



国防科技图书出版基金

■ 杨伟 常楠 王伟 著



飞机复合材料 翼面结构优化设计理论与应用

Structural Optimization Design
of Aircraft Composite Wing



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

国防工业出版社

飞机复合材料翼面结构优化 设计理论与应用

Structural Optimization Design of Aircraft Composite Wing

杨伟 常楠 王伟 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

飞机复合材料翼面结构优化设计理论与应用/杨伟,常楠,王伟著. —北京:国防工业出版社,2014. 11

ISBN 978 - 7 - 118 - 09528 - 9

I. ①飞... II. ①杨... ②常... ③王... III. ①飞机 - 复合材料 - 结构设计 IV. ①V257

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 257303 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100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 插页 4 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 252 千字

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

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 第七届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	吴有生	蔡 镛	杨崇新	
秘 书 长	杨崇新			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨 伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆 军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

随着飞机性能的日益提高和使用环境的严酷,对飞机结构设计的要求越来越高。与传统金属材料相比,复合材料具有比强度高、比刚度大等优点,用于飞机结构一般可减重 25% 左右。此外,复合材料还具有可设计性强、疲劳性能好、耐腐蚀、易于整体成型等优点。自 20 世纪 70 年代初,复合材料在飞机结构上的应用日益广泛,与铝、钢、钛一起,迅速发展成为四大航空结构材料。

相对于机身,翼面提供飞机的主要升力。因此,翼面结构设计中不仅仅要考虑常规结构设计中需考虑的应力、应变、稳定性、刚度等因素,还需重点考虑气动载荷所带来的静、气动弹性问题,后者也是飞机结构设计的重点和难点。现代战斗机一般翼型高度低、重量和刚度要求严格、专业综合性更强,因此轻质复合材料在机翼设计中得到了越来越多的应用。通过对复合材料进行合理的刚度剪裁设计,不但能带来显著的减重效益,还能改善结构静、气动弹性性能。与各向同性材料相比,复合材料的应用给飞机结构带来巨大收益的同时也扩大了结构设计空间,大大增加了设计的难度,对结构设计提出了更高的要求,采用传统的设计、校核、修改设计的方式已经难以满足要求。结构优化技术通过优化结构的尺寸、形状和拓扑等参数,能够帮助设计者在满足一定性能的前提下找出较优的结构形式和参数,因此,结构优化技术是现代飞机结构设计中最重要技术之一。从而实现结构优化设计。

我国在复合材料结构设计优化领域起步晚,虽然近年来有很多学者和工程人员在该领域进行了广泛而深入的研究,但是大多集中在算法研究上,与工程型号的结合还有待进一步加强。其原因主要是复合材料结构优化的特殊性:复合材料优化问题属于离散变量优化问题,采用传统的优化方法和策略来处理具有局限性;近年来出现的各种智能算法虽然适合解决复合材料结构优化问题,但一方面工程设计人员了解的较少,另一方面,该类优化算法与具体工程问题相结合时参数设置、模型构建等较为复杂,因此鲜有智能算法与工程型号结构优化设计相结合的应用实例。

本书以复合材料翼面结构为研究对象,按照涉及的关键技术进行组织,从优

化模型、最优化理论、复合材料层合板优化方法、复合材料加筋壁板优化方法、翼面结构布局优化方法、复合材料气动弹性剪裁设计等方面,对复合材料结构优化进行了详细介绍。

第1章介绍了飞机翼面结构的设计要求、结构形式、载荷分类和传力分析,给出了翼面结构设计的输入,阐述了结构优化的分类和相应采取的优化方法,重点叙述了结构优化在工程上的最新应用和减重效果。

第2章对翼面结构优化问题进行合理的分析,抓住主要矛盾,建立了既能反映工程问题物理本质,又便于使用优化算法求解的数学模型。针对翼面结构,给出了翼面结构尺寸优化、形状优化、拓扑优化和复合材料优化的数学模型。

第3章介绍了最优化理论。内容涉及翼面结构优化较为常用的优化准则法;复合材料优化设计常用的遗传算法、粒子群算法、蚁群算法;拓扑优化常用到的变密度法、渐近结构优化方法。同时给出了部分优化算法的改进策略。

第4章研究了复合材料层合板优化设计方法。首先对复合材料经典层合板理论进行阐述,详细推导了用于复合材料层合板厚度优化的准则法迭代公式;对经典粒子群算法进行改进,形成交换离散粒子群算法;对复合材料铺层参数优化问题进行合理转换,转变为经典TSP优化问题,并采用蚁群算法进行求解。针对以上每种优化算法,本章分别给出了经典算例,并对优化算法的应用过程、应用效果进行了详细的描述。

第5章首先介绍了复合材料加筋壁板结构分析方法,进行了典型加筋壁板稳定性变参数分析,得到了各参数对稳定性的影响。在此基础上,建立了复合材料加筋壁板的多目标多约束优化模型。最后,以大型机翼整体化壁板为研究对象,进行了恒重增稳优化设计研究,给出了加筋壁板优化设计的方法和流程。

第6章提出了翼面结构布局优化的分级优化思想,给出了翼面结构纵向结构布局优化的改进型ESO优化方法,多梁多墙翼面结构布局优化方法,以及翼面结构的形状与尺寸综合优化设计方法。

第7章首先详细阐述了复合材料气动弹性剪裁的概念、原理、分析方法及优化设计工程应用现状,然后以大展弦比复合材料机翼为研究对象,采用NAS-TRAN为优化工具,进行了静气弹优化设计研究;将不同蒙皮厚度的翼盒作为研究对象,研究了蒙皮厚度变化对颤振速度的影响,并考虑翼盒的颤振速度和翼盒整体弯曲刚度进行了多目标优化设计。最后,以某型号飞机复合材料机翼气弹剪裁工程案例为对象,详细阐述了气动剪裁设计的工程应用方法、关键技术与解决途径。

第8章分析了翼面结构优化工程应用要素。对分级优化、优化规模的控制、合理有限元模型的建立、灵敏度快速分析技术、工程适用的优化算法、快速布局设计软件、细节设计中的复合材料铺层顺序优化等7个优化要素进行了详细地分析和探讨,最后给出了翼面结构工程优化设计的流程。

作者多年来从事飞机设计及飞机复合材料结构优化工程应用研究,在多年型号工作经验基础上,借鉴国内外同行专家的研究成果,力图从工程实际应用角度出发,将优化算法与飞机复合材料结构设计相结合,对优化算法进行适应性改进,在飞机结构布局优化、典型结构件优化设计、复合材料层合板优化设计等方面取得了一定的成果,并在型号设计上进行了应用,取得了可喜的成就。本书是作者多年研究工作的经验总结,但由于水平有限,难免有不足甚至错误之处,敬请读者批评指正。

作者

2014年6月

目 录

第 1 章 飞机翼面结构设计及优化概述	1
1.1 引言	1
1.2 飞机翼面功能与设计的要求	3
1.3 典型翼面结构形式及传力分析	4
1.3.1 翼面结构形式	4
1.3.2 传力分析	6
1.4 翼面结构优化理论与应用现状	8
1.4.1 翼面结构优化分类	8
1.4.2 优化方法	10
1.4.3 优化软件及工程应用	13
参考文献	16
第 2 章 翼面结构优化的数学模型	19
2.1 结构优化三要素	19
2.1.1 设计变量	19
2.1.2 目标函数	19
2.1.3 约束条件	20
2.2 翼面结构尺寸优化数学模型	21
2.3 翼面结构形状优化数学模型	21
2.4 翼面结构拓扑优化数学模型	22
2.5 复合材料结构优化数学模型	23
参考文献	24
第 3 章 最优化基本理论	25
3.1 优化准则法	25

3.1.1	满应力法	25
3.1.2	位移准则法	28
3.1.3	多约束下的结构优化准则法	31
3.2	遗传算法	34
3.2.1	遗传算法的特点	35
3.2.2	基本遗传算法	35
3.2.3	遗传算法的数学理论	38
3.3	粒子群算法	40
3.3.1	基本粒子群算法	40
3.3.2	自适应粒子群算法	41
3.4	蚁群算法	42
3.4.1	蚁群算法的特点	42
3.4.2	基本蚁群算法	42
3.4.3	蚁群算法的改进策略	44
3.5	变密度法	44
3.5.1	变密度法数学模型描述	44
3.5.2	灵敏度分析	46
3.5.3	优化准则的推导	47
3.6	渐进结构优化方法	48
3.6.1	基本渐进结构优化方法	48
3.6.2	具有刚度约束的结构渐进优化方法	50
	参考文献	51
第4章	层合板优化设计方法	53
4.1	复合材料经典层合板设计	53
4.1.1	经典层合板理论的基本假设	53
4.1.2	单层复合材料的应力—应变关系	53
4.1.3	层合板的应力—应变关系	56
4.1.4	层合板的内力—应变关系	57
4.1.5	各类层合板的刚度系数计算	58
4.1.6	层合板的强度准则	67
4.2	准则法在层合板优化设计中的应用	68

4.2.1	大型结构中层合板在强度、刚度约束下的准则优化及算例	68
4.2.2	基于模糊理论的水平迭代—准则法	74
4.3	基于交换离散粒子群算法的层合板铺层顺序优化	79
4.3.1	层合板铺层顺序优化问题描述	79
4.3.2	问题转换及铺层顺序优化的离散粒子群算法	81
4.3.3	交换离散粒子群优化算法	82
4.3.4	算例结果及讨论	86
4.4	基于蚁群算法的层合板铺层角度优化设计	89
4.4.1	层合板铺层角度优化问题描述	89
4.4.2	问题转换与铺向角优化的蚁群算法	90
4.4.3	算例结果及讨论	92
4.5	基于蚁群算法的层合板铺层顺序优化设计	96
4.5.1	问题转换与铺层顺序优化的蚁群算法	96
4.5.2	算例结果及讨论	97
	参考文献	98
第5章	复合材料加筋板优化设计	100
5.1	复合材料加筋壁板屈曲分析方法	100
5.1.1	工程经验法	101
5.1.2	有限元法	105
5.1.3	有限条法	108
5.2	典型复合材料加筋壁板稳定性变参数分析	109
5.3	多目标多约束复合材料加筋壁板优化	118
5.3.1	成本模型	119
5.3.2	制造工艺约束	120
5.3.3	强度约束	121
5.3.4	实际结构重量评估	121
5.3.5	优化模型	121
5.4	复合材料加筋壁板稳定性优化设计	122
5.4.1	问题描述	122
5.4.2	蚁群算法的实施过程	124

5.4.3	结果与讨论	125
	参考文献	128
第 6 章	复合材料翼面结构布局优化设计	129
6.1	翼面结构布局优化的分级优化思想	129
6.2	翼面纵向结构的布局优化	130
6.2.1	基于改进 ESO 的翼面纵向结构布局优化	130
6.2.2	基于递阶—蚁群的翼面纵向结构布局优化	134
6.2.3	多梁多墙翼面纵向结构布局优化	138
6.3	翼面结构形状与尺寸综合优化设计	144
6.3.1	性能指标的定义	144
6.3.2	基于两相法的翼面结构形状尺寸综合优化设计	145
6.4	响应面近似技术	148
6.4.1	神经网络响应面近似技术	149
6.4.2	函数近似技术	150
	参考文献	151
第 7 章	复合材料翼面结构气弹剪裁设计	152
7.1	概述	152
7.1.1	复合材料气弹剪裁的基本概念	152
7.1.2	气弹剪裁研究现状及工程应用	153
7.2	气动弹性问题的原理及其分析方法	155
7.2.1	静、动气弹原理说明	155
7.2.2	气动发散问题的物理现象和原理	155
7.2.3	副翼效率问题物理现象和原理	156
7.2.4	颤振问题物理现象和原理	159
7.3	机翼刚度方向与气弹性能的关系	162
7.4	基于 NASTRAN 的大展弦比复合材料机翼气弹剪裁设计	163
7.4.1	NASTRAN 优化模块	164
7.4.2	算例	165
7.5	复合材料翼盒颤振特性分析及多目标优化设计	169
7.5.1	模型和分析方法	170

7.5.2	使用多岛遗传算法优化翼盒颤振速度	171
7.5.3	各段翼盒铺层参数对整体机翼的颤振速度影响	176
7.5.4	翼盒多目标优化	178
7.6	某型复合材料机翼工程化气弹剪裁优化设计	180
7.6.1	F22 气弹剪裁优化设计情况	180
7.6.2	技术难点分析	182
7.6.3	总体技术方案	183
7.6.4	关键技术及解决途径	184
	参考文献	189
第 8 章	翼面结构工程优化设计关键技术分析及设计流程	190
8.1	翼面结构工程优化关键技术分析	190
8.1.1	分级优化思想	190
8.1.2	优化规模的控制	192
8.1.3	合理有限元模型的建立	193
8.1.4	灵敏度快速分析技术	193
8.1.5	工程适用的优化算法	194
8.1.6	快速布局设计工具软件的开发	194
8.1.7	细节设计中铺层顺序优化的应用	195
8.2	翼面结构工程优化设计流程	196
	参考文献	198

Contents

Chapter 1 Introduction of design and optimization for wing structure	1
1.1 Introduction	1
1.2 Functions and design requirements of wing structure	3
1.3 Structural form and force transfer analysis of typical wing structure ...	4
1.3.1 Types of wing structure	4
1.3.2 Force transfer analysis of wing structure	6
1.4 Optimization theories and application status of wing structure	8
1.4.1 Classification of wing structure optimization	8
1.4.2 Optimization methods	10
1.4.3 Optimization software and engineering application	13
References	16
Chapter 2 mathematic model of wing structural optimization	19
2.1 Three key elements of structural optimization	19
2.1.1 Design variables	19
2.1.2 Objective function	19
2.1.3 Design constrains	20
2.2 Mathematic model of wing size structural optimization	21
2.3 Mathematic model of wing shape structural optimization	21
2.4 Mathematic model of wing topology structural optimization	22
2.5 Mathematic model of composite structural optimization	23
References	24
Chapter 3 Basic theories of optimization	25
3.1 Optimization criterion method	25
3.1.1 Full stress design method	25

3.1.2	Displacement criterion method	28
3.1.3	Multi-constrains optimization criterion method	31
3.2	Genetic algorithm	34
3.2.1	Characters of GA	35
3.2.2	Basic genetic algorithm	35
3.2.3	Mathematical theory of GA	38
3.3	Particle swarm optimization(PSO) algorithm	40
3.3.1	Basic PSO	40
3.3.2	Adaptive PSO	41
3.4	Ant colony algorithm	42
3.4.1	Characters of ant colony algorithm	42
3.4.2	Basic ant colony algorithm	42
3.4.3	Improvement strategy of ant colony algorithm	44
3.5	Variable Density Method	44
3.5.1	Mathematical theory of Variable Density Method	44
3.5.2	Design sensitivity analysis	46
3.5.3	Optimization criterion derivation	47
3.6	Evolutionary structural optimization algorithm	48
3.6.1	Basic evolutionary structural optimization algorithm	48
3.6.2	Evolutionary structural optimization algorithm based on stiffness constraint	50
	References	51
Chapter 4 Optimization methods of composite laminate		53
4.1	Classical design theory of laminate	53
4.1.1	Basic hypothesis of classical laminate design	53
4.1.2	Stress-strain relationship of Single Layer composite	53
4.1.3	Stress-strain relationship of composite laminate	56
4.1.4	Inner Force-strain relationship of composite laminate	57
4.1.5	Stiffness coefficient of laminate	58
4.1.6	Strength criterions of laminate	67
4.2	Application of criterion method on laminate optimization	68
4.2.1	Criterion optimization method and case study of complex composite structure with strength and stiffness constrains ...	68

4.2.2	Iterative level assemble-criterion (ILAC) method based on fuzzy theory	74
4.3	Composite stacking sequence optimization based on permutation discrete particle swarm optimization (PDPSO) algorithm	79
4.3.1	Introduction of composite stacking sequence optimization ...	79
4.3.2	Problem transfer and discrete particle swarm optimization algorithm for composite stacking sequence optimization	81
4.3.3	Permutation discrete particle swarm optimization algorithm	82
4.3.4	Results and discussions of case study	86
4.4	Composite ply orientation Angle optimization based on ant colony algorithm	89
4.4.1	Introduction of composite ply orientation Angle optimization	89
4.4.2	Problem transfer and ant colony algorithm for composite ply orientation Angle optimization	90
4.4.3	Results and discussions of case study	92
4.5	Composite stacking sequence optimization based on ant colony algorithm	96
4.5.1	Problem transfer and ant colony algorithm for composite stacking sequence optimization	96
4.5.2	Results and discussions of case study	97
References	98
Chapter 5	Composite stiffened panel design optimization	100
5.1	Buckling analysis methods of composite stiffened panel	100
5.1.1	Engineering methods	101
5.1.2	Finite element method	105
5.1.3	Finite stripe method	108
5.2	Parametric buckling analysis of typical composite stiffened panel ...	109
5.3	Multi-objectives and multi-constrains optimization of composite stiffened panel	118
5.3.1	Cost model	119
5.3.2	Manufacture processing constrains	120