

电子测量原理

成都电讯工程学院

郑家祥 陆玉新 编

国防工业出版社



内 容 简 介

本书比较详细地论述了电子测量的基本原理及测量方法。全书共分两篇。第一篇主要介绍了测量学及计量学的基本知识、误差理论及数据处理。此外，还编写了非正态分布、电子测量仪器的误差检验等参考内容。第二篇着重介绍了电压、频率、阻抗等基本电参量的测量技术及其误差分析，并概要地介绍了电子测量中一些带共性的问题，以及自动测试系统等。

本书在阐述基本理论的同时，还介绍了现代电子测量中的若干新技术和新理论。

本书系高等院校电子仪器及测量技术专业的教学用书。同时，对从事电子测量及计量工作的科技人员也有一定参考价值。

电 子 测 量 原 理

成都电讯工程学院

郑家祥、陆玉新 编

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092^{1/16} 印张28 855千字

1980年1月第一版 1980年1月第一次印刷 印数：00,001—12,400册

统一书号：15031·1968 定价：2.85元

前 言

本书系高等学校工科电子类电子仪器及测量技术专业的统编教材之一。

本书的教学时数为 100 学时左右。

考虑到近年来电子测量技术及仪器的发展极为迅速，因此，本书在着重阐述基本理论的同时，力求反映国内外电子测量技术的新发展和新成就。本书第一篇介绍了测量学及计量学的基本概念，并较详细地阐述了误差理论的一些新进展。例如，关于系统不确定度的概念、置信度问题、系统误差及差错的统计检验方法、非正态分布、误差的合成等。本书第二篇，除了对电子测量中一些带共性的问题加以综述外，着重介绍了电压、频率、集中参数电路阻抗的测量技术及其误差分析。此外，还介绍了测量系统的自动化问题。在以上论述中，对取样技术、频率的精密测量技术（包括频率稳定度的时域及频域测量技术）、原子频率标准、约瑟夫逊效应、频率合成技术、数字测量技术、随机测试技术，以及自动测试技术等部分别作了概略的介绍。

关于本书内容的安排和使用本书时应注意的问题，将在绪论中详细加以说明。

书中凡是加有“*”号的章节，为选学内容，教学中可视具体情况自行取舍。

为了适应教学及自学需要，各主要章后附有习题，书末附录有常用数表、部分公式的推导过程，以及实验参考资料等。

华南工学院李拔强、金云程二同志详细地审阅了本书初稿，并提出了许多宝贵意见，编者谨在此表示衷心的感谢。

本书一至十章由郑家祥同志编写；十一至十三章以及实验参考资料，由陆玉新同志编写。由于我们业务水平有限，书中肯定会有不少缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

一九七九年二月十日

目 录

绪论	1	§ 5-3 随机误差的合成	95
第一篇 测量的物理及数学基础		* § 5-4 系统不确定度的合成	105
第一章 测量学及计量学的基本知识	5	§ 5-5 不同性质误差的合成	108
§ 1-1 测量学的基本概念	5	§ 5-6 微小误差准则	109
§ 1-2 计量学的基本概念	6	§ 5-7 误差的分配	110
§ 1-3 测量方法的分类	10	§ 5-8 最佳方案的选择	113
§ 1-4 误差与修正值	11	习题	115
§ 1-5 测量误差及其主要来源	14	第六章 非等精度的测量	118
§ 1-6 误差的性质及其分类	17	§ 6-1 概述	118
习题	22	§ 6-2 测量结果的权及广义算术平均值	119
第二章 随机误差	23	§ 6-3 广义算术平均值的精密度	121
§ 2-1 概述及数学基础	23	§ 6-4 广义算术平均值的权	122
§ 2-2 随机误差的统计直方图	30	§ 6-5 间接测量中函数权的确定	122
及其数学模型	30	习题	123
§ 2-3 随机误差离散度的表示方法	36	第七章 测量结果的处理	124
§ 2-4 算术平均值及最小二乘法概念	41	§ 7-1 概述	124
§ 2-5 算术平均值及标准偏差的简便计算	43	§ 7-2 测量结果的数据处理	124
§ 2-6 测量结果的置信度及表示方法	45	§ 7-3 测量结果的图解分析	130
§ 2-7 判断可疑误差的统计学方法	50	§ 7-4 利用最小二乘法修匀曲线	134
习题	53	§ 7-5 修匀曲线及直线的工程方法	141
第三章 系统误差	54	§ 7-6 经验公式的确定	144
§ 3-1 概述	54	§ 7-7 插值法的应用	146
§ 3-2 系统误差的检查	54	习题	152
§ 3-3 系统误差的削弱或消除	60	* 第八章 电子测量仪器的误差检验	* 153
§ 3-4 系统误差的消除准则	64	§ 8-1 概述	153
习题	65	§ 8-2 仪器误差的含义及数学形式	153
* 第四章 非正态分布	* 67	§ 8-3 电子测量仪器误差的表示方法	155
§ 4-1 概述	67	§ 8-4 仪器误差检验的一般问题	158
§ 4-2 非正态分布的几种形式	67	§ 8-5 误差检验中的可靠性问题	163
§ 4-3 随机性系统误差的非正态分布	72	§ 8-6 多阶检定中的误差传递	165
§ 4-4 非正态分布中的置信问题	73	第二篇 基本测量技术	
§ 4-5 分布假设的统计检验	82	第九章 电子测量引论	169
习题	91	§ 9-1 概述	169
第五章 误差的合成与分配	93	§ 9-2 正弦测试技术	171
§ 5-1 概述	93	§ 9-3 方波及脉冲测试技术	178
§ 5-2 系统误差的合成	93		

§ 9-4 噪声测试技术 181

§ 9-5 电子测量中的变换技术 189

第十章 电压测量技术 203

§ 10-1 概述 203

§ 10-2 交流电压的表征 205

§ 10-3 电子技术中电压测量的基本方案 208

10-3-1 利用变换原理测量交流电压 208

10-3-2 利用比较原理测量电压 266

10-3-3 利用取样技术测量高频电压 274

§ 10-4 电压测量中的波形响应 276

§ 10-5 脉冲电压的测量 285

10-5-1 利用示波器测量脉冲电压 285

10-5-2 利用检波器测量脉冲电压 286

§ 10-6 电压的计量 290

§ 10-7 电压测量的应用 295

习题 296

第十一章 时间及频率的测量 299

§ 11-1 概述 299

§ 11-2 测量频率的工程方法及误差分析 303

11-2-1 利用电荷的某种频率响应特性来测量频率 303

11-2-2 利用有强比较法来测频率 306

* § 11-3 时间及频率标准 326

11-3-1 时间频率的工作基准(石英晶体振荡器) 326

11-3-2 时间频率基准 328

§ 11-4 频率的精密测量 338

11-4-1 频率源的主要质量指标 340

11-4-2 频率稳定度的定义 342

11-4-3 时域定义与频域定义之间的关系 347

11-4-4 频域的时域测量技术 350

11-4-5 频域的频域测量技术 352

11-4-6 无标淮三台频率源的相关对比 355

§ 11-5 频率的计量 356

§ 11-6 频率测量的应用 357

习题 358

第十二章 集中参数阻抗测量 360

§ 12-1 概述 360

12-1-1 阻抗的特性及其表示方法 360

12-1-2 阻抗标准 364

12-1-3 阻抗测量的特点 367

§ 12-2 阻抗测量方法及误差分析 367

12-2-1 概述 367

12-2-2 电桥法测阻抗 367

12-2-3 谐振法测阻抗 386

§ 12-3 阻抗测量的新进展 397

12-3-1 电阻的交流测量法 397

12-3-2 阻抗测量的数字化和自动化 402

§ 12-4 阻抗测量的应用 407

12-4-1 空管特性的测量 407

12-4-2 天线阻抗的测量 409

12-4-3 非电参量的电测法 409

习题 412

第十三章 测量系统及测量自动化 414

§ 13-1 测量系统 414

13-1-1 测量系统的组成与分类 414

13-1-2 对测量系统的基本要求 417

13-1-3 自动化电子测量系统的新发展 420

§ 13-2 测量的自动化 421

附 录

附录 I 误差函数表 429

附录 II 关于 $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-a^2 t^2} dt = \sqrt{\frac{\pi}{a}}$ 的推导 430

附录 III 关于 $\sigma^2 = \frac{1}{2k^2}$ 的推导 431

附录 IV t 分布表 431

附录 V 标准偏差的置信限(χ^2 分布) 432

附录 VI 标准偏差的置信限(对称限) 433

附录 VII χ^2 检验数表($\nu = N - 3$) 434

附录 VIII 分布函数的极值检验 435

附录 IX 关于式(12-40) $\dot{U}_p = \delta Z K E_0$ 的推导 435

附录 X 实验参考资料 436

绪 论

1. 电子测量的意义以及和其它学科之间的关系

测量,是人们认识和改造自然的重要手段。人类对天体的认识、时间的计量,新元素的发现,化学成分的分析,微观现象的研究,物理单位的制订和统一,若干物理定律的发明,直到山川的丈量……都需要进行各种各样的测量。

现代工业中,从零件的加工到机器的装配、调整、更离不开测量。没有统一和精确的测量,便无法保证产品质量。

随着科学技术向纵深发展,各学科之间的渗透性越来越强,所研究的对象更加广泛。一个研究课题的解决,往往需要进行大量的或非常复杂的测量、统计、分析和归纳工作。因而,测量工作(即实验手段)在科学研究中的地位越来越重要。测量学本身,也在科学技术的发展中逐步形成了一门完整、精密及理论与实践密切结合的学科。

无线电电子学的诞生和发展,为经典的测量学提供了崭新的手段,并出现了电子测量技术这一新分支。

电子测量,是泛指以电子技术为手段进行的测量。电子测量的内容涉及到在极宽的电磁频谱上对所有电量、磁量,以及各种非电量的测量。今天,电子测量已形成了一门发展很迅速、与现代科学技术密切相关,并对现代科学技术的发展起着重大推动作用的独立学科。

从某种意义上说,近代科学技术的水平,是由电子测量的水平来保证和体现的。而后者也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。

近代科学技术的许多领域(例如,原子物理学、量子电子学、无线电电子学、光学、材料科学、化学、生物学……)都对电子测量技术的发展产生重大的影响。其中,以无线电电子学为最显著,这方面的例子很多。

以电子示波器为例,其心脏部分的阴极射线管(即示波管),早在1897年就出现了。但直到本世纪三十年代后期,由于宽带放大、高压整流、脉冲技术等电子技术的实际应用,才开始出现了电子示波器的雏形。电子示波器的出现,在电子测量的发展中具有重大意义,它不仅加深了人们对许多电现象的理解,而且反过来又促进了脉冲技术的发展,并对以后的雷达、电视奠定了基础。随着电子技术水平的提高,以及新型元器件的不断完善,电子示波器几十年来已发生了巨大的变化。今天,各种类型的电子示波器,已成为电子技术各部门必不可少的实验设备。

近年来,电子计算技术的发展十分迅速。自七十年代初期开始,出现了电子计算技术与电子测量仪器相结合的一代崭新仪器及测试系统。这样,就可以对若干电参量自动进行测量,并可自动地进行量程选择、数据记录、结果的计算、某些误差的修正、甚至检查故障等。自动化测量仪器及系统的出现,不仅打破了人们长期以来的若干传统观念,而且对整个电子技术和若干近代科学技术产生了巨大影响。例如,由于集成电路向大规模及超大

规模发展，在一块硅片上就集成了数千只元器件，如果用经典的电子测量仪器逐个进行测试，是根本不可能的。而用电子计算机控制的自动化大规模集成电路测试仪，则能迅速、自动地进行测试和分选，从而保证了大规模集成电路的质量及其推广应用。

由一片或几片大规模集成电路作成中央处理单元（CPU），便可构成微处理器（ μP ）。它不仅可用来组成微型计算机，而且与电子测量仪器相结合，可组成如上所述具有一系列自动测试及运算功能的自动化测量仪器，或称为“智能”仪器。其中，计算技术与电子测量技术已融为一体。目前，智能仪器以及由计算机与若干可控电子测量仪器组成的自动测试系统，已成了八十年代电子测量技术及仪器发展的重要方向。

2. 电子测量的特点

电子测量的主要特点，可归纳为以下几点：

(1) 频率范围极宽

仅就狭义的电子测量而言，其频率低端已进入 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Hz 量级，而高端已达 40 GHz，有的则已进入可见光的范围（约 88×10^{12} Hz）。

由于通常在不同的频段，其测量方法、元器件、工艺结构等都可能相差很大，因此，早期的电子测量，当被测对象的工作频率范围很宽时，往往要用几种工作于不同频段的仪器来进行衔接。显然，这是不能适应快速、自动测量要求的。近年来，由于采用了若干新技术（例如，取样技术、扫频技术、随机测试技术、频率合成技术等），新的宽频段元器件及电路，新的工艺等，电子测量技术正在向着宽频段以至全频段（例如，从直流或低频一直扩展到几十兆赫）方向发展。

(2) 量程很广

电子测量仪器与其它测量仪器相比，量程很广。例如，米尺最小可以测至 1 mm，最大可测出 1 m，量程是 1:1000，即三个量级；游标尺的量程约四个量级；普通卷尺的量程为三个量级；即使是大地测量用的股钢尺，量程也不过四至五个量级。然而，普通的欧姆表，可测出大约几欧至几十兆欧的电阻，量程达六个量级；一台晶体管电压表可以测出数百微伏至一千伏的电压，量程为七个量级；一台数字式频率计，其量程甚至可达十七个量级以上。

(3) 精确度很高

电子测量仪器的精确度可达相当高的水平。以时间频率测量为例，测量的精确度可优于 10^{-12} 量级，是目前物理量中测得最精确的一个。相比之下，长度、热量及力学测量的最高精确度目前还只能分别达到 10^{-8} 、 10^{-5} 及 10^{-6} 量级。

(4) 可进行遥测

电子测量的一个突出优点，是可以通过各种类型的传感器实现遥测、遥控。这对于远距离（包括人造卫星、导弹、其它星球以及远处地面等）或人体难以接近的地方的待测信号的测量，具有特殊的意义，这也是电子测量在各种学科得以广泛应用的又一个重要原因。

(5) 可实现快速测量

由于电子测量是通过电磁波的传播和电子的运动来进行工作的，因而可实现测量过程的高速度。在现代科学技术，特别是国防尖端技术中，测量过程（包括对测量结果的处理）的高速度具有十分重要的意义。

(6) 易于实现测量过程的自动化

前面曾提到测量自动化的重要意义。自动化的实现需要借助于各种脉冲及数字电路，而电子测量仪器数字化的发展，为与电子计算机相结合组成自动化仪器创造了非常有利的条件。目前已出现了许多不同类型带微处理器的自动化示波器、信号发生器、数字式电压表、数字式频率计、数字式阻抗仪、数字式频谱分析仪，以及受计算机控制的自动化集成电路测试仪、自动网络分析仪和其它自动测试系统。

3. 电子测量的内容

电子测量的内容很多，仅就集中参数电路而言，主要的电参量可分为以下四大类型。

(1) 关于电能的量 包括电流(I)、电压(U)、功率(P)、电场强度(E)等；

(2) 关于电路参数的量 包括电阻(R)、电感(L)、电容(C)、阻抗(Z)、品质因素(Q)及损耗角正切($\text{tg } \delta$)等；

(3) 关于电信号波形特征的量 包括频率(f)、周期(T)、相位(ϕ)、失真度($\gamma\%$)、调幅度($M\%$)、调频指数(m)等；

(4) 关于电子设备性能的量 包括放大量(K)、衰减(A)、灵敏度(S)、通频带(B 或 Δf)等。

上述各种电参量中，具有重要意义的是频率、电压、阻抗、相位等基本电参量。它们是其它许多次要参量测量的基础。在电子测量领域中，有些量是很少测量的，如高频电流的测量，由于测量起来很不方便，常常被电压测量所取代，又例如功率的测量，除了微波分布参数电路外，一般也很少进行测量。

4. 本课程的任务及学习方法

《电子测量原理》是高等学校电子仪器及测量技术专业的一门重要专业课。根据教育计划的安排及分工，本课程的主要任务是学习有关测量的基本概念、测量误差理论及数据处理方法，以及一些基本的电参量测量技术等。

鉴于本课程的特点，在学习方法上应注意处理好以下几个关系：

(1) 重点与一般的关系

如前所述，电子测量的内容很多，涉及的知识面也很广。在学习时必须有所侧重。例如，本书第一篇《测量的物理及数学基础》涉及较多的概率论、数理统计等知识。本课程只是从应用的角度加以介绍，没有作详细的数学推导及计算，读者也不宜把精力用在这方面。又如，第九章介绍的约瑟夫逊效应、第十一章介绍的原子频率标准、第十三章介绍的自动测试系统等，分别涉及到若干原子物理学、量子电子学以及电子计算机原理等其它学科的内容；第九、十章所介绍的取样技术、频率合成技术、时域、频域及噪声测试技术等，其具体分析也超出了本书的范畴。对上述内容以及书中其它加有“*”号的部分，读者只需要有一般的了解。总的说来，学习本课程的重点，是了解一般测量知识（第一章）掌握测量误差的性质及数据处理的方法（第二、三、五、七章），以及电压（第十章）、频率（第十一章）、阻抗（第十二章）等基本电参量的测量技术。同时，通过若干习题、实验来巩固和加深对理论的认识和培养分析及解决实际问题的能力。

(2) 掌握基本内容与灵活应用的关系

由于实际的待测参量和测量方法种类繁多，故本书不可能对各种参量及所有方法都一

一论述，只能选择其中最基本、最有代表性的几种作比较详细的分析。对其它次要参量的测量，有的只是作为应用举例简单予以介绍（例如，调幅度测量、失真度测量、噪声系数测量、衰减测量、相位测量等），还有更多参量尚未提到。因此，在学习本课程时，应在掌握几种基本电参量测量技术的前提下，注意灵活运用。例如，在对电压测量技术有了比较全面的了解后，便为灵敏度、放大量、幅频特性、衰减量、效率、失真度、调幅度、噪声系数等许多次要参量的测量打下基础。因为这些参量的测量都可归结为电压的测量，只不过在具体方法上各有其特殊性罢了。

（3）测量技术与仪器电路的关系

测量技术与测量仪器是紧密联系的，但又有一定的侧重和分工。本课程着重于对测量原理、方案、方法和测量结果进行分析，对实现该原理及方案的电子测量仪器，只局限于介绍其组成方框。对其中具体的电路形式、设计计算等通常不作分析。因为就单元电路而言，其原理已在有关电路课程中作了介绍，而总体设计及某些特殊的、重要的单元电路分析，则是《电子测量仪器原理》课的任务。因此，学习本课程时应注意集中在对测量原理的了解、测量方案的制订、测量方法中应注意的问题、对测量结果的分析，以及研究如何尽可能减少测量误差等方面。对具体的电路，除了某些带有方案性特点的例子（如电压测量中的各类检波器）外，一般只需要作定性的了解。

（4）理论分析与实际操作的关系

《电子测量原理》是一门实践性很强的课程，在实际进行测量时，往往出现许多事先在制订方案中没有估计到的现象。因此，判断某种测量方案及方法是否能达到预期的效果，必须通过实践来加以检验。为此，本课程除安排有三个比较集中的实验外，还在有些章节中附有若干具有小型实验性质的习题，对这些题目，应尽可能通过实验加以验证。特别注意在理论指导下提高实验技能，并对实际操作中出现的各种现象作出正确的解释。

总之，既不能把本课程作为纯理论课来学习，也不能把它降为一般的实验课，而应注意二者的密切结合。

第一篇 测量的物理及数学基础

第一章 测量学及计量学的基本知识

§ 1-1 测量学的基本概念

一、测量的定义

测量,是人们借助于专门的设备,通过实验的方法,对客观事物取得数量观念的认识过程。

二、测量结果的表示

测量结果既可能表现为一定的数字,也可能表现为一条曲线,或显示出某种图形。在特殊情况下,也可能表现为某种反馈形式的控制信号。但无论其表现形式如何,测量结果总包含有一定的数值(绝对值大小及其符号)以及相应的单位两部分。即测量结果是有名数。例如, 9.17 V 、 $22.40\ \Omega$ 、 $790\ \text{kHz}$ 等[●]。

表示测量结果时,必须同时注明单位,否则,该结果将无意义。

由于各种因素的影响(见§1-5),测量结果中不可避免地存在着误差。为了说明测量结果的可信赖程度,在表示测量结果时,还必须同时注明其测量误差数值或范围。

三、量具和仪器

测量是一个比较过程,即把一个被测量与一个充当测量单位的已知量进行比较,确定它是该单位的若干倍,或是若干分之一。

在各种比较过程中,必须有一个体现测量单位的已知量,在测量学里,将这些体现测量单位的器具称为量具。只有少数的量具如尺子、量杯等直接就可以参与比较。然而,大多数量具在参与比较时,都需要借助于专门的比较设备才能完成。例如,用标准电阻来测量一个未知电阻时,需要借助于电桥;利用标准电池来测量一个未知的直流电压时,需要借助于电位差计等。这些用作比较的设备称为比较仪。

大多数量具都要配以相应的比较仪才能进行测量,其操作较为麻烦。有的量具结构比较脆弱或对生活条件要求比较苛刻,而且大多数量具的测量范围不宽。此外,还有不少参量(如速度、效率、功率、高频电压、非线性失真等)无法作成实物量具。因此,在实际工程测量中,很少使用量具,而是广泛地使用各种直读式仪器,这类仪器可以通过其读数机构直接得到测量结果。日常工作中使用的三用表、失真度测量仪、电子示波器、数字式频率计等,都属于直读式仪器。直读式仪器测量速度快,使用起来也比较简便。但是,由于它在生产出厂前要对读数装置进行定标,再加上其零、部件(尤其是各种可调的零、部件)较多,造成读数不稳的因素也较多,故直读式仪器一般不如量具测量的精确度高。

● 有的测量结果,表面上是无名数,但实际上是两个有名数之比。例如,电压增益为输出电压(V)与输入电压(V)之比。

比较仪和直读式仪器都属于测量仪器。测量仪器(简称仪器)是泛指一切参与测量工作的设备。它包括各种直读及非直读的仪器、作比较用的仪器(如电桥)、为测量工作提供各种信号及电源的设备以及完成其他辅助任务(例如,放大、滤波、频率变换、记录、运算等)的设备。

在无线电电子学中使用的各种信号发生器、电压表、频率计、Q表、示波器、网络分析仪、失真度测量仪等都是测量仪器。由于这些仪器都是运用无线电电子技术,并以各种电子元件、器件、部件为核心组成的仪器,故又称为电子测量仪器。

四、测量装置及测量系统

在实际工作中,为了完成某种测量任务,往往需要把几台测量仪器以及其他辅助设备组成一个整体,这个整体称为测量装置。例如,衰减测量装置就包含有信号发生器、标准衰减器、比较设备、检测设备、显示器等。

为了实现对多种参量的综合测量,还可以把若干不同用途的测量仪器及有关辅助设备组成一个测量系统。例如,微波测量系统、网络测量系统、接收机综合测试系统、集成电路测试系统等。早期的测试系统,只是把各种仪器及辅助设备简单地联结在一起,根据测量任务的不同,随时由人工搬动转换开关或重新接线。后来发展成把各种仪器及辅助设备装到一个机箱或机柜内,搬动各种功能开关,便能实现对不同参量的测量。例如,雷达综合测试仪、电台综合测试仪等。随着电子计算机、特别是微处理器的诞生和发展,使电子计算技术与电子测量仪器结合为一整体,从而迅速地出现了各种自动测试系统(简称ATS)。这种自动测试系统在测量中,几乎所有的测量步骤、数据的记录整理、甚至某些误差的修正、故障的判断等均可由该系统自动完成。

五、测量中的变换过程

近代测量中除了比较过程外,还必须进行各种变换。变换的含义有两个方面:一方面是为了解决某些被测量不便于或无法直接观测的困难而采取的变换。例如,电压的高低利用指针式电压表可以变换成指针的偏转位移,就很容易观察出来。还有其他许多物理量,如速度、压力、湿度等,都必须经过变换才能测量出来。

另一方面,随着科学技术的发展,要求测量的精确度愈来愈高、速度愈来愈快、量程愈来愈广,以及能实现自动测量等,这时,原有的经典测量方法,往往就不能满足上述各项新的要求。于是,对变换器提出了新的研究课题。例如,在各种电参量的测量中,目前频率测量的精确度最高,因而许多电参量(如电压、电容、电感、相位等)都在积极设法变换成频率的量来进行测量。在自动化测试中,变换器的设计还必须考虑自动化、多功能、误差的修正,以及计算机编制程序的方便等。

§ 1-2 计量学的基本概念

一、计量的意义、任务及其与测量的关系

由于测量在本质上是一个比较过程。因此,作为体现某一物理量(简称参量)单位的已知量,必须以严格的科学理论为依据来定义。而同一物理量的千万只量具及仪器所表示的测量单位,也必须以此为依据,互相统一。于是,便形成和发展了计量学这门科学。

广义地讲,计量学是一门关于测量的基础理论的科学。它是研究如何保证量值的统一

和准确所必须的方法、技术、政策以及专门设备的科学。

计量学研究的内容包括：

- 1) 关于测量及计量的一般理论；
- 2) 关于测量及计量的方法、技术及计量用的专门量具和仪器（指各种基准和标准）；
- 3) 关于各种物理量单位的定义，以及各单位之间的关系（即单位制）；
- 4) 关于量值的传递，以及保证量值统一而必须采取的措施、规程和法制等。

上述第四项内容，使得计量学还必须具有一定的法律性和权威性。有关这部分工作又专门称为法制计量学。

*二、物理量的单位及单位制

根据定义而令系数为 1 的量称为物理量的单位。例如，米是长度的单位；安培是电流的单位，等等。单位是表征测量结果的重要组成部分，是用以对两个同类物理量进行比较的基础。

把那些任意地、彼此无关地分别加以确定的物理量单位作为基本单位，由这些基本单位通过定义、定律或其他函数关系式推导、派生出各种导出单位，然后由这些基本单位和导出单位便可以组成各种不同的单位制。例如，静电单位制（CGSM 制）、实用单位制（MKSA 制）等。由于单位制的类型很多，给科学技术的进一步发展带来了许多混乱。于是，在 1948 年第九届国际计量大会上通过了一项决议：建议在国际上采用一种以实用单位为基础而规定的统一单位制。1960 年第十一届国际计量大会上，正式通过了这种新的统一单位制，命名为国际单位制，代号为 SI。

自 1971 年第十四届国际计量大会以来，国际单位制的基本单位共有以下七个[●]：

1) 长度单位——米

米等于 Kr^{86} 原子的 $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的 1650763.73 个波长的长度。

2) 质量单位——千克（公斤）

千克是质量单位，等于国际千克原器的质量。

3) 时间单位——秒

秒是 Cs^{133} 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间。

4) 电流单位——安培

安培是一恒定电流，若保持在处于真空中相距 1 米的两无限长而圆截面可忽略的平行直导线内，则此两导线之间产生的力在每米长度上等于 2×10^{-7} 牛顿。

5) 热力学单位——开尔文

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

① 摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与 0.012 千克 C^{12} 的原子数目相等。

② 在使用摩尔时，基本单元应予指明，可以是原子、分子、离子、电子及其它粒子、

● 国家标准计量局，《国际单位制及使用办法》，1978.1。

或者是这些粒子的特定组合。

7) 光强度单位——坎德拉

坎德拉是在 101325 帕斯卡压力下, 处于铂凝固温度的黑体的 1/600000 平方米表面垂直方向上的光强度。

表1-1 国际单位制中一些常用的力学量及电学量

量	名 称	代 号	
		中 文	国 际
长度	米	米	m
质量	千克(公斤)	千克(公斤)	kg
时间	秒	秒	s
力	牛顿	牛	N
能量、功、热量	焦耳	焦	J
功率	瓦特	瓦	W
电流	安培	安	A
电流密度	安培每平方米	安/米 ²	A/m ²
电量、电荷	库仑	库	C
电位、电压、电动势	伏特	伏	V
电场强度	伏特每米	伏/米	V/m
磁通(磁)	韦伯	韦	Wb
磁感应(强度)	特斯拉	特	T
磁场强度	安培每米	安/米	A/m
频率	赫兹	赫	Hz
电阻	欧姆	欧	Ω
电导	西门子	西	S
电容	法拉	法	F
电感	亨利	亨	H

此外, 国际单位制中, 还有两个为便于引出有关导出单位而定义的辅助单位, 即平面角单位“弧度”以及立体角单位“球面度”。

国际单位制中一些常用的力学量及电学量的单位列于表 1-1。

国际单位制由于吸取了其它单位制的优点, 并包括了力学、电磁学、热力学、光学等各种物理量, 是目前最完善的, 故很快为世界上几十个国家所采用。一些重要的国际组织, 如国际标准化组织(ISO)、国际法制计量组织(IOLM)、国际电工委员会(IEC)、联合国教科文组织(UNESCO)等, 均作出采用国际单位制的决定或建议。我国于 1977 年初参加国际计量委员会(其常设机构为国际计量局(BIPM)), 同年五月, 作出了“逐步采用国际单位制”的正式决定。

三、基准和标准

所谓基准, 是指用当代最先进的科学技术及工艺水平, 以最高的精确度和稳定性建立起来的、专门用以规定、保持和复现某种物理量计量单位的特殊量具或仪器。

依据基准的性质和用途的不同, 可以分为以下几类:

1) 主基准 又称原始基准或原器, 是指一个国家直接按物理量单位的定义复现的、具有最高水平的基准。经过严格的法定手续, 主基准可用来充当国家基准。

2) 副基准 又称次级基准, 其量值根据主基准来确定, 平时用来代替主基准向下传递量值。这样可保证国家基准不致因经常使用和搬动而降低精度, 通常设有若干副基准以完成各种不同的工作。

3) 作证基准 它是用来检验国家基准的完善性, 并在国家基准一旦损坏或失效时代替国家基准的一种(通常为几个)副基准。通过定期的国际比对, 可以判明国家基准与作证基准之间的量值变化情况, 并能对其系统偏差(见 § 1-5)进行修正以便恢复其原有之值。

4) 参考基准 这是进行量值传递的一种副基准。为了使用方便及对组成基准的不同方案进行比较, 其原理、结构、外形往往与国家基准不同。

5) 中介基准 由于某些基准互相难以进行直接比对, 故需要专门的基准作中介, 例如, 国家伏特基准与国际伏特基准进行比对时, 是通过标准电池来实现的, 此即中介基准。

6) 工作基准 用以直接向下属标准量具或仪器进行量值传递。

一般又把主基准划为一级基准, 各种用途的副基准划为二级基准, 而各种工作基准则属于三级基准^①。

应指出的是, 并非所有单位都配置有上述各种类别、等级的基准。而基准也不限于具体实物或仪器, 有时也可能为某种特定条件下的标准物质。例如, 国际单位制中的温度基准是利用水的三相点(即固相、液相和气相的平衡点)来实现的。

基准器的量值大小并不一定刚好等于一个计量单位。例如, 铯频标复现的时间并不是 1 s 而是 $1/(9192631770)$ s; 氩长度基准复现的是 $1/(1650763.73)$ m; 标准电池复现的是 1.0186 V 等等。

为了保证最高的精确度和稳定性, 基准器的工艺、结构往往都十分精细, 对环境要求也很严格, 但一般操作复杂, 价格较贵, 不宜经常动用。于是, 便根据基准器复现的量值制成了各种不同等级、便于使用的标准量具及仪器, 简称标准。这是一类有限精度的计量标准, 按精度高低又分为一级标准、二级标准和三级标准。物理量的量值便通过基准和各级标准向日常工作仪器进行传递。

四、量值的传递和检定

在生产、科研、日常工作中, 使用着大量的、不同精度、不同类型的量具和仪器。对同一物理量来说, 保证各类量具或仪器所体现的量值互相统一是十分重要的。于是, 就需要通过各级基准、标准以及相应的辅助设备把一个物理量单位从国家基准一直传递到日常工作用的千万只量具或仪器。为了保证所有的传递工作精确可靠和相互统一, 国家计量部门以法定的形式制订出一套检定规程。其中包括检定方法、所用的设备、对标准(或基准)及受检量具或仪器精度比的要求、操作步骤以及对受检量具或仪器给出误差的方式等。

检定规程的执行称为检定。各类量具及仪器(特别是电子测量仪器)由于所用元器件性能的不稳和老化, 在使用一段时间后其精确度可能下降, 故应定期进行检定, 这一工作称为周期检定, 周期长短随仪器种类不同而有不同规定。

各种类别、等级的基准、标准以及工作量具及仪器, 必须按规定的检定周期、检定规程交上级计量部门进行检定并发给合格证书。没有检定合格证书或证书有效期已超过者, 其原有说明书或检定记录上所标明的精度指标不再可信而只能作为参考, 用这样的标准进行产品检验被认为是不合法的。

五、比对

比对工作是计量部门经常开展的一项重要业务活动。比对是指相同(或相近)精度的基准、标准或测量仪器为了比较相互间量值的一致性而进行的一项比较工作。在新的基准和标准的研制中, 比对工作尤为重要。特别当采用不同原理、不同结构、不同方案制成各种基准(如 § 11-3 所述的各种原子频标)时, 为了比较其一致性和对新的计量原理作出评价, 更需要进行相互间的比对。

① 习惯上, 对复现基本单位的基准器均称作基准, 如长度基准、质量基准……。而对若干导出单位的基准器常称作标准, 例如, 原子频率标准、标准电池、标准线圈……。其含义与下面将介绍的标准量具及仪器不同。

有时，由于种种原因，不能由上一级计量机构的基准或标准对本地区或本单位的量具或仪器进行检定时，常常也通过一些相同或相近精度的标准或工作仪器进行相互比对，以确定彼此之间的差异。

§ 1-3 测量方法的分类

测量方法的分类形式很多。例如，根据在测量过程中，被测量是否随时间变化而分为静态测量和动态测量；根据测量结果要求获得的必须数据，分为必要测量和多余测量；根据测量数据是否通过对基本量的测量而求得，可分为绝对测量和相对测量；根据测量条件分为等精度测量和非等精度测量等。但对研究测量技术来说，更有意义的是按测量方法分为直接测量和间接测量两大类。

此外，在上述两类方法的基础上还发展了一类组合测量。

一、直接测量

用预先按已知标准量定度好的测量仪器对某一未知量直接进行测量，从而得出未知量的数值，这类测量称为直接测量。例如，用电压表测电压、用电桥测电阻、用计数器测频率等。

需要注意的是，直接测量并不意味着就是用直读式仪器进行测量。许多比较式仪器（例如，电桥、Q表、电位差计、外差式频率计等）虽然不一定能直接从仪器度盘上获得被测量之值，但因参与测量的对象就是被测量，故仍属直接测量。可见，直接测量有可能达到很高的精度。

二、间接测量

对几个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量，然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格求出该未知量，这类测量即属间接测量。例如，直接测出电阻 R 的阻值及其两端的电压 U ，由公式 $I = U/R$ 便可求出被测量电流 I 的值。

当遇到下列情况之一时，常常需要进行间接测量：（1）直接测量很不方便；（2）直接测量误差较大；（3）缺乏直接测量的仪器；（4）多参数综合测试仪，为了尽可能简化电路及程序等。

三、组合测量

测量中，使各个未知量以不同的组合形式出现（或改变测量条件来获得这种不同的组合），根据直接测量和间接测量所得的数据，通过解一组联立方程而求出未知量的数值，这类测量称为组合测量。

例如，为了测出在环境温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时标准电阻的阻值 R_t ，需利用下述方程，即

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

式中 R_{20} ——在 20°C 下该电阻的实际值 (Ω)；

t ——摄氏温标的度数；

α 及 β ——温度系数。

为了求得任意温度下的 R_t 值，至少必须在三种温度下分别测出 R_t' 、 R_t'' 及 R_t''' 才能列出三个方程，解出三个未知量 α 、 β 及 R_{20} 。

§ 1-4 误差与修正值

利用任何量具或仪器（包括基准、标准）进行测量时，总存在着误差。故测量结果总不可能准确地等于被测量的真值。

所谓真值，是指在一定的时间及空间条件下，某物理量所体现的真实数值，这个真实数值是利用理想无误差引入的量具或测量仪器而得到的。

一、绝对误差

令被测量的真值为 A_0 ，量具的标称值或仪器的示值[●]为 x ，于是得到绝对误差为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-1)$$

由于真值 A_0 一般无法求得，故式 (1-1) 只有理论上的意义，常用上一级标准仪器的示值作为实际值 A 以代替真值 A_0 。由于上一级标准也存在误差（只是小一些），故 A 并不等于 A_0 。但一般地说， A 总比 x 更接近于 A_0 。

x 与 A 之差称为仪器的示值误差，记为

$$\Delta x = x - A \quad (1-2)$$

由于式 (1-2) 以代数差的形式给出误差的绝对值大小及其符号，故通常称为绝对误差。

绝对值与 Δx 相等但符号刚好相反的值，称为修正值，一般用 C 表示。于是有

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1-3)$$

通过检定，可以由上一级标准（或基准）给出受检仪器的修正值。利用修正值便可求出该仪器的实际值

$$A = x + C \quad (1-4)$$

例如，某电流表的量程为 1mA，通过检定而得出其修正值为 -0.02mA 。如用这只电流表测某一未知电流，其示值为 0.78mA ，于是得被测电流的实际值为

$$A = 0.78 + (-0.02) = 0.76\text{mA}$$

修正值给出的方式不一定是具体的数值，也可以是一条曲线、公式或数表。在某些自动测试仪器中，修正值则预先编制成有关程序，贮存于仪器中，所得测量结果，已自动对误差进行了修正[●]。

此外，还需补充说明两点：

1) 根据 IEC359 号公报的推荐，我国第四机械工业部标准 SJ943-75《电子测量仪器误差的一般规定（暂行）》中，对于供给量仪器（如各种信号发生器、稳压电源等），其绝对误差的定义与式 (1-2) 刚好相反，即

$$\Delta x = A - x \quad (1-5)$$

同样，此时修正值 C 的符号也与式 (1-3) 刚好相反。在以后的叙述中，如未加说明，都是指式 (1-2) 及式 (1-3) 的一般情况。

2) 仪器的示值和读数往往容易混淆，但二者是有区别的。读数通常是指从仪器的刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数字，而示值则是该读数所代表的被测量的数值。

● 为便于叙述，以后仅讨论仪器的示值，而不再讨论量具的标称值。

● 实际上只能对其中某些系统误差进行修正。

有时，读数与示值在数字上相同，但一般说来是不同的。通常需要把读数经过简单的计算，查曲线或数表才能得出示值。例如，一只线性刻度为0~100，量程为500 μ A的电流表，当指针指到85分度位置时，读数就是85，而示值 x 为

$$x = \frac{85}{100} \times 500 = 425 \mu\text{A}$$

在记录测量结果时，为避免差错和便于查对，应同时记下读数及其相应的示值。

二、相对误差

为了说明测量精确度的高低，经常采用相对误差的形式。

(一) 实际相对误差

实际相对误差，是用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 的百分比值来表示的相对误差，记为

$$r_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

如前例，已知 $\Delta x = -C = 0.02\text{mA}$ ， $A = 0.76\text{mA}$ ，故

$$r_A = \frac{0.02}{0.76} = 0.02632 \approx 2.6\%$$

(二) 示值相对误差

示值相对误差，是用绝对误差 Δx 与仪器的示值 x 的百分比值来表示的相对误差，记为

$$r_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-7)$$

同前例，已知 $\Delta x = 0.02\text{mA}$ ， $x = 0.78\text{mA}$ ，故

$$r_x = \frac{0.02}{0.78} = 0.02564 \approx 2.6\%$$

由上例中可见，当 r_A 及 r_x 之值不大时， A 与 x 很接近，故一般两者相差很小。如果误差本身较大，就需要注意二者的区别了。例如，RBT-2型高阻表的误差，合格指标是 $\leq \pm 20\%$ ，现对100 Ω 示值点进行检定，实际值为81 Ω 。于是很容易算出 $r_x = -19\%$ ， $r_A = -23\%$ 。显然，按 r_x 应为合格，而按 r_A 则已超差。一般说来，除了某些理论分析工作外^④，用 r_x 较为适宜。这是由于：1)在仪器某些指定点上进行检定时，误差范围是相对于该检定点的示值而言。如上例，实际上是检定100 Ω 点是否满足 $\pm 20\%$ 以内的误差指标。2)通常都在仪器某几个整数刻度上进行检定，这样，按 r_x 计算较简便。3)有时，修正值是以某检定点的相对值形式给出的，即给出 C/x ，这与 r_x 是相应的，而且计算实际值也很方便，即

$$A = x(1 + C/x)$$

(三) 满度(或引用)相对误差

满度相对误差又简称满度误差，是用绝对误差 Δx 与仪器的满度值 x_m 之比来表示的

④ 在误差理论分析中，常常把某种理想情况下仪器的示值作为实际值，这时，用 r_A 较为简单(例如，见§10-3-(二)3)。