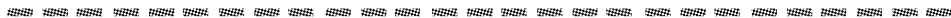
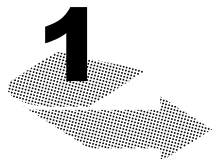




第一部分

测试技术的理论基础





绪 论

1.1 测试技术的发展与研究的内容

知识的获取往往从测量开始。人类在其自身的社会发展中创造并发展了测量科学。英国物理学家开尔文勋爵(William Thomson, 温度单位 K 即以他的名字来命名)说过:“凡存在之物,必以一定的量存在。”他又说:“我经常说,当你能测量你在谈及的事物并将它用数字表达时,你对它便是有所了解的;而当你不能测量它,不能将它用数字表达时,你的知识是贫瘠的且不能令人满意的。”开尔文勋爵的这两段话指出了测量的广博性,也指出了测量的内涵及其科学性。人类早期的测量活动涉及对长度(距离)、时间、面积和重量等量的测量。随着社会的进步和科学的发展,测量活动的范围不断扩大,测量的工具和手段不断精细和复杂化,从而也不断地丰富和完善了测量的理论。早在公元前 3000 年,古埃及人出于对工程和生产的需要便已建立了长度的统一标准——埃尔,他们将当时统治埃及的法老的自肘关节到中指指尖的长度加上他手中一根棕榈枝长的总长度定义为“1 埃尔”,并将该长度标准用黑色花岗岩来实现而作为原始标准。埃及人在建造众多的祠庙和金字塔的浩大工程中正是使用了这一长度标准。秦始皇在统一六国后便立即建立了统一的度量衡制度,并对破坏这一制度的人科以严厉的刑罚。这些都说明了测量对促进当时生产发展和社会进步的重要性。今天,测量已渗透到人类活动的每个领域。从日常生活的三表(水、电、煤气表)、每日的天气预报、医院中的病人监护设施、汽车中的各种指示仪表,直至宇宙飞船的姿态控制装置、飞机的导航仪表,测量无处不在。科学技术的迅猛发展给测量学这一古老的学科注入了新的活力,现代电子技术,尤其是信息技术的发展更推动了测量学科的迅猛发展。因此测量学是一门多学科交叉的边缘学科。毫不夸张地说,任何一门学科都可以在测量学科中找到它的踪迹。反过来说,测量学科的发展也进一步促进了其他学科的发展。

世界已进入信息时代,信息技术正成为推动国民经济和科技发展的关键技术。信息

技术包括计算机、通信和仪器测量技术,而仪器测量技术是对客观世界的信息进行感知的基本技术,因此它是信息技术的基础,具有任何技术不可替代的作用,在当今社会的发展中起着举足轻重的作用。

测量提供了有关物理变量和过程的现实状态的定量信息,如果没有测量,对这种现实状态便只能进行估计。测量是重新认识客观世界的工具,也是对任何理论或设计的最终检验。测量是一切研究、设计和开发的基础,它的作用在工程中十分显著。

所有的工程设计均涉及到 3 个要素:经验要素、理性要素和实验要素。经验要素基于之前对类似系统的经历,也是基于工程人员的一种共同感觉;理性要素依据定量的工程原理和物理定律;而实验要素则以测量为基础,亦即它基于对被开发的装置或过程操作和性能方面的不同量的测量,测量则在被期望的和实际所得到的结果之间提供一种比较。

测量也是控制过程的一个基本元素。当实施一个控制过程时,则要求在实际的和所希望的性能间具有测量到的差别。控制装置必须知道该差别的大小和方向,以此来做出明智的反应。

许多日常的操作要求通过测量来获取正确的性能。如一个现代化的中央发电厂,要求对温度、流量、压力以及振动幅度等量用测量来加以恒定监测,以保证系统的正常工作。再如,测量对于商业也是不可缺少的。商业上各项费用的确定是建立在对材料、动力、时耗和工耗以及其他约束条件的定量分析基础上的。

因此,凡是要定量描述事物特征和性质的地方,都离不开测量。我们处在一个广大的物质世界中,面对众多的测量对象和任务,被测的量千差万别、种类各异。但根据被测量随时间变化的特性,可将它们总体地分成静态量和动态量。静态量指静止的或缓慢变化的物理量,对这类物理量的测量称为静态测量;动态量指随时间快速变化的物理量,对它们的测量相应地称为动态测量。本书主要研究对动态量的测量,亦即动态测量的理论、方法及应用。动态测试的例子在我们周围比比皆是:为了保证加工零件的质量,要对机床主轴的振动特性进行监测和分析;飞机在飞行时依靠众多的仪表来测量和指示航向、速度、加速度、里程等一系列数据,从而确保飞机位于正确的航程中;轧钢过程中需要对轧制的带钢厚度及宽度尺寸进行连续自动检测;旋转机械因轴承摩擦发热而造成部件的热变形的检测……。静态与动态测量是相对的,采用哪一种方法取决于被测对象的性质和对测量过程的要求。每一种方法相应地都有它自己的理论、手段和仪器,应根据被测量本身的特征及测量任务的条件和要求(精度、稳定性等)来加以选择。

一个测量或测试系统总体上可用如图 1.1 所示的原理方框图来加以描述。

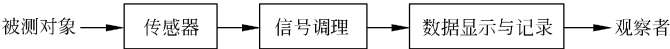


图 1.1 测试系统原理框图

传感器是测试系统中的第一级,用于从被测对象获取有用的信息,并将其转换为适合于测量的变量或信号。如采用弹簧秤测量物体受力,其中的弹簧便是一个传感器或称敏感元件,它将物体所受的力转换成弹簧的变形——位移量。又如在测量物体的温度变化时,可以采用水银温度计作传感器,将热量或温度的变化转换为汞柱亦即位移的变化;同样可采用热敏电阻来测温,此时温度的变化便被转换为电参数——电阻率的变化。再如在测量物体振动时,可以采用磁电式传感器,将物体振动的位移或振动速度通过电磁感应原理转换成电压变化量。由此可见,对于不同的被测物理量要采用不同的传感器,这些传感器的作用原理所依据的物理效应也是千差万别的。对于一个测量任务来说,第一步是能够(有效地)从被测对象取得能用于测量的信息,因此传感器在整个测量系统中的作用十分重要。

信号调理级是对从传感器所输出的信号作进一步的加工和处理,包括对信号的转换、放大、滤波、存储、重放和一些专门的信号处理。这是因为从传感器出来的信号往往除有用信号外还夹杂有各种有害的干扰和噪声,因此在作进一步处理之前必须要将干扰和噪声滤除掉。另外,传感器的输出信号往往具有光、机、电等多种形式,而对信号的后续处理往往都采取电的方式和手段,因而常常必须将传感器的输出信号进一步转换为适宜于电路处理的电信号,其中也包括信号的放大。通过信号调理部分的处理,最终希望获得能便于传输、显示和记录以及可作进一步后续处理的信号。

显示和记录级是将经信号调理部分处理过的信号用便于人们所观察和分析的介质和手段进行记录或显示。

图 1.1 所示的 3 个级中的功能都是通过传感器和不同的测量仪器和装置来实现的,它们构成了测试系统的核心部分。但需要注意的是,被测对象和观察者也是测试系统的组成部分,它们同传感器、信号调理级以及数据显示与记录级一起,构成了一个完整的测试系统。这是因为在用传感器从被测对象获取信号时,被测对象通过不同的连接或耦合方式也对传感器产生了影响和作用;同样,观察者通过自身的行为和方式也直接或间接地影响着系统的传递特性。因此在评估一个测试系统的性能时必须也考虑这两个因素的影响。

测试系统是用来测量被测信号的,被测信号在经系统的加工和处理之后以不同的形式在系统的输出端输出。系统的输出信号应该真实地反映原始被测信号,这样的测试过程被称为“精确测试”或“不失真测试”。如何实现一个“精确的”或“不失真”的测试?系统各级应具备什么样的条件才能实现精确的测试?这是测试技术中所要研究的一个主要问题。本书在下面的叙述中将始终围绕精确测试这一主题在各章节展开讨论。

“测试技术”是高等院校机械工程类各专业的一门专业基础课。通过对本课程的学习,要求学生掌握有关测试技术的基本理论和技术,掌握使用测试仪器对不同参数进行测量和分析的方法和手段,从而为进一步研究和处理工程测试技术问题打下基础。

本书内容按照如下主线展开：信号理论—测试系统特性—信号传感—信号调理—信号输出。在阐述基本测试理论、测试手段和测试技术的基础上，介绍测试技术发展的新方向和学科前沿知识，如新的测试方法、新型传感器和记录仪器、虚拟测试技术和微纳米测量技术等。本书在讲述基础理论的同时，辅以大量实际应用的例子，目的是使学生掌握对工程测试技术的理论和实际的分析和应用方法。本书中讲述的重点主要有以下几点：

(1) 信号与信号处理的理论和方法。包括信号的时域和频域的描述方法，信号的频谱和谱分析的方法，信号的卷积与相关，数字信号处理的基本理论和方法。

(2) 测试系统的参数及其评价方法。包括测试系统传递特性的时、频域描述，脉冲响应函数和频率响应函数，一、二阶系统的动态特性描述及其参数的测量方法，不失真测试的条件。

(3) 传感器理论。包括各类常用传感器的原理、结构及性能参数以及传感器的典型应用。

(4) 信号调理的原理和方法。包括电桥电路，信号的调制与解调，信号的滤波，信号的模/数和数/模转换，上述各种电路的原理及典型应用。

(5) 常用显示与记录仪器的工作原理及结构，它们的动态性能及应用。

(6) 典型物理量的测试方法与工程应用。

测试技术是一门实践性很强的课程，本课程在理论学习的同时，强调学生实验能力的培养。为此在每章的学习过程中均安排有实验，使学生通过做实验来进一步加深对所学章节内容的消化和理解，同时培养学生运用测试技术解决工程问题的能力。本课程所有的实验均编写在《测试与检测技术实验指示书》中，本书对此不作介绍。

1.2 测量的本质和基本前提

广义地讲，测量过程一方面是采集和表达被测物理量，另一方面是与标准作比较。因此测量数值总是与一定的标准紧密相连的。

将度量数字 x 作为比较量 N (标准) 的倍数赋予被测量 X ，则有

$$X = xN \quad (1.1)$$

从量纲上考虑对应上式有下述公式成立：

$$[d] = [-] \cdot [d] \quad (1.2)$$

式中， $[d]$ 表示量纲； $[-]$ 表示无量纲。

式(1.1)和式(1.2)即为测量定义的数学表达。应注意的是，上述操作亦即测量只有在满足以下两个基本前提条件下才能实施：

- (1) 被测的量必须有明确的定义；
- (2) 测量标准必须通过协议事先确定。

这两个条件并不是自然地就能被满足的,亦即并非所有的量都有明确的定义。像长度、时间和重量等量是可以也已经被人们明确定义了的,而另外的一些量,诸如空调技术中的“环境舒适度”或人的“智力”等,至今也不可能有一致公认的定义,因而在上述意义上是不可测的。

彼此相互独立的标准称之为绝对标准或基本标准,在国际计量大会(Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM)上定义了7个基本标准:长度、质量、时间、温度、电流、光强和原子物理中的物质的量。

1.3 标准及其单位

所有的国家在商业及其他涉及公众利益的范围内都制定有法定计量学的规定条例,这些条例涉及法定计量学的三大范畴:

- (1) 确定单位和单位制;
- (2) 确定国家施加影响的范围(测量仪表的校准义务,官方的监督职能和校准能力);
- (3) 实施校准和官方监督。

这一体制一方面用于保证正当竞争,另一方面应保护公民免遭不公平的对待或由不正确计量结果所带来的损害。而最重要的是要保护消费者的利益,使之能得到计量准确的商品,并通过对计量仪器提出的最低要求来促进有效的竞争。通常在上述规定范围内所使用的仪器必须经过校验,这种校验多数情况下要事先经过上级计量局的准许,它大多数由国家级机构进行的多级检验所组成,最后盖章完成。

目前各国对给予许可和进行校验所依据的条文的规定还不完全相同,因为它涉及到仪表结构和误差的范围。一些国际团体,如作为米制公约组织的国际计量大会、法定计量学国际组织以及欧共体等等正努力来统一各国的法定条例。

1.3.1 国际单位制及其基本单位

国际计量大会在1960年将大会以前所确定的7个基本单位所组成的系统命名为“国际单位制”,国际上统一缩写为SI(Système International d'Unités)。这7个基本单位分别赋予7个基本量,经协议规定被认为是彼此独立的(表1.1)。SI基本单位的定义如下:

- (1) 1米定义为真空中的光在 $\frac{1}{299\,792\,458}$ s(秒)时间内所经过的距离(1983年)。该

标准的复制精度可达 $\pm 10^{-9}$ 。

- (2) 1千克定义为国际千克原型器的质量(1889年),该国际千克原型器是保存在法

国巴黎塞夫勒博物馆中的一根铂铱合金圆柱体。其复制精度可达 10^{-9} 数量级。

(3) 1 秒定义为铯 133 原子基态的两个超精细能级间的跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间(1967 年)。

表 1.1 国际单位制的基本量和基本单位

量的名称	量 纲	SI 单 位	
		单位名称	单位符号
长度	L	米	m
质量	M	千克	kg
时间	T	秒	s
电流	I	安[培]	A
热力学温度	Θ	开[尔文]	K
物质的量	N	摩[尔]	mol
发光强度	J	坎[德拉]	cd

(4) 1 安培定义为流经在真空中两根平行且相距 1m(米)的无限长直导线(其圆横截面可忽略不计)并能在其每米长导线之间产生 0.2×10^{-6} N(牛)的电动力的不随时间变化的电流量(1948 年)。

(5) 1 开尔文定义为水的三相点的热力学温度的 1/273.16(1967 年)。

(6) 1 摩尔定义为一个由确定成分组成的系统,如果它含有粒子的个数等于碳 12 原子核的 $\frac{12}{1\,000}$ kg(千克)质量中所含原子的个数,则该系统的物质的量为 1 摩尔(1971 年),此处所述的粒子可以是原子、分子、离子或电子及其特定组合。

(7) 1 坎德拉定义为一个在一定方向上发送频率为 540×10^{12} Hz(赫兹)的单色光辐射的辐射源,在该方向上的辐射强度为 $\frac{1}{683}$ W/sr(瓦/立体角)时的光强(1979 年)。

1.3.2 国际单位制的导出单位

导出单位从基本单位出发,用乘、除符号以代数式来表达。不同的导出单位有各自专门的名称和专门的单位符号,这些单位名称和单位符号可单独使用,也可和基本单位一起合成进一步的导出单位。

热力学温度(T)除用开尔文表示外,也可用摄氏温度(t)表示,定义如下:

$$t = T - T_0$$

式中规定 $T_0 = 273.15$ K。摄氏度的单位等于开尔文的单位。

球面度(sr)在本书中作为基本单位来处理。

国际单位制的导出单位分别示于表 1.2、表 1.3 和表 1.4。

表 1.2 用基本单位表示的 SI 导出单位

量的名称	SI 导出单位	
	名 称	符 号
面积	平方米	m^2
体积	立方米	m^3
速度	米每秒	m/s
加速度	米每二次方秒	m/s^2
波数	每米	m^{-1}
密度	千克每立方米	kg/m^3
电流密度	安培每平方米	A/m^2
磁场强度	安培每米	A/m
物质的量浓度	摩尔每立方米	mol/m^3
[光]亮度	坎德拉每平方米	cd/m^2

表 1.3 具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	SI 导出单位		
	名 称	符 号	用 SI 基本单位表示
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力	牛[顿]	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
压强	帕[斯卡]	Pa	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
能[量],功,热量	焦[耳]	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
功率,辐射通量	瓦[特]	W	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
电荷[量]	库[仑]	C	$\text{s} \cdot \text{A}$
电压,[电势]	伏[特]	V	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
电容	法[拉]	F	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
电阻	欧[姆]	Ω	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
电导	西[门子]	S	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
磁通密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
电感	亨[利]	H	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
摄氏度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	K
光通量	流[明]	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
[光]照度	勒[克斯]	lx	$\text{m}^{-2} \cdot \text{cd} \cdot \text{sr}$
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	s^{-1}
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

表 1.4 专用名称单位表示的导出单位

量的名称	SI 导出单位		
	名 称	符 号	用 SI 基本单位表示
[动力]黏度	帕秒	Pa · s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
力矩	牛[顿]米	N · m	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
表面张力	牛[顿]每米	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
熵	焦[耳]每开[尔文]	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
比内能	焦[耳]每千克	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
热导率	瓦[特]每米开[尔文]	W/(m · K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
能量密度	焦[耳]每立方米	J/m ³	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
电场强度	伏[特]每米	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
电荷[体]密度	库[仑]每立方米	C/m ³	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
电通[量]密度, 电位移	库[仑]每平方米	C/m ²	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
介电常数	法[拉]每米	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
磁导率	亨[利]每米	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
摩尔内能	焦[耳]每摩[尔]	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
摩尔熵, 摩尔热容	焦[耳]每摩[尔]开[尔文]	J/(mol · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

1.3.3 单位的十进制倍数和小数

表 1.5 列出的国际单位制词头可用来表示国际单位制中单位的十进制倍数或小数。

表 1.5 国际单位制的词头

因 数	词头名称		符 号	因 数	词头名称		符 号
	英文	中文			英文	中文	
10 ¹⁸	exa	艾[可萨]	E	10 ⁻¹	deci	分	d
10 ¹⁵	peta	拍[它]	P	10 ⁻²	centi	厘	c
10 ¹²	tera	太[拉]	T	10 ⁻³	milli	毫	m
10 ⁹	giga	吉[咖]	G	10 ⁻⁶	micro	微	μ
10 ⁶	mega	兆	M	10 ⁻⁹	mano	纳[诺]	n
10 ³	kilo	千	k	10 ⁻¹²	pico	皮[可]	p
10 ²	hecto	百	h	10 ⁻¹⁵	femto	飞[母托]	f
10 ¹	deca	十	da	10 ⁻¹⁸	atto	阿[托]	a

词头紧接着写在单位名称前,词头符号也紧接着写在单位符号前,中间不留空位,如:

千米(单位符号: km);

毫米(单位符号: mm);

微米(单位符号: μm)。

不允许使用两个以上的词头符号,如百万分之一秒(10^{-6}s)不能写成 $\text{m}\mu\text{s}$,只能写成 ns 。

有关计量单位的其他立法规定,请参阅有关的文献资料[32,33,34],这里不再详述。

习 题

1-1 什么是测量? 试用数学关系式表达一个测量过程。

1-2 实施测量的基本前提条件是什么?

1-3 什么是国际单位制? 其基本量及其单位是什么?

1-4 试述一个测试系统的基本组成及其各环节的功能。

1-5 考虑一根玻璃水银温度计作为一个测温系统,详细讨论组成该系统的各级。

1-6 自己选择一本有关测试的参考书,写一篇关于其中一章测量某物理量的过程与方法的总结。