

高等学校教材

传感器 与检测技术

陈杰 黄鸿 编著



内容提要

本书系统地论述了各种传感器的基本原理、基本特性、信号调节电路、设计原理以及它们在电量和非电量检测系统中的应用。

全书共 15 章。第 0 章和第 1 章为传感器和检测技术总论,介绍传感器和检测技术的基本概念、基本理论、一般特性和分析方法;第 2 章至第 9 章论述常见的、应用广泛的传感器,它们是电阻式、电感式、电容式、磁电式、压电式、光电式、热电式、核辐射传感器等传感器;第 10 章介绍国内外近年来研制与开发的智能化新型传感器,反映了当代传感器技术的新发展与新成就;第 11 章和第 12 章介绍传感器的标定方法和可靠性;第 13 章是检测技术基础,论述了数据的检测及信号处理方法和技术;第 14 章介绍的是多传感器信息融合技术;第 15 章介绍的是现代检测系统。本书附有习题、思考题和实验。

本书取材新颖,内容丰富,广深兼顾,以求适应不同层次对象使用,可作为检测技术、自动控制、仪器仪表及各种机电类专业的本科生、大专生及研究生教材,也可供有关工程技术人员使用参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术 / 陈杰, 黄鸿编著. —北京: 高等教育出版社, 2002.8

高等学校自动控制、仪器仪表、机电控制等专业用书

ISBN 7-04-010811-9

I. 传... II. ①陈...②黄... III. ①传感器—高等学校—教材②自动检测—高等学校—教材
IV. TP212②TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 043523 号

传感器与检测技术
陈杰 黄鸿 编著

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
邮政编码 100009
传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 21.5
字 数 520 000

版 次 2002 年 8 月第 1 版
印 次 2002 年 8 月第 2 次印刷
定 价 26.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前言

信息科学是众多领域中发展最快的一门科学,也是最具有发展活力的学科之一。信息科学中的四大环节(信息捕获、提取、传输、处理)是人们最关心、对社会发展和进步起着十分重要的作用的重要内容。信息捕获技术是信息科学最前端的一个“阵地”和手段,而信息捕获的主要工具就是传感器。传感器作为测控系统中对象信息的入口,在现代化事业中的重要性已被人们所认识。

随着信息时代的到来,国内外已将传感器技术列为优先发展的科技领域之一。国内许多高校相继都开设了相应课程。随着高新技术的发展,专业面的拓宽和适应传感器与检测技术的开发、应用的需要,作者在北京理工大学多年讲义的基础上,广取兄弟院校教材之所长,博采国内外文献、专著之精髓,结合多年来教学经验和科研实践的成果,编著了本书。

全书共 15 章,分两大部分,第一部分为传感器,第二部分为检测技术。本书在第 0 章中介绍传感器和检测技术的基本概念;第 1 章介绍传感器的特性;从第 2 章至第 10 章描述当前使用较多的几类传感器,如电阻式、电感式、电容式、磁电式、压电式、光电式、热电式、核辐射传感器的基本原理和设计知识,并对智能式传感器作了介绍;第 11 章和第 12 章介绍传感器的标定方法和传感器可靠性;第 13 章是检测技术基础,介绍了数据的检测及处理方法;第 14 章介绍的是传感器信息融合技术;第 15 章介绍的是现代测试系统,旨在使读者对传感器与检测技术的现状和未来发展有较全面的了解。

本书与国内现有的教材比较具有以下特色:

1. 本书将传感器与检测技术有机的结合在一起,使学生能够更全面学习和掌握信号传感、信号采集、信号转换、信号处理及信号传输的整个过程。

2. 本教材增加了传感器标定和传感器可靠性等章节,能使学生对制作传感器的全过程有一个全面的认识,并通过相关实验提高学生的动手能力。传感器的可靠性技术对于整个自动检测系统的数据获取的准确性和稳定性是至关重要的,这也是我国传感器产品与国外产品相比的最大薄弱环节,因此,本教材特别增加了可靠性技术方面的内容。

3. 紧密联系传感器与检测技术的最新进展,全面介绍这些领域的相关知识,以拓宽学生的眼界。本项目除介绍传统的结构性传感器外,还介绍了借助现代相关新技术和新方法,特别是与微型计算机技术相结合,给予其功能的扩展和性能的提高,注入了新的活力的传感器。

4. 本教材附有的习题及思考题、多媒体课件和相关实验,使学生更容易学习和掌握课程的内容。

本书内容新颖、丰富、全面,具有一定的深度和广度。叙述简明,深入浅出。可作为高等学校检测技术、仪器仪表及自动控制等专业的教材。也可供有关专业人员使用和参考。

本书由涂序彦教授主审。张训文副教授对本书实验的编写提供了帮助。

由于本书涉及到的传感器应用的电路较多,加之时间仓促和编者的水平有限,难免存在疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评和指正。

作 者

2002 年 5 月于北京

目 录

0 传感器与检测技术概念	1	2.2.1 电阻应变片的工作原理	31
0.1 传感器的组成与分类	1	2.2.2 金属电阻应变片主要特性	32
0.1.1 传感器的定义	1	2.2.3 温度误差及其补偿	36
0.1.2 传感器的组成	1	2.2.4 应变片式电阻传感器的测量电路 ...	39
0.1.3 传感器的分类	1	2.2.5 应变片式电阻传感器的应用举例 ...	42
0.2 传感器的作用与地位	2	3 电感式传感器	46
0.3 传感器技术的发展动向	2	3.1 自感式传感器	46
0.4 检测技术的定义	4	3.1.1 工作原理	46
0.5 检测技术的作用	4	3.1.2 灵敏度及非线性	48
1 传感器的特性	5	3.1.3 等效电路	48
1.1 传感器的静态特性	5	3.1.4 转换电路	48
1.1.1 线性度	5	3.1.5 零点残余电压	52
1.1.2 迟滞	7	3.1.6 自感式传感器的特点及应用	52
1.1.3 重复性	7	3.2 变压器式传感器	53
1.1.4 灵敏度与灵敏度误差	8	3.2.1 工作原理	53
1.1.5 分辨率与阈值	8	3.2.2 等效电路及其特性	54
1.1.6 稳定性	8	3.2.3 差分变压器式传感器的测量电路 ...	56
1.1.7 温度稳定性	9	3.2.4 零点残余电压的补偿	60
1.1.8 多种抗干扰能力	9	3.2.5 变压器式传感器的应用举例	61
1.1.9 静态误差	9	3.3 涡流式传感器	62
1.2 传感器的动态特性	9	3.3.1 工作原理	62
1.2.1 动态特性的数学描述	10	3.3.2 转换电路	63
1.2.2 线性系统的传递函数	11	3.3.3 涡流式传感器的特点及应用	64
1.2.3 传感器的动态特性指标	11	3.4 压磁式传感器	66
1.2.4 动态响应分析的基本方法	13	3.4.1 工作原理	66
1.2.5 典型环节的动态响应特性	15	3.4.2 结构形式	66
2 电阻式传感器	23	3.5 感应同步器	69
2.1 电位器式电阻传感器	23	3.5.1 工作原理	69
2.1.1 线性电位器	23	3.5.2 类型与结构	71
2.1.2 非线性电位器	26	3.5.3 输出信号的测量方法	72
2.1.3 负载特性与负载误差	27	3.5.4 误差分析	75
2.1.4 电位器的结构与材料	28	4 电容式传感器	77
2.1.5 电位器式传感器应用举例	29	4.1 电容式传感器的工作原理及类型	77
2.2 应变片式电阻传感器	30	4.1.1 工作原理	77

4.1.2 类型	77	6.5 压电式传感器的应用举例	127
4.2 电容式传感器的灵敏度及非线性	79	6.5.1 压电式测力传感器	127
4.3 电容式传感器的特点及等效电路	80	6.5.2 压电式加速度传感器	128
4.3.1 特点	80	6.6 影响压电式传感器精度的因素分析	129
4.3.2 等效电路	81	6.6.1 非线性	129
4.4 电容式传感器的设计要点	82	6.6.2 横向灵敏度	129
4.4.1 保证绝缘材料的绝缘性能	82	6.6.3 环境温度的影响	130
4.4.2 消除和减小边缘效应	83	6.6.4 湿度的影响	131
4.4.3 消除和减小寄生电容的影响	83	6.6.5 电缆噪声	131
4.4.4 防止和减小外界干扰	85	6.6.6 接地回路噪声	131
4.5 电容式传感器的转换电路	85	7 光电式传感器	132
4.5.1 调制型电路	85	7.1 光电效应	132
4.5.2 脉冲型电路	89	7.1.1 外光电效应	132
4.6 电容式传感器的应用举例	92	7.1.2 内光电效应	133
4.6.1 差分式电容压力传感器	92	7.1.3 光生伏特效应	133
4.6.2 电容式加速度传感器	92	7.2 光电器件及其特征	133
4.6.3 电容式料位传感器	93	7.2.1 光电管与光电倍增管	133
4.6.4 电容式位移传感器	94	7.2.2 光敏电阻	135
5 磁电式传感器	95	7.2.3 光敏二极管及光敏三极管	136
5.1 磁电感应式传感器	95	7.2.4 光电池	137
5.1.1 工作原理和结构类型	95	7.2.5 半导体光电元件的特性	138
5.1.2 动态特性分析	97	7.3 光电式传感器的测量电路	142
5.1.3 测量电路	101	7.3.1 光源	142
5.1.4 磁电感应式传感器应用举例	106	7.3.2 测量电路	142
5.2 霍尔式传感器	107	7.4 光电传感器及其应用	145
5.2.1 霍尔效应和霍尔元件材料	107	7.4.1 模拟式光电传感器	145
5.2.2 霍尔元件构造及测量电路	109	7.4.2 脉冲式光电传感器	147
5.2.3 霍尔元件的主要技术指标	109	7.5 光纤传感器	148
5.2.4 霍尔元件的补偿电路	110	7.5.1 光导纤维	148
5.2.5 霍尔式传感器的应用举例	112	7.5.2 光纤传感器的工作原理	150
6 压电式传感器	114	7.6 电荷耦合器件(CCD)	153
6.1 压电效应	114	7.6.1 CCD的工作原理	153
6.1.1 石英晶体的压电效应	114	7.6.2 CCD应用举例	156
6.1.2 压电陶瓷的压电效应	116	7.7 光栅式传感器	157
6.1.3 高分子材料的压电效应	117	7.7.1 基本工作原理	157
6.1.4 压电方程与压电常数	118	7.7.2 莫尔条纹	159
6.2 压电材料	120	7.7.3 辨向原理和细分电路	161
6.3 等效电路	122	7.8 激光式传感器	165
6.4 测量电路	123	7.8.1 激光干涉仪测位移	165
6.4.1 电压放大器	124	7.8.2 激光测长度原理	167
6.4.2 电荷放大器	125	8 热电式传感器	168

8.1 热电阻	168	10.5.1 数据处理包含的内容	206
8.1.1 热电阻的材料及工作原理	168	10.5.2 标度变换技术	206
8.1.2 测量电路	170	10.5.3 非线性补偿技术	208
8.2 热电偶	171	10.5.4 传感器的温度误差补偿	210
8.2.1 热电效应	171	10.5.5 数字滤波技术	212
8.2.2 热电偶基本定律	173	10.6 智能传感器的硬件设计	213
8.2.3 热电偶材料及常用热电偶	174	10.6.1 正确选择微处理器	213
8.2.4 热电偶测温线路	175	10.6.2 智能传感器的输入输出技术	214
8.2.5 热电偶参考端温度	177	10.6.3 智能传感器实例	218
8.3 热敏电阻	181	11 传感器的标定	220
8.3.1 热敏电阻的主要特性	182	11.1 传感器的静态特性标定	220
8.3.2 热敏电阻的特性线性化	183	11.1.1 静态标准条件	220
8.3.3 热敏电阻的应用举例	184	11.1.2 标定仪器设备精度等级的确定	220
9 核辐射传感器	186	11.1.3 静态特性标定的方法	220
9.1 核辐射的基本特性	186	11.2 传感器的动态特性标定	221
9.1.1 核辐射的特性	186	11.3 测振传感器的标定	222
9.1.2 测量中常用的同位素	189	11.3.1 绝对标定法	223
9.2 核辐射传感器	190	11.3.2 比较标定法	223
9.2.1 电离室	190	11.4 压力传感器的标定	223
9.2.2 气体放电计数管	191	11.4.1 动态标定压力源	223
9.3 核辐射传感器的应用举例	192	11.4.2 激波管标定法	225
9.4 放射性辐射的防护	192	12 传感器可靠性技术	231
10 智能传感器	194	12.1 可靠性技术基础概述	231
10.1 概述	194	12.1.1 可靠性技术定义及其特点	231
10.1.1 智能传感器的概念	194	12.1.2 可靠性技术的基本特征量	232
10.1.2 智能传感器的功能	195	12.2 可靠性设计	236
10.1.3 智能传感器的特点	196	12.2.1 可靠性设计的重要性	236
10.2 智能传感器实现的途径	196	12.2.2 可靠性设计程序和原则	236
10.2.1 非集成化实现	196	12.2.3 系统的可靠性框图模型及计算	237
10.2.2 集成化实现	198	12.3 可靠性管理	238
10.2.3 混合实现	200	12.3.1 可靠性管理的意义及特点	238
10.2.4 集成化智能传感器的几种形式	200	12.3.2 可靠性管理机构 and 职责	238
10.3 智能传感器输出信号的预处理	201	12.3.3 可靠性标准、情报与保证	239
10.3.1 传感器输出信号的分类	201	12.3.4 可靠性管理的实施	239
10.3.2 开关信号的预处理	202	12.4 可靠性试验	239
10.3.3 模拟信号预处理	202	12.4.1 传感器环境试验概述	239
10.4 数据采集	203	12.4.2 传感器的可靠性试验实例	242
10.4.1 数据采集的配置	203	12.5 敏感元件及传感器的失效分析	243
10.4.2 取样周期的选择	204	12.5.1 概述	243
10.4.3 A/D 转换器的选择	205	12.5.2 分析方法	244
10.5 智能传感器的数据处理技术	206	13 检测技术基础	250

13.1 检测技术概述	250	14.4 传感器信息融合的实例	285
13.2 测量方法	250	14.4.1 机器人中的传感器信息融合	285
13.2.1 直接测量、间接测量和联立测量	250	14.4.2 舰船上的传感器信息融合	287
13.2.2 偏差式测量、零位式测量和微差式测量	251	15 现代检测系统	289
13.3 测量系统	252	15.1 计算机检测系统的基本组成	289
13.3.1 测量系统的构成	253	15.1.1 多路模拟开关	289
13.3.2 主动式测量系统与被动式测量系统	254	15.1.2 A/D 转换与 D/A 转换	290
13.3.3 开环式测量系统与闭环式测量系统	254	15.1.3 取样保持	293
13.4 测量数据处理方法	255	15.2 总线技术	294
13.4.1 静态测量数据的处理方法	255	15.2.1 总线的基本概念及其标准化	294
13.4.2 动态测量数据的处理方法	273	15.2.2 总线的通信方式	295
14 多传感器信息融合技术	278	15.2.3 测控系统内部总线	296
14.1 概述	278	15.2.4 测控系统外部总线	298
14.1.1 概念	278	15.3 虚拟仪器	302
14.1.2 意义及应用	278	15.3.1 虚拟仪器的出现	302
14.2 传感器信息融合的分类和结构	279	15.3.2 虚拟仪器的硬件系统	303
14.2.1 传感器信息融合的分类	279	15.3.3 虚拟仪器的软件系统	304
14.2.2 信息融合的结构	280	15.3.4 虚拟仪器的发展趋势	305
14.2.3 信息融合系统结构的实例	281	15.4 网络化检测仪器	305
14.3 传感器信息融合的一般方法	282	15.4.1 基于现场总线技术的网络化测控系统	306
14.3.1 嵌入约束法	282	15.4.2 面向 Internet 网络测控系统	306
14.3.2 证据组合法	283	15.4.3 网络化检测仪器与系统实例	308
14.3.3 人工神经网络法	285	附录 1 习题与思考题	310
		附录 2 《传感器与检测技术》实验	318
		参考文献	331

0 传感器与检测技术概念

0.1 传感器的组成与分类

0.1.1 传感器的定义

传感器是能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,通常由敏感元件和转换元件组成。其中,敏感元件是指传感器中直接感受被测量的部分,转换元件是指传感器能将敏感元件的输出转换为适于传输和测量的电信号部分。

有些国家和有些学科领域,将传感器称为变换器、检测器或探测器等。应该说明,并不是所有的传感器都能明显区分敏感元件与转换元件两个部分,而是二者合为一体。例如,半导体气体、湿度传感器等,它们一般都是将感受的被测量直接转换为电信号,没有中间转换环节。

传感器输出信号有很多形式,如电压、电流、频率、脉冲等,输出信号的形式由传感器的原理确定。

0.1.2 传感器的组成

通常,传感器由敏感元件和转换元件组成。但是由于传感器输出信号一般都很微弱,需要有信号调节与转换电路将其放大或变换为容易传输、处理、记录和显示的形式。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用,传感器的信号调节与转换可以安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上。因此,信号调节与转换电路以及所需电源都应作为传感器的组成部分。如图 0-1 所示。

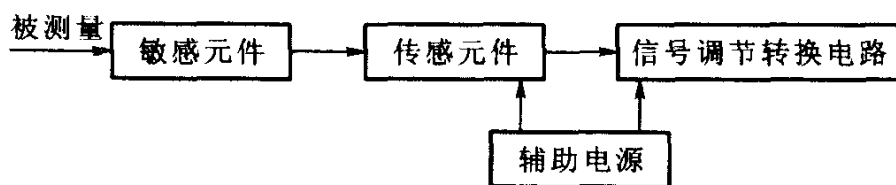


图 0-1 传感器组成方框图

常见的信号调节与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器等,它们分别与相应的传感器相配合。

0.1.3 传感器的分类

传感器的种类繁多,不胜枚举。传感器分类方法很多,表 1-1 给出了常见的分类方法。

表 0-1 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说 明
按输入量分类	位移传感器、速度传感器、温度传感器、压力传感器等	传感器以被测物理量命名
按工作原理分类	应变式、电容式、电感式、压电式、热电式等	传感器以工作原理命名
按物理现象分类	结构型传感器	传感器依赖其结构参数变化实现信息转换
	特性型传感器	传感器依赖其敏感元件物理特性的变化实现信息转换
按能量关系分类	能量转换型传感器	传感器直接将被测量的能量转换为输出量的能量
	能量控制型传感器	由外部供给传感器能量,而由被测量来控制输出的能量
按输出信号分类	模拟式传感器 数字式传感器	输出为模拟量 输出为数字量

0.2 传感器的作用与地位

人类社会已进入信息时代,人们的社会活动主要依靠对信息资源的开发及获取、传输与处理。传感器处于研究对象与测试系统的接口位置,即检测与控制系统之首。因此,传感器成为感知、获取与检测信息的窗口,一切科学研究与自动化生产过程要获取的信息,都要通过传感器获取并通过它转换为容易传输与处理的电信号。所以传感器的作用与地位就特别重要了。

若将计算机比喻为人的大脑,那么传感器则可以比喻为人的感觉器官。可以设想,没有功能正常而完美的感觉器官,不能迅速而准确地采集与转换欲获得的外界信息,纵有再好的大脑也无法发挥其应有的作用。科学技术越发达,自动化程度越高,对传感器的依赖性就越大。所以,20世纪80年代以来,世界各国都将传感器技术列为重点发展的高技术,备受重视。

0.3 传感器技术的发展动向

传感器技术所涉及的知识非常广泛,渗透到各个学科领域。但是它们的共性是利用物理定律和物质的物理、化学和生物特性,将非电量转换成电量。所以,如何采用新技术、新工艺、新材料以及探索新理论达到高质量的转换,是总的发展途径。

当前,传感器技术的主要发展动向,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

利用物理现象、化学反应和生物效应是各种传感器工作的基本原理,所以发现新现象与新效应是发展传感器技术的重要的工作,是研究新型传感器的重要基础,其意义极为深远。例如,日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度比霍尔器件高,仅次于超导量子干涉器件。而其制造工艺远比超导量子干涉器件简单,它可用于磁成像技术,具有广泛推广价值。

2. 开发新材料

传感器材料是传感器技术的重要基础,由于材料科学的进步,人们在制造时,可任意控制它们的成分,从而设计制造出用于各种传感器的功能材料,例如,半导体氧化物可以制造各种气体传感器,而陶瓷传感器工作温度远高于半导体,光导纤维的应用是传感器材料的重大突破,用它研制的传感器与传统的相比有突出的特点。有机材料做为传感器材料的研究,引起国内外学者的极大兴趣。

3. 采用微细加工技术

半导体技术中的加工方法,如氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺、各向异性腐蚀以及蒸镀、溅射薄膜工艺都可用于传感器制造,因而制造出各式各样的新型传感器。例如,利用半导体技术制造出压阻式传感器,利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏、湿敏传感器,日本横河公司利用各向异性腐蚀技术进行高精度三维加工,在硅片上构成孔、沟棱锥、半球等各种开头,制作出全硅谐振式压力传感器。

4. 研究多功能集成传感器

日本丰田研究所开发出同时检测 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ 等多离子传感器。这种传感器的芯片尺寸为 $2.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$,仅用一滴血液即可同时快速检测出其中 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 的浓度,适用于医院临床,使用非常方便。

催化金属栅与 MOSFET 相结合的气体传感器已广泛用于检测氧、氨、乙醇、乙烯和一氧化碳等。

我国某传感器研究所研制的硅压阻式复合传感器可以同时测量压力与温度。

5. 智能化传感器

智能化传感器是一种带微处理器的传感器,它兼有检测、判断和信息处理功能。其典型产品如美国霍尼尔公司的 ST-3000 型智能传感器,其芯片尺寸为 $3 \times 4 \times 2 \text{ mm}^3$,采用半导体工艺,在同一芯片上制作 CPU、EPROM 和静压、压差、温度等三种敏感元件。

6. 新一代航天传感器研究

众所周知,在航天器的各大系统中,传感器对各种信息参数的检测,保证了航天器按预定程序正常工作,起着极为重要的作用。随着航天技术的发展,航天器上需要的传感器越来越多,例如,航天飞机上安装 3500 支左右传感器,对其指标性能都有严格要求,如小型化、低功耗、高精度、高可靠性等都有具体指标。为了满足这些要求,必须采用新原理、新技术研制出新型的航天传感器。

7. 仿生传感器研究

值得注意的一个发展动向是仿生传感器的研究,特别是在机器人技术向智能化高级机器人发展的今天。仿生传感器就是模拟人的感觉器官的传感器,即视觉传感器、听觉传感器、嗅觉传

感器、味觉传感器、触觉传感器等。目前只有视觉与触觉传感器解决的比较好,其他几种远不能满足机器人发展的需要。也可以说,至今真正能代替人的感觉器官功能的传感器极少,需要加速研究,否则将会影响机器人技术的发展。

0.4 检测技术的定义

检测技术属于信息科学的范畴,与计算机技术、自动控制技术和通信技术构成完整的信息技术学科。测量是指确定被测对象属性量值为目的的全部操作。测试是具有试验性质的测量,或者可以理解为测量和试验的综合。

0.5 检测技术的作用

客观世界的一切物质都以不同形式在不断地运动着。运动着的物质是以一定的能量或状态表现出来的,这就是信号。人们为了认识物质世界,就必须寻找表征物质运动的各种信号以及信号与物质运动的关系。这就是检测的任务。

自古以来,检测技术早就渗透到人类的生产活动、科学实验和日常生活的各个方面,如计时、产品交换、气候和季节的变化规律等等。

在工业生产这个领域内,广泛地应用检测技术,如生产过程中产品质量的检测、产品质量的控制、提高生产经济效益、节能和生产过程的自动化等等。这些都要测量生产过程中的有关参数和(或)进行反馈控制,以保证生产过程中的这些参数处在最佳最优状态。

在科学研究领域内,人们通过观察、试验、并用已有的知识和经验,对试验结果进行分析、对比、概括、推理。通过不断的观察、试验,从而找出新的规律,再上升为理论。因而能否通过观察试验得到结果,而且是可靠的结果,决定于检测技术的水平,所以,从这个意义上讲,科学的发展、突破是以检测技术的水平为基础的。例如,人类在光学显微镜出现以前,只能用肉眼来分辨物质。而16世纪出现了光学显微镜,这就使人们能借助显微镜观察细胞,从而大大推动了生物学的发展。而到20世纪30年代,出现了电子显微镜,又使人们的观察能力进入微观世界,这又推动了生物学、电子科学和材料科学的发展。当然,科学技术的发展又反过来促进检测技术的发展。

现代人们的日常生活中,也愈来愈离不开检测技术。例如现代化起居室中的温度、湿度、亮度、空气新鲜度、防火、防盗和防尘等的测试、控制,以及由视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉等感觉器官,并有思维能力的机器人来参与各种家庭事务管理和劳动等,都需要各种检测技术。尤其是自动化生产出现以后,要求生产过程参数的检测能自动进行。这时就产生了自动检测系统。

1 传感器的特性

传感器的特性是指传感器所特有性质的总称。而传感器的输入-输出特性是其基本特性,一般把传感器作为二端网络研究时,输入-输出特性是二端网络的外部特性,即输入量和输出量的对应关系。由于输入作用量的状态(静态、动态)不同,同一个传感器所表现的输入-输出特性也不一样,因此有静态特性、动态特性之分。由于不同传感器的内部参数各不相同,它们的静态特性和动态特性也表现出不同的特点,对测量结果的影响也各不相同。因此从分析传感器的外特性入手,分析它们的工作原理、输入-输出特性与内部参数的关系、误差产生的原因、规律、量程关系等是一项重要内容。本章主要是从静态和动态角度研究输入-输出特性。

静态特性是指当输入量为常量或变化极慢时传感器输入-输出特性。动态特性是指当输入量随时间变化时传感器的输入-输出特性。

1.1 传感器的静态特性

衡量传感器静态特性的主要指标是线性度、迟滞、重复性、分辨力、稳定性、温度稳定性、各种抗干扰稳定性等。

1.1.1 线性度

传感器的输入-输出关系或多或少地都存在非线性问题。在不考虑迟滞、蠕变等因素的情况下,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 y ——输出量;

x ——输入量;

a_0 ——零点输出;

a_1 ——理论灵敏度;

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项系数

各项系数不同,决定了特性曲线的具体形式。

静态特性曲线可由实际测试获得,在获得特性曲线之后,可以说问题已经解决。但是为了标定和数据处理方便,希望得到线性关系。这时可采用各种方法,其中也包括计算机硬件和软件补偿,进行线性化处理。一般来说,这些办法都比较复杂。所以在非线性误差不太大的情况下,总是采用直线拟合的办法来线性化。

在采用直线拟合线性化时,输入输出的校正曲线与其拟合直线之间的最大偏差,称为非线性误差,通常用相对误差 γ_L 来表示,即

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

式中 $\Delta L_{\max}$ ——非线性最大偏差;

y_{FS} ——满量程输出

由此可见,非线性误差的大小是以一定的拟合直线为基准而得出来的。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、计算方便等。

目前常用的拟合方法有:①理论拟合;②过零旋转拟合;③端点拟合;④端点平移拟合;⑤最小二乘法拟合等。前四种方法如图 1-1 所示。图中实线为实际输出的校正曲线,虚线为拟合直线。

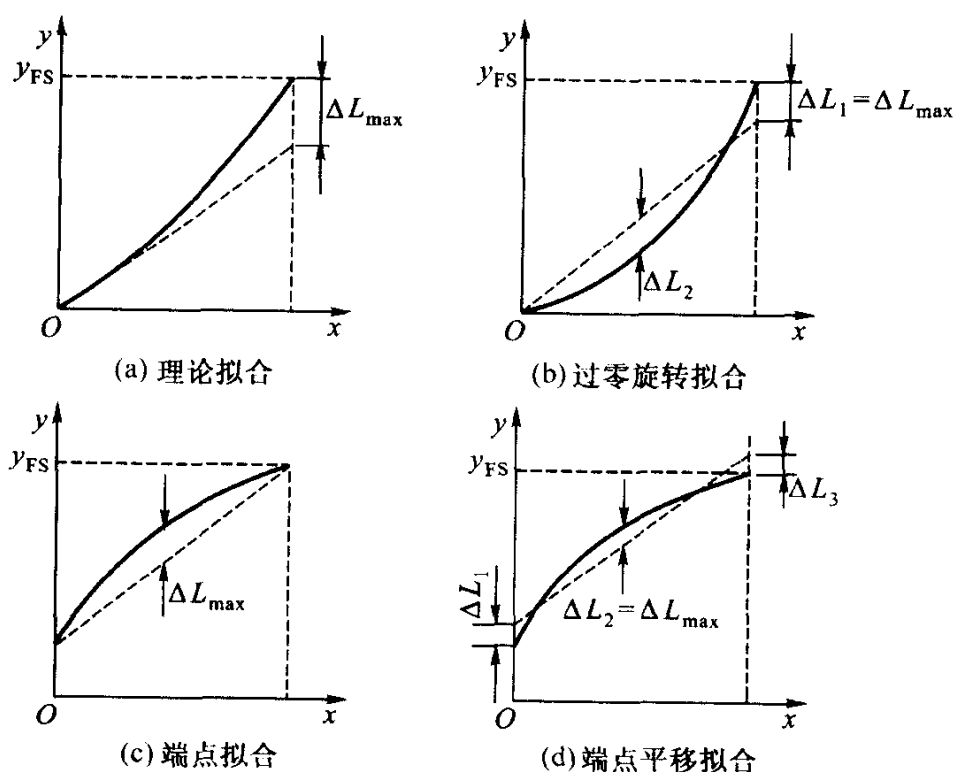


图 1-1 各种直线拟合方法

在图(a)中,拟合直线为传感器的理论特性,与实际测试值无关。这种方法十分简便,但一般说来 $\Delta L_{\max}$ 很大。

图(b)为过零旋转拟合,常用于校正曲线过零的传感器。拟合时,使 $\Delta L_1 = |\Delta L_2| = \Delta L_{\max}$ 。这种方法也比较简单,非线性误差比前一种小很多。

图(c)中,把校正曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便,但 $\Delta L_{\max}$ 较大。

图(d)在图(c)基础上使直线平移,移动距离为图(c)的 $\Delta L_{\max}$ 的一半。这条校正曲线分布于拟合直线的两侧, $\Delta L_2 = |\Delta L_1| = |\Delta L_3| = \Delta L_{\max}$ 。与图(c)相比,非线性误差减小一半,提高了精度。

最小二乘法在误差理论中的基本含义是:在具有等精度的多次测量中求最可靠值时,是当各测定值的残值的残差平方和为最小时,所求得的值,也就是说,把所有校准点数据都标在坐标图上,用最小二乘法拟合的直线,其校准点与对应的拟合直线上的点之间的残差平方和为最小。设拟合直线方程式为

$$y = kx + b \quad (1-3)$$

若实际校准测试点有 n 个, 则第 i 个校准数据 y_i 与拟合直线上相应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (kx_i + b) \quad (1-4)$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值, 也就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 对 k 和 b 的一阶偏导数等于零, 即

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0 \quad (1-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0 \quad (1-6)$$

从而求出 k 和 b 的表达式为

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-7)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \cdot \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-8)$$

在获得 k 和 b 值之后, 代入(1-3)式即可得到拟合直线, 然后按式(1-4)求出误差的最大值 $\Delta i_{\max}$ 即为非线性误差。最小二乘法有严格的数学依据, 尽管计算繁杂, 但所得到的拟合直线精密度高, 即误差小。

顺便指出, 大多数传感器的校正曲线是通过零点的, 或者使用“零点调节”使它通过零点。某些量程下限不为零的传感器, 也应将量程下限作为零点来处理。

1.1.2 迟滞

传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输出与输入曲线不重合时称为迟滞。迟滞特性如图 1-2 所示。迟滞大小一般由实验方法测得。迟滞误差一般以满量程输出的百分数表示, 即

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 $\Delta H_{\max}$ ——正反行程间输出的最大差值。

1.1.3 重复性

重复性是指传感器在输入按同一方向作全量程连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。

图 1-3 所示为校正曲线的重复特性, 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最大偏差中之较大者 $\Delta R_{\max}$, 再以满量程输出的百分数表示, 即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-10)$$

重复性误差也常用绝对误差来表示。检测时也可选取几个测试点, 对应每一点多次从同一

方向接近, 获得输出值系列 $y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, \dots, y_{in}$ 算出最大值与最小值之差作为重复性偏差 ΔR_i , 在几个 ΔR_i 中取出最大值 $\Delta R_{\max}$ 作为重复性误差。

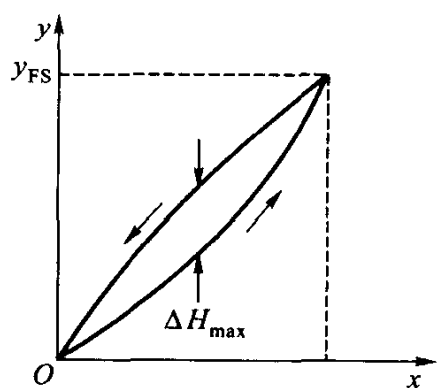


图 1-2 迟滞特性

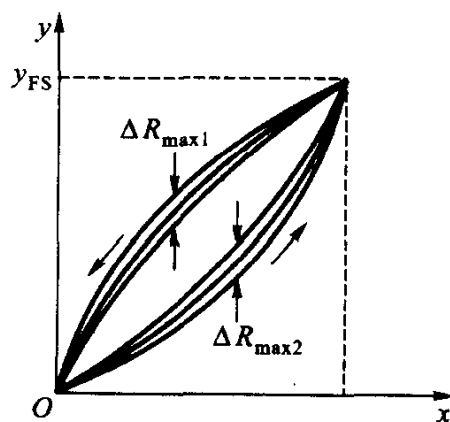


图 1-3 重复特性

1.1.4 灵敏度与灵敏度误差

传感器输出的变化量 Δy 与引起该变化量的输入变化量 Δx 之比即为其静态灵敏度, 其表达式为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-11)$$

由此可见, 传感器校准曲线的斜率就是其灵敏度, 线性传感器其特性是斜率处处相同, 灵敏度 k 是一常数。以拟合直线作为其特性的传感器, 也可以认为其灵敏度为一常数, 与输入量的大小无关。

由于种种原因, 会引起灵敏度变化 Δk , 产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差 γ_s 来表示:

$$\gamma_s = \frac{\Delta k}{k} \times 100\% \quad (1-12)$$

1.1.5 分辨率与阈值

分辨率是指传感器能检测到的最小的输入增量。有些传感器, 如电位器式传感器, 当输入量连续变化时, 输出量只做阶梯变化, 则分辨力就是输出量的每一个“阶梯”所代表的输入量的大小。

分辨率可用绝对值表示, 也可用与满量程的百分比表示。

在传感器输入零点附近的分辨率称为阈值。

1.1.6 稳定性

稳定性是指传感器在长时间工作情况下输出量发生的变化。有时称为长时间工作稳定性或零点漂移。前后两次输出之差即为稳定性误差。稳定性误差可用相对误差表示, 也可用绝对误差来表示。

1.1.7 温度稳定性

温度稳定性又称为温度漂移。它是指传感器在外界温度变化情况下输出量发生的变化。测试时先将传感器置于一定温度(例如 20 ℃)下,将其输出调至零点或某一特定点,使温度上升或下降一定的度数(例如 5 ℃ 或 10 ℃),再读出输出值,前后两次输出之差即为温度稳定性误差。温度稳定性误差用每若干℃的绝对误差或相对误差表示,每℃的误差又称温度误差系数。

1.1.8 多种抗干扰能力

这是指传感器对各种外界干扰的抵抗能力。例如抗冲击和振动能力、抗潮湿的能力、抗电磁场干扰的能力等,评价这些能力比较复杂,一般也不易给出数量概念,需要具体问题具体分析。

1.1.9 静态误差

静态误差是指传感器在其全量程内任一点的输出值与其理论输出值的偏离程度。

静态误差的求取方法如下:把全部校准数据与拟合直线上对应值的残差,看成随机分布,求出其标准偏差 σ ,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2} \quad (1-13)$$

式中: Δy_i ——各测试点的残差;

n ——测试点数。

取 2σ 或 3σ 值即为传感器的静态误差。静态误差也可用相对误差表示,即

$$\gamma = \pm \frac{3\sigma}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-14)$$

静态误差是一项综合性指标,基本上包含了前面叙述的非线性误差、迟滞误差、重复性误差、灵敏度误差等。所以也可以把这几个单项误差综合而得,即

$$\delta = \pm \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_H^2 + \gamma_R^2 + \gamma_S^2} \quad (1-15)$$

1.2 传感器的动态特性

实际中大量的被测量信号是动态信号,这时传感器的输出能否良好地追随输入量的变化是一个很重要的问题。有的传感器尽管其静态特性非常好,但不能很好地追随输入量的快速变化而导致严重误差。这种动态误差若不注意加以控制,可以高达百分之几十甚至几百,这就要求我们认真注意传感器的动态响应特性。

研究动态特性可以从时域和频域两个方面采用瞬态响应法和频率响应法来分析。由于输入信号的时间函数形式是多种多样的,在时域内研究传感器的响应特性时,只能研究几种特定的输入时间函数,如阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等的响应特性。在频域内研究动态特性可以采用正弦信号发生器和精密测量设备很方便地得到频率响应特性。动态特性好的传感器应具有很短的暂态响应时间或者应具有很宽的频率响应特性。

在研究传感器的动态特性时,为了便于比较和评价,经常采用的输入信号为单位阶跃输入量