

# 引信压电电源机电转换装置振动特性分析

张 恺<sup>1</sup>, 王德石<sup>1</sup>, 张程烨<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 91872 部队, 北京 102442)

**摘要:** 利用压电效应将振动能量转化为电能被广泛应用于能量转换系统中, 通过压电传感器将火炮发射过程中的冲击能量转换为电能, 并输送给储能电路, 形成引信电源的压电传感器供电方案; 将弹丸内的压电振动转换系统简化为单自由度振动系统, 研究了振动系统的物理与数学模型, 并由该模型进行了振动特性分析, 研究了结构刚度、阻尼以及等效质量等振动参数的设计规律, 可为引信压电电源的设计提供参考。

**关键词:** 压电效应; 冲击能量; 引信电源; 振动特性

中图分类号: TJ43

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)11-0017-03

## Analysis of the Vibration Characteristics of the Fuze Piezoelectric Transducer's Converter

ZHANG Kai<sup>1</sup>, WANG De-shi<sup>1</sup>, ZHANG Chen-ye<sup>2</sup>

(1. Department of Weapon Engineering, Navy Engineering University, Wuhan 430033, China;

2. Chinese People's Liberation Army 91872, Beijing 102442, China)

**Abstract:** Vibration energy is converted to electric power by using the piezoelectric effect, which is widely used in the electromechanical systems. The fuze power is designed to convert the impact energy to electric energy by using piezoelectric transducer. In order to study the vibrational characteristics, the single degree system is built, and the piezoelectric material, structural stiffness, damper and equivalent mass are designed, which can provide design base for the fuze power fabrication.

**Key words:** piezoelectricity; impact energy; fuze power; vibration characteristics

引信电源是将机械能、化学能或其他形式的能量转换为引信所需电能的装置。引信电源可在引信内专门设置,也可从弹丸飞行过程中取能发电。由于现代战争的复杂性,对不同的攻击目标、不同的场合、不同的攻击目的,可能需要使用不同的弹种,而不同弹种的引信,其工作环境不同对引信电源就有不同的要求。作为制约引信技术发展的一个重要因素,新型引信电源的研发成为引信技术的一个重要研究方向。

火炮发射过程中,弹丸在撞击动能的作用下引燃火药,由此产生的高温高压火药燃气推动弹丸飞向目标。由于冲击能量的瞬时性使得收集器的能量转换与存储时间受到脉冲宽度的限制,因此利用火炮发射时的冲击能量开发引信电源,必须将冲击能量转换为振动能量,然后通过压电传感器

将振动能量转换为电能输送给储能电路,形成引信电源的压电传感器供电方案,该类电源通过将压电换能器的脉冲放电整流为直流,经过存储、稳压等环节实现冲击能量的收集与存储。冲击含有更大的脉冲能量,因此收集冲击能量受到了国内外研究者的关注,Shenck 等人研究的置于鞋跟的步行能量收集系统,获得了 8.3 mW 的输出功率<sup>[1]</sup>。刘飘楚等人研究了压电能量激活引信携带的电源问题<sup>[2]</sup>;李豪杰等研究者论证了利用冲击能量快速激活引信的可行性方案<sup>[3,4]</sup>,并进行了能量与效率分析。至今,无论是收集振动能量还是收集冲击能量,都利用电容存储能量,如何优化存储效率是微能供电的研究方向之一<sup>[5-7]</sup>。正因此,在开发振动能量收集技术的过程中,提高能量收集系统的效率始终受到重视。

冲击能量转换为何种形式下的振动,以及采用何种类型

的压电换能器,并不明确它们与能量收集系统的效率有直接关系。本文以压电悬臂梁结构振动系统为例,研究冲击作用下振动系统的特性,确定压电悬臂梁的设计指标范围,为设计冲击能量压电收集系统提供技术参考。

## 1 系统模型

弹丸内的连接基座以及换能器本身具有弹性、阻尼与质量,在处理它们的振动问题时,处于弹丸内的振动转换系统可以简化为单自由度线性振动系统。将质量视为压电系统的质量,由于基座和换能器具有弹性,故将其视为无质量的弹簧,振动系统的阻尼是包含在各个部分中的内阻,如此形成弹簧质量系统,即振动转换系统;火炮发射过程中的冲击形成了弹簧阻尼质量系统外激励。如图 1 所示,振动系统可由 3 个参数描述:质量  $m$ 、阻尼系数  $\xi$  和固有频率  $\omega$ 。通过建立单自由度振动系统的动力学模型,分析冲击振动能量的衰减特性,在冲击能量作用下,质量块推动弹簧产生形变,从而将一部分冲击能量转化为弹簧的势能,形成振动的初始条件,并且决定了能量收集器的原始能量,另一部分被阻尼消耗掉。

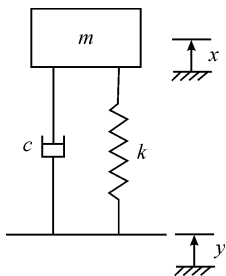


图 1 等价阻尼弹簧质量系统

系统的运动方程可表示为

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = -M\ddot{y} \quad (1)$$

其中,  $z = x - y$ , 同样, 该系统的振动特性可由阻尼系数  $\xi$  和固有频率  $\omega_n$  来描述。且,  $\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{mK}}$ ,  $\omega_n = \sqrt{K/M}$ ,  $K$  为刚度系数, 以矩形悬臂梁结构为例,  $\omega_n = \sqrt{3EI/(ML^3)}$ , 其中  $E$  为弹性模量,  $I$  为转动惯量,  $L$  为悬臂梁的长度, 转动惯量  $I = bh^3/12$ , 式(1)中  $b, h$  为悬臂梁的宽度和厚度。

在零初始条件下, 输出量  $z(t)$  和输入量  $y(t)$  的比值的拉氏变换为

$$\left| \frac{Z(s)}{Y(s)} \right| = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

假定在简谐激励  $y = Y\sin(\omega t)$  作用下

$$z(t) = \frac{(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}} Y\sin(\omega t - \phi) \quad (3)$$

式(3)中相角  $\phi = \arctan(\frac{C\omega}{K - \omega^2 M})$ ,  $Y$  为振动幅度, 则机械功率近似可表示为

$$P(t) = \frac{m\xi Y^2 (\omega/\omega_n)^3 \omega^3}{(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2} \quad (4)$$

当工作频率和固有频率相等( $\omega = \omega_n$ )时, 输出功率达到最大

$$P_{\max} = \frac{mY^2 \omega_n^3}{4\xi} \quad (5)$$

式(5)中  $\xi$  为总的阻尼率。总的能量转化为电能则需要乘以电阻尼  $\xi_e$ , 此时输出的电功率可表示为

$$P_e = \frac{m\xi_e Y^2 \omega_n^3}{4\xi}$$

压电悬臂梁表面  $x$  位置上的平均应力可表示为

$$\sigma_s = \frac{k_{\text{eff}} X_0 E_p}{(EI)_1} (L - x) \left( \frac{t_p}{2} \right) \quad (6)$$

其中,  $k_{\text{eff}}$  为整个悬臂梁的有效弹簧刚度,  $X_0$  为顶端质量块得位移,  $(EI)_1$  为悬臂梁的弯曲模量。

$$(EI)_1 = \frac{E_p b_p t_p^3}{12} + \frac{E_s b_s t_s}{12} (4t_s^2 + 6t_s t_p + 3t_p^2) \quad (7)$$

$$k_{\text{eff}} = \left[ \left( \frac{L_{p2}^3 + 3L_{p2}^2 L_s + 3L_{p2} L_s^2}{3(EI)_1} \right) + \frac{L_s^3}{3(EI)_2} \right]^{-1}$$

式(7)中  $(EI)_2 = \frac{E_s b_s t_s^3}{12}$ 。

在冲击作用时, 悬臂梁会产生一定的形变量, 假定为  $X_0$ , 由于冲击作用时间极短, 此后, 悬臂梁结构开始作自由衰减振动。由 PZT 材料层产生开路电压, 其幅值将会以指数规律衰减。初始条件下的开路电压幅值可表示为

$$V_{\text{open}} = \frac{-d_{31} t_p \sigma_s}{\epsilon} = \left( \frac{-d_{31} t_p}{\epsilon} \right) \frac{3k_g X_0 L_p}{b_p t_p} \quad (8)$$

则输出电压的幅值随时间衰减的函数可表示为

$$V = V_{\text{open}} e^{-\xi\omega_g t} \sin(\omega_g t)$$

式(8)中:  $d_{31}$  为压电常数;  $t_p$  为 PZT 材料层厚度;  $\epsilon$  为介电常数;  $k_g$  为弹簧刚度;  $b_p$  为 PZT 材料层的宽度;  $L_p$  为 PZT 材料层的长度。

## 2 结果与讨论

对于冲击作用下的振动系统, 冲击能量通过振动的初始条件激起系统的振动, 初始条件大小决定振动的幅值, 进而决定系统振动的能量级别, 或者说振动能量反映的即为振动系统的初始位移与初始速度。所以有必要考察初始条件、频率与振动系统的能量  $E$  之间的关系, 如图 2 所示, 从图 2 中可以看出, 初始能量 ( $E = 1/2[(\omega x_0)^2 m]$ ) 随着频率的增加而逐渐增加。另外, 衰减时间仅和阻尼系数和频率有关, 且频率一定的情况下, 能量衰减的时间随着阻尼系数的增加而减小。如图 3 所示, 系统振动频率为 20 Hz, 阻尼系数为 0.02 时, 系统能量衰减 90% 仅需 0.9 s, 且随着阻尼系数的增加,

衰减时间急剧减小,当 $\xi=0.05$ 时,衰减时间减少为0.4 s。

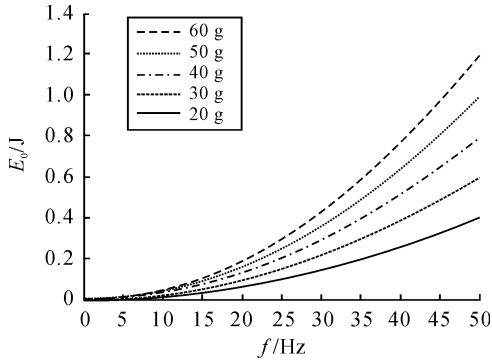


图2 振动系统初始能量曲线

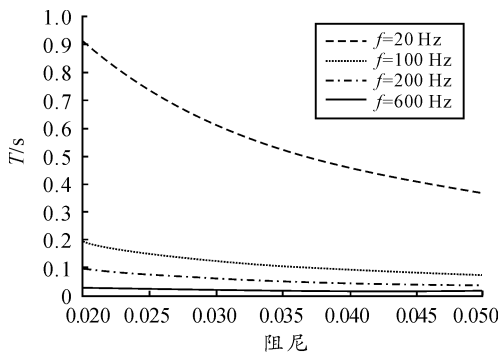


图3 能量衰减90%所需时间

由 $V_{open}$ 的计算公式可以看出在悬臂梁结构尺寸确定的前提下,压电悬臂梁结构产生的开路电压与梁端最大位移量成线性关系,而在实际应用中,梁端位移过大会导致压电材料层断裂,因此公式仅作为估算压电悬臂梁结构输出电压的大小。图4所示为不同频率下开路电压的衰减曲线,从图4中可以看出,频率越高,电压衰减越快;图5表明,阻尼增加使得电压衰减加快。

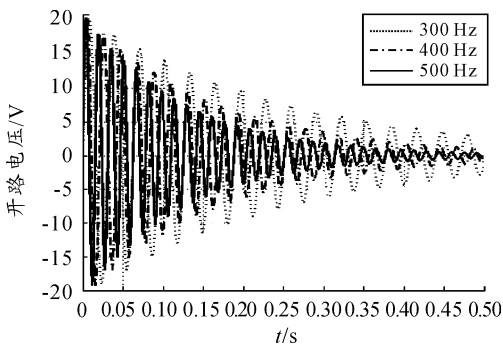


图4 不同频率下开路电压曲线

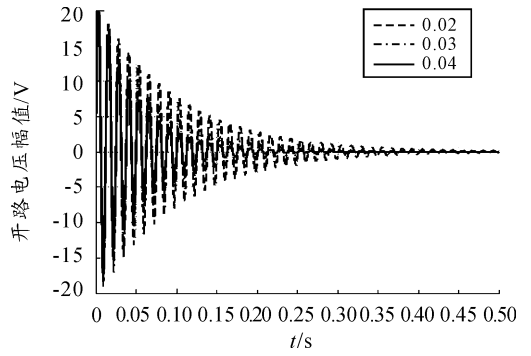


图5 不同阻尼下开路电压曲线

### 3 结束语

对弹丸内的转换系统进行了简化,获得了单自由度线性振动系统的物理与数学模型,并由该模型进行了振动特性分析;分析结果表明:设计频率与周期对振动持续时间基本上无影响,无论频率与周期如何设计,振动持续时间,即压电换能器收集与转换能量将时间不大于1 s。但是振动频率或周期影响电压输出波形,需要针对该波形设计收集电路,其幅值在模型与实验分析之后补充,其他形式的电能波形也需要研究比较后,再确定电路的设计方案。另外,压电换能器工作频率与振动系统的固有频率失配,会导致压电换能器转换效率偏低,使得整体转换效率降低。

### 参考文献:

- [1] Shenck N S, Paradiso J A. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics [J]. IEEE Micro, 2001 (21): 30-42.
- [2] 刘飘楚. 引信电源系统分析与关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
- [3] 李豪杰, 张河. 提高引信压电电源传输效率的方法研究[J]. 南京理工大学学报, 2003(27): 657-660.
- [4] 李豪杰. 引信压电发电机原理及试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [5] Ottman G K, Hofmann H F, Bhatt A C. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply [J]. IEEE Transactions on power electronics, 2002 (17): 669-676.
- [6] Shu Y C, Lien I C. Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system [J]. Journal Micromechanic microengineering, 2006(16): 2429-2438.
- [7] Richards C D, Anderson M C, Bahr D F, et al. Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component [J]. Journal Micromechanic microengineering, 2004(14): 717-721.

(责任编辑 周江川)