



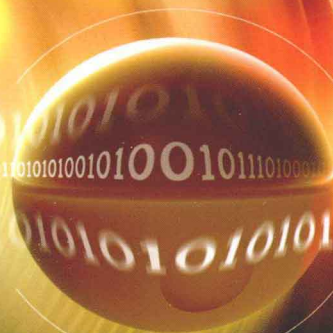
普通高等院校“十二五”规划教材

CHUANGANQI

YUANLI YU JIANCE JISHU
SHIJIAN ZHIDAO JIAOCHENG

传感器 原理与检测技术 实践指导教程

潘雪涛 邬华芝 主编
温秀兰 张美凤 副主编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

传感器原理与检测技术 实践指导教程

潘雪涛	邬华芝	主 编
温秀兰	张美凤	副主编
潘雪涛	邬华芝	等编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是《传感器原理与检测技术》的配套实践教程。全书共分上、中、下3篇。上篇是传感器原理与检测技术实验的理论基础,简单介绍传感器的基本概念、特性指标、各类常用传感器的基本原理、测量误差、数据处理方法和常用的数据处理软件;中篇是传感器原理与检测技术实验中的典型仪器,详细介绍了实验的基本规则,常用电测仪表的使用方法,国内典型传感器与检测技术实验装置的结构组成、特性参数以及使用说明;下篇是传感器原理与检测技术实验,详细介绍了包括信号调理电路、常用传感器原理及应用、光电类传感器原理及应用3个方面的验证性、综合性和设计性实验,并在第10章专门讲述了基于NI ELVIS平台的创新性实验。

本书内容丰富、条理清晰、通俗易懂。通过验证性、综合性、设计性、创新性实验多个环节的分层次、递进式反复训练,实现从基础层、应用层、提高层到创新层的跨越,以达到培养学生的实践能力和创新能力的目的。本书主要供各类本科院校的测控技术与仪器、电子信息工程、光电信息工程、自动化、机械设计与自动化等专业学生作为配套实验教材使用,也可独立作为高职高专学校少学时课程的教材,还可供学生进行课程设计、毕业设计、科技小制作以及在生产企业一线从事传感器与检测技术方面工作的工程师和技术人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理与检测技术实践指导教程/潘雪涛, 郭华芝

主编. —北京:国防工业出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-118-07721-6

I. ①传... II. ①潘...②郭... III. ①传感器—教材

IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 215837 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13½ 字数 304 千字

2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 27.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

信息技术的发展正给人们的生产、生活带来巨大的变化,科技越发达,自动化程度越高,对传感器与检测技术等信息获取与处理技术的依赖性也就越强烈。传感器与检测技术既是现代信息系统的“源头”和“感官”,又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。如果没有性能可靠的传感器,没有先进的检测技术,那么信息的准确获取和精密检测就是一句空话,通信技术和计算机技术也就成了无源之水、无木之本。因此,应用、研究和发展传感器与检测技术是生产过程自动化和发展信息时代的必然要求。

《传感器原理与检测技术实践指导教程》是《传感器原理与检测技术》的配套实践教材,是为各类高校,尤其是应用型本科院校的测控技术与仪器、电子信息工程、光电信息工程、电气工程与自动化、机械设计与自动化等专业编写的一本辅导教材,也可独立作为高职高专学校少学时课程的教材,还可供学生进行课程设计、毕业设计、科技小制作以及在生产企业一线从事传感器与检测技术方面工作的工程师和技术人员作为参考用书。

全书共分三篇 10 章,上篇是传感器原理与检测技术实验的理论基础,分为 3 章,主要介绍传感器的基本概念、各类常用传感器的工作原理以及测量误差与数据处理方法等;中篇是传感器原理与检测技术实验中的典型仪器,分为 3 章,分别介绍了实验的基本规则、常用电测仪表的使用方法以及国内典型传感器与检测技术实验装置的结构、各器件特性等内容;下篇是传感器原理与检测技术实验,分为 4 章,其中第 7 章为信号调理电路实验、第 8 章为常用传感器原理及应用实验、第 9 章为光电类传感器原理及应用实验、第 10 章为基于 NI ELVIS 平台的设计性、创新性实验,每个实验都给出了详细的实验目的、实验原理、实验所需设备、实验步骤等。

本书中的实验项目不是将传感器实验仪器说明书中的实验简单重复罗列,而是在此基础上进行很好的整理、归纳和提高,通过验证性、综合性、设计性、创新性实验多个环节的分层次、递进式反复训练,实现从基础层、应用层、提高层到创新层的跨越,以达到培养学生的实践能力和创新能力的目的。

本书由常州工学院潘雪涛、邬华芝任主编,南京工程学院温秀兰、常州工学院张美凤任副主编,参加编写工作的还有太原理工大学王峰、淮阴工学院李洪海、常州工学院蔡建文、郭杰。其中,潘雪涛编写第 2 章、第 8 章和第 9 章,温秀兰编写第 1 章,张

美凤编写第5章,王峰编写第6章,蔡建文编写第4章和第7章,李洪海编写第3章,郭杰编写第10章。

全书在编写过程中参考并引用了许多文献,在此向参考文献作者表示衷心感谢!尤其要感谢的是杭州赛特传感技术有限公司、浙江天煌科技实业有限公司(天煌教仪)、浙江高联仪器技术有限公司、美国国家仪器公司(NI公司),本书中涉及的主要实验设备都是由他们生产的,很多实验是在他们提供的资料上整理综合而成。本书承蒙北京理工大学娄文中教授主审,他们审阅了全稿并提出了很多宝贵意见和建议,在此表示诚挚的谢意!

由于传感器是多学科知识的综合,种类多、发展快、应用领域广,而编者的水平和经验有限,书中出现错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者
2011年7月

目 录

上篇 传感器原理与检测技术实验的理论基础

第1章 传感器与检测技术的基本概念	1
1.1 传感器的定义与组成	1
1.1.1 传感器的作用	1
1.1.2 传感器的定义与组成	1
1.1.3 传感器的分类	2
1.1.4 对传感器的一般要求	3
1.2 传感器与检测技术的基本特性	3
1.2.1 传感器的数学模型	3
1.2.2 传感器的静态特性	4
1.2.3 传感器的动态特性	6
1.3 传感器的标定	9
1.3.1 传感器的静态特性标定	9
1.3.2 传感器的动态特性标定	9
1.4 传感器的选用原则	9
第2章 各类常用传感器的基本原理	12
2.1 电阻式传感器	12
2.1.1 电位器式传感器	12
2.1.2 电阻应变式传感器	13
2.1.3 固态压阻式传感器	19
2.2 电感式传感器	20
2.2.1 自感式电感传感器	20
2.2.2 差动变压器式电感传感器	25
2.2.3 电涡流式传感器	29
2.3 电容式传感器	30
2.3.1 电容式传感器的工作原理	31
2.3.2 电容式传感器的输出特性分析	31
2.3.3 电容式传感器的测量电路	34
2.4 磁电式传感器	36

2.4.1	磁电感应式传感器	36
2.4.2	霍尔传感器	38
2.5	压电式传感器	40
2.5.1	压电效应	40
2.5.2	压电常数和表面电荷的计算	43
2.5.3	压电元件的常用结构形式	47
2.5.4	压电传感器的测量电路	47
2.6	光电式传感器	50
2.6.1	光电效应	51
2.6.2	光电器件	53
2.6.3	光纤传感器	57
2.6.4	光栅传感器	59
2.6.5	光固态图像传感器	62
2.7	热电式传感器	65
2.7.1	热电偶温度传感器	65
2.7.2	电阻温度传感器	70
2.7.3	半导体温度传感器	72
第3章	测量误差与数据处理方法	75
3.1	测量的基本概念	75
3.2	误差理论与数据处理	75
3.2.1	误差的基本理论	75
3.2.2	数据处理方法	77
3.3	常用数据处理软件的应用	83

中篇 传感器原理与检测技术实验中的典型仪器

第4章	实验的基本规则	85
4.1	实验须知	85
4.2	实验报告的整理、书写	86
第5章	常用电测仪表的使用方法	87
5.1	万用表	87
5.1.1	万用表的基本结构	87
5.1.2	万用表的使用	87
5.1.3	万用表使用时的注意事项	89
5.2	示波器	89
5.2.1	示波器的工作原理	89

5.2.2 示波器使用	91
5.3 信号发生器	94
5.3.1 信号发生器的分类与用途	94
5.3.2 信号发生器的使用与测量单位	95
5.4 基于 LabVIEW 的虚拟测试仪器	95
5.4.1 虚拟仪器的特点	95
5.4.2 虚拟仪器的构成及其分类	96
5.4.3 LabVIEW 虚拟仪器开发平台	97
第 6 章 国内典型传感器与检测技术实验装置	102
6.1 CSY 系列传感器与检测技术实验台	102
6.2 THZK 测控技术综合实验平台	105
6.3 CSY 型光电传感系统实验台	107

下篇 传感器原理与检测技术实验

第 7 章 信号调理电路实验	109
7.1 差动放大器实验	109
7.2 信号放大电路实验	112
7.3 信号运算电路实验	117
7.4 调制及解调实验	120
7.5 开关电容滤波器实验	123
7.6 精密全波整流及检波实验	124
7.7 有源滤波器设计实验	126
第 8 章 常用传感器原理及应用实验	129
8.1 应变式传感器单臂、半桥、全桥性能实验	129
8.2 压阻式压力传感器的压力测量实验	132
8.3 扭矩传感器性能实验	134
8.4 激励频率对差动变压器特性的影响实验	135
8.5 差动变压器输出特性分析及零点残余电压补偿实验	137
8.6 被测体材质、面积大小对电涡流传感器的特性影响实验	138
8.7 电容式传感器的静态特性实验	140
8.8 直流、交流激励时霍尔式传感器的位移实验	142
8.9 压电式传感器测量振动实验	145
8.10 集成温度传感器测量温度性能实验	146
8.11 铂电阻传感器测量温度性能实验	147
8.12 热电偶温度测量及冷端补偿实验	149

8.13	气敏、湿敏传感器性能实验	151
8.14	转速测量实验	153
8.15	传感器静态特性标定实验	154
8.16	传感器动特性标定实验	154
8.17	数字式电子秤设计实验	155
第9章	光电传感器原理及应用实验	156
9.1	光敏电阻特性测试实验	156
9.2	光敏二极管特性测试实验	161
9.3	光敏三极管特性测试实验	165
9.4	光电开关实验	168
9.5	光电池性能测试实验	169
9.6	光纤传感器应用实验	172
9.7	PSD 位置传感器测量位移实验	175
第10章	基于 NI ELVIS 平台的设计性、创新性实验	178
10.1	NI ELVIS 平台简介	178
10.2	设计性、创新性实验实例	179
10.2.1	电子元件参数测试仪设计实验	180
10.2.2	虚拟数字温度计设计实验	185
10.2.3	双向十字路口交通灯自动控制系统设计	187
10.2.4	常用滤波器的设计实验	192
10.2.5	射频无线通讯器设计实验	196
10.2.6	直流电机转速计设计实验	200
参考文献		205

上篇 传感器原理与检测技术实验的

理论基础

第1章 传感器与检测技术的基本概念

1.1 传感器的定义与组成

1.1.1 传感器的作用

人通过感官来接收外界的信号,并将所接收的信号送入大脑,进行分析处理后获取有用的信息。对现有的或者正在发展中的机械电子装置来说,电子计算机(即常称电脑)相当于人的大脑,而相应于人的感官部分的装置就是传感器。所以说,传感器是人类感官的扩展和延伸,又称之为“电五官”。

借助传感器,人类可以去探测那些无法直接用感官获取的信息。例如,用超声波探测器可以探测海水的深度,用红外遥感器可以从高空探测地球上的植被和污染情况等等。在自动控制领域中,自动化程度越高,控制系统对传感器的依赖性就越大,因此,传感器对控制系统功能的正常发挥起着决定性的作用。

传感器早已渗透到诸如工农业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程、甚至文物保护以及其它更广泛的领域中。可以毫不夸张地说,从茫茫太空到浩瀚的海洋,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。

由此可见,传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用是十分明显的。

1.1.2 传感器的定义与组成

1. 传感器的定义

我国国家标准(GB7765—2005)中,传感器(Transducer/Sensor)的定义是:“能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置”。我们的定义是: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。

这一定义包含了以下几方面的意思:

- (1) 传感器是测量装置,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,这种量要便于传输、转换、处理、显示等,这种量可以是气、光、电物理量,但主要是电物理量;
- (4) 输出输入有对应关系,且应有一定的精确程度。

2. 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、基本转换电路三部分组成,组成框图如图 1-1 所示。

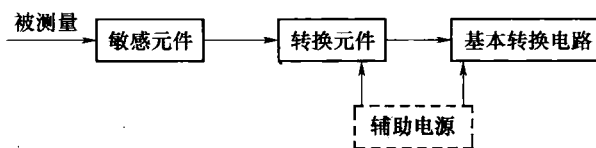


图 1-1 传感器的组成

(1) 敏感元件:它是直接感受被测量,并输出与被测量有确定关系的某一物理量的元件。

(2) 转换元件:敏感元件的输出信号就是它的输入信号,它把输入信号转换成电路参量。

(3) 基本转换电路:电路参数接入基本转换电路(简称转换电路),便可转换成电量输出。传感器只完成被测参数至电量的基本转换,然后输入到测控电路,进行放大、运算、处理等进一步转换,以获得被测值或进行过程控制。

实际上,有些传感器很简单,有些则较复杂。最简单的传感器由一个敏感元件(兼转换元件)组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶就是这样。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,因转换元件的输出已是电量,故无需转换电路,如压电式加速度传感器。有些传感器,转换元件不只一个,要经过若干次转换。敏感元件与转换元件在结构上常是装在一起的,而转换电路为了减小外界的影响也希望和它们装在一起,不过由于空间的限制或者其他原因,转换电路常装入电箱中。尽管如此,因为不少传感器要在通过转换电路后才能输出电信号,从而决定了转换电路是传感器的组成环节之一。

1.1.3 传感器的分类

传感器是知识密集、技术密集的行业,它与许多学科有关,它的种类十分繁多。为了更好的掌握它、应用它,需要有一个科学的分类方法。目前广泛采用的分类方法主要有按照其工作的物理原理分类和按照传感器的用途来分类。

(1) 按照物理原理分类可分为电参量式传感器(包括电阻式、电感式、电容式等三个基本型式),磁电式传感器(包括磁电感应式、霍尔式、磁栅式等),压电式传感器,光电式传感器(包括一般光电式、光栅式、激光式、光电码盘式、光导纤维式、红外式、摄像式等),热电式传感器(包括热电偶、热电阻、半导体集成温度传感器等),波式传感器(包括超声波式、微波式等),射线式传感器和其他原理的传感器等。

有些传感器的工作原理是具有两种以上原理的复合形式,如不少半导体式传感器,也

可看成电参量式传感器。

(2) 按照传感器的用途来分类可以分为位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器等。

1.1.4 对传感器的一般要求

无论何种传感器,作为测量与控制系统的首要环节,通常都必须具有快速、准确、可靠且又经济的实现信息转换的基本要求。因此,尽管各种传感器由于原理、结构不同,使用环境、条件、目的不同,其技术指标也不可能相同。但是有些一般要求,却基本上是共同的:

- (1) 足够的容量。传感器的工作范围或量程足够大,具有一定过载能力。
- (2) 与测量或控制系统相匹配性好,转换灵敏度高和线性程度好。
- (3) 反应快、精度适当、工作可靠性好。
- (4) 适用性和适应性强,对被测量的状态影响小,不易受外界干扰的影响,使用安全等。
- (5) 使用经济,即成本低、寿命长,易于使用、维修和校准。

当然完全能满足上述要求的传感器是很少的。我们应根据应用的目的、使用环境、被测对象状况、精度要求和信号处理等具体条件全面综合考虑。

1.2 传感器与检测技术的基本特性

传感器的特性是指传感器所特有性质的总称。传感器的基本特性就是系统输入—输出特性,即系统输出信号与输入信号之间的关系,它是与传感器的内部结构参数有关的基本特性。

根据输入信号随时间的变化关系,传感器的输入量可分为静态量和动态量,相应的基本特性分为静态特性和动态特性。静态量是指不随时间变化或变化极其缓慢的量;动态量是指周期变化、瞬态变化或随机变化的量。当输入量为静态量时,传感器的基本特性表现为静态特性;当输入量为动态量时,传感器的基本特性表现为动态特性。

1.2.1 传感器的数学模型

1. 静态模型

静态模型是指在静态信号情况下,描述传感器输出与输入间关系的数学模型。一般可用多项式表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n \quad (1-1)$$

式中 x ——输入量;

y ——输出量;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——传感器的线性灵敏度;

$a_2 \cdots a_n$ ——非线性项的待定系数。

式(1-1)中的各项系数决定传感器静态特性曲线的具体形式。但是在研究传感器线性特性时,可以不考虑零位输出量,也就是取 $a_0 = 0$ 。实际运用时,传感器数学模型的建立究竟应取几阶多项式,是一个数据处理问题。建立数学模型的古典方法是分析法,该法太复杂,有时甚至难以进行。利用校准数据来建立数学模型,是目前普遍采用的一种方法,它很受人们重视,并得到了发展。

2. 动态模型

动态模型是指在准动态信号或动态信号作用下,描述传感器输出与输入间关系的数学模型。一般可用微分方程和传递函数来表示:

(1) 微分方程:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-2)$$

式中: $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m$ 是与传感器的结构特性有关的常数。

(2) 传递函数:

对微分方程两边取拉普拉斯变换,得

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0) Y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + b_1 s + b_0) X(s) \quad (1-3)$$

定义传递函数 $H(s) = Y(s)/X(s)$, 则有

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-4)$$

传递函数与微分方程两者完全等价,可以相互转化。考察传递函数所具有的基本特性,比考察微分方程的基本特性要容易得多。

1.2.2 传感器的静态特性

传感器的静态特性指标主要有线性度、灵敏度、迟滞、重复性等。

1. 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。输出与输入关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看,希望具有线性关系,即理想输入输出关系。但实际遇到的传感器大多为非线性,如图 1-2 所示。

在实际使用中,为了标定和数据处理的方便,希望得到线性关系,因此引入各种非线性补偿环节,如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理,从而使传感器的输出与输入关系为线性或接近线性。但如果传感器非线性的方次不高,输入量变化范围较小时,可用一条直线(切线或割线)近似地代表实际曲线的一段,使传感器输入输出特性线性化,所采用的直线称为拟合直线。

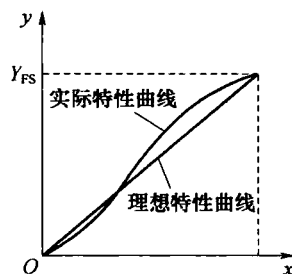


图 1-2 线性度示意图

传感器的线性度是指在全量程范围内实际特性曲线与拟合直线之间的最大偏差值 $\Delta L_{\max}$ 与满量程输出值 y_{FS} 之比。线性度也称为非线性误差,用 γ_L 表示,

$$\gamma_L = \pm (\Delta L_{\max} / y_{FS}) \times 100\% \quad (1-5)$$

由此可见,非线性误差的大小是以一定的拟合直线为基准直线而得来的。拟合直线不同,非线性误差也不同。所以,选择拟合直线的主要出发点应是获得最小的非线性误差。另外,还应考虑使用是否方便,计算是否简便。

目前常用的拟合方法有:①理论拟合;②过零旋转拟合;③端点连线拟合;④端点连线平移拟合;⑤最小二乘拟合;⑥最小包容拟合等。

2. 灵敏度与灵敏度误差

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 Δy 与引起输出量增量 Δy 的相应输入量增量 Δx 之比。用 S 表示灵敏度,即

$$S = \Delta y / \Delta x \quad (1-6)$$

由此可见,传感器输出曲线的斜率就是其灵敏度。对具有线性特性的传感器,其特性曲线的斜率处处相同,灵敏度 S 是一常数,与输入量大小无关。而非线性传感器的灵敏度是变量,用 dy/dx 表示某一点的灵敏度,如图 1-3 所示。

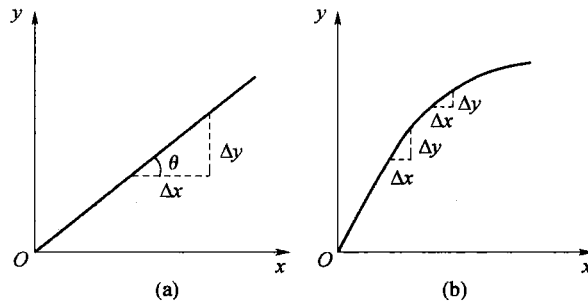


图 1-3 灵敏度示意图
(a) 线性传感器; (b) 非线性传感器。

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

$$\gamma_s = \pm (\Delta k / k) \times 100\% \quad (1-7)$$

3. 迟滞

传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输出输入曲线不重合称为迟滞。也就是说,对于同一大小的输入信号,传感器的正反行程输出信号大小不相等,这个差值称为迟滞误差。迟滞特性如图 1-4 所示。

迟滞误差一般是由实验方法测得,一般以满量程输出的百分数表示,即

$$\gamma_H = \pm (1/2) (\Delta H_{\max} / y_{FS}) \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 $\Delta H_{\max}$ ——正反行程间输出的最大差值。

迟滞误差的另一名称叫回程误差。回程误差常用绝对误差表示。检测回程误差时,可选择几个测试点。对应于每一输入信号,传感器正行程及反行程中输出信号差值的最大者即为回程误差。

4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。

如图 1-5 所示为输出曲线的重复特性,正行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 1}$,反行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性误差取这两个偏差之中较大者为 $\Delta R_{\max}$,再以满量程 y_{FS} 输出的百分数表示,即

$$\gamma_R = \pm (\Delta R_{\max} / y_{FS}) \times 100\% \quad (1-9)$$

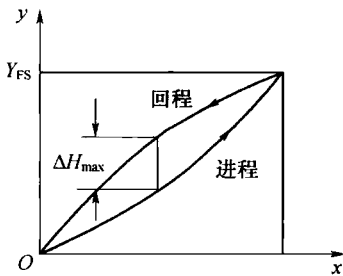


图 1-4 迟滞误差

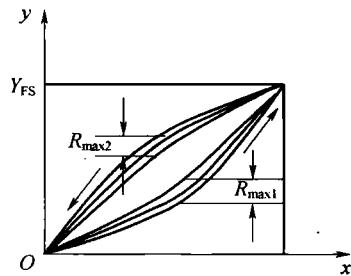


图 1-5 重复性误差

传感器的静态特性还有分辨力与阈值、稳定性、温度稳定性、抗干扰稳定性、静态误差等,此处不在详述,读者可参阅相关书籍。

1.2.3 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指输入量随时间变化时传感器的响应特性。

很多传感器要在动态条件下检测,被测量可能以各种形式随时间变化。只要输入量是时间的函数,则其输出量也将是时间的函数,其间的关系要用动态特性来说明。

一个动态特性好的传感器,其输出量将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际的传感器,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

1. 传感器的基本动态特性方程

传感器的种类和形式很多,但它们的动态特性一般都可以用式(1-2)的微分方程来描述:

1) 零阶系统

在方程式(1-2)中的系数除了 a_0 、 b_0 之外,其他的系数均为零,则微分方程就变成简单的代数方程,即 $a_0 y(t) = b_0 x(t)$,通常写成:

$$y(t) = kx(t) \quad (1-10)$$

式中: $k = b_0/a_0$ 为传感器的静态灵敏度或放大系数。传感器的动态特性用方程式(1-10)来描述的就称为零阶系统。

零阶系统具有理想的动态特性,无论被测量 $x(t)$ 如何随时间变化,零阶系统的输出都不会失真,其输出在时间上无任何滞后,所以零阶系统又称为比例系统。在工程应用中,电位器式的电阻传感器、变面积式的电容传感器及利用静态式压力传感器测量液位均

可看作零阶系统。

2) 一阶系统

在式(1-2)中的系数除了 a_0, b_0, a_1 之外,其余系数均为零,则微分方程就变为

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-11)$$

上式通常写为

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t) \quad (1-12)$$

式中 τ ——传感器的时间常数, $\tau = a_1/a_0$;

k ——传感器的静态灵敏度, $k = b_0/a_0$ 。

时间常数 τ 具有时间量纲,它反映传感器惯性的大小,静态灵敏度则说明其静态特性。用式(1-12)描述其动态特性的传感器就称为一阶系统,一阶系统也称为惯性系统。不带保护套管热电偶测温系统、阻容滤波器等都可看作为是一阶系统。

3) 二阶系统

$$\text{二阶系统的微分方程为 } a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-13)$$

一般可以规一化为标准形式:

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = S\omega_n^2 x(t) \quad (1-14)$$

式中 $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$ ——传感器的固有角频率;

$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ ——传感器的阻尼比;

$S = b_0/a_0$ ——传感器的静态灵敏度。

带有套管的热电偶、电磁式的动圈仪表及 RLC 振荡电路等均可看作为二阶系统。

2. 传感器的动态响应特性

传感器的动态特性不仅与传感器的“固有因素”有关,还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说,同一个传感器在不同形式的输入信号作用下,输出量的变化是不同的。实际的传感器往往比上述的数学模型要复杂。因此动态响应特性一般并不能直接给出其微分方程,而是通过一些实验给出传感器与阶跃响应曲线和频率响应曲线上的某些特征值来表示动态响应特性。

1) 与阶跃响应有关的动态性能指标

如图 1-6 所示两条典型的阶跃响应曲线,一条是一阶系统的阶跃响应曲线,另一条是二阶系统的阶跃响应曲线。

与这两种阶跃响应有关的动态性能指标有:

(1) 时间常数 τ : 一阶传感器输出由零上升到稳态值的 63.2% 所需的时间,称为时间常数,这种方法的缺点是曲线的起点往往难于准确判断;

(2) 延迟时间 t_d : 传感器输出达到稳态值的 50% 所需的时间;

(3) 上升时间 t_r : 传感器输出达到稳态值的 90% 所需的时间,有时也采用其他百

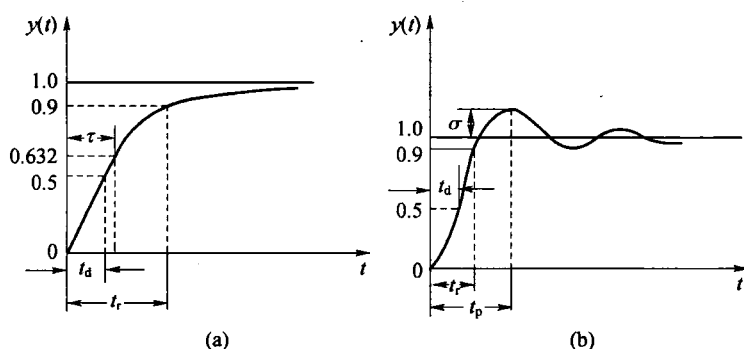


图 1-6 阶跃响应曲线

(a) 一阶传感器; (b) 二阶传感器。

分数;

- (4) 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;
- (5) 超调量 σ : 二阶传感器输出超过稳态值的最大值;
- (6) 衰减比 d : 衰减振荡的二阶传感器输出响应曲线第一个峰值与第二个峰值之比。

2) 与频率响应有关的动态性能指标

如图 1-7 所示,是典型一阶系统的频率响应曲线。

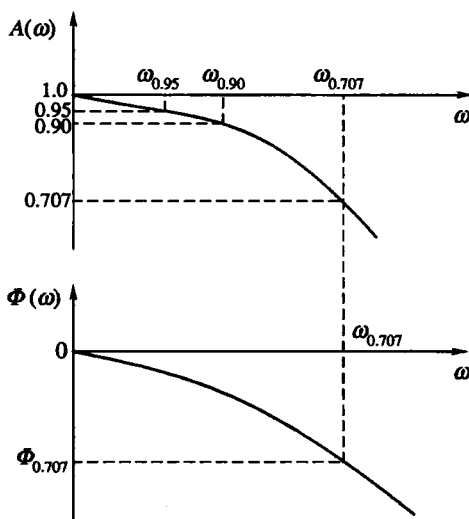


图 1-7 频率响应曲线

与这频率响应有关的动态性能指标有:

- (1) 通频带 ω_n : 传感器在对数幅频特性曲线上幅值衰减 3dB 时所对应的频率范围。
- (2) 工作频带 $\omega_{0.95}$ (或 $\omega_{0.90}$): 当传感器的幅值误差为 $\pm 5\%$ (或 $\pm 10\%$) 时其增益保持在一定值内的频率范围。
- (3) 时间常数 τ : 用时间常数 τ 来表征一阶传感器的动态特性。 τ 越小,频带越宽。
- (4) 固有频率 ω_n : 二阶传感器的固有频率 ω_n 表征其动态特性。
- (5) 相位误差: 在工作频带范围内,传感器的实际输出与所希望的无失真输出间的相