

## 第25篇 自动平衡显示仪表

**主编单位**

上海自动化仪表二厂

**编写单位**

上海工业自动化仪表研究所

**合稿人**


程祥彪 沙达夫

**编写人**

阮伯如

**特约编辑**

盛树琪



## 常用符号表

$C$ ——被测热电偶在其参比端温度变化间隔 $\Delta t$ 上的平均灵敏度	阻感温元件的电阻值
$E$ ——桥路供电电压	$\Delta R_{tm}$ ——对应于仪表标度范围内的热电阻感温元件阻值的变化值
$I_1, I_2$ ——测量桥路上、下支路的电流	$R_y$ ——放大器的输入阻抗
$I_{t0}$ ——当 $n = 0$ 时流过热电阻感温元件的电流	$R_{\Sigma}$ ——当限流电阻阻值为零时，相应于仪表标度起始值时电桥上支路的总电阻
$I_{tm}$ ——流过热电阻感温元件的工作电流最大允许值	$\Delta t$ ——相应于仪表工作环境温度范围的热电偶参比端温度变化间隔，仪表环境温度和 $20^\circ\text{C}$ 之差
$n$ ——用满量程百分数表示的仪表指针位置系数	$t_0$ ——仪表经常工作的环境温度统计平均值
$R_1$ ——连接铜导线电阻	$t_G, t_D$ ——热电偶参比端温度变化间隔的上、下限
$R_2, R_3, R_4$ ——桥路固定电阻	$\Delta u_{min}$ ——桥路平衡破坏时的等效电势最小值
$R_5$ ——调整仪表刻度范围用电阻	$u_y$ ——放大器不灵敏区
$R_6$ ——调整仪表刻度起始值用电阻	$\alpha$ ——换算为以 $20^\circ\text{C}$ 为基准的铜连接导线的电阻温度系数
$R_7$ ——限流电阻	$\alpha_0$ ——铜导线的电阻温度系数
$R_{30}$ ——零位检查电阻	$\alpha_t$ ——以 $t^\circ\text{C}$ 为基准的铜电阻温度系数
$R_2^t$ ——用以自动补偿热电偶参比端温度变化的补偿电阻	$\gamma$ ——用满量程百分数表示的连接导线附加温度误差
$R_B$ ——与滑线电阻并联成标准阻值为 $90\Omega$ 的电阻	$\lambda$ ——滑线电阻两端不工作部分电阻和整个滑线电阻阻值之比
$R_e$ ——放大器输入端的滤波电阻	
$R_i$ ——桥路内阻	
$R_p$ ——滑线电阻	
$R_{t0}, R_{t1}$ ——相应于仪表标度起始点和终点温度值时电	

# 第1章 概 论

为了及时了解和掌握工业生产过程中所需检测和控制的各种变量的变化情况,就需要通过一定的技术工具将这些变化的信息变成便于人眼观察的形态显示出来。显示仪表就是这样的一类技术工具。

早期,工业自动化仪表的检出元件和显示部分一般都做成一体,安装在现场(称为基地式仪表),所以并没有显示仪表和显示系统的概念。随着工业自动化技术的发展,自动化系统中,监测和控制的变量越来越多。为了便于集中管理和满足高度自动化的要求,出现了工段、车间乃至全厂的控制室,系统中的各种变量,需在仪表屏上用显示仪表作指示和记录,便于运行操作人员及时了解过程的情况并进行参数整定。后来出现了单元组合式仪表,为了使用上的灵活性及制造上的标准化、系列化和通用化,检出元件与显示部分逐渐分开而形成了显示仪表的系列产品。

近年来,由于显示原理和新材料、新元件的不断出现,显示技术发展比较迅速,不仅限于制造各种单机的显示仪表和装置,还出现了与计算机联用的大型显示系统。可以预料,随着科学技术的迅猛发展,新原理、新材料、新元件的不断出现,特别是微处理器和微型计算机的发展,必将有力地推动显示技术及装置的发展。

在科学技术和工业生产自动化中,为了达到显示的目的,人们设计制造了各种显示仪表、显示装置以及更复杂的显示系统。从显示的方式而言,这些显示仪表和装置可分为模拟显示、数字显示、图形显示以及声、光报警等。在目前的自动化系统中大量采用的仍是模拟式显示仪表,数字式显示仪表正在迅速发展,图形显示仪表则将随着计算机技术的发展而日益显得重要起来。

在模拟式显示仪表中,自动平衡显示仪表是设计制造上均比较成熟的产品。现在各国的仪表工厂仍在继续大量生产,并普遍地应用于工业自动化中。自动平衡显示仪表的开发已有几十年的历史。随着电子技术和器件的发展,它经历了40年代的全机械式、50年代的电子管式、60年代的晶体管式

70年代的集成电路式四个阶段,相应地出现了四代产品。现在已普遍采用了集成运算放大器,有的还采用了导电塑料电位器等新元件。在产品设计上则侧重于附加各种调节、计算、程序控制装置,扩大了功能。精确度一般为 $\pm 0.5\%$ ,有的已达 $\pm 0.25\%$ 。

随着微处理器的引入,不仅扩展了自动平衡显示仪表的功能,而且使自动平衡显示仪表的性能也有明显提高。例如,国外已有带8位微处理器的六笔记录仪,其微处理器主要用于笔位补偿。多笔记录仪的笔尖由于机械缘故每笔之间总有3~5mm的间隔。当仪表进行记录时,笔尖不能在一个时间轴上同时描绘出曲线。若需要分析同一时间轴上各参数的关系时就不太方便。采用微处理器后,由微处理器来存入信号,随后根据走纸的速度延迟一定时间,使各支笔在同一时间座标上画下各自的参数曲线,使用者就可以十分方便地比较和分析所记录的图形。

我国已制定了自动平衡显示仪表系列型谱,采用了新的命名法,而且各个系列仪表都已投入了大量生产和使用。自动平衡显示仪表按其外形、结构及所起作用(指示或记录)主要分为十个系列:

- 条形指示(调节)仪系列;
- 大形圆图记录(调节)仪系列;
- 大形长图记录(调节)仪系列;
- 小形长图记录(调节)仪系列;
- 小形圆标尺指示(调节)仪系列;
- 中形长图记录(调节)仪系列;
- 中形圆图记录(调节)仪系列;
- 旋转刻度指示仪系列;
- 台式长图记录仪系列;
- 携带式长图记录仪。

各个系列仪表大致可以分成以下几种基型品种:

- 单针指示或指示及记录;
- 双笔记录及指示;
- 多点打印记录或多点打印单针指示;

单针指示或单针指示记录电  
动调节；

单针指示或单针指示记录气  
动调节；

旋转刻度指示。

每个基型品种按测量线路的  
不同又可分为四种主要变型：

直流电位差计电路；

直流电桥电路；

交流电桥电路；

交流电压平衡电路。

每个变型品种还可分别增带  
各种附加装置，以满足各种使用  
要求。

### 1 自动平衡显示仪表的工 作原理及桥路计算

自动平衡显示仪表由测量桥  
路、放大器、平衡电机、同步电机和指示记录机构  
等组成，其框图如图25.1-1所示。

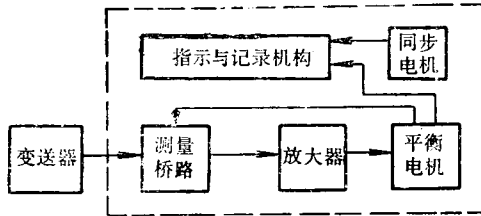


图25.1-1 自动平衡显示仪表组成框图

自动平衡显示仪表有自动电位差计和自动平衡  
电桥两类主要的基型仪表。由于两者的测量桥路不  
同，因而有着本质的区别。

#### 1.1 平衡电桥工作原理

平衡电桥测量桥路如图25.1-2所示，以四臂平  
衡桥路为其测量基础。它可以与热电阻感温元件 $R_t$   
配合用于温度测量。热电阻感温元件通常由纯度  
高、稳定性好的铂或铜或镍丝绕制而成，把它安装  
在距离仪表较远的生产过程检测点上，其阻值随着  
被测温度的变化而呈现规律性的变化。正是利用这  
一特性，将热电阻感温元件 $R_t$ 直接作为电桥的一  
个桥臂。当桥路处于平衡状态时，电桥对角线的输

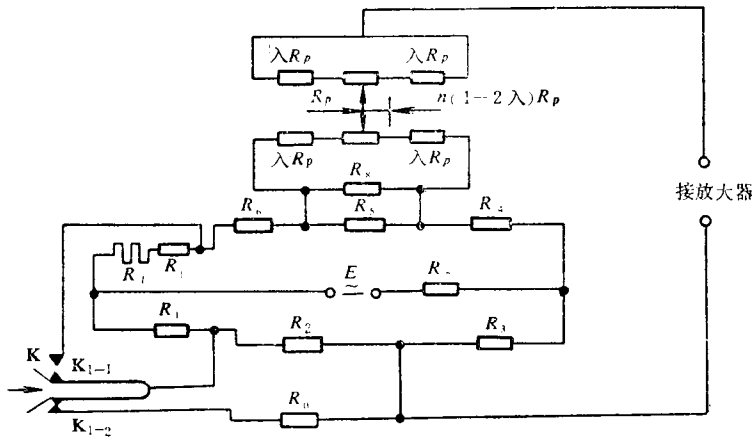


图25.1-2 平衡电桥测量桥路

$R_1$ —连接铜导线电阻(当环境温度为 $20^{\circ}\text{C}$ 时，规定 $R_1=2.5\Omega$ )  $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ —桥路固定电阻  $R_5$ —调整仪表刻度范围用的电阻  $R_6$ —调整仪表刻度起始值用的电阻  $R_7$ —限流电阻  $R_8$ —滑线电阻  $R_B$ —与滑线电阻并联成标准阻值 $90\Omega$ 的电阻(通常 $R_p$ 和 $R_B$ 的并联等效电阻用 $R_{PM}$ 表示  $R_{PM}=90\Omega$ ，有的仪表为 $300\Omega$ 、 $600\Omega$ 等)

出为零。当被测温度变化时， $R_t$ 的阻值相应地  
变化，使电桥失去平衡，在电桥的一个对角线上出现  
不平衡电压信号。此信号经放大器放大后去驱动平  
衡电机，并通过机械传动装置改变滑线电阻触头位  
置，带动指针及记录机构向相应的方向移动，使电  
桥逐渐恢复平衡，从而指示并记录下被测量值的相  
应量值。

为了消除连接导线电阻在周围环境温度改变时  
对测量结果的影响，热电阻感温元件和电桥桥路采  
用了三线接法，其连线分别接在桥路的相邻桥臂  
中。这样，当环境温度变化使连接导线的阻值改变  
时，电桥的相邻桥臂阻值同时改变，从而消除了此  
影响。

平衡电桥因其所采用的供电方式不同而分为直  
流电桥和交流电桥两种。前者为直流电源供电，后  
者为 $6.3\text{V}$ 交流电源供电，但它们的工作原理基本  
相同。交流电桥由于采用了交流电源，所以仪表中  
省掉了稳压电源，放大器不需采用变流级，简化了  
仪表结构，但仪表的抗干扰能力较直流电桥有所降  
低。

#### 1.2 平衡电桥桥路的计算和设计

自动平衡电桥桥路的计算公式是以热电阻感温  
元件所消耗的功率小于允许值和连接导线的附加耗

差在仪表标度中点予以全补偿为前提条件推导出来的。按照这一方法计算桥路参数，可以使连接导线的最大附加温度误差最小，但所求得的桥路电阻  $R_3$  和  $R_4$  是不相等的。为了便于生产，应以  $R_3 = R_4$  (或  $R_2 = R_3 = R_4$ ) 这一原则来计算桥路参数。推导桥路计算公式时，流过热电阻感温元件的最大电流不超过允许值，连接导线的附加温度误差略去不计。

为了计算方便，规定：

$$R_{t_1} = R_{t_0} + n \Delta R_{tm}$$

式中  $R_{t_0}$ 、 $R_{t_1}$ ——相应于仪表标度起始点和终点温度值时电阻感温元件的电阻值。在计算多量程仪表的桥路参数时，用  $R_{t_{01}}$ 、 $R_{t_{11}}$ 、 $R_{t_{02}}$ 、 $R_{t_{12}}$ ……分别表示不同量程时所对应的标度起始点和终点的热电阻元件阻值  $\Omega$

$\Delta R_{tm}$ ——对应于仪表标度范围内的热电阻感温元件阻值的变化值  $\Omega$

$n$ ——用满量程百分数表示的仪表指针位置系数

$$n = \frac{R_t - R_{t_0}}{\Delta R_{tm}}$$

当  $R_t = R_{t_1}$  时， $n = 1$ ； $R_t = R_{t_0}$  时， $n = 0$ 。

$E$ ——桥路供电电压 V

$I_{tm}$ ——流过热电阻感温元件的工作电流最大允许值 mA

$I_{t_0}$ ——当  $n = 0$  时流过热电阻感温元件的电流 mA

$R_{n_p}$ ——图25.1-2中电阻  $R_5$ 、 $R_B$ 和 $R_p$ 的并联等效电阻  $\Omega$

$\lambda$ ——滑线电阻两端不工作部分电阻和整个滑线电阻阻值之比。

### 1.2.1 $R_3 = R_4$ 的自动平衡电桥桥路计算

1) 根据桥路供电电压  $E$  和流过热电阻元件的电流的允许值  $I_{t_0}$  计算  $R_2$

$$R_2 = \frac{E}{I_{t_0}} \quad (25.1-1)$$

式中  $I_{t_0} \leq I_{tm}$

$R_2$ ——当限流电阻  $R_7 = 0$  时，相应于仪表标度起始值时电桥上支路的总电阻  $\Omega$

$$R_2 = R_{t_0} + R_1 + R_B + R_{n_p} + R_4 \quad (25.1-2)$$

2) 确定桥路下支路两桥臂电阻之比  $i$ ，计算  $R_{n_p}$  和  $R_5$

$$i = \frac{R_2 + R_1}{R_3} \quad (25.1-3)$$

$$R_{n_p} = \frac{\Delta R_{tm}}{(1 - 2\lambda)(1 + i)} \quad (25.1-4)$$

$$R_5 = \frac{90 R_{n_p}}{90 - R_{n_p}} \quad (25.1-5)$$

在计算  $R_{n_p}$  之前，必须按下述原则选择  $i$  值：

(1) 必须保证桥路有足够的电压灵敏度

为了保证仪表的精确度等级，在选择  $i$  时，应使桥路电压灵敏度  $S_u$  满足下式：

$$S_u \geq \frac{u_y}{2} \quad (25.1-6)$$

式中  $u_y$ ——放大器不灵敏区  $\mu V$   
直流电桥桥路电压灵敏度

$$S_u = \frac{\Delta u_{min}}{1 + \frac{R_x + R_i}{R_y}} \quad (25.1-7)$$

式中  $R_x$ ——放大器输入端的滤波电阻  $\Omega$

$R_y$ ——放大器输入阻抗  $\Omega$

$R_i$ ——桥路内阻  $\Omega$

$\Delta u_{min}$ ——桥路平衡破坏时的等效电势最小值。

对0.5级仪表而言，其电势可按下式计算：

$$\Delta u = \frac{E \Delta R_{tm}}{1000(1 + i)(R_2 + n \Delta R_{tm})} \quad (25.1-8)$$

通过热电阻感温元件支路电流

$$I_{tn} = \frac{E}{R_2 + n \Delta R_{tm}}$$

代入公式 (25.1-8) 得

$$\Delta u = \frac{I_{tn} \cdot \Delta R_{tm}}{1000(1 + i)}$$

当  $n = 0$  时，流过热电阻感温元件的电流为最大值

$$I_{t_0} = \frac{E}{R_2}$$

当  $n = 1$  时，流过热电阻感温元件的电流为最小值

$$I_{t_1} = \frac{E}{R_2 + \Delta R_{tm}}$$

这时， $\Delta u$  亦为最小值。将  $I_{t_1}$  和  $\Delta R_{tm} = (1 - 2\lambda)(1 + i)R_{n_p}$  代入公式 (25.1-8) 得

$$\Delta u_{\min} = \frac{I_{t1}(1-2\lambda)R_{np}}{1000} \quad (25.1-9)$$

在设计直流电桥时,取 $R_y \approx 25 \text{ k}\Omega$ ,  $R_e \approx 3.5 \text{ k}\Omega$ 。因桥路内阻很小,只有几百欧姆,它对 $S_u$ 的影响可忽略不计,故将 $R_y$ 、 $R_e$ 和 $\Delta u_{\min}$ 代入公式(25.1-7)可得

$$\begin{aligned} S_u &= \frac{0.877E\Delta R_{tm}}{1000(1+i)(R_z + \Delta R_{tm})} \\ &= \frac{0.877I_{t1}\Delta R_{tm}}{1000(1+i)} \\ &= 0.877 \times 10^{-3} I_{t1}(1-2\lambda)R_{np} \quad (25.1-10) \end{aligned}$$

由此可见,桥路电压灵敏度和流过热电阻感温元件的电流成正比。但 $I_{t1}$ 太大会使热电阻感温元件发热而产生附加的温度误差,故流过的最大电流 $I_{t0} \leq I_{tm}$ ,通常 $I_{tm} = 6 \text{ mA}$ 。

如果 $I_{t1}$ 保持不变,则桥路电压灵敏度和仪表量程阻值 $\Delta R_{tm}$ 成正比, $\Delta R_{tm}$ 愈大, $S_u$ 愈高。

桥路电压灵敏度随 $i$ 值增大而降低。一般放大器的不灵敏区为 $4 \sim 20 \mu\text{V}$ ,因此在设计小量程仪表的桥路时可以选择较小的 $i$ 值,仪表量程较宽时可选较大的 $i$ 值。

(2) 当仪表量程较宽时,取较大的 $i$ 值( $i > 1$ )以便于桥路电阻 $R_5$ 的绕制和仪表的调整。

因为 $R_p$ 、 $R_b$ 和 $R_5$ 并联的最大阻值只有 $90 \Omega$  ( $R_5 \rightarrow \infty$ ),当 $i = 1$ 时,由公式(25.1-4)式可得仪表的最大量程阻值 $\Delta R_{tm} = 2(1-2\lambda)R_{np} = 170 \Omega$ 。因此,当仪表量程阻值 $\Delta R_{tm}$ 接近 $170 \Omega$ 时,如果取 $i = 1$ ,则所求得 $R_5$ 的数值将很大(几百到几千欧姆),从而给 $R_5$ 的绕制和仪表的调整造成困难。所以仪表量程较大时必须取较大的 $i$ 值。例如,当 $\Delta R_{tm} \geq 100 \sim 140 \Omega$ 时,可取 $i \geq 2$ 。

3) 按顺序计算桥路参数

$$R_3 = R_4 = \frac{1}{1+i} \left( R_z - \frac{\lambda}{1-2\lambda} \Delta R_{tm} \right) \quad (25.1-11)$$

$$R_2 = \frac{i}{1+i} \left( R_z - \frac{\lambda}{1-2\lambda} \Delta R_{tm} \right) - R_1 \quad (25.1-12)$$

$$R_5 = R_2 + \frac{\lambda}{1-2\lambda} \Delta R_{tm} - R_{t0} - R_{np} \quad (25.1-13)$$

如果由公式(25.1-11)计算所得之 $R_3$ 为小数,则为方便起见,可将小数部分四舍五入,化为整数。此时必须根据所取整数再按公式(25.1-11)

重新计算 $R_2$ 。在计算完桥路参数后还可用下式进行验证:

$$\begin{aligned} i &= \frac{R_2 + R_1}{R_3} = \frac{R_{t0} + R_1 + R_5 + (1-\lambda)R_{np}}{R_4 + \lambda R_{np}} \\ &= \frac{R_{t1} + R_1 + R_5 + \lambda R_{np}}{R_4 + (1-\lambda)R_{np}} \quad (25.1-14) \end{aligned}$$

4) 计算零位检查电阻 $R_0$

如图25.1-2所示,按下电键 $K$ ,电接点 $K_{1-1}$ 接通,将热电阻感温元件 $R_t$ 短接。同时电接点 $K_{1-2}$ 接通,将检查电阻 $R_0$ 和 $R_2$ 并接。 $R_2$ 和 $R_0$ 的等效电阻 $R'_2$ 和 $R_5$ 、 $R_{np}$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 组成新的桥路。由图可见,要使仪表指零必须满足

$$R'_2(R_4 + \lambda R_{np}) = R_3[R_5 + (1-\lambda)R_{np}] \quad (25.1-15)$$

$$\text{而} \quad R'_2 = \frac{R_2 \cdot R_0}{R_2 + R_0} \quad (25.1-16)$$

代入公式(25.1-15)式可得

$$R_0 = \frac{R_2 R_3 [R_5 + (1-\lambda)R_{np}]}{R_2 (R_4 + \lambda R_{np}) - R_3 [R_5 + (1-\lambda)R_{np}]} \quad (25.1-17)$$

### 1.2.2 $R_2 = R_3 = R_4$ 的桥路计算

由于一般放大器的不灵敏区为 $4 \sim 20 \mu\text{V}$ ,而工业用自动平衡电桥的量程阻值约为 $10 \sim 100 \Omega$ ,故在计算这些仪表的桥路参数时,取 $i = 1$ ,桥路的电压灵敏度已能满足公式(25.1-6)的要求。为了简化桥路计算和便于生产,可取 $R_2 = R_3 = R_4$ 。则由

$$i = \frac{R_2 + R_1}{R_4} = 1 + \frac{R_1}{R_4}$$

可将上述计算公式加以简化,得

$$\begin{aligned} R_2 = R_3 = R_4 &= \frac{1}{2} \left( R_z - \frac{\lambda}{1-2\lambda} \Delta R_{tm} - R_1 \right) \quad (25.1-18) \end{aligned}$$

$$R_{np} = \frac{\Delta R_{tm}}{(1-2\lambda) \left( 2 + \frac{R_1}{R_4} \right)} \quad (25.1-19)$$

$$R_0 = \frac{R_2 [R_5 + (1-\lambda)R_{np}]}{R_4 - R_5 - (1-2\lambda)R_{np}} \quad (25.1-20)$$

如果流过热电阻感温元件的电流为 $3 \text{ mA}$ ,滑线电阻的并联等效电阻为 $90 \Omega$ ,则直流电桥按 $R_2 = R_3 = R_4$ 的计算方法应用范围是:

当放大器不灵敏区为 $20 \mu\text{V}$ 时, $8 \Omega \leq \Delta R_{tm} \leq 140 \sim 170 \Omega$ ;

当放大器不灵敏区为  $10\mu\text{V}$  时,  $4\Omega \leq \Delta R_{tm} \leq 140 \sim 170\Omega$ ;

当放大器不灵敏区为  $5\mu\text{V}$  时,  $2\Omega \leq \Delta R_{tm} \leq 140 \sim 170\Omega$ 。

在计算桥路参数时,  $R_2$  值不能取得太小,  $R_2$  必须满足

$$R_2 \geq R_{t0} + R_{np} - \frac{\lambda}{1-2\lambda} \Delta R_{tm} \quad (25.1-21)$$

如果仪表标度起始电阻  $R_{t0}$  较大, 而  $R_2$  值取得太小, 不能满足公式 (25.1-21), 则将使  $R_2$  为负值。这就意味着在选定的参数下电桥失去平衡, 必须改选较大的  $R_2$  值。由公式 (25.1-18) 可见,  $R_2$  将随  $R_2$  的增加而增大, 流过桥路的电流则随之减小, 从而使  $S_u$  值下降。但在一般情况下, 由于仪表量程较大, 增大  $R_2$  仍然能使桥路电压灵敏度大于或等于放大器灵敏度 (否则就必须相应增大桥路的供电电压)。

### 1.2.3 连接导线的附加温度误差

在自动平衡电桥中, 虽然将热电阻感温元件采用了三线连接法, 但连接导线的附加误差仍是不可避免的。

$$\gamma = \left| \frac{R_3 - R_4 - [\lambda + n(1-2\lambda)]R_{np}}{(R_2 + R_3 + R_4)R_{np}} R_1 \alpha \Delta t \right| \quad (25.1-22)$$

式中  $\gamma$  ——用满量程百分数表示的连接导线附加温度误差

$\alpha$  ——换算为以  $20^\circ\text{C}$  为基准的铜连接导线的电阻温度系数  $1/^\circ\text{C}$

$\Delta t$  ——仪表环境温度和  $20^\circ\text{C}$  之差  $^\circ\text{C}$

将  $R_3 = R_4$  代入公式 (25.1-22) 得

$$\gamma = \frac{[\lambda + n(1-2\lambda)]R_1 \alpha \Delta t}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (25.1-23)$$

显而易见, 在标度起点的  $\gamma$  值最小, 在标度终点的  $\gamma$  值最大。如果取  $\alpha = 3.90 \times 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$ ,  $\lambda = 0.03$ ,  $R_1 = 2.5\Omega$ ,  $n = 1$  则

$$\begin{aligned} \gamma_{\max} &= \frac{(1-\lambda)R_1 \alpha \Delta t}{R_1 + R_2 + R_3} \\ &= \frac{0.97 \times 2.5 \times 3.90 \times 10^{-3} \Delta t}{R_1 + R_2 + R_3} \\ &= \frac{0.9458 \times 10^{-2} \Delta t}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (25.1-24) \end{aligned}$$

由公式 (25.1-24) 可见, 连接导线最大附加温度误差和导线电阻  $R$ 、 $\alpha$  及  $\Delta t$  成正比, 且随着下支路总电阻 ( $R + R_2 + R_3$ ) 的增大而减小。如果取  $R + R_2 + R_3 = \text{恒值}$ , 且  $R_3 = R_4$ , 则  $\gamma_{\max}$  也为恒值, 和仪表量程、标度、起始值的大小无关。

### 1.2.4 交流电桥桥路计算和交直流电桥的选用原则

为了生产方便, 当仪表所配用的热电阻感温元件的型号和仪表的量程相同时, 交直流电桥采用相同的桥路参数。

交流电桥的桥路用  $6.3\text{V}$  交流电源供电, 而直流电桥的桥路则采用  $1\text{V}$  的定电压电源供电, 因此必须在交流电桥的供电回路中串接一限流电阻  $R_7$  (见图 25.1-2), 使流过热电阻元件的电流不超过允许值。

$$\begin{aligned} R_7 &= \frac{(E_{\sim} - u_{\sim}) \times 10^{-3}}{\frac{u}{R_2} - \frac{u}{R_7 - \frac{\lambda}{1-2\lambda} \Delta R_{tm}}} \\ &\approx \frac{(E_{\sim} - u_{\sim}) \times 10^{-3}}{2I_{t0}} \quad (25.1-25) \end{aligned}$$

式中  $E_{\sim}$  ——交流供电电压  $\text{V}$

$u_{\sim}$  ——实际加于电桥上下支路两端的交流电压  $\text{V}$

在交流电桥中, 放大器输入端未接入滤波电阻, 因此电压灵敏度

$$S_{u_{\sim}} \approx \frac{u_{\sim} \Delta R_{tm}}{1000(1+i)(R_2 + \Delta R_{tm})} \cdot \frac{R_y}{R_y + R_i}$$

$$\because R_i \ll R_y$$

$$\text{所以 } S_{u_{\sim}} \approx \frac{u_{\sim} \Delta R_{tm}}{1000(1+i)(R_2 + \Delta R_{tm})} \quad (25.1-26)$$

在交流电桥中, 由于热电阻感温元件和桥路电阻实际上还存在着无功分量, 例如热电阻元件同芯连接导线较长, 存在着较大的分布电容; 更重要的是放大器输入端没有滤波网络, 在输入端有外界电磁干扰时将造成放大器饱和和仪表灵敏度下降。因此, 在设计交流电桥时, 希望桥路电压灵敏度有较大的余量, 即

$$S_{u_{\sim}} \geq 2S_u \quad (25.1-27)$$

其它桥路参数的计算与直流桥路相同。

1.3 电位差计的工作原理

电子电位差计的测量系统采用自动电压补偿原理。当被测直流信号通过滤波单元输送到测量桥路时，与桥路电压比较后的偏差电压输入放大器，经斩波器转换成交流信号并经放大后驱动平衡电机，使滑线电阻触头往偏差电压减小的方向移动，直到等于零为止。这时候与触头联动的指针在标度尺上指示出被测量，记录机构记下被测量。

1.4 电位差计的桥路计算

与热电偶配套使用的电位差计的桥式补偿线路原理如图25.1-3所示。

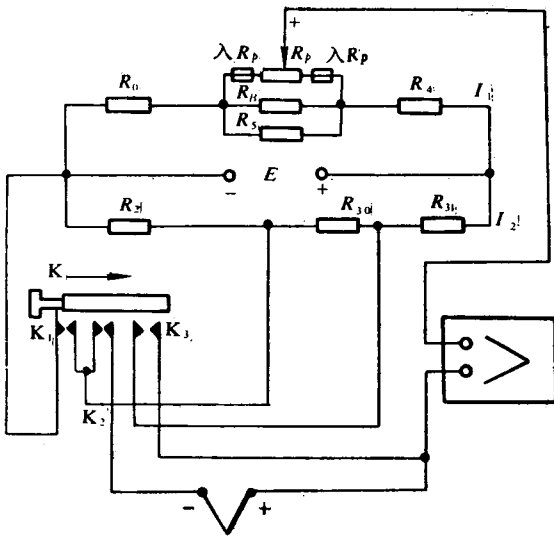


图25.1-3 电位差计测量线路原理图

$R_p$ —滑线电阻  $R_B$  与  $R_p$  并联成标准值  $90\Omega$  的电阻  $R_0, R_2, R_3, R_4, R_5$ —测量桥路电阻 ( $R_3 = R_{30} + R_{31}$ )  $R_{30}$  零位检查电阻

为计算方便，规定如下：

$\Delta t$ —相应于仪表工作环境温度范围的热电偶参比端温度变化间隔  $^{\circ}\text{C}$

$$\Delta t = t_c - t_D$$

式中  $t_c, t_D$ —热电偶参比端温度变化间隔的上、下限  $^{\circ}\text{C}$

$t_0$ —仪表经常工作的环境温度（即环境温度的统计平均值） $^{\circ}\text{C}$

$$t_0 = \frac{t_c + t_D}{2}$$

$C$ —热电偶在其参比端温度变化间隔  $\Delta t$  上的平均灵敏度

$$C = \frac{E_t(t_c, t_D)}{\Delta t}$$

$R_2'$ —用以自动补偿热电偶参比端温度变化的补偿电阻，将它替代图 25.1-3 中的  $R_2$  即可起补偿作用  $\Omega$

$\alpha_0$ —铜导线的电阻温度系数  $1/^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_0 = 4.25 \times 10^{-3}$$

$\alpha_t$ —以  $t^{\circ}\text{C}$  为基准的铜电阻温度系数  $1/^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_t = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 t}$$

$\eta$ —下支路补偿比例系数，即两电阻在  $t_0$  时的比值

$$\eta = \frac{R_2'^0}{R_3}$$

$R_{np}$ — $R_p, R_B$  和  $R_5$  之并联电阻  $\Omega$

$\lambda$ — $R_p$  两端不工作部分的电阻值与  $R_p$  之比，一般取  $\lambda = 0.03 \sim 0.05$

$E$ —测量桥路供电电源电压  $\text{V}$

$I_1, I_2$ —测量桥路上、下支路的电流  $\text{mA}$

$E_0(t_0), E_1(t_0)$ —热电偶参比端温度为  $0^{\circ}\text{C}$  时，测量端温度相当于仪表标度起始、终端示值时的热电势  $\text{mV}$

$\Delta E_n$ —仪表量程电压  $\text{mV}$

$$\Delta E_n = E_1 - E_0$$

由于仪表的桥路采用  $1\text{V}$  的稳压电源供电，故取消了自动调整工作电流的部分，流过上支路的电流  $I_1$  不变。但桥路下支路电流  $I_2$  由于受温度补偿电阻  $R_2'$  变化的影响而成为变量，这是计算这种桥路时必须考虑的因素。

如图25.1-3所示， $R_2'$  与  $R_3$ （即  $R_{30} + R_{31}$ ）在一条支路上， $E$  恒定， $I_2$  的大小则取决于  $R_3$  与  $R_2'$  之和的大小，也即  $I_2$  与  $\eta$  有关。

1) 桥路参数计算公式

$$\eta = \frac{C}{E\alpha_{t_0} - C\{2 + \alpha_{t_0}[\Delta t - 2(t_0 - t_D)]\}} \quad (25.1-28)$$

$C$  值与热电偶种类有关， $C$  值越大， $\eta$  值也越大。因为  $t_0 = (t_c + t_D)/2$ ，故公式 (25.1-28) 可化简为

$$\eta = \frac{C}{E\alpha_{t_0} - 2C} \quad (25.1-29)$$



设计时一般取  $t_c = 55^\circ\text{C}$ ,  $t_b = 5^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  
 $\alpha_{t_0} = 3.84 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ,  $E = 1\text{V}$ 。

$$R_3 = \frac{E}{I_2(1 + \eta)} \quad (25.1-30)$$

$$R_2' = \eta R_3 \quad (25.1-31)$$

$$R_0 = \frac{E_1[t_0]}{I_1} + \frac{\eta E}{I_1(1 + \eta)} - \frac{\lambda \Delta E_n}{I_1(1 - 2\lambda)} \quad (25.1-32)$$

$$R_4 = \frac{E}{I_1(1 + \eta)} - \frac{E_1[t_0]}{I_1} - \frac{\Delta E_n(1 - \lambda)}{I_1(1 - 2\lambda)} \quad (25.1-33)$$

$$R_{np} = \frac{\Delta E_n}{I_1(1 - 2\lambda)} \quad (25.1-34)$$

$$R_5 = \frac{90\Delta E_n}{I_1(1 - 2\lambda) - \Delta E_n} \quad (25.1-35)$$

2) 计算零位检查电阻

由图 25.1-3 可知, 当按下键 K 时, 其电接点  $K_1$  闭合, 补偿铜电阻  $R_2'$  被短路; 常闭接点  $K_2$  断开, 使热电偶支路断开; 电接点  $K_3$  闭合, 由  $R_{30}$ 、 $R_3$  组成电桥的下支路, 其交点通过  $K_3$  接入放大器输入端。显然, 这时要使仪表指零,  $R_{30}$  必须满足

$$I_2' R_{30} = I_1(R_0 + \lambda R_{np}) \quad (25.1-36)$$

式中  $I_2'$  为将电阻  $R_2'$  短路时流过下支路的电流

$$I_2' = \frac{E}{R_3}$$

代入 (25.1-36) 式可得

$$R_{30} = \frac{I_1(R_0 + \lambda R_{np}) R_3}{E} \quad (25.1-37)$$

$$R_{30} = I_3 - R_{30} \quad (25.1-38)$$

根据计算和实践经验, 系数  $\eta$  和  $C$  值以及有些电阻是固定不变的 (见表 25.1-1), 在修改标度时不需更动。

表 25.1-1 电位差计计算定值表

热 电 偶	符 号			
	$R_2(25^\circ\text{C时})$ $\Omega$	$R_3(\Omega)$	$\eta$	$C$
镍铬-镍硅(铝)	5.33	495	0.01078	0.0405
镍铬-考铜	8.92	492	0.0181	0.0674
铂铑 <sub>10</sub> -铂	0.72	500	0.00157	0.00602

2 用途

自动平衡显示仪表由于采用了自动平衡或补偿原理及模拟显示方式, 使仪表具有一系列优点:

1) 对检出元件的影响很小, 测量精确度较高。一般为 0.5 级, 如遇特殊需要, 尚可做得更高。

2) 灵敏度较高。由于仪表采用了电子放大器作为检零器件, 故指示不灵敏区均为 0.25%。

3) 仪表借助本身的机械结构及电路, 能耐较大的过载信号或较长时间的过载。

4) 由于采用了平衡电机作动力源, 故力矩大, 可以附带多种附加装置, 扩大仪表的使用范围。

5) 仪表经统一设计, 其放大器、微电机等主要部件可以通用互换, 各厂均采用统一的外形尺寸和仪表盘开孔尺寸, 符合三化要求。

6) 记录仪表上得到的被测变量与另一个参变量 (大多数是时间) 的变化关系是一种客观记录, 因而排除了主观观察的误差。

7) 记录曲线是一种便于保存的技术资料, 随时可以供查阅。

8) 通过记录能节省运行操作人员从指示仪表上不断读数 and 抄录被测变量值所耗费的时间和精力。特别是当追随一个持续很久的过程时、或连续进行大量相同试验时以及许多相同或不同的过程同时进行, 采用记录式仪表就很合理。它能代替大量的观察人员, 具有一定的经济性。

9) 可以记录变化速度超出人们观察能力的过程, 能够记录出不能预见但突然出现的变量变化。

10) 记录仪表能够记录操作人员不能接近, 或者操作人员在现场会使测量受到障碍的过程。显示仪表既可就地安装, 也可集中安装在控制室内。指示机构的指针大, 标度尺长, 因此高仪表较远处尚能观察指示, 近处读数更方便。

正因为如此, 自动平衡显示仪表在工业生产和科学实验中应用非常广泛。即使是在新建的、采用计算机控制的现代企业中也仍受到广泛重视

自动平衡显示仪表配以不同的检测仪表可以实现电量、非电量的电测量。除用以显示各种不同的过程中被测变量的变化过程外, 附加调节器、报警器、积算器等附加装置后还可进行单变量调节及其他功能。

自动平衡显示仪表与热电偶、热电阻感温元件、热敏电阻元件、辐射高温计、温度变送器以及带有发信装置的测温仪表等配套可实现生产过程中

温度的测量、指示、记录和控制；与各种压力变送器、差压变送器、膜片式差压计以及其它形式带有远传的压力仪表配套可实现压力和差压的测量、指示和记录；与各种流量变送器或流量计配套可实现流量的测量、指示和记录；与液位变送器或各种液位计配套可实现液位的测量、指示和记录；在电工

量测量方面可测量电压、电流、功率、频率等；在测量化学量方面可测量化学成分、浓度、酸度等。

### 3 技术指标

自动平衡式指示和记录仪表的主要技术指标如表25.1-2、25.1-3和25.1-4所示。

表25.1-2 指示仪主要技术指标

技术指标	条型指示仪	大型圆标尺指示仪	小型圆标尺指示仪	中型圆标尺指示仪	小条型指示仪
标尺形式	长标尺	圆标尺	圆标尺	圆标尺	长标尺或色带
标尺直径(mm)	—	—	φ110	φ200	—
标尺长度(mm)	300	≈742	≈300	≈548	100
精确度等级	0.3, 0.5	0.5	0.5	0.5	0.5, 1.0
允许基本误差(%)	±0.3, ±0.5	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5, ±1.0
允许不灵敏区(%)	0.15, 0.25	0.25	0.25	0.25	0.25, 0.5
全行程时间(s)	<5	<5	<2.5	<5	<5

表25.1-3 记录仪主要技术指标

技术指标	圆形记录仪	长图记录仪	小型长图记录仪	中型长图记录仪	中型圆图记录仪	小条型记录仪	台式记录仪	携带式记录仪
记录纸形式	圆形	带形	带形	带形	圆形	带形	带形	带形
记录宽度(mm)	—	250	120	180	—	100	250	180
记录笔数	1	1~2	1~2	1~2	1	1~2	1~8	1~2
打印记录点数	—	6, 12	6	6, 12	—	—	—	—
精确度等级	0.5	0.3, 0.5	0.5	0.3, 0.5	0.5	0.5, 1.0	0.3, 0.5	0.5
允许基本记录误差(%)	±1.0	±0.8, ±1.0	±1.0	±0.8, ±1.0	±1.0	±1.0, ±1.5	±0.8	±1.0
允许不灵敏区(%)	0.5	0.15, 0.25	0.25	0.15, 0.25	0.5	0.5, 1.0	0.3, 0.5	0.25
全行程时间(s)	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	0.31	0.5
记录纸速度	24h/c	多档	多档	多档	24h/c	30~120 mm/h	多档	多档

表25.1-4 自动平衡显示仪表使用条件

使用条件项目		条形指示仪	大形圆图记录仪	大形长图记录仪	小型长图记录仪	小型圆标尺指示仪	中型长图记录仪	中型圆图记录仪	小条形记录仪	台式记录仪	携带式记录仪
输入阻抗	电位差计	<1000Ω								2 MΩ	<1000Ω
	平衡电桥	<1500Ω								—	—
环境	温度(°C)	0~50			0~45			0~50			
	湿度(%)	30~85									
供电电源	电压(V)	~220±10%									
	频率(Hz)	50±5%								—	
耐电干扰	单模	电位差计能耐量程100%，直流电桥耐量程20%									
	共模	~50V 50Hz									
绝缘情况	绝缘电阻	不小于20MΩ									
	绝缘强度	测量电路-表壳：500V 电力电路-表壳或测量电路：1000V									
阻尼特性	指示及打印	不超过三次半周期									
	划线记录	不超过二次半周期									
耗电量(VA)	单点	<14	<20	<14	<14	<14	<14	<14	<14	<14	<5
	双针或双笔	<28	<34	<28	<28	<28	<28	<34	<34	<34	<10
	多点打印	<20	<25	—	<25	—	—	—	—	—	—

## 第2章 仪表的构成

自动平衡显示仪表采用组件化结构,安排紧凑,可分别拆装,由接插件进行电连接。

### 1 测量系统

测量系统由滤波单元、桥路单元、稳压单元三个组件和滑线电阻部件所组成。

滤波单元主要用以消除串模干扰,一般由三级“L”形滤波器组成,其阻容元件均装在一块印制电路板上做成一个单元组件。

桥路单元是测量电路中的几个桥臂电阻,根据仪表的量程配置相应的线绕电阻,装于一块印刷电路板上组成一个单元组件。用户如需改变仪表量程,只要更换该桥路单元即可。

稳压单元是桥路的电源,由整流二极管、稳压管、电容器及电阻器等组成。

上述三个单元的电路如图25.2-1所示。

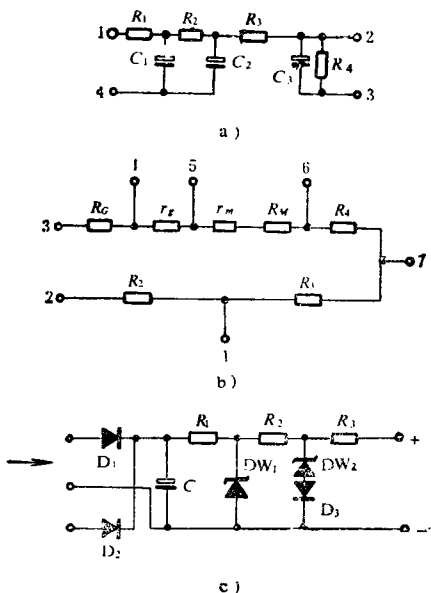


图25.2-1 测量系统各单元图

a) 滤波单元 b) 桥路单元 c) 稳压单元

滑线电阻是自动平衡显示仪表的关键部件,与仪表的精确度有着密切的关系。滑线电阻与上述三

个单元一起组成仪表中的测量系统。

### 2 指示记录机构

圆标度尺的指示机构较简单。指针装于中心轴,中间是轴承。轴的另一端上装有滑线电阻的触点滑臂,由平衡电机通过减速齿轮带动滑触点在滑线电阻上滑动。

指示机构再通过一些齿轮、杠杆、记录笔构成圆图记录机构。

长标度尺的指示记录机构由平衡电机通过减速齿轮带动绳轮,由绳轮上的传动绳通过滑轮带动指针滑架在导轨上滑行进行指示。如果是记录仪,则在指针滑架下再装上记录笔。多点打印记录较复杂,还得有间歇机构和打印架等组成。

色带指示机构采用一条伸缩性很小的半透明的涤纶材料制成的带子,通过减速齿轮及导轮装置由平衡电机驱动。

#### 2.1 记录笔架和多点打印机构

单笔和双笔记录仪用记录笔记录。记录笔由笔架、笔尖、自动抬笔装置及指针等组成。

记录笔用不受墨水腐蚀的材料,如镍、贵金属或宝石等制成。整个记录笔架被仪表的平衡机构所带动,可沿导轨自由移动。记录笔与笔架间有偏心扭簧,用手把记录笔向上一抬,记录笔即可弹起。需要记录时,用手将其向下按一下即可。墨水瓶出口有两根导管。一根由塑料软管与笔尖相连以输送墨水;另一根用以通气,使用前可用吹气球轻微打气,使墨水流至笔尖。笔尖由宝石制成,不易磨损,划线润滑流畅。

多点打印记录仪表是通过打印机构进行的。打印机构如图25.2-2所示,由间歇机构驱动完成下列动作:打印字盘5抬头与印色盒中的色块1接触而蘸上印油;平衡后,打印字盘5在记录纸上打下有颜色的符号圆点“·”或叉点“×”;打印完毕后字盘5向上复位,并转换到下一次打印位置,同时印色盒1也转过一格。

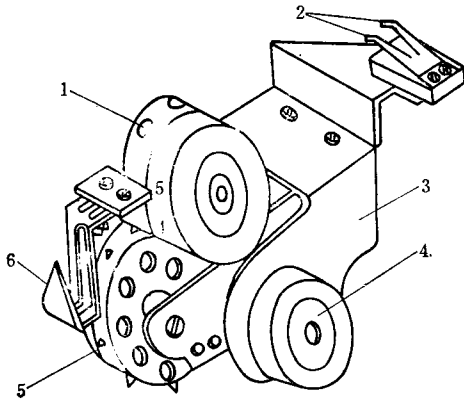


图25.2-2 多点打印机构

1—印色盒的色块 2—滑线电阻动触点 3—打印架支架 4—横动轴承 5—打印盘 6—指针

记录笔架和打印架尾部都装有滑线电阻的滑动触点，由于指针与滑动触点是在同一支架上（刚性连接），所以能使仪表的传动误差减至最小。

### 2.2 间歇机构

间歇机构只有在多点记录仪表上采用，它控制多点仪表外接信号周期性的轮换测量以及打印、换点、复位等动作。实际上它是打印、切换和仪表平

衡三者的时间分配器。

间歇机构原理如图25.2-3所示，它是一个采用销钉-槽轮及凸轮-摆杆的复合机构，由一个单独的同步电动机驱动，经减速后电机的出轴转速为12rpm。

根据仪表的要求，多点仪表有6点和12点两种，所以采用两个六等分槽轮。槽轮A用来控制外接信号的切换（转换开关）。当同步电机通过传动齿轮传动到槽轮机构时，槽轮A受打印凸轮的销钉拨动。销钉每转一周，便驱动槽轮A定位转过60°，因此与槽轮A相联系的转换开关也转过一格，这样就起到了周期切换信号的作用。换点、打印和复位等动作是通过槽轮B及打印凸轮和摆杆来实现的。与打印凸轮相联系的摆杆随着旋转凸轮轮廓曲线的变化而摆动。与摆杆同轴连接在一起的是打印机构。当摆杆端部的滚动轴承进入打印凸轮的凹穴时就打印；此轴承滑出凹穴，打印机构就抬头复位；当此轴承滑到凸轮最高位置时，打印字盘与印油盒接触而蘸上印油。这样就周而复始地以一定的速度随着间歇机构的运转而实现打点。

打印周期分为5秒和10秒两种。为了保证多点仪表各点有足够的平衡时间进行测量，打印周期为10秒的仪表其全程平衡时间应为5秒；打印周期为5秒的仪表其全程平衡时间则应为2.5秒。这样就能够保证仪表在切换以后到打印之前的时间内充分完成全程的平衡。

### 2.3 转换开关

多点仪表采用的转换开关以耐磨合金印制电路及簧片电刷为接触元件。转换开关前面的油管可上下拨动供加油和放油。为保证转换开关的良好接触，使用前应先注入变压器油，加油量应以达到油线为宜。

### 3 记录纸传动机构

记录纸传动机构即走纸机构，是由卷纸部件、齿轮变速器及同步电机组成的。整个走纸机构形成一个单独系统，可向下倾斜转动一个角度，这样便于装卸记录纸。

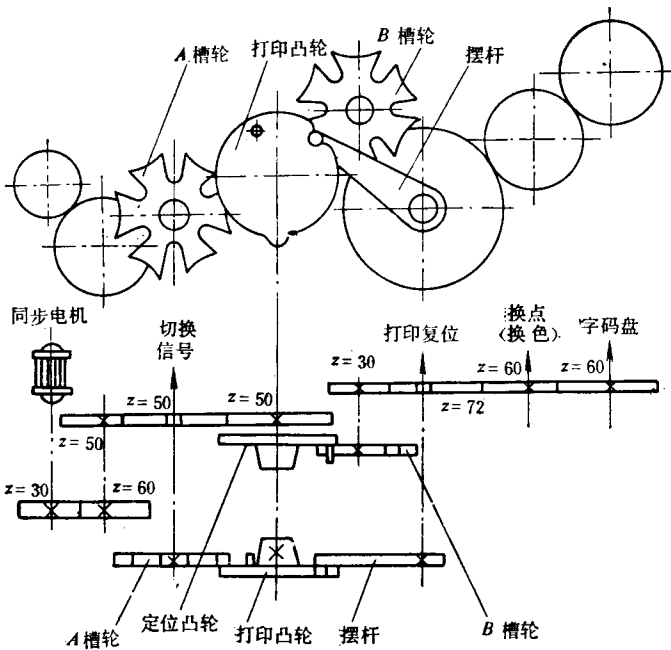


图25.2-3 间歇机构传动原理图

齿轮变速器是走纸机构的重要部件。目前所采用的变速器具有结构简单、调速范围大、使用方便可靠等优点。走纸速度可以分为九档：30、60、120、300、600、1200、3000、6000、12000 mm/h。仪表出厂时分慢速和快速两种。慢速的走纸速度为30、60、120、300、600、1200 mm/h 六种，与多点打印仪表配套。快速的走纸速度为300、600、1200、3000、6000、12000 mm/h 六种，与单、双笔记录仪表配套使用。

走纸机构的滚筒通过链条传动，并靠摩擦离合器控制收纸速度，如图25.2-4所示。

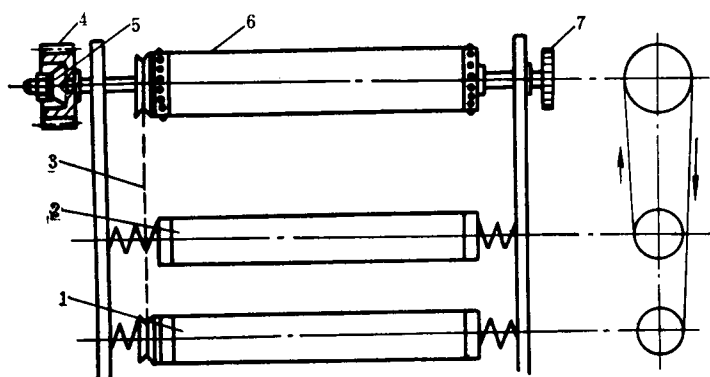


图25.2-4 走纸机构传动示意图

1—收纸筒 2—放纸筒 3—传动链条 4—传动齿轮  
5—打滑机构 6—滚筒 7—手柄

装在滚筒左侧的传动齿轮带动着链条转动，驱动收纸筒收纸。由于下面的收纸滑轮比上面的链轮小，因此下面收纸的速度比上面放纸的速度快，这样可使记录纸拉紧。但如果下面收纸筒直径随着记录纸的收卷而不断增大，则会使记录纸越拉越紧，以致出现记录纸断裂的危险。为避免记录纸拉断，在收纸筒上装有摩擦离合器传动装置。当下面的收纸拉得太紧时，摩擦离合器即开始打滑，从而达到放纸与收纸同步的目的。

#### 4 平衡系统

自动平衡显示仪表是一种机电式仪表，被测信号是通过滑线电阻动触点的平衡位置来显示记录的。因此，除了测量桥路、放大器等电气组件外，机械传动机构（主要包括平衡机构和走纸机构）设计的好坏，零部件加工、装配及调整的质量都将直接影响仪表整机的质量。

平衡系统由平衡电动机、拉线盘、指示记录机构和滑线电阻等组成。它以平衡电机为动力，带动滑线电阻的动触点（同时带动指针和记录笔架）使仪表达到平衡。它是仪表的反馈平衡和指示系统，直接影响着仪表的技术性能。因此设计时应考虑以下一些问题：

##### 1) 传动比的选择

因为仪表的指示记录机构是由平衡电机通过齿轮和拉线传动机构驱动的，所以根据电动机的转速和对仪表全行程时间的技术要求，就可以求出所需的齿轮传动比。

为了防止仪表在失常情况下由于电动机单向转动而拉坏笔架和烧坏电机，在主轴传动齿轮上装有限位销，电机出轴上装有摩擦离合器。

##### 2) 减小传动误差

大型长图记录仪表的直线型滑线电阻就装在笔架上部，滑动触点是直接装在笔架上的，因而几乎不产生传动误差。

齿轮传动的间隙一般是不会引起误差的，但它将引起仪表的传动噪声，严重时还会因存在齿轮间隙而引起自振荡，这是完全不允许的。

为了消除这些现象，仪表中广泛采用小模数齿轮（ $m=0.5$ ）传动或无间隙齿轮传动。

##### 3) 减小传动摩擦力

平衡系统是由平衡电机驱动的。当平衡电机功率一定时，如果平衡机构的摩擦力太大，就会使仪表的灵敏度降低或动作变慢，全行程时间增长，影响仪表指针低速运动的平稳性。

平衡系统的摩擦力来自滑线电阻的滑动触点、笔架在导轨上移动的摩擦力以及各转动零件（如电动机转子、主轴、绳轮等）支承处的摩擦力。因为各转动零件通常采用滚珠轴承，并尽量减小摩擦力的作用半径，故摩擦力的产生原因主要是前面两种。滑线电阻与触点之间的摩擦力主要取决于它们之间的压力，压力过大，则摩擦力增加，并且会加快磨损，但压力太小，又容易增加接触电阻或引起接触不良，使仪表不能正常工作。因而应当在保证触点接触可靠的前提下尽量减小它们之间的

压力。

对于笔架移动时产生摩擦力则必须在机构设计中很好地加以考虑。笔架的轴套架可以分为滚动和滑动两种。滚动轴套架结构较复杂，但摩擦力小，通常在高精度快速仪表中采用。一般均采用滑动轴套架，此时应合理选择笔架轴套架的孔与导轨之间的公差配合。间隙太小会增大摩擦力，间隙太大则容易造成笔架晃动，两种情况都会使仪表精确度降低。因此轴套架与导轨的加工不仅应保证加工精确度的要求，还应有足够的表面光洁度，以保证良好地滑动。

另外，设计笔架时应充分注意笔架运动时的力平衡，要尽量防止对笔架产生附加转矩。首先，最好使拉线通过笔架的重心。这样在加速和减速运动中，拉线力和笔架的惯性力就不会产生附加转矩而使笔架扭转；其次，各摩擦力对拉线轴心的转矩最好能互相抵消。这样在等速移动时笔架就不会因受不平衡转矩作用而扭转。

#### 4) 减小传动部分的转动惯量

当被测信号改变时，为了使仪表能很快达到重新平衡，改善其过渡过程品质，希望传动部分的转动惯量要小。传动部分转动惯量的大小不仅取决于

传动零件质量的大小，而且还与其几何形状有很大的关系。例如圆形物体对其轴心的转动惯量与其直径的四次方成正比，因此如果拉线盘的直径过大，将使其转动惯量显著增大。在大型长图系列快速仪表中，为了减小转动惯量，将拉线盘的直径减小，拉线盘转两圈时指针才走完全行程。所以在设计仪表时，除了应当注意减轻传动零件的重量外，还应合理地设计它的几何形状，使零件的转动惯量尽可能地减少，这一点对快速仪表而言尤为重要。

为了使平衡电机的工作接近最佳状态，即充分利用电动机的输出功率以达到尽可能小的全行程时间，就希望负载折算到电动机转子轴上的转动惯量和电动机转子的转动惯量大致相等。显然，如果电动机转子的转动惯量相对负载而言过大，电动机的转矩大部分消耗在电动机本身上，这是没有意义的；反之，如果负载的转动惯量过大，这就势必使指针行程时间增长。所以合理的情况应使两者接近相等。

为使平衡系统具有良好的阻尼特性，仪表采用直流测速发电机作为阻尼器。它由扇形齿轮与拉线盘连接，使其动圈转动，从而将一个与其角速度成正比的电势反馈于测量电路。

## 第3章 仪表用放大器

自动平衡显示仪表中的放大器主要有下列四种。

- 1) 平衡放大器。这是每台仪表必不可少的最基本的放大器；
- 2) 调节放大器。它与附加  $P$  (比例)  $I$  (积分)  $D$  (微分) 调节器配套使用；
- 3) 比较放大器。用以完成多点仪表中的各点定值；
- 4) 特殊用途放大器。例如用于快速、小信号等仪表中的放大器。

### 1 平衡放大器

平衡放大器分直流、交流两种。直流平衡放大器用于直流电位差计、直流平衡电桥；交流平衡放大器用于交流平衡电桥。

#### 1.1 基本要求

在自动平衡显示仪表中，平衡放大器是作为一个指零放大器来使用的。当被测信号发生变化时，仪表系统失去平衡，测量桥路产生一个电压信号。此即为放大器的输入信号。放大器要将其放大至足够的功率去驱动平衡电机使系统重新达到平衡。在系统平衡时，放大器没有输入信号，因而它主要用来反映不平衡信号的“有”、“无”。这种直流指零放大器应满足下列基本要求：

- 1) 要有足够大的放大倍数

为了使仪表有较高的灵敏度和精确度，平衡放大器必须具有足够大的放大倍数。这样才能使放大器在有不平衡信号电压时就能驱动平衡电动机。反馈信号与被测信号越接近，仪表的灵敏度和精确度

越高。对于0.5级的仪表，其指示基本误差为全量程的 $\pm 0.5\%$ ，灵敏度为 $\pm 0.1\%$ ，因此要求放大器在输入信号为全量程的 $\pm 0.1\%$ 左右就能使仪表动作。由于一般的自动平衡显示仪表的电压量程均比较小，最大不超过100mV，通常是10mV左右，因此要求放大器在输入为10 $\mu$ V时就有输出并能驱动仪表。为了使指示记录仪平衡机构的平衡电机能克服传动机构中的摩擦力矩而转动起来，放大器的电压放大倍数应有 $10^5 \sim 10^6$ 倍（即100~120dB），并应有充分的余量以能方便地调整放大倍数，配合和补充由于其它元件参数的离散性所带来的差别。对于小信号仪表，全量程只有1mV或更小，则要求放大器只有1 $\mu$ V左右的输入信号就能使仪表动作，这时要求放大器的电压放大倍数就更高。为了驱动平衡电机，必须有足够的功率，所以还需进行功率放大以满足平衡电机驱动功率的要求。

因为自动平衡显示仪表是一个具有负反馈的闭环系统，放大器是作为指零放大器使用的，因此只要求放大倍数（满足灵敏度要求）在一定范围内就行，对放大倍数的稳定性并无很高要求。因为平衡电机对高次谐波没有什么严重反应，因此允许波形失真也可以较大些。

#### 2) 输入阻抗要大，输出阻抗要小

放大器的输入阻抗直接影响测量桥路的灵敏度，最理想的情况是放大器的输入阻抗远远大于测量桥路和信号源的内阻，即使信号源内阻有一些变化也不大。一般要求放大器的输入阻抗起码比信号源内阻大十余倍。例如，大型长图系列仪表的信号源内阻最大为1k $\Omega$ ，所以放大器的输入阻抗要求为20~30k $\Omega$ 。

因为平衡电机是放大器的负载，而电动机控制绕组的阻抗是随着转速而变化的，因此减小放大器的输出阻抗是保证在不同负载阻抗情况下能输出足够功率的必要条件。

#### 3) 要妥善解决零点漂移

直流指零放大器的零点漂移问题必须很好解决，否则虽然被测信号没有变化，而由于环境温度和时变化的影响将会因零漂而产生输出，仪表就会有误差，严重时甚至不能工作。因此通常都采用调制型直流放大器来解决。

因为晶体管特性受温度的影响较大，所以在放大器线路中还采用了一些补偿措施来稳定晶体管的

工作点，使放大器能在0~55 $^{\circ}$ C范围内稳定工作。

#### 4) 要有良好的抗干扰性

放大器具有很高的放大倍数，因此干扰信号进入放大器后同样会得到放大，这就破坏了放大器的正常工作，使仪表失灵。为此放大器必须具有良好的抗干扰能力，设计时必须采取抗干扰措施。

#### 5) 应有良好的相位特性

在采用交流平衡电机做执行元件时，放大器的输出级均采用相敏功率放大。如果在放大过程中产生较大的相移，就会使平衡电机控制绕组和激磁绕组中的电流相位不是相差90 $^{\circ}$ ，结果使输出转矩减小，仪表性能变坏。因此放大器在放大过程中带来的相移要小。

### 1.2 主要技术特性

1) 使用环境：温度0~65 $^{\circ}$ C，相对湿度30~85%。

2) 使用电源：交流220V $\pm 10\%$ ，频率50Hz $\pm 5\%$ 。

3) 不灵敏区及其可调范围：

直流放大器20 $\mu$ V；

交流放大器50 $\mu$ V；

不灵敏区可调到2000 $\mu$ V左右。

4) 不平衡电压：

直流放大器不超过15 $\mu$ V；

交流放大器不超过30 $\mu$ V。

5) 干扰电压：

在平衡状态下，放大器输出端的总干扰电压不超过1.5V

6) 零点漂移：

经半小时预热后，直流放大器的零点漂移不超过5 $\mu$ V；交流放大器不超过10 $\mu$ V。

7) 绝缘电阻：不小于50M $\Omega$ 。

8) 信号源内阻：0~1000 $\Omega$ 。

9) 饱和性能：在放大器输入端加入10mV信号时，其输出电压不小于7V。

10) 消耗功率：约10VA。

### 1.3 工作原理

图25.3-1为直流放大器的框图，图25.3-2为其原理线路图。输入直流信号由变流器和输入变压器调制成50Hz的交流信号，经电压放大级和功率放

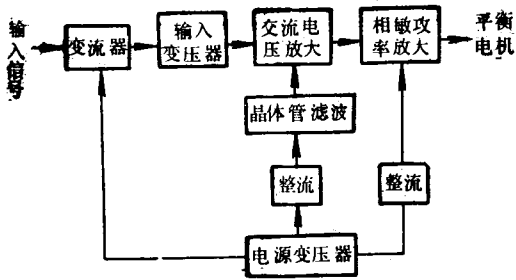


图25.3-1 直流放大器框图

大级放大到足够的功率，以控制平衡电机带动仪表的平衡机构和指示、记录机构工作。

交流放大器仅前置级不带变流器，其它均与直流放大器相同。

### 1) 前置级

放大器的前置级由变流器和输入变压器组成，其作用是把输入的微弱直流信号调制成 50Hz 的交流信号。

变流器有机械振动式变流器和场效应管变流器两种。为了得到较高的输入阻抗，机械振动式的变流器把触点调成常开式。场效应管变流器是一种无触点式变流器，可靠性高，寿命长。

输入变压器除与变流器配合作为前置级调制输入信号外，还使放大器的输入阻抗得到匹配。由于初级电流很小，为了得到较高的效率，铁心材料采用坡莫合金。为了减弱外界磁场的干扰，铁心采用“ $\square$ ”形芯片，初、次级绕组均用双线并绕，绕组间有双层静电屏蔽。

### 2) 电压放大级

由前置级输出的交流信号仍是十分微弱的，电压放大级的作用是将其微弱的交流信号放大到足以推动功率级，从而驱动平衡电动机。

由图25.3-2可知，放大器的电压放大级采用四级硅管共发射极直接耦合方式，这样既避免了采用大容量的电解电容器，缩小了体积，简化了线路，又可避免信号传送过程中的相移。放大级的工作电压由  $BG_5$  和 RC 组成的晶体管滤波电路供给。

电压放大级中主要元件的作用如下：

在晶体管  $BG_2$ 、 $BG_3$  的发射极上串联硅二极管  $D_{201}$  和  $D_{202}$  有利于工作电压的稳定。由  $BG_4$  基极引出的  $R_{200}$  大环直流深度负反馈保证电压放大级有足够稳定的工作点。 $R_{W_{201}}$  是不灵敏区调节电位

器，供调整增益之用。 $R_{203}$ 、 $R_{210}$ 、 $R_{217}$  是电流负反馈电阻，改变其值可改变交流反馈量，使放大器的放大倍数变化，达到改变不灵敏区大小的目的。

电压放大器采用了硅管，使放大器的工作环境温度可达  $65\sim 70^\circ\text{C}$ 。

### 3) 功率放大级

功率放大级的作用是将电压放大级输出信号经功率放大后得到足以推动平衡电动机的功率。

功率放大级采用没有耦合变压器的无耦功率放大级。由图25.3-2可知，功放级由  $BG_6$ 、 $BG_7$  和电阻、电容组成的射极输出器以及  $BG_8$ 、 $BG_9$  组成的相敏推挽功率放大器组成。射极输出器具有输入阻抗大和输出阻抗小的特点，在电压级和功率级之间起着分相和阻抗变换的作用。这样可使电压放大级充分发挥放大作用，不致因功率放大级的输入阻抗低而降低其放大倍数。而且可使相敏功率放大充分发挥作用。热敏电阻  $R_{307}$  和电阻  $R_{312}$  起稳定工作点的作用。

当放大器有正信号输入时，经前置级、电压放大级和功率放大级后驱动平衡电机按顺时针方向转动；当输入负信号时，平衡电机则按逆时针方向转动；无信号输入时电机则停转。

### 4) 电源变压器

电源变压器的作用是将电源电压变换成各种不同的电压以提供放大器和仪表各部分所需要之电源，如图25.3-2所示：绕组  $2\times 18$ 、 $2\times 17\text{V}$  经全波整流后分别供给放大器的电压级和功率级；绕组  $2\times 35\text{V}$  作为仪表测量电路稳压单元的电源；绕组  $6.9\text{V}$  供仪表指示灯用；绕组  $2\times 6.9\text{V}$  供变流器用；绕组  $110\text{V}$  经电容移相后供平衡电机激磁绕组用。

电源变压器采用 P、E、G 多层屏蔽以提高抗干扰能力。

电源变压器的主要技术指标：

- (1) 空载电流不得大于  $30\text{mA}$ ；
- (2) 在温度为  $20\pm 5^\circ\text{C}$ 、相对湿度不超过  $80\%$  时，变压器的初、次级绕组之间以及初级与外壳之间的绝缘电阻不应小于  $100\text{M}\Omega$ ；
- (3) 在温度为  $20\pm 5^\circ\text{C}$ 、相对湿度不超过  $80\%$  的环境中，变压器初、次级绕组之间以及初级绕组与外壳之间应能承受  $50\text{Hz}$  正弦交流电压  $2000\text{V}$ 、历时一分钟的耐压试验无击穿现象；



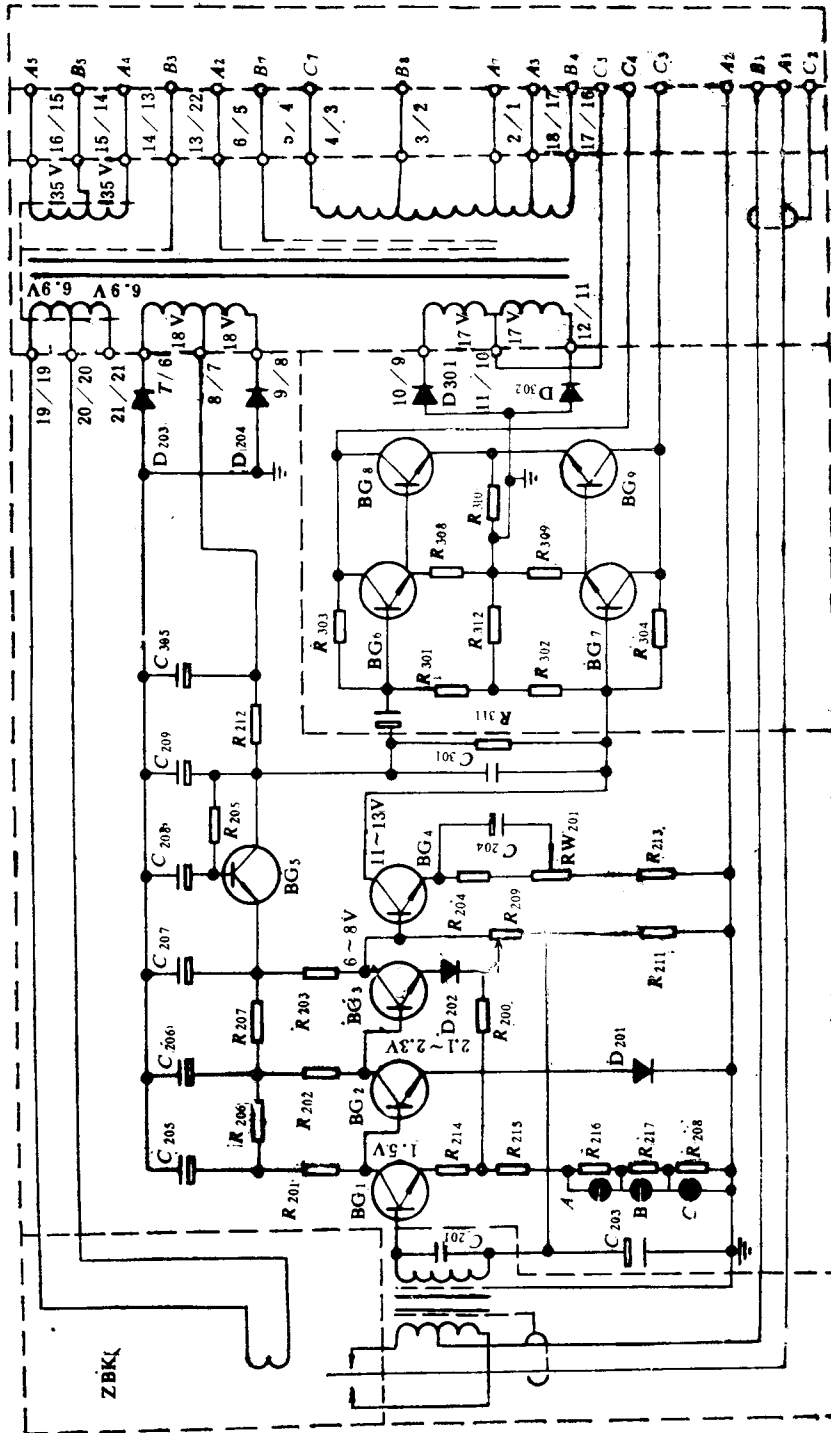


图 25.8-2 直流放大器原理线路图