

高等学校教材

自动检测技术

主 编 韩如成

副主编 李临生

兵器工业出版社

高等学校教材

TP274

89

自动检测技术

主 编 韩如成

副主编 李临生

参 编 白墅洁 潘 峰

主 审 吴聚华

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书对自动化专业、电气工程与自动化专业开设的传感器原理、检测与转换技术等课程进行了整合,合并为自动检测技术。本书的特点是面向应用,注重内容与生产实际的紧密结合。本书第 1 章介绍了自动检测技术的基本概念及系统的组成;第 2 章介绍了测量误差的分析与数据处理方法;第 3 章介绍了常用电路参数的测量方法;第 4 章、第 5 章分别介绍了电量和非电量测量;第 6 章介绍了新型传感器;第 7 章介绍了虚拟仪器以及利用计算机实现虚拟仪器的设计。

本书可以作为自动化专业、电气工程与自动化专业以及其他相关专业的本科教材,也可以供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术 / 韩如成主编. —北京:兵器工业出版社, 2002.12

ISBN 7-80172-088-1

I. 自... II. 韩... 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(2002)第 093385 号

出版发行:兵器工业出版社
责任编辑:常小虹
责任技编:魏丽华
邮编社址:100089 北京市海淀区车道沟 10 号
经 销:各地新华书店
印 刷:北京市艺辉印刷有限公司
版 次:2006 年 2 月第 1 版第 2 次印刷
印 数:1551—3050

封面设计:底晓娟
责任校对:王 绛 全 静
责任印制:王京华
开 本:787×1092 1/16
印 张:15.5
字 数:379.08 千字
定 价:28.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前言

为了积极推进“高等学校面向 21 世纪教学内容与课程体系改革计划”，结合专业调整以及拓宽专业知识面改革的需要，我们对自动化专业、电气工程与自动化专业开设的传感器原理、检测与转换技术等课程进行了整合，合并为自动检测技术。本书的特点是面向应用，注重内容与生产实际的紧密结合，尽量选用先进的、典型的自动检测与转换技术的方法和手段，在介绍了各种电量和非电量的检测以及利用不同的传感器完成各种自动检测任务的基本原理与基本方法的同时，增加了近几年来已广泛应用于生产实际中的新技术核心内容。

本书内容的组织有一定的先进性和系统性，同时又有一定的理论深度和较强的实践性。第 1 章绪论介绍了自动检测技术的基本概念及系统的组成和在生产实际中的应用；第 2 章介绍了测量误差的分析与数据处理方法；第 3 章介绍常用电路参数的测量方法；第 4 章、第 5 章分别介绍了电量和非电量测量，将各种仪表及传感器融入各种电量和非电量的测量中，使得学生在学完每一章节后对不同待测量的测量方法及手段、仪表与传感器的功能与选择有一个整体的概念；第 6 章介绍了新型传感器；第 7 章介绍了虚拟仪器以及利用计算机实现虚拟仪器的设计。

本书由韩如成教授主编，第 1 章、第 2 章由韩如成教授编写，第 7 章由李临生副教授编写，第 5 章由白墅洁老师编写，第 3 章、第 4 章由潘峰老师编写，第 6 章由白墅洁与潘峰合写。全书由吴聚华教授主审。

本书的部分内容参考了兄弟院校的有关教材，在此表示感谢。

由于时间仓促，加之编者的水平有限，书中定有不足之处，殷切希望读者给予批评指正。

编者

2002 年 10 月

目 录

1	绪论	1
1.1	概述	1
1.1.1	自动检测与转换技术的基本概念	1
1.1.2	自动检测与转换技术的地位和作用	1
1.1.3	自动检测与转换技术的发展概况	2
1.1.4	本课程的任务和目的	3
1.2	自动检测方法	3
1.2.1	自动检测与转换方法	3
1.2.2	检测与转换系统	4
2	误差分析与数据处理	8
2.1	测量误差的分类和表示方法	8
2.1.1	测量误差的分类	8
2.1.2	误差的表示方法	9
2.2	系统误差的产生和消除	10
2.2.1	系统误差的产生	10
2.2.2	系统误差的消除方法	10
2.3	随机误差的估计	12
2.4	间接测量误差的传递、综合与分配	13
2.4.1	误差的传递	13
2.4.2	误差的综合	15
2.4.3	误差的分配	16
2.5	提高测量准确度的方法	17
3	常用测量仪表与测量方法	21
3.1	直读测量仪表	21
3.1.1	模拟指示仪表的组成和基本工作原理	21
3.1.2	数字测量仪表的组成和基本工作原理	26
3.2	电位差计	31
3.2.1	直流电位差计	31
3.2.2	交流电位差计	38
3.3	直流电桥	40
3.3.1	直流单电桥	40
3.3.2	直流双电桥	43

3.4	交流电桥	45
3.4.1	经典电桥	45
3.4.2	有源电桥	53
4	电量电测	59
4.1	电流和电压的测量	59
4.1.1	电流和电压的直接测量	59
4.1.2	电流和电压的间接测量	65
4.1.3	非正弦周期量的测量	68
4.2	阻抗的测量	75
4.2.1	直流电阻的测量	75
4.2.2	交流电参数的测量	81
4.3	功率和电能的测量	84
4.3.1	直流功率的测量	84
4.3.2	单相交流功率的测量	86
4.3.3	三相功率的测量	89
4.3.4	电能测量	91
4.4	频率和相位的测量	100
4.4.1	直读仪表	100
4.4.2	测量方法	104
4.5	磁的测量	110
4.5.1	概述	110
4.5.2	磁场的测量	111
4.5.3	磁性材料的测量	114
5	非电量电测	119
5.1	非电量电测的分类	119
5.2	非电量电测中的弹性敏感元件	119
5.2.1	弹性元件的基本特性	120
5.2.2	弹性敏感元件的形式及其应用范围	121
5.2.3	变换力的弹性敏感元件	122
5.2.4	变换压力的弹性敏感元件	129
5.3	常用传感器	135
5.3.1	传感器的分类	136
5.3.2	机械式传感器	137
5.3.3	电阻式传感器	138
5.3.4	电感式传感器	143
5.3.5	电容式传感器	147
5.3.6	压电式传感器	151
5.3.7	磁电式传感器	156
5.3.8	半导体传感器	158

5.3.9	传感器的选用原则	163
5.4	各种力参量的测量	164
5.4.1	测力传感器的弹性元件和转换器	165
5.4.2	测量各种力参量时的贴片和接桥方法	166
5.5	位移和速度的测量	172
5.5.1	位移的测量	172
5.5.2	速度的测量	176
5.6	加速度的测量	178
5.6.1	线加速度的测量	178
5.6.2	角加速度的测量	179
5.7	液体压力和流量的测量	180
5.7.1	液体压力的测量	180
5.7.2	液体流量的测量	183
5.8	振动的测试	184
5.8.1	单自由度系统的受迫振动	184
5.8.2	振动测量方法及测振传感器	186
6	新型传感器	193
6.1	新型敏感材料	193
6.1.1	半导体敏感材料	193
6.1.2	光导纤维	194
6.1.3	高分子材料	195
6.2	电耦合器件	196
6.2.1	CCD 器件	196
6.2.2	CCD 在测量中的应用	200
6.3	光纤传感器	201
6.3.1	光纤传感器原理	201
6.3.2	常见光纤传感器	205
6.4	集成传感器	208
6.4.1	集成压敏传感器	208
6.4.2	集成温敏传感器	210
6.4.3	集成磁敏传感器	212
6.5	薄膜传感器	212
6.5.1	薄膜热传感器	213
6.5.2	薄膜应变片	214
6.5.3	薄膜气敏传感器	215
7	虚拟仪器	217
7.1	概述	217
7.2	虚拟仪器的组成、结构及性能特点	218
7.2.1	虚拟仪器的组成	218

7.2.2	虚拟仪器的结构	218
7.2.3	虚拟仪器的性能特点	219
7.2.4	虚拟仪器的设计与实现步骤	220
7.3	虚拟仪器的信号调理与数据采集	220
7.3.1	信号调理	221
7.3.2	模/数(A/D)转换	222
7.3.3	数/模(D/A)转换	223
7.3.4	数据处理	223
7.4	虚拟仪器的软件开发平台	224
7.5	虚拟仪器编程语言 Labwindows/CVI	227
7.5.1	Labwindows/CVI 基本概念	227
7.5.2	Labwindows/CVI 程序的组成	227
7.5.3	Labwindows/CVI 程序的设计	228
7.6	虚拟仪器的设计实例	228
7.6.1	被测信号的实时采集原理	228
7.6.2	数据采集卡及其性能指标	229
7.6.3	虚拟示波器的原理	230
7.6.4	虚拟示波器实现过程	231
参考文献		239

1 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 自动检测与转换技术的基本概念

自动检测与转换技术是自动检测技术和转换技术的总称，它是以研究自动检测系统中信息的获取、转换以及处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。

1) 信息获取——用组成的测试系统，从自然界诸多的被检测量(物理量、化学量、生物量和社会量)中提取出有用的信息(一般都是电信号)。

2) 信息转换——将所提取的有用信息，根据下一单元的需要，在幅值、功率以及精度等方面进行处理和转换。

3) 信息处理——视输出环节的需要，将变换后的电信号进行数值运算、A/D 变换等处理。

4) 信息传输——在排除干扰的情况下经济地、准确无误地把信息进行传递。

1.1.2 自动检测与转换技术的地位和作用

从自动检测与转换技术的基本概念中可以看出，人类在研究未知世界的过程中是离不开检测与转换技术的，如最早人类依靠自身的感觉器官(听觉、视觉、嗅觉、味觉、触觉)和简陋的量具去观察自然现象，此时检测技术仅仅达到人感觉器官所能达到的限度，因此作用也很有限，只有检测技术的高度发展，才使人类认识客观世界达到相当的深度和广度。比如：生物显微镜及电子显微镜的出现，使人们能进入观察生物细胞、材料结构等微观世界中去；射电望远镜的使用使人们能主动地探索浩瀚的宇宙；红外、微波检测技术出现并在卫星探测上得到应用后，使人们由依靠局部的观察来推测气象、水文、资源、污染、森林覆盖、泥沙流失、农业收成等发展到能从整个地球的宏观上去观察，因此，也就更为及时、客观和真实。

人类步入信息社会的今天，对信息的获取、处理、传输以及综合的要求愈加迫切。作为信息获取的功能器件——仪表及传感器，与人类的关系愈来愈密切。例如，用电压表对电压进行监视，用一氧化碳气敏传感器对煤气溢出进行监视等等。采用自动检测系统实时测量及分析产品性能，采用自动控制系统对产品加工过程实时控制，是提高产品质量的现代方法。

目前，自动检测与转换技术已成为一些发达国家最重要的热门技术之一，其主要原因是它可以给人们带来巨大的经济效益和社会效益。可以说，一个国家的现代化水平是用自动化水平来衡量的，而自动化水平是用仪表及传感器的种类和数量来衡量的。由此看来，自动检测与转换技术在国民经济中占有极其重要的地位和作用。

1.1.3 自动检测与转换技术的发展概况

早期的人类生产和生活中,只限于直观的计量。现代生产无论从生产技术、规模、产量和质量,或从管理形式、方法和范围都有极大的发展。常规检测系统只能将传感器所获得的信息进行测量,或再经放大、变换后成为适于测量的或在一定的范围内进行显示或传送的信号,这种常规方法难以满足现代生产与生活的需要。对相互关联的多参数的测量,特别是对淹没在噪声干扰中的有用信号或随机信号的测量,常规检测系统是无能为力的。只有综合采用信息论、系统论、控制论、预测论、智能与模糊控制、相关理论、谱分析、随机过程、卡尔曼滤波、自适应滤波、模式识别、故障诊断、神经网络等现代理论,针对不同被测对象,以计算机技术为核心构成规模不同的新型现代检测系统,在各种先进算法和软件技术支持下,才可能在噪声环境中成功地获取有用信号。总之,自动检测与转换技术是适应客观世界的发展和需要而兴起的一门新兴学科。由常规检测系统发展到现代检测系统大约经历了三个阶段。

1) 单参数测量。最早进行参数测量的量是几何量(机械量)与热学量。我国民间传说的角尺、墨母(木工画长线的墨斗)等,就是检测技术的杰出成就。19 世纪初蒸汽机的问世,使欧美等国的手工业工场逐步发展成为工业化、机械化的生产工厂。由于机械制造业的兴起需要准确的几何测量、转速测量及温度测量等,于是陆续出现了一些相当准确的量具与温度表以及传递这些量的标准器,并对有关的测量原理进行了研究。但直到 20 世纪 40 年代,都只是研究某个参数的测量原理,所测量的数值都是直观(读)的刻度。到 60 年代,理论上主要仍在讨论物理学、几何学、化学与电学等基本原理、研制传感器和测量方法,所得信号只能用慢时域方法描述,研制的仪器仪表主要追求测量的实用性和一定程度的准确性,对实时性与可靠性以及噪声的危害等还知之甚少,或基本上没有考虑。

2) 多参数测量。随着生产规模的发展和生产技术的进步,为了克服与生产有关的参数之间的影响,要求对各参数进行检测,于是对各参数之间的关系进行了大量的研究,并从宏观物理过程进入微观物理过程,而且也开始研究利用化学过程、生物过程的一些现象,在测量原理上得到极快的发展,为传感器的开发研究提供了理论基础。从 20 世纪 70 年代到 90 年代传感器技术得到飞速发展,促进了多参数测量技术的发展和應用。理论上着重研究测量原理及新型检测元、器件的开发制造,在方法上虽仍然是一个个参数独立进行测量,但已注意到了零漂、温度、电源等变化的影响与噪声干扰的危害,对这些影响的消除或补偿、对微弱信号的测量以及模拟滤波器理论、设计与应用已有明显的进展,检测理论也随之逐渐发展起来。

3) 现代检测系统。工农业生产和科学技术的发展对检测技术的发展起了促进作用。现代检测系统要解决信号的检测、信号处理(如滤波、平滑、非线性、零漂、温漂、时漂、温度或(与)压力自动补偿)以及自动量程扩展、自校正、自诊断、自恢复的综合测量方法和理论问题,由于测量手段已发展到比较全面和完善的的地步,信息检测元器件也不再是问题的关键,重要的是如何组织检测元器件以构成合适的现代自动检测系统,从被干扰或混杂的信号中成功地取出有用信号。如电子对抗、雷达干扰、宇航、声纳,以及用于地球物理、地震、生物医学、语音及文字识别、图像处理,以及各种大规模生产过程的控制与管理等的多输入多输出系统,这些系统既有静态测量,也有动态测量,还有随机信号的测量,只有随着现代检测

理论的发展进行综合测量，才能达到预期的目的。

在现代检测系统中，除采用慢时域分析外，还采用快时域分析或多种非时域特征函数分析法，以适应快速、准确、实时、可靠的要求。20 世纪 90 年代前后，关于自动检测理论的文章很多涉及上述各种理论，在数学手段方面，广泛应用概率论、矩阵、复数与数组运算、数理统计、各种傅氏变换(FT、FFT)、状态空间法、模糊数学等，这些理论的应用，大大推动和发展了自动检测技术理论。

现代检测系统依靠计算机硬件和软件技术，实现了多种计算方法；依靠电子技术的高度发展，实现了高性能检测和处理元器件的利用。从整体上分析，现代检测系统具有的特点是：实时性强；精确度高；可靠性高；可进行静态、动态测量及具有抗干扰性能；能完成多输入多输出的全面测量；采用了数字化、图形图像化及数据通信技术。

1.1.4 本课程的任务和目的

本课程的任务在于使学生掌握检测与转换技术的基本概念、基本理论和常用电工仪表及传感器的工作原理、结构、应用及现代测试技术的一般概念。

本课程的目的在于培养学生具有以下能力：

- 1) 具有选择电工仪表及传感器的能力。
- 2) 具有组建一般测试系统的能力。
- 3) 对一般测试系统的技术问题具有一定的分析和处理能力。

由于本课程具有综合性的技术基础课性质，在考虑先修课的同时，应尽量围绕上述任务和目的进行讲授。也希望学生在学习时，注意自己上述能力的培养。

1.2 自动检测方法系统

1.2.1 自动检测与转换方法

自动检测与转换的目的是寻找反映客观世界运动状态的信息，由于运动状态以及被测对象所处背景环境的错综性，为检测它们就产生出了各种变换原理和技术手段。

1) 电量和非电量电测。由于非电量的错综复杂，对它的检测比起电量来相对要复杂和困难得多，虽有各种检测方法，但目前主要还是用非电量电测量技术，即通过各种传感器把非电量转换成电量，再用测量电量的方法检测这些反映被测非电量的电量信号。这种方法的优点是：不同的被测非电量转换成电量后，可用相同的仪器仪表测量；变换成的电量便于远传、利于控制和远距离操作；有利于动态测量和记录瞬时值；便于和计算机联接，有利于对检测结果的分析处理。因此检测技术主要分成电量的测量和非电量的测量两大类。

2) 非电量转换原理。为了把被测非电量转换成电量，目前依赖物理的、化学的、生物的种种原理以及功能材料的特性来实现，常用的检测原理有：电磁法、光学法(可见光、激光、红外光、紫外光等)、微波法、超声波法、核辐射法和某些半导体效应的利用，以及电化学分析、色谱分析、质谱分析等分析方法。

3) 一般检测方法。为适应错综复杂的检测对象、检测环境和被测量，可从不同的角度出发对一般检测方法进行分类，如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的一般检测方法

分类依据	名称	原理	特点
是否施加能量	主动式	测量中需向对象施加能量	
	被动式	测量中无需向对象施加能量	
是否和被测介质接触	接触式	检测元件与被测介质接触	对被测介质有干扰, 当被测介质有特殊性质时, 对检测元件要求高
	非接触式	检测元件与被测介质不接触	不干扰被测介质, 但易受外界干扰
得到测量结果的操作程序	直接法	直接对被测量和单位作比较	简便
	间接法	直接测量的是和被测量有函数关系的几个量, 然后代入函数式计算出被测量	有利于提高检测能力, 有时也有利于提高检测精度
被测量与单位的比较方式	零值法(平衡法)	调节已知的标准量, 使之与被测量相平衡, 平衡时(偏差指示为零)即可用标准量来表示被测量	精度高, 操作复杂, 速度慢, 要求高灵敏的偏差指示表
	偏差法	由检测仪表指针偏移显示被测量	操作简便, 迅速, 但精度低
	微差法	用数值接近被测量的标准量和被测量比较, 取得偏差, 然后用偏差法测此差值, 被测量为标准量和此差值之和	差值足够小时, 准确度可很高, 操作简便, 但设备复杂
	替代法	在测量装置上用已知量替代被测量后, 使装置仍然恢复原状态, 则此已知量即等于被测量	准确度高, 操作复杂
	计算法	用标准脉冲(或单位量值)的个数来表示被测量	准确度高, 直观
被测量的变化速度	静态检测	被测量变化速度慢, 只需检测其稳态值	准确度高, 操作简便, 常用的方法
	动态检测	被测量变化速度快, 需检测其变化过程	要求检测系统具有能检测快变信号的相应动特性

1.2.2 检测与转换系统

1.2.2.1 自动检测与转换系统的组成

检测的第一个环节是由传感器或灵敏元件将被测量变换成便于检测的量(称一次变换)。由于它们的变换原理或特性上的限制及外界影响, 一次变换所得信号常常不能满足测量或控制的要求, 为此, 总要再经一些环节来处理, 比如: 将 R 、 L 、 C 一类的电路参数变换成 U 、 I 等电参数; U 和 I 间的变换; 交流和直流间的变换; 电平调整; 阻抗匹配; 干扰抑制和处理; 信号改善等诸环节, 如图 1-1 所示。

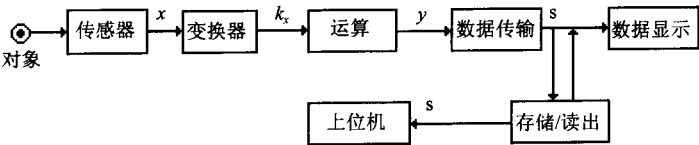


图 1-1 自动检测与转换系统的组成

就某一自动检测与转换系统而言, 不一定包含图 1-1 中的全部环节, 但其所具有的环节却是按照一定规律构成开环或闭环系统。

开环系统如图 1-2, x 为被测量, 即系统输入; y 为系统输出; K_1 、 K_n 分别为传感环节 T 和显示环节 D 的灵敏度, 中间其他环节的灵敏度分别为 K_2 , K_3 , ... K_{n-1} , 这样, 系统的输入—输出特性为:



图 1-2 开环检测系统

$$y = \prod_{i=1}^n K_i x = K_c x \tag{1-1}$$

式中 K_c 为系统的灵敏度, $K_c = \prod_{i=1}^n K_i$ 。

由式(1-1)可知, 各环节本身的误差以及由它们引入的干扰都将直接影响检测结果, 故对每个环节的准确度和抗干扰能力都要求较高, 但这种开环系统结构简单、可靠、实现方便。

闭环系统又可分为无差系统和有差系统, 分别如图 1-3a、b 所示, K_1 、 β 、 K_2 分别为传感环节 T、反馈环节 B 和信号的正向通道 A 的传递系数, 有差系统有显示环节 D, 而无差系统由具有记忆作用的元件(如伺服电机、继电器、双稳态触发器或保持电路等)构成保持环节 R, 它既起显示作用, 也可使反馈和输入之差 $\Delta F = F_x - F_y$ 达到零(无差)。

这种系统的准确度主要取决于反馈环节 B, 所以要求它稳定性要好、惯性要小(以便快速反应); 正向通道的灵敏度不仅要高, 而且要求稳定, 但过高会使系统稳定性变差; 有差系统因有显示环节 D, 使其准确度会比无差系统低, 但其量程可较宽。

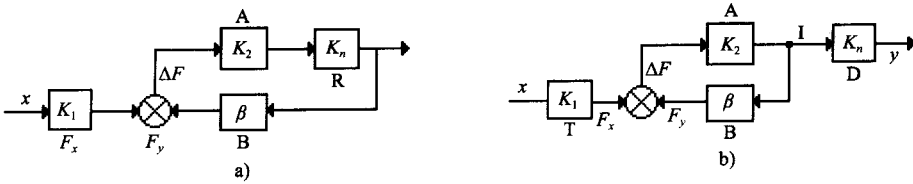


图 1-3 闭环检测系统

a) 无差平衡检测系统 b) 有差平衡检测系统

1.2.2.2 自动检测与转换系统的一般特性

自动检测与转换系统实质上是一个传递检测信息的通道, 当被测信号为定值或变化十分缓慢时表现为静特性, 若为随时间变化的信号则表现为动特性。静特性和动特性描述了自动检测与转换系统的性能。

1. 静态特性

(1) 输入—输出特性

系统的输入—输出特性一般可表示成为

$$y = a_0 + a_1 x^1 + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (1-2)$$

式中 x 为系统输入量, 即被检测量; y 为系统输出量, 一般即为检测结果; a_i 为标定系数。

对此特性可由如下几个主要方面来描述。

1) 线性度 δ 。当系数 $a_i=0(i=1, 2, \dots, n)$ 时, 特性为线性, a_0 为零偏, a_1 为系统灵敏度; 当 $a_i \neq 0(i=2, \dots, n)$ 时, 特性为非线性。从使用角度上讲一般总希望尽可能近似线性, 故常选用一条拟合直线来替代此非线性曲线, 这样造成的误差称为非线性误差(线性度) δ

$$\delta = \pm \frac{\Delta m}{y_{FS}} \quad (1-3)$$

式中 Δm 为实际曲线和拟合直线间的最大偏差; y_{FS} 为检测系统的满量程输出。

2) 灵敏度 K 。系统稳态输出变化与引起这一变化所对应的输入变化之比称为灵敏度 K

$$K = \frac{dy}{dx} \quad (1-4)$$

对于线性特性, K 为常数, 否则它将是 x 的函数。

3) 分辨率。指系统能检测到被测量的最小变化的能力, 它和系统的显示装置密切相关。

4) 灵敏限。指输入量的最小变化。所谓“最小”是以能使显示可觉察到此变化为准。这是由于系统有内部噪声和传动间隙等影响造成的。

5) 回差和死区。死区是指不能引起输出有可见变化的输入之最大变化范围，这是由于有的系统内部可动元件存在间隙或摩擦等造成的。回差是指当被测量由小变大和由大变小，若输出一输入关系是两条不重合的曲线，其间的最大差值称为回差。这是由于存在死区和系统中有带滞后特性的磁性元件或弹性元件所致。

(2) 准确度

检测总会有误差，不同性质的误差对检测结果的影响不同，描述亦不同。

精密度—对某一稳定的被测量，短时间内在相同条件下检测结果示值的不一致程度。这主要是随机误差造成的影响。

正确度—检测示值有规律的偏离被测量真实值的程度。这是由于系统误差的影响造成的。

准确度—精密度和正确度的综合，又称精度。检测仪表的精度等级说明了允许误差的变化范围，如 1.0 级精度仪表，表示其允许误差为 $\pm 1\%$ 。

2. 动态特性

和一般系统一样，当检测系统内有弹性、惯性、阻尼等一类元件时，在系统输入(即被检测信号)发生变化时，系统的输出(即检测结果)将不能无失真地立即随之改变，这样系统的输出和输入之间不再是定值关系。如前所述，检测系统实质上是一个信息传输通道，它的动态特性就是描述变化的信号在通过此通道时所赋予的影响。描述这种影响的办法有两种：给系统建立一个数学模型，或者找出系统的动态特性函数。前者是在忽略了一些较小的影响因素后，得到一个常系数线性微分方程，但在实际使用中，在被检测信号或系统本身稍复杂时，用此方程研究就较为困难，甚至无法求解；为此常用后者，找出能反映系统动态特性的函数，由此来为系统的输入—输出建立关系。这种函数有：在复频域中研究系统用的传递函数；在频域中研究用的频率响应函数；在时域中研究用的脉冲响应函数，这些均可适应对不同形式输出信号的研究。

(1) 一般数学模型

忽略一些较小因素的影响，一般检测系统可近似看成常系数线性系统，如

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中 x 为系统输入，即被检测信号； y 为系统输出，即系统的检测结果； a_i 、 b_i 为常系数。

(2) 传递函数 $H(s)$

在检测系统由零状态起始时，对式(1-5)作拉氏变换后的系统传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-6)$$

系统实际输出 $y(t)$ 为 $y(s)$ 之拉氏反变换

$$y(t) = L^{-1}[y(s)] = L^{-1}[H(s)x(s)]$$

(3) 脉冲响应函数 $h(t)$

当输入 $x(t)$ 为单位脉冲函数 $\delta(t)$ 时, 因 $\delta(t)$ 的拉氏变换 $L[\delta(t)] = \Delta(s) = 1$, 所以

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{y(s)}{\Delta(s)} = y(s)$$

$$h(t) = L^{-1}[H(s)] = L^{-1}[y(s)] = y_s(t) \quad (1-7)$$

即: 脉冲响应函数 $h(t)$ 是系统在单位脉冲输入时的输出 $y_s(t)$, 又称系统对单位脉冲的响应。

当输入 $x(t)$ 为任意信号时, 系统输出 $y(t)$ 为 $h(t)$ 和 $x(t)$ 的卷积:

$$y(t) = L^{-1}[H(s)x(s)] = h(t)x(t) \quad (1-8)$$

(4) 频率响应函数 $H(j\omega)$

对于稳定的常系数线性系统, 可用傅氏变换替代拉氏变换, 因此式(1-6)可变换成

$$H(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \cdots b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \cdots a_1(j\omega) + a_0} \quad (1-9)$$

表示频率响应函数 $H(j\omega)$ 是系统在正弦输入时的传递函数, 是在频率域中对检测系统传递信号能力的描述, $H(j\omega)$ 是复数量 $H(j\omega) = H_R(\omega) - jH_I(\omega) = |H(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$

$$|H(j\omega)| = \sqrt{[H_R(\omega)]^2 + [H_I(\omega)]^2} \quad (1-10)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \quad (1-11)$$

式(1-10)和式(1-11)分别称为检测系统的幅频和相频特性。

自动检测与转换系统动态性能指标的描述方法与自动控制系统动态性能的描述方法相同, 已经在有关课程中作了详尽介绍, 这里不再重复。

习题和思考题

1. 自动检测与转换技术研究的内容和性质是什么?
2. 自动检测与转换系统的静态特性包括哪些内容? 用哪些指标描述其动态特性?
3. 某检测系统由传感器、放大器和记录仪组成, 各环节的灵敏度分别为: $k_1=0.2\text{mV}/^\circ\text{C}$, $k_2=2.0\text{V/mV}$, $k_3=5.0\text{mm/V}$, 求该系统的总灵敏度?
4. 检定一只精度为 1.0 级 100mA 的电流表, 发现最大误差在 50mA 处为 1.4mA, 试问这只表是否合格?

2 误差分析与数据处理

被测对象某参数的量值之真实大小(真值)是客观存在的, 由于测量方法、测量设备以及人为因素等原因, 使测量结果总有误差。有的误差人们只能将其控制在所允许的有限范围内, 并用数学办法估算出大小, 而不能主动使其为零。测量误差显然会影响人们认识的准确性, 为此要对测量误差进行研究。此处研究误差主要基于如下目的:

- 1) 研究测量误差的性质, 分析产生误差的原因, 寻求最大限度地减小测量误差的途径。
- 2) 寻求正确处理数据的理论和方法, 以便在同样条件下能获得最精确、最可靠地反映真值的测量结果。

2.1 测量误差的分类和表示方法

2.1.1 测量误差的分类

测量误差的分类有多种方法, 根据测量误差的特征和性质, 可将测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

在相同条件下多次重复测量同一量时, 误差的大小和符号均保持不变, 或当条件改变时, 按某一确定的规律变化的误差称为系统误差。在测量过程中其大小及符号均保持不变的测量误差称为恒定系统误差; 在测量过程中随某些因素按某一规律(如线性规律、周期规律、多项式规律或复杂规律)变化的误差称为可变系统误差。

由于系统误差是某些个别因素影响较大所致, 它使测量结果偏离真值, 影响准确度, 依靠增加测量次数是无法消除系统误差的, 但它的大小和符号具有一定的规律性, 因此可以按其规律性引入修正量加以校正或通过改善测量方法来消除。

2. 随机误差

在相同条件下多次重复测量同一量时, 误差的大小和符号均发生变化, 其值时大时小, 符号时正时负, 没有确定的变化规律, 这种无法控制也不能事前预知的误差称为随机误差。它的产生不像系统误差那样是由于某个因素造成的固定不变的或按规律而变化的误差, 而是由多个互不相关的独立因素围绕其平均值产生随机起伏(如电磁场微变、热起伏、空气扰动、大地微震、仪器结构参数的波动、测试人员感觉器官的生理变化等等)对测量结果的综合影响所造成的, 它使测量结果随机性分散, 因此一次测量的单个随机误差没有任何预知的确定规律, 但通过大量的测量实践发现, 在多次重复测量的总体上, 误差的出现(大的、小的; 正的、负的)是有一定的统计规律的, 最典型的规律是正态分布。因此通过适当增加测量次数, 用数理统计的办法可使测量结果尽可能接近真值。

3. 粗大误差

粗大误差简称粗差。粗差是指所测的值明显歪曲被测对象真值。由于错读数据、记录错误、操作仪器失误及计算错误等原因所造成的误差，均为粗差。粗差通常在数值上明显超过同一客观条件下的系统误差或随机误差。

2.1.2 误差的表示方法

为研究误差，以下介绍一些有关名词和误差的表示方式。

1) 真值 X_0' ——在确定条件下被测对象的客观值或实际值。从测量意义上讲，它是一个理想概念。

2) 约定真值 X_0 ——根据理论定义所确定的值，如电流的单位值。在工业和科研测试中，常将标准仪表的示值也当作约定真值，例如在校验电表时，常以准确度高 3~5 级的同类仪表的示值作为准确值即假想的真值。

3) 绝对误差 $\Delta X'$ ——测得值 X 与真值 X_0' 之差，即

$$\Delta X' = X - X_0' \quad (2-1)$$

如果用约定真值 X_0 代替 X_0' ，则绝对误差还可以表示为

$$\Delta X = X - X_0 \quad (2-2)$$

4) 修正值 ΔX_c ——是指绝对误差 ΔX 的负值，即

$$\Delta X_c = X_0 - X \quad (2-3)$$

亦即测得值加上修正值可得到准确结果。

5) 相对误差 γ ——绝对误差与真值或约定真值之比。相对误差用于表示准确度，也常用于多个同类不同量值的被测对象测得结果准确程度的比较。在误差较小即 X 很接近 X_0 或 X_0' 时，可用 X 代替 X_0 或 X_0' ，在此条件下有

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0'} \times 100\% \approx \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (2-4)$$

6) 引用误差 γ_m' ——定义为绝对误差 ΔX 与特定值之比。常取指示仪表的量程上限满刻度值 X_m 作为特定值，按定义有

$$\gamma_m' = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (2-5)$$

一些常用电表和仪器准确度等级的确定就借用了引用误差的概念，不同之处在于将上述公式中的绝对误差 ΔX 改为绝对误差限 ΔX_m (即在量程有效部分内各处的绝对误差不得超过的限值)。根据这样的考虑，指示仪表的准确度等级 α ，实际上就是用 ΔX_m 与 X_m 所组成的引用误差的绝对值 $|\Delta X_m/X_m|$ 乘以 100 来定义，并据此值的大小分出不同级别。由此可引伸出以下结论：

① $\Delta X_m/X_m$ 就是仪表满刻度处的相对误差限。

② 如已知仪表的准确度等级和量程 X_m ，则不难计算出该量程的绝对误差限 ΔX_m 。例如量程为 250 V 的 0.5 级电度表， $\Delta X_m = \pm 250 \text{ V} \times 0.5\% = \pm 1.25 \text{ V}$ ；又如，5 A，1.0 级的电度表， $\Delta X_m = \pm 5 \text{ A} \times 1\% = \pm 0.05 \text{ A}$ 。

③ 在量程范围内，某刻度值 X' 处的相对误差限为