



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

全国优秀畅销书

江苏省精品教材

# 传感器原理及工程应用

(第四版)

郁有文 常健 程继红 编著

CHUANGANGYUANJI  
JINGYONG



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 传感器原理及工程应用

(第四版)

郁有文 常 健 程继红 编著



全国优秀畅销书

江苏省精品教材

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书介绍工程检测中使用的各种传感器的原理、特性及其应用技术。全书共有16章,第1章介绍了传感与检测技术的理论基础;第2章介绍了有关传感器的基本分类和特性;第3章至第14章根据传感器的工作原理分类,分别介绍了应变式、电感式、电容式、压电式、磁电式、光电式、半导体、超声波、微波、辐射式、数字式及智能式传感器的工作原理、性能、测量电路及应用;第15章介绍了温度、压力、流量、物位、气体成分、振动等工程参数的测量;第16章为传感器实验。本书内容全面,具有较高的实用性。

本书可作为自动化、测控技术与仪器、机电工程以及电气工程与自动化等专业的教材,也可供其他专业的师生和相关领域的工程技术人员参考。

★本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及工程应用/郁有文,常健,程继红编著. —4版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2014.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5606-3338-1

I. ①传… II. ①郁… ②常… ③程… III. ①传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 018765 号

策 划 马乐惠

责任编辑 马晓娟 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014年5月第4版 2014年5月第34次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 19.5

字 数 458千字

印 数 236 001~244 000册

定 价 34.00元

ISBN 978-7-5606-3338-1/TP

**XDUP 3630004-34**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

## 序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应的教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入 21 世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、深圳大学、解放军电子工程学院等 10 余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大类的教学计划和课程大纲,对目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、好中选优、以质取胜。教材内容要反映 21 世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用;体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会

# 高等学校计算机、信息工程类专业

## 规划教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电大学校长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电大学通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

### 计算机组

组长：韩俊刚（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子科技大学计算机学院教授）

孙力娟（南京邮电大学计算机学院副院长、教授）

李秉智（重庆邮电大学计算机学院教授）

孟庆昌（北京信息科技大学教授）

周娅（桂林电子科技大学计算机学院副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

### 信息工程组

组长：张德民（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

方强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、教授）

胡建萍（杭州电子科技大学信息工程学院院长、教授）

徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐宁（桂林电子科技大学通信与信息工程学院副教授）

章坚武（杭州电子科技大学通信学院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电大学自动化学院院长、教授）

总策划：梁家新

策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

# 前 言

本书自 2000 年第一版出版以来，受到了广大读者的欢迎和支持，并提出了许多宝贵的意见和建议。随着传感器技术的不断发展，其应用领域更为广泛，根据使用中发现问题及读者的意见建议，对本书不断进行修订和完善是十分必要的。

在修订过程中，作者继续坚持内容力求系统、丰富、全面、新颖，叙述力求由浅入深的原则；在讲述传感器原理和特性时，力求讲清物理概念；对传感器应用的介绍，充分结合了生产和工程实际。再版后的教材保留了原书的整体结构，全书分成四大板块：传感器和检测技术的基本概念；各种传感器的原理和应用技术；工程参数的检测技术；传感器实验。每一个板块和章节都保持其独立性，可根据专业特点和要求选择讲解。

此次修订使得书稿在内容上更紧凑，系统性更强，并且更侧重于应用技术的介绍。

本书可作为工业自动化、测控技术及仪器、机电一体化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、电子信息工程等本科专业的教材，也可供从事检测技术和传感器应用的工程技术人员参考。

在编写本书的过程中，作者参阅了大量的文献资料，谨在此向参考文献的原作者表示诚挚的感谢！

传感器及检测技术发展快，涉及的知识面非常广泛，而作者的水平有限，接触领域和理解有一定的局限性，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正，多提宝贵意见，使教材不断加以改进和完善。

编 者

2014 年 1 月

# 目 录

<b>第 1 章 传感与检测技术概论</b> .....	1
1.1 检测技术概论 .....	1
1.2 测量数据的估计和处理 .....	8
思考题和习题 .....	25
<b>第 2 章 传感器概述</b> .....	27
2.1 传感器的组成和分类 .....	27
2.2 传感器的基本特性 .....	28
思考题和习题 .....	37
<b>第 3 章 应变式传感器</b> .....	39
3.1 电阻应变片的工作原理 .....	39
3.2 电阻应变片的结构、材料及粘贴 .....	41
3.3 电阻应变片的特性 .....	44
3.4 电阻应变片的测量电路 .....	49
3.5 应变式传感器的应用 .....	54
思考题和习题 .....	58
<b>第 4 章 电感式传感器</b> .....	60
4.1 自感式电感传感器 .....	60
4.2 差动变压器式传感器 .....	69
4.3 电涡流式传感器 .....	74
思考题和习题 .....	81
<b>第 5 章 电容式传感器</b> .....	83
5.1 电容式传感器的工作原理和结构 .....	83
5.2 电容式传感器的灵敏度及非线性 .....	87
5.3 电容式传感器的等效电路 .....	88
5.4 电容式传感器的测量电路 .....	89
5.5 电容式传感器的应用 .....	94
思考题和习题 .....	96
<b>第 6 章 压电式传感器</b> .....	98
6.1 压电效应及压电材料 .....	98
6.2 压电式传感器的测量电路 .....	102
6.3 压电式传感器的应用 .....	105
思考题和习题 .....	108
<b>第 7 章 磁电式传感器</b> .....	109
7.1 磁电感应式传感器 .....	109
7.2 霍尔式传感器 .....	113

思考题和习题 .....	120
<b>第 8 章 光电式传感器</b> .....	121
8.1 光电器件 .....	121
8.2 光纤传感器 .....	139
思考题和习题 .....	144
<b>第 9 章 半导体传感器</b> .....	146
9.1 半导体气敏传感器 .....	146
9.2 湿敏传感器 .....	151
9.3 色敏传感器 .....	155
9.4 半导体式传感器的应用 .....	159
思考题和习题 .....	161
<b>第 10 章 超声波传感器</b> .....	162
10.1 超声波及其物理性质 .....	162
10.2 超声波传感器 .....	165
10.3 超声波传感器的应用 .....	166
思考题和习题 .....	169
<b>第 11 章 微波传感器</b> .....	170
11.1 微波概述 .....	170
11.2 微波传感器 .....	171
11.3 微波传感器的应用 .....	173
思考题和习题 .....	177
<b>第 12 章 辐射式传感器</b> .....	178
12.1 红外传感器 .....	178
12.2 核辐射传感器 .....	183
思考题和习题 .....	192
<b>第 13 章 数字式传感器</b> .....	193
13.1 光栅传感器 .....	193
13.2 编码器 .....	199
13.3 感应同步器 .....	203
思考题和习题 .....	206
<b>第 14 章 智能式传感器</b> .....	208
14.1 概述 .....	208
14.2 传感器的智能化 .....	209
14.3 集成智能传感器 .....	211
思考题和习题 .....	215
<b>第 15 章 传感器在工程检测中的应用</b> .....	216
15.1 温度测量 .....	216
15.2 压力测量 .....	240
15.3 流量测量 .....	246
15.4 物位测量 .....	256
15.5 气体成分测量 .....	260
15.6 振动测量 .....	270



思考题和习题 .....	275
<b>第 16 章 传感器实验</b> .....	278
16.1 实验须知 .....	278
16.2 实验仪器简介 .....	279
16.3 电阻应变式传感器实验 .....	282
16.4 差动变压器式传感器实验 .....	286
16.5 电涡流式传感器实验 .....	289
16.6 电容式传感器实验 .....	291
16.7 霍尔式传感器实验 .....	293
16.8 光纤位移传感器实验 .....	296
16.9 光电传感器实验 .....	297
<b>参考文献</b> .....	301

# 第 1 章 传感器与检测技术概论

## 1.1 检测技术概论

人类已进入瞬息万变的信息时代。在信息时代，人们在从事工业生产和科学实验等活动时，主要依靠的是对信息的开发、获取、传输和处理。检测技术就是研究自动检测系统中信息提取、信息转换及信息处理的一门技术学科。在自动检测系统中传感器处于研究对象与检测系统的接口位置，是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学实验和生产过程中的信息，特别是在自动检测和自动控制系统中获取的原始信息，都要通过传感器转换为容易传输和处理的电信号。

在各个领域的工程实践和科学实验中，通常提出的检测任务是正确、及时地获得被测对象的各种信息，寻求最佳的信息采集方法，对一些参量进行定性或定量的检测。在某些情况下，要获取被测对象信息的大小，即被测量的大小，这种信息采集的含义就是测量。

“检测系统”这一概念是传感技术发展到现在一定阶段的产物。在工程中，需要由传感器与多台仪表或多个功能模块组合在一起，才能完成信号的检测，这样便形成了检测系统。计算机技术及信息处理技术的发展，使得检测系统所涉及的内容不断得以充实。

为了更好地掌握传感器的应用方法，更有效地完成检测任务，需要掌握检测的基本概念、检测系统的特性、测量误差的基本概念及数据处理的方法等。

### 1.1.1 测量

检测技术的主要任务之一是测量，检测是广义上的测量。人们要获取研究对象在数量上的信息，要通过测量才能得到定量的结果。测量要达到准确度高、误差极小、速度快、可靠性强等标准，则要求测量方法精益求精。

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的标准量进行比较，确定被测量对标准量的倍数的活动。它可由下式表示：

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

或

$$n = \frac{x}{u} \quad (1-2)$$

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,并非真值,所以还应给出测量结果的质量,即测量结果的可信程度。这个可信程度用测量不确定度表示,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应包括估计值、测量单位及测量不确定度。

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。被测量作用到实际物体上,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电势,差压流量传感器中的孔板工作参数是差压  $\Delta p$ 。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,经过变换、传输、处理,从而获得被测量量值的过程。

### 1.1.2 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。针对不同测量任务,进行具体分析,找出切实可行的测量方法,对测量工作是十分重要的。

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、间接测量与组合测量;根据测量方式可分为偏差式测量、零位式测量与微差式测量;根据测量条件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;根据测量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

在使用仪表或传感器进行测量时,测得值直接与标准量进行比较,不需要经过任何运算,直接得到被测量的数值,这种测量方法称为直接测量。被测量与测得值之间的关系可用下式表示:

$$y = x \quad (1-3)$$

式中:  $y$ ——被测量的值;

$x$ ——直接测得的值。

例如,用磁电式电流表测量电路的某一支路电流,用弹簧管压力表测量压力等,都属于直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而又迅速,缺点是测量精度不容易达到很高。

在使用仪表或传感器进行测量时,首先对与被测量有确定函数关系的几个量进行直接测量,将直接测得值代入函数关系式,经过计算得到所需要的结果,这种测量称为间接测量。间接测量与直接测量不同,被测量  $y$  是一个测得值  $x$  或几个测得值  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的函数,即

$$y = f(x) \quad (1-4)$$

或

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-5)$$

被测量  $y$  不能直接测量求得,必须由测得值  $x$  或  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  及其与被测量  $y$  的函数关系确定。如直接测量电压值  $U$  和电阻值  $R$ , 根据式  $P=U^2/R$  求电功率  $P$  即为间接测量的实例。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。如有若干个被

测量  $y_1, y_2, \dots, y_m$ , 直接测得值为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 把被测量与测得值之间的函数关系列成方程组, 即

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= f_1(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ x_2 &= f_2(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ &\vdots \\ x_n &= f_n(y_1, y_2, \dots, y_m) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

其中, 方程组中方程的个数  $n$  要大于被测量  $y$  的个数  $m$ , 用最小二乘法可求出被测量的数值。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. 偏差式测量、零位式测量与微差式测量

用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的量值, 这种测量方法称为偏差式测量。应用这种方法测量时, 仪表刻度事先用标准器具分度。在测量时, 输入被测量按照仪表指针在标尺上的示值, 决定被测量的数值。偏差式测量的测量过程简单、迅速, 但测量结果的精度较低。

用指零仪表的零位反映测量系统的平衡状态, 在测量系统平衡时, 用已知的标准量决定被测量的量值, 这种测量方法称为零位式测量。在零位测量时, 已知标准量直接与被测量相比较, 已知标准量应连续可调, 指零仪表指零时, 被测量与已知标准量相等。例如天平测量物体的质量、电位差计测量电压等都属于零位式测量。零位式测量的优点是可以获得比较高的测量精度, 但测量过程比较复杂, 费时较长, 不适用于测量变化迅速的信号。

微差式测量是综合了偏差式测量与零位式测量的优点而提出的一种测量方法。它将测量与已知的标准量相比较, 取得差值后, 再用偏差法测得此差值。应用这种方法测量时, 不需要调整标准量, 只需测量两者的差值。设:  $N$  为标准量,  $x$  为被测量,  $\Delta$  为二者之差, 则  $x=N+\Delta$ 。由于  $N$  是标准量, 其误差很小, 且  $\Delta \ll N$ , 因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量  $\Delta$ , 即使测量  $\Delta$  的精度不高, 但因  $\Delta \ll x$ , 故总的测量精度仍很高。微差式测量的优点是反应快, 而且测量精度高, 特别适用于在线控制参数的测量。

### 3. 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, 用同一台仪器, 用同样的方法, 在同样的环境条件下, 对同一被测量进行多次重复测量, 则称为等精度测量。在实际中, 极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, 用不同精度的仪表, 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。

### 4. 静态测量与动态测量

被测量在测量过程中是固定不变的, 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。

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。

### 1.1.3 检测系统

#### 1. 检测系统构成

检测系统规模的大小与被测量的性质、被测量的多少及被测对象的性质有关。检测系统应具有对被测对象的特征量进行采集、变换、处理、传输及显示等功能。检测系统的基本构成如图 1-1 所示。

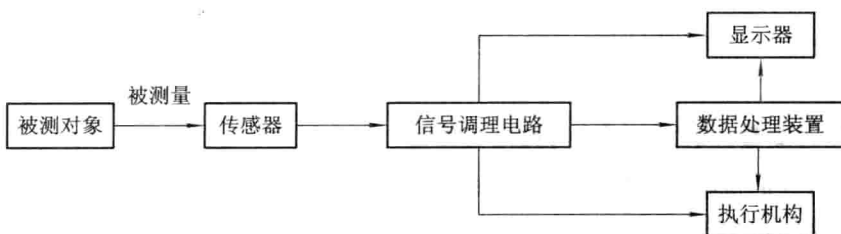


图 1-1 自动检测系统的基本构成框图

传感器是感受被测量(物理量、化学量、生物量等)的大小,并输出相对应的输出信号(一般多为电量)的器件或装置。它是连接被测对象和检测系统的接口,提供给检测系统进行处理和决策的原始信息。

信号调理电路对传感器的输出电信号进行处理,包括对信号进行转换、放大、线性化等。通过信号的调理把传感器输出的电量变成具有一定驱动和传输能力的电压、电流或频率信号等,以推动后级的显示、数据处理及执行机构。

显示器将所测得的信号变成人的感官能接受的信号,以完成监视、控制和分析的目的。常用的显示器有模拟显示器、数字显示器、图像显示器及记录仪等。模拟显示器利用指针对标尺的相对位置进行读数。数字显示器采用发光二极管(LED)和液晶(LCD)等,以数字的形式显示读数。图像显示器用 CRT 或点阵方式来显示读数或被测参数的变化曲线,还可以用图表或彩色图等形式来反映整个生产线上的多组数据。记录仪用来记录被测量的动态变化过程,常用的记录仪有笔式记录仪、高速打印机、绘图仪、数字存储示波器、磁带记录仪、无纸记录仪等。

数据处理装置对测得的数据进行处理、运算、分析以及对动态测试结果进行频谱分析等,完成这些任务必须采用计算机技术。数据处理的结果通常送到显示器或执行机构,以显示各种数据或控制各种被控对象。在不带数据处理装置的检测系统中,显示器和执行机构由信号调理电路直接驱动。

执行机构通常是指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等,它们起通断、控制、调节、保护作用。在自动检测系统中输出与被测量有关的电压或电流信号,作为自动控制系统的控制信号,去驱动这些执行机构。

#### 2. 开环测量系统与闭环测量系统

(1) 开环测量系统 开环测量系统全部信息变换只沿着一个方向进行,如图 1-2 所示。其中  $x$  为输入量,  $y$  为输出量,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为各个环节的传递系数。输入输出关系表示如下:

$$y = k_1 k_2 k_3 x \quad (1-7)$$

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

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1-8)$$

式中： $\delta$ ——系统的相对误差；

$\delta_i$ ——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，但各环节特性的变化都会造成测量误差。

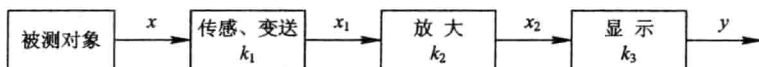


图 1-2 开环测量系统框图

(2) 闭环测量系统 闭环测量系统有两个通道，一为正向通道，一为反馈通道，其结构如图 1-3 所示。其中  $\Delta x$  为正向通道的输入量， $\beta$  为反馈环节的传递系数，正向通道的总传递系数  $k = k_2 k_3$ 。由图 1-3 可知：

$$\Delta x = x_1 - x_f$$

$$x_f = \beta y$$

$$y = k \Delta x = k(x_1 - x_f) = kx_1 - k\beta y$$

$$y = \frac{k}{1 + k\beta} x_1 = \frac{1}{\frac{1}{k} + \beta} x_1$$

当  $k \gg 1$  时，有

$$y \approx \frac{1}{\beta} x_1 \quad (1-9)$$

系统的输入输出关系为

$$y = \frac{k k_1}{1 + k\beta} x \approx \frac{k_1}{\beta} x \quad (1-10)$$

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，放大器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。

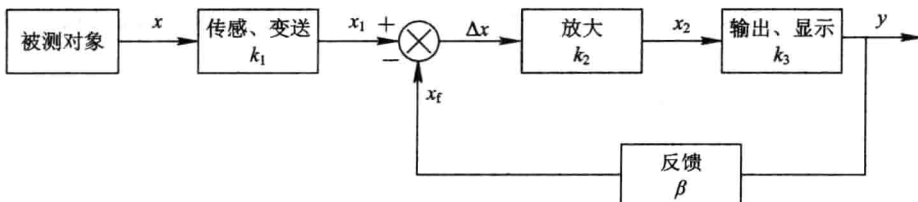


图 1-3 闭环测量系统框图

根据以上分析可知，在构成测量系统时，应将开环系统与闭环系统巧妙地组合在一起加以应用，才能达到所期望的目的。

### 1.1.4 测量误差

测量的目的是希望通过测量获取被测量的真实值。但由于种种原因,例如,传感器本身性能不十分优良,测量方法不十分完善,外界干扰的影响等,造成被测量的测得值与真实值不一致,因而测量中总是存在误差。测量误差是测得值减去被测量的真值。由于真值未知,所以在实际中,有时用约定真值代替真值,常用某量的多次测量结果来确定约定真值;或用精度高的仪器示值代替约定真值。

在工程技术及科学研究中,对被测量进行测量时,测量的可靠性至关重要,不同场合对测量结果可靠性的要求也不同。例如,在量值传递、经济核算、产品检验场合应保证测量结果有足够的准确度。当测量值用作控制信号时,则要注意测量的稳定性和可靠性。因此,测量结果的准确程度,应与测量的目的与要求相联系、相适应,那种不惜工本,不顾场合,一味追求越准越好的做法是不可取的,要有技术与经济兼顾的意识。

#### 1. 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有多种,含义各异。

(1) 绝对误差 绝对误差可用下式定义:

$$\Delta = x - L \quad (1-11)$$

式中:  $\Delta$ ——绝对误差;

$x$ ——测量值;

$L$ ——真值。

绝对误差是有正、负之分并有量纲的。

在实际测量中,有时要用到修正值,修正值是绝对误差大小相等、符号相反的值,即

$$c = -\Delta \quad (1-12)$$

式中,  $c$  为修正值,通常用高一等级的测量标准或标准仪器获得修正值。

利用修正值可对测量值进行修正,从而得到准确的实际值,修正后的实际测量值  $x'$  为

$$x' = x + c \quad (1-13)$$

修正值给出的方式,可以是具体的数值,也可以是一条曲线或公式。

采用绝对误差表示测量误差,不能很好说明测量质量的好坏。例如,在温度测量时,绝对误差  $\Delta = 1^\circ\text{C}$ ,对体温测量来说是不允许的,而对钢水温度测量来说是极好的测量结果,所以用相对误差可以比较客观地反映测量的准确性。

(2) 实际相对误差 实际相对误差的定义由下式给出:

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中:  $\delta$ ——实际相对误差,一般用百分数给出;

$\Delta$ ——绝对误差;

$L$ ——真值。

由于被测量的真值  $L$  无法知道,实际测量时用测量值  $x$  代替真值  $L$  进行计算,这个相对误差称为标称相对误差,即

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1-15)$$

(3) 引用误差 引用误差是仪表中通用的一种误差表示方法。它是相对于仪表满量程的一种误差，又称满量程相对误差，一般也用百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta}{\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中： $\gamma$ ——引用误差；

$\Delta$ ——绝对误差。

我国模拟仪表有七种等级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。仪表精度等级是根据最大引用误差来确定的。例如，0.5级表的引用误差的最大值不超过 $\pm 0.5\%$ ；1.0级表的引用误差的最大值不超过 $\pm 1\%$ 。等级数值越小，仪表的精确度就越高。

在使用仪表和传感器时，经常会遇到基本误差和附加误差两个概念。

(4) 基本误差 基本误差是指传感器或仪表在规定的标准条件下所具有的误差。例如，某传感器是在电源电压 $(220 \pm 5)$  V、电网频率 $(50 \pm 2)$  Hz、环境温度 $(20 \pm 5)$  °C、湿度 $65\% \pm 5\%$ 的条件下标定的。如果传感器在这个条件下工作，则传感器所具有的误差为基本误差。仪表的精度等级就是由基本误差决定的。

(5) 附加误差 附加误差是指传感器或仪表的使用条件偏离额定条件的情况下出现的误差。例如，温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。

## 2. 测量误差的性质

根据测量数据中的误差所呈现的规律及产生的原因可将其分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 随机误差 在同一测量条件下，多次测量被测量时，其绝对值和符号以不可预定方式变化着的误差称为随机误差。

在我国新制定的国家计量技术规范 JJF1001—1998《通用计量术语及定义》中，对随机误差的定义是根据国际标准化组织(ISO)等七个国际组织制定的《测量不确定度表示指南》定义的，即随机误差是将测量结果与在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。重复性条件包括：相同的测量程序，相同的观测者，在相同的条件下使用相同的测量仪器，相同的地点，在短时间内重复测量。随机误差可用下式表示：

$$\text{随机误差} = x_i - \bar{x}_\infty \quad (1-17)$$

式中： $x_i$ ——被测量的某一个测量值；

$\bar{x}_\infty$ ——重复性条件下无限多次的测量值的平均值，即

$$\bar{x}_\infty = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (n \rightarrow \infty)$$

由于重复测量实际上只能测量有限次，因此实用中的随机误差只是一个近似估计值。

对于随机误差，不能用简单的修正值来修正，当测量次数足够多时，随机误差就整体而言，服从一定的统计规律，通过对测量数据的统计处理可以计算随机误差出现的可能性的大小。

随机误差是由很多不便掌握或暂时未能掌握的微小因素，如电磁场的微变，零件的摩擦、间隙，热起伏，空气扰动，气压及湿度的变化，测量人员感觉器官的生理变化等，对测



量值的综合影响所造成的。

(2) 系统误差 在同一测量条件下, 多次测量被测量时, 绝对值和符号保持不变, 或在条件改变时, 按一定规律(如线性、多项式、周期性等函数规律)变化的误差称为系统误差。前者为恒值系统误差, 后者为变值系统误差。

在我国新制定的国家计量技术规范 JJF1001—1998《通用计量术语及定义》中, 对系统误差的定义是, 在重复性条件下对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。它可用下式表示:

$$\text{系统误差} = \bar{x}_{\infty} - L \quad (1-18)$$

式中,  $L$  为被测量的真值。

因为真值不能通过测量获知, 所以通过有限次测量的平均值  $\bar{x}$  与  $L$  的约定真值近似地得出系统误差, 称之为系统误差的估计, 得出的系统误差可对测量结果进行修正, 但由于系统误差不能完全获知, 因此通过修正值对系统误差只能有限程度地补偿。

引起系统误差的原因复杂, 如测量方法不完善, 零点未调整, 采用近似的计算公式, 测量者的经验不足等。对于系统误差, 首先要查找误差根源, 并设法减小和消除, 而对于无法消除的恒值系统误差, 可以在测量结果中加以修正。

(3) 粗大误差 超出在规定条件下预期的误差称为粗大误差, 粗大误差又称疏忽误差。

粗大误差的发生是由于测量者疏忽大意, 测错、读错或环境条件的突然变化等引起的。含有粗大误差的测量值明显地歪曲了客观现象, 故含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值。

在数据处理时, 要采用的测量值不应该包含有粗大误差, 即所有的坏值都应当剔除。所以进行误差分析时, 要估计的误差只有系统误差和随机误差两类。

## 1.2 测量数据的估计和处理

从工程测量实践可知, 测量数据中含有系统误差和随机误差, 有时还含有粗大误差。它们的性质不同, 对测量结果的影响及处理方法也不同。对于不同情况的测量数据, 首先要加以分析研究, 判断情况, 分别处理, 再经综合整理, 得出合乎科学性的测量结果。

### 1.2.1 随机误差的统计处理

#### 1. 正态分布

多次等精度地重复测量同一量值时, 得到一系列不同的测量值, 即使剔除了坏值, 并采取措施消除了系统误差, 然而每个测量值数据各异, 可以肯定每个测量值还会含有误差。这些误差的出现没有确定的规律, 具有随机性, 所以称为随机误差。

随机误差的分布规律, 可以在大量测量数据的基础上总结出来, 就误差的总体来说是服从统计规律的。由于大多数随机误差服从正态分布, 因而正态分布理论就成为研究随机误差的基础。

随机误差一般具有以下几个性质: