



10年口碑积累，成功培养50000多名研发工程师，铸就专业品牌形象
华清远见的企业理念是不仅要良心教育、做专业教育，更要受人尊敬的职业教育。

《物联网技术与实践》

作者：华清远见

专业始于专注 卓识源于远见

第3章 传感器技术

本章简介

在阅读完第2章的内容后，相信大家已经对整个物联网体系有了一个大概的了解。物联网产业会涉及哪些方面，物联网与这些行业是怎样的一个联系，这些我们都可以从中获知。

2.3节中我们了解物联网的最下面一层是感知层，这也是其中最为重要的一层。可以这样想，如果没有感知层来获取各种数据信息，那么上面的网络层和应用层又将操作什么呢？而感知层的感知功能又是如何的一个情况呢？

专业始于专注 卓识源于远见

人们通过视觉、嗅觉、听觉及触觉等感官来感知外界的信息，感知的信息输入大脑进行分析判断（人的思维）和处理，再指挥人做出相应的动作，这是人类认识世界和改造世界具有的本能。但是通过人的五官所感知的外界信息非常有限，例如，人无法利用触觉来感知超过几百甚至上千度的温度吧，而且也不可能判别温度的微小变化，这就需要电子设备的帮助。电子仪器特别是计算机控制的自动化装置可以代替人的此类工作，这里计算机类似于人的大脑，仅有大脑而没有感知外界信息的“五官”显然是不够的，中央处理系统也还需要它们的“五官”——传感器。

人的五官也可视作一个功能非常复杂、灵敏的“传感器”，例如，人的触觉是相当灵敏的，它可以感知外界物体的温度、硬度、轻重及外力的大小，还可以具有电子设备所不具备的“手感”，例如棉织物的手感、液体的黏稠感等。然而我们的五官感觉大都只能对外界的信息做“定性”感知，而不能做定量感知，而且许多物理量人的五官是感觉不到的，例如对磁性就不能感知。视觉可以感知可见光部分，对于频域更加宽的不可见光谱则无法感觉到，如红外线和紫外线光谱。借助温度传感器很容易感知到几百度到几千度的温度，而且要是到 1°C 以下的精确度也是轻而易举的。同样借助红外和紫外线传感器，便可感知到这些不可见光，所以人类才制造出了具有广泛用途的红外夜视仪和X光诊断设备，这些技术在军事、国防及医疗卫生领域有着极其重要的作用。

传感器技术包括基于材料科学技术的敏感原件和基于电子技术和计算机技术的传感器电路，是一门汇集材料科学、信息科学和高科技工艺技术的交叉学科。

3.1 传感器概述

3.1.1 传感器概念

传感器是测量系统中直接作用于被测量（包括物理、生物、化学量等）的器件，通过它将被测量转换成容易处理，容易与标准量比较的物理量（如位移、频率、电流、电阻、电压等）。传感器通常是依据有关的物理、化学和生物效应进行工作的。各种功能材料是传感技术发展的物质基础。传感器技术的研究开发，不仅要求原理正确，选材合适，而且要求有先进的加工工艺技术。近年来，人们根据社会生产、科研和生活的需要，在工业生产自动化和资源节约、灾害预测、安全防卫、环境保护、医疗诊断等方面研制出各种用途的传感器，为检测、自动控制、环保及电子计算机的应用等方面创造了十分有利的条件。世界各工业发达国家对于开发研究传感器不仅在思想认识上给予高度重视，而且投入了大量人力和物力，它已被列为新技术革命的核心技术之一。今后它必将在我国现代化建设中发挥日益重要的作用。

3.1.2 传感器特性

传感器的基本特性可分为静态特性和动态特性两种。

1. 静态特性

静态特性是指输入不随时间而变化的特性。设输入为 x ，输出为 y ，若不考虑时间变化，则输入/输出关系可用下式表示： $y=f(x)$

若输入分别为 x ， $x+\Delta x$ ，则对应两者的输出差

$$\Delta y = dy \cdot \Delta x / dx = k(x) \cdot \Delta x \quad (\text{式 3-1})$$

式中， $k(x)$ 为灵敏度系数，当 x 值较小时， $k(x)$ 为定值，当 x 较大时， $k(x)$ 则随 x 而变化。根据式 3-1 的输入、输出关系，有如下特性：

(1) 灵敏度界限。一般来说，当 Δx 小到某种程度，输出就不再变化了，此时的 Δx 称为灵敏度界限。

(2) 迟滞差。迟滞差是由于传感器的响应受到输入过程影响而产生的。它的存在破坏了输入和输出的一一对应关系，因此，必须尽量减少迟滞差。

(3) 非线性度。指输入/输出线性比例关系的偏差程度。

(4) 环境特性。影响传感器特性的环境因素中，最重要的是温度，即使采取了温度补偿措施，或者在结构上有所考虑，仍然会受到温度的影响。尤其是半导体的特性，它对温度变化很敏感，必须给予充分重视。此外，还有气压、湿度、振动、电源电压等也会影响传感器特性。气压的变化将使气敏传感器的体积发生变化。湿度变化不仅会使光学传感器改变折射率，还会影响电容式传感器的介电常数。

湿度变化会导致电路产生漏电现象，漏电将使元件的阻抗值下降，放电现象则会使元件损坏。振动对传感器的影响也是不可忽视的，它除了会使输出发生变化外，还可能导致机械支撑部分发生形变、脱落、导线折断等，造成传感器故障。尤其要防止外界振动频率与传感器固有频率一致，此时将产生共振，其破坏的可能性更大。电源电压的波动又会使灵敏度系数改变和输出漂移。

(5) 稳定性。因为传感器及其部件的特性会随时间而发生变化，即经时变化，所以对同一大小的输入，即使环境条件不变，而输出值也会有所不同。

2. 动态特性

动态特性是指输入信号随时间而变化的特性。此时，要求传感器能够随时精确地跟踪输入信号，其输出能按照输入信号的变化规律而变化。输入信号变化时，引起输出信号也随着时间变化，这个过程称为响应。响应是描述动态特性的重要参数。

3.1.3 传感器分类

传感器按其结构原理来分，大致分为 3 类。

1. 结构型传感器

结构型传感器大多通过结构部分的位移，将被测参数转换成相应的电阻、电感、电容等变化，从而检测出被测量。这是目前应用最多、最普遍的传感器。

2. 物性型传感器

物性型传感器是利用某些材料本身的物性变化来实现被测量的变换。其主要是以半导体、电介质、磁性体等作为敏感材料的固态器件。这些器件具有灵敏度高、重量轻、体积小、便于集成等优点。它减少了对被测对象的影响，提高了响应速度，能解决常规结构型传感器不能解决的某些特殊参数及非接触测量的问题，从而大大扩大了传感器的应用领域。

3. 智能型传感器

智能型传感器是一种带有微处理器的、兼有检测与信息处理功能的传感器。在半导体基片上，采用微电子加工技术把传感器功能、逻辑功能、存储功能集成在一起，传感器具有自动校正、自动补偿并进行数字处理、图像识别、存储、记忆等功能。

3.2 传感器结构

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路 3 部分组成。

1. 敏感元件

敏感元件是直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。图 3-1 是一种气体压力传感器的示意图。膜盒的下半部与壳体固接，上半部通过连杆与磁心相连，磁心置于两个电感线圈中，后者接入转换电路。这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力 p_0 相通，内部感受被测压力 p 。当 p 变化时，引起膜盒上半部移动，即输出相应的位移量。

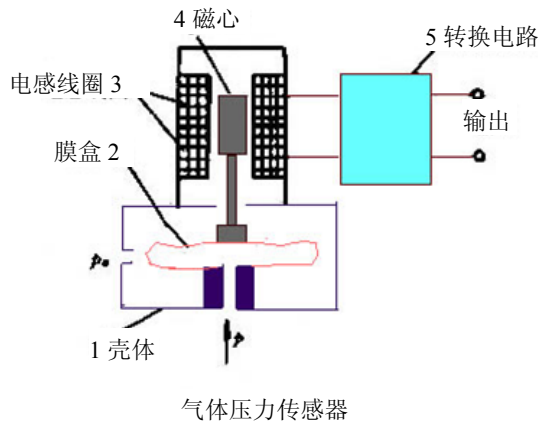


图 3-1 气体压力传感器示意图

2. 转换元件

敏感元件的输出就是转换元件的输入，转换元件把输入转换成电路参数量。在图 3-1 中，转换元件是可变电感线圈，它把输入的位移量转换成电感的变化。

3. 转换电路

上述电路参数接入转换电路，便可转换成电量输出。

实际上，有些传感器很简单，有些则较复杂，大多是开环系统，也有些是带反馈的闭环系统。最简单的传感器由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶。有些传感器由敏感元件和转换元件组成，没有转换电路，有些传感器转换元件不只一个，要经过若干次转换。

敏感元件与转换元件常常组装在一起，而转换电路为了减小外界的影响，也希望和它们组装在一起，不过由于空间的限制或者其他原因，转换电路常装入电箱中。尽管如此，因为不少传感器要通过转换电路之后才能输出电量信号，从而决定了转换电路是传感器的组成环节之一。这里顺便说明一下：一般情况下，转换电路后面的后续电路，如信号放大、处理、显示等电路不再包括在传感器范围之内。

3.3 常用传感器

3.3.1 电阻式传感器

电阻式传感器的基本原理是将被测量的变化转换成传感元件电阻值的变化，再经过转换电路变成电信号输出。它的类型很多，在几何量和机械量测量领域中应用广泛，常用来测量力、压力、位移、应变、扭矩、加速度等。

一般来说，电阻式传感器的结构简单、性能稳定、灵敏度较高，有的还适合于动态测量。

电阻式传感器中的传感元件有应变片、半导体膜片、电位器和电触点等。由它们分别制成了应变式传感器、压阻式传感器、电位器式传感器和电触点式传感器等。其中电触点式传感器目前已经极少应用。

1. 应变式传感器

应变式传感器基本上是利用金属的电阻应变效应将被测量的变化转换为电量输出的一种传感器。应变式传感器主要有应变式力传感器、环式力传感器和梁式力传感器。

1) 工作原理

(1) 金属的电阻应变效应。当金属丝在外力作用下发生机械变形时，其电阻值将发生变化，这种现象称为金属的电阻应变效应。

(2) 应变片的基本结构及测量原理。电阻丝应变片是用直径为 0.025mm 具有高电阻率的电阻丝制成的。为了获得高的阻值，一般将电阻丝排列成栅网状，称为敏感栅，并粘贴在绝缘的基片上。电阻丝的两端焊接引线，敏感栅上面粘贴有保护用的覆盖层。

用应变片测量时，将其粘贴在被测对象表面上，当被测对象受力变形时，应变片的敏感栅也随之变形，其电阻值发生相应变化，通过转换电路转换为电压或电流的变化，这时可直接测量应变。

通过弹性敏感元件，将位移、力、力矩、加速度、压力等物理量转换为应变，则可用应变片测量上述各量，而做成各种应变式传感器。

应变片之所以应用得比较广泛，是由于它有如下优点：

(1) 测量应变的灵敏度和精确度高，性能稳定、可靠。

(2) 应变片尺寸小、重量轻、结构简单、使用方便、测量速度快。测量时对被测件的工作状态和应力分布基本上无影响。既可用于静态测量，又可用于动态测量。

(3) 测量范围大。既可测量弹性变形，也可测量塑性变形。变形范围可从 1%~2% 至 20%。

(4) 适应性强。可在高温、超低温、高压、水下、强磁场以及核辐射等恶劣环境下使用，便于多点测量、远距离测量和遥测。

2. 应变片的类型、材料及粘贴

(1) 应变片的类型和材料。电阻应变片分为金属丝式、金属箔式和金属薄膜式。

① 金属丝式应变片。金属丝式应变片有回线式和短接式两种。

② 金属箔式应变片。它是利用照相制版或光刻技术将厚约 0.003~0.01mm 的金属箔片制成所需图形的敏感栅，也称为应变花。它有如下优点：

□ 可制成多种复杂形状尺寸准确的敏感栅，其栅长可做到 0.2mm，以适应不同的测量要求。

□ 与被测件粘结面积大。

□ 散热条件好，允许电流大，提高了输出灵敏度。

□ 横向效应小。

□ 蠕变和机械滞后小，疲劳寿命长。在常温条件下，金属箔式应变片已逐步取代了金属丝式应变片。

③ 金属薄膜应变片。金属薄膜应变片是薄膜技术发展的产物。它采用真空蒸发或真空沉积等方法在薄的绝缘基片上形成厚度在 0.1μm 以下的金属电阻材料薄膜的敏感栅，最后再加上保护层。它的优点是应变灵敏系数大，允许电流密度大，工作范围广，可达-197℃~317℃。目前使用中的主要问题是难于控制电阻与温度和时间变化关系。

(2) 应变片的粘贴。应变片是用粘结剂粘贴到被测件上的。粘结剂形成的胶层必须准确迅速地将被测件应变传递到敏感栅上。粘结剂的性能及粘结工艺的质量直接影响着应变片的工作特性，如零漂、蠕变、滞后、灵敏系数、线性及它们受温度变化影响的程度。可见，选择粘结剂和正确的粘结工艺与应变片的测量精度有着极其重要的关系。

3) 转换电路

应变片将被测件的应变 ε 转换成电阻相对变化的 $\Delta R/R$ ，还需进一步转换成电压或电流信号，才能用电测仪表进行测量。通常采用电桥电路实现这种转换。根据电源的不同，电桥分直流电桥和交流电桥。

4) 温度误差及其补偿

温度误差。用应变片测量时，希望其电阻只随应变而变，而不受其他因素的影响。但实际上环境温度变化时，也会引起电阻的相对变化，从而产生温度误差。为除此项温度误差，必须采取温度补偿措施。通常补偿温度误差的方法有自补偿法和线路补偿法两种。

2. 压阻式传感器

1) 基本工作原理

半导体材料受到应力作用时，其电阻率会发生变化，这种现象称为压阻效应。实际上，任何材料都不同程度地呈现压阻效应，但半导体的这种效应特别强。从宏观来看，电阻应变效应的分析及公式也适用于半导体电阻材料。

2) 类型与特点

压阻式传感器主要有半导体应变式传感器、压阻式压力传感器和压阻式加速度传感器。压阻式传感器有两种类型：一类是利用半导体材料的体电阻制成粘贴式的应变片，做成半导体应变式传感器；另一类是在半导体材料的基片上用集成电路工艺制成扩散电阻，作为测量传感元件，也称扩散型压阻式传感器，或固态压阻式传感器。固态压阻式传感器主要用于测量压力和加速度等物理量。

压阻式传感器的优点如下：

(1) 灵敏度非常高，有时传感器的输出不需放大可直接用于测量。

(2) 分辨力高，例如测量压力时可测出 10~20Pa 的微压。

(3) 测量元件的有效面积可做得很小，故频率响应高。

(4) 可测量低频加速度与直线加速度。压阻式传感器的最大缺点是温度误差较大，故需温度补偿或在恒温条件下使用。

3) 温度误差及其补偿

压阻式传感器受到温度影响后，要产生零位漂移和灵敏度漂移，因而会产生温度误差。

压阻式传感器中，扩散电阻的温度系数较大，电阻值随温度变化而变化，故引起传感器的零位漂移。当用电桥测量时，若能将四个桥臂的扩散电阻做的大小相差不大，温度系数也一样，则电桥的零漂值会很小，但这在工艺上很难实现，传感器灵敏度的温漂是由于压阻系数随温度变化而引起的。当温度升高时，压阻系数变小，传感器的灵敏度降低；反之，灵敏度升高。

3. 电位器式传感器

1) 工作原理及特点

电位器由电阻元件及电刷等零件组成。电刷相对于电阻元件的运动可以是直线运动、转动和螺旋运动，因而可以将直线位移或角位移转换为与其成一定函数关系的电阻或电压输出。它除了用于线位移和角位移测量外，还用于测量压力、加速度等物理量。

电位器式传感器结构简单、价格低廉、性能稳定，对环境条件要求不高，输出信号大，并易实现函数关系的转换。但由于存在摩擦和分辨力有限，一般精度不够高，动态响应较差，适合于测量变化较缓慢的量。

电位器电阻元件通常有线绕电阻、薄膜电阻、导电塑料等。

2) 线性与函数电位器

两者均具有空载特性。

3) 负载特性与负载误差

电位器输出端接有负载电阻时，其特性称为负载特性。负载特性相对于空载特性的偏差称为负载误差。

4) 电位器的基本结构与材料

各种电位器通常都是由骨架、电阻元件及活动电刷组成。常用的线绕式电位器的电阻元件由金属电阻丝绕成。

5) 电位器的移动或转动

电刷可直接或通过机械传动装置与被测对象相连，以测量机械线位移或角位移。电位器还可以和弹性敏感元件如膜片、膜盒、波纹管等相连接，弹性元件位移通过机构推动电刷，而输出相应电压信号。可以组成压力、液位、高度等各种传感器。

3.3.2 电感式传感器

电感式传感器是利用线圈自感或互感的变化实现测量的一种装置。

电感式传感器的核心部分是可变自感或可变互感，在被测量转换成线圈自感或互感的变化时，一般要利用磁场作为媒介或利用铁磁体的某些现象。这类传感器的主要特征是具有线圈绕组。

电感式传感器具有：结构简单可靠、输出功率大、输出阻抗小、抗干扰能力强、对工作环境要求不高、分辨力较高（如在测量长度时一般可达 $0.1\mu\text{m}$ ）、示值误差一般为示值范围的 $0.1\%\sim 0.5\%$ 、稳定性好等优点。它的缺点是频率响应低、不宜用于快速动态测量。一般说来，电感式传感器的分辨力和示值误差与示值范围有关，示值范围大时，分辨力和示值精度将相应降低。

电感式传感器种类很多。当用自感原理时，首先把被测量的变化转换成自感 L 的变化，自感 L 接入一定的转换电路，便可转换成电信号输出。自感 L 又称电感，人们习惯上所称的电感式传感器就是特指这一种。当用互感原理时，常做成差动变压器形式，这时一次侧线圈要用固定电源激磁，它与两个二次侧线圈间互感 M 的变化，可导致二次侧线圈产生电压信号输出。因为它具有差动变压器的形式，故习惯上称为差动变压器式传感器。此外，还有利用电涡流原理的电涡流式传感器，利用压磁原理的压磁式传感器，利用互感原理的感应同步器等。

1. 自感式传感器

1) 自感线圈的等效电路

自感线圈不是一个纯电感，它除了具有一定的电感量 L 之外，还有一些其他参量伴随它存在。自感线圈的等效电路如图 3-2 所示。

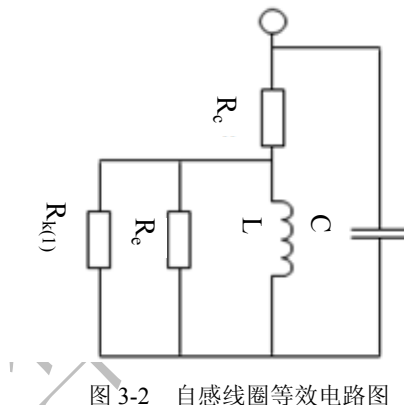


图 3-2 自感线圈等效电路图

其中与 L 串联的 R_c 是铜损电阻，与其并联的 R_e 和 $R_k(f)$ 则分别代表铁心的涡流损失及磁滞损失与 L 及 R_c 并联的电容 C 则反映了线圈的自身电容，这在高频时必须给予特别的考虑。

2) 转换电路和传感器灵敏度

自感式传感器实现了把被测量的变化转变为电感量的变化。为了测出电感量的变化，同时也为了送入下级电路进行放大和处理，就要用转换电路把电感变化转换成电压（或电流）变化。把传感器电感接入不同的转换电路后，原则上可将电感变化转换成电压（电流）的幅值、频率、相位的变化，它们分别称为调幅、调频、调相电路。在自感式传感器中，调幅电路用得较多，调频、调相电路用得较少。调幅电路的一种主要形式是交流电桥。

3) 零点残余电压

当两线圈的阻抗相等时，即 $Z_1 = Z_2$ ，这时电桥平衡输出电压为零。由于传感器阻抗是一个复数阻抗，有感抗也有电阻，为了达到电桥平衡，就要求两线圈的电阻 R 相等，两线圈的电感 L 相等。实际上，这种情况是不能精确达到的，就是说不易达到电桥的绝对平衡。

如果零点残余电压（以下简称零残电压）过大，会使灵敏度下降，非线性误差增大，不同挡位的放大倍数有显著差别，甚至造成放大器末级趋于饱和，致使仪器电路不能正常工作，甚至不再反映被测量的变化。在仪器的放大倍数较大时，这一点尤应注意。

因此,零残电压的大小是判别传感器质量的重要标志之一。在制造传感器时,要规定其零残电压不得超过某一定值。例如某自感测微仪的传感器,经200倍放大后,在放大器末级测量,零残电压不得超过80mV,仪器在使用过程中,若有迹象表明传感器的零残电压太大,就要进行调整。

为了尽可能地减小零残电压,在设计和制造上应采取相应的措施:设计时应使上、下磁路对称;制造时应使上下磁性材料特性一致,磁筒、磁盖、磁心要配套挑选;线圈排列要均匀;松紧要一致;最好每层的匝数都相等。至于匝间电容,其值较小,在高频时要考虑,在音频范围内关系不大。为了控制零残电压不超过允许范围,在生产中及在仪器鉴定中一般还要进行必要的调整。

2. 差动变压器式传感器

1) 工作原理

差动变压器式传感器的工作原理是把被测量的变化转换成互感系数 M 的变化。传感器本身是其互感系数可变的变压器,当一次侧线圈接入激励电源后,二次侧线圈就将感应产生电压输出,互感变化时,输出电压将作相应变化。一般这种传感器的二次侧线圈有两个,接线方式又是差动的,故常称为差动变压器式传感器。另外,因为它是基于互感变化的原理,故也称互感式传感器。

2) 互感计算与特性分析

差动变压器式传感器的类型与自感式传感器极为类似,也可以分为气隙型、截面型和螺管型三种。气隙型差动变压器与气隙型电感传感器一样,其优点是灵敏度高,近年来这种类型的使用逐渐减少。虽然螺管型差动变压器的灵敏度较低,但其市值范围大,自由行程可任意安排,制造装配也比较方便,因而获得了广泛的应用。

3) 转换电路

差动变压器的转换电路一般采用反串电路和桥路两种。

4) 零残电压的补偿

与电感传感器相似,差动变压器也存在零残电压问题。零残电压的存在使得传感器的特性曲线不通过原点,并使实际特性不同于理想特性。

零残电压的存在使得传感器输出特性在零点附近的范围内不灵敏,限制着分辨力的提高。零残电压太大,将使线性度变坏,灵敏度下降,甚至会使放大器饱和,堵塞有用信号通过致使仪器不再反映被测量的变化。因此,零残电压是评定传感器性能的主要指标之一。同时说明,对零残电压进行认真分析,找出减小的办法是很重要的。

产生零残电压的原因大致有如下两点:

(1) 由于两个二次侧线圈的等效参数不对称,使其输出的基波感应电动势的幅值和相位不同,调整磁心位置时,也不能达到幅值和相位同时相同。

(2) 由于铁心的 $B-H$ 特性的非线性,产生高次谐波不同,不能互相抵消。

3. 电涡流式传感器

1) 工作原理

金属导体置于变化的磁场中,导体内就会产生感应电流,这种电流像水中旋涡那样在导体内转圈,所以称为电涡流或涡流。这种现象就称为涡流效应。电涡流式传感器就是在这种涡流效应的基础上建立起来的。

要形成涡流必须具备下列两个条件:①存在交变磁场;②导体处于交变磁场之中。因此,涡流式传感器主要由产生交变磁场的通电线圈和置于线圈附近、处于交变磁场中的金属导体两部分组成。金属导体也可以是被测对象本身。

2) 参数计算与分析

(1) 涡流损耗功率。电涡流式传感器的物理基础是涡流效应。金属导体具有电阻,有涡流流通时便会消耗一部分电磁能量。涡流引起的能量损耗,称为涡流损耗。

(2) 线圈轴上磁感应强度。在影响涡流损耗的诸因素中,大多数因素是固定的或基本不变的,所以对涡流式传感器的工作起着重大影响的因素是金属导体内的磁场分布。尤其是对涡流式位移传感器,磁场分布对灵敏度和线性范围起着决定性的作用。

对传感器来说,总是希望其灵敏度高,线性范围大。欲使线性范围大,就要求磁场轴向分布范围大;欲使灵敏度高,就要求被测体在轴向移动时涡流损耗功率的变化大,即轴向磁场强度变化梯度大。

(3) 涡流分布。涡流只存在于金属导体的表面薄层内,在径向只在一个有限的范围内存在涡流,所以实际上存在一个涡流区。但是在推算涡流损耗功率时,曾把涡流当做均匀分布来处理,这是不符合实际的。实际上,涡流分布是不均匀的、涡流区内各处的涡流密度是不同的。

3) 转换电路

由涡流式传感器的工作原理可知,被测参数变化可以转换成传感器线圈的品质因数 Q 、等效阻抗 Z 和等效电感 L 的变化。转换电路的任务是把这些参数转换为电压或电流输出。总的来说,利用 Q 值的转换电路使用较少。利用 Z 的转换电路一般用桥路,属于调幅电路。利用 L 的转换电路一般用谐振电路。根据输出是电压幅值还是电压频率,谐振电路又分为调幅与调频两种。

4) 涡流式传感器的应用

涡流式传感器的特点是结构简单,易于进行非接触连续测量,灵敏度较高,适用性强,因此得到了广泛的应用。它的变换量可以是位移 x ,也可以是被测材料的性质 (ρ 或 μ), 其应用大致有以下四方面:

(1) 利用位移 x 作为变换量,可以做成测量位移、厚度、振幅、振摆、转速等传感器,也可做成接开关、计数器等。

(2) 利用材料电阻率 ρ 作为变换量,可以做成测量温度、材质判别等传感器。

(3) 利用导磁率 μ 作为变换量,可以做成测量应力、硬度等传感器。

(4) 利用变换量 x 、 ρ 、 μ 等的综合影响,可以做成探伤装置等。

4. 压磁式传感器

1) 压磁效应

铁磁材料具有晶体的构造,在晶体形成的过程中也就形成了磁畴。各个磁畴的磁化强度矢量是随机的。在没有外磁场作用时,各个磁畴互相均衡,材料总的磁化强度为零。当有外磁场作用时,磁畴的磁化强度矢量向外磁场方向产生转动,材料呈现磁化。当外磁场很强时,各个磁畴的磁化强度矢量都转向与外磁场平行,这时材料呈现磁饱和现象。

在磁化过程中,各磁畴之间的界限发生移动,因而产生机械变形,这种现象称为磁致伸缩效应。

铁磁材料在外力的作用下,引起内部发生形变,产生应力,使各磁畴之间的界限发生移动,使磁畴磁化强度矢量转动,从而使材料的磁化强度发生相应的变化。这种应力使铁磁材料的发生磁性质变化的现象,称为压磁效应。

铁磁材料的压磁效应的具体内容包括:

(1) 材料受到压力时,在作用力方向磁导率 μ 减小,而在作用力的垂直方向, μ 略有增大;作用力是拉力时,其效果相反。

(2) 作用力取消后,磁导率复原。

(3) 铁磁材料的压磁效应还与外磁场有关。为了使磁感应强度与应力间有单值的函数关系,必须使外磁场强度的数值一定。

2) 工作原理

前面说过,铁磁材料在受外力时,内部产生应力,引起磁导率变化。当铁磁材料上绕有线圈时,将引起线圈阻抗变化。当铁磁材料上同时绕有激励绕组和输出绕组时,磁导率的变化将导致绕组间耦合系数变化,从而使输出电动势变化。这样就把作用力变换成电量输出。

3) 压磁元件

压磁式传感器的核心部分是压磁元件,它实质上是一个力/电变换元件。

(1) 材料。压磁元件可采用的材料有硅钢片、坡莫合金和一些铁氧体。坡莫合金是理想的压磁材料,它具有很高的相对灵敏度,但价格较贵。铁氧体也有很高的相对灵敏度,但由于它较脆而不常采用。在压磁式传感器中大多采用硅钢片,虽然灵敏度比坡莫合金低一些,但在实际应用中已经可以满足要求。

(2) 冲片形状。为了减小涡流损耗,压磁元件的铁心大都采用薄片的铁磁材料叠合而成。

压磁元件的制造工艺对其性能有很大的影响。在冲片、热处理、粘合、穿线和装配等几个方面都要精心处理,才能使传感器达到预定的优良性能要求。

(3) 激励安匝数的选择。压磁元件输出电压的灵敏度和线性度在很大程度上决定于铁磁材料的磁场强度,而磁场强度取决于激励安匝数。

激励过小或过大都会产生严重的非线性和灵敏度降低,这是因为在压磁式传感器中,铁磁材料的磁化现象不仅与外磁场的作用有关,还与各个磁畴内部磁矩的总和及外作用力在材料内部引起的应力有关。最佳条件是外加作用力所产生的磁能与外磁场及磁畴磁能之和接近相等,而且工作在磁化曲线($B-H$ 曲线)的线性段,这样可以获得较好的灵敏度和线性度。

4) 测量电路

压磁式传感器的输出绕组输出电压值比较大,因此一般不需要放大,只要通过整流、滤波,即可传送指示器指示。

5) 压磁式传感器的应用

压磁式传感器具有输出功率大、抗干扰能力强、过载性能好、结构与电路简单、能在恶劣环境下工作、寿命长等一系列优点。尽管它的测量精度不高(误差约为1%),反应速度低,但由于上述优点,尤其是寿命长,对使用条件要求不高这两条,很适合在重工业、化学工业等部门应用。

压磁元件是一个力/电变换元件,因此压磁式传感器最直接的应用是做测力传感器,不过若其他物理量可以通过力的变换的话,也可以使用压磁式传感器进行测量。

目前,这种传感器已成功地用在冶金、矿山、造纸、印刷、运输等各个工业部门。例如,用来测量轧钢的轧制力、钢带的张力、纸张的张力,吊车提物的自动称量、配料的称量、金属切削过程的切削力及电梯安全保护等。

5. 感应同步器

感应同步器是利用两个平面形绕组的互感随位置不同而变化的原理组成的。可用来测量直线或转角位移。测量直线位移的称长感应同步器,测量转角位移的称圆感应同步器。

感应同步器的优点有以下几个。

(1) 具有较高的精度与分辨力。感应同步器可以不经任何机械传动直接测量仪器或机床的线位移或角位移,所以其测量精度首先取决于印制电路绕组的加工精度,这可由工艺来保证。长感应同步器的基板与安装部件材料相近,热膨胀系数接近,圆感应同步器的基板受热后向各方向的膨胀都对应于圆心,所以温度变化对其测量精度影响不大。感应同步器由许多节距同时参加工作,多节距的误差平均效应减小了局部误差的影响。感应同步器的分辨力取决于原始信号质量与电子细分电路的信噪比及电子比较器的分辨力,前者可通过控制印制电路绕组的加工精度、稳定励磁电压、限制气隙变化等措施来解决,后者可通过线路的精心设计和采取严密的抗干扰措施来解决。

(2) 抗干扰能力强。感应同步器在一个节距内是一个绝对测量装置,在任何时间内都可以给出仅与位置相对应的单值电压信号,因而不受瞬时作用的偶然干扰信号的影响。平面绕组的阻抗很小,受外界干扰电场的影响很小。

(3) 使用寿命长,维护简单。定尺和滑尺,定子和转子互不接触,没有摩擦、磨损,所以使用寿命很长。它不怕油污、灰尘和冲击振动的影响,不需要经常清扫。但需装设防护罩,防止铁屑进入其气隙。

(4) 可以作长距离位移测量。可以根据测量长度的需要,将若干根定尺拼接。拼接后总长度的精度可保持(或稍低于)单个定尺的精度。

(5) 工艺性好,成本较低,便于复制和成批生产。

由于感应同步器具有上述优点,长感应同步器目前被广泛应用于大位移静态与动态测量中,例如三坐标测量机、程控数控机床、高精度重型机床及加工中的测量装置等。圆感应同步器则被广泛应用于机床和仪器的转台及各种回转伺服控制系统中。

1) 类型与结构

(1) 长感应同步器。长感应同步器可分为标准型、窄型、带型、三重型几种。

(2) 圆感应同步器。一般来说,在极数相同的情况下,圆感应同步器的直径做得越大,越容易做得准确,精度越高。圆感应同步器可在定子转子圆盘上各配置粗、细绕组而做成二重型,也可配置粗、中、细绕组而做成三重型,从而做成绝对坐标测量系统。

2) 信号处理方式

由感应同步器组成的检测系统可以采取不同的励磁方式,并可对输出信号采取不同的处理方式。

从励磁方式来说,可分为两大类:一类是以滑尺(或定子)励磁,由定尺(或转子)取出感应电动势信号;另一类以定尺(或转子)励磁,由滑尺(或定子)取出感应电动势信号,目前在实用中多数用前一类励磁方式。

从信号处理方式来说,可分为鉴相方式和鉴幅方式两种。它们的特征是用输出感应电动势的相位或幅值来进行处理。

3) 误差分析

感应同步器的误差包括零位误差与细分误差。

(1) 零位误差。感应同步器的零位误差是指在只有一组励磁绕组情况下定尺输出零电压时的实际位移量与理论位移量之差。感应同步器的零位误差习惯上以累积误差形式表示,即取各点零位误差中的最大值与最小值之差的一半,并冠以±号表示。

引起零位误差的因素可能有刻划误差、安装误差、变形误差,以及横向段导电片中的环流电动势的影响等。

(2) 细分误差。感应同步器的细分误差是指在一个周期中每个细分点的实际细分值与理论细分值之差。细分误差也是以累积误差形式表示的,即取各点细分误差中的最大值与最小值之差的一半,并冠以±号表示。

产生细分误差,除了电路方面的原因外,在感应同步器方面,主要是由于定尺输出信号不符合前述的理论关系引起的。这可能由于:①正、余弦绕组产生的感应电动势幅值不等;②感应电动势与位移 x 间不完全符合正弦、余弦关系;③两路信号的正交性有偏差等。

生产中要对感应同步器的上述两项误差进行测试,测试结果超过误差时应找出原因并加以解决。

3.3.3 电容式传感器

电容式传感器是将被测量(尺寸、压力)的变化转换成电容量变化的一种传感器。实际上,它本身(或和被测物)就是一个可变电容器。

电容式传感器具有零漂小、结构简单、动态响应快、易实现非接触测量等一些突出的优点。虽然它易受干扰和寄生电容的影响,但随着电子技术的发展,这些缺点正在逐步被克服。因此电容式传感器越来越广泛地应用于位移、振动、液位、压力等测量中。

1. 工作原理及类型

1) 工作原理

由物理学可知,两平行极板组成的电容器,如果不考虑边缘效应,其电容量为

$$C = \epsilon S / \delta \quad (\text{式 3-2})$$

当被测量的变化使式中的 ϵ 、 S 或 δ 任一参数发生变化时,电容量 C 也就随之变化。

2) 类型

电容式传感器有3种基本类型,即变极距(或称变间隙)(δ)型,变面积(S)型和变介电常数(ϵ)型。它们的电极形状有平板形、圆柱形和球平面形(较少采用)3种。

3) 电容式传感器的主要性能表现在以下方面

(1) 灵敏度。静态灵敏度为:被测量变化缓慢的状态下,电容变化量与引起其变化的被测量之比。

(2) 非线性。变极距型传感器,当板级间距 ζ 变化 $\pm \Delta \zeta$ 时,电容量 C 随之变化。通过计算可以发现,输出电容 ΔC 与被测量 $\Delta \zeta$ 之间的关系是非线性的。

2. 电容式传感器的特点

1) 优点

电容式传感器与电阻式、电感式等传感器相比有如下一些优点。

(1) 温度稳定性好。电容式传感器的电容值一般与电极材料无关, 有利于选择温度系数低的材料, 而且本身发热极小, 影响稳定性甚微。而电阻式传感器有电阻, 电感式传感器有铜损等, 易发热产生零漂。

(2) 结构简单、适应性强。电容式传感器结构简单, 易于制造, 易于保证高的精度: 可以做得非常小巧, 以实现某些特殊的测量; 能工作在高温、低温、强辐射及强磁场等恶劣的环境中, 可以承受很大的温度变化, 承受高压、高冲击、高过载等; 能测超高压和低压差, 也能对带磁工件进行测量。

(3) 动态响应好。电容式传感器由于带电极板间的静电引力很小, 需要的作用能量极小, 又由于它的可动部分可以做得很小很薄, 即质量很轻, 因此其固有频率很高, 动态响应时间短, 能在几兆赫的频率下工作, 特别适用于动态测量。又由于其介质损耗小, 可以用较高频率供电, 因此系统工作频率高。它可用于测量高速变化的参数, 如测量振动、瞬时压力等。

(4) 可以实现非接触测量, 具有平均效应。例如, 非接触测量回转轴的振动或偏心率、小型滚珠轴承的径向间隙等。当采用非接触测量时, 电容式传感器具有平均效应, 可以减小工件表面粗糙度等对测量的影响。

电容式传感器除了上述优点外, 还因其带电极板间的静电引力很小, 所需输入力和输入能量极小, 因而可测极低的压力、力和很小的加速度、位移等, 可以做得很灵敏, 分辨力高, 可测 $0.01\mu\text{m}$ 甚至更小的位移; 由于其空气等介质损耗小, 采用差动结构并接成桥式时产生的零残电压极小, 因此允许电路进行高倍率放大, 使仪器具有很高的灵敏度。

2) 缺点

电容式传感器的主要缺点如下。

(1) 输出阻抗高, 负载能力差。电容式传感器的容量受其电极的几何尺寸等限制, 一般为几十到几百皮法, 甚至只有几皮法, 使传感器的输出阻抗很高。因此传感器负载能力差, 易受外界干扰影响而产生不稳定现象, 严重时甚至无法工作, 必须采取屏蔽措施, 从而给设计和使用带来不便。容抗大还要求传感器绝缘部分的电阻值极高 (几十兆欧以上), 否则绝缘部分将作为旁路电阻以影响仪器的性能。如灵敏度降低、为此还要特别注意周围的环境, 如湿度、清洁度等。若采用高频供电, 可降低传感器输出阻抗, 但高频放大传输远比低频的复杂, 且寄生电容影响大, 不易保证工作十分稳定。

(2) 寄生电容影响大。电容式传感器的初始电容量小, 而连接传感器和电子线路的引线电缆电容、电子线路的杂散电容及传感器内极板与其周围导体构成的电容等 (所谓“寄生电容”) 却较大, 不仅降低了传感器的灵敏度, 而且这些电容 (如电缆电容) 常常是随机变化的, 将使仪器工作很不稳定, 影响测量精度。因此对电缆的选择、安装、接法都有要求。

应该指出, 材料、工艺、电子技术, 特别是集成技术的高速发展, 使电容式传感器的优点得到发扬而缺点不断地得到克服。电容式传感器正逐渐成为一种高灵敏度、高精度, 在动态、低压及一些特殊测量方面大有发展前途的传感器。

3) 转换电路

将电容量转换成电压 (或电流) 的电路称做电容式传感器的转换电路。它们的种类很多, 目前较常采用的有电桥电路、调频电路、脉冲调宽电路和运算放大器式电路等。

3. 电容式传感器的应用

电容式传感器具有结构简单、灵敏度高、分辨力高、能感受 $0.01\mu\text{m}$ 甚至更小的位移、无反作用力、动态响应好、能实现非接触测量、能在恶劣环境下工作等优点, 而且随着新工艺、新材料的问世, 特别是电子技术的发展, 干扰和寄生电容等问题不断得到解决, 因此越来越广泛地应用于各种测量中。电容式传感器可用来测量直线位移、角位移、振动振幅, 尤其适合测量高频振动振幅、精密轴系回转精度、加速度等机械量, 还可用来测量压力、差压力、液位、料面、成分含量、非金属材料的涂层、油膜等的厚度, 测量电介质的湿度、密度、厚度等, 在自动检测和控制系统中也常常用来作为位置信号发生器。当测量金属表面状况、距离尺寸、振动振幅时, 往往采用单边式变极距型电容传感器, 这时被测物是电容器的一个电极, 另一个电极则在传感器内。

4. 容栅式传感器

容栅式传感器是在变面积型电容传感器的基础上研制的一种新型传感器。它具有电容式传感器的优点，如动态响应快、结构简单、易实现非接触测量，还因具有多极电容及平均效应，使其抗干扰能力强，精度高，对刻制和安装精度要求不高，量程大、是一种很有发展前途的传感器。现已应用于数显量具（如数显卡尺、数显千分尺）及雷达测角系统中。

3.3.4 磁电式传感器

磁电式传感器是通过磁电作用将被测量（如振动、位移、转速等）转换成电信号的一种传感器。磁电感应式传感器、霍尔式传感器和磁栅式传感器都是磁电式传感。它们的工作原理并不完全相同，各有各的特点和应用范围。

1. 磁电感应式传感器

磁电感应式传感器简称感应式传感器，也称为电动式传感器。它是利用导体和磁场发生相对运动而在导体两端输出感应电动势的。它是一种机-电能量变换型传感器，不需要供电电源，电路简单，性能稳定，输出阻抗小，又具有一定的频率响应范围（一般为 10~1000Hz），适用于振动、转速、扭矩等测量。但这种传感器的尺寸和重量都较大。主要应用有磁电感应式振动速度传感器、磁电感应式转速传感器和磁电感应式扭矩仪。

1) 工作原理和类型

(1) 工作原理。磁电感应式传感器是以电磁感应原理为基础的。磁电感应式传感器只适用于动态测量，可直接测量振动物体的速度或旋转体的角速度。如果在其测量电路中接入积分电路或微分电路，那么还可以用来测量位移或加速度。

(2) 类型。将磁电感应式传感器分为恒定磁通式和变磁通式两类。

2) 动态特性

磁电感应式传感器只适用于测量动态物理量，因此动态特性是这种传感器的主要性能。这种传感器和压电式传感器一样都是机-电能量变换型传感器，且具有双向性质，既能用做传感器，将机械量转换为电量，也能用做发生器，将电量转换为机械量。在测量简谐运动时，为了更简便地分析它们的动态特性，将不采用以往求解运动微分方程的分析方法，而采用二端口网络理论，并引入机械阻抗，像分析线性电路的频率传递函数一样来分析传感器的频响特性。分析时，用矩阵形式表示机械量和电量间的关系，建立它们的传递矩阵，从而得到传感器的传递函数，由此画出频响特性曲线来说明传感器的动态特性。

动态特性主要体现在：机械阻抗、传递矩阵和传递函数。

2. 霍尔式传感器

霍尔式传感器是利用霍尔元件基于霍尔效应原理而将被测量，如电流、磁场、位移、压力等转换成电动势输出的一种传感器。虽然它的转换效率较低，温度影响大，要求转换精度较高时必须进行温度补偿，但霍尔式传感器结构简单、体积小、坚固、频率响应宽（从直流到微波）、动态范围（输出电动势的变化）大、无触点、使用寿命长、可靠性高、易微型化和集成电路化，因此在测量技术、自动化技术和信息处理等方面得到广泛的应用。

1) 工作原理与特性

(1) 霍尔效应。金属或半导体薄片置于磁场中，当有电流流过时，在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势，这种物理现象称为霍尔效应。

(2) 霍尔元件。基于霍尔效应原理工作的半导体器件称为霍尔元件。它是由霍尔片、数据引线和壳体组成。

(3) 霍尔元件的电磁特性。霍尔元件的电磁特性包括控制电流（直流或交流）与霍尔输出电势之间的关系；霍尔输出与磁场（恒定或交变）之间的关系；元件的输入或输出电阻与磁场之间的关系。

2) 霍尔元件的误差及其补偿

由于制造工艺问题及实际使用时所存在的各种影响霍尔元件性能的因素，如元件安装不合理、环境温度变化等，都会影响霍尔元件的转换精度而带来误差。

(1) 霍尔元件的零位误差及其补偿。霍尔元件的零位误差包括不等位电动势、寄生直流电动势等。

解决不等位电动势，除了工艺上采取措施降低不等位电动势外，还需采用补偿电路加以补偿。

在元件制作和安装时，尽量使电极欧姆接触，并做到散热均匀，使其有良好的散热条件。通过这种方法，可解决寄生直流电动势的误差。

(2) 霍尔元件的温度误差及其补偿。一般半导体材料的电阻率、迁移率和载流子浓度等都随温度而变化。霍尔元件由半导体材料制成，因此它的性能参数如输入和输出电阻、霍尔常数等也随温度而变化，致使霍尔电动势变化，产生温度误差。为了减小温度误差，除选用温度系数较小的材料如砷化钢外，还可以采用适当的补偿电路。下面简单介绍几种温度误差补偿方法：

- ① 采用恒流源供电和输入回路并联电阻。
- ② 合理选取负载电阻的阻值。
- ③ 采用恒压源和输入回路串联电阻。
- ④ 采用温度补偿元件（如热敏电阻、电阻丝等）。
- ⑤ 采用霍尔元件不等位电动势 U_0 的温度补偿。

3) 应用

(1) 霍尔式位移传感器。该传感器保持霍尔元件的控制电流恒定，而使霍尔元件在一个均匀梯度的磁场中沿 x 方向移动，则输出的霍尔电动势为 $U_H=kx$ 。

电势的极性表示了元件位移的方向。磁场梯度越大，灵敏度越高；磁场梯度越均匀，输出线性度就越好。为了得到均匀的磁场梯度，往往将磁钢的磁极片设计成特殊形状。这种位移传感器可用来测量 $\pm 0.5\text{mm}$ 的小位移，特别适用于微位移、机械振动等测量。若霍尔元件在均匀磁场内转动，则产生与转角的正弦函数成比例的霍尔电压，因此可用来测量角位移。

(2) 霍尔式压力传感器。任何非电量只要能转换成位移量的变化，均可利用霍尔式位移传感器的原理变换成霍尔电动势。霍尔式压力传感器就是其中的一种。它首先由弹性元件（可以是波登管或膜盒）将被测压力变换成位移，由于霍尔元件固定在弹性元件的自由端上，因此弹性元件产生位移时将带动霍尔元件，使它在线性变化的磁场中移动，从而输出霍尔电动势。

3. 磁栅式传感器

磁栅式传感器主要由磁栅和磁头组成。磁栅上录有等间距的磁信号，利用磁带录音的原理将等节距周期变化的电信号用录磁的方法记录在磁性尺子或圆盘上。装有磁栅传感器的仪器或装置工作时，磁头相对于磁栅将占有一定的相对位置或相对位移，在这个过程中，磁头把磁栅上的磁信号读出来，这样就将被测位置或位移转换成电信号。

1) 磁栅的类型

磁栅分为长磁栅和圆磁栅两大类，前者用于测量直线位移，后者用于测量角位移。长磁栅又可分为尺型、带型和同轴型 3 种。

2) 磁头

磁栅上的磁信号由读取磁头读出，按读取信号方式的不同，磁头可分为动态磁头与静态磁头两种。

(1) 动态磁头。动态磁头为非调制式磁头，又称速度响应式磁头。常见的录音机信号取出就属于此类。它只有一组线圈，当磁头与磁栅之间以一定的速度相对移动时，由于电磁感应将在该线圈上产生信号输出。当磁头与磁栅之间相对运动很缓慢或相对静止时，由于磁头线圈内的磁通变化很小或变化为零，输出电压将很小或为零，因此，速度响应式磁头在使用上受到一定的局限。

(2) 静态磁头。静态磁头是调制式磁头，又称磁通响应式磁头。它与动态磁头的根本不同在于，在磁头磁栅之间没有相对运动的情况下也有信号输出。

3) 信号处理方式

动态磁头利用磁栅磁头以一定的速度进行相对移动，读出磁栅上的信号，将此信号进行处理后使用。例如，某些动态丝杠检查仪就是利用动态磁头读取磁尺上的磁信号，作为长度基准，与圆光栅盘（或磁盘）上读取的圆接准信号进行相位比较，以检测丝杠的黏度。

静态磁头一般成对使用，就是用两个磁头，其信号处理方式分为鉴幅与鉴相两种。

4) 磁栅传感器的特点与误差分析

磁栅传感器的优缺点及使用范围与感应同步器相似，其精度略低于感应同步器，除此之外，它具有以下特点：

- (1) 录制方便，成本低廉。发现所录磁栅不合适时可抹去重录。
- (2) 使用方便，可以在仪器或机床上安装后再录制磁栅，因而可避免安装误差。
- (3) 可方便地录制任意节距的磁栅。如检查蜗杆时希望基准量中含有 X 因子，可在节距中考虑。

与感应同步器相似，磁栅传感器的误差也包括零位误差与细分误差两项。

影响零位误差的主要因素有：①磁栅的节距误差；②磁栅的安装与变形误差；③磁栅剩磁变化所引起的零线漂移；④外界电磁场干扰等。

影响细分误差的主要因素有：①由于磁膜不均匀或录磁过程不完善造成磁栅上信号幅度不相等；②两个磁头间距偏离正交较远；③两个磁头参数不对称会引起误差；④磁场高次谐波分量和感应电动势高次谐波分量的影响。

上述两项误差应限制在允许范围内，若发现超差，则应找出原因并加以解决。

一般来说，空间磁场不影响磁栅传感器的正常工作，尽管如此，仍要注意对它的屏蔽，磁栅外面应有防尘罩，防止铁屑进入。不要在仪器未接地时插拔磁头引线插头，以防止磁头磁化。

3.3.5 压电式传感器

压电式传感器的工作原理是以某些物质的压电效应为基础，它是一种发电式传感器。

压电效应是可逆的。

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，在一定表面上产生电荷，当外力去掉后，又重新回到不带电状态。

逆压电效应：当在电介质的极化方向施加电场，这些电介质就在一定方向上产生机械变形或机械应力；当外加电场撤去时，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”。

具有压电效应的电介质称为压电材料。在自然界中，已发现 20 多种单晶具有压电效应，石英 (SiO_2) 就是一种性能良好的天然压电晶体。此外，人造压电陶瓷，如钛酸钡、锆钛酸铅等多晶体也具有有良好的压电功能。

由于压电转换元件具有自发电和可逆电两种重要性能，加上它的体积小、重量轻、结构简单、工作可靠、固有频率高、灵敏度和信噪比高等优点，因此，30 多年来压电式传感器的应用获得飞跃的发展。利用正压电效应研制成压电电源、煤气炉和汽车发动机的自动点火装置等多种电压发生器；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那些物理量，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。利用逆压电效应可制成多种超声波发生器和压电扬声器等，如电子手表就用到压电谐振器。利用正、逆压电效应可制成压电陀螺、压电线性加速度计、压电变压器、声呐和压电声表面波器件等。更有意义的是根据研究生物压电学的结果认识到生物都具有压电性，人的各种感觉器官实际上是生物压电传感器。如根据正压电效应治疗骨折，可加速痊愈，用逆压电效应，对骨头通电具有矫正畸形骨等功能。

压电转换元件的主要缺点是无静态输出，要求有很高的电输出阻抗，需用低电容、低噪声电缆，很多压电材料的工作温度只有 250°C 左右。

1. 工作原理

压电方程是关于压电体中电位移、电场强度、应力和应变张量之间关系的方程组。常表现为：当压电元件受到外力 F 作用时，在相应的表面产生表面电荷 Q ，其关系为

$$Q=dF \quad (\text{式 3-3})$$

式中， d 为压电系数。它是描述压电效应的物理量，对方向一定的作用力和产生一定电荷的表面是一个常数。

2. 压电材料

明显呈现压电效应的敏感功能材料称为压电材料。由于它是物性型的，因此选用合适的压电材料是设计高性能传感器的关键。主要应考虑以下几方面：具有大的压电系数 d 和 ξ ；机械强度高、刚度大，以便获得较高的固有振动频率；高电阻率和大介电系数；高的居里点；温度、湿度和时间稳定性好。

1) 石英晶体

晶体的许多物理特性取决于晶体切割的方向。为了利用石英的压电效应进行力—电转换，需将晶体沿一定方向切割成晶片。适于各种不同应用的切割方法很多，最常用的就是 X 切和 Y 切。有关晶片的切型及其符号是这样规定的：在直角坐标中，如切片的原始位置是厚度平行于 X 轴，长度平行于 Y 轴，宽度平行于 Z 轴，以此原始位置旋转出来的切型为 X 切族；如切片的厚度、长度和宽度边分别平行于 X、Y 和 Z 轴，从此原始位置旋转出来的切型为 Y 切族，并规定逆时针旋转为正切型，而顺时针旋转为负切型。

石英晶体最明显的优点是它的介电常数和压电常数的温度稳定性好，适于做工作温度范围很宽的传感器。

2) 铌酸锂晶体

铌酸锂晶体是人工拉制的，像石英一样也是单晶体，时间稳定性远比多晶体的压电陶瓷好，居里点高达 1200℃，适于做高温传感器。这种材料各向异性很明显，比石英脆，耐冲击性差，故加工和使用时要小心谨慎，避免急冷急热。

3) 压电陶瓷

用做压电陶瓷的铁电体将原料粉碎、成型，通过 1000℃ 以上的高温烧结得到多晶铁电体。由于它有制作工艺方便、耐湿、耐高温等优点，因此在检测技术、电子技术和超声等领域中用得最普遍。

需要指出的是，原始的压电陶瓷材料没有压电性，陶瓷烧结后有电畴，它们是压电特性的基础，可惜它们在原始材料中是无序排列的。

压电陶瓷的电极最常见的是一层银，通过锻烧与陶瓷表面牢固地结合在一起。电极的附着力极重要，如结合不好会降低有效电容量和阻碍极化。

3. 压电元件常用结构形式

1) 压电元件的基本变形

对能量转换有意义的石英晶体变形方式有以下几种：

- 厚度变形（TE 方式）。
- 长度变形（LE 方式）。
- 面剪切变形（FS 方式）。
- 厚度剪切变形（TS 方式）。
- 弯曲变形（BS 方式）。

2) 双晶片元件

在实际使用中，如果仅用单片压电片工作的话，要产生足够的表面电荷就要有很大的作用力。而测量粗糙度和微压差时所能提供的力是很小的，所以常把两片或两片以上的压电片组合在一起。

多晶片是双晶片的一种特殊类型，已广泛应用于测力和加速度传感器中。

为了保证双片悬臂元件粘结后两电极相通，一般用导电胶粘结。并联接法时中间应加入一铜片或银片作为引出电极。

4. 测量电路

为了使压电元件能正常工作，它的负载电阻（即前置放大器的输入电阻 R_i ）应有极高的值。因此与压电元件配套的测量电路的前置放大器有两个作用：一是放大压电元件的微弱电信号；二是把高阻抗输入变换为低阻抗输出。前置放大器有两种形式：一种是电压放大器，其输出电压与输入电压（压电元件的输出电压）成正比；另一种是电荷放大器，其输出电压与输入电荷成正比。

5. 压电式传感器的应用举例

从上面的介绍可以看出，压电元件是一种典型的力敏感元件。可用来测量最终能转换为力的多种物理量。在检测技术中，常用来测量力和加速度，主要有：

- 压电式和压力传感器。
- 压电式加速度传感器。
- 压电阻抗头。
- 压电式粗糙度测量传感器。

6. 压电式传感器的误差

1) 环境温度的影响

环境温度的变化对压电材料的压电系数和介电常数的影响都很大，它将使传感器灵敏度发生变化。压电材料不同，温度影响的程度也不同。如用石英，当温度低于 400℃ 时，其压电系数和介电常数都很稳定。

人工极化的压电陶瓷受温度的影响比石英要大得多；不同的压电陶瓷材料，压电系数和介电常数的温度特性比钛酸钡好得多。一种新型的压电材料——铌酸锂晶体的居里点为 $1210 \pm 10^\circ\text{C}$ ，远比石英和压电陶瓷的居里点高，所以用做耐高温传感器的转换元件。

2) 湿度的影响

环境湿度对压电式传感器性能的影响也很大，如果传感器长期在高湿环境下工作，其绝缘电阻将会减小，低频响应变坏。现在，压电式传感器的一个突出指标是绝缘电阻要高。为了能达到这一指标，采取的必要措施是：合理的结构设计，把转换元件组做成一个密封式的整体，有关部分一定要良好绝缘；要进行严格的清洁处理和装配，电缆两端必须气密焊封，必要时可采用焊接个密封方案。

3) 横向灵敏度和它所引起的误差

压电式单向传感器只能感受一个方向的作用力。一只理想的加速度传感器，只有当振动沿压电传感器在轴向运动时才有输出信号。若在与主轴正交方向的加速度作用下也有信号输出，则此输出信号与横向作用的加速度之比称为传感器的横向灵敏度。产生横向灵敏度的主要原因是：压电材料的不均匀性；压电片切割或极化方向的偏差；压电片表面粗糙或有杂质，或两个表面不平行；基座平面与主轴方向互不垂直，质量块加工精度不够；安装不对称等。其中尤其以安装时传感器的轴线和安装表面不垂直的影响为最大。结果是传感器最大灵敏度方向与其几何主轴不一致；横向作用的加速度在传感器最大灵敏度方向上分量不为零。

4) 电缆噪声

普通的同轴电缆由聚乙烯或聚四氟乙烯作绝缘保护层的多股绞线组成，外部屏蔽层由一个编织的多股镀银金属套包在绝缘材料上。工作时电缆受到弯曲或振动，屏蔽套、绝缘层和电缆芯线之间可能发生相对移动或摩擦而产生静电荷。由于压电式传感器是电容性的，这种静电荷不会很快消失而被直接送到放大器，这就形成电缆噪声。为了减小这种噪声，可使用特制的低噪声电缆，同时将电缆固紧，以免产生相对运动。

5) 接地回路噪声

在测试系统中接有多种测量仪器，如各仪器和传感器分别接地，各接地点又有电位差，这便在测量系统中产生噪声。防止这种噪声的有效方法是整个测量系统在一点接地，而且选择指示器的输入端为接地点。

7. 压电声表面波传感器

当外加交变电场通过逆压电效应的耦合作用时，便在压电体中激发起各种形式的弹性波。当外电场的频率与弹性波在压电体中传播时的机械谐振频率一致时，压电体便进入机械谐振状态，成为压电振子。

逆压电效应来源于带电粒子在电场中所受的力。正负离子在电场中往往是反向移动，而电偶极子则往往旋转，直至与电场方向一致，其所引起的位移就称为逆压电效应的机械应变。

应当指出：逆压电效应与固体介质如玻璃上发生的电致伸缩效应虽然都是电—机耦合效应，但它们对外电场的响应特性则完全不同。主要存在两个区别：逆压电应变通常比电致伸缩应变大几个数量级；压电应变与电场强度成正比，当外加电场反向（极化强度也反向）时，材料产生的应变也同时反向，而电致伸缩应变则与场强的平方成正比，因此与外加电场的方向无关。这两种效应几乎同时发生，但电致伸缩效应在实际应用中往往可以忽略不计。

同时利用正逆压电效应可以制作多种器件，压电声表面波传感器和压电陀螺就是它们的代表。

声表面波（SAW）技术自 1965 年由 White 等人发现以来，已研制成多种表面波器件，如带通滤波器、振荡器、相关器和延迟线等。近几年来，人们观察到外界因素（如温度、压力、加速度等）对声表面波传播参数的影响，制作了声表面波传感器（SAWS）。它能得到迅速发展和广泛应用是因为它具有很多优点：

（1）高精度、高灵敏度，它能把被测量转变为电信号频率的测量，而频率的测量精度高，抗干扰能力强。

（2）被测量转换成频率变化的数字信息进行传输、处理，因此极易与微机直接配合，组成自适应实时处理系统。

（3）SAW 器件应用平面制作工艺，极易集成化、一体化，结构牢固、质量稳定、重复性和可靠性好。

（4）体积小、重量轻、功耗小。

3.3.6 光电式传感器

光电式传感器的工作原理是：首先把被测量的变化转换成光信号的变化，然后通过光电转换元件变换成电信号。

由于光电测量方法灵活多样，可测参数众多，一般情况下具有非接触、高精度、高分辨力、高可靠性和反应快等优点，加之激光光源、光栅、光学码盘、CCD 器件、光导纤维等的相继出现和成功应用，使得光电传感器的内容极其丰富，在检测和控制领域中得到了广泛的应用。

1. 光电效应及光电器件

光电转换元件的作用原理是基于一些物质的光电效应。

当前物理学界认为光是由分离的能团——光子组成，兼有波和粒子的特性。把光看做一个波群，波群可想象为一个频率 f 的振荡，能量 E 和频率 f 的关系为

$$E=hf \quad (\text{式 3-4})$$

因此，不同颜色的光子由于其光波频率不同，其能量也不同，绿光光子比红光光子具有更多的能量。

光照射在物体上可看成是一连串具有能量为 E 的粒子轰击在物体上。光子与物质间的连接体是电子，如一个光子被半导体吸收后，半导体内的一个电子从光子那里得到能量，并马上释放出来参加导电过程。同样，一个自由电子被俘获后，便失去能量，用发射光子的形式释放该能量。

由上可见，所谓光电效应即是物体吸收能量为 E 的光后所产生的电效应。下面分别介绍目前所利用的几种光电效应及其器件。

（1）光电发射型

在光线作用下能使电子逸出物体表面，也称外光电效应。用这种原理制成的光电元件主要有真空光电管和光电倍增管等，用这种原理制成的辐射计数管仍在普遍使用。

（2）光电导型。这种型式的光电器件采用半导体材料并利用内光电效应组成。在光线作用下，其电阻值往往变小，这种现象称为光导效应，具有光导效应的材料称为光敏电阻，也称光导管。

（3）光电导结型。这类光电元件的工作原理与上一种光电导型是相似的，其差别只是光照射在半导体结上而已。

（4）光伏特型。光伏特型光电元件是自发电式的，是有源器件。也就是说，这种半导体器件受到光照时就会产生一定方向的电动势，而不需外部电源。这种因光照而产生电动势的现象称为光生伏特效应。

上面讨论的 3 种光电元件都是半导体传感元件，它们各有特点，但又有相似之处，为了便于分析和选用，把它们的特性综合如下：

- 光电特性。
- 伏安特性。
- 光谱特性。
- 频率特性。
- 温度特性。

2. 一般形式的光电传感器

影响光电元件接收量的因素可能是光源本身的变化，也可能是由光学通路造成的。按其接收状态可分为模拟式光电传感器和脉冲式光电传感器两大类。

1) 模拟式光电传感器

模拟式光电传感器的工作原理是基于光电元件的光电特性，其光通量是随被测量而变，光电流就成为被测量的函数，故称为光电传感器的函数运用状态。这种形式通常有以下几种情况：

(1) 吸收式。被测物放在光学通路中，光源的部分光通量由被测物吸收，剩余的投射到光电元件上，被吸收的光通量与被测物的透明度有关，所以常用来做混浊度计等。

(2) 反射式。光源发出的光投射到被测物上，被测物把部分光通量反射到光电元件上。反射光通量取决于反射表面的性质、状态和与光源之间的距离。利用这个原理可制成表面粗糙度测试仪等。

(3) 遮光式。光源发出的光通量经被测物遮去其一部分，使作用到光电元件上的光通量减弱，减弱的程度与被测物在光学通路中的位置有关。

(4) 辐射式。物体作为辐射源，其自身参数（如辐射能量）按照一定的算法转换为光电元件参数的变化。

2) 脉冲式光电传感器

脉冲式光电传感器的作用方式是光电元件的输出仅有两种稳定状态，也就是“通”与“断”的开关状态，所以也称为光电元件的开关运用状态。

光电式转速计即是其应用之一。光电式转速计将转速的变化变换成光通量的变化，再经光电元件转换成电量的变化。根据其工作方式又可分为反射型和直射型两类。

3. 光纤传感器

由于光导纤维（简称光纤）具有很多优点，因此用它组成的光纤传感器（FOS）与常规传感器相比就有很多特点。

(1) 抗电磁干扰能力强。常用光纤主要由电绝缘、耐腐蚀的 SiO_2 做成，工作时利用光子传输信息，因而不怕电磁场干扰。电磁干扰噪声的频率与光频相比很低，对光波无干扰。此外，光波易于屏蔽，外界光频性质的干扰也很难进入光纤。

(2) 灵敏度高。很多光纤传感器的灵敏度都优于同类常规传感器，有的甚至高几个数量级。

(3) 重量轻、体积小。光纤直径只有几微米到几百微米。同时光纤柔软，可深入机器内部或人体弯曲的内脏进行检测，使光波可沿需要的途径传输。

(4) 适于遥测。利用光通信技术组成遥测网。

由于光纤传感器的这些独特优点和广泛的潜在应用，使它发展极快。自 1977 年以来已研制出多种光纤传感器，被测量遍及位移、速度、加速度、液位、压力、流量、振动、水声、温度、电流、电压、磁场和核辐射等。新的传感原理及应用正在不断涌现和扩大。

1) 光导纤维

光纤的种类从构成光纤的材料来看，除掉玻璃光纤外尚有塑料光纤。但不论是通信用或传感用光纤，从性能和可靠性而言，当前大多采用玻璃光纤。

光纤按其传输的模式分为单模光纤和多模光纤两类。简单地说，光在纤芯中传播就是交变的电场和磁场在光纤中向前传输，可分解为沿轴向和径向传播的平面波。沿径向传播的平面波在纤芯和包层的界面上产生反射。

光纤按其中的折射率分布可分为：梯度型、阶跃型和单孔型。

2) 光纤传感器

光纤传感器按工作原理可分为以下两大类。

(1) 功能型（或称物性型、传感型）光纤传感器。光纤在这类传感器中不仅作为光传播的波导，而且具有测量的功能。因为光纤既是电光材料又是磁光材料，所以可以利用克尔效应、法拉第效应等，制成测量强电流、高电压等传感器；其次可利用光纤的传输特性把输入量变为调制的光信号。因为表征光波特性的参量，如振幅（光强）、相位和偏振态会随着光纤的环境（如应变、压力、温度、电场、射线等）而改变，故利用这些特性便可实现传感测量。

(2) 非功能型（或称结构型、传光型）光纤传感器。光纤在这类传感器中只是作传光的媒质，还需加上其他敏感元件才能组成传感器。它的结构比较简单并能充分利用光电元件和光纤本身的特点，因此很受重视。主要有：光纤位移传感器、光纤温度传感器、光波长分布（颜色）传感器和光频率调制型光纤传感器。

3) 光纤传感器发展趋势

光纤传感器是 20 世纪 70 年代中期出现的一种新型光学传感器，它具有很多优点，是对以电为基础的传统传感器的革命性变革，发展前景是极其光明的。但是，目前光纤传感器的成本较高，在这方面仍面临着传统传感器的挑战，存在着与传统传感器和其他新型传感器的竞争问题。为此，有必要说明光纤传感器未来可能的发展趋势。

(1) 应以传统传感器无法解决的问题作为光纤传感器的主要研制对象。例如，高电压、大电流、强电磁干扰、易燃易爆、强腐蚀、高温高压等恶劣环境下所使用的传感器，光纤陀螺、光纤水听器、干涉型光纤磁场计等也应成为当前光纤传感器的主要研究对象。

(2) 集成化光纤传感器。除光纤外的其他光学元件、信号处理系统，以及光源和光检测器都采用集成回路。

(3) 多功能全光纤控制系统。利用具有各种功能的光纤传感器，通过光纤网络，把各种敏感信息馈送到中心计算系统，对信息处理，做出判断，输出各种控制信号，对生产过程做出合理的控制。

(4) 充分发挥光纤的低传输损耗特性，发展远距离监测系统。如环境保护监测系统、核能发电站监测系统。

(5) 开辟新领域。一种新产品的生命力不仅表现其对旧市场的占领能力，而且表现其对新市场的开拓能力，光纤式仪表很可能发展成新一代仪表。因为现在所用的仪表都是电磁式仪表，其主要缺点是抗电磁干扰能力差，与其相反，光纤传感器则有强的抗电磁干扰能力。因此，由光学探头（光纤敏感元件）和信号处理系统相结合的光纤仪表，将是较理想的新一代测量仪表。

4. 电荷耦合摄像器件

电荷耦合摄像器件（Charge-Couple Device to imaging, CCD），是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型器件，它将光敏二极管阵列和读出移位寄存器集成为一体，构成具有自扫描功能的图像传感器。它不仅作为高质量固体化的摄像器件成功应用于广播电视、可视电话和无线电传真，而且在生产过程自动检测和控制等领域已显示出广阔的前景和巨大的潜力。

5. 光栅式传感器

在玻璃尺、金属尺或玻璃盘上，像刻线标尺或度盘那样进行长刻线（一般为 10~20mm）的密集刻划，没有刻划的地方透光（或反光），刻划的发黑处不透光（或不反光）、这就是光栅。

实际上，光栅很早就被人们发现了，但应用于技术领域只有一百多年的历史。早期人们利用光栅的衍射效应进行光谱分析，到了 20 世纪 50 年代人们才开始利用光栅的莫尔条纹现象进行精密测量，从而出现了光栅式传感器。现在人们把这种光栅称为计量光栅，以示区别于其他的光栅。近年来，光栅式传感器在精密测量领域中的应用得到了迅速的发展。光栅式传感器有如下特点：

(1) 精度高。光栅式传感器在大量程测量长度或直线位移方面仅仅低于激光干涉传感器。在圆分度和角位移测量方面，光栅式传感器也属于精度最高的。

(2) 大量程测量兼有高分辨力。感应同步器和磁栅式传感器也具有大量程测量的特点，但分辨力和精度都不如光栅式传感器。

(3) 可实现动态测量，易于实现测量及数据处理的自动化。

(4) 具有较强的抗干扰能力，对环境条件的要求不像激光干涉传感器那样严格，但不如感应同步器和磁栅式传感器的适应性强，油污和灰尘会影响它的可靠性。主要适用于在实验室和环境较好的车间使用。

(5) 高精度光栅的制作成本高，目前制造量程大于 1m 的光栅尚有困难。

光栅式传感器在几何量测量领域中有广泛的应用。凡是与长度（或直线位移）和角度（或角位移）测量有关的精密计量仪器常使用光栅式传感器，如工具显微镜、三坐标测量机、分度头和一些位移量同步比较的动态测量仪器。在一些高精度机床和数控机床上也常用光栅式传感器进行线位移和角位移的测量。

此外，在测量振动、速度、应力、应变等机械量测量中也有应用。

目前，应用光栅式传感器测量长度，精度最高可达到 $0.5\sim 3\mu\text{m}/3000\text{mm}$ ，分辨力可达 $0.05\mu\text{m}$ ；测量角度，精度最高可达 $0.15''$ 、分辨力能做到 $0.1''$ 甚至更小。

6. 激光式传感器

激光是在 20 世纪 60 年代初问世的。由于激光具有方向性强、亮度高、单色性好等特点，使激光不仅作为一种新颖光源，而且还发展成一种新技术——激光技术，广泛应用于工农业生产、国防军事、医学卫生、科学研究等各个方面，如用来测距、通信、准直、定向，进行难熔材料打孔、切割、焊接，用来精密检测、定位等，还有可能作为长度基准和光频标准。

激光器是发射激光的装置。按工作物质不同可分为固体激光器、气体激光器、半导体激光器、染料激光器等。它们各有各的特点和应用场合。

由于激光器、光学零件和光电器件所构成的激光测量装置能将测量量（长度、流量、速度）转换成电信号。因此广义上也可将激光测量装置称为激光式传感器。

7. 码盘式传感器

码盘式传感器建立在编码器的基础上。只要编码器保证一定的制作精度，并配置合适的读出部件，这种传感器可以达到较高的精度。另外，它的结构简单、可靠性高。因此，在空间技术、数控机械系统等方面得到了广泛的应用。

编码器从原理上看，类型很多，如电触式、电容式、感应式、光电式等。这里只讨论光电式，称之为光学编码器。

编码器包括码盘和码尺，前者用于测角，后者用于测长。因为测长的实际应用较少，故这里只讨论码盘。

编码器又可分为增量码编码器和绝对码编码器两大类。

8. 红外传感器

1) 红外辐射的基本知识

红外辐射俗称红外线，是一种人眼看不见的光线。

任何物体，当其温度高于绝对零度（ -273.15°C ）时，都将有能量向外辐射。物体温度越高，则辐射到周围空间的能量越多。辐射能以波动的方式传递，其中包括的波长范围很广，这里主要是研究能被物体吸收的并能重新转变为热能的波长为 $0.8\sim 40\mu\text{m}$ 的红外线。这种射线又称热射线，其传递过程称为辐射或红外辐射。

实验证明，红外辐射与可见光是同样的东西，可见光所具有的一切特性，红外辐射也都具有。即红外辐射也是按直线前进，也服从反射定律和折射定律，也有干涉、衍射和偏振等现象。事实上，在近代红外技术中，这些红外辐射的各种特性都一再被利用，都能得到预期的良好结果。

2) 红外探测器

凡是能把红外辐射量转变成另一种便于测量的物理量（通常是电信号）的器件，就叫做红外探测器。所以它是红外传感器的关键部件——传感元件。红外探测器的特性可用 4 个基本特性参数来描述。

(1) 响应率探测器输出信号方均根电压与入射到探测器上的方均根辐射功率 P 之比。

(2) 噪声等效功率和探测率。信号方均根电压等于噪声的方均根电压时，入射到探测器上的功率（方均根值）叫做噪声等效功率（NEP）。定义 NEP 的倒数为探测率。

(3) 时间常数。以一个矩形的辐射脉冲照射到探测器上，输出信号上升沿或下降沿都落在矩形脉冲之后，信号电压从零值上升到 $1-1/e=63\%$ 的时间，叫做探测器的时间常数或响应时间。

(4) 光谱响应。相同功率的各单色辐射入射到探测器上所产生的信号电压与辐射波长的关系，称为探测器的光谱响应。

目前，已研制的探测器就其工作机理可分成两大类，即光子探测器和热探测器。

3.3.7 其他

除前面提到的几种传感器之外,还有很多传感器没有提及。比如,半导体式传感器、热电式传感器、射线式传感器、谐振式传感器、力平衡式传感器等,可以通过查看相关的书籍来获取更多的传感器知识。

3.4 MEMS 技术

你是否曾想过:为什么智能型手机倒向一边时,荧幕会自动从垂直的显示方式调整为横向的显示方式,或者为什么游戏机的控制器能回应方向、速度和加速度的改变?这些用户友好功能的背后是微机电系统(MEMS)的加速度运动传感器,它们是实现这些功能的关键因素,也是这些智能型手机与游戏机如此流行的核心元素之一。

3.4.1 微机电系统概念

微机电系统(Micro-Electronic Mechanical System, MEMS),是在微电子技术基础上结合精密机械技术发展起来的一个新的科学技术领域,微机电系统是一个独立的智能系统。

一般来说, MEMS 是指可以采用微电子批量加工工艺制造的,集微型机构、微型传感器、微型致动器(执行器)及信号处理和电路,直至接口、通信和电源等部件于一体的微型系统。

通常, MEMS 主要包含微型传感器、执行器和相应的处理电路三部分。

3.4.2 微机电系统发展简史

微机电的概念最早可追溯到 1959 年 R.Feynman 在加州理工大学的演讲。1982 年, K.E. Peterson 发表了一篇题为“Silicon as a Mechanical Material”的综述文章,对硅微机械加工技术的发展起到了奠基的作用。

微机电研究的真正兴起则始于 1987 年,其标志是直径为 $10\mu\text{m}$ 的硅微电动机(转子直径 $120\mu\text{m}$, 电容间隙 $2\mu\text{m}$) 在加州大学伯克利分校的研制成功,引起了世界的轰动。自此以后,微电子机械系统技术开始引起世界各国科学家的极大兴趣。专家预言,它的意义可与当年晶体管的发明相比。

为了进一步完善这一学科,使其更多更快地为人类服务,除探索新技术、新工艺以外,各国科学家们还在积极努力从事 MEMS 基础理论研究,包括对微流体力学、微机械摩擦和其他相关理论的研究,并建立一套方便、快捷的分析与设计系统。相信在不久的将来, MEMS 将广泛渗透到医疗、生物技术、空间技术等领域。

3.4.3 微机电系统的特点及前景

1. 微机电系统的特点

微机电系统具有以下 6 个特点。

(1) 微型化。MEMS 器件体积小、重量轻、耗能低、惯性小、谐振频率高、响应时间短。

(2) 以硅为主要材料,机械电器性能优良。硅的强度、硬度及杨氏模量与铁相当,密度类似铝,热传导率接近钨和钨。

(3) 大量生产。用硅微加工工艺在一片硅片上可同时制造成百上千个微型机电装置或完整的 MEMS,批量生产可大大降低生产成本。

(4) 集成化。可以把不同功能、不同敏感方向或致动方向的多个传感器或执行器集成于一体或形成微传感器阵列、微执行器阵列,甚至把多种功能的器件集成在一起,形成复杂的微系统。微传感器、微执行器和微电子器件的集成可制造出可靠性、稳定性很高的 MEMS。

(5) 多学科交叉, MEMS 涉及电子、机械、材料、制造、信息与自动控制、物理、化学和生物等多种学科,并集中了当今科学技术发展的许多尖端成果,是一种多学科交叉技术。

(6) 应用上高度广泛。MEMS 的应用领域包括信息、生物、医疗、环保、电子、机械、航空、航天、军事等。它不仅可形成新的产业，还能通过产品的性能提高、成本降低，有力地改造传统产业。

2. 应用前景

MEMS 在国防、医疗、仪器检测、材料等领域，尤其是活动空间狭小、操作精度要求高、功能需要高度集成的航空航天等领域，具有广阔的应用前景，被认为是一项面向 21 世纪可以广泛应用的新兴技术。

目前 MEMS 已从实验室探索走向产业化轨道，据美国 MCNC（北卡罗来纳微电子中心）MEMS 技术应用中心预测，当前 MEMS 业界的年增长率为 10%~20%，2001 年有高于 80 亿美元的 MEMS 潜在市场。2003 年 MEMS 市场达到 400 亿美元。

从 MEMS 市场的角度来看，2005 年 MEMS 原材料的市场规模是 3.85 亿美元，这些与 MEMS 产品和半导体产品直接相关。2005 年 MEMS 市场规模是 53 亿美元，2010 年达到 86 亿美元，预计 2020 年底将达到 200 亿美元。

3.5 传感器接口

3.5.1 SPI 接口

SPI 接口的全称是“Serial Peripheral Interface”，意为串行外围接口，是 Motorola 首先在其 MC68HCXX 系列处理器上定义的。SPI 接口主要应用在 EEPROM、Flash、实时时钟、AD 转换器、数字信号处理器和数字信号解码器等。

SPI 总线系统是一种同步串行外设接口，它可以使 MCU 与各种外围设备以串行方式进行通信以交换信息。

SPI 总线系统可直接与各个厂家生产的多种标准外围器件直接接口，该接口一般使用 4 条线：串行时钟线（SCLK）、主机输入/从机输出数据线 MISO、主机输出/从机输入数据线 MOSI 和低电平有效的从机选择线 SS（有的 SPI 接口芯片带有中断信号线 INT、有的 SPI 接口芯片没有主机输出/从机输入数据线 MOSI）。

SPI 接口在 CPU 和外围低速器件之间进行同步串行数据传输，在主器件的移位脉冲下，数据按位传输，高位在前，低位在后，为全双工通信。数据传输速度总体来说比 I²C 总线要快，可达到几 Mb/s。SPI 接口是以主从方式工作的，这种模式通常有一个主器件和一个或多个从器件。其接口包括以下 4 种信号。

- MOSI——主器件数据输出，从器件数据输入。
- MISO——主器件数据输入，从器件数据输出。
- SCLK——时钟信号，由主器件产生。
- \overline{SS} ——从器件使能信号，由主器件控制，有的 IC 会标注为 CS（Chip Select）。

在点对点的通信中，SPI 接口不需要进行寻址操作，且为全双工通信，显得简单高效。SPI 接口的一个缺点是没有指定的流控制，没有应答机制确认是否接收到数据。

3.5.2 I²C 接口

1. I²C 总线定义

I²C（Inter-Integrated Circuit）总线是一种由 PHILIPS 公司开发的两线式串行总线，用于连接微控制器及其外围设备。I²C 总线产生于在 20 世纪 80 年代，最初为音频和视频设备开发，如今主要在服务器中使用，其中包括单个组件状态的通信。如管理员可对各个组件进行查询，以管理系统的配置或掌握组件的功能状态，如电源和系统风扇。可随时监控内存、硬盘、网络、系统温度等多个参数，增加了系统的安全性，方便了管理。

2. 总线特点

I²C 总线最主要的优点是其简单和有效。由于接口直接在组件之上，因此 I²C 总线占用的空间非常小，减少了电路板的空间和芯片引脚的数量，降低了互联成本。总线的长度可达 8m，并且能够以 10kbps 的最大传输速率支持 40 个组件。I²C 总线的另一个优点是，它支持多主控（Multimastering），其中任何能够进行发送和接收的设备都可以成为主总线。一个主控能够控制信号的传输和时钟频率。当然，在任何时间点上只能有一个主控。

3. 工作原理

I²C 总线是由数据线 SDA 和时钟 SCL 构成的串行总线，可发送和接收数据。在 CPU 与被控 IC 之间、IC 与 IC 之间进行双向传送，最高传输速率 100kbps。各种被控制电路均并联在这条总线上，但就像电话机一样只有拨通各自的号码才能工作，所以每个电路和模块都有唯一的地址，在信息的传输过程中，I²C 总线上并接的每一模块电路既是主控器（或被控器），又是发送器（或接收器），这取决于它所完成的功能。CPU 发出的控制信号分为地址码和控制量两部分，地址码用来选址即接通需要控制的电路，确定控制的种类；控制量决定该调整的类别（对比度、亮度）及需要调整的量。这样，各控制电路虽然挂在同一条总线上，却彼此独立，互不相关。

I²C 总线在传送数据过程中共有 3 种类型信号，它们分别是开始信号、结束信号和应答信号。

开始信号：SCL 为高电平时，SDA 由高电平向低电平跳变，开始传送数据。

结束信号：SCL 为高电平时，SDA 由低电平向高电平跳变，结束传送数据。

应答信号：接收数据的 IC 在接收到 8bit 数据后，向发送数据的 IC 发出特定的低电平脉冲，表示已收到数据。CPU 向受控单元发出一个信号后，等待受控单元发出一个应答信号，CPU 接收到应答信号后，根据实际情况做出是否继续传递信号的判断。若未收到应答信号，由判断为受控单元出现故障。

这些信号中，起始信号是必需的，结束信号和应答信号都可以不要。

目前有很多半导体集成电路上都集成了 I²C 接口。带有 I²C 接口的单片机有：CYGNAL 的 C8051F0XX 系列，PHILIP 的 SP87LPC7XX 系列，MICROCHIP 的 PIC16C6XX 系列等。很多外围器件如存储器、监控芯片等也提供 I²C 接口。

3.5.3 串行接口

串行接口简称串口，也称串行通信接口（通常指 COM 口），是采用串行通信方式的扩展接口。

串口的出现是在 1980 年前后，数据传输速率为 115~230kbps。串口出现的初期是为了实现连接计算机外设的目的，初期串口一般用来连接鼠标和外置 Modem 及老式摄像头和写字板等设备。串口也可以用于两台计算机（或设备）之间的互联及数据传输。由于串口不支持热插拔及传输速率较低，目前部分新主板和大部分便携式计算机已开始取消该接口，多用于工控和测量设备及部分通信设备中。

串口按照电气标准以及协议来分，包括 RS-232-C、RS-422、RS-485、USB 等。RS-232-C、RS-422 与 RS-485 标准只对接口的电气特性做出规定，不涉及接插件、电缆或协议。USB 是最近几年发展起来的新型接口标准，主要应用于高速数据传输领域。

1. RS-232-C

RS-232-C 也称标准串口，最常用的一种串行通信接口。它是在 1970 年由美国电子工业协会（EIA）联合贝尔系统、调制解调器厂家及计算机终端生产厂家共同制定的用于串行通信的标准。它的全名是“数据终端设备（DTE）和数据通信设备（DCE）之间串行二进制数据交换接口技术标准”。传统的 RS-232-C 接口标准有 22 根线，采用标准 25 芯 D 型插座（DB25），后来使用简化为 9 芯 D 型插座（DB9），现在 25 芯插座已很少采用。

RS-232 采取不平衡传输方式，即单端通信。由于其发送电平与接收电平的差仅为 2~3V，所以其共模抑制能力差，再加上双绞线上的分布电容，其传送距离最大为约 15m，最高传输速率为 20kbps。RS-232 是为点对点（即只用一对收发设备）通信而设计的，其驱动器负载为 3~7kΩ。所以 RS-232 适合本地设备之间的通信。

2. RS-422

RS-422 标准全称是“平衡电压数字接口电路的电气特性”，它定义了接口电路的特性。典型的 RS-422 是四线接口。实际上还有一根信号地线，共 5 根线。由于接收器采用高输入阻抗和发送驱动器比 RS-232 更强的驱动能力，故允许在相同传输线上连接多个接收结点，最多可接 10 个结点。即一个主设备（Master），其余为从设备（Slave），从设备之间不能通信，所以 RS-422 支持点对多的双向通信。接收器输入阻抗为 $4k\Omega$ ，故发端最大负载能力是 $10 \times 4k\Omega + 100\Omega$ （终接电阻）。RS-422 四线接口由于采用单独的发送和接收通道，因此不必控制数据方向，各装置之间任何必需的信号交换均可以按软件方式（XON/XOFF 握手）或硬件方式（一对单独的双绞线）实现。RS-422 的最大传输距离为 1219m，最大传输速率为 10Mb/s。其平衡双绞线的长度与传输速率成反比，在 100kbps 速率以下，才可能达到最大传输距离。只有在很短的距离下才能获得最高速率传输。一般 100m 长的双绞线上所能获得的最大传输速率仅为 1Mbps。

3. RS-485

RS-485 是从 RS-422 基础上发展而来的，所以 RS-485 的许多电气规定与 RS-422 相仿。如都采用平衡传输方式，都需要在传输线上接终接电阻等。RS-485 可以采用二线与四线方式，二线制可实现真正的多点双向通信，而采用四线连接时，与 RS-422 一样只能实现点对多的通信，即只能有一个主（Master）设备，其余为从设备，但它比 RS-422 有改进，无论四线还是二线连接方式，总线上最多可接 32 个设备。

RS-485 与 RS-422 的不同还在于其共模输出电压，RS-485 在 $-7V \sim +12V$ 之间，而 RS-422 在 $-7V \sim +7V$ 之间。RS-485 接收器最小输入阻抗为 $12k\Omega$ ，RS-422 是 $4k\Omega$ 。由于 RS-485 满足所有 RS-422 的规范，所以 RS-485 的驱动器可以用在 RS-422 网络中应用。

RS-485 与 RS-422 一样，其最大传输距离约为 1219m，最大传输速率为 10Mbps。平衡双绞线的长度与传输速率成反比，在 100kbps 速率以下，才可能使用规定最长的电缆长度。只有在很短的距离下才能获得最高传输速率。一般 100m 双绞线最大传输速率仅为 1Mbps。

4. USB

USB 是英文 Universal Serial Bus（通用串行总线）的缩写，是在 1994 年底由英特尔、康柏、IBM、Microsoft 等多家公司联合推出的新型外设接口标准。USB 用一个 4 针（USB3.0 标准为 9 针）插头作为标准插头，采用菊花链形式可以把所有的外设连接起来。USB 接口可用于连接多达 127 个外设，如鼠标、调制解调器和键盘等。USB 接口速度快、连接简单、不需要外接电源，传输速率 12Mbps，USB2.0 可达到 480Mbps；电缆最大长度 5m，USB 电缆有 4 条线：2 条信号线，2 条电源线，可提供 5V 电源，USB 电缆分为屏蔽和非屏蔽两种。

3.6 本章习题

1. 介绍日常生活中常用的一些传感器，并叙述它们的功能及特性。
2. 传感器有哪些接口？
3. 传感器的应用领域有哪些？

联系方式

集团官网：www.hqyj.com

嵌入式学院：www.embedu.org

移动互联网学院：www.3g-edu.org

企业学院：www.farsight.com.cn

物联网学院：www.topsight.cn

研发中心：dev.hqyj.com

集团总部地址：北京市海淀区西三旗悦秀路北京明园大学校内 华清远见教育集团

北京地址：北京市海淀区西三旗悦秀路北京明园大学校区，电话：010-82600386/5

上海地址：上海市徐汇区漕溪路银海大厦 A 座 8 层，电话：021-54485127

深圳地址：深圳市龙华新区人民北路美丽 AAA 大厦 15 层，电话：0755-22193762

成都地址：成都市武侯区科华北路 99 号科华大厦 6 层，电话：028-85405115

南京地址：南京市白下区汉中路 185 号鸿运大厦 10 层，电话：025-86551900

武汉地址：武汉市工程大学卓刀泉校区科技孵化器大楼 8 层，电话：027-87804688

西安地址：西安市高新区高新一路 12 号创业大厦 D3 楼 5 层，电话：029-68785218

华清远见