

传感器原理 及应用

朱蕴璞 孔德仁 王芳 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

传感器原理及应用

朱蕴璞 孔德仁 王芳 编著

国防工业出版社

·北京·

1

内 容 简 介

本书介绍了各种传感器的原理、特性及其应用技术。全书共有14章。第1章绪论,介绍了传感器的作用与定义、组成与分类、应用和发展以及传感与检测技术的基础知识;第2章介绍了传感器的基本特性;第3章~第12章从传感器的工作原理出发,分别介绍了电阻式、压电式、电容式、电感式、磁电式、光电式、气湿色半导体式、数字式、温度式、智能式等各类传感器的工作原理、性能、测量电路及应用;第13章介绍了传感器性能的测试与校准;第14章从系统的角度介绍了传感器的典型应用,使教材更具有实用性。

本书可作为高等院校测控技术及仪器、精密仪器与机械、工业自动化、计算机应用、机械电子工程、应用电子等专业的教科书或参考书,亦可供相关专业的研究生、教师及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用 / 朱蕴璞等编著. —北京:国防工业出版社,2005.8

ISBN 7-118-04003-7

I. 传... II. 朱... III. 传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 070157 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 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21 482 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:32.00 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

由于科学技术的飞速发展,特别是微机械加工技术、计算机技术及信息处理技术的发展,人们对信息资源的需要日益增长,作为提供信息的传感器及传感技术越来越引起人们的重视。而综合各种先进技术的传感器技术也进入到一个飞速发展的阶段。要及时正确地获取各种信息,解决工程、生产及科研中遇到的各种具体问题,必须合理选择和善于应用各种传感器及传感技术。

本书内容丰富,把传统的经典传感器原理及现代新型传感器原理、传感器的静动态特性、常用物理量检测、传感器的校准方法以及传感器的典型工程应用汇于一体,融入编者多年从事传感器教学的心得以及科研的实践和积累,相当一部分内容是编者在科研项目中的总结。

全书共 14 章,由朱蕴璞、孔德仁、王芳、何云峰、狄长安、安宝林编写,其中朱蕴璞编写了第 1、3、8、10 章,孔德仁编写了第 2、4、13 章,王芳编写了第 9、12 章,何云峰编写了第 6、7 章、狄长安编写了第 5、11 章,安宝林编写了第 14 章。全书由朱蕴璞统稿,王昌明教授、林知良副教授审阅了全书并提出了许多宝贵意见,何云峰绘制了书中的全部图稿,编者的研究生们为本书的完成也付出了辛勤劳动,在此表示衷心的感谢。同时,本书在编写过程中参阅了许多文献,在此向文献作者致谢。

由于作者水平有限,书中一定会有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2005 年 5 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 传感器的作用及定义	1
1.2 传感器的分类	2
1.3 传感器的发展趋势	3
1.4 测量技术的基本知识	4
1.4.1 测量概论	4
1.4.2 测量误差与不确定度	7
第2章 传感器的基本特性	11
2.1 概述	11
2.2 传感器的静态标定与静态特性	12
2.2.1 静态标定	12
2.2.2 静态特性参数	13
2.3 传感器的动态特性	17
2.3.1 动态参数测试的特殊问题	17
2.3.2 传感器动态特性的分析方法及主要指标	18
2.3.3 传感器的数学模型	19
2.3.4 传递函数	19
2.3.5 频率响应函数	20
2.3.6 冲激响应函数	21
2.4 典型传感器的动态特性分析	21
2.4.1 典型传感器的频率响应	22
2.4.2 典型激励的传感器瞬态响应	25
2.4.3 相似原理	27
2.5 传感器不失真测量的条件	28
2.6 传感器的动态特性参数获取方法	29
2.7 动态误差修正	32
2.7.1 频域修正方法	32
2.7.2 时域修正方法	32
第3章 电阻式传感器	34
3.1 应变式传感器常用的弹性敏感元件	34
3.1.1 弹性圆柱	34
3.1.2 悬臂梁	35

3.1.3	弹性圆环	36
3.1.4	周边固支圆形平膜片	36
3.1.5	弹性筒	38
3.1.6	扭转圆柱	39
3.2	金属应变式传感器	40
3.2.1	电阻应变片	40
3.2.2	电阻应变片的温度误差及补偿	49
3.2.3	电阻应变片的信号调理电路	52
3.3	半导体压阻式传感器	58
3.3.1	半导体的压阻效应	58
3.3.2	晶向的表示方法	60
3.3.3	压阻系数	61
3.3.4	压阻式传感器	67
3.4	电阻应变仪	72
3.4.1	应变仪的分类及其特点	73
3.4.2	载波放大式应变仪的组成及工作原理	73
3.4.3	电标定及电标定桥	74
3.4.4	常用电阻应变仪主要电路的特点	75
第4章	压电式传感器	77
4.1	压电式传感器的工作原理	77
4.1.1	压电效应	77
4.1.2	压电常数和表面电荷的计算	79
4.1.3	压电元件的基本变形	80
4.2	压电材料	82
4.2.1	石英压电晶体	82
4.2.2	压电陶瓷	83
4.2.3	压电元件常用结构形式	84
4.3	压电式传感器的等效电路	85
4.4	压电式传感器的信号调节电路	86
4.4.1	电压放大器(阻抗变换器)	87
4.4.2	电荷放大器	90
4.5	压电式传感器的应用	91
4.5.1	压电式测力传感器	91
4.5.2	压电式加速度传感器	93
4.5.3	压电阻抗头	95
4.5.4	压电式压力传感器	95
4.6	引起压电式传感器测量误差的因素	97
第5章	电容式传感器	100
5.1	电容式传感器的工作原理及分类	100

5.2	电容式传感器的结构类型及主要特性	101
5.2.1	结构类型	101
5.2.2	电容式传感器的灵敏度及非线性	102
5.2.3	电容式传感器的等效电路	107
5.3	电容式传感器的测量电路	107
5.3.1	电桥电路	107
5.3.2	差动脉宽调制电路	109
5.3.3	运算放大器式电路	110
5.4	典型的电容式传感器	111
5.4.1	电容式压力传感器	111
5.4.2	电容式加速度传感器	112
5.5	电容式传感器的结构及抗干扰问题	113
5.5.1	温度变化对结构稳定性的影响	113
5.5.2	温度变化对介质介电常数的影响	114
5.5.3	绝缘问题	114
5.5.4	寄生电容的干扰与防止	114
5.6	硅电容式集成传感器	116
5.6.1	硅电容式集成压力传感器	116
5.6.2	硅电容式加速度传感器	117
第6章	电感式传感器	119
6.1	自感式电感传感器	119
6.1.1	工作原理	119
6.1.2	输出特性	120
6.1.3	测量电路	123
6.1.4	自感式电感传感器的应用	124
6.2	差动变压器式传感器	125
6.2.1	工作原理	125
6.2.2	结构类型和主要特性	125
6.2.3	差动变压器的测量电路	128
6.2.4	差动变压式传感器的应用	129
6.3	电涡流式传感器	129
6.3.1	工作原理	129
6.3.2	等效电路	130
6.3.3	测量电路	131
6.3.4	传感器的结构	132
6.3.5	电涡流传感器的应用	132
第7章	磁电式传感器	135
7.1	磁电感应式传感器	135
7.1.1	磁电式振动传感器的工作原理	136

7.1.2	典型结构	138
7.1.3	磁电式传感器的误差	140
7.1.4	磁电感应式传感器的应用	142
7.2	霍耳式传感器	143
7.2.1	霍耳效应	143
7.2.2	霍耳元件	144
7.2.3	霍耳元件的不等位电势和温度误差的补偿	145
7.2.4	集成霍耳传感器	147
7.2.5	应用	148
第8章	光电式传感器	150
8.1	光电测量基本知识	150
8.1.1	光源	150
8.1.2	光电效应	151
8.2	光电器件的特性	153
8.2.1	光谱灵敏度 $S(\lambda)$	153
8.2.2	相对光谱灵敏度 $S_r(\lambda)$	154
8.2.3	积分灵敏度 S	154
8.2.4	通量阈 ϕ_H	154
8.2.5	响应特性 $S_z(t)$ 和时间常数 τ	154
8.2.6	光电器件的频率特性 $S_r(f)$	155
8.2.7	光照特性 $U(E_e)$	155
8.2.8	光谱特性 $S_r(\lambda)$	155
8.2.9	温度特性	155
8.2.10	伏安特性 $I(U)$	156
8.3	光电器件	156
8.3.1	光电管器件	156
8.3.2	光敏电阻	157
8.3.3	光敏二极管	159
8.3.4	光敏晶体管	162
8.3.5	光电池	164
8.3.6	常用光电传感器及其应用	166
8.4	光电位置传感器(PSD)	168
8.4.1	PSD 的工作原理	168
8.4.2	PSD 的特性	170
8.4.3	PSD 的应用	171
8.5	CCD 图像传感器	172
8.5.1	CCD 的结构及工作原理	172
8.5.2	CCD 的应用(CCD 固态图像传感器)	175
8.6	光纤传感器	177

8.6.1	光纤传感器基础	177
8.6.2	光纤传感器应用实例	180
第9章	气湿色敏传感器	184
9.1	气敏传感器	184
9.1.1	引言	184
9.1.2	气敏传感器的分类	186
9.1.3	半导体气敏传感器的工作原理及结构	186
9.1.4	其他气敏传感器	190
9.1.5	半导体气敏元件的主要特性参数	191
9.1.6	气敏传感器的应用	194
9.2	湿敏传感器	196
9.2.1	引言	196
9.2.2	湿敏传感器的主要特性参数	198
9.2.3	湿度传感器的分类	200
9.2.4	湿敏传感器的测量电路	205
9.3	色敏传感器	207
9.3.1	半导体色敏器件的结构与工作原理	207
9.3.2	半导体色敏传感器的颜色识别电路	210
第10章	数字式传感器	212
10.1	光栅传感器	212
10.1.1	光栅传感器的结构和工作原理	212
10.1.2	辨向原理	217
10.1.3	细分技术	218
10.2	编码器	219
10.2.1	光学编码器结构及工作原理	220
10.2.2	码制与码盘	220
10.2.3	二进制码与循环码的转换	222
10.2.4	应用	223
10.3	感应同步器	224
10.3.1	结构原理	225
10.3.2	信号处理方式	225
10.3.3	感应同步器位移测量系统	226
第11章	温度传感器	228
11.1	温度传感器的类型	228
11.2	热电阻	229
11.2.1	常用热电阻	229
11.2.2	热电阻测量电路	230
11.3	热敏电阻	232
11.3.1	热敏电阻的结构和特点	232

11.3.2	热敏电阻的温度特性	233
11.4	热电偶	235
11.4.1	热电效应及测温原理	235
11.4.2	热电偶的基本定律	237
11.4.3	热电偶的种类	239
11.4.4	热电偶的冷端温度补偿	241
11.4.5	热电偶的实用测温电路	242
11.4.6	温度测量的动态误差修正	244
11.5	集成温度传感器	246
11.5.1	PN 结温度传感器	246
11.5.2	集成温度传感器	247
11.5.3	应用举例	247
11.6	其他类型温度传感器	249
11.6.1	热辐射式测温传感器	249
11.6.2	石英晶体温度传感器	250
11.6.3	光纤温度传感器	251
第 12 章	智能传感器	253
12.1	概述	253
12.2	集成智能传感器	255
12.2.1	智能传感器的初级形式	255
12.2.2	智能传感器的中级形式	256
12.2.3	智能传感器的高级形式	257
12.3	多传感器信息融合	258
12.3.1	曲面拟合法基本原理	258
12.3.2	二传感器信息融合的应用	261
12.4	人工神经网络在智能传感器中的应用	262
12.4.1	神经网络基本知识	262
12.4.2	前向网络	266
12.4.3	反馈网络	270
12.4.4	神经网络在智能传感器中的应用	272
第 13 章	传感器性能测试与校准	277
13.1	传感器静态标定的要求	277
13.1.1	静态标准条件	277
13.1.2	标定仪器设备的精度等级的确定	277
13.1.3	静态标定的方法	277
13.1.4	传感器静态标定实例	278
13.2	压力传感器及测压系统的标定	280
13.2.1	静态标定	280
13.2.2	测压系统的动态标定	281

13.3 测振传感器(振动测量仪器)校准	290
13.3.1 绝对标定法	290
13.3.2 比较标定法	290
13.3.3 互易法	291
13.4 力传感器校准	292
13.4.1 概述	292
13.4.2 基准测力机	293
13.4.3 标准测力机	295
13.4.4 标准测力计	297
13.5 温度传感器校准	299
13.5.1 概述	299
13.5.2 标准铂电阻	301
13.5.3 标准铂铑 10—铂热电偶	302
13.5.4 校验设备	304
第 14 章 传感器的典型应用	305
14.1 传感器在航空航天中的应用	305
14.1.1 导航仪	305
14.1.2 在飞机自动驾驶仪及导航系统中的应用	305
14.1.3 在火箭发动机测试中的应用	306
14.2 传感器在兵器工业中的应用	307
14.2.1 在弹丸速度测量中的应用	307
14.2.2 在自动机运动参数测量中的应用	308
14.2.3 在兵器压力测量中的应用	310
14.3 传感器在公路交通系统中的应用	316
14.3.1 在交通管制及高速公路中的应用	316
14.3.2 传感器在汽车工业中的应用	316
14.4 传感器在工业自动化中的应用	318
14.5 传感器在机器人学中的应用	319
14.5.1 视觉传感器	320
14.5.2 听觉传感器	321
14.5.3 接近觉传感器	321
14.5.4 触觉传感器	322

第 1 章 绪 论

现代信息产业的三大支柱是传感器技术、通信技术和计算机技术,它们分别构成了信息系统的“感官”、“神经”和“大脑”。传感器是信息采集的首要部件,鉴于其重要性,世界各国自 20 世纪 80 年代开始都将其列为重点发展的关键技术。

1.1 传感器的作用及定义

传感器的作用就是测量。没有传感器,就不能实现测量;没有测量,也就没有科学技术。它主要表现在以下几个方面。

1. 信息的收集

科学研究中的计量测试、产品制造与销售中所需要的计量都要由测量获得准确的定量数据;在航空、航天技术领域,仅“阿波罗”10 号飞船就有 3000 多个参量需要监测。

在兵器领域中,现代引信实质就是完成引爆战斗部任务的传感器系统,为了更好地解决安全、可靠和通用性问题,同时增强功能,目前采用几个传感器分别监测环境和目标信息。各国竞相研制的重要新型精确打击武器——目标敏感弹更是以传感器为技术核心来获取各种信息,制导炮弹、各种导弹也是如此。

在工业生产中,传感器采集各种信息,起到工业耳目的作用。例如,冶金工业中连续铸造生产过程中的钢包液位检测、高炉铁水硫磷含量分析,均由各种传感器为操作人员提供可靠的数据。此外,用于工厂自动化柔性制造系统(FMS)中的机械手或机器人可实现高精度在线实时测量,从而保证产品的产量和质量,其测量需要各种传感器来完成。

2. 信息数据的转换

把以文字、符号、代码、图形等多种形式记录在纸或胶片上的信号数据转换成计算机、传真机等易处理的信号数据,或者读出记录在各种媒体介质上的信息并进行转换。例如,磁盘和光盘的信息读出磁头就是一种传感器。

3. 控制信息的采集

检测控制系统处于某种状态的信息,并由此控制系统的状态,或者跟踪系统变化的目标值。

根据 GB7665 规定,传感器的定义是: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(sensing element)是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分;转换元件(transduction element)是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。随着电子集成技术的发展,测量处理电路也成为传感器的一部分,如图 1-1 所示。当传感器的输出为标准化信号(例 $0\text{V} \sim 5\text{V}$, 或 $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$)时,则称为变送器。

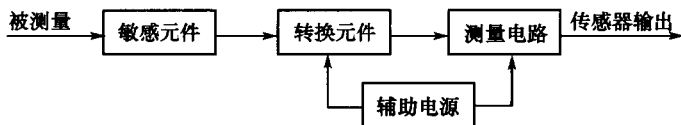


图 1-1 传感器的组成

① 敏感元件:传感器中能直接感受或响应被测量的部分。它往往将被测量转变成另一种易于变换成电量的非电量。如应变式传感器中的弹性元件,通常称为弹性敏感元件。

② 转换元件:将感受到的非电量直接转换为电量的器件。例如压电晶体、热电偶等。

③ 测量电路:将转换元件输出的电量变成便于显示、记录、控制处理的有电信号的电路。测量电路的类型视转换元件的类型而定,常采用的电路有电桥电路、高阻抗输入电路、振荡回路等。

1.2 传感器的分类

传感器种类繁多,目前尚没有统一的分类方法。目前常用的分类方法归纳如下。

1. 按工作机理分类

(1) 结构型传感器

所谓结构型传感器,主要是通过机械结构的几何形状或尺寸的变化,将外界被测参数转换成相应的电量(如电阻、电感、电容等)的变化,从而检测出被测信号,这种传感器目前应用最为普遍。如应变式压力传感器、电容式压力传感器。

(2) 物性型传感器

物性型传感器则是利用某些材料本身物理性质的变化而实现测量,它是以半导体、电介质、铁电体等作为敏感材料的固态器件,它对应力、温度、电场、磁场等有一定依赖关系,并能进行转换。如压电式压力传感器、半导体压阻式压力传感器。

2. 按能源分类

(1) 有源传感器

有源传感器如一台微型发电机,它能把非电功率转换为电功率,传感器起能量变换作用,故又称发电型传感器,如磁电式、压电式、热电式等传感器。

(2) 无源传感器

无源传感器本身不是一个信号源,所以配合的测量电路常常是电桥或谐振电路,如电感式、电容式传感器。

这种分类方法有利于对传感器的内在联系作统一概括的分析和深入的研究。

3. 按被测量范畴分类

按照我国国标制定的传感器分类体系表,传感器分为物理量传感器、化学量传感器以及生物量传感器三大门类,下共含 12 个小类。

(1) 物理量传感器

包括力学量传感器、热学量传感器、光学量传感器、磁学量传感器、电学量传感器、声学量传感器和射线传感器。

(2) 化学量传感器

包括气体传感器、离子传感器和湿度传感器(属生物量传感器)。

(3) 生物量传感器

包括生化量传感器和生理量传感器。

4. 按工作原理分类

包括电阻式传感器、压电式传感器、电容式传感器、……

这种分类方法以传感器的工作原理为依据,避免了传感器的名目过于繁多,有利于专业工作者对传感器进行归纳性的研究。本教材采用该分类方法。

由于传感器门类繁多,涉及的学科面广,还有不少分类方法。如按输出信号把传感器分为模拟式和数字式传感器,按功能把传感器分为单功能、多功能和智能传感器。

1.3 传感器的发展趋势

1. 努力实现传感器新特性

由于自动化生产程度的不断提高,必须研制出一批具有检测范围宽、灵敏度高、精度高、响应速度快及互相换性好的新型传感器,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:具有较长的使用寿命,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。根据需要,今后将把超大规模集成电路、执行机构与多种传感器集成在单个芯片上,以实现传感器与信息处理功能的一体化。

4. 传感器微型化

微机电系统(又称 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、泵、阀门、各种光学镜片及各种悬臂梁,而它们的尺寸仅有 $30\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 。微机电系统与微电子技术的结合,为实现信号检测、信号处理、控制及执行机构集于一体的微型集成传感器提供了可能性,采用这种技术可以制成力、压力、加速度、光学、化学等微型集成传感器,它们在生物、医学、通信、交通运输、军事、航天及核能利用等领域有非常重要的应用价值。

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形成;高分子压电薄膜的出现,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、非晶半导体、超微粒陶瓷、记忆合金、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. 发展仿生物传感器

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,将有很好的应用前景。

7. 多传感器信息融合(Multisensor Information Fusion)

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,从而产生新的有意义的信息,而这种新信息是任何单一传感器所无法获得的。

早在 20 世纪 80 年代中期,一些西方发达国家就开始广泛开展多传感器信息融合技术的研究与应用,现在已研制出“多传感器多平台跟踪情报相关处理”等近百种多传感器信息融合系统,并相继出版了 10 多部信息融合方面的专著。

国内对该领域的研究则在 20 世纪 90 年代初才开始逐渐形成高潮,现已研制出少量的初级多传感器信息融合系统。

除军事应用外,多传感器信息融合在工业、交通和金融领域将有十分好的应用前景。

1.4 测量技术的基本知识

1.4.1 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,只有了解和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:

$$x = nu \quad (1.4.1)$$

或

$$n = \frac{x}{u} \quad (1.4.2)$$

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。当报告测量结果时,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”比“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,这些信息依托于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。选择其中适当的参数作为测量信号,例如热电偶温度传感器的工作参数是热电偶的

热电势,应变式传感器的工作参数是机械应变。

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

实现被测量与标准量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

无需经过函数关系的计算,直接通过测量仪器得到被测量值的测量为直接测量。直接测量又可分为直接比较和间接比较两种。直接将待测量物理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。直接测量的另一种方法是间接比较,该方法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,例如用弹簧测力计、用直流电表测电流等。

间接测量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的场合。

若被测量必须经过求解联立方程组求得,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,如由同一个测量者,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认为是固定不变的,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

开环测量系统全部信息只沿着一个方向进行,如图 1-2 所示,其中 x 为输入量, y 为

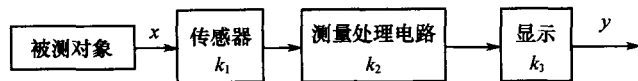


图 1-2 开环测量系统框图

输出量, k_1 、 k_2 、 k_3 为各个环节的传递系数。输入输出关系表示如下:

$$y = k_1 k_2 k_3 x \quad (1.4.3)$$

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。

即:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \cdots + \delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1.4.4)$$

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, 结构较简单, 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。其结构如图 1-3 所示。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 1-3 可知:

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

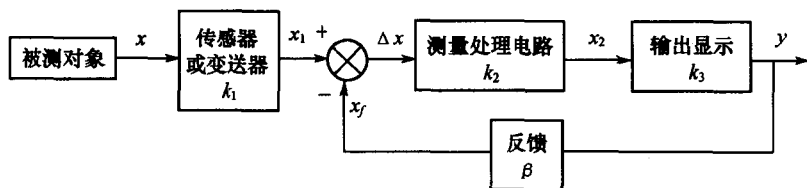


图 1-3 闭环测量系统框图

当 $k \gg 1$ 时,

$$y \approx \frac{1}{\beta} x_1 \quad (1.4.5)$$

系统的输入输出关系为

$$y = \frac{k k_1}{1 + k \beta} x \quad (1.4.6)$$