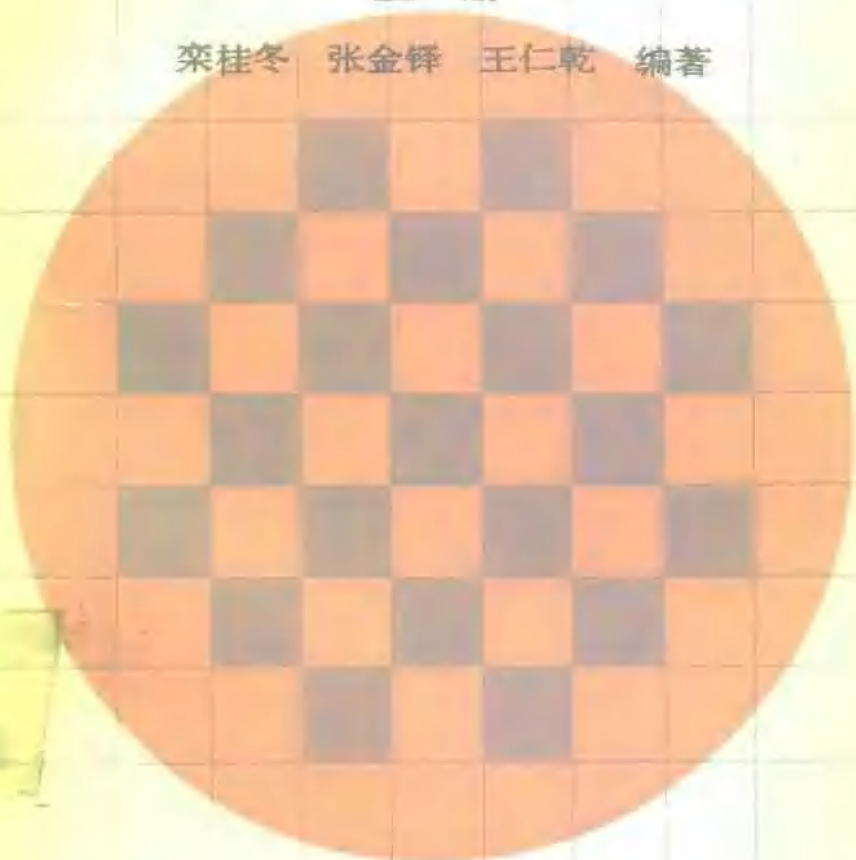


# 压电换能器 和换能器阵

上册

栾桂冬 张金铎 王仁乾 编著



北京大学出版社

TB 552  
L91P  
1

346729

# 压电换能器和换能器阵

上册

李桂冬 张金铎 王仁乾 编著



北京大学出版社



## 压电换能器和换能器阵

上册

栾桂冬 张金铎 王仁乾 编著

责任编辑：李采华

北京大学出版社出版

(北京大学校内)

北京大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

850×1168毫米 32开本 9.5印张 224千字

1990年7月第一版 1990年7月第一次印刷

印数：0001—2,000册

ISBN 7-301-01094-X/O·184

定价：4.80元

## 内 容 简 介

本书内容由浅入深，着重阐明压电换能器和换能器阵的基础理论，对换能器和换能器阵中所涉及的重要问题作了重点讨论并概述了发展动态。

全书分上、下两册，共十五章。上册包括第一章至第九章，下册包括第十章至第十五章。第一章引言；第二、三、四章为压电换能器的基础知识；第五、六、七、八章介绍几种常见的典型压电换能器；第九章介绍暂态效应；第十章讨论压电弹性体的数值分析方法；第十一章介绍换能器主要参数的测量方法；第十二章为换能器阵的理论基础；第十三、十四章介绍均匀和非均匀换能器阵；第十五章简介几种新型换能器阵。

本书可作为高等院校声学专业换能器和换能器阵课程的教材，亦可供从事声学研究及其他有关专业的大专院校教师及工程技术人员参考。

0261/10



## 序

换能器或称换能元件，是现代应用科学中有广泛用途的元件，用它可以将一种形式的能（含信息或不含信息）转换为另一种形式的能，以便加工处理和应用。

换能器有多种不同的类型，如声光、光电、热电等，但本书所讨论的是压电换能器及用它形成的阵。压电换能器是利用某些材料的压电效应作成的换能器，它可以把声能转换为电能或反过来把电能转换为声能，使它在媒质中传播，以输送信息或获取有关该媒质的信息。在应用中常把多个压电换能器形成阵以获得某种特殊效果。压电换能器和换能器阵广泛用于声学领域中各个分支学科，是声学 and 声学技术研究与应用中的重要元件。

众所熟知，声学是一门渗透性很强的学科。很多学科中应用了声学的原理或技术，如医学中的超声成像、材料科学中的无损评价、农业中对某些种子的处理等。近年来随着科学技术的进步，使声学各个分支迅速发展。声学的发展特别是声学技术的发展需要换能器，因而对压电换能器的研制提出了更高的要求。

在此书的写作过程中，除与作者讨论一些内容及内容的安排外，我详细地阅读了各个章节，并征询学过该课学生的意见。据此，我认为该书比较系统地阐明了压电换能器及换能器阵的基本理论，具有一定的学术水平和实用价值，适合大学本科三、四年级学生及从事声学研究的工作者使用或参考。它填补了这方面教材或参考书的不足。

杜建耀

1987年7月15日

写于北京大学

## 编 者 的 话

本书是根据作者多年来讲授换能器和换能器阵课的讲义修改补充而成的，内容的叙述力图由浅入深、循序渐近。书中侧重讲解基本概念和基础理论，以便初学者易于理解和掌握。依据换能器和换能器阵的应用和研究的需要，对其中的主要问题作了重点讨论，读者若有兴趣进一步从事较深入的研究，可参阅每章后的有关参考文献。

全书分上、下两册，共十五章。上册包括第一章至第九章，下册包括第十章至第十五章。第一章引言，叙述换能器的地位、作用和发展简况。第二章讨论由于晶体的各向异性对介电性、弹性和压电性带来的影响。第三章叙述评价压电材料的主要参数，从发展的角度介绍了常用的几种压电材料和新型压电材料。第四章详细推导压电陶瓷常用振动模梅森等效电路。第五章至第八章讨论几种常用的典型压电换能器，推导了它们的等效电路和主要参数的表达式。第九章介绍压电换能器的暂态效应。第十章讨论用有限差分法和有限元法处理压电弹性振动体问题。第十一章介绍当前常用的换能器主要参数的测量方法。第十二章是换能器阵的理论基础。第十三章介绍几种典型的均匀换能器阵，推导了指向性函数和主要参数的表达式。第十四章讨论非均匀阵的处理和设计方法。第十五章简介几种新型换能器阵。

本书第一章、第二章（其中部分节段由张金铎同志起草）、第三、四、五、六、七章和第九章由栾桂冬同志编写，第八章、第十章和第十一章由张金铎同志编写，第十二、十三、十四和第十五章由王仁乾同志编写。本书特聘请杜连耀教授审稿。

由于换能器的研究内容涉及的面很广，要在有限的篇幅内论

及换能器研究中所有问题是困难的，本书仅侧重于基础理论的阐述和重点问题的讨论。由于作者水平所限和时间仓促，错误不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1987年7月30日

于北京大学

# 符 号 表

## 一、拉丁字母

- $A$  常数, 幅值, 频率比, 总吸收量, 矩阵, 哈密顿作用量
- $A_G$  阵的空间处理增益
- $A_{H}$  高频阵非归一化指向性函数
- $\sim$
- $A_i$  第  $i$  阵元复振幅
- $A_L$  低频阵非归一化指向性函数
- $A_1, A_2, A_3$  常数
- $a$  半径, 加速度, 常数, 指条宽度, 换能器最大尺寸
- $a_i$   $i$  阵元接收信号振幅, 灵敏度
- $a_1, a_2, a_3$  系数
- $B$  电纳, 归一化导纳因子, 质量比, 常数, 参数,  $n$  阶列向量
- $B_A$  声纳
- $B/A$  非线性参量
- $B_M$  力纳
- $B_F$  振子的等效并联电纳
- $B_1, B_2$  常数
- $b$  归一化补偿因子, 常数, 半径, 宽度, 指条间隔
- $b(\alpha, \theta, \omega)$  声强指向性函数
- $b(\alpha, \theta, \Delta\omega)$   $\Delta\omega$  带宽功率指向性函数
- $b_1$  静态电纳
- $b_2$  动态电纳
- $C$  电容, 归一化导纳因子, 比例系数,  $n$  阶列向量
- $C_A$  声顺
- $C_{A-B}$   $A-B$  端之间的杂散电容
- $C_D$  部分夹紧电容
- $C_d$  等效电容
- $C_L, C_{L1}, C_{L2}$  负载电容



$C_M$  力顺

$C_m, \bar{C}_m$  等效柔顺性

$C_D$  动态电容

$C_c$  夹絮电容

$C_1$  自由电容

$C_0$  并联电容, 静态电容

$C_0'$  低频电容

$C_1$  动态电容

$C_1, C_2$  常数

$c$  膨胀系数, 声速, 常数

$c$  弹性常数矩阵

$c, c'$  老化系数

$c_{k1}(k, k=1, 2, \dots, 6)$  弹性常数分量

$D$  电位移, 能量密度, 直径, 损耗因素, 常数, 指向性函数

$D$  (肩标) 表示在固定电位移时

$D$  电位移矩阵

$D_d$  低频指向性函数

$D_{EP}$  虚源指向性函数

$DI$  指向性指数

$D_i(i=1, 2, 3)$  电位移分量

$D_i$  第  $i$  个子阵的指向性函数

$D_x(\theta)$  乘积阵指向性函数

$D_z$  电位移在  $z$  方向分量

$D(\alpha, \theta)$  指向性函数

$D_0$  剩余式偏置电位移

$d$  压电常数, 直径, 厚度, 宽度, 距离, 位移, 确定频率的尺寸

$d$  压电常数矩阵

$d_{FH}$  发射器和互易换能器声中心间的距离

$d_k$  等静压压电常数

$d_{ij}$  阵元  $i, j$  间距

$d_{ik}(i=1, 2, 3; k=1, 2, \dots, 6)$  压电常数

$d(j)$  引导信号(离散)

$d_p$  平面压电常数

$d(t)$  引导信号(连续)

- d.** 平均距离
- E** 电场强度, 电动势, 电压, 能量, 能量密度, 杨氏模量, 带数, 单位矩阵
- $E$  (肩标) 表示在固定电场时
- E** 电场强度矩阵
- $E_i$  ( $i=1,2,3$ ) 电场强度分量
- $E_r, E_\theta, E_\phi$  柱坐标中电场强度分量
- $E_r, E_\theta, E_\phi$  球坐标中电场强度分量
- $\bar{E}[x]$  对系踪平均
- E** 每对电极激发的振幅
- e** 压电常数, 电动势, 电压
- $e$  压电常数矩阵
- $e$  声线单位向量
- $e_i$  第  $i$  个单元
- $e_{ik}$  ( $i=1,2,3; k=1,2,\dots,6$ ) 压电常数
- $e$  传输网络输出电压
- F** 力, 延展系数, 自由能
- F** 表面力面密度
- $\{F\}$  总载荷向量
- $F_j$  单元  $j$  上的电压  $V_j$  产生的压电力
- $F_1, F_2$  晶片或盖板两端受力
- $F_{10}, F_{11}$  盖板两端受力
- f** 频率, 力
- 体力体密度
- $f_0$  反共振频率(零电纳)
- $f_m$  最大导纳频率
- $f_{m1}$  最大传输频率
- $f_{mTL}$  振子和  $C_L$  组合后的最大传输频率
- $f_0$  最小导纳频率
- $f_{mT}$  最小传输频率
- $f_p$  并联共振频率
- $f_r$  共振频率(零电纳)
- $f_3$  动态共振频率
- $f_{3L}$  振子和  $C_L$  组合后的动态共振频率
- $f_{3L1}$  振子与  $C_{L1}$  的动态共振频率

$f_{SL}$ : 振子与 $C_{L1}$ 的动态共振频率

$(f_0)_a$ : 空气中机械共振频率

$(f_0)_d$ : 媒质中机械共振频率

$f_1, f_2$ : 半功率点频率

$G$  切变弹性模量, 拉密常数, 电导, 吉布斯函数

$G_A$  声导

$G_b$  属于 $G$ 内部的节点集合, 内点

$G_M$  力导

$G_0$  振子的等效并联电导

$g$  压电常数, 重力加速度, 显示器的识别系数

$g$  压电常数矩阵

$g_{ik} (i=1,2,3; k=1,2,\dots,6)$  压电常数

$g(\alpha, \theta)$  噪声场的指向性函数

$g$ , 动态电导

$H$  磁场强度, 损耗功率/单位体积, 焓, 哈密顿函数, 参数, 高频阵滤波网络系统函数

$h$  压电常数, 高度, 厚度

$h$  压电常数矩阵

$h_{ik} (i=1,2,3; k=1,2,\dots,6)$  压电常数

$I$  电流, 声强, 惯性矩, 单位矩阵

$I_F$  加到发射器输入端的电流

$I_{max}$  最大声强

$I_r$  某一距离上的声强

$i$  泛音次数, 电流

$i_i$  对传输网络的输入电流

$J$

$J$ , 自由场球面波互易常数

$J$ , 以分贝计的自由场球面波互易常数

$K$  磁致伸缩常数, 回转半径, 相对介电常数, 等效刚度, 矩阵

$[K]$  总刚度矩阵

$K_D$  机电耦合系数

$[K_{11}]$  总刚度矩阵

$[K_{11}^0]$  单元刚度矩阵

$[K_{12}]$  总机电耦合矩阵

$[K_{12}^0]$  单元机电耦合矩阵

$[K_{11}]$  总电容矩阵或总静电矩阵

$[K_{22}^0]$  单元电容矩阵

$k$  波数, 衰变常数, 机电耦合系数, 等效劲度

$k_d$  差频波波数

$k_i^e$  第  $i$  个模式有效机电耦合系数

$k_{eff}$  有效机电耦合系数

$k_p$  平面机电耦合系数

$k_t$  厚度机电耦合系数

$k_1, k_2$  前后盖板的波数

$k_{2s}$  厚度剪切机电耦合系数

$k_x$  横向机电耦合系数

$k_y$  纵向机电耦合系数

$L$  电感, 距离, 拉格朗日函数, 周期节长, 线阵长度, 低频滤波网络系统函数

$L_s$  与振子并联的电感

$L_d$  动态电感

长度

$l_0$  单个晶片长度

$l_1, l_2$  晶片堆两部分的长度

$l_3, l_4$  前后盖板的长度

$M$  质量, 力矩, 弯矩, 振子的品质, 接收电压灵敏度, 等效质量

$M$  接收电压灵敏度级

$[M]$  总质量矩阵

$M_A$  声质量

$M_{dB}$  旁瓣级

$[M^0]$  单元质量矩阵

$M_H$  互易换能器的自由场灵敏度

$M_i$  接收器的自由场电流灵敏度

$M_w$  等效质量

$M_r$  传输网络终端品质, 接收灵敏度级的基准值

$M_v$  接收器的自由场电压灵敏度

$M_{0.0}$  基准灵敏度

$m$  质量, 喇叭的展宽常数, 宽度, 长度

$m$  主波束方向的单位向量

- $m_A, m_i$  阵元数  
 $m$  棒的质量  
 $m_M$  棒的等效质量  
 $m_m$  机械振动系统等效质量  
 $m_r$  辐射回振质量  
 $N$  数, 频率常数, 匝数, 指数对数, 阵元数, 幅度  
 $[N^*]$  插值位移函数矩阵  
 $N_i, N_i, N_m, N_e$  插值位移基函数  
 $NR$  噪声降低  
 $N$  圆弧阵阵元数  
 $n$  机电转换系数, 泛音级数, 法线方向  
 $n_i(t)$  阵元  $i$  输出电压的噪声分量  
 $n_1$  第一象限内栅瓣数  
 $P$  压力, 周长, 应变能  
 $[P]$  总机电耦合向量  
 $P_A$  发射阵辐射功率  
 $P_e$  声源功率, 发射声功率, 总发射声功率  
 $P_{d_0}$  介质损耗功率  
 $P_e$  有功电功率  
 $[P_c]$  单元机电耦合向量  
 $\{P^e\}$  单元面力载荷向量, 单元体力载荷向量  
 $P_{e_0}$  电磁损耗功率  
 $P_i (i=1, 2, 3)$  电极化强度分量  
 $P_m$  机械功率, 有功机械功率  
 $P_{m_0}$  摩擦损耗功率, 机械损耗功率  
 $P_r$  实际作用在接收器表面的声压  
 $P_{\Sigma}$  合成声场  
 $P_0$  大气压力  
 $p$  声压, 电极化强度, 数, 拉氏变换参数  
 $p_0$  平均声压  
 $p_n$  差频波声压  
 $p_f$  自由场声压  
 $p_t$  瞬时声压  
 $p_m$  最大声压

- $Q$  电荷, 声源强度, 品质因数, 自由面电荷密度, 阵接收噪声场的协方差矩阵
- $(Q_s)$  单元等效面电荷
- $Q_m$  机械品质因数
- $Q_E$  电学品质因素
- $q$  电荷, 单位面积所受外力, 自由体电荷密度
- $q_0$  差频波源密度函数
- $(q^e)$  单元等效体电荷
- $q_i$  虚源的等效密度函数
- $q_{s1}, q_{s2}$  电致伸缩系数
- $R$  半径, 曲率半径, 电阻, 求解区域
- $R_A$  声阻
- $R_s$  在  $f_s$  时的电阻
- $R_0$  等效电阻
- $R(d)$  阵间相关函数
- $R_e$  振子的等效串联电阻
- $R_M$  力阻, 等效机械阻, 机械摩擦阻
- $R'_M$  单位面积的机械摩擦阻
- $R_N$  噪声的相关函数
- $R_n$  损耗电阻
- $R_r$  在  $f_r$  时的电阻
- $R_r$  辐射声阻, 信号的相关函数
- $R'_a$  单位面积的辐射阻
- $R_{st}$  标准电阻
- $R_T$  端接电阻
- $R_i$  动态电阻, 串联电阻
- $R_{iL}$  振子和  $C_L$  组合后的动态电阻
- $r$  到声源的距离, 半径, 电容比, 反射系数, 可变电阻
- $r_s$  声阻率
- $r_i$  阵元  $i$  的矢径
- $r_{ij}$  阵元  $i$  和  $j$  间的矢径
- $r_{1,2}$  位移反射系数
- $r_{2,1}$  二维空间阵元  $i, j$  间矢径
- $r_{3,1}$  三维空间阵元  $i, j$  间矢径
- $S$  距离, 面积, 平面, 力矩, 应变分量, 闭区域  $V$  的边界面, 阵接收信号的协方差矩阵

$S$  (肩标) 表示在固定应变时

$S$  应变张量, 应变分量矩阵

$S'$  面积, 平面, 截面

$S_k$  ( $k=1, 2, \dots, 6$ ) 应变分量

$S_i$  发送电流响应

$S_i$  发送电流响应级

$S_{iP}$  发射器的发送电流响应

$S_{1i}$  发送电流响应级的基准值

$S_r, S_\theta, S_\phi$  柱坐标中的正应变

$S_r, S_\theta, S_\phi$  球坐标中的正应变

$S_{r\theta}, S_{\theta r}, S_{r\phi}$  柱坐标中的切应变

$S_{r\theta}, S_{\theta r}, S_{r\phi}$  球坐标中的切应变

$S_v$  发送电压响应

$S_{v1}$  发送电压响应的基准值

$S(\omega)$  功率谱函数

$S_1, S_2$  盖板的截面积

$\mu$  压缩系数, 灵敏度, 柔性常数

$\mathcal{S}$  柔性常数矩阵

$s_{kk}$  ( $k=1, 2, \dots, 6$ ) 柔性常数分量

$e_i$  发射电流灵敏度

$e_i(t)$  阵元  $i$  输出电压的信号分量

$e_0$  给定电荷的表面

$e_0$  发射电压灵敏度, 给定位移的边界

$e_0$  给定应力的边界

$e_\phi$  给定电位的表面

$T$  应力分量, 力矩, 温度, 动能, 周期, 传递比

$T$  (肩标) 表示在固定应力时

$T$  应力张量, 应力分量矩阵

$\{T\}$  总等效自由电荷

$T_k$  ( $k=1, 2, \dots, 6$ ) 应力分量

$TL$  传递损失

$T_N(Z)$   $N$  阶契比雪夫多项式

$T_r, T_\theta, T_\phi$  柱坐标中的正应力

$T_r, T_\theta, T_\phi$  球坐标中的正应力

- $T_{r\theta}, T_{\theta r}, T_{r\phi}, T_{\phi r}$  柱坐标中的切应力  
 $T_{r\theta}, T_{\theta r}, T_{r\phi}, T_{\phi r}$  球坐标中的切应力  
 $t$  时间, 厚度, 圆柱或球壳的厚度与外直径之比  
 $U$  内能, 流量, 弹性能, 电压  
 $\{U\}$  节点位移向量  
 $U_A$  纯弹性能  
 $U_{AB}$  机变机的机电耦合能  
 $U_{EA}$  电变机的机电耦合能  
 $U_E$  纯电能  
 $U_r$  单位面积的电能, 弹性自能密度  
 $U_A$  介电自能密度  
 $U_M$  换能器的总机械能  
 $U_{ME}$  机电耦合能  
 $U_m$  弹性应变能, 互弹性介电能量密度  
 $u$  弹性位移, 弹性能密度, 响应分布函数  
 $u$  位移向量, 插值位移函数  
 $u_e$  电能密度  
 $u(x, t)$  空间变量  $x$  和时间变量  $t$  的函数  
 $V$  体积, 容积速度, 位能, 电位, 电压, 列矩阵  
 $\{V\}$  节点电位向量  
 $v$  声速, 质点速度  
 $v_e$  级联后晶片中声速  
 $v_s$  声表面波速  
 $v(x)$  响应(孔径)函数  
 $v_w$  水中声速  
 $v_1, v_2$  前后盖板中声速  
 $W$  功和能, 功率, 换能器孔径  
 $W$  权重向量矩阵  
 $W_s$  声能  
 $W_E$  外界电场力所作的功  
 $W_m$  外界机械力所作的功  
 $W_{N1}$  阵输入噪声平均功率  
 $W_{N0}$  阵输出噪声平均功率  
 $W_o$  阵输出总功率均方值



$W_{i1}$  阵输入信号平均功率

$W_{i0}$  阵输出信号平均功率

ω 宽度, 挠度

X 体积位移, 归一化频率, 电抗, 矩阵

$X_A$  声抗

$X_{A-B}$  杂散电容  $C_{A-B}$  的电抗

$X_e$  振子的等效串联电抗

$\{X_j\}$  第  $j$  个特征向量, 属于  $\lambda_j$  特征值的特征向量

$X_M$  力抗, 机械抗

$X_{m1}$  在最大传输频率时的归一化频率因子

$X_N$  归一化频率

$X_T$  动态共振频率时  $C_T$  的电抗

$X_c$  在串联共振时分路 (并联) 电容的电抗

$X_d$  振子串联臂的动态电抗

z 距离, 位移

$z_s$  声抗率

$z_i$  阵元  $i$  接收信号的复向量

$z_i(t)$  阵元  $i$  输出电压

Y 电导纳, 杨氏模量

$Y_A$  声导纳

$Y_M$  力导纳

$Y_m$  振子在  $f_m$  时的导纳 (最大导纳)

$Y_n$  振子在  $f_n$  时的导纳 (最小导纳)

$Y_s$  静态导纳

$Y_s, Y'_0$  杨氏模量

$Y_d$  动态导纳

y 随时间变化的某一参数

Z 电阻抗

$Z_A$  声阻抗

$Z_e, Z_b, Z_{m1}, Z_{m2}$  等效机械阻抗

$Z_{a12}, Z_{b12}, Z_{e1}, Z_b$  前后盖板的机械阻抗

$Z_c$  电负载

$Z_{TJ}$  发射器 F 和接收器 J 间的转移电阻抗

$\hat{Z}_{11}$  互阻抗系数