

自动平衡式记录仪

原理及维修

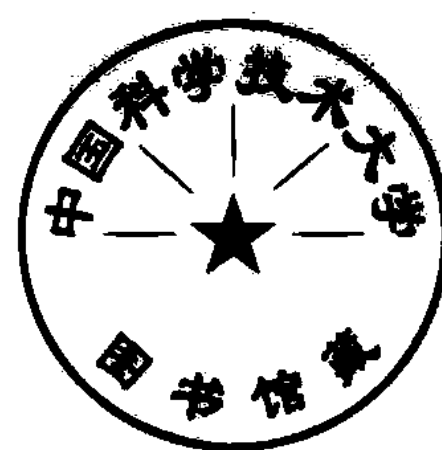
潘其光 王有章 等编著

国防工业出版社

1165
P17

自动平衡式记录仪原理及维修

潘其光 王有章 等编著



国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

自动平衡式记录仪原理及维修/潘其光等编著. —北京:
国防工业出版社, 1994
ISBN 7-118-01201-7

I. 自…

II. 潘…

III. ①自动平衡式记录仪-理论 ②自动平衡式记录仪-维
修

IV. TH85

自动平衡式记录仪原理及维修

潘其光 王有章 等编著

责任编辑 吴芝萍

*

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市王史山胶印厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 20¼ 465 千字

1994 年 6 月第 1 版 1994 年 6 月北京第 1 次印刷 印数 1—2500 册

ISBN 7-118-01201-7/TH·83 定价:17.20 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

建社四十周年献礼图书

前 言

自动平衡式记录仪是属于模拟式仪表,被测参数是以仪表指针或记录笔的线性位移的形式来显示的。虽然它的测量精度和速度都受到一定的限制,但也具有很多优点,诸如:

1. 记录曲线是一种便于保存的技术资料,查阅也很方便。
2. 通过记录可免除运行操作人员从指示仪表上不断读数和抄录测量结果所耗费的时间和精力。特别是当需观察一个持续很久的生产过程时,或需对多个不同的生产过程同时进行连续的观察时,采用记录仪表更显得经济合理。
3. 记录仪能够记录出非预期的突然出现的参数变化。即使是责任心很强的观察者,有时也会由于偶然的原因而错过重要的过程,尤其是在发生事故的时候,而记录仪却能如实地把变化状态记录下来。

正由于这些原因,自动平衡式记录仪得到广泛的应用,现今世界各大仪表制造厂仍继续大量生产这类仪表。

XW、XQ 系列自动平衡式记录仪在我国投产较早,已广泛用于冶金、电力、化工、机械、轻纺等部门,可谓“量大面广”。随着科学技术的发展,集成电路运算放大器、电子开关以及导电塑料电阻等新元件已被应用到模拟式记录仪中,成为后起之秀,如 ER 系列记录仪等。鉴于我国新旧型式的记录仪并存的现状,故本书对两者均作专门的论述。

应该看到,目前在基层部门中,许多从事温度仪表计量、检修人员对增长专业知识,提高操作技能的要求甚为强烈;同时,我国每年都有大批青年技术人员、工人参加工作,这是一支人数众多的新生力量,他们深感专业知识不足,迫切需要进行技术培训,熟识这类记录仪的原理和检修方法,以便更快地掌握专业技术。本书主要是针对这部分人员编写的,当然也可作为技术短训班的教材及专业学校师生的参考书。

参加本书编写人员有潘其光、王有章、李振湘、李吉林、刘强友、刘阳。全书由潘其光、王有章审订。

由于编著者水平所限,书中难免存在不妥或错误之处,欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	(1)
----------	-----

第一篇 自动平衡式记录仪 的测量桥路

第一章 电子电位差计的测量 桥路	(3)
§ 1-1 测量桥路的基本原理	(3)
§ 1-2 测温电子电位差计的测量桥 路及其计算	(4)
§ 1-3 小量程电子电位差计的测量 桥路及其计算	(18)
§ 1-4 电子电位差计测量桥路的故 障检修	(22)
第二章 自动平衡电桥的测量 桥路	(27)
§ 2-1 自动平衡电桥测量桥路的 基本原理	(27)
§ 2-2 自动平衡电桥测量桥路的 计算	(30)
§ 2-3 自动平衡电桥测量桥路的 故障检修	(39)

第二篇 自动平衡式记录仪中的 晶体管放大器

第一章 JF 型晶体管放大器	(44)
§ 1-1 对自动平衡式记录仪中放 大器的基本要求	(44)
§ 1-2 JF-12 型晶体管放大器的 组成	(46)
§ 1-3 放大器的交流级	(48)
§ 1-4 电压放大级	(63)
§ 1-5 晶体管滤波器	(68)
§ 1-6 功率放大级	(69)
第二章 JF 型放大器的测试与 检修	(74)
§ 2-1 JF 型放大器主要技术指标 的测试	(74)

§ 2-2 放大器的故障与检修	(77)
-----------------------	------

第三篇 自动平衡式记录仪 的使用与检修

第一章 自动平衡式记录仪的安 装与维护	(89)
§ 1-1 记录仪工作条件	(89)
§ 1-2 记录仪安装注意事项	(92)
§ 1-3 记录仪的现场使用与维护	(95)
第二章 自动平衡式记录仪的性 能与检定	(101)
§ 2-1 自动平衡式记录仪的性能 与指标	(101)
§ 2-2 自动平衡式记录仪的检定	(104)
第三章 自动平衡式记录仪的 检修	(115)
§ 3-1 检查方法及步骤	(115)
§ 3-2 常见故障的检修	(118)
§ 3-3 故障原因分析框图	(122)

第四篇 电动 PID 调节器

第一章 电动调节器的由来及 其比例、积分、微分调 节作用	(128)
§ 1-1 自动调节系统	(128)
§ 1-2 比例、积分、微分调节作用	(131)
第二章 电动调节器的工作原 理与结构	(134)
§ 2-1 电动 PID 调节器概述	(134)
§ 2-2 设定发信装置和滤波单元	(137)
§ 2-3 TF-10A 型调节放大器的结 构与工作原理	(139)
§ 2-4 PID 阻容反馈运算单元	(145)
§ 2-5 手动输出和手动-自动跟踪 电路	(150)
§ 2-6 整机布线及各开关的作用	(151)
第三章 电动 PID 调节器的检	

定与修理	(153)
§ 3-1 电动 PID 调节器的检定	(153)
§ 3-2 电动 PID 调节器的修理	(157)

第五篇 DDZ 系列记录仪

第一章 DXJ 型记录仪	(168)
§ 1-1 主要特点	(169)
§ 1-2 记录仪的工作原理	(169)
§ 1-3 稳压电源	(170)
§ 1-4 滤波器	(174)
§ 1-5 测量电路	(176)
§ 1-6 放大器	(176)
§ 1-7 报警单元	(180)
§ 1-8 记录仪的可靠性	(184)
§ 1-9 故障判断	(188)
§ 1-10 元件参数	(191)
§ 1-11 主要技术性能	(193)
§ 1-12 型号规格	(194)
§ 1-13 外形尺寸	(194)
§ 1-14 端子板配线图	(195)
§ 1-15 关于 DXD 型色带指示仪	(196)
第二章 SXJ 型记录仪	(197)
§ 2-1 主要特点	(197)
§ 2-2 记录仪的工作原理	(198)
§ 2-3 稳压电源	(198)
§ 2-4 滤波器	(199)
§ 2-5 测量电路	(201)
§ 2-6 放大器	(202)
§ 2-7 报警单元	(206)
§ 2-8 步进电机驱动板	(206)
§ 2-9 元件参数	(208)
§ 2-10 主要技术性能	(209)
§ 2-11 型号规格	(210)
§ 2-12 外形尺寸	(210)
§ 2-13 端子板配线图	(211)
§ 2-14 关于 SXD 型色带指示仪	(212)

第六篇 ER 系列记录仪

第一章 ER180 系列记录仪	(213)
-----------------------	-------

§ 1-1 主要特点	(213)
§ 1-2 伺服放大器的工作原理	(214)
§ 1-3 mV 输入量程板原理	(219)
§ 1-4 热电偶输入量程板原理	(222)
§ 1-5 mV 输入及热电偶输入量 程板的实际电路	(225)
§ 1-6 热电阻输入量程板原理	(227)
§ 1-7 热电阻输入的多点仪表电 子切换开关原理	(229)
§ 1-8 mV 输入及热电偶输入的 多点仪表用切换开关	(233)
§ 1-9 故障检查	(234)
§ 1-10 元件参数一览表	(244)
§ 1-11 伺服放大器及量程板的元 件配置图	(249)
§ 1-12 主要技术特性	(251)
§ 1-13 ER250 系列记录仪	(252)

第二章 ER100 系列记录仪	(254)
§ 2-1 主要特点	(254)
§ 2-2 伺服放大器	(255)
§ 2-3 mV 输入量程板的电路原 理	(256)
§ 2-4 热电偶输入量程板的原理	(258)
§ 2-5 热电阻输入量程板的原理	(259)
§ 2-6 电源开关电路	(260)
§ 2-7 故障检查	(261)
§ 2-8 元件参数一览表	(265)
§ 2-9 印刷板元件配置图	(269)
§ 2-10 外型尺寸	(271)
§ 2-11 ER100 系列记录仪新电气 系统	(271)

第三章 ER180 系列记录仪的 附加装置	(275)
§ 3-1 两位置调节器 C1PS	(277)
§ 3-2 电流 PID 调节器 C5SA	(283)
§ 3-3 内藏报警单元 A6HB	(290)
§ 3-4 多量程单元	(302)

参考文献	(308)
------------	-------

绪 论

自动平衡式显示仪表是一种用途广泛的工业自动化仪表,它和各种变送器(常称为“一次仪表”,如热电偶、热电阻、温度变送器、压力变送器、流量变送器、液位变送器等)配合,接收各种电压、电流、电阻等电信号,可以自动显示和自动记录各种热工参量,带有附加装置(如调节器、报警器)的仪表,还可实现对以上热工参量的自动调节或自动控制。它们广泛使用于冶金、电站、石油、化工、机械、轻工等部门。有时我们也把这种仪表称为“二次仪表”。由于大部分自动平衡式显示仪表都带有记录装置,因此现在往往更多地称它们为“电子记录仪”或“模拟记录仪”。

与电子技术从电子管、晶体管到集成电路的发展一样,我国电子记录仪的发展也大致分为二个阶段。50年代末,我国仿制原苏联的EW、EQ系列电子管式自动平衡式记录仪开始正式生产,从而结束了我国记录仪生产的空白历史。60年代后期,我国自行设计的XW、XQ系列晶体管式电子记录仪问世,使此类仪表技术水平步入了第二阶段,较之电子管式仪表,其体积缩小、重量减轻、功耗下降,抗干扰性能提高。80年代中期,随着我国改革开放的深入,记录仪行业也引进了外国的先进技术,经国产化及不断地消化吸收,使我国记录仪技术达到了国际水平。其中较有代表性的是从日本横河引进的ER系列记录仪(四川仪表四厂生产的ER180中型长图记录仪及ER100小型长图记录仪分别获得国家优质产品金质奖章),这是使用集成电路运算放大器作为主放大器的第三代仪表。

电子记录仪技术发展到现在大致有下列趋势:

①使用导电塑料滑线电阻或导电塑料电位器作为位置反馈元件,具有光滑耐磨、耐腐蚀、耐氧化、接触良好、寿命长(≥ 1000 万次)、可靠性高等优点。该项技术的采用使记录仪的无故障工作时间大幅度提高,因为老式滑线电阻所造成的故障几乎占记录仪故障率的70%以上。

也有部分仪表已使用无触点位置检测元件,其寿命理论上基本是无限的。

②多点仪表的输入切换开关采用特殊的贵金属合金作为动触头和静触片的材料,也具有寿命长、可靠性高的优点,使仪表的质量得到很大提高。这种切换开关不须加油,使体积缩小。输入切换开关接触不良的问题是以前记录仪表中仅次于滑线电阻的第二大问题。

③记录笔使用纤维笔,解决了原来使用记录墨水记录而经常出现的漏水或堵塞现象,使记录质量问题得到较好的解决。

④电气系统使用印刷板插件,取消了机械斩波器、输入变压器、耦合变压器等笨重部件,不仅体积缩小,且可靠性提高。其前置放大级均为直接放大式,这是因为低漂移、低噪音、低失调电压、高增益、高输入阻抗的高精度运算放大器已问世且已大批生产。这就不须先经调制再进行放大,从而使电路简化,可靠性提高。

⑤伺服电机(用于指示系统)及同步电机(用于记录机构)设计先进、体积小、温升高、

可靠性高。

⑥机械结构方面采用铝型材及铝压铸件较多,不但挺括美观,且大大减少了零件数量,并提高了可靠性。

⑦有些记录仪的记录纸走纸速度变速部分使用步进电机,用电气方法变速。

以上措施均使仪表的可靠性指标提高,无故障工作时间可达数万小时。

由于微电子技术的发展,数字技术及电子计算机已开始应用于自动化领域,许多大、中企业已开始在生产过程中使用工业控制机或集中分散控制系统,取得了较好的经济效益。这已经成为一种大潮流。但是尽管如此,由于有些重要参数需要有专门的记录供当时监控或供以后保存查阅,且模拟记录曲线有直观、醒目、清晰、容易比较等优点,再加上模拟记录仪表价格低廉,又已为多数操作人员及维修人员所熟悉,因此仍被大量采用,尤其为中、小企业所乐于使用。在今后相当长一段时间里,模拟记录仪仍有其相当的生命力,仍将是工业自动化的基础仪表。

随着科学技术的发展,数字技术及微处理器也渗入了记录仪领域,使仪表具有智能性质,从而大大扩大了仪表的功能和适应性。可以认为智能记录仪是近期记录仪发展的主要方向。

第一篇 自动平衡式记录仪的测量桥路

第一章 电子电位差计的测量桥路

§ 1-1 测量桥路的基本原理

图 1-1(a) 是由四个电阻组成的电桥。当 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 时, $U_{AD} = 0$, 即 $I_G = 0$ 。这时电桥处于平衡状态。

假如把电桥改成图 1-1(b) 的样子, 只要滑点在适当位置, 即 R_H 一部分属于 R_1 一臂, 另一部分属于 R_4 一臂, 也可以使电桥平衡, 即 $U_{AD} = 0$ 。平衡以后, 如果再使滑点向右或向左移动一下, 电桥就不平衡了, 于是电桥 AD 两端之间存在着一个不平衡电压 U_{AD} , 检流计指针就会不指零。这时如果在检流计支路中加进一个大小等于 U_{AD} 而极性相反的电势 E_x , 则检流计指针重又指零(图 1-1(c))。在这种状态下, 电桥本身虽然不平衡, 但整个测量电路是平衡的。

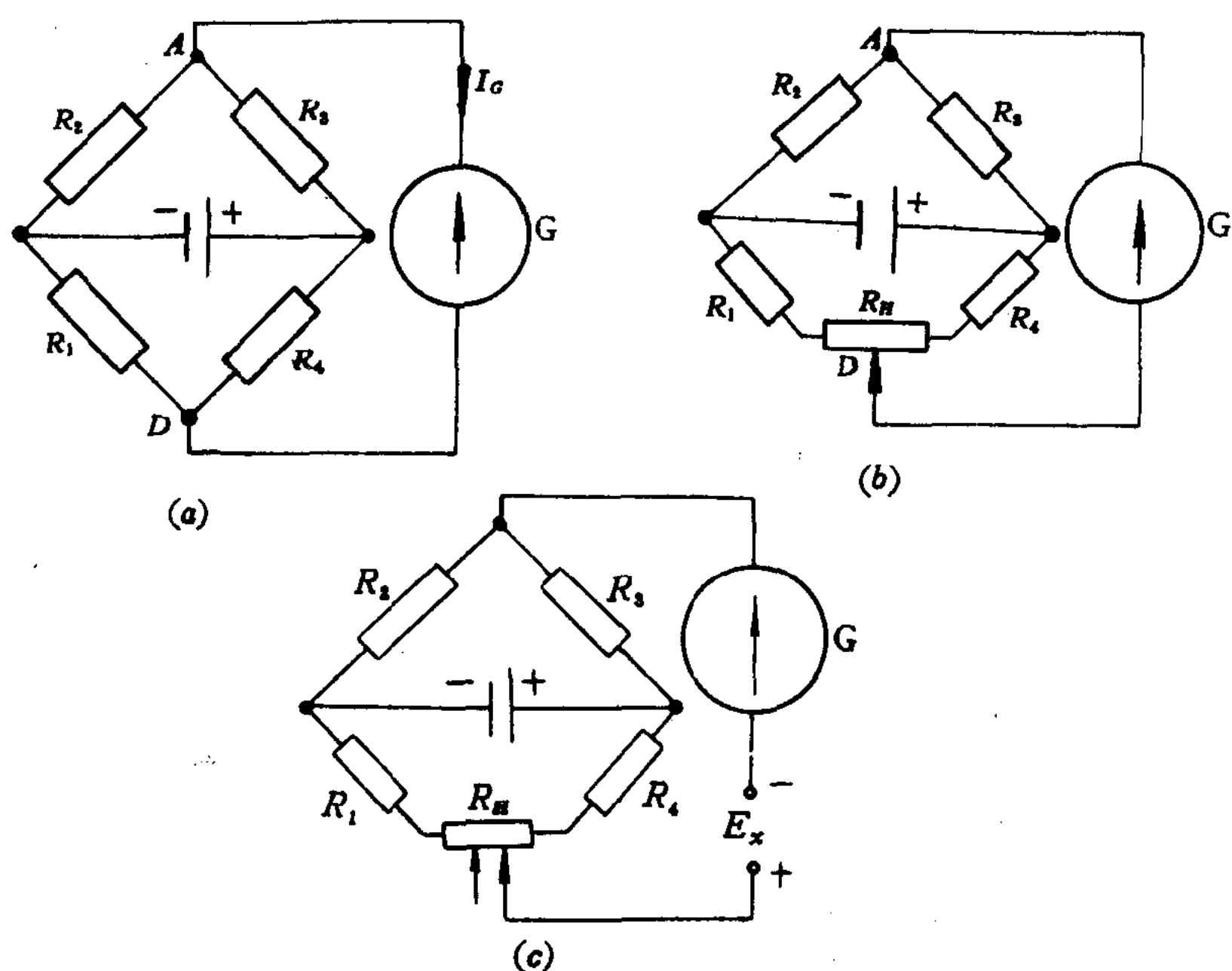


图 1-1 测量桥路原理图

(a) 电桥原理图; (b) 带滑点的电桥; (c) 补偿法测量桥路。

简单说来,图 1-1(c) 就是电子电位差计测量电路的基本原理。当然在自动平衡式记录仪中是用检零放大器代替检流计的,后面还要详细介绍。

应该指出,采用桥式线路的原因主要有下述两点:

① 能方便地制成测量范围从负值变到正值或从正值变到负值的仪表(例如 $-100^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$, $+100\text{mV} \sim -100\text{mV}$);

② 能方便地实现热电偶参比端温度自动补偿,这是制造近代化的配热电偶用的测温仪表所必须解决的问题。

在电子电位差计中,实现自动平衡(补偿)原理如图 1-2 所示。当被测电势 E_x 加进之后,只要滑动触点处于适当位置,使 $U_{AD} = E_x$,测量桥路即呈现平衡状态,即 $U_{AF} = 0$ 。如果把 U_{AF} 作为放大器的输入信号,再由放大器驱动可逆电机 SM 而带动滑动触点,那么上述过程便可自动完成。当被测电势 E_x 变化了(即 $U_{AD} \neq E_x$)时,测量桥路就不再平衡了(即 $U_{AF} \neq 0$),这时放大器有了输入信号,可逆电机开始转动而带动滑动触点,当滑动触点移到某个新的位置时,又使 $U_{AD} = E_x$,即 $U_{AF} = 0$,这时可逆电机不转,滑动触点也就不动了。

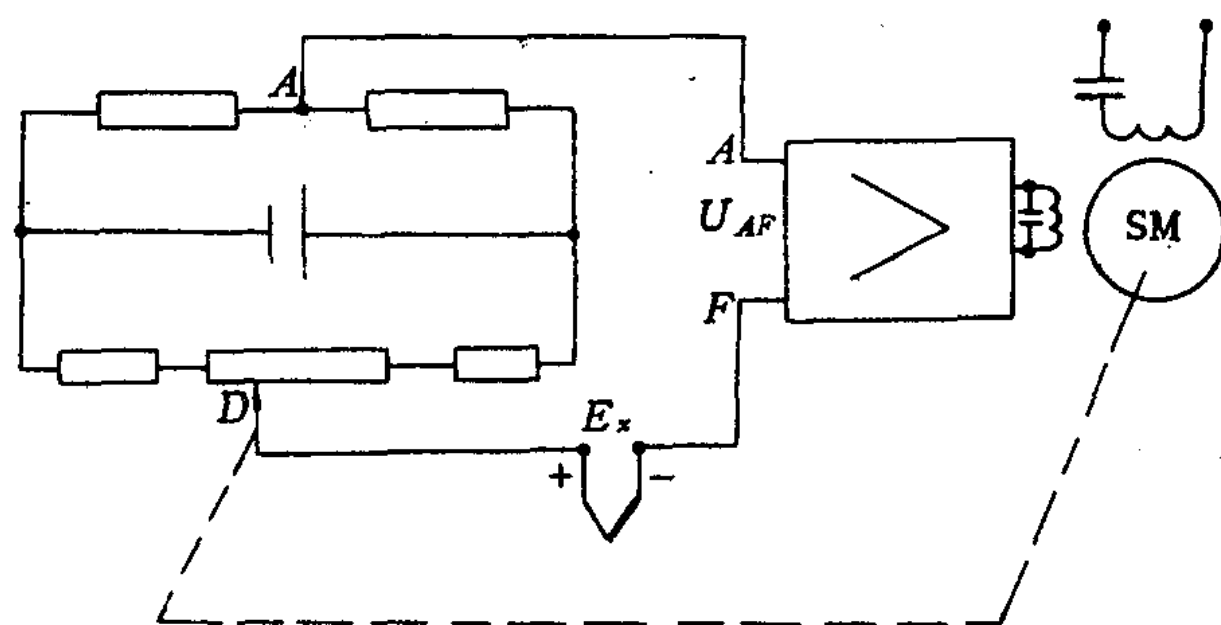


图 1-2 自动平衡原理图

§ 1-2 测温电子电位差计的测量桥路及其计算

在 XW 系列仪表中比较典型的测量桥路如图 1-3 所示。这种测量桥路一般规定上支路电流 I_1 为 4mA ,下支路电流 I_2 为 2mA ,直流电源采用输出电压为 1V 的半导体稳压电源。

一、工作原理简述

由图 1-3 可知,放大器输入端电压为

$$U_i = U_{DC} + U_{CB} - U_{AB} - E_i$$

当测量桥路处于平衡状态时,即 $U_i = 0$,则

$$U_{DC} + U_{CB} - U_{AB} - E_i = 0 \quad (1-1)$$

此时放大器无输入信号,可逆电机不转动,因而滑动触点 D 也不会移动。

如果被测温度升高,则热电偶的热电势将在原有的基础上升,即出现 $E_i + \Delta E_i$ 的情况,测量桥路就不再平衡,方程式(1-1)也不再等于零,放大器便有了输入信号,从而驱使可逆电机转动,带动滑动触点 D 向右移动到适当位置,直至

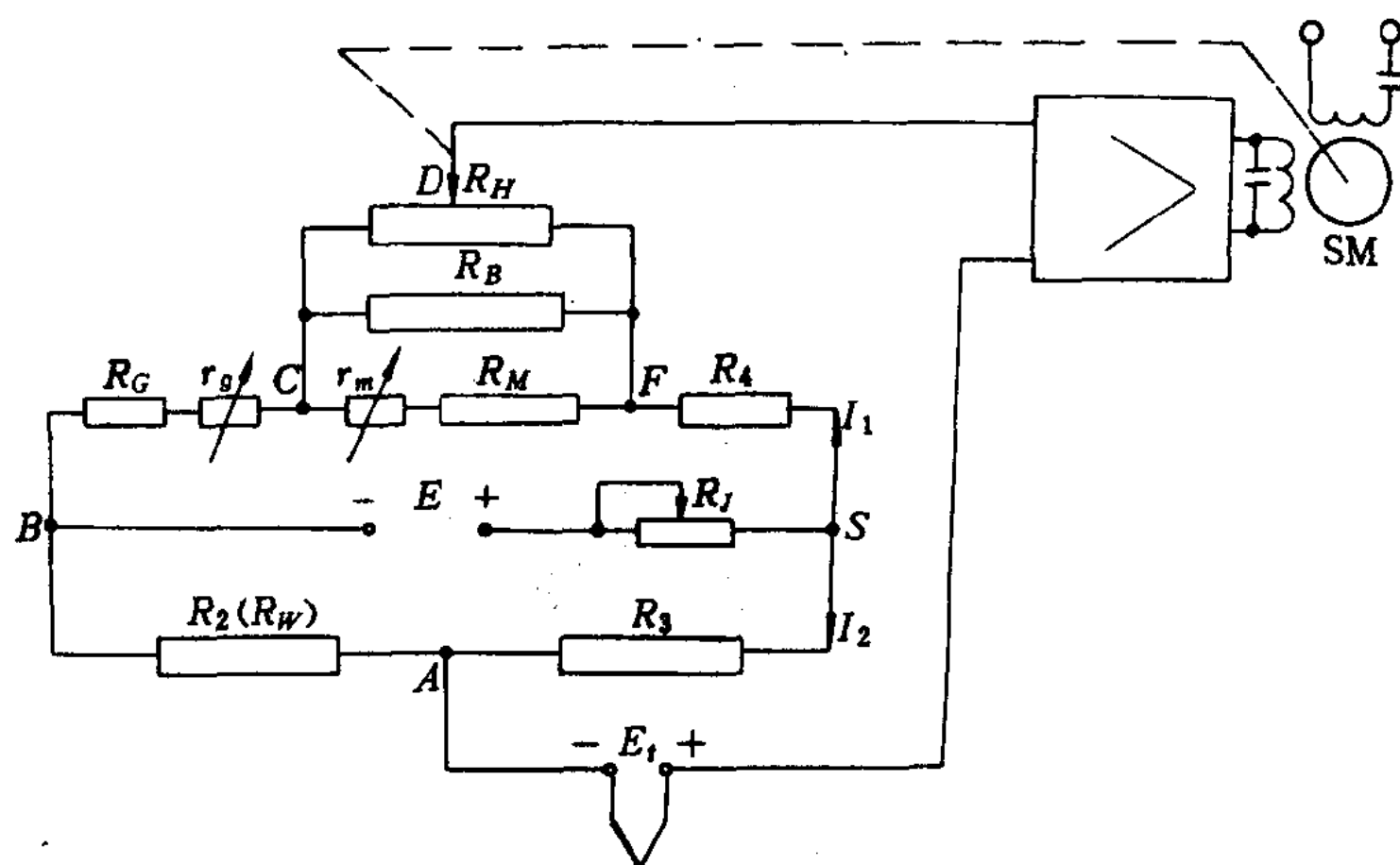


图 1-3 电子电位差计测量桥路

$$(U_{DC} + \Delta U_{DC}) + U_{CB} - U_{AB} - (E_i + \Delta E_i) = 0$$

滑动触点移动的同时,仪表的指针也被带动,指示出升高后的温度值。

反过来,被测温度降低了,即出现 $E_i - \Delta E_i$ 的情况,此时滑动触点向左移动,重新平衡,指针指示出降低了的温度值。

二、各电阻的作用

1. $R_G + r_g$ 起始电阻

当仪表指示下限值时,显然滑动触点 D 应处于最左端,即 $U_{DC} = 0$ (为分析方便,暂不考虑 R_H 的非工作段),这时方程式(1-1)为

$$U_{CB} - U_{AB} - E_1 = 0$$

即

$$U_{CB} = U_{AB} + E_1$$

或

$$I_1(R_G + r_g) = I_2 R_2 + E_1$$

式中 E_1 是仪表测量范围的下限值,下限值为零的仪表 $E_1 = 0$ 。 I_1 、 I_2 是上、下支路工作电流,其值是一定的, R_2 也是一定的(当热电偶参比端温度不变化时),可见 $R_G + r_g$ 的大小与起始(下限)电势 E_1 大小有关,所以称 $R_G + r_g$ 为起始电阻。 r_g 可作微调,这样既便于仪表误差的调整,又能降低对 R_G 阻值的精度要求。调校仪表时,若增大 r_g 的阻值,则仪表指针向标尺起始点方向偏移。

2. $R_M + r_m$ 量程电阻

仪表指示下限值时,滑动触点 D 在 R_H 的左端,仪表指示上限值时, D 在 R_H 的右端。可见滑线电阻 R_H 两端电压降的大小,决定了测量范围的大小,即

$$U_{FC} = E_2 - E_1$$

式中 E_2 、 E_1 分别是仪表测量范围的上、下限值。电阻 $R_M + r_m$ 与滑线电阻相并联, $R_M + r_m$ 越大,则它从上支路工作电流 I_1 所分流出的电流越小,仪表的量程就越大。反之,仪表的量程就越小。 r_m 供微调之用。调校仪表时,若增大 r_m ,则仪表指针向标尺始端方向偏移。

3. R_H 滑线电阻

滑线电阻是测量桥路中的重要部件,仪表的基本误差、回差以及仪表运行的平滑性等

都和滑线电阻的优劣有关。因此除了要求装配牢固外,对材料的耐磨、抗氧化、接触的可靠性以及绝缘性能等都有较高的要求。对于精确度为 0.5 级的仪表,滑线电阻的非线性误差应小于 0.15%。

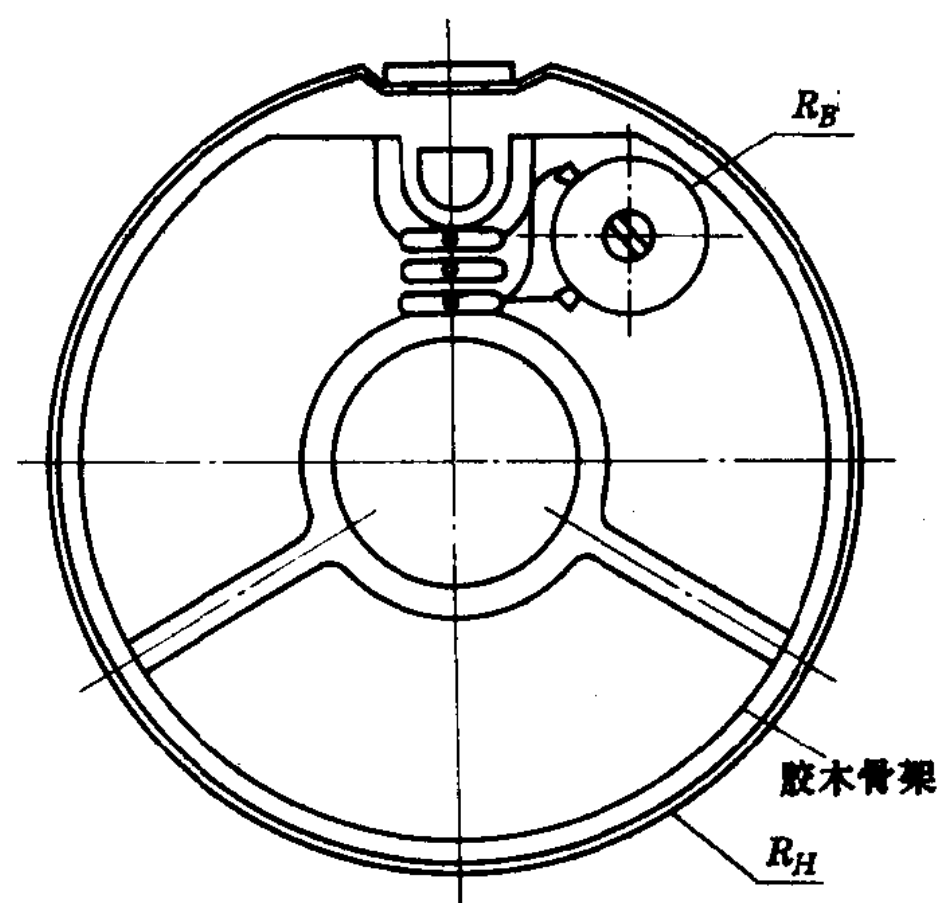


图 1-4 滑线电阻部件

滑线电阻的结构有圆形和直线形两种。圆图仪表都采用圆形滑线电阻,如图 1-4 所示,而长图仪表的滑线电阻有圆形的也有直线形的。前者的优点是防尘条件好,但指针和滑动触点之间是柔性传动,容易产生误差;后者的指针和滑动触点之间是刚性连接,不易产生误差,但它的防尘条件较差。

最常用的滑线电阻是螺旋状的结构,如图 1-5 所示。它是用锰铜电阻丝在母线(漆包粗铜线)上密绕而成,绕成的滑线电阻需进行表面局部除漆工序。进行此工序是用砂纸擦去滑线电阻的漆层,这样往往会造成滑线电阻各处不同程度的擦伤,因而使其线性度大为降低。为了改善线性

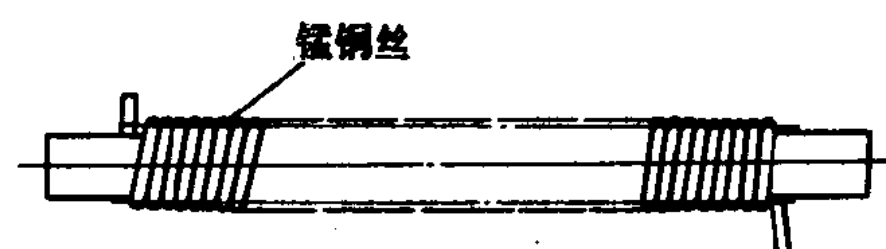


图 1-5 滑线电阻

度,常采用裸锰铜丝绕制滑线电阻,它是在母线上先用丝漆包铜线密绕一层(底层)并经过绝缘处理,然后再以细一号的裸锰铜丝绕在底层线的匝与匝之间隙上。由于底层线直径稍大于裸锰铜丝的直径,因此保证了裸锰铜丝的匝与匝之间不会发生短路,因为裸锰铜丝不需要进行除漆工序,这样在工艺上能保证滑线电阻有良好的线性度。

4. R_B 工艺电阻

由于滑线电阻 R_H 的阻值很难绕制得十分准确,而且绕制成的电阻不便于采用增加或减少圈数的方法来调整阻值,为此给滑线电阻 R_H 并联一个电阻 R_B ,使并联后的阻值为一个固定的电阻值,之后即把 R_H 和 R_B 作为一个整体来处理,这样便于计算,有利于成批生产。并联后阻值的大小,在保证满足制造最大电流量程仪表的需要的的前提下,没有什么严格的规定。我国较多地选取 R_H 与 R_B 并联后的阻值为 $90 \pm 0.1\Omega$,有的厂家采用卡玛丝或银钯丝制作滑线电阻,其并联后的阻值并不选取 90Ω 。

5. R_4 上支路限流电阻

R_H 、 R_B 、 R_M 并联后再与 R_G 、 R_4 串联,其总电阻值要保证上支路工作电流 I_1 为 4mA。虽然 R_4 的准确度会影响到上支路电流的大小,但只要 R_4 的误差不致过大,总是能借助于 r_g 、 r_m 的微量调整,使仪表的测量范围大小及测量的起始位置与设计要求的相吻合。因此对 R_4 阻值的准确度,不必过于苛求,一般 R_4 的误差允许达到 $\pm 0.2\%$ 的程度。

6. R_3 下支路限流电阻

R_3 与 R_2 配合,保证了下支路的工作电流 I_2 为 2mA。由于 R_2 是用铜线绕制,其阻值随温度而变化,实际上,下支路工作电流是在仪表的标准工作温度(定值温度)时才为 2mA。在下支路中没有设置微调电阻,所以 R_3 的准确度直接影响下支路工作电流 I_2 的大小,因此对它的准确度有较高的要求,一般应控制在 $\pm 0.1\%$ 以内。

7. R_2 热电偶参比端温度补偿电阻

这个电阻很重要,现分析一下它的作用。

热电偶产生的热电势是与其两端温度差有关的。因此,虽然测量端(热端)温度不变,当参比端(冷端)温度升高时,热电势将减小,反之,参比端温度降低,热电势将增大,从而引起测量误差。例如,分度号为 K 的热电偶,当参比端温度从 0°C 升高到 25°C 时,热电偶输出的热电势将降低 1mV,这时仪表指示值偏低约 25°C 。如果把 R_2 做成随温度变化的电阻(例如采用铜线绕制),并且使其阻值变化所引起桥路输出的变化量恰与参比端温度变化造成的热电势变化量相抵消,就能实现参比端温度的自动补偿。拿上面的例子来说,若 R_2 阻值在温度从 0°C 升高到 25°C 时增大 $\Delta R_2 = 0.5\Omega$,而流过 R_2 的工作电流 $I_2 = 2\text{mA}$,这时 R_2 上的电压降增大了 $\Delta R_2 \times I_2 = 1\text{mV}$,那么桥路输出端电压就减少了 1mV,从而达到了自动补偿的目的。用铜线绕制的 R_2 常称为“参比端温度补偿电阻”,它通常装在仪表外壳连接热电偶补偿导线的接线端子板上,以使其尽量与热电偶参比端温度保持一致。

三、XW 系列电子电位差计测量桥路的计算

测量桥路的计算是根据已经拟定的桥路形式和已知条件、计算桥路中各个电阻的阻值。

在计算测量桥路参数时采用下列符号:

$\Delta t = t_G - t_D$ ——热电偶参比端温度变化的间隔($^\circ\text{C}$);

t_G 、 t_D ——热电偶参比端温度间隔的上、下限($^\circ\text{C}$);

t_0 ——仪表工作时的标准环境温度($^\circ\text{C}$);

$c = \frac{E(t_G, t_D)}{\Delta t}$ ——热电偶在其参比端温度变化间隔 Δt 内的平均灵敏度;

R_H 、 R_B 、 R_G 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_M ——测量桥路电阻(Ω), (其中 R_H 、 R_B 并联成标准值 90Ω);

R_2 ——热电偶参比端温度补偿电阻,在 R_2 的右下角加一温度标志,表示在该温度时的电阻,例如 $R_{2(t_0)}$ 表示温度为 t_0 时的 R_2 值(Ω);

α_t ——以 $t^\circ\text{C}$ 为基准的铜电阻温度系数, $\alpha_t = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 t} / (^\circ\text{C})$;

α_0 ——在 0°C 时铜电阻的温度系数, $\alpha_0 = 4.25 \times 10^{-3} / (^\circ\text{C})$;

$\eta = \frac{R_{2(t_0)}}{R_3}$ ——下支路电阻在 t_0 时的比例系数;

R —— R_H 、 R_B 、 R_M 并联后的等效电阻值(Ω);

λ —— R_H 的每端不工作部分的阻值与 R_H 之比,一般 $\lambda = 0.03 \sim 0.05$;

E ——测量桥路供电电源的供电电压(mV);

I_1 、 I_2 ——测量桥路上、下支路的电流(mA);

$E_1(t_0)$ 、 $E_2(t_0)$ ——热电偶参比端温度为 t_0 ,工作端温度分别为相当于仪表标尺的始端和终端温度时的热电势(mV);

$\Delta E_m = E_2 - E_1$ ——仪表的电量程(mV)。

1. 下支路计算的几点前提

① 测量桥路中应用 1V 的稳压电源,在负载有微小变化时,认为电源电压不变。

② 当参比端温度补偿电阻阻值随温度变化时,将使下支路工作电流 I_2 也随之改变。虽然其变化程度不大,但也会造成温度补偿误差。考虑到这一因素的影响,计算时引入一个比值 η , η 为下支路两个电阻在 t_0 时的比值。 η 是一个无因次的多位小数,其引入的结果将使桥路的计算较为复杂。

③ 热电偶参比端反电势存在有非线性,为了简化计算,往往采用近似方法,忽略其非线性因素

④ 下支路中工作电流 I_2 实际上是一变量,工作电流的校准,通常是指在标准环境温度时的电流为基准。

⑤ 标准环境温度 t_0 有采用标准室温(20°C)加上仪表本身的温升 5°C 的,此时 $t_0 = 20^\circ\text{C} + 5^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C}$;有采用仪表实际工作环境温度等于实际室温($0 \sim 50^\circ\text{C}$)加上温升,即 $t_G = 55^\circ\text{C}$, $t_D = 5^\circ\text{C}$ 的平均值的,此时 $t_0 = (t_G + t_D)/2 = 30^\circ\text{C}$ 。

2. 下支路电阻的计算

(1) 首先求取 η 值

当参比端温度由 t_0 增至 t_G 时,桥路输出不平衡电压应补偿热电偶参比端温度变化时所产生的热电势变化,即

$$E(t_G, t_0) = I_{2(t_G)} R_{2(t_G)} - I_{2(t_0)} R_{2(t_0)} \quad (\text{a})$$

同理,参比端温度由 t_0 降至 t_D 时,有

$$E(t_0, t_D) = I_{2(t_0)} R_{2(t_0)} - I_{2(t_D)} R_{2(t_D)} \quad (\text{b})$$

(a) 式 + (b) 式,得

$$E(t_G, t_D) = I_{2(t_G)} R_{2(t_G)} - I_{2(t_D)} R_{2(t_D)}$$

即

$$\begin{aligned} E(t_G, t_D) &= \frac{E}{R_{2(t_G)} + R_3} R_{2(t_G)} - \frac{E}{R_{2(t_D)} + R_3} R_{2(t_D)} \\ &= E \frac{R_{2(t_G)}(R_{2(t_D)} + R_3) - R_{2(t_D)}(R_{2(t_G)} + R_3)}{(R_{2(t_G)} + R_3)(R_{2(t_D)} + R_3)} \\ &= E \frac{R_3(R_{2(t_G)} - R_{2(t_D)})}{R_3^2 + R_3(R_{2(t_G)} + R_{2(t_D)}) + R_{2(t_G)}R_{2(t_D)}} \end{aligned} \quad (\text{c})$$

$R_{2(t_G)}$ 、 $R_{2(t_D)}$ 都比 R_3 小得多,故分母中可略去 $R_{2(t_G)}R_{2(t_D)}$ 一项,并将

$$R_{2(t_G)} = R_{2(t_0)}[1 + \alpha_{t_0}(t_G - t_0)]$$

$$R_{2(t_D)} = R_{2(t_0)}[1 - \alpha_{t_0}(t_0 - t_D)]$$

两式代入(c)式中,化简后得

$$E(t_G, t_D) = E \frac{R_{2(t_0)} \alpha_{t_0} (t_G - t_D)}{R_3 + R_{2(t_0)} [2 + \alpha_{t_0} (t_G + t_D - 2t_0)]}$$

将 $\Delta t = t_G - t_D, \eta = \frac{R_{2(t_0)}}{R_3}$ 代入上式,可得

$$E(t_G, t_D) = \frac{E \alpha_{t_0} \Delta t}{\frac{1}{\eta} + 2 + \alpha_{t_0} [\Delta t - 2(t_0 - t_D)]}$$

将 $E(t_G, t_D) = c \Delta t$ 代入上式,可得

$$c \Delta t = \frac{E \alpha_{t_0} \Delta t}{\frac{1}{\eta} + 2 + \alpha_{t_0} [\Delta t - 2(t_0 - t_D)]}$$

解上式,可得

$$\eta = \frac{c}{E \alpha_{t_0} - c \{2 + \alpha_{t_0} [\Delta t - 2(t_0 - t_D)]\}} \quad (1-2)$$

如果 t_0 取参比端实际温度的平均值,即

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

则式(1-2)可简化为

$$\eta = \frac{c}{E \alpha_{t_0} - 2c} \quad (1-3)$$

(2) 求 R_3 及 $R_{2(t_0)}$ 的值

桥路供电电压为 E , 当环境温度为 t_0 时, 流过下支路的电流为 I_2 , 则

$$R_3 + R_{2(t_0)} = \frac{E}{I_2}$$

$$R_3 (1 + \frac{R_{2(t_0)}}{R_3}) = \frac{E}{I_2}$$

将 $\eta = \frac{R_{2(t_0)}}{R_3}$ 代入上式得

$$R_3 (1 + \eta) = \frac{E}{I_2}$$

故

$$R_3 = \frac{E}{I_2 (1 + \eta)} \quad (1-4)$$

因

$$\eta = \frac{R_{2(t_0)}}{R_3}$$

故得

$$R_{2(t_0)} = \eta R_3 \quad (1-5)$$

3. 上支路计算的几点前提

① 电路中各电阻都用温度系数极小的锰铜丝做成, 因此认为上支路总阻是恒定不变的, 处于恒定工作电流状况。

② 使用滑线电阻时, 滑动触点工作到两个端点是难以实现的, 因此滑线电阻两端总留有一个剩余电阻。这剩余电阻可等效为 R 的一部分, 以 λR 表示之, 一般 $\lambda = 0.03 \sim 0.05$, 视各生产厂的情况而定, 在计算上支路各电阻时, 必须予以考虑。

4. 上支路电阻的计算

(1) 求 R_M 的值

因滑线电阻 R_H 与工艺电阻 R_B 及量程电阻 R_M 并联后的等效电阻为 R , 其中 $2\lambda R$ 为不工作部分, 工作部分为 $(1 - 2\lambda)R$, 在工作部分所产生的电压降应与仪表的量程相等, 即

$$I_1(1 - 2\lambda)R = \Delta E_m$$

由于 $R = \frac{90R_M}{90 + R_M}$, 并代入上式得到量程电阻为

$$R_M = \frac{90\Delta E_m}{90I_1(1 - 2\lambda) - \Delta E_m} \quad (1-6)$$

(2) 求 R_G 的值

在环境温度为 t_o 时, 滑动触点在标尺始端位置平衡时应满足

$$\begin{aligned} E_{1(t_o)} &= I_1(R_G + \lambda R) - I_2R_{2(t_o)} \\ \text{故 } R_G &= \frac{E_{1(t_o)}}{I_1} + \frac{I_2}{I_1}R_{2(t_o)} - \lambda R \end{aligned} \quad (1-7)$$

如果将 $R_{2(t_o)} = \eta R_3$, $R = \frac{\Delta E_m}{I_1(1 - 2\lambda)}$ 代入上式, 可得

$$R_G = \frac{E_{1(t_o)}}{I_1} + \frac{\eta E}{I_1(1 + \eta)} - \frac{\lambda \Delta E_m}{I_1(1 - 2\lambda)} \quad (1-8)$$

(3) 求 R_4 的值

由于上支路电流 I_1 是恒定的, 并有下列关系

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E}{R_G + R + R_4} \\ \text{所以 } R_4 &= \frac{E}{I_1} - R_G - R \end{aligned} \quad (1-9)$$

如果把 R_G 、 R 的表达式代入上式, 可得

$$\begin{aligned} R_4 &= \frac{E}{I_1} - \left(\frac{E_{1(t_o)}}{I_1} + \frac{\eta E}{I_1(1 + \eta)} - \frac{\lambda \Delta E_m}{I_1(1 - 2\lambda)} \right) - \frac{\Delta E_m}{I_1(1 - 2\lambda)} \\ &= \frac{E}{I_1(1 + \eta)} - \frac{E_{1(t_o)}}{I_1} - \frac{\Delta E_m(1 - \lambda)}{I_1(1 - 2\lambda)} \end{aligned} \quad (1-10)$$

(4) 计算举例

① 已知: 配用 K 型热电偶, 仪表测量范围为 $0 \sim 800^\circ\text{C}$, $E_{1(t_o)} = -1.000\text{mV}$, $E_{2(t_o)} = 32.277\text{mV}$, $\Delta E_m = 33.277\text{mV}$, $t_G = 55^\circ\text{C}$, $t_D = 5^\circ\text{C}$, $t_o = 25^\circ\text{C}$, $E_{t_D} = 0.198\text{mV}$, $E_{t_G} = 2.229\text{mV}$, $E_{t_o} = 1.000\text{mV}$, $\alpha_{t_o} = 3.84 \times 10^{-3}/(^{\circ}\text{C})$, $E = 1000\text{mV}$, $I_1 = 4\text{mA}$, $I_2 = 2\text{mA}$, $\lambda = 0.03$ 。

② 桥路参数的计算:

$$c = \frac{E_{t_G} - E_{t_D}}{\Delta t} = \frac{2.229 - 0.198}{55 - 5} = 0.0406(\text{mV}/^{\circ}\text{C})$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{c}{E\alpha_{t_o} - c\{2 + \alpha_{t_o}[\Delta t - 2(t_o - t_D)]\}} \\ &= \frac{0.0406}{1 \times 10^3 \times 3.84 \times 10^{-3} - 0.0406\{2 + 3.84 \times 10^{-3}[50 - 2(25 - 5)]\}} \\ &= 0.01078 \end{aligned}$$

$$R_3 = \frac{E}{I_2(1 + \eta)} = \frac{1000}{2 \times (1 + 0.01078)} = 494.67(\Omega)$$

$$R_{2(t_o)} = \eta R_3 = 0.01078 \times 494.67 = 5.33(\Omega)$$

$$R_M = \frac{90\Delta E_m}{I_1 90(1 - 2\lambda) - \Delta E_m} = \frac{90 \times 33.277}{4 \times 90 \times (1 - 0.06) - 33.277} = 9.83(\Omega)$$