



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
本书荣获中国石油和化学工业优秀出版物奖（教材奖）一等奖

自动检测技术

第三版

王化祥 编著



化学工业出版社



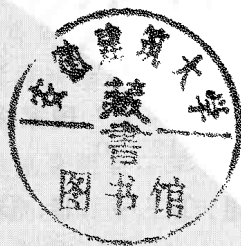
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

本书荣获中国石油和化学工业优秀出版物奖（教材奖）一等奖

自动检测技术

第三版

王化祥 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在介绍测量误差理论、测量系统特性及系统可靠性基本知识的基础上,系统地阐述了温度、压力、流量、液位、成分分析等过程参数以及运动控制系统中的位置、速度(转速)、转矩及功率测量等参数的检测原理、测量方法、测量系统构成及测量误差分析,同时还注意介绍各种测量装置的安装使用条件,以保证检测系统的测量精度。

本书可作为高等院校自动化、测控技术与仪器及相关专业的教材,也可供从事自动化检测技术、过程控制以及运动控制领域科研及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术/王化祥编著. —3版. —北京:化学工业出版社, 2018.2
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-31215-0

I. ①自… II. ①王… III. ①自动检测-高等学校-教材
IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第309231号

责任编辑:唐旭华 郝英华

装帧设计:张 辉

责任校对:王素芹

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张19 $\frac{3}{4}$ 字数516千字 2018年3月北京第3版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:45.00元

版权所有 违者必究

前 言

本书第一版自 2004 年 8 月出版到现在已 13 年多,使我们深感荣幸的是本书受到不少大专院校欢迎,并被选为教材。本次再版,编者努力在保持原有教材特点基础上,对教材某些部分内容作修改补充。

编者编写这本教材的宗旨是,既注意保持传统的流程工业中主要参数的基本检测技术有关内容,又力求反映当前国内外检测技术的最新成就和发展。本书第 1~3 章重点讲述了测量系统的测量误差分析及处理、测量系统的构成和特性分析以及测量系统的可靠性等有关内容,使学生能从测量系统的角度,对测量误差、测量精度和测量系统特性及可靠性有一个总体的了解;第 4~8 章主要介绍了流程工业中的主要参数,如温度、压力、液位、流量、成分分析等参数的检测技术,以及动力系统的机械量,如位置、速度、转矩及功率测量等相关内容。本次修订对“流量测量”章节进行了进一步的修改和调整,主要考虑加深基本概念和基本理论有关内容的阐述。其中,有关传统的流程工业中广泛应用的测量方法和测量技术是本书的基本内容,学生需要牢固掌握;同时本书也包括了目前流程工业中参数检测的最新技术,如温度测量中“红外测温仪与红外热像仪”、流量测量中“多相流检测技术”,以及运动控制中有关机械量测量方法,这有助于学生扩大视野、开阔思路,掌握当前最新科技发展动态,进而提高解决实际问题的能力。

本书按照教学学时的要求安排内容(教学课时一般安排为 64 学时),内容较为丰富;文字力求通俗易懂;为便于学习,每章均附有一定的思考题和习题(附有答案),以帮助读者学习时练习与参考。对于教学学时不足 64 学时,可选择重点内容讲解。

“自动检测技术”既是一门独立的课程,又是一门交叉应用专业课,即融传感技术、电子技术、计算机技术及通信技术等于一体的课程,为学生掌握跨学科研究的思路和方法奠定了基础。

本书由王化祥教授编著。本书上一版修订时张涛教授对流量测量一章进行了改写,张淑英副教授对书稿进行了认真校对,王超、许燕斌搜集有关资料并制图。同时编者在编写本书的过程中,参考和引用了其他专家学者的有关著作,在此一并表示感谢!

本书相关教学电子课件可免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用,如有需要请联系: cipedu@163.com。

由于编者学识有限,书中不妥之处在所难免,恳请诸位专家、读者批评指正。

编 者

2017 年 11 月于津大园

目 录

绪论	1	思考题与习题	133
1 检测系统基本特性	5	附表 5.1 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	134
1.1 检测系统的数学模型	5	附表 5.2 镍铬-镍硅热电偶分度表	135
1.2 检测系统的特性及性能指标	5	附表 5.3 工业热电阻分度表	135
1.3 不失真测量的条件	17	附表 5.4 各种材料在 $\lambda = 0.65\mu\text{m}$ 下的单色 辐射率 ε_λ	136
1.4 测量系统动态特性参数的测定	20	附表 5.5 各种材料辐射率 ε	136
思考题与习题	25		
2 测量误差与数据处理	27	6 流量测量	137
2.1 误差的基本概念	27	6.1 概述	137
2.2 随机误差	29	6.2 容积式流量计	142
2.3 有限次测量误差分析与处理	31	6.3 浮子流量计	148
2.4 系统误差	37	6.4 涡轮流量计	156
2.5 粗大误差	41	6.5 旋涡流量计	163
2.6 误差的传递和综合	43	6.6 电磁流量计	169
2.7 测量不确定度	45	6.7 超声流量计	177
思考题与习题	51	6.8 节流式流量计	181
3 测量系统的可靠性	52	6.9 质量流量计	202
3.1 可靠性概念及其特征量	52	6.10 多相流体的流量测量	207
3.2 不可修复系统的可靠性	55	6.11 流量标准装置	218
思考题与习题	58	思考题与习题	223
4 压力测量	60	7 物位测量	225
4.1 概述	60	7.1 浮力式液位测量	225
4.2 液柱式压力计	61	7.2 静压式液位测量	233
4.3 弹性式压力计	63	7.3 电容式液位测量	238
4.4 电远传式压力计	66	7.4 超声波物位测量	241
4.5 压力表的选择、校验和安装	91	7.5 微波法物位测量	244
思考题与习题	93	思考题与习题	247
5 温度测量	95	8 成分分析	249
5.1 概述	95	8.1 概述	249
5.2 热电偶测温	99	8.2 热导式气体分析器	250
5.3 热电阻测温	112	8.3 氧化锆氧分析器	257
5.4 辐射式测温法	119	8.4 气相色谱分析仪	262
5.5 红外测温仪与红外热像仪	128	8.5 工业电导仪	273
		8.6 工业酸度计	278
		思考题与习题	285

9 动力机械量测量	286	9.5 无速度传感器技术	303
9.1 位置测量	286	思考题与习题	303
9.2 速度（转速）测量	296	部分习题参考答案	305
9.3 转矩测量	299	参考文献	307
9.4 霍尔电压、电流测量	302		

绪 论

一、过程检测的对象与需求

在工业生产中，反映过程的参数常见有温度、压力、流量、物位、成分、密度等。这些参数的检测构成了过程检测的基本内容，这对于保证产品的产量与质量，对于企业节能降耗增效，提高市场竞争力，对于保障安全生产，都起着十分重要的作用。

过程检测是生产过程自动控制系统的重要组成部分。实施任何一种控制，首要问题是要准确及时地把被控参数检测出来，并变换成为调节、控制装置可识别的方式，作为过程控制装置判断生产过程的依据。因此，过程检测是实现生产过程自动化、改善工作环境、提高劳动生产率的重要环节。如加热炉的温度控制，首先应对被测对象即炉膛内炉温进行测定，将测定数据提供给操作人员掌握炉况，并将此工况值送入调节或控制装置以便实施自动控制炉温。

二、检测系统的组成与功能

检测系统的主要作用在于测量各种参数以用于显示或控制。为实施测量，一般检测系统都包括以下几部分：传感器、测量电路、显示或输出部分。当然，根据传感器输出测量信号的形式不同及测量系统的功能不同，检测系统的构成也相应地有所区别。图 1 所示的计算机辅助检测系统主要由传感器、基本转换电路、信号预处理电路、微机处理、输出等环节组成。其中，基本转换电路和信号预处理电路统称为测量电路。

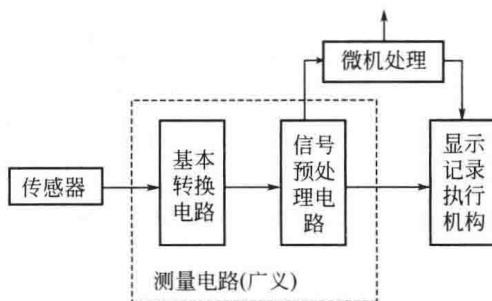


图 1 检测系统构成

(1) 传感器

传感器是将各种非电量（包括物理量、化学量和生物量等）按一定规律转换成便于处理和传输的另一种物理量（一般为电量）的装置。传感器是检测系统中的关键器件，是实现自动检测及控制的首要环节。

(2) 测量电路

测量电路的功能是将传感器输出的电信号经过必要的转换和信号处理，使之便于驱动显示、记录、执行机构或进行微机数据处理。测量电路的组成与传感器输出测量信号的形式及测量系统（或仪器）功能要求有关，由此决定测量电路的类型，其中绝大部分为模拟量测量电路。图 2 所示为模拟量测量电路的基本构成方框图。

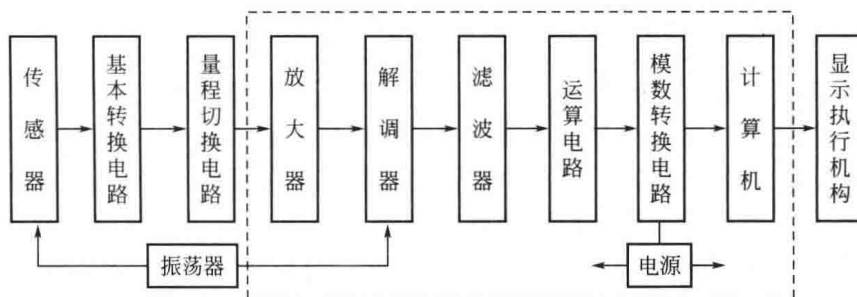


图 2 模拟量测量电路

(3) 微机数据处理

微机在检测系统中的应用，使检测系统产生了质的飞跃。如计算机数据采集系统、智能数据采集系统及虚拟设备技术等都是计算机技术在测量系统中应用的结果。

测量数据的微机处理，不仅可以对信号进行分析、判断、推理，产生控制量，还可以用数字、图表显示测量结果。如果在微机中采用多媒体技术，可使测量结果的显示丰富多彩。

(4) 显示输出部分

显示输出部分是检测系统向观察者显示或输出被测量数值的装置。显示输出部分包含显示和打印记录装置、数据处理和控制装置等，它们不仅可以实时检测，而且可以实现对被测对象的控制。目前，显示方式可分为指针式、数字式、屏幕式三种。

三、检测系统的分类

在生产过程中，不同行业生产流程复杂多样，被测对象多样性和复杂化对过程检测提出了诸多要求。从企业的原辅材料、燃料进厂到生产过程安全、环保、质量、产品监控等，均涉及检测问题。下面介绍常见的检测分类方法。

(1) 按被测参数分类

常见的被测参数有过程参数、电气参数、机械参数等几大类。

电气参数有电能、电流、电压、频率等。

机械参数有质量、距离、振动、缺陷检查、故障诊断等。

过程参数主要是热工参数，通常又可细分为温度、压力、流量、物位、湿度、密度、成分分析等。每种参数被测对象范围、特性不同需采用检测方法和装置不同，因此过程参数检测仪表用量大、检测介质多变、所处环境恶劣，故本书重点讲述这类非电量的过程参数。

(2) 按使用性质分类

检测仪表使用场合不同决定其使用性质的差异，通常可据此分为工业用表、实验室仪表和标准表三种。

工业用表，是指在实际工业现场长期使用的仪表，为数最多，根据安装地点的不同又分为现场安装和控制室安装。

实验室仪表精确度比工业仪表高，但对使用环境如温度、湿度、振动等要求较严，往往无需特殊的防水、防尘措施，宜在实验室条件下使用。

标准表是专用于校准工业用表和实验室仪表的。各企业使用计量标准表时须经所在地计量部门定期检定，获得有效检定合格证书方可使用。

(3) 按是否接触被测介质分类

可分为接触式和非接触式检测仪表。

接触式仪表的检测元件与被测介质直接接触，感受被测量的作用或变化，从而获得测量信号。如热电阻温度计测温、电容式物位计测物位等都是接触式，其测量结果较准确，但易受介质物理、化学性质影响。

非接触式仪表不直接接触被测介质，而是间接感受被测量的变化达到检测目的。如辐射温度计不与被测物直接接触，而是接收被测物热辐射的能量并转换为电信号，再按辐射定律以温度值显示出来。其特点是不受被测对象污染或影响，使用寿命长，适用于接触式仪表某些难以胜任的场合，但测量精度一般比接触式略低。

(4) 按被测对象状态分类

检测仪表按被测对象状态可分为静态和动态测量。静态测量是指被测对象处于稳定状态，其被测参数不随时间变化或随时间缓慢变化；动态测量是指被测对象处于不稳定状态，

或被测参数随时间变化的情况下实施的测量。

(5) 按仪表各环节连接方式分类

如前所述,检测仪表是由传感器、测量电路及显示输出部分等环节组成,这些内部环节的连接方式不同,使检测仪表有开环式与闭环式之分。

开环式仪表中各环节按开环方式连接,如图3所示,仪表中前一环节的输出是后一环节的输入,首尾相接形成测量链,信号由输入端到输出端沿一个方向传递。

闭环式仪表又称反馈式仪表,如图4所示。闭环式仪表最大特点是整个仪表的传递函数只与反馈环节传递函数 K_f 有关,而与各串联环节无关,故在很大程度上消除或减少了其他环节的影响。

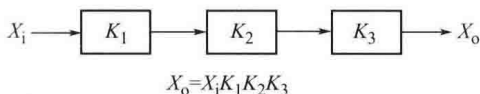


图3 开环式仪表方框图

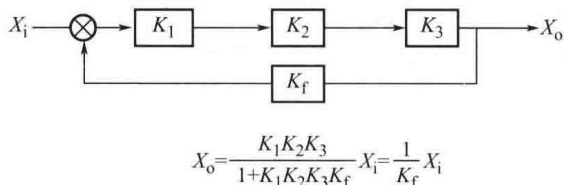


图4 闭环式仪表方框图

四、检测技术的发展

目前,非电量测量技术发展的总趋势如下。

(1) 不断扩大测量范围,提高可靠性和精度

随着科学技术的发展,对测量技术要求不断提高,尤其是测量范围的进一步扩大。如为满足超低温技术发展的要求,利用超导体的约瑟夫逊效应已开发出能测量 10^{-6} K 的超低温传感器;辐射型温度传感器最高测量温度原理上可达 10^5 K,但可控聚核反应理想温度却要达到 10^8 K,这就要求超高温测量范围还要进一步扩大。此外,超高压测量、大吨位如 3×10^7 N 以上测量等也都需要扩大测量范围。

随着测量范围的不断扩大,测量环境将变得越来越复杂和恶劣,这就要求测量的可靠性随之提高。如导弹和卫星上安装的测量仪器,既要能耐高温,又要能在极低温和强辐射的环境下保持正常工作,因此,它必须有极高的可靠性和工作寿命。

科学技术的发展,对测量精度要求也在不断提高。因为,只有测量精度更高,才能更准确地反映被测量的真实情况。

(2) 开发集成化、一体化、多功能化的传感器

随着半导体技术的发展,现在部分传感器实现了传感器与信号调节电路的集成化、一体化。在半导体技术基础上,利用某些固体材料的物理性质变化(机械特性、电特性、热特性等)实现物理量的变换,同时把测量电路也集成在一起,可以直接转换出所需要的电信号供显示输出单元使用。如压阻式传感器、集成温度传感器等。多功能化是指把两种或两种以上敏感元件集成于一体,在一块芯片上可实现多种功能。如半导体温湿敏传感器、多功能气体传感器等。

(3) 非接触测量技术

接触式测量是把传感器安装在被测对象上,直接感受其物理量的变化,但在有些情况下,这会使被测对象工作状态受到干扰。如温度传感器贴在被测物体上,会使被测物体散热、导热状态发生变化,影响测温精度。此外,有些被测体上不可能安装传感器,如测量高速旋转体的转速、振动等。因此,非接触测量技术越来越受重视,已开发出光电式、电涡流式、超声波及微波等传感器,同时人们也正在研究利用其他的原理及方法进行非接触测量。

(4) 利用计算机技术使测量智能化，提高测试水平

自从微处理器特别是单片机问世以来，使传统的测量仪器变为智能仪器，增加了功能，提高了精度。智能仪器一般都可以完成自校准、自调零、自动测试，并能对传感器非线性进行校正，从而提高测量精度，增加可靠性。

此外，配备计算机大型数据采集系统，可同时采集多达数千路信号，并可根据误差理论自动进行测量数据处理，其处理后的结果，既可以用磁盘长期储存、用打印机打印、用绘图仪绘出曲线，又可以在计算机屏幕上观看。因此，大大增强了数据采集的功能和测量水平。

20 世纪末，国外提出了虚拟仪器的概念。在通用计算机系统上，利用与此计算机相配的硬件板卡和组态软件组成具有测量控制功能的系统。在虚拟仪器中软件集成了数据采集、控制、处理、打印输出及用户界面等功能，用户可以根据自己的需要，组建自己专用的测量仪器，打破了传统测量仪器由厂家定义而用户无法改变的方式，给测量领域注入了新观念。

1 检测系统基本特性

1.1 检测系统的数学模型

在工程实践和科学实验中,常遇到的一些检测系统大都可以认为是线性系统,不论是电气、机械、热工或生物医学工程等系统,均可以近似地用常系数线性微分方程来描述。

当线性系统在不变的单输入和单输出时,并忽略外界噪声干扰的影响,其检测系统的数学模型表示为

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) \\ &= b_m \frac{d^m X(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dX(t)}{dt} + b_0 X(t) \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中 $Y(t)$ ——输出量;

$X(t)$ ——输入量;

t ——时间;

n 和 m ——正整数,一般 $n \geq m$;

$a_0, a_1, \cdots, a_n$ 及 $b_0, b_1, \cdots, b_m$ ——与检测系统特性有关的常数。

对上式进行拉氏变换,即可由时域形式变换到复频域形式,当初始条件为零时,得到系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1.2)$$

式中 s ——复频率。

传递函数是一个有理分式,可以很方便地描述系统特性。

1.2 检测系统的特性及性能指标

检测系统的输入量可分为静态量和动态量两类。静态量指稳定状态的信号或变化极其缓慢的信号。动态量通常指周期信号、瞬变信号或随机信号。无论静态量或动态量,检测系统的输出量都应当不失真地复现输入量的变化。这主要取决于检测系统的静态特性和动态特性。

1.2.1 静态特性及其指标

检测系统在被测量的各个值处于稳定状态时,输出量和输入量之间的关系称为静态特性。

通常,要求系统在静态情况下的输出与输入之间关系保持线性。在不考虑迟滞和蠕变效应时,输出量和输入量之间的关系可由下列方程式确定。

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \cdots + a_n X^n \quad (1.3)$$

式中 Y ——输出量;

X ——输入量；

a_0 ——零位输出；

a_1 ——检测系统的灵敏度，常用 K 表示；

$a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性项待定常数。

由式(1.3)可知，如果 $a_0 = 0$ ，表示静态特性通过原点。此时静态特性是由线性项 (a_1, X) 和非线性项 ($a_2 X^2, \dots, a_n X^n$) 叠加而成，一般可分为以下四种典型情况。

① 理想线性 [见图 1.1(a)]

$$Y = a_1 X \tag{1.4}$$

② 具有 X 奇次阶项的非线性 [见图 1.1(b)]

$$Y = a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \dots \tag{1.5}$$

③ 具有 X 偶次阶项的非线性 [见图 1.1(c)]

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_4 X^4 + \dots \tag{1.6}$$

④ 具有 X 奇、偶次阶项的非线性 [见图 1.1(d)]

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + \dots \tag{1.7}$$

由此可见，除图 1.1(a) 为理想线性关系外，其余均为非线性关系。其中具有 X 奇次项的曲线图 1.1(b)，在原点附近一定范围内基本上是线性特性。

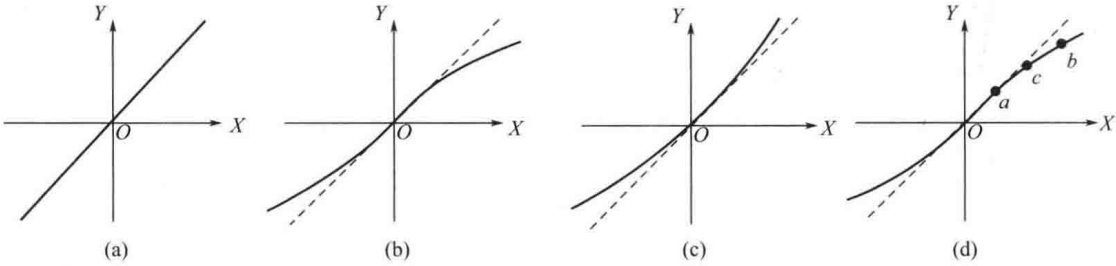


图 1.1 检测系统的四种典型静态特性

实际应用中，若非线性项的方次不高，在输入量变化不大的范围内，用切线或割线代替实际的静态特性曲线的某一段，使系统的静态特性曲线接近于线性，这称为系统静态特性的线性化。在设计系统时，应将测量范围选取在静态特性最接近直线的一小段，此时原点可能不在零点。以图 1.1(d) 为例，如取 ab 段，则原点在 c 点。系统静态特性的非线性，使其输出不能成比例地反映被测量的变化，而且对动态特性也有一定影响。

检测系统的静态特性是在静态标准条件下测定的，标准条件是指没有加速度、振动、冲击（除非这些参数本身就是被测物理量）；环境温度一般为室温 (20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度不大于 85%；大气压为 $(760 \pm 60)\text{mmHg}$ ^① 的情况。在标准工作状态下，利用一定精度等级的校准设备，对系统进行往复循环测试，即可得到输出-输入数据。将这些数据列表，再画出各被测量值（正行程和反行程）对应输出平均值的连线，即为系统的静态校准曲线。

(1) 线性度（非线性误差）

在规定条件下，系统校准曲线与拟合直线间最大偏差与满量程 ($F \cdot S$) 输出值的百分比称为线性度，如图 1.2 所示。

用 δ_L 表示线性度，则

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{F \cdot S}} \times 100\% \tag{1.8}$$

① 注：1mmHg=133.3224Pa。

式中 $\Delta Y_{\max}$ ——校准曲线与拟合直线间的最大偏差；
 $Y_{F \cdot S}$ ——系统满量程输出；
 $Y_{F \cdot S} = Y_{\max} - Y_0$ 。

由此可知，非线性误差是以一定的拟合直线或理想直线为基准直线算出来的。因而，基准直线不同，所得线性度也不同，如图 1.3 所示。

应当指出，对同一检测系统，在相同条件下做校准试验时得出的非线性误差不会完全一样。因而，不能笼统地说线性度或非线性误差，必须同时说明所依据的基准直线。目前，国内外关于拟合直线的计算方法不尽相同，下面仅介绍两种常用的拟合基准直线方法。

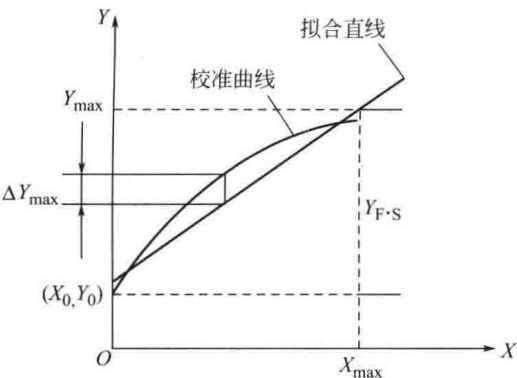


图 1.2 检测系统的线性度

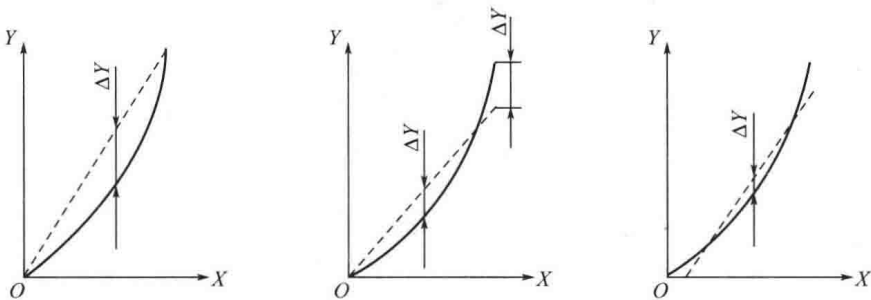


图 1.3 基准直线的不同拟合方法

① 端基法。把检测系统校准数据的零点输出平均值 a_0 和满量程输出平均值 b_0 连成直线 a_0b_0 作为拟合直线，如图 1.4 所示。其方程式为

$$Y = a_0 + KX \tag{1.9}$$

式中 Y ——输出量；
 X ——输入量；
 a_0 —— Y 轴上截距；
 K ——直线 a_0b_0 的斜率。

由此得到端基法拟合直线方程，按式(1.8)可算出端基线性度。这种方法简单直观，但是未考虑所有校准点数据的分布，拟合精度较低，一般用在特性

曲线非线性度较小的情况。

② 最小二乘法。用最小二乘法原则拟合直线，可使拟合精度最高。其计算方法如下。
令拟合直线方程为 $Y = a_0 + KX$ 。假定实际校准点有 n 个，在 n 个校准数据中，任一个校准数据 Y_i 与拟合直线上对应的理想值 $a_0 + KX_i$ 间线差为

$$\Delta_i = Y_i - (a_0 + KX_i) \tag{1.10}$$

最小二乘法拟合直线的拟合原则就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值，亦即使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 对 K 和 a_0 的一阶偏导数等于零，从而求出 K 和 a_0 的表达式。

$$\frac{\partial}{\partial K} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (Y_i - KX_i - a_0)(-X_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial a_0} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (Y_i - KX_i - a_0)(-1) = 0$$

联立求解以上两式，可求出 K 和 a_0 ，即

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \quad (1.11)$$

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \quad (1.12)$$

式中 n ——校准点数。

由此得到最佳拟合直线方程，由式(1.8)可算得最小二乘法线性度。

通常采用差动测量方法减小检测系统的非线性误差。如某位移传感器特性方程式为

$$Y_1 = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + \dots$$

另一个与之完全相同的位移传感器，但是它感受相反方向位移，则特性方程式为

$$Y_2 = a_0 - a_1 X + a_2 X^2 - a_3 X^3 + a_4 X^4 - \dots$$

在差动输出情况下，其特性方程式可写成

$$\Delta Y = Y_1 - Y_2 = 2(a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \dots) \quad (1.13)$$

可见采用此方法后，由于消除了 X 偶次项而使非线性误差大大减小，灵敏度提高一倍，零点偏移也消除了。因此差动式传感器已得到广泛应用。

(2) 灵敏度 K

灵敏度是指检测系统在静态测量时，输出量的增量与输入量的增量之比的极限值，即

$$K = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right) = \frac{dY}{dX} \quad (1.14)$$

灵敏度的量纲是输出量的量纲和输入量的量纲之比。当某些检测装置或组成环节的输出和输入具有同一量纲时，常用“增益”或“放大倍数”来代替灵敏度。

对线性检测装置来说，灵敏度为

$$K = \frac{Y}{X} = \tan \theta \quad (1.15)$$

式中 θ ——相应点切线与 X 轴向夹角。

式(1.15)表示线性测量装置的灵敏度为常数，可由静态特性曲线（直线）的斜率求得，直线斜率越大，其灵敏度越高，如图 1.5(a) 所示。对线性不太好的检测装置如图 1.5(b)

所示，则可用输出量与输入量测量范围 $\bar{Y}$ 与 $\bar{X}$ 的比值来表示其平均灵敏度，即

$$K = \frac{\bar{Y}}{\bar{X}} \quad (1.16)$$

式中， $\bar{X} = X_h - X_i$ ； $\bar{Y} = Y_h - Y_i$ ；而 X_i 与 Y_i 是 X 和 Y 的测量下限值， X_h 与 Y_h 是 X 和 Y 的测量上限值。

对于非线性检测装置，其灵敏度是变化的，如图 1.5(c) 所示。

一般希望检测装置的灵敏度 K 在整个测量范围内保持为常数。这样要求一方面有利于读数，另一方面便于分析和处理测量结果。

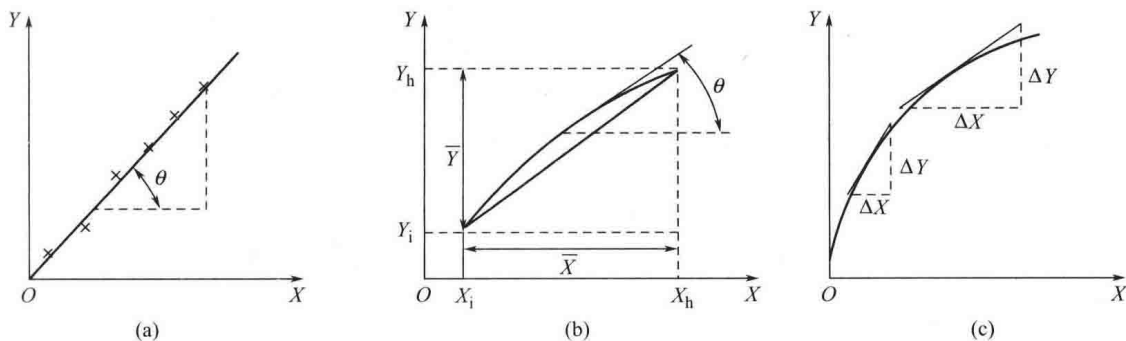


图 1.5 检测装置的灵敏度

实际测量中,常用的还有相对灵敏度表示法。相对灵敏度 K_r 为输出变化量与被测量的相对变化率之比,即

$$K_r = \frac{\Delta Y}{\frac{\Delta X}{X} \times 100\%} \quad (1.17)$$

(3) 精度

在静态测量中,由于任何检测装置和测量结果都含有一定大小的误差,所以人们往往用误差来说明精度。

① 绝对误差 δ 。绝对误差是检测装置示值 X 与被测量真值 X_0 之间的代数差值,即

$$\delta = X - X_0 \quad (1.18)$$

实际上,真值是未知的,通常只能用实际值(或约定真值)来代替真值,它是由高一级的计量标准所复现或高精度仪器测得的被测量值。绝对误差 δ 越小,说明示值越接近于真值,测量精度越高,但这一结论只适用于被测值相同的情况,而不能比较不同值的测量精度。

在校准或检定仪表时,常采用比较法,即对同一被测量,将标准表的示值 X_0 (真值)与被校表的示值 X 进行比较,则它们的差值就是被校表示值的绝对误差。如果它是恒定值,则是系统误差,此时仪表的示值应加以修正,修正后才可得到被测量的实际值 X_0 。即

$$X_0 = X - \delta = X + C \quad (1.19)$$

式中 C ——修正值或校正值。

修正值与示值的绝对误差数值相等,但符号相反,即

$$C = -\delta = X_0 - X$$

试验室用的标准表常由高一级的标准表校准,检定结果附带有示值修正表,或修正曲线 $C = F(x)$ 。

② 示值相对误差 r (简称相对误差)。示值相对误差是检测装置示值绝对误差与真值 X_0 之比值,常用百分数表示,即

$$r = \frac{\delta}{X_0} \times 100\% = \frac{X - X_0}{X_0} \times 100\% \quad (1.20)$$

当测量误差很小时,示值相对误差可近似用式(1.21)计算。

$$r = \frac{\delta}{X} \times 100\% \quad (1.21)$$

示值相对误差只能说明不同测量结果的准确程度,而不能用来评价检测仪表本身的质量。因为同一台检测仪表在整个测量范围内的相对测量误差不是定值,随着被测量的减小,

相对误差也增大，当被测量接近于量程起始零点时，相对误差趋于无限大，故一般不应测量过小的量，而多用于测量接近上限的量，如 2/3 量程附近处。

③ 最大引用误差 $q_{\max}$ （又称满量程相对误差）。检测仪表表示值绝对误差 δ 与仪表量程 L 的比值，称之为仪表表示值的引用误差 q 。引用误差常以百分数表示为

$$q = \frac{\delta}{L} \times 100\%$$

最大引用误差是检测仪表绝对误差（绝对值）的最大值与仪表量程 L 之比的百分数，即

$$q_{\max} = \frac{|\delta|_{\max}}{L} \times 100\% = \frac{|X - X_0|_{\max}}{L} \times 100\% \tag{1.22}$$

最大引用误差是检测仪表基本误差的主要形式，故也常称之为仪表的基本误差。

④ 精度等级。仪表在出厂检验时，其示值的最大引用误差 $q_{\max}$ 不能超过其允许误差 Q （以百分数表示）即

$$q_{\max} \leq Q$$

工业检测仪表常以允许误差 Q 作为判断精度等级的尺度。规定：取允许误差百分数的分子作为精度等级的标志，即用最大引用误差中去掉百分数（%）后的数字表示精度等级，其符号为 G ，则 $G = Q \times 100$ 。工业仪表常见的精度等级见表 1.1。

表 1.1 工业仪表常见精度等级

精度等级 G	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
允许(引用)误差 $ Q $	0.1%	0.2%	0.5%	1%	1.5%	2.5%	5%

(4) 迟滞

迟滞是指在相同工作条件下作全测量范围校准时，在同一次校准中对应同一输入量的正行程和反行程其输出值间的最大偏差（见图 1.6）。其数值用最大偏差或最大偏差的一半与满量程输出值的百分比表示。

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100\% \tag{1.23}$$

或

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{F.S}} \times 100\% \tag{1.24}$$

式中 $\Delta H_{\max}$ ——输出值在正反行程间最大偏差；

δ_H ——系统的迟滞。

迟滞现象反映了装置机械结构或制造工艺上的缺陷，如轴承摩擦、间隙、螺钉松动、元件腐蚀或积塞灰尘等。

(5) 重复性

重复性是指在同一工作条件下，输入量按同一方向在全测量范围内连续变化多次所得特性曲线的不一致性（见图 1.7）。数值上用各测量值正、反行程标准偏差最大值的两倍或三倍与满量程 $Y_{F.S}$ 的百分比表示。即

$$\delta_k = \pm \frac{2\sigma \sim 3\sigma}{Y_{F.S}} \times 100\% \tag{1.25}$$

式中 δ_k ——重复性；

σ ——标准偏差。

当用贝塞尔公式计算标准偏差 σ 时，则有

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}}$$

式中 Y_i ——测量值；
 $\bar{Y}$ ——测量值的算术平均值；
 n ——测量次数。

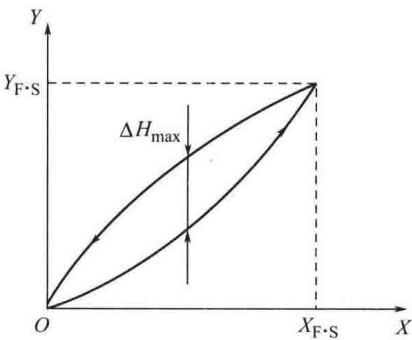


图 1.6 检测系统的迟滞特性

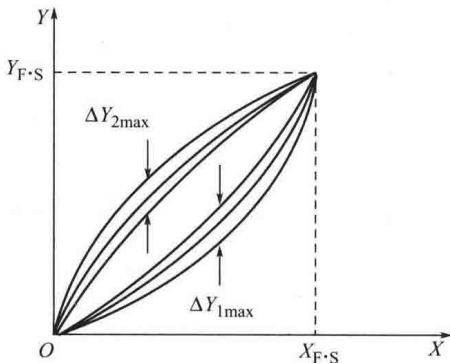


图 1.7 检测系统的重复性

重复性所反映的是测量结果偶然误差的大小，而不表示与真值之间的差别。有时重复性虽然很好，但可能远离真值。

(6) 其他静态性能指标

灵敏阈，又称死区，是指由于摩擦或游隙等影响引起的检测装置不响应的最大输入变化量，是衡量起始点不灵敏的程度。

分辨力，是指能引起输出量发生变化时输入量的最小变化量 ΔX 。它说明了检测装置响应与分辨输入量微小变化的能力。具有数字式显示器的测量装置，其分辨力是指最后一位有效数字增加一个字时相应示值的改变量，即相当于一个分度值。

测量范围，是指检测装置能够正常工作的被测量范围，即测量最小输入量（下限）至最大输入量（上限）之间的范围。

稳定性，是指在一定工作条件下，保持输入信号不变，输出信号随时间或温度变化而出现的缓慢变化程度。随时间变化而出现的漂移称为时漂；随环境温度变化而出现的漂移称之为温漂。如弹性元件的时效、电子元件的老化、放大线路的温漂、热电偶电极的污染等。

1.2.2 动态特性及其指标

检测系统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。在分析系统动态特性时，常把一些典型信号作为输入信号，如阶跃信号、正弦信号等，而其他较复杂的信号均可以将其分解为若干阶跃信号或正弦信号之和。

(1) 检测系统的动态误差

动态特性好的检测系统应具有很短的暂态响应和很宽的频率响应特性。由于检测系统中总是存在机械的、电气和磁惯性，从某种程度上说，任何实际的检测系统都不可能精确地响应变化中的输入信号。也就是说，系统输出信号不会与输入信号具有相同的时间函数，即存在动态误差。

在静态灵敏度 $K=1$ 的情况下，检测系统的动态误差是输出信号与其相应的输入信号之差，可表示为