

# 一种测量切向压电常数 $d_{15}$ 的新方法

潘 潮 陈守六<sup>†</sup> 鲍小琪

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

**摘要** 本文提出了测量压电材料切向压电常数  $d_{15}$  的一种新方法—准静态法。有限元仿真分析表明了测量原理的正确性。方法利用设计产生切向力的专用夹具,在普通的准静态  $d_{33}$  仪上,就可方便,快捷,准确地测量大多数压电材料的切向压电常数  $d_{15}$ 。

**关键词** 压电常数测量, 准静态法,  $d_{15}$ , 有限元

## A new method for measuring the shear piezoelectric constant $d_{15}$

PAN Chao CHEN Shou-Liu BAO Xiao-Qi

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** This paper presents a new method for measuring the shear piezoelectric constant  $d_{15}$ . The principle of the method is verified by finite element simulation. A special fixture was designed to create the needed shear force on a tested specimen for quasi-static  $d_{33}$  meter. By using the fixture, the ordinary quasi-static  $d_{33}$  meter is able to easily perform fast and accurate  $d_{15}$  measurement.

**Key words** Piezoelectric constant measurement, Quasi-static,  $d_{15}$ , FEM

### 1 引言

压电材料是功能材料中极重要的一类材料,由于其具有机械-电形式能量之间的转换功能,在现代科学技术与工业领域有着十分广泛的影响。

压电材料具有把机械能转换成电能,或把电能转换成机械能的特性;故其机械-电能量之间的转换能力自然就成为评价一种压电材料性能优劣的重要指标,代表这一能力的参数通常称为压电常数。压电常数共有四种形式,即

$d, g, e, h$ 。这四种形式之间并非独立,而是互相关联的;如由  $d$  常数和介电常数,弹性常数可以计算得到  $g, e, h$  形式常数。日常用得最多的形式为  $d$ , 或  $g$  常数。

既然压电常数是评价压电材料性能优劣的重要指标,故能准确,快速地测定就显得十分重要。最早测量压电常数的方法是静态法<sup>[1]</sup>,该法的优点是方便,直观,但误差太大,只宜作为演示使用的半定量方法。后来出现了动态法<sup>[1, 2]</sup>,该法的优点是准确度高,缺点是测量费事,且对被测试样的形状尺寸都有特殊

2007-10-17 收稿; 2007-12-17 定稿

作者简介:潘潮(1956-),男,广东梅县人,副研究员,研究方向:压电,电子技术。

陈守六(1935-),男,副研究员。鲍小琪(1946-),男,博士,研究员。

<sup>†</sup> 通信联系人 E-mail: slchen@mail.ioa.ac.cn

要求,这对实用压电元件(它们往往不满足动态法对形状尺寸的要求)测量就往往无能为力。在上世纪70~80年代出现了一种基于准静态法的  $d_{33}$  测量仪<sup>[3,4]</sup>,用该仪器测量压电常数既具有静态法的方便,直观,又有动态法准确度高的优点,同时又避免了两者的缺点,故该法得到广泛的应用。压电常数大致可分为三类,即纵向压电常数(如  $d_{33}, d_{11}, d_{22}$ ),横向压电常数(如  $d_{31}, d_{32}$ ),切向压电常数(如  $d_{15}, d_{24}, d_{36}$  等)。对于目前最广泛应用的属6mm晶类(点群)的陶瓷类压电材料,其独立的压电常数共3个,即  $d_{33}, d_{31}, d_{15}$ 。准静态法最早只适用于测量  $d_{33}$  压电常数,后来经改进也能测量  $d_{31}$  压电常数<sup>[5]</sup>,而  $d_{15}$  的测量至今还未能实现,虽曾有人作过用准静态法测量  $d_{15}$  的尝试<sup>[6]</sup>,但准确性难以确证,且难以实用。我们利用应力方向转换的原理,设计出一种专用测量夹具,配合在普通准静态  $d_{33}$  测量仪上,使由原来仪器施加的纵向力转换为作用于试样上的切向力,从而实现了利用准静态法也能准确,方便,快速地测量切向压电常数  $d_{15}$ 。我们已进一步研制出 ZJ-3BN 型准静态  $d_{33}/d_{15}$  测量仪,它既能测量  $d_{33}$ ,同时也能测量  $d_{15}$ 。这样,实现了准静态法可以测量所有压电常数的愿望。

## 2 原理

以属6mm晶类的PZT压电陶瓷为例,如图1所示的一个切向效应的试样。试样先在3(Z)方向极化,极化后去除两端面上的电极,再在YZ平面的左右两平面上电镀上电极(不能用烧渗银的办法,那样会被退极化)。对于这样一个试样,如果在左右两面电镀有电极的平面上施加一对面切向力  $F_5$ (应力  $T_5$ ),则由切向压电效应,即会在左右两电极面上产生压电

电荷  $Q_1$ ,其比值就是压电常数  $d_{15}$ ,即

$$d_{15} = \frac{Q_1}{F_5} \quad (1)$$

式中, $d_{15}$ 为切向压电常数, $Q_1$ 为压电电荷, $F_5$ 为面切向力。

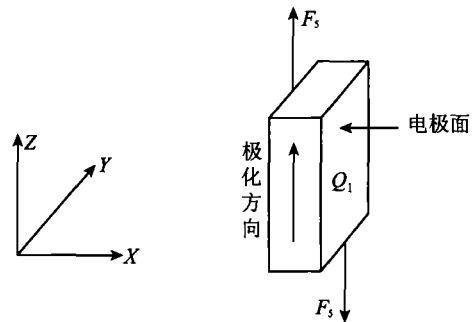


图1 切向压电常数测量示意图

切向力的产生可基于如图2所示的物理模型,被测试样置于上下两金属压块的斜面处,当在两压块的上下两端面中心处施加纵向准静态低频交变力  $F$ ,且假设金属压块为刚性体,则力  $F$  将被分解为平行于斜面的切向力  $F_5 = F \cos \alpha$  和垂直于斜面的纵向力  $F_1 = F \sin \alpha$ ,作用于被测试样,这里,  $\alpha$  为  $F$  与斜面之间的夹角。为使被测试样在两斜面间不滑动,在其垂直于斜面方向要预先施加一预应力(用一夹具把两压板在垂直于斜面方向紧固住)。由于切向压电效应,切向力  $F_5$  将会在试样电极面上产生压电电荷  $Q_1$ ,对于压电陶瓷类材料,其  $d_{11}$  压电常数为零,所以分力  $F_1$  及紧固预应力在两电极面上不产生电荷。这样,根据压电方程及应力分解,有

$$Q_1 = d_{15} \times F_5 = d_{15} \times F \cos \alpha \quad (2)$$

即

$$d_{15} = \frac{Q_1}{F \cos \alpha} \quad (3)$$

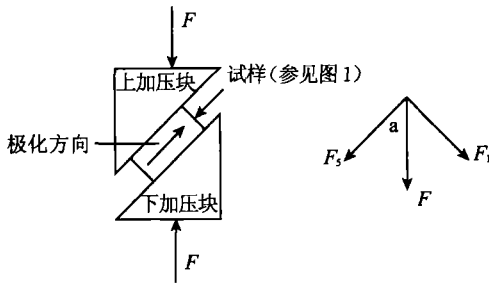


图 2 力分解示意图 ( $F_5 = F \cos \alpha$ )

但实际上,金属压块也是弹性体,故其实际的应力情况要比这复杂的多,由有限元分析结果表明(参见下面的有限元仿真验证):一是各应力,如  $T_5$  并非均匀分布,故其电位移  $D_1$  的分布也是不均匀的,二是  $T_1, T_3$  应力也不等于零,故此时需从完整压电方程出发,即:

$$Q_1 = \int_A D_1 = \int_A \left( \sum_{j=1}^6 d_{1j} \times T_j + \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{1i}^T \times E_i \right) \quad (4)$$

式中,  $Q_1$  为压电电荷,  $\int_A$  为对面积  $A$  进行积分,  $D_1$  为电位移(电荷密度),  $d$  为压电常数,  $T$  为应力,  $E$  为电场强度,  $\varepsilon$  为介电常数,  $A$  为电极面积。在此准静态法测量的设备中,为满足恒定电场边界条件,在准静态测量仪内与试样并

联了一个大电容(比试样电容大 100 倍以上),所以电场强度  $E = 0$ ;对于压电陶瓷,除  $d_{15}$  不为零外,其它压电常数  $d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{16}$  均为零,故上式可简化为:

$$Q_1 = \int_A D_1 = \int_A d_{15} \times T_5 = d_{15} \int_A T_5 = d_{15} F_5 \quad (5)$$

$D_1$  和  $T_5$  分别对面积  $A$  积分后,上述由理想状态得到的关系式仍然成立。

### 3 方法

图 3 为准静态法测量  $d_{15}$  专门设计的测量夹具结构图,夹具由上下两带斜面的金属压块及一用于在垂直于斜面方向夹紧两金属块的框架组成。测量时,试样平行置于两斜面之间,由框架上的紧固螺钉夹紧,上下两金属压块之间绝缘。然后把此夹具置于准静态  $d_{33}$  测量仪<sup>[4]</sup>的上下探头之间,如图 4 所示;用与通常测量  $d_{33}$  时相似的操作,仪器上就会有数值显示,把此值除以斜面角的方向余弦  $\cos \alpha$ (当角度为  $45^\circ$ ,则  $\cos \alpha = 0.707$ ),即可得到  $d_{15}$  值。

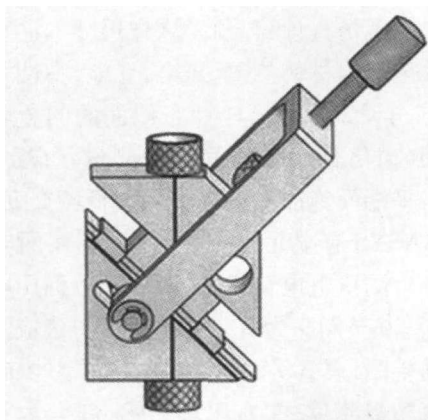


图 3 准静态法测量  $d_{15}$  压电常数专用夹具结构图

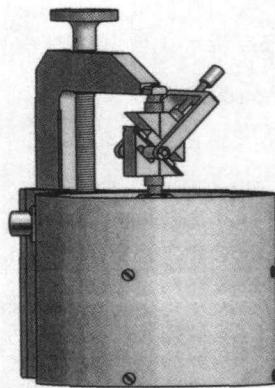


图 4 准静态法测量  $d_{15}$  施力装置与专用夹具配置示意图

## 4 实验

### 4.1 试样制备

先制一尺寸约  $15 \times 14 \times 7\text{mm}$  的压电陶瓷块,在宽度端面(即  $15 \times 7$  端面)烧渗银电极,然后极化。极化后,去除原极化电极,然后在垂直于长度方向上切割出厚度约为  $1\text{mm}$  的多个薄片,在薄片两平面上电镀上电极(参考图5)。

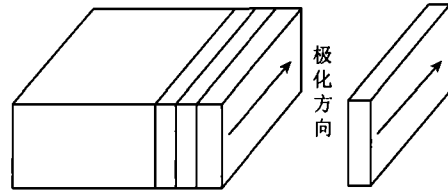


图5 片形切向极化试样制备示意图

### 4.2 准静态法测量 $d_{15}$

把上面制得的薄片试样,按上节所述的方法进行测量。测量结果例示于表1中。

表1 准静态法,动态法测量压电常数  $d_{15}$  结果比较

样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
1. 准静态法(-100Hz)	778	776	782	780	764	790	796	760	778
2. 动态法(-1MHz)	710	707	698	700	700	722	722	685	718
3. 动态法(修正到100Hz)	784	780	770	773	773	797	797	756	779
“1和3结果的”绝对偏差	6	4	12	7	9	7	1	4	6
“1和3结果的”相对偏差%	0.8	0.5	1.5	0.9	1.2	0.9	0.1	0.5	0.8

### 4.3 动态法验证

为证明上述准静态法测量  $d_{15}$  的准确性,对同组被测试样用动态法进行了测量。上文已提到,动态法是最准确的方法,无论国际还是国内,都以动态法作为压电性能测量的标准方法。按国家标准<sup>[7]</sup>,或国际标准<sup>[3]</sup>,利用阻抗分析仪(HP4192)测量试样的串联共振频率  $f_s$ , 并联共振频率  $f_p$ , 以及高次泛音频率  $f_3, f_5$ ; 再由试样尺寸(长度  $l$ , 宽度  $w$ , 厚度  $t$ ) 以及材料密度  $\rho$ , 低频电容  $C^T$ , 即可计算得到动态  $d_{15}$  压电常数, 结果也列于表1中。动态法测量的  $d_{15}$  是在其厚度切变模共振频率附近(约  $1\text{MHz}$ ) 测量得到的, 准静态法是在约  $100\text{Hz}$  频率处测量得到的; 而压电常数与频率有关, 通常随频率升高而单调下降, 为使两法测量的  $d_{15}$  压电常数可资比较, 需把动态法在  $1\text{MHz}$  频率附近测量的  $d_{15}$  压电常数, 按 Berlincourt<sup>[3]</sup> 给出的频率修正曲线进行频率修正, 以得到  $100\text{Hz}$  处的  $d_{15}$ 。表1中同时给

出了直接由动态法测得的和经频率修正后的  $d_{15}$ 。由表1可见, 准静态法测量结果和动态法测量结果(修正到  $100\text{Hz}$  频率后) 非常接近。

### 4.4 有限元仿真验证

为进一步验证准静态法的准确性, 用有限元法作了仿真计算。预设试样尺寸  $l, w, t$ , 密度  $\rho$ , 及全套的材料参数(压电, 介电, 弹性系数矩阵), 再设定试样置于两带斜面的金属压块之间(以仿真实际准静态法测量状况), 在压块水平端面施加  $1$  牛顿  $100\text{Hz}$  低频交变力, 利用 ANSYS 有限元分析程序, 计算在两电极面上产生的压电电荷  $Q$ , 进而计算得到压电常数  $d_{15}$ 。图6至图9为有限元分析所得诸应力分布的结果图, 表2为计算结果。试样为切向极化压电陶瓷薄片, 左右压块为铝, 斜度为  $45^\circ$ , 作用力为  $1$  牛顿, 力频率为  $100\text{Hz}$ 。图6至图9中的坐标系与图1中的有区别, 图6中  $Y$  为压电陶瓷的极化方向(相当于图1中的  $Z$ ), 故

图 6 和图 7 中标示的应力  $S_{XY}$  即相当于切向应力  $T_3$ 。表 2 充分证明了本准静态应力  $T_3$ ，图 8 中的  $S_X$  相当于应力  $T_1$ ，图 9 中的  $S_Y$  相当于应力  $T_3$ 。表 2 充分证明了本准静态法测量压电常数  $d_{15}$  原理上的准确性。

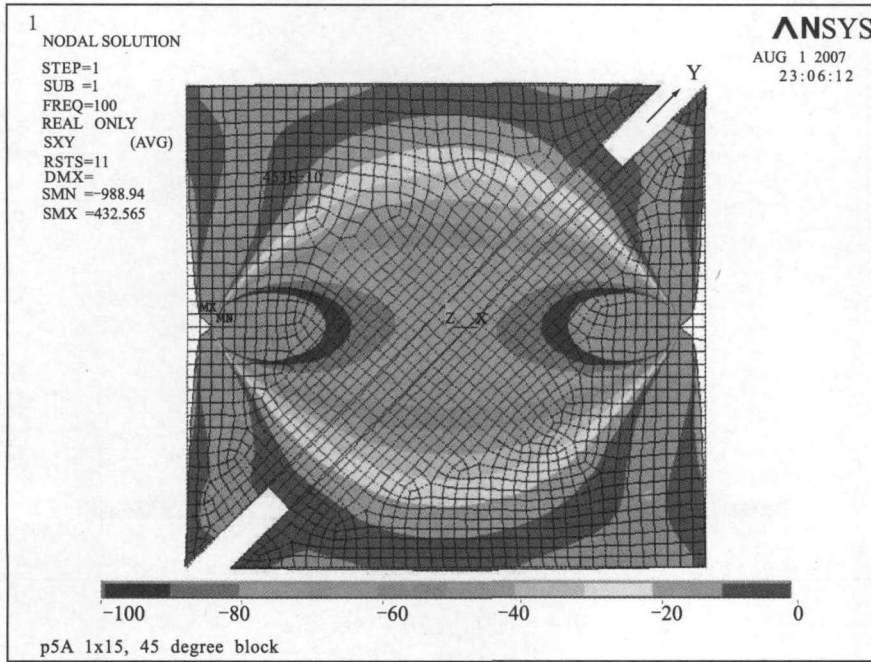


图 6 左右金属压块与试样整体结构内有限元分析切向应力  $T_3$  分布图

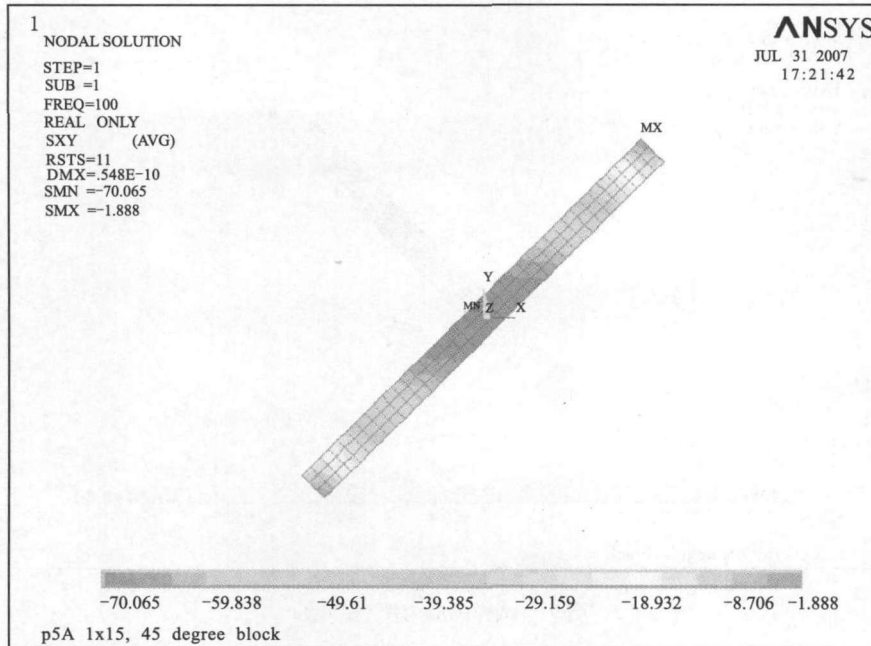


图 7 试样内应力  $T_3$  分布图

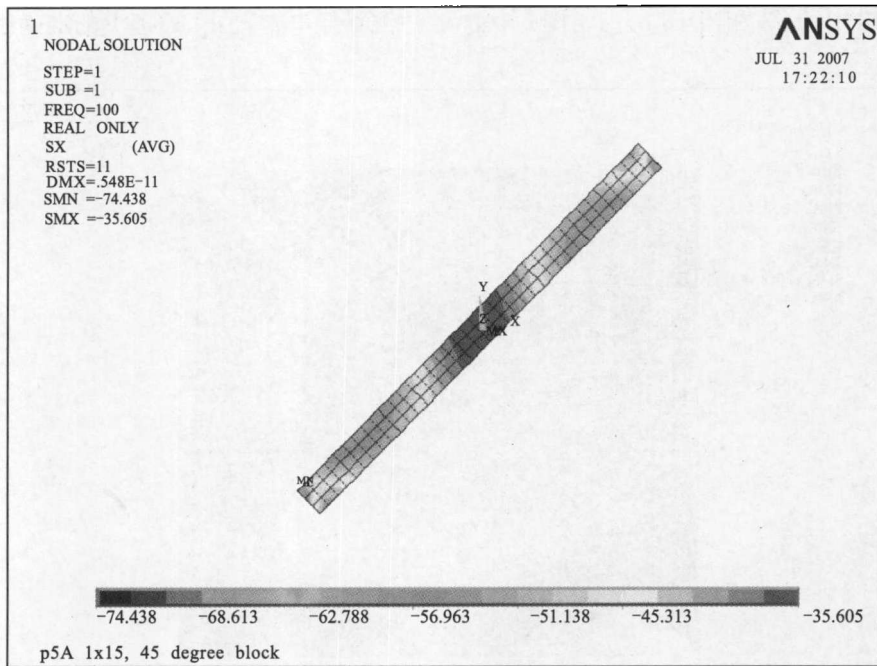
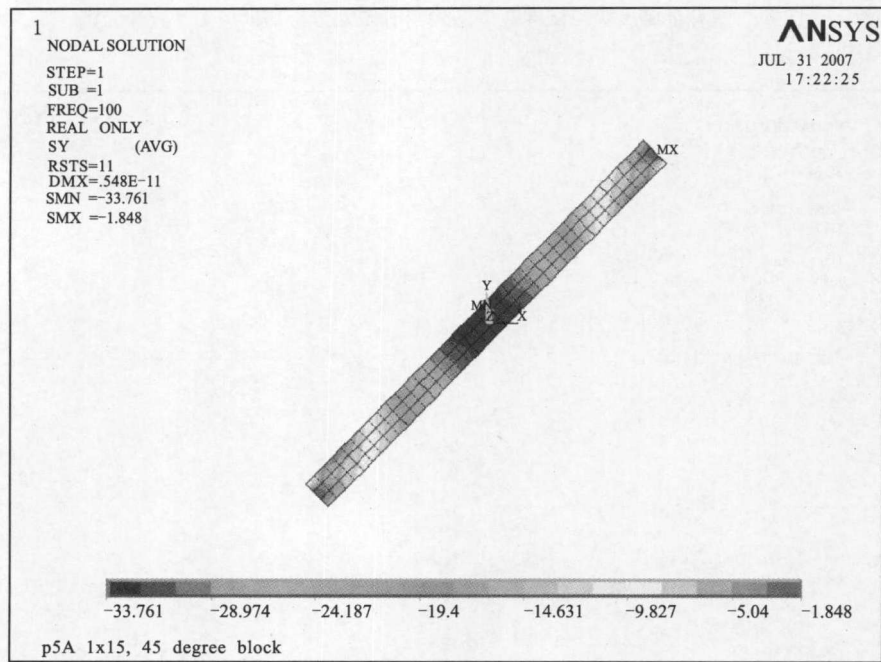
图8 试样内应力  $T_1$  分布图图9 试样内应力  $T_2$  分布图

表2 有限元分析计算结果

夹具斜角	PZT 尺寸 <sub>mm</sub>	仿真得 $Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	仿真得 $d_{15}$ ( $\mu\text{C}/\text{N}$ )	预设 $d_{15}$ ( $\mu\text{C}/\text{N}$ )	预设与仿真之间误差
45°	5 × 15	412.95	584.00	584.00	0.00
45°	2 × 15	412.95	584.00	584.00	0.00
45°	1 × 15	412.95	584.00	584.00	0.00
45°	1 × 25	412.95	584.00	584.00	0.00
60°	2 × 15	292.00	584.00	584.00	0.00

## 5 结语

设计的具有斜面压板的专用夹具,用在准静态  $d_{33}$  测量仪上可方便,快速,准确地测量压电材料的切向压电常数  $d_{15}$ 。如再利用介电常数  $\epsilon_{11}^T$ ,还可进一步计算得到  $g_{15}$ 。

本实验中专用夹具的斜角为 45°,其他角度也同样可用,角度越小,切向分力越大,信噪比越高。此外,本法对试样尺寸没有特殊要求,各种片形切向极化试样均可,不像动态法那样有严格要求,这对实际应用非常重要。

本法原则上只适用于  $d_{11}$ ,  $d_{13}$  压电常数为零的压电材料,好在大多数压电材料的  $d_{11}$ ,  $d_{13}$  压电常数均为零,事实上,在所有 32 晶类的可能具有压电效应的 20 类晶体中,只有 2 种晶类的  $d_{11}$ ,  $d_{13}$  不为零,4 种晶类的  $d_{11}$  不为零。而这 6 种晶类中,目前发现只有属三角晶系 32(D3) 晶类的石英具有压电效应。对于压电石英单晶,虽然其  $d_{11}$  不为零,但由于其  $d_{21}$ ,  $d_{22}$ ,  $d_{23}$  为零,所以通过合适的电极配置可以测量  $d_{25}$  切向压电常数,而石英的另一个切向压电常数  $d_{14}$ ,由于  $d_{14} = -d_{25}$ ,故  $d_{14}$  也就同时得到了。所以,用此专用夹具,就可以测量目前所有常用

的压电材料的切向压电常数。

**致谢** 本实验中所用的试样由中科院声学所易晓星副研究员提供,夹具的设计绘图工作由中科院高能所张童高级工程师协助完成,在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] Cady N G. Piezoelectricity. New York: McGraw Hill, 1946: 243 - 244.
- [2] IEEE standard on Piezoelectricity, ABSI/IEEE Std. 176 - 1987.
- [3] Operating Manual for channel products models CADT 3300 Berlincourt piezo  $d_{33}$  meter, Channel technology Company, Ohio USA.
- [4] 潘潮,陈守六. 准静态法  $d_{33}$  测量仪. 应用声学, 1987, 6 (1): 37 - 38.
- [5] ZJ-6A 型准静态  $d_{33}/d_{31}$  测量仪操作手册,中国科学院声学研究所,北京.
- [6] Manfred K, Robert I, and David L. Calculations and Measurements of the Spatial Piezoelectric Response and the  $d_{15}$  parameter of PZT5A Ceramic. J. Am. Ceram. Soc., 1989, 72(5): 785 - 790.
- [7] 国家标准: GB/T3389.6 - 1997. 压电陶瓷材料性能测试方法,长片厚度切变振动模式。