

◀ 专家论坛 ▶

# 基于 PVDF 的新型高速公路压电动态称重传感器<sup>\*</sup>

褚祥诚<sup>1</sup>, 徐亚楠<sup>1</sup>, 袁松梅<sup>2</sup>, 王 林<sup>1</sup>, 刘 明<sup>2</sup>, 李龙士<sup>1</sup>

(1. 清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室 北京, 100084)

(2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京, 100083)

**摘要** 针对高速公路车辆超载严重的问题,提出了一种以压电薄膜聚偏二氟乙烯(polyvinylidene fluoride,简称PVDF)为敏感元件的新型高速公路压电动态称重传感器。分析了该新型传感器的工作原理,采用有限元分析软件ANSYS建立了传感器的机-电耦合模型,模拟得出了单片PVDF、双片PVDF串/并联情况下产生的电荷量。针对该传感器设计了一种简单调理电路,使PVDF的高阻抗输出变为低阻抗输出,并对所采集的电信号进行有效的放大。为验证该压电传感器方案设计的可行性,进行了室内试验和小型乘用车现场动态实测。试验结果表明,压电传感器具有较高的灵敏度,可以对车重进行实时检测和数据分析。

**关键词** 压电传感器;聚偏二氟乙烯(PVDF);动态称重;高速公路

**中图分类号** TP212.12; TH71

## 引 言

近年来,我国的公路事业取得了长足发展,公路总里程迅猛增长。交通运输业的发展对国民经济建设起到了积极的推动作用,但是公路运输车辆超限超载的现象也较为普遍。车辆超限超载运输对道路、交通安全、运输市场及汽车生产秩序造成了极大的危害<sup>[1]</sup>。作为遏制超限超载的一种手段,货运车辆经过收费站时,要对其进行计重收费。自从2000年以来,国内多个省份开展了一系列的治理工作,并在高速公路上应用了动态称重系统(weigh in motion,简称WIM)<sup>[2]</sup>,其核心部件就是称重传感器。用于公路超载快速检测的传感器最早源于20世纪60年代对动态力测试的技术。20世纪90年代,由于公路车辆超限超载问题严重,使这类传感器在公路车辆轴载超载预判、桥梁超载报警和轴载动态称重中的应用得到快速发展。瑞士Kistler(奇石乐)公司开发出可以埋在路面下的以石英晶体为敏感元件的工字梁型动态称重传感器,用于公路车辆轴载超载预判、隧道保护和车辆轴载计量,取得了很好的应用效果。由于我国研究起步晚,压电传感器研究与应用落后于世界先进水平,对车辆动态称重过程

中的各种干扰也未作深入分析,故检测精度不高。因此,研究开发精度高、稳定性好的动态称重传感器必将为公路运营部门治理超限超载和实施计重收费提供有效的技术手段。

压电薄膜聚偏二氟乙烯(polyvinylidene fluoride,简称PVDF)是一种柔软的压电材料,自1969年日本的Kawai发现其具有压电性以后,几十年来,人们对PVDF薄膜的研究一直没有中断。我国早在60年代中期就开始了PVDF压电材料的研究。1977年,中国科学院上海化学研究所开始研制PVDF及其共聚物后,它的应用日趋广泛,几乎涉及到所有领域<sup>[3]</sup>。结合利用PVDF传感器补偿性的红外检测器,可以用来建立入侵警报、交通灯切换和自动电梯监测等系统。在美国,联邦交通管理局已考虑将PVDF用来记录路面振动情况,以便了解公路交通状况。一种可以用来检测石墨-环氧树脂复合结构缺陷<sup>[4]</sup>的“便携式自动远程检查系统”,关键元件就是含有1024个换能器的PVDF压电薄膜。在建筑方面,PVDF压电薄膜被用在桥梁、大坝、房屋等大型建筑的测振减震上;在医学<sup>[5]</sup>方面,已有采用PVDF材料用来防止婴儿猝死的呼吸检测器。

通过以上分析可知,PVDF压电薄膜电作为新兴的压电材料,具有诸多优点,包括工艺性好、耐腐蚀、机械性能强、工作温度范围宽、介电常数高等,这些优

<sup>\*</sup> 精细陶瓷北京市重点实验室开放课题资助项目;国家自然科学基金资助项目(51075223);北京市自然科学基金资助项目(3102018)

收稿日期:2013-01-10;修改稿收到日期:2013-02-20

点使它成为一种理想的换能器或传感器材料。用PVDF制作的传感器由于结构简单、制作方便、成本低等因素,被广泛应用于各个领域<sup>[6]</sup>。基于以上分析,笔者选择PVDF作为压电动态称重传感器的压电材料,目标设计一种精度高、稳定性好的动态称重传感器。同时,该传感器不同于已有的压电公路传感器必须埋在道路结构中,而是一种高刚度的扁平结构,实际使用中将根据车道宽度和测试参数要求将数个传感器并联预置在道路表面,便于后期维护、检修和更换,尽可能减小传感器对道路结构的破坏。

## 1 传感器的设计与原理分析

### 1.1 传感元件设计

传感元件设计如图1所示,主要包括上盖、底座、PVDF压电材料。上盖和底座用16个M3螺钉连接,用以提供PVDF的预紧力。中间部分用于放置PVDF,两片PVDF以并联的方式放入传感器中。

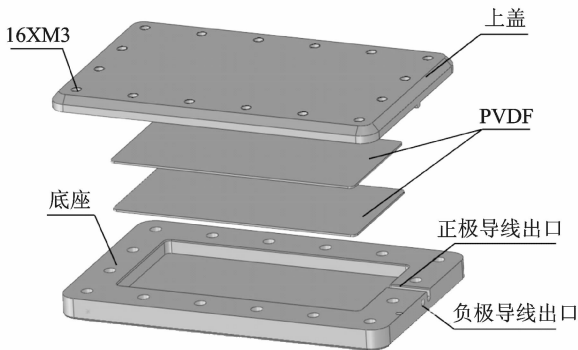


图1 压电动态称重传感器结构示意图

图2是压电传感器内部PVDF的布置和连线方式示意图。两片PVDF中间用铜箔连接作为正极输出,另外两面则与整个传感器相连作为负极输出。硬质塑料的作用是为PVDF材料提供预紧力,同时也使传感器结构内部保持一定弹性,避免PVDF材料的损坏。

### 1.2 工作原理

对于压电晶体,当其沿一定方向受到外力作用时,在晶体的某两个表面上便产生符号相反、大小相等的电荷,当外力去掉后,又恢复到不带电的状态。将应力 $\mathbf{T}$ 和电场强度 $\mathbf{E}$ 作为自变量,应变 $\mathbf{S}$ 和电位移 $\mathbf{D}$ 作为因变量,这一现象可用如下的压电方程表示

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \mathbf{s}^E \cdot \mathbf{T} + \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{d} \cdot \mathbf{T} + \boldsymbol{\epsilon}^X \cdot \mathbf{E} \end{cases} \quad (1)$$

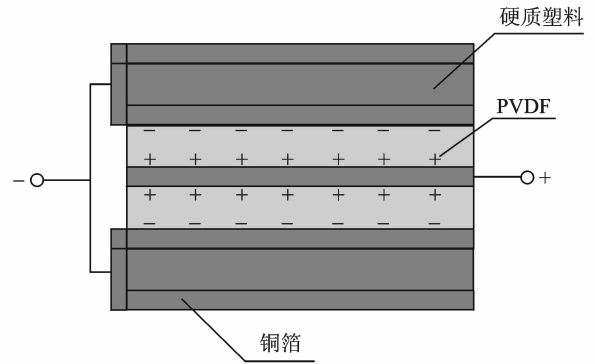


图2 PVDF布置和连线方式示意图

其中: $\mathbf{d} = \mathbf{d}_{ij}$  ( $i=1,2,3; j=1,2,\dots,6$ )为压电常数矩阵; $\mathbf{s}^E$ 为恒电场下的柔性常数矩阵; $\boldsymbol{\epsilon}^X$ 为恒应力时的介电常数矩阵。

PVDF拉伸极化后具有4 mm点群的对称性<sup>[7]</sup>,常选取 $x$ 轴为拉伸方向, $z$ 轴垂直于膜面平行于极化方向, $y$ 轴用右手定则选取,当仅考虑 $z$ 方向受均匀力时,即 $T_3 \neq 0, E=0$ ,PVDF的压电常数矩阵为

$$\mathbf{d}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $d_{24} = d_{15}$ ,且其绝对值较 $d_{31}, d_{33}$ 小近二个数量级,所以具体应用时可认为 $d_{24} = d_{15} \approx 0$ 。

式(2)可简化为

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

当仅考虑 $z$ 方向的受力时,式(3)可简化为

$$D_3 = d_{33} T_3 \quad (4)$$

即压电传感器产生的电荷大小与所受压力成正比,此即压电传感器的理论基础。

上述现象称之为正压电效应,压电动态称重传感器正是利用了压电材料的正压电效应,感知车轮经过传感器表面时的压力变化,进而通过计算得知车辆的轴重。

### 1.3 压电材料连接方式

为了提高压电传感器的输出灵敏度,在实际应用中通常是由两片以上的压电材料叠合起来使用。根据输出要求,压电片的联接有串联和并联两种,而具体选择哪一种则应视情况而定,如图3所示的传感器由两片PVDF压电材料叠合而成。

如图3(a)所示,两片压电片负极都集中于中间电极上,正极在上下两面电极上,这种接法称为并联。图3(b)中的接法是上极板为正电荷,下极板为

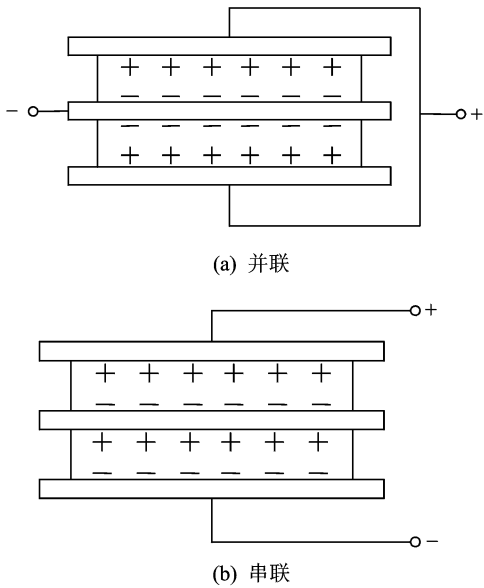


图 3 压电元件的并联与串联

负电荷,而中间极板上上片产生的负电荷与下片产生的正电荷抵消,这种接法称为串联。

对于并联接法

$$Q_b = nQ_c, U_b = U_d, C_b = nC_d \quad (5)$$

对于串联接法

$$Q_c = Q_d, U_c = nU_d, C_c = \frac{C_d}{n} \quad (6)$$

其中: $n$  为压电元件片数; $Q_c, Q_b, Q_d$  分别为串、并联和单层陶瓷的电荷量; $U_c, U_b, U_d$  分别为串、并联和单层陶瓷的输出电压; $C_c, C_b, C_d$  分别为串、并联和单层陶瓷的电容量。

在这两种接法中,并联接法输出电荷量大,适用于以电荷作为输出量的场合。串联接法输出电压高,适用于以电压作为输出量的场合。

## 2 有限元仿真分析

ANSYS 分析的主要目的是模拟传感器受力时产生电荷量的大小,同时验证两片 PVDF 并联和串联时所产生电荷量的关系。

模拟分析时设定车辆经过传感器时的速度为 20 km/h,传感器的表面宽度是 60 mm,则车轮经过传感器的时间约 0.02 s;小型乘用车总重量约 1.5 t,则每个车轮所承受的静力约 3 750 N。

图 4 为单片 PVDF 的电压云图。由图可知,最大电压  $U = 0.193\ 608\ V$ ;单片 PVDF 的电容为

$$C_d = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} = \frac{12 \times 8.854\ 188 \times 75 \times 10^{-3} \times 35 \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-3}} =$$

$$557.81\ pF \quad (7)$$

故单片 PVDF 产生的电荷量的大小为

$$Q_d = C_d U_d = 557.81 \times 0.193\ 608\ pC = 107.99\ pC \quad (8)$$

图 5 为两层 PVDF 膜并联时的电压云图。由图 5 可知,此时的电压最大值  $U_b = 0.174\ 637\ V$ ,又因为并联时  $C_b = 2C_d$ ,故同理可得产生的电荷量大小为

$$Q_b = C_b U_b = 2 \times 557.81 \times 0.174\ 637\ pC = 194.83\ pC \quad (9)$$

图 6 为两层 PVDF 膜串联时的电压云图。因为串联时电容  $C_c = \frac{1}{2}C_d$ ,且由图 6 可知,串联时的最大电压  $U_c = 0.348\ 983\ V$ ,则串联时产生的电荷量为

$$Q_c = C_c U_c = \frac{1}{2} \times 557.81 \times 0.348\ 983\ pC = 97.33\ pC \quad (10)$$

由分析可知, $Q_b = 194.83\ pC \approx 2Q_c = 2 \times 97.33\ pC = 194.66\ pC$ , $U_c = 0.348\ 983\ V \approx 2U_b = 2 \times 0.174\ 637\ V = 0.349\ 274\ V$ 。通过仿真分析证明了在误差允许的范围内,两片 PVDF 并联所产生的电荷量是串联时的 2 倍,串联时的输出电压约为并联时的 2 倍。图 7 为 3 种情况下的电压变化曲线图。

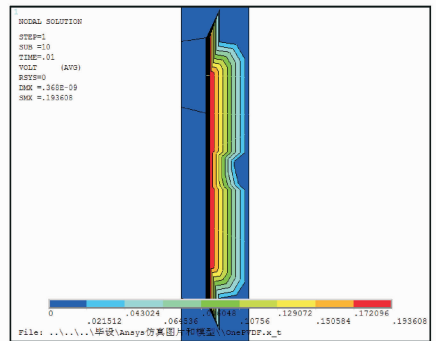


图 4 单片 PVDF 时的电压云图

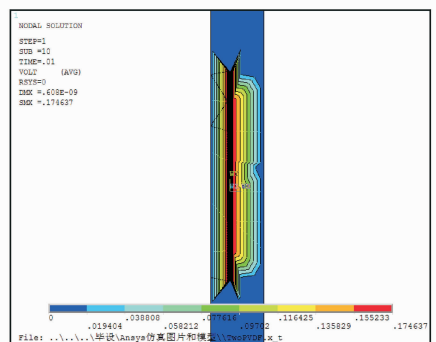


图 5 两片 PVDF 并联时的电压云图

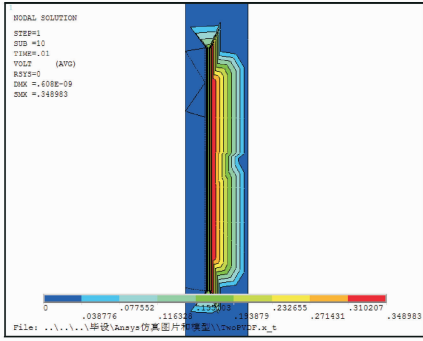


图6 两片PVDF串联时的电压云图

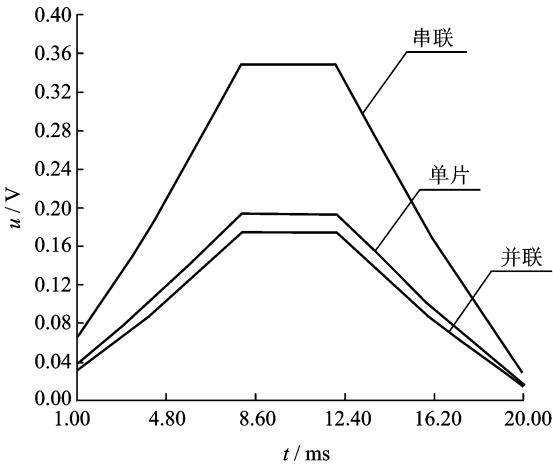


图7 3种情况下产生电压的变化曲线图

### 3 研制与试验验证

为验证以PVDF压电薄膜为基础制作的高速公路压电动态称重传感器的可行性与可靠性,笔者研制了基于PVDF的动态称重传感器样品,并进行了室内试验和小型乘用车的现场动态测试。

### 3.1 传感器组装

结合压电动态称重传感器的结构设计要求,制作的传感器实物如图8所示。该传感器的规格为100 mm×60 mm×9.5 mm,工作面成扁平状外形结构,便于铺设在道路的表面。传感器由上盖、底座和PVDF压电材料3部分组成。上盖和底座所用材料为45钢,两者用16个M3螺钉连接,用以提供PVDF的预紧力。PVDF薄膜的厚度为0.5 mm,两片以并联的方式放入传感器中,PVDF表面粘贴铜箔作为电极并用导线引出,正极与PVDF中间电极连接,负极与传感器外壳相连作为接地线。

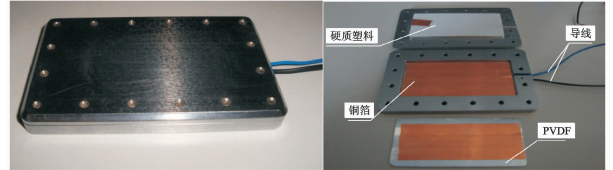


图8 压电传感器实物图

### 3.2 测量电路设计

因为压电式传感器是一个能产生电荷的高阻抗发电元件,它产生的电荷量很小,因此压电片上的电荷量很容易通过测量电路的输入电阻释放掉。只有当输入阻抗很高时,才有可能把变化的电荷量测出来。所以不能用一般的仪表来直接进行测量,而是需要设计一个调理电路(如图9和图10)<sup>[8]</sup>,其作用为:a.将高输出阻抗变换为低输出阻抗;b.放大传感器输出的微弱信号。

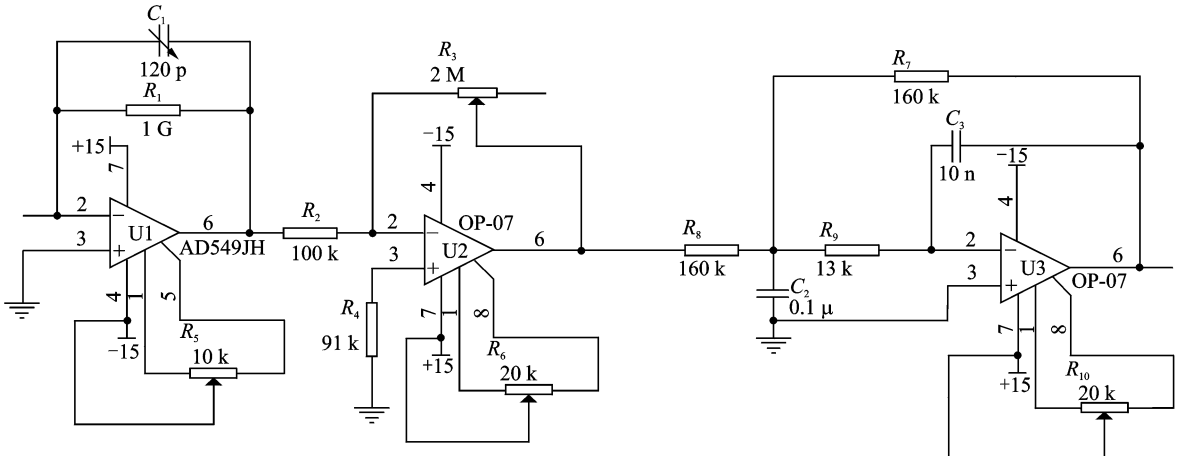


图9 调理电路原理图

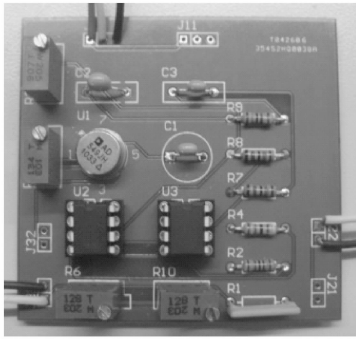


图 10 调理电路实物图

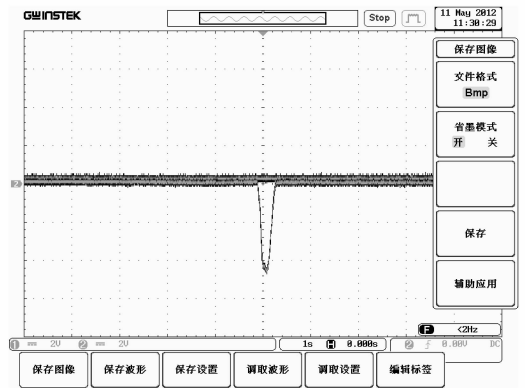


图 12 加调理电路之后的传感器输出波形图

### 3.3 室内试验

为验证 PVDF 压电传感器的使用可行性,对设计的传感器进行了室内压力测试。选用的测试仪器是台湾固纬 (GWINSTEK) 公司生产的型号为 GDS-3152 的数字存储示波器和 MATRIX 公司生产的型号为 MPS-3005L-3 的直流稳压电源。测试得到 PVDF 压电传感器的电容值为 862 pF,电阻值 >500 MΩ。

图 11 为传感器未加调理电路时的输出波形图。测试条件为在传感器表面用脚进行踩压的动作,以此来获得一个动态力。从波形图可以看到,只是一个简单的踩压动作就能产生最大值为 2 V 左右的电压,可见压电传感器的灵敏度还是很可观的。图 12 是在相同的测试条件下,加上调理电路后的输出波形图,由图可见积分效果很好,达到了测试要求。

的灵敏度。波形图中第 1 个波谷表示车辆前轮经过传感器产生的波形,第 2 个波谷表示车辆后轮经过传感器产生的波形。将此信号送入单片机和 PC 机处理,可求得车辆轴重、车速或前后轮轴距等参数。

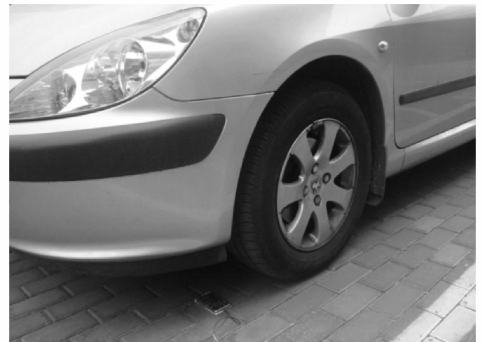


图 13 压电动态称重传感器的现场测试

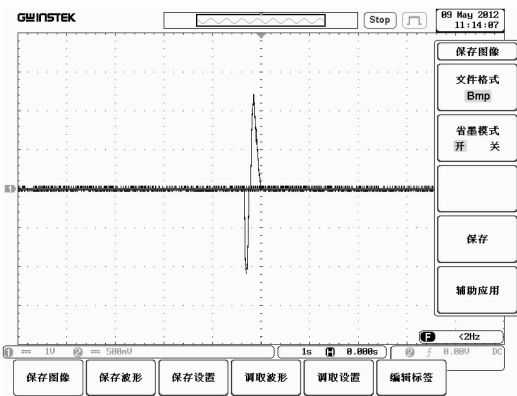


图 11 传感器输出波形

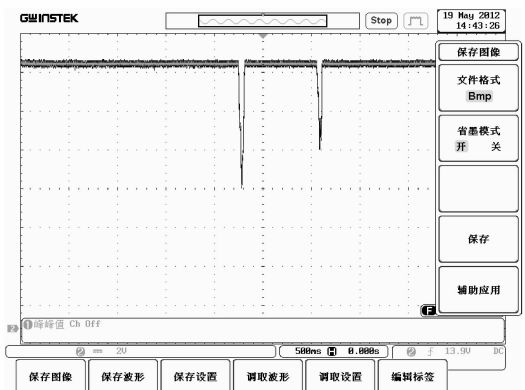


图 14 传感器的输出波形

### 3.4 现场实测

为了测试传感器的性能,利用小型乘用车进行了传感器的现场动态试验,试验照片如图 13 所示。传感器与地面用 3M 双面胶进行固定,车辆前后轮依次从传感器宽度方向压过。由图 14 可知,车辆经过传感器产生的电压最大值能达到 6 V,具有很好

## 4 结论

1) 设计并制作了一种以 PVDF 压电薄膜作为敏感元件的压电动态称重传感器。

2) 采用有限元分析软件 ANSYS 建立了传感器的机-电耦合系统模型,分析验证了 PVDF 在单

片、并联和串联3种情况下产生电荷量的关系。

3) 设计并制作了压电动态称重传感器的调理电路,使PVDF的高阻抗输出变为低阻抗输出,并对信号进行有效的放大。

4) 进行了压电动态称重传感器的室内模拟实验和小型乘用车现场动态试验,得到了车辆信号的波形图,与预期的基本一致,达到了试验目的,验证了该压电动态称重传感器的可行性。

为进一步推进该PVDF压电传感器的实用化,课题组将在随后的试验中,结合道路的具体要求,制备出结构上串并联的压电传感器结构,系统研究器件的灵敏度、固有频率、线性度、测量综合误差、绝缘电阻、量程与鉴别阈之比及抗干扰能力等参数。

#### 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通部. 2008年公路水路交通行业发展统计公报[EB/OL]. (2009-04-29)[2013-01-02]. <http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/zhengwugonggao/jiaotongbu/guihuatongji/200904/t20090429577813.html>.
- [2] 程路,张宏建,曹向辉. 车辆动态称重技术仪器[J]. 仪表学报,2006,27(8):943-948.  
Cheng Lu, Zhang Hongjian, Cao Xianghui. Vehicle weigh-in-motion technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(8): 943-948. (in Chinese)
- [3] 功能材料及其应用编写组. 功能材料及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1991:36-40.

- [4] Gerliczy C, Betz R. New technical developments in PVDF piezoelectric devices in Europe and in USA[J]. Applications of Ferroelectrics, 1986, 6: 519-522.
- [5] Meixner H. Passive infrared detector based on PVDF[J]. Ferroelectrics, 1986, 61: 52-54.
- [6] 陶秀,刘礼勇,陶圣. 基于压电薄膜的车辆动态称重数据采集及处理[J]. 交通信息与安全, 2011, 29(2): 130-132.  
Tao Xiu, Liu Liyong, Tao Sheng. Test data acquisition and processing of a piezo film-based vehicle dynamic weighing system[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2011, 29(2): 130-132. (in Chinese)
- [7] 王春雷,李吉超,赵明磊. 压电铁电物理[M]. 北京:科学出版社,2011:20-23.
- [8] 王国力,赵子婴,白金星. PVDF压电薄膜脉搏传感器的研制[J]. 传感技术学报,2004,4:688-692.  
Wang Guoli, Zhao Ziying, Bai Jinxing. Design and implementation of the three-point PVDF piezo-film sphygmo-transducer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2004, 4: 688-692. (in Chinese)



**第一作者简介:**褚祥诚,男,1971年出1月生,博士、副研究员。主要研究方向为压电陶瓷材料、结构与器件。曾发表《A disk-pivot structure micro piezoelectric actuator using vibration mode B11》(《Ultrasonics》2006, Vol. 44)等论文。  
E-mail: xuyanan1010@126.com