

含金属芯压电纤维智能夹层制备与性能研究

严春霞, 裘进浩, 罗俊, 陈海荣, 杜建周

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于工程实用性的需要, 制备了含金属芯压电陶瓷纤维(MPF)智能夹层并研究了其传感性能。首先设计了融合柔性电路板、MPF元件与智能夹层等先进技术于一体的分布式传感器——MPF智能夹层, 并制作了实物样品。通过对理论模型的简化及求解, 建立了MPF智能夹层的传感性能表征方法。最后, 为了避免常规标定方法带来的结构损伤, 提出了自激励标定法, 并与常规标定结果对比, 最大偏差仅为3.6%。结果表明, 自激励标定法准确、可靠, 该智能夹层具有优良的传感性能, 其传感系数与载荷无关, 与理论模型一致。

关键词: 压电纤维; 智能夹层; 制作工艺; 传感; 标定

中图分类号: TB552

文献标识码: A

Study on Preparation and Performance of Metal-core Piezoelectric Fiber SMART Layer

YAN Chunxia, QIU Jinhao, LUO Jun, CHEN Hairong, DU Jianzhou

(State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A type of metal-core piezoelectric fiber (MPF) SMART layer has been fabricated and its sensing performance has been studied according to the needs of the practical engineering. Firstly, a distributed sensor——MPF SMART layer which integrated into the flexible circuit board (FCB), MPF component and smart layer has been designed and a sample was fabricated. Secondly, a theoretical model was simplified and a characterization procedure for MPF SMART layer was obtained. At last, a self-motivated calibration method for MPF SMART layer was proposed in order to avoid structural damage caused by the conventional method. Comparing with the conventional method, the maximum deviation of 3.6% was obtained. The results revealed that the self-motivated calibration method was accurate and reliable. The MPF SMART layer has excellent sensing performance. Its sensor factor is independent with any load, and that is consistent with the theoretical one.

Key words: piezoelectric fiber; SMART layer; manufacturing process; sensing; calibration

0 引言

压电智能夹层^[1-3]是由美国斯坦福大学提出并研制的一种含有压电网络的柔性智能铺层, 是一种具有商业应用价值的结构健康监测方法^[4-5]。它由压电智能夹层和智能分析仪组成^[6-7]。含金属芯压电纤维(MPF)是一种新型压电器件, 由裘进浩等^[8-9]采用挤压法和 Hiroshi S 等^[10]采用水热法和挤压法先后成功制备。其金属芯在纤维的中心位置, 周围是圆柱状的压电陶瓷, 金属芯可用作一个电

极, 而喷镀在纤维表面的金属层可用作另一个电极, 这样, 单根 MPF 就可作为传感器或驱动器使用。它具有体积微小, 质量轻, 易集成, 传感性能好(具有方向性), 需要的外部设备少, 能最大限度地减少对基体材料影响的特点。因此自问世以来受到了广大专家学者的广泛关注和研究^[11-15]。虽然 MPF 具有很多突出的优点, 但其在使用中对使用者的操作熟练性有较高的要求, 首先其电极细小, 难以引出; 其次压电陶瓷的脆性使其易受环境 and 外力的影响而损伤。为了方便, 其广泛应用于实际工程, 本文结合

收稿日期: 2011-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90923029, 50830201), 长江学者创新团队基金资助项目(IRT0968), 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009020), 江苏高校优势学科建设工程基金资助项目, 江苏省普通高校研究生科研创新计划基金资助项目(CXZZ11_0194), 南航博士学位论文创新与创优基金资助项目(BCXJ11-02), 南航基本科研业务费专项科研基金资助项目(NJ2010010, NZ2010001)

作者简介: 严春霞(1987-), 女, 安徽合肥人, 硕士生, 主要从事智能传感与驱动技术的研究。E-mail: nuaa_chunxia@163.com。通信作者: 裘进浩(1963-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事智能传感与驱动技术的研究。E-mail: qiu@nuaa.edu.cn。

MPF 的特点与智能夹层原理,设计并制作以 MPF 为传感元件的分布式传感器——MPF 智能夹层。针对 MPF 智能夹层标定问题的特殊性提出一种自激励标定方法,并通过实验验证这一方法的可行性与准确性。

1 MPF 智能夹层

1.1 智能夹层原理

智能夹层由电路层、绝缘层、压电驱动/传感层组成,其设计思想是采用柔性印刷线路工艺将压电传感器设计制作成夹层的形式,其中,压电元件按照一定工艺封装在夹层中,并用印刷线路代替普通导线连线。通过这样的方法有效解决压电元件脆弱,不易使用的弊端。而作为模块化夹层,它可按模块化方式预先制作、标定,再根据需要铺设于复合材料表面或埋入复合材料内部以实现结构的健康监测。由于压电传感层一次性制备完成,保证了传感元件性能的一致性。同时,传感网络的连线预制在传感层内,最终通过一个标准接口输出,便于连接和大面积使用。

1.2 MPF 智能夹层设计

将 MPF 元件集成到智能夹层,再应用到具体结构的监测中,需根据结构的特点和使用环境来确定夹层设计、安装工艺等。二维板结构的损伤定位是结构健康监测中研究的热点之一,在这个应用背景下,本文根据其特点和使用环境设计符合实用化要求的智能夹层,在设计时采用和遵循了以下设计要点:

1) MPF 元件布局。将 3 根 MPF 元件采用等边三角形排列形成类似应变花的组合传感器,作为一个单元集成到夹层内部。使用该传感器仅需提取组合中每根 MPF 的响应电压幅值,就可确定结构中应变场的方向,因此使用 2 个传感器间隔一定距离布置就可确定结构中损伤的位置。

2) 基材。根据线路需求设计制作柔性电路板,并以其作为电路层,热固化胶固化形成的基体物质和一层聚酰亚胺薄膜作为绝缘保护层。图 1 为 MPF 智能夹层。

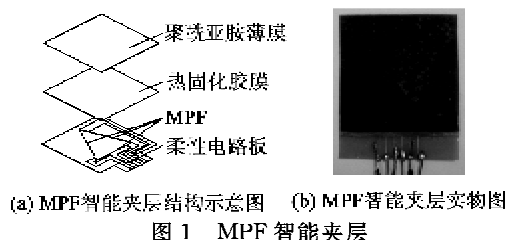


图 1 MPF 智能夹层

根据 MPF 智能夹层的设计思想制作样品,具体制作工艺如下:

1) 根据 MPF 的数量、排布方式,设计加工出带有相应的焊点、外接端口的柔性电路板。

2) 在柔性电路板上合适的位置将 3 根 MPF 排列呈等边三角形,将压电纤维的外层涂布电极和金属芯电极分别与柔性电路板上对应的焊点连接。

3) 将热固化胶膜均匀粘贴到柔性电路板上,在上面覆盖一层聚酰亚胺薄膜,放入精密恒温炉中 120 °C 下固化 1.5 h。

4) 冷却后取出样品,对夹层中的 MPF 进行重新极化。

制作的样品如图 1(b) 所示。该 MPF 智能夹层的长宽为 30 mm×35 mm,埋入的 MPF 的几何尺寸和材料参数如表 1 所示。

表 1 MPF 的几何尺寸和材料参数

	$\frac{L}{\text{cm}}$	$\frac{R}{\mu\text{m}}$	$\frac{C_p}{\text{nF}}$	$\frac{e_{33}}{(\text{nF/m})}$	$\frac{S_{11}}{(\text{m}^2/\text{N})}$	$\frac{d_{31}}{(\text{pC/N})}$
MPF ₁	1.5	124	1.584	39.5	19.9×10^{-12}	149
MPF ₂	1.5	125	1.561	38.6	19.7×10^{-12}	147
MPF ₃	1.5	122	1.726	39.2	19.3×10^{-12}	142

2 MPF 智能夹层传感性能的理论模型

MPF 智能夹层中 3 根 MPF 元件独立工作,监测结构不同位置处的应变。单根 MPF 作为传感器,输入量为平均应变 $\bar{S}$,输出量为电压 V 。为了标定其传感性能,需研究其输出量与输入量的依存关系。将两者的比值 k 定义为 MPF 的传感系数,即

$$k = V/\bar{S} \quad (1)$$

MPF 的几何形状如图 2 所示,金属芯位于正中位置,半径为 R_m ,外围的陶瓷内部半径和金属芯相同,外部半径为 R_c ,MPF 的长度为 L 。由于 MPF 是圆柱形状,为了研究方便,采用圆柱坐标系。压电

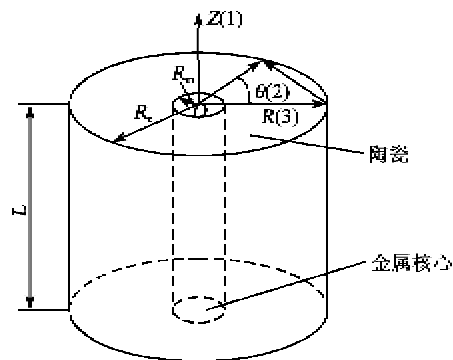


图 2 MPF 的几何形状及圆柱坐标系

方程的直角坐标系和圆柱坐标系的对应关系为:1 对应 Z , 2 对应 θ , 3 对应 R , 为研究方便, 可认为其电场沿径向分布, 其极化方向也认为是径向分布。

根据以上假设, MPF 的第一类压电方程可表示为:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} S_{RR} \\ S_{\theta\theta} \\ S_{ZZ} \\ S_{R\theta} \\ S_{RZ} \\ S_{\theta Z} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} s_{33}^E & s_{13}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{11}^E & s_{12}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{12}^E & s_{11}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E \end{pmatrix} \times \\ &\begin{pmatrix} T_{RR} \\ T_{\theta\theta} \\ T_{ZZ} \\ T_{R\theta} \\ T_{RZ} \\ T_{\theta Z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{33} & 0 & 0 \\ d_{31} & 0 & 0 \\ d_{31} & 0 & 0 \\ 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{15} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E_R \\ E_\theta \\ E_Z \end{pmatrix} \quad (2) \\ \begin{pmatrix} D_R \\ D_\theta \\ D_Z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} d_{33} & d_{31} & d_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} \end{pmatrix} \times \\ &\begin{pmatrix} T_{RR} \\ T_{\theta\theta} \\ T_{ZZ} \\ T_{R\theta} \\ T_{RZ} \\ T_{\theta Z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_{33}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{11}^T \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E_R \\ E_\theta \\ E_Z \end{pmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

式中: S_{ij} 为应变; T_{ij} 为应力; E_i 为电场强度; D_i 为电位移; s_{ij}^E 为弹性柔顺系数; ϵ_{ij}^T 为介电常数; d_{ij} 为压电常数, 上标 E 和 T 分别为恒定电场和恒定应力, 下标 i, j 可以为 θ, R 或 Z , 代表变量的方向。

MPF 作为应变传感器, 外围的压电陶瓷在径向可自由伸缩。与长度方向相比, MPF 的半径很小, 其沿圆周方向的应力也可忽略不计。且纤维只有在半径方向的外加电场, 因此,

$$T_{RR} = T_{\theta\theta} = T_{R\theta} = T_{RZ} = T_{\theta Z} = 0, E_\theta = E_Z = 0. \quad (4)$$

根据以上力学和电学边界条件, MPF 传感器的压电方程可简化为

$$\begin{cases} S_{ZZ} = s_{11}^E T_{ZZ} + d_{31} E_R \\ D_R = d_{31} T_{ZZ} + \epsilon_{33}^T E_R \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)整理得到 MPF 的电位移表达式为

$$D_R = \frac{d_{31}}{s_{11}^E} S_{ZZ} + \left(\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}}{s_{11}^E} d_{31} \right) E_R \quad (6)$$

而当 MPF 作为传感器测量其响应电压时, 电学边界条件为开路, 所以电极上的总电荷量为 0, 即

$$\iint (D_R \cdot R) d\theta dZ = 0 \quad (7)$$

式中积分区域分别为 2 个电极表面。而压电陶瓷中无自由电荷存在, 所以式(7)对所有满足 $R_m < R < R_c$ (其中 R_m 为金属芯半径; R_c 为 MPF 半径) 的圆柱形区域适用。

由于 MPF 中电场是径向的, 且 2 个电极(中间金属芯和外表面金属层)面积大小不同, 所以其电场不是均匀分布的。理想情况下假设 E_R 与 Z 无关, T_{ZZ} 与 R 无关, 式(6)、(7)中电场、应力、应变可表示为:

$$E_R = E_0 / R; S_{ZZ} = S_{ZZ}^0 / R. \quad (8)$$

式中: E_0 为常数, 与 Z 无关; S_{ZZ}^0 为 Z 的函数。

当在纤维两电极间产生电场时, 纤维产生的电压计算式为

$$V = \int_{R_m}^{R_c} E_R dR = E_0 \ln(R_c / R_m) \quad (9)$$

由式(6)~(9)可推出 MPF 作为应变传感器时的电压响应为

$$V = \frac{2R_m R_c \ln\left(\frac{R_c}{R_m}\right)}{R_m + R_c} \bar{S} \quad (10)$$

其中 $\bar{S}$ 与 S_{ZZ}^0 的关系为

$$\bar{S} = \frac{\int_0^L \frac{S_{R_c} + S_{R_m}}{2} dZ}{L} = \frac{R_c + R_m}{2R_c R_m} \cdot \frac{\int_0^L S_{ZZ}^0 dZ}{L} \quad (11)$$

由此, 可得到 MPF 的传感系数为

$$K = \frac{V}{S} = \frac{2R_m R_c \ln\left(\frac{R_c}{R_m}\right)}{R_m + R_c} \frac{1}{d_{31} - \frac{\epsilon_{33}^T s_{11}^E}{d_{31}}} \quad (12)$$

从式(12)可看出, MPF 作为传感器, 其传感系数与载荷无关, 仅与 MPF 的材料参数及几何尺寸有关。

3 MPF 智能夹层传感系数标定与性能分析

由于 MPF 元件集成到智能夹层后其传感性能受到夹层厚度、制作工艺等因素的影响, 差异性较大, 在使用前需对其传感系数进行实验标定。而标定过程常用的直接将智能夹层粘贴在结构上的方法会对其造成损伤, 从而极大地影响其多次使用。为

了有效避免这一问题,本文设计了以智能夹层内部的 MPF 为激励源的自激励标定方法。同时,用常规标定法测试了该智能夹层的传感系数以验证前者的可行性。

3.1 自激励标定实验

图 3 为自激励标定实验系统。在智能夹层上 MPF 元件位置处分别粘贴应变片,选择 1 根 MPF 作为激励纤维,1 根为传感纤维,利用 NI 9263 模块和功率放大器对激励纤维加载激励电压,通过 NI 9237 和 NI 9234 分别采集传感纤维的应变及响应电压,为了得到全部 3 根 MPF 的传感系数,分别进行 3 次实验。

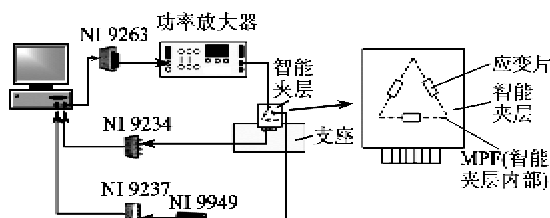


图 3 自激励标定实验系统

为了验证前面所测得的传感系数的精确性,这里用常规的测试传感系数的方法进行验证。图 4 为常规标定实验元件位置示意图。图中,以一块压电片(35 mm×40 mm×2 mm)作为激励源,将智能夹层传感器粘贴到压电片的一面,3 片应变片分别粘

贴到该压电片的另一面,与夹层中 3 根 MPF 位置对应处。该试验系统与图 3 相似,加载电压施加于压电片上。一次加载的同时可采集 3 根 MPF 的响应电压和应变。

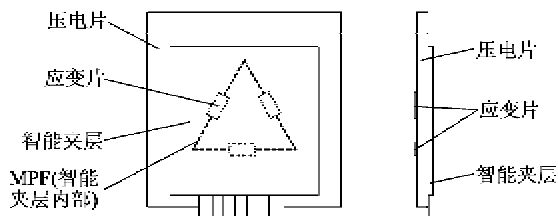


图 4 常规标定实验元件位置示意图

4 实验和理论模型结果分析

实验根据工况不同分为变幅值实验和变频率实验两种。变幅值实验中加载一组频率为 500 Hz,幅值为 $(10+5i)$ V($i=0,1,2,\dots,8$)的正弦电压,研究输入信号频率不变时,MPF 传感系数随电压幅值的变化规律;变频率实验中加载一组幅值为 40 V,频率为 $(100+50 \cdot i)$ Hz($i=0,1,2,\dots,38$)的正弦电压,研究输入信号幅值不变时,MPF 传感系数随频率改变的变化规律。

实验结果表明,MPF 的传感系数都不随加载幅值、频率而改变,并且这与理论模型预测结果吻合。表 2 为由实验和理论模型得到的 3 根 MPF 的传感系数。

表 2 传感系数理论值与实验值对比

	常规标定测定传感系数 $k/(\text{mV}/\mu\epsilon)$		自激励标定传感系数 $k/(\text{mV}/\mu\epsilon)$		传感系数理论模型 $k/(\text{mV}/\mu\epsilon)$
	变频率实验	变幅值实验	变频率实验	变幅值实验	
MPF ₁	8.1	8.0	8.2	8.1	13.0
MPF ₂	8.6	8.5	8.3	8.4	13.3
MPF ₃	7.9	7.8	8.0	8.9	12.7

由表 2 可知,本文提出的自激励法标定的智能夹层的传感系数和实际测得相吻合,最大相对误差仅为 3.6%,有较高的标定精度。由于自激励和压电片激励所产生的振动在震源位置、传播方向等会影响到应变沿 MPF 长度方向的分布变化,且实验中应变片测量的应变与 MPF 长度范围内的平均应变有一定的差别,所以他们之间存在较小的差异。从表中可发现,实验值约为理论值的 62%。这是因为

1) 理论值计算中有理想化假设,使计算出的传感系数偏高。

2) 理论计算中没有考虑智能夹层基体物质对 MPF 的影响,柔性电路板和基体物质并非绝对刚

性,弹性波经其缓冲会产生衰减,使实际传递到 MPF 上的应变小于结构上的应变。

5 结束语

本文设计了一种 MPF 智能夹层,降低了 MPF 元件使用过程中的难度,有效地保护了 MPF 不受外界环境影响而损伤,同时解决了压电监测系统中常用的直接将传感元件粘贴在结构上所引起的胶层厚度不均、电绝缘问题,满足了健康检测系统对传感器的模块化、集成化的要求。另外,研究了一种 MPF 智能夹层的传感性能表征方法。最后,提出的自激励标定法能在不损伤智能夹层的前提下完成传感性能标定,并用常规标定方法做了验证,实验结果表明,MPF 智能夹层具有优良的应变传感性能,

自激励标定法准确、可靠,这为智能夹层的标定提供了一种新型方法。

参考文献:

- [1] YONG Lv, ZHANG Xiaoyu, LI Zhouqiu. Study on ERT system of SMART layer of carbon fiber composite[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 48(2): 1154-1157.
- [2] YANG S M, HUNG C C, CHEN K H. Design and fabrication of a SMART layer module in composite laminated structures[J]. SMART Materials and Structures, 2005, 14(2): 315-320.
- [3] LIN M, QING Xinlin, KUMAR A, et al. SMART layer and SMART suitcase for structural health monitoring applications[A]. In: Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering[C]//CA, USA; Newport Beach, 2001: 98-106.
- [4] LIN M, CHANG F K. Development of smart layer for built-in diagnostics for composite structures[A]. In: Thirteenth Technical Conference of the American Society for Composites[C]//MD, USA; Baltimore, 1998: 21-23.
- [5] DONG Xiaoma. Study of fiber-optic SMART layer based on FBG sensors[A]. In: 2010 2nd International Conference on Networking and Digital Society[C]//Wenzhou, China; 2010: 346-348.
- [6] PAN Xiaowen, LIANG Dakai, LI Dongsheng. Optical fiber sensor layer embedded in SMART composite material and structure[J]. SMART Materials and Structures, 2006, 15(5): 1231-1234.
- [7] STEFAN H, LOTHAR G. Smart layer for damage diagnostics[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004, 15: 729-736.
- [8] BIAN Yixiang, QIU Jinhao. Dynamic admittance matrix of metal core piezoelectric fiber[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2011, 35: 189-200.
- [9] QIU Jinhao, T Junji, Y Naoki, et al. Fabrication of piezoelectric fibers with metal core[A]. In: SMART Structures and Materials 2003[C]//Proceeding of SPIE; 2003: 475-483.
- [10] SHIMOJO Y, HIROSHI S, KIYOSHI T. SMART system using new piezoelectric fiber with metal core[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2007, 6: 728-733.
- [11] 边义祥. 含金属芯压电纤维的驱动和传感特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2009.
- [12] 边义祥, 裘进浩, 王鑫伟, 等. 含金属芯压电纤维的传感特性研究[J]. 振动测试与诊断, 2010, 30(1): 28-32.
- [13] 刘建, 裘进浩, 常伟杰, 等. 含金属芯压电纤维传感 Lamb 波方向性研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(2): 54-57.
- [14] HIROSHI S, SEKIVA T, SHIMOJO Y. Fabrication and vibration suppression behavior of metal core-piezoelectric fibers in CFRP composite. In: Transducing Materials and Devices[C] //Brugge, Belgium; S. n., 2003: 80-87.
- [15] DAVOOD A, HIROSHI A, MEHRDAD N, et al. A comparative study on macro-fiber composites and active fiber composites with metal-core piezoelectric actuators/sensors[A]. In: SMART Structures and Materials[C]//S. l.: Proc of SPIE, 2006: 1-12.
- [13] 贺敦敏, 肖定全, 朱建国, 等. 钛酸铋钠钾锂银系无铅压电陶瓷: 中国, CN1814570A [P]. 2006-08-09.
- [14] 吴浪, 肖定全, 贺敦敏, 等. $[\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x}\text{Ag}_x)_{0.5}]_{1-y}\text{Ba}_y\text{TiO}_3$ 系压电陶瓷研究[J]. 压电与声光, 2006, 28(4): 455-457.
WU Lang, XIAO Dingquan, LIN Dunmin, et al. Studies of $[\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x}\text{Ag}_x)_{0.5}]_{1-y}\text{Ba}_y\text{TiO}_3$ lead-free piezoelectric ceramic[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2006, 28(4): 455-457.
- [15] LIAO Y W, XIAO D Q, LIN D M, et al. Piezoelectric and ferroelectric properties of $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x-y}\text{K}_x\text{Ag}_y)_{0.5}\text{TiO}_3$ lead-free piezoelectric ceramics[J]. Appl Phys A, 2008, 90: 165-169.
- [16] 康利梅. BNT 无铅压电陶瓷体系的设计及制备工艺研究[J]. 科技广场, 2010(7): 190-192.
KANG L M. Research of BNT lead-free piezoelectric ceramics system design and preparation[J]. Science Mosaic, 2010(7): 190-192.

(上接第 428 页)