

2022春 过程控制系统

过程控制系统

授课教师：苗子博

内容回顾

检测仪表： 六个指标

热电偶： 均质导体定律；
中间导体定律；
中间温度定律。

例 有两块直流电流表，它们的精度和量程分别为

1) 2.0级，0—75mA；

2) 1.0级，0—160mA。

现要测量50mA的直流电流，从准确性、经济型考虑哪块表更合适。

例 某压力表的测量范围是0—10MPa，精度等级为1.0级。试问此压力表允许的最大绝对误差是多少？若用标准压力计来校验该表，在校验点为5MPa时，校验压力计上面读数为5.08MPa。试问被校压力表在这一点上是否符合1级精度，为什么？

2.2.2.5 热电偶冷端温度补偿

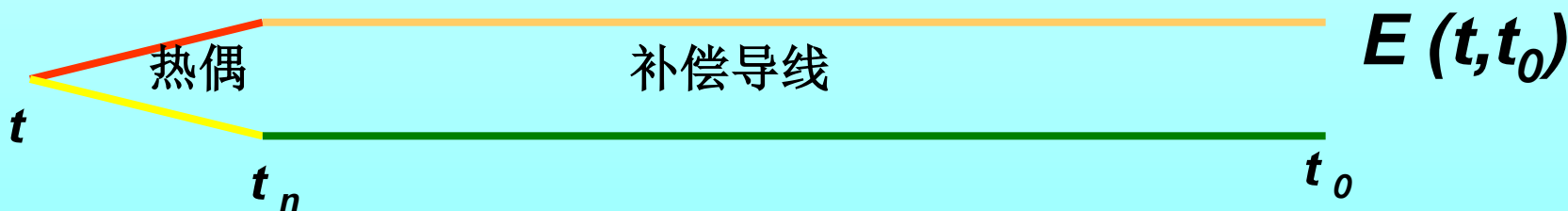
热电偶的热电势大小不仅与热端温度有关，还与冷端温度有关。所以使用时，需保持热电偶冷端温度恒定。但热电偶的冷端和热端离得很近，使用时冷端温度较高且变化较大。为此应将热电偶冷端延至温度稳定处。

为了节约，工业上选用在低温区与所用热电偶的热电特性相近的廉价金属，作为热偶丝在低温区的替代品来延长热电偶，称为补偿导线。



根据中间温度定律，补偿导线和热电偶相连后，其总的热电势等于两支热电偶产生的热电势的代数和。

$$E(t, t_0) = E_{\text{偶}}(t, t_n) + E_{\text{补}}(t_n, t_0)$$



用补偿导线延长热电偶的必须条件是：补偿导线的热电特性在低温段与所配热电偶相同。因此，不同的热电偶配不同的补偿导线。常用热电偶的补偿导线见表2.2。

使用补偿导线只是将热电偶的冷端延长到温度比较稳定的地方，而标准热电势要求冷端温度为零度，为此还要采取进一步的补偿措施。

1. 查表法（计算法）

如果某介质的温度为 t ，用热电偶进行测量，其冷端温度为 t_0 ，测得的热电势为 $E_{AB}(t, t_0)$ 。根据中间温度定律，有

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0)$$

得出标准热电势 $E_{AB}(t, 0)$ ，再查分度表就可得出被测温度。

例 用K型热电偶测量某加热炉的温度。测得的热电势 $E(t, t_0) = 36.122\text{mV}$ ，而自由端的温度 $t_0 = 30^\circ\text{C}$ ，求被测的实际温度。

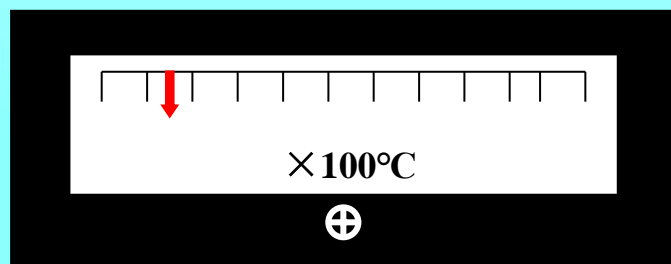


计算法适用于实验或临时测温。

2、仪表零点调整法

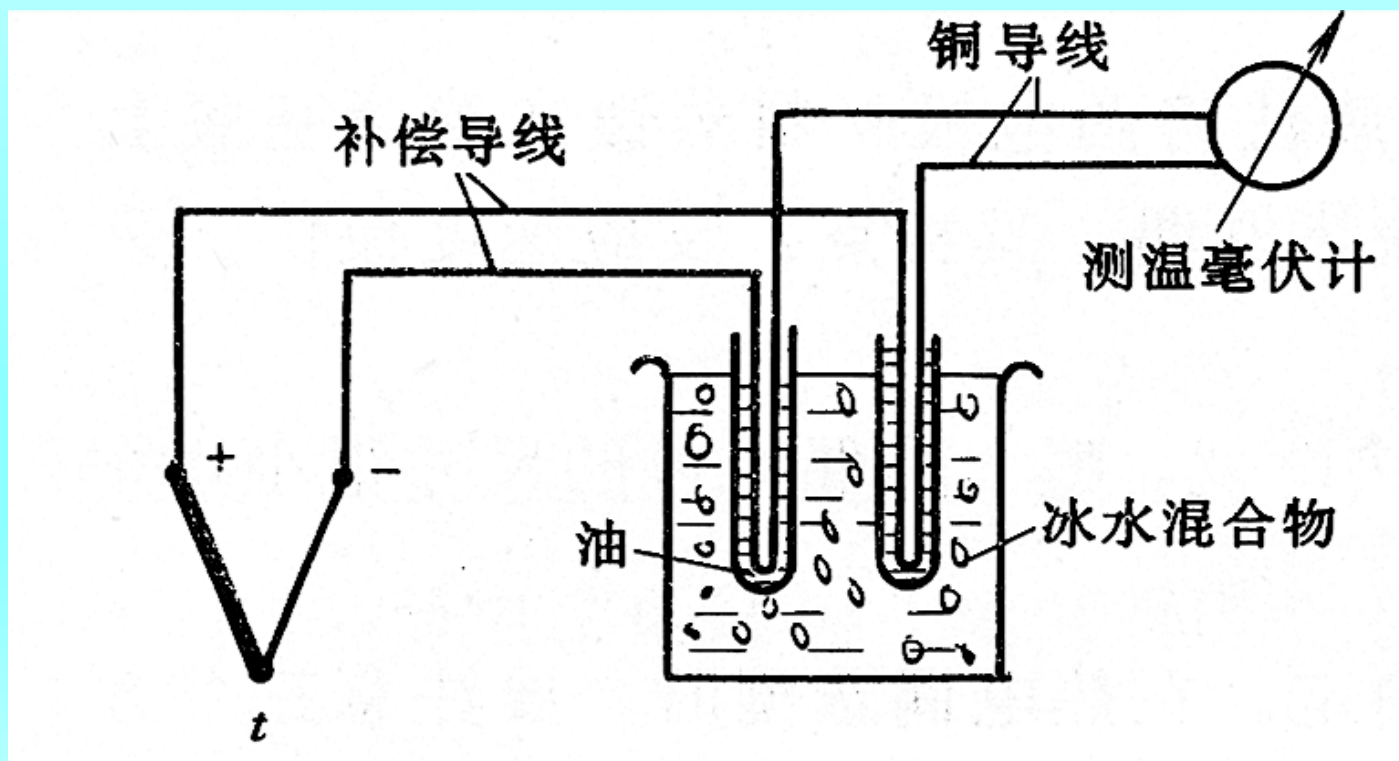
如果热电偶冷端温度比较稳定，与之相接的显示仪表又可以调整零点，那么在测试前，将仪表指针就调整到冷端温度处，再开始测量。

此法比较简单，但由于冷端温度（室温）也有波动，所以只能在测温要求不太高的场合下应用。



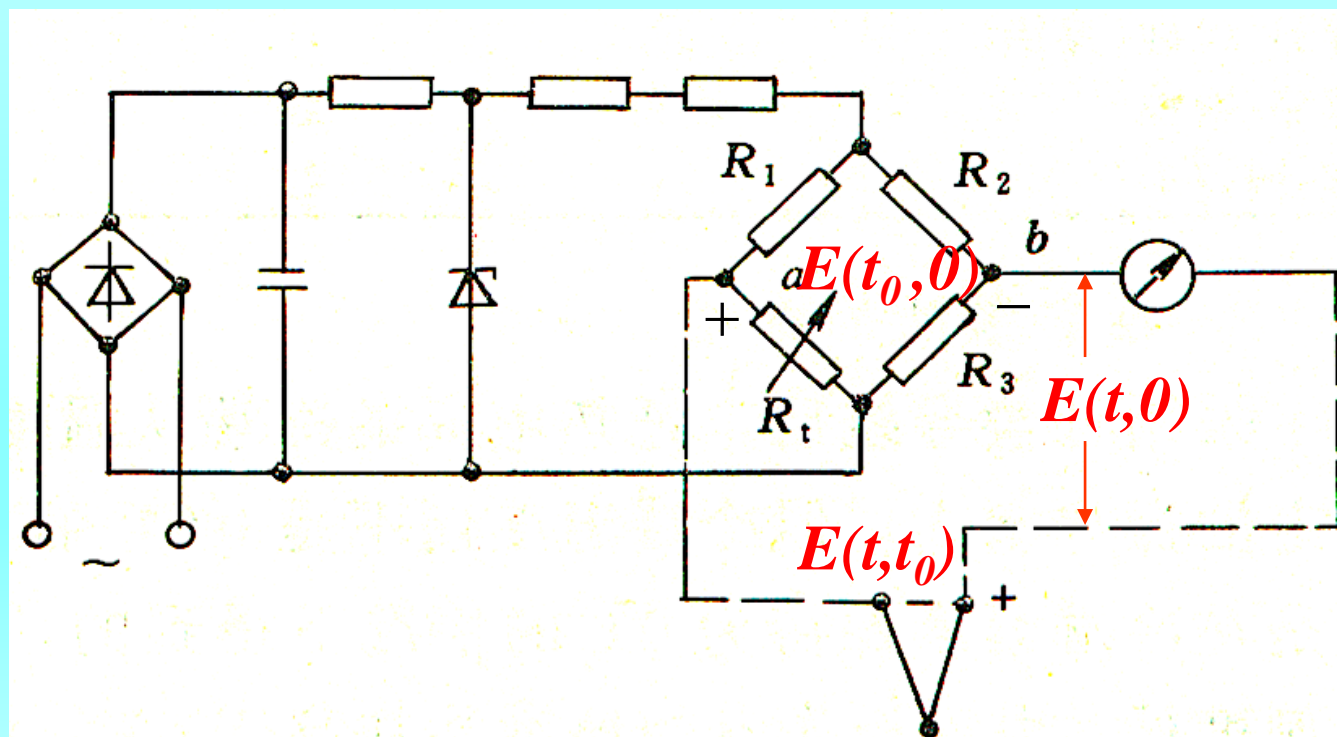
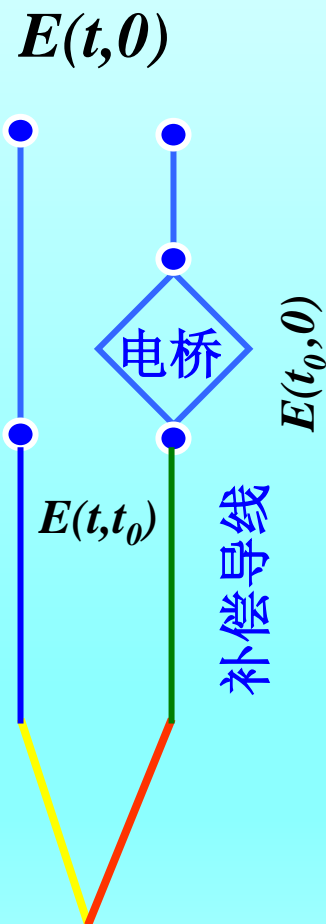
3、冰浴法

把热电偶的冷端插入盛有绝缘油的试管中，然后将试管放入装有冰水混合物的容器中，保持冷端为 0°C 。这种方法多数用于热电偶的检定。



4、补偿电桥法

补偿电桥法是利用不平衡电桥产生的电势，来补偿热电偶因冷端温度变化而引起的热电势变化值。

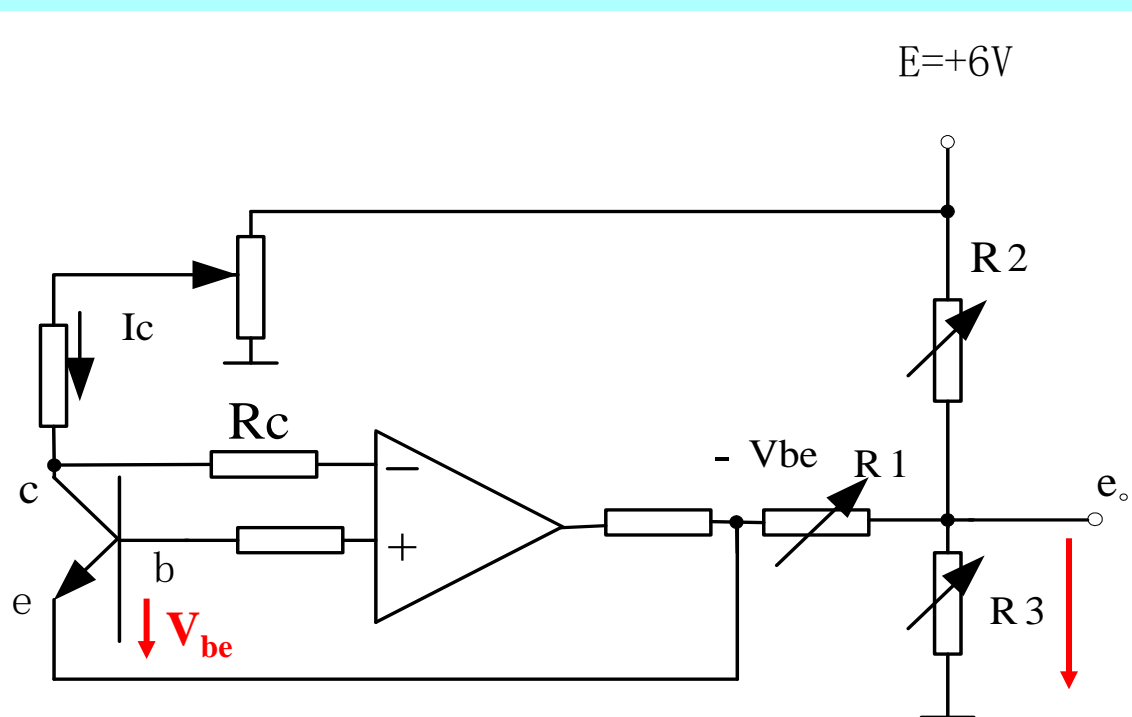


5. 半导体PN结补偿法

利用半导体PN结电压随温度升高而降低的特性自动补偿热电偶的冷端温度引起的误差。

图中半导体三极管基极结电压 V_{be} 随温度升高而降低。将 V_{be} 放大后即可输出。

只要保持三极管集电极电流 I_c 恒定，冷端补偿电压 e_0 即与冷端温度成正比。



2.2.3热电阻

对于500°C以下的中、低温，热电偶输出的热电势很小，容易受到干扰而测不准。一般使用热电阻温度计来进行中低温度的测量。

热电阻有金属热电阻和半导体热敏电阻两类。

2.2.3.1金属热电阻

金属热电阻测温精度高。大多数金属电阻阻值随温度升高而增大。具有正温度系数。

$$\text{温度系数 } \alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

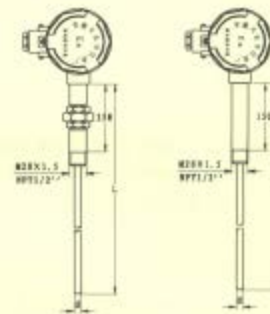
作为工业用热电阻的材料要求：

- 电阻温度系数大，电阻率大；
- 在测温范围内物理化学性能稳定；
- 温度特性的线性度好。

工业中用得最多的是铂电阻和铜电阻，也有镍电阻、钨电阻、锰电阻及碳电阻等用于低温及超低温测量。

固定螺纹管接头式热电阻

Thermal Resistance with Fixed Threaded Tube Connector



型 号 Type	分度号 Graduation	测温范围℃ Measuring Range	连接尺寸 Connection Size	保护管材料 Protection Tube Material	规 格 Specification	
					d	L
WZP- 84	Pt100	-200—500	M20 × 1.5	1Cr18Ni9Ti	Φ4	250
WZP ₂ - 84			NPT1/2		Φ5	275
WZP- 84A					Φ6	300
WZP ₂ -84A						350
WZC- 84	Cu50 Cu100	-50—100	M20 × 1.5		Φ6	400
WZC-84A			NPT1/2			450
						550
					Φ8	650
						750

1.铂电阻

铂材料容易提纯，其化学、物理性能稳定；测温复现性好、精度高。被国际电工委员会规定为-259~+630 °C间的基准器，但线性度稍差，常用于-200~+600 °C温度测量。

电阻温度关系：

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \quad (-200 \sim 0^\circ\text{C})$$

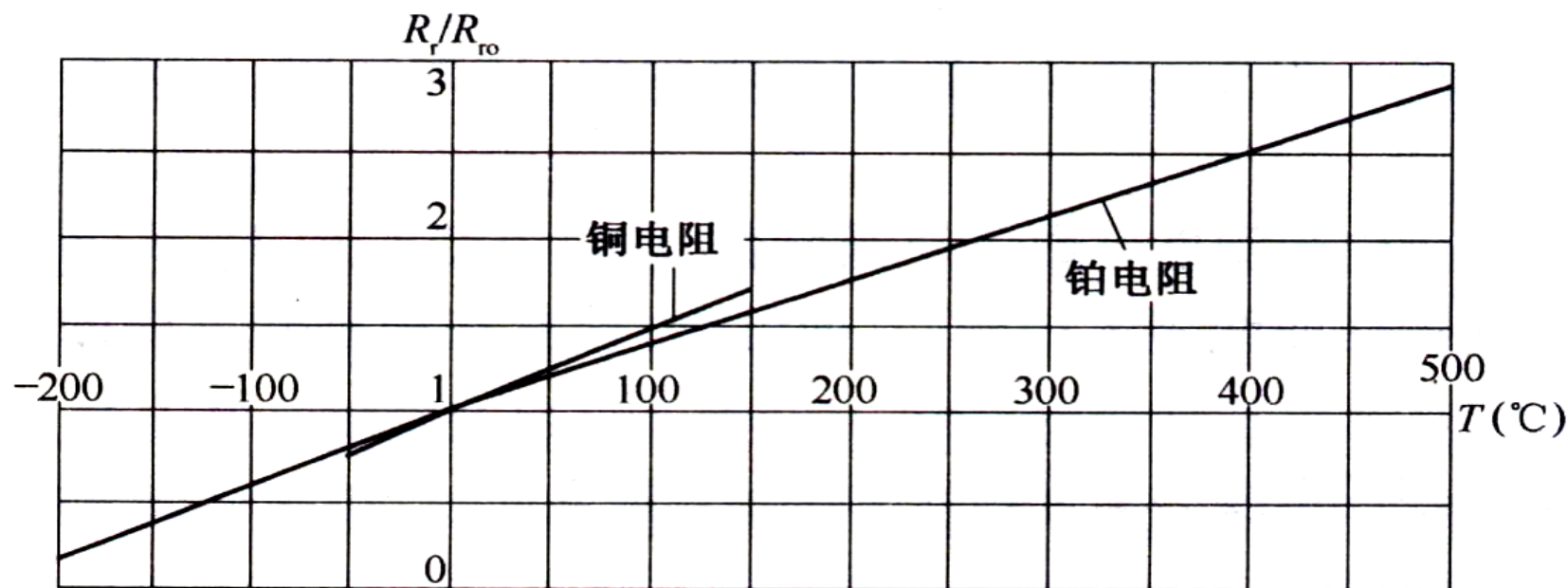
$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (0 \sim 850^\circ\text{C})$$

铂电阻有两种分度号：Pt10 , Pt100

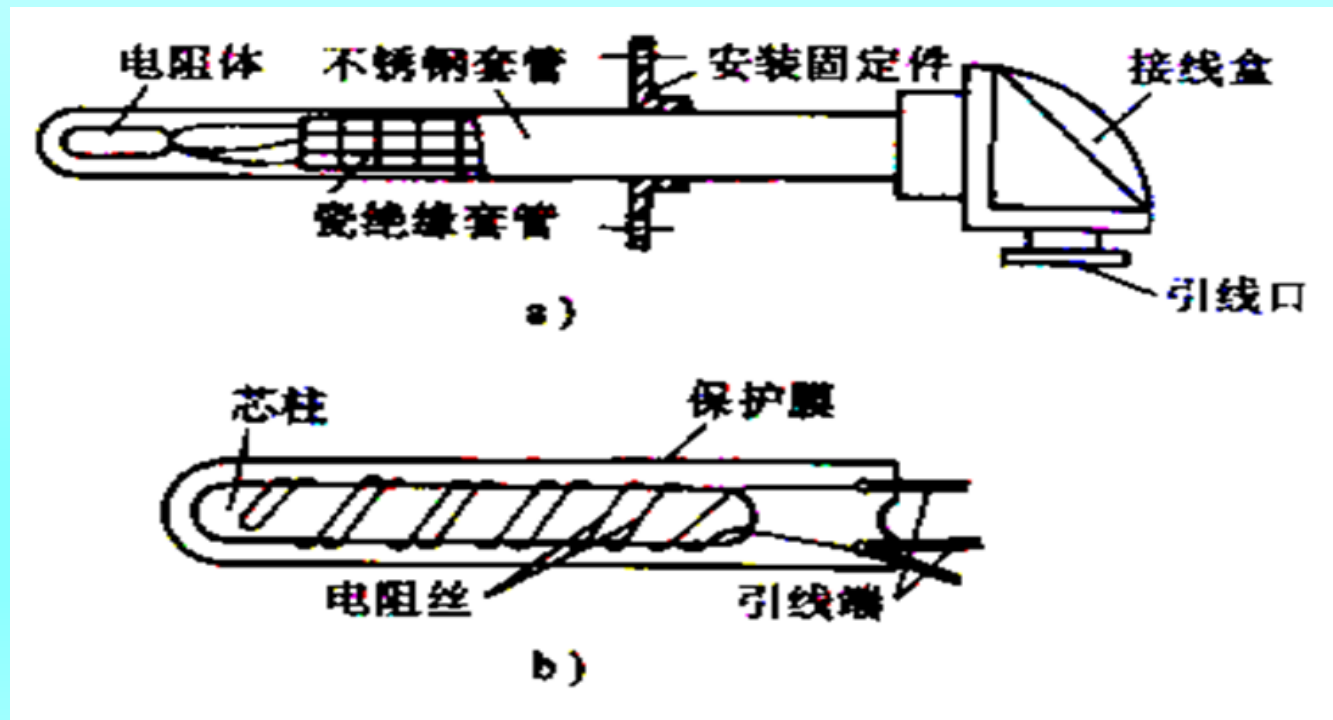
2.铜电阻

铜电阻价格便宜，线性度好，但温度稍高易氧化，常用于-50~+100 °C温度测量。铜电阻有两种分度号：Cu50 ， Cu100 。电阻温度关系：

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \quad (-50 \sim 150^\circ\text{C})$$

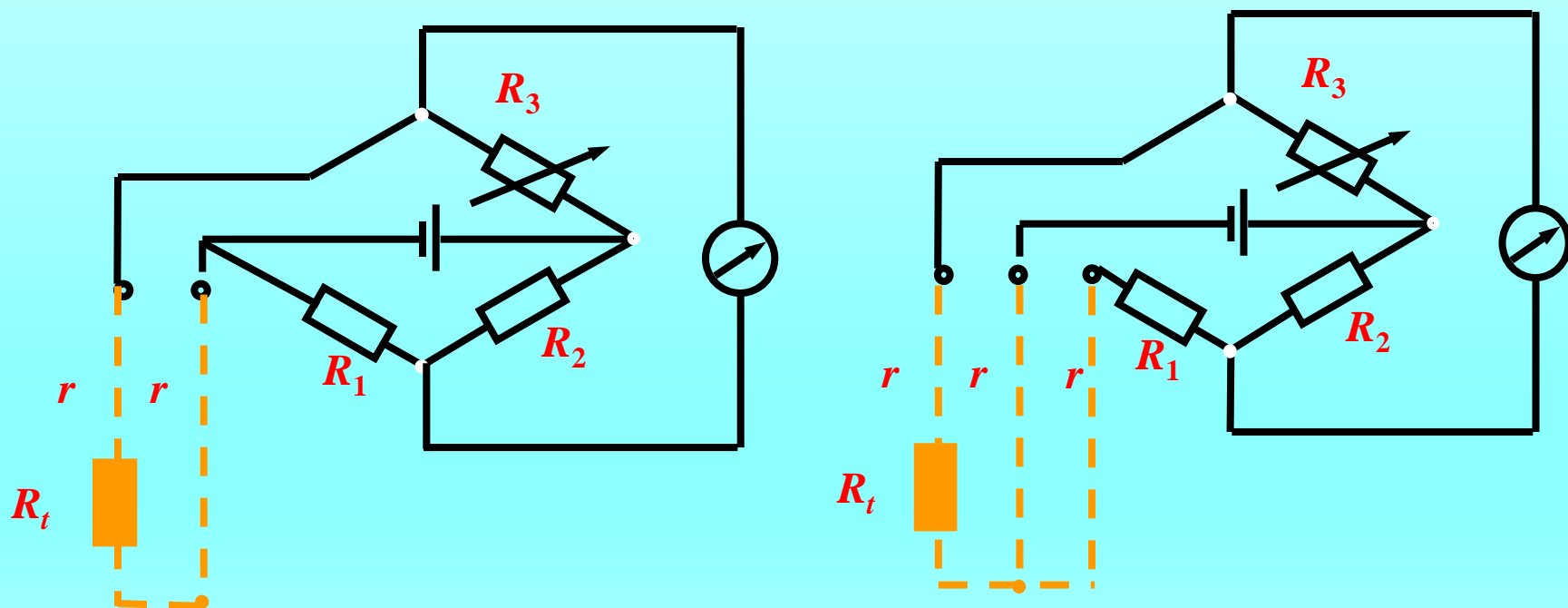


热电阻的结构型式常见有普通型热电阻、铠装热电阻。其结构是，以云母片或石英玻璃柱作骨架，将金属丝用双线法绕在骨架上，以消除电感。此外，还有薄膜型热电阻。

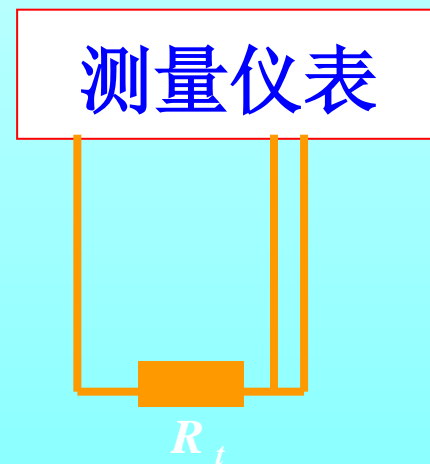
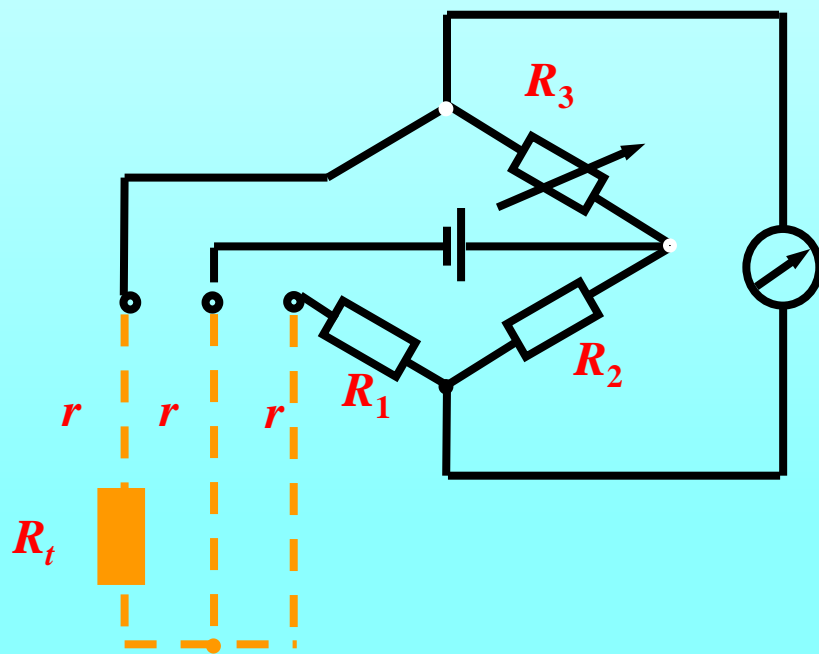


3.热电阻的三线制接法

电阻测温信号通过电桥转换成电压时，热电阻的接线如用两线接法，接线电阻随温度变化会给电桥输出带来较大误差，必须用三线接法。



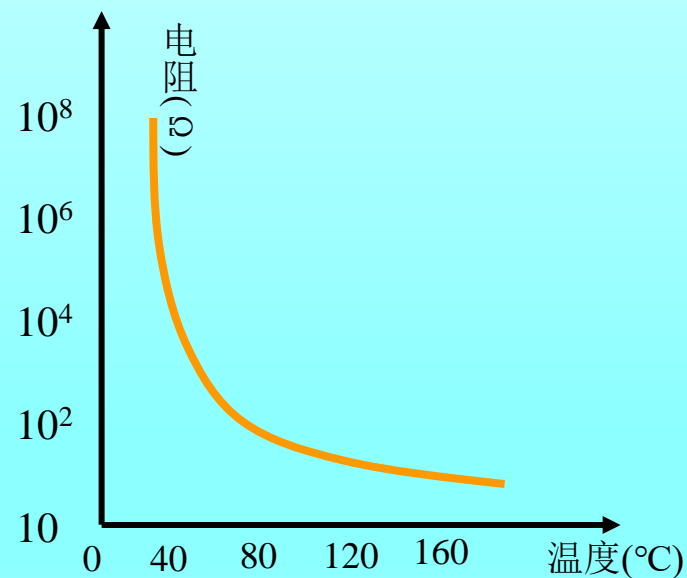
电阻测温信号通过电桥转换成电压时，热电阻必须用三线制接法，以抵消接线电阻随温度变化对电桥的影响。



2.2.3.2 热敏电阻

半导体材料的电阻值具有负温度系数，可以作温度传感元件，特点是：

- 电阻率大—电阻体积小，响应快；
- 温度系数大—灵敏度高；
- 非线性严重—影响精度；
- 温度特性分散—互换性差。



负温度系数热敏电阻特性

2.2.4 集成温度传感器

集成温度传感器将温敏晶体管和外围电路集成在一个芯片上构成，相当于一个测温器件。

特点：体积小、反应快、线性较好、价格便宜，测温范围为 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

集成温度传感器按输出量形式不同，可分为电压型、电流型和数字型三类。

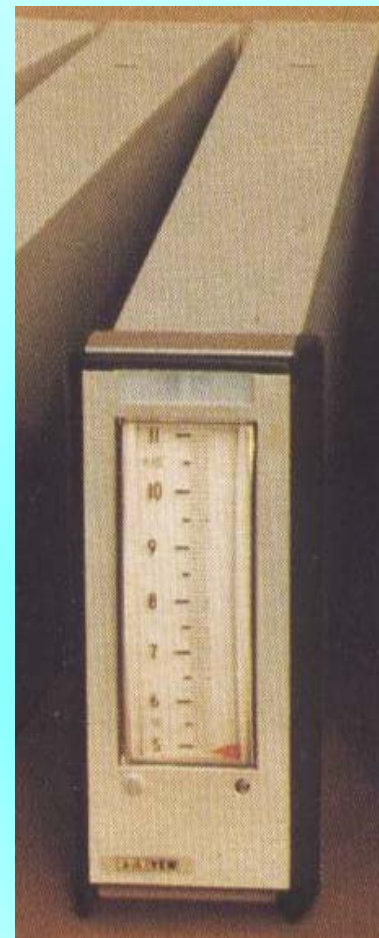
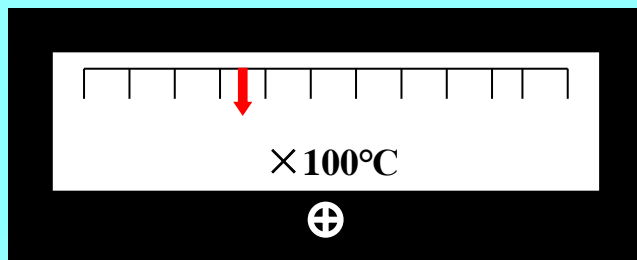


2.2.5温度显示与记录

热电偶、热电阻等传感元件的测温信号，必须经后级仪表处理，将温度显示出来或记录保存。

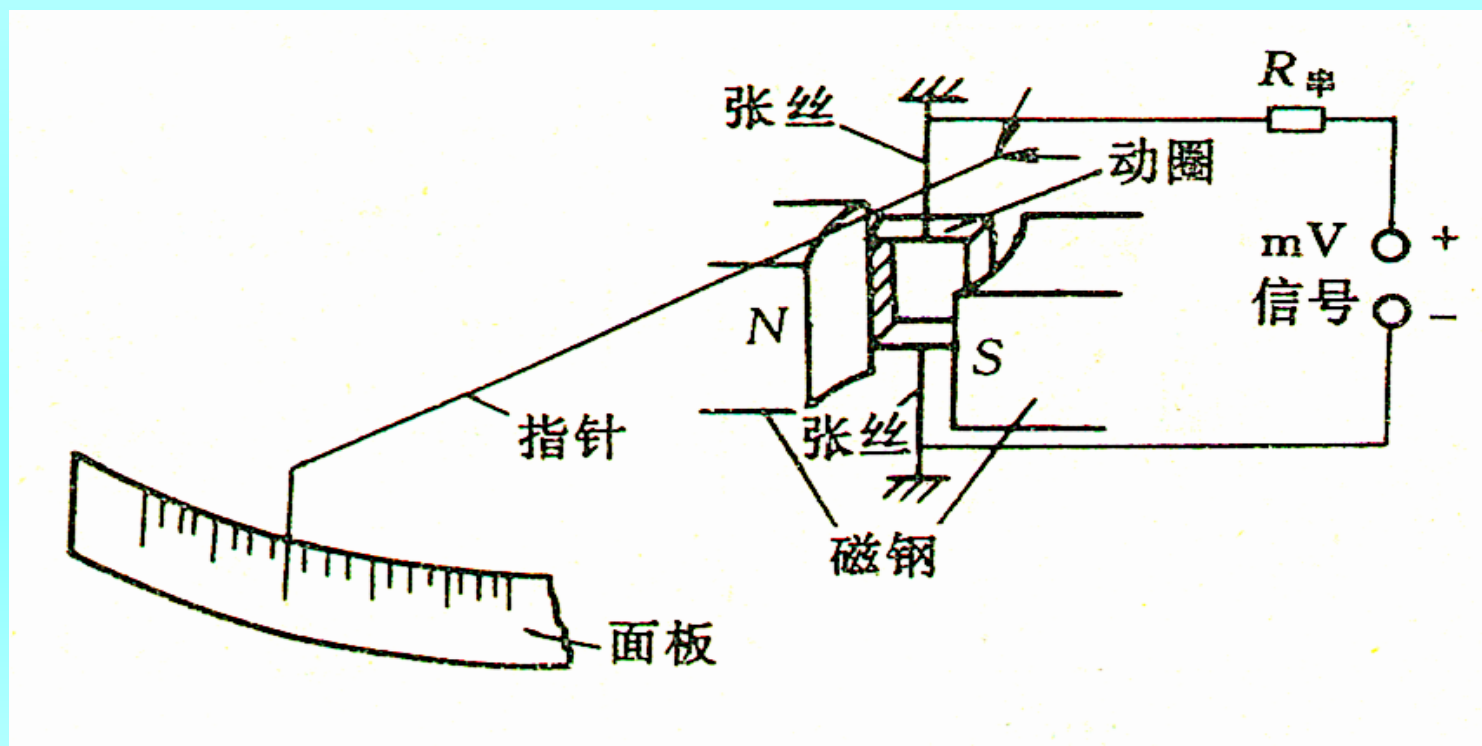
2.2.5.1动圈式指示仪表

可直接与热电偶、热电阻配套显示温度，是最简单的模拟指示仪表。



动圈式仪表实质上是测量电流的仪表，其指示机构的核心部件是一个磁电式毫安表。

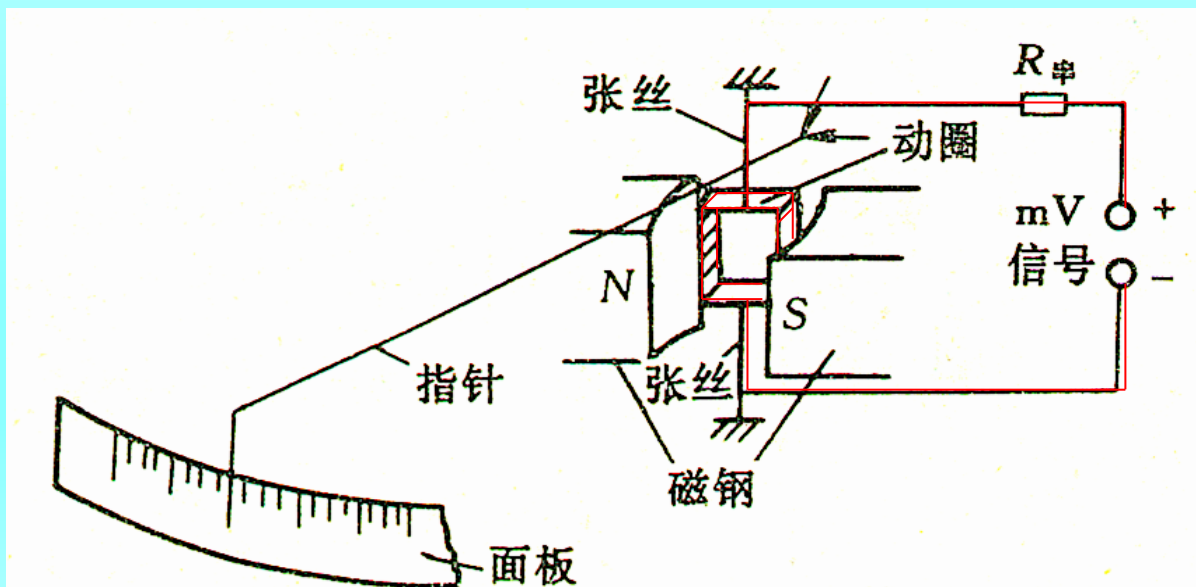
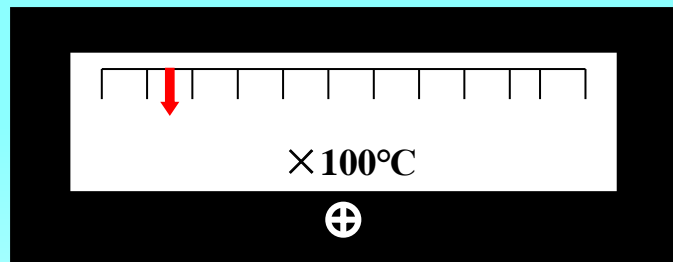
利用通电线圈在磁场中受到力矩的作用产生偏转的原理，带动装在动圈上的指针移动，从而指示出被测参数。



动圈测量机构原理

当测量信号通过张丝加在动圈上，有电流流过动圈时，动圈受磁场力作用而偏转。

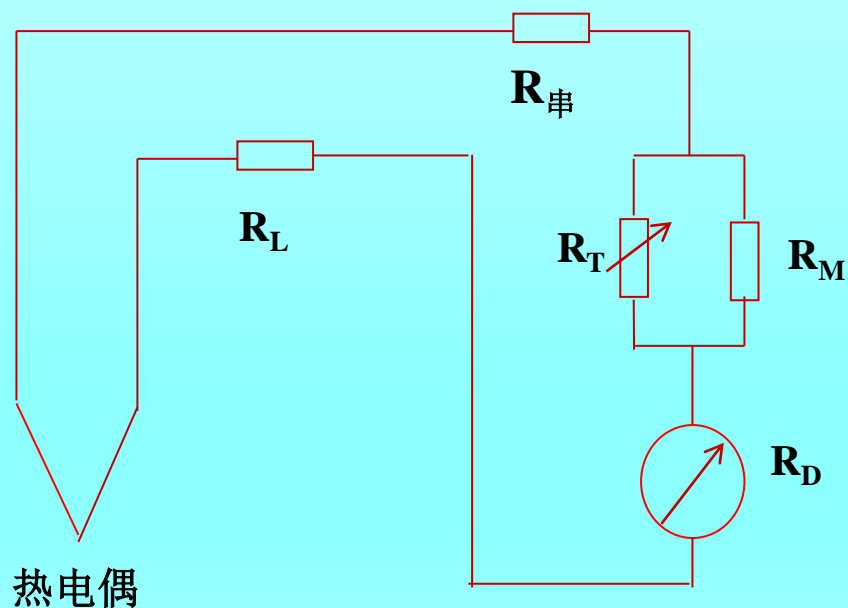
动圈转动使张丝扭转，于是张丝产生反抗动圈转动的力矩，当两力矩平衡时，动圈就停留在某一位置上，指针指示出被测参数值。



1、配热电偶的动圈仪表

热电偶直接输出毫伏信号，可以驱动动圈仪表。
但有动圈电阻温度补偿和量程匹配问题要解决。

1) 用热敏电阻补偿动圈电阻的温度误差



由于热敏电阻温度系数太大，用一个锰铜电阻 R_M （ 50Ω ）和热敏电阻 R_T （ $68\Omega_{20^\circ\text{C}}$ ）并联。 $R_{串}$ 按量程大小调整。

2) 外接电阻和外接调整电阻

热电偶和动圈仪表相接后，流过动圈的电流为：

$$I = \frac{E(t, 0)}{R_{\text{总}}} = \frac{E(t, 0)}{R_{\text{外}} + R_{\text{内}}}$$

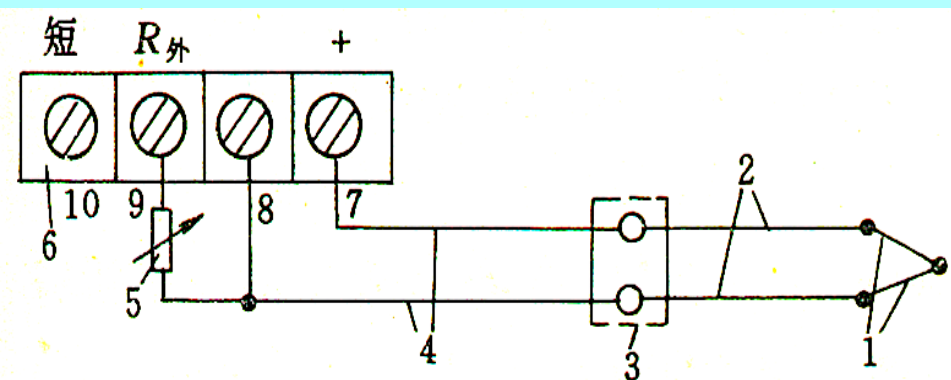


图 4-2 热电偶现场接线图

- 1—热电偶；2—补偿导线；3—冷端补偿器；
4—连接导线；5—调整电阻；6—仪表接线板；
7~10—接线端子

$$R_{\text{外}} = R_{\text{热}} + R_{\text{补}} + R_{\text{连}} + R_{\text{调}}$$

$$R_{\text{内}} = \text{表内电阻之和}$$

测量时要求回路：

$$R_{\text{总}} = 15\Omega$$

通过调整 $R_{\text{调}}$ 实现。

2、配热电阻的动圈仪表

一般用电桥将热电阻信号转换成电压信号。

1) 电桥工作原理

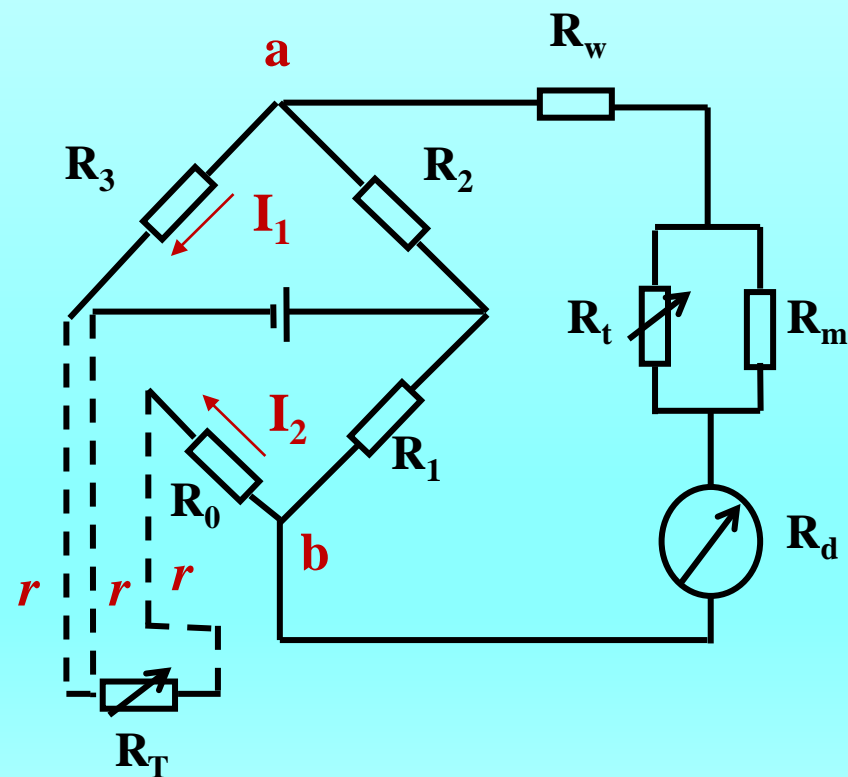
设 T_0 °C时，电桥平衡。则 $R_1 R_3 = R_2 (R_0 + R_{T0})$

且 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_{T0} + R_0$

有: $I_1 = I_2 = I$

当 T °C时，电桥输出

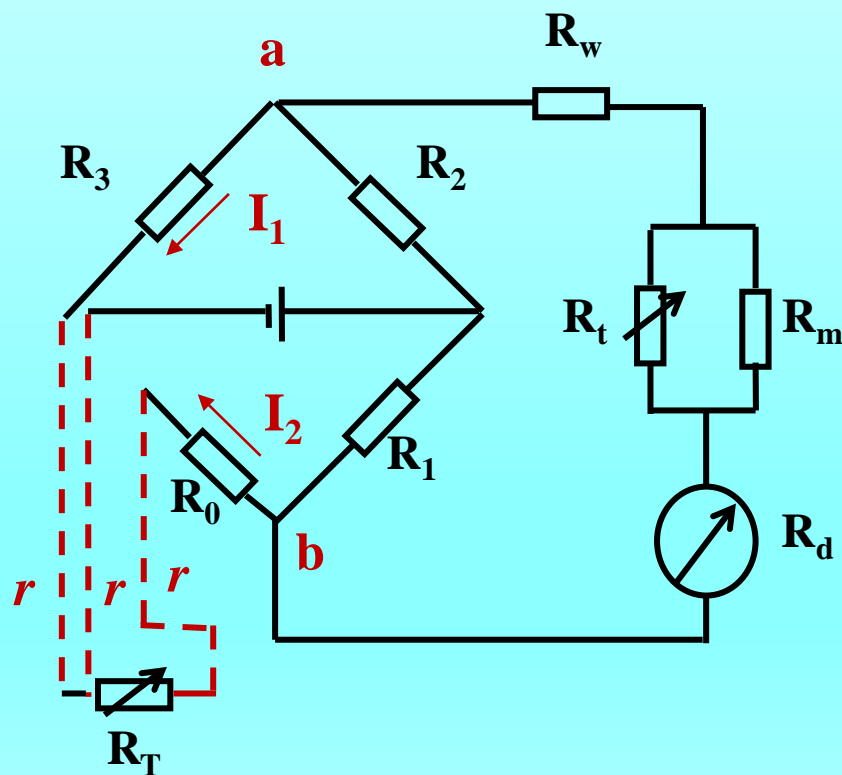
$$\begin{aligned} U_{ab} &= R_3 I - (R_T + R_0) I \\ &= R_3 I - (R_{T0} + \Delta R_T + R_0) I \\ &= -\Delta R_T I \end{aligned}$$



2) 三线制与外接调整电阻

在考虑接线电阻后，电桥输出：

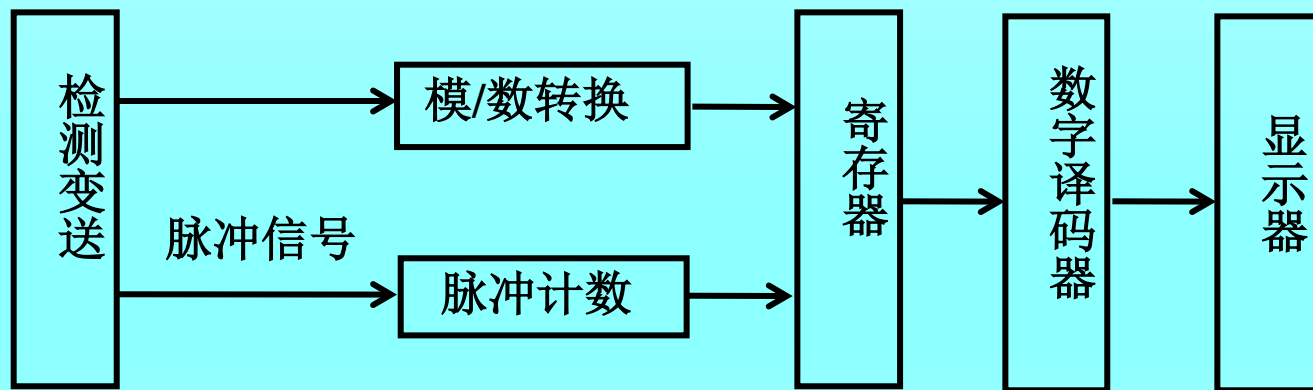
$$U_{ab} = (R_3 + r) I - (R_T + \Delta R_T + R_0 + r) I = - \Delta R_T I$$



可见三线制接法可以消除接线电阻的影响。一般规定每根连接导线的电阻值为 5Ω 。

2.2.5.2 数字式指示仪表

数字式指示仪表是以数字电压表为主体而构成的测量仪表。其原理框图如下：



例：配热电偶的数字式测温仪表原理框图



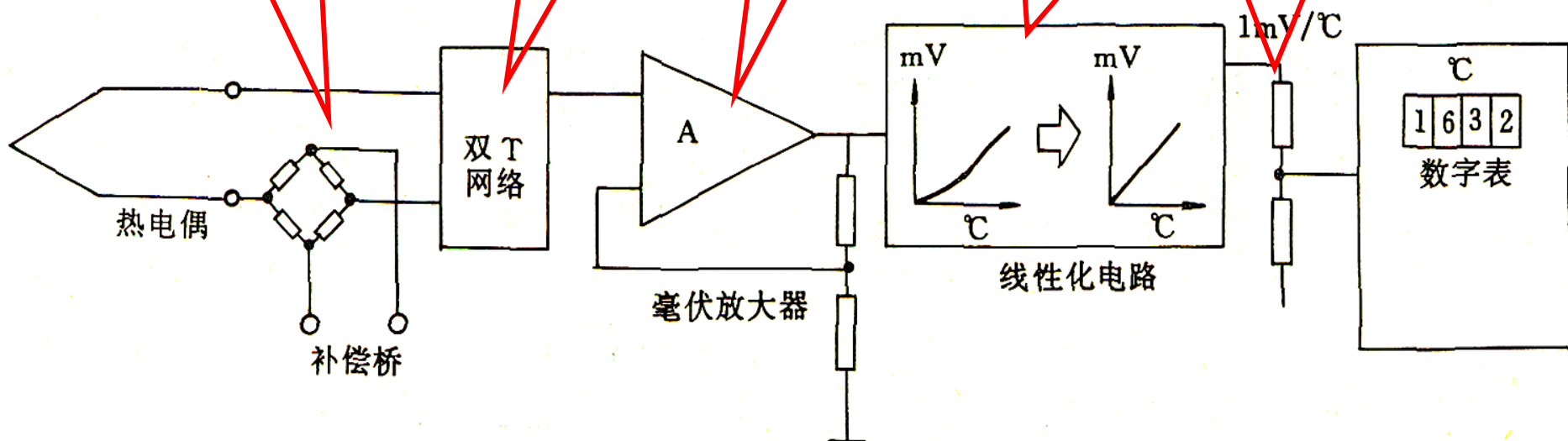
标准热
电势

滤波

放大

线性化

标度变换

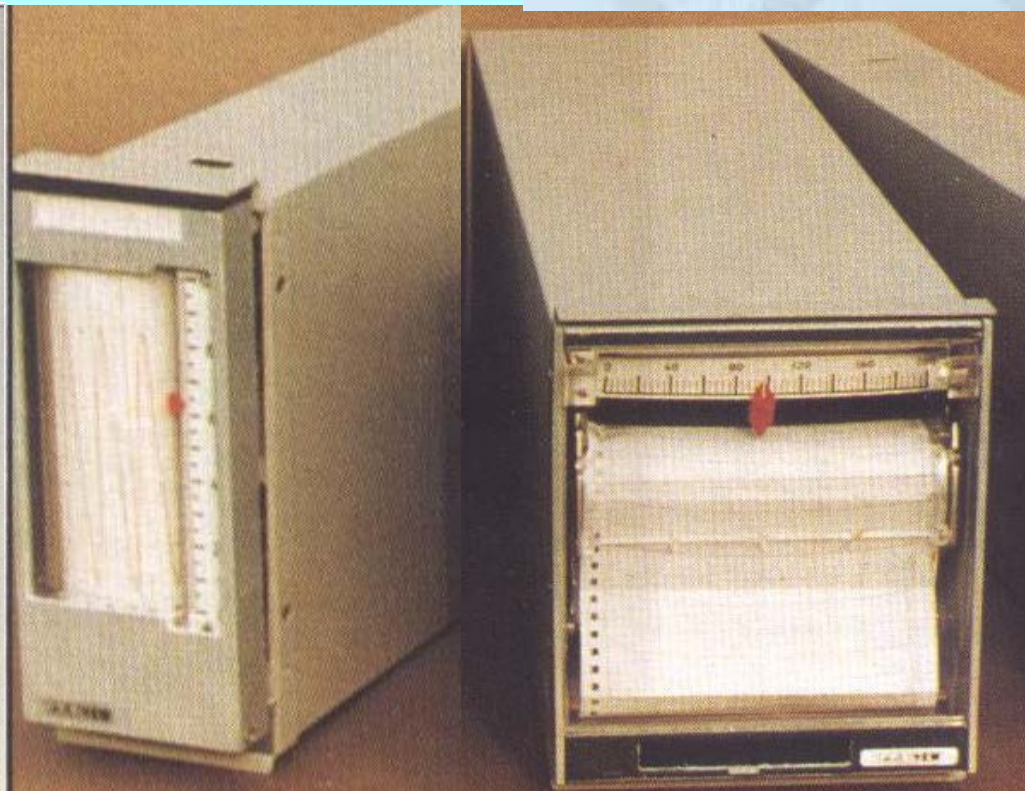


2.2.5.3 自动记录仪表

自动记录仪能实时记录被测参数。
记录的方式有纸记录和无纸记录两类。



HWP-CS 系列
彩色无纸记录仪



1.自动平衡电桥式记录仪

利用电桥的平衡动作进行测量记录。可配接热电阻组成测温记录仪。

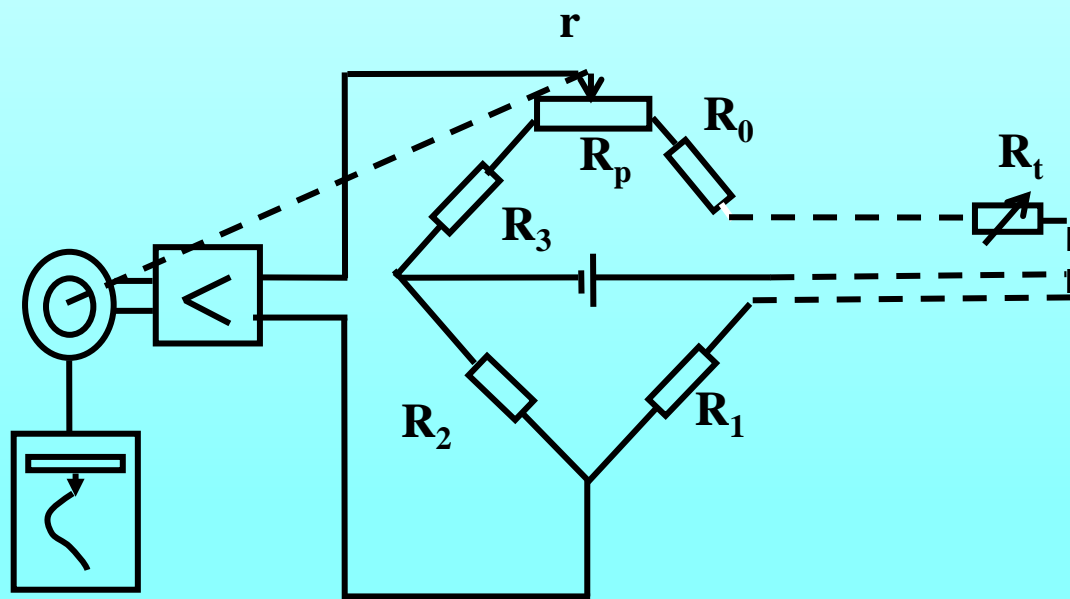
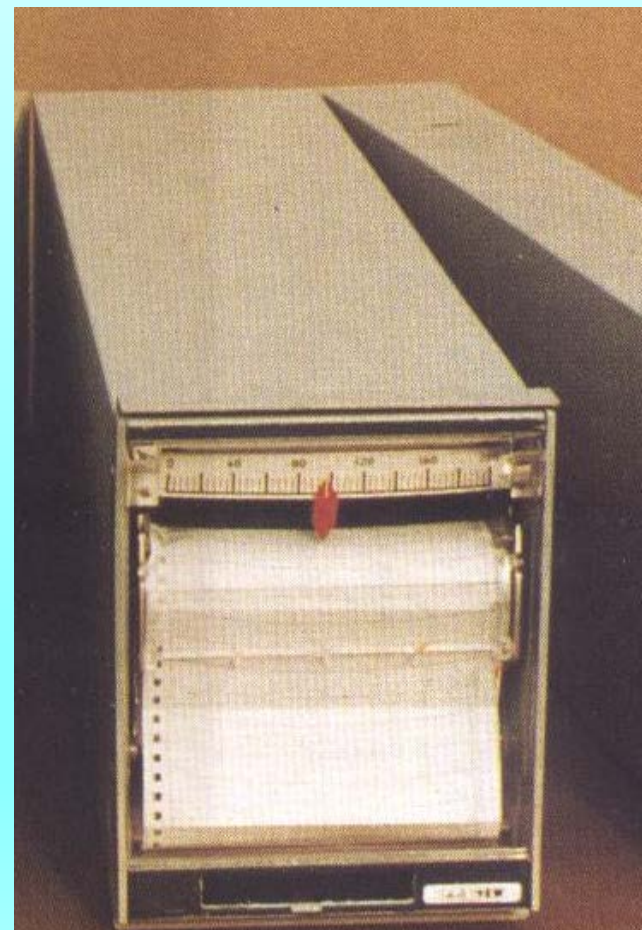


图2.22 自动平衡电桥原理图



平衡电桥测温原理

当被测温度为下限时， R_t 有最小值 R_{t0} ，滑动触点应在 R_p 的左端，此时电桥的平衡条件是：

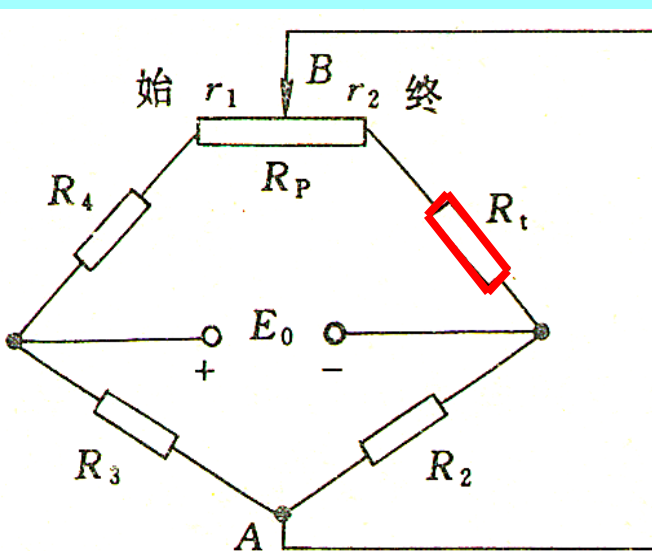
$$R_3 (R_{t0} + R_p) = R_2 R_4$$

被测温度升高后，电桥输出不平衡电压，驱动电机，带动触点向右移动，直至新的平衡点：

$$R_3 (R_{t0} + \Delta R_t + R_p - r_1) = R_2 (R_4 + r_1)$$

两式相减得：

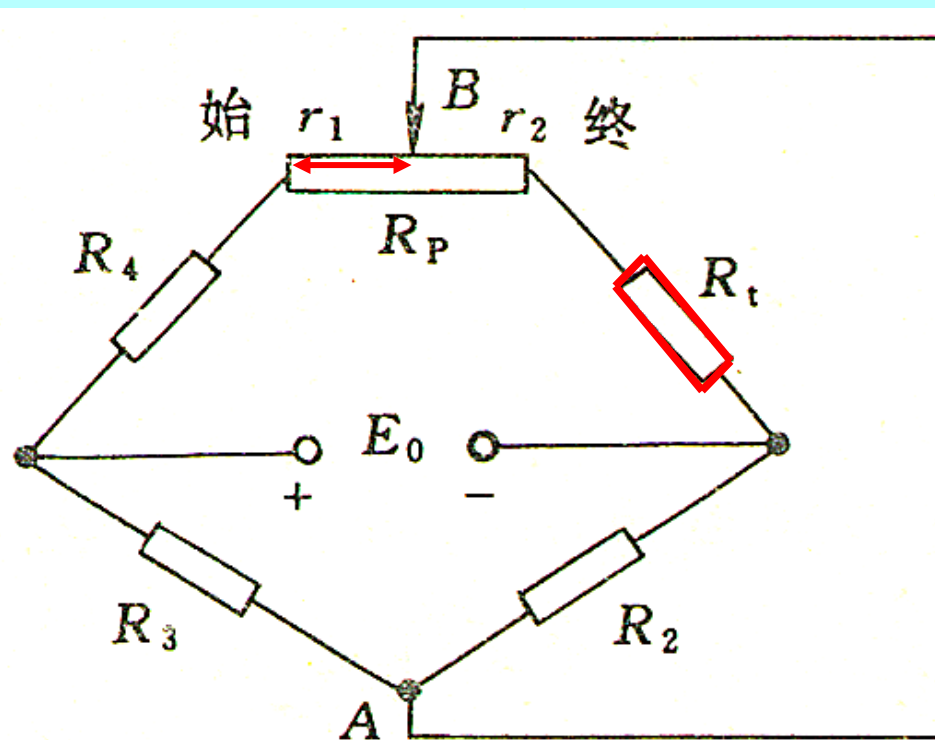
$$r_1 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \Delta R_t$$



r_1 是滑线电阻 R_p 的输出可变电阻。电机带动触点 B 向新的平衡位置移动，到达平衡点时，电桥输出为零，电机停止。 B 的位置就可以反映 ΔR_t ，即反映了温度的变化。

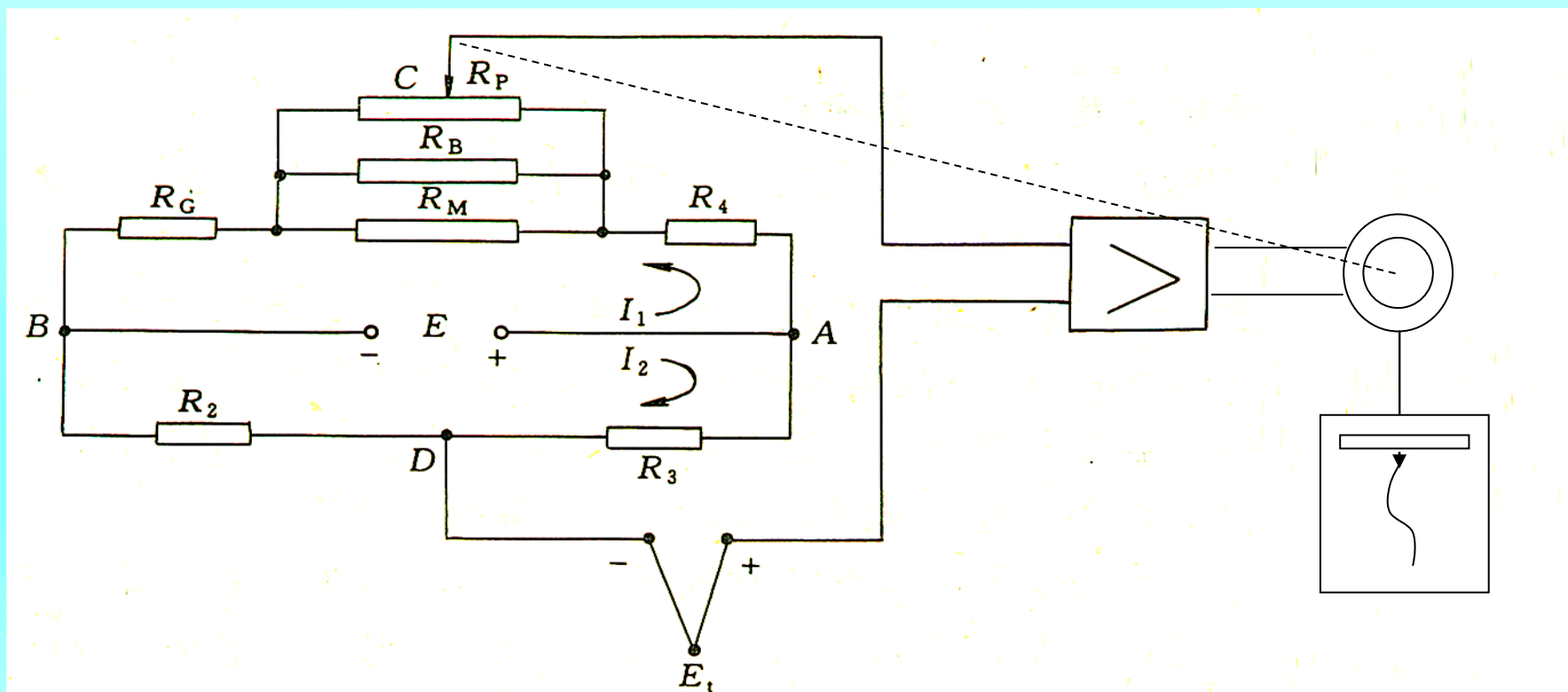
触点位移与 ΔR_t 呈比例关系：

$$r_1 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \Delta R_t$$

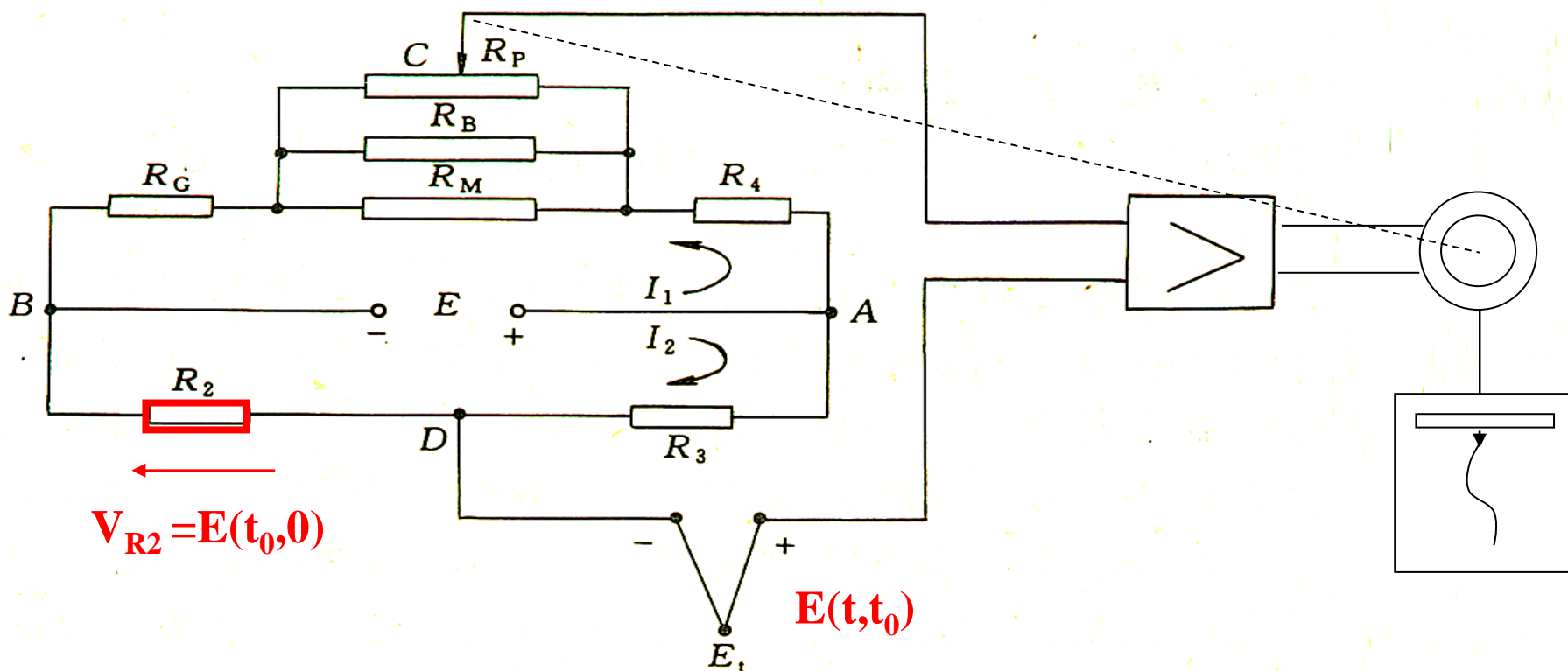


2.自动电位差计式记录仪

自动电位差计式记录仪输入电压信号，因此可配接热电偶。和自动平衡电桥式记录仪相比，两者除测量部分不同外，其余部分都相同。

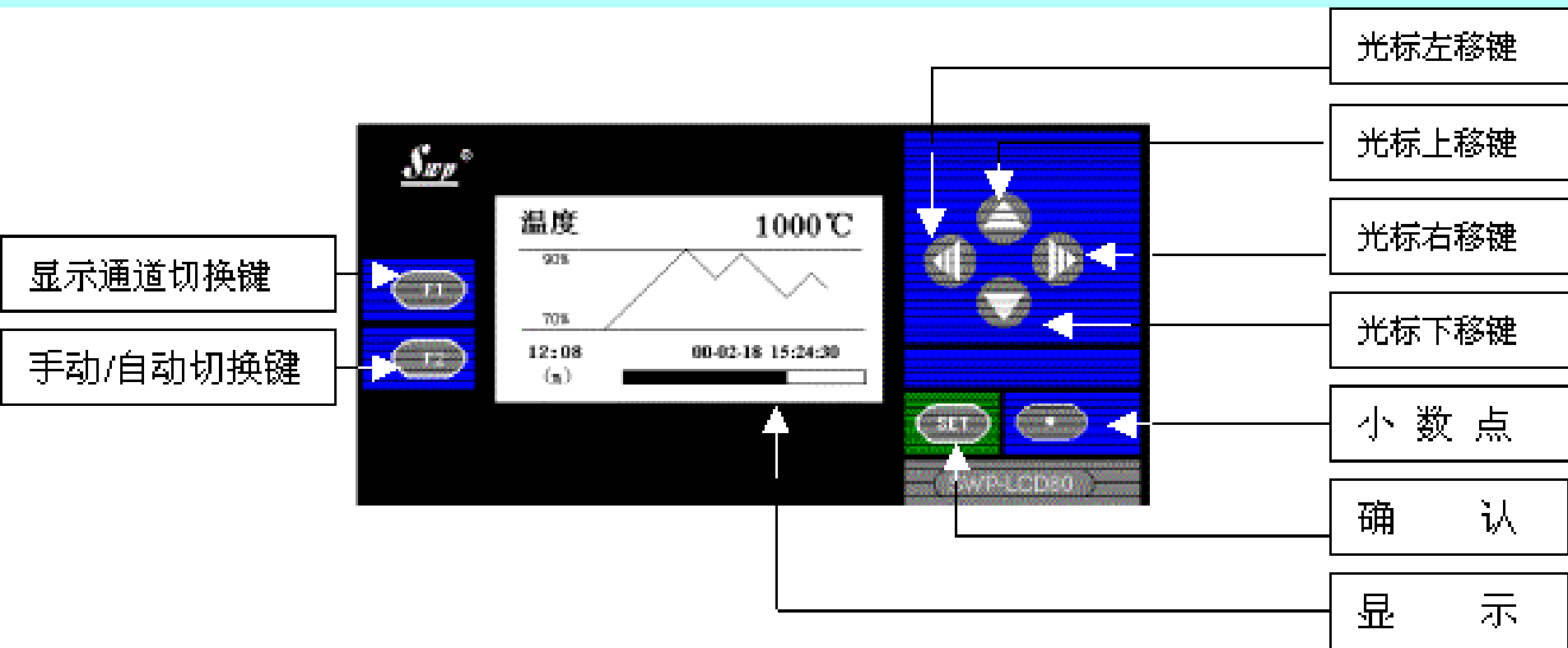


配接热电偶，必须考虑冷端补偿问题。图2.23中，将 R_2 换成铜电阻，和热电偶的冷端置于同一温度下。当冷端温度升高时，设计使电压 V_{R_2} 的增加量恰好弥补热电势的减少值。



数字式记录仪表

形式多样，内装CPU，无纸记录被测参数。可实时显示，也可随时调出历史曲线。可多通道记录。



2.2.6温度变送器

检测信号要进入控制系统，必须符合控制系统的信号标准。变送器的任务就是将不标准的检测信号，如热电偶、热电阻的输出信号转换成标准信号输出。

模拟控制系统的信号标准是：

II 型：0~10mA、0~10V

III型：4~20mA、1~5V

数字控制系统的信号标准有：

FF协议、 HART协议等



2.2.6.1 模拟式温度变送器

模拟式温度变送器有多个品种、规格，以配合不同的传感元件和不同的量程需要，但结构基本相同。

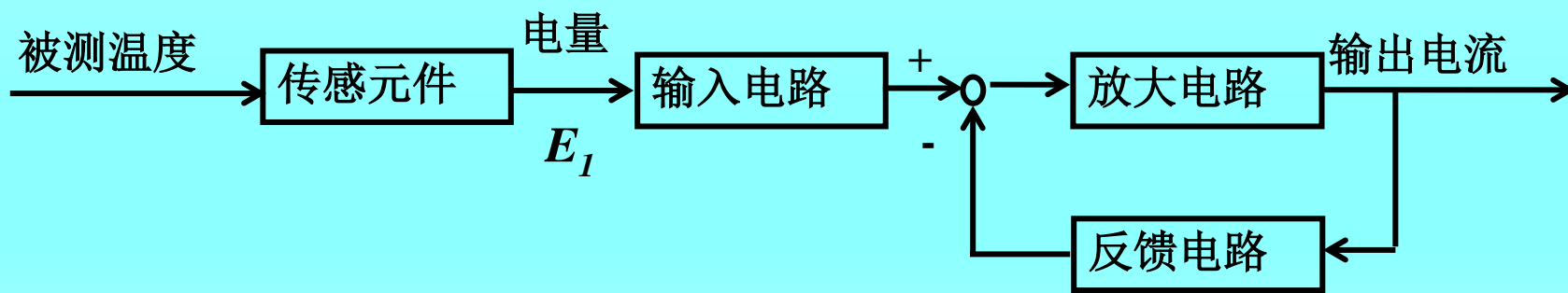


图2.24 温度变送器原理框图

以DDZ-III型热电偶温度变送器为例：

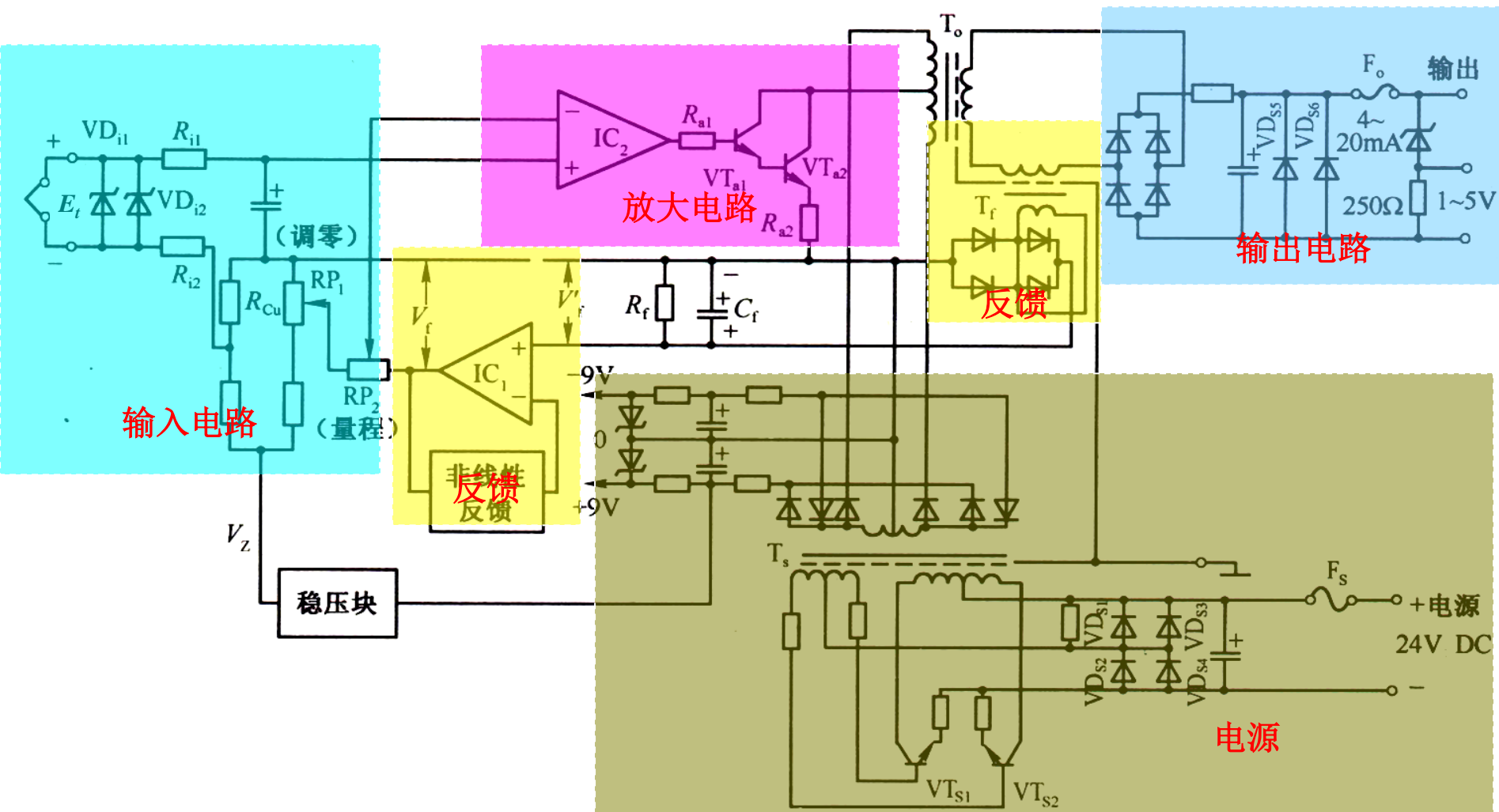


图 1-14 DDZ-III 型热电偶温度变送器的简化原理图

下面具体分析各环节的工作原理。

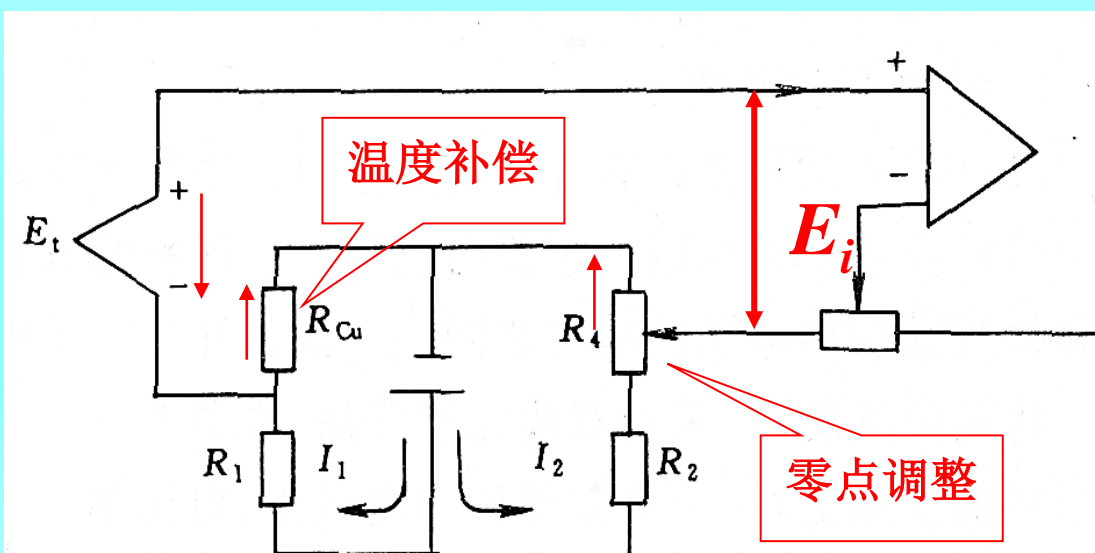
1. 输入电路

热电偶温度变送器的输入电路主要是在热电偶回路中串接一个电桥电路。电桥的功能是实现热电偶的冷端补偿和测量零点的调整。

$$E_i = E_t + V_{R_{cu}} - V_{R_4}$$

冷端补偿设计:

$$\Delta V_{R_{cu}t_0} = E(t_0, 0)$$



$$E_i = E_t + V_{Rcu} - V_{R4}$$

$$= E_t + \Delta V_{Rcut0} + V_{Rcu0} - V_{R4}$$

标准
热电势

零点
调整

V_{Rcu0} — 0度时

R_{cu} 上压降,

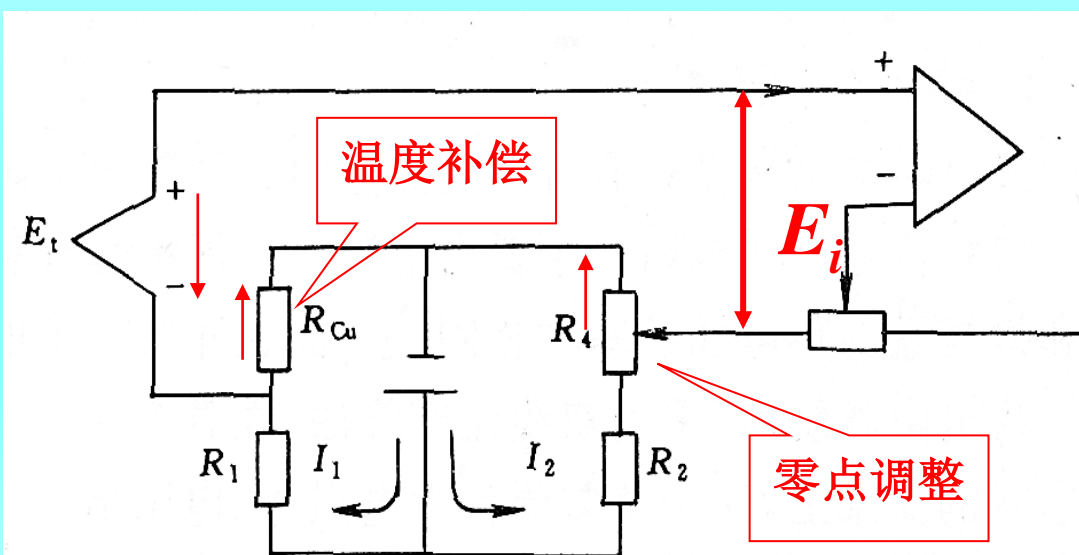
ΔV_{Rcut0} — t_0 度时

R_{cu} 上压降增量

冷端补偿:

$$\Delta V_{Rcut0} = E(t_0, 0)$$

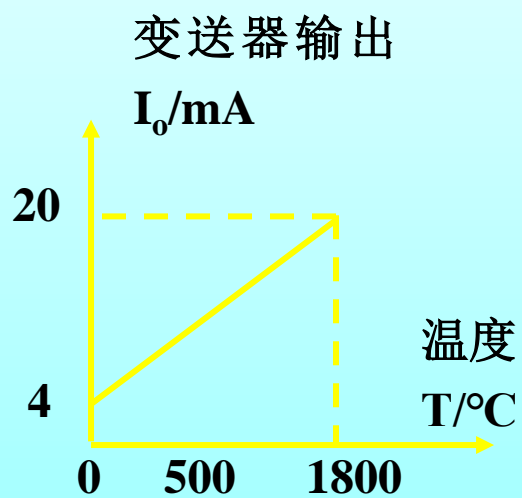
调 R_4 实现零点调整。



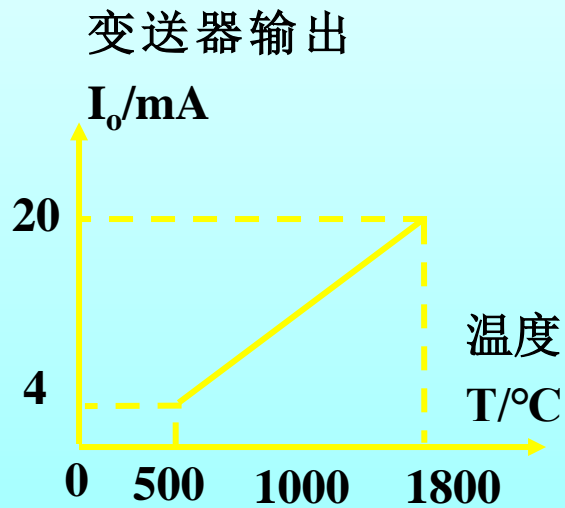
$$E_i = E_t + \Delta V_{Rcut0} + \underbrace{V_{Rcu0} - V_{R4}}_{\text{零点调整}}$$

大幅度的零点调整叫零点迁移。实用价值是：

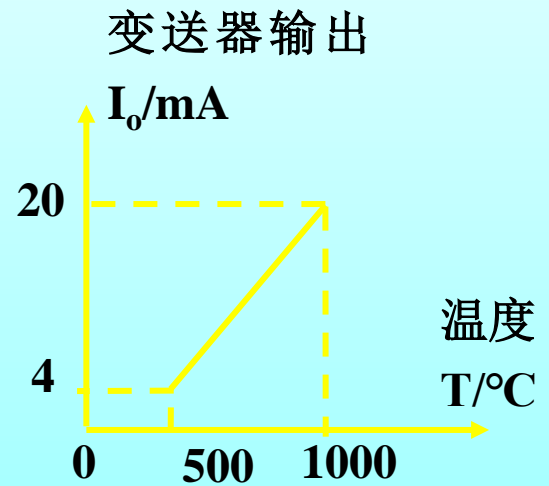
有些工艺的参数变化范围很小，例如，某设备的温度总在500~1000℃之间变化。如果仪表测量范围在0~1800℃之间，则500℃以下、1000℃以上的测量区域属于浪费。因为变送器的输出范围是一定的。可通过零点迁移，配合量程调整，使仪表的测量范围在500~1000℃之间，可提高测量精度。



a. 未迁移



b. 零点正向迁移



c. 零点正向迁移
且缩小量程

图2.26 温度变送器的零点迁移和量程调整

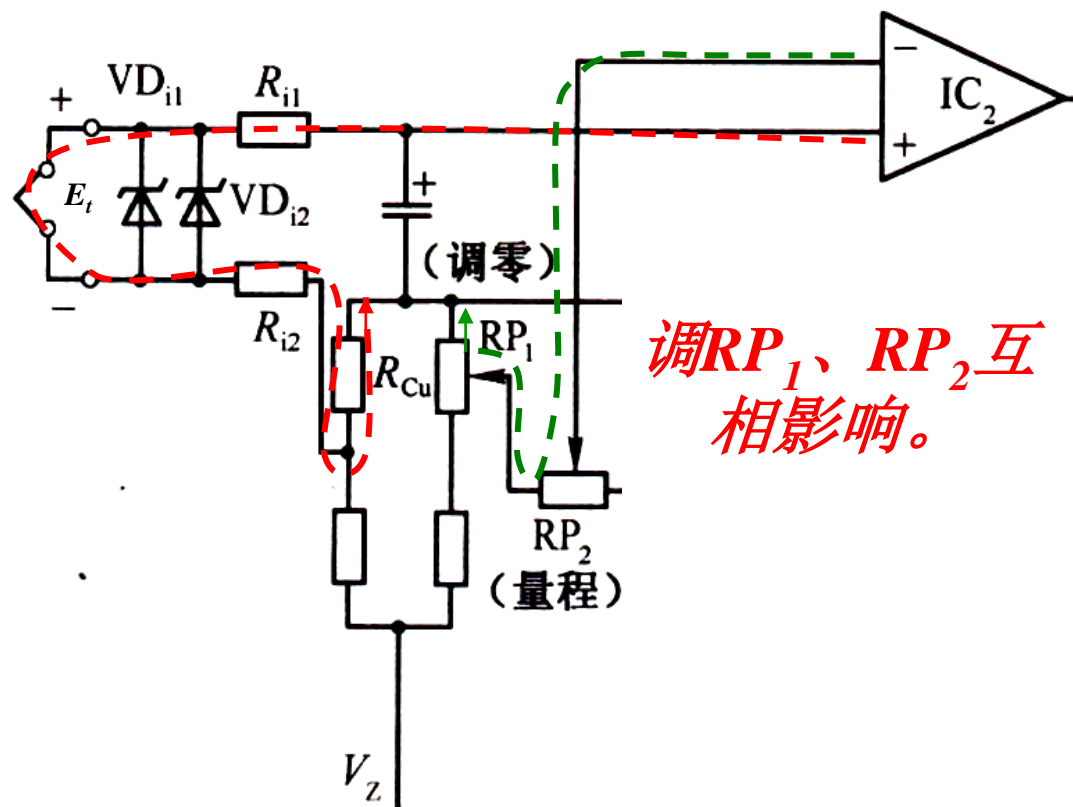
实际输入电路

RP_1 为零点迁移电位器， RP_2 为量程迁移电位器，改变 RP_2 ，可改变反馈电压 V_f 的分压比，即改变反馈强度，因而改变整个变送器的量程。

差动输入：

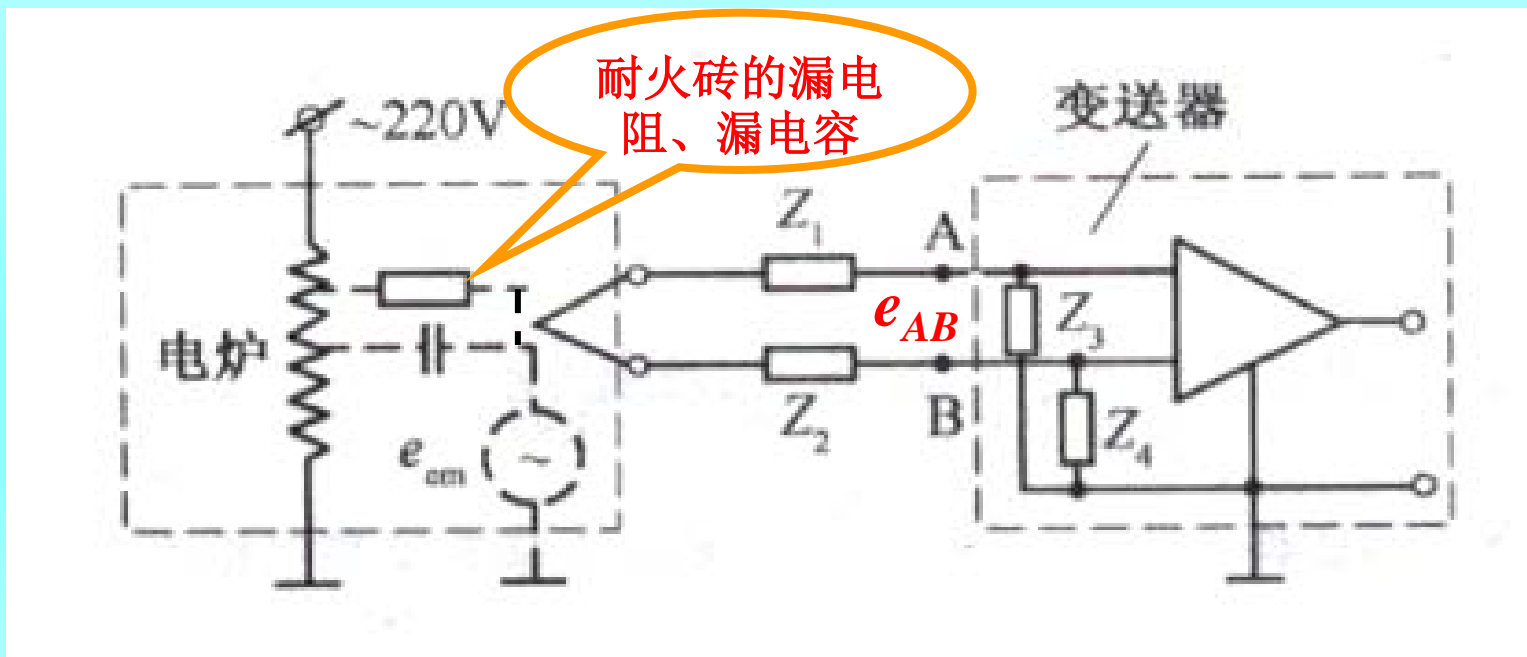
$$E_t + V_{RCU} \rightarrow IC_2 +$$

$$V_{RP'1} + V_{RP'2} \rightarrow IC_2 -$$



2、放大电路

由于热电偶输出的热电势为毫伏级信号，放大电路必须是高增益低漂移的运放，同时还要采取抗干扰措施。因为测量元件和连接导线在现场很容易引入干扰。例如用热电偶测量电炉温度时：

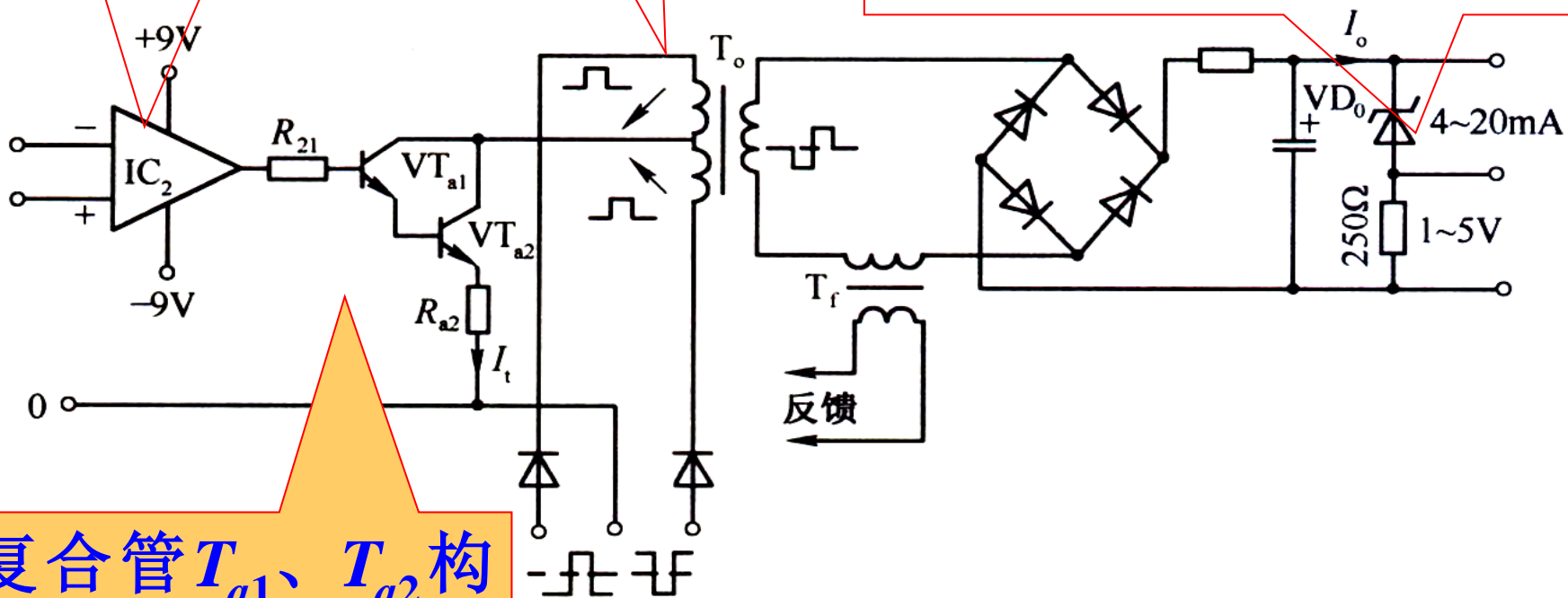


实际放大电路

高增益、低漂 移的IC₂，构成 差动放大器

调制 隔离

稳压管 VD_0 的作用是在
电流输出回路断线时，
电压输出信号不受影响

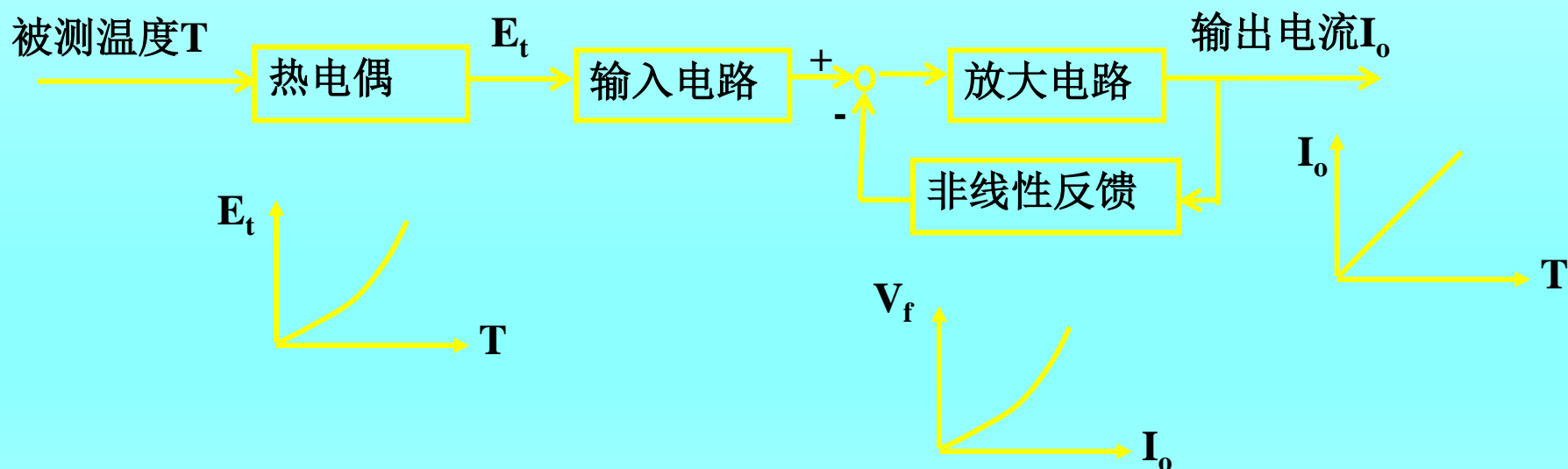


复合管 T_{a1} 、 T_{a2} 构成射极输出器，实现 $V-I$ 的转换

5 变送器的功率放大及输出电路

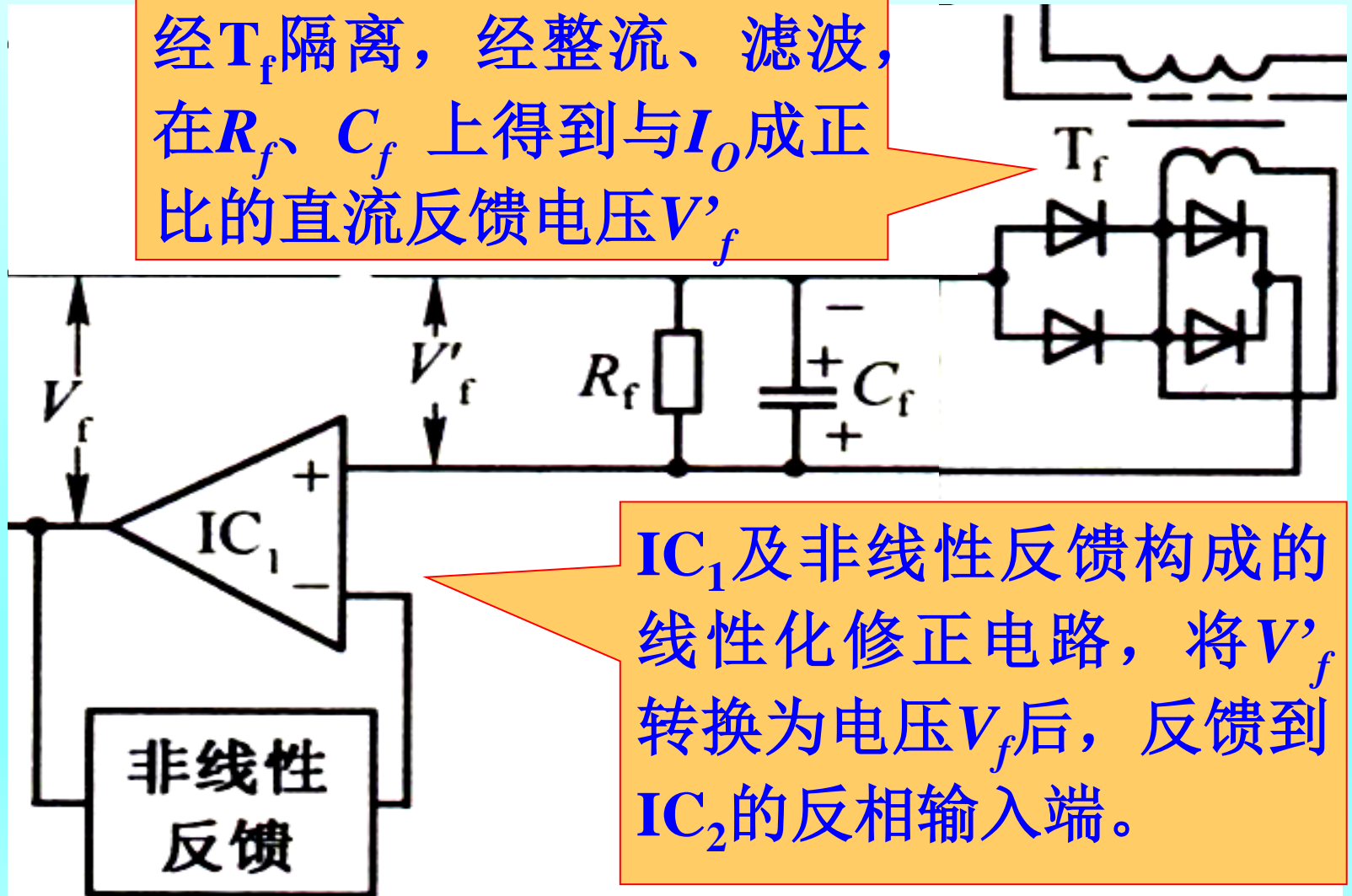
3、反馈电路

在反馈电路中需要完成量程调整和非线性校正两个功能。量程调整实质上是调整放大电路的闭环放大倍数，通过调节反馈电阻的大小就可实现。而非线性校正则需要一个校正网络来实现。



实际反馈电路

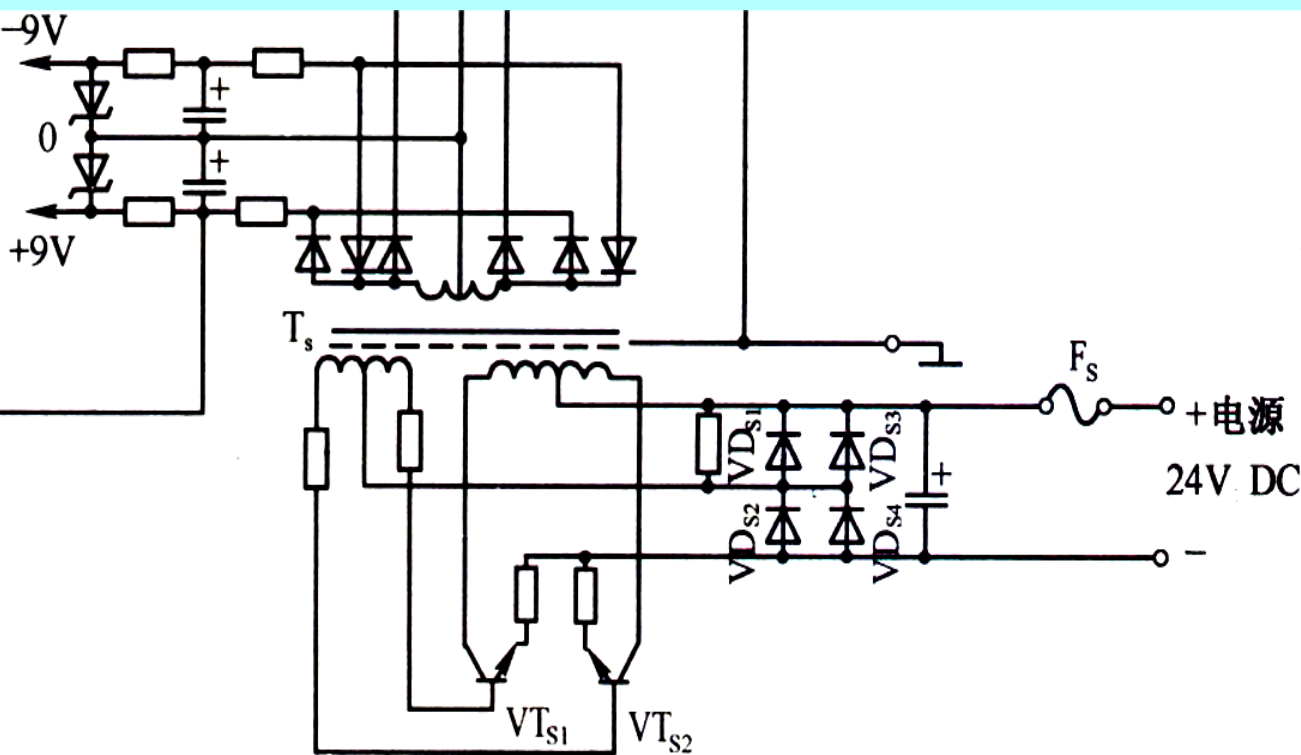
经 T_f 隔离，经整流、滤波，在 R_f 、 C_f 上得到与 I_o 成正比的直流反馈电压 V'_f



IC_1 及非线性反馈构成的线性化修正电路，将 V'_f 转换为电压 V_f 后，反馈到 IC_2 的反相输入端。

电源

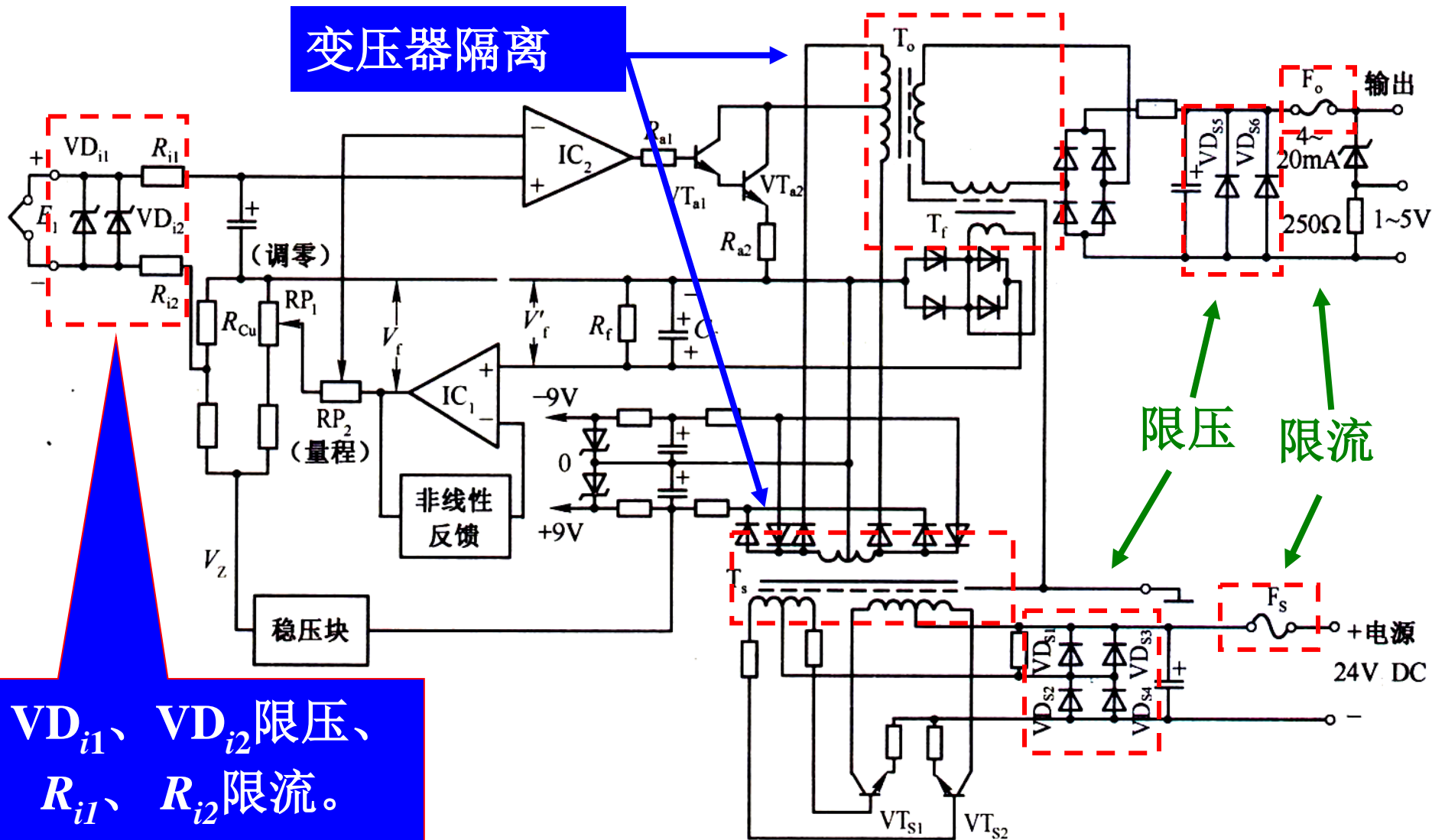
变送器的供电电源是+24V。为了提高变送器的抗共模干扰能力和有利于安全防爆，放大器需要在电路上与电源隔离。



为此，24V 直流电源经调制解调后，获得±9V的直流电压供给运算放大器。

安全防爆措施

变压器隔离



4、DDZ-III型热电偶温度变送器的实际线路（简图）

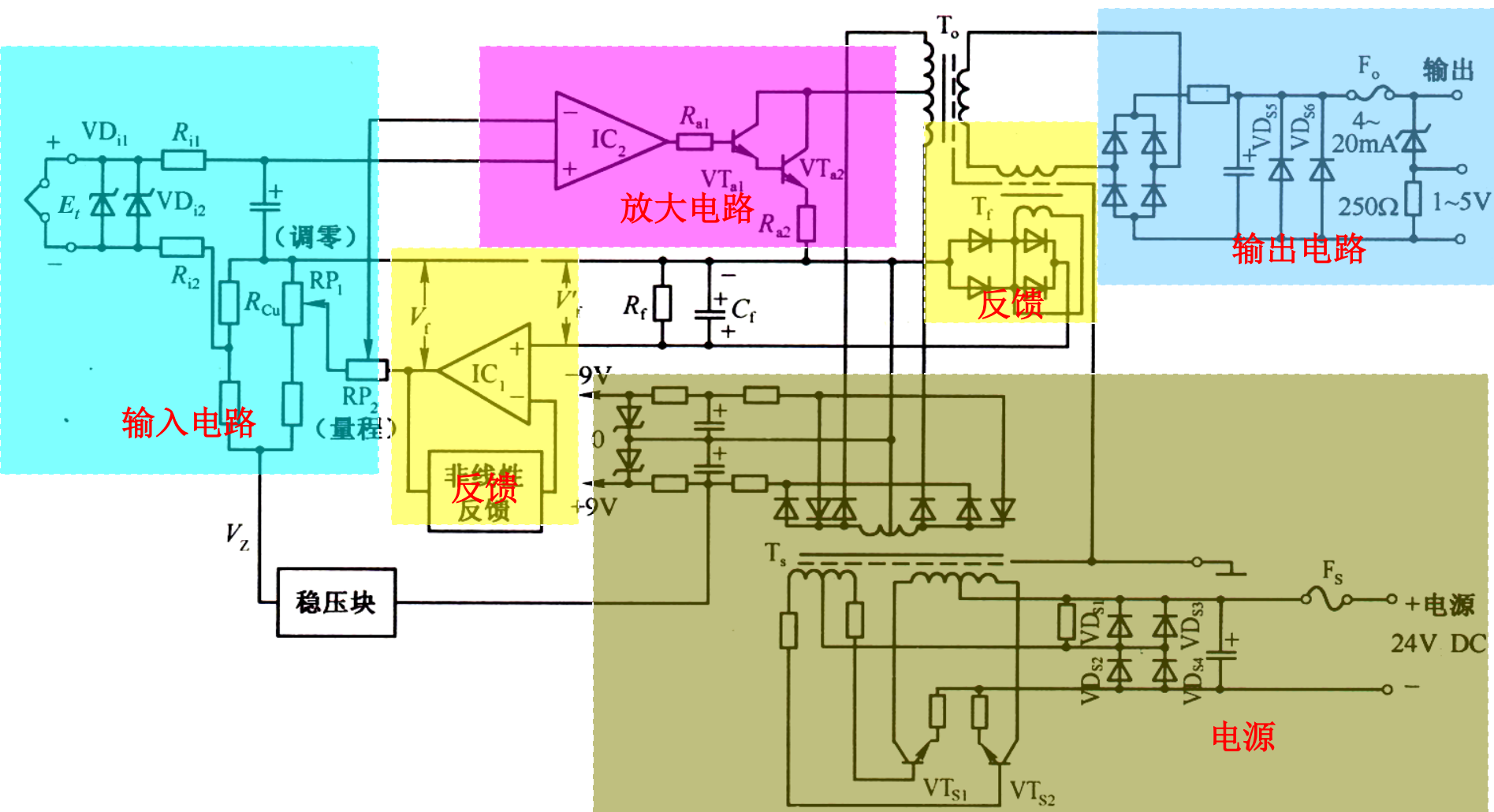


图 1-14 DDZ-III 型热电偶温度变送器的简化原理图



近年来，已推出小型固态化温度变送器和一体化温度变送器，它将传感元件与测量电路一体化，电路高度集成，自带冷端补偿功能，24VDC供电。



SBW 系列
一体化温度变送器



2.2.6.2 智能温度变送器

智能变送器是采用微处理器技术的现场型仪表。可输出模拟、数字混合信号或全数字信号，而且可以通过现场总线通信网络与上位计算机连接，构成集散控制系统和现场总线控制系统。





西仪444系列温度变送器



上海横河YT200温度变送器

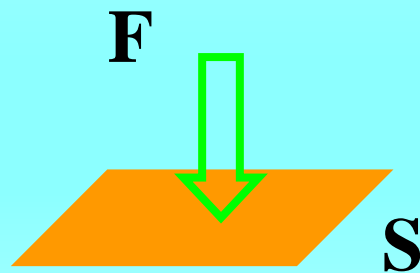
2.3 压力检测及仪表

压力是工业生产中的重要工艺参数之一。如在化工、炼油等生产工艺中，经常会遇到压力，包括高压、超高压和真空度（负压）的测量。

2.3.1 压力检测的方法

工程上习惯把垂直作用于单位面积上的力称为“压力”。即

$$P = F/S$$



压力的单位是“帕斯卡”—— $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

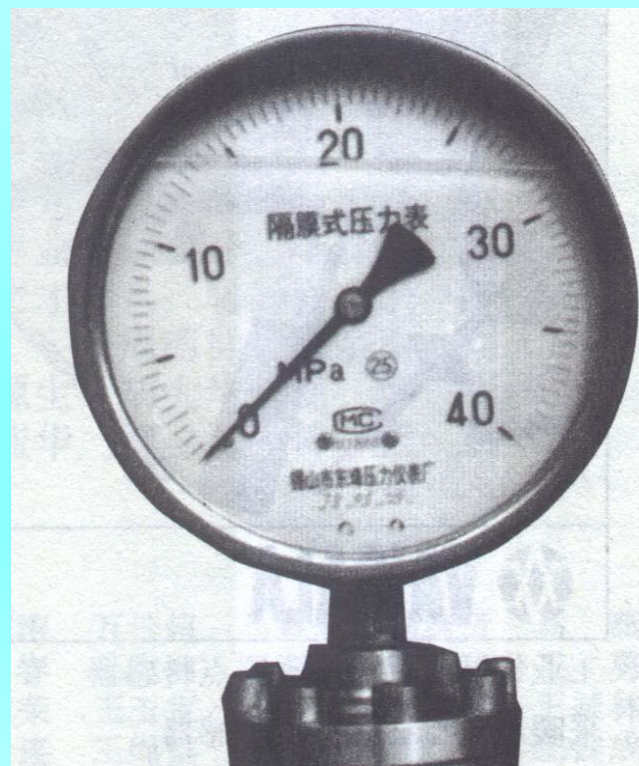
$$1\text{工程大气压} = 1\text{kgf/cm}^2 = 9.80665 \times 10^4\text{Pa}$$

$$\approx 0.1\text{MPa}$$

工程中压力的表示方式有：

表压、负压（真空度）、
差压、绝对压力。

工业中所用仪表的压力指示值，大多数为表压和差压。

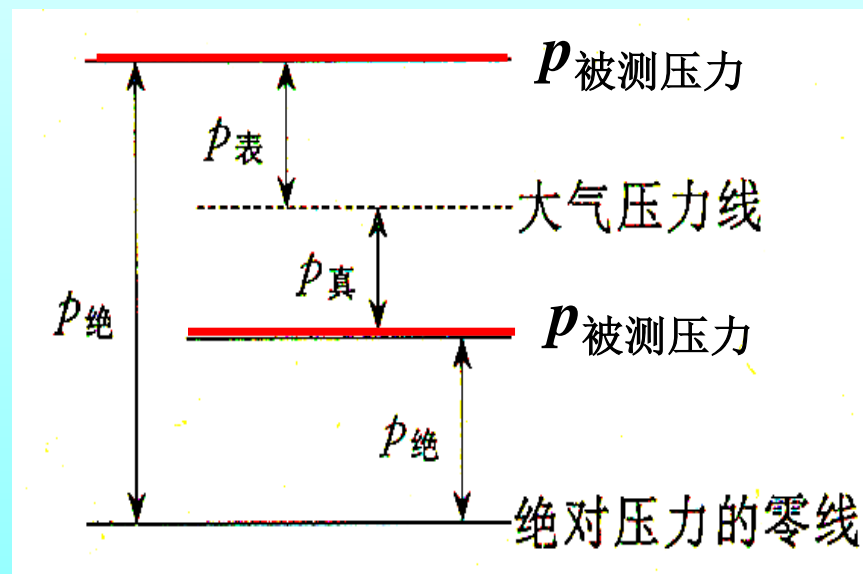


表压、绝对压力、负压（真空度）、差压之间的关系：

$$p_{\text{表压}} = p_{\text{绝对压力}} - p_{\text{大气压力}}$$

$$p_{\text{真空度}} = p_{\text{大气压力}} - p_{\text{绝对压力}}$$

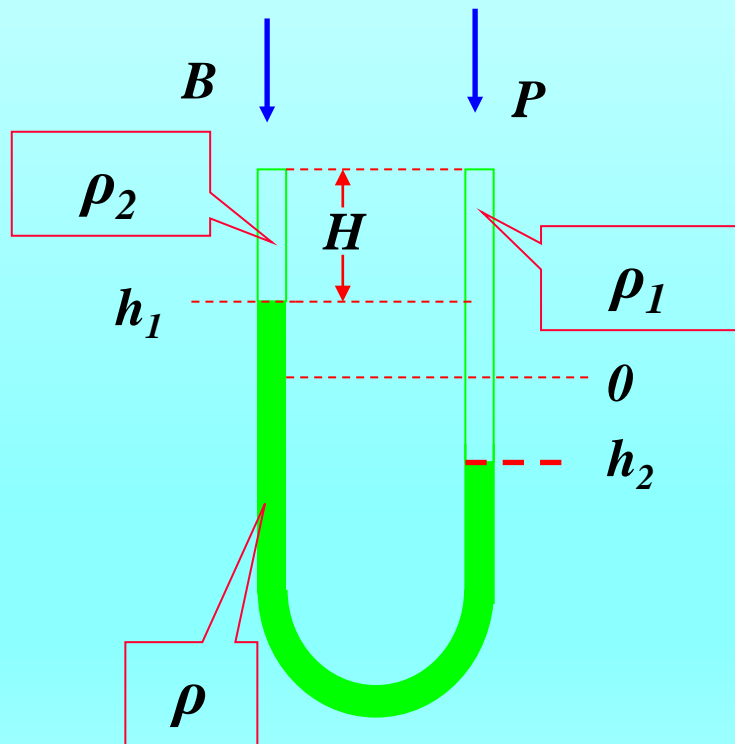
$$p_{\text{差压}} = p_{\text{被测压力1}} - p_{\text{被测压力2}}$$



压力测量仪表品种很多，按照其转换原理的不同，大致可分为四大类。

1、液柱式压力计

利用液体静力学原理测压，如U型管压力计，当被测压力 P 大于大气压力 B 时，液柱会产生高度差。



在U型管 h_2 处等压面上有：

$$P + \rho_1 g (H + h_1 + h_2) \\ = B + \rho_2 g H + \rho g (h_1 + h_2)$$

则：

$$p = P - B = (\rho_2 - \rho_1) g H \\ + (\rho - \rho_2) g (h_1 + h_2)$$

只要读出 $(h_1 + h_2)$ 便可知 p

U型管压力计在读 ($h_1 + h_2$) 时，产生两次读数误差。为了减少读数误差，可将其改进为单管压力计和斜管压力计，测量原理相似。

目前，液柱式压力计使用较少。

2、弹性式压力计



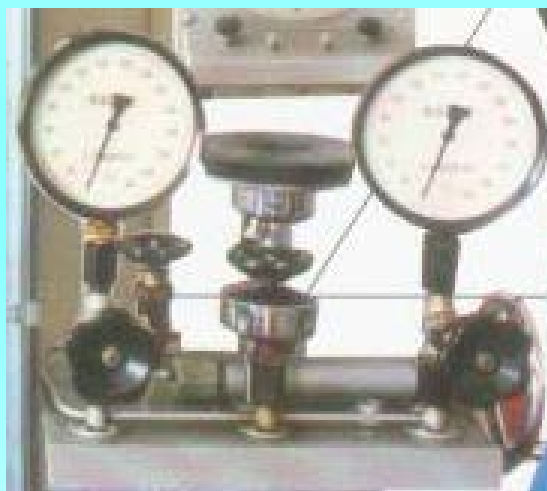
它是将被测压力转换成弹性元件的变形位移进行测量的。

3. 电气式压力计

是通过各种敏感元件将被测压力转换成电量（电压、电流、频率等）进行测量的。例如力平衡式压力变送器、电容式压力变送器等。

4. 活塞式压力计

是根据液体传送压力的原理，将被测压力与活塞上所加的砝码质量进行平衡来测量的。它的测量精度很高。



2.3.2 弹性式压力计

利用弹性元件受压产生变形可以测量压力。由于其产生的位移或力易转化为电量，且构造简单，价格便宜，测压范围宽，被广泛使用。

常用的弹性元件有5种：

(1) 单圈弹簧管

将截面为椭圆形的金属空心管弯成 270° 圆弧形，顶端封口，当通入压力 p 后，它的自由端就会产生位移。

□ 测压范围较宽，可高达1000MPa。



(2) 多圈弹簧管

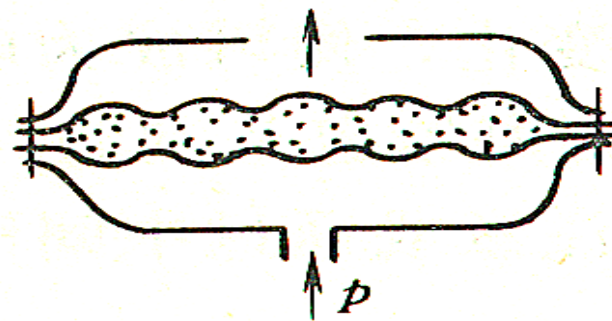
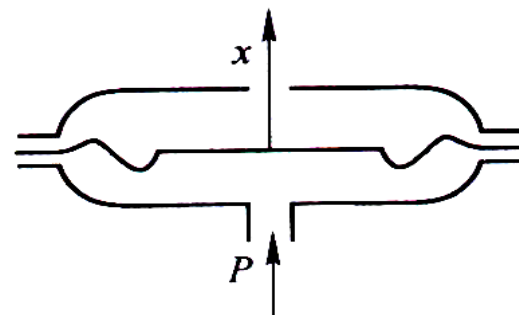
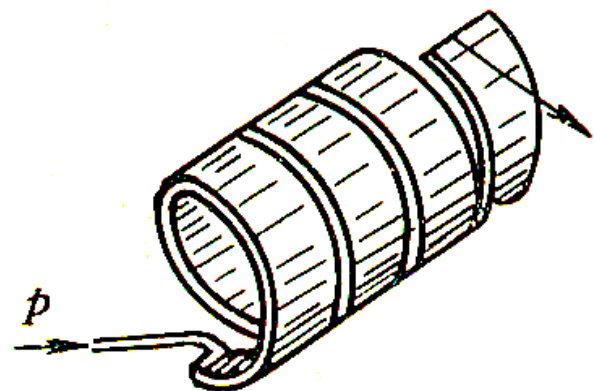
为了在测低压时增加位移，
可以将弹簧管制成多圈状。

(3) 膜片

用金属或非金属材料做成的具有弹性的圆片（有平膜片和波纹膜片）。在压力作用下，其中心产生变形位移。可测低压。

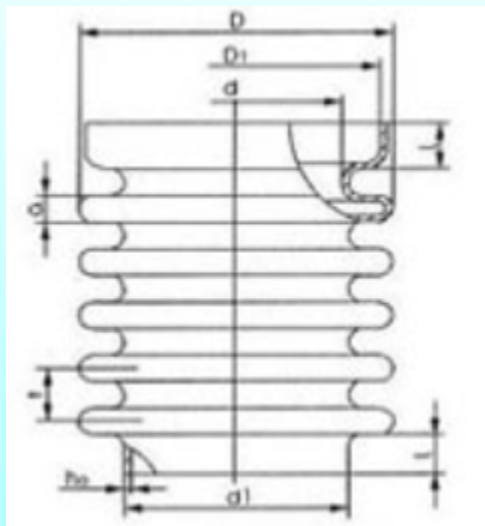
(4) 膜盒

将两张金属膜片沿周口对焊，
内充硅油。使膜片增加强度。



(5) 波纹管

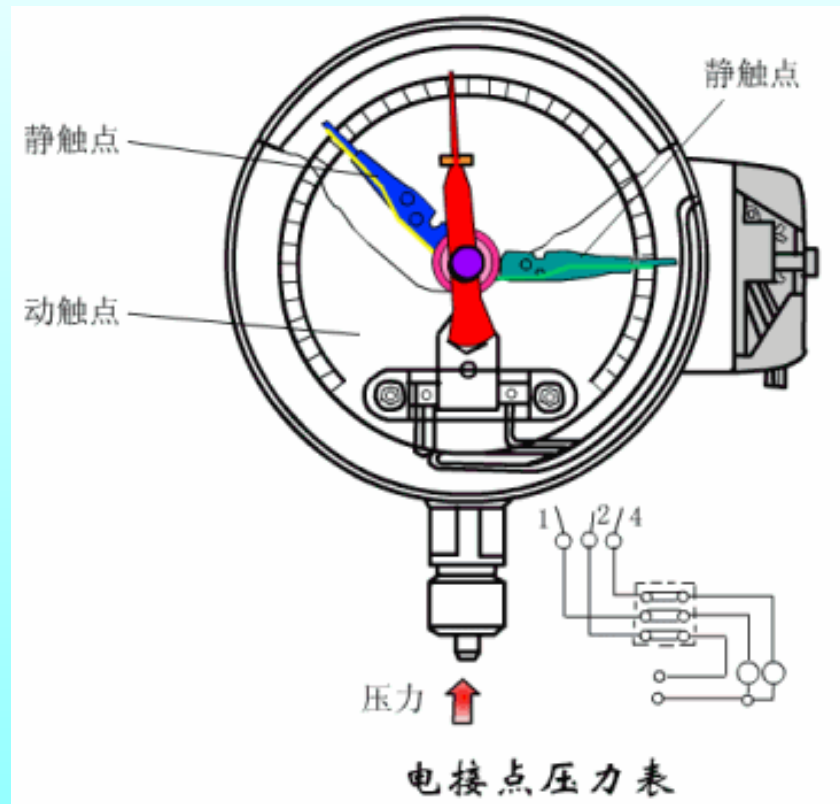
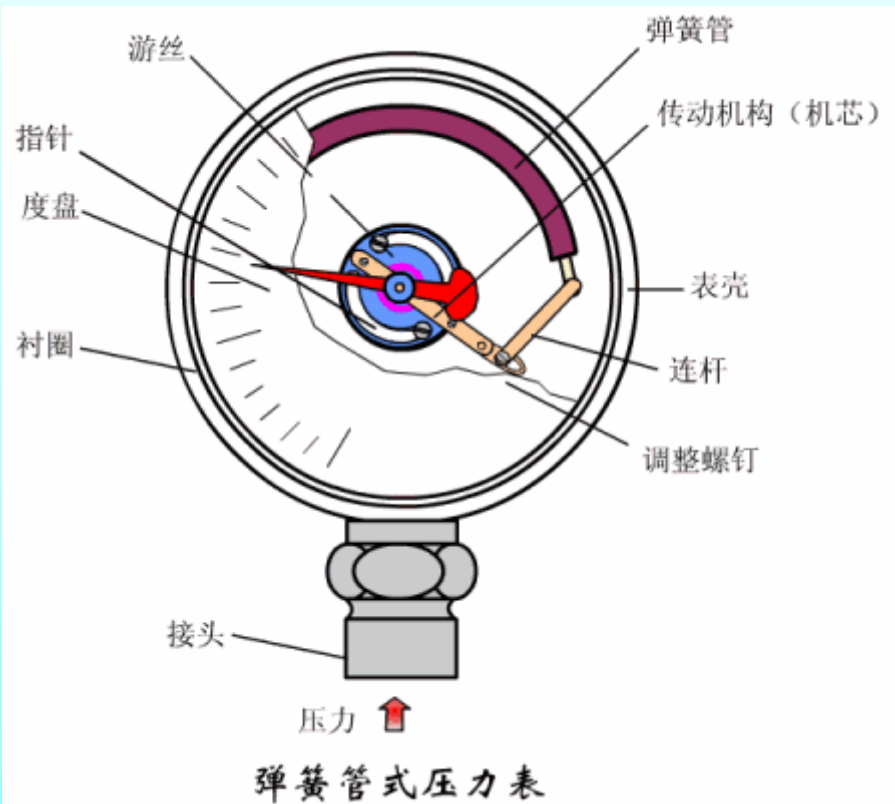
位移最大，可测微压 ($<1\text{MPa}$)。



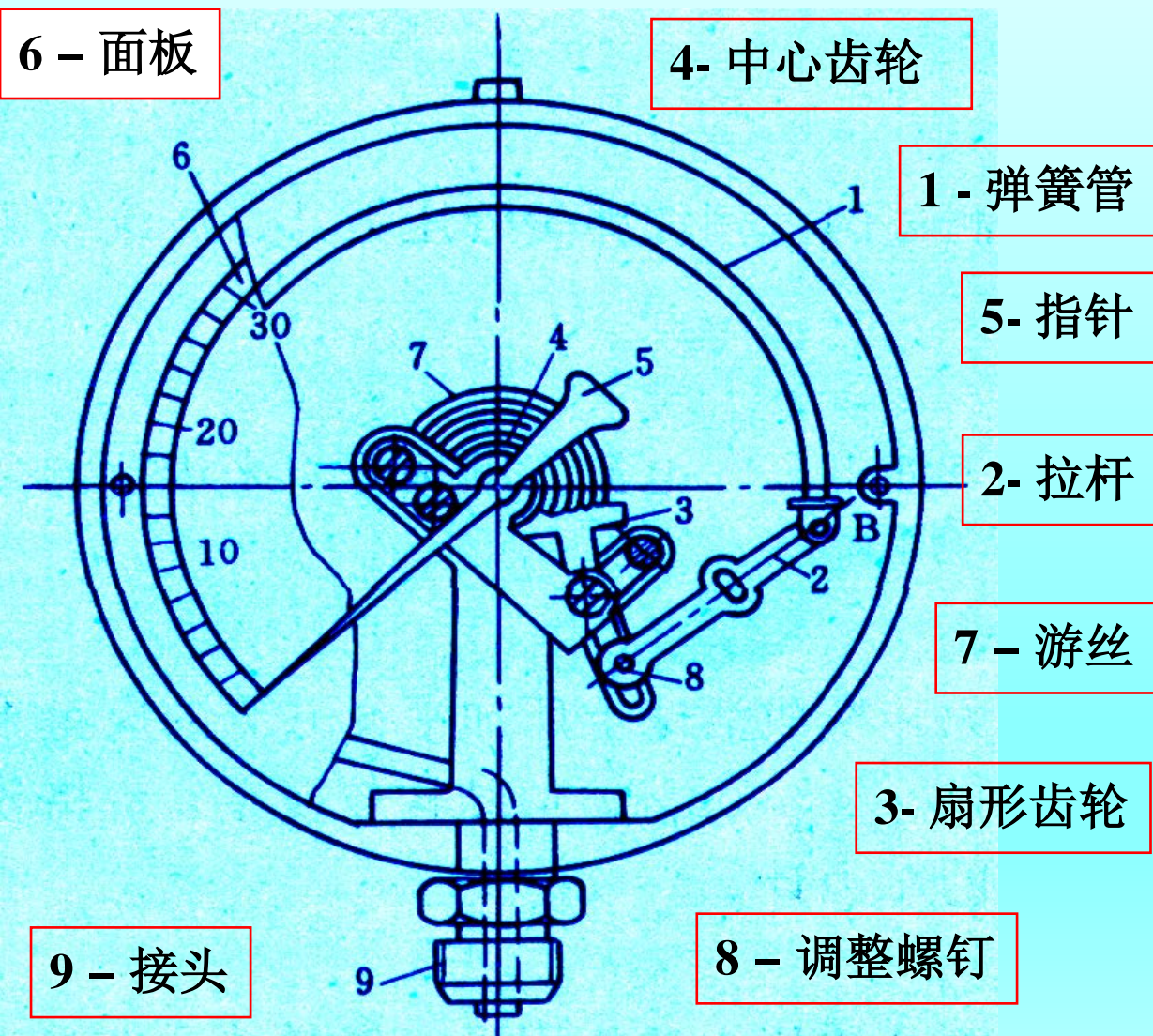
2.3.2.2 弹簧管压力表

弹簧管压力表的品种规格繁多。按其用途不同，有普通弹簧管压力表、耐腐蚀的氨用压力表、禁油的氧气压力表等。但它们的外形与结构基本相同，只是所用的弹簧管材料有所不同。





弹簧管压力表的原理

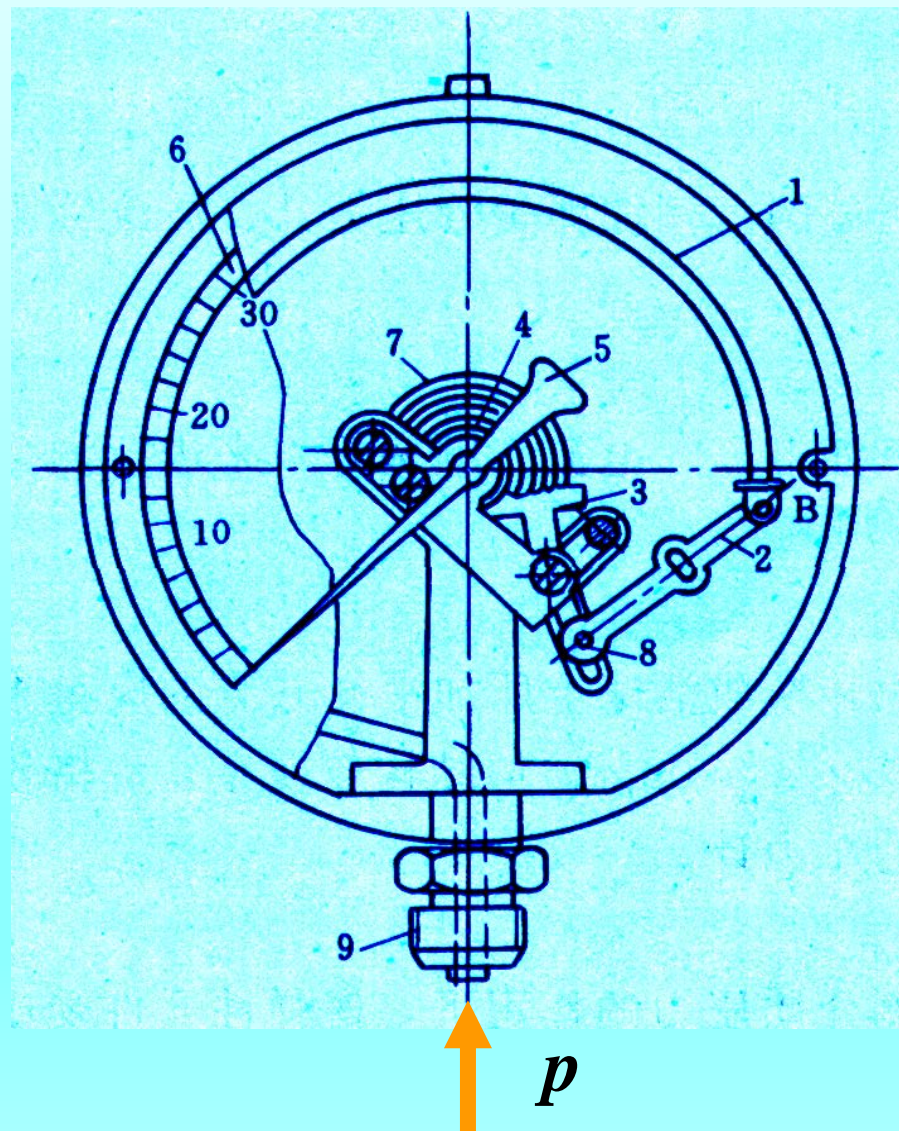


弹簧管是一根弯成 270° 圆弧的椭圆截面的空心金属管，管子的自由端B封闭，并连接拉杆及扇形齿轮，带动中心齿轮及指针。

基本测量原理

在被测压力 p 的作用下，弹簧管的椭圆形截面趋于圆形，圆弧状的弹簧管随之向外扩张变形。

自由端 B 的位移与输入压力 p 成正比。通过拉杆、齿轮的传递、放大，带动指针偏转。

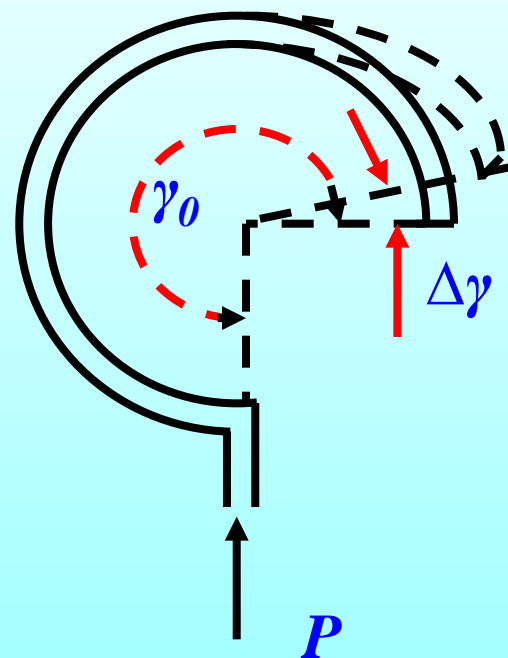


测压关系：

自由端的相对角位移
 $\Delta\gamma/\gamma_0$ 与被测压力 P 成正比。

$$\Delta\gamma/\gamma_0 = KP$$

K —常数



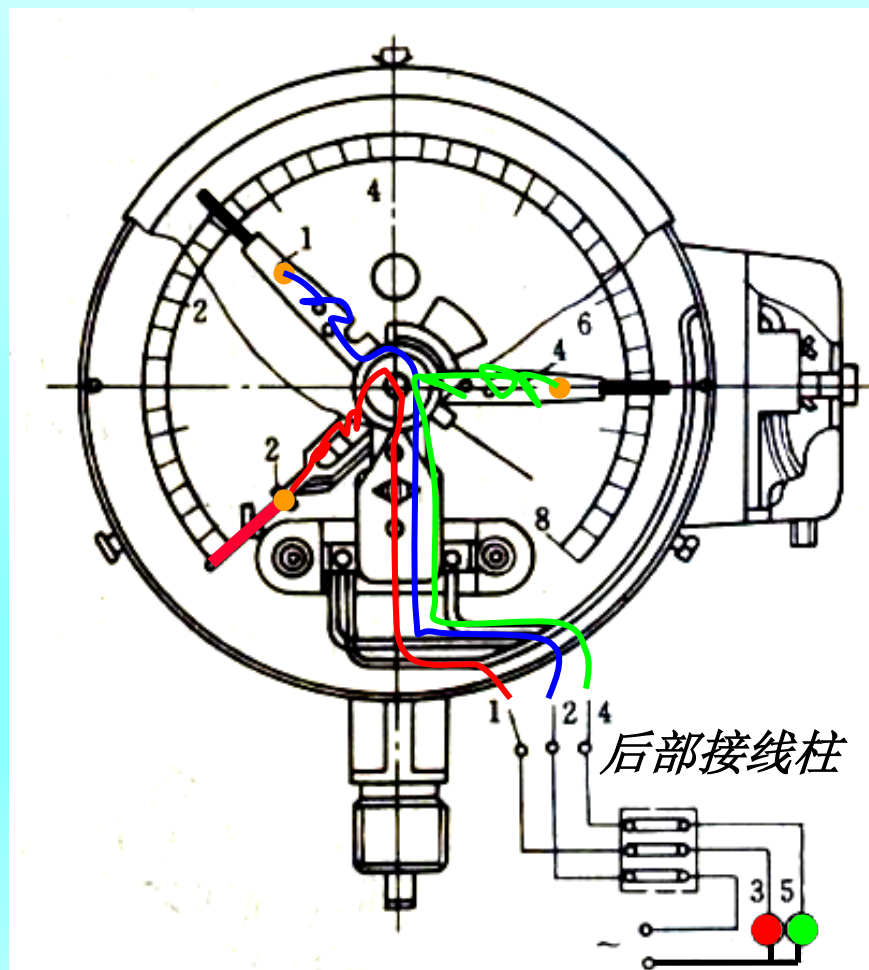
生产中，常需要把压力控制在某一范围内。要求当压力超出给定范围时，测量仪表能发出信号，以提醒操作人员，或启动继电器实现压力的自动控制。这就要求压力表带有报警或控制输出。

□ 电接点压力表

在普通弹簧管压力表的基础上稍添部件，便可成为电接点信号压力表。

增加两个报警针，上面分别装静触点1和4，指示针上装动触点2。分别用软导线引至输出接线柱。

使用时可后接两个信号灯或继电器3、5。



报警原理：

若压力降到下限值时，动触点2与静触点1接触，接通了信号灯3的电路。当压力超过上限值时，动触点2和静触点4接触，信号灯5的电路被接通。

