

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.02.09

复合材料桨叶静力矩测量影响因素研究

王伟辉¹, 贾志婷^{2*}, 索顺¹, 李艳², 杨宇龙¹, 白微¹, 孙磊¹, 庄志茂¹

(1. 凌云科技集团有限责任公司, 湖北 武汉 430040;

2. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了解决复合材料桨叶的静力矩测量结果差异较大、难以完成准确合格性判定等问题, 采用基于天平基本理论的控制变量法对多组桨叶的静力矩展开研究。通过分析造成实验数据差异的原因, 结合测量设备本身的精度, 发现了对测量影响较大的关键因素, 并进行了定量分析计算。通过对比实验, 证明了对大轴线力矩测量影响最大的是定位面与测量刀口之间的距离以及其平面加工精度; 对小轴线力矩测量影响最大的是对桨叶特定截面的角度测量精度。本研究为后续螺旋桨设计、生产、维修提供了工艺优化的理论和数据基础, 对后期新型桨叶的研发具有重要意义。

关键词: 螺旋桨桨叶; 静力矩测量; 大轴线力矩; 小轴线力矩

中图分类号: V228; TB93; TH82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 02-0082-07

Study of the influencing factors on the static moment measurement of composite blades

WANG Weihui¹, JIA Zhiting^{2*}, SUO Shun¹, LI Yan², YANG Yulong¹, BAI Wei¹, SUN Lei¹, ZHUANG Zhimao¹

(1. Lingyun Science & Technology Group Co. LTD., Wuhan 430040, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to solve the problem that the static moments of composite paddles are widely varied and it is difficult to make an accurate qualification evaluation, the static moments of multiple sets of paddles are investigated by using the control variable method according to the basic theory of the balance. By analyzing the differences caused in the experimental data and considering the accuracy of the measuring equipment itself, the main factors that have a greater impact on the measurement are discovered with quantitative analyses and calculations. Through comparative experiments, it is proved that the greatest influence on axial torque measurement is the distance of the positioning surface from the measuring cutter and its flat machining accuracy. The greatest influence on radial torque measurement is the angular measurement accuracy of the specific section of the propeller blade. This study provides a theoretical and data basis for process optimization for subsequent propeller design, production and maintenance, and is significant for the research and development of new propeller blades in the future.

Key words: propeller blade; static moment measurement; axial moment; radial moment

收稿日期: 2024-01-12; 修回日期: 2024-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3407900)

引用格式: 王伟辉, 贾志婷, 索顺, 等. 复合材料桨叶静力矩测量影响因素研究[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 82-88.

Citation: WANG W H, JIA Z T, SUO Shun, et al. Study of the influencing factors on the static moment measurement of composite blades[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 82-88.



0 引言

螺旋桨飞机使用螺旋桨发动机作为主要的动力装置,由于其具有低速、高效、经济等特点,在通用航空和航空运输领域应用广泛^[1]。随着生产工艺的进步,复合材料螺旋桨桨叶因具有效率高、质量轻、振动噪音低、维修相对便捷等特点^[2],而开始应用于船舶及飞机制造领域^[3]。

航空发动机螺旋桨桨叶(特别是手工加工的桨叶)因外形原因(体积大、重心距离螺旋桨旋转中心较远、外形不规则),很难保障加工的一致性^[4]。部分金属螺旋桨桨叶采用浇注、车削等工艺加工成型^[4],工艺成熟,加工一致性相对较好。而复合材料桨叶制造过程中,模具、铺层角度及方式、喷漆厚度等^[5]都会对螺旋桨桨叶最终的质量及重心产生影响,要保障每片桨叶的重心位置和多片桨叶安装组合后的整体不平衡量在要求范围内是很困难的^[6]。为了调整同组螺旋桨桨叶的整体不平衡量,对待装配及维修后的螺旋桨桨叶进行双方向多角度的静力矩测量,调整其力矩值,使其力矩差值在设计允许的不平衡力矩范围内,是我国保障螺旋桨发动机性能的重要手段^[7]。

对于桨叶的静力矩测量,目前主要有力矩平衡(天平原理)、支点平衡、重心测量^[8]三种方法,其中,较为常用的是力矩平衡法。力矩平衡法可实现对桨叶轴向及径向多角度的静力矩测量,其测量原理是将桨叶安装在测量设备上,利用测量设备中的高精度砝码与固定力臂,产生与桨叶相同的静力矩,以达到测量目的^[9]。

为明确螺旋桨轴向及径向静力矩测量时的基本要求,利用天平测量原理对桨叶进行轴向及径向多角度的静力矩测量,研究测量过程中的影响因素,并对各因素的影响程度进行分析,以得出桨叶静力矩测量中需要控制的关键因素。

1 测量基本原理

利用基于天平原理所设计的静力矩测量装置开展桨叶静力矩的测量及分析试验,该装置包括主梁、测量设备支点刀、刀承支撑及导向组件、刀承升降切换组件、主梁升降及支撑组件、固定框架组件、游码组件、设备重点刀及刀座、工作

砝码自动加载组件、中心套、配重码及安装支座、夹具及定位组件、基座、测量结果显示与控制组件,以及配套的检具及检定砝码等部分。测量设备以支点刀作为支撑,通过刀一侧砝码的加卸载和游码的移动,以配平支点刀另一侧所加载桨叶的力矩,实现桨叶在其转轴方向产生的静力矩以及在不同旋转角度下垂直于其转轴的径向力矩的测量。

被测桨叶为某新型可变距的复合材料桨叶,在对此型号桨叶的静力矩测量工序中,需对桨叶的轴向静力矩进行超差判断,此方向静力矩通常称为大轴线力矩,其数据需符合后期螺旋桨整体配平设计需求。在桨叶的径向方向上进行三个不同旋转角度下的静力矩测量,此方向静力矩通常称为小轴线力矩,其角度按照桨叶对应的设计截面与地面垂直方向作为起始 0° ,再分别将该截面旋转至三个测量角度进行静力矩测量,并使用增减配重的方法对每个角度静力矩进行调整,使其在各个角度下均满足工艺要求。

1.1 大轴线力矩测量原理

测量装置通过夹具实现桨叶的装配、对中,以及对桨叶转动半径的控制,使得桨叶转动中心与装置的支点刀刀刃重合。桨叶加载后,通过砝码加载机构、游码、零位偏移监测及补偿系统进行装置的配平,使得测量装置端产生的力矩与桨叶装载端的力矩互相平衡,得到桨叶的大轴线静力矩值。测量桨叶大轴线力矩的原理如图1所示。

力矩装置称量大轴线力矩时,根据力矩平衡原理可得^[9]

$$M_a = W_1 L_2 = W_2 L_1 \quad (1)$$

式中: M_a 为桨叶大轴线力矩值, W_1 为桨叶重力在轴向的分量, L_2 为设备支点刀至桨叶重心轴向距离, W_2 为测量所加载砝码的重力值, L_1 为设备支点刀至重点刀间距离。

根据所加载砝码质量及装置支点刀至重点刀的距离,计算得到桨叶大轴线力矩 M_a 。影响装置测量精度的主要因素包括距离及质量因素。距离因素包括设备设计力臂长度在测量过程中的形变情况、设备重复升降的定位精度、桨叶定位面的加工精度、桨叶重复加载的定位差异等;质量因素包括设备工作砝码、游码的精度等级和测微小力的传感器测量精度。

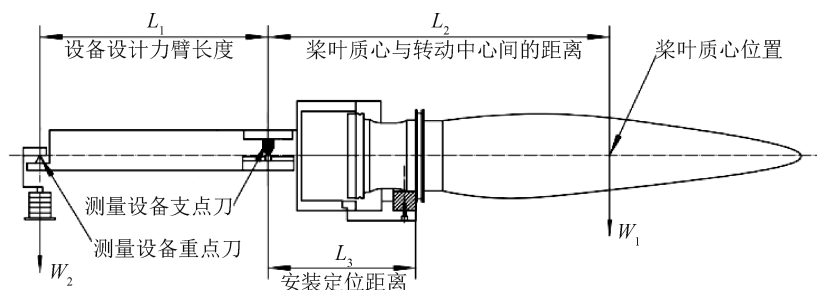


图1 大轴线力矩测量原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of axial moment measurement principle

1.2 小轴线力矩测量原理

小轴线力矩测量方法与大轴线力矩测量方法相似，通过小轴线方向的游码移动量以及游码质量，计算得到小轴线静力矩值。小轴线力矩测量原理示意图如图2所示。小轴线方向的桨叶旋转角度由另外的测角仪给出。根据装置设计的力矩平衡原理可得^[10]

$$M_r = W_4 L_4 = W_3 L_5 \quad (2)$$

式中： M_r 为桨叶小轴线力矩值， W_4 为桨叶重力在径向的分量， L_4 为设备支点刀至桨叶重心径向距离， W_3 为测量装置游码的重力值， L_5 为游码相对支点刀所移动的距离。

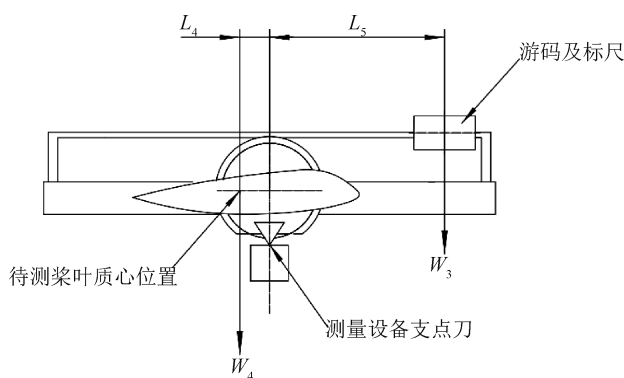


图2 小轴线力矩测量原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of radial moment measurement principle

由式(2)可知，根据游码质量及移动距离，可完成对桨叶小轴线力矩 M_r 的测量。其中影响装置测量精度的主要因素为游码标尺的分辨率及精度、游码的精度等级、测微小力的传感器测量精度。

1.3 测量设备技术指标

利用专用力臂标准器与F1等级的标准砝码对设备进行性能校准。表1为测量设备技术指标。

表1 测量设备技术指标

Tab.1 Technical specifications of the measuring equipment 单位: g·m

灵敏度	大轴线示值误差	小轴线示值误差
0.5	2	1

2 大轴线力矩试验及分析

大轴线力矩测量的影响因素包括测量设备的测量性能影响及桨叶装夹带来的影响，根据影响因素设计试验，并对数值进行分析。

2.1 测量重复性试验及分析

将一片待测桨叶安装至测量装置夹具，使其定位面与测量装置定位面完全贴合，并将角度测量截面调整至大轴线力矩测量的设计截面角度，开启力矩装置进行测量。在测量中，保障重复性测量条件^[10]，即短时间内利用该装置重复测量6次，读取数值并记录，以重复测量结果中的最大值减最小值作为测量的重复性。试验结果如表2所示，可以看出同一桨叶不拆卸时的重复测量效果较好，最大测量值与最小测量值之差仅为0.2 g·m，仅为测量设备最大允许误差的1/10。

2.2 重复装夹试验及分析

将同一片待测桨叶重复拆卸并安装至测量装置夹具，使其定位面与测量装置定位面完全贴合，每次安装后均将角度测量截面调整至大轴线力矩测量的设计截面角度，然后开启力矩装置进行测量。以测量结果的标准偏差体现重复装夹对测量结果的影响情况，试验结果如表3所示。此项测量结果标准差为0.628，最大值与最小值之差为1.7 g·m。对于一片26 kg的桨叶，若其重复装夹，定位面距刀口差距为0.1 mm，则将产生0.1 mm ×

表2 重复性测量结果

Tab.2 Repeat measurements of the same blade

测量次数/次	$M_a / (\text{g} \cdot \text{m})$
1	19 135.2
2	19 135.0
3	19 135.1
4	19 135.2
5	19 135.2
6	19 135.1
重复性测量结果	0.2

表3 重复装夹同一桨叶的测量结果

Tab.3 Measurement results of repeated clamping of the same blade

测量次数/次	$M_a / (\text{g} \cdot \text{m})$
1	19 048.4
2	19 048.6
3	19 047.9
4	19 049.3
5	19 048.9
6	19 047.6
标准偏差	0.628

26 kg = 2.6 g·m 的力矩误差, 因此可知, 本设备的定位安装误差约为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{m} \div 26 \text{ kg} = 0.07 \text{ mm}$ 。

由表3可知, 重复装夹桨叶进行测量的标准偏差为0.628, 影响程度在测量设备的最大允许误差2 g·m 以内。

2.3 其他影响因素分析

桨叶在全年均有生产, 其生产环境存在温度变化, 由此而引发的线性热膨胀将会使桨叶质心位置发生变化。热膨胀系数的数学表示方法为^[12]

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta T} \quad (3)$$

式中: α 为材料热膨胀系数, L 为材料原始长度, ΔL 为长度变化量, ΔT 为温度变化量。

桨叶表面为碳纤维铺层结构, 以其常见铺层方式的热膨胀系数 $2.84 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 计算^[11], 桨叶质心至测量设备刀刃长度为1 m, 测量厂房在不同季节测量温度变化为20 °C, 则有

$$\Delta L = \alpha L \Delta T = 0.057 \text{ mm} \quad (4)$$

称量26 kg桨叶将产生或减少的附加力矩为

$$M = \Delta L \cdot m = 1.48 \text{ g} \cdot \text{m} \quad (5)$$

其余可能存在的影响因素还包括测量厂房横风对桨叶测量的影响、测量桨叶定温时间对测量的影响、不同地域重力加速度对力矩值的影响等。

3 小轴线力矩试验及分析

小轴线力矩(简称小矩)为桨叶在不同角度下, 垂直于旋转轴线方向上所产生的力矩, 即径向力矩。需在三个角度下测量此型号桨叶的小轴线力矩, 小轴线力矩测量截面示意图如图3所示。

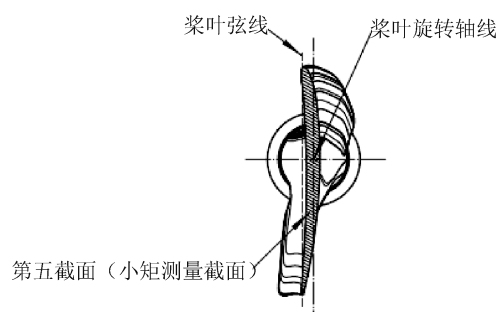


图3 小轴线力矩测量截面示意图

Fig.3 Radial moment measurement section diagram

3.1 测量重复性试验及分析

将一片待测桨叶安装至测量装置夹具, 并使其定位面与测量装置定位面完全贴合, 将桨叶调整至测量角度, 开启力矩装置进行测量。在测量中, 保障重复性测量条件^[10], 仍以重复测量结果中的最大值减最小值作为测量的重复性。试验结果如表4所示。

表4 重复测量同一角度的结果

Tab.4 Repeat measurements of the same angle

测量次数/次	$M_r / (\text{g} \cdot \text{m})$
1	241.9
2	241.9
3	241.9
4	241.8
5	241.9
6	241.9
重复性测量结果	0.1

由表4可见,重复测量得到的小轴线力矩值相对稳定,最大测量值与最小测量值之差仅为 $0.1\text{ g}\cdot\text{m}$,为测量设备最大允许误差的 $1/10$ 。

3.2 重复调整角度试验及分析

根据小轴线力矩测量原理可知,其不受定位面精度影响,仅受桨叶旋转角度影响。不断重复调整桨叶角度,观察其力矩值变化情况。重复调整角度的测量结果如表5所示,标准偏差为 0.286 ,最大测量值与最小测量值之差为 $0.75\text{ g}\cdot\text{m}$ 。由此可见,桨叶旋转角度将会较大程度地影响小轴线力矩的测量结果。

表5 重复调整角度的测量结果

Tab.5 Repeatedly adjust the angle of measurement

测量次数 / 次	$M_r / (\text{g}\cdot\text{m})$
1	236.9
2	237.7
3	237.2
4	237.1
5	237.1
6	237.7
标准偏差	0.286

将桨叶质量在此测量截面上等效为桨叶质心,沿旋转轴线转一定角度,在此截面下桨叶的质心位置与旋转轴线的关系如图4所示。

桨叶重心与水平方向夹角为 θ ,等效质心到旋转轴线 O 的距离为 l_0 ,投影到水平方向的力臂长

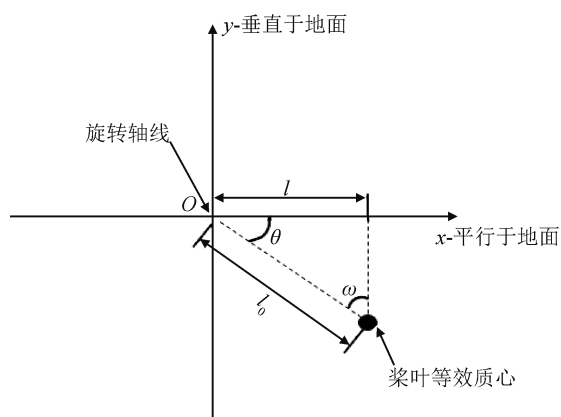


图4 桨叶质心位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the position of the blade center of mass

度 l 为

$$l = l_0 \cdot \cos \theta \quad (6)$$

记桨叶质心与角度测量装置 0° 位置的夹角为 ω ,在 $0^\circ \leq \omega \leq 90^\circ$ 范围内,有

$$\theta = 90^\circ - \omega \quad (7)$$

则力臂长度与夹角 ω 的关系为

$$l = l_0 \cdot \cos(90^\circ - \omega) = l_0 \cdot \sin \omega \quad (8)$$

在质量不变的条件下,力矩测量结果与力臂成正比,桨叶旋转时质心位置的变化如图5所示。

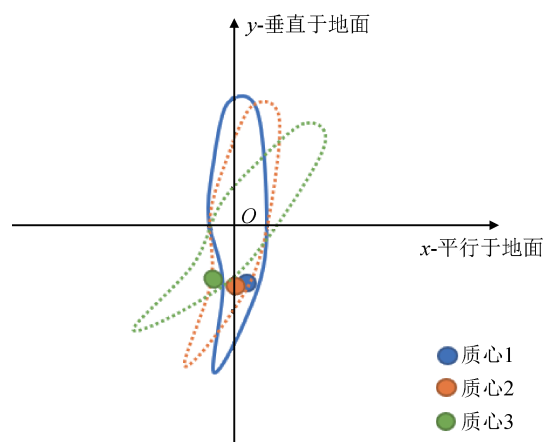


图5 桨叶旋转时质心位置的变化示意图

Fig.5 Schematic diagram of the change in the position of the center of mass as the blades are rotating

选取一片桨叶进行分析,利用MATLAB对三个角度下得到的小轴线力矩值进行正弦曲线拟合^[12],结果如图6所示。

由图6拟合结果知: $a_1 = 513$, $b_1 = 0.01723$, $c_1 = 2.403$,将此代入至所拟合的正弦方程 $f(x) =$

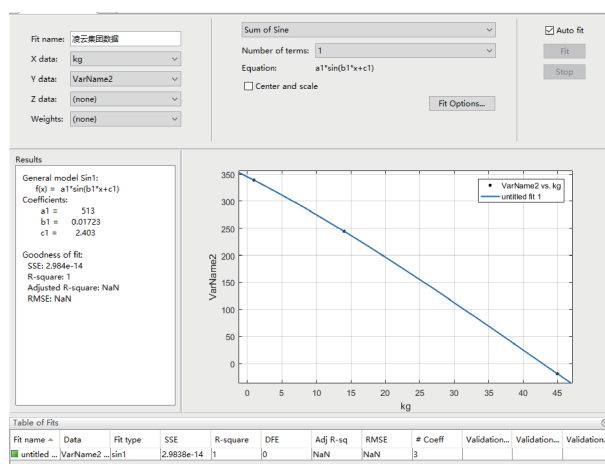


图6 测量数据曲线拟合结果

Fig.6 Measurement data curve fitting results

$a_1 \sin(b_1 x + c_1)$ 中, 得到的正弦函数表达式为

$$f(x) = 513 \cdot \sin(0.01723x + 2.403) \quad (9)$$

式中: $f(x)$ 为小轴线力矩值, x 为测量时桨叶所在的旋转角度。利用测量设备, 验证此桨叶在其他角度的小轴线力矩值, 结果如表6所示。

表6 其他角度数据验证

Tab.6 Data validation from other angles

旋转角度 / (°)	测得值 / (g·m)	三角函数计 算值 / (g·m)	差值 / (g·m)
0	344.9	345.4	-0.5
13	251.9	252.5	-0.6
15	236.9	237.0	-0.1
46	-27.3	-27.7	0.4

根据表6数据可知, 利用所拟合的正弦函数表达式求得的桨叶小矩值与实测小矩值之差小于 $0.6 \text{ g}\cdot\text{m}$, 设备小矩测量示值误差为 $1 \text{ g}\cdot\text{m}$, 由此可证明小矩值与旋转角度满足正弦关系。

由式(9)可知: 当 $x = 0.9^\circ$ 时, 角度相差 $\pm 0.15^\circ$, 就会引起力矩值 $\pm 1 \text{ g}\cdot\text{m}$ 的变化; 当 $x = 14^\circ$ 时, 角度相差 $\pm 0.13^\circ$, 就会引起力矩值 $\pm 1 \text{ g}\cdot\text{m}$ 的变化; 当 $x = 45^\circ$ 时, 角度相差 $\pm 0.12^\circ$, 就会引起力矩值 $\pm 1 \text{ g}\cdot\text{m}$ 的变化。

对这三个测量角度而言, 测量角度越大, 角度的微小变化对测量结果的影响越大。要保证角度引起的测量结果误差不超过 $\pm 1 \text{ g}\cdot\text{m}$, 测量角度不得超过 $\pm 0.12^\circ$, 否则将影响桨叶小轴线力矩测量的准确性。

3.3 其他影响因素分析

以质量为 26 kg 的桨叶在 0° 状态下的小轴线力矩为例, 计算其小轴线力臂如下

$$l = \frac{M_r}{m} = 0.013 \text{ m} \quad (10)$$

式中: l 为小轴线力臂, M_r 为在此角度下测得的小轴线力矩, m 为桨叶质量。小轴线力臂相较大轴线力臂更短, 因此在同样温度变化情况下受热膨胀影响较小^[13], 若测量厂房在不同季节环境温度变化为 20°C , 则力臂仅有 $7.38 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 的变化量, 由此带来的静力矩值变化量为 $0.019 \text{ g}\cdot\text{m}$, 相较于测量设备精度和分辨力而言, 可忽略不计。

其他可能的影响因素包括: ①桨叶旋转轴线

与测量轴线不完全重合, 导致旋转不同角度后轴线偏转一定角度^[14], 造成小轴线力矩值存在误差; ②桨叶测量截面位置不同, 则根据此测量截面所确定的转角不同, 造成测量误差; ③设备的装夹定位表面或桨叶定位面有异物或变形, 造成安装后旋转轴线与测量轴线偏离, 产生测量误差等。

4 结论

阐述了基于天平式桨叶静力矩测量的原理, 利用相应设备完成了桨叶大轴线、小轴线的力矩测量, 分析造成测量结果差异的原因, 包括桨叶重复装夹、桨叶角度重复调整、装置测量重复性、角度测量精度、温度等, 明确了对大轴线力矩及小轴线力矩影响较大的关键因素分别为桨叶装夹和角度调整, 为后期研发新型桨叶、配平同组桨叶以及提高螺旋桨发动机维修效率等提供了数据基础, 对于实现桨叶互换、产品合格判断、复合材料维修等具有重要意义。

参考文献

- [1] 杨士威, 丛培田. 飞机螺旋桨静平衡检测系统研究[J]. 光电技术应用, 2019, 34(5): 58-62.
YANG S W, CONG P T. Research on aircraft propeller static balance detection system[J]. Electro-Optic Technology Application, 2019, 34(5): 58-62. (in Chinese)
- [2] 骆海民, 洪毅, 魏康军, 等. 复合材料螺旋桨的应用、研究及发展[J]. 纤维复合材料, 2012, 29(1): 3-6.
LUO H M, HONG Y, WEI K J, et al. The application and study and development of composite propeller[J]. Fiber Composites, 2012, 29(1): 3-6. (in Chinese)
- [3] 张帅, 朱锡, 孙海涛, 等. 船用复合材料螺旋桨研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 620-633.
ZHANG S, ZHU X, SUN H T, et al. Review of researches on composite marine ropellers[J]. Advance in Mechanics, 2012, 42(5): 620-633. (in Chinese)
- [4] 姜治芳. 可调螺距螺旋桨桨叶静平衡问题研究[J]. 舰船科学技术, 2004, 26(4): 11-14.
JIANG Z F. The study on static balance for blade of controllable pitch propeller [J]. Ship Science and Technology, 2004, 26(4): 11-14. (in Chinese)
- [5] 孙海涛, 熊鹰, 黄政. 复合材料螺旋桨纤维铺层的影响及预变形设计[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(5): 116-121.
SUN H T, XIONG Y, HUANG Z. Effect of stacking mode

- of composite laminates and pre-deformed design of composite marine propellers [J]. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.: Natural Science Edition, 2014, 42(5): 116-121. (in Chinese)
- [6] 谢伟. 五叶调距桨的桨叶优化组合及整桨静平衡方法研究[J]. 舰船科学技术, 2004, 26(5): 7-10.
XIE W. Study on optimum combination of blades of five-blade controllable-pitch propeller and static balancing methods of the whole propeller [J]. Ship Science and Technology, 2004, 26(5): 7-10. (in Chinese)
- [7] 瞿剑苏, 马晓苏. 飞机螺旋桨发动机桨叶力矩平衡测量方法研究[J]. 计量学报, 2010, 31(6): 533-536.
QU J S, MA X S. The measurement methods for torque balance of airplane propeller blades [J]. Acta Metrologica Sinica, 2010, 31(6): 533-536. (in Chinese)
- [8] 邱晓峰, 卫建兵, 黄昭锋. 桨叶静平衡重心的力矩测量方法: CN101074896A[P]. 20071121[2024-1-10].
QIU X F, WEI J B, HUAGN Z F. Measurement of moments at the center of gravity for static equilibrium of paddles: CN101074896A[P]. 20071121[2024-01-10]. (in Chinese)
- [9] JIA Z T, ZHAO Z Y, QU J S, et al. Study of a static torque measurement device for composite variable pitch propeller blades [C]// SPIE 12282, 2021 International Conference on Optical Instruments and Technology. SPIE: Optoelectronic Measurement Technology and Systems, 2022.
- [10] 林景星, 陈丹英. 计量基础知识[M]. 3版. 北京: 中国质检出版社、中国标准出版社, 2015.
LIN J X, CHEN D Y. Fundamentals of measurement [M]. 3rd ed. Beijing: China Quality Inspection Press, China Standard Press, 2015. (in Chinese)
- [11] 邱雪琼, 陈琳. 碳纤维增强复合材料层压板的热膨胀系数测量及理论计算方法[J]. 复合材料科学与工程, 2021(7): 28-32, 104.
QIU X Q, CHEN L. Test and theoretical method for coefficients of thermal expansion of carbon fiber reinforced composite laminate [J]. Fiber Reinforced Plastics/ Composites, 2021(7): 28-32, 104. (in Chinese)
- [12] 董惠敏, 姜立学. 轴、孔接触面荷载分布研究[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(6): 912-916.
DONG H M, JIAGN L X. Study of loads distribution between shaft and hole body contact interface [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(6): 912-916. (in Chinese)
- [13] 苗恩铭, 费业泰. 固体热膨胀系数实用解析[J]. 现代机械, 2003(2): 56-57.
MIAO E M, FEI Y T. Practicality resolution of solid coefficient of temperature expansion [J]. Modern Machinery, 2003(2): 56-57. (in Chinese)
- [14] 卢志辉, 孙志扬, 陈惠南, 等. 旋转体质心形心和质心横偏量的测量机构设计及精度分析[J]. 机械设计, 2001, 18(4): 25-27.
LU Z H, SUN Z Y, CHEN H N, et al. Mechanism design and precision analysis for barycenter, centroid and lateral eccentricity of barycenter measurement of a rotative body [J]. Journal of Machine Design, 2001, 18(4): 25-27. (in Chinese)

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 王伟辉(1974—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为飞机螺旋桨修理技术。



通信作者: 贾志婷(1992—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事几何量计量研究及相关产品研制、静力矩测量装置研发等。