

电磁量计量器具的检定

〔俄〕P.Φ.阿克纳叶夫 Л.И.留必莫夫

A.M.巴纳休克-米罗维齐 著

李绍贵 王登安 译

中国计量出版社

新登（京）字024号

内 容 提 要

本书主要叙述了电磁量计量器具的检定原理，研究了基准和标准计量器具的检定方法和器具，以及计量监督的组织问题。

本书适用于有关专业的中等技术学校的学生，也适用于从事电磁量计量器具使用和检定的工程技术人员。

ПОВЕРКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИ- ЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Р.Ф.Акнаев, Л.И.Любимов,
А.М.Панасюк-Мирович
ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ 1983
Москва

电磁量计量器具的检定

〔俄〕Р.Ф.阿克纳叶夫 Л.И.留必莫夫
А.М.巴纳休克-米罗维齐 著
李绍贵 王登安 译
责任编辑 刘宝兰

—

中国计量出版社出版
北京和平里西街甲 2 号
中国计量出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

—

开本 787×1092/32 印张 9.5 字数 212 千字
1992年 5 月第 1 版 1992年 5 月第 1 次印刷
印数 1—4 000

ISBN 7-5026-0507-X/TB·391

定价 6.50元

译 者 的 话

当今科技飞速发展，测量已涉及到国民经济的所有部门和科学研究的各个领域。科研、生产水平及其复杂程度的提高，必然导致被测量数量的增加、测量范围的扩展和要求的测量准确度的提高。例如，在精密机器制造中，要求把测量误差减少到超小长度（到 10^{-8} ）；在火箭制造中，测量压力超过4800MPa时，要求误差不超过 10^{-6} ，测力超过10 MN时，误差应为 10^{-5} ；为提高原子反应堆的效率和安全性，必须使温度测量的误差不超过 10^{-5} 等等。因此，必须研制新的计量器具和研究新的测量方法。即要建立高测量准确度的计量基、标准，才能准确复现、保存和传递量值，进而实现单位统一和量值准确可靠的测量。为此，国家和部门计量机构的工作人员，对计量器具的正确使用，及其功能的可靠性必须进行计量监督。计量器具的检定就是计量监督的主要形式之一，即评定计量器具的计量特性、确定其是否符合法定要求，所进行的检定工作是非常重要的，它是计量保证工作的重要组成部分。电磁量计量器具量大面广，应用于各个测量领域。为满足广大计量检定人员和计量管理人员对开展电磁量计量器具检定工作的迫切需要，我们翻译了这本书，目的是使有关人员掌握电磁量计量器具的检定方法和检定的组织工作。

该书由原苏联国家标准委员会的学校和干部管理局批准出版，并允许作为中等专业学校《电测仪表与量具的检定技术》和《电磁量计量器具的计量保证》等课程的教材。其特

点是全面地叙述了各种电磁量计量器具的计量特性、检定原理和方法，及其检定的组织与进行。作者在编写中吸取了其它学校相应专业的教学经验，内容丰富、实用。因此，该书特别适用于计量检定和计量管理人员。

在翻译过程中得到了国家技术监督局计量司副司长、高级工程师罗振之同志的热心帮助与指导，并做了部分章节的审校工作，在此表示衷心的感谢！

由于译者水平和时间的限制，不当之处在所难免，请读者批评指正。

译 者

1991年12月

目 录

第一章 计量器具的计量特性

第1节	测量误差及其表示方法	(1)
第2节	计量器具的分类	(7)
第3节	计量器具的计量特性	(11)
第4节	计量器具误差的限额规定	(20)
第5节	计量器具的准确度等级	(25)

第二章 基准·检定系统表

第6节	关于基准的一般概念	(29)
第7节	电学及磁学量单位基准	(31)
第8节	单位量值由基准向标准和工作器具的传递·检定系统表	(44)

第三章 组织和实施计量器具检定的一般性问题

第9节	组织和方法的基础	(49)
第10节	检定工作的一般特点	(58)
第11节	进行检定的条件及步骤	(68)

第四章 电磁量计量器具的检定方法

第12节	定义及分类	(75)
第13节	检定方法	(74)
第14节	计量器具的检定方式	(85)

第五章 检 定 装 置

第15节	概述	(88)
第16节	检定装置的电源	(89)
第17节	调节装置	(100)
第18节	平衡指示器	(105)
第19节	恒温系统	(107)
第20节	交流检定装置	(110)
第21节	直流电位差计装置	(113)
第22节	直流电桥测量装置	(120)
第23节	电学比较仪	(124)

第六章 直读式仪表的检定

第24节	关于电流表、电压表、功率表及无功功率表检定的一般概念	(128)
第25节	用直接比对法检定电流表和电压表	(131)
第26节	用比较法检定功率表和无功功率表	(138)
第27节	用直流电位差计检定电流表、电压表和功率表	(141)
第28节	用热电比较仪检定电流表、电压表和功率表	(146)
第29节	电流表、电压表和功率表检定的自动化	(151)
第30节	欧姆表和法拉计的检定	(152)
第31节	频率计的检定	(157)
第32节	相位计的检定	(160)
第33节	电能表的检定	(165)
第34节	数字仪表的工作特点及其检定	(172)
第35节	数字电压表的检定	(181)
第36节	数字电阻表的检定	(187)

第七章 电学量具的检定

第37节	电学量具的结构特点及技术特性	(190)
------	----------------	-------

第38节	标准电池的检定	(204)
第39节	电阻量具的检定	(212)
第40节	电容量具的检定	(217)
第41节	电感量具的检定	(221)

第八章 比较仪器的检定

第42节	直流电位差计的检定	(224)
第43节	交流比较仪的检定	(235)
第44节	直流电桥的检定	(240)
第45节	交流电桥的检定	(249)

第九章 测量变换器的检定

第46节	分流器的检定	(255)
第47节	分压器的检定	(261)
第48节	电流互感器的检定	(265)
第49节	电压互感器的检定	(273)

第十章 磁学量计量器具及其检定

第50节	磁学量的量具	(277)
第51节	磁学量具的检定方法及器具	(281)
第52节	磁学量计量仪器的检定方法	(284)

第一章 计量器具的计量特性

第1节 测量误差及其表示方法

自然界中的所有物体和现象都具有某些性质。其中的一些性质只能定性（味道、香味）的加以描述，另一些性质可用数量（长度、时间、温度）进行评价。对于许多物理实体在定性方面是一般的，但对于每个物体在定量方面是独特的性质叫做物理量。表征电路和磁路中产生的现象的量叫做电磁量（电量、电阻、电感、磁化强度等）。物理量是能被测量的量，也就是能以物理量值的形式得到评价。由测量结果得到的这种量值有两个特性。第一，不是简单地由测量结果得到数值，而是得到称做单位量值的名数，例如，常说的“220伏”、“5安培”、“100欧姆”，即同时说出数值和该量所采用的单位。把量值中的数叫做“数值”。第二，测量结果必须含有对得到的量值准确度的评价，例如，同一个电压220V，可能是以 $\pm 10V$ 或 $\pm 0.1V$ 误差测量的。很明显，第二次测量的价值大大高于第一次测量，但是，如果在记录测量结果时不指出误差值，这些测量就成了等价的。

测量误差可以用绝对形式（绝对误差 Δ ）表示

$$\Delta = X - X_n \quad (1.1)$$

式中， X 为测量的量值， X_n 为量的真值。因为量的真值 X_n 是永远不可知的，在实际测量中将其用实际值 X_n 代替。把为了已知目的用实验方法得到的，可以用来代替真值而又非常接

近真值的量值叫做实际值。绝对误差用被测量的量的同一单位表示。

用绝对误差往往不能够评定测量的准确度。例如，电压是以 1 V 的误差测量的，如不指出被测量的电压值是没有意义的，因为，以 1 V 的误差测量 1000 V 电压和当用同样误差测量 10 V 电压时完全是另一回事。关于测量的准确度，大多数是以相对的误差形式（相对误差 δ ）来表示的

$$\delta = \Delta / X_H \quad (1.2)$$

同样，像在计算绝对误差时那样，当计算相对误差时，一般用 X_H 值代替 X_H 。除此之外，相对误差用百分数表示，在这种情况下，用下列公式计算

$$\delta = \frac{\Delta}{X_H} \cdot 100 \quad (1.2')$$

按产生源的误差分类。由于不同原因可能出现误差，并由某些分量构成。如计量器具本身，也就是用其完成测量的某个仪表或者测量变换器的固有误差是分量中的一个，这个误差分量叫做器具误差。计量器具特性的不理想，周围环境对这些特性的影响等等，可能是产生器具误差的原因（在第 3 节将详细叙述计量器具的误差）。

误差的另一个分量是由于测量方法本身的不完善产生的方法误差。被测量的量与其在测量时取作模拟的量不符合；计量器具对测量对象和在其中产生的过程的影响都属于方法不完善。如，把整流器输出端的电压当成恒定的，与此相应地可以用模拟式磁电式电压表，或用时间脉冲式的数字电压表进行测量，但是，如果在被测电压中有可变分量（波动），则这些电压表的示值将不相同，因为它们对这些波动将按不同方式加以反应，磁电式电压表的示值将等于恒定电压与波动的平均值之和，而数字电压表指示的是测量瞬间的

电压瞬时值。在这种情况下，电压表的示值不同，不是由于仪表的不完善，而是在测量时认为电压是恒定的，实际上并不是如此。

在测量时，可能由观测者的个人特性引起误差，把这种误差叫做主观误差。由仪表标尺十分之一分度的不正确读数、不正确的内插等引起的误差属于主观误差。这些误差随着仪表的完善程度而减小。如，在模拟仪表里采用光指示器能消除由于视差造成的误差，而采用数字读数能消除主观误差。

按显示特性的误差分类。测量误差是由不同原因引起的。这些原因中有一些是固定地和恒定地在起作用，另一些原因在个别的测量中产生。相应地，根据引起误差的原因，测量误差也有固定的或各不相同的，因此测量误差往往是随机量，可将其看成是固定的非随机量与随机量之和。这些量中的第一种叫做系统误差 Δ_c ，并将作为误差的分量来测定，在重复测量同一个量时该分量不变或有规律地变化。第二个分量叫做随机误差 $\overset{\circ}{\Delta}$ 。它是在重复测量同一个量时以随机方式变化的测量误差的分量。因此，测量的总误差 Δ 可以用系统误差与随机误差之和的形式表示

$$\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta} \quad (1.3)$$

此时可把随机误差看成是数学期望值等于零的随机量，在这种情况下把系统误差看成是总误差的数学期望值。

按出现的特性可把系统误差分为固定的和可变的，后者，又分为渐变的、周期的和按复杂规律变化的。

许多计量器具都有固定的系统误差。例如，当电阻线圈或电感线圈的绕制不够准确、仪表标尺刻度不正确时，当测量互感器的实际变比系数偏离额定值时和在许多其他情况

下，均产生固定的系统误差。

在测量过程中渐变误差单调地增长或减少，例如，在直流电位差计中供电电压的固定降低，电阻量具中流过的电流造成加热，以及其他原因将引起渐变误差。

周期误差按周期性规律变化，但它们对于电测量来说不是特有的。

不是周期性的非渐变的系统误差属于按复杂规律变化的误差。在测量负荷时产生的电能计数误差、测量互感器的角误差等属于这种误差。

应当指出，当用同一个仪表完成一批测量时或在分析单一型式仪表组的误差时，会碰到系统误差从测量到测量或从样机到样机按随机规律变化的现象。在这种情况下用随机量的参数和特性来描述系统误差，这种现象对于计量器具的批量试验是特有的，实际上，在电量的计量器具检定时是碰不到的。在检定时测定计量器具样机的误差；在对同量不必多次观察的前提下，选择检定方法和标准量具，在标准条件下进行测量，因此，可把系统误差看成是固定量。

系统误差，因为其值是固定的或者是有规律地变化的，可用下列三种方法之一从测量结果中消除：在测量开始前消除误差源（预防法），在测量过程中消除误差，在测量结束后消除误差。

在测量开始前为消除误差，必须发现和消除误差出现的原因。例如，如果误差的出现是由于外部电磁场，则必须屏蔽仪表或消除干扰源。为了消除计量器具的温度误差要恒温。用减振器消除由仪表振动产生的误差。由于仪表调整不正确造成的误差可很容易地消除，为此，仪表的调整应完全与标准技术文件中的要求相符合。

在测量过程中使用特殊的测量方法来消除系统误差。

在实际的测量中为消除系统误差经常利用误差符号补偿方法。这种方法的实质如下：如果误差的性质已知，但不知其数值，则要进行两次观察，为的是使这个误差包含在带相反符号的结果之中，取两个结果之和的一半作为被测量的实际值。在用直流电位差计和直流电桥进行精密测量时广泛采用这种方法（见第七章）。

在测量后用引入修正值的方法消除系统误差，修正值在数值上等于系统误差，但与系统误差符号相反。引入修正值有三个步骤：首先进行明显含有系统误差的测量，进一步根据检定结果或知道修正值与温度、频率及其他外部因素的依赖关系，可用计算方法确定对仪表示值的修正值；然后对不正确的测量结果在代数上增补修正值。

有时不用修正值，而用修正因数，也就是需要给仪表示值乘以固定的数，以便消除系统误差。修正因数用于消除分压器、电桥的比例臂等的系统误差，换句话说，校正过的数值以相乘数的形式包含在测量结果之内。

在某些情况下完全消除系统误差是不可能的，甚至在引入修正值之后还有没消除的残差，其规律性是不知道的。用概率理论和数学统计方法，实现对这个规律性的分析。

在记录测量结果时，用指出区间界限的方法记载没有消除的系统误差，系统误差以给定的概率 P_c 处于该区间内，如果可能的话，应指出系统误差分布的函数。例如， $1.018\,564\text{ V}$ ； Δ_c 从 0 到 $5 \times 10^{-6}\text{ V}$ ， $P_c = 0.95$ 这样的记录表示已测的电压等于 $1.018\,564\text{ V}$ ，同时系统误差可能是从 0 到 $5\mu\text{V}$ ，概率为 0.95。

彼此独立作用的大量原因引起随机误差。这些原因导致同一量的单个测量结果彼此不同，同时这些变化的发生是没有任何规律性的。

为了减少随机误差的影响，在相同条件下用同一器具多次测量同一个量（在这种情况下单个测量叫做观察）。很显然每 i 个观察的结果中将含有系统误差 Δ_c 和随机误差 Δ_i 。消除系统误差后，单个测量结果可用 $X_i = X + \Delta_i$ 的形式表示，式中， X 为被测量值。如果进行 n 次观测，并计算结果的算术平均值 $\bar{X}$ ，则得

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X + \Delta_i) \\ &= \frac{nX}{n} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i\end{aligned}$$

由此看出，测量结果的随机误差等于单个观测随机误差的算术平均值。因为，正如上边指出的那样，随机误差是对中随机量，在大量的观测下其平均值将趋近于零。实际上不可能无限制地增加观测次数，同时这也是没有必要的，因为10~15个观测已经能够明显地减少结果的随机误差。

为了分析和评价随机误差，利用几率理论方法，这种方法是以在非常大量的观测下，不同符号的随机误差是等几率的，并且与大误差相比常常遇到小误差的理论为基础的。

可用以图、表或分析公式形式给出的分布函数最完备地表征随机误差。知道分布函数可以求得随机误差的任意特性。但是确定实际的分布函数要做出很大的努力，如大量的观测和结果的复杂数学处理，因此很少这样做，只有在非常重要的测量中才进行。

正如实践指出的那样，多数的实际分布函数能以足够的准确度近似于标准函数的有限数量，见ГОСТ 8.011—72《国家保证测量统一系统。测量准确度指标和测量结果表示形式》和表1。所有这些都是截尾分布，并且可以用一个参

数——均方偏差 σ 来表征。将 σ 乘以因数 g 可得到误差的极限值，不同函数的因数值在表1中给出。在具有实验数据的物理先决条件基础上选择函数形式。例如，众所周知，在数字仪表中量化误差是均匀分布的，而有间隙活动型现象起重要作用的仪表，其误差是非模态分布的。

在记录测量结果时，指出标准近似种类的标志和以被测量值单位表示的测量误差随机分量的均方偏差评价，例如220V， $\bar{\sigma}(\Delta) = 0.1V$ ，均匀分布。

第2节 计量器具的分类

在测量时使用的，并具有规范化计量性质的技术器具叫做计量器具。图1指出了电磁量计量器具的分类。

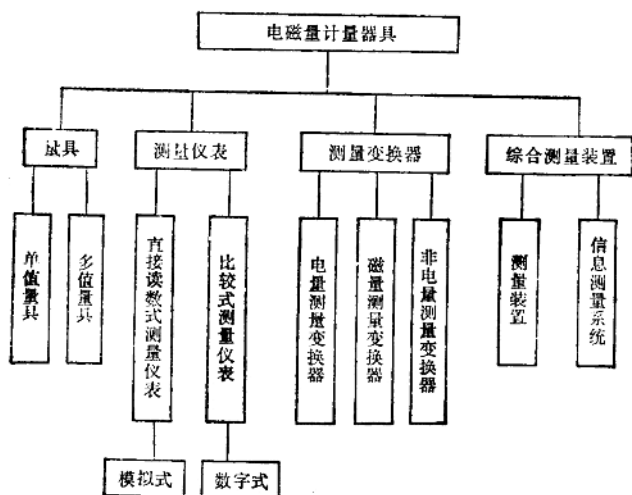
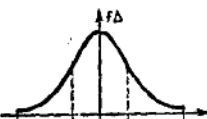
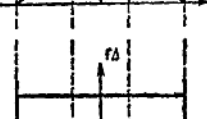
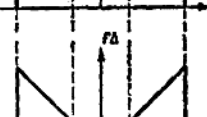
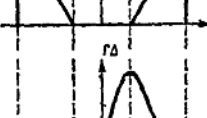


图1 计量器具的分类

表 1

函数名称 和符号	概 率 密 度		$\xi = \frac{a}{\sigma}$
	函 数	形 式	
正态函数 (高斯函数) норм	$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}\right)$		3
三角函数 (辛普森函数) Δ	$f(\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{a^2}(a - \Delta), & \text{当 } \Delta \leq a \text{ 时;} \\ 0 & \text{当 } \Delta > a \text{ 时} \end{cases}$		2.4
梯形函数 трап	$f(\Delta) = \begin{cases} \frac{3}{4a} & \text{当 } \Delta < \frac{a}{2} \text{ 时;} \\ \frac{3}{4a} \left(1 - \frac{ \Delta }{a}\right) & \text{当 } \frac{a}{2} \leq \Delta < a \text{ 时;} \\ 0 & \text{当 } \Delta \geq a \text{ 时} \end{cases}$		2.3
均匀函数 равн	$f(\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{2a} & \text{当 } \Delta \leq a \text{ 时;} \\ 0 & \text{当 } \Delta > a \text{ 时} \end{cases}$		1.7
非模态函数 I ам I	$f(\Delta) = \begin{cases} \frac{ \Delta }{a^2} & \text{当 } \Delta \leq a \text{ 时;} \\ 0 & \text{当 } \Delta > a \text{ 时} \end{cases}$		1.4
非模态函数 II ам II	$f(\Delta) = \begin{cases} \frac{9}{4a^2} \Delta - \frac{3}{4a} & \text{当 } -\frac{a}{3} \leq \Delta \leq a \text{ 时;} \\ 0 & \text{当 } \Delta < -\frac{a}{3} \text{ 和 } \Delta > a \text{ 时} \end{cases}$		1.3
雷里函数 (截尾函数) пер	$f(\Delta) = \begin{cases} \frac{2\Delta}{m} \exp\left(-\frac{\Delta^2}{m}\right) & \text{当 } \Delta \geq 0 \text{ 时;} \\ 0 & \text{当 } \Delta < 0 \text{ 时} \end{cases}$ 式中 $m = \frac{4\sigma^2}{4-\pi}$		3.3

量具。用于复现一给定值的物理量的计量器具叫做量具。分为单值和多值量具。

单值量具复现物理量的一个值，例如，电阻线圈复现电阻的某个值，标准电池复现电动势值。

电学和磁学量的单值量具的标称值，一般用 10^n 这个数来表示，式中， n 为任意一个正的或负的整数。但在某些情况下量具值可能不等于整数，例如，标准电池的电动势为 1.018V。

多值量具用于复现同一个物理量的一系列值。这些量具本身是一种均匀地或断续地改变量值的装置。例如，用可变电容测量电容器能够均匀地改变电容值，而可变电感器能均匀地改变电感。作为多值量具的电阻（或电感）箱得到了广泛的应用。这种量具是在一个共同壳体内、结构上连接的，并包括在不同组合下，能接通单值量具的切换开关的单值量具组合内。在实际测量中均广泛应用电阻箱、电容箱、电感箱。

某些量具能够同时复现两个物理量值。例如，测量电容器可同时是电容量具和介电损耗正切量具，电感线圈可同时是电感量具和品质因数量具。

量具本身不一定是简单的装置，例如，像电感线圈或电阻箱那样简单。在某些情况下是不仅含有无源元件，而且含有源元件的相当复杂的装置，例如，石英振荡器——电振荡频率量具。但用量具复现某些量是相当困难的，甚至不太可能，电功率和电能属于这类量。

测量仪器——是以观测者直接接受的形式处理测量信息的计量器具。

在测量时将被测量与取作单位的某一量进行比较。根据仪表存在的比较方式，将仪表分为直接读数式仪表和比较式

仪表。第一种仪器是根据以被测量为单位刻度的标尺直接读取测量结果（电流表、电压表、电阻表等）。在比较式仪器中，在每次测量时把被测量与量具（电桥、电位差计）复现的量进行比较。因此，在用比较式仪器的测量过程中，必须使用量具，而用直接读数式仪表测量时不必使用量具。但由此不能得出直接读数式仪表能从测量过程中完全排除量具的结论。在这种仪表刻度时，在仪表制造过程中量具将量值传递给仪表。

根据输出信息的形式，仪表分为模拟式仪表（其计数装置是带有指针的标尺）和数字式仪表。

测量变换器——为便于传递，对测量信号进行进一步变换、处理、保存，但不给予观测者直接感受的计量器具。

根据输入（被测）量的种类分为电的、磁的和非电量的变换器。在实际电测量中比例变换器使用最广，即这些变换器的输出量与输入量相差一定倍数。电流和电压测量变换器、分流器、分压器、放大器属于此类。这些变换器扩大了仪表的测量范围，使得制造多量程仪表成为可能，提高了其工作的安全性。磁量变换器能够得到与被测磁学量值成比例的电信号，以此简化了测量过程并提高了其准确度。磁量变为电量的感应式、量子式、电磁式变换器得到了广泛的应用。

综合测量装置。量具、测量仪表、测量变换器可以单独使用，也可以和其他计量器具一起使用，例如，作为测量装置的组成部分。

测量装置——这是放在一起的功能上组合的计量器具与为方便观测者直接接受的形式处理测量信息的辅助装置的总和。用于测定材料磁特性、测量和研究电工器件的装置