

— 高等学校教材 —

检测技术 与智能仪器

戚新波 主 编
范 峰 田效伍 副主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高等学校教材

检测技术与智能仪器

戚新波 主编

范 峥 田效伍 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合计算机、数字信号处理和传感器技术的最新发展,介绍了测量误差和数据处理的基础知识,电参数测量方法,非电量测试技术,智能仪器技术,检测新技术,检测系统的设计与分析,以及由单片机组成的测量系统的设计方法。

本书内容丰富,实用性强,可作为高等学校自动控制、检测、机电一体化等专业课教材,也可作为相关专业技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术与智能仪器/戚新波主编,范峥,田效伍副主编.—北京:电子工业出版社,2005.8
高等学校教材

ISBN 7-121-01605-2

I. 检… II. ①戚…②范…③田… III. ①自动检测—高等学校—教材②智能仪器—高等学校—教材
IV. ①TP274 ②TP23

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第085495号

责任编辑:赵丽松 张 剑

印 刷:北京李史山胶印厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:13.5 字数:346千字

印 次:2005年8月第1次印刷

印 数:5000册 定价:19.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

本书是按照“电气工程与自动化专业检测技术”课程的教学大纲编写的。计算机技术、数字信号处理技术和新型传感器技术的发展，给传统的检测技术注入了大量的新内容。生产实际的发展和教学改革的需要，也促使了原有的检测技术课程在体系上和内容上也必须进行相应的调整。基于此背景下，我们编写了此书。

本书正是根据作者多年的教学实践，并在吸收了国内外同类教材优点的基础上编写而成的。

本书是高等院校电气技术类相关专业学生的基础课教材，也可作为从事测试工作的工程技术人员参考用书。

全书分为6章，第1章是检测技术的理论基础，介绍了测量误差和数据处理的基础知识。第2章是电量的测量方法和相关仪器仪表的原理及使用，重点讲解测试的基础原理和仪器仪表的选用。第3章是介绍各种传感器的原理和非电量测试技术。第4、第5章是智能仪器仪表技术及检测新技术。随着计算机技术和通信技术的发展，测量技术和测量仪器发生了翻天覆地的变化，重点讲解智能仪器的算法及接口技术、虚拟仪器、现场总线等知识。第6章是检测系统的设计与分析，从工业现场测量应用出发，介绍了由单片机组成的测量系统的设计步骤和设计方法。

本书由戚新波任主编，范峥、田效伍任副主编。其中第1章由马宪华编写，第2章由戚新波编写，第3章由田效伍、郭海针编写，第4章由范峥编写，第5章由孟昕元编写，第6章由范峥、马宪华编写。全书由戚新波统稿。编写过程中得到了许多老师的支持和帮助，在此深表感谢。

因时间仓促、水平所限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 检测技术的基础知识	1
1.1 检测技术的基础知识和常用方法	1
1.1.1 检测技术的基础知识	1
1.1.2 检测的常用方法	1
1.2 仪表的基本结构和特性	3
1.2.1 仪表的构成原理	3
1.2.2 仪表的基本性能	5
1.2.3 仪表的输入/输出特性	6
1.3 测量误差及处理	10
1.3.1 误差的来源	10
1.3.2 误差的分类	11
1.3.3 误差的表示方法	11
1.3.4 减小误差方法	14
1.4 误差的合成与分配	17
1.4.1 误差传递公式	17
1.4.2 系统误差的合成	20
1.4.3 系统误差的分配	22
1.4.4 最佳测量条件的确定	24
第 2 章 电量的测量及相关仪表	26
2.1 电压与电流的测量	26
2.1.1 测量方法	26
2.1.2 磁电系电压表和电流表	27
2.1.3 电磁系电压表和电流表	29
2.1.4 电动系电压表和电流表	31
2.1.5 钳形电流表	34
2.1.6 万用表	34
2.2 功率和电能的测量	37
2.3 电路参数的测量	46
2.4 频率和相位的测量	54
2.4.1 频率的测量方法	54
2.4.2 电动系频率表	59
2.4.3 相位的测量方法	61
2.4.4 电动系相位表	63

2.5	磁参数的测量	66
2.5.1	磁场测量	66
2.5.2	磁性材料的测量	69
第3章	非电量检测技术	74
3.1	传感器的基础知识	74
3.1.1	传感器的定义与组成	74
3.1.2	传感器的分类	75
3.1.3	传感器的基本特性	78
3.2	温度的测量	80
3.2.1	热电偶传感器	81
3.2.2	热电阻传感器	86
3.2.3	热敏电阻传感器	87
3.2.4	集成温度传感器	88
3.3	压力的测量	89
3.3.1	电阻应变式传感器	90
3.3.2	压电式传感器	93
3.3.3	电容式差压变送器	96
3.4	流量的测量	99
3.4.1	差压式流量计	99
3.4.2	涡轮式流量计	101
3.4.3	电磁式流量计	102
3.4.4	涡街式流量计	104
3.5	物位的测量	104
3.5.1	压力式液位变送器	105
3.5.2	浮力式液位传感器及变送器	107
3.5.3	超声式物位传感器	109
3.6	位移与位置的测量	113
3.6.1	位移的测量	113
3.6.2	位置测量	122
3.7	转速的测量	123
3.7.1	光栅传感器	123
3.7.2	测速发电机	124
3.8	其他非电量的测量	126
3.8.1	湿度传感器	126
3.8.2	化学成分的分析	127
第4章	智能仪器技术	129
4.1	智能仪器的基本知识	129
4.1.1	智能仪器的特点	129
4.1.2	智能仪器的基本结构	130

4.1.3	智能仪器的发展现状	131
4.2	智能仪器的数据采集技术	133
4.3	智能仪器的常用算法	141
4.3.1	误差处理算法	142
4.3.2	抗干扰和数字滤波	145
4.3.3	仪器的自动校准	147
4.4	智能仪器的接口技术	150
4.4.1	GPIB 标准接口系统的基本特性	150
4.4.2	三线连锁挂钩原理	151
4.4.3	GPIB 总线系统的功能	151
4.4.4	接口消息与编码	152
4.4.5	GPIB 接口系统的运行	153
4.4.6	GPIB 接口设计	154
4.5	智能仪器的设计	155
4.5.1	总体设计阶段	155
4.5.2	软硬件的开发	156
第 5 章	检测测量领域的新技术	159
5.1	虚拟仪器技术	159
5.1.1	虚拟仪器的基本概念	159
5.1.2	虚拟仪器的组成及特点	159
5.1.3	虚拟仪器的设计步骤	161
5.1.4	虚拟仪器系统的数据采集	162
5.1.5	虚拟仪器软件开发工具 LabVIEW 介绍	163
5.1.6	虚拟仪器应用	166
5.2	现场总线技术	168
5.2.1	现场总线的本质含义	168
5.2.2	现场总线的优点	170
5.2.3	现场总线的几种类型	171
5.2.4	HART 协议的应用情况	172
5.3	多传感器数据融合	173
5.3.1	分类及特点	174
5.3.2	基本原理、过程及关键技术	174
5.3.3	结构与功能模型	176
5.3.4	数据融合方法	178
5.3.5	多传感器数据融合的应用	180
5.4	软测量技术	182
5.4.1	软测量建模方法	182
5.4.2	模型实时演算的工程化实施技术	184
5.4.3	软测量模型的自校正及维护	185

5.4.4	软测量技术在工业中的应用	185
第 6 章	测试系统的设计与分析	187
6.1	智能温度测控系统	187
6.1.1	智能温度测控仪器的设计要求	187
6.1.2	系统的组成与工作原理	188
6.1.3	硬件电路	188
6.1.4	系统软件	191
6.1.5	温度测量与误差纠正	193
6.2	智能化数字多用表 (DMM)	195
6.2.1	DMM 的组成	195
6.2.2	交/直流转换器	196
6.2.3	其他转换器	199
6.2.4	典型 DMM 介绍	200
6.3	数字化电能测量系统	204
参考文献	208

第 1 章 检测技术的基础知识

人们如何去认识客观世界呢？去观察、测量，获得定性和定量的信息，然后形成科学的概念。随着科学技术向纵深发展及各学科之间的交叉渗透，解决一个研究课题，往往要进行大量复杂的测量与分析。测量技术水平的高低是公认的评价一个国家科学技术和现代化水平的重要标志之一。

1.1 检测技术的基础知识和常用方法

1.1.1 检测技术的基础知识

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。而电气测试技术是指按照被测量的特点，选用合适的检测装置与实验方法，通过测量和数据处理及误差分析，准确得到被测量的数值，并为进一步提高测量精度、改进实验方法及测量装置性能提供可靠的依据。

测量主要是以电子技术为依据，凭借电子仪器和设备，对电量和非电量进行测量的原理和方法。主要包括下列 3 个阶段：

1. 准备阶段

明确被测量的性质及测量所要达到的目的，然后选定适当的测量方法和测量仪器。

2. 测量阶段

建立测量仪器所必需的测量条件，慎重进行操作，认真记录测量数据。

3. 数据处理阶段

根据记录的数据，考虑测量条件的实际情况，进行数据处理，以求得测量结果和测量误差。

测量结果可表示成数字、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测量误差数值或范围。

1.1.2 检测的常用方法

检测的具体方法是由被测量的种类、数值大小、准确度、测量速度、测量所需的条件，以及其他一系列因素决定的。一个电参量的测量，可以通过不同的方法来实现。因此，电气测量也有不同的方法。

检测方法的分类形式很多, 根据被测量的特点(在测量期间可以认为是恒定的量或是随时间变化的量)可分为静态测量和动态测量; 根据测量条件可分为等精度测量和非等精度测量; 根据测量元件是否与被测介质接触可分为接触式测量和非接触式测量; 根据测量手续来分可分为直接测量、间接测量和在此两类方法的基础上形成的组合测量法; 根据测量方式来分可分为直读式测量、零位式测量、微差式测量和替代式测量等。下面就根据常用的后两种分类方法对测量方法进行研究。

1. 按测量手续分类

(1) 直接测量法 用事先标定好的测量仪表直接读取被测量测量结果的方法称为直接测量。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。直接测量的特点是测量的数据就是被测量本身的价值, 比较直观。同时具有方法简单、使用方便、响应迅速等优势, 是电气测试中最常用的方法。

(2) 间接测量法 间接测量一般是在无法进行直接测量时采用, 其方法是先对与被测量有确定函数关系的几个参量进行测量, 并将结果代入函数关系中, 经过计算得到所需被测量的值。例如, 测量电功率时, 根据 $P=UI$, 分别对 U 和 I 进行直接测量, 再计算出电功率 P 。间接测量方法比较复杂, 花费时间也比较长。间接测量法多在实验室中使用, 在工程测量中很少用。

(3) 组合测量法 在测量中使各个未知量以不同形式的组合时, 通过直接测量和间接测量所得的数据, 然后求解一组联合方程而求得被测量的数值, 称为组合测量。例如, 要测量标准线绕电阻温度系数 α 和 β , 以及 20°C 时的电阻值 R_{20} 时, 可先测出在 3 种 t_1 、 t_2 、 t_3 温度下该标准电阻的阻值 R_{t_1} 、 R_{t_2} 、 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。

组合测量法有两个明显的特点: 一是在准确度要求相同的情况下, 组合测量需要进行的次数较少; 二是系统误差出现的规律变为随机性质, 因而可使测量结果的准确度提高。但在测量过程中, 操作手续复杂, 花费时间长, 一般适合于科学实验或特殊场合。

2. 按测量方式分类

(1) 直读式测量 直读式测量是根据仪表的读数来判断被测量的大小。而作为单位的标准量具并不参与比较。为了读取被测量之值, 这些仪表已经预先按被测量的单位刻度分好度, 因而实际上是被测量与量具间接比较。例如, 利用万用表测量电流、电压都属于这种测量方法。这种测量方法具有测量过程简单、迅速的优点, 但测量精确度较低, 在工程测量方面得到广泛应用。

(2) 零位式测量 零位式测量是利用已知的标准去平衡或抵消被测量的作用, 并用指零式仪表来检测系统的平衡状态, 从而判定被测量值等于已知标准量的方法。例如, 利用天平测量物体即是一个典型的零位式测量的例子。在零位式测量中, 标准量具是测量系统的一部

分, 它提供一个可调节的标准量, 被测量能够直接与标准量相比较, 测量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测量结果产生一定的影响。因此, 零位式测量可以获得比较高的测量精度。但这种方法测量过程比较复杂, 花费时间也比较长。

(3) 微差式测量 微差式测量是将直读式测量和零位式测量的优点综合起来的一种测量方法。其基本思路是将被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测量。在微差式测量中, 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测量, 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。微差式测量的优点是反应速度快, 测量精度高, 特别适合于在线控制参数的测量。

(4) 替代式测量 替代式测量是将被测量与已知量先后两次接入同一测量装置, 如果两次测量中测量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量, 与替代后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测量装置的工作状态保持不变。

采用这种方法, 如果前后两次测量相隔的时间很短, 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测量所产生的影响可以认为完全相同或绝大部分相同, 所以测量的误差极小, 准确度几乎完全取决于标准量本身的误差。

各种测量方法都有自己各自的特点。在选择测量方法时, 应首先研究被测量本身的特性、所提出的精度要求、环境条件及所具有的测量仪表(装置)、仪器等, 经综合考虑, 再确定采用哪种测量方法和选用哪些设备。

1.2 仪表的基本结构和特性

在生产和科学实践中, 经常会遇到测量任务。在测量任务面前首先要考虑的是应用什么样的测量原理, 采用什么样的测量方法; 还要考虑使用什么样的测量仪器去进行测量。测量仪器包括敏感元件、传感器、变换器、运算器、显示器和数据处理装置等。测量仪表性能的好坏将直接影响测量结果的可信度。因此, 研究和掌握测量仪表的构成原理和性能十分必要。

1.2.1 仪表的构成原理

测量仪表(系统、传感器)由若干环节组成。根据各个环节(或变模元件)的连接方式不同, 仪表就有不同的组成结构。

1. 直接变换型结构

在直接变换型结构中, 由 n 个组成环节串联连接而成, 信息的变换只沿一个方向进行, 如图 1-2-1 所示, 它是一个开环系统。

设各组成环节的传递系数分别为 k_1, k_2, \dots, k_n , 则整个系统的传递系数 k 为

$$k = \prod_{i=1}^n k_i \quad (1-2-1)$$

在各个环节中难免会引进一些干扰信号 u_1, u_2, \dots, u_i , 如图 1-2-1 所示。这些干扰信号就会毫无衰减地反映在输出信号 y 中。因此, 这种结构的仪表(系统、传感器)对每个环节的

要求都很高，各个环节都应具有很好的选择性，否则仪表的稳定性就较差，精确度也不会做得很高。

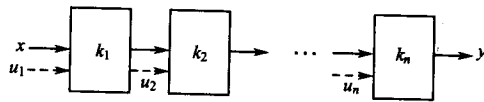


图 1-2-1 直接变换型结构

2. 平衡变换型结构

平衡变换型结构有 2 个变换回路，如图 1-2-2 所示。一个是正向变换回路，其各环节的传递系数分别为 k_1, k_2, \dots, k_n ，则正向变换回路总的传递系数 k 见式 (1-2-1)。另一个是反向变换回路，其各环节传递系数分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ ，根据式 (1-2-1) 则得反向变换回路总传输系数 β 为

$$\beta = \prod_{i=1}^m \beta_i \tag{1-2-2}$$

因此，图 1-2-2 (a) 可简化为图 1-2-2 (b)。

平衡变换型结构仪表形成一个闭环式系统，其输出为

$$y = \frac{k}{1 + k\beta} x$$

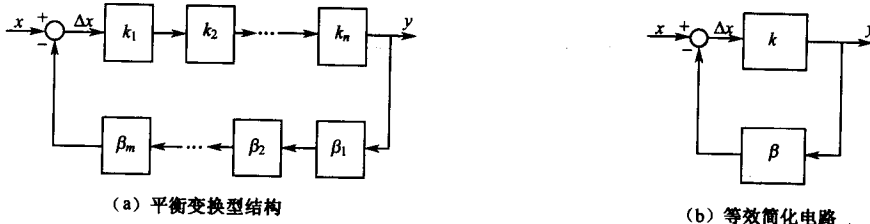


图 1-2-2 平衡变换型结构

当 $k\beta \gg 1$ 时，式 (1-2-2) 变为

$$y = \frac{1}{\beta} x \tag{1-2-3}$$

很显然，输出量 y 与正向变换回路各组成环节的性能无关，即正向变换回路中各环节引进的干扰不影响输出量。但是反向回路中引进的干扰会影响输出量。一般来说，组成反向回路的变换环节不会很多，因此只要细心制作反向回路就可以保证较高的稳定性和高精度。

3. 差动变换型结构

差动变换型结构由 3 个回路组成，如图 1-2-3 所示。设 3 个组成回路的传递系数分别为 k_1, k_2, k_3 ，每个回路都可以是前述的直接变换型结构或平衡变换型结构，但 k_1 和 k_2 回路的组成结构要相同。设 $k_1 = k_2 = k$ ，被测量 x 以 $+x$ 和 $-x$ 分别作用于 k_1 和 k_2 回路，可得 $y_1 = k_1 x$ ， $y_2 = -k_2 x$ ， y_1 和 y_2 在 k_3 回路中作减法运算，则

$$y = k_3(y_1 - y_2) = 2k_3 k x \tag{1-2-4}$$

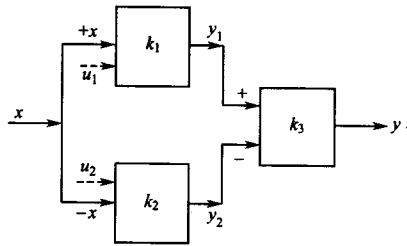


图 1-2-3 差动变换型结构

若有干扰信号 u_1 和 u_2 分别作用于 k_1 和 k_2 回路，则 $y_1 = k_1(x + u_1)$ 和 $y_2 = (-x + u_2)$ ， y_1 和 y_2 在 k_3 回路中相减，则

$$y = k_3[k_1(x + u_1) - k_2(-x + u_2)] = 2k_3kx + k_3k(u_1 - u_2)$$

若干扰信号 $u_1 = u_2$ ，则

$$y = 2k_3kx = Kx \quad (1-2-5)$$

式中， $K = 2k_3k$ 。

由式 (1-2-5) 可知，差动变换型结构的灵敏度比较高， k_1 和 k_2 回路引进的干扰只要相等，即 $u_1 = u_2$ ，就不会影响输出量 y ，因此抗干扰能力较强。但是 k_3 回路引进的干扰影响输出量，所以只要细心制作 k_3 回路便可以保证较高的精确度。

1.2.2 仪表的基本性能

评价测量仪表的品质指标是多方面的，但作为仪表的基本性能，主要是衡量仪表测量能力的指标，如精确性、稳定性、输入/输出特性等。

1. 精确性

说明精确性的指标有 3 个：精密度 δ 、准确度 ϵ 和精确度 τ 。

(1) 精密度 δ 它说明仪表指示值的分散程度，即对某一稳定的被测量，用同一台仪表，由同一个测量者用同一精细程度，在相当短时间内连续重复测量多次，其测量结果（示值）的分散程度。 δ 愈小，测量愈精密，其精密度愈高。例如某温度仪表的精密度 $\delta = 0.5^\circ\text{C}$ ，说明多次测量结果的分散程度不大于 0.5°C 。

(2) 准确度 ϵ 它说明仪表的指示值偏离被测量的真值的程度。例如某电压表的准确度 $\epsilon = 0.5\text{V}$ ，说明该表的指示值偏离被测量的真值不会大于 0.5V 。 ϵ 愈小，准确度愈高。

(3) 精确度 τ 精确度是精密度和准确度的综合反映。在最简单的场合可取二者的代数和，即 $\tau = \delta + \epsilon$ 。精确度高说明精密度和准确度都高。精密度和准确度两者中，若只有某一个高而另一个低都不能说精确度高。

因此，精密度、准确度、精确度的含义都不同，使用时不得混淆。

2. 稳定性

表征仪表指示值稳定性的指标有两个：一是时间上的稳定性，以稳定度表示；二是仪表外部环境和条件变化所引起的示值不稳定，以各种影响系数来表示。

(1) 稳定度 δ_s 仪表的稳定度是由于仪表内部的随机变动的因素引起的。例如，仪表内部的某些因素作周期性变动、漂移或机械部分的摩擦力变化等引起仪表的示值变化。通常它以精密度的数值和时间长短一起表示。例如电压波动，在 8h 内引起示值变化 1.3mV，则可写成稳定度为 $\delta_s = 1.3\text{mV}/8\text{h}$ 。

(2) 环境影响 使用仪表时的周围环境，例如室温、大气压、振动等外部状态变化引起仪表示值的变化，以及电源电压、波形、频率等工作条件变化引起仪表示值变化，统称为环境影响，用影响系数表示。例如，温度变化引起示值变化，用温度系数 β_T 表示；电源电压变化引起示值变化，用电源电压系数 β_U 表示等。

1.2.3 仪表的输入/输出特性

为了获得准确的测量结果，需要根据被测试对象、测试目的与要求，正确、合理地选择与使用测量仪表（测量系统或传感器）。为此，要讨论测量仪表的输入/输出特性，按照输入作用量状态（静态、动态）的不同，可分为静态特性与动态特性。

1. 静态特性

静态特性是指被测量 x 不随时间变化或变化极为缓慢的情况下，输出信号 y 与输入信号 x 之间的函数关系，可表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1-2-6)$$

式中， $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ 为决定曲线形状的系数。由式 (1-2-6) 可见，只有 a_0 与 a_2, a_3, \dots, a_n 均为 0，而 $a_1 \neq 0$ 时，测量设备的特性曲线才是过零点的直线。

2. 主要静态性能指标

(1) 测量范围和量程 测量范围指正常工作条件下，测量仪表所能够测量的被测量值的范围。通常以测量范围的上、下限来表示。量程则是测量范围上、下限的代数差。如一温度测量范围是 $-20 \sim 100^\circ\text{C}$ ，则其量程为 120°C 。

(2) 灵敏度 测量设备的灵敏度是指静态测量时，输出量变化量和引起此变化的输入量变化量的比值。可表示为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \text{或} \quad k = \frac{dy}{dx} \quad (1-2-7)$$

如图 1-2-4 所示。

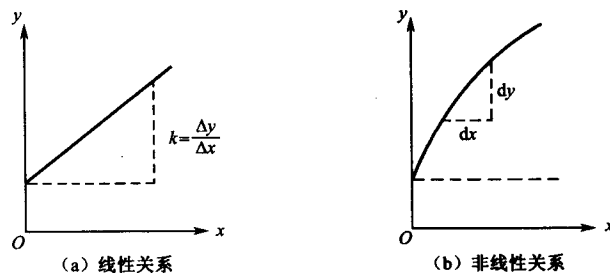


图 1-2-4 灵敏度定义

如果系统的灵敏度为一个常数,则输出和输入之间为线性关系,如图 1-2-4 (a) 所示;若输出和输入之间为非线性关系,则系统的灵敏度是变化的,是由静态特性曲线上各点的斜率来决定的,如图 1-2-4 (b) 所示。一般希望灵敏度在整个测量范围内能够保持为常数,这样可以得到均匀的刻度,也便于测量结果的分析 and 处理。

如果测量系统由多个环节组成,各环节的灵敏度分别为 k_1, k_2, k_3 , 则整个系统灵敏度为:

$$k = k_1 k_2 k_3 \quad (1-2-8)$$

一般来说,提高灵敏度可以得到较高的精度。但灵敏度越高,测量范围也越小,稳定性也越差。

(3) 分辨率 分辨率是指测量仪表所能检测出被测量的最小变化的能力。在测量范围内,输入量从任意值开始缓慢增加,直到可以测量到输出的变化为止,此时的输入量的增量就是分辨率,它表明了检测仪表响应和分辨输入量最小变化的能力。一般来说,分辨率和灵敏度有关,灵敏度越高,分辨率就越好。

(4) 线性度 线性度指测量设备实际的输入/输出特性曲线与拟合(参考)直线偏离的程度,常用实际的输入/输出特性曲线偏离拟合直线的最大偏差 ΔL_{\max} 与仪表满量程 y_{FS} 输出值之比的百分数表示,即

$$E_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2-9)$$

由于线性度(非线性误差)与所参考的拟合直线有关,所以拟合直线不同,所得到的线性度也不同。采用不同的方法选取拟合直线,可以得到不同的线性度,如图 1-2-5 所示。一般常见的拟合方法有:理论拟合(取仪表的零点作为理论直线的始点,以最大输入的最大输出量对应的坐标点为终点,所作的连线作为拟合直线),如图 1-2-5 (a) 所示;端点法拟合(以测量设备多次实测之零输入所得平均值点与满量程输出平均值点可连成的直线为拟合直线),如图 1-2-5 (c) 所示。其他还有端点平移拟合、过零旋转拟合、最小二乘法拟合等。其中端点法拟合比较简单,而最小二乘法拟合效果比较好。

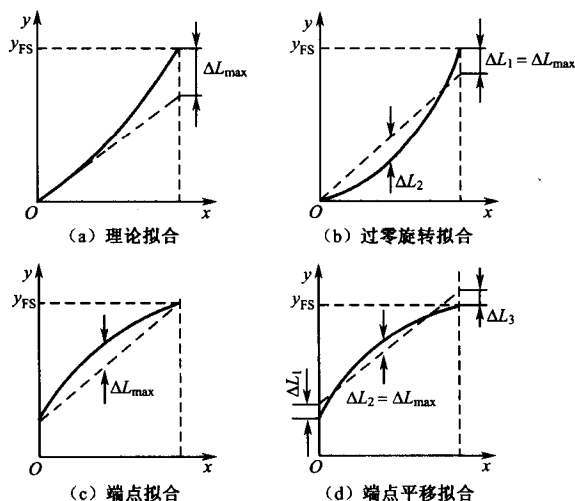


图 1-2-5 不同方法选取的拟合直线的线性度

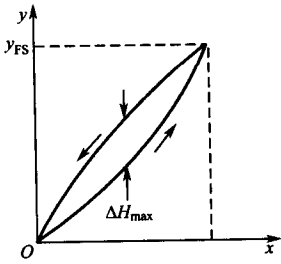


图 1-2-6 滞后特性

(5) 滞后 滞后是测量设备输出量与先前输入量顺序有关的一种特性。当输入量 x 分别由增加方向、减小方向到达同一量时，两个输出量之差称为滞后误差，如图 1-2-6 所示。

测量设备滞后误差常用全量程中最大滞后差值 ΔH_{\max} 与满量程输出值 y_{FS} 之比的百分数表示：

$$E_H = \frac{|\Delta H_{\max}|}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2-10)$$

产生滞后误差的主要原因有仪表设备内部的弹性材料变形和磁性材料的磁滞效应，还有机械部分的摩擦、间隙和积尘等。

(6) 稳定性 稳定性指传感器在长期工作时输出量发生的变化。

3. 动态特性

测量设备的动态特性是指在动态测量时，输出量与随时间变化的输入量之间的关系。

对测量设备动态特性的理论研究，通常是先建立系统的数学模型，运用拉氏变换找出传递函数的表达式，根据输入条件得到相应的频率响应并以此来描述系统的动态特性，因此可以方便地应用自动控制原理中的方法和结论。

在实际工作中，测量设备的动态特性通常用试验方法求得。在研究测量设备动态特性时为了便于比较和评价，经常采用的输入量为阶跃输入或单位正弦输入，然后根据测量设备的响应来标定其动态特性。在时域内研究动态特性常用阶跃信号的瞬态响应来分析；在频域内研究动态特性时则采用正弦信号来分析测量设备的动态特性。测量设备的动态特性可以由时域过渡过程曲线或频率特性曲线来描述。

4. 主要动态性能指标

(1) 时域动态性能指标 测量设备的时域动态性能指标一般用阶跃输入时测量设备的输出响应（过渡过程）曲线上的特性参数来表示。

一阶测量设备，阶跃输入时的输出响应是非周期性的，如图 1-2-7 所示。动态性能指标如下所述。

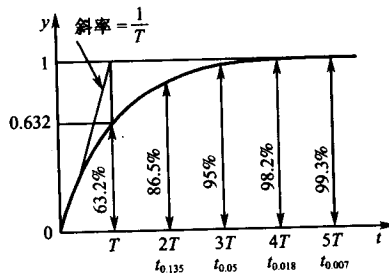


图 1-2-7 一阶测量设备阶跃输入响应

① 时间常数 T ：输出量上升到稳态值的 63.2% 所需时间。

② 响应时间 t_s ：输出量达到稳态值的某一允许误差范围内，并保持在此范围内所需最小时间。由于允许误差范围不同时，响应时间不同，所以下标 s 表示不同的允许误差范围。例

如，允许误差为 5%，则表示为 $t_{0.05}$ 。

一阶测量设备 t_s 与 T 的关系为： $t_{0.135}=2T$ ； $t_{0.05}=3T$ ； $t_{0.018}=4T$ 。可见时间常数 T 越小，响应越快。 t_s 与 T 的对应关系表示于图 1-2-7 中。

③ 上升时间 t_r ：测量设备输出响应值从 5%（或 10%）到达稳态值的 95%（或 90%），或从 0 上升到稳态值所需时间。

④ 延迟时间 t_d ：测量设备输出响应值从 0 上升到稳态值的 50% 所需时间。

对二阶测量设备，当传递函数中阻尼比 ζ （实际阻尼系数与临界阻尼系数之比）大于 1 时，在阶跃输入作用下，输出响应也是非周期性的，所以按上述一阶测量设备的性能指标讨论即可；当 $\zeta < 1$ 时，输出响应为衰减振荡曲线（如图 1-2-8 所示），则除应讨论前述响应时间 t_s 、上升时间 t_r 、延迟时间 t_d 等指标外，还需讨论峰值时间 t_p （输出响应曲线达到第一个峰值所需时间）与超调量 σ （输出响应曲线的最大偏差与稳态值的百分比）。

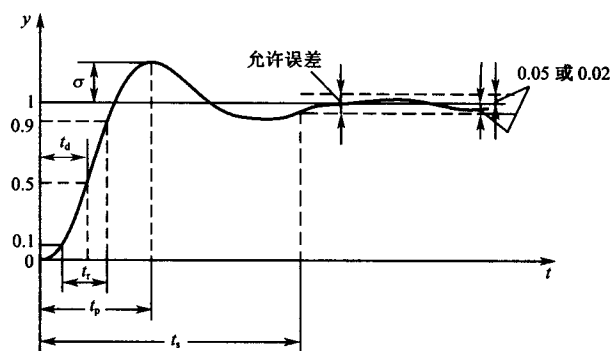


图 1-2-8 二阶测量设备阶跃输出响应曲线

此外，有的测量设备还用衰减率 d （或对数衰减率）表示过渡过程曲线上时间相差 1 个周期 T 的 2 个峰值之比，如图 1-2-9 中 A_1 与 A_2 之比。

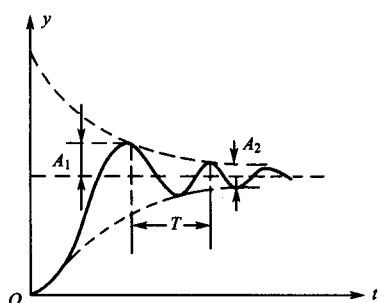


图 1-2-9 衰减率

(2) 频域动态性能指标 频域动态性能指标常以输入量为正弦信号时幅频特性（或对数幅频特性）和相频特性的参数来规定。常用的指标有：

① 频带宽 ω_b ：对数幅频特性曲线上幅值增益不超过 $\pm n$ dB（例如 ± 3 dB， $n=3$ ）所对应的频率范围。

② 工作频带 ($0 \sim \omega_g$)：与给定的测量设备幅值误差范围（例如 $\pm 1\%$ ， $\pm 2\%$ ）相对应的