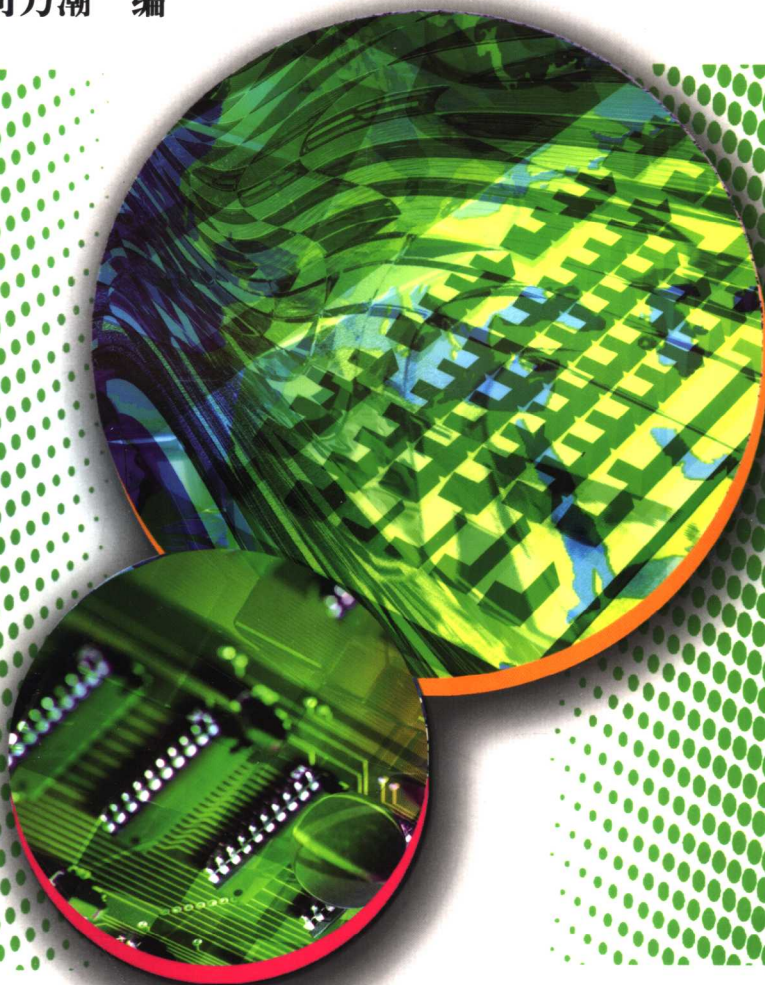


高 等 学 校 教 材

检测技术与 自动控制工程基础

● 严学华 司乃潮 编



化学工业出版社

高 等 学 校 教 材

检测技术与自动控制工程基础

严兴华 司乃潮 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书前半部分主要系统介绍了检测技术的基础内容,检测技术中的关键部件——各种传感器的工作原理、特点及用途,材料加工中最主要的物理量——温度的检测技术,以及材料加工工程中应用的各种先进的无损探伤检测技术的工作原理及特点;后半部分主要在介绍自动控制系统理论发展的基础上,简要介绍了自动控制系统中的主要控制仪表与装置,结合当前应用发展趋势对典型的自动控制理论(包括神经控制系统、模糊控制、专家控制、分级递阶智能控制)作了重点介绍,并具体介绍了各先进控制理论、计算机技术在材料热加工领域中的应用。

本书可作为高等工科院校材料工程专业、自动控制工程专业及其相关专业的技术基础教材,亦可作为相关专业科研人员、有关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术与自动控制工程基础/严兴华,司乃潮编. —北京:
化学工业出版社,2006.7

高等学校教材

ISBN 7-5025-9177-X

I. 检… II. ①严…②司… III. ①技术测量-高等学校-教材②自动控制理论-高等学校-教材 IV. ①TG806②TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第088192号

高等学校教材

检测技术与自动控制工程基础

严兴华 司乃潮 编

责任编辑:杨菁 彭喜英

文字编辑:李玉峰

责任校对:蒋宇

封面设计:韩飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010) 64982530

(010) 64918013

购书传真:(010) 64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 9 字数 214千字

2006年8月第1版 2006年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-9177-X

定价:18.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

根据新编教学大纲的要求,材料成型专业的学生必须掌握先进检测技术与先进控制理论,以适应新时期国民经济生产的需要。由于材料成型专业不同于机械、自动控制专业,材料成型专业的学生缺乏检测技术与控制工程的理论基础,更缺乏感性认识。本教材正是针对这一需要进行编写。

本教材较为全面地阐述了材料成型及控制工程设备中所涉及的检测技术与常见自动控制系统的结构和基本原理。在编写教材的选取上,尽量选用较为成熟的检测技术方法和常规自动控制基础理论,所引用的具体例子均来自国内各高校及相关科研院所的研究成果。

本教材在编写过程中,以材料成型及控制工程的各专业,即铸造、焊接、锻压等,为背景,前四章主要系统介绍检测技术的基础内容,各种检测技术中的关键部件——传感器的工作原理,材料加工中最主要的物理量——温度的检测技术以及各类先进检测技术在材料成型过程中的应用。本书的后四章主要在系统介绍自动控制理论发展的基础上,介绍了自动控制系统中的主要仪表与装置,并系统介绍了典型的自动控制理论,在此基础上,介绍了先进控制在材料成型过程中的应用。本书最后一章还介绍了计算机技术在材料成型工程中的应用。通过本教材的学习,使得材料成型及控制工程专业的学生具备分析工程中所涉及的先进检测技术与控制理论的能力,并在工作中加以运用,促进材料成型过程的技术改造和自动化建设。

本教材的编写工作主要由严学华和司乃潮完成,在编写过程中得到本单位诸位同仁的有益建议和意见,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,教材中的不当之处望高校同仁和读者不吝指正。

编者
2006年6月

目 录

第 1 章 检测系统概论	1
1.1 概述	1
1.1.1 检测技术的作用	1
1.1.2 测试技术的发展趋势	2
1.2 检测系统的组成	3
1.3 信号及其分类	4
1.3.1 常见信号类型	4
1.3.2 信号的传递形式	5
1.3.3 信号的标准化	5
1.4 检测系统的静态特性	5
1.5 检测系统的动态特性	8
1.5.1 概述	8
1.5.2 检测系统的动态误差	8
1.5.3 常见检测系统的动态特性	8
1.5.4 检测系统的动态性能指标	12
思考与讨论题	15
第 2 章 传感器技术	16
2.1 传感器的选用	16
2.2 常用传感器	17
2.2.1 传感器的构成	17
2.2.2 传感器的分类	18
2.3 电阻式传感器	18
2.3.1 工作原理	19
2.3.2 应变式传感器	21
2.4 电感式传感器	21
2.4.1 自感型传感器工作原理	21
2.4.2 电感式传感器的特点与用途	23
2.5 电容式传感器	23
2.5.1 工作原理	24
2.5.2 电容式传感器的用途	25
2.6 其他特殊用途传感器	25
2.6.1 光纤传感器	25
2.6.2 网络化传感器技术	31
2.7 传感器的集成化和智能化技术	34
2.7.1 智能传感器	35

2.7.2 多功能传感器	37
思考与讨论题	38
第3章 温度检测技术	39
3.1 温度和测温方法的分类	39
3.1.1 温标的基本概念	39
3.1.2 测温法分类	39
3.2 接触式测温方法	40
3.2.1 热膨胀式温度计	41
3.2.2 电阻温度计	42
3.2.3 热电偶温度计	44
3.3 非接触式测温方法	46
3.3.1 辐射测温计	46
3.3.2 红外测温	46
3.4 温度检测技术在材料成型中的应用	48
3.4.1 分布式光纤温度传感系统	48
3.4.2 智能温度传感器	49
思考与讨论题	49
第4章 检测技术在材料加工工程领域中的应用	50
4.1 磁粉探伤	50
4.1.1 磁粉探伤法种类	50
4.1.2 磁粉	50
4.1.3 适用范围及特点	50
4.2 超声波探伤法	50
4.2.1 穿透法	51
4.2.2 共振法	51
4.2.3 反射法	51
4.2.4 斜探头的使用	52
4.3 X射线探伤	53
4.3.1 基本原理	53
4.3.2 应用范围及特点	54
4.4 液体渗透剂探伤	54
4.4.1 原理	54
4.4.2 种类	54
4.4.3 特点	54
4.5 其他微波无损检测技术	54
4.5.1 红外无损检测技术	55
4.5.2 电磁超声检测技术	57
4.5.3 激光超声检测	58
4.5.4 光学法激光超声信号检测	59
4.6 无损检测在抗磨铸铁中的应用	60

4.7 复合材料的常用无损检测方法	61
4.7.1 综合声振检测	61
4.7.2 超声成像技术	62
4.7.3 扫查声显微镜	63
4.7.4 声发射检测技术	64
4.7.5 其他检测技术	64
4.8 焊缝的无损检测技术	66
4.8.1 外观检查	66
4.8.2 射线检查	66
4.8.3 磁粉检测	67
4.8.4 液体渗透检测	67
4.8.5 超声波检测	68
思考与讨论题	68
第5章 控制系统理论基础	69
5.1 自动控制系统的发展历史	69
5.2 自动控制系统的工作原理	70
5.2.1 开环控制系统	70
5.2.2 闭环控制系统	71
5.2.3 复合控制系统	72
5.3 闭环控制系统的基本组成	73
5.4 对控制系统的要求	73
5.5 自动控制系统的分类	74
5.6 控制系统性能分析	75
5.6.1 典型输入信号	75
5.6.2 系统性能分析方法	78
5.7 对控制系统的一般要求	78
5.8 控制系统的计算机辅助设计	79
5.8.1 控制系统的计算机辅助设计发展概况	79
5.8.2 控制系统计算机辅助设计的主要内容	80
思考与讨论题	81
第6章 控制仪表与装置	82
6.1 控制仪表与装置的分类与发展	82
6.1.1 控制仪表与装置的分类	82
6.1.2 控制仪表与装置的发展	83
6.2 调节器	84
6.2.1 PID 调节规律	84
6.2.2 数字式调节器	85
6.2.3 可编程数字调节器	86
6.3 执行器	87
6.4 变送器	87

思考与讨论题	88
第7章 典型的自动控制理论	89
7.1 神经控制系统	89
7.1.1 神经网络简介	89
7.1.2 人工神经网络的结构	90
7.1.3 人工神经网络的典型模型	92
7.2 模糊控制	93
7.2.1 传统控制系统的特点	93
7.2.2 模糊控制系统的工作原理	94
7.2.3 模糊控制的系统结构	97
7.3 专家控制	97
7.3.1 专家系统概念	97
7.3.2 专家控制系统	100
7.4 分级递阶智能控制	105
7.4.1 递阶控制的一般原理	105
7.4.2 分级递阶智能控制	106
思考与讨论题	111
第8章 自动控制在材料热加工领域的应用	112
8.1 模糊控制在冲天炉上的应用	112
8.2 人工神经网络在铸造工业中的应用及研究进展	113
8.3 虚拟制造在铸造生产中的应用	115
8.3.1 铸件设计	116
8.3.2 浇注充型或造型过程的数值模拟及结果的可视化	116
8.3.3 铸造生产过程的仿真优化	116
8.4 专家系统在铸造工艺设计中的应用	118
8.4.1 铸造方法选择中的专家系统	118
8.4.2 专家系统在浇冒系统中的研究和应用状况	118
思考与讨论题	120
第9章 计算机技术与热加工工程	121
9.1 引言	121
9.2 计算机在热加工中的应用	122
9.2.1 计算机辅助设计和集成制造系统	123
9.2.2 计算机检测与控制系统	124
9.2.3 计算机的信息处理系统	125
9.2.4 人工智能与专家系统	126
9.2.5 计算机的数值模拟系统	128
思考与讨论题	134
参考文献	135

第1章 检测系统概论

检测是科学地认识各种现象的基础性的方法和手段。从这种意义上讲,检测技术是所有科学技术的基础。检测技术又是科学技术的重要分支,是具有特殊性的专门科学和专门技术。随着科学技术的进步和社会经济的发展,检测技术也正在迅速地发展,反过来检测技术的发展又进一步促进着科学技术的进步。同眼、耳、鼻等感觉器官对于人类的重要作用相类似,测量装置(传感器、仪表仪器等)作为科学性的感觉器官,在工业生产、科学研究和企业的科学管理方面是不可缺少的。企业越是科学地高度发展,越需要科学的检测。

1.1 概 述

1.1.1 检测技术的作用

随着生产和科学技术的发展,检测技术在国民经济各个部门和科学研究各个领域的应用日益广泛,已成为促进生产和科学技术发展的有力手段。使用先进的检测技术是科学技术现代化的重要标志之一,也是科学技术现代化必不可少的条件。

利用检测技术这个科学手段,可以有效地揭示出表征各种生产工艺和技术操作过程特征的物理参量,能更深刻地认识和把握客观过程的本质和规律性,从而有利于生产工艺和生产设备的研究与改造,有利于生产过程机械化和自动化水平的不断提高。

现在从事机械制造业的工程技术人员,不仅面临着静态几何量的检测,而且随着科学技术的发展,还越来越多地面临着许多不可避免的动态物理量(如位移、振动、力、流量、温度和噪声等)的检测。这些检测,大量的使用非电量电测法,即通过传感器将被测量变换为电量,而后对这种电信号进行各种中间变换来最终达到检测的目的。

由于现代检测技术具有测量精度高,响应速度快,能够自动、连续地进行测量;便于进行遥测与自动记录,可与计算机连接进行处理;可采用微机做成智能仪器等优点,所以已经在各个科学技术部门得到广泛应用。

在机械制造工业中,以机床为例,以往只是测量一些静态或静态下的性能参数,而现在要求测量动态性能,如在切削状态下的动态稳定性、自激现象、加工精度等,因此就要利用压电加速度计、力传感器、速度传感器及非电量电测仪器,测量刀架、床身等的振动、机械阻抗等参数来检验其动态特性,找出薄弱环节,提出改进意见。又如对切削力的大小和变化进行可靠性的检测,可监视刀具的磨损,工件表面质量的变化,防止机床过载,控制切削过程平稳;同样通过切削力的测量,可为研究金属切削原理,制定切削用量,设计机床、夹具,提供必要的参数。在自动化的机床中,采用大量的非电量电测仪器在生产过程中检验工件尺寸、形状和表面质量。

此外,机械工程中许多理论和计算方法只具有粗略估算性质,往往不是很准确的。如金属加工机床的工作,不仅与复杂的加工条件有关,而且与金属塑性变形有关,加上工作零件又往往具有复杂的结构和形状,迄今还没有较为成熟的理论方法来精确判断机器的真实工作载荷和工作零件的实际应力,因此只能通过实地测试获得数据并进行分析,方能了解与实际

工作情况较接近的承载及变形情况、动态过程的载荷特征和运动参数的情况。所以测试技术的研究,也是检验理论、探讨和发展新理论的有效途径。

因此,从事机械制造业的工程技术人员,必须掌握测试技术的有关知识。

1.1.2 测试技术的发展趋势

随着现代科学技术的发展,对测试技术的要求越来越高。当前除不断提高性能与可靠性外,总的趋势是小型化、轻量化、测量放大一体化、非接触化、智能化,具体地说可以有以下几个方面。

(1) 不断提高仪器的性能、可靠性,扩大应用范围

随着科学技术的发展,对仪器仪表性能的要求也相应地在提高,同时需要研究解决工艺过程中极端参数测量用的仪器,如连续测量液态金属的温度,长时间连续测量高温介质($2500\sim 3000^{\circ}\text{C}$),固体表面高温测量,极低温度测量(超导),混相流量测量,脉动流量测量,微压差(几十帕斯卡)测量,超高压测量,高温高压下成分测量,分子量测量,高精度(0.02%)重量称重,大吨位($3\times 10^7\text{N}$ 以上)测量等,所以仪器要在原有的基础上不断地提高技术性能指标,扩大应用范围。

仪器仪表的可靠性对仪表的质量来说已成为一个重要因素,这方面内容包括了仪表可靠性和故障率的数学模型和计算方法的研究,仪表可靠性设计、预测、检验和分析实验的研究,仪表系统组件可靠性对仪表整机性能的影响和确定整机可靠性方法的研究等。

(2) 研究材料、器件、电路一体化的仪表

为了减少传感器与测量电路分开所造成的电缆干扰等的影响,所以希望能把传感器与测量电路合在一起。随着半导体技术的发展,这方面已开始实现,最简单的如压阻传感器。近年来国外在研究的一种物性型检测传感器,就是在半导体技术基础上,进一步实现“材料、器件、电路、系统一体化”的新型仪表,它利用某些固体材料的物性变化(机械特性、电特性、磁特性、热特性、光特性、化学特性)来实现信息直接变换,也就是说是利用不同材料的物理、化学、生物效应做成器件,直接测量对象物性的信息,而且把电路也做在一起,这样与一般传感器相比,有构造简单、体积小、无可动部件、响应快、灵敏度高、稳定性好的特点,为解决许多特种参数的测量、成分分析和非接触测量等问题提供了手段。

(3) 研究非接触测试技术

在测量过程中,把传感器置于被测对象上,相当于加一负载在上面,这样多少会影响测量的精度,而在有些被测物体上,根本不可能安装传感器,例如测量高速旋转轴的振动、转矩等。因此,国际上都在研究采用非接触式的测试技术,目前已采用的光电式传感器、电涡流式传感器、同位素仪表都是在这个要求上发展起来的,而且还在研究用其他的原理和方法如微波技术来进行非接触式的测量等。

(4) 采用微处理器,使仪器智能化

从20世纪70年代以大规模集成电路为基础的微处理器问世以后,已逐步地应用到测试技术中来,使测量仪器智能化,把传统的测量仪器变成了智能仪器,从而扩展了功能,提高了精度。带微处理器的测量仪器与传统的仪器相比,有如下的特点。

① 校正功能 可以通过功能键送入命令,按预先编制并在机内存储的操作程序,完成自校准、自调零、自选量程、自动测试和自动分选。这样就能对传感器的非线性及仪器零点进行校准,能根据机内或机外基准定期作自校准,提高仪器的精度,而且可降低对元器件长

期稳定性的要求。

② 信息变换功能 它可以按各参数之间的关系式,通过计算作参数变换,因而可以通过某些参数的测试而自动求出一系列其他有关的参数,便于实现多功能参数测试,或者通过最易测的参数测量,而获得难测的或者甚至无法测出的参数。

③ 统计处理功能 可将测量得到的数据,根据误差理论对测得的数据进行计算,求出误差,并从测量结果中扣除,这就提高了仪器的测量精度。它可以根据工作条件(如环境温度、相对温度、大气压力等)的变化,根据一定公式计算修正值,并修正测量结果,这样就使测量的精度提高,使结果更为可靠。

④ 指令功能 根据熟练的测量人员编制的程序,给测量者以指示,即使外行人也可以进行可靠性高的测量。

(5) 研究新型原理的传感器

由于科学技术的发展,需要测量极端参数值(超高压、高温、超低温)和特种参数(如测光的明暗,识别颜色,判断距离,味觉,嗅觉)等,因此促使人们不断地在探讨新的测量原理,研制新型的传感器和仪表。这方面目前除研究利用新的物理效应外,还不断研究仿生学,仿照生物的感觉功能和人的视、听、触、嗅、味五官功能,来开发未来的传感器。

1.2 检测系统的组成

一个具体的检测系统由传感器、变换及测量装置、记录及显示装置和实验结果的分析处理装置组成。有时还存在着实验激发装置,如图 1-1 所示。

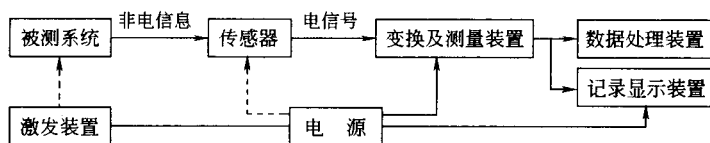


图 1-1 检测系统的组成
(图中虚线表示可根据需要接入)

① 传感器——信息的检测,是一种能把某种信息从被测对象中检测出来,并将它转换成电信号的装置。它是一种获得信息的手段,在整个检测系统中占有主要地位,它的灵敏度、精确度直接影响着整个检测系统的灵敏度和精确度。

② 变换及测量装置——信息的变换和传输,它的作用是把传感器送来的电信号变换成具有一定功率的电压或电流信号,以推动下一级的记录和显示装置。有时,传感器送来的信号变化功率很低,近似直流信号,为了传输方便,需要在这里把它调制成高频大信号。对一些简单信号,常在这里进行测量。测量的主要过程是比较,即把要测的量与某一标准量进行比较,获得的被测量为标准量若干倍的数量概念。这部分常由电桥电路、调制电路、解调电路、阻抗匹配电路、放大电路、运算电路等组成,是检测系统中比较复杂的部分。

③ 记录与显示装置——信息的显示和记录,它的作用是把变换及测量装置送来的电压或电流信号不失真地记录下来和显示出来。记录和显示这两个功能有时可以在一个装置中实现:如光线示波器。有的装置只具有一个功能,如电子示波器,它只能显示而不能记录;又如磁记录器,它只能记录而不能显示。记录和显示的方式一般有模拟和数字两种。前者记录的是一条或一组曲线,后者则是一组数字或代码。

④ 数据处理装置——信号的处理和分析，它是用以对测试所得的实验结果（曲线或数据）进行处理、运算、分析。如大量数据的数理统计分析，实验曲线的拟合，特别是动态测试结果的频谱分析，幅值谱分析，能量谱分析等。

⑤ 实验激发装置——它的作用是人为地模拟某种条件把被测系统中的某种信息激发出来，以便检测。如用激振器来模拟各种不同条件的振动，在将激振器作用在机械或构件上后，把机械或结构产生的振动幅度、应力变化等信息激发出来，以便检测后对它在振动中的状态和抗振能力进行研究分析。

1.3 信号及其分类

所谓信号，是指为了传递信息而使用的量。其中包括实际存在于自然界中的各种物理量，也包括为了传递信息而人工设置的各种信号（如文字、标记等信号）。

在检测技术中仅仅考虑那些利用电、磁、光、声、热、辐射、流体、机械以及各种化学能来传递信息的信号。根据信息-能量理论，在测量装置中传递信息的工具是能量流。如果没有能量进入测量装置的输入端，则测量信息的传递过程是不可能实现的。在工业检测中，携带有被测信息的被测信号，可能具有各种各样的能量形式，热气一般是非电量，它们进入测量装置的输入端后，必须转变成便于测量、转换、传输和显示的能量形式。也就是说，在测量系统中流动的信号，并不是原始的被测信号，而是与被测信号呈一定单值函数关系的信号，两者的能量形式很可能是不相同的。现将测量系统中流动的常见信号种类和传递形式介绍如下。

1.3.1 常见信号类型

作用于测量装置输入端的被测信号，通常要转换成以下几种便于传输和显示的信号。

(1) 位移信号

位移信号包括直线位移和角位移两种形式，它属于一种机械信号。在测量力、压力、质量、振动等物理量时，通常都首先要把它们转换成位移量，然后再做进一步处理。如当被测参数是力或压力时，可以通过适当的弹性元件转换成位移。在测量系统中，唯一信号可利用杠杆、齿轮副等机构进行机械放大和传送，也可以利用一定的元件变换为气压信号或转换成电信号。

(2) 压力信号

压力信号包括气压信号和液压信号，工业检测中主要应用气压信号。在气动检测系统中，以净化的恒压空气为能源，气动传感器将被测参数转换为与之相适应的气压信号。在测量系统中，气压信号可以通过气动功率放大器放大，也可通过气动计算单元进行加、减、乘、除、开方等数学运算，还可输送给显示单元进行指示、记录、报警或用于自动调节，采用气-电转换器，可将气压信号转换成电信号。

(3) 电气信号

常用的电气信号有电压信号、电流信号、阻抗信号和频率信号。

电气信号可以远距离传递，便于和电子计算机连接，易于实现检测自动化，而且响应速度快。因此，将被测的非电参数转换成电信号进行测量，在检测技术中应用越来越广，并已逐渐形成一个重要分支——非电量电测技术。将被测参数的变化直接或间接地转换成电信号的传感器，近年来也发展很快。

(4) 光信号

光信号包括光通量信号、干涉条纹信号、衍射条纹信号、莫尔条纹信号等。随着激光、光导纤维和计量光栅等新兴技术的发展,光学检测技术也得到了很大的发展,特别是在高精度、非接触测量方面,占有十分重要的地位。利用各种光学元件构成的光学系统可将光信号进行传递、放大和处理。

在非电量电测技术中,利用光电元件可以将光信号转换成电信号。光信号和电信号的形式,既可以是连续的,又可以是断续(脉冲式)的。

1.3.2 信号的传递形式

从传递信号连续性的观点来看,在检测系统中传递的信号形式可以分为模拟信号、数字信号和开关信号。

(1) 模拟信号

在时间上是连续变化的,即在任何瞬时都可以确定其数值的信号,称为模拟信号。生产过程中常遇到的各种连续变化的物理量和化学量都属于模拟信号。模拟信号变换为电信号就是平滑地、连续地变化的电压或电流信号。例如,连续变化的温度信号可以利用热电偶转换成与它成比例的连续变化的电压信号。

(2) 数字信号

数字信号是一种以离散形式出现的不连续信号,通常用二进制“0”和“1”组合的代码序列来表示。数字信号变换成电信号就是一连串的窄脉冲和高、低电平交替变化的电压信号。

连续变化的模拟信号可以通过数字式传感器直接转换成数字信号。然而,大多数情况是首先把这些参数变换成电参量的模拟信号,然后再利用模数(A/D)转换技术把电模拟量转换成数字量。将一个模拟信号转换为数字信号时,必须用一定的计量单位使连续参数整量化,即用最近的离散值(数字量)来近似表示连续量的大小。由于数字量只能增大或减小一个单位,因此,计量单位越小,整量化所造成的误差也就越小。

(3) 开关信号

用两种状态或用两个数值范围表示的不连续信号叫做开关信号。例如,用水银触点温度计来检测温度的变化时,可利用水银触点的“闭合”和“断开”来判断温度是否达到给定值。在自动检测技术中,利用开关式传感器可以将模拟信号变换成开关信号。

1.3.3 信号的标准化

在自动检测与自动控制系统中,往往需要同时应用多种自动化仪表,为了便于仪表间的互相通信,必须采用统一标准信号。例如,在单元组合式自动化仪表中,常用的标准电气信号为0~10mA或4~20mA的直流电流信号。

1.4 检测系统的静态特性

检测系统的静态特性是在静态标准条件下进行标定的。静态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)℃;相对湿度不大于86%;大气压力为(101324.72 ± 7999.32)Pa的情况。在这种标准工作状态下,利用一定精度等级的校准设备,对系统输入高精度的标准量信号,测出相应的输出量值,并

进行往复循环测试, 得出系统的静态特性, 可以用输出-输入数据列成表格或画成曲线表示。

检测系统的静态性能指标有以下几个。

(1) 灵敏度 S

灵敏度是指检测装置在静态测量时, 输出量的增量与输入量的增量之比的极限值, 即

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

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

$$S = \frac{y}{x} = K = \tan \theta$$

式中, θ 是相应点切线与 x 轴间的夹角。

对非线性检测装置, 其灵敏度是变化的。一般希望检测装置的灵敏度 S 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。此外, 灵敏度越高, 系统就越容易受外界干扰, 即系统稳定性往往越差。

(2) 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, 所以人们感兴趣的往往是用误差来说明精度。

① 绝对误差 δ 绝对误差是检测装置显示值 x 与被测量 x_0 之间的代数差值, 即

$$\delta = x - x_0 \quad (1-1)$$

绝对误差越小, 则显示值越接近于真值, 测量精度越高, 但这结论只适用于被测值相同的情况, 而不能说明不同值的测量精度。

② 相对误差 r 相对误差是绝对误差 δ 与真值 x_0 之比值, 常用百分数表示, 即

$$r = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

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里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的起始零点时, 相对误差趋于无限大, 故一般不应测量过小的量, 而多用在测量接近上限的量, 如 $2/3$ 量程处。

③ 满量程相对误差 $q_{\max}$ 检测仪表显示值绝对误差与仪表量程 L 之比值, 称为仪表显示值的引用误差 q 。引用误差常以百分数表示

$$q = \frac{\delta}{L} \times 100\% \quad (1-3)$$

满量程相对误差是检测仪表显示值的绝对误差的最大值与仪表量程 L 之比值的百分数, 即

$$q_{\max} = \frac{|\delta|}{L} \times 100\% = \frac{|x - x_0|}{L} \times 100\% \quad (1-4)$$

满量程相对误差是检测仪表基本误差的主要形式, 故也常称为仪表的基本误差, 它很好地说明了检测仪表的测量精度, 是检测仪表的主要质量指标。

④ 精度等级 仪表在出厂检验时, 其显示值的满量程误差不能超过其允许误差 Q (以百分数表示), 即

$$q_{\max} \leq Q \quad (1-5)$$

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，即用满量程误差中去掉百分数（%）后的数字来表示精度等级，其符号是 G ，则 $G=Q \times 100$ ，或 $Q=G\%$ 。

一般情况下，1.0 级精度仪表，表示其允许误差 $Q=\pm 1\%$ ，即允许误差的变化范围可以从 -1% 至 $+1\%$ 。应当注意的是：精度等级说明了满量程相对误差允许值的大小，它决不意味着该仪表实际测量中出现的误差。如果认为 1.0 级仪表所提供的测量结果一定包含着 $\pm 1\%$ 的误差，那就错了。只能说在规定的条件下使用时，它的绝对误差的最大值的范围是在量程的 $\pm 1\%$ 之内，即

$$\delta_{\max} = \pm G\% \times L = \pm 1\% \times L \quad (1-6)$$

(3) 线性度 e_L

具有线性特性的检测装置最受用户欢迎。但实际上，由于各种原因，其输出量与输入量之间的关系并不是完全线性的。通常用检测装置的标定曲线与某种拟合直线之间的偏差程度作为线性度的一种度量，以输出最大偏差与满量程输出比值的百分数来表示其大小，即

$$e_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_1} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中， $\Delta L_{\max}$ 为输出平均值与基准拟合直线间的最大偏差； y_1 为满量程输出平均值。

(4) 迟滞 e_H

检测装置的输入量由小增大（正行程），继而自大减小（反行程）的测试过程中，对应于同一输入量，输出量往往有差别，这种现象称为迟滞。迟滞是由于装置内部的弹性元件、磁性元件以及机械部分的摩擦、间隙、积塞灰尘等原因而产生，迟滞大小常用全量程中最大的差值 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出平均值之比的百分数表示

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_1} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中， $\Delta H_{\max}$ 为输出值在正、反行程中的最大差值，见图 1-2。

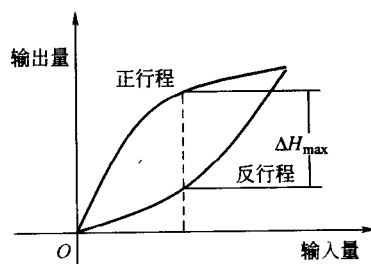


图 1-2 检测系统迟滞表示

(5) 重复性

检测装置于多次重复测试时，在同是正行程或反行程中，对应于同一输入量，其输出量也不尽相同。重复性表示对应于同一输入量时，其输出量的重复程度。

(6) 静态性能指标的其他术语

灵敏阈——又称为死区，是指由于摩擦或游隙等影响所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——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。可以用具体数值表示，也可用全量程中最大的 $\Delta x_{\max}$ 与满量程 L 之比的百分数表示。

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

量程——指检测装置测量上限和测量下限之代数差。

稳定性——指在一定工作条件下，保持输入信号不变时，输出信号随时间或温度的变化而出现的缓慢变化程度。

可靠性——衡量检测装置可靠性的综合指标是有效度，其定义为

$$\text{有效度} = \frac{\text{平均无故障工作时间}}{\text{平均无故障工作时间} + \text{平均修复时间}}$$

1.5 检测系统的动态特性

1.5.1 概述

许多工业生产中需要对保持恒定或者变化非常缓慢的量值进行检测，例如在化工生产中，需要测量恒定的压力或者恒定的温度。在这种情况下，检测系统的静态特性有着重要意义。然而，随着自动化程度的不断提高，就使重点转向检测系统是否能对变化中的信号保持足够的响应。如果传感器对输入量的突然变化响应缓慢，则对该输入量的自动控制就有问题。又例如，分析某振动检测系统时，被测参数本身就在变化，如果检测系统不能对变化着的振动的频率保持足够的响应，则所得的测量结果就全无用处。因此，研究检测系统的动态特性十分重要。

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。通常在分析检测系统的动态特性时，常把一些典型信号作为输入信号，例如阶跃信号、斜坡信号、正弦信号。因为这些输入信号在检测系统中比较常见，并且系统对这些输入信号的响应特性较容易用实验方法求得。至于工程实践中一些复杂的输入信号，可以将其分解为若干阶跃信号或正弦信号之和。

1.5.2 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。由于检测系统总是存在着机械的、电气的和磁的等惯性，从某种程度上说，任何实际的检测系统都不能精确地响应处在变化中的输入信号，也就是说，系统输出信号将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 $S=1$ 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

$$\varepsilon_x(t) = y_x(t) - x(t) \quad (1-9)$$

(1) 稳态误差

动态误差中只与系统特性参数有关而与时间无关的那一部分误差称为系统的稳态误差。即使时间趋于无穷大，稳态误差也依然存在。

(2) 瞬态误差

动态误差中与时间有关的那一部分误差称为系统的瞬间误差。一般来说，当时间趋于无穷大时，瞬态误差趋于零。

检测系统的动态误差可用动态特性曲线来描述。

1.5.3 常见检测系统的动态特性

常见的检测系统多为一阶或二阶系统，在动态特性分析中，灵敏度 S 仅起使输出相对

输入增大 S 倍的作用, 因此为方便起见, 在阐述一阶和二阶系统的动态特性时均取

$$S = \frac{b_0}{a_0} = 1 \quad (1-10)$$

(一) 一阶系统的动态特性

在灵敏度 $S=1$ 的条件下, 一阶系统的输出输入方程可表示为

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

或

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (1-12)$$

式中, $\tau = a_1/a_0$ 为一阶系统的时间常数。

对式(1-12) 进行拉氏变换, 可得一阶的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (1-13)$$

对于稳定的检测系统, 令式(1-13) 传递函数 $H(s)$ 中的复变数 $s = j\omega$ ($\omega = 2\pi f$), 可得其频率响应函数 (又称频谱) 为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad (1-14)$$

一些 RC 滤波器、 LC 谐振电路和热电偶测温系统都是一阶系统。

(1) 瞬态响应

① 对阶跃输入的响应 当输入信号 $x(t)$ 为单位阶跃函数 $u(t)$ 时, 即

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-15)$$

其拉氏变换为 $X(s) = 1/s$ 。代入式(1-13) 可得

$$Y(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \times \frac{1}{s} \quad (1-16)$$

对上式进行拉氏反变换可得瞬态响应 $y_u(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ (1-17)

图 1-3 是一阶系统的阶跃响应曲线, 它说明系统的实际输出量是按指数规律上升至最终值的 (稳态输出值)。而理想的响应是应该得到阶跃输出, 因此一阶系统的动态误差为

$$\epsilon_u(t) = y_u(t) - u(t) = -e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-18)$$

并随着时间的增加按指数规律衰减。图 1-3 当 $t = \tau$, 2τ , 3τ , 4τ , 输出量仅为稳态输出值的 63.2%, 86.5%, 95%, 98.2%。当 t 趋于无穷时, $\epsilon_u(t)$ 趋于 0。

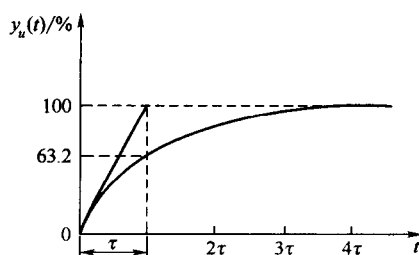


图 1-3 一阶系统的阶跃响应曲线

时间常数 τ 是按指数规律上升至最终值的 63.2%

所需的时间。时间 $t=0$ 时, 响应曲线的初始斜率为 $1/\tau$, 要使斜率大, 输出与输入差异小 (即减小动态误差), 就要求 τ 值小。所以, 一阶系统的时间常数越小, 响应越快。

② 对斜坡输入的响应 当一阶系统输入信号 $x(t)$ 为斜坡函数 $r(t)$ 时, 即

$$r(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-19)$$