



X912.9  
W-148

高等教育安全工程系列“十一五”规划教材

# 安全人机工程学

王保国 王新泉 刘淑艳 霍 然 编著  
龙升照 主审



机械工业出版社

本书以安全科学、系统科学和人体科学为核心,强调人、机、环境三大要素之间的相互关联与制约,十分重视基本概念、基本原理、基本方法的阐述,强调内容的科学性、系统性、新颖性。全书共12章,涵盖了以下五大方面的内容:人的特性及其数学模型;机的特性以及人机界面的设计;环境特性以及作业空间的设计;人一机—环境系统的总体性能分析与安全评价计算;安全人机工程学基础理论的应用以及人为失误而导致的12个典型事故案例的分析。

本书可作为高等院校理工类安全工程专业、人机与环境工程专业、系统工程专业的本科教材,也可供有关教师、科技人员以及研究生学习参考。目录中标注“\*”的章节,可作为研究生课程的讲授内容,对本科生可不作要求。

### 图书在版编目(CIP)数据

安全人机工程学/王保国等编著. —北京:机械工业出版社,2007.6  
(高等教育安全工程系列“十一五”规划教材)  
ISBN 978-7-111-21502-8

I. 安… II. 王… III. 安全工程—人—机系统—高等学校—教材 IV. X912.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第069281号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:冷彬 版式设计:冉晓华 责任校对:申春香

封面设计:张静 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷(国英印务有限公司)

2007年7月第1版第1次印刷

169mm×239mm·14.5印张·546千字

标准书号:ISBN 978-7-111-21502-8

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379720

封面无防伪标均为盗版

# 安全工程专业教材编审委员会

主任委员：冯长根

副主任委员：王新泉 吴 超 蒋军成

秘 书 长：季顺利

委 员：（排名不分先后）

冯长根 王新泉 吴 超 蒋军成 季顺利 沈斐敏

钮英建 霍 然 孙 熙 金龙哲 王述洋 刘英学

王保国 张俭让 司 鹤 王凯全 董文庚 景国勋

柴建设 周长春 冷 彬

# 序 一

“安全工程”本科专业是在 1958 年建立的“工业安全技术”、“工业卫生技术”和 1983 年建立的“矿山通风与安全”本科专业基础上发展起来的。1984 年，国家教委将“安全工程”专业作为试办专业列入普通高等学校本科专业目录之中。1998 年 7 月 6 日，教育部发文颁布《普通高等学校本科专业目录》，“安全工程”本科专业(代号:081002)属于工学门类的“环境与安全类”(代号:0810)学科下的两个专业之一。据“安全工程专业教学指导委员会”1997 年的调查结果显示，自 1958~1996 年底，全国各高校累计培养安全工程专业本科生 8130 人。近年，安全工程本科专业得到快速发展，到 2005 年底，在教育部备案的设有安全工程本科专业的高校已达 75 所，2005 年全国安全工程专业本科招生人数近 3900 名。

按照《普通高等学校本科专业目录》(1998)的要求，原来已设有与“安全工程专业”相近但专业名称有所差异的高校，现也大都更名为“安全工程”专业。专业名称统一后的“安全工程”专业，专业覆盖面大大拓宽。同时，随着经济社会发展对安全工程专业人才要求的更新，安全工程专业的内涵也发生很大变化，相应的专业培养目标、培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化，学生毕业后的执业身份是注册安全工程师。但是，安全工程专业的教材建设与专业的发展出现尚不适应的新情况，无法满足和适应高等教育培养人才的需要。为此，组织编写、出版一套新的安全工程专业系列教材已成为众多院校的翘首之盼。

机械工业出版社是有着 50 多年历史的国家级优秀出版社，在高等学校安全工程学科教学指导委员会的指导和支持下，根据当前安全工程专业教育的发展现状，本着“大安全”的教育思想，进行了大量的调查研究工作，聘请了安全科学与工程领域一批学术造诣深、实践经验丰富的教授、专家，组织成立了“安全工程专业教材编审委员会”(以下简称“编审委”)，决定组织编写“高等教育安全工程系列‘十一五’规划教材”。并先后于 2004.8(衡阳)、2005.8(葫芦岛)、2005.12(北京)、2006.4(福州)组织召开了一系列安全工程专业本科教材建设研讨会，就安全工程专

业本科教育的课程体系、课程教学内容、教材建设等问题反复进行了研讨,在总结以往教学改革、教材编写经验的基础上,以推动安全工程专业教学改革和教材建设为宗旨,进行顶层设计,制订总体规划、出版进度和编写原则,计划分期分批出版近30余门课程的教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,以后再根据专业方向的需要逐步增补。

由安全学原理、安全系统工程、安全人机工程学、安全管理学等课程构成学科基础平台课程,已被安全科学与工程领域学者认可并达成共识。本套系列教材编写、出版的基本思路是,在学科基础平台上,构建支撑安全工程专业的工程学原理与由关键性的主体技术组成的专业技术平台课程体系,编写、出版系列教材来支撑这个体系。

本系列教材体系设计的原则是,重基本理论,重学科发展,理论联系实际,结合学生现状,体现人才培养要求。为保证教材的编写质量,本着“主编负责,主审把关”的原则,编审委组织专家分别对各门课程教材的编写大纲进行认真仔细的评审,教材初稿完成后又组织同行专家对书稿进行研讨,编者数易其稿,经反复推敲定稿后才最终进入出版流程。

作为一套全新的安全工程专业系列教材,其“新”主要体现在以下几点:

**体系新。**本套系列教材从“大安全”的专业要求出发,从整体上考虑各门课程的内容安排,构建支撑安全工程学科专业技术平台的课程体系,按照教学改革方向要求的学时,统一协调与整合,形成一个完整的、各门课程之间有机联系的系列教材体系。

**内容新。**本套系列教材的突出特点是内容体系上的创新。它既注重知识的系统性、完整性,又特别注意各门学科基础平台课之间的关联,更注意后续的各门专业技术课与先修的学科基础平台课的衔接,充分考虑了安全工程学科知识体系的连贯性和各门课程教材间知识点的衔接、交叉和融合问题,努力消除相互关联课程中内容重复的现象,突出安全工程学科的工程学原理与关键性的主体技术,有利于学生的知识和技能的发展,有利于教学改革。

**知识新。**本套系列教材的主编大多由长期从事安全工程专业本科教学的教授担任,他们一直处于教学和科研的第一线,学术造诣深厚,教学经验丰富。在编写教材时,他们十分重视理论联系实际,注重引入新理论、新知识、新技术、新方法、新材料、新装备、新法规等理论研究、工程技术实践成果和各校教学改革的阶段性成果,充实与更新了知识点,增加部分学科前沿方面的内容,充分体现了教材的先进性和前瞻性,以适应时代对安全工程高级专业技术

## VI 安全人机工程学

人才的培育要求。本套教材中凡涉及安全生产的法律法规、技术标准、行业规范，全部采用最新颁布的版本。

安全是人类最重要和最基本的需求，是人民生命与健康的基本保障。一切生活、生产活动都源于生命的存在。如果人们失去了生命，生存也就无从谈起，生活也就失去了意义。全世界平均每天发生约 68.5 万起事故，造成约 2200 人死亡的事实，使我们确认，安全不是别的什么，安全就是生命。安全生产是社会文明和进步的重要标志，是经济社会发展的综合反映，是落实以人为本的科学发展观的重要实践，是构建和谐社会的有力保障，是全面建设小康社会、统筹经济社会全面发展的重要内容，是实施可持续发展战略的组成部分，是各级政府履行市场监管和社会管理职能的基本任务，是企业生存、发展的基本要求。国内外实践证明，安全生产具有全局性、社会性、长期性、复杂性、科学性和规律性的特点，随着社会的不断进步，工业化进程的加快，安全生产工作的内涵发生了重大变化，它突破了时间和空间的限制，存在于人们日常生活和生产活动的全过程中，成为一个复杂多变的社会问题在安全领域的集中反映。安全问题不仅对生命个体非常重要，而且对社会稳定和经济发展产生重要影响。党的十六届五中全会首次提出“安全发展”的重要战略理念。安全发展是科学发展观理论体系的重要组成部分，安全发展与构建和谐社会有着密切的内在联系，以人为本，首先就是要以人的生命为本。“安全·生命·稳定·发展”是一个良性循环。安全科技工作者在促进、保证这一良性循环中起着重要作用。安全科技人才匮乏是我国安全生产形势严峻的重要原因之一。加快培养安全科技人才也是解开安全难题的钥匙之一。

高等院校安全工程专业是培养现代安全科学技术人才的基地。我深信，本套系列教材的出版，将对我国安全工程本科教育的发展和高级安全工程专业人才的培养起到十分积极的推进作用，同时，也为安全生产领域众多实际工作者提高专业理论水平提供了学习资料。当然，由于这是第一套基于专业技术平台课程体系的教材，尽管我们的编审者、出版者夙兴夜寐，尽心竭力，但由于安全学科具有在理论上的综合性与应用上的广泛性相交叉的特性，开办安全工程专业的高等院校所依托的行业类型又涉及军工、航空、化工、石油、矿业、土木、交通、能源、环境、经济等诸多领域，安全科学与工程的应用也涉及到人类生产、生活和生存的各个方面，因此，本套系列教材依然会存在这样和那样的缺点、不足，难免挂一漏万，诚恳地希望得到有关专家、学者的关心与支持，希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提意见和建议。谨祝

本系列教材在编者、出版者、授课教师和学生的共同努力下，通过教学实践，获得进一步的完善和提高。

“婴其鸣矣，求其友声”，高等院校安全工程专业正面临着前所未有的发展机遇，在此我们祝愿各个高校的安全工程专业越办越好，办出特色，为我国安全生产战线输送更多的优秀人才。让我们共同努力，为我国安全工程教育事业的发展作出贡献。

中国科学技术协会书记处书记  
中国职业安全健康协会副理事长  
中国灾害防御协会副会长  
亚洲安全工程学会主席  
高等学校安全工程学科教学指导委员会副主任  
安全工程专业教材编审委员会主任  
北京理工大学教授、博士生导师

冯长根

2006年5月

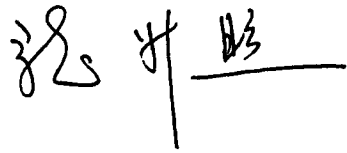


## 序 二

安全人机工程学是一门发展中的新兴学科。随着钱学森先生亲自倡导的人—机—环境系统工程与系统科学的飞速发展，安全人机工程学的发展得到了更大的促进，其内涵也更加丰富了。本书以人、机、环境三大要素所构成的系统为研究对象，以安全、高效、经济为三个主要评价指标，以控制论、模型论和优化论等基础理论为支撑，深入探讨人、机、环境系统中的最优组合问题，进行了这方面有益的尝试。很显然，这里优化论是人、机、环境系统工程的精髓。当然，它也应该是安全人机工程学的重要内容之一。另外，书中关于人的数学模型、人的热舒适计算、系统的建模与辨识以及系统安全的综合评价等都写得十分准确、精彩，它凝练了几十年来作者们从事这方面科研与教学的精华与心血，同时也展现了本书的重大特色。书中给出的12个重大事故案例再次警示了学习这门课程的重要性。全书共12章，分别从人的特性、机的特性、环境的特性、人机关系与人环关系以及人机环境系统的总体性能与安全评价计算等方面进行了细致的讨论与分析。本书还列举了多篇参考文献，这对学有余力的读者的确是一个很好的文献索引。

本书的4位作者都是长期活跃在教学与科研第一线上的教授。本书的第一作者王保国博士是一位数学、力学功底深厚的教授、博士生导师。他在中国科学院工作过16年，在清华大学任教授、博导10余年，深得同学们的爱戴与欢迎，并两次获清华大学教学优秀奖，荣获国家人事部优秀博士后奖、两次获中国科学院重大成果奖，他是清华大学优秀的教授与博士生导师。2002年作为知名教授由清华大学来北京理工大学任教，并成功的创建了该校人机与环境工程博士点，并担任该博士点的首任学科带头人。王教授是中国人类工效学学会理事、人机工程专业委员会副主任，中国系统工程学会人—机—环境专业委员会副秘书长，中国交通运输协会交通运输安全委员会委员、中国职业安全健康协会安全工程教育委员会委员。另外，他还是北京热物理与能源工程学会理事、北京力学学会专业委员会副主任。他是有名的气体动力学家，在流场模拟、微气候研究与人的热舒适计算、人机可靠性计算以及系统分析等方面有较深的研究。本书的第二作者王新泉教授是安全科学与工程界的知名专家，他是全国机械安全标准化技术委员会(SAC/TC208)委员、第一届高等学校安全工程学科教学指导委员会委员(1996~2004)、中国职业安全健康协会理事、河南省职业安全健康协会副理事长、河南省安全生产专家组组长、《安全工程师

论坛》主编、安全与环境学报编委。王教授早年指导的学生多已成为我国安全科学与工程学科带头人、高校知名教授及安全生产监督管理工作者。王教授在建筑环境特性与控制、职业危害与职业安全健康、人体热舒适性、作业空间设计等方面有较深的研究，著作颇丰。本书的第三作者刘淑艳教授在交通运输以及驾驶行为理论方面有较深的研究并在科学出版社出版过这方面的专著。本书的第四位作者霍然教授是我国从事防火安全方面的知名专家之一，他早年留学英国，出版过多部防火安全方面的论著，在事故分析与安全防护等方面有很深的研究。这4位教授优势互补，密切合作，共同编著了这部概念清晰、体系完整、方法先进、内容丰富、贴近前沿的专业基础课教材，它较好地体现了加强基础、面向前沿、突出思想、关注应用、方便阅读的原则。我深信，它的出版将大大丰富安全人机工程学的内涵，为我国安全工程类专业、人机与环境工程类专业、管理科学与工程类专业的本科生与研究生提供一部优秀教材。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters '王军' followed by a horizontal line.

# 前 言

---

安全人机工程学是安全工程类专业以及人机与环境工程类专业的重要专业基础课程之一。它从安全的角度出发,以人、机、环境三大要素所构成的系统为研究对象,以安全、高效、经济三者为主要评价指标,以系统科学和人体科学(包括人体工程学、工程心理学等)为基础理论、以系统工程方法为工具深入细致地研究人、机、环境系统的最优组合,它是一门典型的新兴交叉学科。显然,安全人机工程学既是一种设计思想和理论,又是一种有效的系统综合设计与评价技术,因此这门科学已成为推动工业生产发展的新技术动力,它的发展与完善倍受工程界与科学技术界的关注与重视。

在本书编写过程中,我们始终以安全科学、系统科学和人体科学为核心,十分重视基本概念、基本原理、基本方法的阐述,非常强调教材的科学性、系统性、新颖性和整体构思的完整性。全书分12章,涵盖了以下五大方面的内容:

(1) 人的特性及其数学模型,主要研究人在工作中的生理、心理特征,内容包括人的基本特征与热感觉,人的作业能力与疲劳分析,人的自然倾向以及人的可靠性模型等。这些内容是人机工程学的重要基础理论之一,是研究人一机—环境系统的基础和设计依据。

(2) 机的特性以及人机界面的研究,内容包括机的可操作性、机的易维护性、机的本质可靠性、显示器与控制器的设计原则与方法、人机功能匹配研究、典型安全防护装置的设计等。

(3) 环境特性以及作业空间的研究,内容包括作业空间分析、工作座椅的舒适性设计、微气候的评价与人热舒适性的计算、职业危害以及相关的防护等。

(4) 人一机—环境系统的总体性能分析与安全评价计算,内容包括总体性能与总体指标的确定、系统的建模与辨识、人机系统可靠性的分析、系统故障树的定性与定量分析、系统的安全综合评价方法等。

(5) 基础理论的应用以及人为失误而导致的典型事故案例分析, 内容包括视频显示装置的安全设计、汽车运输作业中的驾驶行为分析、航天作业中的安全人机问题、车辆人机环境系统中乘员热舒适的计算问题以及 12 个人为失误典型重大事故案例的分析等。

全书图文并茂, 给出了 300 多幅插图及附表。另外, 书后还列举了多篇参考文献, 为学有余力的读者进一步阅读、学习安全人机工程学方面的专著、教材等文献, 提供了一个较为完整、全面的目录。此外, 编著者通过对多年教学实践与长期科学研究成果的提炼、升华, 认真编写了每章节后的习题, 这些题目对加深理解书中所讲授的基本内容、密切与现代科研方向的联系、提高学生解决工程实践问题的能力都是十分有益的。

本书由北京理工大学、中原工学院、中国科学技术大学的 4 位教授, 在几十年从事科学研究的基础上并且经历了多年的教学实践之后编写定稿的。编写中力求文献新、数据全、方法先进、适应面广、理论体系完整、思想逻辑性强, 能使初学者尽快掌握这门课程的整体核心框架并达到学到手、会应用的基本目的。作者万分感谢全国人一机一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地审阅了本书, 并提出了十分宝贵的指导性意见。同时要提到的是在本书的编写过程中, 安全工程专业教材编审委员会积极组织专家对本书的编写大纲和书稿进行审纲和审稿工作, 在此向他们表示衷心的感谢。

本书可作为高等院校安全工程专业、人机与环境工程专业、系统工程专业本科教材, 也可供有关教师、科技人员以及研究生参考、学习。目录中标注“\*”的章节, 可作为研究生课程的讲授内容, 对本科生可不作要求。

由于作者的水平有限, 本书难免存在一些缺点与不足, 敬请各位专家及广大读者批评指教。作者联系方式(E-mail): bguowang@bit.edu.cn

编著者

# 目 录

序一

序二

前言

<b>第 1 章 安全人机工程学概述及其研究方法</b> .....	1
1.1 人一机一环境系统及工程概论 .....	1
1.2 人机工程学及安全人机工程学 .....	5
习题 .....	11
<b>第 2 章 人因失误事故模型</b> .....	14
2.1 事故致因理论 .....	14
2.2 基于人体信息处理的人因失误事故模型 .....	20
2.3 事故的统计规律与预防原则 .....	21
习题 .....	23
<b>第 3 章 人机系统中人的基本特性与热感觉</b> .....	25
3.1 人的物理特性 .....	25
3.2 人的生理特性 .....	48
3.3 人的心理特性 .....	55
3.4* 人的数学模型 .....	56
3.5* 人一机一环境系统中人体热调节的数学模型 .....	66
3.6* 人体热舒适模型 .....	77
3.7 人的热感觉以及相关的评价指标 .....	88
习题 .....	91
<b>第 4 章 人的作业能力与疲劳分析</b> .....	93
4.1 人体作业时能量交换的特性 .....	93
4.2 作业时人体的调节与适应 .....	103
4.3 作业能力的动态分析 .....	108
4.4 作业疲劳及其测定 .....	110
4.5 提高作业能力与降低疲劳的措施 .....	114

习题	117
<b>第 5 章 人的自然倾向与人的可靠性概论</b>	119
5.1 习惯与错觉	119
5.2 精神紧张与躲险动作	120
5.3 人为差错	123
5.4 人的生理节律	126
5.5 人的可靠性模型及其研究方法	130
5.6 人可靠性的基本数据	138
习题	140
<b>第 6 章 机的特性研究及其数学模型</b>	142
6.1 机的可操作性以及机的动力学特性分析	142
6.2 机的易维护性以及基本维修性指标	146
6.3 机的本质可靠性	152
习题	154
<b>第 7 章 人机界面的安全设计</b>	155
7.1 信息显示装置的类型及其特点	155
7.2 显示装置的设计	159
7.3 控制器的设计	163
7.4 显示器与控制器的工效学设计	171
习题	174
<b>第 8 章 环境特性的研究以及作业空间的设计与改进</b>	176
8.1 环境的分类以及环境的基本特性	176
8.2 作业空间设计的基本要求	183
8.3 作业空间分析	185
8.4 安全作业研究与标准化作业	188
8.5 工作座椅的静态舒适性设计原理	192
8.6 微气候及其改善	195
8.7 职业危害以及职业安全与健康	213
8.8 航空航天作业中的宇宙辐射及其防护	220
习题	226

## XIV 安全人机工程学

<b>第9章 人机系统功能匹配以及安全防护装置设计</b> .....	229
9.1 人机功能关系 .....	229
9.2 人机系统设计的基本要求和要点 .....	236
9.3 安全防护装置设计 .....	243
习题 .....	245
<b>第10章 人一机—环境系统的分析与评价</b> .....	246
10.1 人一机—环境系统总体性能的指标、任务与理论基础 .....	246
10.2 系统的建模与辨识 .....	248
10.3 人机系统的连接分析方法 .....	272
10.4 人机系统故障树分析评价法 .....	275
10.5 人机系统的可靠性分析 .....	294
10.6 系统安全综合评价法 .....	308
习题 .....	324
<b>第11章 安全人机工程学基本理论的应用</b> .....	328
11.1 视频显示装置的安全人机工程学 .....	328
11.2 汽车运输作业中的安全人机工程学 .....	330
11.3 航天人一机—环境系统中的安全人机工程学问题 .....	340
11.4 车辆人一机—环境系统中乘员热舒适性的数值计算 .....	348
习题 .....	360
<b>第12章 人为失误事故的典型案例与分析</b> .....	362
12.1 人为失误的定义及分类 .....	362
12.2 北京东方化工厂储罐区爆炸特别重大事故分析 .....	364
12.3 上海高桥石油化工公司炼油厂液化气爆炸事故 .....	367
12.4 南京金陵石化公司炼油厂爆炸事故分析 .....	367
12.5 飞机一等飞行事故 .....	369
12.6 汽车交通特大事故 .....	371
12.7 轮船搁浅沉没重大事故 .....	372
12.8 TNT 生产线硝化车间特大爆炸事故 .....	375
12.9 上海沪东造船厂特大吊装事故 .....	379
12.10 贵州省马岭河峡谷风景区索道失控坠落特大事故 .....	382
12.11 河南平顶山十矿瓦斯爆炸特大事故分析 .....	383
12.12 皖北矿务局刘桥一矿重大火灾事故 .....	385

12.13	湖南省武冈市红旗煤矿特大透水事故 .....	387
12.14	全国煤矿安全状况概述 .....	390
12.15	美国锅炉压力容器事故的状况与分析 .....	393
12.16	人为事故的预防 .....	395
	习题 .....	398
	附录 .....	400
	参考文献 .....	421



## 安全人机工程学概述及其研究方法

安全人机工程学既属于安全科学的一个分支<sup>[1]</sup>，又属于系统科学的一个分支<sup>[2,3]</sup>，也是人一机—环境系统工程的一个分支<sup>[4~6]</sup>，因此它具有多个学科的特点，属于典型的一门交叉分支学科。

### 1.1 人一机—环境系统及工程概论

#### 1.1.1 系统

系统(systems)是具有特定功能的、相互之间具有有机联系的许多要素(或元素)(element)所构成的一个整体。一般系统论的创始人、理论生物学家 Bertalanffy(贝塔朗菲)把系统定义为“相互作用的诸元素(或要素)的综合体”。美国著名学者 Ackoff(阿柯夫)教授认为：系统是由两个或两个以上相互联系的任何种类的元素(或要素)所构成的集合。综上所述，一个系统通常是由多个元素所构成，它是一个有机的整体，并具有一定的功能。在物质世界中，系统的任何部分都可以看为一个子系统，而每一个系统又可以成为一个更大规模系统中的—一个组成部分。

#### 1.1.2 系统的特性

一般系统都具有以下五个特性。

##### 1. 相关性

系统论强调组成系统的要素与要素之间是相互联系、相互依存、相互作用与制约的。以人体系统为例，每一个器官或者子系统都离不开人体这个整体而存在，各个器官和组织的功能与行为都直接影响着人整体的功能与行为，因此系统的这种相关性恰能体现出系统具有结构性的特征。

##### 2. 目的性

通常系统都具有某种目的。为达到这一目的，系统都具有一定的功能。系