

测量是人类认识自然、改造自然的重要手段，从土地的丈量、时间的计量乃至对微观现象的研究、化学成分的分析及物理定律的发现，都离不开测量技术。

现代工业技术和科学实验更离不开测量技术。从宇宙航行、原子弹爆炸及制造大规模集成电路等尖端科学一直到机械制造业中的零件加工和机器装配、调整，无一不需要统一和精确的测量。所以，从某种意义上讲没有近代的测量技术，就没有当今的科学技术。

随着科学技术和生产发展的需要，测量技术已经发展成为一门较完整的技术学科。

测量技术科学所涉及的内容比较广泛，它包括信号检测与转换、信号传输与信号处理等内容。一个完整的测量过程不仅仅是将被测参数检测出来。而且包括在上述基础上进一步运用电工和电子技术将被测信号放大、模/数转换或数/模转换等方法进行处理，以及信号的传输；紧接着研究如何将这经过加工和处理的信号与模拟仪表或计算机配接成自动测量装置。在近代工业生产和科学实验中，还要求测量人员掌握测量技术的基本理论与方法，以及数据处理和抗干扰等相应技术。

近年来，自动化理论及电子技术的发展，使上述测量过程能自动进行，测量工具从带伺服系统的自动测量仪表发展到应用微处理机，从而实现了测量的高度自动化。

1. 测量技术与生产、科学实验的关系

测量技术是随着生产和科学技术的发展而发展的。在生产较原始的时代，测量技术也比较原始，如土地的丈量、物重的称量等。在这些测量过程中，几乎全都依靠手工操作，并且自始至终需要人的感官参与测量，而且被测参数也很局限。

生产技术的发展，光学仪器的创造发明，延伸和扩大了人们的眼界，使测量技术前进了一步。

之后由于发电机、电动机及变压器等电器设备的出现，迫切需要解决电磁参数的测量，于是以电磁原理为基础的电子测量技术便得到迅速发展。近年来，半导体技术的发展，特别是集成电路的发展，更极大地促进了电子测量技术的迅速发展。

伴随生产过程、自动化而发展起来的自动测量技术，是测量技术在现阶段的最新发展。它以自动控制理论及计算机技术为基础，集中了先进的测控技术成果，把测量技术、计算机技术和自动控制原理有机地结合起来。

科学技术的发展与测量技术更有着密切的关系。测量技术的完善（表现在准确度的提高和创造出新的测量方法与仪器、仪表、设备上），会促使科学更快发展，而科学技术的新发

明又促进测量技术的跃进,为测量技术提供新的前提条件和手段。例如,遥感技术是以宇航事业与空间科学技术的发展为前提才实现的,相应地只有产生高度精确、高度灵敏、可靠的自动化测量仪表,才使宇宙飞行得以实现。

可见,测量技术在生产和科学实验中起着重要作用。

2. 近代测量技术的进展

近年来,测量技术的进展主要表现在以下几个方面:测量技术性能的提高,被测对象的增加与测量领域的扩大;有关理论(如现代控制理论、信息论等)发展与新的物理效应或化学反应的应用,以及新技术(如集成电路、数字技术及计算机等)的引入,导致测量用的传感器及测量仪表向小型化、轻量化、高精度,半导体化,数字化及检测放大一体化等方向变革,使测控技术进一步向非接触测量、动态测量、在线测量以及多功能测量等自动化方向发展。

(1) 测量技术性能的提高 由于测量技术和测量工具的发展,测量技术性能不断提高。主要表现在测量精度、测量范围、仪表可靠性及使用寿命等方面。

测量精度是测量技术中的关键性指标之一。20世纪30~40年代,测量精度一般为百分之几到千分之几。近年来的测量精度已达到万分之几,甚至百万分之几(或更高精度)。在提高精度的同时,测量的量限也在相应扩大。

(2) 测量对象的增加与测量领域的扩大 早期的测控对象较多为工业生产中的技术参数,例如温度、压力及流量等。随着工业生产发展,特别是近年来科学技术的发展,测量技术的领域向以下几个方面发展:空间技术,其中遥感、遥测技术进展特别快;海洋开发,如海底测量技术;核工程,如核技术实验研究、放射性测量等;环境保护,如环境污染的监测、三废处理及净化等,在这方面特别是成分分析技术进展较快。此外,资源普查、地质勘察及生物医疗等方面,检测技术都取得较大进展。

(3) 新的物理效应的应用 测量技术是应用科学,因此它的进展与基础科学发展休戚相关。特别是物理学方面,在当前的测量技术中,已被应用的和正在探索其应用可能性的物理效应已达近百种,尤其是近代物理学中的新成就正在进一步被应用。用激光、红外、超声、半导体、微波、各种谱线及射线等原理可以制成测温、测流及测距等各类新颖传感器或探索新的测量方法。

(4) 信息检测理论 技术的进展必然导致相应的理论的深化和发展,早期的测量技术由于生产过程比较简单以及对事物的本质认识还不够深入,因此被测参数数量较少且相互独立,所以测量人员只要掌握与被测对象有关的物理知识即可。然而,现代的测量技术所服务的对象往往是复杂的生产过程控制,宇宙空间的探测,或揭示微观世界的研究等,因此,测量对象与控制对象(或科研对象)往往合成一体,形成一个较为完整的自动测量系统。由于生产技术的需要,导致有关的信息检测理论、信号传输理论、工程控制理论,乃至系统工程方面等理论在自动测量技术中得以综合应用。

(5) 电子技术与计算机对测控技术的影响 随着半导体材料及工艺的发展,出现了许多灵敏度高、反应速度快及体积小的半导体传感器,加上采用集成电路技术以及组合元件的出现,使检测仪表总的发展趋向小型轻量化、高精度化、检测放大一体化、固体化及数字化。同时新型传感器在可靠性方面也得到提高。此外,与测量装置有关的设备都已系列化、单元化,如需完成某种测试任务,只需根据测试要求选用若干标准系列的仪器就能组成测试系统。

以上介绍了近年来测量技术在几个方面的进展,可以预计今后除了加强近代物理化学等

新成就在测量技术领域应用外，还将注意其他学科，如仿生学、信息论、统计学等在测量技术中的应用。与此同时，还将进一步大力开展对检测传感器的研究，发展灵巧的、高可靠性的测量仪器，开展识别图形、文字、语言、景物，并能判断处理事件的智能仪表的开发工作。

一、测量基本知识

（一）测量概念

测量是人类对自然界的客观事物取得数量观念的一种认识过程。进行测量，就是将被测量与一个性质相同的充当测量单位的已知标准量比较，确定被测量对此标准量的倍数（或几分之一倍），并用数字表示。例如，用米尺测量物体的长度，就是将被测物体的长度与标准长度（米尺）进行比较，最后得出物体的长、宽、高是几米零几厘米（毫米）长。所以说，测量是一个比较过程。

一般来说，测量结果，既可表现为一定的数字，也可以表现为一条曲线，或显示出某种图形，还可以表示为某种反馈形式的控制信号。但不管用任何形式表示，测量结果总包含一定的数值（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，1.0186V， -40°C 和55.6kg等。

由于各种因素的影响，测量结果中不可避免地存在误差。为了说明测量结果可信赖程度，在表示测量结果时，必须同时阐明测量误差数值或误差范围。

（二）量具和仪表

量具和仪表是测量工具，即进行测量的物质基础。

在测量中，为了进行比较，必须有一个体现测量单位的已知量，这些体现测量单位的器具在测量学中被称为量具。在实际测量时，往往只有少量量具能够直接参与比较，例如测量长度用直尺，测量液体体积用量杯等。而大多数场合，常常不能直接比较。特别是电测技术中，由于被测参数与标准量均是电量，无法直接看到它们。若要将它们进行比较，必须采用较为复杂的方法或专门的比较设备才能完成。例如用标准电阻来测量未知电阻时，需借助于电桥。用作比较的设备称为比较仪。

大多数量具需要配以相应的比较仪才能进行测量，操作过程亦比较麻烦。有的量具结构十分脆弱或对使用条件要求相当苛刻，并且大多数量具的测量范围都不宽。工程测量中的不少参量，如速度、加速度、效率、温度及压力等都无法制成实物量具。因此，在实际的工程测量中，很少使用量具，大多使用各种直读式仪表进行测量，这类仪表可以通过其读数机构直接得到测量结果。例如常用的电压表、电流表、压力表、转速表等均属直读式仪表。

比较仪和直读式仪表都属于测量仪表。广义地讲，测量仪表是泛指一切参与测量工作的设备，它包括各种直读式及非直读式仪表、作比较用的比较仪、为测量工作提供各种信号及电源设备以及完成其他辅助任务（例如放大、滤波、频率变换、记录及运算）的设备。不过，通常把由测量仪表及有关的辅助设备组成的一个整体称为测量装置。典型的电子测量装置主要由传感器、电子测量电路、显示装置（指示仪、记录仪、数字显示器等）组成。

（三）测量系统

在实际工作中，对于比较复杂，要求较高的以及被测参数较多的测量工作，必须使用较多的测量设备。这种由数量较多的测量仪表、有关附件和连接器件，且按照一定规律组合而

成的有机整体，称为测量系统。

测量系统由下列几部分组成。

- ① 测量对象。
- ② 测量仪器及附属设备（附件连接器件及电源等）。
- ③ 测量结果的处理机构。

从广义的角度来理解，测量系统应包括测量人员及测量环境等内容。

测量系统的各个组成部分是互相联系又相互制约的，其框图如图 1-9 所示。

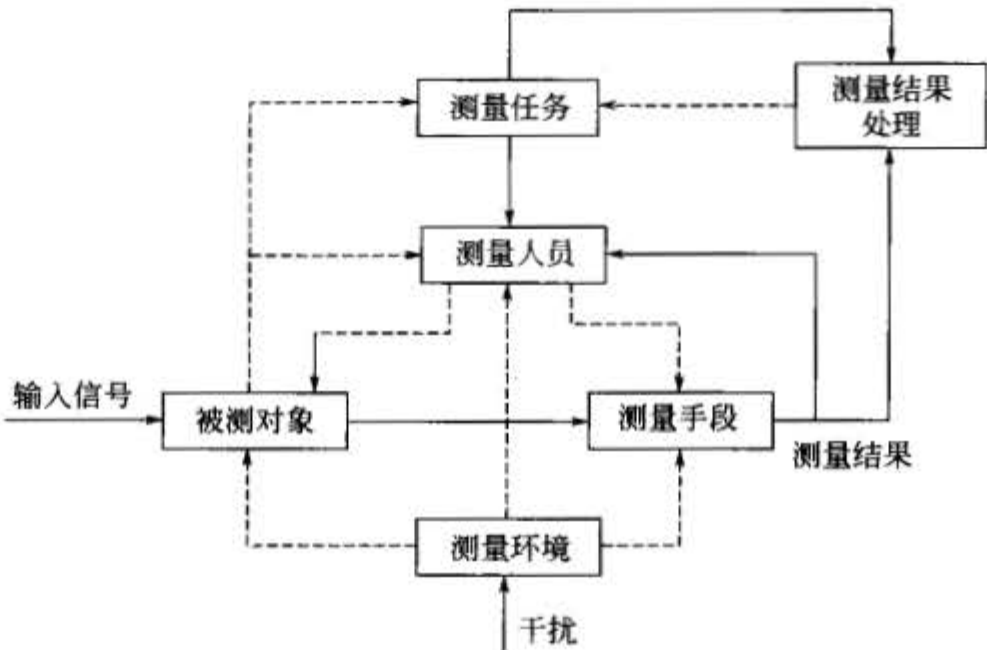


图 1-9 测量系统框图

按照测量过程进行分类，测量系统可分为以下几种。

1. 手动测量系统

手动测量系统是指在测量过程中的全部或大部分操作、调整及计算等工作，是由测量人员直接参与并取得测量结果的测量系统。在这类系统中，测量人员作为一种不可缺少的因素，自始至终参与整个测量过程。目前所使用的大多数内燃机试验台架，就是手动测量系统。

2. 半自动测量系统

这种测量系统中，测量人员不需要自始至终参与测量过程，测量过程中的部分或全部操作和调整由机器自动完成，测量结果也可以打印记录。但进一步的数据处理仍需由测量人员参与。由配有打印记录设备的程序控制电力测功机所组成的内燃机试验台架即为半自动测量系统。

3. 全自动测量系统

在全自动测量系统中，所有的仪器设备都必须能与计算机联机工作。它们都具有程控输入和编码输出的性能，即这些仪器设备的工作状态（量程改变、调整电平等）要能受电子计算机控制，并能将测量结果以模拟或数字形式输出，供存储、处理、显示或打印之用。

二、测量方法与分类

在拟订测量方案时，测量方法的正确与否是十分重要的，它直接关系到测量的成败。因此，必须根据测量任务要求，进行认真分析，找出切实可行的测量方法。然后根据测量方法选择合适的测量工具，组成测量装置或测量系统，进行实际测量。如果测量方法不合理，即使有高级精密的测量仪器或设备，也不能得到理想的测量效果。

测量方法分类形式很多，例如，根据测量过程中，被测量是否随时间变化而分为静态测量和动态测量；根据测量条件可分为等精度测量和不等精度测量；按测量手段可分为直接测量、间接测量和组合测量；按测量方式可分为偏差式测量法、零位式测量法和微差式测量法等。此外，按测量敏感元件与被测介质是否接触可分接触式测量与非接触式测量；按测量系统是否向被测对象施加能量可分为主动式测量和被动式测量等。下面对不同测量手段和方式的测量方法进行介绍。

(一) 直接测量、间接测量与组合测量

1. 直接测量

凡是用预先按已知标准量定度好的测量仪器进行测量，或将被测量参数与同一物理量的标准量直接比较，从而直接求得被测参数的数值的测量方法为直接测量。例如，用磁电式电压表测量电压，用转速表测量转速等。直接测量并不意味着就是用直读式仪表进行测量。许多比较式仪器，例如，电桥、电位差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本身，故仍属直接测量。换句话说，直接测量是从测量结果直接获得被测量参数数值的一种测量方法。可用一般公式表示如下：

$$y=X$$

式中 y ——被测量参数数值；
 X ——测量结果。

直接测量的优点是测量过程简单而迅速，在工程技术中被广泛采用。

2. 间接测量

对几个与被测量参数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、曲线或表格求出被测量参数数值的测量方法称为间接测量。例如，直接测量出电阻 R 阻值及电阻两端电压，由欧姆定律 $I=U/R$ 便可求出被测电流 I 的值；用测量汽车通过给定距离间隔的标杆所经过的时间可计算汽车在该路段的平均车速；通过测量发动机转矩和转速来计算发动机功率等均是间接测量。用一般公式表示为

$$y=F(X_1,X_2,X_3,\cdots,X_n) \tag{1-6}$$

式中 y ——被测量参数的数值；
 $X_1,X_2,X_3,\cdots,X_n$ ——直接测量参数的测量结果。

间接测量法测量步骤较多，花费时间也较多，通常是在下列情况下应用：直接测量很不方便；直接测量误差较大；缺乏直接测量的仪器等。

3. 组合测量（联立测量）

在测量中，使各个被测量参数以不同的组合形式出现（可通过改变测量条件获得不同的组合）。根据直接测量或间接测量所得到的数据，通过解一组联立方程而求出被测量参数的数值。这类测量称为组合测量，又称联立测量。

例如，为了测量电阻的温度系数，需利用电阻值与温度间的关系公式：

$$R_t=R_{20}+\alpha(t-20)+\beta(t-20)^2 \tag{1-7}$$

式中 α,β ——电阻的温度系数；
 R_{20} ——电阻在 20°C 时的电阻值；
 t ——测量时的温度。

为了测出电阻 $R_{20}、\alpha、\beta$ 的值，采用改变测试温度的方法。在三种温度 $t_1、t_2$ 及 t_3 下，分别测出对应的电阻值 $R_{t1}、R_{t2}$ 与 R_{t3} ，然后代入上式，得到一组联立方程：

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \\ R_{t3} = R_{20} + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2 \end{cases}$$

解此联立方程组，便可求得 R_{20} 、 α 、 β 的值。

组合测量的测量过程比较复杂，花费时间较多，但容易达到较高精度，是一种特殊的精密测量方法，一般适用于科学实验或特殊场合。

(二) 偏差式测量法、零位式测量法与微差式测量法

按测量方式不同，通常有以下测量法。

1. 偏差式测量法

在测量过程中，用仪表指针的位移（即偏差）表示被测量的测量方法，称为偏差式测量法。用这种方法测量，标准量具并不装在仪表内；而是事先用标准量具，对仪表刻度进行校准，然后在测量时输入被测量，按照仪表在标尺上的指示值，确定被测量的数值。它是以间接方式实现被测量与标准量的比较。这种方法的测量过程比较简单、迅速，但是测量精度较低。

通常所用的直读式仪表测量即为偏差式测量法。

2. 零位式测量法

零位式测量法（又称补偿式或平衡式测量法），是在测量过程中，用指零仪表的零位指示来检测测量系统是否处于平衡状态，当测量系统平衡时，用已知的基准量确定被测未知量的数值。应用这种方法进行测量，标准量具装在仪表内，在测量过程中，标准量直接与被测量相比较。测量时要调整标准量，即进行平衡操作，一直到被测量与标准相等，即指零仪表回位。用天平称重即是零位测量法。

采用零位式测量法进行测量的优点是可以获得比较高的精确度，但是，测量过程比较复杂。在测量时，要进行平衡操作，费时较多，采用自动平衡操作过程可以加快测量过程，但是反应速度仍不可能很快。因此这种测量方法不适于测量变化迅速的信号，只适用于测量变化较慢的信号。

3. 微差式测量法

微差式测量法是综合了偏差式和零位式测量法的优点而提出的一种测量方法。它将被测的未知量与已知的标准量进行比较，并取得差值，然后用偏差式测量法求得此偏差值。应用这种方法进行测量时，标准量具装在仪表内。标准量直接与被测量进行比较，由于两者很接近，因此不需要调整标准量。

设 N 为标准量， X 为被测量， Δ 为两者之差。显然，有关系式 $\Delta = X - N$ 。经移项后得 $X = N + \Delta$ ，即被测量是标准量与偏差值之和。

N 是标准量，其误差很小。由于 $\Delta \ll N$ ，因此，可选用高灵敏度的偏差式仪表测量，即使测量 Δ 的准确度较低，但是，因为 $\Delta \ll N$ ，故总的测量准确度仍然很高。

广泛应用的电阻应变片电桥测量电路即是微差式测量法。

微差式测量法的优点是反应快，测量精确度高。

三、测量仪表及其特性

(一) 测量仪表的基本功能

测量仪表是测量用的工具，是实现测量技术的物质基础。

测量仪表必须具备下列三种功能：物理量的变换、信号的传输和测量结果的显示。

1. 变换功能

在生产和科研中，有各种各样的检测量。可以说，其中大部分都是非电量。例如，热工参数中的温度、热量、比热容、压力、压差、流量等，机械参数中的位移、速度、加速度、压力、力矩等，物性参数中的酸碱度、相对密度、成分含量等。对于这些物理量想通过与其对应的标准量进行比较，直接得到测量结果，往往非常困难，有时甚至不可能。原因就在于这些非电量及其对应的标准量都不能直接看到，所以很难将被测量与其标准量直接在一起比较。

为了解决实际测量中的这类问题，工程上采取的解决办法是依据一定的物理原理，将难于直接同标准量比较的物理量经过一次或多次的信号能量形式的变换，变换成便于测量、处理和传输的能量形式。这个过程称之为变换。在工程上，电信号（电压和电流）是最容易测量处理和传输的物理量。因此往往将非电量的被测量依据一定的物理原理转换成电量，然后再对变换得到的电量进行测量和处理。例如，内燃机试验时的温度测量，经常利用热电偶的热电效应将被测温度变换成直流（热电势）信号，然后再进行测量和传输。这里所利用的热效应是与热电偶材料性质密切有关的物理定律。实现信号变换功能的器件称为变换器或传感器。

研究仪表的变换功能是一个相当重要的课题，设法将新发现的物理定律新技术及材料引入传感器中，往往会创造出新颖的传感器或新的测量技术。

还应该指出，变换的功能含义不仅仅是为了解决某些被测量不便于或无法直接测量才采取的测量技术。如上面所说的非电量转换。

随着科学技术的发展，要求测量精度愈来愈高，速度愈来愈快，量程愈来愈广，以及要求实现测量自动化等，这时原有的测量方法往往不能满足这些新的要求。目前频率测量的精度最高，因而许多电参量（如电压、电流及相位等）都在积极设法变换成频率进行测量。

2. 传输功能

被测参数的变换，并不是测量的终结。实际测量中，变换后的信号，通常必须经过一定距离的传输才测量，最终显示出结果。即仪表在测量过程中完成变换功能以后，第二个作用是将信号进行一定距离的传输。

比较简单的测量过程，信号的传输距离很短，因此仪表的信号传输作用还不十分突出。随着生产发展，自动化水平的提高，生产现场与中央控制室的距离都很远，位于现场的传感器将被测参量经变换与放大后，经过较长距离的传输才能将信号送至控制室。工业生产中，应用比较多的是有线传输，即通过电缆或导线传输直流电流信号。在信号传输中，要解决信号失真和抗干扰问题。

随着远距离测量技术和遥感技术的发展，信号的无线传输显得越来越重要。对于内燃机和汽车试验来说，无线传输其意义也是不言而喻的。总之信号传输是仪表中要研究的另一重要课题。

3. 显示功能

测量的最终目的是将测量结果用便于人眼观察的形式表现出来。这就是测量仪表的另一种必须具备的功能——显示功能。

仪表的显示方式可以概括如下：模拟式——指针式、记录曲线；数字式——数码显示、数字式打印记录。

各种显示方式都有各自的特点和用途，因此要根据实际情况选择合适的显示方式。

(二) 测量仪表分类

测量仪表品种繁多,为了便于管理、研制、生产和学习,必须对它们进行适当分类。仪表的分类方法是很多的,可按原理、用途、指示方式、结构特点等方式划分。各种方法的分类从不同角度反映仪表的特征,而仪表命名通常也以仪表类别为依据。这样,根据仪表名称即可知仪表基本特征。当然对于一台具体仪器或仪表,必须阅读其详细说明书才能对其有一定的了解。而类别则能从某一个侧面反映该仪表的特征。下面介绍仪表的一些分类方法。

1. 按使用分类

测量仪表按其使用范围分为通用和专用仪表两大类。通用仪表有较宽的适用范围。例如,在电测量中用的通用电压表、通用示波器;机械测量中的转速表、应变片、扭矩仪等。这类仪表、仪器具有很强的通用性,它们既能用来作为各类设备的测量仪器,也可用作测量各类单元电路的测试仪器,还能作为组成测试系统的组件。专用仪表是为特定目的而设计的仪表。它只能适用特定的测试对象及测试条件。例如,用作测试晶体管特性的图示仪,只适用于测量汽油发动机速度的汽油机转速表等,这类仪表的设计在很大程度上受到测试对象的限制。

仪表按使用场合又可分为实用仪表和范型仪表。实用仪表是指实际测量用的仪表,它又分为实验室用和工程用两种。实验室用仪表准确度较工程用仪表高,并在使用时要考虑对周围环境的修正值(需要有校正资料);而后者仅要求测量使用方便、迅速。范型仪表是供复制或对其他仪表进行校验或重新标定用的仪表,其准确度更高。

2. 按显示方式分类

仪表按其显示方式不同可以分为模拟式、数字式和图像显示等几大类。

模拟式仪表是把具有连续性的被测量变换成可以直接感觉的具有连续性的模拟量,通过指针或光点和刻度盘,随时给出测量结果。常见的指针式仪表即为模拟式仪表。

数字式仪表是将具有连续性的被测量变成具有离散性的数字量,而以数字形式显示。数字式仪表的指示值是整量化了的,即其最小数量单位是按10进位指示的。而读数误差仅为最小数量的 ± 1 值。换句话说,其最小分辨力为最小数量的单位值,所以十分准确。可避免读数上的视觉误差。

图像显示仪表(各种类型的示波器)主要用于动态测量或观测肉眼无法直接观测到的被测对象。

3. 按原理分类

按仪表原理可分为机械式仪表、电测量仪表、光学式仪表等。电测量仪表按其转换部分的原理又分为电感式、电容式、光电式、压电式、发电式等。

4. 按用途分类

按用途常以被测参数来划分,如测量电参数的仪器有电压表、电流表、欧姆表、电容测试仪、频率计、相位计等。测量其他物理量的仪表有测速仪、转速表、温度计、里程表等。

除以上分类方法外,还有按指示的特点分类,如累计(积)式仪表,它除了能指示瞬时测量值外,还能随时累计测量结果,例如汽车里程表。预调式仪表,指带有自动调节元件,能按照要求预调的数据与测得数据进行比较后,以两者的差值来自动调节生产或试验过程的仪表。信号指示式仪表或称信号指示器,是能按信号区间自动将试验或生产过程中出现的

正常工况，通过指示灯、电铃或其他报警方式发出信号的仪表（器）。仪表类别十分繁杂，种类很多，以上是常见的仪表种类。

（三）仪表基本技术性能

评价仪表性能的指标是多方面的，衡量测量仪表基本性能的主要指标有以下几方面。

1. 仪表的精度和精度等级

仪表的精度是评价、选用仪表的主要性能指标，它表明仪表测得数据的可靠程度。

说明精度的指标有三个：精密度、准确度和精确度（简称精度）。

（1）精密度 δ 它说明仪表指示值的分散性。即对某一稳定的被测量由同一个测量者，使用同一个仪表，在相当短的时间内，连续重复测量多次，其测量结果（指示值）分散的程度。 δ 愈小，说明测量愈精密。例如，某温度仪表的精密度 $\delta=0.2^{\circ}\text{C}$ ，即表示多次测量结果的分散程度不大于 0.2°C 。精密度是随机误差大小的标志，精密度高，意味着随机误差小。但必须注意，精密度与准确度是两个概念，精密度高不一定准确。

（2）准确度 ϵ 它说明仪表指示值与真值的偏离程度。例如，某流量表的准确度 $\epsilon=0.3\text{m}^3/\text{s}$ ，表示该仪表的指示值与真值偏离 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 。

准确度是系统误差大小的标志，准确度高，意味着系统误差小。同样，准确度高不一定精密。

（3）精确度 τ 它是精密度与准确度的综合反映，精确度高，表示精密度和准确度都比较高。在最简单的情况下，可取两者的代数和，即 $\tau=\delta+\epsilon$ 。精确度常以测量误差的相对值表示。

图 1-10 所示的射击例子有助于加深对精密度、准确度和精确度三个概念的理解。图 1-10(a) 表示准确度高而精密度低，图 1-10(b) 表示准确度低而精密度高，图 1-10(c) 表示精确度高。在测量中，希望得到精确度高的结果。

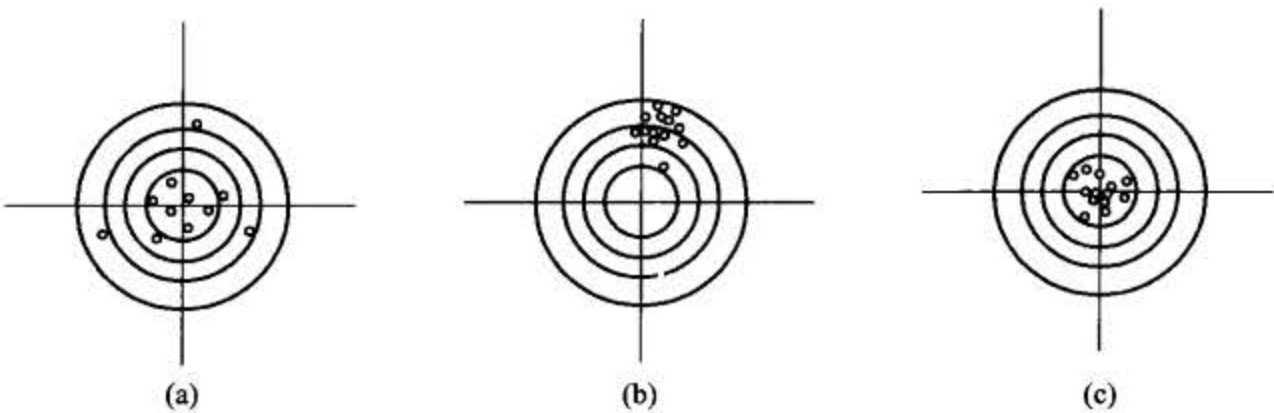


图 1-10 射击举例

2. 稳定性

仪表的稳定性有两个指标：一是仪表指示值在一段时间中的变化，以稳定度表示；二是仪表外部环境和条件变化引起指示值的不稳定，用影响量表示。

（1）稳定度 指在规定时间内，测量条件不变的情况下，由仪表中随机性变动、周期性变动、漂移等引起指示值的变化。一般以仪表精密度数值和时间长短一起表示。例如，某仪表电压指示值每小时变化 1.3mV ，则稳定度可表示为 $1.3\text{mV}/\text{h}$ 。

（2）影响量 测量仪表由外界环境变化引起指示值变化的量，称为影响量。它是由温度、湿度、气压、振动，电源电压及电源频率等一些外部环境因素所引起的。说明影响量时，必须将影响因素与指示值偏差同时表示。例如，某仪表由于电源电压变化 10% 而引起其指示值变化 0.02mA ，则应写成 $0.02\text{mA}/(U\pm 10\%)$ 。

3. 线性度

传感器的理想输出-输入特性应呈现直线特性。线性的输出-输入特性具有以下优点。

可大大简化理论分析和计算。当分析和设计具有线性特性的传感器时,可以充分利用叠加原理,将正弦的和非正弦的,周期的和非周期的,有用信号和干扰等多种复杂的输入变量化为单一输入变量来分析,然后应用叠加原理综合总的效果。这样可以充分利用代数方程和微分方程进行精确分析和计算,使设计、分析和计算大为简化。

只要知道线性输出-输入特性上的两个点(一般为零点和满度值)就可以确定其余各点。这将使输出量的处理简便,如数据的数值计算和处理等。可使仪表刻度均匀,因而容易制作、安装和调整,刻度盘的互换性也好,从而具有较小的刻度误差。只要校准好仪表的零位和满度值,就保证了全刻度的精度,这对测量设备的标定也是有利的。

实际上许多传感器并非都具有线性的输出-输入特性,总是具有不同程度的非线性。测量仪表输出量与输入量之间的数量关系,即被测量与其输出(指示值)的函数关系可用数据表格形式给出,也可用数学方程式 $y=f(x)$ 给出。

如果不考虑迟滞和蠕变效应,一般可用下面的多项式表示输出-输入特性:

$$y=f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_nx^n \quad (1-8)$$

式中 x ——输入物理量;
 y ——输出物理量;
 a_0 ——零位输出;
 a_1 ——传感器线性灵敏度;
 $a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性的待定系数。

如用横坐标表示被测量,纵坐标表示指示值。当 $a_0, a_1, \cdots, a_n$ 选值不同时,可作出图 1-11 所示的图像。

(1) 理想的线性特性 如图 1-11(a) 所示的线性方程,在这种情况下,因为

$$a_0=a_2=a_3=\cdots=a_n=0$$

则 $y=a_1x$

为一直线,具有这种输出-输入特性的传感器其灵敏度为常数, $S=a_1$ 。这是希望实现的理想特性。

(2) 仅有奇次非线性项 如图 1-11(b) 所示,其输出-输入特性方程式为

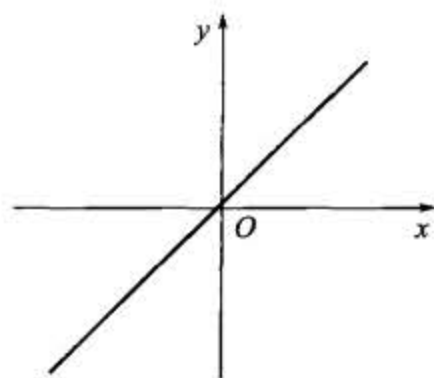
$$y=f(x)=a_1x+a_3x^3+a_5x^5+\cdots \quad (1-9)$$

具有这种特性的传感器,一般在输入量 x 相当大的范围内具有较宽的准线性。

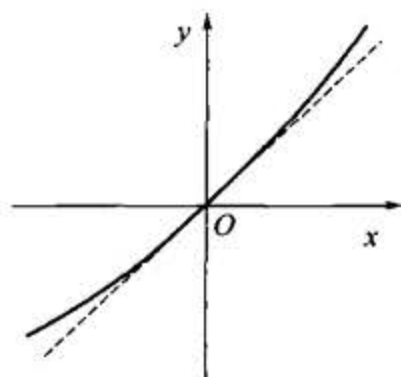
四、智能仪器

智能仪器是计算机技术与电子测量仪器相结合的产物,是含有微型计算机或微处理器的测量仪器。由于它拥有对数据的存储、运算、逻辑判断及自动化操作等功能,因而具有一定的智能作用,被称为智能仪器。

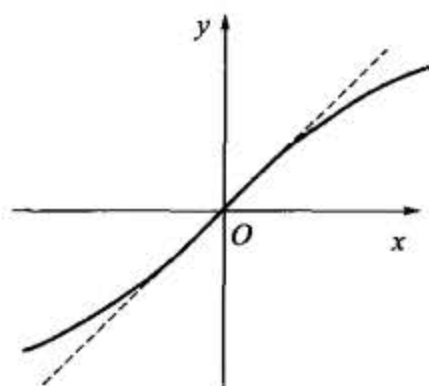
自 20 世纪 70 年代微处理器诞生以来,计算机技术得到了迅猛发展。微型计算机的问世和普及,是信息革命的一个最重要的助推器。微型计算机问世不久,便很快用于电子测量和仪器之中。利用微型计算机的记忆、存储、数学运算、逻辑判断和命令识别等功能,发展了微型计算机化仪器和自动测试系统。随着计算机技术和电子测量技术的发展,在测试系统中解决了通用接口母线的标准化问题,使得微型计算机化仪器和自动测试系统得到了飞速发展。微型计算机与电子测量的结合,先后出现了智能仪器、GPIB 总线仪器、VXI 总线仪器



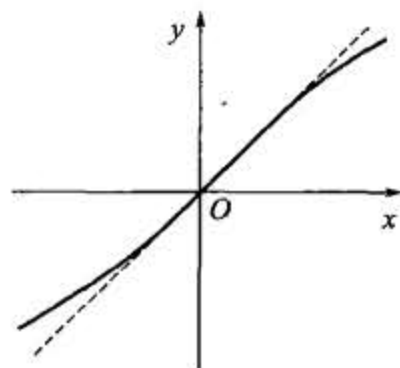
(a) 理想线性特性 $y=a_1x$



(c) 仅有偶次非线性项 $y=a_1x+a_2x^2+a_4x^4+\dots$



(b) 仅有奇次非线性项 $y=a_1x+a_3x^3+a_5x^5+\dots$



(d) 具有奇次、偶次阶非线性项 $y=a_1x+a_2x^2+a_3x^3+\dots$

图 1-11 典型刻度曲线

系统等，使电子测量在测量原理与方法、仪器设计、仪器性能和功能、仪器使用和故障检修方面都产生了巨大变化。可以说，在高准确度、高性能、多功能的测量仪器中已经很少有不采用微型计算机技术的了。

在智能仪器中每个仪器都包含一个或数个微处理器，并且以微型计算机的软硬件为核心，对传统仪器进行了重新设计，使仪器测量部分和微机部分互相融合。与传统仪器相比，智能仪器的性能明显提高、功能大大丰富，而且多半具有自动量程转换、自动校准、自动检测甚至具有自动切换备件进行维修的能力。智能仪器大多配有通用接口以便多台仪器构成自动测试系统。

(一) 智能仪器的特点

智能仪器相对于过去传统的、纯硬件的仪器来说是一种新的突破，概括起来，智能仪器具有以下诸多特点。

1. 强大的控制能力

智能仪器在测量过程中采用了计算机技术，不仅简化了硬件结构，缩小了仪器的体积及功耗，提高了可靠性，增加了灵活性，而且还使仪器的自动化程度更高。智能仪器使用键盘代替传统仪器中的旋转式或琴键式切换开关，从而使仪器面板的布置和仪器功能部件的安排可以完全独立地进行。这样，有利于提高仪器的技术指标而且方便了仪器的操作使用。智能仪器具有友好的人机界面，使用时只需通过键盘输入命令，仪器就能实现测量、自检、数据处理、显示及打印等多种功能。

2. 强大的数据处理功能

智能仪器最突出的特点是它的数据处理功能，主要表现在改善测量的精度及对测量结果的处理两方面。在提高测量精度方面，智能仪器采用软件对测量结果进行及时的在线的处理，对各种误差进行计算和补偿，精度和数据处理的质量都大为提高。例如传统的数字万用

表 (DMM) 只能测量电阻、交直流电压、电流等, 而智能型数字万用表不仅能进行上述测量, 而且还能对测量结果进行诸如零点平移、平均值、极值、统计分析以及更加复杂的数据处理。又如, 一些信号分析仪器在微型计算机的控制下, 不仅可以实时采集信号的实际波形, 在 CRT 上复现, 并可在时间轴上进行展开或压缩, 还可以对所采集的样本进行数字滤波, 将淹没在干扰中的信号提取出来, 也可以对样本信号进行时域的或频域的分析。这样使仪器具有更深层次的分析能力。

3. 实现仪器功能多样化

智能仪器利用计算机具备的功能, 可以使仪器的性能得到提高, 功能得到扩展, 甚至可以进行一些传统仪器无法进行的测量。例如智能仪器对网络参数的测量, 往往只要测得几个参数, 就可以通过仪器内安排的程序进行计算, 直接给出大量或全部参数。又如对于测量所得的数据, 可以进行多种运算、比较、逻辑判断等数据处理, 然后再按要求输出显示。可见, 采用微型计算机控制以后, 使仪器的测试功能大大增加。微处理器的使用使智能仪器的测量过程、软件控制及数据处理等更多方面的功能易于实现。例如智能型 8520 数字万用表的主要运算功能有: 自检、零点设置、数值运算、偏差百分比、峰值、超极限检查、统计运算、用电平表示电压或功率等; 有的智能仪器还具有时钟、日历、自动记录、打印、报警及控制等多方面的功能。这样多的功能如果不用微型计算机控制, 在一台仪器中是不可能实现的。

另外, 智能仪器一般都配有 GPIB 或 RS-232 等接口, 使其具有可编程的能力, 从而可以很方便地与计算机和其他仪器一起组成自动测试系统, 以此来完成更复杂的测试任务。

(二) 智能仪器的基本构成

智能仪器实际上是一个专用的微型计算机系统, 它由硬件和软件两大部分组成。智能仪器的硬件部分主要包括 CPU、存储器、总线 BUS、各种 I/O 接口、输入输出通道、仪器面板 (键盘、开关、按钮、显示器) 等, 其基本结构如图 1-12 所示。

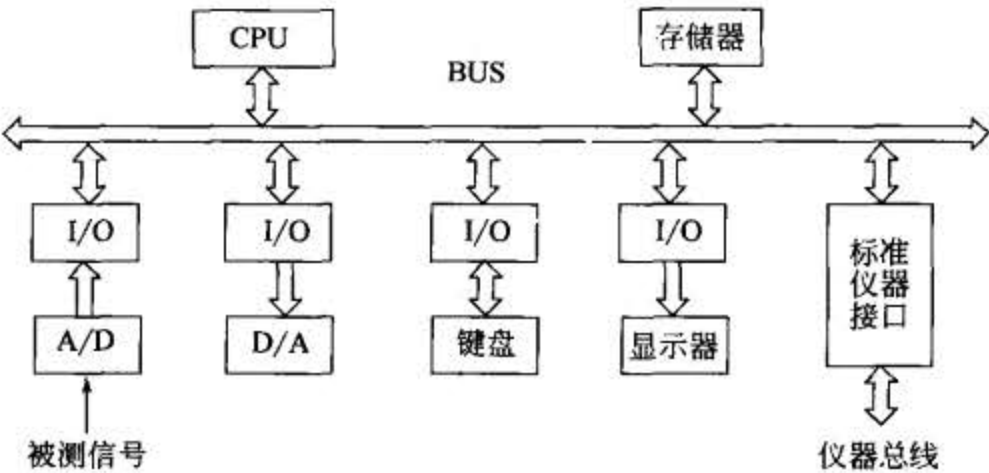


图 1-12 智能仪器的基本结构

智能仪器以微处理器为核心, 通过总线及接口与 I/O 通道及输入输出设备相连。可见, 智能仪器的硬件系统与传统的仪器有着明显的区别。智能仪器是用微处理器与存储器来代替电子线路的硬件功能, 微处理器是智能化仪器仪表的核心, 它作为控制单元来控制数据采集装置进行采样, 并对采样数据进行计算及数据处理, 如数字滤波、标度变换、非线性补偿和数据计算等, 然后, 把计算结果进行显示或打印。智能仪器的面板及控制操作机械与传统仪器也大不相同, 它淘汰了大多数的旋转式波段开关、衰减器、调节器之类的操作器材。智能仪器广泛使用键盘、LED/LCD 显示器或 CRT, 它们由微处理器控制, 不但能显示检测结果或处理结果, 而且可以显示选用的程序、输入的数值, 甚至图像画面等。

智能仪器的软件部分主要包括系统监控程序、测量控制程序以及数据处理程序等。

用计算机软件代替传统仪器中的硬件具有很大的优势，如用微处理器及其软件直接产生仪器中需要的信号，用软件直接产生或控制 A/D 变换过程等。这不仅降低了仪器的成本、体积和功耗，增加了仪器的可靠性，还可以通过对软件的修改，使仪器对用户的要求做出灵活的反应，提高产品的竞争力。由于应用了微处理器，不少硬件被软件代替，从而使仪器的体积和质量相应减小。

智能仪器的硬件和软件都是其重要组成部分，两者在功能上各有千秋。因此，要注意软硬件的折中，最大限度地发挥软硬件各自的优势。

五、虚拟仪器技术

随着计算机技术的高度发展，传统仪器开始向计算机化方向发展。以计算机为核心，计算机软件技术与测试系统的有机结合，产生了新的仪器概念即虚拟仪器。这里主要介绍虚拟仪器的基本概念、组成及设计方法。

(一) 虚拟仪器的概念

随着微电子技术、计算机技术、软件技术、网络技术的高度发展及其在电子测量技术与仪器上的应用，新的测试理论、新的测试方法、新的测试领域以及新的仪器结构不断涌现，在许多方面已经突破了传统仪器的概念，测量仪器的功能和作用也发生了质的变化。在这种背景下，1986 年美国国家仪器公司 (national instruments corp, NI) 提出了一种新型的仪器概念，即虚拟仪器 (virtual instrument, VI)。虚拟仪器是计算机技术介入仪器领域所形成的一种新型的、富有生命力的仪器种类，在虚拟仪器中计算机处于核心地位，计算机软件技术和测试系统更紧密地结合成了一个有机整体，仪器的结构概念和设计观点等都发生了突破性的变化。显然虚拟仪器突破了传统电子仪器以硬件为主体的模式，使用者在操作具有测试软件的计算机进行测量时，犹如操作一台虚设的电子仪器，虚拟仪器也因此而得名。

与传统仪器一样，虚拟仪器同样划分为数据采集、数据分析处理、显示结果三大功能模块，如图 1-13 所示。虚拟仪器以透明方式把计算机资源和仪器硬件的测试能力结合，实现仪器的功能运作。



图 1-13 虚拟仪器的内部功能划分

从构成上来说，虚拟仪器就是利用现有的计算机，配上相应的硬件和专用软件，形成既有普通仪器的基本功能，又有一般仪器所没有的特殊功能的高档低价的新型仪器。从使用上来说，虚拟仪器利用 PC 机强大的图形环境，建立界面友好的虚拟仪器面板（即软面板），操作人员可通过友好的图形界面及图形化编程语言控制仪器运行，完成对被测试量的采集、分析、判断、显示、存储及数据生成。

虚拟仪器技术的实质是充分利用最新的计算机技术来实现和扩展传统仪器的功能。虚拟仪器的基本构成包括计算机、虚拟仪器软件、硬件接口模块等。其中，硬件接口模块可以包

括插入式数据采集卡 (DAQ)、串/并口、IEEE-488 接口 (GPIB) 卡、VXI 控制器以及其他接口卡。目前较为常用的虚拟仪器系统是数据采集卡系统、GPIB 仪器控制系统、VXI 仪器系统以及这三者之间的任意组合。在这里, 硬件仅仅解决信号的输入输出问题, 软件才是整个系统的关键。正由于软件是虚拟仪器的关键, 所以当基本硬件确定以后, 就可以通过不同的软件 (如用于数据分析、过程通信及图形用户界面的软件) 实现不同的功能。虚拟仪器应用软件集成了仪器的所有采集、控制、数据分析、结果输出和用户界面等功能, 使传统仪器的某些硬件乃至整个仪器都被计算机软件所代替。因此从某种意义上可以说软件就是仪器。用户可以根据自己的需要, 设计自己的仪器系统, 满足多种多样的应用要求。利用计算机丰富的软硬件资源, 可以大大突破传统仪器在数据的处理、表达、传递、储存等方面的限制, 达到传统仪器无法比拟的效果。它不仅可以用于测量、测试、分析、计量等领域, 而且还用于进行设备的监控, 用于工业过程自动化。

目前, 虚拟仪器在工业发达国家中设计、生产、使用日益广泛。随着计算机技术、软件技术和测量技术的发展, 虚拟仪器将会逐步取代传统的测试仪器, 从而推动自动测量技术不断向前发展。

(二) 虚拟仪器的特点及意义

现代化生产不仅要求电子仪器品种多、功能强、精度高、自动化程度高, 而且要求测试速度快、实时性好、具有良好的人机界面。虚拟仪器正可以实现这些要求。与传统仪器相比, 虚拟仪器具有如下优点。

1. 仪器功能可由用户自己定义

传统仪器的功能是供应商定义的, 用户不可更改, 而对虚拟仪器, 当用户的测试要求变化时, 用户可以方便地增减软件模块, 或重新配置系统以满足现有系统的测试要求, 系统开放灵活。

2. 速度和可靠性高

对于传统仪器, 在测试过程中人工干预多、操作容易出错、测试的速度和稳定性也难以保证, 这些都大大影响了测试特别是生产性测试的顺利进行, 虚拟仪器技术把仪器的部分功能软件化, 封装形成模块以供调用, 实现了软件的即插即用, 这样用户就可以通过友好的用户界面调用不同的软件模块来实现不同的测试功能, 减少了人工干预的成分, 提高了测试的速度和可靠性。

3. 数据可以进行编辑、存储和打印

普通测试设备需要人工记录测试数据, 或者通过仪器自带的软盘驱动器与其他分析仪器交流数据, 而虚拟仪器技术、测试设备得到的数据将会实时、直接地通过计算机总线, 传输到计算机的内存或硬盘, 供以后分析使用。

4. 基于软件的结构体系可大大节省开发费用

传统仪器关键是硬件, 开发维护费用高, 技术更新周期长; 虚拟仪器关键是软件, 开发维护费用低, 技术更新周期短。

5. 价格低廉 (是传统仪器的 $1/10 \sim 1/5$)

虚拟仪器通过软件将计算机硬件资源与仪器硬件有机地融合为一体, 从而把计算机强大的计算处理能力和仪器硬件的测量、控制能力结合在一起, 大大缩小了仪器硬件的成本和体积, 并通过软件实现对数据的显示、存储以及分析处理。

虚拟仪器由于其功能灵活, 很容易构建, 所以应用面极为广泛。尤其在科研、开发、测

量、计量、测控等领域更是不可多得的实用工具。虚拟仪器技术先进，十分符合国际上流行的“硬件软件化”的发展趋势，因而常被称为“软件仪器”。它功能强大，可实现示波器、逻辑分析仪、频谱仪、信号发生器等多种普通仪器的全部功能，虚拟仪器系统已成为仪器领域的一个基本方案，是技术进步的必然结果。今天，它的应用已经遍及各行各业。

在仪器计量系统方面，示波器、频谱仪、信号发生器、逻辑分析仪、电压电流表是科研机关、企业研发实验室、大专院所的必备测量设备。随着计算机技术在测绘系统的广泛应用，传统的仪器设备缺乏相应的计算机接口，因而配合数据采集及数据处理十分困难。在完成某个测试任务时，需要许多仪器，如示波器、电压表、频率分析仪、信号发生器等，对复杂的数字电路系统还需要逻辑分析仪、IC测试仪等。这么多的仪器不仅价格昂贵、体积大，占用空间，而且相互连接起来也费事费时。而虚拟仪器将计算机资源与仪器硬件、DSP 技术结合，在系统内共享软硬件资源，既有普通仪器的功能，又有一般仪器所没有的特殊功能。它把由厂家定义仪器功能的方式转变为由用户自己定义仪器功能，用户可根据测试功能的需要，自己设计所需要的仪器系统，只要将具有一种或多种功能的通用模块相组合，并且调用不同功能的软件模块，就能组成不同的仪器功能。

在专用测量系统方面，虚拟仪器的发展空间更为广阔。环顾当今社会，信息技术的迅猛发展，各行各业无不转向智能化、自动化、集成化。无所不在的计算机应用为虚拟仪器的推广提供了良好的基础。虚拟仪器的设计理念就是用专用的软硬件配合计算机实现专有设备的功能，并使其自动化、智能化。因此，虚拟仪器适合于一切需要计算机辅助进行数据存储、数据处理、数据传输的计量场合。测量与处理、结果与分析相脱节的面貌将大为改观。

在自动控制和工业控制领域，虚拟仪器同样应用广泛。绝大部分闭环控制系统要求精确地采样，及时地数据处理和快速地数据传输。虚拟仪器系统恰恰符合上述特点，十分适合测控一体化的设计。尤其在制造业，虚拟仪器的卓越计算能力和巨大数据吞吐能力必将使其在温控系统、在线监测系统、电力仪表系统、流程控制系统等工控领域发挥更大的作用。

虚拟仪器的出现是仪器发展史上的一场革命，代表着仪器发展的最新方向和潮流，对科学技术的发展和工业生产的进步将产生不可估量的影响。

（三）虚拟仪器的现状及发展前景

电子测量仪器经历了由模拟仪器、数字化仪器、智能仪器到全部可编程虚拟仪器的发展历程，而虚拟仪器的发展大致分为以下三个阶段。

第一阶段：利用计算机增强传统仪器的功能。由于 GPIB 总线标准的确立，计算机和外界通信成为可能，只需要把传统仪器通过 GPIB 和 RS-232C 同计算机连接起来，用户就可以用计算机控制仪器。随着计算机系统性能价格比的不断上升，用计算机控制测控仪器成为一种趋势。这一阶段虚拟仪器的发展几乎是直线前进。

第二阶段：开放式的仪器构成。仪器硬件上出现了两大技术进步：一是插入式计算机数据处理卡（PC-DAQ）；二是 VXI 仪器总线标准的确立。这些新的技术使仪器的构成得以开放。

第三阶段：虚拟仪器框架得到了广泛认同和采用。软件领域面向对象技术把任何用户构建虚拟仪器需要知道的东西封装起来。虚拟仪器平台已经得到认可并逐渐成为虚拟仪器行业的标准工具。发展到这一阶段，人们也认识到了虚拟仪器软件框架才是数据采集和仪器控制

系统实现自动化的关键。

总线式仪器、虚拟仪器等微机化仪器技术的应用，虽然可使组建集中和分布式测控系统变得更为容易，但集中测控越来越满足不了复杂、远程（异地）和范围较大的测控任务的需求。随着计算机技术、网络通信技术的进步而不断拓展，21 世纪的仪器概念是一个开放的系统概念。以 PC 机和工作站为基础，通过组建网络来构成实用的测控系统，提高生产效率和共享信息资源，已成为现代仪器仪表发展的方向。从某种意义上说，计算机和现代仪器仪表已相互包容，计算机网络也就是通用的仪器网络。如果在测控系统中有更多不同类型的智能设备也像计算机和工作站一样成为网络的节点联入网络，例如各种智能仪器、虚拟仪器及传感器等，它们充分利用目前已比较成熟的 Internet 网络的设施，不仅能实现更多资源的共享、降低组建系统的费用，还可提高测控系统的功能，并拓宽其应用的范围。传统测试（测量）仪器或系统一旦联网，即一旦与某种合适的电子化信息载体结合在一起组成了网络化仪器，便正像电信服务运营商今天已能进行远程测试一样，就可以做到从地球上的任何地点、任意时间，获取到任何地方的所需要的测量信息。