

《传感器与自动检测技术》习题解答

第1章 传感器的基本知识

1. 简述传感器的概念、作用及组成。

答：传感器的定义是：“能感受（或响应）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”。

作用：将被测量转换成与其有一定关系的易于处理的电量。

组成：敏感元器件、转换元器件、转换电路及辅助电源。

2. 传感器的分类有哪几种？各有什么优缺点？

答：传感器常用的分类方法有两种，一种是按被测输入量来分，另一种是按传感器的工作原理来分。

按被测输入量来分：这种分类方法的优点是比较明确地表达了传感器的用途，便于使用者根据其用途选用。其缺点是没有区分每种传感器在转换机理上有何共性和差异，不便于使用者掌握其基本原理及分析方法。

按传感器的工作原理来分：这种分类的优点是对传感器的工作原理表达的比较清楚，而且类别少，有利于传感器专业工作者对传感器进行深入的研究分析。其缺点是不便于使用者根据用途选用。

3. 传感器是如何命名的？其代号包括哪几部分？在各种文件中如何应用？

答：一种传感器产品的名称，应由主题词及4级修饰语构成。

（1）主题词——传感器。

（2）第1级修饰语——被测量，包括修饰被测量的定语。

（3）第2级修饰语——转换原理，一般可后续以“式”字。

（4）第3级修饰语——特征描述，指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件及其他必须的性能特征，一般可后续以“型”字。

（5）第4级修饰语——主要技术指标（量程、精确度、灵敏度等）。

本命名法在有关传感器的统计表格、图书索引、检索以及计算机汉字处理等特殊场合使用。

例1： 传感器，绝对压力，应变式，放大型，1~3500kPa；

例2： 传感器，加速度，压电式，±20g。

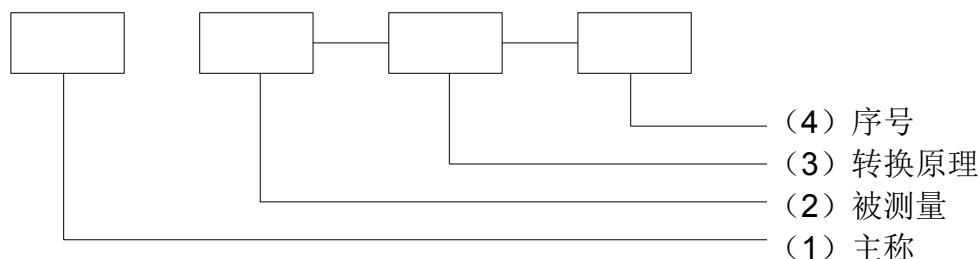
在技术文件、产品样书、学术论文、教材及书刊的陈述句子中，作为产品名称应采用与上述相反的顺序。

例3： 1~3500kPa 放大型应变式绝对压力传感器；

例4： ±20g 压电式加速度传感器。

在侧重传感器科学研究的文献、报告及有关教材中，为方便对传感器进行原理及其分类的研究，允许只采用第2级修饰语，省略其他各级修饰语。

传感器代号的标记方法：一般规定用大写汉字拼音字母和阿拉伯数字构成传感器完整代号。传感器完整代号应包括以下4个部分：（1）主称（传感器）；（2）被测量；（3）转换原理；（4）序号。4部分代号格式为：



在被测量、转换原理、序号3部分代号之间有连字符“-”连接。

例5：应变式位移传感器，代号为：CWY-YB-10；

例6：光纤压力传感器，代号为：CY-GQ-1；

例7：温度传感器，代号为：CW-01A；

例8：电容式加速度传感器，代号为：CA-DR-2。

有少数代号用其英文的第一个字母表示，如加速度用“A”表示。

4. 传感器的静态性能指标有哪些？其含义是什么？

答：传感器的静态特性主要由线性度、灵敏度、重复性、迟滞、分辨力和阈值、稳定性、漂移及量程范围等几种性能指标来描述。

含义：线性度是传感器输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离理论拟合直线的程度，又称非线性误差。通常用相对误差表示其大小；

灵敏度是指传感器在稳态下，输出增量与输入增量的比值。对于线性传感器，其灵敏度就是它的静态特性曲线的斜率，对于非线性传感器，其灵敏度是一个随工作点而变的变量，它是特性曲线上某一点切线的斜率。

重复性是传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时，所得特性曲线不一致性的程度。

迟滞是传感器在正向行程(输入量增大)和反向行程(输入量减小)期间，输出一输入特性曲线不一致的程度。

传感器的分辨力是在规定测量范围内所能检测的输入量的最小变化量 $\Delta_{\min}$ 。有时也用该值相对满量程输入值的百分数表示，称为分辨率。阈值通常又称为死区、失灵区、灵敏限、灵敏阈、钝感区，是输入量由零变化到使输出量开始发生可观变化的输入量的值。

稳定性有短期稳定性和长期稳定性之分。传感器常用长期稳定性表示，它是指在室温条件下，经过相当长的时间间隔，如一天、一月或一年，传感器的输出与起始标定时输出之间的差异。通常又用其不稳度来表征其输出的稳定度。

传感器的漂移是指在外界的干扰下，输出量发生与输入量无关的不需要的变化。漂移包括零点

漂移和灵敏度漂移。零点漂移和灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移。时间漂移是指在规定的条件下，零点或灵敏度随时间而缓慢变化的情况；温度漂移为环境温度变化而引起的零点或灵敏度的变化。

传感器所能测量的最大被测量（输入量）的数值称为测量上限，最小被测量称为测量下限，上限与下限之间的区间，则称为测量范围。测量范围可能是单向的（只有正向与负向）、也可能是双向的、或双向不对称的和无零值的等。测量上限与下限的代数和称为量程。

5. 传感器的动态特性主要从哪两方面来描述？采用什么样的激励信号？其含义是什么？

答：传感器的动态特性主要从时域和频域两方面来描述，采用瞬态响应法和频率响应法来分析。通常采用阶跃信号和正弦信号作为激励信号。以阶跃信号作为系统的输入，研究系统输出波形的方法称为瞬态响应法（时域）；以正弦信号作为系统的输入，研究系统稳态响应的方法称为频率响应法（频域）。

第2章 力、压力传感器

1. 力传感器的组成是什么？

答：力传感器主要由力敏感元件、转换元件和测量电路组成。

2. 弹性敏感元件的作用是什么？其分类有几种？各有何特点？

答：作用：弹性敏感元件把力或压力转换成了应变或位移。

分类：变换力的弹性敏感元件和变换压力的弹性敏感元件。

常用的变换力的弹性敏感元件有圆柱式、圆环式、悬臂梁、扭转轴等。

其特点：（1）圆柱式弹性敏感元件，根据截面形状可分为实心圆柱及空心圆柱等。结构简单，可承受较大的载荷，便于加工，实心圆柱形可测量大于 10kN 的力，空心圆柱形可测量 1~10kN 的力，应力变化均匀。

（2）圆环式弹性敏感元件比圆柱式输出的位移量大，因而具有较高的灵敏度，适用于测量较小的力。但它的工艺性较差，加工时不易得到较高的精度。

（3）悬臂梁式弹性敏感元件。它的一端固定，一端自由，结构简单，加工方便，应变和位移较大，适用于测量 1~5kN 的力。等截面悬臂梁，梁上各处的变形大小不同，不便于粘贴应变片。变截面悬臂梁（也称等强度悬臂梁），梁上各处的截面不等，但沿整个长度方向上各处的应变相等，便于粘贴应变片。

（4）扭转轴弹性敏感元件主要用来制作扭矩传感器，它利用扭转轴弹性体把扭矩变换为角位移，再把角位移变换为电信号输出。

3. 电阻应变式传感器的工作原理是什么？它是如何测量试件的应变的？

答：电阻应变片式传感器是利用了金属和半导体材料的“应变效应”的原理来工作的。即金属和半导体材料的电阻值随它承受的机械变形大小而发生变化的现象。

测试时，将应变片用粘接剂牢固的粘贴在被测试件的表面上，随着试件受力变形，应变片的敏感栅也获得同样的变形，从而使其电阻随之发生变化，而此电阻的变化是与试件应变成比例的，因此如果通过一定的测量线路将这种电阻的变化转换为电压或电流变化，然后再用显示记录仪表将其显示记录下来，就能知道被测试件应变量的大小。其原理图如图 2-7 所示。



图 2-7 电阻应变片测试与原理图

4. 电阻应变式传感器的测量电路有哪些？各有何特点？

答：电阻应变片传感器输出电阻的变化较小，一般为 $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-1} \Omega$ ，要精确的测量出这些微小电阻的变化，常采用桥式测量电路。根据电桥电源的不同，电桥可分为直流电桥和交流电桥，可采用恒压源或恒流源供电。由于直流电桥比较简单，交流电桥原理与它相似，所以我们只分析直流电桥的工作原理。

其特点是，当被测量无变化时，电桥平衡，输出为零。当被测量发生变化时，电桥平衡被打破有电压输出，输出的电压与被测量的变化成比例。

根据电桥工作桥臂的不同，分为单臂电桥、差动双臂电桥（半桥）、差动全桥三种类型。

双臂电桥输出灵敏度是单臂电桥的两倍，全桥输出是双臂电桥的两倍。并且采用双臂和全桥测量，可以补偿由于温度变化引起的测量误差。

5. 电阻应变片为什么要进行温度补偿？补偿方法有哪些？

答：电阻应变片传感器是靠电阻值来度量应变的，所以希望它的电阻只随应变而变，不受任何其他因素影响。但实际上，虽然用作电阻丝材料的铜、康铜温度系数很小（大约在 $\alpha = (2.5 \sim 5.0) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ），但与所测应变电阻的变化比较，仍属同一量级。如不补偿，会引起很大测量误差。

应变片的温度补偿方法通常有两种，即线路补偿和应变片自补偿。

6. 应变片的粘贴、固化和检查工艺有哪些？

答：应变片的粘贴工艺如下：

（1）试件表面的处理 粘贴之前，应先将试件表面清理干净，用细砂纸将试件表面打磨平整，再用丙酮、四氯化碳或佛利昂彻底清洗试件表面的灰尘、油渍，清理面积约为应变片的 3~5 倍。

(2) 确定贴片位置 根据实验要求在试件上划线, 以确定贴片的位置。

(3) 粘贴 在清理的试件表面上均匀涂刷一薄层粘接剂作为底层, 待其干燥固化后, 再在此底层及应变片基地的地面上均匀涂刷一薄层粘接剂, 等粘接剂稍干, 即将应变片贴在画线位置, 用手指滚压, 把气泡和多余的粘接剂挤出。注意, 应变片的底面也要清理。

(4) 固化 粘贴好的应变片按规定压力、升降温度速率及保温时间等进行固化处理。

(5) 稳定处理 粘接剂在固化过程中会膨胀和收缩, 致使应变片产生残余应力。为使应变片的工作性能良好, 还应进行一次稳定处理, 称为后固化处理, 即将应变片加温至比最高工作温度高 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$, 但不用加压。

(6) 检查 经固化和稳定处理后, 测量应变片的阻值, 以检查贴片过程中敏感栅和引线是否损坏。另外还应测量引线和试件之间的绝缘电阻, 一般情况下, 绝缘电阻为 50 兆欧即可, 对于高精度测量, 则需在 2000 兆欧以上。

7) 引线的焊接与防护 应变片引线最好采用中间连接片引出, 引线要适当固定, 为了保证应变片工作的长期稳定性, 应采取防潮、防水等措施, 如在应变片及其引线上涂以石蜡、石蜡松香混合剂、环氧树脂、有机硅、清漆等保护层, 或在试件上焊上金属箔, 将应变片全部覆盖。

7. 图 2-88 为一直流应变电桥。 $U_i = 5\text{V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 120\Omega$, 试求:

(1) R_1 为金属应变片, 其余为外接电阻, 当 R_1 变化量为 $\Delta R_1 = 1.2\Omega$ 时, 电桥输出电压

$U_o = ?$

(2) R_1 、 R_2 都是应变片, 且批号相同, 感受应变的极性和大小都相同, 其余为外接电阻, 电

桥的输出电压 $U_o = ?$

(3) 题 (2) 中, 如果 R_1 、 R_2 感受应变的极性相反, 且

$|\Delta R_1| = |\Delta R_2| = 1.2\Omega$, 电桥的输出电压 $U_o = ?$

(4) 由题 (1) ~ (3) 能得出什么结论与推论?

答: (1) 当 R_1 为金属应变片, 其余为外接电阻时, 电桥

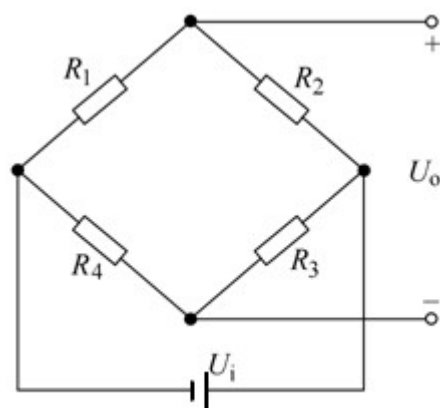


图 2-88 直流应变电桥

为单臂工作电桥，当 R_1 变化量为 $\Delta R_1 = 1.2\Omega$ 时，电桥输出电压：

$$U_0 = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} U_i = \frac{1}{4} \times \frac{1.2}{120} \times 5 = 0.0125 \text{ (V)} = 12.5 \text{ mV}$$

(2) 当 R_1 、 R_2 都是应变片，且批号相同，感受应变的极性和大小都相同，其余为外接电阻时
根据电桥的输出总公式

$$U_0 = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \text{ 可知，此时 } \Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R, \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0。$$

$$\text{电桥的输出：} U_0 = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{5}{4} \left(\frac{\Delta R}{120} + \frac{\Delta R}{120} - \frac{0}{120} - \frac{0}{120} \right) = 0$$

(3) 题 (2) 中，如果 R_1 、 R_2 感受应变的极性相反，且 $|\Delta R_1| = |\Delta R_2| = 1.2\Omega$ ，也就是 $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = 1.2\Omega$ ，此时电桥为差动双臂电桥（半桥），

$$\text{电桥输出电压：} U_0 = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} U_i = \frac{1}{2} \times \frac{1.2}{120} \times 5 = 0.025 \text{ (V)} = 25 \text{ mV} \quad \text{此时电桥。}$$

(4) 由题 (1) ~ (3) 可知双臂电桥输出灵敏度是单臂电桥的两倍，电桥的相邻两个桥臂为应变片工作桥臂时，感受的应变必须是一个受拉，一个受压，电桥才有输出。

8. 压电式传感器的工作原理是什么？压电材料有哪些？

答：压电式传感器的工作原理是压电效应，即某些晶体受一定方向外力作用而发生机械变形时相应地在一定的晶体表面产生符号相反的电荷，外力去掉后，电荷消失。力的方向改变时，电荷的符号也随之改变，这种现象称为压电效应。

用于传感器的压电材料或元件可分三类：一类是单晶压电晶体；另一类是极化的多晶压电陶瓷第三类是高分子压电材料。

9. 试用石英晶体为例说明压电效应产生的过程。

答：石英晶体是一种应用广泛的压电晶体。它是二氧化硅单晶体，图 2-24 是天然石英晶体的外形图，它为规则的正六角棱柱体。在正常情况下，石英晶体的每一个晶体单元中，有三个硅离子和六个氧离子，正负离子分布在正六边形的顶角上，当无外力作用时，正、负电荷中心重合，对外不显电性。当在 X 轴向施加压力时，如图 2-25(a) 所示，各晶格上的带电粒子均产生相对位移，氧离子挤入两个硅离子之间，而硅离子也挤入两个氧离子之间，正电荷中心向 B 面移动，负电荷中心向 A

面移动，因而B面呈现正电荷，A面呈现负电荷。当在X轴向施加拉力时，如图2-25(b)所示，各晶格上的带电粒子均沿X轴向外产生位移，因而A面呈现正电荷，B面呈现负电荷。在Y方向施加压力时，如图2-25(c)所示，晶格沿y轴被向内压缩，A面呈现正电荷，B面呈现负电荷。在Y方向施加拉力时，如图2-25(d)所示，晶格在y向被拉长，X向缩短，B面呈现正电荷，A面呈现负电荷。若沿Z轴方向施加力的作用时，由于硅离子和氧离子是对称的平移，故在表面没有电荷出现，因而不产生压电效应。这就是石英晶体压电效应产生的过程。

10. 压电陶瓷有何特点？

答：压电陶瓷是人工制造的一种多晶压电体，它有无数的单晶组成，各单晶的自发极化方向是任意排列的。因此，虽然每个单晶具有强的压电性质，但组成多晶后，各单晶的压电效应却互相抵消了，所以，原始的压电陶瓷是一个非压电体，不具有压电效应。为了使压电陶瓷具有压电效应，就必须进行极化理。即在一定的温度条件下，对压电陶瓷施加强电场，使极性轴转动到接近电场方向，规则排列，这时压电陶瓷就具有了压电性，在极化电场去除后，留下了很强的剩余极化强度。当压电陶瓷受到力的作用时，极化强度就发生变化，在垂直于极化方向上的平面上就会出现电荷。压电陶瓷的纵向压电系数比石英晶体的压电系数大得多，所以采用压电陶瓷制作的压电式传感器灵敏度较高。

11. 压电传感器的测量电路是什么？各有何特点？为什么压电传感器不能测量静态的力？

答：根据压电传感器的工作原理和等效电路，压电传感器的输出可以是电压信号，这时可以把传感器看作电压发生器；也可以是电荷信号，这时可以把传感器看作电荷发生器。因此前置放大器也有两种形式：电电压放大器压放大器和电荷放大器。

特点：由电压放大器的输出 $U_{im} = \frac{d}{C_i + C_c + C_a} F_m$ 可以看出，放大器输入电压与电缆的电容 C_c

有关系，当改变连接传感器与前置放大器的电缆长度时， C_c 将改变，从而引起放大器的输出电压也发生变化。在设计时，通常把电缆长度定为常数，使用时如要改变电缆长度，则必须重新校正电压灵敏度值。

电荷放大器输出电压 $U_o = -\frac{Q}{C_f}$ ，可以看出电荷放大器输出电压与电缆电容无关。因此电缆

可以很长，可长达数百米，甚至上千米，灵敏度却无明显损失。这是电荷放大器的一个突出优点。因此在测量时，不必考虑传感器与放大器配套的问题，放大器与传感器可以任意互换。

为什么压电传感器不能测量静态的力？由于外力作用在压电元件上产生的电荷只有在无泄露的情况下才能保存，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。因为在实际测量

时，放大器的输入电阻 R_i 和传感器的泄漏电阻 R_a 不可能为无穷大，因此电荷就会通过放大器的输

入电阻 R_i 和传感器的泄漏电阻 R_a 漏掉，所以压电传感器不能用于静态力测量。压电元件在交变力的

的作用下，电荷可以不断得到补充，可以供给测量电路以一定的电流，故只适用于动态测量。

12. 如图 2-32b 所示电荷放大器等效电路。压电元件为压电陶瓷，压电陶瓷的压电系数

$d_{zz} = 5 \times 10^{-10} \text{ C/N}$ ，反馈电容 $C_f = 0.01 \mu\text{F}$ ，若输出电压 $U_o = 0.4 \text{ V}$ ，求压电传感器所受

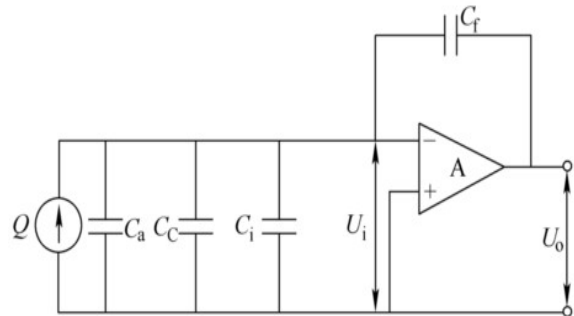
力的大小？

答：根据电荷放大器的输出 $U_o = -Q/C_f$

$$|Q| = U_o \cdot C_f = 0.4 \times 0.01 = 4 \times 10^{-9} \text{ C}$$

可知，压电陶瓷上产生的电荷

$$F_z = \frac{Q_{zz}}{d_{zz}} = \frac{Q}{d_{zz}} = \frac{4 \times 10^{-9}}{5 \times 10^{-10}} = 8 \text{ (N)}$$



b)

2-32 电荷放大器等效电路

13. 石英晶体的纵向压电系数 $d_{xx} = 2.3 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ ，晶体的长度是宽的 2 倍，是厚的 3 倍，求：

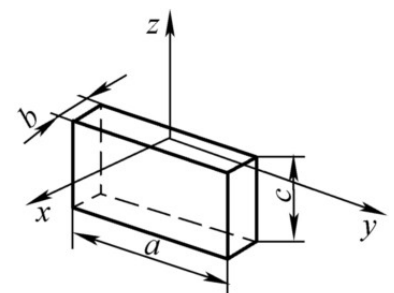
(1) 当沿电轴方向施加 $3 \times 10^4 \text{ N}$ 的力时，用反馈电容为 $C_f = 0.01 \mu\text{F}$ 的电荷放大器测量的输出电压是多少？

(2) 当沿机械轴施加力 F_y 时，用同样的电荷放大器测出的输出电压为 3V， F_y 为多少？

解答：(1) 电荷放大器的输出

(2) 根据题意，参考石英晶体的切片图，可以看出 $a=3b$

当沿机械轴施加力 F_y 时，产生的由 $Q_{xy} = -d_{xx} \frac{a}{b} F_y$



石英切片

根据式 $U_o = -\frac{Q}{C_f}$ 得 $Q = -U_o \times C_f$ ，即

$$Q = Q_{XY} = -d_{XX} \frac{a}{b} F_Y = U_o \times C_f$$

$$\text{求出 } F_Y = U_o \times C_f \frac{b}{a} \times \frac{1}{d_{XX}} = 0.01 \times 10^{-6} \times \frac{b}{3b} \times \frac{1}{2.3 \times 10^{-12}} = 4348(N)$$

14. 用压电式传感器测量一正弦变化的作用力，采用电荷放大器，压电元件用两片压电陶瓷并联，

压电系数 $d_{zz} = 190 \times 10^{-12} C/N$ ，放大器为理想运放，反馈电容 $C_f = 3800 pF$ ，实际测得放

大器输出电压为 $U_o = 10 \sin \omega t (V)$ ，试求此时的作用力 $F = ?$

解答：根据题意压电元件是两片压电陶瓷并联，所以总电荷是单个压电元件电荷的两倍，即

$$Q = 2Q_{XX},$$

根据电荷放大器的输出 $U_o = -\frac{Q}{C_f}$ ，得

$$Q = -U_o \times C_f = -10 \sin \omega t \times 3800 \times 10^{-12} = -3.8 \times 10^{-8} \sin \omega t,$$

$$Q_{XX} = d_{ZZ} \cdot F_Z = \frac{1}{2} Q, \text{ 得压电传感器受到的作用力}$$

$$F = F_Z = \frac{1}{2} Q \times \frac{1}{d_{ZZ}} = -\frac{3.8 \times 10^{-8}}{2 \times 190 \times 10^{-12}} \sin \omega t = -100 \sin \omega t (N)$$

15. 电容式传感器的工作原理是什么？可分成几种类型？各有何特点？

答：根据平行极板的电容器，如果不考虑其边缘效应，则电容器的电容量为

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$$

由上式可知，电容 C 是 A 、 d 、 ε 的函数，即 $C = f(\varepsilon, d, A)$ 。当 A 、 d 、 ε 改变时，电容量 C 也随之改变。若保持其中两个参数不变，通过被测量的变化改变其中的一个参数，就可把被测量的变化

转换为电容量的变化。这就是电容传感器的基本工作原理。

分类：电容式传感器根据工作原理不同，可分为变间隙式、变面积式、变介电常数式三种；按极板形状不同有平板形和圆柱形两种。

特点：变间隙式电容传感器：只能测量微小位移（微米级）；

变面积式电容传感器：可以测量较大位移的变化，常为厘米级位移量。

变介电常数式电容式传感器。可用来测量物位或液位，也可测量位移，可以测量较大位移的变化。

16. 试说明差动式电容传感器结构是如何提高测量灵敏度，减小非线性误差的？

答：以变间隙式电容传感器为例来分析。当 d 变化时，电容量的相对变化约为

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (2-35)$$

为了提高测量的灵敏度，减小非线性误差，实际应用时常采用差动式结构。如图 2-44 所示，

两个定极板对称安装，中间极板为动极板。当中间极板不受外力作用时，由于 $d_1 = d_2 = d_0$ ，所

以 $C_1 = C_2$ 。当中间极板向上移动 x 时， C_1 增加， C_2 减小，总电容的变化量 ΔC 为

$$\Delta C = C_1 - C_2 = \frac{2\Delta d}{d_0} C_0$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{2\Delta d}{d_0} \quad (2-37)$$

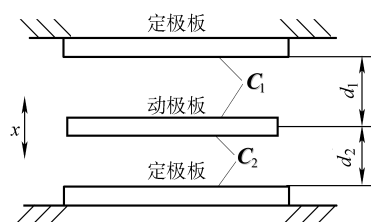


图 2-44 差动式电容器结构

式 (2-37) 与式 (2-35) 相比，输出灵敏度提高了一倍。

17. 电容式传感器的测量转换电路主要有哪些？

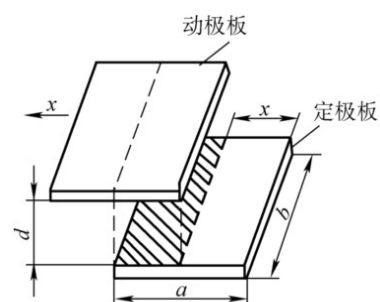
答：常见的电容式传感器测量转换电路有桥式电路、调频电路、充放电脉冲电路、运算放大器电路等。

18. 有一个以空气为介质的变面积型平板电容传感器，如图 2-45a 所示，其中 $a = 8mm, b = 12mm$ ，

两极板间距为 $d = 1mm$ 。当动极板在原始位置上平移了 $5mm$

后，求传感器电容量的变化 ΔC 及电容相对变化量 $\Delta C / C_0$ 。

（空气的相对介电常数 $\epsilon_r = 1$ ，真空的介电常数



a) 平板形线位移

图 2-45 变面积式电容传感器结构原理

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

答：根据变面积型平板式电容传感器的电容表达式： $\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{x}{a}$ 可得当动极板在原始位置上平

移了 5mm ，也就是公式中 $x = 5\text{mm}$ 后，电容的相对变化量为 $\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{x}{a} = -\frac{5}{8} = -0.625$

传感器电容量的变化

$$\Delta C = -C_0 \frac{x}{a} = -\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 a b}{d} \frac{x}{a} = \frac{1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 12 \times 5}{1} = 531.24 \text{ pF}$$

19. 电感传感器的基本原理是什么？可分成几种类型？

答：电感传感器的基本原理是电磁感应原理。利用电磁感应将被测非电量(如压力、位移等)转换成电感量的变化输出，再经测量转换电路，将电感量的变化转换为电压或电流的变化，来实现非电量电测的。

电感传感器的分类：根据信号的转换原理，电感式传感器可以分为自感式和互感式两大类。

20. 电感传感器的常用的测量电路有哪些？

答：自感式传感器常用的测量转换电路有桥式测量电路、调幅、调频、调相电路，在自感式传感器中，用得较多的是桥式测量电路和调幅电路。

差动变压器输出电压可直接用交流电压表接在反相串联的两个二次绕组上测量，此时空载输出

电压为 $U_O = E_{21} - E_{22}$ ，也可采用电桥电路来测量。

21. 电涡流传感器的工作原理是什么？形成电涡流的两个必备条件是什么？

答：电涡流传感器的工作原理是电涡流效应。即块状金属导体置于变化的磁场中或在磁场中做切割磁力线运动时，导体内将产生感应电流，这种电流的流线在金属体内自行闭合，类似于水中的漩涡，所以称为电涡流。电涡流的存在必然要消耗一部分磁场的能量，从而使激励线圈的阻抗发生变化，这种现象称为电涡流效应。根据电涡流效应制成的传感器称为电涡流传感器。

要形成电涡流必须具备两个条件：（1）存在交变磁场；（2）导体处于交变磁场中。

22. 压阻式压力传感器的工作原理是什么？主要应用是什么？

答：压阻式压力传感器的工作原理是基于压阻效应工作的。所谓压阻效应就是指半导体材料的受外力或应力作用时，其电阻率发生变化的现象。

主要应用是：用于压力、加速度、重量、应变、拉力、流量等参数的测量。

第3章 温度传感器

1. 温度的测量方法有几种？各有何特点？

答：按照感温元件是否与被测温对象相接触，温度测量可以分为接触式和非接触式测温两种。

接触式测温：感温元件与被测对象接触，彼此进行热量交换，使感温元件与被测对象处于同一环境温度下，感温元件感受到的冷热变化即是被测对象的温度。这类传感器的优点是：结构简单、工作可靠、测量精度高、价格便宜、可测得被测对象的真实温度及物体内部某一点的温度；缺点是：有较大的滞后现象（由于与被测物热交换需要一定的时间），不适于测量小的物体、腐蚀性强的物体及运动物体的温度，并且由于感温元件与被测对象接触，从而影响被测环境温度的变化，测温范围也受到感温元件材料特性的限制等。

非接触式测温：利用物体表面的热辐射强度与温度的关系来测量温度的。通过测量一定距离处被测物体发出的热辐射强度来确定被测物的温度。这类温度传感器的优点是：可以测量高温及腐蚀性、有毒物体的温度。测温速度快，不存在滞后现象，测温范围不受限制，可以测量运动物体、导热性差、微小目标、热容量小的物体、固体、液体表面的温度，不影响被测物环境温度。缺点是：易受被测物体与仪表间距离、烟尘、水气及被测物热辐射率的影响，测量精度较低等。

2. 膨胀式温度计有几种？其工作原理是什么？各有何特点？

答：膨胀式温度计可分为液体膨胀式温度计、固体膨胀式温度计、气体膨胀式温度计 3 种类型。

液体膨胀式温度计：利用玻璃感温泡内的液体受热体积膨胀与玻璃体积膨胀之差来测量温度的一般用于低温和中温温度测量。特点：不仅比较简单直观，而且还可以避免外部远传温度计的误差。但易破碎，刻度微细不便读取，不适于有振动和容易受到冲击的场合。

固体膨胀式温度计：利用膨胀系数不同的两种金属材料牢固地粘贴在一起制成的。当温度变化时，由于两种金属线膨胀系数不同而产生弯曲，弯曲的程度与温度的高低成比例的原理工作的。

特点：现场显示温度，直观方便，抗震性能好，结构简单，牢固可靠，使用寿命长，但精度不高。

气体膨胀式温度计：是基于密封在容器中的气体或液体受热后体积膨胀，压力随温度变化而变化的原理测温的。

特点：主要用于远距离设备的气体、液体、蒸汽的温度测量，也能用于温度控制和有爆炸危险场所的温度测量。

3. 电阻式温度传感器的工作原理是什么？有几种类型？

答：电阻式温度传感器是利用导体或半导体材料的电阻值随温度变化而变化的原理来测量温度的，即材料的电阻率随温度的变化而变化，这种现象称为热电阻效应。

类型：按制造材料来分，一般把由金属导体铂、铜、镍等制成的测温元件称为金属热电阻，简称热电阻传感器；把由半导体材料制成的测温元件称为热敏电阻。

4. 金属热电阻温度传感器常用的材料有哪几种？各有何特点？热电阻传感器的测量电路有哪些？说明每种测量电路的特点。

答：金属热电阻温度传感器常用的材料有铂和铜。

特点：铂金属热电阻：铂易于提纯、复制性好，在氧化性介质中，甚至高温下，其物理化学性质极其稳定，主要用于高精度温度测量和标准测温装置，测温范围为-200~850℃。

铜金属热电阻：铜易于提纯，价格低廉，电阻--温度特性线性较好。但电阻率仅为铂的几分之一。因此，铜电阻所用阻丝细而且长，机械强度较差，热惯性较大，在温度高于 100℃ 以上或腐蚀性介质中使用时，易氧化，稳定性较差。因此，只能用于低温及无腐蚀性的介质中。

热电阻传感器的测量电路常用电桥电路。外界引线如果较长时，引线电阻的变化会使测量结果有较大误差，为减小误差，可采用三线制电桥连接法测量电路或四线制恒流源测量电路。

特点：三线制电桥连接法测量电路，导线电阻 r 对测量毫无影响。

四线制恒流源测量电路，四根导线的电阻 r 对测量都没影响。但要因为电流流过导体时导体存在发热现象，所以供电电流不宜过大，一般在 0.6mA 以下。精确测量时，通电电流为 0.25mA。

5. 热电偶温度传感器的工作原理是什么？热电势的组成有几种？说明热电势产生的过程，并写出热电偶回路中总热电势的表达式。

答：热电偶温度传感器的工作原理是热电效应。即两种不同材料的导体 A 和 B 组成一个闭和回路，若两接点的温度不同，则在该回路中将会产生电动势，两个接点的温差越大，所产生的电动势也越大。组成回路的导体材料不同，所产生的电动势也不一样，这种现象称为热电效应。

热电势的组成：由两种导体的接触电势和单一导体的温差电势组成。

热电势产生的过程：

(1) 两种导体的接触电势

接触电势是由于两种不同导体的自由电子浓度不同而在接触面形成的电势。假设两种金属 A、B 的自由电子浓度分别为 N_A 和 N_B ，且 $N_A > N_B$ 。当两种金属相接时，将产生自由电子的扩散现象。在同一瞬间，由 A 扩散到 B 中去的电子比由 B 扩散到 A 中去的多，从而使金属 A 失去电子带正电；金属 B 得到电子带负电，在接触面形成电场。此电场阻止电子进一步扩散，当达到动态平衡时，在接触

面的两侧就形成了稳定的电位差，即接触电势 E ，如图 3-22 所示。接触电势的数值取决于两种导体的性质和接触点的温度，而与导体的形状及尺寸无关。温度越高，接触电势也越大。接触电势的方向由两导体材料决定。

(2) 单一导体的温差电势

对于单一导体，如果两端温度分别为 t 、 t_0 ，如图 3-23 所示，则导体中的自由电子，在高温端具有较大的动能，因而向低温端扩散；高温端因失去电子带正电，低温端获得电子带负电，即在导体两端产生了电势，这个电势称为单一导体的温差电势。

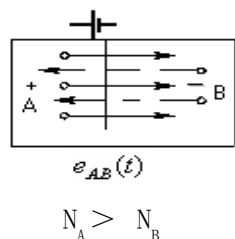


图 3-22 两种导体的接触电势

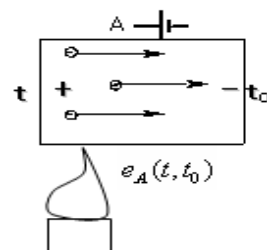


图 3-23 单一导体的温差电动势

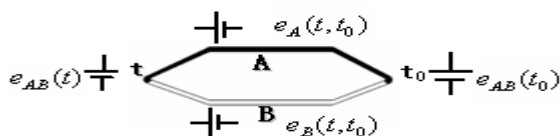


图 3-24 热电偶回路总热电势

由图 3-24 可知，热电偶回路中产生的总热电势为

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_B(t, t_0) - e_{AB}(t_0) - e_A(t, t_0) \quad (3-5)$$

式中， $E_{AB}(t, t_0)$ 为热电偶电路的总热电势； $e_{AB}(t)$ 为热端接触电势； $e_B(t, t_0)$ 为 B 导体的温差电势； $e_{AB}(t_0)$ 为冷端接触电势； $e_A(t, t_0)$ 为 A 导体的温差电势。

在总热电势中，温差电势比接触电势小很多，可忽略不计，则热电偶的热电势可表示为

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (3-6)$$

6. 热电偶的基本定律有哪些？其含义是什么？每种定律的意义何在？并证明每种定律。

答：热电偶的基本定律有：中间导体定律、中间温度定律、参考电极定律。

含义：中间导体定律——在热电偶电路中接入第三种导体，只要保持该导体两接入点的温度相等回路中总的热电势不变，即第三种导体的引入对热电偶回路的总热电势没有影响。

中间导体定律的意义：根据这个定律，我们可采取任何方式焊接导线，可以将热电势通过导线接至测量仪表进行测量，且不影响测量精度。可采用开路热电偶对液态金属和金属壁面进行温度测量，只要保证两热电极插入地方的温度相同即可。

中间温度定律含义：在热电偶测量电路中，测量端温度为 t ，自由端为 t_0 ，中间温度为 t' ，则 $E(t, t_0)$ 的热电势等于 $E(t, t')$ 与 $E(t', t_0)$ 热电势代数和。即

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t') + E_{AB}(t', t_0)$$

中间温度定律的意义：利用该定律，可对参考端温度不为 0°C 的热电势进行修正。另外，可以选用廉价的热电偶 A' 、 B' 代替 t' 到 t_0 段的热电偶 A 、 B ，只要在 t' 、 t_0 温度范围内 A' 、 B' 与 A 、 B 热电偶具有相近的热电势特性，便可将热电偶冷端延长到温度恒定的地方再进行测量，使测量距离加长，还可以降低测量成本，而且不受原热电偶自由端温度 t' 的影响。这就是在实际测量中，对冷端温度进行修正，运用补偿导线延长测温距离，消除热电偶自由端温度变化影响的道理。

参考电极定律含义：已知热电极 A 、 B 与参考电极 C 组成的热电偶在接点温度为 (t, t_0) 时的热电势分别为 $E_{AC}(t, t_0)$ 、 $E_{BC}(t, t_0)$ ，则相同温度下，由 A 、 B 两种热电极配对后的热电势可按式计算为： $E_{AB}(t, t_0) = E_{AC}(t, t_0) - E_{BC}(t, t_0)$

参考电极定律的意义：参考电极定律大大简化了热电偶选配电极的工作，只要获得有关电极与参考电极配对的热电势，那么任何两种电极配对后的热电势均可利用该定理计算，而不需要逐个进行测定。由于纯铂丝的物理化学性能稳定，熔点较高，易提纯，所以目前常用纯铂丝作为标准电极。

7. 热电偶的性质有哪些？

答：（1）当两热电极材料相同时，不论接点温度相同与否，回路总热电势均为零。

（2）当热电偶两个接点温度相同时，不论电极材料相同与否，回路总热电势均为零。

（3）只有当电极材料不同，两接点温度不同时，热电偶回路才有热电势。当电极材料选定后，两接点的温差越大，热电势也就越大。

（4）回路中热电势的方向取决于热端的接触电势方向或回路电流流过冷端的方向。

8. 为什么要对热电偶进行冷端温度补偿？常用的补偿方法有几种？补偿导线的作用是什么？连接补偿导线要注意什么？

答：由于热电偶的分度表是在冷端温度为 0°C 时测得的，如果冷端温度不为零，测得的热电势就不能直接去查相应的分度表。另外，根据热电偶的测温原理，热电偶回路的热电势只与冷端和热

端的温度有关，当冷端温度保持不变时，热电势才与测量端温度成单值对应关系。但在实际测量时，冷端温度常随环境温度变化而变化， t_0 不能保持恒定，因而会产生测量误差。为了消除测量误差，要对热电偶进行冷端温度补偿。

常采补偿方法：0℃冷端恒温法、冷端恒温法、补偿导线法（延引电极法）、电桥补偿法。

补偿导线的作用：补偿导线仅起延长热电极的作用，它本身并不能消除冷端温度变化对测温的影响，不起任何温度补偿作用。但由于补偿导线比热电偶便宜，节约了测量经费。

连接补偿导线必须注意两个问题：①两根补偿导线与热电偶相连的接点温度必须相同；②不同的热电偶要与其型号相应的补偿导线配套使用，且必须在规定的温度范围内使用，极性不能接反。

9. 热电偶测温线路有几种？试画出每种测温电路原理图，并写出热电势表达式。

答：测温某一点温度、测量两点间温差电路、测量多点温度之和电路、测量几点的平均温度、多点温度测量线路。

测温电路原理图：

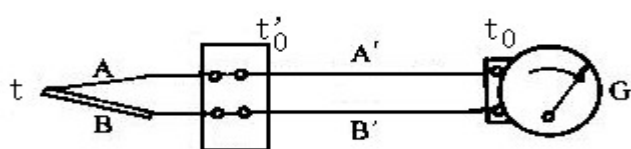


图 3-37 热电偶测量某一点温度

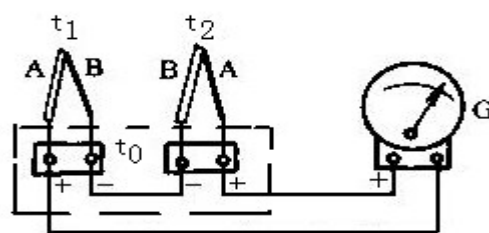


图 3-38 热电偶测量两点温差

$$E = E_{AB}(t_1, t_0) - E_{AB}(t_2, t_0) = e_{AB}(t_1) - e_{AB}(t_2)$$

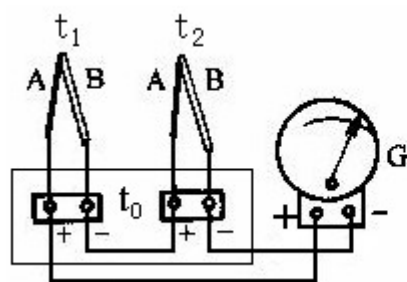


图 3-39 测量两点温度之和

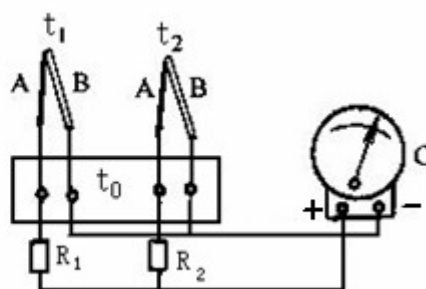


图 3-40 测量两点平均温度

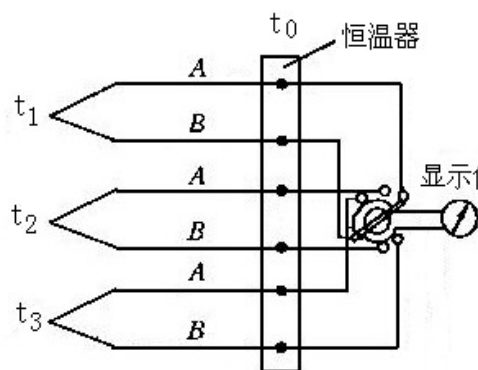


图 3-41 一台仪表分别测量多点温度

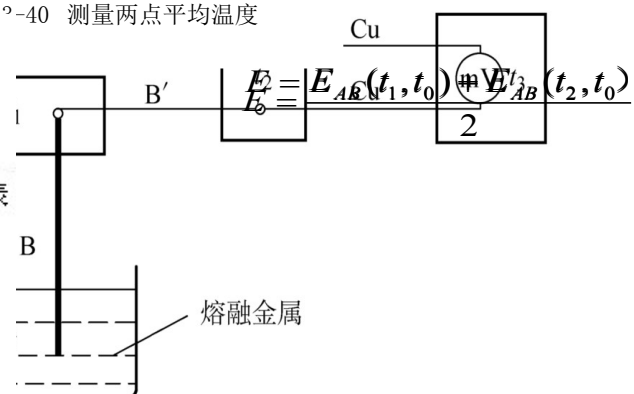


图 3-42 热电偶测量炼钢炉熔融金属某一点温

(1) 当仪表指示为 39.314mV 时，计算被测点温度 $t = ?$

(2) 如果将 A'、B' 换成铜导线，此时仪表指示为 37.702mV，再求被测点温度 $t = ?$

(3) 将热电偶直接插到熔融金属同一高度来测量此点的温度，是利用了热电偶的什么定律？如果被测液体不是金属，还能用此方法测量吗？为什么？

答：(1) 当 A'、B' 为补偿导线，Cu 为铜导线时。热电偶的冷端温度为 $t_2=0.0^{\circ}\text{C}$ ，此时仪表的指示 39.314mV 即为热端温度 t 相对于 0.0°C 热电势，即 $E = E_{AB}(t, 0) = 39.314\text{mV}$ ，查分度表可得被测点温度 $t \approx 950^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 如果将 A'、B' 换成铜导线，此时热电偶的冷端温度即变为 $t_1=40^{\circ}\text{C}$ ，此时仪表的指示为 $E = E_{AB}(t, 40) = 37.702\text{mV}$ ，根据中间温度定律即可求得测量端相对于 0°C 的热电势：

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, 40) + E_{AB}(40, 0) = 37.702 + 1.611 = 39.313\text{mV}，查分度表可得被测点温度$$

$t \approx 950^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 将热电偶直接插到熔融金属同一高度来测量此点的温度，是利用了热电偶的中间导体定律，如果被测液体不是金属，就不能用此方法来测量？因为不满足热电偶的基本定律要求。

11.

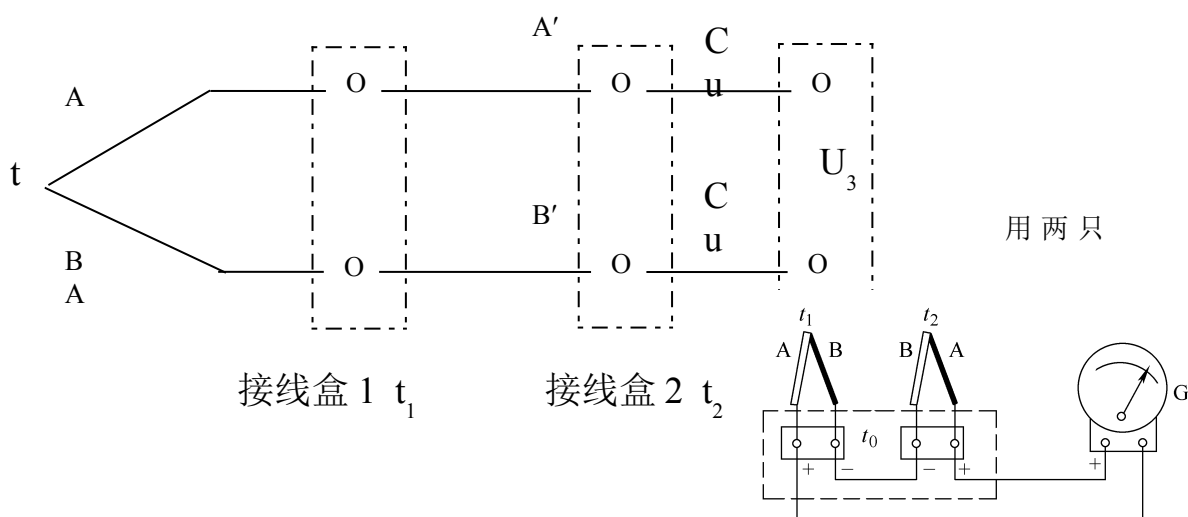


图 3-38 热电偶测量两点温差

K 型热电偶测量两点温差，如图 3-38 所示。已知 $t_1 = 980\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $t_2 = 510\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，试求

t_1 、 t_2 两点的温差。

答：根据热电偶测量两点温差的电路可知仪表的指示为：

$$\begin{aligned} E &= E_{AB}(t_1, t_0) - E_{AB}(t_2, t_0) = e_{AB}(t_1) - e_{AB}(t_2) \\ &= 40.488 - 21.066 = 19.422(\text{mV}) \end{aligned}$$

查分度表可知 $t_1 - t_2$ 为 $471.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

12. 试分析图 3-47 所示集成温度传感器 AD590 用于热电偶参考端温度补偿电路的工作原理。

答：由图 3-47 所示，AD590 与热电偶参考端处于同一温度下。AD580 是一个三端稳压器，其输出电压 $U_0 = 2.5\text{V}$ 。电路工作时，调整电阻 R_2 使得 $I_1 = t_0 \times 10^{-3}\text{mA}$ ，这样在电阻 R_1 上便产生一个随参考端温度 t_0 变化的补偿电压 $U_1 = I_1 \times R_1$ 。若热电偶参考端温度为 t_0 ，工作时应使 $U_1 \approx E_{AB}(t_0, 0^{\circ}\text{C})$ 。这样就能自动补偿由于冷端温度变化带来的测量误差。不同分度号的热电偶， R_1 的阻值亦不同。这种补偿电路灵敏、准确、可靠、调整方便。

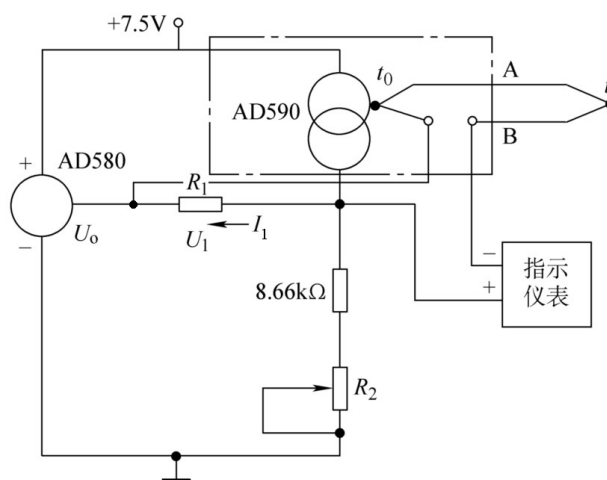


图 3-47 热电偶参考端的补偿电路

13. 辐射式温度传感器的工作原理是什么？有何特点？

答：辐射式温度传感器是利用物体的辐射能随温度变化的原理制成的。是一种非接触式测温方法，只要将传感器与被测对象对准即可测量其温度的变化。与接触式温度传感器相比，具有以下特点：

1) 传感器与被测对象不接触，不会干扰被测对象的温度场，故可测量运动物体的温度，且可进行遥测。

2) 由于传感器与被测对象不在同一环境中，不会受到被测介质性质的影响，所以可以测量腐蚀性、有毒物体、带电体的温度，测温范围广，理论上无测温上限限制。

3) 在检测时传感器不必和被测对象进行热量交换，所以测量速度快，响应时间短，适于快速测温。

4) 由于是非接触测量，测量精度不高，测温误差大。

第4章 位移、物位传感器

1. 莫尔条纹的含义是什么？其主要特性有哪些？试画图分析。

答：莫尔条纹含义：如果把两块栅距 W 相等的光栅面平行安装，且让它们的刻痕之间有较小的夹角 θ ，这时光栅上会出现若干条明暗相间的条纹，这种条纹称莫尔条纹，如图 4-10 所示。

莫尔条纹是光栅非重叠部分光线透过而形成的亮带，它由一系列四棱形图案组成，图 4-10 中 d-d 线区所示。f-f 线区则是由于光栅的遮光效应形成的。

莫尔条纹有两个重要的特性：

(1) 位移的方向性：当指示光栅不动，主光栅左右平移时，莫尔条纹将沿着指示光栅的方向上下移动，查看莫尔条纹的上下移动方向，即可确定主光栅左右移动方向。

(2) 放大作用：莫尔条纹有位移的放大作用。当主光栅沿着与刻线垂直的方向移动一个栅距 W 时，莫尔条纹移动一个条纹间距 B 。当两个等距光栅的栅间夹角 θ 较小时，主光栅移动一个栅距 W ，莫尔条纹移动 KW 距离， K 为莫尔条纹的放大系数，可由下式确定，即

$$B = \frac{\frac{W}{2} \cos \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad K = \frac{B}{W} = \frac{1}{\theta}$$

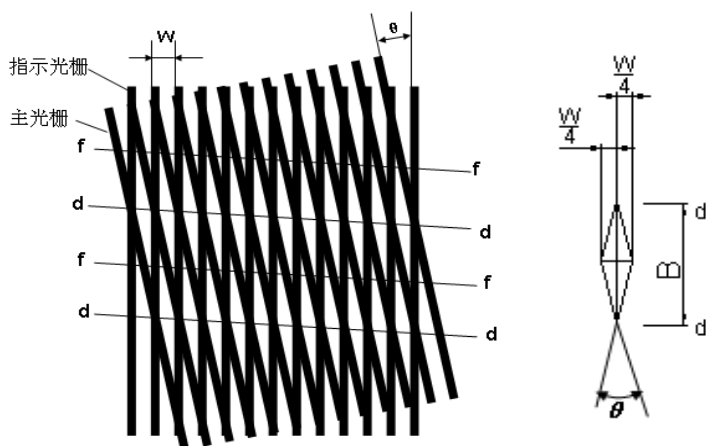


图 4-10 莫尔条纹

例如：每毫米有 50 根线的光栅， $W = 0.02mm$ ，当两光栅间的夹角 $\theta = 0.1^\circ (0.0017453rad)$

时，莫尔条纹间距 $B = 11.459mm$ ， $K = \frac{B}{W} = \frac{1}{\theta} = 573(\text{倍})$ 。当 $\theta = 0.5^\circ$ ， $B = 115W$ 。由此看出，两个光栅面夹角越小，莫尔条纹的放大倍数越大，这样就可把肉眼看不见的光栅位移变成清晰看见的莫尔条纹移动，可以用测量莫尔条纹的移动来测量光栅的位移，从而实现高灵敏的位移测量。

2. 磁栅位移传感器的工作原理是什么？

答：磁栅位移传感器由磁尺（磁栅）、磁头和检测电路组成。其工作原理是电磁感应原理，当线圈在一个周期性磁体表面附近匀速运动时，线圈上就会产生不断变化的感应电动势。感应电动势的大小，既和线圈的运动速度有关，还和磁性体与线圈接触时的磁性大小及变化率有关。根据感应电动势的变化情况，就可获得线圈与磁体相对位置和运动的信息。

3. 电容式、电感式接近传感器的工作原理是什么？被测物体是什么材料？为什么？

答：电容式接近传感器的工作原理：电容式接近传感器是一个以电极为检测端的静电电容式接近开关，它由高频振荡电路、检波电路、放大电路、整形电路及输出电路组成，平时检测电极与大地之间存在一定的电容量，它成为振荡电路的一个组成部分。当被检测物体接近检测电极时，由于检测电极加有电压，检测电极就会受到静电感应而产生极化现象，被测物体越靠近检测电极，检测电极上的感应电荷就越多，由于检测电极的静电电容为 $C=Q/V$ ，所以随着电荷量的增多，使检测电极

电容 C 随之增大，由于振荡电路的振荡频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 与电容成反比，所以当电容 C 增大时振荡

电路的振荡减弱，甚至停止振荡。振荡电路的振荡与停振这两种状态被检测电路转换为开关信号后向外输出。

电感式接近传感器的工作原理：电感式接近传感器由高频振荡电路、检波电路、放大电路、整形电路及输出电路组成。检测用敏感元件为检测线圈，它是振荡电路的一个组成部分，振荡电路的振

荡频率为 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。当检测线圈通以交流电时，在检测线圈的周围就产生一个交变的磁场，当金

属物体接近检测线圈时，金属物体就会产生电涡流而吸收磁场能量，使检测线圈的电感 L 发生变化，从而使振荡电路的振荡频率减小，以至停振。振荡与停振这两种状态经检测电路转换成开关信号输出。

电容、电感式接近传感器被测物体都是金属导体材料，因为电容式接近传感器是一个以电极为检测端的静电电容式接近开关，只有金属导体材料才能产生电荷。电感式接近传感器工作原理是电涡流效应，只有在金属导体内才能产生电涡流。

4. 试分析图 4-22 所示压力传感器是如何测量液位高度的？

答：图 4-22 为压差式液位传感器，其工作原理是根据液面的高度与液压成比例的原理制成的。如果液体的密度恒定，则液体加在测量基准面上的压力与液面到基准面的高度成正比，因此通过压力的测定便可知液面的高度。

5. 电容式物位传感器是如何测量物体位置的？

答：电容式物位传感器是利用被测物不同，其介电常数不同，电容量也不同的特点进行检测的。

6. 试分析电磁流量计的工作原理，并推导流量的表达式。

答：根据法拉第电磁感应定律，当一导体在磁场中运动切割磁力线时，在导体的两端即产生感生电势 e ，其方向由右手定则确定，其大小与磁场的磁感应强度 B ，导体在磁场内的长度 L 及导体的运动速度 v 成正比，如果 B ， L ， v 三者互相垂直，则 $e = BLv$ 。与此相仿，在磁感应强度为 B 的

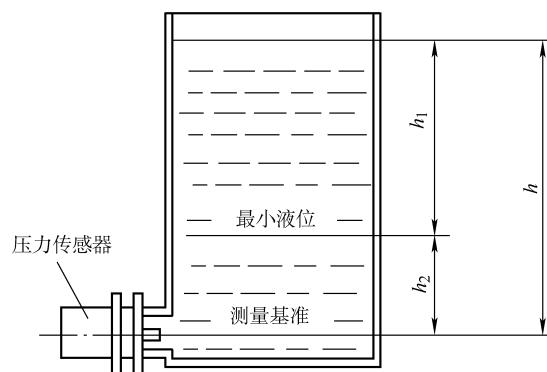


图 4-22 开放型储液罐压力示意图

均匀磁场中，垂直于磁场方向放一个内径为 D 的不导磁管道，当导电液体在管道中以流速 $\bar{v}$ 流动时，导电流体就切割磁力线。如果在管道截面上垂直于磁场的直径两端安装一对电极，如图 4-33 所示。

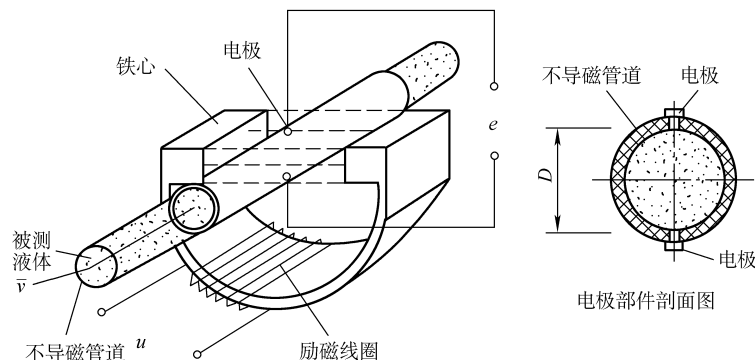


图 4-33 电磁流量计原理简图

可以证明，只要管道内流速分布均匀，两电极之间也将产生感生电动势： $e = BD\bar{v}$ 。

式中， $\bar{v}$ 为管道截面上的平均流速。由此可得管道的体积流量为：

$$Q_v = \bar{v}A = \frac{e}{BD} \frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{\pi D}{4B} e$$

由上式可见，体积流量 Q_v 与感应电动势 e 和测量管内径 D 成线性关系，与磁场的磁感应强度 B 成反比，与其它物理参数无关。这就是电磁流量计的测量原理。

第 5 章 光电传感器

1. 光电效应有哪些？分别对应什么光电元件？

答：光电效应大致可以分为三类：外光电效应、内光电效应和光生伏特效应。

对应的光电元件：用外光电效应制成的光电元件有光电管、光电倍增管、光电摄像管等；内光电效应制成的光电元件有光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管和光敏晶闸管等；基于光生伏特效应的光电元件是光电池。

2. 试比较光敏电阻、光电池、光敏二极管和光敏晶体的性能差异，并简述在不同场合下应选用哪种元件最为合适。

答：（1）光谱特性：

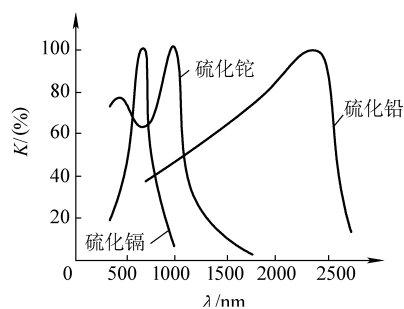


图 5-6 光敏电阻的光谱特性曲线

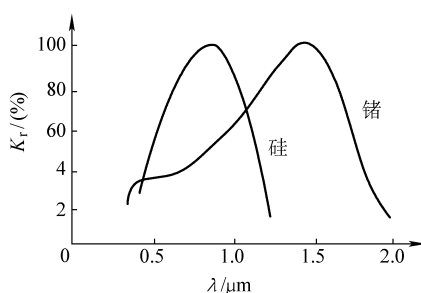


图 5-11 光敏二极管的光谱特性

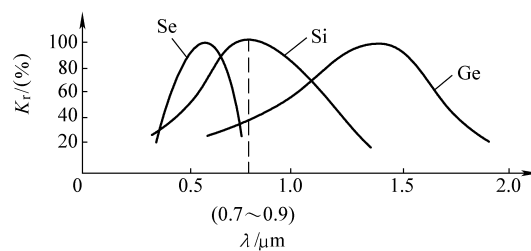


图 5-15 光电池的光谱特性

（2）响应时间：

光敏电阻中的光电流的变化滞后于光的变化时间，即光敏电阻突然感受光照时，光电流并不是立刻上升到其稳定数值，且当光突然消失时光电流也不会立刻下降到零，这说明光电流的变化对于光的变化，在时间上有一个滞后。尽管不同材料的光敏电阻具有不同的响应时间，但都存在着这种时延特性，因此，光敏电阻不能用在要求快速响应的场合。

硅光敏二极管的响应时间约为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ s 左右，光敏晶体管的响应速度则比相应的二极管大约慢一个数量级，而锗管的响应时间要比硅管小一个数量级。因此在要求快速响应或入射光调制频率（明暗交替频率）较高时，应选用硅光敏二极管。

由于光敏晶体管基区的电荷存储效应，所以在强光照和无光照时，光敏晶体管的饱和与截止需要更多的时间，所以它对入射调制光脉冲的响应时间更慢，最高工作频率更低。

光电池：由于光电池受照射产生电子-空穴对需要一定的时间，因此当入射光的调制频率太高时，光电池输出的光电流将下降。硅光电池的面积越小，PN 结的极间电容也越小，频率响应就越好，硅光电池的频率响应可达数十千赫兹至数兆赫兹，硒光电池的频率特性较差，目前已较少使用。

（3）温度特性：

光敏电阻和其他半导体器件一样，受温度的影响较大，随着温度的升高，它的暗电阻与灵敏度都下降的特性。

光敏二极管和光敏晶体管：温度变化对亮电流影响不大，但对暗电流影响非常大，并且是非线性的。在微光测量中有较大误差。硅管的暗电流比锗管小几个数量级，所以在微光测量中应采用硅管。另外由于硅光敏晶体管的温漂大，所以尽管光敏三级管灵敏度较高，但是在高精度测量中应选择硅光敏二极管。可采用低温漂、高精度的运算放大器来提高精度。

光电池：温度特性是描述光电池的开路电压 U_0 和短路电流 I_{sc} 随温度变化的特性。从图 5-17 中可以看出，开路电压随温度增加而下降的速度较快，电压温度系数约为 $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。而短路电流随

温度上升而缓慢增加，温度系数较小。当光电池作为检测元件时，应考虑温度漂移的影响，采取相应措施进行补偿。

3. 光电传感器有哪些部分组成？被测量可以影响光电传感器的哪些部分？

答：光电式传感器由光源、光学元器件和光电元器件组成光路系统，结合相应的测量转换电路而构成。被测量主要影响光电传感器的敏感原件。

4. 简述光电倍增管的工作原理。

答：光电倍增管由真空管壳内的光电阴极、阳极以及位于其间的若干个倍增电极构成。工作时在各电极之间加上规定的电压。当光或辐射照射阴极时，阴极发射光电子，光电子在电场的作用下加速逐级轰击发射倍增电极，在末级倍增电极形成数量为光电子的 $10^6 : 10^8$ 倍的次级电子。众多的次级电子最后为阳极收集，在阳极电路中产生可观的输出电流。通常光电倍增管的灵敏度比光电管要高出几万倍，在微光下就可产生较大的电流。

5. 试述图5-50所示光敏电阻式光控开关的工作原理。

答：白天有光照时，光敏电阻 R_G 阻值很小，晶体管 $V T_1$ 、 $V T_2$ 不导通，继电器 K 断开；夜晚无光照时，光敏电阻 R_G 呈现高阻，晶体管 $V T_1$ 、 $V T_2$ 导通，继电器 K 吸合，从而实现光控开关的作用。

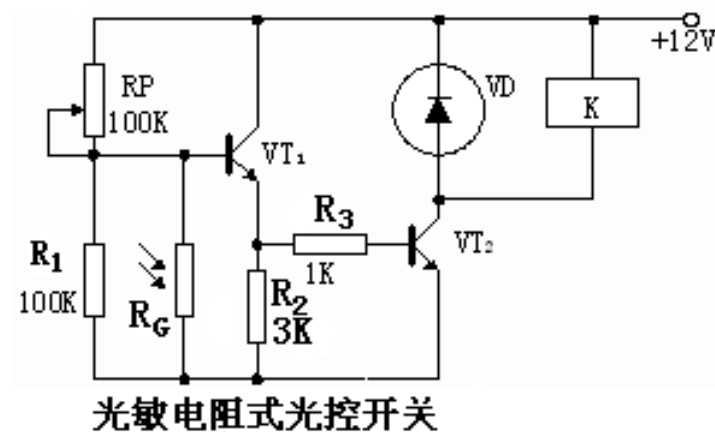


图5-50 光敏电阻式光控开关

6. 试分析图 5-51 所示光控自动照明灯电路的工作原理。

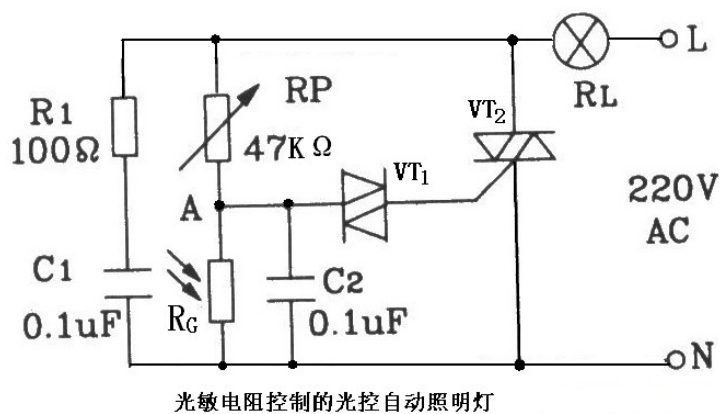


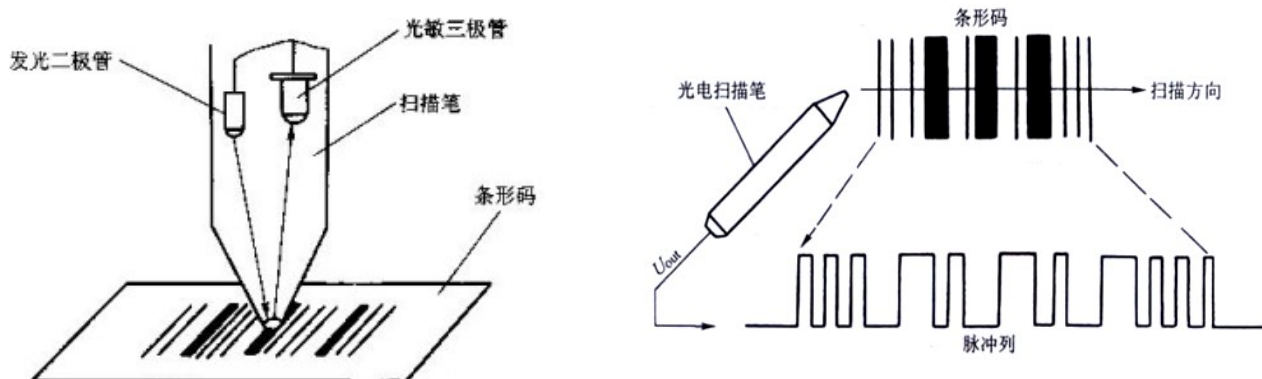
图 5-51 光控自动照明灯

解答：图中 VT_1 为触发二极管，触发电压约为 30V 左右。白天自然光线较强，光敏电阻器 R_g 呈现低阻，它与 RP 的分压低于 30V（A 点），触发二极管截止，双向可控硅无触发电流， VT_2 呈断开状态，灯 EL 不亮。夜幕来临时，照射在 R_g 上的自然光线较弱， R_g 呈现高电阻，A 点电压大于 30V，，触发二极管导通，双向可控硅导通，灯 EL 点亮。 R_1 、 C_1 为保护双向可控硅的吸收电路。

7. 试分析光电扫描笔是如何工作的？

答：扫描笔的前方为光电读入头，它由一个发光二极管和一个光敏三极管组成，当扫描笔头在条形码上移动时，若遇到黑色线条，发光二极管发出的光线将被黑线吸收，光敏三极管接收不到反射光，呈现高阻抗，处于截止状态。当遇到白色间隔时，发光二极管发出的光线，被反射到光敏三极管的基极，光敏三极管产生光电流而导通。

整个条形码被扫描过之后，光敏三极管将条形码变成一个一个电脉冲信号，该信号经放大、整形后便形成了脉冲列，脉冲列的宽窄与条形码的宽窄及间隔成对应关系，脉冲列再经过计算机处理后，完成对条形码信息的识读。



8. 光纤传感器有哪两种类型？光纤传感器调制方法有哪些？

答：根据工作原理不同，光纤传感器可以分为传感型和传光型两大类。

光纤传感器调制方法有强度调制、相位调制、频率调制及偏振调制等几种。

9. 根据硅光电池的光电特性，在 4000lx 的光照下要得到 2V 的输出电压，需要几片光电池？如何连接？

答：如图 5-16 为光电池的光照特性。光池负载开路时的开路电压与光照度的关系线呈非线性关系，在 2000 lx 以上便趋于饱和最大电压只能达到 0.6V，即使在 4000lx 的光照下要得到 2V 的输出电压，也得需要 4 片电池，串联连接。

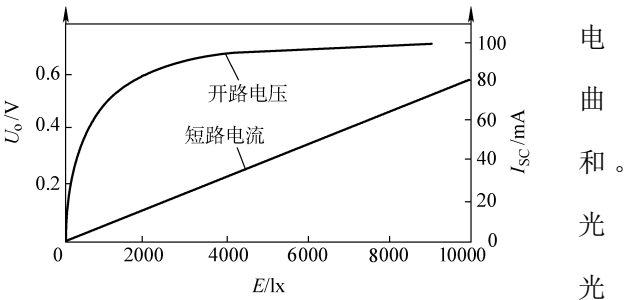


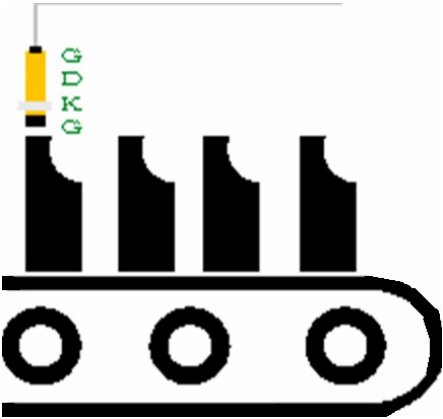
图 5-16 光电池的光照特性

10. 设计一光电开关用于生产流水线的产量计数，画出结构图，并简要说明，为防止日光灯等其他光源的干扰，设计中应采取什么措施？

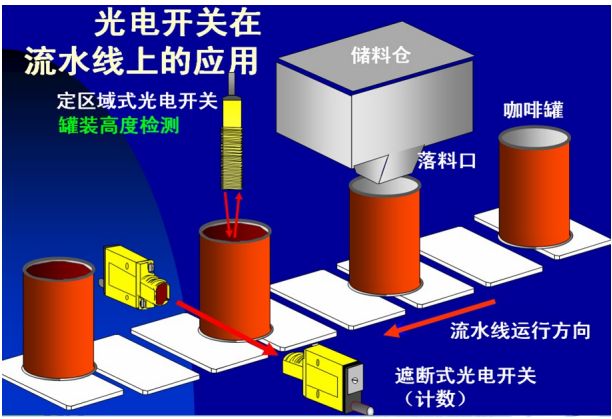
答：下图为光电开关用于生产流水线的产量计数的常用测量方法。图 a 为反射式，图 b 为遮断式。对于发射式计数测量，当产品通过光电开关时，产品反射光线，接收器接收到一个光信号，输出一系列光脉冲，通过计算光脉冲的个数就可以得到产品的数量。

对于遮断式计数器，当产品通过光电发射器与接收器之间时，产品挡住了光信号，接收器接收不到光信号，从而使输出信号发生变化，信号的变化同样以脉冲的形式输出，通过计算光脉冲的个数就可以得到产品的数量。

为防止日光灯等其他光源的干扰，可用遮光罩将光电开关和光通路遮挡起来，与外间光源隔绝。



(a) 反射式



(b) 遮断式

11. 根据图 5-47b 所示的光电数字转速表的工作原理，如果转盘的孔数为 N，每秒钟光电二极管的脉冲个数为 f，试问转速为每分钟多少转？

答：如果转盘的孔数为N，每秒钟光电二极管的脉冲个数为f，转速可用下列公式计算：

$$n = \frac{60f}{N} (r/min)$$

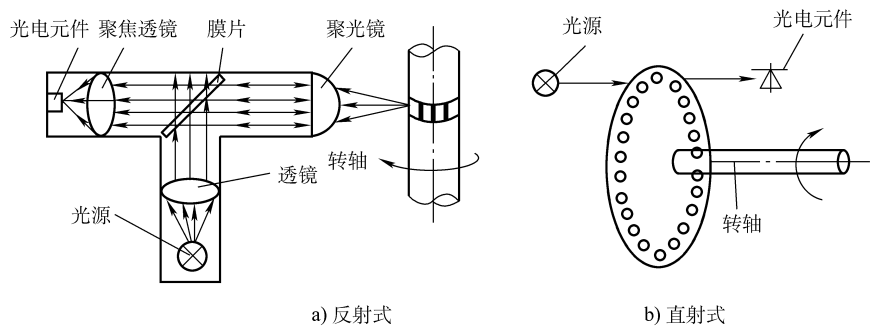


图 5-47 光电式转速计

12. 冲床工作时，为保护工人的手指安全。设计一安全控制系统，选用两种以上的传感器来同时探测工人的手是否处于危险区域（冲头下方）。只要有一个传感器输出有效（即检测到手未离开该危险区），则不让冲头动作，或使正在动作的冲头惯性轮刹车。说明检测控制方案，以及必须同时设置两个传感器组成“或”的关系、必须使用两只手（左右手）同时操作冲床开关的好处。

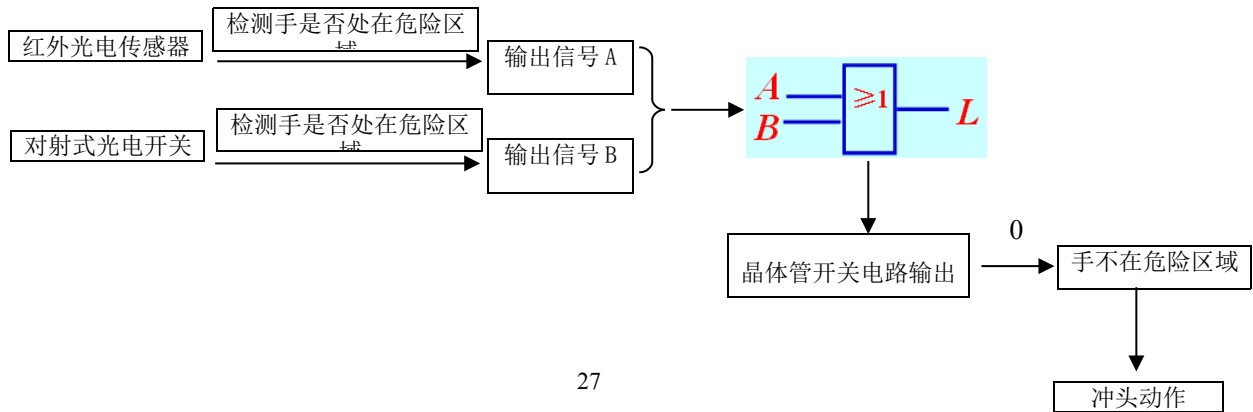
解题思路：（1）使用光电传感器：发光器发出的光直射到受光器，形成保护光幕。当光幕被遮挡时，受光器产生一遮光信号，通过信号电缆传输到控制器，控制器将此信号进行处理，产生一控制输出信号，控制冲床的制动控制回路或其他设备的报警装置，实现冲床停止运行或安全报警。

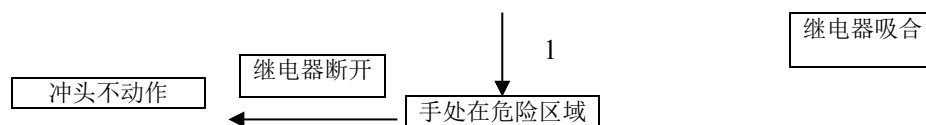
组成：

发光器：由若干发光器件组成，发射红外光线；

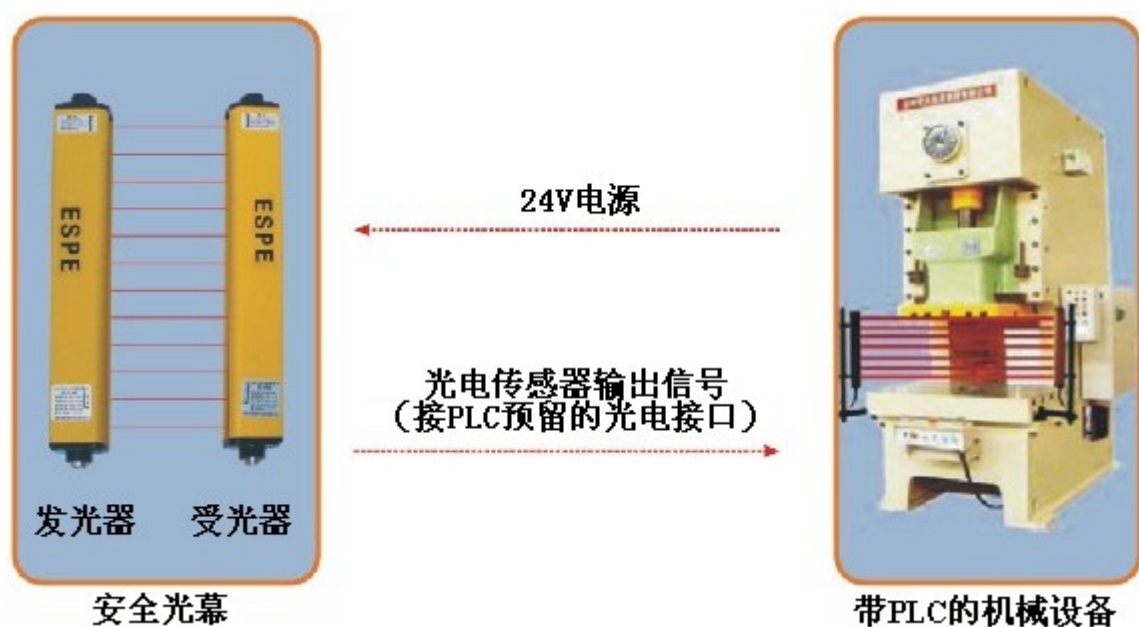
受光器：由若干受光器件组成，接受红外光线，与发光器的发光器件一一对应，形成保护光幕产生通光、遮光信号，同时通过信号。

（2）红外光电传感器：光电安全装置通过发射红外线，产生保护光幕，当操作者的手进入危险区域时，安全防护装置所发出的红外线光束受到遮挡，控制装置发出紧急刹车信号，使目标设备停止运行（如冲头停止动作，不能下行）；当操作者的手从安全保护装置的光幕作用区域内退出时，红外线光束立即接通，控制装置发出接通信号，目标设备开始运行（如冲头开始运行）。





在很多机器上，由于双手的不协调或其它原因，一只手在起动机器的同时，另一只手可能处于危险区域，经常出现安全事故。使用双手同步控制模块可以避免由于工人先按住或用物体或身体的一部分去顶住其中一个按钮而带来的安全问题。在同步控制状态下，必须两个按钮同时按下机床才动作（两个按钮按下的时间差超过同步控制时间机床则不动作），同时输出处于自锁状态，只有启动急停按钮，输出信号才断开终止。使用两只手（左右手）同时操作冲床开关，这样可以在很大程度上减少安全事故的发生。



13. 思考如何利用热释电传感器及其他元器件实现商场玻璃大门的自动开闭。

解题思路：人体或者体积较大的动物都有恒定的温度，一般在 37 度，所以会发出特定波长 10um 左右的红外线，当人体进入检测区，因人体温度和环境温度有差别，人体发射的 10um 左右的红外线通过菲涅耳透镜滤光片增强后聚焦到红外感应源（热释电元件）上，红外感应源在接收到人体发出的红外线后就会失去电荷平衡，向外释放电荷，进而产生温度变化，向外围电路输出一串脉冲信号，后续电路检测处理后就能产生大门开闭信号。

主要组成：热释电传感器+单片机+电机驱动机构

工作过程：热释电传感器检测门口，如果有人进来，传感器产生一个信号给单片机，这时候单片机去控制电机驱动器，打开玻璃大门。

第6章 磁电式传感器

1. 什么是霍尔效应?试分析霍尔效应产生的过程。一个霍尔元件在一定的电流控制下, 其霍尔电动势与哪些因素有关?

答: 霍尔效应的概念: 在置于磁场中的导体或半导体内通入电流, 若电流与磁场垂直, 则在与磁场和电流都垂直的方向上会出现一个电动势差, 这种现象称为霍尔效应。

霍尔效应产生的过程: 如图6-1所示, 在长、宽、高分别为 L 、 W 、 H 的半导体薄片的相对两侧 a 、 b 通以控制电流, 在薄片垂直方向加以磁场 B 。设图中的材料是 N 型半导体, 导电的载流子是电子。在图示方向磁场的作用下, 电子将受到一个由 c 侧指向 d 侧方向力的作用, 这个力就是洛伦兹力。洛伦兹力用 F_L 表示, 大小为:

$$F_L = qvB \quad (6-1)$$

式中 q —— 电子电荷量; v —— 载流子的运动速度; B —— 磁感应强度。

在洛伦兹力的作用下, 电子向 d 侧偏转, 使该侧形成负电荷的积累, c 侧则形成正电荷的积累。

这样, c 、 d 两端面因电荷积累而建立了一个电场 E_H , 称为霍尔电场。该电场对电子的作用力与洛伦兹力的方向相反, 即阻止电荷的继续积累。当电场力 ($F_H = qE_H$) 与

洛伦兹力大小相等时, 达到动态平衡。这时有 $qE_H = qvB$

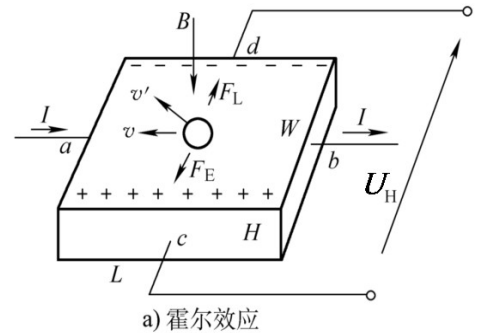


图6-1 霍尔效应

$$\text{所以霍尔电场的强度为 } E_H = vB \quad (6-2)$$

在 c 与 d 两侧面间建立的电动势差称为霍尔电势, 用 U_H 表示; $U_H = E_H W$ 或 $U_H = vBW$

(6-3)

当材料中的电子浓度为 n 时, $v = I/(nqHW)$, 代入式(6-3)得

$$U_H = vBW = \frac{I}{nqHW} BW = \frac{1}{nqH} IB \quad (6-4)$$

设 $R_H = \frac{1}{nq}$ ——霍尔系数，得 $U_H = \frac{R_H}{H} IB$ (6-5)

设 $K_H = \frac{R_H}{H}$ ——霍尔灵敏度，则 $U_H = \frac{R_H}{H} IB = K_H IB$ (6-6)

式 (6-6) 中， R_H 为霍尔系数，它反映材料霍尔效应的强弱，是由材料性质所决定的一个常数；

K_H 为霍尔灵敏度，它表示霍尔元件在单位控制电流和单位磁感应强度时产生的霍尔电势的大小。

由式 6-4 可知，在一定的电流控制下，其霍尔电动势的大小与下列因素有关：

(1) 一般来说，金属材料 n 较大，导致 R_H 和 K_H 变小，故不宜做霍尔元件。因材料电阻率 ρ 与

载流子浓度 n 和迁移率 μ 有关， $R_H = \rho\mu$ ，而电子的迁移率 μ 比空穴大，所以霍尔元件一般采用 N 型半导体材料。

(2) 霍尔电势 U_H 与元件的尺寸关系很大，所以生产霍尔元件时要考虑到以下几点：

① 根据式 (6-6)， H 愈小， K_H 愈大，霍尔灵敏度愈高，所以霍尔元件的厚度都比较薄。但 H 太小，会使元件的输入、输出电阻增加，因此，也不宜太薄。

② 元件的长宽比对 U_H 也有影响。 L/W 加大时，控制电极对霍尔电势影响减小。但如果 L/W 过大，载流子在偏转过程中的损失将加大，使 U_H 下降，通常要对式 (6-6) 加以形状效应修正：

$$U_H = K_H IB f(L/W)$$

③ 霍尔电势 U_H 与控制电流及磁场强度有关。根据式 (6-6)， U_H 正比于 I 及 B 。当控制电流恒定时， B 愈大， U_H 愈大。当磁场改变方向时， U_H 也改变方向。

2. 说明为什么导体材料和绝缘体材料均不宜做成霍尔元件？为什么霍尔元件一般采用 N 型半导体材料？

答：根据霍尔电势的公式 $U_H = vBW = \frac{I}{nqHW} BW = \frac{1}{nqH} IB$ ，可知霍尔电势的大小与材料

的电子浓度成反比，导体材料的电子浓度比较大，所产生的霍尔电势比较小，霍尔效应不明显。

而绝缘体内电子不可自由活动，没有载流子，不会产生霍尔效应；所以也不宜做成霍尔元件。

因材料电阻率 ρ 与载流子浓度 n 和迁移率 μ 有关，霍尔系数 $R_H = \rho\mu$ ，而电子的由于电子的有效质量小，迁移率 μ 比空穴大，在同样强度电场作用下，漂移速度大，所受洛伦兹力大，霍尔角大，霍尔效应明显，在很小磁场下，就可以观察到霍尔效应，所以霍尔元件一般采用 N 型半导体材料。

3. 霍尔集成传感器有哪几种类型？其工作特点是什么？

答：霍尔集成传感器有分为线性型霍尔传感器和开关型霍尔传感器。

霍尔线性集成传感器工作特点：这种线性型传感器的输出电压与外加磁场强度在一定范围内呈线性关系，广泛用于位置、力、重量、厚度、速度、磁场、电流等的测量、控制。这种传感器有单端输出和双端输出（差动输出）两种电路。

开关型霍尔传感器工作特点：当有磁场作用在霍尔开关集成传感器上时，根据霍尔效应原理，霍尔元件输出霍尔电势 U_H ，该电压经放大器放大后，送至施密特整形电路。当放大后的霍尔电势大于“开启”阈值时，施密特电路翻转，输出高电平，使晶体管导通，整个电路处于开状态。当磁场减弱时，霍尔元件输出的 U_H 电压很小，经放大器放大后其值仍小于施密特的“关闭”阈值时，施密特整形器又翻转，输出低电平，使晶体管截止，电路处于关状态。这样，一次磁场强度的变化，就使传感器完成一次开关动作。

4. 磁敏二极管和磁敏晶体管有何特点？适用于什么场合？

答：磁敏二极管是PN结型的磁电转换元件，有硅磁敏二极管和锗磁敏二极管两种。在高纯度锗半导体的两端用合金法制成高掺杂的P型和N型两个区域，在P、N之间有一个较长的本征区I，本征区I的一面磨成光滑的复合表面（为I区），另一面打毛，成为高复合区（r区），因为电子-空穴对易于在粗糙表面复合而消失。当通以正向电流后就会在P、I、N结之间形成电流。由此可知，磁敏二极管是PIN型的。

所以利用磁敏二极管在磁场强度的变化下，其电流发生变化，于是就实现磁电转换。且I区和r区的复合能力之差越大，磁敏二极管的灵敏度就越高。

NPN型磁敏晶体管是在弱P型近本征半导体上，用合金法或扩散法形成三个结——即发射结、基极结、集电结所形成的半导体元件。其最大特点是基区较长，在长基区的侧面制成一个复合率很高的高复合区 r 。在 r 区的对面保持光滑的无复合的镜面（I区）。磁敏晶体管工作原理与磁敏二极管完全相同。在正向或反向磁场作用下，会引起集电极电流的减少或增加。因此，可以用磁场方向控制集电极电流的增加或减少，用磁场的强弱控制集电极电流的增加或减少的变化量。

5. 设计一个利用霍尔集成电路检测发电机转速的电路，要求当转速过高或过低时发出警报信号。

答：在被测转速的转轴上安装一个齿盘，也可选取机械系统中的一个齿轮，将线性型霍尔器件及磁路系统靠近齿盘。齿盘的转动使磁路的磁阻随气隙的改变而周期性地变化，霍尔器件输出的微小脉冲信号经隔直、放大、整形后就可以确定被测物的转速。如图6-23所示。转速计算公式为：

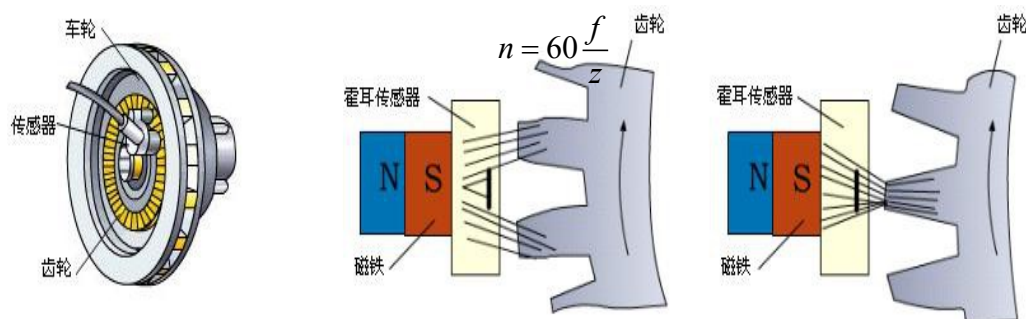


图6-23

6. 设计一个采用霍尔传感器的液位控制系统，要求画出磁路系统示意图和电路原理简图，并说明其工作原理。

参考解答：

7. 试分析图 6-33 所示霍尔计数装置的工作原理。

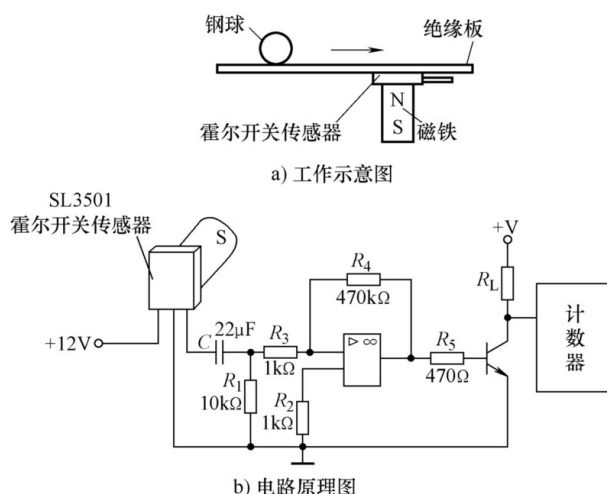


图 6-33 霍尔计数装置示意图

解答：当钢球通过霍尔开关传感器时，传感器输出电压增大，该电压经放大器放大，三极管导通，输出低电平，计数器开始计数；当钢球滚过传感器表面时，霍尔电压减小，该电压经放大器放

大还不能使三极管导通，三极管输出高电平，计数器停止计数。这样钢球每经过传感器表面一次，计数器就记录一次，从而实现了计数功能。

1. 思考有哪些可以用霍尔传感器检测的物理量以及霍尔传感器应用的领域。

解答：霍尔传感器可以用于测量地球磁场，制成电罗盘；将它卡在环形铁心中，可以制成大电流传感器。它还广泛用于无刷电动机、高斯计、接近开关、微位移测量等。

第七章 波式传感器

1. 超声波有哪些传播特性？

解答：超声波在两种介质中传播时，会产生反射与折射现象；在不同介质中的传播速度不同；在介质中传播会产生能量衰减等。

2. 应用超声波传感器探测工件时，在探头与工件接触处要涂有一层耦合剂，请问这是为什么？

解答：无论是直探头还是斜探头，一般不能直接将其放在试件表面（特别是粗糙金属表面）来回移动，以防探头磨损。更重要的是，由于超声探头与被测物体接触时，在工件表面不平整的情况下，探头与被测物体表面间必然存在一层空气薄层。由于空气的密度很小，将引起三种介质两个界面间强烈的杂乱反射波，造成严重的测量干扰，而且空气还会造成超声波的严重衰减。因此必须将接触面之间的空气排挤掉，使超声波能够顺利的入射到被测介质中。在工业测量中，经常使用一种称为耦合剂的液体物质，使之充满在接触层中，起到传递超声波的作用。常用的耦合剂有水、机油、甘油、水玻璃、胶水、化学糨糊浆糊等。根据不同的被测介质而选定。耦合剂的厚度应该尽量薄一些，以减小耦合损耗。

3. 根据你已学过的知识设计一个超声波探伤使用装置（画出原理框图），并简要说明它探伤的工作过程？

解答：参考教材 P159 超声波探伤来设计。

4. 比较微波传感器与超声波传感器有何异同？

解答：微波传感器就是指利用微波特性来检测一些非电量的器件和装置。其原理是：由发射天线发射出微波，当遇到被测物体时将被吸收或反射，使微波功率发生变化。若利用接受天线接收到通过被测物或由被测物反射回来的微波，将它转换成电信号，再经过信号调理电路后，即能显示出被测量，这就是微波检测过程。与一般传感器不同，微波传感器的敏感元件可以认为是一个微波场。

微波传感器的分类：反射式微波传感器、遮断式微波传感器

超声波传感器也即换能器又称超声波探头。超声波换能器根据其工作原理不同，分为压电式、

磁致伸缩式、电磁式等数种。在检测技术中主要采用压电式。换能器由于其结构的不同，又分为直探头、斜探头、双探头、表面探头、聚焦探头、水浸探头、空气传导探头以及其它专用探头等。

与微波传感器类似，工作方式主要有两种：当超声波发生器与接受器分别置于被测物两侧时，这种类型称为透射型；当超声波发生器与接受器置于同侧时，这种类型称为反射型。

5. 多普勒传感器的工作原理是什么？其应用有哪些？

解答：多普勒传感器的工作原理是多普勒效应：即由于波源和接收者之间存在着相互运动而造成接收者接收到的频率与波源发出的频率不同，这种现象称为多普勒效应。

应用：测量运动物体的速度，如车速、船速、卫星速度和流体的流速等。也可根据光学多普勒频移测定天体相对地球的运动。

第八章 生物传感器

1. 生物传感器的工作原理是什么？

解答：生物传感器是在基础传感器上再耦合一个生物敏感膜而形成的，其工作原理如图 8-1 所示（教材 P170）。图中生物功能膜上(或膜中)附着有生物传感器的敏感物质，被测量溶液中待测定的物质经扩散作用进入生物敏感膜层，经分子识别或发生生物学反应，其所产生的信息可通过相应的化学或物理原理转变成可定量和可显示的电信号，通过电信号的分析就可知道被测物质的成分或浓度。

2. 举例说明酶传感器的应用。

解答：利用酶传感器可以测定各种糖、氨基酸、酯质和无机离子等，在医疗、食品、发酵工业和环境分析等领域获得多方面的应用。例如：酶传感器可以用于水质监测，酚是一类对人体有害的化合物，经常通过炼油和炼焦等工厂的废水排放到河流和湖泊中。根据测定水中酚含量的需要，科学家利用固定化多酚氧化酶研制成多酚氧化酶传感器，这种酶传感器可快速测定出水中质量分数仅有

2 10^{-7} 的酚。

3. 微生物传感器分为哪几种？各有何特点？

解答：微生物的生存特性对氧气有好气性与厌气性之分，其传感器分为好气性微生物传感器和厌气性微生物传感器两大类。

特点：

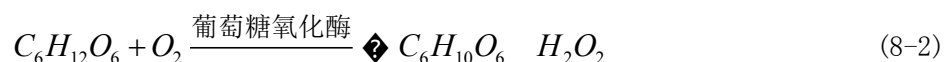
好气性微生物传感器:好气性微生物生存在含氧条件下，生长过程离不开氧，它吸入氧气而放

出二氧化碳，这种微生物的呼吸可用氧电极或二氧化碳电极来测定。

厌气性微生物传感器:厌气性微生物的生长会受到存在氧的妨碍，可由其生成的二氧化碳或代谢产物量来测定其生理状态。当测定微生物的代谢生成物时，可用离子选择电极来测定。

4. 葡萄糖传感器的工作原理是什么？

解答：葡萄糖传感器是以葡萄糖氧化酶(GOD)为生物催化剂，氧电极为电化学测量装置，通过测定酶作用后氧含量的变化实现对糖的量的测量，反应方程为：



式(8-2)表明可以通过测量氧的消耗量、或 H_2O_2 的生成量、或由葡萄糖酸引起的P H值的变化来测量葡萄糖的浓度。

5. 举例说明葡萄糖传感器的应用。

解答：糖尿病的诊断。测量血糖、尿糖等。

第九章 化学物质传感器

1. 气敏传感器可以分为哪几种类型？半导体气敏元件是如何分类的？

解答：根据传感器的气敏材料以及气敏材料与气体相互作用的机理和效应不同主要可分为半导体式、固体电解质式、电化学式、接触燃烧式和其他类型。

半导体气敏传感器又可分为电阻型和非电阻型。

2. 简述N型半导体气敏元件的原理。

解答：通常器件工作在空气中，由于氧化的作用，空气中的氧被半导体（N型半导体）材料的电子吸附负电荷，结果半导体材料的传导电子减少，电阻增加，使器件处于高阻状态；当气敏元件与被测气体接触时，会与吸附的氧发生反应，将束缚的电子释放出来，敏感膜表面电导增加，使元件电阻减小。导电机理用一句话描述：半导体表面因吸附气体引起半导体元件电阻值变化，根据这一特性，从阻值的变化测出气体的种类和浓度。

3. Pd-MOSFET 的工作原理是什么？

解答：由于金属钯（Pd）对氢气特别敏感。当Pd吸附氢气以后，使Pd的功函数下降，且所吸附气体的浓度不同，功函数变化量也不同，这将引起MOS管的C—U特性向左平移（向负方向偏移），由此可测定氢气的浓度。

4. 什么是绝对湿度和相对湿度？

解答：绝对湿度就是在一定温度和压力条件下，单位体积空气内所含水蒸气的质量，也就是指空气中水蒸气的密度。一般用一立方米空气中所含水蒸气的克数表示；

相对湿度是表示空气中实际所含水蒸气的分压（ P_w ）和同温度下饱和水蒸气的分压（ P_N ）的百分比。

5. 氯化锂和陶瓷湿敏电阻各有何特点？

解答：氯化锂湿敏电阻是利用物质吸收水分子而使导电率变化来检测湿度。在氯化锂溶液中，Li 和 Cl 以正负离子的形式存在，锂离子（Li⁺）对水分子的吸收力强，离子水合成度高，溶液中的离子导电能力与溶液浓度成正比，溶液浓度增加，导电率上升。当溶液置于一定湿度场中，若环境 RH 上升，溶液吸收水分子使浓度下降，电阻率 ρ 上升，反之 RH 下降，电阻率 ρ 下降。通过测量溶液电阻值 R 实现对湿度的测量。

半导体陶瓷湿敏电阻通常用两种以上的金属氧化物半导体在高温 1300℃ 下烧结成多孔陶瓷，半导体陶瓷湿敏电阻分为两种，有一种材料的电阻率随湿度增加而下降，称为负特性半导体陶瓷湿敏电阻。还有一种材料的电阻率随着湿度的增加而增大，称为正特性半导体陶瓷湿敏电阻。

不论是 N 型还是 P 型半导体陶瓷，其电阻率都可随湿度的增加而下降。

6. 简述高分子电阻式湿度传感器的工作原理。

解答：高分子电阻式湿度传感器使用高分子固体电解质材料制作感湿膜，由于膜中的可动离子而产生导电性，随着湿度的增加，其电离作用增强，使可动离子的浓度增大，电极间的电阻值减小。反之，电阻值增大。因此，湿度传感器对水分子的吸附和释放情况，可通过电极间电阻值的变化检测出来，从而得到相应的湿度值。

7. 利用所学知识设计一个测量湿度的电路。

解答：参考教材 P191 湿度传感器的应用。

第十章 机器人传感器

1. 机器人主要有哪些种类？

解答：机器人按照用途分类：

- （1）工业机器人 用于焊接、喷漆、组装、搬运、密封等行业。
- （2）医疗福利机器人 用于护理、帮助病人和残疾人。
- （3）教育和电子游戏机器人 用于教育、研究、电子游戏等。
- （4）特殊工作机器人 用于擦窗、建筑、宇宙开发、原子能发电站的维修、检修等。

(5) 其它机器人 用于办公和家庭服务。

机器人按输入信息分类：(1)手控机器人 、(2)固定顺序机器人 、(3)可变顺序机器人、

(4)再现式机器人、(5)数字控制机器人 、(6)智能机器人

按照动作形态可以将机器人分：(1)直角坐标机器人(2)圆柱坐标机器人(3)极坐标机器人(4)多关节机器人 。

2. 机器人传感器的工作原理是什么？主要用途是什么？

解答：机器人传感器就是机器人所用的传感器。机器人传感器可以定义为一种能将机器人目标物特性（或参量）变换为电量输出的装置。机器人通过传感器实现类似于人的知觉作用。被称为机器人的“电五官”。

机器人传感器一般可分为机器人外部传感器（感觉传感器）和内部传感器两大类。内部传感器的功能是用来测量运动学及动力学参数，以使机器人按规定的位置、轨迹、速度、加速度和受力大小进行工作。机器人外部传感器的功能是识别工作环境，为机器人提供信息，检查、控制、操作对象物体、应付环境变化和修改程序。

第十一章 传感器输出信号的处理技术

1. 传感器输出信号有哪些特点？

解答：①传感器输出的信号类型有电压、电流、电阻、电容、电感、频率等，通常是动态的。

②输出的电信号一般都比较弱，如电压信号通常为 μV — mV 级，电流信号为 nA — mA 级。

③传感器内部存在噪声，输出信号会与噪声信号混合在一起，当噪声比较大而输出信号又比较弱时，常会使有用信号淹没在噪声之中。

④传感器的输出信号动态范围很宽。输出信号随着物理量的变化而变化，但它们之间的关系不一定是线性比例关系，例如，热敏电阻值随温度变化按指数函数变化。输出信号大小会受温度的影响，有温度系数存在。

⑤传感器的输出信号受外界环境（如温度、电场）的干扰。

⑥传感器的输出阻抗都比较高，这样会使传感器信号输入到测量电路时，产生较大信号衰减。

2. 传感器测量电路的主要作用是什么？

解答：传感器测量电路主要作用是具有一定信号预处理的功能。经预处理后的信号，应成为可供测量、控制、使用及便于向微型计算机输出的信号形式，从而提高测量系统的测量精度和线性度。

3. 传感器测量电路有哪些类型，其主要功能是什么？

解答：传感器测量电路的**类型及主要功能**如下表所示：

接口电路	对信号的预处理功能
阻抗变换电路	在传感器输出为高阻抗的情况下，换为低阻抗，以便于检测电路准确地拾取传感器的输出信号
放大变换电路	将微弱的传感器输出信号放大
电流电压转换电路	将传感器的电流输出转换成电压
电桥电路	把传感器的电阻、电容、电感变化为电流或电压
频率电压转换电路	把传感器输出的频率信号转换为电流或电压
电荷放大器	将电场型传感器输出产生的电荷转换为电压
有效值转换电路	在传感器为交流输出的情况下，转为有效值，变为直流输出
滤波电路	通过低通及带通等滤波器滤去噪声成分
线性化电路	在传感器的特性不是线性的情况下，用来进行线性校正
对数压缩电路	当传感器输出信号的动态范围较宽时，用对数电路进行压缩

4. 为什么要对传感器测量电路采取抗干扰措施？

解答：在传感器电路的信号传递中，所出现的与被测量无关的随机信号被称为噪声。在信号提取与传递中，噪声信号常叠加在有用信号上，使有用信号发生畸变而造成测量误差，严重时甚至会将有用信号淹没其中，使测量工作无法正常进行，这种由噪声所造成的不良效应被称为干扰。而传感器或检测装置需要在各种不同的环境中工作，于是噪声与干扰不可避免地要作为一种输入信号进入传感器与检测系统中。因此系统就不可避免地会受到各种外界因素和内在因素的干扰。为了减小测量误差，在传感器及检测系统设计及使用过程中，应尽量减少或消除有关影响因素的作用。

1. 测量装置常见的噪声干扰有哪几种？通常可采用哪些措施？

解答：常见的干扰有机械干扰（振动与冲击）、热干扰（温度与湿度变化）、光干扰（其他无关波长的光）、化学干扰（酸/碱/盐及腐蚀性气体）、电磁干扰（电/磁场感应）、辐射干扰（气体电离、半导体被激发、金属逸出电子）等。

对由传感器形成的测量装置而言，形成噪声干扰通常有 3 个要素：噪声源；通道（噪声源到接收电路之间的耦合通道）；接收电路。

按照噪声产生的来源，噪声来源可分为两种：

（1）内部噪声 内部噪声是由传感器或检测电路元件内部带电微粒的无规则运动产生的，例如热噪声、散粒噪声以及接触不良引起的噪声等。

（2）外部噪声 外部噪声则由传感器检测系统外部人为或自然干扰造成的。外部噪声的来源主要为电磁辐射，当电机、开关及其它电子设备工作时会产生电磁辐射，雷电、大气电离及其它自然现象也会产生电磁辐射。在检测系统中，由于元件之间或电路之间存在着分布电容或电磁场，因而

容易产生寄生耦合现象，在寄生耦合的作用下，电场、磁场及电磁波就会引入检测系统，干扰电路的正常工作。

根据噪声干扰必须具备的 3 个要素，检测装置的干扰控制方式主要是消除或抑制干扰源；阻断或减弱干扰的耦合通道或传输途径；削弱接收电路对干扰的灵敏度。

检测装置的干扰噪声控制方法常采用的有屏蔽技术、接地技术、隔离技术、滤波器等硬件抗干扰措施，以及冗余技术、陷阱技术等微机软件抗干扰措施。对其它种类干扰可采用隔热、密封、隔振及蔽光等措施，或在转换为电量后对干扰进行分离或抑制。

第十二章 传感器的标定和传感器 的发展展望

1. 试述静态标定的方法。

解答：标定的基本方法——利用标准仪器产生已知的非电量（如压力、位移等）作为输入量，输入到待标定的传感器中，然后将传感器的输出量与输入的标准量相比较，获得一系列校准数据或曲线。

标定过程及步骤：

- （1）将传感器全量程（测量范围）分成若干个等间隔点；
- （2）按照等间隔点，由小到大逐一输入标准量值，并记录下与各输入值相对应的输出值；
- （3）再由大到小逐一输入标准量值，同时记录对应的各输出值；
- （4）按（2）、（3）所述过程，对传感器进行正、反行程反复循环多次测试，将得到的输出、输入测试数据用表格列出或画成曲线；
- （5）对测试数据进行必要的处理，根据处理结果，可以确定传感器的线性度、灵敏度、滞后和重复性等静态特性指标。

2. 动静态标定对仪器设备的要求是什么？

解答：对于动态校准系统，除具备静态标定对仪器设备精度等级要求外，还必须具有足够的动态响应范围。一般要求动态系统的工作频率范围应大于被校准传感器的 5—10 倍，上升时间应小于被校准传感器上升时间的 1/5。如：标准传感器的精度为 0.01%，被校传感器的精度可在 0.03%~0.05%之内；标准传感器的精度为：0.1%，被校：0.3 %~ 0.5%。

3. 提高传感器性能指标的方法有哪些？

解答：为改善传感器的性能，可采用下列技术途径：差动技术、平均技术、补偿与修正技术、屏蔽、隔离与干扰抑制、稳定性处理等方法。