

21 世纪普通高等教育
电气信息类规划教材

误差理论与 测试信号处理

袁有臣等 编著

化学工业出版社

21世纪中国
教育出版工程

误差理论与 测试信号处理

张纪岳 主编



清华大学出版社

21 世纪普通高等教育电气信息类规划教材

误差理论与测试信号处理

袁有臣等 编著

邵巍 崔凤英 周春丽 王涛 参编

童刚 审阅



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍测量和误差的基本概念、基于最小二乘法的数据处理方法、测量不确定度评定和信号采集与处理中的误差分析等,旨在使学生学习和掌握工程实践中常见的对测试信号进行误差分析的基本理论与处理方法。全书共分8章,内容包括:测量、误差与数据处理基础、随机误差与系统误差的处理、函数误差、最小二乘法原理与应用、回归分析、测量不确定度和信号采集与处理的误差分析等。本书强调误差基本概念和信号处理的工程应用,主要内容围绕着检测仪表的测试精度展开讨论。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程等相关专业误差理论与数据处理课程的教材,同时可供科研院所及测试仪表生产厂家的工程技术人员在工程项目和产品的研究与设计中参考。

图书在版编目(CIP)数据

误差理论与测试信号处理/袁有臣等编著. —北京:化学工业出版社, 2011.12

21世纪普通高等教育电气信息类规划教材

ISBN 978-7-122-12898-0

I. 误… II. 袁… III. ①误差理论-高等学校-教材②信号处理-高等学校-教材 IV. ①0241.1②TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第243399号

责任编辑:郝英华

文字编辑:汲永臻

责任校对:蒋宇

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张15¼ 字数379千字 2012年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00元

版权所有 违者必究

前 言

本书是在《误差理论与数据处理》的基础上，为了适应测控技术与信息技术的快速发展而编写的，主要介绍误差理论与测试信号处理的基本概念、理论和方法，以及在信号采集与处理中的实际应用。误差理论与数据处理已有很长的发展历史，广泛应用于自然科学、社会科学和工程技术的各个领域。计算机、网络、智能芯片和软件编程技术的快速发展，已经把工程技术人员从繁杂的数据处理与工程计算中解放了出来，科研人员可以花更多的时间去研究误差理论与数据处理在信号的自动采集与处理中的应用问题。误差理论与数据处理也应该从主要针对静态测量数据的处理转向针对动态信号的处理，为了适应这种从数据处理到信号处理的转换，本书定名为《误差理论与测试信号处理》。工程实践中，需要大批对误差理论与测试信号处理有深入了解的科研人员通过设计信号处理电路和编写数据处理程序解决工程测试中的各种信号处理问题。通过《误差理论与测试信号处理》以及其他相关课程的学习，能够为在工程应用中解决实际的误差分析与信号处理问题打下良好的基础。

本书内容分为两方面，一方面是误差理论与数据处理的基本概念，另一方面是测试信号处理的理论与方法。误差理论与数据处理主要涉及概率论与数理统计方面的基本概念，这与静态数据处理的情况相同。对测试信号处理来说，需要熟悉电路和信号两方面的内容。电路方面包括模拟和数字信号处理电路，后者主要是所谓的智能芯片；信号处理方面主要是信号与系统和数字信号处理的基本理论与方法。信号采集也是测试信号处理的重要内容，涉及传感器与电子测量、A/D与D/A转换和检测技术及仪表等相关内容。测试信号处理的引入，为误差理论在信号处理方面的应用拓展了道路，但与此同时必须兼顾所需的背景知识。

本书以工程应用为主要目的，尽量减少对有关理论的深入探讨，力求通过工程应用实例展示测试信号处理的思路和方法。全书分为8章，具体内容安排如下。

绪论部分简述测量、信号、数据、信息与网络的关系；测量与测量误差的基本概念；研究测量误差的目的和意义。

第1章介绍测量的定义与分类；单位制与计量的基本概念；误差的定义和有效数字的应用等。

第2章是关于随机误差的处理，介绍随机误差的统计和分布特征，包括正态分布、均匀分布、三角形分布和反正弦分布等；算术平均值、数学期望、方差和标准差的概念和计算方法；异常数据的发现与处理以及信号与数据处理实例。

第3章是系统误差的处理，介绍系统误差产生的原因和分类方法；测量序列中系统误差的发现与消除；系统误差与检测仪表测量精度的关系，包括温度误差的消除、非线性误差的校正和测量仪表精度等级评定等内容。

第4章介绍函数误差的处理，包括函数误差的基本概念、函数误差的合成与分配等内容；分别针对定值系统误差、随机误差和未定系统误差给出了误差合成公式；简述了误差之间的相关性对函数误差的影响和由此而引出的相关测量，且给出了相关测量的实例。

第5章介绍数据处理的基本方法——最小二乘法；以最小二乘原理为中心，对线性参数问题采用矩阵方法求解，这样安排有利于编程和工程应用；对于非线性问题，可以通过转化为线性参数问题的方法求解；详细讨论了最小二乘数据处理的精度估计问题，对包含精度估

计信息的方差阵中的各协方差分量进行了细致的讨论；给出了较为详细的数据与信号处理实例。

第6章是回归分析，介绍一元线性回归、非线性回归和多元线性回归；一元线性回归中介绍了回归效果检验、回归方程的精度分析和如何通过增加信号采集数量以提高回归效果与回归方程精度的方法；非线性回归中介绍了分段直线回归技术与实现、一般非线性模型的拟合以及直接非线性回归等，且都给出了实例；多元线性回归部分给出了一元线性回归和非线性回归统一的解决方案，并以较大篇幅介绍了线性递推回归的理论、方法和实例。

第7章是测量不确定度，包括测量不确定度的概念，标准不确定度的A类评定和B类评定，扩展不确定度及评定和不确定度评定实例等内容；通过实例将不确定度与测量仪表精度等级评定相联系，丰富了测量不确定度评定的实质性内容。

第8章信号采集与处理的误差分析中涉及内容较多，有信号的表示与分类，系统的性质与分类，测量系统的特性，测量系统的动态误差，信号的采集与处理，数字信号处理的误差分析6方面的内容。本章主要介绍误差理论在模拟信号处理和离散信号处理中需要面对的基本问题，如信号通过系统时产生的误差，动态测量误差，信号采集中产生的误差，信号的量化误差，以及信号在DFT和FFT变换中产生的误差等。

《误差理论与测试信号处理》课程讲授的是测量、误差、精度、数据、信号和信息的基本概念和基本关系，是理工科各专业、学科和层次都应具备的知识和技能。本书可直接作为“误差理论与数据处理”课程的教材使用，能够使学生在信号的自动采集与处理方面运用误差理论的基本概念，处理工程中的实际问题；也能使学生对误差理论在信号处理方面的应用前景树立信心，从而取得更好的学习效果。为了配合教师的授课和学生的学习，每章都配有习题，习题内容与教材内容相呼应；部分习题有详细解答在书后附录中给出；大部分习题稍加修改即可作为试题使用。与本书配套的讲稿、课件、试题和习题解答可直接登录相关网站下载，或发邮件至 cip_edu@163.com 索取。

本书由袁有臣执笔并定稿，邵巍、崔凤英、周春丽、王涛参编，童刚审阅，本书是误差理论与数据处理课程教学团队辛勤劳动的成果，包含着老师们20多年误差理论教学经验的积累和总结。

书中的不足和疏漏，敬请读者指正，不胜感激。

编著者

2011年10月

目 录

绪论	1
0.1 测量、信号、数据、信息与网络	1
0.2 测量与测量误差	2
0.3 研究测量误差的目的和意义	2
第 1 章 测量误差的基本概念	4
1.1 测量及其分类	4
1.1.1 测量的基本概念	4
1.1.2 测量方法分类	4
1.1.3 测量系统	5
1.2 测量单位与计量	6
1.2.1 计量工作	6
1.2.2 单位制	7
1.2.3 计量基准	8
1.2.4 计量器具与检定	9
1.2.5 计量工作的特点	9
1.3 测量误差	10
1.3.1 误差的定义	10
1.3.2 误差的表示方法	11
1.3.3 误差的分类	12
1.4 测量精度	13
1.5 有效数字与数据运算规则	13
1.5.1 有效数字	14
1.5.2 数字舍入规则	15
1.5.3 数据运算规则	15
习题 1	16
第 2 章 随机误差的处理	18
2.1 随机误差的统计规律	18
2.1.1 概率分布密度函数	18
2.1.2 随机误差的特征参数	18
2.1.3 正态分布	21
2.1.4 随机误差的其他分布	25
2.2 算术平均值原理	29
2.2.1 算术平均值	29
2.2.2 测量标准差与极限误差	30
2.3 加权算术平均值原理	34
2.3.1 测量数据的权	34

2.3.2 加权算术平均值	35
2.3.3 加权算术平均值的标准差与极限误差	36
2.4 异常数据的发现与处理	38
2.4.1 异常数据产生的原因与处理方法	38
2.4.2 异常数据的判别准则	39
2.5 信号与数据处理实例	41
2.5.1 随机误差的处理实例	41
2.5.2 异常数据的判别	43
2.5.3 不等精度测量序列的数据处理	44
习题 2	47
第 3 章 系统误差的处理	49
3.1 系统误差概述	49
3.1.1 系统误差的来源	49
3.1.2 系统误差的分类	49
3.2 系统误差的发现	51
3.2.1 定值系统误差的发现——实验对比法	51
3.2.2 变值系统误差的发现方法——残差观察法	51
3.2.3 残差校核法	52
3.2.4 不同公式计算标准差比较法	53
3.2.5 检测仪表的系统误差	54
3.3 测量序列中系统误差的减小与消除	56
3.3.1 定值系统误差的消除	56
3.3.2 线性系统误差的消除——对称法	58
3.3.3 周期性系统误差的消除——半周期法	58
3.4 检测仪表系统误差的减小与消除	59
3.4.1 温度误差的减小与消除	60
3.4.2 非线性误差的校正	61
3.5 仪表的测量精度	69
3.5.1 测量仪表的精度等级	69
3.5.2 影响测量仪表精度等级的误差因素	70
习题 3	70
第 4 章 函数误差的处理	72
4.1 函数误差	72
4.1.1 函数的系统误差	72
4.1.2 函数的随机误差	73
4.1.3 相关性与相关系数	75
4.1.4 相关测量实例	77
4.2 误差的合成	79
4.2.1 随机误差的合成	79
4.2.2 系统误差的合成	80
4.3 误差的分配	83

4.3.1	误差分配的等作用原则	84
4.3.2	调整和验算	85
4.3.3	误差分配示例	85
习题 4		86
第 5 章	最小二乘法	89
5.1	最小二乘原理	89
5.2	线性参数最小二乘处理	90
5.2.1	非线性参数到线性参数的转换	90
5.2.2	等精度线性参数最小二乘处理	91
5.2.3	线性参数方程的矩阵表示	92
5.2.4	正规方程的矩阵表示	93
5.2.5	不等精度测量线性参数最小二乘处理	94
5.2.6	不等精度线性参数最小二乘处理的矩阵表示	95
5.3	最小二乘估计举例	96
5.3.1	被测量的算术平均值	96
5.3.2	物体运动状态估计	97
5.3.3	相邻四条刻线间距的精密测量	98
5.3.4	简单的非线性问题	100
5.4	最小二乘的精度估计	101
5.4.1	最小二乘估计的方差阵	102
5.4.2	测量数据的精度估计	103
5.4.3	最小二乘估计量的精度估计	104
5.5	最小二乘精度估计举例	110
5.5.1	物体运动状态估计的精度估计	110
5.5.2	四条刻线之间间距测量的精度估计	112
习题 5		114
第 6 章	回归分析	116
6.1	一元线性回归	116
6.1.1	一元线性回归方程	116
6.1.2	电容式传感器的一元线性回归分析	120
6.1.3	回归方程的平方和分析与回归效果检验	121
6.1.4	提高回归效果的方法	123
6.2	非线性回归	129
6.2.1	曲线分段拟合技术	129
6.2.2	能化为线性回归的曲线回归	132
6.2.3	一般非线性模型的曲线拟合	133
6.2.4	非线性回归实例	135
6.3	多元线性回归	138
6.3.1	多元线性方程	138
6.3.2	多元线性方程组的最小二乘解	139
6.3.3	回归方程的精度和显著性检验	142

6.3.4 线性递推回归	144
习题 6	148
第 7 章 测量不确定度	151
7.1 不确定度的概念	151
7.1.1 误差、精度和不确定度的关系	151
7.1.2 测量不确定度	152
7.2 标准不确定度的 A 类评定	153
7.2.1 标准不确定度的 A 类评定	153
7.2.2 标准不确定度 A 类评定的方法	153
7.3 标准不确定度的 B 类评定	155
7.3.1 不确定度的 B 类评定	155
7.3.2 标准不确定度 B 类评定的方法	156
7.3.3 不确定度 B 类评定的自由度	157
7.4 扩展不确定度的评定	157
7.4.1 合成标准不确定度	157
7.4.2 扩展不确定度的概念	159
7.4.3 不确定度报告	160
7.5 不确定度评定实例	160
7.5.1 测量不确定度评定步骤	161
7.5.2 运算放大器输入失调电压测量的不确定度评定	161
7.5.3 运算放大器输入失调电压测量仪精度等级的评定	163
7.5.4 直流电压测量仪表测量结果的不确定度评定	165
7.5.5 温度测量数据采集系统不确定度评定	166
习题 7	168
第 8 章 信号采集与处理的误差分析	170
8.1 信号的表示与分类	170
8.1.1 连续信号与非连续信号	170
8.1.2 确定性信号与随机信号	171
8.2 系统的性质与分类	171
8.2.1 系统的性质	171
8.2.2 系统的分类	172
8.3 测量系统的特性	173
8.3.1 测量系统的时域分析	173
8.3.2 测量系统的频域分析	176
8.4 测量系统的动态误差	180
8.4.1 动态测量误差	180
8.4.2 动态测量误差的评定指标	180
8.5 信号的采集与处理	183
8.5.1 模拟输入通道	183
8.5.2 离散傅里叶变换	183
8.5.3 时域连续信号的采样	186

8.5.4 快速傅里叶变换	192
8.6 数字信号处理的误差分析	196
8.6.1 数值的量化误差	196
8.6.2 数据的截尾与舍入误差	198
8.6.3 定点 FFT 运算误差分析	203
8.6.4 浮点 FFT 运算误差分析	209
习题 8	212
附录 A	216
附录 B	220
附录 C	223
部分习题参考答案	227
参考文献	231

绪 论

0.1 测量、信号、数据、信息与网络

科学技术的发展与测量技术的进步关系密切，没有测量就没有科学，测量是认识世界的主要工具，已成为共识。现代社会已步入网络时代，社会生活网络化，生产过程网络化，国家和人类安全网络化，最终将实现真正意义上的全球网络化。对网络的全面依赖，反映了对信息的迫切需求。网络技术的快速发展，将为各类用户提供更多的信息，不断地满足人们对信息的需求。在网络中，信息被信号承载，信息和信号都可以用数据表示；信息、信号和数据三者相互联系，各自扮演着不同的角色。

在一般的工业测量中，测量、数据、信号和信息都是通过检测仪表获取的。测量是检测仪表的基本任务，完成从被测量到数据、信号和信息的转换；信号贯穿了测量过程的始终，从非电量到电信号的转换、滤波、放大、传输和各种处理等；信号被记录、存储或显示称之为数据；信息则是从信号或数据中提取出来的有用的内容；信号处理还包括 AD 或 DA 转换、压缩、解压和各种 DSP 运算等。测量、数据和信号在一般工业测量中的关系示于图 0-1 中。图中信号处理（模拟的和数字的）是工业测量的主体，而与数据处理有关的内容处于边缘位置。

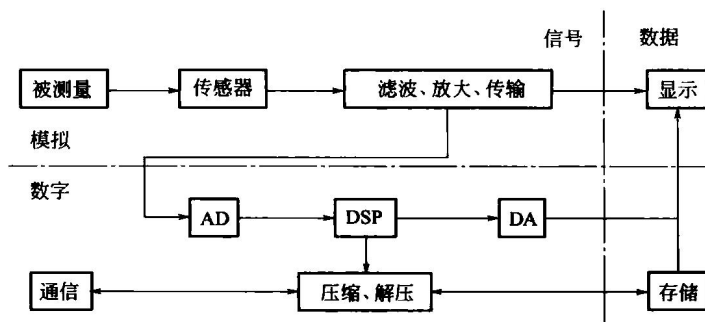


图 0-1 工业测量中的信号和数据

检测仪器的智能化（亦称数字化）一方面增强了仪表的信号处理能力，另一方面加强了仪表的通信能力，总线化仪表和网络化仪表就是通过对检测仪表提供通信接口实现的。

在现代测量中，检测仪表成为网络的重要组成部分，为网络提供各种信号、数据和信息，图 0-2 给出了测量、信号、数据和信息与网络的关系。网络中所有的内容（信号、数据和信息）一般都是通过某种测试装置得到的，这些内容，有的是通过自动测量获得，有的是通过人工测量（包括键盘、鼠标等录入）得到。如果这些内容在网络中被采集、变换（放大、去噪、压缩、解压）或传输等处理，人

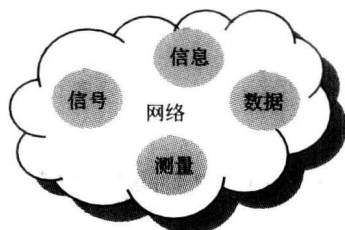


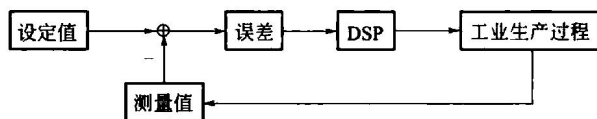
图 0-2 现代测量中测量、信号、数据和信息与网络的关系

们将其称之为信号；如果在网络中的某个终端被记录、存储或显示，则称之为数据；如果通过分析、计算或推理等从信号或数据中得出有价值的结果，则称之为信息。某种程度上，可以将网络视为一台信号处理功能强大、性能完善的检测仪表。

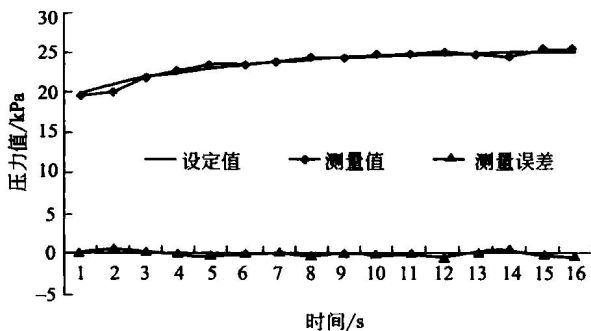
0.2 测量与测量误差

任何测量都是不准确的，所有测量结果都含有误差。信号在变换、采集和传输等处理过程中产生的误差通过数据得以体现，一般以测量精度（精确度、精密度和准确度）表示；信息（有用或有价值的测量结果）的误差一般要求用不确定度表示（参看第7章）。在信号采集与处理过程中，每个环节都要产生误差，这是误差的必然性；表示信号与信息的数据都含有误差，反映了误差的普遍性；描述一个测量结果优劣的量化指标是数据的可信赖程度（可信度）。误差理论研究测量误差的运动变化规律，旨在给出最可信赖的测量结果。与误差理论相关的数据处理研究含有误差的信号（动态）或数据（静态）在处理过程中的运动与变化规律，从而得到信号与数据的有用结果，亦即信息。基于物理实验数据处理发展起来的误差理论在现代测量中更多地倾向于信号处理，代表了误差理论的发展方向，误差理论与数据处理的成果在现代信号处理中找到了更大的发展空间。

误差被看作是测量值与真值之差（误差定义），或测量值与约定真值（或估计值）之差，亦可看作是设定值（或期望值）与测量值之差。在常见的工业控制系统或控制网络中，测量误差是控制器的输入信号，如图0-3(a)所示。测量误差、测量值与设定值之间的关系曲线示于图0-3(b)。



(a) 单回路工业控制系统



(b) 压力值从20kPa变化到25kPa过程中，设定值、测量值和测量误差的记录曲线

图 0-3 工业控制系统中的测量值、设定值和测量误差

0.3 研究测量误差的目的和意义

研究测量误差，学习误差理论的目的在于提高测量精度；认识误差的变化和运动规律，探索减小和消除测量误差的可能性和有效方法；研究测量仪表和装置的测量误差形成机制，

提高测量仪表和装置的测量精度和综合性能等。

学习误差理论有着深远的理论意义和广阔的实际意义。

误差理论在静态数据的处理方面发展比较完善,已经建立了一套基于概率论与数理统计的随机误差处理的理论框架,不确定度概念的提出和正在被广泛采用是其重要成果。在动态信号处理理论方面,相应的理论基础,如随机信号处理和随机过程的理论还在发展。算法方面,一般方法是采用智能信号处理系统,对采样信号逐点或逐段进行处理,处理过程如同静态数据处理。这方面的理论涉及概率论与数理统计、随机信号处理、信号与系统、数字信号处理和随机过程等多门学科。应用方面,误差理论主要解决诸如实验数据处理、电子测量与仪器、各类检测与控制仪表、控制系统设计和传感与信号采集中出现的信号与数据的误差处理问题。技术方面,主要是构成智能信号处理系统的电路系统和相应的软件。图 0-4 中按理论体系、应用领域和技术实现分三个层次对上述内容进行了综合。对于快速变化的信号,要求智能信号处理系统具有较好的实时性;对于微弱信号和被噪声污染的信号,还要设计相应的信号处理电路对信号进行放大和消除噪声。

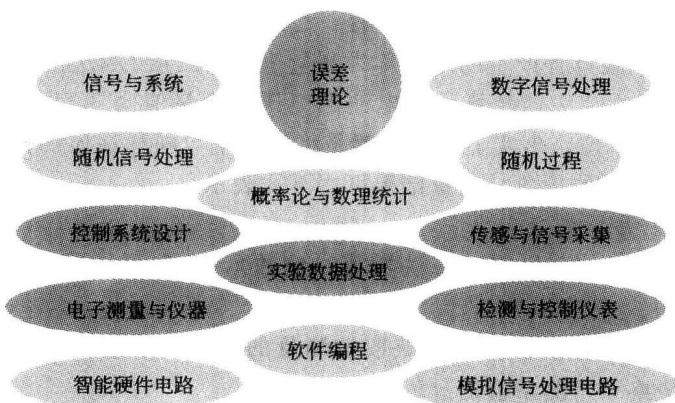


图 0-4 误差理论主要的理论体系、应用领域和技术实现

随着科学技术的发展,对测量精度的要求越来越高。测量技术水平的高低能够反映科学技术的最新成果,而测量精度是测量技术的主要标志之一。无论采取何种技术措施,测量误差总是不可避免,测量精度的提高总是受到限制的。通常我们只能通过在一定程度上减小测量误差来提高测量精度,这就需要对误差的产生原因、误差的分类、误差的特性进行全面和系统的研究,找到减小或消除测量误差对测量结果影响的方法。

学习和掌握误差理论的基本概念和有关知识,可以减小和控制误差的影响,对所进行的各种测量作进一步的理解,并对测量结果做出科学的评价;认识误差的运动和变化规律、分析误差因素和产生原因;对测量结果进行不确定度评定,最终给出测量结果的最可信赖值。

第 1 章 测量误差的基本概念

人类为了认识自然与改造自然，需要对各种自然现象与物理量进行研究与测量。由于测试装置常常无法达到理想精度要求，加上人员技术水平和环境条件的影响，测量值与被测量的真值之间总是存在着误差。随着科学技术的发展和人们认识水平的提高，虽然测量误差被控制得越来越小，测量精度也越来越高，但最终误差还是不能完全消除。

1.1 测量及其分类

1.1.1 测量的基本概念

测量是用实验方法确定物理量量值的过程，也就是将待测物理量与作为标准的同类物理量进行比较的过程，比较过程产生的结果称为测量值。被测量的测量值由数值和单位两部分组成。例如，用电压表的 5V 挡测量手机电池的电压，测量值为 3.58V，其中 3.58 是读数（数值），V（伏特）是单位。事实上，测量就是将被测量与同种性质的标准量进行比较，以确定被测量相对于标准量的倍数。测量结果可用下式表示

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

式中， x 为测量结果（测量值）； n 为数值（纯数），含有测量误差； u 为标准量，即测量单位。

测量也是使用检测装置从被测对象获取被测量的信息，产生测量信号，经过变换、放大、传输等处理，最终获得测量值的过程。

1.1.2 测量方法分类

（1）按测量手续对测量分类

① 直接测量 可以用测量装置直接读出测量值的测量称为直接测量。直接测量的特点是不需要对被测量本身或与他测量值进行函数运算，测量过程简单快捷，是最常用的工程测量方法。

② 间接测量 对于无法直接测量的被测量或直接测量比较困难时，需要依据待测量与若干直接测量值的函数关系求出测量结果，这样的测量称为间接测量。如在电阻 R 上消耗的直流功率 P ，一般可通过直接测量电压 U 和电流 I ，再根据函数关系 $P=UI$ ，间接计算得到功率 P 。间接测量在信号的自动测量、采集与处理中应用较为广泛。

③ 组合测量 如有若干个待求量，把这些待求量用不同方法组合起来进行测量，并把测量结果与待求量之间的函数关系列成方程组，再从方程组中求解待求量，即为组合测量。以铂热电阻温度计零温度电阻值和电阻温度系数的测量为例，当 $t \geq 0^\circ\text{C}$ 时，铂热电阻温度计电阻温度关系为

$$R(t) = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1-2)$$

式中， R_0 为 $t=0^\circ\text{C}$ 时的电阻值， A 和 B 称为热电阻的温度系数。为了获得 R_0 、 A 和 B 的值可以在 3 个不同的温度下，分别测量对应的电阻值，数据代入式(1-2)，得到联立方程

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_0 + R_0 A t_1 + R_0 B t_1^2 \\ R_{t_2} = R_0 + R_0 A t_2 + R_0 B t_2^2 \\ R_{t_3} = R_0 + R_0 A t_3 + R_0 B t_3^2 \end{cases} \quad (1-3)$$

三个独立方程，三个待求量，方程有独立解，从方程组(1-3)可以解得 R_0 、 A 和 B 的值。为了提高测量精度，增加测量次数是有效的方法，但这样会使方程数量大于待求量个数，联立方程不再有唯一解。本书第5章介绍的最小二乘法是求解此类问题的有效方法。

(2) 按照对测量精度的要求分类

在较短时间内进行测量，如果影响和决定误差大小的全部因素始终保持不变，如由同一个测量人员，用同一台测量仪表，同样的方法，在相同的环境条件下，对同一个被测量进行多次重复测量，这样的测量被称之为等精度测量。在实际中，无法保证影响和决定误差大小的全部因素始终保持不变，所谓的等精度测量一般是近似的和相对的。

测量过程中任何条件（仪器、人员、环境和方法）发生变化，都将对测量结果的精度产生影响，得到的测量结果的测量精度将各不相同，这样的测量称为不等精度测量。

对同一个被测量进行等精度测量得到的测量结果称之为等精度测量列；同样对同一个被测量进行不等精度测量得到的测量结果称之为不等精度测量列。

(3) 根据被测对象在测量过程中所处的状态分类

静态测量是指在测量过程中被测量保持不变，不需要考虑时间等因素对测量结果的影响；若在测量过程中被测量是随时间变化的，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) 开环测量系统

开环系统中全部信号只沿一个方向流动，如图1-1所示，其中 x 为输入量（被测量）， y 为输出量（测量值）， k_1 、 k_2 和 k_3 为各环节的传递系数。设传感器、信号处理电路和显示三个环节的静态特性都是线性的，则 k_1 、 k_2 和 k_3 均为常数，此时输入输出关系可表示如下

$$y = k_1 k_2 k_3 x \quad (1-4)$$

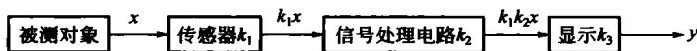


图 1-1 开环测量系统框图

(2) 闭环测量系统

闭环测量系统有两个通道，一个是正向通道，一个是反向通道，其结构如图1-2所示。其中 Δx 为正向通道输入量， β 为反馈环节传递系数。从图中可以求得 $\Delta x = k_1 x - \beta y$ ，输出信号为

$$y = k_2 k_3 \Delta x = k_1 k_2 k_3 x - \beta k_2 k_3 y \quad (1-5)$$

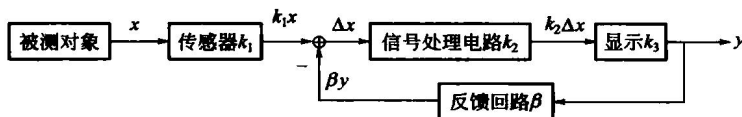


图 1-2 闭环测量系统框图

从式(1-5)解出

$$y = \frac{k_1 k_2 k_3 x}{1 + \beta k_2 k_3} \quad (1-6)$$

当 $k_2 k_3 \gg 1$ 时, 上式化简为

$$y = \frac{k_1}{\beta} x \quad (1-7)$$

显然, 这时系统的输入输出关系由传感器和反馈环节的特性决定, 信号处理电路和显示等环节特性的变化对输出信号基本上不产生影响。闭环测量系统有较高的静态测量精度和动态稳定性。

1.2 测量单位与计量

在表示测量结果的式(1-1)中, 测量单位 u (unit) 是测量结果的重要组成部分。所有测量都是针对物理量 (被测量) 进行的, 所有物理量都是有单位的, 因此所有测量结果都必须包含单位。测量单位是基于计量学的, 是计量工作的重要内容。

1.2.1 计量工作

计量是研究测量原理和方法, 保证测量单位统一和量值准确的科学, 它包括测量理论与实践的各个方面; 计量是关于测量的科学, 也是现代科学的重要组成部分。

(1) 计量技术

计量技术是研究计量基准、标准、测量单位、检定和测量方法等方面的科学技术。计量技术贯穿于各行各业, 渗透于社会的每个领域, 服务于国民经济和社会生活, 其重要性已被充分认识。现代科学技术的发展, 推动计量技术水平不断提高, 计量技术的快速发展加快了科学技术在社会各领域的应用, 促进了国民经济的发展和人民生活水平的提高。

计量技术按专业进行分类可分为十大类: ①几何量 (长度) 计量; ②温度计量; ③力学计量; ④电磁学计量; ⑤无线电 (电子) 计量; ⑥时间频率计量; ⑦光学计量; ⑧声学计量; ⑨电离辐射; ⑩化学 (标准物质) 计量。

(2) 计量机构与计量管理体系

① 国际法制计量组织 国际法制计量大会是国际法制计量组织的最高组织形式, 每 4 年召开一次。国际法制计量委员会是国际法制计量组织的领导机构, 由各成员国政府任命的一名从事计量工作的代表组成。国际法制计量局是国际法制计量组织的常设执行机构, 设于法国巴黎。

国际法制计量组织的任务是:

- a. 制定计量器具及其使用的法律、法规和计量器具检定规程;
- b. 确定法制计量的一般规则;
- c. 规定计量器具应具有的特性及质量, 并推荐各国使用;
- d. 翻译、编辑和出版各国现行的计量法规及计量器具使用的有关说明;
- e. 促进各成员国或与有关国际机构在法制计量方面的合作与联系。

② 我国的计量管理体系 根据《中华人民共和国计量法》规定, 我国按行政区域建立各级政府计量行政管理部门。国家质量技术监督局是国务院的直属机构, 负责组织研究、建立和审批各项计量基准、标准; 推行国家法定计量单位、组织起草、审批和颁布各项计量检定体系和检定规程; 指导和协调各部门和地区的计量工作, 对各级质量技术监督部门实行业务领导。