

东南土木

青年教师

科研论丛

地铁项目运营安全风险 预测方法及应用

陆莹 著

Methodology for
Safety Risk Prediction on
Subway Project Operation and
ITS Applications

东南大学出版社

东南土木·青年教师·科研论丛

地铁项目运营安全风险 预测方法及应用

陆莹 著

项目基金资助:

国家自然科学基金青年基金项目(51308113)

教育部人文社会科学研究青年基金项目(13YJCZH120)

江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20130616)

高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)(20130092120040)

中央高校基本科研业务费专项资金资助

 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内 容 提 要

地铁系统是一个技术复杂、人口密集的交通系统,作为城市人口的重要运载体,一旦发生安全事故,将对个人生命及社会经济造成巨大影响。如何保证地铁系统的安全运行已成为各级政府及管理部门亟待解决的重要问题,同时也引起了社会的高度重视。本书将把关注点集中到地铁项目运营阶段的安全风险预测方法上,并将现有的视角引入到地铁项目运营安全风险的前兆信息,研究安全风险识别、安全风险概率测定的方法,为地铁项目运营安全事故的防治打下良好的理论基础。地铁项目运营安全风险预测方法体系为开发地铁项目运营安全风险管理系统提供了全新的思路,是系统的核心价值所在。在地铁实际运行过程中,根据该系统识别、预测的结果,可采取积极的措施来预防地铁运营事故的发生,最大程度地保证地铁的安全使用,保障地铁持续地发挥基础效用。

本书可供地铁运营安全风险相关研究人员和地铁运营公司从业人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地铁项目运营安全风险预测方法及应用/陆莹著. —

南京:东南大学出版社,2015.8

(东南土木青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-5717-3

I. ①地… II. ①陆… III. ①地下铁道运输—安全风险—预测 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 096896 号

书 名 地铁项目运营安全风险预测方法及应用

著 者 陆 莹

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d. d. 00@163. com

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出版人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 南京玉河印刷厂

版 次 2015 年 8 月第 1 版

印 次 2015 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 8.25

字 数 201 千

书 号 ISBN 978-7-5641-5717-3

定 价 38.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

序

作为社会经济发展的支柱性产业,土木工程是我国提升人居环境、改善交通条件、发展公共事业、扩大生产规模、促进商业发展、提升城市竞争力、开发和改造自然的基础性行业。随着社会的发展和科技的进步,基础设施的规模、功能、造型和相应的建筑技术越来越大型化、复杂化和多样化,对土木工程结构设计理论与建造技术提出了新的挑战。尤其经过三十多年的改革开放和创新发展,在土木工程基础理论、设计方法、建造技术及工程应用方面,均取得了卓越成就,特别是进入 21 世纪以来,在高层、大跨、超长、重载等建筑结构方面成绩尤其惊人,国家体育场馆、人民日报社新楼以及京沪高铁、东海大桥、珠港澳桥隧工程等高难度项目的建设更把技术革新推到了科研工作的前沿。未来,土木工程领域中仍将有许多课题和难题出现,需要我们探讨和攻克。

另一方面,环境问题特别是气候变异的影响将越来越受到重视,全球性的人口增长以及城镇化建设要求广泛采用可持续发展理念来实现节能减排。在可持续发展的国际大背景下,“高能耗”“短寿命”的行业性弊病成为国内土木界面临的最严峻的问题,土木工程行业的技术进步已成为建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需求。以利用预应力技术来实现节能减排为例,预应力的实现是以使用高强高性能材料为基础的,其中,高强预应力钢筋的强度是建筑用普通钢筋的 3~4 倍以上,而单位能耗只是略有增加;高性能混凝土比普通混凝土的强度高 1 倍以上甚至更多,而单位能耗相差不大;使用预应力技术,则可以节省混凝土和钢材 20%~30%,随着高强钢筋、高强等级混凝土使用比例的增加,碳排放量将相应减少。

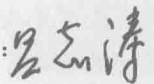
东南大学土木工程学科于 1923 年由时任国立东南大学首任工科主任的茅以升先生等人首倡成立。在茅以升、金宝楨、徐百川、梁治明、刘树勋、方福森、胡乾善、唐念慈、鲍恩湛、丁大钧、蒋永生等著名专家学者为代表的历代东大土木人的不懈努力下,土木工程系迅速壮大。如今,东南大学的土木工程学科以土木工程学院为主,交通学院、材料科学与工程学院以及能源与环境学院参与共同建设,目前拥有 4 位院士、6 位国家千人计划特聘专家和 4 位国家青年千人计划入选者、7 位长江学者和国家杰出青年基金获得者、2 位国家级教学名师;科研成果获国家技术发明奖 4 项,国家科技进步奖 20 余项,在教育部学位与研究生教育发展中心主持的 2012 年全国学科评估排名中,土木工程位列全国第三。

近年来,东南大学土木工程学院特别注重青年教师的培养和发展,吸引了一批海外知名大学博士毕业青年才俊的加入,8 人入选教育部新世纪优秀人才,8 人在 35 岁前晋升教授或博导,有 12 位 40 岁以下年轻教师在近 5 年内留学海外 1 年以上。不久的将来,这些青年学

者们将会成为我国土木工程行业的中坚力量。

时逢东南大学土木工程学科创建暨土木工程系(学院)成立 90 周年,东南大学土木工程学院组织出版《东南土木青年教师科研论丛》,将本学院青年教师在工程结构基本理论、新材料、新型结构体系、结构防灾减灾性能、工程管理等方面的最新研究成果及时整理出版。本丛书的出版,得益于东南大学出版社的大力支持,尤其是丁丁编辑的帮助,我们很感谢他们对出版年轻学者学术著作的热心扶持。最后,我们希望本丛书的出版对我国土木工程行业的发展与技术进步起到一定的推动作用,同时,希望丛书的编写者们继续努力,并挑起东大土木未来发展的重担。

东南大学土木工程学院领导让我为本丛书作序,我在《东南土木青年教师科研论丛》中写了上面这些话,算作序。

中国工程院院士: 

2013.12.23.

前 言

地铁系统是一个技术复杂、人口密集的交通系统,作为城市人口的重要运载体,一旦发生安全事故,将对个人生命及社会经济造成巨大影响。随着国内地铁项目建设的相继完工,地铁系统陆续投入使用,运营安全问题已引起研究人员和从业人员的广泛关注。为防止事故的发生,研究地铁项目运营安全风险显得尤为重要。识别事故发生前可能的前兆信息(Precursor)具有提高安全绩效的巨大潜力,许多组织已经开始研究如何确定事故前兆信息的程序和方法,并且已经从中获益。本书的研究目标就是基于前兆信息的视角,建立针对地铁项目运营安全风险识别、风险概率测定的预测方法体系,并进行实证分析。

本书在详细的文献综述的基础上,首先分析了国内外安全风险、地铁项目运营安全风险的研究现状和研究方向,并指出目前地铁项目运营安全风险研究在系统性及方法论方面有很大的不足。进而,运用社会技术系统理论及相关的 SoTeRiA 模型,分析了地铁项目运营安全风险的形成机理。

针对现有研究及实践中提高安全绩效的不足,阐述了地铁项目运营过程中的前兆信息对提高安全绩效的重要意义,系统分析了地铁设备、环境系统可能存在的前兆信息;同时基于人因分析和分类系统(HFACS)对地铁项目相关工作人员进行了前兆信息的构建。在已构建的关于设备、环境及人的前兆信息体系的基础上,以两个列车碰撞事故、一个火灾事故为例,分析事故的原因,找出相应事故的前兆信息。

接着,运用信号检测理论及模糊集理论,对地铁项目运营系统的风险前兆信息进行判别。针对部分可测的前兆信息的识别和监控问题,技术上已经肯定了实时监控子系统实现的可能性,而大量与人相关的前兆信息,目前尚未先进到用技术来进行判别。因此,依靠地铁项目工作人员来判别前兆信息显得尤其重要,而如何衡量这样的判别能力也成为风险管理的关键。本书针对地铁系统中的工作人员,运用信号检测中的两个基本指标——辨别力指标与反应倾向性指标来衡量工作人员对风险前兆的判别能力,并进行了实证分析。实证结果表明,信号检测方法很好地区分出了工作人员对风险前兆的判别能力,对提高地铁项目运营的安全绩效具有重要意义。

再次,利用人工智能方法——案例推理,识别地铁项目运营安全风险。传统的风险识别依赖于企业安全管理人员的经验,这种风险识别的效率和结果将受到个人风险态度的影响;本书设计的风险识别系统是从前兆信息出发,分析系统现状与以往发生的事故案例的相似性,进而提供相似事故的危险情况,对系统现状的安全风险进行识别。在系统设计的过程中,案例表示主要根据事故的内容来进行框架的构建,其中,前兆信息是案例表示中的主要

内容。为了实现案例的相似度计算,本书构建了前兆信息的语义网,运用概念相似度的方法计算前兆信息的局部相似度及案例的综合相似度。为了验证该方法的可行性,本书计算了列车碰撞案例之间的相似度、列车碰撞与火灾案例之间的相似度。从计算结果来看,两个列车碰撞案例之间的相似度明显大于列车碰撞与火灾案例之间的相似度,这与事实情况是符合的。因此,运用案例推理的方法来进行安全风险识别是可行而有效的。在实证分析中,以某地铁项目的运营情况为例,在已构建的地铁项目运营安全风险识别系统的基础上做进一步分析。结果表明,该系统存在乘客从 A 站台掉入轨道的风险及乘客在 B 站台拥挤受伤的风险。

最后,运用贝叶斯网络理论,实现地铁项目运营安全风险的概率测定。为构建安全风险事件的贝叶斯网络,本书在改进的受损致因模型(MLCM)的基础上,分析案例的致因过程,并基于多案例的集合方法建立了安全风险的贝叶斯网络模型。在确定条件概率的过程中,运用模糊集理论,依靠专家知识来提供可用的数据进行分析。推理算法是贝叶斯网络的核心,本书针对两类贝叶斯网络——离散贝叶斯网络和混合贝叶斯网络,分析了多种推理算法,实现安全风险的不确定性分析。在实证分析中,以基于 Hugin 消息传递方案的联合树算法为主,运用 Hugin 软件计算了某地铁项目运营中列车起火的风险概率。接着,针对贝叶斯网络中的基本事件,运用敏感性分析确定出对后果事件发生概率贡献较大的基本事件,以便采取有效的措施来减小这些基本事件的发生概率,从而减小后果事件发生的概率。敏感性分析结果显示,车轴温度过高的敏感性因子最大,是引起火灾风险的关键事件。在引起这个关键事件的顶事件中,现场管理更为重要,因此加强现场管理能够更加有效地降低事故发生的概率。现场管理不仅仅涉及站台员工、司机以及各类正在运营的工作人员,更关系到地铁项目运营公司的组织文化、安全气候,是一个综合有效的安全管理因素。因此,通过加强地铁项目运营人员的风险意识,实时监控地铁项目运营的安全状态,建立合理的现场管理流程,才能更加有效地降低事故发生的概率。

本书是在作者博士论文的基础上进一步完善而来的,导师李启明教授在本书的完成过程中一直给予关心并提供了重要的指导,在此一并表示深深的谢意!

在本书的写作过程中,参考了许多国内外相关专家学者的论文和著作,已在参考文献中列出,在此向他们表示感谢!对于可能遗漏的文献,在此也向作者表示歉意。

对地铁项目运营安全风险预测方法的研究是一个全新的方向,如果广大学者和地铁运营工作者能在本书中得到启发,作者不胜荣幸。同时书中难免有错漏之处,敬请各位读者批评指正,不胜感激!

陆莹

2015年3月于东南大学

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景及研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状及不足	3
1.2.1 安全风险的研究现状	3
1.2.2 预测方法的研究现状	4
1.2.3 安全风险研究的发展阶段	6
1.2.4 地铁项目运营安全风险的研究现状	7
1.2.5 现有研究的评论及不足	10
1.3 研究目标和内容	10
1.3.1 基本概念	10
1.3.2 研究目标	11
1.3.3 主要研究内容	12
1.3.4 研究内容框架结构	12
1.4 研究方法及技术路线	15
1.4.1 研究方法	15
1.4.2 技术路线	15
1.5 本章小结	16
第二章 基于 STS 理论的地铁项目运营安全风险形成机理	17
2.1 社会技术系统理论	17
2.1.1 社会技术系统理论概述	17
2.1.2 社会技术系统的失效机制	18
2.2 社会技术系统安全风险分析方法	19
2.2.1 技术系统的模型方法	19
2.2.2 社会系统的致因模型方法	21
2.2.3 社会技术系统的模型方法	22

2.3	基于 SoTeRiA 模型的地铁项目运营安全风险形成机理	24
2.3.1	地铁项目运营安全风险事件的分类	24
2.3.2	两列车碰撞风险形成机理	25
2.4	本章小结	29
第三章	地铁项目运营安全风险前兆信息体系构建	30
3.1	前兆信息的理论研究	30
3.1.1	前兆信息的基本概念	30
3.1.2	前兆信息的重要性	30
3.2	基于人一机一环境的地铁项目运营安全风险前兆信息体系构建	32
3.2.1	设备相关的前兆信息分析	33
3.2.2	环境相关的前兆信息分析	34
3.2.3	基于 HFACS 的人员相关前兆信息分析	34
3.3	地铁项目运营事故案例 PaICFs 调查模型	38
3.3.1	PaICFs 调查模型简介	39
3.3.2	地铁项目运营事故案例的 PaICFs 调查模型应用示例	40
3.3.3	相关结论	44
3.4	本章小结	45
第四章	基于 SDT 的地铁项目运营安全风险前兆信息判别	47
4.1	信号检测理论概述	47
4.1.1	信号检测理论的基本原理	47
4.1.2	信号检测理论的应用综述	51
4.2	模糊集理论	52
4.2.1	模糊数	53
4.2.2	模糊数解模糊	54
4.3	基于信号检测理论的前兆信息判别过程	54
4.3.1	选择模糊语言隶属函数	55
4.3.2	运用隐藏函数	56
4.3.3	计算击中率及虚报率	57
4.3.4	计算辨别力指标与反应倾向性指标	57
4.4	实证分析	58
4.4.1	调查问卷设计及数据收集	58
4.4.2	研究结果及讨论	59
4.5	本章小结	62

第五章 基于案例推理的地铁项目运营安全风险识别	63
5.1 基于案例推理的风险识别系统构建	63
5.1.1 案例推理的基本原理	63
5.1.2 基于案例推理的地铁项目运营安全风险识别系统架构	65
5.2 案例表示	66
5.2.1 地铁项目运营事故案例的内容	66
5.2.2 地铁项目运营事故案例的表示	66
5.2.3 前兆信息的权值计算方法	68
5.3 案例检索	69
5.3.1 前兆信息语义网络的构建	69
5.3.2 概念相似度的计算方法	71
5.3.3 地铁项目运营事故案例综合相似度计算	73
5.3.4 验证案例推理方法的有效性	75
5.4 实证分析	79
5.4.1 案例信息的输入	79
5.4.2 案例信息的检索	80
5.4.3 风险识别的结果	81
5.5 本章小结	81
第六章 基于贝叶斯网络的地铁项目运营安全风险概率测定	83
6.1 贝叶斯网络理论	83
6.2 贝叶斯网络的构建方法	84
6.2.1 基于改进的 MLCM 模型的致因链分析	85
6.2.2 基于多案例集合的安全风险模型构建	88
6.2.3 贝叶斯网络的条件概率确定	89
6.3 贝叶斯网络的精确推理算法	90
6.3.1 离散贝叶斯网络的精确推理算法	90
6.3.2 混合贝叶斯网络的精确推理算法	94
6.4 实证分析	96
6.4.1 确定条件概率	97
6.4.2 贝叶斯网络推理	98
6.4.3 敏感性分析	99
6.5 本章小结	100
第七章 结论与展望	102
7.1 主要的研究工作及其结论	102

7.2 创新点	103
7.3 研究不足及研究展望	104
参考文献	106
附录	117
附录 1:关于地铁运营安全风险前兆信息的调查问卷	117
附录 2:标准正态分布函数数值表	120
附录 3:利用 Hugin 软件计算边际概率及后验概率的界面示意	121

第一章 绪 论

1.1 研究背景及研究意义

1.1.1 研究背景

地铁(Subway)发展至今已有 100 多年的历史,从世界上许多大城市的发展经验可以看出,只有大力采用快速轨道交通系统,才能有效完成艰巨的城市客运任务^[1]。从我国目前的情况来看,许多大中型城市都在大力建设地铁交通系统。作为城市人口的重要运载体,地铁在城市发展和人们日常生活中发挥着越来越重要的作用。

正是由于地铁的巨大作用,地铁项目运营阶段的安全问题也将随着地铁项目日后不断的投入使用而引起重视。这些安全问题主要体现在以下两个方面^[2]:一方面是各种设备故障、运营管理不当等原因造成的列车运营延误或中断,其后果是影响乘客的正常出行,大面积和长时间的延误还会给整个城市的生产和生活造成较大的负面影响,如 2005 年 8 月 26 日上班高峰期,由于电风扇出现故障短路,北京市一辆内环地铁列车行驶至崇文门站时突然冒烟起火,被迫停在和平门地铁站灭火,内环地铁因此停运 40 余分钟,造成沿线车站大面积乘客滞留;另一方面是由于人为破坏、自然灾害等造成的火灾、爆炸、中毒等灾难性的重大事件,其后果是造成生命和财产的重大损失。如 1995 年日本东京地铁车站发生沙林毒气事件,共造成 12 人死亡,5 000 余人受伤;2003 年韩国大邱地铁人为纵火案造成 198 人死亡;2004 年莫斯科地铁发生爆炸,造成 30 多人死亡,70 多人受伤;2004 年西班牙马德里连环爆炸案共造成 200 多人死亡^[3];2005 年伦敦地铁爆炸案共造成 49 人死亡,700 多人受伤;2010 年莫斯科地铁恐怖袭击案共造成 60 多人伤亡。

地铁系统是一个由人一机一环境组成的复杂系统。美国联邦运输管理机构 FTA (Federal Transit Administration)的国家运输数据库 NTD(National Transit Database)^[4]显示(如表 1-1),美国在 2002—2008 年间发生的地铁项目安全事件主要有 4 类:碰撞、出轨、火灾以及未分类的其他安全事件,其中 23.0%属于火灾类事件、1.8%属于碰撞类事件、0.3%属于出轨类事件,而另外的 74.9%属于未分类事件(图 1-1)。这些事故的发生,一方面对乘客造成了巨大的威胁,另一方面对国家也造成了巨大的损失。

表 1-1 2002—2008 年美国地铁项目运营安全事件及其后果统计

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
碰撞(Collisions)	143	130	152	102	102	113	62
出轨(Derailment)	15	11	20	15	29	28	11
火灾(Fires)	1 718	1 561	1 620	1 830	1 702	1 967	12
未分类事件(Not otherwise classified)	5 044	3 832	4 479	3 791	4 434	4 854	7 543
合计(Total incidents)	6 920	5 534	6 271	5 738	6 267	6 962	7 628
死亡人数(Fatalities)	73	47	60	35	23	32	67
受伤人数(Injuries)	4 834	4 154	4 759	3 814	4 820	5 015	7 166
财产损失(Property damage)	\$ 2 475 703	\$ 5 652 164	\$ 3 677 529	\$ 4 413 656	\$ 1 360 540	\$ 7 813 527	无记录

■ Collisions ■ Derailment ■ Fires ■ Not otherwise classified

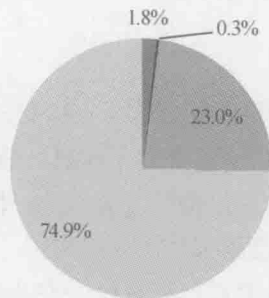


图 1-1 2002—2008 年美国地铁项目运营安全事件所占百分比

1.1.2 研究意义

面对上述大量的风险事故及安全隐患,如何保证地铁系统的安全运行已成为各级政府及管理部门亟待解决的重要问题,同时也引起了社会的高度重视,尤其是我国地铁尚处于快速发展的初期,和发达国家相比,我国地铁项目运营安全管理经验还很不足,针对地铁项目运营风险的研究十分缺乏。因此,针对我国目前的情况,即大部分地铁仍在建设中,少数地铁投入运营,在这种情况下便开始关注地铁项目运营阶段的安全风险,无论对于地铁项目安全研究领域还是地铁项目运营事故防范的实际应用方面都具有极大的前瞻性和挑战性。

同时,如果能在安全事故发生前就能预测到事故的发生,从而就能向可能受到伤害的人员发出信号,相关人员可以及时采取措施而避免此次事故的发生,这将是预防安全事故的有效途径。

从全寿命周期理论的研究角度出发,通过研究地铁项目运营阶段的安全风险,可以有效地为地铁项目设计阶段和施工阶段提供参考意义,从而尽量在设计 and 施工阶段将运营阶段有可能出现的问题加以考虑,增强在设计 and 施工阶段对于风险的分析,实现全寿命周期风险损失最小的目标。

基于这些关键问题,本书将把关注点集中到地铁项目运营阶段的安全风险预测方法研究上,并将现有的研究视角引入到地铁项目运营安全风险的前兆信息,提供了对前兆信息进行实时监控的途径,解析了安全风险识别、安全风险概率测定的方法,为地铁项目运营安全事故的防治打下良好的理论基础。

同时,本书提出的地铁项目运营安全风险预测方法体系为开发地铁项目运营安全风险管理系统提供了全新的思路,是系统的核心价值所在。该系统可综合前兆信息的监控、判别功能,通过案例库的运用实现风险识别及风险概率的测定,具有广泛的应用价值。在地铁实际运行过程中,根据该系统识别、预测的结果,可采取积极的措施来预防地铁运营事故的发生,最大限度地保证地铁的安全使用,保障地铁持续地发挥基础效用。

1.2 国内外研究现状及不足

1.2.1 安全风险的研究现状

与预测地铁项目运营安全风险实践相辅相成的是对安全风险(Safety risks)相关理论的研究。国内外关于安全风险的研究主要集中在以下两个方面:关于事故致因理论的研究、事故预防理论的研究。

(1) 事故致因理论

对于事故致因的研究,较为著名的是 Heinrich 的事故致因模型(Accident Causation Models),也就是著名的“多米诺”理论,该理论构建了导致伤亡事故的各种因素之间、因素与伤害之间的关系。其核心思想是,伤亡事故的发生不是一个孤立的事件,而是一系列原因事件相继发生的结果,伤害与各原因相互之间具有连锁关系^[5]。之后,Gibson 又提出能量转移理论,认为事故是一种不正常的或不希望的能量释放,各种形式的能量释放构成了伤害的直接原因,应该通过控制能量或控制作为能量达到人体媒介的能量载体来预防伤害事故。同时,轨迹交叉理论认为,在事故发展过程中,人的因素的运动轨迹与物的因素的运动轨迹的交点,即人的不安全行为与物的不安全状态相遇,则将在此时间、空间发生事故。按该理论,可以通过避免人与物两种因素运动轨迹交叉,即避免人的不安全行为和物的不安全状态同时、同地出现,来预防事故的发生。

针对人为失误的研究,主要体现在行为模型和人的因素模型中。行为模型认为工人是事故的主要原因,研究人在不同的状态和环境状况下发生失误的趋势。Rigby 的人员过失理论(Human Error Theories)将人为失误定义为“人”的行为的结果超出了可接受的界限,换言之,人为失误是指人在生产操作过程中,实际实现的功能与被要求的功能之间的偏差,其结果可能以某种形式给系统带来不良的影响^[6]。同时,Reason 提出的人为失误理论,对人为因素在安全事故发生过程中的作用进行了详细分析^[7]。

(2) 事故预防理论

在事故预防理论的研究过程中,美国安全工程师海因里希在 1931 年出版的著作《安全

事故预防:一个科学的方法》一书中,通过分析 55 万起工伤事故的发生概率,为保险公司的经营提出了著名的安全金字塔法则。该法则认为,在 1 起重伤害事故背后,有 29 起轻伤事故,303 起无伤害虚惊事件,以及大量的不安全行为和不安全状态存在,之间的关系可以形象地用安全金字塔来示例。金字塔的顶峰为严重事故,它可能导致人员的伤亡、财产的损失、对环境的影响以及对生产过程严重的干扰。险兆事件则是处在金字塔的最底层,这些事件有可能导致事故的发生,但幸运的是事实上并没有发生。险兆事件相比事故来说很不明显,它不会对人员或环境造成直接的影响。

从海因里希的安全金字塔分析可以得出:若不对不安全行为和不安全状态进行有效控制,可能形成 303 起无伤害的虚惊事件,而这 303 起无伤害虚惊事件的控制失效,则可能出现 29 起轻伤事故,直至最终导致重伤害事故的发生。

海因里希“安全金字塔”法则揭示了一个十分重要的事故预防原理:要预防死亡重伤害事故,必须预防轻伤事故;预防轻伤事故,必须预防无伤害虚惊事故;预防无伤害虚惊事故,必须消除日常不安全行为和不安全状态;而能否消除日常不安全行为和不安全状态,则取决于日常管理是否到位,也就是常说的细节管理,这是作为预防死亡重伤害事故的最重要的基础工作。现实中就是从细节管理入手,抓好日常安全管理工作,降低安全金字塔最底层的不安全行为和不安全状态,预防重大事故的发生,实现全员安全。

黄洪举在总结了事故致因理论的基础上,提出了伤亡事故金字塔模型,该模型从险兆事件到最后实际事故发生的过程中,每一个阶段都有不同的隔板。该模型认为事故一个因素向另一个因素过渡是需要能量的,这个能量主要是引起隐患、克服隔板阻挠、产生事故以及对周围环境影响的因素^[8]。同时该文献提出如果工业生产中科技得到充分应用,可以杜绝事故的发生,并控制事故对周围环境的影响。

飞机涡轮机的发明者德国人帕布斯海恩提出了一个在航空界关于飞行安全的法则,即每一起重大飞行安全事故的背后有 29 个事故征兆,每一个事故征兆背后又有 303 个事故苗头,每一个事故苗头背后又有 1 000 个事故隐患,这就是著名的海恩法则,简记为 1 : 29 : 303 : 1 000,这一法则虽然是针对航空界飞行安全而言的,但它所揭示的事故背后有征兆,征兆背后有苗头是适用于各行各业的。因此,海恩法则被业界奉为万能法则。吕保和在文中引用了著名的海恩法则,并将其演变成:如果将事故按其后果的严重程度分为无伤害事故、轻伤事故和严重伤害事故,那么对于同类事故而言,大量出现的是无伤害事故,而严重伤害事故所占的比例很小^[9]。他在调查中发现,每 333 起同种事故中,303 起事故没有造成任何伤害,29 起有轻微伤害,只有 1 起造成了严重伤害,即三者的比例为 303 : 29 : 1。

1.2.2 预测方法的研究现状

事故预测是基于可知的信息和情报,对预测对象的安全状况进行预报和预测。由于可以分析事故的变化趋势和事故的安全隐患,近年来事故预测的方法逐步成为学者们关注的热点。据不完全统计,现有的各类预测方法达 300 种之多,而且现代预测方法的发展,往往是各种预测方法的交叉运用和相互渗透,因此难以进行绝对化的划分。基于国内外主要数

数据库和资料(如 EBSCO、Science direct 等),当前常见的事故预测方法可概括为两大类:情景分析法和回归预测法。

(1) 情景分析法(Scenario analysis)

情景分析法普遍适用于对缺少历史统计资料或趋势面临转折的事件进行预测。该方法目前发展很快,在事故预测方面常结合其他定量方法,根据情景分析得到最有可能发生的情景方案,对其进行调整优化将会使预测的结果更加合理。

自 20 世纪 50 年代以来,国外研究人员提出了初步危险分析(PHA)、事故树分析(FTA)、事件树分析(ETA)、因果分析图法、运行危险分析(HAZOP)等分析方法,经过多年的研究与改进,目前这些方法已逐步成熟,并在实际应用中取得了良好的效果^[10-25]。目前对安全性研究的一个热点是对系统动态过程安全性的研究,国外学者在 80 年代末提出了动态事件树法^[26-27]、动态故障树法^[28-29]、Petri 网^[30-34]等分析方法。

Nivolianitou 从事件排序、事件因素、事件之间的依赖性、建模时间以及差错恢复能力等方面对这 3 种技术进行了对比,发现 Petri 网对事故发展提供了较好的时间描述,而事件树侧重于分析事件的因素,故障树侧重于梳理出影响事故发生的主要事件^[35]。目前研究的热点是管理者智力模型的伸展、组织学习的引发和加速过程等。

Khan 研究了化工过程中比较普遍的风险评估方法——最大可信事故分析(Maximum Credible Accident, MCA)^[36],开发出了相关的软件包^[37];在此基础上,Khan 提出了一种可以从大量的可能性中识别出最可信事故情景的准则,降低了用不可信情景代替可靠情景的代价^[38],并结合最大可信事故和概率统计故障树分析方法,提出了一种新的方法——SCAP(Safety, Credible Accident, Probabilistic fault tree analysis)^[39]。

(2) 回归预测法

回归预测是根据历史数据的变化规律,寻找自变量与因变量之间的回归方程,确定模型参数,据此做出预测。回归预测中的因变量和自变量在时间上是并进关系,即因变量的预测值要由并进的自变量值来旁推。回归预测要求样本量大且样本有较好的分布规律。根据自变量的多少可将回归问题分为一元和多元回归,按照回归方程的类型可分为线性回归和非线性回归。

多元线性回归在事故分析时可能会带来一些不必要的统计特征,因此为了弥补多元线性回归的缺陷,提出了用泊松分布来对事故发生的概率建模,而当样本数据过度离散时,泊松模型可能无法准确描述其概率分布,或过高地估计事故发生的可能性,这时可以使用更加一般的概率分布,如负二项分布。

Abdel-Aty 和 Evans 的研究表明泊松分布和负二项分布均是常见的离散型分布^[40-41]。

Maher 以交通事故为例,将广义线性回归、泊松和二项式模型的适用性进行了比较,发现基于最小二乘法,具有泊松误差结构的线性回归比传统的多元线性回归更适用^[42]。考虑到观察样本中出现较多零事件的情况,此时泊松和负二项式模型不能解释这种分布,从而在此基础上产生了 ZIP(Zero Inflated Poisson)回归预测模型和 ZINB(Zero Inflated Negative Binomial)预测模型,这种模型具有 2 个状态,也就是将 0 状态从原有的数据状态中分离出来^[43]。

Milton 将 Mixed Logit 模型(也称为 Radom Parameters Logit 模型)用到事故预测中,

来评估整体而不是局部事故分布^[44]。Mixed Logit 模型的参数能够随机变化,并且能够处理异质性问题,也就是能够发现事故分布中的异常现象,这种现象往往由大量因素造成,从而揭示了没有观察到的其他因素的潜在影响。

当预测的长度大于占有的原始数据长度时,采用回归方法进行预测在理论上不能保证预测结果的精度;另外,可能出现量化结果与定性分析结果不符的情况,有时难以找到合适的回归方程类型。因此,针对诸多不同的事故因素和可能后果,要选择不同的模型,而且事故与各个因素之间的关系可能相当复杂,对建立的模型进行检验是很重要的。如 ANOVA 统计检验,可以发现这些样本数据之间是否存在重要的区别,从而确定是否需要增加或合并数据以及针对不同情况分别建立模型^[45]。

1.2.3 安全风险研究的发展阶段

关于安全风险的研究主要经历了以下几个阶段的发展^[46]。

在早期阶段,高风险的核工业系统主要是基于深层次的防御保护来进行设计的。这个理念的结果是,工程系统具有非常保守的设计和规则,如频繁的质量控制和检查。操作人员、维护人员的工作指导书是根据功能设计产生的,官方标准的操作程序是根据技术可靠性分析而形成的,这也是当时控制行为的唯一工具。Rasmussen 称这个阶段主要考虑技术系统,而将人的行为假设为标准模型(Normative models)^[47]。

第一阶段的主要特点是开始使用正式的风险分析,如经典的概率风险评价(Probabilistic Risk Assessment, PRA)^[48],这些方法主要用于规则系统(如具有风险概念的规则)和操作(如基于风险理论的维护中断计划),并且大部分的方法是面向技术系统。之后发现除了技术故障,人因失误(Human Error)也是导致事故发生的主要原因。研究人的可靠性的第一代方法,如人的错误率预测技术(Technique for Human Error Rate Prediction, THERP)^[49],是用来预测操作人员完成给定任务程序的错误概率。紧接着,新的扩展模型,即包含组织因素的安全风险模型开始出现。经大量事故调查发现,在操作和维护技术系统时,人因失误的根源在于现场管理和组织因素^[50-51]。Reason's^[50-51]的奶酪模型(Swiss Cheese Model)是第一个包含组织因素的事故理论,描述了组织因素对人员失误及最终发生事故的影响过程。这个时期也有大量的方法用于定量研究组织因素对系统风险的影响,包括 MACHINE^[52],WPAM^[53-54],SAM^[55],Omega Factor Model^[56],ASRM^[57],以及 Causal Modeling of Air Safety^[58]。Rasmussen^[47]称这个阶段安全风险理论的特点是面向“标准行为偏差”(Deviations from normative performance)。而对于包括组织因素的事故模型,则主要面向“偏离正常的管理错误”(Management errors and deviations from norm)。

第二阶段的安全风险研究更现实地考虑了硬件、人以及组织。经典的 PRA 方法发展为动态的 PRA^[59-60];人的可靠性(Human Reliability Analysis, HRA)模型越来越多地考虑认知行为,主要包括 Hollnagel 的认知可靠性和错误分析方法(Cognitive Reliability and Error Analysis Method, CREAM)^[61],Mosleh and Chang 的面向组员的信息、决策和行为模型(Information, Decision, and Action in Crew context, IDAC)^[62]。同时该阶段还提出了基于模拟的技术,主要