

绪论

21 世纪是信息的世纪,面对各种各样的海量的信息,不仅需要传感器能捕捉、识别各种物理信息,还需要网络层对收集到的数据进行分类和管理,更需要一个强大的数据处理中心。为了应对这些问题,物联网(Internet of Things)的概念应运而生。物联网是继计算机、互联网的应用与普及之后蓬勃兴起的世界信息技术革命的第三次浪潮,是 20 世纪人类社会以信息技术应用为核心的技术。纵观全球,欧盟、美国、日本等都十分重视物联网的发展,我国对“物联网”的关注和重视并不亚于其他国家,物联网已被正式列为国家五大新兴战略性新兴产业之一。

物联网是整个的智能网络,传感器则是其一个重要的组成部分。如果将物联网比作一个人,那么传感器就是人肌体的神经末梢,是全面感知外界的最核心元件。传感器将外界的各种信息转换为可测量、可计算的电信号,经过设置的程序输出结果,发送指令使各种事物可以不由人控制而只是由外界条件的变化自觉地调整行为。因此加强传感及检测技术的学习与研究具有重要意义。

1. 传感检测技术的发展历史

传感检测技术是现代科技的前沿技术,发展迅猛,同计算机技术与通信技术一起被称为信息技术的三大支柱,许多国家已将传感技术列为与通信技术和计算机技术同等重要的位置。现代传感检测技术具有巨大的应用潜力,拥有广泛的开发空间,发展前景十分广阔。

传感检测技术是在 20 世纪的中期问世的。在那时,与计算机技术和数字控制技术相比,传感技术的发展都落后于它们,不少先进的成果仍停留在实验研究阶段,并没有投入到实际生产与应用中,转化率比较低。在国外,传感技术主要是在各国不断发展与提高的工业化浪潮下诞生的,并在早期多用于国家级项目的科研研发以及各国军事技术、航空航天领域的试验研究。随着各国机械工业、电子、计算机、自动化等相关信息化产业的迅猛发展,以日本和欧美等西方发达国家为代表的传感器研发及其相关技术产业的发展已在国际市场中逐步占有重要的份额。

我国从 20 世纪 60 年代开始了传感技术的研究与开发,经过从“六五”到“九五”的国家

攻关,在传感器研究、开发、设计、制造、可靠性改进等方面获得长足的进步,初步形成了传感器研究、开发、生产和应用的体系,并在数控机床攻关中取得了一批可喜的、为世界瞩目的发明专利与工况监控系统或仪器的成果。但从总体上讲,它还不能适应我国经济与科技的迅速发展,我国不少传感器、信号处理和识别系统仍然依赖进口。同时,我国传感技术产品的市场竞争力优势尚未形成,产品的改进与革新速度慢,生产与应用系统的创新与改进少。

2. 传感器与传感检测技术现状

传感器(transducer/sensor)是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。

目前传感器产品的门类品种繁多,用于流程工业的主要有温度传感器、压力传感器、重量传感器、流量传感器、液位传感器、氧敏传感器、力敏传感器、气敏传感器、分析仪表等,用于机械工业的还有开关类的接近/定位传感器、安全门开关等安全传感器、旋转编码器、视觉传感器、速度传感器、加速度传感器等。目前国内传感器共分 10 大类,24 小类,6 000 个品种。国外品种较多,如美国约有 17 000 种传感器,所以我国发展传感器品种的范围很宽广。中国传感器的市场近几年一直持续增长,增长速度超过 15%,2003 年销售额为 186 亿元,同比增长 32.9%。世界非军用传感器市场 1998 年为 325 亿美元,平均增长率为 9%,预计 2008 年将增加到 506 亿美元。2003 年中国传感器应用四大领域为工业及汽车电子产品、通信电子产品、消费电子产品专用设备,其中工业和汽车电子产品占市场份额的 33.5%。国内传感器和检测仪表生产虽有发展,但这远不能跟上形势的要求。改革开放以来,我国引进了西门子、横河、霍尼韦尔、欧姆龙、邦纳等传感器生产厂商,为最终用户和工业设备制造厂带来了很大的便利。各国传感器生产和研发的规模不断扩大,美国约有 1 300 家生产和开发传感器的厂家,100 多个研究院所和院校,日本有 800 家厂商。我国近年建立了传感技术国家重点实验室、微米/纳米国家重点实验室等研发基地,初步建立了敏感元件和传感器产业,2000 年总产量超过 13 亿只,目前我国已有 1 688 家从事传感器的生产和研发的企业,其中从事 MEMS 研制生产的有 50 多家,到“十五”末,敏感元件和传感器年总产量已达到 20 亿只。

传感检测技术包括敏感机理、敏感材料、工艺设备和计测技术 4 个方面,约有 30 多种技术。随着微电子技术的发展,传感技术发展很快,我国研发的力量尚需大量投入,特别要加强具有自主知识产权的传感器的开发、科研成果的转化及传感器生产产业化等。在批量生产情况下,控制传感器产品性能(主要是稳定性、可靠性),使之合格率很高,就需要有先进的制造工艺和自动化水平很高的工艺设备,我国应在开发专用工艺设备上下功夫,解决传感器生产产业化的“瓶颈”问题。在传感器的应用上,特别是新型传感器的应用上,还没大力推广,改革开放创造了有利条件,各种工业设备应用了先进的传感器,这扩大了传感器市场,也使我国新型传感器生产产业化有了动力。我国在传感器生产产业化过程中,应该兼顾引进国外技术和自主创新两方面。在引进国外先进技术中,可以提高自己的技术,同时也满足了国内市场需求,形成传感器生产产业规模。如横河公司最近发布的 EJX 多变量变送器,就是个可以考虑引进技术的例子。EJX 多变量变送器精度高(0.025%),智能化程度高,采用现场总线技术,可把质量流量、介质压力及导管堵塞、诊断、蒸气伴热诊断和孔板磨损情况等多种变量和信息经现场总线传输给中央控制室,对保证生产和提供设备维护信息、保证安

全运行都很有利。这种新型变送器的发展,配合了自动化系统管控一体化的变革,只有信息源头能力强了,信息丰富了,才能使信息化更好促进生产力发展。

3. 传感器与传感检测技术发展

随着信息技术的发展,当前传感器及其检测系统正向着微小型化、智能化、多功能化和网络化的方向发展。今后,随着 CAD 技术、MEMS 技术、信息理论及数据分析算法的继续发展,未来的传感器检测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。在当今各种新兴科学技术呈辐射状广泛渗透的社会,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。

传感检测技术的特点集中表现在它是集知识密集性、功能智能性、测试精确性、品种庞杂性、内容离散性、工艺复杂性和应用广泛性为一体的综合型技术。

4. 课程性质、主要任务及要求

本课程是一门专业课程,具有知识面广、实践性强的特点,通过本课程的学习,应该达到以下几点要求:

(1) 基本了解传感技术是怎样一门学科,对传感检测系统的设计有一个整体的认识;了解传感器件、传感器技术与传感检测技术之间的相互关系;掌握常用传感器的工作原理及在检测系统中的应用,对传感技术在信息技术应用中的重要性有一个较为系统的认识。

(2) 具有根据被测对象及检测要求合理选用传感器及相应测量电路的能力,并能够构建相应的测控系统;了解和掌握常用物理量,如位移、速度、力、温度、气体等的检测方法,并能够分析典型测控系统中传感器的结构组成、应用电路、系统构成方法、检测效果等。

(3) 了解传感技术与计算机技术、通信技术及微电子技术等相关技术的结合现状和发展趋势,从而提高对引进设备的自动化检测技术、智能仪器仪表的消化和吸收能力。

(4) 在课堂教学的基础上具备一定的自学能力。

此外,在学习本课程的过程中应该努力掌握其基本规律。首先对教材中提出的概念、原理等应该搞懂并理解它;对传感器、应用测量电路、检测手段及应用等的学习,应从基本原理开始,进而搞清其功能、应用条件及要求等;在检测系统设计中,需要分析传感器特性、检测系统组成、接口方式、信息传递方式和提取方法、信息处理方法等。在实践教学中,应该多动手、多动脑,努力掌握相应技能。

第1章

传感与检测技术基础

本章主要介绍传感技术、传感器的基本概念、基本特性、组成及分类等,了解检测电路及检测系统的基本组成及信号流程等。

1.1 传感技术及传感器概述

学习目标

1. 了解和掌握传感技术、传感器的基本概念。
2. 了解和掌握传感器的基本组成、分类及基本特性。

1.1.1 传感技术及传感器的基本概念

传感技术是关于从自然信源获取信息,并对其进行处理(变换)和识别的一门多学科交叉的现代科学与工程技术,它涉及传感器(又称换能器)、信息处理和识别的规划、设计、开发、制/建造、测试、应用及评价改进等活动。

传感技术获取信息要靠各类传感器,主要包括各种物理量、化学量或生物量的传感器。按照信息论的凸性定理,传感器的功能与品质决定了传感系统获取自然信息的信息量和信息质量,是高品质传感技术系统的构造第一要素。信息处理包括信号的预处理、后置处理、特征提取与选择等。识别的主要任务是对处理过的信息进行辨识与分类,它利用被识别(或诊断)对象与特征信息间的关联关系模型对输入的特征信息集进行辨识、比较、分类和判断。因此,传感技术遵循信息论和系统论,包含了众多的高新技术,被众多的产业广泛采用,它也是现代科学技术发展的基础条件。传感技术同计算机技术和通信技术一起被称为信息技术的三大支柱,是衡量一个国家信息化程度的重要标志。

传感器是人类五官的延长,又称为电五官。国家标准 GB 7665—2005 对传感器的定义是:“能感受规定的被测量件并按照一定的规律(数学函数法则)转换成可用信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成”。

在工程领域,传感器(transducer/sensor)是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。

现代传感器的特点包括微型化、数字化、智能化、多功能化、系统化、网络化,它是实现自动检测和自动控制的首要环节。传感器的产生和发展,让物体有了触觉、味觉和嗅觉等感官,让物体慢慢变得活了起来。

提示 物联网在中国受到了全社会极大的关注,物联网的核心器件是传感器,现代社会传感器早已渗透到工业生产、智能家居、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程,甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说,从茫茫的太空,到浩瀚的海洋,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。

1.1.2 传感器的组成与分类

1. 传感器组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、变换电路和辅助电源 4 部分组成,如图 1-1 所示。

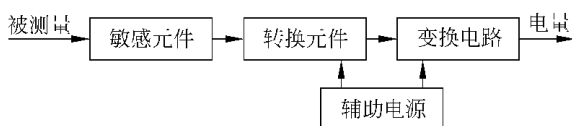


图 1-1 传感器组成结构图

敏感元件直接感受被测量,并输出与被测量有确定关系的物理量信号。转换元件将敏感元件输出的物理量信号转换为电信号。变换电路负责对转换元件输出的电信号进行放大调制。转换元件和变换电路一般需要辅助电源供电。

2. 传感器分类

传感器按其用途可分为:压力敏和力敏传感器、位置传感器、液位传感器、能耗传感器、速度传感器、加速度传感器、射线辐射传感器、热敏传感器等。

传感器按其原理可分为:振动传感器、湿敏传感器、磁敏传感器、气敏传感器、真空度传感器、生物传感器等。

传感器按其输出信号可分为:

- (1) 模拟传感器:将被测量的非电学量转换成模拟电信号。
- (2) 数字传感器:将被测量的非电学量转换成数字输出信号(包括直接和间接转换)。
- (3) 膺数字传感器:将被测量的信号量转换成频率信号或短周期信号的输出(包括直接或间接转换)。
- (4) 开关传感器:当一个被测量的信号达到某个特定的阈值时,传感器相应地输出一个设定的低电平或高电平信号。

传感器按其制造工艺可分为:

- (1) 集成传感器:用标准的生产硅基半导体集成电路工艺技术制造,通常还将用于初步处理被测信号的部分电路也集成在同一芯片上。
- (2) 薄膜传感器:是通过沉积在介质衬底(基板)上的、相应敏感材料的薄膜形成的。

使用混合工艺时,同样可将部分电路制造在此基板上。

(3) 厚膜传感器:利用相应材料的浆料涂覆在陶瓷基片上制成,基片通常是 Al_2O_3 制成的,然后进行热处理,使厚膜成形。

(4) 陶瓷传感器:采用标准的陶瓷工艺或其某种变型工艺(溶胶、凝胶等)生产。完成适当的预备性操作之后,已成形的元件在高温中进行烧结。厚膜和陶瓷传感器这两种工艺之间有许多共同特性,在某些方面,可以认为厚膜工艺是陶瓷工艺的一种变型。每种工艺技术都有自己的优点和不足。由于研究、开发和生产所需的成本投入较低,以及传感器参数的高稳定性等原因,采用陶瓷和厚膜传感器比较合理。

传感器按其测量目的可分为:

(1) 物理型传感器:利用被测量物质的某些物理性质可发生明显变化的特性制成的。

(2) 化学型传感器:利用能把化学物质的成分、浓度等化学量转化成电学量的敏感元件制成的。

(3) 生物型传感器:利用各种生物或生物物质的特性制成的,用以检测与识别生物体内化学成分的传感器。

传感器按其构成可分为:

(1) 基本型传感器:一种最基本的单个变换装置。

(2) 组合型传感器:由不同单个变换装置组合而构成的传感器。

(3) 应用型传感器:基本型传感器或组合型传感器与其他机构组合而构成的传感器。

传感器按其作用形式可分为:

(1) 主动型传感器:又有作用型和反作用型。此种传感器对被测对象能发出一定探测信号,能检测探测信号在被测对象中所产生的变化,或者由探测信号在被测对象中产生某种效应而形成信号。检测探测信号变化方式的称为作用型,检测产生响应而形成信号方式的称为反作用型。雷达与无线电频率范围探测器是作用型实例,而光声效应分析装置与激光分析器是反作用型实例。

(2) 被动型传感器:只是接收被测对象本身产生的信号,如红外辐射温度计、红外摄像装置等。

提示 常将传感器的功能与人类 5 大感觉器官相比拟,如光敏传感器为视觉,声敏传感器为听觉,气敏传感器为嗅觉,化学传感器为味觉,流体传感器为触觉。

1.1.3 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指传感器的输出与输入之间的关系特性。传感器所测量的非电量一般有 2 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可分为静态特性和动态特性。为了降低或消除传感器在测量控制系统中的误差,传感器必须具有良好的静态和动态特性,才能使信号(或能量)按规律准确地转换。

1. 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指传感器在静态工作条件下的输入输出特性。静态数学模型是指

在静态信号作用下(即输入量对时间 t 的各阶导数等于 0)得到的数学模型。所谓静态工作条件是指传感器的输入量恒定或缓慢变化而输出量也达到相应的稳定值的工作状态,这时,输出量为输入量的确定函数。若在不考虑滞后、蠕变的条件下,或者传感器虽然有迟滞及蠕变等但仅考虑其理想的平均特性时,传感器的静态模型的一般式在数学理论上可用 n 次代数方程式表示,即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中: x ——传感器的输入量,即被测量;

y ——传感器的输出量,即测量值;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——传感器线性灵敏度;

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项的待定常数。

$a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ 决定了特性曲线的形状和位置,一般通过传感器的校准试验数据经曲线拟合求出,它们可正可负。

在研究其特性时,可先不考虑零位输出。根据传感器的内在结构参数不同,它们各自可能含有不同项数形式的数学模型。理论上为了研究方便,式(1-1)可能有以下 4 种情况,如图 1-2 所示。这种表示输出量与输入量之间的关系曲线称为特性曲线。

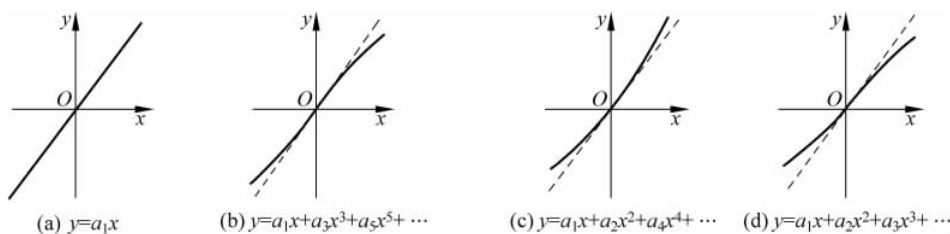


图 1-2 传感器的静态特性

(1) 理想的线性特性通常是所希望的传感器应具有的特性,只有具备这样的特性才能正确无误地反映被测量的真值,这时,传感器的数学模型如图 1-2(a) 所示。由图 1-2(a) 可知

$$a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$$

因此得到

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

因为直线上任何点的斜率均相等,所以传感器的灵敏度为

$$S = \frac{y}{x} = a_1 = \text{常数}$$

(2) 仅有偶次非线性项,如图 1-2(c) 所示。其数学模型为

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_4x^4 + \cdots \quad (1-3)$$

方程仅包含一次方项和偶次方项,因为它没有对称性,所以线性范围较窄。一般传感器设计很少采用这种特性。通常,实际特性可能不过零点。

(3) 仅有奇次非线性项,如图 1-2(b) 所示。其数学模型为

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots \quad (1-4)$$

具有这种特性的传感器一般在输入量 x 相当大的范围内具有较宽的准线性,这是较接近理想线性的非线性特性,它相对坐标原点对称的,即 $y(-x) = -y(x)$,所以它具有相当宽的近似线性范围。通常,实际特性也可能不过零点。

(4) 一般情况下,传感器的数学模型应包括多项式的所有项,即

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots \quad (1-5)$$

如图 1-2(d)所示。这是考虑了非线性和随机等因素的一种传感器特性。

当传感器的特性出现了图 1-2(b)、(c)、(d)所示的非线性的情况时,就必须采用线性补偿措施。

传感器及其元部件的静态特性方程除在多数情况下可用代数多项式表示以外,在一些情况下则以非多项式的函数形式表示更为合适,如双曲线函数、指数函数、对数函数等。

传感器的静态特性是通过各静态性能指标表示的,它是衡量传感器静态性能优劣的重要依据。静态特性是传感器应用的重要依据,传感器的出厂说明书中一般都列有其主要的静态性能指标的额定数值。

传感器可完成将某一输入量转换为可用信息,因此,总是希望输出量能不失真地反映输入量。在理想情况下,输出输入给出的是线性关系,但在实际工作中,由于非线性(高次项)和随机变化量等因素的影响,不可能是线性关系。所以,衡量一个传感器检测系统静态特性的主要技术指标有灵敏度、分辨率、线性度、迟滞(滞环)、重复性等,以下将分别介绍。

1) 灵敏度(sensitivity)

灵敏度(静态灵敏度)是传感器或检测仪表在稳态下输出量的变化量 Δy 与输入量的变化量 Δx 之比,用 K 表示,有

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-6)$$

如果输入输出特性为线性的传感器或仪表,则有

$$K = \frac{y}{x} \quad (1-7)$$

如果检测系统的输入输出特性为非线性,则灵敏度不是常数,而是随输入量的变化而改变,应以 dy/dx 表示传感器在某一工作点的灵敏度。实际使用中,由于需要外加辅助电源的传感器的输出量与供给传感器的电源电压有关,因此,其灵敏度的表达式往往需要包括电源电压的因素。灵敏度是一个有单位的量,其单位取决于传感器输出量的单位和输入量的单位以及有关的电源电压的单位。

例如:某位移传感器,当电源电压为 1 V 时,每 1 mm 位移变化引起的输出电压变化为 100 mV,则其灵敏度可表示为 100 mV/(mm · V)。

例 1-1 某铂丝热敏传感器。

(1) 在小测量温度范围内,铂丝传感器阻值与温度可近似看作线性关系,如图 1-3 所示。有

$$R = R_0(1 + \alpha_t T)$$

灵敏度为

$$K = dR/dT = R_0\alpha_t$$

其中: R_0 ——铂丝传感器在 0 °C 时的阻值;

α_t ——铂丝传感器的温度系数。

(2) 将此铂丝传感器构成电桥进行温度测量, 输出电压信号与温度的关系呈非线性关系, 如图 1-4 所示, 有

$$U = a_0 + a_1 T - a_2 T^2$$

其中 a_0 、 a_1 、 a_2 是常数。

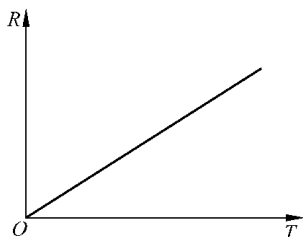


图 1-3 铂丝热敏传感器温度特性

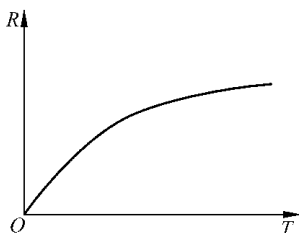


图 1-4 铂丝非线性温度特性

灵敏度可表示为

$$K = \frac{dU}{dT} = a_1 - 2a_2 T$$

工程上近似表示为

$$K = a_1$$

2) 分辨率

分辨率也称灵敏度阈值, 即引起输出量产生可观测的微小变化所需的最小输入量的变化量。因为传感器的输入输出关系不可能都做到绝对连续, 有时输入量开始变化, 但输出量并不随之相应变化, 而是输入量变化到一定程度时, 输出才突然产生一小的阶跃变化。这就出现了分辨率和阈值问题。从微观看, 传感器的特性曲线并不是十分平滑的, 而是有许多微小的起伏。当输入量改变 Δx 时, 输出量变化 Δy , Δx 变小, Δy 也变小。但是一般而言, Δx 小到某种程度, 输出量就不再变化了, 这时的 Δx 就是分辨率或灵敏度阈值。

存在灵敏度阈值的原因有两个。第一个原因是输入的变化量通过传感器内部被吸收, 因而反映不到输出端上。典型的例子是螺丝或齿轮的松动, 螺丝和螺帽, 齿条和齿轮之间都有空隙, 如果 Δx 表示空隙, 那么 Δx 是无法传递出去的。又例如, 装有轴承的旋转轴, 如果不加上能克服轴与轴之间摩擦的力矩, 轴是不会旋转的。第二个原因是传感器输出存在噪声。如果传感器的输出值比噪声电平小, 就无法把有效信号和噪声分开。如果不加上最起码的输入值(这个输入值所产生的输出值与噪声的电平大小相当), 则得不到有效的输出值, 该输入值即灵敏度阈值, 也叫灵敏阈、门槛灵敏度或阈值。

对数字显示的测量系统, 分辨率是数字显示的最后一位所代表的值。对指针式测量仪表, 分辨率与人们的观察能力和仪表的灵敏度有关。举例说明如下:

(1) 数字天平。如图 1-5 所示的数字天平分辨率是多少?

答: 因为对数字显示的测量系统, 分辨率是数字显示的最后一位所代表的值, 所以, 数字天平的分辨率是 0.01 g。

(2) 已知人们所能观察的指针最小偏移量为 0.3 mm。如图 1-6 所示的指针式称重计的灵敏度 S 为 10 mm/kg, 则此称重计的分辨率是多少?

答：因为人们所能观察的指针最小偏移量 $\Delta y = 0.3 \text{ mm}$ ，称重计的灵敏度 $S = 10 \text{ mm/kg}$ ，所以，分辨率 $\Delta x = \Delta y / S = 0.3 / 10 = 0.03 \text{ (kg)}$ 。

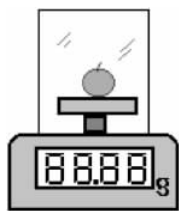


图 1-5 数字天平

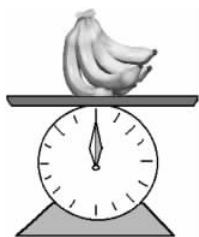


图 1-6 指针式称重计

3) 线性度

通常为了标定和数据处理方便，总希望得到线性关系，可采用各种方法如硬件或软件的补偿进行线性化处理，这样就使得输出不可能丝毫不差地反映被测量的变化，总存在一定的误差（线性或非线性），即使实际是线性关系的特性，测量的线性关系也并不完全与其重合，而常用一条拟合直线近似代表实际的特性曲线。线性度就是用来评价传感器的实际输入-输出特性对理论拟合的线性输入-输出特性的接近程度的一个性能指标，即传感器特性的非线性程度的参数。线性度的定义为：传感器的实测输入-输出特性曲线与理论拟合直线（理想输入-输出特性曲线）的最大偏差对传感器满量程输出之比的百分数表示。线性度也称为“非线性误差”或“非线性度”。

如图 1-7 所示，非线性误差（线性度）为

$$\delta = \frac{\Delta_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中： $\Delta_{\max}$ ——实测特性曲线与理想线性曲线间的最大偏差；

A ——传感器满量程输出平均值；

δ ——非线性误差（线性度）。

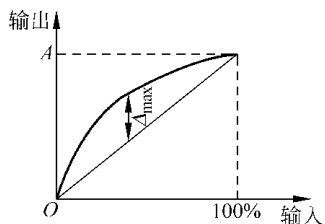


图 1-7 输入-输出特性图

非线性误差（线性度）的大小是以一拟合直线或理想直线作为基准直线计算得到的，基准直线不同，所得到的线性度就不一样，因而不能笼统地提线性度或非线性误差，必须说明其所依据的拟合基准直线，比较传感器线性度好坏时必须建立在相同的拟合方法上。按照所依据的基准直线的不同，线性度可分为理论线性度、端基线性度、独立线性度、最小二乘法线性度等。

理论线性度：又称绝对线性度，其拟合直线为理论直线，通常取零点作为理论直线的零点，满量程输出 100% 作为终止点，这两点的连线即为理论直线，所以理论直线与实际测试点无关，其优点是简单、方便，但通常是最大偏差 $\Delta_{\max}$ 很大。

端基线性度：将传感器校准数据的零点输出平均值和满量程输出平均值连成直线（实际特性曲线首、末两端点的连线）作为拟合直线，其方程式为

$$y = b + kx \quad (1-9)$$

式中， b 和 k 分别为截距和斜率。

这种方法简单，但最大偏差 $\Delta_{\max}$ 也很大。