

电测量 指示仪表 原理与使用

下册

D*C*L*Z*S*Y*B
*Y*L*Y*S*Y

验所

(封面字见封面设计稿)

版本记录印在:正文最后一面

电测量指示仪表原理与使用

(上、下册)

李谦主编

责任编辑:贾平静

*

湖南科学技术出版社出版发行

(长沙市展览馆路3号)

长沙市兴华印刷厂印刷

(印装质量问题请直接与本厂联系)

*

1996年1月第1版第1次印刷

开本:787×1097毫米 1/32 印张:23.5 插页: 字数:53,000

印数:1—5,000

ISBN 7-5357-1970-8

TM·20 定价:25.00元

(上、下两册)

主编的话(代前言)

电测量模拟指示仪表是发供电企业和电力试验研究单位的计量测试人员最常用的基本测量仪表。这类仪表品种繁多,原理各异,用途也十分广泛,可谓“量大面广”。因此,对它们的原理和使用作一系统全面的介绍,以供电力计量测试人员和维修人员参考,是会受到欢迎的。早在八十年代初,北京的一家出版社就曾约我写这样一本书,但因日常工作较忙,一拖数年,无暇动笔,只好中止合同。九十年代初,本人退休,湖南科学技术出版社又盛情向我约稿,当时认为退休后可以有充裕的时间从事写作,借此机会总结一下近40年的工作经验,供后来者参考,也是一件很有意义的工作。因此,欣然应允。不料,在写作中途,电力工业部计量办公室又为我安排了另一项更为紧迫的任务,只好暂时缀笔。待电力部安排的任务即将完成之际,本人又突患眼疾,一时难以坚持写作。为了使本书不再继续拖延问世时间,只好求助于我的几位同行和好朋友——雷惠博(西北电力试验研究院)、洪珍华(湖南电力试验研究所)和黄伦灼(广东电力试验研究所)协助我完成部分书稿的写作任务和个别试验验证任务。这三位都是各有专长的技术专家或高级工程师,他们的加盟不但加快了本书的出书进度,而且也弥补了我在某些知识领域的不足或无知。因此,在这里,我向他们三位表示由衷感谢的同时,也可以坦诚地告诉各位读者:奉献给您的这本书是一本既有较深入的理论分析,又十分实用的电测量指示仪表专业参考书。具体地说,本书有以下特点:

1. 理论和实际并重,而且二者的结合比较密切;

2. 对生产现场使用的仪表和各种试验室仪表的原理和使用都进行了比较全面的介绍。因此,本书可供不同层次、不同岗位的技术人员和技术工人参考。

这里所说的“原理”,主要是指各类仪表的结构原理,但是对各类仪表的技术特性和技术要求也都有较详细的介绍。所说“使用”,包括各种仪表的使用方法;各种电气量的测量方法;各类仪表的误差调整方法;常用仪表的量限或测量种类改制方法;三相仪表接线检查方法和误接线时的读数更正方法;仪表及其检定装置的检定方法等。

3. 全面贯彻现行国家标准和国家计量检定规程、计量技术规范。

我们知道,自解放初至七十年代末期,我国的电测量指示仪表标准是以原苏联国家标准为主要参考的。自改革开放以后,国家号召向国际标准靠拢。因此,自八十年代中后期,我国的指示仪表标准已完成了向国际标准的过渡。我国目前已在施行的国家标准 GB7676—87《直接作用模拟指示电测量仪表及其附件》就是等效采用了国际电工委员会(IEC)的相应标准。

现行标准和旧标准在许多方面存在差异。本书是以现行标准为主进行介绍的,并据此编制了一些实用计算用表。但是,一些按旧标准生产的仪表仍在继续使用,因此,为了使读者了解新旧标准的差别,在本书中往往不得不把新旧标准作对比介绍。

此外,自 1985 年 9 月 6 日全国人民代表大会通过《中华人民共和国计量法》以后,国家计量行政部门又颁布了大量计量技术规范 and 检定规程,这些规范和规程的有关部分,在本书中也得到了充分的反映。

4. 着重误差分析是本书的第四个特点。在某种意义上说,

测量就是与误差作斗争。只有全面掌握各种误差的规律,才有可能在最经济的条件下得到理想的测量结果。

在本书中不但分析了各种仪表本身的误差,而且还着重分析了仪表在使用中的误差和测量方法误差,并就如何评估各种计量检定装置的总不确定度提出了具体建议。这些都是有实用意义的。

在编写本书的过程中,得到了湖南省电力工业局、湖南省电力试验研究所;电力系统和仪表制造行业的知名专家彭时雄(华北电力试验研究院)、蓝永林(东北电力试验研究院)、赵恒庆(华中电力试验研究所)、方吉六(哈尔滨电表仪器厂)、周民权(天津中环电表公司)、徐民华和瞿斌(上海第二电表厂)、李郁文(上海第四电表厂)、薛德晋(上海第六电表厂)、邵友康(上海浦江电表厂)诸位先生的热情帮助和指导,谨向他们表示由衷的谢意。

此外,西北电力试验研究院的曹永兴、武炳炎、杨雪雅、李思荣、饶瑞珍、胡惠纳、陈锋、姚敏、张敏、安晓莉等同仁以及户县热电厂、宝鸡电厂、宝鸡供电局和电力部电力科学研究院、甘肃省电力试验研究所、兰州供电局的师傅们也都曾给过我以很大帮助,在本书出版之际,谨向他们表达我的感激之情。

本书书稿虽经多次推敲、修改,但是,缺点甚至错误恐难避免,热诚欢迎各界读者不吝指正。

李 谦

1995.05.12

目 录

下 册

第八章 万用电表 (李谦 洪珍华)

第一节 万用电表的结构原理	(335)
第二节 万用电表的电阻测量电路(电阻表).....	(336)
一 电阻表的基本原理	(336)
二 串联调零式电阻表	(344)
三 并联调零式电阻表	(357)
四 闭路平衡调零式电阻表	(361)
五 倒欧姆电路的电阻表	(374)
六 电阻表的检定	(375)
第三节 万用电表的电平测量功能	(376)
一 电平的概念	(376)
二 电平的测量	(378)
三 万用电表电平刻度的检定	(382)
第四节 万用电表的使用与维修	(384)
一 万用电表的使用	(384)
二 万用电表的故障检查和判断	(387)
三 万用电表表头电阻的测定	(393)
复习思考题	(395)

第九章 绝缘电阻表和接地电阻表 (雷惠博)

第一节 绝缘电阻表的原理和结构	(398)
一 绝缘电阻表的工作原理	(398)
二 绝缘电阻表的屏蔽	(401)
三 磁电系流比计	(404)
四 直流电压源	(409)

第二节 绝缘电阻表的检定与修理	(414)
一 绝缘电阻表的检定	(414)
二 绝缘电阻表的修理	(428)
第三节 接地电阻表	(434)
一 接地电阻表的原理	(434)
二 ZC-8 型绝缘电阻表	(436)
三 接地电阻表的检定	(441)
复习思考题	(448)
第十章 相位表和功率因数表 (李谦 黄伦灼)	
第一节 功率因数的测量	(451)
一 功率因数的意义	(451)
二 单相电路功率因数的测量	(453)
三 三相电路功率因数的测量	(456)
第二节 电动系相位表和功率因数表	(461)
一 一般结构原理	(461)
二 D3- φ 类型单相相位表	(464)
三 D26- $\cos\varphi$ 型单相功率因数表	(487)
四 D31- $\cos\varphi$ 型三相功率因数表	(503)
第三节 铁磁电动系三相功率因数表	(508)
一 结构原理	(508)
二 误差调整	(512)
第四节 变换器式功率因数表	(513)
一 三相功率因数表	(513)
二 单相功率因数表	(517)
第五节 相位表和功率因数表的检定	(518)
一 一般要求	(519)
二 单相功率因数表的检定	(522)
三 三相功率因数表的检定	(526)
复习思考题	(547)

第十一章 同步指示器 (李谦)

第一节 概述	(549)
第二节 电磁系同步指示器	(550)
一 旋转磁场	(550)
二 电磁系同步指示器	(559)
三 MZ10 型组合式同步指示器	(565)
四 电磁系同步指示器误差的调整	(566)
第三节 其它类型的同步指示器	(567)
一 整流系同步指示器	(570)
二 灯光显示的同步指示器	(570)
第四节 同步指示器的检验	(573)
一 检验项目	(573)
二 检验方法	(574)
复习思考题	(581)

第十二章 频率表 (李谦 黄伦灼)

第一节 概述	(583)
第二节 电动系频率表	(584)
一 结构原理	(584)
二 误差分析	(591)
三 故障分析及误差调整	(595)
第三节 铁磁电动系频率表	(598)
一 结构原理	(598)
二 误差的调整	(604)
第四节 其它系别的频率表	(608)
一 整流系频率表	(608)
二 变换器式频率表	(609)
三 电磁系频率表	(613)
四 振簧系频率表	(614)

第五节 频率表的检验	(616)
复习思考题	(619)
第十三章 电流表、电压表和功率表的检定 (雷惠博)	
第一节 检定工作的一般规定	(621)
一 对仪表的技术要求	(621)
二 检定条件	(624)
三 检定项目	(626)
第二节 外观检查和基本误差测定方法	(627)
一 外观检查	(627)
二 测定基本误差的通用试验程序	(628)
三 直接比较法	(629)
四 直流补偿法	(634)
五 热电比较法	(638)
第三节 其它检定项目和改变量的测定方法	(641)
一 其它检定项目的测定方法	(641)
二 改变量的测定方法	(643)
第四节 检定结果的处理和检定周期	(649)
一 数据修约要求	(649)
二 数据修约方法	(650)
三 检定结果的处理	(651)
四 检定周期	(652)
复习思考题	(652)
第十四章 电测量指示仪表检定装置的检定 (雷惠博 李谦)	
第一节 交流仪表检定装置的检定	(655)
一 对检定装置的技术要求	(656)
二 检定条件	(664)
三 检定项目	(665)

四	检定方法	(666)
五	检定结果的处理和检定周期	(679)
第二节	直流仪表检定装置的检定	(680)
一	检定项目	(680)
二	检定方法	(681)
三	检定周期	(689)
第三节	电测量指示仪表检定装置的误差分析	(690)
一	测量不确定度介绍	(690)
二	计算总不确定度时应考虑的几个问题	(694)
三	电测量指示仪表检定装置总不确定度的估算	(699)
四	检定装置重复性的测量和总不确定度的验证	(715)
复习思考题		(717)
附录一	圆铜线的使用数据	(721)
附录二	锰铜合金线和镍铜合金线的电阻值	(724)
附录三	常用三角公式及常用三角函数值	(725)
附录四	常用函数的误差传播公式	(727)
主要参考文献		(728)

第八章 万用电表

第一节 万用电表的结构原理

万用电表俗称万能表。根据国家专业标准(ZB N21004 和 ZB N21005)规定,万用电表分为工业用万用电表和民用级万用电表两类。前者的最高准确度等级(含电阻和阻抗测量范围)为 1.0 级,后者为 2.0 级。它可以测量直流电压、直流电流、交流电压、电阻和音频电平等。有些万用电表还可以测量交流电流、电容、电感和晶体管的某些参数。是电气测试人员必备的测试维修工具。

万用电表主要由表头、测量线路和开关组成。表头实际上是一只磁电系毫安表或微安表,用以显示被测量的数值。测量线路实质上是多量限磁电系直流电流表、多量限直流电压表、多量限整流系交流电压表和多量限欧姆表的组合。其测量种类和测量范围的变换都是通过转换开关实现的。

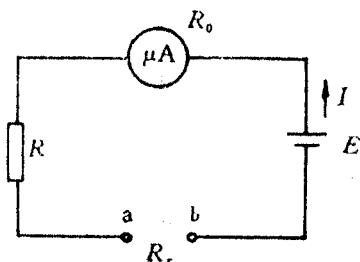
在以上提到的主要测量功能中,除电阻和电平的测量功能外,本书都已作过介绍,因此不再重复。下面将重点介绍电阻测量功能和电平测量功能。

第二节 万用电表的电阻测量电路(电阻表)

一、电阻表的基本原理

(一)原理电路

万用电表的电阻档实质上就是一个多量限电阻表。电阻表俗称欧姆表,它测量电阻的原理电路如图 8-1 所示。图中的电源 E 为内附干电池。 μA 是磁电系微安表,一般称其为电阻表的表头, R_0 是表头支路电阻, R 是附加电阻。使用时把被测电阻 R_x 与电源和表头相串联,所以,把按这种原理接线的电阻表称为串联接线的电阻表。这是最常用的电阻表。另外还有一种并联接线的电阻表,所谓倒欧姆电阻表。我们将另作介绍。



由图 8-1 可以看出,如果适当选择电阻 R ,使 $R_x = 0$ 时表头有满刻度偏转,即有

$$I_{om} = \frac{E}{R + R_0} = \frac{E}{R_i} \quad (8-1)$$

图 8-1 电阻表原理电路

由此可得

$$R = \frac{E}{I_{om}} - R_0 = R_i - R_0 \quad (8-2)$$

式中 E —电源(干电池)电动势, V;

I_{om} —表头满刻度电流, A;

R_i —电阻表内阻, $R_i = R_0 + R, \Omega$;

R_0 —表头支路电阻;包括内阻或调整电阻和补偿电阻,
 Ω 。

当接入被测电阻 R_x 后,电路的工作电流 I 为:

$$I = \frac{E}{R + R_0 + R_x} = \frac{E}{R_i + R_x} \quad (8-3)$$

理论上说,上式中的电动势 E 和电阻表内阻 R_i 都是定值,所以,流过表头的电流的大小只与被测电阻 R_x 的大小有关。也就是说,流过表头电流的大小是与被测电阻 R_x 的大小一一对应的。例如:

当被测电阻 $R_x = 0$ 时,(即短路图 8-1 的 a、b 端时),电流等于满刻度电流 I_{om} ,表头指示满刻度,但标为 0Ω 。

当被测电阻 R_x 趋于无穷大时(即 a、b 端开路时),通过表头的电流为零,表头无指示,但标为 $\infty \Omega$ 。

当被测电阻 R_x 等于电阻表的内阻 $R_i (= R + R_0)$ 时,流过表头的电流为:

$$I = \frac{E}{2(R + R_0)} = \frac{E}{2R_i} = \frac{I_{om}}{2}$$

即等于满刻度电流的 $1/2$,表头指针指在中间刻度线,标以其数值等于电阻表内阻的值。

由上述讨论可知,如图 8-1 所示的电路就是一个下限为零欧,上限为无穷大欧姆的简单电阻表。它的零欧姆刻度点对应表头的满刻度电流; $\infty \Omega$ 刻度点对应表头指示器的零位。以这种原理制成的电阻表称为串联式电阻表。常见的电阻表基本上都是基于这种原理制成的。

(二)中值电阻和标度尺特性

1. 中值电阻

中值电阻又称电阻中心值,它是电阻表的一个重要技术数

据。什么是中值电阻呢？前面我们已经作过介绍：当被测电阻 R_x 等于电阻表的内阻时，表头的指示器指示在中间刻度线，我们称这时的电阻为中值电阻，也可以说中值电阻等于正常工作电压下电阻表的内阻。严格说，这个内阻还应包含供电电源（干电池）的内阻 R_E ，即中值电阻 R_T 等于：

$$R_T = R_i = R + R_0 + R_E \quad (8-4)$$

式中 R_E —电源内阻， Ω 。

设计电阻表时，电阻表中值电阻的大小取决于供电电动势和电阻表电路的电流灵敏度，并应满足下式：

$$R_T \leq \frac{E_{\min}}{I_{\min}} \quad (8-5)$$

式中 $E_{\min}$ —干电池的最低工作电压，若为一节电池，一般选 1.2 伏或 1.25 伏；

$I_{\min}$ —当 $R_x = 0$ 时，为使表头得到满刻度偏转，必须由电池供给的最低工作电流，A。

例如，当采用一节干电池时，若想使表头达到满刻度偏转，设为 $50\mu\text{A}$ 时，中值电阻可选为：

$$R_T = \frac{1.2\text{V}}{50 \times 10^{-6}\text{A}} = 24\text{k}\Omega$$

当最小电流设计为 $150\mu\text{A}$ 时，中值电阻可选为

$$R_T = \frac{1.2\text{V}}{150 \times 10^{-6}\text{A}} = 8\text{k}\Omega$$

当然，中值电阻还可以选得比这些值低，但不能高，否则，电池电压降低以后，表头电流将不能调到满刻度（ 0Ω ）。把中值电阻尽量选大的好处是可以充分利用表头灵敏度，把电阻测量上限尽可能扩展。测量下限则可以通过加分流器的方法加以扩展。

电阻表电阻电路的电流，可以选得与直流电流档的电流量

限相一致,也可以不一致。

对于已经制成的电阻表,标度尺半刻度点的电阻值就是该档的中值电阻,这个中值电阻也就是电阻表的内阻。例如,某万用电表电阻标度尺的半刻度点是 25Ω ,则该电阻表的“ $\times 1$ ”档中值电阻是 25Ω ;“ $\times 100$ ”档的中值电阻就是 2500Ω 。当电池电压有变化时,经过调零,仪表内阻将有所变化,内阻将不再等于定度时的中值电阻,从而产生测量误差。

2. 电阻表的标度尺特性

电阻表的表头采用的是磁电系毫安表(或微安表),用它测量电流时,标度尺的刻度是均匀的。因此,我们只要研究被测电阻和电流的关系就可以了解电阻表的标度尺特性。

当被测电阻为 R_x 时,电阻表电路工作电流为

$$I = \frac{E}{R_i + R_x}$$

最大值为
$$I_{om} = \frac{E}{R_i}$$

取二者之比可得,
$$\frac{I}{I_{om}} = \frac{R_i}{R_i + R_x}$$

因为电阻表电路电流 I 与满刻电流 I_{om} 之比等于表头指针转偏格数 α 与满刻度格数 α_m 之比,所以,上式可改写为:

$$\alpha = \frac{R_i}{R_i + R_x} \alpha_m \quad (8-6)$$

这就是直流表头的电流分格数 α 与被测电阻 R_x 间的关系式。由上式可知:

当 $R_x = 0$ 时, $\alpha = \alpha_m$, 表头指针为满刻度偏转;

当 $R_x = R_i$ 时, $\alpha = \alpha_m/2$, 表头指针为半刻度偏转;

当 $R_x \rightarrow \infty$ 时, $\alpha = 0$, 指针处于机械零位。

为了研究表头标度尺用电阻定度时的标度尺特性,我们将

上述关系改写为:

$$C_a = \frac{\alpha}{\alpha_m} = \frac{R_i}{R_i + R_x} = \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R_i}} = \frac{1}{1 + K} \quad (8-7)$$

$K = R_x/R_i$, 即被测电阻与电阻表内阻(中值电阻)之比。

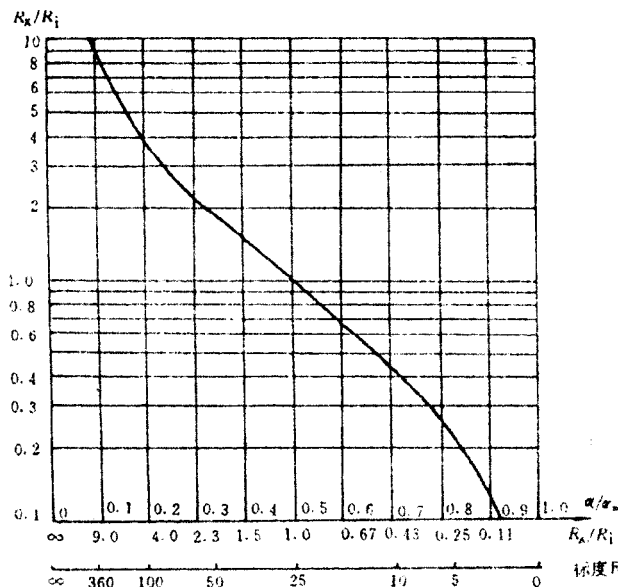


图 8-2 电阻表标度特性曲线

R_i 也是常量, 所以, 这个曲线也代表被测电阻 R_x 与表头指针偏转格数 α 之间的关系曲线。横轴线的上侧是以 α/α_m 表示的标度尺特性, 它是线性的; 下侧则是以 R_x/R_i 值表示的标度尺特性,

可以看出, 这是一个反比例函数, 它的图象是双曲线, 图 8-2 就是用比值 α/α_m 为横轴, 以 R_x/R_i 为纵轴的图象。因为对于已经制成的电阻表来说, α_m 是个常量,

它是非线性的。在表 8—1 中给出了 R_x/R_i 和 α/α_m 之间对应的数值关系。这个表中的数值是和图 8—2 的曲线相对应的。

因为图 8—2 中曲线的坐标都是用相对值表示的,对于具有不同中值电阻的电阻表都是适用的,因此,这个曲线被称为电阻表的万用特性曲线。在图 8—2 下方标度尺就是根据这个曲线画出来的,它的中值电阻是 25Ω 。

表 8—1

电阻表转角与被测电阻关系

R_x/R_i	α/α_m	R_x/R_i	α/α_m
0.00	1.000	1.20	0.455
0.0200	0.980	1.40	0.417
0.0500	0.952	1.50	0.400
0.1000	0.909	1.60	0.385
0.1111	0.900	1.80	0.357
0.200	0.833	2.00	0.333
0.250	0.800	2.33	0.300
0.300	0.769	3.00	0.250
0.400	0.714	4.00	0.200
0.428	0.700	5.00	0.167
0.500	0.666	6.00	0.143
0.600	0.625	7.00	0.125
0.666	0.600	8.00	0.111
0.700	0.588	9.00	0.100
0.800	0.556	10.00	0.091
0.900	0.526	20.00	0.048
1.000	0.500	∞	0.000

(三)电阻表的基本误差

由式(8—3)可知,当被测电阻的变化为 ΔR_x 时,电阻表工作电流的变化是 ΔI