



学者书屋系列

火力发电厂事故应急管理 及虚拟仿真研究

姜金贵◎著



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

学者书屋系列

火力发电厂事故应急管理及 虚拟仿真研究

姜金贵 著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书以火力发电厂事故为研究对象,对火力发电厂事故的应急管理及虚拟仿真进行了深入系统的研究。全书共分为7章:第1章、第2章是本书绪论及相关理论综述;第3章是基于耗散结构理论的火力发电厂事故机理研究,研究了火力发电厂这一耗散结构中熵的产生因素、事故的演化机理、事故的控制机理;第4章、第5章、第6章研究了火力发电厂事故应急管理的前期预警、中期应急救援、后期处置;第7章对火力发电厂事故虚拟仿真体系进行了设计与开发。

图书在版编目(CIP)数据

火力发电厂事故应急管理及虚拟仿真研究/姜金贵著.
哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2008.8
ISBN 978-7-81133-265-0

I.火… II.姜… III.火电厂-事故-安全管理-研究
IV.TM621.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 123268 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 12.25
字 数 120 千字
版 次 2008 年 8 月第 1 版
印 次 2008 年 8 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

电力生产是国民经济发展的基础,是当代社会经济发展的重要驱动力,其安全性直接影响到社会的稳定与经济的发展。近几年来,我国各类电力事故发生频率急剧增加,造成大量的人员伤亡和巨额的经济损失。为了有效应对各类电力事故,迫切 need 要加强电力生产事故的应急管理,建立完善、有效的事故应急管理体系和机制,以提高快速、有效应对突发事件的能力,最大限度地减少事故的影响和损失。本书在借鉴相关基本理论和分析电力生产中大量事故案例的基础上,对火力发电厂事故应急管理及虚拟仿真进行了深入、系统的研究。主要研究内容如下:

第一,运用耗散结构理论研究了火力发电厂事故的演化机理和控制机理。火力发电厂是处于非平衡态的开放系统,存在着非线性的涨落,是一个耗散结构。火力发电厂事故的演化过程是其系统熵增变化的结果,因此,要想对其事故进行有效的控制,就需要向火力发电厂系统中引入负熵。

第二,构建了火力发电厂事故的全周期应急管理体系。事故应急管理能够集中地向火力发电厂系统输入大量负熵,形成强势负熵合力以实现对火力发电厂熵增的有效控制,恢复其正常的生产秩序,因此,本书构建了涵盖火力发电厂事故的前期预警、中期应急救援和后期处置的事故全周期的应急管理体系。

第三,对火力发电厂事故应急管理的前期事故预警进行了研究。结合事故应急管理的特点,分别从预警分析、预控对策两方面论述了火力发电厂事故预警管理的内容,给出事故预警管理的工作流程。分析火力发电厂事故危险点的成因,给出危险点预控的原则和预控流程,用以指导事故危险点的辨识与预控。引入小波变换改进神经网络,运用小波神

经网络进行火力发电厂事故诊断,并以凝汽器系统事故诊断为例进行了实证分析。

第四,对火力发电厂事故应急管理的中期事故应急救援进行了系统的研究。在明确事故应急救援系统中应急指挥中心、事故应急现场指挥机构、支持保障机构、媒体机构、信息管理机构等组织结构任务的基础上,研究了事故应急救援的实施过程及注意事项。本文从应急资源储备和调度两方面探讨了应急资源管理,建立了应急资源数量有限、应急时间最少、应急救援成本最低等多约束条件下的事故应急资源调度模型,并应用粒子群优化算法对该模型进行求解,以实现应急救援资源的高效利用与合理调度。在明晰了应急预案的目的、基本要求、分级之后,重点论述了火力发电厂事故应急预案的基本要素及编制流程。

第五,从事故调查、事故分析、事故责任追究和事故善后处理等方面对火力发电厂事故应急管理的后期处置工作进行了研究,从而丰富、完善了事故应急管理的内容。在事故分析过程中,运用蚁群聚类方法对火力发电厂事故原因进行了分析,并以锅炉“四管”爆漏事故为例进行了实证研究。

第六,进行了火力发电厂事故的虚拟仿真。运用虚拟现实和 HLA 仿真技术对火力发电厂事故进行虚拟仿真,构建了基于 HLA 的虚拟仿真框架,并进行了火力发电厂事故虚拟仿真体系的设计,并以锅炉灭火爆炸事故为例进行了实例仿真。

综上,本书以火力发电厂事故为研究对象,对其机理进行了研究,构建了应对火力发电厂事故的全周期应急管理体系,对火力发电厂事故应急管理前期的事故应急预警、中期的事故应急救援以及后期包含事故调查、事故分析、责任追究和善后处理在内的处置工作进行了系统、深入的研究,并研究了火力发电厂事故的虚拟仿真。本书是对电力生产企业事故进行的一项开拓性研究,促进了我国基层电力企业事故应急管理体系的建设,对于基层电力生产企业事故研究及事故的应急预警、预案编制、应急救援等工作的开展起到了推动作用。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 本书的研究背景、目的和意义	1
1.1.1 本书的研究背景	1
1.1.2 本书的研究目的和意义	3
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 国外研究现状	4
1.2.2 国内研究现状	14
1.2.3 国内外研究现状述评	21
1.3 本书总体思路及主要内容	22
1.4 本书的研究方法	24
1.5 本书的创新之处	24
第2章 相关理论综述	26
2.1 事故理论	26
2.1.1 事故的定义及特征	26
2.1.2 事故分析及其过程	27
2.1.3 事故归因理论	28
2.2 应急管理理论	32
2.2.1 应急管理的概念	32
2.2.2 应急管理的特征	33
2.2.3 应急管理的过程	34
2.3 虚拟现实理论	35
2.3.1 虚拟现实的概念及特征	35
2.3.2 虚拟现实对象建模	36
2.3.3 虚拟现实模型优化	40
2.4 分布式交互仿真理论	48

目 录

2.4.1 分布式交互仿真的概念	48
2.4.2 分布式交互仿真的特点	48
2.4.3 分布式交互仿真体系结构的比较	49
2.4.4 HLA 分布式交互仿真	51
2.5 本章小结	53
第3章 基于耗散结构理论的火力发电厂事故机理研究	54
3.1 火力发电厂生产工艺流程	54
3.2 火力发电厂事故的分类	56
3.3 耗散结构理论	57
3.4 基于耗散结构理论的火力发电厂事故演化机理分析	62
3.4.1 火力发电厂耗散结构分析	62
3.4.2 火力发电厂中熵的产生因素分析	64
3.4.3 基于耗散结构理论的火力发电厂事故演化过程	68
3.5 基于耗散结构理论的火力发电厂事故控制机理分析	70
3.6 本章小结	72
第4章 火力发电厂事故预警管理	73
4.1 火力发电厂事故预警管理含义、特点及内容	73
4.1.1 事故预警管理含义及特点	73
4.1.2 火力发电厂事故预警管理的内容	74
4.2 火力发电厂事故预警管理工作流程	76
4.3 火力发电厂事故危险点辨识及预控	78
4.3.1 危险点含义及特性	78
4.3.2 火力发电厂事故危险点辨识	79
4.3.3 火力发电厂事故危险点成因分析	82
4.3.4 火力发电厂危险点预控	83
4.4 基于小波神经网络的火力发电厂事故诊断	84
4.4.1 小波神经网络模型	84
4.4.2 小波神经网络算法	87
4.4.3 基于小波神经网络的凝汽器系统事故诊断	89

4.5 本章小结	103
第5章 火力发电厂事故应急救援	105
5.1 火力发电厂事故应急救援的任务及组织结构	105
5.1.1 火力发电厂事故应急救援的任务	105
5.1.2 火力发电厂事故应急救援的组织结构	106
5.2 火力发电厂事故应急资源管理	108
5.2.1 火力发电厂事故应急资源储备	109
5.2.2 多约束条件下的火力发电厂事故应急资源调度	112
5.3 火力发电厂事故应急预案管理	118
5.3.1 火力发电厂事故应急预案的目的及制定的要求	118
5.3.2 火力发电厂事故应急预案的分级	119
5.3.3 火力发电厂事故应急预案的内容	121
5.3.4 火力发电厂事故应急预案的编制	122
5.3.5 火力发电厂事故应急预案的演练	125
5.4 火力发电厂事故应急救援的实施	126
5.4.1 火力发电厂事故报警	126
5.4.2 火力发电厂事故应急救援的实施过程	126
5.5 本章小结	128
第6章 火力发电厂事故应急管理后期处置	130
6.1 火力发电厂事故调查	130
6.1.1 火力发电厂事故的调查原则	130
6.1.2 火力发电厂事故的调查内容	131
6.1.3 火力发电厂事故的调查程序	131
6.2 火力发电厂事故分析	133
6.2.1 火力发电厂事故分析技术方法	133
6.2.2 基于蚁群聚类的火力发电厂事故原因分析	138
6.3 火力发电厂事故的责任追究	146
6.4 火力发电厂事故的善后处理	148
6.4.1 火力发电厂事故善后处理的内容	148

目 录

6.4.2 火力发电厂事故善后处理的原则	150
6.5 本章小结	151
第7章 火力发电厂事故的虚拟仿真	152
7.1 火力发电厂事故的虚拟仿真必要性分析	152
7.2 基于 HLA 的虚拟仿真框架设计	153
7.2.1 虚拟仿真框架的设计目标	154
7.2.2 基于 HLA 的虚拟仿真框架的功能	154
7.2.3 虚拟仿真框架的结构	155
7.3 火力发电厂事故虚拟仿真环境绘制引擎选择	156
7.4 火力发电厂事故虚拟仿真设计	157
7.4.1 火力发电厂事故虚拟仿真过程模型	157
7.4.2 火力发电厂事故虚拟仿真体系设计	159
7.5 火力发电厂事故虚拟仿真的开发	161
7.5.1 HLA 仿真开发的模型体系	161
7.5.2 火力发电厂事故虚拟仿真实例	163
7.5.3 火力发电厂事故虚拟仿真数据库设置	165
7.5.4 火力发电厂事故虚拟仿真软硬件环境设置	166
7.6 本章小结	167
结论	168
参考文献	171
攻读博士学位期间发表的论文和取得的科研成果	185

第 1 章 绪 论

1.1 本书的研究背景、目的和意义

1.1.1 本书的研究背景

进入 21 世纪,世界范围内出现的一系列重大危机:“9·11 事件”、“SARS 危机”、美国和加拿大的大面积停电事故、“禽流感事件”、印度洋地震海啸以及近期我国南方各省发生的雨雪冰冻灾害等等,使人们越来越认识到加强应急管理的重要性,“应急预案”一词也逐渐变成了流行语。

“SARS”之后,我国加快了对突发公共事件应急机制的建设。党的十六届三中、四中全会明确提出,要建立健全社会预警体系,提高保障公共安全和处置突发事件的能力。2005 年以来,以制定和完善各类应急预案为切入点,我国的应急管理体系建设开始逐步健全完善,应急管理步入规范化、制度化、法制化的轨道。

电力工业作为国民经济的基础产业,其安全性关系到国计民生、社会稳定,电厂生产是电力工业的源头和核心环节,其安全与否直接影响到整个电力工业体系的安全。电厂生产中,火力发电厂又是主要支柱,在我国的电力工业中,目前火电约占总发电量的 70% 左右,因此火力发电厂的安全管理就成为电力工业安全管理研究的重点。

火力发电厂的机组发电设备是一个复杂的巨系统,生产的劳动环境具有明显的行业特点,即电气设备多,关联性大;高温高压设备多,如火力发电厂的锅炉、汽轮机、压力容器和热力管道等;易燃、易爆和有毒物

品多,如燃煤、燃油、强酸、强碱、制氢气及制氧气系统等;高速旋转机械多,如发电机、风机等;特种作业多,如带电作业、高空作业、起重及焊接作业等,因此,工作中稍有疏忽,潜在的危险就会转化为事故。

火力发电厂的这些特点决定了事故的安全防范是其安全管理工作的主要内容,在安全管理工作中必须加强事故的应急管理,提高预防和快速、有效应对火力发电厂事故的能力,最大限度地减少事故的影响和损失,保证电力生产安全稳定运行,维护国家、社会稳定和人民生命财产安全。

经过两年多的建设与发展,目前我国电力行业已经逐步建立并完善了电网大面积停电事故的处理应急机制,初步形成了有系统、分层次、上下一致、分工明确、相互协调、信息畅通的电网大面积停电事故应急体系。但同时电力安全生产及其应急管理中还存在一些问题,主要表现在以下几方面:

(1)目前的应急管理机制主要是针对电力行业建立的,而对于基层,尤其是基层的电力生产企业还没有建立完善有效的事故应急管理机制,这直接导致电力企业在应对突发事件,特别是重特大事故的时候,缺乏有效的应对策略;

(2)在已有的电力系统事故应急管理实施过程中,关联部门之间各自为政,缺乏一个系统完善的应对电力系统突发事件的应急指挥机构,造成应急救援工作开展不力、救援时间延误、应急资源浪费的现象经常发生;

(3)应急预案的针对性、实用性和可操作性不强,应急预案还不能够做到持续改进,各基层电力部门对应急预案的演练及联合演习工作重视不够,致使应急管理工作尚未实现常态化,应对突发事件的能力略显不足;

(4)电力生产中对于突发事件的应急管理还不能够做到全过程的管理,在注重应急救援的同时还缺少对突发事件的早期预警、善后处理等

内容的研究;

(5)对于电力生产安全事故的研究手段还不够丰富,缺少能够实时交互反映事故发生过程的研究手段。

鉴于以上电力安全生产及其应急管理中存在的问题,为了进一步提高基层电力企业应对电力生产事故的能力,迫切的需要构建涵盖应急预案、应急救援、应急预案、事故调查、智能分析以及善后处理等全过程的电力生产企业的事故应急管理体系,以实现部门之间的互通互联、信息共享与互为支撑,从而达到基层电力生产企业快速、高效的应对突发事件的目的。

1.1.2 本书的研究目的和意义

本书的研究目的在于分析火力发电厂事故的机理和演化过程,在此基础上建立包括火力发电厂事故的前期预警、中期应急救援和后期处置的事故全周期的应急管理,以完善火力发电厂事故的应急管理体系,提高其应对事故的能力,同时通过火力发电厂事故的虚拟仿真,丰富其研究事故的方法。

鉴于此,本书的研究工作具有重要的理论意义和实用价值,主要表现在以下几方面:

(1)推动了基层电力企业事故的应急管理工作的开展

通过对火力发电厂事故应急管理的研究,促进了基层电力企业的事故应急管理体系的建设,对于基层电力生产企业的突发事件应急预案、预案编制、应急救援等工作的开展起到了推动作用。

(2)完善了电力企业的事故应急管理的内容

本书系统的阐述了包括火力发电厂事故的前期预警、中期应急救援、后期处置在内的事故全周期的应急管理,改善了以往电力企业应急管理只注重应急预案的局面,完善了电力企业事故的应急管理内容。

(3)对于电厂事故诊断、事故分析提供了新的智能方法

在火力发电厂事故的全周期应急管理中,运用小波神经网络、粒子群优化算法、蚁群聚类算法等智能分析方法研究了电厂事故的早期诊断、事故应急资源调度、事故的原因分析等问题,提高了预测诊断的准确度,为确定事故责任提供了帮助。

(4)丰富了火力发电厂事故的研究方法

运用虚拟现实和 HLA 技术对火力发电厂事故进行虚拟仿真,为事故的研究提供一种真实的现场,从而为分析事故发生、发展的原因以及制定事故应急对策提供了新的有效途径。

(5)促进了理论与生产实际的结合

本书的研究丰富了管理决策、事故应急管理、虚拟现实、分布式仿真等相关理论在电力生产实际中的应用,同时也为其他领域类似问题的科学决策提供了参考,具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

1.2.1.1 事故的研究现状

国外对于事故的系统研究起源于工业革命以后,1939 年,H. Farmer 和 Chamber 提出了事故频发倾向论^[1],该理论认为工厂中少数工人具有事故频繁倾向,是事故频发的主要原因。Wigglesworth 在 1972 年提出,人失误构成了所有类型事故的基础^[2],他认为,在生产操作过程中,各种各样的信息不断地作用于操作者的感官,若操作者对于刺激能做出正确的响应,事故就不会发生;反之,如果错误或不适当地响应了一个刺激(人失误),就可能会出事故。

瑟利把事故的发生过程分为危险出现和危险释放两个阶段^[2],这两

个阶段各自包括一组类似的人的心理处理过程,即知觉、认知和行为响应过程。在危险出现阶段,如果人的信息处理的每个环节都正确,危险就能被消除或得到控制;反之,只要任何一个环节出现问题,就会使操作者面临危险。在危险释放阶段,如果人的信息处理过程的各个环节都是正确的,则虽然面临着已经显现出来的危险,但仍然可能避免危险释放出来,不会带来伤害或损坏;反之,只要任何一个环节出错,危险就会转化成伤害或损坏。

美国的安全工程专家海因里希^[3-4]通过对75 000起工业安全事故的调查研究,得出结论:88%的工业安全事故是由人的不安全行为引起的,10%是由不安全状况或条件引起的,还有2%是不可避免的,由此他开创了人因事故理论的研究。

Bird、北川彻三等人事故连锁论中指出,除了人的因素外,物的不安全状态也是事故的原因。Gibson 等人提出了解释事故发生的物流本质的能量意外释放论,他认为,事故是一种不正常的或不希望的能量释放,各种能量是构成伤害的直接原因。

近年美国、日本科学界进行了综合论事故研究^[5],该理论认为事故的发生不是单一因素造成的,也不是个人偶然失误或单纯设备故障所形成,而是各种因素综合作用的结果。事故之所以发生,有其深刻原因,包括直接原因、间接原因和基础原因。综合结论认为,事故是社会因素、管理因素和生产中危险因素被偶然事件触发所造成的结果,而偶然事件之所以触发,是由于生产中环境条件存在着危险因素,即不安全状态,它和人的不安全行为共同构成事故的直接原因。而由于管理上的失误、缺陷、管理责任所导致物质的、环境的以及人的原因,则是造成直接原因的间接原因。那些形成间接原因的因素,如社会经济、文化、教育、社会历史、法律等基础原因,则被称为社会因素。综合论进一步拓展了事故发生原因的研究范围,为避免事故发生所采取的对策措施提供了理论依据。

美、英等国学者提出以系统安全的思想为核心,采用系统、结构化的管理模式^[6],为企业提供了一种科学、有效的职业安全健康管理规范和指南。其核心思想是:从人、机器和环境的本质安全入手,不但要解决人的安全知识、技能、意识素质,还要解决人的观念、伦理、情感、态度、认知、品德等人文素质,从而提出安全文化建设的思路;从物和环境的本质安全化入手,采用先进的安全科学技术,推广自组织、自适应、自动控制与闭锁的安全技术,从而应用系统方法去预防事故发生。

1.2.1.2 应急管理研究现状

进入 21 世纪以来,各类突发事件频发,在造成大量的人员及经济财产损失的同时,也推动了世界范围内的应急管理研究,通过对相关文献的总结,可以看出,近几年来国外学者针对应急管理的研究主要从以下几个方面展开:

(1) 应急管理体制建设

应急管理体制是有效应对突发事件的基础,世界各国都纷纷成立专门的机构,负责突发事件的应急管理工作,建设完善了适应本国发展的应急管理体系。

1979 年,美国成立联邦突发事件管理署(FEMA),负责全国防灾、减灾、备灾、救灾和灾后恢复工作,提供应急管理指导与支持。2001 年“9·11 事件”后,合并了 20 多个政府机构,成立了一个新的国土安全部,FEMA 被并入该部成为“突发事件准备局(BPR)”,迄今该体系负责自然灾害、工业化环境、复杂社会结构所产生的突发事件的应急工作。现在,美国已形成了一个“完善法律、预防在先、适度集中”的应急管理机制,其应急组织系统包括警察、消防、911 中心、医疗救助、有关政府机构、社会服务团体、新闻媒体、工商企业等众多部门^[7]。

日本政府自 20 世纪 90 年代以来,建立起了一套从中央到地方较有特色、也较为成功的应对突发事件的应急管理机制,在日本突发事件应

急管理机制中,消防、警察、医师会、医疗机构协会、电话、铁道、电力、煤气、供水等市政服务公司,以及有关政府机构,都按照各自的应急管理实施要领和与特定类型突发公共事件的相关牵头部门进行相互配合^[8]。

俄罗斯国土广袤,国情复杂,因而特别注重跨部门协作,逐步建立了一个以总统为核心,以联邦安全会议为决策中枢,政府各部门分工协作、相互协调的应急管理机制。作为应急处理机制中枢指挥系统的重要组成部分,其安全会议中设立了12个常设跨部门委员会,它们在不同的危机中发挥不同的作用,彼此相互协调与运作,根据危机类型的不同而相应变化^[9]。

此外,新西兰、澳大利亚、新加坡以及瑞士、荷兰等欧洲国家也都结合本国的实际,建立了统一、综合的应急管理体制和完善的应急管理法律、法规体系。

(2) 应急资源的布局及调配研究

应急资源是实施应急救援的保障,在应急管理中如何对其进行合理的布局、有效的调配一直是国外学者研究的热点,研究成果主要是各种应急资源布局及调配模型。

在资源布局方面,ReVelle C. S. 和 H. A. Eiselt 认为,在应急设施的选址问题中,设施的服务半径是有标准的,根据这一思想,他们建立了设施覆盖问题(Location Set Covering Problem, LSCP)模型和最大覆盖问题(Maximal Covering Location Problem, MCLP)模型^[11-12]; Daskin M. S 基于MCLP模型提出了最大期望覆盖选址问题(Maximum Expected Coverage Location Problem, MEXCLP)^[13],建立了MEXCLP模型;Jamil 和 Mamnoon 等综合运用排队论和选址理论建立考虑时间分布的资源布局模型等^[14]。

在资源调度方面,G. Barbarosoglu 发展了救灾援助中的直升机派遣问题的数学模型^[15],并给出了算法;G. Barbarosoglu 和 Y. Arda 则讨论了救灾物资运输计划编制中的两阶段随机规划框架^[16]问题。

(3) 突发事件应急管理的分类分级和评估问题研究

突发事件在发生和处置的过程中是动态变化的,为了更有效的开展应急管理工作,国外普遍采用了分类分级的形式进行管理。如美国在“9·11”事件之后,美国核管理委员会(NRC)提出一种新的“威胁预警系统”,这种系统将突发事件分为五个等级:绿色(低风险状态——正常/常规级别)、蓝色(警戒状态——提高关注)、黄色(较高风险状态——常规威胁)、橙色(高风险状态——迫近威胁)和红色(严重状态——定域威胁)^[17-19],针对不同级别的突发事件,相应的机构采取不同的应急策略,提供不同程度的应急资源保障。

对于应急管理评估问题的研究,国外学者的成果主要集中在对现有应急系统或方法的可靠性、有效性的研究上,如 Robert L. Bishop 等在 1971 年对现有的消防系统进行了评估^[20],基本方法是根据统计数据计算出整个洲的火灾对资源需求量和潜在危险的资源需求,和现有的消防资源进行比较;Mohan R. Akellaa 等建立模型对应急管理中的通信设施的可靠性进行评估^[21];Richard C. Larson 和 Evelyn A. Franc 对车辆自动选址系统的派遣策略进行了评估,并提出了改进建议^[22]。

(4)应急预案的研究

应急预案是应急管理体系中的一个重要组成部分,与前期预防预警、后期的善后处理等工作构成了应急管理的体系。目前的研究主要集中在防范措施的选取问题和预案编制中的场景、方案及机构选取等问题。Jenkins L. 针对有毒物质泄漏处置预案的制定,讨论了如何选取预案中的特定场景进行深入研究的决策问题,并建立了一个整数规划模型,使得所有选取的情境的覆盖程度之和最大^[23-24];Bryson 等借鉴该模型的思想,建立一个灾后恢复计划中的决策辅助模型^[25];M. Hoonendoorn 等人讨论了应急预案的形式化建模和分析问题^[26];Z. Hernandez 等人使用 TTL 语言以描述应急管理体系的组织结构及其动态特性^[27];J. H. Canos 等人为了了解应急预案的不易阅读和理解问题,讨论了使用多媒体信息(包括图、文、声、像)、三维模型和动画描述应急预案^[28],将应急响应过