

摘 要

凝汽器系统是电站凝汽式汽轮机组重要的辅助设备，其运行状态的优劣对汽轮机组的安全性及经济性都有很大的影响。凝汽器设备的热力性能是决定凝汽器运行状态的关键，因此凝汽器的热力性能是运行和管理人员随时了解和掌握的。凝汽器系统运行方式优化是保证凝汽器经济运行的关键，因而，凝汽器系统运行状态的监测一方面应是凝汽器性能指标的在线监测和能损分析；另一方面是凝汽器系统的故障诊断。

本文的第二、三、四章是理论基础与专业技术方法介绍部分，首先论述了凝汽器系统性能指标的确定方法和凝汽器能损分析的依据，以及凝汽器系统典型故障与征兆之间的关系，为凝汽器系统的神经网络初级诊断和专家系统高级诊断建立了故障诊断知识库；然后，介绍了专家系统的诊断原理，分析了专家系统的优点和不足，进而阐述了神经网络诊断模型的原理，并对专家系统和神经网络进行了总结、归纳，发现经典的专家系统与新兴的神经网络在功能上具有关联性和互补性，从而确定了凝汽器系统故障诊断的模型—神经网络专家系统；其次，介绍了凝汽器性能优化的实现过程，包括汽轮机性能计算、循环水系统的优化和凝汽器能损分析。

本文的最后是整个凝汽器系统智能辨识系统的计算机技术实现方法介绍部分，主要论述了实现该系统所采用的编程语言和开发工具，以及它们之间通讯过程的实现，并介绍了该系统的主要功能和主要界面；最后，用现场实例验证了该系统的准确性和可用性。

关键词： 凝汽器；性能优化；故障诊断；神经网络；专家系统

ABSTRACT

In the plant, condenser system is an important auxiliary equipment for condensing turbine unit. Good or bad of its state has a heavy impact on the security and economy for turbine unit. The operator and manager hope to master and know condenser's thermodynamic characteristic at any moment, because of condenser's thermodynamic characteristic is very important for condenser. Condenser optimization of thermodynamic characteristic is the key to ensure condenser economic operation, which is the online monitor and energy loss of condenser characteristic index from the superficial side. On the other side, it is the fault diagnosis of condenser system.

In the part of theory and professional technology —the second、 third、 fourth chapter, and , the method of condenser characteristic index and the base of condenser energy loss analysis are discussed, and the relation between condenser typical fault and its symptom is founded. Secondly, the theory of expert system and neural network is discussed. On the base of analyzing the advantage and disadvantage, it is discovered that traditional expert system and new neural network are correlative and mutual. So the model of condenser system fault diagnosis—neural network expert system is set up. In the end of this part, condenser optimization realization of thermodynamic characteristic is introduced. It is consist of the calculation of turbine thermodynamic characteristic、 the optimization of circulating water and condenser energy loss analysis.

At the last chapter, the computer technology realization of intelligent distinguishing system of condenser is discussed, which consists of the developing language and the communication with each other. At last, the veracity and usability of this system is verified by the practical cases.

Key words: Condenser; Performance Optional; Fault Diagnosis; Neural Network; Expert System

主要符号

P_k	凝汽器压力
t_{w1}	循环水进水温度
t_{w2}	循环水出水温度
Δt	循环水温升
δt	凝汽器端差
C	比热
F	冷却面积
D_k	汽轮机排汽流量
D_w	循环水流量
x	汽轮机排汽干度
P_d	发电机的实际发电量
ΔH_i	1kg 蒸汽在汽轮机内的有效焓降
ΔH_i	1kg 蒸汽在汽轮机内的理想焓降
η_i	汽轮机理想的循环热效率
η_g	发电机机械效率
η_d	汽轮机绝对电效率
α_i	抽汽份额
h_d	加热器的疏水焓
h_w	加热器出水焓
h_{wc}	凝汽器出水焓

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：滕丕忠 日期：2007.1.23

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名：滕丕忠 导师签名：杨西平 日期：2007.2.23

第1章 绪论

1.1 引言

随着我国经济的快速发展、产业结构的不断变化及经济结构的改革,能源消费持续增长。自20世纪90年代末起,我国能源开始供不应求,并且在未来几年可能呈现愈演愈烈的趋势。根据近几年的国内经济报道,我国的一些发达城市同时发生煤、油、电“三荒”的情况,可见我国能源供应不足的紧张局面确实已经存在。目前,中国煤炭能源的消耗占全国一次能源消耗的67%,而世界平均水平是25%^[1]。煤发电仍然是21世纪初期我国发电的主要形式,预计到2020年,煤电装机容量为600GW左右,约需煤炭1400Gt,占该年煤产量2100Gt的66%。火电厂巨大的煤炭消耗不仅给环境带来巨大压力而且造成了煤矿能源的短缺,同时火电厂发电输电效率低下等因素也加剧了能源供应紧张的态势。

火电厂是我国主要的耗能大户,因此火电厂的节能对解决我国能源短缺紧张局面的重要性不言而喻。我国电力行业存在的突出问题之一就是汽轮机组热效率不高。有资料显示:我国火电厂煤耗为每千瓦时标准煤404克,与国际先进水平317克标准煤相比,高出了27.4%。我国火力发电厂发电效率低与大量使用中小机组有关,有些小机组的发电煤耗甚至高达1000克/千瓦时^[2]。可见,我国火电厂有提高发电效率、降低煤耗的必要性,且发电效率的提高还有很大的空间。在电厂中,最重要的指标就是:经济、安全和环保。自20世纪90年代中后期,我国开始大力扩建火电厂并引进大容量、高参数汽轮机组来提高机组发电效率、降低煤耗,并且对机组安全运行的要求更加严格。可见,电力工业正由过去粗放型生产的方式,向节煤、节水、低排放、高效率、环保型发展转变。在相同的条件下,能源利用率的提高程度与环境污染的减轻程度成正比。因此,火电厂汽轮机组的状态监测、故障诊断以及运行优化对保证电厂经济、安全、环保的指标是至关重要的。

在现代大型电站汽轮机组的热力循环中,凝汽器设备是汽轮机组主要辅助设备,在汽轮机组的热力循环中起着冷源的作用,其主要任务:一是在汽轮机的排汽口造成高度真空,使进入汽轮机的蒸汽在汽轮机内膨胀到低于大气压力的压力,以提高蒸汽在机组内的有效焓降;二是将汽轮机的排汽凝结成水,而且这种凝结水的品质纯净,最适宜作为锅炉给水之用,使锅炉的给水得到保证^[3]。凝汽器系统运行的好坏对汽轮机组循环热效率的高低有重要影响。所以,提高火电厂发电效率的重要途径之一就是保证凝汽器系统运行的质量。在电厂中,凝汽设备一般包括凝汽器、循环水泵、凝结水泵、抽气器以及这些部件之间的连接管道和附件,其状态监测、故障诊断以及运行的优化对整个机组的安全性、经济性有着重要影响。国外资料表明:配置故障诊断系统能减少事故停机率,具有很高的收益/投资比。据日本统计,在采用诊断技术后,事故率减少75%,维修费用降低25%~50%。英国对2000个企业进行的调查表明:采用故障诊断技术后,每年节约维修费用3亿英镑,而故障诊断系统的成本为0.5亿英镑,收益为投入的6倍^[7]。随着机组容量的不断增大,机组运行的自动化水平不断提高,但其系统比小机组更加复杂,对设备的安全运行有更高的要求。因此,凝汽设备智能故障诊断系统的研究以及运行状态的优化势在必行。

信息、通讯、计算机、智能控制、仪表测量技术的发展,为火电厂的高效、节约运作、科学管理,以及过程优化提供了科学、有效的手段,从而使凝汽设备的在线状态监测、智能控制和诊断成为现实,进而促进火电厂的科学管理和自动化水平的提高。新的测量方法和新的测量元件使信号测量的准确性和有效性都有较大程度的提高,而计算机软件技术的研究与开发使很多人工智能技术可以成为现实。现在的人工智能技术解决了过去在故障诊断方面的瓶颈,使大量非相关、非线性输入参数的并行处理成为可能。在信号处理、模拟人类决策、系统优化控制、在线监测和故障诊断方面人工智能都取得了前所未有的成果。火电机组容量的不断增大,对其运行的经济性和安全性提出了更高的要求,单靠运行人员的现场观测和分析已远远不够,必须有一套设备故障诊断和运行优化的监管决策系统,以保证运行人员能够及时了解 and 掌握设备的

运行状态。经过 40 多年的发展,人工智能在故障诊断方面的研究已趋于成熟,凝汽设备故障诊断的方法主要有专家系统、模糊逻辑、神经网络、灰色理论、模拟退火和遗传算法等。这些故障诊断方法都有自己的特点和适用的范围,有时要根据具体的诊断事例和应用场合结合各诊断方法的优缺点,总结得出最适合的诊断方法。

1.2 国内外研究现状

设备故障诊断技术是 20 世纪 50 年代以后才发展起来的一门新技术,它是随着计算机在工业信号处理、工业控制方面的应用而逐步发展和完善。在设备故障诊断技术发展的初期,专家将故障发生时的相关参数记录下来,组合成诊断知识表的方式来分析故障。随着诊断技术的发展,专家系统、模糊理论、灰色理论以及神经网络理论,逐步由浅到深地去把握故障诊断规律,使诊断技术的自动化水平不断提高,诊断结果的准确性和置信度也不断提高。在火电厂中,凝汽设备的故障诊断以及对设备状态参数进行监测和分析,可以在汽轮机运行的状态下,判断设备是否存在异常或故障、查出故障发生的部位和原因,判断设备的运行状态是否经济可靠,或者预测设备的运行状态用于确定合理的检修时间和方案,达到减少事故停机损失和定期检修次数、提高设备运行可靠性、降低设备维修费用的目的,最终会使电厂的发电效率提高、能耗降低。

我国煤炭能源的紧缺迫使火电厂必须提高发电效率,以提高市场竞争力。火电厂凝汽器系统的故障诊断和运行优化是整个火电厂设备故障诊断和优化的一个子系统,对整个汽轮机发电效率的提高以及可靠、经济运行都有着重要的影响。凝汽器系统故障原因的多样性、模糊性以及非线性关系,使传统的故障诊断技术在实际应用上有些难题无法解决。随着信号、测量、计算机技术的发展,凝汽器的在线监测和实时数据分析已经成为可能,可以实现对凝汽器运行中重要参数的监测,如凝汽器真空度、凝汽器传热端差、凝结水过冷度、循环水的进、出口温度,从而使凝汽器运行在安全经济状态下。

在汽轮机经济分析方面,主要的方法有火用分析法、简捷热平衡、等效热降、耗差分析法和小扰动理论法。等效热降法,由于它便于实现计算机编程,因而在汽轮机在线经济分析中得到广泛应用;20 世纪 60 年代加拿大学者提出了“耗差分析法”,20 世纪 80 年代以后,该方法开始在我国广泛应用。耗差分析法可以对关键的运行参数连续的进行监督分析,并将其对机组经济性的影响,最终反映到汽耗、煤耗、煤耗变化上面。

近年来,国内外在凝汽设备故障诊断方面的研究都有很多,主要的诊断方法还是传统的专家系统、模糊理论、神经网络以及遗传算法等。在专家系统方面,有基于规则的专家系统,主要用于对诊断领域有充分的认识,能以完备和健全的理论知识表示该领域理论的情况;基于事例的专家系统,主要用于缺乏完备和健全的理论,但又可获得丰富经验(事例)的领域,如医疗诊断;基于模型的专家系统,主要用于新的及未有经验的系统故障,能够诊断多重故障并能对诊断结论进行解释。在神经网络方面,BP 神经网络是应用最广泛、研究最深入的一种诊断方法。国外在凝汽设备方面的研究主要是凝汽器结构设计的合理性、传热系数的提高,以及利用径向基神经网络和 BP 神经网络对凝汽器的运行状态进行预测和诊断^{[4][5][6]}。国内有很多文献,对神经网络的其他模型做了一些理论研究,如自组织特征映射神经网络、回归神经网络等,但是它们在实际工程中还是没有得到很好的应用。国内有很多单位研制了故障诊断系统,如哈尔滨工业大学和东方汽轮机厂研制的微计算机化旋转机械状态监测故障诊断装置、西安交通大学研制的 200MW 发电机组状态监测与故障诊断系统、南京汽轮机厂研制的旋转机械振动状态监测与数据处理软件等。实践证明,经过十几年的努力,国内开发的适合于火电厂的故障诊断系统在电力行业中发挥了一定的作用,也取得了一定的经济和社会效益。

总结近几年国内外在凝汽设备方面的文献,可以得出结论:单一的设备故障诊断技术的研究已很成熟,也没有更大的发展空间,更多的是各诊断方法的结合,如模糊神经网络、遗传神经网络、模糊专家系统、神经网络专家系统、模糊神经网络专家系统以及遗传算法专家系统等。同时,火电机组的性能监测和故障诊断系统的软件功能从简单计算到系统分析,正朝着通用化、专业化、智能化方向发展。经济优化从整体经济性的计算向局部定量分析影响机组经济性偏差原因的深度和多机之间的优化调度方向发展。

1.3 凝汽器故障诊断和性能计算方法

1.3.1 凝汽器系统故障诊断方法

随着工业生产和科学技术的发展,机械设备的可靠性、可用性、可维修性与安全性的问题日益突出,从而促进了人们对机械设备故障机理及诊断技术的研究。早期的汽轮机组故障诊断方法为人工诊断,经过十几年的研究与发展,到目前为止出现了许多新的诊断方法,这些方法不论是检测性能、诊断性能,还是鲁棒性都有很大的提高。

1.3.1.1 专家系统

专家系统(Expert System, ES)是一个能在某应用领域内,以人类专家的水平去解决该领域中困难问题的计算机程序。专家系统的基本结构包括知识库、数据库、推理人机界面接口等。在专家系统中比较常用的方法是:基于规则、基于模型和基于事例的故障诊断方法。基于规则推理的专家系统在建立规则库时,需要权威专家和工程师共同研究确定大量而繁杂的规则用于保证故障诊断系统的准确性和可靠性,这种推理规则完全匹配才能得到最后的诊断结果,因此规则库建立和维护的工作量比较大,但该方法具有诊断过程简便、快速等优点;基于事例推理的专家系统是新崛起的一种重要的推理技术,是通过类比的推理方式,利用过去经历的典型事例求解或理解当前出现的新问题;基于模型的专家系统是运用被诊断系统的运行模型和故障模型,根据由模型获得的预测形式和所测量观察的形态之间的差异计算出被诊断系统的结论。

1.3.1.2 模糊逻辑

模糊逻辑是在模糊数学发展的基础上迅速发展起来的,它解决了经典数学无法描述和处理的模糊性问题,使无法用精确的数学公式表达的复杂事物能够用一种模糊集合的方法去解决。模糊集合是对普通集合的扩充,可以用隶属函数来描述。例如:如果 X 是对象 x 的集合,则 X 的模糊集合 $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$, μ_A 称为模糊集合 A 的隶属函数, X 称为论域。隶属函数可分为三角形、梯形、高斯形隶属函数,其中还包括参数的选取,隶属函数的选取决定了模糊诊断的准确性。

1.3.1.3 神经网络

神经网络是近几年国内外专家主要研究的对象,因为神经网络具有自学习、联想、记忆的功能、并行推理机制、非线性映射等优点,这使其在模式识别方面得到广泛应用,其中BP神经网络是应用最广泛、技术最成熟的一种神经网络。BP神经网络是多层前馈神经网络,采用误差逆传播校正法进行网络学习。国内许多学者对神经网络做了深入的研究,在神经网络学习率的自适应改变、网络的稳定性、误差函数的选取和输入参数的归一化等方面多做了很多的改进,使神经网络的收敛速度和诊断的准确性提高都有了很大的提高^{[8][9]}。神经网络故障诊断方法易实现对非线性系统的故障诊断,但其解释能力较差。

1.3.1.4 遗传算法

模拟自然界优胜劣汰的进化现象,把搜索空间映射为遗传空间,把可能的解编码成一个向量称为染色体,向量的每个元素称为基因。通过不断计算各染色体的适应值,选择最好的染色体,获得最优解。遗传算法的基本运算包括根据适应值大小进行的选择运算、由交叉概率决定的交叉运算,以及变异。遗传算法主要用于优化,其在故障诊断方面还只是辅助作用,例如:在神经网络诊断系统中,遗传算法可以优化神经网络的权值和阈值等。

1.3.1.5 模糊神经网络

模糊神经网络是模糊逻辑和神经网络相融合的产物,使故障诊断技术发生了质的飞跃,不再是单一诊断方法的研究,而是两种或多种诊断方法的结合,为故障诊断技术研究提供了新的

思路。模糊神经网络模型的神经元在信息共享的基础上各部分信息相互支持、相互补充、各自独立地从与其输入端相连接的其他神经元采集输入，并计算其输出，再将其传递给上一层的神经元，作为它们的一个输入，或作为整个模型的输出，从而赋予模型较强的容错抗错性能和联想能力，使它不会因为部分神经元的损坏而严重影响其总体性能，也不会因为输入信号受到一定程度噪声污染而严重歪曲其输出。

1.3.1.6 模糊专家系统

模糊专家系统是指采用模糊技术来处理不确定性的一类专家系统，它具有经典专家系统的特征，还具有模糊符号处理能力、模糊问题的求解能力、特定领域内知识的复杂性和模糊性等特点。模糊专家系统的基本结构包括人机接口模块、模糊数据库、模糊知识库、模糊推理机、知识获取模块和解释模块。由于模糊专家系统和经典专家系统在诊断原理和结构上有很多相似性，就其本质来说它们的诊断原理是一样的，都是需要大量的专业的理论知识和建立相应的规则。因此，模糊专家系统的结合方式不能充分发挥两者优势，在故障诊断方面没有得到很好的应用。

1.3.1.7 神经网络专家系统

神经网络是基于输入/输出的一种训练样本的映射，其特点就是可以联想、记忆、快速并行推理；专家系统是基于知识匹配的逻辑推理，是深层次的符号推理。将两者科学地结合形成神经网络专家系统，可以取长补短，因而成为当前研究的热点^[11-13]。神经网络专家系统是一类新的知识表达体系，其知识的获取、表达、推理都采用不同于经典专家系统的方式。信息处理是通过大量节点的相互作用而进行的，通过对样本的反复学习并在此过程中不断调整网络连接权值，从而使网络误差收敛到全局最小后存储这些连接权值，形成分布式信息保持方式，构成神经网络专家系统的知识库^[10]。

1.3.2 火电机组性能分析方法

火电机组性能分析是确定主辅机及热力系统运行参数是否合理和运行方式是否经济的一种定量计算方法，它可以指导运行人员调整汽轮机组的运行状态，以提高火电厂经济运行水平。汽轮机组热力系统的定量分析是汽轮机组性能监测的重要组成部分，下面介绍常用的热力系统分析方法。

1.3.2.1 简捷热平衡法

简捷计算是在改进常规计算的基础上逐步完善形成的，对实际热力系统进行一定的简化和假定，结合质量平衡和能量平衡进行计算。

1.3.2.2 等效热降法

等效热降法是一种新的热工理论。在 20 世纪 60 年代后期，它首先由苏联学者库兹涅佐夫提出，并在 20 世纪 70 年代由西安交通大学的林万超教授逐步完善，形成了完整的理论体系。等效热降法可以用于整体热力系统的计算，也可用于热力系统的局部定量分析。

1.3.2.3 熵分析法和火用分析法

熵分析法主要是通过对体系的熵平衡计算，求取熵产的大小及其分布，分析影响熵产的因素，确定熵产与不可逆损失的关系，作为评价过程的不完善程度和改进过程的依据。火用分析法是在热力学两大定律的基础上，结合环境情况，从对能量本性的全面认识以及从能量实用性出发而提出的一种思想和方法。

1.3.2.4 小扰动理论法

随着节能理论的发展，1992 年华北电力学院张春发教授等科研人员在国家自然科学基金资

助下,采用网络热经济学扰动理论的研究方法,结合矩阵分析,提出并建立了研究火电机组热力系统小扰动理论。小扰动理论利用多元函数的偏微分对电厂热力系统进行分析,思路独特,定义的 H_i 及给出的限定条件更加明确和理性化;小扰动理论是利用矩阵分析的方法求解热力系统,它适用于任意机组热力系统的全面性汽水分布方程。

1.4 本文的主要研究内容

本课题的目的是对凝汽器热力系统运行特性和凝汽器设备的典型故障及其征兆进行研究,并利用应用软件实现凝汽系统的故障诊断和运行优化,主要内容有:

- 1、深入研究凝汽器的热力特性以及影响凝汽器系统运行的各项参数之间的关系,构建完备的理论知识库,为凝汽器热力系统计算、经济运行优化软件的实现和专家系统的推理工作做好准备;

- 2、对凝汽器系统的故障机理进行研究,分析凝汽设备故障与征兆之间的关系,为神经网络的模式分类提供依据;

- 3、研究神经网络的网络结构并进行改进。主要是在输入参数区间的划分和网络训练学习率方面改进;并分析研究神经网络与专家系统的结合方式,得到更完善的凝汽设备故障诊断系统;

- 4、开发凝汽器故障诊断和运行优化软件,使其界面友好、操作简单,并具有数据保存、查询、修改以及诊断结果和凝汽器运行状态优化的指导等有利于现场工作人员使用的方便快捷的功能,达到火电厂汽轮机组的经济、安全运行。

第2章 凝汽器系统热力特性及典型故障分析

2.1 凝汽器简介

在现代大型电站汽轮机组的热力循环中，凝汽器设备是汽轮机组的主要辅助设备，在汽轮机组的热力循环中起着冷源的作用，其主要任务：一是在汽轮机的排汽口造成高度真空，以提高蒸汽在机组内的有效焓降；二是将汽轮机的排汽凝结成水。

凝汽设备包括凝汽器、循环水泵、凝结水泵、抽气器及这些部件之间的连接管道和附件，以及带动水泵所需要的动力机械。如图 2-1 所示，来自汽轮机末级的乏汽进入凝汽器，其汽化潜热被由循环水泵来的冷却水通过铜管间接吸收并凝结成水，而凝结水在凝汽器底部热井并通过凝结水泵抽出，送入轴封加热器，冷却轴封蒸汽后再送至低压加热器，最后通过除氧器后的给水泵送往锅炉。

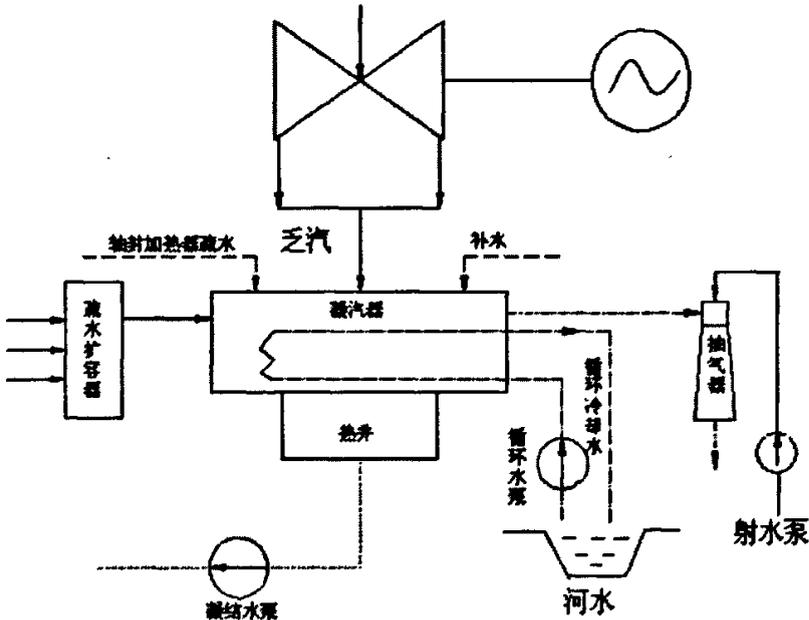


图 2-1 凝汽设备原则性热力系统图

凝汽器按照汽轮机排汽凝结方式的不同，可以分为混合式凝汽器和表面式凝汽器。混合式凝汽器是汽轮机排汽直接与冷却水混合，然后由水泵排出凝汽器。这种凝汽器优点是构造简单、制造成本低，传热效果好，但是存在丢失纯净凝结水的缺陷，现已很少使用；表面式凝汽器是用铜管将排汽和冷却水隔开，间接换热的一种换热器，它可以保证凝结水的水质。凝汽器的冷却方式主要有开式冷却系统（直流供水）和闭式冷却系统（循环供水）两种。以江、河、湖、海等水作为冷却水的供水系统是开始冷却系统；采用专门的冷却塔，冷却水在凝汽器与冷却塔之间进行循环的冷却方式是闭式冷却系统。

凝汽器在发电厂中占有非常重要的地位，但是凝汽器经常会运行在非经济状态，甚至故障状态下，这会对机组的安全带来隐患。如凝汽器真空过低、凝结水过冷度过高、凝汽器端差过大、循环水温升变化过大等，这些参数是评价凝汽器运行热力性能的主要指标，需加以监视。

2.2 凝汽器系统的热力性能监测及能损分析

目前国内外机组运行中存在的一个问题就是凝汽器系统运行性能达不到设计值,因而严重影响了机组出力 and 厂用电率。循环水系统不匹配、真空系统不严密以及凝汽器铜管结垢等都会影响凝汽器的运行状态,由于凝汽器系统缺少在线实时的性能分析系统,特别是在低负荷调峰工况下的实时诊断,导致凝汽器设备的运行参数偏离最优值,由此造成的煤耗损失达 0.9—5.0g/(kW·h)。因此,开发凝汽器性能实时分析软件指导机组运行人员具有极大的现实意义和良好的经济效益。

2.2.1 凝汽器系统主要性能指标的确定

要对凝汽器系统进行性能优化,首先需要确定能够反映凝汽器系统经济状态的主要性能指标,然后再确定这些指标在不同运行状态下的标准值,最后是将指标参数的标准值与实测值进行比较,这是凝汽器系统的能损分析的基础。下面主要介绍凝汽器系统性能指标参数标准值的确定。

1. 凝汽器真空度

凝汽器压力,是指高凝汽器管束第一排冷却管上方 300mm 处的蒸汽绝对压力,用 p_k 表示;汽轮机排汽压力,是指汽轮机末级排出蒸汽的绝对压力,用 p_k' 表示, p_k' 与 p_k 之差决定于凝汽器喉部的阻力情况。凝汽器真空对机组的出力和热耗有很大的影响,是凝汽器运行监测的重要参数。当凝汽器的真空度过低时,不仅汽轮机的效率降低,而且由于汽轮机的排汽温度升高,会使汽轮机的排汽口和凝汽器壳体产生过量的热变性,这可能引起汽轮机振动,或者破坏凝汽器水管管口胀管的严密性。当凝汽器真空度降低时,为保证机组出力不变,必须增加蒸汽流量,而蒸汽流量的增加又将导致轴向推力的增大,使推力轴承过负荷,这将影响汽轮机组的安全运行^[15]。凝汽器的真空度每降低 980Pa (0.01kgf/cm²),会使汽耗量增加 1.5~2.5%。凝汽器真空度不但受循环水量和水温的影响,还与真空系统的严密性、铜管的清洁程度、凝汽器负荷(即汽轮机排汽流量)有关,其运行标准值的确定可以通过凝汽器变工况计算得到,也可以通过凝汽器热力特性曲线得到。凝汽器热力特性曲线表示凝汽器真空度与凝汽器进汽量及循环水进、出水温度之间的变化关系曲线,是判断凝汽器运行优劣的主要依据。凝汽器热力特性曲线的绘制需要大量的热力试验数据为基础,本系统即以凝汽器特性曲线数的数据库支持得到凝汽器运行中须保持的真空度。

2. 凝汽器传热端差

在凝汽器内含有少量空气,由于空气的相对含量很小,可以认为凝汽器压力 p_k 即等于蒸汽的分压力 p_s , 因此蒸汽温度等于凝汽器压力 p_k 相对应的饱和温度 t_s 。 t_s 与凝汽器循环水出口温度 t_{w2} 之差称为凝汽器的端差,用 δt 表示。凝汽器传热端差也是衡量凝汽器运行状态的重要参数,它可以反映凝汽器真空的密封性和铜管的传热效果。运行中的凝汽器传热端差大小决定于:真空系统的严密性、铜管内外表面的清洁程度、铜管内循环水的流量和流速、凝汽器负荷、循环水的进口温度等。用下式表示:

$$t_s = t_{w1} + \Delta t + \delta t \quad (2-1)$$

式中: t_{w1} ——循环水进口温度(℃)

Δt ——循环水温升(℃)

δt ——传热端差(℃)

在凝汽器冷却面积一定时,传热端差决定于传热量和传热系数。

$$\alpha_t = \frac{\Delta t}{\frac{F}{c_w D_w - 1}} \quad (2-2)$$

式中： K ——传热系数 ($\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$)
 D_w ——循环水量 (kg/h)
 C ——比热 $4.187\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{C})$
 F ——冷却面积 (m^2)

在凝汽器负荷和循环水流量一定时, 传热端差决定于铜管表面的清洁程度和凝汽器内积存的空气量。凝汽器冷却面积结垢和脏污会影响传热效果, 导致传热端差增大; 真空系统不严密或者抽气器工作不正常会使凝汽器内积空气, 并在冷却表面形成部分空气膜, 同样会使传热端差增大^[3]。在凝汽器能损分析时, 标准凝汽器端差值来自凝汽器端差—负荷性能试验曲线, 由该簇曲线根据已知的循环水进水温度和循环水流量, 输入凝汽器负荷, 即可得到标准的凝汽器端差值; 然后, 再与实测的凝汽器端差值进行比较, 得到能损偏差。

3. 循环水温升

循环水温对机组的经济性也有非常重要的影响。循环水温随季节变化, 冬季凝汽器的真空比夏季高。当循环水温度比制造厂设计规定值偏高时, 会导致凝汽器真空下降。对一台 200MW 汽轮机, 在冷却倍率满足设计要求, 系统比较清洁的情况下, 如当循环水进口温度由 20C 升至 33C 过程中, 循环水温度每变化 1C , 机组煤耗平均升高 $0.635\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; 当循环水温度由 20C 降至 5C 过程中, 循环水温度每变化 1C , 机组煤耗下降 $0.285\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。汽轮机的排汽在凝汽器中放出的热量被循环水吸收, 由热平衡方程可得循环水温升为: 汽轮机规程^[17]规定: 循环水温升允许值为 $8\sim 10\text{C}$ 。

$$\Delta t = \frac{h - h'}{4.187 D_w / D_t} = \frac{h - h'}{4.187 m} \quad (2-3)$$

式中: h 、 h' ——蒸汽和凝结水的焓 (kJ/kg)
 D_t ——进入凝汽器的蒸汽量 (kg/h)
 D_w ——循环水量 (kg/h)
 $m = D_w / D_t$ ——凝汽器的冷却倍率

循环水温升也是评价凝汽器性能的一个重要指标, 它不仅可以直接的影响凝汽器的真空大小, 还可以直接说明循环水流量是否与当前机组运行的负荷相适应。在凝汽器能损分析时, 标准循环水温升值, 也是来自循环水温升—负荷试验曲线。优化分析时, 如要得到标准循环水温升值, 只要选择相应的循环水进水温度值和循环水流量值, 然后输入凝汽器负荷值即可。

4. 凝结水过冷度

汽轮机排汽被循环水凝结成为凝结水, 从理论上讲, 凝结水的温度应该等于凝汽器真空对应的饱和温度, 但是由于凝汽器结构或者运行上的缺陷, 导致凝结水的温度低于凝汽器真空对应的饱和温度 t_s 。饱和温度与凝结水的实际温度 t_n 之差就是凝结水的过冷度, 用 α_t 表示。

$$\alpha_t = t_s - t_n \quad (2-4)$$

凝结水过冷度的存在使锅炉给水吸热量增加, 系统的热经济性降低。凝结水的过冷度每增加 1C , 火电厂的煤耗量约增加 $0.1\%\sim 0.15\%$; 凝结水过冷还会使凝结水中的含氧量增加, 因而对它流过的管道和设备产生腐蚀作用。汽轮机规程^[17]规定: 凝结水过冷度允许值应小于 2C 。

2.2.2 凝汽器运行工况的能损分析

发电厂性能计算和能损分析软件主要解决火电机组运行中经济性参数的获取, 并给出机组的运行性能状况和相应的操作指导, 让电厂的运行人员及时了解影响机组经济性的主要因素, 也让电厂的管理人员了解机组的运行状态, 为火电厂的安全、经济运行提供可靠的数据和决策依据。对于一个比较完善的凝汽器运行工况的性能计算和能损分析系统来说, 其应当具有以下的主要功能^[23]:

1) 首先计算出当前电厂的机组热耗率以及全厂标准煤耗率等数据。对于正在运行的电厂, 可以由运行过程中测量的数据, 算出实际运行的热经济性。然后再计算假设循环水量变化对凝汽器真空造成的影响、凝汽器真空的变化对机组功率的修正关系以及循环水流量的变化与循环水泵功率的关系, 为凝汽器经济运行提供依据。

2) 找出可控损失项, 并将这种损失反映到电厂标准煤耗率的变化上, 从而为考核和改善运行水平提供指导。

3) 指出经济性能下降的设备, 获得早期存有缺陷设备的预报, 通过将热力设备的实际运行数据与其在正常、健康条件下的应有数据进行比较和分析, 可以判断出设备的正常程度, 并获得该设备性能变化导致的机组经济性能变化的方向和幅度。

4) 给出不同运行条件下全厂的经济效益对比, 为设备合理调整和检修维护提供决策依据。

目前工程上常用的分析方法曲线法和热力学法。曲线法, 利用汽轮机制造商给出的机组功率等经济计算曲线, 得到功率或者凝汽器真空、凝汽器端差的相对变化量。但当机组热力系统结构发生变化或者机组运行年久老化查用原设计提供的曲线可能会产生较大的误差。因此, 要进行大量的汽轮机性能和凝汽器性能试验, 通过曲线得到各参数标准值。热力学方法, 以汽轮机组的基本热力循环为基础, 再利用凝汽器内的热平衡方程, 得到凝汽器参数的标准值。由于热力学方法存有较大误差, 本文采用试验法确定标准值。能损分析就是凝汽器参数标准值和实时值的偏差计算与分析, 一般包括两个步骤: 首先是通过分析该参数的变化对机组功率的影响, 从而确定该参数对机组经济性的影响程度; 其次, 根据该参数偏离理想工况参数的幅度, 确定由于该参数的偏差导致机组效率的偏差。理想工况参数的数值称为“应达值”或“标准值”, 应达值由凝汽器性能曲线得到, 凝汽器的运行优化就是要根据这些应达值和在线实时数值进行比较, 并分析它们的偏差, 从而给出相应的合理科学的运行调整和操作指导。

2.3 凝汽器系统的典型故障及其征兆分析

凝汽器运行中故障可以分为紧急故障和非紧急故障, 紧急故障是故障发生时会对机组的安全性构成威胁, 必须马上处理的故障, 如: 循环水泵供水严重不足、凝汽器铜管大量破裂、轴封断汽等; 非紧急故障是对机组的安全性不会马上构成威胁, 但会对机组的经济性造成影响, 如: 真空系统慢性漏空气、凝汽器铜管脏污等。在实际运行中可以根据不同故障的性质设置相应的报警信号。

本文针对 100MW 机组开式凝汽器系统选取了 11 个典型故障: 循环水泵故障、真空系统不严密、凝汽器铜管脏污、凝汽器管板堵塞、凝汽器虹吸破坏、凝汽器铜管破裂、低压加热器管道破裂、凝汽器满水、凝结水泵故障、抽气器故障、轴封供气不足。下面予以分述故障原因及其故障征兆。

2.3.1 循环水泵故障

循环水泵是提供循环水保证凝汽器真空的重要设备, 如果循环水泵出现了严重故障, 如水泵不出水; 循环水泵电机电流降至零等, 这些都会造成循环水供水不足或断水, 导致凝汽器真空度下降, 因此循环水泵作为凝汽器系统重要的设备应重点监测保证其正常工作。

对于开式循环水系统, 由于循环水中可能含有大量的木屑、贝壳、石块、杂草等机械性杂物, 使进口滤网被杂物堵塞, 循环水不能顺利通过, 使循环水进水量减少。有些循环水滤网因年久失修, 起不到过滤的作用, 大量的机械性杂质进入凝汽器, 使凝汽器冷却管堵塞, 水阻增加, 并且影响到循环水泵出水阻力, 而使循环水泵工作区发生变化, 从而导致循环水量减少, 进水压力和温升增大, 影响凝汽器的换热效率, 使机组真空下降。此外, 由于设计考虑不周到或循环水泵选型不当, 循环水泵出力小, 使实际通过凝汽器的循环水量远远小于热力计算的规定, 也会影响凝汽器真空。

循环水泵可能发生的故障及其消除措施, 如表 2-1。循环水泵发生故障时, 直接的影响就

是循环水量供水不足,间接影响凝汽器真空、循环水温升,最终影响机组效率。循环水泵发生故障时,可能出现的故障征兆:凝汽器真空急剧或缓慢下降;循环水温升增加;循环水泵电流降至为零或减小;抽气器抽出的空气温度与冷却水入口温度之差增加。

表 2-1 循环水泵常见故障

故障现象	原因	消除措施
水泵不出水,压力表和真空表指针剧烈晃动	注入水泵的水不够;水表管或仪表漏气	水泵继续抽真空或泵内注水,拧紧管道上的连接法兰,堵塞仪表漏水漏气处
出水量低于设计要求	水泵被杂物堵塞;密封环磨损过多;转速不够;运转方向不对	检查、清洗水泵管路;更换密封环;调整电机转速和转动方向
水泵不出水,真空表指示高度真空	进水底阀已堵塞;吸水管路阻力太大;吸水高度超过规定值	消除底阀不洁情况,改变吸水管直径;降低吸水高度
压力表有压力指示,但水泵不出水	出水管路阻力太大;水泵转速太低;运转方向不对	改善出水管阻力;调整电机转速,转向

2.3.2 真空系统不严密

凝汽器真空系统是指凝汽设备与系统中所有处于低于大气压力运行的设备、管道和阀门等。凝汽器运行中,如果真空系统不严密,可能导致空气漏入系统,如凝汽器汽侧人孔门及喉部存在焊接缺陷导致漏气;在潮湿的地方或地下管道发生锈蚀、破裂,造成管道漏气;管道的法兰接口处、凝汽器及低压加热器汽侧的水位计接头连接不严密导致漏气;疏水系统阀门、容器等存在泄漏或连接不严密等导致漏气;低压缸结合面、低压缸轴封不严密导致漏气等。此时,凝汽器内将存在蒸汽和空气的混合气体。因此,凝汽器压力 p_t 应该是汽气混合物的总压力,即

$$p_t = p_s + p_a \quad \text{kPa} \quad (2-5)$$

式中: p_s ——蒸汽分压力 kPa

p_a ——空气分压力 kPa

由理想气体方程和凝汽器内空气与蒸汽占有相同的体积 V_t , 换算成空气量与凝汽器压力之间的关系为:

$$p_t = \frac{\left(1 + 0.622 \frac{1}{\chi} \frac{D_a}{D_t}\right) R_a T_a}{0.622 \frac{1}{\chi} \frac{V_t}{D_t}} \quad \text{kPa} \quad (2-6)$$

式中: χ ——汽轮机排汽干度

D_a ——凝汽器内的漏气量, (kg/h)

D_t ——凝汽器内汽气混合物的总质量流量, (kg/h)

R_a ——气体常数

T_a ——凝汽器内空气的温度, K

真空系统不严密造成的影响包括:由于空气是不凝结气体,会在铜管表面形成空气膜,降低传热系数,若大量空气漏入凝汽器,将会严重影响凝汽器的传热效果;大量空气渗漏,引起抽气装置的过负荷;由于空气的溶解度与其压力成正比,导致更多的空气溶解于水,使凝结水的含氧量增加,造成管道和设备的腐蚀;空气量的增加,蒸汽分压力的减小,而凝结水的温度是蒸汽压力下的饱和温度,导致凝结水过冷度的增加,若不严密处在管沟中,凝结水硬度将超标。

2.3.3 凝汽器铜管脏污和管板堵塞

凝汽器管侧脏污程度,主要取决于冷却水水质、冷却水供水方式、季节、供水系统工作条件以及冷却管材料等。凝汽器管侧脏污可分为三类:机械脏污、生物类脏污、盐类脏污。

机械脏污,指冷却管或管板被砂石、木屑、杂草、树叶、泥沙、藻类、小贝壳以及其它碎末弄脏或堵塞。当滤水网不能充分清除水中得这些机械混合物时,这些悬浮颗粒便在管内沉积导致传热面变脏,传热恶化。这类脏污带有明显的季节特性,一般春、秋季较严重。它不仅覆盖管板表面,导致凝汽器传热效率下降,还会堵塞管路,使循环水量下降,从而导致机组事故停机。

生物类脏污,是指活的单细胞微生物或水藻类附着在冷却管内和管板表面上。由于循环水中菌类含量多,若未采取有效的杀菌措施,这些微生物在凝汽器中水温稳定的条件下会迅速繁殖,在铜管表面形成黏膜,水中的其它混合物就很容易黏附在这种黏膜上,必将恶化冷却管传热效果,使机组真空变差。

盐类脏污,指当水中溶有无机盐的条件下,部分盐陆续沉降,在冷却管内、管板面乃至水室内形成结垢。这种沉淀物主要是钙盐、镁盐所组成的水垢在管内积聚的结果,由于盐类结垢而使管子传热恶化,尤其是当冷却管内结有较厚的硬垢时,凝汽器冷却管整体传热系数呈直线下降,严重时会使汽轮机停止运转,以便对凝汽器作特殊的化学清洗。据对 125MW 汽轮机组试验证明:当冷却管内结垢厚度达 1.2mm~1.5mm 时,在同样的冷却条件下,使汽轮机真空降低 6.66kPa,增加发电煤耗 10g/kWh~15 g/kWh。

凝汽器管侧脏污会使凝汽器传热恶化,传热端差增加、汽轮机排汽压力升高、机组的循环效率降低、发电煤耗增加,甚至使汽轮机不能带负荷运行,而且脏污结垢的铜管还容易受到腐蚀、逐步造成铜管泄漏,影响机组的安全运行。

当较大的颗粒不能被滤水网清除,而进入凝汽器内时,管侧的机械脏污可能会造成凝汽器铜管堵塞,流通的管道数变小,循环水的凝汽器水阻增加,循环水的流量减小,循环水泵的出口压力增加。这种类型的堵塞多发生在使用江河、湖泊水源作为循环水的供水系统中。

对于不同的脏污情况应采取不同的清洗方法,为了清除管内的因机械混合物所造成的积垢,或清除可能堵塞的铜管内的杂物,凝汽器应定期进行机械清洗:利用胶球清洗装置可在机组运行中清洗凝汽器;在对分制的凝汽器中,可在运行中降低负荷,对凝汽器水侧的一半进行机械清洗。为了清除微生物沉积,在循环水中定期的加入氯气或漂白粉溶液,使循环水氯化,可以消除微生物在管面上生长的可能性。为了清除循环水的暂时硬度和永久硬度,防止凝汽器冷却面的盐类脏污,可采用盐酸溶液来清洗凝汽器。

2.3.4 凝汽器虹吸破坏

凝汽器出口水室有空气将导致循环水出口管上部虹吸被破坏,凝汽器水阻变大,造成循环水流量减少。凝汽器水阻是指循环水从凝汽器进水接管起至出水接管的整个流动过程中的阻力,由三部分组成:循环水在铜管内的流动阻力 Δp_1 、循环水进入和离开铜管时由于通流截面积变化而造成的阻力 Δp_2 、循环水从进水接管进入水室以及从水室进入出水接管时产生的局部阻力(分别简称水室进口阻力和水室出口阻力) Δp_3 。

当凝汽器虹吸破坏时,循环水进入和离开铜管时由于通流截面积变化而造成的阻力 Δp_2 就会增加,造成凝汽器水阻的增加,从而导致循环水流量减少,循环水温升增加。

2.3.5 凝汽器铜管和低加管道破裂

凝汽器铜管断裂对火电厂构成很大的威胁,它不同于腐蚀穿孔,无法用加铝末的方法在运行中堵漏,一旦断裂,必须立即降负荷或停机处理。同时,由于大量的循环水涌入凝结水中,不仅造成凝结水泵过负荷、凝汽器满水等故障,还会造成设备和管道的腐蚀结垢、积盐等后果。

我国火电厂凝汽器以黄铜管材为主,这是由于黄铜有一定的强度,良好的韧性,相当高的导热率,在常用的凝汽器管材中是最廉价的。黄铜虽有一定的韧性,但是其抗应力腐蚀性能很差,尤其是有氨存在时更易发生应力腐蚀破裂^[21]。

低加管道破裂发生时会使低压加热器的水位升高,造成低压加热器的出水温度和疏水温度的变化,最终对汽轮机组的热力性能产生较大的影响。

2.3.6 凝汽器满水

凝汽器满水一般由凝结水泵工作不正常、补水和疏水系统失常或者凝汽器铜管破裂等原因造成的,凝汽器满水会导致凝结水过冷度增加,降低机组运行的经济性。凝汽器的水位可以通过控制水位调节阀的开度进行调节,当水位调节阀卡阀或调节失灵时,调节阀开度失控,凝汽器也会发生满水现象。当凝汽器满水时,凝汽器处在高水位下运行,凝结水会将凝汽器下部的一部分冷却管淹没,造成冷却面积的减小,并且由于冷却管被凝结水淹没,会导致凝结水过冷度增加。

2.3.7 凝结水泵故障

凝结水泵的任务是将凝汽器热井中的凝结水抽出,使凝结水流经轴封加热器和低压加热器,进入除氧器。凝结水泵的工作是在高度真空的条件下输送接近凝汽器压力下的饱和温度的水,因此泵轴两端的填料要求有很好的严密性,防止空气漏入凝汽器内。凝结水在压力比较低时容易气化,造成泵的气蚀,导致凝结水泵工作不正常。因此,在凝结水泵运行中,应加强对凝结水泵的出口压力、电动机电流和热井水位的监视,保证凝结水泵正常的工作。

表 2-2 凝结水泵常见故障

故障现象	原因	消除措施
凝结水泵无法启动	电动机故障; 轴承故障	检查电动机; 查看是否有异物, 检查处理轴承
出力不足或不出水	负压部分漏空气; 叶轮损坏; 出口阀门调整不当或出口门门芯脱落;	检查消除漏空气点; 更换叶轮; 调整出口阀门或检修出口阀门
水泵或电动机异常振动	联轴器不同心; 轴承损坏; 转子弯曲或转子不平衡; 电动机不良	联轴器校正; 检修更换轴承; 直轴、消除不平衡; 检修更换电动机

2.3.8 抽气器故障

抽气器是凝汽器设备的重要组成部分,其任务是在汽轮机启动时建立真空以及在运行中抽出从真空系统不严密处漏入的空气和不凝结蒸汽,以维持凝汽器的真空度^[24]。因而抽气器的工作状态必然对凝汽器的工作特性有很大的影响,抽气器工作不正常,不能将凝汽器中的空气排除,凝汽器内的空气含量逐渐增大,使凝汽器抽气口至抽气器进口之间的压差增大,凝汽器内空气的分压力增大,汽轮机的排汽压力就会增大,对应的饱和温度升高,凝汽器抽气口至抽气器进口之间的温差增大,导致凝结水过冷度增加;由于凝汽器铜管的传热效果的降低,还会使凝汽器端差升高。可见,抽气器工作是否正常对凝汽器的运行状态确实具有很重要的影响,抽气器工作状态的监视是凝汽器安全、经济、可靠运行的重要保障。

抽气器的特性线是相对于某一确定的混合物温度而言,凝汽器工况变化往往引起空冷区出口汽、气混合物温度的变化,从而改变了抽气器的工作特性。从凝汽器抽出的汽气混合物温度 t_k 是评价凝汽器运行状况的重要参数,该温度允许的最高值为:

$$t_k = t_{w1} + \frac{d_k - 14}{3} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2-7)$$

式中: t_{w1} ——凝汽器循环水进水温度, $^\circ\text{C}$

d_k ——凝汽器的实际比蒸汽负荷, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

抽气器的结构型式很多,在现代发电厂中,汽轮机的凝汽器上应用的最广泛的抽气器是喷射式抽气器,喷射式抽气器的优点在于布置紧凑、结构简单、维护方便、工作可靠以及能在短时间内(5~10分钟)建立必要的真空^[9]。喷射式抽气器又可分为射汽式和射水式两种:

1. 射汽抽气器

射汽抽气器由工作喷管、混合室及扩压管三部分组成,其工作原理是:参数为 P_e (通常为0.8~1.6MPa)的工作蒸汽在喷管中膨胀至混合室,混合室中的压力稍低于凝汽器压力;混合室与凝汽器抽气口相连,来自凝汽器的汽气混合物在混合室中被流速将近1000m/s的高速蒸汽带动,共同进入扩压管被压缩,其速度不断降低,压力逐渐升高,在扩压管出口处,混合物压力升高到稍大于大气压力,排入大气。

2. 射水抽气器

近年来,随着蒸汽参数的提高以及大功率单元机组的发展,发电厂热力系统中采用节流新蒸汽的射汽抽气系统显得复杂并不合理。此外,目前在广泛采用单元制控制的情况下,广泛采用滑参数启动,在机组启动前不可能有足够的汽源供给射汽抽气器使用。因此,我们目前则以发展射水抽气器为主。

射水抽气器的工作原理与射汽抽气器基本相同:来自射水泵的工作水经水室进入工作喷嘴,工作水在喷嘴中依靠压差形成高速,通过混合室时造成高度真空,将凝汽器内的汽气混合物吸入混合室,一起进入缩放扩压管,水和汽气混合物在扩压管中减速升压,最后排入专用水箱或明渠。射水抽气器本身效率高,可使大量不凝结气体被抽出排走,其建立的负压越高,真空就越高;反之则影响真空,使真空达不到额定值。射水池水温太高,会降低抽气效果,使真空降低;因抽气器工作水温下的饱和压力随工作水温的升高而升高,所以射水抽气器吸入室压力随着工作水温的升高而升高。因此,在一定的工作水压下,由于工作水温的升高,引起吸入室压力升高,其值等于工作水温对应的饱和压力。某电厂曾对一台200MW汽轮机组作射水抽气器特性试验,在其他参数即工况一定的情况下,当射水抽气器的工作水温由39℃降至35℃时,其机组真空值由89.86kPa提高到91.2kPa。由此看出:射水抽气器的工作水温对汽轮机组的真空影响还是很明显的。

2.3.9 轴封供汽不足

汽轮机轴封系统的主要作用是防止蒸汽沿高压缸轴端向外泄漏,甚至窜入轴承箱致使润滑油中进水;防止空气漏入低压汽缸而破坏凝汽器真空。机组漏汽主要是在汽轮机高压端或高中压缸两端主轴穿出汽缸处、在汽轮机的低压端或低压缸两端主轴穿出汽缸处会有空气漏入。汽轮机采用轴封系统的主要作用是减少高压端轴端蒸汽外泄损失和防止空气漏入低压缸而破坏机组的真空。

轴封供汽不足可能是由于新蒸汽汽源供给失常;高压轴封系统工作失常;低压轴封系统工作失常;轴封加热器工作失常。

2.4 凝汽器系统的故障征兆知识库

针对前面分析的11种典型故障,本文选取了13个独立的运行参数作为故障征兆参数,如表2-3。

表 2-3 凝汽器系统的征兆参数

序号	征兆参数	序号	征兆参数
1	凝汽器真空	8	凝汽器端差
2	循环水温升	9	#1低加出水温度
3	循环水泵电流	10	凝结水导电度
4	凝汽器水阻	11	轴封进汽压力
5	凝结水泵电流	12	热井水位
6	凝结水出口压力	13	抽气器入口真空
7	凝结水过冷度		

表 2-4 凝汽器系统的故障征兆知识库

序号	故障类别	征兆特征
1	循环水泵故障	真空急剧下降；循环水泵电机电流降至零、出口压力降至零；循环水温升增加
2	真空系统不严密	真空缓慢下降；凝汽器端差和凝结水过冷度增加
3	凝汽器铜管脏污	真空缓慢下降；冷却水温升减小；凝汽器端差增加
4	凝汽器管板堵塞	真空缓慢下降；冷却水温升增加；循环水量减少
5	凝汽器虹吸破坏	真空缓慢下降；凝汽器水阻增大
6	凝汽器铜管破裂	凝结水泵出口压力增加，电机电流增加；凝结水导电度、过冷度增加
7	低压管道破裂	最后一级低加水位增加、低加出水温度升高
8	凝汽器满水	凝结水泵出口压力增加，电机电流增加；热井水位升高；凝结水过冷度增加
9	凝结水泵故障	凝结水泵出口压力减小，电机电流减小；热井水位升高；凝结水过冷度增加
10	抽气器故障	真空急剧下降；凝汽器端差增加；抽气器入口真空下降
11	轴封供气不足	真空急剧下降；轴封进汽压力减小；凝汽器端差增加

2.5 本章小结

本章介绍了评价凝汽器经济运行状况的主要性能指标和能损分析方法，并分析了各项经济性能指标的主要特点和变化规律，同时针对 100MW 机组的凝汽器开式循环水系统总结出了 11 种典型故障，分析了故障产生的原因及相应的消除措施，最后建立了故障征兆知识库，这些都为神经网络故障诊断和专家系统推理，以及凝汽器运行优化提供了必要的技术支持条件。

第3章 凝汽器故障诊断的神经网络专家系统

3.1 专家系统的基本结构和特征

3.1.1 专家系统的发展过程

专家系统(Expert System, ES)是一个或一组能在某特定领域内,以人类专家的水平去解决该领域中困难问题的计算机程序,是人工智能从理论研究向实际应用的一个转折点,是人工智能实际应用的辉煌成果。这段计算机程序内部具有大量专家的领域知识与经验,它能利用人类专家可用的知识和推理方法去解决特定领域中的困难问题,并得到与专家相同的结论^[22]。可见,专家系统就是以专家的知识为基础(即知识库),采取有效的推理方法(即推理机),去解决某些特定领域内的复杂问题,得到与人类专家相同的结论。

1965年,以化学数据推断分子假设的DENDRAL专家系统研究的开始标志着专家系统的诞生。从20世纪70年代后期开始,专家系统处于大发展时期,渗透到了工业和生活的各个领域。日本和美国许多公司和大学相继建造了一批优秀的专家系统,其中包括斯坦福大学建造的对细菌感染疾病进行诊断和治疗并提供咨询的计算机咨询专家系统MYCIN;卡内基-梅隆大学研发的语音理解系统Hearsay-II。20多年来,正是由于这些获得成功的专家系统的推动,各种专家系统如雨后春笋般延伸到各个专业领域。我国也有了不止专家系统研发和应用的实例,国家在一些重大科技发展和规划研究中对专家系统、知识渗透与扩展、学科交叉和融合给予了充分的支持和重视,在农业咨询、天气预报、故障诊断和中医诊疗等方面出现了一批实用的专家系统。1985年10月中国科学院合肥智能研究所与安徽农业科学院土壤肥料研究所共同研制成功了砂姜黑土小麦施肥专家系统。

专家系统由于存在知识获取的“瓶颈”,而且当前又出现了许多智能方法,如模糊逻辑、神经网络等,受这些新诊断技术的影响,使得专家系统在一些领域的研究应用受阻。但是,随着计算机技术的发展,许多专家又开始研究专家系统,他们将专家系统与其它的智能方法结合,即广义专家系统,如层次专家系统、模糊专家系统、神经网络专家系统等。广义专家系统的产生是对经典专家系统的创新,是故障诊断技术的新发展。下面对专家系统的结构、特点、推理机制和搜索策略作一下介绍。

3.1.2 专家系统的基本结构

专家系统是模拟人类的知识推理能力,是以逻辑推理为基础的基于符号、基于知识的逻辑思维机制。专家系统包括5个基本组成部分,如图3-1,下面予以分述它们各自的作用。

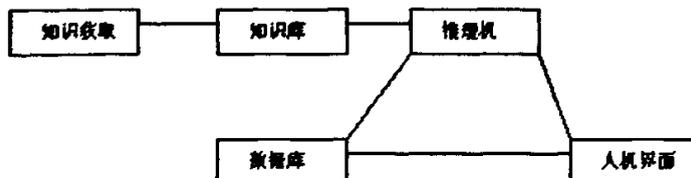


图 3-1 专家系统的基本结构

1. 知识获取

知识获取是专家系统解决问题、做出正确决策的基础,是专家系统不断适应外界变化的保

障,是修改知识库中原有知识和扩充知识的手段,是专家系统最关键、最困难的问题。学习是知识获取的一个基本手段,通过学习可以把领域专家提供的信息转化为系统能够理解并应用的形式。

2. 知识库

知识库存储了从专家那里得到的特定领域的知识,是专家系统重要的组成部分,直接关系到专家系统的性能。知识库的建造需要知识工程师和领域专家的密切合作,并用计算机系统能够理解的方式将知识存储到计算机中,保证推理机的正常运行。

3. 数据库

数据库用于存放专家系统运行过程中所需要和产生的所有信息,可以分为静态数据库和动态数据库。静态数据库主要存放相对比较稳定的数据,如凝汽器的设计参数、运行的额定参数等;动态数据库是由数据采集模块从现场采集来的实时数据。

4. 推理机

推理机是专家系统的核心部分,是按照一定的控制策略进行推理的计算机程序。推理的方式主要有正向推理、反向推理和混合推理。正向推理是由原始数据出发,按一定的策略,运用相关的知识库和数据库的知识,推出结论的方法;反向推理又叫逆向推理,是由得到的结论去寻找支持这个结论的证据。反向推理实现简单,可提高系统的运行效率;混合推理是根据数据库中原始数据,正向推理先得到结论,然后再利用反向推理寻找支持的证据。

5. 人机界面

人机界面是软件使用人员和专家系统的桥梁,负责解决用户提出的问题,要求界面友好,操作方便简单。

通过上面的介绍可以看出:知识获取和知识库的建立过程可以等同为一个过程,而数据库主要是存储现场采集数据和专家系统的推理过程,最后由人机界面完成与用户的信息交换,为用户提供有效的决策依据。专家系统在很多领域得到广泛应用主要是因为它与用户信息交互的透明性和系统结构的灵活性,也正是由于这些特征使其在机械设备的故障诊断决策领域中占有重要的地位。

3.1.3 专家系统的基本特征

1. 透明性

专家系统能够解释本身的推理过程和回答用户提出的问题,以便让用户能够了解推理过程,提高专家系统的置信度。但是将专家系统用于工业领域的控制或诊断中时,这个特征的优势不是很明显。在工业领域中,当出现问题时,需要的是及时、快速的解决问题。当然一个很好的透明性专家系统会给管理决策层提供很好的决策依据。

2. 启发性

专家擅长凭借经验形成对当前问题的实际理解,并把经验蕴含在专家规则中,采用启发式的搜索策略,以加快问题的求解过程。专家系统应用启发式搜索技术可以处理一些不确定性的推理问题,可以解决以前没有遇到的问题。

3. 专属性

专家系统所用的知识的重要特征就是它体现了人类专家的专业知识,其主要任务就是获取足够准确,而且丰富的专家经验知识,并在计算机程序内表示这些专家的专业知识。大多数人类专家能够在其狭窄的专业领域内熟练运用专业知识解决其他人所不能解决的问题,但他们在这个领域之外的能力有限。因此,以这些人类专家提供的专业知识为基础开发的专家系统也只能解决某个狭窄领域的问题。

4. 灵活性

知识库与推理机是专家系统的独立模块，专家系统将知识组成和控制分离，使得其在知识维护上的灵活性。专家系统能够不断的增长知识，修改或更新原有知识，保证专家系统的专业技术与实际情况的一致性，使专家系统推理结果的准确性得到保障。

3.2 专家系统的分类

专家系统可以分为基于规则的专家系统、基于事例的专家系统和基于模型的专家系统。

(1) 基于规则推理 RBR (Rule-Based Reasoning) 的专家系统在建立规则库时，需要权威专家和工程师共同研究确定大量而繁杂的规则用于保证故障诊断系统的准确性和可靠性，这种推理规则完全匹配才能得到最后的诊断结果，因此规则库建立和维护的工作量比较大，但该方法具有诊断过程简便、快速等优点，RBR 适合于对诊断领域有充分的认识，能以完备和健全的理论知识表示该领域理论的场合；

(2) 基于事例推理 CBR (Case-Based Reasoning) 的专家系统是新崛起的一种重要的推理技术，是通过类比的推理方式，利用过去经历的典型事例求解或理解当前出现的新问题。基于事例的推理的实现过程主要是通过对事例库中的事例进行检索、提取、改进，得到满足要求的适合新问题的解决方案，最后再存储新事例到事例库。但是事例库建立的前提是有大量的故障事例，在实际中火电厂凝汽设备故障事例的积累需要很长时间，而且事例检索是其最关键的技术，但还没有很好的解决，此外事例库的维护也是 CBR 的“沼泽问题”。所以，CBR 在凝汽设备故障诊断方面并没有很好的得到应用，比较适合于缺乏完备和健全的理论，但又可获取丰富经验（事例）的领域，如医疗诊断；

(3) 基于模型的专家系统 (Case-Based Model) 是运用被诊断系统的运行模型和故障模型，根据由模型获得的预测形式和所测量观察的形态之间的差异计算出被诊断系统的结论。人工智能是对各种定性模型的获得、表达及使用的计算方法进行研究的一门学科、一个知识系统中的知识库是由各种模型综合而成的，由于模型的建立与知识的获取密切相关，所以有关模型的获取、表达及使用自然的包含了知识获取、知识表达和知识使用。基于模型的专家系统一般建立在因果模型基础上，然后把问题和结果联系起来，深度推理得到结论。

基于规则的专家系统是经典的专家系统，也是专家系统中最常用的形式，这主要归功于大量成功的基于规则的专家系统实例和可行的基于规则专家系统开发的工具的出现。例如以诊断传染病血液疾病为目标的 MYCIN 专家系统，没有别的专家系统比 MYCIN 专家系统更合理解释基于规则的专家系统，还有 XCON 专家系统和 PROSPECTOR 专家系统也是说明基于规则专家系统成功的实例。

本文选用基于规则的经典专家系统实现凝汽器系统的故障诊断。经典的专家系统适用于理论知识完备的某些特有领域，否则可能导致推理效率低、诊断结果不准确。如果用经典的专家系统对整个汽轮机组进行诊断，诊断结果的准确率就可能不高，因为整个汽轮机组中相关的参数多、参数之间都是非线性关系；如果用经典的专家系统对汽轮机组的辅助设备凝汽器设备进行诊断，其诊断结果的准确性相对就会提高很多。当然也不能把要解决的问题范围选的很小，那样采用专家系统的效果也不会很明显。

专家系统都有自己的搜索策略和推理机制，即不同类型的专家系统必须根据具体的应用场合选择适合自己的搜索策略和推理机制，只有这样才能保证专家系统的推理效率和诊断结果的准确性。

3.3 经典专家系统的搜索策略和推理机制

专家系统具有透明性和启发性的特征是由它独特的搜索策略和推理机制决定的。搜索策略是知识库中搜索有效知识的方法，有效知识就是与推理目标相关的知识；而推理机制是在有效知识的基础上采用的推理方法，如正向推理、反向推理等。

3.3.1 搜索策略

搜索策略就是问题的求解过程,可分为盲目搜索和启发式搜索。盲目搜索是按预定的搜索方向进行搜索,包括广度优化搜索和深度优化搜索。由于盲目搜索总是按预先规定的路线进行,没有考虑到问题本身的特性,所以这种搜索效率不高。启发式搜索是搜索中加入了与问题有关的启发性信息,用以指导搜索朝着最有希望的推理方向前进,加速问题的求解过程并找到最优解^[30]。本文采用的是启发式搜索策略。

1、状态空间描述法

状态 (state) 是为描述某一类问题中各个不同情况之间的差异而引入的一组变量 q_0, q_1, \dots , 表示成矢量形式 $Q = [q_0, q_1, \dots]^T$; 算符 (operator) 是当状态中某些分量发生改变时, 问题由一个具体状态变化到另一个具体状态, 所采用的规则、算子或过程; 状态空间 (state space) 是一个表示问题的全部可能的状态及其相互关系的有向图, 它的结点表示状态, 它的圆弧表示从一个状态转变到另一个状态的算符。状态空间可由三元组表示 (S, F, G), 其中 S 为问题可能的初始状态的集合, F 为操作的集合, G 为目标状态的集合。

2、启发式搜索

在日常生活中, 使用“窍门”求解问题, 往往能达到事半功倍的目的。这种窍门来自经验, 与求解的问题密切相关, 在大多数情况下能很快解决问题。这就是说, 对许多任务来说尽可能使用与任务有关的信息会大大减小搜索的代价, 并找到比较满意的解。这种与任务或问题有关的信息称为启发信息, 利用启发信息进行的搜索叫启发式搜索^[37]。启发式搜索需要用到几个数据结构: 一个结构 C, 表示当前已生成的显示搜索; 一张 OPEN 表, 存放已生成而尚未进行扩展处理的结点; 一张 CLOSE 表, 存放已经生成并且处理的结点。两张表中的结点, 除含有节点的状态描述外, 还包含一个前趋指针, 指明该结点在通向初始结点的最佳通路上的父结点。因此, 在找到目标结点后, 只要沿着主链的指针追踪到初始结点, 便可获得整个求解路径。

3.3.2 推理机制

专家系统的推理机制是依据一定的搜索策略从知识库中选择有关的知识, 对已知数据或用户提供的证据进行不断的推理, 直到得出结论为止。一个庞大的专家系统包含的知识规则很多, 需要推理搜索的空间就比较大, 知识库的维护很困难。为了提高推理效率, 将系统分成相对独立的模块比较合适, 这与在设计开发任何大系统时将程序模块化是一致的。专家系统逻辑推理的方法可以分为: 正向推理、逆向推理和不确定性推理。

1、正向推理

正向推理就是根据已知数据推理得出结论的一般推理方法。这种推理过程从事实出发, 试图使事实和规则的 IF 部分相匹配, 然后得到规则的 THEN 部分。从初始数据 D 开始, 推理部分满足条件的知识 K, 寻找知识 K 相关的数据 D_1 , 再推理得出知识 K_1 , 一步一步的推理即可得到结论。正向推理的优点是充分利用用户提供的信息, 快速响应用户输入的信息, 但是正向推理有一种盲目推理的倾向。

2、逆向推理

由目标出发, 为了验证结论去寻找满足条件的证据。如已知结论 A, 反向推理得到满足的证据 B、C, 再反向推理得到满足的证据 D、E、F, 其中 D 和 E 为已知证据, 而 F 不是已知证据, 继续反向推理证据 F, 得到已知证据 M 和 N, 最后得到满足条件的证据共有 4 个: D、E、M 和 N, 其推理结构如图 3-2 所示。逆向推理更具有目的性和条理性, 非常适合在基于规则的经典专家系统中应用。

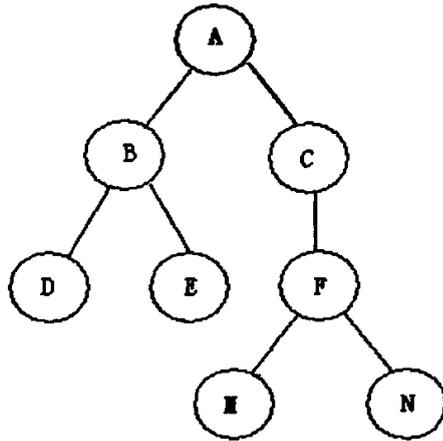


图 3-2 逆向推理结构图

3、不确定性推理

在专家系统要解决的很多领域中，往往含有复杂的、不完全的、模糊的和不确定性的信息，这就要求设计者建立某种不确定性的计算和推理过程。不确定性包括证据（事实）的不确定性和规则的不确定性，以及造成的结论的不确定性。一般对事实给予一个介于 0 和 1 之间的系数来表示事实的不确定性。1 代表完全确定，0 代表完全不确定。这个系数被称为可信度（也有一些专家系统，如 MYCIN 和 EXPERT 等，取可信度的范围为-1 到+1）^[29]。当存在多个事实时，总的可信度取所有事实可信度的最小值。规则的不确定性就是由已知事实推出结论的可信度。结论的不确定性是由事实的不确定性和规则的不确定性的乘积确定。

本文采用的凝汽器系统诊断模型是将经典系统串接在神经网络诊断模型之后，神经网络主要负责将大量的输入信息进行模式识别，并将诊断结果输出到专家系统模块中。因此，逆向推理的推理机制比较适合本系统，如图 3-3 所示。专家系统首先神经网络的诊断结果存储在临时存储器中，再由逆向推理的推理机制搜索知识库中的有效知识，由浅到深的推理得到更明确的、真正发生故障的设备。

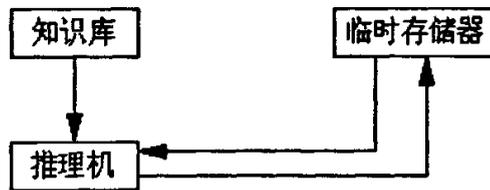


图 3-3 经典专家系统的推理过程

3.4 人工神经网络的基本原理

3.4.1 人工神经网络基础

人工神经网络简称为神经网络 (Neural Network)，是用大量的简单计算单元构成的非线性系统，是在现代生物学研究人脑组织所取得的成果基础上提出的，用以模拟人脑神经网络的信息处理、存储及检索功能。人工神经网络不同于当前人工智能领域研究中普遍采用的基于逻辑与符号处理的理论和方法，它是一门活跃的边缘性交叉学科，是巨量信息并行处理和大规模平

行计算的基础，既是高度非线性动力学系统，又是自适应组织系统，可用来描述认知、决策、诊断及控制的智能行为。神经网络与其它学科的理论和技术如专家系统的结合，将会产生较好的模拟思维、记忆和学习等这样一些人类大脑的基本功能；它的分布式并行处理、离散与连续时间计算的作用等特性与传感器或 PLC 技术的结合，又将解决串行的操作和信息存储模式的传统计算机难于解决的高速、实时的复杂问题。

1. 神经元模型^[31]

神经元是人类大脑神经组织的主要成分，由胞体和突起两部分组成，其中突起又分树突和轴突。神经元之间的信息传递是依靠连接点称为突触。神经元的树突是信息的输入端，而轴突是信息的输出端，神经元之间通过突触传递信息。在 1943 年，神经生物学家 McCulloch 与青年数学家 Pitts 合作，从人脑信息处理观点出发，采用数理模型的方法研究了脑细胞的动作和结构及其生物神经元的一些基本生理特性，他们提出了第一个神经元计算模型，即神经元的阈值元件模型，如图 3-4 所示。图中 X_1, X_2, \dots, X_n 是神经元的输入向量； W_1, W_2, \dots, W_n 是相应的神经元的连接权值； T 是神经元的阈值； $u(\cdot)$ 和 $f(\cdot)$ 分别是神经元的基函数和激活函数； Y 是神经元的输出。基函数 $u(\cdot)$ 是一个多输入单输出函数 $u = u(X, W, T)$ ；激活函数的作用就是对基函数的输出 u 进行归一化： $Y = f(u)$ ，即通过非线性函数 $f(u)$ 将 u 变换到指定范围内。

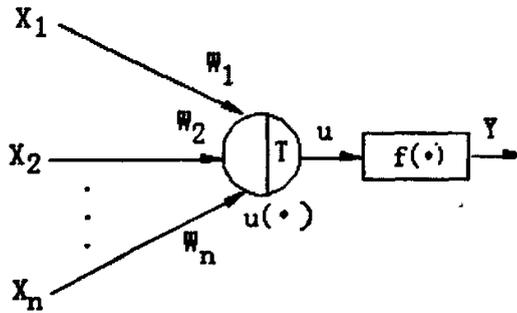


图 3-4 神经元模型

$$\text{基函数 } u = \sum_{i=1}^n W_i X_i - T = X^T W - T \tag{3-1}$$

激活函数有多种包括：硬极限函数、线性函数、Sigmoid 函数和高斯函数。硬极限函数又称为阈值函数主要用来模式分类；线性函数常用于实现函数逼近；Sigmoid 函数可以用于模式分类、函数逼近或优化，与硬极限函数相比，Sigmoid 函数是连续可微的，使得神经元的权值可用误差反向传播学习算法（即 BP 算法）调节；高斯函数也是很重要的一类激活函数，主要用于径向基函数神经网络（RBF 网络）。

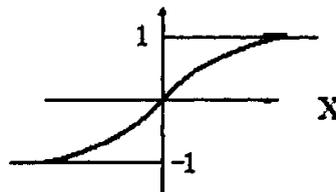


图 3-5 双极性 Sigmoid 函数

在此主要介绍一下 Sigmoid 函数，其表达式为：

$$Y = f(u) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda u}} \quad (3-2)$$

式中， λ 为 Sigmoid 函数的增益，其值决定了函数非饱和段的斜率， λ 越大，曲线越陡。

2. 神经元的学习过程

神经网络的学习方法主要有两种形式：有导师学习和无导师学习。

有导师学习也称为有监督学习 (supervised learning)，有导师学习的训练样本要求每一输入矢量与输出的目标矢量必须配对 $(p_i, d_i), i = 1, 2, \dots, n$ ，其中 p_i 为样本输入， d_i 为样本输出 (即目标输出)。通常对一个神经网络进行学习要求许多这样配对的学习样本。在学习过程中，利用学习样本的输入矢量计算网络的输出矢量，再与学习样本的目标输出进行比较，如存在误差，再用学习算法按差错减小的方向修改网络的权值，直至整个学习样本集的误差达到可以预先设定的误差精度。例如 BP 神经网络就是有导师学习。

无导师学习也称无监督学习 (unsupervised learning) 或自组织学习 (self-organized learning)。无导师学习在训练样本中不提供样本目标输出，而是规定了某些学习方式或学习规则，神经元根据具体的学习内容随系统的样本输入而不同，系统可以自动发现环境特征和规律。例如自组织特征映射网络就是无导师学习。

3.4.2 人工神经网络的结构

从早期的神经网络模型单层 MP 感知器来看，单个神经元解决问题的能力有限。1958 年计算机科学家 Rosenblatt 基于 MP 模型，增加了学习机制，推广了 MP 模型。他证明了两层感知器能够将输入分为两类，假如这两种类型是线性并可分，也就是一个超平面能将输入空间分割，其感知器收敛定理：输入和输出层之间的权重的调节正比于计算输出值与期望输出之差^[32]。可见，多个神经元解决问题的能力更强，如果将许多单个神经元进行组合，组成复杂的神经网络，将大大提高神经网络的能力。但并不是说神经元的个数越多，神经网络解决问题的能力越强，神经元越多也会使网络的连接权值和阈值复杂，造成连接权值和阈值调整困难。经过国内外学者多年的研究表明：一个三层的神经网络可以解决任何非线性的问题。现在三层神经网络的结构可以分为前馈神经网络和反馈神经网络。

1. 前馈神经网络

典型前馈神经网络的结构包括输入层，隐层，输出层，各层之间实行全互连接，层内神经元之间无连接。各神经元接受前一层的输入，并输出给下一层，直到输出层，没有反馈。前馈神经网络是神经网络中应用最广的一种，典型代表就是 BP 神经网络。

2. 反馈神经网络

反馈神经网络是一层的输出通过连接权回送到同一层或前一层的输入。反馈神经网络最显著的特点是将输出端信号通过带时延(离散型)或一阶惯性环节(连续型)的反馈机构回接到输入端，网络的外部输入可有可无。Hopfield 网络是典型的全反馈网络。一个反馈神经网络用一组耦合的非线性常微分方程组描述^[38]。反馈神经网络的非线性和高维数，使得现有数学工具难以确定其状态轨迹，甚至可能出现混沌现象。

3.5 BP 神经网络

神经网络有多种类型：BP 神经网络、径向基神经网络、自组织特征映射神经网络、Hopfield 神经网络。本文选用了 BP 神经网络，因为在众多的神经网络中，BP 神经网络最适合于故障诊断。当 BP 神经网络的权值和阈值确定后，网络从输入到输出就成了一个非线性映射。对三层 BP 神经网络，许多人证明了以下的万能逼近定理：包含一个隐含层的 3 层 BP 神经网络，只要隐含节点数足够多，就能以任意精度逼近有界区域上的任意连续函数^[34~36]。

3.5.1 BP 神经网络结构

BP 神经网络(Back-Propagation Network)是由 Rumchart 提出的多层前馈神经网络模型, 采用误差逆传播校正法进行网络学习。BP 算法是一种有导师的学习算法, 这种算法通常是应用最快下降法调整权值。

根据万能逼近定理, 包含一个隐含层的 3 层 BP 神经网络, 只要隐含节点数足够多, 就能以任意精度逼近有界区域上的任意连续函数。因此, 本文采用三层的网络结构, 输入层接受现场采集的征兆参数的特征向量, 输入节点数对应征兆数为 13; 隐含层节点数为 10; 输出层节点数对应故障数为 11。三层 BP 神经网络模型的结构如图 3-6 所示:

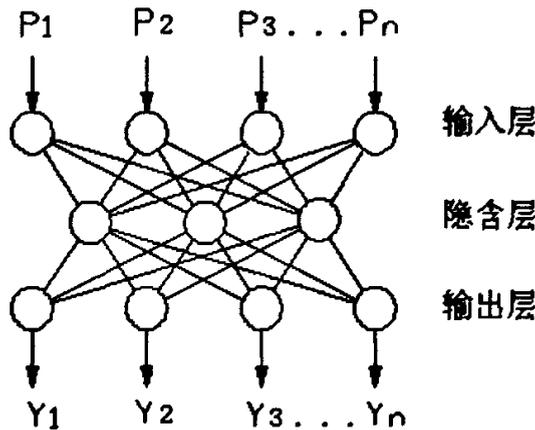


图 3-6 BP 神经网络结构

P_1, P_2, \dots, P_n 为输入神经元, Y_1, Y_2, \dots, Y_n 为输出层神经元。

3.5.2 BP 神经网络的学习算法

由前面的神经网络知识可知: BP 神经网络的激活函数为 Sigmoid 函数, 误差函数采用误差累积算法对网络进行训练, 使网络的学习次数减少、精度提高、稳定性增强。对第 p 个样本误差函数表达式为:

$$E_p = \frac{\sum_i (t_{pi} - Y_{pi})^2}{2} \tag{3-3}$$

$$\text{全部样本的误差为: } E = \sum_{p=1}^M E_p \tag{3-4}$$

式中, t_{pi} ——第 p 个样本中第 i 个输入值所对应的预期目标值;

Y_{pi} ——第 p 个样本中第 i 个输入值所对应的实际输出值;

M ——训练样本的个数。

BP 神经网络的学习指导思想是: 通过不断的学习, 对网络的权值和阈值进行修正, 使误差函数 (E) 沿梯度方向下降。BP 神经网络三层节点表示为: 输入节点 P_j 、隐含节点 H_i 、输出节点 Y_i 。输入节点和隐含节点的网络权值为 w_{ij} , 隐含节点的阈值为 θ_i ; 隐含节点和输出节点的网络权值为 T_{ik} , 输出节点的阈值为 θ_k 。当输出节点的期望目标输出为 t_i 时, BP 神经网络的计算公式^[33]为:

(1) 隐含节点的输出

$$H_i = f(\sum_j w_{ij} P_j - \theta_i) = f(\text{net}_i) \quad (3-5)$$

(2) 输出节点的计算输出

$$Y_i = f(\sum_j T_{ij} H_j - \theta_i) = f(\text{net}_i) \quad (3-6)$$

(3) 输出节点的误差公式

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \sum_i (t_i - Y_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_i (t_i - f(\sum_j T_{ij} H_j - \theta_i))^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_i \{t_i - f[\sum_j T_{ij} f(\sum_j w_{ij} P_j - \theta_i) - \theta_i]\}^2 \end{aligned} \quad (3-7)$$

(4) 权值修正

$$\text{输出节点: } \delta_i = (t_i - Y_i) f'(\text{net}_i) \quad (3-8)$$

$$\begin{aligned} \text{权值修正: } T_{ij}(k+1) &= T_{ij}(k) + \Delta T_{ij} = T_{ij}(k) + (-\eta \frac{\partial E}{\partial T_{ij}}) \\ &= T_{ij}(k) + \eta \delta_i H_j \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$\text{隐含节点: } \delta_i = f'(\text{net}_i) \sum_j \delta_j T_{ji} \quad (3-10)$$

$$\begin{aligned} \text{权值修正: } w_{ij}(k+1) &= w_{ij}(k) + \Delta w_{ij} = w_{ij}(k) + (-\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}) \\ &= w_{ij}(k) + \eta \delta_i P_j \end{aligned} \quad (3-11)$$

其中, η 和 η' 为学习率。

(5) 阈值修正

$$\text{输出层阈值修正: } \theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \eta \delta_i \quad (3-12)$$

$$\text{隐含层阈值修正: } \theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \eta' \delta_i \quad (3-13)$$

3.5.3 BP 神经网络的学习步骤

BP 神经网络的信息传送是由两部分组成, 即正向传播与反向传播。在正向传播过程中, 输入样本从输入层经过隐层神经元的处理后, 传向输出层, 隐含层和输出层的计算根据公式 3-5 和 3-6。如果在输出层得不到期望的输出 (即误差大于实际设定值), 则转入反向传播, 此时误差信息从输出层向输入层传播并沿途调整整个层间连接权值, 以使误差不断减小, 直到达到精度要求。

由 BP 神经网络的学习算法公式可以看出, 各个连接权值的调整量 Δw_{ij} 、 ΔT_{ij} 分别与各个学习样本对的误差函数 E_k 成比例变化, 称为标准误差逆传播算法。而相对于全局误差函数 E 的连接权值的修正, 应该在所有 M 个学习样本全部提供给网络之后统一进行, 称为累积误差逆传播算法。下面介绍 BP 神经网络整个学习过程的步骤, 其流程图如 3-7 所示:

(1) 网络权值、阈值初始化。初始权值的选择对于学习是否达到局部最小, 是否能够收敛以及训练时间的长短的关系都很大。一般初始权值取在 $(-1, 1)$ 之间的随机数。初始阈值根据凝汽器实际情况选取。

(2) 依次输入 M 个学习样本, 设当前输入为第 p 个样本。

(3) 根据隐含层和输出层计算公式 3-5 和 3-6, 计算隐含层和输出层的输出值。

(4) 计算输出层和隐含层的逆向误差。

- (5) 根据权值修正公式 3-9 和 3-11 计算调整网络权值。
- (6) 记录已学过的样本个数, 直到全部样本学习完成, 否则训练样本数 $p=p+1$, 并转到步骤 (2) 继续训练。
- (7) 计算累积误差是否小于预先设定值, 否则转到步骤 (2) 继续训练。训练完毕后, 将最后的网络权值和阈值保存在网络中。
- (8) 学习结束。

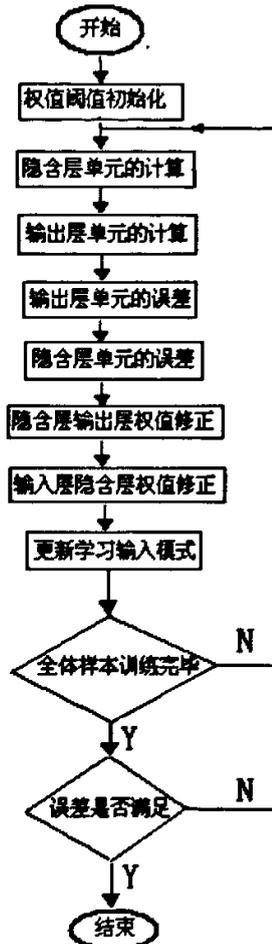


图 3-7 BP 神经网络流程图

3.5.4 BP 神经网络的改进

本文主要研究 BP 神经网络学习率和输入参数归一化的改进。

(1) 由 BP 神经网络的学习算法公式可以看出, 网络的学习率对权值和阈值的修正有很大的影响。学习率越大, 权值和阈值调整的幅度就越大, 但是网络的稳定性会大大降低; 而学习率越小, 网络权值和阈值调整的幅度就越小, 网络收敛的速度就会减小。在最优的梯度法中, 学习率 η 应当是可变的, 是一个一维搜索的结果。一般要求是: 当训练到误差曲面的平坦区域时, 为加快收敛速度应使 η 增大; 当训练到误差曲面变化剧烈区域时, 为防止训练结果陷入局部极小或训练误差变换较大, 应使 η 减小。本文选用带有动量项的自适应学习率算法 traingdm ,

它是一种批处理的前馈神经网络训练算法，它不但具有更快的收敛速度，而且引入了一个动量项，有效的避免了局部最小问题在网络训练中的出现。

动量项的加入就是在网络每次的权值和阈值改变量中加入前一次的改变量，第 k 次循环中的权值和阈值可表示为：

$$\Delta w(k) = -\eta g_w(k) + mc \times \Delta w(k-1) \quad (3-14)$$

$$\Delta \theta(k) = -\eta g_\theta(k) + mc \times \Delta \theta(k-1) \quad (3-15)$$

式中， $g_w(k)$ 和 $g_\theta(k)$ 分别表示当前性能函数对权值和阈值的梯度， mc 是动量系数。 mc 的值在 0 到 1 之间，当 mc 为 0 时，权值和阈值的改变量就由此时计算出的负梯度来确定；当 mc 为 1 时，权值和阈值的改变量就等于负梯度加它们前一时刻的改变量。

(2) 在网络训练中往往会出现这样的情况，当网络的训练误差很小时，一个新的输入会使网络的训练误差迅速增大。这是因为神经具有记忆的功能，前面的网络已经记忆了已训练的样本，而对新的输入没有良好的泛化能力，也就是说网络对新输入的输出与对应的目标输出有较大的误差。提高网络泛化能力的一个方法就是对输入样本归一化处理，使归一化后的样本输入均值为零。另外，应使用主成分分析等方法，尽量使各输入变量不相关，各输入变量的协标准偏差也接近相等，以确保权值的收敛速度大致相同。BP 神经网络输入样本归一化函数主要有：最大最小型函数，使输入向量量化到 [0 1] 范围内；零均值和标准偏差型函数，可以将输入样本的均值为 0 以及偏差为 1。

BP 神经网络的这两方面的改进都是在大量尝试的基础上得出最优的动量系数，输入样本的归一化还要与实际要解决的问题相联系，使归一化后的样本均值为零。

3.5.5 BP 神经网络本身的不足

神经网络是近几年国内外专家主要研究的对象，因为神经网络具有自学习、联想、记忆的功能、并行推理机制等优点，这使其在模式识别、信号处理以及工业控制等方面得到广泛应用。总结 BP 神经网络故障诊断方面的文献可知：神经网络在学习率的自适应改变、网络的稳定性、误差函数的选取和输入参数的归一化等方面多做了很多的改进，使神经网络的收敛速度和诊断的准确性提高都有了很大的提高，但 BP 神经网络本身存在的一些问题限制了它在实际中的广泛应用：

(1) 神经网络的诊断过程是一个“黑箱”处理过程，使人们难以理解网络的学习和决策过程，不能真正掌握其内在原理。

(2) 神经网络反映的是训练样本的统计特性。但对特殊样本的容错性较差，难以得到准确的诊断，甚至得出错误的判断。

(3) 神经网络的诊断结果没有完善的解释说明。虽然通过程序可以利用预设文本对诊断结果做一下说明，但这种说明是对每一种出现的故障做出相同的、固定不变的解释，并不能根据新故障的具体问题做出改进，使解决方案更符合实际问题。

(4) 神经网络的故障事例没有保存。现在很多神经网络的诊断软件没有保存诊断结果的操作，即使有保存操作，其诊断结果也只是当作历史纪录用于查看，而没有起到历史经验的价值——对新故障的诊断起指导作用。

3.6 神经网络专家系统

3.6.1 经典专家系统的不足

尽管专家系统可以像人类专家一样解决某些领域的问题，但是随着所处理问题的难度和复杂程度的不断增大，专家系统在某些方面已不能满足实际需要，具体体现在以下几个方面。

(1) 知识获取上遇到的“瓶颈”问题

- (2) 推理效率不高
- (3) 处理大型复杂问题较困难
- (4) 适应能力差

专家系统虽有知识获取的瓶颈问题、知识检索困难、推理效率低、自适应能力差等缺点；但专家系统具有概念明确、推理路径清晰和便于解释等优点。经典专家系统的主要特点就是利用历史经验作为故障诊断的依据，诊断过程更接近人类的决策过程。

3.6.2 神经网络专家系统

根据前面的分析可以看出，神经网络和经典专家系统各有其优缺点，而且在许多方面具有关联性和互补性，它们可以结合成为神经网络专家系统。它们的结合方式有并联和串联，并联式神经网络专家系统是将现场采集的数据分别输入到神经网络模块和专家系统模块，经过诊断以后比较两者的诊断结果，再采取融合的方式得到最后的结果；串联式神经网络专家系统是将现场采集的数据先输入到神经网络模块，发挥神经网络在大量信息模式识别方面的优势，再将诊断结果输出到专家系统模块中，进行高级诊断。本文采用串联式神经网络专家系统，如图 3-8 所示。由神经网络和专家系统串接而成的神经网络专家系统具有以下特点：

- (1) 知识获取和表达容易方便。神经网络的自学习、联想记忆功能，解决了专家系统中知识获取的“瓶颈”问题，将知识以权值和阈值的形式存储在网络中，从而使知识获取和表达更加容易方便。
- (2) 诊断效率提高和实时性增强。神经网络信息并行处理的功能，解决了专家系统推理效率低的问题，使故障诊断效率得到提高、实时性增强。
- (3) 诊断准确率提高。现场采集的实时数据首先经过神经网络的诊断模块，得到凝汽器典型故障中隶属度最大的一种故障，将诊断结果输入专家系统推理机验证。如果诊断结果相同，则输出诊断结果；但由于神经网络对没有出现过的故障容错性比较差，可能出现诊断结果不同的情况，此时由专家推理机发出指令调整神经网络的阈值，再进行诊断。
- (4) 诊断过程清晰。神经网络的“黑箱”推理过程，使人类对其推理过程难以理解，而专家系统使用自然语言、便于解释，使推理过程更加清晰、便于理解。诊断事例用于指导。神经网络专家系统可以将刚出现的事故存于知识库，并用于以后故障诊断指导。

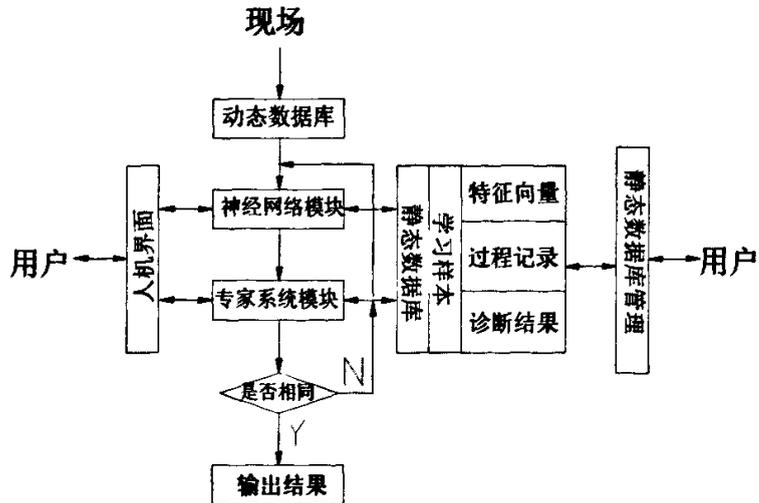


图 3-8 神经网络专家系统的结构

动态数据库是由数据采集模块从现场采集来的实时信息；神经网络模块是训练好的 BP 神经网络诊断模块，负责将采集到的数据并行处理进行初次诊断；专家系统模块接受神经网络的诊断结果，并进一步诊断，得出真正发生故障的原因；静态数据库包括神经网络模块训练用的学习样本和专家系统模块用的历史故障，记录了历史故障的特征向量、过程推理和诊断结果，是神经网络专家系统的知识库；静态数据库管理主要负责静态数据库的查询、修改和扩充。

综上所述，专家系统与神经网络各有优点，并且优势互补。神经网络强大的模式识别功能与专家系统专有的推理机制相结合，可以使凝汽设备的故障诊断技术更加完善、诊断推理过程更加清晰。作为神经网络专家系统主要模块之一的神经网络，其样本学习的对象是模糊的、抽象的数据，并不关心研究对象的本身特性，具有广泛的适用性；而专家系统推理机与知识库相互连接技术也很成熟。因此，神经网络专家系统在凝汽器系统故障诊断方面具有可行性和适用性。

3.7 本章小结

本章是针对凝汽器系统故障诊断技术的阐述，主要介绍了专家系统的基本结构、基本特征、推理机制、搜索策略和人工神经网络的神经元模型、BP 神经网络的结构及其学习算法，在此基础上结合经典专家系统和 BP 神经网络各自的优点提出了神经网络专家系统，最后给出了串接神经网络专家系统的结构，并总结了串接神经网络专家系统的特点。

第 4 章 凝汽器系统的运行优化

4.1 凝汽器系统运行优化的内容和方法

神经网络专家系统为凝汽器的故障诊断提供了诊断模型。凝汽器系统经过神经网络专家系统的诊断以后，凝汽器设备如果不存在故障，则进入凝汽器系统运行优化模块。凝汽器系统的运行优化主要包括循环水系统的水泵组合优化和凝汽器运行状态的调整优化。由于本软件是对凝汽器系统的实时优化，因此首先要通过汽轮机的性能计算来确定汽轮机的实时排汽状态，即进入凝汽器的排汽流量和排汽焓，然后才可以进行循环水系统的水泵组合优化和凝汽器运行状态的调整优化。

循环水系统的水泵组合优化是根据真空变化曲线确定最佳真空，然后根据循环水泵性能试验曲线和真空变化对机组功率的修正曲线得到汽轮机组的投入和产出，最后进行比较，得到最佳水量和最优组合方式，从而实现循环水系统的优化。

凝汽器运行状态的调整优化根据汽轮机性能计算模块得到的汽轮机排汽焓和汽轮机排汽量，以及由多次现场试验得到凝汽器热力特性曲线，进行凝汽器性能计算，实现凝汽器的能损分析，并为现场运行人员提供合理、科学的凝汽器状态调整方案和检修指导建议。下面介绍一下各个模块的实现方法。

4.2 汽轮机热力性能计算

4.2.1 热力系统热平衡计算

汽轮机性能指标计算主要是根据汽轮机热力系统热平衡原理来实现。对于图 4-1 表面式加热器系统，其热平衡计算公式，如表 4-1 所示；对于图 4-2 混合式加热器系统，其热平衡计算公式，如表 4-2 所示。

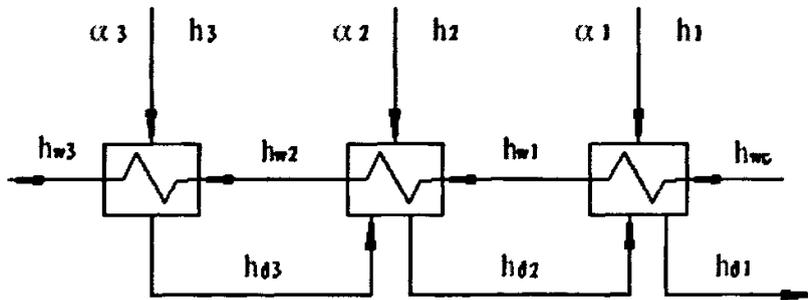


图 4-1 F3 表面式加热器系统

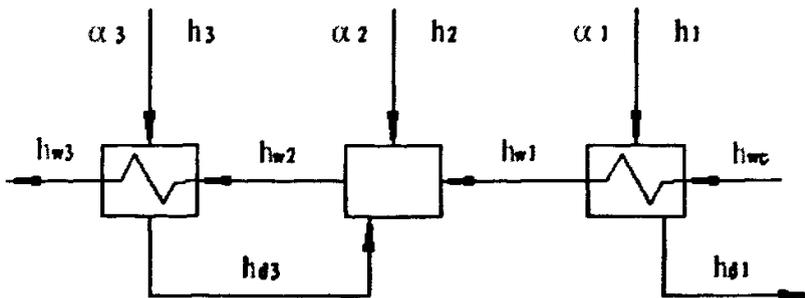


图 4-2 FCF 混和式加热器系统

表 4-1

	#3	#2	#1
抽汽放热量 q_i	$h_3 - h_{d3}$	$h_2 - h_{d2}$	$h_1 - h_{d1}$
疏水放热量 γ_i	0	$h_{d3} - h_{d2}$	$h_{d2} - h_{d1}$
给水吸热量 τ_i	$h_{w3} - h_{w2}$	$h_{w2} - h_{w1}$	$h_{w1} - h_{wc}$
抽汽份额 α_i	$\frac{\tau_3}{q_3}$	$\frac{\tau_2 - \alpha_1 \cdot \gamma_2}{q_2}$	$\frac{\tau_1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \gamma_1}{q_1}$

表 4-2

	#3	#2	#1
抽汽放热量 q_i	$h_3 - h_{d3}$	$h_2 - h_{d2}$	$h_1 - h_{d1}$
疏水放热量 γ_i	0	$h_{d3} - h_{w1}$	0
给水吸热量 τ_i	$h_{w3} - h_{w2}$	$h_{w2} - h_{w1}$	$h_{w1} - h_{wc}$
抽汽份额 α_i	$\frac{\tau_3}{q_3}$	$\frac{\tau_2 - \alpha_1 \cdot \gamma_2}{q_2}$	$\frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot \tau_1}{q_1}$

其中, h_i ——加热器进汽焓, $i=1,2,3$

α_i ——抽汽份额, $i=1,2,3$

h_d ——加热器的疏水焓, $i=1,2,3$

h_w ——加热器出水焓, $i=1,2,3$

h_{wc} ——凝汽器出水焓

本文针对的汽轮机组是七级回热抽汽系统:两个高压加热器、一个除氧器、四个低压加热器。在实际计算时,各加热器的抽汽进汽温度、进汽压力、疏水温度和进、出水温度都是在现场采集数据,根据这些在线参数就可以确定各加热器的进汽焓、疏水焓和进、出水焓;然后根据各加热器的能量平衡关系式计算各加热器的抽汽份额,各加热器的能量平衡关系为:抽汽放热量+疏水放热量=给水吸热量。

现对各加热器进行编号,从最高一级高压加热器到最低一级低压加热器依次为1号,2号, ..., 7号加热器,各级加热器的抽汽放热量、疏水放热量、给水吸热量分别用各自的下标表示,则各级加热器的抽汽份额可表示为:

$$\alpha_1 = \frac{\tau_1}{q_1}, \alpha_2 = \frac{\tau_2 - \alpha_1 \cdot \gamma_2}{q_2}, \alpha_3 = \frac{\tau_3 - (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \gamma_3}{q_3} \quad (4-1)$$

$$\alpha_4 = \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \tau_4}{q_4}, \dots, \alpha_7 = \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3) \tau_7 - (\alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6) \cdot \gamma_7}{q_7} \quad (4-2)$$

在得到各级加热器的抽汽份额以后,便可以计算汽轮机的排汽份额 α_c ,排汽份额与汽轮机的进汽流量相乘就是汽轮机的排汽流量。

$$\alpha_c = 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7 \quad (4-3)$$

在得到汽轮机各级加热器的抽汽份额和汽轮机排汽份额后,便可以计算汽轮机的排汽焓。然而,汽轮机排汽焓的计算一直是汽轮机性能在线分析的难点,下面重点介绍汽轮机排汽焓在线计算的实现。

4.2.2 汽轮机排汽焓的计算

在热力系统在线性能计算中,由于汽轮机的排汽通常处于湿蒸汽状态,因此要实现排汽焓的在线监测必须先将水和水蒸汽的热力性质用公式表示出来,以便用数值方法确定工质的状态参数。湿蒸汽焓值的计算方法可以采用国际公式化委员会拟定的用来计算水及蒸汽热力特性参数的公式,该方法占用内存小,在给出某一状态点一、两个独立状态参数后,以函数调用的形式快速而准确的计算出湿蒸汽焓值。目前,理论上计算汽轮机排汽焓主要有以下几种方法

1. 能量平衡法

将汽轮机及回热系统看作一个封闭的热力单元,利用热平衡方程、物质平衡方程和汽轮机功率方程,根据单元能量守恒原则计算排汽焓。其优点是:理论上可以精确计算汽轮机排汽焓;缺点是:很难全面考虑单元的能量进出。

2. 曲线外推法

根据汽轮机在过热蒸汽区入口蒸汽状态点和抽汽状态点做热力过程线,并平滑外推到湿蒸汽区,由此确定排汽焓。其优点是:简单,易于计算机在线计算;缺点是:精度不够,尤其是在汽轮机低负荷时。

3. 迭代法

方法类似于曲线外推法,只是增加收敛条件,迭代计算。该方法精度较高,由于受收敛条件的限制,迭代次数可能会较多,但是计算机的产生使迭代法用于汽轮机排汽焓的在线实时计算变成可能。计算机的快速发展,使其能够在1秒钟内完成数以百万次科学计算,所以采用曲线迭代法不仅可以实现汽轮机排汽焓的精确计算,还可以实现它的在线实时计算。下面主要介绍曲线迭代法。

首先,将汽轮机的进汽状态和处于过热区的抽汽点状态在*i-s*图上画出,并用平滑的曲线绘制出由进汽状态至最后一级过热抽汽的级段膨胀过程线。我们根据凝汽式汽轮机组的热力特性以及通过多次试验数据的分析可以得出结论,汽轮机组在最后一级抽汽时,才处于湿蒸汽状态,其它各级抽汽均是过热状态。虽然最后一级抽汽处于湿蒸汽状态,但一般湿度不大,所以,该级的膨胀过程线与前一级的变化趋势向下延伸。但是在最后一级抽汽之后,由于湿汽损失增大,级效率会降低,膨胀过程线相对平缓。根据最后一级抽汽压力与膨胀线的交点,确定末级抽汽的焓值,再由回热系统热平衡计算公式得出末级抽汽量。最后,由汽轮机热平衡方程式得到汽轮机排汽焓*i_{ex}*:

$$i_{ex} = \frac{G_m \cdot i_m - (G_{d1} \cdot i_{d1} + G_{d2} \cdot i_{d2} + G_{d3} \cdot i_{d3} + G_{d4} \cdot i_{d4} + G_{d5} \cdot i_{d5} + G_{d6} \cdot i_{d6} + G_{d7} \cdot i_{d7} + N)}{G_{ex}} \quad (4-4)$$

式中, $G_m \cdot i_m$ —主蒸汽带入汽轮机内的热量

$G_{di} \cdot i_{di}$ —各级回热抽汽带出汽轮机的热量, $i = 1, 2, \dots, 7$

G_{ex} —进入凝汽器的蒸汽流量

i_{ex} —汽轮机排汽焓

N —汽轮机内功率的热当量

由上式得到的汽轮机排汽焓不一定是该工况下的真实排汽焓,它需要通过校核膨胀终点焓才能确定。方法是,根据假设的膨胀终点焓,利用下式得到排汽的容积流量:

$$V_{\alpha} = G_{\alpha} \frac{V'_{\alpha}(i_{end} - i'_{\alpha})}{i'_{\alpha} - i_{\alpha}} \quad (4-5)$$

式中, V'_{α} —排汽压力下的干饱和蒸汽的比容

i_{end} —假设的膨胀终点焓

i'_{α} —排汽压力下的干饱和蒸汽的焓

i_{α} —排汽压力下的干饱和水的焓

利用计算出的排汽容积流量, 根据厂商提供的排汽损失与排汽容积流量的关系曲线, 得到排汽损失。由计算得到的汽轮机排汽焓减去这个排汽损失即为计算的膨胀终点焓, 将计算的膨胀终点焓与假设的膨胀终点焓比较, 若误差小于 1%, 则计算的汽轮机排汽焓在运行范围之内, 否则重复上述计算过程, 直到计算结果符合要求为止。

4.2.3 汽轮机的效率指标和能耗指标

在得到汽轮机的排汽流量和排汽焓之后, 为了能够让运行人员及时掌握汽轮机的经济运行状态, 本文同时还计算了汽轮机的汽耗率、热耗率和标准煤耗率作为评价、监视指标。汽轮机各个效率的计算即是机组能耗计算的基础, 而又存在相互关系, 下面首先简单介绍效率指标的计算, 然后再论述能耗指标的计算。

1. 汽轮机相对内效率 η_{ri}

$$\eta_{ri} = \frac{\Delta H_i}{\Delta H_i} \quad (4-6)$$

式中: ΔH_i —1kg 蒸汽在汽轮机内的有效焓降, kJ/kg

ΔH_i —1kg 蒸汽在汽轮机内的理想焓降, kJ/kg

汽轮机的相对内效率一般在 78%~90%之间, 表示汽轮机中能量转换的完善程度。 η_{ri} 称作汽轮机的绝对内效率, 它反映的是汽轮机内的有效焓降与蒸汽在锅炉中的吸热量的比值。

2. 机械效率 η_m

$$\eta_m = \frac{P_c}{P_i} \quad (4-7)$$

式中: P_c —汽轮机传输给发电机的轴功率, kW

P_i —汽轮机的内功率, kW

机械效率 η_m 一般为 0.98~0.99

3. 汽轮机组的绝对电效率 η_{ed}

$$\eta_{ed} = \frac{3600P_d}{Q_0} = \eta_1 \eta_{ri} \eta_m \eta_g \quad (4-8)$$

式中: P_d —发电机的实际发电量, kW

Q_0 —汽轮机热耗, 即蒸汽在锅炉中的吸热量, kJ/h

η_1 —循环的理想热效率, 一般为 0.5~0.54

η_g —发电机效率, 等于 $\frac{P_d}{P_c}$, 一般为 0.98~0.99

4. 全厂热效率 η_{cp}

$$\eta_{cp} = \frac{3600P_d}{BQ_1} = \frac{3600P_d}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_n \eta_m \eta_g = \eta_b \eta_p \eta_d \quad (4-9)$$

式中： B ——锅炉煤耗，kg/h

Q_1 ——煤的低位发热量，kJ/kg

Q_{cp} ——煤燃料的发热量，kJ/h

η_b ——锅炉效率，一般为 0.9

η_p ——管道效率，一般为 0.98

全厂热效率 η_{cp} ，又称为电厂的毛热效率，除去厂用电容量 P_{ep} (kW)的全厂热效率称作“净热效率”。我国 1990 年燃煤火电厂平均厂用电率为 8.2%。其中 125~200MW 机组电厂为 8.5%；300MW 及以上机组电厂为 4.7%~5.5%左右；中、小容量机组电厂为 9%~12%^[39]。

5. 汽耗率 SR

$$SR = \frac{D_0}{P_d} \text{ kg/(kW} \cdot \text{h)} \quad (4-10)$$

汽轮发电机组的汽耗率 SR 是指机组每发出 1kW·h 电能所需要的蒸汽量。

6. 热耗率 HR

$$HR = \frac{Q_0}{P_d} = \frac{3600}{\eta_d} \text{ kJ/(kW} \cdot \text{h)} \quad (4-11)$$

热耗率 HR 是汽轮发电机组每发出 1kW·h 电能所需要的热量。

7. 标准煤耗率 b'

$$b' = \frac{3600}{29310\eta_{cp}} = \frac{0.123}{\eta_{cp}} \text{ kg标煤/(kW} \cdot \text{h)} \quad (4-12)$$

标准煤就是低位发热量为 29310kJ/kg 的煤。

$$\text{实际煤耗率 } b = \frac{B}{P_d} = \frac{3600}{Q_1\eta_{cp}} \text{ kg/(kW} \cdot \text{h)} \quad (4-13)$$

4.3 循环水系统运行优化

火电厂的循环水系统是一个庞大的动力系统，其供水量一般是汽轮机排汽量的 50~70 倍，同时其消耗的电能约占总发电量的 1%~1.5%，而且凝汽器真空与循环水系统也有着紧密的联系。因此，研究循环水系统的优化的对凝汽器系统的优化具有重要的意义。在机组实际运行中，循环水量可以通过开大或关小循环水供水阀门的开度来调节，但这种方法是不经济的，关小阀门循环水量可能减小很多，而循环水泵功率却减小不多。

在得到汽轮机排汽流量和汽轮机排汽焓之后就要进行循环水系统优化。循环水系统的优化运行是指满足汽轮机凝汽器最佳水量的前提下，寻取最优的并联水泵运行组合和调速比，使整个泵组处于最优运行状态，并保证每台水泵运行在高效区，从而使循环水系统经济运行，提高火电厂的经济效益。循环水系统优化首先根据真空变化曲线确定最佳真空，然后根据各循环水泵性能试验曲线和真空变化对机组功率的修正曲线得到汽轮机组的投入和产出，最后进行比较，得到最佳水量和最优泵组合方式，从而实现循环水系统的优化。

4.3.1 真空变化曲线

在一定的蒸汽负荷下,循环水量增加会使凝汽器真空增大,使蒸汽在汽轮机中的有用焓降增加,机组出力增加;在一定的循环水量下,汽轮机排汽流量增加会使凝汽器真空下降,机组的出力减小。真空变化会引起机组出力的变化,通过微增出力试验,可以得到凝汽器真空通用曲线,进而可以得到真空变化对机组出力的修正曲线。机组微增出力试验就是要在汽轮机排汽流量不变的条件下,获得单位比凝汽器压力和单位比机组功率改变的关系(真空变化通用曲线)。在得到比凝汽器压力和单位比机组功率关系以后,利用比凝汽器压力和单位比机组功率关系得到的真空变化通用曲线,在曲线上选取若干点,由曲线查出这些点的 $\frac{P_n}{D_k}$ 和 $\frac{\Delta N}{D_k}$ 值,然后假设

一些流量值,分别与 $\frac{P_n}{D_k}$ 和 $\frac{\Delta N}{D_k}$ 相乘,从而得到各种流量下的 P_n 和 ΔN , 绘制真空变化对机组功率的修正曲线,如图4-3所示:凝汽器进汽流量从最左边开始分别是140t/h、160t/h、180t/h、200t/h、220t/h、240t/h、260t/h。

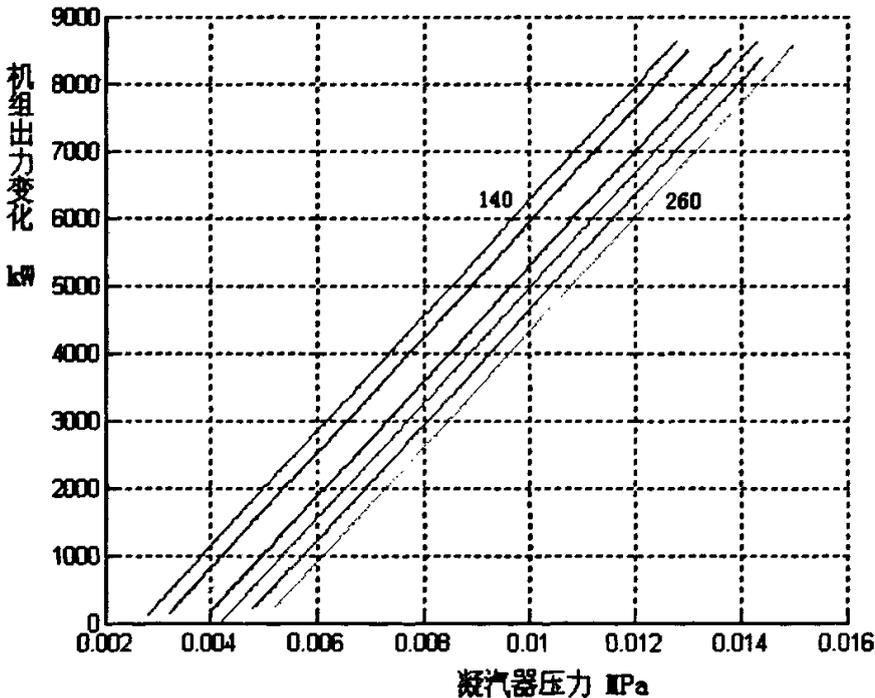


图 4-3 真空变化对机组功率的修正曲线

4.3.2 循环水泵性能曲线

火力发电厂中,循环水泵的耗电量仅次于给水泵,约占全部厂用电消耗量的10%~25%,约占整个发电量的0.8%~1%左右^[3]。为了减少循环水泵的消耗功率,就要进行循环水泵性能试验,获得循环水泵在实际运行时的性能曲线,从而确定循环水泵的高效运行区域。循环水泵性能曲线主要是水泵的流量—扬程曲线、流量—效率曲线和流量—功率曲线。

1、循环水泵流量—扬程曲线

水泵扬程是1kg水在流出水泵时所具有的单位能量减去它在流入水泵时所具有的单位能量,即1kg水通过水泵时所具有的能量,用米来表示。水泵扬程计算公式:

$$H = H_{CH} - H_J + \frac{V_{CH}^2}{2g} - \frac{V_J^2}{2g} \quad \text{m} \quad (4-14)$$

式中: H_{CH} ——水泵出口压力表读数(相对于水泵轴线), m

H_J ——水泵进口压力表读数(相对于水泵轴线), m

V_{CH} ——水泵出口管道中水的流速, m/s

V_J ——水泵进口管道中水的流速, m/s

水泵扬程计算时,进、出口压力表相对的水泵轴线可能不在同一个水平面上,导致水泵扬程的计算错误,因此在扬程计算时,应该进行修正。由计算出的扬程和相应的流量就可以得到扬程—流量曲线,如图4-4所示,为#10水泵的流量—扬程曲线。

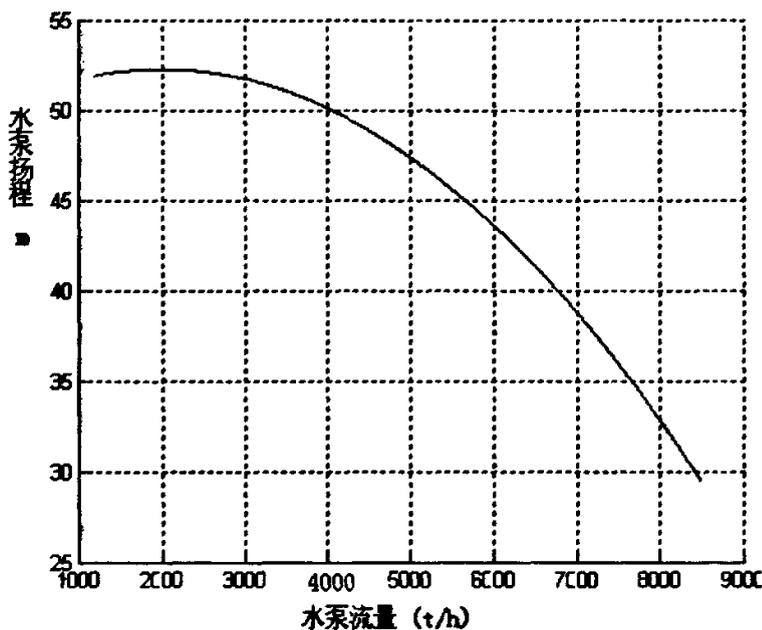


图4-4 水泵的流量—扬程曲线

2、循环水泵流量—功率曲线

本文的循环水泵功率是由两个瓦特表测量得到,测量时读取瓦特表数据,再根据公式 4-15 即可得到电动机的实际功率,绘制的循环水泵流量—功率曲线如图 4-5 所示:

$$N = k_u \cdot k_i (W_1 + W_2) \cdot B \quad (4-15)$$

式中: k_u ——电压互感器的变压比

k_i ——电流互感器的变流比

W_1, W_2 ——瓦特表的读数

B ——瓦特表常数

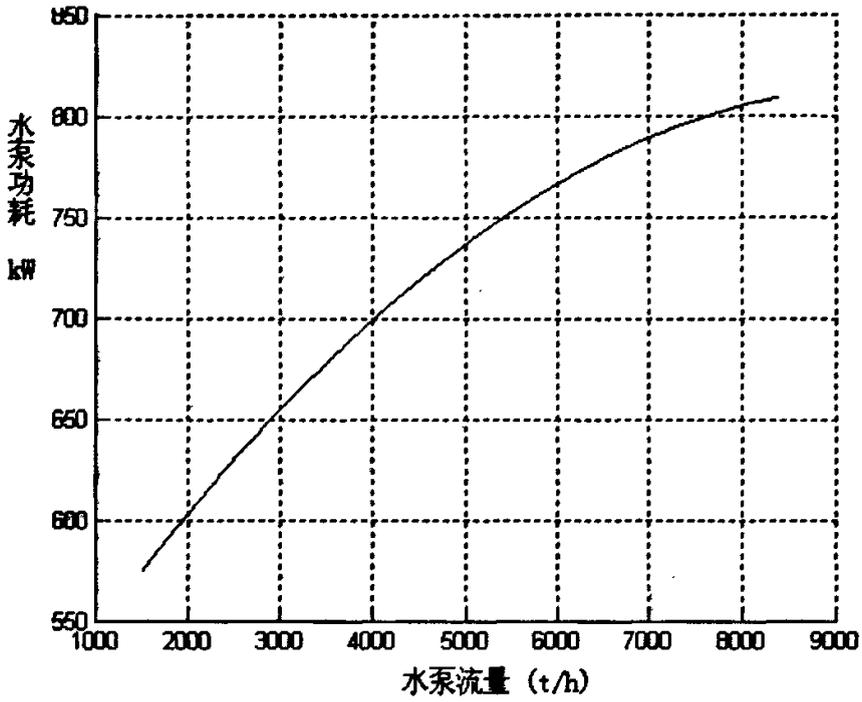


图4-5 水泵的流量-功率曲线

3、循环水泵流量-效率曲线

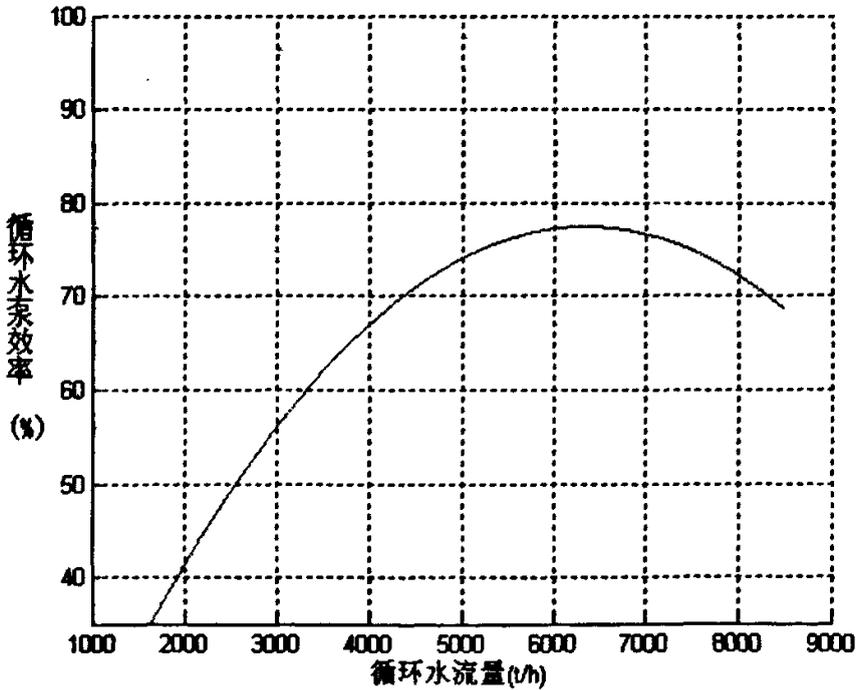


图4-6 循环水泵的流量-效率曲线

水泵在水力方面和机械方面性能的完善程度用水泵效率来说明，水泵效率等于水泵的有效功率与泵的轴功率之比。循环水泵的轴功率可以近似等于电动机实际功率。水泵的有效功率等于：

$$N_{yx} = \frac{QH\rho}{3600 \times 102} \text{ kW} \quad (4-16)$$

式中：Q——循环水泵的流量， m^3/h

H——循环水泵扬程，m

ρ ——循环水的密度， kg/m^3

水泵的效率为：
$$\eta = \frac{N_{yx}}{N} \quad (4-17)$$

根据公式 4-17 得到循环水泵的流量—效率曲线，如图 4-6 所示，通过该曲线可以确定水泵的高效运行区域。

4.4 凝汽器热力性能计算

凝汽器的热力性能计算是在机组运行状态下，根据凝汽器的性能指标参数的实际值与标准值的偏差，得到由于参数偏差而引起的机组标准煤耗率的能损偏差，从而及时有效的了解并调整机组运行状态，使机组处于良好的状态下。在机组运行中，凝汽器的凝汽负荷及循环水的进水温度是经常变化的，而且凝汽器压力、循环水温升和凝汽器端差还与循环水流量有关。因此，要确定凝汽器的热力特性，就要在不同的循环水流量和自然环境条件下，进行大量的现场试验。本文凝汽器热力特性曲线是在多次现场试验的基础上，根据不同的循环水流量、水温 and 机组负荷绘制完成的。

4.4.1 凝汽器热力特性曲线

1. 凝汽器压力-蒸汽负荷曲线

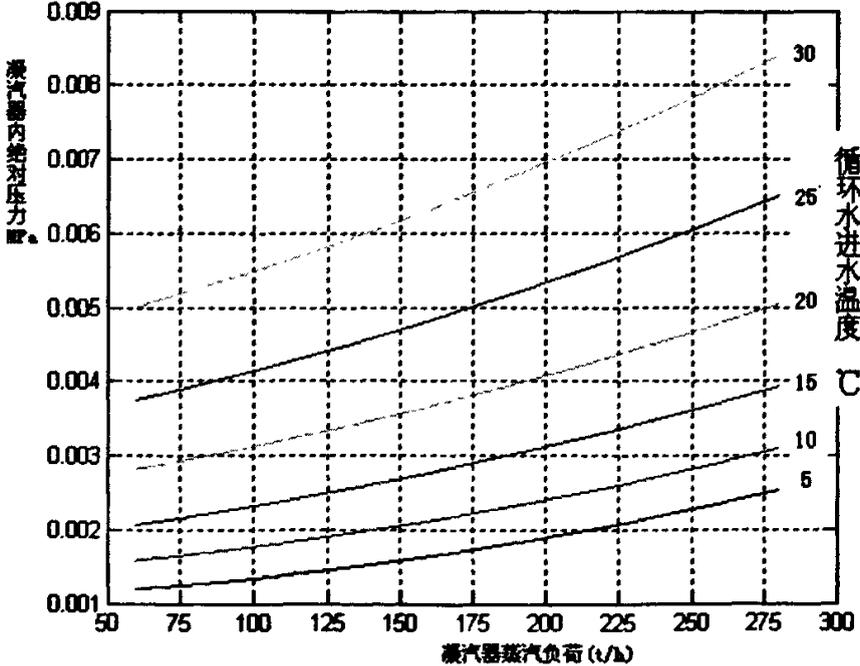


图4-7 凝汽器压力-蒸汽负荷曲线 ($W=15100t/h$)

凝汽器压力-蒸汽负荷曲线是描述凝汽器性能的最重要的曲线,它是在循环水流量和循环水进水温度一定的条件下,根据不同的凝汽器负荷得到相应的凝汽器绝对压力。图4-7和4-8分别是在循环水流量 W 为15100t/h和18000t/h的条件下,不同循环水进水温度时,凝汽器绝对压力与凝汽器负荷的关系曲线。由下图可以看出:当循环水流量和凝汽器负荷一定时,凝汽器压力随循环水进水温度的降低而降低,因而循环水进水温度降低,机组出力会增加;当循环水流量和循环水进水温度一定时,凝汽器压力随凝汽器负荷的降低而降低;最后结合两图,当凝汽器负荷和循环水进水温度一定时,凝汽器压力随循环水流量的增加而降低,因而增开循环水泵会使机组出力增加。例如,当循环水进水温度为20℃时,循环水流量为15100t/h时,200t/h的凝汽器负荷对应的凝汽器压力为0.0041MPa左右,而循环水流量为18000t/h时,200t/h的凝汽器负荷对应的凝汽器压力为0.0036MPa左右,大约降低0.5kPa。

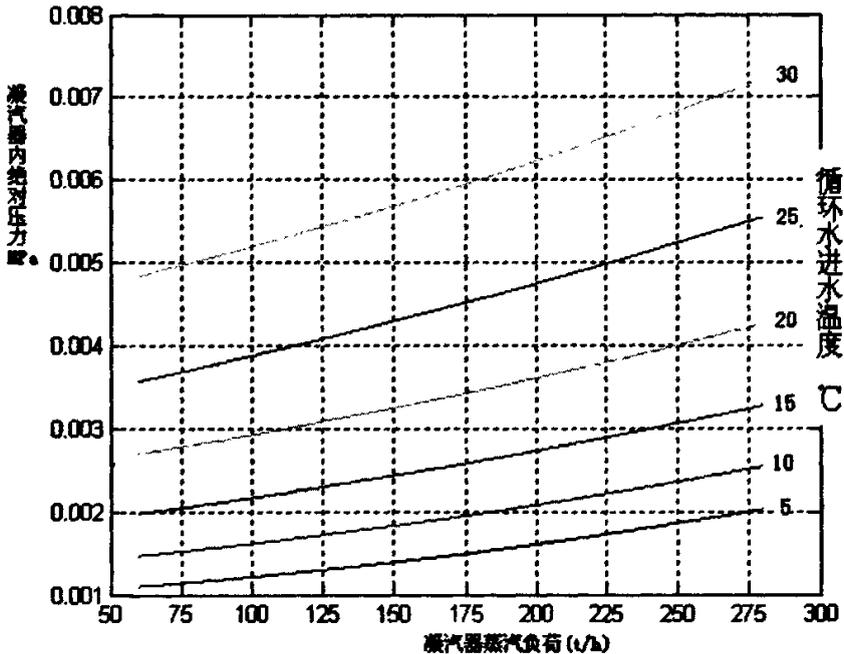


图4-8 凝汽器压力-蒸汽负荷曲线 ($W=18000t/h$)

2. 循环水温升-蒸汽负荷曲线

循环水温升-蒸汽负荷曲线是在不同循环水流量下绘制而成,该曲线的作用是在不同的循环水流量和比蒸汽负荷下,计算标准的循环水温升值。本文选取9000t/h到18000t/h区间内的六个循环水流量段,如图4-9所示。

3. 凝汽器端差-蒸汽负荷曲线 (循环水流量为15100t/h)

本文还根据循环水流量的六个区域段绘制了一簇凝汽器端差-蒸汽负荷曲线,用来确定在不同的循环水流量、循环水水温 and 比蒸汽负荷下标准的凝汽器端差值。图4-10是循环水流量为15100t/h时的凝汽器端差-蒸汽负荷曲线。在相同的运行条件下,如果机组实际运行的凝汽器压力、循环水温升和凝汽器端差高于曲线上对应的数值太多,则机组运行异常,本优化系统可以给出相应的建议,运行人员可以根据优化建议采取相应的措施。

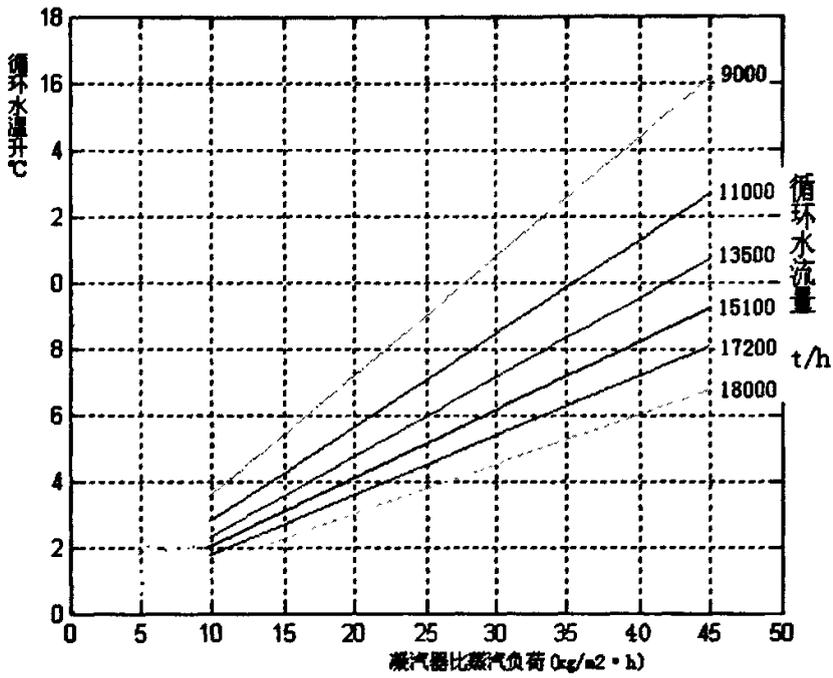


图4-9 循环水温升-蒸汽负荷曲线

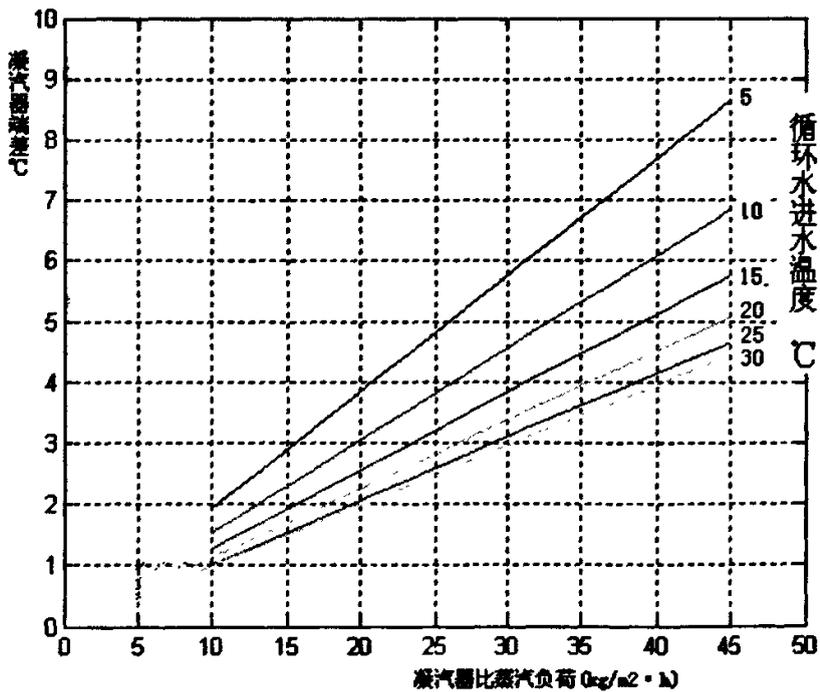


图4-10 凝汽器端差-蒸汽负荷曲线 (W=15100t/h)

4.4.2 凝汽器热能损分析

凝汽器工作的好坏直接影响机组的发电效率，为了实现机组安全、经济运行，做好凝汽器的性能监测工作尤为重要。通过凝汽器主要性能指标的监测，并在线分析计算由于指标参数的变化而引起机组汽耗率、热耗率和标准煤耗率的偏差，以便运行和管理人员及时掌握机组的运行状态。

目前电厂均以机组的供电标准煤耗率为经济考核的主要指标，但是为了让电厂运行人员掌握更多的机组运行状态信息，把机组的汽耗率和热耗率也计算出来，以供运行人员查看。机组的总能耗可表示为实际工况和设计工况中，标准煤耗率偏差：

$$\Delta b_n^s = b_n^s - b_{nd}^s \quad \text{g 标煤/(kW} \cdot \text{h)} \quad (4-18)$$

式中： Δb_n^s ——当前工况的标准煤耗率偏差；

b_n^s ——当前工况的标准煤耗率；

b_{nd}^s ——设计工况的标准煤耗率

由凝汽器性能指标参数凝汽器压力、凝汽器端差和循环水温升的偏差，而引起的机组耗差，是在假设其它参数不变的条件下，只考虑某一个单一参数的变化而引起的机组汽耗率、热耗率和标准煤耗率的变化。譬如，凝汽器压力变化 ΔP_k ，由真空变化对机组功率的修正曲线可以得到

由于凝汽器压力变化 ΔP_k ，而引起的机组出力变化 ΔP_{el} ；然后，根据汽耗率公式 $SR = \frac{D_0}{P_{el}}$ ，

得到汽耗率的变化 ΔSR ，进而可以得到热耗率的变化 ΔHR ；最后，根据标准煤耗率与热耗率的关系公式，得到标准煤耗率变化 Δb_n^s 。凝汽器端差 α 变化后，在循环水进水温度 t_{w1} 和循环水温升 Δt 不变时，会引起凝汽器内饱和蒸汽温度 t_s 的变化，从而引起凝汽器压力的变化，再根据上面凝汽器压力变化的计算步骤即可得到汽耗率、热耗率和标准煤耗率的变化。循环水温升 Δt 的变化后，也会引起凝汽器压力的变化，也可以得到汽耗率、热耗率和标准煤耗率的变化。

4.5 本章小结

本章主要介绍了凝汽器性能优化的理论和计算过程，为凝汽器系统优化软件的实现提供技术支持。软件中汽轮机组性能计算为凝汽器系统优化和凝汽器能损分析提供必要的计算参数，再通过循环水系统优化和凝汽器能损分析两个模块，为运行人员提供设备调整和检修决策依据，从而保证机组运行状态的最佳。

第 5 章 凝汽器系统性能优化软件的实现

5.1 软件开发环境及接口实现

火电厂凝汽器系统的故障诊断和运行优化软件可以分为诊断和优化两大部分，其系统结构如图 5-1 所示。诊断部分，主要是利用神经网络专家系统的方法，在 Matlab 编程环境下，利用 Matlab 神经网络工具箱函数训练故障诊断知识库，得到训练好的模型，再用 Visual Basic 软件调用 Matlab 函数实现凝汽器系统的在线诊断，并将诊断的结果自动保存到数据库中；运行优化部分，主要包括汽轮机组排汽焓、排汽流量、汽耗率、热耗率以及标准煤耗率的在线计算和凝汽器运行参数能损分析、循环水量优化两部分，并将相应的操作指导显示给运行人员，这一部分主要是利用 Visual Basic 软件和数据库实现。在此之前，有很多凝汽器系统方面的研究和软件开发，但他们不能兼顾凝汽器故障诊断方法的完善性和运行优化的实时性，也不能对诊断结果和性能分析的结果实现在线数据库保存。本软件在诊断方法上采用最新的神经网络模式识别方法，并与经典的专家系统结合，使凝汽器的故障诊断和推理方法更加完善，且在系统安全性诊断评价之后，串接了汽轮机性能计算、循环水优化和凝汽器能损分析的凝汽器运行优化技术，为实现整个机组安全性和经济性的提高提供了技术支持和决策依据。

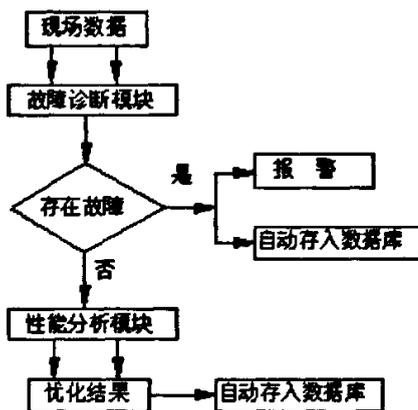


图 5-1 凝汽器系统优化软件的流程

5.1.1 软件开发环境

目前新建电厂或改造后的老电厂都安装了不同规模、结构的 DCS 控制系统，与老式的控制系统相比，DCS 控制系统最大的优势在于它能够为操作运行人员采集现场大量的参数信息。DCS 控制系统是 70 年代中期发展起来的以微处理器为基础的计算机综合控制系统，称为集散控制系统 (Distributed Control System, DCS)。“集”为集中监视、集中操作和集中管理；“散”为分散控制。DCS 控制系统将计算机技术、控制技术、通信技术和显示技术相结合应用于工业生产、控制和管理，并且具有良好的扩展性和开放性，为应用开发打下了良好的基础，DCS 系统的应用标志着控制仪表系统进入了一个新的阶段。

DCS 控制系统的组成如图 5-2 所示，其中现场控制站和过程监测站属于分散控制部分；工程师站、操作员站和监控计算机属于操作管理部分；数据总线将它们连成一个完整的系统；网络接口用于连接其它系统。

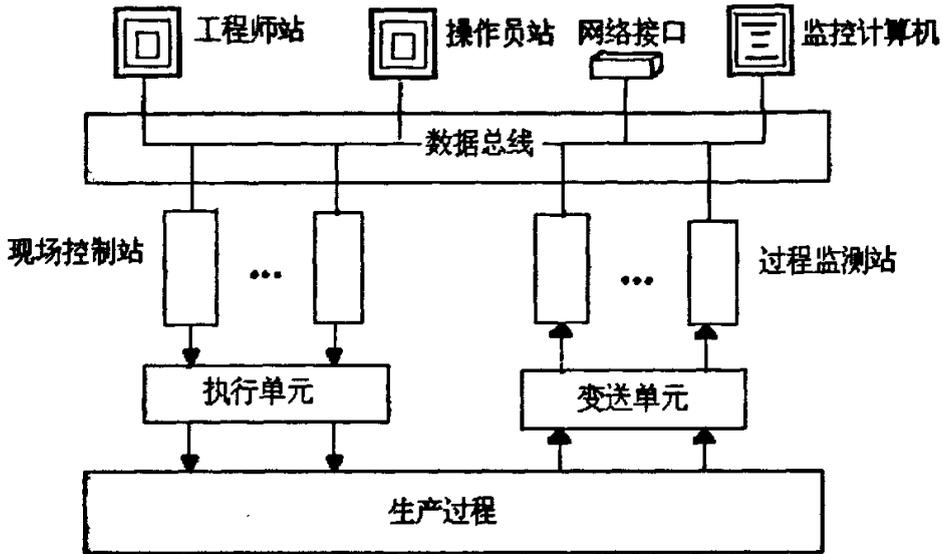


图 5-2 DCS 控制系统的组成

DCS 控制系统可以方便地进行数据监测和过程控制，但是它对汽轮机组性能的在线分析、潜在的故障以及汽轮机组运行的状态不能做出很好的判断。因此，我们自己配置了工控机，并将开发的软件安装在工控机内，然后将工控机连接到电厂的 DAS（即数据采集系统）系统上，通过 DDE 通讯协议实现数据的实时采集，数据采集连接如图 5-3 所示^[14]。

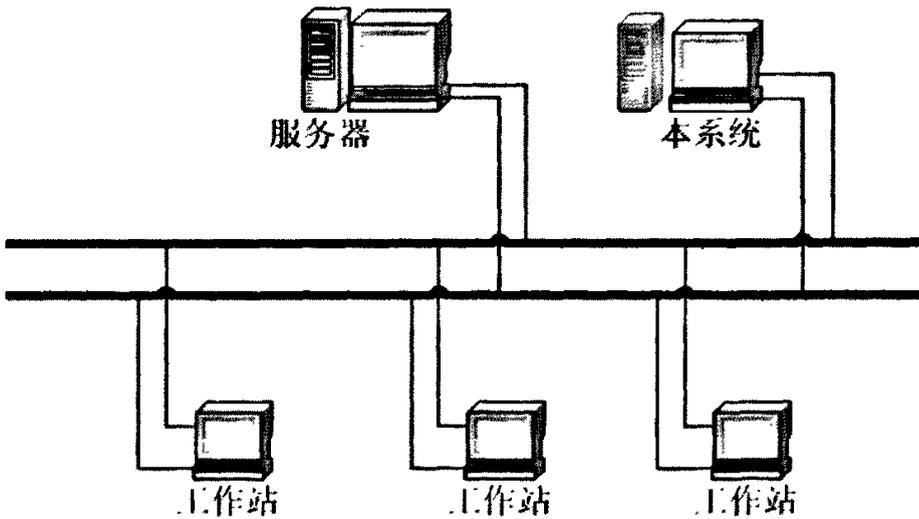


图 5-3 系统数据采集示意图

本软件的开发环境是一台独立运行的工控机，工控机上装有组态王 6.5 工控软件、SQL Server 数据库以及 Visual Basic 6.0 等主要的开发软件，为了能够调用 Matlab 函数还安装了 Matlab 6.5 辅助软件。组态王是 Windows 系统下国产组态软件，支持多种通讯方式，其主要功能就是可以方便、快捷的实现现场数据的实时采集，而且有丰富的图库和大量的内部函数，可以使工业控制或者流程演示形象真实，编程效率提高；SQL Server 数据库主要功能是保存组态王采集的数据，以供管理人员调用、查看；Visual Basic 软件主要功能是实现凝汽器系统的故障诊断和性能计算分析，优化凝汽器系统的运行状态，即本软件最重要的部分。

5.1.2 组态王与 VB 数据通信的实现

本软件是利用组态王的采集到的数据进行故障诊断和性能分析，它们之间是通过 DDE 方式进行数据交换。组态王通过 DDE 方式与其它应用程序进行数据交换，通过 DDE 方式用户自编的应用程序可以无缝的与组态王进行数据交换，为用户开发应用软件提供更为灵活的空间，也为应用软件功能的完善提供了有效途径。

Windows 是基于信息机制的协作式多任务系统，动态数据交换（Dynamic Data Exchange, DDE）协议是 Windows 提供的一种利用共享内存进行应用程序间数据交换的方法，它充分体现了 Windows 的多任务优点^[26]。DDE 通信采用客户/服务器模式，客户与服务器程序之间的数据交换称为会话，发起会话者称为客户程序（Client），它从服务器获得数据，响应者称为服务器程序（Server），它维护其它应用程序可能使用的数据。DDE 的会话有三种类型：冷链接、温链接和热链接。在冷链接中，服务器数据的变化并不通知客户，无论何时客户都必须明确地从服务器请求每一个数据；在温链接中，服务器通知客户数据项的值已经发生变化，但只有客户发出请求时，服务器才向客户机发送该数据；而在热链接中，无论何时数据发生变化，客户内部的一个例程都会自动接受服务器发来的变化数据，将数据进行加工处理后存入相应的数据库保存，这种方式充分利用了 DDE 的优点，也是最常用的一种方式^[26]。

DDE 数据交换的实现要确定三部分：“服务程序名（Application）”是与组态王交换数据的 DDE 服务程序名称，一般是 I/O 服务程序或者 Windows 应用程序，如 Visual Basic；“话题名（Topic）”是本程序和服务程序进行 DDE 连接的主题，如 form1；“数据项（Item）”是进行数据交换的具体控件或变量，如 text1。然后在组态王数据变量的定义中将逻辑设备名称为“VB”，变量数据类型为 I/O 实型，最后将变量寄存器选为 Visual Basic 中对应的控件名。

5.2 凝汽器系统故障诊断模块实现

凝汽器故障诊断模块主要完成凝汽器系统的初级故障诊断和高级诊断，判断凝汽器是否存在故障，或找出可能存在的潜在故障。该模块主要是利用 Visual Basic 语言编写，并调用 Matlab 神经网络工具箱函数，实现凝汽器系统的在线诊断，并将存在的故障诊断结果自动保存到数据库中。

5.2.1 VB 与 Matlab 数据通信的实现

Matlab 是由美国 Mathworks 公司开发的用于科学和工程计算与分析的软件工具，它具有强大的数值运算和符号运算功能、提供了丰富的图形处理函数和应用程序接口，集成了工程应用领域的大量函数工具箱，例如信号处理、控制系统、模式识别、模糊逻辑、神经网络、小波分析、光谱分析以及模型预测等。现在流行界面友好、操作简单以及功能强大的可视化软件，但是 Matlab 的弱点就是图形用户界面功能简单，不能满足许多工程软件开发的要求。Visual Basic 是 Microsoft 公司推出的一个功能强大的应用系统开发工具，继承了 Basic 语言面向普通用户、易学易用的优点，同时引入了可视化图形界面的程序设计方法和面向对象的编程机制，使程序设计更加直观、简单、编程效率提高。而且 Visual Basic 6.0 提供了多种应用程序接口，可以方便的调用 Matlab 的工具箱函数，还可以与数据库通信，实现数据库中数据地保存、修改、更新、删除以及查询等操作。因此，VB 与 Matlab 和数据库结合使用，不仅可以实现数据、图形和界面的有机结合，而且可以实现数据的有效管理。本文即采用该方法开发了具有快速故障诊断、诊断结果图示、操作决策指令表达的凝汽器故障诊断模块，直接服务于运行操作的技术指导和车间日常生产管理工作中。

VB 与 Matlab 集成的基本方法主要有四种^[27]：借助 Active 部件、引入 MatrixVB、借助 DDE 技术和通过 M 文件。文献^[28]还提出了一种利用 COM 组件的方法。本模块采用 ActiveX 技术，它不仅可以实现应用程序间的数据交换，还可以调用大量的 Matlab 函数实现图形显示等功能。在 Windows 注册表中，Matlab 的 ActiveX 对象名为“Matlab.Application”，其主要方法有：Execute(Command as string)，执行一条 Command 字符串的 Matlab 命令，并以字符串的形式返回结果；GetFullMatrix([in] BSTR name,[in] BSTR workspace,[out] Double pr,[out] Double pi)，将

指定的 Matlab 工作空间 (workspace) 的矩阵变量 (name) 赋值给 VB 程序中的数组变量, pr 和 pi 分别是数组的实部和虚部: `PutFullMatrix([in] BSTR name,[in] BSTR workspace,[out] Double pr,[out] Double pi)`与 `GetFullMatrix` 相反, 是将 VB 程序中的数组赋值得到 Matlab 工作空间中的某个矩阵变量。通过这些函数就可以实现在 VB 环境下 Matlab 函数的使用。

5.2.2 凝汽器系统故障诊断模块

凝汽系统故障诊断模块主要包括神经网络初级诊断界面和专家推理高级诊断界面, 既可以人工手动输入故障征兆, 也可以直接调用数据库中的实时数据。

神经网络初级诊断界面主要包括诊断、图示诊断结果、进入专家推理界面以及操作指导等功能, 该界面如图 5-4 所示。当程序运行时, 系统默认的是自动调用数据库中的实时数据, 每隔 1 秒钟, 系统就会自动从数据库获取数据进行诊断, 有故障的数据可以自动保存到数据库。

在专家推理高级诊断界面中, 主要是利用凝汽器系统的理论知识构建知识库, 采用经典专家系统的逻辑推理机对神经网络初级诊断结果的逆向推理, 如图 5-5 所示。神经网络的诊断是初级的诊断, 它只是得到发生故障的设备或系统, 并不能进一步找出故障的具体原因, 或者没有详细的故障解决操作指导。专家推理就可以实现故障原因的进一步确定, 或者给出详细的故障解决操作指导, 帮助运行人员及时掌握发生故障的具体设备, 引导运行人员找出发生故障设备的具体原因。

现场采集的数据经过故障诊断模块处理, 如果存在故障, 系统会自动保存故障数据, 以备以后调度查看; 如果不存在故障, 系统将会进入凝汽器性能优化模块。

神经网络初级诊断

征兆参数	典型故障隶属值		
凝汽器真空(kPa)	96.47		
循环水温升(°C)	9.41		
循环水泵电流(A)	142.5		
凝汽器水阻(MPa)	0.046		
凝结水泵电流(A)	260		
凝结水出口压力(MPa)	0.94		
凝结水过冷度(°C)	-2.22		
凝汽器端差(°C)	4.995		
#1低加出水温度(°C)	58.98		
凝结水导电度(us/cm)	0.24		
轴封进汽压力(MPa)	0.03		
热井水位(mm)	130		
抽气器入口真空(kPa)	91		
循环水泵故障	0005	低加管道破裂	0005
真空系统不严密	001	凝汽器满水	01
凝汽器铜管脏污	012	凝结水泵故障	001
凝汽器管板堵塞	001	抽气器故障	001
凝汽器缸顶破坏	001	轴封供气不足	001
凝汽器铜管破裂	0003		

开始诊断
图示结果

专家系统界面
返回

帮助

图 5-4 神经网络初级诊断界面

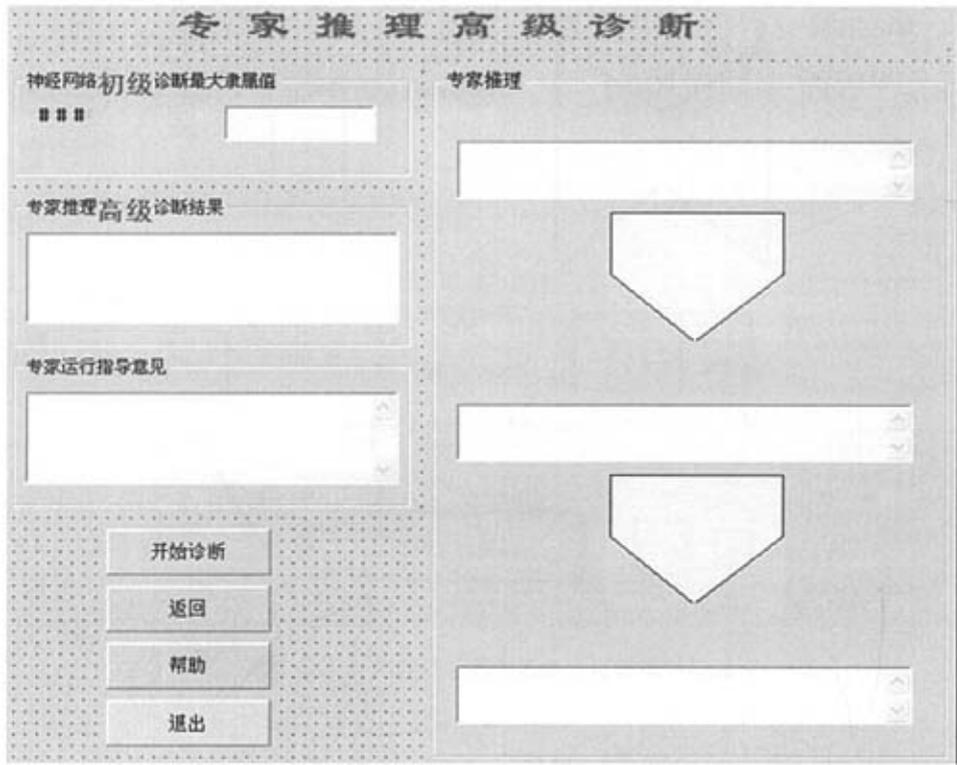


图 5-5 专家推理高级诊断界面

5.3 凝汽器系统性能优化模块实现

当凝汽器经过神经网络专家系统的诊断证明凝汽器不存故障后,进入凝汽器性能优化模块。该模块主要包括汽轮机性能计算模块、循环水系统优化模块和凝汽器能损分析模块。汽轮机性能计算模块主要完成汽轮机组绝对电效率、汽耗率、热耗率、标准煤耗率、汽轮机排汽焓和汽轮机排汽量的在线计算,还附有简单的水蒸汽参数计算功能;循环水系统优化模块主要是分析当前循环水系统运行方式是否最优;凝汽器能损分析模块就是凝汽器热力性能计算模块,主要分析当前工况的凝汽器性能指标参数偏差和由于偏差引起的凝汽器能量损失。

5.3.1 汽轮机性能计算模块

本模块由两个界面组成:第一个界面是汽轮机组热力系统参数的实时在线显示;第二个界面是汽轮机组热力参数的计算结果,如图 5-6 和 5-7 所示。

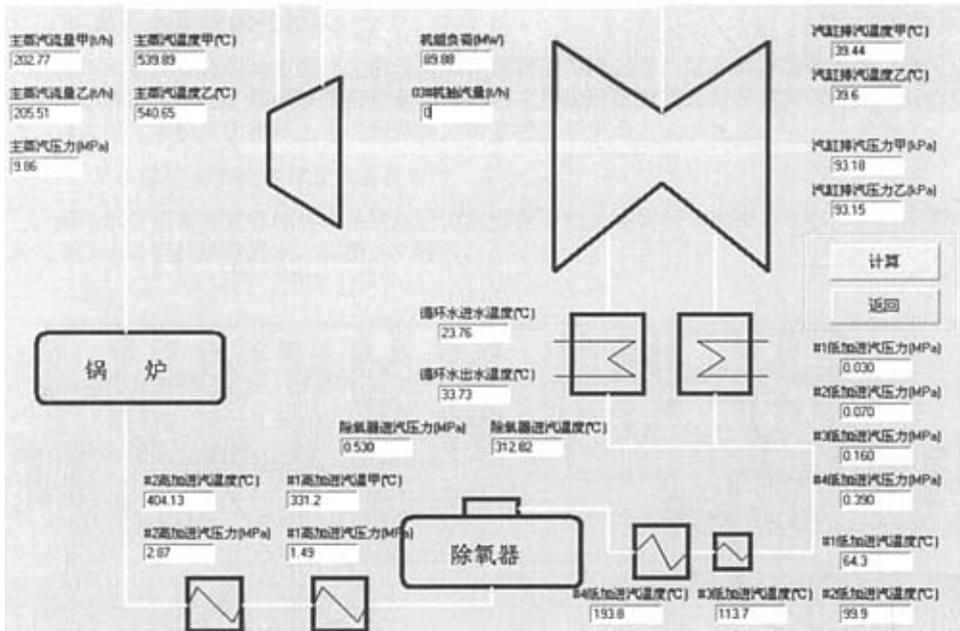


图 5-6 汽轮机组热力系统主要数据采集画面



图 5-7 汽轮机组热力系统计算结果

5.3.2 循环水系统优化模块

循环水系统优化模块根据汽轮机性能模块得到的凝汽器进汽量和凝汽器进汽焓，便可以对循环水系统进行优化。该模块主要包括当前循环水系统运行方式选择及其应该达到的运行值查询、以及单元制机组和循环水系统联网运行时多种水泵组合方式的优化。

1、当前循环水系统运行方式选择界面

循环水泵组合方式和循环水系统运行方式要在下拉式编辑框中选择，选择以后，在循环水系统画面会上有相应的显示，如图 5-8 所示。

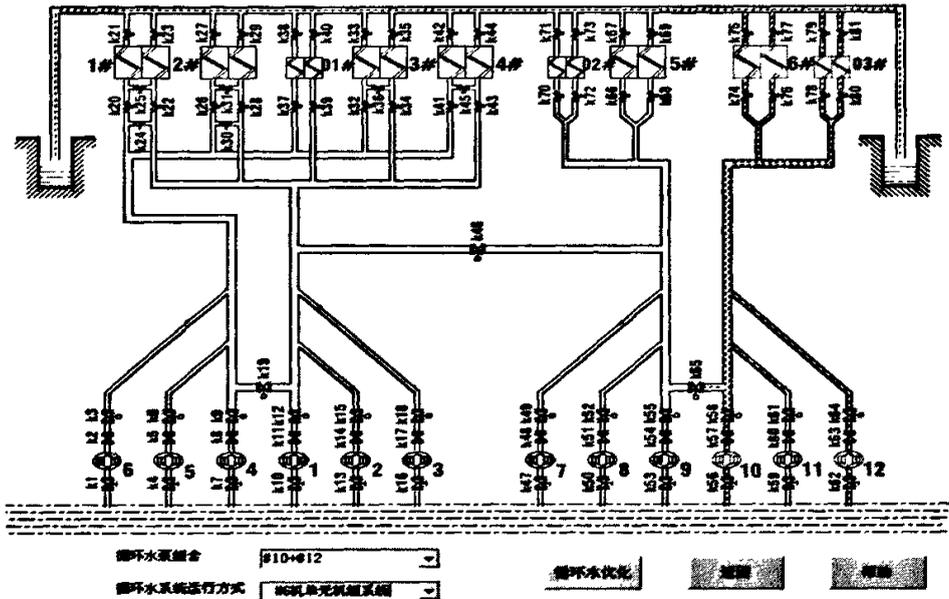


图 5-8 循环水系统选择界面

2、循环水系统优化界面

循环水系统优化界面是当前机组工况循环水系统应达优化值和当前工况的循环水泵功耗值和机组功率相对最佳真空的变化值，如图 5-9 所示。该图中“当前循环水系统应达优化值”一栏内的参数是当前循环水系统应该要达到或接近的值；“机组当前工况功耗”是比较当前工况的循环水泵功耗和机组出力的大小。

3、循环水系统优化结果界面

循环水系统优化结果界面针对单元制和联网系统进行优化；它计算了水泵组合方式变化后，水泵功耗的增加和机组功率的增加值，并加以比较，给出优化结果，如图 5-10 所示。该图是单元制循环水系统的优化结果，“水泵功耗增加”是假定循环水系统水泵组合变化时，水泵功耗的变化；“机组功率增加”是在水泵组合变化时，引起循环水量的变化，从而进一步引起的机组功率变化；“差值”是“机组功率增加”减去“水泵功耗增加”得到的数值，该数值为正，则表示该循环水系统运行方式有效，而且该数值越大对机组的发电效率的提高越有利。

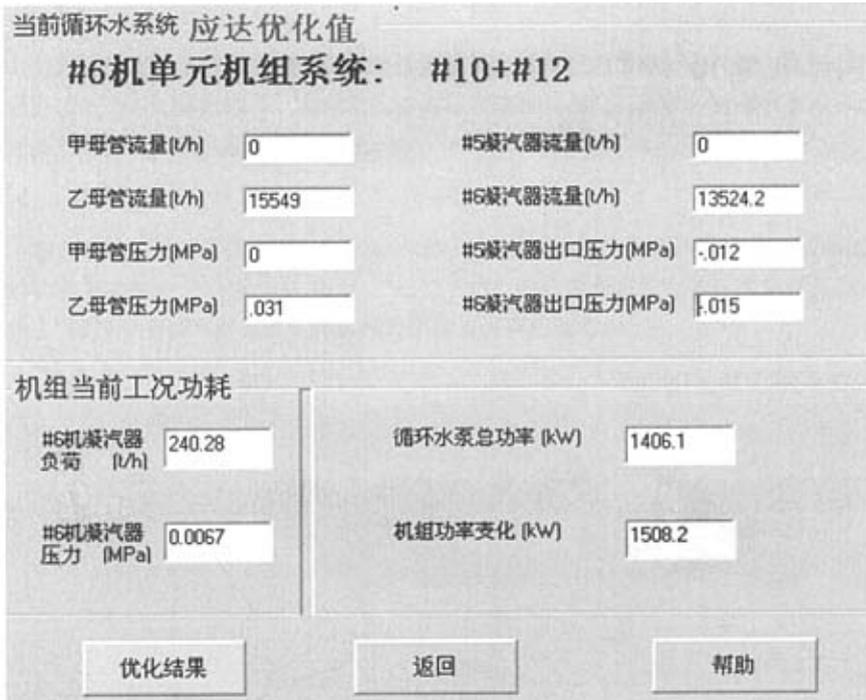


图 5-9 循环水系统优化界面

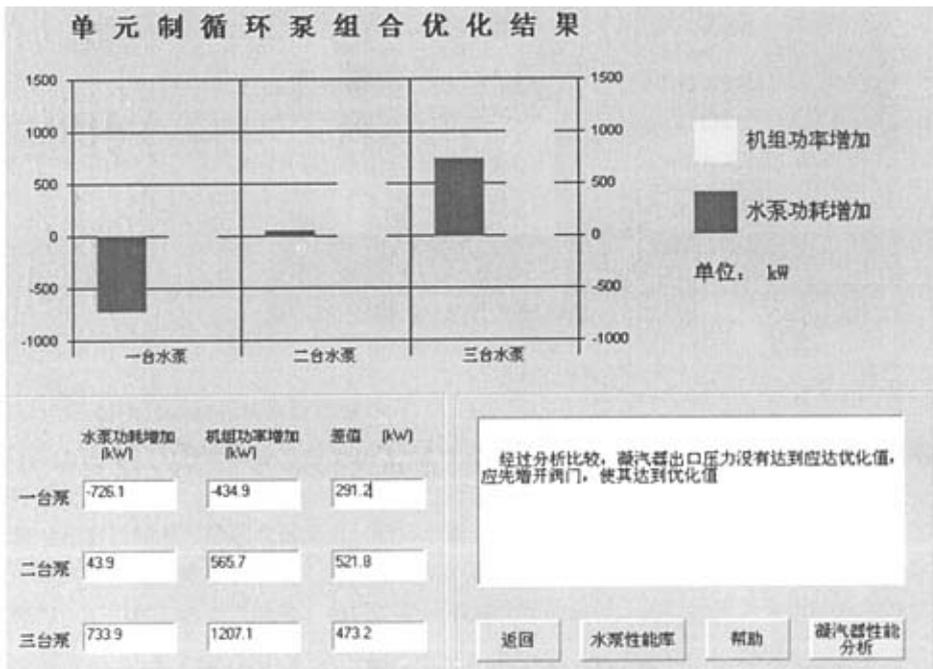


图 5-10 单元制系统优化结果界面

当前的循环水系统运行方式为#10和#12水泵, 经过优化后可以得出结果: 两台水泵可以使机组净功率增加 521.8KW。但是凝汽器出口压力没有达到优化值, 运行人员应该增开阀门。

5.3.3 凝汽器能损分析模块

凝汽器能损分析就是要根据汽轮机性能模块计算得到的凝汽器进汽量和凝汽器进汽焓，通过凝汽器压力、循环水温升、凝汽器端差的标准值和实测值的比较，对凝汽器设备的性能进行进一步的分析。该模块由两部分组成：

1、凝汽器能损分析界面

凝汽器能损分析界面主要是比较凝汽器压力、循环水温升和凝汽器端差的实测值和标准值，并给出相应的偏差，如图 5-11 所示：“已知参数”栏内是凝汽器参数标准值计算所需要的已知条件；“偏差”是凝汽器参数实测值减去标准值得到的数值。

凝 汽 器 能 损 分 析

已知参数

凝汽器负荷 (t/h)	240.28	循环水流量 (t/h)	13619.6	循环水进水 温度 (°C)	23.79
----------------	--------	----------------	---------	------------------	-------

分析结果

	标准值	实测值	偏差
凝汽器压力 (MPa)	0.0056	0.0067	0.0011
循环水温升 (°C)	7.22	9.95	2.73
凝汽器端差 (°C)	3.72	5.82	2.1

图 5-11 凝汽器能损分析界面

2、凝汽器能损分析结果界面

凝汽器能损分析结果界面主要是当凝汽器压力、循环水温升和凝汽器端差存在偏差时，计算出机组汽耗率、热耗率和标准煤耗率变化的值；并附有相应的建议，如图 5-12 所示：“凝汽器运行参数偏差”是凝汽器压力、循环水温升和凝汽器端差三个参数实测值与标准值的比较；

“凝汽器运行参数能损分析”是分别在凝汽器压力、循环水温升和凝汽器端差三个参数存在偏差时，而引起的机组汽耗率、热耗率和标准煤耗率的偏差，并有相应的分析结果和建议。

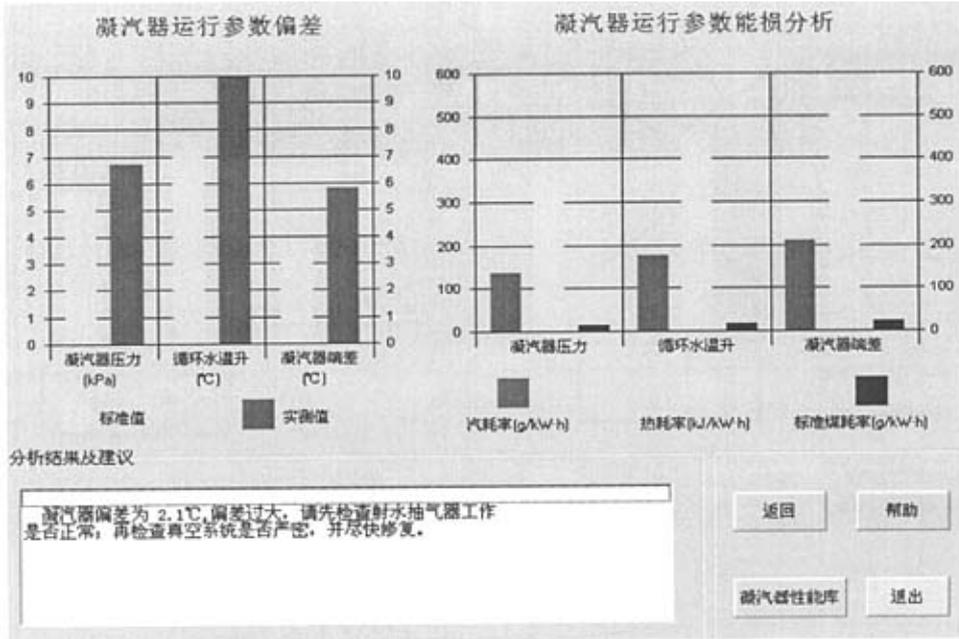


图 5-12 凝汽器能损分析结果界面

5.4 凝汽器系统性能优化实例分析

为了考核凝汽器系统性能优化软件的实际应用功能, 下面通过该软件对一些现场实时工况进行分析。

实例一: 在机组额定负荷正常运行情况下, 考核凝汽器性能优化整个软件计算、分析的准确性。该工况稳定后测得的主要数据, 如图 5-13 所示: 机组负荷 99.85MW、主蒸汽流量 420.2t/h、主蒸汽压力 9.92MPa、汽缸排汽温度 37.35°C、汽缸排汽真空 93.9kPa、循环水进、出水温度分别为 23.87°C 和 31.82°C; 汽轮机性能计算结果, 如图 5-14 所示; 当前循环水系统组合方式为: #10+#11+#12 三台水泵的单元制系统, 得到循环水系统优化结果, 如图 5-15 所示; 凝汽器能损分析结果, 如图 5-16 所示; 故障诊断结果, 如图 5-17 和 5-18 所示。

由本软件的计算和分析结果来看, 汽轮机性能计算结果中, 汽耗率、热耗率和标准煤耗率比机组设计工况下的数值要高 0.5%~1%; 循环水优化结果和凝汽器能损分析结果, 表明循环水系统没有达到应达的优化值, 应该增开凝汽器出口阀门, 降低凝汽器循环水出口压力, 增大循环水流量。

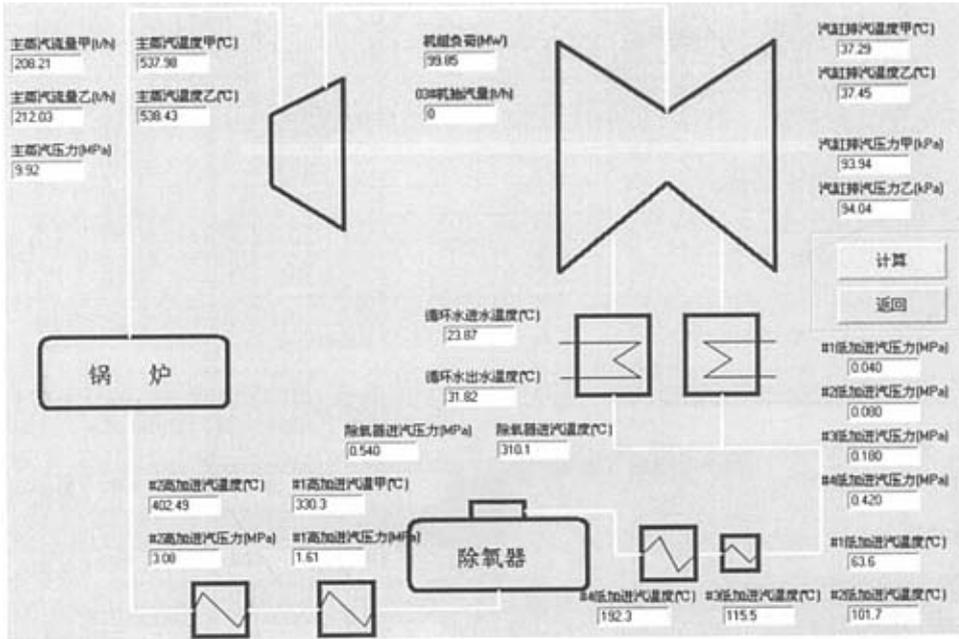


图 5-13 机组额定负荷工况主要参数



图 5-14 额定负荷工况计算结果

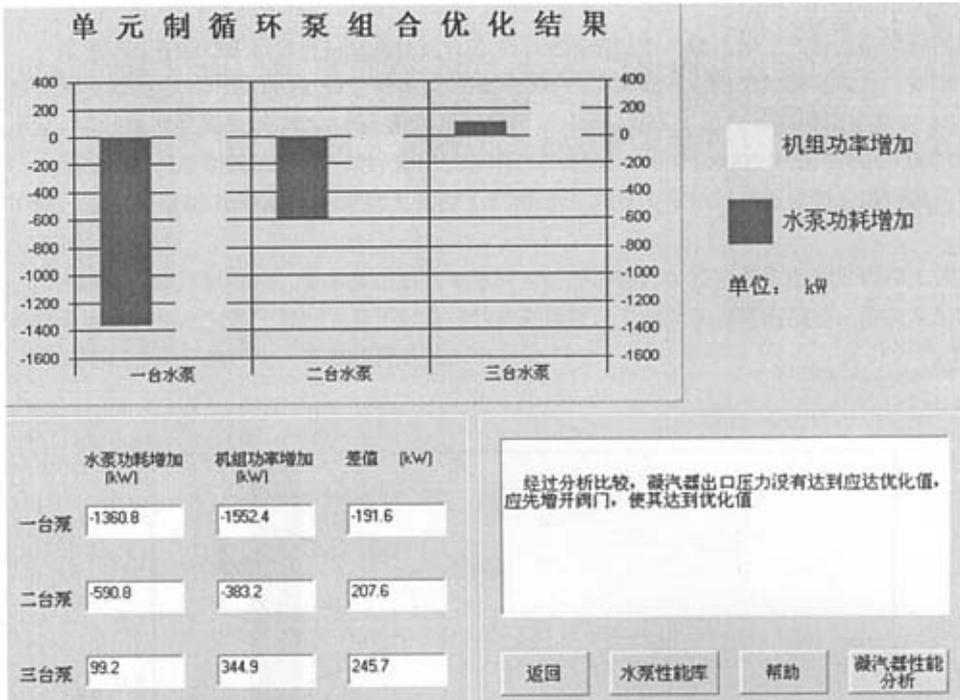


图 5-15 额定负荷工况循环水系统优化结果

当前的循环水系统运行方式为#10、#11 和#12 水泵，经过优化后可以得出结果：三台水泵可以使机组净功率增加 245.7KW。但是凝汽器出口压力没有达到优化值，即循环水系统没有达到最优化，运行人员应该增开阀门，使循环水流量增大。

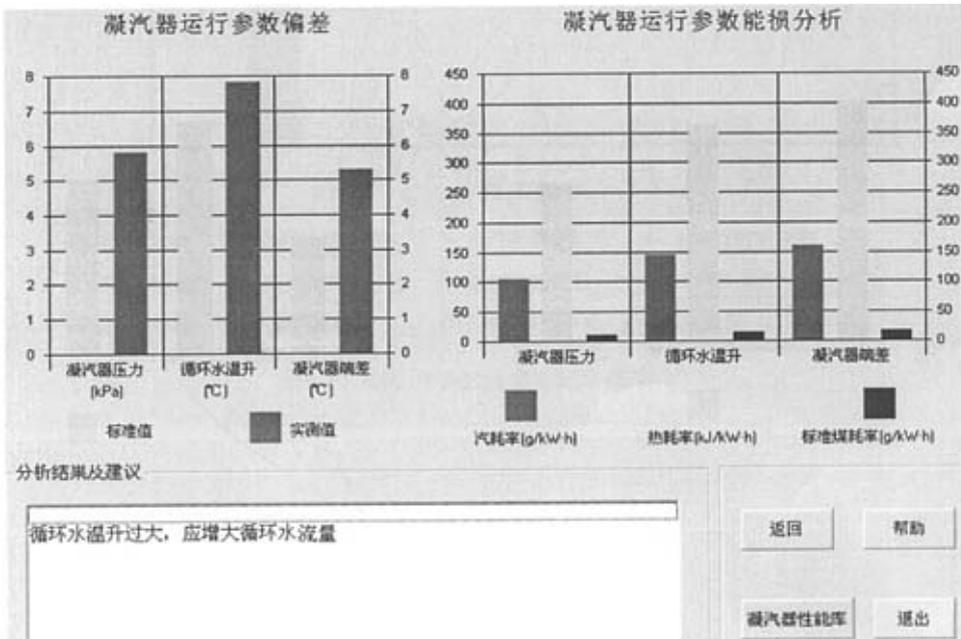


图 5-16 额定负荷工况凝汽器能损分析结果

实例二：在维持机组负荷以及其他运行方式不变的情况下，通过放空气的方法使凝汽器真空达到较低的水平，来考核故障诊断模块的准确性。该工况稳定后测得的征兆数据，如图 5-18 所示：凝汽器真空降低到 91.84kPa、凝结水过冷度增加到 4.67℃、凝汽器端差增加到 10.885℃。

经过神经网络初级诊断后，故障隶属值分别为{0.0005 0.9998 0.0003 0.001 0.001 0.001 0.001 0.0004 0.0003 0.0006}，诊断结果如图 5-17 所示；经过专家推理高级诊断后的结果，如图 5-19 所示。

由诊断结果可以看出，专家推理的故障原因和处理措施，以及诊断依据和过程都比神经网络要全面和详细，有助于运行人员了解具体的故障原因，及时采取相应的措施，解决发生的故障，从而减少电厂的损失，提高经济效益。

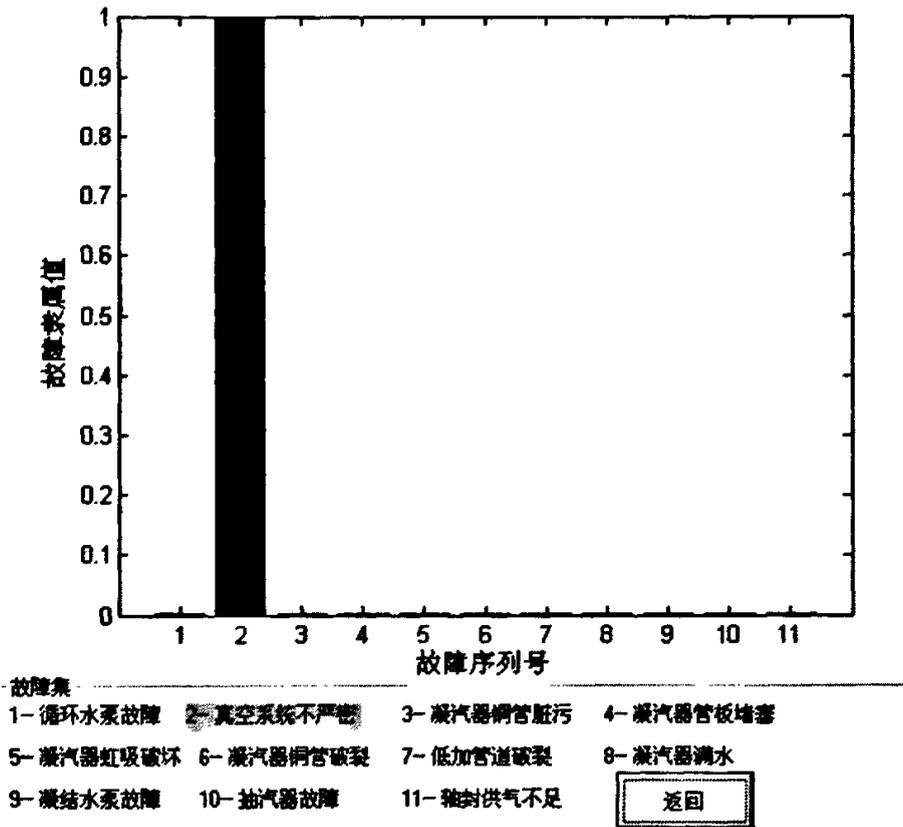


图 5-17 神经网络初级诊断图示结果



图 5-18 神经网络初级诊断征兆值和故障隶属值分布

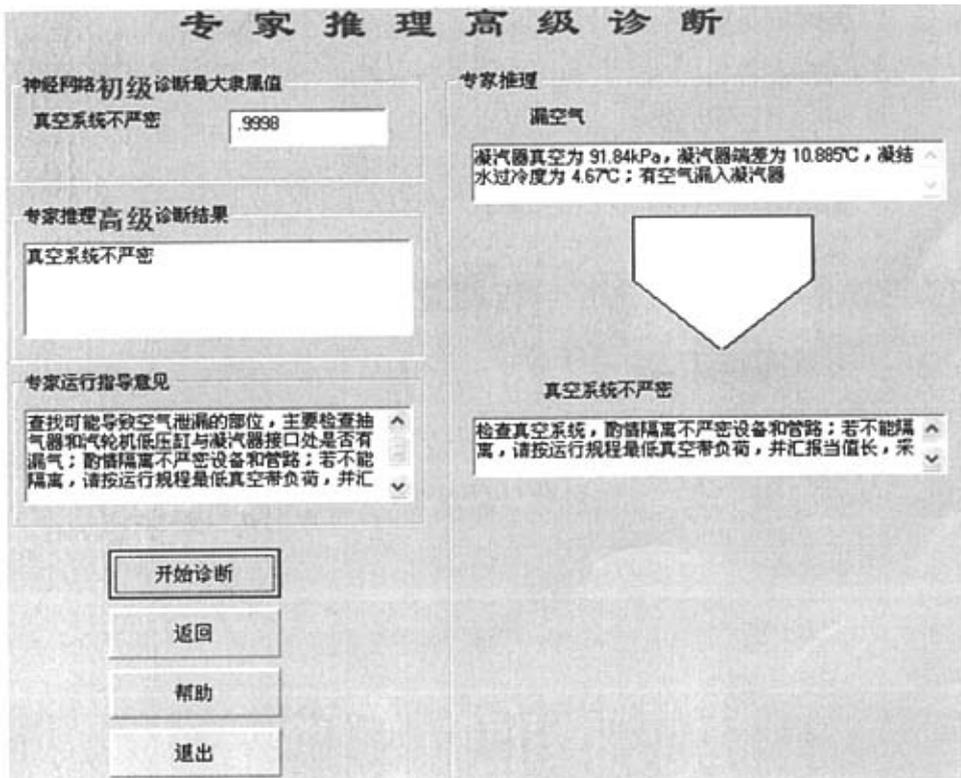


图 5-19 专家推理高级诊断结果

5.5 系统需进一步完善的功能

根据用户的需要,该系统可以提供以下扩展功能:提供主要参数报警功能;进一步减少手工操作,实现数据显示、保存、计算、分析的全部自动化,便于用户的使用。

5.6 本章小结

本章主要介绍了凝汽器系统性能优化软件的开发环境,以及不同应用软件之间的数据通讯的接口实现;然后对凝汽器系统性能优化的各个模块功能做了介绍,并用几个实例验证了该软件的准确性和可用性。

结 论

凝汽设备是汽轮发电机组的重要辅机之一，其运行状态对于整个电厂的安全经济运行有着重要的影响。因此对凝汽器的故障诊断和运行优化的研究就显得尤为重要。本文在大量收集国内外相关文献及现场实际运行数据的基础上，对凝汽系统的故障诊断和性能优化进行了深入研究，主要工作和结论如下：

1. 对凝汽器的热力特性进行研究，得到凝汽器故障诊断和运行优化的知识库，为凝汽器故障诊断和运行优化的实现提供数据库保障。

2. 研究经典专家系统和神经网络故障诊断模型，并根据其各自特点得到神经网络专家系统，使新技术在电厂设备故障诊断中得到实际应用。

3. 以汽轮机性能计算为前提，以凝汽器运行优化为中心，通过汽轮机性能计算、循环水系统优化和凝汽器能损分析三个模块，实现凝汽器在运行过程中的实时分析和优化，为电厂机组的合理调整和设备检修提供决策依据。

4. 本文利用组态王、Visual Basic 和 MATLAB6.5 作为开发环境，开发了基于 Windows 环境下的凝汽器故障诊断和运行优化软件，并利用组态王软件开发了在线数据监测和采集软件，可以对运行数据和试验期间的数据进行现场的监测和采集，这些操作界面是基于对话框设计，其界面友好，操作简单。

本文的工作是立足于中国华电集团的科技开发项目基础之上，所已经开发的系统已在国内某 100MW 电站汽轮机组得到应用，经过长时间的试运行表明，系统状态辨识功能强，优化分析准确，性能稳定可靠，能够为电厂的运行人员提供合理、科学的指导建议，而且工程实用性和针对性好，本项目目前已通过了由中国华电集团主持的专家组验收，并获得与会专家的一致好评。

致 谢

本论文是在导师杨亚平教授的悉心指导下完成的，他治学严谨，为人谦和，学识渊博。在我刚开始展开工作，感到无从着手时，给我指明了方向，在工作过程中，事无巨细，都给予了悉心的指导。同时他还教给我们应该放宽眼界，密切关注前沿动态，要学以致用，要有创新精神。杨老师的言传身教使我受益匪浅，在此谨向导师致以最诚挚的谢意！

在论文完成期间，得到了司丽丽、陈耀森、单娟娟、田永明等同学的帮助，同时身边的其他同学也给予了很多的热情指导，在此表示真诚的感谢！

在我攻读研究生的这将近三年时间中，与老师和身边的同学朝夕相处，不仅得到了他们的帮助，而且从他们身上学到了很多为人处事的道理。短暂的研究生生活即将结束了，同宿舍的舍友和班级同学的关心和帮助，是我在研究生阶段过得愉快和充实。

最后感谢在百忙中审阅我的论文、参与论文答辩的教授、专家。

滕丕忠

2007年1月

参考文献

- [1] 宋晓慧, 赵宇. 浅谈解决我国能源匮乏的有效途径[J]. 吉林省经济管理干部学院学报. 2005 19(4)
- [2] 郭永基. 电力系统新进展[M]. 冶金工业出版社, 2000
- [3] 苏州电力技工学校 沈振飞 郑美蓉. 汽轮机辅助设备[M]. 水力电力出版社, 1987
- [4] Chia-Chin Chuang, Deng-Chern Sue. Performance effects of combined cycle power plant with variable condenser pressure and loading. Energy 30(2005):1793-1801
- [5] M.M. Prieto, E.Montanes, O.Menendez. Power plant condenser performance forecasting using a nonfully connected artificial neural network. Energy 26(2001):65-79
- [6] A.Munoz, M.A. Sanz-Bobi. An incipient fault detection system based on the probabilistic radial basis function network: Application to the diagnosis of the condenser of coal power plant. Neurocomputing 23(1998):177-194
- [7] 韩璞, 王东风, 周黎辉, 焦嵩鸣等. 火电厂计算机监控与监测[M]. 中国水利水电出版社, 2005
- [8] 张利平, 王伟峰, 唐德善. 改进的 BP 网络在凝汽器故障诊断中应用[J]. 热力发电 2004(03)
- [9] 赵洪宇, 李蔚, 盛德仁等. 基于 BP 神经网络的凝汽器故障诊断研究[J]. 电站系统工程 2004, 20(6)
- [10] 程伟良. 广义专家系统[M]. 北京理工大学, 2005
- [11] 王学成, 谭得键. 神经网络得应用与发展趋势[J]. 计算机工程与应用, 2003, (3)
- [12] 汤民. 神经网络专家系统的应用研究[D]. 华北电力大学, 2004
- [13] Timo S, Heikki N K. Application of artificial neural networks in process fault diagnosis, Computer & Chemical Engineering. 1999, 17 (10): 1001-1014
- [14] 石永恒. 凝汽器故障诊断方法研究及应用软件开发[D]. 东南大学, 2006
- [15] 杨善让. 汽轮机凝汽设备及运行管理[M], 水利电力出版社, 1993
- [16] 瞿培强. 凝汽器循环水进口温度变化对机组经济性影响的探讨[J]. 华中电力, 2002
- [17] 汽轮机运行规程[Z]. 福建永安火电厂
- [18] 雍干. 模糊理论在凝汽器故障诊断中的应用[J]. 华东电力, 2002, 4
- [19] 齐复东, 贾树本, 马义伟. 电站凝汽设备和冷却系统[M]. 北京水利电力出版社, 1990
- [20] 胥伟普等. 汽轮机低真空运行故障原因分析及诊断[J]. 江苏电机工程, 1993(3)
- [21] 窦照英. 凝汽器黄铜管内应力验收标准研究[J]. 华北电力技术, 1994, 4
- [22] 黄可鸣. 专家系统[M]. 东南大学出版社, 1991
- [23] 杨宝勇, 江宁, 刘炳刚等. 火力发电厂性能计算与能损分析的研究与实现[J]. 汽轮机技术, 2001, 43(4)
- [24] 张卓澄. 大型电站凝汽器[M]. 机械工业出版社, 1993. 3
- [25] 于足恩. DDE 通讯在“组态王”中的应用(上)[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版) 2003, 19(5)
- [26] 房向蓉, 施仁. 组态王与智能仪器的动态数据交换[J]. 工业仪表与自动化装置 2005, 3
- [27] 席俊红. VB 与 Matlab 的集成方法探讨[J]. 运城学院学报 2005 23(2)
- [28] 冯莉, 李巨, 邓云华. VB 与 Matlab 的混合编程方法[J]. 软件技术 2005 24(5)
- [29] 蔡自兴, [美]约翰·德尔金, 龚涛. 高级专家系统: 原理、设计及应用[M]. 科学出版社, 2005. 8
- [30] 尹朝庆, 尹皓. 人工智能与专家系统[M]. 中国水利水电出版社, 2002
- [31] 魏海坤. 神经网络结构设计的理论与方法[M]. 国防工业出版社, 2005

-
- [32] Rosenblatt, F., The Perceptron: A Probabilistic Model for Information storage and Organization in The Brain. *Psychological Review*, 1958, (65):386~408
- [33] 闻新, 周露, 李翔, 张宝伟. *Matlab 神经网络仿真与应用*[M]. 科学出版社, 2003
- [34] Cybenko G. Approximation by superposition of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals, Systems*, 1989, 2(4):303~314
- [35] Hornik K, Stinchcombe M and White H. Multilayer feed-forward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 1989(2):359~366
- [36] Ito Y. Representation of functions by superposition of a step or sigmoidal function and their neural network theory. *Neural Networks*, 1991(4):385~394
- [37] 吴泉源, 刘江宁. *人工智能与专家系统*[M]. 国防科技大学出版社, 1995
- [38] 吴晓红. 反馈神经网络的一种反向传播算法[J]. *系统工程与电子技术*, 1999, 9(21)
- [39] 王国清. *汽轮机设备运行*[M]. 中国电力出版社, 2005

作者简介

滕丕忠，男，24岁，山东济南人，1982年生，主要研究方向火电厂运行设备性能优化和热工控制系统研究。通过东南大学能源与环境学院热能工程专业2.5年的研究生学习，本人掌握了本专业的理论知识，并利用组态王、Visual Basic、Matlab和SQL Server数据库开发了一套电站凝汽器经济运行状态监测智能决策系统。该系统经过三个月的试运行，于2007年1月通过了中国华电集团主持的专家组验收。下面是作者在学期间发表的论文：

滕丕忠、陈荣生、张聘、陈群、禹宝宁、杨亚平，组态王与SQL Server在凝汽器运行优化中的应用，工业控制计算机，2006年第9期

滕丕忠、张聘、陈荣生、陈群、石永恒、禹宝宁、杨亚平，基于模糊神经网络的凝汽器故障诊断及性能监测，电力自动化设备，2007年第1期