

HZ BOOKS
华章教育

高等院校信息学科应用型本科规划教材

自动检测技术

ZI DONG JIAN CE JI SHU

刘传玺 袁照平 主编



机械工业出版社
China Machine Press

TP274/122

2008

高等院校信息学科应用型本科规划教材

自动检测技术

ZI DONG JIAN CE JI SHU

刘传玺 袁照平 主编 王进野 胡新颜 朱蕾 副主编



机械工业出版社
China Machine Press

本书叙述简明、内容丰富,注重理论联系实际。本书系统介绍了自动检测技术的基础概念、传感技术、信号交换处理、抗干扰技术等内容,并对自动检测技术的综合应用、系统设计及发展方向等作了介绍。

本书可作为高等院校电气自动化、电子信息工程、机电一体化技术、测控技术与仪表等专业的教材,也可作为机电类其他相关专业学生的教材或参考书。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术/刘传玺,袁照平主编. —北京:机械工业出版社,2008.1
(高等院校信息学科应用型本科规划教材)
ISBN 978-7-111-22663-5

I. 自… II. ①刘… ②袁… 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(2007)第166253号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:王颖

北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2008年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.75印张

定价:26.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

前 言

随着我国经济的飞速发展和教育改革的不断深化,教育结构向着适应经济发展的方向不断调整。在这一调整过程中,应用型本科作为普通高等教育的一个单独的类型被划分出来,随之而来的是应用型本科教学中教材建设问题。本书就是针对应用型本科而编写的一部教材。

自动检测技术是整个自动化技术中的重要基础,是一门理论与实践结合十分密切的技术基础课程,在整个自动化技术学科体系中占有非常重要的地位。检测技术是科学实验和工业生产活动中对信息进行获取、传递、处理的一系列技术的总称。检测的基本任务就是获取有用的信息,通过借助专门的仪器、设备,设计合理的实验方法以及进行必要的信号分析与数据处理,从而获得与被测对象有关的信息,最后将其结果提供显示或输入其他信息处理装置、控制系统。本课程主要是培养学生综合运用检测技术的基本理论和知识来分析和解决工程实际问题的能力。

本书共9章,第1章:检测技术的基本知识;第2章:传统传感器,包括传感器基础知识、电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、热电式传感器;第3章:新型传感器,包括气敏和湿敏传感器、霍尔传感器、感应同步器、磁栅式传感器、热电阻红外线传感器、光电式传感器、光纤传感器、图像传感器、传感器的智能化与微型化等内容;第4章:检测系统中信号的转换与调理;第5章:检测系统中的抗干扰技术;第6章:自动检测技术应用举例;第7章:自动检测系统的设计;第8章:自动检测技术发展方向;第9章:虚拟仪器系统应用。每章均附有习题和思考题。

本书由山东科技大学刘传玺、袁照平任主编,参加编写的有王进野、胡新颜、朱蕾。其中第1、2、3章由刘传玺编写,第4章由袁照平、王进野合编,第5章由王进野编写,第6章由胡新颜、朱蕾合编,第7、8章由袁照平编写,第9章由胡新颜编写。全书由刘传玺负责统稿。袁照平、朱蕾负责电子课件的制作。

在本书编写的过程中,参考了一些相关教材和文献资料,在此向所有参考文献的作者表示衷心的感谢。同时受到山东科技大学有关部门的领导和同志们的支持与帮助,在此一并表示感谢。本书的出版得到了机械工业出版社有关专家的指导和支持,在此也表示诚挚的谢意。

本书编写的过程中,力求做到体系结构完整,内容丰富精炼,突出实用性与先进性,叙述方法由浅入深。本书可作为高等院校电气自动化、电子信息工程、机电一体化技术、测控技术与仪表等专业的教材,也可作为机电类其他相关专业学生的教材或参考书。

编 者
2007年8月

目 录

前言

第1章 检测技术的基本知识 1

- 1.1 概述 2
 - 1.1.1 检测技术的含义、作用和地位 2
 - 1.1.2 工业检测技术的内容 3
 - 1.1.3 自动检测系统的组成 3
 - 1.1.4 检测技术的发展趋势 4
- 1.2 检测系统的基本特性 5
 - 1.2.1 静态特性 5
 - 1.2.2 动态特性 7
- 1.3 测量误差及消除方法 7
 - 1.3.1 测量误差的概念 7
 - 1.3.2 误差的表示方法 7
 - 1.3.3 误差的分类 9
 - 1.3.4 误差处理 10
- 习题与思考题 15

第2章 传统传感器 16

- 2.1 传感器基础知识 17
 - 2.1.1 传感器的概念与定义 17
 - 2.1.2 传感器的命名与分类 17
 - 2.1.3 传感器的性能指标 17
 - 2.1.4 提高传感器性能的技术途径 20
 - 2.1.5 传感器选用原则 20
 - 2.1.6 传感器的发展方向 22
- 2.2 电阻式传感器 23
 - 2.2.1 电阻应变式传感器 23
 - 2.2.2 电位器式传感器 31
- 2.3 电容式传感器 34
 - 2.3.1 电容式传感器的基本原理 34
 - 2.3.2 电容式传感器的类型与特性 34
 - 2.3.3 电容式传感器的测量电路 36
 - 2.3.4 电容式传感器应用举例 39

- 2.4 电感式传感器 41
 - 2.4.1 自感式传感器 42
 - 2.4.2 互感式传感器 45
 - 2.4.3 电涡流式传感器 48
 - 2.4.4 电感式传感器应用举例 50
- 2.5 压电式传感器 52
 - 2.5.1 压电效应与压电材料 53
 - 2.5.2 压电式传感器工作原理及压电元件常用结构形式 56
 - 2.5.3 压电式传感器的测量电路 57
 - 2.5.4 压电式传感器的应用举例 58
- 2.6 磁电式传感器 59
 - 2.6.1 磁电感应式传感器的工作原理 60
 - 2.6.2 磁电感应式传感器的结构 60
 - 2.6.3 应用举例 62
- 2.7 热电式传感器 63
 - 2.7.1 金属热电阻传感器 64
 - 2.7.2 半导体热敏电阻传感器 65
 - 2.7.3 热电偶传感器 66
 - 2.7.4 集成温度传感器 72
 - 2.7.5 热电式传感器应用举例 73
- 习题与思考题 75

第3章 新型传感器 78

- 3.1 气敏和湿敏传感器 79
 - 3.1.1 气敏电阻式传感器 79
 - 3.1.2 离子感烟传感器 81
 - 3.1.3 湿敏电阻式传感器 83
- 3.2 霍尔传感器 84
 - 3.2.1 半导体材料的霍尔效应 84
 - 3.2.2 霍尔元件的结构、符号及基本电路 85
 - 3.2.3 霍尔元件的特征参数 86

3.2.4 霍耳传感器的连接方式和输出 电路	87
3.2.5 霍耳传感器应用	88
3.3 感应同步器	89
3.3.1 感应同步器的类型及结构	90
3.3.2 感应同步器的工作原理	90
3.3.3 感应同步器输出信号的鉴别 方式	91
3.4 磁栅式传感器	92
3.4.1 磁栅	93
3.4.2 磁头	93
3.4.3 磁栅式传感器的工作原理	94
3.4.4 信号处理方式	96
3.4.5 磁栅式传感器的应用	97
3.5 热电型红外线传感器	98
3.5.1 红外测温原理	98
3.5.2 常见的红外传感器	98
3.5.3 红外传感器使用中应注意的 问题	100
3.6 光电式传感器	100
3.6.1 光电效应	100
3.6.2 光电器件	101
3.6.3 光电元件的特性	103
3.6.4 光电元件应用	107
3.7 光纤传感器	108
3.7.1 光导纤维的结构和导光 原理	109
3.7.2 光纤传感器的工作原理	110
3.7.3 光纤传感器的分类	110
3.7.4 光纤传感器的应用	111
3.8 图像传感器	112
3.8.1 CCD 图像传感器的基本结构 和工作原理	112
3.8.2 CCD 图像传感器的应用	113
3.9 传感器的智能化与微型化	114
3.9.1 智能传感器	115
3.9.2 微型传感器	120
习题与思考题	122

第4章 检测系统中信号的转换与

调理	123
4.1 电桥	124
4.1.1 直流电桥	124
4.1.2 交流电桥	126
4.2 信号的放大与隔离	127
4.2.1 测量放大器	127
4.2.2 程控增益放大器	130
4.2.3 隔离放大器	134
4.3 调制与解调	136
4.3.1 调幅及其解调	137
4.3.2 调频及其解调	139
4.4 滤波电路	141
4.4.1 低通滤波器	142
4.4.2 高通滤波器	142
4.4.3 带通滤波器	143
4.4.4 带阻滤波器	143
4.5 信号变换电路	144
4.5.1 采样—保持器	144
4.5.2 信号转换电路	146
4.6 线性化	155
4.7 温度补偿技术	157
4.7.1 温度误差灵敏度	157
4.7.2 并联式温度补偿原理	157
4.7.3 反馈式温度补偿原理	158
4.7.4 综合应用实例	159
习题与思考题	162

第5章 检测系统中的抗干扰技术

5.1	检测系统中的干扰	164
5.1.1	干扰的种类、噪声源及防护 办法	164
5.1.2	干扰的传播	165
5.2	常用抗干扰技术	166
5.2.1	屏蔽技术	167
5.2.2	接地技术	168
5.2.3	隔离技术	169
5.2.4	滤波器	170

5.2.5 软件抗干扰技术	171
习题与思考题	172
第6章 自动检测技术应用举例	174
6.1 电感式微位移测量仪	175
6.1.1 测量仪的组成	175
6.1.2 传感器及其信号处理电路	175
6.1.3 单片机及其扩展	176
6.1.4 键盘、显示与打印	177
6.1.5 数字低通滤波与插值	177
6.2 检测技术在智能楼宇中的应用	178
6.2.1 空调系统的监控	178
6.2.2 给排水系统	179
6.2.3 火灾监视与控制系统	179
6.2.4 门禁与防盗系统	180
6.2.5 电梯的运行管理	180
6.3 检测技术在全自动洗衣机中的 应用	182
6.3.1 全自动洗衣机单片机控制 系统逻辑结构	182
6.3.2 模糊全自动洗衣机的模糊 推理	184
6.3.3 洗衣机物理量检测	185
6.3.4 控制软件	187
6.4 检测技术在环境检测中的应用	187
6.4.1 检测电路	188
6.4.2 A/D 模板	188
6.4.3 系统标定及数据处理	193
6.5 检测技术在数控机床中的应用	193
6.5.1 各传感器在加工过程中的 作用	194
6.5.2 系统的报警、故障自诊功能	196
6.6 布匹长度自动记录与控制仪	196
6.6.1 测量原理	196
6.6.2 系统功能	198
6.6.3 软件结构	199
习题与思考题	200
第7章 自动检测系统的设计	201
7.1 自动检测系统及设计原则	202

7.1.1 开环检测系统	202
7.1.2 闭环检测系统	202
7.1.3 自动检测系统设计原则	203
7.2 自动检测系统的设计步骤	205
7.2.1 自动检测系统的分析	205
7.2.2 自动检测系统总体方案的 设计	205
7.2.3 自动检测系统硬件的设计	206
7.2.4 自动检测系统软件的设计	208
7.2.5 系统集成	210
7.3 加热炉温度测控系统设计	210
7.3.1 温度测控系统的设计要求与 组成	210
7.3.2 温度测控系统的硬件电路	211
7.3.3 温度测控系统的软件设计	216
习题与思考题	219
第8章 自动检测技术的发展方向	220
8.1 现场总线技术	221
8.1.1 CAN (控制器局域网)	222
8.1.2 LonWorks (局部操作网络)	222
8.1.3 PROFIBUS (过程现场总线)	223
8.1.4 HART (可寻址远程传感器 数据通路)	223
8.1.5 FF (现场总线基金会现场 总线)	223
8.2 虚拟仪器	224
8.2.1 虚拟仪器的发展与特点	224
8.2.2 虚拟仪器的结构组成	225
8.3 网络化测控系统	227
8.3.1 网络化测控系统的特点与 发展	227
8.3.2 网络化测控系统的体系结构	227
习题与思考题	229
第9章 虚拟仪器系统的应用	230
9.1 LabVIEW 简介	231
9.1.1 LabVIEW 概述	231
9.1.2 LabVIEW 的运行机制	231

9.1.3 LabVIEW 应用	232
9.2 虚拟电子秤系统	233
9.2.1 虚拟电子秤系统组成	233
9.2.2 虚拟电子秤程序设计	233
9.3 大气污染虚拟检测系统	237
9.3.1 当今城市环境现状	237
9.3.2 SO ₂ 测量原理	237

9.3.3 氮的氧化物浓度的测量	238
9.3.4 二氧化硫浓度的计算	238
9.3.5 二氧化氮浓度的计算	239
9.3.6 主程序设计	239
习题与思考题	240
参考文献	241

第1章

检测技术的基本知识

- ◇ 1.1 概述
- ◇ 1.2 检测系统的基本特性
- ◇ 1.3 测量误差及消除方法



1.1 概述

1.1.1 检测技术的含义、作用和地位

在人类的各项生产活动和科学实验中,为了了解和掌握整个过程的进展及其最后结果,经常需要对各种基本参数或物理量进行检查和测量,从而获得必要的信息,作为分析判断和决策的依据,可以认为检测技术就是人们为了对被测对象所包含的信息进行定性的了解和定量的掌握所采取的一系列技术措施。随着人类社会进入信息时代,以信息的获取、转换、显示和处理为主要内容的检测技术已经发展成为一门完整的学科,在促进生产发展和科技进步的广阔领域内发挥着重要作用。其主要应用如下:

1)检测技术是产品检测和质量控制的重要手段。借助于检测工具对产品进行质量评价是人们十分熟悉的,这是检测技术重要的应用领域。但传统的检测方法只能将产品区分为合格品和废品,起到产品验收和废品剔除的作用。这种被动检测方法,对废品的出现并没有预先防止的能力。在传统检测技术基础上发展起来的主动检测技术或称之为在线检测技术使检测和生产加工同时进行,及时地用检测结果对生产过程主动地进行控制,使之适应生产条件的变化或自动地调整到最佳状态。这样检测的作用已经不只是单纯检查产品的最终结果,而且还要掌握和干预造成这些结果的原因,从而进入质量控制的领域。

2)检测技术在大型设备安全经济运行监测中应用广泛。电力、石油、化工、机械等行业的一些大型设备通常在高温、高压、高速和大功率状态下运行,保证这些设备安全运行在国民经济中具有重大意义。为此,通常设置故障监测系统以对温度、压力、流量、转速、振动和噪声等多种参数进行长期动态监测,以便及时发现异常情况,加强故障预防,达到早期诊断的目的。这样做可以避免严重的突发事件,保证设备和人员安全,提高经济效益。即使设备发生故障也可以从监测系统提供的数据中找出故障原因,缩短检修周期,提高检修质量。另外,在日常运行中,这种连续监测可以及时发现设备故障前兆,采取预防性检修。随着计算机技术的发展,这类监测系统已经发展到故障自诊断系统,可以采用计算机来处理检测信息,从而进行分析、判断,及时诊断出设备故障并自动报警或采取相应的对策。

3)检测技术和装置是自动化系统中不可缺少的组成部分。任何生产过程都可以看作是由“物流”和“信息流”组合而成,反映物流的数量、状态和趋向的信息流则是人们管理和控制物流的依据。人们为了有目的地进行控制,首先必须通过检测获取有关信息,然后才能进行分析判断以便实现自动控制。所谓自动化,就是用各种技术工具与方法代替人来完成检测、分析、判断和控制工作。一个自动化系统通常由多个环节组成,分别完成信息获取、信息转换、信息处理、信息传送及信息执行等功能。在实现自动化的过程中,信息的获取与转换是极其重要的组成环节,只有精确及时地将被控对象的各项参数检测出来并转换成易于传送和处理的信号,整个系统才能正常地工作。因此,自动检测与转换是自动化技术中不可缺少的组成部分。

4)检测技术的完善和发展推动着现代科学技术的进步。人们在自然科学各个领域内从事的研究工作,一般是利用已知的规律对观测、试验的结果进行概括、推理,从而对所研究的对象取得定量的概念并发现它的规律性,然后上升到理论。因此,现代化检测手段所达到



的水平在很大程度上决定了科学研究的深度和广度。检测技术达到的水平愈高，提供的信息愈丰富、愈可靠，科学研究取得突破性进展的可能性就愈大。此外，理论研究的一些成果，也必须通过实验或观测来加以验证，这同样离不开必要的检测手段。

从另一方面看，现代化生产和科学技术的发展也不断地对检测技术提出新的要求和课题，成为促进检测技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于检测技术中，也有力地促进了检测技术自身的现代化。

检测技术与现代化生产和科学技术的密切关系，使它成为一门十分活跃的技术学科，几乎渗透到人类的一切活动领域，发挥着愈来愈大的作用。

1.1.2 工业检测技术的内容

工业检测涉及的内容广泛，常见的工业检测涉及的内容如表 1-1 所示。

表 1-1 常见的工业检测

被测量类型	被 测 量	被测量类型	被 测 量
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力(压强)压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面	物体的性质和成分量	气体、液体、固体的化学成分、浓度、黏度、湿度、密度、酸碱度、浊度、透明度、颜色
机械量	直线位移、角位移、速度、加速度、转速、应力、应变、力矩、振动、噪声、质量(重量)	状态量	工作机械的运动状态(启、停等)、生产设备的异常状态(超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等)
几何量	长度、厚度、角度、直径、间距、形状、平行度、同轴度、粗糙度、硬度、材料缺陷	电工量	电压、电流、功率、电阻、阻抗、频率、脉宽、相位、波形、频谱、磁场强度、电场强度、材料的磁性能

显然，在实际工业生产中，需要检测的量远不止以上所举的项目。而且，随着自动化、现代化的发展，工业生产将对检测技术提出越来越多的新要求，本教材只介绍基本非电量的检测技术。

1.1.3 自动检测系统的组成

一个完整的检测系统或检测装置通常是由电源、传感器、信号处理电路、显示记录装置、传输通道等几部分组成，有时还有数据处理仪器及执行机构等部分，分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能，检测系统的组成如图 1-1 所示。

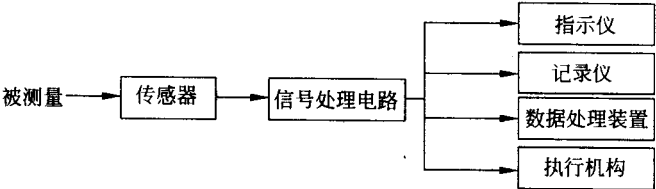


图 1-1 检测系统的组成框图



1. 传感器

传感器是指将被测量(一般为非电量)转换为另一种与之有确定对应关系并便于测量的量(一般为电量)的器件,它又叫探测器、换能器等。

传感器使检测系统与被测对象直接发生联系,它处于被测对象和检测系统的接口位置,是信息输入的主要窗口,它为检测系统提供必要的原始信息。它是整个检测系统极其重要的环节,其获得的信息正确与否,关系到整个检测系统的精度。

2. 信号处理电路

通常传感器输出的信号是微弱的,还不能满足显示记录装置或执行机构的要求。信号处理电路的作用就是将传感器的输出信号转换成易于测量、具有一定功率的电压或电流或频率等信号。根据需求和传感器的类型,信号处理电路不仅能进行信号放大,还能进行阻抗匹配、微分、积分、线性化补偿等信号处理工作。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用,已经实现了将传感器的敏感元件与传导调理转换电路集成在同一芯片上的传感器模块和集成电路传感器。

3. 显示记录及数据处理装置

显示记录装置是检测人员和检测系统联系的主要环节,检测人员通过显示记录装置了解和掌握数据大小及变化的过程。

目前常用的显示装置有模拟显示、数字显示和图像显示。模拟显示是利用指针对标尺的相对位置表示被测量数值的大小,如各种指针式电气测量仪表、模拟光柱等。数字显示是用发光二极管(LED)和液晶(LCD)等以数字的形式显示读数。图像显示一般用CRT或LCD屏幕来显示数据或显示被测参数的变化曲线,有时还可用图表及彩色图等形式反映多组检测数据。

记录仪的主要作用是记录被测量的动态变化过程,常用的记录仪有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪、快速打字机等。

数据处理装置是用来对检测结果进行处理(如A/D转换)、运算、分析。可利用计算机完成数据处理和控制执行机构的工作。

所谓执行机构通常是指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、伺服电动机等在电路中起通断、控制、调节、保护等作用的电器设备。许多检测系统能输出与被测量有关的电流或电压信号,以驱动这些执行机构,从而为自动控制系统提供控制信号。

1.1.4 检测技术的发展趋势

科学技术的迅猛发展,对检测技术提出了更新更高的要求,同时,又为检测技术的发展创造了条件。检测技术的发展趋势主要表现在以下几个方面:

- 1) 不断提高检测系统的测量精度、量程范围、延长使用寿命、提高可靠性等。
- 2) 应用新技术和新的物理效应,扩大检测领域。
- 3) 采用微型计算机技术,使检测技术智能化。
- 4) 不断开发新型、微型、智能化传感器,如智能传感器、生物传感器、高性能集成传感器等。
- 5) 不断开发传感器的新型敏感元件材料和采用新的加工工艺,提高仪器的性能、可靠



性,扩大应用范围,使测试仪器向高精度和多功能方向发展。

6)不断研究和发展微电子技术、微型计算机技术、现场总线技术与仪器仪表和传感器相结合的多功能融合技术,形成智能化测试系统,使测量精度、自动化水平进一步提高。

7)不断研究开发仿生传感器,主要是指模仿人或动物的感觉器官的传感器,即视觉传感器、听觉传感器、嗅觉传感器、味觉传感器、触觉传感器等。

8)参数测量和数据处理的高度自动化。

1.2 检测系统的基本特性

检测系统的特性一般是指检测系统输入量和输出量关系的特性。它分为静态特性和动态特性。

当被测量不随时间变化或变化很慢时,可以认为检测系统的输入量和输出量都与时间无关,表示输入量和输出量之间关系的是一个不含时间变量的代数方程,由此方程确定的检测系统性能参数特性称为静态特性。

当被测量随时间变化很快时,输入量和输出量就有一个动态关系,表示这一关系的含有时间变量的微分方程,由此方程确定的检测系统对快速变化的被测量的响应特性称为动态特性。

1.2.1 静态特性

1. 灵敏度

灵敏度是指传感器或检测系统在稳态下,输出量变化值与输入量变化值的比值。用 K 来表示灵敏度,即

$$K = \frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-1)$$

式中, x 为输入量; y 为输出量。

如果检测系统输出和输入之间是线性关系,则灵敏度 K 是一个常数;否则,它将随输入量的变化而变化。从图 1-2 可见,曲线越陡,灵敏度越高,曲线上任一点处的灵敏度就是由该点所作的曲线切线的斜率。

如果输入和输出的变化量有不同的量纲,则灵敏度也是有量纲的。例如,输入量为温度($^{\circ}\text{C}$),输出量为电压(mV),则灵敏度的量纲为 $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。如果输入量和输出量是同类量,则灵敏度是无量纲的,此时也可把灵敏度理解为放大倍数。

提高灵敏度,可得到较高的测量精度,但测量范围窄,稳定性也会变差。

2. 分辨力

分辨力是指检测仪表能精确检测出被测量的最小变化的能力。输入量从某个任意值(一般为非零值)缓慢增加,直到可以测量到输出的变化为止,此时的输入量就是该测量仪表的

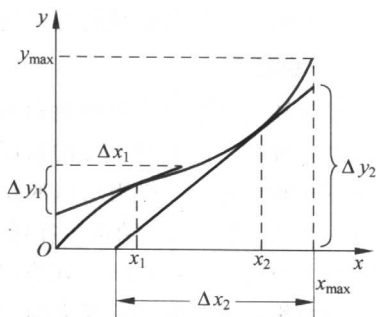


图 1-2 检测系统灵敏度



分辨力。

分辨力可用绝对值表示,也可用量程的百分数表示。一般模拟式仪表的分辨力规定为最小刻度分度值的一半;数字式仪表的分辨力一般可以认为是该表最后一位的一个字。有时也可把仪表的最大绝对误差看作该仪表的分辨力。

分辨力说明检测仪表响应与分辨输入量微小变化的能力,分辨力越好,其灵敏度越高。

3. 线性度

线性度又称非线性误差,是指检测系统实际的输入-输出特性曲线与拟合直线之间最大偏差和满量程输出的百分比。即

$$\gamma_L = \frac{\Delta L_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, $\Delta L_{\max}$ 为非线性最大误差; $y_{\max} - y_{\min}$ 为量程范围。

如图 1-3 所示,由于线性度是以拟合直线为基准线而得出的,所以选取的拟合直线不同,其线性度也不同。拟合直线的选取有多种方法,如拟合直线通过实际特性曲线的起点和满量程点,称为端基拟合直线,由此得到的线性度称为端基线性度;连接理论曲线坐标零点和满量程输出点的直线称为理论拟合直线,由此得到的线性度称为理论线性度。

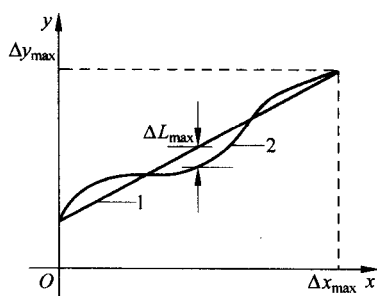


图 1-3 线性度示意图

1—拟合直线; 2—实际特性曲线

4. 迟滞

迟滞是指检测系统在输入量增大(正向)和输入量减小(反向)行程间,输入-输出特性曲线不一致的程度。

即同样大小的输入量,检测系统在正反行程中,往往对应两个大小不同的输出量,这两个不同输出量的最大差值 Δm 与满量程输出量的百分比即为迟滞量,如图 1-4 所示。

产生迟滞的主要原因是仪表元件存在能量的吸收和传动机构的摩擦,间隙及紧固件的松动等。一般希望检测系统的迟滞越小越好。

5. 稳定性

稳定性包含稳定度和环境影响量两个方面。稳定度是指检测装置在所有条件恒定不变的情况下,在规定时间内能维持其示值不变的能力,一般用示值的变化量和时间的长短的比值来表示。例如,某仪表示值电压在所有条件不变的情况下,在 8 h 内的最大变化量为 1.3 mV,其稳定度可写成 1.3 mV/8 h。环境影响量是指由于外界环境因素的变化而引起的仪表示值变化的变化量。造成环境影响量的因素有温度、湿度、气压、电源电压或频率、电磁场等。表示环境影响量时要同时写出示值偏差及造成这一偏差的影响因素的大小。例如,温度每变化 1℃ 引起示值变化 0.3 mV,其环境影响量可表示为 0.3 mV/℃;又如电源电压变化 $\pm 5\%$ 时,引起示值变化 0.02 mA,可表示为 0.02 mA/ $\pm 5\%$ V。检测系统的稳定性越好,其抗干扰的能力越强。

检测系统的静态特性还包括重复性、可靠性、死区等参数。

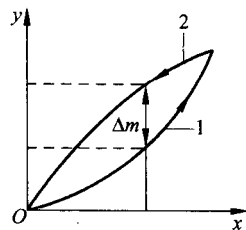


图 1-4 迟滞特性示意图

1—正向特性; 2—反向特性



1.2.2 动态特性

检测系统要具有良好的动态特性,才能较精确地测出被测量的大小和随时间变化的规律。否则,会引起较大的动态误差。

在实际检测工作中,检测系统的动态特性通常是用实验的方法得出的。系统对标准输入信号的响应与对任意输入信号的响应之间存在一定的关系,可根据系统对一些标准信号的响应来评定它的动态特性。例如,在时域内,常采用阶跃信号来分析系统的瞬态响应;在频域内,常采用正弦输入信号来分析系统的频率响应等。

对检测系统的动态特性的理论研究,通常是先建立系统的数学模型,通过拉氏变换找出传递函数表达式,再根据输入条件得到响应的频率特性,并以此来描述系统的动态特性。大部分检测系统可以简化为单自由度一阶或二阶系统。因此可方便地应用自动控制原理的分析方法和结论。

1.3 测量误差及消除方法

1.3.1 测量误差的概念

测量误差是指检测结果与被测量的客观真值的差值。在检测过程中,被测对象、检测系统、检测方法和检测人员都会受到各种因素的影响。有时,对被测量的转换也会改变被测对象原有的状态,造成测量误差。由误差公理可知:任何实验结果都是有误差的,误差自始至终存在于一切科学实验和测量之中,被测量的真值是永远难以得到的。但是,可以改进检测装置和检测手段,并通过测量误差进行分析处理,使测量误差处于允许的范围。

测量的目的是希望通过测量求取被测量的真值。在分析测量误差时,采用的被测量真值是指在确定条件下被测量客观存在的实际值。判断真值的方法有三种:一是理论设计和理论公式的表达值,称理论真值。例如,三角形内角之和为 180° 。二是由国际计量学确定的基本的计量单位称约定真值。例如,在标准条件下水的冰点和沸点分别是 0°C 和 100°C 。三是精度高一级或几级的仪表与精度低的仪表相比,把高级仪表的测量值称为相对真值。相对真值在测量中应用最为广泛。

1.3.2 误差的表示方法

检测系统(仪器)的基本误差通常有以下几种表示形式。

1. 绝对误差

检测系统的测量值(即示值) X 与被测量的真值 X_0 之间的代数差值 Δx 称为检测系统测量值的绝对误差,即

$$\Delta x = X - X_0 \quad (1-3)$$

式中,真值 X_0 可为约定真值,也可由高精度标准仪器所测得的相对真值。绝对误差 Δx 说明了系统示值偏离真值的大小,其值可正可负,具有和被测量相同的量纲。

在标定或校准检测系统样机时,常采用比较法,即对于同一被测量,将标准仪器(具有比样机更高的精度)的测量值作为近似真值 X_0 与被校检测系统的测量值 X 进行比较,它们



的差值就是被校检测系统测量示值的绝对误差。如果它是一恒定值,即为检测系统的“系统误差”。该误差可能是系统在非正常工作条件下使用而产生的,也可能是其他原因所造成的附加误差。此时对检测仪表的测量示值应加以修正,修正后才可得到被测量的实际值 X_0 。

$$X_0 = X - \Delta x = X + C \quad (1-4)$$

式中,数值 C 称为修正值或校正量。修正值与示值的绝对误差数值相等,但符号相反,即

$$C = -\Delta x = X_0 - X \quad (1-5)$$

计量室用的标准仪器常由高一级的标准仪器定期校准,检定结果附带有示值修正表,或修正曲线 $C=f(x)$ 。

2. 相对误差

检测系统测量值(即示值)的绝对误差 Δx 与被测参量真值 X_0 的比值,称为检测系统测量值(示值)的相对误差 δ ,常用百分数表示,即

$$\delta = \frac{\Delta x}{X_0} \times 100\% = \frac{X - X_0}{X_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

这里的真值可以是约定真值,也可以是相对真值(工程上),在无法得到本次测量的约定真值和相对真值时,常在被测参量(已消除系统误差)没有发生变化的条件下重复多次测量,用多次测量的平均值代替相对真值。用相对误差通常比用绝对误差更能说明不同测量的精确程度,一般来说相对误差值小,其测量精度就高。

在评价检测系统的精度或测量质量时,有时利用相对误差作为衡量标准也不很准确。例如,用任一确定精度等级的检测仪表测量一个靠近测量范围下限的小量,计算得到的相对误差通常比测量接近上限的大量(如 $2/3$ 量程处)得到的相对误差大得多。故引入引用误差的概念。

3. 引用误差

检测系统测量值的绝对误差 Δx 与系统量程 L 之比值,称为检测系统测量值的引用误差 γ 。引用误差 γ 通常仍以百分数表示。

$$\gamma = \frac{\Delta x}{L} \times 100\% \quad (1-7)$$

比较式(1-7)和式(1-6)可知:在 γ 的表示式中用量程 L 代替了真值 X_0 ,使用起来虽然更为方便,但引用误差的分子仍为绝对误差 Δx ,当测量值为检测系统测量范围的不同数值时,各示值的绝对误差 Δx 也可能不同。因此,即使是同一检测系统,其测量范围内的不同示值处的引用误差也不一定相同。为此,可以取引用误差的最大值,既能克服上述的不足,又更好地说明了检测系统的测量精度。

4. 最大引用误差(或满度最大引用误差)

在规定的工作条件下,当被测量平稳增加或减少时,在检测系统全量程所有测量值引用误差(绝对值)的最大者,或者说所有测量值中最大绝对误差(绝对值)与量程的比值的百分数,称为该系统的最大引用误差,用符号 $\gamma_{\max}$ 表示。

$$\gamma_{\max} = \frac{|\Delta x_{\max}|}{L} \times 100\% \quad (1-8)$$

最大引用误差是检测系统基本误差的主要形式,故也常称为检测系统的基本误差。它是



检测系统最主要的质量指标,能很好地表征检测系统的测量精度。

5. 精度等级

工业检测仪器(系统)常以最大引用误差作为判断精度等级的尺度。人为规定:取最大引用误差百分数的分子作为检测仪器(系统)精度等级的标志,也即用最大引用误差去掉正负号和百分号后的数字来表示精度等级,精度等级用符号 G 表示。

为统一和方便使用,国家标准 GB776—76《测量指标仪表通用技术条件》规定,测量指标仪表的精度等级 G 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个等级,这也是工业检测仪器(系统)常用的精度等级。检测仪器(系统)的精度等级由生产厂商根据其最大引用误差的大小并以选大不选小的原则就近套用上述精度等级得到。

1.3.3 误差的分类

为了便于误差的分析和处理,可以按误差的规律性将其分为三类,即系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

在相同的条件下,对同一物理量进行多次测量,如果误差按照一定规律出现,则把这种误差称为系统误差(system error),简称系差。系统误差可分为定值系统误差(简称定值系差)和变值系统误差(简称变值系差),数值和符号都保持不变的系统误差称为定值系差。数值和符号均按照一定规律变化的系统误差称为变值系差。变值系差按其变化规律又可分为线性系统误差、周期性系统误差和按复杂规律变化的系统误差。如图 1-5 所示,其中 1 为定值系差,2 为线性系统误差,3 为周期系统误差,4 为按复杂规律变化的系统误差。

系统误差的来源包括仪表制造、安装或使用方法不正确,测量设备的基本误差、读数方法不正确以及环境误差等。系统误差是一种有规律的误差,故可以通过理论分析采用修正值或补偿校正等方法来减小或消除。

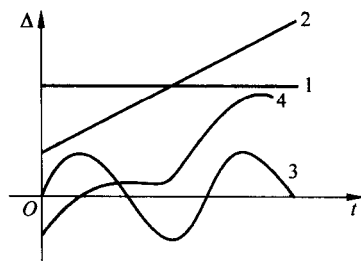


图 1-5 系统误差示意图

2. 随机误差

当对某一物理量进行多次重复测量时,若误差出现的大小和符号均以不可预知的方式变化,则该误差为随机误差(random error)。随机误差产生的原因比较复杂,虽然测量是在相同条件下进行的,但测量环境中温度、湿度、压力、振动、电场等总会发生微小变化,因此,随机误差是大量对测量值影响微小且又互不相关的因素所引起的综合结果。随机误差就个体而言并无规律可循,但其总体却服从统计规律,总的来说随机误差具有下列特性。

1) 对称性:绝对值相等、符号相反的误差在多次重复测量中出现的可能性相等。

2) 有界性:在一定测量条件下,随机误差的绝对值不会超出某一限度。

3) 单峰性:绝对值小的随机误差比绝对值大的随机误差在多次重复测量中出现的机会多。

4) 抵偿性:随机误差的算术平均值随测量次数的增加而趋于零。