

# 压电测量

张沛霖 张仲渊 编

国防工业出版社

# 压 电 测 量

张沛霖 张仲渊 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

压电材料日益得到广泛的应用，现在已经深入到各个技术领域，而在研制、生产和应用压电材料或压电器件时，有关压电振子参数和材料参数的测量是十分重要的。本书系统地介绍了压电振子参数和材料参数的各种测量方法。

全书共分八章。第一章扼要地介绍压电材料的各种参数及其物理意义。第二章介绍压电振子的等效电路。第三章介绍压电振子参数的各种测量方法。第四章至第八章介绍材料参数的各种测量方法。

本书可供研制、生产或应用压电材料和压电器件的有关科技人员参考，也可供大专院校有关专业的师生参考。

## 压 电 测 量

张沛霖 张仲渊 编

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张15<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 329千字

1983年4月第一版 1983年4月第一次印刷 印数：0,001—5,700册

统一书号：15034·2440 定价：1.60元

## 前 言

近年来，压电材料的发展极为迅速，其应用日益广泛，已经深入到电子技术、激光、超声、引燃引爆等各个领域。在研制、生产和应用压电材料或压电器件时，有关的压电振子参数和材料参数的测量是极其重要的。因此，国内外对这些参数的测量方法的研究都非常重视。国际上已对小信号参数的测量方法制订了一些测量标准，国内也正在制订某些测量标准。

本书系统地介绍了压电振子参数和材料参数的各种测量原理和测量方法，其中对测量振子参数的传输线路法，以及通过串联谐振频率（或并联谐振频率）测定弹性和压电常数的谐振法作了特别详细的介绍。同时，本书对晶体阻抗计法、导纳圆图法等方法也作了比较详细的介绍，而且还适当地介绍了强场下的材料参数和压电材料的声表面波参数的测量方法。

山东大学压电铁电物理教研室在教学、科研和生产中，对压电测量也做了许多工作，本书的一些内容是这些工作的总结。

本书的编写工作得到了中国科学院上海硅酸盐化学和工学研究所、声学研究所、湖北物理所、四机部标准化所、六机部 601 所、706 所、哈尔滨船舶工程学院，以及 721 厂等单位的不少同志的帮助，尤其上海硅酸盐化学与工学研究所

#### IV

副研究员王永令、助理研究员冯宝康和陈熙同志为我们提供了不少的宝贵资料。王永令同志还审读了本书的第一次修改稿，提出了不少宝贵意见。在本书的编写过程中，张振凡同志做了大量工作。在此谨对这些同志表示衷心的感谢。

由于编者的学识和水平有限，书中定有缺点和错误，恳请广大读者给予批评指正。

编 者

## 目 录

第一章 压电材料参数 .....	1
§ 1-1 压电方程 .....	1
§ 1-2 压电晶体的弹性常数 .....	10
§ 1-3 压电晶体的介电常数 .....	13
§ 1-4 压电晶体的压电常数 .....	16
§ 1-5 压电陶瓷的独立弹性、介电和压电常数 .....	21
§ 1-6 电学品质因数 $Q_e$ 和机械品质因数 $Q_m$ .....	22
一、介质损耗 $\text{tg}\delta_e$ 和电学品质因数 $Q_e$ .....	23
二、机械品质因数 $Q_m$ .....	25
§ 1-7 机电耦合系数 $k$ .....	26
参考资料 .....	30
第二章 压电振子的等效电路 .....	31
§ 2-1 压电振子的谐振特性 .....	32
§ 2-2 压电振子的等效电路 .....	34
一、动态电阻 $R_1$ 等于零的情况 .....	35
二、动态电阻 $R_1$ 不等于零的情况 .....	37
§ 2-3 压电振子的导纳特性和阻抗特性 .....	38
§ 2-4 压电振子等效电路的推导 .....	47
§ 2-5 包含高次振动模式的压电振子等效电路 .....	58
一、横效应振动 .....	58
二、纵效应振动 .....	62
三、等效电路 .....	63
§ 2-6 压电换能器振子的动态特性 .....	65
§ 2-7 各种常用典型压电振子的试验样品 .....	70
一、切型符号 .....	71
二、试样制备 .....	77
参考资料 .....	79

第三章 压电振子参数的测量方法	81
§ 3-1 石英振子的传输测量线路	82
一、测量线路	82
二、传输线路各部分的作用和要求	87
§ 3-2 串联谐振频率 $f_s$ 的测定	89
§ 3-3 动态电容 $C_1$ 和动态电感 $L_1$ 的测定	97
§ 3-4 动态电阻 $R_1$ 的测定	100
一、测量动态电阻 $R_1$ 的常用方法	100
二、测量 $R_1$ 的精确方法	101
§ 3-5 石英振子参数的 $\pi$ 型网络零相位测量法	103
一、测量原理	104
二、 $\pi$ 型网络	105
三、基准电阻	107
四、测试仪表	108
五、测量方法	109
§ 3-6 零相位法用的 T 型网络	110
一、测量原理	111
二、T 型网络	112
三、频率和电阻测量	114
§ 3-7 零相位法测量谐振频率的系统误差分析	114
一、T 型网络的分析	117
二、 $\pi$ 型网络的分析	120
三、系统误差的计算实例	123
§ 3-8 测量压电陶瓷振子的传输线路法	127
一、 $\pi$ 型传输线路	127
二、混合传输线路	128
三、适用的近似方法	133
§ 3-9 晶体阻抗计法	136
一、谐振频率 $f_r$ 和动态电阻 $R_1$ 的测定	137
二、动态电容 $C_1$ 和动态电感 $L_1$ 的测定	138
三、测量误差	139
§ 3-10 中心线法	141
一、基本原理	141

二、测量线路和测量方法 .....	146
§ 3-11 导纳圆图法 .....	148
§ 3-12 矢量电压表法 .....	155
§ 3-13 并联电容 $C_0$ 的测定 .....	158
§ 3-14 机械品质因数 $Q_m$ 的测定 .....	160
参考资料 .....	164
<b>第四章 机电耦合系数的测定 .....</b>	<b>167</b>
§ 4-1 机电耦合系数 $k$ 与弹性、压电以及介电常数的关系 .....	169
一、横向机电耦合系数 $k_{31}$ .....	169
二、平面机电耦合系数 $k_p$ .....	171
三、平面切变机电耦合系数 $k_{36}$ .....	172
四、厚度切变机电耦合系数 $k_{15}$ 、 $k_{24}$ .....	173
五、纵向机电耦合系数 $k_{33}$ .....	175
六、厚度伸缩机电耦合系数 $k_t$ .....	175
七、等静压机电耦合系数 $k_s$ .....	176
§ 4-2 长条片横向长度伸缩振动模式 .....	178
§ 4-3 棒的纵向长度伸缩振动模式 .....	185
§ 4-4 薄圆片的径向伸缩振动模式 .....	189
§ 4-5 薄圆环的径向伸缩振动模式 .....	199
§ 4-6 薄球壳的球径向伸缩振动模式 .....	202
§ 4-7 板的厚度振动模式 .....	205
一、厚度伸缩振动模式 .....	205
二、厚度切变振动模式 .....	208
§ 4-8 泛音比法 .....	212
一、测量原理 .....	212
二、测量方法 .....	218
§ 4-9 近似公式 .....	222
参考资料 .....	229
<b>第五章 弹性、压电和介电常数的测定 .....</b>	<b>230</b>
§ 5-1 泊松比 $\sigma$ 的测定 .....	232
一、利用薄圆片的径向伸缩振动模式 .....	236



## VIII

二、利用方片的轮廓伸缩振动模式 .....	238
三、利用长条片的长度伸缩振动模式和圆片的径向伸缩振动模式 .....	240
四、利用薄圆片的非轴对称振动模式 .....	242
§ 5-2 频率常数 $N$ 、动态电容常数 $\Gamma$ 和电容比 $\gamma$ .....	248
一、频率常数 $N$ .....	248
二、动态电容常数 $\Gamma$ .....	249
三、电容比 $\gamma$ .....	250
§ 5-3 弹性常数的测定 .....	250
一、由长度伸缩振动模式和轮廓切变振动模式测定的弹性 柔顺常数 .....	251
二、由其他振动模式测量的弹性柔顺常数 .....	255
三、弹性常数的修正 .....	255
§ 5-4 压电常数的测定 .....	258
一、电容比法 .....	258
二、动态电容法 .....	260
三、压电应变常数 $d$ 的测定 .....	261
§ 5-5 介电常数的测定 .....	274
一、静电容 .....	274
二、自由介电常数 $\epsilon^T$ 及其测量方法 .....	277
三、受夹介电常数 $\epsilon^S$ 及其测量方法 .....	278
§ 5-6 铌酸锂的弹性、压电和介电常数的测量 .....	280
§ 5-7 压电陶瓷的弹性常数和压电常数的测定 .....	287
一、弹性常数的测量 .....	289
二、压电常数的测定 .....	292
三、压电陶瓷材料参数之间的关系 .....	293
四、压电陶瓷各种振动模式的有关计算公式 .....	296
§ 5-8 弹性和压电常数温度系数的测定 .....	305
一、弹性和压电常数的温度系数及其测量方法 .....	305
二、零温度系数切型 .....	307
§ 5-9 材料参数老化率的测定 .....	312
§ 5-10 影响谐振法测量精确度的因素 .....	314
§ 5-11 复数压电应变常数的测定 .....	317
参考资料 .....	321

<b>第六章 弹性和压电常数的其他测量方法</b> .....	323
§ 6-1 增益-带宽法 .....	323
一、增益-带宽法 .....	323
二、压电陶瓷其他材料参数的测定 .....	327
三、增益-带宽法的优点 .....	331
§ 6-2 迭代法 .....	336
一、基本原理 .....	336
二、迭代方法 .....	338
§ 6-3 静态法和准静态法 .....	340
一、静态法 .....	340
二、准静态法 .....	343
三、等静压压电应变常数 $d_h$ 的测定 .....	344
§ 6-4 超声测量法 .....	345
一、相位比较法 .....	345
二、Q表法 .....	346
三、脉冲法 .....	349
§ 6-5 颗粒试样的测量方法 .....	355
一、卡塔声振荡器法 .....	355
二、电桥法 .....	356
参考资料 .....	359
<b>第七章 强场下的参数测量</b> .....	361
§ 7-1 铁电材料的铁电性 .....	362
§ 7-2 强电场介电常数和介质损耗的测量 .....	365
一、高压电桥法 .....	366
二、电滞回线法 .....	369
三、电阻放电法 .....	375
§ 7-3 非线性区的谐振曲线 .....	378
§ 7-4 抗张强度的测定 .....	381
一、测量原理 .....	382
二、测量方法 .....	384
§ 7-5 一维压缩应力对压电陶瓷特性的影响 .....	385
一、实验装置和试样 .....	386

二、弱电场下材料参数的测量	389
三、强电场介电特性的测量	394
§ 7-6 二维压缩应力对压电陶瓷特性的影响	396
一、二维压缩应力系统	396
二、实验装置和试样	397
三、测定材料参数的方法	399
§ 7-7 等静压对压电陶瓷特性的影响	403
参考资料	406
<b>第八章 声表面波参数测量</b>	<b>407</b>
§ 8-1 声表面波	407
一、瑞利表面波	408
二、声表面波的激发和检测	410
§ 8-2 声表面波速度的测定	412
一、脉冲超声法	413
二、脉冲重叠法	414
§ 8-3 机电耦合系数的测定	417
一、相移测量法	418
二、脉冲测量法	421
三、导纳测量法	422
§ 8-4 表面质点速度的测量方法	423
§ 8-5 声表面波参数的光学测定法	426
一、基本原理	426
二、测量装置和测量方法	428
参考资料	432
附录一 机械品质因数 $Q_m'$ 值的修正系数 $\beta$ 表	434
附录二 $k_{s1}$ 与 $\frac{\Delta f}{f_s}$ 关系的数值表	437
附录三 $k_{s3}$ 与 $\frac{\Delta f}{f_p}$ 关系的数值表	443
附录四 $k_p$ 与 $\frac{\Delta f}{f_s}$ 关系的数值表	449
附录五 某些常用压电材料的材料参数	479
附录六 基本物理量的单位	486

## 第一章 压电材料参数

我们对某些电介质施加机械力时，就会引起它内部的正负电荷中心发生相对位移而产生电的极化，从而导致介质两个表面上出现符号相反的束缚电荷，并且其电荷密度与外力成正比，这种现象称为压电效应，也叫做正压电效应。反之，如果我们将具有压电性的电介质置于外电场中，由于电场的作用，同样也会引起介质内部的正负电荷中心产生相对位移，而这一位移又导致介质发生形变，这种现象称为逆压电效应。

晶体是否具有压电性，通常只取决于晶体结构的对称性。一般说来，有对称中心的晶体不可能具有压电效应，而无对称中心的晶体通常都具有压电性。其中只有 432 点群的晶体属于例外，432 点群的晶体虽然没有对称中心，但是却不具有压电性。

压电晶体独立的弹性、压电和介电常数的数目与晶体的对称性有关。三斜晶系压电晶体的对称性最低，它具有 21 个独立的弹性常数、18 个独立的压电常数和 6 个独立的介电常数。随着压电晶体对称性的提高，其独立的弹性、压电和介电常数的数目愈来愈少。

### § 1-1 压电方程

一块不受外力作用的电介质，在外电场中，其电行为可

以用电场强度  $\mathbf{E}$  和电位移  $\mathbf{D}$  二个电学量来描写。它们之间的关系为

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1-1)$$

式中,  $\epsilon$  是电介质的介电常数, 其单位是法/米。对于各向异性的电介质,  $\epsilon$  是一个二阶对称张量, 共有 9 个分量。如果  $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$  的分量分别用  $E_i$  和  $D_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 来表示, 则方程 (1-1) 可以用矩阵的形式表示为

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (1-2)$$

上式中, 足标说明分量所沿坐标的轴向, 数字 1、2、3 各自与  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴相对应, 如图 1-1 所示。方程式 (1-2) 也常写成下式:

$$D_i = \sum_{j=1}^3 \epsilon_{ij} E_j \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1-3)$$

对于同一电介质, 在无外电场的情况下, 其力学行为可以用应力  $\mathbf{T}$  和应变  $\mathbf{S}$  二个力学量来描写。在弹性限度范围内, 它们之间有线性关系, 遵守虎克定律, 即

$$\mathbf{S} = \mathbf{s} \mathbf{T} \quad (1-4)$$

式中  $\mathbf{s}$ ——弹性柔顺常数矩阵。

应力  $\mathbf{T}$  和应变  $\mathbf{S}$  都是二阶对称张量。如果我们用双足标 ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 来表示它们的分量, 则其矩阵形式分别为

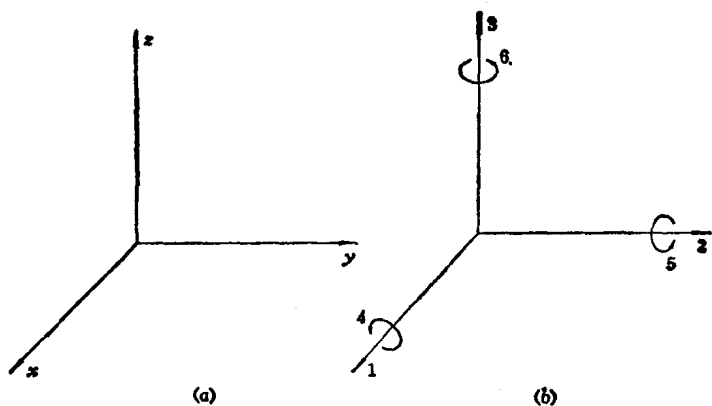


图1-1 直角坐标系

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{12} & T_{22} & T_{23} \\ T_{13} & T_{23} & T_{33} \end{pmatrix} \quad (1-5)$$

$$\text{和} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{pmatrix} \quad (1-6)$$

从式 (1-5) 和式 (1-6) 可以看出,  $\mathbf{T}$  和  $\mathbf{S}$  是对称张量, 都只有 6 个独立分量。因此, 我们可以进一步把双足标简化为单足标, 将  $\mathbf{T}$  和  $\mathbf{S}$  的分量分别表示为  $T_\alpha$  ( $\alpha=1, 2, \dots, 6$ ) 和  $S_\beta$  ( $\beta=1, 2, \dots, 6$ ), 即

$$\begin{aligned} \text{三个法向应力} \quad & T_{11}=T_1, \quad T_{22}=T_2, \quad T_{33}=T_3; \\ \text{三个切向应力} \quad & T_{23}=T_{32}=T_4, \quad T_{13}=T_{31}=T_5, \\ & T_{12}=T_{21}=T_6; \end{aligned}$$

和

$$\text{三个法向应变} \quad S_{11}=S_1, \quad S_{22}=S_2, \quad S_{33}=S_3;$$

$$\begin{aligned} \text{三个切向应变 } 2S_{23} &= 2S_{32} = S_4, \quad 2S_{13} = 2S_{31} = S_5, \\ 2S_{12} &= 2S_{21} = S_6. \end{aligned}$$

于是，我们就可以把式 (1-5) 和 (1-6) 写成一列矩阵形式，即

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad (1-7)$$

把式 (1-7) 代入式 (1-4)，就可得到下式：

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} \quad (1-8)$$

式中， $s_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ) 称为弹性柔顺常数，其单位是  $\text{米}^2/\text{牛}$ 。 $s_{ij}$  的矩阵是联系二阶张量  $\mathbf{T}$  和  $\mathbf{S}$  的四阶张量，共有 81 个分量。在简化了应力和应变张量的足标以后， $s_{ij}$  矩阵就只有 36 个分量。另一方面，因为它是对称张量，所以其独立分量最多只有 21 个。式 (1-8) 也可以写为

$$S_i = \sum_{j=1}^6 s_{ij} T_j \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (1-9)$$

或者写为

$$T_i = \sum_{j=1}^6 c_{ij} S_j \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (1-10)$$

式中,  $c_{ij}$  称为弹性刚度常数, 其单位是 牛/米<sup>2</sup>。 $c_{ij}$  矩阵的形式与  $s_{ij}$  矩阵的形式完全相同, 其独立分量也最多只有 21 个。 $c_{ij}$  矩阵和  $s_{ij}$  矩阵之间具有互为倒置矩阵的关系, 即

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{pmatrix}^{-1} \quad (1-11)$$

电介质的压电性涉及到电学和力学行为之间的相互作用, 我们可以用二个电学量和二个力学量之间的线性关系, 即压电方程来近似地描写这种相互作用。假定取应力  $T_\alpha$  ( $\alpha=1, 2, \dots, 6$ ) 和电场强度  $E_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为自变量, 而应变  $S_\beta$  ( $\beta=1, 2, \dots, 6$ ) 和电位移  $D_j$  ( $j=1, 2, 3$ ) 为因变量, 则压电方程为<sup>[1][2]</sup>



$$\begin{aligned}
 S_1 &= s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + s_{14}^E T_4 + s_{15}^E T_5 + s_{16}^E T_6 \\
 &\quad + d_{11} E_1 + d_{21} E_2 + d_{31} E_3 \\
 S_2 &= s_{21}^E T_1 + s_{22}^E T_2 + s_{23}^E T_3 + s_{24}^E T_4 + s_{25}^E T_5 + s_{26}^E T_6 \\
 &\quad + d_{12} E_1 + d_{22} E_2 + d_{32} E_3 \\
 S_3 &= s_{31}^E T_1 + s_{32}^E T_2 + s_{33}^E T_3 + s_{34}^E T_4 + s_{35}^E T_5 + s_{36}^E T_6 \\
 &\quad + d_{13} E_1 + d_{23} E_2 + d_{33} E_3 \\
 S_4 &= s_{41}^E T_1 + s_{42}^E T_2 + s_{43}^E T_3 + s_{44}^E T_4 + s_{45}^E T_5 + s_{46}^E T_6 \\
 &\quad + d_{14} E_1 + d_{24} E_2 + d_{34} E_3 \\
 S_5 &= s_{51}^E T_1 + s_{52}^E T_2 + s_{53}^E T_3 + s_{54}^E T_4 + s_{55}^E T_5 + s_{56}^E T_6 \\
 &\quad + d_{15} E_1 + d_{25} E_2 + d_{35} E_3 \\
 S_6 &= s_{61}^E T_1 + s_{62}^E T_2 + s_{63}^E T_3 + s_{64}^E T_4 + s_{65}^E T_5 + s_{66}^E T_6 \\
 &\quad + d_{16} E_1 + d_{26} E_2 + d_{36} E_3 \\
 D_1 &= d_{11} T_1 + d_{12} T_2 + d_{13} T_3 + d_{14} T_4 + d_{15} T_5 + d_{16} T_6 \\
 &\quad + \epsilon_{11}^T E_1 + \epsilon_{12}^T E_2 + \epsilon_{13}^T E_3 \\
 D_2 &= d_{21} T_1 + d_{22} T_2 + d_{23} T_3 + d_{24} T_4 + d_{25} T_5 + d_{26} T_6 \\
 &\quad + \epsilon_{21}^T E_1 + \epsilon_{22}^T E_2 + \epsilon_{23}^T E_3 \\
 D_3 &= d_{31} T_1 + d_{32} T_2 + d_{33} T_3 + d_{34} T_4 + d_{35} T_5 + d_{36} T_6 \\
 &\quad + \epsilon_{31}^T E_1 + \epsilon_{32}^T E_2 + \epsilon_{33}^T E_3
 \end{aligned} \tag{1-12}$$

式中  $s_{\alpha\beta}^E$ ——电场强度  $\mathbf{E}$  为零 (或常数) 时的弹性柔顺常数, 我们通常称为短路弹性柔顺常数, 其单位是  $\text{米}^2/\text{牛}$ ;

$\epsilon_{ij}^T$ ——应力  $\mathbf{T}$  为零 (或常数) 时的介电常数, 其单位是  $\text{法}/\text{米}$ ;

$d_{ja}$ ——压电应变常数, 其单位是  $\text{库}/\text{牛}$  (或  $\text{米}/\text{伏}$ ),

方程组 (1-12) 的矩阵表示式为