

 中国电子教育学会高教分会推荐
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

传感器与检测技术

周 征 杨建平 主 编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国电子教育学会高教分会推荐
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

传感器与检测技术

周 征 杨建平 主编



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以被测物理量为研究对象,全面地阐述了各种被测物理量的检测方法、对应传感器的工作原理和按工程实际选用传感器的原则。

全书共 11 章,内容分别为:检测技术基础知识、传感器概述、温度传感器及其检测技术、力与压力传感器及其检测技术、流量传感器及其检测技术、机械量传感器及其检测技术、物位传感器及其检测技术、气体和湿度传感器及其检测技术、新型传感器及其应用、传感器应用技术、检测系统的抗干扰技术。书中给出了大量来源于生产实际的实用电路和实例。书末附有 6 个附录可供查阅。

本书体系新颖,内容丰富,论述深入浅出,实用性突出,可作为应用技术型本科院校的测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、电气工程及其自动化、建筑电气与智能化及物联网等专业的教材或教学参考书,也可作为测控领域的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/周征,杨建平主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.9
(普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材)

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4536 - 0

I. ① 传… II. ① 周… ② 杨… III. ① 传感器—检测 IV. ① TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 171958 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 张 玮

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 27.5

字 数 657 千字

印 数 1~3000 册

定 价 55.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4536 - 0/TP

XDUP 4828001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

传感器是检测技术的物理载体,是集材料、机械、电子、信息及控制等于一体的综合技术,是自动化领域的关键技术之一,是信息获取的重要环节。随着现代科学技术的发展,传感器及其检测技术不仅在国防、航空、航天、铁路、冶金、化工等国民经济的各个行业得到广泛应用,而且在人类生活的各个领域,如办公自动化、商业自动化、家庭自动化等都可以看到它们的身影,特别是近年来蓬勃发展的物联网产业就是传感器及其检测技术在“互联网+”时代的新应用。

传感器与检测技术的开发和应用水平已成为一个国家工业发展水平的重要标志之一。它也是高等工程应用技术型本科院校自动化、测控技术与仪器、电子信息工程、电气工程及其自动化、建筑电气与智能化及物联网等专业的主要专业课程之一。

本书是针对检测技术在各学科间相互交叉融合的特点以及对信息获取的要求,把握传感器将不同物理量信号转换成电量的共性关键技术,将传感器与检测技术有机结合,突出工程应用,强化理论与实际的联系,在充分借鉴目前国内外相关文献资料的基础上编写而成的。

本书的特点是:以被测物理量为主线,贯穿物理参量的分析,引出检测方法、典型电路和传感器,最后按照工程实际应用的要求总结出传感器的选择原则。这种编排方式突出了被测物理量,集中讨论了传感器的基本原理及实际应用技术,体系新颖,在内容上注重反映有实用价值的核心技术,力求培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力,使初学者比较容易掌握从被测对象到检测方法再到传感器的认知过程,便于进行总结,也为今后的应用奠定了基础,从而避免了传统的以传感器工作原理来编制章节的不足(一种传感器可检测多种物理量)。

全书共11章,第1章为检测技术基础知识;第2章为传感器概述;第3~8章为各种被测量传感器及其检测技术,这些被测量分别是温度、力与压力、流量、机械量、物位、气体和湿度;第9章为新型传感器及其应用;第10章为传感器应用技术;第11章为检测系统的抗干扰技术。

本书由周征教授编写第1、2、6、7、9、10、11章,杨建平教授编写第3、4、5、8章。全书由周征整理定稿。在编写本书的过程中,编者得到了兰州工业学院的大力支持和帮助,并听取了许多同行提出的宝贵意见,在此向学校及编者

的同行表示衷心的感谢。此外，本书在编写过程中参考了许多教材、文献和有关网站信息，在此也对相关作者表示谢意。

鉴于课程涉及的知识面广，而编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2017 年 3 月

于兰州工业学院

目 录

第1章 检测技术基础知识	1	3.3 非接触式温度传感器及其检测技术	77
1.1 检测技术概述	1	3.3.1 红外传感器及温度检测	78
1.1.1 检测的含义、任务及地位	1	3.3.2 光纤传感器及温度检测	84
1.1.2 检测系统的组成与性能评价	2	3.4 温度传感器的选型	93
1.1.3 检测技术的发展概况	4	思考题与习题	94
1.2 检测的基本方法	5	第4章 力与压力传感器及其	
1.2.1 测量方法的分类	5	检测技术	96
1.2.2 测量方法的选择	7	4.1 力与压力的概述	97
1.3 测量误差及处理方法	7	4.1.1 压力的概念及单位	97
1.3.1 误差的基本概念	7	4.1.2 力与压力的检测方法	98
1.3.2 误差的分类	8	4.1.3 常用的压力检测仪表	100
1.3.3 误差的处理	12	4.1.4 压力传感器及其分类	101
1.3.4 误差的综合与分配	19	4.2 弹性压力传感器	101
思考题与习题	20	4.2.1 弹性敏感器	101
第2章 传感器概述	22	4.2.2 电容式传感器及压力检测	105
2.1 传感器的基本概念	22	4.2.3 电感式传感器及压力检测	115
2.1.1 传感器的定义与组成	22	4.3 应变片式传感器及力与压力检测	124
2.1.2 传感器的分类	24	4.3.1 电阻应变片式传感器	125
2.1.3 传感器的命名与代号	25	4.3.2 压阻式传感器	128
2.1.4 传感器技术的发展趋势	28	4.3.3 应变片式力与压力传感器	129
2.2 传感器的一般特性	31	4.4 压电式传感器及力与压力检测	132
2.2.1 传感器的静态特性	31	4.4.1 压电效应及压电材料	132
2.2.2 传感器的动态特性	34	4.4.2 压电式传感器	134
2.3 传感器的性能指标	36	4.4.3 压电式力与压力传感器	136
2.3.1 传感器的主要性能指标	36	4.5 压力传感器的应用技术	138
2.3.2 传感器工作要求	38	4.5.1 压力传感器的基本电路	138
2.3.3 改善传感器性能的主要		4.5.2 压力传感器的应用实例	142
技术途径	39	4.5.3 压力传感器的选择	146
2.4 变送器简介	40	思考题与习题	147
思考题与习题	40	第5章 流量传感器及其检测技术	150
第3章 温度传感器及其检测技术	42	5.1 概述	151
3.1 温度检测的相关知识	43	5.1.1 流量检测基础	151
3.1.1 温度与温标	43	5.1.2 流量的检测方法	151
3.1.2 温度检测的主要方法及特点	44	5.1.3 流量计的分类	152
3.2 接触式温度传感器及其检测技术	45	5.1.4 流量计的主要技术参数	153
3.2.1 热电阻及温度检测	46	5.2 差压式流量计	154
3.2.2 热敏电阻及温度检测	52	5.2.1 节流式流量计	154
3.2.3 热电偶及温度检测	57	5.2.2 靶式流量计	155
3.2.4 集成温度传感器	69	5.2.3 转子流量计	157

5.2.4 差压式流量计标准节流装置的 安装要求	158	思考题与习题	248
5.2.5 差压式流量计的使用	159	第7章 物位传感器及其检测技术	250
5.3 容积式流量计	160	7.1 概述	250
5.3.1 椭圆齿轮流量计	161	7.1.1 物位检测的方法	251
5.3.2 腰轮流量计	162	7.1.2 影响物位测量的因素	253
5.3.3 旋转活塞式流量计	163	7.2 连续式物位传感器	254
5.3.4 刮板式流量计	163	7.2.1 连续式液位检测	254
5.3.5 容积式流量计的安装与使用	164	7.2.2 连续式料位检测	273
5.4 速度式流量计	164	7.2.3 相界面检测	277
5.4.1 涡轮流量计	164	7.3 定点式物位传感器	277
5.4.2 叶轮式流量计	165	7.3.1 定点式液位检测	278
5.4.3 涡街流量计	166	7.3.2 定点式料位检测	282
5.4.4 电磁流量计	167	7.4 接近开关与物位检测	289
5.4.5 超声波流量计	171	7.4.1 接近开关概述	289
5.5 质量流量计	179	7.4.2 涡流式接近开关	292
5.5.1 间接式质量流量计	179	7.4.3 电容式接近开关	293
5.5.2 直接式质量流量计	180	7.4.4 霍尔式接近开关	295
5.6 流量计的选用	181	7.4.5 光电式接近开关	297
5.6.1 选用流量计应考虑的因素	182	7.4.6 其他接近开关及物位检测技术	302
5.6.2 流量计选型的步骤	185	思考题与习题	304
思考题与习题	186	第8章 气体和湿度传感器及其 检测技术	305
第6章 机械量传感器及其检测技术	187	8.1 概述	305
6.1 位移传感器及其检测技术	188	8.1.1 过程分析仪表及其分类	305
6.1.1 位移的检测方法和常用 位移传感器	188	8.1.2 过程分析仪表的组成	306
6.1.2 电位器式传感器及位移检测	190	8.1.3 过程分析仪表的主要技术特性	306
6.1.3 霍尔传感器及位移检测	195	8.2 气敏传感器及成分分析检测技术	307
6.1.4 光栅式、磁栅式传感器及 位移检测	203	8.2.1 气敏传感器概述	307
6.1.5 编码器传感器及位移检测	211	8.2.2 半导体式气敏传感器	309
6.1.6 其他常用位移传感器	213	8.2.3 接触燃烧式气体传感器	316
6.2 厚度传感器及检测技术	217	8.2.4 常用气体分析仪	317
6.2.1 超声波式传感器及厚度检测	217	8.2.5 气体分析仪的选择及注意事项	322
6.2.2 电涡流式传感器及厚度检测	218	8.3 湿度传感器及物质性质检测技术	324
6.2.3 核辐射式传感器及厚度检测	227	8.3.1 湿度传感器及其检测技术	325
6.2.4 厚度传感器应用实例	228	8.3.2 物质含水量检测技术	331
6.3 速度(转速)传感器及检测技术	229	8.3.3 物质密度检测技术	332
6.3.1 速度(转速)的检测方法	229	8.3.4 湿度传感器的选择	335
6.3.2 磁电式速度传感器及转速检测	231	思考题与习题	337
6.3.3 光电式传感器及转速检测	234	第9章 新型传感器及其应用	338
6.3.4 霍尔式转速传感器	245	9.1 图像传感器	338
6.3.5 多普勒雷达测速	246	9.1.1 CCD 图像传感器	339
		9.1.2 CMOS 图像传感器	342

9.1.3 图像传感器的应用举例	343	第 11 章 检测系统的抗干扰技术	392
9.2 生物传感器	344	11.1 干扰的相关知识	392
9.2.1 生物传感器概述	344	11.1.1 干扰的来源	393
9.2.2 酶传感器	347	11.1.2 干扰的传播途径	396
9.2.3 微生物传感器	348	11.1.3 干扰的模式	398
9.2.4 免疫传感器	351	11.1.4 电磁兼容的基本概念	399
9.3 智能传感器	352	11.2 常用的抗干扰技术	402
9.3.1 智能传感器的结构	352	11.2.1 屏蔽技术	402
9.3.2 智能传感器的功能与特点	353	11.2.2 接地技术	405
9.3.3 智能传感器的实现途径	355	11.2.3 搭接技术	413
9.3.4 智能传感器的应用举例	356	11.2.4 隔离技术	415
9.4 机器人传感器	358	11.2.5 长线干扰的抑制技术	418
9.4.1 机器人传感器的分类	358	11.2.6 电源系统的抗干扰技术	421
9.4.2 机器人传感器的特点和要求	359	11.2.7 印制电路板抗干扰技术	424
9.4.3 内部检测传感器	359	思考题与习题	426
9.4.4 外界检测传感器	361	附录	427
思考题与习题	366	附录 1 Pt100 铂热电阻分度表	
第 10 章 传感器应用技术	368	(ZB Y301-85)	427
10.1 传感器的补偿技术	368	附录 2 Pt10 铂热电阻分度表	
10.1.1 非线性补偿技术	368	(ZB Y301-85)	427
10.1.2 温度补偿技术	371	附录 3 Cu100 铜热电阻分度表	
10.2 传感器的标定与校准技术	373	(JJG229-2010)	428
10.2.1 传感器标定的基本概念	373	附录 4 Cu50 铜热电阻分度表	
10.2.2 传感器的静态标定	374	(JJG229-2010)	429
10.2.3 传感器的动态标定	381	附录 5 镍铬—镍硅热电偶	
10.3 传感器的选择与使用	388	分度表(K 型)	430
10.3.1 传感器的选择	388	附录 6 ITS-1990 国际温标	430
10.3.2 传感器的正确使用	390	参考文献	432
思考题与习题	391		

第 1 章 检测技术基础知识

教学目标

本章通过对检测技术相关基本知识的阐述，引出检测技术应用过程中的基本方法和测量误差及其处理技术；重点介绍了检测的任务和地位、检测系统的组成、性能评价和检测技术发展趋势，检测技术中常用的测量方法和测量方法的选择，以及误差及其处理方法和误差在检测系统中的分配。

通过本章的学习，读者了解检测在现代工业中的作用和重要地位，熟悉检测系统的基本组成和性能评价指标；了解检测技术中常用的测量方法；掌握误差的基本知识，会根据现象来判别误差，熟悉各种误差的处理方法。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
检测技术概述	(1) 熟悉检测内涵及检测系统的组成、性能评价； (2) 了解检测技术的发展概况	检测技术
检测的基本方法	(1) 熟悉检测方法的分类； (2) 了解测量方法的选择	(1) 检测技术； (2) 数学
测量误差及处理	(1) 理解测量误差基本概念； (2) 熟悉误差的分类和处理方法	(1) 误差分析； (2) 数学

随着科技的不断发展，人类已经进入信息时代，人们在日常生产、生活中，越来越离不开各种信息的获取、传输和处理等。检测技术就是以研究检测系统中的信息提取、信息转换以及信息处理的理论与技术为主要内容的一门应用技术学科。在现代工业生产中，检测技术是实现生产设备的自动控制、自动调节的首要技术保证。国内外已将检测技术列为优先发展的科学技术之一。

作为电气信息类专业的学生和从事这方面工作的工程技术人员，检测技术是必备的知识。要掌握这门知识，首先应该了解检测的任务和地位，了解检测技术的发展趋势，明确检测技术与本专业各技术课程之间的关系。

1.1 检测技术概述

1.1.1 检测的含义、任务及地位

人有“五官”——耳、眼、鼻、舌、皮肤，就具有听、视、嗅、味、触觉的功能，来感知外界的刺激，并通过大脑对这些刺激信号进行处理，做出判断，指导人的行动。对于一个生

产过程的检测系统要通过各种传感器采集到如电压、电流、温度、压力、流量、液位、成分等表征它们特性、状态的信息，送入计算机进行处理，做出判断，并对这些信息参数的大小、变化速度、变化方向等进行监督和控制，就能使生产过程或实验处于最佳状态，做到安全、经济，最终达到预期的结果。检测系统与人体系统的对照关系如图 1-1 所示。

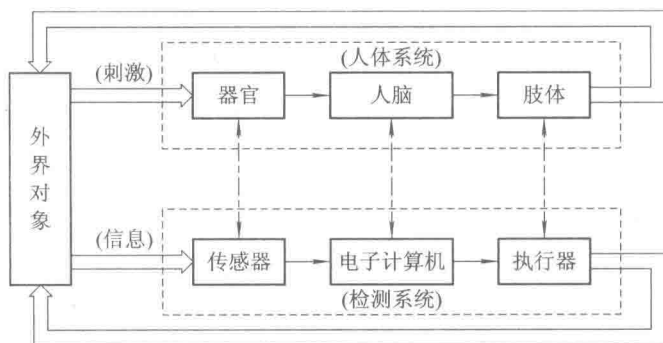


图 1-1 检测系统与人体系统的对照关系

在自动控制领域中，检测的任务不仅是对成品或半成品的检验和测量，而且为了检查监督和控制某个生产过程或运动对象使之处于人们选定的最佳状况，需要随时检查和测量各种参量的大小和变化等情况（如热工参数、几何参数、表面质量、内部缺陷、泄漏、成分等）。这种对生产过程和运动对象实施定性检查和定量测量的技术又称为工程检测技术。因此，检测技术是指人们为了定性了解或掌握自然现象或状态所从事的一系列定性检查和定量测量的技术措施。

在各种现代装备系统的设计和制造工作中，检测工作内容已占首位。检测系统的成本已达到该装备系统总成本的 50%~70%，它是保证现代工程装备系统实际性能指标和正常工作的重要手段，是其先进性及实用性的重要标志。以电厂为例，为了实现安全高效供电，电厂除了实时监测电网电压、电流、功率因数及频率、谐波分量等电气量外，还要实时监测电机各部位的振动（振幅、速度、加速度）以及压力、温度、流量、液位等多种非电气量，并实时分析处理、判断决策、调节控制，以使系统处于最佳工作状态。如果检测系统不够完备，主汽温度测量值有+1%的测量偏差，则汽机高压缸效率减少 3.7%；若主汽流量测量值有-1%的测量偏差，则电站燃烧成本增加 1%。又如：为了对工件进行精密机械加工，需要在加工过程中对各种参数，如位移量、角度、圆度、孔径等直接相关量以及振动、温度、刀具磨损等间接相关参量进行实时监测，实时由计算机进行分析处理，然后由计算机实时地对执行机构给出进刀量、进刀速度等控制调节指令，才能保证预期高质量要求，否则得到的将是次品或废品。

总之，人们对自然界的认识在很大程度上取决于检测。

1.1.2 检测系统的组成与性能评价

1. 检测系统的组成

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。由于被测对象复杂多样，

因此,检测方法和检测技术也不尽相同,基本检测系统的组成如图1-2所示。

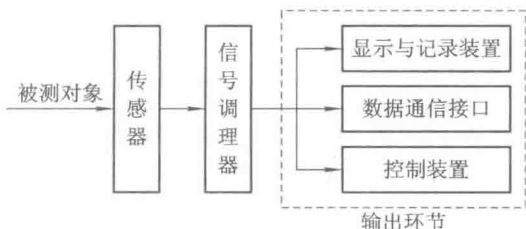


图1-2 基本检测系统的组成

图1-2中,基本检测系统由传感器、信号调理器和输出环节(显示与记录装置、数据通信接口和控制装置)三个模块组成。

(1) 传感器。传感器处于被测对象与检测系统的接口位置,是一个信号变换器。它直接从被测对象中提取被测量的信息,感受其变化并变换成便于测量的其它量。例如将速度变换成电压,将流量变换成压力等。传感器是检测系统的重要组成部件。

(2) 信号调理器。信号调理器又称中间转换器,它的作用是将传感器的输出信号进行放大、转换和传输等,使其适合于显示、记录、数据处理或控制。例如测量电桥、滤波器、放大器、V/F变换器、电压/电流变换器、交流/直流变换器等。

(3) 输出环节。输出环节包含显示和打印记录装置、数据通信接口和控制执行器等,从而使检测系统不仅用于检测,还能完成控制和保护操作等功能。

从检测系统的组成结构可以看出,要掌握检测技术,不仅要具备力学、光学、电磁学等物理学知识,还要具备电子、计算机、自动化、信息等领域的知识和技术。例如,传感器一般都基于复杂的物理和化学定理和规律;信号的放大和调理又依赖于电子技术;信号的处理和分析则依靠数字信号处理、随机信号分析等信息领域的研究成果;检测仪器的智能化,则是自动化技术、计算机技术、接口与网络技术相结合的产物;此外,检测系统中还要用到测量误差理论、信号与系统分析方法(时域、频域、复频域、Z域)、抗干扰技术等知识。因此,检测技术是一门综合了现代电子技术、微电子技术、生物技术、材料科学、化学科学、光电技术、精密加工技术、计算机技术和信息技术等的交叉性技术学科。可以说检测技术是现代科学技术水平高低的标志之一。

2. 检测系统的性能评价

如前所述,检测系统是由众多环节组成的对被测物理量进行检测、调理、变换、显示或记录的完整系统。检测系统的性能指标是评价系统性能差异、质量优劣的主要依据,也是正确地选择测量方法和使用测量系统、达到正确测量目的所必须具备和了解的知识。

检测系统或仪表的性能指标很多,概括起来不外乎技术、经济及使用等方面的指标。

(1) 检测系统或仪表技术方面的指标:主要是指误差、精度、稳定性、输入/输出特性等。

(2) 检测系统或仪表使用方面的指标:主要是指操作维修是否方便、运行是否可靠安全、抗干扰与防护能力的强弱、重量体积的大小、自动化程度的高低等。

(3) 检测系统或仪表经济方面的指标:主要是指使用寿命的长短、功耗的大小、价格的高低等。

上述检测系统或仪表的性能指标的划分是相对的,如系统的使用寿命既是经济方面的性能指标,而从系统的可靠性来说,又是一项极为重要的技术指标。

1.1.3 检测技术的发展概况

随着科学技术和工业生产的不断发展,为检测技术提供了新的检测理论和检测方法。因而出现了各种新的检测工具,这就有可能开拓新的检测领域。故可以从以下几个方面了解检测技术的发展。

1. 检测理论方面

目前,随着计算机的普及,使信息论中的误差理论、估计理论应用于检测系统成为可能;计算机的高速运算能力和信息处理量大的特点,使统计技术中的平均值、最小二乘等算法得以实现,从而可以获得更多且精确有用的信息。

2. 检测领域方面

(1) 人类活动范围的扩展,反映在新的检测对象、新的检测领域和新的检测要求上。例如,随着工业生产的发展,工厂中排出的“三废”对自然界造成了严重污染,破坏了生态平衡,破坏了人们赖以生存的自然环境。为了保护环境,防止水、空气的污染及废渣的污染,就要对环境所含有的各种杂质进行微量的检测,并加以控制。这就要求制造新的灵敏度极高的检测元件和寻找新的检测方法。

(2) 人们生活条件的改善和提高,使人们的安全、健康意识加强,对医疗卫生行业提出了新的要求,出现了新的医疗器械——生物医学仪器,如CT、B超;还有牵涉到有关人的心理、生理、精神方面的检测,如不安感、疲劳度等,还有犯罪方面的检测。

(3) 工业生产的发展,使生产过程的间接参数 T (温度)、 Q (流量)、 P (压力)等的检测,转向表征生产过程本质的物性、成分、组分、能量等参数的检测。参数的显示已逐渐由模拟式变为数字式或图像显示等。

(4) 仿生学的出现又进一步拓宽了检测领域。

3. 检测工具和方法

随着新的检测领域的出现,新的检测方法和检测工具也随之出现。如利用激光脉冲原理测量大距离(如地球到月球的距离)可以大大提高精度。

另一方面,充分利用新技术扩大了仪表的测量功能。近年来在测量仪表中引入微机进行数据分析、计算、处理、校验、判断及储存等工作,实现了原来单个仪表根本不可能实现的许多功能,大大提高了测量效率、测量精度、测量的可靠性、测量的稳定性和测量的经济性。

例如,目前工业上质量比较高的模拟仪表,其典型漂移值约为 $0.1\%/h$,对标准信号 $1\sim 5\text{ V}$ 而言,其漂移值约为 5 mV/h ;在抗干扰方面,百米长的电缆可能有 5 mV 的噪声电压,故仪表的总精度不会优于 0.2% 。而对数字仪表来说,只要能辨别0和1,就不会受到噪声的影响。例如,一般的数字电路中,高电平是 5 V ,则它1000倍于噪声电压,当然噪声对它的影响就很小,漂移问题也不存在,故就可靠性和稳定性来看,数字仪表优于模拟仪表。因此,数字仪表组成的检测系统愈来愈多地得到应用。

1.2 检测的基本方法

为了对物理参量进行检测,就需要考虑采用什么检测方法,选择什么样的传感器去进行测量。据国际通用计量学基本名词推荐:测量是以确定量值为目的的一组操作。这种操作就是测量中的比较过程——将被测参数的量值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,即为测量结果。与测量相近的概念是检验,它常常只需分辨出参数量值所归属的某一范围带,以此来判别被测参数是否合格或现象是否存在等。检测不仅包含了上述两种内容,而且在自动控制系统中,还用于对被测/被控对象有用信息的检出。所以,检测是意义更为广泛的测量,是检验、测量的统称(测试是测量和试验的全称,有时把较复杂的测量称为测试)。

1.2.1 测量方法的分类

一个物理量的测量可以通过不同的方法实现。测量方法的选择是否正确,直接关系到测量结果的可信赖程度,也关系到测量的经济性和可行性。

1. 根据测量条件分类

按测量条件分类有等精度测量和非等精度测量。

(1) 等精度测量法。在测量过程中,使影响测量误差的各因素(环境条件、仪器仪表、测量人员、测量方法)保持不变,对同一被测量进行次数相同的重复测量,这种测量方法称为等精度测量。等精度测量所获得的测量结果,其可靠程度是相同的。

(2) 非等精度测量法。在测量过程中,测量环境条件有部分不相同或全部不相同,如测量仪表精度、重复测量次数、测量环境、测量人员熟练程度等有了变化,所得测量结果的可靠程度显然不同,这种方法称为非等精度测量法。

一般说来,在科学研究中、重要的精密测量或检定工作中,为了获得更可靠和精确的测量结果才采用非等精度测量法。在工程技术中,常采用的是等精度测量法。

2. 按测量手段分类

按测量手段分类有直接测量、间接测量和组合测量。

(1) 直接测量。将被测量与标准量直接比较,或用预先经标准量标定好的测量仪器或仪表进行测量,从而直接测得被测量的数值。例如,用弹簧管式压力表测量流体压力就是直接测量。直接测量的优点是测量过程简单、迅速,缺点是测量精度不是很高。该方法是工程上广泛采用的方法。

(2) 间接测量。被测量本身不易直接测量,但可以通过与被测量有一定函数关系的其他量(一个或几个)的测量结果求出(如用函数解析式的计算、查函数曲线或表格)被测量数值,这种测量方式称为间接测量。例如,导线的电阻率 ρ 的测量,只要利用直接测量得到导线的 R 、 l 、 d 的数值,再代入 $\rho = \frac{\pi d^2}{4l} R$,就可得到 ρ 值。在这种测量过程中,手续较多,花费时间较长,但与直接测量被测量方法相比,可以得到较高的精度。

(3) 组合测量。如果被测量有多个,而且被测量又与某些可以通过直接或间接测量得

到结果的其他量存在着一定的函数关系,则可先测量这几个量,再求解函数关系组成的联立方程组,从而得到多个被测量的数值。它是一种兼用直接测量和间接测量的方式,这种方法比较繁琐,通常用于精密测量以及智能仪表、实验室和科学研究中。

3. 按测量方式分类

按测量方式分类有偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

(1) 偏差式测量。在测量过程中,被测量作用于测量仪表的比较装置(指针),使比较装置产生偏移,利用偏移位移直接表示被测量大小的测量方法称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时,要用标准量具对仪表刻度进行校准,并按照仪表指针在标度尺上的示值决定被测量的数值。它是以间接方式来实现被测量与标准量的比较的。例如,用弹簧秤、磁电式仪表就属于偏差式测量。该测量方法过程比较简单、迅速,但测量结果的精度低,因此广泛用于工程测量。

(2) 零位式测量。在测量过程中,被测量作用于测量仪表的比较装置,利用指零机构的作用,使被测量和标准量两者达到平衡,用已知的标准量决定被测量未知量的测量方法称为零位式测量法。应用这种方法进行测量时,标准量具装在仪表内,在测量过程中标准量具直接与被测量相比较,调整标准量,一直到被测量与标准量相等,即指零仪表回零。例如,利用天平测量质量和惠斯通电桥测量电阻(或电感、电容)就是这种方法的一个典型例子。对于零位式测量,只要零指示器的灵敏度足够高,其测量准确度几乎等同于标准量的准确度,因而测量准确度很高,所以常用在实验室作为精密测量。但由于在测量过程中为了获得平衡状态,需要进行反复调节,即使采用一些自动平衡技术,检测速度仍然较慢,这是该方法的不足之处。

(3) 微差式测量法。当未知量尚未完全与已知标准量平衡时(被测量大部分被已知的标准量抵消,剩余差值未被抵消),读取它们之间的差值,由已知的标准量和偏差值得到被测量的数值。或者说零值量(基本量)平衡,增量产生的不平衡即为差值。这种方法的误差主要取决于差值,差值愈小,对总的测量结果的影响就愈小,差值的测量误差对总的误差的影响就愈小。由于这种方法不需要可调节的标准量,也无需平衡操作,标准量的精度容易做得很高,测量过程也比较简单,所以它比较适合于工程测量,如不平衡电桥测电阻。

4. 按被测量在测量过程中的状态分类

按被测量在测量过程中的状态分类有静态测量和动态测量。

(1) 静态测量。当被测量可以认为不随时间变化时,采用静态测量。因此在一段时间内可以重复测量,以表征被测量的性质和状态。

(2) 动态测量。当被测量本身随时间快速变化时,必须采用动态测量,动态测量的输出也是变化信号,它表征被测量的状态变化过程。在动态测量中,所采用的仪器仪表工作响应速度应能满足被测量快速变化的需要。

5. 其它测量方法

前面四种测量分类方法,也可以说是传统的检测方法,随着科学实验及工业应用的不断发展,这些测量方法远不能满足要求。因此,非接触检测及在线检测在科学实验、工业过程检测及工业控制过程中显得越来越重要,显示出巨大的优越性。

非接触检测是利用物理、化学及声光学的原理,使被测对象与检测元器件之间不发生

物理上的直接接触而对被测量进行检测的方法。

在线检测与离线检测的区别是：检测工作是在被测量变化过程中进行，还是在过程之外或过程结束后进行。

在线检测，狭义上讲，是在检测量变化过程中进行的检测；广义地说，是应用各种传感器对被检测量进行实时监测，并实时地进行分析处理而获得信息，与预先设定的量进行比较，然后根据误差信号进行处理，保证检测精度或使生产过程处于最佳运行状态。

随着在线检测技术的发展对检测系统各个环节的实时性提出了更高的要求，即要求各个环节响应要快，满足实时监测的需要。

1.2.2 测量方法的选择

在选择测量方法时，要综合考虑下列主要因素：

(1) 从被测量本身的特点来考虑。被测量的性质不同，采用的测量仪器和测量方法当然不同，因此，对被测对象的情况要了解清楚。例如，被测参数是否为线性、数量级如何、对波形和频率有何要求、对测量过程的稳定性有无要求、有无抗干扰要求以及其他要求等。

(2) 从测量的精确度和灵敏度来考虑。工程测量和精密测量对这两者的要求有所不同，要注意选择仪器、仪表的准确度等级，还要选择满足测量误差要求的测量技术。如果属于精密测量，则还要按照误差理论的要求进行比较严格的数据处理。

(3) 考虑测量环境是否符合测量设备和测量技术的要求，尽量减少仪器、仪表对被测电路状态的影响。

(4) 测量方法简单可靠，测量原理科学，尽量减少原理性误差。

总之，在测量之前必须先综合考虑以上诸方面的情况，恰当选择测量仪器、仪表及设备，采用合适的测量方法和测量技术，才能较好地完成测量任务。

1.3 测量误差及处理方法

1.3.1 误差的基本概念

测量过程中，首先因为测量设备、仪表、测量对象、测量方法、测量者本身都不同程度受到本身和周围各种因素的影响，且这些影响因素也不断地变化。其次，被测量对测量系统施加作用之后，才能使测量系统给出测量结果，也就是说，测量过程一般都会改变被测对象原有的状态。因此测量结果反映的并不是被测对象的本来面貌，而只是一种近似，故测量不可避免地总存在测量误差。

1. 测量误差的名词术语

(1) 真值。真值是指一定的时间及空间条件下，某物理量体现的真实数值，即与给定的特定量定义一致的值。真值的本性是不确定的，它是客观存在的。在实际测量工作中，经常使用“约定真值”和“相对真值”。约定真值是按照国际公认的单位定义，利用科技发展的最高水平所复现的单位基准约定，真值通常以法律规定或指定；相对真值也叫实际值，是在满足规定准确度时用来代替真值使用的值。

(2) 标称值。标称值是指测量器具上标注的量值，如标准砝码上标出的 1 kg 受制造、

测量及环境条件变化的影响。标称值并不一定等于它的实际值,通常在给出标称值的同时也应给出它的误差范围或精度等级。

(3) 示值。示值是指由测量仪器给出或提供的量值,也称测量值。

(4) 精确度(精度)。精确度也称精度,是指测量结果中各种误差的综合,表示测量结果与被测量的真值之间的一致程度。精确度是一个定性的概念,它并不指误差的大小,所以不能用 $\pm 5\text{ mg}$ 、 $\leq 5\text{ mg}$ 或 5 mg 等形式来表示。精确度只是表示是否符合某个误差等级的要求,或按某个技术规范要求是否合格,或定性地说明它是高或低。定量表达则用“测量不确定度”(过去常讲的两个术语“精密度”和“正确度”在1993年第二版的《国际通用计量学基本术语》中已不再列出)。

(5) 重复性。重复性是指,在相同条件下,对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的一致性。所谓相同条件即重复条件,包括相同的测量程序、测量条件、观测人员、测量设备、地点等。

(6) 误差公理。实际测量中,由于测量设备不准确,测量方法、手段不完善,测量程序不规范及测量环境因素的影响,都会导致测量结果或多或少地偏离被测量的真值。测量结果与被测量真值之差就是测量误差,它的存在是不可避免的,也即“一切测量都具有误差,误差自始至终存在于所有科学实验的过程之中”,这就是误差公理。研究误差的目的就是寻找产生误差的原因,认识误差的规律、性质、找出减小误差的途径方法,以求获得尽可能接近真值的测量结果。

2. 测量中注意的问题

在实际测量中,对具体的测量任务只要满足一定的精度,即把测量的误差限制在允许范围之内就行了,决不要盲目追求高精度,必须清楚地知道,提高精度,减小误差是以消耗人力、财力和降低测量可靠性为代价的。一般情况下,在科学研究及科学实验中,精度是首要的;在工程实际中,稳定性是首要的,精度只要满足工艺指标范围即可。工程中的仪表应是既廉价又实用,不要盲目追求高精度。

1.3.2 误差的分类

误差的分类方法很多,下面分别从误差的来源、误差出现的规律、误差的使用条件、被测量随时间变化的速度、误差与被测量的关系和误差的表示方法等方面来介绍测量误差的分类方法。

1. 按误差的来源分类

(1) 测量装置误差。测量装置误差是指测量仪表本身及附件所引入的误差。如装置本身电气或机械性能、制造工艺不完善,仪表中所用材料的物理性能不稳定,仪表的零位偏移、刻度不准、灵敏度不足以及非线性,电桥中的标准量具、天平的法码、示波器的探极性能等。

(2) 环境误差。环境误差是指由于各种环境因素与要求条件不一致所造成的误差。如环境温度、电源电压、电磁场影响等引起的误差。

(3) 方法误差。方法误差是指由于测量方法不合理所造成的误差。在选择测量方法时,应首先研究被测量本身的性能、所需要的精度等级、具有的测量设备等因素,综合考虑后,再确定采用哪种测量方法。正确的测量方法,可以得到精确的测量结果,否则还会损坏仪

器、设备和元器件等。

(4) 理论误差。理论误差是指由于测量原理是近似的,用近似公式或近似值计算测量结果时所产生的误差。

(5) 人身误差。人身误差是指由于测量者的分辨能力、视觉疲劳、不良习惯或疏忽大意等因素引起的误差。如操作不当、读错数等。

总之,在测量工作中,对于误差的来源必须认真分析,采取相应措施,以减小误差对测量结果的影响。

2. 按误差的性质(或按误差出现的规律)分类

(1) 系统误差。系统误差是在一定的测量条件下,测量值中含有固定不变或按一定规律变化的误差。它主要由以下几个方面的因素引起:材料、零部件及工艺缺陷;环境温度、湿度、压力的变化以及其他外界干扰等。其变化规律服从某种已知的函数,它表明了一个测量结果偏离真值或实际值的程度,系统误差越小,测量就越准确,所以经常用正确度来表征系统误差的大小。

系统误差根据其变化规律又可分为恒定系统误差和变值系统误差,而变值系统误差又可分为线性系统误差、周期性系统误差和复杂规律系统误差,如图1-3所示。图中, ϵ 表示系统误差, t 表示时间。

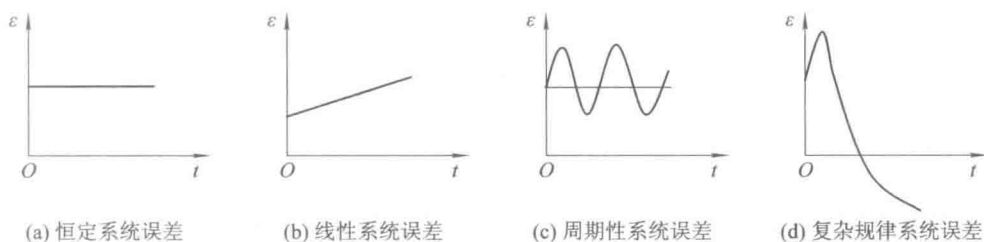


图1-3 不同类型的系统误差

恒定系统误差是指在整个测量过程中,误差的大小和符号固定不变。例如,仪器仪表的固有(基本)温差;工业仪表校验时,标准表的误差会引起被校表的恒定系统误差;仪表零点的偏高或偏低,观察者读数据的角度不正确(对模拟式仪表而言)等所引起的误差均属此类。

线性系统误差是指一种在测量过程中,随着时间的增长,误差逐渐呈线性地增大或减小的系统误差。其原因往往是由元件的老化、磨损,以及工作电池的电压或电流随使用时间的加长而缓慢降低这些因素引起的。例如,电位差计中,滑线电阻的磨损,工作电池电压随放电时间的加长而降低等,对于后者使用中要注意经常标定工作电池。

周期性系统误差是指测量过程中误差大小和符号均按一定周期变化的系统误差。例如,晶体管的 β 值随环境温度周期性变化;冷端为室温的热电偶温度计会因室温的周期性变化而产生周期性系统误差。

复杂变化规律的系统误差是指在整个测量过程中,误差的变化规律很复杂。例如微安表的指针偏转角与偏转力矩不能严格保持线性关系,而表盘仍采用均匀刻度所产生的误差等。

(2) 随机误差。随机误差也称为偶然误差,是指在同一条件下对同一被测量进行多次重复测量时所产生的绝对值和符号变化没有规律、时大时小、时正时负的误差。随机误差是由很多复杂因素的微小变化的总和所引起的,其变化规律未知,因此分析起来比较困