



普通高等教育“十二五”规划教材



检测与转换技术

(第二版)

董爱华 主 编

李 良 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

检测与转换技术

(第二版)

主 编 董爱华
副主编 李 良
编 写 余琼芳 苏 波 吕 辉
 曾志辉 仝兆景 杨 艺
主 审 马宏忠



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共分13章，主要内容包括检测技术基础、参数检测、检测信号的处理、传感器的特性、电阻式传感器、压电式传感器、电感式传感器、电容式传感器、磁电式传感器、热电式传感器、光电式传感器、新型传感器、现代检测系统。本书内容突出教材的基础性、实用性和先进性；内容丰富全面，涵盖了检测技术与系统必要的知识与应用，以及现代传感器技术的最新进展。

本书主要作为普通高等学校自动化类、电气类、电子信息类、机械类、仪器仪表类等相关专业的教学用书，也可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

检测与转换技术/董爱华主编. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2014. 12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-6319-9

I. ①检… II. ①董… III. ①自动检测-高等学校-教材②传感器-高等学校-教材 IV. ①TP274②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 187636 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007年12月第一版

2014年12月第二版 2014年12月北京第五次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 20.5印张 502千字

定价 41.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

检测与转换技术已成为普通高等院校工科学生的必修的科学基础课和工程基础课。为适应高等工科学校检测技术类课程教学的需要,2007年我们编写出版了普通高等教育“十一五”规划教材《检测与转换技术》,该书不仅适用于自动化、电气类、电子信息类专业,也适用于机械类、仪器仪表类等非电气信息类专业。由于新材料、检测方法的出现,需要对本书内容进行更新和充实;同时经过近几年的使用,发现本教材中有些内容需要进行修改、完善。为此,在第一版教材的基础上经过优化整合、修订成了第二版。

本教材分为基础知识、基本传感器和新型传感器与现代检测系统三个部分。其中,基础知识部分对测量误差分析进行了补充或充实,增加了例题及习题;基本传感器部分改动较多,首先根据内容的难易程度,将磁电式传感器与光电式传感器进行了顺序调换,为增强教材内容的系统性,将光栅传感器和CCD图像传感器的内容调整到新型传感器中,各章中充实或更新了应用实例,部分章节增加了例题和习题;新型传感器与现代检测系统部分也进行了相应充实和更新。同时,本次修订还对原教材中重复性内容进行修改和整合;为了增强实用性,附录中增加了常用热电阻、常用热电偶的分度表。

本教材由河南理工大学的老师担任修订工作。董爱华教授为主编,李良老师为副主编。其中,绪论部分和第1章、第6章由董爱华执笔;第2章和第4章由李良执笔;第3章和第8章由苏波执笔;第5章、第9章由余琼芳执笔;第7章和第12章由吕辉执笔;第10章由曾志辉执笔;第11章由杨艺执笔;第13章由仝兆景执笔。

在本书的编写中参考了一些文献,在此对有关文献的作者致以谢意!

限于编者水平,书中疏漏之处在所难免,恳求读者指正。

编 者

2014年8月

第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

检测与转换技术作为信息科学的重要分支,与计算机技术、自动控制技术和通信技术 etc 一起构成了信息技术的完整学科。由检测与转换技术支撑的现代检测系统、科学仪器和测量仪表在我国的信息产业中发挥着越来越重要的作用。检测与转换技术也已成为高等工科学生必要的科学基础和工程基础。为适应高等工科学学校检测技术类课程教学的需要,我们对现有教材进行了分析总结,在借鉴和汲取同类教材优点的基础上,编写完成了这本《检测与转换技术》教材。

本书分为基础知识、基本传感器、新型传感器与现代检测系统三个部分。在编写过程中,我们力求突出教材的基础性、实用性和先进性。其目的是让工科大学生既掌握检测技术与系统必要的知识与应用,又了解现代传感器技术的新进展。

本书由河南理工大学电气工程与自动化学院教师担任编写工作,董爱华教授为主编,李良老师为副主编。书中绪论部分和第1章由董爱华编写;第2章和第4章由李良编写;第7章和第8章由苏波编写;第5章和第9章由余琼芳编写;第6章由曾志辉和郑煤集团谢东力共同编写;第3章和第12章由吕辉编写;第10章由刘群坡编写;第11章由曾志辉编写;第13章由全兆景编写。

本书由河海大学的马宏忠教授主审。在本书的编写过程中还参考了一些文献。在此对马宏忠教授和有关文献的作者一并致谢。

由于编者的水平有限,书中不妥、错漏之处在所难免,恳切希望广大读者指正。

编者

2007年3月

目 录

前言	
第一版前言	
绪论	1
第1章 检测技术基础	4
1.1 检测的基本概念及方法	4
1.2 检测误差及分类	6
1.3 检测系统的组成	12
思考题与习题	15
第2章 参数检测	16
2.1 概述	16
2.2 温度的检测	18
2.3 压力的检测	26
2.4 流量的检测	29
2.5 物位的检测	33
2.6 机械量的检测	35
2.7 物质成分的分析与检测	40
思考题与习题	43
第3章 检测信号的处理	44
3.1 电桥	45
3.2 放大器	53
3.3 滤波器	59
3.4 信号转换电路	66
3.5 非线性特性的线性化	68
思考题与习题	72
第4章 传感器的特性	74
4.1 传感器的定义、组成与分类	74
4.2 传感器的静态特性	75
4.3 传感器的动态特性	79
思考题与习题	86
第5章 电阻式传感器	87
5.1 电位器式电阻传感器	87
5.2 应变片式电阻传感器	95
5.3 电阻应变传感器的应用	109
思考题与习题	118

第 6 章 压电式传感器	120
6.1 压电效应	120
6.2 压电材料	124
6.3 等效电路	127
6.4 测量电路	128
6.5 压电式传感器的应用	131
思考题与习题.....	134
第 7 章 电感式传感器	136
7.1 自感式传感器	136
7.2 变压器式传感器	142
7.3 涡流式传感器	146
7.4 感应同步器	150
7.5 电感式传感器的应用	152
思考题与习题.....	160
第 8 章 电容式传感器	161
8.1 电容式传感器的工作原理及类型	161
8.2 电容式传感器的等效电路	164
8.3 电容式传感器的信号转换电路	165
8.4 电容式传感器的应用	168
思考题与习题.....	171
第 9 章 磁电式传感器	172
9.1 磁电感应式传感器	172
9.2 霍尔式传感器	176
9.3 磁电式传感器的应用	186
思考题与习题.....	189
第 10 章 热电式传感器	190
10.1 热电阻传感器.....	190
10.2 热电偶传感器.....	200
10.3 热电式传感器的应用.....	211
思考题与习题.....	217
第 11 章 光电式传感器	218
11.1 光电效应.....	218
11.2 主要光电器件及其特点.....	220
11.3 光栅式传感器.....	227
11.4 光电编码器.....	232
11.5 光电式传感器的应用.....	236
思考题与习题.....	241
第 12 章 新型传感器	242
12.1 生物传感器.....	242

12.2	微波传感器	249
12.3	超声波传感器	254
12.4	光纤传感器	261
12.5	CCD 图像传感器	269
12.6	机器人传感器	276
12.7	智能传感器	283
	思考题与习题	287
第 13 章	现代检测系统	288
13.1	现代检测系统的基本组成	288
13.2	现代检测系统的设计	290
13.3	总线技术	296
13.4	虚拟仪器	299
13.5	计算机检测系统设计实例	304
	思考题与习题	307
附录		309
附录 1	常用热电阻分度表	309
附录 2	常用热电偶分度表	311
参考文献		319

绪 论

1. 检测与转换技术的基本概念

检测与测量含义基本相同,国家标准中对测量一词的定义为:“测量是指以确定被测对象属性和量值为目的的全部操作,以电子技术、计算机技术为基础对各种电量和非电量的检测,是人们从事工农业生产、科学实验和科学发明的重要手段。”

转换是利用敏感器件或电路将被测参数由一种量变换为另一种量的过程。它可以将被测参数的非电量变换为电量,以便于测量;也可以将被测量的大小进行变换,以提高测量精度;也还可以将一种物理量变换为另一种物理量,以满足测量或控制的要求。

检测与转换技术包括自动检测技术和自动转换技术,是科学地认知客观事物的手段,也是信息技术的重要组成部分。只有通过检测人们才能够定量地表述某个生产过程或运动对象,才能进行比较和判断,进而对生产过程或运动对象进行有效的管理和控制。检测与转换技术是以研究自动检测系统中的信息提取、信息转换以及信息处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。信息提取是检测与转换的基础,指从自然界、社会、生产过程中或科学实验中获取人们需要信息的过程。信息处理是检测与转换中的重要环节,它借助专门的设备、仪器和系统,将获得的物理量进行显示、输出,或者将得到的信息进行加工、运算、分析或综合,以便进行故障诊断、报警、检测、计量、保护、控制、调度和管理等,以达到预防自然灾害、防止事故发生、改善产品质量、提高生产的自动化水平、降低劳动强度、顺利完成科学实验、进行文明生产和科学管理等目的。

2. 检测与转换技术的应用

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,而自动化水平是用检测与转换仪表以及传感器的种类和数量多少来衡量的。一个完整的检测与转换过程一般包括信息的提取、信号的分析与转换、数据的存储与传输、显示或打印。

检测与转换技术应用领域十分广泛,在工农业生产、科学研究、医疗卫生、交通运输和经济贸易等方面起着重要作用。就是在日常生活中,检测与转换技术也在不知不觉中发挥着作用。例如:电冰箱的温度调节离不开对温度的检测;家庭用电、用水和用气的多少,则要通过电表、水表和煤气表对电量、水流量和气流量进行检测;医生对病人进行诊断时,常常要测量病人的体温和血压等。这些简单实例中都渗透着检测与转换技术。

在科学技术与社会生产高度发达的今天,要求与之适应的检测与转换仪器或系统虽然错综复杂,被测对象的跨度既广泛又具多样性,但是归纳起来主要是:

- (1) 能够测量多种参量,既有电量,又有非电量;
- (2) 具有多个输入通道,既可进行定点测量,又可进行多点测量;
- (3) 能够进行快速动态在线实时测量,因为绝大多数的被测信号是随时间变化的动态信号;
- (4) 能够实时快速进行信号分析处理,排除噪声干扰、消除偶然误差、修正系统误差,

从而实现测量结果的精度以及具有对被测信号的高分辨能力。

据有关资料统计,在现代工程装备中,检测环节的投入已达到装备系统总成本的60%左右。检测技术已成为保证装备实际性能指标和正常工作的重要手段,科学上的重大发现,往往是通过新的检测手段来完成的。在科学技术迅速发展的今天,对检测与转换仪器或系统有着更高层次的要求。可以说,大到天体观测、遥感遥测、气象预报、地质探测、找矿,小到物质成分分析、晶体结构测定、原子核结构研究等都离不开检测技术。从军事用途的电子侦查、雷达等到民用的工业过程参数测控和医用断层扫描(CT),无一不是现代检测与转换技术手段的体现。随着微电子技术和计算机技术的不断发展,检测与转换技术将在各个领域发挥越来越重要的作用。

3. 检测与转换仪表的发展

检测与转换技术的发展伴随着仪器仪表(或系统)的发展,而仪器仪表(或系统)的发展可归纳为以下阶段。

第一代检测与转换测试仪表。它是以电磁感应基本定律为基础的模拟指针式仪表,主要特点是结构简单,功能单一,检测精度低,读数不方便,且体积大,响应速度慢,开放性差。典型的模拟式仪表包括指针式电压表、电流表、功率表和一些通用的磁电式测试仪表等。

第二代检测与转换测试仪表。它是以电子管或晶体管为基础的分立元件式仪表或系统。当20世纪50年代出现了电子管、60年代出现晶体管时,检测与转换仪器也进入了电子时代,其主要特点是功能较完善,但精度低,响应速度慢。

第三代检测与转换仪表。它是以集成电路芯片为基础的数字式仪表或系统。20世纪70年代集成电路的出现,推动了检测与转换技术的前进与发展,使检测与转换仪表具有A/D转换电路,能将被测的模拟信号转换成数字信号,检测结果以数字形式输出显示。其主要特点是检测精度高,速度快,读数与显示清晰、直观,结果可打印,同时数字信号便于远距离传输。

第四代检测与转换仪表。它是智能式仪表或系统。20世纪80年代,随着微电子技术的发展、微处理器的普及和智能控制理论的出现,使检测与转换技术又向前推进了一大步。其主要特点是具有数据存储、运算、逻辑判断、自选量程、自动校正、自动补偿、自寻故障等功能以及检测精度高、操作使用方便等优点。智能式仪表或系统是以自动化和智能化为标志的,近几十年以来,现代空间技术、导航、卫星通信、计算机技术、集成电路等科学技术的新领域和新发展对电子测量技术提出了很多新要求:精度高、速度快;能自动进行数据处理、显示、存储、传输;能多点综合测量;能自动控制测量过程等;信息论、控制论、误差理论、电子技术、计算机技术、传感器技术、信号处理技术和集成电路技术的普及、应用和各学科相互渗透也为现代检测技术奠定了基础。计算技术的发展和广泛应用,适合测量技术的语言和标准接口与通信技术的进步,特别是大规模集成电路,尤其是微机的出现,大大促进了现代检测技术的发展。随着微电子技术与计算机技术的飞速发展,测试技术与计算机深层次的结合又引起了测试仪器领域的一场新的革命。一种全新的仪器结构概念导致新一代仪器或系统——虚拟仪器的出现,进而产生集成仪器和系统,由单台仪器子系统向多台仪器组成的大的测试系统方向发展。

目前,检测与转换仪表正朝着以下方向发展。

(1) 微型化。由于微电子技术、微机械技术、信息技术综合应用,使智能仪器的体积大大减小,而功能更全。

(2) 多功能化。单个检测仪表(仪器)具有两个以上或更多的功能,实现一表多用,一表多能,为检测仪表(仪器)的应用带来极大的方便。

(3) 高智能化。智能化是计算机应用的一个崭新领域,检测技术利用计算机模拟人的智力,用于机器人、医疗诊断、专家系统等方面。高智能化仪器可代替人的一部分脑力劳动,在视觉(图形及色彩辨识)、听觉(语音识别及语言领悟)、思维(推理、判定、学习与联想)等方面具有一定的能力。

(4) 网络化。网络化是指利用通信技术和计算机技术,把分布在不同地点的计算机、各类电子终端设备、检测系统互联起来,按照一定的网络协议相互通信,以达到资源(软件、硬件和数据)共享的目的。最典型的应用是物联网(Internet of Things),它是互联网的延伸或扩展,主要由感知层、网络层、系统层、应用层组成。它将传感器、移动终端、工业系统、楼控系统、家庭智能设施、视频监控系统等末端设备(Devices)和设施(Facilities)通过无线或有线、长距离或短距离通信网络方式实现互联互通,在互联网(Internet)或专网(Extranet)环境下,采用必要的信息安全保障机制,提供安全、可靠的实时在线监测、定位追踪、报警联动、调度指挥、预案管理、远程控制、安全防范、在线升级、统计报表、决策支持等管理和服务功能,实现对“万物”的“高效、安全、环保”的“管、控、营”一体化。

4. 本课程的目的、任务和学习方法

检测与转换技术应用的领域广,覆盖的知识范围宽,涉及物理学、电工学、电子学和计算机技术等诸多学科。因此检测与转换技术是高等学校电类各专业的一门综合性和实用性都很强的专业基础课(或专业课),对培养学生的创新思维能力和实际动手能力具有重要的作用。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,为今后从事工程技术工作和科学研究工作打下必要的基础。

为了学好这门课程,首先要具有正确的学习目的和态度,还要有刻苦学习的精神和正确的学习方法。现就学习本课程的几个教学环节提出应注意的事项,以供参考。

(1) 学习时要抓住物理概念、检测与转换电路的基本结构和原理、各种传感器的应用场合和选用方法;在此基础上,还要注意各部分内容之间的联系,前后是如何呼应的,重在理解,积极思考,在教师的指导下,培养自学能力。

(2) 重视实验环节,通过实验巩固所学基本知识、培养和训练实验技能、培养科学作风。实验是学习本课程的一个重要环节,实验前最好要认真准备,实验时要积极思考,实验后要认真总结,力求掌握规律性的东西。

(3) 联系实际,多看参考书,力求做到举一反三。

设立本课程的目的旨在培养学生具有以下能力:

(1) 具有选择测量仪表及传感器的能力;

(2) 具有正确设计、组建一般测试系统的能力;

(3) 对一般测试系统中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,老师在考虑修课的同时,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对自己上述能力的培养。

第1章 检测技术基础

1.1 检测的基本概念及方法

1.1.1 检测的基本概念

检测是人们借助于专门设备,通过一定的技术手段和方法,对被测对象收集信息、取得数量概念的过程。它是一个比较过程,即将被检测对象与它同性质的标准量进行比较,获得被检测量为标准量的若干倍的数量概念。

检测是一个过程,包括比较、平衡、误差和读数,这一过程的核心是比较。此外,检测还必须进行一定的变换。因为人们的感官能直接给出定量概念的被检测量不多,绝大多数的被检测量都要变换为某一个中间变量,然后才能给出定量的概念。例如,人的感官对温度只能给出定性的冷与暖的感觉,而要想得出定量的温度,则需要利用物质热胀冷缩的原理,把温度变换为中间变量(如长度),然后进行比较和测量。因此,变换是实现检测的必要手段和有效途径。再如,在自动检测控制系统中,多数被检测量是模拟量,通常需要将其转换成数字量,才能送到计算机中进行数据处理。因此,必须用传感器将模拟量变换成为标准电量(如电压或电流),再经A/D转换器送入计算机中进行分析处理。

检测的目的就是求取被检测量的真值。所谓真值是指在一定的客观条件下,某物理量确切存在的真实值。但是,真值是永远无法获得的,因为在检测中会不可避免地产生各种误差,这些误差是由于测量设备、测量方法和手段以及检测者本身因素的影响且是无法克服的影响造成的。

例如,在检测温度时,热量可以通过温度传感器从被测物体上传导出来,这将导致温度的下降。因此,检测结果并未反映出被测对象的真实面貌,而仅仅是一种近似值。

1.1.2 检测方法

检测方法是实施检测所采用的具体手段。检测方法不仅对完成检测任务非常重要,而且还影响到检测的数据精度,甚至还影响到检测结果的可信度。因此,需要针对不同的检测任务,进行认真而具体地分析,采取切实可行的检测方法并选择适当的检测仪器设备。如果检测方法不当,即使选择再先进的检测仪器设备,也不能得到满意的检测结果。

检测方法很多,可按不同的方法分类。

1. 按检测过程分类

根据检测过程,检测方法可分为直接法、间接法和联立法。

(1) 直接法。在使用仪表进行检测时,对仪表的读数不需要经过任何运算,就能得到所需要的检测结果,这种方法称为直接法。例如,用磁电式电流表检测电路中的电流,用弹簧管式压力表检测流体压力等。直接法的特点是操作简单、检测方便,但检测精度不易达到很高。目前,这种方法被广泛应用于工程检测上。

(2) 间接法。在使用仪表进行检测时,首先对与被测量有确定关系的几个量进行检测,然后将检测量的值代入已知的函数关系式中,经过计算得到所需要的结果,这种方法称为间接法。间接法需要的检测手续较多,花费的检测时间较长,但往往能得到较高的检测精度。

这种方法多用于科学实验中的实验室检测，工程检测中也有应用。

(3) 联立法。在应用仪表进行检测时，先检测出若干个中间量，再经过联立方程组求解后才能得到所需要的结果，这种方法称为联立法，又称组合法。在进行联立测量时，一般需要改变测试条件，才能得到联立方程组所需要的数据。联立法的操作过程复杂、花费时间较长，但它是一种特殊的精密检测方法，多用于某些科学试验或某些特殊的场合。

2. 按检测方式分类

根据获取数据的方式，检测可分为偏差式、零位式和微差式。

(1) 偏差式。在检测过程中，用仪表指针的位移（即偏差）确定被测物理量数值的方法称为偏差式检测法。这种检测方法的标准量具不在仪表内，而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准。当对被测量进行检测时，按照仪表指针在刻度上的示值来确定被测量的数值。它是以直接方式实现被测量与标准量的比较，检测过程比较简单、迅速，但检测结果的精度比较低。这种方法在工程检测中应用较为广泛。

(2) 零位式。在检测过程中，用指零仪表的零位指示检测系统的平衡状态，当检测系统达到平衡时，用已知的基准量确定被测未知量的方法，称为零位式检测法又称补偿式检测法或平衡式检测法。应用这种方法进行检测时，标准量具放在仪表内，在测量过程中，标准量与被测量进行比较；调整标准量直到被测量与标准量相等，使指针仪表回零。例如，用平衡电桥测量电阻、电容、电感等就是典型的应用实例。零位式检测法的特点是检测精度高，但检测过程比较复杂，需要进行平衡操作，花费时间较长；采用自动平衡操作，可加快检测过程，但由于受工作原理的限制，反应速度不会很高。因此这种方法适用于缓慢变化信号的检测。

(3) 微差式。这种方法是综合了偏差式与零位式的优点而提出的检测方法。它将被测量与已知的标准量进行比较，并取得差值后，用偏差法测得此差值。应用这种方法进行检测时，标准量具放在仪表内，并且在检测过程中，标准量直接与被测量进行比较，由于二者的值很接近，因此，检测过程不需要调整标准量，而只需要检测二者的差值。

设 N 为标准量， x 为被测量， Δ 为二者之差，则 $x = N + \Delta$ ，即被测量为标准量与偏差值之和。由于 N 是标准量，其误差很小，即 $\Delta \ll N$ ，因此，可选用高灵敏度的偏差式仪表测量差值 Δ ，即使检测 Δ 的精度很低，但由于 $\Delta \ll x$ ，故总的检测精度较高。

微差式检测法具有反应速度快且检测精度高的特点，特别适用于在线控制参数的检测。

3. 按接触关系分类

根据检测敏感元件与被测介质的接触关系，检测方法可分为接触式和非接触式两种。

(1) 接触式。接触式检测法是将仪表的敏感元件与被测对象相接触。敏感元件从被测对象得到能量或被带动产生运动，使得敏感元件产生转换作用。如用热电偶、电感式测厚仪进行检测都是接触式检测。接触式检测法可用于静态或运动速度缓慢的物质参数检测。

(2) 非接触式。非接触式检测法的敏感元件与被测对象之间无机械接触，当被测参数（如 X 射线测厚仪中 X 射线强度随厚度衰减）变化或被测物体的能量变化（如红外测温仪中仪表接收的红外线随被测温度变化）时，检测仪表辐射能量随之变化，根据仪表辐射能量变化的大小检测出被测物理量的值。这种方法适用于高速运动或环境恶劣场合的检测。

4. 按被测量的变化快慢分类

根据被测量的变化快慢,可分为静态检测和动态检测两类。

(1) 静态检测。被测信号相对于仪表的动态特性变化缓慢,这种检测称为静态检测。静态检测系统的输入输出关系可用代数方程描述,其输出的检测结果是一个稳定值(或恒定值)。这种检测系统的相应速度远快于被测信号的变化速度。它适用于被测值不变化(如成品的尺寸)或变化缓慢(如室内温度)信号的检测。

(2) 动态检测。对于变化速度快或需要观察变化过程的被测信号,为了保证结果真实可靠,需要检测系统具有足够的快速反应能力。被测信号和检测系统的输入输出关系一般都需要用含时间变量的微分方程描述;为保证被测量具有足够的精度(在允许的误差范围内),采样周期必然很短,即需要快速采样。只有满足这种要求的检测系统,才能实时地检测出被测信号的变化情况,这种检测称为动态检测。为了实现动态检测,除了敏感元件具有快速转换功能外,信号变换电路的动态响应也要好,同时还应有快速记录、记忆器件。

5. 按检测系统是否施加能量分类

根据检测系统是否需要向被测对象施加能量,检测系统可分为主动式和被动式两类。

(1) 主动式。在检测过程中,主动式检测需要外加辅助能源。因为检测系统的输出信号的强弱(大小),除了反映被测量的大小以外,还依赖于辅助能源的大小;检测系统施加的能量会影响信号大小,故称其为主动式。例如:用霍尔元件检测磁场强度 B ,需要外加一个稳定的电流 I ;霍尔电动势 $E_H = KBI$,其中, K 为霍尔元件灵敏度, E_H 除了正比于被测量 B 以外,还与辅助电流 I 有关。

(2) 被动式。在检测过程中,检测系统的输出只与被测量有关,即只从被测对象中获取能量,不需要加入辅助能源,故称其为被动式检测。如用热电偶检测温度,热电偶只从被测温度场中获取热能,并通过热电效应转换为热电动势,热电动势是温度的单值函数,而没有其他辅助能量成分。

1.2 检测误差及分类

检测结果偏离真值的大小可用检测误差来衡量。检测误差的大小反映了检测结果的好坏,即检测精度的高低。讨论检测误差的目的就是要研究误差产生的原因,认识误差的性质和特点,以便制定合理的检测方案,科学组织实验,正确选择检测方法和测量仪器设备,采取有效措施减小误差,提高检测的精度,保证产品或研究课题的质量。

1.2.1 测量误差的来源

显然,误差是各种因素综合作用的结果。测量误差的来源主要有四个方面。

1. 理论误差与方法误差

由于测量时依据的理论不严密或使用了不适当的简化,用近似公式或以近似值计算测量结果时所引起的误差,称为理论误差。由于测量方法不合适所造成的误差,称为方法误差。例如,用普通万用表测量高内阻回路的电压,由万用表输入电阻所引起的误差。有时也将理论误差和方法误差合称为理论误差或方法误差。

2. 仪器误差

由于仪器本身及其附件的电气、机械性能等不完善所造成的误差,称为仪器误差。例

如,由于刻度不准确、调节机构不完善等原因所造成的读数误差,内部噪声引起的误差,由于元件老化、环境改变等原因造成的稳定性误差都属于仪器误差。在测量中,仪器的误差往往是主要误差。

3. 影响误差

由于各种环境因素与要求的条件不一致所造成的误差称为影响误差,也称为环境误差。例如,测量过程中,由于温度、湿度、电源电压、电磁场、大气压强等因素所引起的误差都是影响误差。

4. 人为误差

由于测量者的分辨能力、视觉疲劳、反应速度等生理因素,以及固有习惯和缺乏责任心等心理因素引起的误差称为人为误差。例如,看错刻度、读错数据、使用或操作不当所造成的误差都是人为误差。

任何测量都是与环境条件相关的,这些环境条件包括环境温度、相对湿度、电源电压和安装方式等。应用仪表按规定的环境条件(即参比工作条件)进行测量,此时产生的误差称为基本误差。如果在非参比工作条件下进行测量,测量误差除包含基本误差外,还包含附加误差。因此误差通常由基本误差和附加误差两部分组成。

1.2.2 检测误差的表示方法

造成检测误差的原因是多方面的,误差的表示方法也有多种。误差常用绝对误差和相对误差来表示。

1. 绝对误差

仪表指示装置所显示的被测量的值称为示值,它是被测真值的反映。严格地说,真值只是一个理论值,无论采用何种仪表测到的值都有误差。实际中常用适当精度的仪表测出的或用特定的方法确定的约定真值代替真值。所谓约定真值,是由国际计量委员会定义的、用当今最先进科学技术复现的、并被公认为国际或国家基准的值。例如,使用国家标准计量机构标定过的标准仪表进行测量,其检测值即可作为约定真值。

绝对误差 Δx 就是示值 x 与公认的约定真值 A_0 之差,即

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-1)$$

绝对误差通常可简称为误差。当误差为正时表示仪表的示值偏大,反之偏小。

2. 相对误差

有时绝对误差不足以反映检测值偏离真值的程度,为了说明检测精确度的高低,通常引入相对误差这一概念。

检测仪表测量值(即示值)的绝对误差 Δx 与被检测实际值(即真值) A_0 的比值,称为检测仪表的相对误差,用百分数表示,即

$$\delta = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% = \frac{x - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

这里的真值可以是约定真值或相对真值。用高一等级检测仪表测量同一被测量,所得到的结果误差较小,则把高一等级检测仪表的测量值称为相对真值。

通常用相对误差比用绝对误差更能说明检测结果的精确程度,一般来说,相对误差小,则检测精度高,反之,检测精度低。

3. 引用误差

检测仪器表示值的绝对误差 Δx 与仪表量程 L 的比值, 称为检测仪器的引用误差, 用百分数表示, 即

$$\lambda = \frac{\Delta x}{L} \times 100\% \quad (1-3)$$

在检测仪器仪表的量程范围内, 各示值的绝对误差也各不相同。通常把检测仪器仪表在其量程内的最大绝对误差 Δx_{\max} 与仪器仪表量程之比称为最大引用误差, 即

$$\lambda_m = \frac{\Delta x_{\max}}{L} \times 100\% \quad (1-4)$$

检测仪器仪表在出厂检验时, 规定其示值的最大引用误差 λ_m 和不超过其允许误差 Q , 即

$$\lambda_m = \frac{\Delta x_{\max}}{L} \leq Q \quad (1-5)$$

通常以允许误差 Q 作为衡量检测仪器仪表精度等级的尺度。检测仪器仪表精度等级用符号 G 表示, 它与允许误差 Q 之间的关系为

$$G = Q \times 100 \quad (1-6)$$

我国电工仪表的精度等级共分七级, 根据 GB 776—1976《电测量指示仪表通用技术条件》规定, 电测仪表的精度等级见表 1-1。

表 1-1 电测仪表精度等级

精度等级 G	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
允许误差 Q	0.1%	0.2%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%	5.0%

精度等级为 G 的检测仪器仪表在规定条件下正常使用时, 它的绝对误差的最大值的范围是

$$\Delta x_{\max} = \pm G\% \times L \quad (1-7)$$

例如, 精度等级为 1.0 的仪表, 其允许误差 $Q = \pm 1\%$, 即允许误差的变化范围为 $-1\% \sim +1\%$ 。它的绝对误差的最大值 $\Delta x_{\max} = \pm 1\% \times L$, 当测量量程为 100V 时, $\Delta x_{\max} = \pm 1\% \times 100 = \pm 1V$; 当测量量程为 750V 时, $\Delta x_{\max} = \pm 1\% \times 750 = \pm 7.5V$ 。即在仪表的精度等级一定的情况下, 绝对误差的最大值与测量量程有关。

【例 1-1】 一个满度值为 750V 的 1.0 级电压表, 若在 200V 刻度处的绝对误差最大, 其值为 +10V, 试判别该电压表的精度是否合格。

解 (1) 方法一, 根据最大引用误差判别。由式 (1-5) 可求得电压表的最大引用误差为

$$\lambda_m = \frac{\Delta x_{\max}}{L} \times 100\% = \frac{10}{750} \times 100\% = 1.33\%$$

测量时的最大引用误差 1.33% 大于该电压表的允许误差 1.0%, 不合格。

(2) 方法二, 根据绝对误差的最大值的范围判别。由式 (1-7) 可求得电压表的绝对误差的最大值的范围是

$$\Delta x_{\max} = \pm G\% \times L = \pm 1\% \times 750 = \pm 7.5(V)$$

测量时的绝对误差 +10V 超过该电压表绝对误差的最大值的范围 $\pm 7.5V$, 因此不合格。

【例 1-2】 如果需要测量约为 200V 的电压, 现有电压量程为 300V、1.0 级和电压量程为 750V、0.5 级电压表两块, 试分析这两块电压表的测量精度。

解 使用量程为 300V、1.0 级的电压表, 根据式 (1-2) 可计算出其示值的相对误差为

$$\delta \leq \frac{300 \times 1.0\%}{200} \times 100\% = 1.5\%$$

使用量程为 750V、0.5 级的电压表, 根据式 (1-3) 可计算出其示值的相对误差为

$$\delta \leq \frac{750 \times 0.5\%}{200} \times 100\% = 1.875\%$$

通过计算可知, 量程为 300V、1.0 级的电压表测量的相对误差小, 测量精度高, 量程为 750V、0.5 级相对误差大, 测量精度低。可见, 由于仪表量程的不同, 选用高等级仪表的测量精度并不一定高, 关键的是要选择合适的仪表量程。

1.2.3 检测误差的分类

根据检测误差的性质和特点, 可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

相同的条件下, 多次测量同一量值时, 误差的绝对值和符号保持不变, 或测量条件改变时按一定规律变化的误差, 称为系统误差。系统误差产生的原因很多, 在实际应用中, 可以归结为误差来源的各种因素中。

系统误差的特点是: 它遵循一定的规律。检测条件一经确定, 误差为一确定的量值, 使用多次求平均值的方法并不能改变系统误差的大小。

系统误差按其遵循的规律的不同, 可分为恒值系统误差和变值系统误差。不因检测条件的变化而改变的系统误差为恒值系统误差; 随检测条件的变化而变化的系统误差为变值系统误差。

如果对某被测量进行等精度独立检测结果为: x_1, x_2, \dots, x_n , 则检测结果的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-8)$$

式中, \bar{x} 又称为取样平均值。

当检测次数 n 趋向于无穷大 ($n \rightarrow \infty$) 时, 取样平均值的极限称为检测值的总体平均值, 通常用符号 A 表示, 即

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-9)$$

我国制定的计量技术规范《通用计量术语及定义》(JJF 1001—2011) 中, 给出的系统误差定义是: 在相同检测条件下, 对同一类被检测进行无限多次重复检测所得结果的总体平均值 A 与被测量真值 A_0 之差被定义为系统误差, 用符号 ϵ 表示, 即

$$\epsilon = A - A_0 \quad (1-10)$$

系统误差表示了检测结果偏离真值或实际值的程度, 可反映检测结果准确度的高低。系统误差越小, 检测值越接近真值, 检测结果越准确。

2. 随机误差

相同的条件下, 多次检测同一量值时, 绝对值和符号均以不可预定的方式变化的误差称为随机误差, 又称为偶然误差。