

第一章 综合与现代物理实验

§ 1.1 传感器技术（二）

在本书第二册传感器技术（一）中已对传感器的定义、基本组成和电阻应变式传感器等作过介绍，鉴于传感器技术在现代科技领域中起着愈来愈重要的作用，因此在本册中将进一步拓宽和加深相关知识。

传感器在科技发展中的重要性表现在以下三个方面：

（1）传感器的地位与作用

现代科学技术的迅猛发展，使人类社会进入信息时代。而在信息时代中，人们的社会活动将主要依靠对信息资源的开发及获取、传输与处理。传感器位于自动检测与控制系统之首，是感知、获取和检测信息的窗口；传感器处于研究对象与测控系统的接口位置，一切科学研究和生产过程中获取的信息，都要通过它转换为容易传输与处理的电信号。因此，传感器的地位与作用就特别重要。现在人们常常将计算机比喻为人的大脑，传感器则可比喻为人的感觉器官。没有功能正常而完美的感觉器官，就不能迅速而准确地采集与转换欲获取的外界信息，纵有再好的大脑也是无法发挥其功能与作用的。“没有传感器技术就没有现代科学技术”的观点现在已为全世界所公认。科学技术越发达，自动化程度越高，对传感器的依赖性就越大。所以，国内外都将传感器技术列为重点发展的高技术之一，倍受重视。

（2）传感器技术是信息技术的基础与支柱

20世纪80年代以来，人类社会进入了信息时代，因而信息技术对社会发展、科技进步将起决定作用。现代信息技术的基础是信息采集、信息传输与信息处理，它们就是传感器技术、通信技术和计算机技术。传感器在信息采集系统中处于前端，它的性能如何将直接影响整个系统的工作状态与质量。因此近十多年来，人们对传感器在信息社会中的重要性又有新的认识与评价。

（3）传感器已经广泛应用于各个学科领域

各个学科的发展与传感器技术都有密切的关系。例如工业自动化、农业现代化、航天技术、军事工程、机器人技术、资源开发、海洋探测、环境监测、安全保卫、医疗诊断等领域都与传感器有密切的关系。而且传感器技术的发展，会对其他学

科的发展产生相互影响.科学上的每一个发现与进步,都离不开传感器与检测技术的作用

传感器的种类十分繁多,分类方法也很多.例如按信号转换效应来分可分为物理型(利用物理效应)、化学型(利用化学效应)及生物型(利用生物效应、微生物、机体组织等)传感器;按构成原理来分,可分为结构型和物性型两类;按构成传感器敏感元件的材料来分,又可分为半导体传感器、陶瓷传感器、有机材料传感器等等;而在应用中通常按用途来进行分类,如压力传感器、温度传感器、光传感器等等.

现代传感器这个名称具有两个含义.其一,与传统的、常见的传感器(如电阻应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器等)相比较而言,它是指最近十年左右研制开发成功的新型传感器;其二,现代传感器是借助于现代先进科学技术研制开发出来的传感器,它是利用了现代科学原理,或者应用了现代新型功能材料,或者采用了现代先进的制造技术.

当前,现代传感器技术的发展方向有以下几个方面:

(1) 发现新现象

利用物理现象、化学反应和生物效应等是各种传感器的基本原理,所以发现新现象与新效应是现代传感器发展的重要基础,其意义极为深远.

(2) 开发新材料

功能材料是发展传感器技术的另一重要基础.现在,由于材料科学的进步,在制造各种材料时,人们可以任意控制它的成分,从而可以设计与制造出各种用于传感器的功能材料.例如控制半导体氧化物的成分,可以制造出各种气体传感器;光导纤维用于传感器是传感器功能材料的一个重大发现;有机材料作为功能材料,正引起国内外科学家的极大关注.

(3) 采用新工艺

传感器的敏感元件性能除了由其功能材料决定外,还与其加工工艺有关.随着半导体、陶瓷等新型材料用于传感器敏感元件,许多现代先进制造技术也引入传感器的制造,例如集成技术、微细加工技术、离子注入技术、薄膜技术等,能作出性能稳定、可靠性高、体积小、重量轻的敏感元件.

(4) 研究多功能集成传感器

研究多功能集成传感器是传感器发展的一个重要方向,即在一个芯片上集成多种功能敏感元件或同一功能的多个敏感元件.例如日本研制出可检测 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 的多种离子传感器,我国也研制出复合压阻传感器,一个芯片可同时检测压力与温度.

(5) 研究智能式传感器

智能传感器是一种带微型计算机,兼有检测、判断、信息处理等功能的传感

器.与传统传感器相比,它具有很多特点,例如,它可以确定传感器的工作状态,对测量数据进行修正,以减少环境因素如温度变化引起的误差,用软件解决硬件难以解决的问题,完成数据计算与处理工作等等.

(6) 仿生传感器研究

值得注意的一个动向是对仿生传感器的研究,特别是机器人技术向智能化高级机器人的发展.仿生传感器就是模仿人的感觉器官的传感器,即视觉传感器、听觉传感器、嗅觉传感器、味觉传感器、触觉传感器等.目前,只有视觉传感器与触觉传感器解决得比较好,其他几种远不能满足机器人技术发展的需求,也可以说,至今真正能代替人的感觉器官功能的传感器极少.

总之,传感器技术在发展国民经济、推动社会进步方面的作用是非常显著的.传感器和传感技术,即信息拾取技术已成为现代信息技术的三大基础之一,这是与多种现代技术密切相关的尖端技术.因此在教学实验中学习和掌握与其有关的基本知识和实验方法是非常重要的.

本节将介绍光电转换特性的研究、电涡流传感器、压电传感器等三个实验.

参考资料

1. 刘迎春,叶湘滨.现代新型传感器原理与应用.北京:国防工业出版社,1998
2. 吴兴惠,王彩君.传感器与信号处理.北京:电子工业出版社,1998

实验 1.1.1 光电转换器特性的研究

传感器技术中很重要的一类称为光传感器.光传感器通常是指紫外到红外波长范围的传感器,其类型可分为量子探测器和热探测器两类.本实验将介绍常用的量子探测器或称光子探测器,它是利用材料的光电效应制作成的探测器,故也称光电转换器.其主要参数有响应度(灵敏度)、光谱响应范围、响应时间和可探测的最小辐射功率等.

光电转换器件主要是利用光电效应将光信号转换为电信号.自光电效应发现至今,光电转换器件获得了突飞猛进的发展,目前各种光电转换器件已广泛地应用在各行各业.常用的光电效应转换器件有光敏电阻、光电倍增管、光电池、PIN管、CCD等.

光电倍增管是把微弱的输入光转换为电子,并使电子获得倍增的电真空器件.当光信号强度发生变化时,阴极发射的光电子数目相应变化,由于各倍增极的倍增因子基本上保持常数,所以阳极电流亦随光信号的变化而变化,此即光电倍增管的简单工作过程.由此可见,光电倍增管的性能主要由光阴极、倍增极及

极间电压决定。光电阴极受强光照射后，由于发射电子的速率很高，光电阴极内部来不及重新补充电子，因而使光电倍增管的灵敏度下降。如果入射光强度太高，导致器件内电流太大，以至于电阴极和倍增极因发热而分解，就会造成光电倍增管的永久性破坏。因此，使用光电倍增管时，应避免强光直接入射。光电倍增管一般用来测弱光信号。

光电池是把光能直接转换成电能的器件，可作为能源器件使用，如卫星上使用的太阳能电池。它也可作为光电子探测器件。

光电二极管有耗尽层光电二极管和雪崩光电二极管两种半导体 pn 结区附近称为耗尽层，该层的两侧是相对高的空间电荷区，而耗尽层内通常情况下并不存在电子和空穴。只有当光照射 pn 结时才能使耗尽层内产生载流子（电子 - 空穴对），载流子被结内电场加速形成光电流。利用该原理制成的光电二极管称为耗尽层光电二极管。耗尽层光电二极管有 pin 型、pn 型、金属 - 半导体型、异质型等。

雪崩光电二极管是利用二极管在高的反向偏压下发生雪崩效应而制成的光电器件。雪崩光电二极管的倍增效应与外加电压有关。雪崩光电二极管具有 $10^2 \sim 10^3$ 倍的电流增益，因此，它的灵敏度很高，并且响应速度快，常用于超高频的调制光和超短光脉冲的探测。

CCD (Charge Coupled Device) 即电荷耦合器件，通过输入面上光电信号逐点的转换、储存和传输，在其输出端产生一时序信号。随着科技的进步，CCD 技术日臻完善，已广泛用于安全防范、电视、工业、通信、远程教育、可视网络电话等领域。

本实验的目的是了解光电效应原理及光电转换器件的工作模式并测量光电转换器件的基本特性

实验原理

光电转换器件主要是利用物质的光电效应，即当物质在一定频率的光的照射下，释放出光电子的现象。当光照射金属、金属氧化物或半导体材料的表面时，会被这些材料内的电子所吸收，如果光子的能量足够大，吸收光子后的电子可挣脱原子的束缚而逸出材料表面，这种电子称为光电子，这种现象称为光电子发射。又称为外光电效应。有些物质受到光照射时，其内部原子释放电子，但电子仍留在物体内部，使物体的导电性增加，这种现象称为内光电效应。

某些半导体材料在光的照射下，内部电子吸收光子后，挣脱原子的束缚而成为自由电子，使其导电性能增加，电阻率下降。这种半导体器件称为光敏电阻。这种现象称为光电导效应。当光停止辐照后，自由电子又被失去电子的原子所俘获，其电阻率恢复原值。利用光敏电阻的这种特性制成的光控开关在我们的日常

生活中随处可见。

二次电子发射效应：当电子轰击某物体时，如果该电子的动能足够大，被轰击物体将会有新的电子发射出来，该现象称为二次电子发射效应。轰击物体的电子称为一次电子，物体吸收一次电子后激励体内的电子到高能态，这些高能电子的一部分向物体表面运动，到达表面时仍具有足够的能量克服表面势垒而发射出来的电子称为二次电子。

常用的光电转换器件主要有光敏电阻、光电倍增管、光电二极管等。

光电二极管是典型的光电效应探测器，具有量子噪声低、响应快、使用方便等特点，广泛用于激光探测器。图 1.1.1-1 是硅光电二极管的工作原理。外加反偏电压与结内电场方向一致，当 pn 结及其附近被光照射时，就会产生载流子（即电子-空穴对）。结区内的电子-空穴对在势垒区电场的作用下，电子被拉向 n 区，空穴被拉向 p 区而形成光电流。同时势垒区一侧一个扩散长度内的光生载流子先向势垒区扩散，然后在势垒区电场的作用下也参与导电。当入射光强变化时，光生载流子的浓度及通过外回路的光电流也随之发生相应的变化。这种变化在入射光强很大的动态范围内仍能保持线性关系。

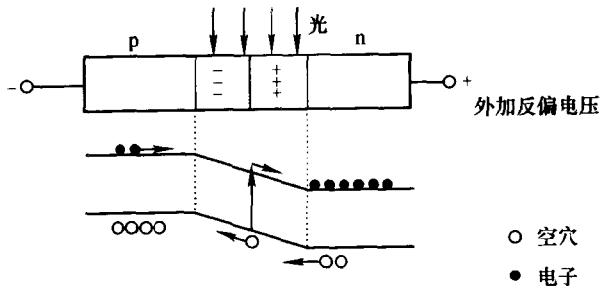


图 1.1.1-1 硅光电二极管工作原理

1. 伏安特性

当没有光照射时，光电二极管相当于普通的二极管。其伏安特性是

$$I = I_0 [\exp(eV/kT) - 1]$$

式中 I 为流过二极管的总电流， I_0 为反向饱和电流， e 为电子电荷， k 为玻耳兹曼常量， T 为工作温度， V 为加在二极管两端的电压。如图 1.1.1-2 所示，对于外加正向电压， I 随 V 指数增长，称为正向电流；当外加电压反向时，在反向击穿电压之内，反向饱和电流基本上是个常数。

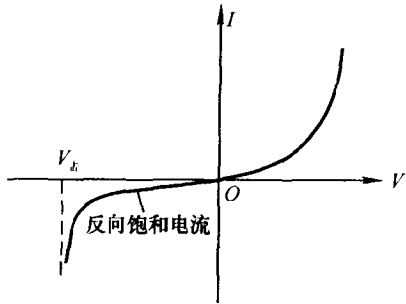


图 1.1.1-2 普通二极管伏安特性曲线

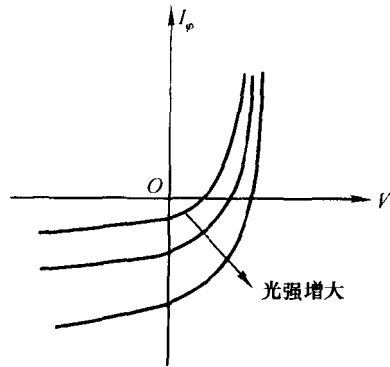


图 1.1.1-3 硅光电二极管的伏安特性

对于硅光电二极管来说，其伏安特性可表示为

$$I_{\varphi} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] + I_P$$

式中 I_{φ} 是流过硅光电二极管的总电流， $I_P = SP$ 是反向光电流， S 是电流灵敏度， P 是入射光功率。因硅光电二极管是反向偏压工作，故上式可简化为

$$I_{\varphi} = -I_0 - I_P = -(I_0 + I_P)$$

硅光电二极管的伏安特性曲线相当于把普通二极管的伏安曲线向下平移。其实际伏安曲线如图 1.1.1-3 所示。在工作反偏压一定的情况下，从图 1.1.1-3 可以绘出 I_{φ} 与入射光强的关系曲线，如图 1.1.1-4 所示。从图中可以看出，在很大的动态范围内，它们基本上是线性关系。因此光电二极管不像光电倍增管那样容易损坏。

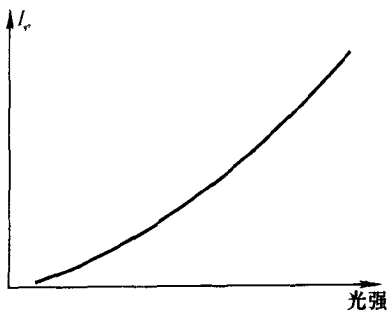


图 1.1.1-4 光电流与入射光强的关系

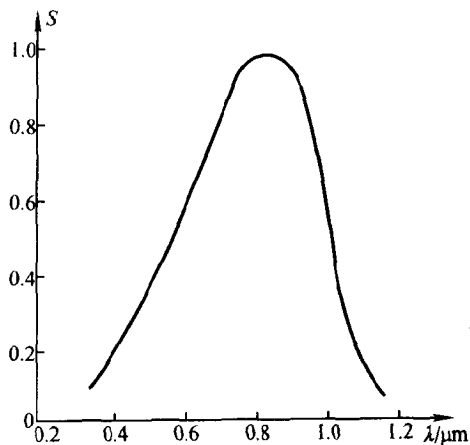


图 1.1.1-5 硅光电二极管的光谱响应曲线

2. 光电二极管的频率响应、峰值响应、时间响应

光电二极管具有频率响应宽、灵敏度高、时间响应快等特点，是一种常用的光电探测器件。光电二极管的光谱响应主要由构成 pn 结的材料决定。图 1.1.1-5 是硅光电二极管的光谱响应曲线

3. 量子效率

光电探测器吸收光子产生光电子，光电子形成光电流因此，光电流 I 与每秒入射的光子数，即光功率 P 成正比。根据统计光学理论，光电流与入射光功率的关系为

$$I = \alpha P = \frac{\eta e}{h\nu} P$$

式中 I 为光电流， P 为光功率， $\alpha = \frac{\eta e}{h\nu}$ 是光电转换因子， e 为电子电荷， h 为普朗克常量， ν 为入射光频率， η 为量子效率。从上式可知

$$\eta = \frac{I h \nu}{e P}$$

实验内容

1. 测量光电二极管的频谱曲线、峰值响应频率

如图 1.1.1-6 所示，在暗箱里，强度较高的白光光源通过滤光片后入射到光电二极管上，光电二极管的线路图如图 1.1.1-7 所示。利用示波器或电压表观察、测量不同波长的光（用不同颜色的滤光片获得）照射在 pin 管上所获得的电压。绘出波长 - 电压及 $\lambda - S$ 图。通过 $\lambda - S$ 曲线向找到峰值响应频率， $\lambda - S$ 曲线向两边延伸，确定截止波长。

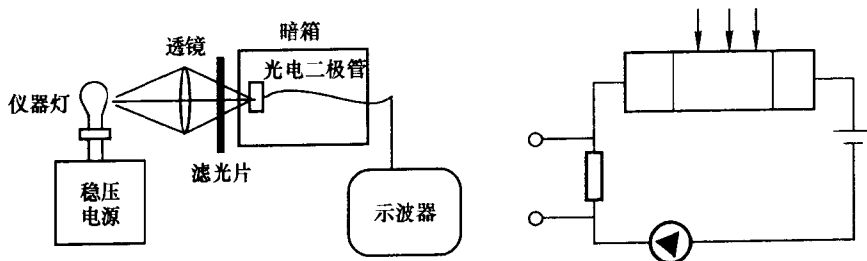


图 1.1.1-6 测量光电二极管频谱曲线装置图 图 1.1.1-7 光电二极管电路图

能量计是一种灵敏度较高的测量激光输出能量的仪器，使用中应注意适当的挡位，以免过高能量损坏仪器，存储示波器内含微处理器，可将测得的波形经

机内 RAM/ROM 存贮起来 获得静态显示 便于观察、测量、拍照。

2. 按图 1.1.1-7 的接线, 用已确定对应于峰值波长的滤光片, 加一定的反偏电压, 改变入射光强 (用可变光阑实现), 测量光电流与光强的关系, 绘出其关系图, 观察二者之间的关系。

3. 利用上述装置测量光敏电阻的长波极限以及峰值响应波长和频谱曲线。光电二极管的灵敏度高, 应避免强光入射时损坏器件。

4. 自己设计一套电路装置, 测量光电二极管的量子效率。

思考题

利用光敏电阻的特性, 设计一光控开关电路。

(张增明)

实验 1.1.2 电涡流传感器

电磁感应线圈产生的磁通量接触金属导体时, 金属导体中产生“涡流”。磁通量的强度和频率不同, 对金属导体的渗透度也不同。由于金属导体的质量、形状、电导率、透磁率、伤痕、膜厚等不同, 涡流会使电磁感应线圈的总阻抗发生变化。检测这种变化量的方法即电涡流传感器的方法, 它可用来测量振动体的振幅和频率, 检测金属表面的腐蚀膜、电镀膜等的膜厚……

本实验的目的是: 加深对电涡流传感器工作原理和特性的理解, 了解被测材料对电涡流传感器特性的影响, 掌握用电涡流传感器测量振动体振幅和频率的方法。

实验原理

1. 电涡流传感器的工作原理

一个通有交变电流的传感线圈, 因电流变化而在周围空间产生交变磁场。将被测金属置于该磁场内, 则在金属导体内会感应出一圈圈自相闭合的电流, 称为“电涡流”如图 1.1.2-1 所示。涡流的大小和金属导体的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、厚度 d 、线圈与金属导体的距离 x , 以及线圈励磁电流的角频率 ω 等参数有关。如果固定其中某些参数, 就可根据涡流的大小来测量出另外一些参数。

为了简化问题, 我们把金属导体理解为一个闭合线圈, 图 1.1.2-2 为电涡流传感器与被测体的等效电路。其中 R_1 、 L_1 为初级线圈的电阻和电感; R_2 、 L_2 为闭合线圈的电阻和电感; M 则为两线圈间的互感。根据等效电路, 可写出两个电压平衡方程式:

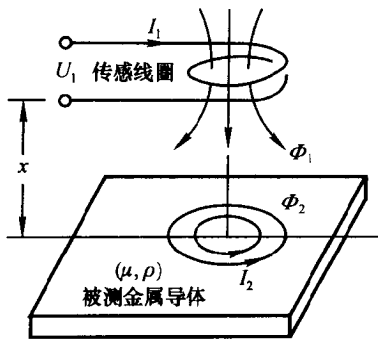


图 1.1.2-1 电涡流传感器原理示意图

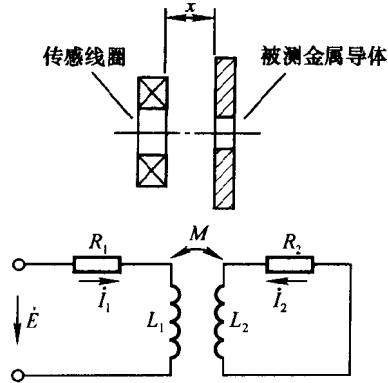


图 1.1.2-2 电涡流传感器工作时的简化模型和等效电路

$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{E} \\ -j\omega M \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 - j\omega L_2 \dot{I}_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

解之得

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j \left[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right]} \quad (2)$$

$$\dot{I}_2 = j\omega \frac{M \dot{I}_1}{R_2 + j\omega L_2} = \frac{M \omega^2 L_2 \dot{I}_1 + j\omega M R_2 \dot{I}_1}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (3)$$

由式 (2) 可得空心线圈的总阻抗为

$$Z = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_1} = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2 + j \left[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right]} \quad (4)$$

根据式 (4) 可进一步求出空心线圈的等效电阻 R_{eq} 、等效电感 L_{eq} 和等效品质因数 Q_{eq} ：

$$R_{eq} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 \quad (5)$$

$$L_{eq} = L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} L_2 \quad (6)$$

$$Q_{eq} = \frac{\omega \left[L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} L_2 \right]}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \quad (7)$$

由此可见当线圈接近金属导体时，电参数 Z 、 R_{eq} 、 L_{eq} 、 Q_{eq} 均为互感 M 的函数，即为涡流线圈与金属导体间距离 x 的函数，所以凡是能引起涡流变化的电量和非电量，如金属的电阻率、磁导率、几何形状、线圈与导体间的距离等，均可通过测量涡流线圈的 Z 、 R_{eq} 、 L_{eq} 和 Q_{eq} 来确定，这便是电涡流传感器的工作原理。

2. 电涡流传感器测量电路

如上所述，电涡流传感器可以把涡流线圈和被测金属导体间的距离变化，转换为线圈等效电阻、等效电感、等效阻抗和等效品质因数的变化，并将这些变化量转化为电压或电流的变化显示出来。

本实验采用的测量电路方框图如图 1.1.2-3 所示，其中涡流线圈 L 和电容 C 组成谐振电路，谐振频率为

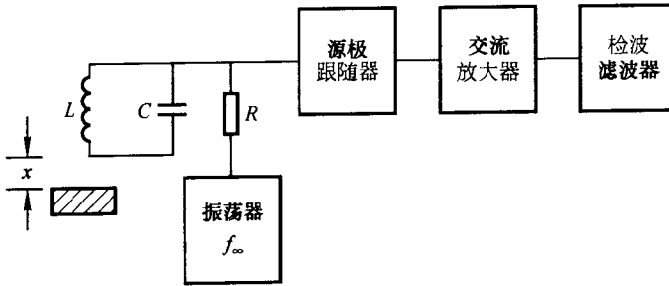


图 1.1.2-3 涡流传感器测量电路框图

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

若将振荡器的振荡频率取为 f_{∞} ，即 $x \rightarrow \infty$ 时谐振电路的谐振频率，则涡流线圈上的端电压为

$$V_{\infty} = Qu_1$$

式中 Q 为谐振电路的品质因数， e_1 为初级线圈的电源电压，如图 1.1.2-4 所示。把两线圈的初始位置定为 x_0 ，相应的线圈初电感为 L_0 ，谐振电路的初谐振频率为 f_0 则涡流线圈的端电压为

$$V_0 = kQ_0 u_1$$

其中 K 为与 Q_0 有关的系数， f_0 一般取为 1 MHz 左右。当距离 x 变化后， L 、 Q 、 f 都要变化，

$$V_1 = k_1 Q_1 u_1$$

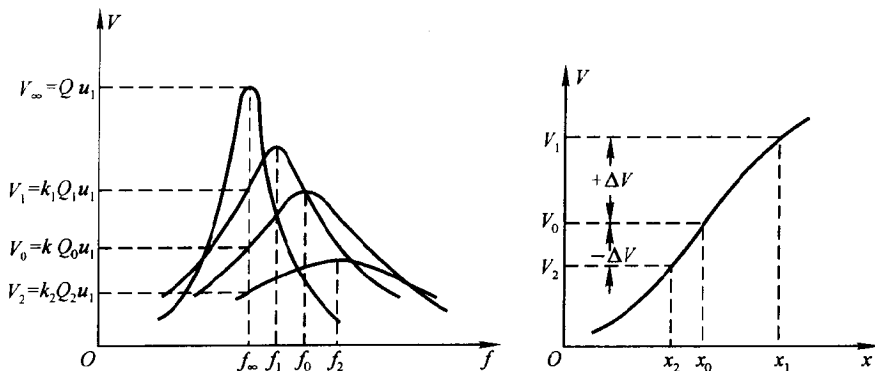


图 1.1.2-4 变频调幅测量电路原理

$$V_2 = k_2 Q_2 u_1$$

此时端电压的增量 $\Delta V_1 = V_2 - V_1$ 正比于 Δx 。为取得较大的线性范围，通常将 f_0 置于线性段的中点。电涡流传感器的测量电路有多种类型，本实验采用的测量电路属于变频调幅式电路。

实验内容

1. 电涡流传感器的静态标定

(1) 涡流传感器静态标定电路如图 1.1.2-5 所示。

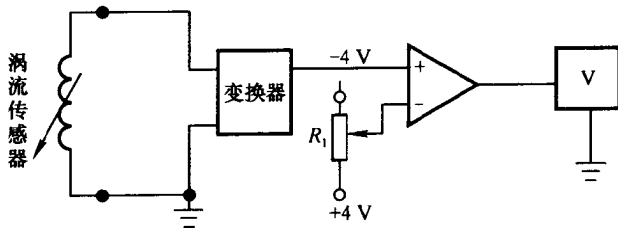


图 1.1.2-5 涡流传感器的静态标定电路

(2) 松开固定涡流传感器的螺丝，使之与被测铝片有一较大距离（约 10 mm），并固定之。

(3) 用示波器观察涡流变换器输入端波形，并测定其频率、峰峰值和输出直流电压。

(4) 装上测微头并调至 10 mm 降低传感器高度使其与铝片（铁片）中心部位对准，并由此开始读数。

(5) 向下转动测微头 每隔 0.25 mm 记录示波器波形的峰峰值 (V_{p-p}) 的电压表值 (V) 直到线性严重破坏为止。

(6) 根据实验数据, 在坐标纸上画出 $V-x$ 曲线, 找出线性范围, 求出系统灵敏度 $S = \frac{\Delta V}{\Delta x}$ 。

2. 被测材料对电涡流传感器特性的影响

将铝测片换成铁测片, 重复 1 中 (4)、(5) 步骤实验. 对两种材料的测量结果进行比较讨论,

3. 振动体振幅和频率的测量

(1) 卸下测微头, 差动放大器调零, 增益旋钮左旋到底, 使 $K_A = 1$ 。

(2) 按图 1.1.2-6 接线 其中 R_1 为电桥单元调平衡电位器。

(3) 利用实验 2 的结果, 找出传感器的线性范围, 调整传感器的位置, 使其与被测铁片距离为最佳工作点 (线性区中点, 可根据 V_{p-p} 值反推距离)。

(4) 调整电桥平衡电位器 R_1 使电压表读数为零。

(5) 将低频激励信号输出到激振器, 使平台振动。

(6) 调整示波器, 同时观察涡流变换器输入端和差动放大器输出端的波形。

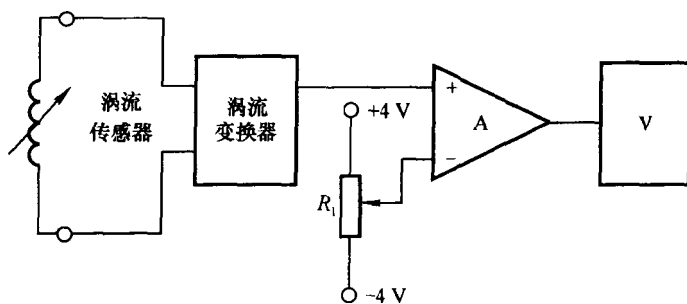


图 1.1.2-6 涡流传感器振幅测量电路

(7) 在低频振荡频率 15~30 Hz 范围内变化, 观察差放输出端波形, 测定相应的峰峰值, 并利用实验 2 的 $V_{p-p} - x_{p-p}$ 关系, 求出平台振动时的最大位移值 x_{p-p} 。

4. 电涡流传感器应用——电子称实验

传感器用作电子称的实验在本书第二册传感器技术 (一) 中已有描述. 本实验内容的目的在于了解电涡流传感器在静态测量中的应用之一——电子称实验。

调整传感器的位置, 使其处于线性范围的起始距离处. 开启电源, 调整电桥单元上的电位器 R_1 使电压表为零. 在平台上逐渐加上砝码, 记录电压表的相应

读数. 在平台上放一重物, 记上电压表读数, 根据实验数据作出 $V - R$ 曲线, 计算出灵敏度及重物的重量.

操作时注意差动放大器的增益适当, 所称重物不得使位移超过线性范围.

5. 检测金属表面的腐蚀膜、电镀膜膜厚 (根据实验室教学要求可作为选做实验).

如图 1.1.2-7 所示的膜厚检测电路, IC_1 和 IC_2 将正弦波振荡器 (频率 $1 \sim 100$ kHz) 的正弦波加到变压器 T_1 上. 通过电桥电路, 取不平衡时金属材料表面的涡流变化. 涡流变化分量在 IC_3 检测放大器中适当放大, 然后将涡流变化信号在 IC_4 交流放大器中放大几十倍, 再由 IC_5 放大器适当放大并输出. VR_1 调整灵敏度, VR_2 调整零点, VR_3 调整电平.

检测膜厚的方法如图 1.1.2-8 所示, 在某种金属材料表面形成腐蚀膜, 磁传感器和金属材料表面的距离为 D , 设在同一金属材料表面没有膜时磁传感器和金属表面的距离为 L , L 和 D 之差即为膜厚 d .

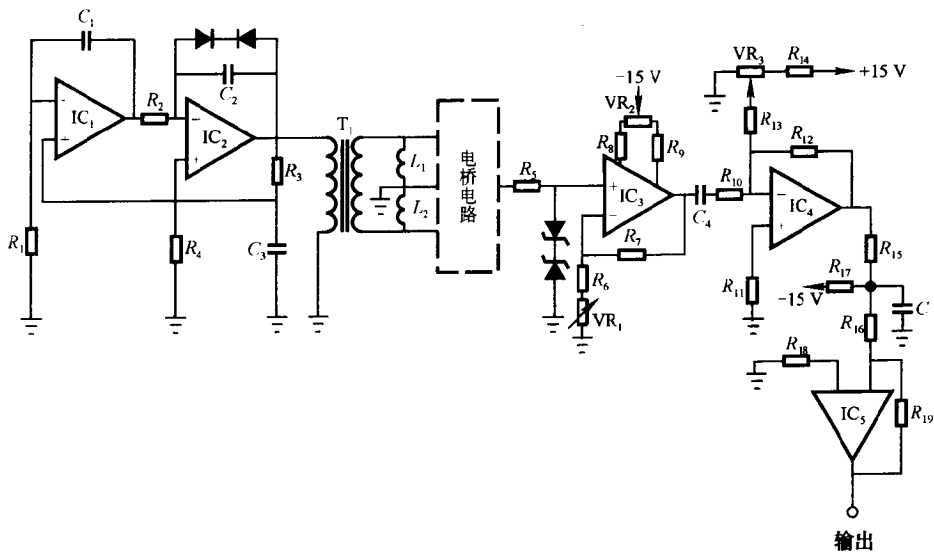


图 1.1.2-7 涡流膜厚检测电路

这种检测方法也可用作位移检测, 在绝缘板表面粘附铜箔的过程中检测膜厚.

铜箔膜厚的检测结果表明, FPC0.15t 和 PC1.67t 两种双面铜箔都可获得 $\pm 10\%$ 左右的精度. 若能将精度提高到 1% , 则在对铜箔电镀的自动监视, 提高质量管理以及节省人力等方面都将起到重要作用.

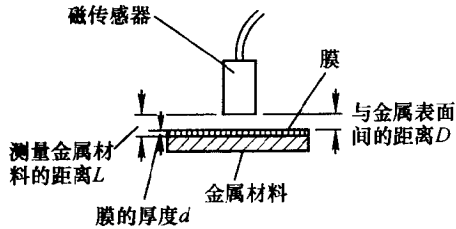


图 1.1.2-8 膜厚检测法

6. 注意事项

(1) 涡流传感器测试头要尽量对准被测体中间，两者平面平行。

(2) 激振幅度必须很好控制，以免产生过大振幅，撞击测片，影响测量结果，甚至损坏仪器。

(3) 根据铁片线性区峰峰值灵敏度 S_{p-p} 由不同频率下的 V_{p-p} 值 计算得到相应的 $x_{p-p} = V_{p-p} / S_{p-p}$ 。

思考题

1. 用什么方法可以扩大此传感器的线性范围？

2. 利用现有电路单元，你是否有办法将涡流变换器输出的交变信号（为 15 ~ 30 Hz）变换成直流电压信号，并由表头直接读出振幅的大小。

参考资料

张福学, 传感器实用电路 150 例, 北京: 中国科学技术出版社, 1993

(赵永飞)

实验 1.1.3 压电传感器

压电传感器是利用某些材料的压电效应制作的传感器。由于压电转换元件具有体积小、重量轻、结构简单、工作可靠、固有频率高、响应快、灵敏度和信噪比高等优点，因此压电式传感器获得了飞速的发展。在测试技术中，压电转换元件是一种典型的力敏元件，能测量最终可变换为力的有关物理量，例如压力、加速度、机械冲击和振动等，因此在声学、力学、医学和宇航等广阔领域中都可见到压电式传感器的应用，在扫描类显微工具中（如扫描隧穿显微镜、同步辐射扫描软 X 射线显微镜等）也得到了应用。

本实验的目的是了解压电加速度传感器的原理结构及应用。

实验原理

1. 压电转化元件的原理和压电效应表达式

(1) 压电转化元件的原理

具有压电效应的材料称为压电材料. 在自然界中, 已发现二十多种单晶具有压电效应, 石英 (SiO_2) 晶体就是一种性能良好的压电材料. 此外人造压电陶瓷, 如钛酸钡、锆钛酸铅等多晶体也具有良好的压电功能. 现以石英晶体为例讨论正压电效应及其工作方式.

压电效应是可逆的, 即有两种压电效应: 其一为正压电效应, 当沿着一定方向对某些电介质加力而使其变形时, 在某些表面上产生电荷, 当外力去掉后, 又重新回到不带电状态. 其二是逆压电效应, 当在电介质的极化方向施加电场时, 这些电介质就在一定方向上产生机械变形或机械应力, 当外加电场撤去后, 这些变形或应力也随之消失. 可见, 压电式传感器是一种典型的“双向传感器”.

(2) 压电效应表达式

描述压电效应的是压电方程, 它是压电体中电位移、电场强度、应力和应变张量之间关系的方程组, 常表现为当压电元件受到应力 E 作用时, 在相应的表面产生电荷 Q 其关系为

$$Q = dE \quad (1)$$

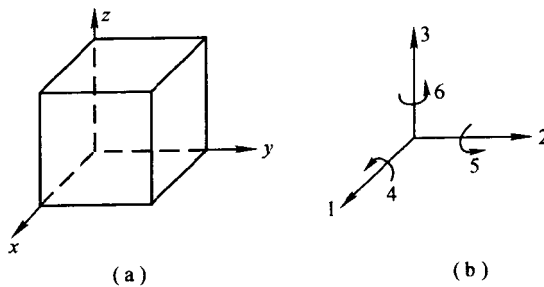


图 1.1.3-1 压电转换元件坐标系表示法

式中 d 为压电系数, 对一定方向的作用力和产生电荷的一定的表面是一常数, 它是描述压电效应的物理量. 考虑到晶体的极化方向和作用力的各种可能性, 将上式推广可得

$$q_i = \sum d_{ij} \sigma_j \quad (2)$$

此式给出了晶体在任意受力状态下产生的表面电荷密度. 式中 d_{ij} 为压电应变常数 $i=1,2,3$, 表示晶体的晶化方向; σ_j 为应力 $j=1,2,3,4,5,6$ 分别表示沿 x 、

y 和 z 轴方向作用的单向应力和垂直于 x 、 y 、 z 轴的平面内的剪切应力，如图 1.1.3-1 所示。

2. 常用压电材料的压电效应及其特点

(1) 石英晶体和压电陶瓷的压电效应

研究表明，石英晶体的压电常数只有 d_{11} 和 d_{14} 是独立的，因此其压电常数矩阵为

$$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

在应力 σ_1 和应力 σ_2 作用下产生的压电效应分别称为“纵向压电效应”和“横向压电效应”。

人工合成的压电陶瓷也是一种常用的压电材料，其压电常数为石英晶体的几倍，因此灵敏度高，但它们在未极化时是非压电体，极化后，当力垂直于极化面作用时（即作用力沿极化方向），在极化面上便产生电荷，其电荷 q 与 σ 的关系为

$$q = d_{33}\sigma$$

研究表明，压电陶瓷 BaTiO_3 的独立压电常数只有 d_{31} 、 d_{33} 和 d_{15} 三个，其压电常数矩阵为

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 d_{33} 称为纵向压电常数，其下角标的意义和石英晶体相同，只是在压电陶瓷中常把其极化方向定为 z 轴。

(2) 压电元件的基本变形

从压电常数矩阵看出，对能量转换有意义的石英晶体变形方式有 5 种，如图 1.1.3-2 所示。

(3) 石英晶体和压电陶瓷的特点

作为敏感功能材料，对压电材料的要求是：具有大的压电常数 d 和 g ；机械强度高、刚度大，以便获得高的固有振荡频率；高电阻率和大电容量；高的居里点；温度、湿度和时间稳定性好。

石英晶体最显著的优点是它的电容率和压电常数的温度稳定性好，适于做温度范围很宽的传感器。压电元件的性能与压电应变常数 d_{ij} 、电容率 ϵ 和电阻率 ρ 三个参数密切相关，而这几个参数都与温度有关，如图 1.1.3-3 所示。由此可见，在常温时 d 和 ϵ 几乎不随温度而变，在 $20 \sim 200^\circ\text{C}$ 时，温度每升高 1°C 。

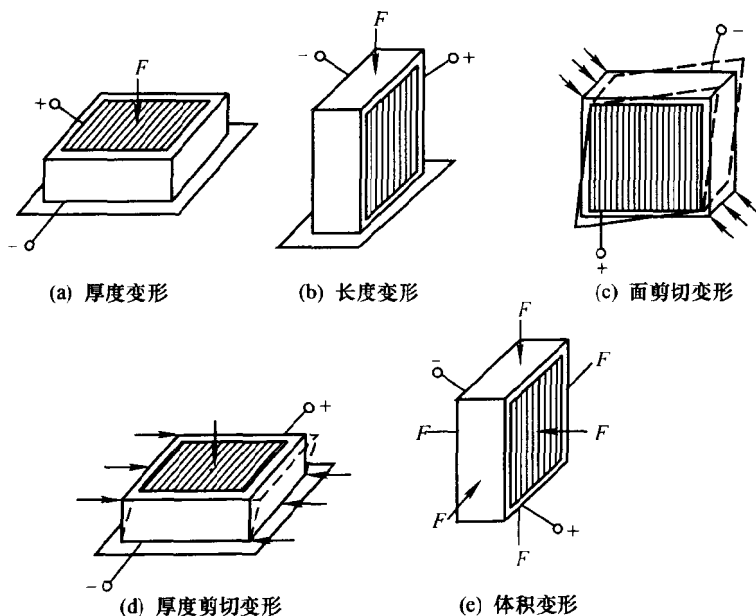


图 1.1.3-2 压电元件的受力状态及变形方式

d_{11} 仅减小 0.6% 当上升到 400 °C 时, d_{11} 急剧下降, 当达到 573 °C 时, 石英晶体就失去压电特性, 此温度即为其居里点或称倒转温度. 由图 1.1.3-3(c) 看出, 当温度变化到居里点时, ρ 变化很大, 这种变化是单调的, 从居里点到室温, 几乎变化 6 个数量级.

石英晶体的机械强度很高, 可承受约 10^8 Pa 的压力, 在冲击力作用下漂移也很小, 弹性系数较大. 所以可用来测量大量程的力和加速度.

现代压电陶瓷是“铁电体”, 它与石英晶体不同, 有明显的非线性特征. 由于它的特性与铁磁体有很多共同点, 所以命名中用了“铁”字. 它的重要特性就是与磁畴对应的“电畴”和与磁滞回线对应的“极化回线”. 一个电畴内的电偶极子采取同向排列, 它的势能关系要用量子力学解释. 极化回线说明极化过程的非线性和不可逆性. 在技术应用中有时可以忽略非线性和不可逆性, 有时不可以, 视情况而定.

原始的压电陶瓷没有压电性, 但在材料内部有自发的电偶极矩形成的称之为“电畴”的微小极化区域, 它们是压电特性的基础; 然而它们在原始材料中是无序排列的 如图 1.1.3-4(a) 所示, 它们各自的极化能力相互抵消. 将这些小的电畴在 2~3 MV/m 的强化电场中放 2~3 小时后, 会使极性转到接近电场方向,