

涡致振动型风力压电俘能器流场数值模拟与试验*

文 晟 张铁民 杨秀丽 卢玉华 许志林

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 基于涡致振动原理设计了一种风力型压电俘能器,通过串联配置的双绕流圆柱增加进气道内流场的压强波动,以 Helmholtz 共振腔作为尾流区域的风压谐振放大装置,利用 PVDF 压电薄膜直接将湍流引起的持续性压强波动转换为电能。采用计算流体力学数值方法,分析了在不同风速下压电俘能器内部流场的流体动力学行为。数值分析及试验结果表明:在相同风速下,当耦合因子 $L/D=2.2$ 时,双绕流圆柱引起的压强波动最大,可达到单绕流圆柱的 2 倍; Helmholtz 共振腔内气体在振荡流的作用下产生谐振后,腔内气体压强的幅值随风速的增加而增大,但振动频率均相同且为共振腔的固有频率。

关键词: 压电俘能器 涡致振动 流场 数值模拟

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)02-0269-07

引言

压电材料具有压电效应,可直接把环境中的动能(机械能、流体动能等)转换为电能,而且结构简单易于整合,因此利用风能的微型压电俘能器是农业环境中无线传感器网络节点较为理想的能量源。典型的微型风力压电俘能器为风车式^[1-5],其工作原理是利用风力带动叶片旋转,再通过压电材料把叶片旋转的机械能转换为电能输出。但风车式压电俘能器加工及装配工艺较复杂,而且有旋转机构需定期维护,特别是当风扇叶片和风速均减小时,其能量转换效率将大幅度降低^[6]。

流体经过非流线型物体时,在一定条件下会在物体两侧周期性地脱落后旋向相反、排列规则的漩涡即卡门涡街(Karman vortex street)。这种因湍流造成的持续性压强波动可利用压电材料直接转换为电能^[7-9]。本文基于流体的涡致振动原理,利用串联配置的双绕流圆柱增大进气道内流场的压强波动,并使用 Helmholtz 共振腔作为尾流区域的风压谐振放大装置,设计一种风力型压电俘能器。基于计算流体力学软件 Fluent 对进气道及共振腔内流场的流体动力学特性进行分析,根据数值结果制作样机并进行相关试验。

1 压电俘能器的结构

压电俘能器结构如图 1 所示,主要由进气道、双

扰流圆柱及 Helmholtz 共振腔构成,其中 Helmholtz 共振腔的底部覆以 PVDF 压电薄膜,并用后盖及螺钉实现压紧及闭合。当气流从左端流入进气道,在绕流圆柱表面摩擦阻力及压差阻力的作用下,边界层发生分离且在尾流中产生漩涡(图 2),随着漩涡的流动又形成振荡流并产生声波,当声波进入共振腔后引起腔内空气振动,从而激励底部的 PVDF 压电薄膜一起振动并输出电流。

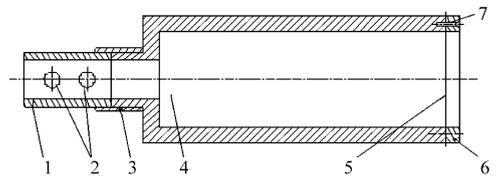


图 1 压电俘能器的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of piezoelectric energy harvester

1. 进气道 2. 双扰流圆柱 3. 套筒 4. Helmholtz 共振腔
5. PVDF 压电薄膜 6. 后盖 7. 紧固螺钉

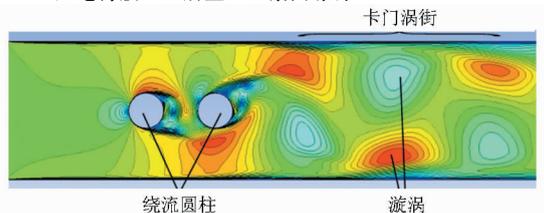


图 2 双圆柱绕流示意图

Fig. 2 Flow around two circular cylinders

2 流场的数学模型及数值模拟

对于研究的风力压电俘能器,在日常风速下形

收稿日期: 2013-09-22 修回日期: 2013-10-28

* 国家自然科学基金资助项目(50677023)

作者简介: 文晟, 讲师, 博士, 主要从事机电系统和压电振动研究, E-mail: vincen_wen@163.com

通讯作者: 张铁民, 教授, 博士生导师, 主要从事智能控制、机电系统控制及自动化研究, E-mail: tm-zhang@163.com

成周期性的漩涡是实现涡致振动的必要条件。由于气流经绕流圆柱阻塞产生漩涡后,在进气道内的流动基本处于湍流状态,流场的分布较为复杂,因此采用计算流体力学中的大涡模拟(Large eddy simulation, LES)方法对湍流运动进行数值模拟^[10]。

2.1 大涡模拟的控制方程

湍流大涡模拟的控制方程为纳维-斯托克斯(N-S)方程^[11],其基本思想是通过滤波方法把湍流运动分解为大尺度和小尺度两部分运动,直接数值模拟大尺度量,小尺度量则通过亚网格尺度模型建立与大尺度量的关系。经过滤波后的大尺度量定义为^[10-11]

$$\bar{\phi}(x) = \int_{D'} \phi(x') G(x, x') dx' \quad (1)$$

式中 D' ——流场计算域 G ——滤波函数

$\bar{\phi}(x)$ —— $\phi(x)$ 经过滤波后的函数

经过过滤后,湍流速度可以分解为低通脉动 \bar{u}_i 和剩余脉动 u_i'' 之和,即

$$u_i = \bar{u}_i + u_i'' \quad (2)$$

其中低通脉动由大涡数值模拟方法解出,为可解尺度脉动,剩余脉动为亚格子尺度脉动。对于不可压缩流体,大涡模拟的控制方程即滤波后的N-S方程为^[12]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中 ρ ——流体密度

u_i, u_j ——流体在 x 及 y 方向的速度分量

μ ——流体动力粘度 p ——压力

σ_{ij} ——由分子粘度决定的应力张量

τ_{ij} ——亚网格应力

上标“—”表示过滤后大尺度量。

根据 Boussinesq 提出的涡粘假设,亚网格应力 τ_{ij} 与滤波后应力张量的速率 \bar{s}_{ij} 的关系表达式为

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_s \bar{s}_{ij} \quad (5)$$

$$\text{其中 } \bar{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中 μ_s ——亚网格涡粘系数

τ_{kk} ——亚网格尺度各向同性的一部分

在计算时,涡粘系数根据 Smagorinsky-Lilly 模型定义为

$$\mu_s = \rho L_s^2 |S| \quad (7)$$

式中 L_s ——网格混合长度

$|S|$ ——过滤后应变速率张量

2.2 数值模型及边界条件

2.2.1 数值模型

为研究压电俘能器内部流场的压强波动,利用 Fluent 软件建立的二维流场计算域如图 3a 所示,压电俘能器各部分的结构尺寸如图 3b 所示,其中 2 个绕流圆柱的直径 D 相同,均为 10 mm。数值计算时,在进气道与 Helmholtz 共振腔内部设置了 2 个监测点 $A(5.5D, 0)$ 及 $B(25.5D, 0)$ 以检测进气道及共振腔内的流体动力学特性。图 3c 为双绕流圆柱有限元网格划分的局部放大图,绕流圆柱表面及进气道的内壁均假设为固壁边界,图 3d 为用于进行对比分析的单绕流圆柱网格划分图。流场计算域的单元尺寸均设置为 0.5 mm,单、双绕流圆柱的流场计算域网格数分别为 71 345 和 71 082。

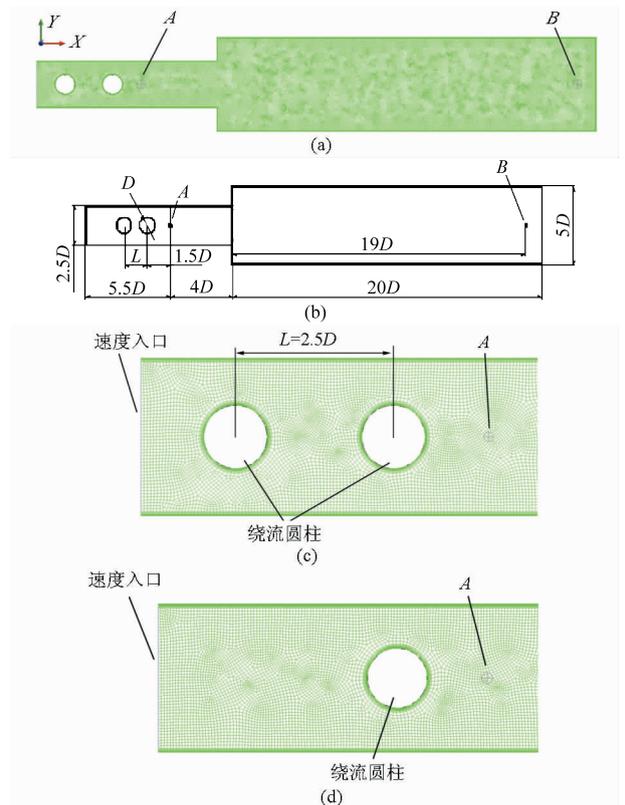


图3 压电俘能器的流场计算域、结构尺寸及网格划分

Fig. 3 Computational domain, structure dimensions and mesh of piezoelectric energy harvester

(a) 流场计算域 (b) 压电俘能器的结构尺寸 (c) 双绕流圆柱的局部网格 (d) 单绕流圆柱的局部网格

2.2.2 边界条件

压电俘能器的流体动力学特性使用 Fluent 进行数值计算,其中双绕流圆柱的耦合因子(L/D)范围设为 1.2~3.0,计算的边界条件如下:

(1) 进气道的入口处设为速度入口,速度范围 U_{in} 为 1~20 m/s ($Re = 685 \sim 13\ 695$) 以模拟自然界的 1~8 级风力,空气密度 ρ 为 1.225 kg/m³,动力粘

度 μ 为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

(2) 整个流场计算域采用 LES 模型, 并使用 Smagorinsky - Lilly 亚网格尺度模型, 压力-速度耦合项采用 SIMPLIEC 算法求解, 动量方程使用二阶迎风格式, 压力方程用二阶精度离散。为准确捕获流场的瞬态动力学行为, 时间步长 Δt 设为漩涡脱落周期 T_s 的 $1/20$ 。

3 数值结果及讨论

3.1 双绕流圆柱的分析

图 4 为一个周期内, 进气道内流场在 4 个典型时刻的涡量等值线图, 在 2 个绕流圆柱后部均出现了漩涡脱落, 在边界层分离区形成的漩涡以一定周期从 2 个绕流圆柱的上下两侧交替脱落, 从而在尾流区形成了较为稳定的涡街。

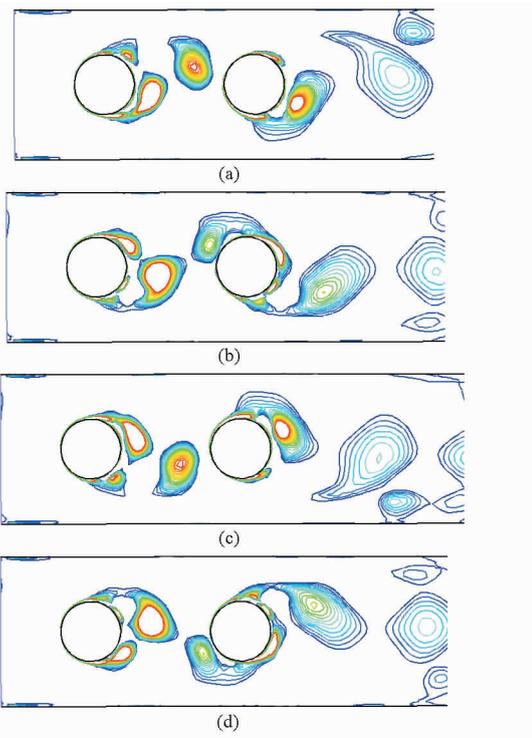


图 4 涡量等值线图

Fig. 4 Instantaneous contours of vorticity magnitude

($U_{in} = 10 \text{ m/s}$, $Re = 6\ 847$, $L/D = 2.5$)

(a) $t = T/4$ (b) $t = T/2$ (c) $t = 3T/4$ (d) $t = T$

绕流圆柱后方监测点 A (图 3b) 的流场静压 p 与 x 方向 (即水平方向) 速度 u_x 随时间的变化曲线如图 5a 所示, 进气道内流场的流线图如图 5b 所示。从图中可知, 静压 p 及 x 向速度均表现为简谐波, 且两者相位相差 $\pi/2$, 显然随着气流漩涡向下游运动的过程中, 已经逐渐延伸并形成了振荡流。

上下交替出现的漩涡会导致进气道内流场压强出现周期性波动, 图 6a 为相同条件下 ($U_{in} = 10 \text{ m/s}$, $Re = 6\ 847$), 在单、双绕流圆柱后同一位置监测点 A

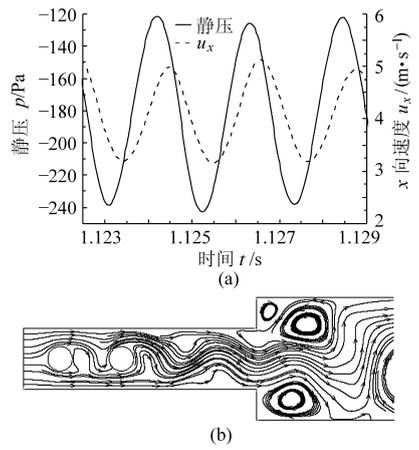


图 5 点 A(5.5D, 0) 处静压及速度的时间历程和流线图
Fig. 5 Time histories of static pressure on point A(5.5D, 0) and streamline chart

的静压-时间曲线。从图中可知, 单、双圆柱后的压强差 Δp ($\Delta p = p_{max} - p_{min}$) 分别为 81.7 Pa 和 125.5 Pa , 双绕流圆柱引起的压强波动是单圆柱的 1.5 倍。对监测点 A 的静压进行快速傅里叶变换, 可分别得到单、双绕流圆柱的声压谱曲线如图 6b 所示, 当入口处风速 $U_{in} = 10 \text{ m/s}$ 时, 单、双绕流圆柱尾流漩涡的脱落频率 f_s 分别为 450 和 460 Hz 。

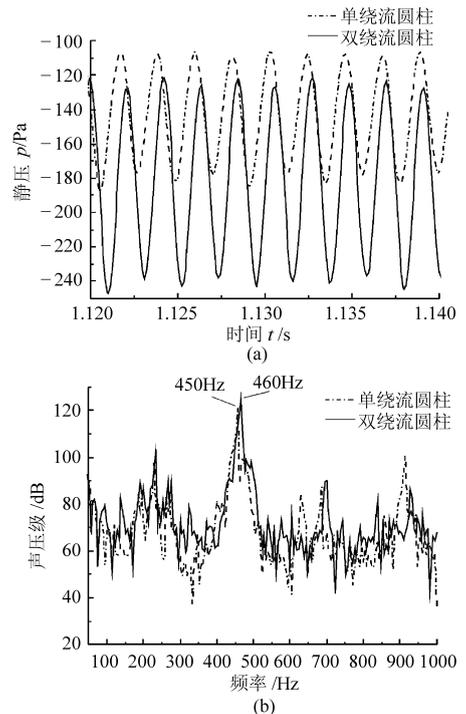


图 6 单、双圆柱的静压时间历程及声压谱曲线
Fig. 6 Time histories of static pressure and sound pressure spectrum of circular cylinders
($U_{in} = 10 \text{ m/s}$, $Re = 6\ 847$, $L/D = 2.5$)

斯特劳哈尔数 St 是一个描述漩涡脱落非定常性的特征参数, 因此可用斯特劳哈尔数 St 来判断数值结果的准确性。由流体力学相关理论, 在有限流道内漩涡脱落频率 f_s 与 St 的关系表达式为^[13]

$$f_s = St \frac{U}{mD} \quad (8)$$

$$\text{其中 } m = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\frac{D}{d} \sqrt{1 - \left(\frac{D}{d}\right)^2} + \arcsin \frac{D}{d} \right] \quad (9)$$

式中 D ——绕流圆柱直径

U ——均匀流的来流速度

m ——圆柱两侧弓形面积与进气道横截面面积之比

d ——进气道入口处直径

国内外学者在试验的基础上,对圆柱绕流中斯特劳哈尔数 St 与雷诺数 Re 的关系进行了大量研究,对于大雷诺数而言,目前较为普遍接受的经验公式为^[14-15]

$$St = 0.2040 + (0.3364 / \sqrt{Re}) \quad (10)$$

由图 6b 可知,利用 Fluent 求得单绕流圆柱的涡脱频率 f 为 450 Hz,利用式 (8) 可求得此时的斯特劳哈尔数 St 为 0.22,与式 (10) 的相对误差为 5.5%。

双绕流圆柱耦合因子 (L/D) 与气流在点 A 处压强差的关系曲线如图 7a 所示,从图中可知两圆柱间距对尾流的压强有较大影响,当 $L/D = 2.2$ 时压强差 Δp 达到最大。图 7b 和 7c 则表明双绕流圆柱尾部流场形态与两圆柱的间距有关,当 $1.2 \leq L/D < 1.8$ 时,上游圆柱无明显的漩涡发放,其边界层分离

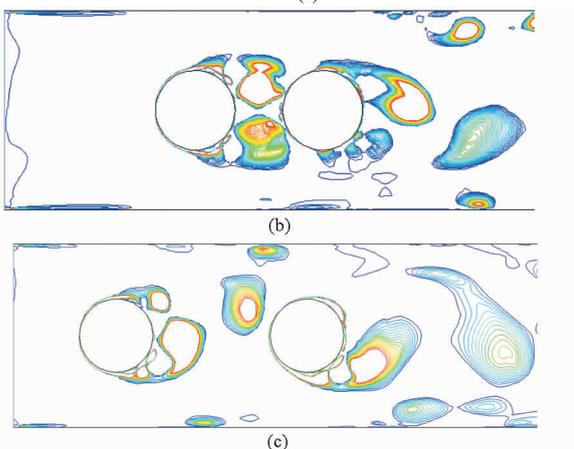
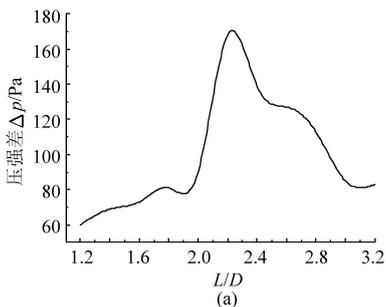


图 7 耦合因子与压强差的关系曲线及量测图
Fig.7 Relationship curves between coupling factor and pressure difference ($U_{in} = 10 \text{ m/s}$, $Re = 6847$)

(a) L/D 与压强差的关系曲线 (b) $1.2 \leq L/D < 1.8$
(c) $1.8 \leq L/D \leq 3$

后直接附着于下游圆柱上;当 $1.8 \leq L/D \leq 3$ 时,上、下游圆柱尾流中均有明显的漩涡产生。

3.2 Helmholtz 共振腔的分析

Helmholtz 共振腔具有较好的声学特性,已被广泛应用于声音增强和噪声控制领域,其结构如图 8a 所示,是由一个空腔和颈部短管构成。Helmholtz 共振腔可等效为弹簧-质量系统^[16],其中颈部空气的体积等效为质量块,共振腔内空气的体积等效为弹簧,如图 8b 所示。共振腔的固有频率取决于其结构参数^[17]

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l'V}} \quad (11)$$

其中 $l' = l + 0.85d'$ $V = \pi R^2 L_1$

式中 c_0 ——声速 S ——短管截面积

l' ——短管有效长度

l ——短管长度 d' ——短管直径

V ——空腔容积 L_1 ——空腔长度

R ——底面圆板半径

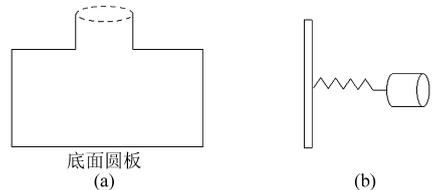


图 8 Helmholtz 共振腔及其等效结构

Fig.8 Helmholtz resonator and equivalent structure

当 Helmholtz 共振腔以频率 f_r 共振时,腔内的气体压强将被谐振放大。本文中共振腔的颈部短管直接与进气道后部相连,以实现圆柱尾流压强波动的放大作用。

图 9 为进气道入口处风速 $U_{in} = 10 \text{ m/s}$ 、绕流圆柱耦合因子 $L/D = 2.5$ 时,压电俘能器在某一时刻流场的压强云图及流线图。当气流从左端入口处流入,在进气道内壁及绕流圆柱的共同作用下产生漩涡,随着漩涡远离圆柱又形成振荡流并产生声波,声波进入 Helmholtz 共振腔后引起腔内空气振动,并在共振腔底部形成了约 1.13 kPa 的负压区。

图 10a 为 Helmholtz 共振腔底部监测点 B (图 3b) 在不同风速下的静压-时间关系曲线及声压谱曲线。在振荡流的冲击作用下,共振腔内的气体压强呈现周期性变化,且共振腔入口处气流压力波动越大则腔内的气体压强变化越明显。图 10b 也表明在不同风速下,当 Helmholtz 共振腔内的气体产生谐振后,气体压强变化的幅值不等但频率相同,均为 280 Hz。根据表 1 中 Helmholtz 共振腔的形状尺寸,利用式 (11) 可计算出共振腔固有频率的理论解为 263 Hz,显然 Helmholtz 共振腔内气体的谐振频率即为共振腔的固有频率。艾伦等^[18]的喷注边棱系统

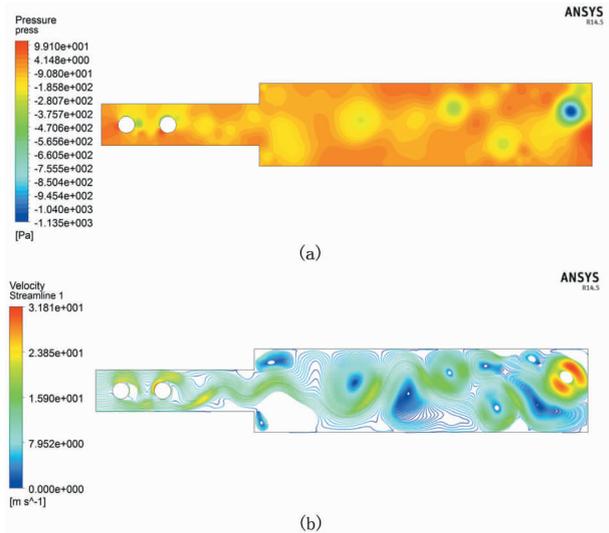


图 9 压电俘能器的压强云图与流线图

Fig. 9 Total pressure contour and streamline of piezoelectric energy harvester

(a) 压强云图 (b) 流线图

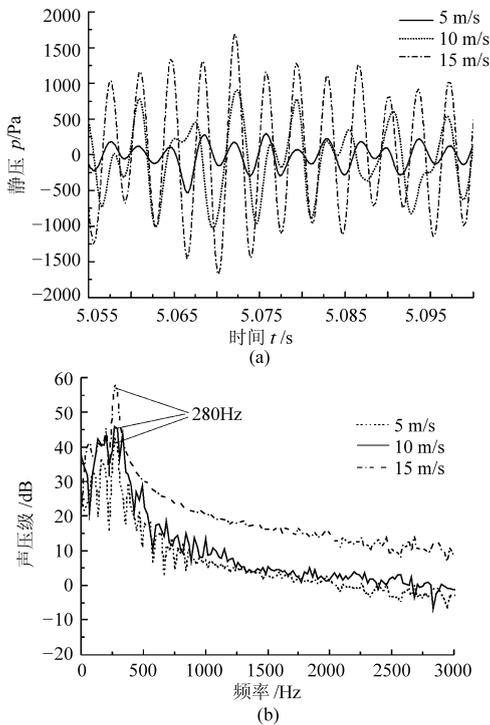


图 10 点 B 的静压时间历程及声压谱曲线

Fig. 10 Time histories of static pressure and sound pressure spectrum on point B

表 1 Helmholtz 共振腔的几何尺寸

Tab. 1 Dimensions of Helmholtz resonator cm

参数	d	l	R	L_1
数值	2.5	3	3	18

共振器试验也清楚描述了类似原理。

4 试验

为测试压电俘能器在不同风速下的振动特性及

发电能力,加工的压电俘能器样机如图 11 所示,其各部分尺寸如图 3b 及表 1 所示,其中两个绕流圆柱的直径 $D = 10 \text{ mm}$,耦合因子 $L/D = 2.2$ 。采用的 PVDF 压电薄膜(锦州科信电子材料有限公司,辽宁锦州)厚度为 $30 \mu\text{m}$,压电常数 $d_{33} = 21 \text{ pC/N}$ 。

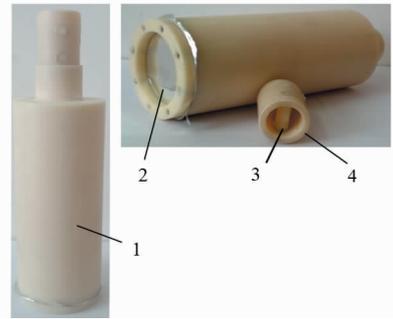


图 11 压电俘能器试验样机

Fig. 11 A photo of experimental setup

1. Helmholtz 共振腔 2. PVDF 压电薄膜 3. 绕流圆柱 4. 进气道

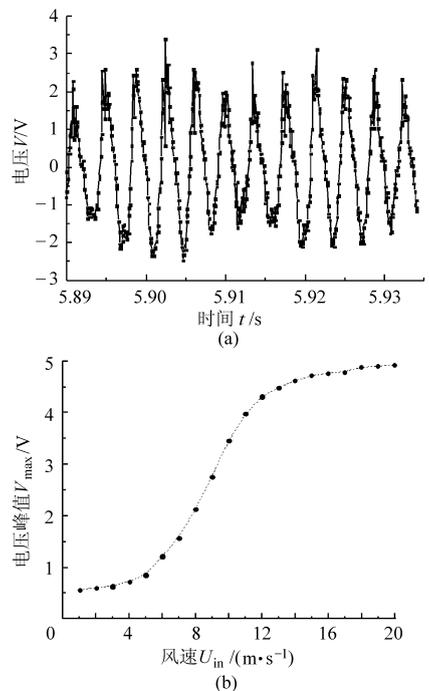


图 12 压电俘能器产生的电压及随风速的变化曲线

Fig. 12 Induced voltage and voltage variation curves with wind speed

试验测试的风速范围为 $0 \sim 20 \text{ m/s}$,利用变频器(HJ02S1)调节风机转速,以模拟自然界中 1 ~ 8 级风力。风速仪(BENETECH, GM8908)量程范围 $0 \sim 30 \text{ m/s}$,精度为 0.1 m/s ,用风速仪在压电俘能器入口处测量 3 次,取平均值作为入口处风速的测量值。试验结果表明,当 Helmholtz 共振腔在气流的冲击振荡作用下发生谐振,底部的 PVDF 压电薄膜可输出较为稳定的电压,其频率与共振腔的固有频率一致。图 12a 即为压电俘能器在 10 m/s 的风速下产生的开路电压波形,此时输出的电压峰值为 3.4 V ,

图 12b 为压电俘能器产生的电压峰值随入口处风速的变化曲线。随着进气道入口处风速的增大, PVDF 压电薄膜输出的电压幅值变大, 当风速为 5 ~ 12 m/s 时, 电压随风速的增加迅速增大。但当风速介于 12 ~ 20 m/s 之间时, 输出的电压幅值随风速增加而增大的幅度减小, 变化曲线逐渐趋于平缓。这是因为受压电薄膜的材料特性所限, 即使内部气流压强持续增大, 但压电薄膜产生的变形有限, 这使得输出的电压无法完全随气压同步增大。

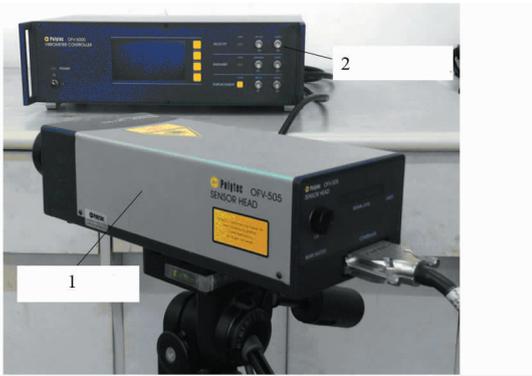


图 13 OFV-505 型激光测振仪

Fig. 13 Type OFV-505 laser doppler vibrometer

1. 激光探头 2. 激光测振仪

Helmholtz 共振腔内部气流的压强变化规律可直接体现在 PVDF 压电薄膜的振动上, 利用激光测振仪 (Polytec OFV-505) 的非接触式测量, 即可得到共振腔底部 PVDF 压电薄膜的振动响应。图 14a 为压电薄膜在不同风速下的振动位移, 图 14b 为对振动位移进行快速傅里叶变换的频谱图。由图可知, 当 Helmholtz 共振腔内的气体在振荡流的作用下产生谐振后, 气体压强的幅值随风速的增大而增大, 但振动频率相同且为共振腔的固有频率, 数值计算的结果与试验较吻合。

5 结论

(1) 基于 Fluent 的数值分析结果显示, 与单绕

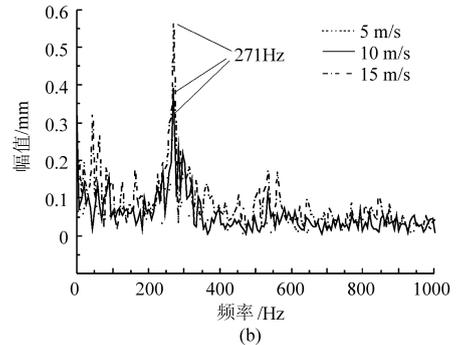
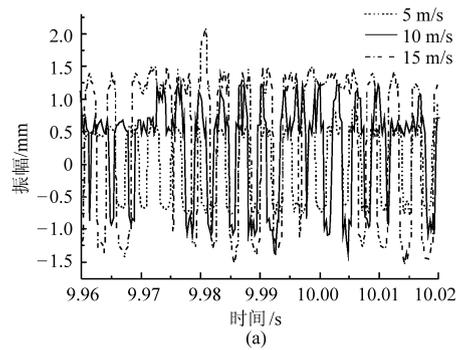


图 14 PVDF 压电薄膜的振幅曲线及频谱图

Fig. 14 Amplitude curve and spectrum of PVDF

流圆柱相比, 串联配置的双绕流圆柱可使流场产生较强的压强波动, 当入口处风速为 10 m/s, 耦合因子 $L/D = 2.2$ 时, 双绕流圆柱后部尾流区域的压强差 Δp 约为单绕流圆柱的 2 倍。

(2) PVDF 压电薄膜产生的电压随风速增加呈现出非线性增大, 对于本文中压电俘能器而言, 较适宜风速为 5 ~ 12 m/s, 此时产生的电压随风速增加而迅速增大, 但当风速超过 12 m/s 后, 因受压电薄膜材料特性所限, 输出电压的幅值随风速增加而增大的幅度减小。

(3) 数值结果及试验均表明, 当 Helmholtz 共振腔内气体在振荡流的作用下产生谐振后, 共振腔内气体的压强波动呈周期性变化, 且气体压强的幅值随风速增加而增大, 但腔内气体的振动频率均相同, 都为共振腔的固有频率。

参 考 文 献

- 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181-185.
Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 181-185. (in Chinese)
- 冯友兵, 张荣标, 沈敏. 面向精确灌溉的无线传感器网络构建[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 56-59.
Feng Youbing, Zhang Rongbiao, Shen Min. Construction of wireless sensor networks for precision irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 56-59. (in Chinese)
- Anastasi G, Conti M, Francesco M D, et al. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey [J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(3): 537-568.
- Roundy S, Wright P K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics [J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(5): 1131-1142.
- Priya S. Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(18): 184101.
- Mitcheson P D, Yeatman E M, Rao G K, et al. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices

- [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2008, 96(9): 1 457 – 1 486.
- 7 Allen J J, Smits A J. Energy harvesting eel[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15(3): 629 – 640.
- 8 Akaydin H D, Elvin N, Andreopoulos Y. Wake of a cylinder: a paradigm for energy harvesting with piezoelectric materials[J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 49(1): 291 – 304.
- 9 Gao X T, Shih W H, Shih W Y. Flow energy harvesting using piezoelectric cantilevers with cylindrical extension[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(3): 1 116 – 1 118.
- 10 Jaber F A, James S. A dynamic similarity model for large eddy simulation of turbulent combustion[J]. *Physics of Fluids*, 1998, 10(7): 1 775 – 1 777.
- 11 郝鹏, 李国栋, 杨兰, 等. 圆柱绕流流场结构的大涡模拟研究[J]. *应用力学学报*, 2012, 29(4): 437 – 443.
Hao Peng, Li Guodong, Yang Lan, et al. Large eddy simulation of the circular cylinder flow in different regimes[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2012, 29(4): 437 – 443. (in Chinese)
- 12 赵宏强, 蒋海华, 谢武装. 基于大涡模拟的旋风分离器内流场数值模拟研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(4): 759 – 763.
Zhao Hongqiang, Jiang Haihua, Xie Wuzhuang. Study of flow field of cyclone separator based on large eddy simulation[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(4): 759 – 763. (in Chinese)
- 13 Miao J J, Hu C C, Chou J H. Response of a vortex flowmeter to impulsive vibrations [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2000, 11(1): 41 – 49.
- 14 Fey U, König M, Eckelmann H. A new Strouhal-Reynolds-number relationship for the circular cylinder in the range $47 < Re < 2 \times 10^5$ [J]. *Physics Fluids*, 1998, 10(7): 1 547 – 1 549.
- 15 Vít T, Ren M, Trávníček Z, et al. The influence of temperature gradient on the Strouhal-Reynolds number relationship for water and air[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 31(7): 751 – 760.
- 16 马大猷. 亥姆霍兹共鸣器[J]. *声学技术*, 2002, 21(1): 2 – 3.
Ma Dayou. Helmholtz resonator[J]. *Technical Acoustics*, 2002, 21(1): 2 – 3. (in Chinese)
- 17 Chanaud R C. Effects of geometry on the resonance frequency of Helmholtz resonators[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 178(3): 337 – 348.
- 18 艾伦·鲍威尔. 风刮过树木为何发出啸声[J]. *声学学报*, 1986, 11(4): 230 – 241.
Alan Powell. Why the wind whistles through the trees[J]. *Acta Acustica*, 1986, 11(4): 230 – 241. (in Chinese)

Numerical Simulation and Experiment of a Wind Piezoelectric Energy Harvester Based on Vortex-induced Vibrations

Wen Sheng Zhang Tiemin Yang Xiuli Lu Yuhua Xu Zhilin

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A wind piezoelectric energy harvester based on vortex-induced vibrations was studied. The tandem arrangement of two circular cylinders was designed to enhance the amplitude of the pressure fluctuation. The Helmholtz resonator was used for magnifying the wind pressure in the wake region. The flow energy was converted into electrical energy by piezoelectric conversion with oscillation of a PVDF film. The fluid dynamics behaviors of the internal flow field subjected to different wind speeds were analyzed using computational fluid dynamics (CFD) numerical method. Numerical analysis and experimental results showed that the pressure fluctuation in the case of two circular cylinders could reach up to nearly 2 times as that of a single circular cylinder, when the coupling factor $L/D = 2.2$ and subjected to the same wind speed. As the gas in the cavity induced by the oscillatory flow, the gas pressure increased with the wind speed while the vibration frequency kept the same with the natural frequency of the resonator.

Key words: Piezoelectric energy harvester Vortex-induced vibrations Flow field Numerical simulation