

文章编号: 1001-4888(2017)01-0049-08

水流—圆柱—发电机动力相互作用 量纲分析及实验装置^{*}

李小超^{1,2,3,4}, 周熙林¹, 赵利平^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004; 3. 可再生能源电力技术湖南省重点实验室(长沙理工大学), 湖南长沙 410004; 4. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 涡激振动能量转换装置涉及水流—圆柱—发电机之间复杂的动力耦合问题。本文从圆柱涡激振动、能量传递、电能转换三个方面对涡激振动能量转换装置的工作机理进行理论分析, 提取出相关的影响参数, 并应用量纲分析方法对水流、圆柱、发电机三者之间的动力耦合作用进行了分析, 确定了实验模拟中应满足一致的相似参数。为了研究不同水流条件下涡激振动能量转换装置的工作特性, 设计制作了一套实验装置, 并对初步实验结果进行了分析。

关键词: 涡激振动; 能量转换; 量纲分析; 实验装置

中图分类号: TH212; TH213.3

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-055

0 引言

由于煤炭、石油等传统能源价格不断上涨以及应对气候变化和环境保护等的要求, 海洋能的开发和利用在国际上日益受到重视。潮流能发电是海洋能中技术相对成熟和具备商业化开发前景的能源开发利用方式之一, 国内外高校及科研院所正不断推出新的潮流能发电装置。近年来提出的涡激振动水生清洁能源^[1]是一种可在低流速条件下利用水中涡激振动现象从周围流场中提取水流动能的新兴能源技术, 它的提出引起了各国科学家和工程师的广泛关注。由于能够适应低流速条件, 涡激振动水生清洁能源技术具有能够广泛应用于河流、海洋、潮汐和其他水流上的广阔发展前景。Bernitsas 和他的合作者们 在密西根大学的水槽中开展了一系列基础性模型实验研究^[2-6], 采用圆柱体作为振动体模型, 主要考察了涡激振动能量转换效率, 以及雷诺数、海床近壁、表面粗糙度等因素对高阻尼条件下涡激振动动力响应的影响。Bernitsas 在他的研究报告^[7]中对利用涡激振动发电的可行性进行了详细探讨。报告指出: 装置的能量转换效率最大达到了 30.73%, 效率均方根值为 21.73%。Meliga 等^[8]基于比例反馈控制提出了流体—圆柱耦合系统的渐近分析方法, 用于评估作用于圆柱周围流场以优化涡激振动能量提取的控制流速。Lobo 等^[9]通过数值模拟对涡激振动水力发电场的设计可行性进行了探讨, 研究表明涡激振动水力发电场具有良好的可行性。Zahari 等^[10]对涡激振动能量转换装置在海洋油气平台上的应用进行了初步研究。Wang 等^[11]提出了一个电磁捕能器用于从涡激振动中获取能量, 并制作实验装置, 将其置于水槽中进行实验, 成功获取了电能。Nishi^[12]对双圆柱振动系统建立了理论模型, 计算结果表明双圆柱系统的提取功率远远大于单圆柱系统的, 并进一步开展了实验验证^[13]。

涡激振动能量转换装置涉及弹簧支撑的刚性圆柱的涡激振动, 与其他涡激振动问题不同的是, 涡激

^{*} 收稿日期: 2016-03-30; 修回日期: 2016-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309038), 海岸和近海工程国家重点实验室开放基金(LP1403), 可再生能源电力技术湖南省重点实验室开放基金(2014ZNDL001)

通讯作者: 李小超(1981—), 男, 讲师。研究方向: 水流与结构物相互作用。Email: chao0735@qq.com

振动能量转换装置在工作状态下发电机与结构振动存在相互影响,能量的转换和提取会使系统产生高阻尼,而以往的研究主要关注于低阻尼系统。因此,涡激振动能量转换装置是水流—圆柱—发电机之间复杂的动力耦合问题,目前物理模型实验是研究此类问题最为有效的手段之一。本文从圆柱涡激振动、能量传递、电能转换三个方面对涡激振动能量转换装置的工作机理进行分析,提取出相关的影响参数,应用量纲分析法对相关参数进行量纲分析,确定实验模拟中应保持一致的相似参数,用于指导模型实验。

1 理论分析

1.1 数学模型

采用如图 1 所示的齿轮齿条系统将结构的直线振动转化为发电机转轴的旋转运动,圆柱在流体升力的作用下竖直方向发生上下振动(水流方向为垂直于纸面的方向),其振动方程可表示为:

$$m_{\text{osc}} \ddot{y} + c_s \dot{y} + ky = F - F_{g/c} \quad (1)$$

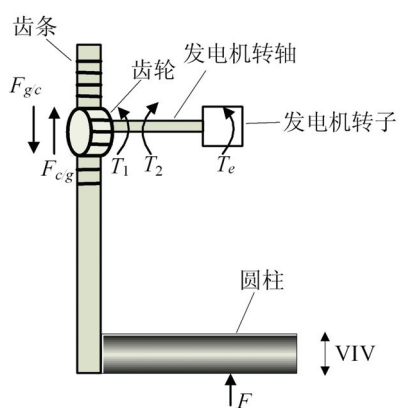


图 1 齿轮齿条系统

Fig. 1 Rack and gear transmission

式中, y 为振动位移; m_{osc} 为振动结构质量; 阻尼 c_s 为结构阻尼; k 为弹性系数; F 为作用在圆柱体上的流体升力; $F_{g/c}$ 为齿轮对振动结构的作用力。振动结构对齿轮有一个与 $F_{g/c}$ 大小相等、方向相反的作用力 $F_{c/g}$, 在 $F_{c/g}$ 作用下齿轮上产生转矩 T_{inv} 。齿轮的转动方程为:

$$J_g \ddot{\theta} + c_g \dot{\theta} = T_{\text{inv}} - T_1 \quad (2)$$

式中, θ 为齿轮的转角; J_g 为齿轮的转动惯量; c_g 为齿轮的阻尼系数; T_1 为发电机对齿轮的阻力转矩。

齿轮的转动带动发电机转轴及转子转动, 其转角与齿轮的转角相同, 均为 θ 。转子旋转时, 转子上的电枢导体切割气隙磁场, 其切割气隙磁场的线速度 v 与发电机转子的旋转角速度 $\dot{\theta}$ 有关, 令发电机转子半径为 r_r , 则

$$v = r_r \dot{\theta} \quad (3)$$

电枢导体切割气隙磁场时, 电枢绕组产生的感应电动势与导体切割磁场的速度成正比:

$$E_a = Blv = Blr_r \dot{\theta} \quad (4)$$

式中, l 为电枢导体的有效长度; B 为平均气隙磁通密度, B 取决于发电机的工作方式和结构特性。

圆柱连带齿条一起振动, 令 r_g 为齿轮半径, 转动角速度 $\dot{\theta} = \frac{\dot{y}}{r_g}$, 于是

$$E_a = \frac{r_r Bl}{r_g} \dot{y} \quad (5)$$

式(5)将感应电动势与圆柱振动速度联系起来。

当电枢绕组通有电流时, 电枢的载流导体与气隙磁场相作用, 就会产生电磁转矩。对于发电机, 电磁转矩是一个与转子转向相反的制动转矩。令齿轮传递给转子的驱动转矩为 T_2 , T_2 与 T_1 大小相等, 方向相反, 即 $T_2 = T_1$ 。为了使发电机转子转动, 驱动转矩需要克服电磁转矩和转子自身的机械阻力。电磁转矩 T_e 与电枢电流 I_a 成正比, 令比例系数为 C_T , 则 $T_e = C_T I_a$ 。令 J_r 为转子(含转轴)的转动惯量, c_r 为转子阻尼系数, 则转子的运动方程为:

$$J_r \ddot{\theta} + c_r \dot{\theta} = T_2 - C_T I_a = T_1 - C_T I_a \quad (6)$$

将式(2)和式(6)相加, 并令 $J^{\text{eq}} = J_r + J_g$, $c^{\text{eq}} = c_r + c_g$, 得

$$J^{\text{eq}} \ddot{\theta} + c^{\text{eq}} \dot{\theta} = T_{\text{inv}} - C_T I_a \quad (7)$$

为了求得电枢电流 I_a , 考虑如图 2 所示的他励直流发电机, 图中 R_f 为励磁绕组, U_f 为励磁电压, I_f 为励磁电流, G_f 为线圈的电感, R_a 为电枢电阻, E_a 为电枢绕组的感应电动势, R_L 为负载电阻, U 为负载电阻两端的电压。

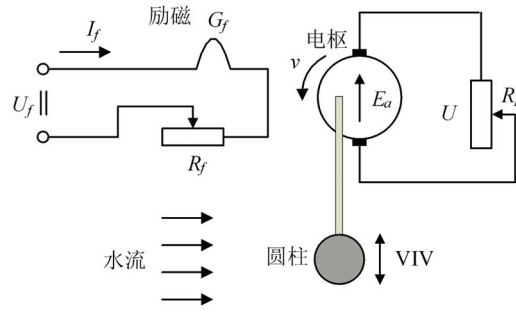


图 2 他励直流发电机的负载运行示意图

Fig. 2 Separately excited generator operating under load

在电枢电动势 E_a 的作用下,发电机向负载供电,根据基尔霍夫电压定律和欧姆定律可得

$$I_a = \frac{E_a}{R_a + R_L} \quad (8)$$

将式(5)和式(8)代入式(7)得:

$$\frac{J_g}{r_g} \ddot{y} + \frac{c^{eq}}{r_g} \dot{y} = T_{viv} - \frac{r_r C_T B l \dot{y}}{r_g (R_a + R_L)} \quad (9)$$

于是

$$T_{viv} = \frac{J_g}{r_g} \ddot{y} + \left[\frac{c^{eq}}{r_g} + \frac{r_r C_T B l}{r_g (R_a + R_L)} \right] \dot{y} \quad (10)$$

齿轮对振动结构施加的作用力为:

$$F_{g/c} = \frac{T_{viv}}{r_g} = \frac{J_g}{r_g^2} \ddot{y} + \left[\frac{c^{eq}}{r_g^2} + \frac{r_r C_T B l}{r_g^2 (R_a + R_L)} \right] \dot{y} \quad (11)$$

将式(11)代入方程式(1),化简后得:

$$\left[m_{osc} + \frac{J_g}{r_g^2} \right] \ddot{y} + \left[c_s + \frac{c^{eq}}{r_g^2} + \frac{r_r C_T B l}{r_g^2 (R_a + R_L)} \right] \dot{y} + ky = F \quad (12)$$

式(12)将水流力、结构振动、能量传递、电能转换联系在一起,式中 $\frac{J_g}{r_g^2}$ 为齿轮和发电机转子转动引起的

惯性质量, $\frac{c^{eq}}{r_g^2} + \frac{r_r C_T B l}{r_g^2 (R_a + R_L)}$ 为能量传递和转换过程中引起的阻尼。令 $m = m_{osc} + \frac{J_g}{r_g^2}$, $c = c_s + \frac{c^{eq}}{r_g^2} + \frac{r_r C_T B l}{r_g^2 (R_a + R_L)}$, 则振动方程进一步简化为:

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + ky = F \quad (13)$$

其中质量 m 包括振动结构质量 m_{osc} 和齿轮及发电机转子(含转轴)的转动惯性质量;系统阻尼 c 包括结构阻尼 c_s 、传递阻尼 c_{tra} 、发电机阻尼 c_{gen} 和能量提取阻尼 c_{harn} 。传递阻尼 c_{tra} 表示齿轮和发电机转子自身的机械阻力以及齿轮与齿条摩擦产生的能量损耗引起的阻尼;发电机阻尼 c_{gen} 表示发电机内部电枢的电阻损耗引起的阻尼,能量提取阻尼 c_{harn} 表示用于提取能量的负载电阻产生的阻尼;发电机阻尼 c_{gen} 随负载电阻的变化而变化,对于负载电阻为无穷大的开路状态,内部电阻产生的电损耗为零。

1.2 量纲分析

由上述分析可知,涡激振动能量转换装置涉及流体、圆柱体与发电机三者之间的相互作用,问题非常复杂。本文采用量纲分析方法对涡激振动能量转换装置涉及到的参数进行量纲分析,获取相关的无量纲参数,为物理模型实验的开展提供依据。

水流、振动结构与发电机涉及到的参数有流速 u 、流体密度 ρ 、粘性系数 μ 、圆柱直径 D 、圆柱长度 L 、质量 m 、结构自振频率 f_0 、系统阻尼系数 c 、齿轮半径 r 、齿轮质量 m_g 、发电机转子半径 r_r 、发电机转子质量 m_r 、重力加速度 g 以及时间 t 等,将涡激振动频率 f 、振幅 A 、转换功率 P 表示成隐函数形式:

$$f = F_1(u, \rho, \mu, D, L, m, f_0, c, r_g, m_g, r_r, m_r, g, t, \dots) = 0 \quad (14)$$

$$A = F_2(u, \rho, \mu, D, L, m, f_0, c, r_g, m_g, r_r, m_r, g, t, \dots) = 0 \quad (15)$$

$$P = F_3(u, \rho, \mu, D, L, m, f_0, c, r_g, m_g, r_r, m_r, g, t, \dots) = 0 \quad (16)$$

令圆频率 $\omega_0 = 2\pi f_0$, 选取圆柱外径 D 、质量 m 、流速 u 作为基本物理量, 应用 π 定理, 频率比 f/f_0 、振幅比 A/D 、能量转换效率 η 表示为:

$$\frac{f}{f_0} = F_1' \left(\frac{\rho u D}{\mu}, \frac{L}{D}, \frac{m}{\frac{\pi}{4} \rho D^2 L}, \frac{u}{f_0 D}, \frac{c}{2 m \omega_0}, \frac{r_g}{D}, \frac{m_g}{m}, \frac{r_r}{D}, \frac{m_r}{m}, \frac{g D}{u^2}, \frac{t u}{D}, \dots \right) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{A}{D} = F_2' \left(\frac{\rho u D}{\mu}, \frac{L}{D}, \frac{m}{\frac{\pi}{4} \rho D^2 L}, \frac{u}{f_0 D}, \frac{c}{2 m \omega_0}, \frac{r_g}{D}, \frac{m_g}{m}, \frac{r_r}{D}, \frac{m_r}{m}, \frac{g D}{u^2}, \frac{t u}{D}, \dots \right) = 0 \quad (18)$$

$$\eta = F_3' \left(\frac{\rho u D}{\mu}, \frac{L}{D}, \frac{m}{\frac{\pi}{4} \rho D^2 L}, \frac{u}{f_0 D}, \frac{c}{2 m \omega_0}, \frac{r_g}{D}, \frac{m_g}{m}, \frac{r_r}{D}, \frac{m_r}{m}, \frac{g D}{u^2}, \frac{t u}{D}, \dots \right) = 0 \quad (19)$$

式中各无量纲参数的物理意义解释如下: $\frac{\rho u D}{\mu}$ 为雷诺数, 表示流体惯性力与粘性力的比值; $\frac{L}{D}$ 为长细比, 表示圆柱的长度和直径的比值; $\frac{m}{\frac{\pi}{4} \rho D^2 L}$ 为质量比, 表示振动结构质量与柱体排开水体的质量的比值;

$\frac{u}{f_0 D}$ 为约化速度 (或无量纲流速), 表示在一个振动周期内水质点的位移长度与圆柱直径的比值; $\frac{c}{2 m \omega_0}$

为阻尼比, 表示系统阻尼与临界阻尼的比值; $\frac{r_g}{D}$ 为齿轮半径与圆柱半径的比值; $\frac{m_g}{m_{\text{osc}}}$ 为齿轮质量与结构

质量的比值; $\frac{r_r}{D}$ 为发电机转子半径与圆柱半径的比值; $\frac{m_r}{m}$ 为发电机转子质量与结构质量的比值; $\frac{g D}{u^2}$ 为佛汝德数, 表示流体内惯性力与重力的比值。

1.3 相似分析

根据相似准则, 在进行模型实验时应该使上述无量纲参数在实验室物理模型与在原型中保持相同的比例, 才能在实验室内准确模拟原型中的现象。

假设采用水进行实验, 那么流体密度 ρ 和粘性系数 μ 则保持与原型相同。原型雷诺数的数量级通常在 $10^4 \sim 10^5$, 而模型实验中由于造流能力的限制, 大部分涡激振动实验的雷诺数数量级集中在 $10^3 \sim 10^4$ 的范围, 考虑到模型实验中结构尺寸进行了缩小, 因此要达到雷诺数相似必须提高流速, 也即要提高实验室设备的造流能力, 目前国内大部分实验室水槽都很难开展量级为 10^5 雷诺数下的模型实验, 其实验研究都是使模型雷诺数达到一定的范围使模型的流态与原型保持一致, 但是 Raghavan 和 Bernitsas^[4] 的研究表明涡激振动响应对雷诺数有较强的依赖性。

佛汝德数的一致表征重力相似, 重力相似与雷诺数相似往往难以同时满足。目前在涡激振动实验研究中更多的是关注雷诺数的影响。

对于阻尼比 $\zeta = \frac{c}{2 m \omega_0}$, 其值一般小于 1, 当 $\zeta \geq 1$ 时, 则不会发生振动。自然界中大部分工程结构的阻尼比较小, 其数量级一般为 10^{-3} , 而对于涡激振动能量转换装置, 由于能量传递和转换的引入, 高阻尼是必然的, 其数量级为 10^{-1} ^[2], Lee 和 Bernitsas^[5] 对高阻尼情况下的涡激振动响应进行了研究, 结果显示在高阻尼情况下仍可获得较大的振幅。在实验过程中, 只要使阻尼比的值与原型值保持在一定的范围内, 是可以达到相似的。

长细比对于涡激振动实验的设计是一个非常重要的参数, 长细比对圆柱绕流脱落涡旋相关长度及作用在圆柱上的涡激力有重要的影响。在涡激振动中, 水流流经圆柱的相关长度定义为沿圆柱轴向在一定允许范围内涡旋脱落可以视为同相位的长度。所谓相关长度是指水流流经圆柱时, 沿圆柱轴向涡旋的脱落一定程度上可以视为同相位的长度。在确定作用在结构物上的涡激力时, 结构的长细比是一个最为重要的参数, 相关长度越大, 所引起的作用在振动圆柱上的总的涡激力就越大^[14, 15]。当雷诺数到达 $4 \times 10^3 \sim 4.8 \times 10^3$ 时, 旋涡脱落变得不规则, 由于不同相位的旋涡脱落的产生, 导致相关长度减

小,进而影响与其相关的涡激力,因而有必要在圆柱末端设置端板,减小尾涡的三维效应^[14, 15]。一般地,当 $\frac{L}{D} > 7$ 时,在圆柱末端设置端板的情况下,长细比的影响将变得相对较小^[14, 16]。

质量比对频率锁定的发生以及锁定的流速范围有重要的影响。Williamson 和 Govardhan^[17]的研究表明,理论上存在一个临界质量比,其值为 0.54,当质量比小于 0.54 时,频率锁定的流速范围将变得无限宽。

约化速度 $\frac{u}{f_0 D}$ 通常用于表征频率锁定的流速范围,其中自振频率 f_0 取决于弹簧弹性系数和质量 m ,即

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (20)$$

式中 k 为弹性系数。模型实验中,在圆柱质量及实验流速一定的情况下可通过调整弹簧弹性系数使约化速度与原型保持一致。

$\frac{r_g}{D}$, $\frac{m_g}{m}$, $\frac{r_r}{D}$, $\frac{m_r}{m}$ 等无量纲参数可在模型制作过程中通过合理的方法使其在模型实验中达到相似。

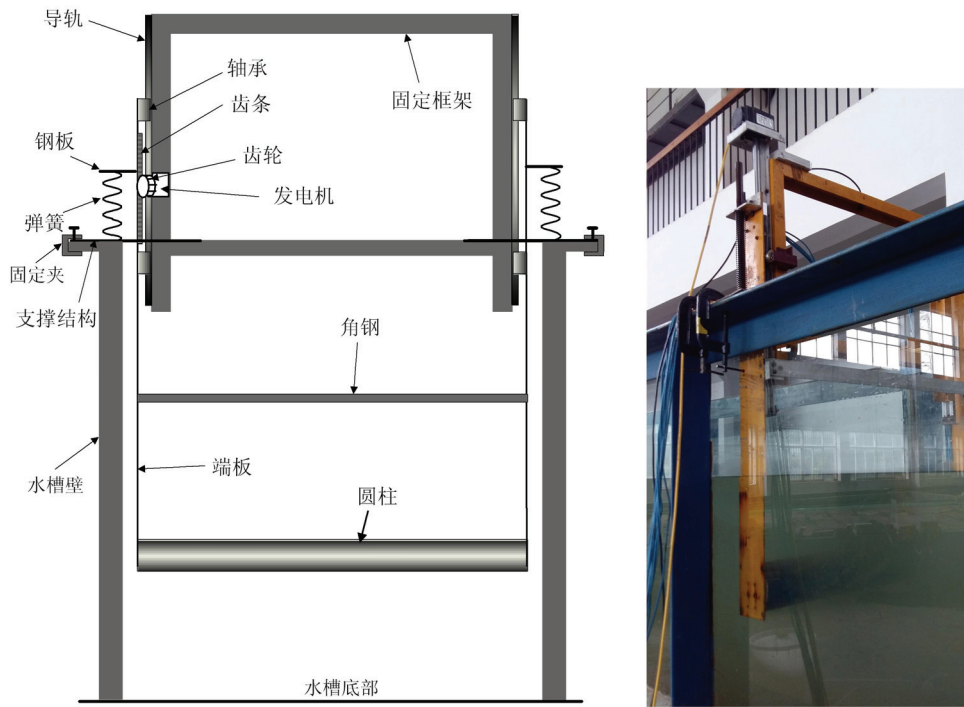


图3 放置于水槽上的实验装置

Fig. 3 Experimental apparatus mounted on the channel

2 实验装置及模型

实验装置由支撑系统、振动系统、侧向位移限制系统、能量传递系统及发电系统组成,其中支撑系统由支撑结构和固定框架构成,振动系统由圆柱、端板、齿条、轴承、钢板和弹簧构成,侧向位移限制系统由轴承和导轨构成,能量传递系统由齿轮和齿条构成,发电系统为发电机。图3为安装于水槽上的实验装置。

实验在长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室的波流水槽中进行,水槽长45m、宽0.8m、深1m。实验时,取水深为0.6m,为了获得较高的雷诺数,圆柱的外径不宜太小,取 $D=0.11\text{m}$, $L=0.78\text{m}$,圆柱长细比为7.091,圆柱为一根PVC管。振动系统质量 m 包括结构质量 m_{oc} 和齿轮及发电

机转子的转动惯性质量 $m_e = \frac{J_{eq}}{r_g^2}$, 其中结构质量包括圆柱质量、端板质量、齿条质量、轴承质量和钢板质量。每根弹簧的弹性系数为 303.9 N/m, 因而总的弹性系数 $k = 607.8$ N/m, 实验测得系统在空气中的自振频率为 0.9765 Hz, 根据式(20)换算可得到系统质量 $m = 8.0728$ kg, 因而质量比为 $m^* = 1.089$ 。阻尼比的测量依赖于测试过程中给定的初始位移, 具有一定的不确定性, 但每次测量得到的阻尼比数量级均为 10^{-1} 。由于附加质量的影响, 在水下的自振频率比空气中的小, 为 0.8545 Hz。

实验采用市场上现有的小型旋转式发电机作为实验发电机, ADV 流速仪测量流速, 拉绳位移传感器对结构振动位移进行测量, 发电机直接与动态信号采集仪相连, 进行输出电压测试。实验流速范围为 0~0.8 m/s, 最大实验雷诺数约为 8.5×10^4 , 对应的最小佛汝德数为 1.72。

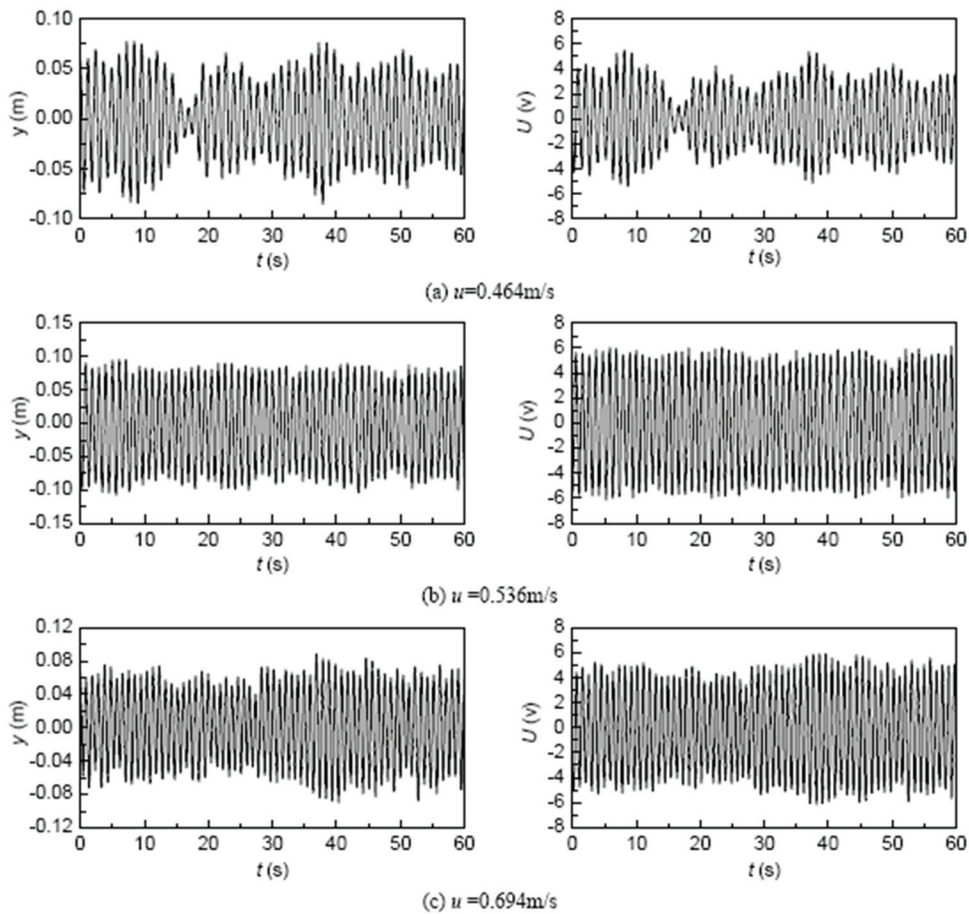


图 4 开路状态下不同流速时的振动位移(y)与发电机输出电压(U)

Fig. 4 Time histories of measured cylinder displacement (y) and output voltage (U) for the open circuit case

3 初步结果

图 4 给出了开路状态下三个不同流速时 60 s 内振动位移和发电机输出电压的测试曲线, 从图中可以看出, 在较低流速下圆柱振动表现出间歇性振动特征, 随着流速的增大, 圆柱振动变得规则, 表现出简谐振动特征, 电压变化与振动位移变化较为相似。图 5 为开路状态下振幅比、频率比及最大输出电压随流速的变化曲线, 最大输出电压曲线与振幅比曲线较为相似。频率锁定的流速范围约为 0.4~0.75 m/s, 对应无量纲流速范围为 4.3~8.0, 最大振幅比约为 0.94, 最大输出电压约为 6.85 V, 且两者出现在同一流速下。振动位移特征及振幅比和频率比曲线形状与 Khalak 等^[18]和 Bernitsas 等^[2]人的实验结果较为一致, Khalak 实验得到的最大振幅比约为 0.96, Bernitsas 实验得到的最大振幅比约为 1.4。实验结果表明本文实验装置能够用于涡激振动能量转换装置的模型实验研究。

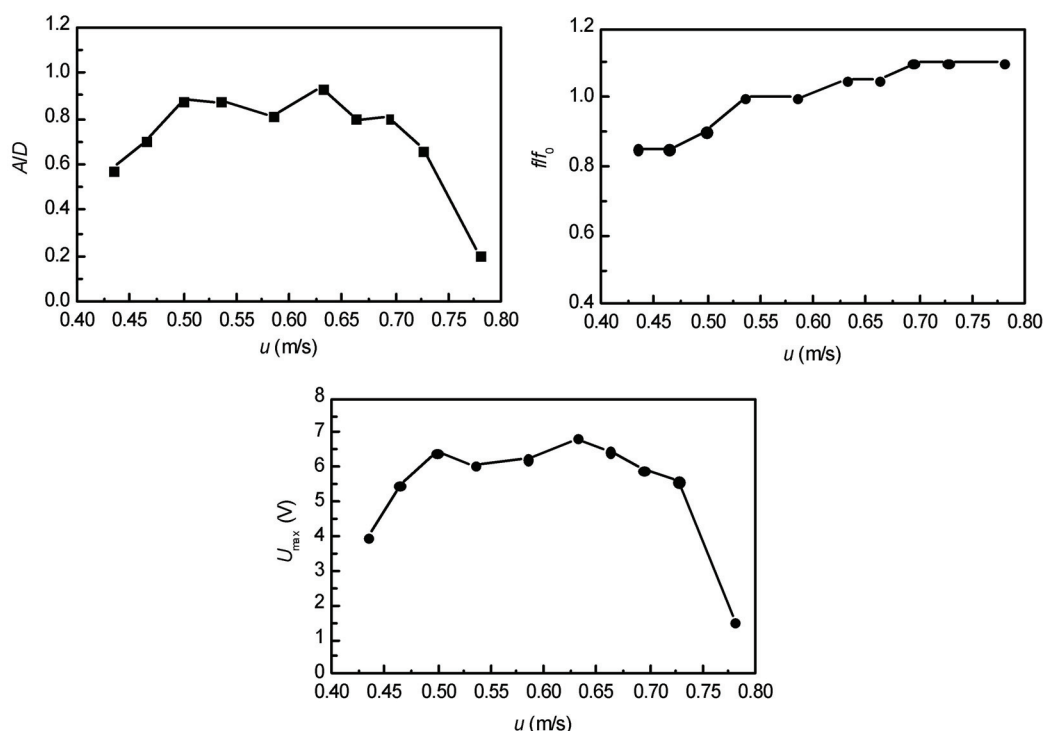


图5 开路状态下振幅比(A/D)、频率比(f/f_0)及最大输出电压($U_{\max}$)随流速的变化

Fig. 5 Amplitude ratio (A/D), frequency ratio (f/f_0) and maximum output voltage ($U_{\max}$) vs water Velocity for the open circuit case

4 结束语

本文从圆柱涡激振动、能量传递、电能转换三个方面对涡激振动能量转换装置的工作机理进行理论分析,建立了相关的数学模型,并提取出涡激振动能量转换装置的影响参数,应用量纲分析方法对水流、圆柱、发电机三者之间的动力耦合作用进行了分析,确定了实验模拟中应保持一致的相似参数。设计制作了一套用于研究涡激振动能量转换装置工作特性的实验装置,在波流水槽内开展了模型实验,初步实验结果表明本文实验装置能够模拟不同水流条件下涡激振动能量转换装置的工作特性。

参考文献:

- [1] 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):041101-1—041101-15.
- [2] Bernitsas M M, Ben-Simon Y, Raghavan K, et al. The VIVACE converter: model tests at high damping and reynolds number around 10^5 [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2009, 131(1):011102-1—011102-12.
- [3] Raghavan K, Bernitsas M M, Maroulis D E. Effect of bottom boundary on VIV for energy harnessing at $8 \times 10^3 < Re < 1.5 \times 10^5$ [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2009, 131(3):1—13.
- [4] Raghavan K, Bernitsas M M. Experimental investigation of Reynolds number effect on vortex induced vibration of rigid circular cylinder on elastic supports[J]. Ocean Engineering, 2011, 38:719—731.
- [5] Lee J H, Bernitsas M M. High damping, high Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter[J]. Ocean Engineering, 2011, 38:1697—1712.
- [6] Lin D, Zhang L, Bernitsas M M, et al. Numerical simulation and experimental validation for energy harvesting of single-cylinder VIVACE converter with passive turbulence control[J]. Renewable Energy, 2016, 85:1246—1259.
- [7] Bernitsas M M. Low head, vortex induced vibrations river energy converter[R]. Vortex Hydro Energy LLC

- Report DE-FG36-05GO15162, Ypsilanti, Michigan, 2006.
- [8] Meliga P, Chomaz J M, Gallaire F. Extracting energy from a flow; an asymptotic approach using vortex-induced vibrations and feedback control[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27(5-6):861—874.
 - [9] Lobo V, Mainsah N, Banerjee A, et al. Design feasibility of a vortex induced vibration based hydro-kinetic energy harvesting system[C]. *Proceeding of Green Technologies Conference (IEEE-Green)*, 2011 IEEE. Baton Rouge, LA, 2011.
 - [10] Zahari M A, Dol S S. Application of vortex induced vibration energy generation technologies to the offshore oil and gas platform: the preliminary study[J]. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2014, 8(7):1321—1324.
 - [11] Wang D A, Chiu C Y, Pham H T. Electromagnetic energy harvesting from vibrations induced by Kármán vortex street[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(6):746—756.
 - [12] Nishi Y. Power extraction from vortex-induced vibration of dual mass system[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(1):199—212.
 - [13] Nishi Y, Ueno Y, Miyamoto T. Energy harvesting using wake-induced vibration: experiment in circulating water channel[J]. *Journal of Ocean and Wind Energy*, 2015, 2(4):231—238.
 - [14] Norberg C. Experimental investigation of the flow around a circular cylinder; influence of aspect ratio[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 258:287—316.
 - [15] Szepessy S, Bearman P W. Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992, 234:191—217.
 - [16] Norberg C. Flow around a circular cylinder; aspect ratio of fluctuating lift[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15(3-4):459—469.
 - [17] Williamson C H K, Govardhan R. Vortex-induced vibrations[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36: 413—455.
 - [18] Khalak A, Williamson C H K. Dynamics of a hydroelastic cylinder with very low mass and damping[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1996, 10(5):455—472.

On the Dimensional Analysis and Experimental Apparatus of Interaction among Water Current-Cylinder and Generator

LI Xiao-chao^{1, 2, 3, 4}, ZHOU Xi-lin¹, ZHAO Li-ping^{1, 2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China; 3. Key Laboratory of Renewable Energy Electric-Technology of Hunan Province (Changsha University of Science & Technology), Changsha 410004, China; 4. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Hydrokinetic energy converter of vortex induced vibration (VIV) involves complex dynamic interaction among water current, cylinder and generator. In this paper, the working mechanism of vortex induced vibration energy converter was theoretically analyzed from following three aspects: the cylinder vortex induced vibration, the energy transmission and the electric energy conversion. Relative parameters were extracted. The dynamic coupling of water current, cylinder and generator was analyzed based on dimensional analysis. The similar parameters used in simulation experiment were determined. In order to study the working property of vortex induced vibration energy converter under different water current conditions, an experimental apparatus was designed and fabricated, its preliminary experimental results were analyzed.

Keywords: vortex induced vibration; energy conversion; dimensional analysis; experimental apparatus