

引用格式: 黄政, 熊鹰, 杨光. 复合材料螺旋桨模型的应变模态与振动特性[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 98-105.

HUANG Zheng, XIONG Ying, YANG Guang. Composite propeller's strain modal and structural vibration performance [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(2): 98-105.

复合材料螺旋桨模型的应变模态与振动特性

黄政, 熊鹰, 杨光

海军工程大学 舰船工程系, 武汉 430033

摘要: 采用有限元模态算法和应变模态测量试验对比金属桨和碳纤维桨模型的固有频率、位移和应变模态振型, 试验测得铜桨和碳纤维桨的前三阶固有频率与计算值相差分别在3%和12%以内。碳纤维桨各阶固有频率均比铜桨要小, 应变模态振型相似, 前者结构阻尼是后者的4倍左右。计算二者在流域中的湿模态, 铜桨的前四阶湿模态固有频率比干模态减小18%~33%, 碳纤维桨减小54%~64%。研究铜桨和不同铺层碳纤维桨之间的振动特性, 得出有利于减轻振动的纤维铺层方式, 优选出的碳纤维桨总振动加速度级(TAL)比试验用碳纤维桨降低2 dB。

关键词: 复合材料螺旋桨; 应变模态; 固有频率; 振动响应; 振动加速度级

中图分类号: U664.33

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.02.013

Composite propeller's strain modal and structural vibration performance

HUANG Zheng, XIONG Ying, YANG Guang

Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: The natural frequency and displacement strain modal's vibration mode is comparative studied using validated finite modal algorithm and strain modal experiment, the result showed that the deviation of tested and calculated first three natural frequency of copper and carbon fiber propeller is within 3% and 12%. The carbon fiber propeller has smaller natural frequency, similar strain modal and four times structure damping compared with copper propeller. Further calculation of the wet modal of two propellers, the first four wet modal natural frequency of copper propeller reduced 18%~33% compared with the corresponding dry modal, while the carbon fiber propeller's reduction is 54%~64%. More research on vibration performance of propeller is carried out, the fiber orientation beneficial for vibration attenuation is obtained, the total acceleration level of optimized carbon fiber propeller is 2 dB less than the tested carbon fiber propeller.

Keywords: composite propeller; strain modal; natural frequency; vibration response; acceleration level

0 引言

复合材料螺旋桨具有高弹、质轻、低磁、可设计性强、抗冲击和抗腐蚀性强、阻尼减振等优点, 采用复合材料代替常规镍铝青铜材料就必须考虑其结构振动特性。在结构方面, 确定螺旋桨的模

态和固有频率是基础工作, 由于几何形状复杂, 需采用贴附电阻应变片的方式测量固有频率, 再进一步与铜桨结合研究其振动特性, 探究碳纤维桨与铜桨振动响应的差别并提出改善方法。

在螺旋桨模态和固有频率计算方面, Young等^[1-7]分别通过理论计算和试验验证了不同螺旋

收稿日期: 2015-05-29

网络出版时间: 2016-3-17 10:56

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179198)

作者简介: 黄政, 男, 1989年生, 博士生。研究方向: 复合材料螺旋桨性能。

E-mail: huangzheng.315@163.com

熊鹰(通信作者), 男, 1958年生, 教授, 博士生导师。研究方向: 船舶流体力学。

E-mail: ying_xiong28@126.com



桨模型的模态和固有频率,得出模态的振型和固有频率随桨参数的变化规律,试验方法均通过敲击法采用加速度传感器测量,计算方法采用有限元软件计算。其中没有探究加速度传感器的附加质量影响。

在螺旋桨应变模态研究方面,Suneetha等^[8]采用ABAQUS计算了螺旋桨的变形和应力,Herath等^[9]研究了NACA翼型的弯扭耦合特性,并通过纤维光栅FBG进行了应变测试。李德葆等^[10-11]从振动应变响应模态模型出发,阐明了应变传递函数的构成特点、测试方案以及模态参数识别的4种方法,并通过对悬臂梁位移模态和应变模态测量结果的对比,完善了应变模态测量方法。应变测量和试件应变模态的研究工作值得借鉴,但没有针对螺旋桨模型进行过应变模态测量和验证。

在流场中结构振动与噪声计算方面,夏齐强^[12]对单、双层圆柱壳舱段的振动和声辐射性能进行了计算和测量。杨坤^[13]和丁德勇等^[14]研究了复合材料舵翼结构的振动噪声,采用优化设计后的复合材料实现了减振降噪。对本文中螺旋桨模型的振动频响分析方法提供了参考。

以上研究工作中,均没有对小尺寸的螺旋桨模型进行过应变模态测量和验证,也没有对新型材料的螺旋桨分析过振动响应,从结构层面探讨推进器是其流固耦合研究的基础。本文将通过贴附电阻应变片的方式测量直径为240 mm金属桨模和碳纤维桨模的应变模态和固有频率,验证有限元计算结果,并研究湿模态固有频率和纤维铺层对复合材料螺旋桨固有频率的影响,借鉴结构振动频响分析方法研究复合材料螺旋桨模型的振动特性。本文将应变模态测量方法应用于铜桨和复合材料桨的模态研究并分析振动频响属于探索性工作。

1 桨模的干模态计算与试验

由于螺旋桨模型结构复杂,且尺寸较小,若想测得其固有频率,就需要在有限元计算的基础上,结合试验测量,才能更为准确地选定模态振型,从而得到固有频率。前期研究中确立了可靠的模态计算方法,本节将在此基础上预报铜桨和碳纤维桨的固有频率和模态振型,并通过应变模态测量试验进行验证。

1.1 应变模态基本原理

通常测量结构固有频率采用位移模态测量方法,贴附加速度传感器,通过锤击或扫频激励力输入测量位移频响函数。这种方法已经很成熟。从

理论上讲,应变模态和位移模态是同一能量平衡状态的2种表现形式,位移模态代表结构固有的振动平衡状态,应变模态则是其对应的应变分布状态。如同位移模态分析方法建立结构振动位移响应预测模型一样,应变模态分析方法也可建立振动应变响应预测模型,从而得到载荷—应变频响函数,求取与位移模态相对应的应变模态及有关模态参数。

1.2 螺旋桨干模态计算方法验证

采用ABAQUS软件进行模态计算,在modal分析步中进行频率提取计算。而小尺寸模型常规加速度传感器会因附加质量产生较大影响,电阻应变片测量模态在其之上改变输出为应变值,其中碳纤维桨的阻尼较大,输入信号需经过多次敲击后再筛选,对于小尺寸模型的模态试验,操作和振型的选取是反复调整的过程。

为建立螺旋桨模态的有限元计算方法,先与Young^[1]的计算结果对比,以验证算法的可行性。通过理论预报,应力和应变与试验结果吻合较好,进一步预报了系列桨的干模态和湿模态固有频率,计算对象为直径0.305 m的438 X系列桨,4个桨除侧斜、纵倾、拱度外,其余几何参数均相同,采用2014-T4铝制成,密度2 800 kg/m³,杨氏模量 $E=75$ GPa,泊松比 $\nu=0.33$ 。

由如图1所示的计算结果可知,通过本文干模态计算方法所得的各阶固有频率与Young^[1]的计算结果均相差在6%以内,具有较好的精度。随着侧斜的增大,桨叶弹性增强,固有频率也随之减小。

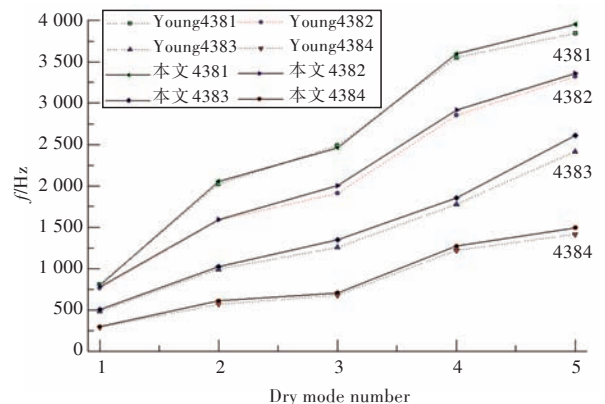


图1 本文计算438X系列桨干模态固有频率与Young^[1]计算结果对比

Fig.1 Comparison of 438X's dry modal natural frequencies with Young's^[1] research

1.3 铜桨的干模态计算与试验

试验用铜桨模型直径240 mm,材料为镍铝青

铜,杨氏模量为 150 GPa,泊松比为 0.3,通过称重得桨模质量为 1.98 kg,计算确定该镍铝青铜的密度为 $8.41 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。铜桨模型为 5 叶桨,采用面元法编程规则将桨叶划分 400 个 C3D8I 网格,将桨毂划分 10 620 个 C3D10 网格。将桨毂中心螺栓设定为固定的边界,即桨毂中心内圆柱面为刚性固定。经过计算,桨叶之间的谐振导致每 5 阶模态的固有频率相近,振型分布在不同叶片上,可视作为同一阶模态。

位移模态振型和应变模态振型如图 2 所示,第 1 阶位移模态为径向弯曲变形,第 2 阶位移模态为弦向扭转变形,第 3 阶位移模态为弯扭变形。前 3 阶的固有频率,如表 1 所示。

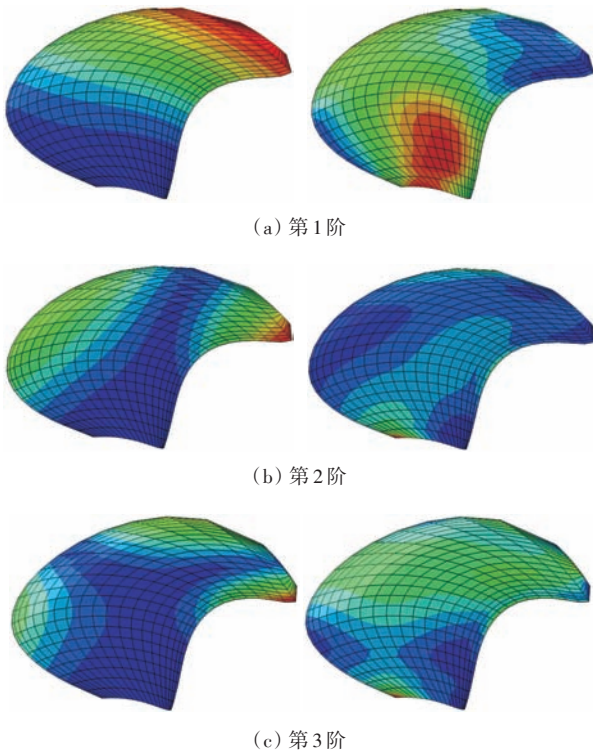


图 2 铜桨前三阶位移模态振型(左)和应变模态振型(右)

Fig.2 Copper propeller model's first three displacement modal vibration mode (left) and strain modal vibration mode (right)

表 1 铜桨前三阶固有频率的计算值与试验值对比
Tab.1 Comparison of first three natural frequencies of copper propeller between calculation and test

	阶 数			阻尼/%
	1	2	3	
计算值/Hz	744.16	1 176.26	1 731.24	
试验值/Hz	751	1 185	1 702	0.98

采用了 2 种方法测量模态:

1) 方法 1:固定 0.5R 处测量点作为响应输出点(OP),移动激励点(IP1~IP15),即多输入单输出(MISO),通过测得应变频响函数矩阵的各行确定

固有频率和应变模态振型。

2) 方法 2:固定 0.8R 激励点(IP),移动测量点(OP1~OP5),即单输入多输出(SIMO),通过测得应变频响函数矩阵的各列确定固有频率,在 1) 确定振型的基础上,再次验证固有频率测量的准确性,如图 3 所示。

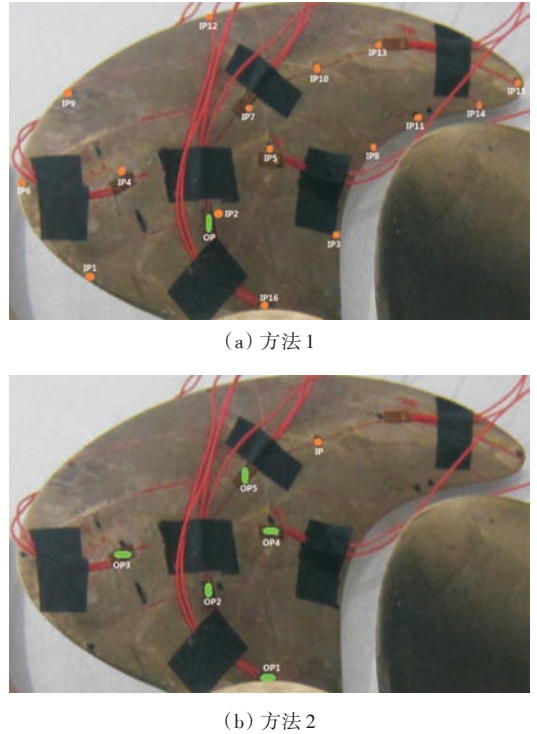
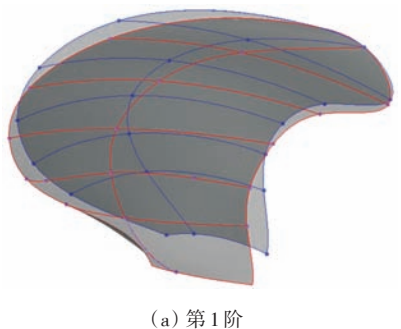
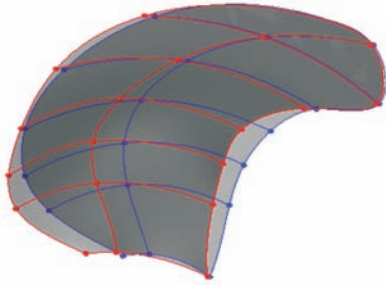


图 3 铜桨应变模态测量 2 种方法敲击点和应变片布点图
Fig.3 The distributions of IP and OP of copper propeller model

数据采集仪输出值为应变值,每次敲击前信号需清零,敲击时要掌握好力度和瞬时性,每次敲击要满足信号在有效值内,且只能有一个峰值,若出现伴随峰值则需重新敲击,取 2 次激励信号平均值,每种方法测量 3 次,以确保试验可靠性。选取的前两阶应变模态振型如图 4 所示,模态振型与计算应变图(图 2)相似。经过 3 次平均,所测得铜桨的前三阶固有频率如表 1 所示,可见所测得的固有频率与计算值吻合较好,误差均在 3% 以内。



(a) 第 1 阶



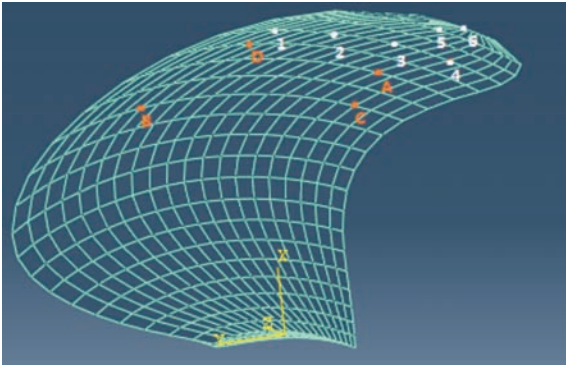
(b) 第2阶

图4 铜桨前两阶应变模态试验振型图

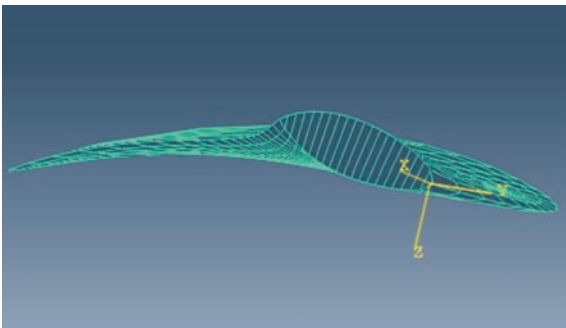
Fig.4 The first two test strain modal's vibration mode of copper propeller model

1.4 复合材料桨的干模态计算与试验

本文试验用复合材料螺旋桨采用正交碳纤维布制成,根据静载试验确认材料参数为:弹性模量 $E_1=E_2=75$ GPa, $E_3=9$ GPa; 剪切模量 $G_{12}=4.5$ GPa, $G_{13}=G_{23}=3.5$ GPa; 泊松比 $\nu_{12}=0.038$, $\nu_{13}=\nu_{23}=0.3$; $\rho = 1\ 650$ kg/m³; 铺层角度组合为[60, -30, 60, -30]。主方向为与 X 轴的夹角,第一象限内为正,纤维布铺在由桨叶中部表面所确定的 XY 平面上,如图 5 所示。



(a) 叶面纤维主方向和坐标系



(b) 桨叶与纤维布同平面

图5 纤维铺层坐标系

Fig.5 The coordinate system of fiber stacking

采用经过验证的模态计算方法和确定的材料参数,对复合材料螺旋桨整体模型进行了固有频率和模态振型的计算,固有频率如表 2 所示,位移模态和应变模态振型与金属桨相似,仅在不同位置的振型幅值不同。

碳纤维桨应变模态测量步骤与铜桨相同,试验过程如图 6 所示。频响函数的峰值不如铜桨明显,是由于碳纤维桨的高阻尼特性引起的振动衰减造成,在固有频率提取时采用峰值频率平均的方式来保证试验数据的合理性。通过试验测量,碳纤维桨应变模态振型与铜桨相似,前三阶固有频率如表 2 所示。前两阶固有频率的计算值与试验值相差在 8% 以内,第三阶固有频率则相差 12%,是由于设备的精密度和结构的复杂度所致。碳纤维桨各阶固有频率均比铜桨要小,是由于碳纤维桨的刚度小且密度小,其比值也小所造成。



(a) 碳纤维桨照片



(b) 测试仪器

图6 碳纤维桨试验图

Fig.6 The test scene of composite propeller

表 2 碳纤维桨前三阶固有频率的计算值与试验值对比
Tab.2 Comparison of first three natural frequencies of composite propeller between calculation and test

	阶 数			阻尼/%
	1	2	3	
计算值/Hz	676.16	1 085.20	1 925.54	
试验值/Hz	727	1 080	1 690	4.0

2 桨模的湿模态计算

螺旋桨运转于流场中,其结构的固有特性与在空气中有所不同,流场的附连水质量将对螺旋桨的固有频率和振型产生影响,从而改变螺旋桨的振动响应。由于流体对电阻应变片产生影响,因此未进行湿模态的测量,仅通过与文献[1]的结果进行了对比验证,并在前期空气中螺旋桨干模

态研究的基础上,预报其湿模态固有频率和振型,为进一步研究振动响应打下基础。

基于有限元方法将复合材料螺旋桨桨叶的流固耦合湿模态振动问题看作是一个声学流固耦合问题,该模型的耦合振动方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & 0 \\ \rho_f \mathbf{R} & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & -\mathbf{R}^T \\ 0 & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_s \\ 0 \end{Bmatrix}$$

求解可得结构表面的节点位移和压力,若忽略阻尼和外力则可得到自由振动时的矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & 0 \\ \rho_f \mathbf{R} & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & -\mathbf{R}^T \\ 0 & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

式中: \mathbf{M}_s , \mathbf{M}_f 分别为固体和流体的质量矩阵; \mathbf{K}_s , \mathbf{K}_f 分别为固体和流体的刚度矩阵; \mathbf{C}_s 为固体的阻压矩阵; \mathbf{F}_s 为固体的力矩阵; \mathbf{R} 为阻力; \mathbf{u} 为位移; \mathbf{p} 为压力。

采用复特征值分析求解可得结构与流体相互作用的自由振动固有频率和模态。

由于湿模态测量难以进行,故与文献[1]对比,以验证螺旋桨的湿模态计算方法。由图7所示的计算结果可知,通过本文湿模态计算方法所得的各阶固有频率与 Young^[1]的结果相差均在8%以内,具有较好的精度。

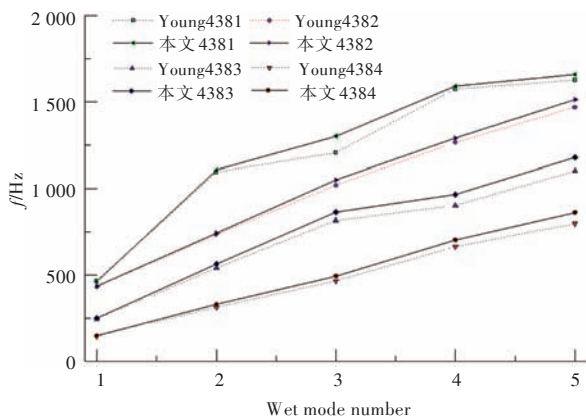


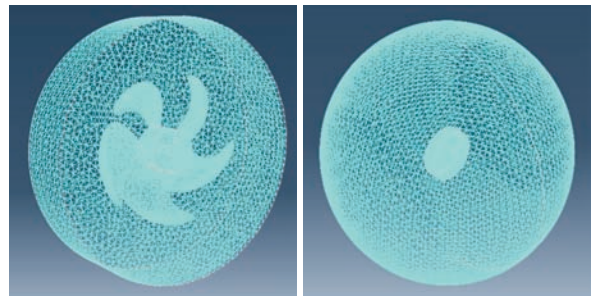
图7 本文计算438X系列桨湿模态固有频率与Young^[1]结果对比

Fig.7 Comparison of 438X's wet modal natural frequencies with Young's research^[1]

2.1 铜桨的湿模态固有频率

铜桨湿模态计算模型的水域直径为2000 mm,是桨模尺度的8.3倍,这是参照文献[13]中水域直径为模型尺寸6倍的网格划分方式,并进行加密后结果改变不大而确定的。桨叶和桨毂的网格划分方式与干模态计算模型相同,流体域采用声学单元AC3D4建模,内域网格183876个,外域网格469853个。铜桨与流域模型通过与耦合面的绑定实现耦合计算,流固耦合湿模态内外域网格模

型如图8所示。流体材料的体积模量2.13 GPa,密度为 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。



(a) 内域

(b) 外域

图8 湿模态流体内外域网格

Fig.8 The inner (a) and outer (b) domain of wet modal

计算得出铜桨的湿模态固有频率比其干模型相应固有频率小,并随着阶数的增加,减小程度降低,说明附连水质量对低阶固有频率影响较大,对高阶影响较小。前四阶湿模态固有频率计算结果如表3所示,减小比例18%~33%,各阶振型与干模态相应振型相似。

表3 铜桨前4阶干、湿模态固有频率的对比

Tab.3 Comparison of the first four dry and wet modal frequencies of copper propeller

	阶数			
	1	2	3	4
干模态/Hz	744.16	1176.26	1731.24	2611.24
湿模态/Hz	498.95	843.14	1340.12	2139.34
差比%	32.95	28.32	22.59	18.07

2.2 复合材料桨的湿模态固有频率

复合材料桨的计算模型设置与铜桨的湿模态计算模型设置相同,仅材料不同。附连水质量同样使低阶固有频率减小较多,高阶固有频率减小较少。前4阶湿模态固有频率计算结果如表4所示,减小比例54%~64%,各阶振型与干模态相应振型相似。

表4 碳纤维桨前4阶干、湿模态固有频率的对比

Tab.4 Comparison of the first four dry and wet modal frequencies of carbon fiber propeller

	阶数			
	1	2	3	4
干模态/Hz	676.16	1085.20	1925.54	2735.84
湿模态/Hz	247.06	440.366	852.5	1237.82
差比%	63.46	59.42	55.73	54.76

相比于铜桨,碳纤维桨的湿模态固有频率减小得更多,是由于碳纤维桨比铜桨密度小得多,仅为水体密度的1.65倍,流域对其产生的影响更大。此结论与Young^[1]文中弹性桨湿模态固有频率减小50%的结论一致。

3 桨模的结构振动特性研究

螺旋桨在流场中旋转承受一定的压力载荷,在结构振动研究中,压力载荷被视为具有一定频率特性的激励力,在相关频率段内会引起桨叶的振动。分析螺旋桨振动特性是研究其噪声特性的基础,由于湿模态计算和流场中振动响应计算耗时较长,故在此计算空气中桨叶的振动。虽然空气和流场中桨叶的振动情况不同,但是从对比研究的角度出发,不同材料桨叶之间在空气中的振动特性对比能反映出其在流场中的振动特性差异,因此通过规律研究可得出有意义的结论。

本节将首先研究纤维铺层角度对固有频率的影响,然后在假设承受相同单位压力载荷的情况下,研究铜桨和不同铺层碳纤维桨之间的振动响应,得出有利于减轻振动的纤维铺层方式。

3.1 纤维铺层对固有频率的影响

复合材料螺旋桨由树脂基体和增强纤维材料组成,而纤维材料作为主要支撑体,决定着整体的材料性能,纤维铺层角度的不同将对螺旋桨的结构特性产生很大的影响。现在针对前文选定的纤维材料,在角度 180° 范围内对复合材料螺旋桨进行干模态固有频率计算,探究铺层角度对桨叶结构特性的影响规律。

不同桨叶铺层所对应的固有频率计算结果如图 9 所示,由于复合材料为正交碳纤维布,在 180° 范围内固有频率呈现出 2 个周期,是因为正交碳纤维布的主方向和次方向弹性模量、剪切模量、泊松比均相同。可以发现,铺层角度旋转 90° 后,桨叶的固有频率相等。同时,一阶弯曲振型的固有频率与三阶弯扭振型的固有频率呈同增减规律,与二阶扭转振型的固有频率成反增减规律,说明了碳纤维布弯曲振动与扭转振动的不可兼得性。

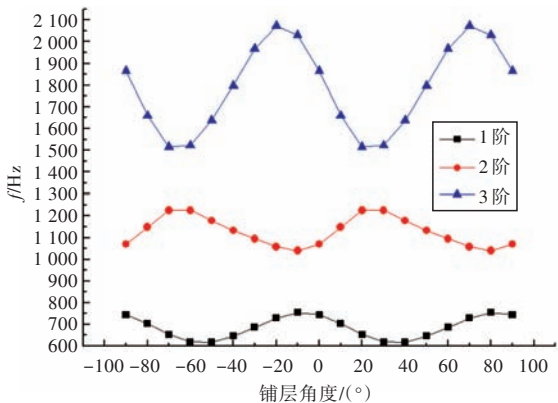


图9 不同铺层角度的前三阶固有频率

Fig.9 The first three natural frequencies of composite propeller with different fiber orientations

3.2 复合材料桨的结构振动响应

对于螺旋桨的振动特性研究,需先对其在相同激励工况下的振动响应进行分析。假设桨叶表面承受单位激励载荷 1 Pa,激振频率为 10~5 000 Hz,步长为 10 Hz。选取桨叶中部一点 i 作为测点,通过计算振动加速度级来进行量化分析,通过加速度频率响应线性谱计算测试频带内此点的有效值(均方根值),计算公式为

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m a_k^2}$$

式中: a_k 为第 k 个频率点的加速度响应幅值; m 为分析频段范围内频率点个数。工程中常采用测点的总振动加速度级 (Total Acceleration Level, TAL) 表示,其计算公式为

$$TAL = 20 \log_{10} \left(\frac{a_i}{a_0} \right)$$

式中, a_0 为标准值 10^{-6} m/s^2 。

首先对比铜桨和碳桨模型的振动响应加速度级,二者的结构阻尼系数试验值分别为 1% 和 4%,在 ABAQUS 软件中输入直接模态阻尼系数进行模拟。如图 10 所示,振动加速度响应与螺旋桨的固有频率相关,在固有频率处出现峰值,反映激起的各阶模态振动加速度的大小。铜桨和碳纤维桨的固有频率不同,所体现出的加速度峰值频率也不同,但总体而言,碳纤维桨由于弹性大而表现出振动加速度大于铜桨,总加速度级 136 dB 亦大于铜桨的 127.16 dB。可见前文所确定材料参数的碳纤维桨模型在承受单位压力载荷时的振动性能比铜桨模型要差。

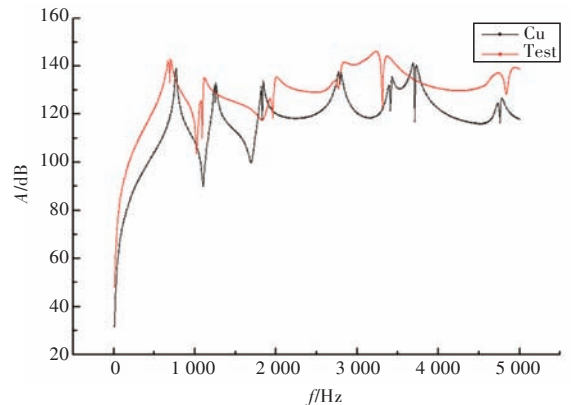


图10 铜桨和测试碳纤维桨模的振动响应

Fig.10 The vibration response of copper propeller and carbon fiber propeller tested

研究不同铺层碳纤维桨的振动加速度级,因正交碳纤维布的固有频率以 90° 为一个周期,在此仅计算 -30° ~ 60° 铺层碳纤维的振动加速度级。

如前所述,纤维铺层对碳纤维浆的固有频率影响很大,同样会影响到其振动特性。为了对比不同纤维铺层时的碳纤维浆振动频响,将结构阻尼系数降为0.5%,以降低阻尼衰减作用。

由图11可见,纤维铺层角度对振动加速度级的影响很大,-10°铺层时的碳纤维浆TAL值142.11 dB最小,比60°铺层时的碳纤维浆TAL值145.36 dB低3.25 dB,具体结果见表5。

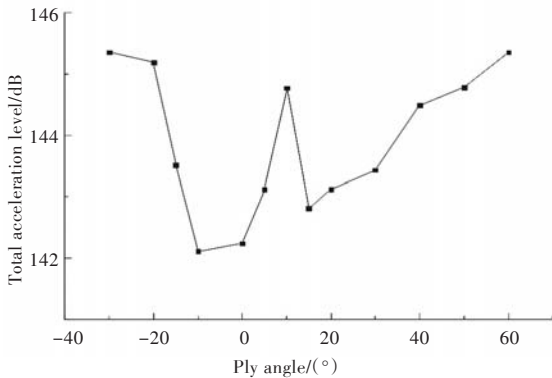


图11 不同铺层角度碳纤维浆的总加速度级

Fig.11 The total acceleration level of composite propeller with different fiber orientations

表5 不同铺层角度碳纤维浆的总加速度级

Tab.5 The total acceleration level of composite propeller with different fiber orientations

铺层角度/(°)	TAL/dB	铺层角度/(°)	TAL/dB
-30	145.4	20	143.1
-20	145.2	30	143.4
-10	142.1	40	144.5
0	142.2	50	144.8
10	144.8	60	145.4

最后,对试验用碳纤维浆模和优选后的碳纤维浆赋予结构阻尼系数,以反映其真实的材料阻尼特性。因前者的阻尼是经过试验真实测量出的,后者是对比分析时得出的减振型纤维铺层角度,对二者赋予相同的结构阻尼系数4%,计算结果如图12所示,可见碳纤维浆赋予阻尼特性后的振动响应表现出固有频率处的削峰现象很明显,是阻尼材料对振动的衰减所致。经过材料优选的碳纤维浆振动性能有所改善,其TAL值为134.01 dB比试验用碳纤维浆降低2 dB,但仍比金属浆的TAL大7 dB。

值得说明的是,此处计算的振动加速度级不能作为振动响应的数值计算依据,仅是在假设承受单位压力载荷时的定性分析。可见,若选用碳纤维材料,则通过改变纤维铺层方式可以有效改善碳纤维浆的振动特性,减小其振动响应。但仍

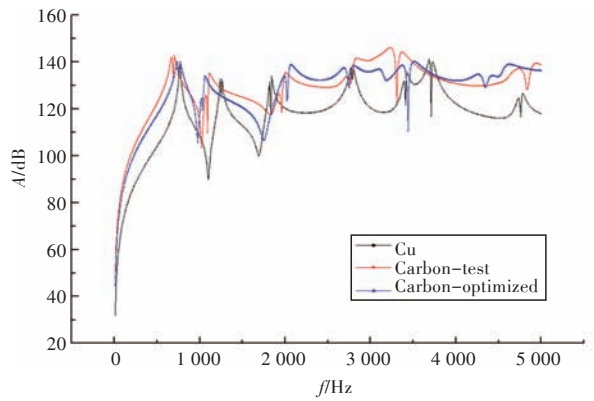


图12 40°铺层与测试碳纤维浆在设置阻尼时的振动响应

Fig.12 The vibration response of optimized and tested carbon fiber propeller with damp

比铜浆的振动加速度级要大,这是碳纤维浆的弹性大于铜浆一倍所致,高阻尼特性仍无法掩盖其高弹性所带来的振动缺陷。

经过分析和推理,在流域中由于流固耦合作用,优选纤维铺层的碳纤维浆振动加速度高于铜浆的分贝值将比其在空气中减小。若适当降低碳纤维浆的弹性,碳纤维浆本身具有的高阻尼和低密度特性可能会有效降低振动响应。

4 结 语

螺旋桨由于模型尺寸小而更适合采用电阻应变片测量应变模态。为研究结构振动特性,本文对金属浆和碳纤维浆模型进行了应变模态试验研究,采用经过验证的有限元模态算法计算了二者的固有频率和位移、应变模态振型,所得铜浆和碳纤维浆的前三阶固有频率与计算值相差分别在3%和12%以内。碳纤维浆各阶固有频率均比铜浆要小,应变模态振型相似,结构阻尼前者是后者的4倍左右。

在此基础上,计算了铜浆和碳纤维浆在流域中的湿模态,铜浆的前四阶湿模态固有频率比干模态减小比例18%~33%,碳纤维浆减小比例54%~64%,相比于铜浆减小得更多,这是由于碳纤维浆比铜浆密度小得多,仅为水体密度的1.65倍,流域的附连水质量对其产生的影响更大。

最后,研究了铜浆和不同铺层碳纤维浆之间的振动特性,得出有利于减轻振动的纤维铺层方式,优选出的碳纤维浆TAL比试验用碳纤维浆降低2 dB,但仍比金属浆的TAL大7 dB。

本文对铜浆和碳纤维浆的固有特性和振动特性进行的研究,将为进一步的流固耦合振动噪声计算提供依据,为复合材料螺旋桨的减振降噪研究和设计打下基础。

参考文献:

- [1] YOUNG Y L. Time-dependent hydroelastic analysis of cavitating propulsors [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2007, 23(2): 269-295.
- [2] KUO J, VORUS W. Propeller blade dynamic stress [C]//*Proceedings of the Tenth Ship Technology and Research (STAR) Symposium*. Norfolk: STAR, 1985: 39-69.
- [3] YOUNG Y L. Fluid-structure interaction analysis of flexible composite marine propellers [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2008, 24(6): 799-818.
- [4] LEE H, SONG M C, SUH J C, et al. Hydro-elastic analysis of marine propellers based on a BEM-FEM coupled FSI algorithm [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2014, 6(3): 562-577.
- [5] 熊家敏, 赵德有, 马骏. 螺旋桨桨叶固有动力特性方法研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2000, 40(6): 737-740.
- XIONG Jiamin, ZHAO Deyou, MA Jun. Dynamic analysis of propeller blades [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, 40(6): 737-740.
- [6] HONG Y, HE X D, WANG R G. Vibration and damping analysis of a composite blade [J]. *Materials and Design*, 2012, 34: 98-105.
- [7] LOU B Q. Fluid-structure coupling dynamic characteristic analysis of underwater propeller based on FEM and test [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [8] SUNEETHA M, SURENDRA R R, VISHNU VARDHAN V, et al. Design & analysis of a surface propeller using FEM [J]. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, 3(9): 198-204.
- [9] HERATH M T, PRUSTY B G, YEOH G H, et al. Development of a shape-adaptive composite propeller using bend-twist coupling characteristics of composites [C]//*Proceedings of the Third International Symposium on Marine Propulsors*. Tasmania, Australia: ISMP, 2013: 128-135.
- [10] 李德葆, 张元润, 罗京. 动态应变/应力场分析的模态法 [J]. *振动与冲击*, 1992(4): 15-22.
- LI Debao, ZHANG Yuanrun, LUO Ning. Using modal analysis method in analyzing dynamic strain/stress field [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 1992(4): 15-22.
- [11] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [12] 夏齐强. 单、双层圆柱壳舱段结构声学设计方法研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2013.
- [13] 杨坤. 粘弹性正交加筋复合材料夹层结构动力学特性分析及其应用研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2014.
- [14] 丁德勇, 张伟, 杨坤. 舰船艏轴架系统固有振动特性测试与分析方法 [J]. *中国舰船研究*, 2013, 8(2): 95-99.
- DING Deyong, ZHANG Wei, YANG Kun. The experiment and analytical method of the inherent characteristics of ship shaft bracket systems [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(2): 95-99.