



半导体 敏感元件与传感器

李和太 魏永广 揣荣岩 编著



NEUPRESS
东北大学出版社

半导体敏感元件与传感器

李和太 魏永广 揣荣岩 编著

东北大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

半导体敏感元件与传感器/李和太, 魏永广, 揣荣岩编著. —沈阳: 东北大学出版社, 2000.8

ISBN 7-81054-541-8

I. 半… II. ①李… ②魏… ③揣… III. ①敏感器件-基本知识… ②传感器-基本知识 IV. ①TN379 ②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 30236 号

内 容 简 介

本书详细地介绍了各类半导体敏感元件和传感器的工作原理、基本结构和制作工艺, 同时介绍了一些基本的应用电路。

全书共分七章, 第一章介绍了传感器的基本知识; 第二章至第七章分别介绍了半导体光电传感器、气体传感器、湿度传感器、温度传感器、磁传感器和力学量传感器。各章后列举了各类传感器的应用实例。

本书可作为微电子技术、应用电子技术、自动化等专业本科生和研究生的教学用书, 也可作为从事信息与控制技术、过程检测技术、传感器技术等领域广大科技人员的技术参考书。

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 邮政编码 110006)

电话: (024) 23890881

传真: (024) 23892538

网址: <http://www.neupress.com> e-mail: neuph@neupress.com

铁岭新华印刷厂印刷

东北大学出版社发行

开本: 787×1092 1/16

字数: 296 千字

印张: 11.875

印数: 1~1000 册

2000 年 8 月第 1 版

2000 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 孟 颖

责任校对: 张淑萍

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定价: 19.80 元

前 言

传感器在非电量检测与工业生产过程中应用越来越广泛。各种半导体传感器虽然有不少共同之处,但是在其工作原理、所用材料的种类和性能、元件结构、制备工艺和信号采集等方面又有较大差别。因此本书各章论述的各种半导体传感器之间既有联系,又具相对独立性。

在介绍各种半导体敏感元件和传感器时力图讲清其工作机理。从各种非电量作用于敏感元件时,引起敏感材料的微观结构、显微结构的变化,阐明传感器宏观特性(主要是电特性)变化的原理。同时对传感器具体结构、制造工艺、特性参数也做了详细说明。每种传感器后面列举了基本应用实例,有一定的参考价值。

本书是在广泛收集、参考国内外技术资料,并总结作者多年从事科研和教学工作经验的基础上撰写而成的。全书共分七章。其中,第一、三、七章由李和太编写;第二、五、六章由魏永广编写;第四章由揣荣岩编写。全书由李和太负责统稿,崔志武教授审阅了全部书稿。

在编写过程中得到了许多同志的帮助,特别是王向东教授给予了热情指导,提出了宝贵的修改意见,在本书组稿过程中董海青同志做了很多技术性工作,在此表示衷心感谢。

由于编著者水平所限,书中如有不妥之处,恳请读者批评指正。

编著者

2000.4

目 录

前 言

第一章 传感器的基础知识.....	1
第一节 传感器的基本概念.....	1
第二节 传感器的特性.....	2
第二章 光电传感器	11
第一节 半导体的光电效应	11
第二节 光电导效应器件——光敏电阻器	12
第三节 光生伏特效应器件	17
第四节 电荷耦合成像器件(CCD)	24
第五节 光电耦合器件	27
第三章 半导体气敏元件和传感器	30
第一节 金属氧化物半导体材料	30
第二节 表面电阻控制型气体敏感元件	35
第三节 烧结型 SnO_2 气敏元件的制备工艺	39
第四节 氧化锌(ZnO)表面电阻控制型气敏元件	42
第五节 体电阻控制型气敏元件	43
第六节 ZrO_2 固体电解质气敏元件	52
第七节 二极管式气敏器件	53
第八节 MOSFET 型气敏器件	54
第九节 气敏元件的应用举例	57
第四章 湿度敏感元件与湿度传感器	60
第一节 湿度表示方法及湿敏元件分类	60
第二节 半导体陶瓷湿敏元件	64
第三节 元素半导体湿敏元件	78

第四节 半导体结型和 MOS 型湿敏元件	79
第五节 湿敏元件的应用	82
第五章 热敏元件与温度传感器	89
第一节 半导体陶瓷热敏电阻	89
第二节 半导体热敏二极管	95
第三节 半导体热敏晶体管	97
第四节 集成温度传感器	98
第六章 半导体磁敏元件及传感器	104
第一节 半导体的磁敏效应	104
第二节 霍尔元件	106
第三节 霍尔元件的补偿技术	109
第四节 霍尔元件的应用	112
第五节 磁阻元件	115
第六节 磁阻元件的应用举例	122
第七节 磁敏二极管	124
第八节 磁敏三极管	130
第九节 磁敏集成电路	134
第七章 力敏元件和力学量传感器	139
第一节 应力、应变的基本概念	139
第二节 电阻应变片	140
第三节 电阻应变片的测量电路	144
第四节 电阻应变片的应用举例	148
第五节 扩散硅压阻式压力传感器	150
第六节 压阻式力学量传感器的结构与性能	165
第七节 压电式力传感器	169
参考文献	183

第一章 传感器的基础知识

现代科学技术的发展与传感技术的水平的关系越来越密切,传感技术是信息技术的三大组成部分之一。信息技术主要是由信息采集、信息处理和信息传输三部分组成。信息的采集主要是利用传感技术将非电量(例如:压力、力矩、位移、速度、加速度、温度、湿度、磁场、浓度、光照等)的信息采集下来转变为电信号,因此,传感技术已经成为各个领域,特别是在自动检测、自动控制系统中不可缺少的部分。

传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。如果没有传感器对原始信息进行精确的可靠的捕捉和转换,那么一切的测量和控制都是不可能实现的。人们往往把传感器比作人的“五官”和“四肢”,直接感受外部世界的信息;信息处理主要是利用计算机技术对信息进行加工处理,因此计算机被比作人的大脑;信息的传输主要采用通讯技术,这犹如人的神经系统。显然,没有传感器也就没有现代化的测量和控制系统,没有传感器也就没有现代科学技术的迅速发展。

第一节 传感器的基本概念

传感器是能够感受被测量的非电量,并按照一定的规律将该被测量转换成与之有确定对应关系的可用作输出的电量信号的器件或装置。传感器有时也被称为变换器、换能器或探测器。传感器一般是由敏感元件、传感元件和其他辅助部件组成,如图 1-1 所示。

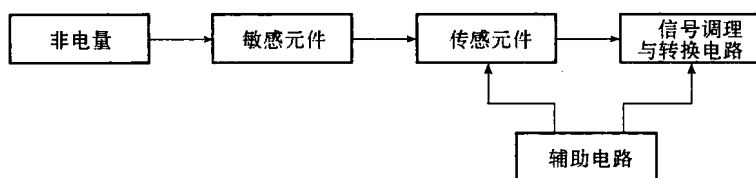


图 1-1 传感器的组成框图

敏感元件是可以直接感受被测非电量的“探头”,并把这种非电量按照一定的规律转换成与之有确定关系且易于变换成电量的其他量(通常情况仍为非电量)。传感元件又称为转换元件或变换器,它能将敏感元件感受的非电量直接转换成适合传输和测量的电量。

需要指出的是,并不是所有的传感器都包括敏感元件和传感元件。如果敏感元件直接输出电量,它就同时兼为传感元件。如果传感器能直接感受被测的非电量而输出与之对应成确定关系的电量,此时,传感器就只有传感元件而无敏感元件。例如:热电偶、热敏电阻、压电晶体和光电器件等。敏感元件与传感元件合二为一的传感器还是很多的。

信号调理与转换电路是把传感元件输出的电信号转换为便于测量、显示、记录、处理和控制在有用信号的电路。信号调理与转换电路千差万别,传感器的种类不同采用的电路也不同。常用的电路主要有振荡器、电桥、各种放大器、变换器和转换器等。

辅助电路通常包括电源电路等。在测量仪器中,有时把敏感元件部分称为一次仪表,而测量电路和输出部分称为二次仪表。

传感器技术包括了传感器材料的研究,敏感元件的设计、制造工艺,传感器的性能测试及传感器的开发和应用等项综合技术。它涉及物理学、数学、化学、材料学、工艺学、统计学以及多种现代科学技术。

早期出现的传感器,多是利用构件的移动、伸缩等位置或几何尺寸的变化测知物理量。例如利用毛发、肠衣的伸缩来感知湿度的变化,进一步用以移动衔铁改变电感而获得电磁信号。这类传感器被称为结构型传感器。随着半导体陶瓷及有机高分子功能材料的不断开发,传感器技术也有了变化,这些功能材料可以直接感知某些非电的物理量、化学量或生物量,并将其转换为电信号。这些材料的敏感特性,并不是通过其结构改变而是通过某种物性的变化来实现的。这类传感器常称之为物性型传感器。虽然目前这类传感器还不够完善,不少问题有待解决,但发展势头方兴未艾、前景广阔。

随着半导体集成技术的发展,现在可以把敏感元件、传感元件与信号处理电路集成到一块芯片上,构成信息型传感器。如果把微处理器也集成到同一芯片上,就成了智能型传感器。

现在的传感器有以下几种分类方法:

1. 按传感器的工作机理及转换形式分类,分为结构型、物性型、数字(频率)型、量子型、信息型和智能型等。
2. 按敏感材料分类,分为半导体型、功能陶瓷型和功能高聚物型等。
3. 按测量对象的参数分类,分为光传感器、湿度传感器、气体传感器、温度传感器、磁传感器、压力(压强)传感器、振动传感器和超声波传感器等。
4. 按应用领域分类,分为机器人传感器、汽车传感器、医用(生物)传感器、环保传感器以及各种过程检测传感器等。

本书按照第三种分类方法论述各种传感器的工作原理、制造方法及典型应用。

第二节 传感器的特性

传感器的特性是指传感器的输入量与输出量之间的对应关系。传感器所测量的非电量一般有两种形式,一种是稳定的,即不随时间变化或变化很缓慢的量称为静态信号,另一种是随时间变化而变化的量称为动态信号。由于输入量的状态不同,传感器所呈现的输入-输出特性也不同,传感器的特性通常分为静态特性和动态特性。

传感器的静态特性是指其输入信号不随时间变化即输入量各个值处于不同稳定状态的情况下,传感器输出量与输入量之间的关系。

传感器的动态特性是指传感器在随时间变化而变化的输入量作用下,输出量与输入量之间的关系。

一、传感器的静态特性

传感器在理想情况下,静态特性呈现线性关系。但实际上,由于传感器本身存在着迟滞、蠕变和摩擦等,同时还受到外界各种因素的影响,使得传感器的静态特性不完全符合线性关系。

描述传感器静态特性的参数有线性度、灵敏度、重复性和迟滞特性等。

(一)线性度

传感器的线性度是指传感器的输出量与输入量之间的关系曲线偏离某一规定直线的程度。线性度又称非线性误差。

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代数方程来表示

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

式中, x 为输入量(被测量); y 为输出量; $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ 为常数, a_0 为零位输出(零偏), a_1 为传感器的灵敏度,常用 k 来表示, $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性待定常数。

这种多项式代数方程的图像经常可以有如图 1-2 所示的四种情况:

1. 理想情况,在这种情况下

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

因此

$$y = a_1x \quad \frac{y}{x} = a_1 = k$$

k 称为传感器的灵敏度,其输出-输入的关系曲线如图 1-2(a)所示。

2. x 只有奇次项

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots$$

这表明在原点附近相当大的范围内输出-输入呈线性关系,如图 1-2(b)所示。曲线具有对称性质。

$$y(x) = -y(-x)$$

3. x 除线性项外非线性项只有偶次项

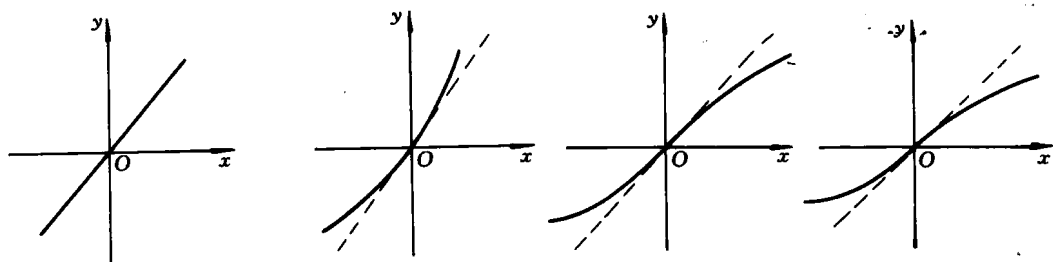
$$y = a_1x + a_2x^2 + a_4x^4 + \cdots$$

输出-输入关系曲线如图 1-2(c)所示,不对称。

4. 普遍情况,即式(1-1)

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n$$

输出-输入关系曲线如图 1-2(d)所示。



(a)理想直线

(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

图 1-2 传感器的输入-输出特性曲线

上述四种情况的线性度是不一样的。

从图 1-2 可见,在实际应用中,如果非线性项的方次不高,则在输入量变化不大的范围内,可以用切线或割线来代替实际曲线的某一段,使传感器的输出-输入特性近似于线性关系。对于一个传感器来说,输入量 x 总是有高次项存在,所以 x 与 y 一般总是非线性关系。为了表示这种非线性关系,习惯上都用非线性误差来表征。传感器的非线性误差,是用其实际特性曲线与规定的拟合直线之间最大偏差与传感器的满量程输出之比的百分数来表示的。即

$$\delta_f = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, $\Delta_{\max}$ 为传感器实际曲线与拟合直线之间的最大偏差; y_{FS} 为传感器输出满量程值。

由此可见, 非线性误差大小是以一定的拟合直线为基准计算出来的。因此, 拟合直线的不同选择, 所得到的线性度也不一样。一般并不要求拟合直线必须通过所有检测点, 而只要求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即可。

下面介绍几种拟合直线的选取方法。

1. 端点线性度。端点线性度又称理论线性度或绝对线性度。拟合直线通常以零(0%)点为起点, 满量程输出(100%)点为终点的连线, 称为端点直线。端点直线与传感器特性按正、反行程多次描绘的实际特性曲线间的最大正负偏差与 y_{FS} 之比称为端点线性度, 如图 1-3 所示。图中所示端点线性度为 $+1.4\%(F \cdot S)$, $-0.8\%(F \cdot S)$ 。

2. 独立线性度。独立线性度的拟合直线称为最佳直线, 最佳直线作法是先作两条与端点直线平行的极限直线, 两条极限直线之间应包括所有的标定点。然后在这两条极限直线之间作一条与实际特性曲线正负最大偏差等距离的直线, 这条直线即为拟合直线。如图 1-4 所示。此时线性度计算公式为:

$$\delta_f = \pm \frac{|\Delta_{\max}| + |-\Delta_{\max}|}{2y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

图 1-4 中所示的独立线性度为 $\pm 1.1\% F \cdot S$

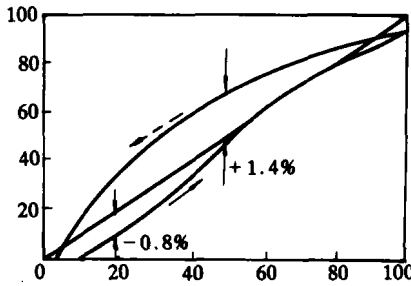


图 1-3 端点线性度

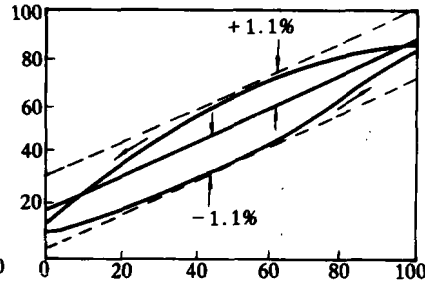


图 1-4 独立线性度

3. 平均选点线性度。为了找到较理想的拟合直线, 将测量得到的 n 个测试点分成数目相等的两组: 前半部 $n/2$ 个测试点为一组; 后半部 $n/2$ 个测试点为另一组。两个测试组各有一个“点系中心”, 通过这两个“点系中心”的直线就是所要求的拟合直线。

前半部 $n/2$ 个测试点的点系中心 A 点的坐标为

$$\bar{x}_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} x_i, \bar{y}_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} y_i \quad (1-4)$$

后半部 $n/2$ 个测试点的点系中心 B 点坐标为

$$\bar{x}_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n x_i, \bar{y}_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n y_i \quad (1-5)$$

通过这两个点系中心 $A(\bar{x}_1, \bar{y}_1)$ 和 $B(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ 的直线斜率为

$$k = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1} \quad (1-6)$$

在 y 轴上的截距

$$b = \bar{y}_1 - \frac{(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)\bar{x}_1}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1} = \bar{y}_2 - \frac{(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)\bar{x}_2}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1} \quad (1-7)$$

平均选点法的拟合直线方程式为

$$y = kx + b \quad (1-8)$$

再由此拟合直线求非线性误差。平均选点法拟合直线如图 1-5 所示, 两组测试点的点系中心也就是各组测试点的平均值点。这种拟合方法的精度较高, 测试点在拟合直线两侧合理分布, 数据处理也比较简单。

4. 最小二乘法线性度。最小二乘法线性度的拟合直线方程形式仍为 $y = kx + b$ 。设实际测试点为 n 个, 第 i 个测试点的实际测试值为 y_i , 与拟合直线上相应值之间的残差 Δ_i 为

$$\Delta_i = y_i - (b + kx_i) \quad (1-9)$$

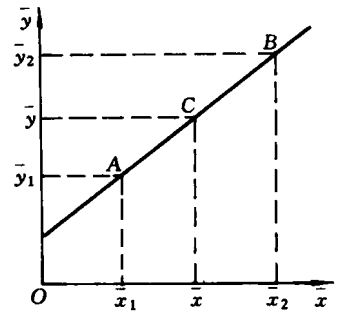


图 1-5 平均选点的拟合直线

最小二乘法拟合直线的拟合原则就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值, 也就是说, 使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 对 k 和 b 的一阶偏导数等于零, 从而求出 k 和 b 的表达式, 即

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0$$

由以上二式求出的 k 和 b 为

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \times \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-10)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \times \sum y_i - \sum x_i \times \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-11)$$

将上述 k 和 b 值代入方程 $y = kx + b$ 中可得最小二乘法拟合直线方程

$$y = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \times \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} x + \frac{\sum x_i^2 \times \sum y_i - \sum x_i \times \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-12)$$

将 n 个测试点的输入值 x_i 代入式(1-12), 求出理论拟合直线的各点输出值。然后找出输出-输入实际测试的各点与拟合直线相应点数值之间的最大偏差 $\pm \Delta_{\max}$, 根据式(1-2)便可求出非线性误差 δ_f 。

(二) 灵敏度

传感器的灵敏度是指传感器的输出变化量与相应的输入(被测量)变化量之比, 用 k 来表示

$$k = \frac{dy}{dx} = \frac{\text{输出量变化}}{\text{输入量变化}} \quad (1-13)$$

对于线性传感器, 其灵敏度即是其静态特性曲线的斜率, $k = \frac{y}{x}$ 。对于非线性传感器, 其灵敏度 $\frac{dy}{dx}$ 只表示某一点的灵敏度, 或者用某一较小的输入量区间内拟合直线的斜率来表示。

(三) 迟滞

迟滞特性表明传感器在正(输入量增大),反(输入量减小)行程期间输出-输入特性曲线不重合的程度,又称“回差”。也就是说,对应于同一大小的输入信号,传感器正、反行程的输出信号大小不相等。如图 1-6 所示。迟滞反映了传感器机械部分不可避免的缺陷及传感器内部存在的损耗等。迟滞的大小一般由实验确定,其值用输出最大差值 $\Delta_{\max}$ 与满量程输出 y_{FS} 的百分比表示。

$$\delta_c = \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中, $\Delta_{\max}$ 为输出值在正反程间的最大差值; y_{FS} 为传感器的满量程输出值。

(四)重复性

重复性表示传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化所得特性曲线不一致的程度。如图 1-7 所示。若特性曲线一致,重复性就好,误差也小。重复性特性与许多随机因素有关。为了衡量重复性指标,一般可用极限误差来表示,即用标准数据与相应行程输出平均值之间的最大偏差与满量程输出值的百分比来表示。这时要求求出正行程多次测量的各个测试点输出值之间的最大偏差 Δm_1 以及反行程多次测量的各个测试点输出值之间的最大偏差 Δm_2 ,再取 Δm_1 与 Δm_2 中之较大者为 $\Delta_{\max}$ 。这样,重复性的数学表达式为

$$\delta_x = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-15)$$

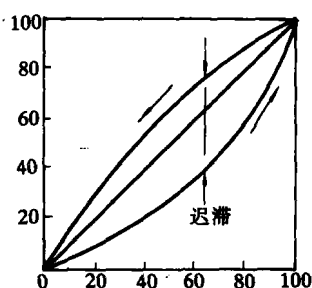


图 1-6 迟滞特性曲线

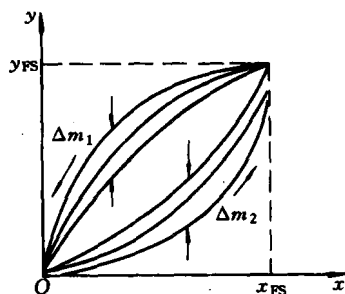


图 1-7 重复性特性曲线

(五)稳定性

稳定性是指传感器的特性参数随时间或外界条件的变化程度。由于敏感元件及其构件随着时间的流逝产生失效变化,因此,对于同一输入量,即使环境条件不变其输出量也要随时间变化;即使传感器不使用,失效变化也会发生,当然,使用越频繁,失效越快。如果在传感器使用过程中,环境条件(例如温度)发生变化其特性也将发生变化。反映传感器稳定性的参数为漂移。

传感器在输入量一定时,输出量发生一定方向的偏离称为漂移。输入为零时,若输出量不为零,这个不为零的输出称为零点漂移。漂移又可分为时间零漂和温度漂移。

1. 时间零漂

时间零漂是指在规定的时间内,环境条件不变的情况下零输出的变化值。

2. 温度漂移

温度漂移又包括零点温漂和灵敏度温漂。在规定的工作条件下(电源电压),环境工作温度每变化 1°C ,零输出的变化值与满量程输出之比为零点温漂;在规定的工作条件(电源电压)下,环境工作温度每变化 1°C ,灵敏度变化值与满量程输出之比为灵敏度温漂。

二、传感器的动态特性

传感器的动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。一个具有良好静态特性的传感器,未必具有良好的动态特性。这是由于在动态(快速变化)输入信号情况下,不仅要求传感器能精确地测量信号的幅值大小,而且需要能测量出信号变化过程的波形,即要求传感器能迅速、准确地响应信号幅值变化和无失真地再现输入信号随时间变化的波形。实际的被测信号随时间变化的形式是各种各样的,在研究传感器的动态特性时,通常从时域和频域两个方面用瞬态(时间)响应法和频率响应法来分析。在时域内通常用阶跃函数研究传感器的时间响应特性;在频域内通常用正弦函数研究传感器的频率响应特性。传感器的动态特性分析和动态参数的标定都以这两种标准输入状态为依据。

对于任一传感器,只要其输入量是时间的函数,则其输出量也是时间的函数。

(一)动态特性的数学模型

传感器是信息(能量)转换和传递的通道,在静态情况下,其输出量(响应)与输入量(激励)的关系符合多项式方程(1-1)。在动态情况下,输入量是随时间变化的,如果输出量能立即随输入量无失真地变化,则这样的传感器可以看作是理想的。但实际传感器,输出量 y 不仅与输入量 x 有关,而且还与输入量的变化速度 $\frac{dx}{dt}$ 、加速度 $\frac{d^2x}{dt^2}$ 等有关。在研究传感器动态响应时,一般都忽略传感器的非线性和随机变化等复杂因素,把传感器看成是线性的,并且看成一个集总参数系统,因而用常系数的线性微分方程来描述其输出-输入关系,即:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-16)$$

式中, $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$ 均为与系统结构有关的常数; $x = x(t)$ 为输入信号; $y = y(t)$ 为输出信号。

对于传感器而言,除 $b_0 \neq 0$ 外,一般 $b_1 = b_2 = \cdots = b_m = 0$, 这样,式(1-16)变为

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-17)$$

上式是一般情况,对于常见的传感器,通常可分别用零阶、一阶和二阶常微分方程来描述其动态特性。

$$\text{零阶传感器} \quad a_0 y = b_0 x \quad (1-18)$$

$$\text{一阶传感器} \quad a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-19)$$

$$\text{二阶传感器} \quad a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-20)$$

(二)传递函数

传递函数是以代数式的形式表征系统本身的传输和转换特性的,而与激励系统的初始状态无关。

在上述微分方程中, $t \leq 0$ 时, $y(t) = 0$, 则 $y(t)$ 的拉氏变换定义为

$$y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt$$

式中, $s = \delta + j\omega$, $\delta > 0$ 。

对式(1-16)两边取拉氏变换则得:

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0) y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0) x(s) \quad (1-21)$$

输出函数 $y(t)$ 的拉氏变换式 $y(s)$ 与输入函数 $x(t)$ 的拉氏变换 $x(s)$ 之比称为该传感器的传递函数 $H(s)$

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-22)$$

对于 $y(t)$ 进行拉氏变换的初始条件是 $t \leq 0$ 时, $y(t) = 0$, 这对于传感器被激励之前的所有储能元件均可满足上述条件。

从式(1-22)可知传感器的传递函数 $H(s)$ 与输入量 $x(t)$ 无关, 只与系统结构参数 a_i, b_i 有关。因此, $H(s)$ 可以简单而恰当地描述传感器的输出-输入关系。只要知道 $y(s)$, $x(s)$, $H(s)$ 三者中任意两者, 第三者便可方便地求出。由此可见, 无须了解复杂系统的具体内容, 只要给系统一个激励信号 $x(t)$, 便可得到系统的响应 $y(t)$, 系统的特性就可被确定。

(三) 频率响应

当传感器输入的信号为一个正弦波信号 $x(t) = A \sin \omega t$ 时, 由于存在瞬态响应, 开始输出不是正弦波。随着时间的增长, 瞬态响应结束, 开始出现正弦波, 如图 1-8 所示。输出正弦波为 $y(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$ 。拉氏变换是广义的付氏变换, 取 $s = \sigma + j\omega$ 中 $\sigma = 0$, 则, $s = j\omega$ 即将拉氏变换局限于 s 平面的虚轴, 从而得到付氏变换, 则式(1-22)变为

$$H(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0} \quad (1-23)$$

$H(j\omega)$ 称为传感器的频率响应函数(频响), 频率响应函数 $H(j\omega)$ 是复函数, 它可以用指数形式表示, 即

$$H(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{y}{x} e^{j\varphi} = A(\omega) e^{j\varphi} \quad (1-24)$$

式中, $A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{y}{x}$, 即 $A(\omega) = \sqrt{[H_R(\omega)]^2 + [H_I(\omega)]^2}$, 其中 $H_R(\omega)$ 为 $H(j\omega)$ 实部, $H_I(\omega)$ 为 $H(j\omega)$ 虚部。 $A(\omega)$ 称为传感器的幅频特性。也称为传感器的动态灵敏度, 它表示传感器的输出与输入幅度之比随频率而变化的关系。

式(1-24)中角度 $\varphi(\omega) = \arctan \left[\frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \right]$ 称为传感器的相频特性。对于传感器而言, $\varphi(\omega)$ 通常为负角, 表示传感器输出滞后于输入的相位角度, 而且 φ 随频率变化而变化。传感器的幅频特性和相频特性之间有一定的内在关系, 在研究传感器的频率特性时一般主要研究其幅频特性。

下面以一阶系统为例研究其频率响应特性。

一阶传感器的微分方程由式(1-19)表示。它可以改写为

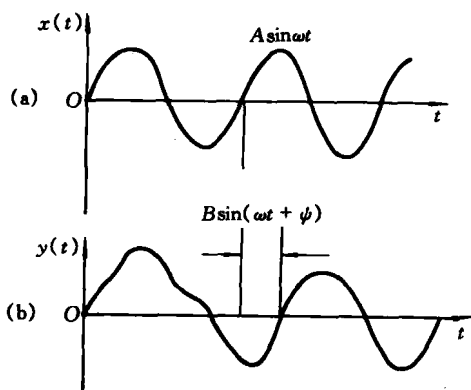


图 1-8 正弦输入的瞬态响应
(a)输入的正弦信号 (b)输出的响应信号

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x \quad (1-25)$$

式中, $\frac{a_1}{a_0}$ 具有时间量纲, 为传感器的时间常数 τ , 即 $\tau = \frac{a_1}{a_0}$, 传感器的静态灵敏度 $k = \frac{b_0}{a_0}$ 。则式(1-25)化为

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = kx \quad (1-26)$$

对式(1-26)作拉氏变换, 可得其传递函数为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} = \frac{k/\tau}{s + 1/\tau} \quad (1-27)$$

当传感器输入信号为 $x(t) = A \sin \omega t$ 时, 其传递函数 $H(j\omega)$ 、幅频特性 $A(\omega)$ 和相频特性 $\varphi(\omega)$ 分别为

$$H(j\omega) = \frac{k}{\tau(j\omega) + 1} \quad (1-28)$$

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (1-29)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1-30)$$

当 $\omega\tau \ll 1$ 时, $A(\omega) = k$, 系统接近零阶的情况, 即输出-输入为线性关系。

当 $\omega\tau = 1$ 时, $A(\omega) = 0.707k$ 。即传感器的灵敏度下降了 3db, 此时的频率定义为工作频率的上限频率 ω_p , $\omega_p = \frac{1}{\tau}$ 。由此可见, τ 越小, 工作频率越高。

当 $\varphi(\omega)$ 很小时, $\varphi(\omega) \approx \omega\tau$, 相位差 $\varphi(\omega)$ 与 ω 成线性关系, 这时保证测试是无失真的, $y(t)$ 能真实地反映输入 $x(t)$ 的变化规律。

(四) 时间响应

研究传感器的时间响应特性, 以阶跃信号为输入信号。当给静止的传感器输入一个单位阶跃信号

$$x(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ 1 & (t > 0) \end{cases} \quad \text{时}$$

其输出特性称为时间响应特性或阶跃响应特性。

1. 非欠阻尼传感器对阶跃输入的响应

非欠阻尼传感器对所测物理量阶跃变化的响应特性用响应时间、上升时间和时间常数来表示, 如图 1-9 所示。当对传感器施加一个阶跃信号, 输出在经过一段时间的非线性变化后向终值(100%输出值)逼近。输出信号由 0 上升到终值的 95%(或 98%)所需时间为响应时间; 输出信号由终值的 5%上升到终值的 90%所需时间为上升时间; 输出信号由 0 上升到终值的 63.2%(即 $1 - e^{-1}$)所需时间为时间常数, 通常用 τ 来表示。

2. 欠阻尼传感器对阶跃输入的响应

所谓阻尼, 是能量消耗的特性, 它与固有频率一起决定了频率响应的上限和传感器瞬态响应特性。

欠阻尼系统在到达最终值之前要产生超调, 即在稳定值上下摆动, 如图 1-10 所示, 欠阻尼传感器响应时间由于超调现象不好确定, 故通常只用时间常数来表示其响应特性。时间常数的定义与非欠阻尼传感器相同。

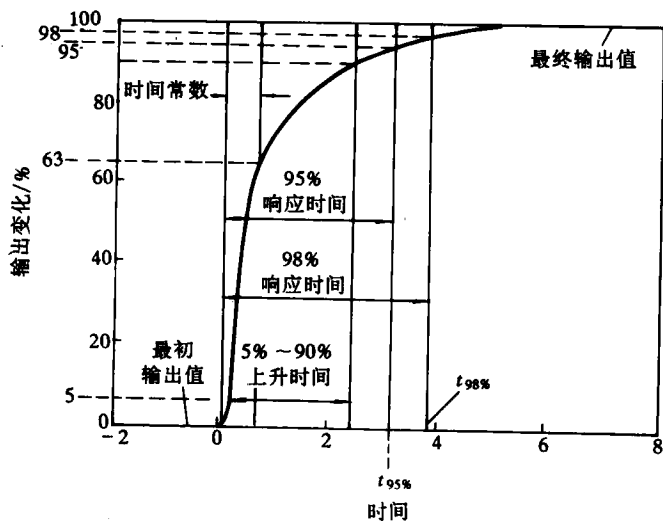


图 1-9 阶跃变化的响应特性

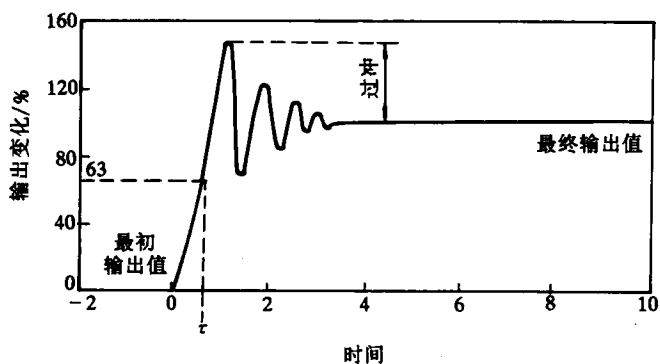


图 1-10 欠阻尼传感器对阶跃变化的响应特性

第二章 光电传感器

第一节 半导体的光电效应

光电传感器是一种将光能量转换成电能量的传感器。其工作的物理基础是物质的光电效应,即半导体中束缚电子在吸收光子后所产生的电学效应。半导体的光电效应可分为内光电效应和外光电效应。

一、内光电效应

当光照射到半导体上时,使半导体的电导率 σ 发生变化,或产生光生电动势的效应称为内光电效应。因此,内光电效应又分为光电导效应和光生伏特效应。

光电导效应产生的原因是:在光照作用下,半导体材料中的电子吸收光子能量后从键合状态变到自由状态,从而引起材料电导率的变化,这种现象称为光电导效应。基于这种效应的元件主要是光敏电阻器。

当光照射到本征半导体材料上时,若光的辐射能量足够大,半导体中价带上的电子被激发到导带上去,从而使导带中电子和价带中空穴浓度增加,引起半导体的电导率(本征光电导)变大,这就是半导体材料的本征光电导效应。为了能够实现电子在能带间跃迁,入射光的能量必须大于或等于半导体材料的禁带宽度 E_g ,即

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \quad (2-1)$$

式中, ν 为入射光的频率, $\frac{1}{s}$; λ 为入射光的波长; h 为普朗克常数, $h = 6.626\,196 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为光速。

上式说明,对于一种半导体材料,存在一个照射光的波长限 λ_c ,只有波长小于 λ_c 的光照射该半导体材料,才能发生本征光电导效应。实际上,光把光电材料中杂质和晶格缺陷所形成的能级上的电子激发到导带上的情况是很多的。这些能级与导带间的宽度要比禁带宽度小得多。这就意味着,光电导材料对波长比用式(2-1)计算的波长长的光也有响应,而且在晶体中掺杂有时可以使材料的光谱响应向长波方向发展。光的波长越短,光子能量也越大,越容易产生光电效应。但是由于光电导材料对波长短的光吸收系数也大,几乎在进入表面层附近处波长短的光就被吸收,故激发的表面载流子浓度高,使表面载流子复合速度加快,因此波长太短的光,光电效应反而减弱。

对于掺杂的N型或P型半导体。当照射光的光子能量小于禁带宽度 E_g 时,光子可能将P型半导体价带中的电子激发到受主能级中或将N型半导体中施主能级中的电子激发到导带上,这两种情况都使半导体电导率(杂质光电导)变大。但杂质光电导一般较小。

若半导体样品沿光照方向足够厚,当光照射到其上时,光生载流子将沿光照方向出现浓度梯度,使光生电子和光生空穴都沿光照方向扩散,但由于电子和空穴的扩散系数不同,电子扩