

第 1 章



仪器设计技术概论

为了对仪器设计技术建立初步的认识,本章首先介绍有关测量及其量化基准、测量误差与仪器精度等基本概念之间的关系,然后介绍仪器和仪表的关系及其测量过程,以及仪器系统设计基本过程,逐渐导出仪器测量方法、仪器设计任务分析、仪器测量性能评价等内容。作为进一步学习仪器系统设计技术的基础知识,本章还介绍传感器和执行器等仪器关键功能部件的主要技术指标及其性能评价方法。

1.1 仪器及测量基本概念

人们对仪器的最早认知莫过于古代“度量衡”。在远古时期,“度”是指测量长度的工具,“量”是指测量体积或容积的工具,“衡”是指测量物体重量的工具,因此“度量衡”是古代最常用的三种仪器。自古至今,仪器始终都是指能够完成某种“测量”功能的工具或设备。

“测量”是指将未知“被测量”与已知“基准量”进行比较和量化的具体过程。而“被测量”就是希望能够精确量化的待测物理量,“基准量”则是国际计量组织法定的国际计量基准及其法定传递基准,或某些通过量纲变换可以溯源到国际计量基准的实用测量基准。计量是一种服务于测量基准和维护社会公平公正的高精度法定测量,其测量过程和规范都必须得到相关法律的允许和认可。国际计量基准的法定传递及所有量化基准量自身的精确测量都可称为计量。仪器是一种包括但不限于计量、能直接或间接完成指定测量任务的设备或工具。

早期仪器的使用者在测量过程中的主要作用是“读数”和“比较”。其中,“读数”的目的是了解仪器的最终测量结果,“比较”的目的是完成测量。例如,在读数过程中将指针与刻度进行比较,或者在测量过程中直接将被测对象与基准刻度进行比较。测量过程中,仪器使用者参与的环节越多,其测量结果的可信度就越低。在现代仪器的测量过程中,除了需要仪器使用者通过读数了解仪器的最终测量结果以外,其他过程都可依靠仪器自身功能自动完成。

仪器是人们认识世界和改造世界的基本工具或设备。无论是出于对未知世界的探索和认知,还是出于对已知世界的规范和改造,人们总是希望知道某些东西或目标对象是什么,或者该东西或目标对象的数量到底是多少,确定这一事实的过程就是测定或测量。所谓“测定”就是分析和探索未知物或对象是什么的过程,而“测量”则是确定已知物或对象的数量到底是多少的过程。能够帮助人们完成这一测量愿望的工具或设备都可统称为“仪器”。

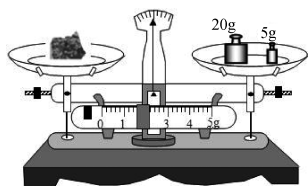
探索和测定未知物是什么的仪器被称为科学分析仪器,可以精确量化和确定被测对象大小的仪器被称为常规测量仪器。许多科学分析仪器都是基于常规测量仪器工作的。例

如,某些化学分析仪器测定未知物的过程,就是先假设待测定的未知物中可能含有哪些化学元素,然后分别测量这些元素的实际含量,最后根据实际测得的化学元素组成和相对比例来确定该未知物到底是什么。因此,常规测量仪器是科学分析仪器的技术基础,而科学分析仪器是常规测量仪器的一种综合应用。本书所介绍的仪器设计技术内容主要是针对常用的计量、测量、测试和工控等常规测量仪器的设计。

测量仪器的本质功能是直接或间接地将未知“被测量”与已知“基准量”进行自动比较,并获得其精准的量化结果,即仪器的测量结果。用于量化比较的“基准量”、“被测量”及“比较器”则是所有测量仪器都具备的三个本质特征结构。

用于仪器量化比较的测量基准被称为量化基准,量化基准可以是各种国际计量基准及其法定传递基准,或者是某些可溯源到国际计量基准的实用测量基准。用于计量的量化基准必须是高精度等级的计量级基准,而用于测量的量化基准可以是各种实用的测量级基准。

如图 1-1-1(a)所示,在中学物理中学过的天平质量测量仪非常直观地给出了几乎所有仪器都必须具备的量化比较过程。放在天平左边托盘中的被测物体的质量就是该仪器未知的“被测量”,而放在天平右边托盘中的砝码的质量就是该仪器已知的“基准量”。天平本身其实就是一种将未知“被测量”与已知“基准量”进行比较和量化的工具或设备,因此又被称为质量测量仪。



(a)



(b)

图 1-1-1 质量测量仪的工作原理及其测量结果的具体量化过程示意图

天平中间的长指针用于指示天平的平衡状态,小刻度盘用于指示小于最小砝码质量的质量测量结果。天平测量的初始状态是,小刻度盘上的滑块处于其小刻度盘的“0”位置,并通过调节平衡杠杆两端的调零螺母使得天平杠杆达到平衡状态。

用天平进行测量时,先在左边托盘放入质量未知的被测物,通过往右边托盘放入质量已知的不同砝码,并调节滑块在其刻度盘上的位置,使得天平再次达到平衡,以完成未知“被测量”与已知“基准量”的比较和量化过程。此时,天平右边托盘中所有砝码的质量之和(图中为 $20\text{ g} + 5\text{ g} = 25\text{ g}$),再加上滑块在其刻度盘上的读数(图中为 2 g),即为被测物的实际质量。如图 1-1-1(a)所示,天平质量测量仪的最终测量结果为 $25\text{ g} + 2\text{ g} = 27\text{ g}$ 。

由于天平是一种精密测量仪器,在其测量的量化比较过程中,使用了用砝码表示的质量量化基准和用刻度间距表示的长度量化基准,两种量化基准的功能互补,以最终获得“被测量”的精确量化结果。

在图 1-1-1(b)所示的电子秤中,尽管其结构与图 1-1-1(a)所示的天平完全不同,但其同样存在将未知“被测量”与已知“基准量”进行比较量化的过程。首先通过一个被称为传感器的特殊功能部件将被测物体的质量转换为电压信号,然后通过一个被称为 A/D 转换器的电压信号比较器与仪器内置的基准电压进行量化比较,最终完成其测量过程。

其实,仪器测量的本质过程都是通过其“比较器”将“被测量”与“基准量”进行量化比较的过程,而其量化比较的结果就是仪器的测量结果。由于各种因素的影响,仪器量化比较的结果往往很难十分精准,常用测量精度来表征仪器量化比较的精准程度。

测量精度是一种表征仪器设备自身量化比较能力及其测量行为精准程度的综合性技术指标,可通过仪器实际测量行为的某些误差统计特性来表征。

与测量行为和测量过程无关的被测物理量自身大小,属于被测物理量的固有属性,称为真值 x_0 。仪器实际测量结果 x 与被测物理量真值 x_0 之间的偏差被称为测量误差 δ ,在数学上可以描述为

$$\delta = x - x_0 \quad (1-1-1)$$

测量误差是仪器单次测量行为的属性,即指某次测量的实际测得值与被测物理量真值之差。当 $x \geq x_0$ 时, $\delta \geq 0$; 当 $x < x_0$ 时, $\delta < 0$ 。可见,测量误差是一个具有正负符号之分的物理量。

由于各种随机因素的影响,若用仪器某次测量结果的误差大小来表征该仪器测量精度显然不公平,因此常用仪器多次测量结果的误差统计特性表征该仪器的测量精度。

假设某仪器对同一被测对象进行 n 次测量,其测量结果为 $x_i, i \in [1, n]$,测量结果的平均值可表达为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-1-2)$$

若被测对象的真值为 x_0 。根据式(1-1-1),每次测量的测量误差 δ_i 可描述为

$$\delta_i = x_i - x_0 = (x_i - \bar{x}) + (\bar{x} - x_0) \quad (1-1-3)$$

上述测量误差表达式共由两项构成,第一项测量误差表示实际测量值相对于测量平均值的误差,表示仪器测量行为的精密度(precision);第二项测量误差表示测量平均值相对于被测对象真值的误差,表示仪器测量行为的准确度(accuracy)。仪器测量行为的精密度和准确度共同影响着仪器的测量精度,既准确又精密是所有仪器的测量行为追求的最终目标。

图 1-1-2 所示的射箭打靶过程可帮助大家进一步理解精密度和准确度的具体物理含义。仪器的每次测量过程就好比一次射箭打靶过程,靶标的靶心就好比是被测物理量的真值,每支箭的实际中靶位置就相当于仪器的每次测量结果。就像所有射手都以击中靶心为目标一样,所有仪器都以获得被测物理量的真值为目标。

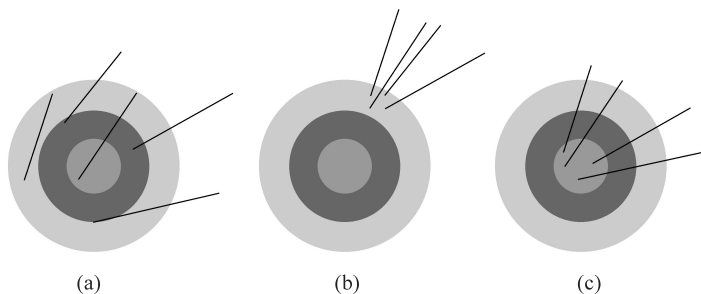


图 1-1-2 仪器测量过程与射手射击过程的对比示意图

靶标上每支箭的实际中靶位置相对于靶心的距离,就相当于仪器单次测量结果相对被测物理量真值的距离,而偏离靶心的方位,就相当于仪器测量误差的正负符号。

当评价一位射手的射击精度水平时,往往只关心其每支箭的实际中靶位置偏离靶心的距离,而不关心其方位,因此测量精度也只关心仪器测量结果偏离其真值的大小,而不关心其正负符号,这也正是仪器测量精度与测量误差的主要区别。测量精度是表征仪器设备自身测量能力和水平的固有属性,而测量误差仅仅是仪器单次测量行为及其测量结果的自然属性。

考虑到射击场灯光和风速等各种变化随机因素的影响,常用射手多次射击结果来更公平地评价射手的真实水平。因此在仪器系统的测量精度评价体系中,也常用仪器多次测量行为的测量误差来公平地评价仪器的实际测量精度。

图 1-1-2 中的(a)、(b)和(c)分别给出了三位射手的不同射击结果。靶标上所有箭的平均位置可表达为式(1-1-2)所示结果。每支箭的中靶误差可表达为式(1-1-3)所示结果。

式(1-1-3)中第一项误差表示每支箭的实际中靶位置偏离其平均位置的距离,可用于表征射手瞄准水平中的精密度;而式(1-1-3)中第二项误差表示所有箭的平均位置偏离靶心的距离,可用于表征射手瞄准水平中的准确度。

图 1-1-2(a)所示的结果表明,该射手的瞄准准确度很高,但其精密度很低;图 1-1-2(b)所示的结果表明,该射手的瞄准准确度很低,但其精密度很高;图 1-1-2(c)所示的结果表明,该射手的瞄准准确度和精密度都很高,既准确又精密,这既是射手也是仪器最终追求的目标。

影响仪器准确度的主要因素往往是工作原理、系统结构、量化基准及其比较过程等方面的设计缺陷或天然不足,由于这类因素所导致的测量误差被统称为系统误差。除了量化基准自身可能存在的误差以外,其他误差均与仪器系统的工作原理设计有关,因此也被称为原理误差。若忽略基准自身的误差,则原理误差和系统误差具有相同的内涵。

影响仪器精密度的主要因素则往往是测量过程中可能存在的各种难以预测和控制的随机因素,因此由于这类因素所导致的测量误差被统称为随机误差。

在式(1-1-3)所示的测量误差中,第一项误差即为随机误差,第二项为系统误差。仪器的系统误差一般具有确定性和规律性,可通过仪器标定等方法进行修正或补偿。经过标定的仪器,理论上其测量结果中将不再包含系统误差,即使包含少量的系统误差,其大小也可忽略不计,此时仪器测量精度的内涵将完全等价于其精密度内涵。

由于随机误差的大小往往是不确定的,因此无法直接用随机误差的大小来表征仪器精密度即测量精度。但对于各态历经的随机过程而言,其标准差 σ 往往是确定的,因此常用随机误差标准差 σ 的若干倍,如 1σ 、 2σ 、 3σ 等来表征仪器的测量精度。根据统计学知识,随机误差的标准差 σ 可表达为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (1-1-4)$$

由于仪器的测量过程实际上就是一个被测物理量与基准量进行比较的过程,因此,可能影响仪器测量精度的另一重要因素是其量化基准本身的误差,即量化基准误差。

量化基准误差是指量化基准的标称值与其真值的偏差,对量化基准的测量为计量,计量

是一种必须严格按照相关法定规程进行的精确测量,包括但不限于各种量化基准的精确测量。国际计量组织法定的计量基准可被认定为没有误差或其误差可忽略不计的量化基准。其他源于该国际计量基准的法定传递基准都会或多或少地存在一定误差,而且该误差最终将被纳入仪器系统误差。

国际计量组织以法定形式定义的计量基准,包括且只包括7个最基本的物理量,其名称及计量单位分别为长度(m,米)、质量(kg,千克)、时间(s,秒)、温度(K,开尔文温度)、电流(A,安培)、发光强度(cd,坎德拉)、物质量(mol,摩尔)。这7个法定计量基准量被规定为没有误差或误差可忽略的权威计量基准,全世界各国实际使用的其他一切计量基准或测量量化基准均为该计量基准的直接或间接法定传递基准,其精度均低于该国际法定计量基准。

以上7个国际法定计量基准,其早期的呈现形式均为实物基准,保存在位于法国巴黎的国际计量部门,用于全世界各国计量传递基准的精确比对。目前,除了质量(kg,千克)依然为实物基准以外,其他6个计量基准均已转换为了可在全世界任意位置重现的物理基准。

细心的读者可能早已发现这7个计量基准中,并不包括人们日常使用且十分熟悉的伏特(电压或电动势)、欧姆(电阻)、牛顿(力)、帕斯卡(压强)、焦耳(能或功)、瓦特(功率)等计量基准。事实上,大量在工程实践中常用的计量基准均不在上述范围内。

在工程实践中常用的量化基准被称为实用测量基准,这些实用测量基准或是国际计量基准的末端法定传递基准,或是可通过其计量单位的物理学量纲溯源到国际计量组织法定的7个权威计量基准。其溯源过程可用以下实例予以说明。

例 1-1 电压或电动势的计量单位为伏特(V),在物理学上1 V的定义为:通过1 A恒定电流的导体内,两点之间所消耗的功率若为1 W,则这两点之间的电位差为1 V,即 $1 \text{ V} = 1 \text{ W/A}$ 。试给出电压的计量单位伏特(V)的量纲溯源公式及其溯源过程。

解: 根据题意和物理学知识,有

$$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} \quad (1-1-5)$$

上述量纲公式中的电流计量单位A已在7个国际计量基准和计量单位范围内。而功率1 W的物理学定义为1 s内能给出1 J能量的功率,即

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} \quad (1-1-6)$$

上述量纲公式中的时间计量单位s已在7个国际计量基准和计量单位范围内。而能量1 J的物理学定义为在1 N力作用下移动1 m距离时所做的功,即

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1-1-7)$$

上述量纲公式中的长度计量单位m已在7个国际计量基准和计量单位范围内。而力1 N的物理学定义为使1 kg质量产生 1 m/s^2 加速度的力,即

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (1-1-8)$$

上述量纲公式中的质量计量单位kg、长度计量单位m以及时间计量单位s均在7个国际计量基准和计量单位范围内。因此,计量单位溯源完毕。综合式(1-1-5)~式(1-1-8)可得

$$\begin{aligned} 1 \text{ V} &= 1 \text{ W/A} = 1 (\text{J/s})/\text{A} = 1 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{A}) \\ &= 1 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{s} \cdot \text{A}) = 1 (\text{kg} \cdot \text{m/s}^2) \text{m}/(\text{s} \cdot \text{A}) \\ &= 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/(\text{s}^3 \cdot \text{A}) \end{aligned} \quad (1-1-9)$$

即

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3 \cdot \text{A}} \quad (1-1-10)$$

式(1-1-10)等号右边所有物理量及其计量单位均在7个国际计量基准和计量单位范围内,该表达式即为电压计量单位伏特(V)的量纲溯源公式。

事实上,工程实践中所使用的所有测量基准都可通过其计量单位的物理学量纲溯源到7个国际计量基准。因此,国际计量组织仅需要定义7个国际计量基准即可满足所有计量与测量应用的基准传递和精度比对需求。例如,在天平质量测量仪中所使用的砝码,其本身并不是国际法定计量基准,但它是国际法定计量基准的传递基准,该基准是否足够精确,则需要将其测量结果与国际法定计量基准进行比对,这种将实际测量结果与更高精度的基准物理量进行比对并确定其精度的过程被称为精度标定。只有经过精度标定的各种计量基准传递量才能成为可应用于仪器系统设计的量化基准,简称实用基准。

在仪器系统设计中实际使用的测量基准均为国际法定计量基准的国内法定传递基准。直接由国际法定计量基准传递下来的量化基准为各国最高级别的国内法定计量基准,该基准可在国内计量部门继续传递,但每传递一次,其精度等级将下降一个级别,直到最终形成可在工程实践中直接应用的各种测量量化实用基准。

各种法定传递计量基准在仪器系统设计中的主要作用具体体现在以下两个方面。一方面,其可直接用于仪器的测量量化基准。例如,在天平质量测量仪中使用的各种砝码,就是不同精度等级的法定传递计量基准;高精度光学比长仪中所使用的量块,也是不同精度等级的法定传递计量基准。另一方面,法定传递计量基准还可用于高精度仪器系统的测量精度标定和校准。例如,某些高精度的长度或位移测量仪器,往往需要采用国际法定长度计量基准,或其传递下来的高精度量块进行标定和校准;某些高精度的计时仪器,则往往需要采用国际法定计量基准中所规定的原子钟进行标定和校准。

在常规仪器系统中所使用的测量量化基准往往都是各种实用基准,例如,基准电压源的电压、仪表刻度盘的刻度、某些单色光的波长或其干涉条纹间距、石英晶振或RC振荡电路的振荡周期等。这些实用基准其实就是国际法定计量基准传递下来的末端基准,其精度可能不是很高,但却非常简单实用。

不同种类的测量仪器要求使用不同精度等级的法定传递基准作为其测量量化基准。以时间测量为例,图1-1-3给出了时间计量基准和时间测量基准两种时间量化基准的对比图。图1-1-3(a)所示的时间计量基准为国际计量组织规定的原子钟,其计时精度很高,每50亿年的累计计时误差不会超过1s,但其体积很庞大,大约相当于一间普通房间的大小。图1-1-3(b)所示的时间测量基准为普通仪器测量电路中常用的石英晶振,其体积只有几毫米,足以放进全世界最小的手机或手表中,但其计时精度相对较低,每个月的累计计时误差可能高达1s。

仪器的基本功能是测量,而测量的基本过程是其量化比较,即将被测物理量与测量基准量进行直接或间接的比较,不同的比较过程对应着不同的测量方法。若从测量原理和其基准特性区分,仪器的测量方法一般可分为直接测量、间接测量和表征测量。若从测量过程区分,则仪器的测量方法可分为接触测量和非接触测量。

直接测量方法是一种能将“被测物理量”与“基准量”直接进行比较,并最终获得其测量结果的测量方法。直接测量方法中的被测物理量往往都是可以与基准量进行直接比较或者

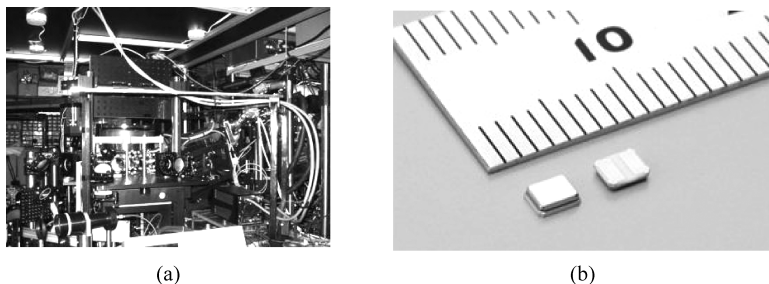


图 1-1-3 时间计量基准与实用基准对比图
(a) 时间计量基准-原子钟；(b) 时间测量基准-石英晶振

方便比较的物理量,例如,如果需要测量一个圆形工件的直径,那么可利用游标卡尺等仪器直接测得该直径的大小。此时,在该游标卡尺中,被测物理量(即被测直径)可与其长度测量基准(即卡尺刻度间距)直接进行比较和量化。同理,电压、电流、质量、长度、角度等许多物理量都可直接测量。

间接测量方法是一种无法或者难以将“被测物理量”与“基准量”直接进行比较的测量方法。例如,如果需要测量一个圆形工件的截面积,那么可以在该仪器系统中先测量该工件圆截面的直径,然后通过简单计算获得其面积测量结果。在这类间接测量仪器系统中,需要测量的被测物理量(如面积)与能够直接测量的物理量(如直径)往往无法直接比较,但却存在一一对应的线性或非线性映射关系。通过这种映射关系的转换,对应的仪器系统中不必存在“面积”“体积”等难以实现的复杂量化基准,而将其统一简化为比较容易实现的“长度”“电压”“时间”等简单量化基准。事实上,大多数测量仪器都需要通过这种间接测量方法来完成其测量任务。

无论是直接测量方法还是间接测量方法,其被测对象都必须是一种可直接测量或便于观察的物理量,即易测物理量。事实上,并非所有的被测对象都是易测物理量。例如,人体内的病灶位置和形状,某些材料的内部缺陷,或者某些材料的热扩散等物理特性参数。这些被测对象本身往往难以直接测量,但与许多易测物理量及其变化过程存在某些特征响应关系,或者说是存在某些复杂的特征响应过程函数关系。理论上可以先测量这些易测物理量及其变化过程,然后根据其特征响应过程函数进行反演,最终获得其测量结果,这种测量方法被称为表征测量方法。

表征测量是目前许多复杂仪器测量系统中常用的一种测量方法。例如,测量材料热扩散率的测量仪、医用CT断层成像测量仪等,都是典型的表征测量仪器。表征测量仪器的测量精度取决于其选取的各易测物理量参数的实际测量误差及其在特征响应函数中的传递过程。也就是,表征仪器的测量精度不仅与其易测物理量的参数测量精度本身有关,还与该仪器系统所选用的具体表征测量方法有关。

表征测量方法与间接测量方法的主要区别在于:①间接测量方法通过测量1~2个简单的物理参数即可,而表征测量方法往往需要测量多个物理参数及其变化过程;②间接测量方法中的被测物理量与可观测物理参数之间仅仅是一种一一对应的简单映射关系,而表征测量中的表征关系往往是一种多输入和多输出的特征过程响应函数,因此需要更加复杂的测量装置和更加复杂的数理运算才能获得其最终测量结果。

在仪器系统的测量过程中,若该仪器或其传感器必须与被测对象直接接触则被称为接触测量,否则被称为非接触测量。例如,当用普通体温计测量体温时,需要体温计(仪器)与人体(被测对象)直接接触,这类测量方法被称为接触测量;而当用红外测温仪测量体温时,无需将该仪器与人体直接接触,这类测量方法被称为非接触测量。

接触测量和非接触测量仅仅是两种与测量过程有关的信号获取方式,与仪器的测量原理分类无关。因此,无论是直接测量方法、间接测量方法,还是表征测量方法,都可采用接触测量或非接触测量方式来获取其待测物理参数。

相对于科学分析仪器,其他仪器都可统称为常规测量仪器。根据不同的使用需求和测量目的,常规测量仪器大致可以分为计量仪器、测量仪器、测试仪器、测控仪器四大类。

计量仪器:这是一类以完成法定计量任务为主的物理参数测量仪器。由于计量仪器以精确计量为目的,因此必须选用精度更高的法定传递计量基准。相对于国际法定计量基准,法定传递计量基准的传递链路越短,其精度越高。计量仪器常用于涉及国家法定计量基准的传递和测量,以及涉及公平公正的法定计量物理参数测量。计量仪器除了对测量精度要求较高以外,在响应速度和使用便捷性方面往往没有过高要求。

在图 1-1-1 所示的质量测量仪中,图 1-1-1(a)所示仪器的测量量化基准量为计量基准,其国际计量基准传递链路很短,更容易获得更高精度的量化基准;而图 1-1-1(b)所示仪器的测量量化基准量为实用基准,通过其量纲可溯源至对应的国际计量基准,其计量基准传递链路较长,因此不容易获得更高精度的量化基准。如果不考虑仪器结构自身特性所带来的原理性测量误差,使用国际计量基准传递链路较短的各种法定传递计量基准作为测量量化基准的仪器,一般更容易获得高精度的测量结果。因此,目前最高精度的质量计量仪器,依然是以高精度砝码为测量比较量化基准的各种天平。

测量仪器:这是一类以完成非法定计量参数测量为主的普通测量仪器。这类仪器常用于工业现场测量、实验室测量以及日常测量。其设计要求与计量仪器刚好相反,可适当牺牲一定的测量精度,但必须保证其具有足够的响应速度和使用便捷性。因此,其测量基准常选用各种实用测量基准而非计量基准。

同样以质量测量为例,电子体重计与电子秤的工作原理几乎完全相同,但由于电子体重计属于非计量仪器,其测量精度要求更低,选用普通稳压电源电压作为其测量基准即可。而电子秤属于计量仪器,一般需要选用更高精度等级的基准电压源电压作为其量化基准。另外,在其测量精度标定和校准过程中,所选用的砝码精度等级要求也不相同。

测试仪器:这是一类以完成产品质量控制和质量检测目的为主的测量仪器,其测量基准常使用实用基准。类似于测量仪器的要求,测试仪器的量化基准越简单实用越好。相对于直接或间接测量方法,测试仪器多采用表征测量方法。例如,隐藏在金属零件内部的裂纹或缺陷,既无法直接测量,也不便于观察,但可以设法让声波穿越该零件,并从其反射或透射的声波信号中分析出该裂纹或缺陷的大小和位置,这正是超声波探伤测试仪的基本工作原理。测试其实就是一种需要人为制造试验条件的测量。由于许多测试仪器都需要通过其动态测试信号分析来给出其最终测量结果,因此,测试仪器对测量信号的动态响应特性要求,往往要比计量仪器或普通测量仪器都高,几乎接近工控仪器的要求。

测控仪器:这是一类以工业监测和工业控制为目标的测量仪器,也常被称为工控仪器,这类仪器对其测量信号的动态响应特性要求较高。相对于测试仪器,工控仪器为了获得足

够的动态测量特性,可适当牺牲一定的测量精度。工控仪器系统中最常用的量化基准是基准源电压基准和晶振周期时间基准。工控仪器的主要特点和设计 requirements 是,响应速度越快越好,可扩展性越强越好,可靠性越高越好,集成度越高越好,体积越小越好,安装和拆卸越简便越好。而前面介绍的测试仪器、测量仪器和计量仪器,对这些设计要求则可以相对低一些。

测控仪器和自动控制系统一般都同时具备测量和控制功能,其主要区别在于,测控仪器一般是为“测”而“控”,以实现其最佳测试条件或测量状态;而自动控制系统则往往是为“控”而“测”,以实现其预期的工业过程和状态控制。无论测控仪器,还是自动控制系统,最终都离不开“测量”,即本书所介绍的仪器技术。

飞机如果离开仪器就飞不起来,动车如果离开仪器就跑不起来,导弹如果离开仪器就是炮弹,而卫星如果离开仪器就是一个在太空中自由飞行的铁疙瘩。在机器人、数控机床、自动纺织机械等现代工业和工程技术中,仪器和机器已经高度融合,那么仪器和机器的本质区别到底是什么呢?

仪器和机器的本质区别在于,在仪器系统中传递和输出的主要物理量是“信息”(information),而在机器系统中传递和输出的主要物理量是“功率”(power)。图 1-1-4 所示的 γ 射线管道爬行探伤仪看起来很像机器,但它其实是用于管道检修和探伤的仪器,因为其主要功能是测量管道内部可能的伤痕和缺陷,它以传递和输出测量信息为主,而其爬行功能仅仅是为获取这些测量信息而提供的服务。图 1-1-5 所示的某飞机驾驶舱,看起来全都是仪器,其实该设备是机器,因为飞机传递和输出的主要物理量是其完成高速运输所需的功率,而其驾驶舱内大量使用的仪器仅仅是为飞机正确飞行控制而提供的服务。

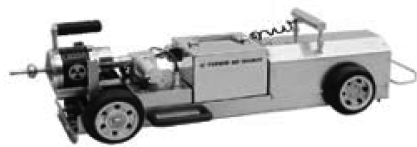


图 1-1-4 γ 射线管道爬行探伤仪



图 1-1-5 某飞机驾驶舱

有时仪器和机器的确难以区分。如图 1-1-6 所示的医用 CT 设备,其主要功能是输出医用 CT 成像所需的原始测量数据,因此应该是一种仪器,常被叫作 CT 仪。但为了获取这些数据,它又不得不输出足以穿透人体各种组织结构、具有一定功率的 X 射线,同时还需要输出足够的机械功率以确保人体躺台的匀速直线运动,以及 X 射线发射装置和 X 射线接收装置的同步高速旋转。这种设备既需要输出大量的信息,又需要输出足够大的功率,而且两者的重要程度可以说不相上下。因此,该设备有时也被叫作 CT 机。图 1-1-7 给出了一种在 CT 仪的基础上增加了 X 射线功率聚焦功能的癌症治疗设备,尽管该设备与 CT 仪的功能和结构十分类似,但其以 X 射线功率定点聚焦杀死癌细胞为目的,因此是一种用于癌症探测和治疗的机器。



图 1-1-6 医用 CT 成像测量设备

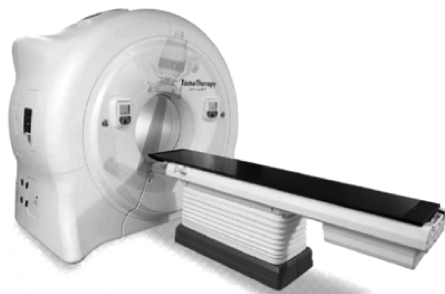


图 1-1-7 癌症探测和治疗设备

思考题

- 1-1-1 什么是测量？什么是仪器？
- 1-1-2 假设某直角零件的直角测量结果为 $90^{\circ}00'02''$ ，试求其测量误差。
- 1-1-3 试简述真值、测量误差与测量精度的具体物理含义。
- 1-1-4 根据你的理解，试阐述仪器精度、精确度、精密性、系统误差、随机误差等概念的具体含义及其内在关系。
- 1-1-5 试简述仪器的基本功能及其特征结构。
- 1-1-6 试举例说明仪器的测量量化基准和精度标定基准有何不同。
- 1-1-7 试分析图 1-1-1 所示两种质量测量仪中测量量化基准的国际计量基准传递过程。
- 1-1-8 试给出电阻计量单位欧姆(Ω)的最终量纲溯源公式及其溯源过程。
- 1-1-9 试给出压强计量单位帕斯卡(Pa)的最终量纲溯源公式及其溯源过程。
- 1-1-10 试分别解释计量、测量、测试与测控的具体含义。
- 1-1-11 如何从使用需求和测量目的对仪器进行分类？各类仪器的主要特点是什么？
- 1-1-12 试简述接触测量与非接触测量两种测量方法的主要区别。
- 1-1-13 试简述直接测量、间接测量与表征测量三种测量方法的主要区别。
- 1-1-14 试举例说明仪器与机器的主要区别。
- 1-1-15 假设在现有的 6 枚金币中有且只有一枚假币，该假币除了其质量略有微小的差别以外，其他特征与金币完全相同。现在需要仅使用无砝码的天平作为工具来找出该假币。如果最多只允许测量 3 次，试给出其具体测量方案，并指出每次测量过程中的“被测量”“基准量”及其量化“比较器”。

1.2 仪器仪表技术

以实现测量功能为主的所有工具和设备都可称为仪器。因此，仪器的范畴很广，包括前面介绍的计量、测量、测试和测控等各种常规测量仪器，以及不在本书介绍范围之内的各种科学分析仪器。