



## 基础与发展介绍



# 第1章

## 传感技术基础知识

### 学习目标

**知识能力：**熟悉传感器静态和动态特性，了解传感器标定方式，掌握测量数据处理方法。

**实操技能：**掌握传感器的识别和标定方法。

**综合能力：**提高学生分析问题和解决问题的能力，加强学生沟通能力及团队协作精神的培养。

在科学技术迅速发展的今天，人类已进入瞬息万变的信息时代。人们在从事工业生产和科学实验等活动时，主要依靠对信息的开发、获取、传输和处理。检测技术就是研究自动检测系统中信息提取、信息转换及信息处理的一门技术学科，而传感器则是感知、获取与检测信息的窗口。

“检测系统”是传感技术发展到现在一定阶段的产物，工程需要由传感器与多台仪表或多个功能模块组合在一起，才能完成信号的检测，这样便形成了检测系统。

为更好掌握传感器的应用方法，有效完成检测任务，工程人员需要掌握检测的基本概念、检测系统的特性、测量误差的基本概念及数据处理的方法等。

## 1.1 传感器的认识与标定

### 1.1.1 传感器的认知

#### 1. 传感器的定义

根据中华人民共和国国家标准，传感器的定义是：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。传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置。

传感技术、通信技术和计算机技术是现代信息技术的三大支柱，构成信息系统的感官、

神经和大脑,实现信息的获取、传递、转换和控制。传感技术是信息技术的基础,传感器的性能、质量和水平直接决定了信息系统的功能和质量。因此,国外一些著名专家评论说“征服了传感器就等于征服了科学技术”。

## 2. 传感器的组成与分类

如图 1-1 所示,传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成。



图 1-1 传感器的组成框图

- (1) 敏感元件: 直接感受被测量,并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。
- (2) 转换元件: 以敏感元件的输出为输入,把输入转换成电路参数。
- (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。

实际上,有些传感器很简单,仅由一个敏感元件组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,没有转换电路。有些传感器,转换元件不止一个,要经过若干次转换。

目前,传感器通常按照两种方式分类:一种是按被测量分类,另一种是按传感器的原理分类,见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 按被测量分类

| 按测量类别  | 被 测 量                                                 |
|--------|-------------------------------------------------------|
| 热工量    | 温度、热量、比热容,压力、压差、真空度,流量、流速、风速                          |
| 机械量    | 位移(线位移、角位移),尺寸、形状;力、力矩、应力;重量、质量;转速、线速度;振动幅度、频率、加速度、噪声 |
| 特性和成分量 | 气体化学成分、液体化学成分,酸碱度(pH)、盐度、浓度、黏度,密度、相对密度                |
| 状态量    | 颜色、透明度、磨损量、材料内部裂缝或缺陷、气体泄漏、表面质量                        |

表 1-2 按传感器的原理分类

| 序 号 | 工 作 原 理   | 序 号 | 工 作 原 理        |
|-----|-----------|-----|----------------|
| 1   | 电阻式       | 8   | 光电式(红外式、光导纤维式) |
| 2   | 电感式       | 9   | 谐振式            |
| 3   | 电容式       | 10  | 霍尔式(磁电式)       |
| 4   | 阻抗式(电涡流式) | 11  | 超声式            |
| 5   | 磁电式       | 12  | 同位素式           |
| 6   | 热电式       | 13  | 电化学式           |
| 7   | 压电式       | 14  | 微波式            |

## 3. 传感技术的特点与作用

传感技术是现代科技的前沿技术,是现代信息技术的三大支柱之一,其水平高低是衡量一个国家科技发展水平的重要标志之一。它的特点主要体现在:

- (1) 属边缘学科。传感技术机理涉及多门学科与技术,包括测量学、微电子学、物理学、

光学、机械学、材料学、计算机科学等。在理论上以物理学中的“效应”“现象”，化学中的“反应”，生物学中的“机理”作为基础。在技术上涉及电子、机械制造、化学工程、生物工程等学科的技术。这是多种高技术的集合产物，传感器在设计、制造和应用过程中技术的多样式、边缘性、综合性和技艺性呈现出技术密集的特性。

(2) 产品、产业分散，涉及面广。自然界中各种信息（如光、声、热、湿、气等）千差万别，传感器品种繁多，被测参数包括热工量、电工量、化学量、物理量、机械量、生物量、状态量等。应用领域广泛，无论是高新技术，还是传统产业，乃至日常生活，都需要应用大量的传感器。

(3) 功能、工艺要求复杂，技术指标不断提高。传感器应用要求千差万别，有的量大面广，有的专业性很强，有的要求耐热、耐振动，有的要求防爆、防磁等。面对复杂的功能要求，设计制造工艺也越来越复杂，技术指标更是与时俱进。

(4) 性能稳定、测试精确。传感器应具有高稳定性、高可靠性、高重复性、低迟滞、快响应和良好的环境适应性。

(5) 基础、应用两头依附，产品、市场相互促进。基础依附是指传感器技术的发展依附于敏感机理、敏感材料、工艺设备和测量技术；应用依附是指传感器基本上属于应用技术，其开发多依赖于检测装置和自动控制系统，才能真正体现它的高附加效益，并形成现实市场。

分析传感技术在现代科学技术、国民经济和社会生活中的地位与作用，著名科学家、两院院士王大珩对仪器仪表做了非常精辟的论述：“当今世界已进入信息时代，信息技术成为推动科学技术和国民经济发展的关键技术。测量控制与仪器仪表作为对物质世界的信息进行采集、处理、控制的基础手段和设备，是信息产业的源头和重要组成部分。仪器仪表是工业生产的‘倍增器’，科学研究的‘先行官’，军事上的‘战斗机’，国民活动的‘物化法官’，应用无所不在。”

#### 4. 传感器技术的发展趋势

当前，传感器技术的主要发展动向包括两方面：一是开展基础研究，发现新现象，开发传感器的新材料和新工艺；二是实现传感器的集成化与智能化。

(1) 发现新现象，开发新材料。新现象、新原理、新材料是发展传感器技术，研究新型传感器的重要基础，每一种新原理、新材料的发现都会伴随新的传感器种类诞生。

(2) 集成化，多功能化。传感器的集成化和多功能化就是将半导体集成电路技术用于传感器的制造，并向敏感功能装置发展。如采用厚膜和薄膜技术制作传感器，采用微细加工技术制作微型传感器。

(3) 向未开发的领域挑战。到目前为止，正大力研究、开发的传感器大多为物理传感器，今后将积极开发研究化学传感器和生物传感器。特别是智能机器人技术的发展，需要研制各种模拟人的感觉器官的传感器，如已有的机器人力觉传感器、触觉传感器、味觉传感器等。

(4) 智能化传感器。具有判断能力、学习能力的传感器，事实上是一种带微处理器的传感器，它具有检测、判断和信息处理功能。同一般传感器相比，智能化传感器具有精度高、稳定可靠性好、检测与处理方便、功能广、性价比高的显著特点。

### 1.1.2 传感器的基本特性

如果把传感器看做二端口网络,即有两个输入端和两个输出端,那么传感器的输入输出特性是与内部结构参数有关的外部特性。传感器的基本特性通常可以分为静态特性和动态特性。

#### 1. 静态特性

传感器静态特性是指被测量值处于稳定状态时输出与输入的关系。对静态特性而言,在不考虑迟滞蠕变及其他不确定因素的情况下,传感器的输入量  $x$  与输出量  $y$  之间的关系通常可用如下的多项式表示:

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

式中:  $a_0$ ——输入量  $x$  为零时的输出量;

$a_0, a_1, \cdots, a_n$ ——非线性项系数。

传感器的静态特性可以用一组性能指标来描述,如灵敏度、线性度、分辨率、迟滞、重复性和漂移等。

##### 1) 灵敏度(sensitivity)

灵敏度是传感器静态特性的一个重要指标,其定义是输出量增量  $\Delta y$  与引起输出量增量  $\Delta y$  的相应输入量增量  $\Delta x$  之比,用  $S$  表示灵敏度,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

它表示单位输入量变化所引起传感器输出量的变化,灵敏度  $S$  越大,则传感器越灵敏。

线性传感器灵敏度就是它的静态特性斜率,其灵敏度  $S$  是常量,如图 1-2(a)所示;非线性传感器的灵敏度为一变量,用  $S = dy/dx$  表示,实际上就是输入输出特性曲线上某点的斜率,且灵敏度随输入量的变化而变化,如图 1-2(b)所示。

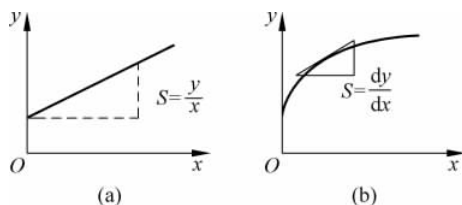


图 1-2 灵敏度定义

(a) 线性测量系统; (b) 非线性测量系统

##### 2) 线性度(linearity)

线性度是指传感器输出与输入之间数量关系的线性程度。传感器理想输入-输出特性应是线性的,但实际输入-输出特性大都具有一定程度的非线性。在输入量变化范围不大的条件下,可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合等来近似地代表实际曲线的一段,这就是传感器非线性特性的线性化,如图 1-3 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间的偏差称为传感器的非线性误差,取其最大值与输出满刻度值(full scale,即满量程)之比作为评价非线性误差(或线性度)的指标,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中:  $\gamma_L$ ——非线性误差;

$\Delta L_{\max}$ ——最大非线性绝对误差;

$Y_{FS}$ ——输出满量程。

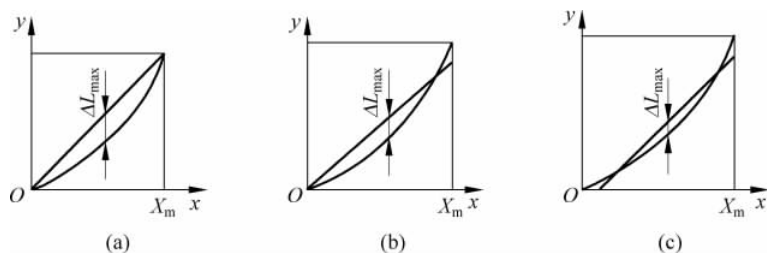


图 1-3 输入-输出特性的线性化

(a) 切线或割线; (b) 过零旋转; (c) 端点平移

### 3) 分辨率(resolution)

分辨率是指传感器能够感知或检测到的最小输入信号增量,反映传感器能够分辨被测量微小变化的能力。分辨率可以用增量的绝对值或增量与满量程的百分比来表示。

### 4) 迟滞(hysteresis)

迟滞也叫回程误差,是指在相同测量条件下,对应于同一大小输入信号,传感器正(输入量由小增大)、反(输入量由大减小)行程的输出信号大小不相等的现象。产生迟滞的原因是:传感器机械部分存在不可避免的摩擦、间隙、松动、积尘等,引起能量吸收和消耗。

迟滞特性表明传感器正、反行程期间输出-输入特性曲线不重合的程度。迟滞的大小一般由实验方法来确定。用正反行程间的最大输出差值  $\Delta H_{\max}$  对满量程输出  $Y_{FS}$  的百分比来表示,如图 1-4 所示。

### 5) 重复性(repeatability)

重复性表示传感器在输入量按同一方向进行全量程多次测试时所得输入-输出特性曲线一致的程度。实际特性曲线不重复的原因与迟滞的产生原因相同。重复性指标一般采用输出最大不重复误差  $\Delta R_{\max}$  与满量程输出  $Y_{FS}$  的百分比表示,如图 1-5 所示。

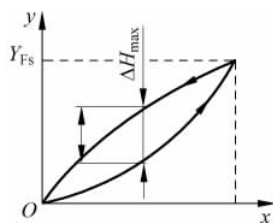


图 1-4 迟滞特性

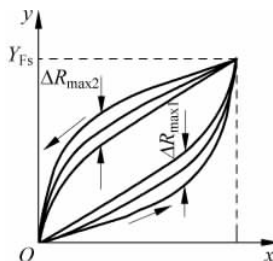


图 1-5 重复性

### 6) 漂移(drift or shift)

漂移是指传感器在输入量不变的情况下,输出量随时间变化的现象;漂移将影响传感器的稳定性或可靠性(stability or reliability)。产生漂移的原因主要有两个:一是传感器自身结构参数发生老化,如零点漂移(简称零漂);二是在测试过程中周围环境(如温度、湿度、压力等)发生变化,最常见的是温度漂移(简称温漂)。

## 2. 动态特性

传感器动态特性是指传感器对动态激励(输入)的响应(输出)特性,即其输出对随时间

变化的输入量的响应特性。一个动态特性好的传感器,其输出随时间变化的规律(输出变化曲线),将能再现输入随时间变化的规律(输入变化曲线),即输出和输入具有相同的时间函数。但实际上由于制作传感器的敏感材料对不同的变化会表现出一定程度的惯性(如温度测量中的热惯性),因此输出信号与输入信号并不具有完全相同的时间函数,这种输入与输出间的差异称为动态误差,动态误差反映的是惯性延迟所引起的附加误差。

传感器的动态特性可以从时域和频域两个方面分别采用瞬态响应法和频率响应法来分析。在时域内研究传感器的响应特性时,一般采用阶跃函数;在频域内研究动态特性时,一般采用正弦函数。

对应的传感器动态特性指标分为两类,即与阶跃响应有关的指标和与频率响应特性有关的指标。

### 1) 阶跃响应特性

在采用阶跃输入研究传感器的时域动态特性时,常用延迟时间、上升时间、响应时间、超调量等来表征传感器的动态特性。

一阶或二阶传感器单位阶跃响应的时域动态特性分别如图 1-6 所示( $S=1, A_0=1$ )。其时域动态特性参数描述如下。

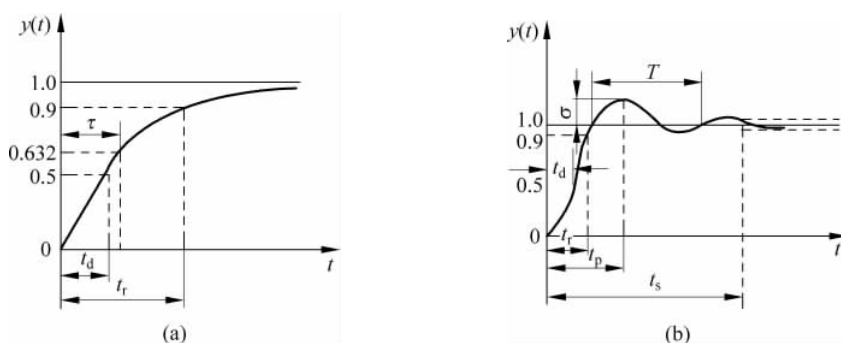


图 1-6 一阶或二阶传感器单位阶跃响应的时域动态特性

(a) 一阶传感器; (b) 二阶传感器( $\zeta < 1$ )

时间常数  $\tau$ : 一阶传感器输出上升到稳态值的 63.2% 所需的时间。

延迟时间  $t_d$ : 传感器输出达到稳态值的 50% 所需的时间。

上升时间  $t_r$ : 传感器的输出达到稳态值的 90% 所需的时间。

峰值时间  $t_p$ : 二阶传感器输出响应曲线达到第一个峰值所需的时间。

响应时间  $t_s$ : 二阶传感器从输入量开始起作用到输出指示值进入稳态值所规定的范围内所需要的时间。

超调量  $\sigma$ : 二阶传感器输出第一次达到稳定值后又超出稳定值而出现的最大偏差,即二阶传感器输出超过稳定值的最大值。

### 2) 频率响应特性

在采用正弦输入信号研究传感器的频域动态特性时,常用幅频特性和相频特性来描述传感器的动态特性。一般可以将大多数传感器简化为一阶或二阶系统,下面以一阶传感器的频率响应为例说明。

一阶传感器的微分方程为



$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-4)$$

它可改写为

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = S \cdot x(t) \quad (1-5)$$

式中： $\tau$ ——传感器的时间常数(具有时间量纲)。

这类传感器的幅频特性为

$$A(\omega) = 1 / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2} \quad (1-6)$$

相频特性为

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1-7)$$

图 1-7 所示为一阶传感器的频率响应特性曲线。时间常数  $\tau$  越小, 此时  $A(\omega)$  越接近于常数 1,  $\varphi(\omega)$  越接近于 0, 因此, 频率响应特性越好。当  $\omega\tau \ll 1$  时,  $A(\omega) \approx 1$ , 输出与输入的幅值几乎相等, 表明传感器输出与输入为线性关系。 $\varphi(\omega)$  很小,  $\tan\varphi \approx \varphi$ ,  $\varphi(\omega) \approx -\omega\tau$ , 相位差与频率  $\omega$  呈线性关系。

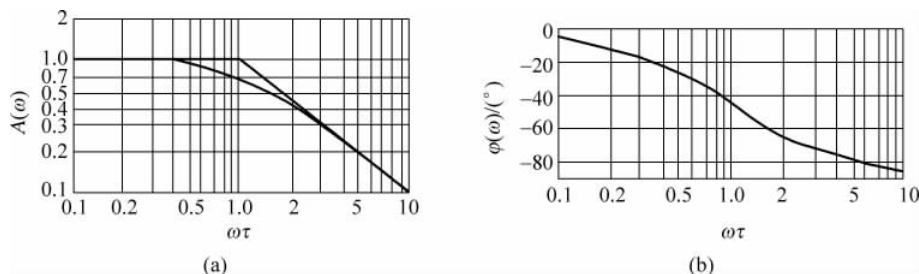


图 1-7 一阶传感器的频率特性

(a) 幅频特性; (b) 相频特性

总之, 动态特性是传感器性能的一个重要指标。在测量随时间变化的参数时, 只考虑静态性能指标是不够的, 还要注意其动态性能指标。

### 1.1.3 传感器的标定与校准

传感器的标定是利用某种标准仪器对新研制或生产的传感器进行技术检定和标度; 它是通过实验建立传感器输入量与输出量间的关系, 并确定不同使用条件下的误差关系或测量精度。传感器的校准是指对使用或储存一段时间后的传感器性能进行再次测试和校正, 校准的方法和要求与标定相同。

传感器的标定分为静态标定和动态标定两种。

传感器的静态标定是对输入信号不随时间变化的静态特性指标的标定, 静态标定的目的是确定传感器静态特性指标, 包括线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性等。

传感器的动态标定主要是研究传感器的动态响应特性, 如频率响应、时间常数、固有频率和阻尼比等。对传感器的标定是根据标准仪器与被标定传感器的测试数据进行的, 即利用标准仪器产生已知的非电量并输入到待标定的传感器中, 然后将传感器的输出量与输入的标准量进行比较, 从而得到一系列标准数据或曲线。

传感器使用一段时间或经过修理后,需要利用标准器具对其性能指标重新进行确认,看是否可继续使用或仍符合原先技术指标所规定的要求。这一性能复测过程称为校准。校准是在规定条件下,为确定测量装置或测量系统所指示的量值,或实物量具或参考物质所代表的量值,与对应的由标准所复现的量值之间关系的一组操作。校准主要确定测量仪器的示值误差,是自愿溯源行为,不具法制性。

标定和校准在许多情况下是相同的,但标定必须严格采用基准或精度高一级的标准器进行;而校准在没有基准或高一级的标准器时则可以使用同等精度的同类合格传感器,采用比对的方法对原性能是否变化作出判断。比对属于无法直接实现量值溯源时的一种计量行为,是对不同计量量具进行的同参数、同量程的相互比对。

## 1.2 测量误差与测量不确定度

### 1.2.1 测量误差

检测技术的主要任务是测量,检测是广义上的测量。在检测与测量中,必定存在测量误差。人们要获取研究对象在数量上的信息,要通过测量才能得到定量的结果。测量要达到准确度高、误差极小、速度快、可靠性强等标准,则要求测量方法精益求精。

通常把检测结果和被测量的客观真值之间的差值叫测量误差。误差主要产生于工具、环境、方法和技术等方面因素,下面主要介绍测量误差的有关概念。

#### 1. 量值

量是物体可以从数量上进行确定的一种属性。量值有理论真值、约定真值和实际值或标称值与指示值之分。

##### 1) 理论真值、约定真值和实际值

真值是指在一定的时间和空间条件下,能够反映被测量真实状态的数值。真值分为理论真值和约定真值两种情形。理论真值是理想情况下表征一个物理量真实状态或属性的值,它通常是客观存在但不能实际测量得到,或者是根据一定的理论所定义的数值,如三角形的三个内角和为 $180^\circ$ ;约定真值是为了达到某种目的按照约定的办法所确定的值,如光速被约定为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,或以高精度等级仪器的测量值约定为低精度等级仪器测量值的真值。实际值是在满足规定准确度时用以代替真值使用的值。

##### 2) 标称值和指示值

标称值是计量或测量器具上标注的量值。指示值(即测量值)是测量仪表或量具给出或提供的量值。因受制造、测量或环境影响,标称值并不一定等于它的实际值,通常在给出标称值的同时也给出它的误差范围或精度等级。

#### 2. 精度

反映测量结果与真值接近程度的量,称为精度。精度与误差的大小相对应,可用误差的大小来表示精度的高低,误差小则精度高,误差大则精度低。

##### 1) 准确度

准确度反映测量结果中系统误差的影响(大小)程度,即测量结果偏离真值的程度。