

# 基于压电阻抗的混凝土裂缝深度发展定量研究

蔡金标,李忠良,楼旦丰,陈双聪,张燕青

(浙江大学 建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

**摘要:**混凝土结构是土木工程领域使用最广的结构形式,裂缝是其损伤的主要形式。该文基于压电阻抗(EMI)监测技术,对混凝土立方体标准试块裂缝深度的定量发展进行了监测。制作150 mm×150 mm×150 mm标准试块,将压电片(PZT)粘贴于试块表面,用精密阻抗分析仪 HP4294A 提取压电片在混凝土试块健康状况和不同损伤工况下的电导纳信号,并分析二者的联系。实验结果表明,随着裂缝损伤的发展,压电片电导纳频谱发生了变化;压电片-粘胶层-主体结构耦合系统的共振频率及电导信号峰值能表征混凝土裂缝深度的发展,但其存在稳定性缺陷;传统损伤指标中,绝对比例平均偏差(MAPD)和均方根偏差(RMSD)比相关系数(CCD)更适于监测混凝土裂缝的出现,而 CCD 则比 MAPD 和 RMSD 更适于定量分析裂缝的发展。此外,该文还得到了混凝土试块裂缝发展时损伤参数的具体数值,可供 EMI 健康监测实际应用时参考。

**关键词:**压电阻抗;结构健康监测;混凝土;裂缝;定量研究

**中图分类号:**TM282;TU323 **文献标识码:**A

## Quantitative Study on Crack Development in Concrete Based on EMI

CAI Jinbiao, LI Zhongliang, LOU Danfeng, CHEN Shuangcong, ZHANG Yanqing

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Concrete structure is the most widely used structure form in civil engineering, and crack is its main damage form. Based on the electro-mechanical impedance (EMI) monitoring technique, The experiment was carried out to monitor the crack quantitative development in concrete cubes. The concrete test cubes with size of 150 mm×150 mm×150 mm were prepared, and PZT piezoelectric patches were bonded on the surfaces. An impedance analyzer HP4294A was used to extract the admittance signals of concrete cubes corresponding to healthy condition and several damage conditions, and the relations between them was studied. The results showed that the admittance signals varied with the development of crack in concrete. The peaks of conductance signals and resonance peaks of the coupling system of piezoelectric patches-cohesive course-main structure could indicate the crack development in concrete cubes, but its stability was poor. Among the traditional damage index, the mean absolute percentage deviation (MAPD) and root mean square deviation (RMSD) were more suitable for monitoring the emerge of crack in concrete than the correlation coefficient deviation (CCD), while CCD was more suitable for the quantitative analysis of crack development than MAPD and RMSD. Besides, some specific values of damage index of crack development in concrete cubes were obtained, it was available for health monitoring application based on EMI.

**Key words:** electro-mechanical impedance (EMI); structural health monitoring; concrete; crack; quantitative study

### 0 引言

混凝土由于凝固变形、约束及施工等原因常导致成型的混凝土结构中存在数量众多的微孔隙、气穴及微裂缝<sup>[1]</sup>。所以,理论上混凝土结构尤其是受弯构件总是带裂缝服役的,当这些初始裂缝发展到

一定程度,位于混凝土结构内部的材料如钢筋等将发生锈蚀,这将降低构件的承载能力,影响工程结构的外观和使用寿命,甚至威胁人们的生命和财产安全。因此,对混凝土结构进行裂缝动态监测,特别是对初始裂缝监测就显得很重要。但土木工程结构形

收稿日期:2013-03-27

作者简介:蔡金标(1965-),男,浙江浦江人,副教授,博士,主要从事结构有限元分析和结构损伤监测方面研究。E-mail:caijb@zju.edu.cn,通信作者:李忠良,E-mail:312640878@qq.com。

式复杂,周围环境多变,这使得对混凝土结构裂缝的监测,特别是长期和连续监测尤其困难。因此,如何实时、在线、准确地判断混凝土结构的裂缝等损伤的出现甚至定量的发展,从而为加固工程结构,转移人民群众及其财产赢得宝贵时间,已成为工程中亟待解决的问题。

本文利用压电阻抗技术(EMI)对混凝土标准试块裂缝的出现及发展进行了监测,并选取多个损伤指标对裂缝的发展进行定量分析,取得了较好的效果。

### 1 压电阻抗健康监测技术的基本原理

近年来,以压电片(PZT)作为机电耦合传感器(MIT)的EMI凭借其对于初始损伤敏感,效费比高,可实时在线监测等优点,依靠压电材料和计算机技术的飞速发展,逐渐成为一种新型的无损检测(NDE)技术<sup>[2]</sup>。其基本原理<sup>[3-4]</sup>:将PZT作为驱动器-传感器安装在被检测结构上,对PZT施加激励使其振动,由于PZT可耦合结构的机械阻抗,结构损伤必然导致电阻抗变化,通过与结构无损时电阻抗对比可判断结构受损情况,对结构进行健康监测与故障诊断。而混凝土结构随着裂缝的出现及发展其刚度将发生变化,表现为电阻抗的变化,利用压电材料的机电耦合特性所测得的电导纳信号包含了结构状态变化的信息,分析所获得的信号便可了解混凝土结构裂缝的出现及发展信息,这就是利用EMI技术监测混凝土损伤的基本思路。

为了验证压电阻抗技术在混凝土结构健康监测中的可行性和有效性,很多学者进行了这方面的实验研究。Sung等<sup>[5]</sup>基于压电阻抗技术对圆柱体小试块在养护期间进行了监测,实验表明,电导共振频率与电导均方根偏差(RMSD)与混凝土强度的发展具有一定的联系;Soh等<sup>[6]</sup>对一根两跨混凝土梁的加载过程进行了监测,实验结果表明,电导纳信号会随着裂缝的出现及发展而变化,RMSD与加载力存在一定联系;此外, Park等<sup>[7]</sup>、Yang等<sup>[8]</sup>及国内的朱宏平等<sup>[9]</sup>也对混凝土梁的裂缝发展进行了监测。以上研究大多为定性研究,或只选取了一种损伤参数分析裂缝的发展,实验结果也不尽如人意。

本文对混凝土试块裂缝的发展进行了监测,提出压电片-粘结层-主体结构的共振频率及电导峰值大小可表征混凝土裂缝深度的发展,为基于压电阻抗的健康监测定量分析提供了新思路。同时对比了RMSD、绝对比例平均偏差(MAPD)和相关系数(CCD)3个压电阻抗健康监测传统损伤识别指标的有效性。

## 2 实验研究

### 2.1 实验材料及装置

本实验采用的3块混凝土试块均为15 cm×15 cm×15 cm标准试块,浇筑试块所用的水泥为钱潮325,细骨料为普通黄沙,粗骨料则为粒径小于 $\varnothing 2$  cm的碎石。实验采用的PZT由中国科学院上海硅酸盐研究所提供,其尺寸为10 mm×10 mm×0.3 mm,为均质横观各向同性弹性体,压电材料参数如表1所示。由于压电片的一面要粘贴在混凝土试块上,所以把该面电极层绕道另一面,并通过两根导线与测试仪器相连。实验共用6片PZT,每个混凝土试块粘贴2片PZT,PZT位置如图1所示。粘结剂采用瞬间强力胶502。裂缝采用切割机施加。实验测试仪器为美国安捷伦(Agilent)公司生产的4294A精密阻抗分析仪,该试验仪器集智能网络分析、光谱分析和阻抗分析于一身,具有强大的功能,通过与其相连的计算机提取电导纳信号。实验装置如图2所示。

表1 压电材料参数

密度/( $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	介电损耗正切	弹性模量/GPa
7.800	0.015	65
介电常数/( $10^{-8} \text{ m/V}$ )	压电应变常数/( $10^{-10} \text{ m/V}$ )	
2.14	5	

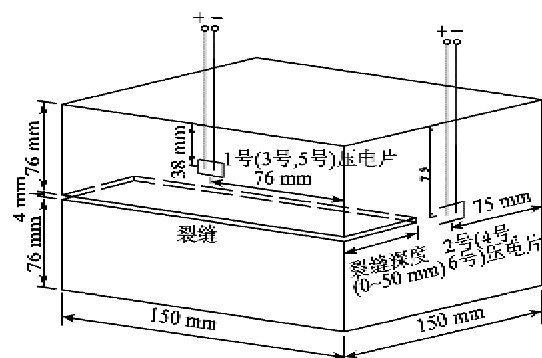


图1 PZT分布图



2 实验装置

### 2.2 实验操作

实验准备时,对多片自由压电片提取电导纳信号,选取 6 片吻合度较好的 PZT,分别命名为 1~6 号 PZT,其自由状态下电导信号如图 3 所示。由图可知,6 片 PZT 在自由状态下测试得到的电导纳信号基本一致,说明 PZT 性能较稳定。待混凝土试块养护 28 天后将 PZT 用 502 胶水黏贴于试块表面,以形成压电片-粘结层-主体结构耦合系统,再测试一次,测试时在混凝土试块下垫一层泡沫,以模拟自由边界。阻抗分析仪的激励电压为 1 V,测频范围为 1~740 kHz,步长 1 kHz。同时,对每个共振频率周围频宽 100 kHz 内精测,步长 50 Hz,由于一次测试点为 801 个,因此一次扫频范围为 40 kHz,一次精测分 3 次测完,此为试块健康状况下电导纳信号。接着用切割机切割裂缝,裂缝宽度 4 mm,深度分为 5 个损伤工况,即 1 cm、2 cm、3 cm、4 cm、5 cm,每个损伤工况与健康状态一样提取电导纳信号。考虑到电纳信号(电导纳虚部)一般不用于损伤识别<sup>[16]</sup>,所以本文只考虑电导信号(电导纳实部)。

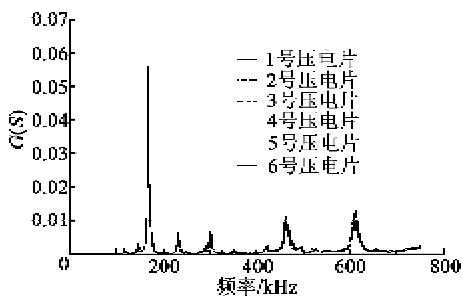


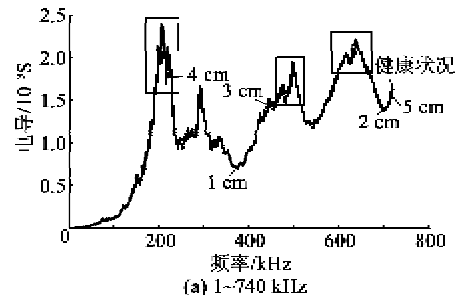
图 3 自由压电片电导谱

## 3 实验结果及其分析

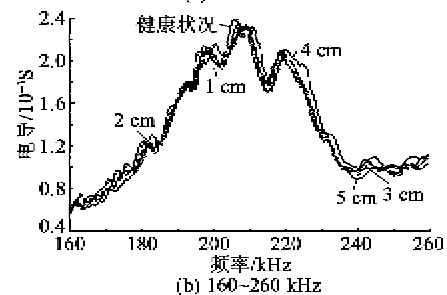
### 3.1 电导信号峰值及共振频率变化研究

混凝土试块健康状态与各损伤工况下的 1 号 PZT 电导谱如图 4(a)所示。由图可知,随着裂缝的出现和发展,电导谱发生了漂移,且损伤越大漂移量越大。仔细观察可发现,电导峰值附近变化最明显。为了清楚地显示这种变化,截取前三阶共振频率附

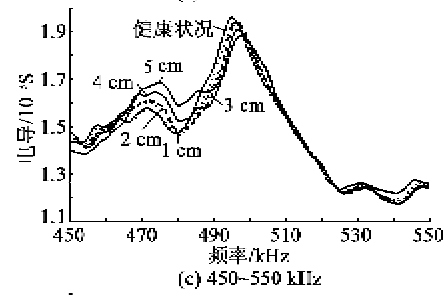
近电导谱,如图 4(b)~(d)所示。不难发现,随着裂缝的出现和发展,前三阶共振频率逐渐增大,共振频率对应的电导峰值逐渐减小。这是由于裂缝的出现使压电片-粘结层-主体结构耦合系统的质量、刚度和阻尼发生了变化而造成的。为了更直观地表示这种变化,把 6 片压电片电导信号峰值的变化列于表 2,共振频率的变化列于表 3。仔细观察表 2、3 发现,对于不同位置的压电片,耦合系统共振频率及电导信号峰值相差较大,少数压电片或少数工况共振频率及其对应电导信号峰值的变化甚至异常,这说明通过耦合系统共振频率及电导信号峰值的变化来判断裂缝的发展可供参考但并不完全可靠,还需辅以其他损伤参数。



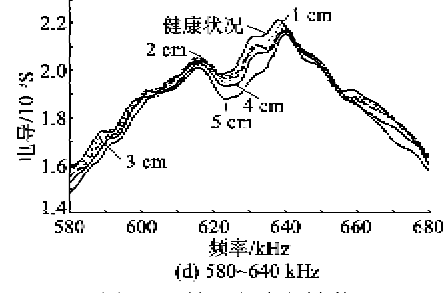
(a) 1-740 kHz



(b) 160-260 kHz



(c) 450-550 kHz



(d) 580-640 kHz

图 4 1 号压电片电导谱

表2 各损伤工况下电导峰值平均值

裂缝深度/cm	第一阶电导峰值平均值/ $10^{-3}S$			第二阶电导峰值平均值/ $10^{-3}S$			第三阶电导峰值平均值/ $10^{-3}S$		
	1,3,5号 压电片	2,4,6号 压电片	1~6号 压电片	1,3,5号 压电片	2,4,6号 压电片	1~6号 压电片	1,3,5号 压电片	2,4,6号 压电片	1~6号 压电片
健康状况	2.188	2.201	2.195	2.242	2.063	2.153	2.650	2.831	2.741
1	2.145	2.097	2.121	2.207	2.022	2.115	2.614	2.792	2.703
2	2.102	2.070	2.086	2.183	2.002	2.093	2.589	2.757	2.673
3	2.090	2.061	2.076	2.184	2.001	2.093	2.569	2.749	2.659
4	2.091	2.056	2.074	2.169	1.996	2.083	2.565	2.730	2.648
5	2.062	2.018	2.040	2.118	1.967	2.043	2.544	2.703	2.624

表3 各损伤工况下共振频率

裂缝深度/cm	第一阶共振频率/kHz			第二阶共振频率/kHz			第三阶共振频率/kHz		
	1,3,5号 压电片	2,4,6号 压电片	1~6号 压电片	1,3,5号 压电片	2,4,6号 压电片	1~6号 压电片	1,3,5号 压电片	2,4,6号 压电片	1~6号 压电片
健康状况	252.68	268.22	260.45	504.57	528.02	516.30	656.37	665.10	660.74
1	253.45	269.75	261.60	506.00	529.63	517.82	659.75	667.46	663.61
2	253.93	270.05	261.99	506.25	530.52	518.39	660.68	668.50	664.59
3	254.08	271.45	262.77	506.43	530.63	518.53	660.85	668.93	664.89
4	254.37	271.60	262.99	506.95	530.93	518.94	661.03	669.28	665.16
5	254.92	272.48	263.70	507.62	531.45	519.54	661.23	669.55	665.39

3.2 传统损伤指标有效性研究

第3.1节研究了混凝土裂缝对耦合结构共振频率及电导信号峰值的影响,二者具有一定联系,但随着裂缝的出现和发展,电导信号峰值及耦合结构共振频率变化并不明显,甚至还存在异常点,这显然无法满足压电阻抗技术定量分析的需要。为了定量分析损伤的发展,本文引入如下3个损伤指数<sup>[11]</sup>:

1) 均方根偏差:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2}} \times 100(\%) \quad (1)$$

2) 绝对比例平均偏差:

$$MAPD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - x_i}{x_i} \right| (\%) \quad (2)$$

3) 相关系数:

$$CCD = 1 - \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (3)$$

式中: $x_i, y_i$ 分别为结构健康状态下和损伤后的压电片电导纳信号值; $N$ 为采集的频率点个数; $\bar{x}, \bar{y}$ 为该组数据的平均值; $\sigma_x, \sigma_y$ 为该组数据的标准差。

这是压电阻抗健康监测中常用的3个损伤指

标,其有效性已被证明<sup>[6,12]</sup>。3个损伤指标折线图如图5所示,2个不同位置的压电片电导信号损伤指标平均值及6片压电片平均值如表4所示。

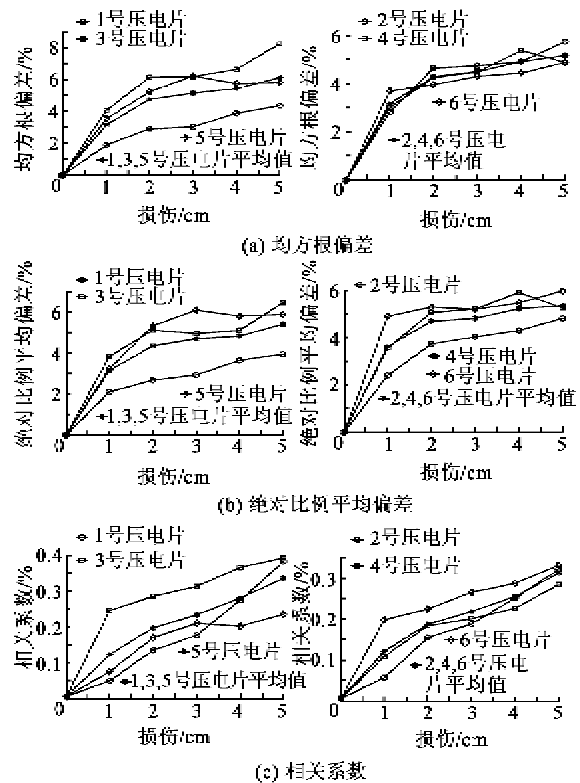


图5 压电片电导损伤指标

表 4 各损伤工况下传统损伤指标平均值

裂缝深度/cm	均方根偏差平均值/%			绝对比例平均偏差平均值/%			相关系数平均值/%		
	1,3,5 号	2,4,6 号	1~6 号	1,3,5 号	2,4,6 号	1~6 号	1,3,5 号	2,4,6 号	1~6 号
	压电片	压电片	压电片	压电片	号压电片	压电片	压电片	压电片	压电片
健康状况	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01
1	3.15	3.15	3.15	3.15	3.62	3.39	0.12	0.12	0.12
2	4.76	4.28	4.52	4.34	4.69	4.52	0.20	0.19	0.20
3	5.14	4.50	4.82	4.70	4.81	4.76	0.23	0.22	0.23
4	5.42	4.90	5.16	4.83	5.22	5.03	0.28	0.26	0.27
5	6.13	5.17	5.65	5.41	5.34	5.38	0.34	0.31	0.33

仔细观察图 5、表 4 可知:

1) 由图 5 可知,对初始段,即裂缝从 0~1 cm 段曲线较陡,说明 3 个损伤指标对裂缝的出现均很敏感。

2) 裂缝出现后,RMSD 和 MAPD 的变化明显比 CCD 大,这说明 RMSD 和 MAPD 比 CCD 更适于监测裂缝的出现。

3) 当损伤为 1 cm 时,无论是对于 1、3、5 号压电片还是对于 2、4、6 号压电片,RMSD 平均值均为 3.15%,此值可作为裂缝深度达到 1 cm 的指标,MAPD 平均值则为 3.39%,此值可供参考。

4) 裂缝展开后,CCD 与裂缝的线性关系比 RMSD 和 MAPD 更强,这说明在混凝土裂缝深度发展定量监测中,CCD 要优于 RMSD 和 MAPD。若 CCD 值用  $y$  表示,裂缝深度用  $x$  表示,则线性拟合后的表达式为

$$y=0.048x+0.083 \quad (4)$$

线性拟合后理论 CCD 值与实验 CCD 值的比较如表 5 所示,从表 5 可发现二者很接近,最大误差仅为 11.1%,平均误差为 5.1%,从而证明了此种方法的有效性、可行性。

表 5 CCD 理论值与实际值的对比

裂缝深度/cm	CCD 实际值/%	CCD 理论值/%	CCD 理论值相对实际值误差绝对值/%
1	0.12	0.13	7.7
2	0.20	0.18	11.1
3	0.23	0.23	0
4	0.27	0.28	3.6
5	0.33	0.32	3.1

综上所述,当我们用 EMI 技术监测混凝土裂缝的发展时,可先根据 RMSD 和 MAPD 的变化判断裂缝的出现,再根据 CCD 定量监测裂缝的发展。

#### 4 结束语

本文基于 EMI 技术,对混凝土试块裂缝的发展

进行了监测与定量分析。研究结果表明:

1) 压电片-粘结层-主体结构的共振频率及电导峰值大小能表征混凝土裂缝深度的发展,但不够稳定。

2) 传统损伤指标中,RMSD 和 MAPD 比 CCD 更适合用于监测裂缝的出现。

3) 当 RMSD 值为 3.15% 时,表明混凝土结构裂缝深度为 1 cm。

4) 对于混凝土裂缝深度发展的定量监测,则 CCD 要优于 RMSD 和 MAPD,且 CCD 值与裂缝深度成线性关系。

但本文实验是在室内相对稳定的环境下进行的,且实验对象仅为混凝土小试块,本文结论是否适用于土木工程领域大型复杂的结构或复杂多变的外部环境则还有待进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 吴涛.压电阻抗技术应用于结构健康监测的实验研究[D].杭州:浙江大学,2010.

[2] BHALLA S,NAIDU A S K,SOH C K. Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE [C]//Bangalore,India;Proceeding of SPIE Conference on Smart Materials,Structures, and Systems, 2003 (5062): 263-269.

[3] 孙明清,李卓球,侯作富.压电材料在土木工程结构健康监测中的应用[J].混凝土,2003,161(3):22-24. SUN Mingqing, LI Zhuoqi, HOU Zuofu. Application of piezoelectric materials in structural health monitoring of civil engineering structures[J]. Concrete, 2003, 161(3):22-24.

[4] 曹艳芹,邓国红,杨鄂川,等.基于阻抗分析法的压电片尺寸分析[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2012,26(11):54-58. CAO Yanqin, DENG Guohong, YANG Echuan, et al.

- The analysis of the piezoelectric patch size based on impedance method[J]. *Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science*, 2012, 26(11): 54-58.
- [5] SUNG W S, TAE K O. Application of electro-mechanical impedance sensing technique for online monitoring of strength development in concrete using smart PZT patches [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 1185-1188.
- [6] SOH C K, TSENG K K H, BHALLA S, et al. Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge[J]. *Smart Structures and Materials*, 2000, 9(4): 533-542.
- [7] PARK S, AHMAD S, YUN C B, ROH Y. Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques[J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(5): 609-618.
- [8] YANG Y W, DIVSHOLI B S. Sub-frequency interval approach in electromechanical impedance technique for concrete structure health monitoring [J]. *Sensors*, 2010 (10): 11644-11661.
- [9] 朱宏平, 王丹生, 张俊兵. 基于压电阻抗技术的结构损伤识别基本理论及其应用[J]. *工程力学*, 2008, 25(10): 34-43.
- ZHU Hongping, WANG Dansheng, ZHANG Junbing. Theory and application of structure damage detection based on piezoelectric technique[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(10): 34-43.
- [10] KRISHNAMURTHY K, LALANDE F, ROGERS C A. Temperature effects on piezoelectric elements used as collocated actuator/sensors. *Proceedings, PIE North American Conference on Smart Structures and Materials[C]*//San Diego, CA: SP publishing, Bellingham, WA, 1996, 2441: 276-286.
- [11] TSENG K K H, NAIDU A S K. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material [J]. *Smart Structures and Materials*, 2002, 11(3): 317-329.
- [12] TAWIE R, LEE H K. Monitoring the strength development in concrete by FMI sensing technique[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9): 1746-1753.

(上接第 78 页)

- [2] 刘昭博, 彭光正. 基于 PVDF 压电薄膜灵巧手触觉传感器的研究[J]. *传感器世界*, 2007, 13(11): 11-14.
- LIU Zhaobo, PENG Guanzheng. The study of tactile sensor of dexterous hand based on PVDF piezo-film [J]. *Sensor World*, 2007, 13(11): 11-14.
- [3] 孟仁俊. PVDF 压电薄膜传感器的研制[D]. 上海: 东华大学, 2008.
- [4] 陈志毅, 周德华, 吴志东. 低频感应式磁传感器优化设计[J]. *四川兵工学报*, 2013(4): 123-126.
- CHEN Zhiyi, ZHOU Suihua, WU Zhidong. Optimization of induction magnetic sensors at lower frequency [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2011(3): 103-105.
- [5] 赵东升. PVDF 压电薄膜传感器的研制[J]. *物理测试*, 2007, 25(1): 24-26.
- ZHAO Dongsheng. Development study of PVDF piezoelectric film sensors[J]. *Physics Examination and Testing*, 2007, 25(1): 24-26.
- [6] 卢朝洪, 梅涛, 骆敏舟, 等. 一种用于机器人手爪的 PVDF 接触力传感器设计[J]. *压电与声光*, 2006, 28(3): 311-313.
- LU Chaohong, MEI Tao, LUO Minzhou, et al. A PVDF contact force sensor for robotic hand[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2006, 28(3): 311-313.
- [7] 黄英. 基于压力敏感导电橡胶的柔性多维阵列触觉传感器研究[M]. 安徽: 合肥工业大学, 2008.
- [8] 姜明文, 王人成, 罗志增, 等. 具有触滑觉功能的肌电假手[J]. *清华大学学报*, 2004, 44(8): 1051-1053.
- JIANG Mingwen, WANG Rencheng, LUO Zhizeng, et al. Myoelectric prosthetic hand with tactile and slip feedback functions[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2004, 44(8): 1051-1053.
- [9] 蒋亚超, 杨勇, 李兴东, 等. 三种双 T 网络陷波电路分析与比较[J]. *电子技术*, 2011, 38(1): 70-72.
- JIANG Yachao, YANG Yong, LI Xingdong, et al. Analysis and comparison about three types of double-T band stop filter[J]. *Electronic Technology*, 2011, 38(1): 70-72.