

文章编号:0254-0096(2019)01-0285-06

## 不同介质中海流机叶片的模态试验分析

韩巧丽<sup>1</sup>, 邢为特<sup>2</sup>, 李汪灏<sup>2</sup>, 张正<sup>2</sup>, 郭珊珊<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学能源与交通工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 采用试验模态法对海流机叶片进行模态分析,分别在空气和水中对其进行模态试验,发现叶片在水中比在空气中1阶固有频率降低了72%、阻尼比降低了66%,2阶固有频率降低了69%、阻尼比降低了53%,不同介质对叶片节线的位置无影响。在水中额定工况下转轮旋转频率为2.5 Hz,而叶片在水中的1阶固有频率为5.724 Hz,两者差值较大,所以该海流机组在额定转速运行时发生共振的几率较小。采用试验法研究海流机叶片在不同介质中的模态参数,建立海流机叶片结构与模态试验测试在水和空气2种不同介质中的联系,为海流机叶片设计和优化提供理论依据。

**关键词:** 海流; 模态分析; 水; 空气; 固有频率; 叶片  
**中图分类号:** TK79      **文献标识码:** A

### 0 引言

海流能的利用逐渐受到世界各国重视,因此开发利用海流能具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。叶片作为海流机的核心部件之一,其性能直接影响海流能利用率及其稳定性。海流机叶片的设计方法目前还不成熟,相比之下,风力机叶片设计方法已趋于成熟,研究二者相关性,可为海流机叶片设计提供理论依据。

目前海流机叶片动力外形设计参考风力机叶片设计,文献[3~7]说明了海流机叶片设计采用水平轴风力机的相关理论与设计方法。由雷诺数相似准则分析,水的运动黏度是空气运动黏度的1/10,所以转轮在水中额定流速是在空气中额定风速的1/10,可为海流机额定流速选取提供依据<sup>[8]</sup>。流体机械叶片的结构动力学特性在不同介质中存在明显差异,在风力机叶片结构设计及模态试验测试的基础上探索海流机叶片结构与其关联性,可为海流机叶片设计提供依据。而研究此差异的方法中以有限元分析居多,缺少实物试验进行验证。

研究海流机叶片在水中的结构动力学特性对提升其安全性和稳定性十分必要。对叶片进行结构动力学研究的主要手段是模态分析。目前对风

力机叶片分析主要采用有限元的方法<sup>[9-11]</sup>。王旭等<sup>[12]</sup>采用全耦合法计算了转轮叶片的前5阶模态,获得了其每阶模态下的固有频率和影响系数,使用锤击法对其仿真结果进行验证。刘庆茂<sup>[13]</sup>发现流体对结构振动的主要影响是附连水质量,证明了空气中的模态分析适用于湿模态试验。陈明等<sup>[14]</sup>发现水中1阶弯曲振动模态频率比空气中降低约30%。赵军等<sup>[15]</sup>为了避免水下航行器燃气涡轮机在工作时发生共振,采用有限元的方法进行了模态分析。吴少龙<sup>[16]</sup>采用有限元法对海流机叶片和主轴进行模态分析,证明两者不存在共振频率。何煜平<sup>[17]</sup>采用有限元法对3种铺层设计方案下的海流机叶片进行模态分析,避免发生共振。采用有限元方法计算叶片的模态参数,由于其边界条件设定与实际难相符,所以存在一定误差<sup>[18]</sup>。

采用模态试验法<sup>[19,20]</sup>,对海流机叶片进行模态试验的研究较少。本文采用模态试验法,以海流机叶片为研究对象,分别在空气和水中对其进行模态试验,得到叶片在不同介质中模态参数,寻找在不同介质中叶片设计的相关性。以为后续海流机叶片设计和模态测试研究提供理论依据。

收稿日期: 2018-05-25

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2017MS0515)

通信作者: 韩巧丽(1976—),女,博士、副教授,主要从事风力发电技术方面的研究。nmgtynxh@hotmail.com

## 1 理论基础

### 1.1 流体机械相似运动

#### 1) 雷诺数 $Re$

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

式中,  $\rho$ ——流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v$ ——流体流速,  $\text{m/s}$ ;  $d$ ——特征长度,  $\text{m}$ ;  $\mu$ ——动力粘性,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

流体机械在不同介质中额定流速选取可参考雷诺数相似准则。

#### 2) 叶尖速比 $\lambda$

$$\lambda = \frac{\pi n R}{30 u} \quad (2)$$

式中,  $R$ ——转轮半径,  $\text{m}$ ;  $u$ ——转轮转速,  $\text{r/min}$ 。

流体机械在不同介质中达到相同叶尖速比时转轮输出功率相同。

### 1.2 转轮在空气中的模态分析

离散的结构动力学方程可表示为:

$$M_s \ddot{U} + C_s \dot{U} + K_s U = F \quad (3)$$

式中,  $M_s$ ——结构的质量矩阵;  $C_s$ ——结构的阻尼矩阵;  $K_s$ ——结构的刚度矩阵;  $U$ ——节点位移向量;  $F$ ——外激励载荷。

当求解结构的模态特性时,为了更好地研究自由振动系统,将自由振动系统简化为无阻尼自由振动系统,方程可简化为:

$$M_s \ddot{U} + K_s U = 0 \quad (4)$$

### 1.3 转轮在水介质中的模态分析

在水中的模态试验,涉及到流固耦合问题,需要同时考虑到结构的动力学方程和流体 Navier-Stokes 方程<sup>[21]</sup>。考虑流体作用时的结构的振动方程为:

$$M_s \ddot{U} + K_s U = -K_{fs} P \quad (5)$$

式中,  $K_{fs}$ ——耦合的刚度矩阵;  $P$ ——流体单元的位移。

假设流体为不可压缩、黏性流体,且平均密度在整个流场中保持不变,则流体的 Navier-Stokes 方程可做适当简化得到离散的流场域控制方程,并参考结构动力学方程形式可写为:

$$M_f \ddot{P} + K_f P = -M_{fs} \ddot{U} \quad (6)$$

式中,  $M_f$ ——流体的质量矩阵;  $K_f$ ——流体的刚度矩阵;  $M_{fs}$ ——耦合的质量矩阵。

合并式(5)与式(6)得到耦合系统控制方程式:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ M_{fs} & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & M_{fs} \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = 0 \quad (7)$$

## 2 试验对象与试验方法

### 2.1 试验对象

海流机叶片是以樟松木为芯,外包玻璃纤维,其中玻璃纤维共包3层,内部缎纹玻璃纤维2层,外部平纹玻璃纤维1层,叶片总长度1025 mm。该叶片所应用的海流机在设计过程中额定转速为50 r/min,叶片数量为3个,叶片翼型截面共13个,截面的序号从叶片的根部开始,从中选取6个截面作为测试截面,见表1。

表1 叶片测试截面参数

Table 1 Blade test section parameters

截面	编号	叶根 距离/mm	截面	编号	叶根 距离/mm
SN4	1	173	SN10	4	773
SN6	2	375	SN12	5	946
SN8	3	574	SN13	6	1025

将相应测点布置在所选取的6个截面上,每个截面上分别在叶片两端轮廓处选取2个点作为测点。叶片的几何外形和截面分布见图1。试验过程中用螺栓将叶片固定在特制工装上,为了充分激起叶片的模态,响应点选在叶片的SN12和SN13中间。

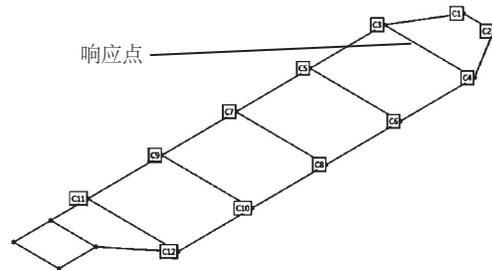


图1 叶片形状与测点分布

Fig. 1 Blade shape and section distribution

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 叶片在空气中的模态试验

将叶片固定在特制工装上,迎水面向上摆放,让叶片更接近工作状态,如图2所示。叶片可近似悬臂梁进行试验。在室温16℃、大气压1025 hPa

的环境下,雷诺数  $Re$  为  $1.27 \times 10^6$ ,采用锤击法。模态试验系统如图 3 所示,试验中需对叶片上的每个测试点进行 3 次敲击,每次敲击时均保证敲击方向垂直于水平面,使其受力方向保持竖直,同时要避免响应点在节点位置上。采用单点响应,多点激励的测试方法,用加速度传感器和力传感器对信号进行收集。



图2 空气中模态试验图

Fig. 2 Model test diagram in air

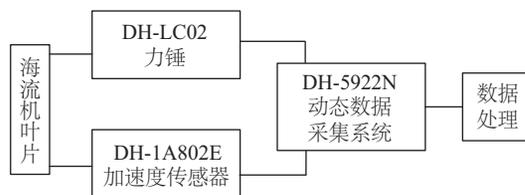


图3 模态试验系统

Fig. 3 Block diagram of modal test system

使用 DHDAS 动态数据采集分析系统对所得信号进行分析处理,频率范围为 0~400 Hz,其参数估计方法采用多参考最小二乘复频域法。可精确识别出模态参数同时获得极点和模态参与因子。

### 2.2.2 叶片在水中的模态试验

在水中进行试验时将叶片放入提前准备好的水温为  $13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  的水中,雷诺数  $Re$  为  $1.92 \times 10^6$ ,采用锤击法进行试验。水槽中的水面宽 520 mm、水面长 2000 mm、水深 240 mm。将叶片放入水槽中,叶尖距水面 75 mm、叶根距水面 65 mm,如图 4 所示。



图4 水中模态试验图

Fig. 4 Modal test diagram in water

力锤在水中敲击叶片时,尽量避免引起水波的震荡,如果水波震荡过大会对叶片造成二次冲击。

其他试验内容与空气中测试相同。

空气与水中模态试验结束后,得到测试信号并对其处理时,采用 DHDAS 动态数据采集分析系统对数据进行处理,检查频响函数时发现存在明显的共振峰,且峰值处的相干函数值介于 0.9~1.0 之间,检查数据确认合理之后,通过分析得其各阶模态参数。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 不同介质中的频率和阻尼比

使用 DHDAS 动态数据采集分析系统得到叶片的前 3 阶模态。由表 2 可知,叶片在空气中的 1 阶固有频率为 20.130 Hz,阻尼比为 0.824%。叶片在水中的 1 阶固有频率为 5.724 Hz,阻尼比为 0.284%。

表2 叶片在空气和水中的模态参数

Table 2 Blade modal parameters in air and in water

介质	阶数	固有频率/Hz	阻尼比/%
空气	1阶	20.130	0.824
	2阶	102.847	0.667
	3阶	280.797	0.783
水	1阶	5.724	0.284
	2阶	31.947	0.311
	3阶	87.242	0.311

对比叶片在不同介质中的固有频率发现,在不同介质中叶片的固有频率差值较大。叶片在水中比在空气中 1 阶固有频率降低了 72%, 2 阶固有频率降低了 69%, 3 阶固有频率降低了 69%, 如表 3 所示。

表3 叶片的固有频率和阻尼比水中比空气中的降低率

Table 3 Natural frequency and damping ratio of blades are lower in water than that in air

阶数	固有频率降低率/%	阻尼比降低率/%
1阶	72	66
2阶	69	53
3阶	69	60

由雷诺数相似准则,同一转轮在水中的额定流速比空气中的额定风速小,为水运动粘度和空气运动粘度的比值与空气中额定风速的乘积。考虑机

械传动的可行性,本次水中额定流速取空气中额定风速的 1/8。同一转轮在不同介质中,达到相同叶尖速比即可输出相同功率,水中转轮额定转速与空气中转轮额定转速比值与二者额定流速比值相同。

在水中额定工况下叶片旋转频率为 2.5 Hz,叶片在水中的 1 阶固有频率为 5.724 Hz,所以该海流机组在额定转速运行时发生共振的几率较小。叶轮在水中实际旋转频率在 1.50~3.75 Hz 之间,而叶片的 1 阶固有频率超出了叶轮实际旋转的频率范围,所以该叶片在运行过程中是安全的。

对比叶片在不同介质中的阻尼比发现,叶片在水中比在空气中 1 阶阻尼比降低了 66%, 2 阶阻尼比降低了 53%, 3 阶阻尼比降低了 60% (如

表 3 所示)。由此可推断,当叶片在水中振动时,与空气中的振动相比,振动周期增大,振幅减小。此数值为不同介质下叶片的结构动力学研究提供参考依据。

### 3.2 不同介质中的振型图

海流机叶片 1 阶、2 阶、3 阶主要振动形式为挥舞振动。因为海流机的运行环境主要是受低阶激励力作用,高阶成分对叶片的影响较小,所以对海流机叶片的主要影响就是低阶的挥舞振动。图 5a 为叶片在空气中的前 3 阶振型图。图 5b 为叶片在水中的前 3 阶振型图。由振型图可知叶片在不同介质中振型无明显变化,振型节线位置不变。

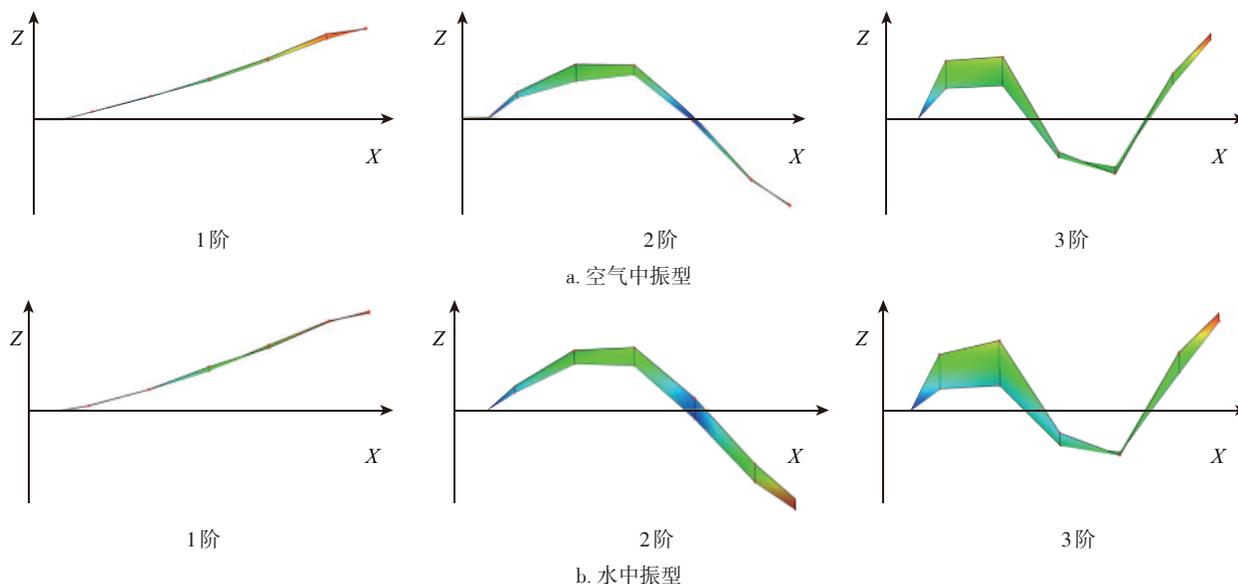


图5 叶片在不同介质中的前3阶振型图

Fig. 5 First three - order mode shapes of blades in different media

## 4 结 论

1) 叶片在不同介质中的固有频率差值较大,叶片在水中比在空气中 1 阶固有频率降低了 72%, 2 阶固有频率降低了 69%, 3 阶固有频率降低了 69%。此数值可为不同介质下叶片的结构动力学有限元分析提供参考依据。

2) 考虑雷诺数相似、叶尖速比相同,建立转轮在不同介质中额定流速和额定转速比值关联性,对海流机的设计具有实际指导意义。

3) 转轮的旋转频率与固有频率相接近时,易产生共振。在水中额定工况下叶片的 1 阶固有频率

与转轮旋转频率差值,比在空气中二者差值大,所以发生共振的几率比在空气中小。

### [参考文献]

- [1] 田应元,张云海,任 翀. 海流发电发展方向及技术路线思考[J]. 能源工程, 2010, (1): 9—14.
- [1] Tian Yingyuan, Zhang Yunhai, Ren Chong. Research on the trend and technical line of marine current generation[J]. Energy Engineering, 2010, (01): 9—14.
- [2] 罗竹梅. 海流能发电涡激振动驱动的水动力特性及能量获取研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [2] Luo Zhumei. Research on hydrodynamic characteristics

- and harvesting energy in ocean current power generation driven by VIV [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [3] 辛小鹏. 水平轴海流能发电机械水动力性能的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [3] Xin Xiaopeng. Study on hydrodynamic performance of horizontal marine current turbine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [4] 赵伟国, 邵雪明, 李 伟. 基于BEM理论的水平轴海流机设计[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 208—213.
- [4] Zhao Weiguo, Shao Xueming, Li Wei. Hydrodynamic design of horizontal-axis marine current turbine based on BEM theory [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(4): 208—213.
- [5] 黄光胜. 定桨距水平轴海流机叶轮的水动力外形设计及性能评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2015
- [5] Huang Guangsheng. Hydrodynamic shape design and performance evaluation of fixed-pitch HAMCT turbine wheel [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [6] 李 伟. 水平轴螺旋桨式海流能发电技术研究[A]. 中国可再生能源学会海洋能专业委员会. 中国可再生能源学会海洋能专业委员会成立大会暨第一届学术讨论会论文集[C]. 杭州: 中国可再生能源学会海洋能专业委员会, 2008: 10.
- [6] Li Wei. Research on horizontal axis propeller type sea current energy generation technology [A]. China Renewable Energy Society marine energy Specialized Committee. China Renewable Energy Society, the Specialized Committee Establishment Conference and the First Academic Symposium Papers [C], Hangzhou: China Renewable Energy Society marine energy Specialized Committee, 2008: 10.
- [7] 林勇刚, 李 伟, 刘宏伟, 等. 水下风车海流能发电技术[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(7): 1242—1246.
- [7] Lin Yonggang, Li Wei, Liu Hongwei, et al. Ocean current power generation technology for underwater turbine [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Edition, 2008, 42(7): 1242—1246.
- [8] 徐学涛. 水平轴潮流能发电机械叶片设计及特性分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012
- [8] Xu Xuetao. Design and characteristic analysis on blades of horizontal axis marine current turbine' mechanics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012
- [9] 李仁年, 刘有亮. 大型风力机叶片铺层及模态分析 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(1): 49—53.
- [9] Li Rennian, Liu Youliang. Ply and Modal Analysis for the Large Wind Turbine Blade [J]. Acta Energetica Sinica, 2015, 36(1): 49—53.
- [10] 陈文朴, 李 春, 叶 舟, 等. 基于气动弹性剪裁的风力机叶片模态分析[J]. 热能动力工程, 2016, 31(9): 52—57, 133—134.
- [10] Chen Wenpu, Li Chun, Ye Zhou, et al. Analysis of the modal of a blade in a wind turbine based on the aeroelastic tailoring [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(9): 52—57, 133—134.
- [11] 武玉龙, 李 春, 高 伟. 3 MW 风力机叶片设计建模与模态分析[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(3): 4—7.
- [11] Wu Yulong, Li Chun, Gao Wei. Design and modal analysis for 3 MW wind turbine blade [J]. Mechanical Research & Application, 2013, 26(3): 4—7.
- [12] 王 旭, 罗 凯. 流固耦合的水轮机转轮静应力仿真与模态分析[J]. 水力发电, 2015, 41(12): 72—75.
- [12] Wang Xu, Luo Kai. Static stress simulation and modal analysis for the runner of hydro turbine based on fluid-solid coupling [J]. Water Power, 2015, 41(12): 72—75.
- [13] 刘庆茂. 复杂结构水下模态试验研究[J]. 导弹与航天运载技术, 1997, (4): 25—31.
- [13] Liu Qingmao. Modal test investigation of complex body structure in water [J]. Missiles and Space Vehicles, 1997, (4): 25—31.
- [14] 陈 明, 钱家昌, 曹为午. 不同介质中多舱段复杂壳体的振动模态特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2009, 29(2): 1—5, 87.
- [14] Chen Ming, Qian Jiachang, Cao Weiwu. Study of vibration mode characteristic of multi-cabin shell in different media [J]. Noise and Vibration Control, 2009, 29(2): 1—5, 87.
- [15] 赵 军, 单晓亮, 樊晓波. 水下航行器燃气涡轮机叶轮模态分析[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(3): 214—217.
- [15] Zhao Jun, Shan Xiaoliang, Fan Xiaobo. Modal analysis of gas turbine impeller for underwater vehicle [J]. Torpedo Technology, 2011, 19(3): 214—217.
- [16] 吴少龙. 水平轴海流能发电机组关键部件载荷分析及其试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [16] Wu Shaolong. Load analysis and experimental study of horizontal axis marine current turbine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

- [17] 何煜平. 水平轴海流机叶片与漂浮式支撑的设计与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [17] He Yuping. Designing and research on the blades and floating support structure of a horizontal-axis current turbine [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [18] Gauthier J P, Giroux A M, Etienne S, et al. A numerical method for the determination of flow-induced damping in hydroelectric turbines [J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2017, 69: 341—354.
- [19] 马剑龙, 汪建文, 董 波, 等. 风力机风轮低频振动特性的试验模研究[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(16): 164—170.
- [19] Ma Jianlong, Wang Jianwen, Dong Bo, et al. Experimental modal analysis on low-frequency vibration characteristics of wind turbine [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(16): 164—170.
- [20] 汪建文, 闫建校, 刘金鹏, 等. 多叶片风轮的试验模态测试分析[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(12): 1460—1464.
- [20] Wang Jianwen, Yan Jianxiao, Liu Jinpeng, et al. Experimental modal analysis of multi-blade wind turbine [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2008, 29 (12) : 1460—1464.
- [21] 方道元, 张 挺. 变黏性 Navier-Stokes 方程组[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008.
- [21] Fang Daoyuan, Zhang Ting. Variable viscous Navier-Stokes equations[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008.

## EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS OF BLADES IN DIFFERENT MEDIA

Han Qiaoli<sup>1</sup>, Xing Weite<sup>2</sup>, Li Wanghao<sup>2</sup>, Zhang Zheng<sup>2</sup>, Guo Shanshan<sup>2</sup>

(1. *College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;*

2. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)*

**Abstract:** Modal analysis on the blades of the marine current turbine is carried out on the way of modal test, and the modal tests are implemented in air and in water respectively. It is found that the first order natural frequency of the blade in water is decreased by 72% than that in air and the damping ratio decreased by 66%. The second order natural frequency is decreased by 69% and the damping ratio decreased by 53%. Different media have no effect on the position of the blade pitch line. The rotation frequency of the rotor under rated condition in water is 2.5 Hz, while the first order natural frequency of the blade in water is 5.724 Hz. The difference between the two cases is relatively large. So the marine current turbine is less likely to resonate at rated speed. In this article, the modal parameters of the current turbine blades are studied in different media by the method test. The relationship between structure design and modal test of the marine current turbine blade under two different media is established. It provides a theoretical basis for the design and optimization of the marine current turbine blades.

**Keywords:** ocean currents; modal analysis; water; air; natural frequency; blade