

单元1 认识传感器与自动检测系统

本单元传授的知识要点是：

- (1) 自动检测系统基本组成。
- (2) 传感器基本组成、分类。
- (3) 测量误差及表示方法。

学生应掌握的基本技能是：

- (1) 能根据自动检测系统实际应用示意图指出系统组成，并画出组成框图。
- (2) 能利用传感器静态特性参数估算一些性能指标。
- (3) 能理解误差表示方法。

本单元的拓展知识是传感器选用、标定与校准方法；测量误差处理方法。拓展能力是能够利用互联网或其他资料初步选用传感器，能够初步设计出传感器标定与校准方案，能够运用所学知识分析计算测量数据的准确度。

在素质培养方面，本单元主要培养学生能利用基本概念解释传感器与自动检测系统的一些常用技术术语；通过测量数据分析处理的训练培养学生分析问题的能力，培养学生具有根据数据说明问题的基本科学思维方面的素质。

本单元由2个项目组成，每个项目有知识学习和技能训练两部分。项目1教学学时为1课时，项目2教学学时为3课时。拓展知识，可用于课堂教学，也可让学生自学。

1.1 项目1 自动检测系统认识

1.1.1 项目1知识学习 自动检测系统基本概念

1. 什么叫自动检测系统？

随着科学技术的发展，自动检测技术已深入到现代社会的各个领域，包括工农业生产，国防科技、现代生活，无所不在、无所不有。自动检测系统或者自动检测装置是实现信息提取、信息转换以及信息处理的系统或装置。信息提取是从自然界、社会、生产过程或科学实验中获取人们所需要的信息。信息处理是自动检测的真正目的，是指人们把已经获得的信息进行加工、运算、分析或综合，以便进行预报、报警、检测、计量、保护、控制、调度和管理等，达到预防自然灾害、防止事故发生、提高劳动生产率、正确计量、改善产品质量、顺利进行科学实验、进行文明生产和科学管理等目的。

2. 为什么要学习自动检测系统？

当今信息社会，人们对信息的提取、处理、传输以及综合等要求愈加迫切。作为信息提取的功能器件——仪表或传感器与人类的关系愈来愈密切。例如，一辆汽车的等级标准之

一，就是其上所配置的传感器数量和性能，以使用来测量车速、方位、负载、震动、油压油量、温度等；飞机和高铁之所以能够成为高速快捷的交通工具，正是有了自动检测技术作为其可靠的后盾；也正因为有了自动检测系统，才使得古老的机械加工焕发了青春，数控加工技术的引进，使得机械加工在机械产品的生产质量、数量以及个性化方面都发生了革命化的变化。检测技术同时也进入到了我们的生活中，如洗衣机、电冰箱、空调器这类家用电器，检测系统是其组成部分的核心；用电压表对电压进行监测，用一氧化碳气敏传感器对煤气溢出进行监测等。所以，有了自动检测技术，才有了我们今天的现代化信息社会。

采用自动检测系统实时测量及分析产品性能，采用自动测控系统对产品加工过程实时控制，是提高产品质量的现代方法。

随着科学技术的迅速发展，自动检测技术的应用领域日益扩大，在冶金、化工、电力、自动化机床、工业机器人控制、柔性制造系统和计算机集成制造系统等方面已取得了举世瞩目的研究和应用成果，在国民经济中发挥着越来越大的作用。目前，自动检测技术已成为未来物联网时代最主要的技术之一，其主要原因是它可以给人们带来巨大的经济效益和社会效益。

3. 自动检测系统基本组成

首先我们介绍两个自动检测技术的应用实例。图 1.1 和图 1.2 分别给出了气象参数自动检测系统示意图和电炉温度自动测控过程示意图。

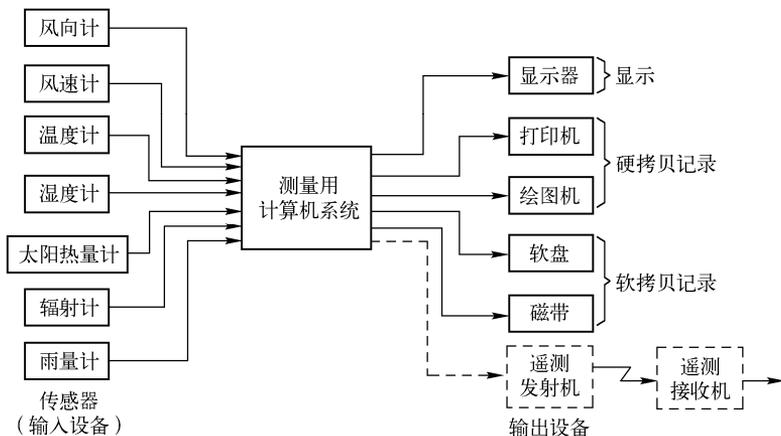


图 1.1 气象参数自动检测系统示意图

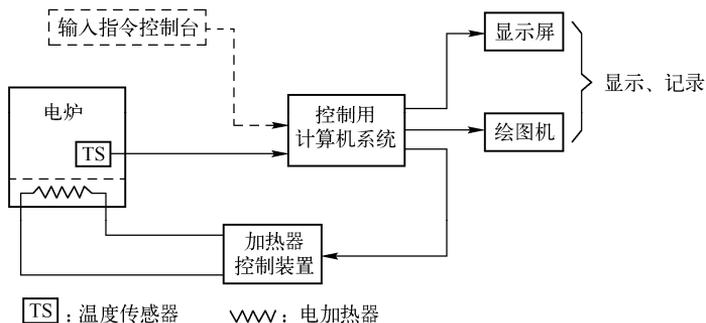


图 1.2 电炉温度自动测控过程示意图

如图 1.1 所示，自动检测对象是风向、风速、温度、湿度、日照、辐射、雨量等气象参数，采用 7 种相应的传感器进行自动检测。计算机系统每隔一段时间间隔对自动检测数据进行收集和处理，处理后的数据被实时显示在显示屏上，同时被送到记录装置进行记录。此外，还可以通过遥测装置向其他系统发送数据。

如图 1.2 所示，电炉控制过程的控制对象是电炉温度，为使电炉内的温度按预先设定的规律变化，首先，计算机系统通过电炉内的温度传感器采集温度信息，根据设定的温度时间曲线变化要求进行运算，运算结果送给加热器控制装置，以控制加热器产生最佳热量，从而完成控制操作。同时，可对电炉内的温度进行实时显示和绘图等。此外，系统还具有从外部控制电炉的启动与停止，输入参数和指令的功能，即备有输入指令操作台。

上述两个实例是有区别的，图 1.1 所示属于开环工作的自动检测系统，因为系统只是对对象参数自动采集、处理；图 1.2 所示则属于闭环工作的自动测控系统，因为系统不仅需要对象参数自动采集、处理，而且还需要对对象参数进行调节或控制。

一般的自动检测系统组成可由图 1.3 的框图来表示。在图 1.3 中，传感器把待测的物理量（一般为非电量）转换为信号（一般为电量），信号调制装置把传感器输出的信号转变成成为显示或记录装置可以直接利用的信号。如果待测物理量是电压，它可能需要放大；如果待测物理量是微小的机械运动（位移）信号，它可能需要放大或转换成其他运动形式；待测物理量甚至可能是一串需要转换为电脉冲的光脉冲信号。经过调制以后，信号被显示给用户或存储在记录装置上，以备后用。



图 1.3 自动检测系统的组成框图

一般的自动测控系统可由图 1.4 的框图来表示。自动测控对象参数，常常为非电量，需要通过传感器转换为电量，信号调理装置需要对传感器输出信号进行处理与转换，使它能够被计算机系统所接收，计算机系统接收信号数据并处理后，送给控制装置产生相应的信号去控制执行器的动作。执行器是将控制装置输出的电信号转变为各种控制动作，以实现对被控对象参数的控制。此外，系统还将自动测控的结果，送往显示器显示出来或送往记录器记录下来，供操作人员现场监视和分析。当自动测控结果异常时，计算机系统还可启动报警器报警。

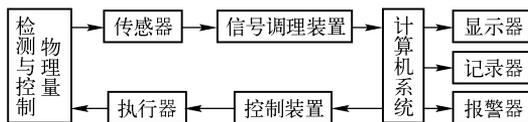


图 1.4 自动检测与控制系统组成框图

1.1.2 项目 1 技能训练 指出系统组成并画组成框图

(1) 根据图 1.1 所示气象参数自动检测系统示意图和图 1.2 所示电炉温度自动测控过程示意图，画出自动检测系统的组成框图和自动测控系统组成框图。

(2) 图 1.5 所示为智能化水质检测过程示意图，它勾画了未来的水质监测系统，通过无线水质感应器将水质信息自动传送给检测中心，水质感应器沿河流而下，而无须现场取水。根据图 1.5 示意图指出该自动检测系统由哪几个部分组成？并画出自动检测系统的组成框图。

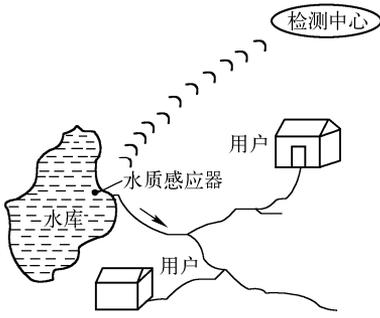


图 1.5 智能化水质检测过程示意图

一个实际自动检测装置或者自动测控装置，首先要明确装置的使用目的。如果装置仅仅是监视一个或者多个对象，那么该装置就是一个自动检测系统；如果装置是监控一个或者多个对象，那么该装置就是一个自动测控系统。对象可以用一个或者多个参数来描述，如图 1.1 所示，检测对象是气象参数，它是由风向、风速、温度、湿度、日照、辐射、雨量等多个参数描述的；图 1.2 所示测控对象是电炉温度，只是一个参数；图 1.5 所示检测对象是水质，水质不是参数，需要做调查研究，或者需要与用户反复讨论，最终确定是什么参数。

许多自动检测系统或者自动测控系统中的检测参数或测控参数是非电量，为了能够将被测参数进行远距离传送和自动显示、记录、处理和控制在构建自动检测系统或者自动测控系统时首先需要选择传感器或者仪表，把非电量转换为电量。例如，在气象参数自动检测系统中，需要选择风向、风速、温度、湿度传感器以及光度机、辐射机和雨量机；在电炉温度自动测控系统中，需要选择温度传感器；在智能化水质检测系统中，需要选择相应参数传感器或仪表，如 PH 传感器、浊度传感器、大肠杆菌仪等。

传感器电量输出有多种类型，如电压、电流、频率等；传感器电量输出也有多种形式，如模拟量、脉冲、数字等。这些形式显然不方便用户阅读、保存和警示，故通常使用显示器、记录仪和报警器。显示器、记录仪和报警器对输入信号一般有一定的要求，因此在传感器与显示器、记录仪和报警器之间还需要信号调理装置。对于自动测控系统，为了实施对对象的测控，需要有控制装置和执行器。

综上所述，气象参数自动检测系统组成框图如图 1.6 所示，电炉温度自动测控系统组成框图如图 1.7 所示。

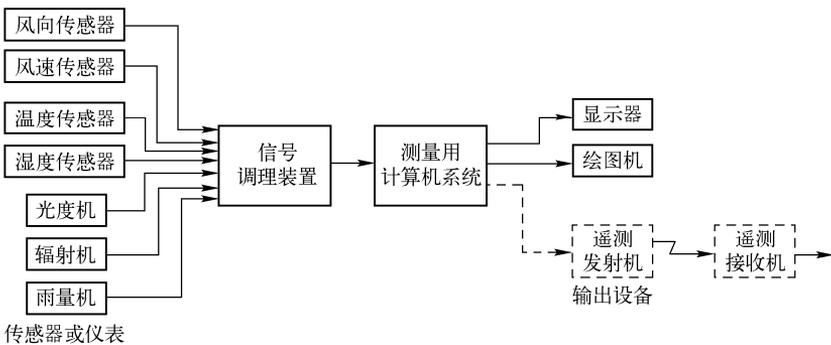


图 1.6 气象参数自动检测系统组成框图

智能化水质检测系统由传感器、信号调理与无线发送装置、显示器和记录仪组成，智能化水质检测系统框图如图 1.8 所示。

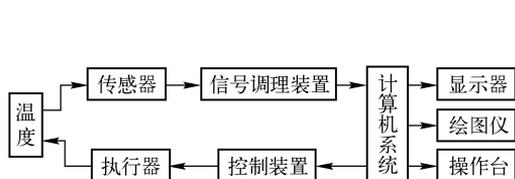


图 1.7 电炉温度自动检测与控制系统组成框图

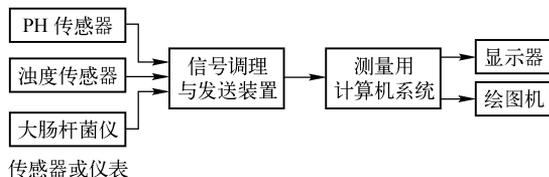


图 1.8 智能化水质检测系统框图

1.2 项目 2 认识传感器

1.2.1 项目 2 知识学习 传感器基本知识

1. 传感器在自动检测系统中的作用

在自动检测系统中，需要用传感器把自然界的物质信息（各种物理量、化学量和生物量形态的信息）转换为电信号，之所以要转换为电信号，是因为电信号便于远距离传送和传送速度快、传送信号不失真、利于与计算机通信和处理。通过信号调理装置输出给显示器、记录仪等便于人们阅读的设备。传感器是构建自动检测系统首要的、决定性的组成部分，能否选择合适的传感器决定着能否构建合理的自动检测系统。传感器获取信息的准确程度关系到整个自动检测系统能否准确检测信息，传感器对现代化科学技术、现代化农业及工业自动化的发展起着基础和支柱作用，已被世界各国列为关键技术之一。可以说，“没有传感器就没有现代化科学技术，没有传感器也没有人类现代化的生活。”传感器技术已成为科学技术和国民经济发展水平的标志之一。

2. 传感器的定义和组成

根据中华人民共和国国家标准（GB/T 7665—2005）的规定，传感器（Transducer/sensor）的定义是：“传感器是一种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。”

传感器的定义包含以下几方面的含义：

- (1) 传感器是一种测量装置，能完成检测任务。
- (2) 它的输入量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量，生物量等。
- (3) 它的输出量是某种物理量，这种量可以是气、光、电量，但主要是电量。
- (4) 输出输入有对应关系，且应有一定的精确程度。

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成，其组成框图如图 1.9 所示。

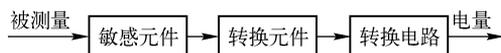


图 1.9 传感器组成框图

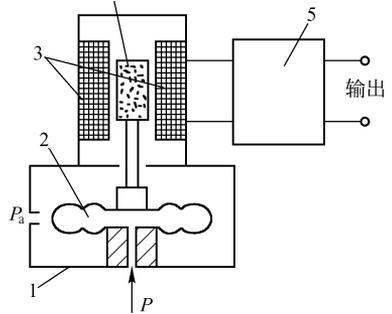
(1) 敏感元件。它是直接感受被测量，并输出与被测量构成有确定关系、易于转换为某一物理量的器件。如图 1.10 所示是一种气体压力传感器的示意图。膜盒 2 下半部与壳体 1 固定连接，上半部通过连杆与磁芯 4 相连，磁芯 4 置于两个电感线圈 3 中，后者接入转换电

路 5。这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力 P_a 相通，内部感受被测压力 P ，当 P 变化时，引起膜盒上半部移动，即输出相应的位移量。

(2) 转换元件。敏感元件的输出就是转换元件的输入，转换元件把输入转换成电路参数量。在图 1.10 所示中，转换元件是可变电感 3，它把输入的位移量转换成电感器的变化。

(3) 转换电路。上述电路参数接入转换电路，便可转换成电量输出。

应该指出，不是所有的传感器均由以上三部分组成。最简单的传感器是由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它直接输出电量，如热电偶传感器。有些传感器由敏感元件和转换元件组成，而没有转换电路，如压电式加速度传感器，其中质量块是敏感元件，压电片（块）是转换元件；有些传感器，转换元件不只一个，要经过若干次转换。



1—壳体；2—膜盒；3—电感线圈；
4—磁芯；5—转换电路

图 1.10 气体压力传感器

3. 传感器的分类

目前，传感器主要有几种分类方法：根据传感器工作原理分类；根据传感器能量转换情况分类；根据传感器转换原理分类；按照传感器的使用分类。表 1-1 是按传感器转换原理分类给出的各类型的名称及典型应用。

表 1-1 传感器分类表

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参数			
电参数	电阻	移动电感器触点改变电阻	电感器传感器	位移
		改变电阻丝或电阻片的尺寸	电阻丝应变传感器、 半导体应变传感器	微应变、力、负荷
		利用电阻的温度效应（电阻温度系数）	热线传感器	气流速度、液体流量
			电阻温度传感器	温度、辐射热
			热敏电阻传感器	温度
		利用电阻光敏效应	光敏电阻传感器	光强
		利用电阻湿度效应	湿敏电阻传感器	湿度
	电容	改变电容的几何尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的介电常数		液位、厚度、含水量
		电感	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	电感传感器
涡流去磁效应	涡流传感器		位移、厚度、硬度	
利用压磁效应	压磁传感器		力、压力	
电参数	电感	改变互感	差动变压器	位移
			自整角机	位移
			旋转变压器	位移
	频率	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参数			
电参数	频率		石英谐振传感器	力、温度等
	计数	利用莫尔条纹	光栅	大角位移、大直线位移
		改变互感	感应同步器	
	数字	利用数字编码	角度编码器	大角位移
电量	电动势	温差电动势	热电偶	温度、热流
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
		电磁感应	磁电传感器	速度、加速度
		光电效应	光电池	光强
	电荷	压电效应	压电传感器	动态力、加速度

除了上述几种分类方法外，还可按是否需要供电电源来分类，将传感器分为有源传感器和无源传感器；按输出信号的性质分类，将传感器分为模拟式传感器和数字式传感器（数字式传感器的输出为数字量，便于与计算机联用，且抗干扰能力强，例如盘式角度传感器、光栅传感器等）；按防爆等级可分为普通型、防爆型。

本教材是按照被测量对传感器进行分类的。

4. 传感器的基本特性及性能指标

传感器的特性主要是指输出与输入之间的关系，它有静态、动态之分。静特性是指当输入量为常量或变化极慢时，即被测量各个值处于稳定状态时的输入输出关系。动特性是指输入量随时间变化的响应特性。由于动特性的研究方法与控制理论中介绍的研究方法相似，故不再重复，这里仅介绍传感器静特性的一些指标。

理想传感器总希望输出与输入成线性关系，但由于存在着误差因素、外界影响等，输入输出不会完全符合所要求的线性关系。传感器输入输出作用如图 1.11 所示，图中的误差因素就是衡量传感器静态特性的主要性能指标。

(1) 线性度。静态特性曲线可由实际测试获得，在得到特性曲线后，为了标定和数据处理的方便，希望得到线性关系。这时可采用各种方法进行线性化处理，一般在非线性误差不太大的情况下，总是采用直线拟合的办法来线性化。

所谓的线性度也称非线性误差，是指传感器实际特性曲线与拟合直线（也称理论直线）之间的最大偏差与传感器满量程输出的百分比，如图 1.12 所示。它常用相对误差 γ_L 来表示：

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta_{L_{\max}}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中， $\Delta_{L_{\max}}$ 是非线性最大偏差；

$y_{FS} = y_{\max} - y_{\min}$ 为输出范围。

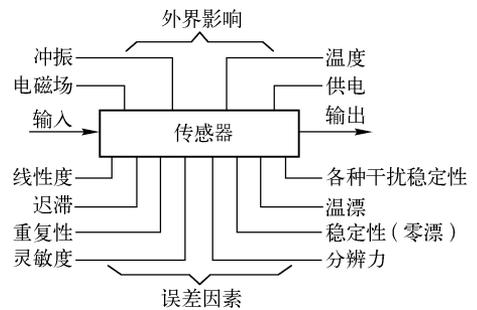


图 1.11 传感器输入输出作用图

拟合直线有多种方法，常用的拟合方法有：理论拟合，过零旋转拟合，端点拟合，端点平移拟合，最小二乘拟合等。

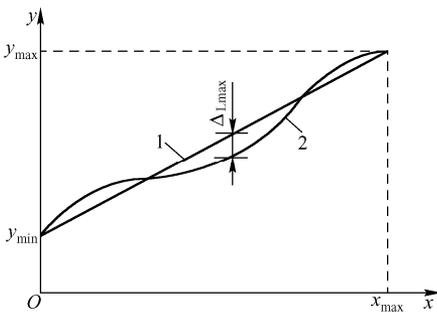
选择拟合直线的主要出发点应是获得最小的非线性误差，还要考虑使用是否方便，计算是否简便。图 1.12 所示是选取端点拟合方法，即将传感器输出起始点与满量程点连接起来的直线作为拟合直线，因而得出的线性度称为端点线性度。非线性误差越小越好，即希望传感器的静态特性近于直线，是因为线性传感器的分度是均匀的，容易标定，也不容易引起读数误差。

(2) 迟滞。传感器在正（输入量增大）、反（输入量减小）行程中输入输出曲线不重合的现象称为迟滞。迟滞特性如图 1.13 所示，它一般由实验方法获得，表达式为：

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta_{H\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1.2)$$

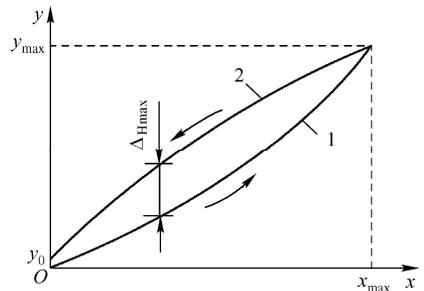
式中， $\Delta_{H\max}$ 为正、反行程间输出的最大差值；

y_{\max} 为满量程输出。



1—拟合直线；2—实际输出特性曲线

图 1.12 传感器线性度示意图



1—正向行程特性；2—反向行程特性

图 1.13 迟滞特性示意图

必须指出，正、反行程的特性曲线是不重合的，且反行程特性曲线的终点与正行程特性曲线的起点也不重合。迟滞会引起分辨力变差，或造成测量盲区，故一般希望迟滞越小越好。

(3) 重复性。重复性是指传感器在输入按同一方向做全量程连续多次变动时所得特性

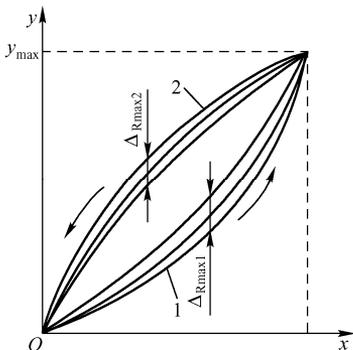
曲线不一致的程度。图 1.14 所示为校正曲线的重复特性，正行程的最大重复性偏差为 $\Delta_{R\max1}$ ，反行程的最大重复性偏差为 $\Delta_{R\max2}$ 。重复性误差取这两个最大偏差中较大的为 $\Delta_{R\max}$ ，再以满量程输出 y_{\max} 的百分比表示为：

$$\gamma_R = \frac{\Delta_{R\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1.3)$$

(4) 灵敏度与灵敏度误差。传感器在稳态标准条件下，输出的变化量 Δy 与引起该变化量的输入变化量 Δx 的比值称为灵敏度，用 K 表示，其表达式为：

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.4)$$

由此可见，线性传感器其特性曲线的斜率处处相同，灵敏度 K 是一常数。以拟合直线作为其特性曲线的传感器，也认为其灵敏度为一常数，与



1—正向行程特性；2—反向行程特性

图 1.14 重复特性示意图

输入量的大小无关。

由于某种原因，会引起灵敏度变化，产生灵敏度误差。灵敏度误差 γ_s 用相对误差表示为：

$$\gamma_s = \frac{\Delta K}{K} \times 100\% \quad (1.5)$$

(5) 分辨率与阈值。分辨率指传感器检测到被测量的最小增量。分辨力可用绝对值表示，也可用其与满量程之比的百分数表示。当被测量的变化小于分辨率时，传感器对输入量的变化无任何反应。

在传感器输入零点附近的分辨率称为阈值。对数字仪表而言，如果没有其他附加说明，一般可认为该仪表的最末位的数值就是该仪表的分辨率。

(6) 稳定性。稳定性包括稳定度和环境影响量两方面。稳定度是指传感器在所有条件均不变的情况下，能在规定的时间内维持其示值不变的能力。稳定度是以示值的变化量与时间长短的比值来表示的。例如，某传感器中仪表输出电压在 4h 的最大变化值为 1.2mV，则用 1.2mV/(4h)表示其稳定性。

环境影响量是指由于外界环境变化而引起的示值的变化量。示值变化由两个因素组成：零点漂移和灵敏度漂移。零点漂移是指在受外界环境影响后，已调零仪表的输出不再为零，而有一定漂移的现象，这在测量前是可以发现的，应重新调零，但在不间断测量过程中，零点漂移是附加在读数上的，因而很难发现。带微机的智能化仪表可以定时地自动暂时切断输入信号，测出此时的零点漂移值，恢复测量后从测量值中减去漂移值，相当于重新调零。灵敏度漂移使仪表的输入与输出的曲线斜率发生变比。

造成环境影响量的因素很多，要予以重视，使传感器对外界各种干扰有抵抗能力。

传感器的性能指标很多，要求一个传感器具有全面良好的性能指标，不仅会给设计、制造造成困难，而且在实用上也没有必要。因此，应根据实际需要与可能，在确保主要性能指标的基础上，放宽对次要性能指标的要求，以求得到高的性能价格比。表 1-2 给出了传感器的一些常用性能指标，它可作为检验、使用和评价传感器的依据。

表 1-2 传感器的一些常用性能指标

基本参数指标	量程指标	量程范围、过载能力等
	灵敏度指标	灵敏度、满量程输出、分辨率和输入输出阻抗等
	精度方面指标	精度（误差）、重复性、线性、滞后、灵敏度误差、阈值、稳定性及漂移等
	动态性能指标	固有频率、阻尼系数、频率范围、频率特性、时间常数、上升时间、响应时间、过冲量、衰减率、稳态误差、临界速度及临界频率等
环境参数指标	温度指标	工作温度、温度误差、温度漂移、灵敏度温度系数和热滞后等
	抗冲振指标	各向冲振容许频率、振幅值、加速度及冲振引起的误差等
	其他环境参数	抗潮湿、抗介质腐蚀及抗电磁场干扰能力等
可靠性指标		工作寿命、平均无故障时间、保险期、疲劳性能、绝缘电阻、耐压及反抗电弧性能等
其他指标	使用方面	供电方式（直流、交流、频率和波形等）、电压幅度与稳定度、功耗及各项分布参数等
	结构方面	外形尺寸、重量、外壳、材质及结构特点等
	安装连接方面	安装方式、馈线及电缆等

5. 传感器的选用

传感器的型号、品种繁多，即使是测量同一对象，可选用的传感器也较多。如何根据

测试目的和实际条件，正确合理地选用传感器，是一个需要认真考虑的问题。选择传感器主要考虑其静态特性、动态响应特性和测量方式等方面的问题，而静态特性又包括灵敏度、线性度、精度等指标，动态响应特性包括稳定性、快速性等指标。

(1) 灵敏度。一般来说，传感器灵敏度越高越好，因为灵敏度越高，传感器所能感知的变化量越小，即只要被测量有一微小变化，传感器就有较大的输出。但是，在确定灵敏度时，还要考虑以下几个问题：

① 当传感器的灵敏度过高时，对干扰信号也会很敏感。因此，为了既能使传感器检测到有用的微小信号，又能使噪声干扰小，要求传感器的信噪比 (S/N) 愈大愈好。

② 与灵敏度紧密相关的是量程范围。过高的灵敏度会影响其适用的测量范围。

③ 当被测量是向量时，情况就复杂些。如果是一个单向量，就要求传感器纵向灵敏度愈高愈好，而横向灵敏度愈低愈好；如果被测量是二维或三维的向量，那么还要求传感器的交叉灵敏度愈小愈好。

(2) 准确度和精密度。衡量测量结果优劣常用精确度来表示。精确度包括准确度和精密度。精密度指在同一条件下进行重复测量时，所得结果之间的差别程度，也叫重复性。传感器的随机误差小，精密度高，但不一定准确。

准确度是指测量结果与实际数值的偏离程度。同样，准确度高的传感器不一定精密。在选用传感器时，要着重考虑精密度，因为准确度可用某种方法进行补偿。精密度是传感器本身固有的。

(3) 动态范围和直线性。动态范围是由传感器本身决定的，线性和非线性相对应。若配用一般测量电路，线性很重要；若用微型计算机进行数据处理，则动态范围需要重点考虑。即使非线性很严重，也可用计算机等对其进行线性化处理。

(4) 响应速度和滞后性。对所使用的传感器，希望其动态响应快，时间滞后少，但这类传感器的价格相应就会偏高一些。

(5) 稳定性。影响传感器稳定性的因素是时间与环境。在选择传感器时，一般应注意两个问题。其一，根据环境条件选择传感器。例如，选择电阻应变式传感器时，应考虑到温度会影响其绝缘性，温度会产生零漂，长期使用会产生蠕变现象等。又如，对变极距型电容式传感器，环境温度的影响或油剂浸入间隙，会改变电容器的介质；光电传感器的感光表面有尘埃或水汽时，会改变感光性质。其二，工作环境，尤其是工业环境往往有各种干扰，一般希望能经受住高低温、湿度、磁场、电场、辐射、振动、冲击等恶劣环境的考验，但都有一定的适应限度。这一条往往成为选择传感器的关键。要创造或保持一个良好的环境，在要求传感器长期工作而不需经常更换或校准的情况下，应对传感器的稳定性有严格的要求。

(6) 测量方式。传感器在实际条件下的工作方式，也是选择传感器时应考虑的重要因素。例如，接触与非接触测量、破坏与非破坏性测量、在线与非在线测量等，条件不同，对测量方式的要求亦不同。

在机械系统中，对运动部件的被测参数（如回转轴的误差、振动、扭矩等），往往采用非接触测量方式。因为对运动部件采用接触测量时，有许多实际困难，如测量头的磨损、接触状态的变动、信号的采集等问题都不易妥善解决，容易造成测量误差。这种情况下采用电容式、涡流式、光电式等非接触式传感器就很方便；若选用电阻应变片，则需要

配备遥测应变仪。

在某些条件下，可以运用试件进行模拟试验，这时可进行破坏性检验。然而有时无法用试件模拟，因被测对象本身就是产品或构件，这时宜采用非破坏性检验方法，例如涡流探伤、超声波探伤、核辐射探伤以及声发射检测等。非破坏性检验可以直接获得经济效益，因此应尽可能选用非破坏性检测方法。

在线测试是与实际情况保持一致的测试方法。特别是对自动化过程的控制与检测系统，往往要求真实性与可靠性，必须在现场条件下才能达到检测要求。实现在线检测是比较困难的，对传感器与测试系统都有一定的特殊要求。例如，在加工过程中实现表面粗糙度的检测，以往的光切法、干涉法、触针法等都无法运用，取而代之的是激光、光纤或图像检测法。

(7) 其他方面。互换性是指传感器性能的一致性。值得指出的是，大多数传感器的性能一致性不理想，在修理或调换时要特别注意。

传感器使用一段时间后，会出现所谓老化现象，性能有所变化；或者即便无输入信号或输入信号不变，传感器的输出也会有某些变化，这都将影响传感器的可靠性，故要定期对其进行检验。

另外，传感器的输出信号形式也是必须考虑的。输出信号要和变送器（测量电路）相适应。若用微型计算机测量，最好选用脉冲输出型，这样可省去 A/D 转换器；若现场距仪表室较远，最好选用可以长距离传输而抗干扰能力强的电流输出型。输出电流国际上规定为 4~20mA，信号为 0 时对应 4mA，满输出时对应 20mA。

传感器及其应用是一门不断前进的实用科学技术。传感器的灵活性、可选择性极强。新型传感器层出不穷，新的测量技术日新月异，选好用好传感器是本课程所要求的基本技能之一。

6. 传感器标定与校准

新研制或生产的传感器需要对其性能进行全面的检定，经过一段时间储存或使用的传感器也需要对其性能进行复测。

所谓传感器的标定，是指在明确输入和输出的变换对应关系的前提下，利用某种标准或标准器具对传感器的静态特性指标或动态特性指标等进行标度。而将传感器在使用中或储存后进行的性能复测称为校准。校准的方法与标定方法本质相同。

标定的基本方法是，利用标准设备产生已知的非电量（如标准力、压力、位移等）作为输入量，输入待标定的传感器，然后将传感器的输出量与输入的标准量做比较，获得一系列标准数据或曲线。有时输入的标准量是利用一标准传感器检测而得到的，这时的标定实质是待标定传感器与标准传感器之间的比较。

传感器的标定系统一般由以下几个部分组成：

- (1) 被测非电量的标准发生器。如活塞式压力计、测力机、恒温源等。
- (2) 被测非电量的标准测试系统。如标准压力传感器、标准力传感器、标准温度计等。
- (3) 待标定传感器所配接的信号调节器和显示、记录器等。所配接的仪器亦作为标准测试设备使用，其精度是已知的。

为了保证各种量值的准确一致，标定应按计量部门规定的测试规程和管理办法进行。

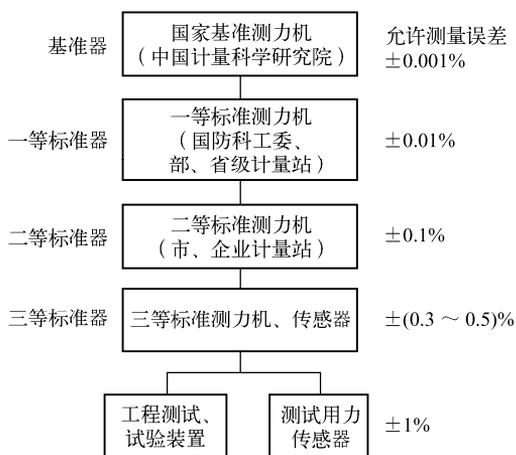


图 1.15 力值传递系统示意图

图 1.15 所示为标准装置部门规定的力值传递系统示意图。按此系统，只能用下一级标准装置检定下一级传感器及配套仪表。如果待标定传感器精度较高，可以跨级使用更高级的标准装置。

工程测试所用传感器的标定应在与其使用条件相似的环境下进行。有时为了获得较高的标定精度，可将传感器与配用的电缆、滤波器、放大器等测试系统一起标定。有些传感器在标定时还应注意规定的安装技术条件。

7. 测量误差与误差类型

在实际测量中，由于测量设备不准确、测量方法（手段）不完善、测量程序不规范及测量环境因素的影响，都会导致测量结果或多或少地偏离被测量的真值。测量结果与被测量真值之差就是测量误差。测量误差的存在是不可避免的，也就是说：“一切测量都具有误差，误差自始至终存在于所有科学实验之中”，这就是误差公理。人们研究测量误差的目的就是寻找产生误差的原因，认识误差的规律、性质，进而找出减小误差的途径与方法，以求获得尽可能接近真值的测量结果。下面介绍一些测量误差的基本术语。

(1) 真值。被测量本身所具有的真正值称之为真值。真值是一个理想的概念，通常很难知道。

(2) 指定真值。由于真值是一个理想值，通常很难知道，所以一般用指定真值来代替真值。指定真值指由国家设立各种尽可能维持不变的实物标准（或基准），以法令的形式指定其所体现的量值作为计量单位的指定值，指定真值也叫约定真值。

(3) 实际值。实际测量中，不可能都直接与国家基准相比对，所以国家通过一系列的各级实物计量标准构成量值传递网，把国家基准所体现的计量单位逐级比较传递到日常工作仪器或量具上去。在每一级的比较中，都以上一级标准所体现的值作为准确无误的值，通常称为实际值，也叫相对真值。

(4) 标称值。测量器具上标定的数值称为标称值。如标准砝码上标出的 1kg，标准电阻上标出的 1Ω ，标准信号发生器度盘上标出的输出正弦波的频率 100kHz 等。由于制造和测量精度不够以及环境等因素的影响，标称值并不一定等于它的真值或实际值。为此，在标出测量器具的标称值时，通常还要标出它的误差范围或准确度等级。如 XD7 型低频信号发生器频率刻度的工作误差 $\leq \pm 3\% \pm 1\text{Hz}$ 。如果在额定工作条件下该仪器频率刻度是 100Hz，这就是它的标称值，而实际值是 $100 \pm 100 \times 3\% \pm 1\text{Hz}$ ，即实际值在 96Hz 到 104Hz 之间。

(5) 示值。由测量器具指示的被测量值称为测量器具的示值，也称为测量值。它包括数值和单位。一般地说，示值与测量仪表的读数有区别，读数是仪器刻度盘上直接读到的数据。例如，以 100 分度表示 50mA 的电流表，当指针指在刻度盘上的 50 处时，读数是 50，而电流值是 25mA。为便于核查测量结果，在记录测量数据时，一般应记录仪表量程、读数和示值，对于数字显示仪表，通常示值和读数是统一的。

测量误差的分类有多种方法，以下是几种常用的分类方法。

测量误差按其性质可分为系统误差、随机误差和粗大误差：

(1) 系统误差。系统误差是在一定的测量条件下，测量值中含有固定不变或按一定规律变化的误差。主要由以下几方面因素引起：材料、零部件及工艺缺陷；环境温度、湿度、压力的变化以及其他外界干扰等。其变化规律服从某种已知函数，它表明了一个测量结果偏离真值或实际值的程度，系统误差越小，测量就越正确，所以经常用正确度来表征系统误差的大小。

(2) 随机误差。随机误差又称偶然误差，是由很多复杂因素的微小变化的总和所引起的，其变化规律未知，因此分析起来比较困难。但是随机误差具有随机变量的一切特点，在一定条件下服从某一统计规律，一般为正态分布。因此，经过多次测量后，对其总和可以用统计规律来描述，可以从理论上估计对测量结果的影响。

(3) 粗大误差。粗大误差是指在一定条件下测量结果显著地偏离其实际值所对应的误差。在测量及数据处理中，如果发现某次测量结果所对应的误差特别大或特别小时，应认真判断误差是否属于粗大误差，如果属于粗大误差，该值应舍去不用。

测量误差按被测量随时间变化的速度可分为静态误差、动态误差：

(1) 静态误差。静态误差是指在被测量随时间变化很慢的过程中，被测量随时间变化很缓慢或基本不变时的测量误差。

(2) 动态误差。动态误差是指在被测量随时间变化很快的过程中，测量所产生的附加误差。动态误差是由于有惯性、有纯滞后，因而不能让输入信号的所有成分全部通过；或者输入信号中不同频率成分通过时受到不同程度衰减时引起的。

测量误差按使用条件可分为基本误差、附加误差：

(1) 基本误差。基本误差是指测试系统在规定的标准条件下使用时所产生的误差。所谓标准条件，一般是测试系统在实验室标定刻度时所保持的工作条件，如电源电压（ $220 \pm 5\%$ ）V，温度（ 20 ± 5 ） $^{\circ}\text{C}$ ，湿度小于 80%，电源频率 50Hz 等。

基本误差是指测试系统在额定条件下工作时所具有的误差，测试系统的精确度是由基本误差决定的。

(2) 附加误差。当使用条件偏离规定的标准条件时，除基本误差外还会产生附加误差。例如，由于温度超过标准引起的温度附加误差以及使用电压不标准而引起的电源附加误差等，这些附加误差使用时叠加到基本误差上去。

8. 误差表示方法与测量数据处理

测量误差可采用绝对误差、相对误差和容许误差来表示。

(1) 绝对误差。绝对误差表示为示值与被测量真值之差，设某一被测量的测量值为 x ，真值为 x_0 ，绝对误差则为 Δx ：

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.6)$$

测量值 x ，具体应用中可以用测量仪表的示值；真值 x_0 ，在实际测量中，常用某一被测量多次测量的平均值或上一级标准仪表测得的示值作为约定真值，代替真值 x_0 。

对于绝对误差，应注意下面几个特点：

(1) 绝对误差是有单位的量，其单位与测量值和实际值相同。

(2) 绝对误差是有符号的量，其符号表示出测量值与实际值的大小关系，若测量值较实际值大，则绝对误差为正值；反之为负值。

(3) 测量值与实际值之间的偏离程度和方向通过绝对误差来体现，但仅用绝对误差通常不能说明测量质量的好坏。例如，人体体温在 37°C 左右，若测量绝对误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，这样的测量质量不能被常人接受；如果测量 1400°C 左右的炉温，绝对误差能保持 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，这样的测量质量就令人满意了。因此，为了表明测量结果的准确程度，一种方法是将测得值与绝对误差一起列出，如上面的例子可以写成 $37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 和 $1400^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ；另一种方法就是用后面介绍的相对误差来表示。

在实际测量中，还经常用到修正值这个概念，其绝对值与绝对误差 Δx 相等但符号相反，通常用符号 C 表示为：

$$C = -\Delta x = x_0 - x \quad (1.7)$$

修正值给出的方式不一定是具体的数值，也可以是一条曲线、公式或数表，利用修正值和仪表示值，可得到被测量实际值：

$$x_0 = x + C \quad (1.8)$$

智能化仪器的优点之一就是可利用内部的微处理器存储修正值，并利用式 (1.8) 自动对被测量实际值进行修正。

(2) 相对误差。相对误差用来说明测量精度的高低，相对误差有：

① 实际相对误差。实际相对误差是用绝对误差 Δx 与被测量约定真值 x_0 的百分比来表示的相对误差：

$$r_{x_0} = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.9)$$

② 示值相对误差。示值相对误差定义为绝对误差 Δx 与仪器示值 x 的百分比值：

$$r_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.10)$$

在误差相对较小时， r_{x_0} 与 r_x 相差不大，无须区分，但在误差较大时，两者不能混淆。

③ 引用相对误差（或满度相对误差）。满度相对误差是用仪器量程内最大绝对误差 Δx_m 与测量仪器满度值 x_m 的百分比值：

$$r_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.11)$$

满度相对误差也称为满度误差或引用误差，通过满度误差实际上给出了仪表各量程内绝对误差的最大值：

$$\Delta x_m = r_m x_m \quad (1.12)$$

引用误差可以评价测量仪表精确度等级，它客观正确地反映了测量仪表的精确度高低。国际上规定，电测仪表的准确度等级 S 就是按满度相对误差分级的，按 r_m 大小依次划分成 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 七级。因此，准确度等级 S 与满度相对误差 r_m 有以下关系：

$$|r_m| \leq S\% \quad (1.13)$$

例 1-1 某电压表 $S=1.5$ ，试标出它在 $0 \sim 100\text{V}$ 量程中的最大绝对误差。

解：在 $0 \sim 100\text{V}$ 量程内上限值， $x_m = 100\text{V}$ ，而 $S=1.5$ ，则有

$$\Delta x_m = r_m x_m = \pm \frac{1.5}{100} \times 100 = \pm 1.5\text{V}$$

一般而言，测量仪表在同一量程不同示值处的绝对误差实际上未必处处相等，但对使用者来讲，在没有修正值可利用的情况下，只能按最坏情况处理，即认为仪器在同一量程各处的绝对误差是个常数且等于 Δx_m ，人们把这种处理叫做误差的整量化。由示值相对误差和满度相对误差表达式可以看出，为了减小测量中的示值误差，在进行量程选择时应尽可能使示值接近满度值，一般以示值不小于满度值的 $2/3$ 为宜。但这一结论只适合于正向刻度的一般电压表、电流表等类型的仪表，而不适合于测量电阻的普通型欧姆表，因为这类欧姆表是反向刻度，且刻度是非线性的。可以证明，此种情况下示值与欧姆表的中值接近时，测量结果的准确度最高。

例 1-2 某 1.0 级电流表，满度值 $x_m = 100V$ ，求测量值分别为 $x_1 = 100\mu A$ ， $x_2 = 80\mu A$ ， $x_3 = 20\mu A$ 时的绝对误差和示值相对误差。

解：由满度相对误差表达式可得绝对误差为：

$$\Delta x_m = r_m x_m = \pm \frac{1}{100} \times 100 = \pm 1\mu A$$

绝对误差是不随测量值改变的，而测量值分别为 $100\mu A$ 、 $80\mu A$ 、 $20\mu A$ 时的示值相对误差各不相同，分别为：

$$r_{x_1} = \frac{\Delta x}{x_1} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_1} \times 100\% = \frac{\pm 1}{100} \times 100\% = \pm 1\%$$

$$r_{x_2} = \frac{\Delta x}{x_2} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_2} \times 100\% = \frac{\pm 1}{80} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

$$r_{x_3} = \frac{\Delta x}{x_3} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_3} \times 100\% = \frac{\pm 1}{20} \times 100\% = \pm 5\%$$

可见在同一量程内，测得值越小示值相对误差越大。由此应当注意到，测量中所用仪表的准确度并不是测量结果的准确度，只有在示值与满度值相同时二者才相等，否则测得值的准确度数值将低于仪表的准确度等级。

测量结果的数据处理可以按照下列步骤进行：

(1) 将一系列等精度测量数据 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 按先后顺序列成表格（在测量时应尽可能消除系统误差，其消除方法可参考相关书籍）。

(2) 按以下方法求出测量数据 x_i 的算术平均值 \bar{x} 。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1.14)$$

(3) 计算出各测量值的残余误差 $v_i (v_i = x_i - \bar{x})$ ，并列入表中的每个测量数值旁。

(4) 检查 $\sum_{i=1}^n v_i^2 = 0$ 的条件是否满足。若不满足，说明计算有错误，需再计算。

(5) 在每个残余误差旁列出 v_i^2 ，然后按以下方法求出均方根误差 σ 。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1.15)$$

(6) 判别是否存在粗大误差（即是否有 $|v_i| > 3\sigma$ 的数），若有，应舍去此读数 x_i ，然后从第 (2) 步重新计算。

(7) 在确定不存在粗大误差 (即 $|v_i| \leq 3\sigma$) 后, 按下式求出算术平均值的标准差 $\bar{\sigma}$ 。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.16)$$

(8) 写出最后的测量结果 $x = \bar{x} \pm 3\bar{\sigma}$, 并注明置信概率 (99.7%)。

1.2.2 项目 2 技能训练 传感器性能评估、校准与误差处理

1. 任务 1 采用合适方法查找传感器技术说明书

某公司采购人员为本公司研发部门技术人员采购了一批传感器, 型号为: LM35AH (温度传感器), FH-S03 (湿度传感器), TP805 (光电开关), 但这些传感器没有技术说明书。研发部门经理请刚来工作的小王查一查这些传感器的技术说明书, 小王正在发愁。请你帮助小王查出这些传感器说明书。

任务 1 分析。传感器使用之前, 一定要了解它的技术性能指标。技术性能指标可以从以下几个方面获得:

- (1) 购买时直接向供货单位索取。
- (2) 查阅相关的技术手册。
- (3) 查阅相关的传感器网站。

(4) 在互联网通过搜索引擎搜索, 注意关键词的选择。关键词可以按照不同的传感器分类选择, 如按照检测量不同, 传感器可分为温度传感器、压力传感器、振动传感器等; 如按照工作原理不同, 传感器可分为热电偶传感器、热电阻传感器、热敏电阻传感器等。关键词也可以选择传感器的型号。总之, 用引擎搜索需要反复试凑。

2. 任务 2 利用传感器静态特性参数估算一些性能指标

有一压力传感器校准数据如表 1-3 所列。要求根据这些数据求最小二乘法线性度的拟合直线方程, 并确定该传感器的线性度。

表 1-3 压力传感器校准数据表

			0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
校准数据	1	正行程	0.0020	0.2015	0.4005	0.6000	0.7995	1.0000
		反行程	0.0030	0.2020	0.4020	0.6010	0.8005	
	2	正行程	0.0025	0.2020	0.4010	0.6000	0.7995	0.9995
		反行程	0.0035	0.2030	0.4020	0.6015	0.8005	
	3	正行程	0.0035	0.2020	0.4010	0.6000	0.7995	0.9990
		反行程	0.0040	0.2030	0.4020	0.6010	0.8005	

任务 2 分析。传感器的线性度 (非线性误差) 是传感器重要的性能指标, 但要估算非线性误差首先要对测试数据进行直线拟合。不同的拟合直线, 非线性误差也不同。选择拟合直线的主要出发点, 应是获得最小的非线性误差。

最简单的是端基线性度的拟合直线，如图 1.16 所示。只需校正传感器的零点和对应于最大输入量 x_{\max} 的最大输出值 y_{FS} 点，将这两点连成直线便得到该传感器的拟合直线，此法简单方便，但精度不高。

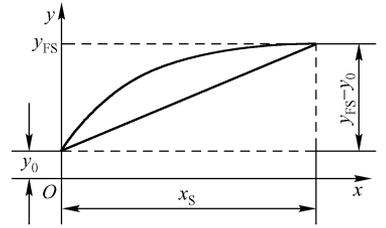


图 1.16 端基线性度示意图

根据误差理论，采用最小二乘法来确定拟合直线，其拟合精度最高。令输出量 y 与输入量 x 满足下述关系式：

$$y = a + Kx \quad (1.17)$$

式中， a 和 K 的确定条件是使实际测量值 y_i 和由方程式 (1.17) 给出的值 y 之间的偏差为极小。假定实际校准测试点有 n 个，则第 i 校准数据 y_i 与拟合直线上相应值之间的残差为：

$$\Delta_i = y_i - (a + Kx_i) \quad (1.18)$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值，也就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 对 K 和 a 的一阶偏导数等于零，从而求 a 和 K 的表达式：

$$\frac{\partial}{\partial K} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - Kx_i - a)(-x_i) = 0 \quad (1.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - Kx_i - a)(-1) = 0 \quad (1.20)$$

从以上两式可求出 K 和 a 为：

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1.21)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1.22)$$

在获得 K 和 a 值后代入式 (1.17) 即可得到拟合直线。

根据上述分析，为了求得直线方程式，必须先算出式 (1.18) 中各数值之和。从所给数据知道，校准次数 $n = 33$ 。所求各值如下：

$$\sum_{i=1}^{33} x_i = 37.5$$

$$\sum_{i=1}^{33} y_i = 15.0425$$

$$\sum_{i=1}^{33} x_i y_i = 25.5168$$

$$\sum_{i=1}^{33} x_i^2 = 63.75$$

把上述数据代入式 (1.21) 和式 (1.22)，得到：

$$K = 0.39850$$

$$a = 0.00298$$

于是，得到最小二乘法的拟合直线方程为：

$$y = 0.00298 + 0.39850x$$

再将各个输入值 x_i 代入上式，就得到理论拟合直线的各点数值，见表 1-4。

表 1-4 理论拟合直线各点数值

输入值	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
输出值	0.00298	0.2022	0.4015	0.6007	0.8000	0.9992

按表 1-4 中数据和上述数据绘出曲线，可依次找出输出输入校准值与上述理论拟合直线相应点数值之间的最大偏差 $\pm\Delta_{\max}$ 。根据式 (1.1) 便可求出该传感器的非线性误差。

3. 任务 3 设计一套测力传感器校准方案

某公司 5 年前购买了一套压力自动检测系统，由于公司业务发展，最近又购买了一套同样的系统。但是测试人员发现两个系统测试结果总是不一样，为此，测试人员向公司有关领导反映了这一问题。公司确定把这一问题反映给产品提供单位。产品提供单位详细询问了有关情况后指出，问题的原因很可能是 5 年前购买的检测系统中的应变式测力传感器出现误差，解决的办法是需要对该传感器进行一次校准。请你设计一套校准方案。

任务 3 分析。传感器校准有静态校准和动态校准。静态校准主要用于检测、测试传感器（或传感器系统）的静态特性指标，如静态灵敏度、非线性、回差、重复性等。动态校准主要用于检验、测试传感器（或传感器系统）的动态特性，如动态灵敏度、频率响应和固有频率等。该应变式测力传感器仅做静态校准就可以。

进行静态校准首先要设计静态校准系统。图 1.17 所示为应变式测力传感器静态校准系统组成框图。图中测力机产生标准力，高精度稳压电源经精密电阻箱衰减后向传感器提供稳定电压，其值由数字电压表读取，传感器的输出电压由另一数字电压表指示。

由图 1.17 所示可知，静态校准系统的关键在于被测非电量的标准发生器（即图 1.7 中所示的测力机）及标准测试系统。测力机可以由砝码产生标准力的基准测力机、杠杆式测力机或液压式测力机。图 1.18 所示是由液压缸产生测力并由测力计或标准力传感器读取力值的校准装置。测力计读取力值的方式有利用百分表读数、光学显微镜读数与激光干涉仪读数等。

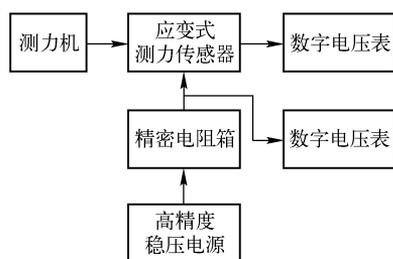


图 1.17 应变式测力传感器静态校准系统

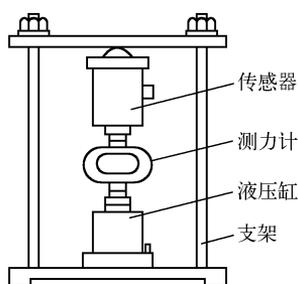


图 1.18 测力校准装置

对传感器进行动态校准，需要对它输入一标准激励信号。常用的标准激励信号分为两类：一是周期函数，如正弦波、三角波等，以正弦波为常用；一是瞬变函数，如阶跃波、半正弦波等，以阶跃波最为常用。

上述介绍了静态与动态校准的基本概念和方法。由于传感器种类繁多，校准设备与方法各不相同，各种传感器的校准项目也远不止上述几项。此外，随着技术的不断进步，标准