
硕士研究生课程
《智能传感器技术》(考查)
自选课题

题 目： 压电式传感器的国内外现状与发展趋势
学 院： 自动化工程学院

压电式传感器的国内外现状及发展趋势

The Current Situation and Tendency of
Piezoelectric Sensor at Home and Aboard

毕业论文（设计）原创性声明

本人所提交的毕业论文（设计）是我在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文（设计）不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本论文（设计）的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确说明并表示谢意。

作者签名：_____ 日期：_____

毕业论文（设计）授权使用说明

本论文（设计）作者完全了解**学院有关保留、使用毕业论文（设计）的规定，学校有权保留论文（设计）并向相关部门送交论文（设计）的电子版和纸质版。有权将论文（设计）用于非赢利目的的少量复制并允许论文（设计）进入学校图书馆被查阅。学校可以公布论文（设计）的全部或部分内容。保密的论文（设计）在解密后适用本规定。

作者签名：_____ 指导教师签名：_____

日期：_____ 日期：_____

注 意 事 项

1.设计（论文）的内容包括：

- 1) 封面（按教务处制定的标准封面格式制作）
- 2) 原创性声明
- 3) 中文摘要（300 字左右）、关键词
- 4) 外文摘要、关键词
- 5) 目次页（附件不统一编入）
- 6) 论文主体部分：引言（或绪论）、正文、结论
- 7) 参考文献
- 8) 致谢
- 9) 附录（对论文支持必要时）

2.论文字数要求：理工类设计（论文）正文字数不少于 1 万字（不包括图纸、程序清单等），文科类论文正文字数不少于 1.2 万字。

3.附件包括：任务书、开题报告、外文译文、译文原文（复印件）。

4.文字、图表要求：

- 1) 文字通顺，语言流畅，书写字迹工整，打印字体及大小符合要求，无错别字，不准请他人代写
- 2) 工程设计类题目的图纸，要求部分用尺规绘制，部分用计算机绘制，所有图纸应符合国家技术标准规范。图表整洁，布局合理，文字注释必须使用工程字书写，不准用徒手画
- 3) 毕业论文须用 A4 单面打印，论文 50 页以上的双面打印
- 4) 图表应绘制于无格子的页面上
- 5) 软件工程类课题应有程序清单，并提供电子文档

5.装订顺序

- 1) 设计（论文）
- 2) 附件：按照任务书、开题报告、外文译文、译文原文（复印件）次序装订
- 3) 其它

摘 要

压电式传感器是一种典型的自发电式传感器。它具有灵敏度高、使用频带宽、信噪比高、结构简量轻、工作可靠等优点。压电式传感器正不断地向智能化发展。

文章首先介绍了压电传感器的理论基础即压电效应，压电材料，压电方程以及压电传感器的等效电路。接着又介绍了两种压电式传感器。一是 PDVF 压电式传感即由一种新型压电材料 PDVF 薄膜制作的传感器，分别阐述了 PDVF 薄膜的优点，压电特性，用其制作的正余弦压电式传感器以及 PDVF 压电式传感器测量振动梁的物理量的工作原理。二是 IEPE 压电加速传感器，包括加速传感器的优点，工作原理以及其在振动压路机振动测试中的应用。

关键词：压电式传感；IEPE加速计；加速度传感器；PDVF压电模

Abstract

The piezoelectric sensor is a kind of typically spontaneous electricity sensor. It has the advantages of high sensitivity, wide frequency band, high signal-to-noise ratio, simple in structure, and reliable lightweight etc. And the piezoelectric sensors are constantly to intelligent development.

This paper introduces the basic theory of piezoelectric sensors which are piezoelectric effect, piezoelectric materials, piezoelectric equation and piezoelectric sensor equivalent circuit. Then it introduces two kinds of piezoelectric sensors. One is PDVF piezoelectric sensor which is made by a new type of piezoelectric materials. It respectively explains the advantages of PDVF film, piezoelectric properties, cosine and sine PDVF piezoelectric sensor and the use of measuring vibrates beam. Another is IEPE piezoelectric sensor, including acceleration sensor accelerated the advantages, working principle and the application of vibration compacting roller test.

Keywords: piezoelectric sensor, IEPE acceleration, acceleration sensor, PDVF film

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 压电传感器的特点及发展	1
1.2 压电传感器的国内外发展现状	1
1.3 智能传感器的产生与发展前景	2
第 2 章 压电传感器的理论基础	4
2.1 压电传感器的基本特性	4
2.1.1 压电效应	4
2.1.2 压电材料	5
2.1.3 压电方程与压电常数	5
2.2 压电式传感器的等效电路	8
2.3 压电式传感器的信号变换电路	9
2.3.1 变换电路的必要性	9
2.3.2 电压放大器	10
2.3.3 电荷放大器	12
第三章 PDVF 压电传感器	13
3.1 PVDF 压电薄膜	13
3.1.1 PVDF 压电薄膜的压电方程	13
3.1.2 PVDF 压电薄膜制作传感器的理论分析	14
3.2 PVDF 压电传感器的设计	17
3.2.1 梁的弯曲波	17
3.2.2 振动梁的基本物理量	19
3.3 传感器的设计	19
3.3.1 形状设计	19
3.3.2 正弦传感器的设计	20
3.3.3 余弦传感器的设计	20
3.4 正余弦传感器测量物理量的原理	22
第四章 压电加速传感器	24
4.1 压电式加速度传感器的基本概念	24
4.2 加速度传感器的工作原理	24
4.3 IEPE 加速计	25
4.3.1 IEPE 加速计的工作原理	26
4.3.2 IEPE 加速计的优点	26
4.4 压电加速传感器在振动测量中的应用	27
4.4.1 压电式加速计的测振原理	27
4.4.2 用压电式加速度传感器的振动测试方案	28
4.4.3 振动压路机振动的测量	30

第五章 结论	32
致谢	33
参考文献	34

第 1 章 绪论

根据中华人民共和国国家标准(GB7665-87),传感器(transducer/sensor)的定义是:能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。其中,敏感元件(sensing element)是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分;转换元件(transduction element)是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分^[1]。

1.1 压电传感器的特点及发展

压电式传感器是一种典型的自发电式传感器。它以某些晶体受力后在其表面产生电荷的压电效应为转换原理,压电晶体是机电转化元件,它可以测量最终转化为力的那些非电学物理量。例如力、压力、加速度等。压电式传感器具有灵敏度高、使用频带宽、信噪比高、结构简量轻、工作可靠等优点。

压电传感器技术的发展历程可分为三个阶段。第一个阶段是 60~70 年代,传感器以电荷输出为主,测量系统包括压电传感器和以电荷放大器为主的信号适配装置;到了 80~90 年代中期,出现了 IEPE(In Electronics Piezoelectricity)传感器,也被称为低阻抗电压输出传感器,它主要解决了压电信号以高阻抗传输带来的一系列问题;第三阶段是 90 年代中期至今,即插即用智能 TEDS 混合模式接口传感器

1.2 压电传感器的国内外发展现状

现代信息技术的三大支柱是传感器技术、通信技术和计算机技术,它们分别构成信息系统的“感官”“神经”和“大脑”,因此,传感器技术是信息社会的重要基础技术,传感器是信息获取系统的首要部件。然而,目前不论国内还是国外,传感器技术大大落后于信息系统中其它的技术,满足不了信息技术系统的需要。计算机与网络技术已经达到了飞跃发度,但是计算机的信息输入部分直到今天还没能与其发展相适应。该部分的落后影响了计算机的效率。可以说,整个信息系统水平的提高,主要取决于传感器技术水平的提高”。

在我国压电传感器的研究与应用明显落后于世界先进水平，自纪 70 年代以来，压电传感器的应用主要是为了满足航天技术发展的需要。改革开放之后，随着引进国外先进技术和管理经验，国民经济进入快阶段，现代测量技术的发展与应用成为必然。因此，压电传感器测术引起了一定程度的重视。但是，由于在压电传感器测量技术的研究与应用上与国外发达国家相比，起步较晚，技术基础薄弱。直到目前压电传感器总体技术水平依然处于上述的第一发展阶段。目前，国内仅有一家产 IEPE 加速计的厂家，但完全依赖于国外提供的内装微电子电路，并不能自主研发。

国内进行智能传感器研究的单位主要有：中科院合肥智能机械研究所传感器技术国家重点实验室(国家“863”计划资助项目；安徽省自然科金资助项目；中国博士后科学基金资助项目)；中国科技大学；电子科学自动化系；北京大学计算机科学技术系(国家“863”计划资助项目)，华南理工大学机电工程系(广州市重点攻关项目；广州市重点攻关项目)；东南大学仪器科学与工程系(973 计划项目)。通过几年的努力，这些单位都在网络化测控系统和智能传感器开发平台的研究中取得了不同程度的成就。

当我们正在致力于经典传感器的开发、研制及其推广应用，以力求缩小与发达国家之间的差距之时，信息技术的飞速发展，又在该领域结提出了新的课题、新的任务和新的方向，这就是智能传感器的发展。在美国 NI 公司的倡导下，目前共有 16 家全球领先的传感器生产商作为即插即用智能传感器计划项目的合作伙伴，这些成员已经开始向市场供应或研制符合 IEEE1451.4 传感器电子数据表 (TEDS) 的传感器，这种传感器被称为 TEDS 传感器、即插即用传感器或智能传感器。许多公司已经取得了令人满意的成果。智能传感器的发展是信息技术、知识经济在这一发展的必然产物和自然趋势。

1.3 智能传感器的产生与发展前景

微处理器带来的数字化革命到虚拟仪器的飞速发展，对传感器的综合精度、稳定可靠性和响应要求越来越高，传统传感器已不能适应多种测试要求，随着微处理智能技术和微机械加工技术在传感器上的应用，智能传感器(Smart Sensor)诞生了。

关于智能传感器的中、英文称谓尚未完全统一。英国人将智能传感器称为“Intelligent Sensor”，美国人则习惯于把智能传感器称作“Smart Sensor”，直译就是“灵巧的、聪明的传感器”。所谓智能传感器，就是带微处理器、兼有信息检测和信息处理功能的传感器。智能传感器的最大特点就是传感器检测信息的功能与微处理器的信息处理功能实际地融合在一起。从一定意义上讲，它具有

类似于人工智能的作用。需要指出，这里讲的“带微处理器”包含两种情况：一种是将传感器与微处理器集成在一个芯片上构成所谓的“单片智能传感器”

；另一种是指传感器能匹配微处理器。显然，后者的定义范围更宽，但二者均属于智能传感器的范畴”。

目前，国际传感器领域已对“Smart Sensor”定义形成了基本共识。智能传感器从其功能来说是具有一种或多种敏感功能，能够完成信号探测、变换处理、逻辑判断、功能计算、双向通讯，内部可实现自检、自校、自补偿、自诊断、具备以上部分功能或全部功能的器件^[3]。

智能传感器技术是一门正在蓬勃发展的现代传感器技术，是涉及微机械与微电子技术、计算机技术、信号处理技术、电路与系统、传感技术、神经网络技术及模糊理论等多种学科的综合性技术。在智能传感器发展进程中，由于对其“智能”的理解不断深化，各个时期的学者给予智能传感器的定义也会随着传感器的发展历程的推移而演变。

1983年，美国 Honeywell 公司研制出第一个智能传感器——用于过程控制的智能压力传感器。在此之后，其它公司纷纷效仿，先后研制出各自的智能传感器产品。这些智能传感器具有反应速度快，能实现非接触测量，精度高、分辨率高和可靠性好等优点，因此在军事、工业检测与控制领域获得广泛应用，也使传感器的智能化倍受关注并获得迅速发展^[3]。

智能传感器过去主要用于过程控制，如今在离散自动化领域和商业领域都有广泛应用。尤其是近十年，由于半导体技术的迅速发展，使微控制器的功能不断升级，价格不断下降，从而引起工业传感器设计的革命，也使检测技术的发展跃上一个新台阶。

第 2 章 压电传感器的理论基础

2.1 压电传感器的基本特性

压电式传感器是以具有压电效应的器件为核心组成的传感器。由于压电效应具有顺、逆两种效应，所以压电器件是一种典型的双向有源传感器。基于这一特性，压电器件已被广泛应用于超声、通信、宇航、雷达和引爆等领域，并与激光、红外、微波等技术相结合，将成为发展新技术和高科技的重要条件”。

2.1.1 压电效应

由物理学知，一些离子型晶体的电介质如石英、酒石酸钾钠、钛酸钡等。不仅在电场的作用下，在机械力的作用下也会产生极化现象。主要表现为：

1. 在电介质的一定方向上施加机械力作用而产生变形时，就会引起电介质内部正负电荷中心相对转移而产生电的极化、从而导致其两个相对表面(极化面)上出现符号相反的束缚电荷，如图 2-1(a)所示。

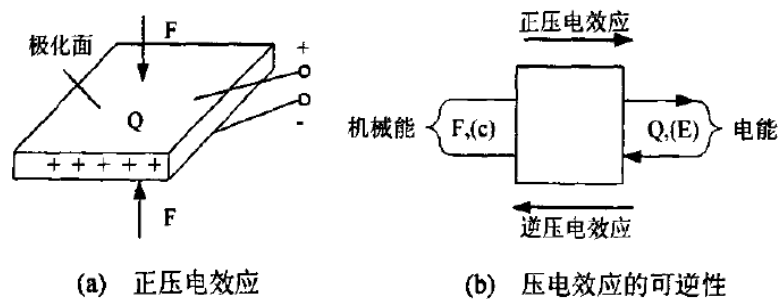


图 2.1 压电效应

其电位移 D (在 MKS 单位制中即为电荷密度 Q)与外应力张量 F 成正比

$$D=d \cdot F \text{ 或 } Q=d \cdot F \quad (2-1)$$

式中： d —压电常数。

当外力消失后，电介质又恢复为不带电状态，当外力方向改变时其电荷极性随之改变，这种现象物理学上称为正(顺)压电效应，或简称压电效应。

2. 若对上述电介质施加电场作用时，同样会引起电介质内部正、负电荷中心的相对位移而导致电介质产生变形，且应变 ε 与外电场强度 E 成正比

$$\varepsilon=dt E \quad (2-2)$$

式中 dt —逆压电常数矩阵。

这种现象物理学上称为逆压电效应，或称电致伸缩效应。可见，具有压电性的压电材料能够实现机械能与电能的相互转化，如图 2-1(b)所示。

2.1.2 压电材料

1. 人们把具有压电效应的材料称为压电材料，压电材料可以分为以下三大类：

- (1)压电晶体(单晶)它包括压电石英晶体和其它压电单晶；
- (2)压电陶瓷又称为多晶半导瓷；
- (3)新型压电材料主要包括压电半导体和有机高分子压电材料两种。

在传感技术中，目前国内外普遍应用的是压电单晶中的石英晶体和压电多晶中的钛酸钡等系列压电陶瓷。

2. 压电材料的特性参数主要包括：

(1)压电常数。压电常数是衡量材料压电效应强弱的参数，它直接关系到压电传感器输出的灵敏度。

(2)弹性常数 压电材料的弹性常数(刚度)决定着压电器件的固有频率和动态特性。

(3)介电常数。对于一定形状、尺寸的压电元件，其固有电容与介电常数有关，而固有电容又影响着压电传感器的频率下限。

(4)机电耦合系数。在压电效应中，转换输出的能量(如电能)与输入的能量(如机械能)之比的平方根称为机电耦合系数。它是衡量压电材料机电能量转换效率的一个重要参数。

(5)电阻。压电材料的绝缘电阻将减少电荷泄漏，从而改善压电传感器的低频特性。

(6)居里点。压电材料开始丧失压电性的温度称为居里点。

2.1.3 压电方程与压电常数

压电元件受力时，在相应表面产生电荷，力与电荷之间的关系为

$$Q = d_{ij}F \quad (2-3)$$

式中 d_{ij} —压电系数，单位为 C/N。

式(2-3)仅适用于一定尺寸的压电元件，没有普遍意义。为使用方便，常使用下式表示电荷面密度 δ 与作用应力的关系

$$\delta = d_{ij}\sigma \quad (2-4)$$

压电系数 d_{ij} 中，角注 i 表示电学量方向， $i=1, 2, 3$ 分别表示 X 轴方向、Y 轴方向及 Z 轴方向， j 就表示力学量方向， $j=1, 2,$

3, 4, 5, 6 分别表示在沿 X 轴、Y 轴、Z 轴方向作用的正应力和在 YOZ 平面、ZOX 平面及 XOY 平面作用的切应力, 如图 2-2 所示。正应力的符号规定是拉应力为正, 压应力为负; 切应力的正号规定为自旋转轴的正向看去的逆时针方向; 对晶体因受力产生电荷的电场方向作一个规定: 当电场方向指向晶轴正向时为正, 反之为负。

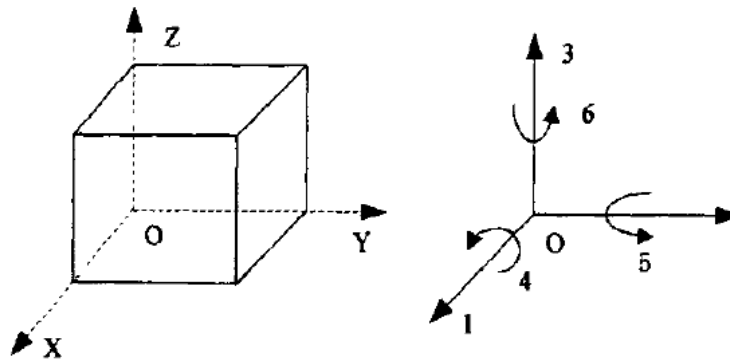


图 2.2 压电元件坐标表示法

根据上述规定, d_{11} 表示 X 轴方向受力, 在垂直于 X 轴的两表面产生的电荷的大小; d_{31} 表示 X 轴方向受力, 垂直于 Z 轴的两表面产生的电荷的大小; 晶体在任意受力状态下所产生的电荷面密度可由下列方程组决定

$$\left. \begin{aligned} \delta_{XX} &= d_{11}\sigma_{XX} + d_{12}\sigma_{YY} + d_{13}\sigma_{ZZ} + d_{14}\tau_{YZ} + d_{15}\tau_{ZX} + d_{16}\tau_{XY} \\ \delta_{YY} &= d_{21}\sigma_{XX} + d_{22}\sigma_{YY} + d_{23}\sigma_{ZZ} + d_{24}\tau_{YZ} + d_{25}\tau_{ZX} + d_{26}\tau_{XY} \\ \delta_{ZZ} &= d_{31}\sigma_{XX} + d_{32}\sigma_{YY} + d_{33}\sigma_{ZZ} + d_{34}\tau_{YZ} + d_{35}\tau_{ZX} + d_{36}\tau_{XY} \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

这样, 压电材料的压电特性可以用它的压电系数矩阵表示为:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

对石英晶体, 其压电系数矩阵为:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

根据晶格的对称性有: $d_{12}=-d_{11}$, $d_{25}=-d_{14}$, $d_{26}=-2d_{11}$ 。实际上, 石英晶体中只有 d_{11} 和 d_{14} 才有意义。对右旋石英 $d_{11}=-2.31 \times 10^{-12}$ C/N, $d_{14}=-0.67 \times 10^{-12}$ C/N; 对左旋石英 d_{11} 和 d_{14} 取正号, 数值不变。

压电系数矩阵的物理意义是:

(1) 矩阵的每一行表示压电元件分别受到 X、Y、Z 方向正应力, 以及 YOZ、ZOX、XOY 平面内剪应力作用时, 相应地在垂直于 x 轴、Y 轴及 Z 轴表面产生电荷

的可能性与大小。

(2) 若矩阵中某一 $d_{ij}=0$ ，则表示在该方向上没有压电效

应。这说明压电元件不是在任何方向都存在压电效应的。相对于空间一定的几何切型，只有在某些方向，在某些力的作用下，才能产生压电效应。

(3)上述石英压电系数矩阵还表示，当石英承受机械应力作用时可通过 d_{ij} 将五种不同的机械效应转化为电效应，也可以通过 d_{ij} 将电效应转化为五种不同模式的振动。

(4)根据压电系数绝对值的大小，可以判断在哪几个方向应力作用时，压电效应最显著。

由上所述，可以清楚地看到，压电系数矩阵是正确选择力/电转换元件、转换类型、转换效率以及晶片几何切型的重要依据，因此合理而灵活地运用压电系数矩阵是设计压电传感器的关键。

对于不同的压电材料，其压电系数矩阵是不同的。钛酸钡陶瓷的压电系数矩阵为：

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

式中： $d_{33} = 190 \times 10^{-12} C/N$

$d_{31} = d_{32} = -78 \times 10^{-12} C/N$

$d_{15} = 250 \times 10^{-12} C/N$

压电系数 d_{ij} 的物理意义是：在“短路条件”下，单位应力所产生的电荷密度。“短路条件”是指压电元件的表面电荷从一开始发生就被引开，因而在晶体变形上不存在“二次效应”的理想条件。

实际应用中还会遇到如下一些压电常数：

压电电压系数 g_{ij} ：在不计“二次效应”的条件下，每单位应力在晶体内部产生的电势梯度。它在数值上等于压电系数除以晶体的绝对介电常数，即

$$g_{ij} = d_{ij} / \epsilon_0 \epsilon_{ij} \quad (2-9)$$

式中： ϵ_{ij} —相对介电常数；

ϵ_0 —空间介电常数。

上式中 g , d , ϵ 各量应具有相同的下角注。

压电劲度系数 d_{ij} ：在不计“二次效应”的条件下，每单位机械应变在晶体内部产生的电势梯度。其在数值上等于压电电压系数 g_{ij} 和晶体弹性模量 E_{ij} ，即

$$d_{ij} = g_{ij} E_{ij} \quad (2-10)$$

式中，各量的下角注也应相同。

机电耦合系数 K_{ij} ：它是一个无量纲的数，表示压电体中存储的电能 E_{cd}

与其吸收的机械能 E_{ij} 之比的平方根；或表示压电体中存储的机械能 E_{cj} ，对其吸收的电能 E_{rd} 之比的平方根。即

$$K_{ij}^2 = E_{cd}/E_{ij} \text{ 或 } K_{ij}^2 = E_{cj}/E_{rd} \quad (2-11)$$

式(2-11)可以作为压电晶体的压电效应强弱的一种无量纲表示，能反映出压电材料的能量转换效率。故机电耦合系数可表示为

$$K_{ij} = \sqrt{h_{ij}d_{ij}} \quad (2-12)$$

式中，各量应具有相同的下角注。

2.2 压电式传感器的等效电路

当压电式传感器的压电敏感元件受力后，便在压电元件一定方向的两个表面上分别产生正、负电荷，因此可以把压电传感器视为一个电荷源，其电荷等效电路如图2-3(a)所示；同理当压电元件的表面聚集同性的正、负电荷时，则也可以将它视为一个电容器，压电元件的电容器等效电路如图2-3(b)所示。

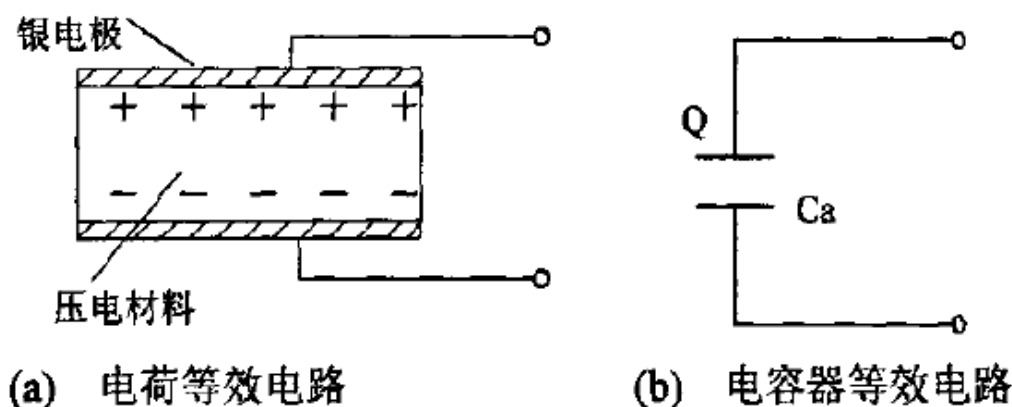


图 2.3 压电元件的等效电路

等效电容为

$$C_a = \epsilon s / \delta t = \epsilon_r \epsilon_0 / \delta t \quad (2-13)$$

式中： ϵ —压电材料介电常数；

ϵ_r —压电材料相对介电常数；

ϵ_0 —真空介电常数；

s —极板面积；

δ —电荷面密度；

t —压电元件厚度；

等效电容器两极板间的电压为：

$$U_a = Q/C_a \quad (2-14)$$

式中： Q ---两极板间的电荷量。

对式(2-14)，可用以下两种电路来等效压电式传感器。

1. 电荷等效电路电荷源与一个电容并联的电路如图 2-4(a)所示，此电路的输出为

$$Q=C_a U_a \quad (2-15)$$

2. 电压等效电路一个电压源与一个电容串联构成，如图 2-4(b)所示，此电路的输出为

$$U_a=Q/C_a \quad (2-16)$$

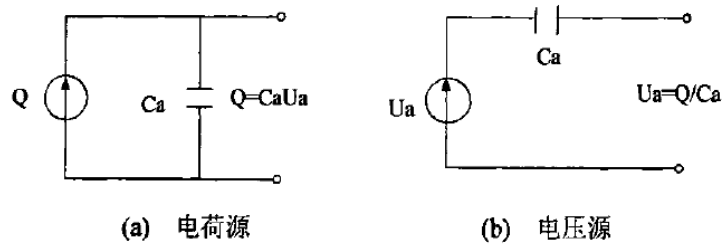


图 2.4 压电式传感器的等效电路

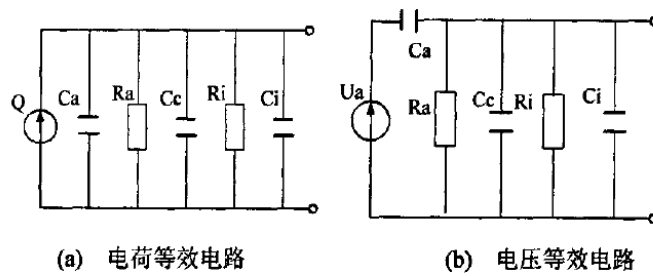


图 2.5 压电式传感器的实际等效电路

传感器的实际输出中有传感器对地的绝缘电阻 R_a ，电缆的分布电容 C_c ，放大器的输入阻抗(R_i ， C_i)等损耗，这样，按照压电元件的两种等效电路，压电式传感器的实际等效电路也有两种，如上图 2-5 所示。

2.3 压电式传感器的信号变换电路

2.3.1 变换电路的必要性

如上所述，压电元件实际上可以等效为一个电容器，因此，它也存在着与电容传感器相同的问题，即具有高内阻和小功率的问题，对于这些问题可以使用转换电路来解决。

1. 由于存在小功率问题，压电传感器输出的能量就微弱，再加上电缆分布电容和干扰等因素，将严重影响输出特性，为此在测量电路中需要加前置放大器。

2.

由于存在高内阻问题，使得压电元件难以直接使用一般放大器，而必须使用前置阻抗变换器。

对应压电元件的电压源和电荷源等效原理，前置放大器也有电压放大器和电荷放大器两种形式，而且必须具备有信号放大及阻抗匹配两种功能。

2.3.2 电压放大器

因为压电元件内阻抗很高，再加上电级分布电容等因素，给直接放大造成一定困难。为了解决这个问题，常在信号放大之前使用阻抗变换器，将高阻抗变为低阻抗输出，如图 2-6 所示。

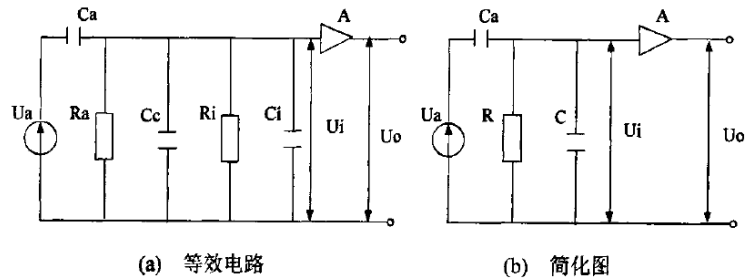


图 2.6 压电传感器与电压放大器连接的电路

图 2-6 中

$$R=R_a R_i / (R_a + R_i) \quad (2-17)$$

式中 R_a —传感器的绝缘电阻；

R_i —前置放大器的输入电阻；

$$C=C_c + C_i \quad (2-18)$$

式中 C_i —前置放大器的输入电容；

C_c —电缆电容。

设作用在压电元件上为一交变力 F_x ，即

$$F_x = F_m \cdot \sin \omega t \quad (2-19)$$

当使用的压电元件材料为压电陶瓷时，在 F_x 的作用下，压电元件上产生的电荷量为

$$q = d_{33} F_x = d_{33} F_m \sin \omega t \quad (2-20)$$

由式(2—16)可知压电元件产生的电压值为

$$U_a = Q / C_a d_{33} F_m \sin \omega t \quad (2-21)$$

由图 2-6 可得到前置放大器的输入电压 U ，写成复数形式为

$$U_i = \frac{d_{33} F_m j \omega R}{1 + j \omega R (C + C_a)} \quad (2-22)$$

则输入电压的幅值为：

$$U_{im} = \frac{d_{33} F_m \omega R}{\sqrt{1 + (\omega R)^2 (C_a + C_c + C_i)^2}} \quad (2-23)$$

输入电压与作用力之间的相位差为：

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \arctg(C_a + C_c + C_i)R\omega \quad (2-24)$$

在理想情况下，传感器的绝缘电阻 R_a 和前置放大器的输入电阻 R_i 都为无穷大，即等效电阻 R 为无穷大的情况，电荷没有泄漏，则式(2-23)变为：

$$U_{am} = d_{33}F_m / (C_a + C_c + C_i) \quad (2-25)$$

这样放大器的实际输入电压幅值为：

$$U_{im} / U_{am} = \frac{\omega R(C_a + C_c + C_i)}{\sqrt{1 + (\omega R)^2(C_a + C_c + C_i)^2}} \quad (2-26)$$

$$\tau = R(C_a + C_c + C_i) \quad (2-27)$$

则(2-26)和(2-24)式分别变为：

$$U_{im} / U_{am} = \omega\tau / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2-28)$$

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega\tau) \quad (2-29)$$

式中 τ —— 测量回路的时间常数。

1. 当作用在压电元件上的力为静态力($\omega=0$)时，则放大器的输入 $U_{im}=0$ ，这就从原理上说明压电式传感器不能测量静态物理量。

2. 当 $\omega\tau \gg 1$ 时， $\omega\tau \gg 3$ ，则 $U_{im} / U_{am} \approx 1$ ，可以近似视为放大器的输入电压与作用力的频率无关。在时间常数一定的条件下，被测物理量的变化频率越高，越能满足上述条件，则放大器的实际输入电压越接近理想的输入电压。这说明压电传感器具有良好的高频响应特性。

3. 为了扩大传感器的低频特性，就必须提高回路的时间常数 τ ，其办法是：因为 $\tau = R(C_a + C_c + C_i)$ ，所以可以通过增大电路的等效电阻 R ，而 $R = R_a R_i / (R_a + R_i)$ ，因此需要增大传感器的绝缘电阻 R_a 和放大器输入电阻 R_i ；还可以通过增大 $C_a + C_c + C_i$ 来提高 τ ，但由式(2-22)得传感器的灵敏度为

$$S_d = \frac{U_{im}}{F_m} = \frac{d_{33}}{\sqrt{(1/\omega R)^2 + (C_a + C_c + C_i)}} \quad (2-30)$$

$\omega R \gg 1$ 时，传感器的灵敏度为

$$S_d = \frac{d_{33}}{C_a + C_c + C_i} \quad (2-31)$$

所以增大 $(C_a + C_c + C_i)$ 又会使传感器的灵敏度下降，因此，切实可行的办法是提高测量回路的电阻。而传感器本身的绝缘电阻都很大，所以回路的电阻主要取决于放大器的输入电阻。放大器的输入电阻越大，测量回路的时间常数就越高，传感器的低频特性也越好。

4. 由式(2-31)知，电缆的分布电容 C_c 直接影响灵敏度 S_d ，

所以标定的电缆长度不能随意改变，否则将造成测量误差。也就是说，电压放大器作为压电传感器的适调仪时，测量系统灵敏度及频率特性受传感器与信号适调仪之间电缆长度的影响。

2.3.3 电荷放大器

电荷放大器实际上是一个具有深度负反馈的高增益运算放大器，其等效电路如图 2-7 所示。

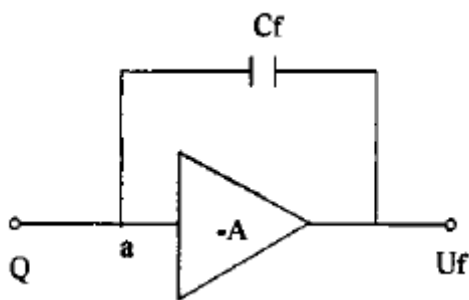


图 2.7 电荷放大器的等效电路

设 A 为放大器的开环增益，理想情况下为无穷大，放大器输入阻抗理想情况下也为无穷大，则由图 2-7 有以下各式成立

$$U_o = U_i - U_f \text{ 或 } U_o = -AU_i \quad (2-32)$$

联立上二式解得

$$U_i = -U_o / A \approx 0 \quad (2-33)$$

由电容定义

$$C_f = Q / U_f \quad (2-34)$$

所以有

$$U_o = -U_f = -Q / C_f \quad (2-35)$$

式中： U_o —放大器的输出电压；

U_f —反馈电容端电压；

Q —电容带电电荷。

由式(2-35)可知：

1. 电荷放大器的输出 $U_o=f(Q, C_f)$ ，只与电荷量 Q 和反馈电容 C_f 有关，而与放大系数和电缆电容无关。

2. 当 C_f 为常数时，放大器的输出 U_o 与电荷量 Q 成正比。

3. 反馈电容减小，输出电压 U_o 增大，所以要使灵敏度提高必须选较小的 C_f 值，通过改变反馈电容，可调节电荷放大器的变换系数。

4. 电荷放大器的作用是将高内阻传感器的电荷源转换为低内阻输出的电压源，使电压输出与输入电荷成正比，且测量系统的灵敏度不受电缆变化的影响。

第三章 PDVF 压电传感器

3.1 PVDF 压电薄膜

PVDF 是一种新型的高分子聚合物型传感材料。1969 年 Kawai 发现其具有很强的压电性以后,几十年来,人们对 PVDF 薄膜的研究一直没有中断。同时, PVDF 与微电子技术相结合,能制成多功能传感元件。下面我们简要地介绍 PVDF 压电薄膜的优点:

- 1、压电常数 d 参数比石英高十多倍。虽然比 PZT 低,但作为传感材料更重要的一个特征参数 g 的值比 PZT 高 20 倍左右。
- 2、柔性和加工性能好,可制成 5 μm 到 1mm 厚度不等、形状不同的大面积的薄膜膜,因此适于做大面积的传感阵列器件。
- 3、声阻抗低:为 $3.5 \times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$,仅为 PZT 压电陶瓷的 1/10,它的声阻抗与水的、人体肌肉的声阻抗很接近,并且柔顺性好,便于贴近人体,于人体接触安全舒适,因此用作水听器 and 医用仪器的传感元件时,可不用阻抗变换器。
- 4、频响宽,室温下在 10^{-5} - 10^9Hz 范围内响应平坦,即从准静态、低频、高频、超声及超高频均能转换机电效应。
- 5、由于 PVDF 的分子结构链中有氟原子使得它的化学稳定性和耐疲劳性高,吸湿性低,并有良好的热稳定性,即耐潮湿、多数化学品、氧化剂、强紫外线和核辐射。
- 6、高介电强度:可耐受强电场作用(75V/ μm),此时大部分陶瓷已退极化。
- 7、质量轻:它的密度只是 PZT 压电陶瓷的 1/4,做成传感器对被测量的结构影响小。
- 8、容易加工和安装:可以根据实际需要来制定形状,用 502 胶来粘贴固定。

3.1.1 PVDF 压电薄膜的压电方程

压电效应的物态方程反映了晶体电学量(E, D)和力学量(T, S)之间的互关系,因此压电方程为:

$$D_i = d_{ip} T_p + \varepsilon_{ij}^T E_{ij} \quad (3-1)$$

式中: T 是应力, E 是电场强度, D 是电位移, ε^T 是介电常数矩阵的转置矩阵, d 是压电应变常数矩阵, $i, j=1, 2, 3$, $p=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

PVDF 拉伸极化后具有 4mm 点

群的对称性。常选取 x 轴为拉伸方向， z 轴垂直于膜面平行于极化方向， Y 轴右手定则选取，如图 4-1 所示。其压电常数矩阵为：

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

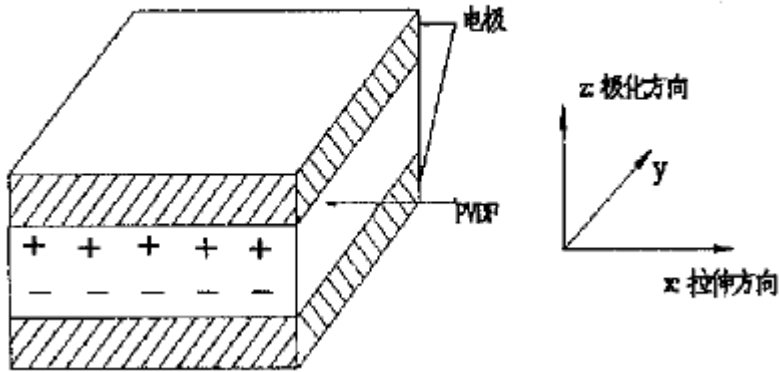


图 3.1 PVDF 压电薄膜示意图

3.1.2 PVDF 压电薄膜制作传感器的理论分析

当将 PVDF 压电薄膜贴在薄板上时，板的坐标轴 X 的方向与薄膜的拉伸方向 x' 之间的夹角为 θ ，这里我们称 θ 叫偏转角， Z 轴的方向它们是一致的，如图 3-2 所示。

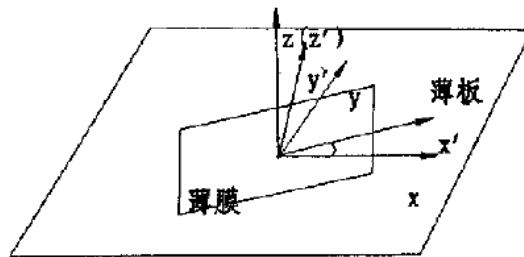


图 3.2 薄板和薄膜位置示意图

薄板系统符合克希霍夫薄板理论的假设条件，即薄板系统内的应力以 T_1 ， T_2 和 T_6 为主。薄板的应力和应变符合广义虎克定律

$$\begin{bmatrix} T_1' \\ T_2' \\ T_6' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y/(1-\nu_f^2) & \nu_f Y/(1-\nu_f^2) & 0 \\ \nu_f Y/(1-\nu_f^2) & Y/(1-\nu_f^2) & 0 \\ 0 & 0 & Y/2(1+\nu_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1' \\ S_2' \\ S_6' \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/147110063161010005>