

电
磁
测
量
上
册

高等学校试用教材

电 磁 测 量

上 册

哈尔滨电工学院袁禄明 主编

机 械 工 业 出 版 社

机
械
TM93

高等学校试用教材

电 磁 测 量

上 册

哈尔滨电工学院袁禄明 主编



机 械 工 业 出 版 社

2572/36

电磁测量 (上册)

哈尔滨电工学院袁禄明 主编

*

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)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 19 · 字数 463 千字

1980 年 9 月北京第一版·1983 年 3 月北京第三次印刷

印数 18,601-24,600 · 定价 1.95 元

*

统一书号: 15033 · 4871

前 言

本书是根据一机部 1978 年在天津召开的高等学校对口专业座谈会的精神和同年在哈尔滨召开的《电磁测量技术及仪表》专业教材大纲审定会拟定的《电磁测量》课程大纲编写的。

本书共十二章分为上下两册，前六章为上册，后六章为下册。上册主要讨论了直流和交流测量的基本方法以及常用仪表和仪器的结构、原理和特性。下册除了讲述示波和记录、数字表、磁和非电量等专门测量知识外，还介绍了电测装置的屏蔽和防护以及误差理论等的基本知识。

本书可以作为高等院校《电磁测量技术及仪表》专业的试用教材，也可以作为从事电磁测量技术及仪表制造、使用和研究工作的技术人员的参考书。

本书初稿经主审单位湖南大学李殿云和李树丞同志审阅。清华大学唐统一教授以及哈尔滨电工仪表研究所和上海电表厂的戚兆年和余鹤栋工程师对初稿有关章节提出了宝贵意见。

本书由哈尔滨电工学院袁禄明同志主编。参加编写的有：湖南大学李殿云和李树丞（第五、六章）、哈尔滨工业大学赵新民（第八、九、十一章）、上海工业大学许继衡（第十章）以及哈尔滨电工学院董怀武（第十二章）、王木兰（第七章）和袁禄明（第一、二、三、四章）等同志。

由于编者水平不高、缺少经验、编写时间短促，书中一定会有不少错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

1979年12月12日

目 录

第一章 测量和指示仪表的一般知识	1
§ 1-1 测量的概念	1
§ 1-2 测量方法的分类	2
§ 1-3 电学量具	4
§ 1-4 电测量指示仪表概论	15
第二章 直流指示测量法	39
§ 2-1 磁电系测量机构	39
§ 2-2 磁电系电流表	44
§ 2-3 磁电系电压表	47
§ 2-4 磁电系电流表和电压表的误差与特性	48
§ 2-5 欧姆表(电阻表)	52
§ 2-6 万用表	56
§ 2-7 检流计的用途及结构特点	59
§ 2-8 检流计的理论 and 特性	61
§ 2-9 冲击检流计	66
§ 2-10 光电放大式检流计	69
§ 2-11 测量电流和电压时的方法误差	75
§ 2-12 用间接法测量电阻和功率	77
第三章 直流比较测量法	81
§ 3-1 概述	81
§ 3-2 直流电位差计的工作原理及分类	81
§ 3-3 直流电位差计的误差	88
§ 3-4 直流电位差计的灵敏度和检流计的选择	91
§ 3-5 直流电位差计的补偿线路	95
§ 3-6 直流电位差计的线路举例	105
§ 3-7 直流电位差计的应用举例	111
§ 3-8 单电桥	114
§ 3-9 双电桥	118
§ 3-10 直流电桥基本线路简介	123
第四章 交流指示测量法	126
§ 4-1 电磁系仪表	126
§ 4-2 电动系仪表	134
§ 4-3 静电系仪表	150
§ 4-4 感应系电度表	156
§ 4-5 具有半导体变换器的磁电系仪表	170
§ 4-6 测量用互感器	174
§ 4-7 用交流指示仪表测量电阻、电感和电容	187

§ 4-8 用功率表测量单相交流电路中的功率	189
§ 4-9 在三相电路中测量功率和电能	191
第五章 交流比较测量法	201
§ 5-1 概述	201
§ 5-2 交流电路中的实际元件及标准量具	202
§ 5-3 交流电位差计的原理及其应用	207
§ 5-4 交直流热电比较仪的工作原理	214
§ 5-5 热电比较仪的交直流转换误差	217
§ 5-6 交流电桥	220
§ 5-7 比例变压器(感应分压器)	236
§ 5-8 测量三端阻抗和两端阻抗的变压器电桥	249
§ 5-9 测量四端阻抗的变压器电桥	260
§ 5-10 交流电流比较仪及电流比较仪电桥	265
附录: 一 双边变压器比例臂电桥	273
二 运算放大器在交流电桥中的应用	274
第六章 磁调制型直流电流比较仪	276
§ 6-1 概述	276
§ 6-2 倍频磁调制器的原理	277
§ 6-3 倍频磁调制器的灵敏度、噪声及误差	280
§ 6-4 自平衡直流电流比较仪	285
§ 6-5 直流电流比较仪式电位差计	287
§ 6-6 直流电流比较仪式电桥	293

第一章 测量和指示仪表的一般知识

§ 1-1 测量的概念

在自然界中,对任何不同的研究对象,如要从数量方面对它进行评价,都是通过测量代表其特性的物理量来实现的。为了达到使认识过程深刻到定量的程度,人们制定出了各种量的单位。

所谓测量,就是通过物理实验的方法,把被测的量与其同种类的,习惯上作为单位的量进行比较的过程。比较的结果可以用两部分来表示:一部分是单位的名称,另一部分是数字值。

如测量结果的数字值为 A_x , 则它等于被测的量 x 与测量单位 x_0 的比, 即

$$A_x = x/x_0$$

因此

$$x = A_x x_0 \quad (1-1)$$

上式可以这样来理解: 被测量 x 是 A_x 个单位量 x_0 。

式 (1-1) 称为测量的基本方程式。它描述了被测量与它的单位量相互比较的情况。由于 x_0 是预先选定的与被测量同一类的某一物理量, 因而 A_x 为纯粹的数字值。

被测量的数字值视所选定的测量单位的大小而定。选定的单位不同, 对同一被测量将得到不同的数字值。例如, 在测量被测量 x 时, 我们先用测量单位 x_{01} , 而后用测量单位 x_{02} , 根据测量基本方程, 可得

$$x = A_{x1} \cdot x_{01}$$

和

$$x = A_{x2} \cdot x_{02}$$

由此得

$$A_{x1} \cdot x_{01} = A_{x2} \cdot x_{02}$$

或

$$A_{x2}/A_{x1} = x_{01}/x_{02} \quad (1-2)$$

式中 A_{x1} 和 A_{x2} 分别为第一次和第二次测量结果的数字值。

式 (1-2) 指出, 被测量的数字值和选定单位的大小成反比。选定的单位大, 测量所得的数字值就小, 反之亦然。

某一单位的大小和新单位大小的比值为 K 称作换算因数, 即

$$K = x_{01}/x_{02} \quad (1-3)$$

考虑到这一关系, 式 (1-2) 具有如下的形式

$$A_{x2}/A_{x1} = K$$

或

$$A_{x2} = K A_{x1} \quad (1-4)$$

由此可见, 换算因数是这样一个数, 即用一定的单位测量某一量所得的数字值, 必须乘上这个数, 才能得出用新单位表示的该量的数字值。

由于科学和技术的不断发展, 引起了测量许多层出不穷的量的必要性。因而也迫使人们去设法制定与这些量对应的测量单位。

测量单位的确定和统一,是非常重要的。为了对同样的一个量在不同时间,不同地点进行测量时得到相同的结果,必须采用公认的而且固定不变的单位。只有这样的测量,才有实际意义。为此,每个国家的计量机关都以专门的“法律”来规定这样的单位。在国际范围内,单位的通用是通过协商来加以调整的。

单位制的建立,就是为解决这一矛盾服务的。我们把某些物理量的单位称作基本单位,他们是彼此无关地被确定的。而其它物理量的单位,则以被测的量与其它量(其单位是基本单位或是用基本单位表示的单位)有相互关系的数学公式为基础,通过上述独立的基本单位来表示。这种单位称作导出单位。

单位制的种类很多。根据国务院颁发的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》第三条规定:“我国的基本计量制度是米制(即“公制”),逐步采用国际单位制”。因此,我们今后应该尽快地推广和采用国际单位制(国际代号为SI)。

在国际单位制中,包括了整个自然科学的全部物理量的单位。根据1971年14届国际权度大会的规定,它有七个基本单位,即

- ① 长度单位——米(m);
- ② 质量单位——千克(公斤,kg);
- ③ 时间单位——秒(s);
- ④ 电流单位——安培(A);
- ⑤ 热力学温度单位——开尔文(K);
- ⑥ 物质的量单位——摩尔(mol);
- ⑦ 光强度单位——坎德拉(cd)。

由上述七个基本单位,可以导出自然界中的所有物理量的单位。后者都是导出单位。

在电磁测量技术的领域中,为了导出各种电磁物理量的单位,只用上述七个基本单位中前四个(即米、千克、秒和安培)就可以了。以此制定出的单位,就叫做国际单位制(SI)的电磁学单位。

因为物理量的测量过程是一个实验过程,所以仅仅有了测量单位还不能实现测量这一任务。为此,还必须要有根据测量单位复制出来的实物(叫做量具或度量器)以及用来比较被测量与量具的设备。例如采用天平测量质量时,砝码是质量的量具,而天平这台仪器就是用来比较被测质量与砝码之间关系的设备。

用来实现测量过程的技术工具中,包括量具、测量仪器以及其它技术工具。它们的总和称作测量设备。

在进行测量之前,首先应当研究被测量本身的特性以及对它所提出的要求。在这个基础上,再综合考虑采用什么测量方法和选取哪些测量设备。

§ 1-2 测量方法的分类

一个物理量的测量,可以用不同方法来实现。在每一指定的情况下,这些方法的选择就与被测量的特性、测量条件以及对准确度所提出的要求有关。测量方法可以根据各种不同的特征来分类。

由于具体条件的限制,在实现测量的过程中,有的被测量就是测量对象本身,而有的就

不是。根据获得被测量结果的方法的不同，可将测量分为三类。

1. 直接测量

在直接测量时，测量结果是从一次测量的实验数据中得到的。在这种测量中，可以使用量具直接与被测量比较而得出被测数值的大小；也可以使用按相应单位刻度的仪表量出。属于直接测量的有：用尺测量长度；用安培表测量电流；用温度计测量温度等等。

2. 间接测量

在间接测量时，测量结果是通过直接测量几个与被测量有一定函数关系的量而得到的。例如，当测量导体的电阻系数 ρ 时，由于已知导体的电阻 R 和它的长度 l 及截面 s 之间有以下关系

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}$$

所以可通过直接测出电阻 R 、长度 l 及截面 s 之后，根据公式计算出电阻系数。当被测量不能直接测量或直接测量很复杂时，或者间接测出的结果比直接测出的更为准确时，可采用间接测量。

3. 组合测量

这种测量是在直接测量具有一定函数关系的某些量的基础上，通过联立求解各函数关系式来确定被测量的大小。测量标准电阻的电阻温度系数 α 和 β ，可作为组合测量的例子。众所周知，标准电阻的电阻值与温度之间具有下述关系

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2]$$

因此，可在 20°C 、 t_1 及 t_2 三个温度下，分别测出三个电阻值 R_{20} 、 R_{t1} 和 R_{t2} ，再用下列方程式组来确定其电阻系数 α 与 β

$$R_{t1} = R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]$$

$$R_{t2} = R_{20} [1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]$$

所列方程式的数目至少应等于被测量的数目。

就测量过程本身来说，有重要意义的是获得测量对象数值的方法，也就是给出测定值的方法。按这个观点，测量方法可以分为直读测量法和比较测量法两类。

1. 直读测量法

直读测量法的实质在于根据仪表(仪器)的读数来判断被测量的大小；而作为测量单位的复制实物的量具并不直接参与该次测量。为了读取被测量，这些测量仪表(仪器)已按被测量的单位预先刻好分度，因而实际上是与量具的间接比较。应用指针式仪表进行测量，例如用安培表测量电流，用具有刻度尺的弹簧秤测量重量等等，都是属于这类测量方法的。

由于利用这种方法进行测量时具有设备简单、实验方便等一系列优点，因而得到了广泛的应用。其缺点是测量准确度因受仪表准确度的限制而不高。

2. 比较测量法

在测量过程中，被测量需要与标准量具作比较的所有测量方法都属于比较测量法。也就是说，比较测量法的特点是在测量过程中要有量具直接参与。

比较测量法可以分为以下四种：

1) 差值法或微差法

在这种方法中，从测量仪表直接读出差值

$$x - A = a$$

或正比于此差值的量。其中 x 是被测量， A 是其值已准确知道的量，例如量具所给出的值。因此测出了 a 之后，被测量 x 即可算出。

这种方法的特点是差值 a 越小，测量结果的准确度越高。如果 a 为 $0.1x$ ，则测量 a 时的不准确程度是以十分之一反映在确定 x 的准确度上。因此，减小这个差值，也就提高了测量准确度。应当注意，已知量 A 的准确度必须与整个测量准确度相适应。

2) 零值法

这种方法的特点是将前面指出的差值 a 导向零。为此， A 必须是可变量。换言之，在这种情况下，与被测量进行比较的量具必须做成在测量过程中可以足够平稳地改变其值的，以便能够将差值 a 导向于零。因此，零值法的测量准确度，决定于 A 的准确度和用以确定差值 a 是否等于零的仪表的灵敏度。

3) 替代法

这种方法是：在测量过程中，以已知量 A 替代被测量 x ，同时通过 A 的改变而使仪表的指示值恢复到原来的状态。显然，在这种情况下 $x = A$ 。这是一种极其准确的测量方法。因为在将已知量替代被测量时，对于测量装置的作用及其状态均不引起任何变化。因此，由内部特性及各种外界因素（干扰）所引起的测量仪表示值的误差，将对测量结果不产生影响。

4) 重合法

这种方法的特点是将被测量的一系列均匀交替的记号或信号，与已知量的一系列均匀交替的记号或信号相比较，并观察其重合的情况，在此基础上求出被测量的值。重合法多用在非电测量，例如游标尺就是根据这一原理制造出来的。

从精确度的观点来说，测量方法可以分为精密测量（实验室测量）和工业测量。在从事精密测量时，必须考虑和研究测量误差。在进行工业测量时，不必研究测量误差。但是，它所采用的量具和仪表的定量误差，必须足够适应该项实际使用的需要。

此外，还有一些其它的分类方法，如自动测量与非自动测量，原位测量与远距离测量等等，这里就不一一讨论了。

§ 1-3 电 学 量 具

一、电学量具的基础知识

如前所述，在进行电工测量时，实际上就是将被测电学量直接或间接与作为测量单位的同类量进行比较，以确定被测电学量的大小。所谓量具（也叫做度量器），就是测量单位或测量单位的分数、整数倍的复制实体。

在电学计量中，根据量具在量值传递上的作用和不同的准确度，分为基准量具（基准器），标准量具（标准器）和工作量具三大类。

1) 基准器

用现代科学技术所能达到的最高准确度来复现和保存测量单位的量具叫做基准器。它由政府的法定机关保存并作为国家处理测量事务的法定基础和科学基础。这项任务在我国是由国家计量科学研究所来承担的。基准器分为主基准器、副基准器、比较基准器和工作基准器等等。

2) 标准器

标准器的准确度低于基准器，供计量中心对工作量具进行检定或标定时使用。按其用途又分为一等标准器和二等标准器。

3) 工作量具

工作量具供日常测量时使用。按其准确度（或年变化）分为若干级别，其级别通常标在铭牌上。在电学计量中经常使用的标准电池、标准电阻、标准电容和标准电感等都属于这一类。

对量具的共同要求是：

- 1) 复制性好 制造容易，能较方便地用量具形式准确地复现测量单位；
- 2) 稳定性好 能较长期地保持它所复制单位的量值不变，而且一切由外界条件或内部结构所引起的变化要很小，并能进行更正；
- 3) 可比性好 能方便地与其它标准量具进行比较，便于监视和标定其量值。

在电学计量中，主要的基准器有电压基准器、电阻基准器及计算电容基准器等，它们共同构成了电学计量的基础。

电压基准器是用经过严格考核挑选的稳定性和其它性能好的饱和标准电池组组成，并以它们成组的电动势的平均值来保存电压单位（伏特）的量值。

电阻基准器是用稳定性极好的 1 欧姆标准电阻组组成，并以它们成组的电阻值的平均值来保存电阻单位（欧姆）的量值。

计算电容基准器是按“汤姆森-蓝帕德定理”制造的交叉电容器。

如前所述，我国在电工测量方面采用的是国际单位制。它包含了四个基本单位： m （米）， kg （千克）， s （秒）和 A （安培）。其它电学单位均由基本单位导出，称为导出单位。由于安培、伏特、欧姆这三个电学单位是由欧姆定律联系起来的，因此，测定了安培及欧姆就能确定伏特。绝对测定安培是用安培天平或在磁场中测定水的质子回转磁比 γ_p 来确定的。绝对测定欧姆是用计算电容通过专用电桥来进行的。

有了安培及欧姆的测定后，就可以确定伏特。

根据国际单位制，以物理实验方法复现其单位量值，并用实物基准器来保存单位量值，这就是建立基准。通过基准器将单位量值传递到标准器，以作为电学量的测量基础。这种电学单位制的建立和相应的复现单位量值的方法，以及为保存电学单位量值而采用的手段，构成了电学计量标准体系，如图 1-1 所示。

当然，随着科学技术的进展，电学计量标准体系也会发生变化。例如，最近已趋向采用“约瑟夫森效应”来建立电压基准。这样，标准电池自然只能作为付基准器使用。

用物理常数来建立计量基准，使基准器由计量单位的实物复制体过渡到自然基准器，将是今

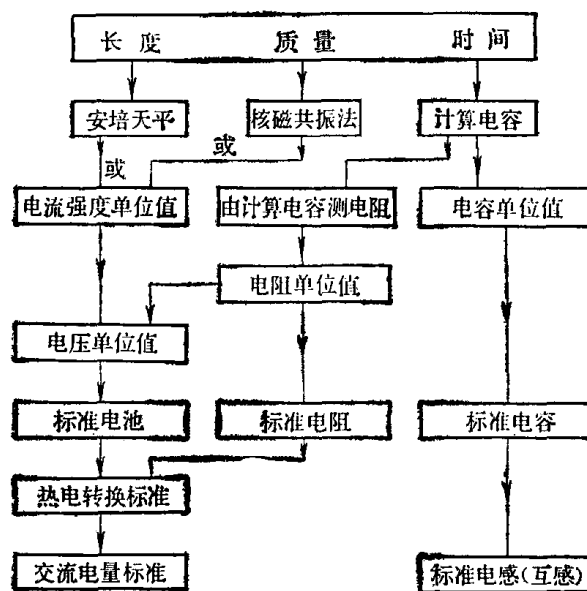


图1-1 电学计量标准体系

后发展的必然趋势。

由上述可知，电学计量中主要量具有电动势（电压）、电阻、电容、电感、互感等。在这一节中只介绍直流用的电学量具。

二、标准电池

标准电池就是复制“伏特”量值的标准量具。

由于我们没有恰好是1伏的电动势标准量具，因此，只能以电动势不等于1伏，但是其值是可以准确知道的原电池来代替。这种特制的原电池，就是目前在计量工作中以及在工业测量中常用的所谓标准电池。标准电池的各个组成部分，是采用化学性能稳定、成分纯净的材料，经过精确配方制成的。这里，材料的提纯是很关键的问题。

在正确制造和使用下，这种电池能够保证其电动势极度稳定；电动势与温度间的关系可以准确的掌握；不产生化学副反应；几乎没有极化作用；以及它的内阻在相当大的程度上不随时间而变。

按电解液的浓度，标准电池可分为饱和标准电池和不饱和标准电池两种。饱和标准电池也叫做国际标准电池。它在使用温度范围内，其电解液（硫酸镉溶液）呈饱和状态。不饱和标准电池在使用温度范围内，其电解液（硫酸镉溶液）呈未饱和状态。

图1-2是饱和标准电池的原理结构：图a是H型结构，图b是单管型结构。各种化学反应物质都放在严密封闭的玻璃管内。电池的正极是纯汞 Hg——1，负极是镉汞齐——2。负电极的上面放着硫酸镉结晶体（ $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ）——4；正电极的上面放着作为去极化剂的硫酸亚汞 Hg_2SO_4 ——3，再上面放着硫酸镉结晶体4。在结晶体的上面灌以硫酸镉的饱和溶液5作为电解液。正负电极的引出线6均用铂线制成。由于电池内有硫酸镉的晶体，所以在任何温度下，硫酸镉溶液总是饱和状态。

不饱和标准电池的结构与上述饱和标准电池的结构基本相同，其区别仅在于电池内没有硫酸镉晶体。

为了防止标准电池中的各种成分在震动时相互混合，在有的标准电池中采用了微孔材料制成的塞片作保护（图1-2中8）。

玻璃管通常装在盛有变压器油的外壳里。在这个外壳上装有端钮，标准电池的两根引出线就接在端钮上。

饱和标准电池的电阻较大，其值一般在500~1000欧的范围内。

由于电流的作用，不饱和标准电池的电解液浓度要起变化。因此，这种电池的稳定性要比饱和标准电池的低。不饱和标准电池的优点在于它的内阻较小（不大于500欧）和温度系数小。当温度在 $+10^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ 之间变化时，每变化 1°C ，不饱和标准电池电动势的变化不超过15微伏，因此，它在应用时一般都不作温度校正。而饱和标准电池的温度系数要比不饱和标准电池的大得多。

虽然饱和标准电池的电动势随温度的变化较大，但是只要我们知道它在 20°C 时的值，便

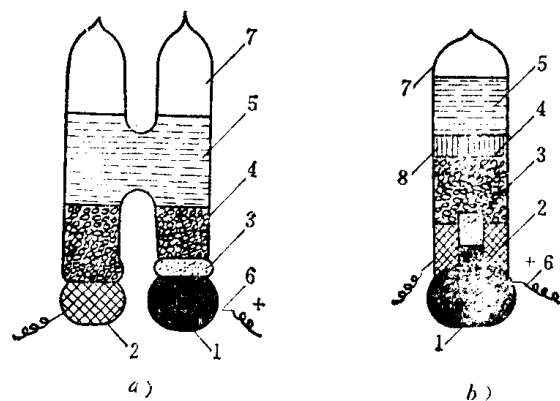


图1-2 饱和标准电池的原理结构

a) H型结构 b) 单管型结构 1—汞Hg(电池正极) 2—镉汞齐(电池负极) 3—硫酸亚汞 Hg_2SO_4 (去极化剂) 4—硫酸镉结晶体 ($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) 5—硫酸镉饱和溶液 (CdSO_4) 6—铂引线 7—玻璃容器 8—微孔塞片

可以借用公式精确地计算出它在某一温度下的电势值。过去国内外习惯上都采用下列“国际公式”来计算

$$E_t = E_{20} - 40.6 \times 10^{-6} (t - 20) - 0.95 \times 10^{-6} (t - 20)^2 + 0.01 \times 10^{-6} (t - 20)^3 \text{ V} \quad (1-5)$$

式中 E_t ——当温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的电动势；

E_{20} ——当温度为 20°C 时的电动势。

这个公式经我国长期使用和多次温度系数实验证明，已不适合高准确度标准电池的情况和精密电学计量的要求。1974年，我国有关单位又进行了精确测定温度系数的实验，于1975年提出了饱和标准电池在 $0 \sim +40^\circ\text{C}$ 时的“电动势-温度”公式

$$E_t = E_{20} - 39.94 \times 10^{-6} (t - 20) - 0.929 \times 10^{-6} (t - 20)^2 + 0.0090 \times 10^{-6} (t - 20)^3 - 0.00006 \times 10^{-6} (t - 20)^4 \text{ V} \quad (1-6)$$

为了使用方便，也提出了 $+5 \sim +35^\circ\text{C}$ 三次方的温度公式：

$$E_t = E_{20} - 39.9 \times 10^{-6} (t - 20) - 0.94 \times 10^{-6} (t - 20)^2 + 0.009 \times 10^{-6} (t - 20)^3 \text{ V} \quad (1-7)$$

显然，离开 $+20^\circ\text{C}$ 使用或检定饱和标准电池时，需对电动势值进行温度校正。为了查用方便，将饱和标准电池电动势与温度关系的更正值 ΔE_t 列于表 1-1 中。

为了加深对标准电池温度特性的了解，在图 1-3 中示出了标准电池电动势的温度更正值 ΔE_t 与温度的关系曲线。

各级标准电池电动势的实际值、电动势的容许变化和最大的容许电流等技术特性应符合表 1-2 中的规定。

为了避免温度对高稳定度标准电池电动势的影响，有时制成带控温箱的标准电池组。BC-23 型控温标准电池组就是一例。它是由四只 BC-11 型 0.0005 级饱和标准电池置于恒温箱内组成。

上面介绍的饱和标准电池的电动势的稳定性虽然很高，但是温度系数却较大，在 $+20^\circ\text{C}$ 时约为 -40 微伏；而不饱和标准电池的温度系数虽然很小，但电动势却不够稳定。镉铅标准电池就避免了上述缺点。它是一种温度系数既小而电动势的稳定性又高的低温度系数标准电池。它的负电极由 5% 的铅、10% 的镉和 85% 的汞制成，其余部分都和饱和标准电池相同。这种电池的年稳定性近似于饱和标准电池的，但温度系数仅为后者的 40% 左右，所以在使用时就可以相应地降低控温的要求。

镉铅标准电池存在的问题是：在 20°C 下的电动势值为 1.0196 伏。这个电动势不易和现有的电位差计配用。如要采用，尚需对目前生产和使用的电位差计调定电阻的范围进行改进。这种标准电池如果用在精密电子仪器 and 数字仪表中作为电压基准，将会有较突出的优点。

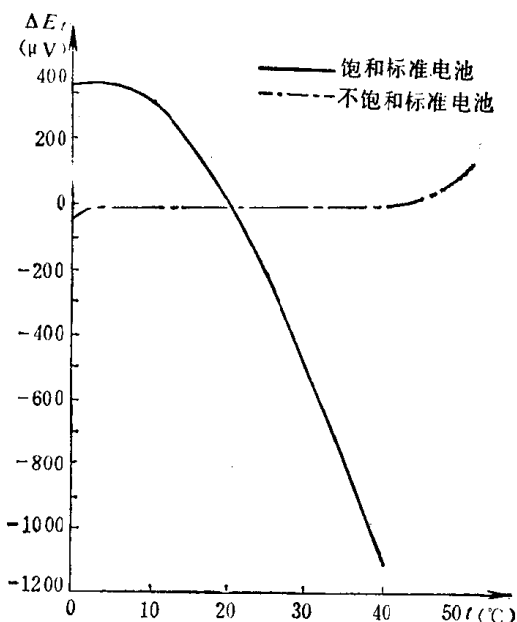


图1-3 标准电池电动势的温度更正值与温度的关系曲线

表1-1 饱和标准电池电动势的温度更正值 ΔE_t

$t/^{\circ}\text{C}$	$\Delta E_t(\mu\text{V})$	$t/^{\circ}\text{C}$	$\Delta E_t(\mu\text{V})$	$t/^{\circ}\text{C}$	$\Delta E_t(\mu\text{V})$	$t/^{\circ}\text{C}$	$\Delta E_t(\mu\text{V})$
0	+345.60	21	-40.86	18.0	+76.09	20.1	-4.00
1	+353.94	22	-83.53	18.1	+72.47	20.2	-8.02
2	+359.13	23	-127.94	18.2	+68.83	20.3	-12.06
3	+361.27	24	-174.06	18.3	+65.17	20.4	-16.12
4	+360.43	25	-221.84	18.4	+61.49	20.5	-20.20
5	+356.66	26	-271.22	18.5	+57.79	20.6	-24.30
6	+350.08	27	-322.15	18.6	+54.07	20.7	-28.41
7	+340.74	28	-374.62	18.7	+50.33	20.8	-32.54
8	+328.71	29	-428.54	18.8	+46.57	20.9	-36.69
9	+314.07	30	-483.90	18.9	+42.80	21.0	-40.86
10	+296.90	31	-540.65	19.0	+39.00	21.1	-45.05
11	+277.26	32	-598.75	19.1	+35.19	21.2	-49.25
12	+255.21	33	-658.16	19.2	+31.35	21.3	-53.47
13	+230.83	34	-718.84	19.3	+27.50	21.4	-57.71
14	+204.18	35	-780.78	19.4	+23.63	21.5	-61.97
15	+175.32	36	-843.93	19.5	+19.74	21.6	-66.24
16	+144.30	37	-908.25	19.6	+15.83	21.7	-70.54
17	+111.22	38	-973.73	19.7	+11.90	21.8	-74.85
18	+76.09	39	-1040.32	19.8	+7.95	21.9	-79.18
19	+39.00	40	-1108.00	19.9	+3.98	22.0	-83.53
20	0			20.0	0		

注: $\Delta E_t = -39.94(t-20) - 0.929(t-20)^2 + 0.0090(t-20)^3 - 0.00006(t-20)^4 \mu\text{V}$ 。

表 1-2

类型	稳 定 度 级 别	在温度+20°C时电动势的实际值(V)		在一分钟内最大允许流过的电流(μA)	在一年中电动势的允许变化(μV)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)		内阻值(Ω) 不 大 于		相对湿度 %	备 注
		从	到			保证准确 度	可 使 用 于	新 的	使用中的		
饱 和	0.0002	1.0185900	1.0186800	0.1	2	19~21	15~25	700		≤ 80	
	0.0005	1.0185900	1.0186800	0.1	5	18~22	10~30	700		≤ 80	
	0.001	1.018590	1.018680	0.1	10	15~25	5~35	700	1500	≤ 80	
	0.005	1.01855	1.01868	1	50	10~30	0~40	700	2000	≤ 80	
	0.01	1.01855	1.01868	1	100	5~40	0~40	700	3000	≤ 80	
不 饱 和	0.005	1.01880	1.01930	1	50	15~25	10~30	500		≤ 80	
	0.01	1.01880	1.01930	1	100	10~30	5~40	500	3000	≤ 80	
	0.02	1.0186	1.0196	10	200	5~40	0~50	500	3000	≤ 80	

其他: a) 电池的电路对其外壳的绝缘电阻, 在正常条件下(使用温度范围内, 相对湿度 $\leq 80\%$), 对于0.005~0.02级的电池不小于1000兆欧, 对于0.0002~0.001级的电池不小于10000兆欧。

b) 出厂的小型电池(重量 < 60 克), 其内阻 ≤ 1500 欧。

c) 在检定时, 3~5天内电动势值允许变化, 一般要求不大于1/3年变化值。

在保存和使用标准电池时, 应该注意如下几点:

1) 使用和存放地点的温度与湿度, 应根据标准电池的级别, 符合表 1-2 中所规定的范围, 同时必须使正负两极处在同一温度下使用。

2) 温度的波动应该尽量小。周围空气温度变化太剧烈, 会造成标准电池内部的化学反

应加剧，致使电动势不稳定，长期下去可能引起电池损坏。温度的骤然变化，也常造成电动势变化滞后于温度变化，使得在使用时的电动势更正不正确。

3) 标准电池应该远离热源、冷源和免受阳光的直接照射。因为标准电池内正电极支路的去极化剂在光线作用下易于变质，以致丧失作用，最后导致标准电池极化作用加剧而损坏。

4) 标准电池不得过载。通过或取自各级标准电池的电流不得超过表 1-2 中的规定值。应该指出，电池的两极间必须有良好的绝缘电阻；不能让人体的任何部分使标准电池的两个端钮短接。绝对禁止用电压表或万用表去测量标准电池的电压。凡是误用电压表或万用表测量过电压或曾消耗较大电流的标准电池，一律不能再用。只有经过长时间多次考核，证明该电池的电动势仍然稳定，各项参数仍然符合要求后，方可决定能否继续使用，否则将会造成计量的错误。

5) 标准电池严禁倒置，摇晃和震动；必须按规定的正常位置放置，平稳携取。经过运输之后，必须静置足够的时间（一般为 1~3 天，视电池等级和运输情况而定）以后再用。被颠倒过的电池，绝对不能再用。如果经过长时期反复考核，证明它确实并未损坏时，也应将它用在不十分重要的地方，以防万一。

6) 标准电池的极性绝对不能接反。

7) 标准电池出厂时的检定证书及历年的检定数据，是衡量该标准电池质量好坏的依据，使用者必须注意保存。

三、标准电阻

标准电阻是电阻单位(欧姆)的量具。它是一个为了确保欧姆量值可以正确统一传递的特制电阻。对标准电阻的要求是：电阻值随时间变化极其微小；结构简单、便于使用；热电效应、电感和电容极其微小。

根据这些条件，在目前，锰铜是制造标准电阻最合适的材料。锰铜是由铜(≈84%)、锰(≈12%)和镍(≈4%)组成的合金。它具有很高的电阻率(约为 $0.45 \sim 0.48 \text{ 欧} \cdot \text{毫米}^2 / \text{米}$)，因而可以制成很紧凑的电阻；其次，它的电阻温度系数很小(约为 $0.00001 / ^\circ\text{C}$)；最后，它与铜成偶时的热电势很小(约为 $1.5 \text{ 微伏} / ^\circ\text{C}$)。通过适当的工艺处理和用特殊的方法绕制，可以得到稳定性很高的我们所需要的标准电阻。

在图 1-4 a 中示出了标准电阻的结构。在骨架 1 的绝缘层上绕着锰铜电阻线 2，其线端 7 引向端钮 5 和 6。端钮 5-5 和端钮 6-6 被固定在绝缘盖 3 上；在内部，它们的对应端分别作电气联接，构成了所谓四端钮电阻，如图 1-4 b 所示。

四端钮中的一对 6-6 叫做电流端钮，通常做得粗大些，利用它们可以把标准电阻接入电路；另一对 5-5 叫做电位端钮，通常做得细小些，用这对端钮可以把标准电阻与测量仪器联接在一起。参看图 1-4 中的 a 和 b，标准电阻上标明的电阻值，是 8-8 间的电阻值。

电阻值高于 10^6 欧 的标准电阻，有的制成三端钮电阻，如图 1-4 c 所示，其中一个端钮是屏蔽。

在图 1-4 a 中，骨架 1 与外壳焊在一起，电阻线是处在骨架与外壳之间的密封空腔内，这种密封性预防了电阻受潮，从而保证了标准电阻的长期稳定性。

当温度改变时，标准电阻的电阻值将随之改变。在标准电阻铭牌上给出的一般是 $+20^\circ\text{C}$

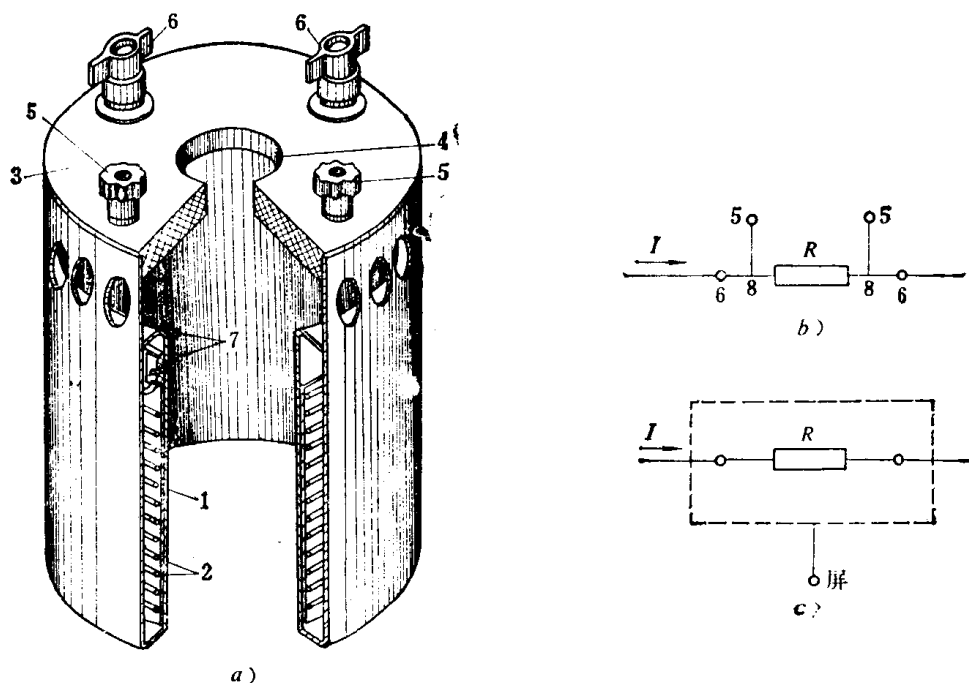


图1-4 标准电阻

a) 结构 b) 四端钮电阻电路的示意 c) 三端钮电阻电路的示意

时的名义值。若在其它规定温度范围内使用时, 某一温度 $t^{\circ}\text{C}$ 下的电阻值, 可以采用下式进行计算:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha (t - 20) + \beta (t - 20)^2] \quad (1-8)$$

式中 R_t ——温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值;

R_{20} ——温度为 $+20^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值;

α 和 β ——该标准电阻的一次和二次项温度系数, 可以采用实验方法确定。

标准电阻在出厂时, 或在每次定期检定后, 一般都给出 R_{20} 、 α 和 β 的数值。

为了测量标准电阻的温度, 在绝缘盖 3 上(参看图 1-4 a) 开了一个小孔 4, 以便插入温度计。

任何一个电阻, 在电路中不但要表现出电阻的作用, 而且还要显示出少许的电感或电容(即所谓残余电感或电容)的影响。标准电阻即使在直流电路中工作, 也要求它们的残余电感小一些好。因为当直流电流变化时, 由于电感的影响, 将使测量发生困难, 甚至会降低测量的准确度。为了减小标准电阻的残余电感, 标准电阻通常都采用双股绕法, 即用两根电阻线绕制。在两根电阻线中流过的电流的方向是相反的。不是特别指明的标准电阻, 都是为了在直流电路中使用而设计的, 其额定电阻值和所标明的误差, 也只适用于直流测量。在交流电路中进行测量时, 可以采用交流标准电阻。它的电阻线圈采用了更为复杂的绕制方法, 以减小残余电感或残余电容的影响(参看第五章)。

标准电阻的名义值(或额定值)一般等于 10^n 欧。其中 n 通常是 -3 到 $+5$ 之间的整数, 有的可以达到 -4 到 $+8$ 。电阻的名义值注明在外壳的铭牌上。

标准电阻的主要技术特性可用表格的形式列出如下:

- 1) 标准电阻的额定功率和最大功率(或额定电压和最大电压), 参看表1-3。
- 2) 标准电阻的保证准确度环境条件和使用环境条件, 参看表1-4。

表 1-3

准确度 级 别	电阻名义值	功率(W)		电压(V)		用 途	参考型号(备注)	
	Ω	额定值	最大值	额定值	最大值			
一 等	$10^{-3} \sim 10^5$	0.03				用于省市及大型企业和科研部 门作电阻量值的传递标准	应从高稳定的标准电阻中反复 考核筛选, 经计量主管部门检定后 方能定等	
二 等	$10^{-3} \sim 10^5$	0.1						
0.005	$10^{-3} \sim 10^5$	0.1	0.3			用于计量部门作电阻标准	BZ15	
0.01	10^{-4}	0.1				用作低阻值标准	BZ14	
	$10^{-3} \sim 10^5$	0.1	1			用于直流电路中作电阻标准	ZB3、BZ10	
	$10^{-1} \sim 10^{-3}$	1	3			用作大功率电阻标准	BZ6	
	$10^6 \sim 10^7$			100	300	用作高阻值标准	BZ9 BZ16($10^8 \Omega$)	
0.02	$10^{-4} \sim 10^5$	0.1	1			用于一般测量用标准	BZ3/1 BZ10/1	
	10^6			100	300	用于高阻测量用标准	BZ16	
	10^7			300	500	用于高阻测量用标准	BZ16	
0.05	10^{-4}		10			用作大功率低阻测量标准		
	$10^6 \sim 10^8$			300	500	用于高阻测量用标准	BZ16($10^8 \Omega$)	
过 渡 标 准 电 阻	0.01	11×100	额定电 流 值 (mA)	500~200		作过渡标准电阻用	BZ11	它属于标准电阻的过 渡量具与标准电阻有区 别, 此处编入是为了选 用方便, 在计量概念上 不要混淆
		11×1000		70~25				
		11×10000		9~3				
	0.02	11×0.1	额定电 流 值 (mA)	500~200		作过渡标准电阻用	BZ5	
		11×1		70~25				
		11×10		9~3				

表 1-4

准 确 度 级 别	电阻名义值 (Ω)	保证准确度环境条件		使用 环 境 条 件	
		温 度 $^{\circ}\text{C}$	相对湿度%	温 度 $^{\circ}\text{C}$	相对湿度%
一 等	$10^{-3} \sim 10^5$	20 ± 0.1	< 80	20 ± 1	< 80
二 等	$10^{-3} \sim 10^5$	20 ± 0.1	< 80	20 ± 2	< 80
0.005	$\leq 10^5$	20 ± 1	< 80	20 ± 5	< 80
0.01	$\leq 10^5$	20 ± 2	< 80	20 ± 10	< 80
0.01	$\geq 10^6$	20 ± 2	< 70	20 ± 10	< 70
0.02	$\leq 10^5$	20 ± 3	< 80	20 ± 15	< 80
0.02	$\geq 10^6$	20 ± 3	< 70	20 ± 15	< 70
0.05	10^{-4}	20 ± 3	< 80	20 ± 15	< 80
0.05	$\geq 10^6$	20 ± 3	< 70	20 ± 15	< 70

3) 标准电阻的负载从额定功率改变到最大功率时, 在稳定的热状态下, 电阻实际值的允许变化, 参看表1-5。

表 1-5

准 确 度 级 别	电阻实际值允许变化(%)	试 验 误 差 (%)
0.005	± 0.0025	0.0005
0.01	± 0.01	0.002
0.02	± 0.02	0.004
0.05	± 0.05	0.01