

直线发电机在流致振动潮流能发电装置中的应用研究

谭俊哲^{1,2}, 王保振¹, 王树杰^{1,2}, 袁 鹏^{1,2}, 郑志爽¹, 蔡云雯¹

(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: 研制直线发电机, 并与流致振动潮流能转换装置相结合, 探索直线发电机在流致振动潮流能发电领域的应用可行性。通过理论分析推导出流致振动潮流能发电装置的有效发电功率, 建立能量转换系统数学模型, 在振子直径 D 为 0.12 m、系统刚度 k 为 600 N/m、流速 v 为 0.50~0.75 m/s 工况下计算该装置的振子振幅、频率及发电功率, 并在相同工况下进行流致振动潮流能发电装置的水槽试验, 试验结果与数值仿真结果的变化趋势基本吻合。

关键词: 潮流能; 能量转换; 流致振动; 直线发电机; 水槽试验

中图分类号: TK79

文献标志码: A

0 引 言

流致振动现象在很多工程领域(如海上石油钻井平台、跨海大桥的桥墩、高层建筑物等)中是不可忽略的问题。当流体流过非线性物体表面时, 会在其两侧交替产生旋涡泻放, 并产生周期性的脉动升力, 如果此时的柱体是弹性支撑, 会在垂直于来流方向产生周期性的振动, 即流致振动(flow-induced motion, FIM)^[1]。流致振动现象在工程领域会对结构物产生交变载荷, 破坏其强度并会缩短使用寿命。然而我们也可利用这种振动现象, 结合发电装置进行发电。利用流致振动原理进行潮流能发电主要分为 2 个部分^[2]: 1) 将水流的动能通过圆柱振子转化为装置直线运动的机械能; 2) 利用发电机或压电材料等将装置的机械能转化为电能。许多学者针对上述潮流能发电的第 1 部分进行了大量研究, 如在不同实验参数(如间距比、质量比、阻尼、流速和雷诺数等)下研究圆柱体的振幅响应、升阻力及尾流形态等。针对发电的第 2 部分的研究相对较少, 且主要为采用压电材料或旋转发电机方面的研究, 如陈东旺^[3]利用介电弹性体, 将人工肌肉应用到潮流能发电装置中, 通过装置的运动驱动介电弹性体自身发生变形, 从而将装置的机械能转化成电能。美

国密歇根大学的 Bernitsas 和 Raghavan^[4]提出涡致振动水生清洁能源收集系统, 即(vortex induced vibrations aquatic clean energy, VIVACE), 利用旋转发电机将振子的机械能转化为电能。重庆大学将多个单圆柱 VIVACE 振子串列排布组成 PTC(passive turbulence control)多圆柱被动湍流控制系统, 实现潮流动能的转化, 引入旋转发电机, 通过传动机构将振子的直线运动转化为旋转运动, 带动旋转发电机发电^[5]。美国的密苏里科技大学 Lobo 等^[6]将直线发电机与涡激振动相结合, 组成 VIV(vortex induced vibrations)发电系统, 研究不同质量比和雷诺数等参数对振子振幅、峰值力及发电效率的影响。

目前, 采用压电材料或旋转发电机基于流致振动发电功率损耗较大, 如压电材料自身阻尼较大, 而旋转发电机则需与中间传动机构相配合使用, 通过传动机构将装置振子的直线运动转换为旋转运动, 其过程能量损耗相对较大。因此, 为进一步提高能量转化效率, 结合装置自身作直线运动的特性, 本文以此为研究出发点, 设计一个直线发电机, 并与流致振动潮流能转换装置结合, 建立流致振动能量转化系统, 对系统的发电功率进行分析计算并进行试验验证。

收稿日期: 2017-12-14

基金项目: 山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2017ZA0202); 国家自然科学基金(51479185)

通信作者: 谭俊哲(1972—), 男, 硕士、副教授, 主要从事海洋机电装备仪器研发和海洋可再生能源方面的研究。

tanjunzhe_cn@163.com

1 能量转化系统模型及发电功率计算

图 1 为潮流能发电装置的二维物理模型简图。图中, v 代表流速(m/s), D 代表振子直径(m), c 代表系统阻尼, m_{cyl} 代表振子质量(kg), R_0 代表直线发电机内阻(Ω), R_L 代表外接负载(Ω), y 代表垂直于流速与圆柱振子轴线方向的位移(m), k 代表弹簧刚度(N/m)。图 1 所示模型可描述为一个单振子弹簧阻尼系统, 工作原理: 当水流流过圆柱振子时, 由于流过其上下表面的速度不同, 会产生上下波动的压力差, 即流体力 F_{fluid} (流体作用在圆柱振子 y 方向的作用力)。流体力驱动振子上下振动, 振子和直线发电机的动子相连, 动子的振动切割磁感线产生感应电动势, 与 R_L 相连, 从而产生感应电流^[7]。

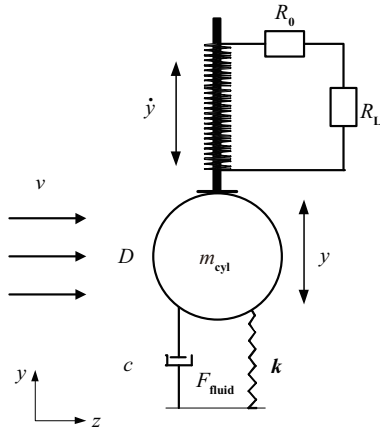


图 1 发电装置二维物理模型

Fig.1 Two-dimensional physical model of electrical generation device

1.1 振子有效功率

根据图 1 所示的发电装置二维物理模型, 构建该系统的动力学二维线性微分方程^[8]:

$$m_{\text{osc}} \ddot{y} + c_{\text{total}} \dot{y} + ky = F_{\text{fluid}} \hat{y} \quad (1)$$

式中, m_{osc} ——总的系统振荡质量, kg; c_{total} ——总阻尼系数。

$$F_{\text{fluid}} = F_{\text{viscous}} + F_{\text{inviscid}} \quad (2)$$

式中, F_{viscous} ——粘性流体力, N; F_{inviscid} ——非粘性流体力, N。

$$F_{\text{inviscid}} \hat{y} = -m_a \ddot{y} \quad (3)$$

$$F_{\text{viscous}} \hat{y} = \frac{1}{2} c_y(t) \rho v^2 DL \quad (4)$$

式中, $c_y(t)$ —— t 时刻的升力系数^[9]; m_a ——附加质量, kg; ρ ——密度, kg/m³; L ——振子长度, m。

$$c_y(t) = C_y \sin(2\pi f_{\text{fluid}} t + \phi) \quad (5)$$

式中, C_y ——升力系数; f_{fluid} ——流体受迫振动频率, Hz; ϕ ——相位角, 即流体力与圆柱振子位移之间的相位差。

式(1)可简化为:

$$(m_{\text{osc}} + m_a) \ddot{y} + c_{\text{total}} \dot{y} + ky = \frac{1}{2} c_y(t) \rho v^2 DL \quad (6)$$

本文研究的单圆柱振子流致振动获能装置, 当水流以速度 $v = 0.50 \sim 0.75$ m/s 流过圆柱表面时, 其产生的尾流模型为 2S 模式^[10], 故 f_{fluid} 等效于旋涡脱落频率 f_s 和圆柱振荡频率 f_{osc} 。

流过圆柱振子水流功率^[11]为:

$$P_{\text{fluid}} = \frac{1}{2} \rho v^3 DL \quad (7)$$

水流功率 P_{fluid} 一部分转化为圆柱振子发生振动的有效功率, 另一部分产生能量耗散。圆柱振子的振动具有一定的周期性, 一个周期 T 范围内的平均有效功率 P_{VIV} 根据式(8)进行计算:

$$P_{\text{VIV}} = \frac{\int_0^T F_{\text{fluid}} \dot{y} dt}{T} \quad (8)$$

Bernitsas^[8]将圆柱振子在水流中的有效功率概括为:

$$\begin{aligned} P_{\text{VIV}} &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{2}{\pi D} c_y(t) m_d v^2 2\pi f_{\text{osc}} A_{\text{max}} \cos(2\pi f_{\text{osc}} t) dt \\ &= \frac{1}{2} \rho \pi C_y v^2 f_{\text{osc}} A_{\text{max}} DL \sin(\phi) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, m_d ——振子排开水的质量, kg; A_{max} ——振子最大振幅, m。

如果水流对圆柱振子所做的有效功可被直线发电机全部吸收利用, 并且直线发电机不产生任何能量损耗, 则直线发电机的最大发电效率为:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{P_{\text{VIV}}}{P_{\text{fluid}}} = \frac{\pi C_y f_{\text{osc}} A_{\text{max}} \sin(\phi)}{v} \quad (10)$$

1.2 发电机实际功率

发电机产生的感应电动势^[12]为:

$$E = Blv \sin \theta \quad (11)$$

式中, B ——磁感应强度, T, 其强度与动子磁极强度有关; l ——线圈有效长度, m, 与线圈匝数有关; v ——发电机动子作直线运动的速度, m/s, 即 $v = \dot{y}$; θ —— v 或 l 与磁感线之间的夹角, ($^\circ$), v 垂直于磁感线的方向, 即 $\theta = 90^\circ$ 。

故将 E 整理为:

$$E = Bl\dot{y} \quad (12)$$

如图 1 所示, 发电机与负载组成一个回路, 回路中产生的感应电流为:

$$I = \frac{E}{R_{\text{total}}} = \frac{Bly}{R_0 + R_L} \quad (13)$$

由此可得发电机的有效发电功率为：

$$P_{\text{ham}} = I^2 R_L = \frac{B^2 l^2 \dot{y}^2 R_L}{(R_0 + R_L)^2} \quad (14)$$

根据式(7)和式(14)可得潮流能转换装置的发电效率为：

$$\eta = \frac{P_{\text{ham}}}{P_{\text{fluid}}} = \frac{2B^2 l^2 \dot{y}^2 R_L}{\rho v^3 D L (R_0 + R_L)^2} \quad (15)$$

2 直线发电机结构设计

直线发电机在波浪能应用领域较多,其工作原理与常用的旋转发电机原理相似,但省略了传动机构^[13]。将旋转发电机的定子径向剖开并拉直,则转化为直线发电机的初级,即直线发电机的定子;而旋转发电机的转子则相应转化为直线发电机的次级,即直线发电机的动子^[14]。通过动子相对于定子作往复直线运动,定子线圈切割磁力线,在线圈内产生感应电动势,外接负载产生感应电流^[15]。

本文设计的直线发电机在结构上选择圆筒型,因为圆筒型永磁发电机在性能上具有较强的优势,端部无需绕组,加工制作相对简便^[16]。圆筒型永磁直线发电机根据充磁方式的不同,大致可分为3类:轴向充磁、径向充磁及 Halbach 结构。在充磁方式上选择轴向充磁,因为轴向充磁结构具有加工工艺简单、无单边磁拉力以及功率密度相对较好的优点。但对气隙要求较高,需要严格控制动子与定子之间的气隙,减少漏磁^[17]。根据前期研制的潮流能转换装置的结构尺寸,设计并制作圆筒型永磁直线发电机,其主要尺寸参数如表1所示。

表1 直线发电机的主要尺寸参数

Table 1 Major dimensions parameters of linear generator

单位:mm

参数	数值	参数	数值
定子外径	55	轴的直径	10
定子内径	20	永磁铁长度	10
定子槽宽	12	永磁铁厚度	5
定子槽深	20	气隙长度	1

圆筒型永磁直线发电机三维模型如图2所示。由图2可看出,直线发电机外部结构为电机外壳、引线槽和支撑端盖等;内部结构为动子和定子^[18]。动子结构包括:动子磁极和支撑轴。动子磁极采用永久磁铁(硬磁),其磁性能稳定,且方便安装^[19];支撑轴为不导磁材料,避免发生漏磁现象。定子结构包括:线圈、定子管和

定子铁芯。永磁铁材料选用钕铁硼稀土磁铁(NdFe40SH),磁感应强度 $B=0.25 \text{ T}$ 。每个定子线圈的匝数为100匝,线圈绕 $R_0 = \rho L/S$ (ρ 、 L 和 S 分别为导线的电阻率、长度和截面积), ρ 为 $0.0172 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, L 、 S 可分别根据线圈匝数和有效直径求出。

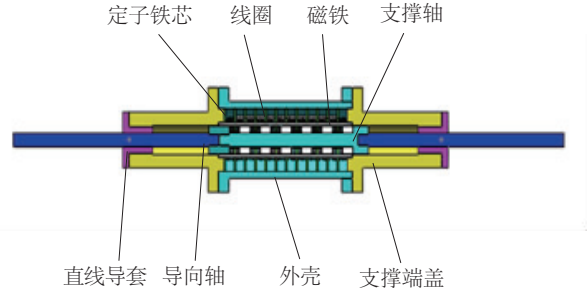


图2 圆筒型永磁直线发电机三维模型

Fig. 2 3D model of cylindrical permanent magnet linear generator

3 流致振动潮流能发电装置试验

3.1 潮流能发电试验装置

根据前述流致振动潮流能转换装置的数学模型分析计算结果,设计并制作如图3所示的流致振动潮流能发电试验装置。该试验装置包括:圆柱振子、流致振动潮流能转换装置(将水流动能转化为装置的机械能)以及直线发电机(将装置的机械能转化为电能)。

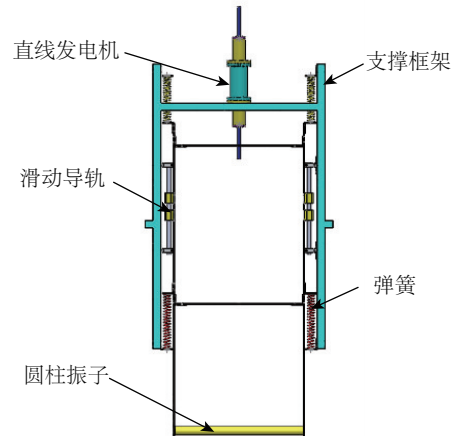


图3 流致振动潮流能发电装置设计图

Fig. 3 Design model of tidal energy generation device based on FIM

3.2 试验设备

为测得直线发电机的实际发电功率,在中国海洋大学海洋工程动力学实验室试验水槽进行试验。试验设

在流速 $v=0.5$ m/s、振幅比 $A/D=0.2$ 、 $D=120$ mm 时,测得的发电功率 $P=0.075$ W,与文献[6]在近似工况下所测得发电功率基本吻合。

4 结 论

本文主要讨论了直线发电机的设计制造,与潮流能转换装置结合形成流致振动潮流能发电装置,并且推导出了该装置将水流动能转化为电能的有效发电功率。在中国海洋大学水槽中进行试验验证,试验结果与理论分析变化趋势基本一致。在 $v=0.5$ m/s、 $A/D=0.2$ 、 $D=120$ mm 时,测得的发电功率 $P=0.075$ W,与文献[6]在近似工况下所测得发电功率基本吻合。

目前对于流致振动能量转化系统的研究还比较匮乏,针对直线发电机与流致振动潮流能发电装置耦合时,二者相互影响的规律有待于进一步研究。利用直线发电机与流致振动潮流能发电装置的耦合规律,可以通过调整电参数改变起振流速,实现潮流能的高效利用。

[参考文献]

- [1] LAZARKOV M, REVSTEDT J. Flow-induced motion of a short circular cylinder spanning a rectangular channel [J]. *Journal of fluids and structures*, 2008, 24 (4): 449-466.
- [2] 周熙林, 李小超, 赵利平. 涡激振动能量转换装置基本原理与量纲分析[C]//第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 南宁, 中国, 2015: 117-121.
ZHOU X L, LI X C, ZHAO L P. Excitation energy conversion device principle and dimension analysis based on vortex-induced vibration [C]//The 17th China Ocean (shore) Engineering Symposium Proceedings, Nanning, China, 2015: 117-121.
- [3] 陈东旺. 涡激振动潮流能转换装置中的介电弹性体发电技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
CHEN D W. Study on dielectric elastomer generation technology in VIV tidal current energy conversion devices[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [4] BERNITSAS M M, RAGHAVAN K, BEN-SIMON Y, et al. VIVACE (vortex induced vibration aquatic clean energy): a new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow [C]//International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Hamburg, Germany, 2006.
- [5] 丁林, 张力, 姜德义. 串列双圆柱流致振动及能量转换特性[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(10): 2146-2149.
- [6] DING L, ZHANG L, JIANG D Y. Flow-induced motion and energy conversion of two circular cylinders in tandem [J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2015, 36 (10): 2146-2149.
- [7] LOBO V, MAINSAH N, BANERJEE A, et al. Design feasibility of a vortex induced vibration based hydrokinetic energy harvesting system [C]//2011 IEEE Green Technologies Conference (IEEE-Green). Baton Rouge, LA, USA, 2011: 1-6.
- [8] KHALAK A, WILLIAMSON C H K, KHALAK A, et al. Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping [J]. *Journal of fluids & structures*, 1999, 13(7-8): 813-851.
- [9] BERNITSAS M M, RAGHAVAN K, BEN-SIMON Y, et al. VIVACE (vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): a new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow [J]. *Journal of offshore mechanics and arctic engineering*, 2008, 130(4): 10-24.
- [10] BEARMAN P W. Vortex shedding from oscillating bluff bodies [J]. *Annual review of fluid mechanics*, 1984, 16: 195-222.
- [11] WILLIAMSON C H K, GOVARDHAN R. A brief review of recent results in vortex-induced vibrations [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2008, 96(6-7): 713-735.
- [12] LEE J H, BERNITSAS M M. High-damping, high-Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter [J]. *Ocean engineering*, 2011, 38 (16): 1697-1712.
- [13] BAKER N J, MUELLER M A, SPOONER E. Permanent magnet air-cored tubular linear generator for marine energy converters [J]. *Power electronics, machines & drives*, 2004, 2(2): 862-867.
- [14] 袁榜, 余海涛, 胡敏强. 用于海浪发电永磁圆筒型直线发电机的结构优化与分析 [J]. *微电机*, 2011, 44 (3): 33-36.
- [15] YUAN B, YU H T, HU M Q. Optimized design and analysis of permanent magnet tubular linear generator for wave converter [J]. *Micromotors*, 2011, 44(3): 33-36.
- [16] 甘旭辉. 轴向充磁式永磁直线发电机的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
GAN X H. Research on axial flux permanent magnet linear synchronous machine [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [17] 刘春元. 圆筒永磁直线发电机在直驱式波浪发电系统

- 的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- LIU C Y. Research on the tubular permanent magnet linear generator using direct-driven wave power take-off system[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [16] JON B N. Linear generators for direct drive marine renewable energy converters [D]. Durham: Durham University, 2003.
- [17] 李林. Halbach 充磁式永磁直线发电机的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- LI L. Research on the linear generator of Halbach magnetized permanent magnet [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [18] BIANCHI N, BOLOGNANI S, CORTE D D, et al. Tubular linear permanent magnet motors: an overall comparison[J]. IEEE transactions on industry applications, 2003, 39(2): 466-475.
- [19] SZABO L, OPREA C, BIRO K A, et al. Novel permanent magnet tubular linear generator for wave energy converters [C]//IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, Turkey, 2007.

STUDY ON LINEAR GENERATOR APPLIED IN TIDAL ENERGY CONVERTER BASED ON FLOW-INDUCED MOTION

Tan Junzhe^{1,2}, Wang Baozhen¹, Wang Shujie^{1,2}, Yuan Peng^{1,2}, Zheng Zhishuang¹, Cai Yunwen¹

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

2. Qingdao Municipal Key Laboratory of Ocean Renewable Energy, Qingdao 266100, China)

Abstract: Mathematic model of the energy conversion device with linear generator was built and effective output of the flow induced vibration device was derived by theoretical analysis. Amplitude of the vibrator, frequency of the vibration and output of the device under the typical condition of vibrator diameter $D=0.12$ m, system stiffness $k=600$ N/m, velocity of flow is from 0.5 m/s to 0.75 m/s were calculated. Flume experiment result got under the same condition was roughly in line with that of numerical analysis.

Keywords: tidal power; energy harvesting; flow-induced motion; linear generator; flume experiment