

第2章 检测仪表

要控制一个生产过程，首先必须实时检测生产过程中的有关参数。例如温度、压力、流量、液位等。用来检测这些参数的工具称为**检测仪表**，其中包括测量指示仪表及将被测参数转换成标准信号输出的**测量变送器**。

第二章检测仪表

主要内容：

- 1.1 温度检测仪表
- 1.2 压力检测仪表
- 1.3 流量检测仪表
- 1.4 液位检测仪表
- 1.5 成分分析仪表

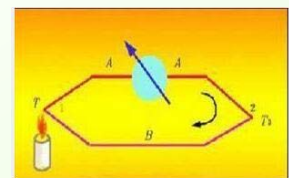
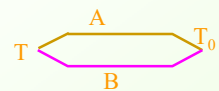
二、热电偶

热电偶是以**热电效应**为原理的测温元件，能将温度信号转换成电势信号（mV）。

特点：结构简单、测温准确可靠、信号便于远传。一般用于测量500 ~ 1600℃之间的温度。

二、热电偶

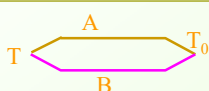
□ 热电效应



二、热电偶

□ 热电偶的工作原理

- 1. **热电效应**：将两种不同材料的导体或半导体组成一个闭合回路，如果两端点的温度不同，则回路中将产生一定大小的电流，这个电流的大小同材料的性质以及节点温度有关，上述现象称为热电效应。这个现象是1821年 Seebeck 发现的故又称为**塞贝克效应**。



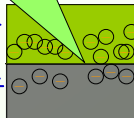
二、热电偶

- 2. **接触电动势**：当两种不同的导体接触时，由于两者有不同的电子密度而产生的电势。

接触电动势

自由电子
密度大

自由电子
密度小



$N_A > N_B$, 则 $E_{AB}(T_i) > 0$

波尔兹曼常数

$$E_{AB}(T_1) = \frac{KT_1}{e} \ln \frac{N_A}{N_B}$$

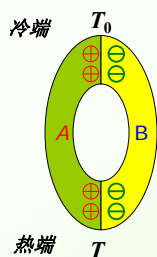
式中 e ——单位电荷；

K ——波尔兹曼常数；

$N_A(T)$ 、 $N_B(T)$ ——材料A、B
在温度为 T 时的自由电子密度；

二、热电偶

(1) 测温原理——热电效应



将两种不同材料的导体或半导体 A 和 B 连在一起组成一个闭合回路，而且两个接点的温度 $T \neq T_0$ ，则回路内将有电流产生，电流大小正比于接点温度 T 和 T_0 的函数之差，而其极性则取决于 A 和 B 的材料。

T_0 : (参比端、冷端、固定端)

T : (工作端、热端、自由端)

图 1 热电偶的原理

二、热电偶

将两种不同的导体或半导体连接成闭合回路，若两个连接点温度不同，回路中会产生电势。此电势称为热电势。

热电偶回路总电势由**接触电势**和**温差电势**叠加而成，称热电势。由于温差电势很小，热电势基本由接触电势构成：

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

此计算式中，有的常数很难确定，无法使用。实际中用实测标定。但从上述公式可以得出基本结论：

对于确定的热电偶，热电势只与热端和冷端温度有关。

当冷端温度固定时， $E(t, t_0)$ 是热端温度 T 的单值函数。

若 $e_{AB}(T_0)$ 固定，则 $E_{AB}(T) = f(T)$

二、热电偶

第一个问题：如何解决远距离传输信号？

热电偶的“中间导体定律”

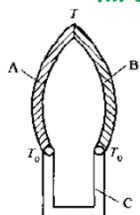


图2 热电偶回路中插入第三种导体

热电偶的“中间导体定律”：
热电偶回路中接入第三种导体后，
只要该导体两端温度相同，热电偶回路中所产生的总热电势与没有接入第三种导体时热电偶所产生的总热电势相同；同理，如果回路中接入更多种导体时，只要同一导体两端温度相同，也不影响热电偶所产生的热电势值。

二、热电偶

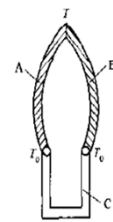
$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0)$$

如果 $T = T_0$ ，则 $E_{ABC}(T, T_0) = 0$ ，即

$$e_{AB}(T_0) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = 0$$

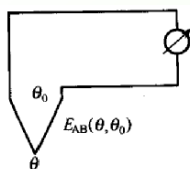
$e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = -e_{AB}(T_0)$ ，代入上式

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0)$$



二、热电偶

热电偶的“中间导体定律”



(b) 热电偶测温回路

根据热电偶的“中间导体定律”可知，热电偶回路可以接入各种显示仪表、变送器、连接导线等。

二、热电偶

第二个问题：生产制造热电偶，金属材料怎么选？

热电偶的材料：

原则上说，两种不同导体焊接，都会出现热电势。这并不是说所有热电偶都有实用价值。

能被大量采用的材料必须在测量范围内具有稳定的物理化学性质，并且与温度接近线性关系。

二、热电偶

热电偶的种类

热电偶种类：国际电工委员会（ICE）对热电偶公认性能比较好的材料制定了统一的标准，**ICE推荐的标准化热电偶7种。**

名称	分度号	名称	分度号	名称	分度号
铂铑10-铂	S	铜-康铜	T	镍铬-镍硅	K
铂铑30-铂铑6	B	镍铬-康铜	E		
铂铑13-铂	R	铁-康铜	J		

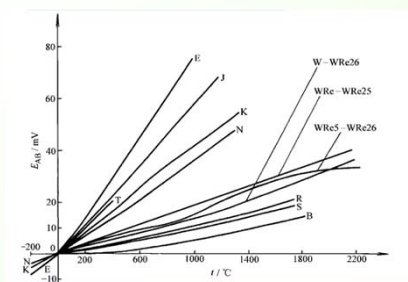
二、热电偶

常用工业热电偶比较

表 1-1 几种常用的我国标准型热电偶

热电偶名称	分度号	热电偶材料	测温范围(℃)	平均灵敏度	特点	补偿导线
铂铑30-铂铑6	B	正铂铑70%，铑30% 负铂铑94%，铑6%	0~1800	10μV/℃	价廉，稳定，精度高，可在氧化性气氛中使用	冷端在0~100℃间可不补偿导线
铂铑10-铂	S	正铂铑90%，铑10% 负铂铑100%	0~1600	10μV/℃	同上。热电特性的线性度比B好	铜-康铜合金
镍铬-镍硅	K	正镍铬89%，硅10% 负镍铬94%，硅3%	0~1300	40μV/℃	线性好，价廉，可在氧化及中性气氛中使用	铜-康铜
镍铬-康铜	E	正镍同上，负康铜 (铜60%，镍40%)	-200~900	80μV/℃	灵敏度较高，价廉，可在氧化及还原气氛中使用	
铜-康铜	T	正铜，负康铜 (铜60%，镍40%)	-200~400	50μV/℃	灵敏度低，但铜易氧化，常用于150℃以下温度测量	

二、热电偶



几种常用热电偶的特性

二、热电偶

分度表：当 $T_0=0^\circ\text{C}$ 时，与温度 T 对应的数值表。
(非线性)

分度号：与分度表所对应的热电偶的代号。

热电偶和热电阻的分度号是国际电工委员会（IEC）发表的相关技术标准（国际标准），我国于1988年采用该标准。

该标准以表格的形式（简称分度表），规定每种热电偶/阻在-271度--2300度（国际温标）每一个温度点上，各种热电偶/阻的输出参数。并且给各种热电偶/阻命名统一代号，也叫**分度号**。



Microsoft Word
文档

二、热电偶

第三个问题：实际测量中，冷端温度不是固定值，应该怎么办？

热电偶冷端温度的补偿方法

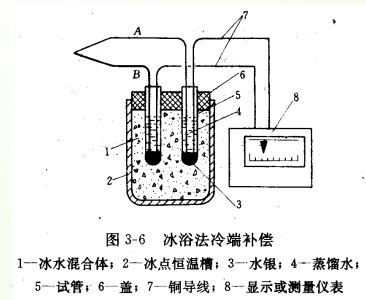
二、热电偶

1. 冰点法

精度高

多用于实验室

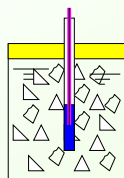
■ 工业用冷端恒温器



二、热电偶

冰瓶的制作

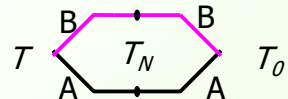
- 冰呈屑状，试管较细，插入较深，底部装变压器油或者水银



二、热电偶

2. 计算补偿法

□ 原理



$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_N) + E_{AB}(T_N, T_0)$$

二、热电偶

计算法举例:

例如: 用镍铬-镍硅 (K) 热电偶测温, 热电偶参比端温度 $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, 测得的热电势 $E(\theta, \theta_0) = 32.479\text{mV}$ 。由 K 分度表中查得 $E(20, 0) = 0.798\text{mV}$, 则

$$\begin{aligned} E(\theta, 0) &= E(\theta, 20) + E(20, 0) \\ &= 32.479 + 0.798 = 33.277 \text{ mV} \end{aligned}$$

再反查K分度表, 得实际温度是 800°C 。

二、热电偶

3. 校正仪表机械零点法

- 当热电偶与动圈仪表配套使用时, 如果冷端相对恒定, 测量精度要求不高, 可将仪表的机械零点调到热电偶冷端温度 T_N , 这就相当于在输入电势之前, 就有一个补偿电势 $E_{AB}(T_N, 0^\circ\text{C})$, 则

$$E_{AB}(T, T_N) + E_{AB}(T_N, 0) = E_{AB}(T, 0)$$

或

$$E_{AB}(T, T_N) = E_{AB}(T, 0) - E_{AB}(T_N, 0)$$

二、热电偶

例题:

用铂铑₁₀-铂热电偶进行温度检测, 热电偶的冷端温度 $t_0 = 30^\circ\text{C}$, 显示仪表的温度读数 (假定此仪表是不带冷端温度自动补偿且是以温度刻度的) 为 985°C , 试求被测温度的实际值。

二、热电偶

解: 由分度表查得 985°C 对应的电动势为 9.412mV 。即 $E(t, t_0) = 9.412\text{mV}$, 查表得 $E(t_0, 0) = E(30, 0) = 0.173\text{mV}$ 。将这两个数值带入如下公式

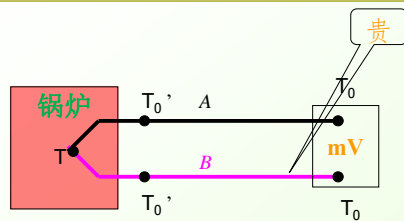
$$E_{AB}(T, T_N) + E_{AB}(T_N, 0) = E_{AB}(T, 0)$$

则,

$$E(t, 0) = 9.412 + 0.173 = 9.585\text{mV}$$

再查分度表, $t = 1000^\circ\text{C}$, 这就是被测温度的实际值。

二、热电偶

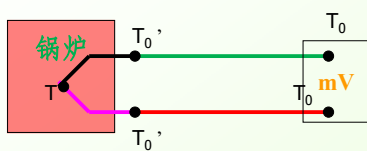


二、热电偶

如果在 $T_0 \sim T_0'$ 范围内, 某对廉价导线的热电性能与贵金属热电偶相同, 则可以用这对导线代替从 T_0' 点到 T_0 点一段的热电偶线, 而不影响热电偶的热电势值, 同时降低热电偶测量成本。

二、热电偶

补偿导线



二、热电偶

1. 普通工业热电偶



二、热电偶

工业用热电偶的结构



二、热电偶

(二) 热电偶的结构类型

1. 普通工业热电偶

□ 结构：热电极，绝缘套管，接线盒，保护套管

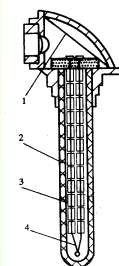
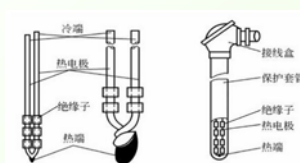


图 3-10 工业热电偶的结构
1—接线盒；2—保护套管；
3—绝缘套管；4—热电极

二、热电偶

2. 铠装热电偶

结构：热电极，绝缘材料，保护套管

特点：测量端热容量小，动态响应快，机械强度高，挠性好，耐高压，耐振动，寿命长，适用各种工业测量。

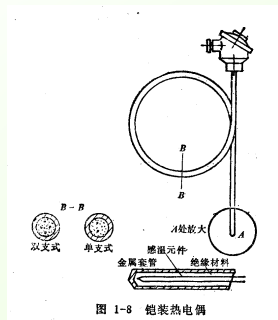


图 1-8 铠装热电偶



二、热电偶

常用补偿导线									
补偿导线型号	配用热电偶分度号	补偿导线合金丝		绝缘层着色		100℃时允差(℃)		200℃时允差(℃)	
		正 极	负 极	正 极	负 极	普通级	精密级	普通级	精密级
SC	S	SPC (铜)	SNC (铜镍)	红	绿	±5	±3	±5	—
KC	K	KPC (铜)	KNC (铜镍)	红	蓝	±2.5	±1.5	—	—
KX	K	KPX (镍铬)	KNX (镍硅)	红	黑	±2.5	±1.5	±2.5	±1.5
EX	E	EPX (镍铬)	ENX (铜镍)	红	棕	±2.5	±1.5	±2.5	±1.5
JX	J	JPX (铁)	JNX (铜镍)	红	紫	±2.5	±1.5	±2.5	±1.5
TX	T	TPX (铜)	TNX (铜镍)	红	白	±2.5	±1.5	±2.5	±1.5

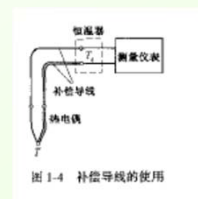
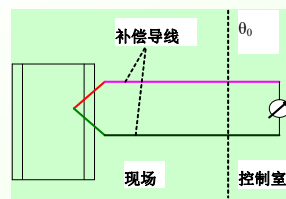


二、热电偶

补偿导线

解决参比端温度的恒定问题。

补偿导线要求：价格便宜，0~100℃范围内的热电性质与要补偿的热电偶的热电性质几乎完全一样



二、热电偶

补偿导线

- **性能** 在一定温度范围和误差范围内与热电偶的热电性能相同
- **作用** 使热电偶冷端远离热源
- **注意**
 - 两个接点温度范围不能超过规定温度
 - 两个接点温度数值应当相同。否则，由于热电偶与补偿导线的热电特性并不完全相同，可能会引起较大的测量误差。
 - 正负极不能接反

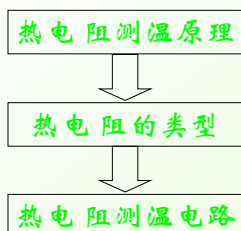
二、热电偶

注意

使用补偿导线时，应当注意补偿导线的正、负极必须与热电偶的正、负极各端对应相接。此外，正、负两极的接点温度 t_1 应保持相同，延伸后的冷端温度 t_0 应比较恒定且比较低。对于镍铬-铜镍等一类用廉价金属制成的热电偶，则可用其本身材料作补偿导线，将冷端延伸到环境温度较恒定的地方。

三、热电阻

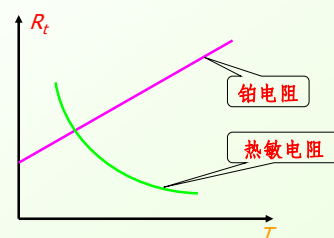
本节主要内容



三、热电阻

1、热电阻测温原理

对于一个给定电阻，其电阻值是温度的单值函数，因而可以通过测量电阻值来推算温度。



1、热电阻测温原理

电阻温度系数：在某一温度间隔内，温度变化1℃时的电阻相对变化量，单位为1/℃。

$$\alpha = \frac{1}{R_{t0}} \cdot \frac{dR}{dt}$$

平均电阻温度系数

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_{t0} \Delta t}$$

- ❖ 金属导体电阻温度系数一般为正值
纯金属一般为0.38~0.68%，金属纯度越高，其电阻温度系数越大
- ❖ 半导体材料的电阻温度系数一般为负值

1、热电阻测温原理

电阻比： $W(100) = \frac{R_{100}}{R_0}$

金属导体纯度越高，电阻比越大。

金属与半导体作为测温元件要具备的条件

- ❖ 电阻温度系数 α 应大
- ❖ 复现性要好
- ❖ 电阻率大
- ❖ 价格便宜，工艺性好

2、热电阻的类型

❖ 金属热电阻

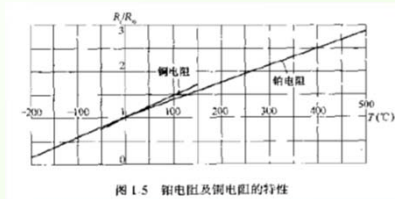
□ 铂热电阻

□ 铜热电阻

□ 镍热电阻

❖ 半导体

❖ 热敏电阻



1) 铂热电阻

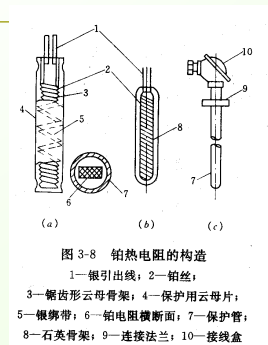
□ **特点：**准确度高，稳定性好、性能可靠、有较高电阻率，广泛应用于基准、标准化仪器中，是目前测温复现性最好的一种。

使用范围：-200~850℃，在90年国际温标中规定平衡氢三相点13.8k到银凝固点961.78℃标准仪器应用铂电阻。

规格型号：Pt100、Pt10、Pt1000。

1) 铂热电阻

结构：电阻丝、绝缘管、保护套管、接线盒



铂电阻



1) 铂热电阻

❖ **特点**：线性度高、电阻温度系数高、价格便宜、电阻率低、易氧化。

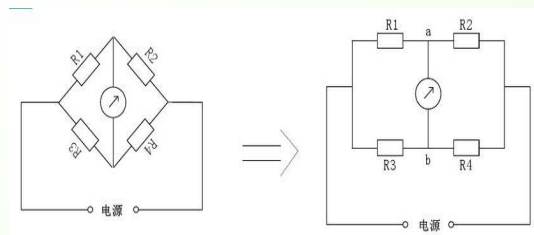
❖ **使用范围**：-50~180℃。

❖ **电阻值与温度关系** $R_t = R_0(1 + \alpha t)$

$$W(100) = 1.428 \pm 0.002$$

❖ **标准化热电阻** Cu50, Cu100

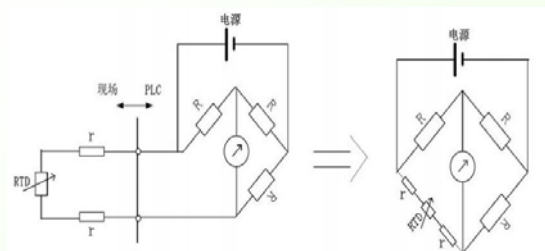
惠更斯电桥原理



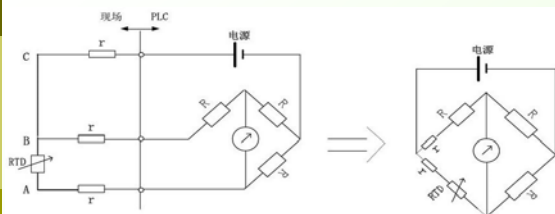
惠更斯电桥原理

问题：如何检测这个与温度对应成比例的电阻值？

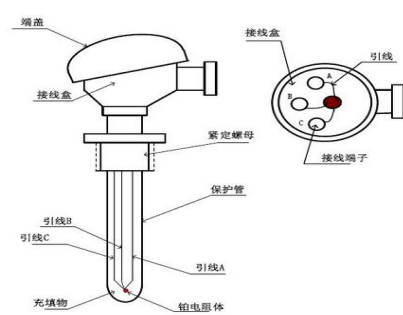
两线制测温



三线制测温



三线制测温



三线制测温

三线制电阻杆的示意图如左图所示。电阻体的一端引出一根引线，我们称为A线，另一端引出两根引线，称为B线和C线。

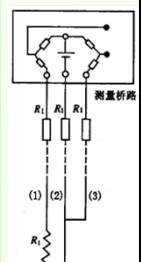
A线、B线和C线引入接线盒内并分别接在标有A、B和C(或B、b)的接线端子上。

当来自PLC的三根信号电缆——对应的接到这三个端子上时，随温度变化的电阻值就被接入到PLC的AI输入插板中并转换为实际温度。



三线制热电阻的测量原理

热电阻温度变送器输入热电阻信号给输入回路。输入回路是一个不平衡电桥，热电阻即为桥路的一个桥臂。如果是金属热电阻，由于连接热电阻的导线存在电阻，且导线电阻值随环境温度的变化而变化，从而造成测量误差，因此实际测量时采用三线制接法。所谓三线制接法，就是从现场的金属热电阻两端引出三根材质、长短、粗细均相同的连接导线，其中两根导线被接入相邻两对桥臂中，另一根与测量桥路电源负极相连。见下图。由于流过两桥臂的电流相等，因此当环境温度变化时，两根连接导线因阻值变化而引起的压降变化相互抵消，不影响测量桥路输出电压的大小。



三线制热电阻的测量原理

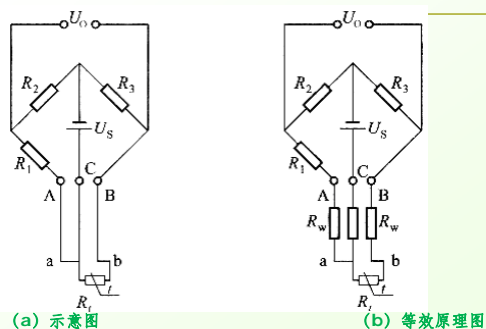
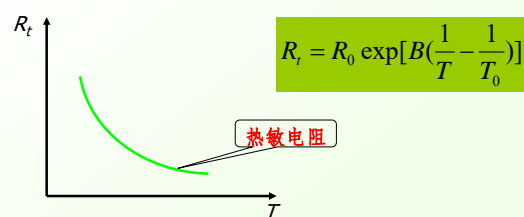


图4 三线制热电阻测量电桥

2) 半导体热敏电阻

- 随着温度的增高阻值降低，具有负的温度系数，测温范围-40~350℃。
- 电阻值随温度按指数曲线变化，



2) 半导体热敏电阻

与金属热电阻比较：

- ①电阻温度系数大，热敏电阻的电阻温度系数约为-（3~6）%，金属热电阻约为0.4~0.6%。
- ②电阻率大，可将电阻做的很大而体积很小，电阻阻值大，连接导线所用的电阻可忽略不计。
- ③结构简单，体积小，可用于测量点温度
- ④热惯性小
- ⑤工艺和互换性差。

3) 热电偶温度变送器的结构

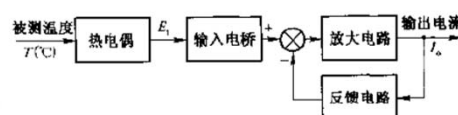


图 1-8 温度变送器的方块图

3) 热电偶温度变送器的结构

输入电路，输入电桥：温度补偿，零点调整

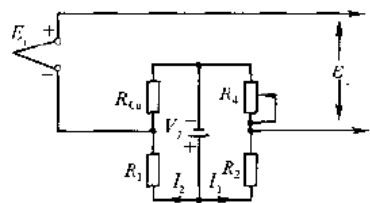
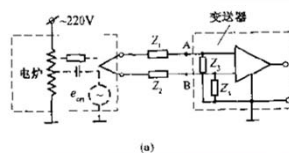
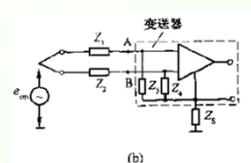


图 1-9 输入桥路

3) 热电偶温度变送器的结构



共模干扰，差模干扰



差模干扰电压：

$$e_{AB} = e_{cm} \left(\frac{Z_3}{Z_1 + Z_3} - \frac{Z_4}{Z_2 + Z_4} \right)$$

仪表浮空

➢ 变送器零点调整的目的是使其输出信号的下限值与输入信号的下限值相对应。在 $x_{\min} = 0$ 时为零点调整；见图2-2a。

➢ 将变送器的测量起始点由零点迁移到某一正值或负值，称为零点迁移。在 $x_{\min} \neq 0$ 时为零点迁移。 $x_{\min} > 0$ 正迁移、 $x_{\min} < 0$ 负迁移。

➢ 零点迁移有正迁移和负迁移，见图2-2 b和图2-2 c。

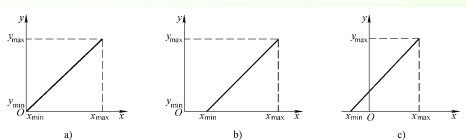


图5 变送器的零点调整与零点迁移

a) 零点调整 b) 正零点迁移 c) 负零点迁移

谢谢！