

第六章 压电传感器

课题：压电传感器的原理及应用		课时安排：2	课次编号：10
教材分析	难点：	振动的测量	
	重点：	压电传感器的应用	
教学目的和要求		1、了解压电传感器的工作原理； 2、了解振动的参数； 3、掌握压电测振的原理； 4、掌握频谱图的读法；	
采用教学方法和实施步骤：		讲授、课堂互动、分析	教具：各种压电传感器
各教学环节和内容	演示： 做以下的实验： 取一只电子打火机的点火头，让圆柱形铜质质量块快速撞击压电片，观察压电片的放电火花。 从以上演示，引入第一节的压电效应。 第一节 压电式传感器的工作原理 一、压电效应：某些电介质在沿一定方向上受到外力的作用而变形时，内部会产生极化现象，同时在其表面上产生电荷，当外力去掉后，又重新回到不带电的状态，这种现象称为压电效应（Piezoelectric Effect）。 在电介质的极化方向上施加交变电场或电压，它会产生机械振动。当去掉外加电场时，电介质变形随之消失，这种现象称为逆压电效应（电致伸缩效应）。 例如，音乐贺卡中的压电片就是利用逆压电效应而发声的。 由于外力作用在压电元件上产生的电荷只有在无泄漏的情况下才能保存，即需要测量回路具有无限大的输入阻抗，这实际上是不可能的，因此压电式传感器不能用于静态测量。压电元件在交变力的作用下，电荷可以不断补充，可以供给测量回路以一定的电流，故只适用于动态测量。 在晶体的弹性限度内，在 x 轴方向上施加压力 F_x 时，在 x 面上产生的电荷为 $Q = d_{11} F_x \quad (6-1)$ 式中 d_{11}——压电常数。 自然界中与压电效应有关的现象很多。 举例：在完全黑暗的环境中，将一块干燥的冰糖用榔头敲碎，可以看到冰糖在破碎的一瞬间，发出暗淡的蓝色闪光，这是强电场放电所产生的闪光，产生闪光的机理也是晶体的压电效应。 又例：在敦煌的鸣沙丘，当许多游客在沙丘上蹦跳或从鸣沙丘上往下滑时，可以听到雷鸣般的隆隆声。产生这个现象的原因是无数干燥的沙子（SiO_2 晶体）在重压引起振动，表面产生电荷，在某些时刻，恰好形成电压串联，产生很高的电压，并通过空气放电而发出声音。 再例：在电子打火机中，多片串连的压电材料受到敲击，产生很高的电压，通过		

尖端放电，而点燃火焰。

二、压电材料的分类及特性

压电式传感器中的压电元件材料主要有三类：压电晶体（单晶体）、经过极化处理的压电陶瓷（多晶体）、高分子压电材料。

1. 石英晶体

石英晶体：突出优点是性能非常稳定。在 $20\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的范围内压电常数的变化率只有 $-0.0001/^{\circ}\text{C}$ 。

不足之处：压电常数较小 ($d=2.31\times 10^{-12}\text{C/N}$)。

因此石英晶体大多只在标准传感器、高精度传感器或使用温度较高的传感器中使用，而在一般要求的测量中，基本上采用压电陶瓷。

2. 压电陶瓷

比石英晶体的压电系数高得多，而制造成本却较低，目前国内外生产的压电元件绝大多数都采用压电陶瓷。

常用的压电陶瓷材料主要有以下几种：

(1) 锆钛酸铅系列压电陶瓷(PZT) 有较高的压电常数 [$d=(200\sim 500)\times 10^{-12}\text{C/N}$] 和居里点 (500°C 左右)，是目前经常采用的一种压电材料。

(2) 非铅系压电陶瓷 为减少铅对环境的污染，人们正积极研制非铅系压电陶瓷。目前非铅系压电陶瓷体系主要有： BaTiO_3 基无铅压电陶瓷、BNT 基无铅压电陶瓷、铌酸盐基无铅压电陶瓷、钛酸铋钠钾无铅压电陶瓷和钛酸铋锶钙无铅压电陶瓷等，它们的各项性能多已超过含铅系列压电陶瓷，是今后压电陶瓷的发展方向。

3. 高分子压电材料

高分子压电材料有聚偏二氟乙烯 (PVF_2 或 PVDF)、聚氟乙烯 (PVF)、改性聚氯乙烯 (PVC) 等。其中以 PVF_2 和 PVDF 的压电常数最高。

高分子压电材料是一种柔软的压电材料。可根据需要制成薄膜或电缆套管等形状。经极化处理后就显现出电压特性。它不易破碎，具有防水性，可以大量连续拉制，制成较大面积或较长的尺度，因此价格便宜。

它的声阻抗约为 $0.02\text{MPa}\cdot\text{s}$ ，与空气的声阻抗有较好的匹配，可以制成特大口径的壁挂式低音扬声器。

高分子压电材料的工作温度一般低于 100°C 。温度升高时，灵敏度将降低。它的机械强度不够高，耐紫外线能力较差，不宜暴晒，以免老化。

新型材料：现在还开发出一种压电陶瓷-高聚物复合材料，它是无机压电陶瓷和有机高分子树脂构成的压电复合材料，兼备无机和有机压电材料的性能。可以根据需要，综合二相材料的优点，制作性能更好的换能器和传感器。它的接收灵敏度很高，更适合于制作水声换能器。

第二节 压电式传感器的测量转换电路

一、压电元件的等效电路

电荷放大器

当被测振动较小时，压电式传感器的输出信号非常微弱，一般需将电信号放大后才能检测出来。

常使用电荷放大器来测量压电式传感器的输出信号的原因：

因为压电传感器的内阻抗极高，因此需要与高输入阻抗的前置放大器配合。如果使用电压放大器，则到电压放大器输入端得到的电压 $u_i=Q/(C_a+C_c+C_i)$ ，导致电压放

大器的输出电压与屏蔽电缆线的分布电容 C_c 及放大器的输入电容 C_i 有关，它们均是不稳定的，会影响测量结果，故压电传感器的测量电路多采用性能稳定的电荷放大器（即：电荷/电压转换器），电荷放大器如图 6-4 所示。

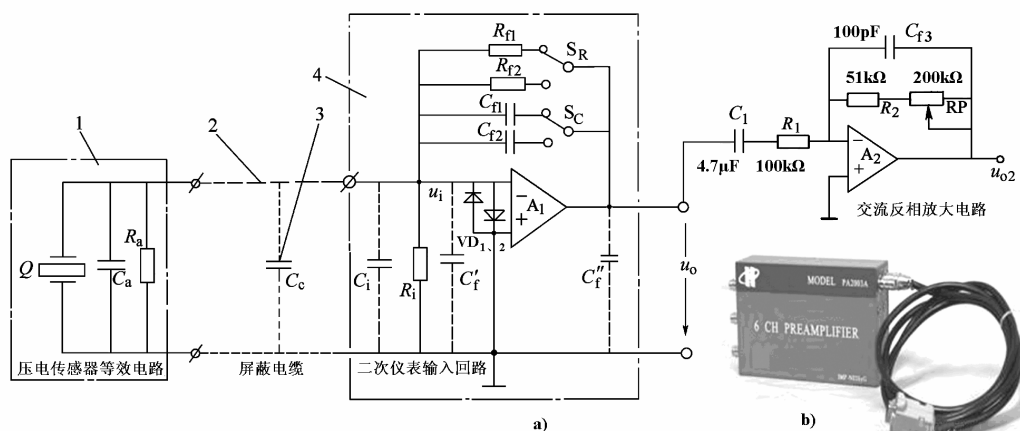


图 6-4 电荷放大器

a) 电路 b) 外形

1—压电传感器 2—屏蔽电缆线 3—分布电容 4—电荷放大器

S_C —灵敏度选择开关 S_R —带宽选择开关

$C_f' - C_f$ 在放大器输入端的密勒等效电容 $C_f'' - C_f$ 在放大器输出端的密勒等效电容

电荷放大器特点：输出电压与输入电荷量成正比的宽带电荷/电压转换器，用于测量振动、冲击、压力等机械量，输入可配接长电缆而不影响测量精度。电荷放大器的频带宽度可达 $0.001\text{Hz} \sim 100\text{kHz}$ ，灵敏度可达 $1/\text{ms}^{-2}$ ，输出可达 $\pm 10\text{V}$ 或 $\pm 100\text{mA}$ ，谐波失真度小于 1% ，折合至输入端的噪声小于 $10\mu\text{V}$ 。

电荷放大器的输出电压可由下式得到

$$u_o = -\frac{Q}{C_f} \quad (6-4)$$

式中 Q ——压电传感器产生的电荷；

C_f ——并联在放大器输入端和输出端之间的反馈电容。

C_f 的选择：

当被测振动较小时，电荷放大器的反馈电容应取得小一些，可以取得较大的输出电压。

电荷放大器的低频下限 f_L 主要由电荷放大器的 R_f 与 C_f 的乘积决定，即

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (6-5)$$

可根据被测信号的频率下限，用开关 S_R 切换不同的 R_f ，来获得不同的带宽。

便携式测振仪外形如图 6-5 所示。

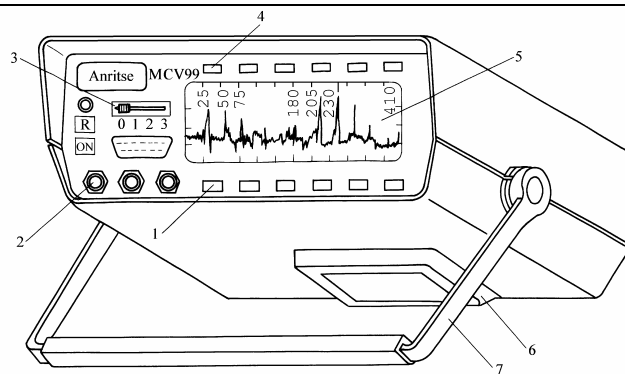


图 6-5 便携式测振仪外形

1—量程选择开关 2—压电传感器输入信号插座 3—多路选择开关 4—带宽选择开关
5—带背光点阵液晶显示器 6—电池盒 7—可变角度支架

提问：

1. 请分析各开关的功能；
2. 读点阵液晶显示器的振动频率

第三节 压电传感器的结构和应用

压电传感器主要用于脉动力、冲击力、振动等动态参数的测量。

一、高分子压电材料的应用

1. 玻璃打碎报警装置
2. 压电式周界报警系统
3. 压电式动态力传感器

第四节 振动测量及频谱分析

一、振动的基本概念

物体围绕平衡位置作往复运动称为振动。

振动分类：

机械振动、土木结构振动、运输工具振动以及武器、爆炸引起的冲击振动等。

从振动的频率范围来分，有高频振动、低频振动和超低频振动等。

振动的主要参数：

频率 f ，单位为 Hz，振幅 x ，单位为 mm；振动的速度 v ，单位为 m/s；加速度 a ，单位为 m/s^2 。

二、测振传感器分类

测振用的传感器又称拾振器。它有接触式和非接触式之分。

接触式中又有磁电式、电感式、压电式等。

非接触式中又有电涡流式、电容式、霍尔式、光电式等。

三、压电式振动加速度传感器的结构

常用压电式振动加速度传感器与被测振动加速度的机件紧固在一起后，传感器受机械运动的振动加速度作用，压电晶片受到质量块惯性引起的交变力，其方向与振动加速度方向相反，大小由 $F=ma$ 决定。惯性引起的压力作用在压电晶片上产生电荷。电荷由引出电极输出，由此将振动加速度转换成电参量。

四、压电振动加速度传感器的性能指标

(1) 灵敏度 K 压电式加速度传感器属于自发电型传感器，它的输出为电荷量，以 pC 为单位 ($1\text{pC}=10^{-12}\text{C}$)。而输入量为加速度，单位为 m/s^2 ，所以灵敏度以 $\text{pC}/(\text{m/s}^2)$ 为单位。

用标准重力加速度 g 作为加速度的单位：这是检测行业的一种习惯用法。大多数测量振动的仪器都用 g 作为加速度单位，并在仪器的面板上以及说明书中标出，灵敏度的范围约为 $10\sim 100\text{pC/g}$ 。

许多压电加速度传感器的灵敏度单位为 mV/g ，通常为 $10\sim 1000\text{mV/g}$ 。

高灵敏度的压电传感器可用于测量微弱的振动。

低灵敏度的压电传感器可用于测量剧烈的振动。

(2) 频率范围 常见的压电加速度传感器的频率范围为 $0.01\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ 。

(3) 动态范围 常用的测量范围为 $0.1\sim 100g$ ，或 1000m/s^2 。测量冲击振动时应选用 $100\sim 10000g$ 的高频加速度传感器；而测量桥梁、地基等微弱振动往往要选择 $0.001\sim 10g$ 的高灵敏度的低频加速度传感器。

七、振动的频谱分析

(1) 时域图形 纵坐标为输入信号，横坐标为时间轴，称为时域图。

(2) 频域图形 如果将时域图经过快速傅里叶变换 (FFT)，就能在计算机显示器上显示出另一种坐标图，它的横坐标为频率 f ，纵坐标可以是加速度，也可以是振幅或功率等。它反映了在频率范围之内，对应于每一个频率的振动分量的大小，这样的图形称为频谱图或频域图。专门用于测量和显示频谱图的仪器称为频谱仪。

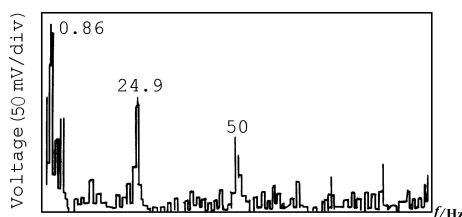


图 6-16 空调压缩机在 720r/min 带负载时的频谱图

(3) 依靠频谱分析法进行故障诊断 从频谱仪得到的频域图 (又称频谱图，见图 6-17b) 中可以清楚地看到，活塞的振动是由 5Hz 和 10Hz 等多个振动分量合成的。 10Hz 的幅值大约是 5Hz 幅值的一半。

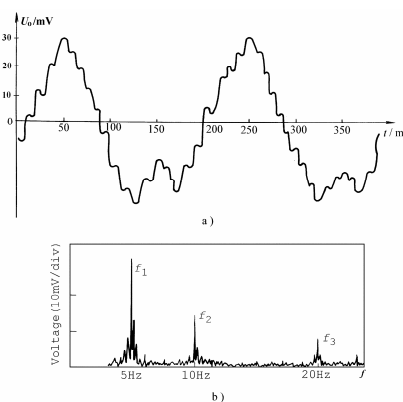


图 6-17 手扶拖拉机发动机活塞振动的时域图形和频谱图
a) 时域图 b) 频域图

课外学习指导	安排每周二下午，在测控办公室进行答疑
课外作业	P140：2、3、5
检测教学目标实现程度	考察学生能否利用频谱仪，完成振动的测量