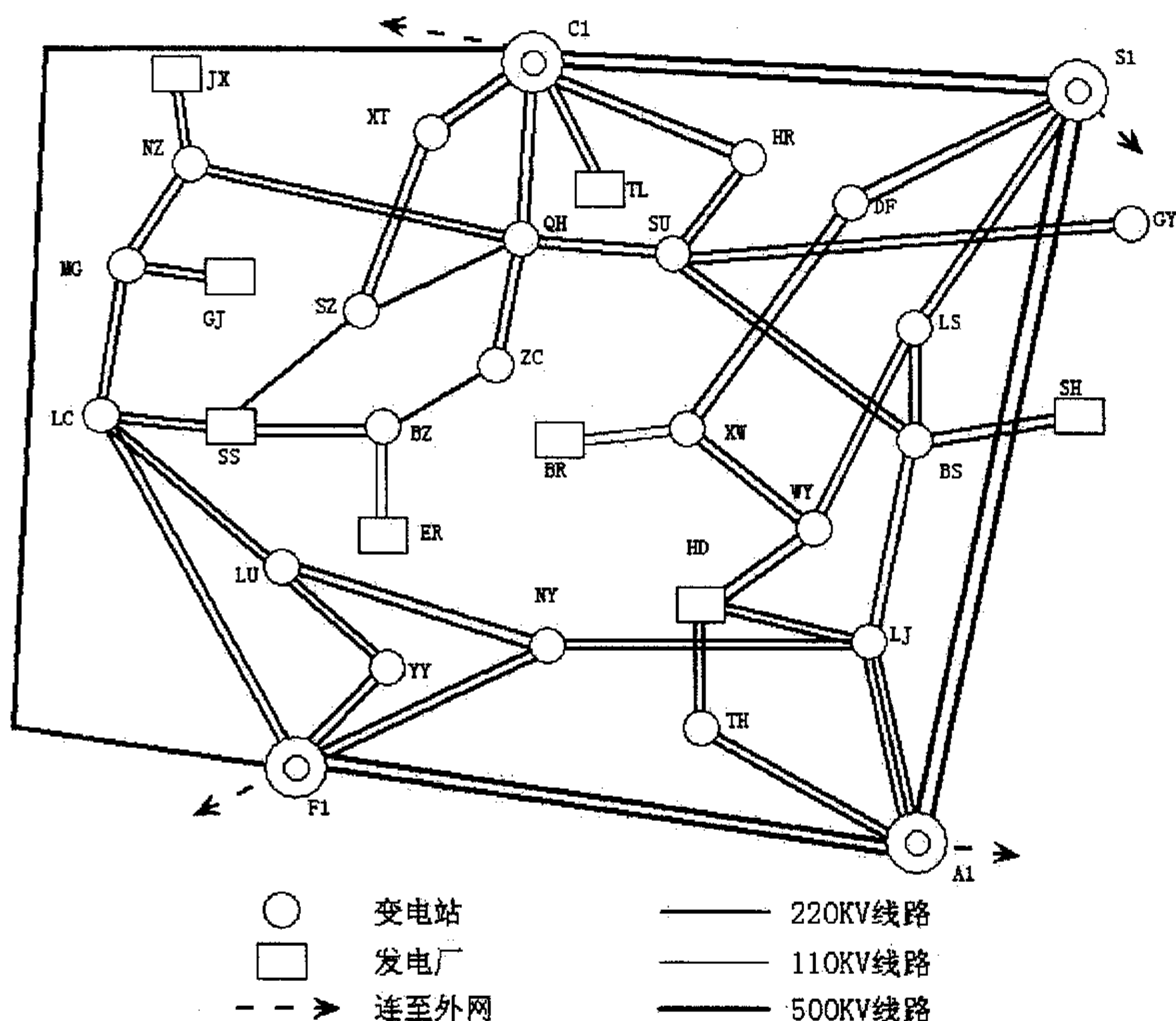


图 3-8 算例系统一次接线图

fig. 3-8 Diagram of an Example Power System

图中，TL 为黑启动机组，GJ、SH、SS 为具有快速启动能力的火电机组，应尽快启动；ZC、BZ、LC、SU、NY 为几处重要的负荷，应优先恢复。设系统的初始条件为全停。并假设该系统为一个独立的系统，不和外部主系统相连，故恢复的目标为将所有厂站重新连成一个稳定的系统，并恢复所有负荷的供电。

为简化起见，假设系统中的故障已经完全清除，所有的元件（开关、线路、发电机等）都是可用的，并且所有开关均已断开，系统中的元件都处于孤立状态。所有的二次设备均已作好重新联网的准备工作。

根据系统中黑启动机组与快速启动机组的分布, 可以确定并行式的恢复策略, 从而以最快的速度重建健康系统。

(1) 首先根据系统初始状态确定对象 Petri 网的初始标识。

初始对象。最初所有的开关都是打开的，故所有节点均为独立的岛。以母线或发电机名称为索引记：

i) 活岛: TL。其初始标识为: BlackAvailable 库所的托肯值为 1'[TG], 其余均为空。

ii) 死岛：其余所有均为死岛。死岛的初始标识为：以 C1 岛为例：LToStart : 1'[L_C1]；IslandConnectAvailable : 1'[True,pneedmin_C1]；其余为空。其中 pneedmin_C1 为该岛充电所需的最小功率值。其他的死岛的托肯取值类似。可见，实际系统的节点数只影响对象的托肯的数量，而不影响对象本身结构及对象间的消息传递。这是常规 Petri 网所无法实现的。

(2) 点火。初始状态下，有两类变迁能被满足：一是所有活岛的 StartBG 变迁能被满足，并由守护函数检测变迁能否被满足激发；二是所有带有急需启动的发电机组的死岛的 ExpandIsland 变迁能被满足。

i) 以活岛 TL 为例，守护函数监测到活岛母线 TL 和该活岛中的黑启动发电机 TL_G 间有开关联系，能够激活变迁。变迁结果使 TL 岛的 Gavailable 库所获得一个托肯，同时 pg 变化至 TL_G 的有功出力。

ii) 以 SS 所在的死岛为例，该死岛的 ExpandIsland 变迁被满足，向外扩展三层拓扑连接生成一个虚拟岛 SS'，将所有被覆盖的节点记下，以增加该死岛的“可见性”。对 SS 岛而言，扩展后该岛包含如下节点{SS, BZ, ZC, ER, QH, SZ, C1, LC, LU, NY, YY, F1, A1}，可见 C1 岛已经被包含在内了，其余岛类似。

(3) 开始激发变迁序列。经过变迁 ConnectDeadIsland(TL, C1)，死岛 C1 的托肯按照 MPRN 图中的形式转移给活岛 TL：活岛 TL 的 Gavailable 的 pg 变为 $pg - p_{needmin_C1}$ ，并将 C1 岛上的 LToStart 加到 TL 岛的 LToStart 上，使 TL 岛的 LToStart 托肯数量增加 1 个，loadlist 添加一个元素。该变迁触发完成后，已经有多个变迁能被满足：TL 岛内部的 ConnectDeadIsland(C1, TG)、ConnectDeadIsland(C1,HR')和 ConnectDeadIsland(C1,SS')。如果 Gavailable 的 pg 不够触发两个变迁（托肯数量是一定能够满足同时触发两个变迁的，因为联系 Gavailable 和这两个变迁间是互补环，不消耗托肯数量），则根据冲突消解规则，优先触发后者，守护函数工作原理同前。触发该变迁即包含了一系列子变迁：在虚拟岛 SS'中找到一条从 C1 到 SS 的最短通路，沿着该通路触发 ConnectDeadIsland 变迁，直到 SS。当存在的连通路不惟一时，优先触发同一电压等级的变迁，本例中通路为 C1-QH-SZ-SS。变迁 ConnectDeadIsland(C1,QH)触发的结果使得死岛 QH 的托肯转移给活岛 C1。如此点火将继续下去，直到最终状态或出现死锁。

点火开始后，在 TL 岛的 ConnectDeadIsland(C1, TG)变迁被激发的同时，如果 pg 足够触发 ConnectDeadIsland(C1,HR')变迁，则以此做为起点，也有变迁能够被满足激发。这体现了恢复过程的并发特性。在 ConnectDeadIsland(C1,HR')变迁被触发后，将沿着独立的路径 HR-SU-BS-SH 去启动发电机组 SH。

变迁沿着数条路径同时激发，代表着恢复进程在几个子系统中同步进行。托肯数量随着死岛数目的不断减少、活岛的不断合并、待启动的发电机和待恢复的负荷数目的不断减少而不断减少，意味着朝向恢复目标进展的待处理任务不断减少，直

到系统转化至目标状态或出现死锁。

(4) 死锁的解决。本文的算例系统中可能出现死锁。导致死锁的因素不是对象结构，而是守护函数。因为分析本系统的各个网图可以发现，死岛库所、GToStart 和 LToStart 库所的托肯不断减少，GAvailable 库所和与之相联系的变迁均被设计成互补环，因而不考虑守护函数作用时的系统肯定会停止于恢复的目标状态——GToStart 和 LToStart 库所中无托肯，意味着所有死岛、所有发电机和负荷都已恢复。守护函数引起的死锁对应着实际系统的电源支持能力再无法恢复更多的网络元件，这时需要重新生成恢复计划。例如，如果在第二次变迁激发时 ConnectDeadIsland 的守护函数 $pg > p_{needmin}$ 未被满足，StartL 的守护函数 $pg > load.pl$ 也未被满足，则出现了死锁。这对应于系统中的现有功率无法给相邻停电元件提供电源支持，恢复失败。

对死锁问题本文采用回溯的方法解决。记忆恢复过程所触发的点火路径，如果探测到系统出现死锁，则沿着点火路径向前回溯数次变迁，直到出现冲突变迁，改为激发冲突中下一个优先级的变迁。这样重复进行，只要真实系统存在恢复方案，就总可以找到解决死锁问题的变迁序列。

(5) 到达目标状态后，由最终的目标状态向前回溯至初始标识，得到的变迁序列即为对应的最终恢复方案。在本算例系统中，除上述几处重要负荷外，其余变电站处的负荷大多数需要靠来自于外网的电源供电，因此，恢复方案仅搜索到将几处重要负荷恢复供电即可认为是达到目标状态。

(6) 重置 Petri 网的初始标识，改为激发下一优先级中的变迁，以生成更多的恢复方案。

(7) 对生成的多个恢复方案进行校验和评估，选出最优的恢复方案。

在整个恢复过程中，托肯的传递对应着明确的物理意义：负荷、发电机和死岛被依次接入系统，恢复运行。对本算例系统，取前 5 种恢复方案，经过校验和评估，得出的最优恢复方案的操作过程如下，其中的“||”表示并发操作过程，“->”表示相继操作过程。

- 1) StartBG(TL) || ExpandIsland(::DeadIsland) (::表示对类的当前所有对象的遍历)；
- 2) ConnectDeadIsland(TL,C1);
- 3) ConnectDeadIsland (TL ,SS') || ConnectDeadIsland (TL ,SH')
(ConnectDeadIsland (TL ,SS')又分为 ConnectDeadIsland (C1 ,QH)-> ConnectDeadIsland (QH ,SZ)-> ConnectDeadIsland (SZ ,SS)，连接虚拟岛 GJ'的过程类似)；
- 4) StartG(SS) || StartG(SH);
- 5) ConnectDeadIsland (TL ,GJ');

- 6) StartG(GJ);
- 7) ConnectDeadIsland (SS ,BZ) || ConnectDeadIsland (BS ,LJ);
- 8) ConnectDeadIsland (BZ ,ER) || ConnectDeadIsland (LJ ,HD);
- 9) StartG(ER) || StartL(BZ) || StartL(ZC) || StartL(SU) || StartG(HD) || StartL(LJ);
- 10) ConnectDeadIsland (MG ,LC);
- 11) StartL(LC);
- 12) ConnectDeadIsland (LC ,LU);
- 13) ConnectDeadIsland (LU ,NY);
- 14) StartL(NY).

3.5 本章总结

将对象 Petri 网技术应用于电力系统故障恢复,得到了一种结构清晰、求解高效的故障恢复计划的生成算法。方法的优点表现在如下几个方面:

(1) Petri 网与专家系统等基于逻辑和知识的系统相比,提供了一种更好的问题求解风范,图形建模使系统结构清晰,推理过程直观,性能分析方便,比传统的专家系统易于维护和理解。恢复进程表现为托肯传递:死岛的托肯不断减少,表示系统中的死岛数目不断减少;活岛的托肯数量的减少,表示子系统被逐步合并或被连至主系统;恢复过程中的资源限制表现为变迁中的冲突,通过冲突消解策略和回溯机制保证在资源有限的条件下得到系统的解;

(2) 具有描述恢复过程中的并发操作的能力。在点火以后的 Petri 网演化过程中,被研究系统中的两个有效事件如果互不影响,则可能独立地发生;事件可以根据要求进行同步化;不同的对象内部能够互不影响的执行并发过程;

(3) 对大系统建模,降低了模型复杂度。模型中仅以托肯数量的增加表征系统对象和状态个数的增加,有效解决了普通 Petri 网建模中遇到的“组合爆炸”问题;并且对象内部能够执行并发过程,从而不影响算法效率;

(4) 层次性好,扩展性好。能在任意关心的层次分析恢复过程,在接口不发生变化的前提下能够扩展分析的层次,而不影响已有系统的模型、代码和工作过程,比如,引入线路接入时的过电压约束,只需在对象内部引入相应的库所和变迁;

(5) 变迁触发过程的求解效率等同于偏序规划系统,高于普通规划系统;回溯过程的求解效率等同于带有启发知识的深度优先搜索系统;因此算法整体的效率高于普通的深度优先搜索系统,低于偏序规划系统。

Petri 网是一种很有潜力的系统化建模与分析工具,随着其理论的逐步完善将得以更广泛、有效的实际应用。在解决故障恢复问题中,进一步研究需要增加如下工

- 6) StartG(GJ);
- 7) ConnectDeadIsland (SS ,BZ) || ConnectDeadIsland (BS ,LJ);
- 8) ConnectDeadIsland (BZ ,ER) || ConnectDeadIsland (LJ ,HD);
- 9) StartG(ER) || StartL(BZ) || StartL(ZC) || StartL(SU) || StartG(HD) || StartL(LJ);
- 10) ConnectDeadIsland (MG ,LC);
- 11) StartL(LC);
- 12) ConnectDeadIsland (LC ,LU);
- 13) ConnectDeadIsland (LU ,NY);
- 14) StartL(NY).

3.5 本章总结

将对象 Petri 网技术应用于电力系统故障恢复,得到了一种结构清晰、求解高效的故障恢复计划的生成算法。方法的优点表现在如下几个方面:

(1) Petri 网与专家系统等基于逻辑和知识的系统相比,提供了一种更好的问题求解风范,图形建模使系统结构清晰,推理过程直观,性能分析方便,比传统的专家系统易于维护和理解。恢复进程表现为托肯传递:死岛的托肯不断减少,表示系统中的死岛数目不断减少;活岛的托肯数量的减少,表示子系统被逐步合并或被连至主系统;恢复过程中的资源限制表现为变迁中的冲突,通过冲突消解策略和回溯机制保证在资源有限的条件下得到系统的解;

(2) 具有描述恢复过程中的并发操作的能力。在点火以后的 Petri 网演化过程中,被研究系统中的两个有效事件如果互不影响,则可能独立地发生;事件可以根据要求进行同步化;不同的对象内部能够互不影响的执行并发过程;

(3) 对大系统建模,降低了模型复杂度。模型中仅以托肯数量的增加表征系统对象和状态个数的增加,有效解决了普通 Petri 网建模中遇到的“组合爆炸”问题;并且对象内部能够执行并发过程,从而不影响算法效率;

(4) 层次性好,扩展性好。能在任意关心的层次分析恢复过程,在接口不发生变化的前提下能够扩展分析的层次,而不影响已有系统的模型、代码和工作过程,比如,引入线路接入时的过电压约束,只需在对象内部引入相应的库所和变迁;

(5) 变迁触发过程的求解效率等同于偏序规划系统,高于普通规划系统;回溯过程的求解效率等同于带有启发知识的深度优先搜索系统;因此算法整体的效率高于普通的深度优先搜索系统,低于偏序规划系统。

Petri 网是一种很有潜力的系统化建模与分析工具,随着其理论的逐步完善将得以更广泛、有效的实际应用。在解决故障恢复问题中,进一步研究需要增加如下工

作：

(1) 引入“操作失败”事件的建模。操作失败通常需要重新考虑恢复计划，在现有算法求解过程中，如果出现操作失败情形，则必须从失败处开始重新生成恢复计划；

(2) 上述冲突消解法相当于带启发信息的深度优先搜索，求解效率偏低，占用内存量偏大。由于电力系统故障恢复过程中涉及到两种指标：操作代价和损失的负荷，最好的恢复方案应该是操作代价最小、损失的负荷最小的方案。因此在对网络和分析手段充足时，可采用 A* 搜索法改进现有冲突消解策略，A* 搜索可以刻划出恢复过程中更深入层次上的专家知识。

第四章 基于机器学习和信息融合的电力系统暂态稳定评估

4.1 基于机器学习的电力系统暂态稳定评估问题的提出

暂态稳定评估 (TSA, Transient Stability Assessment) 是实现电力系统在线决策的重要环节, 尤其对于紧急控制而言, 既不偏于保守也不过于乐观的理想紧急控制措施必须以实时甚至超实时的暂态稳定分析作为制定控制策略的基础。暂态稳定过程是电网所有稳定过程中最严峻、最快速的过程, 在现有计算资源和计算速度的条件下, 利用常规的计算资源和传统的基于模型的暂态稳定算法, 尚无法达到暂稳分析的实时计算要求。目前紧急控制还只能以“离线计算, 在线匹配”或“在线计算, 实时匹配”的方式进行。要做到暂态稳定决策的实时制定有两种途径: 一是使用计算能力更强大的硬件平台 (如 PC cluster), 结合并行计算技术, 实现实时甚至超实时的仿真; 二是研究不同于传统基于模型计算的新的快速暂态稳定分析算法, 将计算时间控制在要求范围内。

测量手段的丰富为研究第二条途径提供了良好的基础, 广域测量系统(WAMS, Wide Area Measurement System)使得在线利用包括相角在内的综合信息进行暂态稳定分析成为可能, 这些新的反映系统全局状态的测量值的使用一方面将显著减小由于计算模型所带来的误差, 另一方面可以省去以往为得到相角数据而花费在耗时较长的数值积分计算上的时间, 从而大大提高暂稳分析的计算速度。利用 WAMS 所提供的相角信息分析暂态稳定有两种途径: 一是传统的基于动力学微分方程模型的分析, 二是利用人工智能方法, 进行非模型的暂态稳定分析。

传统的基于模型的分析方法在在线应用场合受到一定的限制, 测量到的相角信息尚无法被有效利用, 大幅度提高暂态稳定计算的速度。然而利用人工智能方法进行非模型的电力系统暂态稳定评估则能以多种形式利用相角数据和其他量测数据, 具有在线计算速度快的强大优势, 与传统暂稳分析方法构成良好的互补^[165-167]。若不计通信所需时间, 单就计算而言, 采用神经网络或支持向量机技术进行暂稳分析, 可以很容易达到超实时计算的时间指标, 表现出诱人的研究前景。

研究基于人工智能方法的暂态稳定计算的另一个重要原因是, 近年来监测系统在线运行积累了大量的数据, 加上电力调度部门制定运行方式所做的各种运行方式下的预想事故分析结果, 其中包含了极为丰富的电网动态特征信息, 对这些数据可以进行有针对性的数据挖掘、机器学习, 从大量的数据特征中找到进行暂态稳定评估的有效方法和推理模型。

以支持向量机(SVM, Support Vector Machine)^[168]为代表的机器学习方法近年来

第四章 基于机器学习和信息融合的电力系统暂态稳定评估

4.1 基于机器学习的电力系统暂态稳定评估问题的提出

暂态稳定评估 (TSA, Transient Stability Assessment) 是实现电力系统在线决策的重要环节, 尤其对于紧急控制而言, 既不偏于保守也不过于乐观的理想紧急控制措施必须以实时甚至超实时的暂态稳定分析作为制定控制策略的基础。暂态稳定过程是电网所有稳定过程中最严峻、最快速的过程, 在现有计算资源和计算速度的条件下, 利用常规的计算资源和传统的基于模型的暂态稳定算法, 尚无法达到暂稳分析的实时计算要求。目前紧急控制还只能以“离线计算, 在线匹配”或“在线计算, 实时匹配”的方式进行。要做到暂态稳定决策的实时制定有两种途径: 一是使用计算能力更强大的硬件平台 (如 PC cluster), 结合并行计算技术, 实现实时甚至超实时的仿真; 二是研究不同于传统基于模型计算的新的快速暂态稳定分析算法, 将计算时间控制在要求范围内。

测量手段的丰富为研究第二条途径提供了良好的基础, 广域测量系统(WAMS, Wide Area Measurement System)使得在线利用包括相角在内的综合信息进行暂态稳定分析成为可能, 这些新的反映系统全局状态的测量值的使用一方面将显著减小由于计算模型所带来的误差, 另一方面可以省去以往为得到相角数据而花费在耗时较长的数值积分计算上的时间, 从而大大提高暂稳分析的计算速度。利用 WAMS 所提供的相角信息分析暂态稳定有两种途径: 一是传统的基于动力学微分方程模型的分析, 二是利用人工智能方法, 进行非模型的暂态稳定分析。

传统的基于模型的分析方法在在线应用场合受到一定的限制, 测量到的相角信息尚无法被有效利用, 大幅度提高暂态稳定计算的速度。然而利用人工智能方法进行非模型的电力系统暂态稳定评估则能以多种形式利用相角数据和其他量测数据, 具有在线计算速度快的强大优势, 与传统暂稳分析方法构成良好的互补^[165-167]。若不计通信所需时间, 单就计算而言, 采用神经网络或支持向量机技术进行暂稳分析, 可以很容易达到超实时计算的时间指标, 表现出诱人的研究前景。

研究基于人工智能方法的暂态稳定计算的另一个重要原因是, 近年来监测系统在线运行积累了大量的数据, 加上电力调度部门制定运行方式所做的各种运行方式下的预想事故分析结果, 其中包含了极为丰富的电网动态特征信息, 对这些数据可以进行有针对性的数据挖掘、机器学习, 从大量的数据特征中找到进行暂态稳定评估的有效方法和推理模型。

以支持向量机(SVM, Support Vector Machine)^[168]为代表的机器学习方法近年来

得到飞速发展并在电力系统中取得广泛应用^[169-173]，在暂态稳定评估中也表现了很好的应用前景。它比神经网络等模型拟和算法具有一系列优点^[174]，如从理论上避免了局部极小、过学习等现象，能有效针对小样本进行学习，并能保证推广能力的界。但单纯的 SVM 也有其缺点。就应用于模式分类的 SVM 而言，SVM 最大的应用障碍在于自身无法确定最合理的输入组合^[175]。尤其是对于像暂稳分析这样高维数的工程问题，如果输入特征选择过少，则无法全面给出影响结果的特征量；如果选择过多，又会引入噪声和干扰因素，同样会降低学习效果。理论研究表明，能表征问题的最少特征量是最优的。

针对基于 SVM 的暂态稳定分析，为解决输入特征选择困难的问题，本章提出了一种基于信息融合^[176]的组合 SVM 模型。首先构造了具有不同输入特征的 4 组子分类器，在此基础上，对子分类器的结果在输出空间再进行信息融合，以提高分类准确率。文中从不同角度启发式的构造了 4 组不同的输入特征，这是未经过详细论证的 4 组输入特征，由他们构成了 4 组弱分类器。以这 4 组弱分类器为子分类器，再构造一个融合 SVM 对几种子分类器的结果以回归方式进行融合，作为最终判别结果。仿真表明，组合 SVM 的引入很好的解决了输入特征选择困难的问题，显著提高了最终判别结果的准确率。

4.2 统计学习与支持向量机方法简介

4.2.1 学习问题的一般描述

从样本进行学习的一般过程可以表示为^[168]：

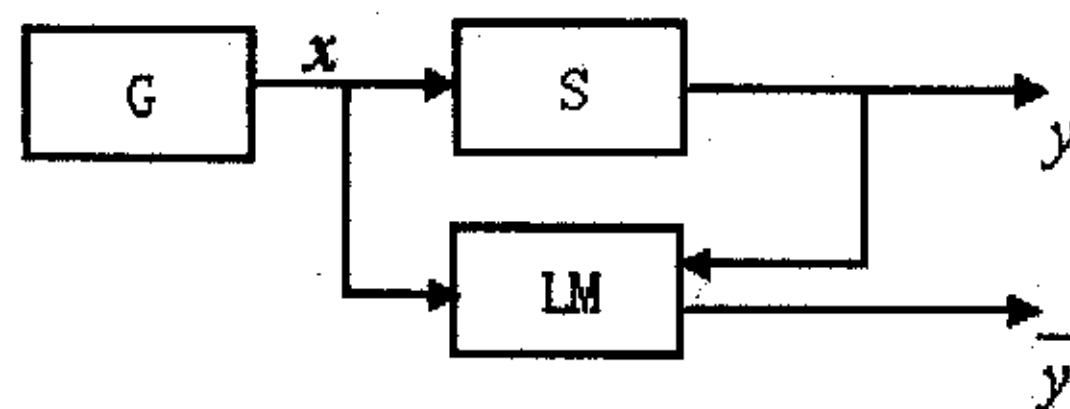


图 4-1 学习问题的一般模型

Fig.4-1 General modal of learning problem

学习机器 LM 观察来自产生器 G 的 x 和来自训练器 S 的 y 所构成的数据对 (x, y) (训练集)，从给定的函数集 $f(x, \alpha)$ ， $\alpha \in \Lambda$ 中选择出能最好逼近训练器响应的函数，这种选择是基于训练集的。训练集是根据联合分布 $F(x, y) = F(x)F(y|x)$ 抽取出的 l 个独立同分布观测 $(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)$ 组成。

在训练之后，学习机器必须对任意输入 x 给出输出 $\bar{y}$ 。学习的目标是能够给出尽可能接近训练器响应 y 的输出 $\bar{y}$ 。

在给定输入下，学习机器给出的响应 $\bar{y}$ 与真实训练器响应输出 y 间的差值可以

得到飞速发展并在电力系统中取得广泛应用^[169-173]，在暂态稳定评估中也表现了很好的应用前景。它比神经网络等模型拟和算法具有一系列优点^[174]，如从理论上避免了局部极小、过学习等现象，能有效针对小样本进行学习，并能保证推广能力的界。但单纯的 SVM 也有其缺点。就应用于模式分类的 SVM 而言，SVM 最大的应用障碍在于自身无法确定最合理的输入组合^[175]。尤其是对于像暂稳分析这样高维数的工程问题，如果输入特征选择过少，则无法全面给出影响结果的特征量；如果选择过多，又会引入噪声和干扰因素，同样会降低学习效果。理论研究表明，能表征问题的最少特征量是最优的。

针对基于 SVM 的暂态稳定分析，为解决输入特征选择困难的问题，本章提出了一种基于信息融合^[176]的组合 SVM 模型。首先构造了具有不同输入特征的 4 组子分类器，在此基础上，对子分类器的结果在输出空间再进行信息融合，以提高分类准确率。文中从不同角度启发式的构造了 4 组不同的输入特征，这是未经过详细论证的 4 组输入特征，由他们构成了 4 组弱分类器。以这 4 组弱分类器为子分类器，再构造一个融合 SVM 对几种子分类器的结果以回归方式进行融合，作为最终判别结果。仿真表明，组合 SVM 的引入很好的解决了输入特征选择困难的问题，显著提高了最终判别结果的准确率。

4.2 统计学习与支持向量机方法简介

4.2.1 学习问题的一般描述

从样本进行学习的一般过程可以表示为^[168]：

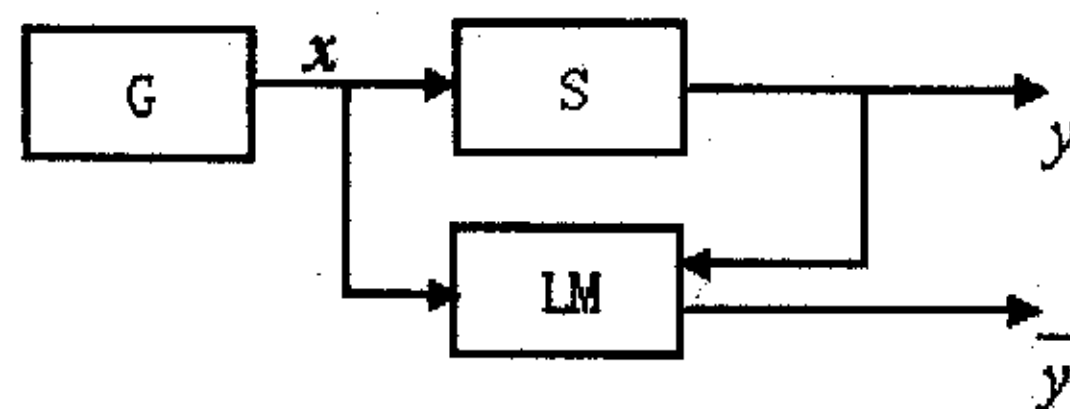


图 4-1 学习问题的一般模型

Fig.4-1 General modal of learning problem

学习机器 LM 观察来自产生器 G 的 x 和来自训练器 S 的 y 所构成的数据对 (x, y) (训练集)，从给定的函数集 $f(x, \alpha)$ ， $\alpha \in \Lambda$ 中选择出能最好逼近训练器响应的函数，这种选择是基于训练集的。训练集是根据联合分布 $F(x, y) = F(x)F(y|x)$ 抽取出的 l 个独立同分布观测 $(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)$ 组成。

在训练之后，学习机器必须对任意输入 x 给出输出 $\bar{y}$ 。学习的目标是能够给出尽可能接近训练器响应 y 的输出 $\bar{y}$ 。

在给定输入下，学习机器给出的响应 $\bar{y}$ 与真实训练器响应输出 y 间的差值可以

得到飞速发展并在电力系统中取得广泛应用^[169-173]，在暂态稳定评估中也表现了很好的应用前景。它比神经网络等模型拟和算法具有一系列优点^[174]，如从理论上避免了局部极小、过学习等现象，能有效针对小样本进行学习，并能保证推广能力的界。但单纯的 SVM 也有其缺点。就应用于模式分类的 SVM 而言，SVM 最大的应用障碍在于自身无法确定最合理的输入组合^[175]。尤其是对于像暂稳分析这样高维数的工程问题，如果输入特征选择过少，则无法全面给出影响结果的特征量；如果选择过多，又会引入噪声和干扰因素，同样会降低学习效果。理论研究表明，能表征问题的最少特征量是最优的。

针对基于 SVM 的暂态稳定分析，为解决输入特征选择困难的问题，本章提出了一种基于信息融合^[176]的组合 SVM 模型。首先构造了具有不同输入特征的 4 组子分类器，在此基础上，对子分类器的结果在输出空间再进行信息融合，以提高分类准确率。文中从不同角度启发式的构造了 4 组不同的输入特征，这是未经过详细论证的 4 组输入特征，由他们构成了 4 组弱分类器。以这 4 组弱分类器为子分类器，再构造一个融合 SVM 对几种子分类器的结果以回归方式进行融合，作为最终判别结果。仿真表明，组合 SVM 的引入很好的解决了输入特征选择困难的问题，显著提高了最终判别结果的准确率。

4.2 统计学习与支持向量机方法简介

4.2.1 学习问题的一般描述

从样本进行学习的一般过程可以表示为^[168]：

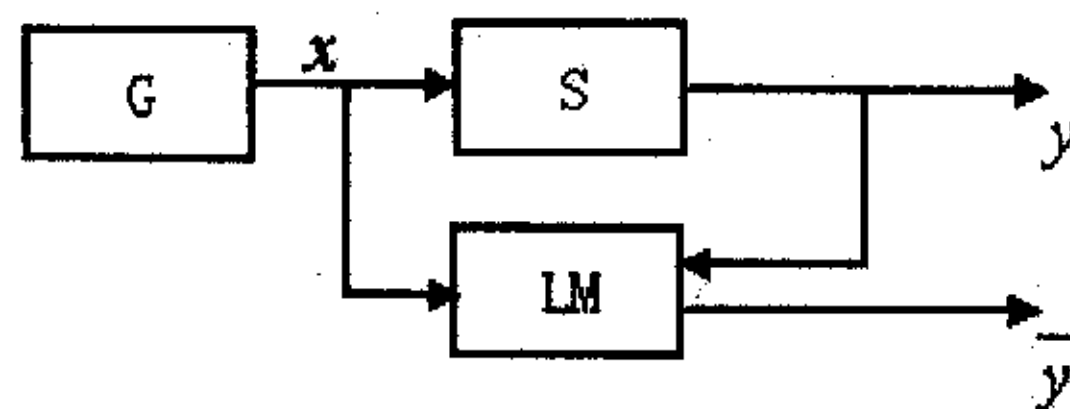


图 4-1 学习问题的一般模型

Fig.4-1 General modal of learning problem

学习机器 LM 观察来自产生器 G 的 x 和来自训练器 S 的 y 所构成的数据对 (x, y) (训练集)，从给定的函数集 $f(x, \alpha)$ ， $\alpha \in \Lambda$ 中选择出能最好逼近训练器响应的函数，这种选择是基于训练集的。训练集是根据联合分布 $F(x, y) = F(x)F(y|x)$ 抽取出的 l 个独立同分布观测 $(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)$ 组成。

在训练之后，学习机器必须对任意输入 x 给出输出 $\bar{y}$ 。学习的目标是能够给出尽可能接近训练器响应 y 的输出 $\bar{y}$ 。

在给定输入下，学习机器给出的响应 $\bar{y}$ 与真实训练器响应输出 y 间的差值可以

表达学习机器的性能。该差值的数学期望值为：

$$R(\alpha) = \int L(y, f(x, \alpha)) dF(x, y) \quad (4-1)$$

称上式为风险泛函。学习的目标就是，在联合概率分布函数 $F(x, y)$ 未知、所有可用的信息都包含在训练集(4-1)式中的情况下，寻找函数 $f(x, \alpha_0)$ ，使它在函数类 $f(x, \alpha)$ ， $\alpha \in \Lambda$ 上，最小化风险泛函 $R(\alpha)$ 。

在学习理论中，学习机器是按照风险泛函的形式来选择逼近（实施优化）的，因此说，风险泛函的形式就定义了一个学习过程。最常用的风险泛函是选择为基于训练集数据得到的一个归纳值：

$$R_{emp}(\alpha) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l Q(z_i, \alpha) \quad (4-2)$$

上式就是所谓的经验风险泛函。选择一个函数 $Q(z, \alpha_i)$ 能使经验风险最小化，这样的归纳原则称为经验风险最小化归纳原则(Empirical Risk Minimization, ERM)。可见，回归估计问题中的最小二乘法、概率密度估计中的最大似然估计法等，都是 ERM 原则的具体实现。SVM 则是不同于 ERM 的又一种归纳原则。

可以证明，采用 ERM 原则得出的函数 $Q(z, \alpha_i)$ 的真实风险 $R(\alpha_i)$ 与其经验风险间具有一定的统计关系。以完全有界非负函数集为例，当学习机器采用的函数集为非负完全有界，即 $0 \leq Q(z, \alpha_i) \leq B$ 时，真实风险，即函数 $Q(z, \alpha_i)$ 的推广能力的界，与经验风险间具有如下关系^[174]：

$$R(\alpha_i) \leq R_{emp}(\alpha_i) + \frac{B\varepsilon}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4R_{emp}(\alpha_i)}{B\varepsilon}} \right) \quad (4-3)$$

上式以至少 $1-\eta$ 的概率成立。不等式左边为函数集的真实风险(或称为总风险)，右端第一项为经验风险， ε 为与函数集、训练集以及 η 有关的参数。对其他类型的函数集，如无界非负函数集、完全有界函数集，也有相应结论。可见，总风险不仅与经验风险有关，还与学习机器采用的函数集的性质有关。为使总风险最小，还必须使学习机器所采用的函数集满足使第二项达到最小，即所谓的结构风险最小原则(Structural Risk Minimization, SRM)。概括说，SRM 原则就是针对经验风险(第一项)和置信范围(第二项)这两项最小化风险泛函。SVM 正是求解学习机器的函数集的结构风险泛函最小化的体现。

SVM 和神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)都是结构风险最小化的体现。但二者在求解中有区别：SVM 是保持经验风险值固定并最小化置信范围，ANN 是保持置信范围固定(通过选择一个适当构造的机器)并最小化经验风险。ANN 的做法在“小样本”情况下或者是在过于复杂的机器结构上，置信范围将变得很大，因此即使经验风险被最小化为 0，式(4-3)成立的概率 $1-\eta$ 却减小，因此在测试集上，

错误数据仍可能很大, 这就是神经网络过学习的原因。与之相比, SVM 则是固定了经验风险, 而寻求置信范围最小, 也就相当于保证了“在最坏情形下”学习机器的推广性能。下面通过分类问题介绍 SVM 的一些概念。

4.2.2 最优分类超平面

简单的考虑分类问题: 设有一组样本 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l)$, 其中 $x \in R^n$ 为输入, $y \in \{-1, 1\}$ 为输出 (-1 代表一类, 1 代表另一类)。分类器的学习问题可以描述如下。

定义 1: 当样本为线性可分时, 即训练数据可以被一个超平面

$$(w * x) - b = 0 \quad (4-4)$$

没有错误的分开, 并且离超平面最近的向量与超平面之间的距离是最大的, 则我们说这个超平面是这个向量集合的最优分类超平面。最优分类超平面是结构风险最小化的结果。

(4-4)式可以等价的变形为:

$$y = \begin{cases} 1, & \text{若 } (w * x) - b \geq 0 \\ -1, & \text{若 } (w * x) - b \leq 0 \end{cases} \quad (4-5)$$

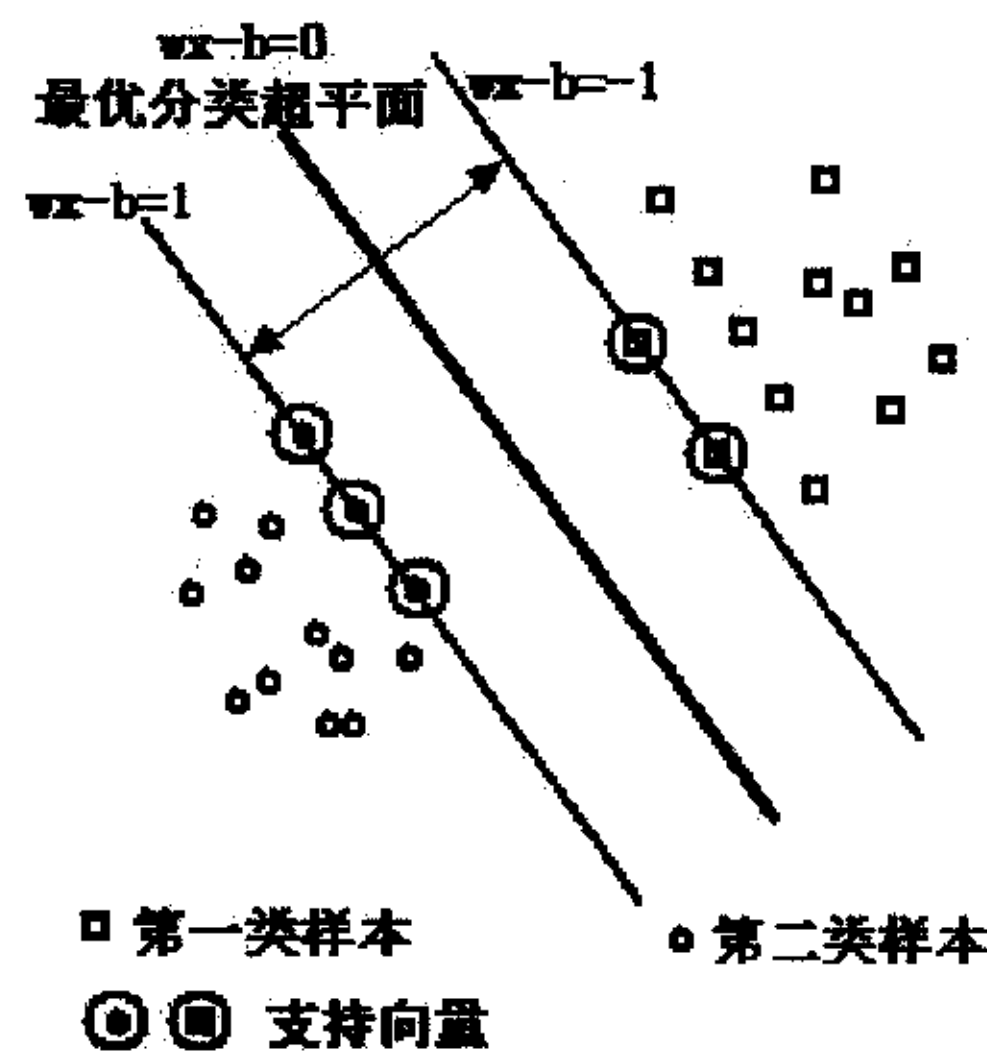


图 4-2 最优超平面示意图

Fig.4-2 demonstration figure of optimal hyper-plane for classification

将(4-5)式变形, 得到另一种等价的表达形式:

$$y_i [(w * x_i) - b] \geq 1, i = 1, 2, \dots, l \quad (4-6)$$

容易验证, 最优超平面是满足(4-6)式并且使得 $\Phi(w) = \|w\|^2$ 最小化的超平面 (最小化是关于向量 w 和标量 b 进行的)。

定义 2: 样本中, 距离最优超平面最近的两类样本向量称为支持向量 (SV, support

错误数据仍可能很大, 这就是神经网络过学习的原因。与之相比, SVM 则是固定了经验风险, 而寻求置信范围最小, 也就相当于保证了“在最坏情形下”学习机器的推广性能。下面通过分类问题介绍 SVM 的一些概念。

4.2.2 最优分类超平面

简单的考虑分类问题: 设有一组样本 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l)$, 其中 $x \in R^n$ 为输入, $y \in \{-1, 1\}$ 为输出 (-1 代表一类, 1 代表另一类)。分类器的学习问题可以描述如下。

定义 1: 当样本为线性可分时, 即训练数据可以被一个超平面

$$(w * x) - b = 0 \quad (4-4)$$

没有错误的分开, 并且离超平面最近的向量与超平面之间的距离是最大的, 则我们说这个超平面是这个向量集合的最优分类超平面。最优分类超平面是结构风险最小化的结果。

(4-4)式可以等价的变形为:

$$y = \begin{cases} 1, & \text{若 } (w * x) - b \geq 0 \\ -1, & \text{若 } (w * x) - b \leq 0 \end{cases} \quad (4-5)$$

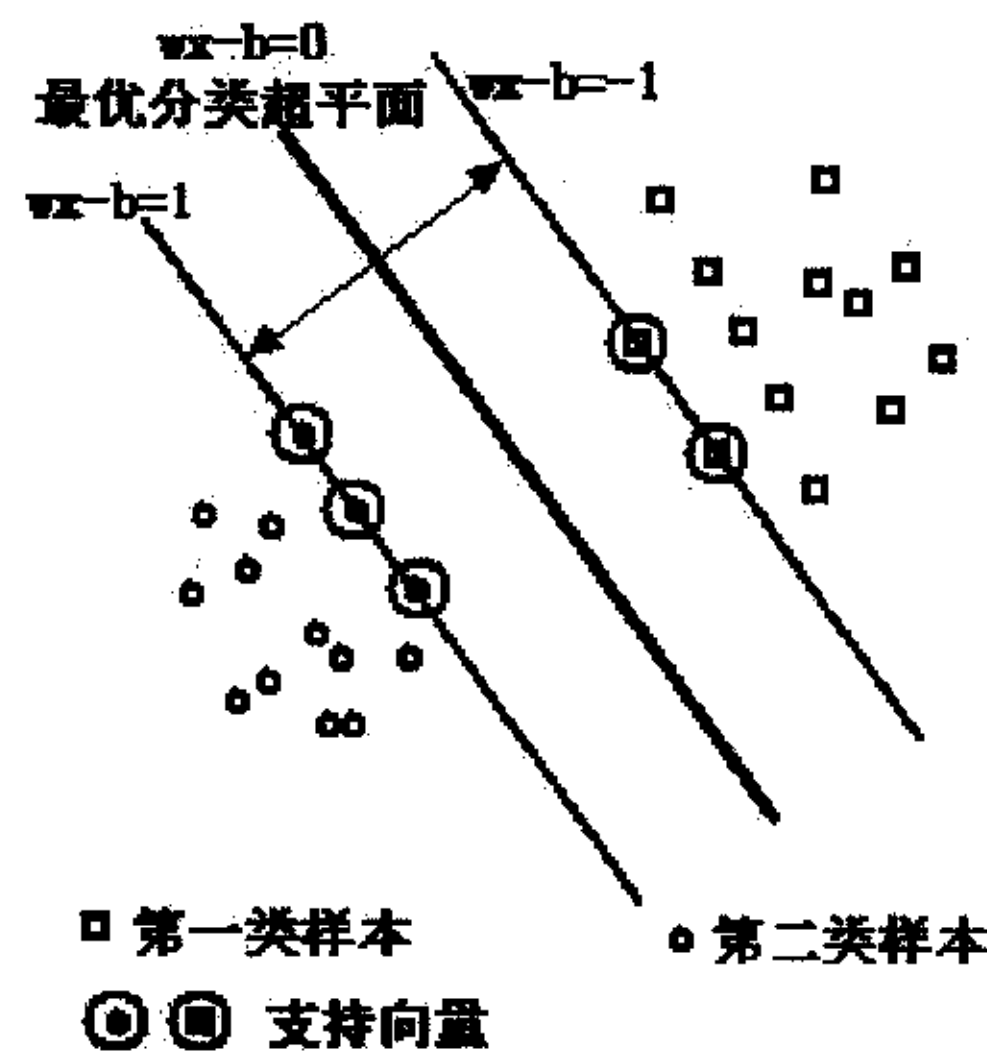


图 4-2 最优超平面示意图

Fig.4-2 demonstration figure of optimal hyper-plane for classification

将(4-5)式变形, 得到另一种等价的表达形式:

$$y_i [(w * x_i) - b] \geq 1, i = 1, 2, \dots, l \quad (4-6)$$

容易验证, 最优超平面是满足(4-6)式并且使得 $\Phi(w) = \|w\|^2$ 最小化的超平面 (最小化是关于向量 w 和标量 b 进行的)。

定义 2: 样本中, 距离最优超平面最近的两类样本向量称为支持向量(SV, support

vectors)。

一组支持向量可以惟一确定一个最优分类超平面。支持向量到最优超平面的距离为： $\frac{2}{\|w\|}$ 。后面可以看到，该最优分类超平面可以转化为优化问题求解。

4.2.3 支持向量机

SVM 是通过在原空间或映射到高维空间中构造最优分类超平面。构造最优超平面的依据是两类样本离超平面的距离最大化。

在上面的线性可分情况下，由于两类支持向量到最优超平面间的距离之和为 $2/\|w\|$ ，故构造最优超平面的问题被转化为如下的优化问题：

$$\begin{cases} \min \Phi(w) = \|w\|^2 = \frac{1}{2}(w * w) \\ \text{s.t. } y_i(w * x_i - b) \geq 1 \quad i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (4-7)$$

求解上式的办法是引入 Lagrange 函数：

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2}(w * w) - \sum_{i=1}^l \alpha_i \{y_i[(w * x_i) - b] - 1\} \quad (4-8)$$

其中， α_i 为 Lagrange 乘子，函数 L 应对最大化，并且对 w 和 b 最小化。因此，对 Lagrange 函数求关于 w 和 b 的偏微分并令他们等于 0，可得：

$$\sum_{i=1}^l y_i \alpha_i = 0, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, l \quad (4-9)$$

上式等价于：

$$Q(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i * x_j) \quad (4-10)$$

此不等式约束下的凸二次优化问题存在惟一解：

$$w_0 = \sum_{i=1}^l \alpha_i^0 y_i x_i \quad (4-11)$$

其中，对所有 $i = 1, \dots, l$ ， $\alpha_i^0 \geq 0$ ， α_i 为 Lagrange 乘子。即，分类超平面的法向量是所有训练集向量的线性组合。进一步整理得：

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{SVS} y_i \alpha_i^0 (x_i * x) - b_0\right) \quad (4-12)$$

其中支持向量集(SVS) = $\{x_i \mid \alpha_i^0 \geq 0, i = 1, 2, \dots, l\}$ ，标量 $b_0 = y_j - (w_0 * x_j)$ ， $x_j \in SVS$ 。在多数情况下，(4-12)式的 w_0 展开式的 α_i^0 均为 0，而非零的 α_i^0 所对应的 x_i 就是支持

vectors)。

一组支持向量可以惟一确定一个最优分类超平面。支持向量到最优超平面的距离为： $\frac{2}{\|w\|}$ 。后面可以看到，该最优分类超平面可以转化为优化问题求解。

4.2.3 支持向量机

SVM 是通过在原空间或映射到高维空间中构造最优分类超平面。构造最优超平面的依据是两类样本离超平面的距离最大化。

在上面的线性可分情况下，由于两类支持向量到最优超平面间的距离之和为 $2/\|w\|$ ，故构造最优超平面的问题被转化为如下的优化问题：

$$\begin{cases} \min \Phi(w) = \|w\|^2 = \frac{1}{2}(w * w) \\ \text{s.t. } y_i(w * x_i - b) \geq 1 \quad i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (4-7)$$

求解上式的办法是引入 Lagrange 函数：

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2}(w * w) - \sum_{i=1}^l \alpha_i \{y_i[(w * x_i) - b] - 1\} \quad (4-8)$$

其中， α_i 为 Lagrange 乘子，函数 L 应对最大化，并且对 w 和 b 最小化。因此，对 Lagrange 函数求关于 w 和 b 的偏微分并令他们等于 0，可得：

$$\sum_{i=1}^l y_i \alpha_i = 0, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, l \quad (4-9)$$

上式等价于：

$$Q(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i * x_j) \quad (4-10)$$

此不等式约束下的凸二次优化问题存在惟一解：

$$w_0 = \sum_{i=1}^l \alpha_i^0 y_i x_i \quad (4-11)$$

其中，对所有 $i = 1, \dots, l$ ， $\alpha_i^0 \geq 0$ ， α_i 为 Lagrange 乘子。即，分类超平面的法向量是所有训练集向量的线性组合。进一步整理得：

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{SVS} y_i \alpha_i^0 (x_i * x) - b_0\right) \quad (4-12)$$

其中支持向量集(SVS) = $\{x_i \mid \alpha_i^0 \geq 0, i = 1, 2, \dots, l\}$ ，标量 $b_0 = y_j - (w_0 * x_j)$ ， $x_j \in SVS$ 。在多数情况下，(4-12)式的 w_0 展开式的 α_i^0 均为 0，而非零的 α_i^0 所对应的 x_i 就是支持

向量 (SV)。

通常训练集中的数据是线性不可分的，这时有两种途径解决：一是引入松弛变量，构造所谓的软间隔分类超平面；二是将原问题映射到某个高维的特征空间（可能是无穷大维数空间）求解，样本在此高维空间内成为线性可分的。如下图所示。第二种方法更具有 SVM 特色。此处不对第一种方法详细介绍，仅介绍第二种方法的求解原则。

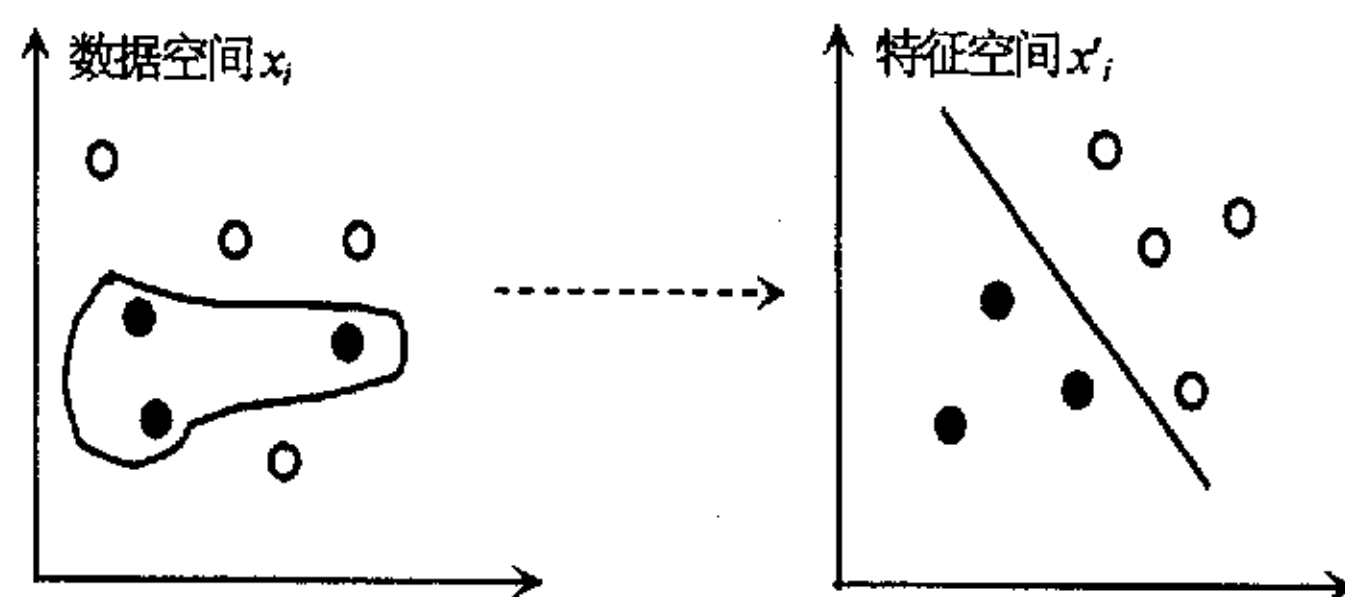


图 4-3 数据空间到特征空间的映射

Fig. 4-3 Mapping from data space to feature space

分析可以发现，在上述分类判别函数(4-12)中，只涉及样本之间的内积运算 ($x_i * x$)，所以在高维空间只需对内积进行运算，而无需求解做变换用的非线性函数。根据泛函理论，只要一种核函数 $K(x_i, x_j)$ 满足 Mercer 条件，它就对应某一变换空间中的内积。所以在最优分类面中采用适当的内积函数，就可以对样本实现某一非线性变换后的线性分类。这样使得高维空间的超平面构造并不增加大量的计算复杂度。

采用核函数 $K(x_i * x)$ 后，最优分类判别函数(4-12)转化为：

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{SVS} y_i \alpha_i^0 K(x_i * x) - b_0\right) \quad (4-13)$$

(4-13)式即为支持向量机的分类判别函数。

常见的核函数有： d 阶多项式核函数 $K(x, y) = ((x \bullet y) + 1)^d$ ；高斯径向基核函数 $K(x, y) = \exp\left(-\frac{(x - y)^2}{2\sigma^2}\right)$ ；多层感知器函数 $K(x, y) = \tanh(\text{scale}(x \bullet y) + \theta)$ 。核函数的选择在 SVM 应用中是一个重要的问题，对不同的实际问题采取何种核函数，至今尚没有确定性的结论。

在 SVM 的实际应用中，还有一个应考虑的问题：距离函数的选择。由于应用于实际问题的 SVM 的各个输入特征通常不具有一致的量纲和取值范围，因而，不同的距离定义形式会导致计算的不同结果。解决此问题有两种途径：一是将不同度量下的特征量先进行归一化，使所有输入都在同一范围内取值，在此归一后的度量下使用标准距离函数。第二种办法是使用马尔可夫距离度量，马氏距离度量不要求“向量”的所有维坐标在同一度量尺度之下。

两个向量 x_1, x_2 之间的马氏距离定义如下：

$$\|x_1, x_2\| = 1/2 (x_1 - x_2)^T * S * (x_1 - x_2) \quad (4-14)$$

$(x_1 - x_2)^T$ 是转置矩阵， S 是两个向量间的协方差矩阵。

4.2.4 对 SVM 方法的评价

相比较于已有的各种学习方法，支持向量机方法的优势在于：

(1) 保持经验风险固定而最小化置信区间的解法，避免了过学习现象的出现，保证了“最坏情形下”的学习机器的泛化能力；

(2) 凸二次优化问题保证了惟一解，从而避免了神经网络遇到的局部极小问题；

(3) 能有效对“小样本”进行处理。实际上，对于实际问题，尤其是来源于工程实际的问题，无论所采用的训练样本有多丰富，相比于原问题都是小样本；

(4) SVM 的解具有高稀疏性特征，即分类超平面仅有少量样本（支持向量）的线性组合构成，这样，有用样本的数量被大大压缩，体现了不同样本对决策规则的支持程度；

(5) 除前面介绍所涉及的一些优点外，SVM 还通过一系列优化问题求解的技巧加快了收敛的速度和一致收敛程度，使学习机器的收敛性和推广能力有了坚实的理论基础做保障。

SVM 应用于实际问题存在的困难和障碍在于：

(1) 首先，输入特征无法准确选择。输入特征选择太少，则无法全面表征暂态稳定问题，得不到良好的训练效果；如果输入特征选择太多，相当于引入了与稳定无关的噪声，也得不到好的学习性能。理论证明指出：能表征问题的最少特征量是最优的。

(2) 其次，SVM 的核参数选择至今无通用方法。典型常用的核函数不一定是针对给定问题的最好映射，映射后的高维空间也不一定是最有效的分类空间。

(3) SVM 的物理意义尚不明确，因此在实际应用中如何加入先验知识成为一个难题。

4.3 组合 SVM 解决暂态稳定判别问题

4.3.1 TSA 问题的 SVM 方法

暂态稳定评估可以抽象为根据特征进行模式分类的问题，从而利用机器学习实现：选择的系统若干状态作为输入特征，基于样本集对判别函数集进行训练得到该概率分布条件下的分类器的判别函数；新样本转化为特征空间中的描述，经过分类器的计算，得到系统是否会失去稳定的结论。

两个向量 x_1, x_2 之间的马氏距离定义如下：

$$\|x_1, x_2\| = 1/2 (x_1 - x_2)^T * S * (x_1 - x_2) \quad (4-14)$$

$(x_1 - x_2)^T$ 是转置矩阵， S 是两个向量间的协方差矩阵。

4.2.4 对 SVM 方法的评价

相比较于已有的各种学习方法，支持向量机方法的优势在于：

(1) 保持经验风险固定而最小化置信区间的解法，避免了过学习现象的出现，保证了“最坏情形下”的学习机器的泛化能力；

(2) 凸二次优化问题保证了惟一解，从而避免了神经网络遇到的局部极小问题；

(3) 能有效对“小样本”进行处理。实际上，对于实际问题，尤其是来源于工程实际的问题，无论所采用的训练样本有多丰富，相比于原问题都是小样本；

(4) SVM 的解具有高稀疏性特征，即分类超平面仅有少量样本（支持向量）的线性组合构成，这样，有用样本的数量被大大压缩，体现了不同样本对决策规则的支持程度；

(5) 除前面介绍所涉及的一些优点外，SVM 还通过一系列优化问题求解的技巧加快了收敛的速度和一致收敛程度，使学习机器的收敛性和推广能力有了坚实的理论基础做保障。

SVM 应用于实际问题存在的困难和障碍在于：

(1) 首先，输入特征无法准确选择。输入特征选择太少，则无法全面表征暂态稳定问题，得不到良好的训练效果；如果输入特征选择太多，相当于引入了与稳定无关的噪声，也得不到好的学习性能。理论证明指出：能表征问题的最少特征量是最优的。

(2) 其次，SVM 的核参数选择至今无通用方法。典型常用的核函数不一定是针对给定问题的最好映射，映射后的高维空间也不一定是最有效的分类空间。

(3) SVM 的物理意义尚不明确，因此在实际应用中如何加入先验知识成为一个难题。

4.3 组合 SVM 解决暂态稳定判别问题

4.3.1 TSA 问题的 SVM 方法

暂态稳定评估可以抽象为根据特征进行模式分类的问题，从而利用机器学习实现：选择的系统若干状态作为输入特征，基于样本集对判别函数集进行训练得到该概率分布条件下的分类器的判别函数；新样本转化为特征空间中的描述，经过分类器的计算，得到系统是否会失去稳定的结论。

4.3.2 现有 SVM 方法解决 TSA 问题的步骤

现有的利用 SVM 方法解决 TSA 问题的步骤如下：

(1) 训练集和测试集的准备。训练集和测试集要求独立同分布，故训练集和测试集要同时构造，随机抽取，因此一般做法是针对特定的网络进行大量运行方式下的随机故障（以保证样本的独立同分布要求）仿真，随机抽取一部分作为训练样本，另一部分作为测试样本；

(2) 选择合适的输入特征。传统做法是根据经验从大量的描述实际问题的特征中选择若干作为 SVM 的输入，对 TSA 问题，常选用的特征为发电机故障切除瞬间的相角、转速、加速功率等；

(3) 选择 SVM 的核函数、参数。通常选择的核函数有高斯型、多项式型和感知器型，每种核函数都有参数需要确定。参数的确定可以用 CV (Cross Validation) 算法寻优 [177]；

(4) 利用训练集对 SVM 进行训练，得到分类判别函数 $f(x)$ 。 $f(x)$ 是基于所选择的核函数的函数集的；

(5) 将训练完的分类器在测试集上测试。

采用常规 SVM 方法进行暂稳评估的最大问题就是输入特征无法准确选择。如果输入特征选择太少，无法全面表征暂态稳定问题，得不到良好的训练效果；如果输入特征选择太多，相当于引入了与稳定无关的噪声，也得不到好的学习性能。理论证明指出，能表征问题的最少特征量是最优的 [174]。已有的应用于暂态稳定判别的 SVM 方法研究中，对输入特征的合理选择问题尚处于启发、试探阶段。在文 [172][173] 中，均阐述了利用 SVM 进行暂态稳定判别的问题，虽然都得到了很好的分类效果，但均未对输入特征的选择问题给予充分论证。

4.3.3 基于信息融合的组合 SVM 模型

对输入特征选择困难的问题，常用的方法为利用遗传算法对大量输入特征进行逐一选择，算法效率低，工作量大。

对此，本文采用了不同的方法，利用信息融合思想，提出了一种组合 SVM 分类器模型：首先设法构造多组输入特征，分别训练，得到相对而言分类效果较弱的几组 SVM 子分类器；然后对这些 SVM 子分类器的输出结果做信息融合，采用融合后的输出作为最终的分类结果。如图 4-4 所示。

4.3.2 现有 SVM 方法解决 TSA 问题的步骤

现有的利用 SVM 方法解决 TSA 问题的步骤如下：

(1) 训练集和测试集的准备。训练集和测试集要求独立同分布，故训练集和测试集要同时构造，随机抽取，因此一般做法是针对特定的网络进行大量运行方式下的随机故障（以保证样本的独立同分布要求）仿真，随机抽取一部分作为训练样本，另一部分作为测试样本；

(2) 选择合适的输入特征。传统做法是根据经验从大量的描述实际问题的特征中选择若干作为 SVM 的输入，对 TSA 问题，常选用的特征为发电机故障切除瞬间的相角、转速、加速功率等；

(3) 选择 SVM 的核函数、参数。通常选择的核函数有高斯型、多项式型和感知器型，每种核函数都有参数需要确定。参数的确定可以用 CV (Cross Validation) 算法寻优 [177]；

(4) 利用训练集对 SVM 进行训练，得到分类判别函数 $f(x)$ 。 $f(x)$ 是基于所选择的核函数的函数集的；

(5) 将训练完的分类器在测试集上测试。

采用常规 SVM 方法进行暂稳评估的最大问题就是输入特征无法准确选择。如果输入特征选择太少，无法全面表征暂态稳定问题，得不到良好的训练效果；如果输入特征选择太多，相当于引入了与稳定无关的噪声，也得不到好的学习性能。理论证明指出，能表征问题的最少特征量是最优的^[174]。已有的应用于暂态稳定判别的 SVM 方法研究中，对输入特征的合理选择问题尚处于启发、试探阶段。在文[172][173]中，均阐述了利用 SVM 进行暂态稳定判别的问题，虽然都得到了很好的分类效果，但均未对输入特征的选择问题给予充分论证。

4.3.3 基于信息融合的组合 SVM 模型

对输入特征选择困难的问题，常用的方法为利用遗传算法对大量输入特征进行逐一选择，算法效率低，工作量大。

对此，本文采用了不同的方法，利用信息融合思想，提出了一种组合 SVM 分类器模型：首先设法构造多组输入特征，分别训练，得到相对而言分类效果较弱的几组 SVM 子分类器；然后对这些 SVM 子分类器的输出结果做信息融合，采用融合后的输出作为最终的分类结果。如图 4-4 所示。

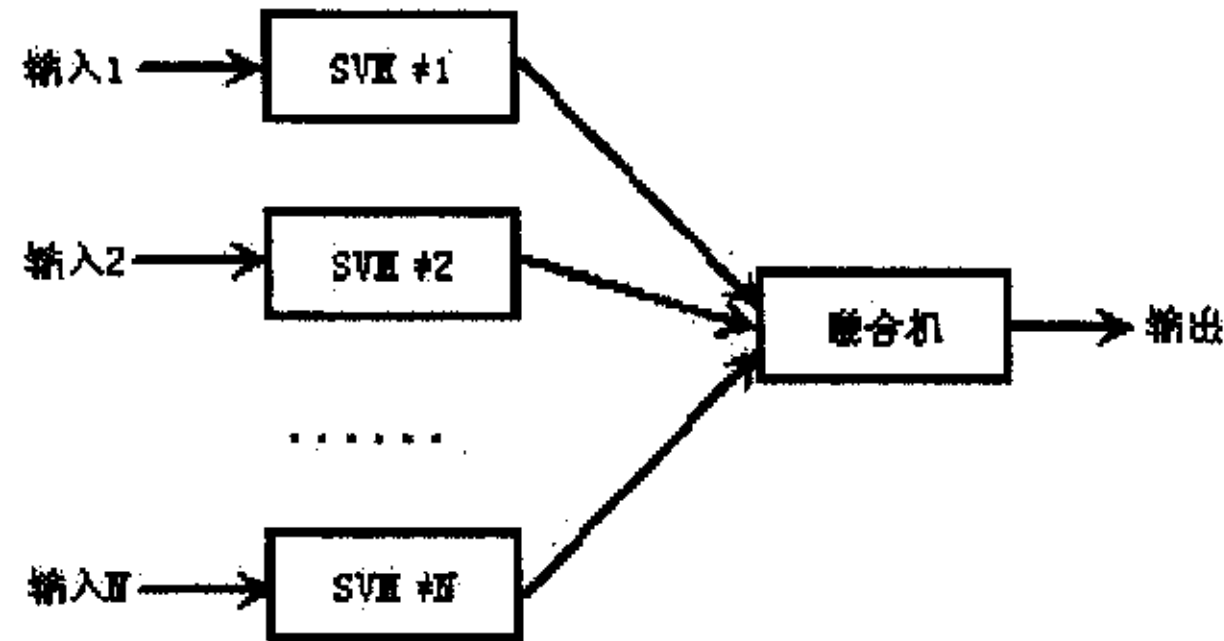


图 4-4. SVM 的信息融合模型图

Fig.4-4 demonstration figure of information fusion for SVM

信息融合是这样—个过程^[176]：把来自许多传感器和信息源的数据和信息加以联合、相关和组合，以获得精确的位置估计和身份估计，以及对现场情况和威胁及其重要程度进行适时的完整评价。信息融合能够把局部环境下的不完整信息加以综合，消除传感器间可能存在的冗余和矛盾信息，加以互补，降低其不确定性，以形成对系统环境的相对完整一致的感知描述，消除信息源不唯一性，从而提高智能系统的决策、策划、反应的快速性和正确性，降低决策风险。

信息融合相比于盲目增加输入特征而言，由于某些重要特征在多组输入中重复出现，这相当于加强了这些重要特征在学习过程中的权重，而噪声和其他特征则被弱化而非完全忽略，所以比盲目增加输入量的学习效果要好。

信息融合的方法有很多种，由于 SVM 能提供结构风险最小的学习结果，故融合机仍使用了 SVM 二分类器。具体的，将第一层子分类器的输出以回归的形式作为另一个融合 SVM（第二层）的输入进行训练，以融合 SVM 的输出作为最终的分类结果。使用回归形式连接两层 SVM 的理由在于，如果直接使用仅含有 0、1 二值的向量作为第二层 SVM 的输入将很难保证输出具有好的泛化能力。

为了使第 1 层的不同子分类器的输出具有同等数量级，在本文的模型中，将第 1 层子分类器输出的实值做了归—化处理如下：

$$I'_i = \frac{I_i}{D_i}, \quad i=1,2,3,4 \quad (4-15)$$

式中 I'_i 为归—化后的输出； I_i 为归—化前的实值输出； D_i 为该子分类器的支持向量到最优超平面的距离。

从形式上看，两层的组合 SVM 分类器模型只是简单的将几个独立的 SVM 做连接，而这种连接背后却有其实意义。第一层的若干个 SVM 分类器可以看成子分类器，每个子分类器独立工作，给出判别结果；而第二层的 SVM 分类器则是对第一层的若干个子分类器的分类结果做综合评判，将最可靠的结果作为最终输出结果，提高分类精度。

使用两层 SVM 信息融合模型进行 TSA 问题的解决过程如下：

（1）训练集、测试集的准备。不同于上文的是训练集再分为两部分，一部分用于

训练单独的 SVM, 另一部分用于训练融合 SVM;

(2) 输入特征的构造。需要根据不同角度对实际问题的分析独立选择多组输入, 作为第一层 SVM 的输入;

(3) 利用训练集的第一部分对构造的多组输入特征进行训练, 得到第一层上的 SVM 子分类器;

(4) 将单独 SVM 的输出以回归的形式作为第二层融合 SVM 的输入, 在训练集的第二部分上进行训练, 得到融合层 SVM;

(5) 融合后的 SVM 在测试集上进行测试。

4.4 多组输入特征的构造

本文根据不同的启发知识选择了四组输入特征, 作为第一层上的若干 SVM 子分类器的输入。其中的三组输入特征分别是。基于对暂态稳定问题的几种分析得到的: 基于超平面与注入功率空间、基于 CUEP 处的临界势能、基于功角曲线的 Taylor 展开式^[178]; 另外一组是已被证明具有良好的 ANN 学习能力的输入^[165]。这四组特征由于只经过了初步分析得到, 故基于这些特征所构造的分类器均属于弱分类器, 但经过信息融合, 可以得到这些弱分类器融合后形成的强分类器, 后面的仿真充分说明了这一点。

4.4.1 基于超平面和功率注入空间选择特征

已经证明, 在一定近似条件下, 电力系统的稳定边界在 UEP 点处可以用超平面近似^[179]。超平面方程如下^[180]: $x^T \eta_1 = x_u^T \eta_1$ 。其中 $x^T = (\alpha^T, \omega_g^T)$ 为超平面自由变量, η_1 为发电机状态方程在 UEP 处线性化后所对应的雅克比矩阵 J_{x_r} 的正特征值的特征向量; x_u 为超平面处的 UEP。

实用的超平面方程为^[180]: $(\eta^T S_2)^{-1} \eta^T S_1 P = \sum_{i=1}^r \alpha_i P_i = 1$ 。其中 P_i 为节点注入功率; η 为

超平面的法矢量:

$\eta = \nabla V(\bar{\alpha}, \bar{\omega}_g)$ 为恒能界面的梯度向量, S_1, S_2 为符合下列等式的矩阵:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\omega}_g \end{bmatrix}_r = S_1 P + S_2, \text{ 具体推导见文[180]。}$$

以上超平面方程的许多参数需要进行大量计算才能得到 (某些参数与 CUEP 有关, 准确求取 CUEP 需耗费大量计算), 只能间接选择与这些参数相关度较大的且方便获得的一些参数。故选择基于超平面启发的输入特征及其理由分别叙述如下:

(1) 故障后关键节点的注入功率 P_i 。关键节点原指与骨干网相连的节点、区域代

训练单独的 SVM, 另一部分用于训练融合 SVM;

(2) 输入特征的构造。需要根据不同角度对实际问题的分析独立选择多组输入, 作为第一层 SVM 的输入;

(3) 利用训练集的第一部分对构造的多组输入特征进行训练, 得到第一层上的 SVM 子分类器;

(4) 将单独 SVM 的输出以回归的形式作为第二层融合 SVM 的输入, 在训练集的第二部分上进行训练, 得到融合层 SVM;

(5) 融合后的 SVM 在测试集上进行测试。

4.4 多组输入特征的构造

本文根据不同的启发知识选择了四组输入特征, 作为第一层上的若干 SVM 子分类器的输入。其中的三组输入特征分别是。基于对暂态稳定问题的几种分析得到的: 基于超平面与注入功率空间、基于 CUEP 处的临界势能、基于功角曲线的 Taylor 展开式^[178]; 另外一组是已被证明具有良好的 ANN 学习能力的输入^[165]。这四组特征由于只经过了初步分析得到, 故基于这些特征所构造的分类器均属于弱分类器, 但经过信息融合, 可以得到这些弱分类器融合后形成的强分类器, 后面的仿真充分说明了这一点。

4.4.1 基于超平面和功率注入空间选择特征

已经证明, 在一定近似条件下, 电力系统的稳定边界在 UEP 点处可以用超平面近似^[179]。超平面方程如下^[180]: $x^T \eta_1 = x_u^T \eta_1$ 。其中 $x^T = (\alpha^T, \omega_g^T)$ 为超平面自由变量, η_1 为发电机状态方程在 UEP 处线性化后所对应的雅克比矩阵 J_{x_r} 的正特征值的特征向量; x_u 为超平面处的 UEP。

实用的超平面方程为^[180]: $(\eta^T S_2)^{-1} \eta^T S_1 P = \sum_{i=1}^r \alpha_i P_i = 1$ 。其中 P_i 为节点注入功率; η 为

超平面的法矢量:

$\eta = \nabla V(\bar{\alpha}, \bar{\omega}_g)$ 为恒能界面的梯度向量, S_1, S_2 为符合下列等式的矩阵:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\omega}_g \end{bmatrix}_r = S_1 P + S_2, \text{ 具体推导见文[180]。}$$

以上超平面方程的许多参数需要进行大量计算才能得到 (某些参数与 CUEP 有关, 准确求取 CUEP 需耗费大量计算), 只能间接选择与这些参数相关度较大的且方便获得的一些参数。故选择基于超平面启发的输入特征及其理由分别叙述如下:

(1) 故障后关键节点的注入功率 P_i 。关键节点原指与骨干网相连的节点、区域代

训练单独的 SVM, 另一部分用于训练融合 SVM;

(2) 输入特征的构造。需要根据不同角度对实际问题的分析独立选择多组输入, 作为第一层 SVM 的输入;

(3) 利用训练集的第一部分对构造的多组输入特征进行训练, 得到第一层上的 SVM 子分类器;

(4) 将单独 SVM 的输出以回归的形式作为第二层融合 SVM 的输入, 在训练集的第二部分上进行训练, 得到融合层 SVM;

(5) 融合后的 SVM 在测试集上进行测试。

4.4 多组输入特征的构造

本文根据不同的启发知识选择了四组输入特征, 作为第一层上的若干 SVM 子分类器的输入。其中的三组输入特征分别是。基于对暂态稳定问题的几种分析得到的: 基于超平面与注入功率空间、基于 CUEP 处的临界势能、基于功角曲线的 Taylor 展开式^[178]; 另外一组是已被证明具有良好的 ANN 学习能力的输入^[165]。这四组特征由于只经过了初步分析得到, 故基于这些特征所构造的分类器均属于弱分类器, 但经过信息融合, 可以得到这些弱分类器融合后形成的强分类器, 后面的仿真充分说明了这一点。

4.4.1 基于超平面和功率注入空间选择特征

已经证明, 在一定近似条件下, 电力系统的稳定边界在 UEP 点处可以用超平面近似^[179]。超平面方程如下^[180]: $x^T \eta_1 = x_u^T \eta_1$ 。其中 $x^T = (\alpha^T, \omega_g^T)$ 为超平面自由变量, η_1 为发电机状态方程在 UEP 处线性化后所对应的雅克比矩阵 J_{x_r} 的正特征值的特征向量; x_u 为超平面处的 UEP。

实用的超平面方程为^[180]: $(\eta^T S_2)^{-1} \eta^T S_1 P = \sum_{i=1}^r \alpha_i P_i = 1$ 。其中 P_i 为节点注入功率; η 为

超平面的法矢量:

$\eta = \nabla V(\bar{\alpha}, \bar{\omega}_g)$ 为恒能界面的梯度向量, S_1, S_2 为符合下列等式的矩阵:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\omega}_g \end{bmatrix}_r = S_1 P + S_2, \text{ 具体推导见文[180]。}$$

以上超平面方程的许多参数需要进行大量计算才能得到 (某些参数与 CUEP 有关, 准确求取 CUEP 需耗费大量计算), 只能间接选择与这些参数相关度较大的且方便获得的一些参数。故选择基于超平面启发的输入特征及其理由分别叙述如下:

(1) 故障后关键节点的注入功率 P_i 。关键节点原指与骨干网相连的节点、区域代

表性节点和需要观察的节点^[181]，在本文中，选择为节点注入功率数值超过系统平均节点注入功率（系统总容量除以系统中电源节点数）的；

（2）故障切除瞬间前绝对转速最大的 k 个和最小的 k 个 δ_i 、 ω_i 。绝对转速最大的和最小的发电机节点影响 CUEP 相对于 SEP 的位置；

（3）故障后线路两端相角差最大的前 k 个线路的 P_{ij} 和 δ_{ij} 。相角差最大的线路通常属于临界割集；

（4）在故障前后 SEP 电压幅值变化最大的 k 个节点电压 U_i 。超平面求解中采用了事故期间各节点电压值保持不变的假设。

应指出的是，上面（1）～（4）中的 k 不必均取相同数值，并且不宜取得过大，因为过多的特征反而会带来噪声因素。

4.4.2 基于功角曲线展开选择特征

将功角曲线进行 Taylor 级数展开，可以得到近似的故障后最大功角差的表达式^[178]。

将功角曲线按 Taylor 级数展开，并考虑由于系统发生故障瞬间及过渡过程的初期，转速变化不大，具有最大角加速度的两台机往往是角差最大的两台机，可得：

$$(\delta_{\max} - \delta_{\min})_t = (\delta_{\max} - \delta_{\min})_0 \cdot \left(1 + \sum_{i=2}^n \frac{(\delta_{\max} - \delta_{\min})^{(i)}_0}{(\delta_{\max} - \delta_{\min})_0} \frac{(\Delta t)^i}{i!} \right)$$

忽略高次项，仅保留至 3 次项，取某一断面时刻的展开式系数为 SVM 分类器的输入特征：

$$\textcircled{1}: \delta_{\max} - \delta_{\min};$$

$$\textcircled{2}: \alpha_{\max} - \alpha_{\min};$$

$$\textcircled{3}: \dot{\alpha}_{\max} - \dot{\alpha}_{\min};$$

$$\textcircled{4}: K_{\max} - K_{\min};$$

$$\textcircled{5}: \dot{K}_{\max} - \dot{K}_{\min};$$

$$\textcircled{6} = \textcircled{2} / \textcircled{1} = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}};$$

$$\textcircled{7} = \textcircled{3} / \textcircled{1} = \frac{\dot{\alpha}_{\max} - \dot{\alpha}_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}};$$

表性节点和需要观察的节点^[181]，在本文中，选择为节点注入功率数值超过系统平均节点注入功率（系统总容量除以系统中电源节点数）的；

（2）故障切除瞬间前绝对转速最大的 k 个和最小的 k 个 δ_i 、 ω_i 。绝对转速最大的和最小的发电机节点影响 CUEP 相对于 SEP 的位置；

（3）故障后线路两端相角差最大的前 k 个线路的 P_{ij} 和 δ_{ij} 。相角差最大的线路通常属于临界割集；

（4）在故障前后 SEP 电压幅值变化最大的 k 个节点电压 U_i 。超平面求解中采用了事故期间各节点电压值保持不变的假设。

应指出的是，上面（1）～（4）中的 k 不必均取相同数值，并且不宜取得过大，因为过多的特征反而会带来噪声因素。

4.4.2 基于功角曲线展开选择特征

将功角曲线进行 Taylor 级数展开，可以得到近似的故障后最大功角差的表达式^[178]。

将功角曲线按 Taylor 级数展开，并考虑由于系统发生故障瞬间及过渡过程的初期，转速变化不大，具有最大角加速度的两台机往往是角差最大的两台机，可得：

$$(\delta_{\max} - \delta_{\min})_t = (\delta_{\max} - \delta_{\min})_0 \cdot \left(1 + \sum_{i=2}^n \frac{(\delta_{\max} - \delta_{\min})^{(i)}|_0}{(\delta_{\max} - \delta_{\min})_0} \frac{(\Delta t)^i}{i!} \right)$$

忽略高次项，仅保留至 3 次项，取某一断面时刻的展开式系数为 SVM 分类器的输入特征：

$$\textcircled{1}: \delta_{\max} - \delta_{\min};$$

$$\textcircled{2}: \alpha_{\max} - \alpha_{\min};$$

$$\textcircled{3}: \dot{\alpha}_{\max} - \dot{\alpha}_{\min};$$

$$\textcircled{4}: K_{\max} - K_{\min};$$

$$\textcircled{5}: \dot{K}_{\max} - \dot{K}_{\min};$$

$$\textcircled{6} = \textcircled{2} / \textcircled{1} = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}};$$

$$\textcircled{7} = \textcircled{3} / \textcircled{1} = \frac{\dot{\alpha}_{\max} - \dot{\alpha}_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}};$$

$$\begin{aligned}\textcircled{8} &= \textcircled{3} / \textcircled{2} = \frac{\dot{\alpha}_{\max} - \dot{\alpha}_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}; \\ \textcircled{9} &= \textcircled{4} / \textcircled{2} = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}; \\ \textcircled{10} &= \textcircled{5} / \textcircled{2} = \frac{\dot{K}_{\max} - \dot{K}_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}; \\ \textcircled{11} &= \textcircled{4} / \textcircled{1} = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}; \\ \textcircled{12} &= \textcircled{5} / \textcircled{1} = \frac{\dot{K}_{\max} - \dot{K}_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}; \\ \textcircled{13} &= \textcircled{4} / \textcircled{3} = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{\dot{\alpha}_{\max} - \dot{\alpha}_{\min}}.\end{aligned}$$

其中, $\delta, \alpha, \dot{\alpha}$ 为转子的角度、角速度、角加速度; $K, \dot{K}$ 为转子的动能及其变化率。本文采用这些特征作为 SVM 的输入。

4.4.3 类比于已有 ANN 选择特征

文[165]给出了已验证具有良好的学习能力的 ANN 的一组输入特征, 共 34 个特征, 如表 4-1 所示。本文将这组特征也作为一个 SVM 子分类器的输入。后文仿真可以看出, 虽然 SVM 理论上有比 ANN 更好的学习和泛化能力, 但由于核函数及参数的选择等原因, 在同样输入条件下, 并不能保证所得到的结果总好于 ANN。这一点在美国邮政的数字识别试验中也有所体现^[174]。并且, SVM 所体现的“在最坏情形下能控制泛化误差”的概念所给出的乃是学习推广能力的下限, 故没有进行优化的 SVM 并不一定比经过优化的 ANN 的推广能力好。因此对于 SVM, 不能简单的使用 ANN 的输入, 仍然需要进行有针对性的特征选择、核函数选择等工作。

表 4-1 基于可分性判据分析的输入特征选择

Table 4-1 Input feature selection based on separability analysis.

特征	物理描述
TZ1	所有发电机机械功率的平均值
TZ2	故障切除时所有发电机转子动能的平均值
TZ3	故障切除时离故障位置最近的发电机电压
TZ4	故障切除时关心中心坐标(COI)转速的变化

$$\begin{aligned} \textcircled{8} &= \textcircled{3} / \textcircled{2} = \frac{\dot{\alpha}_{\max} - \dot{\alpha}_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}; \\ \textcircled{9} &= \textcircled{4} / \textcircled{2} = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}; \\ \textcircled{10} &= \textcircled{5} / \textcircled{2} = \frac{\dot{K}_{\max} - \dot{K}_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}; \\ \textcircled{11} &= \textcircled{4} / \textcircled{1} = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}; \\ \textcircled{12} &= \textcircled{5} / \textcircled{1} = \frac{\dot{K}_{\max} - \dot{K}_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}; \\ \textcircled{13} &= \textcircled{4} / \textcircled{3} = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{\dot{\alpha}_{\max} - \dot{\alpha}_{\min}}. \end{aligned}$$

其中, $\delta, \alpha, \dot{\alpha}$ 为转子的角度、角速度、角加速度; $K, \dot{K}$ 为转子的动能及其变化率。本文采用这些特征作为 SVM 的输入。

4.4.3 类比于已有 ANN 选择特征

文[165]给出了已验证具有良好的学习能力的 ANN 的一组输入特征, 共 34 个特征, 如表 4-1 所示。本文将这组特征也作为一个 SVM 子分类器的输入。后文仿真可以看出, 虽然 SVM 理论上有比 ANN 更好的学习和泛化能力, 但由于核函数及参数的选择等原因, 在同样输入条件下, 并不能保证所得到的结果总好于 ANN。这一点在美国邮政的数字识别试验中也有所体现^[174]。并且, SVM 所体现的“在最坏情形下能控制泛化误差”的概念所给出的乃是学习推广能力的下限, 故没有进行优化的 SVM 并不一定比经过优化的 ANN 的推广能力好。因此对于 SVM, 不能简单的使用 ANN 的输入, 仍然需要进行有针对性的特征选择、核函数选择等工作。

表 4-1 基于可分性判据分析的输入特征选择

Table 4-1 Input feature selection based on separability analysis.

特征	物理描述
TZ1	所有发电机机械功率的平均值
TZ2	故障切除时所有发电机转子动能的平均值
TZ3	故障切除时离故障位置最近的发电机电压
TZ4	故障切除时关心中心坐标(COI)转速的变化

TZ5	系统的能量调整
TZ6	故障切除时系统冲击的大小
TZ7	故障切除时与中心 COI 相差最大的转速
TZ8	故障切除时与中心 COI 相差最大的功角
TZ9	故障切除时领先机与殿后机的功角差
TZ10	故障切除时最大的角加速度之差
TZ11	故障切除时最大的角加速度的变化率之差
TZ12	故障切除时最大的转子动能之差
TZ13	故障切除时最大的转子动能变化率之差
TZ14	TZ13/TZ11
TZ15	TZ13/TZ12
TZ16	TZ12/TZ9
TZ17	TZ13/TZ9
TZ18	TZ12/TZ11
TZ19	故障瞬间转子加速度的最大值
TZ20	具有最大加速度发电机的初始角度
TZ21	所有转子处世加速度的最小值
TZ22	故障切除时发电机的最大动能
TZ23	故障切除时具有最大动能的发电机的功角
TZ24	所有发电机初始加速度的方差
TZ25	故障切除时具有最大转角发电机的动能
TZ26	所有发电机初始加速功率的均值
TZ27	所有发电机初始加速功率的方差
TZ28	所有发电机相对初始加速功率的均值
TZ29	所有发电机相对初始加速功率的方差
TZ30	所有发电机初始加速度的均值
TZ31	故障瞬间发电机所承受的最大有功冲击
TZ32	故障瞬间发电机所受的最小有功冲击
TZ33	所有发电机相对初始加速度的平均值
TZ34	所有发电机相对初始加速度的方差

4.4.4 基于 CUEP 处临界势能值选择特征

在忽略暂态过程中的非自治因素条件下，CUEP 处的临界势能函数值可以作为判断

TZ5	系统的能量调整
TZ6	故障切除时系统冲击的大小
TZ7	故障切除时与中心 COI 相差最大的转速
TZ8	故障切除时与中心 COI 相差最大的功角
TZ9	故障切除时领先机与殿后机的功角差
TZ10	故障切除时最大的角加速度之差
TZ11	故障切除时最大的角加速度的变化率之差
TZ12	故障切除时最大的转子动能之差
TZ13	故障切除时最大的转子动能变化率之差
TZ14	TZ13/TZ11
TZ15	TZ13/TZ12
TZ16	TZ12/TZ9
TZ17	TZ13/TZ9
TZ18	TZ12/TZ11
TZ19	故障瞬间转子加速度的最大值
TZ20	具有最大加速度发电机的初始角度
TZ21	所有转子处世加速度的最小值
TZ22	故障切除时发电机的最大动能
TZ23	故障切除时具有最大动能的发电机的功角
TZ24	所有发电机初始加速度的方差
TZ25	故障切除时具有最大转角发电机的动能
TZ26	所有发电机初始加速功率的均值
TZ27	所有发电机初始加速功率的方差
TZ28	所有发电机相对初始加速功率的均值
TZ29	所有发电机相对初始加速功率的方差
TZ30	所有发电机初始加速度的均值
TZ31	故障瞬间发电机所承受的最大有功冲击
TZ32	故障瞬间发电机所受的最小有功冲击
TZ33	所有发电机相对初始加速度的平均值
TZ34	所有发电机相对初始加速度的方差

4.4.4 基于 CUEP 处临界势能值选择特征

在忽略暂态过程中的非自治因素条件下，CUEP 处的临界势能函数值可以作为判断

系统稳定的一个依据：如果系统在故障切除瞬间的动能与势能之和小于 CUEP 处的势能值，则系统稳定；反之则不稳定。据此，可以构造基于 CUEP 处临界势能值的输入特征。

求取 CUEP 处临界势能的方法如下^[179]：

当假设失稳系统中的母线被分成两个同调群时，定义 B_π ：相角约等于 180° 的母线组； B_0 ：相角约等于 0° 的母线组。于是在 UEP $x^u = (V^u, \alpha^u)$ 处的线路两端的相角差：

$$\sigma_j^u = \begin{cases} \pi - \sigma_j^s & \text{潮流从 } B_\pi \text{ 到 } B_0 \\ -\pi - \sigma_j^s & \text{潮流从 } B_0 \text{ 到 } B_\pi \end{cases}, \text{ 其它 } \sigma_k^u = \sigma_k^s。$$

注意到上式构成潮流方程的一组解，构成一个 UEP，并用到了 $V^u \approx V^s$ 。

带入势能方程并化简得到 UEP 处的势能函数值：

$$V_{PE}(\alpha^u) = \sum \{V_i^s V_k^s B_{ik} (2 \cos(\alpha_i^s - \alpha_k^s) \pm \pi \sin(\alpha_i^s - \alpha_k^s))\}$$

求和是对 B_π 和 B_0 间的所有线路的。具体求解过程见文[180]。

故基于 CUEP 处的临界势能方法启发的输入特征选取如下：

- (1) 故障支路的 B_{ij} 及故障前的 P_{ij} ；
- (2) 故障后两端相角差最大的 k 个线路的 B_{ij} 、转速差最大的 k 个线路的 B_{ij} ；这些线路通常属于 B_π 和 B_0 间；
- (3) 最大的前 k 个故障瞬间节点注入功率失配量 ΔP_i ；
- (4) 故障切除时刻最大的前 k 个 δ_i 和较小的 k 个 δ_i ；
- (5) P_{mi} 、 P_{Li} 和关键线路的 P_{ij} 。关键线路是指故障前后功率变化最大的（受冲击最大的），这些功率从另一个角度表达 α_{ik}^s ；
- (6) 故障切除时刻最大和最小的 k 个 ω_i ；
- (7) 故障切除时刻最大的 k 个发电机动能 Wk_i ；
- (8) 最大的发电机内电势 E_i ，及受冲击最大的前 k 个发电机的 E_i 。

4.5 仿真分析

本文在 IEEE39-BUS 系统和 IEEE145-BUS 系统上进行仿真。对于 IEEE39-BUS 系统，发电机模型采用经典模型，选取故障为三相短路，故障清除时间为 0.1s。在 70%~130% 基准负荷范围内随机设置负荷并配置相应的发电出力，随机设置不同的故障位置及故障元件，共得到 600 个样本。随机抽取其中 400 个样本作为训练集（其中，200 个样本用来训练第 1 层子 SVM，200 个用来训练第 2 层 SVM），其余 200 个作为测试集。在 IEEE145-BUS 系统中，则增加了综合负荷模型，在 B34、B35、B51、B66、B74、B93 等几个负荷较重的节点上使用了综合负荷模型，负荷均由马达负荷、恒功率负荷、恒阻抗负荷及恒电流负荷组成，组成比例由程序随机生成。其中的马达负荷构成比例 <30%，

系统稳定的一个依据：如果系统在故障切除瞬间的动能与势能之和小于 CUEP 处的势能值，则系统稳定；反之则不稳定。据此，可以构造基于 CUEP 处临界势能值的输入特征。

求取 CUEP 处临界势能的方法如下^[179]：

当假设失稳系统中的母线被分成两个同调群时，定义 B_π ：相角约等于 180° 的母线组； B_0 ：相角约等于 0° 的母线组。于是在 UEP $x^u = (V^u, \alpha^u)$ 处的线路两端的相角差：

$$\sigma_j^u = \begin{cases} \pi - \sigma_j^s & \text{潮流从 } B_\pi \text{ 到 } B_0 \\ -\pi - \sigma_j^s & \text{潮流从 } B_0 \text{ 到 } B_\pi \end{cases}, \text{ 其它 } \sigma_k^u = \sigma_k^s。$$

注意到上式构成潮流方程的一组解，构成一个 UEP，并用到了 $V^u \approx V^s$ 。

带入势能方程并化简得到 UEP 处的势能函数值：

$$V_{PE}(\alpha^u) = \sum \{V_i^s V_k^s B_{ik} (2 \cos(\alpha_i^s - \alpha_k^s) \pm \pi \sin(\alpha_i^s - \alpha_k^s))\}$$

求和是对 B_π 和 B_0 间的所有线路的。具体求解过程见文[180]。

故基于 CUEP 处的临界势能方法启发的输入特征选取如下：

- (1) 故障支路的 B_{ij} 及故障前的 P_{ij} ；
- (2) 故障后两端相角差最大的 k 个线路的 B_{ij} 、转速差最大的 k 个线路的 B_{ij} ；这些线路通常属于 B_π 和 B_0 间；
- (3) 最大的前 k 个故障瞬间节点注入功率失配量 ΔP_i ；
- (4) 故障切除时刻最大的前 k 个 δ_i 和较小的 k 个 δ_i ；
- (5) P_{mi} 、 P_{Li} 和关键线路的 P_{ij} 。关键线路是指故障前后功率变化最大的（受冲击最大的），这些功率从另一个角度表达 α_{ik}^s ；
- (6) 故障切除时刻最大和最小的 k 个 ω_i ；
- (7) 故障切除时刻最大的 k 个发电机动能 Wk_i ；
- (8) 最大的发电机内电势 E_i ，及受冲击最大的前 k 个发电机的 E_i 。

4.5 仿真分析

本文在 IEEE39-BUS 系统和 IEEE145-BUS 系统上进行仿真。对于 IEEE39-BUS 系统，发电机模型采用经典模型，选取故障为三相短路，故障清除时间为 0.1s。在 70%~130% 基准负荷范围内随机设置负荷并配置相应的发电出力，随机设置不同的故障位置及故障元件，共得到 600 个样本。随机抽取其中 400 个样本作为训练集（其中，200 个样本用来训练第 1 层子 SVM，200 个用来训练第 2 层 SVM），其余 200 个作为测试集。在 IEEE145-BUS 系统中，则增加了综合负荷模型，在 B34、B35、B51、B66、B74、B93 等几个负荷较重的节点上使用了综合负荷模型，负荷均由马达负荷、恒功率负荷、恒阻抗负荷及恒电流负荷组成，组成比例由程序随机生成。其中的马达负荷构成比例 <30%，

恒功率<30%，恒电流<30%，剩余为恒阻抗。共得到 800 个样本。随机抽取其中 600 个作为训练集（其中，300 个样本用来训练第 1 层子 SVM，300 个用来训练第 2 层 SVM），其余 200 个作为测试集。

4.5.1 数据样本获取与预处理

在实际系统中，大量的实验样本同样只能靠仿真获得，因为暂态稳定的实测、实验数据是难以获得的。SVM 对训练与测试样本的要求是符合独立同分布规律（即所有测试样本与训练样本间要服从同一分布函数）且各组样本间彼此是独立的。因此，基于实际系统中已有的运行方式数据，所进行的预想故障计算结果即可构成 SVM 的训练、测试样本集。从这些样本中随机抽取一部分作为训练样本集，另一部分作为测试样本集，即可满足独立同分布要求。值得指出的是，这些计算结果并不需要单独为 SVM 计算准备。事实上，所有电力公司的相关部门为了制定系统运行方式的计划，均已完成了大量此类型的计算，其结果是直接可用的。在相关部门积累的这些计算结果中，不仅包含了系统的典型工况、重要故障，还隐含了描述系统所必须使用的模型的详细程度等专家知识，其中所包含的信息量对训练 SVM 而言是充分的。文[173]的计算也表明：不用任何额外的数据支持，仅利用这些数据就可以训练出有效的稳定判别分类器。

4.5.2 子分类器构造

经计算发现：对于 IEEE39-BUS 系统，经过 CV 算法对核函数的参数进行优化后，不同的核函数所得到的分类器效果相差不多；而对于 IEEE145-BUS 系统，使用高斯核函数的效果最好。有测试表明，在某些系统的计算中，核函数不同则可能对应差异很大的结果^[173]。然而关于核函数如何选择的问题，理论上尚没有统一的方法，即使是针对某一特定问题，大量采用的仍是试探法。这也是 SVM 当前研究的重要问题之一。

4.5.3 子分类器融合及其性能分析

信息融合在不同的若干输入组合上进行。通过不同组合可以发现哪些组合的效果最好。以下是仿真给出的测试结果。

表 4-2 仿真结果
Table.4-2 Simulation Result

方案序号	分类器融合方案	IEEE39-BUS 系统 测试正确率/%	IEEE145-BUS 系 统测试正确率/%
1	子分类器 1	86.5	88.0
2	子分类器 2	84.0	82.0

恒功率<30%，恒电流<30%，剩余为恒阻抗。共得到 800 个样本。随机抽取其中 600 个作为训练集（其中，300 个样本用来训练第 1 层子 SVM，300 个用来训练第 2 层 SVM），其余 200 个作为测试集。

4.5.1 数据样本获取与预处理

在实际系统中，大量的实验样本同样只能靠仿真获得，因为暂态稳定的实测、实验数据是难以获得的。SVM 对训练与测试样本的要求是符合独立同分布规律（即所有测试样本与训练样本间要服从同一分布函数）且各组样本间彼此是独立的。因此，基于实际系统中已有的运行方式数据，所进行的预想故障计算结果即可构成 SVM 的训练、测试样本集。从这些样本中随机抽取一部分作为训练样本集，另一部分作为测试样本集，即可满足独立同分布要求。值得指出的是，这些计算结果并不需要单独为 SVM 计算准备。事实上，所有电力公司的相关部门为了制定系统运行方式的计划，均已完成了大量此类型的计算，其结果是直接可用的。在相关部门积累的这些计算结果中，不仅包含了系统的典型工况、重要故障，还隐含了描述系统所必须使用的模型的详细程度等专家知识，其中所包含的信息量对训练 SVM 而言是充分的。文[173]的计算也表明：不用任何额外的数据支持，仅利用这些数据就可以训练出有效的稳定判别分类器。

4.5.2 子分类器构造

经计算发现：对于 IEEE39-BUS 系统，经过 CV 算法对核函数的参数进行优化后，不同的核函数所得到的分类器效果相差不多；而对于 IEEE145-BUS 系统，使用高斯核函数的效果最好。有测试表明，在某些系统的计算中，核函数不同则可能对应差异很大的结果^[173]。然而关于核函数如何选择的问题，理论上尚没有统一的方法，即使是针对某一特定问题，大量采用的仍是试探法。这也是 SVM 当前研究的重要问题之一。

4.5.3 子分类器融合及其性能分析

信息融合在不同的若干输入组合上进行。通过不同组合可以发现哪些组合的效果最好。以下是仿真给出的测试结果。

表 4-2 仿真结果
Table.4-2 Simulation Result

方案序号	分类器融合方案	IEEE39-BUS 系统 测试正确率/%	IEEE145-BUS 系 统测试正确率/%
1	子分类器 1	86.5	88.0
2	子分类器 2	84.0	82.0

恒功率<30%，恒电流<30%，剩余为恒阻抗。共得到 800 个样本。随机抽取其中 600 个作为训练集（其中，300 个样本用来训练第 1 层子 SVM，300 个用来训练第 2 层 SVM），其余 200 个作为测试集。

4.5.1 数据样本获取与预处理

在实际系统中，大量的实验样本同样只能靠仿真获得，因为暂态稳定的实测、实验数据是难以获得的。SVM 对训练与测试样本的要求是符合独立同分布规律（即所有测试样本与训练样本间要服从同一分布函数）且各组样本间彼此是独立的。因此，基于实际系统中已有的运行方式数据，所进行的预想故障计算结果即可构成 SVM 的训练、测试样本集。从这些样本中随机抽取一部分作为训练样本集，另一部分作为测试样本集，即可满足独立同分布要求。值得指出的是，这些计算结果并不需要单独为 SVM 计算准备。事实上，所有电力公司的相关部门为了制定系统运行方式的计划，均已完成了大量此类型的计算，其结果是直接可用的。在相关部门积累的这些计算结果中，不仅包含了系统的典型工况、重要故障，还隐含了描述系统所必须使用的模型的详细程度等专家知识，其中所包含的信息量对训练 SVM 而言是充分的。文[173]的计算也表明：不用任何额外的数据支持，仅利用这些数据就可以训练出有效的稳定判别分类器。

4.5.2 子分类器构造

经计算发现：对于 IEEE39-BUS 系统，经过 CV 算法对核函数的参数进行优化后，不同的核函数所得到的分类器效果相差不多；而对于 IEEE145-BUS 系统，使用高斯核函数的效果最好。有测试表明，在某些系统的计算中，核函数不同则可能对应差异很大的结果^[173]。然而关于核函数如何选择的问题，理论上尚没有统一的方法，即使是针对某一特定问题，大量采用的仍是试探法。这也是 SVM 当前研究的重要问题之一。

4.5.3 子分类器融合及其性能分析

信息融合在不同的若干输入组合上进行。通过不同组合可以发现哪些组合的效果最好。以下是仿真给出的测试结果。

表 4-2 仿真结果
Table.4-2 Simulation Result

方案序号	分类器融合方案	IEEE39-BUS 系统 测试正确率/%	IEEE145-BUS 系 统测试正确率/%
1	子分类器 1	86.5	88.0
2	子分类器 2	84.0	82.0

3	子分类器 3	88.0	83.5
4	子分类器 4	84.0	80.5
5	所有输入特征取并集	88.0	85.0
6	子分类器 1、2、3 融合	94.0	93.5
7	子分类器 1、2、4 融合	93.0	91.5
8	子分类器 1、3、4 融合	93.0	93.0
9	子分类器 2、3、4 融合	94.0	92.0
10	子分类器 1、2、3、4 融合	96.0	95.5

由于子分类器的输入特征仅为经过初步分析选择出的,故 4 组子分类器的分类效果均不理想,达不到应用要求的精度。对所有输入特征取并集,其结果并未显著提高分类精度。但经过信息融合后,分类器则被明显强化,分类精度显著提高。

从错误分类结果索引分析中可以发现,融合后的分类器与子分类器的分类结果相比,有如下几种情形:

(1) 强校正。融合后的分类器能在少数分类器结果正确而多数分类器结果错误的情形下仍然得到正确结果。以第 6 组分类器融合方案(1、2、3 融合)为例,39-BUS 系统的结果中,子分类器 1、2 均错分的样本有 10 个,但其中有 6 个在最终融合结果中被校正过来,就是说,子分类器 3 的正确分类校正了子分类器 1、2 的 2 个错误分类结果,少数派获胜,这是融合方法的一大独到优势。在 145-BUS 系统的结果中,该比例为 6/11。强校正现象的原因在于这些样本虽然被子分类器 1、2 错分类,但判别函数的计算表明这些样本均位于分类器 1、2 的类别边界上,在这些区域容易发生错分类;而该样本在分类器 3 中则远离类别边界,在这些区域分类正确的可靠性较高,故最终融合结果仍为正确分类。这一点充分说明了所加入的融合 SVM 具有判断子分类器分类结果有效性的功能。这也是融合能够显著提高分类精度的主要原因。

(2) 反常校正。反常校正是指在所有子分类器均错误分类时,融合后的结果仍然是正确的。造成反常校正现象的根源在于,在训练第 2 层 SVM 的样本中,也存在反常校正的样本,这些样本被分类器“记忆”了下来。在 39-BUS 系统中,上述子分类器 1、2 均错分的另 4 个样本中有 3 个未被校正,仍存在于融合后的错分样本中,还有 1 个被子分类器 3 也错分,但在最终融合结果中却被反常校正为正确分类了。

(3) 过度校正。过度校正是指在只有少数子分类器分类错误而多数子分类器分类正确的情况下,融合后的分类结果却出现错误。过度校正现象也说明子分类器数目并非越多越好。本文中 39-BUS 系统仿真结果的方案 6、8 中及 145-BUS 系统仿真结果的方案 7、8、9 中,各出现了一个过度校正的样本。

(4) 融合失败。融合失败是指在所有子分类器分类结果均正确时,融合后的结果却是错误的。本文仿真中未出现融合失败的情况。

对分类器的互补性能做如下分析：

(1) 被校正的样本数（强校正与反常校正之和）与总的错分样本数的比值。以 39-BUS 系统仿真结果的方案 6 为例，子分类器 1、2 错分被 3 校正过来的比例为 6/10，子分类器 1、3 错分被 2 校正过来的比例为 5/7，2、3 错分被 1 校正的比例为 5/9。可以看出，尽管子分类器 2 的分类效果较差，但它对于校正子分类器 1、3 却能起到较好的作用（5/7，在 145-BUS 系统中的比例为 5/8）。

(2) 融合结果中的错分样本归类。仍以 39-BUS 系统仿真结果的方案 6 为例，最终结果中的 12 个错分样本中有 5 个是子分类器 1、2、3 均错分的（这 5 组样本有 3 组在子分类器 4 中也被错分并保留在第 10 组融合方案中了，另 2 组被子分类器 4 正确分类并在第 10 组融合方案中校正了过来），另外的 7 个错分样本中的 6 个是两组错分没有被另外一组校正的，另一个是被过度校正而造成错误的。对于其它组合的融合方案，也可以做相同分析。

应指出的是，本文仿真结果中 4 组子分类器一起融合的分类效果最佳，但这并非意味着子分类器数目越多越好。当某些子分类器因输入特征选择不当而造成彼此冲突时，就有可能出现“过度校正”和融合失败数量的增加，造成融合后分类精度的降低。通常寻找最优子分类器数目和组合的方法是测试几种情况后留下最好的，而严格的方法是使用最优脑损伤算法^[182]，从一个全连接的网络开始，然后从中去除连接。在网络经过第一次训练之后，用信息论方法确定一个可丢弃的连接的最优选择，网络再次训练，如果性能没有降低，则重复这个过程。在本文提出的 2 层 SVM 融合模型中，最差情形下的计算复杂度为 $O(2^n)$ 。如何寻找计算复杂度更低的有效算法，是一个应进一步研究的课题。

4.6 本章总结

利用机器学习方法来对电网运行中所积累下来的大量关于暂态稳定的实际运行工况记录和仿真分析样本进行数据挖掘，构造有效的暂态稳定判别算法是一个很有意义的课题，一方面可以达到从繁多的数据中发现知识的目的，另一方面，所构造出的暂态稳定判别算法具有快速、灵活等优点，与现有的传统暂态稳定分析方法形成有机互补，为暂态稳定的在线计算和决策提供了一条新的分析途径。

支持向量机方法是一种非常有效的小样本学习方法。为解决支持向量机方法应用于暂态稳定分析中所遇到的输入特征选择难的问题，本文根据信息融合思想构造了 2 层 SVM 组合分类器模型，采取对来自于不同启发知识所构造出的多组输入特征子分类器计算结果进行信息融合，通过第二层分类器的引入有效的降低了预测结果对输入特征选择的敏感性。IEEE 39-BUS 和 IEEE 145-BUS 系统上进行的仿真表明，信息融合方法具有以下明显优势：

对分类器的互补性能做如下分析：

(1) 被校正的样本数(强校正与反常校正之和)与总的错分样本数的比值。以 39-BUS 系统仿真结果的方案 6 为例,子分类器 1、2 错分被 3 校正过来的比例为 6/10,子分类器 1、3 错分被 2 校正过来的比例为 5/7,2、3 错分被 1 校正的比例为 5/9。可以看出,尽管子分类器 2 的分类效果较差,但它对于校正子分类器 1、3 却能起到较好的作用(5/7,在 145-BUS 系统中的比例为 5/8)。

(2) 融合结果中的错分样本归类。仍以 39-BUS 系统仿真结果的方案 6 为例,最终结果中的 12 个错分样本中有 5 个是子分类器 1、2、3 均错分的(这 5 组样本有 3 组在子分类器 4 中也被错分并保留在第 10 组融合方案中了,另 2 组被子分类器 4 正确分类并在第 10 组融合方案中校正了过来),另外的 7 个错分样本中的 6 个是两组错分没有被另外一组校正的,另一个是被过度校正而造成错误的。对于其它组合的融合方案,也可以做相同分析。

应指出的是,本文仿真结果中 4 组子分类器一起融合的分类效果最佳,但这并非意味着子分类器数目越多越好。当某些子分类器因输入特征选择不当而造成彼此冲突时,就有可能出现“过度校正”和融合失败数量的增加,造成融合后分类精度的降低。通常寻找最优子分类器数目和组合的方法是测试几种情况后留下最好的,而严格的方法是使用最优脑损伤算法^[182],从一个全连接的网络开始,然后从中去除连接。在网络经过第一次训练之后,用信息论方法确定一个可丢弃的连接的最优选择,网络再次训练,如果性能没有降低,则重复这个过程。在本文提出的 2 层 SVM 融合模型中,最差情形下的计算复杂度为 $O(2^n)$ 。如何寻找计算复杂度更低的有效算法,是一个应进一步研究的课题。

4.6 本章总结

利用机器学习方法来对电网运行中所积累下来的大量关于暂态稳定的实际运行工况记录和仿真分析样本进行数据挖掘,构造有效的暂态稳定判别算法是一个很有意义的课题,一方面可以达到从繁多的数据中发现知识的目的,另一方面,所构造出的暂态稳定判别算法具有快速、灵活等优点,与现有的传统暂态稳定分析方法形成有机互补,为暂态稳定的在线计算和决策提供了一条新的分析途径。

支持向量机方法是一种非常有效的小样本学习方法。为解决支持向量机方法应用于暂态稳定分析中所遇到的输入特征选择难的问题,本文根据信息融合思想构造了 2 层 SVM 组合分类器模型,采取对来自于不同启发知识所构造出的多组输入特征子分类器计算结果进行信息融合,通过第二层分类器的引入有效的降低了预测结果对输入特征选择的敏感性。IEEE 39-BUS 和 IEEE 145-BUS 系统上进行的仿真表明,信息融合方法具有以下明显优势:

(1) 有效解决了 SVM 的输入特征选择的难题, 能够以弱规则为基础, 经过融合模型的学习得到比原有规则强得多的新规则, 新规则具有很好的模型适应能力。经过强化后的规则能够满足工程应用要求;

(2) 即使在少数分类器得到的结果正确而多数分类器结果错误的情形下, 融合结果也有可能是正确的, 并能保持较高的校正比例, 体现了有效域思想。

如何快速地计算出基于哪些组弱规则进行信息融合能最有效地得到强规则, 即对哪些子分类器进行信息融合才得到最佳分类器, 是一个值得进一步研究的课题。同时, 通过分析校正样本, 研究各种预测方法的互补性能及各自的有效域, 也体现出采用非模型方法分析暂态稳定的优势。

第五章 结论

随着现代电力系统规模的不断发展,系统结构和运行方式日益复杂,系统行为更加多变,这给调度人员执行调度任务带来了巨大的挑战。而随着计算机技术和通信技术的迅猛发展,更加丰富、准确的数据可以被更加快速、灵活的传送到电网的调度控制中心,在控制中心处可以实现更加准确、智能化的数据分析,从而为调度人员提供最有用、最直接的调度决策支持。

本文围绕建立电网调度决策支持系统展开,以保证电网的安全稳定运行为首要目标,以现有 EMS 系统和当前电网监测水平为基础,研究了为电网调度提供故障处理和暂态稳定分析方面提供决策支持的若干分析方法。方法可以为在现有 EMS 基础上构建电网调度决策支持系统提供理论和实际参考。主要工作如下:

(1) 将本体论方法引入电力系统软件建模,建立了用于电力系统调度分析软件设计的领域本体,定义了构成电力系统调度分析所有活动的六类类型本体及其概念关系,以此做为调度决策支持系统软件的统一知识库。该领域本体以 IEC61970CIM 模型为基础,并扩展了对状态、事件两种本体的定义和形式化,使应用软件和系统间能进行更高级别和抽象概念的互联与信息共享,在数据标准化的基础上,进一步实现了应用间的知识表示的统一,使系统具有了更好的开放性和交互效率。基于本体,应用系统的各个模块间的交互复杂度由 $O(n^2)$ 降至 $O(n)$;

(2) 为调度决策支持系统构建了多智能体型的体系结构。以建立的领域本体为基础,提出了一种新的软件结构,从结构上提高了软件的开放程度;实现了对环境的描述与建模;通过对原有软件系统中的对象进行行为模式定义,赋予对象个体以感知环境的能力和合作完成任务的能力,从而使对象进化为具有自主行为特性的 Agent,构成多 Agent 型软件系统,解决了软件模块在线自主运行和协调计算的问题;

(3) 在故障处理方面,建立了一个基于对象 Petri 网技术的大电网故障恢复的推理机模型,该推理机制能对多种知识表示形式进行有效整合,具有很好的图形建模能力和处理并发的能力,在故障恢复的方案搜索过程中,比常规的基于专家系统的推理机具有更高的求解效率;对大系统的建模和求解,通过采用对象划分的分解技术,降低了普通 Petri 网推理模型的复杂度,有效解决了普通 Petri 网建模中遇到的“组合爆炸”问题;

(4) 提出了一种基于机器学习与信息融合技术的快速暂态稳定评估算法。利用多种测量信息及离线计算所积累的大量仿真样本,采用支持向量机方法对样本集进行训练,构建出了一种快速的暂态稳定评估算法,并利用信息融合技术有效降低了常规的支持向量机遇到的计算结果对于输入特征选择的敏感性,从而提高了评估结果的精度。方法具有很快的计算速度和模型适应性,表现出与传统的基于模型的稳定分析方法间的优

势互补。

作者所在的课题组对电网调度决策支持系统进行了系统而深入的研究,并在地区电网上进行了实践——与兰州供电局合作承担了国家电网公司重点项目“地区电网调度决策支持系统的研究”,开发完成了用于地区电网调度的决策支持软件系统。该软件以现有 EMS 资源为基础,基于 SCADA 系统所能提供的稳态“四遥”数据进行了自动调用型的稳态分析计算(包括网络拓扑分析、状态估计、潮流计算、电压无功优化、静态安全分析、负荷预测等六个稳态分析子模块);在此基础上将部分变电站的保护、录波等二次数据通过高速通信网络接入调度控制中心,以此反映故障特征的数据和反映稳态特征的 SCADA 数据共同作为数据源,实现了计算机故障诊断、故障恢复和故障操作指导功能。此外,还加入了智能调度操作票功能,能在有操作任务时由调度员调用自动开具电网调度操作票。该决策支持系统以电网安全运行、可靠供电作为首要目标,将现有 EMS 的应用范围扩展至了电网故障状态,大大减轻调度员的劳动强度和故障时刻的工作压力,为调度员提供了更加全面的决策支持,向应用于大电网的调度决策支持系统迈出了坚实的一步。

本文还应在以下方面展开进一步的研究工作:

(1) 在建立电力系统调度分析领域本体方面,加强对复杂应用场合下的状态、事件定义及其形式化的研究工作,使软件模块间能更高效的进行知识共享与交互;

(2) 在智能体合作算法方面,加强对环境不确定性的研究,使智能体能在不可靠感知环境的状态下也能正常生存;

(3) 在故障恢复的推理机研究方面,一是要研究“操作失败”的建模,使算法能更好适应实际情形;二是在解决死锁时采用优化程度更高的 A*搜索算法,能更精确的结合评估指标求解出优化的恢复方案;

(4) 在基于机器学习的暂态稳定评估算法方面,应开展对各种子分类器互补性能的进一步研究,发现对哪些子分类器进行信息融合才得到最佳融合结果。

参考文献

- [1] 于尔铿, 谢开等, 能量管理系统, 科学出版社, 北京, 1997
- [2] 王明俊, 傅书邈, 吴玉生, 面向对象设计的开放式能量管理系统, 中国电力出版社, 北京: 1997
- [3] 张伯明, 现代能量控制中心概念的扩展与前景展望, 电力系统自动化, 27(15), Aug, 2003: 1-6
- [4] Farrokh A. Rahimi, Neal J. Balu, and Mark G. Lauby, Assessing online transient stability in energy management systems. IEEE Computer Applications in Power, July, 1991: 44-49
- [5] G. C. Ejebe, C. Jing, J. G. Waight, V. Vittal et al., Online dynamic security assessment in an EMS. IEEE Computer Applications in Power, Jan, 1998: 43-47
- [6] 洪宪平, 走向网络化的远动系统, 电力系统自动化, Vol. 25, No. 5, 2001: 1-4
- [7] 金午桥, 洪宪平, 变电站自动化新技术的应用研究, 电网技术, 24(5), 2000: 38-42
- [8] 赵自刚, 黄华林, 赵春雷等, 继电保护运行故障信息自动化管理系统, 电力系统自动化, 1999, 23(19): 55-57.
- [9] 王 苏, 林风, 张长银, 一种网络化保护故障信息信息管理子站系统的设计思想, 电力系统自动化, 2002, 26 (22) : 59-61.
- [10] Hsiao-Dong Chiang, Cheng-Shan Wang and Hua Li. Development of BCU classifiers for on-line dynamic contingency screening of electric power systems., IEEE Transactions on Power Systems. May, 1999, 14(2): 660 - 666
- [11] 薛禹胜, 现代电网稳定理论和分析技术的研究方向, 电力系统自动化, 2000, 7: 1-6
- [12] Ebrahim Vaahedi, Yakout Mansour, E.K. Tse, A General Purpose Method for On-line Dynamic Security Assessment, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, February 1998: 243-249
- [13] Ebrahim Vaahedi, Kwok W. Cheung, Evolution and Future of On line DSA , Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 1, 2000: 63 - 65
- [14] Kip Morison, Lei Wang, and Prabha Kundur, Power system security assessment. IEEE power & energy magazine, Sep/Oct, 2004: 30-39
- [15] J. L. Jardim, Online Dynamic Security Assessment: Implementation Problems And Potential Use Of Artificial Intelligence, Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Vol. 1, July, 2000: 340 - 345
- [16] Dy-Liacco T E, Enhancing Power System Security Control, Computer Applications in Power, IEEE , 1997, 10(3): 38 -41
- [17] 付强, 王少荣, 基于 PMU 同步数据的电力系统暂态稳定分析方法综述, 继电器, Jan,

- 2003, 31(1): 76-80
- [18] Alan M. Turing, Computing machinery and intelligence. *Mind*, 1950(59): 433-460.
- [19] 万建成, 卢雷, 软件体系结构的原理、组成与应用. 科学出版社, 2002
- [20] Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson and John Vlissides, 设计模式——可复用面向对象软件的基础, 北京: 机械工业出版社, 2000
- [21] 陈文伟, 智能决策技术, 北京: 电子工业出版社, 1998
- [22] IEC TC57 wSI3. Draft IEC 61970: Energy Management System Application Program Interface (EMS-API), 2001.
- [23] 杨成峰, 乐秀璠, 配电网故障恢复专家系统的一种实现, 电力自动化设备, 21(11), 2001:28-31
- [24] 周云海, 胡翔勇, 恢复控制的一般策略和实例分析, 三峡大学学报(自然科学版), 25(5), 2003 :425-428
- [25] J J Ancona, A Framework For Power System Restoration Following A Major Power Failure, *IEEE Trans on Power Systems*, 1995, 10(3): 1480-1485.
- [26] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [27] 周孝信, 郑健超, 沈国荣, 等. 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训 . 电网技术, 2003, 27 (9) : T1.
- [28] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示. 电网技术, 2003, 27 (9) : T2.
- [29] 电力系统专门委员会 (日本), 电力系统稳定性问题与对策, 北京: 水利电力出版社
- [30] [加] 余耀南, 动态电力系统 北京: 水利电力出版社. 1985
- [31] 张晓明, 等. 四川电网低频振荡及控制措施, 中国电力, 2000, 6, 33(6): 36-39
- [32] 电力科学研究院. 安保线功率振荡问题研究. 科研项目 X9911, 1999
- [33] 王铁强, 低频振荡共振机理研究, 华北电力大学博士学位论文, 2001
- [34] Hong H. W., Carl F. I., and David L. B. et al., Integrated Support Systems for Electric Utility Operation , *Computer Applications in Power*, IEEE, Jan. 1992, 5(1): 15 - 20
- [35] Chen Ching Liu, Juhwan Jung, Gerald T. and V. Vittal et al., The Strategic Power Infrastructure Defense (SPID) System: A Conceptual Design. *IEEE Control System Magazine*, Aug, 2000: 40-51
- [36] 卢强, 数字电力系统(DPS), 电力系统自动化, 24(9), May, 2000: 1-4
- [37] Gilberto, P. de Azevedo, Bruno F., and Monica Costa, Control Centers Evolve with Agent Technology. *IEEE Computer Applications in Power*, July, 2000: 48-53
- [38] 刘青, 彭晓兰, 程时杰, 电网调度管理多 AGENT 系统研究, 华中理工大学学报, 25(12), 12, 1997: 63-65
- [39] Qing Zhao, Garng Huang, Xiaowei Wu, and Xiaochuan Luo, A Software Architecture for Power Market Supporting System and Reengineering of Legacy EMS. *IEEE Transactions*

- On Power Systems, Vol. 18, No. 1, Feb 2003: 191-197
- [40] Sakaguchi T, Matsumoto K. Development of a knowledge based system for power system restoration. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1983,102(2):320-329
- [41] C Y. Teo, Conventional and knowledge based approaches in fault diagnosis and supply restoration for power network, IEEE Trans. on Power Systems, vol.13, No.1, Feb, 1998: 8-14
- [42] Juhwan Jung, Chen-Ching Liu, Mingguo Hong, Massimo Gallanti, and Giorgio Tornielli, Multiple Hypotheses and Their Credibility in On-Line Fault Diagnosis, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001: 225-230
- [43] C. Y. Teo and Wei Shen, Development of an Interactive Rule-Based System for Bulk Power System Restoration, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000: 646-651
- [44] Zita A. Vale, Carlos Ramos, A Real-Time Inference Mechanism for Knowledge-Based Applications in Power System Control Centers, International Conference on Electric Power Engineering, Sept. 1999: 28
- [45] 何赞峰,赵冬梅,高曙,郑朝明,一种基于故障录波信息的电网故障诊断方法,电网技术, 26(5, May, 2002: 39-43
- [46] N A Fountas, N D Hatziargyriou and K P Valavanis, Hierarchical Time-Extended Petri Nets As A Generic Tool For Power System Restoration, IEEE Trans on Power Systems , 1997, 12(2): 837-843.
- [47] Jaw-shyang Wu, Chen-Ching Liu and Kan-Lee Liou et al, A Petri Net Algorithm For Scheduling Of Generic Restoration Actions, IEEE Trans on Power Systems , 1997, 12(1):69-76.
- [48] Islam S, Chowdhury N, A case-based expert system for power system restoration. Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Alberta, Canada, May, 1999: 1159-1163
- [49] 毕天姝,倪以信,吴复立,杨奇逊. 基于新型神经网络的电网故障诊断方法,中国电机工程学报, 2002, 2
- [50] Narendra K. G, Sood V. K., Khorasani K. et al., Application of a radial basis function (RBF) neural network for fault diagnosis in a HVDC system. IEEE Trans. On Power systems, 1998,13(1):177-183
- [51] Clemente R, Santiago R, Jose Ignacio M, et al., A Modular Neural Network Approach to Fault Diagnosis. IEEE Trans. on Neural networks, 7(2):326-340
- [52] Wang Xiaoru, Wu Sitao, Qian Qingquan, Neural Network Approach to Power Transmission Line Fault Classification. In: International Conference on Information,

- Communication and Signal Processing. USA:1997
- [53] Wen Fushuan, Han Zhenxiang, Fault Section Estimation in Power Systems Using a Genetic Algorithm. *Electric Power Systems Research*, 1995, 34:165-172
- [54] 郑朝明, 配电网故障恢复方法的研究, 华北电力大学(北京)硕士学位论文, 北京, 2002
- [55] Cho H J, Park J K, An Expert System for Fault Section Diagnosis of Power System Using Fuzzy Relations. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1997, 12(1): 342-348
- [56] Monsef H, Ranjbar A M, Jadid S, Fuzzy Rule-Based Expert System for Power System Fault Diagnosis. *IEE Proceedings--Generation, Transmission and Distribution*, 1997, 14(2):186-192
- [57] Chang C S, Chen J M, Srinivasan D, et al, Fuzzy Logic Approach in Power System fault Section Identification. *IEE Proceedings--Generation, Transmission and Distribution*, 1997, 144(5): 406-414
- [58] 汤磊, 孙宏斌, 张伯明等, 基于信息理论的电力系统在线故障诊断, *中国电机工程学报*, 23(7), 2003:5-11
- [59] 李亚楼, 大规模电力系统机电暂态实时仿真算法及软件的研究, 中国电力科学研究院博士学位论文, 北京, 2003
- [60] Magnusson P C. Transient Energy Method of Calculation Stability. *AIEE Trans.*, 1947, Vol.66:747
- [61] Aylett P D. The Energy Integral Criterion of Transient Stability Limits of Power System. *Proceedings of IEE*, 1958, 105c(8):527-536
- [62] Gless G E. Direct Method of Lyapunov Applied to Transient Power System Stability. *IEEE Trans. PAS*, 1966, PAS-85:159-168
- [63] El-Abiad A, Nagappan H K. Transient Stability Region of Multimachine Power System. *IEEE Trans. PAS*, 1966, Vol. PAS-85:169-178
- [64] Athay T, Sherkar E R, Podmore R et al. Transient Energy Stability Analysis, Conference on System Engineering for Power: Emergency Operating State Control — Section IV. Davos, Switzerland, Sept. 1979, also U.S. Dept. of Energy Publication, No.CONF-790704-PL 1980
- [65] Athay T, et al. A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability, *IEEE Trans.* 1979, Vol. PAS-98: 573-584
- [66] N Kakimoto, Y Ohasawa, M Hayaashi Transient Stability Analysis of Power System via Lure' Type Lypunov Function, Part I& II. *Trans. IEE of Japan*, 1978, 98(5/6):62-79
- [67] H D Chiang, F F Wu, P P Varaiya. A BCU Method for Direct Analysis of Power System Transient Stability. *IEEE/PES 1991 Summer Meeting, San Diego, July 28-Aug 1, 1991*, 91

SM 423-4 PWRS

- [68]Y Xue, T V Cutsem, Ribbens-Pavella M, A Simple Direct Method for Transient Stability Assessment of Large Power Systems. IEEE Trans. on Power Systems, 1988, 3(2):400-412
- [69]Y Xue, P Rousseaux, Z Gao et al. Dynamic Extended Equal Area Criteria Part 1. Basic Formulation, Athens Power Tech Conference: "Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems", Athens, Greece, Sept.5-8,1993. 889-895
- [70]薛禹胜. DEEAC 的理论证明—四论暂态能量函数直接法.电力系统自动化, 1993, 17(7): 7-9
- [71]Steven R., Stein Kreetsinger, James T, And Donald B., Decision Trees For Real-Time Transient Stability Prediction. IEEE Transaction on Power System, Aug. 1994, 9(3):1417-1426
- [72]Robert T. T., King A. H. And Harry C. S. Rughooputh, Real-Time Transient Stability Prediction Using Neural Tree Networks. 1995 Intelligent System For The 21st Century, IEEE International Conference on Systems, Man And Cybernetics,, Vol.3: 2182-2187
- [73]Liu Chih-Wen, Su Mu-Chun, Tsay Shuenn-Shing et al., Application Of A Novel Fuzzy Neural Network To Real-time Transient Stability Swings Prediction Based On Synchronized Phasor Measurements. IEEE Transactions On Power Systems, 1999,14(2): 665-692
- [74]刘玉田, 林飞. 基于相量测量技术和模糊径向基神经网络的暂态稳定性预测. 中国电机工程学报, 2000, 20(2):19-23.
- [75]许涛, 电力系统安全稳定的智能挖掘, 华北电力大学博士学位论文, 北京: 2004
- [76]于之虹, 基于数据挖掘技术的暂态稳定评估研究, 哈尔滨工业大学博士学位论文, 哈尔滨: 2004
- [77]俞宣孟, 本体论研究. 上海: 上海人民出版社; 1999
- [78]Gunnar Skirbekk and Nils Gilje, A History of Western Thought. Routledge Publishers. 2001
- [79]Neches R, Fikes R E, Gruber T R, et al, Enabling Technology for Knowledge Sharing, AI Magazine, 1991,12(3): 36-56
- [80]Gruber T R, A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. Knowledge Acquisition, 1993, 5:199-220
- [81]Studer R, Benjamins V R, Fensel D, Knowledge Engineering, Principles and Methods. Data and Knowledge Engineering, 1998, 25(1-2): 161-197
- [82]Guarino N, Formal Ontology and Information System. Trento: IOS Press, 1998
- [83]Guarino N, Masolo C, Vetere G, OntoSeek: content-Based Access to the Web. IEEE Intelligent Systems, 1999, 14(3): 70-80

- [84]陆汝钤, 金芝, 陈刚 (Lu Ruqian, Jin Zhi, Chen Gang).面向本体的需求分析 (Ontology-Oriented Requirements Analysis).软件学报(Journal of Software), 2000, 11(8):1009-1017.
- [85]邢平平, 施鹏飞, 赵奕(Xing Pingping, Shi Pengfei, Zhao Yi), 基于本体论的数据挖掘方法(Ontology Based Data Mining),计算机工程(Computer Engineering), 2001, 27(5): 15-17.
- [86]傅谦, 张申生, 胡锦敏, 基于本体的领域知识共享研究, 计算机集成制造系统—CIMS, 2001, 7(11):54-58
- [87]Mike Uschold and Michael Gruninger. Ontologies:Principles, Methods and Applications. Knowledge Engineering Review, 1996,11(2):1-63
- [88]Stuart Russell, Peter Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson Education, Inc. 1995
- [89]Perez A G, Benjamins V R, Overview of Knowledge Sharing and Reuse Components: Ontologies and Problem-Solving Methods. In: Stockholm V R, Benjamins B, Chandrasekaran A eds. Proceedings of the IJCAI-99 workshop on Ontologies and Problem-Solving Methods(KRR5),1999,1-15
- [90]Uschold M. Building Ontologies: Towards A Unified Methodology. Expert Systems 96, 1996.
- [91]<http://ksl.stanford.edu/software/ontolingua/>
- [92]<http://protege.stanford.edu/>
- [93]<http://www.isi.edu/isd/loom/loom-home.html>.
- [94]Tim Bray et al, Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Second Edition), W3C Recommendation 6 Oct 2000. <http://www.w3.org/TR/2000/REC-xml-20001006>
- [95]<http://www.cogsci.princeton.edu/~wn/>.
- [96]<http://www.icsi.berkeley.edu/~framenet/>
- [97]<http://www.isi.edu/natural-language/resources/sensus.html>.
- [98]<http://www.darmstadt.gmd.de/publish/komet/gen-um/newUM.html>
- [99]<http://crl.nmsu.edu/Research/Projects/mikro/>
- [100] Bernaras A, Laresgoiti I, Bartolome(LABEIN) N, An Ontology for Fault Diagnosis in Electrical Networks. Intelligent Systems Applications to Power Systems, 1996. Proceedings, ISAP '96., International Conference on , 28 Jan.-2 Feb. 1996
- [101] Dy-liacco T E, Control of power Systems via the multi-level concept, Ph.D Dissertation, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1968
- [102] Dy-liacco T E, The Adaptive Reliability of Control System, IEEE Trans. on PAS, vol. Pas-86, May, 1967: 517-531

- [103] Zaborszky J, Operation of the large Interconnected power system by Decision and Control, IEEE Trans. Power Apparatus Syst. 1980, PAS-99: 37-45
- [104] Zaborszky J, A large System Approach Toward operating the Electric Power System By Decision and Control, Proc. Am. Control Conf. 1984: 1143-1155
- [105] Zaborszky J, Ilic M, Huang G, Computer control of a large power system during faults or inherently adaptive selective protection, IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PWRS-2, 1987: 494-504
- [106] Fink L H, Carlsen K, Operating under stress and strain, IEEE Spectrum, Vol. 15, March 1978: 48-53
- [107] CIGRE Study Committee 32 REPORT, Aids for the Emergency Control of Power System Part I and Part II, IEEE PES Winter Meeting, New York, Feb 1980, A80 002-6
- [108] Schultz R. P., Price W. W., Classification and identification of power system emergencies, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-103, Dec, 1984: 3471-3479
- [109] Stott B, and Monticelli A, Security Analysis and optimization, Proc. IEEE, Vol. 75, Dec, 1987: 1623-1644
- [110] IEC TC57. IEC 61850-7: Communication Networks And Systems In Substations. 2003.
- [111] 史忠植, 智能主体及其应用。科学出版社, 2001
- [112] Wooldridge, M., N. R. Jennings. Agents Theories, Architectures and languages: a Survey. In Wooldridge and Jennings, Intelligent Agents, Berlin : Springer-Verlag, 1995
- [113] Minsky, Marvin. The society of Mind. New York: Simon and Schuster, 1985
- [114] Bratman, M. E. Intentions, Plans and Practical Reason. Harvard Univ. Press, Cambridge, MA, 1987
- [115] Weiss, Multi Agent Systems. MIT press, Cambridge, Massachusetts, 1999
- [116] Pont M J, Moreole E, Towards a Practical Methodology for Agent Oriented Software Engineering with C++. Technical Report 96-33, Department of Engineering, Leicester University, 1996
- [117] Wooldridge M J, et al. The Gaia Methodology for Agent Oriented Analysis and Design. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2000,3(3)285-312
- [118] R. J. Kafka et al., System Restoration Plan Development fro A Metropolitan Electric System. IEEE Trans. vol. PAS-100, No. 8, Aug, 1981: 3703-3713
- [119] M. M. Adibi and L H Fink, Power System Restoration Planning, IEEE Trans on Power Systems, 1991, 9(4): 22-28.
- [120] IEEE Committee Report, System Restoration – Deploying the Plan. COPWG, W. A. Johnson, chmn, IEEE Trans. v. PAS-101, Nov,1982, 4263-4271.

- [121] IEEE Committee Report, Power System Restoration – A Task Force Report., SRTF, M. M. Adibi, chmn, IEEE Trans. v. PWRS-2, May 1987,271-277
- [122] R. Kearsley, Restoration in Sweden and Experience Gained from the Blackout of 1983, IEEE Trans. vol. PWRS-2, No.2, May 1987,422-428
- [123] J. Gutierrez et al., Policies for Restoration of a Power System, IEEE Trans. vol. PWRS-2, No. 4, Nov, 1987,927-933
- [124] F. F. Wu and A. Monticelli, Analytical Tools for Power System Restoration – conceptual Design. IEEE Trans. vol. PWRS-3, No.1, Feb,1988,10-16
- [125] R. M. Hill, Power System Restoration – Western Area Power Administration. EPRI/ECC Power System Restoration Seminar, Denver, Sep 27-28,1993
- [126] T. Volkmann, Assessment of Switching Status and Switching Operation –Northern States Power Company. EPRI/ECC Power System Restoration Seminar, Denver, Sep 27-28,1993
- [127] M. M. Adibi, J. N. Borkowski, and R. J. Kafilka, Analytical Tool Requirements for Power System Restoration. IEEE Transactions on Power Systems, Volume 9, Issue 3, Aug. 1994:1582 - 1591
- [128] M. M. Adibi, J. N. Borkowski, and R. J. Kafilka, Expert System Requirements for Power System Restoration. IEEE Transactions on Power Systems, Volume 9, Issue 3, Aug. 1994 Page(s):1592 - 1600
- [129] 蒋雷海,万芳茹,徐泰山,电力系统故障恢复方法简述,电力自动化设备, Vol. 22, No. 5, May, 2002:70-73
- [130] 李志民,刘迎春,李卫星,胡键. 电力系统恢复典型案例分析. 电力系统自动化, Vol. 27, No.2, Jan, 2003:60-64
- [131] 葛朝强,唐国庆,王磊,综合智能式的故障恢复专家系统——与故障恢复算法集相结合的自学习模糊专家系统, 电力系统自动化, Vol. 24, No. 4, Feb, 2000:17-21
- [132] 赖宏毅,朱江,汤卫东. 大电网事故后的恢复处理方法初探, 华中电力, Vol.13, No.5, May, 2000:37-39
- [133] E. K. Nielson, IEEE committee Report, System Operations Challenges. COPWG, IEEE Trans. vol. PWRS-3, Feb, 1988, 118-126
- [134] M. M. Adibi, and R. J. Kafilka, Power System Restoration Issues. IEEE Computer Applications in Power, vol. 4, No. 2, Apr, 1991:19-24
- [135] M. M. Adibi, IEEE committee Report, An Approach to Standing Phase Angle Reduction, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 9, Issue 1, Feb. 1994: 470 - 478
- [136] N. A. Fountas, N. D. Hatziargyriou and C. Orfanogiannis et al., Interactive

- Long-Term Simulation for Power System Restoration Planning. IEEE Trans. on Power Systems, 1997,12(1):61-68
- [137] R. J. Kafilka, Active and Reactive Power Balance – Potomac Electric Power Company. EPRI/ECC Power System Restoration Seminar, Denver, Sep 27-28,1993
- [138] J. G. Raine. Reactive Power Balance (Part IV, 1 in PES Task Force Report: Power System Restoration). IEEE Trans. vol. PWRS-2, May, 1987: 271-277
- [139] M. M. Adibi, IEEE committee Report, Overvoltage control During Restoration. IEEE Trans. vol. PWRS-7, No. 4, Nov, 1992:1464-1470
- [140] M. M. Adibi and D. P. Milanicz, Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines. IEEE/PES 1993 WPM, Feb, 1993
- [141] M. M. Adibi. Reactive Power Balance (in PES Working Group Report: Special considerations in Power System Restoration). IEEE/PES 1993 WPM, Columbus, Feb, 1993
- [142] J. M. Miller. Optimal Sequencing of Starting-up Generating Units (in PES Working Group Report: Special considerations in Power System Restoration). IEEE Trans. vol. PWRS-7, No. 4, Nov, 1992:1419-1427
- [143] J. L. Lams, M. Monseu, Operation of Generating Units During System Disturbances. CIGRE 1986: 39-07
- [144] Sakaguchi T, Matsumoto K. Development of a knowledge based system for power system restoration. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1983,102(2):320-329
- [145] N A Fountas, N D Hatziargyriou and K P Valavanis, Hierarchical Time-Extended Petri Nets As A Generic Tool For Power System Restoration, IEEE Trans on Power Systems , 1997, 12(2): 837-843.
- [146] Jaw-shyang Wu, Chen-Ching Liu and Kan-Lee Liou et al, A Petri Net Algorithm For Scheduling Of Generic Restoration Actions, IEEE Trans on Power Systems , 1997, 12(1):69-76.
- [147] Jaw-shyang Wu, A Petri-Net Algorithm for Multiple Contingencies of Distribution System Operation. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3):1164-1171
- [148] 程云志, 房鑫炎. Petri Nets 算法在电力系统恢复中的应用, 电力自动化设备, Vol. 23, No. 5, May, 2003:12-15
- [149] 赖晓平,周鸿兴, 电力系统网络拓扑分析的有色 Petri 网模型, 电网技术,2000, 24(12): 5-10.
- [150] 任惠,赵洪山,米增强,刘艳, 基于编码PETRI网的电网故障诊断, 电网技术,2004, 28(5): 64-68.
- [151] 王建元, 纪延超,模糊 Petri 网络知识表示方法及其在变压器故障诊断中的应用,

- 中国电机工程学报, 2003, 23(1):121-125.
- [152] 王楠, 律方成, 刘云鹏等, 基于粗糙集理论与模糊 Petri 网络的油浸电力变压器综合故障诊断, 中国电机工程学报, 2003, 23(12):127-132.
- [153] 喻菁, 周建中, 戴洪海等, 机组组合问题的复合控制有色 Petri 网模型, 电网技术, 2004, 28(11): 62-67.
- [154] 吕书强, 秦世引, 宋永华. 混杂电力系统频率紧急控制的 Petri 网建模与仿真. 电力系统自动化, Vol.25, No. 5, Mar 2001: 4-8
- [155] 赵洪山, 米增强, 杨奇逊. 基于冗余嵌入 Petri 网技术的变电站故障诊断. 电力系统自动化, Vol.26, No. 3, Feb 2002: 32-35
- [156] 江志斌. Petri 网及其在制造系统建模与控制中的应用. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [157] Wang Lee, Objected-oriented Petri Nets for modeling and analysis of automated manufacturing systems. Computer Integrated Manufacturing systems, 26(2), 1996, 111-125
- [158] Wang Lee, An integrated Object-Oriented Petri Net Paradigm for manufacturing control Systems. International Journal of computer Integrated Manufacturing, 9(1), 1996: 72-87
- [159] C. A. Petri, Kommunikation mit Automaten. Ph.D. thesis, University of Bonn, Bonn, 1962
- [160] 袁崇义, Petri 网原理, 北京: 电子工业出版社, 1998
- [161] Englist S L., coloured Petri nets for object oriented modeling [dissertation]. Brighton: Univ. of Brighton, 1993
- [162] L. M. Kristensen et al., The Practitioner's guide to colored Petri nets. International Journal on Software Tools for Technology Transfer. Vol. 2, 1998: 98-132
- [163] M. M. Adibi, Load – Generation Balance (Part IV, 2 in PES Task Force Report: Power System Restoration). IEEE Trans. vol. PWRS-2, May, 1987: 271-277
- [164] 周云海, 闵勇. 负荷的快速恢复算法研究. 中国电机工程学报, Vol.23, No.3, 2003:74-79
- [165] 顾雪平, 曹绍杰, 张文勤. 基于神经网络暂态稳定评估方法的一种新思路. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 77-83.
- [166] 戴仁昶, 张伯明, 戚其荟. 暂态稳定仿真的综合人工智能方法. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 1-5.
- [167] 王平洋. 电工数学与智能技术. 电网技术, 1998, 22(5): 1-4.
- [168] Vladimir N. Vapnik, 张学工译, 统计学习理论的本质. 北京: 清华大学出版社, 2000.

- [169] 赵登福,王蒙,张讲社,王锡凡. 基于支撑向量机方法的短期负荷预测. 中国电机工程学报, 2002,22(4): 26-30
- [170] 董明,孟源源,徐长响等. 基于支持向量机及油中溶解气体分析的大型电力变压器故障诊断模型研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 88-92
- [171] 李元诚,方廷健,于尔铿. 短期负荷预测的支持向量机方法研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 55-59
- [172] 许涛,贺仁睦,王鹏等. 基于统计学习理论的电力系统暂态稳定评估. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 51-55.
- [173] Moulin L S, A. P. Alves da Silva, El-Sharkawi M A et al. Support vector machines for transient stability analysis of large-scale power systems. IEEE Trans. on Power Systems, 2004,19(2): 818-825.
- [174] Vladimir N. Vapnik, 许建华, 张学工译, 统计学习理论(Statistic Learning Theory), 北京: 电子工业出版社(Beijing: Electronics Industry Press), 2004
- [175] Muller K. R., Mika S. and Ratsch G., et al, An Introduction to Kernel-Based Learning Algorithm ,IEEE Trans. On N.N., 2001, 12(2): 181-201
- [176] 康耀红. 数据融合理论与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997.
- [177] Efron B. Estimating the error rate of a prediction rule: Improvement on cross-validation. Journal of the American Statistical Association, 1983, 78: 316-331.
- [178] 唐巍,陈学允, BP 算法应用于电力系统暂态稳定分析的新策略.电力系统自动化, 1997, 21(3): 47-50.
- [179] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性理论与方法.北京: 科学出版社, 1999.
- [180] 曾沅,余贻鑫, 电力系统动态安全域的实用解法.中国电机工程学报, 2003, 23(5): 24-28.
- [181] 曾沅,樊纪超,余贻鑫等, 电力大系统实用动态安全域, 电力系统自动化, 2001, 25(16): 6-10
- [182] Le Cun Y, Jackel L, Boser B et al. Handwritten digit recognition: Applications of neural network chips and automatic learning. IEEE Communications Magazine, 1989,27(11): 41-46.

致 谢

本论文的工作是在导师杨以涵教授精心指导下完成的。衷心感谢导师六年来始终如一的教导和关心。杨老师高尚的人格、宽广的胸怀、渊博的知识、对科学前沿的敏锐洞察力、严谨的治学作风，以及对真理的不懈追求与无私奉献精神，深深的激励着我，让我在学业和做人上都终生受益。借此论文完成之际，谨向导师杨以涵教授致以诚挚的敬意和深深的感谢！

在论文和课题的工作过程中，得到了华北电力大学刘文颖老师的关怀与指导，刘老师还为作者所从事的课题的顺利进行提供了宽松、优越的科研条件，在此表示衷心感谢！于尔铿老师在课题进展的关键阶段给予了极为重要的指导和帮助，衷心感谢于老师所给予的热情帮助！

在论文的研究工作和对课题的探索、实践过程中，戚宇林老师、张东英老师、林俐老师、舒隽老师以及课题组其他硕士、博士都给予作者以大力支持和帮助。研究生郭金智、赵川、李勇等同学在课题工作中给予了作者大力帮助，没有他们的工作，本文不可能顺利完成。高曙老师、贺仁睦老师、谭伟璞老师、鲍海老师、郝玉山老师、王鹏老师等在学习过程中给作者很多指导和有启发性的想法。在此对他们表示衷心的感谢！

感谢与作者共同度过博士学习阶段的蒙亮博士、齐郑博士、刘昊博士，和他们在一起度过的这段时光给我留下了美好的回忆。

感谢我的家人对我的教诲与鼓励，没有他们的支持和牺牲，论文的完成是难以想象的。

对所有曾给予作者关心、帮助、支持、鼓励的老师、同学、亲人、朋友表示由衷的谢意！

攻读博士学位期间发表的学术论文

1. Ma Qian, Guo Jinzhi, and Yang Yihan, An Ontology for Power system operation analysis. The 2nd International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Hongkong, 2004, 4 (EI 收录)
2. 马骞, 杨以涵, 郭金智, 基于本体论的调度决策支持软件系统的设计, 电力系统自动化, Vol. 28, No. 20, 2004 (EI 收录)
3. Ma Qian, Yang Yihan, Qi Zheng and Zhang Dongying, A Hybrid Algorithm of On-Line Fault Diagnosis. PowerCon 2004, Singapore, 2004, 11
4. 马骞, 杨以涵, 刘文颖, 张东英, 基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复方法. 电网技术, Vol. 29, No. 3, 2005 (EI 收录)
5. 马骞, 杨以涵, 刘文颖等. 多输入特征融合的组合支持向量机电力系统暂态稳定评估. 中国电机工程学报, Vol. 25, No. 6, 2005 (EI 收录)
6. Ma Qian, Yang Yihan, Construction of Power System Flexible SCADA. Regional Inter-University Postgraduate Electrical and Electronic Engineering Conference (RIUPEEEEC 2003). Hongkong, 2003, 8
7. 马骞, 戚宇林, 张东英等. 一种实时模式的故障信息系统. 2003 年全国电力系统自动化学术交流研讨会, 成都, 2003, 11
8. 马骞, 张东英, 杨以涵. 基于证据理论的电网故障诊断方法研究. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第 20 届学术年会, 郑州, 2004, 10
9. 杨以涵, 张东英, 马骞, 刘文颖. 大电网安全防御体系的基础研究. 电网技术, Vol. 28, No. 9, 2004 (EI 收录)

攻读博士学位期间参加的科研工作

[R-1] 参与并完成了国家电网公司重点项目“地区电网调度决策支持系统的研究” (SGKJ[2003]01-16)