

文章编号: 1004-2474(2005) 02-0200-03

# 压电陶瓷材料电学性能参数测量研究

赵寿根, 程 伟

(北京航空航天大学 固体力学研究所, 北京 100083)

**摘要:**从双层压电梁在电场作用下的位移响应与电场的关系式出发, 借助于试验数据逆推导出压电陶瓷材料的电学性能参数。位移响应的试验数据采用非接触激光测振仪得到。该文方法相对压电参数测量的静态法、动态线路传输法和动态电容法减少了许多中间测量环节和等效处理手段, 且易于具体实施, 相对于动态位移法又有更好的精度, 为压电陶瓷类材料电学性能参数测量提供了一种全新的测量方法。

**关键词:**压电陶瓷; 双层压电梁; 挠度; 电学性能参数; 激光测振仪

中图分类号: O 348. 11; V 249. 121 文献标识码: A

## Evaluation of the Electric Parameters of Piezoelectric Materials

ZHAO Shou-gen, CHENG Wei

(Solid Mechanic Center of BeiHang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the deflection of piezoelectric bimorphs under a certain voltage field and test data which were got using non-contact laser vibrometer, the electric parameters of piezoelectric ceramics can be obtained. Compared with the static state method which was a traditional method, the dynamic circuitry transmission method and the dynamic capacitance method, the method in this paper has less middle metrical tache and equivalence. Compared with dynamic displacement method, it has more high precision. So this paper shows a new method to evaluate the electric parameters of piezoelectric ceramic materials.

**Key words:** piezoelectric ceramics; piezoelectric bimorphs; deflection; electric parameters; laser vibrometers

压电陶瓷材料因其能耗低, 响应快, 刚度大, 易于控制, 可粘贴于本体结构表面或可嵌入本体结构内部, 生产工艺较成熟等优点, 在智能结构中得到了广泛的应用。不同厂家采用不同工艺或不同原料配比制作压电陶瓷材料, 即使同一个厂家生产的同一批压电材料, 其性能也存在差别, 因而在使用前, 应首先通过实验的方法测量出其性能参数。在诸多的压电材料参数中, 横向压电系数  $d_{31}$  是驱动元件的关键参数。本文作者从双层压电梁在电场作用下位移响应与电场的解析式出发, 逆推导出压电陶瓷材料的电学性能参数。本文方法相对压电参数测量的静态法、动态线路传输法<sup>[1~3]</sup>和动态电容法<sup>[4]</sup>减少了许多中间测量环节和等效处理手段, 且易于具体实施, 相对于动态位移法又有更好精度<sup>[5,6]</sup>。

## 1 电学性能参数测量原理

压电材料的压电方程为<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} S_i = s_{ij}^E T_j + d_{in} E_n & i, j = 1, 2, \dots, 6 \\ D_m = d_{mj} T_j + \epsilon_{mn}^T E_n & m, n = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $T_i$  为应力张量;  $S_i$  为应变张量;  $E_n$  为电场分量;  $D_m$  为电位移;  $s_{ij}^E$  为常电场柔度系数;  $d_{in}$  为常应力压电应变系数;  $\epsilon_{mn}^T$  为常应力介电常数。

对于图 1 所示的压电梁 ( $x$  方向记为 1 方向,  $z$  方向记为 3 方向) 由于  $y$  方向 (垂直于  $zx$  面, 记为 2 方向) 可自由伸展, 因而  $T_2 = 0$ , 由 Euler 梁理论,  $T_3$  可近似为零。



图 1 压电梁示意图

Fig. 1 Piezoelectric bimorphs

由于  $E_1 = 0, E_2 = 0$ , 所以  $T_4 = 0, T_5 = 0$  和  $T_6 = 0$ 。图 1 所示的压电梁, 其压电方程可简化为

$$\begin{cases} S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \\ D_3 = d_{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{cases} \quad (2)$$

双层压电梁上梁极化方向为  $z$  方向, 下梁极化方向为  $-z$  方向, 上梁 (用上标  $U$  表示) 压电方程为

$$\begin{cases} S_1^U = s_{11}^E T_1^U + d_{31} E_3 \\ D_3^U = d_{31} T_1^U + \epsilon_3^T E_3 \end{cases} \quad (3)$$

下梁(用上标 L 表示)压电方程为:

$$\begin{cases} S_1^L = s_{11}^E T_1^L - d_{31} E_3 \\ D_3^L = -d_{31} T_1^L - \epsilon_3^T E_3 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $E = -\nabla\Phi = -\frac{V}{2H}$ ,  $\Phi$  为电场电势。

上下梁牢固粘在一起, 在分隔面处梁单元满足位移连续条件, 即

$$\frac{F_{S11}^E}{Bh} + \frac{M^U H}{2EI} + d_{31} E_3 = \frac{F_{S11}^E}{Bh} - \frac{M^L H}{2EI} - d_{31} E_3 \quad (5)$$

式中  $B$  为梁  $y$  方向的宽度。由力矩  $M$  和  $T_j$  的关系为

$$M \int_A T_{11z} dA = \int_A E \frac{dw}{dx} z dA = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (6)$$

得曲率的关系式为

$$\frac{1}{R} = w'' = -\frac{M}{EI} \quad (7)$$

式中  $w$  为梁  $z$  方向的位移,  $\int \dots dA$  为对整个剖面的面积积分,  $I = \int z^2 dA$  剖面绕  $y$  轴的惯性矩。

假设上下梁单元的弯曲曲率相等, 根据梁平面剖面假设, 可得

$$w'' = \frac{1}{R} = -\frac{M^U}{EI} = -\frac{M^L}{EI} \quad (8)$$

由式(8)可得

$$M^U = M^L = M \quad (9)$$

在分隔面上由弯矩和力的关系式

$$M^U + M^L = FH \quad (10)$$

有

$$F = \frac{2M}{H} \quad (11)$$

将式(9)代入式(5)得(其中  $I = \frac{BH^3}{12}$ ):

$$M = -\frac{d_{31} E_3 B H}{8s_{11}^E} \quad (12)$$

将式(12)代入式(8)得:

$$\begin{cases} w' = \frac{3d_{31} E_3 x}{2H} + a \\ w = \frac{3d_{31} E_3 x^2}{4H} + ax + b \end{cases} \quad (13)$$

由夹持梁的边界条件:

$$w|_{x=0} = 0, w'|_{x=0} = 0$$

可得

$$\begin{cases} a = 0 \\ b = 0 \end{cases} \quad (14)$$

从而压电梁的转角和挠度表达式为

$$\begin{cases} W' = a = \frac{3d_{31} E_3 x}{2H} \\ w = \frac{3d_{31} E_3 x^2}{4H} \end{cases} \quad (15)$$

将  $E_3$  的表达式代入式(15)可得

$$\begin{cases} w' = a = -\frac{3d_{31} V x}{4H^2} \\ w = -\frac{3d_{31} V x^2}{8H^2} \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)得当  $x = L$  时,

$$d_{31} = -\frac{8wH^2}{3VL^2} \quad (17)$$

由式(17)可知, 只要测量出双层压电梁端部在一定电场  $V$  下的挠度  $w$ , 和已知压电梁的长度  $L$  及单梁厚度  $H$  即可推出所用压电陶瓷材料的电学性能参数  $d_{31}$ 。

## 2 测量装置

本文采用德国 Polytec 公司生产的激光测振仪作为测量主要工具, 其型号为 OFV 3001S。它是一种光纤位相型调制传感器, 一种可非接触式测量振动速度和位移的仪器, 测量头的型号为 OFV 055, 位移解码器的型号为 VEX020。该激光测量仪速度量程为  $0.3 \sim \pm 10$  m/s, 位移精度为 2 nm。其测试原理如图 2 所示。

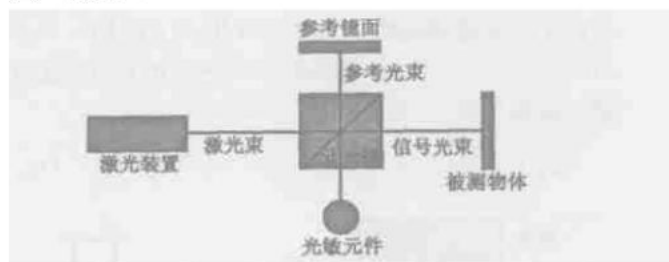


图 2 激光测振仪工作原理示意图

Fig. 2 The schematic diagram of The Laser vibrometer

其余的测量设备还包括  $0 \sim 1500$  V 可调电压源等。整个系统的测量示意图如图 3 所示。



图 3 压电陶瓷电性能参数测量系统示意图

Fig. 3 The test system of piezoelectric ceramic materials

### 3 测量试件

测试所用试件的几何尺寸为  $50\text{ mm} \times 2.0\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 。测试的电压环境为  $0 \sim 700\text{ V}$ ，测试  $\Delta V$  为  $50\text{ V}$ ，一共测试三个样本。单压电梁试件和双层压电梁的实物图如图 4 所示。

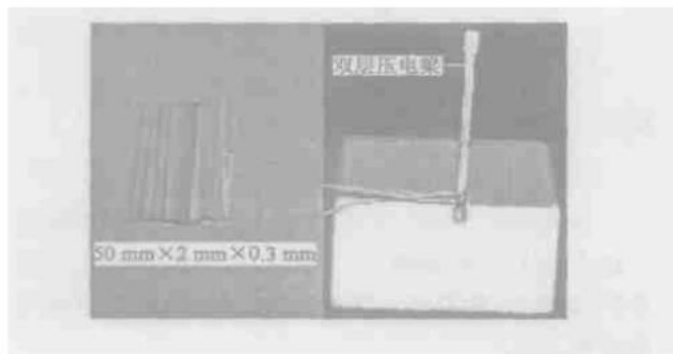


图 4 单压电梁试件和双层压电梁的实物图

Fig. 4 Natural figures of piezoelectric bimorphs

### 4 本文方法与其他方法的比较

目前压电陶瓷电学参数  $d_{31}$  的测量方法分为静态法和动态法两类。其中静态法包括标准静态法和准静态法；动态法包括动态线路传输法、动态位移法和动态电容法。

图 5 为静态参数法的常用装置示意图。静态法是在不受夹持的压电陶瓷片的  $z$  方向上施加一个恒力  $F$  (或电场)，测试测量试件所产生的电荷(或应变)，压电参数  $d_{31}$  为

$$d_{31} = \left( \frac{\partial D_3}{\partial T_1} \right)_{E=0} = \left( \frac{\partial S_1}{\partial E_3} \right)_T \quad (18)$$

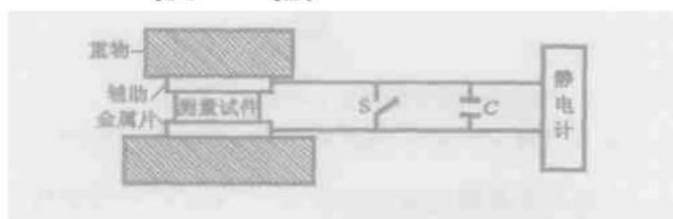


图 5 静态参数法装置示意图

Fig. 5 Devices of the static state method

动态方法测量压电陶瓷片在动态电场下的机械导纳或者位移和动态电容响应来逆推导出压电陶瓷片的参数，具体实施过程可参考文献[1, 4~6]。

在这些方法中，静态法、动态线路传输法和动态电容法在处理方法上采取了一些等效的手段，从而引入了相当的测量误差；动态位移法在处理过程中涉及到阻尼参数的测量，而通常阻尼参数不易准确测量，从而使得该方法存在误差隐患。本文方法从压电梁在电场下的解析式出发得到压电陶瓷的电学性能参数，克服了以上方法的缺陷。表 1 为本文方法和动态线路传输法及动态位移法的试验实测结果的比较。

表 1 3 种方法测量  $d_{31}$  的比较 ( $\text{pC} \cdot \text{V}^{-1}$ )

Table 1 3 different measurement s for  $d_{31}$

本文方法	线路传输法 <sup>[5,6]</sup>	动态位移法 <sup>[5,6]</sup>
220.1	224.5	232.4

### 5 结束语

本文方法相对传统的压电参数测量的静态法、动态线路传输法和动态电容法减少了许多中间测量环节和等效处理手段，且易于具体实施，相对于动态位移法精度高，为压电陶瓷类材料的电学性能参数的测量提供了一种新的测量方法。

参考文献：

- [1] 张沛霖, 张仲渊. 压电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [2] 李远, 秦自楷. 压电与铁电材料的测量[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [3] GB3389.2-82. 准静态压电陶瓷压电应变常数的测试方法[S].
- [4] 程明, 叶会英. 一种由压电双晶片测量压电材料参数的动态方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2000, 14(4): 64-69.
- [5] 陈伟民, 管德. 压电陶瓷受迫振动分析及其应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(1): 66-68.
- [6] 陈伟民, 李敏. 用动态位移响应测量压电常数的方法[J]. 压电与声光, 2001, 23(4): 323-325.