DOI: 10.3901/JME.2019.08.024

一种脱涡纵振式压电管道气流俘能器*

王淑云 富佳伟 阚君武 陈 松 张忠华 梁 程

(浙江师范大学精密机械与智能结构研究所 金华 321004)

摘要: 为满足管道流体监测系统的自供电需求, 针对流速/向恒定、空间有限的管道流环境下压电振子的有效激励问题, 提出一种脱涡纵振式压电管道气流俘能器。介绍了其系统构成及工作原理, 并进行了理论和试验研究, 证明了其结构原理的可行性。研究结果表明: 平均阻力随流速/直径比增长呈二次方关系, 平均阻力过大会减小压电振子振幅, 平均阻力系数随直径比上升先增加最终达到固定值(6.23); 其他参数确定时, 分别存在最佳流速和最佳直径比使输出电压最大, 外接电阻为 240 k Ω , 流速为 32 m/s, 直径比为 0.93 时, 试验测得最大输出功率为 1.25 mW, 应根据实际流速范围确定合理的直径比及负载以提高俘能器的输出功率, 低流速时适当增大直径比、高流速时适当减小直径比有助于提高发电能力。

关键词: 压电; 管道气流; 纵振俘能器; 脱涡; 自激

中图分类号: TN384; TM619

A Pipe Airflows Piezoelectric Energy Harvester with Longitudinal Vibration Excited by Vortex Shedding

WANG Shuyun FU Jiawei KAN Junwu CHEN Song ZHANG Zhonghua LIANG Cheng

(Institute of Precision Machinery and Intelligent Structure, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004)

Abstract: To meet the demands of pipe flows monitoring system for self-power and solve the problem of effective excitation of a piezoelectric vibrator in a flow-rate/direction constant and space-limited pipe flows environment, a novel pipe airflows piezoelectric energy harvester (PAPEH) with longitudinal vibration excited by vortex shedding is presented. Introduce the system composition and operational principle of the PAPEH, and carry out theoretical and experimental studies. The results show that the average drag has a quadratic relationship with flow rates and diameter ratios, and it reduces the amplitude of the piezoelectric vibrator when it is too large; The average drag factor increases with the diameter ratios and finally stabilize to 6.23; Other parameters are determined, respectively, there is the optimal flow rate and the optimal diameter ratio to maximize the output voltage, when the resistor is 240 k Ω , the flow rate is 32 m/s, the diameter ratio is 0.93, and the output power reaches 1.25 mW. Therefore, improving the output power should determine a reasonable diameter ratio and load based on the actual flow rates range. Proper increase the diameter ratio at low flow rates and reduction in diameter ratio at high flow rates help to increase power generation capacity.

Key words: piezoelectric; pipe airflows; longitudinal vibration energy harvester; vortex shedding; self-excited

0 前言

为满足微功率电子产品以及远程传感监测系统的实时供电需求、避免废弃电池造成的环境污染, 基于压电原理的俘能技术已成为国内外的研究热点^[1-4]。压电流体俘能器最初是为收集自然界的风能^[5-6]和波浪能^[7-8](属非恒定流、且使用空间不受

限制)而提出的, 相较于电磁俘能器而言, 具有结构简单、体积小、无电磁干扰、尤其是易于与传感监测系统相集成, 被认为是构造微小型流体俘能器的有效方法^[9-10]。

根据流体特性及压电振子激励方式, 现有压电流体俘能器可归为三类: ① 浪推冲击式^[11-12], 利用流体波浪直接推动或冲击置于流体内部的压电振子, 主要用于构造海浪俘能器, 该方法结构简单, 其主要弊端是压电振子会因变形过大损毁且在高流速环境下无法产生往复自激振荡; ② 旋转激励式^[13-15], 利用流体力驱动叶轮, 再经拨齿或磁力激励压电振子振动发电, 该类方法可用于定常流体能量回收,

* 国家自然科学基金(61574128, 51877199, 51377147, 51577173)、浙江省自然科学基金(LY17F010004, LY16F010003)、国家级大学生创新创业训练计划(201810345036)和浙江省新苗人才计划(2018R404041)资助项目。20180628 收到初稿, 20181104 收到修改稿

但结构复杂、不便于管道内安装、可靠性低，故仅适于流体黏度/流速低、使用空间不受限/非封闭的场合(如构造压电风车)；③ 圆柱扰流横振式^[16-17]，利用流体绕过圆柱后形成的卡门涡街升力迫使俘能器产生横向(垂直来流方向)振动并发电，目前主要用于构造风能、海洋能、潮汐能等流体动能收集装置，该方法可用于定常管道流体能量回收，但俘能器横向振动空间较大，不便与横向尺寸受限的管道相集成使用。显然，上述压电流体俘能器主要采用悬臂梁压电振子产生横向弯曲振动发电，其结构原理(体积大、结构复杂)、可靠性(弯曲变形过大损毁)、发电能力等并不能满足流速/向恒定、空间有限的管道流俘能的需求。

针对现有压电流体俘能器不能满足流体管道横向空间有限、流动参数恒定的管道流发电需求，本文提出利用扰流体与定常管道气流耦合作用形成俘能器纵向(平行来流方向)振动并发电的新方法，并进行了理论分析与试验研究，获得了直径比等参数对输出电压及功率的影响规律，证明了脱涡纵振式压电管道气流俘能器的可行性。

1 俘能器的结构及工作原理

本文提出的脱涡纵振式压电管道气流俘能器使用时与管道相集成，可行方案之一见图 1。施力杆前端安装有用于改变气流流动状态的扰流体，施力杆末端通过弹簧压接在金属基板和压电陶瓷粘结而成的压电振子中部，压电振子简支支撑。

图 1 俘能器的结构示意图

在振动平面内建立坐标系，横向沿 y 轴，纵向沿 x 轴。根据流体动力学理论，当流体流经扰流体时产生卡门涡街(图 2)，旋涡生成与脱落使扰流体前

图 2 扰流体产生的卡门涡街

后压力交替变化，从而经施力杆带动压电振子产生纵向振动并将流体动能转换成电能。当涡激振动频率 f_s 与系统固有频率 f_n 相同或相近时，压电振子将产生共振，其振幅及发电量都将达到最大。

由压电陶瓷和金属基板粘接而成的两叠片压电振子在施力杆作用下产生弯曲变形时，所生成的电压、单位时间内产生的电能以及最大输出功率可分别表示为^[18]

$$V_g = \eta F = \eta KX \quad (1)$$

$$E_g = \frac{C_f V_g^2}{2} f_g \quad (2)$$

$$P_g = \frac{\omega_s C_f V_g^2}{4} \quad (3)$$

式中， η 为与压电振子结构尺度及材料参数有关的系数； F 、 X 分别为压电振子中心所受的外力和变形量； K 为等效刚度； C_f 为自由电容； $\omega_s = 2\pi f_s = 2\pi S_L v / D$ 为涡激圆频率， S_L 为斯特罗哈尔数， v 为流速， D 为扰流体直径。上述公式表明，其他参数确定时，可通过提高压电振子变形量及振动频率提高发电能力。

本文所提出的纵振式压电管道气流俘能器通过脱涡压差阻力间接激励压电振子，使其只承受压应力，可靠性高，激振力通过扰流体尺寸加以调节；此外，俘能器沿管道长度方向安装和纵向振动发电，结构简单，横向安装空间小，易于管道集成。

2 俘能器的激励与响应特性分析

根据振动分析理论，压电振子的性能和发电能力主要由压电梁结构尺寸及动态响应决定的。横振式压电流体俘能器已有较多的理论及试验成果可借鉴，而本文的纵振式压电管道气流俘能器是由气流脱涡引起的压差阻力实现纵向自激振动，有关其动态响应及发电特性研究较少，故首先需要从理论上研究俘能器的响应特性。

扰流体所受压差阻力是由平均气流、脉动气流和脱涡气流三者形成的，流场分布较为复杂。平均气流作用力等效为静力，脉动气流作用力为与结构周期、风压和受风面积有关的随机力，为便于分析，通常尾涡区比较大时，将脱涡气流作用力作为主要激振力。根据机械振动和流体力学理论，俘能器的振动微分方程及压电振子振幅的最大值可表示成

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_0 \sin(\omega_s t) \quad (4)$$

$$X = \frac{F_0}{K\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\lambda\xi)^2}} = \frac{F_0}{K}\beta \quad (5)$$

式中, $F_0=1/2C_D\rho v^2A$ 为脱涡激振力, C_D 为与雷诺数及扰流体结构尺度相关的阻力系数, ρ 为空气密度, A 为扰流体面积; $M=m+m_0$ 为等效质量, m 和 m_0 分别为结构的自身质量及其在流场中的附加质量; $C=c+c_0$ 为等效阻尼系数, c 和 c_0 分别为结构的自身阻尼及其在流场中的附加阻尼; $\beta=1/\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\lambda\xi)^2}$ 为放大因子, $\lambda=\omega_s/\omega_n$ 为频率比, $\omega_n=\sqrt{K/M}$ 为压电振子的固有频率, ξ 为阻尼系数。

工作中扰流体承受平均气流作用力导致压电振子受压弯曲, 弯曲挠度过大会增大系统刚度限制压电振子振幅; D 和 D_0 分别为扰流体直径和管道内径, 现将两者的比值定义为直径比, 即 $\alpha=D/D_0$, 来表征在管道中扰流体的相对尺度, 压电振子的最大弯曲挠度方程为

$$w_{\max} = \frac{F_s l^3}{192EI} \quad (6)$$

$$F_s = C_a \rho \frac{\pi(\alpha D_0)^2}{8} v^2 \quad (7)$$

式中, l 为压电振子长度; E 和 I 分别为材料杨氏模量和转动惯量; F_s 为平均阻力; C_a 为与雷诺数及直径比相关的平均阻力系数。

采用测力计对不同直径的扰流体进行多次测量获得各流速下的平均阻力 F_s , 进而得到平均阻力系数 C_a , 测试照片如图 3 所示。

图3 平均阻力测试

图 4 曲线表明, 直径比一定时平均阻力随流速增长呈二次方关系; 同时, 流速一定时平均阻力随直径比也呈二次方关系, 如图 5 所示; 图 6 曲线表

图4 直径比不同时平均阻力与流速的关系

明, 平均阻力系数随直径比上升先增加最终达到固定值(6.23), 且不同流速下平均阻力系数基本一致。当平均阻力较大时会增加系统刚度(刚度随弯曲挠度增大非线性增加)、限制压电振子振幅; 故使用时应选取合适的直径比, 保证有效的脱涡激励下降低平均阻力载荷。

图5 流速不同时平均阻力与直径比的关系

图6 流速不同时平均阻力系数与直径比的关系

上述公式表明, 俘能器的性能受压电振子结构及材料参数、直径比、扰流体尺寸及流速等因素的影响, 且流场分布较为复杂, 缺少 S_t 、 C_D 等关键系数来获得激励力的频率和幅值, 尚无法建立精确的解析模型; 本文将通过试验的方法研究直径比及流速对俘能器性能的影响规律。

3 试验测试与分析

为证明纵振式压电管道气流俘能器原理的可行性, 获得直径比 α 及流速 v 对输出电压及功率的影响规律, 设计制作了图 7 所示的样机及测试系统,

图7 试验测试平台及样机

结构尺寸和相关参数见表 1。试验所用仪器设备为：DS5042M 型数字存储示波器、变频器(变频范围 0~50 Hz, 步长 0.5 Hz)、风机(风量 16 m³/min)、风速仪、可调电阻器(0~1.1 M Ω)等；试验中通过调节变频器频率改变流速(二者呈较好的线性关系)，可调流速范围 0~40 m/s；金属基板为经热处理的铍青铜，压电陶瓷材料为 PZT-5H。

表 1 俘能器结构尺寸和相关参数

参数	量值	参数	量值
压电振子长 l/mm	71	扰流体厚 h_b/mm	3
压电振子宽 b/mm	19.5	风道内径 D_0/mm	86
基板厚 h_m/mm	0.3	扰流体直径 D/mm	30/50/70/
陶瓷厚 h_p/mm	0.2		80/84/85.8

试验前为保证初始条件下俘能器具有相同的系统参数，弹簧(劲度系数 1.5 N/mm)初始预压力为 1 mm，并对不同直径的扰流体行进了配重，各配重质量限于篇幅不详细列出。

图 8 所示为 $v=32\text{ m/s}$ 时俘能器的电压时域波形图。由图可见，电压波形峰值并非理想的正弦波、存在随机振动成分，且波形形状及幅值受直径比影响都较大：当 $\alpha \leq 0.93$ 时，波形峰值随直径比增大而增加、波形形状越规则(近似简谐波)、且出现了明显的拍振现象；但当 $\alpha > 0.93$ 时波形峰值随直径比增大而减小。产生上述现象的原因在于，直径比 $\alpha \leq 0.93$ 时，随直径比增大卡门涡街形成越稳定；

图 8 电压时域波形图

$\alpha=0.93$ 时的激励频率(涡激频率)接近俘能器的固有频率，从而使涡激振动效果增加、随机振动所占比例降低，拍振是由风机自身振动及流速脉动引起的，各直径比时都是存在的；当 $\alpha > 0.93$ 时，管道内壁和扰流体共同作用下，被阻塞的气流多于脱涡气流，卡门涡街形成受抑制，激振力减小。

图 9 为对电压波形做傅里叶变换所得的直径比不同时俘能器振动主频(f)与流速(v)的关系曲线。曲线表明，直径比 $\alpha \leq 0.581$ 时对应的振动主频与流速非线性变化；直径比为 $0.581 < \alpha < 1$ 时 f 与 v 线性变化，相同流速下直径比越大振动主频越大。产生上述现象的原因在于直径比较小时，低流速下($v < 20\text{ m/s}$)难以形成稳定的卡门涡街，无明显的振动主频，较高流速下脱涡振动比例逐渐提高；而直径比较大时俘能器以脱涡振动为主，振动主频与流速呈较好的线性关系，且随着直径比增大扰流体与管壁的间隙减小，相同流量下气流脱涡扰流体的速度加快，导致脱涡频率在一定范围内随直径比增加而升高，故改变直径比可以调节激振力的频率特性。

图 9 直径比不同时振动主频与流速的关系

为了合理评价俘能器的电压输出特性，本文提取了电压波形的幅值并结合概率密度函数对正、负半波幅值进行了分析，正、负半波幅值分别对应一个概率密度最大的电压幅值，将两者的差值作为输出电压(V_g)，以此分析俘能器的电压输出特性。图 10 为直径比不同时输出电压与流速的关系曲线。直

图 10 直径比不同时输出电压与流速的关系

径比及流速对俘能器的电压特性都有较大影响,各直径比都对应一个最佳流速(v^*)使峰值电压最大(V_g^*);图11给出了直径比与最佳流速及最大峰值电压的关系曲线,直径比小于0.814时的最佳流速超过本文试验所能达到的流速(超过40 m/s),取 $v=40$ m/s对应的电压作为 V_g^* (空心标记符)。

图11 直径比 α 对最佳流速及峰值电压的影响

从图11可知,当管道内径 D_0 一定,试验段内最佳流速随直径比增加而减小,直径比接近1时,俘能器将无法有效工作;当 $\alpha=0.93$ 时最佳流速对应的峰值电压最大,当 α 进一步增加或减小都会使 V_g^* 减小; $\alpha=0.814/0.93/0.977/0.998$ 对应的 v^* 及 V_g^* 分别为39.2/37.6/35.2/35.2 m/s和42.8/57.2/41.6/26.8 V;当 $\alpha=0.998$ 时压电振子振幅下降显著,主要原因在于气流阻力作用下压电振子产生较大的弯曲挠度导致系统刚度增大;另一方面扰流体后方的脱涡尾迹被管壁限制,激振力减小,压电振子难以被有效激励,这与理论分析相吻合。

为使俘能器输出功率达到最大,其他参数确定时,可通过调节负载电阻使之与俘能器阻抗相匹配。图12为 $v=32$ m/s、直径比不同时输出功率与负载电阻的关系曲线。从图中可知存在最佳直径比和最佳的负载电阻使输出功率最大,当 $\alpha=0.93$ 时输出功率达到最大为1.25 mW,最佳负载电阻为240 k Ω 。当 $\alpha=0.581/0.814/0.977$ 时最大输出功率分别为0.147/0.294/0.722 mW,在实际应用中通过选择合理的直径比和负载电阻有助于提高俘获能器的输出能力。

图12 直径比 α 不同时输出功率与负载电阻的关系

4 结论

(1) 平均阻力随流速/直径比增长呈二次方关系;平均阻力系数随直径比上升先增加后达到固定值(6.23);平均阻力过大时会减小压电振子振幅,平均阻力较小时又难以实现压电振子的有效激励;

(2) 直径比对激振力影响显著,直径比较小时俘能器以随机振动为主,振动主频与流速非线性变化,而直径比较大时俘能器以脱涡振动为主,振动主频与流速呈较好的线性关系;

(3) 其他参数确定时,分别存在最佳流速和最佳直径比使输出电压最大;外接电阻为240 k Ω ,直径比 $\alpha=0.93$ 时,试验测得最大输出功率为1.25 mW;应根据实际流速范围确定合理的直径比和外部负载,如低流速时适当增大直径比、高流速时适当减小直径比等有助于提高俘能器输出能力。本文证明了脱涡纵振式压电管道气流俘能器原理的可行性,为满足管道流体监测系统的自供电需求提供新方法。

参考文献

- [1] ABDELKEFI A. Aeroelastic energy harvesting: A review[J]. International Journal of Engineering Science, 2016, 100: 112-135.
- [2] ZHOU G, HUANG L, LI W, et al. Harvesting ambient environmental energy for wireless sensor networks: A survey[J]. Journal of Sensors, 2014, 2014(2): 1-20.
- [3] SALIM M, ALJIBORI H, SALIM D, et al. A review of vibration-based MEMS hybrid energy harvesters[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(11): 5021-5034.
- [4] 王光庆, 展永政, 金文平, 等. 一种宽频压电振动能量采集器的解析模型与试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(6): 155-164.
WANG Guangqing, ZHAN Yongzheng, JIN Wenping, et al. Model and experiments of a broadband piezoelectric vibration energy harvester [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(6): 155-164.
- [5] AKAYDIN H, ELVIN N, ANDREPOULOS Y. Wake of a cylinder: A paradigm for energy harvesting with piezoelectric materials [J]. Experiments in Fluids, 2010, 49(1): 291-304.
- [6] LI S, YUAN J, LIPSON H. Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(2): 026104.
- [7] XIAO Q, ZHU Q. A review on flow energy harvesters based on flapping foils[J]. Journal of Fluids & Structures, 2015, 57: 1-20.

- 2014, 46(2): 174-191.
- [8] NGUYEN H, PHAM H, WANG D. A miniature pneumatic energy generator using Kármán vortex street[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2013, 116: 40-48.
- [9] HOBBS W, HU D. Tree-inspired piezoelectric energy harvesting[J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2012, 28(1): 103-114.
- [10] KARAMI M, FARMER J, INMAN D. Parametrically excited nonlinear piezoelectric compact wind turbine[J]. *Renewable Energy*, 2013, 50(3): 977-987.
- [11] MUTSUDA H, WATANABE R, HIRATA M, et al. Elastic floating unit with piezoelectric device for harvesting ocean wave energy[C]// ASME 2012, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2012: 233-240.
- [12] XIE X, WANG Q, WU N. Energy harvesting from transverse ocean waves by a piezoelectric plate[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2014, 81(81): 41-48.
- [13] TRUYEN L, GOO N. Use of a magnetic force exciter to vibrate a piezocomposite generating element in a small-scale windmill[J]. *Smart Materials & Structures*, 2012, 21(2): 25017-25025.
- [14] YANG Y, SHEN Q, JIN J, et al. Rotational piezoelectric wind energy harvesting using impact-induced resonance[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 053901.
- [15] KAN J, FAN C, WANG S, et al. Study on a piezo-windmill for energy harvesting[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 210-217.
- [16] SONG R, SHAN X, LÜ F, et al. A study of vortex-induced energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever with cylindrical extension[J]. *Ceramics International*, 2015, 41: 768-773.
- [17] DAI H, ABDELKEFI A, YANG Y, et al. Orientation of bluff body for designing efficient energy harvesters from vortex-induced vibrations[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(5): 175-195.
- [18] 阚君武, 唐可洪, 王淑云, 等. 压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 71-75.
- KAN Junwu, TANG Kehong, WANG Shuyun, et al. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(1): 71-75.

作者简介: 王淑云, 女, 1965 年出生, 教授。主要研究方向为工程问题的理论建模、仿真分析及优化。

E-mail: jutwsy@163.com

阚君武(通信作者), 男, 1965 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为压电驱动器、能量回收与自供电技术、精密机械与微小机械。

E-mail: jutkjw@163.com