

压电动态拉应力传感器研究

许斌^{1,2}, 孙广意¹, 陈洪兵¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:该文提出一种用于混凝土结构内部动态拉应力测量的嵌入式应力传感器,在介绍其基本工作原理和结构的基础上,设计制作了拉应力传感器灵敏度标定装置,对一组传感器试样进行动态拉应力测量灵敏度标定。研究了压电陶瓷预加压应力下传感器输出电压与拉应力水平的线性关系,并比较了在不同预紧力水平下传感器的灵敏度。试验结果表明,制作的传感器输出电压与动态拉应力线性相关度较好,预紧力的施加可进一步提高线性相关度,且所制作的不同传感器间的灵敏度差异小。

关键词:压电陶瓷(PZT);动态拉应力;预紧力;混凝土结构;标定

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Study on PZT-based Dynamic Tensile Stress Sensors

XU Bin^{1,2}, SUN Guangyi¹, CHEN Hongbing¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Provincial Key Lab. of Damage Detection for Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract:In this paper, an embedded PZT-based dynamic tensile stress sensor for concrete structure is proposed. The design concept and manufacturing method are described at first and then a calibration device is designed and manufactured. The sensitivity of the developed tensile stress sensor is calibrated. The linearity between the output voltage of sensor under applied prestress on PZT patch and the tensile stress has been investigated, and the linearities under different prestresses were compared. The experimental results show that the linearity between the output voltage of the sensor and the dynamic tensile stress is good. By applying prestress, the linearity between the applied tensile force and the output of the sensor becomes better. The sensitivity differences of different sensors with identical PZT patch sensing element are small.

Key words:piezoelectric ceramic(PZT); dynamic tensile stress; prestress; concrete structures; calibration

0 引言

混凝土材料抗拉强度低,在拉应力作用下易产生开裂。对混凝土的拉应力进行实时监测对判断混凝土在动力荷载作用下的开裂,以及混凝土中应力的分布具有重要意义^[1]。

传统的混凝土结构应力测试手段是在构件表面粘贴电阻式应变片,通过测量构件表面的应变,由混凝土材料的弹性模量间接得到混凝土的应力。一方面,这种方法得到的应力仅反映构件表面应力情况,构件内部的应力无法得到;另一方面,此应力值的可靠性依赖于对混凝土材料弹性模量的选取及线性本构关系的假定。然而,由于混凝土材料本身的离散性,以及在承受外部荷载,特别是地震荷载作用下材料非线性的影响,故根据应变测量所得应力值不太

可靠^[2]。因其他应力测试方法(如光纤光栅测试法、光弹性法)与混凝土材料的相容性不足,价格高及其在混凝土构件中存活率低等问题,限制了其在工程领域的广泛使用^[3]。研究开发出制作工艺简单、造价低和混凝土材料相容性好的应力传感器具有十分重要的意义。

压电材料具有响应速度快,频响范围宽,压电常数大,线性好,易裁剪加工及价格低的优点,因具有正、逆压电效应,可同时作为传感器和作动器使用。近年来,在土木工程结构健康监测和损伤识别领域中得到了成功运用^[4-8]。在应力传感器应用方面,基于压电材料的嵌入式应力传感元件在用于正应力和剪应力的测试中已取得令人满意的结果^[9-12]。本文针对结构内部动态拉应力的测量,开发了基于压电

收稿日期:2016-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51261120374);国际科技合作与交流专项基金资助项目(2014DFE70230);湖南省科技计划基金资助项目(2014TT1006)

作者简介:许斌(1972-),男,湖北孝感人,教授,博士,主要从事大型复杂结构的损伤监测、结构分析的研究。E-mail:binxu@hnu.edu.cn。

陶瓷材料的拉应力传感器,并设计制作了拉应力传感器灵敏度标定装置。

1 压电效应

某些电介质在沿一定方向上因受外力作用而变形时,其内部会产生极化现象,同时在它的两个相对表面上出现正、负相反的电荷。当外力去掉后,它又会恢复到不带电的状态,这种现象称为正压电效应。当作用力的方向改变时,电荷的极性也随之改变。相反,当在电介质的极化方向上施加电场,这些电介质也会发生变形,电场去掉后,电介质的变形随之消失,这种现象称为逆压电效应,或称为电致伸缩现象。依据压电材料的正压电效应,可研制应力传感装置。

图1为压缩型压电陶瓷受拉示意图。此类压电陶瓷片压电方程的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: D_i ($i=1,2,3$)为*i*方向的电位移; d_{ij} ($i,j=1,2,3$)为在*j*方向的应力作用下,垂直于*i*方向的电极面的压电常数; T_i 为正应力, T_4, T_5, T_6 分别为作用于1-2面,1-3面及2-3面的剪应力; ϵ_{ii} 为压电陶瓷*i*方向电容率; E_i 为*i*方向的外加电场强度。

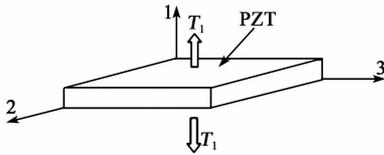


图1 压缩型压电陶瓷受拉示意图

在本传感元件应用中,外加电场为0,且仅存在一个主拉应力,故压电方程可简化为

$$D_3 = d_{31} T_1 \quad (2)$$

由电位移计算可得电荷量为

$$q = \iint [D_1 \quad D_2 \quad D_3] \begin{bmatrix} dA_1 \\ dA_2 \\ dA_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 A_1, A_2, A_3 分别为面1-3,2-1,2-3的面积。将

式(1)、(2)代入式(3)有

$$q = d_{31} T_1 A_3 \quad (4)$$

最后可得电压*U*为

$$U = \frac{q}{C} = \frac{d_{31} A_3}{C} T_1 \quad (5)$$

式中*C*为压电陶瓷片的电容。理论上,测量电压*U*与 T_1 呈线性关系。

2 基于压电陶瓷的动态拉应力传感器的制作

2.1 材料选取

本文采用的压电陶瓷片为压缩型压电陶瓷片,其几何尺寸为10 mm×10 mm×0.3 mm,具体参数如表1所示。表中, Q_m 为品质因数, k_{33} 为机电耦合系数。

表1 压电陶瓷详细参数表

$d_{33}/(\text{pC/N})$	$d_{31}/(\text{pC/N})$	Q_m	k_{33}	泊松比
450	-175	65	0.71	0.35

2.2 传感器制作流程

由于压电陶瓷片属于脆性材料,在混凝土结构中使用必须采取必要的封装措施。本文采用的主要封装材料是无收缩自流密实水泥基高强浇注料,型号为HPG-B,其最高强度能达100 MPa,充分保证了传感器受拉时稳定可靠。首先,将压电陶瓷片的正、负极分别和两芯屏蔽线焊接,屏蔽线的另一端连接BNC接头。为保证封装材料成型标准,专门制作了钢模具,模具底部设计有凸起部分,成型的封装块便自带一个凹槽,用于放置压电陶瓷片。对不施加预紧力的传感元件直接将压电陶瓷片置于凹槽,用环氧树脂固定,最后在封装块表面刷一层环氧树脂。对于施加预紧力的传感器在浇筑封装块时需先预埋圆筒铜花母,在凸槽处先用502固定尺寸为10.5 mm×10.5 mm×0.3 mm的钢板,用于将预紧力均匀传递至压电陶瓷片,避免压电陶瓷片被压碎;之后,同样的方法用环氧树脂封装压电陶瓷片,最后在铜螺母上安装内六角紧定螺丝,并采用位移控制预紧力的大小。试验中,采用的紧定螺丝的螺距*l*=1 mm,控制位移*d*为

$$d = \frac{n}{360} \times l \quad (6)$$

式中*n*为拧紧螺丝的角度。

传感器的尺寸为20 mm×20 mm×20 mm。图2、3为传感器示意图和实物图。

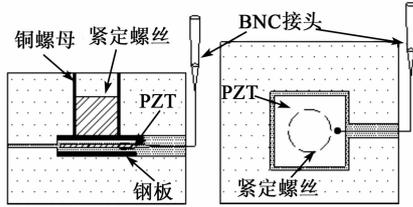


图 2 传感器内部结构示意图

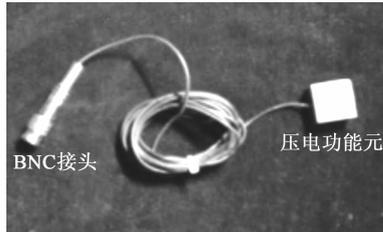


图 3 传感器实物图

3 动态拉应力传感器的标定

3.1 标定装置设计

对动态拉应力传感器进行标定需在传感元件上产生均匀分布的动态拉应力。本文利用小型落锤试验机,将传感器用环氧树脂固定在底座上,上表面对中粘接挂钩,通过滑轮将落锤冲击力转换成对传感器施加的动态拉应力,让质量 5 kg 的落锤从高度 0.3 m 落下施加动态拉应力。试验中,S 型拉力传感器经电荷放大器放大后灵敏度为 200 N/V。力传感器和压电传感器的输出信号均由 NI-6363 数据采集仪采集并保存至计算机终端。由力传感器的灵敏度可计算出力的时程,又因为吊钩底面相对于传感器是近似刚性的,可假设应力在传感器截面是均匀分布,因此得到拉应力为

$$\sigma = \frac{\alpha_F U_F}{A} = 0.5 U_F \quad (7)$$

式中: σ 为压电陶瓷片上应力; α_F 为力传感器经电荷放大器后的灵敏度; U_F 为力传感器经放大后的电压输出; A 为传感器截面面积。

根据应力时程曲线和压电传感器的输出电压信号在达到峰值前的一段时程曲线对压电传感器灵敏度进行标定。图 4、5 分别为标定装置示意图和实物图。

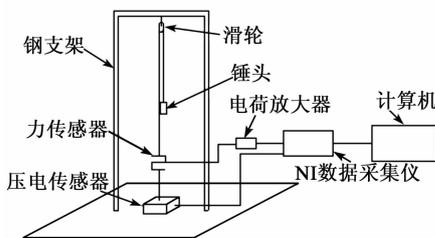


图 4 标定装置示意图

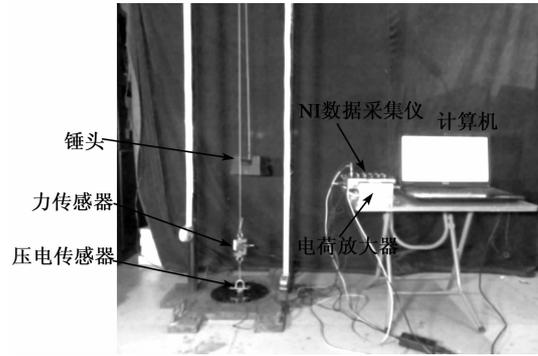


图 5 标定装置实物图

3.2 标定试验方案及结果

试验分别对未施加预紧力及施加不同预紧力水平的传感器进行标定,根据冲击的时程曲线,取第一次达到峰值前的一段应力时程和压电传感器信号进行线性拟合,得到传感器在动态荷载作用下的灵敏度。

根据预紧力水平不同分为 A、B、C 和 D 4 组,每组取 3 个传感器进行标定试验。A 组没有施加预紧力; B、C 和 D 组控制位移依次是 0.05 mm、0.10 mm 和 0.15 mm。

图 6、7 分别为传感器 C1 标定试验时力锤从高度 0.3 m 下落时力传感器和压电陶瓷传感器经切比雪夫低通滤波器滤波后的时程曲线,滤波时截止频率取 20 Hz。图 8 为传感器 C1 的标定拟合曲线。表 2 为各传感器的灵敏系数及线性相关系数 R^2 。

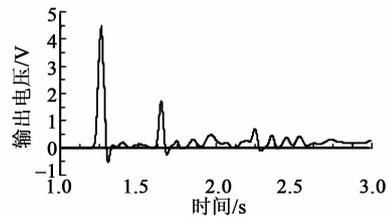


图 6 力传感器时程曲线

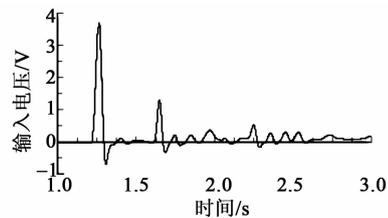


图 7 压电传感器时程曲线

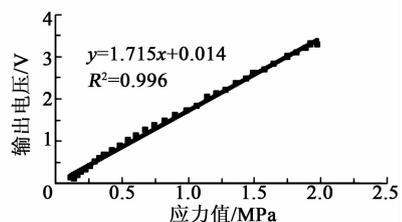


图 8 传感器 C1 标定拟合曲线

表 2 传感器灵敏度及线性相关系数

传感器编号	实测传感器灵敏度/ (V/MPa)	R^2
A ₁	1.707	0.893
A ₂	1.713	0.901
A ₃	1.725	0.894
B ₁	1.741	0.936
B ₂	1.721	0.935
B ₃	1.729	0.925
C ₁	1.715	0.996
C ₂	1.726	0.994
C ₃	1.719	0.996
D ₁	1.733	0.993
D ₂	1.721	0.995
D ₃	1.735	0.994

试验数据表明,传感器输出与动态拉应力线性相关性好,不同传感器间个体差异性小。在施加预紧力后,对传感器线性相关性有较明显提高。这是由于在安装压电陶瓷时存在空隙、气泡,影响应力直接、有效传递给压电陶瓷片。在施加预紧力后,压电陶瓷片受力更加均匀、直接。因为压电陶瓷是脆性材料,过多施加预紧力会有压碎现象,所以位移为 0.1~0.15 mm 时会取得较满意的结果。

4 结论

本文针对混凝土结构的动态拉应力的测量问题,提出了一种基于压缩型压电陶瓷片的传感元件,可用于混凝土内部动态拉应力测量,并设计出对此动态拉应力传感器灵敏度系数的标定方法和标定装置。比较了传感器在 4 种不同预紧力水平下线性相关系数的变化。基于试验结果,可得结论:

1) 所开发的基于压缩型压电陶瓷片的动态拉应力传感器的输出与其所受拉应力具有线性相关性,且不同传感器的个体差异性小。

2) 施加的预紧力保证了压电陶瓷片受力的均匀、直接,可较明显地提高传感器的线性相关度。

本文所提出的动态拉应力传感器为混凝土结构在地震和冲击等强动力荷载作用下内部拉应力的测量提供了一种经济可靠的测量手段,可适用于大型混凝土结构中动态拉应力的监测。

参考文献:

- [1] 过镇海. 钢筋混凝土基本理论[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [2] WU C L, YANG Y S, ELWOOD K J, et al. Collapse of a nonductile concrete frame: shaking table tests[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,

2009,38:205-224.

- [3] XIAO Huigang, LI Hui, OU Jinping. Strain sensing properties of cement-based sensors embedded at various stress zones in a bending concrete beam[J]. Sensors Actuators A,2011,167: 581-587.
- [4] SONG G, OLIMI C, GU H. An overweight vehicle-bridge collision monitoring system using piezoelectric transducers[J]. Smart Materials and Structures,2007, 16(2):462-468.
- [5] 蔡萍,许斌,周宇. 基于外贴压电材料的钢管混凝土界面缺陷检测[J]. 压电与声光,2015,37(2):337-341.
- CAI Ping, XU Bin, ZHOU Yu. Experimental study on interface debonding detection of concrete-filled steel tubular using surface-mounted PZT[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2015,37(2):337-341.
- [6] 许斌,蔡萍,周宇,等. 基于嵌入压电技术的钢管核心混凝土缺陷检测[J]. 压电与声光,2015,37(3):489-496.
- XU Bin, CAI Ping, ZHOU Yu, et al. Experimental study on defect detection of concrete core of concrete-filled steel tubular with embedded PZT[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2015,37(3):489-496.
- [7] 许斌,陈梦琦,王海东,等. 基于压电阻抗的钢管砼柱横隔板剥离缺陷检测[J]. 压电与声光,2015,37(1):172-175.
- XU Bin, CHEN Mengqi, WANG Haidong, et al. Interface debonding detection of diaphragm for large-scale irregular CFST column based on electric-mechanical impedance of PZT [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(1):172-175.
- [8] XU Bin, ZHANG Ting, SONG Gangbing, et al. Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with piezoelectric technologies using wavelet packet analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2013, 36(1): 7-17.
- [9] HOU Shuang, ZHANG Haibin, OU Jinping. A PZT-based smart aggregate for seismic shear stress monitoring[J]. Smart Materials and Structures,2013,22(6): 065012.
- [10] HOU Shuang, ZHANG Haibin, OU Jinping. A PZT-based smart aggregate for compressive seismic stress monitoring[J]. Smart Materials and Structures,2012, 21(10):105035-105043.
- [11] 许斌,王丹. 混凝土嵌入式压电动态剪应力传感器研发[J]. 压电与声光,2015,37(5):764-767.
- XU Bin, WANG Dan. Development of embedded PZT based dynamic shear stress sensors for concrete structures[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(5):764-767.
- [12] 刘益明. 基于嵌入式压电陶瓷的混凝土动态应力监测研究[M]. 长沙:湖南大学,2011.