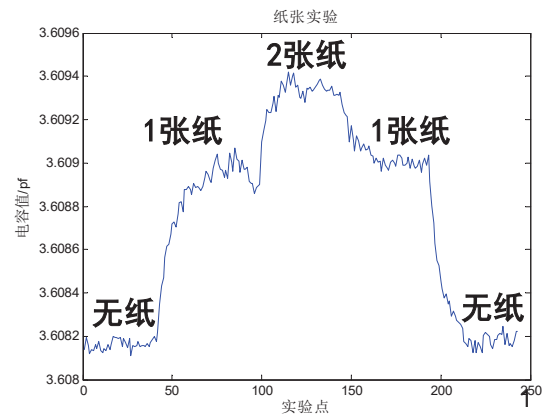
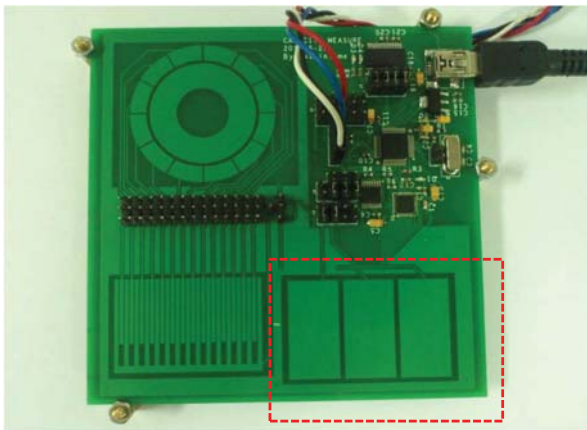


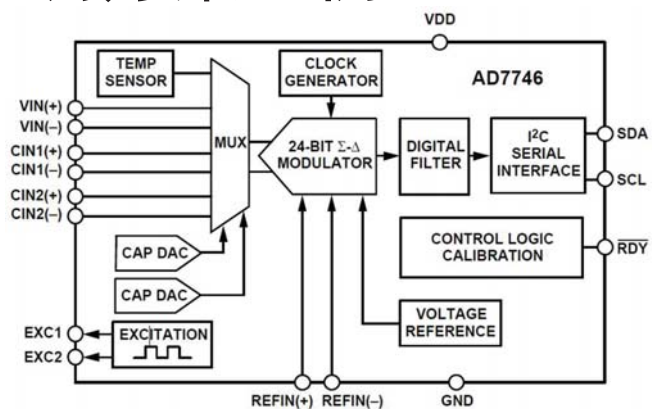
差动电容检测方案（例）

- 差动变电介质式微弱电容传感器的设计与实现
- 采用AD7746电容数字转换器和STM32单片机设计了一款差动电容传感器及其硬件测量电路，对微小电容变化的测量精度可达0.2fF，转换频率约为4Hz，可用来实现纸张厚度检测或空气中粉尘沉积量的检测。

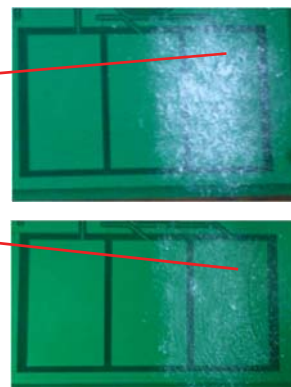
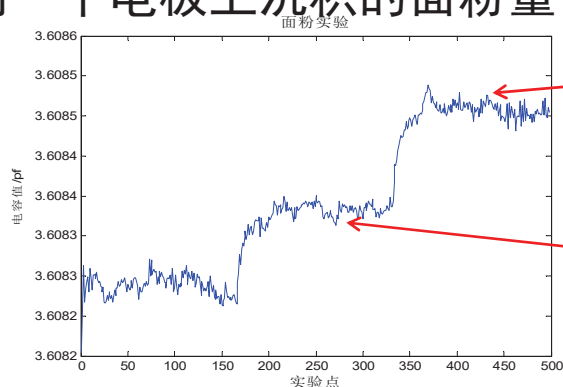


差动电容检测方案（例）

- AD7746的内部结构图
24-Bit Capacitance-to-Digital Converter



- 检测一个电极上沉积的面粉量



位移测量（2）

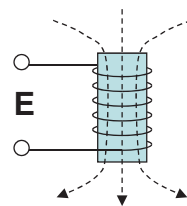
- 自感式位移传感器
- 互感式—《差动变压器》
- 偏位式和零位式检测结构
- 自动平衡式仪表：含反馈环节，零位式检测
 - 力矩平衡式（称重传感器）
 - 电位平衡式（温度记录仪）
 - 磁场平衡式（电流传感器）
 - 力平衡式（加速度传感器）
- 霍尔位移传感器
- 电涡流位移传感器

3

电磁传感器的基础知识

• 电磁感应 $E = -N \frac{d\Phi}{dt}$

感应电动势、感应电流的方向



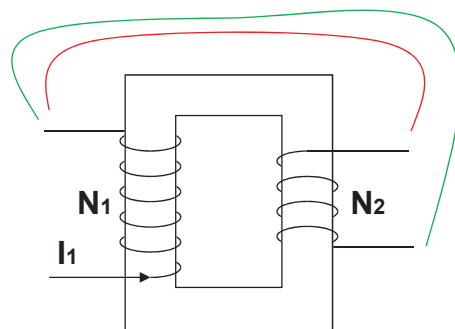
磁通量 Φ [Wb]
磁通量密度 B [Wb/m²]

• 自感 $L_1 = \frac{N_1 \phi_1}{I_1}$

• 互感 $M = \frac{N_2 \phi_1}{I_1} = \frac{N_1 \phi_2}{I_2}$

$$M = k \sqrt{L_1 L_2}$$

无漏磁时，电磁耦合系数 $k=1$

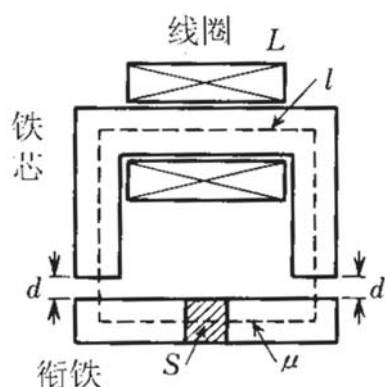


- 两个线圈**顺接**：两个线圈的磁通量方向相同；
- 两个线圈**逆接**：两个线圈的磁通量方向相反。

• 变压器： $V_2 : V_1 = N_2 : N_1$

4

自感式位移传感器

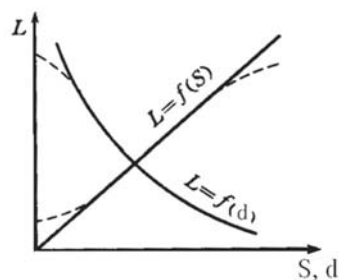


电感

$$L = N \frac{\Phi}{i}$$

磁通

$$\Phi = \frac{Ni}{R_m}$$



磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S} + \frac{2d}{\mu_0 S}$

μ : 磁导率

$$\mu \gg \mu_0$$

电感 $L = \frac{N^2}{R_m}$

测量原理:

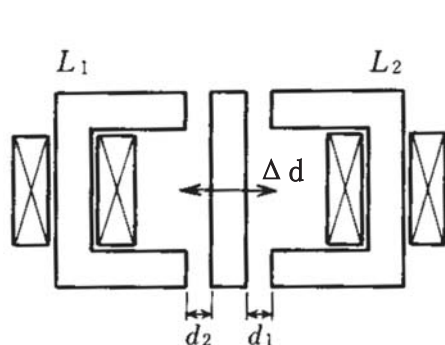
$$L \approx \frac{N^2 \mu_0 S}{2d}$$

应用:

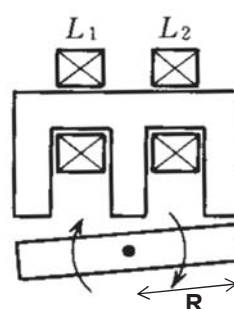
- 绝缘材料厚度检测: 缝隙厚度
- 连续测定钢板厚度: 衔铁厚度

5

自感式差动位移传感器



(a) 直线位移传感器

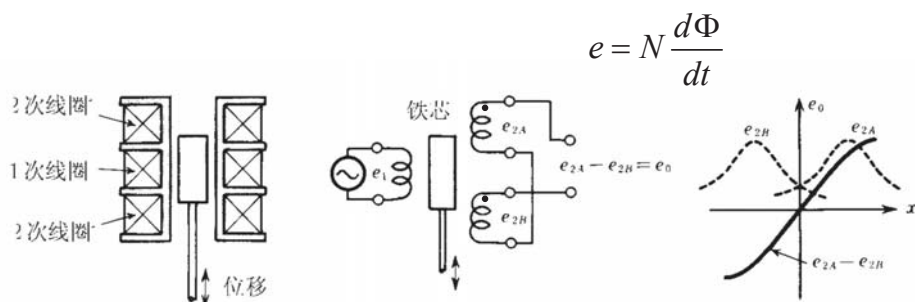


(b) 旋转位移 (角度) 传感器

$$\frac{L_2 - L_1}{L_0} \approx \frac{2\Delta d}{d_0}$$

$$\frac{L_2 - L_1}{L_0} \approx \frac{2R\Delta\theta}{d_0}$$

差动变压器—互感式位移传感器



铁芯在中央： $e_0=0$
铁芯向上移： e_0 正相位
铁芯向下移： e_0 负相位

•铁芯的正负移动方向
 e_0 是交流信号，要经过相位解调，才能得到带正负极性的输出电压，从而判断铁芯的正负移动方向。

性能指标（例）

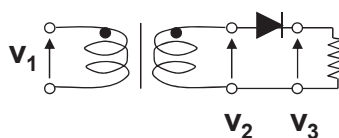
- 移动量程： $\pm 25\text{mm} \sim \pm 0.5\text{m}$
- 分辨率：百万分之一
- 交流频率：3kHz

•**差动放大结果**与理想结果差距较大
有零点残余电压、不同相、高次谐波等。
•原因
不完全对称、铁心磁化非线性等。

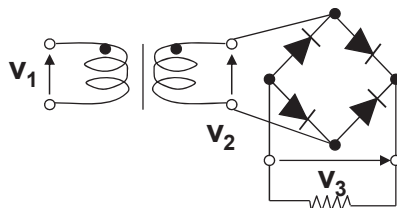
7

差动变压器转换电路—由交流获得直流

1) 半波整流电路



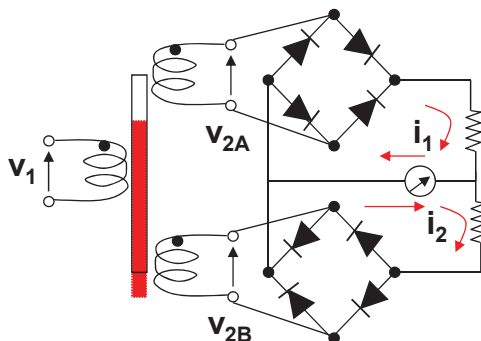
2) 全波整流电路



3) 差动全波整流电路

=》**相敏整流电路**

将不同相位的交流信号
转换成相应极性的直流信号

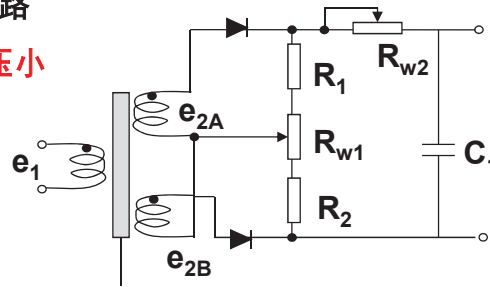


8

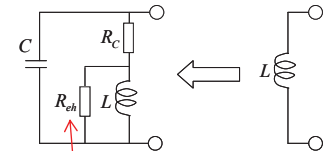
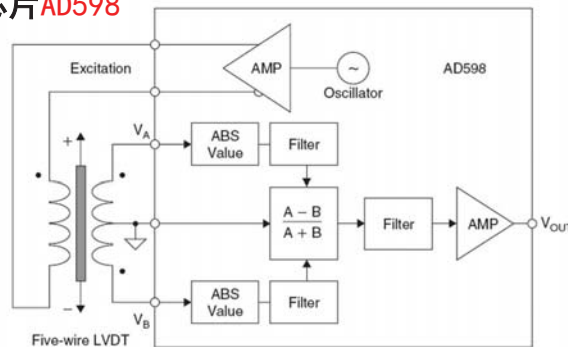
差动变压器转换电路—由交流获得直流

- 整流和滤波电路

零点残余电压小



- 信号调理芯片AD598

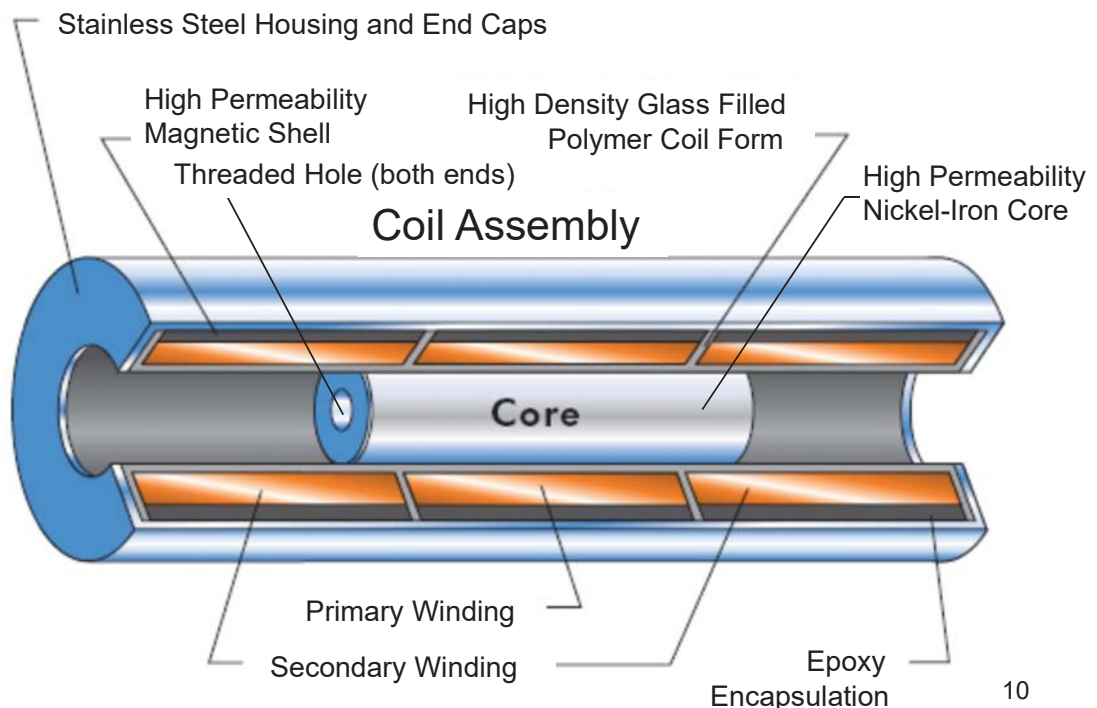


电感等效电路：
铜损电阻 R_c
铁芯涡流损耗 R_e
磁滞损耗 R_h
高频电容特性

9

LVDT结构图

Linear Variable Differential Transformer

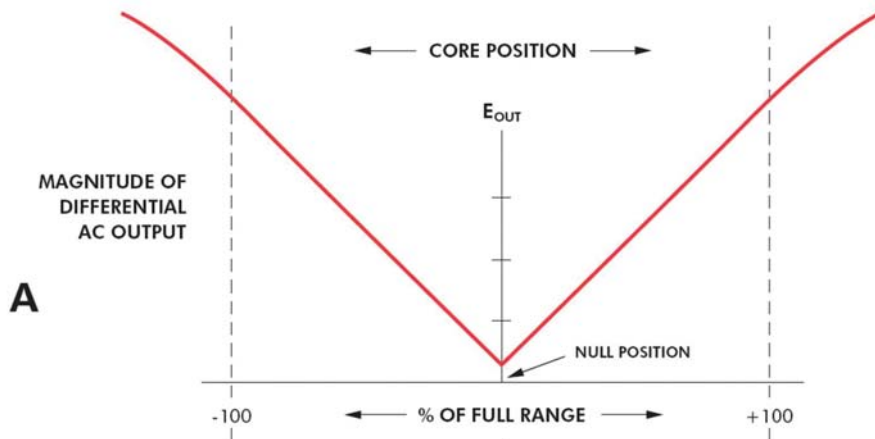


10

LVDT 输出信号

Linear Variable Differential Transformer

- 交流信号输出的幅值

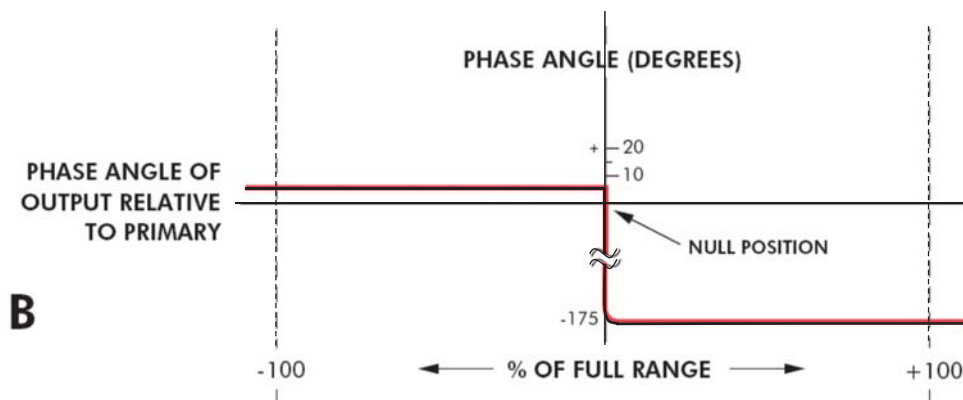


11

LVDT 输出信号

Linear Variable Differential Transformer

- 过零点时相位发生翻转：
与一次线圈对比，同相 \longleftrightarrow 反相

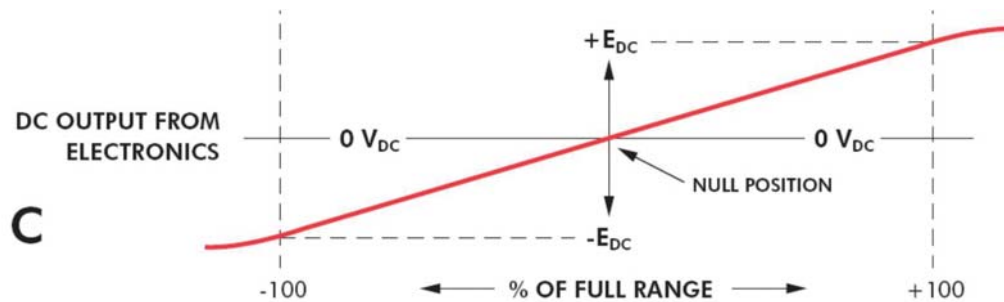


12

LVDT 输出信号

Linear Variable Differential Transformer

- 经过处理的直流信号输出



13

差动变压器接口电路

原则：交流变直流

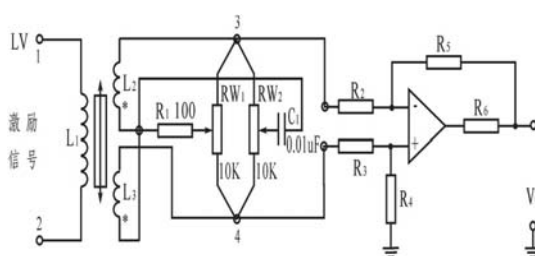
电路：相敏检波电路、整流滤波

集成芯片：AD598，NE5521等

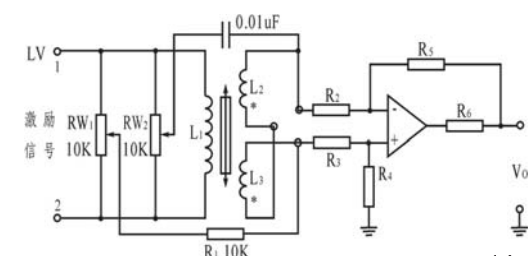
零点残余电压补偿（实验）

- 补偿基波和高次谐波

(1) 电桥调平衡网络



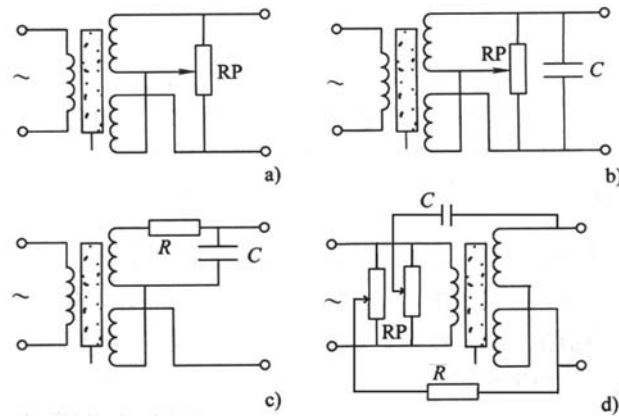
(2) 反馈式调平衡网络



14

零点残余电压补偿方法

- 1) 加串联电阻，消除与基波同相成分
- 2) 加并联电阻，消除与基波正交的成分
- 3) 加并联电容，改变相移，消除高次谐波
- 4) 加反馈电容和反馈电阻，补偿基波和高次谐波=》实验内容之一



15

最多可选2项

设置

判断下列描述是否正确

- A 利用LVDT的原理，可设计RotaryVDT测量角度
- B LVDT的位移分辨率高是因为输出与匝数有关
- C LVDT的输入电流如果有变化，输出需要补偿
- D LVDT二次线圈差动信号的相位与位移无关

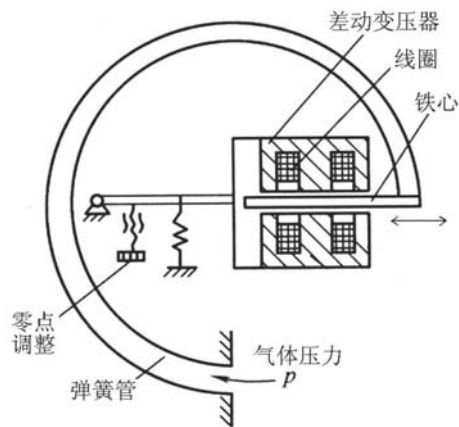
提交

16

差动变压器的应用

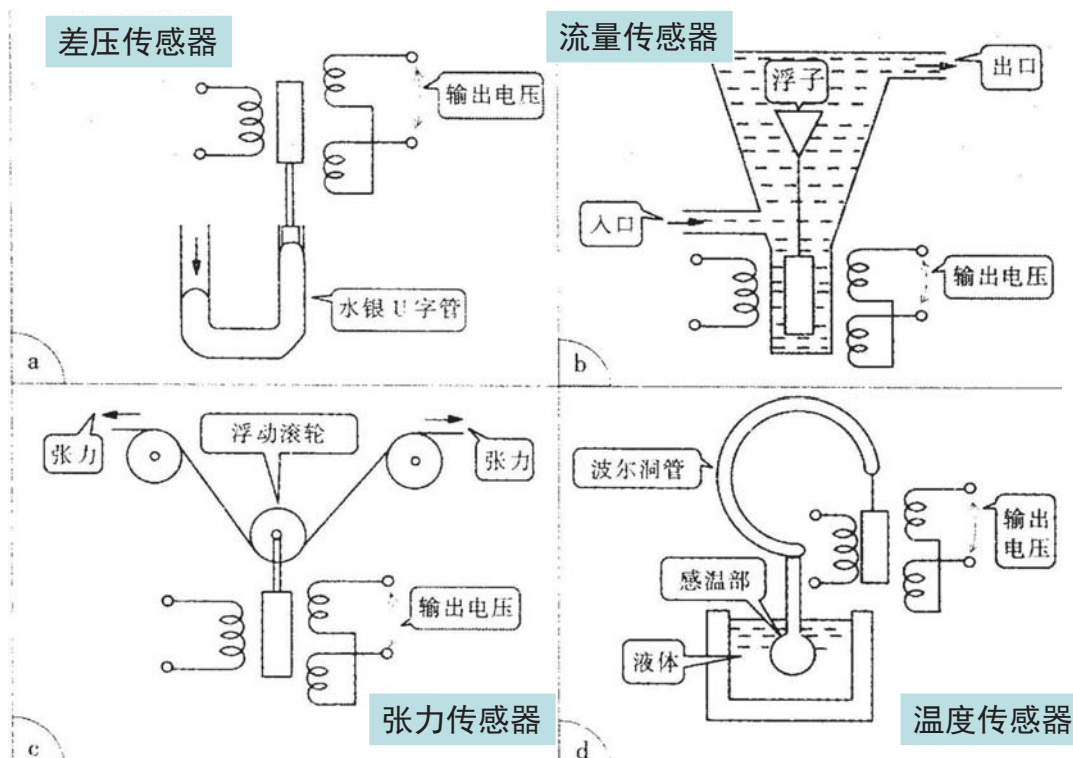
例：气体压力传感器

气体压力升高，
弹簧管伸张，
LVDT的位移向右。



17

差动变压器的应用



18

差动变压器的特点

- 多种传感器的基础部件
气压传感器，温度传感器，流量传感器，张力传感器，...
- 特点：应用广泛
 - 铁心和线圈无摩擦（只有电磁耦合），无机械磨损，寿命长。
 - 分辨率无限小，由电路噪声和显示分辨率决定。
 - 铁心移动超出量程也无损坏，抗震动。
 - 只对轴向敏感，对径向不敏感。
 - 铁心和线框可以是高压、高温液体中的套筒等。
 - 电磁感应不受环境湿度和污染物的影响。（与电容传感器的最大区别）
 - 零点稳定、重复性好，用于平衡式仪表的反馈控制中。

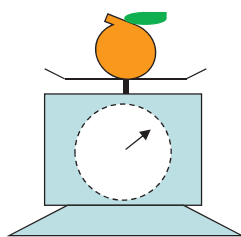


- 偏位式和零位式检测
 - 在称重和电桥电路上的原理比较
 - 自动平衡式仪表/传感器举例：
力矩平衡，电位差平衡，磁场平衡，力平衡等。

19

偏位式和零位式的称重方法比较

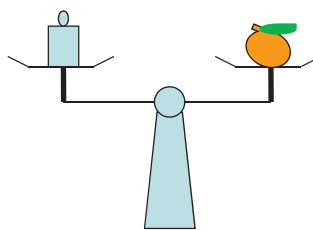
弹簧秤



偏位式：

- 用偏离零点的大小表示输出量；
- 弹性随时间和温度变化的影响；
- 有滞环和非线性的影响

天平称



零位式：

- 在零点平衡；
- 克服了偏位式缺点；
- 利用自动平衡原理；
- 利用其他精密量参数输出。

20

电桥电路中的偏位法和零位法

- 电桥平衡下:

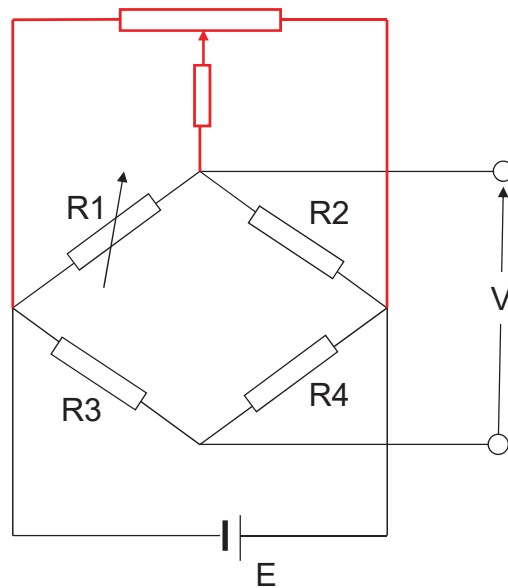
$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

与E无关 (零位法)
利用其他精密电位器

- R_1 发生变化:

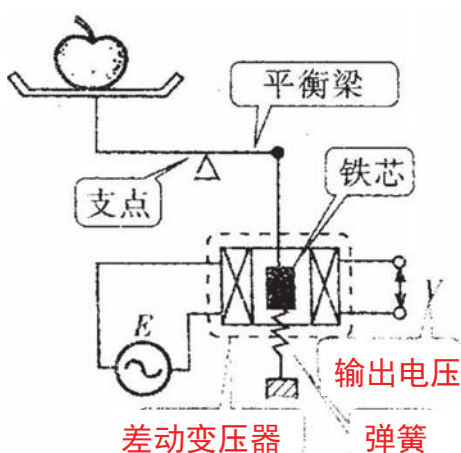
$$V \approx \frac{\Delta R_1}{4R_1} E$$

与E有关 (偏位法)
近似线性

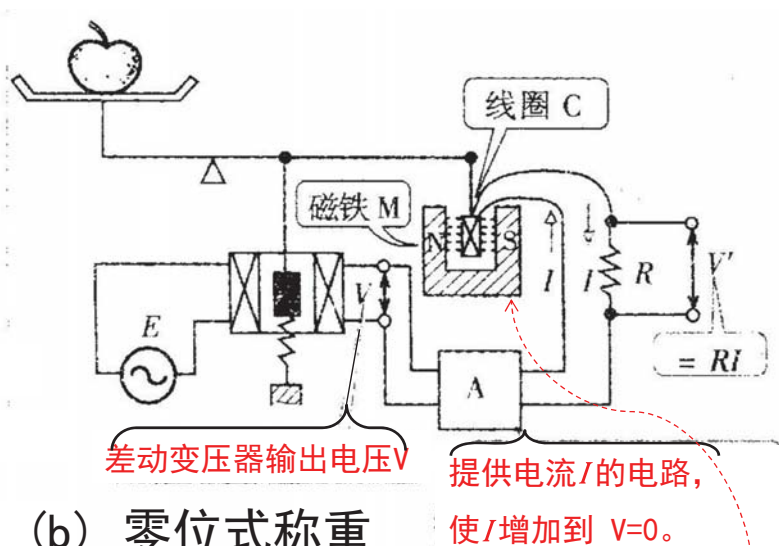


21

偏位式和零位式重量传感器



(a) 偏位式称重



(b) 零位式称重

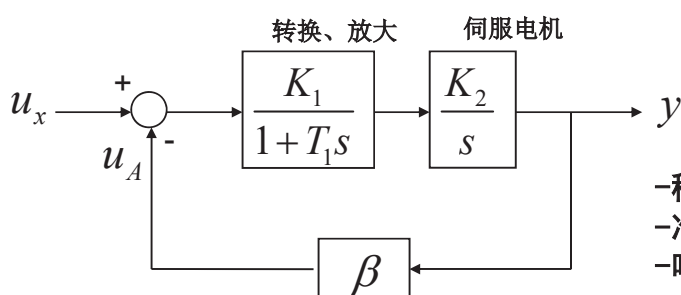
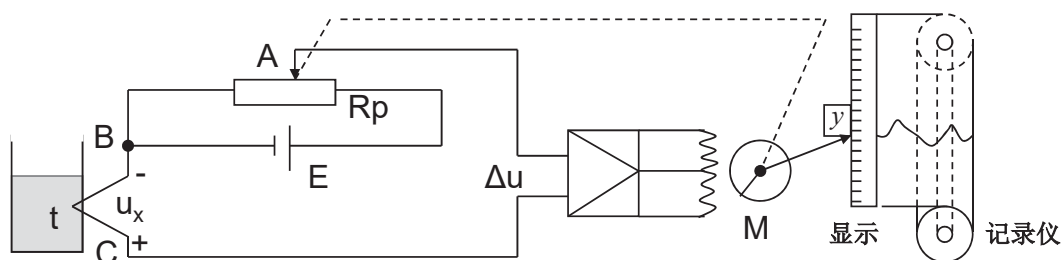
力矩平衡式重量传感器



22

电位平衡式温度记录仪

- 含积分环节（伺服电机），二阶系统



$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_1 K_2 \beta}{T_1}},$$

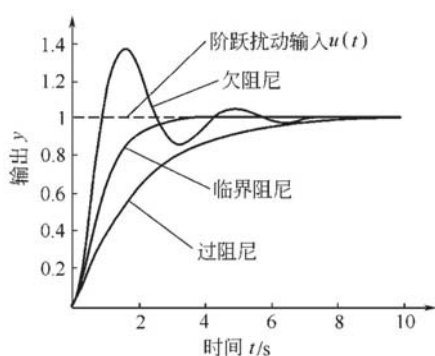
$$\zeta = \frac{1}{2\sqrt{K_1 K_2 \beta T_1}}$$

- 稳定性：无超调，衰减率 ζ (0.4~0.8)
- 准确性：静态误差，等速响应 $\varepsilon = \frac{2\zeta}{\omega_0}$
- 响应速度：过渡时间

23

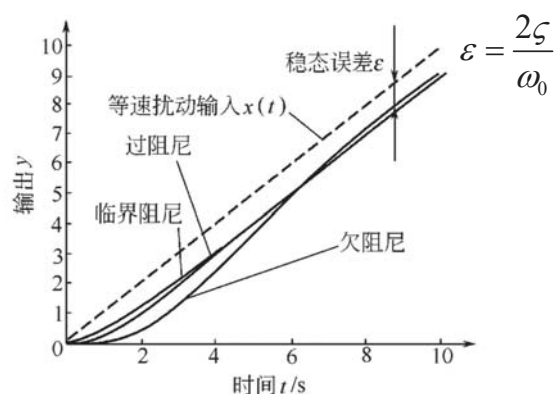
二阶系统的响应特性

- 阶跃扰动响应特性



$$G(s) = \frac{\frac{K_1 K_2}{s(1+T_1 s)}}{1 + \frac{K_1 K_2 \beta}{s(1+T_1 s)}} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2},$$

- 等速扰动响应特性



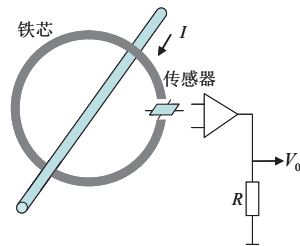
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_1 K_2 \beta}{T_1}},$$

$$\zeta = \frac{1}{2\sqrt{K_1 K_2 \beta T_1}}$$

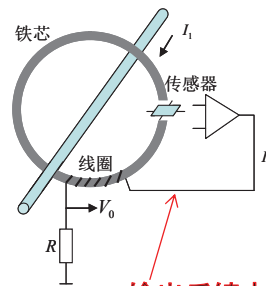
24

平衡式电流传感器

开环型霍尔电流检测



闭环型霍尔电流检测

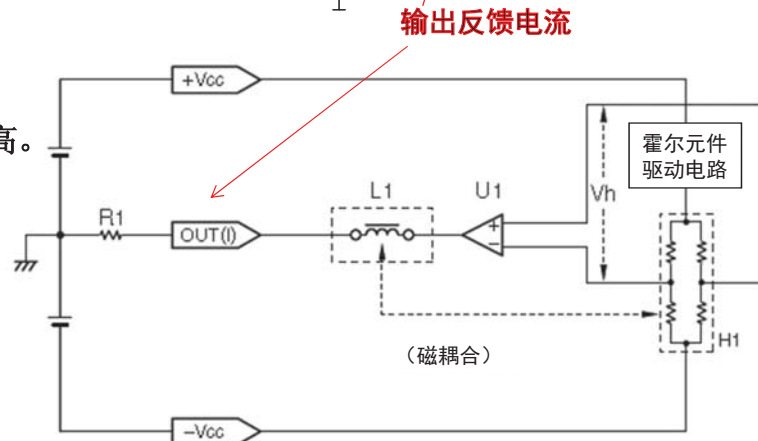


开环型霍尔电流传感器:

一般精度低，带宽窄；

闭环型霍尔电流传感器:

一般带宽较宽，精度较高。



25

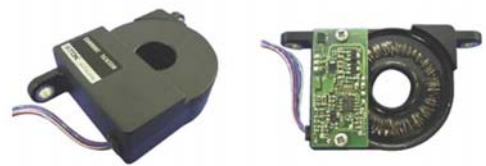
平衡式电流传感器

需求：

- 非接触电流测量；
- 大电流测量（200A）；
- 直流和交流电流成分同时测量；
- 耐振耐高湿高温，耐电磁干扰，耐静电

应用领域:

- 动力电池的电流监测，
如：混合动力车的锂电池的充放电等



电流传感器性能指标

被测电流: $I(1)$ (A)
绕组数: 1匝

U1的反馈电流: $I(2)$ (A)
线圈L1的匝数: 4000

则： $I(1) \times 1 = I(2) \times 4000$

被测电流量程 -200 to +200A (F.S.)

工作电压: $\pm 12V \pm 5\%$

工作温度: -30 to +80 °C

被测电流比: 4000/1

零点偏移 (A) : $\pm 0.8\text{max}$

增益误差 (%) : $\pm 0.4\max$

合成误差 (A) : $\pm 0.8\max$

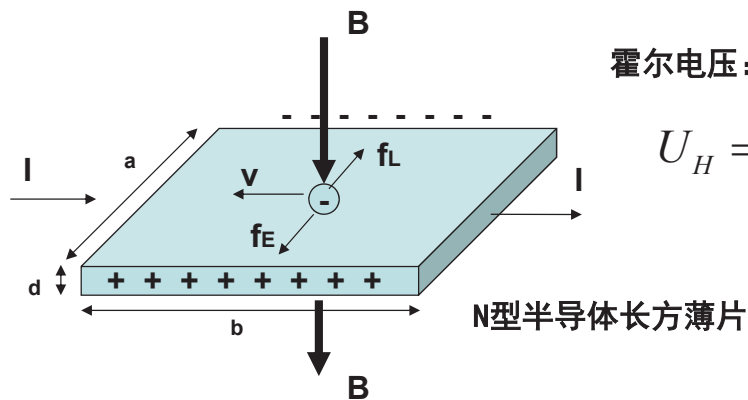
电流消耗 (mA) : $\pm 80\text{max}$

响应时间 (us) : 10max

绝缘电阻 (MΩ) : 100min

霍尔传感器

--磁场传感器、电流/电功率传感器--



霍尔电压:

$$U_H = \frac{IB}{ned} = \frac{R_H}{d} IB$$

N型半导体长方薄片

$$F_L = evB$$

$$F_E = e \frac{U_H}{a}$$

$$I = -nevad$$

恒定电流条件下, 测量磁感应强度B, KHz以下;
恒定磁场条件下, 测量电流I, 可达GHz。

d=0.1-0.2mm

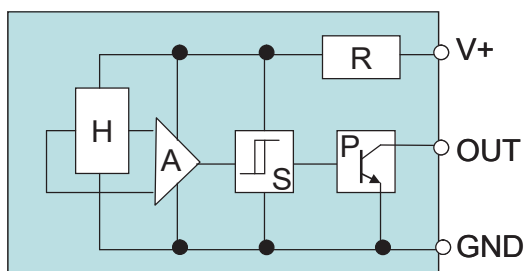
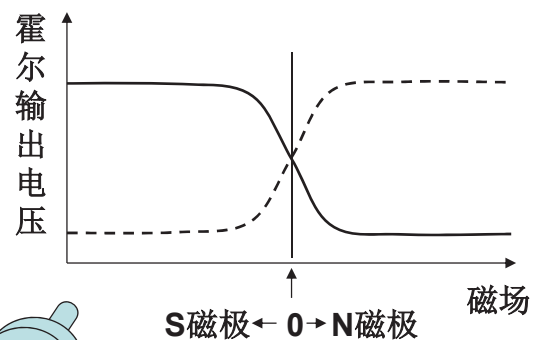
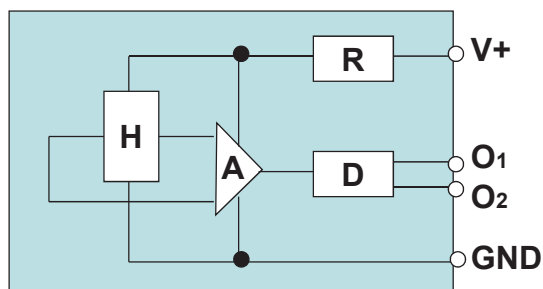
a:b=1:2

长边方向上电流引线

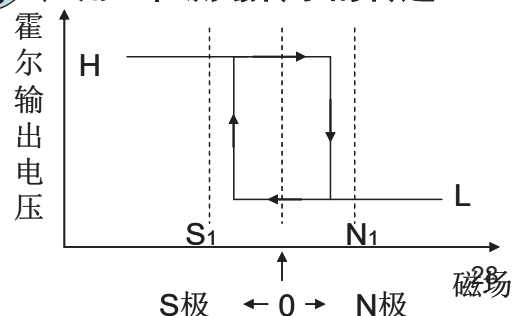
短边方向上霍尔电压引线

27

霍尔集成器件：线性输出和开关输出

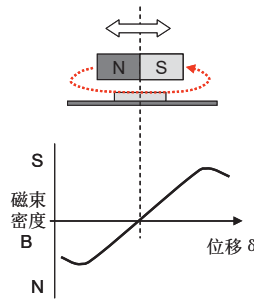


应用：检测磁转子的转速

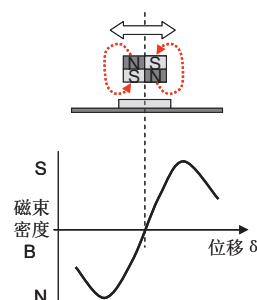


霍尔位移检测方法

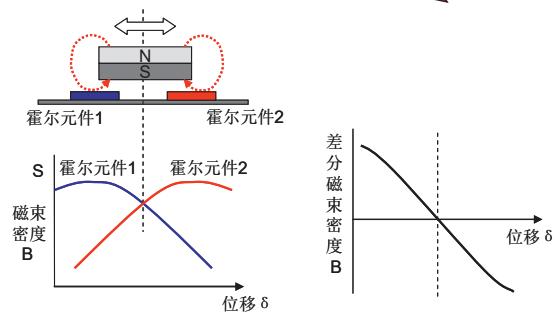
(a) 检测水平方向磁极的位移



(b) 检测垂直方向磁极的位移



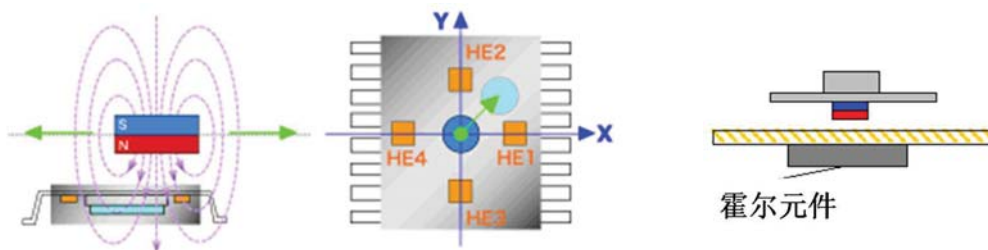
(c) 霍尔元件差动检测位移



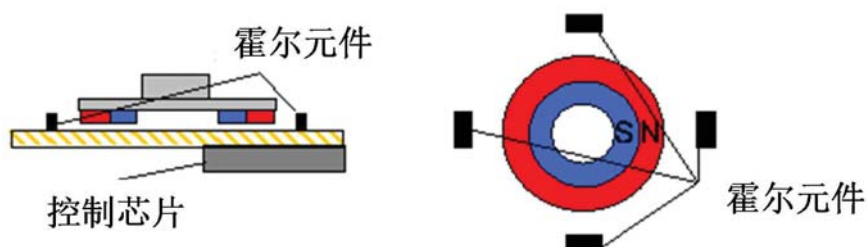
29

四霍尔元件水平定位

(a) 垂直方向磁极和水平方向霍尔元件



(b) 水平方向磁极和垂直方向霍尔元件



30

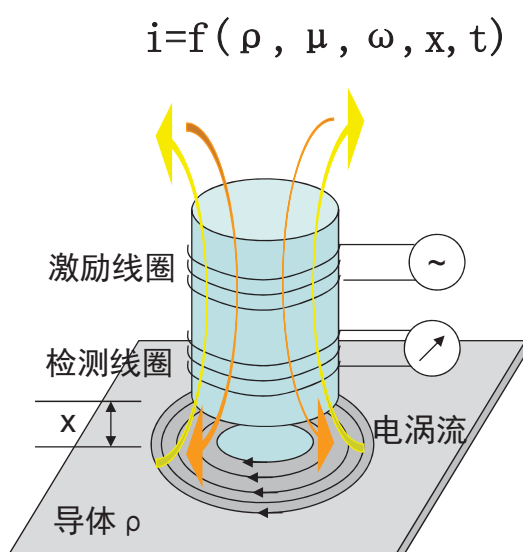
判断下列描述的正确与否

- A 平衡式仪表也叫闭环式、伺服式仪表。
- B 闭环式仪表为了不超调，参数 ζ 越小越好。
- C 霍尔位移检测中需要考虑磁极的排列方向。
- D 四霍尔元件定位时可用开关式霍尔元件。

提交

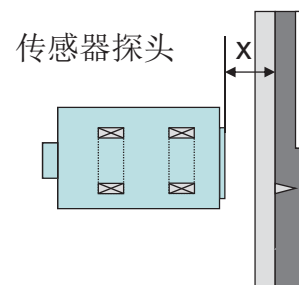
31

涡流式位移传感器 Eddy current sensor



•电涡流的方向：
激励线圈引起磁束密度增加或减少；
电涡流的作用是抵消这种变化；
电涡流方向交变。

•电流大小：由检测线圈输出
随距离变化→ 涡流式位移传感器

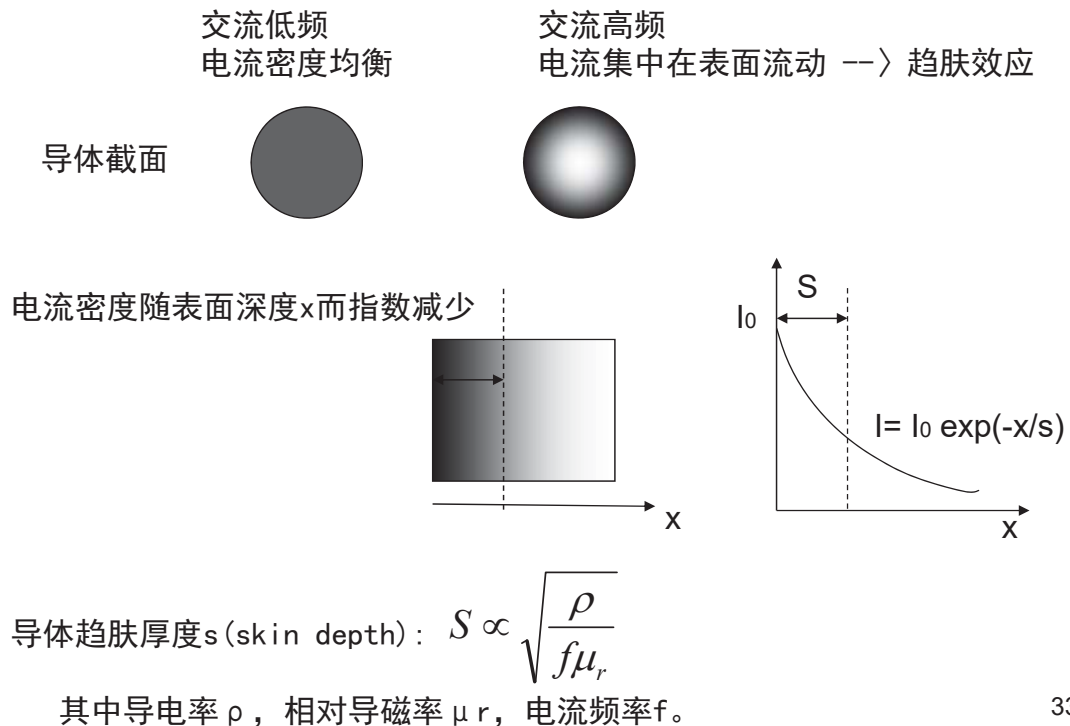


应用：

- 小位移测量；接近开关；
- 膜厚度的测量；
- 探伤、探测接缝或材质或厚度变化等。
(注意选择激励频率)
- 双探头—》差动变压器式探测

32

导体的电流趋肤效应 Skin Effect



33

电磁屏蔽板厚的计算

- 趋肤厚度的计算S[mm]:

频率	Al ($\rho=2.75e-8\Omega m, \mu_r=1$)	Fe ($\rho=10e-8\Omega m, \mu_r=200$)
50Hz	11.8	1.59
1kHz	2.64	0.340
10MHz	0.0264	
- 金属板厚度d比趋肤厚度S足够大时,
电涡流流动充分, 磁通不能穿透金属板 → 屏蔽作用, 接近开关
- 金属板厚度d较小时, 涡流不能充分流动, 有磁通穿过 → 板厚探测
- 金属板厚度d一定时,
激励线圈电流频率高 → 电磁屏蔽
激励线圈电流频率低 → 磁通泄漏

34

电涡流焦尔热的利用

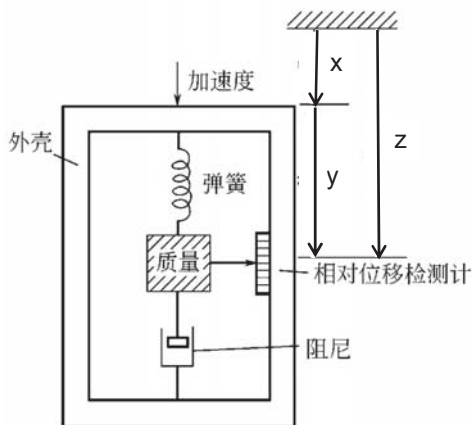
- 感应加热炉：
线圈接通高频交流电，金属块-涡电流-焦尔热-融化
- 观察变压器铁芯：
避免产生涡电流的叠片铁芯结构，表面氧化膜绝缘，磁通方向平行于铁芯薄板。

电流趋肤效应的利用

- 表面裂纹深度计；
- 高频表面淬火；
- 高频加压焊接；

35

加速度检测原理



(a) 弹簧质量系

质量块 m ，弹簧 k ，阻尼 c ，
外壳支点振动位移 $x=A\sin\omega t$
牛顿定律：

$$m \frac{d^2(y+x)}{dt^2} = -c \frac{dy}{dt} - ky$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = A\omega^2 \sin\omega t \quad (= -\frac{d^2 x}{dt^2})$$

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}$$

$$\zeta = c/(2m\omega_0)$$

→

相对位移检测，测量输出 y ， $y=y_0\sin(\omega t-\phi)$

→

$\omega \gg \omega_0$ 时，支点位移检测， $y \approx -A\sin\omega t$

$\omega \ll \omega_0$ 时，支点加速度检测；

$$y \approx A(\omega^2/\omega_0^2)\sin\omega t$$

刚性大，小质量

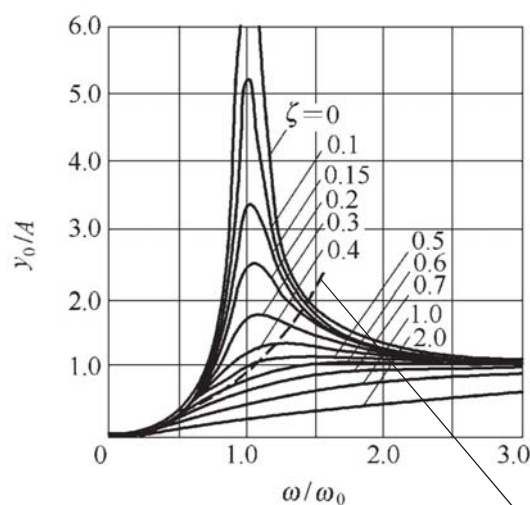
$\omega = \omega_0$ 时，支点速度检测

$$y = \frac{A\omega^2/\omega_0^2}{\sqrt{(1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2})^2 + (2\zeta\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \sin(\omega t - \phi)$$

$$\tan \phi = \frac{2\zeta\frac{\omega}{\omega_0}}{(1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2})}$$

36

加速度传感器的振动频率特性



(b) 振动频率特性

当 $\omega \ll \omega_0$ 时

$$y \approx -\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 x}{dt^2}$$

当 $\omega \gg \omega_0$ 时

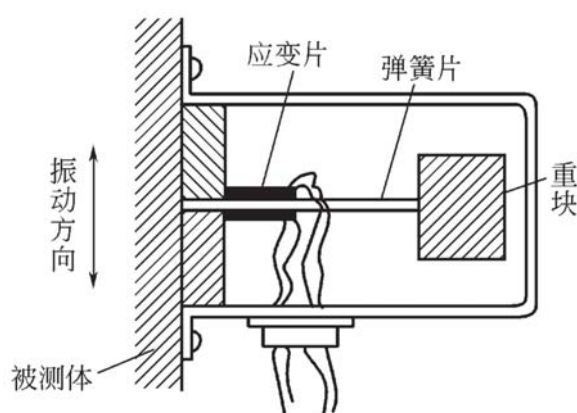
$$y \approx -x$$

$$y_0 / A = \frac{\omega^2}{\omega_0^2}$$

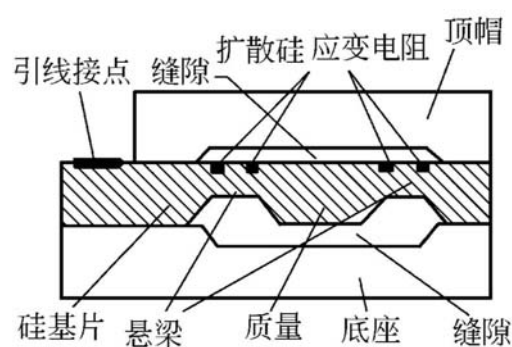
37

各种加速度传感器

- 质量块的相对位移的检测方法不同



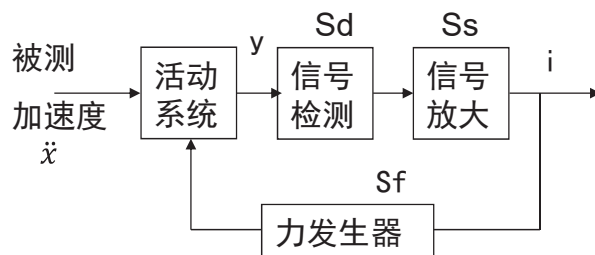
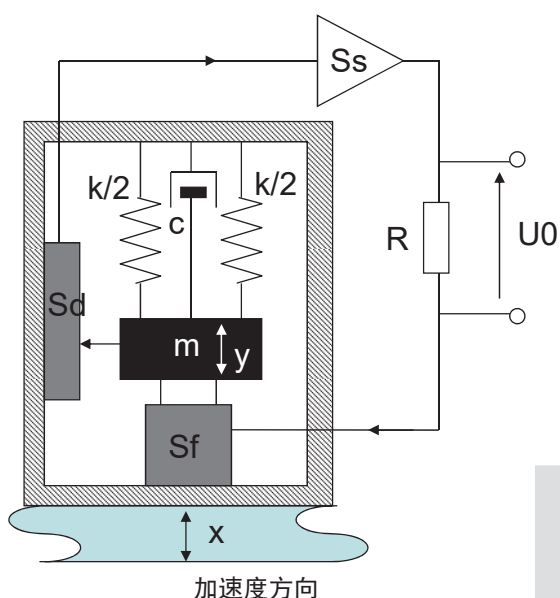
应变片悬臂梁振动检测



扩散硅压阻膜片

38

伺服式（闭环）加速度测量方法



$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = -S_f i - m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$i = S_d S_s y \quad S_f = BL$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = -\frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{S_d S_s S_f}{m} + \frac{k}{m}} \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega_0}$$

加速度计工作状态：

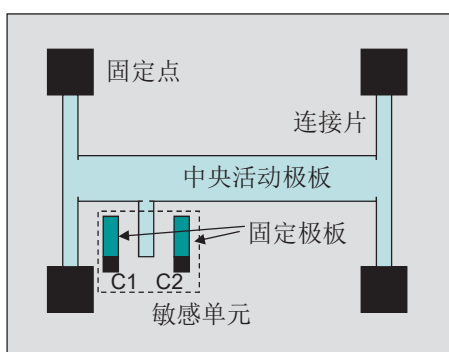
$$y = -\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 x}{dt^2}$$

\ddot{x} 输出灵敏度：

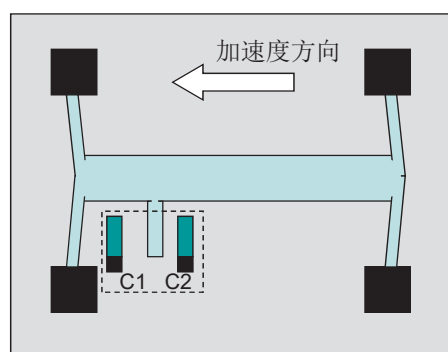
$$S_{U_0} = \frac{U_0}{\ddot{x}} = \frac{-mR}{S_f} \cdot \frac{1}{1 + k / (S_d S_s S_f)} \quad 39$$

叉指式硅微加速度传感器

静止状态：C1=C2



活动状态：C1 ≠ C2



ADXL50的性能和技术指标

满刻度量程：±50g；

单电源：+5V；

输出电压范围：0.25-4.75V

灵敏度：20mV/g；

能承受：2000g的冲击；

用户设定输出放大器的倍数，调节0g的电平；

可改变带宽：DC-1KHz；

谐振频率：24KHz

采用闭环反馈力平衡技术；

→保持极板在中间位置平衡

→消除横梁非线性和老化的影响

叉指电容式MEMS加速度传感器

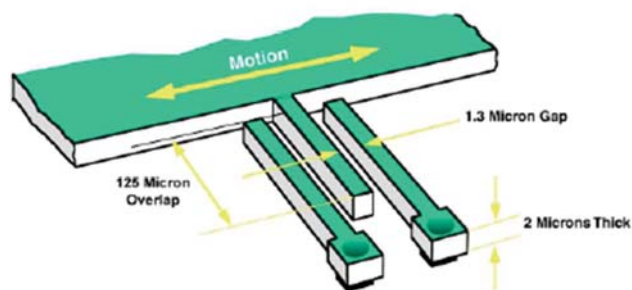


Figure 1. Beam Dimensions for a Single Finger.

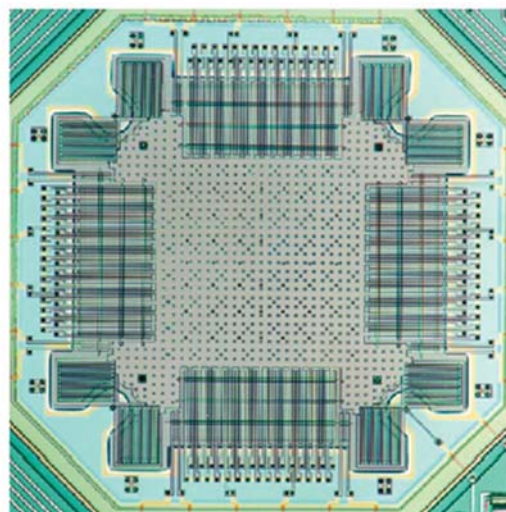


Figure 2. ADXL202 Beam Structure.

41

思考题

- 4-1 举例说明偏位式和零位式检测结构的不同。
- 4-2 电感式位移传感器对于使用条件和环境的要求有哪些优势？
(和电容式及光电式传感器相比较)
- 4-3 差动变压器在铁芯处于正中位置时输出不为零，分析其如下原因的对错。
 - a 铁芯材料磁特性不对称 ()
 - b 二级线圈相位特性不一致 ()
 - c 一次线圈有谐波输入 ()
- 4-4 差动变压器相敏整流电路的作用是什么？
- 4-5 力矩平衡式重量传感器用 () 参数表示被测重量；
电位平衡式温度传感器用 () 参数表示被测温度。

42

思考题

4-6 电位平衡式温度传感器的性能要求是：不超调，过渡时间短，跟踪紧。分别对应仪表的什么性能指标？由哪两个系统参数决定？

4-7 什么是电涡流，利用电涡流的检测应用有哪些？电涡流式厚度探测仪需要探测较厚钢板时，应该选择相对高频还是低频激励信号？

4-8 填空：

加速度检测的基础是（ ）检测。

加速度检测系统是（ ）的二阶系统。

当（ ）远小于（ ）的条件下，二阶系统的相对位移相当于加速度。

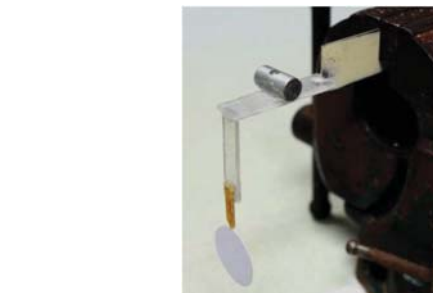
4-9 闭环式加速度测量的灵敏度是否与弹簧弹性系数有关？开环检测呢？分别写出其测量灵敏度的表达式。

4-10 用固有频率为2000Hz，衰减比为0.5的加速度检测仪，分别检测1200Hz的振动加速度和400Hz的振动加速度，比较两种情况下加速度检测的系统误差的大小。

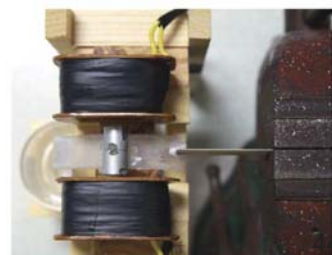
43

激励和检测线圈的测量应用

- 振动式液体粘度测量系统的设计与实现
- 采用电磁激励和检测线圈，通过51单片机的DAC和ADC以及功放和检测电路，设计了振动式粘度测量传感器。对不同粘度样品保持振动强度不变，用所需的驱动力代表粘阻力，进而测量粘度。其中量程为0-6000（比重为1时），精度为量程的1%，重复精度为0.4%，测量开始至可以读数时间小于15s。



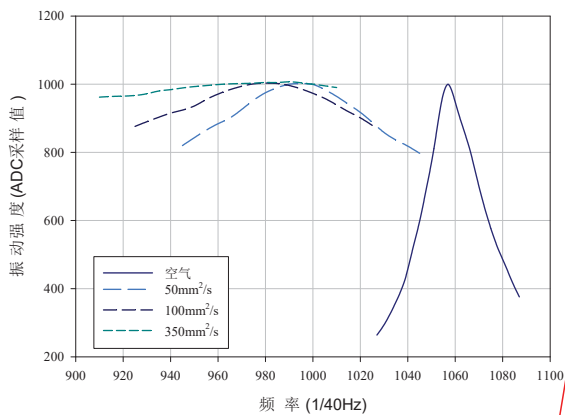
整体侧面



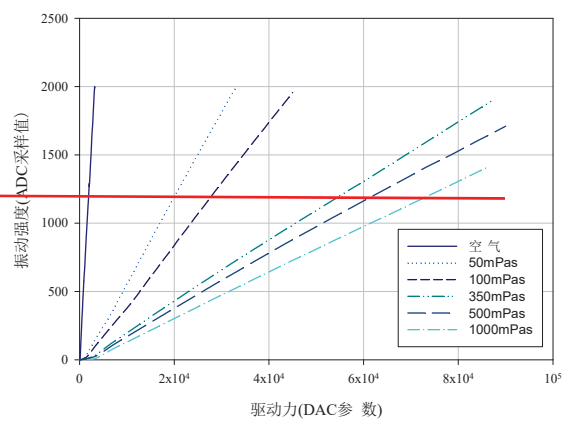
整体顶部

激励和检测线圈的粘度测量应用

振臂在不同介质中的谐振频率测量



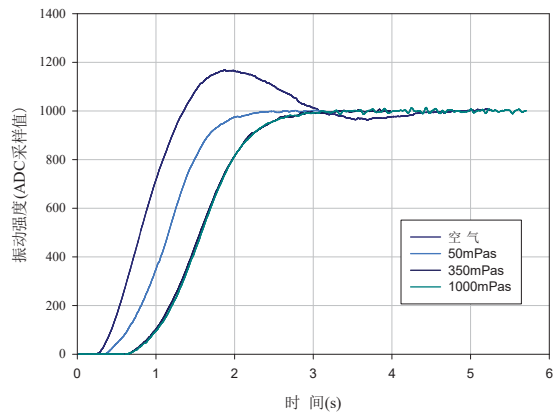
振动强度与驱动力的关系测量



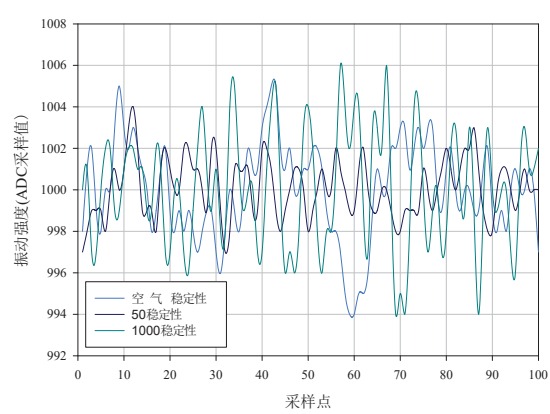
平衡式测量（保持振动强度不变）的优势可以测量较大范围的粘度变化；需要研究控制系统的响应速度和稳定性。

激励和检测线圈的粘度测量应用

样品中的目标振动控制的阶跃响应



振动控制的稳定性测试



粘性阻力测量性能指标

mPas	空气	50	1000
平均值	1013.22	11344.5	54466.12
标准差	0.6788	15.70	81.05
波动比例	0. 067%	0. 14%	0. 15%
总时间(s)	598	430	709
单次时间(s)	11.96	8.6	14.18