

文章编号: 1000-8055(2022)08-1714-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210334

平流层飞艇三叶螺旋桨结构优化方法

尚玲玲, 王海峰, 口启慧, 刘坤澎
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘 要: 为实现螺旋桨轻质量和高固有频率之间的权衡设计, 发展了 1 种桨叶对称剖层结构的分区优化方法。为拓宽其高效率的速度和高度范围, 应采用变桨距技术, 需要设计圆柱形桨叶根部。该桨叶与不同桨距角的桨毂组合装配, 可实现人工变桨距, 在地面试验中达到高空转速。该螺旋桨采用组合分体式桨毂布局、桨叶内部填充泡沫和碳纤维混合结构, 基于 NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm), 完成了支座固支的桨叶铺层参数优化, 得到桨叶质量和频率的 Pareto 解集, 在 $\pm 10\%$ 频率安全裕度外选取最优铺层方案, 并与实物测试值对比, 结果表明: 桨叶质量相对误差 2.09%; 支座固支的单桨叶频率相对误差 9.30%; 桨毂固支的组合物频率相对误差 2.76%, 避开了工作转速共振区间, 证明该结构优化方法是合理有效的。

关 键 词: 平流层飞艇; 螺旋桨; 结构优化; Pareto 解集; 固有频率; 变桨距

中图分类号: V228; V214.8

文献标志码: A

Structure optimization method of three-blade propeller for stratospheric airship

SHANG Lingling, WANG Haifeng, KOU Qihui, LIU Kunpeng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to achieve propeller's trade-off design between light mass and high natural frequency, a partition optimization method of symmetrical cutting layer structure for its blade was developed. For broadening its speed and height range of high efficiency, variable pitch technology should be adopted, and cylindrical blade root should be designed. The blades were assembled with the hub of different pitch angles, which can realize manual variable pitch and reach the high altitude rotate speed in ground test. A combined split hub layout, foam-filled form inside the blades, and carbon fiber hybrid structure in the propeller were adopted, the laying parameters optimization of fixed-supported propeller blades was finished based on the NSGA-II (non-dominated sorting algorithm), and Pareto solution set of blade mass and frequency was obtained. The optimal laying scheme was selected outside the $\pm 10\%$ of frequency safety margin, and compared with test values of the actual prototype. The results showed that the relative error of blade mass was 2.09%, the relative error of single blade frequency on fixed support was 9.30%, and the relative error of the combined frequency of three blades and the hub on fixed support was 2.76%. This avoided resonance region of the working rotate speed, proving that the structure optimization method is reasonable and effective.

收稿日期: 2021-06-30

作者简介: 尚玲玲(1997—), 女, 硕士生, 主要研究方向为飞行器总体设计、结构设计。E-mail: sll376189891@163.com

引用格式: 尚玲玲, 王海峰, 口启慧, 等. 平流层飞艇三叶螺旋桨结构优化方法[J]. 航空动力学报, 2022, 37(8): 1714-1723. SHANG Lingling, WANG Haifeng, KOU Qihui, et al. Structure optimization method of three-blade propeller for stratospheric airship [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(8): 1714-1723.

Key words: stratospheric airship; propeller; structure optimization; Pareto solution set; natural frequency; variable pitch

平流层飞艇是1种高空长航时飞行器,所在驻空高度气象条件稳定,且在20 km高空有最小层流风,可实现长时间定点驻空,对指定区域进行“凝视”观测,或作为通信基站实现数据交换,因此成为当前世界各国开发临近空间资源装备战略研究的热点^[1-3]。综合考虑推进系统发展水平和太阳能电池利用效率等诸多因素,电动机驱动螺旋桨推进装置仍然是临近空间低速飞行器唯一合适的动力推进方式。为实现平流层飞艇“上得去”、“停得住”和“回得来”,需要螺旋桨在全高度和速度范围内均能达到最高效率。因此,螺旋桨设计不仅要保证设计工况效率最高,还要拓宽高效率的速度和高度范围。前者通过气动外形优化设计,后者通过变构型设计,如变桨距和变桨径等措施实现。本文在气动外形确定的基础上,针对细长体螺旋桨挥舞刚度差的问题,以轻质量和高固有频率为目标,发展了1种分体式螺旋桨结构优化方法,实现了轻质量和高固有频率的权衡设计,避免了工作转速内产生共振^[4]。另外,由于地面与高空空气密度差距很大,螺旋桨在地面难以达到高空设计转速,无法验证螺旋桨在高空设计工况离心载荷下的强度。故采用镂空金属桨毂设计,比原有一体式桨毂易于实现变桨距,并且通过更换不同桨距角的桨毂实现人工变桨距,能够在地面旋转试验时达到高空转速,进行推进系统大转速联调和强度验证。

有关复合材料桨叶轻质与高频的设计目标,目前已有不少研究。2013年,安伟刚等^[5]提出削层结构铺层的同级优化方法,以复合材料铺层角度、铺层厚度和铺层长度作为设计变量,以质量最小为目标,使用遗传算法(GA)对机翼进行了优化设计。2016年,王林等^[6]以质量最小化为优化目标,以铺层区域和铺层厚度为设计变量,考虑最大应力、最大形变、频率、屈曲和层压板的连续性,使用GA对复合材料风力机叶片进行了结构优化。2017年,孟俊辉等^[7]以桨尖位移和扭转角的加权(桨尖位移占30%,扭转角占70%)最小为优化目标,以铺层厚度和铺层顺序为设计变量,考虑质量和强度,使用GA对高空飞艇复合材料螺旋桨进行了优化。2021年,程俊杰等^[8]针对大直径两叶螺旋桨,以质量最小和频率最大为优化目标,

使用NSGA-II对两叶螺旋桨进行了优化设计,实现了低质量与高频率之间的权衡。但关于飞艇螺旋桨配套镂空桨毂的设计分析,目前所见并不多。2013年,贾小平等^[9]设计了某陆空汽车变桨距机构及螺旋桨镂空桨毂,并对桨距式镂空桨毂在离心力方向、摆振方向、挥舞方向的应力、应变进行了校核。2018年,胡举喜等^[10]对受推力、扭力、离心力和螺栓受预紧力联合作用下的某型舰船调距桨完整机构的静强度进行了有限元仿真分析。

从以上国内外研究现状看出,为提高效率,目前一般采用大直径两叶螺旋桨设计,这类螺旋桨在太阳能无人机上可安装在机翼前后缘处,不需要很长的安装支架,但在飞艇上,为远离艇身,便需要很长的安装支架。本文提出了一种三叶螺旋桨设计,可在推力不变的情况下,减小螺旋桨直径,大幅度减轻安装支架质量。

1 螺旋桨结构布局、形式和选材

1.1 螺旋桨结构布局

目前,飞艇螺旋桨常见的结构布局有两种:

1) 对插一体式,桨叶根部对插的一体式结构布局如图1(a)所示。优点在于桨毂和桨叶一体成型,安装方便,制造成本低,离心力可在各桨叶之间自平衡;不足是桨距角无法调整。

2) 组合分体式,桨叶根部用金属桨毂组合的分体式结构布局如图1(b)所示。优点在于桨距角可调,可在地面考核高空旋转状态的离心力;不足是安装不太方便,制造成本较高,桨叶离心力会使桨毂产生较大应力。

考虑桨距角可调的初衷,本文采用第2种组合分体式桨毂结构布局。为准确定位,桨叶根部

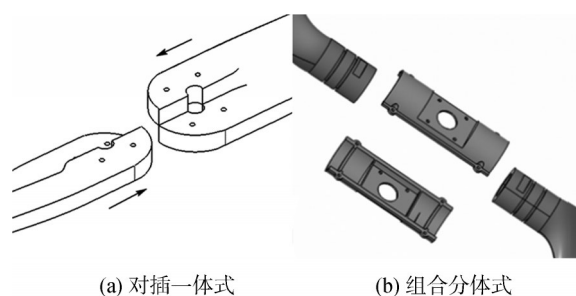


图1 对插一体式和组合分体式螺旋桨结构布局
Fig.1 Plug-in integrated and combined split propeller structure layout

设计为“径向定位卡槽+周向定位切面”的圆柱根部定位形式,如图 2 所示。桨叶前进方向为 $-x$ 轴,前缘方向为 $+y$ 轴,展向方向为 $+z$ 轴。

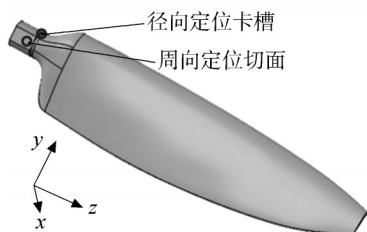


图 2 桨叶圆柱形根部结构布局

Fig.2 Blade cylindrical root structure layout

1.2 螺旋桨结构形式

复合材料螺旋桨常见的结构形式有两种:

1) 内部空心结构,蒙皮使用预浸料层合板构成外形、中间采用泡沫夹芯碳纤维单/双层合板腹板提供支撑,如图 3(a) 所示。

2) 内部填充结构,蒙皮使用预浸料层合板构成外形、整个螺旋桨内部填充泡沫,可以有贯穿腹板,如图 3(b) 所示^[11]。

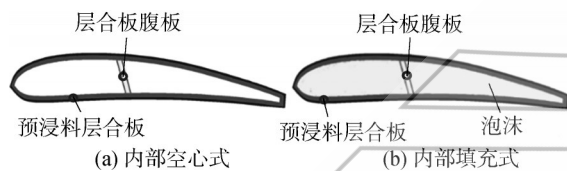


图 3 内部空心式和内部填充式螺旋桨结构形式

Fig.3 Internal hollow type and internal filled type propeller structural style

考虑内部填充结构刚度大、强度大,本文针对已有直径为 2.2 m 的螺旋桨气动外形,采用“蒙皮+梁+泡沫夹芯”结构形式。靠近刚度中心的径向贯穿 C 形梁结构,在降低质量的同时,对于提高桨叶弯曲刚度非常有利^[12],如图 4 所示。在腹板与蒙皮构成的两个闭室内填充高强度高刚度的泡沫夹芯(聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫,简称 PMI 泡沫,性能参数见表 1),主要分散剪应力并支持复合材料铺层的稳定性^[13],可抵抗桨叶受力后的扭

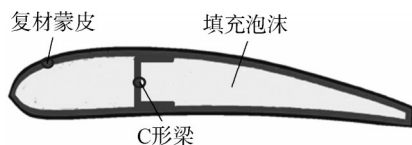


图 4 桨叶剖面 C 形梁内部填充结构形式

Fig.4 Blade profile C-shaped beam internal filling structural style

表 1 复合材料和泡沫性能参数

Table 1 Properties of composites and foams

参数	数值		
	单向带	织物	PMI 泡沫
纵向弹性模量 E_1/GPa	120	70	0.07
横向弹性模量 E_2/GPa	7.3	70	0.07
切变模量 G_{12}/GPa	4.7	4.1	0.019
泊松比 μ	0.32	0.062	0.25
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 580	1 650	52
单层厚度 t_i/mm	0.12	0.20	

转和弯曲变形,增强桨叶刚度。

1.3 螺旋桨选材

由于玻璃纤维/碳纤维复合材料各向异性力学性能强,并且可根据受力情况剪裁设计,制件质量轻、强度/刚度,已经得到广泛应用。因此,飞艇螺旋桨都采用复合材料,以提高比强度/比刚度。在选材上,该类螺旋桨转速比风电螺旋桨高很多,离心力相对大,且质量限制要求严格,因此,要采用比强度更高、比刚度更大的碳纤维复合材料,低成本的玻璃纤维材料无法满足要求。

通过单向带和织物两种碳纤维预浸料的混合优化设计,可获得最佳铺层方案,最大限度地满足轻质高频的需求^[14]。蒙皮外层铺设织物,可保证表面各向承力性^[15],单向带可有效提高铺层方向的拉压性能。本文采用 T700/7901 单向碳纤维预浸料(简称单向带,记为 dx)和 W-3021/6508 碳纤维预浸料织物(简称织物,记为 zw)两种材料进行铺层设计,其性能参数见表 1,若桨径变大,载荷变大,可选用性能更好的碳纤维复合材料。

2 固支桨叶有限元模型

2.1 模型处理

为实现分区优化分析,需要对桨叶进行铺层区域划分。结合 12 个翼型剖面位置,将桨叶的蒙皮和梁分别沿径向划分为 12 个区域,共 24 个区域,如图 5 所示。

使用 HyperMesh 建立单片桨叶有限元模型,复合材料面单元数为 18 734 个,大多使用 Quads 四边形单元,泡沫体单元数为 307 524 个,全部采用 Tetra 四面体单元。通过 PCOMPP 属性建立基于 PLY 铺层和 STACK 黏接的从外向内的复合材料铺层方式,通过 PSOLID 属性建立泡沫的

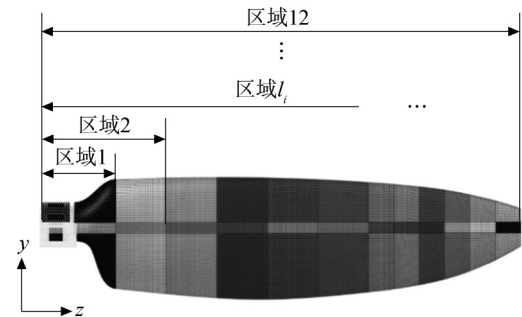


图5 桨叶有限元模型及分区
Fig.5 Blade finite element model and partition

实体填充方式。

由于实际频率试验要使用 45#钢弹性支座,因此添加 45#钢材料参数(弹性模量为 210 GPa、泊松比为 0.31、密度为 1 580 kg/m³)及 PSOLID 属性,建立弹性支座固支桨叶的模型。

考虑桨叶实际加工中包含底漆、面漆及胶层等,经与加工单位协商,估计单片桨叶非结构质量为 0.1 kg,均匀添加到桨叶模型结构单元上。

2.2 约束处理

根据桨叶与支座配合方式,桨叶根部受支座夹持而处于悬臂约束状态。在支座与桨叶根部(包括径向定位卡槽、周向定位切面和周向圆柱面)接触面上、两支座接触面之间添加 CONTACT 接触约束,在支座的对地定位孔上添加 6 个方向的固支约束,如图 6 所示。

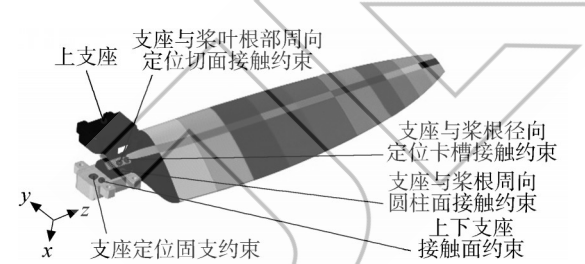


图6 弹性支座固支桨叶有限元模型
Fig.6 Finite element model of fixed-supported blade on elastic support

2.3 载荷施加

飞艇螺旋桨长期变转速运转,桨叶主要受气动力、离心力和重力作用。

首先,对三叶螺旋桨气动外形部分进行结构化嵌套网格划分,网格量约 690 万,进行相应工况的气动计算,湍流模型采用 SST (shear stress transport) 二方程模型,边界条件设为速度进口、压力出口,桨叶表面为无滑移壁面边界条件,并指定具体工况下的温度、压力、风速和转速等参数,

通过中心格式空间离散方式求解雷诺平均 N-S (Navier-Stokes) 方程。以高度为 0.5 km、风速为 0 m/s、转速为 300 r/min 工况为例,气动计算结果与实物测试结果的对比如表 2 所示,可见两者相对误差较小。

表 2 典型工况气动计算结果与实物测试结果对比
Table 2 Comparison of aerodynamic calculation results with physical test results in typical working conditions

参数	气动计算	实物测试	相对误差/%
沿 x 轴的拉力/N	128.32	123.48	3.77
绕 x 轴的力矩/(N·m)	24.02	23.20	3.41

由于气动力非均布载荷,采用高质量耦合的界面数据交换方法——多点挑方法^[16],首先在二面角小于 30°的单元之间找到各结构节点,搜索半径内距离最近的有限个气动节点,之后根据气动节点与有限元节点距离远近分配载荷的基本思想,通过气动载荷的线性插值,得到各结构节点所施加的气动载荷大小。这样将 CFD (computational fluid dynamics) 计算所得气动载荷数据加载到有限元模型上。

加载气动载荷还要确定优化设计的典型工况。由于螺旋桨在高空主要为高转速旋转,受离心力较大,而低空主要为大扭矩旋转,受气动力产生的弯矩较大。故给定蒙皮和梁相同的初始铺层,如表 3 所示,选取气动载荷更大,并且可以达到高空最大载荷工况(高度为 18 km、风速为 10 m/s、转速为 1 200 r/min)应变水平的地面超转工况:高度为 0.5 km、风速为 0 m/s、转速为 800 r/min 进行设计,两个工况的主要气动载荷与应变情况对比见表 4。

原始的 CFD 气动计算结果与将其按照多点

表 3 初始铺层参数
Table 3 Initial layup parameters

铺层区域	材料及厚度/mm	角度/(°)	层数
12	zw 0.2	90	1
1	dxd 0.125	0	2
1	zw 0.2	45	2
1	dxd 0.125	0	2
12	zw 0.2	90	1

表 4 高空最大载荷工况与地面超转工况对比
Table 4 Comparison of the maximum load condition at high altitude and the overturn condition on the ground

参数	高空最大 载荷工况	地面超转 工况
沿 x 轴的拉力/N	-60.36	-307.30
绕 x 轴的力矩/(N·m)	12.62	53.61
复合材料 最大应变/ 10^{-6}	1 307	1 559
泡沫最大应变/ 10^{-6}	2 732	2 954

挑方法加载到有限元模型上之后的载荷对比见表 5,压力云图对比如图 7 所示。由表 5 可见,CFD 气动载荷与有限元模型气动载荷有一定差别,但

表 5 CFD 气动载荷与有限元模型加载的气动载荷对比
Table 5 Comparison of aerodynamic loads between CFD and finite element models

参数	气动载荷		绝对误差
	CFD	有限元模型	
F_x/N	-314.09	-307.30	6.79
F_y/N	-81.73	-75.79	5.94
F_z/N	6.21	8.21	-2.00
$M_x/(\text{N}\cdot\text{m})$	58.36	53.61	4.75
$M_y/(\text{N}\cdot\text{m})$	-244.40	-239.20	5.20
$M_z/(\text{N}\cdot\text{m})$	-0.71	-0.58	0.13

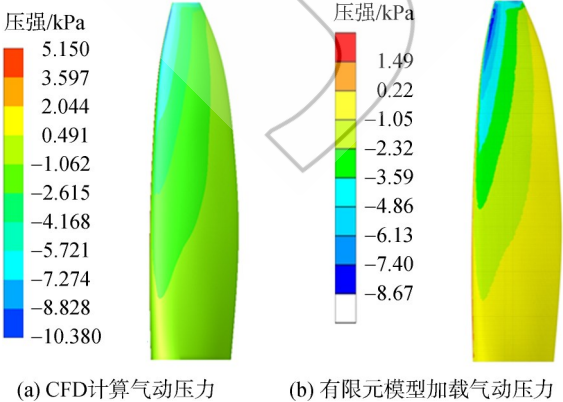


图 7 CFD 计算与有限元模型加载的桨叶气动压力云图对比

Fig.7 Blade aerodynamic pressure contour comparison between CFD calculation and finite element model loading

都在可接受范围之内。其中 F_x 、 F_y 、 F_z 分别表示桨叶在 x 、 y 、 z 轴方向的合力大小, M_x 、 M_y 、 M_z 分别表示桨叶绕 x 、 y 、 z 轴方向的合力矩。

离心力和重力可直接施加,沿 $-y$ 轴方向施加重力,绕 x 轴施加角速度为 13.33 r/s 的离心力。

3 固支桨叶铺层优化

针对桨根受夹持而根部受力大尖部受力小的特点,优化后的铺层结果应为根部厚、尖部薄的削层结构,由于桨叶整体受力对称,为防止拉弯、拉剪耦合引起层合板翘曲变形,铺层应为中面对称形式,铺层角度应均衡(铺层方向与 z 轴的夹角为 θ ,和 $360^\circ - \theta$ 的单向带层数相同)^[17-18],如图 8 所示。同时,为避免两内室剪流分散导致力矩变化,蒙皮与梁应为相同的对称铺层。对此,本文提出基于铺层族的对称削层结构分区优化方法,以相同材料、方向和区域的若干铺层组成的子层合板为 1 个铺层族。

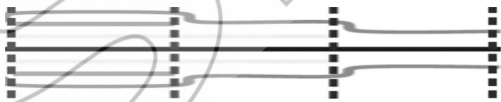


图 8 对称削层铺层结构示意图

Fig.8 Symmetrical cutting layer layup structure diagram

3.1 数学模型

根据铺层对称和角度平衡准则,在优化前给定蒙皮和梁相同的初始铺层(参数同表 3,各 26 层,其余初始厚度为 0 mm)。为保证削层结构,且在满足受力的前提下,方向变量尽可能少,铺层角度一般选择 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 90° ,以应对轴向、剪切以及横向载荷,同时,按照图 5 所示,所有铺层区域都从根部向桨尖方向分段选取,确保纤维连续。为有效降低层间应力,同一铺向角的单层不宜过多集中在一起,考虑该桨叶实际受力相对较小,最多集中 2 层。

本文以铺层厚度、铺层角度和铺层区域为设计变量,以复合材料和泡沫的最大应变(强度指标)和 50%、75%、100% 剖面的扭转角(刚度指标)为约束条件,以质量最小、1 阶固有频率最大为优化目标进行优化,数学模型为

$$\begin{aligned} &\min m(t_2, \dots, t_{13}, l_2, \dots, l_{13}) \\ &\max f(t_2, \dots, t_{13}, \theta_2, \dots, \theta_{13}, l_2, \dots, l_{13}) \\ &\text{s.t.} \\ &\epsilon_1 \leq [\epsilon_1]_{\max} = 0.003, \epsilon_2 \leq [\epsilon_2]_{\max} = 0.004 \\ &\gamma_{50\%} \leq 0.5^\circ, \gamma_{75\%} \leq 0.5^\circ, \gamma_{100\%} \leq 0.5^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_i &\in [\text{dxd } 0.0, \text{dxd } 0.12, \text{dxd } 0.24, \text{zw } 0.0, \\
 &\quad \text{zw } 0.2, \text{zw } 0.4] \\
 \theta_i &\in [0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 90^\circ] \\
 l_i &\in [1, 2, 3, \dots, 12] \\
 i &= 2, 3, \dots, 13
 \end{aligned}$$

其中

1) 设计变量 t_i 、 θ_i 和 l_i 分别表示第 i 铺层的材料和厚度(mm)、方向($^\circ$)、区域; t_i 为“dxd 0.24”表示2层厚度0.12 mm的单向带,为“zw 0.4”表示2层厚度0.20 mm的织物,以此类推,且最外层和最内层确定在全部区域铺设 $0^\circ/90^\circ$ 织物,不作为设计变量; θ_i 以 z 轴绕 x 轴向后缘旋转方向为正; l_i 与图5中12个区域对应。

2) 约束条件 ϵ_1 为复合材料最大应变,考虑各向异性材料各层之间存在应力突变,且离心力为主要载荷,故按拉伸应变约束,取3倍安全系数,许用值 $[\epsilon_1]_{\max}$ 为0.003; ϵ_2 为泡沫最大应变,各向同性材料按应力或应变约束均可,此处按应变约束,取材料压缩强度,并取3倍安全系数,许用值 $[\epsilon_2]_{\max}$ 为0.004;约束条件 $\gamma_{50\%}$ 、 $\gamma_{75\%}$ 和 $\gamma_{100\%}$ 分别为3个展向位置剖面的扭转角($^\circ$)。

3) 目标函数 m 为单片桨叶质量(kg), f 为单片桨叶1阶固有频率(Hz)。

3.2 铺层参数优化

NSGA-II 多目标优化算法所用的精英策略是通过把父代和子代合并后选取下一代,保留了最优秀的个体;所用拥挤度概念通过判断个体周围的拥挤程度,改善了同一支配层面的种群多样性;对提高算法效率和保持种群多样性上优于NSGA,并且求得的 Pareto 最优解分布均匀,收敛性和鲁棒性好^[19]。因此选用 NSGA-II, 利用 Isight 软件就上述数学模型对螺旋桨进行铺层参数优化,主要优化流程如图9所示。

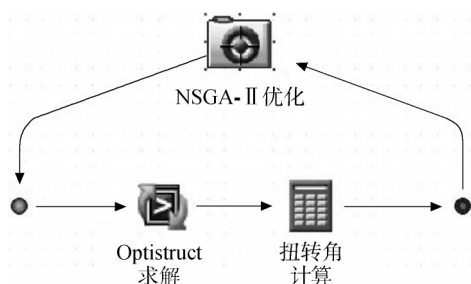


图9 桨叶铺层参数优化模型

Fig.9 Blade layout parameter optimization model

1) 根据数学模型,在“NSGA-II 优化”中给定36个设计变量及初值和取值范围、2个强度指标和3个刚度指标及约束、2个目标函数及优化目标、种群规模20、遗传代数200等优化参数。

2) “NSGA-II 优化”驱动“Optistruct 求解”改变求解文件中36个设计变量的值,调用 Optistruct 求解器求解,并获得此次求解的2个强度指标值和2个目标函数值。

3) 通过“扭转角计算”模块求出3个刚度指标的值。

4) 在“NSGA-II 优化”中判断结果是否满足5个约束条件,满足则为可行解,否则相反。

5) 更新种群,不断循环直至满足设定遗传代数,并在“NSGA-II 优化”中对可行解进行优化,得到 Pareto 解集。

6) 根据工程需要,在所得 Pareto 解集中选择合适的铺层参数,即为最优铺层设计结果。

3.3 最优铺层设计结果

4 000个迭代步完成后,所得 Pareto 解集如图10所示,图中共有726个结果。

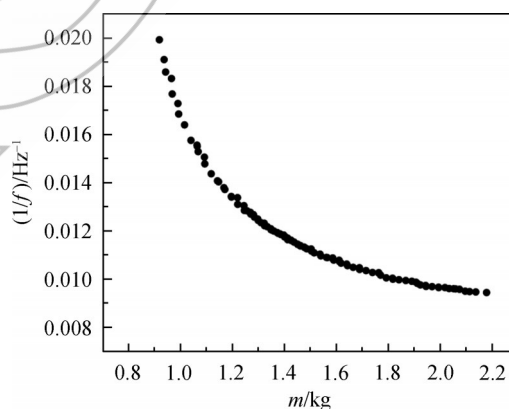


图10 桨叶质量和频率的 Pareto 解集

Fig.10 Pareto solution set of blade mass and frequency

根据所得 Pareto 解集,最小质量0.816 kg对应频率为34.43 Hz,最大质量2.180 kg对应频率为105.94 Hz。考虑三叶桨实际工作状况,为避免共振,一般建议选择桨叶旋转频率(f_r)和穿越频率(nf_r , n 为叶片数量) $\pm 10\%$ 以外的频率值作为1阶固有频率设计值^[20]。本文螺旋桨最大工作转速为1 200 r/min,对应旋转频率和穿越频率分别是20 Hz和60 Hz,考虑 $\pm 10\%$ 的频率安全裕度,剔除频率为[18, 22]U[54, 66]共振区间, Pareto 解集上可选的频率区间即为[34.43, 53.78]U[66.41, 105.95] Hz。在此基础上,考虑工程需要,选择质量小于

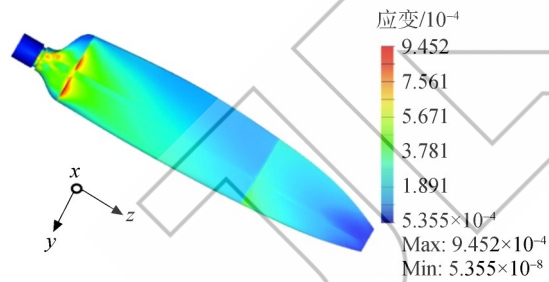
1 kg 的优化结果,本文选取频率为 52.34 Hz、质量为 0.937 kg,对应铺层方案为桨叶蒙皮和梁的最优铺层设计方案,对称铺层的上半部分如表 6 所示。可知,该设计方案除了不属于设计变量的最外层与最内层以外,符合对称削层铺层结构,无角度不均衡铺层,同一角度的铺层集中数最多为 2 层,满足铺层设计准则。

表 6 最优铺层设计方案

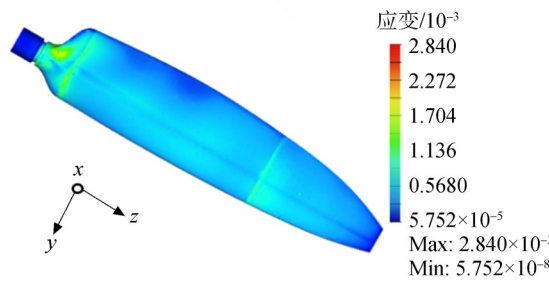
Table 6 Optimal layer design scheme

铺层区域	材料及厚度/mm	角度/(°)
12	zw 0.2	90
1	zw 0.2	90
1	zw 0.2	45
6	dxd 0.125	0

经有限元分析,该方案桨叶的复合材料最大应变 9.45×10^{-4} ,泡沫最大应变为 2.84×10^{-3} ,均小于许用值,桨叶应变云图如图 11 所示;3 个剖面的扭转角分别为 $0.000\ 44^\circ$ 、 $0.000\ 14^\circ$ 、 $0.000\ 99^\circ$,均小于许用值;桨叶 1 阶挥舞振型如图 12 所示。



(a) 设计方案复合材料应变云图



(b) 设计方案泡沫应变云图

图 11 设计方案应变云图

Fig.11 Strain contours of design scheme

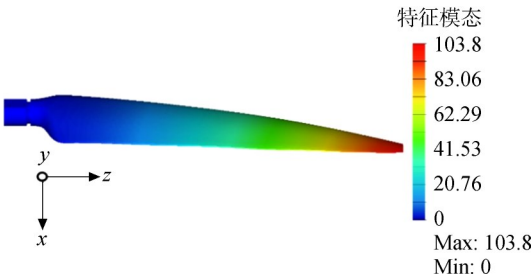


图 12 设计方案 1 阶挥舞振型

Fig.12 Design scheme first order flap-round mode shape

4 镂空桨毂设计分析

4.1 镂空桨毂设计

本文考虑桨叶结构形式,设计了组合分体式镂空桨毂,以实现桨距角可调。桨毂分为近电动机端和远电动机端两部分,先通过 M8 螺栓和键槽将近电动机端与电动机连接,再用 12 个 M6 螺栓将 3 片桨叶与两部分桨毂组合,如图 13 所示。桨毂内部设有与桨叶根部“径向定位卡槽+周向定位切面”相对应的径向限位卡槽和周向限位切面,通过不同的切面位置设计可实现桨距角调整。桨毂两部分接触面上设计 12 个合面限位卡槽。近电动机端留有电动机线路通道,远电动机端留有安装操作通孔。最后,在其余结构上进行适当镂空减轻质量设计。

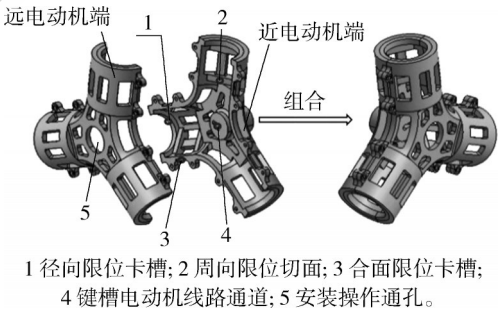


图 13 镂空桨毂设计方案
Fig.13 Hollow out propeller hub design scheme

4.2 镂空桨毂分析

采用铝合金 7075-T6 材料:弹性模量为 71.7 MPa、泊松比为 0.33、密度为 2 820 kg/m³、屈服强度为 524 MPa,按照高度为 0.5 km、风速为 0 m/s、转速为 800 r/min 工况对桨毂进行有限元分析,施加该工况气动力、离心力和重力的合力,考虑 3 倍过载系数,载荷施加情况(A~S 对应图中各箭头的施加位置)和应力分析结果如图 14 所示,最大应力为 245.7 MPa,安全裕度为 2.132。

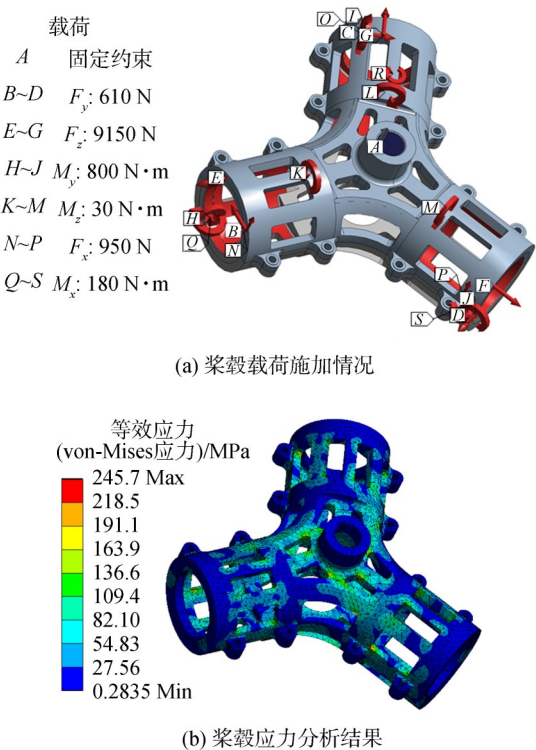


图 14 桨毂载荷施加情况及应力分析结果

Fig.14 Load application and stress analysis results of hub

在单桨叶模型的基础上,建立桨毂模型,分析法兰固支桨毂组合式三叶螺旋桨的组合频率,如图 15 所示。在桨根与桨毂接触面、两部分桨毂接触面和桨毂与法兰接触面分别添加 CONTACT 接触约束,在法兰螺栓孔上添加 6 个方向的固支约束,分析所得频率为 23.22 Hz。

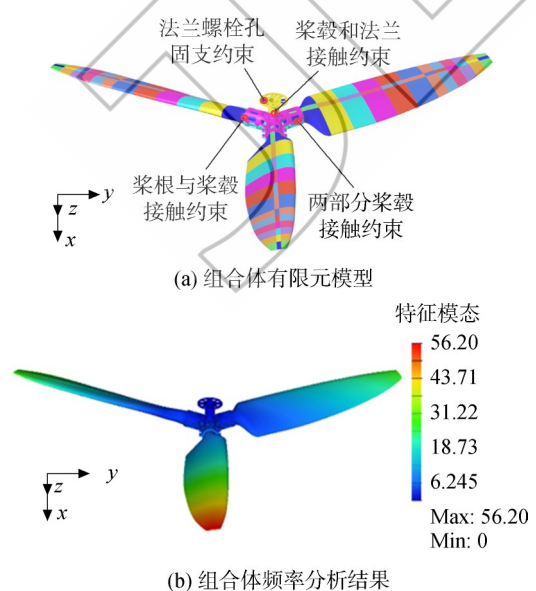


图 15 组合体有限元模型及频率分析结果

Fig.15 Finite element model and frequency analysis results of the combined body

5 实物试验对比

按设计方案加工桨叶,进行称质量和固有频率试验。称质量测试值为 0.957 kg。固有频率试验采用锤击激振法,使用东华 8303 动态信号采集分析系统测试 45#钢弹性支座固支螺旋桨的 1 阶固有频率,测试值为 47.47 Hz,如图 16 所示,测试法兰固支桨毂组合分体式三叶螺旋桨的组合频率,测试值为 22.58 Hz,如图 17 所示。

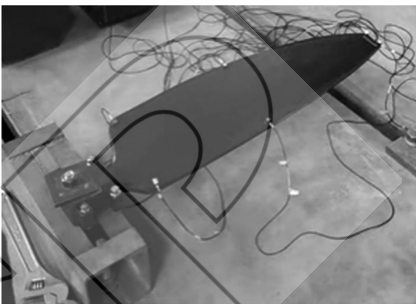


图 16 弹性支座固支桨叶频率试验

Fig.16 Frequency test of fixed blade of elastic support

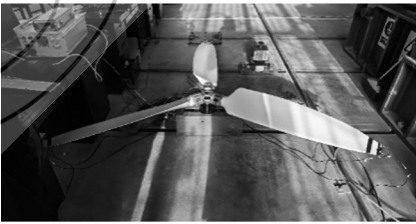


图 17 法兰固支桨毂组合分体式三叶桨频率试验

Fig.17 Frequency test of split three-blade propeller with flange-fixed hub

桨叶测试数据与计算数据的对比见表 7,质量相对误差 2.09%,主要原因是桨叶非结构质量为估值,不够精确;支座固支单叶频率相对误差 9.30%,法兰固支组合频率相对误差 2.76%,因为桨叶质量误差引起的经验误差,也有由于仿真模型与实际测试的理论误差,但仍处于旋转频率和穿越频率±10%的安全裕度之外。

表 7 桨叶测试数据与计算数据对比

Table 7 Comparison of blade test data and calculated data

参数	测试值	分析值	相对误差/%
质量/kg	0.957	0.937	2.09
支座固支单叶频率/Hz	47.47	52.34	9.30
法兰固支组合频率/Hz	22.58	23.22	2.76

6 结 论

本文在选取螺旋桨结构布局、结构形式和复合材料的基础上,考虑桨叶强度和刚度约束,以质量和频率为优化目标,采用NSGA-II对弹性支座固支桨叶铺层参数进行了优化,在所得Pareto最优解集中选取了最优铺层方案,并与实物试验完成对比。同时通过镂空金属桨毂设计,以及桨毂固支组合体频率有限元分析,完成组合体频率计算值与测试值的对比,结论如下:

1) 螺旋桨选用组合分体式桨毂的结构布局,“蒙皮+梁+泡沫夹芯”的结构形式合理。

2) 支座固支桨叶有限元模型合理,通过该对称削层结构分区优化方法得到Pareto解集,从中选取最优方案可有效避开桨叶共振区间。

3) 所设计分体式桨毂可实现桨距角调整,桨毂固支桨叶有限元模型和分析方法合理。

4) 经实物试验验证,该优化方法合理有效,对组合件结构设计具有一定应用价值。

最后,目前的频率计算值与测试值均针对静止状态进行对比,后续可基于此开展旋转状态下的频率计算及测试,以更贴近实际情况。

参考文献:

- [1] 李帅,陈永霖,肖畅,等.平流层飞艇蒙皮复合织物材料撕裂性能研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(11):1456-1462.
LI Shuai, CHEN Yonglin, XIAO Chang, et al. Study on tear properties of composite fabric materials for stratosphere airship envelope[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2020, 43(11):1456-1462. (in Chinese)
- [2] 龙飞.平流层飞艇发展现状研究[J].决策探索(中),2019,35(5):96.
LONG Fei. Research on the development status of stratospheric airship[J]. Policy Research and Exploration (midmonth), 2019, 35(5):96. (in Chinese)
- [3] 彭桂林,万志强.中国浮空器遥感遥测应用现状与展望[J].地球信息科学学报,2019,21(4):504-511.
PENG Guilin, WAN Zhiqiang. The present situation and prospect of aerostat applied to remote sensing and remote survey in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(4):504-511. (in Chinese)
- [4] 牛宏伟,郭海东,张永峰.基于振动应力飞行实测的螺旋桨旋转共振特性研究[J].现代机械,2017,44(3):77-80.
NIU Hongwei, GUO Haidong, ZHANG Yongfeng. Research on the rotation resonance characteristics of propeller based on inflight vibration stress test[J]. Modern Machinery, 2017, 44(3):77-80. (in Chinese)
- [5] AN Weigang, CHEN Dianyu, JIN Peng. A single-level composite structure optimization method based on a blending tapered model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(4): 943-947.
- [6] WANG Lin, KOLIOS A, NISHINO T, et al. Structural optimization of vertical-axis wind turbine composite blades based on finite element analysis and genetic algorithm[J]. Composite Structures, 2016, 153:123-138.
- [7] MENG Junhui, HU Jie, XIAO Houdi, et al. Hierarchical optimization of the composite blade of a stratospheric airship propeller based on genetic algorithm[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 56(6):1341-1352.
- [8] 程俊杰,王海峰,尚玲玲,等.一种高空飞艇螺旋桨结构多目标优化设计方法[J].航空动力学报,2021,36(3):584-591.
CHENG Junjie, WANG Haifeng, SHANG Lingling, et al. Multi-objective optimization design method for propeller structure of high-altitude airship[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(3):584-591. (in Chinese)
- [9] 贾小平,邢旺,于魁龙.某陆空汽车变桨距式镂空桨毂设计[J].湖北理工学院学报,2013,29(4):1-3.
JIA Xiaoping, XING Wang, YU Kuilong. Design of controllable pitch propeller used in air-ground vehicle[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2013, 29(4):1-3. (in Chinese)
- [10] 胡举喜,田靖军,丁晨,等.基于有限元方法的调距桨镂空桨毂机构强度分析[J].船舶工程,2018,40(1):65-70.
HU Juxi, TIAN Jingjun, DING Chen, et al. Strength analysis of hub mechanism of CPP based on finite element method[J]. Ship Engineering, 2018, 40(1):65-70. (in Chinese)
- [11] 王海峰,杨旭东,罗玲,等.平流层飞艇推进系统设计与测试技术[M].北京:国防工业出版社,2021.
- [12] 张碧辉,李喜乐,周波.复合材料螺旋桨结构多目标优化设计[J].航空工程进展,2018,9(1):77-83,98.
ZHANG Bihui, LI Xile, ZHOU Bo. Multi-objective optimization of a composite material propeller structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(1):77-83, 98. (in Chinese)
- [13] 胡培.飞机夹层结构的设计和泡沫芯材的选择[J].航空制造技术,2010,53(17):94-96.
HU Pei. Design of sandwich structure and selection of foam core material for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(17):94-96. (in Chinese)
- [14] 胡殿印,彭苗娇,王荣桥.树脂基复合材料风扇叶片的优化设计[J].航空动力学报,2012,27(7):1630-1637.
HU Dianyin, PENG Miaoqiao, WANG Rongqiao. Optimization design of resin-based composite fan blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7):1630-1637. (in Chinese)
- [15] 韩庆,王广博,钟小平,等.基于遗传算法的复合材料泡沫夹层板铺层优化设计[J].航空工程进展,2013,4(2):182-185.
HAN Qing, WANG Guangbo, ZHONG Xiaoping, et al. Ply optimization design of foam sandwich composite panel based on genetic algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(2):182-185. (in Chinese)

- [16] 安伟刚,梁生云,陈殿宇.一种局部动态数据交换方法在流固耦合分析中的应用[J].航空学报,2013,34(3):541-546.
AN Weigang, LIANG Shengyun, CHEN Dianyu. Local dynamic data exchange in fluid structure interaction analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 541-546. (in Chinese)
- [17] IRISARRI F X, LASSEIGNE A, LEROY F H, et al. Optimal design of laminated composite structures with ply drops using stacking sequence tables[J]. Composite Structures, 2014, 107: 559-569.
- [18] 朱启晨,陈勇,肖贾光毅.复合材料风扇叶片铺层设计方法研究[J].航空发动机,2018,44(3):49-54.
ZHU Qichen, CHEN Yong, XIAO Jianguangyi. Study on laminate design method of composite fan blade[J]. Aeroengine, 2018, 44(3): 49-54. (in Chinese)
- [19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [20] VERITAS D N. Guidelines for design of wind turbines [M]. 2nd ed. Copenhagen: DNV/Risø, 2002: 169-173.

(编辑:陈越)