

一种道路用小型压电发电及储存装置的研究

辛 菲, 陈文革, 张叶伟, 卓 磊

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要:为了收集并利用汽车通过公路时所产生的振动能量,设计了一种利用压电材料的正压电效应采集环境振动能量,把振动能转换成电能的道路用振动发电装置。为使压电材料和道路振动能巧妙结合从而吸收最大的外部能量,获得高的发电效率,进行了以下研究:分析了压电材料变形量对发电能力的影响,并设计了能找到压电材料产生最大电能的最小变形量的模型。通过实验分析压电片的联接方式对电能输出的影响,得到了以并联为主,串联为辅的混联电路模型。设计并制作了道路用压电发电装置模型,通过模拟实验测得其发电功率为 0.061 2 W,电容储电功率为 0.026 4 W,发电效率为 14.42%,电容储电效率 6.21%。

关键词:压电;电路;设计;装置

中图分类号:TN384

文献标识码:A

Research on the Piezoelectric Power Generation and Energy Storage Device for Urban Roads

XIN Fei, CHEN Wenge, ZHANG Yewei, ZHUO Lei

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to collect the vibration energy when cars through the road, a vibration generation device based on piezoelectric materials is designed to transform vibrational energy into electricity, collecting maximum vibration energy from the environment. For purpose of absorbing the maximum external energy, the following research is completed. The influence of the deformation of piezoelectric material to generate electricity is analyzed, and a model which can find the minimum deformation of piezoelectric materials to produce maximum electricity is designed. A hybrid circuit model mainly in parallel and secondly in series is made based on the analyzing of the influence of the link method of piezoelectric patches to the electrical energy output. A piezoelectric generation device is made and experiments show the power of electrical energy output is 0.061 2 W, capacitors store electrical power is 0.026 4 W, power generation efficiency is 14.42%, and capacity storage efficiency is 6.21%.

Key words: piezoelectric; circuit; design; device

0 引言

自 20 世纪 50 年代以来,随着各种新材料、电子技术的发展,各种无线电传感器设备大量出现。由早期的火力发电、水力发电到风力发电、太阳能发电等,电能的来源形式多样。由于压电材料的广泛应用,电能的来源又多了一种渠道,即压电发电^[1-5]。近年来,高集成化、低能耗电子器件和无线电射频技术的使用,为压电发电技术的应用提供了条件;另一方面,随着材料科学和制造技术的发展,高性能、高机电转换效率的压电材料不断出现,也使压电发电

的应用越来越广泛^[6-7]。

日本开发出一种“发电地板”,据测定,平均每个人从 45 cm² 的地板上走过两次就可产生 0.5 W·s 的电能。廖海洋等^[8]为解决汽车轮胎压力无线监测系统电能自给问题,应用压电换能原理,设计了一种压电陶瓷轮胎发电机。Steinhausen 等^[9]设计并模拟了依靠肌肉运动来提供动力的压电发电系统,该机构可用于驱动内置于人体中的医疗机械。褚祥诚等^[10]把压电复合材料用于高速公路的动态称重传感器。2008 年,以色列的 Innowattech 公司与海法

收稿日期:2015-03-01

基金项目:西安市城建委基金资助项目(SJW2014020)

作者简介:辛菲(1990-),女,陕西宝鸡人,硕士生,从事压电材料及器件的研究。

理工学院共同研发了应用于道路工程的压电能量收集系统,但该技术当前仍处于保密状态^[11]。由此可见,压电发电的应用很多,电力储能的装置也较成熟,但把压电效应与普通道路相联系并实施储能和应用的研究不多。

本文设计了一种用于路面的压电发电及储存装置,只需针对城市道路进行简单改造,将压电装置铺设于路面内或直接用压电材料作为路面组成部分,就可通过车辆行走时路面振动来发电,将该电能存储并在必要时加以利用。通过实验分析,提出了一种以并联为主,串联为辅的混联电路模型,提高了压电发电的输出功率。通过模拟实验测试了其发电效果。

1 压电发电装置模型的结构设计

由于道路压电的安装条件的影响,若使用周边固定支撑方式安装压电片,则机电耦合系数极低。考虑到道路压电装置的发电激励方式为强制振动式(通过车辆的运行施加振幅,迫使压电换能器产生交替的弯曲变形来获得能量),本文结合压电片的简支支撑方式,利用弹性体作为支撑物,不但能解决周边固定式的机电耦合系数低的问题,还能对压电片起到保护作用,使之不易失去弹性。设计如图1所示。

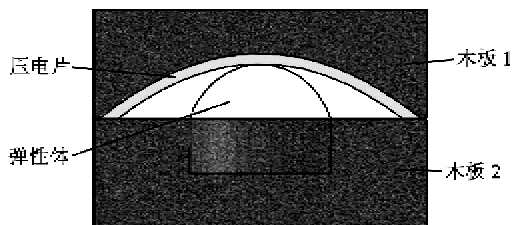


图1 单个压电片安装结构图

由图1可见,木板1模拟路面沥青层,木板2模拟路基。首先,在厚木板上钻一个直径为 $\varnothing 18\text{ mm}$,深 15 mm 的圆柱槽,在里面放上一个直径为 $\varnothing 15\text{ mm}$,高为 23 mm 的弹性体,设计的圆柱槽直径较弹性体大,这样弹性体在发生形变时有适当的伸展空间;同时,因为有圆柱槽的限制,弹性体不会发生较大的变形,解决了因重载荷使弹性体失效的问题。然后将压电片用射钉固定在厚木板上,并紧贴弹性体。加压后的压电片的变形如图2所示,当压电片受到外力作用时,弹性体由于形变,将会龟缩到间隙中,压电片随着弹性体的变形而发生形变,产生电能;当外力撤去后,压电片在弹性体的作用下恢复原貌,这个过程重复进行就会不断地产生电能。

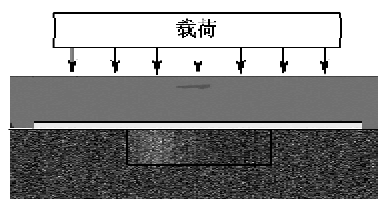


图2 加压后压电片的变形示意图

2 弹性体的设计与选择

2.1 压电片最佳变形量的确定

本实验所用的商用PZT-5H压电陶瓷片的尺寸及电性能如表1所示。

表1 PZT压电陶瓷片的规格及电性能

长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	压电常数/(pC/N)
60	50	0.8	328
介电常数		介电损耗	机械品质因数
2 300		0.02	15.63

压电片的输出电压与其变形量有关,自行设计的实验装置如图3所示。通过实验分析压电陶瓷片在外加载荷(模拟冲击载荷)作用下产生压电效应的最适宜变形量,从而确定弹性体的尺寸大小。

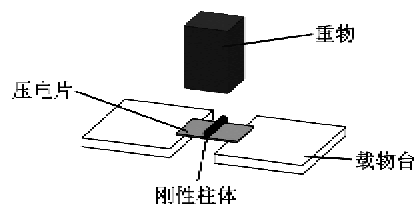


图3 测量压电片最佳变形量的模型

由图3可见,首先将压电片悬空放在可任意调整厚度的载物台上,载物台之间的间距为 50 mm ,将压电片连接上万用表,并将万用表调至电压档;然后在压电片中间粘一个刚性圆柱体,在其正上方 20 cm 处放置一个 10 kg 重物。这样只要改变载物台的厚度就可保证在压电片受力等其他条件相同的情况下产生不同的变形量,通过反复实验记录输出电压值,找到输出电压最大时的压电片的变形量。

图4为压电片变形量与输出电压的关系图(模型实测)。由图可看出,当压电片的变形量逐渐增加时,输出电压也逐渐增加,当变形量达到一定值后,压电材料内部的变形速率达到饱和;继续增加变形量,输出电压几乎不变。本次试验所用的PZT-5H在形变量达到 3 mm 后,产生的电压值几乎不变,所以在设计压电装置时,将压电片的变形量控制在 3 mm 左右。本实验继续增加变形量至 8 mm 时,压电片表面出现了裂纹,即压电装置在未铺设沥青层

时的最大变形量不能超过 8 mm。

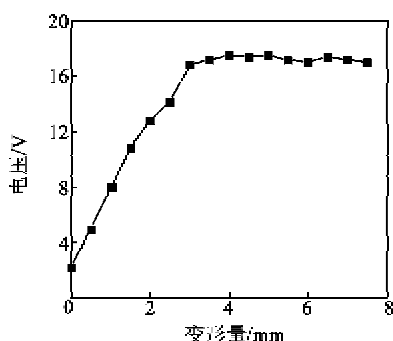


图4 压电片变形量与输出电压的关系图

2.2 弹性体的设计与选择

根据城镇道路工程施工与质量验收规范^[12]的规定:沥青混凝土层(一般工艺的第三条):先铺粗沥青层,厚度 50 mm,最大骨料 ≤ 35 mm,用 12 t 以上碾压机碾压后铺细沥青层,厚度 30 mm,最大骨料 ≤ 15 mm,用 12 t 以上碾压机碾压。密实度(质量要求的第六条):表面压密实度达 97% 以上,干密度达到 2.35 kg/L。理论计算出每块压电片受到沥青层的压力为 2.47 N,而压电片最大能承受近 8 mm 的变形,则所需弹性体或弹簧的弹性系数一般在 550~650 N/mm,生活中很多普通的天然橡胶的弹性系数都能达到要求。由于是汽车碾压的,所以不会产生因弹性系数较大而不易发生形变的问题,因此,本实验模型在理论上是实际可行的。

路基层(一般工艺的第二条):厚度约 200 mm,碎石粒径为 $\varnothing(30\sim 50)$ mm,用 12 t 以上碾压机碾压直至碎石不松动,表面无波纹为止,压实密度达到 2.2 t/m³,厚度允许偏差 8%,允许偏差范围 ≤ 20 mm,所以安放弹性体的槽深不得大于 2 cm。本实验装置是在路基上钻一个深 15 mm,直径为 $\varnothing 18$ mm 的圆柱形槽,安放一个直径为 $\varnothing 15$ mm,高 23 mm 的弹性体,压电片两端固定在路基上,通过理论计算,安装好压电片(此时拱高 8 mm)后铺上沥青层,压电片由于承受沥青的压力,弹性体将收缩约 3~4 mm,此时压电片的拱高约为 4 mm。当车辆经过路面时,压电片近乎平贴路面,这样小量的冲击载荷被弹性体吸收使压电片产生形变,其余载荷由路面与压电片吸收产生小量电荷。

3 压电材料联接方式的确定

由于压电片的高内阻,且产生的电流特别小,不同联接方式对功率的输出影响较大。为了确定压电片的联接方式,本文首先把各个压电片固定在压电

装置上,然后对其串联和并联,在对基板施加 650 N 的作用力下测量输出电流、电压及空载时的内阻。

并联后的测量结果如表 2 所示。由表可看出,随着并联片数的增加,输出电压几乎无变化,电流成倍数增长,电源内阻随着片数的增加而逐渐减少。因此,并联片数越多,对电能的收集越有利。

表2 压电片并联后输出情况

并联片数	电压/V	电流/ μ A	电阻/k Ω
1	17.5	60	251
2	17.0	135	197
3	16.0	185	124
4	14.5	236	84
5	15.0	278	62

串联后的测量结果如表 3 所示。由表可看出,随着串联片数的增加,电压确实在增加,但增幅却是逐渐降低,电流逐渐下降,电源内阻不断升高。多个压电片串联不利于电能收集,但对于制作传感器等需要检测电压信号的装置较为合适,这是因为单个压电片的输出信号很弱,将两片压电片串联,虽然内阻增大,但输出电压几乎增大一倍,有利于电压信号的检测。因此,要想获得高的电压输出和能量收集,串联两片最为适合。

表3 压电片串联后的输出情况

串联片数	电压/V	电流/ μ A	电阻/k Ω
1	17.5	60	251
2	29.7	68	320
3	36.5	45	395
4	43.5	38	475
5	49.5	34	535

结合实际路况,汽车在道路上行驶时,不可能使每块压电片都同时受力,所以压电片发电情况是零散随机分布的。若串联,相邻两个压电片之间会产生逆压电效应,造成能量的损失;而压电片并联后,由于压电片的内阻很大,并联的压电片之间不会产生逆压电效应,可以认为并联压电片之间互不影响。并联后电源内阻降低,有利于电能的输出,所以要进行压电电能收集,需尽可能地采用压电片的并联方式。

本实验对压电片进行了混联(压电片两两串联后再并联),以 6 片压电片为例,混联后测得输出电压 30.2 V,电流 120 μ A,电阻 180 k Ω 。由此可看出混联电路既能提高输出电压,也能提高输出电流,且相同数量压电片联接方式中输出功率最大。

本文的压电片联接方式采用混联电路,联接示意图如图5所示。由图可看出,相邻的两片串联,其余的压电片与其都是并联的关系,如此可保证任意两片相邻的串联压电片直接与电网相关。这样在很大程度上减少了电能的损失。

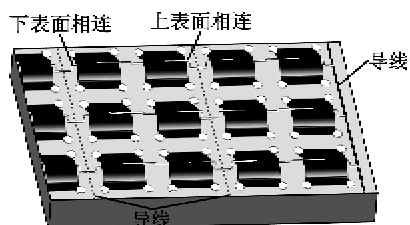


图5 压电片的联接示意图

4 电能的储存及实验测试

能量的收集采用电池储存能量电路图,如图6所示。它由一个整流桥和一个超级电容组成,电池可调节充电频率,电容起到一个稳压的作用,电容的大小根据所产生的电流大小进行选择。超级电容器充电完成后放电,然后将能量储存于电池中。

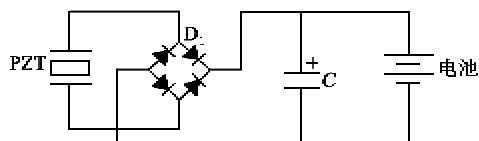


图6 储存电路图

把压电片(6片为例)按照混联方式联接后,接入储存电路。由于在城市道路上来往车辆以小轿车为主,车辆行驶速度一般规定为60 km/h,由此可计算出来往车辆经过每一组压电材料时的理论加载频率约为10 Hz。当车辆经过路面时,大量的冲击载荷被弹性体与路面吸收,而加载在每块压电片上使其产生形变的载荷不超过10 N。

将连接好的实验装置在疲劳试验机上(模拟路况)进行正弦激励测试($f=10$ Hz,作用力峰值 $F=20$ N),选用4.4 F、5.5 V的电容,记录电容两端电压随时间的变化关系如图7所示。由图可看出,在

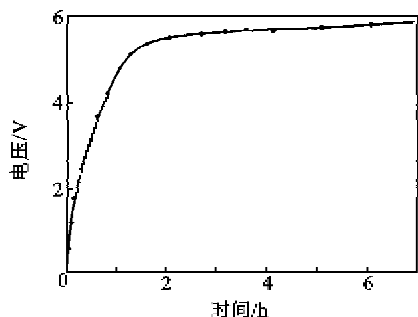


图7 电容充电曲线图

载荷的作用下经过约1.4 h可将4.4 F超级电容充满。实验结果表明,压电片可实现间歇性对外供电。通过计算可得本实验装置在上述振动条件下其发电功率为0.061 2 W,电容储电功率为0.026 4 W,发电效率为14.42%,电容储电效率6.21%。

5 结论

1) 压电片的变形量达到一定程度时,产生的电性能达到最好,继续增加变形量,对压电片的输出电能影响不大。

2) 以并联为主,串联为辅的压电片混联方式与同数量的压电片串联或并联方式相比,混联联接时压电装置的电能输出效果好,因此道路压电发电应尽可能采用混联方式。

参考文献:

- [1] 王强, 骆英, 顾建祖. 基于压电材料的振动能量获取技术的研究[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(3): 47-50.
WANG Qiang, LUO Ying, GU Jiangzu. Research on harvested technique of vibration energy based on piezoelectric materials[J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(3): 47-50.
- [2] 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.
- [3] 许颖颖, 龚俊杰, 宋子玲, 等. 悬臂梁压电发电装置的实验研究[J]. 机械工程与自动化, 2012(1): 80-81.
XU Yingying, GONG Junjie, SONG Ziling, et al. Experimental study on power generation capacity of piezoelectric cantilever[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2012(1): 80-81.
- [4] 何超, 陈文革. 压电材料的制备应用及其研究现状[J]. 功能材料, 2010, 41(增刊D): 11-13.
HE Chao, CHEN Wenge. Fabrication and research and application of piezoelectric materials[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(Suppl. D): 11-13.
- [5] 闫世伟, 杨志刚, 阚君武, 等. 压电陶瓷能量转换系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(2): 344-348.
YAN Shiwei, YANG Zhigang, KAN Junwu, et al. Energy conversion system with piezoelectric ceramic[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2008, 38(2): 344-348.

(下转第1019页)