



普通高等教育“十二五”规划教材
安全工程专业

人机环境安全工程原理

RENJI HUANJING ANQUAN GONGCHENG YUANLI

王保国 黄伟光 王凯全 张力 张麟 © 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

014041168

TB18
78

普通高等教育“十二五”规划教材·安全工程

人机环境安全工程原理

王保国 黄伟光 王凯全 张力 张骞 编著



北航

C1729446

中国石化出版社

TB18/78

881110210

内 容 提 要

本书以钱学森先生的系统学以及人体科学、安全科学为理论基础,强调人、机、环境三大要素的数学建模以及相互间的联系与制约,强调人、机、环境总体性能的评价与预测,并检验是否对生态系统造成干扰。全书坚持少而精的原则,阐述了人、机、环境以及安全工程的基本原理,人因失误与事故分析以及人机环境安全工程的新发展等内容。

本书可作为普通高等教育理工类安全工程、人机与环境工程、系统工程、工业工程、化工、采矿、交通运输、航空航天以及管理科学与工程等专业的本科生教材,也可供有关教师、科技人员以及研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

人机环境安全工程原理/王保国等编著. —北京:
中国石化出版社,2014.3
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5114-2647-5

I. ①人… II. ①王… III. ①人-机系统-安全工程-
高等学校-教材 IV. ①TB18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 025751 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 384 千字

2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

定价:40.00 元

《普通高等教育十二五规划教材·安全工程专业》

编写指导委员会

(以姓氏笔画为序)

王凯全	王保国	田 宏	刘 茂
吕保和	吴宗之	张 力	邵 辉
陈国华	陈网桦	钮英建	柳静献
蒋军成	蔡凤英	廖可兵	

总序

安全是人的身心免受外界因素危害的存在状态(即健康状况)及其保障条件。

人类在社会历史发展的漫长进程中,对安全认识的过程经历了自发安全认识、局部安全认识两个阶段。到20世纪初,随着工业生产高度系统化带来了复杂的安全问题,人们开始进入系统安全认识阶段。在20世纪中叶,在工业工程和生产技术工程人员中出现了运用系统安全认识的技术理论解决种种安全问题的、专职的安全技术人员。与后来的安全系统认识相对应,安全科学学科理论创建的标志是1981年德国锅炉专家库尔曼用德文出版《安全科学导论》一书,指出:“应该将安全科学看作是相互渗透的跨学科的科学分支”,“研究技术应用中的可能危险产生的安全问题。”1983年日本井上威恭教授将生产过程中的种种安全技术理论概括为安全工程学。1985年我国召开全国劳动保护科学体系第二次学术讨论会,笔者公开发表了《从劳动保护工作到安全科学之二——关于创建安全科学的问题》等论文,开始了安全科学学科理论的创立与实践,并获得重大成果,得到学术界认可。中国科协主席、工程院院长朱光亚的评价是:“……在我国1993年7月1日开始实施的国家标准《学科分类与代码》中,实现以‘安全科学技术’为名列为标准的一级学科(代码620),为在学科科学分类中打破自然科学与社会科学的界线,设置‘环境、安全、管理’综合学科,从而在世界科学学科分类史上取得了突破,做出了贡献。”以此为基础,开始了从系统安全理论认识向安全系统理论即安全学科理论认识的升华,进入了安全科学学科理论的创立与实践的关键时期。

系统安全认识是对安全存在领域的认识,即对安全的外延和静态的认识。而安全系统认识是对安全自身作为相对独立系统的认识,该系统由安全的学科科学(即是对安全自身的本质及其运动变化规律的理论)、应用科学(解决安全实践问题的方法、手段、措施的理论)和专业科学(是将学科科学理论转变为应用科学理论的桥梁和载体)三种科学学科及一个特定问题研究(如安全事故研究)四个方面构成。

安全系统认识是对安全的本质、运动变化规律及其保障条件的认识,是人类

对安全从现象到本质的理论认识规律上的一次科学革命。安全科学学科理论的创立则是安全科学革命成功的标志,体现了人类进入对安全本身的内涵结构、功能及其完整的理论体系认识的新阶段。

安全系统本身需要有结构保障作为条件,其结构理论是“‘安全三要素四因素’系统原理”。安全的保障条件表现为安全科学技术体系结构,这个体系结构的横向是安全人体学、安全物质学、安全社会学、安全系统学四个分支学科;纵向是由安全哲学(桥梁安全观)、安全学(安全基础科学)、安全工程学(安全技术科学)、安全工程(安全工程技术)三个台阶四个层次构成。

创立安全科学理论的基础是“科学哲学思想、系统科学方法、科学学的内容与框架。”

由于安全科学学科理论的创立,致使在我国科教六大部门中获得了一级地位,分别为一级学术团体、《国家图书馆分类法》一级类目、一级学术刊物《中国安全科学学报》、国家标准《学科分类与代码》安全科学技术一级学科(代码620)、单列安全工程师技术资格和经历32年的艰辛历程,终于在2011年2月经国务院学位委员会第二十八次会议通过的《学位授予和人才培养学科(专业)目录》中将“安全科学与工程”单列为工学门类的第37个一级学科,标志着安全科学学科、专业高等教育进入新阶段。如何完善和加强安全类专业基础理论教材建设已是当务之急,此次中国石化出版社邀请教育部高等学校安全工程学科教学指导委员会部分同志及关心安全类专业教材建设的同志组织编写《普通高等教育“十二五”规划教材·安全工程专业》,以构建“安全科学与工程”一级学科、专业相匹配的安全科学技术体系基础理论教材,提升“安全科学技术”学科科学教育水平,培养高素质的安全工程技术及管理人才,满足国民经济和社会的安全科学发展的需求,是一项值得称道的具有重要意义的善举。

我作为一名安全科教工作35年的老兵,亲历了在我国成功创立安全科学技术一级学科,自始至终参加“安全科学与工程”一级学科、专业目录的创立,经历了艰难而曲折的历程,深感当今安全科学和学科建设与发展局面来之不易。今天有幸与大家共享成果,倍感欣慰。如今虽已80老朽,仍愿继续在安全科教发展的道路上尽自己绵薄之力。

刘潜

2013年10月于北京

序 言

十分高兴地推荐由王保国等五位教授共同编著的《人机环境安全工程原理》一书,这是目前国内在人-机-环境系统与安全科学领域的框架下首次将“环保”纳入系统总体性能评价四项指标的书籍,也首次提出在评价人-机-环境系统总体性能时要对生态系统是否受损进行检验。全书坚持少而精的基本原则,概念准确、论述严谨,很好地涵盖了人-机-环境系统工程的主要内容,是一部非常优秀的人机领域的教科书。

五位作者都是在教学和科研上耕耘几十年的教授和学科带头人。本书第一作者王保国教授现任中国人类工效学学会副理事长、人机工程专业委员会主任,著有《安全人机工程学》、《工程流体力学》、《高超声速气动热力学》等11部著作与教材,并先后就职于清华大学力学系和北京理工大学宇航学院,担任教授、博士生导师与学科带头人。1987年与1989年王保国先生两次荣获中国科学院重大成果奖,1993年荣获国家劳动人事部首届全国优秀博士后奖,1995年与1998年两次荣获清华大学教学优秀奖,1998年荣获英国剑桥杰出成就奖(Gold Star Award),2000年荣获美国Barons Who's Who颁发的New Century Global 500 Award奖,2007年荣获“北京市教学名师”荣誉称号,2011年10月22日在钱学森先生创建的全国人-机-环境系统工程学术研究30周年大会上,他荣获“人-机-环境系统工程研究个人终身成就奖”(全国两名获奖人之一)。第二作者黄伟光教授现任中国科学院上海高等研究院副院长、研究员,曾任中国科学院工程热物理研究所所长以及国家重点基础研究(973计划)项目首席科学家、曾两次荣获“国家级科技进步二等奖”、一次荣获“国家级自然科学二等奖”,著有《气体动力学》、《高超声速气动热力学》和《人机环境安全工程原理》等著作与教材,兼任北京理工大学特聘教授、中国人类工效学学会常务理事、人机工程专业委员会副主任。第三作者王凯全教授曾任常州大学校纪委书记多年,并至今一直是校安全学科带头人,著有《事故理论与分析技术》、《石油化工安全技术》、《安全心理学》和《石油化工流程的危险辨识》等多部著作与教材。第四作者张力教授现任湖南工学院校长、校安全学科带头人、中国人类工效学学会管理工效专业委员会主任,著有《安全人机工程学》、《概率安全评价中的人因可靠性分析技术》和《人机环境安全工程原理》等多部著作与教材。第五作者张骞教授现任华北科技学院副校长、校安全学科带头人、教育部高等学校安全工程教学指导委员会委员,著有《管理

学》、《运营管理》和《人机环境安全工程原理》等多部著作与教材。五位教授均在著书立说方面拥有丰富的经验、他们强强联合、共同编著了这部富有特色的《人机环境安全工程原理》教材，供高校与科研院所相关专业的师生们与研究人员使用。

人-机-环境系统工程专业委员会主任
北京理工大学教授、博士生导师

杨 升 昭

2012 年 12 月 12 日

前言

由王保国、王新泉、刘淑艳和霍然四位教授共同编著的《安全人机工程学》已于2007年7月在机械工业出版社出版发行。几年来,这部书虽然进行了四次印刷,但仍供不应求,深得广大读者们的厚爱,被机械工业出版社评为“最受读者欢迎的优秀畅销图书”并颁发了优秀图书证书。随着人类生态环境系统的不断恶化,近年来人们开始认识到人类的生存潜伏着不安全问题,逐渐认识到人与大自然和谐共存的重要性。本书正是在这个大社会环境下由北京理工大学宇航学院高超声速气动热力学与人机环境系统工程中心(简称高速气动热与人机工程中心)主任、中国人类工效学学会副理事长、人机工程专业委员会主任、北京市教学名师王保国教授,中国科学院上海高等研究院副院长、中国人类工效学学会常务理事、人机工程专业委员会副主任、北京理工大学特聘教授黄伟光先生,常州大学校纪委书记、安全学科学术带头人王凯全教授,湖南工学院校长、中国人类工效学学会管理工效专业委员会主任张力教授和华北科技学院副校长、中国人类工效学学会理事、安全学科带头人张麟教授在《安全人机工程学》的基础上进一步更新加工与提炼,五位教授共同编著了这部《人机环境安全工程原理》教材供相关专业的本科生与研究生使用。本书第1~4章介绍了人机环境安全工程概论与人、机、环境三要素的特性,包括人机环境安全工程概论及其研究方法;人机环境系统中人的基本特性和模型;机的特性及其人机界面的安全设计;环境的特性及其作业空间环境的设计。第5章为人因失误以及人因事故分析与预防,即人因失误以及人因事故的分析方法。第6~8章为人机环境系统的评价、性能预测和学科的发展,它们分别为人机环境系统模型的构建及其系统评价方法;人机环境系统性能的预测;人机环境安全工程的新发展。全书十分注重对人、机、环境三大要素进行数学建模,十分强调对人机环境系统总体性能的评价与预测方法的探索;在对人机环境系统进行常规总体性能评价时,还特别注意检查是否对生态系统产生干扰作用。书中强调指出:在人机环境系统总体性能评价的四项指标中,“安全”与“环保”要比“高效”与“经济”更重要。除此之外,该书还有三大亮

点：①突出钱学森先生人机环境系统工程的观点，用钱先生系统学中的理论去处理复杂人机系统的问题；②突出安全生产、清洁生产、重视对劳动者个体的保护；③突出对人类环境生态系统健康问题的高度关注。人类在进行各种有序生产活动中，要时刻树立起全人类只有一个赖以生存的地球家园的基本理念，要努力去实现人与大自然的和谐共存。

编写中，我们始终坚持少而精的原则。力求体系完整、逻辑性强、适应面广，使初学者能够尽快掌握这门课程的核心理念，力图达到易上手、会应用的基本目的。五位作者万分感谢中国系统工程学会人-机-环境系统工程专业委员会主任、博士生导师龙升照教授对本书编写所给予的关心与支持，感谢他在百忙中细致审阅了本书的书稿并提出了十分宝贵的指导意见。

本书可作为普通高等教育安全工程类专业、人机与环境工程类专业、系统工程专业、工业工程类专业、化工类专业、采矿类专业、交通运输和航空航天以及管理科学与工程类专业本科生的教材，也可供有关教师、科技人员以及研究生参考。

由于本书涉及面广、加上作者的水平有限，书中可能会存在一些缺点与不足，敬请各位专家及广大读者批评指正。

2.5.2	精神紧张与躲险动作	(42)
2.5.3	人为差错	(45)
2.6	人的热调节数学模型以及热应激与冷应激反应	(48)
2.6.1	人体热调节系统的控制框图	(49)
2.6.2	被控分系统数学模型——人体生物热方程	(51)
2.6.3	控制分系统数学模型——人体热调节的生理学模型	(53)
2.6.4	热应激时的人体生理反应	(56)
2.6.5	冷应激反应时人体的生理反应	(56)
2.6.6	高温对人体以及作业带来的影响	(58)
2.6.7	低温对人体以及作业带来的影响	(59)
2.7	人的热舒适模型及其评价指标	(59)
2.7.1	人体与周围环境的热交换以及热平衡方程	(59)
2.7.2	范格的热舒适方程	(65)
2.7.3	人的热感觉以及相关的评价指标	(69)
2.8	人的行为控制与决策模型	(76)
2.8.1	人的行为控制模型	(76)
2.8.2	人的决策模型	(83)
2.9	人的可靠性模型及其研究方法	(83)
2.9.1	基本可靠性指标以及常用的概率分布函数	(84)
2.9.2	连续作业时人的可靠性模型	(87)
2.9.3	不连续作业时人的可靠性模型	(88)
2.9.4	人的可靠性研究方法	(88)
2.9.5	人的可靠性的基本数据	(90)
	习题	(92)

第3章 机的特性及其人机界面的安全设计

3.1	机的动力学特性分析	(95)
3.1.1	可操作性的三个特征	(95)
3.1.2	机的特性描述及其动力学特性分类	(96)
3.1.3	可操作性的比较	(98)
3.2	机的易维护性以及机的本质可靠性	(99)
3.2.1	易维护性的设计原则	(99)
3.2.2	基本维修性指标	(100)
3.2.3	有效性特征量	(103)

目 录

第 1 章 人机环境安全工程概论及其研究方法

1.1 系统科学的体系和系统学	(1)
1.2 人机环境系统与人机环境系统工程	(2)
1.3 人机工程学和人机环境安全工程	(3)
1.4 人机环境安全工程原理的主要研究内容及其研究方法	(4)
习题	(5)

第 2 章 人机环境系统中人的基本特性和模型

2.1 人的物理特征	(7)
2.1.1 人的几何特征	(7)
2.1.2 人体模板的构建	(18)
2.1.3 人的力学特征	(20)
2.1.4 人的其他物理学特征	(23)
2.2 人的生理特征	(26)
2.2.1 人的感觉与知觉特性	(26)
2.2.2 人的生理适应性	(29)
2.2.3 人的生理节律性	(30)
2.3 人的心理特征	(31)
3.3.1 人的心理过程	(31)
2.3.2 人的个性	(32)
2.4 人的作业能力与疲劳分析	(32)
2.4.1 作业时人体的调节与适应	(33)
2.4.2 作业能力的动态分析	(37)
2.4.3 作业疲劳及其测定方法	(38)
2.5 人的自然倾向以及人为差错	(41)
2.5.1 习惯与错觉	(41)

3.2.4	机的本质可靠性	(104)
3.3	视觉、听觉显示器及其设计	(106)
3.3.1	信息显示方式的类型及其功能	(107)
3.3.2	显示方式的选择方法与原则	(109)
3.3.3	显示器设计的基本原则	(109)
3.3.4	视觉显示器的设计	(110)
3.3.5	听觉显示器的设计	(111)
3.3.6	信号灯与符号标志的设计	(113)
3.4	控制器的设计	(114)
3.4.1	控制器的类型及其适用范围	(114)
3.4.2	控制器设计的人机工程学因素	(117)
3.4.3	手动与脚动控制器的设计	(120)
3.5	显示器与控制器之间的工效学设计	(122)
3.5.1	显示器和控制器的布局设计原则	(122)
3.5.2	视觉显示器的布置	(123)
3.5.3	控制器的布置	(124)
3.5.4	显示器与控制器的配合	(124)
3.6	安全防护装置的作用与设计原则	(125)
3.6.1	安全防护装置的作用与分类	(125)
3.6.2	安全防护装置的组成	(126)
3.6.3	安全防护装置的设计原则	(126)
3.6.4	典型安全防护装置的设计	(127)
3.7	人机系统的功能匹配	(127)
3.7.1	人机功能关系	(128)
3.7.2	人机系统设计的基本要求和要点	(134)
	习题	(137)

第4章 环境的特性及作业空间环境的设计

4.1	环境的分类以及环境的基本特性	(140)
4.1.1	环境的分类及其一般特性	(140)
4.1.2	地球大气层环境的基本特性	(141)
4.1.3	力学环境的基本特性	(142)
4.1.4	声学环境的基本特性	(146)
4.2	作业空间设计及其分析	(147)
4.2.1	行动空间	(147)

4.2.2	心理空间	(148)
4.2.3	活动空间	(149)
4.2.4	作业空间分析	(149)
4.3	工作座椅的静态舒适性设计	(151)
4.3.1	舒适坐姿的生理特征	(151)
4.3.2	工作座椅设计的主要准则与基本要求	(153)
4.4	照明	(153)
4.4.1	照度标准与照明设计	(153)
4.4.2	环境照明对工效的影响	(155)
4.5	噪声与振动	(156)
4.5.1	噪声的危害以及噪声控制措施	(156)
4.5.2	振动	(160)
4.6	微气候环境	(162)
4.6.1	高温作业环境及其改善措施	(162)
4.6.2	低温作业环境及其改善措施	(163)
4.7	职业危害以及职业安全	(164)
4.7.1	有毒环境的卫生标准	(164)
4.7.2	瓦斯及其防治	(168)
4.7.3	矿尘的危害及其防治	(170)
4.8	航空航天作业中的辐射及其防护	(171)
4.8.1	宇宙辐射的生物效应	(171)
4.8.2	宇宙辐射的防护	(176)
4.9	环境生态系统健康的概念及其主要研究内容	(178)
4.9.1	生态系统健康概念的提出以及3次重要的国际会议	(178)
4.9.2	生态系统健康概念的内涵	(178)
4.9.3	生态系统健康学的重要研究内容	(179)
	习题	(179)

第5章 人因失误以及人因事故的分析方法

5.1	人因失误事故模型	(181)
5.1.1	人因失误的定义及分类	(181)
5.1.2	人因事故的基本特性	(183)
5.1.3	事故因果理论	(183)
5.1.4	能量意外转移理论	(186)

5.1.5	轨迹交叉理论·····	(187)
5.1.6	基于人体信息处理的人因失误事故模型·····	(188)
5.1.7	事故的统计规律与预防原则·····	(189)
5.2	复杂人机系统中操作人员失误的分析·····	(190)
5.2.1	HRA 的三种行为类型以及复杂人机系统中操作人员的认 知行为模型·····	(190)
5.2.2	诱发人因事故的主要因素·····	(194)
5.2.3	人因失误的结构模型·····	(196)
5.2.4	人因事故根原因分析方法·····	(196)
5.3	人可靠性分析方法的选择及其比较标准·····	(199)
5.3.1	HRA 方法的选择·····	(199)
5.3.2	HRA 方法的比较标准·····	(201)
5.4	人因事故的预防·····	(202)
5.4.1	人的能力及状态·····	(202)
5.4.2	人因失误的预防·····	(202)
	习题·····	(204)

第 6 章 人机环境系统模型的构建及其系统评价方法

6.1	构建人机环境模型的 3 个理论及总体性能 4 项评价指标···	(205)
6.1.1	控制论与模型论·····	(205)
6.1.2	优化论以及 Nash - Pareto 优化策略·····	(207)
6.1.3	总体性能的 4 项评价指标·····	(210)
6.1.4	总体性能各指标的评价·····	(210)
6.2	系统建模与辨识方法·····	(212)
6.2.1	系统建模的要求与原则·····	(212)
6.2.2	描述系统模型的几类数学方法·····	(213)
6.3	层次分析评价法(AHP)·····	(214)
6.3.1	建立层次结构模型·····	(214)
6.3.2	构造判断矩阵·····	(215)
6.3.3	层次单排序及其一致性检验·····	(216)
6.3.4	层次总排序及其一致性检验·····	(217)
6.3.5	层次分析法的计算过程·····	(218)
6.4	系统的模糊分析评价法·····	(223)
6.4.1	模糊关系及其运算·····	(223)
6.4.2	模糊综合评判·····	(225)

6.5	故障树分析法	(229)
6.5.1	故障树分析的内容与作用	(230)
6.5.2	故障树的建造与规范化	(230)
6.5.3	故障树的定性分析	(235)
6.5.4	故障树的定量分析	(236)
6.6	人机系统的可靠性分析与计算方法	(237)
6.6.1	人机系统可靠性分析的简易模型	(237)
6.6.2	事件树分析法	(242)
6.6.3	事件树分析法与故障树分析法的综合应用	(246)
6.7	环境生态安全评价模型以及生态预报的概述	(249)
6.7.1	PSR 模型	(249)
6.7.2	指标体系的建立和评价指标函数的构建	(250)
6.7.3	生态安全指数的判断标准以及模型评价结果的分析	(252)
6.7.4	生态预报的内涵	(254)
6.7.5	近期生态预报研究的重要领域	(255)
6.8	清洁生产的评价等级及其评价方法	(256)
	习题	(256)

第 7 章 人机环境系统性能的预测

7.1	人机环境系统性能预测的智能算法	(259)
7.1.1	小波神经网络的训练学习过程	(260)
7.1.2	模糊神经网络的训练学习过程	(261)
7.1.3	两个典型算例	(262)
7.2	灰色系统性能的预测	(266)
7.2.1	灰色系统建模与预测	(266)
7.2.2	$GM(1, N)$ 模型	(267)
7.2.3	典型算例——模型建立及关联度计算	(269)
7.2.4	灰色系统的预测	(274)
	习题	(276)

第 8 章 人机环境安全工程的新发展

8.1	数字化人机环境安全工程	(278)
8.1.1	数字化人的体态模型	(278)

8.1.2	人机环境系统的建模与分析·····	(279)
8.1.3	人机环境系统工程的评价系统·····	(279)
8.2	信息化人机环境安全工程 ·····	(279)
8.2.1	协同工作中的人与人间的交互·····	(280)
8.2.2	基于信息交互的界面设计·····	(280)
8.3	虚拟场景下人机环境安全工程 ·····	(281)
8.3.1	虚拟场景下人机工程的设计以及工效学的评价·····	(282)
8.3.2	人机工程学模型系统的研制与应用·····	(283)
8.4	智能化人机环境安全工程 ·····	(283)
8.4.1	人的智能模型·····	(283)
8.4.2	人机智能结合的必要条件·····	(284)
8.4.3	人机交互作用以及计算机的智能结构·····	(285)
8.5	新形势下人机界面技术的新发展 ·····	(286)
8.6	清洁生产、循环经济以及健康环境生态系统的构建 ·····	(288)
8.6.1	清洁生产与循环经济·····	(288)
8.6.2	循环经济的7大基础原则以及“3R”原则的优先顺序 ·····	(291)
8.6.3	可持续发展评价的指标体系概述·····	(292)
8.6.4	干扰与受损的生态系统以及生态恢复·····	(293)
	习题 ·····	(295)
	参考文献 ·····	(297)