

脱涡致振式压电风力发电机性能分析与试验

阚君武^{1,2} 吕 鹏¹ 王 进¹ 张忠华^{1,2} 范春涛¹ 王淑云^{1,2}

(1. 浙江师范大学精密机械与智能结构研究所, 金华 321004;

2. 浙江省城市轨道交通智能运维技术与装备重点实验室, 金华 321004)

摘要: 为满足农业遥感监测系统的供电需求,减少化学电池对水和土壤的污染,提出一种脱涡致振式压电风力发电机,并从理论和试验两方面进行了研究。建立了脱涡致振式压电风力发电机的理论模型,通过仿真分析研究迎风角、压电振子长度及风速对压电振子变形量的影响,并对发电机样机进行了测试试验。结果表明,不同风速下均存在两个最佳迎风角,使发电机输出电压较大,压电振子长度为 60、78 mm,风速为 7.6、11.6、12.4 m/s 时的两个最佳迎风角分别为 (35°,135°)、(45°,125°)、(50°,120°) 和 (35°,120°)、(40°,115°)、(45°,110°)。当迎风角为 120° 时,存在最佳风速,使发电机输出电压达到最大;随着压电振子长度的增加,最佳风速由 12.4 m/s 降低到 8.4 m/s,其对应的最大输出电压由 16.6 V 增加为 16.8 V。当外接电阻为 150 kΩ、迎风角为 30° 时,试验测得最大输出功率为 1 mW。研究表明,根据实际风速确定合理的迎风角及压电振子长度可提高发电机的发电能力。

关键词: 脱涡致振; 压电; 风力发电机; 农业状态监测系统; 迎风角

中图分类号: TN384; TM614

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)04-0411-07

OSID:



Performance Analysis and Test of Vortex Induced Vibration Piezoelectric Wind Harvester

KAN Junwu^{1,2} LÜ Peng¹ WANG Jin¹ ZHANG Zhonghua^{1,2} FAN Chuntao¹ WANG Shuyun^{1,2}

(1. Institute of Precision Machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2. Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology and Equipment of Zhejiang Province, Jinhua 321004, China)

Abstract: Aiming to meet the energy demand of agriculture micro-type sensor and real-time condition monitoring system, and reduce the pollution of chemical batteries to water and soil, a vortex induced vibration piezoelectric wind harvester was proposed and researched in theory and experiment. The theoretical model of the vortex induced vibration piezoelectric wind harvester was established and the simulation analysis was carried out. The influence of the angle of attack, length of piezoelectric cantilever and wind speed on deformation of piezoelectric cantilever was studied. A prototype of the energy harvester was made and the output voltage of the energy harvester was investigated. The results showed that there were two angles of attack that made the output voltage of the energy harvester larger at each wind speed. The two optimal angles of attack for piezoelectric cantilever lengths of 60 mm and 78 mm and wind speeds of 7.6 m/s, 11.6 m/s, and 12.4 m/s were (35°,135°), (45°,125°) and (50°,120°) and (35°,120°), (40°,115°) and (45°,110°), respectively. When the angle of attack was 120°, there was an optimal wind speed to maximize the output voltage of the energy harvester. With the increase of length of piezoelectric cantilever, the optimal wind speed was decreased from 12.4 m/s to 8.4 m/s, and the corresponding maximum output voltage of the energy harvester was increased from 16.6 V to 16.8 V. When the external resistance was 150 kΩ and the wind angle was 30°, the measured maximum output power of the energy harvester was 1 mW. Therefore, according to the range of the actual wind speed to determine the reasonable angle of attack and the length of piezoelectric harvester can be helpful for a wind

收稿日期: 2020-06-05 修回日期: 2020-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(61574128、51877199、52077201)、浙江省重点研发计划项目(2021C01181)、浙江省自然科学基金项目(LY20F010006)和国家大学生创新创业计划项目(201910345047)

作者简介: 阚君武(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事压电俘能与驱动、精密机械与微小机械研究,E-mail: kanjw@zjnu.edu.cn

通信作者: 张忠华(1980—),男,教授,主要从事压电俘能、驱动及控制技术研究,E-mail: zhangzh@zjnu.cn

energy harvester to generate more energy.

Key words: vortex induced vibration; piezoelectric; wind energy harvester; agriculture condition monitoring system; angle of attack

0 引言

近年来,随着农作物实时监测技术的发展^[1-2],作为农业遥感监测主要供能的化学电池带来的环境污染问题愈发严重。为减少使用化学电池对水和土壤造成的污染,国内外学者相继提出了基于静电、电磁、热电及压电等原理的微型发电机(亦称微型能量捕获器或俘能器)^[3-8]。这些发电机均具有各自的特点和运用领域,其中压电发电机以其结构简单、无电磁干扰、能量密度大、易于实现微小化和集成化等优势而被广泛应用^[9]。目前,压电发电机可回收的能量包括旋转体动能^[9-10]、人的肢体和器官运动能^[11]、环境振动能^[12-13]以及水流/风能^[14-15]等。用于人体运动及环境振动能量回收的压电发电机研究较早,取得的成果也较多,已逐步应用于传感器、健康监测及无线发射系统等领域。用于收集可持续清洁能源——风能的压电风力发电机的研究成果及实际应用较少,国内外尚处于探索和起步阶段。

压电风力发电机利用流体流经钝体或压电振子时卡门涡街的生成与脱落而引起钝体或压电振子周围压力差变化,从而激励压电振子振动发电。根据激励方式现有压电风力发电机主要分为尾涡扰流致振式^[16]、钝体拖曳致振式^[17-18]和脱涡致振式^[19-20]3类。尾涡扰流致振式风力发电机利用流体流经钝体后产生的卡门涡街激励压电振子发电,钝体拖曳致振式风力发电机则利用钝体涡激振动带动压电振子发电,这两类发电机结构复杂、体积相对较大,适用于流体速度较高的场合。脱涡致振式风力发电机结构简单、体积小,利用流体直接激励压电振子振动发电,更适用于自然低风速场合下的能量收集。

目前,有关脱涡致振式压电风力发电机的研究大都停留在以试验为主的可行性验证方面^[20-22]。本文在考虑压电振子静平衡变形的基础上,根据涡激振动理论建立发电机的自激振动理论模型,分析压电振子长度、迎风角及风速对发电机发电性能的影响,并进行试验验证,以期为该类发电机的进一步研究与应用提供借鉴。

1 结构及工作原理

本文所研究的脱涡致振式压电风力发电机为悬

臂梁结构,其结构如图1所示,主要由基座、固定轴、分度盘及压电振子构成。压电振子与固定轴连接且可绕轴转动,其迎风角可通过分度盘控制。压电振子由金属基板(铍青铜)和压电陶瓷(PZT-4型)粘接而成。

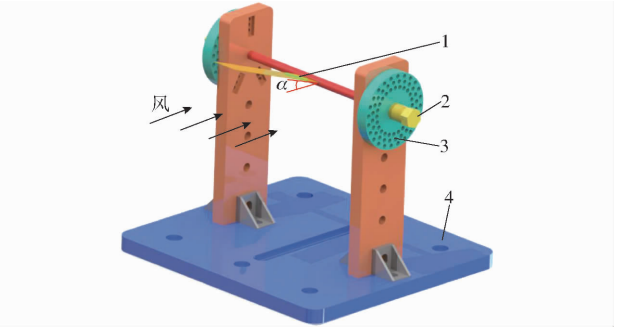


图1 压电风力发电机结构示意图
Fig.1 Structure diagram of piezoelectric wind energy harvester

1. 压电振子 2. 固定轴 3. 分度盘 4. 基座

图2为压电风力发电机的原理图,图中 l 为压电振子长度, α 为压电振子平面与风速方向间的夹角(迎风角), $\Delta\alpha$ 为压电振子受流体作用后其平面与风速方向间夹角的变化量(即压电振子静变形所引起的角度变化量)。根据流体动力学理论,当流体流经压电振子时产生卡门涡街,漩涡生成与脱落使压电振子前后两侧压力交替变化,进而使压电振子产生自激弯曲振动并将流体动能转换成电能。当涡激振动频率 f_s 与压电振子固有频率 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。

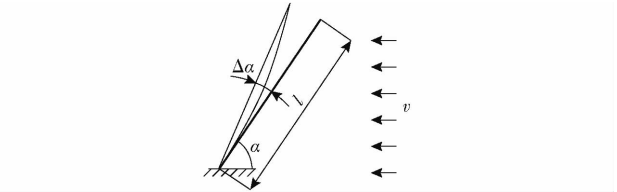


图2 压电风力发电机原理图
Fig.2 Schematic of piezoelectric wind energy harvester

由压电陶瓷晶片和金属基板粘接而成的两叠片压电振子由风力作用产生弯曲变形时,所生成的电压 V_g 、单位时间内产生的电能 E_g 以及最大输出功率 P_g 可分别表示为^[23]

$$V_g = \eta F = \eta KX \tag{1}$$

$$E_g = \frac{C_f V_g^2}{2} = \frac{C_f (\eta KX)^2}{2} \tag{2}$$

$$P_g = \frac{V_g^2}{2R \left[1 + \frac{1}{(\omega_s C_f R)^2} \right]}$$

(3)

其中 $\omega_s = 2\pi f_s$

式中 η ——与压电振子结构尺度及材料参数有关的系数

F ——压电振子自由端所受的外力

X ——压电振子变形量

K ——压电振子等效刚度

ω_s ——脱涡频率

C_f ——自由电容

R ——负载电阻

式(1)~(3)表明,其他参数确定时,可通过提高其变形量及涡激振动频率提高发电能力,而变形量和涡激频率与迎风角有关。

2 建模与仿真分析

根据图 2 所示风力发电机的结构原理及涡激振动理论^[24],压电振子处于静平衡状态时单位长度上所受的风力 P_0 、脱涡频率 ω_s 及动力学方程可分别表示为

$$P_0 = \frac{\mu_L \rho b}{2} (v \sin(\alpha + \Delta\alpha))^2$$

(4)

$$\omega_s = \frac{2\pi v St}{l}$$

(5)

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

(6)

其中 $\Delta\alpha = 0.25P_0/K$ $F = 3P_0 l/8$

式中 μ_L ——与雷诺数及压电振子结构尺度相关的阻力系数

ρ ——空气密度

b ——压电振子宽度

v ——风速

St ——Strouhal 数

x ——压电振子变形量

M ——压电振子等效质量

C ——压电振子等效阻尼系数

根据振动分析理论及上述相关公式可得压电振子变形量为

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

(7)

其中 $\beta = 1/\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\lambda\xi)^2}$ $\lambda = \omega_s/\omega_n$

$\omega_n = \sqrt{K/M}$

式中 β ——放大因子

λ ——频率比

ω_n ——压电振子固有频率

ξ ——阻尼系数

显然,压电风力发电机性能由压电振子结构及材料参数、迎风角及风速共同决定,故可通过上述系统参数调节提高发电机的发电能力。本文主要研究迎风角及风速对压电风力发电机发电性能的影响规律,仿真所用相关参数如表 1 所示,仿真所用压电振子刚度 K 、电容 C_f 及系数 η 等的计算方法详见文献[25]。

表 1 仿真参数

Tab.1 Constant parameters for simulation

参数	数值
基板杨氏模量 E_m/Pa	8.9×10^{10}
陶瓷杨氏模量 E_p/Pa	8.2×10^{10}
空气密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.2
陶瓷密度 $\rho_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8 700
基板密度 $\rho_{mm}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 500
阻尼系数 ξ	0.2
压电振子长度 l/mm	40
压电振子宽度 b/mm	40
陶瓷厚度 δ_p/mm	0.3
基板厚度 δ_m/mm	0.3
Strouhal 数 St	0.2
阻力系数 μ_L	3

图 3 为迎风角 α 和风速 v 对压电振子变形量 X 的影响曲线。由图 3 可知, α 给定时存在最佳的风速 v^* 使压电振子产生最大变形量 X^* ; $\alpha = 90^\circ$ 时 v^* 最低, α 进一步增加或减小都使 v^* 增加,且各 v^* 所对应的 X^* 相同,故在低风速时使迎风角接近 90° 、高风速时使迎风角远离 90° 可提高 X^* 。图中曲线还表明, v 给定时亦存在最佳迎风角 α^* 使压电振子出现 X^* :①低风速($v < 13\text{ m/s}$)时,仅有一个 α^* ,且各风速所对应的 α^* 相同(均为 90°)、相应的 X^* 随风速增加而增加, v 为 7、10、12 m/s 时对应的 X^* 分别为 0.13、0.44、0.91 mm。②高风速($v > 13\text{ m/s}$)时存在两个以 $\alpha = 90^\circ$ 为中心对称的 α^* ,且其和为 180° 。 v 为 13、15、20 m/s 时的两个 α^* 分别为 $(78^\circ, 102^\circ)$ 、 $(65^\circ, 115^\circ)$ 、 $(58^\circ, 122^\circ)$ 。此外,各风速下两个 α^* 所对应的 X^* 基本相等且大于单个最佳迎风角时的 X^* ,即 $\alpha = 90^\circ$ 所对应的 X^* 为两个 α^* 范围内 X^* 的最小值。但由于本文仿真条件下的 $\Delta\alpha$ 很小,故两个最佳迎风角时它们相较于 $\alpha = 90^\circ$ 时对称,且所对应的 X^* 相较于 $\alpha = 90^\circ$ 时几乎相等。因此,应根据实际中的具体风速确定合理的迎风角。

除了迎风角及风速外,压电振子长度(刚度)对其变形量也有较大影响。图 4 为 $v = 12\text{ m/s}$ 时压电振子长度 l 及迎风角 α 对压电振子变形量 X 的影响规律曲线。图 4 表明,任何迎风角时 X 都随 l 的增加而增加,且增加趋势还与迎风角有关: l 较小时,

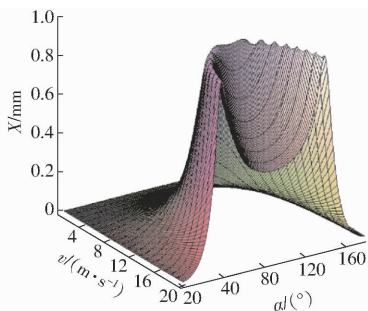


图3 风速及迎风角对压电振子变形量的影响曲线
Fig. 3 Influence curves of wind speed and angle of attack on displacement

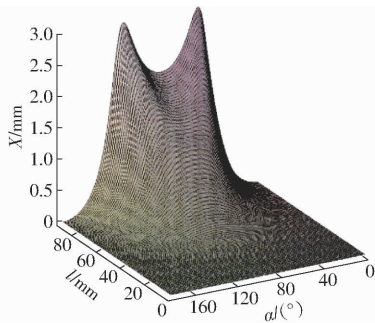


图4 压电振子长度及迎风角对压电振子变形量的影响
Fig. 4 Influence of length of piezoelectric cantilever and angle of attack on displacement

仅存在一个最佳迎风角 ($\alpha = 90^\circ$), 迎风角靠近 90° 时 X 随着 l 增加的增幅相较于迎风角远离 90° 时更大; l 较大时, 存在两个以 $\alpha = 90^\circ$ 为中心对称的 α^* , 且其和为 180° 。此外, 各长度下两个 α^* 所对应的 X^* 基本相等且均高于单个最佳迎风角时的 X^* , $\alpha = 90^\circ$ 所对应的 X 为 $-\alpha^* < \alpha < \alpha^*$ 范围内 X 的最小值。因此, 还可通过调节压电振子长度来提高发电机的性能。

迎风角、风速及压电振子长度对发电机性能之所以都有较大影响, 是因为它们对涡激振动频率 f_s 、压电振子固有频率 f_n 或激振力 F 有影响, 进而影响压电振子振动相应的放大比和变形量。图 5 为 $v = 15 \text{ m/s}$ 时的涡激振动频率 f_s 、压电振子固有频率 f_n 、放大因子 β 、激振力 F 及压电振子变形量 X 与迎

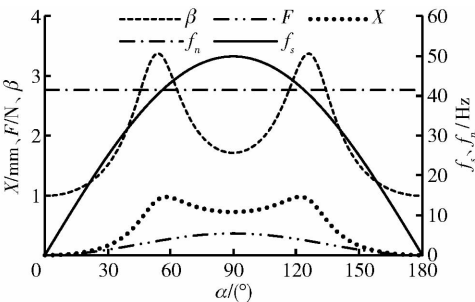


图5 不同迎风角时相关参数的变化曲线
Fig. 5 Change curves of different angle of attack on relative parameters

风角 α 的关系曲线。图中曲线表明, f_s 及 F 均随 α 的增加而先增后减, 且当 $\alpha = 90^\circ$ 时达到最大, 而 f_n 不随 α 变化, 故出现两个 α^* 使得 $f_s/f_n \approx 1$, 此时 β 及 X 均达到最大值。实际中, 当 v 低至出现 $f_s - \alpha$ 与 $f_n - \alpha$ 曲线不相交或相切时, 则仅有一个 $\alpha(90^\circ)$ 。

上述仿真结果表明, 在其他条件确定时可通过改变迎风角及压电振子长度来获得所需的 f_s/f_n , 从而拓宽发电机有效工作时的风速适应范围以提高其发电能力。

3 试验测试与结果分析

为探究压电风力发电机输出特性并验证相关系统参数理论关系的正确性, 设计制作了图 6 所示的样机及测试系统, 样机尺寸和相关参数见表 2。试验所用主要仪器包括计算机控制终端、风洞、DS5042M 型数字存储示波器、变频器(变频器步长为 1.0 Hz)等。试验中风速由变频器来控制(风速 v 与频率 f 之比为 1.2), 试验风速为 $0 \sim 20 \text{ m/s}$ 。

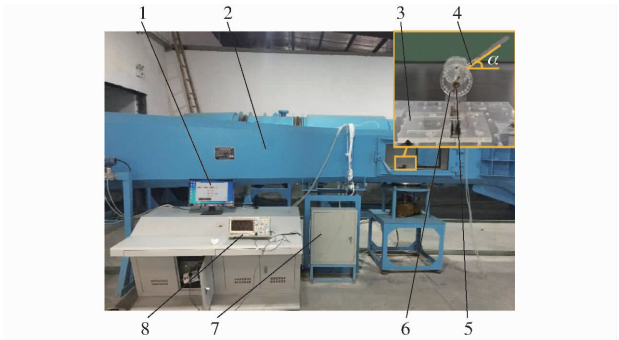


图6 压电风力发电机及测试系统

Fig. 6 Piezoelectric energy harvester and test system

1. 计算机控制终端 2. 风洞 3. 基座 4. 压电振子 5. 固定轴
6. 分度盘 7. 控制箱 8. 示波器

表2 风能采集器结构参数和试验参数
Tab. 2 Harvester structure size and constant parameters

参数	数值
固定轴直径 d/mm	6
迎风角 $\alpha/(\circ)$	$0 \sim 180$
压电振子长度 l/mm	60, 78
压电振子宽度 b/mm	40
陶瓷厚度 δ_p/mm	0.3
基板厚度 δ_m/mm	0.3

图 7a 为压电振子长度 l 取 60 mm , 不同迎风角 α 时输出电压 V_g 与风速 v 的关系曲线。由图 7a 可知, 在迎风角不变时, 除 $\alpha = 120^\circ$ 组 V_g 随 v 的增大而先增后减外, 其余各组 V_g 随 v 的增大而增大; 此外, 当 v 较低 ($v < 5 \text{ m/s}$) 时, V_g 受 α 的影响较小; 当 v 较高 ($v > 10 \text{ m/s}$) 时, V_g 随着 α 的增大呈先增后减再增后减的变化趋势, 可见高风速下存在两个最佳迎风

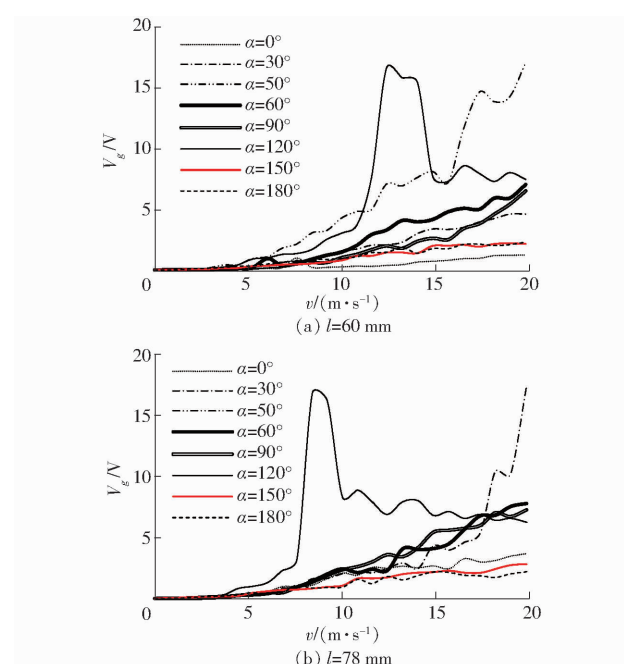


图 7 不同迎风角时输出电压与风速的关系曲线
Fig. 7 Relationship curves of generated voltage and wind speeds under different angles of attack

角 α^* 使发电机输出性能最佳。两个 α^* 分别为 50° 和 120° , 这与仿真分析结论大致相同, 但两个 α^* 之和并非 180° , 其原因在于试验中压电振子弯曲变形使得实际迎风角大于初始迎风角。综上, 迎风角对发电机输出电压有较大影响, 因此需根据实际中的具体风速确定合理的迎风角。

图 7b 为压电振子长度 $l=78$ mm、不同迎风角 α 时输出电压 V_g 与风速 v 的关系曲线。由图 7b 可知, 在迎风角不变时, 除 $\alpha=120^\circ$ 组 V_g 随 v 的增大而先增后减外, 其余各组 V_g 随 v 的增大而增大; 发电机在 $\alpha=120^\circ$ 时相较于 $l=60$ mm, 能在更低风速下实现共振; 此外发电机的两个 α^* 变成了 30° 和 120° , 这与仿真分析中 l 的改变不影响 α^* 的改变有所偏差, 其原因是 l 的增加使压电振子受到的变形更大, 使得实际迎风角进一步大于初始迎风角。综上, 压电振子长度以及迎风角均对发电机输出电压有较大影响, 应根据实际中的具体风速确定合理的迎风角和压电振子长度。

为进一步探究迎风角对发电机发电性能的影响, 压电振子长度 l 取 60、78 mm、不同风速 v 时输出电压 V_g 与迎风角 α 的关系曲线如图 8 所示。图 8a 表明, 相同 v 时, V_g 随着 α 的增加呈现先增后减再增后减的变化趋势; 各风速下, 均存在两个以 $\alpha=85^\circ$ 为中心对称且其和为 170° 的最佳迎风角 α^* 使 V_g 较大, 这与仿真中, 低风速下仅存在 1 个 α^* 、高风速下存在 2 个 α^* 使 X 最大有所偏差。具体地, 当风速 v 为 7.6、11.6、12.4 m/s 时, 对应的两个 α^* 分别为

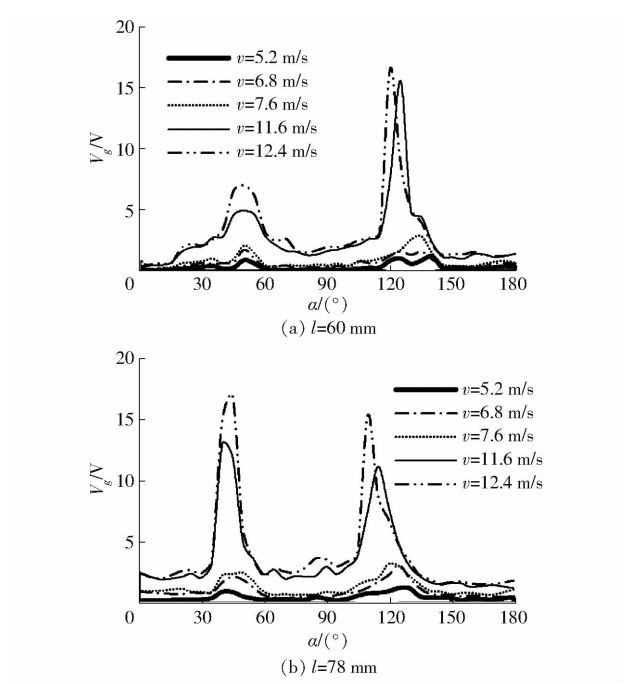


图 8 不同风速时输出电压与迎风角的关系曲线
Fig. 8 Relationship curves of generated voltage and angle of attack at different wind speeds

($35^\circ, 135^\circ$)、($45^\circ, 125^\circ$) 和 ($50^\circ, 120^\circ$)。图 8b 表明, V_g 变化趋势与图 8a 大致相同, 但是 $l=78$ mm 时较小的 α^* 对应的 V_g 相较于 $l=60$ mm 时有明显增大。各风速下, 均存在 2 个最佳迎风角 α^* 使 V_g 较大, 且其和为 155° 、以 $\alpha=77.5^\circ$ 为中心对称, v 为 7.6、11.6、12.4 m/s 时的两个 α^* 分别为 ($35^\circ, 120^\circ$)、($40^\circ, 115^\circ$)、($45^\circ, 110^\circ$)。这与仿真分析存在较大偏差, 其原因在于: 为简化分析, 忽略了压电振子的自身重力的影响。然而在实际试验中, 不仅需要考虑到压电振子受到的流体激振力, 还应考虑到压电振子自身重力以及压电振子在弯曲变形后使得实际迎风角大于初始迎风角等各方面因素。

图 9 为迎风角 $\alpha=120^\circ$ 、压电振子长度 l 不同时, 输出电压 V_g 与风速 v 的关系曲线。由图 9 可知, V_g 随着 v 的增加均呈先增后减的变化趋势, 即有最佳风速 v^* 使得发电机输出电压达到最大值 V_g^* 。此外, 随着 l 增加, v^* 从 12.4 m/s 减小到 8.4 m/s, 对应的最大输出电压则从 16.6 V 增加到 16.8 V。产生上述现象原因在于增加 l 使压电振子刚度减小, 进而降低了其固有频率, 且增加 l 压电振子受风面积增大提高了其脱涡频率。因此, 实际中可通过调节压电振子长度来提高发电机的性能。

为使压电发电机输出功率达到最大, 其他参数确定时, 可通过调节负载电阻使之与发电机阻抗相匹配。图 10 为 $v=12.4$ m/s、不同迎风角时输出功率与负载电阻的关系曲线。试验中, 将压电发电机外接整

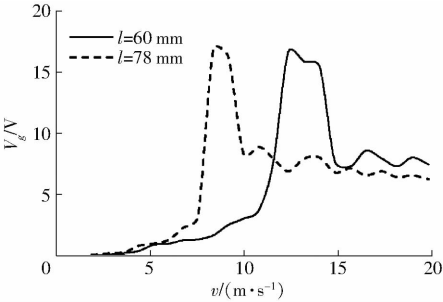


图 9 不同压电振子长度时输出电压与风速的关系曲线
Fig. 9 Relationship curves of generated voltage and wind speeds under different lengths of piezoelectric cantilever

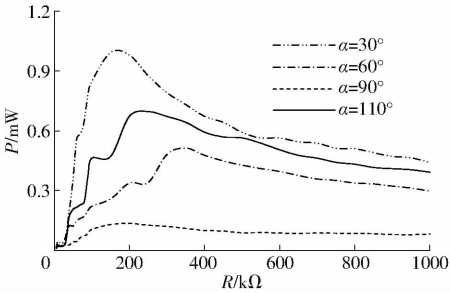


图 10 输出功率与负载电阻的关系曲线
Fig. 10 Relationship curves between average power and external resistance

流滤波电路和电阻箱,对其进行整流电压测试,并计算得到其输出功率。由图 10 可知,存在最佳迎风角和最佳负载电阻使输出功率最大;当 $\alpha=30^\circ$ 时输出功率达到最大,为 1 mW,此时最佳负载电阻为 150 k Ω 。当 α 为 60° 、 90° 、 110° 时最大输出功率分别为 0.51、0.13、0.7 mW。在实际应用中选择合理的迎风角和负载电阻有利于提高发电机的发电性能。

4 结论

(1)在仿真分析中,当风速 v 一定时,存在最佳迎风角 α^* 使压电振子达到最大变形量 X^* ,低风速时仅有一个 α^* (约 90°), α^* 所对应的 X^* 随 v 增加而增加;高风速时存在两个以 90° 为对称中心、且和约为 180° 的 α^* , α^* 所对应的 X^* 不随 v 变化;迎风角 α 不变时,压电振子变形量 X 均随压电振子长度 l 增加而增加,其增加趋势与 α 有关; l 较小时仅有一个固定的 α^* (90°) 使 X^* 最大, l 较大时存在两个以 90° 为对称中心且和为 180° 的 α^* 。

(2)在试验中,各风速下均存在两个最佳迎风角 α^* 使 V_g 较大。当压电振子长度 $l=60$ mm 时,2 个 α^* 之和为 170° ,且以 $\alpha=85^\circ$ 为中心对称, v 为 7.6、11.6、12.4 m/s 时的两个 α^* 分别为 (35° , 135°)、(45° , 125°)、(50° , 120°);当 $l=78$ mm 时,2 个 α^* 之和为 155° 、以 $\alpha=77.5^\circ$ 为中心对称, v 为 7.6、11.6、12.4 m/s 时的两个 α^* 分别为 (35° , 120°)、(40° , 115°)、(45° , 110°)。当迎风角 $\alpha=120^\circ$ 时,存在最佳风速 v^* 使发电机的输出电压达到最大;随着 l 的增加, v^* 从 12.4 m/s 减小到 8.4 m/s,对应的 V_g^* 从 16.6 V 增加到 16.8 V。

(3)存在最佳迎风角和最佳的负载电阻使输出功率最大,当外接电阻为 150 k Ω 、迎风角为 30° 时,试验测得的最大输出功率为 1 mW。

(4)在大多数情况下试验结果与仿真模型对应关系良好,但也存在些许偏差,这是由于仿真模型忽略部分参数的影响。

参 考 文 献

[1] 杨卫中,王雅淳,姚瑶,等. 基于窄带物联网的土壤墒情监测系统[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(增刊):243-247. YANG Weizhong, WANG Yachun, YAO Yao, et al. Soil moisture monitoring system based on narrow band internet of things [J/OL]. Transactions of the Chinses Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 243-247. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s038&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.038. (in Chinese)

[2] 张超,吕雅慧,郎文聚,等. 土地整治遥感监测研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1):1-22. ZHANG Chao, LÜ Yahui, YUN Wenju, et al. Analysis on research progress of remote sensing monitoring of land consolidation [J/OL]. Transactions of the Chinses Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):243-247. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.001. (in Chinese)

[3] MATIKO J W, GRABHAM N J, BEEBY S P, et al. Review of the application of energy harvesting in buildings[J]. Measurement Science and Technology, 2013,25(1): 012002.

[4] KIM H S, KIM J H, KIM J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(6):1129-1141.

[5] ZOU H, ZHAO L, GAO Q, et al. Mechanical modulations for enhancing energy harvesting: principles, methods and applications[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113871.

[6] PATRICIO P, RUIZ R O, VIVIANA M. Experimental study of the variations in the electromechanical properties of piezoelectric energy harvesters and their impact on the frequency response function [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115:469-482.

- [7] JAVED U, ABDELKEFI A. Characteristics and comparative analysis of piezoelectric-electromagnetic energy harvesters from vortex-induced oscillations[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 95(4): 3309 – 3333.
- [8] SOJAN S, KULKARNI R K. A comprehensive review of energy harvesting techniques and its potential applications [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2016, 139(3):14 – 19.
- [9] BEEBY S P, ZHU D. Vibration energy harvesting: fabrication, miniaturisation and applications[J]. *Proc. of SPIE*, 2015, 9517: 951703.
- [10] KAN J, FU J, WANG S, et al. Study on a piezo-disk energy harvester excited by rotary magnets[J]. *Energy*, 2017, 122: 62 – 69.
- [11] SIDDIQUE A R, MAHMUD S, VAN HEYST B, et al. A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 106: 728 – 747.
- [12] 文晟,李晟华,张建桃,等. 基于共振声学放大原理的涡激振动自发电装置设计与试验 [J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(11):209 – 219.
WEN Sheng, LI Shenghua, ZHANG Jiantao, et al. Design and experiment of vortex-induced vibration self-generating device based on principle of resonant acoustic amplification[J/OL]. *Transactions of the Chinses Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48 (11): 209 – 219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171125&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.025. (in Chinese)
- [13] ZHANG Z, KAN J, WANG S, et al. Performance dependence on initial free-end levitation of a magnetically levitated piezoelectric vibration energy harvester with a composite cantilever beam[J]. *IEEE Access*, 2017, 5:27563 – 27572.
- [14] 王淑云,余杰,阙君武,等. 腔式压电气流发电机结构与性能研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(1):421 – 425.
WANG Shuyun, YU Jie, KAN Junwu, et al. Structure and performance of piezoelectric airflow energy harvester[J/OL]. *Transactions of the Chinses Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1):421 – 425. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180153&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.053. (in Chinese)
- [15] ZHANG Z, WANG S, KAN J, et al. A pneumatic piezoelectric vibration energy harvester based on the compressed air-transducer-structure interaction[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020,213: 112861.
- [16] PAN F, XU Z, PAN P, et al. Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibration using a modified circular cylinder [C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2017.
- [17] WANG J, ZHOU S, ZHANG Z, et al. High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 181: 645 – 652.
- [18] SONG J, HU G, TSE K T, et al. Performance of a circular cylinder piezoelectric wind energy harvester fitted with a splitter plate[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(22): 223903.
- [19] 王淑云,沈亚林,阙君武,等. 刚柔复合梁压电风能采集器的试验测试与分析[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(18): 23 – 27.
WANG Shuyun, SHEN Yalin, KAN Junwu, et al. Test and analysis of piezoelectric wind energy harvester based on rigid-flexible composite beam[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(18): 23 – 27. (in Chinese)
- [20] WU N, WANG Q, XIE X. Wind energy harvesting with a piezoelectric harvester[J]. *Smart Materials & Structures*, 2013, 22(9):095023.
- [21] TRUITT A, MAHMOODI S N. A review on active wind energy harvesting designs[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(9): 1667 – 1675.
- [22] HOBECK J D, GESLAINB D, INMAN D J. The dual cantilever flutter phenomenon: a novel energy harvesting method[J]. *Proc. of SPIE*, 2014, 9061: 906113.
- [23] KAN J, FAN C, WANG S, et al. Study on a piezo-windmill for energy harvesting[J]. *Renewable Energy*, 2016,97: 210 – 217.
- [24] SHIGEHICO S, NAKAMURA T, INADA F, et al. Flow induced vibrations: classifications and lessons from practical experiences[M]. London: Academic Press, 2014.
- [25] 阙君武,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. (in Chinese)