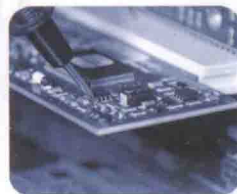
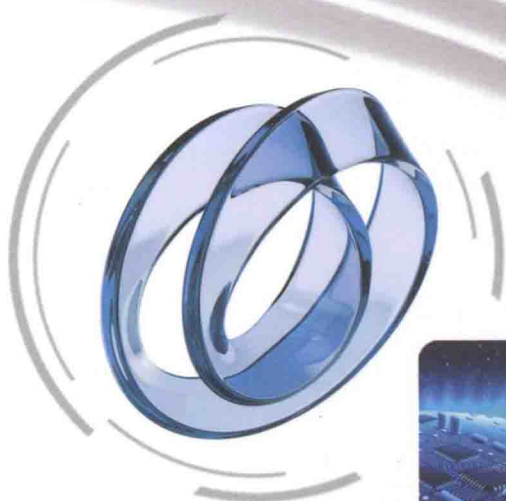




普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十二五”规划教材



第4版

电气测试技术

Electrical Testing Technology

◎ 主编 万频 林德杰



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十二五”规划教材

电气测试技术

第4版

主 编	万 频	林德杰
副主编	李学聪	
参 编	宋亚男	王永华 唐雄民
主 审	黄道平	



机械工业出版社

本书详细介绍了电气测试的原理、方法、测量仪器的特性,测量误差的分析、综合与分配,测量数据的处理。详尽阐述了各种传统的传感器和新型传感器(如压阻、压电、超声、光电、激光、光导纤维、气敏、霍尔、微型化和智能化等传感器)的原理、特性及其在非电量电测技术中的应用。对数字化测量技术和数字化仪器仪表进行了详细论述,并对抗干扰技术作了较深入地介绍。本书有大量的例题和具体应用实例分析,理论联系实际,内容丰富,系统性和实用性强。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程、信息工程、测控技术与仪器等专业及其相近专业本科、专科教材,亦可供相近专业研究生和工程技术人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载。

图书在版编目(CIP)数据

电气测试技术/万频,林德杰主编. —4版. —北京:机械工业出版社, 2015.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-49811-7

I. ①电… II. ①万…②林… III. ①电气测量-高等学校-教材
IV. ①TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第062733号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤

责任校对:刘怡丹 封面设计:张静

责任印制:刘岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2015年6月第4版第1次印刷

184mm×260mm·22.5印张·528千字

标准书号:ISBN 978-7-111-49811-7

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

电气测试技术朝着数字化、智能化、微型化方向发展迅速,因此本书对原教材中部分内容进行了增减,取消原书中第3章,只将其中智能化数字存储示波器和逻辑分析仪原理及应用两节内容放到本书中的第5章,并在本书第5章中新增一节数字化测量仪表设计的内容,强化了对数字化测量仪器仪表的原理和应用的论述。

“电气测试技术”是电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程、信息工程、测控技术与仪器等专业及其相近专业的重要专业基础课。前置课程有模拟电子技术、数字电子技术、电路原理、自动控制理论和微机原理及应用等。本书按56学时编写,适当删减,也并不影响本书的系统性和实用性,亦适用于48学时。

本书第1~2章由林德杰编写,第3章由李学聪编写,第4~5章由万频编写,第6章由宋亚男、王永华和唐雄民共同编写。李学聪制作了本书电子课件。

华南理工大学黄道平教授担任本书主审,详细审阅了全稿,提出许多宝贵意见。广东工业大学教务处和自动化学院相关领导对本书的编写给予了大力支持和帮助。在此,对各位专家教授、领导和原参编者表示衷心的感谢。本书的编写参考了大量文献和资料,在此对有关单位和作者一并致谢。

由于编者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,敬请广大师生和读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 测量的基本概念 1

- 1.1 测量的概念和定义 1
 - 1.1.1 测量的基本方程 1
 - 1.1.2 单位制和单位 2
 - 1.1.3 测量仪表的基本功能 2
- 1.2 测量仪表的结构及其基本性能 3
 - 1.2.1 仪表的基本性能 3
 - 1.2.2 测量仪表的结构 3
- 1.3 测量仪表的输入输出特性 5
 - 1.3.1 静态特性及其性能指标 5
 - 1.3.2 测量仪表的动态特性 9
- 1.4 测量方法 10
 - 1.4.1 概述 10
 - 1.4.2 按测量方法分 10
 - 1.4.3 按测量方式分 11
- 习题与思考题 12

第2章 测量误差及数据处理 13

- 2.1 误差来源及其分类 13
 - 2.1.1 误差的来源 13
 - 2.1.2 误差的分类 14
- 2.2 误差的表示方法 15
 - 2.2.1 测量误差的表示方法 15
 - 2.2.2 仪器仪表误差的表示方法 16
 - 2.2.3 数字仪表误差的表示方法 17
 - 2.2.4 一次直接测量时最大误差的估计 18
- 2.3 随机误差的估算 19
 - 2.3.1 测量值的算术平均值与数学期望 19
 - 2.3.2 标准差 20
 - 2.3.3 随机误差的正态分布 21
 - 2.3.4 贝塞尔公式 21

- 2.3.5 算术平均值标准差 21
- 2.4 粗大误差的判断准则 22
 - 2.4.1 置信概率与置信区间 22
 - 2.4.2 有限次测量的置信度 23
 - 2.4.3 随机不确定度与坏值剔除 24
- 2.5 系统误差及其减小方法 25
 - 2.5.1 系统误差的分类 25
 - 2.5.2 系统误差的判断 26
 - 2.5.3 减小系统误差的方法 27
- 2.6 测量数据的处理 29
 - 2.6.1 测量数据的舍入法则 29
 - 2.6.2 有效数字的位数 29
 - 2.6.3 有效数字的运算规则 30
 - 2.6.4 有效数字位数的确定 30
 - 2.6.5 等精密度测量结果的处理步骤 30
- 2.7 误差的合成与分配 33
 - 2.7.1 概述 33
 - 2.7.2 常用函数的合成误差 34
 - 2.7.3 系统误差的合成 37
 - 2.7.4 系统误差的分配 39
- 2.8 最佳测量条件的确定 40
- 习题与思考题 42

第3章 非电量的电测技术 44

- 3.1 电位器式传感器 44
 - 3.1.1 电位器式传感器的结构 44
 - 3.1.2 线性电位器式传感器 45
 - 3.1.3 非线性电位器传感器 48
 - 3.1.4 电位器式传感器的应用 51
- 3.2 电阻应变式传感器 53
 - 3.2.1 应变片的工作原理 53
 - 3.2.2 电阻应变传感器的测量电路 55
 - 3.2.3 电阻应变传感器的温度误差及其补偿 60



3.2.4 电阻应变传感器及其应用	61	3.10.3 光电信号的检测方法	135
3.3 电感式传感器	65	3.10.4 光电式传感器的应用实例	135
3.3.1 自感式传感器	65	3.11 激光式传感器	137
3.3.2 差动变压器式传感器	72	3.11.1 激光发射原理	137
3.3.3 电涡流式传感器	78	3.11.2 常用激光器及其原理	138
3.3.4 压磁式传感器	83	3.11.3 激光的特点	140
3.4 电容式传感器	85	3.11.4 激光式传感器的应用及实例	140
3.4.1 电容式传感器的工作原理及其特性	85	3.12 光纤式传感器	142
3.4.2 测量电路	88	3.12.1 概述	142
3.4.3 电容式传感器的特点及其应用范围	92	3.12.2 光纤及光在其中的传输	142
3.5 热电偶传感器	94	3.12.3 常用光纤式传感器	143
3.5.1 热电偶的测温原理	94	3.13 红外式传感器	149
3.5.2 有关热电偶回路的几点结论	96	3.13.1 红外检测的基本定律	149
3.5.3 热电偶冷端温度补偿	98	3.13.2 红外探测器的类型	149
3.5.4 常用热电偶及其特性	102	3.13.3 红外探测器的应用及实例	151
3.5.5 热电偶常用测温电路	103	3.14 热敏传感器	152
3.5.6 热电偶测温应用实例	105	3.14.1 半导体热敏电阻及其特性	152
3.6 热电阻传感器	108	3.14.2 半导体热敏电阻的应用	153
3.6.1 金属热电阻及其特性	108	3.15 霍尔式传感器	155
3.6.2 测量电路	110	3.15.1 工作原理	155
3.6.3 热电阻应用实例	111	3.15.2 霍尔元件的特性及其补偿	156
3.7 压电式传感器	114	3.15.3 霍尔集成电路	158
3.7.1 压电材料的特性	114	3.15.4 霍尔式传感器的应用及实例	160
3.7.2 常用压电材料	116	3.16 气敏传感器	161
3.7.3 压电传感器的等效电路和测量电路	117	3.16.1 概述	161
3.7.4 压电传感器的应用	120	3.16.2 半导体气敏电阻	162
3.8 超声波式传感器	123	3.16.3 热导式气敏传感器	164
3.8.1 超声波的种类及其特性	123	3.16.4 气敏传感器的应用实例	165
3.8.2 超声波发生器原理	123	习题与思考题	167
3.8.3 超声波接收器原理	124	第4章 微型化和智能化传感器	171
3.8.4 超声波传感器的应用	124	4.1 概述	171
3.9 振弦式传感器	126	4.2 微型温度传感器	172
3.9.1 工作原理及测量电路	126	4.2.1 热释电温度传感器	172
3.9.2 振弦式传感器的特性	128	4.2.2 PN结温度传感器	173
3.9.3 振弦式传感器的应用	129	4.2.3 集成(IC)温度传感器	174
3.10 光电式传感器	130	4.2.4 石英振子温度传感器	175
3.10.1 光电效应及其器件	130	4.2.5 微型温度传感器应用实例	176
3.10.2 光电元件的特性	134	4.3 硅压阻式微型压力传感器	180



4.3.1 硅盒制作工艺简述	180	5.4.3 多路模拟开关应用举例	217
4.3.2 普通型单片集成压力传感器	181	5.5 集成采样/保持器 (S/H)	217
4.3.3 具有温度补偿功能集成压力传感器	181	5.5.1 概述	217
4.3.4 频率输出型压阻式集成压力传感器	183	5.5.2 集成采样/保持器的工作原理及其主要技术指标	218
4.3.5 集成压力传感器 MPX3100	184	5.5.3 常用集成采样/保持器	220
4.3.6 MPX7000 系列压力变送器	185	5.6 系统误差校正技术	221
4.3.7 扩散硅差压变送器	186	5.6.1 利用误差模型校正系统误差	221
4.4 电容式微型传感器	187	5.6.2 利用校准曲线通过查表法修正系统误差	222
4.4.1 集成 (IC) 电容式加速度传感器 ADXL50	187	5.6.3 折线逼近法非线性校正	225
4.4.2 电容式数字输出压力变送器	189	5.6.4 平方插值法非线性校正	225
4.5 智能化变送器	190	5.7 量程自动切换与标度变换	226
4.5.1 ST-3000 系列智能变送器	191	5.7.1 量程自动切换	226
4.5.2 LD302 智能压力变送器	192	5.7.2 标度变换	227
4.5.3 3051 型智能压力变送器	193	5.8 A-D 转换原理、器件及应用	228
4.5.4 EJA 型差压 (压力) 智能变送器	194	5.8.1 双积分式 A-D 转换原理、器件及应用	228
4.5.5 阵列式智能气敏传感器	195	5.8.2 逐位逼近式 A-D 转换原理、器件及应用	241
4.5.6 阵列式智能压力图像传感器	196	5.8.3 V/F 转换原理及常用器件	247
习题与思考题	198	5.8.4 A-D 转换器的一般选择原则	253
第5章 数字化测量技术	199	5.9 D-A 转换原理及常用器件的应用	254
5.1 概述	199	5.9.1 D-A 转换原理	254
5.2 有源滤波器的设计	200	5.9.2 主要技术指标	255
5.2.1 低通有源滤波器的设计	201	5.9.3 D-A 转换器与单片机接口电路	255
5.2.2 高通有源滤波器的设计	202	5.10 LED 和 LCD 显示技术	260
5.2.3 带通有源滤波器的设计	203	5.10.1 七段 LED 显示器及其接口技术	260
5.2.4 有源带阻滤波器的设计	204	5.10.2 LCD 显示器及其接口技术	266
5.3 模拟信号放大技术	205	5.11 数字化测量仪表分析	270
5.3.1 概述	205	5.11.1 数字式计数频率计	270
5.3.2 通用型集成运算放大器	206	5.11.2 数字多用表	280
5.3.3 高精度集成运放	207	5.11.3 智能化数字存储示波器	286
5.3.4 高输入阻抗集成运放	208	5.11.4 逻辑分析仪的原理及应用	296
5.3.5 测量放大器	209	5.12 数字化测量仪表设计	302
5.3.6 程控增益放大器	211	5.12.1 智能温度变送器设计	302
5.3.7 集成隔离放大器	212	5.12.2 单片机电子称重系统的	
5.4 集成模拟多路开关	213		
5.4.1 概述	213		
5.4.2 常用集成模拟开关	214		



电路设计	311
5.12.3 单相电能计量系统设计	314
习题与思考题	322
第6章 抗干扰技术	323
6.1 干扰源与干扰耦合方式	323
6.1.1 干扰的来源	323
6.1.2 干扰的耦合方式	324
6.1.3 仪表内部的干扰	326
6.2 干扰抑制技术	326
6.2.1 串模干扰及其抑制技术	327
6.2.2 共模干扰及其抑制技术	329
6.2.3 电源引入干扰的抑制	333
6.2.4 其他抑制干扰的措施	334
习题与思考题	335
附录	337
附录 A 铂铑 ₁₀ —铂热电偶分度表	337
附录 B 镍铬—铜镍热电偶分度表	341
附录 C 镍铬—镍硅热电偶分度表	341
附录 D 铂电阻分度表	344
附录 E 铜电阻 (Cu50) 分度表	346
部分习题答案	347
参考文献	350

第 1 章

测量的基本概念

1.1 测量的概念和定义

在自然界中，对任何不同的研究对象，如要从数量方面对它进行研究和评价，都是通过测量代表其特性的物理量来实现的。

1.1.1 测量的基本方程

测量是以同性质的标准量（也称为单位量）与被测量比较，并确定被测量对标准量的倍数。因此，测量结果由数值（大小及符号）和相应的单位两部分组成。没有单位，数值是没有物理意义的。

设被测量为 x ，单位量为 x_0 ，测量结果的数值 A_x 为

$$A_x = \frac{x}{x_0} \quad (1-1)$$

式 (1-1) 称为测量的基本方程。

被测量的数值 A_x 与所选定的单位量 x_0 有关， x_0 越大， A_x 越小，反之亦然。对同一被测量 x ，若先后用单位量 x_{01} 和 x_{02} 与之比较，由式 (1-1) 可得

$$A_{x1} = x/x_{01}$$

和

$$A_{x2} = x/x_{02}$$

由此可得



$$A_{x2}/A_{x1} = K \quad (1-2)$$

即

$$A_{x2} = KA_{x1}$$

式中, K 称为换算因数。

由此可见, 换算因数 K 是这样一个数, 用一定单位量测量某一量所得的数值, 必须乘上换算因数 K 才能得出用新单位量表示的该被测量的数值。

1.1.2 单位制和单位

为了对同一被测量在不同的时间、地点进行测量, 能得到相同的结果, 必须采用公认的而且固定不变的单位。为了有利于各国之间的科学文化交流, 测量单位的确定和统一是非常重要的。

单位制的种类很多, 国际单位制(代号 SI) 具有严格的统一性、突出的简明性与广泛的实用性, 是生产、科研、文教、贸易和人们生活中广泛应用的统一单位。

1.1.3 测量仪表的基本功能

测量过程实际上是能量的变换、传递、比较和显示的过程。例如, 用水银温度计测量室温时, 室温被变换成玻璃管内水银柱的热膨胀位移, 而温度的标准量为玻璃管上的刻度。可见, 被测量和标准量都变换成线位移, 两者进行比较, 从而读出被测室温的数值(大小和单位)。

由此可见, 测量仪表应具有变换、选择、比较和显示 4 种功能。

1. 变换功能 变换是指把被测量按一定的规律转变成便于传输或处理的另一种物理量的过程。图 1-1 为变换元件的功能图,

设被测量为 x , 经变换后输出量为 y , 它们之间的函数关系为

$$y = F(x) \quad (1-3)$$

图 1-1 中实线所示的 y 与 x 之间的关系是理想情况, y 与 x 之间具有单值函数关系。

最简单、最理想的变换规律是变换前后 y 与 x 之间的关系成比例, 变换元件的这种特性称为线性特性。放大可看作变换的一种特殊形式, 即同类量的变换。

2. 选择功能 在实际的物理系统中, 除了被测量 x 外, 还有许多其他影响量 $u_1, u_2, \dots, u_m$ 等以不同程度影响输出量 y , 见图 1-1。实际上, 变换元件的输出量与输入量之间的关系是多变量函数关系, 即

$$y = F(x, u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (1-4)$$

变换元件除了特定的输出与输入的关系外, 不希望 $u_1, u_2, \dots, u_m$ 等影响量对 y 起作用。因此, 应具有选择有用信号、抑制其他一切无用信号的功能, 选频放大器就是一例。

3. 比较功能 由式(1-1)可见, 要确定被测量 x 对标准量 x_0 的倍数 A_x , 比较功能是必不可少的。

4. 显示功能 测量的最终目的是将测量结果用便于人眼观察的形式表示出来, 因此

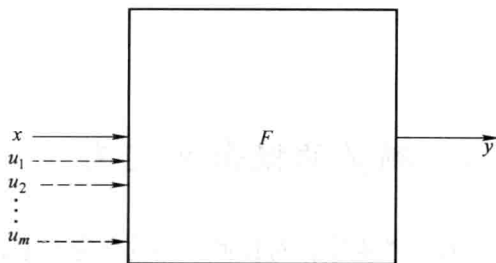


图 1-1 变换元件的功能图



显示功能是测量仪表的基本功能之一。测量仪表有模拟显示和数字显示两种显示方式。

1.2 测量仪表的结构及其基本性能

1.2.1 仪表的基本性能

评价仪表的品质指标是多方面的,作为仪表的基本性能,主要是衡量仪表测量能力的那些指标,如精确度、稳定性、测量范围、输入输出特性等。本节主要介绍精确度和稳定性两个指标,其余性能指标在后续章节中论述。

1.2.1.1 精确度

说明精确度的指标有两个:精密度和准确度。

1. 精密度 δ 精密度表示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样精细程度,在相当短的时间内连续重复测量多次,其测量结果(指示值)的分散程度。 δ 越小,精密度越高。例如某温度仪表的精密度 $\delta = 0.5^\circ\text{C}$,说明该表多次测量结果的分散程度不大于 0.5°C 。

2. 准确度 ε 准确度是指仪表的指示值(简称示值)偏离被测量真正值的程度。例如某电压表的准确度 $\varepsilon = 0.5\text{V}$,说明该表的示值偏离被测量的真正值不会大于 0.5V 。 ε 越小,准确度越高。

3. 精确度(简称精度) 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两者的代数和, $\tau = \delta + \varepsilon$ 。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,若只有某一个指标高而另一个指标低都不能说明精度高。精密度、准确度和精确度是3个不同的概念,不能混为一谈。

1.2.1.2 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引起示值的不稳定,以影响系数来表示。

1. 稳定度 δ_s 稳定度是由于仪表内部某些随机变化的因素引起的。例如仪表内部某些因素作周期性变化、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来表示。例如电压波动在 8h 内引起示值变化 1.3mV ,则可写成稳定度 $\delta_s = 1.3\text{mV}/(8\text{h})$ 。

2. 环境影响 使用仪表时的周围环境(如室温、湿度、大气压、振动等)条件变化引起仪表示值变化,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;其余依此类推。

1.2.2 测量仪表的结构

测量仪表(测量系统、传感器等^①)由若干环节组成。根据各个环节(或变换元件)的连接方式不同,仪表就有不同的组成结构。

① 以后若无特别说明,测量仪表均包括测量系统、传感器系统等。



1.2.2.1 直接变换型结构

直接变换型仪表由 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, 是一个开环系统, 见图 1-2。

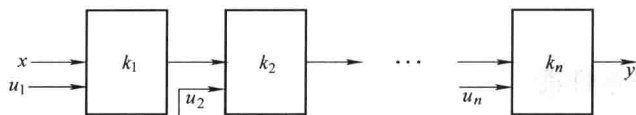


图 1-2 直接变换型结构

设各组成环节的传递系数为 $k_1, k_2, \dots, k_n$, 整个系统的传递系数 k 为

$$k = \prod_{i=1}^n k_i \quad (1-5)$$

在各个组成环节中难免会引进一些干扰信号 $u_1, u_2, \dots, u_n$, 这些干扰信号就会反映在输出信号 y 中。因此, 这种结构的仪表对各个组成环节的要求都很高, 各个环节均应具有很好的选择性, 否则, 仪表的稳定性较差, 精度不容易做得很高。

1.2.2.2 平衡变换型结构

平衡变换型结构有两个变换回路, 见图 1-3。一个是正向变换回路, 其各环节的传递系数为 $k_1, k_2, \dots, k_n$, 则正向变换回路的传递系数 k 如式 (1-5) 所示。另一个回路是由传递系数为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 组成的反向回路。由式 (1-5) 可得反向变换回路的总传递系数为

$$\beta = \prod_{i=1}^m \beta_i \quad (1-6)$$

因此, 图 1-3a 可简化为图 1-3b。

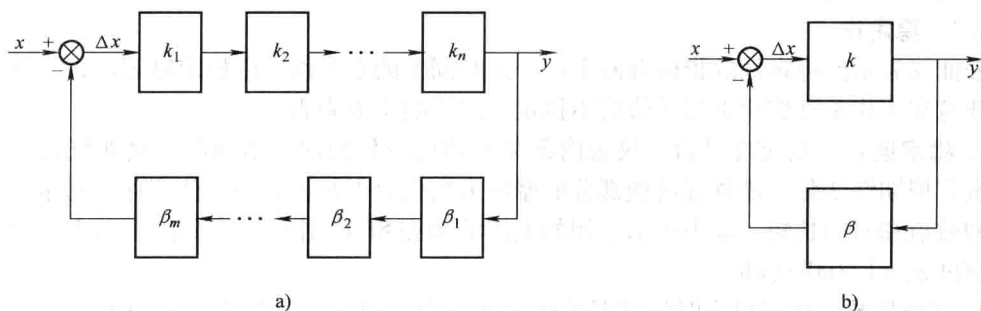


图 1-3 平衡变换型结构

a) 原理框图 b) 等效简化电路框图

由图 1-3 可见, 平衡变换型结构的仪表形成一个深度负反馈的闭环系统。由电子放大器的负反馈原理可知, 若 $k\beta \gg 1$, 则可得

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

由式 (1-7) 可见, 平衡变换型仪表的输出量 y 与正向变换回路各组成环节的性能无关, 因此正向变换回路中各环节引进的干扰不影响仪表的性能。但是, 反向变换回路各环节引进的干扰却影响仪表的性能。通常组成反向回路的变换环节不会多, 只要精心制作反



向变换回路, 提高其选择性功能和传递系数 β 的稳定性, 便能保证仪表具有较高的稳定性和高精度。

1.2.2.3 差动变换型结构

差动变换型结构由 k_1 、 k_2 和 k_3 3个回路组成, 见图1-4。每个回路都可以是前述的直接变换型或平衡变换型结构, k_1 和 k_2 回路的组成结构必须相同。被测量 x 以 $+x$ 和 $-x$ 分别作用于 k_1 和 k_2 回路, 可得 $y_1 = k_1 x$ 和 $y_2 = -k_2 x$ 。设 $k_1 = k_2 = k$, 若有干扰信号 u_1 和 u_2 分别作用于 k_1 和 k_2 回路, 则 $y_1 = k(x + u_1)$ 和 $y_2 = k(-x + u_2)$, y_1 和 y_2 在 k_3 回路中相减, 则得

$$y = k_3 [k(x + u_1) - k(-x + u_2)] = 2k k_3 x + k k_3 (u_1 - u_2)$$

若干扰信号 $u_1 = u_2$, 则

$$y = 2k k_3 x = Kx \quad (1-8)$$

式中, K 称为灵敏度, $K = 2k k_3$ 。

由式(1-8)可见, 差动变换型仪表的灵敏度较高。 k_1 和 k_2 回路引进的干扰只要 $u_1 = u_2$, 就不会影响输出量 y , 因此抗干扰能力较强。 k_3 回路引进的干扰会影响输出量 y , 只要精心制作 k_3 回路, 提高其选择性和稳定度, 便能提高仪表的稳定性和精确度。

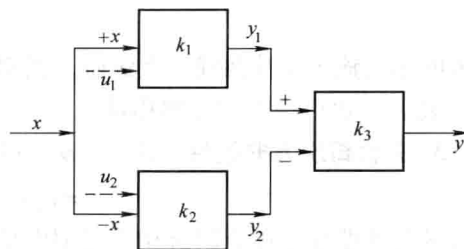


图1-4 差动变换型结构

1.3 测量仪表的输入输出特性

前面介绍了测量仪表的精确度和稳定性, 本节详细讨论测量仪表的输入输出特性。说明仪表输入输出特性的指标有静态特性和动态特性。

1.3.1 静态特性及其性能指标

1.3.1.1 静态特性

在测量过程中, 当输入信号 x 不随时间变化 ($dx/dt = 0$), 或者 x 随时间变化很缓慢时, 输出信号 y 与输入信号 x 之间的函数关系称为仪表的静态特性。仪表的静态特性可用高阶多项式代数方程表示:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \quad (1-9)$$

式中, x 为输入信号; y 为输出信号; a_0 为零位输出或零点迁移量; a_1 为仪表的灵敏度; $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性项的待定系数。

式(1-9)的多项式代数方程可能有下列5种情况:

1. 理想线性 在这种情况下, $a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$ 。由式(1-9)得

$$y = a_1 x$$

上式表明输入输出特性是经过坐标原点的一条直线。该直线上任何点上的斜率都相等, 因此仪表的灵敏度可表示为



$$a_1 = dy/dx = y/x = k = \text{常数}$$

仪表具有理想线性的输入输出特性。

2. 具有零点迁移的线性特性 在这种情况下, $a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$, $a_0 = \pm y_0$, 则得

$$y = \pm y_0 + a_1 x$$

仪表的输入输出特性曲线是在纵轴上的截距为 $\pm y_0$ 的直线, 相当于将仪表的零点迁移到 $\pm y_0$ 处。 y_0 也可视为零点漂移量。

3. 只含奇次方非线性 式 (1-9) 只含奇次方项, 即 $a_0 = a_2 = a_4 = \cdots = 0$ 时, 则得

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots$$

仪表的特性曲线在原点附近相当范围内是线性的。

4. 只含偶次方非线性 在这种情况下, $a_0 = a_3 = a_5 = \cdots = 0$, 则得

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \cdots$$

仪表的输入输出特性具有严重的非线性。

5. 普遍情况 见式 (1-9), 仪表的输入输出特性具有按自然数排列的非线性。

1.3.1.2 静态性能指标

表征仪表静态特性的指标有灵敏度、线性度、重复性和滞环 4 个指标。

1. 灵敏度 k 灵敏度是指测量仪表在稳态下, 输出的变化量对输入变化量之比, 即

$$k = dy/dx \quad (1-10)$$

它是仪表静态特性曲线上各点的斜率。测量仪表的灵敏度可分为 3 种情况:

(1) 灵敏度为常数 在整个测量范围内, 灵敏度 k 不随被测量的变化而变化, 而保持为常数。在这种情况下, 式 (1-10) 可表示为

$$k = y/x = \text{常数}$$

若在整个测量范围内灵敏度为常数, 仪表的静态特性是线性的, 指针式仪表标尺的刻度是均匀的。

(2) 灵敏度随被测量 x 的增大而增大 这种情况下, 仪表的静态特性是非线性的, 指针式仪表标尺的刻度特性是不均匀的。随着被测量 x 的增加, 仪表标尺的刻度将越来越疏。

(3) 灵敏度随被测量 x 的增大而减小 同样, 仪表的静态特性也是非线性的。但是随着被测量 x 的增大, 仪表标尺的刻度将越来越密。

2. 线性度 线性度是指仪表的实际静态特性曲线偏离其理论拟合直线的程度。通常也用仪表的非线性误差表示。仪表的非线性误差定义为: 仪表的实际静态特性曲线与理论拟合直线的最大偏差 Δy_m 与仪表输出满度值 y_m 之比的百分数 (见图 1-5a), 即

$$E_l = \pm \frac{\Delta y_m}{y_m} \times 100\% \quad (1-11)$$

由此可见, 仪表非线性误差的大小与理论拟合直线有关, 对同一条静态特性曲线, 若理论拟合直线不同, 计算所得的非线性误差会差别很大。因此, 不能笼统地提线性度或非线性误差, 必须说明所依据的理论拟合直线。根据理论拟合直线的取得方法, 有理论线性度、独立线性度、端基线性度、平均选点线性度和最小二乘法线性度等。下面介绍常用的



理论线性度、端基线性度和最小二乘法线性度。

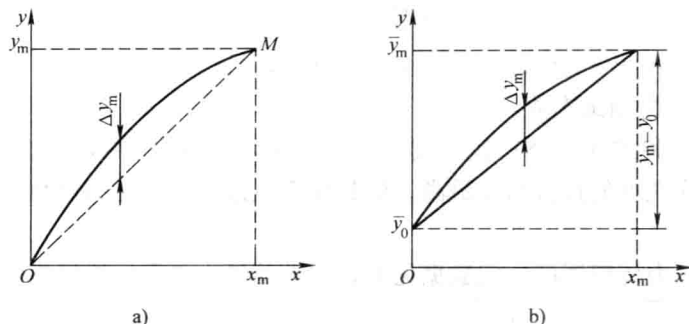


图 1-5 不同理论拟合直线所对应的线性度

a) 理论线性度 b) 端基线性度

(1) 理论线性度 理论线性度又称为绝对线性度。通常取仪表的零点作为理论拟合直线的始点 O ，以最大输入 x_m 的最大输出 y_m 对应的坐标点 M 为终点的连线作为理论拟合直线，见图 1-5a。

(2) 端基线性度 把仪表实际数据的零点输出平均值和满度输出平均值连成的直线作为理论拟合直线，其方程式为

$$y = b + kx \quad (1-12)$$

式中， y 为输出量； x 为输入量； b 为拟合直线在 y 轴上的截距； k 为拟合直线的斜率。

根据端基法作出的拟合直线（见图 1-5b）其方程式对应于式 (1-12)，即 $b = \bar{y}_0$ ， $k = (\bar{y}_m - \bar{y}_0)/x_m$ ，可得

$$y = \bar{y}_0 + \frac{\bar{y}_m - \bar{y}_0}{x_m} x \quad (1-13)$$

式中， $\bar{y}_0$ 为零点输出平均值； $\bar{y}_m$ 为满度输出平均值； x_m 为满度输入。

这种拟合直线的取得方法简单、直观，应用较广泛，但拟合精度较低。

(3) 最小二乘法线性度 拟合直线方程式见式 (1-12)。设实际测试点有 n 个，即 (x_1, y_1) ， (x_2, y_2) ， $\dots$ ， (x_n, y_n) ，则第 i 个校准数据与拟合直线上相应值之间的残余误差为

$$\Delta y_i = y_i - y = y_i - (b + kx)$$

最小二乘法拟合直线取得的原则是使 $\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2$ 为最小值。为此，必须由 $\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2$ 分别对 k 和 b 求一阶偏导数，并令其等于零，即

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta y_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta y_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0$$

由上面两式可求出 k 和 b 为

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-14)$$



$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-15)$$

式中, $\sum x_i = x_1 + x_2 + \cdots + x_n$; $\sum y_i = y_1 + y_2 + \cdots + y_n$; $\sum x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \cdots + x_n y_n$; $\sum x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2$; n 为测试次数。

将式 (1-14) 和式 (1-15) 代入式 (1-12) 便可得最小二乘法拟合直线方程。

最小二乘法线性度的拟合精度最高, 但其计算也最繁琐, 在测试数据较多时, 最好用计算机进行计算。

例 有一只压力传感器的标定数据见下表。求其最小二乘法线性度和灵敏度。

$x_i/10^5 \text{ Pa}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0
正行程 y_i/V	0.0020	0.2015	0.4005	0.6000	0.7995
反行程 y_i/V	0.0030	0.2020	0.4020	0.6010	0.8005

解 为求拟合直线方程式 (1-12), 必须计算式 (1-14) 和式 (1-15) 中各数值之和。由上表可知, 测试次数 $n=10$, 可求得各值如下:

$$\sum_{i=1}^{10} x_i = 10; \sum_{i=1}^{10} y_i = 4.012; \sum_{i=1}^{10} x_i y_i = 6.00575; \sum_{i=1}^{10} x_i^2 = 15$$

把上述数据代入式 (1-14) 和式 (1-5), 可求得

$$k = 0.39875$$

$$b = 0.00245$$

于是可得最小二乘法拟合直线的方程式为

$$y_i = 0.00245 + 0.39875 x_i$$

将各输入量 x_i 代入上式可得理论拟合直线各点的数值, 见下表:

$x_i/10^5 \text{ Pa}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0
y_i/V	0.00245	0.2018	0.4012	0.6006	0.79995

依次找出传感器的输出输入校准值与上述拟合直线相应点的偏差 Δy_i 如下:

正行程 $\Delta y_i/\text{V}$	-0.00045	-0.0003	-0.0007	-0.0006	-0.00045
反行程 $\Delta y_i/\text{V}$	0.00055	0.0002	0.0008	0.0004	0.00055

由上表可见, 最大偏差 $\Delta y_m = 0.0008$, 可求得最小二乘法非线性误差为

$$E_L = \frac{\Delta y_m}{y_m} \times 100\% = \frac{0.0008}{0.79995} \times 100\% = 0.1\%$$

压力传感器的灵敏度用输出量和输入量的测量范围之比来表示, 即

$$K = \left(\frac{0.79995 - 0.00245}{2.0 - 0} \right) \text{V/kPa} = 0.39875 \text{V/kPa}$$

也可以直接由拟合直线方程式的斜率 k 得到

$$K = k = 0.39875 \text{V/kPa}$$

3. 滞环误差 滞环误差表示仪表的正向 (上升) 和反向 (下降) 特性曲线的不一致程度。当被测量 x 连续增加时仪表的输出量 y_e 与被测量 x 连续减小时仪表的输出量 y_d 之间的偏差称为滞环误差, 见图 1-6。滞环误差用在测量范围内产生的最大滞环误差 $\varepsilon_{hm} =$



$|y_d - y_c|_m$ 与仪表满度值 y_m 之比的百分数表示, 即

$$E_{hm} = \frac{\varepsilon_{hm}}{y_m} \times 100\% \quad (1-16)$$

滞环误差主要由于仪表内部的弹性元件、磁性元件和机械部件的摩擦、间隙以及积尘等原因而产生。

4. 重复性 重复性是指仪表在输入量按同一方向作全程连续多次测量时所得到的静态特性曲线的不一致程度, 也用重复性误差表示, 见图 1-7。特性曲线一致, 重复性好, 重复性误差小。

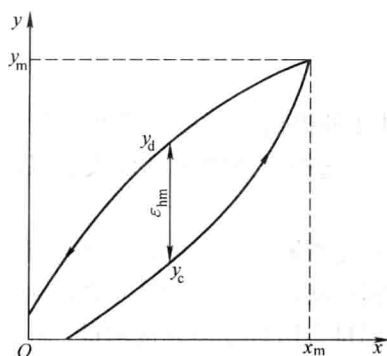


图 1-6 滞环误差

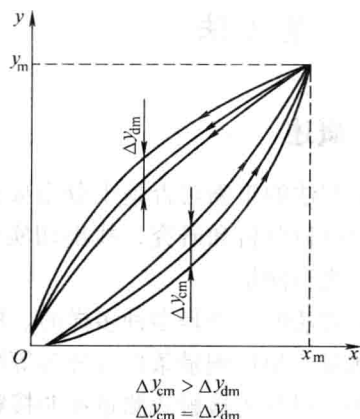


图 1-7 重复性误差

重复性误差用多次正行程测量中各个测量点输出值之间的最大偏差 Δy_{cm} , 以及多次反行程测量中各个测量点输出值之间的最大偏差 Δy_{dm} , 用 Δy_{cm} 和 Δy_{dm} 中最大一个作为 Δy_m 与满度值 y_m 之比的百分数来表示, 即

$$E_z = \pm \frac{\Delta y_m}{y_m} \times 100\% \quad (1-17)$$

利用图 1-7 和式 (1-17) 计算重复性误差比较繁琐, 而且精度很低。实际上, 仪表的重复性是用测量数据的分散程度来描述的, 因此它表征了仪表的精密度。仪表的精密度可用标准差估计值 $\hat{\sigma}$ 来表示。对于 $\hat{\sigma}$ 的计算可参考 2.3 节。计算出全部 $\hat{\sigma}$ 后, 找出其最大值 $\hat{\sigma}_m$, 然后取 $(2 \sim 3) \hat{\sigma}_m$ 作为 Δy_m , 利用式 (1-17) 计算重复性误差。该法计算重复性误差简便、精度高。

1.3.2 测量仪表的动态特性

在生产过程中, 许多被测量是保持恒定的或者变化是非常缓慢的。在这种条件下, 研究仪表的静态特性就具有重要意义。但是, 也有许多被测量随时间的变化非常快, 其幅值是时间的函数。当输入量是时间的函数时, 仪表的输出量与输入量之间的函数关系称为仪表的动态特性。任何仪表都有时间常数 T_m 和时延 τ_m , 可用一阶或二阶加时延环节的特性来描述仪表的动态特性。因此, 当仪表的输入量随时间变化很快时, 其输出量跟不上输入量的变化而存在较大的偏差。仪表输出量随时间变化的曲线与输入量随同一时间变化的曲