

面向 **21** 世纪

高等学校信息工程专业系列教材

传感器原理及工程应用

(第二版)

Principles and Engineering Applications of Sensors

郁有文 常健 程继红 编著



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校信息工程类专业系列教材

传感器原理及工程应用

Principles and Engineering Applications of Sensors

(第二版)

郁有文 常健 程继红 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书介绍各种传感器的原理、特性及其在工程上的应用技术。全书共有 15 章,第 1 章介绍传感与检测技术的理论基础;第 2 章介绍有关传感器的基本概念;第 3 章至第 14 章根据传感器的工作原理分类,分别介绍应变式、电感式、电涡流式、电容式、压电式、磁电式、光电式、半导体式、超声波式、辐射式、微波式、数字式、智能式等传感器的工作原理、性能、测量电路及应用;第 15 章介绍传感器在工程检测中的应用,把传感器与工程检测技术结合起来,使教材更具广泛性和实用性。

本书可作为应用电子、工业自动化、机电一体化、计算机应用、测控技术与仪器等专业教材,也可供其它专业的师生和有关工程技术人员参考。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及工程应用=Principles and Engineering Applications of Sensors/郁有文等编著 -2 版.

- 西安:西安电子科技大学出版社,2003.7

(面向 21 世纪高等学校信息工程类专业系列教材)

ISBN 7-5606-0890-6

I. 传… I. 郁… III. 传感器 高等学校 教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 038524 号

责任编辑 马乐惠 叶德福

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 88203467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2000 年 8 月第 1 版 2003 年 7 月第 2 版 2005 年 8 月第 12 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.5

字 数 388 千字

印 数 68 001 -74 000 册

定 价 18.00 元

ISBN 7-5606-0890-6/TN·0152(课)

XDUP 1161012-12

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专业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。这套教材预计在2004年春季全部出齐。

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。教材内容要及映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,对子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

2002年8月

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

- 主任：杨震（南京邮电学院副院长、教授）
副主任：张德民（重庆邮电学院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）
李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑、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（杭州电子工业学院计算机分院副院长、副教授）
孙力娟（南京邮电学院计算机系副主任、副教授）
李秉智（重庆邮电学院计算机学院院长、教授）
孟庆昌（北京信息工程学院教授）
周 娅（桂林电子工业学院计算机系副主任、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、副教授）
胡建萍（杭州电子工业学院电子信息分院副院长、副教授）
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（桂林电子工业学院通信与信息工程系副主任、副教授）
章坚武（杭州电子工业学院通信工程分院副院长、教授）
康 健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）
蒋国平（南京邮电学院电子工程系副主任、副教授）

- 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

《传感器原理及工程应用》是为高等院校电子信息类的工业自动化、机电一体化、测控及计算机应用等专业编写的教材。该教材自 2000 年出版以来，先后印刷 5 次，被许多院校和工程技术人员用作为教材或参考书。由于科学技术的不断发展，传感器及传感器技术都有了很大的发展和变化，为此我们对第一版教材进行了修改、充实和更新。同时我们也保持了原教材的特色，即内容覆盖面广，叙述由浅入深，在讲述传感器原理和特性时，侧重讲清物理概念，在介绍传感器的应用时，充分结合生产和工程实际，使教材更具有一定的使用和参考价值。

全书内容分三部分：第一部分介绍测量的基本知识及测量误差，例如测量及测量系统的概念，误差理论与测量数据的处理等，第二版的这部分内容中对误差和不确定度根据国际标准化等七个组织制定的指导性文件(GUM)赋予了新的定义；第二部分系统地介绍各种传感器的原理、结构和应用，第二版中增加了微波传感器、辐射传感器及智能传感器等内容，并把第一版工程应用中的数字式传感器放到第二部分；第三部分介绍工程检测的基础知识及传感器在工程检测中的应用，在第二版中增加了工程中应用的新型传感器。

本书由郁有文编写第 1、2、8、13、15 章，常健编写第 3~7、9、10 章，程继红编写第 11、12、14 章。全书由郁有文整理定稿，在编写此书过程中，我们得到了南京师范大学的大力支持和帮助，许多同行提出了很多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。本书在编写过程中参考了许多教材和文献，在此也表示谢意。

由于编者水平有限，本书第二版中一定会存在不足和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2003 年 2 月

第一版前言

由于科学技术的飞速发展，特别是微电子加工技术、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技术及传感器愈来愈引起人们的重视。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的检测问题，就必须合理选择和善于应用各种传感器及传感技术。《传感器原理及工程应用》是为高等院校电子信息类、工业自动化及计算机应用等专业编写的一本专业课教材，是作者在多年从事传感器教学及科研的基础上写成的。本书内容丰富、全面、新颖，叙述力求由浅入深，在讲述传感器原理和特性时，力争讲清物理概念，在介绍传感器的应用时，充分结合生产和工程实际，使教材具有一定的实用和参考价值。书中采用把传感器与检测技术结合起来的写法，充分考虑了传感器的应用和教学内容的需要，我们希望以此促进传感器的教学。

全书内容分三部分：第一部分介绍测量及误差的有关知识，例如测量及测量系统的概念，误差的分析与处理等；第二部分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技巧；第三部分介绍工程检测的基础知识及传感器在工程检测中的应用，将传感器和工程检测方面的知识有机地联系起来，使学生在掌握传感器原理的基础上，更进一步地应用这方面的知识以解决工程检测中的具体问题。

全书共分 11 章，每章内容都有其独立性，在使用本教材时，可根据不同专业的要求和特点，对内容适当进行取舍。实验是本课程不可缺少的重要组成部分，利用“综合传感器实验仪”可对不同传感器（如应变式、电涡流式、霍尔式、压电式、光纤式等）的特性进行研究和分析。通过实验，可以深化理论课的理解，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。

本书可作为应用电子、工业自动化、机电一体化及计算机应用等专业的教材，也可供其它专业和有关工程技术人员参考。

本书由郁有文编写第 1 章、第 2 章、第 8 章及第 11 章，常健编写第 3 章至第 7 章、第 9 章、第 10 章。全书在编写过程中，得到了许多同行的支持，他们提出了许多宝贵意见，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，在此向参考文献作者致谢。

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。

作者

2000 年 5 月

目 录

第 1 章 传感与检测技术的理论基础	1
1.1 测量概论	1
1.2 测量数据的估计和处理	8
思考题和习题	27
第 2 章 传感器概述	29
2.1 传感器的组成和分类	29
2.2 传感器的基本特性	30
思考题和习题	39
第 3 章 应变式传感器	41
3.1 工作原理	41
3.2 应变片的种类、材料及粘贴	43
3.3 电阻应变片的特性	46
3.4 电阻应变片的测量电路	53
3.5 应变式传感器的应用	57
思考题和习题	61
第 4 章 电感式传感器	63
4.1 变磁阻式传感器	63
4.2 差动变压器式传感器	70
4.3 电涡流式传感器	79
思考题和习题	86
第 5 章 电容式传感器	88
5.1 电容式传感器的工作原理和结构	88
5.2 电容式传感器的灵敏度及非线性	92
5.3 电容式传感器的等效电路	94
5.4 电容式传感器的测量电路	94
5.5 电容式传感器的应用	100
思考题和习题	102
第 6 章 压电式传感器	103
6.1 压电效应及压电材料	103
6.2 压电式传感器的测量电路	108
6.3 压电式传感器的应用	111
思考题和习题	113
第 7 章 磁电式传感器	114
7.1 磁电感应式传感器	114
7.2 霍尔式传感器	119

思考题和习题	126
第 8 章 光电式传感器	128
8.1 光电器件	128
8.2 光纤传感器	146
思考题和习题	152
第 9 章 半导体传感器	153
9.1 气敏传感器	153
9.2 湿敏传感器	158
9.3 色敏传感器	162
9.4 半导体式传感器的应用	166
思考题和习题	168
第 10 章 超声波传感器	169
10.1 超声波及其物理性质	169
10.2 超声波传感器	172
10.3 超声波传感器的应用	173
思考题和习题	175
第 11 章 微波传感器	176
11.1 微波概述	176
11.2 微波传感器的原理和组成	176
11.3 微波传感器的应用	178
思考题和习题	182
第 12 章 辐射式传感器	183
12.1 红外传感器	183
12.2 核辐射传感器	187
思考题和习题	195
第 13 章 数字式传感器	196
13.1 光栅传感器	196
13.2 编码器	200
13.3 感应同步器	203
思考题和习题	205
第 14 章 智能式传感器	207
14.1 概述	207
14.2 传感器的智能化	208
14.3 集成智能传感器	210
思考题和习题	214
第 15 章 传感器在工程检测中的应用	215
15.1 温度测量	215
15.2 压力测量	234
15.3 流量测量	240
15.4 物位测量	250
思考题和习感	254
参考文献	256

第1章 传感与检测技术的理论基础

1.1 测量概论

在科学技术高度发展的现代社会中,人类已进入瞬息万变的信息时代。人们在从事工业生产和科学实验等活动中,主要依靠对信息资源的开发、获取、传输和处理。传感器处于研究对象与测控系统的接口位置,是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学实验和生产过程,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与处理的电信号。

在工程实践和科学实验中,提出的检测任务是正确及时地掌握各种信息,大多数情况下是要获取被测对象信息的大小,即被测量的大小。这样,信息采集的主要含义就是测量和取得测量数据。

“测量系统”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,需要有传感器与多台仪表组合在一起,才能完成信号的检测,这样便形成了测量系统。计算机技术及信息处理技术的发展,使得测量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,需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。

1.1.1 测量

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。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 Δp 。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、间接测量和组合测量;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

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

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

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,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

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

方程组中方程的个数 n 要大于被测量 y 的个数 m ，用最小二乘法求出被测量的数值，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. 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，其测量过程简单、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。它将被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，而只需测量两者的差值。设： N 为标准量， x 为被测量， Δ 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 Δ ，即使测量 Δ 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，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。

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 测量系统

1. 测量系统构成

测量系统应具有对被测对象的特征量进行检测、传输、处理及显示等功能，一个测量系统是传感器、变送器(变换器)和其它变换装置等的有机组合。图 1-1 表示测量系统组成结构框图。



图 1-1 测量系统组成框图

传感器是感受被测量(物理量、化学量、生物量等)的大小,并输出相对应的可用输出信号(一般多为电量)的器件或装置。

变送器将传感器输出的信号转换成便于传输和处理的信号,大多数变送器的输出信号是统一的标准信号(目前多为 4~20 mA 直流电流),信号标准是系统各环节之间的通信协议。

当测量系统的几个功能环节独立地分隔开时,必须由一个地方向另一个地方传输信号,传输环节就是完成这种传输功能的。传输通道将测量系统各环节间的输入、输出信号连接起来,通常用电缆连接,或用光导纤维连接,以用来传输数据。

信号处理环节将传感器输出信号进行处理和变换。如对信号进行放大、运算、线性化、数—模或模—数转换,使其输出信号便于显示、记录。这种信号处理环节可用于自动控制系统,也可与计算机系统连接,以便对测量信号进行信息处理。

显示装置是将被测量信息变成人的感官能接受的形式,以完成监视、控制或分析的目的。测量结果可以采用模拟显示,也可采用数字显示或图形显示,也可以由记录装置进行自动记录或由打印机将数据打印出来。

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,因此系统的相对误差等于各环节相对误差之和。即

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

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。

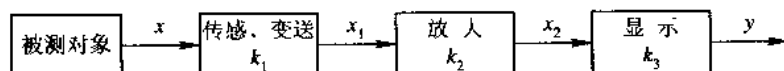


图 1-2 开环测量系统框图

(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 Δx 为正向通道的输入量， β 为反馈环节的传递系数，正向通道的总传递系数 $k=k_2k_3$ 。由图 1-3 可知：

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

当 $k \gg 1$ 时，则

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

系统的输入输出关系为

$$y = \frac{kk_1}{1+k\beta}x \approx \frac{k_1}{\beta}x \quad (1-10)$$

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。

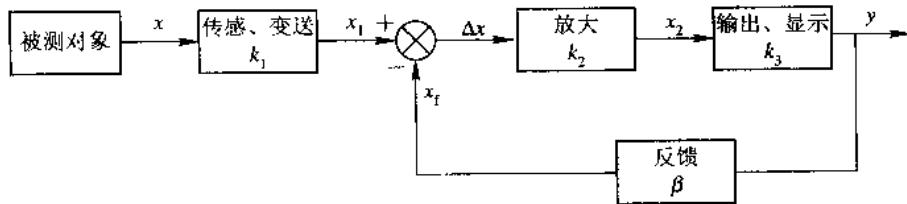


图 1-3 闭环测量系统框图

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

测量误差是测得值减去被测量的真值。

由于真值往往不知道，因此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。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作法是不可取的，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: Δ ——绝对误差;

x ——测量值;

L ——真值。

绝对误差是有正、负并有量纲的。

在实际测量中, 有时要用到修正值, 修正值是与绝对误差大小相等、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 $\Delta = 1\text{C}$, 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: δ ——实际相对误差, 一般用百分数给出;

Δ ——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: γ ——引用误差;

Δ ——绝对误差。

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 $\pm 1\%$ 。

在仪表和传感器使用时, 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 $(220 \pm 5)\text{V}$ 、电网频率 $(50 \pm 2)\text{Hz}$ 、环境温度 $(20 \pm 5)\text{C}$ 、湿度

65%±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。

在我国新制订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)等七个国际组织制订的《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}_∞ ——重复性条件下无限多次的测量值的平均值,即

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

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。

在我国新制订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。

这类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:

① 绝对值相等的正误差与负误差出现的次数大致相等,误差所具有的这个特性称为对称性。

② 在一定测量条件下的有限测量值中,其随机误差的绝对值不会超过一定的界限,这一特性称为有界性。

③ 绝对值小的误差出现的次数比绝对值大的误差出现的次数多,这一特性称为单峰性。

④ 对同一量值进行多次测量,其误差的算术平均值随着测量次数 n 的增加趋向于零,这一特性称为误差的抵偿性。

抵偿性是由第一个特性推导出来的,因为绝对值相等的正误差与负误差之和可以互相抵消。对于有限次测量,随机误差的平均值是一个有限小的量,而当测量次数无限增多时,它趋向于零。抵偿性是随机误差的一个重要特征,凡是具有抵偿性的,原则上都可以按随机误差来处理。