

基于驰振的压电能量采集器建模与实验研究^{*}

赵道利, 胡新宇, 孙维鹏, 郭鹏程

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室 西安, 710048)

摘要 在压电能量采集器分布参数模型的基础上,对驰振作用下悬臂式压电能量采集器的振动和能量采集情况作进一步理论分析,得到质量块起振风速以及从起振到驰振过程中所采集到功率的解析解。利用直流式闭口低速风洞分别对正三棱柱、正四棱柱悬臂式压电能量采集器进行实验测试,结果表明,正四棱柱能量采集器和正三棱柱能量采集器的采集功率分别达到 0.248 5 mW 和 0.125 9 mW。通过对采集功率和电压时程曲线进行对比,其理论解和实验值吻合程度较高,理论模型具有较高精度。通过理论模型分析发现:风速越大,质量块质量越小,能量采集器采集功率越高;对于不同条件下的能量采集器均存在最优外载阻值,低风速下还会出现双最优外载阻值。

关键词 驰振; 压电能量采集; 分布参数模型; 直流式闭口低速风洞

中图分类号 TH703.2; TN712⁺.5; TN752

引言

压电能量采集器能把环境中的潜在能量(风能、振动能等)转化为电能,适合为低能耗、工作环境恶劣的无线传输设备、微机电系统等供能。压电能量采集器打破了传统供能设备(化学电池)在寿命、使用范围等方面的限制,在许多科技领域存在广泛的应用前景^[1-2]。根据能量转换原理的不同,风致振动压电能量采集器主要分为两种:①基于涡激振动的压电能量采集器较早得到研究,涡激振动的自限制特点有碍于更高能量的转换;②基于驰振的压电能量采集器具有较大的振幅,更有利于能量的有效开发^[3]。

从 Barrero 等^[4]提出关于驰振的能量采集概念开始,基于驰振压电能量采集器的相关研究已取得诸多成果。在理论方面:Abdelkefi 等^[5-6]提出一种基于欧拉-伯努利梁理论的非线性机电耦合分布参数模型,并通过数值计算和实验数据进行对比验证,还通过该模型对不同形状截面质量块的能量采集器进行了模态分析,研究了质量块截面形状、风速以及外载荷对能量采集器性能的影响;Bibo 等^[7]建立了能量采集器的能量输出和流速之间的普适性关系,

这种关系有助于采集器性能的优化分析;Yan 等^[8]利用非线性机电耦合分布参数模型研究了从混合振动(驰振和基础激励)中获取能量的概念,并探讨了风速和基底加速度对能量采集器的影响;Tan 等^[9]针对悬臂式压电能量采集器的分布参数模型提出一种机电解耦方法,便于确定各电子元器件的最优值,从而实现最大收获功率;唐浩俊等^[10]基于驰振 Den Hartog 判据发展了驰振的能量分析方法,突破 Den Hartog 判据的局限性。在结构设计方面:文献^[11-12]提出一种单自由度压电能量采集器,该能量采集器在 5.2 m/s 的风速下可以采集到大于 50 mW 的电能,足以为一些无线传感设备供电,还采用线性和非线性的理论研究了特定形状截面下的能量采集效果;Wang 等^[13]提出一种双铰链压电片能量采集器模型并通过多种方法进行分析,发现该模型的振动频率可调以方便适应周围环境,而且其性能还可通过调节电路阻抗进行优化;Kwon^[14]设计出能有效降低起振风速的“T”型悬臂梁式振动能量采集器;Liu 等^[15]研究了一种带三刃“Y”型钝体的悬臂梁式能量采集器,其能量输出高于带方柱的能量采集器,该结构在低风速下能有效激发驰振作用。除此之外:Zhao 等^[16]研究了 3 种不同形式的外接电路对基于驰振的压电能量采集器性能的影响;Shen

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1501902);国家自然科学基金资助项目(51839010);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2018JM5087)

收稿日期:2019-07-03;修回日期:2019-09-29

等^[17]提出一种新型自供能振动阻尼技术,其具有较强的稳定性,可以为其他电路供电,可实现完全自供能;张军等^[18]进行了三棱柱的流致振动实验,并对其能量转化效率做出评估。

通过对各种文献的总结发现,基于驰振的压电能量采集器分布参数模型具有一定的局限性,不能实现对能量采集系统振动情况的分析。针对此缺陷,笔者对悬臂式压电能量采集器的分布参数模型做出进一步的研究,得到质量块起振风速以及能量采集器从起振到驰振过程中所采集到功率的解析解,并分别对正三棱柱和正四棱柱压电能量采集器进行风洞实验,将模型计算所得理论解和实验值对比验证了所得模型的合理性。此外,还通过变模型参数研究了不同截面形状质量块、质量块质量、风速和外载阻值对能量采集系统的影响。

1 理论建模

笔者所研究的悬臂式压电能量采集装置由悬臂梁、压电纤维片(macro fiber composite,简称MFC)和质量块组成,MFC贴在悬臂梁左侧表面,悬臂梁上端与连接杆连接,下端连接质量块。图1为悬臂式压电能量采集装置示意图,悬臂梁的厚度方向为 x 向,宽度方向为 y 向,长度方向为 z 向。作为能量采集器的换能部件,质量块在激励下不产生形变,所以在模型分析中对质量块作理想刚性体处理。在某一时刻 t 时,速度为 v 的流体从 y 方向流经质量块,质量块因流体绕流作用在 x 方向上发生双向摆动,悬臂梁和MFC在质量块的带动下产生周期性形变,MFC因形变而产生电能,其中质量块的模态位移坐标为 $q(t)$,MFC产生的电压值为 $U(t)$ 。

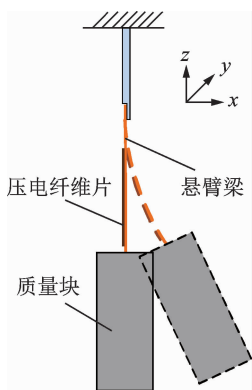


图1 悬臂式压电能量采集装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of cantilever piezoelectric energy harvester

布参数模型,将其降阶可以得到简化后的机电控制方程为

$$\ddot{q}(t) + 2\xi\omega\dot{q}(t) + \omega^2q(t) + \theta_p U(t) = f(t) \quad (1)$$

$$C_p \dot{U}(t) + U(t)/R - \theta_p \dot{q}(t) = 0 \quad (2)$$

其中: ξ 为机械阻尼系数; ω 为能量采集系统的1阶固有频率; $\theta_p = (\varphi'(L_2) - \varphi'(L_1))\vartheta$,为压电耦合项,其中 $\varphi(x)$ 为悬臂梁的1阶模态振型, L_1 为悬臂梁上端到MFC起始端的距离, L_2 为悬臂梁上端到MFC末端的距离, ϑ 为压电耦合系数; $f(t)$ 为1阶气动力; C_p 为MFC的电容项; R 为能量采集系统的外载阻值。

根据 Abdelkefi 等^[6]提出的气动驰振模型可得到驰振作用下的1阶气动力 $f(t)$ 为

$$f(t) = \frac{1}{2}a_1\rho_{\text{air}}vb_{\text{tip}}k_1\dot{q}(t) + \frac{1}{2}\frac{a_3\rho_{\text{air}}b_{\text{tip}}k_3}{v}[\dot{q}(t)]^3 \quad (3)$$

其中: a_1, a_3 为气动力经验系数,由实验确定; ρ_{air} 为空气密度; b_{tip} 为质量块宽度,即迎风面宽度; k_1, k_3 为气动力系数。

k_1, k_3 的具体表达式为

$$\begin{cases} k_1 = \varphi^2(L)L_{\text{tip}} + \varphi(L)\varphi'(L)L_{\text{tip}}^2 + \frac{1}{3}\varphi'^2(L)L_{\text{tip}}^3 \\ k_3 = \varphi(L)\int_0^{L_{\text{tip}}}(\varphi(L) + x\varphi'(L))^3 dx + \\ \varphi'(L)\int_0^{L_{\text{tip}}}x(\varphi(L) + x\varphi'(L))^3 dx \end{cases} \quad (4)$$

其中: L 为悬臂梁长度; L_{tip} 为质量块长度。

令 $f(t) = A\dot{q}(t) + B\dot{q}(t)^3$,则有

$$\begin{cases} A = a_1\rho_{\text{air}}vb_{\text{tip}}k_1/2 \\ B = a_3\rho_{\text{air}}b_{\text{tip}}k_3/2v \end{cases} \quad (5)$$

在能量采集过程中,质量块的振动频率和能量采集器的输出电压频率相同,所以对 $q(t)$ 和 $U(t)$ 作如下假设

$$\begin{cases} q(t) = q_0 \sin(\Omega t) \\ U(t) = U_0 \sin(\Omega t + \alpha) \end{cases} \quad (6)$$

其中: q_0 和 U_0 分别为模态坐标位移的振幅值和输出电压幅值; Ω 为频率; α 为相位差。

将式(6)分别带入式(2)中,且必须满足在任何时间下的有效性,可得

$$\{C_p\Omega U_0 \cos\alpha + U_0 \sin\alpha/R - \theta_p q_0 \Omega = 0 \quad (7)$$

$$\{-C_p\Omega U_0 \sin\alpha + U_0 \cos\alpha/R = 0 \quad (8)$$

消掉式(7,8)中的 α ,得到 U_0 和 q_0 的关系为

$$U_0^2 = RC\Omega^2 q_0^2 \quad (9)$$

其中: $C = R\theta_p^2/(1 + C_p^2\Omega^2 R^2)$,为机电耦合所产生的电阻尼。

将式(7,8)代入式(6),消去三角函数可以得到

根据 Abdelkefi 等^[6]提出的压电能量采集器分

$$U(t) = \frac{C_p \theta_p R^2 \Omega^2}{C_p^2 R^2 \Omega^2 + 1} q(t) + \frac{\theta_p R}{C_p^2 R^2 \Omega^2 + 1} \dot{q}(t) \quad (10)$$

将式(10)代入控制方程(1)中可以得到解耦后的控制方程

$$\ddot{q}(t) + (2\xi\omega + C)\dot{q}(t) + \Omega^2 q(t) = f(t) \quad (11)$$

其中频率满足下面式子

$$\Omega = \sqrt{\omega^2 + C_p \theta_p^2 R^2 \Omega^2 / (C_p^2 R^2 \Omega^2 + 1)} \quad (12)$$

式(1)两边同乘以 $\dot{q}(t)$, 式(2)两边同乘以 $U(t)$, 两式相加并作 t_1 到 t_2 的积分, 其中 t_1 和 t_2 分别表示振动周期中以相邻波峰和波谷为开始和结束所对应的时间点, 而且 $t_2 - t_1 = \pi/\Omega$, $q(t_1) = -q_0$, $q(t_2) = q_0$, 可得到 V_0 和 q_0 之间的第 2 个关系式为

$$U_0^2 = (2\xi\omega - A)\Omega^2 R q_0^2 + \frac{3}{4} B R \Omega^4 q_0^4 \quad (13)$$

由式(9)和式(13)可得

$$q_0^2 = 4(A - 2\xi\omega - C) / (-3B\Omega^2) \quad (14)$$

由式(14)可知, 当 $A - 2\xi\omega - C < 0$ 时, 系统处于稳定状态, 质量块不产生位移。令 $A - 2\xi\omega - C = 0$, 可以得到系统的起振风速为

$$v_0 = 2(2\xi\omega + C) / a_1 \rho_{\text{air}} b_{\text{tip}} k_1 \quad (15)$$

当 $v < v_0$ 时, 压电能量采集器的质量块位移和采集功率均为零。当 $v > v_0$ 时, 质量块振动, 压电能量采集器的采集功率 P 分别为

$$P = \frac{U_0^2}{R} = C\Omega^2 q_0^2 = \frac{4C(A - 2\xi\omega - C)}{-3B} \quad (16)$$

2 实验风洞及测试系统

为了验证上述模型的准确性, 利用如图 2 所示的悬臂梁式压电能量采集器进行风洞实验。MFC 用环氧树脂胶黏剂黏贴在悬臂梁表面, 悬臂梁下端安装质量块。本次实验所用质量块分别是截面形状为正三角形的三棱柱和正方形的四棱柱, 质量块的侧面作为迎风面, 实验时迎风面垂直于来流方面, 如图 3 所示。为保证实验结果之间的有效对比分析, 质量块的重量、高度和迎风面宽度相同, 悬臂梁、MFC 以及质量块的具体几何尺寸和物理参数如表 1 所示。

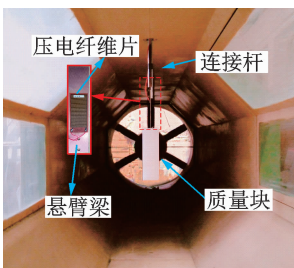


图 2 悬臂梁式压电能量采集器

Fig. 2 Cantilever piezoelectric energy harvester

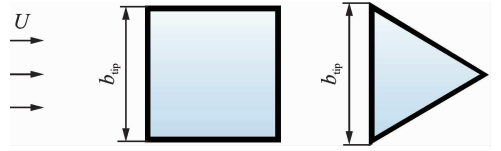


图 3 质量块截面形状示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross-section shape of bluff body

MFC 与外载电阻连接形成闭合电路, 数字示波器和外载电阻并联记录其两端电压值, 压电能量采集器的采集功率采用均方根法计算得到, 即 $P = U_{\text{rms}}^2 / R$, U_{rms} 为采集器输出电压的均方根值, R 为外载阻值, 实验电阻值为 $3 \times 10^5 \Omega$ 。

表 1 悬臂梁、MFC 和质量块的几何尺寸和物理参数

Tab. 1 Geometry and physical parameters of cantilever beam, piezoelectric patches and tips

参数	数值
悬臂梁长度、宽度、厚度/mm	90, 34, 0.6
悬臂梁弹性模量/GPa	127
MFC 长度、宽度、厚度/mm	56, 28, 0.3
MFC 密度/(g · cm ⁻³)	5.44
MFC 弹性模量/GPa	33.336
MFC 应变系数/(pC · N ⁻¹)	-170
MFC 介电常数/(nF · m ⁻¹)	14.04
质量块高度/mm	160
迎风面宽度/mm	50
质量块质量/g	120

实验是在直流式闭口低速风洞中进行的, 该风洞由 5 个主要部件构成, 分别为稳定段、收缩段、实验段、扩散段和风机, 如图 4 所示。稳定段安装有阻尼网和蜂窝器, 流体流经稳定段能有效降低测试流体的湍流度。收缩段用于增加测试流体的速度, 扩散段再降低其出口速度。实验段位于风洞中间位置, 有效实验空间的长度为 1.8 m, 宽度为 0.85 m。实验段前端顶部安装有分体式风速仪, 用来测量流体速度。当风机达到最大转速时, 风洞内的测试流体速度能达到 25 m/s。

实验在接近常温常压的条件下进行, 测试风速从 0 开始到 20 m/s 结束, 气体流动区域的雷诺数处于 $0 \sim 6.73 \times 10^4$ 之间, 测试风速间隔为 1 m/s, 单个风速下测试时间不少于 5 min。实验测试区域的阻塞比为 1.36%, 相对来说非常小, 而且风洞内壁相对光滑, 边界层厚度可以忽略, 可视为滑移边界, 不会对实验测试造成严重影响。当气体经过稳定段时, 实验段入口流速和湍流强度均可实现垂直(与风洞纵截面)分布。

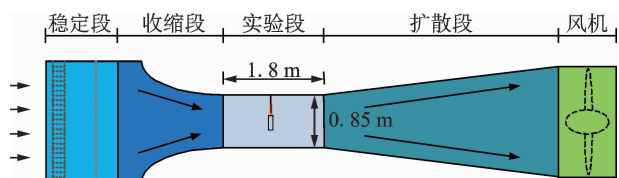


图4 直流式闭口低速风洞示意图

Fig. 4 Schematic diagram of closed direct-flow low-speed wind tunnel

3 结果和分析

3.1 实验结果和模型验证

通过风洞实验发现,正三棱柱和正四棱柱质量块的起振风速 v_0 均约为 2 m/s。当风速比较小时,质量块所受气动升力较小不足以克服系统阻尼力,系统处于稳定状态;当风速超过 2 m/s 时,气动力得到提升致使质量块起振,风速再逐渐增加,正三棱柱和正四棱柱能量采集器的振动幅度均有明显的增加,说明了所测试能量采集器的驰振特征。两种质量块的流致振动频率基本稳定,更有利于为外部设备供电。通过计算可以得到理论模型中的相关参数,其中正三棱柱能量采集器的气动力经验系数 a_1 和 a_3 分别为 2.846 3 和 -46 000;正四棱柱能量采集器的气动力经验系数 a_1 和 a_3 分别为 3.098 5 和 -31 000。

图5是流速分别为 4, 9 和 17 m/s 时,由式(1)和式(2)解得的电压数值解和实验所得电压时程曲线之间的对比。从图中的实验值可以看出:相同流速下,正四棱柱能量采集器的输出电压幅值比较大;随着风速的增加,实验所得输出电压逐步增大,但是较小风速下所得实验电压时程曲线不同时刻幅值的差距较小,波形更稳定一些。通过对模型解和实验值的对比分析发现,模型结果与实验结果相吻合。

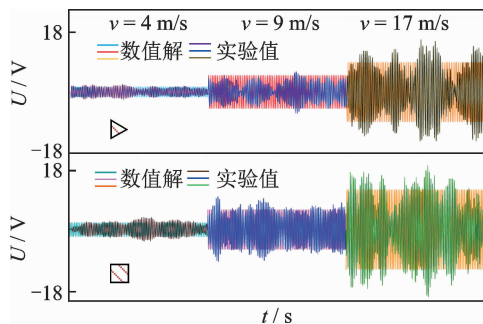


图5 理论解和实验所得电压时程曲线对比

Fig. 5 Comparison of time history of voltage between theoretical solution and experimental values

图6为不同质量块能量采集器采集功率的实验值和式(16)得到的解析解对比。从实验结果可以看出:采集功率均随风速的增加而增大,而且其增加幅

度也有所提高;从采集到的能量大小来看,正四棱柱能量采集器的采集效果要优于正三棱柱能量采集器,且在风速增加的过程中,不同质量块能量采集器采集电压之间的差距拉大,风速达到 20 m/s 时,前、后者的采集功率分别达到 0.248 5 和 0.125 9 mW。从式(16)可以看出,采集功率和气动力经验系数 a_3 成反比,但是和气动力经验系数 a_1 成正比,所以 a_1/a_3 值越大,能量采集器的采集功率越大。从理论计算得出,正四棱柱能量采集器的 a_1/a_3 绝对值较大,所以正四棱柱能量采集器的采集效果较好。通过实验值和数值解的对比,实验值和解析解之间的吻合度较高,所建理论模型具有较高的精度,能有效分析悬臂梁式压电能量采集器的振动和能量输出情况,满足类似能量采集系统的性能预估。

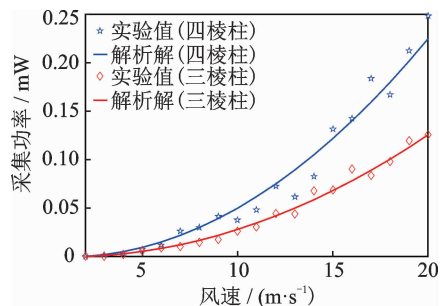


图6 采集功率实验值和解析解对比

Fig. 6 Comparison of harvested power between experimental values and analytic solution

为了对压电能量采集器进行更深入的研究,选取几种结构类似的能量采集器作性能对比,并分析它们之间的优缺点。Akaydin 等^[19]对绕流体为圆柱的能量采集器进行研究,该采集器在 0~12 m/s 风速范围内的最大采集功率密度为 $18.1 \mu\text{W}/\text{cm}^3$,而笔者所研究的采集器在相同风速范围内的最大功率密度达到 $39.4 \mu\text{W}/\text{cm}^3$,说明驰振作用更有利于能量采集。Zhou 等^[20]研究了钝体的颤振和磁效应双重作用下的能量采集器,但是其最大采集功率密度只达到 $3 \mu\text{W}/\text{cm}^3$,而笔者所研究的采集器在相同风速下的功率密度能达到 $15.8 \mu\text{W}/\text{cm}^3$,前者所设计的采集器未能真正激发流致振动作用,致使采集能量较低。但是相比于 Kwon^[14]提出的“T”型能量采集器以及 Liu 等^[15]提出的“Y”型质量块能量采集器,本研究中能量采集器的采集性能还有一定差距,其主要原因有:质量块的驰振效果不及“T”型和“Y”型;悬臂梁尺寸并不能最大程度带动压电片进行形变,所以对于所研究的能量采集器还需进行结构尺寸和质量块的进一步优化。

3.2 系统性能预估

图7为 $v=20$ m/s 时不同质量正三棱柱和正四

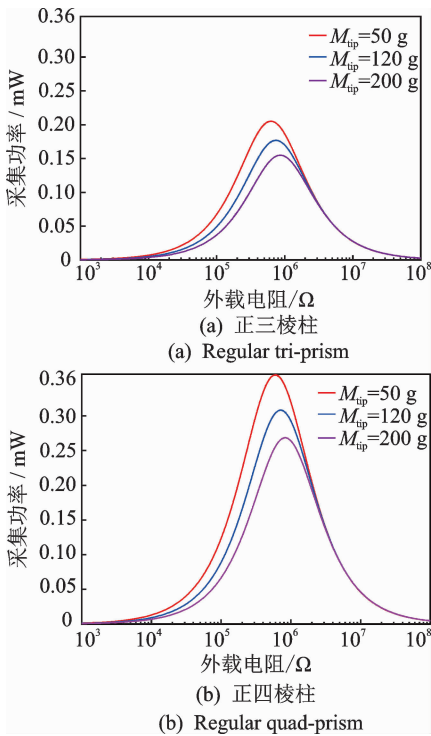


图 7 $v=20\text{ m/s}$ 时不同质量块能量采集器采集功率随外载阻值的变化

Fig. 7 Harvested power of the energy harvester varied with load resistances for different tips mass at $v=20\text{ m/s}$

棱柱能量采集器的采集功率随外载电阻值的变化。如图所示,在同等条件下,正四棱柱能量采集器的采集性能比正三棱柱能量采集器的更优。质量块质量和外载电阻的选取对能量采集器的性能有较大的影响,对于不同条件下的能量采集器均存在最优外载阻值,并非电阻值越大或越小采集器采集效果最好,但是质量块的质量越小,采集器的性能越佳。对于外载电阻比较大 ($R > 2 \times 10^6 \Omega$) 的系统,质量块质量的改变对系统采集性能几乎没有影响;但是对于外载电阻比较小 ($R < 2 \times 10^6 \Omega$) 的系统,质量块质量越大,采集器的采集效果就会变弱。所以对于质量块质量易受外部环境影响的采集器,在达标的条件下使用较大阻值的外载电阻能使系统更稳定。

图 8 为不同风速下正三棱柱和正四棱柱能量采集器的采集功率随外载电阻值的变化。从图中可以看出,在同等条件下,正四棱柱能量采集器的采集效果优于正三棱柱能量采集器。风速增加时,采集功率逐渐增大,两种能量采集器的最优外载阻值均会略微减小。当达到最大风速时,正四棱柱和正三棱柱能量采集器的采集功率分别可以达到 0.3083 和 0.1769 mW 。当采集器的外载阻值越靠近最优阻值 ($2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^7 \Omega$ 区间) 时,风速的变化对采集器能量输出的稳定性产生较大影响,但风速越大采

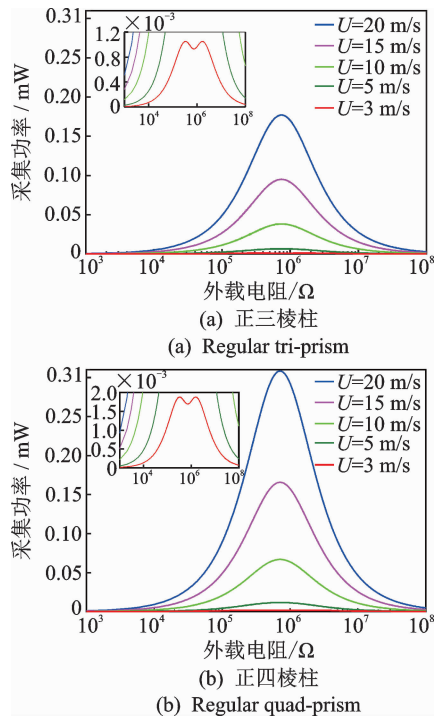


图 8 不同风速下不同质量块能量采集器采集功率随外载电阻值的变化

Fig. 8 Harvested power of the energy harvester with different tips varied with load resistances at different wind speed

集到的功率反而越大。因此对于风场不稳定的情况,外载阻值应选取比最优阻值更大或更小的,必要时还需得到外部电路的修正。对于较小的流速(从开始起振到 3.7 m/s 的风速范围内),不同质量块能量采集器均出现双最优阻值,如图 8 中的小图所示。

4 结束语

笔者在悬臂式压电能量采集器分布参数模型的基础上,对驰振作用下能量采集器的振动和能量采集情况进一步分析,得到质量块起振风速以及从起振到驰振过程中所采集到的功率解析解。建立悬臂式压电能采集器实物模型,并通过风洞实验对其进行测试,发现正三棱柱和正四棱柱能量采集器的起振风速基本相同,但正四棱柱能量采集器的能量采集功率效果要优于正三棱柱能量采集器,当风速达到 20 m/s 时,其采集功率分别达到 0.2485 和 0.1259 mW 。通过对模型求解和实验所得功率、电压时程曲线的对比发现,实验值和理论解之间很好吻合,证实了所建模型的正确性,并选取了类似结构采集器进行了优缺点分析。利用理论模型对能量采集器的性能进行了预估,分析发现:风速越大,质量块质量越小,能量采集器采集功率越高,而且风速和

质量块的变化也会对采集器最优外载阻值产生影响;采集功率随外载阻值的增大均呈现先增大后减小的情形,对于不同条件下的能量采集器均存在最优外载阻值,低风速下还会出现双最优阻值。

参 考 文 献

- [1] 邓志强,王翔,郑政,等. 宽带压电振动能量收集器结构与实验验证[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017(11):200-204.
DENG Zhiqiang, WANG Xiang, ZHENG Zheng, et al. Design and experiment of wideband piezoelectric vibration energy harvester[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017(11):200-204. (in Chinese)
- [2] 王光庆,岳玉秋,展永政,等. 宽频压电振动能量采集器的实验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2017,37(2): 261-265.
WANG Guangqing, YUE Yuqiu, ZHAN Yongzheng, et al. Experimental researches for broadband piezoelectric vibration energy harvester[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(2): 261-265. (in Chinese)
- [3] 燕翔,练继建,刘昉,等. 不同截面形式振子的流致振动试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016(12):48-55.
YAN Xiang, LIAN Jijian, LIU Fang, et al. Model tests on flow-induced motion of oscillators with different cross sections[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016(12):48-55. (in Chinese)
- [4] BARRERO-GIL A, ALONSO G, SANZ-ANDRES A. Energy harvesting from transverse galloping[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(14):2873-2883.
- [5] ABDELKEFI A, YAN Z, HAJJ M R. Modeling and nonlinear analysis of piezoelectric energy harvesting from transverse galloping [J]. Smart Materials & Structures, 2013, 22(2):025016.
- [6] ABDELKEFI A, YAN Z, HAJJ M R. Performance analysis of galloping-based piezoaeroelastic energy harvesters with different cross-section geometries [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(2):246-256.
- [7] BIBO A, DAQAQ M F. On the optimal performance and universal design curves of galloping energy harvesters[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(2): 023901.
- [8] YAN Z, ABDELKEFI A, HAJJ M R. Piezoelectric energy harvesting from hybrid vibrations[J]. Smart Materials & Structures, 2014, 23(2):025026.
- [9] TAN T, YAN Z, HAJJ M R. Electromechanical decoupled model for cantilever-beam piezoelectric energy harvesters [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(10):101908.
- [10] 唐浩俊,李永乐,廖海黎. 方柱截面驰振分析的能量方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(1):103-114.
TANG Haojun, LI Yongle, LIAO Haili. Energy method of galloping analysis for 2D square cylinder [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015(1):103-114. (in Chinese)
- [11] SIROHI J, MAHADIK R. Piezoelectric wind energy harvester for low-power sensors[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(18): 2215-2228.
- [12] SIROHI J, MAHADIK R. Harvesting wind energy using a galloping piezoelectric beam[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2012, 134(1):011009.
- [13] WANG Y, LIAN Z, YAO M, et al. Analysis of a piezoelectric power harvester with adjustable frequency by precise electric field method[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(10):2154-2161.
- [14] KWON S D. A T-shaped piezoelectric cantilever for fluid energy harvesting[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(16):164102.
- [15] LIU F R, ZOU H X, ZHANG W M, et al. Y-type three-blade bluff body for wind energy harvesting[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(23):233903.
- [16] ZHAO L, YANG Y. Analytical solutions for galloping-based piezoelectric energy harvesters with various interfacing circuits [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(7):075023.
- [17] SHEN H, QIU J, BALSU M. Vibration damping as a result of piezoelectric energy harvesting [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 169(1):178-186.
- [18] 张军,练继建,刘昉,等. 正三棱柱流致振动试验研究[J]. 振动与冲击, 2016(20):17-23.
ZHANG Jun, LIAN Jijian, LIU Fang, et al. Experimental investigation on flow induced motion of an equilateral triangle prism [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016(20):17-23. (in Chinese)
- [19] AKAYDIN H D, ELVIN N, ANDREPOULOS Y. The performance of a self-excited fluidic energy harvester [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(2): 025007.
- [20] ZHOU Z, QIN W, ZHU P, et al. Scavenging wind energy by a dynamic-stable flutter energy harvester with rectangular wing [J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(24):243902.



第一作者简介:赵道利,男,1973年1月生,副教授。主要研究方向为水力机械振动分析与故障诊断、压电能量收集等。曾发表《圆弧翼型叶片力学模型的计算及气动特性研究》《太阳能学报》2015年第36卷第9期)等论文。
E-mail: zhaodaoli@126.com

