

# 智能压电系统在结构工程中的应用

成程<sup>1</sup>, 刘军生<sup>2</sup>, 刘柳<sup>3</sup>, 李晓昇<sup>4</sup>

(1. 陕西建工集团股份有限公司, 陕西 西安 710003; 2. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082;  
3. 陕西智筑建设工程技术研究院有限公司, 陕西 西安 710000; 4. 中铁广州工程局深圳工程有限公司, 广东 深圳 510660)

**摘要:** 由于智能材料的发展使得结构健康监测和振动控制的研究走上了一段崭新的道路。利用压电陶瓷材料的瞬间电致变形能力和线性输出性能, 可为结构工程中的损伤识别、振动控制 and 健康监测等领域研制基于压电陶瓷的主动/被动智能压电系统; 智能压电原件既可埋设在结构内部, 也可粘贴在构件表面, 可根据工程需求灵活布置, 适应不同复杂工况, 及时准确的识别结构早期损伤, 控制结构振动反应, 为复杂结构安全诊断评估提供支持, 具有重要的工程应用意义和社会经济价值。

**关键词:** 建压电系统; 监控监测; 振动控制; 安全诊断

中图分类号: TU375; TB381

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-840-06

## Application of intelligent piezoelectric system in structural engineering

CHENG Cheng<sup>1</sup>, LIU Junsheng<sup>2</sup>, LIU Liu<sup>3</sup>, LI Xiaosheng<sup>4</sup>

(1. Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an 710003, China;

2. Shaanxi Academy of Building Science Co., Ltd., Xi'an 710082, China;

3. Shaanxi Zhizhu Construction Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

4. China Railway Guangzhou Engineering Bureau Shenzhen Engineering Co., Ltd., Shenzhen 510660, China;)

**Abstract:** Because of the development of intelligent materials, the study of structural health monitoring and vibration control has embarked on a new path. Using the instantaneous electric deformation ability and linear output performance of piezoelectric ceramic materials, an active / passive intelligent piezoelectric system based on piezoelectric ceramics can be developed for damage identification, vibration control, health monitoring and other fields in structural engineering. The intelligent piezoelectric elements can be embedded in the structure or pasted on the surface of components, and can be flexibly arranged according to the needs of the project to adapt to different complex working conditions. It is of great significance in engineering application and social and economic value to identify the early damage of structure timely and accurately, control the vibration response of structure and provide support for the safety diagnosis and evaluation of complex structure.

**Key words:** Piezoelectric system; monitoring and monitoring; vibration control; safety diagnosis

结构振动控制技术经过多年的发展在土木工程领域已经取得了较多的研究成果, 主要集中在结构健康的实时检测与监控、形状自适应材料与结构、结构抗风减震的自适应控制等领域。应用智能材料的特有功能以一定的方法融合到结构上, 利用智能材料的驱动和感知功能实现结构的自动调节, 使建筑结构向智能化方向发展, 进而有效抵御外界不利环境的影响。经过专家学者的多年努力目前用于制作结构减振控制装置的智能材料有压电材料、形状记忆合金、电磁流变体、磁致伸缩材料等<sup>[1]</sup>。其中压电陶瓷材料具有瞬间电致变形能力, 在电场

作用下能够提供很大的驱动力, 从而在结构智能监测系统当中当了相当重要的角色。

目前土木工程结构中使用压电陶瓷驱动器对结构进行振动控制主要分为压电智能主动控制、压电智能半主动控制以及压电智能混合控制等, 其中压电智能主动控制是利用压电陶瓷驱动器的出力直接对结构进行控制, 压电智能半主动控制是使用压电陶瓷驱动器调节被动阻尼器的控制力以提高被动控制装置的性能的方法, 而压电智能混合控制是将压电驱动器和其他多种控制装置相结合对结构进行振动控制。根据压电陶瓷驱动器在结构控制中的作用

方式不同,压电智能控制减振装置可以分为压电主动控制装置、压电摩擦耗能装置、压电智能混合控制装置等<sup>[1-2]</sup>。

## 1 压电材料的发展

压电效应于1880年被J. Curie等在 $\alpha$ -石英晶体上发现:晶体的某些受压对应表面会出现与压力作用大小成比例的正负束缚电荷。在此之后,G. Lippman依据热力学原理用数学方法证明了逆压电效应的存在,同一时期,Curie等通过试验测出了石英晶体的正逆压电常数,证实了这一现象<sup>[3]</sup>。在20世纪30年代,由于铁电性的钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ )陶瓷被发现,B. Jaffe等研制成功了锆钛酸铅(PZT)二元系压电陶瓷,性能大大优于先前的单元压电陶瓷材料,压电材料取得了快速的发展;1960年,G. A. Smolenski等提出新型复合钙钛矿型化合物的合成法,为三元系及四元系压电陶瓷的研制提供了理论指导<sup>[4]</sup>。随后日本、中国和美国等国家分别研制成功了复合酸铅系的压电化合物,使得压电材料已广泛应用于航天、医学、水声、遥测、气象以及电器等各个领域。智能压电材料的概念在20世纪80年代逐步出现,科研人员研发出了大位移、高强度的压电材料使其应用已经逐步发展到了结构减振控制领域。

## 2 压电陶瓷材料的特性

压电材料的压电特性和电-力学之间的相互作用有关,压电方程表达了压电晶体的电学量和力学量之间相互关系。然而因为不同的应用状态和实验条件,压电晶片可以处在不同的电学条件和机械条件下,也就是说压电方程的独立变量可以相互组合<sup>[5-7]</sup>。

### (1) 电学条件

电学短路:外电路处于短路状态时压电陶瓷的内阻远大于两电极间外电路的电阻。这时电压保持不变,原因是短路电极面上所累积的电荷流走了。

电学开路:外电路处于开路状态时压电陶瓷的内阻远小于两电极间外电路的电阻。这时电极面上的自由电荷和电位移均保持不变。

### (2) 机械条件

机械自由:压电陶在瓷测量样品时中心夹紧而

边界处于机械自由的状态。此时自由介电常数用 $\epsilon^T$ 表示。

机械夹紧:测量样品时,压电陶瓷的边界被刚性夹具固定,使得其边界的应变为零的状态。此时夹紧介电常数用 $\epsilon^S$ 表示。

根据电学条件电学短路与开路以及机械条件机械自由与夹紧的相互组合,压电效应的压电方程可分为d、e、g、h-型四类:

(1)电学短路和机械自由是第一类压电方程的边界条件,自变量是电场强度 $E$ 和应力 $T$ ,因变量是电位移 $D$ 和应变 $S$ ,即

$$d\text{-型} \begin{cases} D = dT + \epsilon^T E \\ S = s^E T + d_t E \end{cases} \quad (1)$$

式中:正压电效应是第一个方程,而逆压电效应是第二个方程;

式中, $d$ 为压电常数, $d_t$ 为 $d$ 的转置, $s$ 为弹性柔顺常数, $\epsilon$ 为介电常数, $\epsilon^T$ 为应力恒定时的介电常数, $s^E$ 为场强恒定时的弹性柔度系数;

(2)电学短路和机械夹紧是第二类压电方程的边界条件,自变量是电场强度 $E$ 和应变 $S$ ,因变量是电位移 $D$ 和应力 $T$ ,即

$$e\text{-型} \begin{cases} T = c^E S - e_t E \\ D = e S + \epsilon^S E \end{cases} \quad (2)$$

式中: $c$ 为弹性刚度常数, $e$ 为压电应力系数, $e_t$ 为 $e$ 的转置, $\epsilon^S$ 为应变恒定时的介电常数(夹紧介电常数), $c^E$ 为场强恒定时(短路)的弹性刚度系数;

(3)电学开路和机械自由是第三类压电方程的边界条件,自变量是电位移 $D$ 和应力 $T$ ,因变量是电场强度 $E$ 和应变 $S$ ,即

$$g\text{-型} \begin{cases} S = s^D T + g_t D \\ E = -g T + \beta^T D \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\beta$ 为自由倒介电常数, $g$ 为压电应变常数, $g_t$ 为 $g$ 的转置, $\beta^T$ 为恒应力作用下的介质的隔离率, $s^D$ 为恒电位移(开路)时弹性柔度系数;

(4)电学开路和机械夹紧是第四类压电方程的边界条件,自变量是电位移 $D$ 和应变 $S$ ,因变量:电场强度 $E$ 和应力 $T$ ,即

$$h\text{-型} \begin{cases} T = c^D S - h_t D \\ E = -h S + \beta^S D \end{cases} \quad (4)$$

式中: $h$ 为压电应力常数, $h_t$ 为 $h$ 的转置, $\beta^S$ 为恒

应变下(夹紧)的介质隔离率,  $c^D$  为恒电位移(开路)时弹性刚度系数<sup>[26]</sup>。

### 3 智能压电系统的应用

#### 3.1 智能压电系统在振动控制中的应用

如今, 在结构振动控制方面智能压电系统已经取得相当多的研究成果。欧进萍等<sup>[8-9]</sup>人发明了一种由压电陶瓷微位移阻尼器和 T 形摩擦阻尼器组成的新型压电摩擦阻尼器, 如图 1 所示, 提出了其基本结构是由叠层压电陶瓷驱动器与 Pall 摩擦耗能器复合而成的, 分析了耗能效果是如何受压电摩擦耗能器形状参数的影响, 并且给出了其可调紧固力的计算方法。

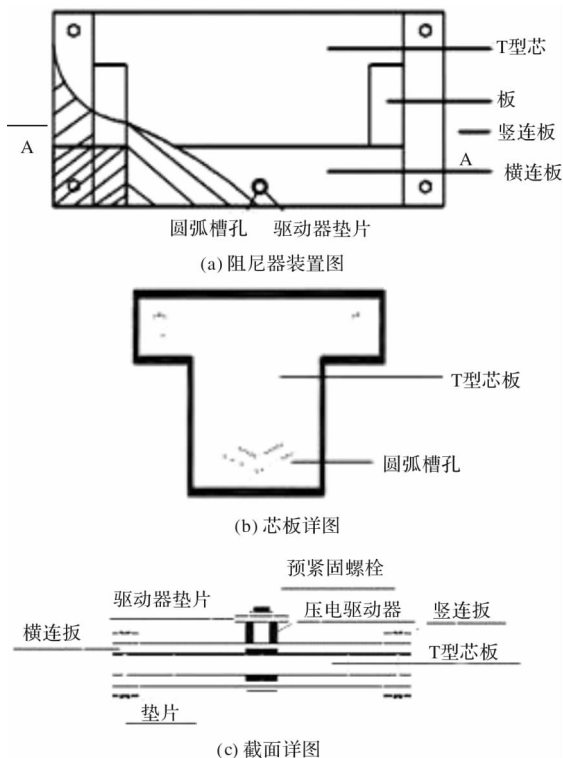


图 1 阻尼器结构布置图

Fig. 1 Structure of piezoelectric friction damper

展猛<sup>[10-11]</sup>等人利用压电陶瓷驱动器具有响应快、耗能小而出力大的优点, 将摩擦耗能器与压电陶瓷驱动器结合, 研发了可实时调节压力的新型压电摩擦型阻尼器, 如图 2 所示。利用压电陶瓷电力压电性能与传统的摩擦阻尼器结合, 采用智能算法, 可以用来研发新型智能半主动阻尼装置, 该类型智能装置体型小巧、质量轻、便于集成, 输入能量小而出力大、耗能稳定, 具有良好的工程适用性。通过合理构造保证了压电驱动器只能轴向受

压, 通过小箱侧壁狭长的孔槽保证了导线的自由活动; 同时, 改新型压电阻尼器的是单轴式压电摩擦阻尼器, 具有构造简单, 占用空间小, 更便于安装与拆卸的特点, 并且可以形成复位型压电摩擦阻尼器通过在活塞机构两侧的平衡拉杆和作动拉杆上安装弹簧的方式, 在绳索式连接中单轴式压电摩擦阻尼器也可发挥作用, 使得阻尼器的连接安装方式丰富多样。通过钢结构输电塔的振动台测试该新型压电摩擦阻尼器的测试结果表明: 钢结构输电塔的地震反应在新型压电摩擦阻尼器的作用下得到了明显的改善, 对结构的减振控制通过阻尼器的摩擦力的实时变化来实现。

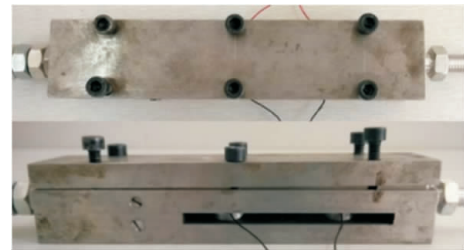


图 2 新型压电摩擦阻尼器

Fig. 2 A new type of piezoelectric friction damper

此外, 瞿伟廉<sup>[12]</sup>等人对设置有压电摩擦阻尼器的钢结构输电塔进行半主动风振控制研究, 控制效果良好; 杜永峰<sup>[13]</sup>提出了一种适用于高层建筑结构的减震控制的万向型压电摩擦阻尼器, 并进行深入研究万向型压电摩擦阻尼器适用的控制算法; 杨颀<sup>[14]</sup>等在欧进萍等人提出的在阻尼器中的可调正压力的基础上提出了全新的粘滞型的摩擦阻尼力模型和限位型的摩擦阻尼力模型, 并成功制造了压电-T 型摩擦阻尼器其最大出力是 450 N; 香港理工大学的徐幼麟<sup>[15]</sup>等设计了一种多摩擦面的压电摩擦阻尼器, 这种半主动压电摩擦阻尼器通过振动台试验和仿真分析表明, 其具有良好减震效果, 主楼和裙楼的刚度突变问题得到有效解决。

#### 3.2 智能压电系统在结构健康监测中的应用

充分利用压电陶瓷波动检测技术将压电陶瓷片以某种特定形式封装在结构中以此来发挥驱动器和传感器的功能, 机械振动通过给驱动器施加特定刺激而产生, 在结构中机械能的传播是以波的形式, 在不同传播介质中, 应力波波形会发生畸变、传播路径和能量也会发生的改变, 以至于传感器终端信

号产生一定变化,结构内部的缺陷情况是通过信号变化来判断。

### (1)智能压电系统的主动健康监测

基于智能压电系统主动健康监测,在结构外表面布置压电陶瓷片或者在构件内部预埋入压电陶瓷片封装成的智能骨料,利用压电材料的机电耦合效应,使其既能发挥驱动器的作用又能作为传感器,接收监测信号,监测系统的原理如图3所示。

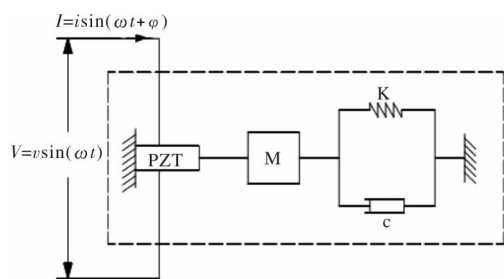


图3 智能压电系统主动健康监测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of active health monitoring of intelligent piezoelectric system

孙威等<sup>[16]</sup>对应力波在混凝土结构内部的衰减特性通过预埋压电陶瓷的方式进行了试验研究。Gu等<sup>[17]</sup>通过预埋智能骨料在混凝土试块中监测早期混凝土的强度变化,强度拟合曲线与实际测量曲线一致。许斌<sup>[18]</sup>教授通过外贴压电陶瓷片和嵌入式智能骨料并基于信号的小波能量对钢管混凝土中钢管壁和核心混凝土的界面剥离进行了有效识别,并对相应指标定量缺陷大小下定义。周宏<sup>[19]</sup>等对混凝土结构的损伤监测的方法是在静力荷载作用下的混凝土结构和在不同工程状况下智能骨料传感器的信号采集。赵晓燕等<sup>[20]</sup>实现检测混凝土裂缝是在波动法原理的基础上,利用自行研制封装的压电陶瓷。通过国内外学者研究表明:在基于PZT的钢结构和钢管混凝土构件的缺陷检测中,可根据检测需要灵活布置压电陶瓷片,既可将压电智能骨料埋设在混凝土内部,也可在构件表面黏贴压电陶瓷片,均可实现工程技术的需求。

### (2)智能压电系统的被动健康监测

被动健康监测对结构在静力、动力、冲击荷载下的健康状况进行判断的原理是通过对一个传感器的最终发出信号的分析,比较传感器结构在不同条件下的某些参数的差异性。当被动健康监测时,自感传感器的形成是因为压电陶瓷片只具有传感功能,成功的检测到缺陷是依靠传感器响

应发生变化。结构在荷载作用下反应结构自身情况的参数如其应力和应变的变化、位移及加速度等通过分析内部信号获得。Li等<sup>[21]</sup>对模拟动态信号进行峰值分析并根据结果判断交通量,并准确做出了识别其用PZT制作为传感器。Song等<sup>[22]</sup>对构件内部预设的损伤还有所施加的外力成功识别是采用将PZT预埋入钢筋混凝土试验梁内的“智能骨料”技术。杨晓明<sup>[23]</sup>在线监测在往复施加下的地震荷载应力应变等参量的变化是选用PZT布置于框架结构外侧的方式。华中科技大学的王丹生等<sup>[24]</sup>在进行了对裂纹钢梁损伤的识别和定位的实验研究后发现结构损伤程度以及裂纹位置可以被定性识别通过压电陶瓷导纳幅值谱和反谐振频率损伤前后的变化。浙江大学的蔡金标等<sup>[25]</sup>利用切割机进行裂缝深度的手动模拟,还对不同裂缝深度处的电导纳信号进行测量。实验结果表明,裂纹损伤发展影响电导纳谱曲线,裂纹深度的变动趋势与频谱的变动趋势相似。

## 4 结论

(1)通过压电陶瓷材料的不断发展,智能压电系统在结构健康监测和振动控制领域的应用为结构工程未来发展开辟了新途径。

(2)利用压电陶瓷开发的智能摩擦阻尼器可应用于钢结构等杆系结构体系的振动控制,通过控制算法的优化阻尼器的摩擦力可及时发生变化,有效的减小了结构的地震反应。

(3)智能压电系统的主/被动健康监测系统,可实现对钢结构、混凝土结构及组合结构内部局部缺陷的高效便捷式监测与检测。

## 参考文献 References

- [1] 谷亮. 基于压电摩擦阻尼器的输电塔模型结构半主动控制试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.  
GU Liang. Experimental study on semi-active control of transmission tower model structure based on piezoelectric friction damper [D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2014.
- [2] 赵大海. 基于压电摩擦阻尼器的结构振动控制理论与试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.  
ZHAO Dahai. Theoretical and experimental study on structural vibration control based on piezoelectric fric-

- tion damper[D]. Dalian: Dalian University of technology, 2007.
- [3] CARY W B. Piezoelectricity[M]. New York: Dover Publications, 1964
- [4] MASON W P. Piezoelectricity, its history and applications [J]. Journal of the Acoustical Society of America. 1981, 70(6): 1561- 566
- [5] 陈堃. 压电超声定位在滑坡变形监测中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 2009.  
CHEN Kun. Application of piezoelectric ultrasonic positioning in landslide deformation monitoring[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [6] WANG L, YUAN F G. Active damage localization technique based on energy propagation of Lamb waves [J]. Smart Structures and Systems, 2007, 3(2): 201-217.
- [7] 许伟华, 鲍海, 杨以涵, 魏孝铭. 基于压电陶瓷逆压电效应的电压信号变送原理 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 80-83.  
XU Weihua, BAO Hai, YANG Yihan, et al. Principle of voltage signal transmission based on inverse piezoelectric effect of piezoelectric ceramics [J]. Power System Automation, 2010, 34 (4): 80-83
- [8] 关春光. 采用纵振换能器的超声振动给料系统的实验研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.  
GUAN Chunguang. Experimental study on ultrasonic vibration feeding system with longitudinal vibration transducer[D]. Jilin: Jilin University, 2007.
- [9] 欧进萍, 关新春, 吴斌等. 智能型-压电摩擦耗能器[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 81-86.  
OU Jinping, GUAN Xinchun, WU Bin, et al. Intelligent piezoelectric friction dampers [J]. Earthquake engineering and Engineering Vibration, 2000, 20 (1): 81-86
- [10] 吴斌, 张纪刚, 欧进萍. 考虑几何非线性的 Pall 型摩擦耗能器滞回特性分析[J]. 工程力学, 2003, 20(1): 21-26.  
WU Bin, ZHANG Jigang, OU Jinping. Analysis of hysteretic characteristics of Pall type friction dampers considering geometric nonlinearity [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20 (1): 21-26.
- [11] 展猛, 王社良, 朱军强, 等. 安装复位型压电摩擦阻尼器模型结构控振试验研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34 (14): 45-50.  
ZHAN Meng, WANG Sheliang, ZHU Junqiang, et al. Experimental study on vibration control of model structure with reset piezoelectric friction damper [J]. Vibration and Impact, 2015, 34 (14): 45-50.
- [12] 展猛, 王社良, 赵云. SMA-压电半主动混合阻尼器减震控制分析[J]. 世界地震工程, 2018, 34(4): 24-30  
ZHAN Meng, WANG Sheliang, ZHAO Yun. Seismic control analysis of SMA piezoelectric semi-active hybrid damper[J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34 (4): 24-30
- [13] 瞿伟廉, 陈朝晖, 徐幼麟. 压电材料智能摩擦阻尼器对高耸钢塔结构风振反映的半主动控制[J]. 地震工程与工程振动 2000, 26(3): 94-99.  
QU Weilian, CHEN Zhaohui, XU Youlin. Semi active control of wind-induced vibration of tall steel tower structures with piezoelectric intelligent friction dampers [J]. Earthquake Engineering and Engineering vibration 2000, 26 (3): 94-99
- [14] 杜永峰. 安装智能摩擦阻尼器的高层建筑结构振动控制的一般算法 [J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(2): 103-106.  
DU Yongfeng. General algorithm for vibration control of tall buildings with intelligent friction dampers[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005, 31 (2): 103-106
- [15] 杨飏, 欧进萍, 刘光聪. T 型压电变摩擦阻尼器性能试验与分析 [J]. 压电与声光, 2005, 27(5): 580-582.  
YANG Yang, OU Jinping, LIU Guangcong. Performance test and analysis of T-type piezoelectric variable friction damper[J]. Piezoelectric and Acousto Optic, 2005, 27 (5): 580-582
- [16] XU Y L, NG C L. Seismic protection of building complex using variable friction damper: Experimental Investigation [J]. Journal of Engineering Mechanics 2008, 114(8): 637-649.
- [17] 孙威, 阎石, 姜绍飞, 等. 基于压电陶瓷传感器的钢筋混凝土框架结构裂缝损伤全过程监测 [J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(4): 84-90.  
SUN Wei, YAN Shi, JIANG Shaofei, et al. Whole process monitoring of crack damage of reinforced concrete frame structure based on piezoelectric sensor[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2013, 30 (4): 84-90
- [18] GU H, SONG G, DHONDE H, et al. Concrete early-age strength monitoring using embedded piezoelectric transducers [J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(6): 1837-1845.
- [19] 许斌, 李冰, 宋刚兵, 等. 基于压电陶瓷的钢管混凝土

- 柱剥离损伤识别研究[J]. 土木工程学报, 2012(7): 86-96.
- XU Bin, LI Bing, SONG Gangbing, et al. Study on identification of peeling damage of concrete filled steel tubular columns based on piezoelectric ceramics[J]. Acta Civil Engineering, 2012 (7): 86-96
- [20] 周宏, 阎石, 孙威. 利用压电智能骨料对混凝土结构损伤的识别研究[J]. 混凝土, 2009(4): 20-23.
- ZHOU Hong, YAN Shi, SUN Wei. Study on damage identification of concrete structures using piezoelectric smart aggregate[J]. Concrete, 2009 (4): 20-23
- [21] 赵晓燕, 李宏男. 基于压电陶瓷的混凝土裂缝损伤监测[J]. 压电与声光, 2009, 31(3): 437-439.
- ZHAO Xiaoyan, LI Hongnan. Damage monitoring of concrete cracks based on piezoelectric ceramics [J]. Piezoelectric and Acousto Optic, 2009, 31 (3): 437-439
- [22] LI Z X, YANG X M, LI Z. Application of cement-based piezoelectric sensors for monitoring traffic flows[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 32(7): 565-573.
- [23] Song G, OLM I C, GU H. An overheight vehicle-bridge collision monitoring system using piezoelectric transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(2): 462-468.
- [24] 杨晓明. 土木工程结构的性能监测系统与损伤识别方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- YANG Xiaoming. Study on performance monitoring system and damage identification method of civil engineering structures[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006
- [25] 王丹生, 朱宏平, 陈晓强, 等. 利用压电自传感驱动器进行裂纹钢梁损伤识别的实验研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(6): 139-142.
- WANG Dansheng, ZHU Hongping, CHEN Xiaoqiang, et al. Experimental study on damage identification of cracked steel beams using piezoelectric self sensing actuator[J]. Vibration and shock, 2006, 25 (6): 139-142.
- [26] 蔡金标, 李忠良, 楼旦丰, 等. 基于压电阻抗的混凝土裂缝深度发展定量研究[J]. 压电声光, 2014, 36(1): 79-84.
- CAI Jinbiao, LI Zhongliang, LOU Danfeng, et al. Quantitative study of concrete crack depth development based on piezoelectric impedance[J]. Piezoelectric Acousto Optic, 2014, 36 (1): 79-84
- [27] 姜斌. 超声波送料机理与关键技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2009.
- JIANG Bin. Study on mechanism and key technology of ultrasonic feeding[D]. Jilin: Jilin University, 2009
- [28] 庄志有. 基于外贴压电陶瓷的钢管混凝土内部缺陷检测方法研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2019.
- ZHUANG Zhiyou. Research on internal defect detection method of concrete filled steel tube based on externally bonded piezoelectric ceramics[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2019
- [29] 宋宁宁. 基于导向波法和PZT型钢筋主动监测混凝土结构损伤的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- SONG Ningning. Research on active damage monitoring of concrete structures based on guided wave method and PZT steel bars[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016.

(编辑 吴海西 沈 波)