

检测技术与系统设计

张靖 刘少强 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

检测技术是自动化技术的重要组成部分。全书较全面地、系统地介绍了检测技术的主要理论知识和应用技术。内容反映了近年来自动化领域中检测技术的新技术、新方法、新器件和新成果。

全书内容共分四篇。第一篇为理论基础。内容有误差理论、基本检测方法、一般检测系统基本构成与分类、检测系统基本特性；第二篇为信号检测。内容有传统的和现代的各种传感器及测量电路的原理及应用；第三篇为信号调理与数据采集。内容有近年来检测系统信号变换与数据采集的常用手段及集成器件；第四篇为检测仪器、系统设计。内容有检测系统的硬件和软件设计、参数指标的规划和评定、干扰及其抑制措施等内容。

本书是作为高等院校自动化及相近专业的教材而编写的，教学时可根据具体要求选择其中部分章节内容。此外，本书还可作为有关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术与系统设计/张靖, 刘少强编. -北京:中国电力出版社, 2001

ISBN 7-5083-0819-0

I. 检… II. ①张… ②刘… III. ①检测-技术 ②自动检测系统-系统设计 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 066820 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 27.5 印张 621 千字

印数 0001—3000 册 定价 39.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

检测技术是自动化技术的支柱之一。检测技术课程是自动化专业共修的专业基础课程。传统的检测技术主要包含两方面的内容,即测量非电参数的传感器技术及应用电测方法的测量仪表。随着自动化技术及信息技术的发展及其在工业控制中的广泛应用,检测技术发生了深刻的变革。目前,检测技术已进入以微处理器为核心的微机化和智能化检测技术阶段。为了适应现代科学技术的发展,必需对检测技术的内容作相应的更新和扩充。

完整的检测技术应包括以下四个方面的内容:①检测系统的参数指标及误差估算;②非电量检测方法及传感器应用;③信号调理及数据采集;④仪器与系统设计的一般方法、原则、思想。我们在充分借鉴目前国内外相关教材和资料文献的基础上,重新组织内容,编写了本书。全书分为四篇,各篇之间相互独立而又有机结合,组成了完整的检测技术内容体系。

第一篇是误差理论与参数指标。误差理论是检测系统参数指标设计和分析的理论基础。本篇不仅介绍了以概率论与数理统计为基础的随机误差分析和处理,而且对检测系统各个环节之间的误差分析和误差分配,以及误差在各个环节之间的传递与合成等问题也作了详细论述。同时,配合检测系统的实际背景,书中深入讨论了系统误差的提取和处理方法。最后,从系统的角度剖析了检测系统的静态动态特性及参数指标的概念。

第二篇是传感器技术与信号检测方法。对于非电量的检测或一些不便直接测量的电量来说,传感器成为检测系统的关键元件。传感器种类繁多、涉及知识面相当广泛,因而所占篇幅较大。我们采用了根据工作原理对传感器分类的方法。不仅主要介绍了传统的传感器,如电位器式、电阻应变片式、电感式、电容式、热电式、磁电和电磁式、压电式、光电式、磁传感器,还不失篇幅地介绍了光纤、气体、湿度、红外、超声、微波和智能传感器等现代传感器,反映了目前传感技术的发展水平。针对传感器专用集成电路的发展,有代表性地相应传感器的原理后插入了集成电路的介绍及应用,使传感器的设计具有现代特点,体积更紧凑,性能更稳定。

第三篇是信号调理与数据采集。由于被测对象本身的条件、传感器工作原理和特性上的局限性及环境等因素的影响,由传感器将被测量转换成的量(一般为电量),常常不能满足直接输出的要求,需进一步变换、处理和分析,以改善特性。检测要求的提高和传感技术的发展,使信号的变换和处理技术不断进步,内容也越来越丰富。目前,常用的硬件方法有测量电桥、信号放大、阻抗变换、硬件滤波、非线性硬件校正、交流/直流转换、电压/电流转换、电压/频率转换等方法,一般称为信号调理技术。本篇借鉴了现代电子技术的发展成果,内容力求反映近年来信号调理的新技术、新方法、新器件。放大电路的重点从运算放大器转向了数据放大器、可编程增益放大器和隔离放大器等新器件。硬件滤波技术除了巴特沃斯、切比雪夫等滤波器的模拟电路实现方法以外,还引入了便于集成和便

于由微控制器实行截止频率编程的开关电容滤波器。传统的模拟非线性校正方法因集成技术的发展变得设计简便、性能稳定，可用在非线性严重的场合取代软件校正，或在测量精度要求高的场合实现辅助校正，其应用价值依然存在，本篇也有详细介绍。针对在音频、振动、交流传感器的信号检测中常需要检测交流信号的有效值、功率、幅值、峰值等特征参数的特点，本篇还重点介绍了目前交流/直流转换的集成化实现方法。此外，信号传输与数据采集两部分也是基于集成电路来展开的。

第四篇是检测仪器、系统设计。本篇汇编了如下内容：检测系统的组建原则与性能评定、检测系统的智能化处理、检测系统的软件设计、现代检测系统的设计思想和方法、干扰及其抑制措施等。本篇旨在从系统的角度来谈检测系统设计的一般原则和方法。

本书在内容取材和体系编排上具有以下特色：

(1) 注重理论原理与应用技术的结合。各篇章均有详细举例，面向工程实践。针对过去信号调理技术内容薄弱，推导简单等不足，加强了原理分析和电路推导，旨在举一反三、加深理解。

(2) 注重新知识的融入。内容反映了近年来自动化领域中检测技术的新技术、新方法、新器件和新成果。

(3) 适应面广。本书是作为高等院校自动化及相近专业的教材而编写的。为配合“淡化专业、扩大适应面”的思想，本书的选材面向整个自动化领域，口径宽，适合仪器仪表、自动控制、电气工程、机电一体化等专业。

(4) 体系完整。本书从传感器的选择、信号的检测和变换、系统的结构和设计、参数指标的分析与评定等方面完整地介绍了检测技术的主要理论知识和应用技术。内容涉及检测系统结构的各个环节和检测系统设计的全过程。

(5) 各篇章内容有相对的独立性。可根据课时与要求选取不同章节教学，也便于读者自学。

本书前两篇内容由刘少强编写；后两篇内容由张靖编写。全书由张靖负责统稿。

由于编者水平有限，加之时间仓促，缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2001年8月于东南大学

目 录

前言

第一篇 理论 基础

第一章 绪论	1
第一节 检测与测量	1
第二节 检测技术的作用和地位	1
第三节 检测系统的组成	3
第四节 检测技术的发展	3
第二章 测量与误差	5
第一节 测量方法及分类	5
第二节 测量误差基本概念	7
第三节 随机误差及其处理	11
第四节 系统误差的处理	19
第五节 坏值的剔除	23
第六节 函数误差的传递与分配	24
第七节 误差合成	28
第八节 微小误差准则	33
第三章 基本检测方法和一般检测系统的构成与分类	36
第一节 基本检测方法	36
第二节 一般检测系统的分类与构成	38
第四章 检测系统基本特性	42
第一节 概述	42
第二节 描述方法	43
第三节 检测系统的特性	45

第二篇 信号 检测

第五章 传感器及传感器技术基础	55
第一节 传感器的基本概念与工作机理	56
第二节 传感器的作用与地位	56
第三节 传感器的组成与分类	57
第四节 传感器的性能参数及要求	58

第五节	传感器的标定与校准	59
第六节	改善传感器性能的主要技术途径	60
第七节	传感器技术的发展趋势	60
第六章	电位器式传感器	62
第一节	电位器的基本概念	62
第二节	一些具代表性的电位器式传感器	63
第三节	电位器主要技术特性	64
第七章	电阻应变式传感器	66
第一节	金属电阻应变片的结构和类型	66
第二节	金属电阻应变片工作原理	67
第三节	应变片的主要特性及参数	68
第四节	电阻应变片的选用和粘贴	69
第五节	应变片测量电路	69
第六节	半导体应变片	75
第七节	电阻应变片式传感器的应用	76
第八章	压阻式传感器	80
第一节	压阻效应及压阻系数	80
第二节	固态压阻式压力传感器	81
第三节	压阻式传感器的应用	83
第九章	电感式传感器	86
第一节	自感式传感器	86
第二节	互感式传感器	93
第三节	电涡流式传感器	96
第四节	电感式传感器的应用	101
第十章	电容式传感器	104
第一节	工作原理、结构及特性	104
第二节	电容传感器应用中需注意的问题	109
第三节	电容传感器的测量电路	110
第四节	电容式传感器的特点及应用	113
第十一章	热电式传感器	117
第一节	热电阻传感器及应用	117
第二节	热敏电阻及其应用	124
第三节	热电偶传感器及其应用	128
第四节	其他温度传感器	138
第十二章	磁电和电磁式传感器	139
第一节	磁电式传感器工作原理	139
第二节	动圈式磁电传感器	139
第三节	磁阻式电磁传感器	140
第四节	电磁式流量传感器	141
第十三章	压电传感器	143

第一节	压电效应	143
第二节	压电材料	144
第三节	压电传感器等效电路	147
第四节	测量电路	149
第五节	压电传感器及其应用	151
第十四章	光电传感器	154
第一节	光电传感器的组成	154
第二节	光电传感器工作原理与结构	154
第三节	光传感器的特性	160
第四节	光源和光电传感器的选用	163
第五节	基本测量电路及集成电路器件	164
第六节	一般形式的光电传感器及应用实例	167
第十五章	磁传感器	170
第一节	霍尔传感器	170
第二节	霍尔传感器器件	176
第三节	磁敏电阻器	178
第四节	磁敏二极管	180
第五节	磁敏三极管	181
第六节	磁传感器应用实例	182
第十六章	光纤传感器	186
第一节	光纤传感器的分类	186
第二节	光纤传感元件	186
第三节	典型光纤传感器及应用	189
第十七章	气体传感器	196
第一节	半导体式气体传感器	196
第二节	接触燃烧式气体传感器	198
第三节	气体传感器结构、符号及基本工作电路	198
第四节	气体传感器的应用	200
第十八章	湿度传感器	202
第一节	基本概念	202
第二节	湿敏元件、传感器工作原理及特性	203
第三节	湿敏元件及传感器结构	204
第四节	湿度传感器的选用与应用电路	205
第五节	结露传感器	206
第十九章	红外传感器	208
第一节	红外辐射的基本知识	208
第二节	红外传感器	210
第三节	红外探测器的性能参数	212
第四节	红外传感器使用中应注意的问题	213
第五节	红外检测技术及应用	213

第二十章 超声波传感器	217
第一节 超声检测的物理基础	217
第二节 超声波传感器原理与种类	219
第三节 超声波传感器基本应用电路	221
第四节 超声检测技术的应用	224
第二十一章 微波传感器	230
第一节 微波检测的基本知识简介	230
第二节 微波传感器及其分类	231
第三节 微波传感器的特点	231
第四节 典型微波传感器及应用	231
第二十二章 智能式传感器	235
第一节 概述	235
第二节 智能传感器	237
第三节 智能结构	238

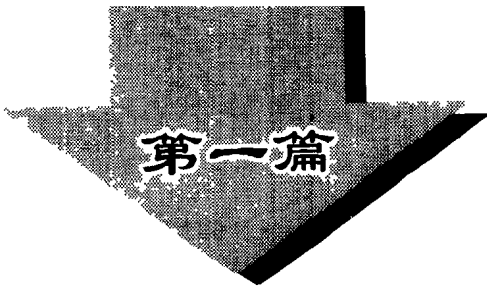
第三篇 信号调理与数据采集

第二十三章 测量电桥	242
第一节 电桥的分类	243
第二节 直流电桥	244
第三节 交流电桥	252
第二十四章 检测信号的放大	260
第一节 仪器放大器	260
第二节 可编程增益放大器 (PGA)	263
第三节 隔离放大器	267
第二十五章 硬件滤波技术	273
第一节 滤波器的分类	273
第二节 滤波器的传递函数	274
第三节 模拟有源滤波器	278
第四节 开关电容滤波器	283
第二十六章 非线性系统的硬件校正	288
第一节 非线性校正的数字方法	288
第二节 非线性校正的模拟方法	289
第三节 模拟非线性校正环节的实现	293
第二十七章 交流/直流转换电路	300
第一节 线性检波电路	300
第二节 绝对值变换电路	301
第三节 有效值变换电路	303
第二十八章 检测信号的传输及器件	308

第一节	模拟信号传输的方法	308
第二节	U/I 变换器集成器件	309
第三节	U/I 变换器的应用	313
第二十九章	检测信号的数据采集	318
第一节	数据采集系统的基本组成单元	318
第二节	数据采集系统的结构形式	337
第三节	数据采集系统的电气隔离	340

第四篇 检测仪器、系统设计

第三十章	检测系统设计基础	343
第一节	检测系统的组建原则与性能评定	343
第二节	检测系统的智能化处理	352
第三节	检测系统软件设计	363
第三十一章	现代检测系统的设计思想和方法	371
第一节	组合化和开放式系统设计思想	371
第二节	现代检测系统的设计方法	372
第三节	计算机及接口设计	374
第四节	现代检测系统的结构类型	377
第三十二章	干扰及其抑制措施	383
第一节	电子器件的固有噪声及抑制措施	383
第二节	干扰的耦合方式及抑制措施	385
第三节	干扰的叠加方式及抑制措施	392
第三十三章	计算机检测系统设计实例-智能温控仪设计	399
第一节	设计要求	399
第二节	系统组成和工作原理	400
第三节	硬件结构和电路设计	401
第四节	软件结构的程序框图	408
习题与思考题		415
参考文献		428



第一篇

理 论 基 础

测量是人们认识和改造世界的一种必不可少的重要手段，它是以确定被测物属性量值为目的的一组操作。通过测量和试验能使人们对事物获得定性或定量的概念，并发现客观事物的规律性。广义地讲，测量是对被测量进行检出，变换分析处理、判断、控制等的综合认识过程。

在科学实验和工程实践中，由于各客观条件不可能完美无缺，以及在测量工作中人在主观方面的各种原因，都会使测量结果与实际值不同，也即测量误差客观存在于一切科学实验与工程实践中。没有误差的测量是不存在的，这就是误差公理。当误差超过一定限度时，测量不仅变得毫无意义，而且会给工作带来危害。因此对测量误差的控制就成为衡量测量技术水平，以至于科技水平的重要标志之一

研究测量误差的目的，就是要根据误差产生的原因、性质及规律，在一定测量条件下尽力设法减小误差，保证测得值有一定的可信度，将误差控制在允许的范围之内。

检测是意义更为广泛的测量，是检验、测量的统称（测试是测量和试验的全称，有时把较复杂的测量称为测试）。具体到工程检测技术，则是对生产过程和运动对象实施定性检查和定量测量的技术。从信息科学看，检测技术则是寻找与自然信息具有对应关系的种种表现形式的信号以及确定二者间的定性定量关系，并在一定条件下找出最合适表现形式以及最佳的采集、变换、处理、存贮等的方法、手段和相应设备 也就是要根据误差理论，根据检测对象的特性和检测的具体问题，合理设计、科学组建检测系统，以正确使用各种检测工具、设备和检测方法，正确地进行测量。

以学习、掌握检测技术和检测系统的相关基础理论、方法为目标，本篇先重点介绍测量与误差的基本概念、理论、方法，再简介一般检测系统的基本构成、检测方法，最后介绍检测系统的特性及描述和评定方法。

第一节 检测与测量

检测是意义更为广泛的测量。据国际通用计量学基本名词推荐：测量是以确定量值为目的的一组操作。这种操作就是测量中的比较过程——将被测参数的量值与作为单位的标准量进行比较，比出的倍数即为测量结果。与测量相近的概念是检验，它常常只需分辨出参数量值所归属的某一范围带，以此来判别被测参数是否合格或现象是否存在等。检测不仅包含了上述两种内容，而且在自动化领域中，还用于对被测/被控对象有用信息的检出。

在自动化领域中，检测的任务不仅是对成品或半成品的检验和测量，而且为了检查监督和控制某个生产过程或运动对象使之处于人们选定的最佳状况，需要随时检查和测量各种参量的大小和变化等情况（如热工参数、几何参数、表面质量、内部缺陷、泄漏、成分等）。这种对生产过程和运动对象实施定性检查和定量测量的技术又称为工程检测技术。

第二节 检测技术的作用和地位

从检测技术的定义中可以看出，人类在研究未知世界的过程中是离不开检测技术的。最早人类只能依靠自身的感觉器官（听觉、视觉、嗅觉、味觉、触觉）和简陋的量具去观察自然现象，指导生产活动。随着检测技术的发展，人类获取信息的能力，达到了新的高度和广度。例如，生物显微镜及电子显微镜的出现，使人们能对生物细胞，材料结构等微观世界进行观察；射电望远镜的使用使人们能探索宇宙的现象；红外、微波等检测技术的发展，并在卫星探测上得到应用后，使人们由依靠局部的观察来推测气象、水文、资源、污染、森林、覆盖、泥沙流失、农业收成等发展到能从整个地球的宏观上去实际观察，因此，更为及时、客观和真实。

工程检测技术的发展，使检测技术不仅能对产品和半成品进行生产后的检测，而且能对生产过程或运动对象进行实时的、在线的检测，提供及时的、准确的信息以便用于实时控制。检测技术已成为自动化技术的重要支柱。

第三节 检测系统的组成

由于被测对象复杂多样，因此，检测方法和检测技术的结构也不尽相同，图 1-1 为一基本检测系统组成框图。

1. 传感器

传感器处于被测对象与测试系统的接口位置，是一个信号变换器。它直接从被测对象中提取被测量的信息，感受其变化并变换成便于测量的其他量。例如将速度变换成电压，将应变变换成电阻，将流量变换成压力等。传感器是检测系统的重要组成部分。

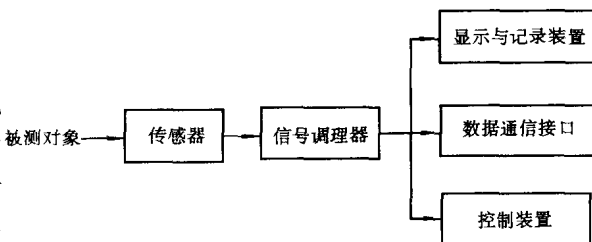


图 1-1 检测系统的组成

2. 信号调理器

信号调理器又称中间转换器，它的作用是将传感器的输出信号进行放大、转换和传输等，使其适合于显示、记录、数据处理或控制。例如测量电桥、滤波器、放大器、 V/F 变换器、 V/I 变换器、交流/直流变换器等。

3. 输出环节

输出环节包含显示和打印记录装置、数据通信接口和控制执行器装置等，从而使检测系统不仅用于检测，还能完成控制和保护操作等功能。

从检测系统的组成结构可以看出，要成功地设计一个检测系统，需要深厚的技术基础。不但需用到力学、光学、电磁学等这些物理学知识，还要用到电子技术、计算机技术、自动化技术、信息技术等领域的知识技术。例如，传感器的设计一般基于复杂的物理和化学的定理和规律；信号的放大和调理又依赖于电子技术；信号的处理和分析则依靠数字信号处理、随机信号分析等这些信息领域的研究成果；检测仪器的智能化，则是自动化技术、计算机技术、接口与网络技术相结合的产物；此外，检测系统中还要用到测量误差理论、信号与系统分析方法（时域、频域、复频域、 I 域）、抗干扰技术等知识。

第四节 检测技术的发展

生产水平与自动化程度的提高，要求先进的检测仪器与仪表作基础。据统计：大型发电机组需要 3000 台传感器及其配套监测仪表；大型石油化工厂需要 6000 台传感器及其配套监测仪表；一个钢铁厂需要 20000 台传感器及其配套监测仪表；一个电站需要 5000 台传感器及其配套监测仪表；一架飞机需要 3600 只传感器及其配套监测仪表；一辆汽车需要 30~100 只传感器及其配套监测仪表。

在各种现代装备系统的设计和制造工作中，测量工作内容已占首位。测量系统的成本已达到该装备系统总成本的 50% ~ 70%，它是保证现代工程装备系统实际性能指标和正常工作的重要手段，是其先进性能及实用水平的重要标志。以电厂为例，为了实现安全高效供电，电厂除了实时监测电网电压、电流、功率因数及频率、谐波分量等电气量外，还要实时监测电机各部位的振动（振幅、速度、加速度）以及压力、温度、流量、液位等多种非电气量，并实时分析处理、判断决策、调节控制，以使系统处于最佳工作状态。如果测量系统不够完备，主汽温度测量值有 + 1% 的测量偏差，则汽机高压缸效率减少 3.7%；若主汽流量测量值有 - 1% 的测量偏差，则电站燃烧成本增加 1%。又如：为了对工件进行精密机械加工，需要在加工过程中对各种参数，如位移量、角度、圆度、孔径等直接相关量以及振动、温度、刀具磨损等间接相关参量进行实时监测，实时由计算机进行分析处理，然后由计算机实时地对执行机构给出进刀量、进刀速度等控制调节指令，才能保证预期高质量要求，否则得到的将是次品或废品。

目前，检测技术的发展主要表现在以下几个方面：

1. 传感器水平的提高

采用新材料、新工艺使传感器的性能进一步提高，可实现传感器的微型化和集成化此外，采用计算机技术，使传感器的数据处理能力提高，提升传感器的智能水平。

2. 检测方法的推进

随着光电、超声波、微波、射线等技术的发展，使得非接触法检测技术得到了发展。随着光纤、光放大器、滤波器等光元件的发展，使信号的传输和处理不再局限于电信号，出现采用光的检测方法。此外，还有多参量复合检测，主动检测等技术均有发展。

3. 检测系统的智能化

以计算机为中心的智能化的检测系统能够测量多种参量，既有电气量，又有非电气量；具有多个输入通道，可进行多点测量；能够快速进行动态在线实时测量，能够实时快速进行信号分析处理，排除噪声干扰、消除偶然误差、修正系统误差，从而实现测量结果的高准确度以及具有对被测信号的高分辨能力。

第二章

测量与误差

本章主要介绍测量与误差的基本概念、误差分析及数据处理方法等。

第一节 测量方法及分类

1. 测量方法及分类

测量是人们认识和改造客观世界的一种必不可少的重要手段，具体说就是把被测未知量与同性质标准量进行比较，确定被测量对标准量的倍数，并用数字表示这个倍数的过程。它是以确定被测物属性量值为目的的一组操作。

对测量方法，从不同角度出发有不同的分类方法：按测量手续分类为：直接测量、间接测量、联立测量；按测量方式分类为：偏差式测量、零位式测量、微差式测量；按测量敏感元件是否与被测介质接触分类为：接触式测量、非接触式测量；按被测量变化快慢分类为：静态测量、动态测量；按测量系统是否向被测对象施加能量分类为：主动式测量、被动式测量；按被测物理量是否在变化过程中被测分类为：在线测量、离线测量。

2. 直接测量、间接测量与联立测量

(1) 直接测量。在使用仪表进行测量时，对仪表读数不需经过任何运算，就能直接表示测量所需的结果，称直接测量。例如用磁电式电流表测电路某一支路的电流就是直接测量。此方法广泛应用于工程上。

(2) 间接测量。使用仪表测量时，先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量，将测量值代入函数关系式，经过计算得到所需的结果，称间接测量。例如测导线的电阻率 ρ 时，由 $\rho = \pi d^2 R / 4l$ ，先测出 R 、 l 、 d 再代入表达式求出 ρ 。此方法手续多、费时，但可得到较高的测量精度，主要用于科学实验中的实验室测量。

(3) 联立测量。应用仪表测量时，若被测物理量必须经过求解联立方程组，才能得到最后结果，这样的测量称为联立测量。进行联立测量时，一般要改变测试条件才能获得一组联立方程所需的数据。

例如对标准线绕电阻温度系数的测量，其阻值 R_t 与温度 t 之间的关系由下式给出：

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2]$$

式中 α 、 β ——电阻线圈的电阻温度系数；

R_{20} ——电阻线圈在 20°C 时的电阻值。

为测出 α 和 β ，必须在三种温度 t_1 、 t_2 、 t_3 下，分别测出对应的阻值 R_{t1} 、 R_{t2} 、 R_{t3} 、

代入上述公式，解联立方程。

联立测量，操作复杂，费时、是一种特殊的精密测量方法。它只适用于科学实验或特殊场合。

3. 偏差式测量、零位测量、微差式测量

(1) 偏差式测量。测量过程中，用测量仪表指针的位移（即偏差）决定被测量的测量方法，称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时，标准量具不装在仪表内，而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准；测量时，输入被测量，按仪表指针在标尺上的示值，决定被测量的数值。它是以间接方式实现与标准量的比较，例如用磁电式电流表测电路支路中的电流。此测量法简单、迅速，但测量结果精度较低。

(2) 零位式测量（又称补偿式或平衡式测量）。测量过程中，用指零仪表的零位指示检测、测量系统的平衡状态，在测量系统达到平衡时，用已知的基准量决定未知量的测量方法，称零位式测量法。用此方法进行测量时，标准量具装在仪表内，在测量过程中标准量直接与被测量相比较；测量时，要调整标准量，即进行平衡操作，一直到被测量与标准量相等，即指零仪回零。例如用天平称量的测量即为零位式测量。

采用此方法测量的优点是可获得较高的测量精度，但过程复杂、费时。此方式不适用测快变信号而只适用于测变化缓慢的信号。

(3) 微差式测量。微差式测量综合了偏差式测量法与零位式测量法的优点。此方法是将被测的未知量与已知的标准量进行比较，并取得差值，然后用偏差法测得此差值。应用此方式测量时，标准量具装在仪表内，且在测量过程中，标准量直接与被测量进行比较，由于两者的值很近，测量过程中不需调整标准量，而只需测两者的差值。

微差式测量法的优点是反应快、精度高，特别适用于在线控制参数的检测。

4. 其他测量方法

前面两种测量分类法，是传统的检测法，随着科学实验与工业应用的不断发展，这些测量方法远不能满足要求。因此非接触检测及在线检测在科学实验、工业过程检测与控制中越来越重要，显示出巨大的优越性。

非接触检测是利用物理、化学及声、光学的原理，使被测对象与检测元器件之间不发生物理上的直接接触而对被测量进行检测的方法。

在线检测与离线检测的区别是：检测是在被测量变化过程中进行，还是在过程之外或过程结束后进行。

狭义地讲，在线检测是在被测量变化过程中进行的检测。广义地说是应用各种传感检测器对被检测量进行实时监测，并实时地进行分析处理而获取信息，与预先设定的量进行比较，然后根据误差信号进行处理，保证检测精度或使生产过程处于最佳运行状态。

在线检测技术的发展，对检测系统各环节的实时性提出了很高的要求，即要求各环节响应要快，满足实时监测的需要，对检测技术的发展起到推动作用。事实上有些量的检测必须是在线实时检测。

第二节 测量误差基本概念

测量过程中，首先因为测量设备、仪表、测量对象、测量方法、测量者本身都不同程度受到本身和周围各种因素的影响，且这些影响因素也不断地变化。其次，被测量对测量系统施加作用之后，才能使测量系统给出测量结果，也就是说，测量过程一般都会改变被测对象原有的状态。因此测量结果反映的并不是被测对象的本来面貌，而只是一种近似，故测量不可避免地总存在测量误差。

1. 测量误差的名词术语

(1) 真值。指一定的时间及空间条件下，某物理量体现的真实数值。真值是客观存在，但不可测量的。随着科技的发展，人们对客观事物认识的不断提高，测量结果的数值会不断接近真值。实际的计量和测量工作中，经常使用“约定真值”和“相对真值”。约定真值是按照国际公认的单位定义，利用科技发展的最高水平所复现的单位基准约定，真值常以法律规定或指定。相对真值也叫实际值，是在满足规定准确度时用来代替真值使用的值。

(2) 标称值。计量或测量器具上标注的量值，如标准砝码上标出的 1kg，受制造、测量及环境条件变化的影响，标称值并不一定等于它的实际值，通常在给出标称值的同时也应给出它的误差范围或精度等级。

(3) 示值。由测量仪器给出或提供的量值，也称测量值。

(4) 精确度（精度）。它是测量结果中系统误差与随机误差的综合，表示测量结果与真值的一致程度。精确度涉及到真值，由于真值的“不可知性”，所以它只是一个定性概念，不能用于定量表达。定量表达则用“测量不确定度”（过去常讲的两个术语“精密度”和“正确度”在 1993 年第二版的《国际通用计量学基本术语》中已不再列出）。

(5) 重复性。在相同条件下，对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的一致性。所谓相同条件即重复条件，它包括：相同的测量程序、测量条件、观测人员、测量设备、地点等。

(6) 误差公理。实际测量中，由于测量设备不准确，测量方法、手段不完善，测量程序不规范及测量环境因素的影响，都会导致测量结果或多或少地偏离被测量的真值。测量结果与被测量真值之差就是测量误差，它的存在是不可避免的，也即“一切测量都具有误差，误差自始至终存在于所有科学实验的过程之中”，这就是误差公理。研究误差的目的就是寻找产生误差的原因，认识误差的规律、性质、找出减小误差的途径方法，以求获得尽可能接近真值的测量结果。

2. 测量误差的表示法

测量误差可表示为四种形式。

(1) 绝对误差。某一被测量的测量值 x 与真值 x_0 的差值为绝对误差 Δx 。

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2-1)$$

式中 x ——测量值，具体应用中可用测量仪器的示值，标准量具的标称值，标准信号源的调定值或定值代替；

x_0 ——被测量的真值，由于真值的不可知性，常用约定真值或相对真值代替。在实际测量中，常用某一被测量多次测量的平均值或上一级标准仪器测得的示值作约定真值，代替真值 x_0 。

绝对误差是一个有符号、大小、量纲的物理量。

绝对误差的负值称之为修正值，也叫补值，一般用 C 表示，即

$$C = -\Delta x = x_0 - x \quad (2-2)$$

测量仪器的修正值一般通过计量部门检定给出，由上式知测量值加上修正值可得相对真值，即实际值。

(2) 相对误差。相对误差常用来表示测量精度的高低，相对误差有：

1) 实际相对误差。实际相对误差是用绝对误差 Δx 与被测量约定真值 x_0 的百分比来表示的相对误差，即

$$r_{x_0} = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (2-3)$$

2) 示值（标称）相对误差。示值相对误差是用绝对误差 Δx 与仪器示值 x 的百分比值，即

$$r_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (2-4)$$

在误差相对较小时， r_{x_0} 与 r_x 相差不大，无须区分，但在误差较大时，两者不能混淆。

3) 引用误差（或满度相对误差）。满度相对误差是用绝对误差 Δx 与仪器满度值 X_m 的百分比来表示的相对误差，即

$$r_n = \frac{\Delta x}{X_m} \times 100\% \quad (2-5)$$

引用误差是为评价测量仪表精确度等级而引入的，以客观正确地反映测量仪表的精确度高低。

仪表的各指示（刻度）值的绝对误差有大小、正负。所以确定测量仪表的精确度等级应使用最大引用误差，即绝对误差的最大绝对值 $|\Delta x|_m$ 与量程之比。若用 r_{nm} 表示最大引用误差，则有

$$r_{nm} = \frac{|\Delta x|_m}{X_m} \times 100\% \quad (2-6)$$

国标规定，电测仪表的精确度等级指数 α 分为：0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0 共 7 级。它们的基本误差（最大引用误差）不能超过仪表精确度等级指数 α 的百分数，即

$$r_{nm} \leq \alpha\% \quad (2-7)$$

依上规定，电测仪表在使用中所产生的最大可能误差可由下式求出