

半电极含金属芯压电纤维阵列研究

汪小华, 张晓明, 陈池来

(中国科学院 合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:通过计算半周期内的有效电压,分析了半电极含金属芯压电纤维阵列能量收集的动力学方程组,推导了纤维完全一致和存在尺寸差异两种情况下阵列收集的电压和能量方程,仿真计算了纤维几何参数满足正态分布时能量收集效率与半径比、纤维长度和半电极角度的方差之间的变化规律。分析结果表明,纤维尺寸差异越大,能量收集效率越低。为提高阵列在不同方向的外界激励下能量收集效率,需要在每根纤维直接连接交流-直流转换电路。

关键词:半电极;金属芯;压电纤维;阵列;能量收集

中图分类号:TN384

文献标识码:A

Research on Half Coated Metal Core Piezoelectric Fiber Array

WANG Xiaohua, ZHANG Xiaoming, CHEN Chilai

(Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The electromechanical coupling dynamics of half coated metal core piezoelectric fiber array is analyzed by calculating the effective voltage in half cycle. The expression of harvest voltage and power is derived in two cases of uniformed fibers and different fibers. When the geometry parameters of the fibers meet normal distribute, the normalized harvesting power affected by the variance of radius ratio, length of fiber and angle of half electrode is simulated. The results show that the normalized harvesting power is lower with bigger difference of the fiber geometry parameters. To improve the normalized harvesting power with different direction of environment vibration every fiber needs an AC-DC transfer circuit.

Key words: half coated; metal core; piezoelectric fiber; array; energy harvesting

0 引言

压电能有效地将环境振动能量转换为电能^[1-3]。为克服压电陶瓷脆性较大的问题,裘进浩等^[4]研制了含金属芯的压电陶瓷纤维。在含金属芯压电纤维的一半纵向表面喷镀金属层得到半电极含金属芯压电纤维,能将弯曲变形的机械能转换为电能。Gael Sebald等^[5]研究全电极纤维的纵向振动物理模型和有限元模型,分析了半径比对频率常数和机电耦合系数的影响;测试了纤维的材料常数。边义祥等^[6]研究了半电极压电纤维的静态本构关系和驱动性能。为了提高压电器件收集效率,Daisuke Koyama等^[7]采用理论和实验方法研究了微机电系统(MEMS)压电悬臂梁阵列的能量收集,获得了较高的能量密度。刘金泉等^[8]设计并研制了压电陶瓷

(PZT)悬臂梁阵列,获得了 3.93 V 的直流电压和 3.98 μ W 的能量。Hyung Hoon Kim 等^[9]研究了大初始变形 PZT 压电悬臂梁阵列,并测试了不同频率下收集的能量。

目前研究的压电悬臂梁阵列都是矩形截面,对激励方向有较强的选择性。本文研究了半电极含金属芯压电纤维阵列的能量收集,分析了阵列的动力学特性和能量收集效率,并对阵列的一致性进行了分析和探讨,以适应不同方向的外界激励。

1 理论模型

单根半电极含金属芯压电纤维截面示意图如图 1 所示。图中, R_p 为外径, R_m 为内径, V_p 为纤维阵列上产生的电压, V_c 为负载电阻 R_c 上的电压, C_c 为滤波电容, y 为外界位移激励。

收稿日期:2014-08-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005224)

作者简介:汪小华(1976-),男,湖南临湘人,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事微声电子材料技术和能量收集相关的研究。

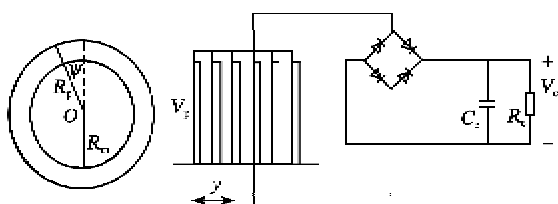


图1 纤维阵列能量收集示意图

基于拉格朗日方程可推导出纤维的动力学方程组为

$$M_i \ddot{u}_i(t) + \eta_i \dot{u}_i(t) + K_i u_i(t) + \Theta_i V_p(t) = K_i y(t) \quad (1)$$

$$-\Theta_i \dot{u}_i(t) + C_{pi} \dot{V}_p(t) = -I_i(t) \quad (2)$$

$$I = \sum_i I_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

其中

$$M_i = \pi [\rho^p (R_{pi}^2 - R_{mi}^2) + \rho^m R_{mi}^2] L_i \quad (4)$$

$$K_i = \pi \left[\frac{1}{4s_{11}^E} (R_{pi}^4 - R_{mi}^4) + \frac{1}{4s_{11}^m} R_{mi}^4 \right] \frac{1}{L_i^3} \quad (5)$$

$$\Theta_i = -0.783 \frac{[\cos \psi_i - \cos(\pi + \psi_i)] d_{31} R_{pi}^2}{s_{11}^E L_i} \quad (6)$$

$$C_{pi} = \frac{\pi L_i}{\ln(R_{pi}/R_{mi})} \left(\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right) \quad (7)$$

式中:上标 p 为压电;上标 m 为金属芯; S_{11}^p , T_{11}^p 分别为沿纤维长度方向的应变和应力; D_{31}^p , E_{31}^p 分别为沿径向的电感应强度和电场强度; d_{31} 为压电系数; s_{11}^E 为柔度系数; ϵ_{33}^T 为介电常数; L 为纤维长度; R_p , R_m 分别为纤维和金属芯的半径; ψ 为半电极与振动方向的角度。

经过 AC-DC 转换电路后的电流满足

$$I = \begin{cases} C_e \dot{V}_e(t) + \frac{V_e}{R_e} & (V_e = V_c) \\ -C_e \dot{V}_e(t) - \frac{V_e}{R_e} & (V_e = -V_c) \\ 0 & (|V_e| < V_c) \end{cases} \quad (8)$$

假设阵列受到谐波激励的作用,即

$$y(t) = y_0 \sin \omega t \quad (9)$$

当系统达到平衡态后,可假设 $u_i(t)$ 和 $V_p(t)$ 周期和相位均相同:

$$u_i(t) = u_{0i} \sin(\omega t - \theta) \quad (10)$$

$$V_p(t) = g(\omega t - \theta) \quad (11)$$

将式(2)累加,并在半个周期内积分,计算在半个周期上的有效电压。由于流经外接电容 C_e 上的电流在半个周期上的积分等于 0,可得

$$V_c = \frac{\omega R_e}{\omega R_e \sum_i C_{pi} + \pi/2} \sum_i \Theta_i u_{0i} \quad (12)$$

$$\bar{V}_c = \frac{V_c \sum_i \Theta_i}{y_0 \sum_i K_i} \quad (13)$$

$$\bar{P} = \frac{P}{y_0^2 \omega \sum_i K_i} \quad (14)$$

式中 P 为负载电阻 R_e 上产生的功率,即转换的功率。

1.1 纤维完全一致阵列

为求解 u_{0i} ,先假设每根纤维完全一致。则参考 Y C Shu 等^[10]的方法,可求出

$$u_{0i} = \frac{K_i y_0}{\left\{ \left[\eta_i \omega + \frac{2\omega R_e (\sum_i \Theta_i)^2 / n}{(\sum_i C_{pi} \omega R_e + \pi/2)^2} \right]^2 + \left[K_i - \omega^2 M_i + \frac{\omega R_e (\sum_i \Theta_i)^2 / n}{\sum_i C_{pi} \omega R_e + \pi/2} \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (15)$$

当每根纤维完全相同时,可求出

$$\bar{V}_c = \frac{nr \Omega k_e^2}{nr \Omega + \pi/2} \times \frac{1}{\left\{ \left[2\zeta + \frac{2nr k_e^2}{(nr \Omega + \pi/2)^2} \right]^2 \Omega^2 + \left(1 - \Omega^2 + \frac{nr \Omega k_e^2}{nr \Omega + \pi/2} \right)^2 \right\}^{1/2}} \quad (16)$$

$$\bar{P} = \frac{nr \Omega k_e^2}{(nr \Omega + \pi/2)^2} \times \frac{1}{\left[2\zeta + \frac{2nr k_e^2}{(nr \Omega + \pi/2)^2} \right]^2 \Omega^2 + \left(1 - \Omega^2 + \frac{nr \Omega k_e^2}{nr \Omega + \pi/2} \right)^2} \quad (17)$$

式中: $k_e^2 = \Theta^2 / (K C_p)$; $\zeta = \eta / (2 \sqrt{KM})$; $\Omega = \omega / \omega_n$, $\omega_n = \sqrt{K/M}$; $r = C_p \omega_n R_e$ 。

当取 $r^* = nr$ 时,式(17)与 n 无关,说明阵列的能量转换效率,收集电压与纤维数目无关,阵列收集的能量和纤维数目成正比。但为获得最大能量转换

效率,匹配阻抗与纤维数目成反比。从式(14)中还可得到在最大转换效率下 $V_c \propto \chi^2$ (χ 为纤维的径长比),收集的电压只取决于 $\chi = R_p/L$,与纤维的大小无关。这表明将纤维微型化、阵列化可在不改变收集电压的条件下有效提高收集的能量。

1.2 纤维尺寸存在差异

直接求解式(1)~(8)存在困难,可将式(15)作为每根纤维的近似解,代入式(9)~(14)求解收集的电压和能量。

2 仿真与分析

使用铝作为金属芯材料, $s_{11}^m = 13.89 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $\rho^m = 2700 \text{ kg/m}^3$; 使用钛酸钡作为压电层材料, $s_{11}^E = 8.05 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $\rho^P = 6070 \text{ kg/m}^3$, $\epsilon_{33}^T = 1486.8 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $d_{31} = -34.5 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ 。设计金属芯半径 $10 \mu\text{m}$, 设纤维数目为 1000, 不同纤维的半径比 $R = R_p/R_m$, 长度 L , 角度 ψ 均满足正态分布。采用蒙特卡罗方法计算采集电压、能量收集与正态分布的方差之间的关系。由于在给定负载阻抗后, 收集的能量与电压存在平方关系, 图 2~4 为归一化能量与方差间的关系。

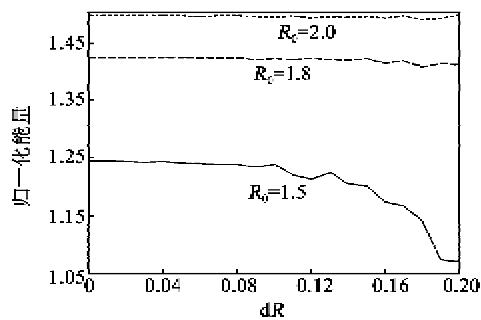


图 2 归一化能量与半径比方差曲线

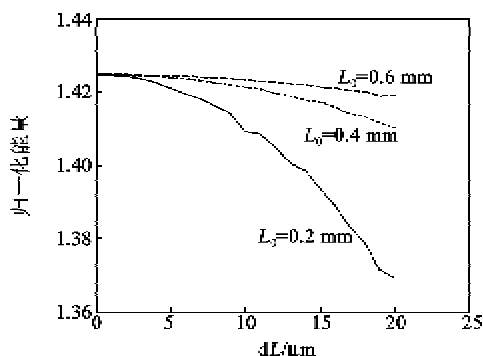


图 3 归一化能量与长度方差曲线

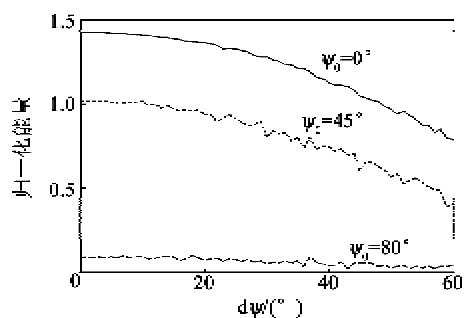


图 4 纤维直接并联归一化能量与角度方差的关系

由图 2 可见, 收集到的能量会随着半径比方差的增加而降低, 随着半径比的增加, 能量随半径比方差的改变越来越不明显。由图 3 可见, 收集到的能量随纤维长度方差的增加而降低, 纤维长度越长时, 收集能量随长度方差的增加降低得越少。由图 4 可见, 当角度变化时, 收集到的能量随角度方差的增加而降低, 当角度增加时, 收集的能量随之降低, 当角度趋近于 90° 时, 收集的能量趋近于 0。这一结果表明, 纤维阵列不同纤维的取向也不同, 并不能改善单根纤维遇到的振动的方向性问题。这主要是因为每根纤维直接并联后, 不同纤维由于角度的差异引起振动的相位差异从而会将收集的能量互相抵消。若将每根纤维直接连接一个 AC-DC 转换电路后再并联, 减小了不同纤维间的互相干扰。通过计算如图 5 所示, 当角度方差超过 70° 时, 不管振动方向如何, 最终的收集都趋近于最大收集能量的一半左右。进一步计算半电极方向均匀分布时收集的归一化能量, 结果如图 6 所示, 不管外界激励的角度如何变化, 归一化能量都约为 0.86, 与正态分布时的大方差分布一致。这说明通过将半电极的方向在空间中均匀分布, 且每根纤维直接连接 AC-DC 转换电路后再并联能有效克服半电极含金属芯纤维的方向性问题。然而随着纤维数目的增加, 每个纤维直接连接一个 AC-DC 电路会使工艺变得很复杂而难以实现。

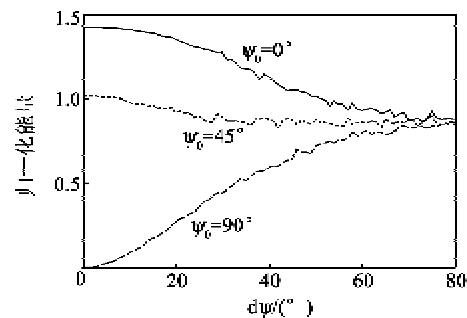


图 5 纤维非直接并联的归一化能量与角度方差的关系

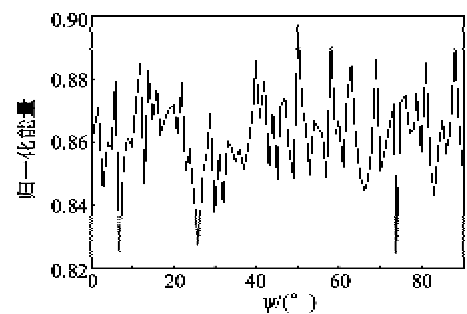


图 6 纤维角度满足平均分布非直接并联归一化能量与角度方差的关系

3 结束语

采用拉格朗日方程推导了半电极含金属芯压电纤维阵列的动力学方程,使用有效载荷法求解纤维完全一致以及几何尺寸和角度分布存在偏差时收集的电压和收集的能量,针对铝作为金属芯,钛酸钡作为压电层的纤维,仿真计算了不同几何方差下的能量收集效率。结果表明,当纤维完全一致时,阵列收集的电压与单根纤维一样,收集的能量与纤维根数成正比,匹配的电阻与纤维根数成反比。收集的能量会随几何方差的增大而降低。纤维直接并联后再连接 AC-DC 转换电路不能克服半电极压电纤维的方向性问题,但纤维直接连接 AC-DC 转换电路后再并联,若纤维的电极角度分布在一定的范围时,对不同外界激励方向,阵列仍能收集到最大能量的 50%。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 贺学锋, 杜志刚, 赵兴强. 悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1771-1778.
HE Xuefeng, DU Zhigang, ZHAO Xingqiang. Modeling and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1771-1778.
- [3] 潘家伟, 黄卫清, 周凤拯, 等. 基于压电效应的能量收集[J]. 压电与声光, 2009, 31(3): 347-349.
PAN Jiawei, HUANG Weiqing, ZHOU Fengzheng, et al. Piezoelectric energy harvesting based on the piezoelectric effect [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(3): 347-349.
- [4] QIU Jinhao, MAJUNG P, DAISUKE H. The research of the development of the air flow sensor using the piezoelectric fiber with Pt core[C]//Sendai, Japan: Proceedings of 13th conference on Electromagnetic Phenomena and Dynamics, 2004: 299-3036.
- [5] SEBALD G, QIU Jinhao, GUYOMAR D, et al. Modeling and characterization of piezoelectric fibers with metal core[J]. Jpn J Appl Phys, 2005, 44(8): 6156-6163.
- [6] 边义祥, 裘进浩. 半电极含金属芯压电纤维的弯曲振动模型[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1298-1305.
BIAN Yixiang, QIU Jinhao. Bending vibration model for half coated metal core piezoelectric fiber[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1298-1305.
- [7] KOYAMA D, NAKAMURA K. Array configurations for higher power generation in piezoelectric energy harvesting[J]. IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2009: 1973-1976.
- [8] LIU Jingquan, FANG Huabin, XU Zhengyi, et al. A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting[J]. Microelectronics Journal, 2008, 39: 802-806.
- [9] KIM H H, YOON S H, AHN C H, et al. Fabrication of a piezoelectric microcantilever array with a large initial deflection and an application to electrical energy harvesting[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(9): 1671-1677.
- [10] SHU Y C, LIEN I C. Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems [J]. Smart Materials and Structures, 2006(15): 1499-1512.

《压电与声光》广告免费咨询卡

姓名: _____ 职务: _____ 职称: _____ 单位: _____

地址: _____ 邮编: _____ 电话: _____

您对本刊 _____ 年 _____ 期的 ☐ 彩色 ☐ 黑白 ☐ 刊花广告

_____ 公司(厂家) _____ 产品/技术感兴趣

希望: ☐ 索取公司资料 ☐ 索取产品资料 ☐ 询问价格 ☐ 建立业务联系 ☐ 其他 _____

请将卡片寄往(或传真):《压电与声光》编辑部 读者服务部

通讯地址:重庆南坪 2513 信箱(400060) 电话:023-62919570 传真:023-62805284

复印有效