

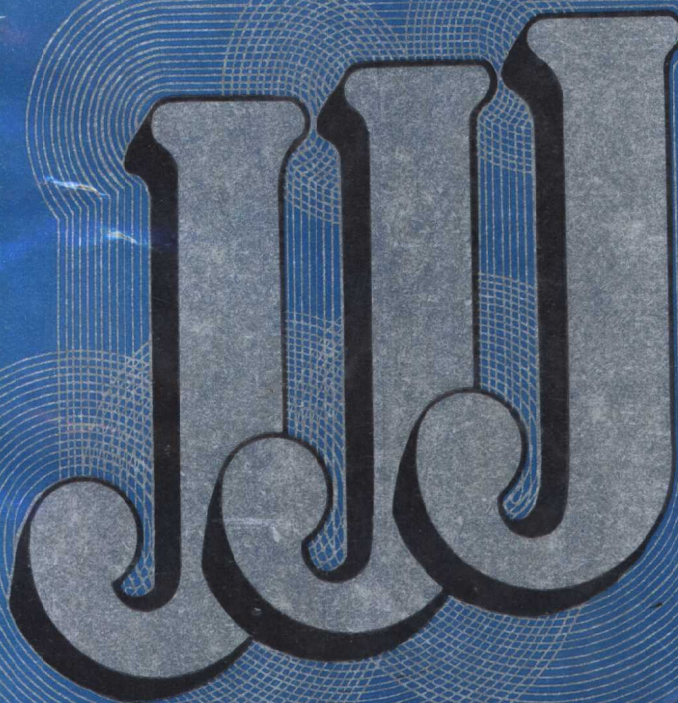
国家机械工业委员会统编

电工仪表修理工工艺学

(中级工适用)

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

机械工人技术理论培训教材

电工仪表修理工工艺学

(中级工适用)

国家机械工业委员会统编



机械工业出版社

本书共分十章，分别介绍了电工仪表的附加误差和温度补偿，电工仪表修理用的标准度量器及其使用方法，各种电工仪表的结构原理，故障分析、检定方法和调修工艺等。每章后面附有一定数量的复习题。

本书由上海电机厂毕萍菁和上海电机制造技术专科学校陈铸声编写，由上海电机厂秦全兴和上海汽轮机厂陶树生审稿。

电工仪表修理工工艺学

(中级工适用)

国家机械工业委员会统编

责任编辑：卢若薇

责任校对：王惠英

封面设计：林胜利 方 芬

版式设计：罗文莉

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

开本787×1092¹/₃₂·印张11·字数243千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 00,001-26,600

·定价：4.40元

ISBN 7-111-01197-X/TM·155

前 言

1981年，原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》，确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此，组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲（试行）》，编写了相应的教材，有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作，初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况，取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准（通用部分）》进行了全面修订，原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求，而且缺少高级部分；编写的教材，由于时间仓促、经验不足，在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此，原机械工业部根据新《标准》，重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》（初、中、高级），于1987年3月由国家机械工业委员会颁发，并根据培训计划、大纲的要求，编写了配套教材149种。

这套新教材的编写，体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神，坚持了文化课为技术基础课服务，技术基础课为专业课服务，专业课为提高操作技能和分析解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上，力求以

基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会
技工培训教材编审组

1987年11月

目 录

前言

第一章 电工仪表的附加误差和温度补偿	1
第一节 仪表的附加误差	1
第二节 仪表的温度补偿	4
复习题	14
第二章 电工仪表修理常用的标准器和使用方法	15
第一节 标准电池	15
第二节 标准电容	20
第三节 标准电感	23
第四节 标准电阻、电阻箱及分压箱	26
第五节 检流计	39
复习题	45
第三章 专用仪表的结构原理和检定	46
第一节 频率表的结构原理和检定	46
第二节 相位表的结构原理和检定	59
第三节 同步表的结构原理和检定	73
第四节 配电盘记录式仪表简介	79
复习题	82
第四章 万用表的原理、使用和调修	84
第一节 万用表的组成	84
第二节 万用表的直流电流, 交、直流电压档	87
第三节 万用表的欧姆档	99
第四节 万用表的分贝测量和电感、电容测量	104
第五节 万用表的使用	108

第六节	万用表的故障分析和调修	110
第七节	多用表的使用	114
复习题		116
第五章	兆欧表的结构原理、调修和校验	117
第一节	兆欧表的结构原理	117
第二节	兆欧表的故障分析和误差调整	128
第三节	兆欧表的校验	132
第四节	接地电阻测量仪的构造、线路和原理	137
复习题		142
第六章	电度表的结构原理、调修和检定	144
第一节	单相电度表的结构原理	144
第二节	三相电度表的结构原理	154
第三节	标准电度表的结构原理	158
第四节	电度表的故障分析和调整	161
第五节	电度表的检定	174
复习题		185
第七章	携带式电桥的原理、调修和检定	186
第一节	直流单臂电桥的结构原理	187
第二节	直流双臂电桥的结构原理	197
第三节	直流电桥常见故障及调修	201
第四节	携带式单、双臂电桥的检定	207
第五节	万能电桥的原理和使用	220
复习题		232
第八章	携带式直流电位差计的原理、调修和 检定	233
第一节	直流电位差计的结构原理	233
第二节	电位差计常见故障分析和调修	254
第三节	携带式直流电位差计的检定	261
复习题		268

第九章	面板式数字电压表的原理和使用	269
第一节	数字电压表的结构原理	269
第二节	数字电压表的使用	292
复习题		302
第十章	电工指示仪表的调修和检定	303
第一节	电工指示仪表的常见故障分析和调修	303
第二节	比较法检定电流表、电压表、单相功率表	322
第三节	补偿法检定电流表、电压表、单相功率表	333
第四节	热电比较法简介	338
复习题		345

第一章 电工仪表的附加 误差和温度补偿

电工仪表基本上由测量机构和线路两大部分组成。电工仪表在使用中，当环境温度偏离其标定刻度的温度时，仪表的机械零件和电子器件在机械参数和电气性能方面，将毫不例外地随着温度而变化，导致仪表产生指示误差。

本章将讨论如何在技术上采取措施进行温度补偿，在这之前还将对有关仪表的附加误差作一简要介绍。

第一节 仪表的附加误差

电工仪表在测量过程中，由于仪表在设计、结构、工艺上的缺陷而造成仪表的误差，称之为基本误差。电工仪表的基本误差的来源和表示方法已在初级工教材中作了叙述。

由于仪表处于不在正常规定的条件下工作而出现的误差，称之为附加误差，它可归纳为下列几种。

一、温度附加误差

电工仪表的零件由于受周围温度的变化，而在性能上发生相应的变化，例如：

- (1) 线圈电阻值、附件电阻值的变化；
- (2) 游丝的弹性、强度、长度和电阻值的变化；
- (3) 永久磁钢的磁感应强度、磁通量的变化；
- (4) 涡流损耗、磁滞损耗的变化；
- (5) 机械零件的尺寸、大小和相对位置、角度的变化；
- (6) 电子元件的电气性能、参数、工作点的变化等等。

由于温度引起的上述变化，都会使仪表在测量时带来附加误差，关于温度附加误差的补偿原理将在本章第二节中详细讨论。

二、频率附加误差

在电路中的电抗元件及线路中的分布电容，将由于频率变化相应引起感抗、容抗的变化，因而使通过测量机构的电流及其产生的磁通，分别在大小及相位角上发生变化，导致作用力矩随着变化。

频率变化还会使得电工仪表内的金属零件（如铁心、线圈、屏蔽罩、机械紧固件等）在交变电流作用下产生涡流，从而引起电阻、电抗的变化、以及铁磁材料磁化、磁滞损耗、涡流损耗的变化。

在高频测量中，电流趋向于导体表面的趋肤效应也将不同程度地发生变化。

以上种种变化的结果，致使仪表产生测量附加误差。

三、波形附加误差

在交流测量中，当波形畸变为非正弦波时，非正弦波在数学分析或波形分解中，可看作是多次谐波的总和，其中直流分量被看作“0”次谐波。在非正弦波中，其有效值等于各次谐波有效值平方和的开方，其平均值等于各次谐波平均值的和。电磁系或电动系的仪表指示值正比于非正弦波电流的有效值，而全波整流磁电系仪表的指示值正比于非正弦波电流的平均值。

电路中的电感、电容等电抗元件，对不同频率的各次谐波呈现的感抗、容抗是不一样的，对铁制元件的磁化也是不相同的。这时，电工仪表的指示值不仅与各次谐波电流的大小有关，而且还与各次谐波相对于基波的相位有很大关系，

从而引起误差。在高次谐波中，三次谐波对测量附加误差的影响为最大。

四、外磁场附加误差

电工仪表外部的地磁、永久磁钢、大电流设备等产生的磁场会引起仪表内部固定磁场的增强或削弱，并使磁场的分布发生变化，这也会给仪表测量带来附加误差。

五、外电场附加误差

电工仪表外界的高电压设备形成的电场，会使仪表的活动部分因静电感应而产生静电转矩。在弱电流的测量中，由于静电感应引起绝缘物质的电阻值发生变化，因而形成不可忽略的泄漏电流。

在交流测量中，主要通过电容（包括分布电容）的交链耦合，引起电容旁路电流。

这些泄漏电流、电容电流都会改变线路中正常的传导电流数值，从而引起了测量中的附加误差。

特别在高灵敏检流计的测量中，由于人体的移动、手的活动往往会使仪表的指针发生摆动、移位等现象。

六、安放位置附加误差

电工仪表由于没有严格正确地按照技术条件的要求去放置，而与规定的水平（或垂直或倾斜某一角度）位置有一定偏离时，会使轴尖、轴承发生位移，引起侧压力以及配重平衡的变化，这些均会给仪表测量带来附加误差。

若放置的地方有震动、摇晃，也会使仪表指针不稳定。

上述有关附加误差的理论和它们的消除方法以及如何防护电场、磁场等干扰的影响，都将在高级工教材中讨论。

第二节 仪表的温度补偿

电工仪表按规定的温度、湿度的工作范围被划分为A、B、C和T四个组别。

当电工仪表的工作环境 温度 偏离 国家标准 ($+15\sim+25^{\circ}\text{C}$) 的范围时, 温度每变化 10°C , 对不同准确度等级的仪表, 分别规定有不同的允许误差。具体如表1-1所示。

表1-1 每变化 10°C 时, 不同组别、等级仪表指示允许误差表

仪表等级	允 许 误 差 (%)		
	A组	B组和T组	C组
0.1	± 0.1	± 0.15	
0.2	± 0.2	± 0.15	± 0.15
0.3	± 0.5	± 0.4	± 0.3
1.0	± 1.0	± 0.8	± 0.5
1.5	± 1.5	± 1.2	± 0.8
2.5	± 2.5	± 2.0	± 1.2
5.0	± 5.0	± 4.0	± 2.5

为了在误差上达到某一等级的指标, 对电工仪表就必须采取温度补偿的技术措施。具体方法用于线路上的有四种: 串联补偿、串并联补偿、桥式补偿和元件补偿; 用于磁路上的有一种: 磁分流补偿; 用于材料上的有一种: 双金属片补偿。在这些补偿方法中, 串联补偿、串并联补偿能达到最佳预期效果, 因此被广泛地采用, 也是我们本节的学习重点。在学习中要求搞清楚概念、学会计算, 这对我们进行仪表修理、调整 and 改装是非常重要的。

一、串联温度补偿

磁电系表头在直接测量电流时, 虽然动圈电阻和游丝电

阻在温度变化时，它们的电阻值也会变化，但对指示没有影响，故可不考虑温度补偿。

在具有分流电阻扩大量程的表头中，由于温度的变化，就会引起误差。因为分流器都采用锰铜电阻，其温度系数小，电阻值基本不随温度变化。而表头的动圈、游丝均为铜电阻，随着温度的升高，其电阻值将增大，这时表头被分配的电流下降，结果指示便产生负误差。为了使允许误差在规定的范围之内，故在电表常采用串联温度补偿线路，如图 1-1 所示。

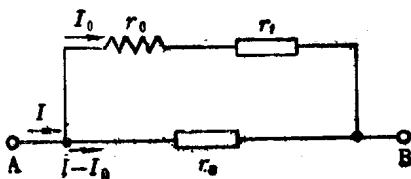


图 1-1 具有串联温度补偿的
电流表线路

在图 1-1 中，分流电阻 r_2 和温度补偿电阻 r_1 采用锰铜材料制成，表头内阻（动圈和游丝电阻） r_0 系用铜材料制成。 I_0 是通过表头动圈的电流 I 是电流表指示扩大了的电流。

当温度升高时，电阻 r_0 增大，但串联电阻 r_1 后，动圈支路的 $(r_0 + r_1)$ 总电阻的变化值却是极小的，这样就可减小温度附加误差。在表头动圈支路中，由于温度变化而产生的电阻相对变化率 β' 为

$$\beta' = \frac{\beta r_0 + \beta_1 r_1}{r_0 + r_1} \approx \frac{\beta r_0}{r_0 + r_1} \quad (1-1)$$

式中 β_1 ——锰铜的电阻温度系数，其数值为 $\beta_1 = 0.0002\%/10^\circ\text{C}$ ；

β ——铜的电阻温度系数， $\beta = 4\%/10^\circ\text{C}$ 。

按技术条件规定, β' 值应不大于仪表准确度等级所对应的允许误差值, 即

$$\beta' \leq K_t \quad (1-2)$$

式 (1-2) 中的 K_t 是温度每变化 10°C 时所允许的温度附加误差值。对于 A 组仪表, 相当于精度级别所对应的数字, 如 1.0 级仪表, 则 $K_t = 1.0$; 而对于 B 组仪表, 相当于精度等级的 $4/5$, 如 1.0 级仪表, 则 $K_t = 0.8$ 。

由式 (1-1) 和式 (1-2) 可得

$$K_t \geq \frac{\beta r_0}{r_0 + r_t}$$

整理后可得

$$r_t \geq \left(\frac{\beta}{K_t} - 1 \right) r_0 = \left(\frac{\beta - K_t}{K_t} \right) r_0 = \frac{4 - K_t}{K_t} r_0 \quad (1-3)$$

下面将分别通过对电流表、电压表进行温度补偿的具体例子, 来加深对内容的理解和公式的运用。

例1 现有一只 B 组 2.5 级 1 mA、内阻为 50Ω 的电流表, 试用串联温度补偿, 将其改装成 5 A 的电流表。

解 改装的线路如图 1-1 所示, 其计算步骤是:

(1) 对于 B 组仪表, 等级为 2.5, 则

$$K_t = \frac{4}{5} \times 2.5 = 2$$

(2) 由内阻 $r_0 = 50\Omega$ 、 $K_t = 2$, 则温度补偿电阻 r_t 为

$$r_t \geq \frac{4 - K_t}{K_t} r_0 = \frac{4 - 2}{2} \times 50 = 50\Omega$$

(3) 计算分流电阻 r_s 为

$$r_s = \frac{I_0(r_0 + r_t)}{I - I_0} = \frac{0.001 \times (50 + 50)}{5 - 0.001} \approx 0.02\Omega$$

如果计算得出的温度补偿电阻 r_t 带有小数，可以取大于 r_t 的一个整数值，这样在计算时会方便些。

例2 现有一只A组1.5级100 μ A的电流表，将其改装成具有串联温度补偿的1.5级200V的电压表。

解 直接采用象例1中串联温度补偿线路也可以满足要求，但此时附加电阻值将是很大的，为减少附加电阻数值和缩小体积，可将其先改装为毫安表，即加装分流电阻，然后再计算附加电阻，这样做效果较好，它的线路如图1-2所示。

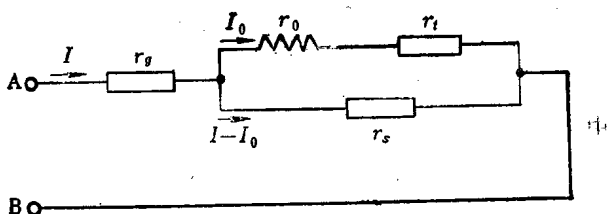


图1-2 具有分流器的电压表的串联温度补偿线路

具体计算步骤如下：

- (1) 测得表头内阻， $r_0 = 500\Omega$
- (2) 对于A组仪表， $K_t = 1.5$
- (3) 由内阻 $r_0 = 500\Omega$ ， $K_t = 1.5$ ，则算得温度补偿电阻 r_t 为

$$r_t \geq \frac{4 - K_t}{K_t} r_0 = \frac{4 - 1.5}{1.5} \times 500 = 833.3\Omega$$

为方便计算，取 $r_t = 850\Omega$

- (4) 将100 μ A的微安表改为量程为1mA的毫安表，算得其分流电阻 r_s 为

$$r_s = \frac{I_0(r_0 + r_t)}{I - I_0} = \frac{0.1 \times (500 + 850)}{1 - 0.1} = 150\Omega$$

(5) 计算附加电阻 r_0 为

$$r_0 = \frac{U - I_0(r_0 + r_i)}{I} = \frac{200 - 0.0001 \times (500 + 850)}{0.001} \\ \approx 199.865 \text{ k}\Omega$$

最后, 应该指出, 从式 (1-3) 中不难看出, 为了满足较小的允许误差 K 时, 算出的温度补偿电阻 r_i 将是很大的数值。如果 r_i 太大, 就会要求表头的灵敏度非常高。因此, 串联温度补偿方法的应用受到一定的限制, 一般被应用在开关式仪表中。

二、串并联温度补偿

精密仪表通常采用串并联温度补偿, 以避免象在串联补偿中, 表头只占用电表线路总电压中一小部分的不理想情况。串并联温度补偿线路如图 1-3 所示。

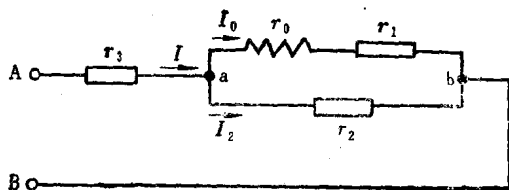


图1-3 串并联温度补偿线路

1. 温度补偿原理 在图1-3中, 表头内阻 r_0 和电阻 r_2 均为铜材料, 电阻 r_1 和 r_3 均为锰铜材料, 当温度升高时, r_1 、 r_3 的电阻值基本不变, 而 r_0 、 r_2 的电阻值增加, 使 a、b 两点间等效电阻 R_{ab} 增加, 若 AB 两端电压 U 不变, 则将引起总电流 I 的下降, 造成电阻 r_3 上的压降减少, 致使 a、b 两点间电压 U_{ab} 上升。如果电压 U_{ab} 的增加率与表头电阻 r_0 的增加率恰好相等时, 就可使通过动圈支路上的电流 I_0 不变。当

然, 电阻 r_2 也同样能起补偿作用, 这是因为温度升高时, r_2 支路电阻的增加率比 r_0+r_1 支路的电阻增加率相对要大, 于是使电阻 r_2 支路上的电流 I_2 减少, 来补偿总电流 I 的减少, 结果使表头电流 I_0 近似地不变。

所以, 串并联温度补偿线路设计完善, 可以达到完全补偿, 使仪表的温度附加误差为零。

2. 温度误差计算 研究温度变化时图1-3所示线路的温度附加误差, 也就是分析温度变化后, 动圈支路电流的变量 ΔI_0 与原来支路电流 I_0 的比值问题。

若 a、b 两点间的电压 U_{ab} 为

$$U_{ab} = IR_{ab} = \frac{U}{\frac{(r_0+r_1)r_2}{r_0+r_1+r_2} + r_3} \quad (1-4)$$

通过电阻 r_0 支路的电流 I_0 为

$$I_0 = \frac{U_{ab}}{r_0+r_1} \quad (1-5)$$

把式 (1-4) 代入式 (1-5) 后, 简化可得

$$I_0 = \frac{U}{r_0+r_1+r_3 + \frac{(r_0+r_1)r_2}{r_2}} = \frac{U}{R_0} \quad (1-6)$$

式中 令

$$R_0 = \frac{(r_0+r_1)r_2}{r_2} + r_0+r_1+r_3 \quad (1-7)$$

当温度变化 Δt 时, 电阻 R_0 的变量为 ΔR_0 , 在式 (1-7) 中, 变量仅在电阻温度系数较大的 r_0 、 r_2 上出现, 而在电阻温度系数很小的 r_1 、 r_3 上是基本不出现的。于是 R_0 在温度变化 Δt 后的电阻 R_0 为