




中国航空学会  
《航空科学技术丛书》

# 直升机复合材料 结构设计



Composite Structures Design  
for Helicopter

杨乃宾 倪先平 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

V275  
1011

中国航空  
《航空科学技术丛书》



# 直升机复合材料结构设计

## Composite Structures Design for Helicopter

杨乃宾 倪先平 编著



国防工业出版社

·北京·

2009020379

图书在版编目 (CIP) 数据

直升机复合材料结构设计 / 杨乃宾, 倪先平编著. —北京: 国防工业出版社, 2008. 11

(航空科学技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 05878 - 9

I. 直... II. ①杨...②倪... III. 直升机—旋翼—航空材料: 复合材料—结构设计 IV. V215.5 V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 110132 号

1



※  
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)

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 12 字数 293 千字

2008 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 42.00 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 程洪彬
- 秘 书 长 程洪彬
- 副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭
- 委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参  
(按姓氏笔画排序)
- 李德毅 杨星豪 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
- 本书主审委员 傅惠民

# 《航空科学技术丛书》

## 编审委员会

主任 刘高倬

副主任 (按姓氏笔画排序)

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 (按姓氏笔画排序)

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 (按姓氏笔画排序)

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

曲岩 赵霜红 邢剑飞

## 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、中航一集团、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
- 003 航空用引射混合器  
李立国 张靖周 著 2006 年
- 004 燃气轮机燃烧室  
林宇震 许全宏 刘高恩 著 2008 年
- 005 直升机复合材料结构设计  
杨乃宾 倪先平 编著 2008 年

## 前 言

20 世纪 60 年代复合材料旋翼桨叶在直升机上的应用,开始了直升机新的一次突破性的技术飞跃。70 年代研制的第三代直升机几乎全都采用了复合材料旋翼桨叶,80 年代以来研制的第四代直升机还在机体结构中大量采用复合材料,用量已占到结构重量的 35% ~ 50%,甚至超过 67%。机体结构复合材料用量现已成为衡量新一代直升机技术先进水平的重要标志之一。复合材料在传动系统中也开始得到应用。

结构设计是材料在结构上应用的主导。直升机结构设计,特别是旋翼系统设计与飞机结构有明显差异,大不相同。我国直升机复合材料结构设计研究工作已开展多年并取得了可喜的成果,积累了宝贵的经验,特别是自主开发研制和国际合作方面的经验,逐渐实现了由初步自行设计向完全自行设计发展。本书作者尽最大努力地收集、归纳了国内外直升机复合材料结构设计资料、经验和体会,特别是国外新型直升机复合材料结构的设计实践报导。

本书在内容安排上,突出直升机独特的旋翼系统和特殊的机体结构的设计原理和方法。

旋翼系统篇:以旋翼桨叶为重点,通过大量实例,全面、系统地介绍复合材料桨叶、桨毂和尾桨的结构构型、设计方法、固化成形工艺、验证试验与寿命评估等内容。

机体结构篇:从直升机机体结构特点出发,介绍直升机特殊的复合材料涵道大垂尾、座舱结构、龙骨整体壁板和油箱结构,以及耐坠吸能结构等部件设计、固化成形工艺技术和验证试验等内容。

本书内容力求科学严谨、系统完整、概念清楚、图文并茂、深入浅出,反映最新技术进展。

本书编撰过程中得到了国内直升机同行专家、教授的大力支持和帮助,在此深表谢意。特别感谢中国直升机研究所黄承恭研究员、夏千友研究员、邓景辉研究员、胡和平研究员、方永红研究员,南京航空航天大学张呈林教授,哈尔滨飞机工业(集团)公司许祖兴研究员、白岩研究员、高大伟研究员、王国平高级工程师、赵剑军高级工程师,北京航空材料研究院廖子龙副研究员,北京航空航天大学程小全教授,保定惠阳航空螺旋桨制造厂韩光荣高级工程师,对书稿提出了许多宝贵的修改意见和建议。

阅读本书需要对直升机有所了解,并具有一定的复合材料力学和工程结构设计方面的知识基础。本书可供直升机行业工程技术人员和研究人员参考,也可供高等院校相关专业作为教材使用。

由于水平和资料所限,错谬之处在所难免,敬请读者批评指正。

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 直升机研制历程与主要技术特征 .....	2
1.2 复合材料在直升机上的应用 .....	7
1.3 直升机使用环境与结构设计要求 .....	10
1.3.1 直升机使用环境 .....	10
1.3.2 直升机结构设计要求 .....	10
1.4 直升机复合材料结构设计特点 .....	11
参考文献 .....	14

## 旋翼系统篇

---

第 2 章 旋翼系统设计导论 .....	16
2.1 旋翼基本工作原理与结构特点 .....	16
2.1.1 旋翼的功能 .....	16
2.1.2 旋翼基本工作原理 .....	17
2.1.3 西尔瓦的贡献——全铰接式桨毂 .....	20
2.1.4 旋翼结构特点 .....	21
2.2 复合材料旋翼桨叶研制概述 .....	22
2.2.1 旋翼桨叶结构设计特点 .....	22
2.2.2 旋翼桨叶设计对材料的要求 .....	24
2.2.3 旋翼桨叶选用复合材料的依据 .....	25
2.2.4 复合材料旋翼桨叶研制历程 .....	27
2.3 旋翼桨叶新翼型与新桨尖 .....	29

2.3.1	旋翼桨叶新翼型 .....	29
2.3.2	旋翼桨叶新桨尖 .....	30
2.4	旋翼桨毂结构研究进展 .....	31
2.4.1	铰接式和无铰式桨毂 .....	32
2.4.2	无轴承桨毂与球柔性桨毂 .....	33
2.5	尾桨结构 .....	34
2.5.1	尾桨的功能与结构型式 .....	34
2.5.2	普通尾桨的问题 .....	35
2.5.3	尾桨的改进与创新 .....	36
	参考文献 .....	36
<b>第3章</b>	<b>旋翼桨叶结构设计</b> .....	<b>38</b>
3.1	旋翼桨叶空气动力设计(简介) .....	38
3.2	旋翼桨叶结构设计要求 .....	40
3.3	复合材料桨叶结构设计 .....	42
3.3.1	复合材料桨叶结构设计特点 .....	42
3.3.2	桨叶剖面构型设计选择 .....	46
3.3.3	桨叶根部结构型式设计选择 .....	48
3.4	复合材料旋翼桨叶制造工艺 .....	50
3.4.1	复合材料旋翼桨叶制造工艺要点 .....	50
3.4.2	旋翼桨叶质量保证 .....	51
3.4.3	桨叶修理 .....	53
3.5	桨叶结构设计选材与许用应变确定 .....	53
3.5.1	桨叶结构设计选材原则 .....	53
3.5.2	桨叶结构元件设计选材特点 .....	54
3.5.3	桨叶材料设计许用应变确定 .....	56
3.6	桨叶剖面特性控制与调频设计 .....	57
3.6.1	桨叶剖面特性控制设计的基本方法 .....	58
3.6.2	桨叶调频设计的基本方法 .....	58
3.6.3	桨叶调频设计分析实例 .....	59
3.7	复合材料旋翼桨叶设计实例 .....	60

3.7.1	轻型直升机旋翼桨叶设计实例 .....	60
3.7.2	C形梁复合材料旋翼桨叶结构设计实例 .....	68
3.7.3	D形梁复合材料旋翼桨叶结构设计实例 .....	81
3.7.4	D形缠绕梁多后段件复合材料旋翼桨叶 .....	90
3.7.5	新颖复合材料旋翼桨叶 .....	92
3.8	自适应旋翼桨叶研究简介 .....	97
3.8.1	自适应旋翼的基本含义 .....	97
3.8.2	驱动系统设计方案的简介 .....	98
3.8.3	自适应旋翼桨叶设计方案的简介 .....	99
	参考文献 .....	102
<b>第4章</b>	<b>旋翼桨毂设计</b> .....	<b>104</b>
4.1	复合材料旋翼桨毂的研制 .....	104
4.1.1	旋翼桨毂的功能 .....	104
4.1.2	旋翼桨毂结构设计要求 .....	105
4.1.3	复合材料旋翼桨毂研制 .....	105
4.2	层压星形柔性桨毂设计分析 .....	106
4.2.1	层压星形柔性桨毂设计原理 .....	107
4.2.2	层压星形柔性桨毂设计 .....	107
4.2.3	星形柔性桨毂复合材料件设计 .....	109
4.2.4	星形柔性桨毂复合材料件成形工艺特点 .....	112
4.3	纤维缠绕中央件桨毂设计分析 .....	114
4.4	复合材料柔性元件无轴承旋翼桨毂设计分析 .....	118
4.4.1	无轴承桨毂设计原理 .....	118
4.4.2	无轴承桨毂应用实例 .....	119
4.4.3	柔性臂设计 .....	121
4.5	新型旋翼桨毂设计分析 .....	123
4.5.1	新型纤维缠绕桨毂设计分析 .....	123
4.5.2	纤维/弹性轴承旋翼桨毂设计分析 .....	125
4.5.3	球柔性桨毂设计分析 .....	127
4.5.4	“柔性梁”无轴承桨毂设计分析 .....	129

4.6	桨毂球面弹性轴承(简介)	131
	参考文献	133
<b>第5章</b>	<b>尾桨设计</b>	<b>134</b>
5.1	尾桨设计特点	134
5.2	无轴承尾桨设计分析	135
5.3	涵道尾桨设计分析	137
5.3.1	涵道尾桨设计特点	137
5.3.2	涵道尾桨设计实例	139
5.3.3	带静子涵道尾桨	140
	参考文献	141
<b>第6章</b>	<b>旋翼系统结构试验与寿命估算</b>	<b>142</b>
6.1	旋翼系统结构试验规划	142
6.1.1	旋翼系统结构设计许用值确定试验	142
6.1.2	旋翼系统结构设计研制试验	144
6.1.3	旋翼系统全尺寸结构验证试验	145
6.2	桨叶动态特性测试	145
6.2.1	桨叶剖面刚度特性测量	145
6.2.2	桨叶固有频率与振型测试	149
6.3	动部件寿命评估程序与寿命估算方法	153
6.3.1	寿命评估的原始资料	153
6.3.2	全尺寸疲劳鉴定试验与寿命评估程序	155
6.3.3	寿命估算方法	155
6.4	复合材料动部件疲劳曲线与安全疲劳极限	161
6.4.1	复合材料疲劳行为特点	161
6.4.2	复合材料 $S-N$ 曲线方程与疲劳极限	162
6.4.3	等寿命曲线图(Goodman图)与材料工作 边界	165
6.4.4	复合材料动部件疲劳曲线	168
6.4.5	动部件中值疲劳极限和标准差	169
6.4.6	动部件安全疲劳极限估计	170



6.4.7	动部件质量保证与安全疲劳极限“截尾”修正 .....	172
6.4.8	动部件工作疲劳曲线与飞行静力修正 .....	175
6.5	桨叶结构疲劳试验与安全寿命计算 .....	177
6.5.1	桨叶根部(接头段)全尺寸疲劳试验 .....	177
6.5.2	桨叶叶身(翼型段)全尺寸疲劳试验 .....	179
6.5.3	桨叶全尺寸疲劳试验实例 .....	179
6.5.4	桨叶安全寿命估算 .....	180
6.6	旋翼系统动部件损伤容限试验与分析 .....	181
6.6.1	旋翼桨叶弹击损伤容限试验分析 .....	181
6.6.2	层压星形柔性桨毂疲劳/损伤容限试验与分析 .....	182
6.6.3	柔性梁元件弹击损伤剩余寿命试验 .....	187
6.7	复合材料桨叶环境试验 .....	188
6.7.1	复合材料桨叶老化试验 .....	188
6.7.2	复合材料桨叶防雷击设计与试验验证 .....	190
	参考文献 .....	192

## 机体结构篇

第7章	机体结构设计导论 .....	195
7.1	直升机机体结构复合材料应用研究 .....	195
7.1.1	直升机机体结构设计特点 .....	195
7.1.2	复合材料在机体结构上的应用研究 .....	197
7.2	复合材料结构设计的一般原则和方法 .....	198
7.2.1	复合材料结构设计特点 .....	198
7.2.2	铺层设计和组件化整体化设计概念 .....	199
7.2.3	复合材料结构设计应考虑的工艺问题 .....	202
7.2.4	复合材料结构设计一般原则 .....	203
7.2.5	复合材料结构设计一般方法 .....	204