

民航特色专业系列教材

航空安全工程

王华伟 吴海桥 编著



科学出版社

民航特色专业系列教材

航空安全工程

王华伟 吴海桥 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从航空器全寿命周期角度出发,全面介绍了航空安全工程的原理、技术和方法。全书共分9章,主要内容包括绪论、航空灾害理论、飞机安全性设计、航空安全系统分析方法、事故树分析、飞机安全监控、人为因素与航空安全、航空安全风险评价和航空安全工程案例。

本书可作为高等院校交通运输、航空器适航技术与管理、安全工程和飞行器设计等专业学生的教材,也可供从事相关专业的技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空安全工程/王华伟,吴海桥编著. —北京:科学出版社,2014.1
民航特色专业系列教材
ISBN 978-7-03-039706-5

I. ①航… II. ①王… ②吴… III. ①民用航空-航空安全-安全管理-高等学校-教材 IV. ①F560.69

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 018100 号

责任编辑:贾瑞娜/责任校对:张小霞
责任印制:阎磊/封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014年1月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:400 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛 书 序

改革开放以来,我国民航事业获得了持续、快速、健康的发展。2010年,我国民用航空发展的主要预期指标是:航空运输总周转量493亿吨千米、旅客运输量2.6亿人次、货邮运输量498万吨。30年来上述指标年均增速均达到两位数字,大约是中国国民经济发展速度的两倍,是世界民航业发展速度的四倍。从2005年至今,中国民航没有发生运输飞行事故,创造了中国民航历史上安全运营时间最长的记录,安全、生产、效益形势喜人。按照我国国民经济发展中长期规划和国际通用方法预测,中国民航的持续快速增长还会有较长一段时间。

近年来,中国民航总局党组提出了全面推进建设民航强国的战略构想,因此,对民航各层次管理和专业技术人才的培养提出了更高的要求。民用航空教育必须把培养知识面广、专业素质高、动手能力强、责任心强的专业人才作为自己的奋斗目标,以适应整个行业发展的需要。但是目前民航专业教材体系建设相对滞后,长期以来多数教材源于国外,不能完全符合中国实际;教材出版时间较早,知识相对陈旧,学生难以据此掌握当前民航的高新科学技术。教材问题已经客观地影响到教学效果和质量。

南京航空航天大学民航学院成立于1993年,由原中国民用航空总局和中国航空工业总公司正式联合创办,已形成具有培养本科、硕士、博士、博士后多层次人才的办学格局。目前设有交通管理与签派、民航运输管理、民航机务工程、民航电子电气工程、机场运行与管理、飞行技术6个专业。依托国家级、江苏省特色专业建设点,依靠国防科工委重点学科建设,以及承担国家级、省部级科研项目等多方雄厚的科研实力,形成了集市场营销、运营管理和维修保障为一体的全方位的人才培养体系,成为我国民用航空领域的重要教学和科研基地。

通过对近17年教学与科研成果的凝练与总结,为适应教学改革和民航发展的需要,及时反映现代民航科技领域的研究成果,保证教材建设与教学改革同步进行,我们出版了《民航特色专业系列教材》丛书。本套丛书在组织编写中,重点体现了以下几个方面的特色:

1. 突出民航和航空制造专业特色。教材编写过程中充分考虑到专业的交叉性、综合性和国际性强的特点,在要求学生掌握知识的同时,以培养技术与管理结合、适应性强、综合素质高、能在航空制造企业和民航企事业单位服务的复合型人才为目标,丰富和完善教材内容。

2. 面向民航应用,注重实践能力的培养。适当拓宽专业基础知识的范围,以增

强学生的适应性;面向民航工程实际,注重实践环节,强化在民航系统就业所必需的职业技能培养内容,以促进对学生的实际动手能力和创新能力的培养。

3. 强化专业素质教育。在专业所应具备的基本知识基础上,拓宽和延伸专业课程内容,及时反映民航科技的最新成果,提升学生的专业素质和学习能力。

4. 兼顾学历教育和执照教育。由于民航专业的特殊性,获取专业执照是从业的必要条件,本套教材在编写过程中,注重学历教育和执照教育的有机结合,为学生顺利走上工作岗位创造条件。

5. 满足多层面的需求。针对同一类课程,根据不同的教学层次和学时要求,编写适合不同层次需求的教材,涵盖不同范围的拓展知识单元,注重与先修课程、后续课程的有机衔接,每本教材在重视系统性和完整性的基础上,尽量减少内容重复。

本套教材注重知识的系统性与全面性,突出民航专业特色;兼顾学生专业能力和综合素养的全面培养,力图提高民航专业人才的培养质量和完善人才培养的模式;着力推广民航专业教学经验和教学成果,推进民航专业教学改革。本套教材的编写出版为提高民航专业教学的整体水平做了有益的探索。

温家宝总理指出:“教育寄托着亿万家庭对美好生活的期盼,关系着民族素质和国家未来。不普及和提高教育,国家不可能强盛”。为了不断促进民航院校学生素质的提高以适应我国民航事业的持续、快速、健康发展,我们在教材编辑与创新上做了一些尝试,迈出了可喜的一步。作为一名老航空工作者,我为此鼓与呼。在丛书编写过程中,南京航空航天大学民航学院还得到众多相关学校与学院各方教授、专家、学者的帮助与指正,在此一并感谢。

王 知

2010年7月

前 言

航空安全工程既是安全工程理论与方法在航空系统中的实践,同时又由于航空器自身的特点丰富和发展了安全工程理论。航空安全是基于全寿命周期的安全,既涵盖安全性设计又涉及运行安全;航空安全受到多种因素的影响,如航空器自身的安全,还受到环境与人为因素的影响。航空器自身的复杂性决定了保障航空器高安全性设计和运行安全的复杂性及系统性。航空安全工程涉及的内容多、领域广,包括的知识点难以用一本教材完全概括,本书内容涵盖了保证航空安全的关键技术和手段,分析和避免航空事故的技术与方法,以及人为因素分析方法。

全书共分为9章。

第1章绪论。介绍了基本概念、安全科学、安全系统工程、系统安全理论,以及航空安全工程的基本理论和发展历程。

第2章航空灾害理论。通过实例介绍了典型的航空灾害,系统分析了航空灾害的影响因素、特点及形成机制,介绍了航空事故致因理论。

第3章飞机安全性设计。介绍了设计阶段的系统安全理论,飞机安全性设计问题,以及安全性设计方法与标准。

第4章航空安全系统分析方法。重点讲解了功能危险分析、预先危险分析、故障模式影响与致命度分析、过程故障模式与影响分析、事件树分析、区域安全性分析和共模分析等安全分析方法。

第5章事故树分析。介绍了事故树分析的基本概念、绘制方法及数学表达形式,讲解了事故树定性和定量分析方法。

第6章飞机安全监控。介绍了飞机运行状态监控、飞行品质监控、飞机故障诊断、飞机可靠性监控和飞机运行可靠性评估等内容。

第7章人为因素与航空安全。介绍了人为因素的基本理论、人为差错分析技术、航空安全人为因素分析及人的可靠性分析方法。

第8章航空安全风险评价。介绍了航空安全风险评价的基本理论、主要的安全风险评价方法,详细讲解了概率风险评价方法。

第9章航空安全工程案例。通过多因素叠加导致的航空事故案例、飞机系统安全性评估过程示例和人为因素分析应用案例,说明航空安全理论与方法的应用。

本书由王华伟、吴海桥协力完成。王华伟负责撰写第4~8章及第1、2、9章的部

分内容,吴海桥负责撰写第3章及第1、2、9章的部分内容,并负责全书的校对与审定工作。硕士研究生钟静、白乃贵和施志坚参与了文字录入工作。

本书在撰写过程中参考了大量的国内外教材与专著,在此对其作者致以由衷的感谢。

航空安全工程是一门新兴的学科,有许多问题值得进一步研究,由于航空器设计理念的不断更新,航空安全工程自身的内涵与外延也在不断变化,加之作者知识和认识的局限性,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2013年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 安全	1
1.1.2 危险、危险源与重大危险源	2
1.1.3 事故与事故隐患	3
1.2 安全科学	3
1.2.1 安全科学基本概念	3
1.2.2 安全科学的学科体系层次	4
1.2.3 安全科学的核心理论	4
1.3 安全系统工程	6
1.3.1 安全工程	6
1.3.2 系统与系统工程	6
1.3.3 安全系统	9
1.3.4 安全系统工程概要	10
1.3.5 安全系统工程的研究对象	12
1.3.6 安全系统工程的研究内容	13
1.4 系统安全	15
1.4.1 系统安全的概念	15
1.4.2 系统安全理论的主要观点	17
1.4.3 系统安全理论在航空安全中的实践	17
1.5 航空安全工程	19
1.5.1 航空安全	19
1.5.2 航空安全系统的特点	20
1.5.3 航空安全的影响因素	22
1.5.4 航空安全与民用航空器适航管理的关系	22
1.5.5 航空安全发展历程	27
1.6 本章小结	29
思考题	30

第 2 章 航空灾害理论	31
2.1 典型的航空灾害	31
2.1.1 飞机设计、制造因素导致的航空灾害	31
2.1.2 维修导致的航空灾害	32
2.1.3 人为因素导致的航空灾害	34
2.1.4 环境因素导致的航空灾害	36
2.2 航空灾害的影响因素、特点及形成机制	38
2.2.1 航空灾害的影响因素	38
2.2.2 航空灾害的特点	39
2.2.3 航空灾害的形成机制	41
2.3 航空事故致因理论	41
2.3.1 能量转移致因论	42
2.3.2 因果关系致因论	45
2.3.3 事故因果链理论	48
2.3.4 变化规律论	50
2.3.5 人的失误致因论	53
2.3.6 综合致因论	56
2.4 本章小结	56
思考题	57
第 3 章 飞机安全性设计	58
3.1 设计阶段的系统安全	58
3.1.1 系统安全工作的途径	58
3.1.2 系统安全过程	58
3.1.3 系统安全与其他专业的关系	60
3.2 飞机安全性设计概述	63
3.2.1 飞机安全性发展历史	63
3.2.2 安全性设计的内涵	65
3.3 安全性设计方法与标准	65
3.3.1 安全性设计方法	65
3.3.2 飞机安全性设计与分析指南	70
3.3.3 适航规章的要求	71
3.4 本章小结	72
思考题	72

第 4 章 航空安全系统分析方法	73
4.1 概述	73
4.1.1 系统安全分析的内容	73
4.1.2 系统安全分析方法的分类	73
4.1.3 选择分析方法考虑因素	75
4.2 功能危险分析	75
4.2.1 方法概述	75
4.2.2 分析的基本过程	76
4.2.3 分析步骤及内容	77
4.2.4 方法应用过程及案例	80
4.2.5 注意事项	86
4.3 预先危险性分析	86
4.3.1 预先危险性分析的概念	86
4.3.2 预先危险性分析的步骤	87
4.3.3 预先危险性分析程序	88
4.4 故障模式影响与致命度分析	90
4.4.1 基本原理	91
4.4.2 FMEA 分析的步骤	92
4.4.3 致命度分析	94
4.4.4 飞机电源系统 FMEA 举例	95
4.5 过程故障模式与影响分析	99
4.5.1 简介	99
4.5.2 基本原理	99
4.5.3 基本流程	102
4.5.4 注意事项	111
4.6 事件树分析	112
4.6.1 基本原理	112
4.6.2 分析步骤	113
4.6.3 事件树举例	113
4.7 区域安全性分析	114
4.7.1 简介	114
4.7.2 基本原理	115
4.7.3 注意事项	118
4.7.4 应用示例	119
4.8 共模分析	121

4.8.1 概述	121
4.8.2 基本原理	122
4.8.3 分析内容与实施流程	126
4.8.4 注意事项	132
4.8.5 应用示例	132
4.9 本章小结	135
思考题	136
第5章 事故树分析	137
5.1 事故树分析概述	137
5.1.1 事故树的基本概念	137
5.1.2 事故树的特点	137
5.1.3 事故树的构成	138
5.1.4 事故树分析步骤及规则	141
5.2 事故树的绘制	144
5.3 事故树的数学表达	145
5.3.1 事故树分析相关数学知识	145
5.3.2 事故树的布尔代数表达与化简	147
5.4 事故树的定性分析	148
5.4.1 最小割集	148
5.4.2 最小径集	150
5.4.3 基本事件的结构重要度	151
5.5 事故树的定量分析	154
5.5.1 基本事件发生概率的计算方法	154
5.5.2 顶上事件发生概率的计算方法	155
5.5.3 基本事件的概率重要度和临界重要度	160
5.5.4 应用举例	161
5.6 本章小结	164
思考题	164
第6章 飞机安全监控	165
6.1 飞机运行状态监控	165
6.1.1 飞机运行状态监控概述	165
6.1.2 发动机状态监控概述	166
6.1.3 部附件状态监控	170
6.2 飞行品质监控	172

6.2.1	概述	172
6.2.2	数据译码	172
6.2.3	监控标准体系的建立	172
6.2.4	飞行事件分析程序	174
6.2.5	飞行事件人工分析和过滤	175
6.3	飞机故障诊断	176
6.3.1	飞行员故障报告分析方法	176
6.3.2	飞机智能故障诊断方法	176
6.3.3	飞机/发动机远程故障诊断	177
6.4	飞机可靠性监控	180
6.4.1	飞机可靠性监控功能	180
6.4.2	飞机可靠性监控框架及工作流程	181
6.4.3	飞机可靠性监控的主要内容	182
6.4.4	飞机可靠性监控的项目及指标体系	184
6.4.5	飞机可靠性监控方案	186
6.5	飞机运行可靠性评估	188
6.5.1	基于 Weibull 分布的小样本故障数据的飞机可靠性评估	188
6.5.2	基于检测和监测信息的飞机可靠性动态评估	190
6.6	本章小结	192
	思考题	193
第 7 章	人为因素与航空安全	194
7.1	人为因素概述	194
7.1.1	人为因素的含义	194
7.1.2	基于人为因素的系统故障分析	195
7.1.3	人的失误是航空事故的主要原因	196
7.1.4	认识人失误的心理机制	198
7.2	人为差错分析	200
7.2.1	人为差错概念及产生	200
7.2.2	人为差错研究模型	201
7.2.3	人为差错管理	205
7.3	航空安全人为因素分析	206
7.3.1	飞行人员人为因素分析	206
7.3.2	维修人员人为因素分析	212
7.3.3	空管人员人为因素分析	215

7.3.4 机场人员人为因素分析	217
7.4 人的可靠性分析方法	217
7.4.1 HRA 方法综述	217
7.4.2 主要的人的可靠性分析方法	219
7.4.3 HRA 方法的比较	227
7.5 本章小结	228
思考题	229
第 8 章 航空安全风险评价	230
8.1 航空安全评价概述	230
8.1.1 风险的定义	230
8.1.2 安全评价的定义	231
8.1.3 安全评价的原理	232
8.1.4 安全评价的程序	233
8.2 安全评价方法	234
8.2.1 安全评价方法分类	235
8.2.2 安全评价方法选择	237
8.3 主要的安全风险评价方法	239
8.3.1 安全检查表	239
8.3.2 故障风险评价	242
8.3.3 危险物质风险评价	244
8.3.4 作业条件风险评价	246
8.3.5 人工神经网络风险评价	248
8.3.6 模糊数学风险评价	252
8.4 概率风险评价	255
8.4.1 概率风险评价概述	255
8.4.2 基本原理	256
8.4.3 分析内容的实施流程	258
8.4.4 注意事项	266
8.5 本章小结	267
思考题	267
第 9 章 航空安全工程案例	268
9.1 多因素叠加导致的航空事故	268
9.1.1 阿拉斯加航空公司 261 航班事故综述及相关背景	268
9.1.2 失事航班飞行过程分析	269

9.1.3	失事飞机坠毁原因分析	271
9.1.4	螺旋顶杆故障分析	271
9.2	飞机系统安全性评估过程示例	272
9.2.1	引言	272
9.2.2	S18 飞机的飞机级 FHA	272
9.2.3	机轮刹车系统级 FHA	277
9.2.4	机轮刹车系统 PSSA	280
9.2.5	机轮刹车系统 SSA	287
9.2.6	共因分析(CCA)结论	288
9.3	人为因素分析应用案例	291
9.3.1	案例简述	291
9.3.2	应用 HFACS 分析	292
9.3.3	总结	296
参考文献		298

第 1 章 绪 论

航空安全工程是安全工程在航空领域的具体应用。学习安全工程的基本概念和方法,是深入认识航空安全的核心和关键。

1.1 基本概念

1.1.1 安全

安全是人类的基本需要。人们的衣食住行样样离不开安全。随着科学技术的飞速发展,安全问题变得越来越复杂,越来越多样化,对安全问题的研究也需要更深入、更具有科学性。

从“安全”这个词本身的含义来理解,“安”是指不受威胁、没有危险;“全”是指完美、完全、齐备、没有伤害、无损坏、无损失、从这个层面上来理解,“安全”是系统的一种“无危险的状态”(《牛津大字典》)。

随着对安全问题研究的逐步深入,人类对安全的概念有了更深的认识,并从不同角度给它下了各种定义。

其一,安全是指客观事物的危险程度能够为人们普遍接受的状态。

可以看出,该定义明确指出安全的相对性及安全与危险之间的辩证关系,即安全和危险不是互不相容的。当将系统的危险性降低到某种程度时,该系统便是安全的,而这种程度即为人们普遍接受的状态。

其二,安全是指没有引起死亡、伤害、职业病或者财产、设备的损坏或损失或环境危害的条件。

此定义来自美国军用标准 MIL-STD-882C《系统安全大纲要求》。该标准是美国军方与军品生产企业签订订购合同时约束企业保证产品全寿命周期安全性的纲领性文件,也是系统安全管理基本思想的典型代表。从 1964 年问世以来,历经 882、882A、882B、882C、882D 若干个版本。对安全的定义也从开始时仅关注人身伤害,进而到关注职业病、财产或设备的损坏、损失直至环境危害,体现了人们对安全问题认识进化的全过程,也从一个角度说明了人类对安全问题研究的不断扩展。

其三,安全是指不因人、机、环境的相互作用而导致系统损失、人员伤亡、任务受影响或造成时间的损失。

第三种说法进一步把安全的概念扩展到任务受影响或时间损失,这意味着系统即使没有遭受直接的损失,也可能是安全科学关注的范畴。

综上,安全是系统的一种状态,安全是以风险进行界定的。

在日常生活中,“风险是可能发生的危险”。在工业系统中,风险是指特定危害事件发生的概率与后果的结合。风险是描述系统危险程度的客观量,又称风险度或危险性。风险具有概率和后果的二重性,风险 R 可用损失的严重程度 s 和发生概率 q 的函数来表示,即 $R = f(q, s)$ 。

(1)风险是系统内部矛盾运动及系统与外部环境相互作用的状态表征。风险与系统共存,只要系统存在,在其内部就必然存在矛盾运动,与其外部就必然存在相互作用,因而也就必然存在风险。因此,绝对没有风险的系统是不存在的,绝对没有风险的航空系统当然也是不存在的。

(2)安全和风险是从正反两个方面描述系统运动状态的一对孪生概念,是一个硬币的两个方面。绝对地说,安全就是无风险,有风险就是不安全。相对地说,安全水平高就是风险度低,风险大就是安全状况差。如果把系统运动的正常性状态描述为一个全集,那么安全和风险就是共同构成这个全集的两个互补的子集,即安全 = $1 - \text{风险}$,或者风险 = $1 - \text{安全}$ 。

(3)从本质上说,认识安全和认识风险是同一个问题。真正弄清了安全,也就弄清了风险。反过来,真正弄清了风险,对安全的认识也就不再成为问题。人们习惯上往往把这两个词连起来用,说成安全风险,是为了强调风险对安全的威胁,但究其本质,这并没有给安全或风险概念增加新的内涵。

(4)安全和风险的性质是相反的。安全是对系统运动状态的正面表述,而风险则是其负面表述。人们平时谈及安全多于风险,反映了心理上的趋利避害倾向,换句话说,人们用对安全的追求掩盖了潜意识中对风险的担忧。

1.1.2 危险、危险源与重大危险源

危险是与安全相对的概念,是指系统中存在导致不期望后果的可能性超过了人们的承受程度,从危险的概念可以看出,危险是人们对事物的具体认识,必须指明具体研究对象,如危险环境、危险条件、危险状态、危险物质、危险场所、危险人员和危险因素等。

危险源是指系统中具有潜在能量和物质释放危险的,可造成人员伤亡、财产损失或环境破坏的,在一定触发因素作用下可转化为事故的部位、区域、场所、空间、岗位、设备和其他位置。危险源的实质是具有潜在危险的源点或部位,是爆发事故的源头,是能量、危险物质集中的核心。

危险源由3个要素构成:潜在危险性、存在条件和触发因素。危险源的潜在危险性是指一旦触发事故,可能带来的危害程度或损失大小,或者说危险源可能释放的

能量强度或危险物质量的大小;危险源的存在条件是指危险源所处的物理、化学状态和约束条件状态;触发因素不属于危险源的固有属性,是危险源转化为事故的外因。

重大危险源(Major Hazard)是指超过一定量的危险源。

1.1.3 事故与事故隐患

《现代汉语词典》对事故的解释是,事故多指生产、工作上的意外损失或者灾祸。

常用的定义:在生产过程中,事故是指造成人员伤亡、伤害、职业病、财产损失或其他损失的意外事件。

事故隐患是指作业场所、设备或设施的不安全状态、人的不安全行为和管理上的缺陷,是引发安全事故的直接原因。其实质是危险的、不安全的、有缺陷的“状态”,这种状态可以在人或物上表现出来,也可以表现在管理的程序、内容或方式上。

1.2 安全科学

1.2.1 安全科学基本概念

1. 安全科学的定义

安全科学的定义:安全科学是研究事物安全与危险矛盾运动规律的科学。具体包括以下内容。

- (1)研究事物安全的本质规律。
- (2)揭示事物安全相对应的客观因素及转化条件。
- (3)研究预测、消除或控制事物安全与危险影响因素及其转化条件的理论和技术。
- (4)研究安全的思维方法和知识体系。

2. 安全科学的本质特征

安全科学的本质特征包括以下几方面。

- (1)安全科学要体现本质安全,即从本质上达到事物或系统的安全最适化。
- (2)安全科学要体现理论性、科学性,不但要研究实现安全目标的技术方法和手段,而且要研究安全的理论和策略。
- (3)安全科学要体现交叉性,不但包括工程科学和技术科学的知识,而且包括基础科学理论、认识论和方法论的知识。
- (4)安全科学要体现研究对象的全面性,即安全科学的研究对象包括人类生存和发展过程中面临的一切负面效应。