

文章编号 1004-924X(2011)08-1801-09

振动模态对压电发电机陶瓷片粘贴位置的影响

刘树林*, 许小勇, 翟宇毅, 刘彦峰, 李余珍
(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:通过对压电单晶悬臂梁振动发电机陶瓷片建模及理论计算,分析了一阶振型与二阶振型状态下陶瓷片不同贴片位置与振动发电机发电能力的关系,利用欧拉伯努利梁模型并通过电机开路电压、短路电流及 LED 照明试验,得到了最佳贴片位置。试验表明在一阶模态时,陶瓷片贴于悬臂梁根部的电机能够获得最大的发电量,对 4 种不同贴片位置电机的发电试验显示,陶瓷片贴于根部的电机其开路电压及短路电流分别是其他电机的 4 倍以上,驱动的 LED 功率为其他电机的 10 倍以上。而对于二阶振型,陶瓷片贴于悬臂梁中间位置的电机发电量最大,贴于根部位置的电机次之,6 种不同贴片位置电机的发电试验表明,前者开路电压、短路电流分别为后者的 1.2 倍和 1.9 倍以上,两者驱动的 LED 功率相差 1.4 倍以上。试验结果与计算结果均表明:一、二阶模态时悬臂梁最佳贴附位置分别是根部和中间位置,设计时需根据不同振型选择陶瓷片最佳粘贴位置。

关键词:压电发电机;陶瓷片;悬臂梁;振型

中图分类号: TN384; TM35 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1801

Effect of vibration modes on positions of piezoelectric ceramic patches for cantilever generators

LIU Shu-lin*, XU Xiao-yong, Zhai Yu-yi, LIU yan-feng, LI yu-zhen

(School of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

* Corresponding author, E-mail: lsl346@126.com

Abstract: By modeling and calculating the piezoelectric ceramic patches of cantilever generators, the effects of different positions of the piezoelectric patches on the generation ability of the generators were analyzed and the optimum positions of the piezoelectric ceramic patches under the first and second vibration modes were obtained with Euler-Bernoulli model and by testing the open circuit voltages, short-circuit currents of generators and the performance of LED lighting. Experiments indicate that the generators show the optimum performance under the first vibration mode when the piezoelectric ceramic patches locate at the root of the cantilever. Its opening voltage and short current are 4 times and LED power is 10 times of experimental data of other three generators. Moreover, the generation ability is investigated under the second vibration mode. When the ceramic patch respectively locates at the middle and the root of cantilever, the generation ability of the former is superior to that of the latter, and the opening voltage and short current of the former are 1.2 and 1.9 times those of lat-

收稿日期:2010-12-10;修订日期:2011-02-15.

基金项目:上海市人才发展基金资助项目(047);上海大学研究生创新基金资助项目(No. SHUCX102191)

ters respectively through six generator experiments. In addition, LED power of the former is 1.4 times those of the others. It points out that the piezoelectric ceramic patches should be located at the root of beam under the first vibration mode and at the middle of beam under the second mode to improve the generation efficiency.

Key words: piezoelectric cantilever; ceramic patch; generator; vibration mode

1 引言

随着集成电路技术的快速发展,许多电子产品,特别是微电子产品能耗越来越低,利用压电材料收集环境中的能量,将其转化成电能即替代电池为微电子产品供电的研究已成为一个热点问题,许多学者开展了相关的研究工作^[1-2],研究内容主要涉及悬臂梁振动发电^[2-3]、踩踏发电^[4]、机械振动发电^[5]及纳米发电^[6]等。

目前,在压电材料发电领域研究较多的是压电悬臂梁振动发电装置,其发电特性主要取决于几何结构、激振形式、阻尼、材料性能等。利用压电单晶悬臂梁发电机进行发电,最重要的是如何最大限度的获取电能^[1-3]。Sodano 等^[7]从压电材料入手,研究了 3 类不同压电材料 PZT、MFC 及 QP 的发电能力,试验发现在谐振激励和随机振动激励下,PZT 材料的电机发电效率高于 QP、MFC 材料的电机。阚君武等^[8-9]从压电振动电机几何结构与悬臂梁(也称基板)材料入手,研究了压电材料与基板厚度比值对发电性能的影响,得到了使发电机获得最大电能的最佳厚度比值。袁江波等^[10]研制了复合型压电振动电机,通过将不同谐振固有频率的振动电机固定在同一基座上,增加了复合型振动电机谐振频带宽度,使环境振源频率与电机谐振固有频率相匹配,提高了能量的捕获效率。还有一些学者研究了悬臂梁结构形式^[11]、机电耦合模式^[12]及压电片堆叠方式^[13]等对电机发电能力的影响,得到了一些有价值的研究结论。

不过,以往对悬臂梁单晶振动发电的研究均未考虑振动模式的影响。实际上,由于外界振动激励源的不同,振动电机将会在不同振动模式下工作,悬臂梁表面应力分布规律将产生较大变化。对于电机不同的振动模式,将陶瓷片总是贴于悬

臂梁根部的传统做法^[1,10]是否能够获得最佳的发电效率,目前还缺乏理论研究和试验验证,存在盲目性。除了将陶瓷片贴于悬臂梁根部外,是否还存在其他最佳贴片位置以及最佳贴片位置与振动模态存在何种关系,尚未见有相关研究报道。

本文利用数学解析法,依据等截面欧拉-伯努利梁模型,分析了一阶和二阶振型下陶瓷片不同贴片位置与振动发电机发电能力的关系,利用数值计算,找到悬臂梁在横向方向上相对应力的最大值点,从理论上得出最佳贴片位置。通过电机开路电压、短路电流及 LED 照明利用试验,从试验角度也得到了陶瓷片最佳贴片位置,其结果与理论分析结果基本一致。研究结果表明,振动模态对压电单晶悬臂梁发电机陶瓷片最佳贴片位置有很大影响,在不考虑振动模态情况下总是将陶瓷片贴于根部的传统做法缺乏科学性和有效性。

2 压电单晶悬臂梁振动发电装置

2.1 几何结构

压电单晶悬臂梁振动发电机是一种悬臂梁结构,其中压电材料选用锆钛酸铅(PZT-5A)材料,悬臂梁(或称基板)选用矩形合金钢片,用环氧树脂将两者粘接,从压电材料的上下表面各电极分别引出导线,电机整体结构如图 1 所示。

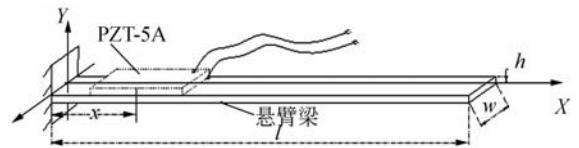


图 1 压电单晶悬臂梁振动发电机装置

Fig. 1 Device of vibration generator on piezoelectric unimorph cantilever

2.2 发电原理

利用环境中的振动,引发悬臂梁受迫振动发

生弯曲变形。根据压电学理论,当压电振子自由端受外力作用而产生弯曲变形时,其表面将产生自由电荷。压电体所受应力、外电场与自身产生电荷、应变之间存在相互耦合关系^[1]:

$$\begin{Bmatrix} D \\ S \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} & \boldsymbol{\varepsilon}^T \\ \mathbf{s}^E & \mathbf{d} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中, D 为电位移, E 为电场强度, \mathbf{d} 为压电常数矩阵, S 和 T 分别为应变和应力, $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 为自由介电常数矩阵, \mathbf{s}^E 为电场恒定时的短路弹性柔顺系数矩阵。因此,压电体在连续振动作用下,可持续输出电能,进而实现发电。

3 压电单晶悬臂梁数学建模与分析

压电单晶悬臂梁振动发电机是一种悬臂梁结构,其振动属于连续弹性体振动,它具有无限多自由度及其相应的固有频率和主振型,其振动可表示为无穷多个主振型的叠加。仅考虑弯曲引起的变形而不计剪切引起的变形及其转动惯量的影响,这种力学分析模型称为欧拉-伯努利梁。根据均匀截面欧拉-伯努利梁的横向振动微分方程,对应 i 阶固有频率的振型函数为^[1]:

$$Y_i(x) = \alpha \left\{ ch\beta_i x - \cos \beta_i x - \frac{sh\beta_i l - \sin \beta_i l}{ch\beta_i l + \cos \beta_i l} (sh\beta_i x - \sin \beta_i x) \right\}, \quad (i=1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

式中, i 为振型阶数, α 为常数, $Y_i(x)$ 为悬臂梁在第 i 阶振型时的挠度,系数 $\beta_i = (2i-1)\pi/2l$, l 为悬臂梁长度。

根据式(2),可计算得到一阶、二阶振型相对挠度与归一化悬臂梁长度的关系,如图 2 所示。

弯矩和挠度曲线存在以下关系:

$$M_i(x) = EI \frac{d^2 Y_i}{dx^2}, \quad (3)$$

式中, $M_i(x)$ 为悬臂梁在第 i 阶振型状态下距离根部 x 截面处的弯矩, E 为悬臂梁弹性模量, I 为悬臂梁惯性矩。当悬臂梁横向弯曲时,弯矩随截面位置变化。一般情况下,由于最大正应力 $\sigma_{\max}(x)$ 发生于弯矩最大截面上,且距离中性轴最远,对应第 i 阶模态下悬臂梁表面应力为

$$\sigma_{\max}(x) = \frac{M_i(x)h}{2I} = \frac{hE}{2} \frac{d^2 Y}{dx^2}, \quad (4)$$

式中, h 为悬臂梁厚度。

将式(2)与式(3)带入式(4),并整理得

$$\sigma_{\max}(x) = \frac{1}{2} hE\alpha (\beta_i^2 ch\beta_i x + \beta_i^2 \cos \beta_i x - \frac{sh\beta_i l - \sin \beta_i l}{ch\beta_i l + \cos \beta_i l} \beta_i^2 (sh\beta_i x + \sin \beta_i x)). \quad (5)$$

因为研究悬臂梁相对应力,常数 $\alpha hE/2$ 取 1。为方便总结规律,对悬臂梁进行归一化处理,同样可令 $l=1$,式(5)进一步简化为

$$\sigma_{\max}(x) = \beta_i^2 ch\beta_i x + \beta_i^2 \cos \beta_i x - \frac{sh\beta_i - \sin \beta_i}{ch\beta_i + \cos \beta_i} \beta_i^2 (sh\beta_i x + \sin \beta_i x). \quad (6)$$

通过对式(6)进行计算,可得到如图 2 所示的一阶与二阶振型状态下悬臂梁表面的相对应力分布图。由图可知,一阶振型时,沿着悬臂梁长度方向上应力逐渐减小到 0,悬臂梁表面最大应力位于 $x=0$ 处;二阶振型时,存在两个应力绝对值最大值点,分别位于 $x=0$ 与 $x=0.53$ 处。此外,还存在一个使应力符号发生变化的节点,该节点位

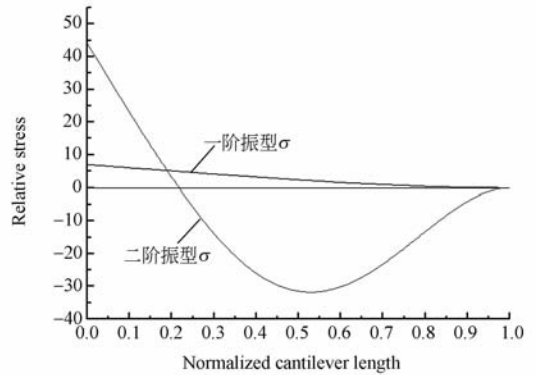


图 2 一阶、二阶振型悬臂梁相对应力分布

Fig. 2 Relative stress distributions of cantilever under the first and second vibration modes

于 $x=0.22$ 处。根据压电理论^[14-15],将陶瓷片贴于距离悬臂梁根部 x 处,振动电机在任一时刻产生的电压和电荷量与正应力 $d^2 Y/dx^2$ 积分成正比,即与 dY/dx 呈线性关系。

由图 2 所示的相对应力分布图可知,在一阶模态下,同一压电陶瓷片不同部位产生的电荷并不均匀,靠近悬臂梁根部的部分产生最多的电荷,对电机输出电压、电荷贡献最大,远离根部的陶瓷片部分贡献较小,直至自由端为零。对于一个有限长度陶瓷片,贴在梁根部,可使电机输出电压、电流及电能达到最大。

在二阶模态下,悬臂梁根部与 $x=0.53$ 处对应的陶瓷片部分对输出电荷量、电压及电能贡献

最为显著。当 $x < 0.22$ 时,随着陶瓷片与根部距离的增加,陶瓷片部分对电能贡献从峰值迅速减小,直至 $x = 0.22$ 处为零,随着距离继续增加,对电能的贡献增大;在 $x = 0.53$ 处达到峰值,随着 x 数值进一步增大,贡献随之下降,直到 x 接近 1 处为零。另外,从图 3 中还可看出,当 $x > 0.22$ 后,陶瓷片产生的电荷与 $x < 0.22$ 处电荷极性相反。

针对二阶振型,对 $x = 0$ 与 $x = 0.53$ 两位置陶瓷片产生电能进行比较。假设 $x = 0, x = 0.53$ 两处各有长为 l_p 的陶瓷片,为方便研究,对其进行归一化处理,归一化陶瓷片长度设为 $2c, 2c = l_p/l$ 。

当 $0 < 2c < 0.22$ 时,将陶瓷片贴于悬臂梁根部与中间两位置,两陶瓷片产生相对电荷量之差可简化表示为:

$$\Delta Q = \left| \int_{x=0}^{x=2c} \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} dx \right| - \left| \int_{x=0.53-c}^{x=0.53+c} \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} dx \right| \quad (13)$$

通过式(13)数值计算可知, ΔQ 恒小于 0,表明陶瓷片贴于中间位置的发电机具有更高的发电能力。

当 $0.22 < 2c \leq 0.62$ 时,若将陶瓷片贴于悬臂梁根部时,则其 $x > 0.22$ 处陶瓷片部分与 $x < 0.22$ 处陶瓷片部分极性相反,其产生的电荷存在相互抵消现象,降低电机发电能力。若将陶瓷片贴于 0.53 处时,陶瓷片都处于同一极性下,无电荷抵消现象。同样可通过(13)式的计算,得出 ΔQ 恒小于 0 的结果,表明将陶瓷片贴于中间位置时,发电机具有最大发电能力。

当 $0.62 \leq 2c \leq 1$ 时,贴于悬臂梁根部和中间的陶瓷片均发生自身电荷抵消现象。通过相同方式的计算,也得出了 ΔQ 恒小于零的结果。

通过以上讨论可知,对于二阶振型,陶瓷片贴于中间位置电机输出电能最大,根部其次。

总之,一阶振型下,只有悬臂梁根部是最佳贴片位置;而二阶振型时,悬臂梁中间是最佳贴片位置,根部次之。

4 试验测试与数据分析

4.1 试验原理

4.1.1 振动电机制备

在实验前需制作压电单晶悬臂梁振动发电机,首先将合金钢加工成悬臂梁,用砂纸将其表面

毛刺除尽,打磨平整,同时用丙酮溶液清洗压电陶瓷片和加工好的悬臂梁,除去表面灰尘、油污等痕迹。从 PZT-5A 压电陶瓷片上下表面侧端分别焊接出导线,用 AB 胶水将 PZT-5A 压电陶瓷片与悬臂梁粘接,为保证粘接效果,应尽量将胶水涂均匀,按压均匀,避免气泡混入。

为验证理论分析结果,制备了两类电机。如图 3 所示,将陶瓷片贴于 $x = 0, 0.53, 0.64$ 及 0.77 等 4 处不同位置,制备第一组振动电机。其中,悬臂梁实际尺寸为 $160 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.48 \text{ mm}$,陶瓷片实际尺寸为 $32 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$,归一化后的陶瓷片长度 $2c = 0.21$ 。

如图 4 所示,将陶瓷片贴于 $x = 0, 0.18, 0.20, 0.47, 0.55$ 及 0.72 等 6 处不同位置,制备第二组电机。其中,悬臂梁尺寸为 $310 \text{ mm} \times 22 \text{ mm} \times 0.48 \text{ mm}$,陶瓷片实际尺寸为 $24 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$,归一化后的陶瓷片长度 $2c = 0.04$ 。

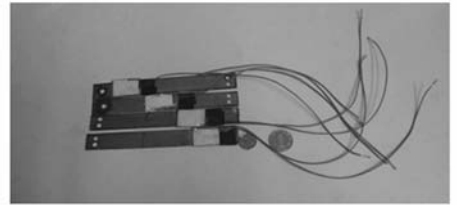


图 3 第一组电机
Fig. 3 Generators 1

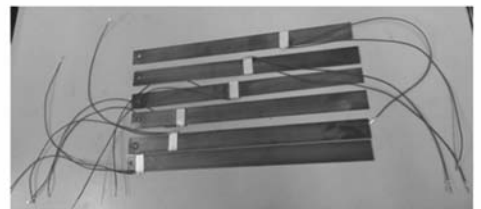


图 4 第二组电机
Fig. 4 Generators 2

4.1.2 能量获取

在稳定的正弦激励下,压电振动电机可输出随时间变化的交流电,需利用桥式整流电路将交流电转换成直流电,比较电压有效值与电流有效值,整流电路如图 5 所示。

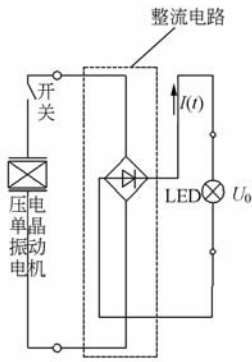


图 5 电能获取电路图

Fig. 5 Schematic diagram of energy harvesting circuit

4.1.3 测试系统

为了从实验角度找出最佳贴片位置,建立了振动发电机与 LED 照明电路系统,比较了上述各电机开路电压、短路电流及串联负载 LED 后电路的电压、电流及功率情况,该系统如图 6 所示。试验装置主要包括悬臂梁单晶振动发电机、TS1212B 低频扫频信号源、激振器、LED 照明电路、数字万用表等。其中,TS1212B 低频扫频信号源可输出频率、振幅可调的正弦激励,控制激振器振动,从而为压电振动发电机提供恒定的激励振源。小功率 LED 为 5BB4HC 型,直径为 5 mm,光强度为 3000~4000 mcd,正向电压 V_F 为 3.0~3.3 V,正向电流 I_F 为 0.01 mA。



图 6 振动发电 LED 照明系统

Fig. 6 Vibration generator system for LED lighting

4.2 测试结果及分析

测试时,保持激振器的频率变化而振幅不变,调节激振频率,使发电机在不同频激振下进行发电。

通过对第一组 4 个电机进行发电测试和数据

分析,得到了如图 7 所示的开路电压曲线及如图 8 所示的短路电流曲线。为了便于讨论,表 1 与表 2 列出了一阶振型与二阶振型时共振点处的开路电压及短路电流参数。

由表 1 与表 2 可知,对于上述 4 种悬臂梁振动发电机,当处于一阶振型时,选择悬臂梁根部贴片,振动电机开路电压分别是陶瓷片贴于 0.53, 0.64 及 0.77 位置处电机的 4.3 倍、12 倍及 34.5 倍。短路电流分别是陶瓷片贴于 0.53, 0.64 及 0.77 位置处电机的 9.7 倍、37.2 倍及 446 倍;对于二阶振型,陶瓷片贴于悬臂梁 0.53 处时,振动电机开路电压分别是陶瓷片贴于 0, 0.64 及 0.77 位置处电机的 3.6 倍、1.1 倍及 2 倍,相应的短路电流分别是 4.7 倍、1 倍及 7.7 倍。

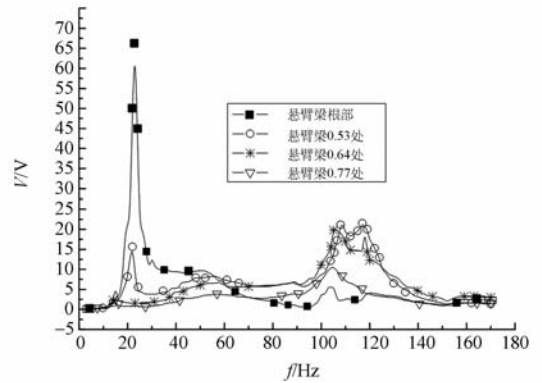


图 7 陶瓷片位置与开路电压(第一组电机)

Fig. 7 Relation of different positions of piezoelectric ceramics with open voltages (generators 1)

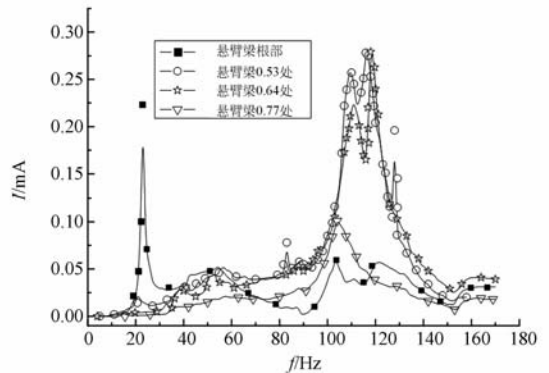


图 8 陶瓷片位置与短路电流(第一组电机)

Fig. 8 Relation of different positions of piezoelectric ceramics with short currents (generators 1)

表 1 不同贴片位置电机的开路电压(第一组电机)

Tab.1 Open voltages of generators with different positions of ceramic patches(generators 1)

	0	0.53	0.64	0.77
一阶	67	15.65	5.54	1.94
二阶	5.8	21.1	19.9	10.59

表 2 不同贴片位置电机的短路电流(第一组电机)

Tab.2 Short currents of generators with different positions of ceramic patches(generators 1)

	0.105	0.53	0.64	0.77
一阶	0.223	0.023	0.006	0.000 5
二阶	0.059	0.278	0.277	0.101

对于第二组电机,主要进行了二阶振型发电试验,采用与第一组电机同样的测试及分析方法,得到如图 9、图 10、表 3 与表 4 的分析结果。由表 3 和表 4 可知,对于陶瓷片贴于悬臂梁 0.47 处的电机,其二阶振型下的开路电压分别是 0, 0.18, 0.2, 0.55 及 0.72 位置处的 1.2 倍、3.6 倍、6.9 倍、1.74 倍及 1.5 倍,相应的短路电流分别是 1.89 倍、4.3 倍、18 倍、3 倍及 4.4 倍。另外,试验时发现,陶瓷片贴于梁的 0.47 处时电机输出电能达到最大,与理论计算及第一组电机存在一定偏差,这可能是由各种仪器及测量误差等因素造成的。

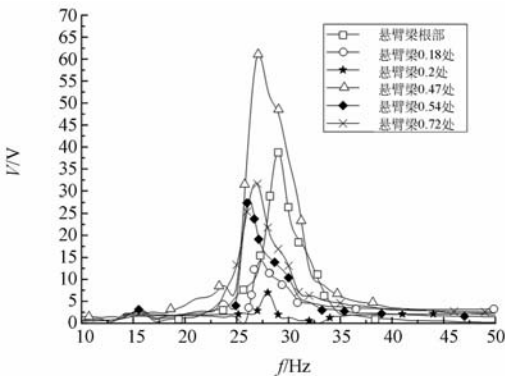


图 9 陶瓷片位置与开路电压(第二组电机)

Fig.9 Relation of different positions of piezoelectric ceramics with open voltages (generators 2)

比较二阶振型下上述参数。试验测试结果,如下表 3,4 所示。

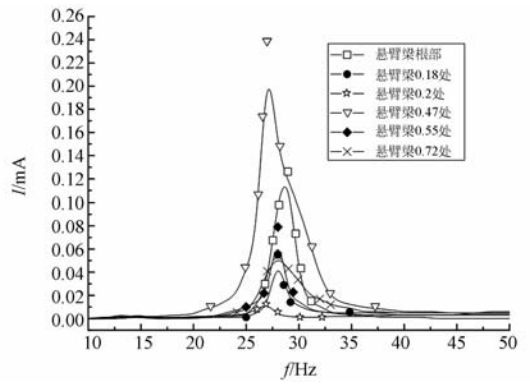


图 10 陶瓷片位置与短路电流(第二组电机)

Fig.10 Relation of different positions of piezoelectric ceramics with short currents (generators 2)

表 3 不同贴片位置电机的开路电压(第二组电机)

Tab.3 Open voltages of generators with different positions of ceramic patches(generators 2)

	0.02	0.18	0.2	0.47	0.55	0.72
二阶	39	13.29	6.95	47.8	27.4	31.6

为了验证不同电机的发电能力、效率及输出性能,进行了 LED 照明试验及功率测试。将两组电机分别驱动 5BB4HC 型 LED,如图 5 所示。

表 4 不同贴片位置电机的短路电流(第二组电机)

Tab.4 Short currents of generators with different positions of ceramic patches(generators 2)

	0.02	0.18	0.2	0.47	0.55	0.72
二阶	0.126	0.055	0.013	0.239	0.079	0.054

通过第一组与第二组电机驱动 LED 负载测

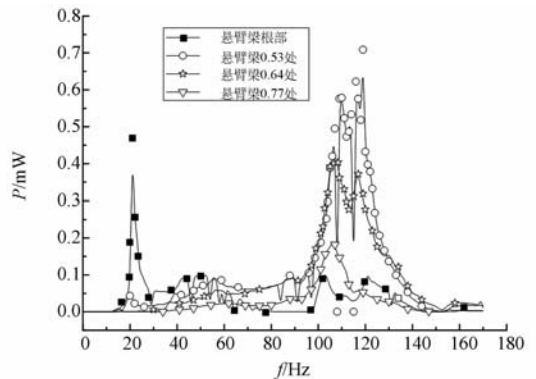


图 11 陶瓷片位置与 LED 功率(第一组电机)

Fig.11 Relation of different positions of piezoelectric ceramics with LED powers (generators 1)

试及数据整理分析,得到了如图 11 及图 13 所示的 LED 功率与陶瓷片粘贴位置关系图。

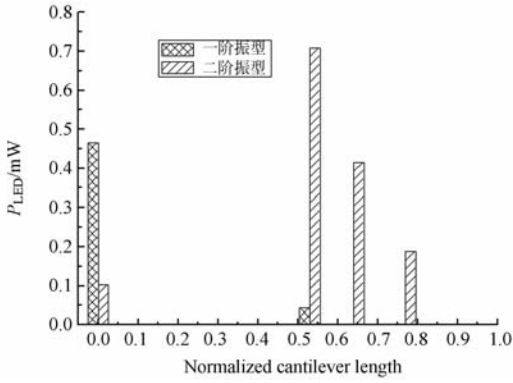


图 12 一、二阶振型对应的 LED 功率(第一组电机)
Fig. 12 LED power under the first and second modes (generators 1)

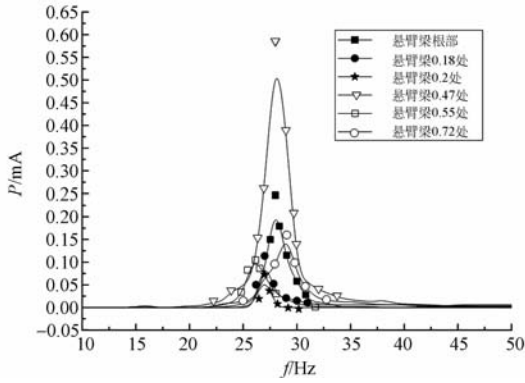


图 13 陶瓷片位置与 LED 功率(第二组电机)
Fig. 13 Relation of different positions of piezoelectric ceramics with LED powers (generators 2)

为了更直观地比较电机发电能力、效率及输出性能,对图 11 与图 13 中振型处 LED 功率与陶瓷片粘贴位置关系进行分析,得到图 12 与图 14。由图可知,对于一阶振型,陶瓷片贴于悬臂梁根部位置时,LED 获得电能功率最大。对于二阶振型,陶瓷片贴于悬臂梁中间处的电机发电功率最大,贴于根部位置的电机次之。另外,LED 照明试验也同样佐证了上述分析结果。

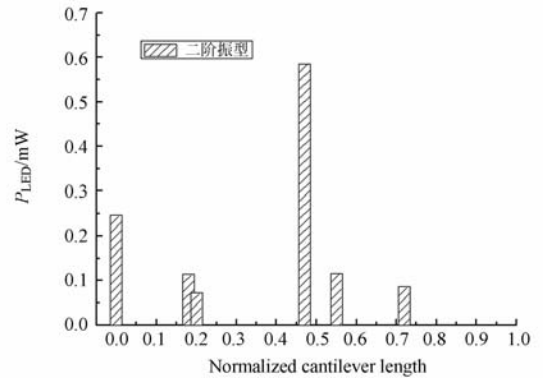


图 14 二阶振型对应的 LED 功率(第二组电机)
Fig. 14 LED power under the second mode (generators 2)

5 结 论

本文通过对压电单晶悬臂梁振动发电机的理论建模及数值计算,分析了一阶振型与二阶振型状态下,陶瓷片不同贴片位置与振动发电机发电能力的关系。理论分析结果表明:对于一阶振型,将陶瓷片贴于悬臂梁根部可使压电单晶振动发电机获得最大发电能力;对于二阶振型,选择悬臂梁中间位置粘贴陶瓷片时,压电单晶悬臂梁振动发电机发电能力最强,而根部次之。通过对两种规格不同贴片位置的 10 种发电机进行发电试验测试、LED 照明试验及数据分析,得到了与理论分析结果相一致的结论。这说明悬臂梁振动发电机最佳贴片位置取决于振型,总是将陶瓷片贴于悬臂梁根部位置的传统方法缺乏科学依据。

根据以上研究结论,可以延伸以下两点:(1) 必须了解环境振动频率来设计发电机,依据振型的类型选择陶瓷片粘贴位置,最大限度地提高发电机的发电能力及输出性能。(2) 应用对一阶与二阶振型状态下寻找最佳贴片位置的方法,同样可以得到更高阶振型的最佳贴片位置。

参考文献:

[1] PRIYA S, INMAN D J. *Energy Harvesting Technologies* [M]. Springer, 2009:373-374.

[2] 唐可洪, 阙君武, 朱国仁, 等. 遥控器用压电发电装置的供电特性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1):92-

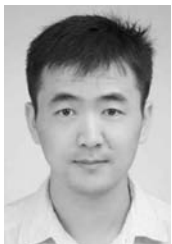
96.

TAMG K H, KAN J W, ZHU G R, *et al.*. Power-supply performance of piezoelectric generator for remote control[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):92-96. (in Chinese)

[3] 袁江波, 单小彪, 谢涛, 等. 悬臂梁单晶压电发电机

- 的实验[J]. *光学精密工程*. 2009,17(5):1073-1076.
- YAN J B, SHAN X H, XIE T, *et al.*. Experiment of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure [J]. *Opt. Precision Eng.*. 2009,17(5):1073-1076. (in Chinese)
- [4] NATHAN S S, JOSEPH A P. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics[J]. *Micro, IEEE*. 2001,21(3):30-42.
- [5] STEVEN W A, CHRISTOPHER P T, DAVID L C, *et al.*. Energy Harvesting Wireless Sensors for Helicopter Damage Tracking [C]. *Proceedings of AHS International Forum, Phoenix, US; HUMS*, 2006:1-6.
- [6] WANG Z L, SONG J H. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays[J]. *Science*, 2006,312(5771):242-246.
- [7] HENRY A S, DANIEL J I, GYUHA E P. Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2005, 16(10):799-807.
- [8] 阙君武, 唐可洪, 任玉, 等. 压电单晶梁发电机的能量效率[J]. *光学精密工程*. 2008, 16(12):2398-2405.
- KAN J W, TANG K H, REN Y, *et al.*. Energy efficiency of piezoelectric monomorph cantilever generator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(12):2398-2405. (in Chinese)
- [9] 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 J W, TANG K H, WANG SH Y, *et al.*. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators [J]. *Opt. Precision Eng.*. 2008,16(1):71-75. (in Chinese)
- [10] 袁江波, 谢涛, 单小彪, 等. 复合型悬臂梁压电振子振动模型及发电试验研究[J]. *机械工程学报*. 2010,46(9):87-91.
- YAN J B, XIE T, SHAN X H, *et al.*. Vibrated model and experiments of multiple piezoelectric cantilevers in energy harvesting [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2010, 46(9):87-91. (in Chinese)
- [11] DENIS B, LUCIANO M, SASA Z, *et al.*. Vibration energy scavenging via piezoelectric bimorphs of optimized shapes [J]. *Microsyst Technol*. 2010,16(5):657-668.
- [12] CHOI W J, JEON Y, JEONG J H, *et al.*. Energy harvesting MEMS device based on thin film piezoelectric cantilevers[J]. *J Electroceram*, 2006,17(2):543-548.
- [13] JORDI B P, MANEL P V. Electromechanical Model of a Multi-layer Piezoelectric Cantilever [C]. *Proceedings of 7th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-electronics and Miro-Systems. Como, Italy, ICMMSE: 2006: 1-7.*
- [14] CHEN S N., WANG G J, CHEN M C. Analytical modeling of piezoelectric vibration-induced micro power generator [J]. *Mechatronics*, 2006, 7(16):379-387.
- [15] ERTURK A, INMAN D J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations[J]. *Smart Materials and structures*. 2009,18(2):1-18.

作者简介:



许小勇(1982—),男,安徽人,硕士研究生,主要研究方向为压电振动发电。E-mail: xuxiaoyong9@sina.com



翟宇毅(1963—),女,陕西人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为机电一体化技术。E-mail: yuyuzhai2009@126.com

导师简介:



刘彦峰(1989—),男,江西人,硕士研究生,主要研究方向为压电振动发电。E-mail:liuyanfengcool@126.com



刘树林(1963—),男,河北人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为设备故障诊断及振动发电等。E-mail:lsl346@126.com



李余珍(1985—),女,浙江人,硕士研究生,主要研究方向为设备故障诊断。E-mail:wss200695@126.com

●下期预告

月基地球等离子体层极紫外成像仪光学设计

陈波¹,何飞^{1,2}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

依据地球等离子体层在 30.4 nm 的辐射特性,首次以月球为观测点进行地球等离子体层极紫外波段成像观测方法研究。确定了在月球表面使用的极紫外成像仪的技术参数,给出了视场角为 15°、角分辨率为 0.1°、入瞳面积大于 70 cm² 的极紫外成像仪的结构形式。极紫外成像仪采用单球面多层膜反射镜与球面微通道板光子计数成像探测器相结合的结构。对设计的极紫外多层膜光学系统成像仪进行光线追迹,弥散斑半径分别为 0.210 mm (0°视场)、0.204 mm (3°视场)、0.204 mm (5°视场)、0.207 mm (7.5°视场),对应的角分辨率为 0.08°,弥散斑在不同视场角度基本均匀,其结果满足设计要求。该仪器可在月球表面工作,获得视场范围 15.0 RE,覆盖地球等离子体层主要区域,空间分辨率 0.10 RE,可以很好观测到地球等离子体层主要细节,为从外部进行地球等离子体层观测提供了一种新的高质量成像观测方法。