

检测技术与传感器

王润炎 编

焦作矿业学院自控教研室

目 录

绪 论

第一章 传感器的一般特性

§ 1-1 概述	1-1
§ 1-2 传感器的静态特性	1-3
§ 1-3 传感器的动态特性	1-10

第二章 基础效应与检测变换

§ 2-1 光电效应	2-1
§ 2-2 电光效应	2-3
§ 2-3 磁光效应	2-6
§ 2-4 电磁效应	2-9
§ 2-5 热电效应	2-11
§ 2-6 热磁效应	2-16
§ 2-7 压力与电间诸效应	2-18
§ 2-8 压磁效应	2-20
§ 2-9 与电介质有关的效应	2-21
§ 2-10 与半导体有关的约瑟夫逊效应	2-22
§ 2-11 光的多普勒效应	2-24
§ 2-12 声音的多普勒效应	2-24

第三章 传感器

§ 3-1 风速传感器 (AEG) W-WM 型	3-1
§ 3-2 CO 传感器 (AEG) MYCO 型	3-9
§ 3-3 甲烷 (CH ₄) 传感器	3-17

§ 3-4	压力传感器 AEC 200/AEC 220 型	3-28
§ 3-5	电流传感器	3-40
§ 3-6	电压传感器	3-47
§ 3-7	电度传感器	3-47
§ 3-8	煤仓煤位传感器	3-53
§ 3-9	机组位置传感器	3-75
§ 3-10	皮带打滑传感器	3-84
§ 3-11	皮带秤 EWM 604 型	3-94
§ 3-12	耦合器 SKG 2K 系列	3-114
§ 3-13	皮带堆煤传感器 EL101 型	3-128
§ 3-14	皮带跑偏传感器	3-129
§ 3-15	TY513/1 TY513/2 型温度传感器	3-131
§ 3-16	TY532/1 TY532/2 棒型温度传感器	3-132
§ 3-17	水位浮子传感器 NS2 N21	3-133

结 论

现代化的煤矿生产、环境安全监测监控系统，显著地改变了矿井安全、生产调度的落后状况。用计算机连续地监测矿井环境参数，可为矿井瓦斯爆炸和自然发火等自然灾害的预防提供依据。能及时发现安全装备中的薄弱环节，避免人工检测可能造成的超限作业，防止意外事故发生。矿井环境数据的积累和分析研究，不仅对指挥当前生产有着重大意义，而且对矿井的进一步开发和新建的建设具有指导意义。在充分积累和深入研究的基础上，有可能提高允许正常生产的安全参数的限定值。从而可以缩短因超限而不得不停止作业的时间，提高生产力。在生产调度方面，系统及时向管理人员提供准确的生产工况信息，制订最优的调度方案，及时发现并处理设备故障，防止事故的发生和扩大，减少故障停机时间，充分发挥设备潜力，提高工时利用率，降低维修费用。计算机监测监控系统能够自动地提供各种报表、图形、曲线，以及中、长期分析报告，使各级领导能心中有数，正确指挥生产，有效地提高了调度效率和科学管理水平。目前我国主要有KJ₁、KJ₂和引进的CP-80和DF-200等系统用于矿井环境安全监测及生产监测监控，都不同程度地取得了经济效益和社会效益。

然而，不管什么监测监控系统，都是以监测技术为基础的，传感器又是首要的环节。所谓传感器是一种测量装置，它能感受或响应被测量，并按一定的规律转换成可用输出，以满足信息的传输、处理、存储、记录、显示和控制的要求。传感器又称“电五官”。计算机相当于人的大脑，大脑是要通过人的五种感觉器官（视觉、听

觉、嗅觉、味觉和触觉)感受外界刺激并作出反应的。这种受刺激“感受的元件”就是传感器。如果没有传感器对原始数据进行精确的可靠测量,那么,无论对信号转换、信息处理、或者最佳数据的显示和控制,都将成为一句空话。可以说,没有精确可靠的传感器,就没有精确可靠的自动检测和控制系统。计算机也无法发挥其应有的作用。由此看来,传感器在科学研究、工业自动化、非电量电测仪表、航天航空、军事技术、医用仪器、家用电器等各方面都起着极为重要的作用。我国的传感器技术正在迅速发展,不久的将来会赶上世界先进水平的。

传感器的使用,已有相当长的历史,过去把它叫做变换器或换能器。早期以测量物理量为主的传感器,如电位器、应变式和电感式传感器等都是利用机械结构的位移或变形来完成非电量到电量的变换。最近出现了谐振式、石英电容式这样一些稳定可靠的高精度传感器。

随着各种半导体材料和功能材料的发展,利用材料的压阻、湿敏、热敏、光敏、磁敏及气敏等效应,可将温度、湿度、光量、气体成份等物理量变换成电量,由此研究出的传感器被叫做物性传感器。大量的半导体材料、功能陶瓷和功能有机聚合物,为物性传感器的发展提供了坚实的物质基础。但由于物性敏感元件的基础工艺要求高(如半导体大规模集成技术、超净和细微工艺等),稳定性较差,在一些要求高可靠、高稳定的使用场合以及恶劣环境条件下,目前尚不能普遍应用。然而,不可否认,物性传感器肯定会在不断提高性能的过程中蓬勃发展起来。

近年来，微电子技术及微处理机技术进入传感器领域之后，传感器出现了新的突破，测量不再仅仅是实时的处理，而把测量从时间的限制中解放出来。传感器与微电脑“硬件”和“软件”集合一体，特别是与“软件”的有机结合，可以把获得的信息进行存储、数据处理、控制及打印，从而扩展了功能，提高了精度，且对环境的自适应性，对信息的识别等方面大大优于传统的单功能传感器，此类传感器称之为智能传感器。还有许多利用新原理制作的各样新型传感器不断涌现出来。如一种响应速度极快的红外探测器，就是利用超导体量子力学的隧道效应及约瑟夫效应制成的传感器。它对光通信贡献非常大。又如图象装置中的电荷耦合器件，就是能把光字图象信号转换成电信号的一种功能传感器，如用于光缆通信中的光端发送机中。综合上述，人们正在向着传感器的小型化、集成化、智能化的方向研究，并且为不断满足测试技术的各种需要而努力开拓新型传感器。我们着重介绍CP-80系统中使用的传感器。

传感器的分类

传感器的分类方法很多，国内外尚无统一方法。我们按两种方法即按被测量来分和按测量原理来分。

1、按被测量分类：包括了输入的基本被测量和由此派生的其他量。

基本被测量：热工量。

由它派生的被测量：温度、热量、比热、压力、压差、真空度、流量、流速、风速。

机械量。由它派生的被测量：位移、尺寸、形状、力、应力、

力矩、振动、加速度、噪声。

物理量化学量。由它派生的被测量：气体、液体、化学成份、浓度、盐度、粘度、湿度、密度、比重。

生物量。由它派生的被测量：心音、血压、体温、气流重、心电图、眼压、脑电波。

2、按测量原理分类：

传感器的变换原理，传感器应用举例：

变电阻——电位器式、应变式、压阻式、光敏、热敏。

变磁阻——电感式、差动变压器式、涡流式。

变电容——电容式、湿敏。

变谐振频率——振动膜（筒、弦、梁）式。

变电荷——压电式。

发电势——霍尔式、感应式、热电偶。

第一章 传感器的一般特性

§ 1-1 概述

各种被测量(物理量、化学量、生物量等)经常会发生各种各样的变动。例如,在测量瓦斯时,甲烷值在一段时间内可能很稳定,而在另一段时间内则可能有缓慢变化,甚至出现突变的尖峰值。传感器主要通过其两个基本特性——静态特性和动态特性——来反映被测量的这种变动性。所谓静态特性是指当被测量的各个值处于稳定状态(静态测量下)时,传感器的输出值与输入值之间关系的数学表达式、曲线或数表。当传感器制成后,可用实际特性反映传感器在当时使用条件下实际具有的静态特性。借实验方法确定传感器静态特性的过程称为静态校准,校准时获得的静态特性称为校准特性。当校准使用的仪器设备有足够高的精度时,工程上常将校准曲线作为传感器的实际特性看待。在多数情况下,可根据校准数据来合理地选择理论特性。取线性特性作为理论特性的传感器称为线性传感器。然而,传感器的实际输出值不可能分毫不差地反映被测量的真值,总存在着一定的误差。因此,有必要先讲清楚有关测量和误差的基本概念及定义。

1、测量值:从测量器具上直接反映或经过必要的计算所得到的量值。

2、测量范围:在允许测量误差范围内,测量装置测量被测量值的范围,测量范围的最高、最低值分别称为“上限值”和“下限值”。

3、量程:测量范围上下限制的代数差。

4、真值：被测量的量客观存在的真实数值，量的真值是一个理想概念。常用与之接近的实际值来代替真值。

5、绝对误差：在当时使用条件下的实际特性（测量值 M ）与理论特性（真实值 T ）之间的偏差，即 $\Delta = M - T$ 。

6、相对误差：绝对误差与被测量的量的真值之比，一般用百分数表示，即

$$\delta = \frac{\Delta}{T} \times 100\%$$

7、系统误差：系统误差是有规律的，指数值固定或按一定规律变化的误差。原则上是可以修正或消除的。

8、随机误差：这是由于某些随机变化因素如机构的摩擦、元件的噪声等引起的误差，它指的是传感器在一次测量中的输出值与实际特性间的偏差。

9、不确定度：这是一个描述尚未确定的误差特征的量，即表示被测量值不能被确定的数值范围，可有系统不确定度，随机不确定度及总不确定度。

10、精密度：反映随机误差大小的程度，表示多次重复测量时测得数值的分散程度。

11、准确度：反映系统误差大小的程度，表示测量结果与被测量真值之间的偏离程度。

12、精确度：反映系统误差和随机误差合成大小的程度，即测量的精密度与准确度的综合反映。

§ 1-2 传感器的静态特性

任何实际传感器的输出与输入关系不会完全符合所要求的线性或非线性的关系，衡量传感器的静态特性指标有：线性度、迟滞、重复、重复性和灵敏度等。

一、线性度

为了标定和数据处理方便，要求传感器的输出——输入关系呈线性，并能准确无误地反映被测量的真值。但实际上只有在理想情况下才有线性的静态特性。传感器如果没有迟滞和蠕变效应，其静态特性可用下列多项式来表示

$$\begin{aligned}\text{即 } y &= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \\ &= a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x^i \quad (1-1)\end{aligned}$$

式中： x —输入量；

y —输出量；

a_0 —零位输出

a_1 —传感器的灵敏度，常用 K 表示；

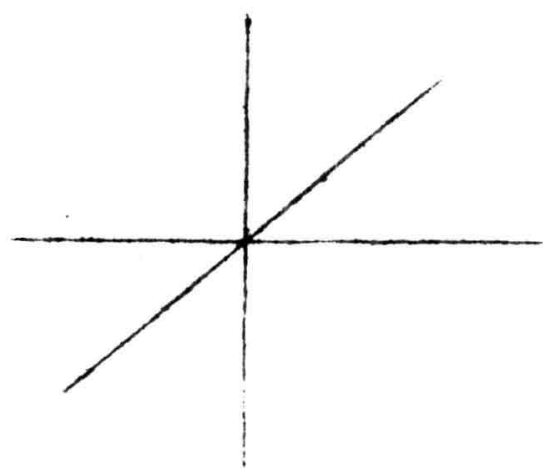
$a_2, a_3, \dots, a_n$ —非线性项的待定常数。

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

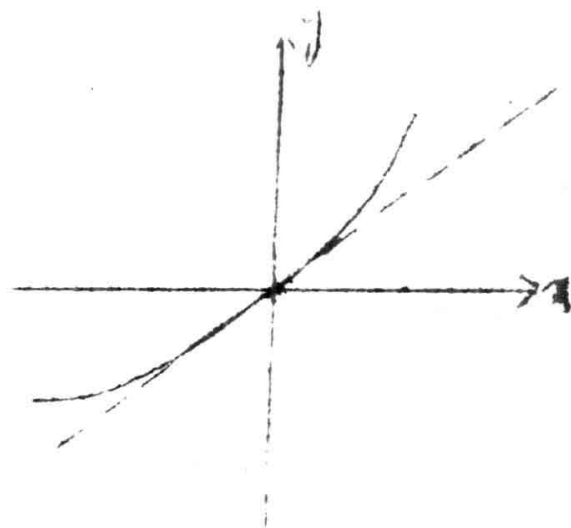
(1-1) 式即为传感器静态特性的数学模型。这种多项式可能有四种情况如下图 1-1 所示。其中：

(a) 理想线性 (b) 只有奇次项的非线性

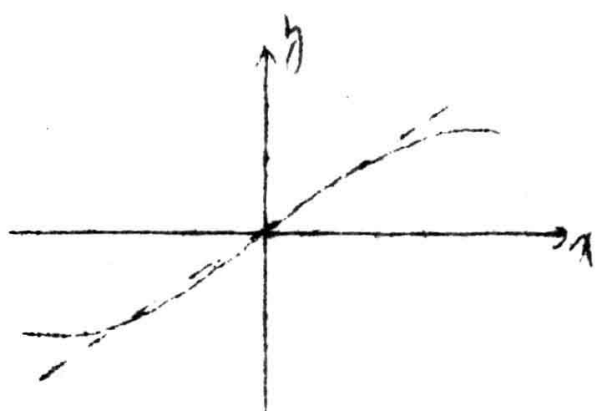
(c) 只有偶次项的非线性 (d) 普遍情况下的非线性。



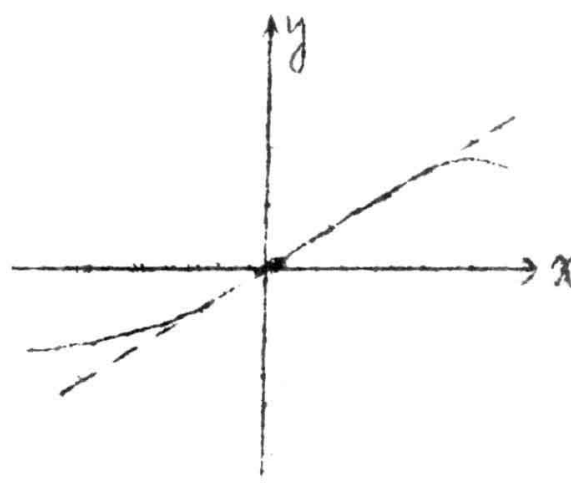
$$(a) y = a_1 x$$



$$(c) y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \dots$$



$$(b) y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \dots$$



$$(d) y = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots$$

图 1-1 传感器的静特性

a. 理想线性情况下

$$a_0 = a_1 = a_2 = \dots = a_n = 0$$

$$\therefore y = a_1 x$$

所以传感器的灵敏度为 $a_1 = \frac{y}{x} = K = \text{常数}$

b. 在原点附近相当范围内输入-输出特性基本成线性, 这种情况下 $y(a) = -y(-a)$

c. 输出-输入特性不对称, $y = a_1 a + a_2 a^2 + a_4 a^4 + \dots$

d. 普遍情况，表达式即(1-1)式。

实际运用时，究竟要用几阶多项式才适合具体传感器的数字模型呢？这是一个数据处理问题，用分析法建立数据模型太复杂，有时甚至很难进行。目前常利用校准数据来建立数字模型。

传感器的静态特性是在静态标准条件下进行校准的。静态标准条件是指没有加速度、振动和冲击（除非这些参数本身就是被测物理量）；环境温度为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ；相对湿度不大于85%；大气压力为 0.1MPa 的情况。利用一定等级的校准设备，对传感器进行往复循环测试，得到的输出—输入数据一般用表格列出或画成曲线。

测出的输出—输入校准曲线与某一规定（理论）直线不吻合的程度，在线性传感器中就称为传感器的“非线性误差”，或称“线性度”。常用相对误差表示其大小，即传感器的正反行程平均校准曲线与线性理论直线之间的最大偏差绝对值对满量程输出之比的百分值。

$$\varepsilon_L = \frac{|(\Delta y)_{\max}|}{y} \times 100\%$$

式中： ε_L —非线性误差（线性度）；

y —满量程输出；

$|(\Delta y)_{\max}|$ —输出平均值与理论值的最大偏差绝对值。

满量程输出用测量上限标称值 y_H 与下限标称值 y_L 之差的绝对值表示，即

$$y = |y_H - y_L|$$

由此可见，非线性误差的大小是以一定的规定直线或理论直线

作为基准直线而算出来的。因此，基准直线不同，得出的线性精度也不一样。传感器校准时所得到的数据总包括各种误差在内，所以一般并不要求规定直线必须通过所有的测试点，而只要找到一条能反映校准数据的一般趋势同时又使误差绝对值为最小的直线就行。

下面介绍几种不同线性度的定义和表示方法。因而在相同条件下对同一传感器作校准试验时，得出的非线性误差大小就不一样。当提到线性度的大小时，必须说明该传感器所依据的规定直线。涉及到传感器的数据处理和精度计算的方法繁多。目前国内外没有一个统一方法，这里只对我国航天工业部和航空工业部规定的线性度标准作一介绍。

一、理论线性度

理论线性度又称绝对线性度，表示传感器的实际输出校准曲线与理论直线之间的偏差程度。理论直线通常取零点（0%）作为理论直线的起始点，满量程输出（100%）为终止点，这两点的连线即为理论直线。

二、独立线性度

选择理论直线的一个简便方法是：在校准曲线循环中找出一条最佳平均直线，并使实际输出特性相对于所选理论直线的最大正偏差等于最大负偏差，这时非线性误差计算公式如下：

$$\epsilon_L = \pm \frac{|+(\Delta y_L)_{\max}| + |-(\Delta y_L)_{\max}|}{2Y} \times 100\%$$

三、端点连线平移线性度

端点连线指的是平均校准曲线对应于测量上、下限的两个端点

的连接直线，端点连线的斜率为

$$K = \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_1}{x_m - x_1}$$

x_1 — 传感器测量下限；

x_m — 传感器测量上限；

y_1 — 对应于测量下限的输出值之算术平均值；

y_m — 对应于测量上限的输出值之算术平均值。

$$\text{端点连线的截距为 } b = \frac{\bar{y}_1 x_m - \bar{y}_m x_1}{x_m - x_1}$$

$$\text{端点连线方程为 } y = \frac{\bar{y}_1 x_m - \bar{y}_m x_1}{x_m - x_1} + \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_1}{x_m - x_1} x$$

当测量下限为 $x = x_1 = 0$ 时，端点连线方程为：

$$y = \bar{y}_1 + \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_1}{x_m} \cdot x$$

端点连线平移线是与端点连线平行，并使在整个测量范围内最大正误差与最大负误差的绝对值相等的那条直线。则端点连线平移线的截距为：

$$b = \frac{\bar{y}_1 x_m - \bar{y}_m x_1}{x_m - x_1} + \frac{|(\Delta y)'_{\max}| - |(\Delta y)''_{\max}|}{2}$$

$|(\Delta y)'_{\max}|$ — 最大正误差绝对值；

$|(\Delta y)''_{\max}|$ — 最大负误差绝对值；

显然，端点连线平移线的方程为：

$$y = \frac{\bar{y}_1 x_m - \bar{y}_m x_1}{x_m - x_1} + \frac{|(\Delta y)'_{\max}| - |(\Delta y)''_{\max}|}{2} + \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_1}{x_m - x_1} x$$

当 $x = x_1 = 0$ 时，

$$y = \bar{y}_1 + \frac{|(\Delta y)'_{\max}| - |(\Delta y)''_{\max}|}{2} + \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_1}{x_m} \cdot x$$

由此可见，以端点连线平移线作为理论特性时的最大误差为：

$$(\Delta y)_{\max} = \frac{|(\Delta y)'_{\max}| + |(\Delta y)''_{\max}|}{2}$$

这时线性度为：

$$\xi_L = \frac{\frac{|(\Delta y)'_{\max}| + |(\Delta y)''_{\max}|}{2}}{y} \times 100\%$$

四、最佳直线线性度

假定有两条间距最小的平行直线，能把校准曲线正反行程部分的各点都包括在内，便可在这两条平行线中间作一条与两侧等距的直线，该直线就称为最佳直线。

在某些情况下，例如校准曲线为单调曲线或平均校准曲线为单调曲线时，且在测量上、下限处正、反行程校准数据之算术平均值相等，则端点连线平移线就是最佳直线。

采用最佳直线作为理论直线时，最大正、负误差的绝对值相等，

且数值为最小。

2. 灵敏度

非线性特性的传感器，将它线性化，这时该直线的斜率为传感器的灵敏度。

一般非线性特性是用 $y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$ 方程表示的，其静态灵敏度应为

$$S_0 = \frac{y}{x} = \frac{a_0}{x} + a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots$$

它是特性曲线上一点 (x, y) 到原点的直线的斜率，是 x 的函数，当非线性误差较小时，实际的静态灵敏度变化不大，用线性化的直线斜率作为传感器的灵敏度。这种考虑方法所带来的误差均已经考虑在非线性误差之内了，不必再去考虑灵敏度误差。

非线性特性在 x 点的微变灵敏度为

$$S_A = \frac{dy}{dx} = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + \dots$$

由于它只表示特性曲线在 x 该点的切线斜率，其值可能随 x 而变化很大，微变灵敏度只用于分析某一输入量值 x 的微小变化引起输出量的变化 Δy 时，其实用价值不大，已经线性化的传感器应以直线的斜率作为它的灵敏度值。

3. 迟滞

迟滞特性说明传感器正（输入量增大）反（输入量减小）行程的输出—输入特性曲线不重合的程度。产生这种现象的主要原因是传感器机械部分存在不可避免的缺陷，如轴承摩擦、间隙、紧固件

松动。材料内摩擦。积尘等。

迟滞大小一般要 实验方法确定，用最大输出差值 Δ_{max} 对满量程输出 y_m 的百分比来表示，其相对迟滞误差为

$$r = \frac{\Delta_{max}}{y_m} \times 100\% \text{ 或 } r = \pm \frac{\Delta_{max}}{2y_m} \times 100\%$$

式中 Δ_{max} ——正反行程输出值间的最大差值。

4、重复性

重复性是说明传感器的输入在按同一方向变化时，在全量程内连续进行重复测试时所得各特性曲线的重复程度，多次重复测试的曲线越重合，说明重复性越好，误差也小。重复特性的好坏是与许多随机因素有关的，与产生迟滞现象具有相同的原因。

为衡量重复性指标，一般用输出最大不重复差 Δ_{max} 与满量程 y_m 的百分比来表示

$$r = \pm \frac{\Delta_{max}}{y_m} \times 100\%$$

该指标只能用实验方法确定，比值越大，不重复性越大，即重复性越差。

§ 1-3 传感器的动态特性

一、概述

实际中大量的被测信号是动态信号，测量设备的基本任务不仅需要精确地指示信号大小，而且需要记录它的波形，这就需要测量