

Cymbal型压电发电装置等效压电常数分析

郭 帅, 郭吉丰

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 压电发电工作于低频时所收集的能量与其等效压电常数和等效电压常数的乘积成正比。为了研究Cymbal型压电发电装置的等效压电常数,建立了Cymbal型压电发电装置的三维有限元分析模型,并分析得出了等效压电常数计算公式;详细地分析了Cymbal型发电装置中金属帽的材料和厚度、金属腔底端直径和顶端直径、金属腔高度、压电陶瓷片厚度等因素对等效压电常数的影响,并给出了等效压电常数的优化准则。试验结果表明,经优化后可获得的等效压电常数大约相当于压电陶瓷本身的60倍。

关键词: 压电陶瓷;Cymbal;能量收集;压电常数;有限元计算

中图分类号: TM619

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0443-04

Analysis of Cymbal piezoelectric generator's effective piezoelectric strain constant

GUO Shuai, GUO Ji-feng

(College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The harvesting energy of piezoelectric generator is proportional to the product of effective piezoelectric strain constant and effective piezoelectric voltage constant at low frequency. In order to study the effective piezoelectric strain constant of the cymbal piezoelectric generator, the 3D finite element analysis (FEA) model of the generator was established, and effective piezoelectric strain constant calculation formula was also given. Besides, the influences of the metal cap material type, the metal cap thickness, the metal cavity bottom diameter, the cavity top diameter, metal cavity height and the PZT thickness on the effective piezoelectric strain constant of cymbal piezoelectric generator were analyzed, and some optimization criterions were given. Results indicate that the obtained effective piezoelectric strain constant is about as 60 times as that of PZT itself.

Key words: PZT; Cymbal; energy harvest; piezoelectric strain constant; finite element analysis (FEA)

0 引 言

压电发电是指通过利用压电陶瓷的正压电效应来将机械能转换为电能。近年来,随着对新能源开发的迫切需求,以及微电子系统的功耗越来越小,使得利用压电陶瓷收集环境中能量成为一个研究热点^[1-3]。与传统的电磁发电方式相比,压电发电具有结构简单、体积小、无污染、能量密度大等优点。

对于压电发电装置的设计,可以使其工作于共振状态,也可以工作于非共振状态,与所收集能量的振动源有关。通常环境中的振动源频率较低,一般为0~

400 Hz^[1]。Priya探讨了压电发电装置工作状态远离共振点,其收集的能量与系统等效压电常数 d^{eff} 和等效电压常数 g^{eff} 的乘积成正比^[3]。同时压电发电具有高电压、低电流的特性^[4],高的压电常数可以增强压电发电的电流特性。要实现高的压电常数,从压电陶瓷材料入手显然进展有限,主要是通过改进压电发电装置的结构来实现,为此国内外的研究者尝试了多种压电发电装置结构,其中Cymbal型压电发电装置具有高效压电常数、大弯曲变形、承载能力高等特点,可以工作于大外力的场合,而且结构简单,便于加工^[5]。

Cymbal型压电发电装置中,由于金属帽的特殊结

收稿日期: 2011-10-31

作者简介: 郭 帅(1983-),男,山西朔州人,主要从事压电发电及能量收集技术的研究。E-mail: guoguo.zju@gmail.com

通信联系人: 郭吉丰,男,教授,博士生导师。E-mail: gjf@zju.edu.cn

构,使得加载于金属帽上的轴向方向作用力经过转换、放大为沿着压电陶瓷片轴向和径向的两个分力,从而使得发电装置同时工作于 d_{31} 和 d_{33} 模式,也就是说压电陶瓷的 d_{31} 和 d_{33} 常数同时对 Cymbal 压电发电装置的纵向等效压电常数 d_{33}^{eff} 做出贡献^[6]。因而 Cymbal 压电发电装置的等效压电常数 d_{33}^{eff} 比单一压电陶瓷片的 d_{33} 高出很多。

对于 Cymbal 结构,以前的讨论大多针对工作于逆压电效应换能器模式,Dogan 讨论的换能器等效压电常数是压电陶瓷自身的 40 倍^[5]。而作为正压电效应的发电模式讨论还比较少,刘智等就 Cymbal 结构参数对其发电性能的影响进行了有限元分析^[7],但其只关注发电装置的输出电压而未对其等效压电常数进行分析。在低频时,高的压电常数意味着可以收集更多的能量。

本研究利用有限元 ANSYS 软件对 Cymbal 结构工作于发电模式的等效压电常数进行分析及优化设计。

1 Cymbal 型压电发电装置的等效压电常数

Cymbal 型压电发电装置由两个金属帽、压电陶瓷片用环氧树脂粘结而成,其结构示意图如图 1 所示。

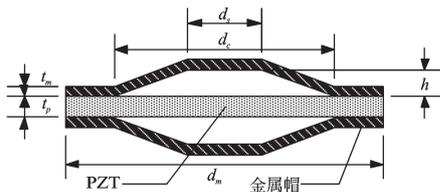


图1 Cymbal结构示意图

t_m, t_p —金属帽和压电陶瓷的厚度; h —金属帽腔体高度;
 d_m, d_c, d_s —压电陶瓷直径、金属帽腔体底部直径和腔体顶部直径。

对于 Cymbal 型的压电片,本研究用第一类压电方程^[8]表示为:

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \tag{1}$$

$$D_m = d_{mi} T_i + \varepsilon_{mk}^T E_k \tag{2}$$

式中: $i, j = 1, 2, 3, \dots, 6$; $m, k = 1, 2, 3$; S —压电材料应变变量; D —电位移量; T —应力矢量; E —电场强度矢量; s^E —弹性柔顺常数; d —压电常数; ε^T —介电常数。

如果压电材料用于发电,即工作于正压电效应,其外加电场 $E = 0$,压电方程简化为:

$$S_i = s_{ij}^E T_j \tag{3}$$

$$D_m = d_{mi} T_i \tag{4}$$

对于 Cymbal 结构,由于金属帽的特殊机制,压电陶瓷同时工作于 d_{31} 和 d_{33} 模式,而施加于 Cymbal 型压电发电装置的力是 3 方向的,将其压电常数全部折换

为 33 方向,可求得 33 方向等效压电常数为:

$$d_{33}^{eff} = D_3 / T_3 \tag{5}$$

式中: D_3, T_3 —3 方向的电位移矢量和等效应力矢量,其值为:

$$D_3 = Q / A \tag{6}$$

$$T_3 = F / A \tag{7}$$

式中: Q —力 F 的作用下压电陶瓷耦合面的电荷, A —压电陶瓷片的面积。由式(6~8),得:

$$d_{33}^{eff} = Q / F \tag{8}$$

压电陶瓷的静电容为:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{33} \varepsilon_0 A}{t_p} \tag{9}$$

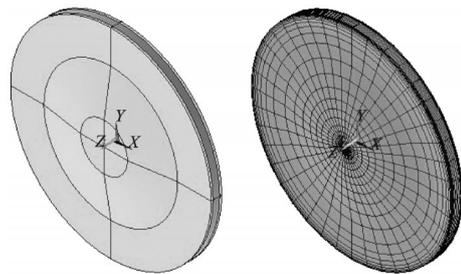
在力 F 的作用下,发电装置输出开路电压为:

$$V = \frac{Q}{C_0} = \frac{d_{33}^{eff}}{\varepsilon_{33} \varepsilon_0} \times \frac{F t_p}{A} \tag{10}$$

在力 F 的作用下, Q 和 V 可由 ANSYS 软件计算得出。

2 有限元分析模型及参数

本研究利用 ANSYS 软件进行仿真分析,所建立的 Cymbal 压电发电装置的 ANSYS 三维模型如图 2(a) 所示,其模型参数如表 1 所示。金属帽采用 solid45 单元,压电晶体采用 solid5 单元进行网格划分,网格剖分图如图 2(b) 所示。金属帽的材料选用黄铜、钢,压电陶瓷的材料为 PZT-5A,压电陶瓷参数如表 2 所示。ANSYS 仿真采用静态分析。



(a) Cymbal模型 (b) 网格剖分图

图2 ANSYS三维模型

表1 Cymbal压电发电装置参数

参数	金属帽		PZT-5A
	黄铜	钢	
密度/(kg·m ⁻³)	8 900	7 850	7 750
弹性模量/GPa	110	206	--
泊松比	0.35	0.26	0.32
d_m /mm		30	30
t_m /mm	0.3、0.4、0.5、0.6		--
t_p /mm	--		1
d_c /mm	20		--
d_s /mm	7		--

表2 PZT-5A 压电参数

相对介电常数 $\left[\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right]$	$\begin{pmatrix} 1730 & 0 & 0 \\ 0 & 1730 & 0 \\ 0 & 0 & 1700 \end{pmatrix}$
压电常数矩阵 $[d]$ (单位: $\times 10^{-12} \text{C/N}$)	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 584 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 584 & 0 & 0 \\ -171 & -171 & 374 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
压电柔性 常数矩阵 $[s]$ (单位: $\times 10^{-12} \text{m/V}$)	$\begin{pmatrix} 16.4 & -5.74 & -7.22 & 0 & 0 & 0 \\ -5.74 & 16.4 & -7.22 & 0 & 0 & 0 \\ -7.22 & -7.22 & 18.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 47.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 47.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 44.3 \end{pmatrix}$

3 仿真结果与讨论

在静力作用下,Cymbal型发电装置产生电荷与力 F 和金属帽材料的关系如图3所示。

由图3可知,在相同力作用下,金属帽为黄铜时可以产生出更多的电荷;而同种材料Cymbal型发电装置产生电荷量随着施加力 F 的增加而线性增大。由式(9)可知,等效压电常数为产生电荷量和施加力的比值,所以等效压电常数与施加力 F 的大小无关。本研究选择黄铜作为金属帽的材料、力 F 的值为 50 N 进行分析。

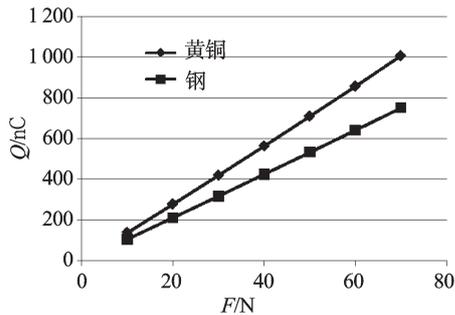


图3 电荷量与施加力 F 和金属帽材料的关系

Cymbal型发电装置等效压电常数与金属腔体底部直径和顶部直径的关系如图4、图5所示。

由图4、图5可知,在相同力 F 作用下,Cymbal等效压电常数随着金属腔顶部直径增加而减小,随着底部直径增加而增大,随着金属帽的厚度增加而减少。但是,实际中考虑到Cymbal型发电装置的加工、安装以及结构的可靠性,本研究选取金属腔底部直径 d_c 和顶

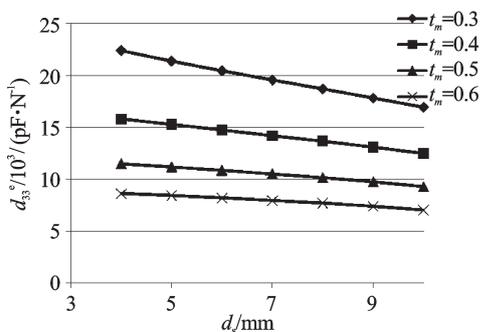


图4 等效压电常数与金属腔顶部直径的关系

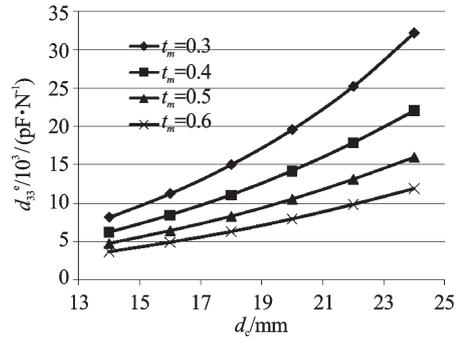


图5 等效压电常数与金属腔底部直径的关系
部直径 d_s 的值分别为 20 mm、7 mm。

Cymbal型发电装置等效压电常数与金属腔高度关系如图6所示。

由图6可知,随着 h 的不断增大,等效压电常数先增大后减小,存在一个最优腔体高度值 h 。在材料以及 d_c 、 d_s 固定的情况下,对于不同厚度的金属帽,其达到的最优值 h 并不相同。本研究对于金属帽厚度 t_m 依次取 0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm 和 0.6 mm,其最优值 h 分别为 0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm 以及 0.7 mm。

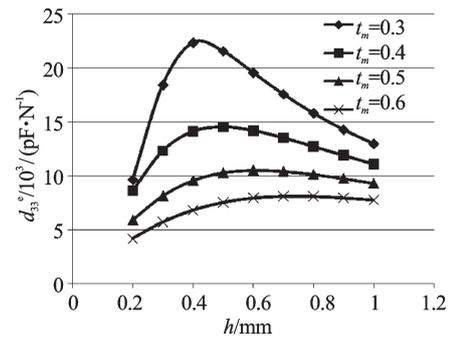


图6 等效压电常数与金属腔高度的关系

Cymbal型发电装置开路电压和等效压电常数与压电陶瓷厚度的关系如图7、图8所示。此时对于不同金属帽厚度 t_m ,其金属腔高度 h 选其最优值。结果表明,随着压电陶瓷片厚度增加,输出电压增加,而等效压电常数却减少。因此,本研究在实际制作Cymbal型发电装置的时候,对其陶瓷片厚度应进行一定的优化选择。从图上看, $t_p < 1.5 \text{ mm}$ 时,压电常数下降较明显,

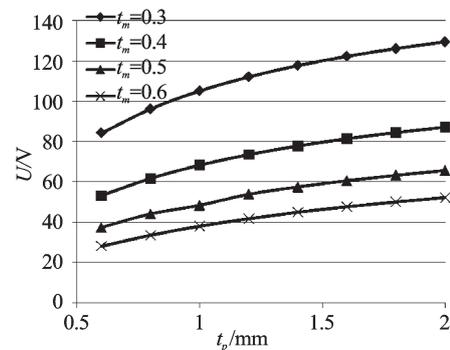


图7 开路电压与PZT厚度的关系

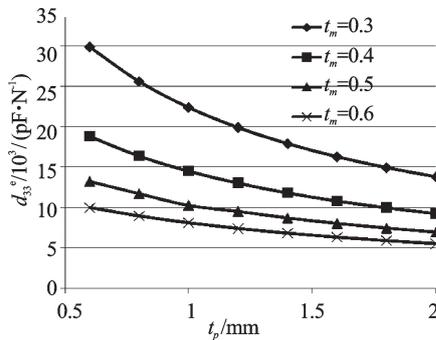


图8 等效压电常数与PZT厚度的关系

而当 $t_p > 1.5$ mm 时, 压电常数变化缓慢。所以衡量输出电压以及等效压电常数, t_p 值应该取 1 mm~1.5 mm 之间。

4 结束语

本研究用 ANSYS 软件建立了 Cymbal 型压电发电装置的有限元模型, 并分析了等效压电常数 d_{33}^{eff} , 得出如下结论:

(1) 金属帽材料选择黄铜, 可以得到更大的等效压电常数。等效压电常数与施加力 F 的大小无关, 随着金属球顶直径增大而减小, 随着底直径增大而增大, 金属帽厚度增加而减小。

(2) 在 Cymbal 的结构参数(如金属帽的厚度、压电陶瓷片的厚度及直径)确定的情况下, 都会存在一个最优的腔体高度 h , 而且针对不同金属帽厚度, 其最优值不同。

(3) Cymbal 电压输出随着压电陶瓷厚度增加而增加, 其等效压电常数却随着压电陶瓷厚度增加而减少,

对压电陶瓷厚度应进行优化选择。优化后 t_m 为 0.3 mm, t_p 为 1 mm, 其等效压电常数值为 22 000 pC/N, 大约是压电陶瓷本身 d_{33} (374 pC/N) 的 60 倍。

参考文献(References):

- [1] ROUNDY S, WRIGHT P K, RABAHEY J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes[J]. **Computer Communications**, 2003, 26(11):1131-1144.
- [2] ANTON S R, SODANO H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials(2003-2006)[J]. **Smart Materials and Struct**, 2007, 16(3):1-21.
- [3] PRIYA S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers[J]. **Electroceram**, 2007, 19(1):167-184.
- [4] PLATT S R, FARRITOR S, HAIDER H. On low-frequency electric power generation with PZT ceramics[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2005, 10(2):240-252.
- [5] DOGAN A, UCHINO K, NEWNHAM R E. Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps "Cymbal"[J]. **Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, 1997, 44(3):597-605.
- [6] KIM H W, PRIYA S, UCHINO K. Piezoelectric energy harvesting under high pre-stressed cyclic vibrations[J]. **Journal of Electroceramics**, 2005, 15(1):27-34.
- [7] 刘智, 单小彪, 袁江波, 等. Cymbal 压电换能器发电性能的有限元仿真分析[J]. **机械设计与制造**, 2010(5):12-15.
- [8] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵(上册)[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.

[编辑: 李辉]

(上接第 427 页)

参考文献(References):

- [1] 卢中原, 郭兴旺, 宋序彤. 我国城市供排水现状与问题[J]. **经济研究参考**, 2008(25):8-14.
- [2] PETER S, CARTWRIGHT P E. Water purification[J]. **Water Treatment**, 1999(5):69-74.
- [3] 张还, 李胜多. 可编程控制器原理与过程控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [4] 孙立书. 基于 PLC 的软启动变频双恒压无塔供水系统[J]. **机电工程**, 2011, 28(6):715-718.
- [5] 李海波. 基于 PLC 的智能变频恒压供水监控系统的设计[J]. **机电工程技术**, 2011, 40(3):48-50.
- [6] 包西平, 赵颖. 全自动变频恒压供水系统设计[J]. **机电工程技术**, 2010, 39(7):27-30.
- [7] 逢启寿, 黄伟玲, 王忠锋, 等. 基于模糊控制技术的单片机恒压供水系统[J]. **自动化技术与应用**, 2006, 25(5):77-78.
- [8] MURRAY C J. Flow control improves pump performance[J]. **Water Environment & Technology**. 2005, 17(1):70-73.
- [9] 西门子公司. MICROMASTER 440 用户手册[M]. 西门子公司, 2003.
- [10] 陶权, 吴尚庆. 变频器应用技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2007.
- [11] 张扬, 蔡春伟, 孙明建. S7-200 PLC 原理与应用系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [12] 廖常初. 可编程控制器应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [13] EKER L. Operation and control of a water supply system[J]. **ISA Transactions**, 2003, 2(3):461-473.

[编辑: 罗向阳]