

高等学校电工电子类系列教材



传感器与检测技术

SENSOR & DETECTION TECHNOLOGY

主编 / 张 毅

主审 / 武玉强



中国石油大学出版社

内容提要

本书系统地介绍了各种传感器的基本原理、基本特性、信号调节电路、设计原理以及相关技术在检测系统中的应用。

本书分为 11 章。第 1 章介绍了传感器与检测技术的相关概念。第 2~8 章系统地介绍了各种传感器的原理、结构和应用,目的在于培养学生使用各类传感器的能力。第 9 章介绍了智能传感器的组成与应用情况。第 10 章介绍了部分新型传感器。第 11 章介绍了新型传感器在工程检测中的应用以及在虚拟仪器和自动检测中的新发展。

本书内容丰富、密切联系实际,提供了大量不同层次的示例与实例,以求适应不同层次的对象。本书既可作为检测技术、自动控制、仪器仪表及各种机电类专业的大专生、本科生及研究生教材,也可供有关工程技术人员和科研工作者使用参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/张毅主编. —东营:中国石油大学出版社,2010.3
ISBN 978-7-5636-3056-1

I. ①传… II. ①张… III. ①传感器—检测 IV.
①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 035168 号

传感器与检测技术

主 编:张 毅
责任编辑:刘 静

出 版 者:中国石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)
网 址:<http://www.uppbook.com.cn>
电子信箱:cbs2006@163.com
印 刷 者:青岛星球印刷有限公司
发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0546—8391810)
开 本:185×260 印张:15.5 字数:377 千字
版 次:2010 年 3 月第 1 版第 1 次印刷
定 价:26.80 元

版权专有,翻印必究。举报电话:0546—8391810

本书封面覆有带中国石油大学出版社标志的激光防伪膜。

本书封面贴有带中国石油大学出版社标志的电码防伪标签,无标签者不得销售。

编 审 委 员 会

BIANSHEN WEIYUANHUI

高等学校电工电子类系列教材 ◀◀

主 任 王志功 (东南大学)

副 主 任 马家辰 (哈尔滨工业大学(威海))

曹茂永 (山东科技大学)

编委会成员 (以姓氏笔画为序)

于海生 (青岛大学)

王宝兴 (聊城大学)

刘法胜 (山东科技大学)

李贻斌 (山东大学)

张 勇 (济南大学)

周绍磊 (海军航空工程学院)

武玉强 (曲阜师范大学)

侯加林 (山东农业大学)

韩 力 (北京理工大学)

谭博学 (山东理工大学)

王培进 (烟台大学)

卢 燕 (青岛理工大学)

刘庆华 (中国石油大学出版社)

李 明 (中国矿业大学)

郑永果 (山东科技大学)

周应兵 (山东交通学院)

孟祥忠 (青岛科技大学)

唐述宏 (潍坊学院)

褚东升 (中国海洋大学)

綦星光 (山东轻工业学院)

编委会秘书 刘 静 (中国石油大学出版社)

出版说明

电工电子技术作为当前信息技术的基础,在国民经济和社会发展中起着越来越直接和越来越重要的作用。在高校中,由于广阔的技术应用和良好的就业前景,使电工电子类专业成为近年来发展势头最强劲的专业之一。在学生人数激增、学科应用拓展、学科发展加速的现实背景下,要使高校的专业教学跟上发展的步伐,适应社会的需求,就必须进行课程体系和课程内容的改革。这是摆在我们电工电子类专业从教者面前的一项重要而紧迫的任务。

正是在这种共同认识的驱动下,我们 20 多所高校——一些平时在教学改革方面颇多交流、在学科建设方面颇多借鉴的院校,走到了一起。我们这些院校各有所长,在一起切磋、比较、学习,搭建了一个很好的学习和交流的平台,共同推动了教育教学改革,促进了各自的发展。经验告诉我们,教改的核心是课程体系和课程内容的改革,但课程体系和课程内容改革的成果呈现在学生面前的最主要资源便是构架完备系统的教材。因此,课程改革与教材建设同步,编写出一套适合当前教学改革要求、结构体系完备、体现教学改革思路的好教材,成了我们共同的追求。

教材指导教学,教材体现教改。根据我们现实的教学需求和进一步的发展规划,我们把这套教材的建设构架为三个方面,也可以说是三个模块:

第一个方面是电工电子的基础理论与技术教材,主要针对工科类学生的通识课或者基础课,包括信号与系统、电路分析、电子线路、模拟电子技术、数字电子技术、单片机原理及应用、微机原理及应用、电气控制及 PLC 技术、计算机控制技术、电机与电气控制技术、传感器与检测技术、电机与拖动等,涵盖电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术等专业的基础知识。为确保教材的权威性、科学性,各书主编及主要撰写者,均由具有多年教学经验的教授和专家担任。教材的覆盖面广、知识面宽,以高校的精品课建设为基础,着重基本概念和基本物理过程的论述,注重教学内容的内拓和精选,突出先进性、针对性和实用性。

第二个方面是实验与实训类教材。实验教学是培养学生基本工程素质、提高工程实践能力的重要手段,是高校工科教育教学改革的核心课题。为此,我们这些高校都极其重视实验教学改革与教材建设,不断更新实训教育理念,注重学生创新能力和动手能力的综合发展。国家级实验教学示范中心是高等学校实验教学研究改革的基地,引领全国高等学校实验教学改革的方向。我们的整套实训教材以山东科技大学和青岛大学“国家级电工电子实验教学示范中心”为依托,将任务驱动与项目引领相结合,融基础实验与综合技能训练、系

统设计与综合应用、工程训练和创新能力培养为一体,体系完整、内容丰富、工程实践性强,以期达到加强学生的系统综合设计能力和训练学生工程思维的目的。这一类教材主要包括电路实训教程、模拟电子技术实验教程、数字电路逻辑设计与实训教程、电子工艺与实训教程、PLC应用实训教程、电子工程实训教程、电气工程实训教程等。相信这部分教材对加强、规范和引导相关高校的实验教学会有有一定的借鉴作用。

第三个方面则是我们独具特色的电工电子类专业的双语教学教材。我们本着自编和引进并重的原则,打造适合我国高等教育发展的电工电子类双语教材体系。我们拥有具有东西方不同教学体系下丰富教学经验的外国专家和教授,他们以纯正的英语语言直接面向我们的大学生编写教材,这在国内恐属首创。比如这套教材中的双语教材之一《Introductory Microcontroller Theory and Applications》就是由英籍专家 Michael Collier 主编完成的英文版双语教材。该教材已在试用中得到了教师和学生的很高评价。在编写原创双语教材的同时,为了提供更丰富的双语教材资源,弥补原创双语教材在数量上的不足,各校将在共同讨论的基础上,引进相对适应性广泛的原版教材。另外,电工电子类双语教学网站也在同步建设中,为师生提供双语教学资源,打造师生互动平台。

诸事万物,见仁见智。对一套好教材的追求是我们的愿望。但当我们倾力追求教材对于我们学校现实的适用性时,我们真的惧怕它们或许已离另一些学校更远。站在不同的起点或角度进行教材构架时,这种差异有时会影响人们对教材的评判。这就时刻提醒我们参与教材编写的院校,在追求教材对于自身的适用性的同时,需要努力与其他院校做更多的沟通和了解,以使自身更好地融入全国教改的主流,同时使这套教材具有更好的普适性,有更广泛的代表意义和借鉴作用。

教材是教学之本。我们希望这套教材:不仅能符合专业培养要求,而且能顺应专业培养方向;不仅能符合教育教学规律,而且能符合学生的接受能力和知识水平;不仅能蕴含和体现丰富的教学经验和思想,而且能为学生呈现良好的学习方法,能指导学生学会自主学习,能调动学生的创造力和学习热情……我们将为此继续努力!

编委会

2009年12月

前言 Preface

现代科学技术迅速发展,人们在研究自然现象和规律及生产活动时,必然要从外界获得大量信息,而要及时正确地获取这些信息,就必须合理选择并善于应用各种传感器及检测仪表。本书是编者在多年从事传感器及仪器仪表教学和科学研究的基础上编写而成的。本书在详尽阐述基本概念、基本理论的基础上,从工程角度出发,强调工程的概念,而不是仅仅作知识点介绍。同时注重近年来本领域中理论和技术的发展,根据目前我国本科教学的需要,有选择地将部分新方法和新技术编入本教材。

本书力图介绍更多的传感器,但更注重传感器的共性内容。因为传感器层出不穷,一本书难以将它介绍全。本书期望对传感器的结构、基本原理及其调理电路的形式作详尽的描述,但更着眼于传感器的使用;更注意从建立传感器测量系统方面来介绍传感器,因为传感器是不可能孤立使用的;更注重传感器技术的发展,因为许多传感器及调理电路、系统已正在向一体化、集成化、智能化、网络化方向发展。

全书内容分为 11 章。第 1 章介绍传感器与检测技术的基本知识。第 2~8 章系统地介绍各种传感器的原理、结构和应用,目的在于培养学生使用各类传感器的能力。第 9 章介绍智能传感器的组成与应用情况。第 10 章介绍部分新型的传感器。第 11 章介绍新型传感器在工程检测中的应用,在虚拟仪器和自动检测中的新发展,以及其中的共性技术的应用。使用本教材时,可根据各校具体的实验仪器情况,结合教材内容开设实验,以深化对理论知识的理解,提高学生分析问题和解决问题的能力,从而取得良好的教学效果。

本书由海军航空工程学院的张毅担任主编,由海军航空工程学院的周绍磊、潍坊学院的马世勇、聊城大学的阮树仁担任副主编。张毅编写第 1、3、9 章;周绍磊编写第 2、6 章;马世勇编写第 4 章和第 10 章的部分内容;阮树仁编写第 7 章部分内容和第 8 章;杨秀霞编写第 5 章和第 10 章的部分内容;吴晓男编写第 7 章部分内容和第 11 章部分内容;武华编写第 11 章的部分内容。全书由张毅统稿,由曲阜师范大学的武玉强教授主审。在编写过程中,参阅了许多专家的教材、著作和论文,还得到了国内外有关同行的支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中误漏难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2010 年 2 月

目录 Contents

► 第1章 绪论

1.1 传感器概述	1
1.1.1 传感器的定义	1
1.1.2 传感器的组成	1
1.1.3 传感器的分类	2
1.1.4 自动检测系统的组成	2
1.1.5 自动检测系统的发展趋势	3
1.2 传感器的基本特性	4
1.2.1 传感器的静态特性	4
1.2.2 传感器的动态特性	7
1.3 测量误差与处理	10
1.3.1 误差的基本概念	10
1.3.2 测量误差的合成	11
1.3.3 测量误差分配	13
1.3.4 最佳测量方案的选择	13
1.4 传感器的标定和校准	14
1.4.1 标定的基本概念	14
1.4.2 传感器的静态标定	15
1.4.3 传感器的动态标定	15
本章小结	17
习题与思考题	17

► 第2章 电阻式传感器

2.1 应变式传感器	19
2.1.1 电阻应变片的工作原理	19
2.1.2 电阻应变片的特性	21
2.1.3 应变式传感器的信号调节电路	25
2.1.4 应变式传感器的应用	

2.2 压阻式传感器	38
2.2.1 压阻式传感器的工作原理	38
2.2.2 测量桥路及温度补偿	39
2.2.3 压阻式传感器的应用	40
本章小结	41
习题与思考题	41

► 第3章 电感式传感器

3.1 自感式传感器	43
3.1.1 工作原理	43
3.1.2 结构形式及特性	44
3.1.3 自感式传感器应用举例	46
3.2 差动变压器式传感器	47
3.2.1 工作原理	47
3.2.2 结构形式及特性	48
3.2.3 差动变压器式传感器测量电路	50
3.2.4 零点残余电压	52
3.2.5 差动变压器式传感器应用举例	53
3.3 电涡流式传感器	54
3.3.1 工作原理	54
3.3.2 结构形式及特性	55
3.3.3 电涡流式传感器测量电路	57
3.3.4 电涡流式传感器应用举例	58
本章小结	61

习题与思考题	62		95
► 第4章 电容式传感器		5.3.2 霍尔元件的结构及测量 电路	96
4.1 电容式传感器的工作原理 和结构	63	5.3.3 霍尔元件的误差及补偿	97
4.2 电容式传感器的线性及灵敏度	64	5.3.4 霍尔传感器的应用	99
4.2.1 变间隙式电容传感器	64	本章小结	100
4.2.2 变面积式电容传感器	68	习题与思考题	100
4.2.3 变介电常数式电容 传感器	68	► 第6章 热电式传感器	
4.3 电容式传感器的等效电路及 测量电路	70	6.1 热电偶传感器	101
4.3.1 电容式传感器的等效 电路	70	6.1.1 热电偶的基本原理 ...	101
4.3.2 电容式传感器的测量 电路	70	6.1.2 热电偶的基本定律 ...	104
4.4 电容式传感器的应用	76	6.1.3 冷端处理及补偿	104
本章小结	78	6.1.4 热电偶的材料及结构	108
习题与思考题	78	6.1.5 热电偶的应用	109
► 第5章 电动势式传感器		6.2 热电阻传感器	110
5.1 压电式传感器	79	6.2.1 金属热电阻	110
5.1.1 工作原理	79	6.2.2 半导体热敏电阻	112
5.1.2 等效电路及测量电路	81	6.2.3 热电阻传感器的应用	114
5.1.3 压电式传感器的应用	86	6.3 PN结温度传感器和集成温度 传感器	115
5.2 磁电式传感器	88	6.3.1 工作原理	115
5.2.1 磁电式传感器的工作 原理	89	6.3.2 PN结温度传感器的 应用	116
5.2.2 结构及工作特性	89	6.3.3 集成温度传感器的分类 及特性	117
5.2.3 磁电式传感器的测量 电路	93	6.3.4 集成温度传感器的应用	122
5.2.4 磁电式传感器的应用	93	本章小结	122
5.3 霍尔传感器	94	习题与思考题	123
5.3.1 霍尔传感器的工作原理		► 第7章 光电式传感器	
		7.1 光电器件	124
		7.1.1 基于外光电效应的光电 器件	124
		7.1.2 基于内光电效应的光电 器件	126

7.1.3 光电器件的应用	133
7.2 电荷耦合器件	134
7.2.1 CCD 传感器的结构与 工作原理	134
7.2.2 CCD 的分类及特性	135
7.2.3 CCD 的应用	138
7.3 光纤传感器	139
7.3.1 光纤的结构及种类 ..	139
7.3.2 光纤的传光原理	140
7.3.3 光纤的传输特性	141
7.3.4 光纤传感器的应用 ..	142
本章小结	143
习题与思考题	144

► 第 8 章 压磁式传感器

8.1 压磁式传感器的工作原理	145
8.1.1 磁致伸缩和压磁效应	145
8.1.2 压磁式传感器的工作 机理	146
8.2 压磁式传感器的结构	146
8.3 压磁式传感器的特性	149
8.3.1 磁体介质能量关系 ..	149
8.3.2 磁介质磁化受力关系	150
8.3.3 压磁式传感器的理论 数学模型	150
8.3.4 压磁式传感器参数的 选取原则	151
8.3.5 压磁式传感器的误差	152
8.4 压磁式传感器的测量电路	152
8.5 压磁式传感器的应用	153
8.5.1 磁致伸缩式扭矩传感器	153
8.5.2 压磁式测力传感器 ..	154

本章小结	155
习题与思考题	155

► 第 9 章 智能传感器

9.1 智能传感器的组成及功能	156
9.1.1 智能传感器的组成 ..	156
9.1.2 智能传感器的功能 ..	157
9.1.3 智能传感器的特点 ..	157
9.2 智能传感器实现的途径	158
9.2.1 非集成化实现	158
9.2.2 集成化实现	158
9.2.3 混合实现	159
9.2.4 集成化智能传感器的 几种形式	160
9.3 智能传感器输出信号的 预处理	161
9.3.1 传感器输出信号的分类	161
9.3.2 开关信号的预处理 ..	161
9.3.3 模拟信号预处理	161
9.4 数据采集	163
9.4.1 数据采集的配置	163
9.4.2 取样周期的选择	164
9.4.3 A/D 转换器的选择	164
9.5 智能传感器的数据处理技术	165
9.5.1 数据处理包含的内容	165
9.5.2 标度变换技术	165
9.5.3 非线性补偿技术	166
9.5.4 数字滤波技术	169
9.6 智能传感器的硬件设计	170
9.6.1 正确选择微处理器 ..	170
9.6.2 智能传感器的输入输出 技术	172
9.6.3 智能传感器实例	173
9.7 无线传感器网络技术	174

9.7.1 无线传感器网络的结构及特点	174
9.7.2 无线传感器网络的关键技术	175
9.7.3 无线传感器网络的主要应用领域	181
本章小结	182
习题与思考题	182

► 第10章 其他新型传感器

10.1 红外传感器	183
10.1.1 红外传感器的基本知识	183
10.1.2 红外传感器的分类	184
10.1.3 红外传感器的性能参数	186
10.1.4 红外成像原理与应用	188
10.1.5 红外无损检测应用	190
10.2 微波传感器	191
10.2.1 微波的基本知识	191
10.2.2 微波传感器及其分类	192
10.2.3 微波传感器的应用	193
10.3 超导传感器	195
10.4 生物传感器	197
10.4.1 生物传感器的概念与基本原理	197
10.4.2 生物活性材料固定化技术	198
10.4.3 酶传感器	199
10.4.4 微生物传感器	200
10.4.5 免疫传感器与生物组织传感器	202

本章小结	203
习题与思考题	203

► 第11章 传感器、检测系统及应用实例

11.1 传感器应用举例	204
11.1.1 提高半导体气体传感器温度稳定性的一种有效补偿技术	204
11.1.2 互补型反射式光纤微位移的设计与实现	208
11.1.3 电涡流式传感器及铜管内壁探伤系统的设计与建立	211
11.2 虚拟仪器应用举例	216
11.2.1 虚拟仪器的基本概念	216
11.2.2 虚拟仪器的特点	217
11.2.3 虚拟仪器的基本结构和类型	218
11.2.4 基于虚拟仪器的应变测量技术设计	219
11.2.5 非电量测量虚拟仪器体系结构分析举例	220
11.3 检测系统应用举例	222
11.3.1 计算机检测系统概述	222
11.3.2 总线技术	223
11.3.3 网络化检测系统	227
本章小结	230

附录	231
附录1	231
附录2	233

参考文献	235
------	-----

绪 论

现代科学技术的进步和社会生产力的飞跃发展,使人类社会进入了信息时代。以信息为中心的技术革命通过信息链影响着整个社会。信息链由信息获取、信息处理和信息传输三个环节组成。它们构成了信息科学与技术的三大学科分支,又称为信息技术的三大支柱,即信息获取科学与技术、计算机科学与技术和通信与网络技术。

在我们所处的这个信息时代,信息技术主宰着社会生产,已成为发展科学研究、高新技术的源泉,改变着人们的社会活动、思考、生产、消费、沟通、生活的方式,乃至战争的方式。信息化社会的战略是知识与信息,相当于前工业化社会的战略资源——资本与物质。可以想象,信息对于我们当今社会的重要性。

传感器技术是关于传感器设计、制造、传感器系统的建立与应用的综合技术,是信息获取的核心技术之一。

1.1 传感器概述

1.1.1 传感器的定义

我国国家标准 GB76615-2005 中关于传感器(Transducer/Sensor)的定义是:能感受规定的被测量,并按一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。它通常由敏感元件与转换元件组成。此定义所表述的传感器的主要内涵和特征包括以下 3 个方面:

(1) 从传感器输入端来看,一个指定的传感器只能感受或响应规定的物理量,即传感器对规定的被测量具有最大的灵敏度和最好的选择性。例如,我们不希望一只单功能的电流传感器同时还受环境温度的影响。传感器能够感受或响应的物理量既可以是电量,也可以是电量。

(2) 从传感器输出端来看,输出信号为“可用信号”。这意指传感器的输出信号中不但载运着待测的原始信息,而且能够被远距离传送,是后续测量环节便于接收和进一步处理的信号形式。最常见的是电信号。

(3) 从输入与输出关系来看,这种关系应具有“一定的规律”。其意指传感器的输入与输出应是相关的,而且这种规律是可复现的。

传感器处于测量系统的最前端,起着获取检测信息与转换信息的重要作用。

1.1.2 传感器的组成

一般来讲,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转换为容易传输、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电路可能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组成的一部分。传感器的组成框图如图 1-1 所示。

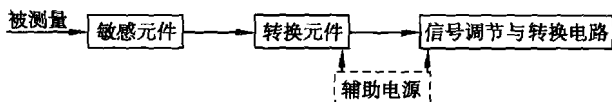


图 1-1 传感器组成框图

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。

1.1.3 传感器的分类

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

表 1-1 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
	物性型传感器	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	传感器直接将被测量的能量转换为输出量的能量
	能量控制型	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	输出为模拟量
	数字式传感器	输出为数字量

1.1.4 自动检测系统的组成

在自动检测系统中,各组成部分常以信息流的过程划分,一般可分为信息的提取、转换、处理和输出几部分。首先获取被检测的信息,将其转换成电量,然后把已转换成电量的信息进行放大、整形等转换处理,再通过输出单元(如指示仪和记录仪)把信息显示出来,或者通过输出单元把已处理的信息送到控制系统的其他单元,成为控制系统的一部分。检测系统的组成框图如图 1-2 所示。

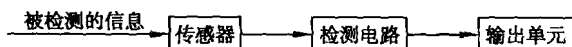


图 1-2 检测系统的组成框图

在检测系统中,传感器是把被测非电量转换成与之有确定对应关系,且便于应用的某些

物理量(通常为电量)的检测装置。传感器获得信息的正确与否,关系到整个检测系统的精度。如果传感器的误差很大,即使后续检测电路等环节精度很高,也难以提高检测系统的精度。

检测电路的作用是把传感器输出的变量转换成电压或电流信号,使之能在输出单元的指示仪上指示或记录仪上记录;或者能够作为控制系统的检测或反馈信号。检测电路的种类通常由传感器的类型而定,如电阻式传感器需用一个电桥电路把电阻值转换成电流或电压输出。由于电桥输出信号一般比较微弱,常常要将电桥输出信号加以放大,所以在测量电路中一般还要有放大器。

输出单元可以是指示仪、记录仪、累加器、报警器、数据处理电路等。若输出单元是显示仪或记录仪,则该测试系统为自动检测系统;若输出单元是计数器或累加器,则该测试系统为自动计量系统;若输出单元是报警器,则该测试系统为自动保护系统或自动诊断系统;若输出单元是数据处理电路,则该测试系统为部分数据分析系统,或部分自动管理系统,或部分自动控制系统。

1.1.5 自动检测系统的发展趋势

微电子技术、通信技术、计算机网络技术的发展,对自动检测技术也提出了越来越高的要求,并进一步推动了自动检测技术的发展。其技术发展趋势主要有以下几个方面。

(1) 不断提高仪器的性能、可靠性,扩大应用范围。科学技术的发展,对仪器仪表的性能要求也相应地提高,如提高其分辨率、测量精度,提高系统的线性度,增大测量范围等,使其技术性能指标不断提高,应用领域不断扩大。

(2) 开发新型传感器。开发新型传感器主要包括:利用新的物理效应、化学反应和生物功能研发新型传感器,采用新技术、新工艺填补传感器空白,开发微型传感器,仿照生物的感觉功能研究仿生传感器等。

(3) 开发传感器的新型敏感元件材料和采用新的加工工艺。新型敏感元件材料的开发和应用是非电量电测技术中的一项重要任务,其发展趋势为:从单晶体到多晶体、非晶体,从单一型材料到复合型材料、原子(分子)型材料的人工合成。其中,半导体敏感材料在传感器技术中具有较大的技术优势,陶瓷敏感材料具有较大的技术潜力,磁性材料向非晶体化、薄膜化方向发展,智能材料的探索在不断地深入。智能材料是指具备对环境的判断和自适应功能、自诊断功能、自修复功能和自增强功能的材料,如形状记忆合金、形状记忆陶瓷等。

在开发新型传感器时,离不开新工艺的采用。如把集成电路制造工艺技术应用于微机电系统中微型传感器的制造。

(4) 微电子技术、微型计算机技术、现场总线技术与仪器仪表和传感器的结合,构成新一代智能化检测系统,使测量精度、自动化水平进一步提高。

(5) 研究集成化、多功能化和智能化传感器或检测系统。传感器集成化主要有两层含义:一是同一功能的多元件并列化,即将同一类型的单个传感元件在同一平面上排列起来,排成一维构成线型传感器,排成二维构成面型传感器(如 CCD);另一层含义是功能一体化,即将传感器与放大、运算、温度补偿、信号输出等环节一体化,组装成一个器件(如容栅传感器动栅数显单元)。

传感器多功能化是指一器多能,即用一个传感器可以检测两个或两个以上的参数。多

功能化不仅可以降低生产成本、减小体积,而且可以有效地提高传感器的稳定性、可靠性等性能指标。

传感器的智能化就是把传感器与微处理器相结合,使之不仅具有检测功能,还具有信息处理、逻辑判断、自动诊断等功能。

1.2 传感器的基本特性

在科学实验和生产过程中,需要对各种各样的参数进行检测和控制。这就要求传感器能感受到被测非电量的变化,并将其转换成与被测量成一定函数关系的电量。传感器所测量的非电量可分为静态量和动态量两类。静态量是指不随时间变化的信号或变化极其缓慢的信号(准静态)。动态量通常是指周期信号、瞬变信号或随机信号。传感器能否将被测非电量的变化不失真地变换成相应的电量,取决于传感器的基本特性,即输出-输入特性。它是与传感器的内部结构参数有关的外部特性。传感器的基本特性可用静态特性和动态特性描述。

1.2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时,传感器的输出与输入的关系。衡量传感器静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞、重复性、漂移等。

1. 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间的线性程度。通常,为了方便标定和数据处理,理想的输出-输入关系应该是线性的。但实际遇到的传感器的特性大多是非线性的,如果不考虑迟滞和蠕变等因素,传感器的输出-输入特性一般可用下列多项式表示

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (1.2.1)$$

式中, x 为输入量(被测量); y 为输出量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器的灵敏度; $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性项的待定常数。

各项系数不同,决定了特性曲线的具体形状也各不相同。理想特性方程为 $y = a_1 x$,是一条经过原点的直线,传感器的灵敏度为一常数。当特性方程中仅含有奇次非线性项,即 $y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots$ 时,特性曲线关于坐标原点对称,且在输入量 x 相当大的范围内具有较宽的准线性。当非线性传感器以差动方式工作时,可以消除电气元件中的偶次分量,显著地改善线性范围,并可使灵敏度提高一倍。

传感器的静态特性曲线可通过实际测试获得。在实际应用中,为了得到线性关系,往往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,或采用差动结构,使传感器的输出与输入关系为线性或接近线性。但如果非线性项的方次不高,在输入量变化范围不大的条件下,可以用一条直线(切线或割线)近似代表实际曲线的一段,如图1-3所示。这种方法称为传感器非线性特性的线性化,所采用的直线称为拟合直线。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差。如图1-3中的 ΔL 值,取其中最大值与输出满度值之比作为评价非线性误差(或线性度)的指标,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

式中, γ_L 为线性度; $\Delta L_{\max}$ 为最大非线性绝对误差; Y_{FS} 为满量程输出。

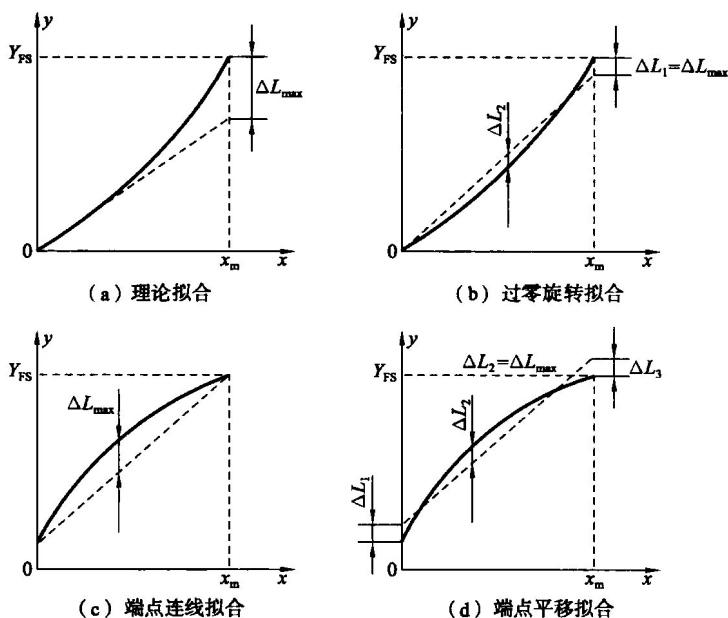


图 1-3 几种直线拟合方法

图 1-3 中, x 为传感器的输入量; y 为传感器的输出量; x_m 为输入最大值。

由图 1-3 可见, 非线性误差是以一定的拟合直线或理想直线为基准直线计算出来的。因而, 即使是同类传感器, 基准直线不同, 所得线性度也不同。选取拟合直线的方法很多, 用最小二乘法求取的拟合直线的拟合精度最高。

2. 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态下的输出变化量 Δy 与引起此变化的输入变化量 Δx 之比, 用 k 表示, 即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.2.3)$$

它表征传感器对输入量变化的反应能力。对于线性传感器, 灵敏度就是其静态特性的斜率, 即 $k = y/x$, 为常数; 而非线性传感器的灵敏度为一变量, 用 $k = dy/dx$ 表示。传感器的灵敏度如图 1-4 所示。一般希望传感器的灵敏度高, 在满量程范围内是恒定的, 即传感器的输出-输入特性为直线。

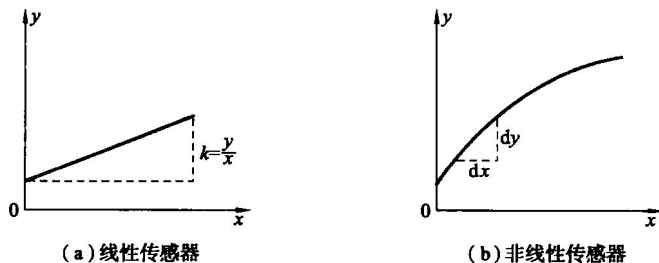


图 1-4 传感器的灵敏度

3. 迟滞

传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程期间, 其输出-输入特性曲线不重合的现

象称为迟滞,如图 1-5 所示。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。产生这种现象的主要原因是传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷。例如,弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件的摩擦、传动机构的间隙、紧固件的松动等。

迟滞 γ_H 的大小一般要由实验方法确定,用最大输出差值 $\Delta H_{\max}$ 或其一半对满量程输出 Y_{FS} 的百分比表示,即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

或

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.2.5)$$

式中, $\Delta H_{\max}$ 为正反行程输出值间的最大差值。

4. 重复性

重复性 γ_R 指在同一工作条件下,输入量按同一方向做全量程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度,如图 1-6 所示。重复性误差属于随机误差,常用标准偏差表示,也可用正反行程中的最大偏差表示,即

$$\gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.2.6)$$

或

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.2.7)$$

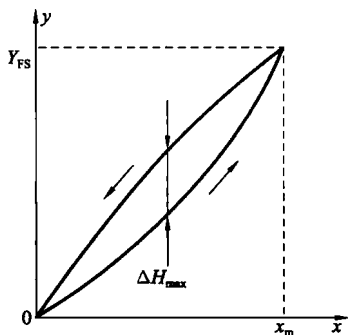


图 1-5 迟滞特性

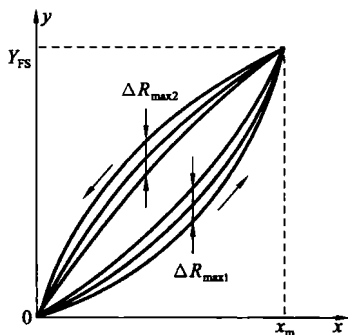


图 1-6 重复性

5. 漂移

传感器无输入时,每隔一段时间进行读数,其输出偏离零值,即为零点漂移,其值为

$$\frac{\Delta Y_0}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.2.8)$$

式中, ΔY_0 为最大零点偏差; Y_{FS} 为满量程输出。

温度漂移表示温度变化时,传感器输出值的偏离程度。一般用温度变化 1°C 时,输出最大偏差与满量程的百分比表示,即

$$\frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS} \Delta T} \times 100\% \quad (1.2.9)$$

式中, $\Delta_{\max}$ 为输出最大偏差; ΔT 为温度变化范围; Y_{FS} 为满量程输出。

1.2.2 传感器的动态特性

在实际测量中,大量的被测量是随时间变化的动态信号,这就要求传感器的输出不仅能精确地反映被测量的大小,还要正确地再现被测量随时间变化的规律。

传感器的动态特性是指传感器的输出对随时间变化的输入量的响应特性,反映输出值再现变化着的输入量的能力。一个动态特性好的传感器,其输出将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际上,除了具有理想的比例特性的环节外,由于传感器固有因素的影响,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种输出与输入之间的差异就是所谓的动态误差。研究传感器的动态特性主要是从测量误差角度分析产生动态误差的原因及改善措施。

由于绝大多数传感器都可以简化为一阶或二阶系统,因此一阶和二阶传感器是最基本的。研究传感器的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分析。

1. 瞬态响应特性

在时域内研究传感器的动态特性时,常用的激励信号有阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等。传感器对所加激励信号的响应称为瞬态响应。一般认为,阶跃输入对于一个传感器来说是最严峻的工作状态。如果在阶跃函数的作用下,传感器能满足动态性能指标,那么在在其他函数的作用下,其动态性能指标也必定会令人满意。在理想情况下,阶跃输入信号的大小对过渡过程的曲线形状是没有影响的。但在实际做过渡过程实验时,应保持阶跃输入信号在传感器特性曲线的线性范围内。下面以传感器的单位阶跃响应来评价传感器的动态性能。

1) 一阶传感器的单位阶跃响应

设 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为传感器的输入量和输出量,均是时间的函数,则一阶传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (1.2.10)$$

式中, τ 为时间常数; k 为静态灵敏度。

由于线性传感器的灵敏度 k 为常数,在动态特性分析中, k 只起使输出量增加 k 倍的作用。因此,为方便起见,在讨论时采用 $k=1$ 。

对于初始状态为零的传感器,当输入为单位阶跃信号时, $X(s) = 1/s$, 传感器输出的拉氏变换为

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (1.2.11)$$

则一阶传感器的单位阶跃响应为

$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.2.12)$$

响应曲线如图 1-7 所示。由图可见,传感器存在惯性,输出的初始上升斜率为 $1/\tau$,若传感器保持初始响应速度不变,则在 τ 时刻输出将达到稳态值,但实际的响应速率随时间的增加而减慢。理论上传感器的响应在 t 趋于无穷时才达到稳态值,但实际上当 $t=4\tau$ 时其输