

# 基于铍式压电阵列的新型引信发电装置设计

陈永超,高敏,俞卫博

(军械工程学院 四系,河北 石家庄 050003)

**摘要:**设计了一种基于铍式压电换能器阵列的新型引信用发电装置,使用等静压压电常数法研究了铍式换能器及其阵列的发电特性,分析了发电装置在弹药发射环境下的电能输出特性。研究表明,该发电装置能有效收集发射环境中的冲击能,并将其先转换为振动能再转换为持续的电能,延长了压电换能器的电能输出时间,解决了现有引信压电电源电能输出小,供电时间短等问题。

**关键词:**引信电源;铍式换能器;振动;数值分析

**中图分类号:** TJ434

**文献标识码:** A

## Design of Novel Fuse Generator Based on Cymbal Piezoelectric Array

CHEN Yongchao, GAO Min, YU Weibo

(The Fourth Dept., Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** A novel fuse generator based on cymbal piezoelectric array has been designed in this work. The generating characteristics of cymbal piezoelectric transducer and cymbal piezoelectric array have been studied according to hydrostatic piezoelectric properties, and the power output characteristic of the generator under the ammunition projectile launch environment has been analyzed. The results show that this novel generator can effectively collect the impact energy under the ammunition projectile launch environment, and convert it into vibration energy firstly, then obtain continuous electrical energy. The designed generator increases the power-on time, and effectively solves the problems of small electrical energy output and short power-on time in the current fuse.

**Key words:** fuze generator; cymbal transducer; vibration; numerical analysis

### 0 引言

引信电源是根据引信战术技术指标,在特定条件下将化学能及机械能等形式的能量转换为电能并为发火控制系统及安全系统等提供能源的装置<sup>[1]</sup>。发电装置作为引信电源的核心部件直接影响着引信的适用范围乃至弹药的作战效能。

目前,压电陶瓷在引信电源中的应用研究是国内外的热点方向。文献[2]对一种新型的可蓄能压电电源原理进行了研究,认为压电电源具有激活时间小,长期储存性能好,体积小,成本低,适合大批量生产等特点;文献[3]设计了一种高能多层压电陶瓷电源,试验表明,该电源的激活时间小于 200  $\mu\text{s}$ ,能量达到 31 mJ,可给引信电路短时间供电;文献[4]设计了一种弹药用的压电发电装置,研究表明,该发电装置能承受 400 000~2 400 000  $\text{m/s}^2$  的加速度,并将弹药发射时的冲击能转换为电能为引信供电。然而现有引信压电电源中发电装置多为压电

陶瓷堆叠,发电时间较短(一般为几十毫秒),靠储能装置实现电源的持续供电,本文设计了一种能在弹药飞行过程中持续供电的发电装置。在分析了铍式换能器及其阵列发电特性的基础上,建立发电模型,仿真结果表明,其发电时间得到显著延长,体现了设计思路的合理性和有效性。

### 1 铍式阵列发电装置结构设计

如图 1 所示,该发电装置由外壳、弹簧质量组件和铍式压电阵列组成。

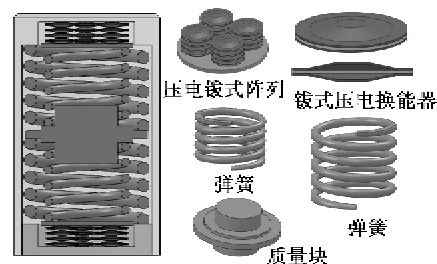


图 1 发电装置结构示意图

收稿日期:2013-04-09

基金项目:快激活自维持压电电源技术研究基金资助项目(装司字[2011]881号)

作者简介:陈永超(1989-),男,硕士生,主要从事引信系统分析与设计的研究。导师高敏教授。E-mail: ycchen126@126.com.

### 1.1 外壳的设计

外壳由圆柱桶和端帽组成,两者通过螺纹连接在一起,端帽留有小孔供导线引出。圆柱桶和端帽均有凹槽以放置钹式压电阵列。圆柱桶内径略大于质量块外径,以防止弹簧质量系统产生径向振动。圆柱桶内表面开细槽存放润滑剂,以减小质量块与圆柱桶内表面之间的摩擦。外壳封装后应保证弹簧产生一定的预压力以防止勤务处理中跌落等使其产生较大电能,提高安全性。

### 1.2 弹簧质量组件的设计

弹簧质量组件由阶梯状质量块和两组弹簧构成。两组弹簧分别位于质量块两端,其高度相同但刚度不同,外弹簧刚度比内弹簧大。外弹簧作用于外壳和质量块间并与之固定,内弹簧作用于质量块和换能器阵列间不作固定处理,这样以防止内弹簧在振动过程中对压电阵列施加拉力损坏压电阵列。当受到冲击力时质量块产生位移,外弹簧主要用于将冲击能收集转换为弹性势能,内弹簧采用小刚度值弹簧以保证作用于换能器阵列上的力不至于过大使钹式换能器损坏。质量块中心处开小孔供导线通过。

### 1.3 钹式压电阵列的设计

钹式压电阵列共两组分别位于外壳两端凹槽内。钹式压电阵列由轴向并联连接的钹式压电堆叠按照一定的间距均匀粘结在基板上构成。这种结构不仅减小了单个压电堆叠的极面面积,而且增加了压电换能器的总数量,成倍的提高了压电结构的发电能力,也增大了整体结构的受力面积。当换能器的共振频率与弹簧质量组件的共振频率相匹配时,发电装置的机电转换效率最高。弹簧质量组件的共振频率

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (1)$$

式中: $m$ 为质量块质量; $K$ 为弹簧刚度。钹式换能器的共振频率<sup>[5]</sup>

$$f_m = \frac{\xi_n h_1}{4\pi R_1^2 \sqrt{3\rho_1(1-\mu_1^2)}} \sqrt{\frac{Y_E}{3\rho_1(1-\mu_1^2)}} \quad (2)$$

式中: $R_1$ 为钹式换能器的半径; $Y_E, \mu_1, h_1, \rho_1$ 分别为钹片材料的杨氏模量、泊松比、厚度、密度; $\xi_n$ 为  $J_0(\xi)I_1(\xi) + J_1(\xi)I_0(\xi) = 0$  方程的第  $n$  个正根,  $I_0$  为零阶虚宗量贝塞尔函数,  $I_1$  为一阶虚宗量贝塞尔函数。由于  $K$  值越大弹簧质量振动系统阻尼越大,

故弹簧质量组件的共振频率受到限制,因此应设计共振频率相对较低的钹式换能器阵列。由式(2)可知,可通过增加单个钹式换能器的半径,降低其共振频率使之与弹簧质量组件相匹配。

### 1.4 工作原理

弹药在发射时,发电装置随着弹药向前做加速运动而受后坐力作用,质量块向下产生位移,在内弹簧的作用下,钹式压电阵列产生变形,由于自身正压电效应第一次将机械能转换为电能,实现了发电装置的快激活,随着后坐力的减小,在外弹簧的作用下质量块持续振动,从而使钹式压电阵列受到重复载荷,于是发电装置持续的产生电能输出。

## 2 发电装置发电性能分析

### 2.1 钹式压电换能器性能分析

钹式换能器由钹式金属帽和压电陶瓷片相互粘结而成,这种结构较简单却结合了“33”、“31”型两种压电换能器的压电特性,很大程度的增强了自身的发电能力,并降低了换能器系统的体积和质量<sup>[6]</sup>。

由于钹式压电复合换能器为轴向对称结构,受力均匀,所以其受力情况如图2所示。沿  $z$  轴取宽度为  $dw$  的体单元作为分析对象。坐标系中心位于压电陶瓷中心处,  $x$  轴为半径方向,  $y$  轴为其对称轴。图中,  $p_z$  为钹式压电换能器所受压强,  $R_{c1}$  为钹形端帽锥形面顶端半径,  $R_{c2}$  为钹形端帽锥形面底端半径,  $R_p$  为压电陶瓷片半径,  $h_{c1}$  为钹形端帽厚度,  $h_{c2}$  为钹形端帽内腔高度,  $h_p$  为压电陶瓷片厚度,  $T_x$  为端帽施加给压电陶瓷的张应力,  $F_x$  为体单元顶面受到的压力,  $F_x$  为体单元中压电层受到的张应力。

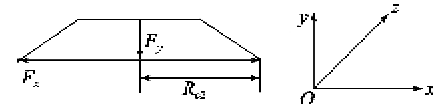
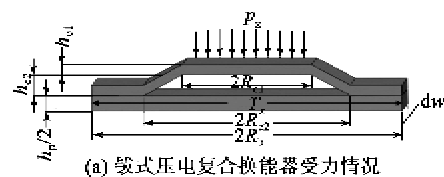


图2 钹式换能器受力分析图

此时压电陶瓷产生的电位移<sup>[7]</sup>

$$D_3 = d_{31} T_1 + d_{32} T_2 + d_{33} T_3 = 2d_{31} T_1 + d_{33} T_3 \quad (3)$$

式中: $T_1, T_2, T_3$  分别为压电陶瓷在  $x, z$  方向和  $y$

极化方向所受到的应力。由图 2(a)可知

$$T_3 = \pi p_z R_{c1}^2 \quad (4)$$

由图 2 可得

$$\frac{F_z}{F_x} = \frac{h_{c1} + h_{c2}}{R_{c2}} \quad (5)$$

若不考虑端帽材料的弹性应力,则

$$F_y = p_z d_{31} R_{c2} \quad (6)$$

$$F_x = \frac{T_3 d_{31} h_p}{2} \quad (7)$$

从而有

$$T_1 = T_x = \frac{2 p_z R_{c2}^2}{(h_{c1} + h_{c2}) h_p} \quad (8)$$

将式(4)、(8)代入式(3)得

$$D_3 = 4 d_{31} \frac{p_z R_{c2}^2}{(h_{c1} + h_{c2}) h_p} + \pi d_{33} p_z R_{c1}^2 \quad (9)$$

由式(9)可得钹式压电复合换能器的等效静压压电常数  $d_h^*$  的近似计算式为

$$d_h^* = 4 d_{31} \frac{R_{c2}^2}{(h_{c1} + h_{c2}) h_p} + \pi d_{33} R_{c1}^2 \quad (10)$$

引进等效压电应变常数的概念后,压电陶瓷产生的电荷为

$$Q_0 = d_h^* F \quad (11)$$

式中  $F$  为钹式换能器端帽顶端所受到的力即  $T_3$ ,则

$$F = \pi p_z R_{c1}^2 \quad (12)$$

钹式复合换能器中压电陶瓷为容性元件,容抗远大于阻抗,一般忽略压电陶瓷的阻抗,将陶瓷视为纯电容型元件。则单片陶瓷等效电容<sup>[8]</sup>为

$$C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (13)$$

式中:  $A$  陶瓷面积;  $d$  为陶瓷厚度;  $\epsilon_r$  为相对介电常数;  $\epsilon_0$  为真空介电常数。则在外力作用下钹式换能器两端的电压和产生的电能分别为

$$U_0 = \frac{Q_0}{C_0} = \frac{d_h^* F d}{\epsilon_r \epsilon_0 A} \quad (14)$$

$$E_0 = \frac{1}{2} C_0 U_0^2 = \frac{(d_h^*)^2 F^2 d}{2 A \epsilon_r \epsilon_0} \quad (15)$$

式中  $Q_0, U_0, E_0$  分别为在相同的力  $F$  作用下单个换能器产生的电荷、电压和电能。

### 2.2 钹式换能器轴向并联基阵发电性能分析

如图 3 所示,轴向并联基阵由若干个钹式换能器轴向粘结,电气上并联构成。相邻钹式换能器的极化方向相反,在顶部力  $F$  的作用下相邻钹式换能器产生电极相反的电荷,通过导线以图中所示方式连接则形成电气上的并联。

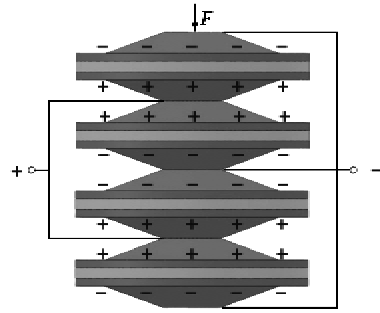


图 3 钹式换能器轴向并联示意图

并联基阵产生的电荷  $Q = N \cdot Q_0$ , 电压  $U = U_0$ , 电能  $E = N \cdot E_0$  ( $N$  为基阵中换能器个数)。

### 2.3 发电装置发电性能分析

模拟弹药发射环境,对所设计发电装置的发电性能进行分析。弹药发射过程中后坐力远大于外壳封装后作用于换能器阵列的预压力且持续时间很短,所以将质量块首次移动到振动幅值处这段时间忽略,将此状态作为初始状态,后坐力消失后弹簧质量组件便进入欠阻尼振动过程。根据牛顿定律可得弹簧质量组件在欠阻尼振动过程中质量块的位移方程<sup>[9]</sup>为

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega' t + \alpha) \quad (16)$$

式中:  $A_0$  为振动幅值;  $\alpha$  为初始相位角;  $\beta = \gamma / (2m)$  为阻尼因数,  $\gamma$  为阻力系数;  $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{K/m}$  为振动系统固有频率。

将初始条件代入式(16)中可得质量块振动的位移变量

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega' t) \quad (17)$$

由于弹簧质量组件只对压电阵列施加压力,不施加拉力,故  $k = k_1 + 2k_2$ , 其中  $k_1$  为内弹簧刚度,  $k_2$  为外弹簧刚度。

根据胡克定理可知,弹簧对压电换能器施加的周期性载荷为

$$F = k_1 x = K_1 A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega' t) \quad (18)$$

将式(18)分别代入式(11)、(14)、(15)结合并联基阵发电性能可得发电装置输出的电荷、电压和电能分别为

$$Q = N \cdot Q_0 = N d_h^* A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega' t) k_1 \quad (19)$$

$$U = U_0 = \frac{d_h^* A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega' t) d k_1}{\epsilon_r \epsilon_0 A} \quad (20)$$

$$E = N \cdot E_0 = \frac{N (d_h^*)^2 (k_1 A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega' t))^2 d}{2 A \epsilon_r \epsilon_0} \quad (21)$$

### 3 结构参数对发电性能的影响规律

以质量块首次移动到幅值处为初始状态,对发电装置在0~10 s内的发电性能进行分析。其中弹簧质量组件的欠阻尼振动参数为: $A_0 = 30 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 0.05 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,  $m = 0.1 \text{ kg}$ ,  $k_1 = 2\,000 \text{ N/m}$ ,  $k_2 = 5\,000 \text{ N/m}$ 。选取 PZT-5A 作为钹式换能器中压电层的制作材料,其余性能参数的取值如表 1 所示。

表 1 钹式换能器结构相关参数表

金属帽相关参数		PZT-5A 相关参数	
$h_{c1}/\text{mm}$	1	$d_{33}/(\text{pC/N})$	450
$h_{c2}/\text{mm}$	1~4	$d_{31}/(\text{pC/N})$	195
$R_{c1}/\text{mm}$	5~10	$\epsilon_{33}/(\text{pF/m})$	8.85
$R_{c2}/\text{mm}$	$R_{c1} \sim 15$	$\epsilon_r$	1\,700
$R_f/\text{mm}$	$R_{c2} \sim 20$	$h_p/\text{mm}$	2

对发电装置的发电性能进行数值分析,总结发电装置内钹式压电阵列中单个换能器结构参数对发电装置的发电性能影响规律,而后可照此规律进行结构优化。

图 4~7 分别为发电装置在弹药发射后 10 s 内的输出电压随钹式换能器的  $R_p$ 、 $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$  及  $h_{c2}$  的变化关系,在此分析中均取钹式换能器阵列为  $4 \times 4$  基阵,则单个阵列中换能器的个数  $N=16$ 。由图可看出,当钹式换能器的结构参数一定时,发电装置的输出电压曲线均为简谐衰减曲线,这是因为弹簧质量组件作用于钹式压电阵列上的力为简谐衰减的。

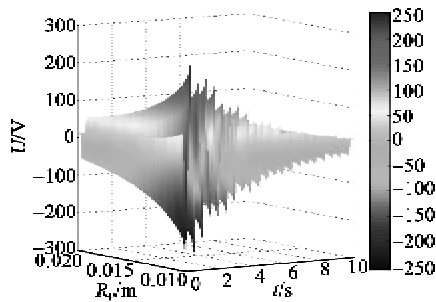


图 4 输出电压与  $R_p$  的关系

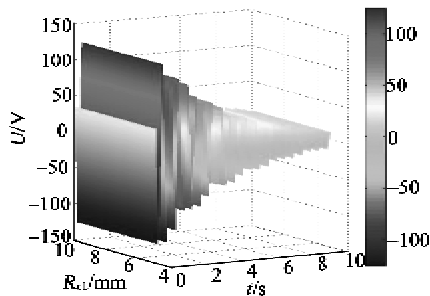


图 5 输出电压与  $R_{c1}$  的关系

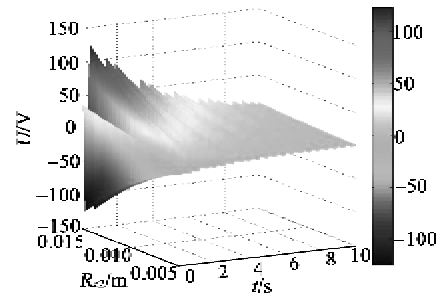


图 6 输出电压与  $R_{c2}$  的关系

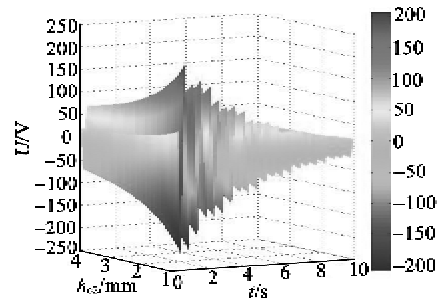


图 7 输出电压与  $h_{c2}$  的关系

图 4 中,  $R_{c1} = 5 \text{ mm}$ ,  $R_{c2} = 10 \text{ mm}$ ,  $h_{c2} = 2 \text{ mm}$ ,  $R_p$  的取值范围为  $11 \sim 20 \text{ mm}$ 。可看出,当  $t$  取定值时,  $U$  随  $R_p$  减小而增大,并与  $R_p$  成指数关系,这是因为在相同的力作用下,减小压电陶瓷晶片半径,其变形量增加,故输出电压增大,但如半径过小,则粘结面积过小,致使压电陶瓷片因受力过大而损坏。

图 5 中,  $R_p = 20 \text{ mm}$ ,  $R_{c2} = 15 \text{ mm}$ ,  $h_{c2} = 2 \text{ mm}$ ,  $R_{c1} = 5 \sim 10 \text{ mm}$ 。可以看出,当  $t$  取定值时,  $U$  随  $R_{c1}$  增大递增,但在此范围内电压变化不明显,这表明空腔顶部半径在此范围内对发电装置输出电压影响不大。

图 6 中,  $R_p = 20 \text{ mm}$ ,  $R_{c1} = 5 \text{ mm}$ ,  $h_{c2} = 2 \text{ mm}$ ,  $R_{c2} = 5 \sim 15 \text{ mm}$ 。由图可看出,当  $t$  取定值时,  $U$  随  $R_{c2}$  增大递增,并与  $R_{c2}$  近似成指数关系,且当  $R_{c2} > 10 \text{ mm}$  时变化程度较明显。这是因为  $R_{c2}$  的增大会将提高外部轴向载荷转换为压电陶瓷径向应力的程度,提高了压电陶瓷的整体发电能力。

图 7 中,  $R_p = 20 \text{ mm}$ ,  $R_{c1} = 5 \text{ mm}$ ,  $R_{c2} = 15 \text{ mm}$ ,  $h_{c2} = 1 \sim 4 \text{ mm}$ 。由图可看出,当  $t$  取定值时,  $U$  随  $h_{c2}$  减小而增大,并与  $h_{c2}$  近似成指数关系,且当  $h_{c2} < 2 \text{ mm}$  时变化程度较明显。这是因为在相同的力作用下  $h_{c2}$  减小则钹式换能器产生的径向形变增加,故输出电压增大。

由于在结构设计中,钹式压电阵列只受压力,故图 4~7 中当电压为正值时表示下部钹式换能器阵

列受力,当电压为负值时表示上部钹式换能器阵列受力,可通过导线的连接使其产生连续的正电压。

#### 4 结束语

以钹式压电阵列和弹簧质量组件为核心,设计了一种新型的引信用压电发电装置,建立了其发电理论模型,并通过数值分析总结了钹式换能器阵列中单个换能器结构参数对该装置发电特性的影响规律,验证了该发电装置的有效性和可行性,可为进一步的结构优化提供理论参考。

#### 参考文献:

- [1] 王卫民,许有法,齐杏林,等. 弹药系统分析与设计[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 李映平,赖百坛,陈荷娟,等. 一种新型的可蓄能压电电源原理研究[J]. 兵工学报,2004,25(4):421-423.  
LI Yingping, LAI Baitan, CHEN Hejuan, et al. A study on the principle of a new energy storage piezoelectric power supply[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4): 421-423.
- [3] 陈荷娟,孙加存. 高能多层压电陶瓷电源设计[J]. 弹道学报,2003,15(4):82-86.  
CHEN Hejuan, SUN Jiacun. Design of the high-output multilayer piezoid power supply[J]. Journal of Ballistics, 2003, 15(4): 82-86.
- [4] RASTEGAR J, MURRAY R, PERIRA C, et al. Energy-harvesting power sources for very-high-G gun-fired munitions[C]//S. I. : SPIE Active and Passive Smart Structure and Integrated Systems, 2010: 7643-0D.
- [5] 潘仲明,刘波. Cymbal型压电复合换能器的数学模型[J]. 中国机械工程,2006,17(3):283-286.
- [6] LUO Laihui, TANG Yanxue, WANG Feifei. Displacement amplification and electric characteristics of modified rectangular cymbal transducers using electroactive materials[J]. Solid State Communications, 2007, 14(3): 321-325.
- [7] 李邓化,姚熹. 关于钹式压电负电荷换能基阵的研究[J]. 压电与声光,2001,23(3):236-239.  
LI Denghua, YAO Xi. Research on cymbal piezoelectric transducer arrays[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2001, 23(3): 236-239.
- [8] SODANO H A, INMAN D J, GYUHAE P. Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(10): 799-807.
- [9] 漆安慎,杜婵英. 力学[M]. 北京:高等教育出版社,1997.
- [7] SANZ M, ALOU P, SOTO A. Magnetic-less converter based on piezoelectric transforms for step-down DC-DC and low power application[J]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003, 2: 615-621.
- [8] 周杰. 压电变压器驱动控制电路设计与应用[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [9] KIM T, CHOI S, LEE S, et al. New piezoelectric transformer adapter with universal input voltage range [C]//S. I. : Power Electronics and Drives Systems, PEDS 2005, 2005, 2: 1223-1227.
- [10] 杨桁,吕文中,汪小红,等. 基于PWM/PFM的压电变压器驱动电路的设计与仿真[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(4): 146-148.
- [11] HAMAMURA S, NINOMIYA T, YAMAMOTO M, et al. Combined PWM and PFM control for universal line voltage of a piezoelectric transformer off-line converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 270-277.
- [12] CHEN S Y, CHEN C L. ZVS considerations for a phase-lock control DC/DC converter with piezoelectric transformer[C]// IEEE Industrial Electronics, IEC-ON 2006 - 32nd Annual Conference on, 2006: 2244-2248.
- [13] DIAZ J, MARTIN R J A, PRIETO M J, et al. A double-closed loop DC/DC converter based on a piezoelectric transformer[C]//S. I. : Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004 APEC' 04. Nineteenth Annual IEEE, 2004, 3: 1423-1428.
- [14] SUGIMOTO H, SHIMIZU T, MORISHIMA Y. Maximum efficiency control of a system composed of a piezoelectric transformer and cold cathode tube driven by inverter, and its characteristics [J]. Electrical Engineering, 2009, 166(3): 961-970.
- [15] SAM B, SIMON L. Frequency tracking to maximum power of piezoelectric transformer HV converters under load variations[C]//S. I. : Power Electronics Specialists Conference, 2002, 2: 657-662.
- [16] 袁纵横,范刚. 基于FPGA的压电陶瓷驱动电源的设计[J]. 压电与声光,2011,33(3): 414-417.  
YUAN Zongheng, FAN Gang. The design and research of piezoelectric drive power based on the FPGA [J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2011, 33(3): 414-417.
- [17] 周党培,陈业仙. 一种实用的反激开关电源变压器设计方法[J]. 四川兵工学报,2011(8):96.  
ZHOU Dangpei, CHEN Yiexian. A sort of economic design method for transformer of flyback switching power supply [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011(8): 96.
- [18] 李月静,谢维成,石一兴,等. 基于SOPC的实时运动目标检测与跟踪系统[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2011(4):99-104.

(上接第680页)