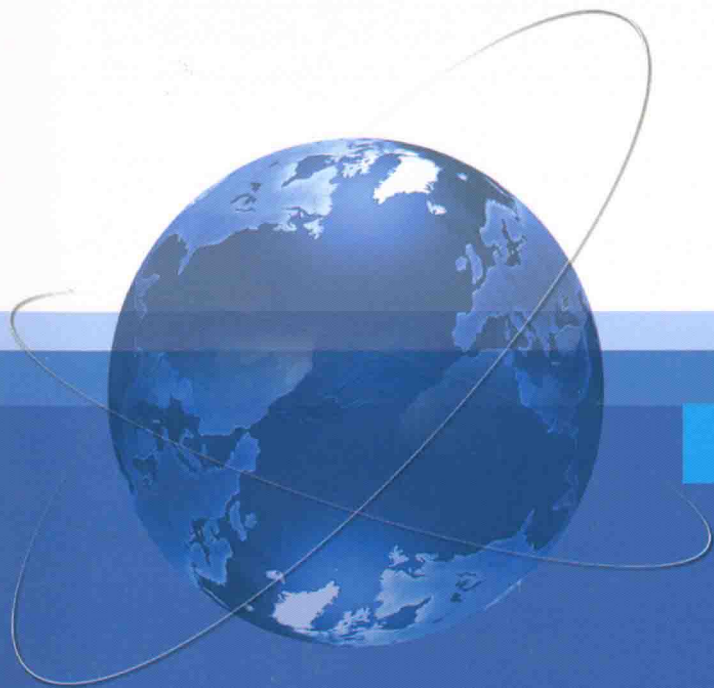




高等职业教育“十二五”规划教材

21世纪高职高专规划教材 (电工电子类)

传感器与 检测技术



林锦实 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等职业教育“十二五”规划教材
21世纪高职高专规划教材（电工电子类）

传感器与检测技术

主 编 林锦实
副主编 齐卫红 金桂梅 石敬波
参 编 秦 梅 黄 河 李继超



机械工业出版社

本书共分7章,首先介绍了传感器与检测技术基础,然后按照传感器的不同分类方式,介绍了各种传感器的原理、结构、性能及使用方法,最后介绍了检测技术的综合应用。

本书简化了公式推导,讲解深入浅出,图文并茂,贴近实际,附有相关的思考题与习题,特别是有些章节还介绍了一些简单实用的“小制作”,便于学生通过实际制作,真正掌握传感器的实用技术。可作为高等职业技术教育电气自动化、机电一体化、无损检测技术及数控技术等专业的教学用书,亦可供大中专院校教师及相关技术人员参考。

本书配有电子教案,凡一次性购书30本以上者免费赠送一份电子教案。请与本书责任编辑余茂祚联系(联系电话010-88379759,邮箱 yu-maozuo@163.com)。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/林锦实主编. —北京:机械工业出版社, 2011. 11
高等职业教育“十二五”规划教材
21世纪高职高专规划教材·电工电子类
ISBN 978-7-111-36330-9

I. ①传… II. ①林… III. ①传感器-检测-高等职业教育-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第225982号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:余茂祚 责任编辑:韩静 版式设计:霍永明
责任校对:任秀丽 责任印制:杨曦
保定市中国画美凯印刷有限公司印刷
2012年1月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·12.5印张·303千字
0 001—3 000册
标准书号:ISBN 978-7-111-36330-9
定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专规划教材 编委会名单

编委会主任 王文斌

编委会副主任 (按姓氏笔画为序)

王建明	王明耀	王胜利	王寅仓	王锡铭
刘 义	刘晶磷	刘锡奇	杜建根	李向东
李兴旺	李居参	李麟书	杨国祥	余党军
张建华	茆有柏	赵居礼	秦建华	唐汝元
谈向群	符宁平	蒋国良	薛世山	

编委会委员 (按姓氏笔画为序, 黑体字为常务编委)

王若明	田建敏	成运花	曲昭仲	朱 强
刘 莹	刘学应	孙 刚	严安云	李学锋
李法春	李超群	杨 飒	杨群祥	杨翠明
宋岳英	何志祥	何宝文	余元冠	沈国良
张 波	张 锋	张福臣	陈月波	陈向平
陈江伟	武友德	郑晓峰	林 钢	周国良
赵建武	赵红英	祝士明	俞庆生	倪依纯
徐铮颖	韩学军	崔 平	崔景茂	焦 斌
戴建坤				

总 策 划 余茂祚

前 言

PREFACE

《传感器与检测技术》是21世纪高职高专规划教材。根据高等职业教育培养目标的要求,本书力图使学生学完本课程后能够系统掌握现代传感器与检测技术的基本理论和应用技术,为将来从事科研和工业领域的技术工作奠定坚实的基础。

本书根据该课程涉及的学科面广、实践性强、内容分散、缺乏系统性和连续性的特点,避免了繁琐的理论推导,深入浅出地分析了各种传感器的原理、特性及信号处理方法,全面深入地分析了典型应用实例,特别有些章节还介绍了一些简单实用的“小制作”,便于学生通过实际制作,真正掌握传感器的实用技术。本书尽可能反映了国内外传感器与检测技术领域的新成果、新进展,充分体现了高职教育培养应用型人才的宗旨,有利于培养学生分析问题、解决问题的能力。

本书共分7章,第1章主要介绍了传感器的特性、测量误差及弹性敏感元件特性;第2章介绍了能量控制型传感器中典型的电阻应变式、电容式、电感式及电涡流式传感器;第3章介绍了物性型传感器中典型的压电式、光电式、霍尔式、磁电式、超声波及核辐射传感器;第4章介绍了环境量检测传感器中典型的热电偶温度传感器、热电阻温度传感器及气敏、湿敏、离子敏传感器;第5章介绍了数字式传感器中的光电编码器、感应同步器及光栅式、磁栅式、容栅式传感器;第6章介绍了新型传感器中的集成温度传感器、光纤传感器、激光式传感器和图像传感器;第7章检测技术的综合应用中介绍了检测系统的抗干扰技术、传感器的可靠性、传感器的标定、现代检测系统及其应用实例。在附录中给出了标准化热电偶和热电阻的分度表。

本书可作为高等职业技术教育电气自动化、机电一体化、无损检测技术及数控技术等专业的教学用书,亦可供大中专院校教师及相关技术人员参考。本书参考学时约为60学时,各校可根据各自的专业方向选讲,以减少相应的学时。

全书内容由林锦实统稿。第1章由佳木斯大学的李继超编写;第2章由辽宁机电职业技术学院的石敬波编写;第3章由华北机电学校的秦梅编写;4.1~4.3节、第6章和附录由辽宁机电职业技术学院的林锦实编写;4.4节和4.5节由日照职业技术学院的金桂梅编写;第5章由宜宾职业技术学院的黄河编写;第7章由西安理工大学高新技术学院的齐卫红编写。

由于传感器与检测技术发展较快,编者水平有限,书中难免有不妥或遗漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

CONTENTS

前言	
第1章 传感器与检测技术基础	1
1.1 传感器简述	1
1.2 测量误差与准确度	7
1.3 弹性敏感元件	13
本章小结	21
思考题与习题	21
第2章 能量控制型传感器	23
2.1 电阻应变式传感器	23
2.2 电容式传感器	32
2.3 电感式传感器	39
2.4 电涡流式传感器	46
本章小结	51
思考题与习题	52
第3章 物性型传感器	54
3.1 压电式传感器	54
3.2 光电式传感器	59
3.3 霍尔式传感器	66
3.4 磁电式传感器	70
3.5 超声波传感器	74
3.6 核辐射传感器	79
本章小结	85
思考题与习题	86
第4章 环境量检测传感器	87
4.1 热电偶温度传感器	87
4.2 热电阻温度传感器	98
4.3 气敏传感器	103
4.4 湿敏传感器	110
4.5 离子敏传感器	114
本章小结	115
思考题与习题	116
第5章 数字式传感器	117
5.1 光电编码器	117
5.2 光栅式传感器	123
5.3 磁栅式传感器	127
5.4 容栅式传感器	132
5.5 感应同步器	135
本章小结	138
思考题与习题	139
第6章 新型传感器	140
6.1 集成温度传感器	140
6.2 光纤传感器	143
6.3 激光式传感器	148
6.4 图像传感器	151
本章小结	156
思考题与习题	157
第7章 检测技术的综合应用	159
7.1 检测系统的抗干扰技术	159
7.2 传感器的可靠性	168
7.3 传感器的标定	173
7.4 现代检测系统及其应用实例	176
本章小结	183
思考题与习题	183
附录	184
附录A 标准化热电偶分度表	184
附录B 标准化热电阻分度表	188
参考文献	190

第 1 章 传感器与检测技术基础

1.1 传感器简述

1.1.1 传感器的组成与分类

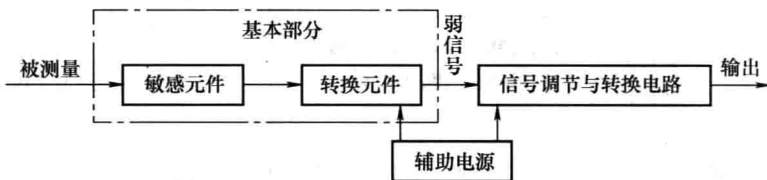
1. 传感器的定义 我国国家标准 (GB/T 7665—2005) 中对传感器 (Transducer/Sensor) 的定义是: 能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。它是一种以一定的准确度把被测量转换成与之有对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置或器件, 所以传感器又被称为敏感元件、检测器件、转换器件等。

传感器的这一定义包含了以下几方面的意义:

- 1) 传感器是测量装置, 能够完成检测任务。
- 2) 它的输入量是某一被测量, 可以是物理量、化学量、生物量等。
- 3) 它的输出量是某一物理量, 这种量要便于传输、转换、处理、显示等, 它可以是气、光、电量, 但主要是电量。
- 4) 输出量与输入量应有对应关系, 且应有一定的准确度。

综上所述, 传感器是实现传感功能的基本部件。传感器技术的共性, 就是利用物理定律和物质的物理、化学、生物特性, 将非电量 (位移、速度、加速度、力等) 转换成电量 (电压、电流、电容、电阻等)。

2. 传感器的组成 传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成, 有时还外加辅助电源提供转换能量, 其组成框图如图 1-1 所示。



(1) 敏感元件 它是直接感受被测量 (如温度、压力等), 并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件 (如弹性敏感元件)。

(2) 转换元件 它是将敏感元件输出的非电信号直接转换为电信号, 或直接将被测非电信号转换为电信号 (如应变式压力传感器的电阻应变片, 它作为转换元件将弹性敏感元件的输出转换为电阻)。

(3) 转换电路 它能把转换元件输出的电信号转换为便于显示、处理和传输的有用信号。常见的转换电路有电压放大器、电荷放大器、电桥、振荡器和阻抗转换器等。

实际上,有些传感器很简单,有些则较复杂,大多数是开环系统,也有些是带反馈的闭环系统。值得指出的是,有些传感器将感受到的被测量直接转换为电信号,即将敏感元件和转换元件两者合二为一,如湿敏传感器、气敏传感器、热电偶、压电晶体、光电器件等。随着半导体器件与集成技术的应用,转换电路可以安装在传感器的壳体或与敏感元件一起集成在同一芯片上,使得传感器更加微型化。

3. 传感器的分类 传感器技术是一门知识密集型技术。作为实现传感功能的基本器件,传感器的原理各种各样,种类繁多,分类方法也很多,不胜枚举。下面将目前广泛采用的分类方法进行简单介绍,见表 1-1。

表 1-1 传感器的分类

分类标准	类型	原理	应用
按传感器的基本效应	物理型	利用某些敏感元件的物理性质,以及某些功能材料的特殊物理性能来实现信号的转换	水银温度计,它就是利用水银的热胀冷缩的现象把周围温度的变化转换为水银柱的高低变化,从而实现对温度的测量
	化学型	利用敏感元件材料本身的电化学反应来实现信号的转换	湿敏传感器和气敏传感器
	生物型	利用生物活性物质的选择性来识别和测定生物化学物质,即利用敏感元件材料本身的生物效应来实现信号的转换	酶传感器
按传感器的构成原理	结构型	以其转换元件结构参数变化来实现信号的转换	电容式传感器。这类传感器的特点是以传感元件的相对位置变化引起电量的变化为基础,而不是以材料特性变化为基础的
	物性型	以其转换元件物理特性变化来实现信号的转换	压电式传感器、光电式传感器等。这类传感器的特点是灵敏度高、响应速度快、结构简单、易于集成
按传感器的能量变换关系	能量转换型(无源型)	传感器的输出量直接由被测量能量转换而获得,不需要外接电源	压电式传感器、热电式传感器
	能量控制型(有源型)	传感器的输出量由外电源供给,但受被测量控制	电阻应变式传感器、电感式传感器
按传感器的工作原理	应变式传感器、压电式传感器、电容式传感器、电感式传感器、热电式传感器等		
按传感器的输入量	以被测物理量命名传感器,阐明了传感器的用途		位移传感器、压力传感器、温度传感器等
按传感器的输出量	模拟传感器	将应变、应力、位移、加速度等被测量转换为模拟量(如电流、电压)输出	
	数字传感器	将被测量直接转换为数字信号输出	光栅传感器、容栅传感器

1.1.2 传感器的基本特性

传感器是实现传感功能的基本部件,传感器的输入-输出关系特性是传感器的基本特性。传感器的各种性能指标都是根据传感器输入与输出对应关系进行描述的。传感器的输入-输出特性是其外部特性,但却是由其内部参数决定的,不同的传感器的内部参数决定了它具有不同的外部特性。

在检测系统中,需要对各种参数进行检测和控制,这就要求传感器能够感受到被测非电量的变化,并将其转换为与被测量成某一确定关系的电量。传感器所测量的物理量一般有两种基本形式:一种是稳定的,即不随时间变化的信号或变化极其缓慢的信号,称为静态信号;另一种是随时间变化的信号,称为动态信号。由于输入物理量的状态不同,因此传感器所表现出来的输入-输出特性也就不同,因此存在静态特性和动态特性。

1. 传感器的静态特性 传感器的静态特性是指检测系统的输入量为不随时间变化的恒定信号时的输入-输出特性关系。衡量传感器静态特性的重要指标有线性度、灵敏度、迟滞、重复性、漂移、分辨率等。

(1) 线性度 检测系统的线性度是指系统输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离直线的程度。理想的输入-输出曲线应该是线性的,但实际传感器的特性曲线是非线性的。在不考虑迟滞、蜕变等因素的情况下,其静态特性可用下列多项式表示,即

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

式中 y ——输出量;
 x ——输入量;
 a_0 ——零点输出;
 a_1 ——传感器的灵敏度;

a_1 、 a_2 、 \cdots 、 a_n ——非线性项系数。各项系数的不同决定了特性曲线的具体形式。

当 $a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$ 时,理想线性特性方程 $y = a_1x$, 是一条经过原点的直线,传感器的灵敏度为常数。当输入-输出特性方程仅为奇次非线性项时,在靠近原点的很大范围内,输入-输出特性基本成线性关系,且特性曲线关于原点对称。当输入-输出特性方程仅为偶次非线性项时,其线性范围窄,且对称性差。

在实际应用中,特性曲线可以由实际测试获得,在获得特性曲线后,测试工作就将结束。但是,为了标定和数据处理的方便,希望得到线性关系,常常引入各种线性补偿环节,如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性处理。但这些方法都比较复杂,所以在传感器非线性的阶次不高、输入量变化范围较小时,总是采用直线拟合的方法来线性化。

所采用的直线称为拟合直线,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称为传感器的非线性误差,取其最大值与量程的比值百分数作为评价线性度的指标。线性度也被称为非线性误差,用 γ_L 表示为

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 γ_L ——线性度;
 ΔL_{\max} ——最大非线性绝对误差;
 y_{FS} ——输出量程值, $y_{FS} = y_{\max} - y_{\min}$ 。

由此可见,非线性误差的大小取决于拟合直线的基准,拟合直线不同,非线性误差也不同。所以选择拟合直线的出发点,应该是获得最小的线性误差,计算方便。目前常用的拟合方法有理论直线拟合、过零旋转拟合、端点连线拟合、端点平移拟合、最小二乘法拟合等。前四种方法如图 1-2 所示。图中实线为实际输出曲线,虚线为拟合直线。

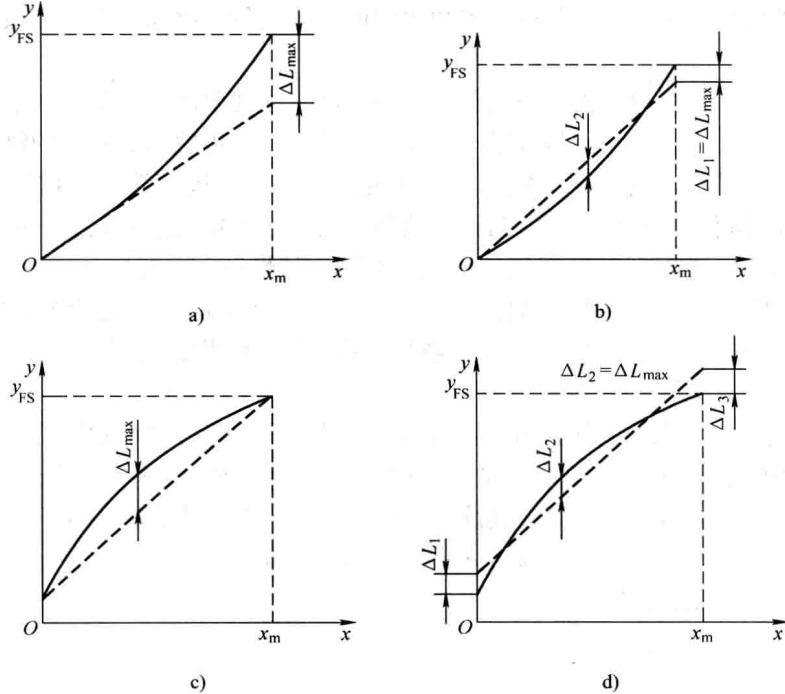


图 1-2 各种直线的拟合方法

a) 理论直线拟合 b) 过零旋转拟合 c) 端点连线拟合 d) 端点平移拟合

在图 1-2a 中,拟合直线为传感器的理论特性,与实际测试值无关,该方法简单,但非线性最大偏差 ΔL_{\max} 很大。图 1-2b 为过零旋转拟合,常用于校正特性曲线过零的传感器。拟合时,使 $|\Delta L_1| = |\Delta L_2| = \Delta L_{\max}$ 。这种方法比较简单,非线性误差要比前一种小很多。图 1-2c 中,把曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法也比较简单,但 ΔL_{\max} 较大。图 1-2d 是在图 1-2c 的基础上使直线平移,移动距离为原来 ΔL_{\max} 的一半,这样输出曲线就会分布于拟合直线的两侧, $|\Delta L_2| = |\Delta L_1| = |\Delta L_3| = \Delta L_{\max}$,与图 1-2c 相比,非线性误差减小了一半,提高了准确度。

(2) 灵敏度 灵敏度是传感器静态特性的一个重要指标,是指传感器在稳态下输出变化量与输入变化量的比值,用 S 表示,即

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (1-3)$$

式中 dy ——输出变化量;
 dx ——输入变化量。

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

对于线性传感器，它的灵敏度就是其拟合直线的斜率，为一常数，如图 1-3a 所示，即

$$S = \frac{y}{x} = \tan\theta = \text{常数} \quad (1-4)$$

对于非线性传感器，它的灵敏度为其工作点处切线的斜率，为一变量，如图 1-3b 所示，用 $S = dy/dx$ 表示。

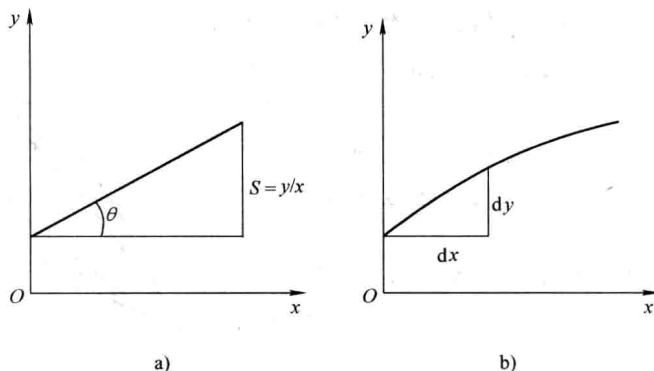


图 1-3 传感器的灵敏度

a) 线性传感器 b) 非线性传感器

如果检测系统的输入量和输出量的量纲相同，则灵敏度量纲为 1，常用放大倍数来代替绝对灵敏度。实际上，灵敏度就是一个放大倍数，它体现了传感器对被测量微小变化的敏感程度。灵敏度在满量程的范围内恒定，则输入-输出特性曲线为直线。一般认为，灵敏度越高越好，但是，灵敏度也不要过高，一方面因输出受到上限的限制，量程必然会减小；另一方面可能会导致输入与输出关系的不稳定，即系统的稳定性差。

(3) 迟滞 迟滞是指在满量程范围内，传感器在升行程（输入量增大）和降行程（输入量减小）测量过程中，输入-输出特性曲线不重合的程度，如图 1-4 所示。产生迟滞的主要原因是传感器的敏感元件材料的物理性质和系统内部机械零件的缺陷，如轴承之间的摩擦、紧固件松动、灰尘的积塞、元件磨损、材料的内部摩擦、弹性敏感元件的弹性滞后等，其大小一般由实验室确定。

迟滞大小一般由实验方法测得，迟滞误差 γ_H 用传感器在全量程范围内升、降行程测量值的最大偏差值与量程的比值百分数表示，即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 ΔH_{\max} ——升、降行程测量值的最大偏差值；

y_{FS} ——输出量程， $y_{FS} = y_{\max} - y_{\min}$ 。

(4) 重复性 重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时，所得输入-输出特性曲线不一致性的程度，如图 1-5 所示。它是反应系统精密性的一个重要指标，产生不一致性的原因与产生迟滞的原因相同。多次按相同输入条件测试得到的输出特性曲线越重合，

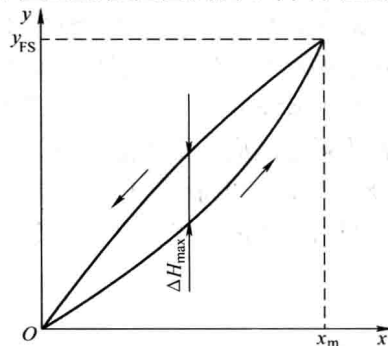


图 1-4 迟滞特性

表明其重复性越好, 误差越小。重复性误差 γ_R 常用升、降行程中最大重复差值 ΔR_{\max} 进行计算, 即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-6)$$

重复性误差也常用绝对误差来表示。检测时, 也可选择若干个测试点, 对应于每个输入信号多次从同一方向接近, 获得输出值序列 $y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, \dots, y_{in}$, 算出最大值与最小值之差作为重复性偏差 ΔR , 在几个重复性偏差 ΔR 中取出最大值 ΔR_{\max} 计算重复性误差。

(5) 漂移 漂移是指在一定时间间隔内, 传感器的输出量发生与输入量无关的变化, 它包括零点漂移和温度漂移。

1) 零点漂移, 简称零漂。它表示传感器零输入时, 在规定的时间内进行读数, 其输出在标称范围内零点的变化。

2) 温度漂移, 简称温漂。它表示周围环境温度变化时, 传感器输出值的变化。

漂移一般可以通过串联或并联可调电阻来消除其带来的误差。

(6) 分辨率 分辨率是指在规定测量范围内传感器能检测到的输入量的最小变化量, 表示检测系统分辨输入量微小变化的能力, 用绝对值表示。有时也可用该值相对满量程输入值的百分比表示。有些传感器, 如电位器式传感器, 当输入量连续变化时, 输出量只做阶跃变化, 则分辨率就是其输出量每个“阶梯”所代表的输入量的大小。

2. 传感器的动态特性 传感器的动态特性是指传感器测量动态信号时, 输入对输出的相应特性, 即其输出对随时间变化的输入量的响应特性。动态特性与静态特性的主要区别在于, 动态特性中输出量与输入量的关系不是一个定值, 而是时间的函数, 它随输入信号的频率而改变。

动态特性好的传感器, 其输出随时间变化的规律与输入对时间变化的规律相同, 即具有相同的时间函数。但在实际工作中, 输出信号与输入信号具有不同的时间函数, 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。

通常, 传感器的动态特性常采用阶跃信号和正弦信号作为输入信号。对于传感器时域和频域上的动态特性, 分别采用瞬态响应法和频率响应法进行分析。

(1) 瞬态响应法 在研究传感器的动态特性时, 在时域中传感器对所加激励信号的响应称为瞬态响应。常用的激励信号为阶跃函数、脉冲函数等, 一般地, 对于传感器动态特性的分析大都采用简单、广泛、易于实现的阶跃信号作为标准输入信号。

当给静止的传感器输入一个单位阶跃信号

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

时, 其输出特性称为瞬态响应特性或阶跃响应特性。阶跃响应特性如图 1-6 所示。

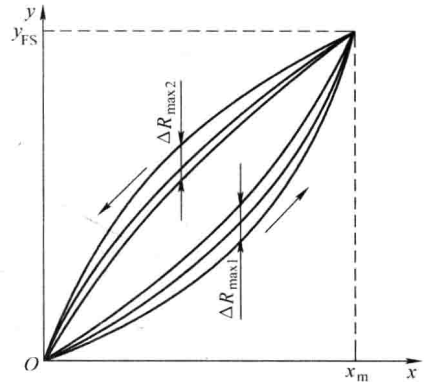


图 1-5 重复性

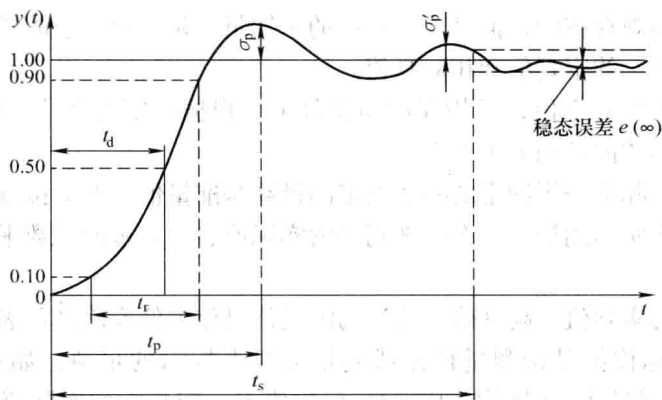


图 1-6 阶跃响应特性

时域响应的主要指标有:

1) 超调量 σ : 传感器输出超出稳定值而出现的最大偏差, 常用相对于最终稳定值的百分比来表示。当稳态值为 $y(\infty)$ 时, 最大百分比超调量为

$$\sigma = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-8)$$

最大超调量反映传感器的相对稳定性。

2) 延滞时间 t_d : 阶跃响应达到稳态值的 50% 所需要的时间。

3) 上升时间 t_r : 传感器的输出由稳态值的 10% 变化到稳态值的 90% 所需的时间。

4) 峰值时间 t_p : 传感器从阶跃输入开始到输出值达到第一个峰值所需的时间。

5) 响应时间 t_s : 传感器从阶跃输入开始到输出值进入稳态值所规定的范围内所需的时间。

(2) 频率响应法 频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性。传感器的频率响应性能指标是由其幅频特性和相频特性曲线上的特性参数来表示的。具体的研究方法与控制理论中的介绍相似, 故不再重复。

1.2 测量误差与准确度

在实际测量过程中, 不论是采用多么精密的测量仪表, 还是采用多么有效的测量方式和方法, 测量结果与被测量的真值之间都会存在偏差, 即测量误差。测量误差存在于一切测量当中, 是无法避免的, 因此可以通过正确地分析误差的性质和来源, 正确地对测量结果进行分析处理, 以得到最接近真值的测量结果。

本节主要介绍测量误差的基本概念、分类、分析方法以及对测量数据进行有效处理的方法。

1.2.1 测量误差的基本概念

1. 测量误差的有关术语

(1) 真值 真值即真实值, 是指在一定时间及空间条件下, 被测物理量本身所具有的

真实数值。真值是客观存在的，但是不可测量的未知量，是一个理想的概念。一般来说，真值可以分为理论真值、约定真值和相对真值。

理论真值又称为绝对真值，是指在严格条件下，根据一定的理论，按照定义确定的真值，例如平面三角形的内角和恒为 180° 。

约定真值是指国际上采用约定的办法确定的最高基准量值，充分接近于真值，因而可以替代真值来使用。在实际测量中，有时被测量的实际值、修正过的算数平均值均可作为约定真值使用。

相对真值又称为实际值，高准确度仪表的测量值可作为低准确度仪表的相对真值。

(2) 标称值 标称值是指测量仪器或测量器具上标示的量值，如标准砝码上标出的 1kg 。由于受制造、测量及周围环境的影响，标称值不一定是它的实际值，因此，通常在给出标称值的同时，也给出了它的误差范围或准确度等级。

(3) 测量误差 测量误差是指用仪器测量出来的结果与被测量的真值之差，即测量误差 = 测量结果 - 真值。

(4) 测量准确度 测量准确度即测量结果的准确度，反映测量结果与真值接近程度的量。准确度与误差大小相对应，可用误差的大小表示准确度的高低，即误差大，准确度低；误差小，准确度高。

(5) 等准确度测量 等准确度测量是指在同一条件下所进行的一系列重复测量。

(6) 非等准确度测量 非等准确度测量是指在多次测量中，对测量结果准确度有影响的一切条件不能维持完全不变的测量。

(7) 测量不确定度 测量不确定度是表征被测量的真值在某数值范围内不能肯定的程度，就是对测量误差极限估计值的评价。

2. 测量误差的表示方法

(1) 绝对误差 绝对误差就是测量值与真值之间的差值，可表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-9)$$

式中 Δx ——绝对误差；

x ——被测量的测量值；

x_0 ——真值。

绝对误差与被测量具有相同的量纲，其值可正可负，用绝对误差表征系统示值偏离真值的大小比较直观。在实际使用工作中，对测量值进行修正时要用到绝对误差。修正值是为了消除系统误差用代数法加到测量结果上的值。修正值与绝对误差大小相等、符号相反。实际值等于测量值加上修正值。

实际上，采用绝对误差表示测量误差时，有时并不能很好地说明测量水平的高低，如测量 1t 的物体和测量 10kg 的物体时产生的绝对误差均为 1kg ，并不能说明两个测量结果具有相同的准确度。于是，人们引入了相对误差。

(2) 相对误差 相对误差是指被测量的绝对误差与其真值的比值百分比，可表示为

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 δ ——相对误差。

通常，用绝对误差来评价测量同一被测量时的准确度高低，用相对误差来评价测量不同

被测量时的准确度高低。

在上面的例子中，测量两个物体的相对误差分别为

$$\delta_1 = \frac{1}{1000} \times 100\% = 0.1\%$$

$$\delta_2 = \frac{1}{10} \times 100\% = 10\%$$

由此可以看出，相对误差比绝对误差能更好地说明测量的准确度。

(3) 引用误差 引用误差是绝对误差与测量仪表量程的百分比，可表示为

$$r = \frac{\Delta x}{L} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 r ——引用误差；

L ——测量仪表的量程。

由于引用误差是以量程作为相对比较量的，所以，引用误差又称为归算误差或满刻度相对误差。引用误差的最大值，就是仪表的基本误差。可以用基本误差表示仪表的准确度等级。国家标准 GB/T 7665—2005 规定，测量指示仪表的准确度等级分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个等级，这也是工业检测仪表常用的准确度等级。对于仪表准确度等级的确定采取“选大不选小”的原则。

下面通过例题来说明确定仪表准确度和选择仪表准确度的方法。

例 1-1 一个电压表的满量程为 100V，校准该表时得到最大绝对误差为 0.15V，试确定该电压表的准确度等级。

解：由式 (1-11) 可知，该电压表的最大引用误差为

$$r = \frac{\Delta x}{L} \times 100\% = \frac{0.15}{100} \times 100\% = 0.15\%$$

去掉%后，该电压表的测量准确度值为 0.15，0.15 介于 0.1 和 0.2 之间，由于对于仪表的准确度等级的确定采取“选大不选小”的原则，则该电压表的准确度等级为 0.2。

例 1-2 现需选择一台测温范围为 0~500℃ 的测温仪表。根据工艺要求，温度指示值的误差不允许超过 ±4℃，试问应选哪一级准确度等级的测温仪表？

解：工艺允许的最大引用误差为

$$r = \frac{\Delta x}{L} \times 100\% = \frac{\pm 4}{500 - 0} \times 100\% = \pm 0.8\%$$

去掉 ± 和 % 后，该表的准确度值为 0.8，介于 0.5~1.0 之间，而 0.5 级表和 1.0 级表可能产生的最大引用误差分别为 ±0.5% 和 ±1.0%。应选择 0.5 级的仪表才能满足测量准确度要求。

从以上两个例子可以看出，根据仪表校验数据来确定仪表准确度等级时，仪表的准确度等级应向低靠；根据工艺要求来选择仪表准确度等级时，仪表准确度等级应向高靠。

1.2.2 误差的分类方法

在测量过程中，由于被测量千差万别，产生误差的原因也不相同，所以，误差的种类也很多。若按照误差产生的原因及其性质来分，误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差 在相同的测量条件下,对同一被测量进行多次测量时,误差的大小和符号保持不变或按照一定规律出现,则把这种误差称为系统误差(system error)。这种误差产生的原因有测量系统的自身缺陷,测量方法不完善,测量者对仪器的使用不当,周围环境变化等因素。

系统误差可分为定值系统误差和变值系统误差。定值系统误差是指数值和符号都保持不变的系统误差。变值系统误差是指数值和符号按照一定规律变化的系统误差。变值系统误差按照其变化规律的不同,又可分为线性系统误差、周期性系统误差和复杂规律系统误差。

系统误差的大小说明测量结果偏离被测量真值的程度,表明测量结果的准确度。系统误差越小,测量结果越准确。系统误差是有规律可循的,因此可以通过分析误差变化规律和产生的原因,对测量值进行修正或采取一定的预防措施,从而减小或消除系统误差对测量结果的影响。

2. 随机误差 在相同的测量条件下,对同一被测量进行多次测量时,其误差的大小和符号以不可预知的方式变化着,把这种误差称为随机误差(random error)。引起随机误差的原因很多,也很难把握,因而不能从测量过程中消除它。

随机误差按其概率分布的特点,可分为正态分布随机误差和非正态分布随机误差。随机误差是独立的、微小的、偶然的,因此,随机误差的大小表明测量结果的分散性。通常用精密度表示随机误差的大小。随机误差大,测量结果分散,精密度低;随机误差小,测量结果的重复性好,精密度高。

3. 粗大误差 在相同的测量条件下,对同一被测量进行多次测量时,显著偏离测量结果的误差,称为粗大误差(abnormal error)。它会明显地歪曲客观现象,应将其剔除掉。所以,在作误差分析时,要分析的误差通常只是系统误差和随机误差。造成粗大误差的原因一般是由于仪表发生故障、操作者粗心大意、重大的外界干扰和实验条件没有达到预定要求等因素造成的。

1.2.3 误差的分析方法

1. 系统误差的分析 系统误差的特点是在一定条件下对同一被测量的多次测量中误差保持恒定,而当条件改变时误差按一定规律变化。在具体测量中它总是使测量结果偏向一方,或偏大、或偏小。系统误差具有确定的规律性,发现了就能消除,针对性很强,不同的测量条件就有不同的系统误差。因此,分析系统误差是当前检测中必须讨论的问题之一。

(1) 发现系统误差的方法 发现系统误差的根本方法应从系统误差来源上去研究,分析实验条件,注意每一个因素的影响。

1) 实验对比法。通过改变产生系统误差的条件,进行不同条件下的测量,以发现系统误差。这种方法适用于发现固定的系统误差。例如,一台仪器由于本身标定不准确存在系统误差,那么只能用高准确度的标准器件进行多次重复测量,或用准确度高于被标定仪器的标准仪器和被标定的仪器同时进行测量比对。

2) 残余误差观察法。根据测量值的残余误差的大小和符号的变化规律,直接由误差数据或误差曲线来判断有无系统误差。这种方法主要适用于有规律变化的系统误差。

3) 计算数据比较法。对同一量进行多次等准确度的测量,用不同的方法计算标准差,通过比较发现系统误差。如不存在系统误差,其比较结果应满足随机误差条件,否则可以认

定存在系统误差。

(2) 系统误差的减小与消除 分析和研究系统误差的最终目的是减小和消除系统误差,常用的方法有以下几种。

1) 从产生误差的根源上消除系统误差,如采用符合实际的理论公式,正确地安装和调整仪器装置,实验中严格保证仪器装置的测量条件,防止外界的各种干扰等。

2) 修正测量结果。对于已知的系统误差,可以用修正值对测量结果进行修正;对于变量系统误差,找出修正公式,对测量结果进行修正;对于未知系统误差,则按随机误差进行处理。

3) 抵消系统误差。找出系统误差的规律,在测量系统中采取补偿措施,自动抵消系统误差。

(3) 系统误差分析的特点 系统误差具有确定的规律性,发现了就能消除,针对性强。

2. 随机误差的分析 就某一次测量来说,随机误差的大小和方向是不可预知的,但对同一量进行多次重复测量就会发现,随机误差是按一定的统计规律分布的,可以利用这种规律对测量结果做出随机误差的估计。

(1) 随机误差的概率 无数次的实验事实和统计理论都证明,大部分测量中的随机误差都服从正态分布规律。但并不是所有的随机误差都遵循这一规律,在一些情况下会遵循其他的规律,如泊松分布、均匀分布等。

实践证明,随机误差服从正态分布有以下特征:

1) 单峰性。绝对值小的误差出现的次数比绝对值大的误差出现的次数多,非常大的误差出现的几率趋于零,即随机误差的分布具有单一峰值。

2) 有界性。在一定的客观条件下,随机误差的绝对值不会超过一定的界限。

3) 对称性。随着测量次数的增加,绝对值相等的正误差与负误差出现的概率趋于相等。

4) 抵偿性。相同条件下,对同一量进行多次重复测量,其误差的算术平均值随着测量次数的无限增加而趋于零。

(2) 随机误差的处理 在相同条件下,对某一物理量进行 n 次重复测量,其测量值分别为 x_1, x_2, \dots, x_n , 若用 \bar{x} 表示平均值,则有

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (1-12)$$

我们将各次测量值的算术平均值作为测量结果。严格地说,误差是测量值与真值之差。但是,由于在测量中真值不可知,通常用测量的算术平均值来代替真值。当测量次数很多时,多次测量值的算术平均数很接近真值,因此,各次测量值与平均值的偏差就很接近它们与真值的误差。

对某一物理量的有限次 (n 次) 重复测量中,某一次测量结果的标准差用 σ_x 表示,即

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-13)$$

n 次测量结果平均值的标准差用 $\sigma_{\bar{x}}$ 表示,即

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-14)$$