

检测技术概论

传感器与检测技术广泛地应用于生产、生活等领域的各行各业,尤其在机械和数控等专业相当重要。随着科学技术发展的不断提高,对检测与测量提出了更高的要求。要求检测系统具有更高的速度、精度、可靠性和自动化水平,并向多功能化、智能化方向发展。

在工程实践与机械行业中,重要的是正确、及时地掌握加工对象的各种信息,大多数情况下要获取被检测对象信息的大小,即被测量的大小。因此,要有效地完成检测任务,就要了解传感器与检测技术的现状与学习意义,必须掌握检测的基本概念、测量误差以及相关的基本常识。

1.1 传感器与检测技术的地位与作用

目前世界已经进入信息时代,正向物联网时代迈进。在利用信息的过程中,首先要解决的就是要获取准确、可靠的信息,而传感器是获取自然科学领域中信息的主要途径与手段。

传感器是现代物联网和测控系统中的关键环节,它处于连接被测控对象和测控系统的接口位置,构成了系统信息输入的主要窗口,提供着系统赖以进行处理和决策所必需的原始信息。如果没有传感器对原始参数进行精确、可靠的测量,那么无论是信号转换和处理,或者最后数据的显示和控制,都将失去意义。这是因为优良的二次仪表可以高保真度地再现传感器的输出,但却无法添加新的检测信息或者消除传感器所引入的误差。

以现代飞行器为例,它装备着各种各样的显示和控制系统,以保证各种飞行任务的完成。反映飞行器飞行的参数和姿态、发动机工作状态的各种物理参数等,都要利用传感器来检测。这些检测结果一方面提供给驾驶人员去控制与操纵飞行器,另一方面传输给各种自动控制系统,以实现飞行器的自动驾驶和自动调节。例如“阿波罗号”的运载火箭部分,检测加速度、声学、温度、压力、振动、应变等参数的传感器共有 2077 个;宇宙飞船部分各种传感器共有 1218 个。这些传感器的数量是很大的,要求是很高的,而且在飞行器研制过程中,也要用各种传感器对样机进行大量的地面和空中测试,才能确定其是否符合各项技术性能指标。

传感器在机械行业的生产中也十分重要。如好的数控机床,其工作过程中涉及温度、长度、位移等传感器的使用,从而实现对加工对象的有效控制与加工。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中,要用各种传感器来监视和控制生产。过程中对各个参数的监控,可以使设备工作在最佳状态或正常状态,并使产品达到最好的质量。因此可以说,如果没有优良的传感器,现代化生产也就失去了基础。

计算机的应用和发展,给人类文明带来了巨大的影响。特别是大规模和超大规模集成电路出现后,计算机的核心部件有了惊人的发展,这同时也要求外部设备与之相配合。计算机输入的外部硬件主要就是传感器。传感器的发展使得计算机的功能得到充分的利用,同时也将促进计算机的进一步发展;而传感器的不足之处极大地限制了计算机功能的发挥,就如一个人具有发达的大脑而欠缺五官一样。应当说,计算机与传感器的协调发展程度,决定了技术的将来。

在基础学科的研究中,传感器更具有突出的地位。随着现代科学技术的发展,科学研究进入了许多新的领域:例如在宏观上要观察上千万光年的茫茫宇宙,微观上要观察小到 10^{-9}cm 的粒子世界;时间上要观察长达数十万年的天体演化,短到 $10\mu\text{s}$ 的瞬间反应。此外,还出现了对深化物质认识、开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种超高端技术的研究,如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场等条件下的研究。显然,没有相适应的传感器,要获取大量信息是不可能的。而一些新机理和高难度的检测传感器的出现,往往会引发该领域内的突破性进展。一些传感器的发展,往往是一些边缘学科开发的前驱。

目前,传感器的应用已经渗透到如工业化生产、产品开发、海洋探测、环境保护、资源调查、健康管理、生物工程、甚至文物保护等极其广泛的领域中。可以毫不夸张地说,从茫茫太空,到辽阔海洋,以至各种复杂的工程系统,几乎每一个现代化项目,都离不开各种各样的传感器。

由此可见,传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用,是十分明显的。各工业发达国家,如美国、英国、日本、德国等,都把对传感器的研究放在十分重要的地位,致力于新型传感器的研制开发工作,对相关项目纷纷增加投资,加速传感技术的研究工作。

1.2 测量方法与检测系统的组成

1.2.1 测量的基本概念

在科学实验和工业生产中,为了及时了解实验进展情况、生产过程情况以及它们的结果,人们需要经常对一些物理量,如温度、压力、流量、位移、速度等参数进行测量,因此,需要选择合适的测量装置,采用恰当的检测方法进行测量。

随着科学技术和生产力的发展,除了传统的比较测量过程外,有时还必须将测量进行变换,如把不容易直接测量的量变换为容易测量的量,把静态测量变为动态测量等。通常把简单的比较测量过程称为狭义的测量,而把对被测量进行检出、变换、分析、处理、存储、控制和显示等功能的综合过程称为广义测量。

1.2.2 测量方法

测量方法是指为实现测量过程所采用的具体方法。在测量过程中,由于测量对象、测量环境、测量参数的不同,需要采用各种各样的测量仪表和测量方法。针对不同的测量任务进行具体分析,以找出切实可行的测量方法,这对测量工作是十分重要的。

对于测量方法,从不同的角度有不同的分类方法。根据获得测量值的方法,可分为直接测量、间接测量和组合测量;根据测量方式,可分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量;

根据被测量变化快慢,可分为静态测量和动态测量;根据测量敏感元件是否与被测介质接触,可分为接触测量和非接触测量;根据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,等等。

1. 直接测量、间接测量与组合测量

(1) 直接测量。用事先分度或标定好的测量仪表,直接读取被测量值的方法,称为直接测量。例如,用游标卡尺测量某轴的直径、用温度计测量温度等,都属于直接测量。直接测量是工程实践中大量采用的方法,其优点是测量过程简单、迅速,但不易达到很高的测量精度。

(2) 间接测量。首先对与被测量有确定函数关系的几个量进行测量,然后再将测量值代入函数关系式,经过计算得到所需结果,这种测量方法称为间接测量。例如,在测量直流功率时,根据 $P=IU$,先对 I 和 U 进行直接测量,再计算出功率 P 。间接测量的测量过程复杂,测量时间较长,一般用在直接测量不方便或没有相应直接测量仪表的情况。

(3) 组合测量。若被测量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果,则这种测量方法称为组合测量。组合测量是一种特殊的精密测量方法,操作步骤复杂,测量时间长,多用于科学实验等特殊场合。

2. 偏差式测量、零位式测量和微差式测量

(1) 偏差式测量。在测量过程中,用仪表指针的位移(即偏差)表示被测量值,这种测量方法称为偏差式测量。仪表上有经过标准量具校准过的标尺或刻度盘。测量时,根据仪表指针在标尺上的示值,读出被测量的数值。偏差式测量简单、迅速,但精度不高,这种测量方法广泛应用于工程测量中。

(2) 零位式测量。用已知的标准量去平衡或抵消被测量,并用指零位式仪表来检测测量系统的平衡状态,从而判定被测量值等于已知标准量的方法,称为零位式测量。如用天平测量物体的质量、用电位计测量未知电压等,都属于零位式测量。在零位式测量中,标准量是一个可连续调节的量,被测量能够直接与标准量相比较,测量误差主要取决于标准量具的误差,因此可获得较高的测量精度。另外,指零机构越灵敏,平衡的判断越准确,越有利于提高测量精度。但这种方法需要平衡操作,测量过程复杂,测量时间长,不适用于迅速变化的参数的测量。

(3) 微差式测量。微差式测量综合了偏差式测量和零位式测量的优点,将被测量放大部分先与已知的标准量相比较,取得差值后,再用偏差法测得此差值。因此,微差式测量的反应速度快,测量精度高,特别适合于在线控制参数的测量。

1.2.3 检测系统的组成

在自动检测系统中,各个组成部分是以信息流动的过程来划分的。检测时,首先获取被测量的信息,并通过信息的转换,把获得的信息变换为电量,然后进行一系列的处理,再用指示仪或显示仪将信息输出,或由计算机对数据进行处理,最后把信息输送给执行机构。一个检测系统可分为信息的获得、信息的转换、信息的处理和信息的输出等几个部分。要完成这些功能,主要依靠传感器、信号处理电路、显示装置、数据处理装置和执行机构等,其具体组成框图如图 1.1 所示。

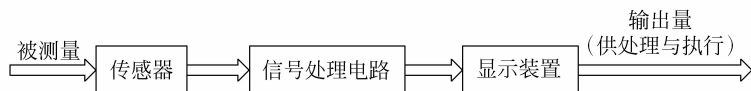


图 1.1 检测系统的组成

1. 传感器

传感器是把被测量(如物理量、化学量、生物量等)变换为另一种与之有确定对应关系、且容易测量的量(通常为电学量)的装置。传感器是一种获得信息的重要手段,其获得信息的正确与否,关系到整个检测系统的精度,因此,传感器在非电量检测系统中占有重要的地位。

2. 信号处理电路

通常传感器输出信号是微弱的,需要由信号处理电路加以放大、调制、解调、滤波、运算以及数字化处理等。信号处理电路的主要作用就是把传感器输出的电学量变成具有一定功率的模拟电压(或电流)信号或数字信号,以推动后级的输出显示,或记录设备、数据处理装置及执行机构的相应反应。

根据测量对象和显示方法的不同,信号处理电路可以是简单的传输电缆,目前多数为由电子元件组成的数据处理电路,也可以是包括计算机在内的复杂处理装置。

3. 显示装置

测量的目的是使人们了解被测量的数值,所以必须有显示装置。显示装置的主要作用就是使人们了解检测数值的大小或变化的过程。目前常用的显示方式有模拟显示、数字显示、图像显示 3 种方式。

(1) 模拟显示。模拟显示通过指针对标尺的相对位置,来表示被测量数值的大小,如毫伏表、毫安表等,其特点是读数方便、直观,结构简单,价格低廉,从而在检测系统中被广泛使用。但模拟显示的精度受标尺最小分度限制,且读数时易引入主观误差。

(2) 数字显示。数字显示用数字形式来显示测量值,如数字电压表,目前大多采用发光数码管或液晶显示屏等来显示。这类检测仪器还可附加打印机,打印记录测量数值,并易于计算机联机,使数据处理更加方便。

(3) 图像显示。图像显示用屏幕显示(CRT)读数或被测参数变化的曲线,主要用于计算机自动检测系统中。如果被测量处于动态变化中,用一般的显示仪表读数就十分困难,这时可将输出信号送给计算机进行图像显示或送至记录仪,从而描绘出被测量随时间变化的曲线,并以此作为检测结果,供分析使用。常用的自动记录仪器有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪和计算机等。

4. 数据处理装置和执行机构

数据处理是指利用计算机技术,对被测结果进行处理,如对测得数值进行频谱、幅值和能量谱分析等。在自动测控系统中,经信号处理电路输出的与被测量对应的电压或电流信号还可以驱动某些执行机构动作,为自动控制系统提供控制信号。

随着计算机技术的飞速发展,计算机在自动检测系统中得到了非常广泛的应用,尤其在

自动测试仪器及系统、智能仪器仪表和虚拟仪器等领域,有着非常重要的作用。

被检测的各种参数(如温度、流量、压力、位移、速度等)由传感器转换成易于后续处理的电信号。如果传感器输出信号太弱或信号质量不高,应由前端处理电路进行放大、滤波等,再由数据采集子系统转换成数字量,并通过接口送入计算机子系统,由微机运算、变换处理后,由数据分配子系统和接口输出到执行机构,以实现要求的自动控制;或由基本 I/O 子系统及其接口,输出数据,数据可以直接显示、记录、打印或绘制成各种图表、曲线等。另外,基本 I/O 子系统还可完成状态、参数的设置和人-机联系。此外,其他仪器仪表或系统通过通信子系统及接口完成相互之间的信息交换和互连。因此,计算机自动检测系统也常称为计算机数据采集系统,或简称为数据采集系统。

计算机自动检测技术不仅能解决传统的检测技术不能或不易解决的问题,而且能简化电路、增加功能、提高精度和可靠性等,还能实现人脑的部分功能,从而使自动检测系统具有智能化,实现代替人工的自动检测目的。随着计算机自动检测技术的不断发展,自动检测系统会变得更加智能化、多功能化。

1.3 误差的基本概念

在检测过程中,不论采用什么样的测量方式和方法,也不论采用什么样的测量仪表,由于测量仪表本身不够准确,测量方法不够完善,以及测量者本人经验不足,人的感觉器官受到限制等原因,都会使测量结果与被测量的真值之间存在差别,这个差值就称为测量误差。

测量误差的主要来源可以概括为工具误差(又称仪器误差)、环境误差、方法误差和人员误差等。

测量的目的就是求得与被测量真值最接近的测量值,在合理的前提下,这个值越逼近真值越好。但不管怎么样,测量误差不可能为零。在实际测量中,只需达到相应的精确度就可以了,绝不是精确度越高越好。必须清楚地知道,提高测量精确度是要付出人力、物力,是以牺牲测量可靠性为代价的。那种不计工本,不顾场合,一味追求越难越好的做法是不可取的,要有技术与经济兼顾的意识,追求最高的性价比。

为了便于对误差进行分析和处理,人们通常把测量误差从不同的角度进行分类。按照误差的表示方法,可分为绝对误差和相对误差;按照误差出现的规律,可分为系统误差、随机误差和粗大误差;按照被测量与时间的关系,可分为静态误差和动态误差。

1.3.1 绝对误差、相对误差和引用误差

1. 绝对误差

绝对误差是指测量值 A_x 与被测量真值 A_0 之间的差值,用 δ 表示,即

$$\delta = A_x - A_0 \quad (1.1)$$

由式(1.1)可知,绝对误差的单位与被测量的单位相同,且有正负之分。用绝对误差表示仪表的误差也比较直观,可以说明测量结果接近被测量真值的程度。在实际测量中,被测量真值 A_0 是得不到的,一般用理论真值或计量学约定真值 X_0 来代替 A_0 ,则式(1.1)可写成

$$\delta = A_x - X_0 \quad (1.2)$$

绝对误差不能用作衡量测量精确度的标准。例如,用一个电压表测量 200V 电压,绝对误差为 4.1V;而用另一个电压表测量 10V 电压,绝对误差为 1.5V。前者的绝对误差虽然大于后者,但误差值相对于被测量值却是后者大于前者,即两者的测量精确度相差较大,为此,引入了相对误差的概念。

2. 相对误差

相对误差(用 γ 表示)是指绝对误差 δ 与被测量真值 A_0 的百分比,即

$$\gamma = \frac{\delta}{A_0} \times 100\% \quad (1.3)$$

所以,相对误差比绝对误差能更好地说明测量的精确程度。

在实际测量中,由于被测量真值是未知的,而指示值又很接近真值 A_0 ,通常用测量值代替真值 A_0 来计算相对误差。

一般情况下,使用相对误差来说明不同测量结果的准确程度,即,用来评定某一测量值的精确度,但不适用于衡量测量仪表本身的质量。因为同一台仪表可以用来测量许多不同真值的被测量,在整个测量范围内的相对误差不是一个定值。随着被测量的减小,相对误差变大。为了更合理地评价仪表质量,采用了引用误差的概念。

3. 引用误差

引用误差是绝对误差 δ 与仪表量程 L 的比值,通常以百分数表示,即

$$\gamma_0 = \frac{\delta}{L} \times 100\% \quad (1.4)$$

如果以测量仪表整个量程中可能出现的绝对误差最大值 δ_m 代替 δ ,则可得到最大引用误差

$$\gamma_{0m} = \frac{\delta_m}{L} \times 100\% \quad (1.5)$$

对一台确定的仪表或检测系统而言,出现的绝对误差最大值是一个定值,所以其最大引用误差就是一个定值,这是由仪表本身的性能决定的。一般用最大引用误差来确定测量仪表的精度等级。工业仪表常见的精度等级有 0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,5.0 级等。

在具体测量某一个值时,其相对误差可以根据仪表允许的最大绝对误差和仪表指示值进行计算。例如,2.0 级的仪表,量程为 100,在使用时,其最大引用误差不超过 $\pm 2.0\%$,也就是说,在整个量程内,绝对误差最大值不会超出其量程的 2.0%,即 $\pm 2.0\%$ 。用它测量真值为 80 的测量值时,相对误差最大为 $(\pm 2.0)/80 \times 100\% = \pm 2.5\%$;测量真值为 10 的测量值时,相对误差最大为 $(\pm 2.0)/10 \times 100\% = \pm 20\%$ 。

由此可见,精度等级已知的测量仪表只有在被测量值接近满量程时,才能发挥其测量精度。因此选用测量仪表时,应当根据被测量的大小和测量精度要求,合理地选择仪表量程和精度等级,只能这样才能提高测量精度,做到最好的性价比。

1.3.2 系统误差、随机误差和粗大误差

1. 系统误差

在相同条件下,多次重复测量同一量时,保持恒定、或遵循某种规律变化的误差,称

为系统误差。其误差的数值和符号是不变的,称为恒值系统误差;按照一定规律变化的,称为变值系统误差。变值系统误差又可分为累进性的、周期性的和按复杂规律变化的等多种类型。

检测装置本身性能不完善、测量方法不当、对仪器的使用不当、环境条件的变化等原因,都可能产生系统误差。如果能设法消除这些原因,则系统误差也就被消除了。例如,由于仪表刻度起始位不对产生的误差,只要在测量前校正指针零位,即可消除。

系统误差的大小表明测量结果的准确度。系统误差越小,则测量结果越准确。系统误差的大小说明了测量结果偏离被测量真值的程度。系统误差是有规律的,因此可通过实验或分析的方法,查明其变化规律和产生原因,通过对测量值的修正,或者采用一定的预防措施,就能够消除或减小它对测量结果的影响。

2. 随机误差

在相同条件下,多次测量同一量时,其误差的大小和符号以不可预见的方式变化,这种误差称为随机误差。

随机误差是由很多复杂因素的微小变化的总和所引起的,分析起来比较困难。但是,随机误差具有随机变量的一切特点,在一定条件服从统计规律,因此通过多次测量后,对其总和可以用统计规律来描述,从而可以在理论上估计出其对测量结果的影响。随机误差的大小表明测量结果重复一致的程度,即测量结果的分散性。通常,用精密度表示随机误差的大小。随机误差大,测量结果分散,精密度低;反之,测量结果的重复性好,精密度高。

3. 粗大误差

明显歪曲测量结果的误差称为粗大误差,又称过失误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值。在实际测量中,由于粗大误差的误差数值特别大,容易从测量结果中发现,一经发现粗大误差,可以认为该次测量无效,坏值应从测量结果中剔除,从而消除它对测量结果的影响。

粗大误差主要是由人为因素造成的。例如,测量人员工作时的疏忽大意,出现了读数错误、记录错误、计算错误或操作不当等。另外,测量方法不恰当,测量条件意外地突然变化,也可能造成粗大误差。在分析测量结果时,就应先分析有没有粗大误差,先把坏值从测量值中剔除,然后再进行系统误差和随机误差的分析。

1.3.3 静态误差和动态误差

1. 静态误差

静态误差是指在测量过程中,被测量随时间变化很缓慢或基本不变化的测量误差。以上所介绍的测量误差均属于静态误差。

2. 动态误差

当被测量随时间变化时,进行测量所产生的附加误差称为动态误差。由于检测系统(或仪表)对动态信号的响应需要一定时间,输出信号来不及立即反应输入信号的增量值,加上传感器对不同频率的输入信号的增益和时间延迟不同,因此输出信号与输入信号的波形将不完全一致,从而造成动态误差。在实际应用中,应尽量选用动态特性好的仪表,以减小动

态误差。

1.4 误差的处理及消除方法

从工程实践可知,测量数据中含有系统误差和随机误差,有时还含有粗大误差。它们的性质不同,对测量结果的影响及处理方法也不同。对测量数据进行处理时,首先判断测量数据中是否含有粗大误差,如有,必须加以剔除。再看数据中是否存在系统误差,对系统误差可设法消除或加以修正。对排除了系统误差和粗大误差的测量数据,则根据随机误差的性质进行处理。总之,对不同情况的测量数据,要先加以分析研究、判断情况,再经综合整理,得出符合科学的结果。

1. 随机误差的处理方法

在相同条件下,对某个量重复进行多次测量,排除系统误差和粗大误差后,如果测量数据仍出现不稳定现象,则存在随机误差。

在等精度测量情况下,得到 n 个测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 设只含有随机误差,则这组测量值或随机误差都是随机事件,可以用概率数理统计的方法来处理。处理随机误差的目的就是从这些随机数据中求出最接近真值的值,并对数据精密度的高低(或可信度)进行评定,给出测量结果。

测量实践表明,随机误差具有以下特征:

(1) 绝对值小的随机误差出现的概率大于绝对值大的随机误差出现的概率。

(2) 随机误差的绝对值不会超出一定界限。

(3) 测量次数 m 很大时,绝对值相等、符号相反的随机误差出现的概率相等,则随机误差的代数和趋近于零。

随机误差的上述特征,说明其分布是单一峰值的、有界的,且当测量次数无穷大时,表现出对称性(即抵偿性),即,随机误差服从正态分布规律。

由长期的实践经验得知,一组等精度的重复测量值的算术平均值最接近被测量的真值,而算术平均值很容易根据测量结果求得,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (1.6)$$

通常在有限次测量时,算术平均值不可能等于被测量的真值,它也是随机变动的。但测量次数越多,算术平均值越接近真值。因此,通常采用多次重复测量的方法,来取得符合要求的精度。

2. 粗大误差的判别与坏值的舍弃

重复测量得到的一系列测量值中,应将含有粗大误差的坏值剔除后,才可进行有关的数据处理。但是,也应当防止无根据地随意丢掉一些误差大的测量值。对怀疑为坏值的数据,应当加以分析,尽可能找出产生坏值的明确原因,然后再决定取舍。如果实在找不出产生坏值的原因,或不能确定哪个测量值是坏值时,可以根据统计学的异常数据处理法则,判别坏值,并加以舍弃。

另外,除对粗大误差用剔除准则外,更重要的是提高工作人员的技术水平和工作责任心,以及保证测量条件稳定,防止因环境条件剧烈变化而产生的突变影响。

在测量结果中,一般都含有系统误差、随机误差和粗大误差。尽管可以通过剔除含有粗大误差的坏值的方法,消除粗大误差对测量结果的影响,但随机误差是不可能消除的,只能通过多次重复测量,根据统计分析的方法估算出随机误差的取值范围,尽可能地减小随机误差对测量结果的影响。

3. 系统误差的处理方法

尽管系统误差是固定的或按一定规律变化的,但往往不易从测量结果中发现和找到其变化规律,又不能像对待随机误差那样,用统计分析的方法确定其存在和影响,只能针对具体情况,采取不同的处理措施,没有普遍适用的处理方法。

有效地找出系统误差的根源并减小或消除的关键是如何查找误差根源,这就需要对测量设置、测量对象和测量系统进行全面分析,了解其中有、无产生明显系统误差的因素,并采取相应措施予以修正或消除。由于具体条件不同,在分析查找误差根源时,并无一成不变的方法,但与测量者的经验和测量技术的发展密切相关,可以从以下几个方面进行分析考虑。

(1) 所用传感器、测量仪表或组成元件是否准确可靠。例如,传感器或仪表灵敏度不高,仪表刻度不准确,变换器、放大器等性能不优良,这些都可能引起常见的系统误差。

(2) 测量方法是否完善。

(3) 传感器或仪表安装、调整或放置是否合理。例如,安装时没有调好仪表的水平位置,仪表指针偏心等,都会引起系统误差。

(4) 传感器或仪表工作场所的环境条件是否符合规定条件。例如,环境温度、湿度、仪表工作电压等的变化,也会引起系统误差。

(5) 测量者的操作是否正确。

分析查找了系统误差的产生根源后,应当进行合适的处理,常用方法有以下几种。

(1) 在测量结果中进行修正。对于已知的系统误差,可以用修正值对测量结果进行修正;对于变值系统误差,设法找出误差的变化规律,用修正公式或修正曲线对测量结果进行修正;未知的系统误差,则按随机误差进行处理。

(2) 消除产生系统误差的根源。在测量之前,仔细地检查仪表,并正确地调整和安装;防止外界干扰影响;选择环境条件比较稳定时进行读数等。

(3) 在测量系统中采用补偿机制。找出系统误差的规律,在测量系统中采取补偿措施,自动消除系统误差。例如,用热电偶测量温度时,热电偶参考端的温度变化会引起系统误差,消除此误差的方法之一是在热电偶回路中加一个冷端补偿器,进行自动补偿。

(4) 实时反馈修正。由于计算机自动检测技术的发展,可用实时反馈修正的方法,来消除复杂变化的系统误差。当查明某种误差因素的变化对测量结果有明显的复杂影响时,应尽可能找出其影响测量结果的函数关系或近似的函数关系。在测量过程中,用传感器将这些误差因素的变化转换成某种物理量形式(一般为电量),及时按照其函数关系,通过计算机算出影响测量结果的误差值,对测量结果进行实时的自动修正。

习题

1. 什么是被测量值的绝对误差、相对误差和引用误差？
2. 用测量范围为 $0 \sim 200\text{kPa}$ 的压力传感器测量 150kPa 压力时，传感器显示值为 155kPa ，求该示值的绝对误差、相对误差和引用误差。
3. 什么是随机误差？什么是系统误差？引起的原因是什么？
4. 有三台测温仪器，量程为 $0 \sim 600^\circ\text{C}$ ，精度等级分别为 2.5, 2.0, 1.5 级，现要求测量 500°C 的温度，要求相对误差不超过 2.5%，选用哪台仪表比较合理？

传感器的基本知识

在如今的信息化和物联网时代传感器是各种信息的感知、采集、转换、传输与处理的功能性器件,广泛地应用于各领域,特别是在机械、数控技术方面。传感器的构成与基本特性是本章的主要内容,也是学习传感器与检测技术的基础。

2.1 传感器的定义

测量仪器一般由信号检出器件和信号处理器件两大部分组成。信号检出器件的任务是检测出测量环境下的被测信号的相关数值。例如,测量锅炉中的压力时,将压力传感器连接到锅炉内部,传感器的弹性敏感元件感受到压力的变化而产生变形,其应变片的电阻值也随之发生变化。这种能感应被测量的变化并将之转化为其他物理量(通常为电量)的器件,就是传感器。

对于各种被测量,有各种各样的传感器与之相对应,其输出信号的形式也因传感器的不同而有差异。一般而言,要求输出信号为电流、电压、电容或数字信号等形式。这是因为这些信号形式便于输送与调理,同时也方便计算机进行处理。

2.2 传感器的组成

图 2.1 所示为传感器的组成示意图。

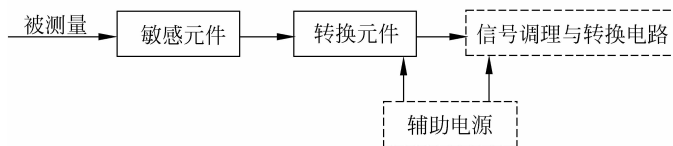


图 2.1 传感器的组成

通常的检测系统一般由敏感元件、转换元件和信号调理与转换电路组成。敏感元件是指传感器中能直接感受并响应被测量的部分。转换元件是指传感器中将敏感元件感受或响应的被测量转换成适用于传输或测量的电信号部分。由于传感器的输出信号一般都很微弱,因此,需要有信号调理与转换电路对其进行调理与放大。

2.3 传感器的分类

传感器技术是一门知识密集型技术,它与许多学科有关。传感器的原理多种多样,其种类十分繁多,分类方法也很多。

1. 按被测量的性质划分

按被测量的性质来划分,可分为位移传感器、压力传感器、温度传感器等。按传感器的工作原理来划分,可分为电阻应变式、电感式、电容式、压电式、磁电式传感器等。习惯上常把两者结合起来命名传感器,比如电阻应变式压力传感器、电感式位移传感器等。

2. 按被测量的转换特征划分

传感器又可分为结构型传感器和物性型传感器。结构型传感器是通过传感器结构参数的变化而实现信号转换的,如电容式传感器依靠极板间距离变化引起电容量的变化。物性型传感器是利用某些材料本身的物理性质会随被测量变化的特性而实现参数的直接转换。物性型传感器具有灵敏度高、响应速度快、结构简单、便于集成等特点,是传感器的发展方向之一。

3. 按能量传递的方式划分

传感器还可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器两大类。能量控制型传感器的输出能量由外部供给,但受被测输入量的控制,如电阻应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器等。能量转换型传感器的输出量直接由被测量能量转换而得,如压电式传感器、热电式传感器等。

2.4 传感器的基本特性

在测量过程中,要求传感器能感受到被测量的变化,并将其不失真地转换成容易测量的量。

被测量一般有两种形式:一种是稳定的,即不随时间变化或变化极其缓慢,称为静态信号;另一种是随时间变化而变化,称为动态信号。由于输入量的状态不同,传感器所呈现出来的输入-输出特性也不同,因此,传感器的基本特性一般用静态特性和动态特性来描述。

2.4.1 静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输出-输入关系,其指标包括线性度、灵敏度、迟滞性、重复性、分辨率、稳定性和漂移等。

1. 线性度

传感器的线性度是指其输出量与输入量之间的实际关系曲线(即静特性曲线)偏离直线的程度,又称为非线性误差,其特性曲线可通过实际测试获得。

在实际使用中,大多数传感器为非线性的,为了得到线性关系,常引入各种非线性补偿环节,如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理等。但如果传感器非线性的要

求不高,输入量变化范围较小时,可用一条直线(切线或割线)近似地表示实际曲线的一段,使传感器输入-输出线性化。如图 2.2 所示,所采用的直线称为拟合直线。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差(或线性度),通常用相对误差 γ_L 表示,即

$$\gamma_L = \pm (\Delta_{L\max} / y_{FS}) \times 100\% \quad (2.1)$$

式中, $\Delta_{L\max}$ 是最大非线性绝对误差; y_{FS} 是满量程输出。

从图 2.3 可知,即使是同类传感器,拟合直线不同,其线性度也是不同的。选取拟合直线的方法很多,常用的有理论直线法、端点法、割线法、切线法、最小二乘法和计算机程序法等,用最小二乘法求取的拟合直线的拟合精度最高。

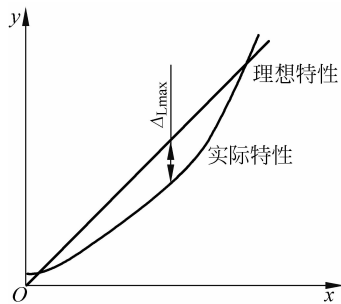


图 2.2 传感器的线性度

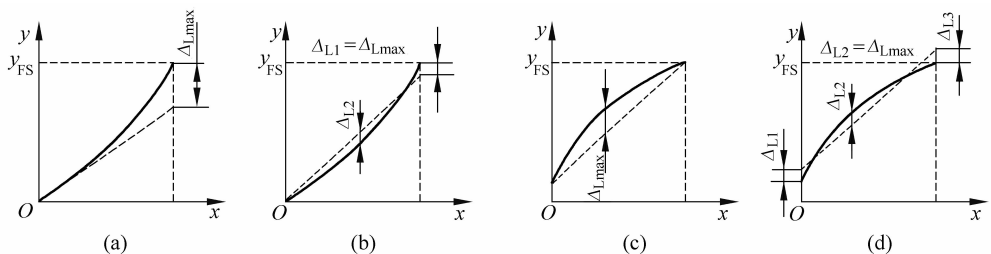


图 2.3 传感器拟合直线几种拟合方法

(a) 理论直线法; (b) 割线法; (c) 端点法; (d) 最小二乘法

2. 灵敏度

灵敏度 k 是指传感器的输出增量 Δy 与引起输出增量 Δy 的输入量 Δx 的比值,对于线性传感器,其灵敏度等于静态特性的斜率,即 k 为常数;而非线性传感器的灵敏度为一变量,用

$$k = dy/dx$$

表示。传感器的灵敏度如图 2.4 所示。

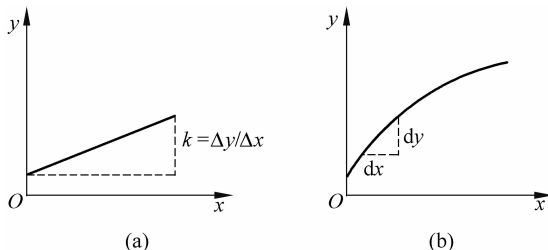


图 2.4 传感器的灵敏度

(a) 线性传感器灵敏度; (b) 非线性传感器灵敏度

另外,有时用输出灵敏度这个性能指标来表示某些传感器的灵敏度。如应变片式压力传感器的输出灵敏度是指传感器在额定载荷作用下,测量电桥供电电压为 1V 时的输出

电压。

3. 迟滞(回差滞环现象)性

传感器在正向(输入量增大)行程和反向(输入量减小)行程期间,输入-输出特性曲线不重合的现象称为迟滞,如图 2.5 所示。也就是说,对于同一大小的输入信号,传感器的正、反行程输出信号大小不等。产生这种现象是由于传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷所造成的,例如,弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等,具有一定的随机性。

迟滞大小通常由实验确定。迟滞误差 γ_H 可由下式计算

$$\gamma_H = \pm (1/2)(\Delta_{Hmax}/y_{FS}) \times 100\%$$

式中, Δ_{Hmax} 是正、反行程输出值间的最大差值。

4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向做量程多次测试时,所得特性曲线不一致性的程度,如图 2.6 所示。多次按相同输入条件测试的输出特性曲线越重合,其重复性越好,误差越小。

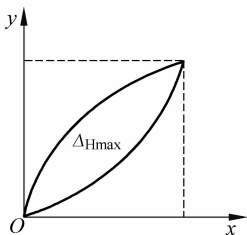


图 2.5 迟滞(回差滞环现象)性

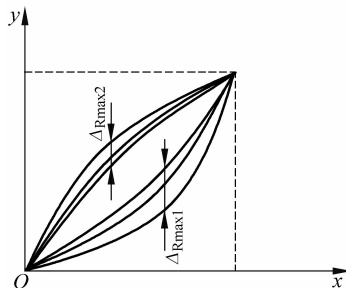


图 2.6 传感器的重复性

重复性 γ_R 常用标准偏差 σ 表示,也可用正、反行程中的最大偏差 Δ_{Rmax} 表示

$$\gamma_R = \pm (\Delta_{Rmax}/y_{FS}) \times 100\%$$

5. 分辨率

传感器的分辨率是指在规定测量范围内所能检测出的输入量的最小变化量。有时也用该值相对满量程输入值的百分数表示。

6. 稳定性

传感器的稳定性一般是指长期稳定性,是指在室温条件下,经过相当长的时间间隔,如一天、一月或一年,传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异,因此通常又用其不稳定性来表征传感器输出的稳定程度。

7. 漂移

传感器的漂移是指在外界的干扰下,输出量会发生与输入量无关的变化,包括零点漂移和灵敏度漂移等。

传感器在零输入时,输出的变化称为零点漂移。零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移。时间漂移是指在规定的条件下,零点或灵敏度随时间的缓慢变化。温度

漂移是指当环境温度变化时,引起的零点或灵敏度漂移。漂移一般可通过串联或并联可调电阻来消除。

2.4.2 动态特性

传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性。一个动态特性好的传感器,其输出将再现输入时的变化规律,即具有相同的时间函数。在动态的输入信号情况下,输出信号一般来说不会与输入信号具有完全相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

影响传感器的动态特性主要是传感器的系统因素,如温度传感器的热惯性等,不同的传感器,其系统因素的表现形式和作用程度不同。另外,动态特性还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说,我们在研究传感器动态特性时,通常是根据不同输入变化规律来考察传感器的动态响应的。传感器的输入量随时间变化的规律是各种各样的,下面对传感器动态特性的分析,同自动控制系统分析一样,通常从时域和领域两方面采用瞬态响应法和频率响应法。

1. 瞬态响应法

研究传感器的动态特性时,在时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析的方法,为时域分析法,这时传感器对所加激励信号的响应称为瞬态响应。常用激励信号有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数等。

2. 频率响应法

频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性。传感器对正弦输入信号的响应特性,称为频率响应特性。对传感器动态特性的理论研究,通常是先建立传感器的数学模型,通过拉普拉斯变换找出传递函数表达式,再根据输入条件得到相应的频率特性。大部分传感器可简化为单自由度一阶或二阶系统,因此,我们可以方便地应用自动控制原理中的分析方法和结论,读者可参考相关书籍,这里不再赘述。

2.5 传感器的应用领域

现代信息技术的三大基础是信息采集(即传感器技术)、信息传输(通信技术)和信息处理(计算机技术),它们在信息系统中分别起到了“感官”、“神经”和“大脑”的作用。传感器属于信息技术的前沿尖端产品,其重要作用如同人体的五官。传感器是信息采集系统的首要部件,是实现现代化测量和自动控制(包括遥感、遥测、遥控)的主要环节。

传感器主要用于以下用途。

1. 生产过程的测量与控制

在生产过程中,对温度、压力及现场工作状态等的控制。

2. 安全报警与环境保护

利用传感器可对高温、放射性污染以及粉尘弥漫等恶劣工作条件下的过程参量进行远距离测量与控制,并可实现安全生产。可用于温控、防灾、防盗等方面的报警系统。在环境保护方面可用于对大气与水质污染的监测、放射性和噪声的测量等。

3. 自动化设备和机器人

传感器可提供各种反馈信息,尤其是传感器与计算机的结合,使自动化设备的自动化程度有了很大提高。在现代机器人中大量使用了传感器,其中包括力、扭矩、位移、超声波、转速和射线等许多传感器。

4. 交通运输和资源探测

传感器可用于对交通工具、道路和桥梁的管理,以保证提高运输的效率与防止事故的发生。还可用于陆地与海底资源探测以及空间环境、气象等方面的测量。

5. 医传卫生和家用电器

利用传感器可实现对病人的自动监测与监护,可用于微量元素的测定、食品卫生检疫等,尤其是作为离子敏感器件的各种生物电极,已成为生物工程理论研究的重要测试装置。

近年来,由于科学技术和经济的发展及生态平衡的需要,传感器的应用领域还在不断扩大。

2.6 传感器的发展

在当前信息时代,对于传感器的需求量日益增多,同时对其性能要求也越来越高。随着计算机辅助设计技术(CAD)、微机电系统技术(MEMS)、光纤技术、信息理论以及数据分析算法不断迈上新的台阶,传感器系统正朝着微型化、智能化和多功能化的方向发展。

1. 微型传感器

为了能够与信息时代信息量激增、要求捕获和处理信息的能力日益增强的技术发展趋势保持一致,对于传感器的性能指标(包括精确性、可靠性、灵敏性等)的要求越来越严格。与此同时,传感器系统的操作友好性亦被提上了议程,因此还要求传感器必须配有标准的输出模式。而传统的大体积弱功能传感器往往很难满足上述要求,所以它们已逐步被各种不同类型的高性能微型传感器所取代。

一方面,计算机辅助设计技术和微机电系统技术的发展,促进了传感器的微型化。在当前技术水平下,微切削加工技术已经可以生产出具有不同层次的三维微型结构,从而可以生产出体积非常微小的微型传感器敏感元件,像毒气传感器、离子传感器、光电探测器这样的以硅为主要构成材料的传感器、探测器都装有极好的敏感元件。目前,这一类元器件已作为微型传感器的主要敏感元件被广泛应用于不同的研究领域中。

另一方面,敏感光纤技术的发展也促进了传感器的微型化。当前,敏感光纤技术日益成为微型传感器技术的另一新的发展方向。预计随着插入技术的日趋成熟,敏感光纤技术的发展还会进一步加快。

就当前技术发展现状来看,微型传感器已经应用于许多领域,对航空、远距离探测、医疗及工业自动化等领域的信号探测系统产生了深远影响。目前开发并进入实用阶段的微型传感器已可以用来测量各种物理量、化学量和生物量,如位移、速度、功率、加速度、压力、应力、应变、电、磁、热、离子浓度及生物分子浓度等。

2. 智能化传感器

智能化传感器是20世纪80年代末出现的另外一种涉及多种学科的新型传感器系统,主要是指那些装有微处理器,不但能够执行信息处理和信息存储,而且能够进行逻辑思考和结论判断的传感器系统。这一类传感器就相当于是微机与传感器的综合体一样,其主要组成部分包括主传感器、辅助传感器及微机的硬件设备。如智能化压力传感器,主传感器为压力传感器,用来探测压力参数,辅助传感器通常为温度传感器和环境压力传感器。采用这种技术时可以方便地调节和校正由于温度的变化而导致的测量误差,环境压力传感器测量工作环境的压力变化并对测定结果进行校正。而硬件系统除了能够对传感器的弱输出信号进行放大、处理和存储外,还执行与计算机之间的通信联络。通常情况下,一个通用的检测仪器只能用来探测一种物理量,其信号调节是由那些与主探测部件相连接的模拟电路来完成的。但智能化传感器却能够实现所有的功能,而且其精度更高,价格更便宜,处理质量也更好。

另外,智能化传感器在空间技术研究领域亦有比较成功的应用实例。在今后的发展中,智能化传感器无疑将会进一步扩展到化学、电磁、光学和核物理等研究领域。可以预见,新兴的智能化传感器将会在关系到全人类国民生计的各个领域发挥越来越大的作用。

3. 多功能化

通常情况下,一个传感器只能用来测量一种物理量,但在许多应用领域中,为了能够完美而准确地反映客观事物和环境,往往需要同时测量大量的物理量。由若干种各不相同的敏感元件组成或借助于同一个传感器的不同效应或利用在不同的激励条件下同一个敏感元件表现的不同特征构成的多功能传感器系统,可以用来同时测量多种参数。例如,可以将一个温度探测器和一个湿度探测器配置在一起(即将热敏元件和湿敏元件分别配置在同一个传感器载体上)制造成一种新的传感器,这种新的传感器就能够同时测量温度和湿度。

随着传感器技术和微机技术的飞速发展,目前已经可以生产出将若干种敏感元件总装在同一种材料或单独一块芯片上的一体化多功能传感器。多功能传感器无疑是当前传感器技术发展中一个全新的研究方向。如将某些类型的传感器进行适当组合而使之成为新的传感器。又如,为了能以较高的灵敏度和较小的粒度同时探测多种信号,微型数字式三端口传感器可以同时采用热敏元件、光敏元件和磁敏元件,这种组配方式的传感器不但能够输出模拟信号,而且还能够输出频率信号和数字信号。

从当前的发展现状来看,最热门的研究领域也许是各种类型的仿生传感器了,在感触、刺激以及视听辨别等方面已有最新研究成果问世。从实用的角度考虑,多功能传感器中应用较多的是各种类型的多功能触觉传感器。

总之,传感器系统正向着微小型化、智能化和多功能化的方向发展。今后,随着CAD技术、MEMs技术、信息理论及数据分析算法的发展,未来的传感器系统必将变得更加微型化、综合化、多功能化、智能化和系统化。在各种新兴科学技术呈辐射状广泛渗透的当今社会,作为现代科学耳目的传感器系统,作为人们快速获取、分析和利用有效信息的基础,必将进一步得到社会各界的普遍关注。

2.7 传感器的选用

现代工业生产与自动控制系统是以计算机为核心、以传感器为基础组成的。传感器是实现自动检测和控制的首要环节,没有精确可靠的传感器,就没有精确可靠的自动测控系统。近年来,随着科学技术的发展,各种类型的传感器已应用到工业生产与控制的各个领域。要利用传感器设计开发高性能的测量或控制系统,必须了解传感器的性能,根据系统要求,选择合适的传感器,并设计精确可靠的信号处理电路。

如何正确选择和使用各种传感器,要考虑的事项很多,但不必都要一一考虑。根据传感器实现使用的目的,选择合适的传感器是职业技术学校必备的职业技能。

1. 测量条件

随着传感器技术的发展,被测对象涉及多个领域,如数控机床,除了传统的力学领域,还要考虑环境、心理、人体工学以及经济学等方面。所以在选择传感器时,首先就应当了解与测量条件有关的因素,如测量的目的、被测量的选择、测量范围、输入信号的特性、精度要求、测量所需的时间等。

2. 环境因素

在了解测量要求后,还应考虑使用环境,如安装现场条件、环境条件(温度、湿度、振动)、现场传输所需要的电源功率配置等。

3. 技术指标

最后根据要求确定传感器的技术指标如精度、稳定性、灵敏度、响应特性、输出幅值、校正周期等。另外,为了提高测量精度,应注意通常使用的显示值应在量程的 70%~80% 来选择测量范围与显示范围。

此外,还应注意其他价格、服务与维修等相关要求。

习题

1. 什么是传感器的静态特性?它有哪些指标?如何用公式表征这些性能指标?

2. 什么是传感器的动态特性?其分析方法有哪几种?

3. 进行某次位移测量时,所采用的电容式位移传感器的灵敏度为 $2 \times 10^{-12} \text{ F/mm}$,将它与灵敏度为 $5 \times 10^9 \text{ V/F}$ 的放大器相连,而放大器的输出接到一台笔式记录仪上,其灵敏度为 20 mm/V ,试计算测量系统的灵敏度。当电容位移为 3 mm 时,记录笔在记录纸上的偏移量为多少?