

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



JIANCE JISHU JI YIBIAO

# 检测技术及仪表

马宏忠 主 编  
王 平 王亦红 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



JIANCE JISHU JI YIBIAO

# 检测技术及仪表

主 编 马宏忠  
副主编 王 平 王亦红  
编 写 张卫存  
主 审 滕召胜



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分 11 章, 主要内容包括检测技术基础、测量误差及其分析、测量系统的基本特性、常用测量仪表、电气量的测量、传感器及其应用、信号的检测与变换、信号分析与处理、多传感器信息融合技术、现代测试系统、检测电路与测控系统实例等。

本书可作为普通高等教育电气信息类、仪器仪表类、能源与动力类、机械类等相关专业的教学用书, 也可作为有关工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

检测技术及仪表/马宏忠主编. —北京: 中国电力出版社, 2010. 8  
普通高等教育“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-5123-0232-7

I. ①检… II. ①马… III. ①自动检测—高等学校—教材②检测  
仪表—高等学校—教材 IV. ①TP274 ②TP216

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 140390 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 10 月第一版 2010 年 10 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 530 千字  
定价 35.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

当前关于检测技术与仪表类的教材并不少，其共性是采用大量篇幅分析传感器的结构原理，这对于以传感器为主要研究方向的学生是非常适合的。但对于电气信息类、能源与动力类、机械类各专业以及仪器仪表类专业中不以传感器为主要研究方向的学生，因为学时有限，教学重点应放在各种电参量、非电参量的检测与转换方法方面，让学生掌握怎样测量这些参量，怎样对被测量进行分析处理等。因此，本教材的重点是各种电参量、非电参量的测量方法，在此基础上，适当介绍测量仪表、检测系统的结构与设计。在传感器方面，将重点放在传感器的基本原理、外部特性及应用方面，而大幅度弱化传感器的内部结构、过细的理论、内部数学关系等内容。所以，本教材更适用于电气信息类、能源与动力类、机械类等各专业学生以及仪器仪表类专业中不以传感器为主要研究方向的学生使用。即使以传感器为特色或研究方向的学生，往往有专门的“传感器原理与应用”或“传感器技术”类课程，本教材重点讲述各种参量的测量方法，具有互补性，也是非常适合的。

全书内容包括检测技术基础、测量误差及其分析、测量系统的基本特性、常用测量仪表、电气量的测量、传感器及其应用、信号的检测与变换、信号分析与处理、多传感器信息融合技术、现代测试系统、检测电路与测控系统实例等 11 章。其中，前 3 章主要讲述检测技术与仪表的基础性内容，包括检测技术基础、测量误差及其分析、测量系统的基本特性；第 4、5 章主要针对电气量的测量展开，包括常用测量仪表、电气量的测量方法；第 6、7、8 章主要针对非电量的检测与转换，包括传感器及其应用、信号的检测与变换、信号分析与处理（有些内容是电量与非电量测量分析共性的）；第 9、10 章重点讲述检测系统中的新技术，包括多传感器信息融合技术、现代测试系统；第 11 章以两个类型的实例分析检测系统的设计方法。不同专业学生可以根据专业需要和学时选择讲授内容，部分内容如果有些专业在前面课程已学过，则可以跳过。

本书中加“※”的内容为选讲内容，主要供学生课外阅读。

除了注重电气量、非电量的检测与转换方法，适当弱化传感器外，本教材还具有以下特色：①有明显专业特色，主要针对电气信息类、能源与动力类、机械类以及不以传感器为研究方向的仪器仪表类专业学生编写；②模块化结构，各章内容有相对的独立性，各专业可根据需要选择讲授内容及安排各章学时；③注重理论与实际的结合，作为专业课程，特别注重实用性；④注重内容的综合性，该教材内容涉及检测技术与转换技术、电气测试技术、传感器技术、检测系统设计等几门课程的相关内容，根据本教材的需要，将它们有机地整合；⑤注重新知识、新技术、新方法的纳入，比如多传感器信息融合技术、现代测试系统等；

⑥叙述由浅入深、力求通俗易懂。

本书由马宏忠教授任主编。其中第1章、第4章、第5章、第6章、第7章、第8章和第11章由马宏忠教授编写，第2章、第3章和第9章由王亦红副教授编写，第10章由王平副教授负责编写。另外孙黎霞、张卫存、张志艳、方瑞明等老师等也参与了部分内容的编写整理工作，在本书校对过程中濮岚、陈琳、涂昊曦等提供了大量的帮助。全书最后由马宏忠教授统稿。

全书承蒙湖南大学滕召胜教授审阅，并提出了宝贵的修改意见与建议；在本书的编写过程中参阅了一些国内外文献；不少兄弟院校的教师为本书的编写提出了许多宝贵的意见；本书的立项和出版得到教育部高教司和中国电力出版社的大力支持和资助，在此一并表示衷心感谢。

本书已在河海大学试用，根据使用情况对书稿内容进行了适当调整。限于笔者水平和实践经验，而且许多地方尚属于教学改革探索，所以书中难免有不足或有待改进之处，尚希读者不吝指正。联系方式：马宏忠 hhumhz@163.com。

编者

2009年10月于南京

# 目 录

前言

<b>第 1 章 检测技术基础</b> .....	1
1.1 检测技术概述 .....	1
1.2 检测仪表与检测系统 .....	4
1.3 检测与传感技术的发展 .....	6
<b>第 2 章 测量误差及其分析</b> .....	8
2.1 测量误差基本概念 .....	8
2.2 测量误差的分类.....	11
2.3 系统误差的分析及处理.....	12
2.4 随机误差的估计与分析.....	15
2.5 粗大误差的处理.....	19
2.6 有效数字的处理.....	20
<b>第 3 章 测量系统的基本特性</b> .....	22
3.1 概述.....	22
3.2 测量系统的静态特性.....	22
3.3 测量系统的动态特性.....	27
<b>第 4 章 常用测量仪表</b> .....	34
4.1 磁电系仪表.....	34
4.2 万用电表.....	43
4.3 电磁系仪表.....	52
4.4 电动系仪表.....	59
4.5 感应系仪表:电能表 .....	73
*4.6 静电系仪表 .....	81
4.7 电桥.....	83
4.8 电阻表、兆欧表、接地电阻测试仪.....	87
4.9 功率因数表、频率表.....	92
<b>第 5 章 电气量的测量</b> .....	97
5.1 仪用互感器.....	97
5.2 电压与电流的测量 .....	106
5.3 功率和电能的测量 .....	111
5.4 功率因数(相位)和频率的测量 .....	116
5.5 电阻的测量 .....	117
5.6 电感、电容的测量.....	120
<b>第 6 章 传感器及其应用</b> .....	126
6.1 传感器的基础知识 .....	126
6.2 温度传感器 .....	135



6.3	应变式传感器与力的测量	142
6.4	振动传感器	146
6.5	电量传感器	157
6.6	测磁传感器	162
6.7	气体传感器	165
6.8	光纤传感器	168
6.9	光电式传感器	172
6.10	其他主要传感器	178
<b>第7章</b>	<b>信号的检测与变换</b>	<b>181</b>
7.1	概述	181
7.2	模拟信号的数字化处理	185
7.3	检测信号的放大	192
7.4	多路开关与采样保持器	197
7.5	A/D转换器	201
7.6	采样数据的预处理	207
*7.7	数据采集系统的抗干扰技术	216
<b>第8章</b>	<b>信号分析与处理</b>	<b>238</b>
8.1	信号的分类与描述	238
8.2	信号的时域分析	241
8.3	相关分析	243
8.4	信号的频域分析	246
*8.5	功率谱密度	257
8.6	倒频谱分析	258
*8.7	频率细化分析简介	260
*8.8	小波变换	261
<b>第9章</b>	<b>多传感器信息融合技术</b>	<b>274</b>
9.1	引言	274
9.2	多传感器信息融合的基本原理与模型	274
9.3	信息融合的方法	281
9.4	传感器信息融合的应用介绍	285
<b>第10章</b>	<b>现代测试系统</b>	<b>288</b>
10.1	现代测试系统概述	288
10.2	总线技术	291
10.3	虚拟仪器及其开发环境	305
10.4	网络化测量技术	315
<b>第11章</b>	<b>检测电路与测控系统实例</b>	<b>326</b>
11.1	智能温度测量控制仪的设计	326
11.2	基于AD73360的电力参数测量系统	333
	<b>参考文献</b>	<b>338</b>

## 第1章 检测技术基础

人们的工、农业生产和日常生活均离不开检测技术。一些科学研究也往往要进行大量复杂的检测与分析。检测水平的高低被公认为评价一个国家科学技术和现代化水平的重要标志之一。

面对检测对象,检测技术首先应解决检测对象需要用什么样的检测原理、采取什么样的检测方法,然后再考虑使用什么技术工具(检测的物质手段)去进行检测。

检测仪表是进行检测所需要的技术工具的总称,也就是说,检测仪表是实现检测的物质手段。广义概念下的检测仪表包括敏感元件、传感器、变换器、运算器、显示器、数据处理装置等。检测仪表性能好坏直接影响检测结果的可信度。

### 1.1 检测技术概述

#### 1.1.1 检测技术的基本概念

首先我们明确关于检测及相近的几个概念。

##### 1. 检查

检查指的是人类利用自己的“五感”(看、听、嗅、尝、触)直接地(不借助仪器仪表)、有目的地对各种客观事物进行反映的过程。例如,人们用眼睛检查锅炉的火焰是白亮还是红暗,用手触摸振动大小等。其特点如下:

- (1) 检查手段主要是靠人的“五感”。
- (2) 检出的结果基本上没有量值(数值和计量单位乘积)的概念。

##### 2. 测量

测量是指为了确定客观事物的量值而进行的一组实验操作。测量的条件如下:

- (1) 可测性:被测的量必须是现实条件下可能测到的量。
- (2) 可量化:量值的单位必须是法定计量单位或法定计量单位的导出单位。

##### 3. 检测

检测是“检查”与“测量”的总称。其比单纯的检查结果增加了量值的部分。

为了和监测有所区别,“检测”主要是针对停用中的对象(如设备)或维修解体中的对象(设备)所进行的检查与测量。

##### 4. 监测

监测是指对运行中的对象的某些状态量进行定期地或连续地测量,并以测出的量值作为设备评价的依据。

比较可见,我们习惯上所讲的检测与检查、测量、监测等是有区别的,对于检测,一般较普遍的说法是:检测技术是人们用实验的方法,借助于一定的仪器或设备,将被测量与同性质的单位标准量进行比较,并确定被测量对标准量的倍数,从而获得关于被测量的定量信息的过程。不过,人们习惯上往往将检测与测量不加以严格区分,统称为检测或测量。



检测过程主要包括下列三个阶段。

(1) 准备阶段：明确被检测量的性质及检测所要达到的目的，然后选定适当的检测方法和检测仪器。

(2) 检测阶段：建立检测仪器所必需的检测条件，慎重进行操作，认真记录检测数据。

(3) 数据处理阶段：根据记录的数据，考虑检测条件的实际情况，进行数据处理，以求得检测结果和检测误差。

检测结果可表示成数字、曲线或图形，但不论表现形式如何，均应包含数值、单位及误差，即应在表示出量值的同时注明检测误差数值或范围。

### 1.1.2 检测的常用方法

检测的具体方法是由被检测的种类、数值大小、准确度、检测速度、检测所需的条件，以及其他一系列因素决定的。无论是电气量还是非电量，均可以通过不同的方法来实现。

检测方法的分类形式很多，根据被检测对象的特点（在检测期间可以认为是恒定的量或是随时间变化的量）可分为静态检测和动态检测；根据检测条件可分为等精度检测和非等精度检测；根据检测元件是否与被测介质接触可分为接触式检测和非接触式检测；根据检测手续来分可分为直接检测、间接检测和在此两类方法的基础上形成的组合检测法；根据检测方式来分可分为直读式检测、零位式检测、微差式检测和替代式检测等。下面就根据常用的几种分类方法对检测方法进行研究。

#### 1. 按检测手续分类

按检测手续不同，检测方法可分为直接检测法、间接检测法和组合检测法。

##### (1) 直接检测法。

用事先标定好的检测仪表可直接读取被检测量的检测结果，不需要进行任何计算的检测方法称为直接检测。例如，利用电压表测量电压或利用温度表测量温度等都属于直接测量。直接检测的特点是检测的数据就是被检测量本身的值，比较直观。同时它具有方法简单、使用方便、响应迅速等优点，是电气测试中最常用的方法；缺点是检测精度往往不是很高。

##### (2) 间接检测法。

间接检测一般是在无法进行直接检测时采用，这就要求先对与被检测量有确定函数关系的几个参量进行检测，并将结果代入函数关系中，经过计算得到所需要的被检测物理量的值。例如，检测电功率时，根据  $P=UI$ ，分别对  $U$  和  $I$  进行直接检测，再计算出电功率  $P$ 。间接检测方法比较复杂，花费时间也比较长。间接检测法多在实验室中使用，在工程检测中很少用。

##### (3) 组合检测法（联立检测法）。

在应用仪表进行检测时，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，则称这样的检测为组合检测法（也称联立检测法）。在进行组合检测时，一般需要改变测试条件，才能获得一组联立方程所需要的数据。

例如，要检测标准线绕电阻温度系数  $\alpha$  和  $\beta$ ，以及  $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻值  $R_{20}$  时，可先测出在 3 种  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  温度下该标准电阻的阻值  $R_{t_1}$ 、 $R_{t_2}$  和  $R_{t_3}$ ，然后通过联立方程

$$R_{t_1} = R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]$$

$$R_{t_2} = R_{20} [1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]$$

$$R_{t_3} = R_{20} [1 + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2]$$

即可求得。

组合检测法检测结果的准确度较高。但在检测过程中，操作手续复杂，花费时间长，一般适合于科学实验中或某些特殊场合。

## 2. 按检测方式分类

按检测方式不同，检测方法可分为偏差式检测、零位式检测、微差式检测和替代式检测。

### (1) 偏差式检测（直读式检测）。

偏差式检测是在检测过程中根据仪表指针的位移（即偏差）决定被测物理量大小的检测方法。而作为单位的标准量具并不参与比较。为了读取被测物理量的值，这些仪表已经预先按被测物理量的单位刻度分度，因而实际上是被检测参量与量具之间的比较。例如，利用万用表检测电流、电压都属于这种检测方法。这种检测方法具有检测过程简单、迅速的优点，但检测结果的精确度较低，在工程检测方面得到广泛应用。

### (2) 零位式检测。

零位式检测是利用已知的标准去平衡或抵消被检测的作用，并用指零式仪表来检测系统的平衡状态，从而判定被测物理量等于已知标准量的方法。例如，用电位差计检测电动势属于零位式检测法，图 1-1-1 所示为电位差计的简化等效电路。在进行测量之前，应先调  $R_1$ ，将回路工作电流  $I$  校准；在测量时，要调整  $R$  的活动触点，使检流计  $G$  回零，这时流过表头的电流  $I_g$  为零，即是  $U_R = U_x$ ，这样，标准电压  $U_R$  的值就是表示被测未知电压值  $U_x$ 。

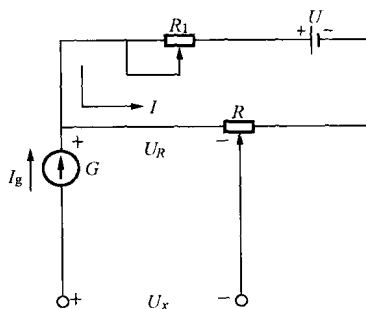


图 1-1-1 电位差计的简化等效电路

零位式检测又称补偿式检测法或平衡式检测法。在零位式检测中，标准量是检测系统的一部分，它提供一个可调节的标准量，被测物理量能够直接与标准量相比较，检测误差主要是标准量具的误差。另外，指零机构的灵敏度和准确度也会对检测结果产生一定的影响。因此，零位式检测可以获得比较高的精度。但这种方法检测过程比较复杂，花费时间也比较长，主要适用于缓慢变化的信号检测，在实验室中应用较普遍。

### (3) 微差式检测。

微差式检测是将直读式检测和零位式检测的优点综合起来的一种检测方法。其基本思路是将被检测的未知量与已知标准量进行比较，并取得差值，然后再使用偏差法进行检测。在微差式检测中，总是先设法使差值很小，然后就可以选用具有较高灵敏度的偏差式仪表检测，这样即使偏差式仪表的精度不高，最终结果也能够达到较高的精度。微差式检测的优点是反应速度快，检测精度高，特别适用于在线控制参数的检测。

### (4) 替代式检测。

替代式检测是将被测物理量与已知量先后两次接入同一检测装置，如果两次检测中检测装置的工作状态能保持相同，则认为替代前接在装置上的待测物理量与替代的已知标准量其数值完全相等。当然要做到完全替代，已知标准量最好是连续可调的，这样才能在替代时通过调节使检测装置的工作状态保持不变。

采用这种方法，如果前后两次检测相隔的时间很短，而且又是在同一地点进行，那么装置的内部特性和各种外界因素对检测所产生的影响可以认为完全相同或绝大部分相同，所以检测的误差极小，准确度几乎完全取决于标准量本身的误差。

### 3. 按检测接触关系分类

根据检测敏感元件与被测介质的接触关系，检测方法可分为接触式和非接触式两种。

#### (1) 接触式检测。

接触式检测法是将仪表的敏感元件与被测对象相接触。敏感元件从被测对象得到能量或被带动产生运动，使得敏感元件产生转换作用。如用热电偶、电感式测厚仪进行检测都是接触式检测。接触式检测法可用于静态或运动速度缓慢的物质参数检测。

#### (2) 非接触式。

非接触式检测法的敏感元件与被测对象之间无机械接触，当被测参数变化或被测物体的能量变化时，检测仪表辐射能量随之变化，根据仪表辐射能量变化的大小检测出被测物理量的值。这种方法适用于高速运动或环境恶劣场合的检测。

### 4. 按被检测对象变化的快慢分类

按检测对象变化的快慢，检测方法可分为静态检测和动态检测。

#### (1) 静态检测。

被测信号相对于仪表的动态特性变化缓慢，这种检测称为静态检测。静态检测系统的输入输出关系可用代数方程描述，其输出的检测结果是一个稳定值（或恒定值）。这种检测系统的响应速度远快于被测信号的变化速度。它适用于被测值不变化（如成品的尺寸）或变化缓慢（如室内温度）信号的检测。

#### (2) 动态检测。

动态检测是针对变化速度快或需要观察变化过程的被测信号进行的检测。为了保证结果真实可靠，需要检测系统具有足够的快速反应能力。被测信号和检测系统的输入输出关系一般都需要用含时间变量的微分方程描述；为保证被检测物理量具有足够的精度（在允许的误差范围内），需要较高的采样速率。如对电动机起动过程的检测、电力系统短路过程的检测等。

各种检测方法都有各自的特点。在选择检测方法时，应首先研究被检测对象本身的特性，检测的精度要求、环境条件及所具有的检测仪表（装置）、仪器等，经综合考虑，再确定采用哪种检测方法和选用哪些设备。

## 1.2 检测仪表与检测系统

### 1.2.1 检测仪表的分类

检测仪表是能确定所感受的被测变量大小的仪表。检测仪表可按下述几种方法进行分类。

#### 1. 按被检测物理量分类

按被检测物理量不同检测仪表可分为温度检测仪表、压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表、机械量检测仪表以及过程分析仪表等。

## 2. 按检测原理分类

按检测原理检测仪表可分为电容式、电磁式、压电式、光电式、超声波式和核辐射式检测仪表等。

## 3. 按输出信号分类

按输出信号形式不同,检测仪表可分为输出模拟信号的模拟式仪表、输出数字信号的数字式仪表,以及输出开关信号的检测开关(如振动式物位开关)等。

## 4. 按照检测结果是否就地显示分类

检测仪表可按照检测结果是否就地显示,分为集检测与显示功能于一身的一体化仪表和将检测结果转换为标准输出信号并远传至控制室集中显示的单元组合仪表。

## 5. 按照仪表是否含有微处理器分类

按照仪表是否含有微处理器,检测仪表可分为不带微处理器的常规仪表和以微处理器为核心的微机化仪表。后者的集成度越来越高,功能性越来越强,有的还具有一定的人工智能,常被称为智能化仪表。

目前,“虚拟仪器”已逐步得到应用。所谓“虚拟仪器”是在标准计算机的基础上加上一组软件或(和)硬件,充分利用最新的计算机技术来实现和扩展传统仪表的功能,使用者操作这台计算机,就像是在操作一台他自己设计的专用电子仪器一样。这套以软件为主体的系统能够享用普通计算机的各种计算、显示和通信功能。在基本硬件确定之后,就可以通过改变软件的方法来适应不同的需求,实现不同的功能。虚拟仪器彻底打破了传统仪表只能由生产厂家定义,用户无法改变的局面。用户可以自己设计、自己定义,通过改变软件来更新自己的仪表或检测系统,改变传统仪表功能单一或有些功能用不上的缺陷,从而节省开发、维护费用,减少开发专用检测系统的时间。

### 1.2.2 检测系统

检测系统是检测仪表的有机结合,对于比较简单的检测工作,只需要一台仪表就可以解决问题。但是,对于比较复杂、要求高的检测工作,往往需要使用多台检测仪表,并且按照一定规划将它们组合起来,构成一个有机整体——检测系统。在现代化的生产过程中和实验中,过程参数的检测都是自动进行的,即检测任务是由检测系统自动完成的。

图1-2-1所示为检测系统的原理结构框图。它由下列功能环节组成。

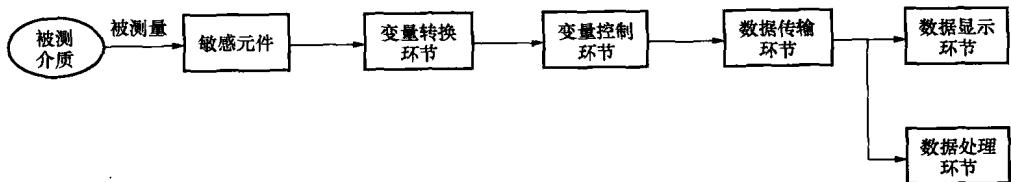


图 1-2-1 测量系统的原理结构框图

#### 1. 敏感元件

敏感元件是检测系统从被测对象获取特征信号的首要环节。它按照物理定律(如热电、光电、压电等)和某些转换规律,将被测量量转换成易于变换或处理的信号形式(一般大多数是电信号)。敏感元件可以是一个简单器件,也可以是复杂的传感器。

#### 2. 变量转换环节

对于检测系统,为了完成所要求的功能,需要将原始敏感元件的输出变量做进一步的变

换，即转换成更适于处理的变量并且要求它应当保存着原始信号中所包含的全部信息。完成这样功能的环节被称为变量转换环节。例如，将电阻、电感甚至电流等信号转换为电压信号。

### 3. 变量控制环节

为了完成对检测系统提出的任务，要求用某种方式“控制”以某种物理量表示的信号，即在保持变量物理性质不变的前提条件下，根据某种固定的规律仅仅改变变量的数值。完成这样功能的环节被称为变量控制环节。

### 4. 数据传输环节

当检测系统的几个功能环节实际上被物理地分隔开的时候，必须从一个地方向另一个地方传输数据。完成这种传输功能的环节被称为数据传输环节。

### 5. 数据显示环节

有关被检测的信息要想传输给人以完成监视、控制或分析的目的，就必须将信息变成人的感官能接受的形式。完成这样的转换机能的环节被称为数据显示环节。

数据显示主要有两大类形式：模拟显示（如指针显示、用记录笔在记录纸上等）、数字显示（包括数字显示、计算机图形显示等）。

### 6. 数据处理环节

检测系统要对检测所得数据进行数据处理。数据处理环节实质上是一台小型计算机。数据处理工作通常由机器自动完成，不需要人工进行繁琐的运算。

## 1.3 检测与传感技术的发展

### 1.3.1 检测与转换技术的发展

检测与转换技术的发展伴随着仪器仪表（或系统）的发展，仪器仪表（或系统）的发展可归纳为以下五个阶段。

**第一代检测与转换测试仪器：**它是电磁感应基本定律为基础的模拟指针式仪表。其主要特点是结构简单、功能单一、检测精度低、读数不方便。

**第二代检测与转换测试仪器：**它是电子管或晶体管为基础的分立元件式仪表或系统。其主要特点是功能较完善，但精度低、响应速度慢。

**第三代检测与转换测试仪器：**它是集成电路芯片为基础的数字式仪表或系统。20世纪70年代集成电路的出现，推动了检测与转换技术的前进与发展，使检测与转换仪表具有A/D转换电路，能将被测的模拟信号转换成数字信号，检测结果以数字形式输出显示。

第三代检测与转换测试仪器的主要特点是检测精度高，速度快，读数与显示清晰、直观，同时数字信号便于远距离传输。

**第四代检测与转换测试仪器：**它是智能式仪器仪表（或系统）。20世纪80年代，随着微电子技术的发展、微处理器的普及和智能控制理论的出现，使检测与转换技术又向前推进了一大步。其主要特点是具有数据存储、运算、逻辑判断、自选量程、自动校正、自动补偿、自寻故障等功能以及检测精度高、操作使用方便等优点。

**第五代检测与转换测试仪器：**它是现代检测与转换系统或装置。现代检测与转换系统或装置的标志是自动化和智能化。测试技术与计算机深层次的结合引起了测试仪器领域的一场

新的革命，一种全新的仪器结构概念导致新一代仪器或系统——虚拟仪器的出现，进而产生集成仪器和系统，由单台仪器子系统向多台仪器组成的大的测试系统方向发展（关于第五代检测系统的概念目前有不同看法，有学者将虚拟仪器归类为第四代检测系统）。

### 1.3.2 传感技术的发展

近年来，传感器正处于传统型向新型传感器转型的发展阶段。新型传感器的特点是微型化、数字化、智能化、多功能化、系统化、网络化，它不仅促进了传统产业的改造，而且可引导建立新型工业，是 21 世纪新的经济增长点。目前已成功应用在硅器件上形成硅压力传感器。

多传感器数据融合技术正在形成热点，它不同于一般信号处理，也不同于单个或多个传感器的监测和测量，而是对基于多个传感器测量结果基础上的更高层次的综合决策过程。多传感器数据融合的定义概括为：把分布在不同位置的多个同类或不同类传感器所提供的局部数据资源加以综合，采用计算机技术对其进行分析，消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾，加以互补，降低其不确实性，获得被测对象的一致性解释与描述，从而提高系统决策、规划、反应的快速性和正确性，使系统获得更充分的信息。鉴于传感器技术的微型化、智能化程度提高，在信息获取基础上，多种功能的传感器进一步集成以至于融合，这是必然的趋势，多传感器数据融合技术也促进了传感器技术的发展。



## 第2章 测量误差及其分析

随着科学技术的迅速发展以及人们对客观事物认识的提高，现代精密检测设备不断推陈出新。在现代测试技术中，对被测量的获取，无论是测试手段、测试条件还是测试设备都在日臻完善。尽管如此，测量误差仍不可避免。它存在于工程应用和科学实验的一切测量过程中。因此，研究和分析测量误差，了解其特性以及相应的处理原则，可有效地减少和消除测量误差的不良影响。

### 2.1 测量误差基本概念

#### 2.1.1 标准及有关术语

##### 1. 真值 $A_0$

一个物理量的真值是指它在一定条件下所呈现的客观大小或真实数值。真值客观存在，但不可测量，是一个理想的概念。绝对的真值如同真理一样，人类只能通过科学技术的不断进步而无限地逼近它。

##### 2. 约定真值 $A_s$

根据各种物理参量单位的定义，国家设立各种尽可能维持不变的实物单位基准，并以法令的形式指定其所体现的量值作为国家基准，称之为约定真值。例如，保存在国家计量局的铂铱合金圆柱体千克原器被指定为 1kg 质量的约定真值。一般会用约定真值代替真值。国家通过一系列由各级实物计量标准构成的量值传递网，把国家基准所体现的计量单位由高一准确度等级的计量标准向下通过逐级比较传递到日常工作仪器或量具上。为了保证国际上的量值统一，国际计量机构经常将准确度等级相同的各国国家基准进行相互比对，以达到量值相对统一的目的。由于国家基准通常不允许搬动，比对工作一般是通过参加国提供的传递标准进行的。

##### 3. 实际值 $A$

在由各级实物计量标准构成的量值传递网中，当更高一级测量器具的误差为本级测量器具误差的 1/3 到 1/10 时，即可认为更高一级测量器具的测得值（示值）为相对真值。通常称之为实际值。

##### 4. 标称值

计量或测量器具上标定的量值称为标称值。例如，标准砝码上标注的 1g，标准电阻上标注的  $10\Omega$ 。由于制造工艺不完备或者环境等因素的影响，标称值并不一定等于它的实际值。为此，在给出计量或测量器具的标称值时，通常还要标出它的误差范围或准确度等级。例如某电阻标称值为  $1000\Omega$ ，误差范围为  $\pm 1\%$ ，即该电阻的实际值在  $990\Omega$  到  $1010\Omega$  之间。

##### 5. 示值

示值也称测得值、测量值或读数。它是指由测量器具给出的被测量的量，由数值和单位两部分组成。

## 6. 测量误差

由测量器具测得的结果与被测量真值之间的差异称为测量误差。实际测量中，主、客观诸多因素都将影响测量结果。例如，测量系统不可能做到绝对精确，测量方法有些可能还不完善，测量人员的操作可能不熟练或在测量中存在疏忽。此外，还有环境影响，外界干扰等。这些因素都会导致测量误差。测量误差不可能完全消除，只能根据需求和可能将其限制在一定范围内。

## 7. 等精度测量和非等精度测量

短时期内，在对同一被测量进行多次测量的过程中，保持影响测量精度的所有主、客观测量因素或条件不变，这样的测量称作等精度测量。所谓短时期，可理解为能保证测量精度要求的时间间隔。在同一被测量的多次重复测量中，如果影响测量精度的所有主、客观条件全部或者部分发生了改变，则这样的测量称为非等精度测量或不等精度测量。

### 2.1.2 测量误差的表示方法

测量系统的基本误差通常可以表示为绝对误差和相对误差两种形式。

#### 一、绝对误差

由测量系统给出的被测量的测得值  $x$  与其真值  $A_0$  之间的差值称为该测得值的绝对误差，即

$$\Delta x = x - A_0 \quad (2-1-1)$$

式中： $\Delta x$  为绝对误差； $x$  为由测量系统给出的被测量的测得值； $A_0$  为真值。

真值  $A_0$  实际无法得到。一般用实际值  $A$  代替真值  $A_0$ 。因而，绝对误差更具实际意义的定义为

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

绝对误差是一个有单位的量。它体现了被测量的测得值与实际值之间的偏离程度和偏离方向。其中，绝对误差的量值反映了测得值与实际值之间的偏离程度。绝对误差的符号表示测得值与实际值的大小关系，若测得值较实际值大，则绝对误差为正值，反之为负值。

与绝对误差的绝对值相等而符号相反的值称为修正值，一般可用符号  $c$  表示

$$c = -\Delta x = A - x \quad (2-1-3)$$

测量系统的修正值由计量部门通过检定给出。其形式可以是表格、曲线或函数表达式等。测量系统只有在检定有效期内，才能利用修正值对该测量系统的示值进行修正，从而得到被测量的实际值为

$$A = x + c \quad (2-1-4)$$

测量系统定期送计量部门检定的目的之一是获得准确的修正值，并由此按式 (2-1-4) 对该系统的测得值进行修正。

绝对误差并不能完全表示测量的质量，其大小不能作为比较测量结果准确度高低的依据。在绝对误差相等的情况下，测量值越小，测量的准确程度越低，测量值越大测量的准确程度越高。为了能确切地反映测量的准确程度，一般情况下采用相对误差的概念。

#### 二、相对误差

相对误差又叫相对真误差，它是绝对误差与被测量的真值之比，常用百分数表示。若用符号  $\gamma$  表示相对误差，则

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (2-1-5)$$

在实际应用中, 真值往往代之以实际值, 有时甚至代之以测量结果。根据相对误差中所取的相对参考值的不同, 相对误差的表示可分为以下四种。

### 1. 实际相对误差

实际相对误差用绝对误差  $\Delta x$  与被测量的实际值  $A$  的百分比值表示。若用符号  $\gamma_A$  表示相对误差, 则

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (2-1-6)$$

### 2. 示值相对误差

示值相对误差又称为标称相对误差, 用绝对误差值  $\Delta x$  与被测量的测得值  $x$  的百分比值表示。若用符号  $\gamma_x$  表示示值相对误差, 则

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (2-1-7)$$

示值相对误差只适合在要求不太严格而误差又比较小的情况下, 作为一种近似计算。

### 3. 分贝误差

分贝误差实际是相对误差用分贝形式来度量, 故称其为分贝误差。若用符号  $\gamma_{dB}$  表示分贝误差, 则分贝误差可以定义为

$$\gamma_{dB} = 20\lg(1 + \gamma_x) \quad (2-1-8)$$

式中:  $\gamma_x$  为示值相对误差。

分贝误差广泛用于增益(衰减)量的测量中。当相对误差为正时, 分贝误差也是正值; 当相对误差为负时, 分贝误差也是负的。

### 4. 满度相对误差

满度相对误差又称引用相对误差。它用量程内最大绝对误差  $\Delta x_m$  与该量程满度值(量程上限值)  $x_m$  的百分比表示。若用符号  $\gamma_m$  表示满度相对误差, 则

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (2-1-9)$$

满度相对误差适合用来表示电表或仪器的准确度。常用电工仪表分为七个准确度等级, 一般用  $S$  表示, 见表 2-1-1。例如, 某型万用表的准确度等级  $S$  为五级, 则表示该型万用表测量交流量时的满度相对误差为  $\pm 1.5\%$ 。如果知道了某量程的满度相对误差, 则可知道测量系统在该量程内绝对误差的最大值:

$$\Delta x_m = \gamma_m \times x_m \quad (2-1-10)$$

表 2-1-1

电工仪表准确度等级

等级	一	二	三	四	五	六	七
$\pm S\%$	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0

实际上, 同一量程不同示值处的绝对误差未必处处相等。对此, 若没有修正值可以利用, 则按最坏情况处理, 即认为在该量程各处的绝对误差是个常数且等于量程内最大绝对误差  $\Delta x_m$ 。这种处理方式称为误差的整量化。在这种处理方式之下, 同一量程内, 测得值越小, 示值相对误差越大。为了减小测量中的示值相对误差, 在进行量程选择时应尽可能使示值接近满度值, 一般以示值不小于满度值的  $2/3$  为宜。