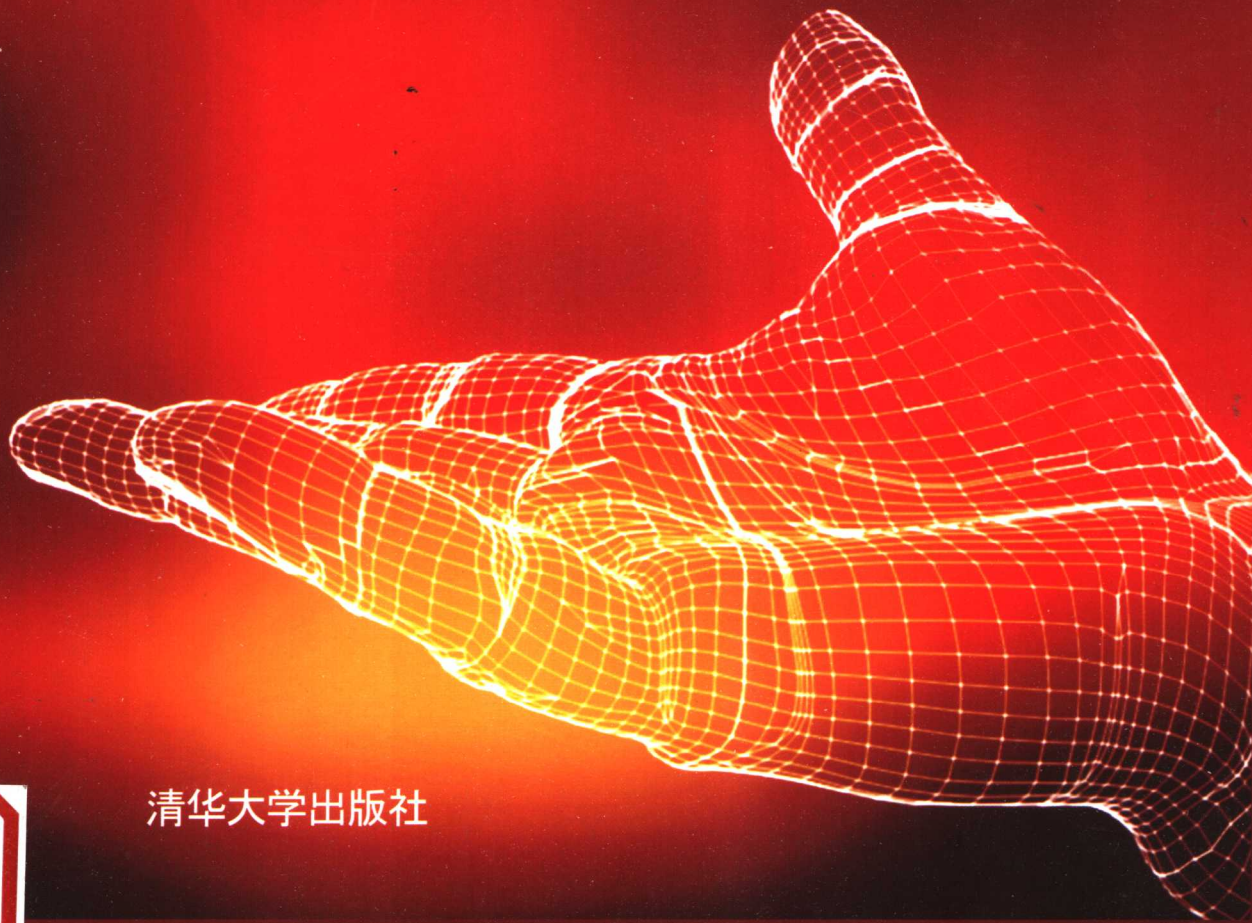
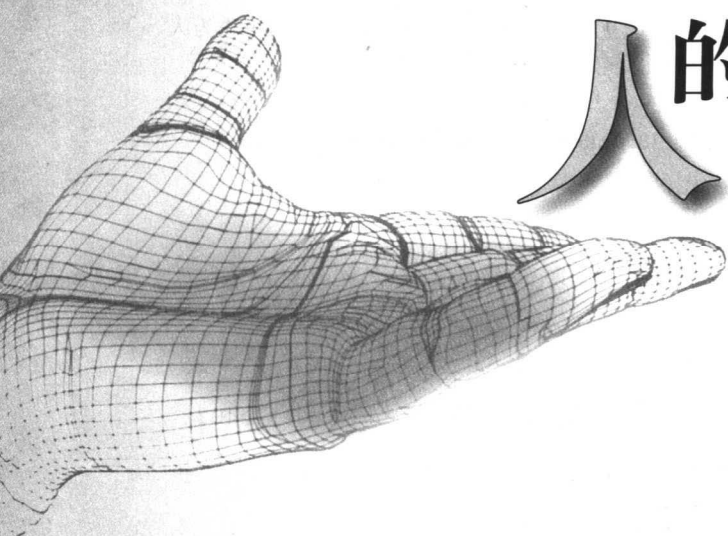


何旭洪 黄祥瑞 编著

工业系统中 人的可靠性分析： 原理、方法与应用



清华大学出版社



工业系统中 人的可靠性分析：

原理、方法与应用

何旭洪 黄祥瑞 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

随着科学技术的发展,人与机器间的关系更加密切了。研究人的失误,探讨人、机器和环境三者之间的相互关系,研究人与系统之间的相互关系,对人的可靠性提出定性分析与定量评价,已日益成为重要的研究内容。

本书是一本介绍人的可靠性分析理论、方法、实际应用以及最新研究进展的书籍。全书共 10 章。第 1 章概论;第 2~4 章讲述人的失误、人误的心理学分析以及人因工程学,这些是人的可靠性分析的基础;第 5 章系统介绍多种人的可靠性分析方法;第 6 章讲述概率安全评价中的人的可靠性分析过程,并给出人的可靠性分析的几个实例;第 7~10 章讲述人的可靠性分析的一些最新研究动态和内容。附录 A 和附录 B 给出 THERP 方法中的多个数据表格和数据分析流程。

本书可作为核电站、石油、化工等领域工作人员在定性和定量风险分析中的参考资料,也可作为人因工程、可靠性工程、安全科学、风险分析等方向的本科生、研究生的教材或参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

工业系统中人的可靠性分析:原理、方法与应用/何旭洪,黄祥瑞编著. —北京:清华大学出版社,2007.10

ISBN 978-7-302-15507-2

I. 工… II. ①何… ②黄… III. 工业工程—人机系统—可靠性—分析 IV. F402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 092021 号

责任编辑:张秋玲

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015

客户服务:010-62776969

印刷者:北京市清华园胶印厂

装订者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:19.25 字 数:435 千字

版 次:2007 年 10 月第 1 版 印 次:2007 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.80 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:024887-01

前言

随着科学技术的发展与进步,人与机器间的关系更加密切。任何系统、设备的设计、运行和管理都离不开人的参与。当代科学技术发展的特点是在系统高度分化的同时进行高度综合,系统的可靠性和安全性对于民众的生产与生活起着至关重要的作用。美国三哩岛核电站二号机组和前苏联切尔诺贝利核电站发生的严重事故,使人们更进一步认识到人的错误操作可能带来的严重后果。经验表明,一些严重事故都与人的失误(以下简称“人误”)直接有关。据非精确统计,人误行为对于系统的失效的作用大致为 60%~90%。因此,研究人误,探讨人与机器和环境三者的相互关系,强调研究人与系统之间的相互作用,对人的可靠性提出定性分析与定量评价,已成为当今工程界重要的研究内容。

自动化水平的提高,已经在很大程度上将人从繁重的体力劳动中解放出来,使人更充分充当设计、管理、控制和监视、故障排除者的角色。在一些高度自动化的复杂系统中,系统的正常运行并不需要人的干预。人的作用正在发生着变化。人的角色从能源输出变化为对自动化系统的监视和控制,因此系统更多地要求人具备诊断、评估、优化计划等处理复杂信息和做出综合决策的能力。自动化给生产过程带来了巨大效益,但同时也给人类带来了大量的隐患。高度的自动化、大量的信息降低了人的可认知性绩效,并隐藏了产生人误的机会。应急状态下一项任务中的微小疏忽,对于一项警告信号的忽视,一个短小的过程细节的跳跃,或者一项指令的错误理解,都有可能产生严重的后果,甚至导致付出许多生命的惨重代价。

在人们的日常生活中,也总是会产生许多错误。必须承认人的绩效中存在着不可避免的差异,当系统涉及人的行为/动作时,总是有可能发生偏离系统功能要求的差错,而不论人员的培训水平、经验与技术的高低如何。人们企图设计全部自动化的设备而完全避免人的参与,但这不但是不合理的也是不可行的。许多人误行为产生于系统设计中的不合理性,这为诱发失误提供了可能的条件。因此,为了提高人机系统的整体可靠性,必须系统、仔细地研究诱发人误的情景环境(context),并给予有效的限制和消除。

人的可靠性分析(human reliability analysis, HRA)是以分析、预测和减少与防止人误为研究核心,对人的可靠性进行定性与定量分析和评价的新兴学科。HRA 也可作为一种方法,用来对人机系统中人的可能性失误对系统正常功能的影响作出评价。因此,它也可视为一种预测性和追溯性的工具,用于系统的设计、改进或再改进,以便将重要的人误概率减少到系统可接受的最小限度。可以说, HRA 是在人因工程学与系统可靠性理论相结合的基础上发展起来的一门新的学科。

人的可靠性分析虽然已有 50 多年的发展历史,但仍处于不成熟的阶段。第一个人的可靠性定量分析是由美国 Sandia 国家实验室(Sandia National Laboratory, SNL)在 1952 年的一个武器系统可行性研究项目中开展的。1958 年,H. H. Williams 提出在系统可靠性预计中必须包括人的可靠性,否则预测的系统可靠性将不能代表实际的情况。1973 年国际电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)的《可靠性学报》发表了人的可靠性专集。从那以后,人的可靠性的分析和预计逐渐被重视起来。

由于 HRA 的重要性,很多国家非常重视改进 HRA 现有的不足,尤其在西方欧美国家。美国核管会(Nuclear Regulatory Commission, NRC)制定了一个长期的 HRA 研究计划,用于收集 HRA 数据、完善 HRA 方法;经合组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)和核能委员会(Nuclear Energy Agency, NEA)在挪威也有一个多国合作项目 Halden Reactor Project,目的是利用 Halden 人机工程实验室(Halden Man-Machine Laboratory, HAMMLAB)收集人误数据,并进行 HRA 模型的检验和确认;韩国最近在模拟机实验、数据收集方面有较大进展;日本则非常重视人误数据库的建立和核电站经验的整理以及人员执行型错误分析方法(a technique for human error analysis, ATHEANA)的实际应用;中国在 HRA 方面也开展了多年的研究,得到了国家自然科学基金多年的支持,并在模拟机数据采集、处理等方面取得了不少成绩,最近在 HRA 方法的比较、HRA 导则方面的研究工作正在进行。所有这些研究必将极大推动 HRA 的发展。

本书是一本介绍 HRA 理论、方法、实际应用以及最新研究进展的书籍。全书共 10 章。第 1 章概论;第 2~4 章讲述人的失误、人误的心理学分析以及人因工程学,这些是 HRA 的基础;第 5 章系统介绍多种人的可靠性分析方法;第 6 章讲述概率安全评价(probability risk assessment, PSA)中的 HRA 过程,并给出 HRA 的几个实例;第 7~10 章讲述 HRA 的最新研究动态和内容,包括执行型错误(error of commission, EOC)的研究、HRA 方法比较、模拟机数据收集和处理、减少 HRA 不确定性的研究;最后的附录 A 和附录 B,给出人员失误概率预测技术(technique for human error rate prediction, THERP)中的多个数据表格和数据分析流程。

本书是作者在多年来完成国家自然科学基金项目(79170048: 人的可靠性分析方法论及其在核安全研究中的应用;79370040: 人的失误及人的可靠性分析(HRA);79670048: 人的动态认知可靠性模型的理论及应用研究;70271008: 人的认知失误模型的理论及管理应用研究)、清华大学核研院基础研究基金项目(091110403: 概率风险评价技术中人的可靠性分析进展)的基础上编著而成的。

本书在写作过程中得到了多位同行、同事和学生的帮助。清华大学沈祖培教授、赵炳全教授、北京科技大学高佳教授与作者进行了多年的合作,对书籍写作作出了很大的贡献;美国资深控制室人因工程和 HRA 专家 Anthony J. Spurgin 提供了很多有用的资料;国家环保总局核安全中心的杨孟琢教授在模拟机实验中提供了帮助;秦山核电站的操纵员、PSA 人员、大亚湾核电站的 PSA 人员,多年来对作者的研究工作提供了大量帮助;南开大学张力教授、黄曙东副教授在本书的写作过程中给予了很大的鼓励;湖南工学院廖可

兵副教授对第4章的内容提出了很多宝贵建议并作了补充;斯堪伯奥(Scandpower)风险管理公司的陈海波博士、Jan T. Ludvigsen 给予了很大的理解和支持;清华大学的董节娟博士以及研究生赵瑞昌、付强也提供了很多帮助;清华大学出版社的张秋玲教授对书稿进行了大量的审核工作,在此一并表示感谢。

最后感谢家人的理解和支持。

由于作者水平有限,时间紧迫,错误实属难免,恳请读者批评指正。如有疑问,欢迎来信交流: xuhong.he@scandpower.com.cn。

何旭洪高级咨询师, Scandpower Risk Management China Inc.

黄祥瑞教授 清华大学

2007年5月于北京清华园

Preface

The relationship between human and machine is getting much closer along with the development of technical systems. Historically human has been involved in design, operating and managing all technical systems. Human has imagined and designed increasingly powerful technical systems that are complex integration of many specific disciplines. The reliable and safe operations of these complex technical systems are essential, considering the adverse consequences if a part of or a whole system is failed. Accidents in the history like the Three Mile Island nuclear power plant (NPP) unit 2 accident and Chernobyl catastrophe in former Soviet Union show that human error in the complex systems can cause severe consequences. Many experiences show that human errors are directly related to many accidents in the history. Hollnagel (1998) estimated that 60% ~ 90% system failures could be attributed to erroneous human actions regardless of the domain. Nowadays research topics such as human error, human-machine-environment, human machine interaction and human reliability analysis are becoming more and more important.

In modern society, human is greatly relieved from the labor works but is increasingly involved in design, monitoring, control and fault diagnosis of the automatic systems. Some highly automatic systems can perfectly run without any intervention in normal operations. The role of human is changing gradually from output of physical forces to a supervisor of automatic systems. Automatic systems in one hand can bring high efficiency in productions, but in the other hand may birth hidden troubles. In abnormal situations, operators may have too much information which might greatly impair their performance. In highly automatic systems, human error like an omission in task operation procedures or a ignoring of an alarm, a misunderstanding of procedure steps, combined with equipment failures, may have severe consequences and even cause loss of life.

In human normal life, making mistakes is common. Human performance has inevitable deviations and may cause error when the deviation is out of tolerance of the system. It is impossible to design a complete automatic system that can be operated without any human intervention. Even some system failures are caused by human errors in the early system design phase. Of course these errors are latent but will show in some contexts in later operations. Some contexts can be error-forcing contexts for operators and must be extinguished to improve the system reliability.

Human reliability analyses (HRA) is a hybrid discipline of human factors and

reliability aiming to analyse, predict, minimize and prevent human errors and to have qualitative and quantitative evaluation of human reliability in tasks. HRA can be a method to help evaluate the influence of human errors upon system. It can also be used as a retrospective and prospective tool to minimize human errors.

Although HRA has over 50-year history, it is still in its early stage. First HRA case was conducted by Sandia National Lab in 1952 in a weapon system reliability project. Williams H. H. in 1958 concluded that system reliability analysis must include human reliability analysis; otherwise the results would be underestimated. In 1973 IEEE Transactions on Reliability published a special issue on HRA. After that HRA received more and more attention in engineering and professional area.

Because of the importance of HRA, nuclear organizations in many countries put intensive resources to cope with the HRA shortcomings. US NRC has made a long term HRA research plan to collect human error data, validating and developing HRA methods and procedures. IFE in Norway has a HAMMLAB participating in Halden Reactor Project of OECD/NEA to analyse human performance through simulator and to validate HRA methods. Organizations in Korea have made much progress in operator experiments in simulators and data treatment. Organizations in Japan focus much in human error database and plant experience analysis. Researchers in China have conducted HRA for many years with supports of national science funds in the area of simulator experiments and HRA methods validation for PSA purpose. All these activities will greatly boost HRA development.

This book is an introduction of HRA theory, methods, applications and recent research development. It has 10 chapters. Chapter 1 is introduction of HRA. Chapter 2~4 are about human error, psychological basis of human error and human factors. These chapters are the basis of HRA. Chapter 5 lists various HRA methods about their module basis, analysis procedures and quantification databases. Chapter 6 illustrates HRA in the context of PSA and gives examples in nuclear industry and chemical industry. Chapter 7~10 are about HRA recent development like Error of Commission, HRA methods validation and evaluation, simulator operator response data treatment and measures for narrowing the uncertainties in HRA. Additionally this book provides two appendices that include HEP tables and search scheme in THERP HRA handbook.

This book is the results of years of research projects; National Natural Science Foundation of China (NSFC) project no. 79170048, HRA method and application in nuclear safety; NSFC project no. 79370040, human error and HRA; NSFC project no. 79670048, human dynamic cognitive model and its application; NSFC project no. 70271008, human cognitive error model theory and application; Tsinghua University fund project no. 091110403, HRA in context of PSA.

The authors would like to acknowledge all the people who helped during the

preparation of this book. Professor Zupei Shen, professor Bingquan Zhao from Tsinghua University, professor Jia Gao from Beijing Science and Technology University have cooperated with the authors for many years in HRA researches and greatly contributed to the preparation of this book. Anthony J. Spurgin provided very good information in his HRA lectures in Tsinghua University in 2005 and many discussions in the subsequent years. Professor Mengzhuo Yang from Nuclear Safety Center provided tremendous collaborations in operator simulator experiments. Operators and PSA technical persons from Qinshan NPP and Dayabay NPP have contributed for many years. Professor Li Zhang, Associate professor Shudong Huang from Nanhua University, Kebing Liao from Hunan Technology Institute, Dr. Haibo Chen and Jan T. Ludvigsen from Scandpower Risk management, Associate professor Jiejuan Tong from Tsinghua University; their helps and discussions are also greatly appreciated.

Graduate students Ruichang Zhao, Qiang Fu from Tsinghua University helped greatly in the preparation of manuscript of this book. Thanks should also be acknowledged to Professor Qiuling Zhang from Tsinghua University Press for the large amount of editing and proofreading.

Finally our special thanks are dedicated to our families for their patience and full hearted supports in the years of the writing of this book.

Xuhong He

Xuhong.he@scandpower.com.cn

Senior Consultant, Scandpower Risk Management China Inc.

Xiangrui Huang

Huangxr@tsinghua.edu.cn

Professor, Tsinghua University

May 2007, Beijing China

目 录

1 概论	1
1.1 人的因素的提出	1
1.2 人误事件引发的事故	2
1.3 人的可靠性分析的概念	5
1.4 人因工程与 HRA	6
1.5 HRA 的历史回顾	7
1.5.1 HRA 的初始阶段	7
1.5.2 HRA 的两个发展阶段	8
1.5.3 HRA 方法的发展过程	9
1.6 HRA 和 QRA	11
1.6.1 QRA	11
1.6.2 HRA 和 QRA 之间的关系	12
1.7 HRA 与人误数据库的开发	12
2 人的失误	13
2.1 人机系统	13
2.2 自动化与人机系统中的人误	14
2.3 人误的定义	16
2.4 人误与人的可靠性	18
2.5 人误的特点	19
2.5.1 人机系统中人与机器的差异	19
2.5.2 人误的随机性与重复性	20
2.5.3 人误往往是情景环境驱使的	21
2.5.4 人误的潜在性	22
2.5.5 人误的可修复性	22
2.5.6 人具有学习能力	23
2.5.7 人的容许限度	23
2.6 人误的分类	24
2.6.1 工程分类法	24

2.6.2	认知行为分类法	28
2.6.3	其他分类法	30
2.6.4	PSA 中的人误事件分类	32
2.6.5	显性失误与潜在失误	32
2.7	绩效形成因子	32
2.7.1	外部的绩效形成因子	33
2.7.2	内部的绩效形成因子	34
2.7.3	应激水平	34
2.7.4	绩效形成因子的选取	36
2.8	人误分析的编码故障树方法	38
2.8.1	事故原因类型编码	38
2.8.2	重大事故的编码故障树描述	38
2.8.3	总结	44
3	人误的心理学分析	46
3.1	人的心理系统的结构	46
3.1.1	感觉	46
3.1.2	知觉	48
3.1.3	意识和注意	49
3.1.4	记忆	50
3.1.5	思维	52
3.1.6	情绪	54
3.1.7	动机	55
3.1.8	人格	56
3.2	人的行为特征	57
3.3	人误的认知心理学	57
3.3.1	认知心理学	59
3.3.2	认知与认知过程	61
3.3.3	人的认知行为中的几项基本原理	61
3.3.4	人的意向与人误	64
3.3.5	通用失误模型系统	66
3.3.6	应用 GEMS 的核电站事故实例分析	73
3.3.7	应用 GEMS 的人与系统交互模拟	77
4	人因工程学	79
4.1	人机系统中人的特性	79
4.1.1	人的行为模型：S-O-R	79
4.1.2	人的基本功能	80

4.2	人机系统设计概述	81
4.2.1	人机系统功能分配	81
4.2.2	人机系统分析	83
4.3	人机系统感知部件的工效学设计	84
4.3.1	信息的种类与传递的信息特征	84
4.3.2	视觉显示与听觉显示的设计	85
4.3.3	人的感觉能力的心理反应限度	89
4.4	人机系统信息处理的工效学设计	91
4.4.1	按人的常规习惯的设计原则	91
4.4.2	按立体(空间)一致性的设计原则	91
4.4.3	按运动方向一致性的设计原则	92
4.4.4	反应时间——信息处理的延迟	92
4.5	人机系统的控制器部件的工效学设计	93
4.5.1	一致性原则	93
4.5.2	控制器的区分特性:编码	93
4.5.3	控制器位置的布置	95
4.5.4	失效-安全准则	96
4.6	环境条件	96
4.6.1	照明	96
4.6.2	温度和湿度	96
4.6.3	噪声与振动	97
4.6.4	计算机环境	98
4.7	典型中国标准:电力行业标准《控制中心人机工程设计导则》	99
4.7.1	概论	99
4.7.2	导则的主要内容	99
4.8	核电站操纵员心理评价研究	103
4.8.1	前苏联的相关研究	103
4.8.2	美国的相关研究	103
4.8.3	我国台湾的相关研究	104
4.8.4	我国内地的相关研究	104
5	人的可靠性分析方法	107
5.1	HRA 的发展历史	107
5.2	第一代 HRA 的缺点及第二代 HRA 的开发	111
5.3	人员失误概率预测技术	113
5.3.1	系统熟悉阶段	113
5.3.2	定性分析阶段	114
5.3.3	定量分析阶段	115

5.3.4	THERP 数据表格和分析流程	117
5.3.5	评论	118
5.4	ASEP HRA	118
5.4.1	背景	118
5.4.2	事故前筛选值定量化	119
5.4.3	事故前精确值定量化	119
5.4.4	事故后筛选值定量化	120
5.4.5	事故后精确值定量化	121
5.4.6	评论	124
5.5	人的认知可靠性模型	124
5.5.1	概述	124
5.5.2	HCR 的理论基础	126
5.5.3	HCR 的两种分布拟合函数	126
5.5.4	人机界面的类型	127
5.5.5	绩效形成因子的修正	129
5.5.6	HCR/ORE 模型的定量化分析过程	129
5.5.7	HCR 模型的应用实例	130
5.6	绝对概率判断法和成对比较法	131
5.6.1	绝对概率判断法	131
5.6.2	成对比较法	131
5.7	成功似然指数法	132
5.7.1	方法介绍	132
5.7.2	应用分析	133
5.8	人误评价与减少方法	134
5.8.1	筛选分析	134
5.8.2	定量化分析	134
5.8.3	评论	137
5.9	认知可靠性和失误分析方法	137
5.9.1	CREAM 的基本理论	137
5.9.2	CREAM 追溯分析方法	138
5.9.3	三哩岛核事故中人误根源原因追溯分析	141
5.9.4	CREAM 预测法	143
5.9.5	三哩岛核事故中人误事件的定量分析	145
5.9.6	小结	147
5.10	ATHEANA 方法	148
5.10.1	分析步骤	149
5.10.2	实例分析	151
5.11	全决策树法	152

5.11.1	背景	152
5.11.2	基本原理	152
5.11.3	实施 HDT 分析的步骤	154
5.11.4	前期工作	154
5.11.5	选择影响人员行为的因素	155
5.11.6	得出各个影响因子的重要性顺序	157
5.11.7	全决策树的构造	157
5.11.8	选择品质因子和鉴定影响因子的重要性等级	158
5.11.9	选择品质描述值	158
5.11.10	选定人误概率标定值	158
5.11.11	计算人误概率值	158
5.12	标准化核电站风险分析 HRA 方法	159
5.12.1	方法描述	160
5.12.2	应用实例	163
5.12.3	评论	164
5.13	CES 方法	165
5.14	IDA 和 IDAC 模拟方法	165
6	概率安全评价中的 HRA	167
6.1	PSA 中的 HRA 分析基础	167
6.1.1	PSA 的概念	167
6.1.2	PSA 中的人员动作类型	168
6.1.3	人员动作在 PSA 中的位置	170
6.1.4	PSA 中 HRA 分析的基本框架	171
6.1.5	HRA 的要求	172
6.2	始发事件前的 HRA 分析	175
6.2.1	定义——类型 A 动作的识别	176
6.2.2	筛选	178
6.2.3	定性分析	178
6.2.4	表征	179
6.2.5	模型结合	179
6.2.6	量化	180
6.2.7	文档记录	181
6.3	引起始发事件的 HRA 分析	181
6.3.1	定义——类型 B 动作的识别	181
6.3.2	筛选	182
6.3.3	定性分析	182
6.3.4	表征	182

6.3.5	模型结合	182
6.3.6	量化	182
6.3.7	文档记录	183
6.4	始发事件后的 HRA 分析	183
6.4.1	定义——类型 C 动作的识别	184
6.4.2	筛选	186
6.4.3	定性分析	187
6.4.4	表征	187
6.4.5	模型结合	188
6.4.6	量化	188
6.4.7	文档记录	189
6.5	相关性分析、不确定性范围估计和敏感性分析	190
6.5.1	相关性分析	190
6.5.2	不确定性范围估计	193
6.5.3	敏感性分析	201
6.6	HRA 实际案例分析	204
6.6.1	始发事件前的人误事件分析	204
6.6.2	始发事件后的人误事件分析	206
6.6.3	化工厂关断操作中的 HRA 分析	215
7	执行型错误分析	217
7.1	执行型操作的概念	217
7.2	EOC 研究和应用的现状	218
7.3	进行 EOC 分析的 HRA	219
7.3.1	CESA 方法简介	220
7.3.2	分析步骤	220
7.3.3	实例分析	221
7.4	小结	225
8	HRA 方法比较分析研究	227
8.1	HRA 方法的选择	227
8.2	HRA 方法的比较标准	229
8.3	HRA 方法的比较结果	230
9	模拟机数据处理方法研究	232
9.1	人的不响应概率统计分析理论	232
9.1.1	威布尔分布拟合	232
9.1.2	对数正态分布拟合	232

9.2 模拟机实验数据的处理结果	233
9.2.1 预处理	233
9.2.2 数据处理	234
9.2.3 模拟机实验数据分析	238
9.2.4 σ 的估计值	239
9.3 σ 的影响分析	239
9.4 参数拟合方法的改进	241
9.5 秦山模拟机实验的威布尔参数与国外实验结果的比较	243
9.6 结论	244
 10 减少 HRA 不确定性的研究	246
10.1 概述	246
10.2 HRA 不确定性的来源	247
10.3 减少 HRA 不确定性的措施	248
 附录 A THERP 数据表格	250
 附录 B THERP 表格数据分析流程	265
 缩略词表	269
 参考文献	273

Contents

1	Introduction	1
1.1	Raise of Human Factors Issues	1
1.2	Accidents Caused by Human Errors	2
1.3	What Is HRA	5
1.4	Human Factors and HRA	6
1.5	HRA History	7
1.5.1	HRA in the Begining	7
1.5.2	Two Development Stages in HRA History	8
1.5.3	Development of HRA Methodologies	9
1.6	HRA and Quantitative Risk Analysis	11
1.6.1	Quantitative Risk Analysis (QRA)	11
1.6.2	HRA and QRA	12
1.7	HRA and Human Error Database	12
2	Human Error	13
2.1	Man-Machine System	13
2.2	Automatic Systems and Human Errors	14
2.3	Human Error Definition	16
2.4	Human Error and Human Reliability	18
2.5	Characteristics of Human Error	19
2.5.1	Differences of Human and Machine in Man-Machine System	19
2.5.2	Randomness and Repetition of Human Error	20
2.5.3	Context Driven Human Error	21
2.5.4	Latent Human Error	22
2.5.5	Amendable Human Error	22
2.5.6	Learning Ability of Human	23
2.5.7	Human Tolerance Limits	23
2.6	Classification of Human Error	24
2.6.1	Engineering Classification	24
2.6.2	Cognitive Classification	28
2.6.3	Other Classifications	30
2.6.4	Types of Human Errors in PSA	32
2.6.5	Latent Error and Active Error	32