

高等学校试用教材

精密电测量

上海工业大学 高光润 主编

GAODENG XUE
XIAOJIAOCAI

机械工业出版社

前 言

本书是根据1983年在哈尔滨召开的原电磁测量技术及仪表专业教材编审小组第二次会议审定的《精密电测量》教学大纲及1984年在沈阳召开的电磁测量技术及仪表专业教材编审小组第四次会议通过的《精密电测量》教材编写大纲并考虑计量技术的现状进行编写的。

本书详细地讨论了测量的基本概念、基本方法,使读者在掌握基本概念和方法中融汇贯通达到举一反三的目的,并把这些方法用于其它测量中去。

第三章着重讨论了测量的误差和误差的处理方法,用大量的实例来阐述误差的综合和分配。在章后附有部分习题,以帮助读者巩固理论学习。在第四~七章中结合具体的测量方法和测量设备进行误差分析与综合,使读者进一步掌握测量误差的处理方法。本书还较全面的介绍了国际上近年来推荐的两类(A类和B类)不确定度及其综合方法。

在各章中除介绍了国内外常用的精密电测量方法外,还对近年来数字测量技术和计算技术在精密电测量中应用的情况进行了阐述。并介绍了其基本原理、框图,以便读者在借鉴的基础上发挥自己的优势,使精密电测量技术向自动化发展。

本书由上海工业大学高光润主编,中国计量学院施大申主审。参加编写的有哈尔滨电工学院董怀武(第三章)、哈尔滨科技大学曾庆德(第八章)、上海工业大学王健(第二章)和高光润(第一、四、五、六、七章)。

本书的审稿会邀请清华大学唐统一教授和哈尔滨工业大学、华中理工大学、西安交通大学等有关从事“精密电测量”教学的同志参加,他们对初稿提出很多宝贵意见。本书在编写过程中曾得到中国计量科学研究院、成都测试技术研究院、哈尔滨工业大学、中国计量学院等单位的大力支持和帮助,谨致深切的谢意。

由于编者的水平不高、缺少经验、编写时间较短促,书中一定会有不少错误或不妥之处,恳请读者批评指正。

编者 1988年4月

目 录

第一章 测量的基本概念.....	1
§ 1-1 测量的概念.....	1
§ 1-2 测量的分类.....	2
§ 1-3 测量过程的注意事项.....	4
第二章 测量单位与基准器.....	7
§ 2-1 测量单位和单位制.....	7
§ 2-2 电气基准器.....	9
第三章 测量误差及其处理.....	24
§ 3-1 误差的基本概念.....	24
§ 3-2 误差的处理方法.....	34
§ 3-3 误差合成.....	53
§ 3-4 实验设计.....	76
§ 3-5 矩阵最小二乘法.....	83
习题.....	89
第四章 直流电压、电流及电阻的测量.....	91
§ 4-1 直流精密测量中应注意的一般问题.....	91
§ 4-2 电压标准.....	91
§ 4-3 标准电池的精密测量.....	93
§ 4-4 测量标准电池时的误差分析.....	96
§ 4-5 用约瑟夫逊效应监视电压标准.....	101
§ 4-6 标准电池的自动测量.....	104
§ 4-7 电压的精密测量.....	107
§ 4-8 电阻标准.....	108
§ 4-9 电阻的精密测量.....	110
§ 4-10 电阻比例量具.....	116
§ 4-11 补偿法测量电阻.....	121
§ 4-12 电阻的绝对测量.....	124
§ 4-13 电阻的负载系数及其测量.....	128
§ 4-14 高值电阻及其电压系数的测量.....	131
第五章 交流电压和电流的标准及测量.....	134
§ 5-1 交、直流比较仪.....	134
§ 5-2 热电变换器.....	137
§ 5-3 热电变换器的误差.....	138
§ 5-4 有保护热电偶的多元热电变换器.....	141
§ 5-5 交流标准器.....	143
§ 5-6 YY-10交、直流热电比较仪.....	144

§ 5-7	音频电压标准	147
§ 5-8	交流电流标准	150
第六章 功率与电能的测量		152
§ 6-1	直流功率的测量	152
§ 6-2	交流功率的精密测量	153
§ 6-3	交流功率的测量	162
§ 6-4	电能的精密测量	170
第七章 交流阻抗的精密测量		179
§ 7-1	组成电测线路的无源元件	179
§ 7-2	电阻元件	182
§ 7-3	电容元件	184
§ 7-4	电感元件	191
§ 7-5	电桥法直接测量阻抗	195
§ 7-6	电容的精密测量	198
§ 7-7	损耗因数的测量	204
§ 7-8	电感的测量	206
§ 7-9	Q值的测量	211
§ 7-10	智能LRC测量仪	213
第八章 电测线路的屏蔽与防护		218
§ 8-1	概述	218
§ 8-2	直流电测装置中对热电动势、静电感应干扰的屏蔽防护	220
§ 8-3	直流电测装置对漏电干扰的屏蔽防护	224
§ 8-4	直流电测装置屏蔽防护举例	229
§ 8-5	磁场、电场和电磁场的屏蔽	236
§ 8-6	交流电测线路屏蔽防护的共同问题	243
§ 8-7	交流电桥的屏蔽防护	254
§ 8-8	电测仪表的屏蔽防护	259
§ 8-9	交流电网供电仪表的屏蔽防护	267
附录		274
附录 I	直流电压单位量值检定系统	274
附录 II	直流标准电阻单位量值检定系统	277
参考文献		281

第一章 测量的基本概念

§ 1-1 测量的概念

测量是人们对自然界客观事物的状态以及所固有的各种性质取得数量概念的一种认识手段。

所谓测量，就是通过物理实验的方法，把被测量与某一个取作比较单位的量值进行比较的认识过程。

被测量 x 对测量单位 x_0 的比值叫做被测量的数值，这个数值为 A_x ，则

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

它可以是整数或分数，但是一个纯数。

式 (1-1) 也可写成如下形式

$$x = A_x x_0 \quad (1-2)$$

式 (1-2) 称为测量的基本方程式。

方程的右面部分称为测量结果，又称为被测量的量值。它由两部分组成。一部分是纯数，表示被测量对单位之比；另一部分是单位的名称。例如测量电流的结果为 1.5A 。若只确定电流为 1.5 ，这是错误的，因为电流的单位有 A ，也有 mA 或 μA 等，因而 1.5 不能说明被测电流的任何概念。

被测量的数字值随所取单位的不同而不同。例如被测量为 x ，先取单位为 x_{01} ，后取单位为 x_{02} 。进行测量时，可得

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

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

则

$$A_{x2} / A_{x1} = x_{01} / x_{02} \quad (1-3)$$

式中 A_{x1} 、 A_{x2} 分别为二次测量结果的数字值。从式中可以看出，被测量的数字值与所选单位的大小成反比，选定的单位大，测量结果的数值就小，反之亦然。我们把 $x_{01} / x_{02} = K$ 称为变换乘数。用 x_{01} 单位测量出被测量的数值乘上变换乘数以后，就能得到用新单位 x_{02} 表示该被测量的数值。

测量单位的确定还没有解决实现测量本身这一任务，还必须要有以固定形式复现量值的计量器具，以便有可能与被测量之间作比较。

以固定形式复现量值的计量器具叫做量具或实物量具。用来复现和保存计量单位，具有现代科学技术所能达到的最高准确度的计量器具，经国家鉴定并批准，作为统一全国计量单位量值的最高依据称谓国家基准。

有了实物量具，还必须具有实现把被测量与量具进行比较的设备。因此，在用来进行测量的技术工具中，除了量具以外，还包括测量仪器，仪表及其它技术工具。包括量具在内的这些技术工具的总和称为测量设备。

在制造或选择测量设备之前必须首先研究测量方法。测量方法是指将被测量与取作单位的物理量进行比较的方法。根据不同的测量方法和测量要求，来制造或选择（已有）测量设备。

综上所述，完成测量必须具有以下三要素：

测量对象——即被测量；

测量方法——比较方法；

测量设备——用以实现测量过程的技术工具之总和。

§ 1-2 测量的分类

根据被测量的种类，进行测量的实验条件，以及实验数据的处理方法等不同，测量的种类非常繁杂，从不同观点都可以对它进行分类。

根据测量进行的方法分：

1) 直读法 即用直接指示的仪器、仪表读数取得被测量数值的方法，如用电压表测量电压；

2) 比较法 把被测量与标准量具通过比较仪器进行比较，从而得到被测量的数值，如用电桥测量电阻。

根据被测量 x 与已知量 N 的关系分：

1) 等值法 $x = N$

2) 差值法 $x = N + J$

式中 J ——被测量与已知量的差值；

3) 比值法 $x = K_1 N + K_2 J$

式中 K_1, K_2 ——为比例值。

对于测量学来说，从方法学观点对各种测量进行分类是最有意义的。以这种观点，根据测量结果的获得，所有测量可分为三类。

一、直接测量

测量结果可直接由实验数据中获得的测量叫直接测量。直接测量可用下式表示：

$$y = x \quad (1-4)$$

式中 y ——被测量的量值；

x ——由实验数据直接获得的值。

直接测量时，被测量可以通过与单位（量具）直接比较获得测量结果，也可以使用按相 \perp 单位刻度的仪表直接量出。例如用安培表测量电流，或用电桥法测量电阻，都是直接测量。

直接测量不一定是简单的测量，如用补偿法测量标准电阻 20°C 时的电阻值，它包括很多步骤。如测量测试环境温度，调节温度补偿盘数值，测定工作电流，调整流进被测电阻的电流，测量标准电阻的压降，测量被测电阻压降，计算电阻值，根据标准电阻温度公式计算 20°C 时的电阻值等，经过这一系列步骤，才得到测量结果。因此，是否划入直接测量并不取决于测量的简单与复杂，直接测量的主要特征是，测量中每个操作都是进行测量所必须的组成部分，但是每一操作本身没有独立的意义。

二、间接测量

是借助于直接测量几个与被测量有一定函数关系的变量，经过计算之后才能得到被测量的量值，这种测量叫间接测量。

间接测量的表达式为

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-5)$$

式中 y ——间接测量被测量的量值；

$x_i (i = 1 \sim n)$ ——直接测量各变量的量值。

例如，测量导线的电阻率

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1-6)$$

式中 ρ ——导线的电阻率；

l ——导线的长度；

s ——导线的截面积。

在测量得到导线的电阻 R ，导线的长度 l ，及导线的截面积 s 之后，通过式 (1-6) 即可求出导线的电阻率。

间接测量，往往在当被测量不能用直接测量测得时；用直接测量很复杂时；间接测量出的结果比直接测量的结果更准确时才采用。

三、组合测量

当被测量不只一个，被测量之间以不同组合形式出现，测量结果是通过进行一系列直接或间接测量测得的实验数据，通过解联立方程组后得到的，这种测量叫组合测量。组合测量的表达式

$$\begin{aligned} F_1(y_1, y_2, \dots, x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots) &= 0 \\ F_2(y_1, y_2, \dots, x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots) &= 0 \\ F_n(y_1, y_2, \dots, x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \dots) &= 0 \end{aligned} \quad (1-7)$$

例如，饱和标准电池电动势的温度公式国际上都采用美国 F. A. Welff 于 1908 年提出的公式。我国科技工作者从 1974 年 7 月到 1975 年 1 月对国内外的标准电池进行长期大量的测试得出新的饱和标准电池电动势为

$$\begin{aligned} E_t = E_{20} - [39.94 \text{ V}/^\circ\text{C}(t - 20^\circ\text{C}) + 0.929 \text{ V}/^\circ\text{C}^2(t - 20^\circ\text{C})^2 \\ - 0.0090 \text{ V}/^\circ\text{C}^3(t - 20^\circ\text{C})^3 + 0.00006 \text{ V}/^\circ\text{C}^4(t - 20^\circ\text{C})^4] \times 10^{-8} \end{aligned}$$

这个公式中温度系数的测量，是在 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 经过组合测量得出的。

其他如电阻线圈的温度系数测量同样是通过改变不同温度测出几组数据然后解联立方程得到的。

直接测量通常是单变量的测量，直接测量较多的用于工程技术实际测量方面。

间接测量是多变量的测量，各变量可以通过直接测量测得，再经过计算得到测量结果，它的用途最多。

组合测量也是多变量的测量，但是无法用直接测量方法测量出各变量，只能组合测出数据，通过解联立方程才能得出各个变量。因此，组合测量经常是在实验室中遇到，它用得最少。因为无论是测量还是数据处理都较复杂。

最后，我们想要提出一种常遇到，也有实际应用价值的分类法，即分为实验室测量和工

程技术测量。

实验室测量是指在行测量时需要考虑测量准确度的那些测量。

工程技术测量是指在测量时，不必研究测量上的误差，而所选的测量设备足够适应实际使用的需要。

§ 1-3 测量过程的注意事项

测量过程一般可以分为三个阶段，即测量准备阶段，测量执行阶段以及测量数据的处理阶段。

一、测量的准备阶段

测量准备阶段首先要明确“被测量”的性质及测量所要达到的目的，然后选定测量方法，找出测量变量与被测量之间的函数关系，再根据测量方法选择相应的测量设备。

(一) 定性地认识被测量

测量是定量认识过程。但在测量之前首先应对被测量作定性的认识。

1) 从测量角度看，被测量是电量还是电参数？电量是指有源的量，它具有一定的能量，可以直接用于指示仪表或其他仪器进行测量，如电流、电压、功率、电能等。电参数是指组成电路的元件的参量，它是无源的量。测量时必须要有试验电源，电参数可以用有关指示仪表进行测量，但较多的是用比较式仪器测量，如电阻、电感、电容、互感等。

2) 如果被测量是电量，就要区分是直流量还是交流量？从目前情况来看，直流量的测量准确度远远优于交流量测量的准确度。如果被测量是电参数，其本身无交流之分，但在不同的使用条件和测量条件下，其值可能不同。因此在测量之前必须了解其使用工作条件，否则测得的数据与实际数据可能相差很大。例如，40W白炽灯的电阻，在用万用表直接测量时，只有100Ω左右，但在220V电压下工作时，其内阻约为1210Ω。

3) 被测量的数值范围很宽，对不同的被测量其范围的划分也不同，一般可按大、中、小三段划分。例如，直流电压，从 $(10^{-6} \sim 10^{-4})$ V为低电压， $(10^{-4} \sim 10^2)$ V为中值电压， 10^4 V以上为高电压。不论电量还是电参数，中量值是经常遇到的，其测量技术比较成熟，测量准确度也高。对于小量值的测量，受到测量设备灵敏度及各种干扰的限制。而大量值的测量则受绝缘，测量设备的灵敏度以及传感器等限制，准确度相对都较低。

其他还要对波形影响等问题进行分析与认识。总之，只有对被测量有了足够的认识 and 了解，才能规划好整个测量。

(二) 选择测量方法和测量设备

在明确了被测量的性质以后，就要根据被测量的性质，它的测量条件，测量设备的安排和作用。测量所需要的准确度，测量的方便和速度以及被测量与测量单位进行比较的方式，来确定测量方法和测量设备。

确定测量方法和选择测量设备的依据是保证测量结果达到所需要的准确度。如果测量时准确度达不到，则测量失去了它的价值，就必须用更完善的手段重新测量。但是，过高的准确度要求也是不必要的，因为达到高准确度测量所需的劳动量，测量时间及设备的投资都大，实质上是一种浪费。因此重要的是保证测量满足准确度要求的前提下恰如其分地选择方法和设备。

1. 明确测量目的和测量对象 在测量方法选定以后,则必须考虑测量目的和测量对象。在测量过程中,有时测量的目的,就是被测量本身,这时测量目的和测量对象是统一的。但有很多情况下,测量的目的和测量对象不同,这时就必须明确两者及其关系。

测量目的(未知参数)是整个测量实践所求得的测量结果。

测量对象(被测参数)是个辅助量,它不具备独立作用,仅通过它来达到测量目的。为了测量某一物理量(测量目的),是通过对几个中间量(测量对象)的测量,得到测量数据后,再经过运算之后得到的。例如测量白炽灯泡的热电阻,测量目的是热电阻,但不能用欧姆计直接测量,因为用欧姆计只能测出它的冷电阻。而热电阻必须在白炽灯工作状态下才能较正确的测得,因此必须用安培表、伏特表法。在加上正常工作电压220V时,再测量通过白炽灯的电流,用欧姆定律计算出其热电阻,这时的测量对象就是两个中间量,加在白炽灯泡两端的电压以及流过它的电流。

2. 选择测量设备应考虑的几个问题 由于各种被测量不同,对测量的准确度要求不同,因而直接影响到对测量设备的选择。测量结果的误差受多种因素影响,一般都大于所用测量设备的误差,为此,所选的测量设备的总误差应小于测量允许误差的 $1/3\sim 1/5$,以保证测量结果的误差符合要求(详细可参阅小误差准则)。

1) 仪器、仪表的准确度等级应满足上述要求,而且是经过检定过的设备。未经检定过的设备从计量学的角度来讲是不能使用的。

2) 要考虑仪器、仪表的正常使用条件和标准条件。一般仪器、仪表的准确度是在正常使用条件或标准条件下检定的,当它们偏离了规定条件将产生较大的误差(附加误差),这点必须充分注意。

3) 仪器、仪表的量限不仅要覆盖被测量值,而对于指示仪表应使被测量的数值与仪表的上限接近,通常选择在仪表量限的 $2/3$ 以上。对于测量仪器也有类似的要求,即测量时至少要用第二读数盘的一个步进值,否则也会造成较大的测量误差。

4) 对于配套设备的选择如扩大量限的器具(分流器、分压器、附加电阻、互感器等)其准确度等级应高于仪器仪表准确度等级一个等级以上。对于试验电源,其稳定性直接影响测量结果,而稳定性与其容量有关,选择时应注意。特别对于精密测量时,必要时可采取各种方法来消除其影响。对于比较法测量用的平衡指示器,主要指标是灵敏度。一般规定,当测量仪器的调节改变了相当于测量误差值的 $1/5$ 时,指示器就应有明显的偏差指示(如 1mm 偏转)。对于交流测量时还要考虑其频率特性。

5) 仪器、仪表的安装情况也应给予足够的重视。安装时应避免各附件及周围设备对测量造成影响,不可将测量设备安装在门、窗的附近,更不得安装在人行道旁。

仪器、仪表的安装应便于操作和进行读数,对于在危险条件下(如高压等),应有必要的安全措施。

(三) 测量前的准备工作

在测量方法和测量设备选定以后,必须作好以下几点要求:

1) 画出测量原理图和测量设备、全部连接导线的实际分布图,作为安装设备的指导。同时要注意导线的焊接,并使其有可靠的绝缘。

2) 安装完毕必须使测量装置所有各个组成部分都应正常工作。如发现有不正常时,应立即设法排除。如果不正常的性质不显著,原因不清,则必须逐步检查装置的各个环节,找

出原因，使其正常工作。

3) 测量开始前必须拟好测量程序，以保证按一定的次序进行操作及取得读数。还须画好记录测量数据的表格。

二、测量阶段

在测量阶段必须建立测量设备所必需的测量条件，慎重地进行测量操作，认真记录测量数据。

1) 在测量中必须按事先拟好的测量程序一步一步地进行操作并读取读数。应该避免在测量开始之后突然中断测量，特别在它的调整与消除系统误差有关时，更不能中断测量。如果出现中断情况，则测量应该从头开始，尤其在精密测量时，这点更需注意。

如果测量很复杂，而且测量进行时间需要很长，则必须将整个测量分成几个阶段，在每个测量阶段中的观测也不许间断。

2) 原始数据是计算测量结果的依据，因此应给予特别重视。在原始数据中应包括以下内容：注明测量类别、应用方法、测量时间、环境条件、使用设备的名称、型号及编号或其他特点。

数据记录应以表格形式进行，同类读数应一行一行或一列一列地记录。记录的数据应从测量仪器上得到的观测值，不需作任何心算（即使最简单的），如按刻度尺进行读数，应记录分度值，和每分度值代表的常数，在数据处理过程中再计算。

数据应以有效数字表示。有效数字的位数就反映了测量的准确度，因此读数的位数应保证其误差有1~2位有效数字。只有高精度的测量才多保留一位有效数字。有效位数取得不够，则无法保证测量准确度，有效位数过多，不但影响计算时间，也没有价值。

三、数据处理阶段

根据记录的数据，考虑测量条件的实际情况，进行数据处理以求得测量结果、测量误差和必要的结论。

1) 数据处理中的公式和计算方法如果只有少数人知道或者是研究者自己提出的，这时需加以说明和列出其公式。

2) 在使用的公式中必须应用已经规定的量值的术语和符号，同时应该遵守标准或规程。所有新的或很少使用的术语和符号应加以说明。

3) 测试的工作报告最好以论文或讲稿的形式加以编制。对做过的一切有价值的工作都应较详细的加以说明，不应由于表达不清而引起读者的误解。

4) 理论根据的叙述只要清楚地说明整个测量工作就可以了。测量方法和测量设备应根据其重要性和特点详加说明，必要时用简图或照片来阐明。然而对一切普遍知道的和容易从文献中（教科书、期刊及手册等）找到的，可以不必多写，仅提供来源就可以了。但是对特定测量目的采用修正的测量方法和设备时，则必须注明。

5) 报告中的举例不宜过多，只要说明报告中的结论是如何取得，数据是如何处理的就可以了。引用的数字材料要注意，数据应排列成表格形式，以便于对准确度进行估计。也可以用曲线图表示数据。

6) 在报告的结尾部分应对全部工作作出有逻辑性的结论，结论应该简洁。

总之从上述可以看出，测量的准备阶段是关键的工作，测量是否达到预期的目的与准备有很大的关系。测量执行应谨慎小心，一丝不苟。测量的结论取决于数据处理和工作报告的书写，应简洁明了。

第二章 测量单位与基准器

§ 2-1 测量单位和单位制

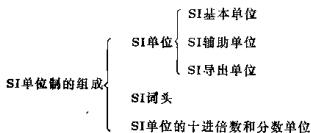
由测量的概念可知,要实现一次测量,除了要有一定的测量设备和方法外,还必须选定相应的单位。因为任何一种测量,目的都在于对某一量(常称物理量)根据所选定的单位,求出它的数值,以便定量表示。因此任何一种物理量都可看作是它的数值和所选定的单位的乘积。单位选择得不同,数值也将随之改变。

在各种物理量之间,存在着内在的规律性的联系,绝大多数的物理量都可以用少数几个基本量来作出它们的定义,所以我们不必对每个物理量的单位都独立地予以规定。我们只需选定一些物理量(如长度、质量、时间)作为基本量,并为每个基本量选取一个基本单位(如米(m)、千克(kg)、秒(s)),则其他的物理量就可按照它们与基本量之间的关系式(定义或定律)导出。例如,根据速度的定义关系式 $v = dl/dt$,可导出其单位是米每秒(m/s)。这些物理量称为导出量,它们的单位称为导出单位。

由基本单位和导出单位所构成的一个完整的单位体系就称为单位制。基本单位选取的不同,单位制亦不同。

由于历史上的原因,世界各国流行的计量单位和单位制是多种多样的,很不统一。例如我们常遇到的单位制就有:米千克秒制(MKS制)、米千克力秒制(工程制)、米吨秒制(MTS制)等。在电磁计量中也存在着绝对静电单位制(CGSE制)、绝对电磁单位制(CGSM制)、高斯单位制、绝对实用单位制(MKSA制)等多种单位制,在实际应用中很不方便,也严重妨碍着生产、科学技术和经济文化交流的发展。因此各国科学技术工作者和有关国际组织,多年来一直在研究改善和统一单位制的问题。

1956年,国际计量委员会决定采用一种通用的适合一切计量领域的单位制,并定名为“国际单位制”(国际缩写为SI)。在1960年第十一届国际计量大会上国际单位制被正式通过。经过历届国际计量大会的修改,到1971年的第十四届国际计量大会以后,国际单位制发展成今天这样的形式,它由以下几部分组成:



SI基本单位共有七个,其定义分别如下:

1) 长度单位——米(m) 米是光在真空中 $1/299.792458$ s 的时间间隔内所经过的距离。

2) 质量单位——千克(kg) 千克是质量单位, 等于国际千克原器的质量。

3) 时间单位——秒(s) 秒是铯-133原子的基态二超精细能级之间跃迁辐射周期的9192631770倍的持续时间。

4) 电流单位——安培(A) 安培是一恒定电流强度, 若保持在处于真空中相距1m的2无限长而圆截面极小的平行直导线内, 则此二导线之间每米长度上产生的力等于 2×10^{-7} N。

5) 热力学温度单位——开尔文(K) 热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

6) 物质的量单位——摩尔(mol)

① 摩尔是一物系的物质的量, 该物系中所包含的结构粒子数与0.012千克碳-12的原子数目相等。

② 在使用摩尔时, 结构粒子应予指明, 而且可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子, 或是这些粒子的特定组合体。

7) 发光强度单位——坎德拉(cd) 是一光源在给定方向上的发光强度, 该光源发出频率为 540×10^{12} Hz的单色辐射, 且在此方向上的辐射强度为 $(1/683)W/sr$ 。

SI辅助单位有两个, 平面角单位弧度(rad)和立体角单位球面度(sr)。

SI导出单位是通过它们与SI基本单位的定义关系式, 由SI基本单位和辅助单位导出的单位, 并且规定所有定义关系式中的比例系数均为1, 据此我们称SI单位制是“一贯性”单位制。

SI基本单位、SI辅助单位和SI导出单位统称为SI单位。

由于在不同的场合需要不同大小的单位, 为了适应这种需要, 国际单位制规定了一套词头, 称SI词头, 共有16个。将SI词头加在SI单位前就构成大大小小的国际单位制的“SI单位的十进倍数单位和分数单位”。例如将SI词头“m”(毫)加在SI单位“m”(米)前, 就构成了“mm”(毫米)。

国际单位制是单位制长期发展演变的产物, 它吸取了过去各种单位制的优点, 又考虑到当前的实际情况, 可以说是现今最完善的单位制。在国际单位制中, 七个基本单位都给出了严格的理论定义, 且能以最高的准确度复现和保存, 并大部分实现了自然基准, 国际单位制坚持了“一贯性”、“一个物理量只有一个SI单位”等科学原则, 使得按国际单位制规律表示的测量结果, 其含义明确严格, 不会混淆; 国际单位制中的SI十进倍数和分数单位是由SI词头加SI单位构成, 关系简单明确, 符合国际习惯, 也便于计算; 国际单位制包括了力学、热学、电磁学、光学、声学、物理化学和分子物理学、核物理学等等几乎全部理论科学和技术科学所需的计量单位; 把科学技术、生产、国际贸易和日常生活等各方面的计量单位统一在一个单位制中, 达到了计量单位在世界范围内的统一。目前世界上工业较发达的国家, 几乎都已由政府部门通过法令或条例正式宣布采用国际单位制。我国在1984年2月, 由国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》, 以法令形式明确规定我国的计量单位一律采用以国际单位制单位为基础的法定计量单位, 从而使我国的计量单位与国际单位制统一了起来。

在电磁测量技术领域中, 只要用七个SI基本单位中的前四个(米、千克、秒、安培)就可导出其他的物理量单位, 按这样规定出来的单位就称为国际单位制的电磁学单位。常见的电磁学SI导出单位列于表2-1中。

表2-1 电学量的SI导出单位

物理量名称	定义方程式	单位名称	符 号		F 纲 式
			中 文	国 际	
电荷〔量〕 q	$q = It$	库仑	库	C	TI
电荷面密度 σ	$\sigma = q/S$	库仑每平方米	库·米 ²	C/m ²	L ² TI
电荷体密度 ρ	$\rho = q/V$	库仑每立方米	库·米 ³	C/m ³	L ⁻³ TI
电位 U	$U = A/q$	伏特	伏	V	L ² MT ⁻² I ⁻¹
电容 C	$C = q/U$	法拉	法	F	L ⁻² M ⁻¹ T ⁴ I ²
电阻 R	$R = U/I$	欧姆	欧	Ω	L ² MT ⁻² I ⁻²
电阻率 ρ	$\rho = eR/l$	欧姆·米	欧·米	$\Omega \cdot m$	L ² MT ⁻² I ⁻²
电导 G	$G = 1/R$	西门子	西	S	L ⁻² M ⁻¹ T ⁴ I ²
电导率 γ	$\gamma = 1/\rho$	西门子每米	西/米	S/m	L ⁻³ M ⁻¹ T ⁴ I ²
电场强度 E	$E = -\nabla U$	伏特每米	伏/米	V/m	LMT ⁻² I ⁻¹
真空介电常数 ϵ_0	$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2}$	法拉每米	法/米	F/m	L ⁻³ M ⁻¹ T ⁴ I ²
电位差 D	$\oint D \cdot d\mathbf{s} = q$	库仑每平方米	库/米 ²	C/m ²	L ⁻² TI
磁通量 Φ	$\epsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$	韦伯	韦	Wb	L ² MT ⁻² I ⁻¹
磁感应强度 B	$B = \Phi/s$	特斯拉	特	T	MT ⁻² I ⁻¹
磁场强度 H	$\oint H \cdot d\mathbf{l} = I$	安培每米	安/米	A/m	L ⁻¹ I
电感 L	$L = N\Phi/I$	亨利	亨	H	L ² MT ⁻² I ⁻²
真空磁导率 μ_0	$F = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a}$	亨利每米	亨/米	H/m	LMT ⁻² I ⁻²

§ 2-2 电学基准器

一、量具的基本概念

所谓量具是以固定形式复现量值的计量器具，它是维持电学单位的统一，保证量值准确传递的器具。量具可分为单值量具（如砝码、标准电池、固定电容器），多值量具（如毫米分度的线纹米尺），成套量具（标准电池组）。

在电学计量中，根据量具自身准确度的高低，将其分为基准、标准和工作量具三类，它们在量值传递中起着不同的作用。

1) 基准 用现代科学技术能达到的最高准确度来复现和保存计量单位的计量器具叫做基准。它由国际及各国的最高计量部门保存。在国际上，基准由国际计量局（在巴黎）保存，在我国由中国计量科学研究院保存。基准有国家基准、副基准、工作基准、比较基准和后备基准之分。

国家基准是作为统一全国计量单位量值的最高依据。国家基准又称为主基准。

副基准是通过直接或间接与国家基准比对来确定其量值并经国家鉴定批准的计量器具。某些绝对测量的结果是借助于一些副基准来保存的。它的地位仅次于国家基准。

工作基准是经与国家基准或副基准校准或比对，并经国家鉴定，用以检定计量标准的计量器具。设立工作基准的目的是不使国家基准和副基准由于使用频繁而丧失其应有的准确度

或遭受破坏。

比较基准是用作与主基准进行比较的。后备基准则是作为其他基准的替补。

2) 标准量具 标准量具是准确度等级低于工作基准的一种量具。它是供计量系统作为检定依据用的一种手段。

3) 工作量具 工作量具供日常检测时用的标准量具。按其准确度(或稳定性)指标的不同,可分为若干个级别,其级别一般都标注在铭牌上。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都属于这一类。

对于量具的共同要求是:

- 1) 复现精度高,能准确地复现测量单位;
- 2) 稳定性好,能长期保持其所复现的单位量值不变,由于外界条件(温度、湿度、电磁场等)的变化而引起的影响要很小;
- 3) 可比性强,能方便地与其他标准量具进行比较或测量,便于标定和监视其量值;
- 4) 使用方便。

二、电磁学单位的复现、保存和传递

在国际单位制中规定电流作为独立定义的基本单位,并直接用电流的力效应来定义电流单位:“若在真空中相距1m的两无限长而圆截面可忽略的平行直导线内通以恒定电流,使得此二导线间每米长度上产生 2×10^{-7} N的力,则此电流称为1A。

电流的单位安培一经确定,其他电磁量如伏特、欧姆、法拉、亨利等就不能随意规定了。这是因为这些量之间的关系必须满足一定的电磁学公式;同时,它们的单位还必须能使电功率的单位一瓦特(W)与机械功率的单位一瓦特(W)相等,即 $W = J \cdot s^{-1} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$ 。由此我们可以看出电磁学单位与力学单位之间存在着必要的联系,并且可从力学的基本单位秒(s)、千克(kg)、米(m)导出电功率单位瓦特(W)。有了电功率单位瓦特(W)和电磁学的基本单位安培(A),再根据电磁学公式 $V = W/A$, $\Omega = V/A$,就能导出电压单位伏特(V)和电阻单位欧姆(Ω)以及其他的电磁学单位。

但实际上当前功率的测量准确度还比较低,按照以上方法导出的电压和电阻单位也无法高准确度地确定,所以在电磁学领域中,往往直接根据力学量的基本单位(m、kg、s)来建立电磁学的各种单位,这就称为电磁学的“绝对测量”。

绝对测量需要的装置是极其复杂的,操作也极其繁琐,对操作人员要求也较高,显然不能满足基准器要使用方便的要求。因此就需要用实物基准器来保存单位量值。实物基准量值的确定首先是将公认的国际计量局(BIPM)所保存的实物基准器与绝对测量的结果相比较,得出与理论值相接近的程度,定出该基准器的值,然后各国再根据它修正本国主基准的值,从而保证测量数据的统一。

但是实物基准器随着时间要发生量值的变化,为了解各国单位量值间的偏差,过去国际计量局每三年进行一次电学单位的国际间比对,并公布各国与BIPM电单位之间的差值,以此来保持国际间电单位的统一。

随着科学技术的发展,复现电单位的准确度也在不断提高,并逐步从实物基准向自然基准过渡。由于实物基准是由极大量的原子和分子组成的宏观物体,它们的尺寸、成分等物理、化学特性,可能由于温度、湿度以及使用中的老化等外界因素的影响而发生各种无法控制的变化。作为更为精确而稳定的计量单位,必须而且只能建立在微观的基础上,因为微观

世界遵循量子定律，具有内在的稳定性和齐一性，这种根据微观世界的特性而建立起来的基准通常称为自然基准。近十几年来，由于激光技术，红外线区频率合成技术和约瑟夫逊器件的发展，使不少基准器由计量单位的实物基准向自然基准的过渡成为了现实。鉴于上述情况，在国际计量委员会的电学咨询委员会（CCF）第14次会议上，建议各国从1973年起分别采用两个决定值：电压标准采用根据约瑟夫逊结的数值；电阻标准采用计算电容法测得的电阻数值，并决定停止传统的标准电池和标准电阻的国际比对。这样，1976年后实际决定电学标准的关系可用图2-1表示。

整个电磁学单位系统由基本单位到具体各导出单位的传递，按照我国的实际情况列于图2-2。由 m 、 kg 、 s 、 c 、 Φ 得出核磁共振

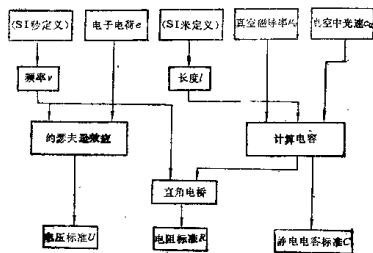


图2-1 1976年后实际决定电标准的关系

(NMR) 及计算电容 (C 计)。由计算电容，经电容过渡电桥 (C-C 桥) 传递到标准电容器 C_N ，建立电容单位标准 C；通过电感电容谐振电桥 (L-C 桥) 传递出标准电感 L_N 的绝对数值，再由电感电桥 (L-L 桥) 建立电感单位标准 L；由标准电容器出发，经电容电阻电桥 (C-R 桥) 传递出交流电阻标准 ($10^4 \Omega$)，加上电阻频率特性计算标准 R_f ，可导出交流电阻标准 R_{AC} ；与时间标准相结合可得到相位标准 Φ ；由 C、 R_{AC} 又可导出互感标准 M；从而得到磁通标准 Φ ；由 R_{AC} 经交流直流转换 (AC-DC) 及直流过渡进行电阻的绝对测量 ($Q_{NL}/Q_{SI}) \Theta$ ，并对 1Ω 的国家欧姆基准 (Q_{ref}) 进行定标，最后传递出我国的直流电阻标准 R_{DC} ；通过核磁共振法可进行电流的绝对测量 ($A_{NL}/A_{SI}) \Theta$ ；与 ($Q_{NL}/Q_{SI}) \Theta$ 结合可对 1V 的国家电动势基准 (E_{ref}) 进行定标，并传递出直流电动势标准 E_{DC} ；同样由电单位绝对测量可以导出约瑟夫逊效应的 $2e/h$ 值 (目前采用约定值)，从而导出 E_{ref} 值；由核磁共振法及频率标准可导出磁感应强度 B 的标准；由 B 和 Φ 传递出磁性材料测量中的所有标准；由直流比例标准 (K_{IDC} 、 K_{VDC}) 可导出直流电流标准 I_{DC} ，与 R_{DC} 、 E_{DC} 等结合可开展对直流仪器 (直流电位差计、直流电桥、分压箱……) 的检定；通过电量的交直流转换，可建立交流电压 U_{AC} 、电流 I_{AC} 、功率 P_{AC} ，和时间一起导出交流电能 W_{AC} 等一系列标准，由交流比例标准 (K_{IAC} 、 K_{UAC}) 与交流标准结合可开展对交流仪器的检定传递。

数值传递除了上面介绍的这种情况，即把一个或几个物理量的单位传递到另一个物理量上去之外，还有一种情况，即把同一物理量单位量值由基准器传递到标准量具乃至工作量具上去。因为某一物理量的单位量值被确定之后，即被保存在基准器中。为了能在生产实践中保证电学单位量值的统一，还须将单位量值由基准器传递到工作器具及使用中的各种仪器仪表中去。上述传递过程加上相应的测量装置，正确的测量方法和数据处理，就构成一个量值传递系统。

① Q_{NL} ：实物基准保持的欧姆， Q_{SI} ：基本单位得到的欧姆

② A_{NL} ：实物基准保持的安培， A_{SI} ：基本单位得到的安培

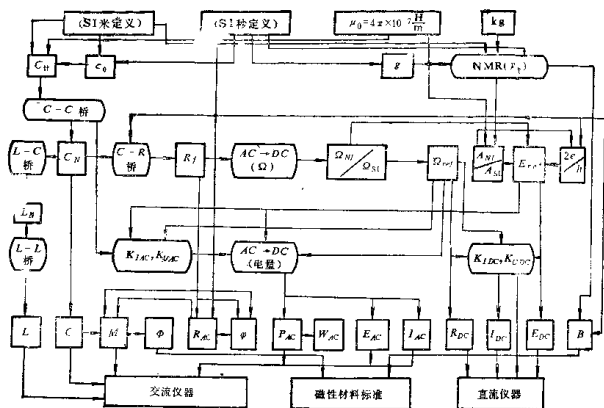


图2-2 电磁单位总传递系统表

综上所述，电磁学单位的建立和确定主要靠绝对测量；而单位的保存和复现主要靠实物基准；各国基准值之间的关系过去靠国际比对保持统一，现在采用一些新的物理现象和效应可以直接监视实物基准的变化；而将基准与工作量具联系起来的是传递系统。只有这样，才能使在不同地方，用不同测量仪器对同一量所进行的测量得到的测量结果能在所要求的准确度范围内进行比较，也才能使测量结果含义明确、清楚、严格。

三、绝对测量

直接根据力学量的基本单位（m、kg、s）来建立电磁学的各种单位，称为电磁学的“绝对测量”。电磁学单位的建立和确定主要靠绝对测量。

1. 电流的绝对测量 安培的定义看来似乎简单，但如果要直接用它来实现安培，就会发现这几乎是不可能的；无限长而圆截面可忽略的导线的实现，以及 $2 \times 10^{-17} \text{N}$ 这么小的力的测量都是十分困难的。由于安培的定义是由经典的电磁学法则得出的，是以麦克斯韦电磁理论为基础的，所以只要满足此理论，找出一个更切合于实际的系统，同样可以复现安培。目前常用的电流天平，Pellat 电动计，核磁共振法都是基于这种思想对电流实行绝对测量的。

1) 电流天平 两个空心线圈 F 和 M ，当分别通以电流 I_1 和 I_2 时（见图2-3）它们之间的相互作用能量为

$$W = I_1 I_2 M_{12}$$

式中 M_{12} —— F 和 M 两个线圈间的互感。

由于能量不便测量，但力却较容易测定，则有

$$F = \partial W / \partial X = I_1 I_2 \partial M_{12} / \partial X$$

将线圈 F 做成外部固定线圈, M 做成挂在天平横梁上的可动线圈, 相对线圈 F 可上下移动, 使两个线圈流过同一电流, 即 $I = I_1 = I_2$, 则当天平平衡时, 两线圈的相互作用力 F 与砝码的重力 mg 相平衡, 于是

$$F = I^2 \partial M_{12} / \partial X = mg$$

$$I = \left(\frac{mg}{\partial M_{12} / \partial X} \right)^{\frac{1}{2}}$$

因为互感 M_{12} 仅与两个线圈的几何形状、尺寸及相互位置有关, 可通过计算得到, 所以电流单位值可根据基本单位米、千克、秒并借助电流天平确定下来, 其测量不确定度在 $\pm(5 \sim 8) \times 10^{-6}$ 之间。

电力计的原理与电流天平相似。

2) 核磁共振 核磁共振是利用在强磁场和弱磁场下测定质子回旋磁比 γ , 而进行电流基本测量的。

我国在强磁场下对 γ_p^+ 的测量误差为 $\pm 3.50 \times 10^{-6}$, 在弱磁场下对 γ_p^+ 的测量误差为 $\pm 0.8 \times 10^{-6}$, 两种方法结合绝对测量安培为

$$(A_{NL}/A_{SI}) = 1 - (3.46 \pm 1.80) \times 10^{-6}$$

这说明了我国的保存安培 A_{NL} 比绝对安培 A_{SI} 小 3.46×10^{-6} , 其测量误差为 $\pm 1.80 \times 10^{-6}$, 国际上的测量误差也是这样一个数量级。表2-2列出了我国与先进国家用绝对测量法复现安培单位的水平比较。

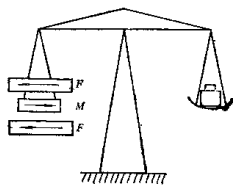


图2-3 电流天平。

表2-2 各国复现安培单位情况

发表年份	国家	研究所	方法	准确度
1958	美国	NBS	电流天平	$\pm 7.7 \times 10^{-6}$
1962 '63	英国	NPL	电流天平	$\pm 6 \times 10^{-6}$
1966	苏联	BHIIIM	电流天平	$\pm 6 \times 10^{-6}$
1966	美国	NBS	电力计	$\pm 9.7 \times 10^{-6}$
1969/70	英国	NPL	电流天平	$\pm 6 \times 10^{-6}$
1974	德意志民主共和国	ASMW	电流天平	$\pm 8 \times 10^{-6}$
1976	英国	NPL	电流天平	$\pm 4 \times 10^{-6}$
1980	中国	NIJ	核磁共振	$\pm 1.8 \times 10^{-6}$

以上介绍的电流绝对测量的方法都含有对几何量的测量, 要进一步提高测量准确度很困难。近年来国际上提出了一些新的电流基本测量的方法, 思路发生了重大的变化, 即通过尽量少测, 甚至完全不测线圈的几何尺寸, 而设法把几何尺寸的因子吸收到别的易测量的物理量(通常是某种电量)中去, 以提高电流基本测量的准确度。

2. 电阻的绝对测量 电阻单位通常不是直接导出的, 而是通过先导出电感(或互感)或电容, 再导出电阻。因为从亨利和法拉的定义及量纲式可知, $1H = 1\Omega \cdot s$, $1F = 1s/\Omega$, 即它们的量纲中都含有电阻的量纲。而根据电磁学理论, 电感或电容如果以真空为介质, 则只

© “ ” 李东来抗磁修正的球形水样晶值。