

ABSTRACT

With the improvement of society and science technique, high-building developed rapidly in our country. Meanwhile many safety problems have come out in the high-rise construction now, because it has the characteristics which are many layers, much workload, complex program and so on. According to the reason, this paper studies safety assessment in the process of building of high-rise construction. It is known that the deep depth of foundation digging, the great height of work place, the much crossover work, the long time for a project of accident of high-rise construction, so this paper identify danger resource through fault tree analysis methods. Through analyzing many existing construction accidents, we get to know that the major injury modes include the falling from high place, machine injury, crane injury, object beating, electric shock and collapse. These accidents occupy the 70 percents of all accidents. However accidents including the falling from high place, machine and crane injury were the major research objects in this paper. A typical accident of each kind was analyzed by FTA methods. Then qualitative analysis was given.

At last, this paper built sound criteria system of risk assessment. Have assessed safety of high-rise construction with fuzzy comprehensive evaluation and built criteria model of safety, which can take measures to the accidents of high-rise construction for the safety of high-rise construction.

Key words: high-rise construction, fault tree analysis, safety management

1 绪论

高层建筑是城市化和工业化发展的产物，随着科学技术的不断进步，在建筑领域内出现了不少新结构、新材料和新工艺，这些为高层建筑的发展提供了有利条件。同时，世界各国旅游业的发展、商业繁荣和国际交往的日益频繁，更促进了高层建筑的蓬勃发展。因此，高层建筑将成为国内外施工的主要内容。

目前，我国已有大批高层、超高层建筑在建设中，还有一些更高、更先进的高层建筑正计划兴建，可以预期，我国高层建筑将以更快的速度向前发展。

1.1 高层建筑施工特点

高层建筑是指 10 层以上的住宅以及总高度超过 24 米的公共建筑和综合性建筑。

高层建筑的楼层多、高度大，但并非是低、多层建筑的简单叠加，而是从建筑结构和使用功能等方面，针对高层建筑的特点，提出了一些新的要求，并从设计上进行了各种处理。高层建筑要求施工具有高度连续性和高质量，施工技术和组织管理复杂，除具有一般多层建筑施工的一些特点外，还具有以下施工特点：

(1) 工程量大、工序多、配合复杂

高层建筑的施工、土方、钢筋、模板、混凝土、砌筑、装修、设备管线量大，一座 20 层的住宅楼，混凝土量约达 5000m^3 钢筋 750t、钢模板 400 t、土方 1.2 万 m^3 、墙体 2000m^3 ，同时工序多，有土方、模板、钢筋、混凝土、砌筑、电管、通风、电焊设备等十多个专业工种交叉联合作业，组织配合十分复杂。

(2) 施工准备工作量大

高层建筑体积、面积大，需用大量的各种建筑材料、构配件和机具设备，品种繁多，采购量和运输量庞大。施工需用大量的专业工种、劳动力，需进行大量的人力、物力以及施工技术准备工作，以保证工程顺利进行。

(3) 施工周期长、工期紧

据建工系统统计，高层建筑单栋工期要经历 2-4 年，平均 2 年左右；结构工期一般为 5-10 天一层，短则 3 天一层，常常是两班或三班作业，工期长而紧，且需进行冬、雨期施工，为保证质量，应有特殊的施工技术措施，需要合理安

排工序，才能缩短工期、减少费用。

(4) 基础深、基坑支护和地基处理复杂

高层建筑基础一般较深，大都有 1-4 层地下室，土方开挖、基坑支护、地基处理以及深层降水，技术上都很困难复杂，它直接影响着工期和造价。

(5) 高处作业多、垂直运输量大

高层建筑高度一般为 45-80m，一些超高建筑高为 100-200 m，最高的可达 400 m 以上，高处作业多，垂直运输量大，施工中要解决好高空材料、制品、机具设备、人员的垂直运输，合理地选用各种垂直运输机械，妥善安排好材料、设备和工人的上下班及运输问题，以及用水、用电、通讯问题，甚至是垃圾的处理等问题，以提高工效。

(6) 层数多、高度大，安全防护要求严

高层建筑层数多，高度大，一般施工场地较窄，常采取立体交叉作业，高处作业多，需要有各种高空安全防护设施、通信联络以及防水、防雷、防触电等。为保证施工操作和地面行人安全，不出现各类安全事故，相应地也增加安全措施费用。

(7) 结构装修、防水质量要求高，技术复杂

为了保证结构的耐久性，美化城市环境，对高层建筑主体结构和建筑物立面装饰标准要求高；基础和地下室墙面、厨房、卫生间的管道和防水都要求不出现任何渗漏水，对土建、水、电、暖通、燃气、消防的材质和施工质量均要求达到优良，施工必须采取有效的技术措施来保证，特别是采用大量的新技术、新工艺、新材料和新机具设备和各种工艺体系，施工精度要求高，施工技术十分复杂。

(8) 平行流水、立体交叉作业多，机械化程度高

高层建筑标准层多，为了扩大施工面，一般均采用多专业工种、多工序平行流水立体交叉作业；为提高工效，大多采用机械化施工，比一般建筑施工配合复杂，需要解决好多工种、多工序的立体交叉配合及纵横向方面关系问题，以保证施工有条理有节奏地进行。

1.2 高层建筑施工中的安全问题

高层建筑由于其自身的特点，在施工的过程中有很多不同于一般建筑施工

的危险因素。高层建筑安全施工有以下显著特点：

(1) 高层建筑基础开挖深度深

高层建筑地基单位面积的载荷大，因此对相当深度范围内的地基土要进行处理，例如打桩做人工地基或加做较深的地下室，在施工中作业危害因素可能从地下土体扩散到工地界限以外，造成重大的生产财产损失，如打桩时造成煤气管漏气使居民中毒，或打桩、挖土时使城市水管爆裂，或是在采用井点降水时使道路下陷、管道开裂等。另外，由于高层建筑基础开挖的基坑深，坑边物体落下打死人，操作人员落入坑下死亡以及挖坑塌土压死人等事故也屡有发生。所以高层建筑施工必须对由于深基础带来对周围与作业人员本身的危险加以防范。

(2) 高层建筑作业高度高

高层建筑大量的施工作业都是在高空进行的，50米以上的高空与10多米高度的作业有质的不同。例如，某高层住宅从檐口落下一小段钢筋，一直飞落到工地外10多米处，打在正在行走的老妇人头上，致使老妇人当即死亡。高层建筑楼面预留洞坠人致死更是常有发生，平常不大注意的小石块从百米高空下落可以砸死人。另外，高空作业物料上下困难，就连最方便的自来水也要采用特殊措施才能上去。一个小小火苗容易造成火警，扑灭也较平地困难。因此大量高空作业带来的不安全因素是高层建筑施工安全技术必须充分考虑和解决的。

(3) 高层建筑施工交叉作业多

高层建筑层数多，作业立体化，在一个垂直空间许多层次上都要进行工作，上下层次互相造成伤亡事故时有发生。如某高层建筑工程，上面有人想看看升降机在哪里，当头探到井道口，而下面正好把升降机开上来，一下子把人轧死。上面落物砸死下面人员的事故就更多了。高层建筑施工不可避免交叉作业，所以必须有可靠的安全措施来防范可能发生的事故。

(4) 高层建筑施工工期长

高层建筑施工工期一般都在两年左右，大的项目工期可达三至四年，许多设施放置以后就要使用一年至几年，在此期间人员变动气候变化等人造的与自然的因素都能使正常的设施转入危险状态，不注意就容易发生事故。例如，高层建筑电缆磨破发生火灾，脚手架倒塌等等。所以，由于高层建筑施工工期长，

各种由于时间变化带来的许多不安全因素必须认真考虑。

由于上述特点，在各行业中，建筑业具有很高的灾害事故风险率。在不少亚太地区建筑业灾害要比一般行业高 6 倍，每 3-4 个工人中会有一个人负伤。改革开放以来，我国建筑业得到迅猛发展，已成为国民经济的支柱产业之一。但是建筑业的安全生产状况很不好，近年来建筑工伤事故骤增，成为居矿山伤亡事故之后全国第二大伤亡行业。主要原因是：

(1) 建筑安全立法滞后于建筑市场的发展。全国普遍存在无证设计、无证施工、越级设计、越级施工、层层转包以及伤亡事故误报、漏报、瞒报、不报现象。

(2) 建筑安全管理落后。我国很多地区没有专门的建筑安全管理机构和专职人员。很多企业趁转换经营机制之机，撤销或合并安全管理机构，削弱安全人员，使得施工中安全工作无人负责，无人监督管理。

(3) 建筑市场混乱，缺乏制约措施。在当前市场经济过渡时期，由于缺乏严格的安全控制措施，一些企业非法转包，越级发包现象严重。还有一些建设单位和非法中介人利用手中的权利，收受贿赂，不顾企业安全资质，使得一些建筑企业资质与所承接工程等级不符，给施工带来不安全因素。

(4) 人员素质低，安全意识差。建筑行业的许多施工人员缺乏安全意识和事故的应急能力，这是事故高发的重要原因。一些建筑企业招用农民工、临时工，未经必要的安全教育和技术培训就上岗。这使得施工现场管理混乱，事故层出不穷。

(5) 安全措施经费的投入不足。当前建筑行业安全经费严重不足，直接影响着施工现场安全防护标准化的实施。经费的欠缺使得一些必要的安全防护措施不能落实。

所有这些造成了我国建筑行业事故率的居高不下。

1.3 国内建筑施工安全评价采用的研究方法

1.3.1 安全检查表法

在建筑施工安全评价中现行的方法基本是安全检查评分表法，即由国家建设部颁布检查评分项目和评分标准（JGJ59-99 和 JGJ/T77-2003）作为文件下达，各单位根据具体情况选取评分标准进行评分汇总，对施工安全状况做出评

价。这是一种集定性、定量、主观与客观的评价方法。虽然检查评分表具有操作简单、通用性强、评分项目全面的特点，但它是一种静态的评价方法，在表中各检查项目分值固定限制了它的灵活性和适用性。如果完全按照检查评分表进行评价，难免得出不符合施工项目具体情况的结果。因此要做出科学的施工安全评价，需要在检查评分表的基础上研究科学的评价方法。

1.3.2 综合评价法

综合评价法是指 2 种以上评价方法的组合，即定性和定量方法的综合。由于各评价方法都有它的适用范围、优缺点，而综合评价兼有多种方法的长处，故可得到较为可靠和精确的评价结果。目前国内在建筑施工安全评价领域，研究较为突出的有安徽建筑工程学院的姚小刚，他主要采用 AHP 法对建筑企业进行安全评价；天津大学的卢岚，她主要综合运用层次分析法和模糊数学，对建筑施工现场的安全状况进行评价。

1.4 安全评价方法综述

安全评价工作开展较早的国家是美国、英国和日本，适于 50、60 年代。1966 年美国波音公司和华盛顿大学在西雅图召开安全系统工程专门学术讨论会议，以波音公司为中心对航空工业开展安全可靠性分析和设计的研究，在导弹和超音速飞机的安全性评价方面取得了很好的效果。英国 60 年代中期对系统的安全性和可靠性问题采用概率评价方法进一步推进了定量评价的工作，日本应用了劳动省化工厂安全评价六阶段法，在理论和实践中都取得了比较好的效果。目前国内外常用的安全评价方法有数十种，归纳为四大类，即：指数法、安全检查表法、概率风险评价法和数值模拟与人工智能方法。常用的有以下几种：

(1) 指数评价法

总的来说，指数评价法使用方便，适用于像化工厂这样多种灾害并存结构复杂且隐患概率及其后果模型难以确定的领域。但是这类方法的缺点也是比较明显的。① 评价中模型对系统安全保障体系的功能重视不够，特别是危险物质和安全保险体系间的相互作用关系未予以考虑。② 由于危险源是危险物质或安全保障体系之间相互作用的有机体，是危险、危险能量与安全防护体系之间相互矛盾着的既对立又统一的整体，评价中只注重某一侧面显然是不全面的。各

价。这是一种集定性定量、主观与客观的评价方法。虽然检查评分表具有操作简单、通用性强、评分项目全面的特点，但它是一种静态的评价方法，在表中各检查项目分值固定限制了它的灵活性和适用性。如果完全按照检查评分表进行评价，难免得出不符合施工项目具体情况的结果。因此要做出科学的施工安全评价，需要在检查评分表的基础上研究科学的评价方法。

1.3.2 综合评价法

综合评价法是指 2 种以上评价方法的组合，即定性和定量方法的综合。由于各评价方法都有它的适用范围、优缺点，而综合评价兼有多种方法的长处，故可得到较为可靠和精确的评价结果。目前国内在建筑施工安全评价领域，研究较为突出的有安徽建筑工程学院的姚小刚，他主要采用 AHP 法对建筑企业进行安全评价；天津大学的卢岚，她主要综合运用层次分析法和模糊数学，对建筑施工现场的安全状况进行评价。

1.4 安全评价方法综述

安全评价工作开展较早的国家是美国、英国和日本，适于 50、60 年代。1966 年美国波音公司和华盛顿大学在西雅图召开安全系统工程专门学术会议，以波音公司为中心对航空工业开展安全可靠性分析和设计的研究，在导弹和超音速飞机的安全性评价方面取得了很好的效果。英国 60 年代中期对系统的安全性和可靠性问题采用概率评价方法进一步推进了定量评价的工作，日本应用了劳动省化工厂安全评价六阶段法，在理论和实践中都取得了比较好的效果。目前国内外常用的安全评价方法有数十种，归纳为四大类，即：指数法、安全检查表法、概率风险评价法和数值模拟与人工智能方法。常用的有以下几种：

(1) 指数评价法

总的来说，指数评价法使用方便，适用于像化工厂这样多种灾害并存结构复杂且隐患概率及其后果模型难以确定的领域。但是这类方法的缺点也是比较明显的。① 评价中模型对系统安全保障体系的功能重视不够，特别是危险物质和安全保障体系间的相互作用关系未予以考虑。② 由于危险源是危险物质或安全保障体系之间相互作用的有机体，是危险、危险能量与安全防护体系之间相互矛盾着的既对立又统一的整体，评价中只注重某一侧面显然是不全面的。各相互矛盾着的既对立又统一的整体，评价中只注重某一侧面显然是不全面的。各

价。这是一种集定性、定量、主观与客观的评价方法。虽然检查评分表具有操作简单、通用性强、评分项目全面的特点，但它是一种静态的评价方法，在表中各检查项目分值固定限制了它的灵活性和适用性。如果完全按照检查评分表进行评价，难免得出不符合施工项目具体情况的结果。因此要做出科学的施工安全评价，需要在检查评分表的基础上研究科学的评价方法。

1.3.2 综合评价法

综合评价法是指 2 种以上评价方法的组合，即定性和定量方法的综合。由于各评价方法都有它的适用范围、优缺点，而综合评价兼有多种方法的长处，故可得到较为可靠和精确的评价结果。目前国内在建筑施工安全评价领域，研究较为突出的有安徽建筑工程学院的姚小刚，他主要采用 AHP 法对建筑企业进行安全评价；天津大学的卢岚，她主要综合运用层次分析法和模糊数学，对建筑施工现场的安全状况进行评价。

1.4 安全评价方法综述

安全评价工作开展较早的国家是美国、英国和日本，适于 50、60 年代。1966 年美国波音公司和华盛顿大学在西雅图召开安全系统工程专门学术讨论会议，以波音公司为中心对航空工业开展安全可靠性分析和设计的研究，在导弹和超音速飞机的安全性评价方面取得了很好的效果。英国 60 年代中期对系统的安全性和可靠性问题采用概率评价方法进一步推进了定量评价的工作，日本应用了劳动省化工厂安全评价六阶段法，在理论和实践中都取得了比较好的效果。目前国内外常用的安全评价方法有数十种，归纳为四大类，即：指数法、安全检查表法、概率风险评价法和数值模拟与人工智能方法。常用的有以下几种：

(1) 指数评价法

总的来说，指数评价法使用方便，适用于像化工厂这样多种灾害并存结构复杂且隐患概率及其后果模型难以确定的领域。但是这类方法的缺点也是比较明显的。① 评价中模型对系统安全保障体系的功能重视不够，特别是危险物质和安全保险体系间的相互作用关系未予以考虑。② 由于危险源是危险物质或安全保障体系之间相互作用的有机体，是危险、危险能量与安全防护体系之间相互矛盾着的既对立又统一的整体，评价中只注重某一侧面显然是不全面的。各

因素之间全部以加或乘的方式处理，忽视各因素之间的重要性差别。③ 评价之初就有风险意义的指标值，使得评价后期对系统的改进显得非常的困难。这是由于影响系统灾变后果与灾变率的因素子集并非完全重合。在各指数法评价模型中，指标值的确定只与指标的设置与否有关，而与指标因素的客观状态存在水平无关，致使出现危险物质的种类、含量、空间布置相似，而实际水平相差较远的系统，其评价结果有相似的后果，这是指数类评价方法灵活性检查和敏感性相差的主要原因。④ 各种危险性因素附加系数范围过宽补偿项目过多，评价结果可能会出现不合理现象。

(2) 安全检查表法

为了系统地找出系统中的危险因素，把系统加以剖析，分成若干个单元或层次，列出各单元或各层次的危险因素，然后确定检查项目，把检查项目按单元或层次的组成顺序编制成表格，以提问或现场观察的方式确定各检查项目的状况并填写到表格对应的项目上，这种表就叫做安全检查表。安全检查表出现于 20 世纪 20 年代，形式很多，可用于系统安全性工作计划的检查、设计评审、设备、设施使用前或使用中的安全性检查等。

安全检查表是一种静态评价方法，其优点是操作简单、直观、易于企业的同步管理。该方法存在的主要问题是：①对系统安全结构的控制缺乏深度和系统性，作为安全管理的手段之一是可行的，但只能作为安全管理辅助的分析方法，不能单独作为安全评价方法；②检查表大多是由有经验的人编写，主观和经验的局限性是显而易见的；③检查表大多数采用评分法或回答“是”/“否”的形式进行，对一些主观指标难于做出客观的评价；④安全检查表是一种静态评价方法，无法做出系统整体的动态安全评价。若能解决这些问题，安全检查表的生命力仍然旺盛。

(3) 概率风险评价方法

概率风险评价方法代表了安全评价的又一个发展方向，是一种精度较高的定量安全评价方法。这类方法通过综合分析系统的基本单元元件的性能及其致灾结构关系，推算整个系统发生事故的概率，通过对灾害后果的估计，来综合反映系统的危险程度，并同既定的目标值相比较，判定其是否达到预期的安全要求。或者，将危险概率值划分为若干等级，作为系统安全评价及制定安全措

施的依据。概率评价法使用的前提是能对系统完整分析、数据充足和准确，否则使用起来很困难。

(4) 常规统计法

这是应用数理统计的原理，进行回归分析的一种方法，是传统方法的典型代表，而且仍然在广泛的应用。这类方法在评价因素少，且主要影响因素突出的系统安全评价中比较适用。对多因素且因素之间相关性大的系统则无法应用这一方法。

(5) 层次分析法

由美国运筹学家 T. Lsaaty 提出的层次分析法（简称 AHP 方法）是建立在系统工程理论基础上的解决实际问题的方法。层次分析法是用于解决多层次多准则决策问题的一种实用方法，能够很好地处理多准则决策问题。它把一个复杂问题按各自因素隶属关系由高到低表示为有序的递阶层次结构，分层排序，通过人们的判断，对每个层次、元素确定相对重要性，进行比较排序，最后把各层次定量关系联系起来，得到总排序作为决策依据，层次分析法还能够统一处理决策中的定性和定量关系。

层次分析法是一种能有效地处理那些难于完全用定量来分析复杂问题的手段。层次分析法应用领域比较广阔，可以分析社会、经济以及科学管理领域中的问题。层次分析法的缺点在于其所构造的模型是递阶层次结构，即从高到低或从低到高的层次结构。而在实际分析中，还会遇到更复杂的系统。在这些系统中，层次已经不能表明高或低了，这是因为某一层次既可直接或间接地影响其它层次，同时又直接地或间接地为其它层次所影响。这种类型的问题，通常用网络结构模型来描述。

(6) 模糊综合评价法

模糊评价是利用模糊数学的基本理论——隶属度来将模糊信息定量化，它合理地选择因素域值，再利用传统数学方法对多因素进行定量评价，从而科学地得出评价结论的一种方法，其优点在于不会忽略因素在程度上的差异。进行模糊评价首先要建立影响评价因素集，并对各因素赋予相应的权重。然后由评价者建立评价集对各因素进行评价，从而得出评价矩阵。最后由相应的权重与评价矩阵形成系统评价矩阵，由此求出系统总得分再对照安全等级。具体评价

模型详见第四章。

模糊综合评判法给出了一个数学模型，它简单、容易掌握，是对多因素、多层次的复杂问题评判效果比较好的方法，也是别的数学分支和模型难以代替的方法，其适用性也比较广。而对于多因素、多层次的复杂评价其计算则比较复杂。并且对于因素权重的定权和变权问题的处理，需要人为解决隶属函数和隶属度的处理和求解问题，因此在一定程度上限制了这种方法解决问题的能力。

1.5 本文研究的内容、方法、目的及意义

1.5.1 研究的内容及方法

(1) 高层建筑施工的主要特点是：工程量大、工序多、配合复杂；施工准备工作量大；施工周期长、工期紧；基础深、基坑支护和地基处理复杂；高处作业多、垂直运输量大；层数多、高度大、安全防护要求严；结构装修、防水质量要求高，技术复杂；平行流水、立体交叉作业多，机械化程度高等特点。施工中主要的安全隐患有：高层建筑基础开挖的基坑深，坑边物体落下打死人，操作人员落入坑下死亡等事故屡有发生。再有作业高度高即使不大注意的小石块从百米高空下来也可能会砸死人。另外，交叉作业多、施工工期长，高层建筑层数多，作业立体化，上下层次互相造成伤亡事故时有发生。本文对高层建筑施工进行的是施工现状评价而不是施工安全预评价。

(2) 本文用事故树分析方法对高处坠落事故及流动式起重机触电伤害事故进行了定性和定量分析。用定性分析方法分析了高处坠落事故的主要原因是人员坠落和脚手架倒塌，高处坠落事故容易发生而且防止事故发生的途径少；流动式起重机触电伤害事故的主要原因是起重机带电，使人与起重机构成了人、机、地导通的条件，而且事故发生的可能性大。文中主要对高处坠落事故进行了定量分析，通过定量分析知道了顶上事件发生的可能性有多大，并将两事件进行了对比。

(3) 文中用事故树分析方法是对具体事件进行的分析，最后用多级模糊综合评价方法对高层建筑施工现状的总体情况进行评价，提出安全评价模型，得出评价等级结果，从而有效地指导施工运行。

1.5.2 研究的目的是意义

近年来我国各行各业突飞猛进，在建筑业也同样得到了发展，特别是高层建

筑的发展遍及全国的许多大中城市。高层建筑的迅猛发展是人类文明的进步，但由于高层建筑层数多，施工量大的特点，它的出现又给人们带来了更多安全问题。文中通过对高层建筑施工安全评价进行研究，用事故树分析法找出施工中影响安全的主要因素，为系统危险辨识及控制措施的制定提供了参考依据，这样就可以指导施工人员有效的控制施工中不安全因素的发展与扩大，尽量减少施工中事故的发生。从而对高层建筑施工安全有一个全面的认识 and 了解。文中建立了施工安全评价指标体系，指出安全评价模型，并用多级模糊综合评价方法对高层建筑施工安全进行评价，从而有效地对高层建筑施工安全进行预测、预报、预防，确保高层建筑施工的安全。因此，高层建筑施工安全评价的研究对工程实践具有指导意义和实用价值。

2 高层建筑施工危险识别

2.1 危险源辨识的基本方法和工作程序

对于一个安全系统,要对其系统危险实施有效的控制,首先必须掌握大量的有关系统危险状况信息,否则其控制管理将成为无源之水、无本之木。系统危险辨识为全面发掘系统危险状况提供了技术手段。通过系统危险辨识,有针对性的运用系统危险分析方法,对系统中潜在危险的构成要素、危险特征、触发条件、缺陷危险状况等进行系统发掘,并进行综合分析,从而对系统危险状况有一个全面的认识。系统危险辨识是安全评价工作的基础,是对系统危险实施有效控制的前提。近几年来,国际上开发出了许多用于系统危险辨识的方法,每一种方法一般只适用于不同危险特征的分析对象。因此,在具体开展危险辨识时,应根据分析对象的特点,有针对性地选择系统危险辨识方法。

进行危险辨识应重点把握以下几方面问题:全面分析主要事故模式(潜在危险因素、触发条件及后果等);系统了解各评价单元固有危险状况信息,包括本质安全化状况及设备、设施、工艺缺陷等;确定各危险因素被触发造成事故的危险严重度,并估计其发生频度;确定各评价单元的管理级别。常用危险辨识方法有:预先危险性分析(PHA);危险度分析;故障模式影响及严重度分析(FMECA);事故树分析(FTA);事件树分析(ETA)等。

事故树分析是典型的逻辑分析法之一,它能对系统的危险性予以辨识和评价,并按照故障事件的逆过程,以演绎的方法探讨其直接和间接原因,研究各事件间的逻辑关系,把研究结果制成事故树进行定性、定量分析。从而了解生产使用中和操作中可能发生的危险,以便采取相应控制措施,对事故进行有效控制。为了深入分析施工过程中潜在的几种重大危险的影响因素及其组合关系,本文特别对施工过程中极易发生的几种事故进行了事故树分析,为系统危险辨识及控制措施的制定提供了参考依据。当然事故树分析不是必须和唯一的事故分析方法。

危险、有害因素的系统发掘是危险辨识的重点和主要工作内容,目的在于全面掌握各种事故发生模式,本质安全化水平,设备、设施、工艺缺陷,作业环境缺陷,危险暴露程度等。实际操作中综合采用查阅资料、现场调查和向有关人员询问等方法,然后结合 FTA 结果以及国内外有关事故案例,较全面地发

掘出各种事故模式，并逐个登记在设计好的危险辨识登记表上。

危险源辨识的工作程序如图 2-1 所示：

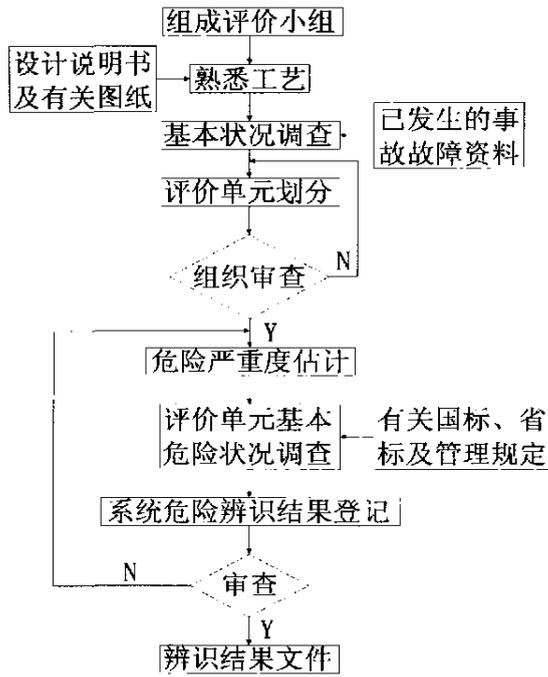


图2-1 系统危险源辨识工作程序图



图 2-2 建筑施工事故分类图

2.2 高层建筑施工危险类型分析

高层建筑施工作业是一个复杂的人、机系统，由施工作业人员、电器和机械设备、环境(施工现场)、管理四个方面组成。它们之间具有相互联系与制约的关系，即事故的原因取决于人、物、环境三个因素的联系，它们的状况又受管理状态的制约。导致事故发生因素中，来自人方面的原因有个人的知识、技能、体质以及是否按客观要求办事的行为准则；来自物方面的原因有材料、机械设备、工具器材等固有的危险特性；来自建筑业自身原因有：环境条件多变、操作多方位交叉、各专业工种混合作业等。因此，进行危险源辨识需根据不同企业的具体情况，在已有安全经验教训、数据资料的基础上用系统理论的方法对整个工程中各种危险因素作全面综合分析，同时结合自身工艺流程、设备装置、环境条件、施工组织等，对建筑施工中的事故进行分析和分类。图 2-2 表示了建筑施工中事故分类关系。

分析高层建筑施工工艺特点，在基础施工和主体施工阶段存在的主要安全事故类型有以下几种：

(1) 高处坠落

从脚手架或垂直运输设施坠落：从洞口、楼梯口、电梯口、天井口和坑口坠落；从楼面、屋顶、高台边缘坠落：从施工安装中的工程结构上坠落：从机械设备上坠落；其它原因滑跌、踩空、拖带、碰撞、翘翻、失衡等引起的坠落。

(2) 机械伤害

机械转动部分的绞入、碾压和拖带伤害；机械工作部分的钻、刨、削、锯、击、撞、挤、砸、轧等的伤害：滑入、误入机械容器和运转部分的伤害：机械部件的飞出伤害：机械失稳和倾翻事故的伤害：其它因机械安全保护设施欠缺、失灵和违章操作所引起的伤害。

(3) 起重伤害

起重机械设备的折臂、断绳、失稳、倾翻事故的伤害；吊物失衡、脱钩、倾翻、变形和折断事故的伤害；操作失控、违章操作和载人事故的伤害；加固、翻身、支撑、临时固定等措施不当事故的伤害：其它起重作业中出现的砸、碰、撞、挤、压、拖等作用的伤害。

(4) 物体打击

空中落物、崩块和滚动物体的砸伤；触及固定或运动中的硬物、反弹物的碰伤、撞伤；器具、硬物的击伤；碎屑、破片的飞溅伤害。

(5) 触电

起重机械臂杆或其它导电物体搭碰高压线事故伤害；带电电线（缆）断头、破口的触电伤害；挖掘作业损坏埋地电缆的触电伤害；电动设备漏电伤害；雷击伤害；拖带电线机具电线绞断、破皮伤害；电闸箱、控制箱漏电和误触伤害；强力自然因素致断电线伤害。

(6) 坍塌

沟壁、坑壁、边坡、洞室等的土石方坍塌；因基础掏空、沉降、滑移或地基不牢等引起的其上墙体和建筑物的坍塌；施工中的建筑（构）物坍塌；施工临时设施的坍塌；堆置物的坍塌；脚手架、井架、支撑架的倾倒和坍塌；强力自然因素引起的坍塌；支撑物不牢引起其上物体的坍塌。

建筑施工的不安全隐患多存在于高空作业、交叉作业、垂直运输以及使用各种电气工具上，伤亡事故多发生于高处坠落、物体打击、机械和起重伤害、触电等四个方面。资料统计表明，每年建筑施工在这四方面发生的事故占总事故的70%以上，其中高处坠落事故占43.1%左右，触电事故占10.96%，物体打击事故占12.49%左右，机械伤害事故占8.77%左右。如能采取措施消除这四大伤害，建筑施工伤亡事故将大幅度下降。所以，降低四大伤害是建筑施工安全技术要解决的主要问题。

下面以高处坠落和起重机械伤害为例进行重点分析。

2.3 高处坠落事故的特点和类型

在建筑施工中，由于高处作业工作量大、操作人员多、员工的流动性大，加上多工种的交叉、立体作业，并且临时设施多，现场条件差，因此，各种不安全因素多，高处坠落事故也就特别多。而高处坠落事故往往使人员受到较严重程度的伤害，非死即伤，造成的经济损失巨大。因此，高处坠落事故被列为建筑行业施工“四大伤害”中第一大伤害，在高层建筑中尤其明显，归纳其有如下特点：

- (1) 事故发生频率高。
- (2) 易发事故部位多。

(3) 群死群伤严重，事故危害性大。

(4) 临时合同工特别是青年工人事故发生率高

依据高处坠落事故对人体伤害的坠落方式，把高处坠落事故大体分为如下九种类型：

(1) 临边、洞口坠落(预留口、通道口、楼梯口、电梯口、阳台口坠落等)；

(2) 脚手架上坠落；

(3) 悬空高处作业坠落；

(4) 石棉瓦等轻型屋面坠落；

(5) 拆除工程中发生的坠落；

(6) 登高过程中坠落；

(7) 梯子上作业坠落；

(8) 屋面作业坠落；

(9) 其它高处作业坠落(铁塔上、电杆上、设备上、构架上、树上、以及其它各种物体上坠落等)。

在高层建筑施工中，其中前面三种是主要类型，也是作为本文研究安全评价方法的主要控制对象。

2.4 机械和起重伤害

建筑机械与工厂内的机械设备相比有很大的不同，主要有以下几个方面特点：

(1) 使用的环境条件不同

大多数建筑机械如塔式起重机、物料提升机、混凝土机械等长期露天工作，经受风吹雨打和日晒。恶劣的环境条件对机械的使用寿命、工作可靠性和安全性都有非常不利的影晌。

(2) 作业对象不同

建筑机械的作业对象以砂、石、土、混凝土、砂浆及其它建筑材料为主。工作时受力复杂，载荷变化大，腐蚀大，磨损严重。如起重机钢丝绳容易磨损断裂，土方机械工作装置容易磨损破坏等。

(3) 作业地点和操作人员不同

工厂内机床设备相对固定，能保证专人专机操作。而施工机械场地和操作

人员的流动性都比较大，由此引起安装质量、维修质量、操作水平变化也比较大，直接影响使用的安全性。

由于建筑机械具有以上的使用特点，其安全性比厂内设备差得多，发生伤害的概率自然也就高得多。

建筑机械伤害事故的发生有以下原因：

(1) 设备安全管理不善。某些施工企业只注重赶工期，拼设备，忽视了设备的安全管理和维修保养，致使设备经常带病工作，造成众多隐患，极易引发伤害。某些企业安全意识淡薄，安全制度不严，有章不循，有法不依，检查不勤，整改不力，更是助长了安全隐患泛滥。

(2) 安装不符合规范要求，不通过验收即投入使用。

(3) 安全装置和防护设施不齐全或失灵，无法起到安全防护作用。

(4) 施工队伍素质差。某些施工企业的操作人员不但技术素质差，安全意识和自我保护能力也差，有的甚至未经培训就上岗。尤其是成千上万的民工涌入建筑施工队伍，其中不少人素质低下，一无知识二无经验三不懂规章，一味冒险蛮干和违章作业。

2.4.1 起重机械事故

起重机是机械设备中蕴藏危险因素最多、发生事故几率最大的典型危险机械，国内外每年都因起重设备、起重作业造成大量的财产损失和人身伤害事故。在工业发达国家，起重伤害事故约占全部产业部门事故总数的 20%左右(如日本)。在我国，随着起重机械使用数量的增多，起重伤害事故占全部工业企业伤亡事故的比例也呈逐年上升的趋势，近年达 15%左右。

有关资料统计，造成伤害事故的起重机械主要集中在桥(门)式起重机、流动式起重机、升降机和塔式起重机 4 类，造成的伤亡事故接近事故总数的 80%，特别是桥(门)式起重机和流动式起重机，发生事故频率最高，占全部起重伤亡事故的 49%。

起重机械常见事故有：吊物坠落、挤压碰撞、坠落事故、触电事故、机体倾翻事故。吊物坠落占全部起重伤害事故总数的 33%左右，挤压碰撞占 30%左右，触电占 10%左右，坠落事故占 8%左右，机体倾翻占 5%左右。下面分述：

(1) 重物失落事故

起重机械吊物坠落事故是指起重作业中，吊载、吊具等重物从空中坠落所造成的人身伤亡和设备毁坏事故。

常见重物失落事故有以下几种类型：

a. 脱绳事故

由于重物从捆绑的吊装绳索中脱落溃散发生的伤亡毁坏事故。

造成脱绳事故的原因有：重物的捆绑方法与要领不当，造成重物滑脱；吊装重心选择不当，造成偏载起吊或吊装重心不稳使重物脱落；吊载遭到碰撞、冲击而摇摆不定，造成重物失落等。

b. 脱钩事故

重物、吊装绳或专用吊具从吊钩钩口脱出而引起的重物失落事故。

造成脱钩事故的原因有：吊钩缺少护钩装置；护钩保护装置机能失效；吊装方法不当及吊钩钩口变形引起开口变形过大等原因所致。

c. 断绳事故

起升绳和吊装绳因破断造成的重物失落事故。

造成起升绳破断的原因有：超载起吊拉断钢丝绳；起升限位开关失灵造成过卷拉断钢丝绳；斜吊、斜拉造成乱绳挤伤切断钢丝绳；钢丝绳因长期使用又缺乏维护保养造成疲劳变形、磨损损伤等达到或超过报废标准仍然使用等造成的破断事故。

造成吊装绳破断的主要原因有：吊钩上吊装绳角度太大($>120^\circ$)，使吊装绳上的拉力超过极限值而拉断；吊装钢丝绳品种规格选择不当，或仍使用已达到报废标准的钢丝绳捆绑吊装重物造成吊装绳破断；吊装绳与重物之间接触处无垫片等保护措施，因而造成棱角割断钢丝绳而出现吊装绳破断事故。

d. 吊钩破断事故

吊钩断裂造成的重物失落事故。

造成吊钩破断事故原因多为吊钩材质有缺陷，吊钩因长期磨损断面减小已达到报废极限标准却仍然使用或经常超载使用造成疲劳破坏以至于断裂破坏。

起重机械失落事故，主要发生在起升机构取物缠绕系统中，除了脱绳、脱钩、断绳和断钩外，每根起升钢丝绳两端的固定也十分重要，如钢丝绳在卷筒上的极限安全圈数是否能保证在 2 圈以上，是否有下降限位保护，钢丝绳在卷

筒装置上的压板固定及楔块固定结构是否安全可靠。另外钢丝绳脱槽（脱离卷筒绳槽）或脱轮（脱离滑轮）事故也会发生失落事故。

(2) 挤伤事故

挤伤事故是指在起重作业中，作业人员被挤压在两个物体之间，所造成的挤伤、压伤、击伤等人身伤亡事故。

造成挤伤事故的主要原因是起重作业现场缺少安全监督指挥人员，现场从事吊装作业和其它作业人员缺乏安全意识和自我保护或从事野蛮操作等人为因素所致。发生挤伤多为吊装作业人员和从事检修维护人员。

挤伤事故发生的在以下作业条件之下：

a. 吊具或吊载与地面物体间的挤伤事故

车间、仓库等室内场所，地面作业人员处于大型吊载与机器设备、土建墙壁、牛腿立柱等障碍物之间的狭窄场所，在进行吊装、指挥、操作或从事其他作业时，使作业人员躲闪不及被挤压在大型吊具（吊载）与各种障碍物之间造成挤伤事故，或者由于吊装不合理，造成吊装剧烈摆动冲撞作业人员致伤。

b. 升降设备的挤伤事故

电梯、升降货梯、建筑升降机的维修人员或操作人员、不遵守操作规程，发生被挤压在轿厢、吊笼与井壁、井架之间而造成挤伤的事故也时有发生。

c. 机体与建筑物间的挤伤事故

这类事故多发生在高空从事桥式起重机维护检修人员中，被挤在起重机端梁与支承承轨梁的立柱或墙壁之间，或在高空承轨梁侧通道通过时被运行的起重机撞击击伤。

d. 机体回转击伤事故

这类事故多发生在野外作业的汽车、轮胎和履带起重作业中，往往由于此类作业的起重机回转时配重部分将吊装、指挥和其他作业人员撞伤或把上述人员挤压在起重机配重与建筑物之间致伤。

e. 翻转作业中的撞伤事故

从事吊装、翻转、倒个儿作业时，由于吊装方法不合理，装卡不牢，吊具选择不当，重物倾斜下坠，吊装选位不佳，指挥及操作人员站位不好，造成吊载失稳，吊载摆动冲击等均会造成翻转作业中的砸、撞、碰、挤、压、等各种

伤亡事故，这种类型事故在挤压事故中尤为突出。

(3) 坠落事故

坠落事故主要是指从事起重作业的人员，从起重机机体等高空处发生向下坠落至地面的摔伤事故。

a. 从机体上滑落摔伤事故

这类事故多发生于在高空起重机上进行维护、检修作业中，检修作业人员缺乏安全意识，抱着侥幸心理不带安全带，由于脚下滑动、障碍物绊倒或起重机突然启动造成的晃动时作业人员失稳从高空坠落于地面而摔伤。

b. 机体撞击坠落事故

这类事故多发生在检修作业中，因缺乏严格的现场安全监督制度，检修人员遭到其他作业的起重机端梁或悬臂撞击，从高空坠落摔伤。

c. 轿厢坠落摔伤事故

这类事故多发生在载客电梯、货梯或建筑升降机运转中，起升钢丝绳破断、钢丝绳固定端脱落，造成乘客及操作者随轿厢、货箱一起坠落而造成人员伤亡事故。

d. 维修工具零部件坠落砸伤事故

在高空起重机上从事检修作业中，常常因不小心，使维修更换的零部件或维护检修工具从起重机上滑落，造成砸伤在地面的作业人员和机器设备等事故。

e. 振动坠落事故

这类事故不经常发生。起重机个别零部件因安装连接不牢，如螺栓未能按要求拧入一定的深度，螺母锁紧装置失效，或因年久失修个别连接环节松动，当起重机一旦遇到冲击或振动时，就会出现因连接松动造成某一零部件从机体脱落，进而坠落造成砸伤地面作业人员或砸伤机器设备的事故。

f. 制动下滑坠落事故

这类事故产生的主要原因是起重机构的制动器性能失效，多为制动器制动环或制动衬料磨损严重而未能及时调整或更换而造成刹车失灵，或制动轴断裂造成重物急速下滑成为自由落体坠落于地面，砸伤地面作业人员或机器设备。

坠落事故形式较多，近些年发生的严重事故大多是吊笼、简易客货体的坠落事故。

(4) 触电事故

触电事故是指从事起重操作和检修作业人员，由于触电遭受电击所发生的人员伤亡事故。

a. 室内作业的触电事故

室内起重机的动力电源是电击事故的根源，遭受触触电击伤害者多为操作人员和电器检修作业人员。产生触电原因从人的因素分析多为缺乏起重机基本安全操作规程知识，缺乏起重机基本电气控制原理知识，缺乏起重机电器安全检查要领，不重视必要的安全保护措施，如不穿绝缘鞋不带试电笔进行电器检修等。从起重机自身的电器设施角度看，发生触电事故多为起重机电器系统及周围相应环境缺乏必要的触电安全保护。

b. 室外作业的触电事故

主要是在作业现场往往有裸露的高压输电线，由于现场安全指挥监督混乱。常有自行起重机的臂架或起升钢丝绳摆动触及高压输电线使机体连电，进而造成操作人员或吊装作业人员间接遭到高压电线中的高压电击伤。如在国内和日本近些年都已连续发生过数起野外施工作业自行式起重机悬臂触及高压电线，造成操作人员触电致死。

c. 触电安全防护措施

① 保证安全电压

为保证人体触电不至于造成严重伤害与伤亡，触电的安全电压必须在 50V 以下，目前起重机应采用低压安全操作，常采用的安全低压操作电压为 36V 或 42V。

② 保证绝缘的可靠性

起重机电气系统虽有绝缘保护措施，但是受环境温度、湿度、化学腐蚀、机械损伤影响，以及电压变化等都会使绝缘材料减小电阻值，或者出现绝缘材料老化击穿造成漏电，因此必须经常用摇表（兆欧表）测量检查各种绝缘环节的可靠性。

③ 加强屏护保护

对起重机不可避免的一些裸露电器，如溃电的裸露滑出线等，必须设有一定的护栏、护网等屏护设施以防触电。

④ 严格保证配电最小安全净距

起重机电气的设计与施工必须规定出保证配电安全的合理距离。

⑤ 保证接地与接零的可靠性

电气设备一旦漏电，起重机的金属部分都会存在一定电压，作业人员若触及起重机金属部分就可能发生触电事故，如果接地和接零措施安全可靠就可以防止这类触电事故。

⑥ 加强漏电触电保护

除了在起重机电气系统中采用电压型漏电保护装置，零序电流型漏电保护装置和泄漏电流型漏电保护装置来防止漏电之外，还应设有绝缘站台（司机室采用木制或橡胶地板）和作业人员必须穿戴绝缘鞋等进行操作与检修。。

(5) 机体毁坏事故

机体毁坏事故是指起重机因超载失稳等产生机体断裂、倾翻造成机体严重损坏及人身伤亡的事故。

常见机体毁坏事故有以下几种类型：

a. 断臂事故

各种类型的悬臂起重机，由于悬臂设计不合理，制造装配有缺陷以及长期使用已有疲劳破坏隐患，一旦超载起吊就有造成断臂或悬臂严重变形等毁机事故。

b. 倾翻事故

倾翻事故是自行式起重机的常见事故，自行式起重机倾翻事故大多是由起重机作业前支承不当，造成自行式悬臂起重机倾翻事故。

c. 机体摔伤事故

在室外作业的门式起重机、门座起重机、塔式起重机等，由于无防风夹轨器，无车轮止垫或无固定锚链等，或者上述安全设施机能失效，当遇到强风吹击时，往往会造成起重机被大风吹跑、吹倒，甚至从栈桥上翻落造成严重的机体摔伤事故。

d. 相互撞毁事故

在同一跨中的多台桥式起重机由于相互之间无缓冲碰撞保护设施，或缓冲碰撞保护设施毁坏失效，难免要有起重机相互碰撞致伤。还有在野外作业的多

台悬臂起重机群中，悬臂回转作业中也难免出现相互撞击而出现碰撞事故。

2.4.2 其它机械伤害

其它机械包括搅拌机、卷扬机、电锯、电钻、钢筋剪切机、木工机械、切割工具和其它小型机具。统计中发现，电锯伤害和钢筋剪切机伤害占了较大的比例。小型机械广泛使用于现代建筑施工中，故对其造成的伤害应引起足够的重视。

3 事故树分析

事故是人们所不希望发生的一种事件。但在生产过程中却隐藏着许多可能导致事故发生的危险。要保证生产的安全（事故不发生），事先了解与控制可能导致事故发生的危险因素是必要且关键的。反之，如果事故已经发生，则表明它是由隐藏着的因素发生所导致的。准确无漏地找出导致事故发生的危险因素（导致事故发生的原因），对促进安全生产，避免今后再次发生类似事故也是极其重要的。

用事故树分析方法来分析事故发生的原因及预测可能导致事故发生的危险因素，才能达到处理事故和预防事故发生的目的。

3.1 事故树分析理论及功能

事故树是由图论理论发展而来的。在许多领域里，常牵涉到图的概念。然而，图论中所研究的图，既不是通常的几何学中的图，也不是工程图。它所研究的图是由一些顶点（节点）及边构成的图，通常称之为线图。若 G 来表示，可表示为：

$$G = \{V, E\} \quad (3-1)$$

其中， V 是由优先个点组成的集合，即

$$V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\} \quad (3-2)$$

E 是由优先条线所组成的集合，即

$$E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\} \quad (3-3)$$

图中的线常称之为边和弧。集合 E 中的元素都是由节点偶对组成的，即当节点偶对 $\{V_i, V_j\} \in E$ 时，节点之间可画一条线。

图的节点常表示某一具体事物，边可依据其权的不同来表示事物间的某种特定关系。

在一个图中，若任何两个节点连通的，则这种图叫做连通图。

若图中某一点边顺序衔接序列中，始点与终点重合，则称之为回路或圈。

若图中的每一条边都赋予一个方向，就称图为一个有向图。

树就是一个没有回路的连通图。

若图是有向图，则树中的树枝同样具有方向性，且其方向决定了节点的起始，即树枝一端的节点若被看成是起点，那么另一端的节点就是终点。

显然，若把上述树中的节点看成是事件的代表，而是之中的节点之间用逻辑门连接，我们就可以认定它是树的一种特殊形式。假定事件与逻辑门连接而构成的树图反映了事故的因果关系，则这样的有向树称为事故树。

在事故树中的树枝趋向性质则决定了一组节点。假定树中的每个树枝的趋向都朝向某一节点（通常为顶上事件），则这个节点成为收点；对某一特定节点而言，若树枝的取向流动离开该节点，则称此节点为源点；而对某一节点而言，存在着树枝流向对着和背离它时，此节点成为中节点。由此可见，事故树是一种逆向树图，各事件（除顶上事件外）发源于源点并收敛于收点（顶上事件）。

利用事故树对事故进行预测的方法就成为事故树分析。

被用于分析事故树也叫事故分析图。

事故树分析图的主要功用有以下几点：

- (1) 用其全面描述导致灾害事故发生的各种因素及其逻辑关系；
- (2) 为定性或定量分析提供基础图形；
- (3) 为人们直观地提供较为全面系统的所有导致事故发生的各种因素（固有的或潜在的），便于对发生的事故进行分析和调查。也能为安全设计、制定预防事故措施和采取管理对策提供依据；
- (4) 供与其他分析技术的综合使用，以达到更好的应用效果。

3.2 事故树分析步骤

事故树分析大体上包括以下几个步骤。

(1) 确定顶上事件

所谓顶上事件，即人们所不期望发生的事件，也是我们所要分析的对象事件。顶上事件的确定可依据我们所需分析的目的直接确定或在调查事故的基础上提出。两者均应调查和整理过去事故，已获得资料。除此，也可先进行事件树分析或故障类型和影响分析，从中确定顶上事件。

(2) 理解系统

要确实了解掌握被分析系统的情况。如工作系统的工作程序、各种重要参数、作业情况及环境状况等。

(3) 调查事故、原因

应尽量广泛地了解所有事故。不仅包括过去已发生的事故，而且也要包括

未来可能发生的事故；不仅包括本系统发生的事故，也包括同类系统发生的事故。查明能造成事故的各种原因，包括机械故障、设备损坏、操作失误、管理和指挥错误、环境不良因素等等。

(4) 确定目标值

根据以往的事故经验和同类型的事故资料，进行统计分析。得出事故的发生概率（或频率），然后根据这一事故的严重程度，确定要控制的事故发生概率的目标值。

(5) 构造事故树

首先广泛分析造成顶上事件起因的中间事件及基本事件间的关系，并加以整理，而后从顶上事件起，按照演绎分析的方法，一级一级的把所有直接原因事件，按其逻辑给予连接，已构成事件树。

(6) 定性分析

依据所构造出的事故树，列出布尔表达式，经解算，求出最小割集、最小径集（根据成功树），确定出各基本事件的结构重要度。

(7) 定量分析

根据各基本事件发生概率求出顶上事件的概率。

在求解出顶上事件概率的基础上，进一步求出各基本事件的概率重要度系数和临界重要系数。通过各重要度分析，选择治理事故的突破口，或按重要度系统值排列的大小，编制不同类型的安全检查表，以加强人为控制。

(8) 制定预防事故（改进系统）措施

在定性或定量分析的基础上，根据各可能导致事故发生的基本事件组合（最小割集或最小径集）的可预防的难易程度和重要度，结合本企业的实际能力，定出具体、切实可行的方案，并付诸实行。

3.3 事故树分析的应用研究

3.3.1 用事故树分析高处坠落事故

高处坠落事故是高层建筑施工中经常发生的事故，事故类型很多，本文仅以从高处坠落作为例子进行事故树分析，了解高坠事故的原因和预防措施。事故树如图 3-1 所示。

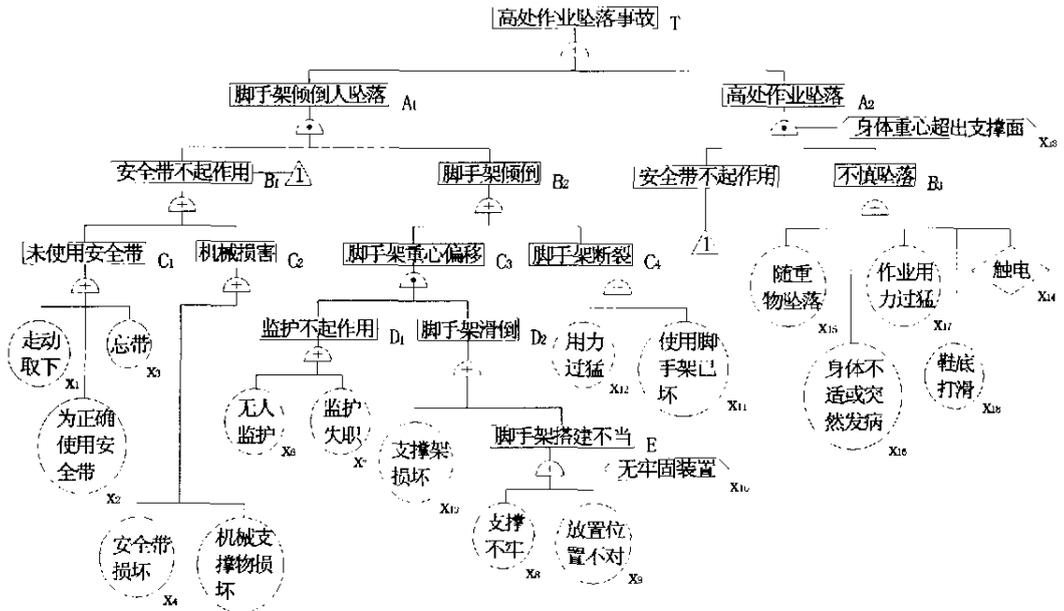


图3-1 高处作业坠落事故

(1) 进行定性分析

对事件 A₁ 进行分析，如图 3-1 所示，对事件 A₁ 进行定性分析。A₁ 最小割集最多有 45 个，比最小径集（只有 4 个）多，所以用最小径集分析比较方便，因此，做出图 3-2 的成功树。

由此，得：

$$A_1' = B_1' + B_2' = C_1' C_2' + C_3' C_4' = x_1' x_2' x_3' x_4' x_5' + (D_1' + D_2') x_{11}' x_{12}'$$

求出 4 个最小径集为：

$$P_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\} \quad P_2 = \{x_6, x_7, x_{11}, x_{12}\}$$

$$P_3 = \{x_8, x_9, x_{11}, x_{12}, x_{19}\} \quad P_4 = \{x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{19}\}$$

对事件 A₂ 进行分析，同样在事件 A₂ 中，A₂ 最小割集最多有 25 个，比最小径集（只有 3 个）多，所以用最小径集分析比较方便，因此，做出事件 A₂ 如图 3-3 的所示。

由此，得：

$$P_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\} \quad P_2 = \{x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}\} \quad P_3 = \{x_{13}\}$$

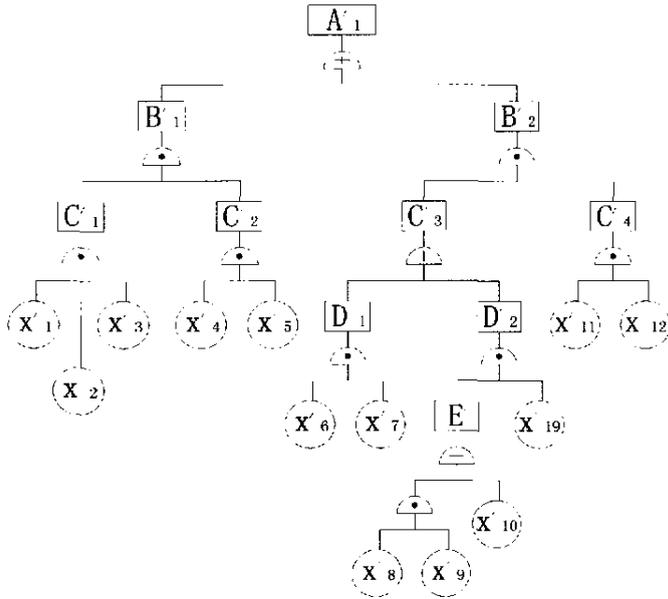


图3-2 A₁事件树的成功树

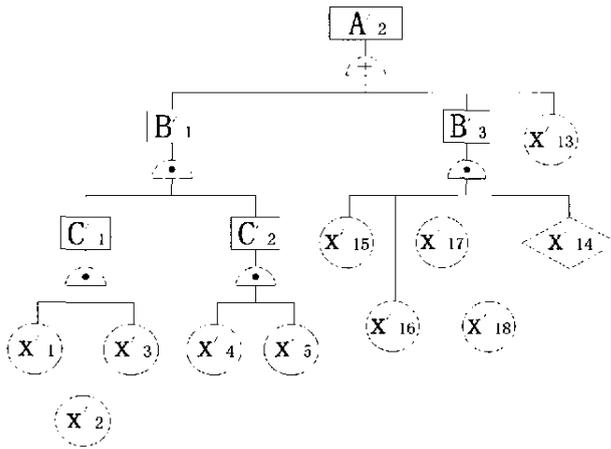


图 3-3 A₂事件树的成功树

(2) 进行结构重要度分析

结构重要度的分析有多种方法，这里采用排列法求解，求解结果排列如下：

事件 A₁ 的结构重要度的分析有：

$$I_{11} = I_{12} > I_{19} > I_6 = I_7 = I_{10} > I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_8 = I_9$$

事件 A₂ 的结构重要度的分析有：

$$I_{13})I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_{14} = I_{15} = I_{16} = I_{17} = I_{18}$$

(3) 进行定量分析

a. 对事件 A_1 进行定量分析

计算 A_1 顶上事件概率 A_1 顶上事件概率 g 为:

$$g = [1 - (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3)(1 - q_4)(1 - q_5)][1 - (1 - q_6)(1 - q_7)(1 - q_{11})(1 - q_{12})] \times [1 - (1 - q_8)(1 - q_9)(1 - q_{11})(1 - q_{12})(1 - q_{19})][1 - (1 - q_{10})(1 - q_{11})(1 - q_{12})(1 - q_{19})]$$

将表 3-1 中数值代入得:

$$g = [1 - 0.98 \times 0.9999 \times 0.9 \times 0.9999 \times 0.999] \times [1 - 0.9 \times 0.999 \times 0.99 \times 0.999] \times [1 - 0.999 \times 0.99 \times 0.99 \times 0.999 \times 0.9999] \times [1 - 0.3 \times 0.99 \times 0.999 \times 0.9999] = 2.18 \times 10^{-4}$$

b. 对事件 A_2 进行定量分析

计算 A_2 顶上事件概率 A_2 顶上事件概率 g 为:

$$g = [1 - (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3)(1 - q_4)(1 - q_5)]q_{13}[1 - (1 - q_{14})(1 - q_{15})(1 - q_{16})(1 - q_{17})(1 - q_{18})]$$

将表 3-1 中数值代入得:

$$g = [1 - 0.98 \times 0.9999 \times 0.9 \times 0.9999 \times 0.999]10^{-2} \times [1 - 0.999999 \times 0.999 \times 0.99999 \times 0.9] = 1.43 \times 10^{-5}$$

分析事故树得到如下结论:

(1) 人员从高处坠落主要原因有人员坠落和脚手架倒塌两类。事故的预防可以从这两方面来采取措施。分析事故树结构可知逻辑或门的数目远多于逻辑与门, 事故发生的可能性很大。

(2) 从最小径集看, 不发生 A_1 事件只有 4 条途径; 不发生 A_2 事件只有 3 条途径, 那么高处作业坠落事故容易发生而且防止事故发生的途径较少。且事件发生的概率 A_1 比 A_2 大。

(3) 导致事故发生的基本事件共 19 个, 其中 11 个与设备有关。所以在预防高处坠落事故中, 安全防护设施是极其重要的, 万万不可马虎。同时安全检查人员要密切注意工人实用安全防护用品的情况。

(4) 从人的角度来考虑, 应加强人的危险预知能力, 提高工人预防事故的能力。

(1) 进行定性分析

对事件 T 进行定性分析，如图 3-4 所示，对事件求最小割集（用布尔代数法）得：

$$T = A_1 A_2 = x_1 x_2 B_1 B_2 B_3 = x_1 x_2 x_3 x_{27} C_1 C_4 (C_2 + C_3 + x_9) = x_1 x_2 x_3 x_{27} (x_4 + x_5) (x_6 + D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + x_9) (D_6 + x_{28}) = x_1 x_2 x_3 x_{27} (x_4 + x_5) (x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26}) (x_{28} + x_{29} + x_{30} + x_{31})$$

带入各基本事件，可求得最小割集如表 3-2:

表 3-2 最小割集

最 小 割 集	$K_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_6, x_{27}, x_{28}\}$	$K_2 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_7, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_3 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_8, x_{27}, x_{28}\}$	$K_4 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_5 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{10}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_6 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{11}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_7 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{12}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_8 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{13}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_9 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{14}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{10} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{15}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{11} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{16}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{12} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{17}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{13} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{18}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{14} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{19}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{15} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{20}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{16} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{21}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{17} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{22}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{18} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{23}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{19} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{24}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{20} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{25}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{21} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_{26}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{22} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{23} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_7, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{24} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_8, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{25} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_9, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{26} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{10}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{27} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{11}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{28} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{12}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{29} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{13}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{30} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{14}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{31} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{15}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{32} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{16}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{33} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{17}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{34} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{18}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{35} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{19}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{36} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{20}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{37} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{21}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{38} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{22}, x_{27}, x_{28}\}$
	$K_{39} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{23}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{40} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{24}, x_{27}, x_{28}\}$
$K_{41} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{25}, x_{27}, x_{28}\}$	$K_{42} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{26}, x_{27}, x_{28}\}$	
.....	$K_{168} = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_{24}, x_{27}, x_{31}\}$	

在进行事故分析时，本文用最小割集的方法，而进行事故预测预防时，则用最小径集的方法。下面对事件求最小径集。

根据事故作出成功树。图 3-4 的成功树如图 3-5 所示。

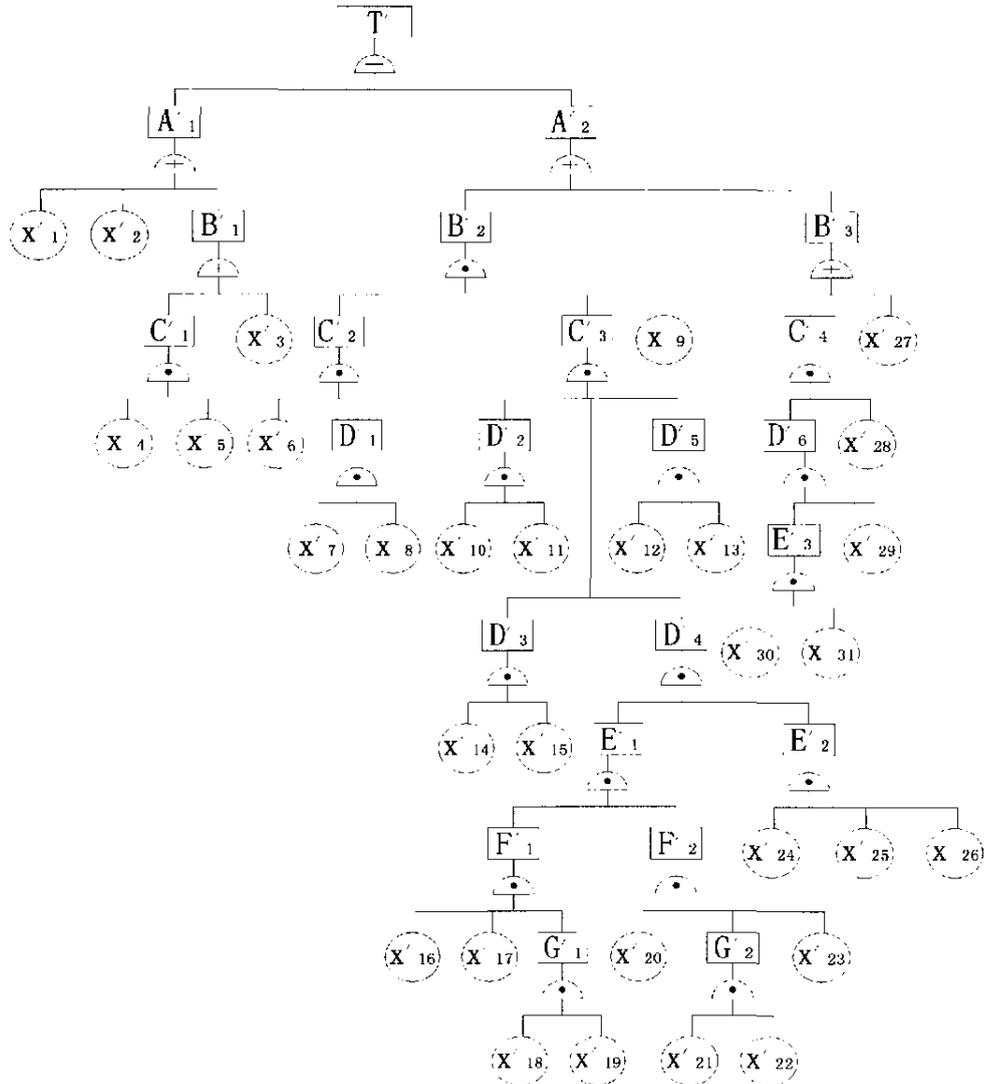


图 3-5 成功树

如图 3-5 所示，对事件求最小径集（用布尔代数法）得：

$$\begin{aligned}
 T' = A_1 + A_2 &= x_1 + x_2 + B_1 + B_2 + B_3 = x_1 + x_2 + x_3 + x_{27} + C_1 + C_4 + C_2 + C_3 + x_9 = x_1 + x_2 + x_3 + x_9 + x_{27} \\
 &+ x_4 + x_5 + x_6 + D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + x_9 + D_6 + x_{28} = x_1 + x_2 + x_3 + x_{27} + x_4 + x_5 + \\
 &+ x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} \\
 &+ x_{28} + x_{29} + x_{30} + x_{31}
 \end{aligned}$$

表 3-3 最小径集

最小割集	$P_1 = \{x_1\}$	$P_2 = \{x_2\}$	$P_3 = \{x_3\}$
	$P_4 = \{x_4, x_5\}$	$P_5 = \{x_{27}\}$	$P_6 = \{x_{28}, x_{29}, x_{30}, x_{31}\}$
	$P_7 = \{x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}, x_{26}\}$		

(2) 进行结构重要度分析

结构重要度的分析有多种方法，这里采用排列法求解，求解结果排列如下：

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_{27} > I_4 = I_5 > I_{28} = I_{29} = I_{30} = I_{31} > I_6 = I_7 = I_8 = I_9 = I_{10} = I_{11} = I_{12} = I_{13} = I_{14} = I_{15} = I_{16} = I_{17} = I_{18} = I_{19} = I_{20} = I_{21} = I_{22} = I_{23} = I_{24} = I_{25} = I_{26}$$

由事故树定性分析得出如下结论：

(1) 从事故树逻辑门看，或门占 78%，与门占 22%，可见流动式起重机触电伤害事故的危险性是较大的。

(2) 从最小割集看：由于最小割集个数共 168 组，表示导致流动式起重机触电伤害事故有 168 种“可能途径”。这就充分说明流动式起重机触电伤害事故的可能性和危险性很大。

(3) 导致事故发生的基本事件共 31 个，其中 26 个与人的不安全行为有关，与设备有关的仅有 5 个。人与设备相比，可靠性要低，人易受各种环境因素影响，而且有些不安全行为又是难以克服的，所以防止事故发生，应从人、机两方面入手，既要加强管理，加强人的安技培训，又要充分利用安全装置才能有效。

(4) 从结构重要度看：不同基本事件在系统中的结构重要度不同。如： x_1, x_2, x_3, x_{27} 基本事件结构重要度最大，则其重要性在系统中占据首位，其次是 x_4, x_5 ，再其次是 $x_{28}, x_{29}, x_{30}, x_{31}$ ，最后是 $x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}, x_{26}$ 。因此，在判定预防措施时可依据各基本事件的重要度排列，结合客观实际的可能性，从小到大选定，就可制定出有的放矢的有效预防事故发生的措施。

(5) 预防事故发生的措施判定简述

主要用最小径集方法判定预防措施。由上述可知，本事故树最小径集共 7

组，那么只要使 P_i 中的任何一个不发生，则事故就不会发生。使 P_i 中的任何一个不发生，则仅需使 P_i 中的事件不发生，即 x_1, x_2, x_3, x_{27} 不发生； x_4, x_5 不同时发生； $x_{28}, x_{29}, x_{30}, x_{31}$ 不同时发生； $x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}, x_{26}$ 不同时发生。

(6) 综合来看，导致起重机触电伤害事故的直接原因是起重机带电，使人与起重机构成了人、机、地导通的条件。因此，导致起重机触电伤害事故发生的设备原因和人操作原因都很多，所以应加强起重机械设备的检查、检验与维修，确保其正常工作。同时操作起重机械设备的属于特种作业人员，应加强技术和安全意识方面的培训，严格持证上岗制度。

4 高层建筑施工多级模糊综合评价

4.1 建立施工安全评价体系

建筑施工安全评价体系是由一系列衡量建筑施工安全评价水平的指标或标准组成，是用于安全评价的安全因素的集合。安全评价体系是安全评价的核心问题，该体系设置的合理与否关系到评价结果的准确性和可信度。

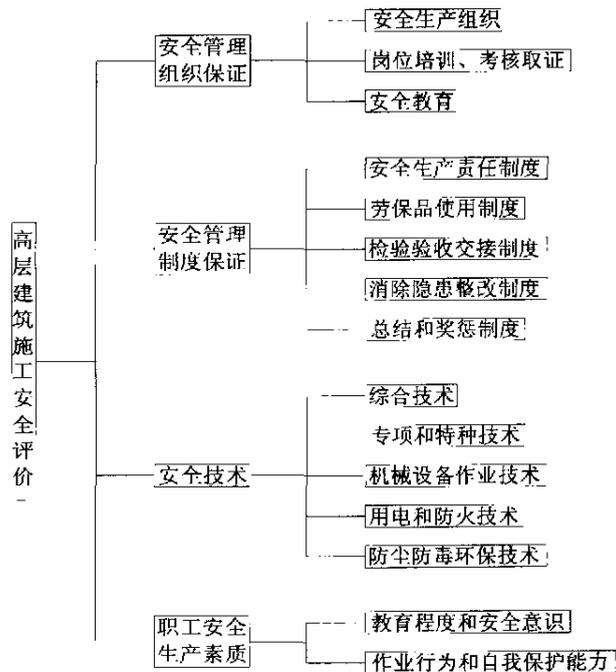


图4-1 高层建筑施工安全评价指标体系

4.2 高层建筑施工安全多级模糊综合评价

模糊评价是利用模糊数学的基本理论——隶属度来将模糊信息定量化，它合理地选择因素域值，再利用传统数学方法对多因素进行定量评价，从而科学地得出评价结论的一种方法，其优点在于不会忽略因素在程度上的差异。

进行模糊评价首先要建立影响评价因素集，并对各因素赋予相应的权数。然后由评价者建立评价集对各因素进行评价，从而得出评价矩阵。最后由相应的权数与评价矩阵形成系统评价矩阵，由此求出系统总得分再对照安全等级。模糊综合评判法给出了一个数学模型，是对多因素、多层次的复杂问题评判效果比较好的方法，也是别的数学分支和模型难以代替的方法，其适用性也比较广。

模糊综合评价是以模糊数学为基础,应用模糊关系合成原理,将一些边界不清,不易定量因素定量化、进行综合评价的一种方法。模糊综合评价分为单级和多级,对于建筑施工安全这样一个复杂的系统,本文采用多级模糊综合评价方法。

4.2.1 高层建筑施工安全模糊综合评价的可行性

模糊综合评价是借助模糊数学的一些概念,对实际的综合评价问题提供一些方法,它与概率、统计的方法是不同的。客观事物的不确定性有两大类,一类是事物对象是明确的,但出现的规律不确定;另一类是事物对象本身不明确,如年轻、年老、严重、不严重等这一类程度上的差别没有截然的分界线。后一类对象的不确定性是与分类的不确定有关,即一个对象是否属于某一类,可以是也可以不是,所以首先要对集合的概念加以推广,引入模糊集合的概念。一个元素 x 可以属于 A 集合,也可以不属于 A 集合,引入隶属度—隶属函数这一概念,这就导出了模糊数学的概念。这一工作是由美国控制论专家查德(L. A. Zadeh)奠定基础的。自 1965 年开始,模糊数学有了很大的发展,得到了广泛的应用。

模糊综合评价就是以模糊数学为基础,应用关系合成原理,将一些边界不清,不易定量的因素定量化、进行综合评价的一种方法。

“安全”与“危险”之间没有明显的分界线,即安全与危险之间存在着一一种中间过渡的状态。这种中间状态具有亦此亦彼的性质,也就是通常所说的模糊性。而模糊数学用“隶属度”来刻画这种模糊性,以达到定量精确的目的。

从图 4-1 评价指标体系来看,用模糊综合评价方法来评价高层建筑施工安全是可行的。首先,高层建筑施工安全评价涉及因素众多,且权重各异,比如高层建筑环境安全,特别是组织管理与安全制度,更是难以量化,只能用“安全”、“较安全”、“危险”等等级概念来描述,具有较强的模糊性。其次,某些因素受外界环境的影响较大,具有偶然性,如安全设施失效等,往往没有规律性,难以预测。另外,对于机械设备质量的评价是具有模糊性的,因为影响机械设备的某些因素是模糊的。由于主观原因,人们对某些影响因素的褒贬程度不尽相同,很难直接用统计学的方法确定这些因素的具体判断值。因此如何对模糊信息资料进行量化处理和综合评价就显得尤为重要。为此,利用模糊综合

评价原理对高层建筑施工质量进行评价有其科学性和实用价值。但是有时需要考虑的因素很多，因素间还可能分属不同的层次，这时就需要在每一层上对要解决的问题进行评价，即所谓的多级模糊综合评价。

总之，模糊综合评价是一种适用于用在高层建筑施工安全方面评价的一种可行的方法。下面详细介绍一下模糊综合评价的方法。

4.2.2 模糊综合评价的基本步骤

模糊综合评价是通过构造等级模糊子集把反映被评事物的模糊指标进行量化(即确定隶属度)，然后利用模糊变换原理对各指标进行综合，一般按以下程序进行：

(1) 确定评价对象的因素论域

$U = \{u_1, u_2, \Lambda, u_p\}$ 也就是 P 个评价指标。这一步是要确定评价指标体系，解决从哪些方面和用哪些因素来评价客观对象的问题。

(2) 确定评语等级论域

$V = \{v_1, v_2, \Lambda, v_m\}$ 即等级集合，每一个等级可对应一个模糊子集。正是由于这一论域的确定，才使得模糊综合评价得到一个模糊评判向量，被评价对象对评语等级的隶属度的信息通过这个模糊向量表示出来，体现评判的模糊性。

从技术处理的角度看，评语等级数 m 取 $[3,7]$ 综合整数，如果 m 过大，那么语言难以描述且不易判断等级归属。如果 m 太小又不符合模糊综合评价的质量要求。 m 取奇数的情况较多，因为这样可以有一个中间等级，便于判断被评事物的等级归属，具体等级可以依据评价内容用适当的语言描述，比如评价数据管理制度，可取 $V = \{好, 较好, 一般, 较差, 差\}$ ，评价施工质量可取 $V = \{优, 中, 劣\}$ 等。这样处理得到综合评判结果后，便于进一步比较隶属度对比指数(比例优良度)

(3) 进行单因素评价，建立模糊关系矩阵 R

在构造了等级模糊子集后，就要逐个对被评事物从每个因素 $u_i (i = 1, 2, \Lambda, p)$ 上进行量化，也就是确定从单因素来看被评事物对各等级模糊子集的隶属度。一个被评事物在某个因素 u_i 方面的表现是通过模糊向量 $(R | u_i)$ ，进而得到模糊关系矩阵

$$R = \begin{bmatrix} R/u_1 \\ R/u_2 \\ \Lambda \\ R/u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \Lambda & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \Lambda & r_{2m} \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & M \\ r_{p1} & r_{p2} & \Lambda & r_{pm} \end{bmatrix}_{p \times m} \quad (4-1)$$

矩阵 R 中的第 i 行第 j 列元素 r_{ij} 表示某个被评事物从 u_i 方面的表现是通过模糊向量 $(R | u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \Lambda, r_{im})$ 来刻画的, 而其他评价方法中多是由一个实际指标 f 值来刻画的, 因此, 从这个角度讲模糊综合评价要求更多的信息。

(4) 确定评价因素的模糊权向量 $A = (a_1, a_2, \Lambda, a_n)$

确定权重的方法很多, 可以采用专家咨询法、层次分析法等。一般情况下, p 个评价因素对被评事物并非是同等重要的, 各单方面因素表现对总体表现的影响是不同的, 因此在合成之前要确定模糊权向量, 在模糊综合评价中, 权向量 A 中的元素 a_i 本质上是因素 u_i 对模糊子集 {对被评事物重要的因素} 的隶属度, 因而一般用模糊方法来确定, 并且在合成之前要归一化。

$$\text{即: } \sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad a_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \Lambda, n)$$

(5) 利用合适的合成算子将 A 与被评事物的 R 合成得到各被评事物的模糊综合评价的向量 B。

R 中不同的行反映了某个被评事物从不同的单因素来看对各等级模糊子集的隶属程度。用模糊权向量将不同的行进行综合就可得到该被评事物从总体上来看对各等级模糊子集的隶属程度, 即模糊综合评价结果向量 B, 模糊综合评价的模型为

$$A \circ R = (a_1, a_2, \Lambda, a_p) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \Lambda & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \Lambda & r_{2m} \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & M \\ r_{p1} & r_{p2} & \Lambda & r_{pm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \Lambda, b_m) \underline{\Delta} B \quad (4-2)$$

其中 o 代表合成算子

其中 b_j 是由 A 与 R 第 j 列运算得到的, 它表示被评事物从整体上看对 v_j 等级模糊子集的隶属程度。

$$b_j = \left(a_1 \dot{*} r_{1j} \right) \dot{*} \left(a_2 \dot{*} r_{2j} \right) \dot{*} \Lambda \dot{*} \left(a_n \dot{*} r_{nj} \right) \quad (j = (1, 2, \Lambda, m)) \quad (4-3)$$

简记为 $M\left(\overset{\cdot}{*}, \overset{\cdot}{+}\right)$ 。其中 $\overset{\cdot}{*}$ 为广义模糊“与”运算， $\overset{\cdot}{+}$ 为广义模糊“或”运算。

广义“与”运算是全面考虑各种因素时， u_i 的评价对等级 v_j 的隶属度，即根据 u_i 在所有因素中的重要程度，对原来单因素评价的 r_{ij} 作一修正，公式中的广义“或”运算就是对修正后的隶属进行合成处理，以求得到一个综合评判向量。

(6) 对模糊综合评价结果向量进行分析

每一个被评事物的模糊综合评价结果都表现为一个模糊向量，这与其他方法中每一个被评事物得到一个综合评价值是不同的，它包含了更丰富的信息，对不同的一维综合评价值可以方便地进行比较并排序，而对不同的多维模糊向量进行比较排序就不那么方便了，具体分析方法将在后面讨论。

以上为模糊综合评价的六个基本步骤，其中第 3 步和第 5 步为比较核心的两步。第 3 步为单因素评价，本质上是求隶属度，在实际应用中往往要凭经验来选取合适的方法，并且工作量相当大，第 5 步的合成本质上是对模糊单因素评价结果的综合，真正体现了综合评价。

4.2.3 多级模糊综合评判

4.2.3.1 模糊综合评判数学模型

上述的模糊关系矩阵 R 作为一个从因素集 U 到评语集 V 的 Fuzzy (模糊) 变换器，每输入一组因素的权重向量 A ，就可以得到一组相应的评判结果 B 。这个关系可用图 4-2 来表示，即模糊综合评判的基本模型。



图4-2 模糊综合评判基本模型

模糊综合评判的数学模型可分为一级模型和多级模型。根据图对评价指标的分析，有些因素间是并列关系，有些因素是彼此之间的因果关系，即这些因素间具有不同的层次级别，这是客观存在的现实问题。对于这种情况，如果仍应用一级模型，就会遇到以下难以解决的问题。

权重难以细致分配，上于权重总值要满足归一化，(即 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$)，这样，每一因素所分得的权重值 a_i 必然很小，如果采用主因素突出型算子，微小的权数

会使相应的单因素评价价值失去意义。同时，不同层次的因素放在同一层次分权，会使评价结果很不合理。

对于复杂的问题，采用多级模糊综合评价。

4.2.3.2 多级模糊综合评判模型

可以先对低层指标进行综合评价，再对评判结果进行高层次的指标，具体步骤是：

(1) 把因素集 U 分成几个子集，记为 $U = \{U_1, U_2, \Lambda, U_p\}$ ，设第 i 个子集 $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \Lambda, U_{ip}\}$ ， $(i = 1, 2, \Lambda, p)$ ，则 $\sum_{i=1}^p k = n$ (4-4)

(2) 对于每个 U_i 按单级模糊综合评价，设指标权重分配为 A_i ， U_i 的模糊评价矩阵为 R_i ，则得到

$$B_i = A_i \circ R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \Lambda, b_{im}) \quad (i = 1, 2, \Lambda, p) \quad (4-5)$$

(3) 把 $U = \{U_1, U_2, \Lambda, U_p\}$ 中 U_i 的综合评判 B_i 看作是 U 中 P 个单因素评价，又设新的权重分配为 A ，那么总的模糊评价矩阵为：

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \Lambda & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \Lambda & b_{2m} \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & M \\ b_{p1} & b_{p2} & \Lambda & b_{pm} \end{bmatrix}_{p \times m} \quad (4-6)$$

则经过模糊合成运算得二级综合评判结果

$$B^* = A \circ R \quad (4-7)$$

它既是 U_1, U_2, Λ, U_p 的综合评判结果，也是 U 中所有因素的综合评判结果。第一步到第三步可根据具体情况多次循环，直到得出满意的综合评判结果为止。

用框图来表示上述两级合成过程如图 4-3 所示

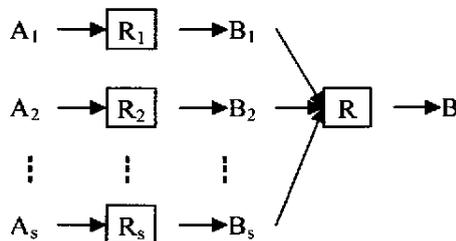


图 4-3 二级模型示意图

从上述分析可得到如下结论：只要给出指标体系中最低层的各 Fuzzy 变换矩阵，即单因素评价矩阵，再给出各层次的权重值矩阵，便可求得任意层次中的任何综合评判结果和最终的综合评判结果。

总之，多层次综合评判模型可以反映评价对象的各因素的层次性，同时又避免了因素过多时难以分配权重的弊病。它比单层次模型更加精细，更加正确的反映了因素间的相互关系。

4.2.4 模糊合成算子的选择

在模糊综合评判的基本公式 $B = A \circ R$ 中，A 与 R 如何合成，对综合评判结果有很大的影响，因此，合成算子的选择非常重要。

目前在综合评判实践中常用的合成算子有 $M(\wedge, \vee)$ ， $M(\bullet, \vee)$ ， $M(\wedge, \oplus)$ ， $M(\bullet, \oplus)$ 四种。

设已知评价矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.04 & 0.88 & 0.32 & 0.00 \\ 0.73 & 0.60 & 0.16 & 0.06 \\ 0.47 & 0.73 & 0.19 & 0.07 \\ 0.00 & 0.78 & 0.57 & 0.15 \end{bmatrix}$$

并取 $A = (0.8, 0.6, 0.4, 0.4)$ 。下面以此 R 和 A 为例分析上述四种合成算子和特点。

(1) 取小取大算子 $M(\wedge, \vee)$

$M(\wedge, \vee)$ 是用 “ \wedge ” 代替 “ $*$ ”，用 “ \vee ” 代替 “ $*$ ” 则

$$b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}) \quad j = (1, 2, \dots, m) \tag{4-8}$$

式中 \wedge 和 \vee 分别为取小 (min) 和取大 (max) 运算，即

$$b_j = \max[\min(a_1, r_{1j}), \min(a_2, r_{2j}), \dots, \min(a_n, r_{nj})] \tag{4-9}$$

按前面给出的 R 和 A，则有

$$b_j = \begin{bmatrix} 0.8 \wedge 0.04 & \vee & 0.6 \wedge 0.73 & \vee & 0.4 \wedge 0.47 & \vee & 0.4 \wedge 0.00 \\ 0.8 \wedge 0.88 & \vee & 0.6 \wedge 0.60 & \vee & 0.4 \wedge 0.73 & \vee & 0.4 \wedge 0.78 \\ 0.8 \wedge 0.32 & \vee & 0.6 \wedge 0.16 & \vee & 0.4 \wedge 0.19 & \vee & 0.4 \wedge 0.75 \\ 0.8 \wedge 0.00 & \vee & 0.6 \wedge 0.06 & \vee & 0.4 \wedge 0.07 & \vee & 0.4 \wedge 0.15 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.04 & \vee & 0.6 & \vee & 0.4 & \vee & 0.00 \\ 0.8 & \vee & 0.6 & \vee & 0.4 & \vee & 0.4 \\ 0.32 & \vee & 0.16 & \vee & 0.19 & \vee & 0.4 \\ 0.00 & \vee & 0.06 & \vee & 0.07 & \vee & 0.15 \end{bmatrix} = (0.6 \quad 0.8 \quad 0.4 \quad 0.15)$$

上面的“与”运算即 $(a_j \wedge r_{ij})$ 表明，单因素 U_i 的评价对象 V_j 的隶属度 r_{ij} 被修正为：

$$r_{ij} = a_i \overset{\cdot}{*} r_{ij} = a_i \wedge r_{ij} = \min(a_i, r_{ij}) \tag{4-10}$$

a_i 是 r_{ij} 的上限，即在合成后 u_i 的评价对任何等级 $v_j (j = 1, 2, \Lambda, m)$ 的隶属度都不能大于 a_i ，如果 r_{ij} 小于 a_i ，则可保持不变，如果 r_{ij} 大于 a_i ，则要降至 a_i 。在本例中， r_{12} 和 r_{21} 分别为0.88和0.73，而 r_{12}' 和 r_{21}' 则分别降至0.8和0.6，而 $r_{44} = 0.15 (a_4 = 0.4)$ ，故 r_{44}' 与 r_{44} 相同。

在 $M(\wedge, \vee)$ 算子中，取“ $\overset{\cdot}{*}$ ”为 \vee 的含义十分明确，那就是对每个等级而言，只考虑 r_{ij}' 中最大的那个起主要作用的因素，而不考虑其他因素的影响，可见这是一种“主因素决定型”的合成方式。用这种方式合成，与 b_j 直接有关的R阵数据只有几个。在本例中，直接决定 b_j 数据的是 $r_{21}, r_{12}, r_{43}, r_{44}$ ，即R阵中每一列中最大的那个数据， $\max r_{11}, \max r_{12}, \Lambda, \max r_{im}$ 。采用这种合成算子，合成时淘汰的信息量至少为R阵中的 $m(n-1)$ 个数据。

但是，主因素决定并不是指整个综合评判最终只考虑了一个因素，而是每个评判等级最终都只考虑了一个因素。本例中，等级一最终只考虑了因素二，由于因素二被评为一等的程度最大，为0.73，经过取小取大运算，综合评判属于一等的程度才0.6。同理，等级二最终只考虑了因素一，等级三、四最终只考虑了因素四。因素三在隶属度等级程度最终确定中没起作用。

(2) 乘与取大算子 $M(\bullet, \vee)$

$M(\bullet, \vee)$ 是用“ \bullet ”代替“ $\overset{\cdot}{*}$ ”，用“ \vee ”代替“ \wedge ”，则

$$b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i r_{ij}) \quad j = (1, 2, \Lambda, m) \tag{4-11}$$

式中“ \bullet ”代表变通实数乘法，即

$$b_j = \max(a_1 r_{1j}, a_2 r_{2j}, \Lambda, a_n r_{nj}) \tag{4-12}$$

按前面给出的R和A，则有

$$b_j = \begin{bmatrix} 0.032 & \vee & 0.438 & \vee & 0.188 & \vee & 0.000 \\ 0.704 & \vee & 0.360 & \vee & 0.292 & \vee & 0.312 \\ 0.256 & \vee & 0.096 & \vee & 0.076 & \vee & 0.228 \\ 0.000 & \vee & 0.036 & \vee & 0.028 & \vee & 0.060 \end{bmatrix} = (0.438 \quad 0.704 \quad 0.256 \quad 0.060)$$

这个算子与 $M(\wedge, \vee)$ 算子是很接近的，其区别在于合成的“与”运算中， $M(\bullet, \vee)$ 以 $r_{ij}' = a_i r_{ij}$ 代替了 $M(\wedge, \vee)$ 中的 $r_{ij}' = a_i \wedge r_{ij}$ 也就是说，对 r_{ij} 乘以一个小于 1 的系数，来代替给 r_{ij} 规定一个上限。

$M(\bullet, \vee)$ 算子也是“主因素决定型”的，用这个算子合成，与 b_j 直接有关的 R 的矩阵数据为 $r_{21}, r_{12}, r_{13}, r_{44}$ ，与 $M(\wedge, \vee)$ 算子相比， r_{13} 代替了 r_{43} 。这是由于 r_{43} 对应的因素向量值 a_4 权为 0.4，而 r_{13} 对应的为 0.8，由 a_i 修正后，第三行最大值为 $a_1 r_{13} = 0.8 \times 0.32 = 0.256$ ，而不是 $a_4 r_{43} = 0.4 \times 0.52 = 0.228$ 。采用 $M(\bullet, \vee)$ 算子，直接决定 b_j 的不仅要求 r_{ij} 数值大，而且要求所对应的 a_i 也大。可见， a_i 起到了权衡因素重要性的作用。

总之， $M(\wedge, \vee)$ 算子和 $M(\bullet, \vee)$ 算子在确定上都是由几个主要因素决定的，区别在于，哪个是主因素，在确定方法上有所不同。

(3) 取小与有界和算子 $M(\wedge, \oplus)$

$M(\wedge, \oplus)$ 用“ \wedge ”代替“ $\dot{\ast}$ ”，用“ \oplus ”代替“ $\dot{\ast}$ ”，则有

$$b_j = \sum_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}) \quad j = (1, 2, \Lambda, m) \text{ 即}$$

$$b_j = \min \left\{ 1, \sum_{i=1}^n \min(a_i, r_{ij}) \right\} \tag{4-13}$$

在本例中， $b_j = (1, 1, 1, 0.28)$ 。

这个算子的“与”运算(第一步运算)与 $M(\wedge, \vee)$ 算子中的前一步运算相同，也是对 a_i 规定上限，以修正 r_{ij} 。区别在 $M(\wedge, \oplus)$ 的第二步运算，是对各 r_{ij}' 作有上界相加，以求 b_j 。

从 R 阵数据的信息利用情况来看，R 阵中小于 a_i 的数据都与 b_j 的合成有关，最终合成时淘汰的信息量为 R 阵中大于 a_i 的数据个数。

(4) 乘与有界和算子 $M(\bullet, \oplus)$

$M(\bullet, \oplus)$ 用“ \bullet ”代替“ $\dot{\ast}$ ”，用“ \oplus ”代替“ $\dot{\ast}$ ”，则有

$$b_j = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij} \quad j = (1, 2, \Lambda, m) \quad (4-14)$$

$$b_j = \min \left\{ 1, \sum_{i=1}^n a_i r_{ij} \right\} \quad (4-15)$$

在本例中, $b_j = (0.658, 1, 0.656, 0.124)$ 。

$M(\bullet, \oplus)$ 算子的“与”运算(第一步运算)与 $M(\bullet, \vee)$ 算子的“与”相同,而“或”运算(第二步)运算和中的 $M(\wedge, \oplus)$ 中的“或”运算相同。这样, $M(\bullet, \oplus)$ 算子具有如下特点:

a. 在 $M(\bullet, \oplus)$ 算子中, 既没有取小运算, 也没有取大运算, 因而在决定各因素的评价对等级 v_i 隶属度时, 考虑了所有因素对 u_i 的影响, 而不是只考虑对 b_j 影响最大的因素的影响, 在R阵数据的信息利用上相比是最优的。

b. 在 $M(\bullet, \oplus)$ 算子与 $M(\bullet, \vee)$ 算子的“与”运算相同, 但用有界各运算代替了取大运算, 使得 a_i 切实起到了代表各因素重要性的作用。即 $M(\bullet, \oplus)$ 是“加权平均型”。

模糊综合评判中合成算子的选择要以模糊综合评判的特点为转移。而模糊综合评判具有其它模糊关系合成不具备的以下特点:

(1) 合成因子R是因素论域与评语论域间的模糊关系, R阵中的第i行是第i个因素 u_i 的单因素评价在V上的模糊子集。

(2) 另一个合成因子A是因素U上的因素模糊子集。其中 a_i 为 u_i 对A的隶属度, 它是单因素 u_i 在总评定各因素中所起作用大小的度量。也即A是各评价因素的权系数向量, 它的权向量性质是不能否定的。

(3) 模糊综合评判具有综合性, 它评判的基础是R阵中的单因素评价, 所谓综合就是把各单因素评价的信息最大限度的合成起来, 以得到一个信息依据充分的总判断。

(4) 模糊综合评判要依据被评判对象各方面状况确定评判值, 将被评判对象在本体上作比较, 排出优劣顺序, 这就是要求合成算子能够最大限度地利用单因素评价值, 使合成结果区分被评对象的能力较强。

根据前面对四种常用的模糊算子的分析比较, 并结合模糊综合评判的特点, 可以得出以下结论:

$M(\bullet, \oplus)$ 算子可以保证 R 阵信息的充分利用, 具有较大程度的综合性, 而且可以保证 A 具有权向量性质, 所以, $M(\bullet, \oplus)$ 算子相比而言是适用于模糊综合评判的优化算子。

4.2.5 模糊综合评判方法的优缺点

从模糊综合评价的特点可以看出, 它具有其他方法所不具备的优缺点, 这主要表现为:

(1) 模糊综合评价结果本身是一个向量, 而不是一个单点值, 并且这个向量是一个模糊子集, 较为准确地刻画了对象本身的模糊状况。所以 B 本身在信息的质和量上都具有优越性。其次, 模糊综合评价结果 B 经进一步加工, 又可提供一系列的参考综合信息。如按照最大隶属度原则, 取隶属度最大的评价等级, 就可确定被评价对象最终等级评语; 又根据加权平均法, 将评价结果作为权数, 给各评语等级赋以适当的分数, 就可计算出一个等级分数值的向量。

(2) 模糊综合评价从层次角度分析复杂对象。一方面, 符合复杂系统的状况, 有利于最大限度地客观描述被评价对象; 另一方面, 还有利于尽可能准确地确定权数。在从因素对被评价对象的重要程度出发确定权重时, 通常把整个评价因素的体系的权数看成是一个整体。即满足 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。这样, 当复杂系统包含评价因素较多时, 必然使每个因素的权数很小, 因素间的重要程度差异将不易被体现出来。但是, 如果将复杂系统分层, 则每个层次内的因素将变少, 因素对被评价对象的隶属度和重要程度会较容易确定。因此, 被评价对象越是复杂, 结构层次越多, 应用多级模糊综合评价的效果就越理想。

(3) 模糊综合评价方法以适用性较强, 它既可用于主观因素的综合评价, 又可以用于客观因素的综合评价。在实际生活中, “亦此亦彼”的模糊现象大量存在, 所以模糊综合评价的应用范围很广, 特别是在主观因素的综合评价中, 同于主观因素的模糊性很大, 使用模糊综合评价可以发挥模糊方法的优势, 评价效果优于其它方法。

(4) 模糊综合评价的权数属于估价权数(估价权数是从评价者的角度认定各评价因素重要程度如何而确定的权数), 因此是可以调整的。根据评价者的着眼点不同, 可以改变评价因素的权数。这种定权方法适用性较强。另外, 还可以同时有几种不同的权数分配对同一被评价对象进行综合评判, 以进行比较研

究。但是，权数调整后往往会破坏同一被评价对象的不同评价结果间的可比性。因为，不同被评价对象使用不同的权数进行综合评价时，彼此间是不可比的。

以上是模糊综合评价方法的优越性，但也有其自身的局限性，比如：

首先，模糊综合评价过程中，不能解决评价因素间的相关性所造成的评价信息重复的问题。因此，在进行模糊综合评价前，因素的预选和筛除十分重要，需要尽量把相关程度较大的因素删除，以保证评价结果的准确性。另一方面，如果评价因素考虑的不够充分，有可能影响评价结果的区分度。本文依据高层建筑施工安全评价的实践经验，确定了高层建筑施工安全评价指标体系。

其次，在模糊综合评价中，指标的权重不是在评价过程中伴随产生的，这样人为定权重有较大的灵活性，一定程度上反映了指标本身对被评价对象的重要程度，但人的主观性较大，与客观实际可能会有偏差。

4.3 实例分析

下面对某建筑公司施工现场的安全状况进行多级模糊综合评价，由于施工综合评价因素较多，我们只考虑影响建筑安全的四个方面。见表 4-1。

表 4-1 高层建筑施工安全综合评价

项目权重 (%)	类别权重 (%)	具体项目	评价矩阵 R				项目权重 (%)
			安全	较安全	临界	危险	
脚手架 (40)	护栏 (60)	立杆基础	2	5	1	0	30
		两杆间距	1	6	1	0	40
		绑扎	1	7	0	0	30
	脚手板 (40)	材料	3	5	0	0	40
		受力	2	5	1	0	40
		搭接	2	5	1	0	20
机械车辆 (40)	搅拌机 (40)	安装位置	1	6	1	0	35
		离合器制动钢丝线	1	7	0	0	45
		保险挂钩	3	4	1	0	20
	卷扬机 (60)	地锚	4	4	0	0	25
		卷筒上保险装置	4	3	1	0	35
		操作相线	2	5	1	0	40
施工用电 (40)	手持电动工具 (40)	保护接地或接零	3	4	1	0	40
		触电保护器	1	6	1	0	40
		场所的环境	2	6	0	0	20
	高低压 (60)	小于规定距离要求	1	7	0	0	40
		高压线附近的物体	1	6	1	0	35
		低压线穿堵过洞	2	5	1	0	25
安全管理 (20)	安全生产责任及安全教育 (30)	各部门执行责任制	5	3	0	0	50
		各部门安全教育	2	6	0	0	20
		特种作业	1	6	1	0	30
	检查处理 (70)	检查项目	1	6	1	0	45
		事故处理	1	7	0	0	30
		检查员配置	1	7	0	0	25

(1) 初级层次的综合评价

a. 脚手架“护栏”安全综合评价

首先确定评价因素, 根据表 4-1, 影响“护栏”安全的因素有 3 个, 由此组成的论域为:

$$U = \{\text{立杆基础}(u_1), \text{两杆间距}(u_2), \text{绑扎}(u_3)\};$$

评价集有 4 个, 由此组成评价论域为

$$V = \{\text{安全}(v_1), \text{较安全}(v_2), \text{临界}(v_3), \text{危险}(v_4)\}.$$

其次确定各因素隶属度: 专家 8 人组中对“立杆基础”的评价: 2 人认为“安全”, 占 25%; 5 人认为“较安全”, 占 62.5%; 1 人认为“临界”, 占 12.5%; 没有人认为“危险”占 0%.

则“立杆基础”的隶属度为 $r_1 = (0.25, 0.625, 0.125, 0)$

同理“两杆间距”的隶属度为 $r_2 = (0.125, 0.75, 0.125, 0)$

“绑扎”的隶属度为 $r_3 = (0.125, 0.875, 0, 0)$

则“护栏”中 3 个因素组成的评价矩阵

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.625 & 0.125 & 0 \\ 0.125 & 0.75 & 0.125 & 0 \\ 0.125 & 0.875 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

再次确定权重. 根据建筑公司的施工现状和对评价因素的分析, 评价组对影响施工安全的因素进行了安全重要性的对比, 并将对比结果作了综合统计, 得到各种评价因素的权重值如表 4-1 所示. 则“护栏”中“立杆基础”的权重为 30%; “两杆间距”的权重为 40%; “绑扎”的权重为 30%.

这些权重数必须满足归一化的要求, 即

$$0.3 + 0.4 + 0.3 = 1.$$

这 3 个权重数构成因素集 U 的一个模糊向量

$$A = (0.3 \ 0.4 \ 0.3).$$

由此可得“护栏”的安全综合评价为

$$B_1 = A_1 R_1 = (0.3 \ 0.4 \ 0.3) \cdot \begin{bmatrix} 0.25 & 0.625 & 0.125 & 0 \\ 0.125 & 0.75 & 0.125 & 0 \\ 0.125 & 0.875 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.163 \ 0.75 \ 0.087 \ 0]$$

因 $0 + 0.163 + 0.75 + 0.087 + 0 + 0 = 1$, 这是归一化的评价结果. 如果评价结果不归

一，可以用评价结果各项除以总和。

b. 依据以上的推论,同理“脚手板”的综合评价结果为

$$B_1 = A_1 R_1 = (0.4 \quad 0.4 \quad 0.2) \cdot \begin{bmatrix} 0.375 & 0.625 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.625 & 0.125 & 0 \\ 0.25 & 0.625 & 0.075 & 0 \end{bmatrix} = [0.3 \quad 0.625 \quad 0.075 \quad 0]$$

(2) 二级层次的综合评价

a. “脚手架”的二级层次综合评价

由“护栏”“脚手架”权重数构成了“脚手架”的一个模糊向量

$A_1^* = (0.6 \quad 0.4)$. 则得到“脚手架”的综合评价结果为

$$B_1^* = A_1^* \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = (0.6 \quad 0.4) \begin{bmatrix} 0.163 & 0.75 & 0.087 & 0 \\ 0.3 & 0.625 & 0.075 & 0 \end{bmatrix} = [0.218 \quad 0.7 \quad 0.082 \quad 0]$$

B_1^* 综合评价结果表明,8人评审小组对“脚手架”的安全综合评价,21.8%的人认为“安全”;70%的人认为“较安全”;8.2%的人认为“临界”,没有人认为“危险”认为“较安全”所占比重最大,所以对“脚手架”的评价结果为“较安全”。

b. 同理“机械车辆”的综合评价结果为

$$B_2^* = (0.4 \quad 0.6) \cdot \begin{bmatrix} 0.18 & 0.76 & 0.06 & 0 \\ 0.4 & 0.51 & 0.09 & 0 \end{bmatrix} = [0.312 \quad 0.61 \quad 0.078 \quad 0]$$

c. 依据以上推论,同理“施工用电”的综合评价结果为

$$B_3^* = (0.4 \quad 0.6) \cdot \begin{bmatrix} 0.26 & 0.65 & 0.09 & 0 \\ 0.16 & 0.77 & 0.07 & 0 \end{bmatrix} = [0.2 \quad 0.722 \quad 0.078 \quad 0]$$

d. 同理“安全管理”的综合评价结果为

$$B_4^* = (0.3 \quad 0.7) \cdot \begin{bmatrix} 0.4 & 0.56 & 0.04 & 0 \\ 0.13 & 0.82 & 0.05 & 0 \end{bmatrix} = [0.211 \quad 0.742 \quad 0.037 \quad 0]$$

(3) 三级层次的综合评价

由脚手架、机械车辆、施工用电和安全管理权重数构成该建筑施工安全评价的模糊向量

$$A^* = [0.4 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2]$$

则三级综合评价结果为

$$B^* = A^* \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = [0.4 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2] \cdot \begin{bmatrix} 0.218 & 0.7 & 0.082 & 0 \\ 0.312 & 0.61 & 0.078 & 0 \\ 0.2 & 0.722 & 0.078 & 0 \\ 0.211 & 0.742 & 0.037 & 0 \end{bmatrix} = [0.2318 \quad 0.6948 \quad 0.0768 \quad 0]$$

以上的三级综合评价结果表明, 专家中 23% 的认为建筑行业安全; 70% 的认为较安全; 8% 的认为处于临界状态. 我们并不应该轻视这 8% 的临界状态, 因为许多事故均源于隐患, 只有抓好预防工作, 防患于未然, 才能保证建筑行业本质安全。

(4) 等级参数评价

上述评价结果 B^* 是一个等级模糊子集, 即 $B^* = [0.2318 \quad 0.6948 \quad 0.0768 \quad 0]$

为了充分利用 B^* 所反映的信息, 我们不采用按“最大隶属度原则”取最大的 $b_j = 0.7$ 所对应的等级 v_j 作为评价结果, 而是设抉择评语集中各等级 v_j 的参数列向量

$$C = [c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4] = [82 \quad 73 \quad 65 \quad 30]$$

这样, 我们就得到了某建筑公司安全综合评价的最后得分为

$$W = B^* C^T = [0.2318 \quad 0.6948 \quad 0.0768 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 82 \\ 73 \\ 65 \\ 30 \end{bmatrix} = 74.72$$

建筑行业综合评价的安全级别划分见表 4-2

表 4-2 建筑行业综合评价安全级别

级别	安全级	较安全级	临界级	危险级
分值(分)	82~100	73~81	65~72	0~64

某建筑公司施工评价最后的得分为 74.72 分, 依据建筑行业综合评价的安全级别划分, 该建筑公司施工的综合评价属于“较安全”级。

5 结论与展望

5.1 结论

本文通过对高层建筑施工安全进行评价,找出了控制事故的安全技术措施和安全管理措施。安全评价模型的提出,使得建筑施工事故控制能够具体的、系统的进行,主要结论如下:

(1) 高层建筑施工与一般建筑施工相比具有独特性,使得高层建筑施工蕴含更大危险性。通过研究比较,本文对高层建筑施工发生事故进行大量统计分析,高层建筑施工存在危险主要划分以下方面:基础开挖深度深;作业高度高;交叉作业多;施工工期长时间紧。

(2) 我国要改进技术采取措施使施工安全评价有针对性,具体性和系统性,本文主要采用了事故树分析法对具体事故进行了分析。

(3) 在建筑施工中最主要的伤害类型应属“四大伤害”,即:高处坠落、物体打击、机械和起重伤害、触电,占总事故的70%以上,本文用事故树分析法详细分析了高处作业坠落事故和起重机触电伤害事故,通过定性、定量分析,得出以下结论:高处坠落事故的主要原因是人员坠落和脚手架倒塌,高处坠落事故容易发生而且防止事故发生的途径少,那么我们就加强安全防范措施,增强人的危险预知能力,提高工人预防事故的能力,防止事故发生;流动式起重机触电伤害事故的主要原因是起重机带电,使人与起重机构成了人、机、地导通的条件,而且事故发生的可能性大,所以,应加强起重机械设备的检查、检验与维修,确保其正常工作。同时加强操作起重机械设备人员的技术和安全意识培训,严格持证上岗制度。

(4) 在分析现行安全评价技术指数法和概率法的优缺点及运用条件的基础上。本文采用的主要是多级模糊综合评价方法,本文通过建立高层建筑施工安全评价指标体系,然后确定评价体系的评语等级论域、评价对象的因素论域、进行单因素评价,建立模糊关系矩阵 R 、确定评价因素的模糊权向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 、利用合适的合成算子将 A 与被评事物的 R 合成得到各被评事物的模糊综合评价的向量 B 、最后对模糊综合评价结果向量进行分析。在文中我们举出具体事例进行了分析,得出了评价的结果。

5.2 前景展望

(1) 事故树分析法中实现定量分析，定量分析中关键是基本事件概率的确定。基本事件概率的确定需要大量的专家和工程人员共同完成。

(2) 实现评价方法的程序化。

致 谢

首先感谢我的导师王继仁教授，从论文的选题到最后定稿都凝聚了导师大量的心血和汗水，在我的学习与研究工作中给予了悉心指导，在我生活中给予了细心关怀和谆谆教诲。

在此，向我最尊敬的导师表示最崇高的敬意和最诚挚的谢意！

同时，感谢在硕士生学习期间给予我帮忙、支持的刘剑教授、齐庆杰教授、贾进章老师、周西华老师、邓存宝师兄等，仅在此表示诚挚的谢意！

最后，感谢在百忙中评审论文和参加答辩的专家与评委们！

参考文献

- [1] 黎湛明, 乐国祥. 实用建筑施工安全手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [2] 杨文柱. 建筑安全工程. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [3] 李忠涌. 施工现场安全标准化管理. 上海: 同济大学出版社, 2001
- [4] 何广乾, 陈祥福, 徐至钧. 高层建筑设计及施工. 北京: 科学出版社, 1990
- [5] 姜华. 施工项目安全控制. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [6] 金龙哲, 宋存义. 安全科学技术. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [7] 国家安全生产监督管理局. 安全评价. 北京: 煤炭工业出版社, 2005
- [8] 蒋永琨. 高层建筑消防设计手册. 上海: 同济大学出版社, 1995
- [9] 薛艳梅. 高层建筑施工伤害风险评价研究(硕士学位论文), 2004
- [10] 郭亚军. 综合评价理论与方法. 北京: 科学出版社, 2002
- [11] 曲和鼎, 王恒毅. 安全软科学的理论和应用[M]. 天津: 天津科技翻译出版社, 1990
- [12] Christinan Preyssl. Safety Risk Assessment and Management ESA Approsch. Reliability Engineering and System Safety. 1995(49):303-309
- [13] Philip Charsley. HAZOP and Risk Assessment. DNV Loss Control Management. London England. 1999(4):5~10
- [14] 陈宝智. 危险源辩识、控制及控制[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1996: 38
- [15] 郭振龙. 工业装置安全卫生预评价方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 26
- [16] 郑双忠, 彭倩鹏, 潘开名, 丁明珍. 企业安全评价分析方法及应用. 辽宁工程技术大学学报[J]. 2003, 8: 494~496
- [17] 陈萌. 谈安全评价及其方法. 武汉: 工业安全与防尘[J], 1999. 6: 6~4
- [18] 贾淑辉. 伤亡事故统计分析和预测及系统安全模糊综合评价的研究. 北京: 北京科技大学(硕士学位论文), 1990: 15
- [19] 谢仁山, 王先华. 层次分析法(AHP)在安全评价有关指标赋值的应用. 工业安全与防尘[J], 1996, 1: 31~34
- [20] Lawrence Bodin, Saul I. Gass. On teaching the analytic hierarchy process. Computers & Operations Research [J]. 2003. (30):1487~1497
- [21] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 53
- [22] A·库尔曼(德). 安全科学导论. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 68
- [23] 陈保胜, 周健. 高层建筑安全疏散设计. 上海: 同济大学出版社, 2003
- [24] 雷春浓. 高层建筑设计手册. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [25] 杨跃, 刘宗仁. 高层建筑施工. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004

- [26] 王赫. 建筑工程质量事故分析. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [27] 张铁. 工程建设机械故障检测与分析. 石油大学出版社, 2002
- [28] 秦寿康. 综合评价原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2003
- [29] 江正荣. 实用高层建筑施工手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [30] 李士轩. 建筑施工安全检查标准实施手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000
- [31] 秦春芳, 魏忠泽. 建筑施工安全技术手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [32] 冯肇瑞. 安全系统工程. 北京: 冶金工业出版社, 1993
- [33] 王金波, 陈宝智, 徐竹云. 系统安全工程. 沈阳: 东北工学院出版社, 1992
- [34] 吴宗之, 高进东, 魏利军. 危险评价方法及应用. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- [35] 黄丽民. 计算机网络信息系统安全评价方法研究(硕士论文), 2005
- 杨少华.
- [36] 边尔伦. 浅析我国建筑安全生产的现状与对策. 成都: 建筑安全, 2003
- [38] 胡永宏, 贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [39] 王小群, 陈洪彪. 模糊层次综合法在企业安全评价中的应用. 北京: 铁道劳动安全卫生与环保, 2003
- [40] Hawksley J.L. Analysis and assessment of hazards and risks, Blackwell Scientific Publication. 1991
- [41] 建设部建筑管理司. 建筑施工安全检查标准实施指南. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [42] 诸克军, 张新兰, 魏毅强. 模糊判断矩阵的一致性及其权重排序. 系统工程理论与实践, 1995
- [43] Usha Shama. Use of recursive methods in Fuzzy fault tree analysis: an aid to quantitative risk analysis. Reliability Engineering and Safety, 1993
- [44] 佟春生. 用加权平均多层次模糊综合评判方法进行安全评价. 武汉: 工业安全与防尘, 1989
- [45] 史润水, 范世铭. 建立矿井安全评价指标体系的研究. 北京: 中国安全科学学报, 1995
- [46] 陈锦灿. 确定安全评价等级的方法——模糊综合评判法. 劳动保护科学技术, 1996
- [47] 张文忠. 公共建筑设计原理. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [48] 谈建筑业高处坠落事故特点、原因及预防对策. 北京: 中国安全科学学报, 1995