

文章编号 1004-924X(2011)09-2108-09

多振子压电发电机的输出特性

阚君武¹, 王淑云², 彭少锋³, 张忠华¹, 曾平^{1*}, 程光明¹, 付晓庆³

- (1. 浙江师范大学 精密机械研究所, 浙江 金华, 321004;
2. 浙江大学 数理信息学院, 浙江 金华, 321004;
3. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为提高多振子压电发电机的输出能力及有效频带宽度,从理论及试验两方面研究了各压电振子直接串/并联及经整流桥串/并联时的输出电压特性。结果表明,压电振子结构及数量相同时,经整流桥串/并联输出的电压及频带宽度均优于直接串/并联输出的电压及频带宽度,且压电振子经整流桥串联输出方式优于并联输出方式,其电压波动也较小。最后,制作了3个压电振子构成的发电装置,并进行了压电振子不同连接方式时的输出电压对比试验。试验结果显示,各压电振子独立发电产生高于10 V电压的频率段分别为143.1~148.1 Hz,160~166.2 Hz,173.1~184.3 Hz,而经整流桥串联输出10 V电压时的连续频率段增至141.8~190 Hz,证明了压电振子经整流桥串联可有效提高多振子发电机的输出电压和频带宽度。

关键词:压电发电机;压电振子;输出电压特性;能量回收

中图分类号: TN384; TM35 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2108

Output performance of piezoelectric generators with multi-vibrators

KAN Jun-wu¹, WANG Shu-yun², PENG Shao-feng³, ZHANG Zhong-hua¹,
ZENG Ping^{1*}, CHENG Guang-ming¹, FU Xiao-qing³

- (1. *Institute of Precision Machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;*
 - 2. College of Mathematics Physics and Information Engineering, Zhejiang University, Jinhua 321004, China;*
 - 3. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: zengping321@163.com*

Abstract: To increase frequency bands and the applicability in vibration environments, a piezoelectric generator consisted of multi-vibrators was presented. The output performance of the piezoelectric generator connected with vibrators in different methods (direct serial/parallel-connection, serial/parallel-connection with rectifiers) was studied theoretically and experimentally. The research results show that the piezoelectric generators connected with vibrators in serial/parallel through rectifiers achieves higher output voltages and wider frequency bands than those connected with vibrators directly. Moreover, the serial-connection piezoelectric generator takes advantages over the parallel-connection one in

收稿日期:2010-12-07;修订日期:2011-02-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075371);浙江省自然科学基金资助项目(No. Y4110315, Y1110529)

output voltages and frequency bands. A piezoelectric generator consisted of three cantilevers was fabricated and tested with the vibrators connected in different ways. With the output voltage beyond 10 V, the individual frequency bands of the three unconnected cantilevers are 143.1-148.1 Hz, 160-166.2 Hz and 173.1-184.3 Hz, respectively. However, the total frequency band for output voltage beyond 10 V is extended to 141.8-190 Hz as the cantilevers are connected in serial with rectifiers.

Key words: piezoelectric generator; piezoelectric vibrator; voltage-output performance; energy harvesting

1 引言

MEMS技术的快速发展和广泛应用,在促进微能源技术发展的同时也对其性能提出了更严格的要求。微能源主要分为微型电池和微发电机两大类^[1]。微电池具有良好的供电特性,但有限的寿命使其难以用于不便更换的场合(如植入式微机电系统等),因此人们提了基于不同原理的振动式微型发电机^[2],包括压电式^[3-4]、静电式^[5]和电磁式^[6]等多种类型。其中,压电发电机以结构简单、无电磁干扰、不发热、易于实现微小化和集成化等优点广泛地用于无线网络、传感与健康监测等领域;但仅当环境振动频率接近其谐振频率时,压电发电机才具有较高的能量转化效率和发电能力,故实际应用中有效带宽很窄,甚至仅几赫兹左右,具有一定的局限性。因此,如何提高振动式压电发电机在较宽频域内的发电效率和供电能力已成为国内外研究的热点^[7-11]。

为提高压电发电机对环境随机振动的适应性及发电能力,国内外学者先后提出由多个压电振子构成的宽频带压电发电机并进行了相关研究。谢涛等^[7]进行了宽频带压电发电机的有限元分析以及频域内单个压电振子与多个压电振子发电装置的功率对比,证明多个压电振子同步工作可有效提高输出功率及频带宽度。SHAHRUZ^[8-9]主要研究了宽频带发电装置的理论设计问题,即通过结构设计使各个压电振子获得不同谐振频率的方法。上述研究工作均未涉及压电振子连接结构及输出方法对发电机总体输出性能的影响,但实际应用中压电振子的连接方式决定其所生成电压的耦合规律,从而影响发电机的整体输

出特性和能力。

本文首先对多振子压电发电机的输出电压特性进行了理论分析,在此基础上制作了3个压电振子构成的发电机,并测试了各压电振子独立发电、直接串/并联发电、以及经整流桥串/并联发电时输出电压的幅频特性及频带宽度。结果表明,采用整流桥将多个压电振子串联的输出方法可有效地提高多振子压电发电机的频带宽度和电压幅值。

2 多振子压电发电机的结构及原理

图1为3个压电振子构成的压电发电机简图,其中各压电振子结构及尺寸相同,通过端部质量大小调节固有频率,构成一个间隔适中的固有频率序列,从而有效地拓宽发电机的总体频带宽度。

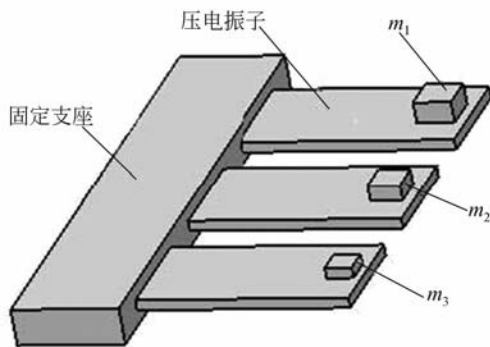


图1 三振子压电发电机的结构示意图

Fig. 1 Structure of piezoelectric generator with three cantilevers

根据压电学知识,压电振子受外力作用时电位移/电场强度与应力/应变之间的关系为^[10]:

$$T_p = E_p(S_1 - g_{31}D_3), \quad (1)$$

$$E_3 = -g_{31}T_p + \beta_{33}^T D_3, \quad (2)$$

其中, S_1 和 T_p 分别为应变和应力, g_{31} 为压电电压常数, D_3 和 E_3 分别为电位移和电场强度, E_p 为压电材料的杨氏模量, β_{33}^T 为介电隔离率。根据上述公式, 压电振子的输出电压主要取决于其形变的大小(即幅频特性)。因此, 可根据环境振动频率及振动强度确定压电振子的结构与数量, 从而获得所需的有效带宽。此外, 多振子压电发电机输出电压及有效频带宽度还取决于各压电振子间的连接方式(如直接串/并联、整流串/并联等), 连接方式不同其输出电压的耦合关系也不同。

3 多振子压电发电机的输出电压特性分析

3.1 压电振子结构及输出电压的幅频/相频特性分析

图 2 为悬臂梁型压电振子的结构及原理简图, 其中 $y(t) = KH\cos(\omega t)$ 为基础(支撑)所受的

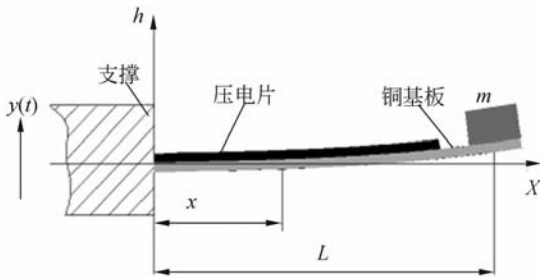


图 2 单悬臂梁压电振子结构示意图

Fig. 2 Structure of piezoelectric cantilever generator

外界激励, 式中 K 为压电振子的等效刚度, H 为常数。令悬臂梁的质量集中在端部(端部总质量为 m), 则将其视为基础做谐波运动的单自由度强迫振动系统, 其动力学方程为:

$$m[\ddot{h}(t) - \ddot{y}(t)] + c[\dot{h}(t) - \dot{y}(t)] + K[h(t) - y(t)] = 0, \quad (3)$$

其中, c 为阻尼系数, $h(t)$ 为端部的振动位移, 且有:

$$h(t) = A\cos(\omega t - \phi), \quad (4)$$

其中,

$$A = H\sqrt{[1 + (2\xi\frac{\omega}{\omega_n})^2] / \left\{ \left[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2 \right]^2 + (2\xi\frac{\omega}{\omega_n})^2 \right\}},$$

其中 ξ 为黏性阻尼因子, ω, ω_n 分别为激励频率和固有频率。相位角为:

$$\phi = \arctan \left[\frac{2\xi\frac{\omega}{\omega_n}}{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2 + (2\xi\frac{\omega}{\omega_n})^2} \right]. \quad (5)$$

根据激励函数 $y(t)$ 及位移响应函数 $h(t)$, 压电振子端部所受作用力为:

$$F = K[h(t) - y(t)] = B\sin(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

其中, $\varphi = \arctan[(A\cos\phi - KH)/(A\sin\phi)]$.

$$B = \sqrt{(KA\sin\phi)^2 + (KA\cos\phi - K^2H)^2}. \quad (7)$$

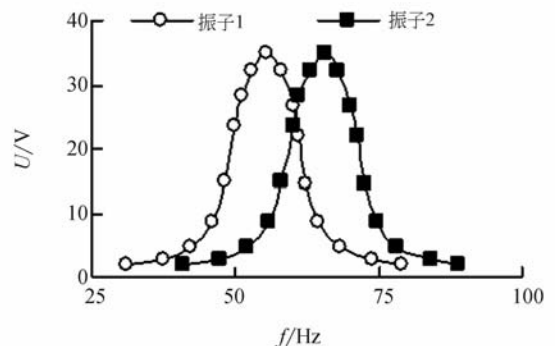
由公式(6)及文献[12], 得压电振子产生的电压:

$$V = \frac{3\alpha\beta g_{31}L(1-\alpha)}{QTZ} B\sin(\omega t + \varphi), \quad (8)$$

其中, L, Z, T 分别为悬臂梁长度、宽度及厚度, α 为压电振子金属基板与其总厚之比, β 为金属基板与压电材料的杨氏模量之比, φ 为电压相位角, Q 为与压电振子形状、材料相关的常数。在频域内 $y(t)$ 与激励频率无关, 仅为时间的函数, 而 $h(t)$ 为 ω/ω_n 的函数。由振动系统叠加原理^[13], 压电振子产生的峰值电压具有与位移响应形状及谐振频率相同、幅值大小不同的幅频及相频特性。

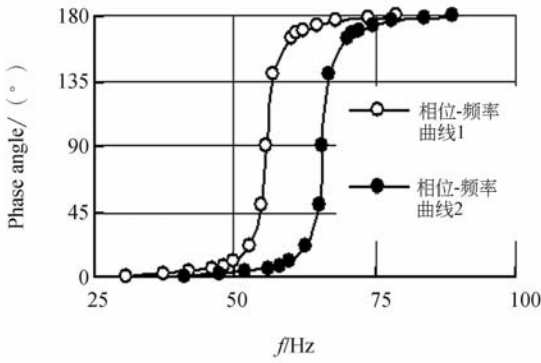
3.2 多振子压电发电机输出电压的耦合特性分析

现以 2 个压电振子为例, 分析压电振子连接方式不同时输出电压的耦合关系。2 个压电振子独立发电时输出电压的幅频及相频特性如图 3 所示。



(a) 幅频特性

(a) Amplitude-frequency characteristic



(b) 相频特性

(b) Phase-frequency characteristic

图3 压电振子独立输出电压的幅频及相频率特性

Fig. 3 Amplitude-frequency and phase-frequency curves of two piezoelectric cantilevers

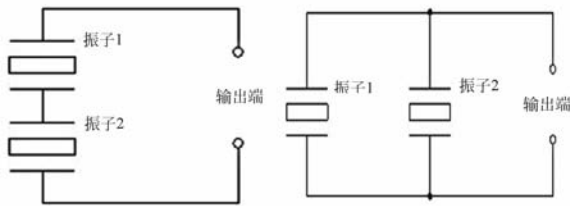
3.2.1 压电振子直接串/并联的输出特性

2个压电振子直接串、并联输出电路如图4所示。令产生电压分别为 V_1 和 V_2 ,由式(8)得:

$$V_1 = X_1 \sin(\omega t + \varphi_1), \quad (9)$$

$$V_2 = X_2 \sin(\omega t + \varphi_2), \quad (10)$$

其中, $X_i = 3\alpha\beta g_{31}L(1-\alpha)B_i/(QTZ)$ ($i=1,2$), B_i 由式(7)确定。



(a) 串联

(b) 并联

(a) Series connection

(b) Parallel connection

图4 2个压电振子直连输出电路

Fig. 4 Direct-connection circuits of two piezoelectric cantilevers

(1)当2个压电振子直接串联时,有:

$$V_s = V_1 + V_2 =$$

$$\sqrt{X_1^2 + 2X_1X_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + X_2^2} \sin(\omega t + \Phi), \quad (11)$$

(11)

其中, $\Phi = \arctan\left(\frac{X_1 \sin \varphi_1 + X_2 \sin \varphi_2}{X_1 \cos \varphi_1 + X_2 \cos \varphi_2}\right)$ 。

(2)当2个压电振子直接并联时,相当于2个

相位相差为 $|\varphi_1 - \varphi_2|$ 的正弦波交流电源的并联。因同一时刻两个直接并联压电振子输出电压的大小不同,电压高的压电振子向电压低的充电,总的输出电压为 $V_p = (Q_1 + Q_2)/(C_{f1} + C_{f2})$,其中 Q_1, Q_2 为2个压电振子独立产生的电荷量, $C_{f1} = C_{f2}$ 为2个压电振子的电容,故有:

$$V_p = \frac{V_1 + V_2}{2}, \quad (12)$$

其峰值为 $\frac{1}{2}\sqrt{X_1^2 + 2X_1X_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + X_2^2}$ 。

根据公式(11)和(12),结合图3中2个压电振子所对应的相位变化关系,得到压电振子独立发电以及直接串/并联时的输出电压-频率曲线如图5所示。

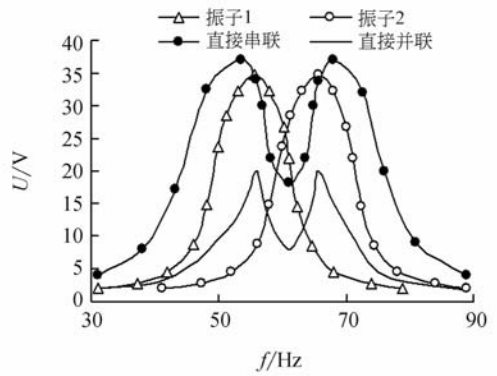
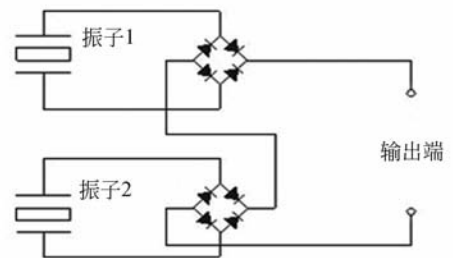


图5 压电振子直连时的输出电压曲线

Fig. 5 Voltage-output performance of piezoelectric cantilevers connected directly

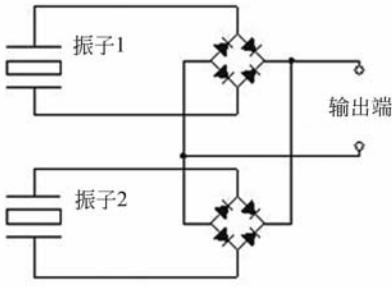
3.2.2 压电振子经整流桥串/并联的电压输出特性

2个压电振子经整流桥串/并联的电路如图6



(a) 串联

(a) Series connection



(b) 并联

(b) Parallel connection

图 6 两振子经整流桥联接电路

Fig. 6 Connection circuit of piezoelectric cantilevers connected with rectifiers

所示。令 2 个压电振子经整流桥输出的电压分别为：

$$V_3 = X_1 |\sin(\omega t + \varphi_1)|, \quad (13)$$

$$V_4 = X_2 |\sin(\omega t + \varphi_2)|. \quad (14)$$

(1) 当 2 个压电振子经整流桥串联时, $V_s = V_3 + V_4$ 。因 V_3, V_4 周期相同, 叠加后依然为周期函数, 故仅需对一个周期进行分析。设 $\varphi_1 > \varphi_2$, 如图 7 所示, 在时域内取单个周期 $[\frac{-\varphi_2}{\omega}, \frac{\pi - \varphi_2}{\omega}]$ 进行分析。

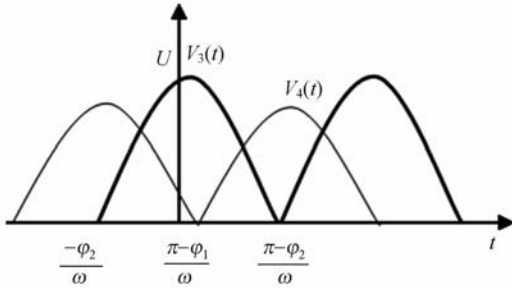


图 7 压电振子经整流桥输出的电压-时间曲线

Fig. 7 Rectified-voltage curves of piezoelectric cantilevers

当 $t \in (\frac{-\varphi_2}{\omega}, \frac{\pi - \varphi_2}{\omega})$ 时,

$$V_s = X_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + X_2 \sin(\omega t + \varphi_2) = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + 2X_1 X_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \times \sin(\omega t + \Phi_1), \quad (15)$$

其中 $\Phi_1 = \arctan \frac{X_1 \sin \varphi_1 + X_2 \sin \varphi_2}{X_1 \cos \varphi_1 + X_2 \cos \varphi_2}$.

当 $t \in (\frac{\pi - \varphi_1}{\omega}, \frac{\pi - \varphi_2}{\omega})$ 时,

$$V_s = X_2 \sin(\omega t + \varphi_2) - X_1 \sin(\omega t + \varphi_1) = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 - 2X_1 X_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \times \sin(\omega t + \Phi_2), \quad (16)$$

其中 $\Phi_2 = \arctan(\frac{-X_1 \sin \varphi_1 + X_2 \sin \varphi_2}{-X_1 \cos \varphi_1 + X_2 \cos \varphi_2})$ 。

根据相位差 $(\varphi_1 - \varphi_2)$ 的取值区间来确定经整流桥串联的输出电压峰值。

当 $0 < \varphi_1 - \varphi_2 < \pi/2$ 时, 可以证明在区间 $[\frac{-\varphi_2}{\omega}, \frac{\pi - \varphi_1}{\omega}]$ 内电压峰值为:

$$V_{Sp1} = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + 2X_1 X_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (17)$$

显然, V_{Sp1} 大于 $[\frac{\pi - \varphi_1}{\omega}, \frac{\pi - \varphi_2}{\omega}]$ 可能出现的最大值

$V_{Sp2} = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 - 2X_1 X_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$ 。因此, 当 $0 < \varphi_1 - \varphi_2 < \pi/2$ 时, 两振子经整流桥串联的输出电压峰值为 V_{Sp1} 。

同理, 当 $\pi/2 < \varphi_1 - \varphi_2 < \pi$ 时, 两振子经整流桥串联输出的电压峰值为:

$$V_{Sp2} = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 - 2X_1 X_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}. \quad (18)$$

(2) 2 个压电振子经整流桥并联时, 相当于 2 个直流电源的并联。由于两电源之间存在着整流桥的反向截止作用, 可避免高电压电源向低电压电源充电的现象, 故所输出的电压为 2 个振子输出电压的较大值。根据图 3 及公式 (17) 和 (18), 得两振子经整流桥串/并联输出的峰值电压理论曲线如图 8 所示。

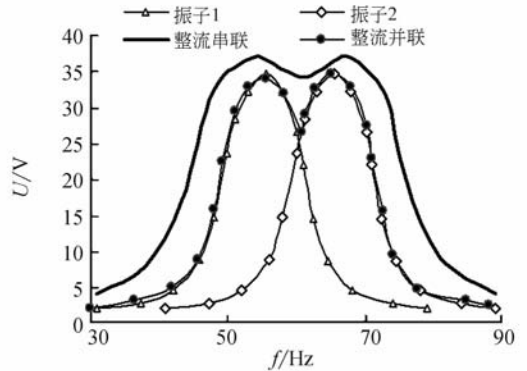


图 8 压电振子经整流桥串/并联时的输出电压曲线

Fig. 8 Voltage-frequency curves under piezoelectric cantilevers connected with rectifiers

4 试验测试

为验证多振子压电发电机输出电压特性及其

频带宽度的理论分析结果,设计制作了3个悬臂梁压电振子构成的压电发电机,并就单个压电振子及各压电振子直接串/并联及经整流桥串/并联时的输出电压特性进行了试验测试。三振子压电发电机及其测试系统如图9所示,其中各压电振子的结构尺寸相同(42 mm×20 mm×0.6 mm,压电晶片与基板厚度均为0.3 mm),自由端质量块大小不同,以获得不同的谐振频率。试验所用仪器设备为HEAS-5型功率放大器、DS5042M型数字存储示波器和HEV-5型激振器。功率放大器内配有正弦波信号发生器,输出频率及幅值可调,输出信号经功率放大后驱动激振器。试验中,功率放大器输出功率和电压均保持恒定,通过调整频率获得各种工作状态下的输出电压及带宽特性(利用数字示波器观测),试验中所记录的电压均为峰值电压。

图10为3个压电振子独立发电时的电压-频率特性曲线。图中曲线表明,压电振子结构尺寸相同时,可通过端部质量调节其谐振频率,进而获得所需的电压-频率特性曲线,且各压电振子仅在其谐振点附近具有较大的发电能力。输出电压为10 V时,3个压电振子所对应的频带宽度分别为143.1~148.1 Hz,160~166.2 Hz和173.1~184.3 Hz,因此,单个压电振子的有效发电频带宽度极其有限。

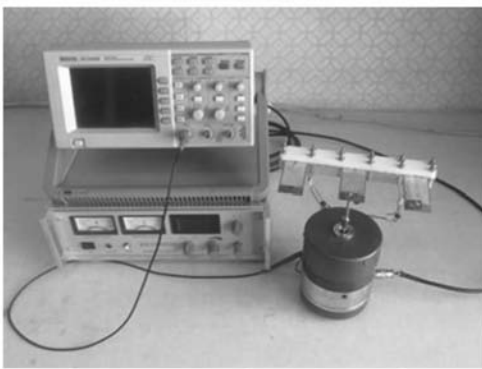


图9 压电发电机及其测试系统

Fig. 9 Piezoelectric generator and test system

图11给出了3个压电振子独立发电及直接串/并联(不用整流桥)时的电压-频率特性曲线。对比图中各个曲线的变化趋势可知:(1)直接串联时,在相邻2个压电振子电压-频率曲线波峰之间的频率段内,相邻2个压电振子的输出电压因相位相反而相互抵消,故输出电压较低(接近该频域

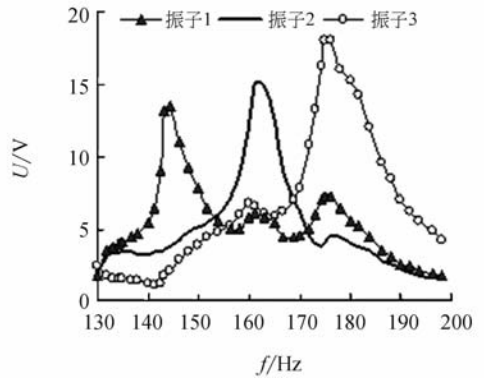


图10 压电振子独立发电的输出电压特性曲线

Fig. 10 Respective voltage-frequency curves of piezoelectric cantilevers

内单个压电振子的输出电压);但在第一个波峰之前和最后一个波峰之后的频率段内,电压相位基本相同,电压叠加,致使多个振子串联的输出电压较高。(2)直接并联时,在相邻2个振子独立发电输出电压峰值之间的频率段内,输出电压出现低谷,并且在整个频率范围内输出电压均较低(低于相同频域内单个压电振子的输出电压),这是由于直接并联的输出电压同时受相位以及各压电振子之间相互充放电的影响(低电压振子成为高电压振子的负载)。上述结果表明,多振子压电发电机的各压电振子在直接串联、并联时输出电压受相位的影响较大,在较大频率域内难以获得较高的输出电压,直接串联输出10 V电压时依然存在3个非连续的有效频带宽度(与单个压电振子输出电压的频带宽度相近,对照图10)。

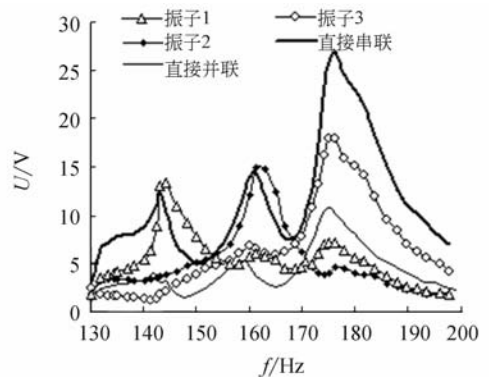


图11 三振子不整流串/并联输出电压特性曲线

Fig. 11 Voltage-frequency curves of piezoelectric cantilevers connected directly

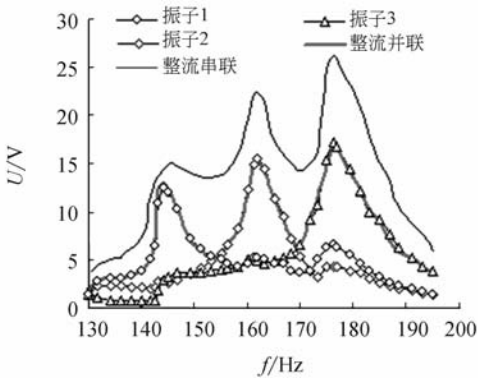


图 12 三振子分别整流后串/并联输出电压特性
Fig. 12 Voltage-frequency curves of piezoelectric cantilevers connected with rectifiers

图 12 给出了各压电振子经整流桥串/并联后的电压-频率曲线。从该图可以看出,压电振子经整流桥串联时,总的输出电压在相邻 2 个压电振子独立发电的峰值电压间的频率段内提高幅度较大(约为各压电振子独立发电输出电压之和),而在第一个波峰之前和最后一个波峰之后输出电压曲线与无整流桥时基本相同。输出电压为 10 V 和 13.7 V 时,连续频带宽度分别为 141.8~190 Hz 和 143~184.3 Hz,因此,振子经整流桥串联可在较大的连续频域内获得较高的输出电压。从图 12 还可发现,压电振子经整流桥并联时的输出电压曲线与 3 个压电振子独立发电输出电压曲线交点以上的部分重合。电压波动幅度较大,

且整个频域内的电压幅值均低于经整流桥串联时的输出电压。

上述试验结果表明,多振子压电发电机的输出电压特性及有效频带宽度与压电振子数量及连接方式有关。当各压电振子经整流桥串联时,可获得较高的输出电压及较宽的连续频带宽度,这与前面的理论分析结论相吻合。

5 结 论

提出了采用多个压电振子联合发电拓宽压电发电机有效频带宽度的研究方法。首先从理论上分析了连接方式不同时各压电振子输出电压的耦合特性,在此基础上设计制作了 3 个压电振子构成的压电发电机并进行了试验测试。研究结果表明,压电振子的连接方式对多振子压电发电机输出电压的幅值及有效频带宽度均有较大影响。压电振子直接串联和经整流桥串联时的输出电压分别大于直接并联及经整流桥并联时的输出电压。此外,在整个频域内经整流桥串联时的输出电压最高。试验中 3 个压电振子独立发电输出 10 V 电压时的频带宽度分别为 143.1~148.1 Hz、160~166.2 Hz 和 173.1~184.3 Hz;经整流桥串联时,输出 10 V 电压的连续频带宽度增加,为 141.8~190 Hz,而在 143~184.3 Hz 频域内的输出电压可达 13.7 V。因此,压电振子经整流桥串联的方法可有效地提高多振子压电发电机的输出电压及有效频带宽度。

参考文献:

- [1] 唐彬,温志渝,温中泉,等. 振动式微型发电机的研究现状与发展趋势[J]. MEMS 器件与技术, 2007, 5: 254-258.
TANG B, WEN ZH Y, WEN ZH Q, et al.. Current R & D of the micro vibration-based generator [J]. MEMS Device & Technology, 2007, 5: 254-258. (in Chinese)
- [2] 刘路,解晶莹. 微能源[J]. 电源技术, 2006, 26(6): 470-474.
LIU L, XIE J Y. Micro energy [J]. Journal of Electronic Technology, 2006, 26(6): 470-474. (in

Chinese)

- [3] 贺学锋,温志渝,温中泉. 压电式振动发电机的建模及应用[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(6): 1436-1441.
HE X F, WEN ZH Y, WEN ZH Q. Modeling and application of piezoelectric vibration-based power generator [J]. Opt. Precision Eng., 2009, 17(6): 1436-1441. (in Chinese)
- [4] KIM S, CLARK W W, WANG Q M. Piezoelectric energy harvesting using a diaphragm structure [J]. SPIE, 2003, 5055: 307-318.
- [5] GLYNNE-JONES P, TUDOR M J, BEEBY S P, et al.. An electromagnetic vibration-powered gener-

- ator for intelligent sensor systems [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 110:344-349.
- [6] MITCHESON P D, MIAO P, STARK B H, *et al.*. MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 115:523-529.
- [7] 谢涛,袁江波,单小彪,等.多悬臂梁压电振子频率分析及发电实验研究[J].*西安交通大学学报*, 2010,44(2):98-101.
- XIE T, YUAN J B, SHAN X B, *et al.*. Frequency analysis and electricity generated by multiple piezoelectric cantilevers in energy harvesting [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44 (2): 98-101.
- [8] SHAHRUZ S M. Design of mechanical band-pass filters with large frequency bands for energy scavenging [J]. *Mechatronics*, 2006,16: 523-531.
- [9] SHAHRUZ S M. Design of mechanical band-pass filters for energy scavenging: multi-degree-of-freedom models [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2008, 14(5): 753-768.
- [10] AYERS J P, GREVE D W, OPPENHEIM I J. Energy scavenging for sensor applications using structural strains [J]. *SPIE*, 2003, 5057: 364-375.
- [11] 季宏丽,马勇,裘进浩,等.高效压电能量回收系统的优化设计[J].*光学精密工程*, 2008,16(12): 2346-2351.
- JI H L, MA Y, QIU J H, *et al.*. Optimal design of high efficiency piezoelectric energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (12): 2346-2351.
- [12] 阚君武,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.
- [13] 陈宇东.结构振动分析[M].长春:吉林大学出版社, 2008.
- CHENG Y D. *Structures Vibration Analysis* [M]. Changchun: Jilin University Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



阚君武(1965—),男,吉林榆树人,教授,博士生导师,1991年、2000年于吉林工业大学分别获得学士和硕士学位,2003年于吉林大学获得博士学位,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,主要从事压电驱动器、能量回收与自供电技术、精密机械与微小机械等方面的研究。E-mail: jutkjw@yahoo.com.cn



王淑云(1965—),女,吉林长岭人,教授,1988年、2001年、2008年于吉林大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事工程问题的理论建模、仿真分析及优化等方面的研究。E-mail: wshy888@yahoo.com.cn



彭少锋(1986—),男,湖南浏阳人,硕士研究生,2009年于吉林化工学院获得学士学位,主要从事压电陶瓷能量回收及自供电振动技术的研究。E-mail: pengshaofeng1986@126.com



张忠华(1980—),男,吉林松原人,博士,2009年于大连理工大学获得博士学位,主要从事压电传感器与驱动器技术的研究。E-mail: zhhzhang225@yahoo.com.cn



程光明(1957—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1982年、1985年和1996年于吉林工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事压电驱动与控制技术及微小型机电液系统等方面的研究。E-mail: cgm123@163.com



付晓庆(1985—),男,河北沧州人,硕士研究生,2009年于吉林化工学院获得学士学位,主要从事压电能量回收及自供电技术的研究。E-mail: fxq1985ly@yahoo.com.cn

通讯作者:



曾平(1957—),女,辽宁盖州人,教授,博士生导师,1982年、1993年于吉林工业大学分别获得学士和硕士学位,2006年于吉林大学获得博士学位,主要从事机械设计及理论、压电驱动技术的研究。E-mail: zengping321@163.com

● 下期预告

全息方法制备嵌段式液晶弹性体

宋 静¹, 栗宏亮¹, 彭增辉², 李文萃^{2,3}

(1. 长春理工大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为研究热致收缩形变液晶弹性体薄膜的制备及收缩特性,对三嵌段式液晶弹性体薄膜的制备方法、偏光特性、热致收缩率等进行了研究和测试。采用全息曝光的方法一次性制备具有栅状结构的热致液晶弹性体薄膜材料。在此基础上利用 YAG 激光器,通过偏光显微镜、He-Ne 激光器对弹性体薄膜的嵌段式栅状结构、偏光特性进行检测,并分析薄膜弹性体偏光特性和液晶分子取向关系,对该液晶弹性体薄膜的热致收缩性能进行测试。实验结果表明嵌段式栅状薄膜具有偏光特性,液晶分子沿垂直于栅状结构的方向排列。在液晶相变温度处(65~80℃),该液晶弹性体薄膜的热致收缩形变率达到 12%。全息方法制备液晶弹性体薄膜简单,薄膜性能稳定,收缩率高,在人工肌肉、微机械等方面有广泛的应用前景。