



普通高等教育规划教材

检测技术

卜云峰 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

检测技术

主 编 卜云峰
副主编 乐建华 张处武
参 编 李 华 李洪海 侯志伟
主 审 康维新



机械工业出版社

本书清晰地反映了自动检测系统中信号获取、信号转换与传输（即信号调理）、检测信号的自动采集以及检测系统中的抗干扰等环节的内在联系，既体现自动检测技术的基本体系，又融合计算机在检测技术中的应用，教材反映了应用型本科注重理论与实践相结合的人才培养特点，适应时代发展的要求。

全书共分十六章，主要内容包括：检测技术理论基础；常用传感器的结构原理、特性、信号转换及应用；信号调理电路的结构和性能；自动化仪表和虚拟仪表的基本组成、基本功能和基本设计方法。

本书是普通高等学校应用型本科数控技术系列教材之一，除作为普通本科院校的教材外，还可作为高职高专的教材，也可供从事检测技术的工程技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

检测技术/卜云峰主编. —北京：机械工业出版社，2005.1

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-15923-3

I. 检... II. 卜... III. 传感器—检测—高等学校—教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 140047 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：王小东 版式设计：霍永明 责任校对：王 欣

封面设计：陈 沛 责任印制：李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·17 印张·418 千字

定价：24.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育应用型人才培养规划教材

编 审 委 员 会 名 单

主 任：刘国荣 湖南工程学院
副主任：左健民 南京工程学院
陈力华 上海工程技术大学
鲍 泓 北京联合大学
王文斌 机械工业出版社

委 员：（按姓氏笔画排序）

刘向东 华北航天工业学院
任淑淳 上海应用技术学院
何一鸣 常州工学院
陈文哲 福建工程学院
陈 峻 扬州大学
苏 群 黑龙江工程学院
娄炳林 湖南工程学院
梁景凯 哈尔滨工业大学（威海）
童幸生 江汉大学

数控技术应用专业分委员会委员名单

主任：朱晓春 南京工程学院
副主任：赵先仲 华北航天工业学院
 龚仲华 常州工学院

委员：（按姓氏笔画排序）

卜云峰 淮阴工学院
汤以范 上海工程技术大学
朱志宏 福建工程学院
李洪智 黑龙江工程学院
吴 祥 盐城工学院
宋德玉 浙江科技学院
钱 平 上海应用技术学院
谢 骐 湖南工程学院

序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用。随着知识经济时代的到来,科学技术突飞猛进,国际竞争日趋激烈。特别是随着经济全球化发展和我国加入WTO,世界制造业将逐步向我国转移。有人认为,我国将成为世界的“制造中心”。有鉴于此,工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止,我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才,为经济的发展作出了巨大的贡献。但据IMD1998年的调查,我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第36位,与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校,并于2001年、2002年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”,对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位作了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的,以适应经济、社会发展对工程教育的新要求,满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程的前驱、美国加州理工学院的冯·卡门教授有句名言:“科学家研究已有的世界,工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律,所以科学强调分析,强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学(包括自然科学、技术科学和社会科学)理论和技术手段去改造客观世界的实践活动,所以它强调综合,强调方案优缺点的比较并做出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案,采用不同的培养模式,采用具有不同特点的教材。然而,我国目前的工程教育没有注意到这一点,而是:①过分侧重工程科学(分析)方面,轻视了工程实际训练方面,重理论,轻实践,没有足够的工程实践训练,工程教育的“学术化”倾向形成了“课题训练”的偏软现象,导致学生动手能力差。②人才培养模式、规格比较单一,课程结构不合理,知识面过窄,导致知识结构单一,所学知识中有一些内容已陈旧,交叉学科、信息学科的内容知之甚少,人文社会科学知识薄弱,学生创新能力不强。③教材单一,注重工程的科学分析,轻视工程实践能力的培养;注重理论知识的传授,轻视学生个性特别是创新精神的培养;注重教材的系统性和完整性,造成课程方面的相互重复、脱节等现象;缺乏工程应用背景,存在内容陈旧的现象。④老师缺乏工程实践经验,自身缺乏“工程训练”。⑤工程教育在实践中与经济、产业的联系不密切。要使我国工程教育适应经济、社会的发展,培养更多优秀的工程技术人员,我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材,目的在于改革传统的高等工程教育教材,建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材,满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是:

1. 保证基础, 确保后劲

科技的发展,要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此,从内容安排上,保证学生有较厚实的基础,满足本科教学的基本要求,使学生日后具有较强的发展后劲。

2. 突出特色，强化应用

围绕培养目标，以工程应用为背景，通过理论与工程实际相结合，构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针：知识新、结构新、重应用。教材内容的要求概括为：“精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上，挑选出最基本的内容、方法及典型应用；“新”指将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容，以适应科学技术发展的需要。妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进。用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容，并将这些按新的教学系统重新组织；“广”指在保持本学科基本体系下，处理好与相邻以及交叉学科的关系；“用”指注重理论与实际融会贯通，特别是注入工程意识，包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

3. 抓住重点，合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课（专业基础课、专业课）教材的建设，并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设，力争做好与之配套的电子教材的建设。

4. 精选编者，确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验，又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务，以确保教材质量。

我们相信，本套系列教材的出版，对我国工程应用型人才培养质量的提高，必将产生积极作用，为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光，高瞻远瞩，及时提出并组织编写这套系列教材，他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作，并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件，在此深表衷心感谢！

编委会主任 刘国荣教授
湖南工程学院院长

前 言

检测技术是信息技术的核心技术之一。随着微型计算机技术的发展及其在工业过程检测和控制中的广泛应用,检测技术发生了深刻的变化,目前已进入了智能化系统阶段。为了适应现代科学技术发展的需要,必须对检测技术课程的内容作相应的扩充和更新,因此对于应用型本科院校和高职高专的学生来说,了解及熟悉检测技术的发展概况、工作原理及设计思想和设计方法是十分必要的。

本书是在一线教师多年教学和科研实践的基础上编写而成的,它以信息的获取(传感器)、信息的转换(检测电路)、信息的处理(微机技术)和显示(仪表)为线索,概要地介绍了检测技术的基础理论、各类传感器的原理和特性、数据采集及处理技术、抗干扰技术,它们之间既有独立性也有相关性。教材使用过程中,可以根据不同的教学要求进行内容的裁剪,也可以在某些知识点上进行扩充,以适应不同层次的教学要求。

竭力将计算机技术与检测技术融为一体是本书的特色。意图为现代自动检测系统的设计、调试和应用打下充实的基础。

本书不仅可作为普通本科院校本科生的教材,还可作高职高专的教材或教学参考书,对从事仪器仪表、自动控制及测控工作的工程技术人员及有关科技工作者也都具有参考价值。

本书由淮阴工学院卜云峰担任主编,南京工程学院乐建华和淮阴工学院张处武担任副主编,黑龙江工程学院康维新担任主审。编写分工如下:卜云峰(第一章、第十五章),乐建华(第十一章、第十三章、第十四章),张处武、李洪海(第七章),侯志伟(第十六章),李华(第二章、第三章、第四章、第十章、第十二章),李华、李洪海(第六章),李洪海(第五章、第八章、第九章)。卜云峰、张处武对全书进行了统稿。由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 12 月

目 录

序	
前言	
第一章 检测技术理论基础	1
第一节 检测技术概论	1
第二节 检测系统的测量误差	4
第三节 检测系统的测量方法	8
第四节 检测系统的基本特性	10
第五节 理想的检测系统	12
思考题与练习题	13
第二章 电阻应变式传感器	14
第一节 电阻应变式传感器的工作原理及结构	14
第二节 电阻应变式传感器的测量电路及补偿	17
第三节 电阻应变片式传感器的应用	21
思考题与练习题	26
第三章 电容式传感器	28
第一节 电容式传感器的工作原理及结构形式	28
第二节 电容式传感器的性能及改善措施	30
第三节 电容式传感器的测量电路	34
第四节 电容式传感器的应用	39
思考题与练习题	41
第四章 电感式传感器	42
第一节 自感式传感器	42
第二节 互感式传感器(差动变压器)	51
第三节 涡流式传感器	59
思考题与练习题	67
第五章 压电式传感器	70
第一节 压电式传感器的工作原理	70
第二节 压电材料	74
第三节 压电元件的常用结构形式	75
第四节 压电式传感器的等效电路	76
第五节 压电式传感器的测量电路	77
第六节 压电式传感器的应用	80
思考题与练习题	82
第六章 光电传感器	84
第一节 光电效应及光电元件	84
第二节 光的产生和常见光源	92
第三节 光电传感器的类型及应用	94
第四节 CCD 图像传感器概述	98
第五节 电荷耦合器件(CCD)	99
第六节 CCD 的主要特性	101
第七节 CCD 应用举例	103
思考题与练习题	104
第七章 热电式传感器	107
第一节 概述	107
第二节 热电偶	108
第三节 热电阻传感器	120
第四节 半导体温度传感器	126
思考题与练习题	130
第八章 气敏传感器	133
第一节 概述	133
第二节 半导体气敏传感器	134
第三节 气敏传感器的应用	138
思考题与练习题	142
第九章 湿敏传感器	143
第一节 概述	143
第二节 湿敏传感器的主要参数	145
第三节 湿敏元件	147
第四节 湿敏传感器的应用	150
思考题与练习题	154
第十章 磁场传感器	155
第一节 霍尔传感器	155
第二节 磁敏电阻	163
第三节 磁敏二极管和磁敏三极管	165
思考题与练习题	167
第十一章 数字式传感器	168
第一节 光栅传感器	168
第二节 旋转角编码器	176
第三节 感应同步器	177
第四节 磁栅	184

思考题与练习题	187	第十五章 自动化仪表	229
第十二章 新型传感器	189	第一节 自动化仪表概述	229
第一节 光纤传感器	189	第二节 自动化仪表的设计思想和研制方法	233
第二节 其他新型传感器	191	第三节 自动化仪表的监控程序设计	239
第十三章 传感器的标定与校准	195	第四节 自动化仪表中的干扰抑制技术	245
第一节 静态标定	195	思考题与练习题	252
第二节 动态标定	197	第十六章 虚拟仪器	253
第三节 传感器的校准	198	第一节 概述	253
思考题与练习题	198	第二节 虚拟仪器硬件构成	256
第十四章 检测信号的加工调理	199	第三节 虚拟仪器软件的开发平台及应用	257
第一节 检测信号的放大	199	第四节 虚拟仪器的应用	259
第二节 滤波	207	思考题与练习题	260
第三节 非线性校正	217	参考文献	261
第四节 信号变换	224		
思考题与练习题	228		

第一章 检测技术理论基础

检测技术是人类认识自然、改造自然的重要工具和手段，检测技术广泛应用于日常生活、商品流通、机械制造、交通运输、电子信息、军事技术以及宇宙科学等各个领域。随着科学技术的发展，对检测技术、检测工具、检测方法、检测理论等提出的要求越来越高。检测技术作为自动化科学的一个重要分支，已经成为一门实用型、综合型的新兴边缘学科。

第一节 检测技术概论

一、检测技术与自动化技术的关系

由于计算机在检测技术中的应用，使得检测手段、检测方法和检测设备发生了根本性的变化，形成了自动化、实时化和智能化的计算机检测系统，从而在检测的准确性、快速性、可靠性和抗干扰等方面得到了明显的提高，大大丰富了检测技术所包含的内容，扩大了检测技术的应用范围。

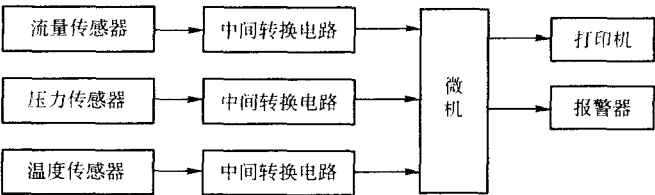


图 1-1 液压元件检测实验台系统的组成框图

在实现自动化过程中，检测技术和装置是自动化系统的“感觉器官”，因为只有知道生产状态和工艺参数的条件下才能进行自动控制。为了阐明检测技术与自动化系统的关系，下面以实际应用为例进行说明。图 1-1 和图 1-2 分别给出了液压元件检测实验台和电炉控制系统的组成框图。图 1-1 的检测对象是压力、流量和温度，采用 3 种相应的传感器和中间转换电路进行检测。检测系统每隔一段时间间隔对检测数据进行收集和处理，处理后的数据实时显示在显示器上，还可通过打印机进行打印，若温度等参数超限即报警。图 1-2 电炉控制系统的控制对象是电炉，为使电炉内的温度按预先设定的规律变化，微机通过电炉内的温度传感器采集信息，根据设定的温度时间曲线变化要求进行运算，运算结果送给加热器控制装置，以控制加热器产生最佳热量，从而完成控制操作。同时，可对电炉内的温度进行实时显示和绘图等。显然，上述两种系统是有区别的，图 1-1 属于开环工作的检测系统，图 1-2 则属于闭环工作的检测与控制系统。

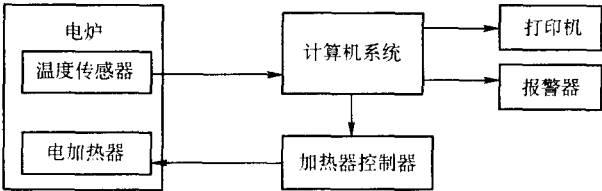


图 1-2 电炉控制系统的组成框图

一般的检测与控制系统如图 1-3 所示。

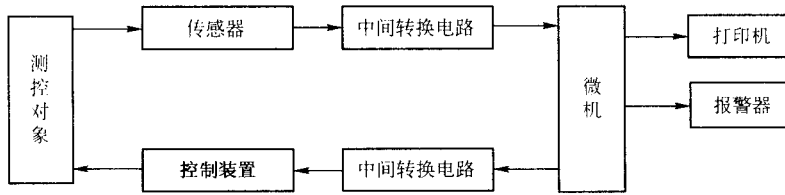


图 1-3 一般的检测与控制系统

由于检测与控制的对象常常为非电量，需要通过传感器转换为电量，再通过中间转换电路对传感器输出信号进行处理与转换，使它能够被微机所接受。微机对信号数据处理后，送给控制电路产生相应的控制信号去控制执行器的工作。执行器的作用是将控制电路的电信号转变为各种控制动作，以实现对被控对象的控制。此外，系统还将检测结果送往显示器显示或送往打印机打印，供操作人员现场监视和事后分析。当检测结果异常时，还可启动报警器报警。

由此可见，在检测与控制系统中，传感器与检测电路用于信息的提取、转换与处理，是整个系统的基础。如果它们性能不佳，就难以确保整个系统的性能优良。检测技术是以研究检测与控制系统中信息的提取、转换及处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。该学科的内容涉及传感器技术、误差理论、测试计量技术、抗干扰技术以及电量间的相互转换技术等。如何提高检测与控制系统的检测分辨率、精度、稳定性和可靠性是本门技术的研究方向。

二、检测技术的应用范围

（一）工业生产

在工业生产中，检测技术在生产过程自动化、运行数据采集、质量检查与控制、故障诊断等方面得到广泛的应用，例如，根据设备的频谱，能够发现设备潜在的问题并进行相应的预防性维修，使潜在故障得到及时排除。在生产铝合金的过程中，借助检测技术可选出正确的配方，对铝合金成品进行分析，也可根据加料计算，对配方进行合理的调整。

（二）能源工业

检测技术在能源技术领域中得到广泛应用。例如，在能源分配领域可对能源进行最佳分配计算，它可以根据精确测到的动态负荷进行计算，也可以利用检测技术对尖峰负荷进行监视，采用这种措施可以达到合理利用能源的目的。

（三）交通管理

先进的交通管理系统可以对车流和人流进行监测，使红绿灯的交替时间间隔根据实际情况改变，实现车辆和行人的平均等待时间最短，从而达到运行最佳化。据报道：上海已研制出汽车自主导航系统，只要在带有电子地图的液晶显示屏上输入目的地，地图上就会显示出一条最佳路线。车辆在行驶中若前方路堵，该系统会自动提示绕道，并立即提供一条最优路径；若发生意外事故，还可自动报警求救。

（四）军事领域

目前，世界上成功地研制出了电子哨兵，它配有多种传感器和在黑暗中监视物体运动的

远红外摄像机,执勤时可提供 24 小时图像监视和周围环境信息,能够较好地完成警戒任务,为未来战争解决了站岗放哨的难题。

三、检测技术的发展趋势

当今时代是信息化的时代,各个领域常以信息的获取与利用为中心。在现代工业生产、仪器仪表高度自动化和信息管理现代化的过程中,已大量涌现出以计算机为核心的信息处理与过程控制相结合的实用检测系统。伴随着这种系统的发展,一些先进技术,如信息传感技术、数据处理技术及计算机控制技术正在飞速发展并不断变革。综合其发展概况,主要有以下几个发展趋势。

(一) 集成化与综合化

电子测量仪器、自动化仪表、智能检测系统、数据采集和控制系统过去分属于不同的学科领域,并各自独立发展。由于生产自动化的需求,使它们在发展中相互靠近,功能相互覆盖,差异缩小,体现为一种“信息流”综合管理与控制系统。

(二) 多功能化与智能化

智能化仪表或系统能随外界条件的变化,具有确定正确行动的能力。例如,智能化检测仪表能在被测参数变化时,自动选择测量方案,进行自校正、自补偿、自检测、自诊断,还能进行远程设定、状态组合、信息存储、网络连接等,以获取最佳的测试结果。如采用实时动态建模技术、在线辨识技术等,根据专家系统中知识库、决策控制模式和控制策略,可取得优良的控制性能,能解决常规控制中不易实现的问题。

(三) 系统化及标准化

现代检测的任务,更多地涉及到系统的特征。所谓系统是指若干个相互间具有内在关联的要素构成的一个整体,由它来完成规定的功能,以达到某一特定的目标。例如作为采集检测与控制用的前端机或仪表,它需要与生产设备的主机、辅机合成一体,相互建立通信联系。由此形成分布式数据采集系统,以适应系统开放、复杂工程及大系统的需要。在向系统化发展的同时,还涉及系统部件接口的标准化、系列化与模块化,以便形成通用的整体。

(四) 仪器虚拟化

随着微电子技术及计算机技术的飞速发展,检测技术与计算机深层次的结合正引起检测仪器领域里一场新的革命,一种全新的仪器结构概念导致新一代仪器——虚拟仪器的出现并走向实用。虚拟仪器 VI (Virtual Instrument) 是随着计算机技术和现代测量技术的发展而产生的一种新型高科技产品,代表着当今仪器发展的新方向。VI 是利用现有的微型计算机,加上特殊设计的仪器硬件和专用软件,形成既有普通仪器的基本功能,又有一般仪器所没有的特殊功能的新型计算机仪器系统。VI 的主要工作是把传统仪器的控制面板移植到普通计算机上,利用计算机的资源,实现相关的测控需求。性能价格比高,可广泛的应用于试验、科研、生产、军工等方面的检测与控制。

(五) 网络化

将一个智能检测和控制系统接入计算机网络,无疑会进一步增强其功能和活力。例如,一个设备工程师出差在外地的时候,突然接到厂里的电话,说正在监测的一台机器出现了异常声响和振动,亟待解决。他打开随身带的计算机,通过互联网与另一城市的专家交换了看法,在 20min 内解决了问题。因此,网络化也是智能检测技术的一个重要发展方向。

第二节 检测系统的测量误差

一、测量误差的基本概念

1. 误差公理

在实际测量中, 由于测量设备的精确度有限、测量方法的不完善、测量程序的不规范及测量环境因素的影响, 都会造成测量结果与被测量的真实值不一致。测量结果与被测量真实值之差就是测量误差。它反映了测量质量的好坏, 所有测量都具有误差, 误差自始至终存在于所有科学实验和检测之中, 这就是误差公理。人们研究测量误差的目的就是寻找产生误差的原因, 认识误差的规律, 找出减小误差的途径与方法, 以求获得尽可能接近真值的测量结果。测量的质量应与测量的目的相联系, 简单追求愈准愈好的作法是不可取的, 要有技术与经济兼顾的意识。

2. 真值

被测量本身所具有的真实值称之为真值。真值是一个理想的概念。因此, 为了研究和计算方便, 在实际工作中, 常把下面的量规定为真值。

(1) 理论真值 例如, 平面三角形的内角和为 180° 。

(2) 约定真值 是指由国家设立的各种尽可能维持不变的实物标准 (或基准), 以法令的形式指定其所体现的量值作为计量单位的指定值。例如, 在标准条件下, 水的冰点和沸点分别是 0°C 和 100°C 。

(3) 相对真值 实际测量中, 不可能都直接与国家基准相比较, 所以国家通过一系列的各级实物计量标准构成量值传递网, 将国家基准所体现的计量单位逐级比较传递到日常工作仪器或量具上去。在每一级的比较中, 都以上一级标准所体现的值当作准确无误的值, 通常称为相对真值。

二、测量误差的分类

(一) 测量误差的分析

测量误差是不可避免的, 下面分别从误差的表示方法、误差出现的规律、误差的来源、被测量随时间变化的速度、使用条件及误差与被测量的关系等方面来分析测量误差。

1. 按表示方法分析

按表示方法分析有绝对误差、相对误差和容许误差之分。

(1) 绝对误差 绝对误差定义为测量值与被测量真值之差, 即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-1)$$

式中 Δ ——绝对误差;

A_x ——测量值;

A_0 ——真值。

对于绝对误差, 应注意下面几个特点:

1) 绝对误差是有单位的量, 其单位与测量值和真值相同。

2) 绝对误差是有正负符号的量, 其符号表示出测量值与真值的大小关系, 若测量值比

真值大，则绝对误差为正值，反之为负值。

3) 测量值与真值之间的偏离程度和方向通过绝对误差来体现，但仅用绝对误差通常不能说明测量质量的好坏。例如，人体体温在 37°C 左右，若测量绝对误差为 1°C ，这样的测量质量人们无法接受，如果测量 1400°C 左右的炉温，绝对误差能保持 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，这样的测量质量就令人满意了。因此，为了表明测量结果的准确程度，需用相对误差来表示。

(2) 相对误差 被测量的绝对误差与真值之比，相对误差用来说明测量精度的高低，但在实际使用仪表测量时，一般不宜测量过小的量，而多用于接近上限的量，如 $2/3$ 的量程处，因此，用引用误差来评价仪表的质量更科学。

(3) 引用误差 测量的绝对误差与仪表的满量程之比，称为仪表的引用误差。

(4) 满度引用误差 满度引用误差定义为仪器量程内最大绝对误差值与测量仪器满度值的百分比值。

满度引用误差也叫做满度误差，通过满度误差实际上给出了仪表各量程内绝对误差的最大值，是仪表的主要质量指标，它应由制造厂家给出，仪表出厂检验时，不论指针在刻度的那一点，其误差都不允许超过满度误差。

我国电工仪表中常用的仪表精度等级 S 就是按满度误差分级的，有下列七种：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 七级。显然，仪表精度的数字愈小，精度愈高。例如，某电压表 $S=2.5$ ，即表明它的精度等级为 2.5 级，也就是它的满度误差不超过 2.5%，若电压表量程为 $0\sim 100\text{V}$ ，则最大绝对误差不超过 $\pm 2.5\text{V}$ 。

另外，使测量值尽可能接近满度值的结论，只适合于正向刻度的一般电压表、电流表等类型的仪表，而对于测量电阻的普通型欧姆表，上述结论并不成立，因为这类欧姆表是反向刻度，且刻度是非线性的。此种情况下测量值与欧姆表的中间值接近时，测量结果的准确度最高。

在实际测量操作时，一般应先在大量程下测得被测量的大致数值，而后选择合适的量程再进行测量，以尽可能减小相对误差。

(5) 容许误差 容许误差是指根据技术条件的要求，规定测量仪器误差不应超过的最大范围，有时就称为仪器误差。

2. 按误差出现的规律分析

(1) 系统误差 对同一被测量进行多次重复测量时，若误差固定不变或按照一定规律变化，则把这种误差称为系统误差。系统误差主要由以下几方面因素引起：材料、零部件及工艺缺陷；环境温度、湿度、压力的变化以及其他外界干扰等。其变化规律服从某种已知函数，它表明了一个测量结果偏离真值的程度，系统误差越小，测量就越准确。

(2) 随机误差 对同一被测量进行多次重复测量时，若误差的大小不可预知地随机变化，则把这种误差称为随机误差。随机误差是由很多复杂因素的微小变化的总和所引起的，一般无法控制。但是随机误差在一定条件下服从统计规律，因此经过多次测量后，对其总和可以用统计规律来描述，可以从理论上估计对测量结果的影响。

随机误差表现了测量结果的分散性，在误差理论中常用精密度来表明随机误差的大小。随机误差越小，精密度越高。如果某一测量结果的随机误差和系统误差均很小，则表明该测量既精密又正确，简称精确。

(3) 粗大误差 测量结果明显地偏离其实际值所对应的误差，称为粗大误差或称为疏忽

误差。这类误差是由于测量者疏忽大意或环境的突然变化而引起的。在测量及数据处理中,如果发现某次测量结果所对应的误差特别大或特别小时,应认真判断误差是否属于粗大误差,如果属于粗大误差,该值应剔除不用。

3. 按误差来源分析

(1) 工具误差 工具误差是指由于因测量工具本身不完善引起的误差,主要包括读数误差、内部噪声引起的误差两方面因素。

(2) 方法误差 方法误差是指测量时方法不完善,所依据的理论不严密以及对被测量定义不明确等诸因素所产生的误差,有时也称为理论误差。

4. 按照被测量随时间变化的速度分析

(1) 静态误差 静态误差是指在被测量随时间变化很慢的过程中,被测量随时间变化很缓慢或基本不变时的测量误差。

(2) 动态误差 动态误差是指在被测量随时间变化很快的过程中,测量所产生的附加误差。动态误差是由于有惯性、滞后,因而不能让输入信号的所有成分全部通过,或者输入信号中不同频率成分通过时受到不同程度衰减时引起的。

5. 按使用条件分析

(1) 基本误差 基本误差是指测量系统在规定的标准条件下使用时所产生的误差。所谓标准条件,一般是测试系统在实验室标定刻度时所保持的工作条件,如电源电压 $220(1 \pm 5\%)$ V, 温度 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 湿度小于 80% 等。

基本误差是指测试系统在额定条件下工作时所具有的误差,测试系统的精确度是由基本误差决定的。

(2) 附加误差 当使用条件偏离规定的标准条件时,除基本误差外还会产生附加误差。例如,由于温度超过标准引起的温度附加误差以及使用电压的非标准而引起的电源附加误差等。

(二) 误差的处理

误差是不可避免的,但应想办法消除或减小测量误差。下面将分别从系统误差、随机误差及粗大误差三方面来考虑如何消除或减小误差。

1. 系统误差的消除或减小

(1) 系统误差的类型 系统误差是一种固定不便的或按一定规律变化的误差。常见的有下面几种类型:

1) 固定不变的系统误差:在重复测量中,绝对值固定不变的误差。

2) 线性变化的系统误差:随着测量次数或时间的增加而增加(或减少)的误差。例如,电池的电压或电流随使用时间的增加而逐步降低而引起的误差。

3) 变化规律复杂的系统误差:变化规律无法用简单的数字解析式表示的误差。

产生系统误差的来源多种多样,因此要减小系统误差只能根据不同的目的,对测量仪器测量误差的仪表、测量条件、测量方法和步骤进行全面分析,以发现系统误差,进而分析系统误差,然后采用相应的措施将系统误差消除或减弱到与测量要求相适应的程度。

(2) 系统误差的减小和消除方法

1) 从产生系统误差的来源考虑:从产生系统误差的来源考虑是减小系统误差的最基本的方法。该方法要求对整个测量过程有一个全面仔细的分析,弄清楚可能产生系统误差的各

种因素，然后在测量过程中予以消除。产生系统误差的来源多种多样，因此要消除系统误差只能根据不同的测量目的，对测量仪器从根源上加以消除。具体地说：选择准确度等级高的仪器设备以消除仪器的基本误差；使仪器设备工作在规定条件下；使用正确调零、预热以消除仪器设备的附加误差；选择合理的测量方法，设计正确的测量步骤以消除方法误差和理论误差；提高测量人员的测量素质，改善测量条件（选用智能化、数字化仪器仪表等）以消除人员误差。

2) 利用修正的方法消除：利用修正的方法是消除或减弱系统误差的常用方法，该方法在智能化仪表中得到了广泛的应用。所谓修正的方法就是在测量前或测量过程中，求取某类误差的修正值，而在测量的数据处理过程中手动或自动地将测量读数或结果与修正值相加，从测量读数或结果中消除或减弱该类系统误差。

3) 利用特殊的测量方法消除：系统误差的特点是大小、方向相对不变，具有可预见性，所以可选用特殊的测量方法予以消除。

① 替代法。替代法是比较测量法的一种，它是先将被测量 A_x 接在测量装置上，调节测量装置处于某一状态，然后用与被测量相同的同类标准量 A_N 代替 A_x ，调节标准量 A_N ，使测量装置恢复原来的状态，于是被测量就等于调整后的标准量，即 $A_N = A_x$ 。

② 差值法。差值法就是测量出被测量 A_x 与标准量 A_N 的差值 δ ，即 $\delta = A_x - A_N$ ，利用 $A_x = A_N + \delta$ 求出被测量。显然，测量结果的准确度由标准量具的准确度和测量差值的准确度决定，且差值 δ 越小，测量差值仪表的误差对测量结果的影响就越小。当差值 δ 等于零时，测量结果的准确度与测量仪表的准确度无关，而仅和标准量具的准确度有关。

③ 正、负误差补偿法。正、负误差补偿法就是在不同的测量条件下，对被测量测量两次，使其中一次测量结果的误差为正，而使另一次测量结果的误差为负，取两次测量结果的平均值作为测量结果。显然，对于大小恒定的系统误差经这样的处理即可被消除。

④ 对称观测法。对称观测法是消除测量系统误差的有效方法。所谓对称观测法就是在测量过程中，合理设计测量步骤以获取对称的数据，配以相应的数据处理程序，以得到与该影响无关的测量结果，从而消除系统误差。消除或减小系统误差的方法还有很多，这里就不再一一列举叙述了。

2. 随机误差的消除或减小

随机误差就单次测量而言是无规律的，其大小、方向不可预知，但当测量次数足够多时，随机误差的总体服从统计学规律，它具有下列特性：

- (1) 有界性 即随机误差的绝对值不超过一定的界限。
- (2) 单峰性 即绝对值小的随机误差比绝对值大的随机误差出现的概率大。
- (3) 对称性 等值反号的随机误差出现的概率接近相等。
- (4) 抵偿性 当测量次数无穷时，随机误差的代数和趋于零。

根据随机误差的特性，经过多次测量后，对其总和可以用统计规律来描述，可以从理论上估计对测量结果的影响。

3. 粗大误差

含有粗大误差的测量数据属于可疑值或异常值，应该予以剔除，以减少和避免粗大误差的出现。判断粗大误差可以从定性和定量两方面来考虑。