

# 基于相似理论的潮流能发电水轮机力特性分析研究

谭俊哲<sup>1,2</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>, 袁 鹏<sup>1,2</sup>, 王树杰<sup>1,2</sup>, 司先才<sup>1,2</sup>

(1. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266100; 2. 青岛市海洋可再生能源重点实验室, 青岛 266100)

**摘 要:** 以流体力学相似理论为基础, 借鉴其在风力发电机中的应用经验, 对潮流能发电水轮机力特性进行分析。根据潮流能发电水轮机和小比尺试验模型的相似关系, 得到潮流能发电水轮机与小比尺试验模型之间的力特性关系, 探索潮流能发电水轮机尺寸缩放对其力特性的影响规律。设计比例模型试验, 通过对不同尺寸叶轮的受力进行测量与对比, 验证相似理论在潮流能发电水轮机力特性分析中的正确性, 为潮流能发电水轮机的模型试验研究和水轮机设计提供一定的参考。

**关键词:** 潮流能; 水轮机; 试验; 相似理论; 力特性分析

**中图分类号:** TK79

**文献标识码:** A

## 0 引 言

潮流能作为一种储量巨大且清洁的可再生能源得到很多国家的重视<sup>[1]</sup>, 而对潮流能利用中, 潮流能发电水轮机是其中的研究重点之一。目前, 对潮流能发电水轮机的研究逐步从模型试验阶段走向工程应用阶段。在研发实尺潮流能发电水轮机时, 可参考小比尺水轮机模型试验的结果进行推算, 在此基础上再进行设计和研究<sup>[2]</sup>。这样不但可节约成本, 还可减小工程危险性。通过小比尺试验模型进行水槽试验, 基于相似理论来分析大型潮流能发电水轮机的功率、扭矩和轴向力等性能, 以此来减少工作量, 降低风险。

基于相似理论, 国内外科研工作者对风力发电机做了大量研究。荷兰的 Holtslag<sup>[3]</sup>应用相似理论对海上风力机的风分量无量纲数进行分析, 研究结果较好地支持了相似理论描述远海大气条件的有效性和适用性。西华大学陈荣盛等<sup>[4]</sup>以流体机械流动相似理论为基础, 提出风力机械相似准则, 并以此对风力机力特性进行分析。同时, 国内外有很多关于潮流能发电水轮机模型试验的研究。法国勒阿弗尔大学的 Paul Mycek 等<sup>[5]</sup>用直径 700 mm 的潮流能发电水轮机模型研究了湍流对水轮机性能的影响。英国南安普敦大学的 Myers 等<sup>[6]</sup>用原样机 1/30

尺寸的潮流能发电水轮机模型进行试验, 对潮流能发电水轮机的性能和尾流特性进行研究。浙江大学<sup>[7]</sup>在岱山水道对 5 kW 模型样机进行试验研究。由此可见, 小比尺模型试验研究在潮流能发电水轮机研究中具有重要作用。由于相似理论在风力机械中得到了很好地应用<sup>[6]</sup>, 本文借鉴相似理论在风力机械研究中的经验, 确立潮流能发电水轮机相似关系, 以此相似关系分析推导潮流能发电水轮机力特性关系, 并通过模型试验进行验证。

## 1 相似理论

### 1.1 流动相似条件

流体流动的复杂性决定了不能用纯粹的理论分析来描述流体的流动, 必须借助于试验研究。相似理论是组织试验、减少试验次数和综合试验数据并将试验数据应用到实际工程设计中的有效方法<sup>[8,9]</sup>。在流体机械中, 水流流过潮流能发电水轮机是粘性不可压缩流体的非定常流动, 在设计模型试验时, 要使之成为样机流动的相似流动, 原则上要满足几何相似、运动相似和动力相似<sup>[6,7]</sup>。

### 1.2 相似准则

根据流体力学相似理论, 要保证试验模型和实尺样机相似, 需要在满足几何相似和物性相似的条

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(51279191)

通信作者: 谭俊哲(1972—), 男, 硕士、副教授, 主要从事机电控制、海洋机电装备仪器方面的研究。tanjunzhe\_cn@163.com

件下,使2个流动的若干无量纲数对应相等即可,这些无量纲数称为相似准则,其中包括雷诺数( $Re$ )、欧拉数( $Eu$ )、弗诺德数( $Fr$ )、马赫数( $Ma$ )、韦伯数( $We$ )和阿基米德数( $Ar$ )<sup>[10]</sup>。

## 2 潮流能发电水轮机相似准则

### 2.1 潮流能发电水轮机相似概念

潮流能发电水轮机和小比尺试验模型的相似是指潮流能发电水轮机模型试验时,试验模型和样机的水轮机转子与水流能量传递过程以及水流在水轮机内的流动过程相似,在研究分析中,假设流过潮流能发电水轮机的水流是不可压缩的流体,满足几何相似和运动相似的条件,并以此作为模型试验的相似准则。

### 2.2 潮流能发电水轮机相似关系的确立

在研究潮流能发电水轮机时,主要用到以下3个特征参数——功率系数 $C_p$ 、推力系数 $C_F$ 和转矩系数 $C_T$ 。当潮流能发电水轮机和小比尺试验模型具有相同的特征参数时,那么它们将具有相同的流动条件,即满足相似原理<sup>[11]</sup>。对潮流能发电水轮机的相似性做如下假设:潮流能发电水轮机和小比尺试验模型具有相同的叶尖速比 $\lambda = \omega R/V$  ( $\omega$ 为潮流能发电水轮机转子的角速度, $R$ 为潮流能发电水轮机转子半径, $V$ 为来流速度);潮流能发电水轮机和和小比尺试验模型叶片的数量、材料和翼型均相同;潮流能发电水轮机各部分(半径、弦长等)均按相同比例缩小得到小比尺试验模型。根据上述条件,潮流能发电水轮机试验模型和样机具有相同的攻角 $\alpha$ 、速度三角形、升力系数 $C_l$ 、阻力系数 $C_d$ 。按照假设的条件,就可达到潮流能发电水轮机和小比尺试验模型的相似。由于水流作用,潮流能发电水轮机受到的力为:

$$F_{\text{zong}} = 0.5\rho\pi R^2 V^2 \quad (1)$$

式中, $\rho$ ——水的密度。

水流对潮流能发电水轮机转子产生的推力为:

$$F = 0.5\rho\pi R^2 V^2 C_F \quad (2)$$

水流对潮流能发电水轮机转子产生的转矩为:

$$T = 0.5\rho\pi R^3 V^2 C_T \quad (3)$$

潮流能发电水轮机的功率为:

$$P = 0.5\rho\pi R^2 V^3 C_p \quad (4)$$

记 $\frac{R_p}{R_M} = C$ ,  $R_p$ 为样机转子半径,  $R_M$ 为试验模型

型转子半径,  $C$ 为潮流能发电水轮机和小比尺试验模型的几何尺寸相似比例因子。根据潮流能发电水轮机相似准则,潮流能发电水轮机和小比尺试验模型的推力 $F$ 、功率 $P$ 、转矩 $T$ 和角速度 $\omega$ 的关系为:

功率关系:

$$\frac{P_p}{P_M} = \frac{0.5\rho\pi R_p^2 V^3 C_p}{0.5\rho\pi R_M^2 V^3 C_p} = C^2 \quad (5)$$

转矩关系:

$$\frac{T_p}{T_M} = \frac{0.5\rho\pi R_p^3 V^2 C_T}{0.5\rho\pi R_M^3 V^2 C_T} = C^3 \quad (6)$$

推力关系:

$$\frac{F_p}{F_M} = \frac{0.5\rho\pi R_p^2 V^2 C_F}{0.5\rho\pi R_M^2 V^2 C_F} = C^2 \quad (7)$$

转速关系:由 $\lambda = \frac{\omega R}{V}$ 得:

$$\frac{\omega_p}{\omega_M} = C^{-1} \quad (8)$$

式中, $\omega$ ——潮流能发电水轮机转子角速度,下标P、M分别代表潮流能发电水轮机、潮流能发电水轮机小比尺试验模型。

## 3 潮流能发电水轮机力分析

基于海洋环境的复杂性和潮流流动的不规则性,潮流能发电水轮机会受到多种力的作用,且在不同的运行状态下,所受载荷有所区别,但其中主要受到的几种力包括轴向力、重力和离心力<sup>[12]</sup>,在这些力作用下,潮流能发电水轮机叶片根部及悬挂装置会产生相对应的应力,对叶根处各种应力的研究对于叶片的结构可靠性及性能具有重要的价值。

### 3.1 轴向力对支架产生的弯曲应力

当水轮机运行时,由于受到轴向推力 $F$ 的作用,支架会产生相应的弯曲应力。根据材料力学知识,在支架顶端产生的弯曲应力最大,即:

$$\sigma_{\max} = \frac{Fh}{z} = \frac{0.5\rho\pi V^2 R^2 C_F}{z} \quad (9)$$

式中, $h$ ——叶片中心到支架顶端的距离; $z$ ——支架的截面模量(支架截面为圆形, $z = \pi d^3/32$ ,  $d$ 为

支架圆形截面直径)。

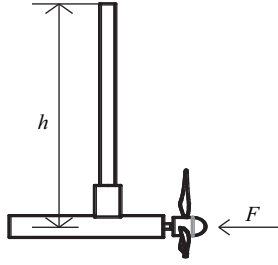


图 1 轴向推力产生的弯曲应力

Fig. 1 Bending stress produced by axial thrust

所以,样机和试验模型支架上由轴向力产生的最大弯曲应力比为:

$$\frac{\sigma_{p,\max}}{\sigma_{M,\max}} = \frac{\frac{0.5\rho\pi V^2 R_p^2 C_F}{\pi d_p^3/32}}{\frac{0.5\rho\pi V^2 R_M^2 C_F}{\pi d_M^3/32}} = C \quad (10)$$

式中,  $d_p$ ——样机的支架直径;  $d_M$ ——试验模型的支架直径。

故由轴向力产生的最大弯曲应力与支架长度成正比关系,在进行悬挂时需要考虑支架的最大弯曲应力,以免由于支架强度不够对支架造成破坏。

### 3.2 叶根处产生的弯曲应力

由于水流作用,潮流能发电水轮机叶片上会产生一个轴向推力和作用在转轴上的力矩,如图 2 所示。对于三叶片潮流能发电水轮机,忽略轮毂的影响,作用在单个叶片上的轴向推力为  $F/3$ , 转矩为  $T/3$ 。对于有  $n$  个叶片的潮流能发电水轮机,作用在单个叶片上的轴向推力为:

$$F_0 = \frac{F}{n} = \frac{1}{2n} \rho \pi R^2 V^2 C_F \quad (11)$$

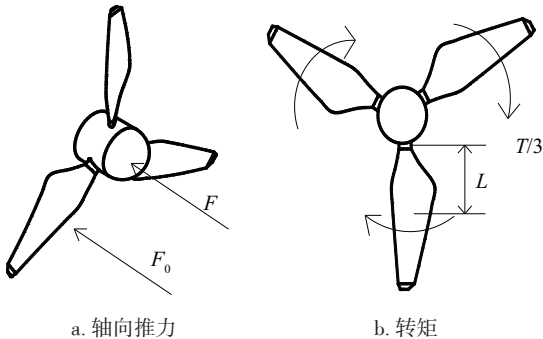


图 2 水轮机所受轴向推力和转矩

Fig. 2 Axial thrust and torque on turbine

水轮机叶片受到的轴向推力和转矩作用在每

个叶片根部的力矩:

$$T_0 = \frac{T}{n} = \frac{1}{2n} \rho \pi R^3 V^2 C_T \quad (12)$$

因此,叶片上产生的轴向弯曲应力为:

$$\sigma_x = \frac{F_0 L}{z} = \frac{\frac{1}{2n} \rho \pi R^2 V^2 C_F L}{\frac{\pi d^3}{32}} \quad (13)$$

式中,  $L$ ——轴向推力作用中心到水轮机叶片根部的距离。

水动力在叶片上产生的切向弯曲应力为:

$$\sigma_\tau = \frac{T_0 L}{z} = \frac{\frac{1}{2} \rho \pi V^2 R^3 L}{\frac{\pi d^3}{32}} \quad (14)$$

根据 2.2 节中假设的条件,几何尺寸  $R$ 、 $d$ 、 $L$  均按相同的比例缩小,无论是轴向弯曲应力  $\sigma_x$  或切向弯曲应力  $\sigma_\tau$  均保持不变,即  $\sigma_{x,p}/\sigma_{x,M}=1$ ,  $\sigma_{\tau,p}/\sigma_{\tau,M}=1$  ( $\sigma_{x,p}$  为实尺样机轴向弯曲应力,  $\sigma_{x,M}$  为试验模型轴向弯曲应力,  $\sigma_{\tau,p}$  为实尺样机切向弯曲应力,  $\sigma_{\tau,M}$  为试验模型切向弯曲应力,  $x$  表示轴向,  $\tau$  表示切向),所以,叶根处产生的轴向弯曲应力、切向弯曲应力与水轮机转子直径大小无关。

### 3.3 离心力产生的拉伸应力

潮流能发电水轮机在叶片旋转时,会产生离心力  $F'$  (见图 3)。由于离心力的作用,叶片根处会产生一个相应的拉伸应力:

$$\sigma_F' = \frac{F'}{A} \quad (15)$$

式中,  $A$ ——叶片根处圆形截面的面积。

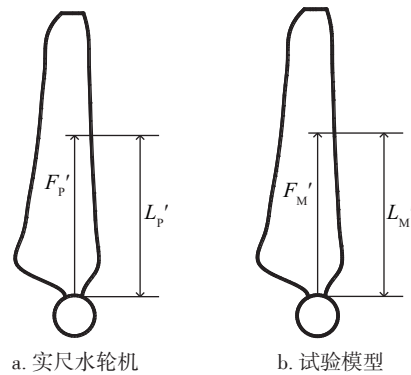


图 3 离心力引起的拉伸应力

Fig. 3 Stretching stress produced by centrifugal force

由图 3 知,潮流能发电水轮机和试验模型的离心力  $F'_p$  和  $F'_M$  分别为:

$$F'_p = m_p L'_p \omega_p^2 \quad (16)$$

$$F'_M = m_M L'_M \omega_M^2 \quad (17)$$

根据潮流能发电水轮机相似关系可知：叶片质量  $m_p = m_M C^3$ ，叶片几何尺寸  $F'_p = L'_M C$ ；水轮机叶轮转速  $\omega_p^2 = \omega_M^2 C^2$ ，由此可得：

$$F'_p = m_M L'_M \omega_M^2 C^2 \quad (18)$$

实尺水轮机与试验模型叶根处的横截面积关系为  $A_p = A_M C^2$ ，所以，离心力在潮流能发电水轮机叶根处产生的拉伸应力为：

$$\sigma'_p = \frac{F'_p}{A_p} = \frac{m_M L'_M \omega_M^2 C^2}{A_M C^2} = \frac{F'_M}{A_M} = \sigma'_M \quad (19)$$

潮流能发电水轮机与小比尺试验模型在叶根处由离心力产生的拉伸应力关系为：

$$\frac{\sigma'_p}{\sigma'_M} = C^0 = 1 \quad (20)$$

所以，由离心力产生的拉伸应力与潮流能发电水轮机叶片尺寸无关。

### 3.4 叶片重力产生的弯曲应力

在大型潮流能发电水轮机中，叶片自身重力也是不可忽略的一个方面，其在叶片根部产生的应力对潮流能发电水轮机具有很大影响。叶片受力如图4所示。其中， $L_{lp}$  和  $L_{lm}$  分别表示实尺水轮机和试验模型水轮机重心到叶片根部的位置。 $G_p$  表示实尺水轮机单个叶片重力， $G_m$  表示试验模型水轮机单个叶片重力。

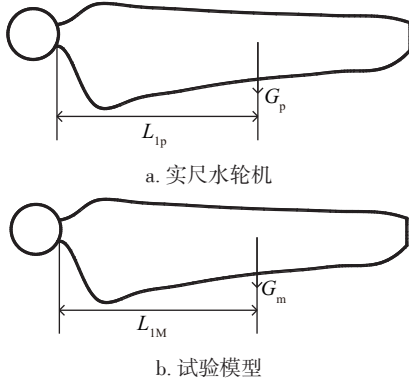


图4 叶片自身重力引起的弯曲应力

Fig. 4 Bending stress produced by gravity

由潮流能发电水轮机相似关系可知， $L_{lp} = CL_{lm}$ ， $T_p = T_M C^4$ ，根据实尺样机与试验模型叶根截面模量( $z$ )的关系  $z_p = z_M C^3$ ，可得到叶片自身重产生的弯曲应力为：

$$\sigma_{gp} = \frac{T_{gp}}{z_p} = \frac{T_{gm}}{z_M} C = \sigma_{gm} C \quad (21)$$

式中， $T_{gp}$ ——实尺样机叶片受到的转矩； $T_{gm}$ ——模型叶片受到的转矩； $z_p$ ——实尺样机叶根截面模量； $z_M$ ——试验模型叶根截面模量； $\sigma_{gm}$ ——试验模型叶片自身重产生的弯曲应力。

因此，叶片自身重力在叶根处产生的弯曲应力与水轮机叶轮直径的变化成线性关系。其原因为：潮流能发电水轮机叶片重力随转子直径的增加而增加，因此，潮流能发电水轮机叶片直径不能无限增加。

## 4 模型试验

为了对理论推导结果进行验证，分别采用2种叶片直径的潮流能发电水轮机进行模型试验。模型试验在中国海洋大学海洋物理国家重点实验室大型风-浪-流水槽中进行，如图5所示。水槽长65 m、宽1.2 m、高1.75 m。整个试验设备由获能装置、传动装置、发电装置、变桨距装置、数据采集装置、吊装固定装置等组成。试验中采用2种潮流能发电水轮机的小比尺试验模型的叶轮直径，分别为  $D=300$  mm 和  $D=600$  mm，其他参数如表1所示。

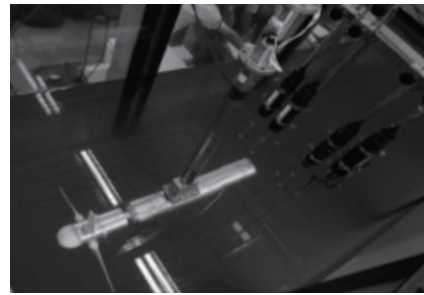


图5 试验现场图

Fig. 5 Scene graph of experiment

表1 试验用小比尺水轮机参数

Table 1 Parameters of experimental turbines

参数	数值
水轮机转子直径 $D/\text{m}$	0.3/0.6
轮毂半径 $r_{hub}/\text{m}$	0.03/0.06
叶片数 $B/\text{个}$	3
设计尖速比 $\lambda$	5.6
功率系数 $C_p$	0.35

试验中来流速度分别为0.3、0.5、0.7、0.9和1.1 m/s。通过贴在支架的应变片测量受到的轴向力，根据3.1节公式计算得到由轴向力产生的弯曲



应力,将  $D=300\text{ mm}$  和  $D=600\text{ mm}$  支架受到的弯曲应力比值做成图 6 所示曲线,试验结果表明,两者比值约为 0.45,接近理论值 0.50,出现的 10% 的误差是由于测量设备的不精确以及试验中水流的湍流造成,综合来看,试验结果误差在合理范围内,符合相似理论。

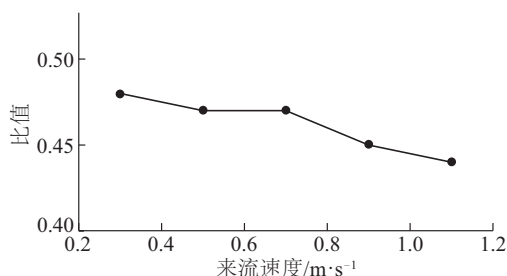


图 6  $D=300\text{ mm}$  和  $D=600\text{ mm}$  弯曲应力比值

Fig. 6 Ratio of bending stress about  $D=300\text{ mm}$  and  $D=600\text{ mm}$

## 5 结论与展望

本文以相似理论为基础,通过理论推导和模型试验分析相结合,得到以下结论:

1)潮流能发电水轮机固定装置支架上产生的最大弯曲应力与支架长度成正比,故实际应用中,支架长度不可过长,以免发生断裂。

2)潮流能发电水轮机叶片叶根处产生的弯曲应力、拉伸应力不随潮流能发电水轮机叶片长度的变化而变化。

3)由重力作用在叶片叶根处产生的应力与潮流能发电水轮机叶片长度成正比,因此,潮流能发电水轮机叶片不能无限增加。

4)相似理论在潮流能发电水轮机中的应用将为潮流能发电水轮机的设计提供可靠的参考。在相似理论指导下,扩大或缩小潮流能发电水轮机转子直径不会有很大影响。

本文通过相似理论详细分析推理了作用在潮流能发电水轮机支架及叶片上力的特性,但未考虑雷诺数对小型潮流能发电水轮机的影响以及质量对大型潮流能发电水轮机的影响。将来可继续应用相似理论,通过对潮流能发电水轮机的轴向力和转矩进行实测,对潮流能发电水轮机与小比例试验模型进行力特性的相似性分析。

## [参考文献]

- [1] 史 丹,刘佳骏.我国海洋能源开发现状与政策建议(上)[J].中国能源,2013,35(9):38—43.
- [1] Shi Dan, Liu Jiajun. The presences and policy of tidal energy in China(First part)[J]. China Energy, 2013, 35(9): 38—43.
- [2] 戴庆忠.潮流能发电及潮流能发电装置[J].东方电机,2014,(2):51—66.
- [2] Dai Qingzhong. Tidal current power generation and tidal current energy conversion system[J]. Dongfang Electrical Machine, 2014, (2): 51—66.
- [3] Holtslag M C, Bierbooms W A A M, van Bussel G J W. Validation of surface layer similarity theory to describe far offshore marine conditions in the Dutch North Sea in scope of wind energy research[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 136: 180—191.
- [4] 陈荣盛,张礼达,任腊春.基于相似理论的风力机分[J].水力发电,2013,34(6):92—94.
- [4] Chen Rongsheng, Zhang Lida, Ren Lachun. The analysis of tidal turbine based on similarity theory[J]. Hydro Power, 2013, 34(6): 92—94.
- [5] Mycek P, Gaurier B, Germain G. Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour (Part I): One single turbine[J]. Renewable Energy, 2014, 68(7): 876—892.
- [6] Myers L, Bahaj A S. Wake studies of a 1/30th scale horizontal axis marine current turbine[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(5): 758—762.
- [7] 崔桂香,许春晓,张兆顺.湍流大涡数值模拟进展[J].空气动力学学报,2014,22(2):121—129.
- [7] Cui Guixiang, Xu Chunxiao, Zhang Zhaoshun. The progress of LES[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 22(2): 121—129.
- [8] 杨俊杰.相似理论与结构模型试验[M].武汉:武汉理工大学出版社,2015.
- [8] Yang Junjie. The similarity theory and test of structure model[M]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology Press, 2015.
- [9] 鲍培德.浅谈相似理论与模型试验在机械设计中的应用[J].机械设计与制造工程,2009,29(6):27—28.
- [9] Bao Peide. The use of similarity theory and model test in machine design[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2009, 29(6): 27—28.

- [10] 沈 昕. 水平轴风力机气动性能预测[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [10] Shen Xin. The prediction of horizontal axis wind turbine aerodynamic performance[D]. Shanghai: Traffic Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [11] 邱绪光. 实用相似理论[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 2000.
- [11] Qiu Xuguang. Practical similarity theory [M]. Beijing: Beijing Aviation Academy Press, 2000.
- [12] 夏运强, 李华军, 唐筱宁. 海洋工程物理模型试验中风场模拟方法研究[J]. 工程力学, 2013, 25(1): 28—33.
- [12] Xia Yunqiang, Li Huajun, Tang Xiaoning. The research of wind simulation in the test of marine physical model [J]. Engineering Mechanics, 2013, 25(1): 28—33.

## RESEARCH ON ANALYSIS OF TIDAL TURBINE FORCE-RELATED CHARACTERISTICS BASED ON SIMILARITY THEORY

Tan Junzhe<sup>1,2</sup>, Wang Peng<sup>1</sup>, Yuan Peng<sup>1,2</sup>, Wang Shujie<sup>1,2</sup>, Si Xiancai<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Qingdao Marine Renewable Energy Key Laboratory, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In this paper, the force-related characteristics of tidal turbines are analyzed based on similarity theory of hydrodynamics and its' applications experience in wind turbines. According to the similarity relationship between tidal turbines and small scale test models, the force characteristics between tidal turbines and small scale test models is obtained. Then this paper explores the influence on force-related characteristics produced by the scaling of tidal turbines. In order to validate the correctness of the similarity theory in tidal turbines, the scale model test is designed. Then the force produced on the tidal turbines' rotors with different diameters are tested and contrasted. The paper provides some references for model test research and tidal turbine design.

**Keywords:** tidal power; turbine; experiments; similarity theory; analysis of force-related characteristics