



第 1 篇

电子测量基础知识

第 1 章 结 论

1.1 测量、电子测量和计量

1.1.1 测量的定义

从古到今，人们在日常生活、生产、贸易和科学研究等活动中，总离不开比较和判断，例如：比较事物的大小、轻重、冷热、快慢等。单凭直觉来比较和判断事物之间的差异，所得的结论不一定可靠、准确。为了得到可靠的判断和准确的数据，就必须进行测量。

准确地说，测量就是利用合适的工具，确定某个给定对象在某个给定属性上的量值的程序或过程。测量结果通常用数值和测量单位来表示。测量的目的是准确地获取被测参数的值。通过测量能使人们对事物的一个或多个属性有定量的概念，从而发现事物的规律性，准确地认识世界。因此，测量是人类认识事物必不可少的手段。正如俄国科学家门捷列夫在论述测量的意义时所说的：“没有测量就没有科学”“测量是认识自然界的主要工具”。测量和仪器作为获取信息的主要手段，是信息技术的源头，发达国家都将测量与仪器技术的进步作为重要的国家发展战略，其整体发展水平成为国家综合国力强弱的重要标志之一。随着信息时代和网络时代的来临，测量技术与电子、通信、计算机、材料、系统工程等学科深度融合，相互促进，推动着测量技术和测量仪器的不断进步，也对现代信息技术的发展产生了深远的影响。

图 1-1-1 描述了完成任何一次测量必不可少的三个部分，即被测对象、测量仪器系统及测量人员。测量人员操作测量仪器系统，从被测对象上获取某一属性的信息，测量人员通过仪表的显示，记录相应的数据。

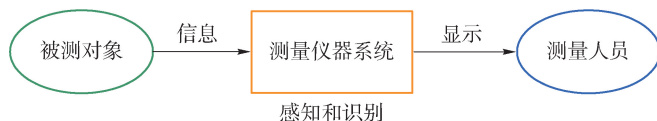


图 1-1-1 测量

实际上，考虑到测量过程中对测量过程和结果可能造成影响的各个因素，测量具有五个基本要素：被测对象、测量仪器系统、测试技术、测量人员和测量环境。各个要素之间

的相互关系如图 1-1-2 所示。

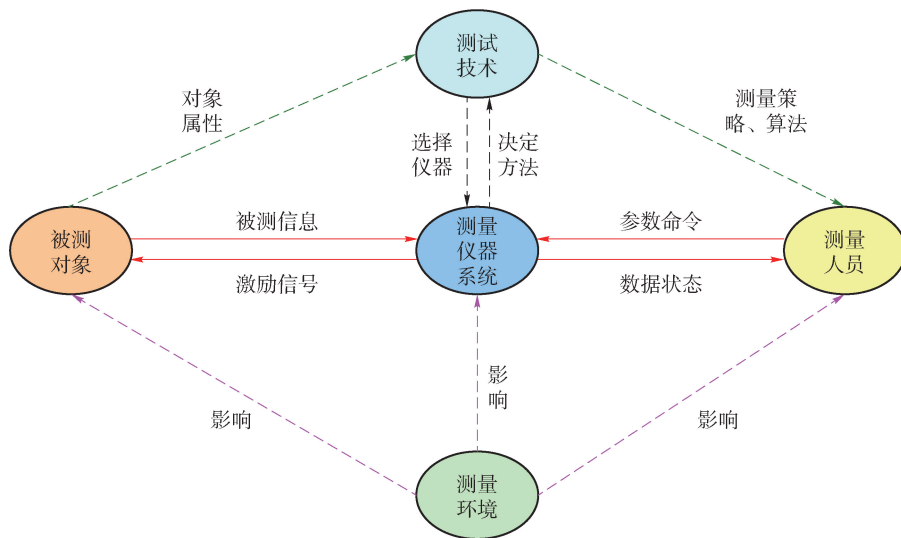


图 1-1-2 测量的五个基本要素之间的关系

其中，被测对象是事物的某一属性，测量是对这一属性信息的获取，信息反映了事物的特性、运动的状态及其变化方式。所要测量的被测对象的属性决定了在测量过程中所采用的测量技术。

测量仪器系统是指测量时使用的量具、仪器系统及附件等。测量仪器系统在测量过程中，负责向被测对象施加激励信号，获取测量数据。

测量人员是测量的主体，负责操作测量设备，设定仪器设备的工作参数，读取测量结果并记录。在测量过程中，可以是测量人员直接操作仪器仪表参与测量，也可以自动测量。自动测量时，测量过程的指挥和管理交给智能设备（计算机等）完成，但测量策略、软件算法、程序编写需由测量人员事先设计好。

测试技术是测量中所采用的原理、方法和技术措施的总称。对同一个量的测量，可以采用不同的原理、技术和方法。

测量环境是指测量过程中测量人员、被测对象和测量仪器系统所处空间的一切物理和化学条件的总和。测量环境会影响处在测量环境中的被测对象、测量仪器系统和测量人员，对最终的测量结果产生影响。

任何一次测量，都可以分成论证、设计和实施三个阶段，如图 1-1-3 所示。

在论证阶段，测量人员根据测量任务要求、被测对象的特点和属性，以及现有仪器设备状况，拟定合理的测量方案；在设计阶段，测量人员选择测量仪器并完成仪器互联，决定测量技术并拟定测量步骤，以此组建测量系统。在实施阶段，对仪器和系统实施测试操作（手动或程控），按照逻辑和时序完成测量过程，主要包括设置仪器工作参数、执行测量操作、处理测量数据并显示测量结果。当然，对一些较为简单的测量，在以往测量经历和经验的基础上，论证和设计阶段可以省略。

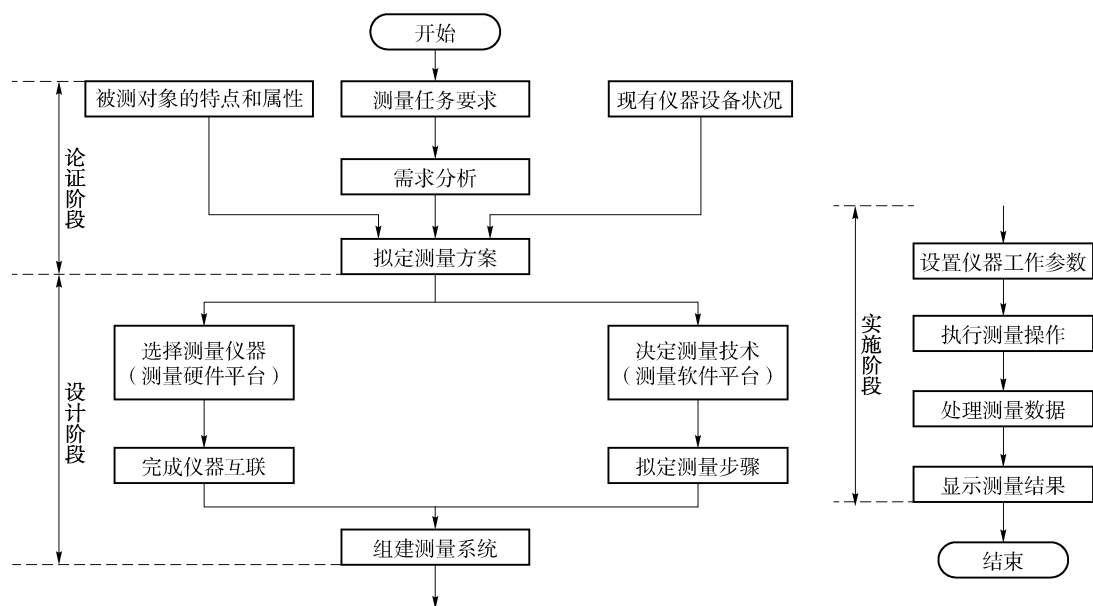


图 1-1-3 测量的三个阶段

1.1.2 电子测量的概念、内容和特点

1. 电子测量的概念

电子测量一般是指利用电子技术和电子设备对电量或非电量进行测量的过程，它是测量学和电子学相互结合的产物。广义地说，电子测量可以分为两类。一类是通过运用电子科学的原理、方法和设备对各种电量、电信号及电路元器件的特性和参数进行测量。另一类是指利用各种敏感元件或传感装置，将非电量如位移、速度、温度、压力、流量、物面高度、物质成分等转换成电信号，再利用电子测量设备进行的测量。因此，电子测量不仅用于电学各专业，也广泛用于物理学、化学、光学、机械学、材料学、生物学、医学等科学领域，以及生产、国防、交通、通信、商业贸易、生态环境保护乃至日常生活的各个方面。本书主要讲述第一类电子测量的相关技术，也称为狭义的电子测量。

2. 电子测量的内容

电子测量的内容主要包括以下两个方面。

(1) 对电信号各种特性的测量

对信号特性的测量可以分为时域测量、频域测量、数据域测量和调制域测量等。在时域测量中，主要考察被测对象随时间的变化情况，既包括对电压、电流和功率等基本参数的测量，也包括对频率、周期、相位、调制系数、失真度等参数的测量，还包括对脉冲占空比、上升时间、下降时间等参数的测量及高级的眼图测量、抖动分析等；频域测量，主要是对电信号的频谱、功率谱、相位噪声等进行测量；数据域测量，是对数字系统中多路数据流的逻辑状态或时序进行测量；调制域测量，是对信号频率、周期、时间间隔、相位

等随时间的变化规律进行测量。时域、频域与调制域的关系如图 1-1-4 所示，广义地说，数据域测量也属于时域测量的范畴。

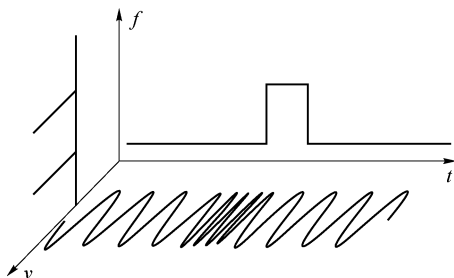


图 1-1-4 时域、频域与调制域

(2) 对电子元器件及电路网络参数的测量

对电子元器件参数的测量包括对电阻、电感、电容、阻抗、品质因数等参数的测量。对各种无源或有源电路网络参数的测量，包括测量电路的传输系数、频率特性、冲击响应、放大倍数/衰减量、灵敏度、信噪比、驻波比及耦合度等参数的测量。

上述各项测量内容中，尤以频率、时间、电压、相位、阻抗等基本电参数的测量更为重要，它们往往是其他参数测量的基础。

3. 电子测量的特点

与其他测量方法相比，电子测量具有以下特点。

(1) 测量频率范围宽

电子测量能够测量的信号频率范围极宽。除直流外，可以测量低至 μHz 、高至 THz 范围的信号频率。由于在不同频段，许多电量的测量原理和方法差异很大，因此有些电子测量仪器根据频段分为不同的类型，例如，在频率和时间测量仪器中就有通用计数器和微波计数器之分。随着技术的发展，能够跨越多个频段、在更宽频率范围工作的仪器不断被研制出来。

(2) 测量量程广

量程是测量范围的上、下限值之差或上、下限值之比。电子测量的被测对象的量值大小相差悬殊，因而电子测量仪器的量程也很广。例如，现代的数字万用表可以测量从 nV 级到 kV 级的电压信号，量程可达 12 个数量级；电子计数器的量程更能够达到 18 个数量级。

(3) 测量准确度高

电子测量结果的准确度可以达到很高的水平，例如对于时间和频率的测量，由于采用原子频标作为基准源，使得最佳相对误差可以达到 $10^{-13} \sim 10^{-18}$ 的量级，这可以说是人类能够达到的最高测量准确度水平。相比之下，长度测量和力学测量能够达到的最高精确度分别为 10^{-8} 和 10^{-9} 。数字信号处理技术在电子测量中的应用使得测量精确度的提高有了更好的技术基础。

(4) 测量速度快

由于电子测量是基于电子运动和电磁波的传播，加之现代测试系统中高速电子计算机

的应用,使得电子测量无论在测量速度上,还是在测量结果的处理和传输中,都可以以极高的速度进行。这对于要求快速测量的工业自动化、国防、航空航天等领域的应用系统十分重要。

(5) 易于实现远距离测量和长期不间断测量

采用电子测量技术可以将测量位置分布距离较远、人类不便长期停留或者无法到达现场的各种测量,转换成易于传输的电信号,用有线或无线的方式传送到测试控制台,进而实现遥测和长期不间断测量,从而扩大了人类认识世界的范围。

(6) 易于实现测量自动化和测试智能化

现代电子测量技术融合了计算机、数字信号处理和软件工程等领域的最新技术,智能仪器、虚拟仪器的发展使得电子测量仪器实现了从硬件实现到软件实现、从单一功能到多功能、从简单功能到智能处理的发展,各种测量专用技术、通用总线技术的发展为测量自动化技术的实现奠定了坚实的基础。

1.1.3 计量及其他相关概念

在人类历史的发展过程中,各国家曾经使用了各种不同的度量单位。单位不统一给生产和贸易带来许多麻烦,也阻碍了人们的交流和科技发展,于是就有了统一单位的需要。我国古代秦王朝第一次统一了全国的度量衡,有力地推动了生产和经济的发展。第二次世界大战后,出现了进一步加强国际合作的趋势,迫切要求进一步改进计量单位和单位制的统一。计量和计量学应运而生。

计量是指利用技术和法制手段实现测量单位统一和量值准确可靠的一种测量,在历史上被称为“度量衡”。随着生产和科学技术的发展,现代计量已远远超出“度量衡”的范围,并形成了一门独立的学科——计量学。计量学研究量与单位、测量原理与方法、测量标准的建立与方法、测量标准的建立与溯源、计量器具及其特性,以及与测量有关的法制、技术和行政管理等内容。计量学也研究物理常量(常数)、标准物质、材料特性的测量。

计量具有统一性、准确性和法制性的特点。计量工作主要是使用计量基准来校准、检定受检器具或仪器设备,以衡量和保证使用受检器具或仪器设备进行测量时所获得的测量结果的可靠性。计量工作也包括单位的统一、计量基准和标准的建立、计量监督管理、测量方法及其手段研究等工作。计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作,意义十分重大,从事电子测量的人员都应该了解计量工作。

1948年,第九届国际计量大会要求国际计量委员会在科学技术领域中开展国际征询,创立一种简单而科学的、供所有米制公约组织成员国均能使用的实用单位制。1954年,第十届国际计量大会决定采用米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)和坎德拉(cd)作为基本单位,其中开尔文是热力学温度的单位,坎德拉是发光强度的单位。1960年,第十一届国际计量大会决定将上述六个基本单位为基础的单位制命名为国际单位制,并以SI(法文*Système international d'unités*的缩写)表示。1971年,第14届国际计量大会又决定增补物质的量的单位摩尔(mol)作为基本单位,至此,确立了目前国际

单位制的七个基本单位，其他的单位都可以通过这七个基本单位经过换算得到（例如 $N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ ）。同时，国际单位制中还规定了一系列配套的导出单位和前缀，形成了一套严密、完整、科学的单位制。SI 测量单位的标准前缀如表 1-1-1 所示，在单位前面使用前缀可以得到原始单位的若干倍数或者分数。SI 单位制的提出和完善是国际科技合作的一项重要成果，也是物理学发展的又一标志。此外，SI 也不是静止不变的，随着测量科技的进步、测量精度的不断提高，国际单位的建立和定义也会通过多国之间的国际协定来进行修改。例如，千克是 SI 中的一个基本单位，1791 年，第 14 届国际计量大会对千克的定义是：1 dm³ 纯水在 4 ℃时的质量，并用铂铱合金制成原器，保存在巴黎，后称国际千克原器，2018 年 11 月 16 日，第 26 届国际计量大会通过“修订国际单位制”决议，正式更新了“千克”的定义为“对应普朗克常量为 $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 时的质量单位”，其原理是将移动质量为 1 千克物体所需机械力换算成可用普朗克常量表达的电磁力，再通过质能转换公式算出质量。

表 1-1-1 SI 测量单位的标准前缀

倍数	名称		deca-	hecto-	kilo-	mega-	giga-	tera-	peta-	exa-	zetta-	yotta-
	符号		da	h	k	M	G	T	P	E	Z	Y
	因子	10^0	10^1	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}	10^{24}
分数	名称		deci-	centi-	milli-	micro-	nano-	pico-	femto-	atto-	zepto-	yocto-
	符号		d	c	m	μ	n	p	f	a	z	y
	因子	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}	10^{-21}	10^{-24}

计量基准或计量标准是指“为了定义、实现、保存或复现量的单位甚至一个甚至多个量值，用作参考的实物量具、测量仪器、参考物质或测量系统”。在 1999 年我国实施的国家计量技术规范中，对“基准”和“标准”视为同义词而并列，有些文献中认为“标准”低于“基准”。计量基准主要分为国际基准、国家基准、原级基准和次级基准四个等级。

①国际基准是指“经国际协议承认的测量标准，在国际上作为对有关量的其他测量标准定值的依据”。国际米制公约组织下设的国际计量委员会（CIPM）和国际计量局（BIPM）两个机构研究、建立、组织和监督国际测量标准的工作。国际基准在国际范围内具有最高计量学特性，它是世界各国测量单位量值定值的最初依据，也是溯源的最终终点。

②国家基准是指“经国家决定承认的测量标准，在一个国家内作为对有关量的其他测量标准定值的依据”。国家基准必须是国家决定承认的，这就确立了它的法定地位。同时，它是一个国家科学计量水平的体现，能以国内最高的准确度复现和保存给定的计量单位。在给定的计量领域中，所有计量器具进行的一切测量均可追溯到国家标准所复现和保存的计量单位量值，从而保证这些测量结果准确可靠和具有实际的可比性。我国《计量法》第五条规定：“国务院计量行政部门负责建立各种计量基准器具，作为统一全国量值的最高依据。”

③原级基准是指“具有最高的计量学特性，其值不必参考相同量的其他标准，被指定的或普遍承认的测量标准”。原级基准具有最高的计量学特性，当被国家承认后，就被称为国家基准；但也还有一些没被国家承认、却被一些部门指定的或公众普遍承认的基准。在我国目前的计量基准体系中，原级基准一直被称为主基准，都是由国家承认批准的国家基准，而其他一些符合该定义的原级基准，则可能被列入社会公用计量标准或部门、企业、事业单位的最高标准。

④次级基准是指“通过与相同量的基准比对而定值的测量标准”。次级基准区别于原级基准，其量值是通过与相同量的基准比对确定的，在计量学特性上要稍低于原级基准，但又高于日常用的工作标准，在我国将副基准与工作基准与其对应。

除了这四个级别的计量基准之外，还有一些计量标准的定义，如参考标准、工作标准、传递标准、搬运式标准等。参考标准是指“在给定地区或在给定组织内，通常具有最高计量学特性的测量标准，在该处所做的测量均从它导出”。工作标准是指“用于日常校准或核查实物量具、测量仪器或参考物质的测量标准”。工作标准通常用参考标准校准。当工作标准用于确保日常测量工作正确进行时，称为核查标准，工作标准是实现量值溯源的重要环节，它的数量很大。传递标准是指“在测量标准相互比较中用作媒介的测量标准”，它是在测量标准相互比较中，包括同级标准间的相互比对或上一级标准向下一级标准传递量值中，用作媒介的测量标准。搬运式标准是指“供运输到不同地点、有时具有特殊结构的测量标准”，这种标准的特点是可在实验室或测试场地间来回搬运。

除了计量之外，与测量相近的其他两个基本概念是测试（test）和检测（detection）。测试是指借助特定测量手段对被测对象的某种功能或者属性进行评估，通常需要设计一些测试装置或者测试系统，以保证测试结果的可信度。检测则是指从大量信息流中抽取特定的信息，不依赖来自信息发送者的协作或者同步操作。例如，信号检测的目的就是从噪声中提取有用信号，再如食品、化学、环境、机械等行业的质量检测。

1.2 电子测量仪器及测试系统

1.2.1 电子测量仪器

测量仪器是将被测量转换成可供直接观察的指示值或等效信息的器具。利用电子技术对各种待测量进行测量的设备，统称为电子测量仪器。电子测量仪器发展至今，经历了模拟器件仪器、数字器件仪器、智能仪器、虚拟仪器等发展阶段。其间，微电子学和计算机技术对仪器技术的发展起了巨大的推动作用。自2004年以来，随着下一代自动测试系统的发展，又出现了合成仪器（synthetic instrument, SI）的概念。

1. 早期的测量仪器

早期的模拟器件仪器采用了电磁机械式的基本结构，借助指针来显示最终结果，如模

拟电压表、模拟电流表、模拟转速表等。这类仪器仪表常用在要求精度不高、定性指示的场合。

20 世纪中期，数模变换和模数变换技术的发展促进了数字化仪器的发展，如电子计数器、数字电压表等。这类仪器将模拟信号的测量转化为数字信号的测量，并以数字方式输出最终结果，目前仍然有一些低端的测量仪器采用这种方式实现。

2. 智能仪器

自 20 世纪 70 年代以来，随着微处理器和计算机技术的发展，微处理器或微机被越来越多地嵌入到测量仪器中，构成了所谓的智能仪器或灵巧仪器（smart instruments）。智能仪器实际上是一个专用的微处理器系统，一般包含微处理器电路（CPU、RAM、ROM 等）、模拟量输入输出通道（A/D、D/A、传感器等）、键盘显示接口、标准通信接口（GPIB 或 RS-232）等。智能仪器使用键盘代替传统仪器面板上的旋钮或开关，对仪器实施操控，这就使得仪器面板布置与仪器内部功能部件的分布之间不再互相限制和牵连；利用内置微处理器强大的数字运算和数据处理能力，智能仪器能够提供单位变换、统计分析、误差处理、长时间记录等传统仪器难以实现的功能；智能仪器还能够实现自动量程转换、自动调零、触发电平自动调整、自动校准和自诊断等“自动化”“智能化”的功能，大大简化了操作人员的操作，减少了人为因素带来的测量误差，提高了测量的精度；智能仪器一般都带有 GPIB（general purpose interface bus）、RS-232 接口或者网络接口，具备可编程功能，可以很方便地与其他仪器实现互联，组成复杂的自动测试系统。此外，智能仪器在成本、体积、功耗控制方面也有很大优势。目前，市场上的很多测量仪器都已经是智能仪器。

3. 个人仪器

随着智能仪器和个人计算机（PC）的大量应用，在工程技术人员的工作台上常常会出现多台带有微机的仪器，与 PC 同时使用。一个系统中拥有多台微机、多套存储器、显示器和键盘，但又不能相互补充或替代，造成资源的极大浪费。1982 年，美国西北仪器系统公司推出了第一台个人仪器（personal instrument）。个人仪器也称为 PC 仪器（PC instrument）或卡式仪器，基本上可以认为是虚拟仪器的前身。在个人仪器或个人仪器系统中，通用的个人计算机代替了各台智能仪器中的微机及其键盘、显示器等人机接口，由置于个人计算机扩展槽或专门的仪器扩展箱中的插卡或模块来实现仪器功能，这些仪器插卡或模块通过 PC 总线直接与计算机相连。个人仪器充分利用了 PC 的软件和硬件资源，相对于传统仪器，大幅度地降低了系统成本、缩短了研制周期。因此，个人仪器的发展十分迅速。个人仪器最简单的构成形式是将仪器卡直接插入 PC 的总线扩展槽内。这种构成方式结构简单、成本很低，但缺点是 PC 扩展槽数目有限，机内干扰比较严重，电源功率和散热指标也难以满足重载仪器的要求。此外，PC 总线也不是专门为仪器系统设计的，无法实现仪器间的直接通信以及触发、同步、模拟信号传输等仪器专用功能。因此，这种卡式个人仪器性能不是很高。

为了克服卡式仪器的缺点，美国 HP（Hewlett Packard）公司于 1986 年推出了 6000 系列模块式 PC 仪器系统，该系统采用了外置于 PC 的独立仪器机箱和独立的电源系统；专门设计了仪器总线 PC-IB；提供了 8 种常用的个人仪器组件，即数字万用表、函数发生