

压电传感器

压电传感器的工作原理基于某些材料的压电效应。压电效应是一种能实现机械能与电能相互转换的效应,最早是由皮埃尔·居里和雅克·居里兄弟于 1880 年发现。

5.1 压电效应

压电效应有两种,即正压电效应及逆压电效应。

某些单晶体或多晶体陶瓷电介质材料,当沿着一特定方向对其施加力而使它发生机械变形时,其内部将产生极化现象,并在它的两个相对晶体面上产生等量的正负电荷;当外力取消后,电荷也随之消失,晶体端面又重新恢复不带电状态。这种现象称为正压电效应,它实质上是机械能转换为电能的过程。图 5-1 中,当作用力 F 的方向改变时,电荷的极性也随着改变,输出电荷的频率与动态压力的频率相同;当动态力变为静态力时,电荷将由于器件表面漏电而很快泄漏、消失。

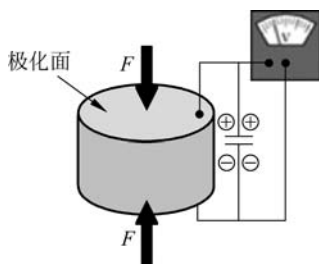


图 5-1 正压电效应

相反,如果在电介质的极化方向上施加电场(电压),这些电介质晶体会在一特定的晶轴方向上产生机械变形或机械应力;当外电场消失时,这些变形或应力也随之消失。这种现象称为逆压电效应,或称为电致伸缩现象。它实质上是电能转换成机械能的过程。

因此,压电效应具有双向性特点,如图 5-2 所示。

图 5-3 是压电晶体的三维示意图,其中 X 轴称为电轴, Y 轴称为机械轴, Z 轴称为光轴。图 5-4(a)、(b)描述的是纵向压电效应;图 5-4(c)、(d)描述的是横向压电效应。纵向压电效应是指沿电轴(X 轴)方向的力作用下产生电荷;横向压电效应是指沿机械轴(Y 轴)方向的

力作用下产生电荷。电荷都出现在 X 轴方向上,受拉力和压力出现的电荷极性相反,而在光轴(Z 轴)方向用力则不产生电荷。

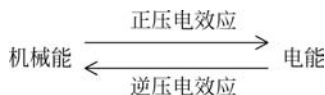


图 5-2 压电效应的双向性

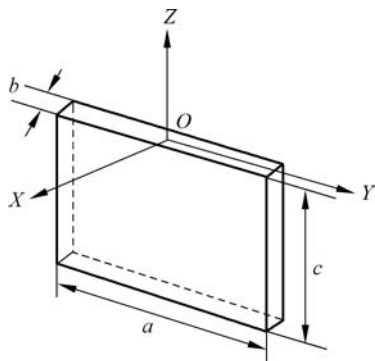


图 5-3 压电晶体示意图

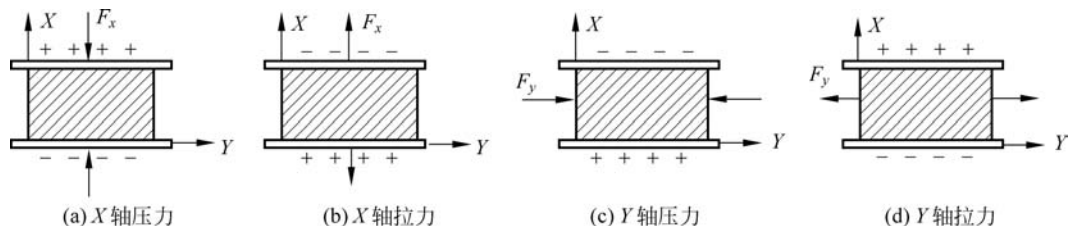


图 5-4 纵向压电效应与横向压电效应

压电材料在外力 F 作用下产生的表面电荷 Q 常用压电方程描述为

$$Q = dF \quad (5-1)$$

式中, d 为压电常数(C/N)。

晶体表面受到剪切力作用也会在其表面出现电荷。

5.2 压电材料

明显呈现压电效应的敏感材料称为压电材料。常用的压电材料有三类:压电晶体、压电陶瓷和有机压电材料。压电晶体是一种单晶体,如石英晶体、酒石酸钾钠等,其稳定性好,特别是天然石英晶体,可用于高精度的传感器;压电陶瓷是一种人工通过高温烧结制造的多晶体,如钛酸钡、锆钛酸铅、铌镁酸铅等,具有制作工艺简单、耐湿、耐高温等优点,主要用在检测技术、电子技术和超声等领域;有机压电材料属于新一代的压电材料,其中较为重要的有半导体和高分子压电材料。压电半导体有氧化锌(ZnO)、硫化锌(ZnS)、碲化镉(CdTe)、硫化镉(CdS)、碲化锌(ZnTe)和砷化镓(GaAs)等;而聚偏二氟乙烯(PVDF)是一种新型的高分子传感材料,自 1972 年首次应用以来,已研制了多种用途的传感器,如压力、加速度、温度和无损检测等,在生物医学领域也获得了广泛的应用。

1. 石英晶体

天然石英(SiO_2)晶体是六角形晶柱,在晶体学中它可用三根互相垂直的轴来表示,在

图 5-5(a)中,柱体纵轴 z 称为光轴,该轴方向无压电效应;通过六角棱线并垂直于光轴的 x 轴称为电轴,此轴上的压电效应最强;同时与 x 轴和 z 轴垂直的 y 轴(垂直于正六面体的棱面)称为机械轴,在电场作用下,沿该轴方向的机械变形最明显。

如果从石英晶体中切下一片平行六面体——晶体切片,并使其晶面分别平行于 x 、 y 、 z 轴,如图 5-5(b)所示,并在垂直 x 轴方向两面用真空镀膜或沉银法得到电极面,如图 5-5(c)所示。

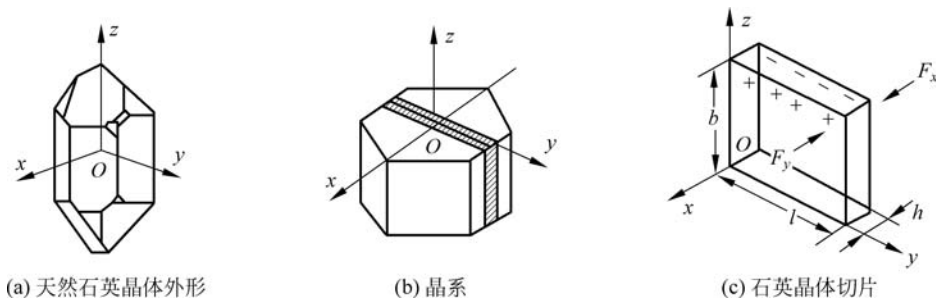


图 5-5 石英晶体

石英晶体具有压电效应,是由其内部结构决定的。石英晶体的化学分子式为 SiO_2 , 在一个晶体结构单元(晶胞)中,有 3 个硅离子 Si^{4+} 和 6 个氧离子 O^{2-} , 后者是成对的, 所以一个硅离子和两个氧离子交替排列, 其压电效应机理如图 5-6 所示。为讨论方便, 将这些硅、氧离子等效为图 5-6(a)中正六边形排列, $\oplus$ 代表 Si^{4+} , $\ominus$ 代表 2O^{2-} 。当晶体受力时, 电荷中心移动, 在 x 轴方向上的电偶极矩不为零, 产生的极化电荷和施加到晶体表面的力成正比, 如图 5-6(b)、(c)所示。

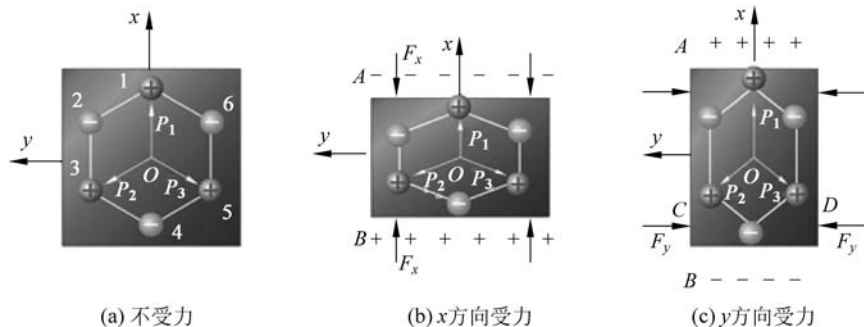


图 5-6 石英晶体的压电效应机理分析

2. 压电陶瓷

压电陶瓷属于铁电体一类的物质, 是人工制造的多晶体压电材料, 其压电效应机理如图 5-7 所示。图中, 晶粒内有许多自发极化的电畴, 是分子形成的区域, 有一定的极化方向, 从而存在一定的电场。在极化处理前, 这些电畴在晶体上杂乱分布, 它们的极化效应被相互抵消, 因此原始的压电陶瓷内极化强度为零, 如图 5-7(a)所示。当施加强度较大的外电场 E ($20 \sim 30 \text{ kV/cm}$) 时, 电畴自发的极化方向将向 E 的方向发生转动, 使陶瓷材料得到极化, 如图 5-7(b)所示。撤去外电场 E 后, 压电陶瓷内部仍有剩余的极化, 电畴的极化方向基本保

持不变,在陶瓷片极化的两端分别出现正、负束缚电荷。但长时间放置时,束缚电荷吸附外界自由电荷,保持电中性,如图 5-7(c)所示。

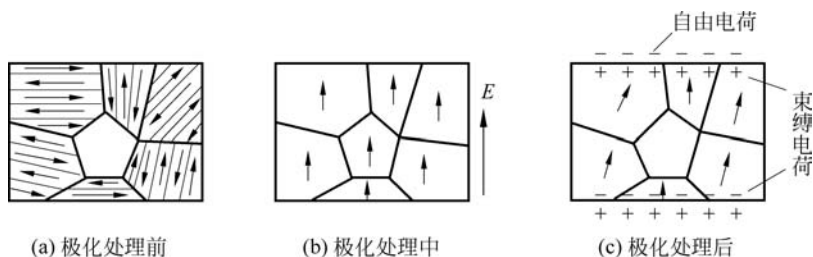


图 5-7 压电陶瓷的极化

如果在陶瓷片上加一个与极化方向平行的压力 F ,如图 5-8(a)所示,陶瓷片将产生压缩形变(图中虚线),片内的正、负束缚电荷之间的距离变小(极化距离变小),极化强度也变小。因此,原来吸附在电极上的自由电荷,有一部分被释放而出现放电现象。当压力撤销后,陶瓷片恢复原状(这是一个膨胀过程),极化距离变大,极化强度也变大,因此电极上又吸附一部分自由电荷而出现充电现象。这种现象由机械效应转换为电效应,即机械能转换为电能。同理,可以分析压电陶瓷的逆压电效应,如图 5-8(b)所示。

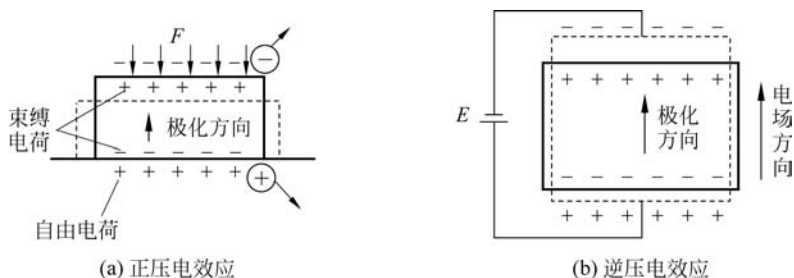


图 5-8 压电效应示意图

压电陶瓷的压电常数比石英晶体的大数十倍。

3. 压电半导体

这里指聚偏二氟乙烯(PVDF),它是高分子聚合物的薄膜,与石英晶体和压电陶瓷材料不同的是,PVDF 具有高弹性、柔软性好;高强度、抗冲击;声阻抗低(声阻抗等于材料密度乘声速, $Z=\rho c$),与水、人体组织、黏胶等接近,便于声阻抗的匹配;具有高介电常数,耐强电场作用可达 $75\text{V}/\mu\text{m}$,而压电陶瓷在这种强电场下性能已开始退化。

PVDF 薄膜的压电常数 $d \approx 23 \times 10^{-12}\text{C/N}$,是石英晶体的 10 倍;响应频带宽($10^{-3} \sim 10^9\text{Hz}$),动态测量范围宽;具有高灵敏度,在示波器上可以直接观察到 PVDF 薄膜的输出信号。

PVDF 薄膜的价格便宜,可以用作压电计数开关、振动冲击传感器等。

5.3 压电元件的等效电路

当压电元件受力时,在它的两个电极上出现极性相反但电量相等的电荷 Q ,如图 5-9 所示。可把它视为两极板上聚集异性电荷,中间为绝缘体的电容器,如图 5-9(b)所示,其电容量为

$$C_a = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} \quad (5-2)$$

式中, ϵ_r 为压电材料的相对介电常数, 石英晶体 $\epsilon_r = 4.5$, 钛酸钡 $\epsilon_r = 1200$; ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} (\text{F/m})$; S 为压电元件工作面面积 (m^2); d 为极板间距离, 即压电元件的厚度 (m)。

负载电阻为无穷大时, 压电元件的开路电压 U 为

$$U = \frac{Q}{C_a} \quad (5-3)$$

因此, 压电元件可以等效为一个与电容并联的电荷源, 也可等效为一个与电容串联的电压源, 如图 5-9(c)、(d) 所示。只有在外电路负载 R_L 无穷大、内部也无漏电时, 外力所产生的电压 U 才能长期保存下来; 如果负载 R_L 不是无穷大, 则电路就要以时间常数 $R_L C_a$ 按指数规律放电。为此在测量一个频率很低的变化力时, 就必须保证负载 R_L 具有很大的数值, 从而保证时间常数很大, 使漏电造成的电压降低很小, 不致造成测量的显著误差, 这时 R_L 常要超过数百兆欧。在进行动态测量时, 电荷可以不断补充, 从而供给测量电路一定的电流, 所以压电式传感器适宜做动态测量。

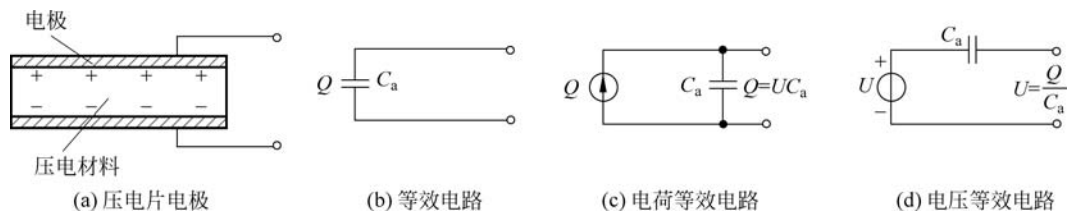


图 5-9 压电元件的等效电路

上述等效电路及其输出, 只有在压电元件本身为理想绝缘、无泄漏、输出端开路 ($R_L = \infty$) 条件下才成立。工作时, 压电元件必定与测量电路相连接, 这就要考虑连接电缆电容 C_c 、放大器的输入电阻 R_i 和电容 C_i 、传感器的漏电阻 R_a 。因此压电传感器的实际等效电路如图 5-10 所示。

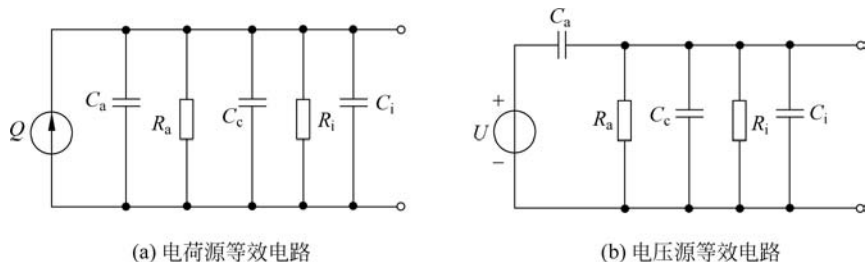


图 5-10 压电式传感器的等效电路

5.4 压电元件常用的结构形式

单片压电元件产生的电荷 Q 很小, 要产生足够的表面电荷要用很大的力。实际使用中, 可采用两片或两片以上压电元件组合在一起增加压电效果。连接方法有两种: 并联和

串联,如图 5-11 所示。图 5-11(a)为并联,两片压电元件的负极集中在中间极板上,正极在上下两边,分别连在一起再引出电极。输出电容 $C_{\text{并}}$ 为单片电容的 2 倍,输出电压 $U_{\text{并}}$ 等于单片电压,极板上的电荷量 $Q_{\text{并}}$ 为单片电容的 2 倍。这时电容量大,输出电荷量大,适用于测量缓变信号和以电荷为输出的场合。图 5-11(b)为串联,上极板为正极,下极板为负极,中间是一元件的负极与另一元件的正极连在一起。输出电容 $C_{\text{串}}$ 为单片电容的 $1/2$,输出电压 $U_{\text{串}}$ 等于单片电压的 2 倍,极板上的电荷量 $Q_{\text{串}}$ 等于单片电容。此时传感器本身电容小,输出电压高,适用于要求以电压为输出的场合,并要求测量电路有高的输入阻抗。

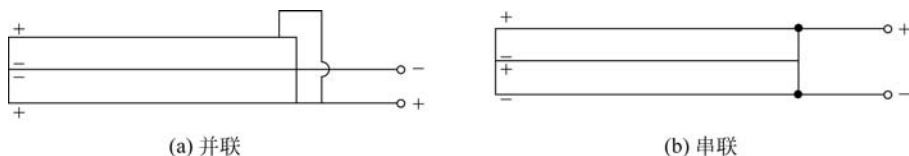


图 5-11 压电元件的并联与串联

5.5 压电式传感器的测量电路

压电式传感器要求负载电阻 R_L 必须有很大的数值,才能使测量误差小到一定数值以内。因此常在压电式传感器输出端后面,先接入一个高输入阻抗的前置放大器,确保测量电路有较大的时间常数,以避免电荷泄漏,然后再接一般的放大电路及其他电路。

前置放大器的作用有两个:①阻抗变换,即把压电式传感器的高输出阻抗变换成低输出阻抗;②把压电式传感器的微弱信号放大。

前置放大器有两种形式:一种是电压放大器,它的输出电压与传感器的输出电压成正比;另一种是电荷放大器,其输出电压与传感器的输出电荷成正比。

1. 电压放大器

电压放大器电路如图 5-12 所示。

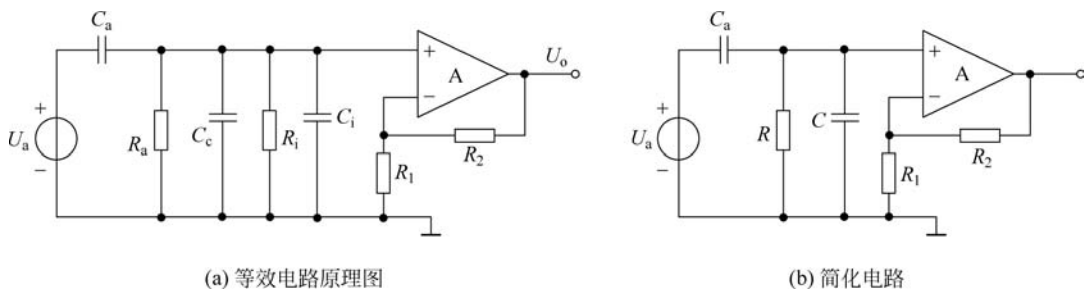


图 5-12 电压放大器电路

在图 5-12 中,输出电压为

$$U_o = \frac{Q}{C} \cdot \frac{K}{1 + \frac{\omega_0}{j\omega}} \quad (5-4)$$

式中, $K = 1 + R_2/R_1$; $\omega_0 = 1/RC$ 。

为扩展传感器工作频带的低频端,须减小 ω_0 ,即增大 C 或增大 R 。根据式(5-4)可知,增大 C 会降低灵敏度,所以一般采取增大 R ,因此应配置输入电阻很大的前置放大器。

连接电缆电容 C_c 。改变会引起 C 改变,进而引起灵敏度改变,所以当更换传感器连接电缆时必须重新对传感器进行标定。

解决电压放大器中电缆分布电容的有效办法是将放大器与传感器组成一体化结构,如图5-13所示。它可以直接输出达几伏的低输出阻抗信号,并可以用普通同轴电缆传输至示波器、记录仪、检流计和其他仪表,不需要再附加放大器;只有在测量低电平振动时,才需要再放大。若采用石英晶片作压电元件,该压电传感器在很宽的温度范围内灵敏度十分稳定,而且可长期使用,性能几乎不变。

2. 电荷放大器

电荷放大器能将高内阻的电荷源转换成低输出阻抗的电压源,其输出电压与输入电荷量成正比。因此电荷放大器同样也起着阻抗变换的作用,要求其输入阻抗高达 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega$,输出阻抗小于 100Ω 。

电荷放大器的等效电路如图5-14所示。近似分析,电荷 Q 只对反馈电容 C_f 充电, C_f 两端的电压近似等于放大器的输出电压,即

$$U_o \approx -\frac{Q}{C_f} \quad (5-5)$$

由式(5-5)可知,电荷放大器的输出电压只与输入电荷量和反馈电容值有关,而与放大器增益的变化以及电缆电容 C_c 等均无关。因此,只要保持反馈电容的数值不变,就可以得到与电荷量 Q 的变化呈线性关系的输出电压。此外,由于输出电压与反馈电容成反比,因此要达到一定的输出灵敏度要求,必须选择适当容量的反馈电容。使用电荷放大器的一个突出优点是,在一定条件下,传感器的灵敏度与电缆长度无关。

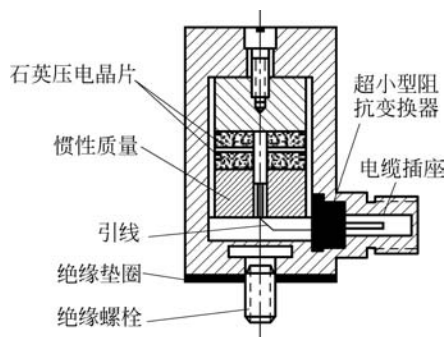


图 5-13 内置超小型阻抗变换器的一体化压电传感器

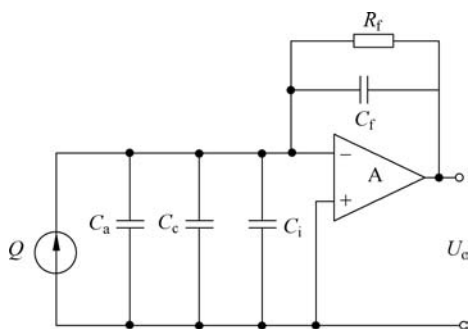


图 5-14 电荷放大器等效电路

5.6 压电式传感器的应用

5.6.1 压电式力传感器

压电元件本身是一种典型的力敏元件,最终能转换为力的物理量。例如压力、加速度、机械冲击和振动等,都可以用压电式传感器测量。压电式传感器的结构包括传感器、弹性敏

感元件和压电转换电路,其应用特点是通过弹性敏感元件把压力收集转换成集中力,再传递给压电元件。在有拉力同时也有压力的场合,通常采用双片或多片石英晶体作为压电元件,其刚度大,测量范围宽,线性及稳定性高,动态特性好。图 5-15 是单向力传感器的结构示意图,它用于机床动态切削力的测量。上盖为传力元件,其变形壁的厚度由测力范围决定。绝缘套用来绝缘和定位。当传力元件受外力作用时,将产生弹性变形,将力传递到石英晶片上;石英晶片采用 x 轴方向切片,利用纵向压电效应实现力-电转换。在结构上,基座对其中心线的垂直度,上盖、晶片、电极上下底面的平行度与表面粗糙度都有极严格的要求,否则会使横向灵敏度增加或晶片因应力集中而过早破碎。为提高绝缘阻抗,传感器装配前要经过多次净化(包括超声波清洗),然后在超净工作环境下进行装配,加盖之后用电子束封焊。

5.6.2 压电式压力传感器

压电式压力传感器的结构类型很多,但它们的基本原理、结构与压电式力传感器大同小异。突出的不同点是,它必须通过弹性膜、盒等,把压力收集并转换为力,再传递给压电元件。为保证静态特性及其稳定性,常采用石英晶体作为压电元件。压电式压力传感器主要用于发动机内部燃烧压力的测量与真空度测量。它既可以用来测量大的压力,也可以测量微小的压力。

图 5-16 是一种测量均布压力的压电式传感器结构。薄壁筒是一个薄壁厚底的金属圆筒,通过拉紧薄壁筒对压电晶片组施加压缩应力,薄壁筒外的空腔内可以注入冷却水,降低晶片温度,以保证传感器在较高的环境温度下正常工作。冷却腔用挠性材料制成的薄膜片进行密封。

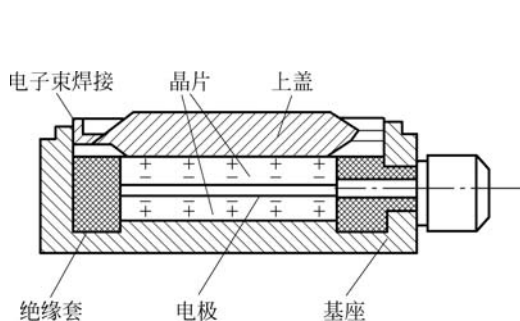


图 5-15 测力传感器的结构示意图

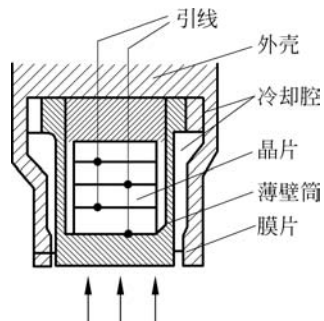


图 5-16 测量均布压力的压电式传感器结构

5.6.3 压电式加速度传感器

压电式加速度传感器是当前运用最广泛的一类加速度传感器。它利用的是具有压电效应的某些物质(如石英晶体)制成的传感元件,在加速度传感器受振时,质量块加在压电元件上的力也随之变化,因此压电式加速度传感器属于惯性式传感器。这里主要介绍压电材料的几种基本变形方式。

1. 压电材料基本变形方式

常用的压电材料有石英晶体、压电陶瓷,在使用之前需要按照一定的方向切成压电晶片,如图 5-3 所示。

图 5-3 中, X 轴方向为晶体片的厚度方向, Y 轴方向为晶体片的长度方向, Z 轴方向为晶体片的宽度方向。如果沿晶体片厚度方向施加压力或拉力, 晶体片产生的变形为厚度变形; 沿长度方向施加压力或拉力, 晶体片产生的变形为长度变形; 其他方向上施加的力为剪切变形, 这三种变形方式是压电晶体片的基本变形方式, 如图 5-17 所示。

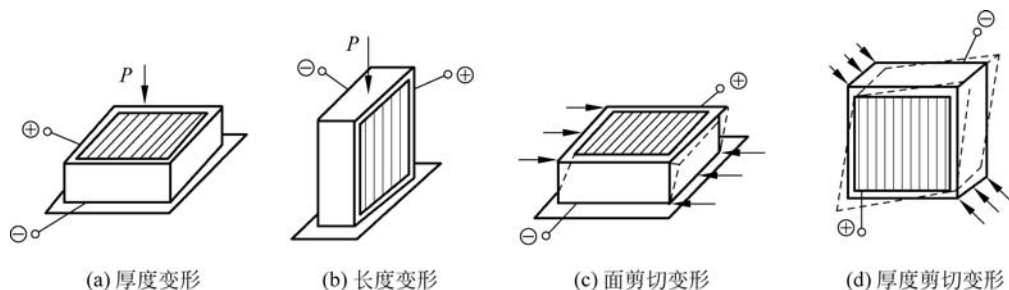


图 5-17 压电材料的基本变形方式

(1) 厚度变形: 力的作用方向沿着晶体片的厚度方向, 施加压力或拉力, 在压电晶体片上所产生的变形称为厚度变形, 如图 5-17(a) 所示。

(2) 长度变形: 力的作用方向沿晶体片的长度方向, 施加压力或拉力, 在压电晶体片上所产生的变形称为长度变形, 如图 5-17(b) 所示。

(3) 剪切变形: 剪切变形有多种, 除了厚度变形和长度变形以外的其他形变, 都可以称为剪切变形, 最常见的剪切变形有面剪切、厚度剪切等, 如图 5-17(c) 和图 5-17(d) 所示。

按压电晶体片变形方式的不同, 可以制成多种加速度传感器, 如压缩式加速度传感器、剪切式加速度传感器和复合式加速度传感器。下面介绍这三类加速度传感器的基本结构。

2. 压电式加速度传感器基本结构

压电式加速度传感器由压电元件、质量块、预压弹簧、基座、外壳等部分组成, 如图 5-18 所示。压电元件一般采用压电陶瓷制成; 质量块由密度较大的材料制成, 对压电元件施加预载荷的作用。测量时, 传感器的基座与被测物体刚性连接, 随着物体一起运动, 通过这种方式来测量运动物体的加速度。

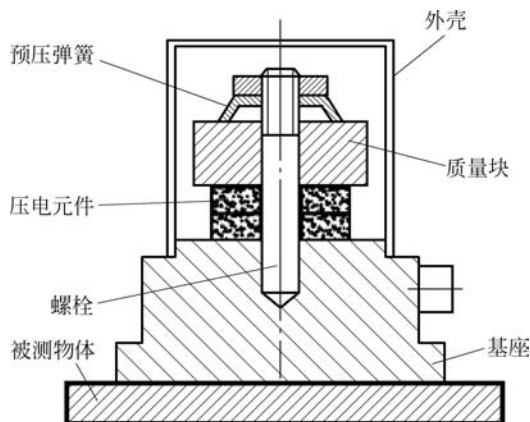


图 5-18 压电式传感器基本结构

其中对力敏感的压电元件是压电式加速度传感器的核心器件,其结构和性质决定着传感器的各种性能和测量精度;同时,与之相连的弹性体结构设计的优劣也对加速度传感器的性能起到了至关重要的作用。

常见的压电式加速度测量系统组成电路结构如图 5-19 所示。其中,压电式加速度传感器将被测加速度的变化转换为电荷量的变化;电荷放大器将传感器输出的微弱信号放大;信号处理电路将信号转换为适合 A/D 转换的信号;处理后的电压信号通过 A/D 转换后传送到单片机系统,通过计算机对数据进行处理分析再输出。

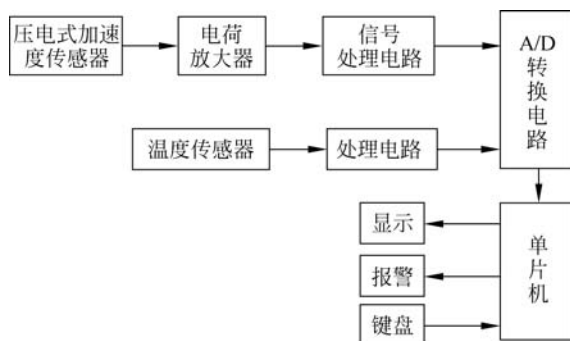


图 5-19 常见的压电式加速度测量系统

图 5-19 中温度传感器用于温度补偿。由于金属材料与陶瓷材料的热膨胀系数相差较大,热胀冷缩造成的机械变形也会对输出产生影响,从而导致质量块对压电陶瓷的预压力发生变化;而且压电陶瓷本身也受温度影响,环境温度变化会使压电材料的压电常数 d_n 、介电常数 ϵ 、电阻率 ρ 和弹性系数 k 等机电特性参数发生变化, d_n 和 k 的变化将影响传感器的输出灵敏度, ϵ 和 ρ 的变化会导致时间常数的变化,从而使传感器的低频响应特性发生变化。

因此在压电式加速度传感器测量系统中有必要引入温度补偿。温度补偿的方法是通过实验对传感器在不同温度下所产生的温度漂移值进行标定,将标定结果以数据表的格式存入单片机中。实际测量中,单片机根据测得的温度自动进行结果的修正。

3. 压电式加速度传感器类型

根据压电元件受到外力作用后变形方式的不同,压电式加速度传感器可以分为压缩式、剪切式和复合式三种类型。

1) 压缩式

压缩式加速度传感器是利用压电陶瓷片的纵向压电效应设计的加速度传感器,是一种基本的压电式加速度传感器。压缩式加速度传感器的压电元件一般采用两片压电陶瓷片构成,两片之间采用并联接法。

压电陶瓷片上面放一块密度较大的质量块,质量块用弹簧和螺栓、螺母对压电陶瓷片预先加载,施加预应力,图 5-18 就是典型的压缩式加速度传感器结构。

当物体产生加速度运动时,因质量块感受到传感器基座的振动,并受到与加速度 a 方向相反的惯性力 F 的作用,力的大小为

$$F = ma \quad (5-6)$$

式中, F 为惯性力(N); m 为质量块的质量(kg); a 为加速度(m/s^2)。

惯性力 F 作用在压电晶体上, 产生压电效应, 聚集产生的电荷 Q 为

$$Q = dF = dma \quad (5-7)$$

式中, d 为压电元件的压电系数(C/N)。

当物体的振动频率远低于传感器的固有频率时, 传感器的输出电荷 Q 与作用力 F 成正比, 即与被测物体的加速度 a 成正比。输出电荷由传感器的输出端引出, 输入到前置放大器后, 通过测量电路处理就可以得出被测对象的加速度。

2) 剪切式

与压缩式加速度传感器相比, 剪切式加速度传感器是一种很有发展前途的传感器, 并有逐步替代压缩式的趋势。它利用的是压电元件受到剪切力的作用而在两侧产生异号电荷来工作的, 常用的类型包括四种, 如图 5-20 所示。

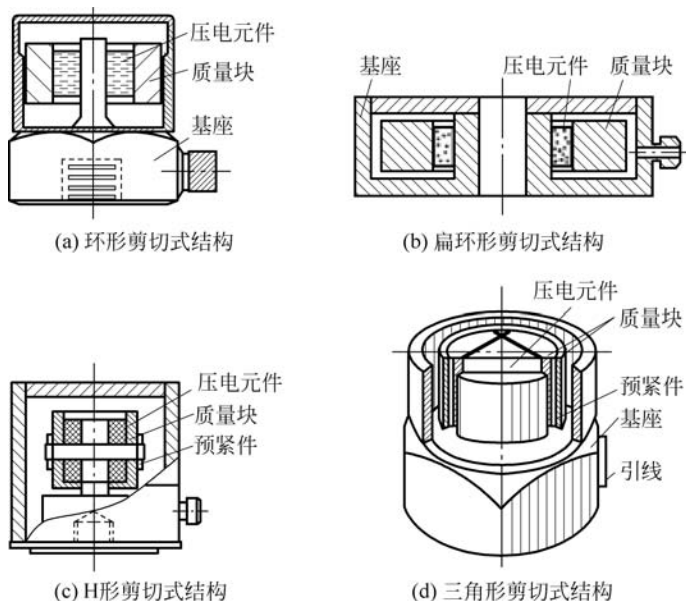


图 5-20 剪切式加速度传感器结构

图 5-20(a)为环形剪切式结构, 测量振动时, 质量块随着惯性力向上或向下移动时, 压电元件承受剪切变形。压电元件和质量块均为空心圆柱形, 质量块粘套在压电元件外侧, 压电元件粘在基座的圆柱上。工作时利用压电材料变形后产生的压电效应进行测量, 在压电元件内外圆柱面上取出感应电荷。环形剪切压电式传感器的性能优于其他结构, 但过载能力稍差, 而且由于黏合剂会随温度的增高而变软, 因此最高工作温度受到限制。

图 5-20(b)为扁环形剪切式结构的压电传感器, 这种结构也属于中空环形剪切型, 其引线能从侧面任意方向引出, 具有结构简单、轻巧、灵敏度高、便于安装的特点。

图 5-20(c)为 H 形剪切式结构的压电传感器, 有左右两片压电晶体片通过横螺栓紧固在中心立柱上。这种加速度传感器具有更好的静态特性、更高的信噪比和较宽的频率特性, 安装起来很方便。

图 5-20(d)为三角形剪切式结构的压电传感器,由三块压电晶片组合构成,晶片片和扇形质量块呈三角形空间分布,由预紧筒紧固在三角形中心柱上,由于取消了黏接剂,改善了线性特性和温度特性。

3) 复合式

复合式压电传感器泛指那些由不同组合结构、差动原理或复合材料构成的压电式传感器。典型结构为剪切-压缩复合型压电加速度传感器,如图 5-21 所示。

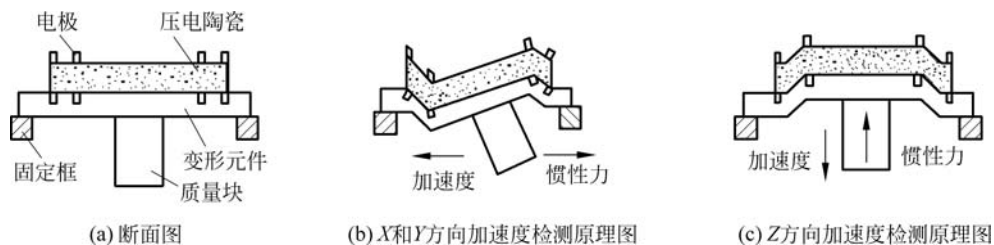


图 5-21 复合式三向加速度传感器结构

图 5-21(a)为剪切-压缩复合型的压电式加速度传感器的断面图,它仅用一个质量块和一组压电元件,可同时测量三个方向的加速度,这种加速度传感器又称为三轴加速度传感器,是性能较高的一种加速度传感器。图 5-21(b)所示为压电传感器在测量 X 和 Y 方向惯性力时的原理图,压电元件受到质量块和基座形成的沿各自方向的剪切力,并分别输出正比于各自方向的加速度分量的电荷。图 5-21(c)为压电传感器受到 Z 方向惯性力时的原理图,压电元件与质量块构成中心压缩式加速度传感器,用来测量 Z 轴方向上的加速度分量。

压电式加速度传感器具有结构简单、体积小、重量轻、测量频率宽、性能稳定、安装使用方便等优点,它是测量振动和冲击的一种较为理想的传感器。其典型的调理电路如图 5-22 所示。

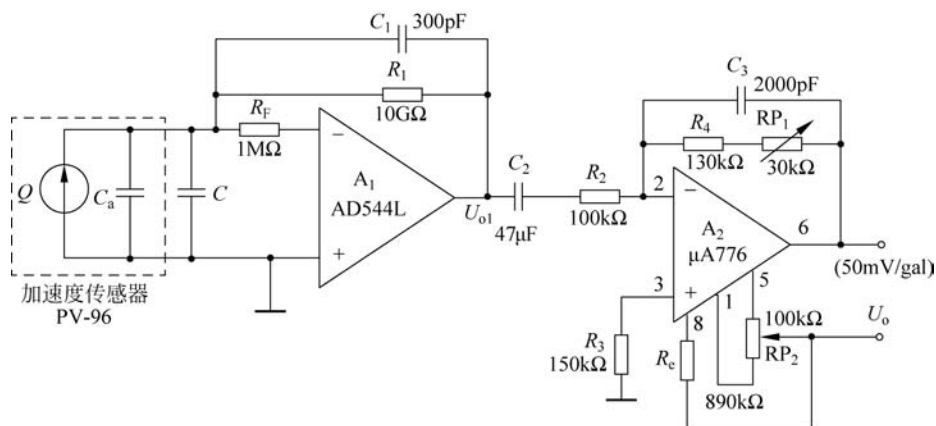


图 5-22 压电式加速度传感器调理电路

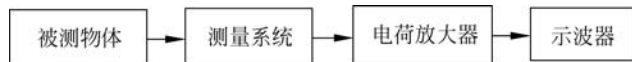
图 5-22 中的压电式加速度传感器调理电路由电荷放大器和电压调整放大器电路组成。第一级是电荷放大器电路, R_F 为过载保护电阻,以避免 AD544L 因输入过高而损坏;第二

级为输出调整放大电路。电荷放大器的低频响应由反馈电容 C_1 和 R_1 决定,低频截止频率为 $f_o=1/(2\pi R_1 C_1)=0.053\text{Hz}$ 。若传感器受到 $1g$ 加速度的作用,则第一级输出 $U_{o1}=Q_0/C_1=-10\,000\times 10^{-12}\text{C}/300\times 10^{-12}\text{F}=-33\text{V}$ 。因此可以推算出 AD544L 的灵敏度为 $-33\text{V}/g=-33.7\text{mV}/\text{gal}(1\text{gal}=1/980g=1\text{cm}/\text{S}^2)$ 。

$\mu\text{A}776$ 是一个反相放大器,其闭环增益为 $A_{F2}=-(R_4+R_{P1})/R_2$,调节 R_{P1} 可使 $A_{F2}=1.48$,因此放大器的输出灵敏度为 $(-1.48)\times(-33.7\text{mV}/\text{gal})=50\text{mV}/\text{gal}$ 。该电路一般与加速度传感器集成在一块芯片上,构成集成加速度传感器,这类传感器在飞机、汽车、船舶、桥梁、堤坝和建筑的振动和冲击测量中已得到了广泛的应用,尤其是在航空和航天领域中的应用更有它的重要地位。

【例 5-1】 利用某压电式传感器组成加速度测量系统。某压电式加速度计的灵敏度为 $S_{CP}=9.00\text{pC}/g$ (g 为重力加速度),连接灵敏度为 $S_{VC}=0.005\text{V}/\text{pC}$ 的电荷放大器,放大后的信号接到灵敏度为 $S_{XV}=200\text{mm}/\text{V}$ 的示波器上显示。试画出该加速度测量系统的框图;并计算系统总灵敏度 S 。

解:



$$S=S_{CP}\cdot S_{VC}\cdot S_{XV}=9.0\text{pC}/g\times 0.005\text{V}/\text{pC}\times 200\text{mm}/\text{V}=9\text{mm}/g$$

5.6.4 拾音器

吉他拾音器电路如图 5-23 所示,元器件参数如表 5-1 所示。压电传感器 PZ 将吉他弦振动的信号转换为电信号,该小信号经 TL071 放大以便于驱动喇叭。信号的放大倍数由 R_3 和 R_5 电阻来确定,根据图中的参数可知其放大倍数为 3.2。喇叭音量的大小由电位器 RW_1 调节。

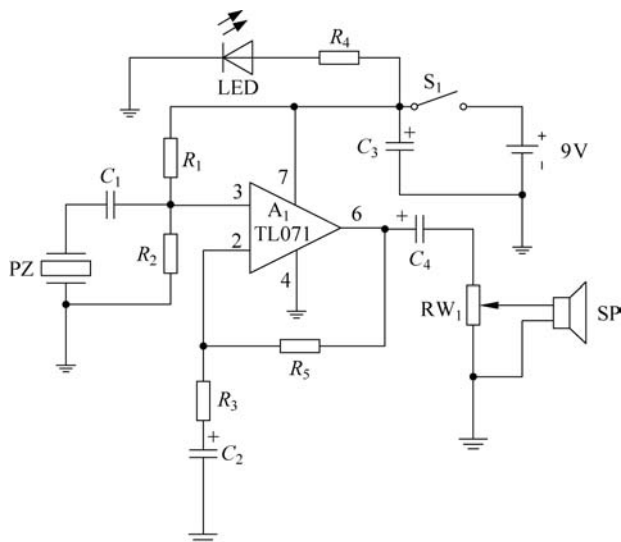


图 5-23 吉他拾音器电路

表 5-1 吉他拾音器元器件参数

元 器 件	参 数
R_1, R_2	2.2M Ω , 1/4W 电阻
R_3	100k Ω , 1/4W 电阻
R_4	1k Ω , 1/4W 电阻
R_5	220k Ω , 1/4W 电阻
RW ₁	10k Ω , 1/4W 电阻
C_1	0.1 μ F, 63V 聚酯电容
C_2, C_3, C_4	10 μ F, 50V 电解电容
A ₁	TL071, 运算放大器
LED	发光二极管
SP	蜂鸣器
PZ	压电片
S ₁	开关
其他	9V 电池