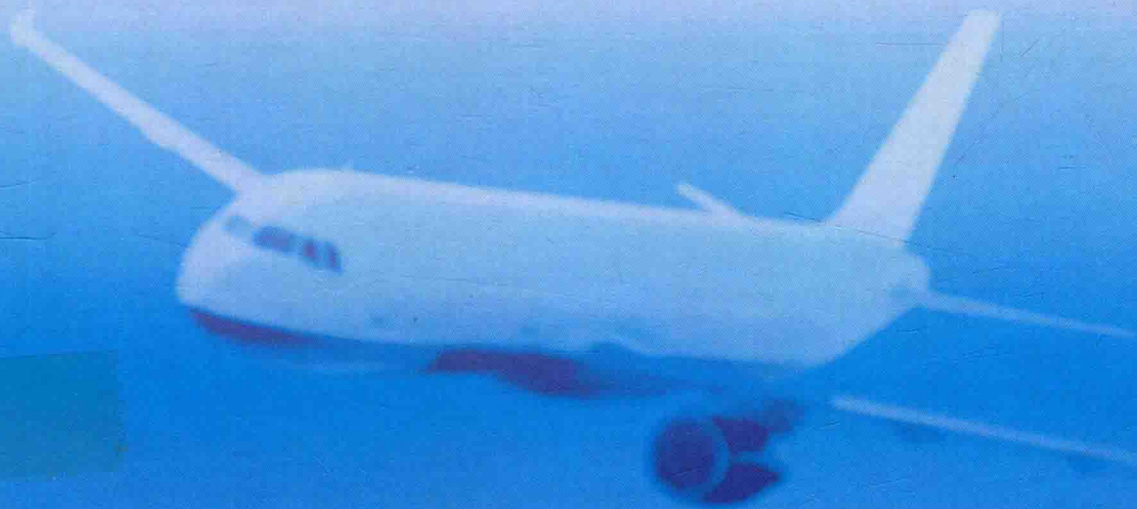


飞行安全理论与分析

徐浩军 李颖晖 李哲 著



科学出版社

飞行安全理论与分析

徐浩军 李颖晖 李哲 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要从复杂动力学系统安全性仿真的角度,论述了与飞行安全相关的理论方法。其中就影响飞行安全的人为因素、装备故障、外部环境等进行了重点的叙述,并介绍了基于复杂系统仿真的人-机-环飞行安全量化评估的模型、理论和方法,为航空器系统安全性预计和理论验证提供参考。在本书的最后介绍了航空器飞行安全边界保护的理论与方法。

本书可供从事航空器飞行安全理论分析和飞行安全保障研究的相关人员阅读,也可供航空器飞行安全理论研究、飞机设计制造和使用维护等专业技术人员、高等院校航空工程相关专业的教师和研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行安全理论与分析/徐浩军,李颖晖,李哲著. —北京:科学出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-03-055265-5

I. ①飞… II. ①徐… ②李… ③李… III. ①飞行安全-研究 IV. ①V328

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 275024 号

责任编辑:张海娜 姚庆爽 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 11 月第一次印刷 印张:28

字数:560 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

当前全球民用航空的重大事故率虽然得到有效控制,但由于航空业的持续增长,民用航空安全仍面临巨大挑战。军用飞机结构复杂,尤其是新型和特种飞机大量采用新材料、新技术,开展安全性设计理论和验证方法研究,制定安全性评估标准,把重大安全隐患暴露和解决在产品定型之前,已经成为刻不容缓的重要工作。因此,无论是民用航空还是军用航空,均迫切需要系统、科学地研究飞机飞行安全问题。

随着航空科学技术的发展,由孤立、单一的人为失误、装备故障或恶劣环境因素引发飞行事故的比例已大大降低,绝大部分飞行事故是由偶然的、耦合作用的不安全基元事件累积导致的。国际上曾对全世界的坠机事故进行分析,结果表明92%的事故是由多个因素导致的,平均每个事故有4.39个基元事件,多的可达20个,仅一个因素就直接导致事故的仅占总数的8%,而且多半为双发停车、重量超载、机务维护失误等致命错误。由于电传操纵系统、综合航电系统等复杂系统的引入,飞机本身的复杂性不断提高,这种多因素耦合诱发飞行事故,发生比例呈上升趋势。多因素耦合诱发飞行事故具有因素关联复杂、隐蔽性强、“不可逆”等特点,且由于涉及边界状态的飞行,存在复杂性、随机性强,难以验证等问题,是飞机安全性研究的重点和难点。研究多因素影响下的复杂飞行情形“人-机-环”系统行为特性,通过飞机设计中对安全性进行建模仿真,切断隐藏的连锁反应的“链条”,消除飞行器的设计缺陷,才能确保从源头上预防多因素耦合事故的发生。因此,必须提高飞机的安全性设计水平。

国外在飞机安全性设计方面走过了从局部、元件可靠性设计到飞机系统安全性设计,从定性设计到定量和定性设计相结合的道路。国外著名飞机设计研制巨头,如波音和空客都已将安全性仿真设计作为一种必备的设计方法,侧重对飞机功能危险的定量仿真和评估。国内新研飞机安全性的系统设计近几年刚刚起步,主要理论依据和技术路线是借鉴欧美基于可靠性的飞机系统安全性设计方法,缺乏我国自主创新的安全性仿真设计的基础理论和核心技术,严重制约着我国新研高端飞行器的研制及军用航空装备和航空技术的快速发展。飞机安全性建模与仿真设计的基础理论和核心技术是亟待解决的难点问题。

目前,国内外对于基于建模仿真的多因素耦合飞行情形的公开的研究成果尚不多见。例如,欧美科学家团队开发的VATES软件具有20余种飞行器的成功设计应用经验,但作为商业软件,其源代码和核心研究模型对外严格保密。国内对于

多因素耦合飞行情形的研究成果较为零散,且尚未与当前的飞机系统安全性设计流程相结合。实际上,对于多因素耦合飞行情形的研究,国外传统的基于可靠性的系统安全性分析方法存在一定局限性,仅是静态分析元件故障和人为失误,无法动态分析事故演化过程,而大部分事故是发生在动态的任务过程中。我国试飞风险科目和飞行训练国军标中仅是对风险科目进行定性分类,缺乏对多因素耦合复杂飞行情形的仿真推演和定量评估。

本书是作者长期从事人-机-环复杂系统建模与飞行安全理论的科研工作经验的总结和凝练。作者先后承担了国家重点基础研究发展计划项目“结冰条件下空气动力学和飞行力学特性及对飞行安全影响机理研究”(2015CB755802),国家自然科学基金项目“复杂系统建模与小概率事件评估在民航安全保障中的应用”(60572172)、“多因素耦合诱发飞机功能危险建模仿真在系统安全性设计中的应用研究”(61374145)、“民用航空器近距尾流风险的量化评估与可视化建模方法研究”(U1333131)、“复杂气流条件下基于多元极值 Copula 的飞行风险概率结构建模方法”(61503406)等相关国家级科研项目,并曾负责某型飞机铁鸟台飞行仿真部分的开发工作,积累了一定的研究经验,为本书的出版打下一定的理论与实践基础。本书从系统建模与动态仿真的角度研究多因素耦合复杂飞行情形的风险评估关键技术问题,将可靠性分析和安全性动态仿真相融合,研究将所提的建模仿真和风险评估方法有机融入当前飞机系统安全性设计、飞行试验和适航验证中的方法。研究成果可为多因素耦合复杂飞行情形下的飞行试验和飞行训练安全保障及新型飞机的安全性设计提供理论支撑。

本书针对影响飞行安全的人为因素、装备故障因素、外部环境因素这三个关键要素的作用机理及建模仿真方法,结合作者多年来长期从事人-机-环复杂系统仿真与飞行安全理论研究的经验,从系统建模与动态仿真的角度定量研究多因素耦合复杂飞行情形的风险评估关键技术问题,并研究将其有机融入当前飞机系统安全性设计流程以及应用于适航验证和飞行试验中的方法。全书共五篇,其中,第一至三篇是人-机-环仿真平台建立的模型基础;第四篇为基于系统仿真的飞行安全量化分析理论及其在飞行器安全性设计中的应用研究;第五篇是飞行安全边界保护方法研究,来自俄罗斯莫斯科国立民用航空技术大学副校长 V. V. Vorobyev 以及 A. N. Akimov 等专家的科研成果,由本书作者整理。

本书的主要工作和各篇章内容安排如下。

第一篇包含第 1~4 章,主要介绍人为因素对飞行安全的影响及对人的建模仿真方法。分别就飞行机组人员、地面维护保障人员、管理人员这三类人员,从影响机理与防范措施方面展开论述,并重点对驾驶员模型进行研究,为下一步开展人机闭环系统仿真提供驾驶员模型支撑。

第二篇包含第 5~8 章,主要介绍装备故障对飞行安全的影响及对故障的建模

仿真方法。分别就操纵系统、发动机系统、机载软件这三类故障,从影响机理与防范措施方面展开论述,并重点对操纵系统故障模型、动力系统故障模型、机载软件安全性需求变更对飞行安全影响的角度进行研究,为下一步开展人机闭环系统仿真提供典型装备故障模型支撑。

第三篇包含第 9~13 章,主要讲述外部环境对飞行安全的影响及其建模仿真方法。分别就几种典型的外部环境因素:大气紊流、风切变与微下击暴流、结冰、尾流,从基本概念、对飞行安全影响机理方面进行阐述,建立典型外部环境数学模型,为下一步开展人机闭环系统仿真提供外部环境模型支撑。

第四篇包含第 14~18 章,主要阐述基于复杂系统仿真的飞行风险量化分析方法及其在飞机系统安全性设计中的应用。提出基于虚拟飞行仿真飞行事故再现方法和安全性分析与仿真模型,就单参数与多维参数极值理论在飞行风险量化评估中的应用,以实际案例进行说明,并叙述复杂飞行情形建模仿真在飞机系统安全性设计中的应用研究。

第五篇包含第 19~23 章,是作者与俄罗斯专家教授合作章节,旨在向国内读者介绍俄罗斯在飞行边界保护方面的先进理论及方法,对于目前先进飞行器的研制及现有飞行器飞行性能的提高具有一定的借鉴意义。

本书由徐浩军负责统稿。第一篇的撰写和第五篇的翻译由徐浩军主笔,第二篇、第三篇由李颖晖主笔,第四篇由李哲主笔。在全书的撰写、修改和统稿过程中,讲师薛源,博士研究生裴彬彬、王小龙、魏扬,硕士研究生王健名、陈威、吕晗阳、王良禹、王国智等均做了大量工作。

本书的出版得到国家重点基础研究发展计划项目(2015CB755802)、国家自然科学基金项目(61374145、61503406)的联合资助。由于作者的水平和资料有限,书中不足之处在所难免,欢迎专家、读者不吝赐教。

作 者

2017 年 8 月

目 录

前言

第一篇 人为因素对飞行安全的影响

第 1 章 航空系统中人为因素综述	3
1.1 人为因素的定义	5
1.2 人为因素的分类	5
1.2.1 人员分类	5
1.2.2 因素分类	6
1.3 飞行中人的因素的性质及相关学科	7
1.3.1 飞行中人的因素的学科组成	7
1.3.2 飞行中人的因素的性质	9
1.4 典型人因失误事故模型	9
1.4.1 瑟利模型	9
1.4.2 威格里斯沃斯模型	12
1.4.3 变化-失误模型	12
1.4.4 SHELL 模型	14
1.5 人为因素造成飞行事故统计分析	16
1.5.1 基于人为因素的民航飞行事故原因统计	16
1.5.2 基于人为因素的事故征候分析	21
第 2 章 飞行机组人员差错对飞行安全的影响及预防措施	24
2.1 典型飞行机组人员差错	24
2.2 驾驶员对飞行安全的影响	25
2.2.1 驾驶员的生理状况对飞行安全的影响	25
2.2.2 驾驶员的其他状况对飞行安全的影响	32
2.2.3 驾驶员团队合作意识对飞行安全的影响	33
2.3 驾驶员模型	35
2.3.1 驾驶员的操纵行为	36
2.3.2 ANN 驾驶员模型	40
2.3.3 航线飞行的驾驶员操纵模型	44
2.3.4 着陆下滑阶段的驾驶员操纵模型	44

2.3.5	不利因素出现后特殊情况驾驶员操纵模型	46
2.3.6	驾驶员滞后失误时间模型	48
2.3.7	驾驶员反操纵失误模型	49
2.3.8	驾驶员目测高/低模型	49
2.4	飞行机组人员在预防飞行事故方面的主要措施	49
2.4.1	提高空勤组安全性的工作重点	50
2.4.2	在学习飞行中应模拟的内容	50
第3章	地面维护保障人员差错对飞行安全影响及预防措施	51
3.1	地面维护保障人员及其典型差错分析	51
3.2	机务人员维修差错的原因	52
3.2.1	维修人员意识水平的影响	52
3.2.2	自然环境对人的影响	53
3.2.3	航空人员自身素质的影响	54
3.3	维修人员失误结构模型	54
3.4	地面维护人员维修差错对飞行安全的影响	56
3.5	维修人员培训大纲	56
3.6	地面维护保障人员在预防飞行事故方面的主要措施	57
第4章	管理人员差错影响飞行安全及预防措施	59
4.1	管理人员及其典型差错分析	59
4.1.1	空中交通管制人员	59
4.1.2	飞行工作组织人员	61
4.1.3	飞行工作管理人员	61
4.2	空管人员失误模型	61
4.3	管理人员失误对飞行安全的影响	62
4.4	管理人员在预防飞行事故方面的主要措施	63
4.4.1	机场技术保障	63
4.4.2	通信和无线电技术保障	64
4.4.3	气象保障和防鸟保障	64
4.4.4	医务保障	65

第二篇 装备故障对飞行安全的影响

第5章	航空装备故障对飞行安全影响综述	69
5.1	研究意义	69
5.2	飞机系统的组成	70
5.2.1	民航飞机系统组成	70

5.2.2 军用飞机系统组成	71
第6章 操纵系统与飞行安全	73
6.1 飞机操纵系统的发展历程与飞行安全	73
6.1.1 机械操纵系统	73
6.1.2 增稳系统与控制增稳系统	75
6.1.3 电传操纵系统	77
6.2 电传操纵系统及其典型故障建模分析	79
6.3 案例:某型飞机横向操纵系统故障对飞行安全的影响	82
6.3.1 横向操纵系统故障模型建立	82
6.3.2 横向操纵系统故障后的飞行风险评估	84
6.4 案例:某型飞机横向电传操纵系统安全性设计	89
6.4.1 飞机级功能危险分析	90
6.4.2 横向电传操纵系统安全性评估	93
6.4.3 共模故障分析	102
第7章 航空发动机故障对飞行安全的影响	104
7.1 航空发动机类型及其发展历程	104
7.2 航空发动机建模方法	104
7.2.1 推力等级预设法	105
7.2.2 燃油流量数学模型	109
7.2.3 高压转子转速 N_2 数学模型	110
7.2.4 推力数学模型	111
7.3 航空发动机典型故障模型	112
7.3.1 航空发动机故障种类	112
7.3.2 航空发动机故障建模	112
7.4 航空发动机故障对飞行安全影响的建模	116
第8章 机载软件系统故障对飞行安全的影响	118
8.1 机载软件系统安全性的研究背景及意义	118
8.2 机载软件系统需求分析与分类	119
8.2.1 需求信息组织结构	119
8.2.2 非功能性需求分析	123
8.2.3 需求分类	124
8.3 机载软件系统安全性需求变更影响分析	125
8.4 安全性需求一致性分析	129
8.5 飞控软件虚拟试飞验证与安全性评估方法	137

8.5.1 飞控软件致灾机理分析	138
8.5.2 基于虚拟试飞的安全性测试与验证流程	140

第三篇 外部环境对飞行安全的影响

第9章 外部环境对航空装备飞行安全影响综述	145
9.1 大气紊流	145
9.2 风切变与微下击暴流	145
9.3 结冰	146
9.4 尾流	147
9.5 其他环境	148
9.5.1 雷电	148
9.5.2 鸟撞	150
第10章 大气紊流对飞行安全的影响	153
10.1 大气紊流基本概念和假设	153
10.2 大气紊流速度的相关函数和频谱函数	153
10.2.1 大气紊流速度的相关函数	153
10.2.2 大气紊流速度的频谱函数	155
10.2.3 大气紊流速度的尺度和强度	156
10.3 大气紊流速度梯度的频谱函数	158
10.4 飞机对大气紊流的响应分析	160
10.4.1 大气紊流速度场的线化	160
10.4.2 大气紊流速度的气动等价作用	161
10.4.3 飞机的运动方程和传递函数	164
10.4.4 飞机对大气紊流的响应特性计算	168
10.5 大气紊流的模拟	174
10.5.1 白噪声的滤波结果	174
10.5.2 大气紊流速度的模拟	175
第11章 风切变与微下击暴流对飞行安全的影响	177
11.1 风切变与微下击暴流基本概念	177
11.2 风切变与微下击暴流建模分析	177
11.2.1 工程化模型	177
11.2.2 单个风场模型	178
11.2.3 中心轴处的诱导速度计算	180
11.2.4 涡核内部的诱导速度计算	180

11.2.5 微下击暴流风场的不规则变换与风速叠加	180
11.3 风切变与微下击暴流对飞行安全的仿真分析	181
11.4 风切变保护措施	183
11.4.1 风切变判断依据	183
11.4.2 风切变的应对措施	184
第 12 章 结冰对飞行安全的影响	186
12.1 飞机结冰形成概况	186
12.1.1 结冰的形成机理	186
12.1.2 大气结冰条件	187
12.1.3 翼面结冰冰形分类	188
12.1.4 结冰的强度与程度	190
12.2 结冰的建模分析	191
12.2.1 均匀结冰模型	191
12.2.2 不对称结冰模型	192
12.3 机翼结冰对飞行安全的影响	193
12.3.1 机翼结冰的危害	193
12.3.2 机翼结冰对飞机动力学响应的影响	195
12.4 平尾结冰对飞行安全的影响	201
12.4.1 平尾结冰的危害	201
12.4.2 平尾结冰对飞机动力学响应的影响	202
12.5 发动机进气道结冰对飞行安全的影响	206
12.6 空速管结冰对飞行安全的影响	208
12.7 结冰预防及保护措施	208
12.7.1 传统研究方法	208
12.7.2 容冰控制方法	209
12.7.3 不同险情下的飞行操纵建议	209
第 13 章 尾流对飞行安全的影响	213
13.1 尾流基本概念	213
13.2 尾流的建模分析	213
13.2.1 近距尾流数学模型	213
13.2.2 长波不稳定阶段模型	215
13.2.3 涡环阶段模型	217
13.3 尾流对飞行安全影响的仿真计算	218

第四篇 基于复杂系统仿真的飞行风险量化分析

第 14 章 基于虚拟飞行仿真飞行事故再现方法	225
14.1 飞行事故虚拟再现系统设计思路	226
14.2 基于决定性参数超限的事故起因	227
14.2.1 决定性参数概念	227
14.2.2 决定性参数超限类型	227
14.2.3 决定性参数综合限制函数	228
14.3 基于 HLA 的虚拟飞行仿真飞行事故再现	229
14.4 案例分析	230
14.4.1 飞机运动方程	230
14.4.2 人-机系统模型	230
14.4.3 3D 模型的构建	231
14.4.4 事故原因的解算	232
14.4.5 事故过程的虚拟再现	233
14.5 讨论	235
第 15 章 飞行安全分析与仿真模型	236
15.1 改进的多因素耦合情形马尔可夫状态转移模型	236
15.1.1 不利因素不可修复的马尔可夫综合评估模型	236
15.1.2 不利因素可修复时对马尔可夫模型的修正	238
15.1.3 不利因素可能修复时对马尔可夫模型的修正	239
15.1.4 训练科目综合应用案例研究	240
15.2 多因素风险情形树评估模型	244
15.2.1 传统理论方法的局限性	244
15.2.2 多因素风险情形树模型的基本概念	246
15.2.3 多因素风险情形树的建模方法和计算方法	247
15.2.4 多因素风险情形树的数学推导	248
15.3 多因素复杂任务科目综合风险评估流程	253
15.4 试飞风险科目综合应用案例研究	254
15.4.1 国军标规范中关于试飞风险科目的要求	254
15.4.2 试飞风险科目潜在危险分析	255
15.4.3 风险定量评估和结果分析	255
第 16 章 飞行风险评估方法	260
16.1 飞行安全评估判据与风险评估标准	260

16.1.1	飞行安全评估判据	260
16.1.2	风险评价等级	260
16.2	基于单参数极值理论的小概率事件风险评估模型	263
16.2.1	小概率事件尾部分布规律	264
16.2.2	极值分布理论模型及渐进分布模型	267
16.2.3	拟合分布函数参数优化及拟合优度检验	270
16.2.4	极值理论的基本步骤	272
16.3	基于多元极值 Copula 理论的飞行风险定量评估	274
16.3.1	Copula 相关理论及性质	275
16.3.2	阿基米德 Copula 函数族	278
16.3.3	多元极值 Copula 的择优准则	279
16.3.4	基于 Copula 的参数相关性分析	282
第 17 章	特殊气象条件下多因素耦合风险飞行科目定量评估方法	289
17.1	翼面结冰情形下飞行风险评估	289
17.1.1	翼面结冰飞行风险的定义	289
17.1.2	翼面结冰下飞行极值参数的提取	290
17.1.3	飞行极值参数的统计特性分析	295
17.1.4	基于单参数极值理论的翼面结冰飞行风险概率分析	296
17.1.5	基于二元 Copula 理论的翼面结冰飞行风险概率分析	302
17.2	尾流遭遇情形下飞行风险评估	308
17.2.1	尾流遭遇飞行风险的定义	308
17.2.2	尾流遭遇情形下飞行极值参数的提取	308
17.2.3	基于二元 Copula 理论的尾流遭遇飞行风险概率分析	318
17.2.4	基于三维 Copula 理论的尾流遭遇飞行风险概率分析	325
17.2.5	尾流遭遇情形下飞行参数极值间的相关性分析	329
第 18 章	复杂飞行情形建模仿真在飞机系统安全性设计中的应用研究	334
18.1	建模仿真与系统安全性的综合安全性设计流程思路	334
18.2	基于虚拟试飞和改进的模糊综合评判的 FHA	335
18.2.1	功能危险分析简介	335
18.2.2	对功能危险分析的研究思路	336
18.2.3	基于虚拟试飞的功能危险分析方法	336
18.2.4	基于改进的模糊综合评判方法的 FHA	339
18.2.5	多因素综合评判应用案例计算	341
18.3	基于主客观最优组合赋权的 PSSA 安全性指标分配	342
18.3.1	基于粗糙集方法的客观赋权	343

18.3.2	基于主客观最优赋权的安全性指标分配	345
18.3.3	PSSA 指标分配应用案例分析	346
18.4	基于复杂系统虚拟试飞的适航性符合性验证方法	349
18.4.1	适航验证科目想定库的建立	349
18.4.2	MIL-HDBK-516B 条款符合性验证案例	350

第五篇 飞行安全边界保护方法

第 19 章	机载限制系统的现状与任务	359
19.1	航空器飞行事故分析	359
19.2	使用飞行状态与极限飞行状态	362
19.3	飞行器操纵限制的主要类型	362
19.4	飞行员在接近边界飞行时的心理特点	364
19.5	机载极限状态限制系统的分类及其功能的典型算法	366
19.6	现有边界保护系统方法综合分析及主要研究任务	370
第 20 章	动力学系统状态向量分量限制边界自适应保护方法	372
20.1	任务的提出	372
20.2	边界保护的一般情况	373
20.3	定常运动时动力学系统边界保护基本规律确定方法	376
20.4	针对动力学系统部分模型的自适应限制系统算法分析	378
20.4.1	定常限制面的几种描述方法	378
20.4.2	线性确定性连续动力学系统的限制模型	381
20.4.3	确定性连续高阶动力学系统的限制模型	382
第 21 章	飞行器操纵参数自适应限制算法	383
21.1	高机动飞机迎角自适应限制	383
21.2	高机动飞机运动参数保护的特点	387
21.3	直升机坡度的限制	390
21.4	二维状态向量空间的限制	393
第 22 章	飞行器运动参数限制自适应保护方法	396
22.1	边界保护的一般情况	396
22.1.1	问题的提出	396
22.1.2	目标及其限制面的模型	396
22.1.3	限制算法的解析解	398
22.2	飞机水平和垂直平面内运动轨迹限制任务	399
22.2.1	飞机在垂直平面内运动脱离限制	399

22.2.2 飞机在水平面内运动脱离限制	403
22.3 作为高度速度包线的限制保持的算法综合	406
22.4 非定常边界保持的特点	408
第 23 章 飞行器按轨迹程序脱离限制面的方法	410
23.1 问题的提出	410
23.2 地形回避时飞行器位置与方位角的计算	411
23.3 打开“脱离”的条件	413
23.4 控制规律	415
23.5 飞行器地形回避任务的求解	416
23.5.1 垂直面类型的障碍物	416
23.5.2 斜置面障碍物	418
23.5.3 “脱离”算法的对比分析	420
参考文献	423

**第一篇 人为因素对飞行
安全的影响**

