



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动检测技术

第二版

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

自动检测技术

第二版

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. —2版. —北京:化学工业出版社, 2009.7
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-05634-4

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第082241号

责任编辑:唐旭华 郝英华

装帧设计:杨 北

责任校对:李 林

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 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张21¼ 字数561千字 2009年8月北京第2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:36.00元

版权所有 违者必究

第二版前言

本书第一版自2004年8月出版到现在已四年多,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,作者努力在保持原有教材特点基础上,力求克服原版教材不足之处,特别是随着科学技术的飞速发展,原教材某些部分内容已不相适应。

作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,本次修订主要对第3章“测量系统的可靠性”进行改写,充实了有关内容,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4~9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、成分分析以及有关机械量等参数的检测技术。本次修订对“流量测量”章节进行了较大的修改和调整,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”,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写,其中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。同时作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:txh@cip.com.cn。

由于编者学识有限,书中的不妥乃至错误在所难免,恳请诸位专家、读者批评指正。

编 者

2009年4月于津大园

第一版前言

为进一步拓宽自动化专业本科生的知识面,许多高等院校已将工业自动化专业和过程自动化专业加以合并,成立了新的自动化专业。“自动检测技术”为该专业的专业必修课,编者自1996年开始讲授这门课程,经多年的教学实践,不断地修改补充,完成了《自动检测技术》这本教材。

编者在编写这本教材时,既注意保持传统的流程工业中主要参数的基本检测技术,又力求尽可能反映当前国内外检测技术的新成就和新发展。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4~9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、成分分析及有关机械量等参数的检测技术。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,学生需要牢固地掌握;同时本书也包括了目前流程工业中参数检测的最新技术,这有助于学生能够从中扩大视野、开阔思路,掌握当前最新科技发展,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,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;对于教学课时不足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、计算机技术及控制理论于一体的课程,为学生掌握跨学科研究的思路和方法奠定了基础。本书既可作为自动化专业及相关专业大学本科生的教学用书,也可供从事测量技术的研究生、科技人员参考。

本书由王化祥教授编写,张淑英副教授对书稿进行认真校正和录入,张涛教授提出了许多有益的建议,同时作者在编写本教材的过程中,参考和引用了许多专家学者的有关著作,在此一并表示感谢!

由于编者学识有限,书中的不妥乃至错误在所难免,恳请诸位专家、读者批评指正。

编 者

2004年3月于津大园

目 录

绪论	1	5.5 辐射式测温法	144
1 检测系统基本特性	5	5.6 红外测温仪与红外热像仪	152
1.1 检测系统的数学模型	5	思考题与习题	158
1.2 检测系统的特性及性能指标	8	附表 5.1 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	159
1.3 不失真测量的条件	20	附表 5.2 镍铬-镍硅热电偶分度表	159
1.4 测量系统动态特性参数的测定	22	附表 5.3 工业热电阻分度表	160
思考题与习题	28	附表 5.4 各种材料在 $\lambda=0.65\mu\text{m}$ 下的单色 辐射率 ϵ_λ	160
2 测量误差与数据处理	29	附表 5.5 各种材料辐射率 ϵ	160
2.1 误差的基本概念	29	6 流量测量	161
2.2 随机误差	31	6.1 概述	161
2.3 有限次测量误差分析与处理	34	6.2 容积式流量计	166
2.4 系统误差	42	6.3 浮子流量计	172
2.5 粗大误差	46	6.4 涡轮流量计	180
2.6 误差的传递和综合	48	6.5 旋涡流量计	187
2.7 测量不确定度	50	6.6 电磁流量计	193
2.8 测量数据的处理	56	6.7 超声流量计	201
思考题与习题	60	6.8 节流式流量计	205
附表 2.1 正态分布密度函数表	61	6.9 质量流量计	229
附表 2.2 标准正态分布表	62	6.10 多相流体的流量测量	234
附表 2.3 $t(\alpha, \nu)$ 值表	62	6.11 流量标准装置	242
3 测量系统的可靠性	64	思考题与习题	246
3.1 可靠性概念及其特征量	64	7 物位测量	248
3.2 不可修复系统的可靠性	67	7.1 浮力式液位测量	248
思考题与习题	70	7.2 静压式液位测量	256
4 压力测量	72	7.3 电容式液位测量	262
4.1 概述	72	7.4 超声波物位测量	265
4.2 液柱式压力计	73	7.5 微波法物位测量	269
4.3 弹性式压力计	75	7.6 光纤式液位测量	273
4.4 电远传式压力计	78	思考题与习题	275
4.5 压力表的选择、校验和安装	103	8 成分分析	277
思考题与习题	105	8.1 概述	277
5 温度测量	107	8.2 热导式气体分析器	278
5.1 概述	107	8.3 氧化锆氧分析器	285
5.2 热电偶测温	111	8.4 气相色谱分析仪	290
5.3 热电阻测温	128	8.5 工业电导仪	300
5.4 接触式测温技术与误差分析	135	8.6 工业酸度计	306
		思考题与习题	313

9 位置、转速、转矩及功率测量	314
9.1 位置测量	314
9.2 速度(转速)测量	323
9.3 转矩测量	326
9.4 霍尔电压、电流测量	328

9.5 无速度传感器技术	329
思考题与习题	330

部分习题参考答案	331
-----------------	-----

参考文献	333
-------------	-----

绪 论

一、过程检测的对象与需求

在工业生产中，反映过程的参数有很多，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的有所区别。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。

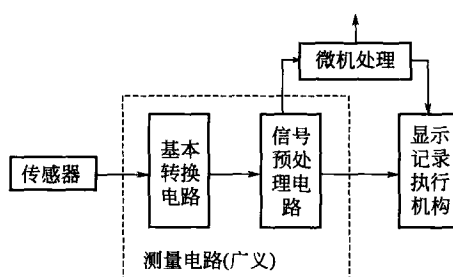


图 1 检测系统构成

(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。

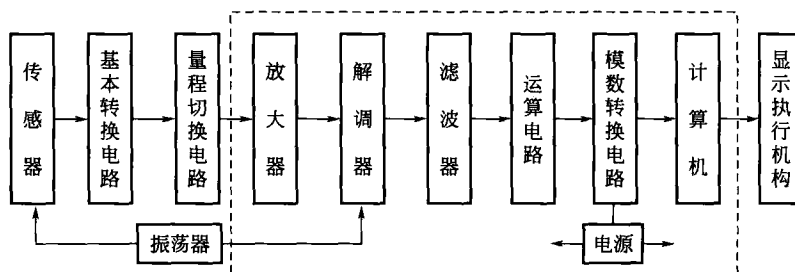


图 2 模拟量测量电路

(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更美妙。

(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小了其他环节的影响。

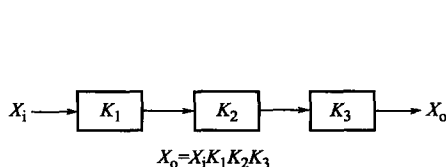


图3 开环式仪表方框图

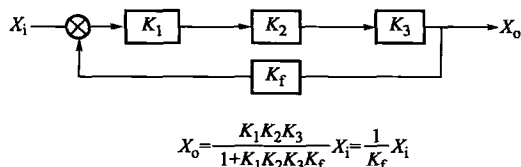


图4 闭环式仪表方框图

四、检测技术的发展

一般的检测技术由来已久,早在几千年前,在人类生活和与自然界作斗争过程中,测量技术就逐步发展起来。如土地丈量、物体称重等。但是近三四十年来,由于电子技术、计算机技术的飞速发展,以及工农业生产、科学研究、人类生活的需求,使非电量检测技术得到迅猛发展,形成一门新兴的学科。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,对测量技术要求在不断提高,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。总之,可靠性是仪器质量的重要因素,已越来越受到重视。

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,同时把测量电路也组合在一起,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,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。以下就开环式和闭环式两种类型分别讲述。

1.1.1 开环式检测系统

(1) 系统框图和信号流程图

开环式检测系统的框图和信号流程图如图 1.1 所示。

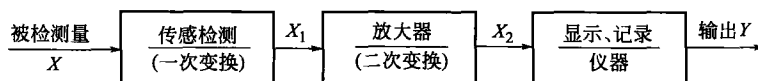


图 1.1 开环式检测系统框图

传感检测(一次变换)通常由不同传感器及基本转换电路组成,把非电量的变化转换为电量;放大器(二次变换)通常由放大电路或测量电路来担任,对电量进行放大;显示、记录仪器为各种显示仪表、记录仪,直观表示被检测量大小及变化趋势。

(2) 系统结构图及传递函数

检测系统的结构图是由许多对信号进行单向运算的方框和一些信号流向线组成,方框表示对信号进行的数学变换,方框中写入各环节或系统的传递函数 $G_i(s)$ 。传递函数是各环节或系统输出与输入拉氏变换之比,是以代数的形式表征其传输、转换特性。

系统结构图实质上是系统原理图与数学方程两者的结合，从结构图上可以用方框进行数学运算，也可以直观了解各环节的相互关系及其在系统中所起的作用，更重要的是根据系统结构图可以方便地求得系统的传递函数。开环检测系统的结构如图 1.2 所示， $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、 $G_3(s)$ 为各环节的传递函数。

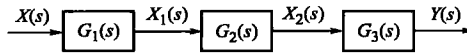


图 1.2 开环检测系统结构

需要指出的是，虽然系统结构图是从系统各环节的数学模型得到的，但结构图中方框与实际系统的各环节并非是一一对应关系。一个实际环节可以用一个方框或几个方框表示，而一个方框也可以代表几个环节、一个子系统或一个大的复杂系统。

对于开环检测系统，其输出 $Y(s) = G_3(s)G_2(s)G_1(s)X(s)$ 。

检测系统在工程实际中，最常见的为零阶、一阶和二阶系统，与控制系统相似，包含有比例环节、惯性环节和振荡环节等。如在应力、应变测量中，已知各环节的连接方式及其传递函数，如图 1.3(a) 所示。当忽略连接环节之间的负载影响，系统的总传递函数便可用各环节的传递函数之积表示，如图 1.3(b) 所示。

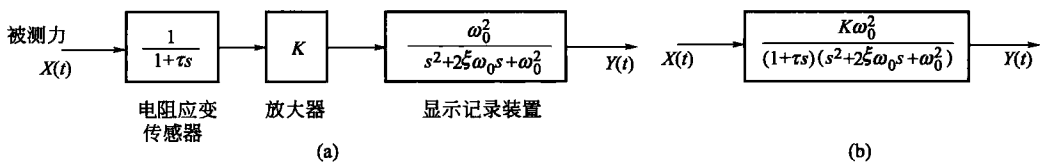


图 1.3 一个应力应变检测系统的传递函数

开环式检测系统，输出直接由系统的输入量产生，给定一个输入量，就有一个输出量与之相对应，检测精度完全取决于所用变换器的精度，所有变换器特性的变化都会造成检测误差，即各环节的特性均影响系统输出结果。其特点是系统的输出量不会对系统的检测量产生影响，而且系统结构比较简单。

1.1.2 闭环式检测系统

(1) 系统框图和信号流图

闭环式检测系统的框图和信号流图如图 1.4 所示。

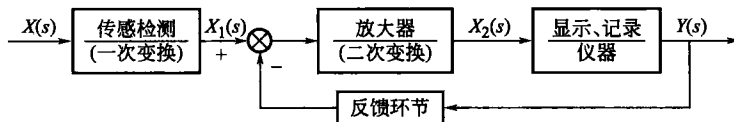


图 1.4 闭环式检测系统的框图和信号流图

(2) 系统结构图及传递函数

闭环式检测系统结构图如图 1.5(a) 所示。由自动控制理论可知，串联合方框的等效传递函数等于各串联合方框传递函数之积，则 $G(s) = G_2(s)G_3(s)$ 。则图 1.5(a) 可以简化为图 1.5(b)。

由图 1.5(b) 可得

$$\begin{aligned} Y(s) &= G(s)E(s) \\ B(s) &= H(s)Y(s) \\ E(s) &= X_1(s) - B(s) \end{aligned}$$

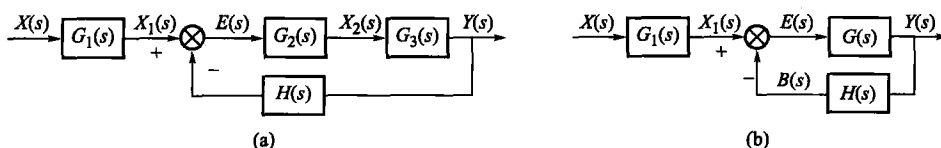


图 1.5 闭环式检测系统结构

消去中间变量 $E(s)$ 和 $B(s)$, 整理后得

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} X_1(s) = \Phi(s) X_1(s)$$

式中

$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{G_2(s)G_3(s)}{1 + G_2(s)G_3(s)H(s)} \quad (1.3)$$

式(1.3)称为输入信号下的闭环传递函数, 由此可进一步求出在输入信号下系统的输出量 $Y(s)$ 为

$$\begin{aligned} Y(s) &= \Phi(s) X_1(s) = \frac{G_2(s)G_3(s)}{1 + G_2(s)G_3(s)H(s)} X_1(s) \\ &= \frac{G_2(s)G_3(s)}{1 + G_2(s)G_3(s)H(s)} G_1(s) X(s) \end{aligned} \quad (1.4)$$

式(1.4)表明, 系统在输入信号作用下, 输出响应 $Y(s)$ 取决于闭环传递函数 $Y(s)/X_1(s)$ 及输入信号 $X_1(s)$ 的形式。当 $G_2(s)G_3(s)H(s) \gg 1$ 时, 式(1.4)可改写为

$$Y(s) = \frac{1}{H(s)} G_1(s) X(s) \quad (1.5)$$

由式(1.5)容易看出, 这时整个系统的输入和输出关系将由反馈系统的特性决定, 二次变换器特性的变化不会造成检测误差或者说造成的误差很小。

闭环检测系统是按偏差进行控制的, 其特点是不论什么原因, 使输出量偏离期望值而出现偏差时, 必定会产生相应控制作用去消除偏差, 使被测量与真值趋于一致, 具有抑制任何内、外扰动对输出量影响的能力, 提高测量精度。但这种系统使用的元件多、线路复杂、系统的性能分析和设计也较麻烦, 尽管如此, 它仍是一种重要的并被广泛应用的检测方式。

如前所述, 一个线性的连续时间系统其数学模型可以用线性微分方程描述, 而对离散系统, 则可以用差分方程来描述。

图 1.6 所示为一种简单的离散系统, $X(n)$ 为系统的输入序列, $Y(n)$ 为系统的输出序列, 离散系统的差分方程可根据系统基本结构来建立。

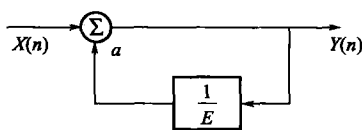


图 1.6 一简单离散系统示意

图 1.6 中 $1/E$ 为位移 (延时) 元件, 表示右移一位或是单位延时, Σ 表示加法器, 箭头旁边 a 表示乘以 a 的乘法器。 $Y(n)$ 经单位移位后得到 $Y(n-1)$, 由加法器写出

$$Y(n) = aY(n-1) + X(n)$$

或

$$Y(n) - aY(n-1) = X(n) \quad (1.6)$$

式(1.6)为一个常系数线性差分方程。对于复杂的离散系统, 必须用高阶的差分方程来表达, 则式(1.6)等号左边由输出序列 $Y(n)$ 及其移位序列 $Y(n-1), Y(n-2), \dots, Y(n-N)$ 组成; 等号右边由输入序列 $X(n)$ 及其移位序列 $X(n-1), X(n-2), \dots, X(n-M)$ 组成, 故差分方程一般形式可以写为

$$\sum_{k=0}^N a_k Y(n-k) = \sum_{r=0}^M b_r X(n-r) \quad (1.7)$$

式中, k 和 r 皆为整数; a_k 和 b_r 为相应项的加权系数。

如果等号左边含有移位序列 $Y(n-N)$, 则此差分方程是 N 阶的, n 以递减方式给出, 称为后向差分方程, 即向右移序的差分方程。

对差分方程进行 Z 变换后并移项, 得

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{r=0}^M b_r z^{-r}}{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}} = \frac{b_M z^{-M} + b_{M-1} z^{-(M-1)} + \cdots + b_1 z^{-1} + b_0}{a_N z^{-N} + a_{N-1} z^{-(N-1)} + \cdots + a_1 z^{-1} + a_0} \quad (1.8)$$

$G(z)$ 称为离散系统的传递函数, 由系统的特性所决定。

1.2 检测系统的特性及性能指标

检测系统的基本特性是指检测系统与其输入、输出的关系。主要应用于如下三个方面。

① 已知检测系统的特性, 输出可测, 那么通过该特性和输出来推断导致该输出的输入量。这就是通常应用检测系统来测未知物理量的测量过程。

② 已知检测系统特性和输入, 推断和估计系统输出量。通常应用于根据对被测量的测量要求组建多个环节的测量系统。

③ 由已知系统的输入和输出, 推断系统的特性。通常用于系统的研究、设计与制作, 一般用数学模型或数表来表示检测系统的特性。

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。

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \cdots + a_n X^n \quad (1.9)$$

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;

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项待定常数。

由式(1.9)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 ($a_2 X^2, \cdots, a_n X^n$) 叠加而成, 一般可分为以下四种典型情况。

① 理想线性 [见图 1.7(a)]

$$Y = a_1 X \quad (1.10)$$

② 具有 X 奇次阶项的非线性 [见图 1.7(b)]

$$Y = a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \cdots \quad (1.11)$$

③ 具有 X 偶次阶项的非线性 [见图 1.7(c)]

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_4 X^4 + \dots \quad (1.12)$$

④ 具有 X 奇、偶次项的非线性 [见图 1.7(d)]

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + \dots \quad (1.13)$$

由此可见, 除图 1.7(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 1.7(b), 在 origin 附近一定范围内基本上是线性特性。

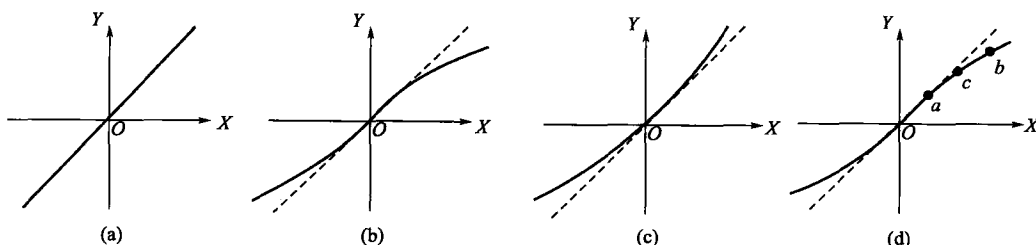


图 1.7 检测系统的四种典型静态特性

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 1.7(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 1.8 所示。

用 δ_L 表示线性度, 则

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{F \cdot S}} \times 100\% \quad (1.14)$$

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 1.9 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

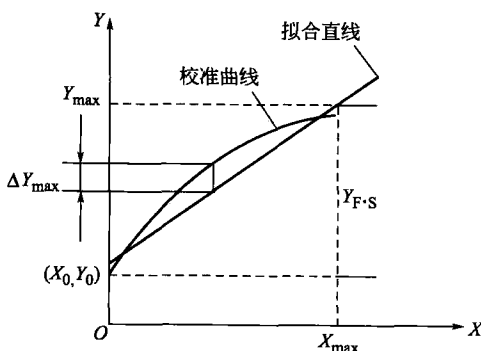


图 1.8 检测系统的线性度

① 注: $1\text{mmHg} = 133.3224\text{Pa}$ 。

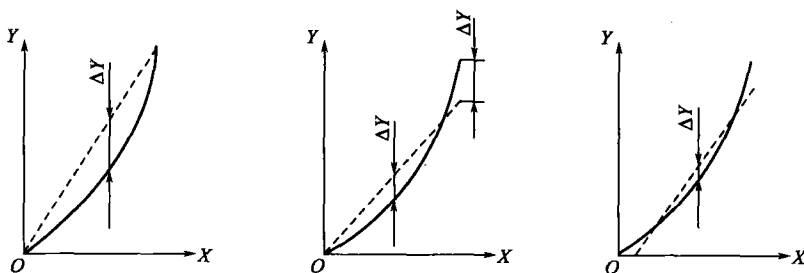


图 1.9 基准直线的不同拟合方法

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。

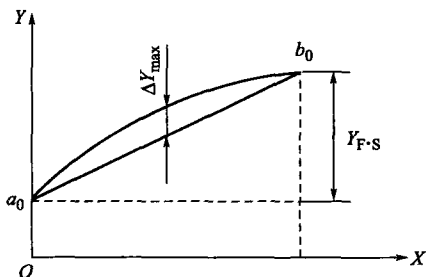


图 1.10 端基线性度拟合直线

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 1.10 所示。其方程式为

$$Y = a_0 + KX \quad (1.15)$$

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(1.14)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 $a_0 + KX_i$ 间残差为

$$\Delta_i = Y_i - (a_0 + KX_i) \quad (1.16)$$

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

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \quad (1.17)$$

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \quad (1.18)$$

式中 n ——校准点数。