

传感器原理及实际应用设计

主 编 李艳红 李海华 杨玉蓓

副主编 周胜兰 李 平 陈向诗瑶

主 审 赵振华 李元科



北京理工大学出版社

面向“十三五”高等教育规划教材

传感器原理及实际应用设计

主 编	李艳红	李海华	杨玉蓓
副主编	周胜兰	李 平	陈向诗瑶
主 审	赵振华	李元科	

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要针对应用型人才培养及实际工程应用编写,系统地介绍了电阻式、电容式、电感式、压电式、霍尔式、光电式以及热电式等各类常用传感器,详细阐述了各个传感器的基本概念、工作原理、主要特性、测量转换电路及其典型应用。同时对测量的基本知识、传感器的特性与标定等内容进行了介绍。并且设置了部分实验,使读者可以更好地理解传感器技术的综合应用。

本书取材广泛,内容丰富,以便于理解和学习为前提,由浅入深,循序渐进,将传感器原理与应用技术紧密结合。

本书可作为高等院校自动化、电子与信息工程、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、计算机应用技术以及机电类各专业的教材,也可供有关工程技术人员参考使用,或作为自学用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及实际应用设计 / 李艳红, 李海华, 杨玉蓓主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 5

ISBN 978 - 7 - 5682 - 2148 - 1

I. ①传… II. ①李…②李…③杨… III. ①传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 073530 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17.75

字 数 / 416 千字

版 次 / 2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 49.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



前言

传感器是机电一体化系统中各种各样设备和装置的“感觉器官”，它将各种各样的信息量转换成能够被直接检测的信息。在当今信息社会的时代，传感器技术被誉为“电子技术的五官”，又是信息采集和处理两个关键环节的基本技术，所有传感器在机电一体化系统中乃至整个现代科学技术领域占有极其重要的地位。

本书共分 12 章，着重讲清原理，并与实际生活中具体应用相结合，在每个章节的后面添加了实际生活中相关例子的具体设计，使读者对所学传感器原理及相关应用思路清晰，做到将理论应用到实际中。

第 1 章为传感器概述，包括传感器的基本概念、测量的概念、误差分析及数据处理；第 2 章为传感器的一般特性，包括传感器的静态特性和动态特性及传感器的静态标定和动态标定；第 3 章为电阻式传感器的原理及其应用，包括电阻式传感器和压阻式传感器的结构、工作原理、测量电路及实际应用的举例；第 4 章为电容式传感器的原理及其应用，包括电容式传感器的结构、工作原理、测量电路、性能和设计的改善措施以及具体的实际应用；第 5 章为电感式传感器的原理及其应用，包括自感式传感器的结构及测量原理与具体应用、差动变压器的结构及测量原理与具体应用，涡流传感器的结构及测量原理与实际应用；第 6 章为压电式传感器的原理及其应用，包括压电效应和压电材料、压电式传感器的工作原理、测量转换电路及其实际应用；第 7 章为霍尔传感器的原理及其应用，包括霍尔传感器的基本工作原理、霍尔传感器的基本结构、霍尔传感器基本测量电路及补偿方法、霍尔传感器的具体应用电路的分析；第 8 章为光电式传感器的原理及其应用，包括光电效应的原理、光电器件的类型、光电式传感器的结构及具体应用、热释电红外线传感器的工作原理及其实际应用、光纤传感器的工作原理及其实际应用；第 9 章为温度传感器的原理及其应用，包括热电阻的工作原理及其实际应用电路、热电偶的工作原理及其实际应用电路、红外温度传感器的原理及其实际应用、集成温度传感器的原理及其实际应用；第 10 章为其他传感器的工作原理及其应用，包括气敏传感器的工作原理及其具体应用、温度传感器的工作原理及其具体应用、超声波传感器的工作原理及其具体应用、智能传感器的工作原理及其具体应用；第 11 章为传感器技术的综合应用，包括传感器在家用电器及安全防范中的应用、传感器在现代汽车中的应用、传感器使用的几项关键技术；第 12 章为传感器及其应用技术实验，包括电阻应变片的认识与粘贴技术、涡流传感器原理及应用实验、霍尔传感器原理及应用实验、光电传感器原理及应用实验和温度传感器原理及应用实验。

本书由武汉工程大学邮电与信息工程学院的李艳红和杨玉蓓、华中科技大学文华学院的李海华担任主编，武汉工程大学邮电与信息工程学院的周胜兰、李平、陈向诗瑶担任副主编，其中第 1 章、第 5 章、第 6 章、第 8 章由杨玉蓓编写，第 2 章由周胜兰编写，第 3 章、

第4章、第9章、第11章由李艳红编写，第7章和第10章由李海华编写，第12章由李平编写，陈向诗瑶为本书的编写搜集了大量的参考资料和实用设计实例。全书由李艳红组织并统稿。本书由武汉工程大学邮电与信息工程学院赵振华教授、华中科技大学李元科教授主审，他们认真仔细地审阅了全部书稿，提出了大量的宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于本书作者水平有限，书中难免有缺点和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 传感器概述	1
1.1 传感器的地位与作用	1
1.2 传感器的组成和分类	2
1.3 传感器的发展趋势	3
1.4 传感器的选用原则	4
1.5 测量技术的基本知识	5
1.5.1 测量概论	5
1.5.2 测量误差与不确定度	7
思考与练习	10
第 2 章 传感器的一般特性	11
2.1 概述	11
2.2 传感器的特性	12
2.2.1 传感器的静态特性	12
2.2.2 传感器的动态特性	15
2.3 传感器的标定	20
2.3.1 传感器的静态标定	20
2.3.2 传感器的动态标定	21
2.3.3 压力传感器的静态标定	21
2.3.4 压力传感器的动态标定	22
思考与练习	24
第 3 章 电阻式传感器的原理及其应用	25
3.1 电阻应变式传感器	25
3.1.1 电阻应变片的工作原理	25
3.1.2 电阻应变片的结构和分类	27
3.1.3 电阻应变式传感器的测量电路	30
3.1.4 电阻应变片的粘贴	35
3.1.5 电阻应变式传感器的应用	36
3.1.6 基于电阻应变式传感器的电子秤实例设计	39
3.2 压阻式传感器	42
3.2.1 压阻式传感器的结构	42
3.2.2 压阻式传感器的工作原理	43
3.2.3 压阻式传感器的应用	45

思考与练习	47
第4章 电容式传感器的原理及其应用	48
4.1 电容式传感器的工作原理及分类	48
4.2 电容式传感器的测量电路	52
4.3 电容式传感器的特点及设计改善措施	57
4.3.1 电容式传感器的优缺点	57
4.3.2 电容式传感器的设计改善措施	58
4.4 电容式传感器的应用	60
4.5 基于电容式传感器在液位检测中的实例设计	64
4.6 电容式指纹识别传感器	68
思考与练习	69
第5章 电感式传感器的原理及其应用	70
5.1 概述	70
5.2 自感式传感器	71
5.2.1 自感式传感器的结构	71
5.2.2 自感式传感器的工作原理	71
5.2.3 差动式自感传感器	72
5.2.4 电感式传感器的测量电路	73
5.2.5 电感式传感器的应用电路	75
5.3 差动变压器式传感器	77
5.3.1 差动变压器的结构	77
5.3.2 差动变压器的工作原理	78
5.3.3 差动变压器的测量电路	79
5.3.4 差动变压器的应用电路	80
5.4 电涡流式传感器	81
5.4.1 电涡流式传感器的工作原理	81
5.4.2 电涡流式传感器的结构	82
5.4.3 电涡流式传感器的测量电路	82
5.4.4 电涡流式传感器的应用电路	83
思考与练习	85
第6章 压电式传感器的原理及其应用	86
6.1 压电效应和压电材料	86
6.1.1 压电效应	86
6.1.2 压电材料	89
6.2 压电元件的常用结构	91
6.3 压电式传感器的等效电路和测量电路	93
6.3.1 压电式传感器的等效电路	93
6.3.2 压电式传感器的测量电路	94
6.4 压电式传感器的应用	95

6.4.1 压电式测力传感器	96
6.4.2 压电式压力传感器	96
6.4.3 压电式加速度传感器	97
6.4.4 新材料压电传感器及其应用	98
6.4.5 高分子压电电缆的典型应用	98
思考与练习	101
第7章 霍尔传感器的原理及其应用	102
7.1 概述	102
7.1.1 霍尔元件的结构	102
7.1.2 霍尔传感器的命名方法	103
7.1.3 霍尔传感器的工作原理	103
7.1.4 霍尔传感器的特性参数	103
7.2 霍尔传感器的测量电路和误差分析	104
7.2.1 霍尔传感器的测量电路	104
7.2.2 霍尔传感器的误差分析	104
7.3 霍尔传感器的应用电路	106
思考与练习	109
第8章 光电式传感器的原理及其应用	110
8.1 概述	110
8.1.1 光的产生和常见光源	110
8.1.2 光电效应及分类	114
8.2 光电器件	115
8.2.1 光电管	115
8.2.2 光敏电阻	117
8.2.3 光敏二极管和光敏三极管	120
8.2.4 光电池	123
8.2.5 高速光电器件	125
8.3 光电式传感器的测量电路及应用	126
8.3.1 光电式传感器的测量转换电路	126
8.3.2 光电式传感器的应用	128
8.4 图像传感器	133
8.4.1 CCD 图像传感器	133
8.4.2 CMOS 图像传感器	137
8.4.3 图像传感器的应用	138
8.5 光纤传感器	141
8.5.1 光纤传感器的结构和工作原理	141
8.5.2 光纤传感器的分类及应用	143
思考与练习	145
第9章 温度传感器的原理及其应用	146

9.1 概述	146
9.1.1 温度传感器的类型和特点	146
9.1.2 温度传感器的应用	147
9.1.3 温度传感器的发展	147
9.2 金属热电阻	148
9.2.1 金属热电阻的结构	149
9.2.2 金属热电阻的工作原理	150
9.2.3 金属热电阻的应用电路	152
9.3 热敏电阻	153
9.3.1 热敏电阻的结构	153
9.3.2 热敏电阻的温度特性	154
9.3.3 热敏电阻的主要参数和优点	155
9.3.4 热敏电阻的应用电路	155
9.4 热电偶	158
9.4.1 热电偶的分类与结构	158
9.4.2 热电偶的工作原理	159
9.4.3 热电偶的参数	160
9.4.4 热电偶的特点	161
9.4.5 热电偶的冷端温度补偿	162
9.4.6 热电偶的应用电路	164
9.4.7 热电偶安装注意事项	165
9.5 红外传感器	166
9.5.1 红外传感器的分类	166
9.5.2 红外传感器的工作原理与结构	166
9.5.3 红外传感器的应用电路	167
9.6 集成温度传感器	169
9.6.1 集成温度传感器的分类	169
9.6.2 集成温度传感器 LM35	169
9.6.3 集成温度传感器 AD590	170
9.6.4 精密温度传感器 LM135、235、335	172
9.6.5 智能化风扇集成控制电路 ADT7460	173
9.6.6 其他集成温度传感器	173
思考与练习	174
第10章 其他传感器的工作原理及其应用	175
10.1 气敏传感器的工作原理及其应用	175
10.1.1 概述	175
10.1.2 气敏传感器的测量电路	177
10.1.3 气敏传感器的应用电路	178
10.2 湿度传感器的工作原理及其应用	180

10.2.1	概述	180
10.2.2	陶瓷湿度传感器	181
10.2.3	高分子湿度传感器	181
10.2.4	湿度传感器的应用	182
10.3	超声波传感器的工作原理及其应用	184
10.3.1	概述	184
10.3.2	超声波传感器的原理及结构	185
10.3.3	超声波探头及耦合技术	186
10.3.4	超声波传感器的应用电路	187
10.4	智能传感器及其应用	189
10.4.1	智能传感器的概述	189
10.4.2	智能传感器实现的途径	191
10.4.3	智能传感器的应用	193
	思考与练习	198
第 11 章	传感器技术的综合应用	199
11.1	传感器在家用电器及安全防范中的应用	199
11.1.1	传感器在家用电器中的应用	199
11.1.2	传感器在防盗报警系统中的应用	204
11.1.3	传感器在火灾探测报警系统中的应用	213
11.2	传感器在现代汽车中的应用	220
11.2.1	汽车传感器的特点	220
11.2.2	压力与流量传感器的应用	221
11.2.3	温度传感器的应用	229
11.2.4	转速传感器的应用	234
11.2.5	加速度和振动传感器的应用	237
11.2.6	位置传感器的应用	240
11.2.7	传感器在汽车中的其他应用	249
11.3	传感器使用的几项关键技术	251
11.3.1	传感器的匹配技术	251
11.3.2	抗干扰的处理方法	253
	思考与练习	255
第 12 章	传感器及其应用技术实验	256
12.1	电阻应变片的认识与粘贴技术	256
12.2	涡流传感器的原理及应用实验	259
12.3	霍尔传感器的原理及应用实验	261
12.4	光电传感器的原理及应用实验	264
12.5	温度传感器的原理及应用实验	267
附录	Pt100 温度传感器分度表	271
	参考文献	274

第 1 章

传感器概述

【课程教学内容与要求】

- (1) 教学内容：传感器的地位及作用、传感器的组成和分类、传感器的发展趋势、传感器的选用原则及测量技术的基本知识。
- (2) 教学重点：传感器的组成和选用原则及测量技术的基本知识。
- (3) 基本要求：了解传感器的地位及作用；掌握传感器的组成和分类；了解传感器的发展趋势；掌握传感器的选用原则及测量技术的基本知识。

1.1 传感器的地位与作用

1. 传感器的地位

随着社会的进步，科学技术的发展，特别是近 20 年来，电子技术日新月异，计算机的普及和应用把人类带到了信息时代。信息技术对社会发展、科学进步起到了决定性的作用。现代信息技术的基础包括信息采集、信息传输与信息处理，如图 1-1 所示。



图 1-1 现代信息技术

传感器技术是构成现代信息技术的三大支柱之一，人们在利用信息的过程中，首先要解决的问题是获取准确可靠的信息，而传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中，要用各种传感器来检测、监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在正常状态或最佳状态，并使产品达到最好的质量。因此，没有众多种类的优良传感器，现代化生产也就失去了基础。

2. 传感器的作用

传感器相当于人体的感觉器官，它可将各种非电量（如机械量、化学量、生物量及光学量等）转换成电量，从而实现非电量的电测技术。在自动控制系统中，检测是实现自动

控制的首要环节，没有对被控对象的精确检测，就不可能实现精确控制。如数控机床中的位移测量装置主要利用高精度位移传感器（光栅传感器或感应同步器）进行位移测量，从而实现对零部件的精密加工。

目前，传感器涉及的领域主要有现代工业生产、基础学科研究、宇宙开发、海洋探测、军事国防、环境保护、医学诊断、智能建筑、汽车、家用电器、生物工程等。

在工农业生产领域，工厂的自动流水生产线、全自动加工设备、许多智能化的检测仪器设备，都大量地采用了各种各样的传感器，它们在合理化地进行生产、减轻人们的劳动强度、避免事故发生等方面发挥了巨大的作用。在家用电器领域，像全自动洗衣机、电饭煲和微波炉都离不开传感器；在医疗卫生领域中，电子脉搏仪、血压仪、医用呼吸机、超声波诊断仪、断层扫描（CT）及核磁共振诊断设备，都大量地使用了各种各样的传感技术。这些对改善人们的生活水平，提高生活质量和健康水平起到了重要作用。在军事国防领域，各种侦测设备、雷达跟踪、武器的精确制导，没有传感器是难以实现的；在航空领域中，导航、飞机的飞行管理和自动驾驶，仪表着陆盲降系统，都需要传感器。人造卫星的遥感遥测都与传感器紧密相关。此外，在矿产资源、海洋开发、生命科学、生物工程等领域传感器都有着广泛的用途。

总而言之，在信息技术不断发展的今天，传感器将会在信息的采集和处理过程中发挥巨大的作用。传感器技术已受到各国的高度重视，并已发展成为一种专门的技术学科。

1.2 传感器的组成和分类

1. 传感器的定义

传感器是一种以一定精确度把被测量（主要是非电量）转换为与之有确定关系、便于应用的某种物理量（主要是电量）的测量装置。这一定义包含了以下几方面的含义。

- (1) 传感器是测量装置，能完成检测任务。
- (2) 传感器的输入是某一被测量，如物理量、化学量、生物量等。
- (3) 传感器的输出是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，这种量可以是气、光、电量，但主要是电量。
- (4) 输出与输入间有对应关系，且有一定的精确度。

2. 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、测量电路3部分组成，组成框图如图1-2所示。

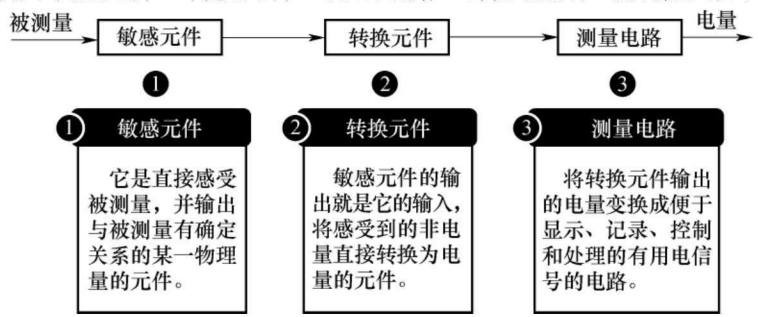


图 1-2 传感器的组成

实际上，有些传感器很简单，有些较为复杂，大多数是开环系统，也有些是反馈的闭环系统。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，如热电偶传感器。有些传感器由敏感元件和转换元件组成，没有测量电路，如压电式加速度传感器。有些传感器，转换元件不止一个，需经过若干次转换。

3. 传感器的分类

传感器技术是一门知识密集型技术。传感器的原理各种各样，它与许多学科有关，因此种类繁多，分类方法也很多。目前，广泛采用的分类方法如表 1-1 所示。

表 1-1 传感器的分类

分类方法	传感器种类	说 明
按输入量	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	应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、热点式传感器	传感器以工作原理命名
按物理现象	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	
按能量关系	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
	能量控制型传感器	由外部供给传感器能量，而由被测量来控制输出量的能量
按输出信号	模拟式	输出为模拟量
	数字式	输出为数字量

1.3 传感器的发展趋势

传感器技术所涉及的知识非常广泛，涵盖各个学科领域。但是它们的共性是利用物质的物理、化学和生物等特性，将非电量转换成电量。所以，采用新技术、新工艺、新材料以及探索新理论和高质量的转换效能，是总的发展途径。当前，传感技术的主要发展动向表现在以下几个方面。

1. 努力实现传感器新特性

由于自动化生产速度的不断提高，必须研制出一批具有检测范围宽、灵敏度高、精度高、响应速度快的新型传感器，以确保自动化生产检测和控制的准确性。

2. 确保传感器的可靠性，延长其使用寿命

确保传感器工作可靠性的意义很直观，因为它直接关系到电子设备的抗干扰和误动作问题。可靠性主要体现在：具有较大的使用寿命，能在恶劣的环境下工作。

3. 提高传感器集成化及功能化的程度

集成化是实现传感器小型化、智能化和多功能化的重要保证，现已能将敏感元件、温度

补偿电路、信号放大器、电压调制电路和基准电压等单元电路集成在同一芯片上。

4. 传感器微型化

微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) 是一种轮廓尺寸在毫米量级, 组成元件尺寸在微米量级的可运动的微型机电装置, MEMS 技术借助于集成电路的制造技术来制造机械装置, 可制造出微型齿轮、微型电机、阀门、各种光学镜片及各种悬臂梁, 而它们的尺寸仅有 $30 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

5. 新型功能材料开发

传感器技术的发展是与新材料的研究开发密切结合在一起的, 可以说, 各种新型传感器孕育在新材料中, 例如半导体材料和新工艺的发展, 促进了半导体传感器的迅速发展, 研制和生产出一批新型半导体传感器; 压电半导体材料促进了压电集成传感器的行程; 高分子压电膜的出现, 使机器人的触觉系统更加接近人的皮肤功能。可以预测, 不久的将来, 高分子材料、金属氧化物、超导体与半导体的结合材料、功能性薄膜等新型材料, 将会导致一批新型传感器的出现。

6. 发展仿生传感器

狗的嗅觉非常灵敏, 蝙蝠的超声波可以测距, 海豚良好的声呐系统可以发现水雷。如能发展以上生物所具有的感觉传感器, 将有良好的应用前景。

7. 多传感器信息融合

多传感器信息融合是指对来自多个传感器的数据进行多级别、多方面、多层次的处理, 从而产生具有新的意义的信息, 而这种新信息是任何一种单一传感器所无法具备的。

1.4 传感器的选用原则

由于传感器技术的研究和发展非常迅速, 各种各样的传感器应运而生, 这对选用传感器带来了很大的灵活性。根据前面的介绍, 对于同种被测物理量, 可以用各种不同的传感器测量, 为了选择适合于测定目的的传感器, 有必要讨论一下如何选择传感器, 并定出几条选用传感器的准则。

虽然在传感器选择时应考虑的事项很多, 但不必一一加以考虑, 可以根据传感器的使用目的、指标、环境条件和成本等限制条件, 从不同的侧重点, 优先考虑几个重要的条件就可以了。例如, 测量某一对象的温度适应性, 要求适应 $0^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 温度范围, 测量精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 且要多点 (128 点) 测量, 那么选用何种温度传感器呢? 能胜任这一要求的温度传感器有: 各种热电偶、热敏电阻、半导体 PN 结温度传感器等, 它们都能满足测量范围、精度等条件。在这种情况下, 则应侧重考虑成本、测量电路和相配设备等因素, 相比之下选用半导体 PN 结温度传感器最为恰当。倘若上述测量范围为 $0^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$, 其他条件不变, 此时只能选用热电偶中的镍-考铜或铁-康铜等热电偶。又如, 需要长时间连续使用传感器时, 就必须重点考虑那些长期稳定性好的传感器; 对化学分析等时间比较短的测量过程, 则需要考虑灵敏度和动态特性均好的传感器。总之, 选择使用传感器时, 应根据几项基本标准, 具体情况具体分析, 选择性能价格比高的传感器。选择传感器时应从如下几个方面考虑。

(1) 与测量条件有关的因素: 测量的目的; 被测试量的选择; 测量范围; 输入信号的幅值, 频带宽度; 精度要求; 测量所需要的时间。

(2) 与传感器有关的技术指标: 精度; 稳定度; 响应特性; 模拟量与数字量; 输出幅值; 对被测物体产生的负载效应; 校正周期; 超标准过大的输入信号保护。

(3) 与使用环境条件有关的因素: 安装现场的条件及情况; 环境条件 (湿度、温度、振动等); 信号传输距离; 所需现场提供的功率容量。

(4) 与购买和维修有关的因素: 价格; 零配件的储备; 服务与维修制度; 交货日期。

以上是选择传感器时主要应考虑的因素。为了提高测量精度, 应注意平常使用时的显示值应在满量程的 50% 左右来选择测量范围或刻度范围。选择传感器的响应速度, 目的是适应输入信号的频带宽度, 从而得到高信噪比、高精度的传感器。此外, 还要合理选择使用现场条件, 注意安装方法, 了解传感器的安装尺寸和重量等, 还要注意从传感器的工作原理出发, 联系被测对象中可能会产生的负载效应问题, 从而选择最合适的传感器。

1.5 测量技术的基本知识

1.5.1 测量概论

为了更好地掌握传感器的应用, 有必要对测量的基本概念、测量系统的特性、测量误差及数据处理等方面的理论及工程方法进行学习和研究, 只有掌握了这些基本理论, 才能更有效地完成检测任务。

1. 测量的概念

测量是以确定被测量的值或获取测量结果为目的的一系列操作。所以, 测量也就是将被测量与同种性质标准量进行比较, 确定被测量对标准量的倍数。它们由下式表示。

$$x = nu \quad (1-1)$$

式中 x ——被测量值;

u ——标准量, 即测量单位;

n ——比值 (纯数), 含有测量误差。

由测量所获得的被测量的量值叫作测量结果, 测量结果可用一定的数值表示, 也可以用一条曲线或某种图形表示, 但无论其表现形式如何, 测量结果应包括比值和测量单位。测量结果仅仅是被测量的最佳估计值, 而非真值。在报告测量结果时, 必须对其质量给出定量的说明, 即给出测量结果的可信程度。近年来, 人们越来越普遍地认为, 在测量结果的定量表述中, 用“不确定度”和“误差”更合适。测量不确定度表征测量值的分散程度。因此, 测量结果的完整表述包括估计值、测量单位和测量不确定度。

被测量值和比值等都是测量过程的信息, 这些信息依托物质才能在空间和时间上进行传递。被测量作用到测量系统上, 使其某些参数发生变化, 参数承载了信息而成为信号。即测量过程就是传感器从被测对象获取被测量的信息, 建立起测量信号, 经过转换、传输、处理, 从而获得被测量量值的过程。

2. 测量方法

将被测量与标准量进行比较得出比值的方法, 称为测量方法。对于测量方法, 从不同角度, 有不同的分类方法。根据获得测量值的方法可分为直接测量、间接测量和组合测量; 根据测量条件不同可分为等精度测量与不等精度测量; 根据被测量变化快慢可分为静态测量与

动态测量；根据测量敏感元件是否与被测介质接触可分为接触式测量与非接触式测量；根据系统是否向被测对象施加能量可分为主动式测量与被动式测量等。

1) 直接测量、间接测量与组合测量

无须经过函数关系的计算，直接通过测量仪器得到测量值的测量方法称为直接测量。直接测量又可分为直接比较和间接比较两种。直接将被测量和标准量进行比较的测量方法称为直接比较，例如用钢皮尺测量圆钢的长度；间接比较是把原始形态的待测物理量的变化变换成与之有已知函数关系（通常是线性关系）的另一种物理量的变化，并以人的感官能接受的形式在测量系统的输出端显示出来。例如用弹簧测力、用直流电表测电流等。

间接测量是在直接测量的基础上，根据已知的函数关系，计算出所要测量的物理量的大小。例如在弹道实验中测量弹丸的初速，就是先用直接测量测出两靶之间的距离和弹丸通过这段距离需要的时间，然后由平均速度公式计算出弹丸的运动速度。间接测量手续较多，花费时间较长，一般用在直接测量不方便，或者缺乏直接测量手段能够应用的场合。

若被测量必须经过求解联立方程组求得，则这种测量方法称为组合测量。组合测量是一种特殊的精密测量方法，操作手续复杂，花费时间长，多适用于科学实验或特殊场合。

2) 等精度测量与不等精度测量

在整个测量过程中，若影响和决定误差大小的全部因素（条件）始终保持不变，如同一个测量者，用同一种仪器，以同样的方法，在同样的环境条件下，对同一被测量进行多次重复测量，称为等精度测量。在实际中，很难做到影响和决定误差大小的全部因素（条件）始终保持不变，所以一般情况下只是近似认为是等精度测量。

有时在科学研究或高精度测量中，往往在不同的测量条件下，用不同精度的仪器、不同的测量方法、不同的测量次数以及不同的测量者进行测量和对比，这种测量称为不等精度测量。

3) 静态测量和动态测量

被测量在测量过程中被认为固定不变的，对这种被测量进行的测量称为静态测量。静态测量不需要考虑时间因素对测量的影响。

若被测量在测量过程中是随时间不断变化的，对这种被测量进行的测量称为动态测量。

3. 测量系统

测量系统有开环测量系统和闭环测量系统之分。

1) 开环测量系统

开环测量系统的全部信息只沿着一个方向传输，如图 1-3 所示，其中 x 为输入量， y 为输出量， k_1 、 k_2 、 k_3 为各个环节的传递函数。输入输出关系表示如下：

$$y = k_1 k_2 k_3 x \quad (1-2)$$

因为开环测量系统是由多个环节串联而成的，因此系统的相对误差等于各环节相对误差之和。

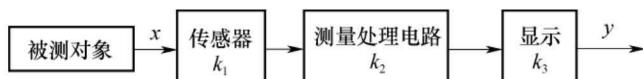


图 1-3 开环测量系统框图

即

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \cdots + \delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1-3)$$

式中 δ ——系统的相对误差;

δ_i ——各环节的相对误差。

采用开环方式构成的测量系统,虽然其结构简单,但每个环节特性的变化都会造成测量误差。

2) 闭环测量系统

闭环测量系统有两个通道:正向通道和反馈通道,其结构图1-4所示。

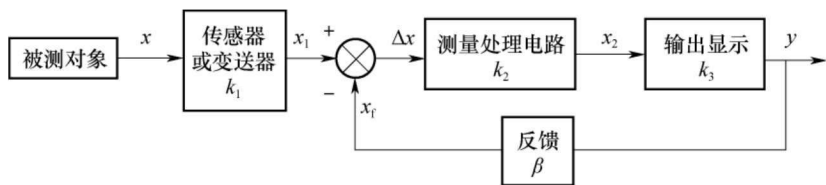


图 1-4 闭环测量系统框图

其中 Δx 为正向通道的输入量, β 为反馈环节的传递系数,正向通道的传递系数 $k = k_2 k_3$,由图1-4可知:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_1 - x_f \\ x_f &= \beta y \\ y &= k \Delta x = k(x_1 - x_f) = kx_1 - k\beta y \\ y &= \frac{k}{1 + k\beta} x_1 = \frac{1}{\frac{1}{k} + \beta} x_1 \end{aligned} \quad (1-4)$$

当 $k \gg 1$ 时,

$$y = \frac{k}{\beta} x_1 \quad (1-5)$$

显然,这时整个系统的输入输出关系由反馈环节的特性决定,测量处理等环节特性的变化不会造成测量误差,或者说造成的误差很小。

在构成测量控制系统时,应将开环系统与闭环系统巧妙地组合在一起加以应用,以能达到所期望的目的。

1.5.2 测量误差与不确定度

1. 误差的概念

1) 真值

真值即实际值,是指在一定时间和空间条件下,被测物理量客观存在的实际值。真值通常是不可测量的未知量,一般说的真值是指理论真值、规定真值和相对真值。

2) 误差

误差存在于一切测量中,误差的定义为测量结果减去被测值的真值。

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-6)$$