

高等职业教育“十三五”规划教材

高 职 高 专 教 育 精 品 教 材

自动检测与 转换技术

主 编 袁冬琴

副主编 江可万



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

高等职业教育“十三五”规划教材

高 职 高 专 教 育 精 品 教 材

自动检测与 转换技术

主 编 袁冬琴

副主编 江可万

参 编 王银月

李 锐

周莹君



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书在介绍了检测技术和传感器技术的基本概念的基础上,对工业中常用传感器的基本工作原理、使用方法和应用作了全面的阐述。本书在编写过程中理论知识以必需、够用为度,突出传感器的应用和使用方法,理论联系实际,图文并茂,易于自学,方便教学。

本书可作为机电一体化技术、数控技术及与之相近专业的高职高专教材,也可作为工程技术人员学习检测技术的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动检测与转换技术/袁冬琴主编. —上海:上海交通大学出版社,2015

ISBN 978-7-313-13481-3

I. ①自… II. ①袁… III. ①自动检测—高等职业教育—教材②传感器—高等职业教育—教材 IV. ①TP274②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 167248 号

自动检测与转换技术

主 编:袁冬琴

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:常熟市文化印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:190 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-13481-3/TP

定 价:25.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:8.25

印 次:2015 年 9 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52219025

前 言

《自动检测与转换技术》教材在介绍了检测技术和传感器技术基本概念的基础上,对电阻式传感器、电感式传感器、电涡流式传感器、电容式传感器、热电偶传感器、超声波传感器、霍尔传感器、压电式传感器、光电传感器和数字式传感器的基本工作原理、使用方法和应用作了全面的阐述。本书参考学时 48 学时,书中理论知识以必需、够用为度,突出传感器的应用和使用方法,理论联系实际,图文并茂,易于自学,方便教学。

本书由上海东海职业技术学院袁冬琴承担绪论、第 1、2、3、4、6、10 章的编写,上海东海职业技术学院李锐承担第 7、8 章的编写,上海东海职业技术学院王银月承担第 5、9 章的编写,上海东海职业技术学院周莹君承担第 11 章的编写。全书由袁冬琴统稿,上海电机学院江可万老师审稿。

在本书编写的过程中,得到了上海东海职业技术学院杨萍以及其他许多老师的关心和帮助,并采纳了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书可作为高等职业院校机电类专业的教材,也可作为工程技术人员学习的参考书。

目 录

绪论	1
0.1 检测技术的地位与作用	1
0.2 自动检测系统的组成	2
0.3 自动检测系统的分类	5
0.4 检测技术的发展趋势	6
第 1 章 检测技术基本概念	8
1.1 测量方法	8
1.2 检测系统误差分析基础	9
1.2.1 测量误差的基本概念	9
1.2.2 测量误差的表示方法	10
1.2.3 检测仪器的精度等级与容许误差	12
1.2.4 测量误差的分类	13
思考与习题	16
第 2 章 电阻式传感器	17
2.1 电位器式传感器	17
2.1.1 电位器的结构及原理	17
2.1.2 电位器式传感器应用举例	18
2.2 应变片式电阻传感器	18
2.2.1 应变片式电阻传感器工作原理	18
2.2.2 电阻应变片的种类	19
2.2.3 电阻应变片的测量电路	20
2.2.4 应变式电阻传感器应用	22
2.3 热电阻传感器	25
思考与习题	27
第 3 章 电感式传感器	29
3.1 变磁阻式传感器	29
3.2 差动变压器式传感器	33



思考与习题	37
第 4 章 电涡流式传感器	38
4.1 电涡流式传感器的工作原理	38
4.2 电涡流式传感器结构	40
4.3 电涡流式传感器的测量转换电路	41
4.4 电涡流式传感器的应用	42
思考与习题	44
第 5 章 电容式传感器	45
5.1 电容式传感器的工作原理和结构特性	45
5.1.1 电容式传感器工作原理	45
5.1.2 电容式传感器类型	46
5.2 电容式传感器的等效电路	49
5.3 电容式传感器的测量电路	50
5.4 电容式传感器的应用	53
思考与习题	55
第 6 章 热电偶传感器	56
6.1 温度概述	56
6.2 热电偶传感器的工作原理	58
6.3 热电偶类型及结构	61
6.4 热电偶冷端补偿	63
思考与习题	65
第 7 章 超声波传感器	67
7.1 超声波及其物理性质	67
7.2 超声波传感器	68
7.3 超声波传感器的应用	69
思考与习题	73
第 8 章 霍尔传感器	75
8.1 霍尔元件的工作原理	75
8.2 霍尔元件	76
8.3 霍尔元件的测量电路及应用	77
思考与习题	81
第 9 章 压电式传感器	82
9.1 压电式传感器的工作原理及结构	82



9.1.1 压电效应	82
9.1.2 压电材料	82
9.1.3 压电式传感器的结构	84
9.2 压电式传感器的等效电路	85
9.2.1 压电晶片的连接方式	85
9.2.2 等效电路	85
9.3 压电式传感器的测量电路	86
9.3.1 电压放大器(阻抗变换器)	87
9.3.2 电荷放大器	87
9.4 压电式传感器应用举例	88
9.4.1 压电式压力传感器	88
9.4.2 压电式加速度传感器	89
9.4.3 压电式玻璃破碎报警器	89
9.4.4 压电式煤气灶电子点火装置	90
9.4.5 压电式声传感器	90
思考与习题	91
第 10 章 光电传感器	92
10.1 常用光源	92
10.2 光电效应及光电元件	94
10.3 光电传感器的应用	103
思考与习题	107
第 11 章 数字式传感器	108
11.1 光栅传感器	108
11.2 磁栅传感器	111
11.3 容栅传感器	113
11.4 角数字编码器	115
思考与习题	117
附录	118
附表 1:Pt100 铂电阻分度表	118
附表 2:E 型热电偶分度表	119
附表 3:K 型热电偶分度表	120
参考文献	121

绪 论

0.1 检测技术的地位与作用

检测是指在各类生产、科研、生活及服务等领域为及时获得被测、被控对象的有关信息而对一些参量进行的定性检查和定量测量。因此,检测是意义更为广泛的测量。

对工业生产而言,采用各种先进的检测技术对生产全过程进行检查、监测,对确保安全生产、保证产品质量、提高产品合格率、降低能源和原材料消耗、提高企业的劳动生产率和经济效益等是必不可少的。

在工业生产中,为了保证生产过程能正常、高效、经济的运行,必须对生产过程的某些重要工艺参数(如温度、压力、流量等)进行实时检测与优化控制。例如城镇生活区污水处理厂在污水的收集、提升、处理、排放的生产过程中,通常需要实时准确检测出液位、流量、温度、浊度、泥位(泥、水分界面位置)、酸碱度(pH)、污水中溶解氧(DO)含量、各种有害重金属含量等多种物理和化学成分参量,再由计算机根据这些实测物理和化学成分参量进行流量、(多种)加药(剂)量、曝气量、排泥量等的优化控制,为保证设备完好及安全生产,还要同时对污水处理所需机电动力设备和电气设备的温度、工作电压、电流、阻抗进行安全监测,这样才能实现污水处理安全、高效率 and 低成本运行。据了解,目前国内外一些城市污水处理厂由于在污水的收集、提升、处理、排放的各环节均实现自动检测与优化控制,大大降低了污水处理的运营成本,其污水处理的平均运行费用约为 0.4 元每立方米;而我国许多基本靠人工操作的城镇污水处理厂其污水处理的平均运行费用约为 1.0~1.6 元每立方米;两者相比差距十分明显。

在军工生产和新型武器、装备研制过程中更离不开现代检测技术,对检测的需求更多,要求更高。研制任何一种新型武器,从设计到零部件制造、装配到样机试验,都要经过成百上千次严格的试验,每次试验需要高速高精度地同时检测多个物理参量,测量点经常多达上千个。例如飞机、潜艇等在正常使用时都装备了上百个检测传感器,组成十几至几十种检测仪表用来实时监测和指示各部位的工作状况。而在新机型的设计和试验过程中需要检测的物理量更多,检测点的数量通常在 5 000 点以上。在火箭、导弹和卫星的研制过程中,需要动态高速检测的参量很多,要求也更高;没有精确、可靠的检测手段,使导弹精准命中目标和使卫星准确进入轨道是根本不可能的。

用各种先进的医疗检测仪器可大大提高疾病的检查、诊断速度和准确性,有利于争取时间、对症治疗,增加患者战胜疾病的机会。



随着生活水平的提高,检测技术与人们日常生活愈来愈密切相关。例如,新型建筑材料的物理、化学性能的检测,装饰材料有害成分是否超标的检测,城镇居民家庭室内的温度、湿度、防火、防盗及家用电器的安全监测等,这些都说明检测技术在现代社会中是不可或缺的。

0.2 自动检测系统的组成

尽管现代自动检测系统的种类繁多,用途和性能千差万别,但它们都是用于各种物理化学成分等参量的检测,其工作流程是:首先通常由各种传感器(变送器)将非电被测物理或化学成分参量转换成电信号,然后经信号调理(信号转换、信号检波、信号滤波、信号放大等)、数据采集、信号处理,最后实现信号显示及输出(通常有 4~20 mA、经 D/A 转换和放大后的模拟电压、开关量、脉宽调制(PWM)、串行数字通信和并行数字输出等)。当然一个完整的检测系统还包括系统所需的交流/直流稳压电源和必要的输入设备(如拨动开关、按钮、数字拨码盘、数字键盘等),其各部分关系如图 0-1 所示。

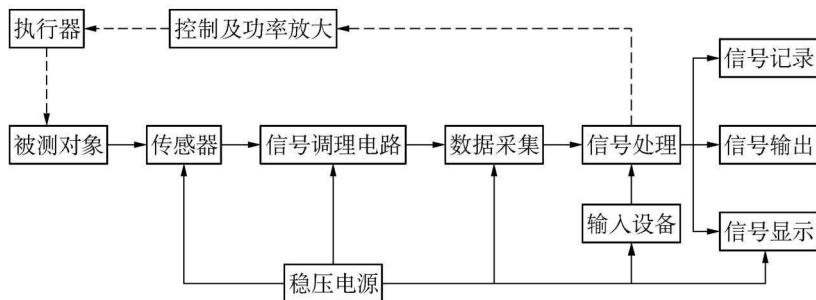


图 0-1 现代检测系统一般组成

1. 传感器

传感器是检测系统与被测对象直接发生联系的器件或装置。它的作用是感受指定被测参量的变化并按照一定规律转换成一个相应的便于传递的输出信号。传感器通常由敏感元件和转换部分组成,其中:敏感元件为传感器直接感受被测参量变化的部分;转换部分的作用通常是将敏感元件的输出转换为便于传输和后续处理的电信号。

例如,半导体应变片式传感器能将被测对象受力后微小的变形感受出来,通过一定的桥路转换成相应的电压信号输出。这样,通过测量传感器的输出电压便可知道被测对象的受力情况。这里应该说明,并不是所有的传感器均可清晰地区分敏感元件和转换部分的,有的传感器已将两部分合二为一,也有的仅有敏感元件(如热电阻、热电偶)而无转换部分,但人们仍习惯称其为传感器(如人们习惯称热电阻、热电偶为温度传感器)。

传感器种类繁多,其分类方法也较多。按被测参量分类,传感器可分为温度传感器、湿度传感器、位移传感器、加速度传感器、荷重传感器等;按工作原理分类,传感器可分为电阻式、电容式、电感式、压电式、超声波式、霍尔式等;按输出信号分类,传感器可分为模拟式传感器和数字式传感器两大类。采用按被测参量分类有利于人们按照目标对象的检测要求选用传感器,而采用按传感器工作原理分类有利于对传感器作研究、试验。

传感器作为检测系统的信号源,其性能的好坏将直接影响检测系统的精度和其他指标,



是检测系统中十分重要的环节。本书主要介绍工程上涉及面较广、应用较多、需求量较大的自动检测技术与实现方法,以及如何选用合适的传感器,对传感器要求了解其工作原理和应用特点,而对如何提高现有各种传感器本身的技术性能,以及设计开发新的传感器则不作深入研究。

通常检测系统对传感器有如下要求:

(1) 准确性:传感器的输出信号必须准确地反映其输入量,即被测量变化。因此,传感器的输出与输入关系必须是严格的单值函数关系,最好是线性关系。

(2) 稳定性:传感器输入/输出的单值函数关系最好不随时间和温度而变化,受外界其他因素的干扰影响要小,重复性要好。

(3) 灵敏度:即要求被测参量较小的变化就可使传感器获得较大的输出信号。

(4) 其他:如耐腐蚀性好、低能耗、输出阻抗小和成本相对较低等。

各种传感器输出信号形式也不尽相同,通常有电荷、电压、电流、频率等;在设计检测系统、选择传感器时对此也应给予重视。

2. 信号调理

信号调理在检测系统中的作用是对传感器输出的信号进行检波、转换、滤波和放大等,以方便检测系统后续处理或显示接收到的信号。例如,工程上常见的热电阻型数字温度检测(控制)仪表的传感器 Pt100 输出信号为热电阻值的变化,为了便于后续处理,通常设计一个四臂电桥,把随被测温度变化的热电阻阻值转换成电压信号;由于信号中往往夹杂着 50 Hz 工频等噪声电压,故其信号调理电路通常包括滤波、放大、线性化等。

需要远距离传送的话,通常采取将 D/A 或 V/I 电路获得的电压信号转换成标准的 4~20 mA 电流信号后再进行远距离传送。检测系统种类繁多,复杂程度差异很大,信号的形式也多种多样,各系统的精度要求和性能指标要求各不相同,它们所配置的信号调理电路的多少也不尽一致。对信号调理电路的一般要求是:

(1) 能准确转换、稳定放大、可靠地传输信号。

(2) 信噪比高,抗干扰性能好。

3. 数据采集

数据采集(系统)在检测系统中的作用是对信号调理后的连续模拟信号离散化并转换成与模拟信号电压幅度相对应的一系列数值信息,同时以一定方式把这些转换数据及时传递给微处理器或依次自动存储。数据采集系统通常以各类 A/D 转换器为核心,辅以模拟多路开关、采样/保持器、输入缓冲器、输出锁存器等组成。数据采集系统主要性能指标是:

(1) 输入模拟电压信号范围,单位为 V。

(2) 转换速度(率),单位为次每秒。

(3) 分辨率,通常以模拟信号输入为满度时的转换值的倒数来表示。

(4) 转换误差,通常指实际转换数值与理想 A/D 转换器理论转换值之差。

4. 信号处理

信号处理模块是自动检测系统进行数据处理和各种控制的中枢环节,其作用与功能和人的大脑相类似。自动检测系统中的信号处理模块通常以各种型号的单片机、微处理器为核心来构建,对高频信号和复杂信号的处理有时需增加数据传输和运算速度快、处理精度高



的专用高速数据处理(DSP)或直接采用工业控制计算机。

当然由于检测系统种类和型号繁多,被测参量不同、检测对象和应用场合不同,用户对各检测仪表的测量范围、测量精度、功能的要求差别也很大。对检测系统的信号处理环节来说,只要能满足用户对信号处理的要求,则是越简单可靠、成本越低越好。对于一些容易实现的传感器输出信号强,用户对检测精度要求不高,只要求被测量不要超过某一上限值,一旦越限,送出声(喇叭或蜂鸣器)或光(指示灯)信号即可的检测仪表的信号处理模块,往往只需要设计一个可靠的比较电路,比较电路一端为被测信号,另一端为表示上限值的固定电平;当被测信号小于设定的固定电平值时,比较器输出为低,声/光报警器不动作,一旦被测信号电平大于固定电平,比较器翻转,经功率放大驱动扬声器/指示灯动作。这种简单系统的信号处理就很简单,只要一片集成比较器芯片和几个分立元件就可构成。但对于像热处理炉的炉温检测和控制系统来说,其信号处理电路将大大复杂化。因为热处理炉炉温测控系统,用户不仅要求系统高精度地实时测量炉温,而且还需要系统根据热处理工件的热处理工艺制定的时间-温度曲线进行实时控制(调节)。

如果采用一般通用的中小规模集成电路来构建这一类较复杂的检测系统的信号处理模块,则不仅构建技术难度很大,而且所设计的信号处理模块必然结构复杂、调试困难、性能和可靠性差。由于微处理器、单片机和大规模集成电路技术的迅速发展和这类芯片价格不断降低,对稍复杂一点的检测系统的信号处理环节都应考虑选用合适的单片机、微处理器、DSP或新近开始推广的嵌入式模块为核心来设计和构建(或者由工控机兼任),从而使所设计的检测系统获得更高的性能价格比。

5. 信号显示

通常人们都希望及时知道被测参量的瞬时值、累积值和其随时间的变化情况,因此,各类检测系统在信号处理器计算出被测参量的当前值后通常均需送各自的显示器作实时显示。显示器是检测系统与人联系的主要环节之一,显示器一般可分为指示式、数字式和屏幕式三种。

(1) 指示式显示:又称模拟式显示。被测参量数值的大小由光指示器或指针在标尺上的相对位置来表示。有形的指针位移用于模拟无形的被测量是较方便和直观的。指示式仪表有动圈式和动磁式多种形式,但均有结构简单、价格低廉和显示直观的特点,在检测精度要求不高的单参量测量显示场合应用较多。指针式仪表存在指针驱动误差和标尺刻度误差,这种仪表的读数精度和仪器的灵敏度均受标尺最小分度的限制,如果操作者读表示值站位不当就会引入主观读数误差。

(2) 数字式显示:以数字形式直接显示出被测参量数值的大小。在正常情况下,数字式显示彻底消除了显示驱动误差,能有效地克服读数的主观误差,相对指示式仪表可以提高显示和读数的精度,还能方便地与计算机连接和进行数据传输。因此,各类检测仪表和检测系统正越来越多地采用数字式显示方式。

(3) 屏幕显示:实际上是一种类似电视显示方法,具有形象性和易于读数的优点,又能同时在同一屏幕上显示一个或多个被测量(大量数据式)的变化曲线,有利于对它们进行比较和分析。屏幕显示器一般体积较大,价格与普通指示式显示器和数字式显示器相比要高得多;其显示通常需由计算机控制,对环境温度、湿度等指标要求较高,在仪表控制室、监控中心等环境条件较好的场合使用较多。



6. 信号输出

在许多情况下,检测系统在信号处理器计算出被测参量的瞬时值后除送显示器进行实时显示外,通常还需把测量值及时传送给控制计算机、可编程控制器(PLC)或其他执行器、打印机、记录仪等,从而构成闭环控制系统或实现打印(记录)输出。检测系统信号输出通常有 4~20 mA、经 D/A 变换和放大后的模拟电压、开关量、脉宽调制(PWM)、串行数字通信和并行数字输出等多种形式,需根据检测系统的具体要求确定。

7. 输入设备

输入设备是操作人员和检测系统联系的另一主要环节,用于输入设置参数、下达有关命令等。最常用的输入设备是各种键盘、拨码盘、条码阅读器等。近年来,随着工业自动化、办公自动化和信息化程度的不断提高,通过网络或各种通讯总线利用其他计算机或数字化智能终端,实现远程信息和数据输入的方式越来越普遍。

8. 稳压电源

一个检测系统往往既有模拟电路部分,又有数字电路部分,通常需要多组幅值大小要求各异,但均需稳定的电源。这类电源在检测系统使用现场一般无法直接提供,通常只能提供交流 220 V 的工频电源或+24 V 的直流电源。检测系统的设计者需要根据使用现场的供电情况及系统内部电路的实际需要,统一设计各组稳压电源,给系统各部分电路和器件分别提供它们所需要的稳定电源。

最后,值得一提的是,以上八个部分不是所有的检测系统都具备的,对于有些简单的检测系统,其各环节之间的界线也不是十分清楚,需根据具体情况进行分析。另外,在进行检测系统设计时,对于把以上各环节具体相连的传输通道,也应予以足够的重视。传输通道的作用是联系仪表的各个环节,给各环节的输入、输出信号提供通路。它可以是导线、管路(如光导纤维)或信号所通过的空间等。信号传输通道比较简单,易被人所忽视,如果不按规定的要求布置及选择,则易造成信号的损失、失真及引入干扰等,影响检测系统的精度。

0.3 自动检测系统的分类

随着科学技术的迅速发展,检测系统的种类不断增加,分类也不尽相同,工程上常用的几种分类法如下所述。

1. 按被测参量分类

常见的被测参量可分为以下几类。

- (1) 电工量:电压、电流、电功率、电阻、电容、频率、磁场强度、磁通密度等。
- (2) 热工量:温度、热量、比热、热流、热分布、压力、压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面等。
- (3) 机械量:位移、形状、力、应力、力矩、重量、质量、转速、线速度、振动、加速度、噪声等。
- (4) 物性和成分量:气体成分、液体成分、固体成分、酸碱度、盐度、浓度、黏度、粒度、密度、比重等。
- (5) 光学量:光强、光通量、光照度、辐射能量等。
- (6) 状态量:颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量等。



严格地说,状态量范围更广,但是有些状态量由于习惯已分别归入热工量、机械量、分量中,因此,在这里不再重复列出。

2. 按被测参量的检测转换方法分类

被测参量通常是非电物理或化学成分量,通常需用某种传感器把被测参量转换成电量,以便于作后续处理。被测量转换成电量的方法很多,最主要的有下列几类。

(1) 电磁转换:电阻式、应变式、压阻式、热阻式、电感式、互感式(差动变压器)、电容式、阻抗式(电涡流式)、磁电式、热电式、压电式、霍尔式、振频式、感应同步器、磁栅。

(2) 光电转换:光电式、激光式、红外式、光栅、光导纤维式。

(3) 其他能/电转换:声/电转换(超声波式)、辐射能/电转换(X射线式、 β 射线式、 γ 射线式)、化学能/电转换(各种电化学转换)。

0.4 检测技术的发展趋势

随着世界各国现代化步伐的加快,对检测技术的需求与日俱增;而科学技术,尤其是大规模集成电路技术、微型计算机技术、机电一体化技术、微机械和新材料技术的不断进步,大大促进了现代检测技术的发展。目前,现代检测技术发展总的趋势大体有以下几个方面。

1. 不断拓展测量范围,努力提高检测精度和可靠性

随着科学技术的发展,对检测系统的性能要求,尤其是精度、测量范围和可靠性指标要求越来越高。以温度为例,为满足某些科研实验的需求,要求研制不仅测温下限接近绝对零度 -273.15°C ,且测温范围尽可能达到 15 K (约 -258°C)的高精度超低温检测仪表;同时,某些场合需连续测量液态金属的温度或长时间连续测量 $2\,500\sim 3\,000^{\circ}\text{C}$ 的高温介质温度。目前虽然已能研制和生产出最高上限超过 $2\,800^{\circ}\text{C}$ 的热电偶,但测温范围一旦超过 $2\,500^{\circ}\text{C}$,其准确度将下降,而且极易氧化从而严重影响其使用寿命与可靠性;因此,寻找能长时间连续准确检测上限超过 $2\,000^{\circ}\text{C}$ 被测介质温度的新方法还在继续。

新材料和研制(尤其是适合低成本大批量生产)出相应的测温传感器是各国科技工作者许多年来一直努力试图解决的课题。目前,非接触式辐射型温度检测仪表测温上限原理上最高可达 $100\,000^{\circ}\text{C}$ 以上,但与聚核反应优化控制理想温度约 10^8°C 相比还相差3个数量级,这说明超高温检测的需求远远高于当前温度检测所能达到的技术水平。仅在十余年前,在长度、位移检测中存在几丝的测量误差,就会被大家认为是高精度测量;但随着近几年许多国家大力开展微机电系统、超精细加工等高技术研究,“微米、纳米技术”很快成了人们熟知的词汇,这就意味着科技的发展迫切需要纳米级、甚至更高精度的检测技术和检测系统。

目前,除了超高温、超低温检测仍有待突破外,诸如混相流量检测、脉动流量检测、微差压(几十个帕)检测、超高压检测、高温高压下物质成分检测、分子量检测、高精度检测和大吨位重量检测等都是需要尽早攻克检测课题。

各行各业随着自动化程度不断提高,其高效率的生产更依赖于各种检测、控制设备的安全可靠。努力研制在复杂的恶劣的测量环境下能满足用户所需精度要求,且能长期稳定工作的各种高可靠性检测系统将是检测技术的一个长期方向。对于航空航天和武备系统等特殊用途的检测仪器的可靠性要求更高。例如,在卫星上安装的检测仪器,不仅要求体积小、重量轻,而且既要耐高温,又要能在极低温和强辐射的环境下长期稳定工作,因此,所有检测



仪器都应具有极高的可靠性和尽可能长的使用寿命。

2. 传感器逐渐向集成化、组合式、数字化方向发展

鉴于传感器与信号调理电路分开,微弱的传感器信号在通过电缆传输的过程中容易受到各种电磁干扰,以及各种传感器输出信号形式众多,而使检测仪器与传感器的接口电路无法统一和标准化,实施起来颇为不便。随着大规模集成电路技术与产业的迅猛发展,采用贴片封装方式、体积很小的通用和专用集成电路越来越普遍,因此,目前已有不少传感器实现了敏感元件与信号调理电路的集成化和一体化,对外直接输出标准的 $4\sim 20\text{ mA}$ 电流信号,成为名符其实的变送器。这为检测仪器整机研发与系统集成提供了很大的方便,亦使得这类传感器身价倍增。另外,一些厂商把两种或两种以上的敏感元件集成于一体,而成为可实现多种功能新型组合式传感器。例如,将热敏元件、湿敏元件和信号调理电路集成于一体,一个传感器可同时完成温度和湿度的测量。

此外,还有厂商把敏感元件与信号调理/处理电路统一设计并集成化,成为能直接输出数字信号的新型传感器。例如,美国 DALLAS 公司推出的数字温度传感器 DS18B20,可测温度范围为 $-55^{\circ}\text{C}\sim +150^{\circ}\text{C}$,精度达到 0.5°C ,封装和形状与普通小功率三极管十分相似,采用独特的一线制数字信号输出。

3. 重视非接触式检测技术研究

在检测过程中,把传感器置于被测对象上,敏感被测参量的变化,这种接触式检测方法通常比较直接可靠,测量精度较高;但在某些情况下,会因传感器的加入对被测对象的工作状态产生干扰,而影响测量的精度。甚至在有些被测对象上,根本不允许或不可能安装传感器,例如测量高速旋转轴的振动、转矩等。因此,各种可行的非接触式检测技术的研究越来越受到重视,目前已商品化的光电式传感器、电涡流式传感器、超声波检测仪表、核辐射检测仪表等应运而生。今后不仅需要继续改进和克服非接触式检测仪器易受外界干扰和绝对精度较低等问题,而且对一些难以采用接触式检测,或无法采用接触方式进行检测的,尤其是那些具有重大军事、经济或其他重要应用价值的非接触检测技术课题的研究投入会不断增加,非接触检测技术的研究、发展和应用步伐都将明显加快。

4. 检测系统智能化

近十年来,由于包括微处理器和单片机在内的大规模集成电路的成本和价格不断降低,功能和集成度不断提高,使得许多以单片机、微处理器或微型计算机为核心的现代检测仪器实现了智能化,这些现代检测仪器通常具有系统故障自测、自诊断、自调零、自校准、自选量程、自动测试、自动分选和自校正功能,强大数据处理和统计功能、远距离数据通信和输入输出功能,可配置各种数字通讯接口,传递检测数据和各种操作命令等,可方便地接入不同规模的自动检测、控制与管理信息网络系统。与传统检测系统相比智能化的现代检测系统具有更高的精度和性价比。

正是由于智能化检测系统具有上述优点,所以其市场占有率多年来一直维持强劲的上升趋势。

第 1 章 检测技术基本概念

1.1 测量方法

实现被测量与标准量比较得出比值的方法,称为测量方法。针对不同测量任务进行具体分析,以找出切实可行的测量方法,对测量工作是十分重要的。

对于测量方法,从不同角度出發,有不同的分类方法。根据获得测量值的方法可分为直接测量、间接测量与组合测量;根据测量的精度因素情况可分为等精度测量与非等精度测量;根据测量方式可分为偏差式测量、零位式测量与微差式测量;根据被测量变化快慢可分为静态测量与动态测量;根据测量敏感元件是否与被测介质接触可分为接触测量与非接触测量等。常用的测量方法描述如下。

1. 直接测量、间接测量与组合测量

在使用仪表或传感器进行测量时,对仪表读数不需要经过任何运算就能直接表示测量所需要的结果的测量方法称为直接测量。例如,用磁电式电流表测量电路的某一支路电流,用弹簧管压力表测量压力等,都属于直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而又迅速,缺点是测量精度不高。

在使用仪表或传感器进行测量时,首先对与测量有确定函数关系的几个量进行测量,将被测量代入函数关系式,经过计算得到所需要的结果,这种测量称为间接测量。间接测量步骤较多,花费时间较长,一般用在直接测量不方便或是缺乏直接测量手段的场合。

若被测量必须经过求解联立方程组,才能得到最后结果,则称这样的测量为组合测量。组合测量是一种特殊的精密测量方法,操作步骤复杂,花费时间长,多用于科学实验或特殊场合。

2. 等精度测量与非等精度测量

用相同的仪表(或同量程同精度的仪表)和相同的测量方法对同一被测量进行多次重复测量,称为等精度测量。

用不同精度的仪表或不同的测量方法,或在环境条件相差很大时对同一被测量进行多次重复测量称为非等精度测量。

3. 偏差式测量、零位式测量与微差式测量

用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的量值,这种测量方法称为偏差式测量。用这种方法测量时,仪表刻度事先用标准器具标定。在测量时,输入被测量,按照仪表指针在标尺上的显示值,决定被测量的数值。这种方法比较简单迅速,但测量结果精度较低。



用指零仪表的零位指示检测测量系统的平衡状态,在测量系统平衡时,用已知的标准量决定被测量的量值,这种测量方法称为零位式测量。在测量时,已知标准量直接与被测量相比较,已知量应连续可调,指零仪表指零时,被测量与已知标准量相等。例如天平、电位差计等。零位式测量的优点是可以获得比较高的测量精度,但测量过程比较复杂,费时较长,不适用于迅速变化的信号的测量。

微差式测量是综合了偏差式测量与零位式测量的优点而提出的一种测量方法。它将被测量与已知的标准量相比较,取得差值后,再用偏差法测得此差值。应用这种方法测量时,不需要调整标准量,而只需测量两者的差值。例设: N 为标准量, x 为被测量, ΔN 为二者之差,则 $x = N + \Delta N$ 。由于 N 是标准量,其误差很小,因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量 ΔN ,即使测量 ΔN 的精度较低,但总的测量精度仍很高。微差式测量的优点是反应快,而且测量精度高,特别适用于在线控制参数的测量。

1.2 检测系统误差分析基础

1.2.1 测量误差的基本概念

1. 测量误差的定义

测量某一个物理量,是将它进行变换、放大、与标准量进行比较、显示或读出数据等环节的综合处理过程。由于检测系统不可能绝对精确、测量原理的局限性、测量方法的不完善性、环境因素的变化、外界干扰的存在以及测量过程可能会影响被测对象的原有状态等,使得测量结果不能准确地反映被测量的真值而存在一定的偏差,这个偏差就是测量误差。

2. 真值

一个物理量被严格定义的理论值通常叫理论真值,如三角形内角和为 180° 。很多物理量的理论真值在实际中很难得到,常用约定真值或相对真值代替理论真值。

1) 约定真值

根据国际计量委员会通过并发布的各种物理量单位的定义,利用当今最先进科学技术制定各物理量单位的基准,这些值被公认为国际或国家基准,称为约定真值。

如国际单位制中长度的单位米,1983 年被定义为光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒的时间内所通过的距离。在这之前,1960 年第十一届国际计量大会,通过了一米长度的定义为氪-86 原子从能量 $2P_{10}$ 至 $5d_5$ 跳跃时辐射线波长的 $1\,650\,763.73$ 倍(真空中)。而质量单位千克,等于国际千克原器的质量,保存在国际计量局的 1 kg 铂铱合金原器就是 1 kg 质量的约定真值。时间单位的定义为:铯-133 原子基态的两个超精细能阶之间跃迁,所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间为 1 秒的真值。

各国或各地通常利用这些约定真值的国际基准或国家基准进行传递,也可以对低一级标准值(标准器)或标准仪器进行对比、计量和校准。而各地可用经过上级法定计量部门按照规定时间定期送检、校检过的标准器、标准仪表及修正值作为当地相应物理量单位的约定真值。

2) 相对真值

如果精度高一级检测仪器的误差为低一级检测仪器误差的 $1/3 \sim 1/10$,那么可以认为高



一级的仪器对某物理量的测量值,为低一级仪器的测量值的相对真值。例如,电子秤称重精度通常高于杆秤的一个数量级,因此,电子秤的称重值为杆秤的相对真值。

测量是以确定量值为目的的一系列操作。所以,测量也就是将被测量与同种性质的标准量进行比较,确定被测量对标准量的倍数。它可由下式表示:

$$x = nu \quad (1-1)$$

式中: x ——被测量值;

u ——标准量,即测量单位;

n ——比值(纯数),含有测量误差。

由测量所获得的被测的量值叫测量结果。

测量结果可用一定的数值表示,也可以用一条曲线或某种图形表示。但无论其表现形式如何,测量结果均应包括两部分:比值和测量单位。确切地讲,测量结果还应包括误差部分。被测量值和比值等都是测量过程的信息,这些信息依托于物质才能在空间和时间上进行传递。参数因为承载了信息而成为信号。选择其中适当的参数作为测量信号,例如热电偶温度传感器的工作参数是热电偶的热电势,差压流量传感器中的孔板工作参数是差压 ΔP 。测量过程就是传感器从被测对象获取被测量的信息,建立起测量信号,经过变换、传输和处理,从而获得被测量的量值。

3. 标称值

标称值是指在计量或测量器具上标注的量值。如天平的砝码上标注 10 g、尺子上标注 50 cm 等。这些测量器具在制造时由于条件的限制,它们的标称值和其真值间存在一定的误差,所以,使用这些值时存在不确定性,通常要根据其精度等级或误差范围进行估计其真值。

4. 示值

示值是测量仪器/系统指示或显示的数值,也叫测量值或读数。因为测量仪器/系统中传感器和信号处理的过程都不可避免地存在误差,再加上测量过程中环境因素和干扰的影响,所以,示值和理论真值间存在着误差。

5. 误差公理

实际测量过程中,由于测量仪器不准确、方法不完善、程序不规范以及环境因素的影响等,都会导致测量结果或多或少地偏离被测物理量的真值。测量的结果与真值之间总是存在着误差,也就说测量误差的存在是不可避免的,一切测量都具有误差,误差自始至终存在于所有的科学实验之中,这就是误差公理。

1.2.2 测量误差的表示方法

测量的目的是希望通过测量获取被测量的真实值。但由于种种原因,例如,传感器本身性能不够好,测量方法不够完善,以及外界干扰的影响等,都会造成被测参数的测量值与真实值不一致,两者不一致的程度用测量误差表示。

测量误差就是测量值与真实值之间的差值,它反映了测量质量的好坏。测量的可靠性至关重要,不同场合对测量结果可靠性的要求也不同。例如,在量值传递、经济核算、产品检验等场合应保证测量结果有足够的准确度。当测量值用作控制信号时,则要注意测量的稳