

基于旋转磁力-风致振动的混合式压电振子发电性能

闫晓东^{1,2,3} 周公博^{1,2,3*} 周坪^{1,2,3} 韩链锋^{1,2,3} 李庆^{1,2,3} 曹爽^{1,2,3}

1. 中国矿业大学机电工程学院, 徐州, 221116

2. 高端矿山装备国家级重点实验室(培育建设点), 徐州, 221116

3. 智能采矿装备技术全国重点实验室, 徐州, 221116

摘要:针对传统单一风致振动式压电振子能量收集效率低的问题,提出了一种基于旋转磁力-风致振动的混合式压电振子。以井下综采工作面的风能为研究背景,设计了混合式压电振子模型,建立磁力耦合模型,分析了不同磁矩时压电振子的磁力变化特性;对所设计压电振子的流场特性进行了仿真分析;最后通过实验对压电振子的发电性能进行了验证。研究表明:所设计压电振子的整体发电功率随着直径比的增大而增大,且存在合适的磁矩和长径比值使得混合式压电振子的发电性能达到最佳,当风速 $v=3.5\text{ m/s}$ 时,最大发电功率达 0.72 mW 以上;与单一风致振动式压电振子相比,提出的旋转磁力-风致振动混合式压电振子的发电功率提高了 166.7% 以上。

关键词:压电振子;风致振动;旋转磁力;磁矩;长径比;发电性能

中图分类号: TN384; TN712

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Power Generation Performance of Hybrid Piezoelectric Vibrator Based on Rotational Magnetic Force-wind Induced Vibrations

YAN Xiaodong^{1,2,3} ZHOU Gongbo^{1,2,3*} ZHOU Ping^{1,2,3} HAN Lianfeng^{1,2,3}

LI Qing^{1,2,3} CAO Shuang^{1,2,3}

1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116

2. State Key Laboratory of High and Mining Equipment (Cultivation and Construction Site), Xuzhou, Jiangsu, 221116

3. State Key Laboratory of Intelligent Mining Equipment Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116

Abstract: Aiming at the problems of low energy harvesting efficiency in traditional single wind-induced vibration piezoelectric vibrator, a hybrid piezoelectric vibrator was proposed based on rotational magnetic force and wind-induced vibrations. With the wind energy from an underground mechanized mining face as the research backdrop, a hybrid piezoelectric vibrator model was conceived. A magnetic coupling model was formulated to elucidate the magnetic variation traits of the piezoelectric vibrator across various magnetic moments. A simulation was conducted to scrutinize the flow field characteristics of the designed piezoelectric vibrator. Lastly, experimental validation was executed to substantiate the power generation performance of the piezoelectric vibrator. The results indicate that the overall power generation of the designed piezoelectric vibrator increases with the diameter ratio, and there is an optimal magnetic moment and aspect ratio for achieving the best power generation performance of the hybrid piezoelectric vibrator. When the wind speed $v=3.5\text{ m/s}$, the maximum power generation reaches over 0.72 mW . Compared with a single wind-induced vibration piezoelectric vibrator, the proposed hybrid piezoelectric vibrator with rotating magnetic force and wind-induced vibrations increases the power generation by more than 166.7% .

Key words: piezoelectric vibrator; wind-induced vibration; rotational magnetic force; magnetic moment; aspect ratio; power generation performance

收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 中央高校青年教师科研创新能力支持项目(ZYGXQNJSKYCXNLZCXM-E2P); 中国博士后科学基金(2025M771383); 江苏省杰出青年基金(BK20180033); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

0 引言

近年来,无线传感器网络凭借其部署灵活、自供能等优点被广泛应用于环境监测、机电装备状

态监测等领域,然而,传感器节点通常依靠电池供电,存在寿命短、定期更换困难等问题^[1]。环境能量收集技术是将环境中的可用能量转换为电能的技术,可解决节点能量受限的问题^[2]。常见的环境能量有风能、振动能、太阳能等。其中,风能作为一种清洁的可再生能源,在环境中广泛存在,具有可持续收集、能量丰富等优点,已成为研究热点^[3]。

目前,风能收集方法主要有两类:第一类是涡轮风力发电机,即利用旋转叶片将风能转换为机械动能,然后通过发电机将其转化为电能,该方式的启动风速相对较高,难以在低风速环境中应用;第二类是风致振动式能量收集器,主要是基于涡激振动、驰振、颤振等^[4]流固耦合机理将风能转化为振动能,然后再利用压电式、电磁式等^[5]能量收集装置进行转换,其中,压电振子具有能量转换效率高、结构简单等优点,尤其适用于节点供能,具有良好的应用前景^[6]。

现有针对风致振动式压电振子的研究主要聚焦于对单钝体、阵列钝体以及双钝体的结构、方向等性能参数进行优化^[7]。在单钝体方面,练继建等^[8]分析了风致振动压电振子在不同来流角度下的振动响应,为振子截面优化研究提供了重要依据;WANG等^[9-11]研究了钝体的倾斜角度、表面凸起形状和出口类型对风致振动压电振子发电性能的影响,并得到了钝体结构与发电性能之间的关系;SONG等^[12]运用机器学习方法对风致振动压电振子的发电性能进行了预测。在阵列钝体方面,于慧慧等^[13]研究了不同阵型风致振动阵列式压电振子的发电性能,结果表明长方阵型的发电性能最优;HOBBS^[14]将4个风致振动压电振子进行串联,发现涡流脱落频率与固有频率比值为1.6时发电性能较好。在双钝体方面,WANG等^[15]提出了一种中间固定的双钝体型风致振动压电振子,该振子具有两种弯曲模式,最大发电功率可达7.812 mW;TANG等^[16]研究了具有干涉圆柱体的风致振动压电振子,结果表明当两圆柱体的长径比为0.6时,发电性能最佳;KAN等^[17]提出了一种增强型风致压电振子,通过在下游放置固定的菱形挡板实现了涡激振动和驰振的耦合。

综上所述,尽管现有基于风致振动能量收集的研究已取得一定进展,研究人员也对压电振子的形状、结构、数量等性能参数进行了优化,但这类研究大多是针对单一风致振动能量进行收集,存在能量收集效率低的问题。为此,本文提出一

种基于旋转磁力-风致振动的混合式压电振子模型,对所设计压电振子的磁力和流场特性进行仿真分析,最后通过实验对压电振子的发电性能进行验证,得出了磁矩、直径比和长径比对其发电性能的影响规律。

1 基于旋转磁力-风致振动的混合式压电振子模型

1.1 场景分析

综采工作面是井工煤矿生产的源头,由于综采工作面的环境十分恶劣,行人空间狭小,导致用于综采工作面环境/装备监测的大规模无线传感器节点电池无法被及时更换,因此,亟需研究适应综采工作面环境/装备监测无线传感器节点的能量收集方法。实际上,为了防止煤矿开采过程中产生一氧化碳、瓦斯等有害气体,《煤矿安全规程》规定了煤矿开采时不同区域的通风标准,如表1所示,其中,综采工作面的平均风速为3.5 m/s。基于此,本文以综采工作面风能为研究背景,以此风速为依据,设计基于风能的混合式能量收集方法。

表1 某矿实际风速测试结果

Tab.1 Actual wind speed test results at a Mine

测试风速地点	平均风速	备注
大巷	2.0 m/s	
副井井口	2.5 m/s	
主运输巷道	1.8 m/s	风管开口附近
综采工作面	3.5 m/s	10个点的平均值

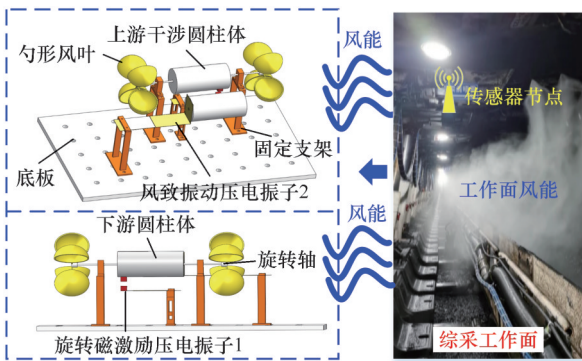
1.2 模型设计

基于上述分析,设计了具有干涉圆柱体的旋转磁力-风致振动混合式压电振子,主要包括上游旋转磁力能量收集模块和下游风致振动能量收集模块,如图1a所示。旋转磁力能量收集模块包括上游干涉圆柱体、勺形风叶、旋转轴、轴承、旋转轴固定支架、激励磁铁、压电振子、磁铁质量块、压电振子1固定支架。其中,上游干涉圆柱体中心与旋转轴通过贯穿的方式固定,旋转轴与轴承配合并固定在支架上;在旋转轴自由端设置了两组用于收集风能的勺形风叶;在上游干涉圆柱体的一侧布置了激励磁铁,并在激励磁铁正下方距离为 d 的位置处布置了自由端带有磁铁质量块的悬臂梁式压电振子1,用于收集柱体旋转时激励磁铁对磁铁质量块产生的周期性磁力能。风致振动能量收集模块包括下游圆柱体、压电振子2、固定支架。其中,压电振子2与固定支架配合,下游圆柱体固定在压电振子2的自由端,用于将风能转换

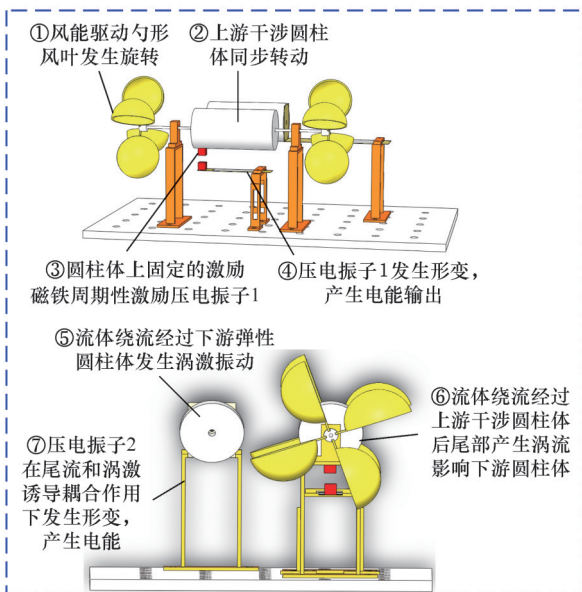
为振动能,并与上游干涉圆柱体的轴线保持水平,两者的间距 L 可调,以实现最佳间距下的风致振动能量收集。

能量收集原理如图1b所示。具体为:当风能绕流至勺形风叶和上游干涉圆柱体区域时,一方面,勺形风叶会发生旋转运动,从而带动旋转轴上的干涉圆柱体同步旋转,此时,上游干涉圆柱体上的磁铁会周期性地激励自由端固定有磁铁质量块的压电振子1,使其发生形变,从而产生电能;另一方面,当流体绕流至上游干涉圆柱体时,会产生交替的尾流旋涡干扰下游圆柱体,从而影响下游圆柱体的动力响应,进一步影响压电振子2的发电性能,同时,下游圆柱体在满足一定条件时自身也会在流体的作用下发生涡激振动,从而引起压电振子2发生形变并产生电能。因此,所设计的混合式压电振子可同时对旋转磁力和风致振动能量进行收集。

由上述能量收集原理可知,风速大小会对混



(a) 混合式压电振子模型



(b) 混合式压电振子能量收集原理

图1 旋转磁力-风致振动混合的压电振子模型

Fig.1 Hybrid piezoelectric vibrator model

合式压电振子的整体发电性能产生影响,而磁矩大小会影响压电振子1的发电性能,上游与下游圆柱体的几何尺寸和间距大小等因素则会影响压电振子2的发电性能。为此,下文将通过仿真和实验的方法研究不同条件下所提出混合式压电振子的发电性能。

此外,上游干涉圆柱体和下游圆柱体平行布置,且两者的间距可调,下游圆柱体固定在悬臂梁式压电振子2的末端。其中,勺形风叶直径为58 mm,轴径为3 mm,上游干涉圆柱体直径为50 mm,下游圆柱体直径为30~50 mm,长度均为100 mm,其余关键参数见表2。

表2 模型参数

Tab.2 Model parameters

参数	基板	PZT-5H	磁铁	质量块
弹性模量/GPa	110	60.6		
密度/(kg·m ⁻³)	8300	7500	7500	7500
压电振子1尺寸/mm	长×宽×厚 20×20×0.2	60×20×0.2	10×10×5	10×10×40
压电振子2尺寸/mm	长×宽×厚 40×40×0.2	60×40×0.2		

2 仿真分析

2.1 磁力仿真分析

压电振子1的发电性能主要取决于压电悬臂梁的受力情况,因此,建立图2所示的基于笛卡儿坐标系的磁耦合模型,分析压电振子在振动方向上磁力的变化情况。

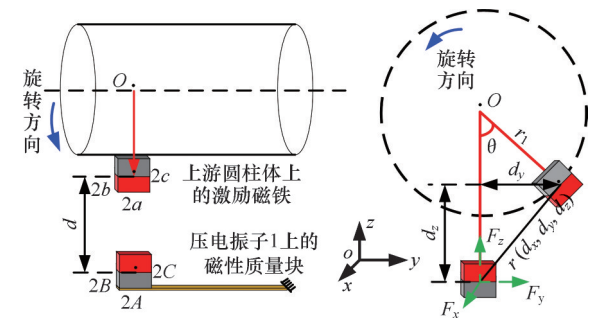


图2 磁力耦合模型

Fig.2 Magnetic coupling model

基于上述模型,激励磁铁和磁性质量块之间的磁相互作用力可以表示为^[18]

$$F = \frac{JJ'}{4\pi\tau} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 (-1)^{i+j+k+l+p+q} \phi(u, v, w, r) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= d_x + (-1)^j A - (-1)^i a \\ v &= d_y + (-1)^j B - (-1)^i b \\ w &= d_z + (-1)^j C - (-1)^i c \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: J, J' 为激励磁铁和磁性质量块的磁化强度; τ 为磁导

率; ϕ 为磁铁的尺寸函数; u, v, w 分别对应两个磁铁之间的距离; 参数 i, j, k, l, p, q 等于 0 或者 1; d_x, d_y, d_z 为两磁铁在笛卡儿坐标系三轴上的间距。

结合图 2 中两磁铁在笛卡儿坐标系上的投影, 假设转盘的旋转中心为点 O , r_1 和 L 分别表示激励磁铁和磁性质量块中心点到旋转中心 O 的距离; θ 为两磁铁与旋转中心 O 之间的夹角, 则两磁铁在三轴上的间距可以表示为

$$\left. \begin{aligned} d_x &= 0 \\ d_y &= r_1 \sin \theta \\ d_z &= L - r_1 \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

进一步, 两磁铁之间的中心距可表示为

$$r = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可进一步得出压电振子在振动方向上的磁相互作用力, 表示为

$$\phi_y = \frac{(u^2 - w^2)}{2} \ln(r - u) + uv \ln(r - v) + vw \arctan\left(\frac{uv}{wr}\right) + \frac{1}{2} ur \quad (5)$$

基于上述磁力模型, 通过数值模拟的方法分析压电振子在不同磁矩下振动方向上的受力情况, 如图 3 所示, 可以看出, 每个旋转周期内的激励方向基本不变, 并且磁力幅值随着磁矩的增大而降低。

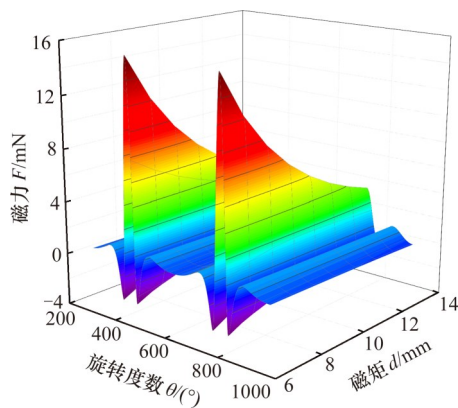


图 3 不同磁矩时压电振子在振动方向的磁力

Fig.3 Magnetic force in vibration direction of piezoelectric vibrator under different magnetic moments

2.2 流场仿真分析

本文通过 COMSOL 6.0 仿真软件对不同工况下的流场特性进行分析。图 4 所示为流场域, 假设上游干涉圆柱体和下游圆柱体与流体域上下边界的距离均为 $W/2$, 直径大小分别为 D_1 和 D_2 ; 流体域的宽度为 W , 且左下角为原点, 入口和出口分别设置在左右两侧; 上游干涉圆柱体与入口处、下游圆柱体之间的距离分别设置为 D 和 L 。其中, L 和 D_2 为变量, 定义 L/D_1 为长径比, D_2/D_1 为直径比。显然, 长径比和直径比的大小均会影

响下游圆柱体周围的气动特性。因此, 下文将通过改变上述两个变量来研究尾流诱导作用下圆柱体的振动特性。其中, 长径比 L/D_1 的范围为 $[2, 9]$, 变化步长为 1; 直径比 D_2/D_1 的范围为 $[0.6, 1]$, 变化步长为 0.1。

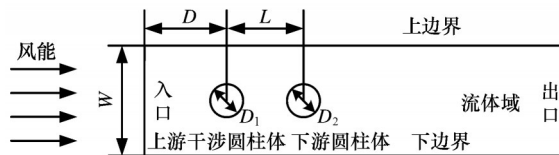


图 4 流场参数示意图

Fig.4 Schematic diagram of flow field parameters

2.2.1 不同长径比仿真分析

设置入口的风速大小为 3.5 m/s, 模拟 8 种不同长径比 L/D_1 时流场的分布情况, 如图 5 所示, 可以看出, 当 L/D_1 较小时, 卡门涡街效应仅出现在下游圆柱体的尾部, 并且上下游圆柱体间的流速几乎为零。此时, 下游圆柱体的运动主要来自于上游干涉圆柱体的尾流诱导激发, 而其自身所产生的涡激振动很小。换言之, 上游干涉圆柱体的存在会抑制下游圆柱体的运动。当长径比继续增加时, 上游干涉圆柱体的抑制作用将逐渐消失, 卡门涡街效应出现在两圆柱体边界的尾部。此时下游圆柱体的运动来自于自身的涡激诱导作用和上游干涉圆柱体对其产生的尾流诱导作用, 所以其升力系数幅值将在两种激励方式耦合作用下被进一步放大。

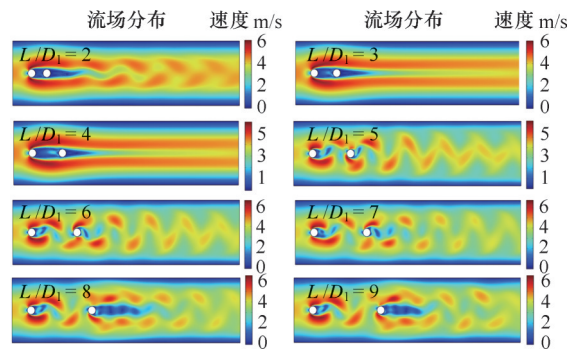


图 5 不同长径比下的流场

Fig.5 Flow field under different length-diameter ratios

由于压电振子的输出功率与升力系数的幅值正相关^[19], 所以分析了不同长径比 L/D_1 时下游圆柱体边界处升力系数的幅值变化情况, 如图 6 所示, 可以看出, 升力幅值的大小随着长径比的增大呈现先增大后减小的趋势。同时, 结合图 5 可知, 当 $L/D_1 \leq 4$ 时, 下游圆柱体的运动被上游干涉圆柱体所抑制; 当 $L/D_1 > 4$ 时, 在上游干涉圆柱体的尾流激励和自身涡激振动耦合作用下, 升力系数幅值出现突增, 并且在 $L/D_1 = 6$ 时出现最大值; 当

$L/D_1 > 6$ 时,由于上游圆柱体对下游圆柱体的干涉作用逐渐减弱,所以升力系数幅值不断减小。因此,通过改变长径比可以改变下游圆柱体的升力系数幅值大小,且存在最佳长径比使得幅值最大。

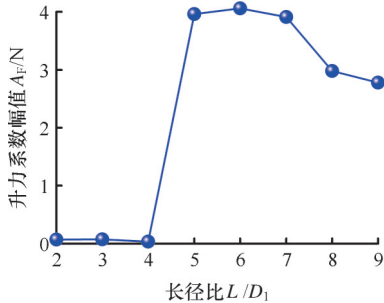


图6 不同长径比下升力系数幅值的变化情况

Fig.6 Variation of lift coefficient amplitude under different length-diameter ratios

2.2.2 不同直径比仿真分析

在最佳长径比条件下,不同直径比时流场的分布情况如图7所示,不同下游圆柱直径时升力系数幅值的变化趋势如图8所示,入口处风速设置为3.5 m/s。由图7和图8可以看出,不同直径比时流场的最大风速变化较小,但升力系数幅值的大小差异较明显,并且随着直径比的减小,下游圆柱体的升力系数幅值也不断减小,即压电振子越难产生大幅度的振动。因此,在实际应用中,需选取合适的直径比,以提高发电效率。

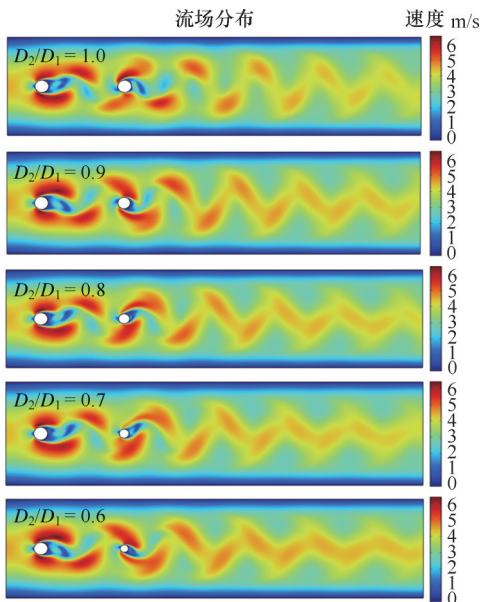


图7 不同直径比下的流场示意图

Fig.7 Flow field with different diameter ratios

3 实验结果与分析

3.1 实验设置

风洞模拟系统如图9a所示,风洞主要由入口

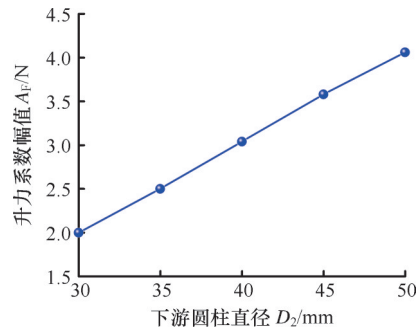


图8 不同直径下升力系数幅值的变化情况

Fig.8 Variation of lift coefficient amplitude with different diameters

段、稳流段、实验段和出口段组成。其中,实验段用于安装所设计的混合式压电振子,并通过采集仪采集风速和输出电压数据。图9b展示了压电振子原型,它通过刚性支架固定在风洞的实验段,上下游圆柱体串联布置,均采用硬质泡沫材料。在实验过程中,首先对系统风速进行调节,具体为:在380 V三相交流电机的驱动下,通过变频器(EV4300)调节电源主频来控制风机(SF5-2)的转速。同时,采用风速仪(UT363S)获取实际风速与调频器频率的关系,从而实现风洞模拟系统不同风速的调节。然后,利用示波器(TBS1102)对压电振子输出电压进行显示,并通过数据采集仪(DH5908)进行采集。由于压电振子收集到的电能为交流信号,故设计了图9c所示的能量测试电路。先通过全桥整流器进行整流,然后利用滤波电容来稳定输出电压。同时,考虑到数据采集仪DH5908的量程为 $[-5 V, 5 V]$,设计了相应的分压电路。其中,分压电阻阻值分别为1 M Ω 和20 M Ω ,即电压比为1:20。在此基础上,对输出电压进行采集,并保存至上位机。

采用电容充电的方法分析发电功率,实验所用充电电容的额定电压为35 V,电容量 C 大小为220 μF 。根据电容充电理论,发电功率可表示为

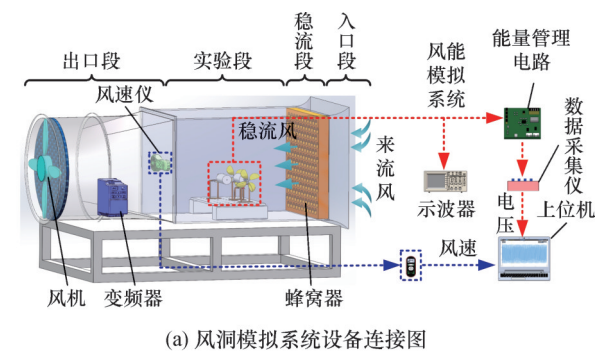
$$P_h = 0.5C(U_2^2 - U_1^2)/(t_2 - t_1) \quad (6)$$

式中: U_1 、 U_2 分别为起始和终止电压值; t_1 、 t_2 为起始和终止充电时间。

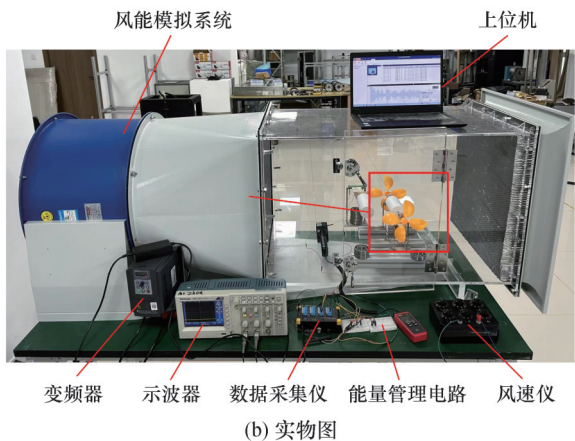
在配置好实验平台后,为了验证所设计混合式压电振子的发电性能,分别比较风速 $v=3.5$ m/s时不同磁矩($d=5, 8, 10, 13, 15, 18$ mm)、长径比($L/D_1=1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0$)、直径比($D_2/D_1=0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$)条件下的发电性能。

3.2 不同磁矩对压电振子发电性能的影响

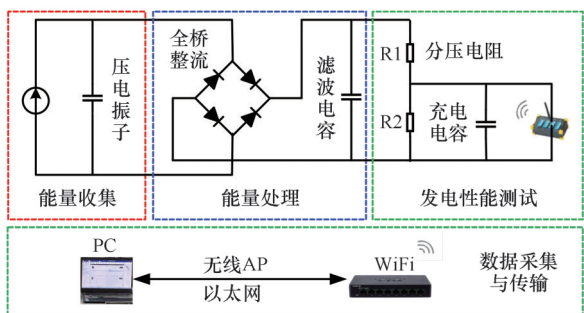
不同磁矩时压电振子的发电电压变化情况如图10a所示,可以看出,当磁矩 d 由18 mm减小至



(a) 风洞模拟系统设备连接图



(b) 实物图



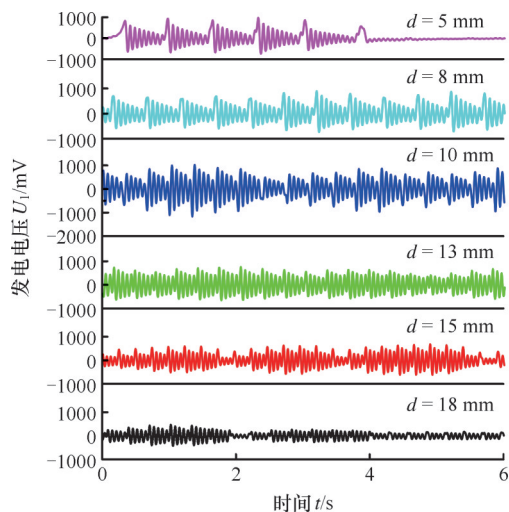
(c) 能量测试电路

图9 风能收集实验平台

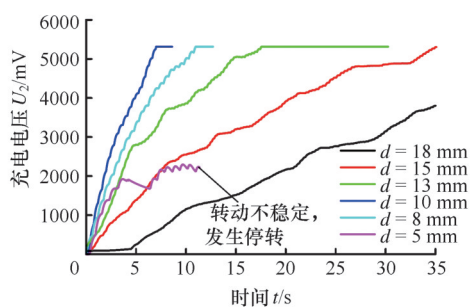
Fig.9 Wind energy harvesting device experimental platform

5 mm时,发电电压的幅值由477 mV上升至1003 mV左右。实际上,由仿真结果可知,当磁矩减小后,磁铁间的作用力增大,这使得压电振子的振动幅值增大。然而,对于本文所设计的旋转磁激励式压电振子,由于节点服役环境中的风速较小($v=3.5\text{ m/s}$),而过小的磁矩($d\leq 5\text{ mm}$)会使得磁铁间的作用力过大,导致系统没有足够的能量越过势垒,在这种情况下,勺形叶片的旋转速度不再稳定,即激励频率降低,进一步使得发电电压的频率降低。

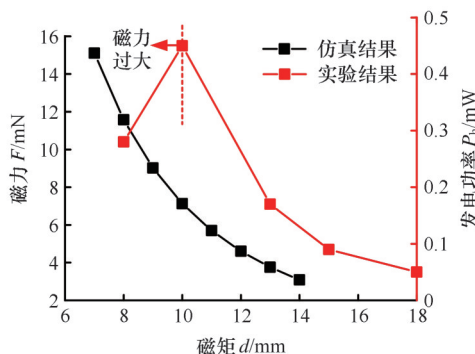
图10b展示了不同磁矩时压电振子的充电效率情况,可以看出,当磁矩由18 mm减小至10 mm时,充电效率明显得到了提高,且发电功率由0.05 mW提高至0.45 mW。结合图10c可知,



(a) 发电电压



(b) 充电效率



(c) 仿真和实验结果对比分析

图10 不同磁矩d时的发电性能

Fig.10 Power generation performance at different magnetic moments d

实验发电功率和仿真磁力分析结果变化趋势一致,进一步验证了实验结果的准确性。究其原因,主要是随着磁矩的减小,磁力不断增大,导致压电振子的振幅变大,从而使得其发电功率增加。由此可知,在一定磁矩范围内,磁矩的减小会提高压电振子的发电性能。然而,当磁矩继续减小,可以看出,充电效率不升反降,且当 $d=5\text{ mm}$ 时,充电趋势不再稳定。究其原因,主要是当磁矩过小时,磁铁间的作用力过大,导致勺形叶片旋转速度变慢,磁铁激励力的频率降低,从而使得发电性能大幅降低。因此,在实际应用过程中,需要选择

合理的磁矩,避免过小的磁矩导致能量收集效率降低。

3.3 不同长径比对压电振子发电性能的影响

在上述研究的基础上,进一步分析所设计具有干涉圆柱体的风致振动压电振子的发电性能,如图 11 所示,可以看出,随着长径比 L/D_1 的不断增大,发电电压先缓慢上升,然后出现突增,最后下降,并均表现出涡激振动特性。这说明长径比对发电性能有明显的影响,且存在最佳长径比使得压电振子的发电电压整体达到最大。这与仿真结果变化趋势一致,说明了实验结果的准确性。

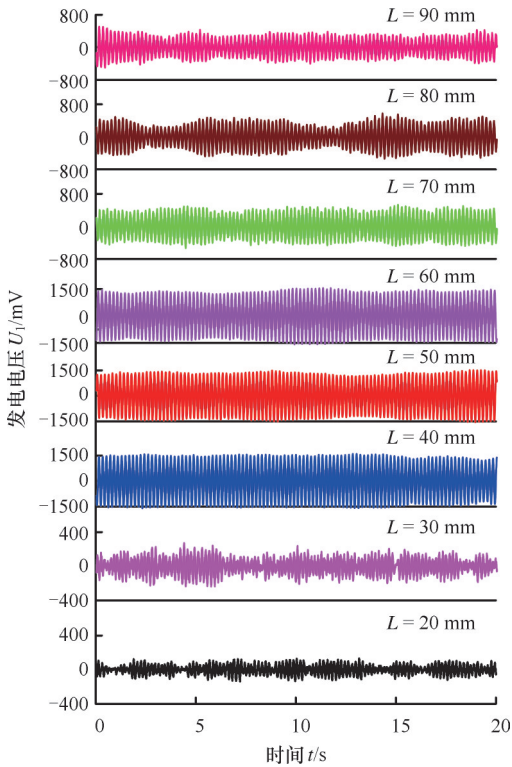
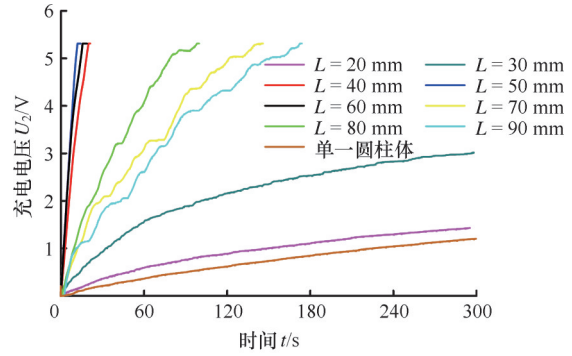
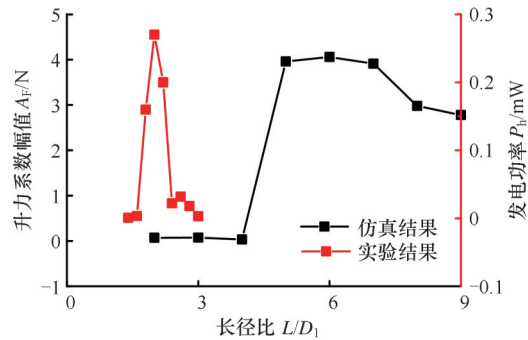


图 11 不同长径比 L/D_1 时的发电电压变化情况
Fig.11 Variation of generation voltage at different aspect ratios L/D_1

图 12a 所示为不同长径比时充电效率的变化情况。结合图 12b 可知,实验发电功率与发电电压变化类似,均与仿真升力系数幅值结果的变化趋势一致,充电效率先缓慢上升,然后出现突增,最后呈现下降的趋势,这进一步验证了实验结果的准确性。表 3 所示为不同长径比时的发电功率,当 L 处于 20~30 mm 之间时,有无干涉圆柱体压电振子的动态响应接近。当 L 增大至 40~60 mm 之间时,发电功率最大,约为 0.27 mW。在相同条件下,与无干涉圆柱体的传统装置相比,发电功率提高了 539%。当继续增大 L 至 70~90 mm 时,发电功率呈下降趋势。这进一步验证了在合适的长径比条件下,上游干涉圆柱体的尾流效应



(a) 不同长径比 L/D_1 时的充电效率变化情况



(b) 仿真和实验结果对比分析

图 12 不同长径比 L/D_1 时的充电效率

Fig.12 Charging efficiency at different aspect ratios L/D_1

表 3 不同长径比时的发电功率

Tab. 3 Generation power under different aspect ratios

长径比 L/D_1	发电功率/mW	长径比 L/D_1	发电功率/mW
1.4	0.0007	2.4	0.0220
1.6	0.0033	2.6	0.0320
1.8	0.1600	2.8	0.0180
2.0	0.2700	3.0	0.0030
2.2	0.2000	单一圆柱体	0.0005

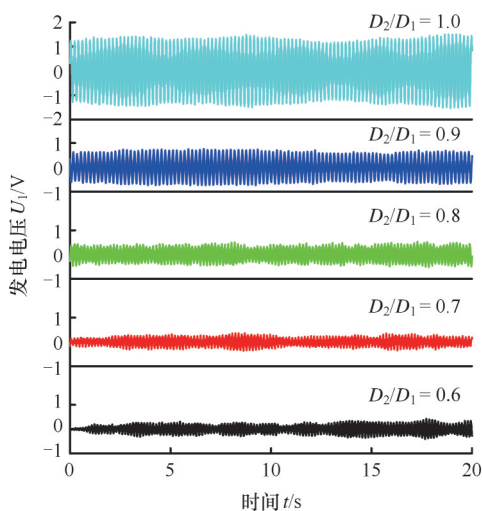
可提高下游压电振子的发电性能,从而实现能量收集的最大化,这一结论可为实际压电振子的布置提供参考。

3.4 不同直径比对压电振子发电性能的影响

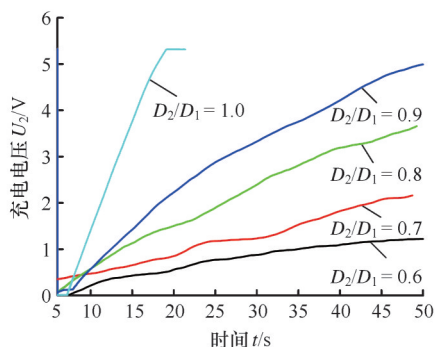
图 13a 所示为最佳长径比条件下,不同直径比 D_2/D_1 对具有干涉圆柱体风致振动式压电振子发电性能的影响,可以看出,随着直径比的不断减小,压电振子的发电电压整体呈不断下降的趋势。这与仿真结果中升力系数幅值的变化趋势一致,验证了实验结果的准确性。

图 13b 所示为不同直径比 D_2/D_1 时,具有干涉圆柱体风致振动式压电振子的充电效率变化。与发电电压变化趋势类似,随着直径比的减小,充电效率不断下降,发电功率由 0.27 mW 降至 0.004 mW。究其原因,主要是因为随着直径比的减小,升力系数幅值不断减小,导致压电振子的振动幅

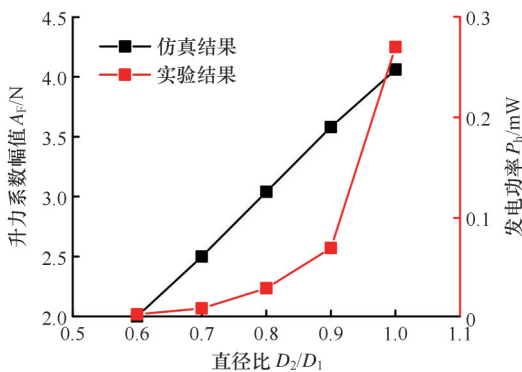
值减小,从而使得其发电性能进一步降低。结合图13c可知,实验发电功率和仿真升力系数幅值结果变化趋势一致,说明了实验结果的准确性。同时进一步证明了直径比的大小会影响压电振子的发电性能,并且较小的直径比会导致下游圆柱因流体诱发的振动受到抑制,从而降低压电振子的发电性能,这一现象可为实际应用中压电振子的尺寸设计提供参考。



(a) 发电电压



(b) 充电效率



(c) 仿真和实验结果对比分析

图13 不同直径比 D_2/D_1 时具有干涉圆柱体压电振子的发电性能

Fig.13 Power generation performance of cylindrical piezoelectric vibrator with interference at different diameter ratios D_2/D_1

3.5 不同方法的性能对比分析

为了更加直观地说明所提出方法的优越性,表4给出了不同方法下压电振子的最佳发电功率。由表4可以看出,当风速区间为1.5~4.5 m/s时,所设计具有干涉圆柱体的旋转磁力-风致振动混合式压电振子的发电性能最优,最大发电功率可达0.72 mW。此外,与有钝体和无钝体的单一风致振动式压电振子相比,所设计的混合式压电振子的发电功率分别提高了1439%和166.7%以上,这进一步证明了所提出方法的优越性。

表4 不同方法的发电性能对比

Tab.4 Comparison of power generation performance of different methods

方法	动力学现象	风速/($m \cdot s^{-1}$)	最大输出功率/(mW)
文献[20]	弛振	4.2	0.0072
文献[21]	涡激振动	1.6	0.2100
无钝体的单一风致振动式	涡激振动	3.5	0.0005
有钝体的单一风致振动式	涡激振动	3.5	0.2700
旋转磁力-风致振动混合式	磁致振动+涡激振动	3.5	0.7200

4 结论

1)当磁矩 $d \geq 10\text{mm}$ 时,压电振子的发电电压随着磁矩的减小而增大;当磁矩 $d < 10\text{mm}$ 时,磁力过大导致激励力的频率降低,从而使得压电振子的发电性能降低,这说明了在实际应用过程中,需要选择合理的磁矩,避免过小的磁矩导致能量收集效率降低。

2)所设计压电振子的整体发电功率随着直径比的增大而增大,并且存在合适的磁矩和长径比值使得混合式压电振子的发电性能达到最佳。

3)与单一风致振动式压电振子相比,所提出的旋转磁力-风致振动混合式压电振子的发电性能表现得更好,当风速 $v = 3.5\text{m/s}$ 时,最大发电功率达0.72 mW以上,提高了166.7%以上。

参考文献:

[1] 亓有超,赵俊青,张弛.微纳振动能量收集器研究现状与展望[J].机械工程学报,2020,56(13):1-15.
 QI Youchao, ZHAO Junqing, ZHANG Chi. Review and Prospect of Micro-nano Vibration Energy Harvesters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13):1-15.
 [2] 姚丙盟,刘志平,李文锋.基于双稳态的振动能量

- 收集系统的设计[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13):1736-1741.
- YAO Bingmeng, LIU Zhiping, LI Wenfeng. Design of Vibration Energy Harvester Based on Bistability [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(13):1736-1741.
- [3] 赵兴强, 王军雷, 蔡骏, 等. 基于风致振动效应的微型风能收集器研究现状[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16):106-112.
- ZHAO Xingqiang, WANG Junlei, CAI Jun, et al. A Review on Micro Wind Energy Harvesters Based Wind Induced Vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16):106-112.
- [4] 李支援, 吕文博, 马小青, 等. 一种磁力滑动式翼型颤振能量俘获器[J]. 力学学报, 2023, 55(10):2146-2155.
- LI Zhiyuan, LYU Wenbo, MA Xiaoqing, et al. A Magnetic Sliding Airfoil Flutter Energy Harvester [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(10):2146-2155.
- [5] 闫晓东, 周公博, 徐懋, 等. 宽频自调谐压电振子发电性能研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(6):1647-1656.
- YAN Xiaodong, ZHOU Gongbo, XU Mao, et al. Power Generation Performance Analysis of Broadband Self-tuning Piezoelectric Vibrator[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(6):1647-1656.
- [6] 闫晓东, 周公博. 中间梁方式下压电式能量采集器发电性能研究[J]. 电子学报, 2022, 50(2):404-414.
- YAN Xiaodong, ZHOU Gongbo. Study on Power Generation Performance of Piezoelectric Energy Harvester under Intermediate Beam Fixed Mode[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2):404-414.
- [7] 黄浩博, 曹迪, 周志勇, 等. 基于涡激振动的压电风能收集器研究进展[J]. 力学学报, 2023, 55(10):2132-2145.
- HUANG Haobo, CAO Di, ZHOU Zhiyong, et al. Research Progress of Piezoelectric Wind Energy Harvesters Based on Vortex-Induced Vibration[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(10):2132-2145.
- [8] 练继建, 燕翔, 刘昉, 等. 正方形截面振子在不同来流方向的单自由度流致振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15):29-35.
- LIAN Jijian, YAN Xiang, LIU Fang, et al. Flow Induced Vibration Characteristics of a Single-DOF Square Cylinder at Different Incident Angles [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(15):29-35.
- [9] WANG J L, ZHANG C Y, YURCHENKO D, et al. Usefulness of Inclined Circular Cylinders for Designing Ultra-wide Bandwidth Piezoelectric Energy Harvesters: Experiments and Computational Investigations[J]. Energy, 2022, 239:122203.
- [10] WANG J L, SUN S K, HU G B, et al. Exploring the Potential Benefits of Using Metasurface for Galloping Energy Harvesting [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243:114414.
- [11] WANG J L, HAN C Y, YURCHENKO D, et al. Energy Concentration Pipe Based on Passive Jet Control for Enhancing Flow Induced Vibration Energy Harvesting [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 319:118948.
- [12] SONG T, DING L, YANG L, et al. Comparison of Machine Learning Models for Performance Evaluation of Wind-induced Vibration Piezoelectric Energy Harvester with Fin-shaped Attachments[J]. Ocean Engineering, 2023, 280:114630.
- [13] 于慧慧, 李莉, 王永耀, 等. 基于涡致振动的压电能量收集阵列的仿真与实验[J]. 压电与声光, 2022, 44(1):77-84.
- YU Huihui, LI Li, WANG Yongyao, et al. Simulation and Experiment on Piezoelectric Energy Harvester Array Based on Vortex-induced Vibration [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022, 44(1):77-84.
- [14] HOBBS W B. Piezoelectric Energy Harvesting: Vortex Induced Vibrations in Plants, Soap Films, and Arrays of Cylinders[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2010.
- [15] WANG G T, LUO L J, ZHAO Q L, et al. A Dual-cylinder Piezoelectric Energy Harvester Using Wind Energy [J]. Ferroelectrics Letters Section, 2023, 50(4/6):150-161.
- [16] TANG B W, FAN X T, WANG J W, et al. Energy Harvesting from Flow-induced Vibrations Enhanced by Meta-surface Structure under Elastic Interference[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 236:107749.
- [17] KAN J W, LIAO W L, WANG J, et al. Enhanced Piezoelectric Wind-induced Vibration Energy Harvester via the Interplay between Cylindrical Shell and Diamond-shaped Baffle [J]. Nano Energy, 2021, 89:106466.
- [18] HU G, WANG J L, SU Z, et al. Performance Evaluation of Twin Piezoelectric Wind Energy Harvesters under Mutual Interference[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(7):073901.