

# 基于滚压的压电叠堆压电转换特性仿真分析\*

黄维彬<sup>1</sup> 魏克湘<sup>2†</sup> 杜荣华<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学汽车与机械工程学院,长沙 410114) (2.湖南工程学院机械工程学院,湘潭 411104)

**摘要** 本文提出一种基于滚压的压电俘能器结构,结合 Cymbal 压电换能器和压电振子叠堆,利用滚珠作为激励源,可以把机构的往复振动转换为对压电振子的单向压迫.使用仿真软件对俘能器结构中滚珠压迫压电单元的力,以及该俘能器结构在并联和串联模式下输出的电压和俘获的电能进行仿真分析,得到该结构的压电转换特性.仿真结果表明,滚珠对压电叠堆的压迫力与压电陶瓷层数并不是单向递减,1-5 层时递增,5 层以后压迫力逐渐减小.在压电陶瓷的总层数不变的情况下,并联和串联时压电叠堆所俘获的总电能是不变的.两种联接模式下总电能随层数的变化关系为 5 层以内时随层数的增加而减小,超过 5 层后逐渐增加.

**关键词** 压电振子, 滚压, 压电叠堆, 压电转换

DOI: 10.6052/1672-6553-2017-45

## 引言

近年来,能量回收技术不断在发展,在周围环境以及机构的机械运动中,能量都是可以被回收的.除了太阳能、风能等,最常见的就是振动能量的回收.振动能量的回收主要有以下三种形式:压电式、静电式和电磁式,其中压电式振动能量回收装置与另外两种形式的振动能量回收装置相比,具有结构简单、转换效率高、易于集成化等优点<sup>[1]</sup>,越来越多学者倾向于研究使用压电式振动能量回收装置来回收振动能量,压电式俘能装置的能量转换效率主要取决于压电材料的性能、压电俘能装置的结构尺寸以及压电振子的振型等几个方面<sup>[2]</sup>.

压电俘能装置的基本结构包括悬臂梁式和板压式<sup>[3]</sup>.目前有大量的文献提出了多种改进方案,如双压电晶片悬臂梁、压电振子叠堆以及厚度变化的压电振子梁结构.此外, Kim 等<sup>[4]</sup>研究了一种压电片上下表面均带有圆锥形金属帽的压电振子结构,并对其振动特性以及能量转换形式进行了实验和分析,结果表明该种结构的压电振子可以在高速变化的循环力场中工作,作用于压电层的应力分布更均匀.冯博琳<sup>[5]</sup>等对 Cymbal 压电俘能器的结构参数与俘能器发电性能的关系进行了研究,建立了

有限元模型进行时域仿真,研究得出 Cymbal 型压电俘能器的输出电压与外直径、金属帽厚度、金属帽内腔尺寸等参数的变化关系,并分析了俘能器工作时的最大应力应变.魏克湘,邹鸿翔<sup>[6]</sup>等提出一种用于电动汽车自供能智能悬架的滚压压迫振动能量俘获装置概念设计,该俘能装置占用空间小,且在悬架的任何运动状态下都能将悬架的振动能量转换为电能输出.

Roundy 等<sup>[7]</sup>指出,在工作环境中 31 模式更容易发生共振,从而使得 31 模式在低频振动环境下能收集更多的能量. Baker 等<sup>[8]</sup>将工作在 31 模态的压电悬臂梁结构和工作在 33 模态的压电叠堆结构进行实验对比,研究结果表明,相同外部条件下,由于叠堆结构所对应的刚度很大,受力时的应变较小,叠堆结构的输出能量比悬臂梁低出大约两个数量级.由此我们可以推断,当外界环境力较大时,叠堆结构将产生可观的能量输出,同时叠堆结构比悬臂梁更坚固,适用于在振动剧烈的环境中使用.党永<sup>[9]</sup>等推导并给出了压电叠堆在 33 模式低频振动时输出电压和功率的数学表达式,并通过实验证明了该表达式的正确性.王光庆<sup>[10]</sup>提出了一种利用压电陶瓷叠堆进行机械能量采集并输出电能的压电发电装置,分析建立了该发电装置的机电耦合模型,仿真分

2016-11-29 收到第 1 稿,2017-02-27 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金(11172100, 11272067),教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0782)

† 通讯作者 E-mail: kxwei@hnie.edu.cn

析了外加激励、激振频率、压电叠堆尺寸等与压电叠堆的输出电压之间的关系,并得出在负载匹配的情况下发电装置的机电转换效率。

另外,有研究表明,采用多层压电振子叠堆构型,可以提高压电振子发电效率。Platt 等<sup>[11]</sup>将 145 片 PZT 陶瓷片以并联的方式叠堆起来,形成一个长方体压电结构(1cm×1cm×1.8cm),随后将这个压电结构与一个直径 1cm、高 2cm 的单块压电圆柱体进行测试对比。叠堆体的开路电压大约 30V,电容约为 1-10μF。单块圆柱体的开路电压高达 10000V,而电容很低,大约为 47pF;实验结果表明,当外接负载的阻抗与各自的俘能结构的系统阻抗相匹配时,相同体积的叠堆体和单块圆柱体所产生的输出能量几乎相同,但叠堆体的匹配载荷电阻在 KΩ 级别,而单块圆柱体的匹配载荷电阻在 GΩ 级别。因此,在实际应用中,无论从开路电压来看,还是从匹配载荷电阻来看,叠堆体构型的俘能装置都更便于操纵。

基于以上研究,本论文提出一种上下面粘接两片凸型金属层的压电叠堆体结构,并通过利用滚珠滚动对其提供压迫力,对该结构的压电转换特性进行仿真分析。

### 1 压电俘能器力电转换模型

参考 Kim 等<sup>[4]</sup>研究的压电片上下表面均带有圆锥形金属帽的压电振子结构,结合压电振子叠堆构型,提出一种压电俘能结构,图 1 表示多层压电晶片组成的压电叠堆结构,参考滚珠轴承的结构,将滚珠和压电叠堆单元固定在两个往复运动的机械结构表面,这种结构可以把机构间的往复运动转换为滚珠对压电叠堆的单向压迫,从而提高俘获能量的效率。在机械结构振动过程中,滚珠对压电单元提供压迫力,从而使压电陶瓷产生电能,并通过电能调整电路将产生的电能储存或使用。

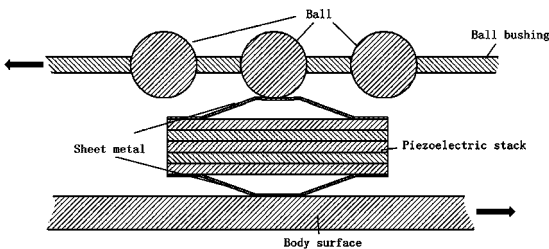


图 1 基于滚动压迫的压电叠堆体结构示意图

Fig.1 Structure diagram of rolling-based piezoelectric stack

下面一对滚珠和压电单元进行动力学分析。由于压电叠堆下方的金属片仅起到支撑作用,因此只分析上层金属片与压电叠堆的受力情况即可。建立如图 2 所示的直角坐标系  $xoz$ ,金属片和滚珠在  $xoz$  平面上的投影如图 2 所示,压电单元受力分析如图 3,滚珠对金属片的压迫力可等效为作用在接触中心的力  $N$ 。

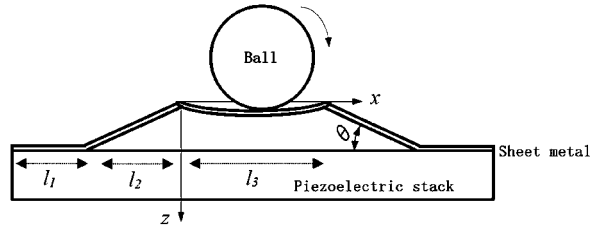


图 2 基于滚动压迫的压电叠堆体结构投影图

Fig.2 Projection drawing of rolling-based piezoelectric stack

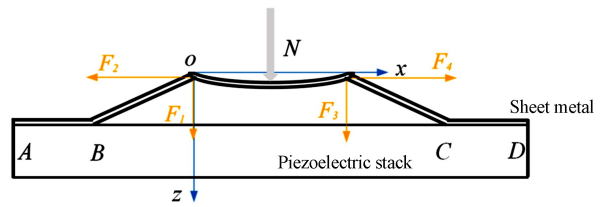


图 3 压电单元受力分析图

Fig.3 Schematic diagram of force analysis for the piezoelectric unit

参考文献[12]所建立的压电俘能模型,在使用滚珠作为压电单元的激励源时,金属片所受到的压迫力  $N$  可表示为:

$$N = \left( \frac{-\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 + 4\lambda_2(R-d)}}{2\lambda_2} \right)^2 \quad (1)$$

其中  $R$  是滚珠半径,  $d$  为滚珠中心与未受压迫时金属片顶面的距离,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  可通过以下公式计算得出:

$$\lambda_1 = \frac{l_3^2}{4} \sqrt{\frac{1}{\pi R D} \sqrt{\left[ \left( \frac{s_t}{l_3} \right)^4 - 2 \left( \frac{s_t}{l_3} \right)^3 + \left( \frac{s_t}{l_3} \right) \right]}}$$

$$\lambda_2 = 4 \left[ \frac{(l_2^3 + 18l_2^2 t_m \theta) \cos^2 \theta}{3Db} + \frac{l_2 \sin^2 \theta}{E_m b t_m} + \frac{s_{33} n t_p}{b l_1} \right] \left[ \left( \frac{s_t}{l_3} \right)^2 - \left( \frac{s_t}{l_3} \right) \right] + 2 \left[ \frac{(l_2^3 + 18l_2^2 t_m \theta) \cos^2 \theta}{3Db} + \frac{l_2 \sin^2 \theta}{E_m b t_m} \right] +$$

$$2 \frac{s_{33}nt_p}{bl_1} \frac{l_2}{l_3} \frac{\cos\theta+1}{2} + 2 \left[ \frac{l_2 \sin\theta \cos\theta}{E_m bt_m} - \frac{(l_2^3 + 18l_2^2 t_m \theta) \sin\theta \cos\theta}{3Db} - \frac{2s_{13}E_p nt_p}{E^* b(2t_m + nt_p)} \right] \times \left[ \frac{(l_2^3 + 18l_2^2 t_m \theta) \sin\theta \cos\theta}{3Db} - \frac{l_2 \sin\theta \cos\theta}{E_m bt_m} \right] \\ 2 \left[ \frac{(l_2^3 + 18l_2^2 t_m \theta) \sin^2\theta}{3Db} + \frac{l_2 \cos^2\theta}{E_m bt_m} \right] + \frac{2s_{11}(2l_2 \cos\theta + l_3)}{bnt_p} \quad (2)$$

金属片上各点分力与  $N$  满足以下关系:

$$F_1 = \frac{l_3 - s_t}{l_3} N \quad (3)$$

$$F_3 = \frac{s_t}{l_3} N \quad (4)$$

$$F_2 = F_4$$

$$= \frac{\left[ \frac{(l_2^3 + 18l_2^2 t_m \theta) \sin\theta \cos\theta}{3Db} - \frac{l_2 \sin\theta \cos\theta}{E_m bt_m} \right]}{2 \left[ \frac{(l_2^3 + 18l_2^2 t_m \theta) \sin^2\theta}{3Db} + \frac{l_2 \cos^2\theta}{E_m bt_m} \right] + \frac{2s_{11}(2l_2 \cos\theta + l_3)}{bnt_p}} N \quad (5)$$

公式中,  $t_p$  为单层压电陶瓷的厚度,  $t_m$  为金属片厚度,  $b$  为金属片与压电陶瓷片的宽度,  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $\theta$  分别如图 2 所示,  $s_{11}$ 、 $s_{13}$ 、 $s_{33}$  均为压电陶瓷柔顺系数,  $n$  为压电陶瓷晶片层数,  $s_t$  为滚珠中心在  $x$  方向上的位移,  $E^*$  为压电单元复合弹性模量, 根据复合材料混合物的相关规律<sup>[13]</sup>,  $E^*$  可通过以下公式计算得出:

$$E_g^* = E_m \frac{2t_m}{2t_m + nt_p} + E_p \frac{nt_p}{2t_m + nt_p} \quad (6)$$

$C_f$  为压电陶瓷晶片开路电容:

$$C_f = bl\varepsilon_{33}/t_p \quad (7)$$

$D$  为金属层的抗弯刚度:

$$D = E_m t_m^3 / 12(1 - \nu_m^2) \quad (8)$$

式中  $E_m$  和  $\nu_m$  分别为金属层的弹性模量和泊松比。

将压电单元分为三个部分进行受力分析, 即图 3 中的 AB 段、BC 段和 CD 段, AB 段和 CD 段压电陶瓷层受到  $x$  方向的拉力和  $z$  方向的压力, 压电陶瓷同时在 D33 和 D31 模式下工作, 压电方程应表示为:

$$D_{3AB} = \varepsilon_{33}E_3 + d_{31}T_{1AB} + d_{33}T_{3AB}$$

$$S_{1AB} = d_{31}E_3 + s_{11}T_{1AB} + s_{13}T_{3AB}$$

$$S_{3AB} = d_{33}E_3 + s_{13}T_{1AB} + s_{33}T_{3AB} \quad (9)$$

$$D_{3CD} = \varepsilon_{33}E_3 + d_{31}T_{1CD} + d_{33}T_{3CD}$$

$$S_{1CD} = d_{31}E_3 + s_{11}T_{1CD} + s_{13}T_{3CD}$$

$$S_{3CD} = d_{33}E_3 + s_{13}T_{1CD} + s_{33}T_{3CD} \quad (10)$$

公式(9)为 AB 段的压电方程, 公式(10)为 CD 段的压电方程,  $D_{3AB}$ 、 $D_{3CD}$  为电位移,  $S_{1AB}$ 、 $S_{3AB}$ 、 $S_{1CD}$ 、 $S_{3CD}$  为应变,  $T_{1AB}$ 、 $T_{1CD}$  为 AB 段、CD 段压电陶瓷在  $x$  方向上的应力,  $T_{3AB}$ 、 $T_{3CD}$  为 AB 段、CD 段压电陶瓷在  $z$  方向上的应力:

$$T_{1AB} = 2E_p F_2 / [E^* b(2t_m + t_p)]$$

$$T_{3AB} = -F_1 / (bl_1)$$

$$T_{1CD} = T_{1AB}$$

$$T_{3CD} = -F_3 / (bl_1) \quad (11)$$

压电单元的 BC 段只受到两端的拉力作用, 压电陶瓷仅在 D31 模式下工作, 因此这一部分的压电方程为:

$$D_{3BC} = \varepsilon_{33}E_3 + d_{31}T_{1BC}$$

$$S_{1BC} = d_{31}E_3 + s_{11}T_{1BC}$$

$$S_{3BC} = d_{33}E_3 + s_{13}T_{1BC} \quad (12)$$

$D_{3BC}$  为电位移,  $S_{1BC}$ 、 $S_{3BC}$  为应变,  $T_{1BC}$  为 BC 段压电陶瓷在  $x$  方向上的应力:

$$T_{1BC} = 2F_2 / bnt_p \quad (13)$$

$d_{31}$  和  $d_{33}$  为压电材料参数,  $\varepsilon_{33}$  为压电材料的介电常数。

由于整个压电叠堆无外加电场, 因此  $E_3 = 0$ , 单层压电陶瓷所产生的电荷量可由以下公式计算得出:

$$Q_g = D_{3AB} \times S_{AB} + D_{3BC} \times S_{BC} + D_{3CD} \times S_{CD} \\ = \left[ \frac{4\beta E_p d_{31} l_1 t_p}{E^* (2t_m + nt_p)} + \frac{2\beta d_{31} (2l_2 \cos\theta + l_3)}{nt_p} - d_{33} \right] N \quad (14)$$

其中  $\beta = N/F_2$ 。

此时叠堆体中单层压电晶片所产生的电压为:

$$U_g = \frac{Q_g}{C_f} = \left[ \frac{4\beta E_p d_{31} l_1 t_p}{E^* bl\varepsilon_{33} (2t_m + nt_p)} - \frac{d_{33} t_p}{bl\varepsilon_{33}} + \frac{2\beta d_{31} (2l_2 \cos\theta + l_3)}{nbl\varepsilon_{33}} \right] N \quad (15)$$

单层压电陶瓷产生的电能为:

$$W_g = \frac{1}{2} C_f U_g^2 = \frac{t_p}{2bl\varepsilon_{33}} \left[ \frac{4\beta E_p d_{31} l_1}{E_g (2t_m + nt_p)} - d_{33} + \frac{2\beta d_{31} (2l_2 \cos\theta + l_3)}{nt_p} \right]^2 N^2 \quad (16)$$

## 2 压电振子叠堆结构排布方式分析

为了提高压电俘能器的俘能效率,可采用多层压电振子叠堆结构,压电陶瓷片间的基本电连接方式有两种:并联和串联<sup>[9,10]</sup>,图4所示为简化为两层的压电叠堆电连接示意图。

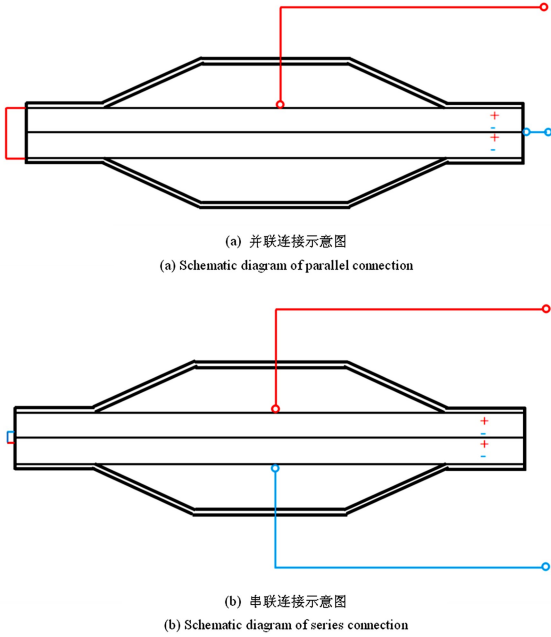


图4 压电叠堆体的两种连接方式

Fig.4 Two connection types of piezoelectric pile

如图4所示,图4(a)为并联,其中负极集中在中间压电振子之间的银电极上,开路电压  $U_b$  等于单片压电陶瓷的输出电压  $U_g$ ,但其电容  $C_b$  为单片压电陶瓷电容  $C_f$  的  $n$  倍,总的输出电荷量  $Q_b$  为单片输出电荷量  $Q_g$  的  $n$  倍,公式描述为:

$$U_b = U_g; C_b = nC_f \quad (17)$$

则并联模式中所产生的总电荷量、总电压以及由压迫力  $N$  产生的电能可表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} C_b &= nC_f = \frac{nbl\epsilon_{33}}{t_p} \\ U_b &= U_g = \left[ \frac{4\beta E_p d_{31} l_1 t_p}{E_g bl\epsilon_{33} (2t_m + nt_p)} - \frac{d_{33} t_p}{bl\epsilon_{33}} + \frac{2\beta d_{31} (2l_2 \cos\theta + l_3)}{nbl\epsilon_{33}} \right] N \\ W_b &= \frac{1}{2} C_b U_b^2 = \frac{nt_p}{2bl\epsilon_{33}} \left[ \frac{4\beta E_p d_{31} l_1}{E_g (2t_m + nt_p)} - d_{33} + \frac{2\beta d_{31} (2l_2 \cos\theta + l_3)}{nt_p} \right]^2 N^2 \end{aligned} \right. \quad (18)$$

图4(b)为多层压电振子串联连接方式,其中

正电荷集中在最上层压电振子的上表面,负电荷集中在最下层压电振子的下表面,那么由于电荷正负抵消,上下两层压电振子电极之间的电荷为零。开路电压  $U_c$  等于单片开路电压  $U_g$  的  $n$  倍,总电容  $C_c$  为单片电容  $C_f$  的  $n$  分之一,用公式描述为:

$$U_c = nU_g; C_c = \frac{1}{n} C_f \quad (19)$$

则串联模式中所产生的总电荷量、总电压和由压迫力  $N$  产生的电能可表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} C_c &= \frac{1}{n} C_f = \frac{bl\epsilon_{33}}{nt_p} \\ U_c &= nU_g = n \left[ \frac{4\beta E_p d_{31} l_1 t_p}{E^* bl\epsilon_{33} (2t_m + nt_p)} - \frac{d_{33} t_p}{bl\epsilon_{33}} + \frac{2\beta d_{31} (2l_2 \cos\theta + l_3)}{nbl\epsilon_{33}} \right] N \\ W_c &= \frac{1}{2} C_c U_c^2 = \frac{nt_p}{2bl\epsilon_{33}} \left[ \frac{4\beta E_p d_{31} l_1}{E^* (2t_m + nt_p)} - d_{33} + \frac{2\beta d_{31} (2l_2 \cos\theta + l_3)}{nt_p} \right]^2 N^2 \end{aligned} \right. \quad (20)$$

## 3 仿真分析

下面对压电陶瓷叠堆体的两种不同的排布方式进行仿真分析,压电陶瓷材料选取 PZT-5A,压电单元设计尺寸和相关参数如表1所示。

表1 压电单元尺寸

Table 1 Piezoelectric unit size and

Parameter	Value
Thickness of the metal sheet $t_m$	0.2mm
Thickness of the single layer PZT $t_p$	2mm
Length of the adhesive layer $l_1$	4mm
Incline projecting length of the metal sheet $l_2$	4mm
Level projecting length of the metal sheet $l_3$	4mm
Radius of the ball $R$	4mm
Width of the PZT element $b$	8mm

表2 材料参数表

Table 2 The material parameter

Parameter	Value
Young modulus of the metal sheet $E_m$	$2 \times 10^{11}$ Pa
Young modulus of the PZT $E_p$	$7 \times 10^{10}$ Pa
Poisson ratio of the metal sheet $\nu$	0.28
Compliance coefficient of the PZT $s_{11}$	$1.65 \times 10^{-11}$ m <sup>2</sup> /N
Compliance coefficient of the PZT $s_{13}$	$-8.45 \times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N
Compliance coefficient of the PZT $s_{33}$	$2.07 \times 10^{-11}$ m <sup>2</sup> /N
Piezoelectric coefficient of the PZT $d_{31}$	$-2.74 \times 10^{-10}$ C/N
Piezoelectric coefficient of the PZT $d_{33}$	$5.93 \times 10^{-10}$ C/N
Piezoelectric coefficient of the PZT $\epsilon_{33}$	3400



在仿真时,压电陶瓷的层数  $n$  取 1~10,  $g$  取 0.3 mm 来分析层数对压迫力、产生的电压以及俘获的电量的影响,为了方便描述,令  $s_i^* = s_i/l_3$ .

### 3.1 并联模式仿真分析

图 5 表示了压电叠堆体中压电陶瓷层数、滚珠中心位移和滚珠对压电单元的压迫力之间的关系.从图 5、图 6 中可以看出,叠堆体中的压电陶瓷层数对滚珠压迫压电单元时产生的压迫力影响并不大,图 6 显示当层数  $n$  在 1-5 层范围内增加时,压迫力随层数的增加而增大,在 5 层时最大,压电陶瓷层数为 5 层以上时,压迫力逐渐减小;并且无论压电陶瓷层数为多少,当滚珠中心位置在  $l_3$  中点时压迫力最大,在  $l_3$  两端时压迫力一样大.

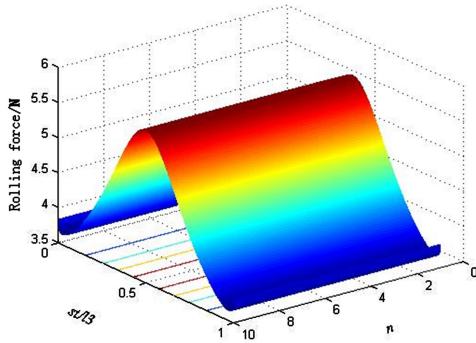


图 5  $n-s_i^*-N$  变化图

Fig.5  $n-s_i^*-N$  curve

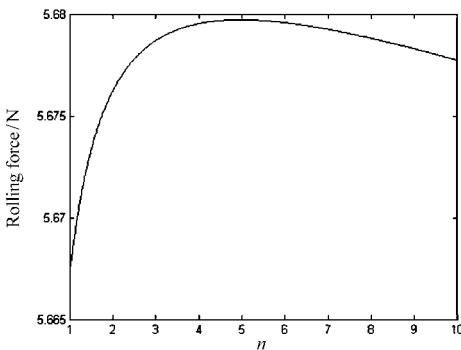


图 6  $s_i^* = 0.5$  时  $n-N$  关系图

Fig.6  $n-N$  curve when  $s_i^* = 0.5$

图 7 表示了压电叠堆体中压电陶瓷层数、滚珠中心位移和单层压电陶瓷由于压迫力而产生的电压之间的关系.从图 8 中可以看出,随着叠堆体的压电陶瓷层数增加,产生的电压随之减小,而且在  $n$  从 1 到 4 时,减小的比率很大,在压电陶瓷层数为 4 层之后电压减小的速率趋于平稳.无论压电层的数量为多少,当滚珠中心位置在  $l_3$  中点时产生的电压最大.

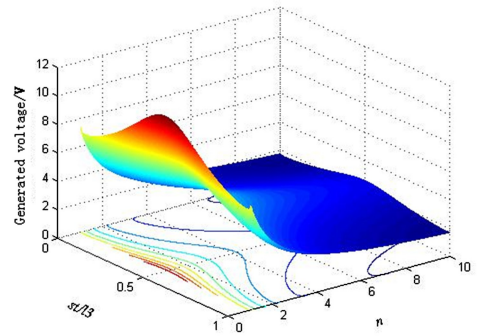


图 7  $n-s_i^*-U_g$  变化图

Fig.7  $n-s_i^*-U_g$  curve

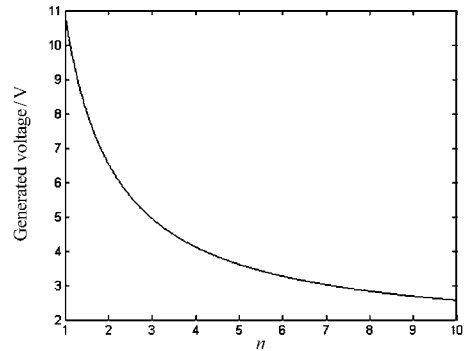


图 8  $s_i^* = 0.5$  时  $n-U_g$  关系图

Fig.8  $n-U_g$  curve when  $s_i^* = 0.5$

图 9 表示了压电叠堆体中压电陶瓷层数、滚珠中心位移和并联连接模式下总电压之间的关系.从图 10 中可以看出,随着叠堆体的压电陶瓷层数增加,产生的电压随之减小,而且在  $n$  从 1 到 4 时,减小的比率很大,在压电陶瓷层数为 4 层之后电压减小的速率趋于平稳,对比图 8 可以看出,并联连接模式下总电压与单片压电陶瓷产生的电压在数值上是相等的,这与公式(17)相符;并联连接模式对产生的电压影响并不大,当滚珠中心位置在  $l_3$  中点时产生的电压最大.

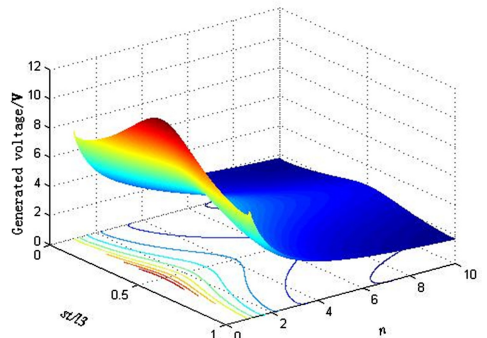


图 9  $n-s_i^*-U_b$  变化图

Fig.9  $n-s_i^*-U_b$  curve

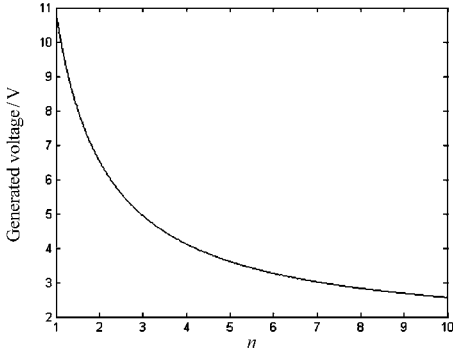


图 10  $s_t^* = 0.5$  时  $n-U_b$  关系图

Fig.10  $n-U_b$  curve when  $s_t^* = 0.5$

图 11 表示了压电叠堆体中压电陶瓷层数、滚珠中心位移和并联连接模式下俘获的总电能之间的关系.从图 12 中可以看出,随着叠堆体的压电陶瓷层数增加,俘获的总电能随之减小,而且在  $n$  从 1 到 5 时,减小的比率很大,在压电陶瓷层数为 5 层之后电压减小的速率趋于平稳;当滚珠中心位置在  $l_3$  中点时俘获的总电能最大.

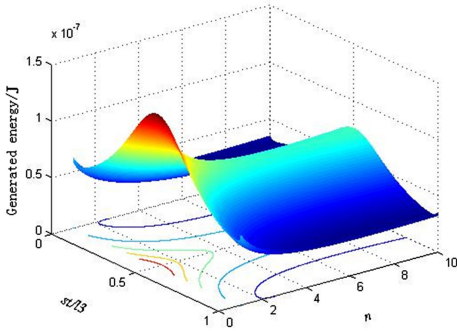


图 11  $n-s_t^* -W_b$  变化图

Fig.11  $n-s_t^* -W_b$  curve

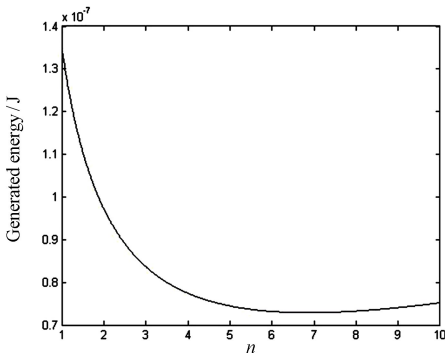


图 12  $s_t^* = 0.5$  时  $n-W_b$  关系图

Fig.12  $n-W_b$  curve when  $s_t^* = 0.5$

### 3.2 串联模式仿真分析

图 13 表示了压电叠堆体中压电陶瓷层数、滚

珠中心位移和串连接模式下总电压之间的关系.从图 14 中可以看出,随着叠堆体中压电陶瓷层数增加,产生的总电压随之增大,对比图 8 可知,串联模式下总电压与单片电压基本符合公式 (19);同样的,串联连接模式对产生电压的位置影响并不大,当滚珠中心位置在  $l_3$  中点时产生的电压最大.

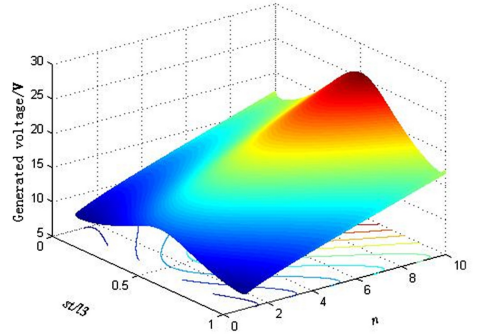


图 13  $n-s_t^* -U_c$  变化图

Fig.13  $n-s_t^* -U_c$  curve

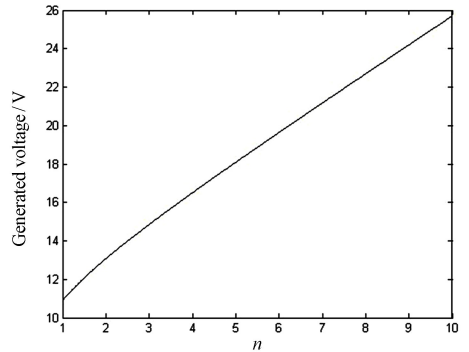


图 14  $s_t^* = 0.5$  时  $n-U_c$  关系图

Fig.14  $n-U_c$  curve when  $s_t^* = 0.5$

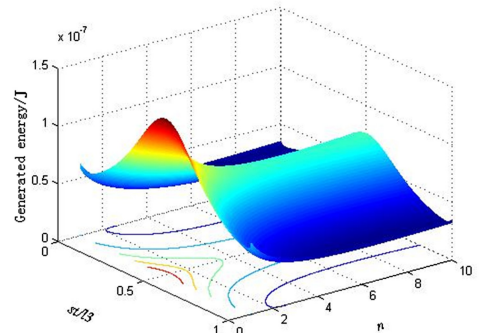


图 15  $n-s_t^* -W_c$  变化图

Fig.15  $n-s_t^* -W_c$  curve

图 15 表示了压电叠堆体中压电陶瓷层数、滚珠中心位移和串联连接模式下俘获的总电能之间的关系.对比图 12 和图 16 可知,在压电叠堆的总

体积不变的情况下,无论选择何种连接方式,压电陶瓷所俘获的总电能是不变的,两种连接方式下,压电振子层数在1至5层以内时,俘能器所俘获的总电能随层数的增加而减小,超过5层后俘获的总电能逐渐增加。

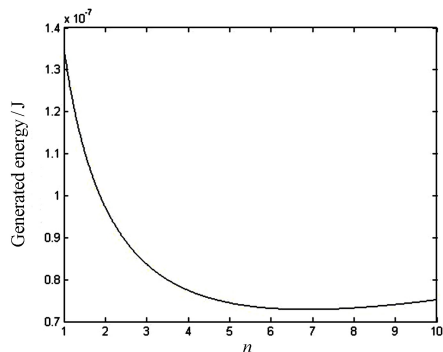


图16  $s_i^* = 0.5$  时  $n-W_c$  关系图

Fig.16  $n-W_c$  curve when  $s_i^* = 0.5$

## 4 结论

本文结合 Kim 等设计的圆锥金属型压电振子和压电叠堆体提出一种通过滚珠提供压迫力的压电振子结构,并利用仿真软件通过对压电叠堆体在两种连接方式—并联和串联模式下压迫力大小,产生的电压以及俘获的电能的分析,得到了该结构的压电转换特性分析,仿真结果表明,滚珠对压电单元产生的压迫力在压电陶瓷层数为5层以内时随层数的增加而增大,5层时压迫力最大,超过5层后滚珠对压电叠堆的压迫力逐渐减小,而单层压电陶瓷所产生的电压随层数增加而减小;并联和串联两种连接模式的仿真结果显示,俘能器所俘获的总电能随层数增加而减小;超过5层后俘获的总电能逐渐增加;在压电叠堆的总体积不变的情况下,无论选择何种连接方式,压电陶瓷所俘获的总电能是不变的,但可以根据使用场合的不同选择不同的连接方式,从而满足不同的使用要求。

## 参 考 文 献

1 刘祥建,陈仁文. 压电振动能量收集装置研究现状及发展趋势. 振动与冲击, 2012, 16(31):169~176 (Liu X J, Chen R W. Current situation and developing trend of piezoelectric vibration energy harvesters. *Journal of Vibra-*

*tion and Shock*, 2012, 16(31):169~176 (in Chinese))

2 张磊,房立清,郭德卿. 单晶压电振子结构二维优化设计. 压电与声光, 2013, 6(35):889~892 (Zhang L, Fang L Q, Guo D Q. Two dimensions optimal design of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2013, 6(35):889~892 (in Chinese))

3 袁江波,谢涛,单小彪等. 压电俘能技术研究现状综述. 振动与冲击, 2009, 28(10):36~41 (Yuan J B, Xie T, Shan X B, et al. A review of current situation for piezoelectric energy harvesting. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(10):36~41 (in Chinese))

4 Kim H W, Batra A, Priya S, et al. Energy harvesting using a piezoelectric cymbal transducer in dynamic environment. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(9):6178~6183.

5 冯博琳,王军利,熊超等. 结构参数对 Cymbal 压电换能器发电性能的影响研究. 机械制造与自动化, 2016(5):171~173 (Feng B L, Wang J L, Xiong C, et al. Properties analysis of electricity generation for cymbal transducer. *Machine Building & Automation*, 2016(5):171~173 (in Chinese))

6 魏克湘,邹鸿翔,张文明. 基于滚压的悬架振动俘能装置设计与特性分析. 振动.测试与诊断, 2016, 36(5):897~901 (Wei K X, Zou H X, Zhang W M. Design and analysis of the vibration energy harvester for self-powered vehicle suspension based on rolling-press. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(5):897~901 (in Chinese))

7 Roundy S. On the effectiveness of vibration-based energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(10):809~823

8 Baker J, Roundy S, Wright P. Alternative geometries for increasing power density in vibration energy scavenging for wireless sensor networks. *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International. Energy Conversion Engineering Conference*, 2005, 2:959~970.

9 党永,董维杰,白凤仙等. 压电叠堆联接方式及低频发电特点的研究. 电源学报, 2011(4):56~62 (Dang Y, Dong W J, Bai F X, et al. Performance of piezoelectric stack for energy harvesting from low frequency vibration. *Journal of Power Supply*, 2011(4):56~62 (in Chinese))

10 王光庆. 压电叠堆式发电装置的建模与仿真分析. 中国机械工程, 2009(19):2298~2304 (Wang G Q. Mod-

- eling and simulation of a piezoelectric stacked generator. *China Mechanical Engineering*, 2009(19):2298~2304 (in Chinese)
- 11 Platt S R, Farritor S, Haider H. The use of piezoelectric ceramics for electric power generation with orthopedic implants. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(2):455~461.
- 12 Zou H X, Zhang W M, Wei K, et al. Design and analysis of a piezoelectric vibration energy harvester using rolling mechanism. *Journal of Vibration & Acoustics*, 2016, 138(5):051007-1-51007-16.
- 13 柏振海,黎文献,罗兵辉等.一种复合材料弹性模量的计算方法.中南大学学报(自然科学版),2006,37(3):438~443 (Bai Z H, Li W X, Luo B H, et al. A method to calculate the elastic modulus of composites. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2006,37(3):438~443 (in Chinese))

## SIMULATION ANALYSIS ON PIEZOELECTRICITY CONVERSION CHARACTERISTICS OF PIEZOELECTRIC STACK BASED ON ROLLING DEPRESSION\*

Huang Weibin<sup>1</sup> Wei Kexiang<sup>2†</sup> Du Ronghua<sup>1</sup>

(1.College of Automobile and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 411104, China)

(2.Department of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China)

**Abstract** The paper proposes a piezoelectric stack structure based on the rolling depression, which combines the Cymbal piezoelectric transducer and the piezoelectric vibrator stack to convert the reciprocating vibration into an one-way oppression of piezoelectric vibrator using the ball bearing as the excitation source. Using the simulation software, the force on the piezoelectric unit produced by ball and the output voltage and trapped energy of transducer structure in parallel and series mode are examined, and the piezoelectric conversion characteristics of the structure are obtained. The simulation results show that the ball force on the piezoelectric stack does not always decrease with the increase of the number of piezoelectric layers. It increases gradually during 1-5 layers of piezoelectric ceramic, but decreases in the more than 5 layers. Meanwhile, it is found that if the total number of the layers of piezoelectric ceramics is unchanged, the total energy trapped by piezoelectric stack remains the same. However, when the number of layers is less than 5, it decreases with the increase of the number, but it gradually increases when the layers are more than 5.

**Key words** piezoelectric vibrator, rolling-pressed, piezoelectric stack, piezoelectric conversion

Received 29 November 2016, revised 27 February 2017.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11172100, 11272067), the new century excellent talent support program of the Ministry of Education (NCET-13-0782).

† Corresponding author E-mail: kxwei@hnie.edu.cn