

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



检测技术及仪表

JIANCEJISHU JI YIBIAO

王建国 主 编
刘彦臣 全卫国 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



检测技术及仪表

JIANCEJISHU JI YIBIAO

主 编 王建国
副主编 刘彦臣 仝卫国
编 写 沈继忱 陈立军 张玉财
主 审 韩 璞



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分为八章，主要内容包括基础知识、温度测量、压力和差压测量、机械量测量、流量测量、物位测量、成分分析和检测新技术等。

本书内容选材新颖实用，体系结构严谨合理，强调实践创新环节，将近几年出现的检测新技术作为独立的一章编写，有助于读者了解自动化学科的发展动态。

本书可作为高等学校自动化及相关专业的本科教材，也可作为高职高专和函授教材，同时可供从事自动化仪器仪表研究领域的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

检测技术及仪表/王建国主编. —北京: 中国电力出版社, 2007

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-6026-3

I. 检… II. 王… III. 检测仪表—高等学校—教材 IV. TH89

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 130731 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 402 千字

印数 0001—3000 册 定价 26.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

检测技术及仪表是现代信息链的源头技术,是新技术革命的关键和基础。对检测技术的需求蕴含在人类生产和生活的各个方面,如长短、快慢、轻重、冷热、亮暗、浓淡等。就其地位而言,仪器仪表工业是国民经济的“倍增器”,是科学研究的“催化剂”,是国防军事的“战斗力”,是与科学技术的发展相互制约、相互促进的重要学科。检测技术及仪表是一个集光、机、电于一体,综合物理、化学、生物、材料、电子、计算机等多学科技术的高新技术研究领域,是自动化学科的重要组成部分。

针对“应用技术主导型”普通工科高等教育的特点,为满足大专院校培养“工程应用型创新人才”的迫切需要,全书在编写过程中力求突出以下特点:

(1) 内容选材体现新颖实用:内容选材不追求面面俱到而是紧密结合工业生产过程的实际需要,符合最新的规范及标准,注重内容的新颖性和实用性,实例分析以电力生产过程为重点,兼顾其他工业过程。

(2) 体系结构力求严谨合理:全书以温度量、压力及差压量、机械量、流量、物位量、成分量等参数为单元分别介绍,并给出了本领域最新的检测技术内容介绍。在逻辑上尽可能从物理现象出发逐步揭示参数的本质,通过理论探讨推测可能的检测方法,通过列举典型的工程需求启发学生创新意识。配合一定量的实践环节可达到以用促学、学以致用的目标。

(3) 知识传授重视实践创新:实践过程是主观思维与客观世界的相互碰撞过程,是迸发创新火花的最好时机,因此在传授知识的过程中,提供一定数量的思考题。教学过程中需通过研讨、设计和实验环节,将科学研究、工程实际紧密融合,达到传授知识、培养能力和建立工程思维模式几方面同步实现的目标。

参加本书编写的有东北电力大学王建国教授(第1、2章)、张玉财副教授(第3、5章)、刘彦臣高级实验师(第4章)、陈立军副教授(第6章及附录)、沈继忱副教授(第7章)和华北电力大学的全卫国副教授(第8章)。全书由王建国担任主编,全卫国、刘彦臣担任副主编,由华北电力大学韩璞教授主审。韩璞教授仔细审阅了全稿并提出了细致的修改意见。编写过程中参阅了大量相关教材、文献及网络资料,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中错漏与不妥之处在所难免,欢迎读者批评、指正,以利改正。

编者

2007年7月



目 录

前言	1
第1章 基础知识	1
1.1 检测技术及仪表概述	1
1.2 电厂热工检测技术及仪表	6
1.3 典型仪表控制系统组成	8
1.4 测量的相关概念	9
1.5 仪表的组成及其性能指标	14
思考及练习题	28
第2章 温度测量	29
2.1 温标与测温方法	29
2.2 膨胀式与压力式温度计	31
2.3 热电偶温度计	36
2.4 热电阻温度计	49
2.5 接触式测温误差及对策	53
2.6 非接触式测温	57
2.7 新型温度传感器	63
思考及练习题	73
第3章 压力和差压测量	75
3.1 压力和差压的基本概念	75
3.2 液柱式压力计	76
3.3 弹性元件及弹性压力表	78
3.4 压阻、压电式压力计	81
3.5 压力计的选择、安装和校准	82
思考及练习题	85
第4章 机械量测量	86
4.1 概述	86
4.2 位移测量	86
4.3 转速测量	107
4.4 振动和加速度的测量	110
思考及练习题	111
第5章 流量测量	112
5.1 概述	112
5.2 节流式流量计	117

5.3 常用流量计	129
思考及练习题	145
第6章 物位测量	146
6.1 物位测量概述	146
6.2 常用物位测量的方法	147
6.3 锅炉汽包水位测量	162
6.4 物位检测仪表的选用及标定	169
思考及练习题	173
第7章 成分分析	175
7.1 水汽循环系统成分分析	175
7.2 锅炉烟气成分分析	196
7.3 热导式氢分析仪	202
思考及练习题	203
第8章 检测新技术	204
8.1 虚拟仪器	204
8.2 软测量技术	212
8.3 模糊传感器	218
8.4 多传感器数据融合	222
思考及练习题	228
附录	229
附录A 国际单位制	229
附录B 铂铑₁₀-铂热电偶 (S型) $E(t)$ 分度表	230
附录C 镍铬-镍硅热电偶 (K型) $E(t)$ 分度表	236
附录D 铂热电阻 (Pt₁₀₀型) $R(t)$ 分度表	242
附录E 铂热电阻 (Pt₁₀型) $R(t)$ 分度表	245
附录F 工业用铜热电阻 (Cu₅₀型) $R(t)$ 分度表	246
附录G 工业用铜热电阻 (Cu₁₀₀型) $R(t)$ 分度表	247
附录H 具有角接取压口的孔板: 流出系数 C	248
附录I 具有 D 和 $D/2$ 取压口的孔板: 流出系数 C	250
附录J 常用缩写词的英文和中文对照	252
参考文献	257
88	1.8
88	8.8
VOI	8.8
OII	1.8
III	8.8
SII	8.8
SII	1.8
VII	8.8

第1章 基础知识

1.1 检测技术及仪表概述

1.1.1 检测技术及仪表的重要性

自然界里有各种各样的物体，它们都具有不同的形状、大小、状态和运动性质，人们在生活和生产实践中，要想了解自然界中存在的各种物体的特性，就要对它们进行检测。自然科学的产生和发展离不开检测技术及仪器仪表。科学技术的进步更是与检测方法、检测技术的完善密不可分。著名科学家门捷列夫说过：“科学，只有当人类懂得测量时才开始”。这说明测量是人类认识自然的主要武器，只有借助于检测技术，人们才有可能掌握、发现自然界中的规律，并利用这些规律为人类服务。

在自然界或生产实践中，一些物体属性特征的信息含量很少，或某些信息十分微弱，常常被另外诸多信息干扰、掩盖或淹没。例如，金属材料被破坏时，内部会发出特定频率的爆裂声，这就是金属的声发射现象，但由于声音强度极小，被淹没在机械噪声当中。如果对机器运转时的机械噪声进行实时监控，寻找金属材料破坏时发出的特定音频和强度，就能用来诊断机器是否出现隐患。例如，在自动机床上进行切削加工，各种噪声混杂在一起，利用声发射技术，就可以及时发现刀具是否发生破损或断裂，以免影响加工质量；在电力生产过程中，大型旋转设备发生振动、高温高压金属设备发生裂纹等故障时都是一个渐变过程，如果利用声发射等技术提前进行预测报警，就能减少或避免因设备故障造成的损失；又如人体发出的磁场被淹没在地球磁场元中，潜艇发动机的噪声被淹没在滔滔海浪中，如何将这些存在的微小量从诸多强大的干扰中分离出来、检测出来，并定量地得出这些量的数值大小，这就是检测技术所研究的内容，也就是说，检测技术的任务就是要在复杂的环境或环境背景噪声下，准确检出或测出某一特定的量。

信息是物体和现象属性的反映，信息通过一定的信号反映出来，人们要了解和研究物体和现象的属性，就要把信息和信号检验出来，然后对这些信号和信息进行各种处理与分析，从而定性和定量地认识客观世界，因此信息和信号的检测理论与技术就成为一门重要的学科。检测技术是以研究信息如何提取、如何转换以及信号如何处理等相关理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。仪器仪表就是用物理、化学或生物的方法，获取被测对象的组分、状态、运动及变化等信息，通过对信息进行转换和处理，使其以量化形式成为易于人们阅读、识别和表达（显示、转换和运用），或使其进一步信号化、图像化，通过显示系统以利于人们观察、存档、或进入其他自动控制系统的装置。检测技术与仪表是自动化学科的重要组成部分。

21世纪是以现代高科技带动全球社会、经济高速发展为标志的全新时代，是以现代科技为第一生产力实现经济全球化，科技、产业、金融、信息、人员国际化为特征的全新时代，而新时代的基础则是现代科技不间断的发展。整个20世纪世界经济和社会发展则证明了这样一个事实：现代科技的发展依赖于检测技术及仪器仪表的发展。

据统计, 20 世纪, 有 27 项诺贝尔奖获奖项目直接与科学仪器创新或基于新仪器科技而取得的成果相关; 在全部获奖项目中, 物理学科的 68.4%、化学学科的 74.6%、生物医学学科的 90% 都直接与实验有关或本身就是实验项目成果, 而所有的科学实验都必须借助于先进的科学仪器。科学上的重大发现, 往往是由于新的观测手段的发明而开展起来的。以物理学诺贝尔奖获得者为例, 50% 的工作得益于新的仪器或测试手段的发明创造。1992 年, 诺贝尔化学奖获得者 R. R. Ernst 就说过很有代表性的一句话: “现代科学的进步越来越依靠尖端仪器的发展”。

近年来在超微 IC 器件、生物芯片、微流控分析、微机械组件、微传感器等方面的进展, 已经使远程光纤通信科技、超高速微型计算机、分子生物学等领域得到了飞跃的发展。不论在哪个科技领域, 其最尖端的理论和实验研究工作, 都离不开最新、最精巧的科学仪器。例如, 1999 年诺贝尔化学奖得主 A. Z. Zewail 籍助于尖端的飞秒 (10^{-15} 秒) 快速激光观测仪器拍摄到化学反应过程中原子化学键的断裂和再形成过程; 曾宣告提前几年完成的人类基因组测序大工程, 完全得益于最快速、精确的阵列毛细管电泳分析仪和 DNA 测序仪的研发成功。

由于电子、计算机、微机械、激光、光纤、生物医学、新型材料等领域科技和产业的迅猛发展, 不但对科学仪器的研究和产业部门提出了更高、更新的发展要求 (例如更快速度、更高效率、更加灵敏可靠、更加便宜好用、小巧、无污染等), 而且各领域科技和产业的发展成果也直接成为仪器仪表科技和产业发展的新基础和新动力。目前, 在市场迫切需求和知识物质基础更新优化的双重推动下, 新型仪器仪表的知识结构和技术内涵已经远远超出传统精密仪器的学科框架, “光、机、电一体化” 已经远远不能概括现代科学仪器的知识和技术范畴, 分子层次的现代化学成果、基因层次的现代生物学成果、超导技术成果、纳米级微机械、微传感成果、多光谱高分辨成果、超快速激光、通信成果、全球网络技术成果等, 都已成为现代新型科学仪器的构成元素, 并正在加速改变仪器仪表科技和产业的原理、设计、工艺和应用面貌。微型和小型的稳定可靠仪器将大量涌现, 可直接安装在检测现场, 植入人体组织甚至随血液流转全身, 嵌装在导弹或微型无人飞行器 (小到如昆虫、苍蝇大小!) 中完成自动分析、检测、信息采集和传输任务。在远离物体或战争后方的实验室、医院检验中心、战场信息处理中心几十米甚至几十公里就可以操纵、接受信息。具体的实例已经不断涌现, 例如纳米离子荧光免疫单分子检测仪器, 可以使检测灵敏度提高十几个数量级, 近场显微境已可分辨光波长的几十分之一, 近场显微光谱仪可以检测单一分子的荧光光谱及其变化, 新颖的扫描隧道电子显微镜可确定超薄膜层面结构中的电子排列形式, 在人体器官内工作的微机器人可以在血管或眼科手术中完成诊断、修补、除血栓等工作。

仪器仪表是信息产业的三大重要组成部分 (检测技术、通信技术、计算机技术) 之一, 是信息工业的源头, 是一个国家科技实力的综合反映, 在工业发展中具有前导地位。现代仪器仪表不是单纯的精密机械加光学、电子, 而是光、机、电、计算机、材料、物理、化学、生物、信息处理等多学科于一体, 是多学科相互交叉、渗透、结合的综合学科。因此, 可以说检测技术与仪器仪表技术是上至航天、航空事业, 下至工农业生产、人民群众的日常生活的 “顶天立地” 的事业, 检测技术和仪器仪表是国民经济发展和人民生活水平提高的物质条件基础。

仪器仪表是一种信息的工具, 起着信息源的作用。仪器仪表工业是信息工业的重要组成

部分,检测技术与仪器仪表的发展水平在很大程度上反映出—个国家的生产力发展和现代化水平。两院院士、“两弹—星”元勋王大珩先生说:“仪器是认识世界的工具,机器是改造世界的工具,改造世界是以认识世界为前提的。高技术仪器仪表的进展代表着科技的前沿,也代表国家现代化的实力。通过仪器观察、分析、测试的结果,人们可以控制生产过程使之规范化,也可以评价产品的优劣”。

从科学技术发展史和仪器仪表的发展史来看科技发展—与仪器仪表的关系,我国近代科学家张之桐先生早就明确指出“没有望远镜就没有天文学”,“没有显微镜就没有细胞学”,“没有指南针就没有航海”。张先生的话告诉我们,很多科学技术的发展正是由于—种新的科学仪器的发现而发展的。

1.1.2 我国检测技术与仪器仪表技术的发展

我国有着悠久的历史,我们的祖先在认识自然、改造自然方面为人类的发展作出过巨大的贡献,特别是在天体测量技术和测试仪器方面、地震监测技术与地震仪、计时、大地勘测等技术都曾领先于世界各国,指南针的发明对人类航海活动作出了巨大的贡献。

新中国成立以来,我国的工业建设蓬勃发展,检测技术及仪器仪表制造技术得到了国家的充分重视。20世纪50年代初期,在数十个高等学校设立了相关的专业,50多年来培养了数十万名检测技术及仪器仪表方面的专业技术人员,在我国的各个行业从事生产、科学研究工作。在我国第一个五年计划首批建设的256个重点工业企业中,就有仪器仪表专业工厂。检测技术与仪器仪表制造技术在我国工农业、国防建设中发挥了不可取代的作用。

我国钢产量从解放前的不到100万t,达到了今天的上亿吨年产量。解放前,我国尚不能制造汽车。从1956年生产第一辆汽车开始,2005年,我国汽车计划目标为320万辆,其中轿车110万辆;而实际产量为570万辆,其中轿车277万辆,分别为计划目标的1.78倍和2.52倍。在轿车销量中,自主品牌的产品已占25%以上;航空、航天事业得到了长足的发展,从仿制苏联的飞机,到实现自己设计制造先进性能的各种飞机,我国“两弹—星”以及载人宇宙飞船的成功使我国国防力量空前强大;我国的机械制造业、轻工业、铁路交通、化工、石油地质、信息等基础产业,建国50多年来都得到了飞跃式的发展;新兴的家电产业在充分满足国内市场需求外,还大批量出口到国外。这些成就的背后,仪器仪表起着国民经济发展的“倍增器”作用。仪器仪表的产值在我国的GDP中的份额很小,但对整个经济发展具有巨大的拉动作用。

我国在天体测量研究方面有着飞跃的发展。1950年,上海徐家汇天文台被中国科学院接管后,大地测量部门在野外作业中采用我国发送的授时信号(BPV信号);1957年应军事测绘和大地测量的需要,建立了我国的时间基准;1958年,我国以上海天文台为首建立了我国的时间服务网;1968年,开始了我国独立自主研制天体测量仪器的时代,先后研制成功了I型和II型光电等高仪(比法国和日本早7年)、摄影天体筒、1.56m和2.18m天体测量望远镜;1980年至今,建立了甚长基线干涉测量(简称VLBI,是现代天文观测中分辨率最高的观测手段)、全球卫星定位系统(简称GPS)的观察网,在基线和台站位置的精确测量、板块运动和中国地区的地壳形变研究方面取得了成果;近几年来,我国在银河系结构研究、太阳系天体的观测等方面取得了长足的进步。而这一切都与天体测量仪器的研制和发展分不开的。

我国的科学研究、国防事业也取得了惊人的发展,这一切都少不了先进的测试技术、仪

器仪表, 并且检测技术与仪器仪表发展趋势是向着计算机化、高度智能化、数字化、信息化、高精度化、精密化、小型化等方向发展, 仪器仪表是科学研究的“催化剂”。现在的所有高科技技术都体现在现代检测技术和先进的检测仪器仪表中, 是当今高科技含量最多的产业之一。

但从另一个方面看, 尽管我国科学仪器事业得到了快速发展, 同发达国家相比, 目前仍存在较大的差距。我国大批的科学仪器都要依靠进口, 在一定程度上阻碍了我国科学仪器的发展。这是因为, 在我们进口别人商品化仪器的时候, 在仪器开发研制中的科学工作已经结束了。正如师昌绪院士所说: “一个仪器从实验室阶段成为商品至少要 3~5 年, 而在这期间大量有开拓性的工作都已发表, 而买来的设备是强弩之末, 难以做出开发性的工作, 用买来的科学仪器进行实验研究, 只能永远跟在别人后面。”

一些高档科学仪器, 特别是涉及国防、科学重大进步及国家重点建设的科学仪器完全依靠国际市场运作是行不通的。因为买的仪器绝不是最先进的, 最先进的仪器有时是花钱也买不到的。我们必须立足于自己开发研制。须知, 一个国家科学仪器的研制开发水平是衡量一个国家国力的重要标志。

1.1.3 检测技术与仪器仪表的典型应用

检测技术与仪器仪表涉及军事国防、工业、农业和科学研究等各个领域, 其中包括兵器、航天、航空、航海、铁道、机械、轻工、化工、电子、电力、电信、钢铁、石油、矿山、煤炭、地质、勘测等各个行业。在国民经济建设中占有重要的地位。

在军事方面, 20 世纪 90 年代以来, 精确测控技术和军用仪器仪表技术的高度发展, 出现了“灵巧炸弹”、“精确打击”、“零伤亡战争”、“反导系统”等新型系统, 世界各国都已经加紧了事关国家安全的军用仪器系统(包括卫星、GPS 系统、制导和反导系统等)的研发。

兵器技术的发展是离不开检测技术的, 或者说检测技术是兵器发展的基础和前提。任何一种兵器从设计到定型装备部队, 都要经过若干环节的试验。从零部件试验到总体试验, 从地面静止试验到飞行打靶试验, 从缩比试验到全尺寸试验从模拟试验到实战试验, 只有经过严格的科学试验, 最终测量得到各项性能指标达到战术要求才能装备部队使用。

常规兵器发展研制周期的长短、投资的多少、性能的优劣, 在很大程度上取决于试验技术水平的高低以及测试手段是否完善。例如, 在发射炮弹的一瞬间, 就需要采用多种试验方法来测量各种参数, 如膛压变化过程、弹底压力、弹后压力波、身管压力分布、弹丸在膛线的挤压过程, 弹丸在膛线的运动速度、膛内燃气分布及身管温度分布、炮口激波压力、发射瞬间的轴向加速度、炮身的振动与反作用力等。炮弹离开炮口能否正确射向目标和摧毁目标, 也要在试验中跟踪测试, 包括中间弹道测试、外弹道测试及终点弹道测试等。再如固体火箭发动机, 作为火箭和导弹的动力装置, 其性能参数的优劣, 直接影响到火箭和导弹的总体性能指标, 在研制发动机过程中, 需进行大量的地面试车台静止试验, 测试发动机内弹道参数(主要是压力、温度、速度)和推力大小以及发动机壳体温度分布和强度。

在战争期间, 战场上的较量很重要是军事情报信息的获取, 谁能掌握对方的军事动态和战场上的军事情报, 谁就可以稳操胜券。战场上地面和空中的侦察, 军事打击后的战果评价, 武器的瞄准定位, 军事装备的状态评估等, 都离不开检测技术和仪器仪表。检测技术和

仪器仪表就是军事上的“战斗力”。

在工业方面：检测技术与仪器仪表在生产过程中的重要作用主要体现在如下几个方面。

(1) 提供设备在运转过程中或其他情况下的有关信息，以便监视生产过程，使之保持在最佳工作状态运行；或将生产过程的种种数据信号测出，经处理后，分析工作状况是否正常，判断出故障的性质，以便决定是否继续生产或进行维修。

(2) 作为控制生产的依据。将生产过程中的各种参数测出来，与要求的数据相比较进行反馈，自动调节后使生产过程在符合规定要求的参数下工作，即所谓用信息流来控制物质流和能量流。

(3) 对工艺和设备的分析。工程中，对一些待改进的工艺过程、工装设备需做系统的测试才能对原有的状态做出分析、评价，找出改进措施；在改进后，是否达到了预期的效果，仍需做系统的测试来进行分析和鉴定。这些测试结果也是今后进行改进新设备和工艺设计参数的依据。

(4) 为宏观技术管理、经济管理提供参考依据。工业生产过程自动化是工业现代化的重要内容方向，在线检测与自动化仪表是工业生产过程自动化的重要内容之一。在线检测技术是指在生产线上加入对生产过程某些参数或工况进行检测技术的系统和技术，例如机械工业中几何量、机械量（例如尺寸、几何形状、位移、速度、加速度等）的动态在线检测。

(5) 满足特殊评价需要。空间技术、高能物理、大规模集成电路以及机器人等高新技术的发展，给检测技术提出了难度大、条件苛刻的新课题。例如，宇航飞行器、原子能反应堆、生产大规模集成电路的生产设备、智能机器人等，它们要求具有很高的精度和运转时的可靠性能，其元件必须有很高的精度和优异性能。这时检测技术就可以对这些设备及元件的质量和性能提供准确和客观的评价，为合理改进生产技术提供必不可少的基础数据。

1) 在农牧业方面：优秀作物品种选育离不开高效优质的科学仪器、农牧产品品质鉴定或痕量残留毒物检测更离不开超高灵敏度准确可靠的新型科学仪器，农作物和家禽牲畜疫病、传染病防治（棉铃虫、黄锈枯病、疯牛病、鸡流感……）更急需可靠、便宜的大量仪器仪表。

2) 在科学研究方面：现代科学技术的发展更离不开检测技术，特别是科学技术迅速发展的今天，在近百年的诺贝尔物理学、化学以及生物医学奖的获奖者中，有四分之一是在检测技术和仪器仪表方面做出了杰出贡献的。在获奖的研究项目中，有我们熟知的 X 光物质结构分析仪、电子显微镜、质谱仪、光学断层扫描仪（CT）、光学相衬显微镜、隧道显微镜等。当今进行的各种科学研究，离不开高超的测试手段和仪器仪表。今日的科学研究成果，明日就会出现在我们的生活中，为人类造福。

科学技术的发展已对现代仪器提出了越来越高的要求，以现代科学仪器（扫描电镜、光谱仪、能谱仪等）为例，人们不仅要求及时、精密、可靠地获得有关物质成分与结构的数据，还要求对物质的价态、结构、表面、薄层与微区及其赋存的状态等进行纵深分析。20 世纪 50 年代初期，仪器仪表取得了重大突破，数字技术的出现使各种数字仪器（数字频率计、数字万用表等）得以问世，把模拟仪器的精度、分辨率与测量速度提高了几个数量级，为实现测试自动化打下了良好的基础。20 世纪 60 年代中期，测试技术又一次取得了重大进

展, 计算机技术的引入, 使仪器的功能发生了质的变化, 从个别电量的测量转变成测量整个系统的特征参数, 从单纯的接收、显示转变为控制、分析、处理、计算与显示输出, 从用单个仪器进行测量转变成用测量系统进行测量。进入 20 世纪 70 年代以来, 计算机技术在测试技术中的进一步渗透, 使现代电子仪器在传统的时域与频域之外, 又出现了数据域测试, 被测系统的信息载体为二进制数据流, 仪器前面板则向键盘化方向发展。科学技术的重大突破和科学理论的新发现与科学仪器是密不可分的。

1.1.4 检测技术与仪器仪表的发展趋势

21 世纪是人类全面进入信息社会的时代, 随着人类探知领域和空间的拓展, 使得人类需要获得的信息种类日益增多, 需要传递的信息速度加快, 信息处理的能力增强, 因此需要与此相对应的传感器技术与采集技术。作为现代信息技术的三大核心技术之一的传感器技术, 将是 21 世纪世界各国在高新技术发展方面争夺的一个重要领域。

传感器是流程自动控制系统和信息系统的的核心基础器件, 是测试仪器不可缺少的感知器件。传感器是测试仪器的眼睛、鼻子、耳朵、皮肤、舌头, 是探测外部微弱信号的感知器官。传感器技术水平直接影响到自动化信息和信息系统的水平, 自动化技术水平越高, 对传感器技术依赖程度越大。在信息社会中, 人们为了推动社会生产力的发展, 需要用传感器来检测许多非电量信息, 如力、压力、流量、速度、温度、湿度以及生物量等。不难看出, 传感器技术是涉及国民经济和国防科研各领域的重要技术。世界上传感器的种类有 20000 余种, 而我国目前只有 3000 余种, 尚有大量的品种需要我们去开发。

不断满足科学研究、大生产流程、国防等传统应用领域的要求, 今后仍将是检测技术与仪器仪表的主要发展方向, 但是在新世纪将蓬勃发展的生物医学、生态环境、社会生活、家庭和个人日常生活等非传统科学仪器应用领域中, 科学仪器的应用市场前景是非常惊人的。当今在生物分子学、基础和临床医学、合成和天然药物、环境污染监控、生态系统平衡、国家经济安全、绿色家居、社区管理、个人健康等等领域科学仪器新应用越来越多。

已经有人断言: 软件就是仪器 (美国 NI 公司), 这说明科学仪器本身的硬件、软件界线已经模糊化, 精密机械零部件加工精度、电子器件和电路质量统治性地决定仪器水平和质量的时代已经过去, 仪器软件 (包括操作软件和应用软件) 已经成为仪器总体设计的主要基础和决定仪器水平及应用的主要因素。

1.2 电厂热工检测技术及仪表

就学科内容而言, 检测技术与仪器仪表是本科自动化专业和测控技术与仪器专业的专业内容之一, 也是其他工科类相关专业学生应该了解和掌握的重要内容。

自动化的含义就是用广义的机器来部分代替、完全取代甚至超越人的体力和智力活动。电厂自动化的内涵主要包括自动检测、自动控制 (自动调节)、自动保护、顺序控制和自动化管理等项内容。其中电厂热工检测技术及仪表是电厂热工自动化的重要内容之一, 所要完成的任务就是为运行操作人员及时、准确和方便地反映生产过程运行情况的各种物理量、化学量以及生产设备的工作状态并自动地进行检查和测量, 以便监督生产过程的进行情况和趋势。

电厂热工过程自动化是随着火力发电事业的发展而发展起来的。20 世纪 50 年代的电厂

大都是分散的就地控制，锅炉、汽轮机和发电机各自独立地进行控制，在控制系统上相互没有联系，“机、炉、电”以及重要辅助设备都各自设置一套控制盘，各有自己的运行人员进行监视操作。那时的机组容量小、参数低、热力系统简单、监视和操作的项目少，所以对自动化的要求不高也不甚迫切。20世纪60年代和70年代初期安装的机组容量逐渐增大、参数逐步提高、要求监视和操作的项目剧增、生产过程的控制迫切需要提高自动化水平，中间再热机组的应用和热力系统的单元化，使汽轮机和锅炉的关系更加密切了。为了使机炉在启停和正常运行时更为协调，更有利于事故判断和事故处理，实行了机炉集中控制。与老式的机炉分散控制相比，这自然是个进步，但随着机组容量的增大，仅仅是机炉集中的低级集中控制方式已不能满足电厂运行和管理的要求。目前，大型机组采用机、炉、电集中控制方式，把汽轮机、锅炉，发电机作为一个不可分割的整体进行监测和控制。这是火电厂实现综合自动化的必由之路。

在火电厂中锅炉和汽轮机都装有大量的检测仪表，其中包括传感器、变送器、显示仪表和记录仪表等，它们随时显示、记录、累积和变送机组运行的各种参数，如温度、压力、流量、水位、转速等，以便进行必要的操作和控制，保障机组安全、经济地运行。目前，大型汽轮机的自动检测项目包括：蒸汽压力和温度、真空度；监视段抽汽压力、润滑油压、调速油压、转速、转子轴向位移；转子与汽缸的相对热膨胀、汽轮机振动、主轴挠度、轴承温度与润滑油温度、推力瓦温度等许多项目。

一个完善的自动检测系统是保证机组安全运行的必不可少的条件。随着技术的进步，自动检测装置的测量范围和水平在不断提高，大型机组常采用巡回检测的方式，对机组运行的各种参数和设备状态进行巡回、显示、报警、工况计算和制表打印。近几年来，工业电视作为辅助检测手段在火电厂中得到应用，如应用工业电视显示汽包水位、监视炉膛燃烧、监视烟囱排烟状况等。

电厂热工自动化系统由大量热工检测和控制设备有机构成，根据信息的获得、传递、反映和处理的过程，热工检测和控制设备共分成如下五类。

(1) 检测仪表。它直接与被测对象联系，感受被测参数的变化，并将变化量转换成一个相应的信号输出或直接测量出来。主要包括温度、压力、流量、物位等参数的测量仪表，如热电偶、弹簧管压力表等。

(2) 显示仪表。把被测物理量显示出来供人观察的仪表称为显示仪表。它们可作模拟量或数字量的指示或记录，也可附设各种附加装置，实现报警、积算、调节和顺序控制等功能，如动圈式仪表、自动平衡显示仪表、数字显示仪表。它们只要与不同的检测元件配套，就可以测量不同参数；再如工业电视、图像字符显示器等。

(3) 调节仪表与集中控制装置。调节仪表可把来自检测仪表的信息综合，再按预定的规律控制执行器动作，使生产过程中各种被调参数，如温度、压力、流量等，符合生产工艺的要求。调节仪表按所用的能源可分为气动、电动和液动三大类，按结构和功能又可分为自力式调节器、简易电动调节器、基地式调节仪表、单元组合仪表、组件组装式调节仪表、基于微处理器的单（多）回路调节器等，目前基于计算机及网络技术的分散控制系统（DCS）已经作为主流控制设备取代了传统的调节仪表。

(4) 集中控制装置。集中控制装置是一种速度较快、能连续自动地把就地、分散的设备进行集中检测或控制的自动化装置。如自动地集中监视生产过程的大量参数，具有报警、记

录等功能的巡回检测装置 (DAS); 可以按照一定的步骤和条件对一台或一组设备进行控制, 以达到预定目的的顺控装置 (如 FSSS, SCS); 具有检测、调节、顺控、保护、计算功能的控制计算机 (DCS, FCS) 等。

(5) 执行器。执行器的动作代替了人的操作。因而人们把执行器比喻为生产过程自动化的“手脚”。调节装置、顺控装置和计算机发出的操作命令都要通过执行器来完成, 以达到调节、控制的目的。

随着电力事业的迅猛发展和控制技术的不断进步, 热工测量和控制技术得到了快速发展。在自动检测方面已向高精度、多功能、高速度、低成本、高可靠性方向发展。采用新原理、新材料和新结构的热工测量仪表不断涌现。在控制技术方面, 重视自动化基础理论的研究, 如对控制论、信息论、系统工程学等的研究; 重视成套自动化系统的设计研究工作, 进一步开发功能组件。智能调节、巡回检测、数据处理、计算机控制等新型成套控制装置, 为我国以更快的速度实现火电厂的综合自动化创造了条件。

随着计算机控制技术和网络技术的应用和发展, 包括整个电厂按最佳方式运行, 机组按最佳方式自启停及事故处理等在内的火电厂综合自动化技术必将得到进一步的发展和应用。

总之, 检测仪表是保证生产过程安全、经济运行及实现自动化的前提条件和必要条件, 配备完善的自动检测系统能够为运行人员提供操作依据, 为自动化装置提供准确及时的测量信号, 为宏观技术管理、经济管理提供参考依据, 可以改善运行和检修人员的劳动条件、提高劳动效率和设备的可靠性。

1.3 典型仪表控制系统组成

控制 (Control) 是指为了改善系统的性能或达到特定的目的, 通过信息的采集和加工而施加到系统的作用。系统可分为可控系统和不可控系统两大类, 前者是指可以通过人为的方法对系统进行干预和控制。而后者是指人无法对系统进行干预和控制。对一个系统进行控制, 首先要通过传感器测得系统的输出, 并把测量结果送给控制器, 控制器根据期望值与测量值的偏差产生一个控制信号, 并把这个信号送给执行器, 执行器根据控制器送来的信号对被控系统实施控制。这一过程可以用图 1-1 来描述。从图中可以看出, 控制信号



图 1-1 自动调节系统的组成框图

流程已形成了一个回路, 把这样的系统称为闭环系统, 把这样的控制称为闭环控制。

一个生产过程在受到某些因素的干扰和影响后, 往往会偏离预期的工况要求, 这就需要通过调节手段来使它按既定的工况正常运行。因此, 调节是对生产过程一种有目的干扰, 其目的就是为了使表征生产过程的一些物理量 (如温度、压力、流量等) 保持为预期的数值。

自动调节是在人工调节的基础上发展起来的。在人工调节过程中, 操作人员需要完成四个步骤: 用眼观察运行情况; 用大脑对观察到的结果进行分析、比较; 得出调节方案; 用手执行操作。人工调节效果的好坏取决于运行人员的经验。

自动调节过程基本上是模拟人的操作经验, 既可以减少人力, 也可避免不必要的人为误操作。自动调节就是根据被测量偏离给定值的情况, 通过自动调节装置, 适当地动作调节机

构, 改变调节量, 最后抵消扰动的影响, 使被调量恢复到给定值。当把一整套的自动调节装置和调节对象连接起来时, 就构成了自动调节系统。在自动调节系统中, 自动调节装置应该按照人们已经掌握的对象特性和积累的操作经验来设计和调整。

一般自动调节系统由以下四个单元组成: 一是测量变送单元, 测量被调量, 并把测得信号转换成易于传送和运算的信号; 二是给定单元, 设定被调量的目标值, 产生与被调量信号同类型的定值信号; 三是调节单元, 输入被调量与给定值, 将两值比较并得到偏差值, 经过一定的调节规律进行运算, 输出信号给执行器; 四是执行单元, 根据调节单元送来的指令去推动调节机构, 改变调节量。

在自动调节系统中, 调节对象就是被调节的生产过程, 包括能完成一特定动作或作用的机器、设备等, 如锅炉、汽轮机、发电机等; 被调量是表征生产过程中需要调节维持为规定数值的物理量, 如温度、压力、流量等; 给定值是希望被调量应该具有的数量, 如正常运行时的锅炉汽温、汽轮机转速等; 扰动是指引起被调量偏离给定值的各种原因, 如锅炉水位变化的扰动来自蒸汽流量和给水量; 调节器指用于调节系统中的控制装置; 执行机构是指接受调节器输出信号对调节对象施加作用的机构, 有机械的、电动的、液压的、气动的等。

1.4 测量的相关概念

1.4.1 测量的基本概念

一、测量的定义

测量就是用实验的方法, 把被测量与所选定的测量单位进行比较, 求其比值以获得被测量数值的过程。其中包括三个要素: 一是必须预先确定测量单位, 并以实物加以复现; 二是测量工具, 它是测量过程的具体体现与实施者, 是为求取比值而实际使用的一些仪器仪表与设备; 三是测量方法, 它是将被测量与其单位进行比较的实验方法。

测量的基本方程式

式中 X ——被测量;

α ——比值;

x ——测量单位;

δ ——测量误差。

αx 常被称为仪表读数、指示值、示值等。例如要测量书桌的长度, 就必须具备长度单位——米、测量工具——米尺和测量方法——尺与桌面比较, 才能获得测量结果。测量的误差可能来源于尺子本身制造、测量过程、环境条件、读数习惯等诸多方面。

计量是测量技术的主要内容之一。它是为保证计量单位统一和量值准确可靠这一特定目的而做的测量工作, 因此是测量的一种特定形式。其方法是以公认的计量基准、标准为基础, 依据计量法规和计量检定系统(表)进行量值传递来保证单位的统一和测量的准确。

二、测量的分类

按照测量的定义, 测量是一个内涵很广的概念, 随着测量技术的发展, 所涉及的范围会越来越广。

1. 按测量用途分类

- (1) 一般测量：对测量结果无需给出误差值或估计测得值的可信度（也称生活测量）。
- (2) 工业测量：对测量结果只需考虑误差的最大可能性（也称技术测量）。
- (3) 精密测量：对取得的测量结果要估计其误差，并评定其不确定度（也称实验室测量）。

2. 按测量方法分类

- (1) 直接测量：被测量物体直接与测量单位比较，直接得出结果。如用玻璃管液位计测量锅炉水位。
- (2) 间接测量：通过某一物理或化学性能随被测量变化而变化的关系，间接地反映出被测量的大小。如弹簧管式压力表，通过压力的作用使弹性元件变形而产生位移，间接测出压力。
- (3) 组合测量法：先测出几个参数，然后把所测得的数值组合起来进行数学运算，最后得出被测结果。例如，智能补偿式流量计测量蒸汽流量，先测出孔板两端的压差、管道内介质的压力和温度，再进行运算后得出实际流量。
- (4) 软测量法：是一种利用较易在线测量的辅助变量和离线分析信息去估计不可测或难测变量的方法。它的基本思想就是依据某种最优准则，选择一组既与主导变量有密切联系又容易测量的变量，通过构造某种数学关系，实现对主导变量的在线估计。软测量技术是在成熟的硬件传感器基础上，以计算机技术为核心，通过软测量模型运算处理而完成的。

3. 按测量工具与被测量的关系分类

- (1) 接触测量：测量工具直接接触被测对象，感受其变化后得出测量结果。
- (2) 非接触测量：测量工具无需直接接触被测对象，就能感受其变化得出测量结果。

4. 按测量机理分类

- (1) 能量变换型：将被测参数的能量转换成另一种易测量的能量类型（电、光等）。
- (2) 能量控制型：被测参数的变化使其他参数发生变化，从而控制外部能量。

5. 按测量示值产生的状态分类

- (1) 偏位法测量：被测参数使测量装置的参数产生偏差，以此来刻度被测量（开环）。被测结果直接从仪表的标尺上读出，读法迅速、简便、直观。如用玻璃杆水银温度计测量温度。
- (2) 平衡法测量：被测参数使测量装置的参数产生偏差用已知的参数进行平衡，当偏差为零时由已知量的变化来刻度被测量（闭环）。这种方法又称为补偿法或零读法。此方法读数快、精度高。如用电子电位差计显示被测参数。
- (3) 微差法测量：综合上两种方法的优点，当被测量和已知量相比较后，测出剩余偏差，来达到测量的目的。这种方法精度高。如热电偶检定时，同分度号的标准热电偶与被检热电偶反向串接，用直流电位差计测得热电偶的差值来表示被检热电偶的误差。

6. 按被测参数时变状态分类

- (1) 静态测量：被测量在测量过程中无需考虑时间因素。
- (2) 动态测量：测量过程中，被测量处于时变状态中。

7. 按测量条件分类

- (1) 等精度测量：在相同条件下进行测量，数据无论偏差大小，具有相同的可信度。

(2) 不等精度测量：在不同的条件下测量的数据。

为适应研究和应用的需要，世界各国均按照工作职能的差异逐步形成了测量技术方面的专业化分工。在我国，习惯把与测量相关的研究工作细分成测试计量技术及仪器和检测技术与仪表。按照工作性质的不同，分为计量管理部门、研发制造部门和应用维护部门。计量管理部门主要从事计量技术的管理工作，主要任务是贯彻国家法定的计量单位，建立、复制、保存基准和标准器具并进行标准的传递，颁布计量法规，管理监督测量器具，研究精密测量器具、方法，研究误差理论，参加国际相关计量工作等。研发制造部门包括仪器仪表的设计、研究和生产单位，其任务是研究新的检测方法设计、开发新型仪表，生产、供应定型的仪器仪表以满足各方面测量的需要。应用维护部门的任务是具体地对被测对象组织测量活动，目的是及时、准确地获得可靠的测量结果。

三、常见的过程检测量

生产过程中的参数测量常被称为过程检测，又称在线检测。本书后续章节将介绍的具体参数测量都属于过程检测范畴。工业生产过程常见的检测参数分类如表 1-1 所示。在我们研究的各类系统中，被测量大多是非电量，如表中的热工量、物性与成分量、状态量等，而电工量的测量相对比较容易。因此，非电量的测量构成了检测技术的基本内容。

表 1-1 工业生产过程检测参数分类

热工量	温度、热量、压力、真空度、压差、流量、物位等
电工量	电压、电流、电阻、电感、电容、电功率、频率、磁场、射线量等
物性与成分量	成分、浓度、黏度、粒度、浊度、湿度、露点、水分、密度、酸碱度、分子量、纯度等
状态量	机械运转状态：启停、振动、位移、声音等 设备异常状态：过热、泄漏、变形、裂纹、磨损、过负荷等 产品在线检测：表面质量、疵品、形状等 仪表装置状态：绝缘、断线、电源等

应该指出，被测的参数一般是不受行业、部门限制的。例如，温度、压力等参数，在电力、冶金、石油、化工等工业部门以及其他行业均是需要测量的重要参数，这也体现了测量的“通用性”。反之，测量同一种参数，随着被测对象、介质、参数数值范围以及对测量范围要求的不同，又往往要采用不同的测量方法、测量仪表，有时甚至差异巨大，这又体现了测量的“特殊性”，这种共存的特性就是测量技术的一大特点。

1.4.2 测量的误差与测量不确定度

1. 测量误差的表示形式

测量误差是指测量结果与被测量的真实值之间的偏差。

绝对误差是测量结果减去被测量真实值（简称真值）所得的偏差，即

$$\delta = x - x_0 \quad (1-2)$$

式中 δ ——绝对误差；

x ——测量结果；

x_0 ——被测量的真值。

绝对误差有明确的单位，其数值大小与所取的单位相关；能反映出测量值与真值的偏离程度和方向；不能确切地反映出测量的精确程度。