



中国航空学会
《航空科学技术丛书》

飞行器结构 优化设计

Aircraft Structure
Optimization

李为吉 宋笔锋 孙侠生 张勇 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

中国
《航空和航天工业》

飞行器结构优化设计

Aircraft Structure Optimization

李为吉 宋笔锋 孙侠生 张勇 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

飞行器结构优化设计 / 李为吉等编著. —北京:国防工业出版社, 2005. 12

ISBN 7-118-03883-0

I. 飞... II. 李... III. 飞行器-结构设计-最优设计 IV. V214.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 044416 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{3}{4}$ 290 千字

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 40.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 (按姓名笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

《航空科学技术丛书》

编审委员会

主 任 刘高倬

副主任 (以姓氏笔画排序)

马恒儒 王 欣 丛日刚 刘国华 杨国庆 杨育中
姜澄宇 胡海岩 魏 钢

编委会顾问 (以姓氏笔画排序)

王 中 刘大响 李 明 宋文骢 张福泽 陈一坚
陈懋章 贲 德 钟群鹏 徐建中 曹春晓 管 德

编委会委员 (以姓氏笔画排序)

王立新 甘晓华 伍贻兆 刘行伟 孙先仿 孙健国
朱自强 严传俊 吴学仁 张靖周 张聚恩 李玉龙
李志强 杨 伟 沈士团 沙长安 苏恩泽 周德云
孟 光 武 哲 胡子建 荣毅超 费斌军 夏品奇
徐肖豪 桂幸民 高 正 高正红 高德远 梁德旺
崔德刚 康 锐 梅文华 程洪彬

编委会编辑部

吴 松 王晓舟 郝 刚 唐应恒

编委会办公室

汪 淳 赵霜红 欧阳黎明

总 序

航空器的诞生和发展,不仅极大地改变了人类的生活方式,促进了社会经济繁荣,而且成为决定现代战争胜负的重要因素和国家综合实力的集中体现。建国以来,我国航空工业经历了维修、仿制、自主研发、试验、生产、装备使用等过程,取得了丰硕成果。尤其是近 20 年来,航空技术研究有不少突破性科技成果,涌现出一大批有突出贡献和学术成就斐然的技术专家、学科带头人,他们的科技成就和丰富经验,是我国航空事业的宝贵财富。以图书为载体,记录这些成就,传播这些经验,可以扩大航空领域科学技术的交流,促进航空科技事业的继承与发展,加快航空科技人才的培养和提高。

21 世纪是科技迅猛发展的时代,国民经济的发展必须依靠高科技,武器装备和军事技术的发展更要依靠高科技。航空科技图书出版工作是航空科技和军队航空武器建设事业的一个组成部分,优秀的航空科技图书既是航空科技工作的一种成果,也是科技水平的重要标志,是国家的重要财富。出版《航空科学技术丛书》,不仅是从总体上对我国航空科技发展的总结,而且是为今后航空科技加强自主创新、实现持续快速发展奠定了良好的技术基础。

这套丛书将按照飞机、发动机、材料工艺、综合航电、机载设备和武器等领域来分类和组成,在每一类中可进一步细分为设计、气动、强度、原理、燃烧、控制、实验与测试技术、工艺、材料、信息技术等学科。其中部分著作是由航空领域的院士、著名专家等牵头组织编撰或修订的学术专著;部分著作是目前处于科研生产一线的学科带头人结合科研课题和科研成果的有较高学术价值的专著;另有一些是偏重工程应用的、有推广价值的技术著作。具体分列

如下:

(1) 在航空科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论著作;学术思想新颖,内容具体、实用,对航空科技发展有较大推动作用的专著。

(2) 航空工程技术理论方面有突破的应用科学专著、应用技术著作。

(3) 密切结合军用、民用航空装备现代化需要的高新技术内容的专著。

(4) 有重大发展前景和重大开拓使用价值,密切结合军用、民用航空装备现代化需要的新思想、新概念、新工艺、新材料内容的专著。

(5) 填补目前我国航空科技领域空白并具有应用价值的前沿学科和边缘学科的科技图书。

这套丛书从组织策划到付诸实施,得到了业界的热烈响应,得到了各领导机关的重视与支持,得到中国人民解放军总装备部、空军装备部和国防科工委、中国一航、中航二集团、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、中国民航学院以及一些航空科研院所、国防工业出版社等单位有关领导和专家的大力支持与协助,得到国防工业出版社的鼎力资助。在此,特向上述单位的领导和专家们致以热忱的谢意。

相信这套丛书的出版将对我国航空事业的发展起到承前启后、继往开来的重要作用,将是一件具有里程碑意义的工作。期望这套丛书能够有益于高技术领域人才的培养,有益于国防科研事业的发展,有益于航空科学技术的进步。

中国航空学会

《航空科学技术丛书》编审委员会

2005 年 12 月

《航空科学技术丛书》 已出版书目

001 航空燃气轮机燃油喷嘴技术

甘晓华 著 2006 年

002 飞行器结构优化设计

李为吉 宋笔锋 孙侠生 张勇 编著 2006 年

前 言

20 世纪 60 年代以来,电子计算机技术、结构分析的有限元素法和数学规划的研究得到迅速的发展,使飞行器结构设计从“分析和校核”进入“优化设计”的新阶段,很大程度上提高了设计质量。在航空航天领域,对结构重量、飞行性能等要求非常严格,优化设计技术得到广泛的应用,优化设计也成为高等院校飞行器设计专业的重要研究方向。飞行器结构优化设计涉及到基础数学知识、工程设计、优化理论与方法等多个领域。现代优化设计方法也在迅速发展,出现了许多新的前沿课题。很有必要出版一本既有基本优化理论、比较完整的基本知识和优化设计方法,又有新的研究方向、科研成果和工程实际应用的专著。为此,本书由三个部分构成:第一,优化设计的理论基础,包括结构优化设计的数学模型、线性规划基本理论和计算方法、无约束非线性规划和约束非线性规划的基本理论、多种计算方法的公式、性质和流程、多目标优化的基本理论和计算方法;第二,工程结构优化设计,包括适用于工程设计的优化准则法、对飞行器结构设计具有重要意义的结构可靠性优化设计,复合材料结构优化设计和复合材料翼面结构的气动弹性剪裁;第三,飞行器优化设计技术的新发展,包括多学科设计优化(MDO)、遗传算法及改进,智能优化设计技术。

本书是作者多年来教学和科研工作的总结,着重基础知识,理论与实践结合以及新的研究方向。全书共 10 章,由西北工业

大学李为吉教授(第1、2、3、4、8章),宋笔锋教授(第5、6章),中国飞机强度研究所孙侠生研究员(第7章),中国空气动力研究与发展中心张勇副研究员(第9、10章)完成。全书由李为吉教授统稿。

本书可作为高等工科院校研究生教学用书,也可供工程技术人员参考。限于作者水平,书中错误和不当之处,敬请读者指正。

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 结构优化设计的数学模型	2
第 2 章 线性规划	7
2.1 线性规划的基本理论	7
2.2 单纯形法	13
2.3 人工变量	23
2.4 单纯形法的矩阵形式	26
2.5 改进的单纯形法	28
2.6 矩阵求逆的乘积形式	31
2.7 线性规划的对偶问题	33
2.8 敏感性分析和补松弛	38
2.9 对偶单纯形法	41
第 3 章 无约束非线性规划	47
3.1 最优解的基本性质	47
3.2 一维搜索	55
3.3 最陡下降法	62
3.4 牛顿法	64
3.5 共轭方向法	66
3.6 拟牛顿法	76
第 4 章 约束非线性规划	87
4.1 约束最小化条件	87
4.2 可行方向法	96
4.3 梯度投影法	104

4.4	罚函数法	114
4.5	障碍函数法	119
4.6	多目标优化	120
第 5 章	优化准则法	130
5.1	基本满应力法	130
5.2	位移准则法	144
5.3	结构优化准则法的一般形式	150
第 6 章	结构可靠性优化设计	163
6.1	结构元件可靠性分析的基本方法	163
6.2	结构系统可靠性分析方法	178
6.3	基于可靠性的结构优化设计	186
6.4	结构可靠性优化设计的大系统方法	195
第 7 章	复合材料结构优化设计	202
7.1	复合材料经典层压板设计	202
7.2	复合材料结构的多级优化设计方法	222
7.3	满应力/应变设计(FSD)	228
7.4	复合材料翼面结构的气动弹性剪裁	232
7.5	复合材料结构优化实例	249
第 8 章	多学科设计优化	255
8.1	多学科设计优化概述	255
8.2	多学科设计优化的通用技术	258
8.3	基于层次型分解的算法	262
8.4	协同优化	268
8.5	协同优化的近似方法	276
8.6	并行子空间优化	282
8.7	并行子空间优化的近似方法	289
第 9 章	飞行器优化设计的遗传算法	295
9.1	基本遗传算法	295
9.2	遗传算法的改进	302
9.3	多目标遗传算法	312

9.4 可重复使用运载器(RLV)机翼外形优化	317
第 10 章 智能优化设计技术	321
10.1 智能优化设计概述	321
10.2 智能优化设计系统的构成和实现	325
10.3 智能优化设计的工程应用	334
参考文献	343

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Brief Introduction	1
1.2	Mathematical Model for Structure Optimization	2
Chapter 2	Linear programming	7
2.1	The Fundamental Theorem of Linear Programming	7
2.2	The Simplex Method	13
2.3	Artificial Variable	23
2.4	Matrix Form of Simplex Method	26
2.5	The Revised Simplex Method	28
2.6	The Product Form of The Inverse	31
2.7	Dual Linear Programming	33
2.8	Sensitivity and Complementary Slackness	38
2.9	The Dual Simplex Method	41
Chapter 3	Unconstrained nonlinear programming	47
3.1	Basic Properties of Optimum Solutions	47
3.2	One-dimensional Search	55
3.3	The Method of Steepest Descent	62
3.4	Newton Method	64
3.5	Conjugate Direction Method	66
3.6	Quasi-Newton Method	76
Chapter 4	Constrained nonlinear programming	87
4.1	Constrained Minimization Condition	87
4.2	Feasible Direction Method	96
4.3	The Gradient Projection Method	104

4.4	Penalty Method	114
4.5	Barrier Method	119
4.6	Multiobjective Optimization	120
Chapter 5	Optimality criteria method	130
5.1	Basic Full-stress Method	130
5.2	Displacement Criterion Method	144
5.3	General Form of Structural Optimality Criteria Method	150
Chapter 6	Reliability-based optimization of structure	163
6.1	Reliability Analysis Methods for Structure Component	163
6.2	Reliability Analysis Methods for Structure System	178
6.3	Reliability-based Optimization of Structure	186
6.4	Large-scale System Method for Reliability-based Optimization of Structure	195
Chapter 7	Composite structure optimization	202
7.1	Composite Laminates Design	202
7.2	Multi-level Optimization Method for Composite Structure	222
7.3	Full-stress/displacement Design	228
7.4	Aeroelastic Tailoring of Composite Wing Structure	232
7.5	Example of Composite Structure Optimization	249
Chapter 8	Multidisciplinary design optimization	255
8.1	Introduction to Multidisciplinary Design Optimization (MDO)	255
8.2	General Technology of MDO	258
8.3	Hierarchical Decomposition	262
8.4	Collaborative Optimization (CO)	268
8.5	Approximation Method for CO	276
8.6	Concurrent Subspace Optimization (CSSO)	282