

《传感器原理与应用》及《传感器与测量技术》习题集与部分参考答案

教材：传感器技术（第 3 版）贾伯年主编，及其他参考书

第 2 章 电阻式传感器

2-1 金属应变计与半导体应变计在工作机理上有何异同？试比较应变计各种灵敏系数概念的不同物理意义。

答：（1）相同点：它们都是在外界力作用下产生机械变形，从而导致材料的电阻发生变化所；不同点：金属材料的应变效应以机械形变为主，材料的电阻率相对变化为辅；而半导体材料则正好相反，其应变效应以机械形变导致的电阻率的相对变化为主，而机械形变为辅。

（2）对于金属材料，灵敏系数 $K_0 = K_m = (1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)$ 。前部分为受力后金属几何尺寸变化，一般 $\mu = 0.3$ ，因此 $(1 + 2\mu) = 1.6$ ；后部分为电阻率随应变而变的部分。金属丝材的应变电阻效应以结构尺寸变化为主。

对于半导体材料，灵敏系数 $K_0 = K_s = (1 + 2\mu) + E$ 。前部分同样为尺寸变化，后部分为半导体材料的压阻效应所致，而 $E \gg (1 + 2\mu)$ ，因此 $K_0 = K_s = E$ 。半导体材料的应变电阻效应主要基于压阻效应。

2-2 从丝绕式应变计的横向效应考虑，应该如何正确选择和使用应变计？在测量应力梯度较大或应力集中的静态应力和动态应力时，还需考虑什么因素？

2-3 简述电阻应变计产生热输出（温度误差）的原因及其补偿办法。

答：电阻应变计的温度效应及其热输出由两部分组成：前部分为热阻效应所造成；后部分为敏感栅与试件热膨胀失配所引起。在工作温度变化较大时，会产生温度误差。

补偿办法：1、温度自补偿法（1）单丝自补偿应变计；（2）双丝自补偿应变计

2、桥路补偿法（1）双丝半桥式；（2）补偿块法

2-4 试述应变电桥产生非线性原因及消减非线性误差的措施。

答：原因：
$$\Delta U = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \bigg/ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

上式分母中含 R_i/R_i ，是造成输出量的非线性因素。无论是输出电压还是电流，实际上都与 R_i/R_i 呈非线性关系。

措施：（1）差动电桥补偿法：差动电桥呈现相对臂“和”，相邻臂“差”的特征，通过应变计合理布片达到补偿目的。常用的有半桥差动电路和全桥差动电路。

（2）恒流源补偿法：误差主要由于应变电阻 R_i 的变化引起工作臂电流的变化所致。采用恒流源，可减小误差。

2-5 如何用电阻应变计构成应变式传感器？对其各组成部分有何要求？

答：一是作为敏感元件，直接用于被测试件的应变测量；另一是作为转换元件，通过弹性敏感元件构成传感器，用以对任何能转变成弹性元件应变的其他物理量作间接测量。

要求：非线性误差要小（ $<0.05\% \sim 0.1\% F.S$ ），力学性能参数受环境温度影响小，并与弹性元件匹配。

2-6 现有栅长 3mm 和 5mm 两种丝式应变计，其横向效应系数分别为 5% 和 3%。欲用来测量泊松比 $\mu = 0.33$ 的铝合金构件在单向应力状态下的应力分布（其应力分布梯度较大）。试问：应选用哪一种应变计？为什么？

答：应选用栅长为 5mm 的应变计。

由公式 $\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon_x + \frac{d\rho}{\rho}$ 和 $\frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)] \varepsilon_x = K_m \varepsilon_x$ 知应力大小是通过测量应变片

电阻的变化率来实现的。电阻的变化率主要由受力后金属丝几何尺寸变化所致部分（相对较大）加上电阻率随应变而变的部分（相对较小）。一般金属 $\mu = 0.3$ ，因此 $(1 + 2\mu) = 1.6$ ；后部分为电阻率随应变而变的部分。以康铜为例， $C = 1$ ， $C(1 - 2\mu) = 0.4$ ，所以此时 $K_0 = K_m = 2.0$ 。显然，金属丝材的应变电阻效应应以结构尺寸变化为主。从结构尺寸看，栅长为 5mm 的丝式应变计比栅长为 3mm 的应变计在相同力的作用下，引起的电阻变化大。

2-7 现选用丝栅长 10mm 的应变计检测弹性模量 $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、密度 $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ 的钢构件承受谐振力作用下的应变，要求测量精度不低于 0.5%。试确定构件的最大应变频率限。

答：机械应变波是以相同于声波的形式和速度在材料中传播的。当它依次通过一定厚度的基底、胶层（两者都很薄，可忽略不计）和栅长 l 而为应变计所响应时，就会有时间的迟后。应变计的这种响应迟后对动态（高频）应变测量，尤会产生误差。由 $f_{\max} < \frac{v}{l\pi} \sqrt{6|e|}$ 式中 v 为声波在钢构件中传播的速度；

又知道声波在该钢构件中的传播速度为：

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2}{7.8 \times 10^{-3} \times 10^6 \text{ kg/m}^3}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^8 \times 9.8 \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2}{7.8 \text{ kg}}} = 1.585 \times 10^4 \text{ m/s}$$

$$\text{可算得 } f_{\max} = \frac{v}{l\pi} \sqrt{6|e|} = \frac{1.585 \times 10^4 \text{ m/s}}{10 \times 10^{-3} \pi \text{ m}} \sqrt{6 \times 0.5\%} = 112 \text{ kHz}$$

2-8 一试件受力后的应变为 2×10^{-3} ；丝绕应变计的灵敏系数为 2，初始阻值 120，温度系数为 $-50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，线膨胀系数为 $14 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ；试件的线膨胀系数为 $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。试求：若温度升高 20 时，应变计输出的相对误差。

2-9 试推导图 2-16 所示四等臂平衡差动电桥的输出特性： $U_0 = f(\Delta R / R)$ 。从导出的结果说明：用电阻应变计进行非电量测量时为什么常采用差动电桥。

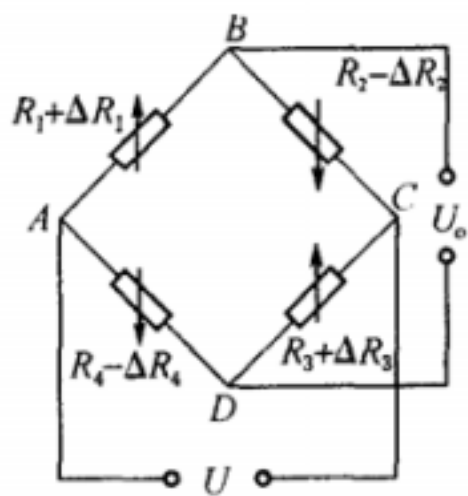


图 2-16 四臂差动电桥

解：全桥差动电路， R_1, R_3 受拉， R_2, R_4 受压，代入，得

$$\Delta U = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \bigg/ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

由全等桥臂，得

$$\Delta U = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{-\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{-\Delta R_4}{R_4} \right) \bigg/ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{-\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{-\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{U}{4} \frac{4\Delta R_1}{R} = U \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

可见输出电压 U_0 与 R_i/R_i 成严格的线性关系，没有非线性误差。即 $U_0 = f(R/R)$ 。

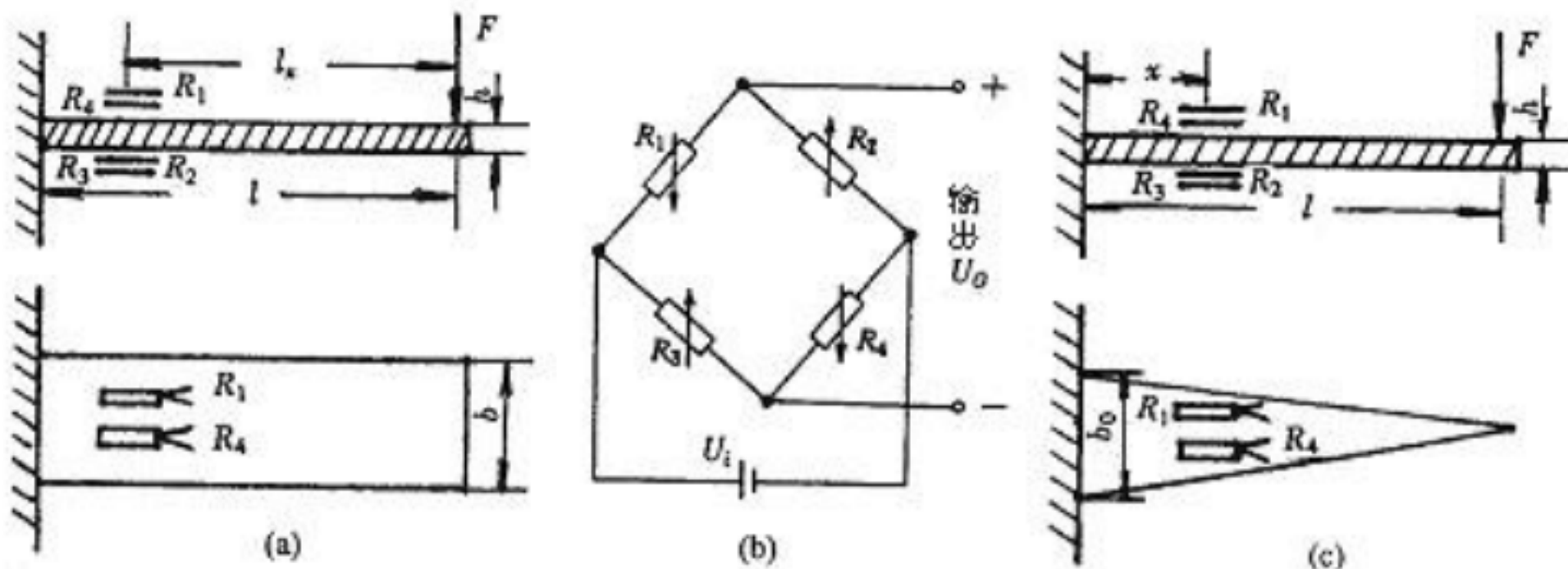
因为四臂差动工作，不仅消除了非线性误差，而且输出比单臂工作提高了 4 倍，故常采用此方法。

2-10 为什么常用等强度悬臂梁作为应变式传感器的力敏元件？现用一等强度梁：有效长 $l=150\text{mm}$ ，固支处 $b=18\text{mm}$ ，厚 $h=5\text{mm}$ ，弹性模量 $E=2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，贴上 4 片等阻值、 $K=2$ 的电阻应变计，并接入四等臂差动电桥构成称得传感器。试问：（1）悬臂梁上如何布片？又如何接桥？为什么？（2）当输入电压为 3V，有输出电压为 2mV 时的称重量为多少？

答：当力 F 作用在弹性臂梁自由端时，悬臂梁产生变形，在梁的上、下表面对称位置上应变大小相当，极性相反，若分别粘贴应变片 R_1 、 R_4 和 R_2 、 R_3 ，并接成差动电桥，则电桥输出电压 U_0 与力 F 成正比。

等强度悬臂梁的应变 $\varepsilon_x = \frac{6Fl}{b_0 h^2 E}$ 不随应变片粘贴位置变化。

1) 悬臂梁上布片如图 2-20a 所示。接桥方式如图 2-20b 所示。这样当梁上受力时， R_1 、 R_4 受拉伸力作用，阻值增大， R_2 、 R_3 受压，阻值减小，使差动输出电压成倍变化。可提高灵敏度。



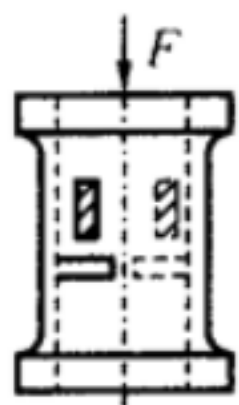
2) 当输入电压为 3V，有输出电压为 2mV 时的称重量为：

计算如下：

$$\text{由公式： } U_0 = U_i K \varepsilon_x = U_i K \frac{6Fl}{b_0 h^2 E} \Rightarrow F = \frac{b_0 h^2 E}{6 K l U_i} U_0 \text{ 代入各参数算 } F=33.3\text{N}$$

1 牛顿=0.102 千克力；所以， $F=3.4\text{Kg}$ 。此处注意： $F=m \cdot g$ ；即力=质量*重力加速度； $1\text{N}=1\text{Kg} \cdot 9.8\text{m/s}^2$ 。
力的单位是牛顿（N）和质量的单位是 Kg；所以称得的重量应该是 3.4Kg。

2-11 一圆筒型力传感器的钢质弹性筒截面为 19.6cm^2 ，弹性模量 $E = 2 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ；4 片阻值为 $R_1=R_2=R_3=R_4=120$ ， $K=2$ 的应变计如表 2-7(a) 所示布片，并接入差动全桥电路。试问：（1）当加载后测得输出电压为 $U_0=2.6\text{mV}$ 时，求载荷大小？（2）此时，弹性件贴片处的纵向应变和横向应变各多少？



2-12 何谓压阻效应？扩散硅压阻式传感器与贴片型电阻应变式传感器相比有什么优点，有什么缺点？如何克服？

答：“压阻效应”是指半导体材料（锗和硅）的电阻率随作用应力的变化而变化的现象。

优点是尺寸、横向效应、机械滞后都很小，灵敏系数极大，因而输出也大，可以不需放大器直接与记录仪器连接，使得测量系统简化。

缺点是电阻值和灵敏系数随温度稳定性差，测量较大应变时非线性严重；灵敏系数随受拉或压而变，且分散度大，一般在（3-5）% 之间，因而使得测量结果有（±3-5）% 的误差。

压阻式传感器广泛采用全等臂差动桥路来提高输出灵敏度，又部分地消除阻值随温度而变化的影响。

2-13 设计压阻式传感器时选择硅片（或硅杯）晶面及布置扩散电阻条的位置和方向有什么讲究？举例说明之。

2-14 有一扩散硅压阻式加速度传感器如图 2-31 所示，4 个扩散电阻接入图 2-16 所示测量电桥。已知硅梁的刚度系数 $k = 2500\text{N/m}$ ，质量块质量 $m=0.001\text{kg}$ ，由空气构成阻尼，阻尼比为 0.6。（1）指出该传感器的敏感元件与转换元件；（2）求幅值相对误差不超过 5% 的频率范围。

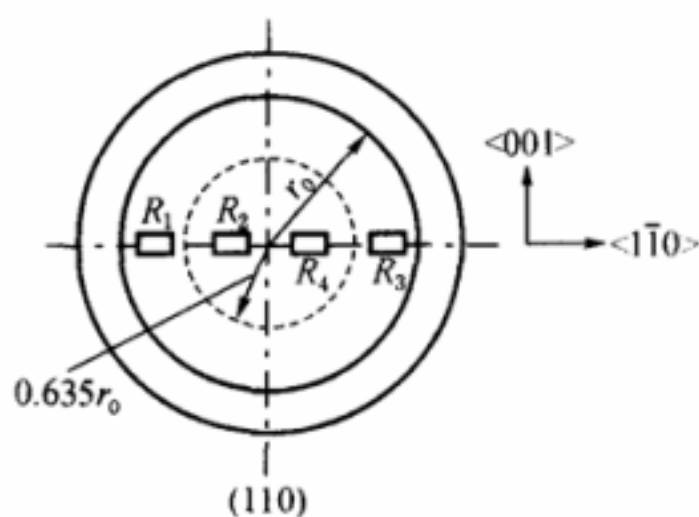


图 2-30 (110)晶面电阻条布片

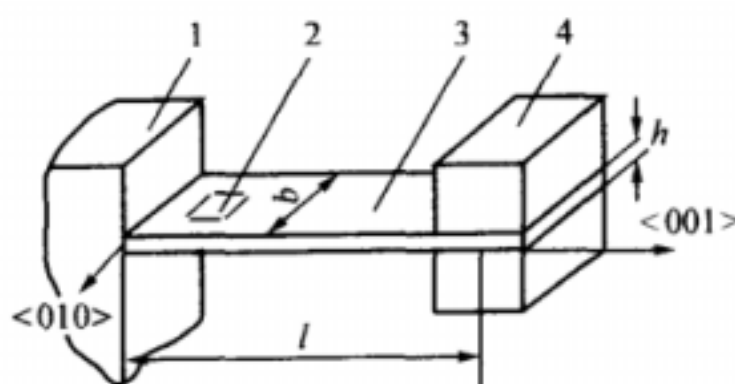


图 2-31 压阻式加速度传感器原理结构

1—基座；2—扩散电阻；3—硅梁；4—质量块。

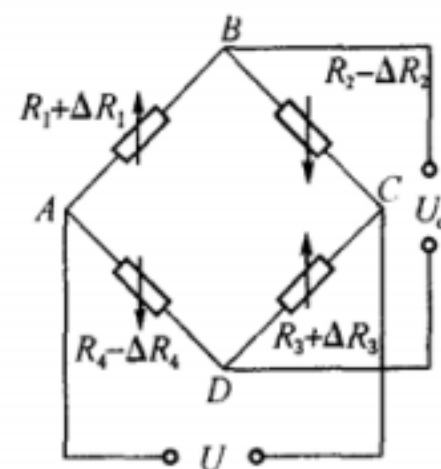


图 2-16 四臂差动电桥

2-15 某扩散硅压力传感器采用 (110) 晶面 N 型硅膜片，4 个扩散电阻条均径向（即纵向）布置如图 2-30 所示。试说明扩散电阻布置的原则。若电桥供桥电压为 U ，画出电桥原理图，推导电桥输出特性

$[U_0 = f(\frac{\Delta R}{R})]$ 和电压灵敏度 $[K_u = U_0 / \frac{\Delta R}{R}]$

*2-16 一应变片的电阻 $R=120$ ， $k=2.05$ ，用作应变片为 $800 \mu m/m$ 的传感元件。

(1) 求 R/R 和 R ；

(2) 若电源电压 $U=3V$ ，惠斯登电桥初始平衡，求输出电压 U_0 。

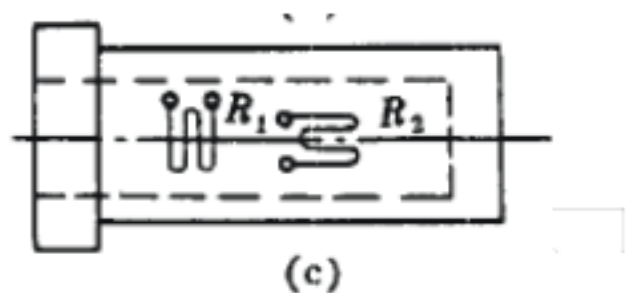
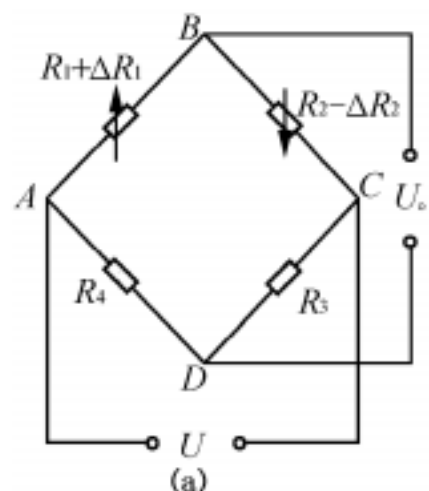
答： $\frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)] \epsilon_x = K_m \epsilon_x$ ，此处 $\frac{dl}{l} = \epsilon_x = 800 \mu m/m$ ；

所以 $\frac{dR}{R} = K_m \epsilon_x = 1.64 \times 10^{-3}$ ； $\Delta R = 1.64 \times 10^{-3} \times 120 = 0.197 \Omega$ ；

全桥电路连接时，输出电压可按下式计算：

$U_0 = U \frac{\Delta R}{R}$ 式中 $n = R_2/R_1$ ，为桥臂比；此处取四个电阻相等，所以 $n=1$ ；算得 $U_0=4.92mV$ 。

*2-17 在材料为钢的实心圆柱形试件上，沿轴线和圆周方向各贴一片电阻为 120 的应变片 R_1 和 R_2 ，把这两片应变片接入差动电桥（如图），若钢的泊松系数 $\mu=0.285$ ，应变片的灵敏度系数 $k=2$ ，电桥电源电压 $U=2V$ ，当试件受轴向拉伸时，测得应变片的电阻变化 $R_1=0.48$ ，求电桥的输出电压 U_0 为多少？



答：由 $\frac{\Delta R}{R} = K \epsilon_x$ 轴向应变引起的电阻变化；可求的轴向应变系数 $\epsilon_x = \frac{\Delta R}{RK} = \frac{0.48}{120 \times 2} = 0.002$ ；总的应变

系数 $\epsilon = \epsilon_x + \epsilon_y = (1 + \mu) \epsilon_x = 1.285 \times 0.002 = 0.00257$ ；

又 $U_0 = \frac{U_i}{4} k \epsilon = 2.57\text{mV}$

或：也可以根据分压定律来做。得 $U_0=2.567\text{mV}$ 。

2-18 什么是应变效应？什么是压阻效应？什么是横向效应？试说明金属应变片与半导体应变片的相同和不同之处。

2-19 有一吊车的拉力传感器如图所示，电阻应变片 $R_1、R_2、R_3、R_4$ 等截面轴上，已知 $R_1—R_4$ 标称阻值为 120 ，桥路电压 2V ，物重 m 引起 $R_1、R_2$ 变化增量为 1.2 。请画出应变片电桥电路，计算出测得的输出电压和电桥输出灵敏度， $R_3、R_4$ 起什么作用？

2-20 在传感器测量电路中， 直流电桥与交流电桥有什么不同， 如何考虑应用场合？用电阻应变片组成的半桥、全桥电路与单桥相比有哪些改善？

2-21 电桥如图所示：

试推导电桥平衡条件 $V_0 (R_1,R_2,R_3,R_4) =0\text{V}$ 。

2-22 电桥预调平衡电路如图，初始不平衡值：

$R_1=348\ \Omega$ ， $R_2=350\ \Omega$ ， $R_3=120\ \Omega$ ，

$R_4=120\ \Omega$ ， $R_5=1\text{K}\ \Omega$ ， $R_6=20\text{K}\ \Omega$ ， $E=24\text{V}$

求：调节滑片，平衡时 R_7 ， R_8 的值。平衡后 $R_1/R_2=R_3/R_4$ ，对吗？

2-23 在用直流电桥测量电阻的时候，若标准电阻 $R_n=10.0004$ 的电桥已经平衡（则被测电阻 $R_x=10.0004$ ），但是由于检流计指针偏转在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内时，人眼就很难观测出来，因此 R_n 的值也可能不是 10.0004 而是 $R_n=10.0004 \pm R_n$ 。若已知电桥的相对灵敏度 $S_r=1\text{mm}/0.01\%$ ，求对应检流计指针偏转 $\pm 0.3\text{mm}$ 时， R_n ？

解：已知 $\Delta y =0.3\text{mm}$ ， $R_n =10.0004\Omega$

$\therefore S_r = \frac{\Delta y}{\Delta R_n / R_n \times 100\%} =1\text{mm}/0.01\%$

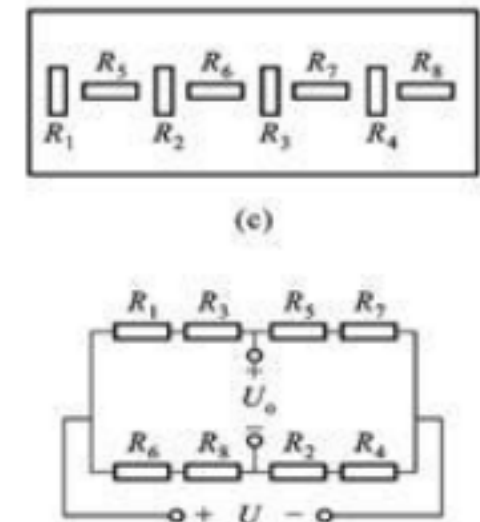
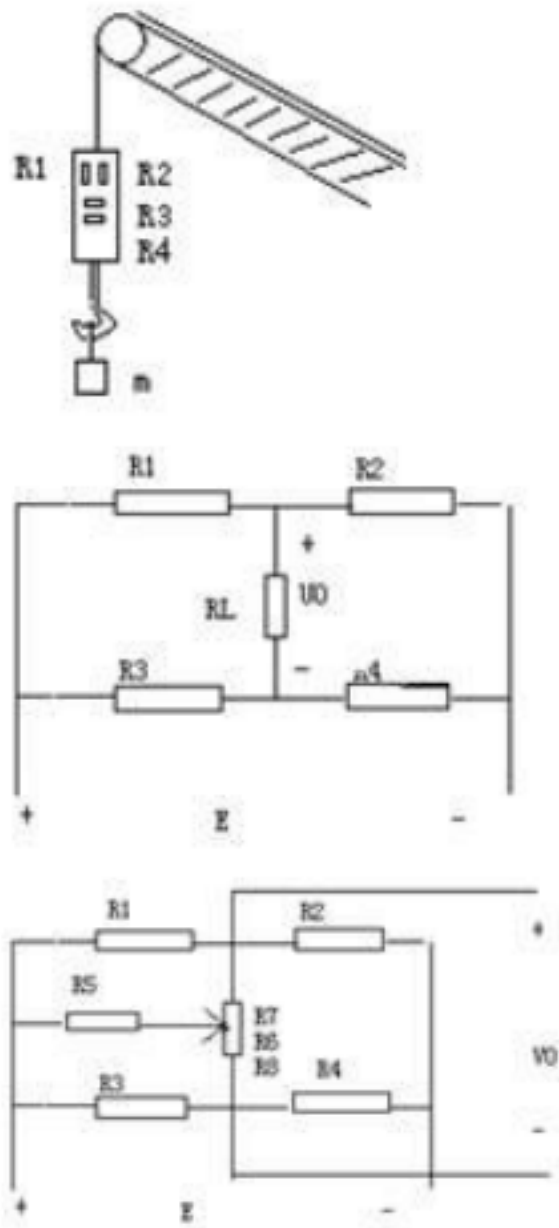
2-24 说明电阻应变片的组成和种类。电阻应变片有哪些主要特性参数？

答： 金属电阻应变片由四部分组成：敏感栅、基底、盖层、粘结剂、引线。分为金属丝式和箔式。

其主要特性参数：灵敏系数、横向效应、机械滞后、零漂及蠕变、温度效应、应变极限、疲劳寿命、绝缘电阻、最大工作电流、动态响应特性。

2-25 一个量程为 10kN 的应变式测力传感器，其弹性元件为薄壁圆筒轴向受力，外径 20mm ，内径 18mm ，在其表面粘贴八各应变片，四个沿周向粘贴，应变片的电阻值均为 120 ，灵敏度为 2 ，泊松比为 0.3 ，材料弹性模量 $E=2.1 \times 10^{11}\text{Pa}$ 。要求：

绘出弹性元件贴片位置及全桥电路；



计算传感器在满量程时，各应变片电阻变化；

当桥路的供电电压为 10V 时，计算传感器的输出电压。

答：(1) 全桥电路如右图所示

$$(2) \text{ 圆桶截面积 } A = \pi(R^2 - r^2) = 59.7 \times 10^{-6}$$

应变片 1、2、3、4 感受纵向应变；

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_x$$

应变片 5、6、7、8 感受纵向应变；

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_6 = \varepsilon_7 = \varepsilon_8 = \varepsilon_y$$

满量程时：

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = k \varepsilon_x R = K \frac{F}{AE} R = 2.0 \times \frac{10 \times 10^3}{59.7 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^{11}} \times 120 = 0.191 \Omega$$

$$\Delta R_5 = \Delta R_6 = \Delta R_7 = \Delta R_8 = -\mu \Delta R_1 = -0.3 \times 0.191 = -0.0573 \Omega$$

$$(3) \Delta U = \frac{U}{2} K (1 + \mu) \frac{F}{AE} = \frac{10}{2} \times 2.0 \times (1 + 0.3) \frac{F}{59.7 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^{11}} = 1.037 \times 10^{-6} F$$

2-26 应变片产生温度误差的原因及减小或补偿温度误差的方法是什么？

答：敏感元件与弹性元件温度误差不同产生虚假误差，可采用自补偿和线路补偿。

2-27 今有一悬臂梁，如图所示，在其中上部上、下两面各贴两片应变片，组成全桥，该梁在其悬臂梁一端受一向下力 $F=0.5N$ ，试求此时这四个应变片的电阻值。已知：应变片灵敏系数 $K=2.1$ ；应变片空载

电阻 $R_0=120$ 。 (已知 $l=25cm$ ， $b=6cm$ ， $t=3mm$ ， $x=1/2l$ ， $E=70 \times 10^5 Pa$)

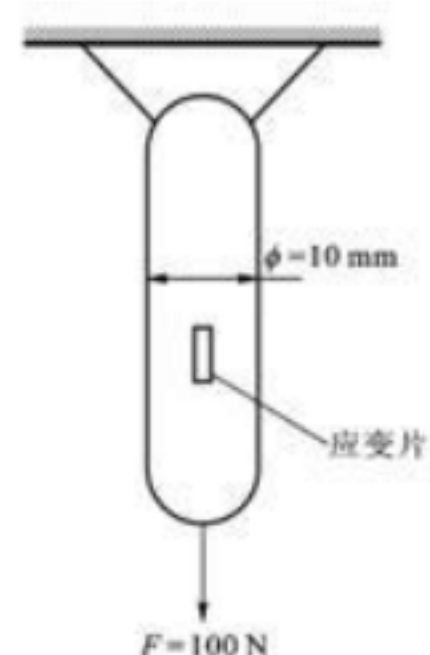
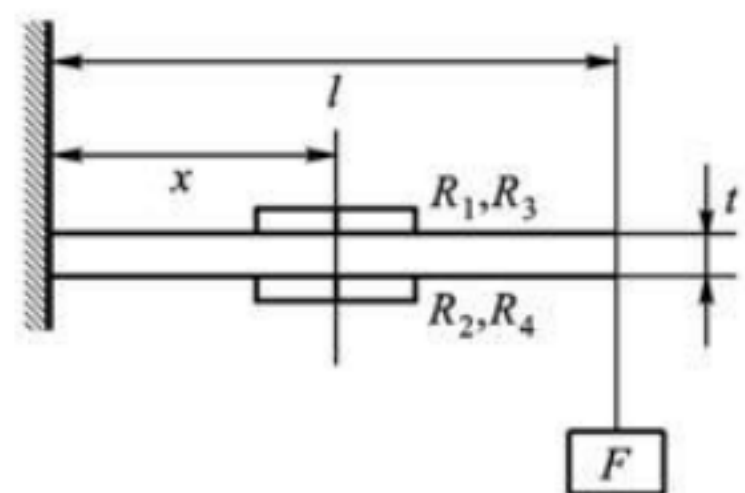
$$\text{解： } \varepsilon_x = \frac{6(l-x)}{bEt^2} F = 0.1$$

$$\Delta R = KR \varepsilon_x = 2.1 \times 120 \times 0.1 = 25.2 \Omega$$

$$R_1 = R_3 = R + \Delta R = 120 + 25.2 = 145.2 \Omega$$

$$R_2 = R_4 = R - \Delta R = 120 - 25.2 = 94.8 \Omega$$

2-28 如图所示一受拉的 10# 优质碳素钢杆。试用允许通过的最大为 30mA 的康铜丝应变片组成一单臂受感电桥。试求出此电桥空载最大可能的输出电压 (应变片的电阻为 120)。



电 流
时 的

解： $\varepsilon_x = \frac{6(l-x)}{bEt^2} F = 19.8$

$\Delta R = KR \varepsilon_x = 350 / 0.3 = 1166.7 \Omega$

$U_0 = \frac{U}{4} \frac{\Delta R}{R} = 17.5V$

$U = 30mA \times 120\Omega \times 2 = 7.2V$

2-29 钢材上粘贴的应变片的电阻变化率为 0.1% , 钢材的应力为 $10kg/mm^2$ 。

求钢材的应变。

钢材的应变为 300×10^{-6} 时, 粘贴的应变片的电阻变化率为多少 ?

解： $\frac{\Delta R}{R} \approx F \frac{\Delta l}{l}$ 是 $R/R=2$ (l/l)。因为电阻变化率是 $R/R=0.001$, 所以 l/l (应变)
 $=0.0005=5 \times 10^{-4}$ 。

因 $l/l=300 \times 10^{-6}$, 所以, $R/R=2 \times 300 \times 10^{-6}=6 \times 10^{-4}$ 。

2-30 截面积为 $1mm^2$ 、长度为 $100m$ 铜线的电阻为多少? 具有和它相同电阻的 $100m$ 铝线的截面积为多大? 比较此时的铝线重量和铜线重量。

答： $R= (l/S)$ 中, (镍)是 $(95 \sim 104) \times 10^{-8} \cdot m$, (铜)是 $1.72 \times 10^{-8} \cdot m$,

所以 $R(\text{镍})/R(\text{铜}) = (\text{镍})/(\text{铜}) = (95 \sim 104)/1.72=55.2 \sim 60.5$ 。

2-31 试推导惠斯顿电桥输入输出之间的关系。

答：假定输入输出端没有电流流过, 流过阻抗 Z_4 和 Z_1 的电流为 i_4 , 流过阻抗 Z_3 和 Z_2 的电流为 i_3 , 由基尔霍夫电压定律得以下关系式：

$(Z_4 + Z_1) i_4 = (Z_3 + Z_2) i_3 = V_i$ (1)

$i_4 Z_4 = i_3 Z_3 + V_o$ (2)

由 (1) 式得 $i_4 = \frac{V_i}{Z_4 + Z_1}$ (3)

$i_3 = \frac{V_i}{Z_3 + Z_2}$ (4)

将 (3) 和 (4) 代入 (2) 求得 V_o 为：

$V_o = i_4 Z_4 - i_3 Z_3 = \left(\frac{Z_4}{Z_4 + Z_1} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_2} \right) V_i = \left[\frac{Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3}{(Z_1 + Z_4)(Z_2 + Z_3)} \right] V_i$

2-32 参考有关书籍中的地震式加速度传感器的工作原理并推导出公式： $\omega^2 U_o = p^2 X_o$

答：由等效力学模型得，当有位移输入 $u(t)$ 时，盛物器的相对位移 x 的运动方向为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{u}(t) \tag{1}$$

因此，如果物体以振动频率 f (角频率 $\omega = 2\pi f$)、振幅 U_0 作正弦振动 $u(t) = U_0 \sin \omega t$ 则上述微分方程为：

$$\ddot{x} + 2r p \dot{x} + p^2 x = \omega^2 U_0 \sin \omega t, \quad \omega = 2\pi f \tag{2}$$

其中 $p = \sqrt{k/m}$, $r = c/2\sqrt{mk}$

因此，(2) 的特解，求得如下：

$$x(t) = X_0 \sin(\omega t + \varphi) \tag{3}$$

X_0 , 用 λ/p 表示，则有

$$X_0 = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2r\lambda)^2}} U_0 \tag{4}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2r\lambda}{1 - \lambda^2} \right) \tag{5}$$

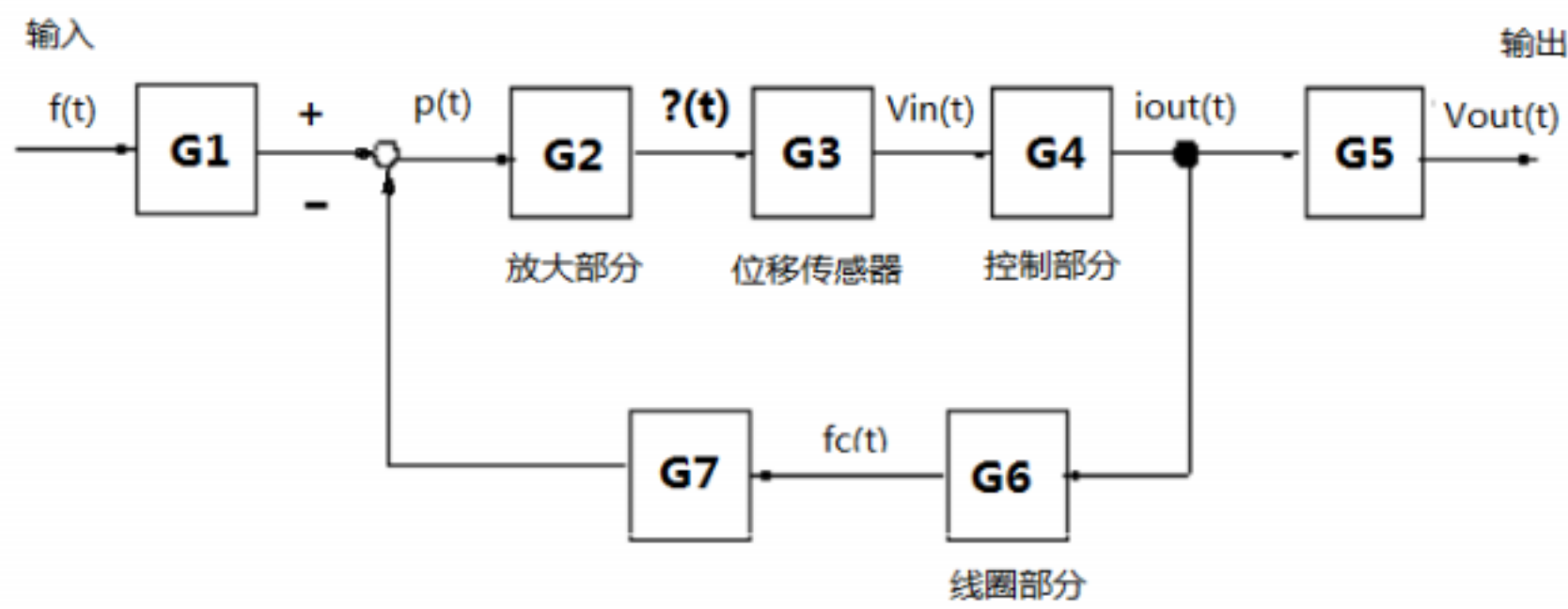
如果 $\lambda \ll 1$ ，则由 (4) 得

$$X_0 = \lambda U_0 = \left(\frac{\omega}{p} \right)^2 U_0 \tag{6}$$

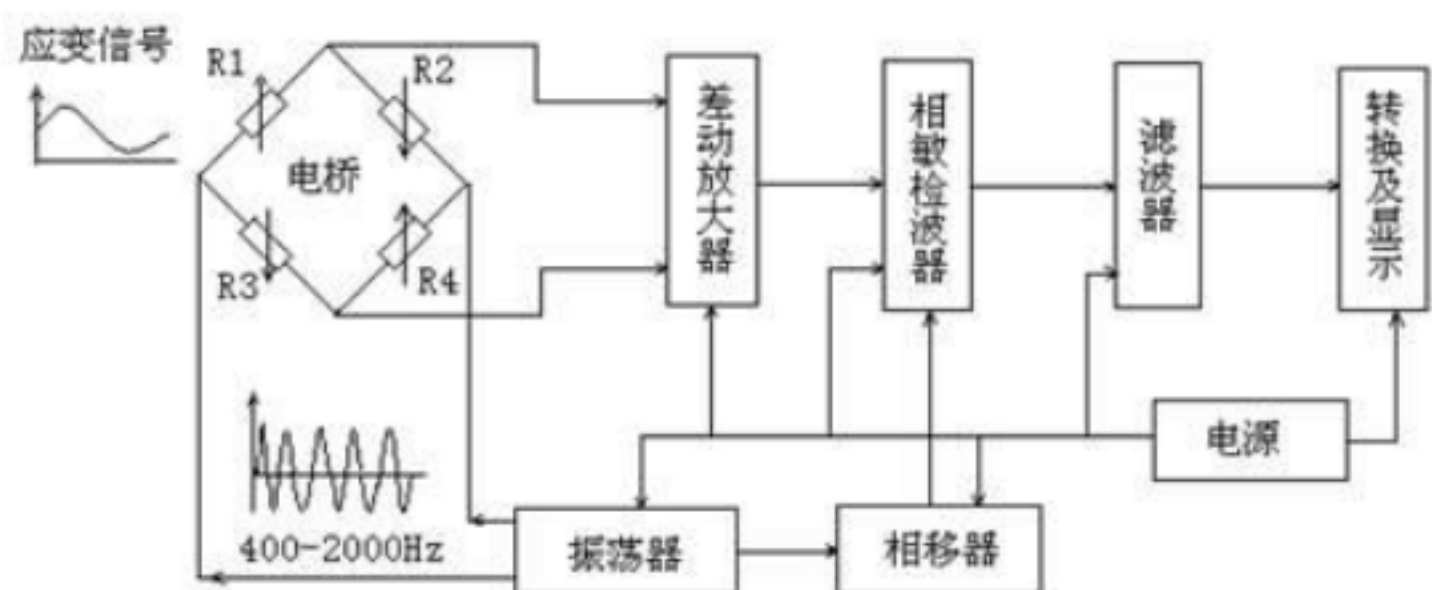
$$\text{即 } p^2 X_0 = \omega^2 U_0, \quad \omega = 2\pi f \tag{7}$$

2-33 给出力平衡测量系统得一个应用实例，并给出系统的信号流方框图。

答：方框图如下：



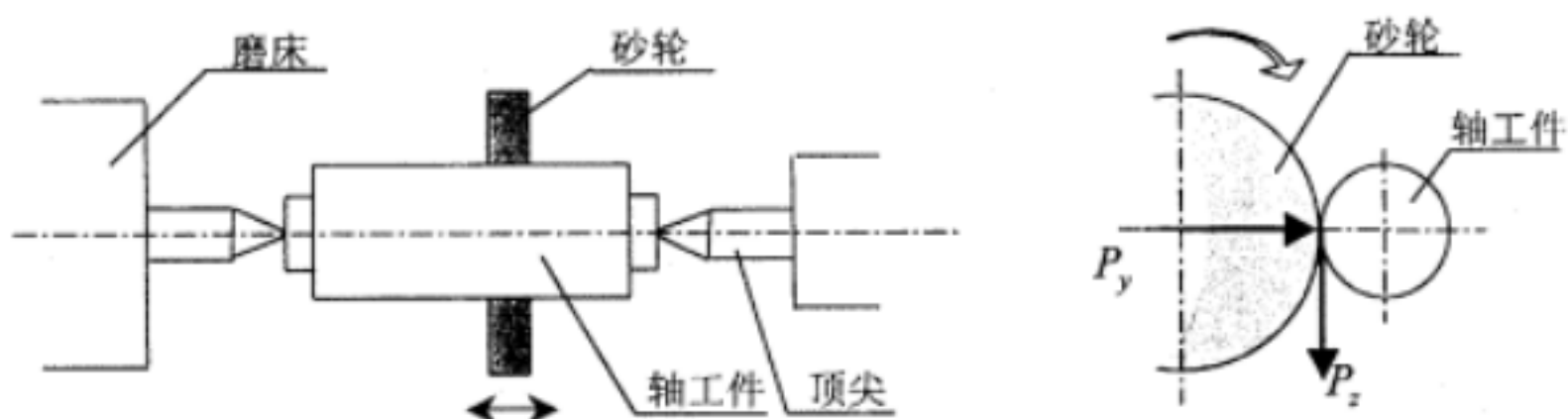
2-34 下图是电阻应变仪电路框图，电桥采用交流供电，应变信号为一正弦变化的信号频率为 20Hz，振荡频率 4KHz。请画出放大器、相敏检波器、低通滤波器的输出波形示意图。



2-35 如图所示，轴工件用前后顶尖支承纵向磨削外园表面，在加工过程中，径向力 P_y 和切向力 P_z 大小基本不变，但着力点位置沿轴向移动，现在前后顶尖上粘贴电阻应变片测量工件所受的 P_z 。

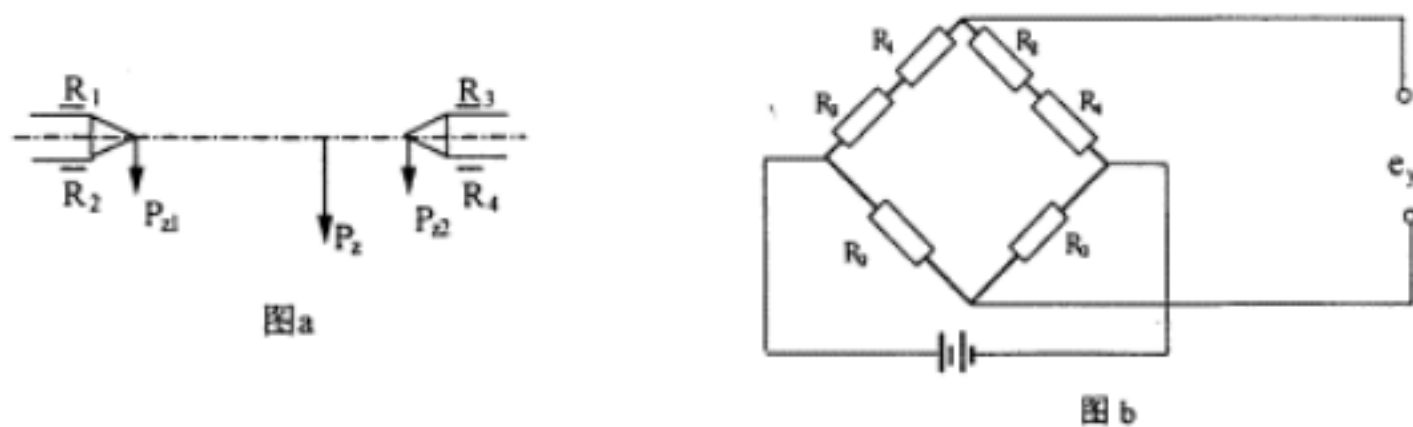
(1) 在图中标明应变片的位置及 P_z 的测量电桥。

(2) 着力点移动对测量结果有无影响？为什么？



解：(1) 应变片 (R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4) 粘贴位置如图 a 所示；测量电桥如图 b 所示。

(2) 根据以上位置布片和电桥接法，着力点位置的变化不会影响 P_z 的大小，因为在顶尖上的分力 P_{z1} 、 P_{z2} ， $P_z = P_{z1} + P_{z2}$ ，由 P_{z1} 、 P_{z2} 引起的电阻 R_1 、 R_3 的变化值之和保持不变，故 P_z 的测量不受着力点的移动而改变。



2-36 简述应变片在弹性元件上的布置原则，及哪几种电桥接法具有温度补偿作用。

答：布置原则有：

- (1) 贴在应变最敏感部位，使其灵敏度最佳；
- (2) 在复合载荷下测量，能消除相互干扰；
- (3) 考虑温度补偿作用；

单臂电桥无温度补偿作用，差动和全桥方式具有温度补偿作用。

2-37 简述金属电阻应变片的工作原理。

答：金属电阻应变片的工作原理：是基于金属导体的应变效应，即金属导体在外力作用下发生机械变形时，其电阻值随着它所受机械变形（伸长或缩短）的变化而发生变化的现象。

2-38 为什么用应变片测量时必须采用温度补偿措施？

答：粘贴到试件上的电阻应变片，除感受机械应变而产生电阻相对变化外，在环境温度变化时，也会引起电阻的相对变化，产生虚假应变，因此需采用温度补偿措施。

2-39 简述压阻效应的概念、分类及利用该原理传感器的测量类型。

答：压阻效应：对半导体材料施加应力时，除了产生形变外，材料的电阻率也要发生变化，这种由于应力的作用而使材料的电阻率发生改变的现象称为压阻效应，分为扩散电阻长度方向的纵向压阻效应和扩散电阻宽度方向的横向压阻效应，分别由其压阻系数决定，而压阻系数除了与晶向有关外，还与材料的掺杂浓度有关。利用半导体压阻效应设计成的传感器，基本类型有两种：测压和测加速度。

2-40 一个半导体应变片的灵敏系数为 180，半导体材料的弹性模量为 $1.8 \times 10^5 \text{ Mpa}$ ，其中压阻系数为多少 Pa^{-1} ？

提示： $K = K/E$

2-41 何谓电阻应变传感器？

答：电阻应变传感器是将被测量的应力（压力、负荷、扭力等）通过它所产生的金属弹性变形转换成电阻变化的检测元件。

2-42 电阻丝应变片的工作原理。

答：当外力（或重力）作用于传感器的弹性原件时，弹性原件便产生 $\Delta l / l$ （应变 ϵ ）的相对变形量，电阻值的相对变化率 $\Delta R / R$ 与应变 $\Delta l / l$ 成正比关系。
$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}$$
，所以， $\Delta R / R$ 与外力 P 成正比关系。

2-43 应变片为什么要进行温度补偿？

答：因为温度变化会造成应变电阻变化，对测量造成误差。

消除这种误差或对它进行修正以求出仅由应变引起的电桥输出的方法。

2-44 为什么必须进行非线性补偿？电阻应变片传感器测量采取何措施？

答：在仪表的基本组成环节中（尤其是灵敏元件）中有许多具有非线性的静特性，为了保证测量仪表的输入与输出之间具有线性关系。所以非线性电阻应变传感器采用桥路接法时，在半导体应变片中对测量值进行修正，或在电路上采取线性补偿措施。

《传感器原理与应用》及《传感器与测量技术》习题集与部分参考答案

教材：传感器技术（第 3 版）贾伯年主编，及其他参考书

第 2 章 电阻式传感器

2-1 金属应变计与半导体应变计在工作机理上有何异同？试比较应变计各种灵敏系数概念的不同物理意义。

答：（1）相同点：它们都是在外界力作用下产生机械变形，从而导致材料的电阻发生变化所；不同点：金属材料的应变效应以机械形变为主，材料的电阻率相对变化为辅；而半导体材料则正好相反，其应变效应

以机械形变导致的电阻率的相对变化为主，而机械形变为辅。

(2) 对于金属材料，灵敏系数 $K_0 = K_m = (1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)$ 。前部分为受力后金属几何尺寸变化，一般 $\mu = 0.3$ ，因此 $(1 + 2\mu) = 1.6$ ；后部分为电阻率随应变而变的部分。金属丝材的应变电阻效应以结构尺寸变化为主。

对于半导体材料，灵敏系数 $K_0 = K_s = (1 + 2\mu) + \frac{E}{E_p}$ 。前部分同样为尺寸变化，后部分为半导体材料的压阻效应所致，而 $E \gg (1 + 2\mu)$ ，因此 $K_0 = K_s = \frac{E}{E_p}$ 。半导体材料的应变电阻效应主要基于压阻效应。

2-2 从丝绕式应变计的横向效应考虑，应该如何正确选择和使用应变计？在测量应力梯度较大或应力集中的静态应力和动态应力时，还需考虑什么因素？

2-3 简述电阻应变计产生热输出（温度误差）的原因及其补偿办法。

答：电阻应变计的温度效应及其热输出由两部分组成：前部分为热阻效应所造成；后部分为敏感栅与试件热膨胀失配所引起。在工作温度变化较大时，会产生温度误差。

补偿办法：1、温度自补偿法 (1) 单丝自补偿应变计；(2) 双丝自补偿应变计

2、桥路补偿法 (1) 双丝半桥式；(2) 补偿块法

2-4 试述应变电桥产生非线性的原因及消减非线性误差的措施。

答：原因：
$$\Delta U = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \bigg/ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

上式分母中含 R_i/R_i ，是造成输出量的非线性因素。无论是输出电压还是电流，实际上都与 R_i/R_i 呈非线性关系。

措施：(1) 差动电桥补偿法：差动电桥呈现相对臂“和”，相邻臂“差”的特征，通过应变计合理布片达到补偿目的。常用的有半桥差动电路和全桥差动电路。

(2) 恒流源补偿法：误差主要由于应变电阻 R_i 的变化引起工作臂电流的变化所致。采用恒流源，可减小误差。

2-5 如何用电阻应变计构成应变式传感器？对其各组成部分有何要求？

答：一是作为敏感元件，直接用于被测试件的应变测量；另一是作为转换元件，通过弹性敏感元件构成传感器，用以对任何能转变成弹性元件应变的其他物理量作间接测量。

要求：非线性误差要小 ($< 0.05\% \sim 0.1\% F.S$)，力学性能参数受环境温度影响小，并与弹性元件匹配。

2-6 现有栅长 3mm 和 5mm 两种丝式应变计，其横向效应系数分别为 5% 和 3%。欲用来测量泊松比 $\mu = 0.33$ 的铝合金构件在单向应力状态下的应力分布（其应力分布梯度较大）。试问：应选用哪一种应变计？为什么？

答：应选用栅长为 5mm 的应变计。

由公式 $\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon_x + \frac{d\rho}{\rho}$ 和 $\frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)] \varepsilon_x = K_m \varepsilon_x$ 知应力大小是通过测量应变片

电阻的变化率来实现的。电阻的变化率主要由受力后金属丝几何尺寸变化所致部分（相对较大）加上电阻率随应变而变的部分（相对较小）。一般金属 $\mu = 0.3$ ，因此 $(1 + 2\mu) = 1.6$ ；后部分为电阻率随应变而变的部分。以康铜为例， $C = 1$ ， $C(1 - 2\mu) = 0.4$ ，所以此时 $K_0 = K_m = 2.0$ 。显然，金属丝材的应变电阻效

应以结构尺寸变化为主。从结构尺寸看，栅长为 5mm 的丝式应变计比栅长为 3mm 的应变计在相同力的作用下，引起的电阻变化大。

2-7 现选用丝栅长 10mm 的应变计检测弹性模量 $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、密度 $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ 的钢构件承受谐振力作用下的应变，要求测量精度不低于 0.5%。试确定构件的最大应变频率限。

答：机械应变波是以相同于声波的形式和速度在材料中传播的。当它依次通过一定厚度的基底、胶层（两者都很薄，可忽略不计）和栅长 l 而为应变计所响应时，就会有时间的迟后。应变计的这种响应迟后对动态（高频）应变测量，尤会产生误差。由 $f_{\max} < \frac{v}{l\pi} \sqrt{6|\epsilon|}$ 式中 v 为声波在钢构件中传播的速度；

又知道声波在该钢构件中的传播速度为：

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2}{7.8 \times 10^{-3} \times 10^6 \text{ kg/m}^3}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^8 \times 9.8 \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2}{7.8 \text{ kg}}} = 1.585 \times 10^4 \text{ m/s}$$

$$\text{可算得 } f_{\max} = \frac{v}{l\pi} \sqrt{6|\epsilon|} = \frac{1.585 \times 10^4 \text{ m/s}}{10 \times 10^{-3} \pi \text{ m}} \sqrt{6 \times 0.5\%} = 112 \text{ kHz}$$

2-8 一试件受力后的应变为 2×10^{-3} ；丝绕应变计的灵敏系数为 2，初始阻值 120，温度系数为 $-50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，线膨胀系数为 $14 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ；试件的线膨胀系数为 $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。试求：若温度升高 20 时，应变计输出的相对误差。

2-9 试推导图 2-16 所示四等臂平衡差动电桥的输出特性： $U_0 = f(\Delta R / R)$ 。从导出的结果说明：用电阻应变计进行非电量测量时为什么常采用差动电桥。

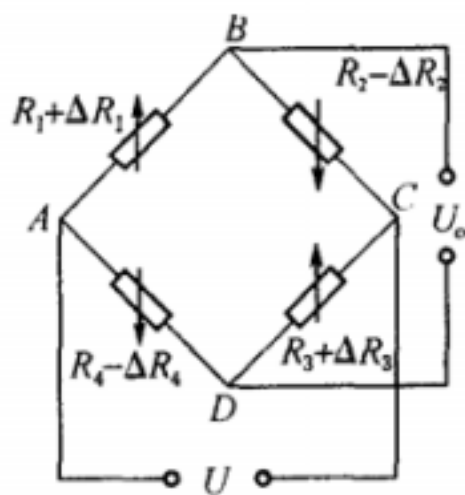


图 2-16 四臂差动电桥

解：全桥差动电路， R_1, R_3 受拉， R_2, R_4 受压，代入，得

$$\Delta U = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \bigg/ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

由全等桥臂，得

$$\Delta U = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{-\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{-\Delta R_4}{R_4} \right) \bigg/ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{-\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{-\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{U}{4} \frac{4\Delta R_1}{R} = U \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

可见输出电压 U_0 与 R_i/R_i 成严格的线性关系，没有非线性误差。即 $U_0=f(R/R)$ 。

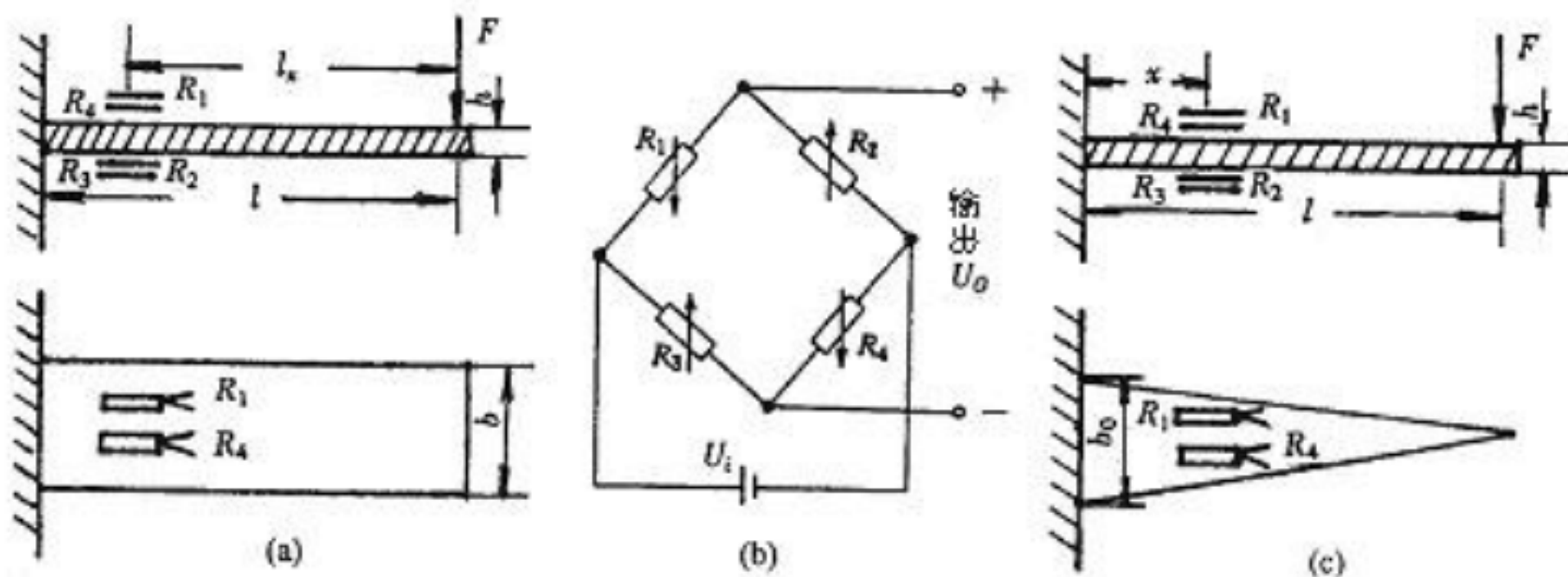
因为四臂差动工作，不仅消除了非线性误差，而且输出比单臂工作提高了 4 倍，故常采用此方法。

2-10 为什么常用等强度悬臂梁作为应变式传感器的力敏元件？现用一等强度梁：有效长 $l=150\text{mm}$ ，固支处 $b=18\text{mm}$ ，厚 $h=5\text{mm}$ ，弹性模量 $E=2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，贴上 4 片等阻值、 $K=2$ 的电阻应变计，并接入四等臂差动电桥构成称得传感器。试问：（1）悬臂梁上如何布片？又如何接桥？为什么？（2）当输入电压为 3V ，有输出电压为 2mV 时的称重量为多少？

答：当力 F 作用在弹性臂梁自由端时，悬臂梁产生变形，在梁的上、下表面对称位置上应变大小相当，极性相反，若分别粘贴应变片 R_1 、 R_4 和 R_2 、 R_3 ，并接成差动电桥，则电桥输出电压 U_0 与力 F 成正比。

等强度悬臂梁的应变 $\varepsilon_x = \frac{6Fl}{b_0 h^2 E}$ 不随应变片粘贴位置变化。

1) 悬臂梁上布片如图 2-20a 所示。接桥方式如图 2-20b 所示。这样当梁上受力时， R_1 、 R_4 受拉伸力作用，阻值增大， R_2 、 R_3 受压，阻值减小，使差动输出电压成倍变化。可提高灵敏度。



2) 当输入电压为 3V ，有输出电压为 2mV 时的称重量为：

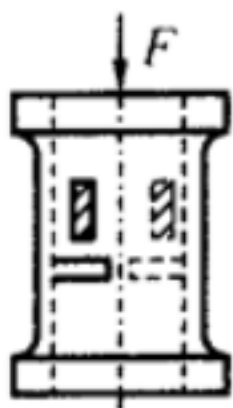
计算如下：

$$\text{由公式： } U_0 = U_i K \varepsilon_x = U_i K \frac{6Fl}{b_0 h^2 E} \Rightarrow F = \frac{b_0 h^2 E}{6KF U_i} U_0 \text{ 代入各参数算 } F=33.3\text{N}$$

1 牛顿 $=0.102$ 千克力；所以， $F=3.4\text{Kg}$ 。此处注意： $F=m \cdot g$ ；即力 = 质量 * 重力加速度； $1\text{N}=1\text{Kg} \cdot 9.8\text{m/s}^2$ 。力的单位是牛顿（N）和质量的单位是 Kg；所以称得的重量应该是 3.4Kg 。

2-11 一圆筒型力传感器的钢质弹性筒截面为 19.6cm^2 ，弹性模量 $E=2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ；4 片阻值为

$R_1=R_2=R_3=R_4=120$ ， $K=2$ 的应变计如表 2-7(a) 所示布片，并接入差动全桥电路。试问：（1）当加载后测得输出电压为 $U_0=2.6\text{mV}$ 时，求载荷大小？（2）此时，弹性件贴片处的纵向应变和横向应变各多少？



2-12 何谓压阻效应？扩散硅压阻式传感器与贴片型电阻应变式传感器相比有什么优点，有什么缺点？如何克服？

答：“压阻效应”是指半导体材料（锗和硅）的电阻率随作用应力的变化而变化的现象。

优点是尺寸、横向效应、机械滞后都很小，灵敏系数极大，因而输出也大，可以不需放大器直接与记录仪器连接，使得测量系统简化。

缺点是电阻值和灵敏系数随温度稳定性差，测量较大应变时非线性严重；灵敏系数随受拉或压而变，且分散度大，一般在（3-5）%之间，因而使得测量结果有（±3-5）%的误差。

压阻式传感器广泛采用全等臂差动桥路来提高输出灵敏度，又部分地消除阻值随温度而变化的影响。

2-13 设计压阻式传感器时选择硅片（或硅杯）晶面及布置扩散电阻条的位置和方向有什么讲究？举例说明之。

2-14 有一扩散硅压阻式加速度传感器如图 2-31 所示，4 个扩散电阻接入图 2-16 所示测量电桥。已知硅梁的刚度系数 $k = 2500 \text{ N/m}$ ，质量块质量 $m = 0.001 \text{ kg}$ ，由空气构成阻尼，阻尼比为 0.6。（1）指出该传感器的敏感元件与转换元件；（2）求幅值相对误差不超过 5% 的频率范围。

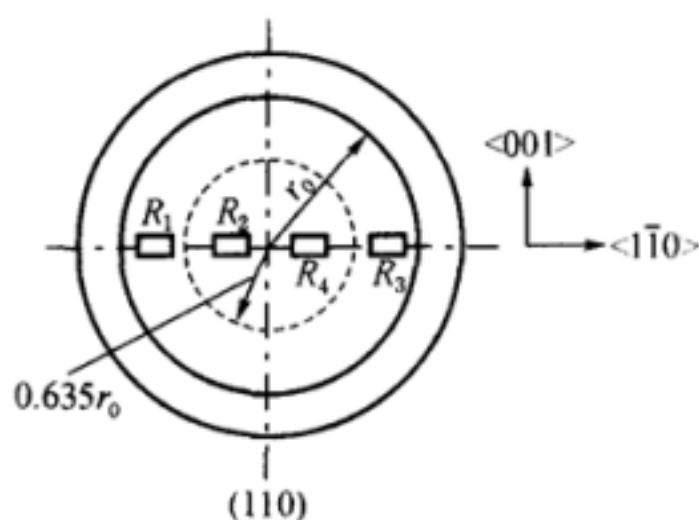


图 2-30 (110)晶面电阻条布片

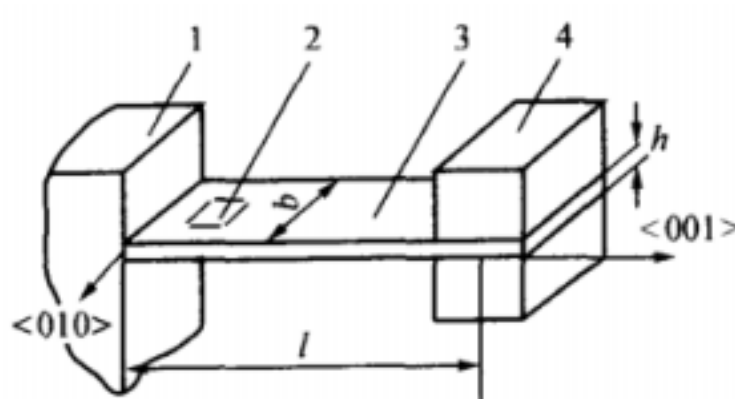


图 2-31 压阻式加速度传感器原理结构
1—基座；2—扩散电阻；3—硅梁；4—质量块。

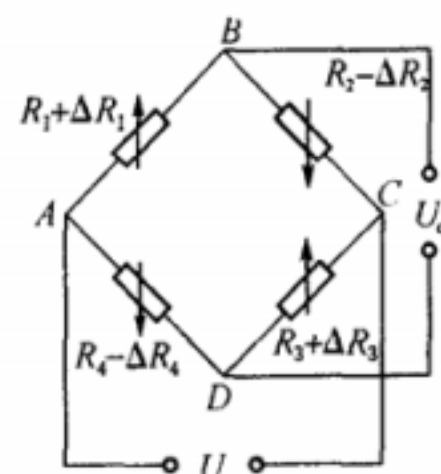


图 2-16 四臂差动电桥

2-15 某扩散硅压力传感器采用（110）晶面 N 型硅膜片，4 个扩散电阻条均径向（即纵向）布置如图 2-30 所示。试说明扩散电阻布置的原则。若电桥供桥电压为 U ，画出电桥原理图，推导电桥输出特性

$[U_0 = f(\frac{\Delta R}{R})]$ 和电压灵敏度 $[K_u = U_0 / \frac{\Delta R}{R}]$

*2-16 一应变片的电阻 $R = 120$ ， $k = 2.05$ ，用作应变片为 $800 \mu \text{ m/m}$ 的传感元件。

（1）求 R/R 和 R ；

（2）若电源电压 $U = 3 \text{ V}$ ，惠斯登电桥初始平衡，求输出电压 U_0 。

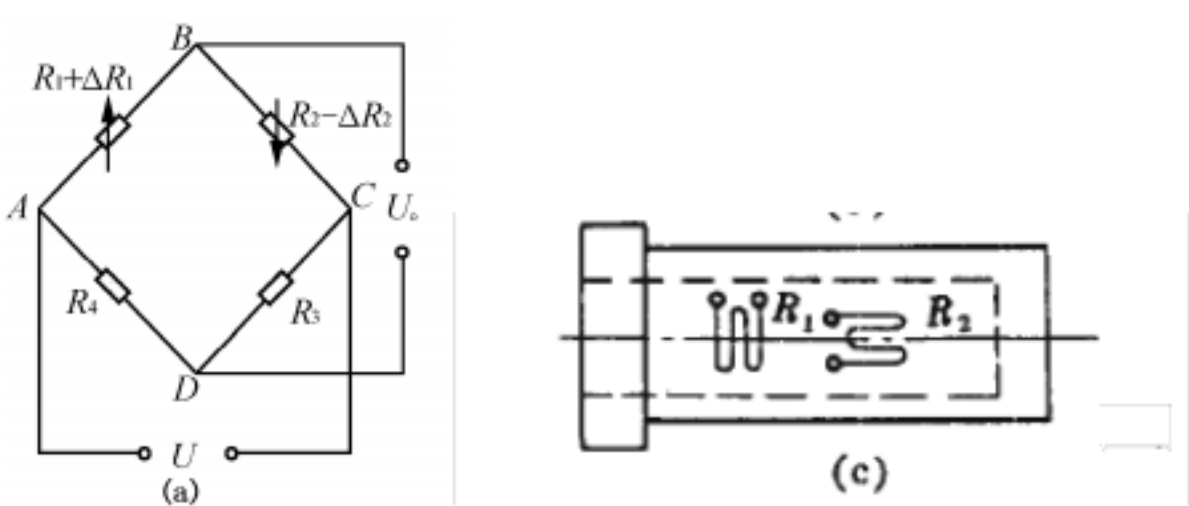
答： $\frac{dR}{R} = [(1 + 2\frac{l}{b}) + C(1 - 2\frac{l}{b})] \epsilon_x = K_m \epsilon_x$ ，此处 $\frac{dl}{l} = \epsilon_x = 800 \mu \text{ m/m}$ ；

所以 $\frac{dR}{R} = K_m \epsilon_x = 1.64 \times 10^{-3}$; $\Delta R = 1.64 \times 10^{-3} \times 120 = 0.197\Omega$;

全桥电路连接时，输出电压可按下式计算：

$U_0 = U \frac{\Delta R}{R}$ 式中 $n = R_2/R_1$ ，为桥臂比；此处取四个电阻相等，所以 $n=1$ ；算得 $U_0=4.92mV$ 。

*2-17 在材料为钢的实心圆柱形试件上，沿轴线和圆周方向各贴一片电阻为 120 的应变片 R1 和 R2 ，把这两片应变片接入差动电桥（如图），若钢的泊松系数 $\mu =0.285$ ，应变片的灵敏度系数 $k=2$ ，电桥电源电压 $U=2V$ ，当试件受轴向拉伸时，测得应变片的电阻变化 $R1=0.48$ ，求电桥的输出电压 U_0 为多少？



答：由 $\frac{\Delta R}{R} = K \epsilon_x$ 轴向应变引起的电阻变化； 可求的轴向应变系数 $\epsilon_x = \frac{\Delta R}{RK} = \frac{0.48}{120 \times 2} = 0.002$;总的应变系数 $\epsilon = \epsilon_x + \epsilon_y = (1 + \mu) \epsilon_x = 1.285 \times 0.002 = 0.00257$ ；

又 $U_0 = \frac{U_i}{4} k \epsilon = 2.57mV$

或：也可以根据分压定律来做。得 $U_0=2.567mV$ 。

2-18 什么是应变效应？什么是压阻效应？什么是横向效应？试说明金属应变片与半导体应变片的相同和不同之处。

2-19 有一吊车的拉力传感器如图所示，电阻应变片 R1、R2、R3、R4 等截面轴上，已知 R1—R4 标称阻值为 120 ，桥路电压 2V ，物重 m 引起 R1、R2 变化增量为 1.2 。请画出应变片电桥电路，计算出测得的输出电压和电桥输出灵敏度， R3、R4 起什么作用？

2-20 在传感器测量电路中， 直流电桥与交流电桥有什么不同， 如何考虑应用场合？用电阻应变片组成的半桥、全桥电路与单桥相比有哪些改善？

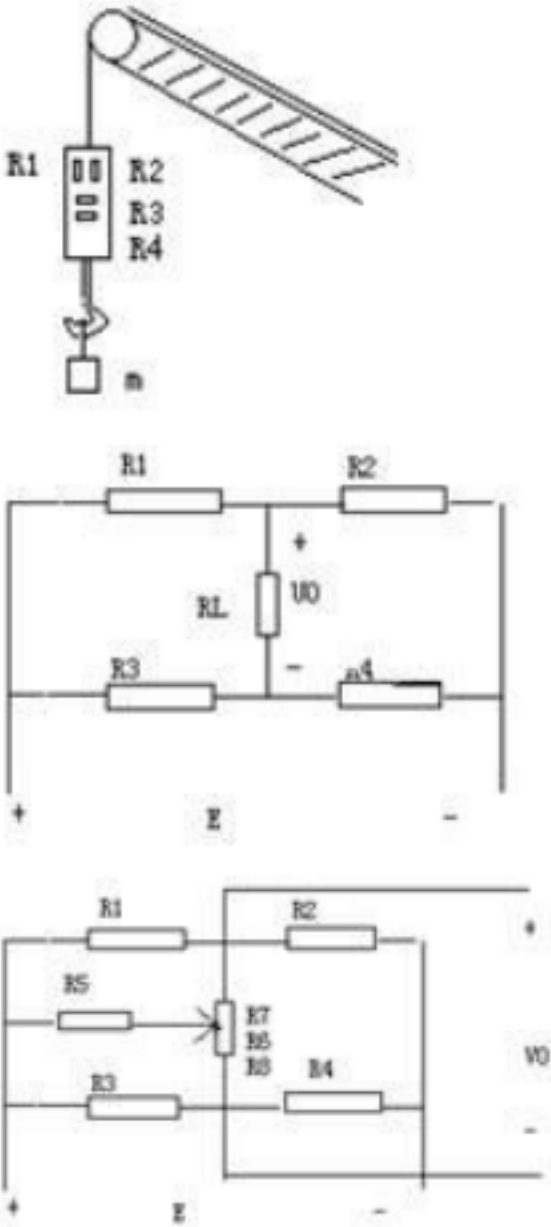
2-21 电桥如图所示：

试推导电桥平衡条件 $V_0 (R_1,R_2,R_3,R_4) =0V$ 。

2-22 电桥预调平衡电路如图，初始不平衡值：

$R_1=348 \Omega$, $R_2=350 \Omega$, $R_3=120 \Omega$,

$R_4=120 \Omega$, $R_5=1K \Omega$, $R_6=20K \Omega$, $E=24V$



求：调节滑片，平衡时 R_7, R_8 的值。平衡后 $R_1/R_2=R_3/R_4$ ，对吗？

2-23 在用直流电桥测量电阻的时候，若标准电阻 $R_n=10.0004$ 的电桥已经平衡（则被测电阻 $R_x=10.0004$ ），但是由于检流计指针偏转在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内时，人眼就很难观测出来，因此 R_n 的值也可能不是 10.0004 ，而是 $R_n=10.0004 \pm R_n$ 。若已知电桥的相对灵敏度 $S_r=1\text{mm}/0.01\%$ ，求对应检流计指针偏转 $\pm 0.3\text{mm}$ 时， R_n ？

解：已知 $\Delta y = 0.3\text{mm}$ ， $R_n = 10.0004\Omega$

$$\therefore S_r = \frac{\Delta y}{\Delta R_n / R_n \times 100\%} = 1\text{mm} / 0.01\%$$

2-24 说明电阻应变片的组成和种类。电阻应变片有哪些主要特性参数？

答：金属电阻应变片由四部分组成：敏感栅、基底、盖层、粘结剂、引线。分为金属丝式和箔式。

其主要特性参数：灵敏系数、横向效应、机械滞后、零漂及蠕变、温度效应、应变极限、疲劳寿命、绝缘电阻、最大工作电流、动态响应特性。

2-25 一个量程为 10kN 的应变式测力传感器，其弹性元件为薄壁圆筒轴向受力，外径 20mm ，内径 18mm ，在其表面粘贴八各应变片，四个沿周向粘贴，应变片的电阻值均为 120 ，灵敏度为 2 ，泊松比为 0.3 ，材料弹性模量 $E=2.1 \times 10^{11}\text{Pa}$ 。要求：

绘出弹性元件贴片位置及全桥电路；

计算传感器在满量程时，各应变片电阻变化；

当桥路的供电电压为 10V 时，计算传感器的输出电压。

答：(1) 全桥电路如右图所示

$$(2) \text{ 圆桶截面积 } A = \pi(R^2 - r^2) = 59.7 \times 10^{-6}$$

应变片 1、2、3、4 感受纵向应变；

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_x$$

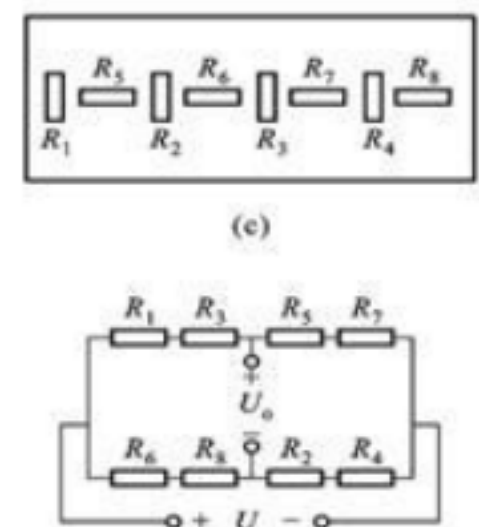
应变片 5、6、7、8 感受纵向应变；

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_6 = \varepsilon_7 = \varepsilon_8 = \varepsilon_y$$

满量程时：

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = k \varepsilon_x R = K \frac{F}{AE} R = 2.0 \times \frac{10 \times 10^3}{59.7 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^{11}} \times 120 = 0.191\Omega$$

$$\Delta R_5 = \Delta R_6 = \Delta R_7 = \Delta R_8 = -\mu \Delta R_1 = -0.3 \times 0.191 = -0.0573\Omega$$



$$(3) \Delta U = \frac{U}{2} K (1 + \mu) \frac{F}{AE} = \frac{10}{2} \times 2.0 \times (1 + 0.3) \frac{F}{59.7 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^{11}} = 1.037 \times 10^{-6} F$$

2-26 应变片产生温度误差的原因及减小或补偿温度误差的方法是什么？

答：敏感元件与弹性元件温度误差不同产生虚假误差，可采用自补偿和线路补偿。

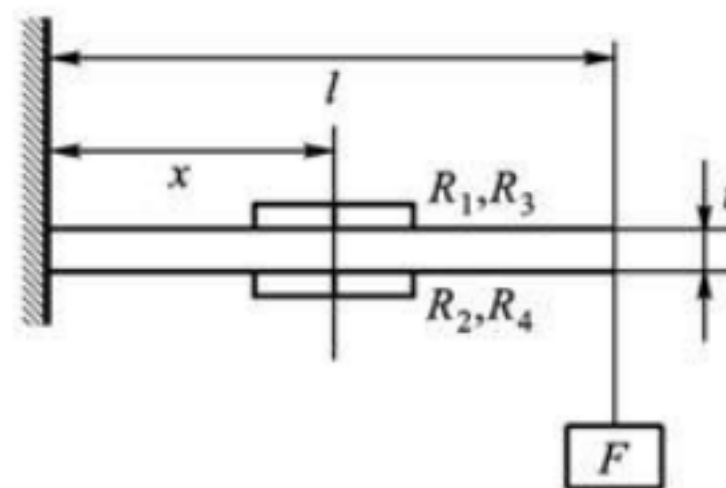
2-27 今有一悬臂梁，如图所示，在其中上部上、下两面各贴两片应变片，组成全桥，该梁在其悬臂梁一端受一向下力 $F=0.5N$ ，试求此时这四个应变片的电阻值。已知：应变片灵敏系数 $K=2.1$ ；应变片空载电阻 $R_0=120$ 。 (已知 $l=25cm$ ， $b=6cm$ ， $t=3mm$ ， $x=1/2l$ ， $E=70 \times 10^5 Pa$)

$$\text{解： } \varepsilon_x = \frac{6(l-x)}{bEt^2} F = 0.1$$

$$\Delta R = KR \varepsilon_x = 2.1 \times 120 \times 0.1 = 25.2 \Omega$$

$$R_1 = R_3 = R + \Delta R = 120 + 25.2 = 145.2 \Omega$$

$$R_2 = R_4 = R - \Delta R = 120 - 25.2 = 94.8 \Omega$$



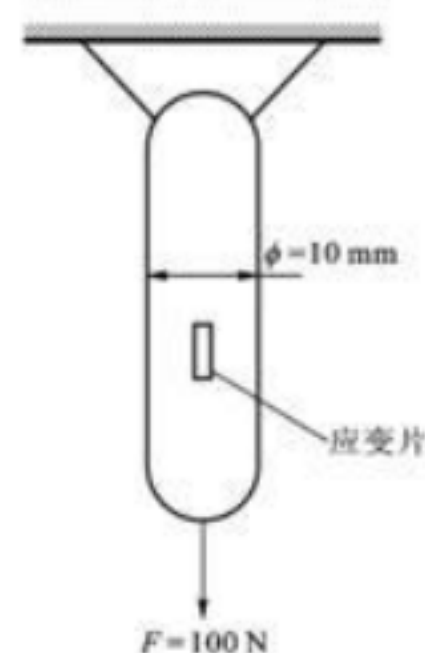
2-28 如图所示一受拉的 10# 优质碳素钢杆。试用允许通过的最大电流为 30mA 的康铜丝应变片组成一单臂受感电桥。试求出此电桥空载时的最大可能的输出电压（应变片的电阻为 120）。

$$\text{解： } \varepsilon_x = \frac{6(l-x)}{bEt^2} F = 19.8$$

$$\Delta R = KR \varepsilon_x = 350 / 0.3 = 1166.7 \Omega$$

$$U_0 = \frac{U}{4} \frac{\Delta R}{R} = 17.5V$$

$$U = 30mA \times 120 \Omega \times 2 = 7.2V$$



2-29 钢材上粘贴的应变片的电阻变化率为 0.1%，钢材的应力为 $10kg/mm^2$ 。

求钢材的应变。

钢材的应变为 300×10^{-6} 时，粘贴的应变片的电阻变化率为多少？

$$\text{解： } \frac{\Delta R}{R} \approx F \frac{\Delta l}{l} \text{ 是 } R/R=2 \text{ (} l/l \text{)。因为电阻变化率是 } R/R=0.001 \text{，所以 } l/l \text{ (应变)} \\ = 0.0005 = 5 \times 10^{-4}。$$

因 $l/l=300 \times 10^{-6}$ ，所以， $R/R=2 \times 300 \times 10^{-6} = 6 \times 10^{-4}$ 。

2-30 截面积为 $1mm^2$ 、长度为 100m 铜线的电阻为多少？具有和它相同电阻的 100m 铝线的截面积为多大？比较此时的铝线重量和铜线重量。

答： $R = (l/S)$ 中，(镍)是 $(95 \sim 104) \times 10^{-8} \cdot m$ ，(铜)是 $1.72 \times 10^{-8} \cdot m$ ，

所以 $R(\text{镍})/R(\text{铜}) = (\text{镍})/(\text{铜}) = (95 \sim 104)/1.72 = 55.2 \sim 60.5$ 。

2-31 试推导惠斯顿电桥输入输出之间的关系。

答：假定输入输出端没有电流流过，流过阻抗 Z_4 和 Z_1 的电流为 i_4 ，流过阻抗 Z_3 和 Z_2 的电流为 i_3 ，由基尔霍夫电压定律得以下关系式：

$$(Z_4 + Z_1) i_4 = (Z_3 + Z_2) i_3 = V_i \quad (1)$$

$$i_4 Z_4 = i_3 Z_3 + V_o \quad (2)$$

$$\text{由 (1) 式得 } i_4 = \frac{V_i}{Z_4 + Z_1} \quad (3)$$

$$i_3 = \frac{V_i}{Z_3 + Z_2} \quad (4)$$

将 (3) 和 (4) 代入 (2) 求得 V_o 为：

$$V_o = i_4 Z_4 - i_3 Z_3 = \left(\frac{Z_4}{Z_4 + Z_1} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_2} \right) V_i = \left[\frac{Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3}{(Z_1 + Z_4)(Z_2 + Z_3)} \right] V_i$$

2-32 参考有关书籍中的地震式加速度传感器的工作原理并推导出公式： $\omega^2 U_0 = p^2 X_0$

答：由等效力学模型得，当有位移输入 $u(t)$ 时，盛物器的相对位移 x 的运动方向为：

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = -m \ddot{u}(t) \quad (1)$$

因此，如果物体以振动频率 f (角频率 $\omega = 2\pi f$)、振幅 U_0 作正弦振动 $u(t) = U_0 \sin \omega t$

则上述微分方程为：

$$\ddot{x} + 2r p \dot{x} + p^2 x = \omega^2 U_0 \sin \omega t, \quad \omega = 2\pi f \quad (2)$$

其中 $p = \sqrt{k/m}$, $r = c/2\sqrt{mk}$

因此，(2) 的特解，求得如下：

$$x(t) = X_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

X_0 , 用 X_0/p 表示，则有

$$X_0 = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2r\lambda)^2}} U_0 \quad (4)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2r\lambda}{1 - \lambda^2} \right) \quad (5)$$

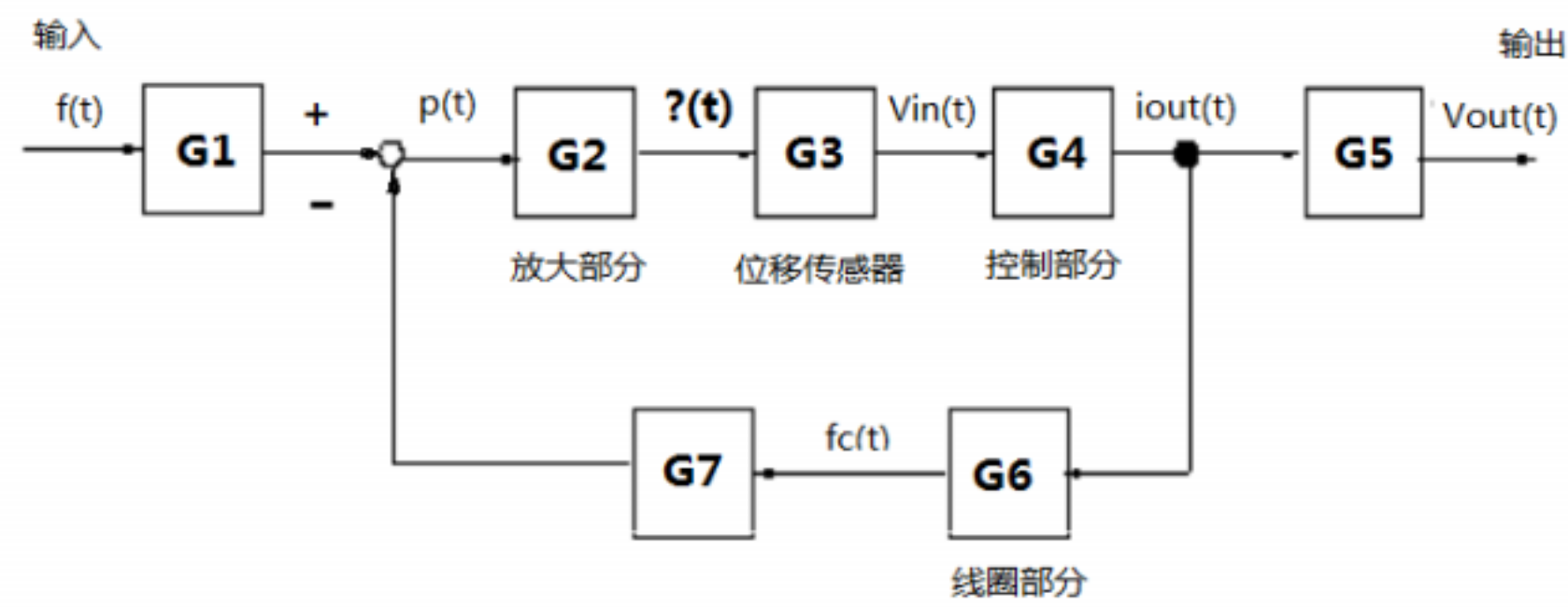
如果 $\lambda \ll 1$ ，则由 (4) 得

$$X_0 = \lambda U_0 = \left(\frac{\omega}{p}\right)^2 U_0 \tag{6}$$

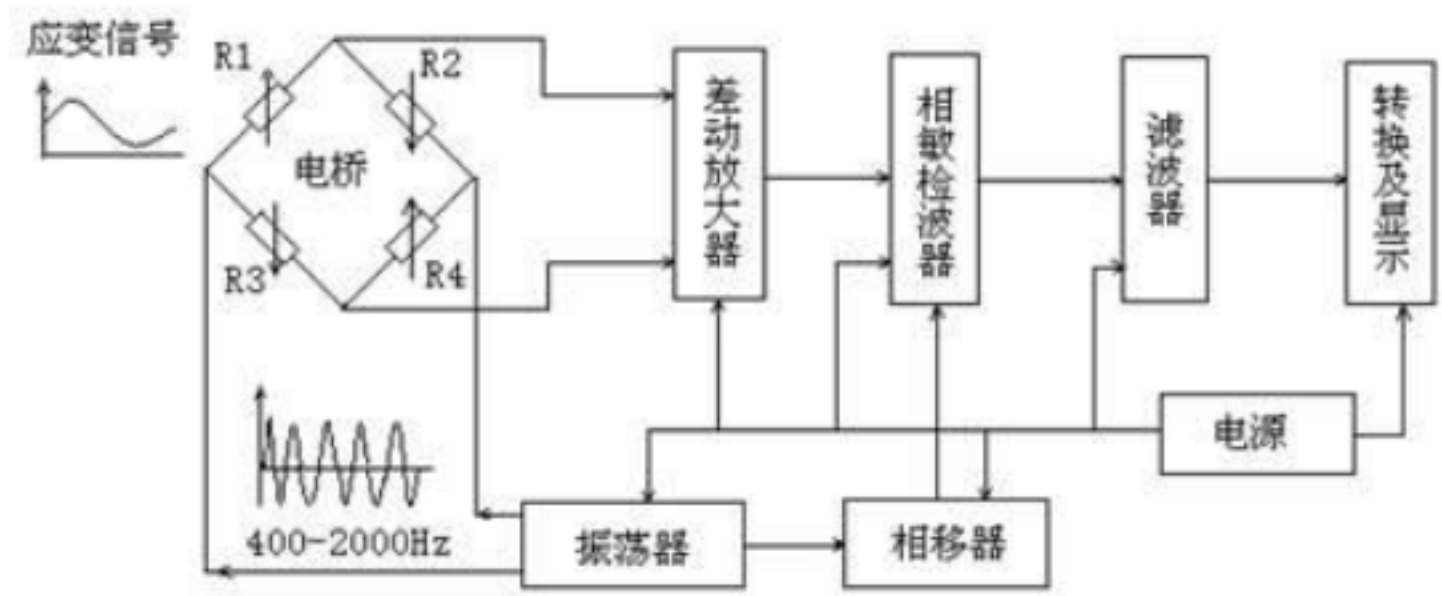
$$\text{即 } p^2 X_0 = \omega^2 U_0, \quad \omega = 2\pi f \tag{7}$$

2-33 给出力平衡测量系统得一个应用实例，并给出系统的信号流方框图。

答：方框图如下：

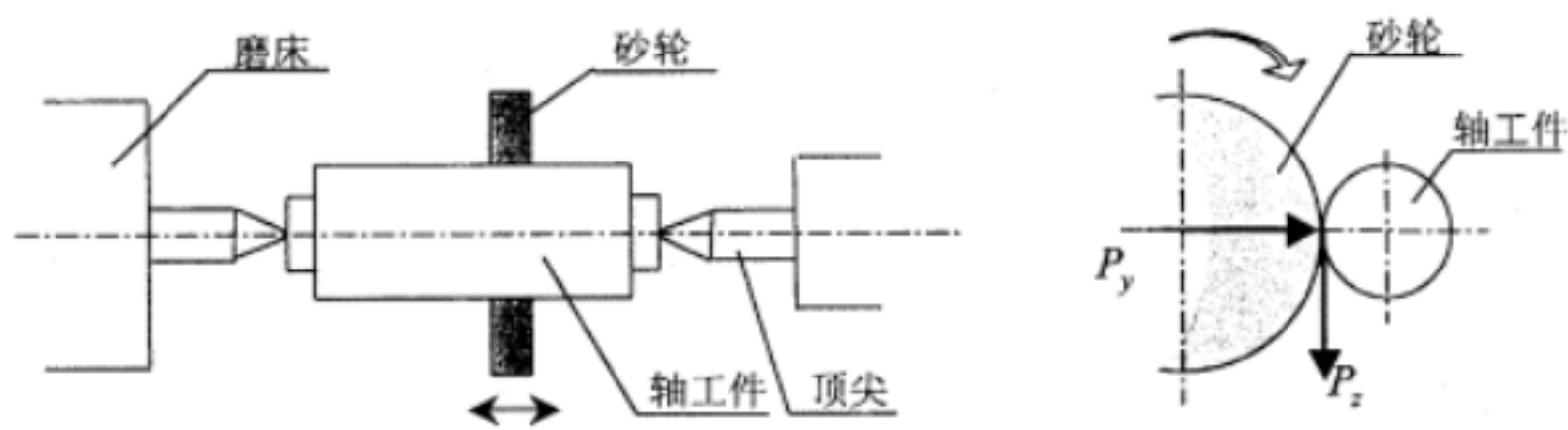


2-34 下图是电阻应变仪电路框图，电桥采用交流供电，应变信号为一正弦变化的信号频率为 20Hz，振荡频率 4KHz。请画出放大器、相敏检波器、低通滤波器的输出波形示意图。



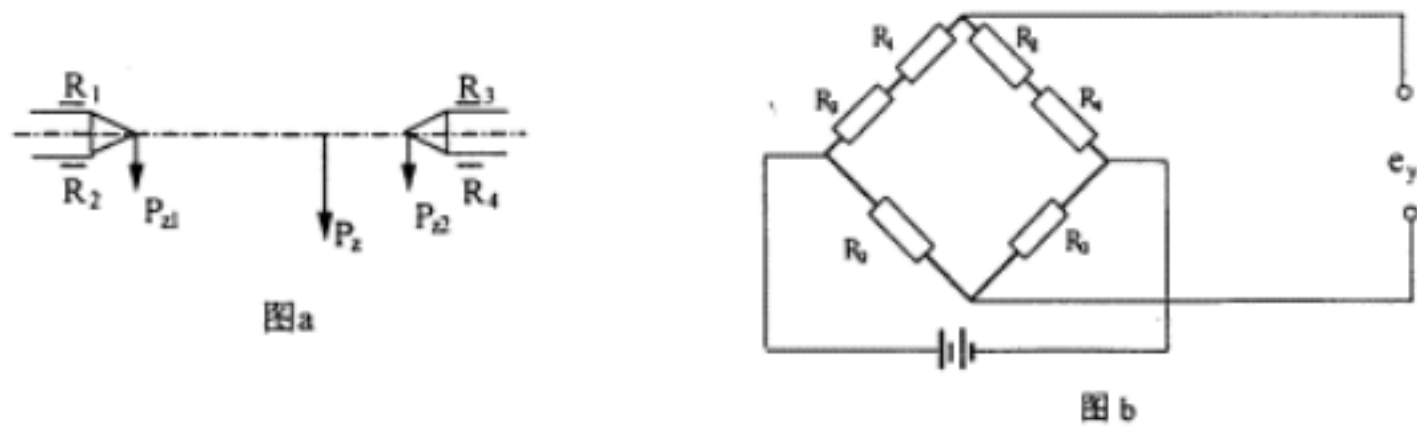
2-35 如图所示，轴工件用前后顶尖支承纵向磨削外园表面，在加工过程中，径向力 P_y 和切向力 P_z 大小基本不变，但着力点位置沿轴向移动，现在前后顶尖上粘贴电阻应变片测量工件所受的 P_z 。

- (1) 在图中标明应变片的位置及 P_z 的测量电桥。
- (2) 着力点移动对测量结果有无影响？为什么？



解：(1) 应变片 (R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4) 粘贴位置如图 a 所示；测量电桥如图 b 所示。

(2) 根据以上位置布片和电桥接法，着力点位置的变化不会影响 P_z 的大小，因为在顶尖上的分力 P_{z1} 、 P_{z2} ， $P_z = P_{z1} + P_{z2}$ ，由 P_{z1} 、 P_{z2} 引起的电阻 R_1 、 R_3 的变化值之和保持不变，故 P_z 的测量不受着力点的移动而改变。



2-36 简述应变片在弹性元件上的布置原则，及哪几种电桥接法具有温度补偿作用。

答：布置原则有：

- (1) 贴在应变最敏感部位，使其灵敏度最佳；
- (2) 在复合载荷下测量，能消除相互干扰；
- (3) 考虑温度补偿作用；

单臂电桥无温度补偿作用，差动和全桥方式具有温度补偿作用。

2-37 简述金属电阻应变片的工作原理。

答：金属电阻应变片的工作原理：是基于金属导体的应变效应，即金属导体在外力作用下发生机械变形时，其电阻值随着它所受机械变形（伸长或缩短）的变化而发生变化的现象。

2-38 为什么用应变片测量时必须采用温度补偿措施？

答：粘贴到试件上的电阻应变片，除感受机械应变而产生电阻相对变化外，在环境温度变化时，也会引起电阻的相对变化，产生虚假应变，因此需采用温度补偿措施。

2-39 简述压阻效应的概念、分类及利用该原理传感器的测量类型。

答：压阻效应：对半导体材料施加应力时，除了产生形变外，材料的电阻率也要发生变化，这种由于应力的作用而使材料的电阻率发生改变的现象称为压阻效应，分为扩散电阻长度方向的纵向压阻效应和扩散电阻宽度方向的横向压阻效应，分别由其压阻系数决定，而压阻系数除了与晶向有关外，还与材料的掺杂浓度有关。利用半导体压阻效应设计成的传感器，基本类型有两种：测压和测加速度。

2-40 一个半导体应变片的灵敏系数为 180，半导体材料的弹性模量为 $1.8 \times 10^5 \text{ Mpa}$ ，其中压阻系数为多少 Pa^{-1} ？

提示： $K = K/E$

2-41 何谓电阻应变传感器？

答：电阻应变传感器是将被测量的应力（压力、负荷、扭力等）通过它所产生的金属弹性变形转换成电阻变化的检测元件。

2-42 电阻丝应变片的工作原理。

答：当外力（或重力）作用于传感器的弹性原件时，弹性原件便产生 $\Delta l / l$ （应变 ϵ ）的相对变形量，电

阻值的相对变化率 $\frac{\Delta R}{R}$ 与应变 $\frac{\Delta l}{l}$ 成正比关系。 $\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}$, 所以, $\frac{\Delta R}{R}$ 与外力 P 成正比关系。

2-43 应变片为什么要进行温度补偿？

答：因为温度变化会造成应变电阻变化，对测量造成误差。

消除这种误差或对它进行修正以求出仅由应变引起的电桥输出的方法。

2-44 为什么必须进行非线性补偿？电阻应变片传感器测量采取何措施？

答：在仪表的基本组成环节中（尤其是灵敏元件）中有许多具有非线性的静特性，为了保证测量仪表的输入与输出之间具有线性关系。所以非线性电阻应变传感器采用桥路接法时，在半导体应变片中对测量值进行修正，或在电路上采取线性补偿措施。

《传感器原理与应用》及《传感器与测量技术》习题集与部分参考答案

教材：传感器技术（第 3 版）贾伯年主编，及其他参考书

第 4 章 电容式传感器

4-1 电容式传感器可分为哪几类？各自的主要用途是什么？

答：（1）变极距型电容传感器：在微位移检测中应用最广。

（2）变面积型电容传感器：适合测量较大的直线位移和角位移。

（3）变介质型电容传感器：可用于非导电散材物料的物位测量。

4-2 试述变极距型电容传感器产生非线性误差的原因及在设计中如何减小这一误差？

答：原因：灵敏度 S 与初始极距 δ_0 的平方成反比，用减少 δ_0 的办法来提高灵敏度，但 δ_0 的减小会导致非线性误差增大。

采用差动式，可比单极式灵敏度提高一倍，且非线性误差大为减小。由于结构上的对称性，它还能有效地补偿温度变化所造成的误差。

4-3 为什么电容式传感器的绝缘、屏蔽和电缆问题特别重要？设计和应用中如何解决这些问题？

答：电容式传感器由于受结构与尺寸的限制，其电容量都很小，属于小功率、高阻抗器，因此极易受外界干扰，尤其是受大于它几倍、几十倍的、且具有随机性的电缆寄生电容的干扰，它与传感器电容相并联，严重影响传感器的输出特性，甚至会淹没有用信号而不能使用。

解决：驱动电缆法、整体屏蔽法、采用组合式与集成技术。

4-4 电容式传感器的测量电路主要有哪几种？各自的目的及特点是什么？使用这些测量电路时应注意哪些问题？

4-5 为什么高频工作的电容式传感器连接电缆的长度不能任意变动？

答：因为连接电缆的变化会导致传感器的分布电容、等效电感都会发生变化，会使等效电容等参数会发生改变，最终导致了传感器的使用条件与标定条件发生了改变，从而改变了传感器的输入输出特性。

述电容测厚仪的工作原理及测试步骤。

4-7 试计算图 P4-1 所示各电容传感元件的总电容表达式。

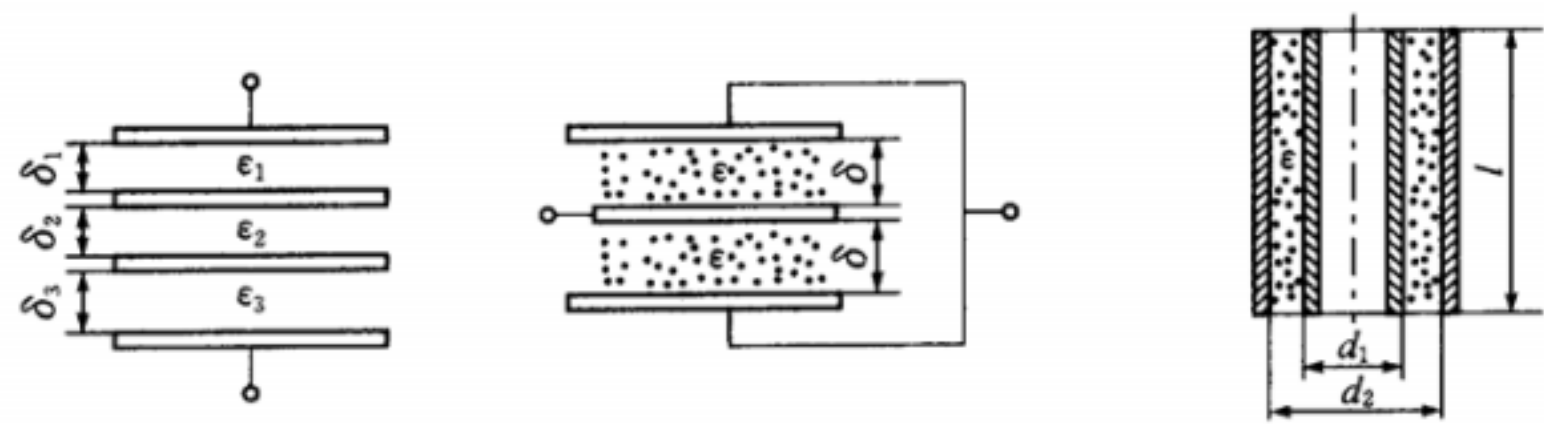


图 P4 - 1

4-8 如图 P4-2 所示，在压力比指示系统中采用差动式变极距电容传感器，已知原始极距 $\delta_1 = \delta_2 = 0.25\text{mm}$ ，极板直径 $D = 38.2\text{mm}$ ，采用电桥电路作为其转换电路，电容传感器的两个电容分别接 $R = 5.1\text{k}\Omega$ 的电阻后作为电桥的两个桥臂，并接有效值为 $U_1 = 60\text{V}$ 的电源电压，其频率为 $f = 400\text{Hz}$ ，电桥的另两桥臂为相同的固定电容 $C = 0.001\mu\text{F}$ 。试求该电容传感器的电压灵敏度。若 $\Delta\delta = 10\mu\text{m}$ 时，求输出电压有效值。

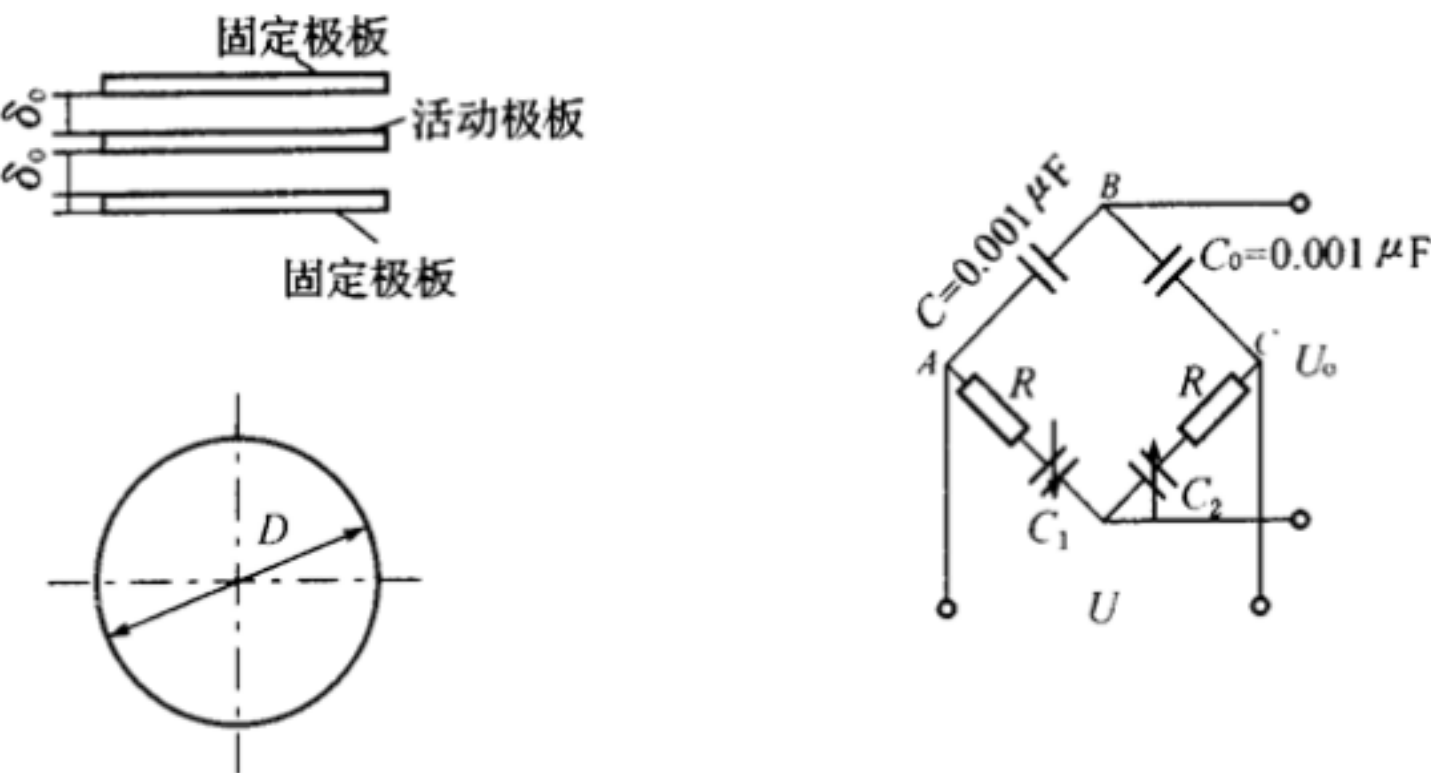
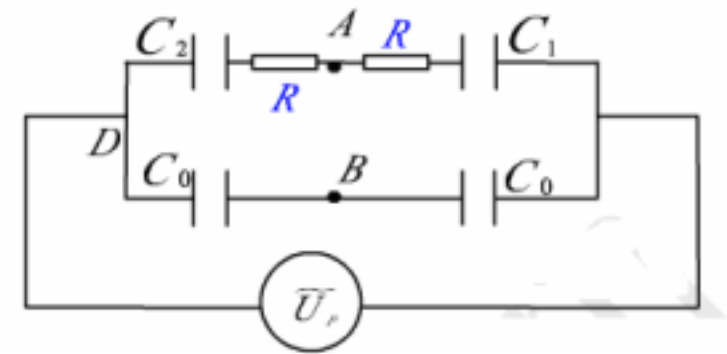


图 P4 - 2

解：等效电路为：



$$U_{sc} = E \left[\frac{Z_{C4}(Z_{C1} + \Delta Z_{C1}) - Z_{C3}(Z_{C2} + \Delta Z_{C2})}{(Z_{C1} + Z_{C4})(Z_{C2} + Z_{C3})} \right] = E \left[\frac{\Delta Z_C}{2Z_{C3}} \right] = E \left[\frac{\Delta C}{2C_1} \right] \approx E \left[\frac{\Delta d}{2d} \right] = 1.2(\text{V}) \text{ K} = \frac{U_{sc}}{\Delta C}$$

从结果看，本定义的电压灵敏度是单位电容变化引起的电压变化。即

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\epsilon_0 \pi (D/2)^2}{d - \Delta d} - \frac{\epsilon_0 \pi (D/2)^2}{d} = 1.707 \text{ pF}$$

所以 $K = \frac{U_{sc}}{\Delta C} \approx \frac{1.2}{1.707} = 0.702(V / pF)$

4-9 变间隙（极距）式电容传感元件如图 P4-3 所示。若初始极板距离 $\delta_0=1mm$ ，当电容 C 的线性度规定分别为 0.1%、1.0%、2.0% 时，求允许的间隙最大变化量 $\Delta\delta_{max} = ?$

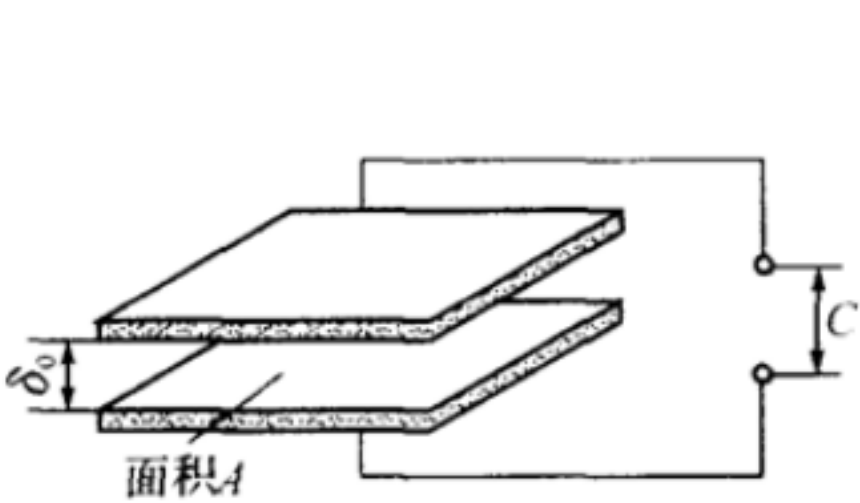


图 P4 - 3

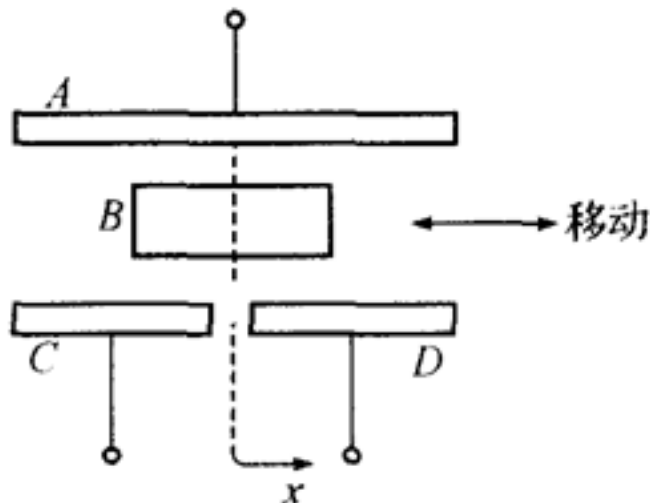


图 P4 - 4

4-10 有一台变极距非接触式电容测微仪，其极板间的极限半径 $r=4mm$ 。假设与被测工件的初始间隙 $\delta_0=0.3mm$ ，试求：

- (1) 若极板与工件的间隙变化量 $\Delta\delta = \pm 10 \mu m$ 时，电容变化量为多少？
- (2) 若测量电路的灵敏度 $K_0=100mV/pF$ ，则在 $\Delta\delta = \pm 1 \mu m$ 时的输出电压为多少？

4-11 差动非接触式电容位移传感器如图 P4-4 所示，由四块置于空气中的平行平板组成。其中极板 A、C 和 D 是固定的，极板 B 可如图示移动，其厚度为 t ，并距两边固定极板的距离为 a ，极板 B、C 和 D 的长度为 l ，极板 A 的长度为 $2l$ 。所有极板的宽度均为 b ，极板 C 与 D 之间的间隙以及边缘效应可以忽略。试导出极板 B 从中点移动 $x = \pm l / 2$ 时电容 C_{AC} 和 C_{AD} 的表达式， $x=0$ 为对称位置。

4-12 图 4-5 所示为油量表中的电容传感器简图，其中 1、2 为电容传感元件的同心圆筒（电极），3 为箱体。已知： $R_1=12mm$ ， $R_2=15mm$ ；油箱高度 $H=2m$ ，汽油的介电常数 $\epsilon_r=2.1$ 。求：同心圆筒电容传感器在空箱和注满汽油时的电容量。

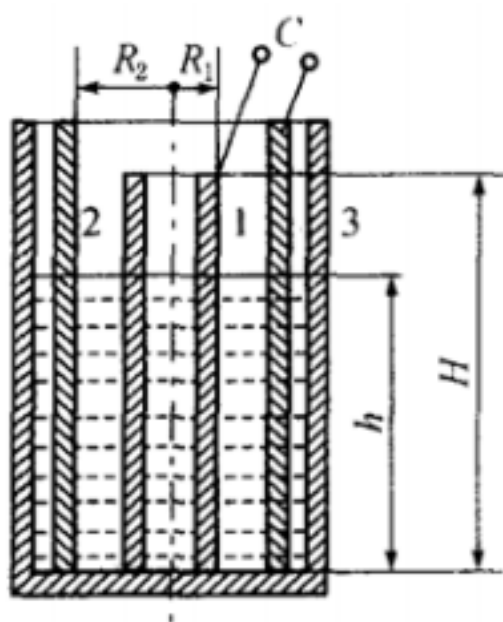


图 P4-5

4-13 图 P4-6 所示为某差动电容传感器的实用电路原理图。已知 C_1 、 C_2 为变间隙式差动电容， C_{L1} 、 C_{L2} 、 C_{L3} 为滤波电容，其电容值远大于 C_1 、 C_2 ； U 为恒流源，在工作中保证 $I_0 R = \text{常数}$ ，测量电路的输出电压为 U_0 。试推导输入位移与输出电压 U_0 间的关系式，并分析之。

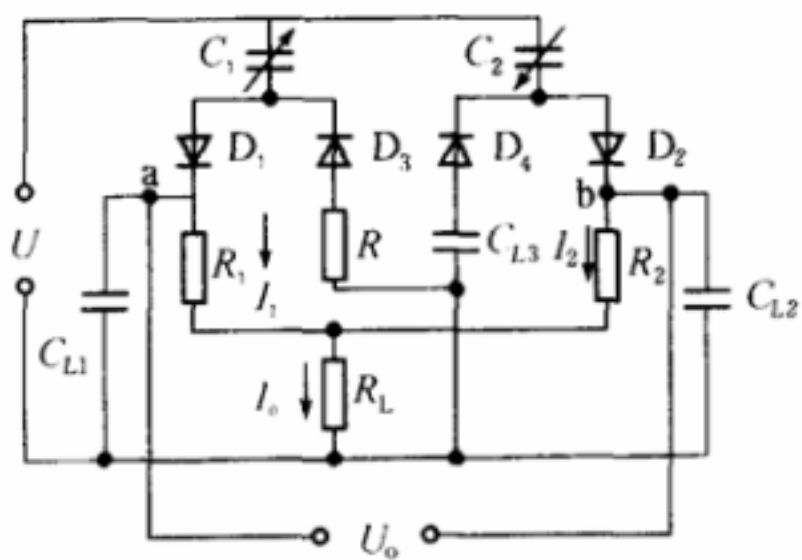
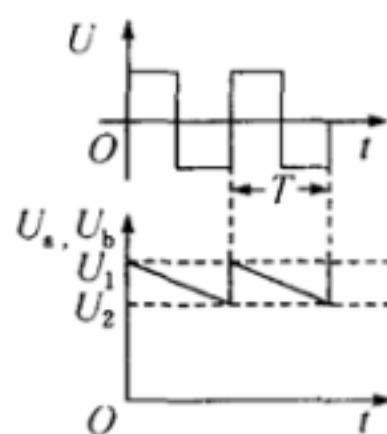


图 P4-6



*4-14 有一只变极距电容传感元件，两极板重叠有效面积为 $8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，两极板间的距离为 1 mm ，已知空气的相对介电常数是 1.0006 ，试计算该传感器的位移灵敏度。

答：由变极距型电容传感器知识可知，其位移灵敏度 $k_g = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \delta} \approx \frac{1}{\delta_0}$ ，

由已知条件可知 $\delta_0 = 1$ ，代入数据可以求得： $k_g = 1$ 。

*4-15 简述电容式传感器的工作原理。

答：有物理知识可知，物体间的电容量 $C = \frac{\epsilon S}{\delta} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{\delta}$ ，电容式传感器的基本原理就是基于物体间的电

容量与其结构参数之间的关系来实现。也即当被测参数变化使得上式中的 S 、 δ 或 ϵ_r 发生变化时，电容量 C 也随之变化。如果保持其中两个参数不变，而仅改变其中一个参数，就可把该参数的变化转换为电容量的变化 ΔC ，这就组成了电容式传感器。

*4-16 采用运算放大器作为电容传感器的测量电路，其输出特性是否为线性？为什么？

答：采用运算放大器作为电容传感器的测量电路时，其输出 / 输入特性关系为：
$$\dot{U}_0 = -\frac{C\delta}{\varepsilon S} \dot{U}_i。$$

可见运算放大器的输出电压与极板间距离 成线性关系。因此，运算放大器式电路解决了单个变极板间距电容传感器的非线性问题。但要求输入阻抗 Z_i 及放大倍数足够大。同时，为保证仪器精度，还要求电源电压的幅值和固定电容 C 值稳定。

4-17 电容传感器有哪些类型？

4-18 叙述电容传感器的工作原理，输出特性。

4-19 为什么电感式和电容式传感器的结构多采用差动形式，差动结构形式的特点是什么？

4-20 电容传感器的测量电路有哪些？叙述二极管双 T 型交流电桥工作原理。

4-21 说明差动式电容压力传感器结构和工作原理。

4-22 已知变面积型电容传感器的两极板间距离为 $d=10\text{mm}$; $\varepsilon=50\mu\text{F/m}$; 两极板几何尺寸一样为 $30\text{mm}\times 20\text{mm}\times 5\text{mm}$ (长 * 宽 * 厚); 在外力作用下动极板在原位置向外移动 10mm (宽); 试求 $C=?$ 。

4-23 差动式电容测厚传感器系统的工作原理？

4-24 电容传感器的双 T 电桥测量电路，已知

$R_1=R_2=R=40\text{K}\Omega$, $R_L=20\text{K}\Omega$,

$E=10\text{V}$, $f=1\text{MHz}$, $C_1=10\text{pF}$, $\Delta C_1=1\text{Pf}$ 。

求 U_L 的表达式，带入参数求 U_L 的值。

4-25 推导差动式电容传感器的灵敏度，并与单极式电容传感器相比较。

答：差动式电容传感器的灵敏度比单极式提高一倍，而且非线性也大为减小。

4-26 根据电容传感器的工作原理说明它的分类，电容传感器能够测量哪些物理参量？

答：原理：由物理学知，两个平行金属极板组成的电容器。如果不考虑其边缘效应，其电容为 $C=\varepsilon S/D$ 式中 ε 为两个极板间介质的介电常数， S 为两个极板对有效面积， D 为两个极板间的距离。由此式知，改变电容 C 的方法有三：

其一为改变介质的介电常数；

其二为改变形成电容的有效面积；

其三为改变各极板间的距离；

而得到的电参数的输出为电容值的增量这就组成了电容式传感器。

类型：

变极距型电容传感器、变面积型电容传感器、变介电常数型电容传感器。

电容传感器的应用：

可用来测量直线位移、角位移、振动振幅。尤其适合测温、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、粮食中的水分含量、非金属材料的涂层、油膜厚度、测量电介质的湿度、密度、厚度等。

4-27 有一个直径为 2m、高 5m 的铁桶，往桶内连续注水，当注水数量达到桶容量的 80% 时就应当停止，试分析用应变片式或电容式传感器系统来解决该问题的途径和方法。

答：可选用差分式电容压力传感器，通过测量筒内水的重力，来控制注水数量。或者选用应变片式液位传感器。

4-28 总结电容式传感器的优缺点，主要应用场合以及使用中应注意的问题。

答： 优点： a 温度稳定性好

b 结构简单、适应性强

c 动响应好

缺点： a 可以实现非接触测量，具有平均效应

b 输出阻抗高、负载能力差

c 寄生电容影响大

输出特性非线性：

电容传感器作为频响宽、应用广、非接触测量的一种传感器，在位移、压力、厚度、物位、湿度、振动、转速、流量及成分分析的测量等方面得到了广泛的应用。

使用时要注意保护绝缘材料的绝缘性能；消除和减小边缘效应；消除和减小寄生电容的影响；防止和减小外界干扰。

4-29 试推导图 F1-8 所示变电介质电容式位移传感器的特性方程 $C=f(x)$ 。设真空的介电系数为 ϵ_0 ， $\epsilon_1 > 1$ ，以及极板宽度为 W 。其他参数如图 F1-8 所示。

$$\text{解： } C = \frac{\epsilon_0^2 \epsilon_1 \epsilon_2 (l-x)W}{(\epsilon_0 - d / \epsilon_0 \epsilon_1 + \epsilon_0 \epsilon_2 d)} + \frac{xW\epsilon_0 \epsilon_2}{\epsilon_0}$$

4-30 在上题中，设 $d=1\text{mm}$ ，极板为正方形（边长 50mm）。 $\epsilon_1=1$ ， $\epsilon_2=4$ 试在 $x=0$ 到 50mm 范围内，输出磁位移传感器的特性曲线，并给以适当说明。

4-31 简述电容式传感器用差动脉冲调宽电路的工作原理及特点。

答：工作原理：假设传感器处于初始状态，即 $C_{x1} = C_{x2} = C_0$ ，且 A 点为高电平，即 $U_a=U$ ；而 B 点为低电平，即 $U_b=0$ 差分脉冲调宽型电路的特点就在于它的线性变换特性。

4-32 电容式传感器有哪些优点和缺点？

答：优点：（1）测量范围大。金属应变丝由于应变极限的限制， R/R 一般低于 1%，而半导体应变片可达 20%，电容传感器电容的相对变化量可大于 100%；

（2）灵敏度高。如用比率变压器电桥可测出电容，其相对变化量可以大致 10^{-7} ；

（3）动态响应时间短。由于电容式传感器可动部分质量很小，因此其固有频率很高，适用于动态信号的测量；

（4）机械损失小。电容式传感器电极间吸引力十分微小，又无摩擦存在，其自然热效应甚微，从而保证传感器具有较高的精度；

（5）结构简单，适应性强。电容式传感器一般用金属作电极，以无机材料（如玻璃、石英、陶瓷等）作绝缘支承，因此电容传感器能承受很大的温度变化和各种形式的强辐射作用，适合于恶劣环境中工作。

电容式传感器有如下缺点：

（1）寄生电容影响较大。寄生电容主要指连接电容极板的导线电容和传感器本身的泄漏电容。寄生电容

的存在不但降低了测量灵敏度，而且引起非线性输出，甚至使传感器处于不稳定的工作状态。

(2) 当电容式传感器用于变间隙原理进行测量时具有非线性输出特性。

4-33 键在和寄生电容的存在对电容传感器有什么影响？一般采取哪些措施可以减小其影响。

答：改变传感器总的电容量，甚至有时远大于应该传递的信号引起的电容的变化；使传感器电容变的不稳定，易随外界因素的变化而变化。

可以采取静电屏蔽措施和电缆驱动技术。

4-34 如何改善单极式变极距型电容传感器的非线性？

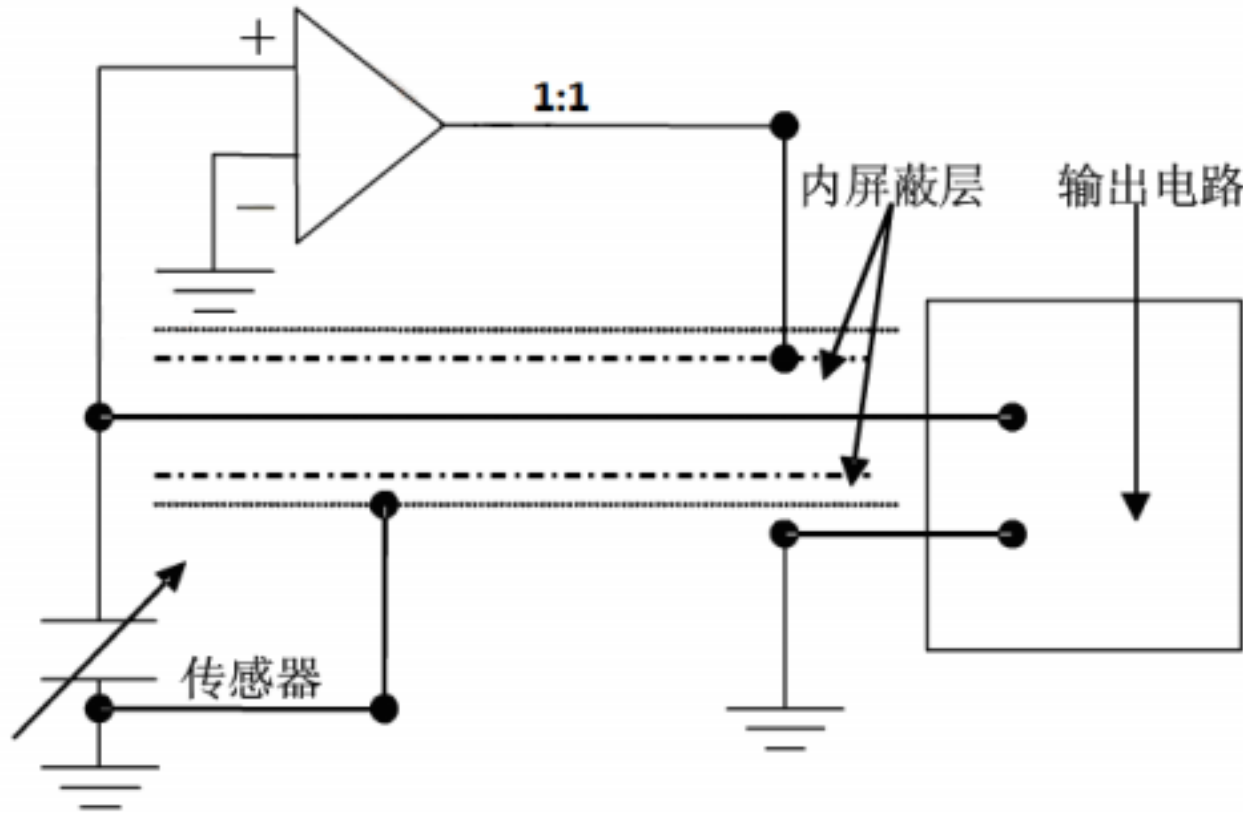
答：采用可以差动式结构，可以使非线性误差减小一个数量级。

4-35 什么叫驱动电缆技术？

答：驱动电缆技术是指传感器与后边转换输出电路间引线采用双层屏蔽电缆，而且其内屏蔽层与信号传输线（芯线）通过 1:1 放大器实现等电位，由于屏蔽电缆上有随传感器输出信号变化而变化的信号电压，所以称之为“电缆驱动技术”。

它能有效地消除芯线与屏蔽层之间的寄生电容。

其中，外屏蔽线则是用来接地以防止其他外部电场干扰，起到一般屏蔽层的作用。内、外屏蔽层之间仍存在寄生电容则成为 1:1 放大器的负载，所以，该 1:1 放大器是一个具有极高输入阻抗（同相输入）、放大倍数为 1、具有容性负载的同相放大器。这种“驱动电缆技术”的线路比较复杂，要求也比较高，但消除寄生电容的影响极好，它在传感器输出电容变化只有 1pF 时仍能正常识别、工作。



4-36 答：差动脉冲宽度调制电路通过双稳态出发器的 Q 端、/Q 端依次借 R1、R2、D1、D2 对差动 C1、C2 充放电，在双稳态触发器的两输出端各自产生一宽度受 C1、C2 调制的方波脉冲。差动电容的变化使充电时间不同，从而使双稳态触发器输出端的方波脉冲宽度不同。因此，A、B 两点间输出直流电压 USC 也不同，而且具有线形输出特性。此外调宽线路还具有如下特点：与二极管式线路相似，不需要附加解调器即能获得直流输出；输出信号一般为 100kHz-1MHz 的矩形波，所以直流输出只需低通滤波器简单地引出。由于低通滤波器的作用，对输出波形纯度要求不高，只需要一电压稳定度较高的直流电源，这比其他测量线路中要求高稳定度的稳频、稳幅交流电源易于做到。

4-37 球-平面型电容式差压变送器在结构上有何特点？

答：利用可动的中央平面金属板与两个固定的半球形状的上下电极构成差动式电容传感器。

4-38 为什么高频工作时的电容式传感器其连接电缆不能任意变化？

答：因为连接电缆的变化会导致传感器的分布电容、等效电感都会发生变化，会使等效电容等参数会发生改变，最终导致了传感器的使用条件与条件发生了改变，从而改变了传感器的输入输出特性。

4-39 如图 3-6 所示平板式电容位移传感器。已知：极板尺寸 $a=b=4\text{mm}$ ，间隙 $d_0=0.5\text{mm}$ ，极板间介质为空气。求该传感器静态灵敏度；若极板沿 x 方向移动 2mm，求此时电容量。

解：
$$K = \frac{C_0}{a} = \frac{\epsilon_r S}{a \times 3.6\pi d} = \frac{4 \times 4 \times 10^{-2}}{4 \times 10^{-4} \times 3.6\pi \times 0.5 \times 10^{-4}} = 0.707 (\text{pF} / \text{cm})$$

$$C = \frac{\epsilon_r S}{3.6\pi d} = \frac{2 \times 4 \times 10^{-2}}{3.6\pi \times 0.5 \times 10^{-1}} = 0.142(\text{pF})$$

4-40 如图所示差动同心圆筒电容传感器，其可动极筒外径为 9.8mm。定极筒内径为 10mm，上下遮盖长度各为 1mm 时，试求电容值 C1 和 C2。当供电电源频率为 60kHz 时，求它们的容抗值。

$$\text{解：因为 } C_1 = C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(R_2/R_1)} = \frac{2\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1 \times 10^{-3}}{\ln(10/9.8)} = 2.75\text{pF}$$

$$Z_1 = Z_2 = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 10^3 \times 2.75 \times 10^{-12}} = 9.65 \times 10^5 \Omega = 9.65\text{k}\Omega$$

$$4-41 \quad \text{解：(1) A} \quad \text{无云母 } C_1 = \frac{\epsilon_0 \pi (D/2)^2}{0.2} \times 10^{-3} = 86.8\text{pF}$$

B 为空气部分与介质部分串联，即

$$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_{\text{空}}} + \frac{1}{C_{\text{介}}} = \frac{1}{\frac{\epsilon_0 \pi (D/2)^2}{0.1} \times 10^{-3}} + \frac{1}{\frac{\epsilon_0 \pi (D/2)^2 \epsilon_r}{0.1} \times 10^{-3}} \Rightarrow C_2 = 151.97\text{pF}$$

$$(2) \quad \frac{\Delta C_1}{C_{10}} = \frac{C_{10} - C_1'}{C_{10}} = \frac{86.8 - \frac{\epsilon_0 \pi (D/2)^2}{0.175} \times 10^{-3}}{86.8} = \frac{86.8 - 99.2}{86.8} = 0.1428 = 14.28\%$$

$$\frac{1}{C_2'} = \frac{1}{C_{\text{空}}} + \frac{1}{C_{\text{介}}} = \frac{1}{\frac{\epsilon_0 \pi (D/2)^2}{0.075} \times 10^{-3}} + \frac{1}{\frac{\epsilon_0 \pi (D/2)^2 \epsilon_r}{0.1} \times 10^{-3}} \Rightarrow C_2' = 194.5\text{pF}$$

$$\frac{\Delta C}{C_2} = \frac{C_2 - C_2'}{C_2} = \frac{152 - 194.5}{152} = 0.2796 = 28\%$$

$$4-42 \quad \text{解：} K = \frac{\Delta C}{P}$$

$$\begin{aligned} \Delta C &= \int_0^a \frac{\epsilon_0 ds}{d} = \int_0^a \frac{\epsilon_0 2\pi r dr}{y} = \int_0^{a^2} \frac{\epsilon_0 \pi dr^2}{\frac{3P(1-\mu^2)(a^2-r^2)^2}{16Et^3}} = \int_0^{a^2} \frac{\epsilon_0 \pi d(a^2-r^2)}{\frac{3P(1-\mu^2)(a^2-r^2)^2}{16Et^3}} \\ &= \frac{\epsilon_0 \pi}{\frac{3P(1-\mu^2)}{16Et^3}} \int_0^{a^2} \frac{d(a^2-r^2)}{(a^2-r^2)^2} = \frac{16\epsilon_0 \pi Et^3}{3P(1-\mu^2)} \end{aligned}$$

4-43 解：由 3-12 式知

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d^2} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 8 \times 10^{-4}}{10^{-6}} = 7.08 \times 10^{-9} = 7.08(\text{pF/mm})$$

4-44 解：零点迁移电容应该是指容器中全部为气体时的电容值，即

$$C_{\text{零}} = \frac{\varepsilon 2\pi H}{\ln(D/d)} = \frac{13.27 \times 2\pi \times 20 \times 10^{-12}}{\ln[4.2/(3 \times 10^{-3})]} = 230.07 \text{ pF}$$

满量程电容值指 $\Delta C_{\text{max}} = \text{全部为液体时的电容值} - \text{全部为气体时的电容值}$ ，即

$$C_{\text{液}} - C_{\text{零}} = \frac{2\pi H}{\ln(D/d)} (\varepsilon_{\text{液}} - \varepsilon_{\text{气}}) = \frac{2\pi \times 20 \times 10^{-12}}{\ln[4.2/(3 \times 10^{-3})]} (39.82 - 13.23) = 460.32 \text{ pF}$$

4-45 解：

$$I = \frac{C_L - C_H}{C_L + C_H} I_C = \frac{\frac{C_0 C_A}{C_A - C_0} - \frac{C_0 C_A}{C_A + C_0}}{\frac{C_0 C_A}{C_A - C_0} + \frac{C_0 C_A}{C_A + C_0}} I_C = \frac{C_0}{C_A} I_C$$

参考相应的图和式子有 $dC_A = \frac{\varepsilon 2\pi r' dr'}{y}$

$$C_A = \int_0^b \frac{\varepsilon 2\pi r' dr'}{y} = \int_0^b \frac{\varepsilon 2\pi r' dr'}{K_{\omega}(P_H - P_L)} = \frac{\varepsilon \pi b^2}{K_{\omega}(P_H - P_L)}$$

$$\text{因为 } C_0 = \frac{\varepsilon_r R}{1.8} \ln \frac{d_0}{d_R}$$

$$\text{所以 } I = \frac{C_0}{C_A} I_C = \frac{\frac{\varepsilon_r R}{1.8} \ln \frac{d_0}{d_R}}{\frac{\varepsilon \pi b^2}{K_{\omega}(P_H - P_L)}} = \frac{\varepsilon_r R K_{\omega}}{1.8 \varepsilon \pi b^2} \ln \frac{d_0}{d_R} (P_H - P_L) = \frac{\varepsilon_r R K_{\omega}}{1.8 \varepsilon \pi b^2} \ln \frac{d_0}{d_R} \Delta P$$

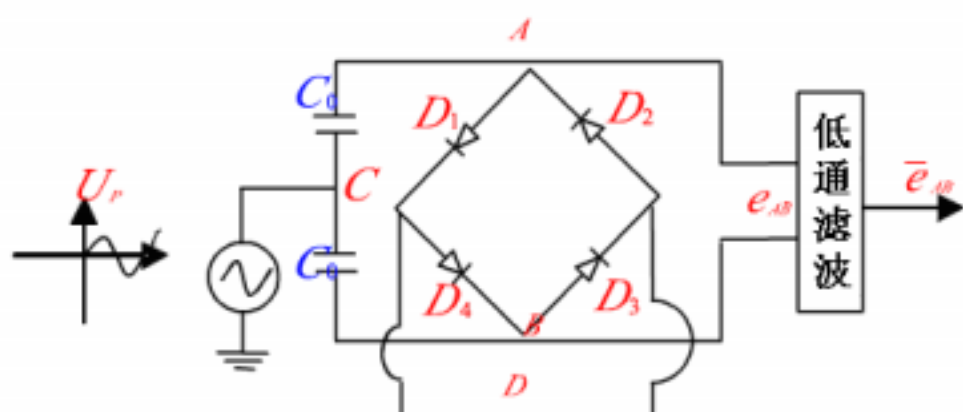
4-46 解：信号为正半周时，D1、D3 导通，负半周时，D2、D4 导通，等效电路如图 1。

若 $C_1 = C_2$ ，则 $e_{AB} = U_{SC} = 0$

若 $C_1 \neq C_2$ ，则

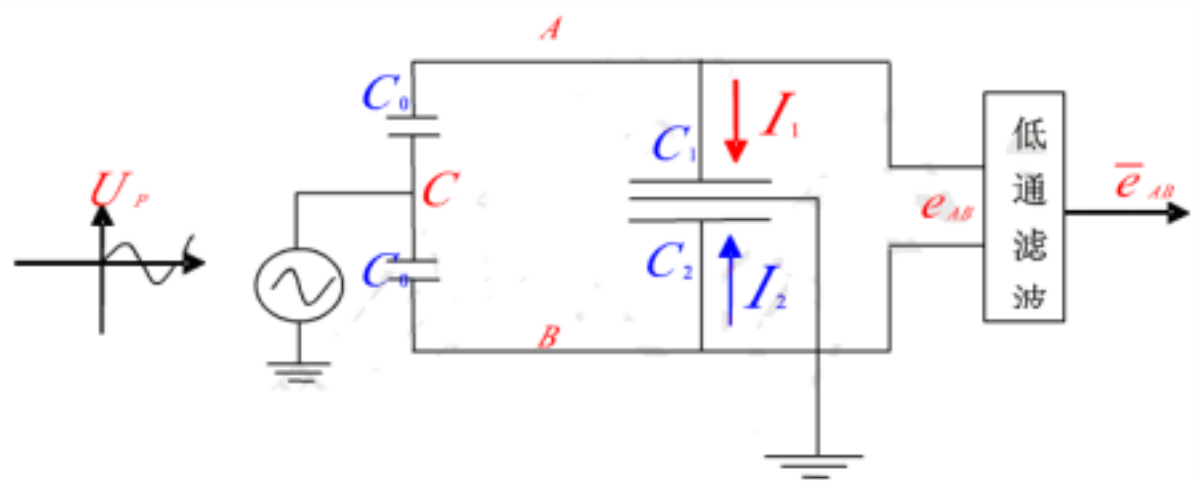
$$U_{SC} = \frac{\beta A}{(1 + A)^2} E, \quad A = \frac{Z_1}{Z_2} = 1$$

$$\text{知 } U_{SC} = \frac{\beta A}{(1 + A)^2} E = \frac{\beta}{4} E$$



又因为是差动输出，所以
$$U_{sc} = \frac{\beta}{2} E = \frac{\Delta Z}{2Z} E = \frac{C_1 - C_2}{2C_1} E$$

由其它式也可以求出同样的结果。



4-47 解：当电源为正半周时 D1、D3 导通，D2、D4 截止， $E_2 \rightarrow D_1 \rightarrow C \rightarrow$ 对 C_H 充电，通过 C_E 的电荷为 $q_1 = C_0(E_2 - E_1) \downarrow \rightarrow C_E \rightarrow B \rightarrow D_3 \rightarrow D$ 对 C_0 充电；

当电源为负半周时 D2、D4 导通，D1、D3 截止， $C_H \rightarrow C \rightarrow D_2 \rightarrow B \rightarrow C_E \rightarrow A$ 放电，通过 C_E 的电荷为 $q_2 = C_H(E_2 - E_1) \downarrow C_0 \rightarrow D \rightarrow D_4 \rightarrow A$ 放电；

所以在一个周期内通过 C_H 的净电荷量为 $q = (q_2 - q_1) = (C_H - C_X)(E_2 - E_1)$

于是通过 M 表回路在一个周期内释放的电荷为 $q = (C_H - C_X)(E_2 - E_1)$

所以，在一个周期内通过 M 表的电流的平均值为：

$I = fq = (C_H - C_X)(E_2 - E_1) \times f = \Delta C_X \Delta E \times f$ ，式中 f 为电源的频率。

4-48 根据工作原理可将电容式传感器分为哪几种类型？各自用途是什么？

答：根据电容式传感器的工作原理，电容式传感器有三种基本类型，即变极距型（又称变间隙型）、变面积型和变介电质型。变间隙型可测量位移，变面积型可测量直线位移、角位移、尺寸，变介电质型可测量液体液位、材料厚度等。

第 5 章 磁电式传感器习题集与部分参考答案

5-1 阐明磁电式振动速度传感器的工作原理，并说明引起其输出特性非线性性的原因。

5-2 试述相对式磁电测振传感器的工作原理和工作频率范围。

5-3 试分析绝对式磁电测振传感器的工作频率范围。如果要扩展其测量频率范围的下限应采取什么措施；若要提高其上限又可采取什么措施？

5-4 对永久磁铁为什么要进行交流稳磁处理？说明其原理。

5-5 为什么磁电式传感器要考虑温度误差？用什么方法可减小温度误差？

5-6 已知某磁电式振动速度传感器线圈组件（动圈）的尺寸如图 P5-1 所示：D1=18mm，D2=22mm，L=39mm，工作气隙宽 Lg=10mm，线圈总匝数为 15000 匝。若气隙磁感应强度为 0.5515T，求传感器的灵敏度。

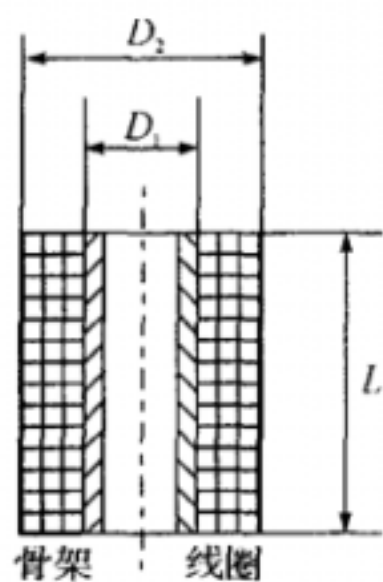


图 P5 - 1

5-6 解：已知 $D_1=18\text{mm}$, $D_2=22\text{mm}$, $L=39\text{mm}$, $L_g=10\text{mm}$, $W=15000$ 匝 , $B_g=0.5515\text{T}$

工作气隙的线圈匝数 $W_g = (\text{总匝数 } W / \text{线圈长度 } L) * \text{气隙长度 } L_g$

$$K = B_g I_0 W_g , I_0 = \frac{\pi (D_1 + D_2)}{2}$$

5-7 某磁电式传感器固有频率为 10Hz , 运动部件 (质量块) 重力为 2.08N , 气隙磁感应强度 $B_g=1\text{T}$, 工作气隙宽度为 $t_g=4\text{mm}$, 阻尼杯平均直径 $D_{CP}=20\text{mm}$, 厚度 $t=1\text{mm}$, 材料电阻率

$\rho = 1.74 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ 。试求相对阻尼系数 $\zeta = ?$ 若欲使 $\zeta = 0.6$, 问阻尼杯壁厚 t 应取多大?

5-8 某厂试制一磁电式传感器 , 测得弹簧总刚度为 18000N/m , 固有频率 60Hz , 阻尼杯厚度为 1.2mm 时 , 相对阻尼系数 $\zeta = 0.4$ 。今欲改善其性能 , 使固有频率降低为 20Hz , 相对阻尼系数 $\zeta = 0.6$, 问弹簧总刚度和阻尼杯厚度应取多大?

5-9 已知惯性式磁电速度传感器的相对阻尼系数 $\zeta = 1/\sqrt{2}$, 传感器 -3dB 的下限频率为 16Hz , 试求传感器的自振频率值。

5-10 已知磁电式速度传感器的相对阻尼系数 $\zeta = 0.6$, 求振幅误差小于 2% 测试时的 ω / ω_n 范围。

解：已知 $\zeta = 0.6$, 振幅误差小于 2% 。

若振动体作简谐振动 , 即当输入信号 x_0 为正弦波时 , 可得到频率传递函数

$$\frac{x_t}{x_0}(j\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2j\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \text{ 得}$$

$$\text{振幅比 } \left| \frac{x_t}{x_0} \right| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left[2j\xi \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \right]^2}}$$

$$\left| \frac{x_t}{x_0} \right| = 1.02 \quad \text{时}, \quad \frac{\omega}{\omega_0} = 3.51; \quad \left| \frac{x_t}{x_0} \right| = 0.98 \quad \text{时}, \quad \frac{\omega}{\omega_0} = 1.45$$

因要求 $\frac{\omega}{\omega_0} \gg 1$ ，一般取 $\frac{\omega}{\omega_0} = 3$ ，所以取 $\frac{\omega}{\omega_0} = 3.51$

5-11 已知磁电式振动速度传感器的固有频率 $f_n = 15\text{Hz}$ ，阻尼系数 $\xi = 0.7$ 。若输入频率为 $f = 45\text{Hz}$ 的简谐振动，求传感器输出的振幅误差为多少？

5-12 何谓霍尔效应？利用霍尔效应可进行哪些参数测量？

答：当电流垂直于外磁场通过导体时，在导体的垂直于磁场和电流方向的两个端面之间会出现电势差，这一现象便是霍尔效应。这个电势差也被叫做霍尔电势差。霍尔器件工作产生的霍尔电势为

$U_H = \frac{R_H IB}{d} = K_H IB$ ，由表达式可知，霍尔电势 U_H 正比于激励电流 I 及磁感应强度 B ，其灵敏度 K_H 与霍尔系数 R_H 成正比，而与霍尔片厚度 d 成反比。

利用霍尔效应可测量大电流、微气隙磁场、微位移、转速、加速度、振动、压力、流量和液位等；用以制成磁读头、磁罗盘、无刷电机、接近开关和计算元件等等。

5-13 霍尔元件的不等位电势和温度影响是如何产生的？可采取哪些方法来减小之。

答：影响霍尔元件输出零点的因素主要是霍尔元件的初始位置。

霍尔位移传感器，是由一块永久磁铁组成磁路的传感器，在霍尔元件处于初始位置 $\Delta x = 0$ 时，霍尔电势 U_H 不等于零。霍尔式位移传感器为了获得较好的线性分布，在磁极端面装有极靴，霍尔元件调整好初始位置

时，可以使霍尔电势 $U_H = 0$ 。不等位电势的重要起因是不能将霍尔电极焊接在同一等位面上，可以通过机械修磨或用化学腐蚀的方法或用网络补偿法校正。

霍尔元件的灵敏系数 K_H 是温度的函数，关系式为： $K_H = K_{H0}(1 + \alpha \Delta T)$ ，大多数霍尔元件的温度系数 α 是正值，因此，它们的霍尔电势也将随温度升高而增加 αT 倍。

补偿温度变化对霍尔电势的影响，通常采用一种恒流源补偿电路。基本思想是：在温度增加的同时，让激励电流 I 相应地减小，并能保持 $K_H \cdot I$ 乘积不变，也就可以相对抵消温度对灵敏系数 K_H 增加的影响，从而抵消对霍尔电势的影响。

5-14 磁敏传感器有哪几种？它们各有什么特点？可用来测量哪些参数？

答：磁敏电阻：外加磁场使导体（半导体）电阻随磁场增加而增大的现象称磁阻效应。载流导体置于磁场中除了产生霍尔效应外，导体中载流子因受洛伦兹力作用要发生偏转，载流子运动方向偏转使电流路径变化，起到了加大电阻的作用，磁场越强增大电阻的作用越强。磁敏电阻主要运用于测位移。

磁敏二极管：输出电压随着磁场大小的方向而变化，特别是在弱磁场作用下，可获得较大输出电压变化， r 区内外复合率差别越大，灵敏度越高。当磁敏二极管反向偏置时，只有很少电流通过，二极管两端电压也不会因受到磁场的作用而有任何改变。利用磁敏二极管可以检测弱磁场变化这一特性可以制成漏磁探伤仪。

5-15 为什么说磁电感应式传感器是一种有源传感器？

5-16 变磁阻式传感器有哪几种结构形式？可以检测哪些非电量？

5-17 磁电式传感器是速度传感器，它如何通过测量电路获得相对应的位移和加速度信号？

5-18 磁电式传感器与电感式传感器有哪些不同？磁电式传感器主要用于测量哪些物理参数？

答：a. 磁电式传感器是通过磁电作用将被测量转换为电信号的一种传感器。

电感式传感器是利用线圈自感或互感的变化来测量的一种装置。

b. 磁电式传感器具有频响宽、动态范围大的特点。而电感式传感器存在交流零位信号，不宜于高频动态信号检测；其响应速度较慢，也不宜做快速动态测量。

c. 磁电式传感器测量的物理参数有：磁场、电流、位移、压力、振动、转速。

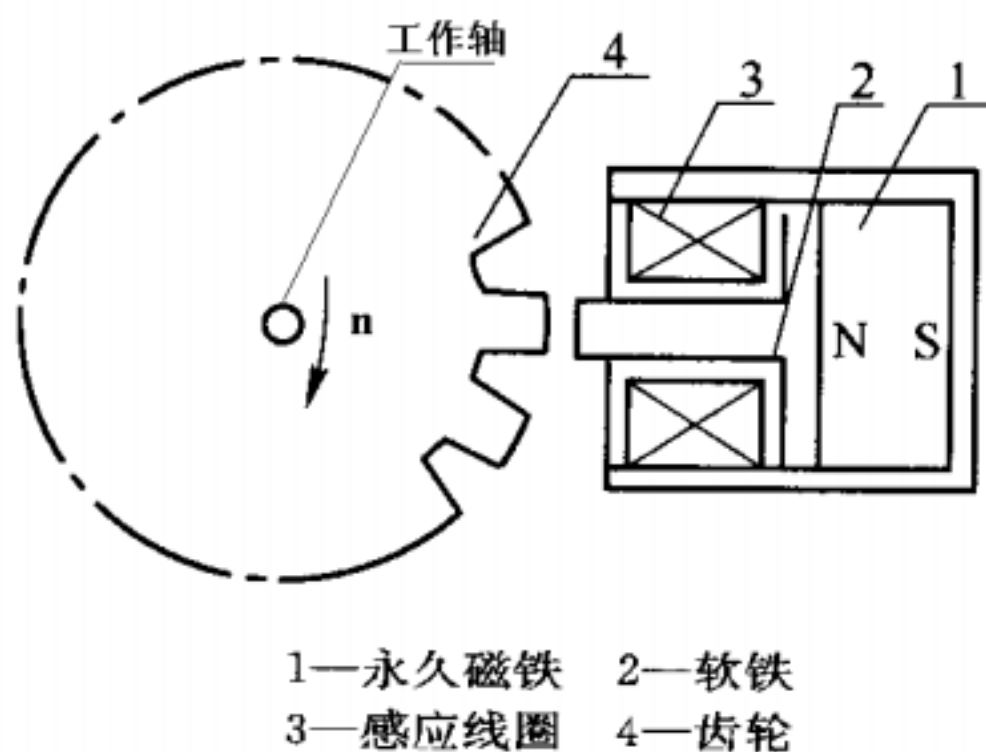
5-19 发电机是利用导线在永久磁铁的磁场中作旋转运动而发电的。无论负载怎样消耗这个电能，永久磁铁不会变弱，这是什么道理？

答：发电机供应给负载的电能为，为转动这个发电机所供应得机械能（火力或水力）变换而来的能量。磁铁持有的能量未被消耗，所以磁铁不会变弱。

5-20 只要磁通量发生变化，就有感应电动势产生，请说出三种产生感应电动势的方法。

答：(1) 线圈与磁场发生相对运动； (2) 磁路中磁阻变化； (3) 恒定磁场中线圈面积变化。

5-21 已知测量齿轮齿数 $Z=18$ ，采用变磁通感应式传感器测量工作轴转速（如图所示）。若测得输出电动势的交变频率为 $24(\text{Hz})$ ，求：被测轴的转速 $n(\text{r/min})$ 为多少？当分辨误差为 ± 1 齿时，转速测量误差是多少？



解：(1) 测量时，齿轮随工作轴一起转动，每转过一个齿，传感器磁路磁阻变化一次，磁通也变化一次，因此，线圈感应电动势的变化频率 f 等于齿轮的齿数 Z 与转速 n 的乘积。

$$f=nZ/60$$

$$n=60f/Z=60*24/18=80(\text{r/min})$$

(2) 读数误差为 ± 1 齿，所以应为 $1/18$ 转，即：

$$n=80 \pm 1/18 (\text{r/min})$$

5-22 什么是霍尔效应？霍尔电势的大小与方向和哪些因素有关？影响霍尔电势的因素有哪些？

答：霍尔效应：将一载流导体放在磁场中，若磁场方向与电流方向正交，则在与磁场和电流方向正交，在与磁场和电流两者垂直的方向上将会出现横向电势，这一现象称为霍尔效应，相应的电势称为霍尔电势。

具有霍尔效应的半导体在其相应的侧面上装上电极后即构成霍尔元件，常用灵敏度 K_H 来表征霍尔元件的特性，霍尔电势正比于激励电流 I 和磁感应强度 B ；而灵敏度 K_H 由霍尔系数 R_H 与霍尔片的厚度 d 决定：

$$U_H = R_H \cdot \frac{1}{d} IB = K_H IB, K_H = R_H / d$$

5-23 集成霍尔器件有哪几种类型？试画出其输出特性曲线。

5-24 有一测量转速装置，调制盘上有 100 对永久磁极，N、S 极交替放置，调制盘由转轴带动旋转，在磁极上方固定一个霍尔元件，每通过一对磁极霍尔元件产生一个方脉冲送到计数器。假定 $t=5\text{min}$ 采样时间内，计数器收到 $N=15$ 万个脉冲，求转速 $n=?$ 转/分。

5-25 磁敏元件有哪些？（磁敏电阻、磁敏二极管、磁敏晶体管）什么是磁阻效应？简述磁敏二极管、晶体管工作原理。

5-26 磁敏电阻与磁敏晶体管有哪些不同？与霍尔元件在本质上的区别是什么？

5-27 磁敏晶体管与普通晶体管的区别是什么？

5-28 试证明霍尔式位移传感器的输出与位移成正比。

5-29 霍尔元件能够测量哪些物理参数？霍尔元件的不等位电势的概念是什么？温度补偿的方法有哪几种？

答：a. 霍尔元件可测量磁场、电流、位移、压力、振动、转速等。

b. 霍尔组件的不等位电势是霍尔组件在额定控制电流作用下，在无外加磁场时，两输出电极之间的空载电势，可用输出的电压表示。

c. 温度补偿方法：分流电阻法：适用于恒流源供给控制电流的情况。电桥补偿法

5-30 简述霍尔效应及构成以及霍尔传感器可能的应用场合。

答：一块长为 l 、宽为 d 的半导体薄片置于磁感应强度为 B 的磁场（磁场方向垂直于薄片）中，当有电流 I 流过时，在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势 U_H 。这种现象称为霍尔效应。霍尔组件多用 N 型半导体材料，且比较薄。霍尔式传感器转换效率较低，受温度影响大，但其结构简单、体积小、坚固、频率响应宽、动态范围（输出电势变化）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、自动控制、电磁测量、计算装置以及现代军事技术等领域中得到广泛应用。

5-31 试分析霍尔效应产生的原因。

答：金属或半导体薄片置于磁场中，当有电流通过时，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。如将 N 型半导体薄片，垂直置于磁场中。在薄片左右两端通以电流，这时半导体

中的载流子（电子）将沿着与电流相反的方向运动。由于外磁场的作用，电子将受到磁场力（洛伦兹力）的作用而发生偏转，结果在半导体的后端面上积累了电子而带负电，前端面则因缺少电子而带正电，从而在前后端面形成电场。该电场产生的电场力也将作用于半导体中的载流子，电场力方向和磁场力方向正好相反，当与大小相等时，电子积累达到动态平衡。这时，在半导体前后两端面之间建立的电动势就称为霍尔电动势。

5-32 霍尔电动势的大小、方向与哪些因素有关？

答：霍尔电动势的大小正比于激励电流 I 与磁感应强度 B ，且当 I 或 B 的方向改变时，霍尔电动势的方向也随着改变，但当 I 和 B 的方向同时改变时霍尔电动势极性不变。

一定的感受机构对一些能够转换成位移量的其他非电量，如振动、压力、应变、流量等进行检测。

《传感器原理与应用》习题集与部分参考答案

教材：传感器技术（第 3 版）贾伯年主编，及其他参考书

第 6 章 压电式传感器

6-1 何谓压电效应？何谓纵向压电效应和横向压电效应？

答：一些离子型晶体的电介质不仅在电场力作用下，而且在机械力作用下，都会产生极化现象。且其电位移 D （在 MKS 单位制中即电荷密度）与外应力张量 T 成正比： $D = dT$ 式中 d —压电常数矩阵。

当外力消失，电介质又恢复不带电原状；当外力变向，电荷极性随之而变。这种现象称为正压电效应，或简称压电效应。

若对上述电介质施加电场作用时，同样会引起电介质内部正负电荷中心的相对位移而导致电介质产生变形，且其应变 S 与外电场强度 E 成正比： $S = d_t E$ 式中 d_t ——逆压电常数矩阵。这种现象称为逆压电效应，或称电致伸缩。

6-2 压电材料的主要特性参数有哪些？试比较三类压电材料的应用特点。

答：主要特性：压电常数、弹性常数、介电常数、机电耦合系数、电阻、居里点。

压电单晶：时间稳定性好，居里点高，在高温、强辐射条件下，仍具有良好的压电性，且机械性能，如机电耦合系数、介电常数、频率常数等均保持不变。此外，还在光电、微声和激光等器件方面都有重要应用。不足之处是质地脆、抗机械和热冲击性差。

压电陶瓷：压电常数大，灵敏度高，制造工艺成熟，成形工艺性好，成本低廉，利于广泛应用，还具有热释电性。

新型压电材料：既具有压电特性又具有半导体特性。因此既可用其压电性研制传感器，又可用其半导体特性制作电子器件；也可以两者合一，集元件与线路于一体，研制成新型集成压电传感器测试系统。

6-3 试述石英晶片切型（ $yxlt + 50^\circ / 45^\circ$ ）的含意。

6-4 为了提高压电式传感器的灵敏度，设计中常采用双晶片或多晶片组合，试说明其组合的方式和适用场合。

答：（1）并联： $C = 2C$ ， $q = 2q$ ， $U = U$ ，因为输出电容大，输出电荷大，所以时间常数，适合于测量

缓变信号，且以电荷作为输出的场合。

(2) 串联： $q = q, U = U, C = C/2$ ，特点：输出电压大，本身电容小，适合于以电压作为输出信号，且测量电路输出阻抗很高的场合。

6-5 欲设计图 6-20 所示三向压电加速度传感器，用来测量 x 、 y 、 z 三正交方向的加速度，拟选用三组双晶片组合 BaTiO₃ 压电陶瓷作压电组件。试问：应选用何种切型的晶片？又如何合理组合？并用图示意。

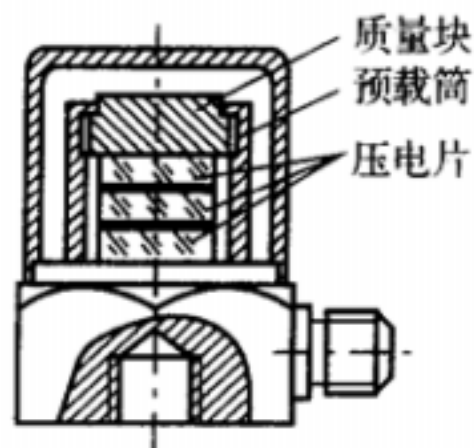


图 6-20 三向压电加速度传感器

6-6 原理上，压电式传感器不能用于静态测量，但实用中，压电式传感器可能用来测量准静态量，为什么？

答：压电式测力传感器是利用压电元件直接实现力-电转换的传感器，在拉力、压力和力矩测量场合，通常较多采用双片或多片石英晶片作压电元件。由于它刚度大，动态特性好；测量范围广，可测范围大；线性及稳定性高；可测单、多向力。当采用大时间常数的电荷放大器时，就可测准静态力。

6-7 简述压电式传感器前置放大器的作用，两种形式各自的优缺点及其如何合理选择回路参数？

6-8 已知 ZK-2 型阻抗变换器的输入阻抗为 $2000M\Omega$ ，测量回路的总电容为 $1000pF$ 。试求：当与压电加速度计相配，用来测量 $1Hz$ 的低频振动时产生的幅值误差。

6-9 试证明压电加速度传感器动态幅值误差表达式：高频段： $\delta_H = [A(\omega_n) - 1]\%$ ；低频段：

$\delta_L = [A(\omega_L) - 1]\%$ 。若测量回路的总电容 $C=1000pF$ ，总电阻 $R=500M\Omega$ ，传感器机械系统固有频率

$f_n=30kHz$ ，相对阻尼系数 $\zeta=0.5$ ，求幅值误差在 2% 以内的使用频率范围。

6-10 试选择合适的传感器：(1) 现有激磁频率为 $2.5kHz$ 的差动变压器式测振传感器和固有频率为 $50Hz$ 的磁电式测振传感器各一只，欲测频率为 $400\sim 500Hz$ 的振动，应选哪一种？为什么？(2) 有两只压电式加速度传感器，固有频率分别为 $30kHz$ 和 $50kHz$ ，阻尼比均为 0.5 ，欲测频率为 $15kHz$ 的振动，应选哪一只？为什么？

6-11 一只压电式压力传感器灵敏度为 $9pC/bar$ ，将它接入增益调到 $0.005V/pC$ 的电荷放大器，放大器的输出又接到灵敏度为 $20mm/V$ 的紫外线记录纸式记录仪上。(1) 试画出系统方框图；(2) 计算系统总的灵敏度；(3) 当压力变化 $35bar$ 时，试计算记录纸上的偏移量。

*6-12 什么是正压电效应？什么是逆压电效应？压电效应有哪些种类？压电传感器的结构和应用特点是什么？能否用压电传感器测量静态压力？

答：某些电介质在沿一定的方向受到外力的作用变形时，由于内部电极化现象同时在两个表面上产生符号相反的电荷，当外力去掉后，恢复到不带电的状态；而当作用力方向改变时，电荷的极性随着改变。晶体受力所产生的电荷量与外力的大小成正比。这种现象称为正压电效应。反之，如对晶体施加一定变电场，晶体本身将产生机械变形，外电场撤离，变形也随之消失，称为逆压电效应。

压电材料有：石英晶体、一系列单晶硅、多晶陶瓷、有机高分子聚合材料

结构和应用特点：

在压电式传感器中，为了提高灵敏度，往往采用多片压电芯片构成一个压电组件。其中最常用的是两片结构；根据两片压电芯片的连接关系，可分为串联和并联连接，常用的是并联连接，可以增大输出电荷，提高灵敏度。

使用时，两片压电芯片上必须有一定的预紧力，以保证压电组件在工作中始终受到压力作用，同时可消除两片压电芯片因接触不良而引起的非线性误差，保证输出信号与输入作用力间的线性关系，因此需要测量电路具有无限大的输入阻抗。但实际上这是不可能的，所以压电传感器不宜作静态测量，只能在其上加交变力，电荷才能不断得到补充，并给测量电路一定的电流。故压电传感器只能作动态测量。

6-13 石英晶体 X、Y、Z 轴的名称是什么？试根据石英晶体的结构分析该晶体各方向有无压电效应。

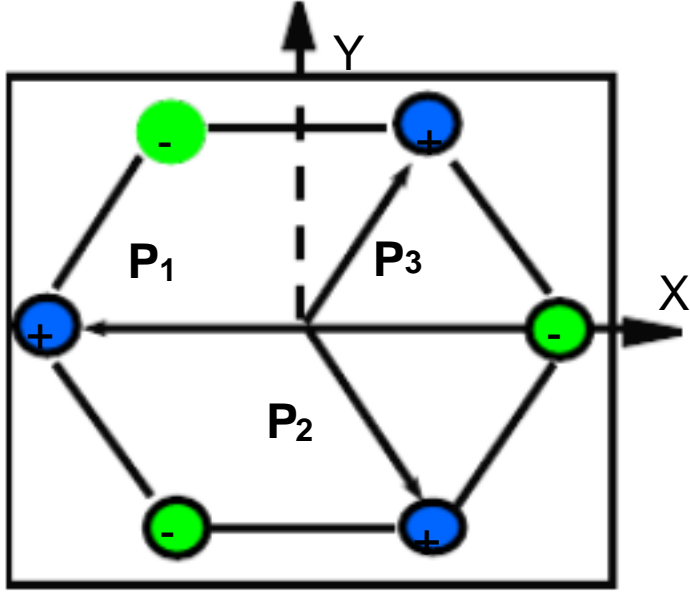
答：电轴：x 轴穿过六棱柱的棱线，在垂直于此轴的面上压电效应最强；

机轴：y 轴垂直六棱柱面。在电场作用下，沿该轴方向的机械变形最明显；

光轴：z 轴晶体上、下晶锥顶点连线重合，也叫中性轴，光线沿该轴通过时，无折射及压电效应。

石英晶体具有压电效应，是由其内部结构决定的。组成石英晶体的硅离子 Si^{4+} 和氧离子 O^{2-} 在 Z 平面投影。为讨论方便，将这些硅、氧离子等效为如图中正六边形排列，图中“+”代表 Si^{4+} ，“-”代表 2O^{2-} 。

当作用力 $F_x=0$ 时，正、负离子（即 Si^{4+} 和 2O^{2-} ）正好分布在正六边形顶角上，形成三个互成 120° 夹角的偶极矩 P_1 、 P_2 、 P_3 ，如图所示。此时正负电荷中心重合，电偶极矩的矢量和等于零，即 $P_1 + P_2 + P_3 = 0$



当晶体受到沿 X 方向的压力（ $F_x < 0$ ）作用时，晶体沿 X 方向将产生收缩，正、负离子相对位置随之发生变化。此时正、负电荷中心不再重合，电偶极矩在 X 方向的分量为 $(P_1 + P_2 + P_3)_x > 0$ ；在 Y、Z 方向上的分量为

$$(P_1 + P_2 + P_3)_y = 0, (P_1 + P_2 + P_3)_z = 0,$$

则在 X 轴的正向出现正电荷，在 Y、Z 轴方向则不出现电荷。

当晶体受到沿 X 方向的拉力（ $F_x > 0$ ）作用时，电极矩的三个分量为

$$(P_1 + P_2 + P_3)_x < 0; (P_1 + P_2 + P_3)_y = 0; (P_1 + P_2 + P_3)_z = 0,$$

则在 X 轴的正向出现负电荷，在 Y、Z 方向则不出现电荷。

当晶体受到沿 X(电轴)方向的力 F_x 作用时，它在 X 方向产生正压电效应，而 Y、Z 方向则不产生压电效应。晶体在 Y 轴方向力 F_y 作用下的情况与 F_x 相似（1 分）。晶体在 Z 轴方向力 F_z 的作用下，因为晶体沿 X 方向和沿 Y 方向所产生的正应变完全相同，故沿 Z(即光轴)方向的力 F_z 作用下，晶体不产生压电效应。

6-14 简述压电陶瓷特性，作为压电元件比较它与石英晶体有哪些特点？

答：石英晶体整个晶体是中性的，受外力作用而变形时，没有体积变形压电效应，但它具有良好的厚度变形和长度变形压电效应。压电陶瓷是一种多晶铁电体。原始的压电陶瓷材料并不具有压电性，必须在一定温度下做极化处理，才能使其呈现出压电性。所谓极化，就是以强电场使“电畴”规则排列，而电畴在极化电场除去后基本保持不变，留下了很强的剩余极化。

当极化后的铁电体受到外力作用时，其剩余极化强度将随之发生变化，从而使一定表面分别产生正负电荷。在极化方向上压电效应最明显。铁电体的参数也会随时间发生变化——老化，铁电体老化将使压电效应减弱。

6-15 简述压电式传感器分别与电压放大器和电荷放大器相连时各自的特点。说明电压放大器与电荷放大器的优缺点，各自要解决什么问题？

答：传感器与电压放大器连接的电路，其输出电压与压电元件的输出电压成正比，但容易受电缆电容的影响。传感器与电荷放大器连接的电路，其输出电压与压电元件的输出电荷成正比，电缆电容的影响小。

6-16 用石英晶体加速度计及电荷放大器测量机器振动，已知，加速度计灵敏度为 5pC/g ；电荷放大器灵敏度为 50mV/p ，最大加速度时输出幅值 2V ，试求机器振动加速度。

6-17 超声波传感器利用压电材料制成发射器和接收器，说明它们各利用哪种压电效应？

6-18 电荷放大器所要解决的核心问题是什么？试推导其输入输出关系。

6-19 简述电压式加速传感器的工作原理？

6-20 为什么压电传感器通常都用来测量动态或瞬态参量？

答：如作用在压电组件上的力是静态力，则电荷会泄露，无法进行测量。所以压电传感器通常都用来测量动态或瞬态参量。

6-21 设计压电式传感器检测电路的基本考虑点是什么？为什么？

答：基本考虑点是如何更好的改变传感器的频率特性，以使传感器能用于更广泛的领域。

6-22 画出 (111) 晶面和 $\langle 110 \rangle$ 晶向。并计算 (111) 晶面内， $\langle 110 \rangle$ 晶向的纵向压阻系数和横向压阻系数。

6-23 压电传感器的输出信号的特点是什么？它对放大器有什么要求？放大器有哪两种类型？

答：特点：其输出阻抗大，要求前置放大器的输入阻抗大，而输出阻抗小。

要求：其信号微弱，要求高的放大倍数。

类型：电压放大器，电荷放大器（与电路电容无关）

6-24 压电传感器测量范围。

答：只能测量变力且交变频率越高，灵敏度越大。

6-25 常用压电材料有哪几种？

答：应用于压电式传感器中的压电材料通常有三类：一类是压电晶体，它是单晶体，如石英晶体、酒石酸钾钠等；另一类是经过极化处理的压电陶瓷，它是人工合成的多晶体，如钛酸钡等；第三类是有机压电材料，是新型的压电材料，如聚偏二氯乙烯等。

6-26 什么叫正压电效应？什么叫逆压电效应？常用压材料有哪几种？

答：某些电介质在沿一定的方向上受到外力的作用而变形时，内部会产生极化现象，同时在其表面上产生电荷，当外力去掉后，又重新回到不带电的状态，这种现象称为压电效应。这种机械能转化成电能的现象，称为正压电效应。反之，在电介质的极化方向上施加交变电场或电压，它会产生机械变形，当去掉外加电场时，电介质变形随之消失，这种现象称为逆压电效应。应用于压电式传感器中的压电材料通常有三类：一类是压电晶体，它是单晶体，如石英晶体、酒石酸钾钠等；另一类是经过极化处理的压电陶瓷，它是人工合成的多晶体，如钛酸钡等；第三类是有机压电材料，是新型的压电材料，如聚偏二氯乙烯等。

《传感器原理与应用》及《传感器与测量技术》习题集与部分参考答案

教材：传感器技术（第 3 版）贾伯年主编，及其他参考书

第 7 章 热电式传感器

7-1 热电式传感器有哪几类？它们各有什么特点？

答：热电式传感器是一种将温度变化转换为电量变化的装置。它可分为两大类：热电阻传感器和热电偶传感器。

热电阻传感器的特点：（1）高温度系数、高电阻率。（2）化学、物理性能稳定。（3）良好的输出特性。（4）良好的工艺性，以便于批量生产、降低成本。

热电偶传感器的特点：（1）结构简单（2）制造方便（3）测温范围宽（4）热惯性小（5）准确度高（6）输出信号便于远传

7-2 常用的热电阻有哪几种？适用范围如何？

答：铂、铜为应用最广的热电阻材料。铂容易提纯，在高温和氧化性介质中化学、物理性能稳定，制成的铂电阻输出 - 输入特性接近线性，测量精度高。铜在 $-50 \sim 150$ 范围内铜电阻化学、物理性能稳定，输出 - 输入特性接近线性，价格低廉。当温度高于 100 时易被氧化，因此适用于温度较低和没有侵蚀性的介质中工作。

7-3 热敏电阻与热电阻相比较有什么优缺点？用热敏电阻进行线性温度测量时必须注意什么问题？

7-4 利用热电偶测温必须具备哪两个条件？

答：（1）用两种不同材料作热电极（2）热电偶两端的温度不能相同

7-5 什么是中间导体定律和连接导体定律？它们在利用热电偶测温时有什么实际意义？

答：中间导体定律：导体 A、B 组成的热电偶，当引入第三导体时，只要保持第三导体两端温度相同，则第三导体对回路总热电势无影响。利用这个定律可以将第三导体换成毫伏表，只要保证两个接点温度一致，就可以完成热电势的测量而不影响热电偶的输出。

连接导体定律：回路的总电势等于热电偶电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 与连接导线电势 $E_{A'B'}(T_n, T_0)$ 的代数和。连接导体定律是工业上运用补偿导线进行温度测量的理论基础。

7-6 什么是中间温度定律和参考电极定律？它们各有什么实际意义？

答： $E_{AB}(T, T_n, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0)$

这是中间温度定律表达式，即回路的总热电势等于 $E_{AB}(T, T_n)$ 与 $E_{AB}(T_n, T_0)$ 的代数和。 T_n 为中间温度。中间温度定律为制定分度表奠定了理论基础。

7-7 镍铬 - 镍硅热电偶测得介质温度 800 ，若参考端温度为 25 ，问介质的实际温度为多少？

答： $t = \text{介质温度} + k \times \text{参考温度} (800 + 1 \times 25 = 825)$

7-8 热电式传感器除了用来测量温度外，是否还能用来测量其他量？举例说明之。

7-9 实验室备有铂铑 - 铂热电偶、铂电阻器和半导体热敏电阻器，今欲测量某设备外壳的温度。已知其温度约为 $300 \sim 400$ ，要求精度达 ± 2 ，问应选用哪一种？为什么？

*7-10 在炼钢厂中，有时直接将廉价热电极（易耗品，例如镍铬、镍硅热偶丝，时间稍长即熔化）插入钢水中测量钢水温度，如图 7-10 所示。试说明测量钢水温度的基本原理？为什么不必将工作端焊在一起？要满足哪些条件才不影响测量精度？采用上述方法是利用了热电偶的什么定律？如果被测物不是钢水，而是熔化的塑料行吗？为什么？

答：测量钢水温度的基本原理是利用了热电效应；因为钢水是导体，又处在同一个温度下，把钢水看作是第三导体接入，利用了热电偶的导体接入定律；如果被测物不是钢水，而是熔化的塑料不行，因为，塑料不导电，不能形成热电势。

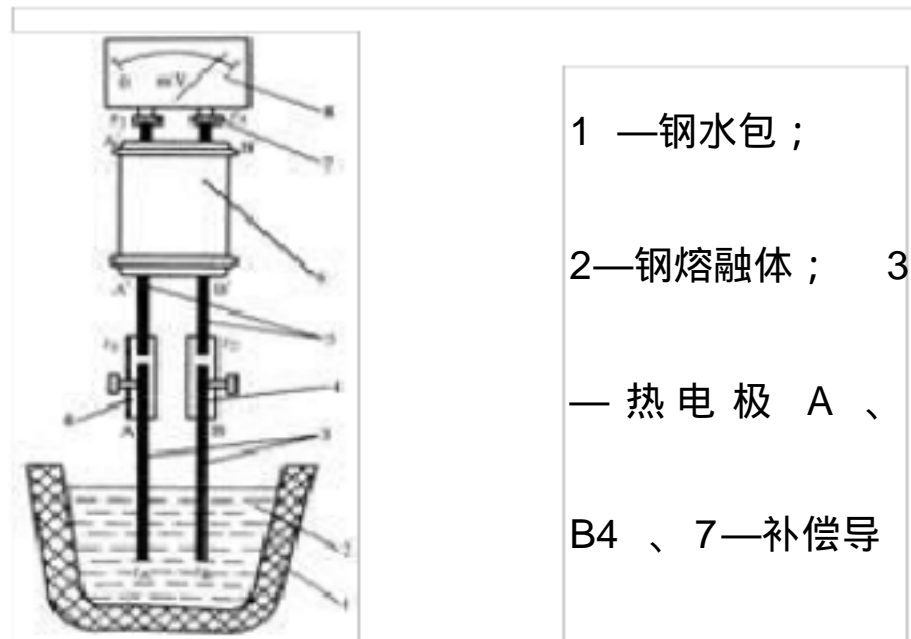


图 7—10 用浸入式热电偶测量熔融金属示意图

*7-11 用镍铬 - 镍硅（K）热电偶测温度，已知冷端温度 t_0 为 40，用高精度毫伏表测得这时的热电势为 29.186mV，求被测点温度？

答：查 K 分度表，热电偶在 40 时相对于 0 的热电势为：1.6118mV；

由公式： $U(t, 0) = U(t, 40) + U(40, 0) = 29.186 + 1.6118 \text{mV} = 30.798 \text{mV}$ ；

查 K 分度表得被测点温度值为：740。

*7-12 使用 k 型热电偶，基准接点为 0、测量接点为 30 和 900 时，温差电动势分别为 1.203mV 和 37.326mV。当基准接点为 30，测温接点为 900 时的温差电动势为多少？

答：由公式 $U(900, 0) = U(900, 30) + U(30, 0)$ ，得： $U(900, 30) = U(900, 0) - U(30, 0) =$

当基准接点为 30，测温接点为 900 时的温差电动势为： $37.326 - 1.203 = 36.123 \text{mV}$ 。

7-13 热电偶冷端温度对热电偶的热电势有什么影响？为消除冷端温度影响可采用哪些措施？半导体热敏电阻的主要优缺点是什么？在电路中是怎样克服的？

7-14 PN 结为什么可以用来作为温敏元件？

7-15 集成温度传感器的测温原理，有何特点？

7-16 如果需要测量 1000 和 20 温度时，分别宜采用哪种类型的温度传感器？

7-17 采用一只温度传感器能否实现绝对温度、摄氏温度、华氏温度的测量？怎样做？

7-18 热电阻传感器主要分为几种类型？它们应用在什么不同场合？

答：热电阻传感器分为以下几种类型：

铂电阻传感器：特点是精度高、稳定性好、性能可靠。主要作为标准电阻温度计使用，也常被用在工业测量中。此外，还被广泛地应用于温度的基准、标准的传递，是目前测温复现性最好的一种。

铜电阻传感器：价钱较铂金属便宜。在测温范围比较小的情况下，有很好的稳定性。温度系数比较大，电阻值与温度之间接近线性关系。材料容易提纯，价格便宜。不足之处是测量精度较铂电阻稍低、电阻率小。

铁电阻和镍电阻：铁和镍两种金属的电阻温度系数较高、电阻率较大，故可作成体积小、灵敏度高的电阻温度计，其缺点是容易氧化，化学稳定性差，不易提纯，复制性差，而且电阻值与温度的线性关系差。目前应用不多。

7-19 什么叫热电动势、接触电动势和温差电动势？说明热电偶测温原理及其工作定律的应用。分析热电偶测温的误差因素，并说明减小误差的方法。

答：热电动势：两种不同材料的导体（或半导体）A、B 串接成一个闭合回路，并使两个结点处于不同的温度下，那么回路中就会存在热电势。有电流产生相应的热电势称为温差电势或塞贝克电势，通称热电势。

接触电动势：接触电势是由两种不同导体的自由电子，其密度不同而在接触处形成的热电势。它的大小取决于两导体的性质及接触点的温度，而与导体的形状和尺寸无关。

温差电动势：是在同一根导体中，由于两端温度不同而产生的一种电势。

热电偶测温原理：热电偶的测温原理基于物理的“热电效应”。所谓热电效应，就是当不同材料的导体组成一个闭合回路时，若两个结点的温度不同，那么在回路中将会产生电动势的现象。两点间的温差越大，产生的电动势就越大。引入适当的测量电路测量电动势的大小，就可测得温度的大小。

热电偶三定律：

a 中间导体定律：热电偶测温时，若在回路中插入中间导体，只要中间导体两端的温度相同，则对热电偶回路总的热电势不产生影响。在用热电偶测温时，连接导线及显示一起等均可看成中间导体。

b 中间温度定律：任何两种均匀材料组成的热电偶，热端为 T ，冷端为 T_0 时的热电势等于该热电偶热端为 T 冷端为 T_n 时的热电势与同一热电偶热端为 T_n ，冷端为 T_0 时热电势的代数和。

应用：对热电偶冷端不为 0 度时，可用中间温度定律加以修正。热电偶的长度不够时，可根据中间温度定律选用适当的补偿线路。

c 参考电极定律：如果 A、B 两种导体（热电极）分别与第三种导体 C（参考电极）组成的热电偶在结点温度为 (T, T_0) 时分别为 $E_{AC}(T, T_0)$ 和 $E_{BC}(T, T_0)$ ，那么受相同温度下，又 A、B 两热电极配对后的热电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0)$$

实用价值：可大大简化热电偶的选配工作。在实际工作中，只要获得有关热电极与标准铂电极配对的热电势，那么由这两种热电极配对组成热电偶的热电势便可由上式求得，而不需逐个进行测定。

误差因素：参考端温度受周围环境的影响减小误差的措施有：

a 0°C 恒温法

b 计算修正法（冷端温度修正法）

c 仪表机械零点调整法

d 热电偶补偿法

e 电桥补偿法

f 冷端延长线法。

7-20 试述热电偶测温的基本原理和基本定理。

答：热电偶测温原理：热电偶的测温原理基于物理的 " 热电效应 "。所谓热电效应，就是当不同材料的导体组成一个闭合回路时，若两个结点的温度不同，那么在回路中将会产生电动势的现象。两点间的温差越大，产生的电动势就越大。引入适当的测量电路测量电动势的大小，就可测得温度的大小。

基本定理见第 7 题。

7-21 试比较电阻温度计与热电偶温度计的异同点。

答：电阻温度计利用电阻随温度变化的特性来测量温度。热电偶温度计是根据热电效应原理设计而成的。前者将温度转换为电阻值的大小，后者将温度转换为电势大小。

相同点：都是测温传感器，精度及性能都与传感器材料特性有关。

7-22 试解释负电阻温度系数热敏电阻的伏安特性并说明其用途。

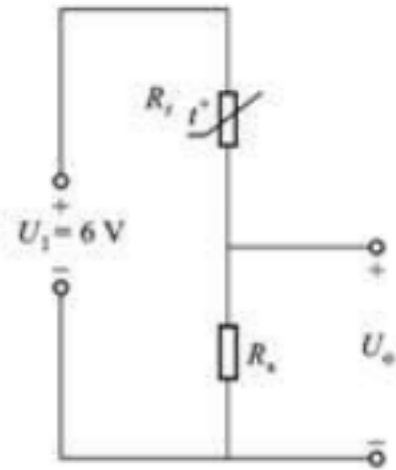
答：伏安特性表征热敏电阻在恒温介质下流过的电流 I 与其上电压降 U 之间的关系。当电流很小时不足以引起自身发热，阻值保持恒定，电压降与电流间符合欧姆定律。当电流 $I > I_s$ 时，随着电流增加，功耗增大，产生自热，阻值随电流增加而减小，电压降增加速度逐渐减慢，因而出现在非线性的正阻区 ab 。电流增大到 I_s 时，电压降达到最大值 U_m 。此后，电流继续增大时，自热更为强烈，由于热敏电阻的电阻温度系数大，阻值随电流增加而减小的速度大于电压降增加的速度，于是就出现负阻区 bc 段。研究伏安特性，有助于正确选择热敏电阻的工作状态。对于测温、控温和温度补偿，应工作于伏安特性的线性区，这样就可以忽略自热的影响，使电阻值仅取决于被测温度。对于利用热敏电阻的耗散原理工作的场合，例如测量风速、流量、真空等，则应工作于伏安特性的负阻区。

7-23 有一串联的热敏电阻测温电路，如图所示。试设计其最佳线性工作特性，并计算其线性度，最后，用坐标纸每 5 一点绘出电路图中 $u=f(t)$ 的曲线。

7-24 铂线电阻在 20 时为 10 。求 50 °C 时的电阻。

答： $R=R_0(1+\alpha t)$ 中， $t=20$ ， $R=10$ ， $\alpha=30 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 。

因此， $10=R_0(1+30 \times 10^{-4} \times 20)$ ， $R=R_0(1+30 \times 10^{-4} \times 50)$ 得 $R=10.8$ 。



17-25 下图 1 所示的铂测温电阻元件，当温度由 0 上升到 100 时，电阻变化率 R/R_0 为多少？下图 2 所示的热敏电阻（ $R_0=28k$ ），其 R/R_0 为多少？

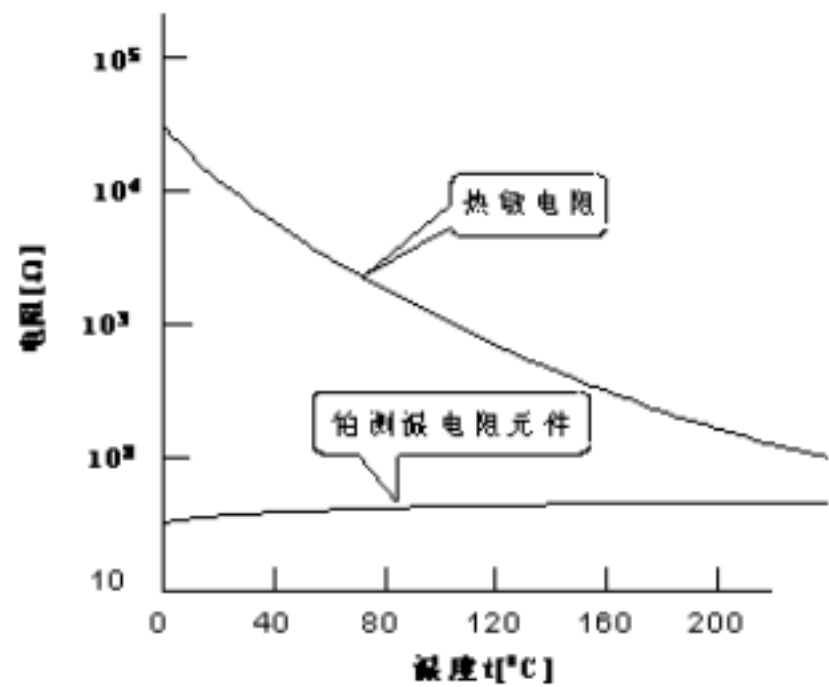


图 1

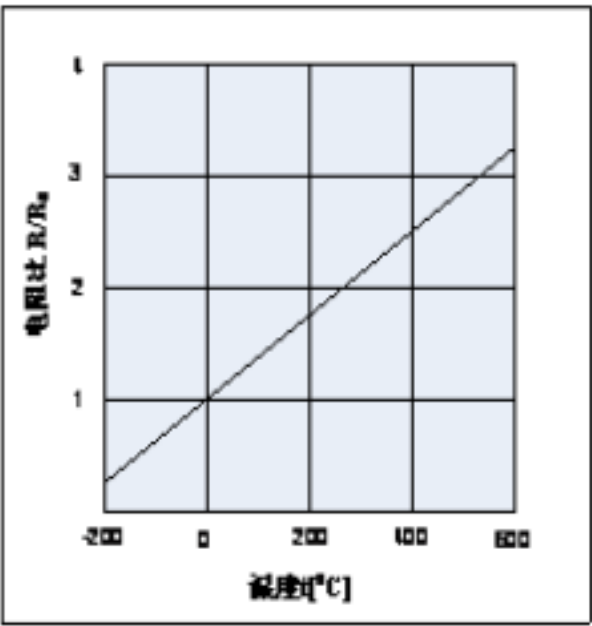


图 2

答：由图 1 可读取 $t=100$ 时的 $R/R_0=1.4$ 。因此， $R=1.4R_0$ ，

又有 $R=R_0+R_0\alpha t=1.4R_0-R_0=0.4R_0$ 。因此， $R/R_0=0.4$ 。

图 2 的热敏电阻中 $t=100$ 时的 $R=103$ 。

又 $R=R_0-R_0=-27k$ 。因此， $R/R_0=-27/28=-0.96$ 。

7-26 上图 1 所示的铂测温电阻元件，在 $0 \sim 200$ 范围内的电阻温度系数为多少？

答：由图 1， $t=200$ 处的 $R/R_0=1.8$ ，

电阻温度系数（曲线的倾斜率） $= (1.8-1)/200=0.4\%$ 。

7-27 要测 1000 左右的高温，用什么类型的热电偶好？要测 1500 左右的高温呢？

答：若是 1000 铬镍-铝镍，铂、铑-铂， 1500 时，铂、铑 30%-铂。

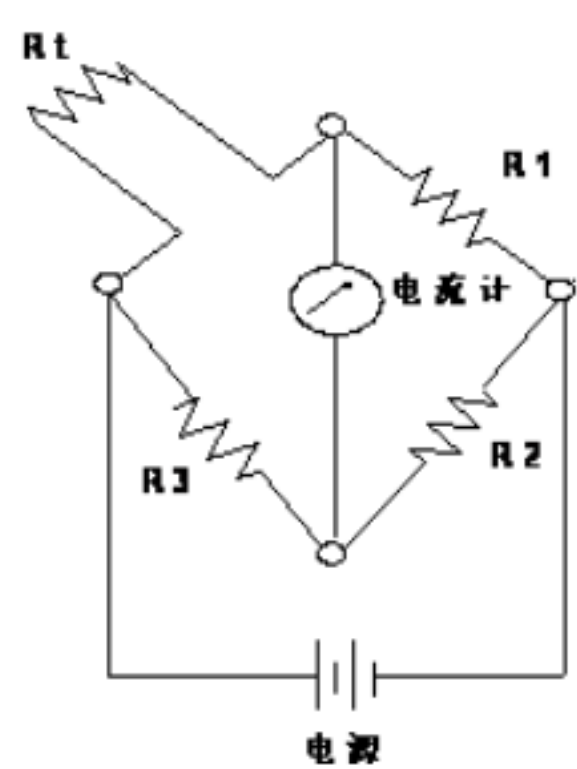
7-28 使用 k 型热电偶，基准接点为 0 、测量接点为 30 和 900 时，温差电动势分别为 $1.203mV$ 和 $37.326mV$ 。当基准接点为 30 ，测温接点为 900 时的温差电动势为多少？

答：现 $t_2=900$ ， $t_1=30$ ，基准接点温度为 30 ，

测温接点温度为 900 时的温差电动势设为 E ，

则 $37.326=1.203+E$ ，所以 $E=36.123mV$ 。

7-29 0 时铂金热电阻的阻值为 100 。按下图所示进行温度测量。 $R_1=100$ ， $R_2=200$ ， $R_3=300$ 时桥路达到平衡。此时温度为多少？假设铂金电阻的温度系数为 0.003851 $^{-1}$ ，电阻与温度成线性关系，另外导线的电阻可忽略不计。



答：电桥平衡的条件为 $R_1 \cdot R_2 = R_3 \cdot R_t$ ，所以

$$R_t = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} = \frac{100 \cdot 300}{200} = 150\Omega$$

另一方面， t () 时的电阻阻值表示式为

$$R_t = 100 (1 + 0.003851 \cdot t) \quad R_t = 150$$

所以 $t=129.8$

7-30 0 时的电阻为 100 的铂金热电阻。 300 时的阻值按下面两种方法计算，其结果之差换算成温度差是多少？电阻用温度的一次方程表示， $R_T = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2)$ 式中 $B=0$ ， $A=0.003851$ $^{-1}$ 。（此时 100 时的电阻值为 138.51 ）电阻值与温度为二次函数关系。用一次方程近似时，温度误差为多少？

答：(1) $R_T = 100 (1 + 0.003851 \cdot t)$ ，以 $t=300$ 代入，得 $R_T=215.53$ 。

(2) $R_T = R_0 (1 + At + Bt^2)$ 式中以 $t=300$ 代入, 得 $R_T=212.05$ 。

(3) 同(2), 算得 $t=310$ 时电阻值为 215.61 ,

即温度上升 10 电阻增加 3.56 。

因此, 由 $(215.53-212.05) / 0.356=9.8$ 算得误差为 9.8 。

7-31 某热敏电阻 0 时电阻为 $30k$, 若用来测量 100 物体的温度, 其电阻为多少? 设热敏电阻的系数 B 为 $3450K$ 。

答:

$$R_T = R_0 \exp\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}\right)$$

式中以 $R_0=3 \times 10^4$, $B=3450$, $T=373.15$ 和 $T_0=273.15$ 代入得 $R_T=1.017k$ 。

7-32 和人体体温 (36) 相同的黑体, 其热辐射的分光辐射辉度为最大时波长为多少?

答: 将 $T=273.15+36=309.15$ 代入 $m \cdot T=2.8978 \times 10^{-3} m \cdot K$,

得 $m=9.37 \times 10^{-6} m=9.37 \mu m$ 。

7-33 何谓热电阻传感器? 测量温度的范围?

答: 热电阻利用电阻随温度变化的特性制成的传感器称热电阻传感器。常用的热电阻有: 铂、铜等。

铂 ($-200 \sim 650$)、铜 ($-50 \sim 150$)

经常使用电桥作为传感器的测量电路, 为了减少连线电阻变化引起的误差, 工业上用铂电阻引线为三根, 实验室用四根, 可消除测量电路中连线电阻引起的误差。

7-34 热电势公式: $E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) = \frac{k}{e} (T - T_0) \ln \frac{n_A}{n_B}$, 从公式中得到的哪几个结论?

答:

(1) 若组成热电偶回路的两种导体相同, 则无论两接点温度如何, 热电偶回路中的总热电势为零。

(2) 如热电偶两接点温度相同, $T=T_0$, 则尽管导体 A 、 B 的材料不同, 则无论两接点温度如何, 热电偶回路中的总热电势为零。

(3) 热电偶 AB 的热电势与 A 、 B 材料的中间温度无关, 而只与接点温度有关。

(4) 热电偶 AB 在接点温度为 T_1, T_3 时的热电势, 等于热电偶在接点温度为 T_1, T_2 和 T_2, T_3 时的热电势总和。

(5) 在热电偶回路中, 接入第三种材料的导线, 只要第三种导线的两端温度相同, 第三种导线的引入不会影响热电偶的热电势。

(6) 当温度为 T_1, T_2 时, 用导体 A 、 B 组成的热电偶的热电势等于 AC 热电偶和 CB 热电偶的热电势之代数和。

7-35 热电偶测温的物理基础是什么? 热电偶冷端为什么要温度补偿? 常用的温度补偿方法有哪些?

答：热电偶测温的物理基础是热电效应。

为了热电势与被测温度间呈单值函数关系，需要热电偶冷端的温度保持恒定。由于热电偶的温度—热电势关系曲线（刻度特性）是在冷端温度保持 0 的情况下得到的与之配套的仪表是根据这一关系曲线进行刻度的，测量时，必须满足 $T_0 = 0$ 的条件，否则出现误差，而在实际工作时，冷端受外界温度影响。

（1）冷端温度恒温法；（2）计算修正法；（3）电桥补偿法。

7-36 常用热电偶及其测温范围

铂铑—铂热电偶：长时间 1300 ，良好环境短期 1600 。

镍铬—镍硅（铝）热电偶：氧化性或中性介质中 900 以下，短期 1200 以下，还原性介质 500 以下

镍铬—考铜热电偶：还原性或中性介质 600 以下，短期： 800

铂铑 30—铂铑 6 热电偶：长期 1600 ，短期 1800 。

7-37 热电偶补偿导线的作用是什么？

答：将热电偶冷端延伸出来。

7-38 试说明热电偶的测温原理。

答：两种不同材料构成的热电变换元件称为热电偶，导体称为热电极，通常把两热电极的一个端点固定焊接，用于对被测介质进行温度测量，这一接点称为测量端或工作端，俗称热端；两热电极另一接点处通常保持为某一恒定温度或室温，称冷端。热电偶闭合回路中产生的热电势由温差电势和接触电势两种电势组成。热电偶接触电势是指两热电极由于材料不同而具有不同的自由电子密度，在热电极接点接触面处产生自由电子的扩散现象；扩散的结果，接触面上逐渐形成静电场。该静电场具有阻碍原扩散继续进行的作用，当达到动态平衡时，在热电极接点处便产生一个稳定电势差，称为接触电势。其数值取决于热电偶两热电极的材料和接触点的温度，接点温度越高，接触电势越大。

《传感器原理与应用》及《传感器与测量技术》习题集与部分参考答案

教材：传感器技术（第 3 版）贾伯年主编，及其他参考书

第 8 章 光电式传感器

8-1 简述光电式传感器的特点和应用场合，用方框图表示光电式传感器的组成。

8-2 何谓外光电效应、光电导效应和光生伏特效应？

答：外光电效应：在光线的作用下，物体内的电子逸出物体表面向外发射的现象。

光电导效应：在光线作用下，电子吸收光子能量从键合状态过渡到自由状态，而引起材料电导率的变化现象。

光生伏特效应：在光线作用下能够使物体产生一定方向的电动势的现象。

8-3 试比较光电池、光敏晶体管、光敏电阻及光电倍增管在使用性能上的差别。

答：光电池：光电池是利用光生伏特效应把光直接转变成电能的器件。它有较大面积的 PN 结，当光照射在 PN 结上时，在结的两端出现电动势。当光照到 PN 结区时，如果光子能量足够大，将在结区附近激发出电子-空穴对，在 N 区聚积负电荷，P 区聚积正电荷，这样 N 区和 P 区之间出现电位差。

8-4 通常用哪些主要特性来表征光电器件的性能？它们对正确选用器件有什么作用？

8-5 怎样根据光照特性和光谱特性来选择光敏元件？试举例说明。

答：不同类型光敏电阻光照特性不同，但光照特性曲线均呈非线性。因此它不宜作定量检测元件，一般在自动控制系统中用作光电开关。

光谱特性与光敏电阻的材料有关，在选用光敏电阻时，应把光敏电阻的材料和光源的种类结合起来考虑，才能获得满意的效果。

8-6 简述 CCD 图像传感器的工作原理及应用。

8-7 何谓 PSD？简述其工作原理及应用。

8-8 说明半导体色敏传感器的工作原理及其待深入研究的问题。

8-9 试指出光电转换电路中减小温度、光源亮度及背景光等因素变动引起输出信号漂移应采取的措施。

8-10 简述光电传感器的主要形式及其应用。

答：模拟式（透射式、反射式、遮光式、辐射式）、开关式。

应用：光电式数字转速表、光电式物位传感器、视觉传感器、细丝类物件的在线检测。

8-11 举出你熟悉的光电传感器应用实例，画出原理结构图并简单说明原理。

8-12 试说明图 8-33(b) 所示光电式数字测速仪的工作原理。（1）若采用红外发光器件为光源，虽看不见灯亮，电路却能正常工作，为什么？（2）当改用小白炽灯作光源后，却不能正常工作，试分析原因。

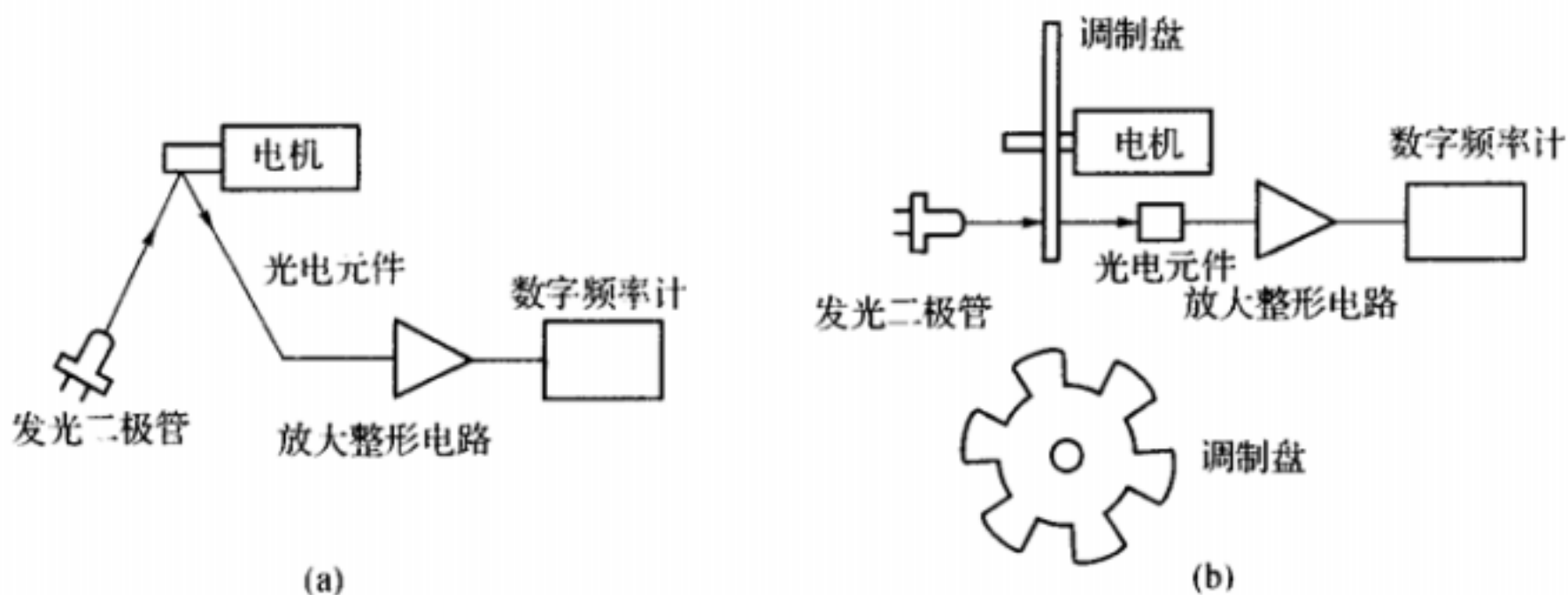


图 8-33 光电式数字转速表工作原理图

8-13 若采用波长为 9100 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) 的砷化镓发光二极管作光源，宜采用哪几种光电元件作测量元件？为什么？

8-14 手头有三种光电元件：硫化铊光敏电阻、硫化铅光敏电阻、硅光敏三极管，用可见光为光源，请按下列条件选用光电元件：（1）制作光电开关，开关频率约 10 Hz ；（2）制作光电开关，开关频率约为 10^4 Hz ；（3）作线性测量元件，响应时间 10^{-1} s 。

8-15 简述视觉传感器概念、结构组成和工作原理。

*8-16 什么是外光电效应？内光电效应？光生伏特效应？光电导效应？

8-17 光电器件中的光照特性、光谱特性分别描述的是光电器件的什么性能？

8-18 试述光敏电阻、光敏晶体管、光电池的器件结构和工作原理。

8-19 当光源波长为 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 时宜采用哪种材料的光敏元件进行测量？

8-20 叙述电荷耦合器件（ CCD ）的结构和存储电荷与转移电荷的工作过程。

答：CCD 是一种半导体器件，在 N 型或 P 型硅衬底上生长一层很薄的 SiO_2 ，再在 SiO_2 薄层上依次序沉积金属电极，这种规则排列的 MOS 电容数组再加上两端的输入及输出二极管就构成了 CCD 芯片，CCD 可以把光信号转换成电脉冲信号。每一个脉冲只反映一个光敏元的受光情况，脉冲幅度的高低反映该光敏元受光的强弱，输出脉冲的顺序可以反映光敏元的位置，这就起到图像传感器的作用。

转移电荷的工作过程：如图三相控制是在线阵列的每一个像素上有三个金属电极 P1,P2,P3，依次在其上施加三个相位不同的控制脉冲 1，2，3，见图（b）。CCD 电荷的注入通常有光注入、电注入和热注入等方式。图（b）采用电注入方式。当 P1 极施加高电压时，在 P1 下方产生电荷包（ $t=t_0$ ）；当 P2 极加上同样的电压时，由于两电势下面势阱间的耦合，原来在 P1 下的电荷将在 P1、P2 两电极下分布（ $t=t_1$ ）；当 P1 回到低电位时，电荷包全部流入 P2 下的势阱中（ $t=t_2$ ）。然后，P3 的电位升高，P2 回到低电位，电荷包从 P2 下转到 P3 下的势阱（ $t=t_3$ ），以此控制，使 P1 下的电荷转移到 P3 下。随着控制脉冲的分配，少数载流子便从 CCD 的一端转移到最终端。终端的输出二极管搜集了少数载流子，送入放大器处理，便实现电荷移动。

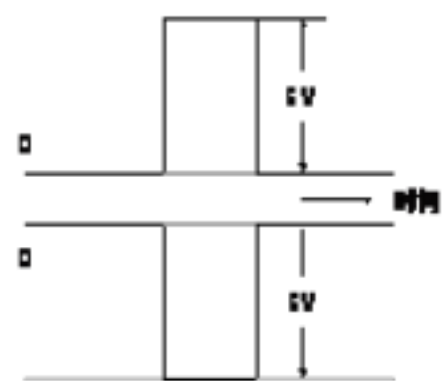
8-21 作为光波 $5 \mu\text{m}$ 红外线的传感器材料有哪些？

8-22 作光电管的 CdS 材料和 InSb 晶体的性质差异是什么？

答：InSb 光电管虽然响应速度快，但必须使用液体氮冷却。

8-23 在用光开关检测物体的系统中，指出输出电压的时间波形。

答：光进入受光器输出电压为 0V，光不进入时，输出 6V，所以下图为所示波形。



8-24 在用光开关检测物体的系统中，由受光器的受光次数，可计算通过输送带上物体的个数，那么，用输送带搬运两种高度的物体时，画出能分别计算两种高度的物体个数的系统组成图。

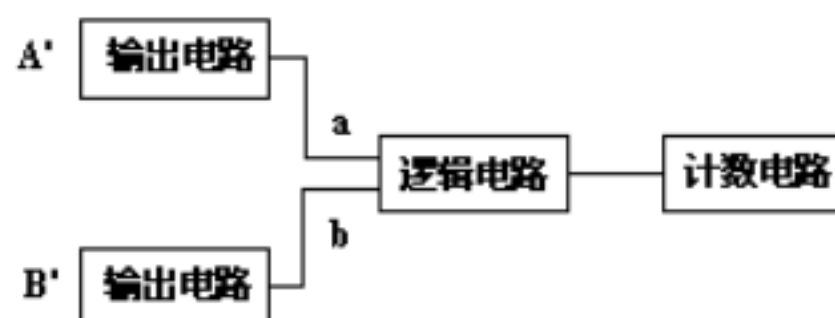
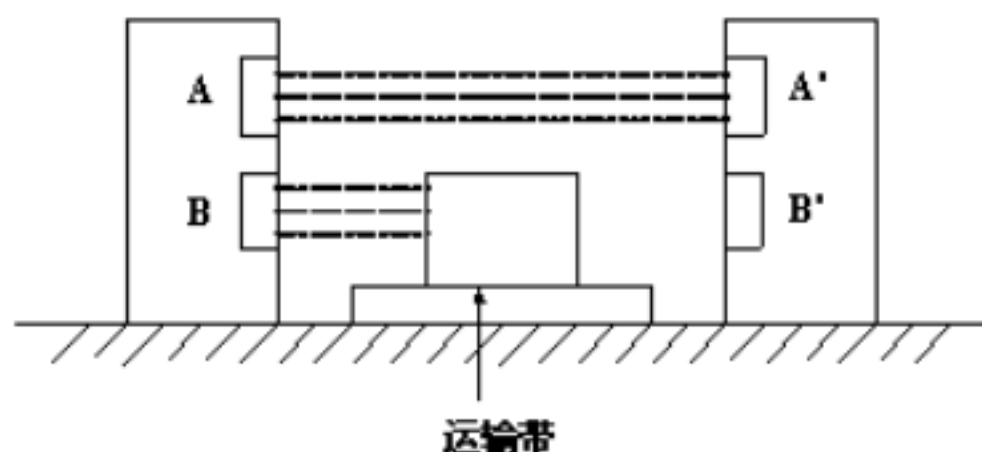
答：在运输带两边分别设置发光器 A 和 B，受光器 A' 和 B'。高度低的物体通过时，（下图（a）），受光器 A' 受光但 B' 不受光（表 1 中分别用符号 和 表示）。若是高低物体，则 A' 和 B' 都不受光（表 1 中分别用 和 表示）。因此可得 b 图的体统组成图。受光时（符号 ）输出是 0V（L 水平），不受光（符号 ）时输出是 6V（H 水平）。因此，表 1 变成表 2。结果，分别数一数输出 a,b 为 L，H 时（低的物体）或者 H，H 时（高的物体）即可。这是用逻辑电路和计数电路完成的。

	A'	B'
低的物体	○	×
高的物体	×	×
没有物体	○	○

表1

	a	b
1)	L	H
2)	H	H
3)	L	L

表2



8-25 由光电二极管二维阵列组成面型传感器进行图像检测，对图像的分辨率由光电二极管的个数决定，试说明理由。

答：面型传感器由许多的单元构成二维平面，其中每一个小单元都是一个光电二极管，称为像素。用面型传感器测量物体的形状所得的图像的分辨率最高只能是一个像素。如果所测得图像长为 l ，对应 N 个像素，分辨率为 l/N 。假设 N 为 200，则分辨率最高只能使 $1/200$ 。

8-26 简述模拟式光电传感器的要求及工作方式。

答：模拟式光电传感器将被测量转换成连续变化的光电流，要求光电元件的光照特性为单值线性，而且光源的光照均匀恒定。属于这类的传感器的工作方式有：

- (1) 被测物体本身是光辐射源，由它释出的光射向光电元件；
- (2) 被测物体位于恒定光源与光电元件之间，根据被测物对光的吸收程度或对其谱线的选择来测定被测参数；
- (3) 恒定光源射出的光投射到被测物体上，再从其表面反射到光电元件上，根据反射的光通量多少测定被测物表面性质和状态；
- (4) 被测物位于恒定光源与光电元件之间，根据被测物阻挡光通量的多少来测定被测参数；
- (5) 时差测距：恒定光源发出的光投射于目的物，然后反射到光电元件，根据发射与接收之间的时间差测出距离。

8-27 光电效应可分几类？说明其原理并指出相应的光电器件。

答：光电效应是指物体吸收了光能后转换为该物体中某些电子的能量而产生电效应的现象。分为：外光电效应和内光电效应两种，其中内光电效应又分为光电导效应和光生伏特效应。

外光电效应：在光的照射下，电子逸出物体表面而产生光电子发射的现象。条件：小于红限波长（或大于其红限频率）即根据爱因斯坦光电效应方程，要使一个电子从物体表面逸出，必须使光子的能量大于该物体的表面逸出功，超过部分的能量表现为逸出电子的动能。外光电效应多发生于金属和金属氧化物。基于外光电效应原理工作的光电器件有光电管和光电倍增管。

内光电效应：半导体材料中处于价带的电子吸收光子能量，通过禁带跃入导带，使导带内电子浓度和价带内空穴增多，即激发出光生电子-空穴对，从而使半导体材料产生电效应。条件：光子能量必须大于材料的禁带宽度 ΔE 。内光电效应按其工作原理可分为两种：

1) 光电导效应：半导体受光照后电阻率变化的现象。过程：当光照射到半导体材料上时，价带中的电子受到能量大于或等于禁带宽度的光子轰击，并使其由价带越过禁带跃入导带，使材料中导带内的电子和价带内的空穴浓度增加，从而使电导率变大。基于光电导效应原理工作的光电器件有光敏电阻、光敏二极管和光敏三极管。

2) 光生伏特效应：光照产生电子-空穴对在结电场作用下，电子 \rightarrow N 区，空穴 \rightarrow P 区，其积累使 PN 结两边的电位发生变化，PN 结两端出现一个因光照而产生电动势的现象，称为光生伏特效应，常称为光电池。基于该效应的光电器件有光电池和光敏二极管、光敏三极管。

8-28 光电器件的基本特性有哪些？它们各是如何定义的？

答：1) 光电流：光敏元件的两端加上一定偏置电压后，在某种光源的特定照度下产生或增加的电流称为光电流。

2) 暗电流：光敏元件在无光照时，两端加电压后产生的电流称为暗电流。

3) 光照特性：当光敏元件加一定电压时，光电流与光敏元件上光照度之间的关系。

4) 光谱特性（又称光谱响应）：当光敏元件加一定电压时，若照射在光敏元件上的是一单色光，且入射光功率不变，光电流随入射光波长变化而变化的关系。

5) 伏安特性：在一定照度下，光电流与光敏元件两端的电压的关系。

6) 频率特性：在相同的电压和相同幅值的光强度下，当入射光受不同的正弦交变频率调制时，光敏元件输出的光电流和灵敏度随调制频率变化的关系。

7) 温度特性：环境温度变化后，光敏元件的光学性质也将随之改变的现象。

8-29 硅光电池的结构是什么？

答：在 N 型硅片上渗入 P 型杂质形成一个大面积 PN 结而成。

8-30 简述光电传感器的物理基础以及光电效应的种类和所对应的光敏元件。

答：物理基础：光电效应。

在光线作用下能使电子逸出物体表面的称外光电效应，有光电管、光电倍增管。在光线作用下能使电阻率改变的称内光电效应（光电导效应），有光敏电阻、光电管。在光线作用下能使物体产生一定方向电动势的称光生伏特效应，有光电池。

8-31 光电效应有哪些类型？与之对应的光电元件各有哪些？简述各光电元件的优缺点。

答：光电效应根据产生结果的不同，通常可分为外光电效应、内光电效应和光生伏特效应三种类型。光电管和光电倍增管是属于外光电效应的典型光电元件。光电倍增管的优点是灵敏度高，比光电管高出几万倍以上，输出线性度好，频率特性好；缺点是体积大，易破碎，工作电压高达上千伏，使用不方便。因此它一般用于微光测量和要求反应速度很快的场合。

基于内光电效应的光电元件有光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管、光敏晶闸管。光敏电阻具有很高的灵敏度，光谱响应的范围可以从紫外线区域到红外线区域，而且体积小，性能稳定，价格较低，所以被广泛应用于自动监测系统中。在使用光敏电阻时，光电流并不是随光强改变而立刻做出相应的变化，而是具有一定的滞后，这也是光敏电阻的缺点之一。光敏三极管的灵敏度比二极管高，但频率特性较差，暗电流较大。光敏晶闸管输出功率比它们都大，主要用于光控开关电路及光耦合器中。

基于光生伏特效应的光电元件主要是光电池。应用最广泛的是硅光电池，它具有性能稳定，光谱范围宽，频率特性好，传递效率高、能耐高温辐射等优点。