绪　论

进入 21 世纪后，人类社会已从工业化社会步入信息化社会。对于每一种信息都有一个检测、转换、存储和加工的过程，检测与转换已经成为获取信息的重要组成部分。换句话说，信息社会的一切活动，无论是日常生活还是社会生产活动和科学实验，时时处处都离不开检测技术。

一、检测技术与传感器

检测是利用各种物理效应和被测量的物理性质，选择合适的方法与手段，将人类的生产、科研、生活等等活动中的有关信息，通过检验与测量的方法赋予定性或定量结果的过程。能够自动地完成这一处理过程的技术称为自动检测与转换技术。

检测技术是现代化生产领域中最有发展前景的技术之一，它在人类生产活动中起着极其重要的作用。

在现代生产过程中为了保证产品质量，提高生产效率，降低生产成本和能源消耗，一方面要对涉及生产的各种因素进行开发与研究以获得更为先进的工艺方案；另一方面为了使生产过程安全有序的进行，就必须对生产过程进行检验、测量、监督和控制。这一系列信息的获取过程都离不开检测技术。例如，在化工、电力、温室型农业等行业中，要随时对工艺流程和生产过程中的流量、温度、压力、液位、界面等物理量或参数进行自动检测。假如没有这些检测，生产过程将无法进行甚至发生危险。又如，在机械制造行业中，运用传感器对机床工件的加工精度、切削速度、刀具位移、床身振动等许多静态、动态参数进行检测，从而控制加工质量。再如汽车行业，一辆现代化的汽车装配有十几种各式各样的传感器，分别用来检测车速、转矩、方位、油压、油量、振动、温度、防盗报警等，没有运用这些检测技术进行检测的汽车档次将大大降低。

在国防工业里，飞机制造、导弹卫星的研制、新型战车的设计更是离不开检测技术。近年来随着人们生活水平的提高，智能型家用电器逐渐进入了人们的家庭。全自动洗衣机、电冰箱、空调、全自动豆浆机等家用电器都应用着各种各样的传感器做检测与控制。综上所述，现代人们的生产、生活已离不开检测技术。而传感器则是检测技术的核心部件。

什么是传感器？传感器是一个完整的测量装置（传感器可以自成一个系统），它能把被测物理量转换为与之有确定的一一对应关系的电量然后输出，用以满足信息的传输、处理、记录、显示、反馈和控制等需求。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。由传感器将被测物理量的参数感知出来，这个信息或信号经过转换与处理可以显示出来或提供给控制系统。可以说，没有精确可靠的传感器就不可能有自动检测和控制系统。

现代科学技术发展的目的，一是用机器代替人的劳动，二是用机器做人不能做的事，这就产生了现代的“智能机器人”。将“智能机器人”的活动过程与人的活动相类比，来看一看传感器的作用和它的重要性。图 1 所示是人与“智能机器人”的对应关系。

人通过五官：视觉、触觉、听觉、嗅觉和味觉感知外界信号（信息），然后把这些信号

需要全本请访问 www.ertongbook.com

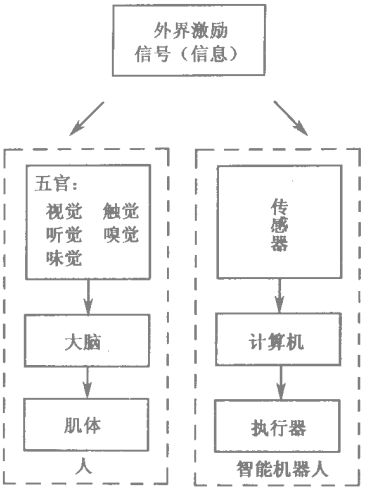


图 1 人与智能机器人的对应关系

传递给大脑，大脑将这些信号进行分析、归纳、提炼处理，然后下达执行命令。并将执行命令传达给肌体，肌体根据大脑的决定做出反应。“智能机器人”的活动过程与人十分相似，它由各种各样的传感器感知外界信号（信息），然后把这些信号传送给计算机。计算机将这些信号进行分析、归纳、提炼、处理，然后给出执行信号并将该信号传送给执行器。由执行器对外界的激励信号做出反应。从图 1 中的类比可以看出，计算机相当于人的大脑，执行器相当于人的肌体，传感器则相当于人体的五官即人的感觉系统。人若失去了整个感觉系统，将无法存世。一个自动控制系统如果没有传感器，这个系统的性能将大为降低。由此可见传感器对现代工业控制是不可缺少的基本部件之一。目前世界各国对传感器在信息社会中的作用都有了新的认识和评价，并十分重视新一代传感器的研制与发展。例如，美国早在 20 世纪 80 年代就将传感器技术列入高技术领域，认为 80 年代已是传感器时代。日本也在 20 世纪 80 年代将传感器技术列为十大科技之首。我国已将传感器技术列为国家重点科技攻关项目之一。

二、工业检测技术所涉及的内容

工业检测技术所涉及的内容比较广泛,它包涵了信息检取与测量、信号变换与处理、自动检测装置的结构与构成、误差的运算与分析、干扰的防范与抑制等内容，其重点则是怎样把信息检拾出来。换句话说，就是运用物理的、化学的或其他的原理性质和效应，通过传感器将某些载有工业信息的被测物理量转换成便于传输处理和测量的电量。因此在有些书中也将工业检测技术称为“非电量的电测法”。

在工业领域中，常见的被检测物理量有以下几种。

1. 热工量

温度、热量、比热、热流、热分布、压力、压差、压强、真空度、流量、流速、容量、物位、液位、界面等。

2. 机械量

直线位移、角位移、速度、加速度、转速、力、应力、应变、力矩、振动、噪声、质量（重

量）等。

3. 几何量

长度、厚度、角度、直径、间距、形状、斜率、平行度、同轴度、粗糙度、硬度、材料缺陷等。

4. 物体的性质与成分量

气体、液体、固体的化学成分、浓度、粘度、湿度、密度、比重、酸碱度、盐度、浊度、透明度、颜色等。

5 状态量

工作机械的运行状态——启动、停止。

生产设备的异常状态——超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等。

非常明显，在实际工业生产中被检测的物理量远不止以上所举。例如，物体中的水分含量、食物的新鲜程度等，我们还可以列举出很多很多。随着工业生产的发展，将对检测技术提出越来越高的新要求。本书仅向读者介绍检测技术的基本原理与方法。

三、自动检测系统的组成

一个自动检测系统总是由传感器、信号处理与数据处理装置以及记录显示执行装置三大部分组成，如图 2 所示。

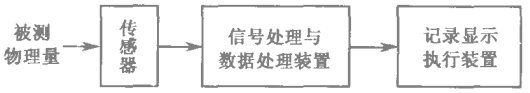


图 2 组成自动检测系统的三大部分

传感器是一种能够把某种信息从被测物理量中检拾出来，并且将它转换成电信号的测量装置，它是获得信息与信号的手段。它的灵敏度、精确度、稳定性直接影响着整个测量系统的性能.

信号处理与数据处理装置，能够将传感器输出的电量变换成具有一定功率的电压、电流或频率信号，然后对这些信号进行处理、运算、分析。这些分析包括：对数据进行数理统计分析和曲线拟合，特别是对动态测试结果做频谱分析、幅值谱分析和能量谱分析等。信号与数据处理的结果通常被送到显示器或执行机构中去。完成上述工作一般采用计算机技术，也就是说：现代电子计算机已经成为自动检测技术的核心部件。

记录显示与执行装置实质上具有两部分功能，即记录显示功能和执行功能。记录显示装置的作用是将处理后的信号不失真地记录下来并且显示出来。记录和显示可以在同一个装置中实现，例如光线示波器；也可以用不同的装置分别实现记录与显示，例如磁记录器，它仅能记录而不能显示，又如普通电子示波器只能显示而不能记录。常用的记录显示装置有四类：模拟显示装置、数字显示装置、图像显示装置及记录仪等。模拟显示装置最常见的是利用指针与标尺的相对位置来表示读数的大小，如磁电系测量机构、电磁系测量机构和电动系测量机构等。数字显示装置大多采用发光二极管显示屏或液晶显示屏等以数字的形式来显示读数。图像显示是

采用阴极射线管（包括示波管和显像管）或液晶屏来显示图像或被测参数变化曲线，有时还可以显示图表或工艺流程。记录仪主要用来记录被测物理的动态变化过程，常见的记录仪有：磁记录仪、笔式记录仪、带有半导体存储器的记录仪等。

执行装置也称执行机构，它的作用是根据数据处理装置传来的指令，控制、调节、保护、通断各种设备，使各种设备安全正常运行。执行机构通常由各种各样的继电器、接触器、电磁阀、伺服电机、步进电机、可逆电机等组合而成。

随着现代科学技术的发展，计算机技术的运用越来越普及深入，检测系统已经广泛地使用微机来控制执行机构，这样使得自动检测系统的精确度和检测速度都有了大幅度的提高。另外，一些检测系统使用了单片机技术，实现了智能化检测。智能化检测是今后自动检测系统发展的方向。

第 1 章　检测技术的基本概念

通过检测来获取物体或事物的信息，在这一过程中必然要用到测量。可以说测量是人类认识事物的本质不可缺少的手段。在科学技术里有很多新的发现和技术的突破都是以测量实验为基础的，许多新的工艺过程、新机器、新仪器的研制都离不开测量各种数据与参数。因此，没有测量就没有科学，离开了测量人类生产活动将无法进行。目前测量技术已经广泛地应用在工农业生产的各个领域、科学研究的各个部门以及人们的日常生活之中。本章将讨论测量的基本概念和测量方法分类、误差的基本概念和分类、误差的计算与处理以及传感器的组成与分类。

1.1　测量的概念和方法分类

1.1.1　测量的基本概念

测量就是借助于专用的技术工具通过实验或计算对被测对象收集信息的过程。在实际操作过程中，测量是把被测量与同种性质的基准单位进行比较，从而获得被测量为基准单位的多少倍数这一信息，这就是测量的定义。上述定义可以用数学公式来表示

$$x = Ax_0 \tag{1-1}$$

式中，x 为被测量，

x_0 为基准单位；

A 为被测量所包含的基准单位。

显然，基准单位确定之后，被测量 x 在数值上将等于比值 A。这表明，测量过程包括两个含义，其一是确定基准单位；其二是将被测量与基准单位作比较。整个测量过程中所使用的专门工具就是检测仪表。

在实际测量中，有时有些被测对象无法直接借助于通常的测量仪表与基准单位进行比较。这时必须做适当的变换，将被测量转换成有确定函数关系的另一个可比较的物理量，然后对该物理量进行比较测得结果，最后根据函数关系来确定被测量的大小。这就是信息检出变换的过程。

在实际测量中的另一些场合，除了要对被测量进行检出变换外，还要对这些信息进行分析、处理、运算、判断、控制、显示等等。这是一个有机统一的综合过程。一般将只有检出、变换环节的测量称为狭义测量，而将具有检出、变换、分析、运算、控制、执行等多个环节的测量称为广义测量。在广义测量系统中，有以检出信号为目的的检出部分，有以转换信号提高测量效率为主的变换部分、以及分析部分、运算部分、反馈部分、控制部分、执行部分、显示部分等多个环节。

1.1.2　测量方法分类

测量方法多种多样，分类方法也各不相同。在测量中可以根据被测量是否随时间变化，分

需要全本请访问 www.ertongbook.com

为静态测量与动态测量；可以根据测量时敏感元件是否与被测量接触，分为接触式测量与非接触式测量；还可以根据产品的生产过程，分为在线测量与非在线测量等等。这里所讨论的是最常见的分类方法，即直接测量和间接测量。

1. 直接测量

利用预先标定好的仪表对被测量进行测量的过程，称为直接测量。直接测量时可以从仪表的显示结果获得测量参数的具体数值。值得注意的是，不要把直接测量和直读式仪表测量这两个概念混淆起来。直接测量包含了直读式仪表测量。例如，用电压表测电压、用万用表测电阻，这些测量都是直读式仪表测量。又如用电位差计测电压，是比较式仪表测量。而两者均是直接测量。直接测量又有三种测量方法。

（1）偏差法。当测量仪表用指针相对于刻度的位移（偏差）来直接表示被测量大小时，这种方法就是偏差式测量法，简称偏差法。测量仪表的刻度线是预先用标准仪器标定校准好的，偏差的大小直接反映了被测量所包含的多少基准单位数。

指针式仪表是最为常用的一种偏差测量法。被测量直接驱动仪表指针偏转，通过指针与标定的刻度线重合位置确定被测量大小。由于刻度线的精确度不可能做得很高，所以这种测量方法的测量精度一般不高于 0.5%，特殊考虑时精度可达 0.1%。偏差法的优点是：直观，简便，相应的仪表结构比较简单。缺点是：精度较低，量程较窄。

（2）零位法。在测量过程中，将被测量与标准量进行比较，二者差值为零时，标准量的读数就是被测量的大小，这种测量方法称作为零位法。在零位法测量过程中，要求标准量是连续可调、可变化的，并且具有精细的分度，同时要有一个灵敏度很高的指零机构。零位法中，测量结果的误差主要取决于标准量的误差大小，因此零位法的测量精度一般比偏差法要高。

零位法在工程测量中应用得比较广泛。测量时常用的电位差计就是一种典型的零位法测量仪表。图 1.1 是电位差计原理示意图，图中，E 是高稳定度的稳压电源；RP 是可调电阻，用它可以调节稳压电源回路的工作电流 I_S，使其达到标准值。电位器 R 上产生标准电势 E_S，电位器滑动端 A 点和电路 B 点之间将产生标准电压降 U_S，被测电压 U_X 接入 D、C 两点，由图可见被测电压通过检流计 G（检零机构）并联在 A、B 两端，调节 R 的滑动端使检流计 G 指零。检流计 G 指零表明 A、D 支路中没有电流流过，换句话说 A、D 等电位，则 $U_X = U_S$。从图中又可知：

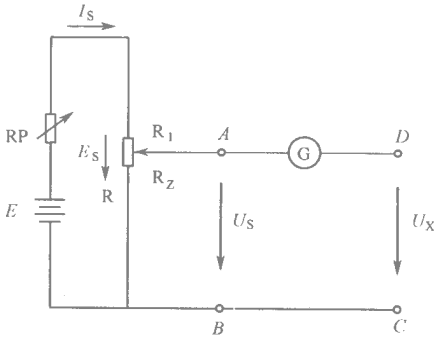


图 1.1　电位差计原理示意图

$$U_S = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_S \tag{1-2}$$

所以

$$U_X = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_S \tag{1-3}$$

这样被测量就可由标准量来表示。上述方法就是零位法的测量原理。零位法虽然具有很高的测量精度，但是由于测量时要进行调节、平衡，所以测量时间较长，不能测量快速变化的信号，所以使用的场合受到了一定的限制。

（3）微差法。微差法是零位法和偏差法同时应用的一种组合测量方法。测量过程中将被测量的大部分用标准信号去抵消，而剩余的部分采用偏差法来测量。微差法的典型例子就是用

不平衡电桥来测量电阻。桥路中被测电阻的基本部分（静态电阻）使电桥处于平衡状态，而变化了的电阻将使电桥失去平衡而产生相应的输出电压。这样，电桥输出电压的变化，只反映电阻的变化部分。被测电阻将是基本部分和由输出电压确定的电阻变化部分两者的和。又如将图 1.1 中的检流计 G 换成毫伏表，用它来测量 U_X 和 U_S 的差值，这就是一个用微差法测电压的例子，图中被测电压 U_X 的大部分被 U_S 抵消，很少的一部分被毫伏表读出。被测电压等于标准电压 U_S 与毫伏表读数之和。

采用微差法进行测量，可以使测量精度大为提高。这是因为被测量的主要部分采用了零位法测量，零位法测量具有很高的测量精度；尽管使用偏差法测量剩余部分时会造成一定的误差，但是这部分误差相对于整个被测量而言将是非常微小的，因此微差法兼有测量精度高、响应快的特点。

2. 间接测量

所谓间接测量就是不直接测量被测量，而是对与被测量有确切函数关系的一个或几个物理量进行直接测量，然后通过已知的函数关系求出被测量的大小，这种测量方法称为间接测量。例如，要测量电功率 P，人们可不直接用仪表测功率 P，而是根据 $P = IU$ 的函数关系通过测量 I 和 U，然后经过计算求得 P 的值。又例如，要想测定导体的电阻率 ρ，必须先测定导体的长度 l、截面积 S、导体的电阻 R，然后用公式 $\rho = \dfrac{RS}{l}$ 计算求得相应的由阻率。类似的例子还可以举出很多，这些测量方法就是间接测量。

一般来说，间接测量比直接测量要复杂一些。因此，只有当被测量没有相应的测量仪表可以测量时，或者由于工作条件的限制直接测量有一定的困难、测量结果误差太大时才会采用间接测量方法。随着计算机技术的普及与应用，测量仪表向智能化方向发展，间接测量方法的应用也正在逐步扩大，测量过程中的数据处理完全由计算机准确完成，这使得间接测量方法变得既直观又简单。

1.2 误差的概念与处理方法

人们对客观世界的认识总是带有一定的局限性，与客观事物的本来面貌存在着差异。测量也是如此，测量是一个变换、选择、放大、比较、显示诸功能的综合作用，又是一个对比、示差、平衡、读数的比较过程。如果这些过程是在理想的环境条件下进行，换句话说：一切能够影响测量的因素都不存在时，测量是万分精确的，或者说没有误差。但是，这种理想的环境和条件在实际测量工程中是不存在的。不论是测量设备、测量仪表，还是测量对象、测量方法以及测量者本身，都不同程度地受到本身因素的影响或周围各种因素的影响，当这些因素发生变化时，必然会影响到被测量的大小，使仪表的指示值与被测量的实际值（也称为真值）之间产生差异，这个差异就是测量误差。

误差产生的原因和类型很多，其表现形式也不尽相同。在测量中根据造成误差的不同原因采用不同的解决方法，尽量减少误差的影响。下面对一些误差及处理误差的方法做一些介绍。

1.2.1 系统误差、随机误差和疏失误差

这一类误差是根据误差所出现的规律划分的，它属于测量误差。无论是采用什么样的测量

方法，使用什么样的测量仪器，由于仪器本身不够精确、测量方法不够完善以及操作实验人员经验不足都会使测量结果与被测量的真实值之间存在着差异。

1. 系统误差

系统误差是不随时间变化的、误差值保持定值或与某个参数成函数关系的有规律的误差。

系统误差的特点是可以采用修正值或补偿校正的方法来消除它。例如可以用修正值来消除仪表的刻度误差；采用校正的方法来补偿非线性误差；采用调零电路或调整仪器零点来消除零位误差。至于那种与某种因素成函数关系的、有规律的系统误差，只要认识了它的规律就可以采用校正补偿的方法予以减少或消除。

2. 随机误差

随机误差也称为偶然误差，它是由一系列偶然因素引起的不易控制的测量误差。

在测量过程中，随机误差是难以避免的。例如，在相同的条件下使用测量灵敏度足够高的仪表对同一量进行多次重复测量，而每次所得到的测量数据均不相同。这是由于许多互不相关的独立因素的综合作用引起各因素变化的结果。就每次测量的误差而言，随机误差的出现是没有规律的，人们不可预计它的大小和符号，但多次测量后，测量结果的全部值符合统计学的规律。

引起随机误差的因素很多，例如仪表及传感器的运动部件的间隙、连接、摩擦、变形都可能引起偶然误差。在测量过程中外界因素如温度、压力、湿度、磁场的扰动、电压波形的变动等瞬间变化也都可能引起偶然误差。

随机误差不能用调整或校正的方法来消除，但是可以用多次重复测量取其平均值的方法来减小它。

3. 疏失误差

疏失误差也称为粗大误差或反常误差。它是由于某些过失引起了明显的与事实不符的误差。

疏失误差的产生主要是由于操作测量人员误操作、误读数、误记录或计算错误等造成的。粗大误差是在非正常条件下得到的数据，这种数据是不可信的，在处理这些数据时，应该从大量的数据中予以剔除。

1.2.2 基本误差和附加误差

这一类误差是根据使用设备时的条件因素划分的。任何一种仪表在其出厂时都给出了它的使用范围和工作条件。例如，使用该仪表时的温度范围、湿度范围等等。不同的工作条件会出现不同的误差，可将其分为基本误差和附加误差。

1. 基本误差

测量仪器或传感器在标准条件下使用时所具有的误差称为基本误差。这里所讲的标准条件可以是国家标准，也可以是企业标准，它们都是明确规定的。例如，温度为 25 ±5℃ ；电源电压为 220V ± 10%； 湿度小于 80%等等。

不同等级的仪器和传感器的基本误差在国家标准或企业标准中均有明确规定。

2. 附加误差

当使用条件偏离了标准条件后，仪器或传感器必然要在基本误差的基础上增添新的误差，称为附加误差。

不同等级的仪器和传感器在国家标准或企业标准中也规定了使用条件及所允许的附加误差。在允许范围内的附加误差可以通过测量计算的方法来修正它。

1.2.3 静态误差和动态误差

这类误差是根据被测量速度划分的。被测量可能随时间变化，也可能在某一段时间内不随时间变化，在这些变化或不变化的过程中都有可能产生误差，可将其分为静态误差和动态误差。

1. 静态误差

静态误差也称为静差，指被测量稳定、不随时间变化时的测量误差。

2. 动态误差

当被测量随时间迅速变化时，系统的输出量在时间上不能与被测量的变化精确吻合，这种误差称为动态误差。例如，某些自动记录系统存在着机械惯量，所以记录的结果在时间上滞后于被测量的变化，这种误差就属于动态误差。又如，传感器或测量仪器对动态信号需要一段响应时间，输出信号来不及立即反映输入信号的量值，加上传感器对不同频率的输入信号的增益和时间延迟也是不相同的，因此使得输出信号与输入信号的波形不能完全一样，这就产生了动态误差。

1.2.4 误差的消除与处理方法

严格地讲误差是不能完全消除的，只能减小误差的影响。这里介绍几种误差的处理方法。

1. 正负误差补偿法

为了消除系统误差，可以对同一量反复测量两次。如果其中一次误差为正，而另一次误差为负，则取它们的平均值，便可以消除这种误差。如若两次测量误差都为正或负，则应该加大测量次数，然后再取其平均值。理论上讲，测量的次数越多，其平均值越接近被测量。又如，为了消除恒定外磁场对仪器设备的影响，可以将设备位置调转 180°，然后再测量一次，取两次测量结果的平均值，即可消除外磁场带来的系统误差。

2. 代替法

这种方法是将被测量用已知量置换，置换时使测量仪器的状态保持不变，这样，由于仪表本身制造不完善和外界因素对仪表的影响均对测量结果不发生作用，从而消除了系统误差。

3. 引入校正值

若系统误差值已知，则可以在测量结果中引入校正值以消除误差。例如，在表盘刻度上引入校正值来消除误差。

另外，随机误差是不能用上述方法来消除的。对于随机误差只能用概率统计的方法来处理，

这里就不讨论了。对于疏失误差惟一的方法就是摒弃该数据，必要时需根据情况补充测量。

1.3 绝对误差、相对误差和精度的计算

测量结果和被测量实际值之间总是存在着某种差别，不可能完全一样，这就是通常所说的误差。怎样来描述误差，将误差表示出来？通常是根据测量结果的精确程度来表述误差的大小，把误差分为绝对误差和相对误差，并且可以将仪表的指示值可能具有的误差大小用精度来表示。

1.3.1 绝对误差

测量值 A_X 与被测量实际值 A_0 之差称为绝对误差，用符号 Δ 来表示。

$$\Delta = A_X - A_0 \tag{1-4}$$

绝对误差的单位与被测量的单位相同，绝对误差的符号有正负之分。

例 1.1　用温度表测量温度读数为 20.5℃，而实际温度值为 20℃，求绝对误差。

解：由公式（1-4）可得

$$\Delta = A_X - A_0 = 20.5 - 20 = +0.5\ ℃$$

求得的绝对误差为 +0.5℃。

1.3.2 相对误差

用绝对误差来表示误差的大小，这种表示方法很难衡量误差对总量的影响程度。例如在上例中，测 20℃ 时绝对误差为 $\Delta_1 = +0.5℃$；而若另外一只温度表测量 200℃温度时，绝对误差为 $\Delta_2 = +1℃$，显然就绝对误差来讲：$\Delta_2 > \Delta_1$，但是它们对测量结果的误差影响却是后者大于前者。所以在实际测量中衡量误差的大小通常用相对误差来表示。

绝对误差 Δ 与被测量实际值 A_0 之比值用百分数来表示，被定义为相对误差，用符号 γ 表示。

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \tag{1-5}$$

有时难于求得实际值，而测量值又与实际值相差不大，故式（1-5）中 A_0 可用 A_X 代替，则相对误差表示为

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_X} \times 100\% \tag{1-6}$$

式（1-5）所示的相对误差也称为实际相对误差；式（1-6）所示的相对误差也称为示值（标称）相对误差。

对于上面所举的两次测量温度的例子：

第一次测量温度，相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{\Delta_1}{A_{01}} \times 100\% = \frac{0.5}{20} \times 100\% = +2.5\% \tag{1-7}$$

第二次测量温度，相对误差为

$$\gamma_2 = \frac{\Delta_2}{A_{02}} \times 100\% = \frac{1}{200} \times 100\% = +0.5\% \tag{1-8}$$

可见，第二次测量的绝对误差大，但是对测量结果的误差影响却小，即相对误差小。

1.3.3 仪表的准确度

仪表的准确度能够用相对误差来表示吗？不能。这是因为一台仪表的准确度决定于仪表本身的性能，如果用绝对误差或相对误差表示都有不足之处。

例如有两只温度表，用它们分别做两次测量。第一只表量程为（0~250）℃，在测量 200℃时，其绝对误差为 1℃，该处的相对误差 γ 为 0.5%。用这只表测量 10℃ 时，由于仪表本身的因素（如指针指示时机械摩擦等）的影响，绝对误差与测 200℃时相差不多，假设测 10℃时绝对误差为 0.9℃，则这时相对误差 γ 达 9%。另一只温度表量程为（0~100）℃，在测量 100℃时绝对误差为 1℃，该处的相对误差 γ 为 1%；再用这只表测量 10℃时的温度，绝对误差为 0.9℃，该处的相对误差 γ 也为 9%。现在来衡量这两只表的性能，如果用最大的绝对误差来比较，则两只表的最大绝对误差均为 1℃，显然绝对误差不能反映出两块表的性能优劣。如果用相对误差来比较，则被测量值不同时相对误差值又不相同。换句话说，一只表可以有无穷多个相对误差。

为了解决上述问题，人们规定取仪表上量限的相对误差来表示一台仪表的精确度，则可以满意地反映出仪表的优劣。这种上量限的相对误差就是人们通常所说的引用误差。如果用 γ_m 表示引用误差，则

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \tag{1-9}$$

由上式可见，引用误差实际上也是一种相对误差，只是规定其分母为该仪表的测量上限值 A_m。上式中，当绝对误差 Δ 取最大值 Δ_m 时，引用误差常被用来确定仪表的准确度等级 S，即

$$S = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \tag{1-10}$$

式中，S 为准确度等级，它的百分数表示仪表在正常使用条件下最大引用误差的数值。仪表准确度越高，则最大引用误差越小。

根据准确度等级 S 及量程范围，可以推算出该仪表可能出现的最大绝对误差 Δ_m。准确度等级 S 规定取一系列标准值，我国电工仪表中常用的模拟仪表的准确度等级有下列七级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。一般仪表面板上都标有该表的准确度等级。利用仪表准确度等级进行计算可以用来选择仪表的量程，估计测量时可能出现的最大相对误差。

例 1.2　现有 0.5 级（0~300）℃和 1.0 级（0~100）℃两只温度表，用它们来测量 80℃的温度，试问使用哪一只温度表较为合适？

解：使用 0.5 级表测量时可能出现的最大相对误差为

$$\gamma(0.5) = \frac{\Delta_{m1}}{A_X} \times 100\% = \frac{300 \times 0.5\%}{80} \times 100\% = 1.875\%$$

若使用 1.0 级表测量时可能出现的最大相对误差为

$$\gamma(1.0) = \frac{\Delta_{m2}}{A_m} \times 100\% = \frac{100 \times 1.0\%}{80} \times 100\% = 1.25\%$$

计算结果表明，选用 1.0 级表比选用 0.5 级表的相对误差反而小，所以进行上述测量时选择 1.0 级（0~100）℃的温度表更为合适一些。由上例可知，在选用仪表时应该兼顾准确度等级和量程，一般总是希望仪表的指示值落在仪表满刻度值的 2/3 处附近。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1.4 传感器的分类组成及特性

按照中华人民共和国国家标准（GB7665-87），传感器的定义为“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。”这里所讲的敏感元件指传感器中能够直接感受或响应被测量的部分；转换元件指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输和测量的电信号部分。传感器在自动检测与转换技术中占有非常重要的位置，为了使读者更好地了解和使用传感器，本节将传感器的作用、分类、组成和特性逐一介绍。

1.4.1 传感器的作用

根据传感器的定义，可以认为传感器是一种以测量为目的，以一定的精度把被测量转换为与之有确定关系的，便于处理的另一种物理量的测量元件。它可以将诸如温度、压力、流量、浓度、流速、位移等非电量转换成电量，如电压、电流、频率等信号，然后传送到后续电子线路或电子设备进行测量、显示和记录。使用传感器来测量的被测物理量五花八门，名目繁多，但是否每一种被测物理量都要配置一种专门的传感器呢？大可不必。因为从本质上看，许多被测物理量是可以从基本量派生出来的，例如重量、密度、应力、转距、压力等被测量可以认为是由力这个基本量派生出来的，因此若要测量这些量，只要选用测量力的传感器就可以了。又如振幅（位移）是速度的积分，加速度是速度的微分，因此使用速度型传感器不但可以测量速度，还可以测量振幅和加速度，人们只要在测量线路中加适当的积分和微分电路运算环节就可以了。表 1-1 列出了一些常见的基本量与派生量的关系，了解基本量与派生量的关系将有助于选择与发挥传感器的使用效能。

表 1-1 基本量与派生量的关系

基 本 量	派 生 量
线位移	长度、宽度、厚度、位置、应变、振动、幅度、磨损、表面质量、腐蚀程度等
角位移	旋转角度、入射角、角偏移、角振动等
线速度	速度、流体速度、振动、动量等
角速度	角速率、角动量、角振动等
角加速度	角振动、转距、转动惯量等
力	重量、密度、应力、转距、压力等
线加速度	振动、力、冲击、质量、应力等
温度	热流量、流体流量、气体压力、气体速度、声响等
光	光通量、光密度、光谱分布、长度等
时间	频率、数目、统计分布等

如上所述传感器是一种获得信息的手段，因而传感器是自动检测与转换技术的核心。传感器获得信息的正确与否，关系到整个测量系统的精度。为了更好地完成测量工作，对传感器的各种特性如频率特性、灵敏度、线性度、信噪比都有一定要求。这些要求是：

（1）灵敏度高；

（2）线性度好；

（3）分辨能力强，可以测出被测信号的最小增量；

（4）精度高，误差小；

（5）测量范围大；

（6）稳定性好。

另外，在传感器的小型化、数字化、固体化、检测放大一体化方面也有所要求。

1.4.2 传感器的分类

传感器的种类名目繁多，分类也不尽相同，常见的分类方法有以下几种。

1. 按被测物理量分类

传感器根据被测物理量分类可分为：温度传感器、压力传感器、位移传感器、速度传感器等。这种分类方法对于使用者来讲较为方便，使用者容易根据被测物理量来选择所需要的传感器。其缺点是传感器的名目繁多，对建立一些传感器的基本概念、掌握基本原理和分析方法是不利的。因为同一种型式的传感器，如压电式传感器它既可以用来测量力和冲击，也可以用来测量机械振动中的速度、加速度和振幅等，其原理是一样的。所以选择使用传感器时要探索传感器的内在联系，正确选用传感器。

2. 按能量传递方式分类

按照能量传递方式分类可将传感器分成两大类：一类是有源传感器，另一类是无源传感器。

（1）有源传感器是一种换能器，它可以将非电能量转换成电能量，在部分传感器中能量的转换是可逆的，即也可以将电能转换为机械能或其他非电能。这类传感器通常伴随有力学系统，一般只能用在接触式测量场合。这类传感器必须运行在动态场合（即力学系统中速度不等于零）才能进行能量传递。因而传感器的标定要在动态下进行，这样的标定设备较为复杂。这类传感器最典型的有：电磁式传感器、压电式传感器、热电式传感器等。

值得指出，有些有源传感器并不一定要伴随有力学系统，如热电偶，它是利用两种不同金属的温差产生电势。

（2）无源传感器本身不是一种能量变换器，被测量仅对传感器中的能量起调节与控制作用，因此它必须要有辅助能源（一般为电源）作支持。它除了可以运行在动态的情况下，还可以在静态下工作，其刻度通常可以用静态标定方法来标定，标定设备也比较简单。它们中绝大部分可以用在非接触式测量场合。常见的这类传感器有：电阻传感器、电容传感器、光敏电阻传感器、热敏电阻传感器等。有源传感器和无源传感器的区分见表 1-2。

表 1-2 有源传感器和无源传感器分类

有源传感器		无源传感器	
电动式	光电式	电阻式	磁敏电阻式
电磁式	磁致压缩式	电感式	弹性电阻式（应变片）
静电式	电致压缩式	电容式	光游离式
热电偶	热电式（辐射热）	热敏电阻式	放射性
压电式	电化学式	光敏电阻式	

3. 按照工作原理分类

传感器以工作原理分类可以分为：动圈式、触点式、压电式、涡流式、电磁式、磁阻式、电感式、电容式、光电式等。这种分类方法的优点是便于了解传感器的原理，缺点是选用传感器时有时感觉不够方便。

4. 按照输出信号的性质分类

根据传感器输出信号的不同分为模拟传感器和数字传感器两类。前者的输出信号是模拟量，如果要将这种传感器配合数字计算机组成测量系统，或将这种传感器所测数据进行数字显示，则要求在传感器的后面要有模／数转换装置。数字传感器的输出信号是数字量，它在配合计算机组成测量系统或进行测量数据的数字显示时不需要转换装置，这给系统的组成带来不少方便。数字传感器还具有电磁兼容能力强，信号易于远距离传输等一系列的优点。

1.4.3 传感器的组成

传感器通常由敏感元件、转换元件和测量电路三部分组成，图 1.2是传感器组成的框图。传感器可以做得很简单，也可以做得很复杂。它可以是带反馈的闭环系统，也可以是不带反馈的开环系统。因此，传感器的组成将依不同的情况各不相同，互有差异。



图 1.2 传感器组成的框图

传感器中的转换元件又称变换元件，是组成传感器的重要元件。转换元件可以直接感受被测量，将感受到的被测量变换成与之成对应关系的电量。也可以不直接感受被测量，而仅感受由敏感元件传递过来的与被测量成一一对应关系的非电量，然后再转换成电量输出给测量电路。例如差动变压器式压力转换器，它并不直接感受压力，只是感受与被测压力成确定关系的衔铁位移量，然后输出电量。

传感器中的测量电路能将转换元件输出的电信号进行放大、运算、调节、显示、记录、控制和处理，有时还要进行模／数转换或数／模转换，以便与各类系统相配接。测量电路的类型，以及繁、简程度视具体工程情况而定。测量电路与转换元件连接部分较常见的是电桥电路。

1.4.4 传感器的基本特性

传感器的特性指输入、输出特性，它有静态与动态之分。动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。动态特性好的传感器，其输出量随时间变化的曲线与被测量随时间变化的曲线基本一致或非常接近。对于任一传感器，只要输入量是时间的函数，则输出量就也应该是时间的函数。

研究传感器的动态特性的方法：一般为建立数学模型，求取传递函数，求其动态响应等等。它的研究方法与控制理论中所介绍的方法相似，本书将不再介绍，这里仅介绍静态特性的一些指标。

1．灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态下，输出变化量与输入变化量之比值，用 K 来表示。

$$K=\frac{\Delta y}{\Delta x} \qquad (1\text{-}11)$$

式中，Δx 为输入量 x 的变化量；

Δy 为由 Δx 引起的输出变化量。

对于线性传感器，灵敏度为一常数，对于非线性传感器，灵敏度随输入量的变化而变化。图 1.3 是用切线法求取传感器灵敏度的示意图，由图可知，传感器的输出曲线越陡，灵敏度越高。可以在传感器输出曲线上用切线的方法求得曲线上任一点处的灵敏度。从图 1.3 中的切线的斜率可看出，x_2 点的灵敏度比 x_1 点高。

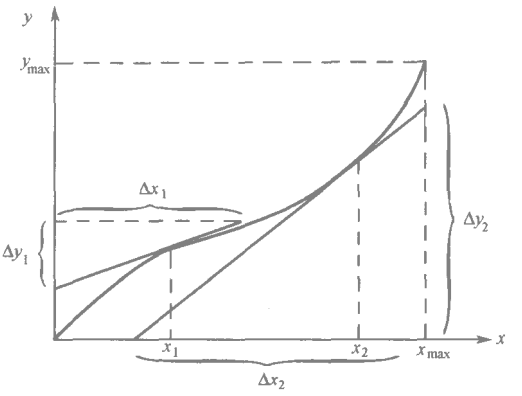


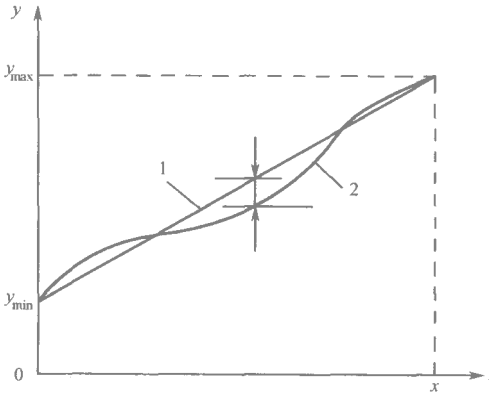
图 1.3　用切线法求取传感器的灵敏度

2．线性度

线性度又称为非线性。它是指传感器输入与输出之间的关系曲线与选定的工作曲线（有时亦称为理论直线）的靠近程度，如图 1.4 所示。工作曲线的选取有多种方法，图 1.4 是将传感器输出起始点与满量程点连接起来的直线作为工作曲线。一般总是希望传感器输入与输出关系曲线与工作曲线重合。

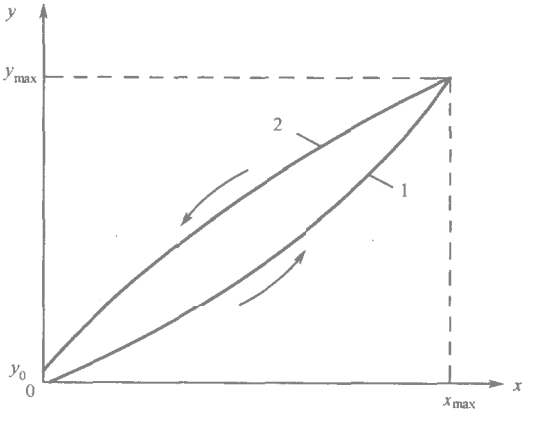
3．迟滞

迟滞又称为回差。它指传感器在输入值增长的过程中(正行程)和减少的过程中(反行程)，同一输入量下输出值的差别，如图 1.5 所示。图中正行程是指在输入量 x 从零开始逐渐增大到满量程情况下所得的曲线，而反行程则与之相反。由图还可以看到对于任一输入量 x 值，正行程与反行程所对应的输出量 y 值是不同的，这就是迟滞。一般希望迟滞越小越好。



1——选定的工作曲线；2——实际特性曲线

图 1.4　传感器线性度示意图



1——正行程；2——反行程

图 1.5　迟滞特性曲线示意图

4. 分辨率

分辨率是指传感器能够检测出的被测信号的最小变化量。换句话说，当传感器的输入从非零的任意值缓慢增加，只有在超过某一输入增量后输出才有变化，这个输入增量称为传感器的分辨率。分辨率说明了传感器最小可测出的输入变量。

5. 稳定性

稳定性表示传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。一般用室温条件下经过一个规定的时间后，传感器的输出与起始标定时的输出的差异程度来表示其稳定性。

6. 重复性

重复性反映了传感器在不变的工作状态下，重复地给予某个相同的输入值时，其输出值的一致性，其意义与精密度相似。传感器的重复性一般在标定过程中来确定，但具体的方法各有所异。较普遍使用的方法是在传感器全量程内连续选择多点进行多次重复标定，根据所得各特性曲线来确定重复程度。也有的只是在接近满量程值时的某个输入值进行多次重复标定，然后根据其输出数据的分散程度来计算重复性。重复性的优劣还与许多随机因素有关。

7. 阈值

通常将传感器最小量程附近的分辨率称为阈值。有的传感器在零输入附近有严重的非线性，形成所谓“死区”，则把死区的大小作为阈值。

8. 零漂

零漂表示传感器在零输入状态下输出值的漂移。零漂有温度漂移和时间漂移两种。

9. 可靠性

可靠性是指在规定的工作条件下，传感器保持原有技术指标的程度。应该说，精确度符合要求而工作稳定的传感器，其测量结果是可靠的。可靠性是用传感器的概率寿命来描述的，所谓概率寿命就是同一型号的传感器按照概率统计方法得到的平均无故障时间。

本 章 小 结

本章从“测量的概念和方法分类”“误差的概念与处理方法”“绝对误差、相对误差和精度的计算”“传感器的分类与组成及特性”四个方面介绍了检测技术的基本概念。

1. 测量的定义，是把被测量与同种性质的基准单位进行比较，从而获得被测量是基准单位的多少倍这一信息。测量方法分两种，直接测量和间接测量，其中直接测量又有三种方法，它们分别是：偏差法、零位法和微差法。

2. 误差按照其产生的原因不同，出现的时间互异等现象，大体上可以分为：系统误差、随机误差、疏失误差、基本误差、附加误差、静态误差和动态误差七种类型。消除这些误差的方法也应该是随误差的不同而有所差异，归纳起来有三种：正负误差补偿法、代替法、引入校正值。

3. 绝对误差和相对误差是对各种误差大小的描述。但是这种描述方法对仪表本身的误差不适用，因而提

出了一个引用误差的概念，用引用误差的大小来衡量仪表本身误差的大小。仪表本身的误差标准确定后，就可以确定仪表的准确度等级。我国电工仪表中常中模拟仪表准确度等级分为七级： 0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0。

4. 传感器的定义为：“能感受规定的被测量并且按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成”。一般成品传感器在敏感元件和转换元件后面都要加测量电路。传感器的基本特性有：灵敏度、线性度、迟滞、分辨率、稳定性、重复性、阈值、零漂、可靠性。

思考题与习题

1.1 什么是直接测量？什么是间接测量？试举例说明间接测量方法。

1.2 传感器由几部分组成？它们各是什么？

1.3 电工实验中，采用平衡电桥测量电阻的阻值属于什么测量？

1.4 用万用表交流电压挡（频率上限为 5kHz）测量 100kHz，10V 左右的高频电压，发现示值不到 2V，该误差属于什么误差？用该万用表直流电压挡测量 5 号干电池电压，发现每次示值均为 1.8V，该误差属于什么误差？为什么？

1.5 什么是偏差法、零位法和微差法？这些方法有什么特点？

1.6 有一个测温仪表，它的测量范围为 0℃～200℃，精度为 0.5 级。试求：（1）该仪表可能出现的最大绝对误差；（2）当该表示值分别为：20℃，100℃，180℃ 时的示值相对误差。

1.7 欲测 240V 电压，要求测量示值相对误差的绝对值大于 0.6%。问：若选用量程为 250V 电压表，其精度为哪级？若选用量程为 300V 和 500V 的电压表，其精度又为哪级？

1.8 已知待测电压约为 70V 左右，现有两只电压表，一只为 0.5 级，测量范围为 0～500V；另一只为 1.0 级，测量范围为 0～100V。试问选用哪一只电压表较好？为什么？

需要全本请访问 www.ertongbook.com