



普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程·自动化专业规划教材

电气与电子测量技术

罗利文 盛戈皞 编 著
张 君 李 喆



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电气与电子测量技术

罗利文 盛戈皞 编 著
张 君 李 喆

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书共 8 章。第 1 章主要介绍测量系统的构成和特性；第 2 章介绍误差理论；第 3 章介绍常用的传感器和差动电桥；第 4 章介绍集成运放和调理电路；第 5 章介绍了互感器、指针式电工仪表原理以及常见的绝缘预防性试验；第 6 章则介绍了现代数字化电气测量系统及其常用的算法；第 7 章介绍了 Labview 在电气测量中应用；第 8 章介绍了电气测量中典型的干扰源及其抗干扰对策。

本书内容丰富，理论推导严谨，可作为高等学校电气工程及自动化或相关专业的教材，也可作为从事相关工作的科技人员的参考书。

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

电气与电子测量技术 / 罗利文等编著. —北京：电子工业出版社，2011.12

ISBN 978-7-121-15315-0

I. ①电… II. ①罗… III. ①电气测量—高等学校—教材②电子测量技术—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 244278 号

责任编辑：董亚峰 特约编辑：王 纲

印 刷：北京京师印务有限公司
装 订：

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

开 本：787×1 092 1/16 印张：16.5 字数：489 千字

印 次：2011 年 12 月第 1 次印刷

定 价：29.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言

电气测量在发电、输配电、用电及保护的各个环节都必不可少，其重要性不必赘言。而且大多数的电气测量仪表，特别是数字化测量系统，电子测量电路必然是其中的重要组成部分。作者在多年的电气与电子测量技术教学中，使用过数本关于电气测量方面的教材，发现在电子测量电路部分内容大多停留在“模拟电子电路”课程的水平上，未作进一步的拓展和深化；同时，有些章节内容过于教条，不够具体，学生的学习热情不高。于是，作者产生重新编写教材的想法。经过一年的努力，我和几位同事合作，一起完成了本书的初稿，以校内讲义的形式在上海交通大学电气工程及其自动化专业三年级本科生中试用1年，虽然讲义版教材中错误不少，但学生对本课程的学习热情有明显提高。这极大地鼓舞了我和我的同事。于是，我们对讲义做了大量的修订，形成本书。

本书在总体内容安排上，不能说有什么创新。如前两章介绍测量系统和误差理论，接下来介绍常用的传感器原理和调理电路，后续章节介绍数字化测量系统等，最后是抗干扰技术。但在具体章节的内容组织上，力求结合电气测量的实际，让设计目标更加具体，激发学生将已学知识充分发挥运用。如第4章中关于调理电路的设计，较全面地介绍了实际集成运算放大器产品的多样性和不同特性，让学生在模电课程中建立的理想集成运放回归到现实非理想的、多样性的集成运放。为了适应现代数字化电气测量系统的广泛应用，本书着重对几种模数转换器的原理做了详细的分析和介绍，从而让学生能在具体的应用中，能根据需要选择正确的模数转换器。

在本书第8章中，重点对电气测量中常见的干扰源做了归纳总结，对干扰路径做了详细的讲解，并从最基本的原理——电磁感应原理出发，来阐述抗干扰的对策，通俗易懂，避免了过去很多教材教条式的罗列，学生普遍有所收获。

本书在编写过程中，上海交通大学电气工程系张彦教授、江秀臣教授对本书提出不少宝贵的意见；美国 Analogue Device 公司为相关电路设计提供了产品资料，在此一并表示感谢。

作者在高等学校从事电气及电子测量技术方面的教学工作近十年，期间也不断地从事相关的科研工作，对电气测量中常涉及的难点，如干扰、共模有深刻的理解和体会，也力求能在本书中得到体现。由于时间仓促，错误或不足之处恐难免，敬请读者及同行批评指正。

罗利文
2011年11月

目 录

第 1 章 测量及测量系统基础	1
1.1 测量及测量方法	1
1.2 现代数字化测量系统的基本组成	3
1.3 测量系统的静态特性	4
1.4 测量系统的动态特性	6
1.4.1 一阶系统	6
1.4.2 二阶系统	8
1.4.3 动态性能指标	10
1.5 测量系统的主要技术指标	12
习题	13
第 2 章 误差的基本理论	15
2.1 测量误差的基本概念	15
2.1.1 测量误差的几个名词术语	15
2.1.2 测量误差的主要来源	17
2.2 表达误差的几种形式	18
2.2.1 绝对误差	18
2.2.2 相对误差	19
2.2.3 引用误差	19
2.3 误差的性质及分类	20
2.3.1 系统误差	21
2.3.2 随机误差	21
2.3.3 粗大误差	21
2.3.4 三类误差的关系及其对测得值的影响	22
2.4 有效数字	22
2.5 系统误差的校正	23
2.5.1 系统误差产生的原因	24
2.5.2 系统误差的分类和特征	24
2.6 随机误差的统计学处理	28
2.7 粗大误差的剔除	34
2.8 误差的合成	39
2.9 数据的一元线性回归分析	41
2.9.1 常用的线性拟合法	41
2.9.2 相关系数及其显著性检验	42
2.9.3 经验公式的回归精度	43

2.10 测量结果的表达形式	46
习题	50
第3章 常用传感器及其调理电路	51
3.1 传感器概述	51
3.1.1 传感器的定义	51
3.1.2 传感器的一般结构	52
3.1.3 变送器	52
3.1.4 传感器的分类	52
3.2 金属温度传感器	53
3.2.1 工作原理	53
3.2.2 金属热电阻	54
3.2.3 热电阻技术参数	55
3.2.4 测量电路	58
3.3 热电偶	59
3.3.1 工作原理	59
3.3.2 热电偶定理	61
3.3.3 热电偶技术参数	62
3.3.4 热电偶的冷端温度补偿	63
3.3.5 热电偶的测温电路	66
3.4 热敏电阻	67
3.4.1 工作原理	67
3.4.2 热敏电阻的基本特性	68
3.4.3 热敏电阻应用特点	69
3.5 霍尔传感器	69
3.5.1 工作原理	69
3.5.2 霍尔元器件及其应用	70
3.5.3 霍尔电流传感器	71
3.6 磁敏式传感器	73
3.6.1 工作原理	73
3.6.2 磁阻元器件的主要特性	74
3.6.3 磁敏电阻的应用	75
3.7 电场测量探头	76
3.8 电涡流传感器	78
3.8.1 工作原理	78
3.8.2 电涡流传感器的基本特性	80
3.8.3 电涡流传感器的调理电路	81
3.8.4 电涡流传感器的应用	82
3.9 压电传感器	83
3.9.1 工作原理	83

3.9.2	压电传感器的等效电路和调理电路	85
3.9.3	压电传感器的应用举例	88
3.10	光电传感器	88
3.10.1	光电效应及其元器件	88
3.10.2	光电传感器的应用	90
3.10.3	光电传感器测量转速	90
3.11	电容式传感器	92
3.11.1	工作原理及其分类	93
3.11.2	调理电路	95
3.11.3	电容传感器的应用	98
3.12	电感式传感器	98
3.12.1	工作原理及其分类	98
3.12.2	同步分离法测量复阻抗	102
3.13	差动传感器与测量电桥	103
3.13.1	差动测量系统	103
3.13.2	差动传感器	103
3.13.3	测量电桥	105
	习题	110
第4章	测量系统中的调理电路	112
4.1	集成运算放大器	112
4.1.1	通用集成运算放大器和高性能集成运算放大器简介	112
4.1.2	通用集成运算放大器的使用	113
4.2	集成运算放大器的结构特点与主要技术参数	114
4.2.1	结构特点	114
4.2.2	集成运算放大器的主要技术参数	115
4.3	仪表放大器	119
4.3.1	仪表放大器的基本电路结构	119
4.3.2	集成仪表放大器	121
4.4	电气测量中的共模信号	124
4.5	集成差分放大器	127
4.6	隔离放大电路	128
4.7	集成乘法器及其应用	129
	习题	132
第5章	电气测量技术	133
5.1	高电压的测量	133
5.1.1	电磁式电压互感器	133
5.1.2	电容式互感器	138
5.1.3	光学电压传感器	141

5.2 大电流的测量	141
5.2.1 电磁式电流互感器	141
5.2.2 罗哥夫斯基 (Rogowski) 线圈	148
5.2.3 光学电流传感器	151
5.3 交流电气量的测量	151
5.3.1 频率和周期的测量	151
5.3.2 相位的测量	154
5.3.3 指针式电工仪	156
5.3.4 功率的测量	158
5.4 电力设备绝缘参数的测量	162
5.4.1 绝缘电阻和吸收比的测量	162
5.4.2 介质损耗因数 $\text{tg}\delta$ 的测量	166
5.5 接地阻抗的测量	168
5.5.1 测量接地阻抗的基本原理	169
5.5.2 接地阻抗的测量方法	170
5.5.3 接地阻抗测量注意事项	171
5.5.4 电力设备接地引下线导通试验	171
5.6 电力设备局部放电的测量	172
5.6.1 局部放电的机理分析	172
5.6.2 局部放电的主要参数	174
5.6.3 局部放电测量的基本回路及检测阻抗的选择	175
习题	176
第 6 章 数字化电气测量技术	177
6.1 数字化电气测量系统概述	177
6.1.1 数字化电气测量系统中的测量信号分类	177
6.1.2 数字化电气测量系统的结构	178
6.1.3 电气测量中常用的微处理器片上外设简介	179
6.2 A/D 转换器	182
6.2.1 名词术语	182
6.2.2 A/D 转换原理	184
6.2.3 常用 ADC 集成芯片及其与微处理器的接口设计	190
6.3 采样保持器 AD781	201
6.4 并行数字 I/O 接口	203
6.4.1 MCU 和 DSP 的并行数字 I/O 接口	203
6.4.2 +5V 和 +3.3V 数字 I/O 接口的互连	204
6.5 数字电表	205
6.5.1 数字电表的基本功能	205
6.5.2 数字化电能计量基础	206
6.5.3 集成三相多功能数字电能计量芯片 ADE7878	206

6.6 数字化测量常用算法	209
6.6.1 有效值的计算与数字积分	210
6.6.2 谐波分析和 DFT 变换	211
6.6.3 噪声抑制与数字滤波	219
习题	228
第 7 章 虚拟仪器及其开发语言	230
7.1 虚拟仪器	230
7.1.1 虚拟仪器的基本概念	230
7.1.2 虚拟仪器的特点和优势	230
7.1.3 虚拟仪器的结构	232
7.2 虚拟仪器的开发语言——LabVIEW 简介	232
7.2.1 LabVIEW 的优势	233
7.2.2 LabVIEW 的编辑界面	233
7.2.3 LabVIEW 的应用实例	234
7.3 虚拟仪器的开发语言——LabWindows/CVI	236
习题	238
第 8 章 电气测量中的抗干扰技术	239
8.1 电气测量中的干扰三要素	239
8.1.1 干扰源	239
8.1.2 干扰途径	239
8.1.3 受扰对象	239
8.2 电容耦合及其抗干扰对策	240
8.2.1 电场耦合或电容耦合	240
8.2.2 采用静电屏蔽层来隔离电场耦合的干扰	242
8.3 磁场耦合及其抗干扰对策	243
8.3.1 磁场耦合或互感耦合	243
8.3.2 防磁场(互感)耦合的措施	244
8.4 共阻抗耦合及抗干扰对策	245
8.4.1 冲击负载电流通过电源内阻抗影响测量仪器的供电质量	245
8.4.2 测量仪器内部不同电路环节间通过直流稳压电源内阻抗的耦合	246
8.5 共模干扰及其对策	247
8.5.1 共模信号及其对测量系统的干扰	247
8.5.2 共模干扰的抑制	249
8.6 测量系统输入级的接地与浮置	250
习题	252
参考文献	253

第 1 章 测量及测量系统基础

给我一个支点，我将撬起整个地球。

——阿基米德

本章首先对测量做出定义，再对测量方法进行分类。在此基础上，介绍现代数字化测量系统的基本构成，重点阐述测量系统的静态特性及一阶、二阶测量系统的动态特性。

1.1 测量及测量方法

测量是人们认识客观事物，并用数量概念描述客观事物，进而达到逐步掌握事物的本质和揭示自然界规律的一种手段。牛津词典对于“测量”术语的解释：“通过使用一个经过标准单位标定的仪器或设备，或者通过与一个已知规模大小的物体相比较来确定大小、数量或程度”（“ascertain the size, amount or degree of (something) by using an instrument or device marked in standard units or by comparing it with an object of known size”, from the Latin *mensurare* – to measure）。

测量的具体方法是由被测量的参数类型、量值的大小、所要求的测量准确度、测量速度的快慢、进行测量所需要的条件以及其他一系列因素决定的。每个物理量都可以用具有不同特点的多种方法进行测量。

为了探讨测量方法的特征，正确地选择测量方法，需要对测量方法进行分类。测量方法的分类形式很多，例如，根据被测量在测量期间是否随时间的变化而变化，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；根据测量器具的敏感元器件是否与被测物体接触，可分为接触测量和非接触测量等。但对于研究测试技术来说，更有意义的是按被测量值的获取方法进行分类，即直接测量法、间接测量法及在此两类方法的基础上形成的组合测量法。

1. 直接测量法

用预先按标准量标定好的仪器对被测量进行测量或用标准量直接与被测量进行比较，从而从仪器的指示机构的读数直接获得被测量的值的一种测量方法，叫做直接测量。采用这种测量方法，可以使用量具进行测量，也可以用预先按已知标准量定制好的直读式测量仪器或比较式仪器对被测量进行测量。例如，用电流表测量电流、电桥测量电阻等。这种方式的特点是测出的数据就是被测量本身的量，测量过程简单快捷，应用非常广泛。

直接测量法又可分为直接比较测量法、替代测量法、微差测量法、零位测量法和符合测量法等。

① 直接比较测量法：将被测量直接与已知其值的同类量相比较的测量方法。例如，用

刻度尺测量长度等。

② 替代测量法：将选定的且已知其值的量替代被测的量，使得在指示装置上有相同的效果，从而确定被测量值。

③ 微差测量法：将被测量与它的量值只有微小差别的同类已知量相比较并测出这两个量值间的差值，从而确定被测量值。

④ 零位测量法：通过调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的量，用平衡的方法确定出被测量的值。零位测量法最典型的例子就是用电桥测电阻。

⑤ 符合测量法：是由对某些标记或信号的观察来测定被测量与做比较用的同类已知量值间微小差值的一种微差测量法。例如，用游标卡尺测量物体的尺寸等。实现符合测量法的原理有游标原理、拍频原理、干涉原理和闪频原理等。

2. 间接测量法

间接测量是通过对与被测量有函数关系的其他量的测量而通过计算得到被测量值的测量方法。例如，用伏安法测电阻，通过测量电阻器两端的电压和通过电阻器的电流，根据欧姆定律，可以计算出被测电阻器的电阻值。

该方法需要测量的量较多，测量过程复杂费时，手续繁多，花费时间相对较长，引起的误差因素也较多；但如果对测量误差进行分析，并选择和确定具体的优化测量方法以及在比较理想的条件下进行测量，测量结果的准确度不一定低，有的甚至有较高的准确度。所以，一般情况下尽量采用直接测量，只有在下列情况下才选择间接测量：

- ① 被测量不便于直接读出；
- ② 直接测量的条件不具备，如直接测量该量的仪器不够准确或没有直接测量的仪器；
- ③ 间接测量的结果比直接测量更准确。

3. 组合测量法

在测量过程中，当测量两个或两个以上相关的未知数时，需要改变测量条件进行多次测量，根据直接测量和间接测量的结果，解联立方程组求出被测量，称为组合测量。例如，测量电阻 R 的温度系数 α 和 β ，根据电阻器在温度 t 时的电阻值与温度系数的关系式，可先测出不同温度下该电阻器的电阻值 R_{t1} 和 R_{t2} ，再通过求解下述联立方程组求 α 和 β ：

$$R_{t1} = R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]$$

$$R_{t2} = R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]$$

组合测量法实质上仍然是一种间接测量法。组合测量法有两个明显的优点：在准确度要求相同的情况下，组合测量需要进行的测量次数较少；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有所提高。组合测量的手续繁多，较花费时间，但容易达到较高的精度，通常在实验室中使用。

测量方法的选择与仪器的选择同等重要，即使在同一种类的测量方法中，仍有很多具体的测量方法。因此，在实际测量时，要根据具体情况选择合适的测量方法。

1.2 现代数字化测量系统的基本组成

现代电气测量系统一般是以嵌入式微处理器 μP 或计算机为中心的系统,采用数据采集与传感器相结合的方法,能最大限度地完成电气参数测量工作的全过程。它既能实现对信号的检测,又能对所获取信号进行分析处理求得有用信息。

现代电气测量系统的基本结构从硬件平台结构来看可分为以下两种基本类型。

① 以嵌入式微处理器 μP 为核心的单机系统。其特点是易制作成小型、专用化的测量系统,其结构框图如图 1-1 所示。

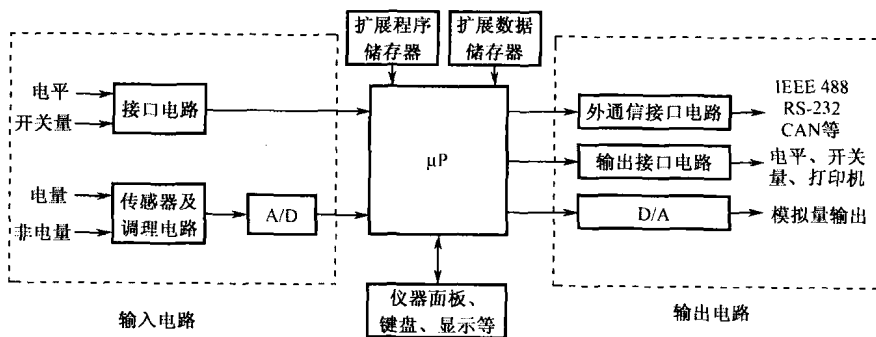


图 1-1 基于 μP 的数字化测量系统单机结构

图 1-1 中输入通道中待测量信号经过传感器及调理电路,输入 A/D 转换器。由 A/D 转换器将模拟量转换为数字信号,再送入 μP 进行分析处理。此外输入通道通常还会包含电平信号和开关量,它们经相应的接口电路(通常为电平转换、隔离等功能单元)送入 μP 。

输出通道包括 IEEE 488、RS-232、CAN 现场总线等通信接口,以及 D/A 转换器等。

μP 系统包括输入键盘和输出显示、打印机接口等,较复杂的系统还需要扩展程序存储器和数据存储器。

② 以 PC 为核心的应用扩展电气测量系统,其结构框图如图 1-2 所示。

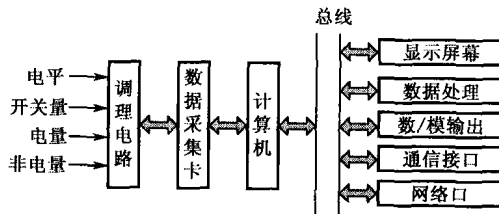


图 1-2 应用扩展电气测量系统结构框图

这种结构属于虚拟仪器的结构形式,它充分利用了计算机的硬件资源,配上数据采集卡和相应的应用软件就可以实现不同的测量功能。

现代电气测量系统与传统测量系统相比,具有以下特点。

经济性：网络中的虚拟设备具有无磨损、无破坏、可反复使用等优点，尤其是一些价格昂贵、损耗大的仪器设备，这点优势更明显。更重要的是还可以利用互联网实现远程虚拟测量控制，对那些没有相应实验条件的学生进行开放式的远程专业实验创造了条件，实现有限资源的大量应用。

网络化：网上实验具有全新的实验模式，实验者不受时间和空间上的制约，可随时随地进入虚拟实验室网站，选择相应的实验，进行虚拟实验操作。

1.3 测量系统的静态特性

所谓测量系统，即指众多环节组成的对被测物理量进行检测、调理、变换、显示或记录的完整系统，如包含传感器、调理电路、数据采集、微处理器或测试仪器，又可以指组成完整测量系统中的某一环节或单元，如传感器、调理电路、数据采集卡、测试仪表，甚至可以是更简单的环节，如放大器、电阻分压器、RC 滤波器等。

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_n \frac{d^n x(t)}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-1)$$

测量系统的静态特性就是在静态测量情况下描述实际测量系统与理想线性时不变系统的接近程度。此时，测量系统的输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 都是不随时间变化的常量（或变化极慢，在所观察的时间间隔内可以忽略其变化而视为常量），因此测量系统输入和输出各微分项均为零，那么式（1-1）就变为

$$y = \frac{b_0}{a_0} x = S \times x \quad (1-2)$$

式（1-2）表明理想测量系统的输出与输入之间呈单调、线性比例关系，即斜率 S 是常数。但实际的测量系统并非理性的线性时不变系统，二者之间就存在差别。所以常用灵敏度、非线性度和回程误差等定量指标来表征实际的测量系统的静态特性。

1. 灵敏度

灵敏度表征的是测量系统对输入信号变化的一种反应能力。一般情况下，当系统的输入 x 有一个微小增量 Δx 时，将引起系统的输出 y 也发生相应的微量变化 Δy ，则定义该系统的灵敏度为 $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ ，对于静态测量，若系统的输入/输出特性为线性关系，则有

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y}{x} = \frac{b_0}{a_0} = \text{常数} \quad (1-3)$$

可见静态测量时，测量系统的静态灵敏度也就等于拟合直线的斜率。而对于非线性测量系统，则其灵敏度就是该系统特性曲线的斜率，用 $S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$ 来表示系统的灵敏度。灵敏度的量纲取决于输入/输出的量纲。若测量系统的输入/输出同量纲时，则常用“放大倍

数”一词代替“灵敏度”。

灵敏度数值越大，表示相同的输入增量引起的输出变化量越大，则测量系统的灵敏度高。在选择测量系统的灵敏度时，要充分考虑其合理性。因为系统的灵敏度和系统的量程及固有频率等是相互制约的，一般而言，系统的灵敏度越高，则其测量范围往往越小，稳定性也往往越差。

2. 非线性度

非线性度是指系统的输出/输入之间保持常值比例关系（线性关系）的一种度量。在静态测量中，通常用实验的方法获取系统的输入/输出关系曲线，并称为“标定曲线”。由标定曲线采用拟合方法得到的输入和输出之间的线性关系，称为“拟合直线”。非线性度就是标定曲线偏离其拟合直线的程度，如图 1-3 所示。作为静态特征参数，非线性度是采用在测量系统的标称输出范围（全量程） A 内，标定曲线与该拟合直线的最大偏差 B_{\max} 与 A 的比值，即

$$\text{非线性度} = \frac{B_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

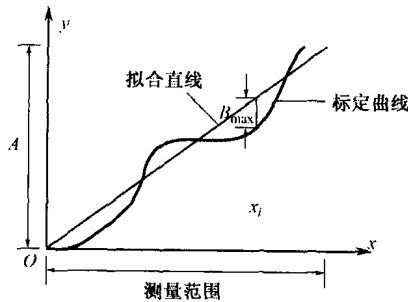


图 1-3 非线性度

拟合直线如何确定，目前尚无统一标准，但常用的拟合原则是：拟合所得的直线，一般应通过坐标原点（ $x=0, y=0$ ），并要求该拟合直线与标定曲线间的最大偏差 B_{\max} 为最小。根据上述原则，其拟合方法往往是采用最小二乘法来进行拟合，即令 $\sum_i B_i^2$ 为最小。有时在比较简单且要求不高的情况下，也可以采用平均法来进行拟合，即以偏差 $|B_i|$ 的平均值作为拟合直线与标定曲线接近程度。一般就把通过拟合得到的该直线的斜率作为名义标定因子。

3. 回程误差

回程误差也称为滞差或滞后量，表征测量系统在全量程范围内，输入递增变化（由小变大）中的标定曲线和递减变化（由大变小时）中的标定曲线二者静态特征不一致的程度。它是判别实际测量系统与理想系统特征差别的一项指标参数。如图 1-4 所示，理想的测量系统对于某一个输入量应当只有单值的输出，然而对于实际的测量系统，当输入信号由小变大，然后又由大变小时，对应于同一个输入量有时会出现数值不同的输出量。在测量系统

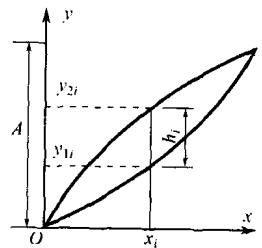


图 1-4 回程误差

的全量程 A 范围内, 不同输出量中差值最大者 ($h_{\max} = y_{2i} - y_{1i}$) 与全量程 A 之比, 定义为系统的回程误差, 即

$$\text{回程误差} = \frac{h_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

回程误差可以由摩擦、间隙、材料的受力形变或磁滞等因素引起, 也可能反映着仪器的不工作区 (又称死区) 的存在, 所谓不工作区就是输入变化对输出无影响的范围。

1.4 测量系统的动态特性

测量系统动态特性是指输入量随时间快速变化时, 系统的输出随输入而变化的关系。在输入变化时, 人们所观察到的输出量不仅受到研究对象动态特性的影响, 也受到测量系统动态特性的影响。例如, 人们都知道在测量人体体温时, 必须将水银体温计放在口腔 (或腋下) 保持足够的时间, 才能将体温计的读数作为人体的温度; 否则, 若将体温计一接触口腔 (或腋下) 就拿出来读数, 其结果必然与人体实际温度有很大差异, 其原因是温度计这种测量系统本身的特性造成了输出滞后于输入, 这说明测量结果的正确与否与测量装置的动态特性有很大的关系。

可见, 对用于动态测量的测量系统, 必须对其动态特性有清楚的了解。否则, 根据所得到的输出是无法正确地确定所要测定的输入量。因为一般来说, 当测量系统输入时随时间变化的动态信号 $x(t)$ 时, 其相应的输出 $y(t)$ 或多或少总是与 $x(t)$ 不一致, 两者之间的差异即为动态误差。研究测量系统的动态特性, 有利于了解动态输出与输入之间的差异以及影响差异大小的因素, 以便于减少动态误差。

一般来说, 在所考虑的测量范围内, 实际的测量系统总是被处理为线性时不变系统, 因而总可以用式 (1-1) 所示的常系数线性微分方程来描述系统与输出与输入的关系。但为了研究和运算的方便, 常通过拉普拉斯变化在复数域 S 中建立其相应的“传递函数”, 并在频域中用传递函数的特殊形式——频率响应, 在时域中用传递函数的拉普拉斯反变化——权函数, 以利于更便捷、明了地描述测量系统的动态特性。

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\int_0^{\infty} y(t)e^{-st} dt}{\int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt} \quad (1-6)$$

动态性能指标按照其所在的分析域可以分为时域型和频域型。

1.4.1 一阶系统

任意一个系统可视为多个一阶、二阶系统的组合。图 1-5 所示的质量为零的弹簧-阻尼机械系统、RC 电路都是一阶系统。

上例中可由通式表示:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-7)$$

对式 (1-7) 进行变换为

$$\tau \dot{y}(t) + y(t) = kx(t) \quad (1-8)$$

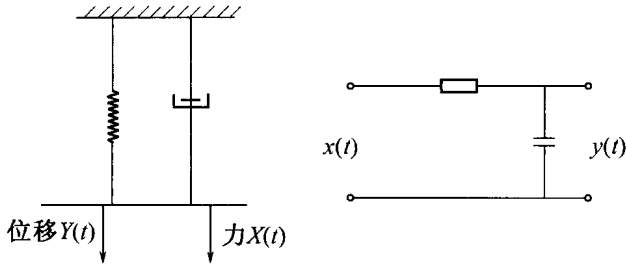


图 1-5 典型一阶系统

其中，静态灵敏度 $k = \frac{b_0}{a_0}$ ，时间常数 $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ 。

那么一阶系统的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (1-9)$$

对应频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{k}{j\omega\tau + 1} \quad (1-10)$$

幅频特性为 $A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau\omega)^2}}$ ，相频特性为 $\phi(\omega) = -\arctg\omega\tau$ ，如图 1-6 所示。

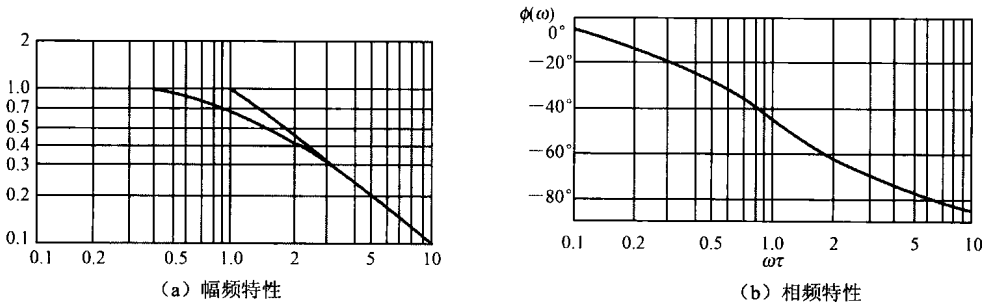


图 1-6 一阶系统幅频和相频曲线

由图 1-6 可见一阶系统频率特性的特点：

① 一阶系统是一个低通环节。只有当 ω 远小于 $1/\tau$ 时，幅频响应才接近于 1，因此一阶系统只适用于被测量缓慢或低频的参数。

② $\omega = \frac{1}{\tau}$ 幅频特性降为原来的 0.707（即 -3dB），相位角滞后 45° ，时间常数 τ 决定了测量系统适应的工作频率范围。

③ 时间常数 τ 越小，频率响应特性越好。

④ 当 $\omega\tau \ll 1$ 时， $k(\omega) \approx 1$ ， $\phi(\omega) = -45^\circ$ ，表明系统输出与输入为线性关系，相位差与

频率 ω 呈线性关系，输出 $y(t)$ 比较真实地反映输入 $x(t)$ 的变化规律。

1.4.2 二阶系统

图 1-7 所示的质量-弹簧-阻尼机械系统、RLC 电路都是二阶系统。

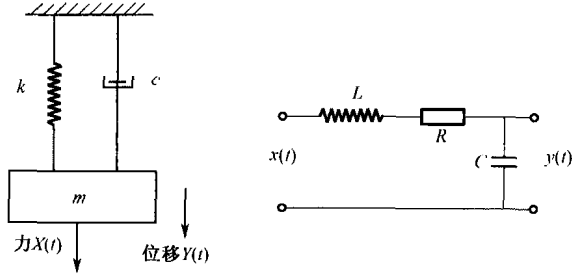


图 1-7 典型二阶系统

对于二阶系统同样可用通式表示：

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-11)$$

对应传递函数为

$$H(s) = \frac{Y}{X}(s) = \frac{k}{s^2 / \omega_n^2 + 2\zeta s / \omega_n + 1} \quad (1-12)$$

对应频率函数为

$$H(j\omega) = \frac{k}{\frac{(j\omega)^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta j\omega}{\omega_n} + 1} = \frac{k}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right) + 2j\zeta \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (1-13)$$

其中，静态灵敏度 $k = \frac{b_0}{a_0}$ ，系统固有频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$ ，阻尼比 $\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ 。

频率函数的幅频特性为

$$K(\omega) = \frac{k}{\sqrt{\left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1-14)$$

频率函数的相频特性为

$$\phi(\omega) = -\arctg \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \quad (1-15)$$

对式 (1-15) 取对数，可得