

文章编号:1000-8055(2012)07-1630-08

树脂基复合材料风扇叶片的优化设计

胡殿印¹, 彭苗娇², 王荣桥¹, 冯笑男¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 中航商用飞机发动机有限责任公司, 上海 200240)

摘 要: 在深入研究树脂基复合材料的材料属性和设计准则的基础上, 提出并建立了一种树脂基复合材料空心风扇叶片的结构设计方法, 并对叶片的强度和振动特性进行了研究, 结果表明所提出的树脂基复合材料空心风扇叶片的结构设计是可行的, 且对于提高风扇叶片的强度和减重起到了显著的效果。在此基础上, 以共振裕度为设计目标, 提出了树脂基复合材料风扇叶片优化设计的流程, 解决了优化过程中学科间、应用软件间的信息传递问题, 并实现了叶片铺层顺序设计优化。结果表明: 在满足强度约束条件的前提下, 树脂基复合材料空心风扇叶片较金属实心叶片质量减少了 78.88%, 共振裕度增加了 8.44%。

关 键 词: 树脂基复合材料; 风扇叶片; 强度; 振动; 优化设计

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Optimization design of resin-based composite fan blade

HU Dian-yin¹, PENG Miao-jiao², WANG Rong-qiao¹, FENG Xiao-nan¹

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Commercial Aircraft Engine Company, Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the study of the material properties and design criteria of resin-based composite, a structural design method of the resin-based composite material hollow fan blade was proposed, and then, the strength and vibration of the fan blade were studied. The results show that the resin-based composite material fan blade has better strength property and lighter weight than the traditional metal fan blade. Then an optimization design process of the resin matrix composite fan blade was established, during which the information transmissions of disciplines and application softwares were solved. Thus, the stacking sequence optimization design of the composite fan blade was achieved. It was verified that compared to the metal fan blade, the weight of the resin-based composite material fan blade decreased by 78.88% and the vibration margin increased by 8.44%.

Key words: resin-based composite material; fan blade; strength; vibration; optimization design

风扇叶片是涡轮风扇发动机最具代表性的重要零件, 涡扇发动机的性能与它的稳定工作密切

相关。特别是近年来, 由于先进制造技术的发展、先进复合材料的应用和计算机技术的飞跃使得风

收稿日期: 2011-08-19

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120801.1438.201207.1630_027.html

基金项目: 凡舟基金(20110401); 教育部博士点基金(20111102120011)

作者简介: 胡殿印(1980—), 女, 辽宁朝阳人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机结构强度及可靠性研究。

扇叶片的设计和制造进入一个全新的阶段。

如今,宽弦、无凸台、空心叶片是高性能发动机风扇叶片的发展方向。宽弦空心叶片具有轻量化、高结构效率的优点,使航空发动机的综合性能得到显著提高。与此同时,纤维增强树脂基复合材料具有比强度高、比刚度大、阻尼特性好、疲劳寿命长、材料品种多、结构可设计等特点,给风扇性能的提高带来了新的希望。因此,先进复合材料宽弦空心风扇叶片将是大型飞机发动机设计的关键技术^[1-4]。

当前,国内外民用航空发动机风扇转子叶片中,76%以上采用钛合金实心风扇叶片,20%左右采用钛合金空心风扇叶片;而成功应用复合材料风扇叶片并投入使用的只有通用(GE)公司生产的GE90和GE9x系列发动机风扇转子叶片。国内树脂基复合材料的应用也在不断扩大,在飞机上的应用已从非承力件扩大到机翼结构等主承力件,但是将树脂基复合材料用于发动机的研制工作,目前鲜见到报道。

树脂基复合材料风扇叶片的设计涉及气动、材料、结构、强度(包括共振、颤振、外物打伤)等诸多学科。本文基于气动、材料、结构强度等学科开展树脂基复合材料风扇叶片的优化设计方法研究,探究利用树脂基复合材料的优异特性提高风扇叶片的强度和振动特性的可行性,为未来先进民用飞机发动机风扇叶片的研制提供技术储备,具有重要的工程借鉴意义。

1 复合材料风扇叶片的结构设计

1.1 树脂基复合材料风扇叶片结构设计流程

本文提出了一套完整的树脂基复合材料风扇叶片结构设计流程,如图1所示。

主要包括:树脂基复合材料的选择,通过对树脂基复合材料特性的研究,确定适用于风扇叶片的树脂基复合材料;树脂基复合材料空心风扇叶片结构设计,设计树脂基复合材料空心叶片的结构形式,通过对叶片的强度和振动特性分析验证采用树脂基复合材料空心叶片提高性能和减轻质量的可行性和有效性。

1.2 树脂基复合材料风扇叶片的选材

风扇转子叶片作为发动机主要的功能转换零件,如果叶片本身强度不足,工作时产生变形、翘曲或者折断,都将直接影响到发动机的工作性能、安全可靠,甚至造成不同程度的故障和飞行事故,

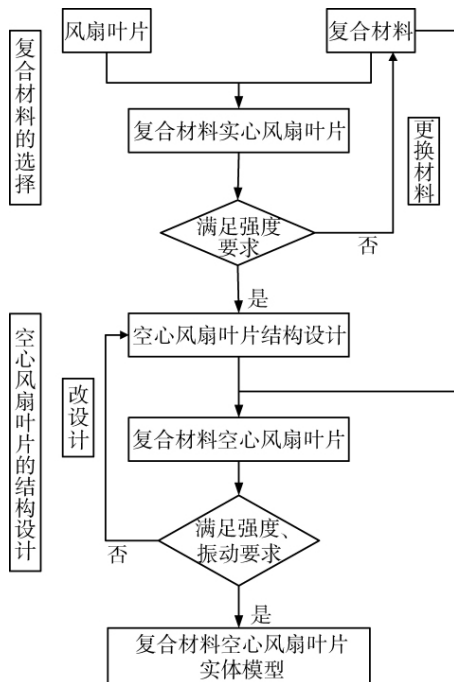


图1 复合材料风扇叶片结构设计流程

Fig. 1 Design process of composite fan blade

所以叶片的强度分析尤为重要^[5]。因此,本文以风扇叶片的强度和振动作为研究重点。

1.2.1 树脂基复合材料强度设计准则

复合材料层合板的强度是建立在单层强度理论基础上的。对于一种纤维增强的复合材料单层,纤维和基体的性质、纤维体积比确定后,其材料主方向的强度和工程弹性常数是通过实验唯一确定的。这样就可以根据单层的应力状态和破坏模式,采取研究各向同性材料强度相同的方法建立单层的强度理论。在复合材料层合板中各单层应力不同,一般应力高的单层先发生破坏,于是可以通过逐层破坏理论确定层合板的强度^[6]。

本文在对复合材料风扇叶片的强度分析中采用蔡-吴(Tsai-Wu)失效判据作为复合材料单层失效准则,其表达式为^[6]

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 = 1 \quad (1)$$

式(1)中的 $F_{11}, F_{22}, F_{12}, F_{66}, F_1, F_2$ 是与单层基本强度有关的6个强度参数; $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ 分别为纤维方向(也称纵向)正应力、垂直纤维方向(也称横向)正应力和切应力。

蔡-吴失效判据既考虑了不同应力及相互作用的影响,又考虑了单层拉压强度不同对材料破坏的影响,在复合材料结构强度分析研究和工程应用上使用最为广泛。

层合板的失效有两个特征状态,即第 1 层失效和层合板最终失效,对应于层合板的两个特征强度即第 1 层失效强度和极限强度. 发动机工作时,风扇叶片要承受离心力、气动力、发动机振动引起的交变力以及随机载荷等多种载荷,叶片将产生拉伸应力、弯曲应力、扭转应力等,由于叶片受力情况复杂,且为了保证叶片具有足够的强度裕度,本文采用第 1 层失效强度作为复合材料风扇叶片的强度准则.

1.2.2 树脂基复合材料的选择

通过对树脂基复合材料特性的研究,考虑到风扇叶片的受力特点和工作状态,本文采用连续纤维增强树脂基复合材料作为风扇叶片材料. 表 1 给出了两种典型的国产连续纤维增强树脂基复合材料的力学性能^[6],其中 HT3/5224 为高强碳纤维/环氧材料,HT3/QY8911 为高强碳纤维/双马材料.

表 1 典型国产连续纤维增强树脂基复合材料的力学性能

材料	HT3/5224	HT3/QY8911
纵向拉伸模量/GPa	140.0	135.0
横向拉伸模量/GPa	8.6	8.8
面内切变模量/GPa	5.0	4.5
泊松比	0.35	0.33
纵向拉伸强度/MPa	1400.0	1239.0
横向拉伸强度/MPa	50.0	38.7
纵向压缩强度/MPa	1100.0	1281.0
横向压缩强度/MPa	180.0	189.0
面内切变强度/MPa	99.0	81.2

为了探究树脂基复合材料应用于风扇叶片的可行性,需要先对树脂基复合材料风扇叶片的强度进行校核. 本文采用 NASA(National Aeronautics and Space Administration) Rotor 67 风扇转子叶片的标准叶型,叶高为 159 mm,风扇入口顶部直径为 513 mm,设计转速为 16 043 r/min^[7]. 将上述两种复合材料 HT3/5224 和 HT3/QY8911 分别应用于实心风扇叶片,应用 ANSYS 软件进行强度校核,叶片有限元模型如图 2 所示.

由于风扇叶片材料采用树脂基复合材料,因此有限元分析中必须采用复合材料单元. 本文

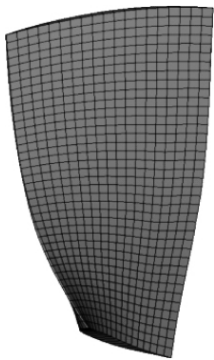


图 2 风扇叶片有限元模型

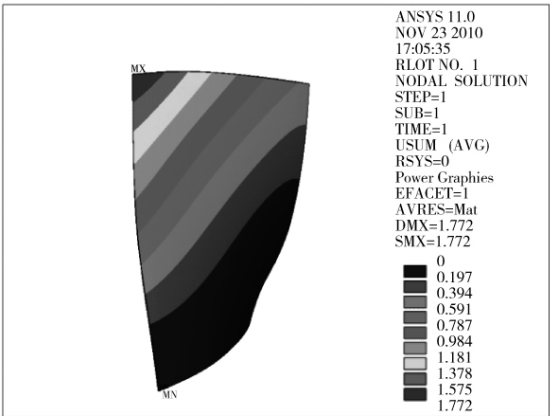
Fig. 2 Finite element model of fan blade

采用 8 节点层状结构体单元 SOLID 46 作为复合材料叶片的实体元,叶片叶尖最大厚度为 2.7 mm,叶根最大厚度为 8.1 mm;而 HT3/5224 和 HT3/QY8911 树脂基复合材料的单层厚度均为 0.125 mm,因此叶片沿厚度方向按对称方式铺 20 层,铺层顺序为 $[0_2/45/0_2/-45_2/0_2/90]_s$;同时因为需要对叶片表面进行气动力加载,因此采用表面效应单元 SURF154,以进行气动力加载.

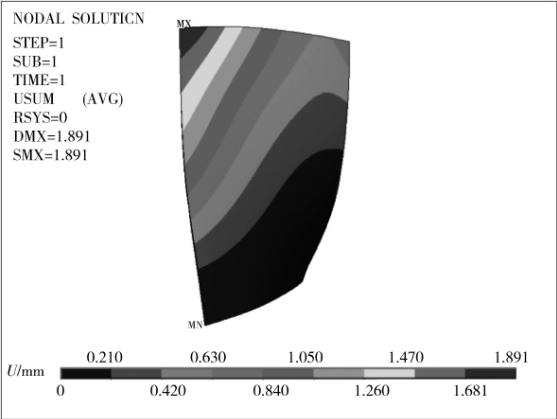
当边界条件加载完毕后即可进行强度校核分析,得到两种复合材料实心风扇叶片的变形和蔡-吴强度因子分布,如图 3 和图 4 所示.

图 4 中蔡-吴强度因子是一个无量纲的量,若蔡-吴强度因子大于或等于 1,表示复合材料失效,结构不满足强度要求;若小于 1,表示材料安全,满足强度要求.

对比图 3 和图 4,可以看出 HT3/5224 复合材料叶片总变形最大值为 1.772 mm,比 HT3/QY8911 复合材料叶片的 1.891 mm 减小了 6.29%;HT3/5224 复合材料叶片蔡-吴强度因子最大值为 0.0618,比 HT3/QY8911 复合材料叶片的 0.0968 减小了 36.16%,即强度增加了 36.16%. 且 HT3/5224 复合材料密度比 HT3/

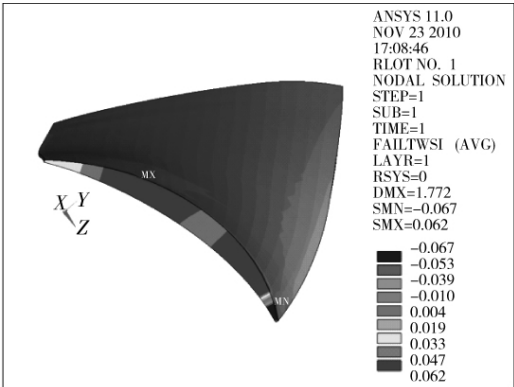


(a) HT3/5224

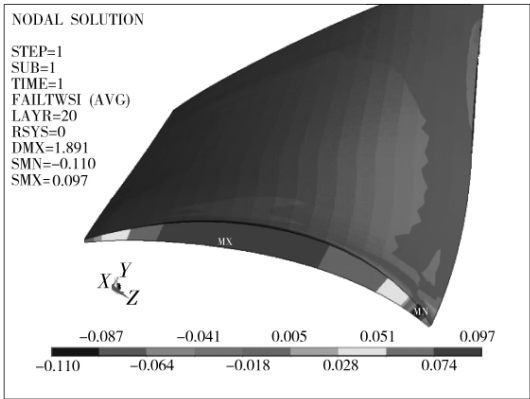


(b) HT3/QY8911

图 3 复合材料实心叶片总变形分布
Fig. 3 Total deformation of composite fan blade



(a) HT3/5224



(b) HT3/QY8911

图 4 复合材料实心叶片蔡-吴强度因子分布
Fig. 4 Tsai-Wu strength factor for composite solid blade

QY8911 小,HT3/5224 复合材料叶片质量较轻.虽然两种复合材料叶片都满足强度要求,但是

HT3/5224 复合材料叶片强度性能更优越,叶片质量更轻,因此采用 HT3/5224 复合材料用于后续的叶片强度和振动特性分析以及优化分析.

1.3 树脂基复合材料空心风扇叶片的结构设计

1.3.1 空心风扇叶片的结构设计

空心风扇叶片独特的结构形式和复杂的加工工艺使得它的结构强度设计不同于普通叶片,除了具有普通叶片所必需的结构设计要求外,风扇空心部分的尺寸选择及布置、叶片整体刚性、芯材与板材的连接强度、叶身的强度、叶片振动模式都将发生变化或有新的特点.采用复合材料的空心风扇叶片,结合先进的复合材料成型工艺,与传统的叶片结构设计和制造方法相比可明显地减轻叶片质量、提高发动机性能.

在 NASA Rotor 67 实心风扇叶片的基础上,利用 UG(unigraphics) 三维建模软件,进行空心叶片内部结构的设计.空心叶片内部芯板采用三角形桁架结构,在每个叶型截面中,壁板厚度是等厚的,芯板厚度也是等厚的,壁板厚度决定了叶片空腔的基本形状和大小.空腔内每一处壁板与芯板连接的长度相等且等距分布,假设芯板数量固定,则可推算出空腔的总长度^[8].

给定芯板数量为 12,考虑到工艺可行性,叶片壁板和芯板不能太薄,从叶根到叶尖的壁厚分别为 1.5,1.5,1.5,1.5,1.0,1.0,0.7,0.7 mm,芯板厚与壁板厚的比值固定为 0.4,则换算出的芯板厚分别为 0.7,0.7,0.7,0.7,0.4,0.4,0.28,0.28 mm.将 8 个截面的芯板轮廓曲线,利用 UG 的实体特征功能,生成芯板实体,如图 5(a)所示,空心叶片实体如图 5(b)所示,空心叶片实体的横截面形状如图 6 所示.

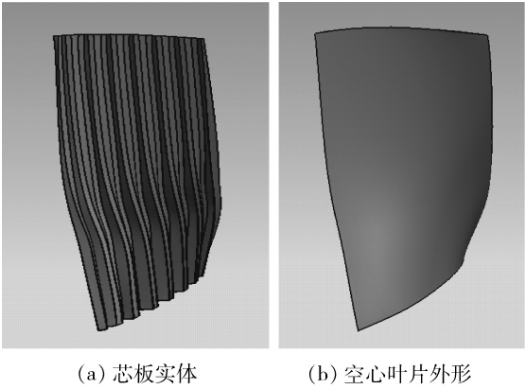


图 5 空心叶片实体模型
Fig. 5 Solid model of hollow blade

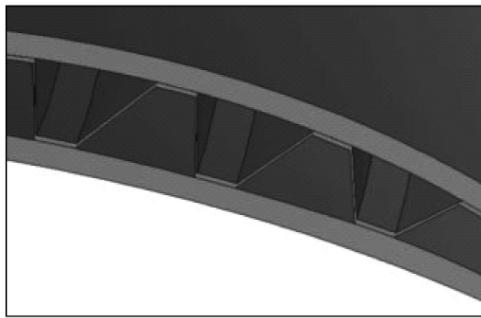


图 6 空心叶片实体横截面
Fig. 6 Cross section of hollow blade

1.3.2 树脂基复合材料风扇叶片强度和振动分析

空心叶片叶尖壁厚为 0.7 mm, 叶根壁厚为 1.5 mm, 而 HT3/5224 树脂基复合材料单层的厚度为 0.125 mm, 因此空心叶片铺层数取 6 层, 采用对称方式铺叠, 铺层顺序为 $[45/0/-45]_s$. 采用蔡-吴失效准则校核叶片强度, 且引入安全系数来比较叶片强度, 金属叶片的安全系数应不低于 1.33, 复合材料叶片的安全系数应不低于 1.5^[9]. 空心叶片的有限元模型如图 7 所示, 叶片单元数为 3800 个.

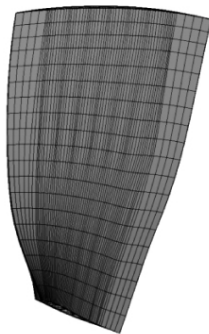
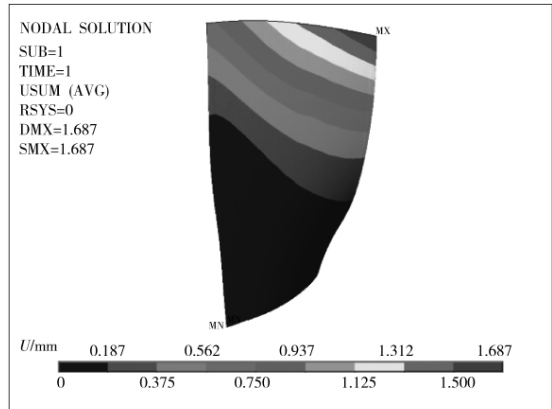


图 7 空心叶片有限元模型
Fig. 7 Finite element model of hollow blade

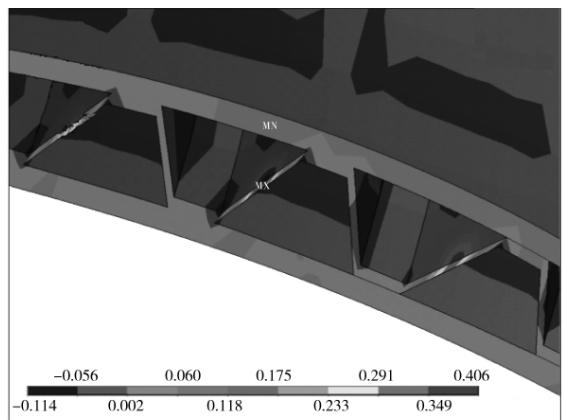
经过强度计算分析, 得到空心叶片的变形和蔡-吴强度因子分布, 如图 8 所示. 可以看出空心叶片叶尖尾缘总变形最大, 为 1.687 mm; 叶根中部蔡-吴强度因子最大, 为 0.406, 即强度安全系数为 $2.46 > 1.5$, 所以复合材料空心叶片满足静强度要求.

利用图解法来求叶片的临界转速, 作出叶片的坎贝尔图(见图 9), 因风扇叶片后面有 34 个静子, 因此在图中作出等转速线和 34 倍转速线, 等转速线和 34 倍转速线与各阶共振频率的交点的横坐标即为对应振型下的临界转速^[10].

经过振动分析得到叶片的前 6 阶振型和固有



(a) 总变形分布



(b) 蔡-吴强度因子分布

图 8 复合材料空心叶片强度分析结果

Fig. 8 Strength results of composite hollow blade

频率, 分析叶片在工作状态下是否发生共振. 根据《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则》中的要求^[11], 叶片共振频率的裕度至少是 10%, 叶片的设计转速为 16043r/min, 因此叶片的共振转速边界为 $[14\,438.7\text{ r/min}, 17\,647.3\text{ r/min}]$, 如图 9 所示, 34 倍转速线与第 6 阶频率线的交点为 6670r/min, 共振裕度为 58.42%; 3 倍转速线与第 1 阶频率线的交点为 12125 r/min, 共振裕度为 24.42%;

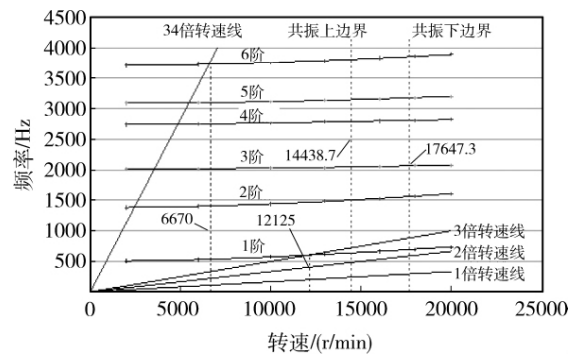


图 9 空心叶片坎贝尔图

Fig. 9 Campbell figure of hollow blade

两者均落在共振转速边界之外,叶片不会发生共振,满足振动特性要求。

将复合材料空心叶片的强度和振动特性分析计算及质量估算的结果与传统金属实心叶片进行比较,如表 2 所示。可以看出,与金属实心叶片相比,树脂基复合材料空心叶片的最大总变形减小了 74.48%,强度安全系数提高了 84.96%,质量减轻了 78.88%,共振裕度减少了 0.95%;证明了提出的树脂基复合材料空心风扇叶片的结构设计是可行的,且对于提高风扇叶片的强度和减重起到了明显的作用;但是减振效果不明显,需要在此基础上进行叶片的优化设计。

表 2 树脂基复合材料与金属实心叶片的比较
Table 2 Comparison between composite hollow blade and metal solid blade

	金属实心叶片	复合材料叶片
最大总变形/mm	6.61	1.69
强度安全系数	1.33	2.46
共振裕度/%	59.37	58.42
材料密度/(g/cm ³)	4.44	1.57
质量/g	215.381	45.498

2 树脂基复合材料风扇叶片铺层顺序优化设计

本文设计的树脂基复合材料风扇叶片本质上是一种纤维增强复合材料的层合板结构,即叶片由若干树脂基复合材料单层按一定角度铺叠并利用一定的成型工艺加工而成,其最突出的问题是铺层顺序对叶片强度和振动性能的影响,即复合材料铺层顺序优化问题。通过对树脂基复合材料空心叶片的振动特性分析,可以看到空心叶片的共振裕度与金属实心叶片相比减少了 0.95%,即空心叶片的减振效果不明显,因此有必要对空心叶片进行铺层顺序的优化,以提高空心叶片的振动性能。

树脂基复合材料空心风扇叶片的铺层数为 6 层。为了降低叶片结构的各向异性,采用对称叠层分布,所以设计变量(铺层角)个数为 3 个;工程上常用的铺层角是 0°,±45°,90°,因此实心叶片铺层角共有 4³=64 种组合方式。如果采用人工计算,将十分费时费力,可利用优化的途径来解决上述问题。因此,采用优化平台 iSIGHT,结合有限元分析软件 ANSYS 来实现树脂基复合材料风扇

叶片的铺层顺序优化。

2.1 优化模型的建立

优化模型的建立主要包括设计变量的选取、约束条件的设置和目标函数的确立,即优化三要素的设定。

选取 3 个铺层角作为设计变量,如表 3 所示。设计变量在模型上对应的位置如图 10 所示,设计变量的初值及变化范围如表 4 所示。

表 3 空心叶片设计变量
Table 3 Design variables of hollow blade

参数	θ_1	θ_2	θ_3
iSIGHT 中对应参数	theta 1	theta 2	theta 3
参数解释	铺层角 1	铺层角 2	铺层角 3

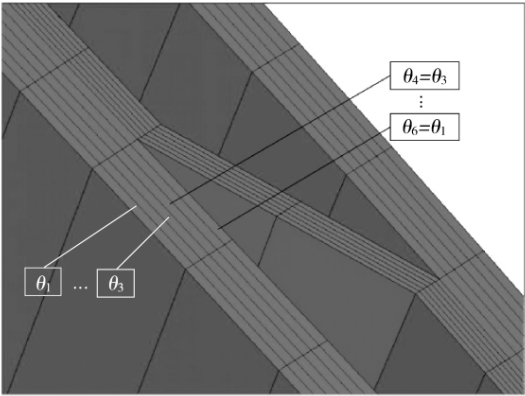


图 10 空心叶片铺层示意图
Fig. 10 Stacking plot for hollow blade

表 4 设计变量初值及取值范围
Table 4 Initial values and ranges of design variables

参数	初值	取值范围
$\theta_1/(^{\circ})$	45	0,+45,-45,90
$\theta_2/(^{\circ})$	0	0,+45,-45,90
$\theta_3/(^{\circ})$	-45	0,+45,-45,90

约束条件着重考虑风扇叶片的强度和振动特性。由 1.2 节的分析可知,复合材料实心叶片最大总变形为 1.772 mm,因此要求复合材料空心叶片的最大总变形不大于 1.772 mm;并且根据复合材料结构设计的要求,需要保证复合材料空心叶片的强度安全系数不低于 1.5,即最大蔡-吴强度因子不大于 0.66。

由图 9 坎贝尔图得出叶片共振区的频率范围 [240.65 Hz,294.12 Hz],[8181.93 Hz,10000.14

Hz]. 为了不发生共振, 必须保证叶片的全部 6 阶共振频率落在这两个频率范围之外. 这样, 施加的振动约束条件见表 5.

表 5 约束条件

Table 5 Constraint conditions

约束条件	下限	上限
叶片最大总变形/mm	0	1.772
叶片最大蔡-吴强度因子		0.66
共振频率最小值/Hz	883	8182
共振频率最大值/Hz	883	8182

铺层顺序优化的目的是为了在叶片减重和满足强度要求的基础上, 进一步提高叶片的抗振性能, 因此以控制第 6 阶最大共振频率最小(即共振裕度最大)为优化目标.

2.2 优化算法的选择

采用 iSIGHT 优化平台自带的优化算法, 由于文中的设计变量(即铺层角)是离散的整型变量, 因此采用多岛遗传算法^[12]来解决铺层顺序优化问题.

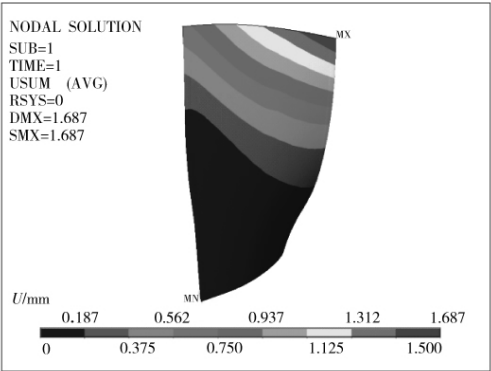
2.3 优化结果

设计变量优化前后的结果比较, 如表 6 所示. 优化前后叶片总变形, 如图 11 所示; 优化前后叶片蔡-吴强度因子云图, 如图 12 所示. 将优化前后的约束和目标值进行对比, 如表 7 所示.

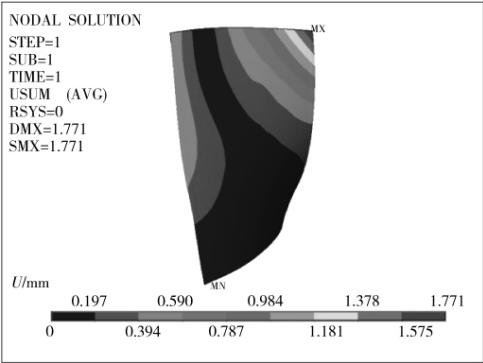
表 6 优化结果

Table 6 Optimization results

铺层角	$\theta_1 / (^\circ)$	$\theta_2 / (^\circ)$	$\theta_3 / (^\circ)$
初值	45	0	-45
优化值	0	0	0



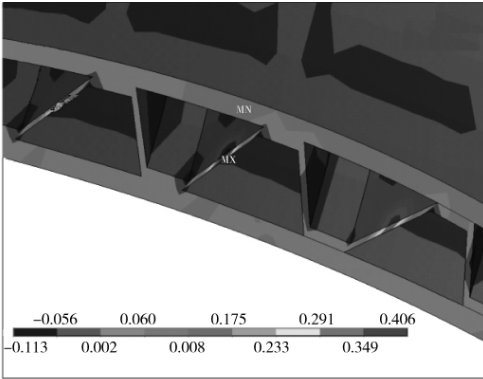
(a) 优化前



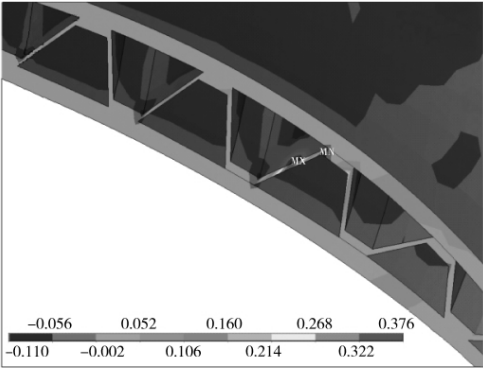
(b) 优化后

图 11 空心叶片总变形云图

Fig. 11 Total deformation distribution of hollow blade



(a) 优化前



(b) 优化后

图 12 空心叶片蔡-吴强度因子云图

Fig. 12 Tsai-Wu strength factor distribution of hollow blade

从表 7 可以看出, 空心叶片铺层优化后, 目标函数即第 6 阶共振频率最大值减小了 24.69%, 第 1 阶共振频率最小值增加了 27.47%, 由计算可知优化后的叶片高阶共振裕度较初始结构增加了 9.39%, 较金属实心叶片增加了 8.44%; 而低阶共振裕度较初始结构减小了 4.88%; 说明需对

叶片几何结构进行进一步优化以提高其低阶共振裕度.此外,叶片最大总变形增加了 4.98%,但总变形最大值为 1.771 mm,约等于复合材料实心叶片的最大总变形 1.772 mm,所以叶片强度并未减弱.叶片最大蔡-吴强度因子减小了 7.39%,即叶片强度提高了 7.39%.综上,铺层优化对提高树脂基复合材料空心叶片的抗振性能起到了重要作用.

表 7 优化前后各约束条件和目标函数的对比
Table 7 Results of constraint variables and objective function before and after optimization

约束条件	优化前	优化后	效果	
叶片最大总变形/mm	1.687	1.771	+4.98%	
叶片最大蔡-吴强度因子	0.406	0.376	-7.39%	
共振频率最小值/Hz	506.35	645.42	+27.47%	
共振频率最大值/Hz	3885.76	2926.43	-24.69%	
目标函数	优化前	优化后	效果	
共振裕度	$K=34$	58.42%	67.81%	+9.39%
	$K=3$	24.42%	19.54%	-4.88%

3 结 论

在深入研究树脂基复合材料的材料属性和设计准则的基础上,建立了一种树脂基复合材料空心风扇叶片的结构设计方法并开展了树脂基复合材料风扇叶片的铺层顺序优化分析.结果表明设计的树脂基复合材料风扇叶片较传统的金属风扇叶片质量轻,而且强度及振动性能好.

1) 提出了一套包括树脂基复合材料选择和树脂基复合材料空心风扇叶片结构形式设计过程、并考虑叶片的强度和振动特性的树脂基复合材料风扇叶片结构设计流程.

2) 与金属实心叶片相比,树脂基复合材料空心叶片的最大总变形减小了 74.48%,强度提高了 84.96%,质量减轻了 78.88%,共振裕度减少了 0.95%.

3) 采用多岛遗传算法实现了树脂基复合材料空心风扇叶片的铺层顺序优化,空心叶片的高阶共振裕度较优化前结构增加了 9.39%,较金属实心叶片增加了 8.44%.

参考文献:

[1] 侯冠群,尚波生.宽弦风扇叶片技术的发展[J].国际航空,2002(12):45-47.
HOU Guanqun, SHANG Bosheng. Development of wide chord fan blade[J]. International Aviation, 2002(12): 45-47. (in Chinese)

[2] 梁春华,杨锐.航空发动机宽弦空心风扇叶片的发展及应用[J].航空发动机,1999(2):54-58.
LIANG Chunhua, YANG Rui Development and application of hollow wide-chord fan blade of aero-engine[J]. Aero-engine, 1999(2): 54-58. (in Chinese)

[3] 梁春华,李宏新,凌瑶.先进航空涡扇发动机风扇/压气机的先进结构与新材料[J].航空制造技术,2007(1):60-63.
LIANG Chunhua, LI Hongxin, LING Yao. Advanced structures and materials for fan/compressor of advanced turbo-fan engine[J]. Advanced Manufacturing Technology of Aeroengine, 2007(1): 60-63. (in Chinese)

[4] 陈懋章.风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议[J].航空动力学报,2002,17(1):1-15.
CHEN Maozhang. Development of fan/compressor techniques and suggestions on further researches[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1): 1-15. (in Chinese)

[5] 宋兆泓,熊昌炳,郑光华.航空燃气涡轮发动机强度设计[M].北京:北京航空学院出版社,1988.

[6] 矫桂琼,贾晋荣.复合材料力学[M].西安:西北工业大学出版社,2008.

[7] Anthony J, Strazisar, Wood J R, et al. Laser anemometer measurements in a transonic axial-flow fan rotor[R]. NASA Technical Paper 2879, 1989.

[8] 杨建秋,王延荣.基于正交试验设计的空心叶片结构优化设计学[J].航空动力学报,2011,26(2):376-384.
YANG Jianqiu, WANG Yanrong. Structural optimization of hollow fan blade based on orthogonal experimental design[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2): 376-384. (in Chinese)

[9] 张志民.复合材料结构力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,1993.

[10] 杨雯,杜发荣,郝勇,等.宽弦空心风扇叶片动力响应特性研究[J].航空动力学报,2007,22(3):444-449.
YANG Wen, DU Farong, HAO Yong, et al. Investigation of dynamic response property of wide-chord hollow fan blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 444-449. (in Chinese)

[11] 《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则》编写委员会.航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则第1册:总论[M].北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局,1997.

[12] 李敏强.遗传算法的基本理论与应用[M].北京:科学出版社,2002.