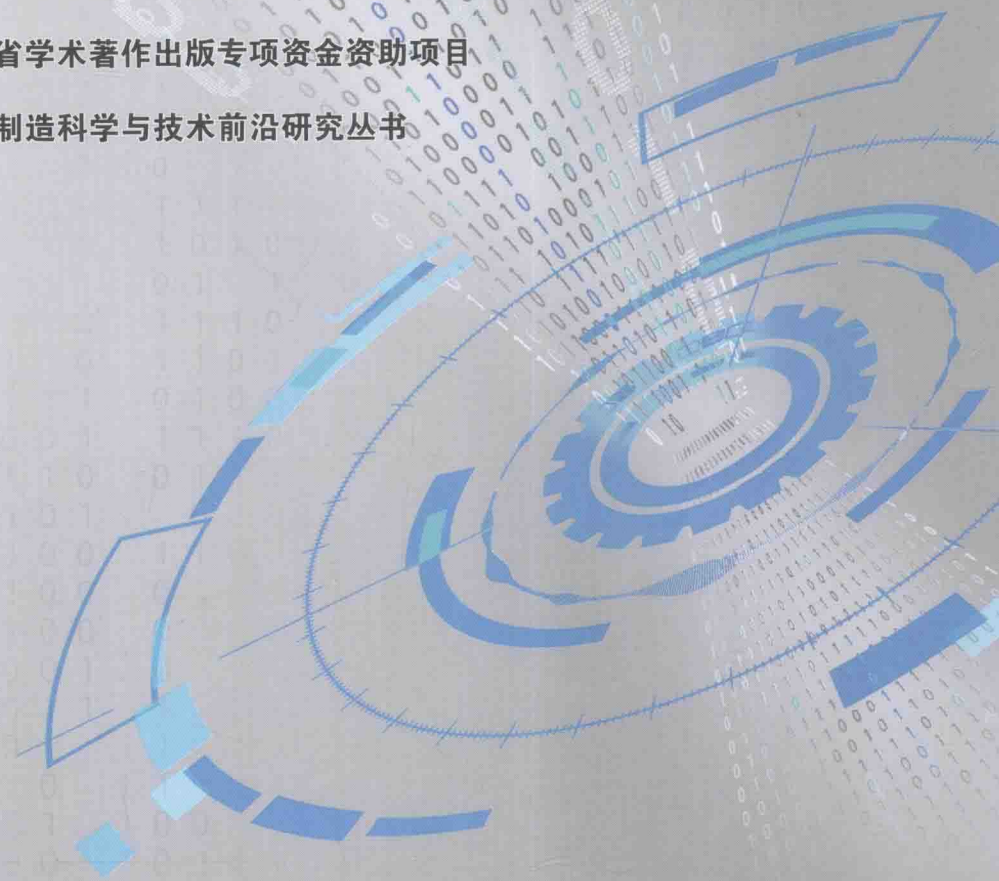




国家出版基金资助项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书



# 压电换能器设计原理

Design Principle for Piezoelectric Transducer

王德石 张 恺 著

 武汉理工大学出版社  
WUTP Wuhan University of Technology Press



国家出版基金资助项目  
湖北省学术著作出版专项资金资助项目  
数字制造科学与技术前沿研究丛书

# 压电换能器设计原理

王德石 张 恺 著

武汉理工大学出版社  
· 武 汉 ·

## 内 容 提 要

在介绍压电材料与压电方程等基本知识的基础上,以声呐阵元、钹式换能器的结构分析与设计为典型案例,论述了压电换能器振动等效机电模型与有限元模型的建立与分析方法,并介绍了压电超声马达、压电变压器、振动能量收集器等压电换能器设计原理。

本书可供从事机械动力学、力学与控制、微机电系统、声呐等领域的工程设计人员、相关领域科研院所的科研人员与大专院校的高年级学生、研究生参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

压电换能器设计原理/王德石,张恺著. —武汉:武汉理工大学出版社,2016.12  
(数字制造科学与技术前沿研究丛书)  
ISBN 978-7-5629-4668-7

I. ①压… II. ①王… ②张… III. ①压电换能器—设计 IV. ①TN712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 298837 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:戴皓华

责任校对:夏冬琴 张明华

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:14

字 数:293 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1—1500 册

定 价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

# 数字制造科学与技术前沿研究丛书 编审委员会

顾问：闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员：周祖德 丁 汉

副主任委员：黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员：田 高

委 员(按姓氏笔画排列)：

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	王德石
毛宽民	冯 定	华 林	关治洪	刘 泉
刘 强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张 霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘 书：王汉熙

总责任编辑：王兆国

# 总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,正在兴起全球新一轮数字化制造的浪潮。发达国家特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,最近大力倡导“再工业化、再制造化”的战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)与制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及整个产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程

的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批我国制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成,提供了他们宝贵的经验和知识,付出了他们辛勤的劳动成果,在此谨表示最衷心的感谢!

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》的出版得到了湖北省学术著作出版专项资金项目的资助。对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等我国制造领域资深专家及编委会讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇3个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

# 前 言

压电换能器是利用材料的压电效应工作的一切装置,该称谓沿用了声呐中的水声装置所用的术语。自发现压电效应以来,其第一个应用领域就是探测水下目标。在第二次世界大战中,潜艇因其隐蔽性而成海战利器,探测水下目标就成为迫切需要解决的军事问题。声场是水下最重要的、可用的物理场。主动发射声波,并通过水下目标的反射声波判断是否存在水下目标的军事需求,迫切需要压电材料。天然的石英成为首选材料,将交变电流施加在其上,产生交变位移驱动海水,在水介质中形成周期变化的微幅压力场,即声波。从现代声呐技术的角度来看,这种最原始的“主动声呐”仅仅是一种完成电能与压力转换的单个压电换能器,产生的声波不具备指向性;为了增加空间增益,需要将多个压电换能器以某种形式组成阵列,成为水声基阵,如直线排列为线列阵,按照一定安装形状排列为共性阵,最简单的情形就是两个压电换能器组成的偶极子,它是分析基阵性能的基础。所以在声呐领域,由多个压电换能器组成的水声基阵称为换能器基阵,则相应地将单个压电换能器称为换能器阵元,有时候为了简便起见干脆将两者都简称为换能器。现代声呐进一步通过信号处理技术提高了时间增益,如此一来,使得换能器基阵仅仅是声呐中的一部分,是声呐的最基本的前端部分,是完成感应的水声装置,这也是压电换能器概念中一种狭义的内涵。为了增加隐蔽性,当今大部分声呐只是通过检测目标产生的噪声来判别目标,即被动检测目标而不主张主动探测目标。无论如何演变,压电换能器的设计至今仍是声呐设计中最重要且最基本的研究内容。

沿用声呐中换能器术语表示广义的压电装置,是压电换能器概念的另一个内涵。随着压电效应的深入研究,为取代昂贵的天然石英,各种压电材料被陆续开发出来,这进一步促进了压电技术的应用。众所周知的B超就是一个典型,其物理与数学本质与声呐是完全相同的。除此之外,用于微量控制的压电驱动器,用于测量的压电传感器如加速度计,用于缩小装备体积的压电变压器、压电扬声器,以及现代开发的、本质上也是用于控制的发动机压电喷嘴、压电喷墨打印,正在开发的厘米级尺度的微型压电马达,微能量供电的环境振动能量收集器等,都采用了材料的压电能量转换方式,故我们将其统称为压电换能器。可以看出,除了需要高功率驱动的声呐换能器阵元或换能器基阵体积较大之外,几乎所有的压电换能器都具备体积微小的特征,尤其重要的是,由于在压电材料中,能量转

换是在机械运动能量与电能之间进行的,所以所有压电换能器都是以机电耦合的方式进行工作的,因而除了狭义上的声呐压电换能器,广义上的压电换能器都属于微机电系统(MEMS)中的一族,B超自然也在其中。

由于压电换能器如此重要,且具有技术应用和技术发展空间,所以数字制造丛书将压电换能器设计原理列入出版计划。简而言之,原因有二:其一是压电换能器代表了一类MEMS装置,在先进的数字制造技术中,压电换能器可以作为一类精密测量与精密控制的工具,数字机床的精密控制就是一个例子;其二是压电换能器作为一类MEMS的产品,其发展与先进制造技术有着千丝万缕的联系。微型压电马达、相机的聚焦控制器、结构表面形状的压电控制器、弹药的引信,以及压电声表面器件等,这些均是未来可占据市场的创新性压电产品。除了压电材料的配方与精细加工之外,集成后的产品也离不开先进的制造技术。可以预见,随着压电换能器技术的开发与运用,它与先进的数字制造技术必定会产生密切的关系。

压电技术既有成熟的产品,也有开发的潜力,其产品设计的共同基础是压电材料的性能与等效的压电动力学分析。迄今为止,陆续出版了不少压电传感器设计的书籍,研究期刊上也发表了诸多的研究文献。作者之所以从事该类研究并撰写设计原理一书,是考虑到正在发展的现代分析计算技术,可以为包括声呐在内的压电换能器设计提供比较精确的开发设计工具;压电换能器设计的共同目标是提高压电效应指标,目前不仅压电材料的种类丰富且性能在提高,压电换能器的结构也在变化,利用换能器结构设计进一步提高本该属于压电材料特性的压电效应,将给分析设计带来新的特点。在有限的篇幅内论述所有的压电换能器设计问题是没必要也不可能的,本书成书过程中,有倾向性地选择并论述了作者认为重要的、有代表性的换能器的设计原理。认识压电材料与描述压电效应的指标,是压电换能器设计的基础,在第1章中,介绍了压电换能器设计中压电材料与压电方程基本知识。第2章介绍压电陶瓷器件的基本工作模式,以及机电耦合振动模型的等效方法,提供了换能器解析模型的建立方法以进行等效的振动分析。第3章介绍一类经典的声呐阵元的工作频率分析方法,等效机电模型中考虑换能器阵元的附加金属质量等处理方法。第4章以带有钹型金属结构的换能器为例,介绍了弯张换能器的结构分析与设计方法;钹式换能器是各类弯曲振动换能器中体积最小、结构最轻的一类,是换能器结构改进的典型,其小型化的设计使得该类压电换能器从单纯的声呐阵元成为MEMS的一员,应用领域扩展到能量收集器、胰岛素注射仪器等开发领域;所以在第5章以其为代表介绍了压电换能器的有限元分析方法,有限元模型与机电等效解析模型是压电换能器设计计算的两种基本分析计算方法,前者更为精确。第6章介绍一种探索性的压电换能器



结构设计方案,即带有欧米伽形状的附加金属结构方案;利用弹性动力学知识确定了压电换能器的共振频率,计算了换能器的部分技术指标。第7章介绍压电超声马达,论述了如何利用行波和驻波原理设计微型马达,并讨论了其应用潜力和研究方向。第8章和第9章分别介绍了压电变压器与振动能量收集器的类型、材料的选择与振动模型,以及电路设计要求等,并以算例分析了机电特性。在每一章之后,列出了相关的参考文献以供读者参考,并表示对相关作者的尊重。

本书是我和张恺同志共同撰写的,书中的基本知识参考了相关文献,在换能器与收集器等方面的内容,引用了我的硕士研究生杜贻群、博士研究生张恺以及博士后王雨虹的部分研究论文。在此对作者们表示十分的敬意和感谢。

由于作者水平与精力有限,书中观点与论述难免挂一漏万,不当之处恳请读者批评指正。

作者  
2016年8月于武汉

# 目 录

1 压电材料与压电效应	1
1.1 压电材料	1
1.1.1 压电单晶材料	2
1.1.2 压电陶瓷	3
1.1.3 压电高分子聚合物	4
1.1.4 弛豫型铁电材料	5
1.1.5 压电复合材料	5
1.2 压电材料的重要参数	6
1.2.1 机电耦合系数	7
1.2.2 介质损耗因子和电学品质因数	7
1.2.3 机械损耗因子和机械品质因数	9
1.2.4 频率常数	10
1.2.5 老化	11
1.2.6 温度稳定性和居里点	11
1.2.7 电退极化	13
1.2.8 额定动态抗张强度	13
1.2.9 高静态应力对材料性能的影响	13
1.3 压电方程	16
1.3.1 压电方程的推导	16
1.3.2 电弹常数的物理意义	19
1.3.3 压电晶体常数之间的关系	20
1.3.4 压电振子的四类边界条件	26
1.3.5 各种压电晶体的常数矩阵	27
1.3.6 压电陶瓷的机电耦合系数与品质因数讨论	30
1.4 压电振子的振动模式	31
参考文献	36
2 压电陶瓷典型振动模式的等效电路	37
2.1 机电类比	37
2.1.1 机械系统和电路的元件	37

2.1.2	单自由度机械系统和单电回路的运动方程式	38
2.1.3	振动稳态解各量之间关系的类比	39
2.2	典型的机电等效模型	40
2.2.1	压电陶瓷薄圆环的径向对称模式	40
2.2.2	电场垂直于长度方向的长度伸缩模式	44
2.2.3	电场平行于波传播方向的厚度剪切模式	49
2.2.4	电场平行于波传播方向的厚度伸缩模式	53
2.2.5	电场平行于长度方向的长度伸缩模式	54
2.2.6	薄圆片的径向振动模式	56
	参考文献	61
<b>3</b>	<b>Tonpiliz 压电换能器机电等效模型</b>	<b>63</b>
3.1	级联理论	64
3.2	$p$ 个晶片级联组合系统的机电等效图	66
3.3	前后盖板的机电等效图	68
3.4	Tonpiliz 压电换能器的机电等效图	72
3.5	频率方程	73
	参考文献	75
<b>4</b>	<b>弯张压电换能器的结构设计与发展</b>	<b>76</b>
4.1	弯张换能器的结构发展	76
4.2	钹式换能器的发展与制作工艺	79
4.2.1	钹式换能器的研究现状与发展	79
4.2.2	钹式换能器的制作工艺	82
4.3	弯张换能器的典型应用	85
4.4	弯张换能器的设计与分析方法	86
	参考文献	87
<b>5</b>	<b>钹式换能器的有限元分析</b>	<b>89</b>
5.1	ANSYS 软件分析方法及过程	89
5.1.1	基本理论	89
5.1.2	物理实体模型	90
5.1.3	有限元离散模型	92
5.1.4	设定问题类型并求解	94

5.1.5 提取结果数据,获得特性参数 .....	94
5.2 钹式换能器基本电声性能分析 .....	96
5.2.1 共振频率 .....	96
5.2.2 振动模态 .....	97
5.2.3 电导纳特性 .....	101
5.2.4 发射响应和接收灵敏度 .....	103
5.2.5 指向性 .....	104
5.3 材料参数对换能器性能的影响规律 .....	105
5.3.1 压电材料对性能的影响 .....	105
5.3.2 金属材料对性能的影响 .....	108
5.4 加电方式对换能器性能的影响 .....	110
5.5 结构参数对性能的影响规律 .....	112
5.5.1 总体尺寸对性能的影响 .....	113
5.5.2 径向尺寸对性能的影响 .....	115
5.5.3 PZT 厚度对性能的影响 .....	117
5.5.4 黄铜片厚度对性能的影响 .....	119
5.5.5 空腔厚度对性能的影响 .....	121
参考文献 .....	123
<b>6 欧米伽型弯张压电换能器 .....</b>	<b>125</b>
6.1 欧米伽换能器的结构与能量表达式 .....	125
6.1.1 欧米伽换能器的结构 .....	125
6.1.2 圆锥薄壳的能量表达式 .....	126
6.1.3 金属圆环、顶部金属圆片及陶瓷圆片的能量表达式 .....	128
6.2 欧米伽换能器谐振频率的 Rayleigh-Ritz 解法 .....	129
6.2.1 位移振型函数 .....	129
6.2.2 几何边界条件 .....	130
6.2.3 谐振频率和位移振型函数待定系数的求解 .....	130
6.3 理论推广与实验对比 .....	131
6.4 欧米伽换能器的有限元分析 .....	136
6.4.1 空腔顶部半径对性能的影响 .....	136
6.4.2 空腔高度对性能的影响 .....	138
6.4.3 空腔底部半径对性能的影响 .....	140
6.4.4 陶瓷片厚度对性能的影响 .....	141

6.4.5	金属端帽厚度对性能的影响 .....	143
6.5	与钹式换能器的对比 .....	145
6.5.1	有限元模型 .....	145
6.5.2	导纳特性对比 .....	146
6.5.3	发射与接收响应对比 .....	147
	参考文献 .....	150
<b>7</b>	<b>压电超声马达 .....</b>	<b>152</b>
7.1	工作原理、分类和特点 .....	152
7.1.1	驻波的形成 .....	154
7.1.2	行波的形成 .....	154
7.1.3	压电马达的性能特点 .....	155
7.2	几种典型的压电马达 .....	156
7.2.1	直线型行波压电马达 .....	156
7.2.2	环形行波压电马达 .....	157
7.2.3	多模态复合驻波型压电马达 .....	157
7.3	压电马达的其他应用 .....	158
7.3.1	精密机械 .....	158
7.3.2	微机电系统 .....	159
7.3.3	航空航天 .....	159
7.4	压电马达的研究方向 .....	160
7.4.1	基础理论与建模 .....	160
7.4.2	功能材料 .....	164
7.4.3	驱动与控制技术 .....	165
	参考文献 .....	168
<b>8</b>	<b>压电变压器 .....</b>	<b>170</b>
8.1	压电变压器的应用与发展 .....	170
8.2	压电变压器工作原理 .....	171
8.3	压电变压器的分类 .....	172
8.3.1	厚度振动模式压电变压器 .....	173
8.3.2	径向振动模式压电变压器 .....	174
8.3.3	剪切振动模式压电变压器 .....	175
8.4	等效电路及机电特性 .....	176

---

参考文献	181
<b>9 压电能量收集器</b>	<b>183</b>
9.1 基于机电转换的能量收集技术	183
9.2 压电俘能结构的构成	185
9.2.1 压电材料	185
9.2.2 压电振子振动模式	186
9.2.3 其他结构形式	189
9.3 能量收集和存储电路	191
9.3.1 能量收集接口电路	191
9.3.2 能量收集存储技术	193
9.4 压电悬臂梁发电结构的理论模型	194
9.4.1 压电单晶片(Unimorph)悬臂梁结构动力学模型	194
9.4.2 压电双晶片(Bimorph)悬臂梁结构动力学模型	197
9.4.3 压电单晶片悬臂梁的数值分析	201
参考文献	204

# 1

## 压电材料与压电效应

在石英、电气石以及罗谢尔盐等 $\alpha$ 类石英晶体上,放置一定数量的砝码,则用静电计可以测量到:这些天然晶体的某些表面上产生了电荷,且电荷产生的数量与所加砝码的重量成正比。材料的这种将压力能量转换为电能的现象,是法国物理学家皮埃尔·居里(Pierre Curie, 1859—1906)与其兄雅克·保罗·居里(Jacques Paul Curie)于1880年发现的,即压电效应。随后李普曼(Gabriel Lippman, 1845—1921)预言了与之相反的可逆现象,即逆压电效应,并得到居里兄弟的实验验证。由于正、逆压电效应都是在压力能和电能之间的转换,所以将其统称为压电效应。压电效应的发现,使得压电技术成为一个重要的应用研究领域,1917年,法国物理学家郎之万(Paul Langevin, 1872—1946)利用石英晶体,研制出可探测潜艇用的水声压电器件<sup>[1]</sup>。利用石英一类的压电材料,开发水下目标探测所需的压电水声换能器,是最初的压电技术;随着压电材料的发展,诸如压电陶瓷、压电聚合物、压电复合物等新材料,逐步取代了昂贵的石英;随着各类工程领域中的精确控制、驱动、检测等需求,包括控制器、驱动器、传感器在内的各类压电换能器,也呈现出新的设计特点,相继出现了各种结构形式的压电元器件。无论是压电材料研究还是设计方案研究,都是为了进一步提高换能器的压电效应,以获得换能器的技术指标。本章简单介绍并讨论压电换能器设计中最基本的压电材料与压电方程问题。

### 1.1 压电材料

压电换能器的核心器件是压电元器件,它是压电材料制成的,所以了解压电材料是压电元器件的设计基础。从最早天然压电晶体,到人工合成的压电晶体及压电复合材料等,压电材料的性能逐渐得到改善,而且种类也越来越多。现有压电材料的类型主要有:单晶、多晶、微晶玻璃、有机高分子、复合材料等。

### 1.1.1 压电单晶材料

压电单晶材料主要有石英、酒石酸钾钠(罗谢尔盐)、磷酸二氢铵(ADP)、磷酸二氢铵钾(EDT)、铌酸锂等,其压电性是由于压电结构的不对称性而产生的。石英晶体是人类最早发现的压电单晶体,其性能稳定,其材料参数随时间和温度的变化极小。在下一节以及后续的压电方程中可以看到,描述压电材料的性能有诸多参数。天然石英晶体机械损耗小、机械品质因数高、介电系数较低、谐振阻抗高,因而被广泛应用于制作标准振源以及高选择性的滤波器。石英晶体属于一种各向异性材料,其材料参数包括六个独立的弹性常数分量、两个独立的压电常数分量和两个独立的介电常数分量。石英晶体的性能因晶体切割取向和切割方位的不同而有差异,石英晶体的切割方式很多,每一种切割方式可以产生不同性质和不同用途的压电振子。石英晶体的切型符号示于表 1.1。图 1.1 形象地表示了这套规定的常用切割方位及代号<sup>[2]</sup>。

表 1.1 石英晶体的切型符号

常用切割符号	IRE 符号	备注
X	$x$	晶片面垂直于 $x$ 轴
Y	$y$	晶片面垂直于 $y$ 轴
Z	$z$	晶片面垂直于 $z$ 轴
AT	$(yxl)35^\circ$	
BT	$(yxl)-49^\circ$ $(-49^\circ \sim -49^\circ 30')$ $(yxl)37^\circ$	
CT	$(37^\circ \sim 38^\circ)$	有时与 $x$ 轴成 $45^\circ$ 斜角来切割
DT	$(yxl)-52^\circ$ $(-52^\circ \sim -53^\circ)$	有时与 $x$ 轴成 $45^\circ$ 斜角来切割
ET	$(yxl)66^\circ 30'$	
FT	$(yxl)-57^\circ$	
GT	$(yxl)57^\circ/45^\circ$	
AC	$(yxl)30^\circ$	棱边与 $x$ 轴成 $45^\circ$ 角切割
BC	$(yxl)-60^\circ$	

作为换能器,X切割常用来产生厚度振动模式;Y切割和AC切割用于产生纯切变振动模式以便用于接收横波;AT和BT切割方式形成的压电振子的频率温度系数很小,可用于实现频率控制的压电振子,也常用于高频滤波器振子;CT、



DT、ET 和 FT 切割可用于低频滤波器振子。另外,石英晶体中的声波衰减也和切割方式以及波的传播方向有关。

除了压电石英晶体以外,压电单晶的种类很多,结构也千差万别,国际上通常将晶体分为七个晶系,即三斜晶系、单斜晶系、正交晶系、四方晶系、三方晶系、六方晶系以及立方晶系。每种材料均有自己的性能特点,在实际应用中,应该根据具体情况合理选择。

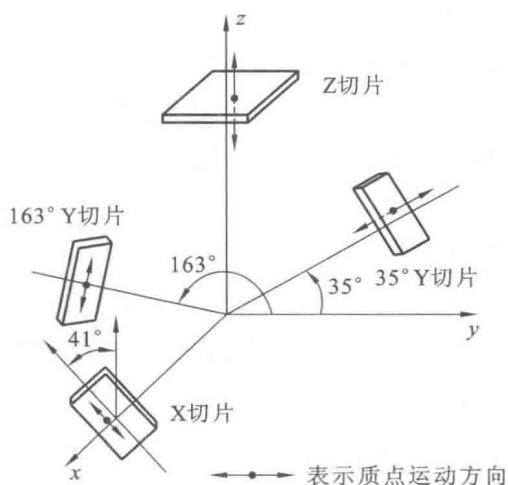


图 1.1 用作厚度模换能器的压电单晶切割

### 1.1.2 压电陶瓷

尽管石英晶体因具有很多优异特性而被广泛应用,但是随着换能器的需求量越来越大,人们不得不寻求新的压电材料。第二次世界大战之后,苏、英、美、日等国各自开始进行压电陶瓷的研究。

第一种被发现的压电陶瓷是钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ ),它在 1943 年由苏联、美国和日本的研究者几乎同时独立发现,其铁电性在物理学上引起极大关注。但是钛酸钡的居里点较低,约为  $120^\circ\text{C}$ ,同时还存在  $-80^\circ\text{C}$  和  $10^\circ\text{C}$  两个相变点,这意味着常用温度下其机电常数不够稳定,所以使用受到限制。1954 年 B. Jaffe 等发现: $\text{PbZrO}_3$ - $\text{PbTiO}_3$  形成的锆钛酸铅(PZT)系固溶体,在准同形相界(Morphotropic Phase Boundary)附近具有良好的压电和介电性能,其机电耦合系数接近钛酸钡陶瓷的两倍,力学性能和温度稳定性也比钛酸钡陶瓷有显著提高<sup>[1]</sup>。压电陶瓷的应用范围因此得以扩展,从传统滤波器、换能器扩展到压电变压器、引燃引爆装置和超声延迟线等<sup>[1]</sup>。在以后的 30 多年里,PZT 以其较强且稳定的压电性能成为压电换能器的主要材料,在无损探测、医疗诊断和 underwater 通信领域得到了广泛应用。

原始的压电陶瓷本身并不具有压电效应,为了使其具备压电功能,需要在一定温度下施加强电场,使陶瓷中的电轴沿电场方向排列,称之为极化;为了使压电陶瓷得到完善的极化,充分发挥其压电性能,必须合理选择极化条件,即极化电场、极化温度和极化时间。一般定义压电陶瓷的极化方向为  $z$  轴,在垂直于  $z$  轴的方向上是各向同性的,其结构相当于六方晶系中的  $6mm$  对称型的晶体。压电陶瓷不是纯的化合物,通过在原有陶瓷中添加不同成分可以得到不同配方的压电材料,从而形成性能各异的压电材料。根据压电材料的成分,可将压电陶瓷材料分为一元系、二元系和三元系等。一元系压电材料包括钛酸钡、钛酸铅、铌酸钾钡和偏铌酸铅等。二元系中有锆钛酸铅、偏铌酸铅钡等,三元系压电陶瓷材料主要