

综采工作面 人—机—环境 系统安全性分析

王玉林 杨玉中 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

综采工作面人 - 系统安全性分析

王玉林 杨玉中 著

北 京
冶金工业出版社
2011

内 容 提 要

本书运用人-机-环境系统工程理论对综合机械化采煤(综采)工作面的安全性进行了系统分析,针对人的特性,分析人为失误的原因,提出控制人为失误的措施。分析了人的模糊可靠性,工伤事故与人素质的关系,工伤事故与人的心理因素、疲劳的关系。在机的C-M-D模型的基础上,分析了机的特性及其可靠度,计算了综采面主要设备组成的生产系统的可靠度的各种指标和故障模式。利用ETA和FTA对综采面事故进行定性分析和定量计算。对主要因素进行灰色关联分析,对采煤工作面环境状况进行模糊聚类分析并提出改善井下采煤工作面环境状况的建议措施。最后,介绍了几种新的安全性评价方法,并对综采面的安全性进行了综合评价。

本书可作为安全技术及工程专业和系统工程专业研究生教材和安全工程专业本科生参考教材,亦可作为采矿工程专业、安全管理人员、生产技术人员和研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

综采工作面人-机-环境系统安全性分析/王玉林,
杨玉中著. —北京:冶金工业出版社, 2011.2
ISBN 978-7-5024-5495-1

I. ①综… II. ①王… ②杨… III. ①采煤综合
机组—安全性—分析 IV. ①TD421.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第014889号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 彭子赫 版式设计 葛新霞

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5495-1

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011年2月第1版, 2011年2月第1次印刷

148mm×210mm; 10.375印张; 305千字; 318页

32.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

人-机-环境系统工程是20世纪80年代发展起来的一门研究人-机-环境系统最优组合的新兴综合性技术科学。它从系统的总体出发,研究人、机、环境各要素本身的性能和三大要素之间的相互关系,找到最佳组合方案,使人-机-环境系统的总体性能达到最佳状态,使系统“安全、高效、经济”。

煤炭在我国一次性能源结构中处于绝对主要位置,在20世纪50年代其比例曾高达90%。随着大庆油田、渤海油田的发现和开发,一次性能源结构才有了一定程度的改变,但煤仍然占到70%以上。在最近完成的《中国可持续能源发展战略》研究报告中,20多位中国科学院院士和中国工程院院士一致认为,到2050年,煤炭所占比例不会低于50%。可以预见,在未来几十年内,煤炭仍将是我国的主要能源和重要的战略物资,具有不可替代性,煤炭产业在国民经济中的基础地位,将是长期和稳固的。综合机械化采煤是现代化煤炭生产的主要工艺,是煤炭企业高产、高效的出路之一,同时也是一个复杂的人-机-环境系统,由于综采面的环境条件比较恶劣,加之煤矿工人的整体素质比较低,导致各类事故发生较多,严重影响和制约着煤矿的安全生产和经济效益的提高。因此,应用人-机-环境系统工程理论,研究综采工作面的安全性,既具有重要的理论意义,又具有重大的现实意义。

本书的主要内容包括如下四部分:

(1) 人的方面。主要研究了井下工人的S-O-R模型,分析了井下工人的反应特性、行为特性和个性心理特征;详细分析了工人人为失误的原因,提出了控制人为失误的措施;分析研究了井下工人的模糊可靠性问题;分析工伤事故与工人素质、人的心理因素以及疲劳的关系等。

(2) 机的方面。主要研究了综采工作面机械设备的 C-M-D 模型, 机子系统的可靠性以及故障模式和影响分析; 对综采面事故进行了事件树分析和事故树分析。

(3) 环境方面。主要研究了顶板、瓦斯、综采面微气候、噪声、粉尘、照明、作业空间、有毒有害气体等作业环境对作业人员的生理、心理影响; 对综采面主要环境要素与安全事故进行了灰色关联分析; 对采煤工作面进行了模糊聚类分析, 最后提出了改善环境的相应措施。

(4) 人-机-环境系统安全性综合评价。主要介绍了系统安全评价的基本内容, 系统安全评价常用的定性方法, 如检查表式安全评价法、作业危险条件评价法、MES 评价法和 MLS 评价法; 主要研究了定量化评价方法, 如灰熵综合评价法、基于熵权的 TOPSIS 方法、基于 AHP-可拓理论的评价方法、模糊综合评价法、基于粗糙集—属性数学的评价方法和基于神经网络的评价方法等; 最后对采煤工作面的安全性进行了综合评价, 指出了存在的问题, 提出了相应的改进对策。

本书由河南神火煤电股份有限公司的王玉林高级工程师和河南理工大学的杨玉中副教授共同主笔, 并得到了河南省重点科技攻关计划 (092102310317)、国家安监总局安全生产科技计划 (08-152)、河南省教育厅科技攻关计划 (2009A620002)、河南省高校青年骨干教师资助计划的资助, 在成稿的过程中, 河南理工大学的吴立云副教授和研究生王文辉等人也提供了大力帮助, 作者在此一并表示感谢。

由于作者的水平所限, 书中不当之处, 敬请读者批评指正!

杨玉中

2010 年 11 月

目 录

1 综合机械化采煤工作面人-机-环境系统安全性概述	1
1.1 人-机-环境系统工程概述	1
1.1.1 人-机-环境系统的概念	2
1.1.2 人-机-环境系统工程与人机工程学的关系	2
1.2 国内外研究现状	4
1.3 综合机械化采煤概述	7
1.4 本书的意义及主要内容	13
1.4.1 煤矿采煤工作面人-机-环境系统的特点	13
1.4.2 采煤工作面人-机-环境系统的安全性	14
1.4.3 本书特色	14
1.4.4 本书的主要内容	18
参考文献	19
2 人的特性分析	22
2.1 事故致因理论	22
2.1.1 概述	22
2.1.2 事故致因理论的发展过程	32
2.1.3 事故致因理论	34
2.1.4 事故致因理论的应用	45
2.2 人的S-O-R模型	47
2.3 人的反应特性	48
2.3.1 调节时间周期	48
2.3.2 刺激量与感觉量	48
2.3.3 反应时间	49
2.4 人的行为特性分析	52

2.4.1 人的行为模式	52
2.4.2 人的行为特性	53
2.4.3 与安全有关的行为特征	54
2.5 人的个性心理特征分析	55
2.5.1 性格	55
2.5.2 气质	57
2.5.3 能力	57
参考文献	58
3 综采面作业人员的人为失误及其可靠性分析	59
3.1 人为失误的概念	59
3.2 人为失误的分类	60
3.3 综采工作面作业人员人为失误的原因分析	61
3.4 人为失误的控制	64
3.4.1 建立以人为中心的安全管理体制	64
3.4.2 人的安全化	64
3.4.3 生物节律与人为失误	65
3.4.4 作业标准化	68
3.4.5 改善环境	69
3.4.6 设计良好的人机界面	70
3.4.7 倡导企业安全文化	70
3.5 人的可靠性分析	80
3.5.1 概述	80
3.5.2 人的模糊可靠性的计算	81
3.5.3 人的可靠性分析方法的评价	85
参考文献	85
4 工伤事故与人的因素的关系分析	87
4.1 工伤事故与人的素质的关系	87
4.1.1 新庄矿工工伤事故状况	87
4.1.2 新庄矿工工伤事故受害者的素质状况	87

4.1.3 工伤事故受害者的素质与事故的关系	90
4.1.4 结论	92
4.2 综采面工伤事故与人的心理因素的关系	93
4.2.1 性格与工伤事故的关系	93
4.2.2 工伤事故与心理状态的关系	95
4.3 工伤事故与疲劳的关系分析	98
4.3.1 疲劳概述	99
4.3.2 产生疲劳的原因	100
4.3.3 预防疲劳影响采煤安全的措施	101
参考文献	103
5 综采面机的特性及其可靠性分析	104
5.1 机的 C-M-D 模型	104
5.2 机的特性及人机功能分配	105
5.3 综采面机的可靠性分析	106
5.3.1 可靠性理论基础	106
5.3.2 综采面机的可靠性分析	113
5.4 故障模式和影响分析	114
5.4.1 故障模式	115
5.4.2 分析程序	120
5.4.3 致命度分析	121
5.4.4 刮板输送机故障模式	123
参考文献	123
6 综采面事故与机的关系分析	124
6.1 综采面事故中机的因素	124
6.2 综采面事故的事件树分析	124
6.2.1 概述	124
6.2.2 事件树分析的理论依据及程序	125
6.2.3 综采面机械设备故障的事件树分析	126
6.3 综采面事故的事故树分析	129

6.3.1	概述	129
6.3.2	事故树分析的概念	130
6.3.3	事故树分析的步骤	130
6.3.4	事故树的最小割集和最小径集	131
6.3.5	事故树的结构函数	132
6.3.6	顶上事件发生概率	133
6.3.7	三种重要度的分析与计算	135
6.3.8	综采面事故的事故树分析	136
参考文献		141
7	综采工作面环境因素分析	143
7.1	劳动环境概述	143
7.2	综采面环境与安全	144
7.2.1	顶板与安全	144
7.2.2	瓦斯与安全	145
7.2.3	温度与安全	155
7.2.4	湿度与安全	161
7.2.5	风速与安全	165
7.2.6	热辐射与安全	165
7.2.7	噪声与安全	166
7.2.8	粉尘与安全	176
7.2.9	照明与安全	190
7.2.10	作业空间与安全	199
7.2.11	有毒有害气体与安全	199
7.3	综采面事故与环境因素的灰色关联分析	208
7.3.1	灰色关联分析的基本思想和计算方法	208
7.3.2	影响综采事故的环境因素及关联度计算	211
7.3.3	结果分析	213
7.4	采煤工作面环境状况的模糊聚类分析	214
7.4.1	模糊聚类分析的基本思想和计算方法	215
7.4.2	采煤工作面环境状况的模糊聚类分析	216

7.5 改善采煤工作面环境状况的措施	220
7.5.1 降低瓦斯浓度的措施	221
7.5.2 温度、湿度的改善措施	234
7.5.3 降低井下噪声的措施	235
7.5.4 综采工作面粉尘的控制措施	236
7.5.5 改善工作面光照环境的措施	237
参考文献	239
8 综采工作面人-机-环境系统安全性综合评价	243
8.1 安全性综合评价概述	243
8.1.1 安全评价的目的	243
8.1.2 安全评价的意义	244
8.1.3 系统安全评价的原理	245
8.1.4 安全评价的原则	249
8.1.5 安全评价的程序	252
8.1.6 安全评价的内容	253
8.1.7 安全评价的限制因素	253
8.1.8 系统安全评价应注意的问题	255
8.1.9 安全评价的发展概况	255
8.2 安全性综合评价的定性方法	262
8.2.1 检查表式安全评价法	263
8.2.2 作业危险条件评价法	265
8.2.3 MES 评价法	268
8.2.4 MLS 评价法	268
8.3 灰熵综合评价模型	269
8.3.1 灰熵与灰熵增定理	270
8.3.2 均衡度	270
8.3.3 灰色关联度	270
8.3.4 单层次灰熵综合评价	271
8.3.5 多层次灰熵综合评价	272
8.4 基于熵权的 TOPSIS 方法	273

8.4.1	TOPSIS 方法概述	273
8.4.2	基于熵权的 TOPSIS 方法	274
8.5	模糊综合评价法	276
8.5.1	模糊数学的基础知识	276
8.5.2	模糊综合评价模型	278
8.6	基于 AHP - 可拓理论的综合评价模型	282
8.6.1	利用 AHP 确定评价指标的权重	282
8.6.2	可拓理论概述	288
8.6.3	安全性综合评价的物元模型	291
8.6.4	可拓综合评价模型	291
8.7	基于粗糙集 - 属性数学的综合评价模型	294
8.7.1	利用粗糙集理论确定评价指标的客观权重	294
8.7.2	基于属性数学的综合评价模型	296
8.8	基于神经网络的综合评价模型	301
8.8.1	人工神经网络的基本原理	301
8.8.2	基于 BP 神经网络评价的基本步骤	305
8.9	采煤工作面安全性灰熵综合评价	308
8.9.1	确定评价对象集	308
8.9.2	建立评价指标集	308
8.9.3	第二层次灰熵综合评价	310
8.9.4	第一层次灰熵综合评价	313
8.9.5	灰熵综合评价的结果分析	313
8.10	采煤工作面安全性 TOPSIS 评价	314
8.10.1	第二层次综合评价	314
8.10.2	第一层次综合评价	316
	参考文献	317

1 综合机械化采煤工作面人-机-环境系统安全性概述

人-机-环境系统工程 (Man - Machine - Environment System Engineering) 是 20 世纪 80 年代发展起来的, 研究人-机-环境系统最优组合的一门新兴的综合性技术科学。它从系统的总体出发, 研究人、机、环境各要素本身的性能和三大要素之间的相互关系, 以找到最佳组合方案, 使人-机-环境系统的总体性能达到最佳状态, 使系统“安全、高效、经济”。综合机械化采煤 (简称综采) 是现代化煤炭生产的主要采煤工艺, 是煤炭企业高产高效的出路之一, 同时也是一个人-机-环境系统, 由于综采面的环境条件比较恶劣, 各类事故发生较多, 严重影响和制约着煤矿的安全生产和效益的提高。因此, 应用人-机-环境系统工程理论, 研究综采工作面的安全性, 既具有重要的理论意义, 又具有重大的现实意义。

1.1 人-机-环境系统工程概述

1981 年, 在著名科学家钱学森的系统科学思想的启发和亲自指导下, 提出了人-机-环境系统工程的科学概念, 标志着这门新兴科学的形成^[2]。人-机-环境系统工程是在人机工程学 (Man - Machine Engineering) 的基础上发展起来的, 是研究人-机-环境系统最优组合的一门新兴的综合性边缘科学。它所研究的系统是由人、机和环境组成的一种复合系统。系统中的“人”, 是指作为工作主体的人, 既包括操作人员, 又包括管理人员; “机”是指人所控制的一切对象的总称, 如飞机、轮船、汽车、生产设备、工具等; “环境”是指人、机共处的特定条件, 包括社会环境、自然环境等^[1]。人、机、环境构成了系统的三大要素, 每个要素都是一个复杂的系统, 它们之间的信息传递、加工和控制就组成了一个非常复杂的人-机-环境巨系统。

1.1.1 人-机-环境系统工程的概念

人-机-环境系统工程是运用系统科学理论和系统工程方法,正确处理人、机、环境三大要素的关系,深入研究人-机-环境系统最优组合的一门科学。其研究对象为人-机-环境系统,通过研究人、机、环境三大要素之间的相互关系、相互作用,找到其最佳组合方案,使人-机-环境系统的总体性能达到最佳状态。

人-机-环境系统工程的特点是把人、机、环境看作是一个系统的三大要素,在深入研究三者各自性能的基础上,着重强调从全系统的总体性能出发,通过人、机、环境三者之间的信息传递、加工和控制,成为一个相互关联的复杂巨系统,并运用系统工程方法,实现系统的“安全、高效、经济”等综合指标^[3]。所谓“安全”,是指不出现人体的生理危害或伤害,并尽量减少事故的发生;所谓“高效”,是指全系统具有最好的工作性能或最高的工作效率;所谓“经济”,就是在满足系统技术要求的前提下,系统的建立要花钱最少,即保证系统的经济性。

1.1.2 人-机-环境系统工程与人机工程学的关系

1.1.2.1 人机工程学的定义

人机工程学(Man-Machine Engineering)是20世纪50年代初发展起来的、应用范围极其广泛的新兴的综合性边缘科学。人机工程学的名称,国际上还未统一。在美国称为人体工程学(human engineering);西欧称为人机工程学(ergonomics);苏联称为工程心理学(engineering psychology);日本则称为人间工学;有的国家也称为人类工程学或机械设备利用学等^[4]。目前,在我国使用较多的是人机工程学和工效学。

关于人机工程学的定义,各国人机学者的见解很不统一,目前尚无统一的定义。

美国人查理斯·伍德(Charles Wood)定义为:“设备设计必须适合于人的各方面因素,以便在操作上付出最小的代价而求得最高效

率”；而另一美国人伍德森（W. B. Woodson）则认为：“人机学是研究人与机器相互关系的合理方案，即对人的信息接受、操纵控制、人机系统的设计及其布置等进行有效的研究，其目的在于获得最高效率，使操作者在作业时安全舒适”；还有一些美国学者认为：“人机学是研究人和机器之间相互关系的边缘性科学”；“人机学是在综合各门有关人的科学成果基础上研究人的劳动活动的科学”。

英国人奥波纳（D. J. Osborne）认为：“人机学是一个混合物，它综合了解剖学、生理学、心理学、医学、物理学、生物力学和科学技术的成果、原理与数据，最大限度地应用于人机学，使操作者在作业时安全、高效、方便、舒适”；许多英国学者认为：“人机学是研究人和环境之间的相互关系的学科”。

苏联人机学者则定义为：“人机学是研究人在生产过程中的可能性、劳动的方式、劳动组织安排，从而提高人的工作效率；同时，创造舒适、安全的劳动环境，有益于劳动者的健康，使人从生理和心理上得到全面发展。”

国际人机工程学会（International Ergonomics Association，简称IEA）给人机学下的定义是：“研究人在工作环境中的解剖学、生理学 and 心理学等方面的各种因素，研究人、机器与环境系统中的交互作用着的各组成部分（效率、健康、安全、舒适等），在工作条件下，在家庭生活中，在闲暇时间内，如何达到最优化的问题的一门学科。”

综上所述，人机工程学的定义为：依据人的生理、心理特征，运用系统工程的原理和方法，利用科技成果、数据，去设计机，使机符合人的使用要求，改进环境，使环境对人无害，优化人-机-环境系统，使三者达到最佳配合，从而创造高效、安全、健康、舒适和方便的条件，以最小的劳动代价，换取最大的经济成果。

1.1.2.2 人-机-环境系统工程与人机工程学的关系

人机工程学主要研究内容包括人的效率与疲劳的关系，人在劳动过程中的生理变化和心理变化，人的作业适应性，人才选拔、技能训练，人的作业能力、各种器官功能的限度及影响因素，人机之间的配

合和功能分配,人机之间的信息沟通,作业环境对人的影响,人机系统的可靠性等。其目的就是要建立一个合理可行的方案,使人-机-环境系统达到最优化配合,充分发挥人与机的作用,做到人尽其力,机尽其用,环境尽其美,经济效益尽其好,使整个系统安全、高效、可靠,让人类在健康、舒适的环境中工作和生活。

人-机-环境系统工程是在人机工程学的基础上发展起来的,它所研究的内容除了人机工程学所研究的内容外,还研究人-机-环境系统总体性能等。它与人机工程学的最大区别在于对环境因素的看法和研究。人机工程学认为环境是孕育人的不安全行为和物的不安全状态的“土壤”,把环境作为一种干扰因素引入系统,环境对系统的总体功能构成不利的影响,从而要求在设计人机系统时,必须尽力消除环境对系统的不利影响。而人-机-环境系统工程抛弃了把环境作为干扰因素的消极观点,积极主张把环境作为系统的一个环节,一大要素,并按系统的总体要求对环境进行全面的规划和控制,深入研究人-环、机-环之间的关系和环境因素产生的机理。

1.2 国内外研究现状

19世纪80年代以前,处于原始人机学和经验人机学阶段。1884年德国人莫索(A. Mosso)进行的肌肉疲劳试验、1898年美国人泰勒(F. W. Taylor)进行的铁锹铲矿石试验和1911年美国人吉尔布雷斯(F. B. Gilbreth)进行的砌砖作业试验^[4]为人机工程学的诞生起到了前奏的作用。第一次世界大战期间,英国已孕育着人机学科的萌芽,1915年成立了军工工人健康委员会,其后成立了工业疲劳研究所。在第二次世界大战期间,武器的性能不断提高,威力不断增大,结构更加复杂,但是,人对武器不能适应,由于人的因素而导致的失败屡见不鲜。此时,人们开始认识到只有工程技术知识是不够的,人的因素在设计中是不可忽视的。于是人机学便应运而生了。

1950年2月,英国海军部召开的边缘学科会议正式通过了人机工程学这一学科,并成立了人机学研究协会。

1960年国际人机工程学会(IEA)成立,并于1961年在斯德哥尔摩召开了第一届国际人机学代表会议。到1988年已开过10届国际

代表会议。1975 年成立了国际人机工程学标准化技术委员会 (ISO/CT—159), 至 1986 年共制定了 8 个标准草案或建议, 发布了《工作系统设计的人类工效学原则》标准。

由于各国工业和科学基础不同, 对人机学的研究重点也有所不同。法国侧重于劳动生理; 捷克侧重于劳动卫生; 保加利亚侧重于人体测量; 苏联侧重于工程心理学; 英国侧重于环境影响; 而美国则侧重于工程技术。

在我国, 人机学研究起步较晚, 但近年来发展很快。许多院校开设了人机学课程, 建立了实验室, 已颁布了人机学标准十余项。1980 年, 机械工业系统成立了人机学会。

1981 年, 我国根据载人航天预先研究的实践, 在对国内外情况进行认真分析的基础上, 在钱学森系统科学思想的启发和亲自指导下, 概括提出了人-机-环境系统工程的科学概念, 标志着这门新兴科学的形成^[2]。

人-机-环境系统工程提出后, 我国先后在军工及其他有关部门得到了应用和发展^[5~7]。国内学术刊物如《自然杂志》、《国际航空》、《工业安全与防尘》等也发表了本科学的有关论文。在有影响的报刊上, 如《解放军报》、《中国科技报》、《北京科技报》和《国防科技要闻》等也有这门学科的内容简介和科技短文, 人-机-环境系统工程已逐渐被广大科技界所熟悉。

1984 年 10 月, 国防科工委成立了人-机-环境系统工程标准化技术委员会; 1987 年 4 月, 国防科工委成立了人-机-环境系统工程专业组; 1988 年 4 月, 北京航空航天大学成立了人-机-环境系统工程研究所; 1993 年 10 月, 中国系统工程学会人-机-环境系统工程专业委员会成立, 并于北京召开了第一届全国人-机-环境系统工程学术会议; 1995 年 8 月, 在湖南张家界召开了第二届全国人-机-环境系统工程学术会议。此后每两年召开一次全国性学术会议, 到目前为止, 已召开了 11 届学术会议。许多专家认为, 我国今后的研究方向应主攻环境医学工程、噪声生理、生命保障系统、劳动条件和人机学最佳化问题等。研究重点因所属专业而异, 工程技术部门侧重于产品人机学, 而安全技术和环保单位, 则侧重于安全人机学。

综上所述, 21 世纪 40 年代以前, 是人-机-环境系统工程的萌芽期; 40 年代至 70 年代, 是准备期; 80 年代初, 人-机-环境系统工程开始进入真正发展期。目前, 人-机-环境系统工程虽处于初期阶段, 但其研究足迹已深入到人类生活的各个领域, 如航空航天、兵器、电子、交通、劳动保护、体育^[8]、医学^[9]、机械^[10,11]、矿业^[12,13]等。

对于煤炭行业来说, 人-机-环境系统工程的研究和应用还处于起步阶段。虽然已开始了部分研究, 如人的不安全行为分析^[14]、井下环境对工效和安全的影响^[15]、可靠性方面的研究^[16]等, 但还没有人深入地研究某一系统的人、机、环境的特性以及人-机、人-环、机-环之间的关系和人-机-环境系统的总体性能。

1995 年, 中国矿业大学北京研究生部王岩、汪茹在矿井生产线基本可靠性模型的基础上, 采用随机过程理论和线性扩散理论, 较好地刻画了煤仓存煤量的连续性变化与采运设备运行和故障维修的状态离散性变化, 给出了基本模型可靠性的精确(解析)解。1995 年中国矿业大学徐志胜、韩可琦等人从综采放顶煤工作面人-机-环境系统入手, 阐述了人-机-环境系统的故障机理和系统运行机制, 用随机过程理论探讨了人-机-环境系统可靠性计算方法并做了定性的分析提高可靠性的方法。1996 年本课题组对矿井运输人-机-环境系统安全性进行了分析, 应用灰色理论对井下运输人与事故关系进行关联研究, 阐述了矿井运输人-机-环境系统故障机理, 建立了数学模型。1999 年湘潭工学院的朱川曲应用神经网络进行研究综采工作面人-机-环境可靠性。建立了神经网络人-机-环境模型并做了定性的分析提高可靠性的方法。2000 年太原理工大学的张贵军应用随机过程和系统控制论的分析方法对水平煤仓的可靠性进行了分析, 建立了新的分析模型, 为水平煤仓的控制提供了一种理论依据。

在人因可靠性分析方面, 以人的失误率预测技术(Technique for Human Error Prediction, THERP)为代表的第一代人因可靠性分析(Human Reliability Analysis, HRA)方法中人的可靠性模型, 基本上是描述作为人的绩效形成因子(Performance Shape Factors, PSFs)的函数的人的失误概率的一种线性模型^[17]。第二代 HRA 方法是在第