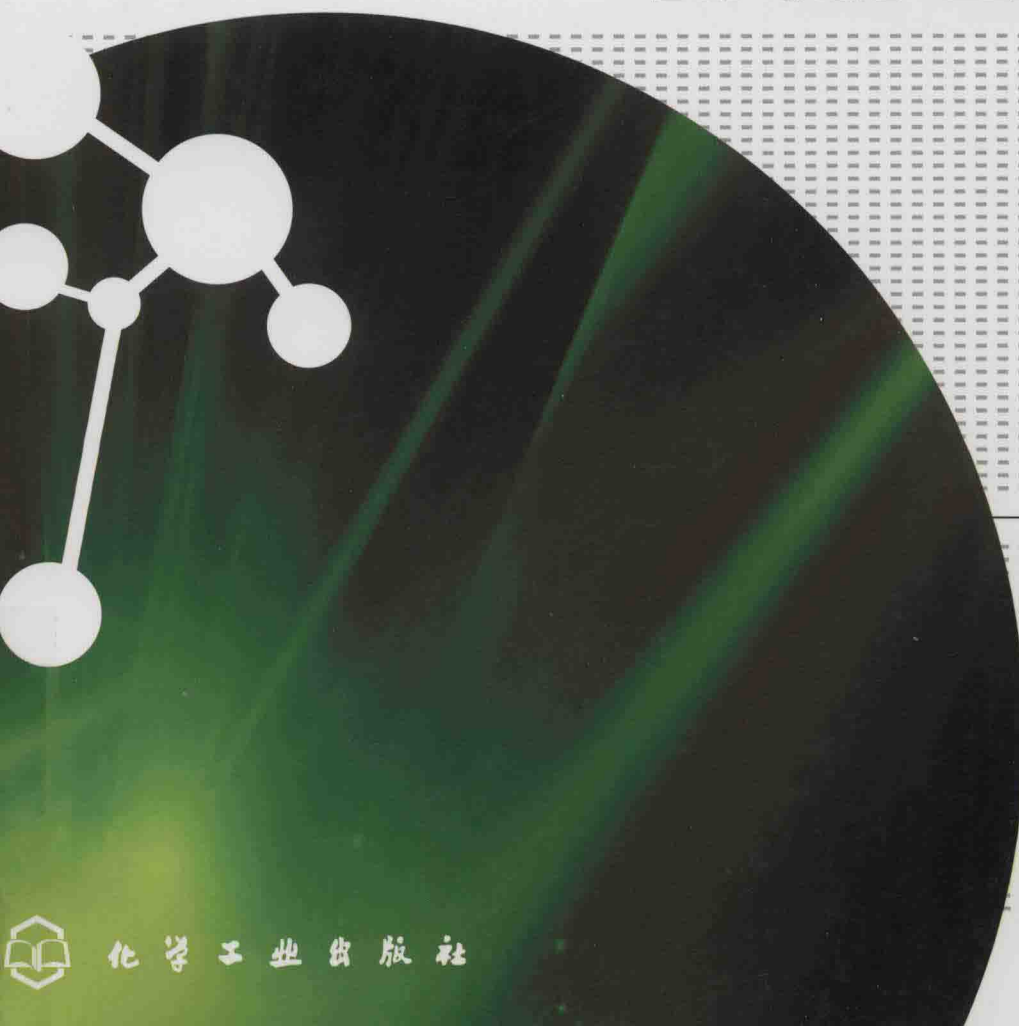


高等学校“十三五”规划教材

过程检测技术 及仪表

第三版

杜 维 张宏建 王会芹 编著



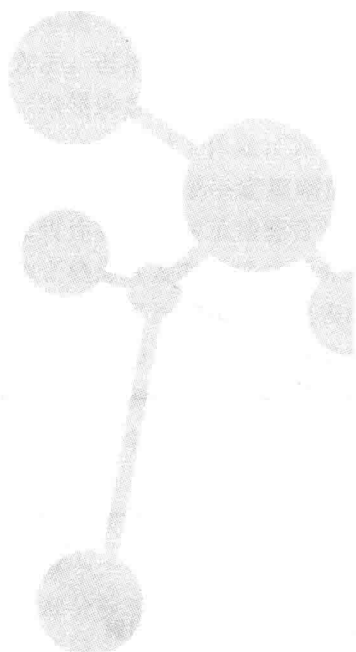
化学工业出版社

高等学校“十三五”规划教材

过程检测技术 及仪表

第三版

杜维 张宏建 王会芹 编著



化学工业出版社

·北京·

《过程检测技术及仪表》(第三版)以信息为主线,从信息的获取、变换、处理等方面介绍了过程检测技术及显示仪表的基本概念、各种参数和检测方法、信号的变换技术及参数的记录、数字显示等内容;并结合检测系统的组成以及误差的产生,讨论了各种误差的补偿方法及途径;同时介绍了各种检测元件和实际工业过程仪表选型的原则,增加了检测技术的新进展(智能检测技术和现场总线仪表)。

本书可作为高等学校自动化、测控技术与仪器等相关专业的教材,也可作为从事检测技术及仪表的研究生、科研工作者及工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

过程检测技术及仪表/杜维,张宏建,王会芹编
著.—3版.—北京:化学工业出版社,2018.8
高等学校“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-32356-9

I. ①过… II. ①杜…②张…③王… III. ①自动检测-
检测仪表-高等学校-教材 IV. ①TP216

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第120201号

责任编辑:唐旭华 郝英华

装帧设计:张 辉

责任校对:王 静

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:中煤(北京)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张15 $\frac{3}{4}$ 字数390千字 2018年8月北京第3版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.80元

版权所有 违者必究

前 言

本书是为高等学校自动化、测控技术与仪器等相关专业编写的一本专业课教材，是在笔者多年来讲授这门课程的基础上编写而成的。本书的思路如下。第一，不采用传统的每一种仪表的介绍方法，而是着重阐述过程检测技术及显示仪表方面较完整、系统的基本概念，例如检测系统的组成，显示仪表的结构型式、技术特点，误差产生的原因以及处理、消除或减小的方法，仪表的线性化和温度补偿等。第二，围绕组成检测系统的各环节加以介绍，突出共性及基本理论，培养解决实际问题的能力，使读者在阅读本书后，能分析和设计各种检测系统及其测量电路，而不是掌握某几种具体仪表。第三，引进了带微处理器的数字、屏幕显示技术和集散控制系统的数据采集及显示原理，介绍了部分模块的电路原理与实际使用时工程量的标度变换，使显示装置内容更加丰富，更具有实际应用价值，更有利于与集散控制系统的联系，使读者可获得集中监测管理的基本概念。第四，简要介绍了智能检测技术和现场总线检测等现代检测新技术。其中智能检测技术主要对软测量技术和虚拟仪表技术的基本概念和构成进行阐述。以嵌入式微处理器和通信控制器为核心的现场总线检测仪表已经广泛用于过程检测现场，本书主要对现场总线仪表的基本原理和设计、选型进行概念性介绍。

过程检测技术及仪表涉及范围相当宽广，特别是在检测器件和检测方法方面，种类繁多，不可能一一介绍。本书只重点介绍过程检测中最典型、最实用和较新的一些检测元件及检测方法，但给出了测量各过程参数常用的部分检测元件和检测方法的分类、用途及性能比较表，以便读者扩大知识范围及选用；对于过程参数中，应用最多、最重要的流量检测给予较多篇幅介绍；对于伴随计算机发展的数字和屏幕显示以及 DCS 系统中的数据采集、显示原理的基本概念给予一定篇幅的介绍，例如，信号的标准化与标度标换、模数（A/D）转换、非线性补偿及显示功能分类等，并结合实例予以分析；对于新近发展的软测量、虚拟仪器，作了概念性及基本结构的介绍，以扩展读者视野。

本书突出了检测技术及仪表的基本概念、基本理论及其共性，同时又新增加了 DCS 系统的数据采集和显示原理、智能检测、现场总线检测的基本概念，内容较丰富，深度和广度有所提高，老师在教学时可根据具体情况，进行安排。

本书相关电子课件可免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用，如有需要请联系：cipedu@163.com。

参加本次修订的有杜维（前言、绪言、第一章和第四章的一～三节），张宏建（第二章和第三章一～三节、附录），王会芹（第二章第一节中基础效应及其余各节的第一部分概述和最后部分检测器件的选择及举例，第三章第四节、第四章第三节和第五章），王会芹作全书整理统排。

本书第一版由周春晖教授审定，乐嘉华高级工程师参与编写，他们对本书的出版付出了辛勤的劳动，在此深表感谢。

编著者

2018 年 5 月写于杭州浙江大学求是园

目 录

绪言	1	五、压力检测器件的选用及举例	55
一、课程的意义	1	第四节 物位检测	56
二、课程讨论的内容	1	一、物位检测的主要方法和分类	58
三、检测技术及仪表发展概况	2	二、静压式物位检测	58
第一章 过程检测技术基础	4	三、浮力式物位检测	61
第一节 过程检测的基本概念	4	四、电气式物位检测	63
一、检测	4	五、超声波物位检测	64
二、检测系统与检测仪表	4	六、其他物位检测	67
三、检测仪表的基本性能	7	七、影响物位测量的因素	69
第二节 误差的产生及分类	9	八、物位检测器件的选择及举例	69
一、概述	9	第五节 流量检测	71
二、误差产生分类	10	一、流量检测的主要方法和分类	72
第三节 误差处理的基本方法	11	二、节流式流量检测	73
一、误差分析	11	三、电磁式流量检测	91
二、误差处理	13	四、容积式流量检测	95
三、仪表的误差补偿及线性化	19	五、变面积式流量检测	97
练习与思考	23	六、其他流量检测方法	99
参考文献	24	七、流量检测器件选择及举例	107
第二章 参数检测技术	25	第六节 成分参数检测	108
第一节 参数检测的一般方法和原理	25	一、热导式检测技术	109
一、自然规律与检测方法	25	二、热磁式检测技术	111
二、基础效应	27	三、红外式成分检测	114
第二节 温度检测	27	四、色谱分析方法	118
一、温标	28	五、固态电解质气敏元件及成分检测	123
二、温度检测仪表的分类及特点	29	六、分析仪器的选择及举例	126
三、热电偶及测温原理	30	练习与思考	126
四、热电阻及测温原理	37	参考文献	128
五、其他温度检测方法 with 仪表	41	第三章 信号变换技术	129
六、新型测温元件及传感技术	44	第一节 信号变换的基本形式	129
七、测温器件选择及举例	46	一、简单直接变换	129
第三节 压力检测	47	二、差动式变换	133
一、概述	47	三、参比式变换	134
二、压力检测的主要方法和分类	48	四、平衡式变换	135
三、弹性式压力检测	48	第二节 常见信号间的变换	140
四、电气式压力检测	51	一、位移与电信号的变换	140

二、电阻与电压的变换	144	三、参数的显示和记录	199
三、电容与电压的变换	147	练习与思考	201
四、电压与电流之间的变换	154	参考文献	202
第三节 典型仪表的信号变换举例 ...	156	第五章 现代检测技术	203
一、差压变送器	156	第一节 智能检测技术	203
二、氧化锆氧量变送器	159	一、概述	203
第四节 新型变送器	162	二、软测量技术	204
一、微电子式变送器	162	三、虚拟仪表技术	208
二、数字式变送器	166	第二节 现场总线检测仪表	210
练习与思考	166	一、概述	210
参考文献	167	二、现场总线仪表的原理	211
第四章 显示仪表	168	三、现场总线仪表设计	213
第一节 显示仪表的构成及基本		参考文献	217
原理	168	附录一 热电偶的分度表	218
一、模拟式显示仪表	169	附录二 主要热电偶的参考函数和逆	
二、数字式显示仪表	174	函数	228
第二节 数字式显示仪表	176	附录三 压力单位换算表	230
第三节 集散控制系统 (DCS)	196	附录四 节流件和管道常用材质的	
一、概述	196	热膨胀系数 $\lambda \cdot 10^6$	231
二、集散控制系统的数据采集	197	附录五 检测仪表的安装	232

绪 言

一、课程的意义

人们对自然界的认识，在很大程度上取决于检测和仪表。无论是日常生活，还是工程、医学、科学实验等各个领域，都与检测有着密切关系。例如，工业生产中，为了正确地指导生产操作，保证生产安全、产品质量和实现生产过程自动化，一项必不可少的工作，是准确而及时地检测出生产过程中各有关参数。又如，在科学技术的发展中，新的发明和突破，都是以实验测试为基础的。1916年爱因斯坦提出的广义相对论，由于当时不具备验证的测试条件，而在将近半个世纪的时间内没有得到很快的发展，后来天文学上的发现和许多精确的检测技术对该理论进行了成功的验证，才使广义相对论重新得到重视和发展，这一事实说明科学和检测之间的密切关系。各种新的设备，新的工艺过程的研究与产生，都与各参数的检测有着密不可分的关系。工业生产的不断发展和科学技术的突飞猛进，对检测技术和仪表又提出了许多新要求，而新的检测技术和仪表的出现，又进一步推动了科学技术的发展，故检测技术的发展程度决定了科学技术的水平，换句话说，检测技术和仪表是现代科学技术水平高低的一个标志。

二、课程讨论的内容

在过程工业中，由于处理和生产的物质是各种各样的，因而相应的生产过程类型各不相同，物质形态各异，可能是气态、液态、固态和混合态。物质的性质可能是腐蚀性的、黏稠的、易挥发的等千变万化。对于这样复杂的生产过程的管理和控制，首先必须取得过程中各装置、设备工况以及各种物质的组分、储存、输送、能量变化和动力供应等信息。而这些信息的取得，必须由检测工具和显示装置来承担，因此检测方法及检测元件的种类必定很多，而它们所处的环境条件又相差悬殊，因而检测系统设计和组成也是千变万化的，不可能也没有必要一一加以介绍。所以，本书以使读者掌握共性的检测技术的基本理论和检测、变换的物理方法和概念为基础，通过典型示例，举一反三，着重介绍检测系统的特性分析及系统设计。关于参数的显示，主要分析带微处理器的数字及屏幕显示装置。近年来随着计算机多媒体技术、网络技术和通信技术的发展，集散控制系统（DCS）和现场总线仪表系统在工业中的应用日益广泛，其数据采集和显示也得以应用。本书对集散控制系统（现场总线仪表系统也类似）的数据采集和显示的一些基本概念和功能分类给予一定程度的阐述，其组成的部分模块电路原理，及应用时工程量的标度变换等，在数字仪表和屏幕显示装置中有较详尽的分析和示例。本书还增加了智能检测技术和现场总线仪表的相关知识。所谓智能检测技术就是将人工智能的技术和方法引入参数的检测。智能检测技术主要对难测参数（现有检测仪表测量误差大或者没有合适检测仪表）和测量精度要求高的重要设备和对象的参数进行测量。本书主要对智能检测技术中的软测量技术和虚拟仪表技术进行介绍。书中阐述了软测量的基本概念，并给出了简单直观的示例，以拓展学习者的学科视野。而虚拟仪表以通用微型计算机的软、硬件资源为基础，将仪表功能板插入计算机或直接与微型计算机连接，使计算机具有仪表的功能。

现场总线检测仪表是将现场总线系统引入到现场检测仪表。和传统检测仪表相比，现场

总线仪表具有数字化、多参数化、多功能化等特点，它不仅具有自动化测量、数据处理和模拟人工智能的功能，而且还具备了远程测量硬件重构等功能，适用于对象规模日益庞大的工业现场的参数检测。通过引入这些现代检测技术，让学习者了解在计算机技术、微电子技术和数字通信技术、网络技术飞速发展的今天，检测系统也不是一成不变的，它不断将当今先进科学技术融合进来，仪表功能也不仅仅是测量，而是检测、数据处理、显示和通信甚至控制为一体的。因此大家在学习时，必须融会贯通，掌握精髓，不局限于检测和仪表的范围之内。

三、检测技术及仪表发展概况

工业生产的不断发展，对检测技术提出了新的要求。随着科学技术的进步，新的检测理论和检测方法也逐渐出现，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。可以从以下几个方面来看检测技术及仪表的发展。

(1) 检测信号数字化 随着计算机技术和数字通信技术的发展，检测信号数字化，是当前的主要趋势之一，它利于信息的传输、存储、运算、处理、判断和显示，同时还可以提高检测的可靠性和稳定性，使仪表的精度有较大提高，抗干扰能力加强，也为综合自动化提供了坚实的基础。

(2) 检测理论方面 随着科学技术的发展，生产规模的扩大和强度的提高，对于生产的控制与管理要求也越来越高，因而需要收集生产过程中的信息的种类也越来越多，这就对过程参数检测提出了更高要求。由于过程参数的检测理论和方法与物理、化学、电子学、激光、材料、信息等学科密切相关，随着这些学科的发展，检测技术覆盖的范围也相应增大，不仅能对过程的操作参数，如温度、压力等进行检测，也能对物料或产品的成分进行检测，甚至对物性、噪声、厚度、泄露、火焰、颗粒尺寸及分布等也能进行检测。近年来随着信息类学科的发展，智能检测技术快速发展并广泛用于检测领域，从而实现对传统检测方法无法测量的参数进行检测和估计。例如油田汽驱现场的湿蒸汽干度检测，多通过人工手动检测实现，而利用神经网络软测量模型可以快速准确地实现对湿蒸汽干度的估计，同时可以有效地消除干扰噪声。将模糊推理技术引入检测仪表构成模糊传感器，可以使仪表具有识别和判断能力。

(3) 检测领域方面 科学技术的发展，生活水平的提高，极大地扩展了人类的活动范围。对检测的影响，首先反映在新的检测对象、检测领域和检测要求。例如，随着工业生产的发展，工业中的“三废”对自然界造成了严重污染，破坏了生态平衡和人类赖以生存的自然环境。为了保护环境，改善污染问题，就需要对环境所含的各种杂质进行微量检测并加以控制，这就需要制造新的灵敏度极高的检测元件和寻找新的检测方法。随着过程工业不断发展，生产过程中的参数检测已逐渐由表征生产过程间接参数如温度、流量、压力、物位等转向表征生产过程本质的物性、成分、气分和能量等参数的检测；同时对于装置的检测，也已逐渐由单参数转向多参数的综合检测；参数的显示，也由模拟式转向数字式图像显示。检测范围也从工业生产扩展到日常生活之中，如出现了声音、味道、视频等信号的检测等。

(4) 检测器件、检测方法和仪表 一方面，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（如地球到月球距离），可以大大提高精度。仿照动物某些方面的超常能力研制的仿生传感器（如视觉传感器、听觉传感器、嗅觉传感器等），利用量子力学诸效应研制的高灵敏度传感器，响应速度极快的红外传感器、光纤传感器等新的检测器件不断涌现。另一方面，随着计算机技术、微电子技术、通信和网

络技术的突飞猛进，仪表功能也大大扩展。在仪表中嵌入微处理器、图形处理器等各种功能模块，可实现数据分析、计算、处理、检验、存储等功能，实现了原来单个仪表无法实现的诸多功能，大大提高了测量效率、测量精度和测量的经济性。如质量流量智能检测仪，利用微处理器等模块能存储大量数据和高速运算的特点，可对饱和蒸汽进行温度、压力补偿，同时还可以随时根据工况变化对流量系数进行即时修正，获得高精度的质量流量检测；现场总线的逐步应用，为信号的传输提供了条件，使得单信号传输逐步过渡到多信号传输；随着产品的日益丰富，各大公司都建立了自己的通信网络和接口，以实现与其他公司的网络连接，这样便可以真正实现系统集成，例如生产过程自动化、楼宇自动化、保安自动化、消防自动化等各系统通过各自接口，使不同功能的系统集成成为一个整体，最终形成综合自动化。

第一章 过程检测技术基础

第一节 过程检测的基本概念

一、检测

检测就是用专门的技术工具，依靠实验和计算找到被测量的值（大小和正负）。例如水银温度计，是把水银（汞）封装在真空等径的玻璃管内，构成一个专门的技术工具；然后根据水银热胀冷缩的原理，计算出水银在不同温度时上升的高度，并加以温度刻度，或者以实验的方法，加以刻度标定，就构成了水银温度计，用来检测温度，这就是检测。检测的目的是为了在限定的时间内，尽可能正确地收集被测对象的有关信息，以便获取被测对象的参数，从而管理和控制生产。在生产过程中，为了监督和控制生产，使生产按照设计目标运行，就必须了解各设备、工段、车间的各有关参数信息，这就需要检测。检测是生产过程中的眼睛，是过程控制中最重要的一环，生产过程中，可以没有自动控制，但绝不能没有检测。

检测通常包括两个过程：一是能量形式的一次或多次转换过程；二是将被测变量与其相应的测量单位进行比较。前者一般应包括检测（敏感）元件、变换（或转换）器、信号传输和信号处理四部分；后者一般应包括测量电路及显示装置两部分。如图 1-1 所示。

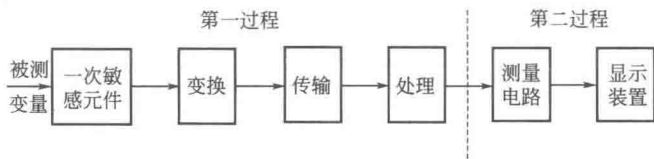


图 1-1 检测的两个过程

二、检测系统与检测仪表

1. 检测系统

检测系统包括被测对象及检测的全过程，即一个检测系统除被测对象外，总包括检测的两个过程。但对某一具体检测系统而言，除被测对象外，检测元件和显示装置总是必需的，而其余几部分则视具体系统结构而异。例如用水银温度计检测加热器的温度时，就构成了一个温度检测系统，在此系统中，加热器为被测对象；在检测过程中，首先水的热能传递给玻璃，再由玻璃传递给水银，水银受热则水银柱升高，水的热能就转换成水银柱的位能，这是

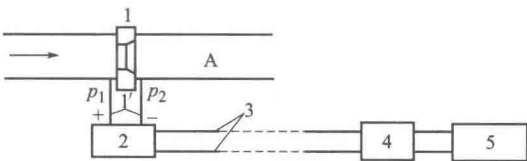


图 1-2 流量检测系统的构成

- 1—节流装置；1'—取压导管；2—差压变送器；
- 3—电流信号传输线；4—开方器；5—显示仪表

能量形式的一次转换；在温度读数时，是将水银柱的高度与玻璃上标准温度刻度进行比较而显示出温度读数，这是测量单位的比较过程；该检测系统除加热器外，只包括检测元件（水银）和显示装置（玻璃刻度）两个部分。

图 1-2 所示为一流量检测系统，图中 A

为流体通过的管道，即被测对象；1 为节流装置（包括节流元件和取压装置），1' 为取压导管，这两部分即为流量检测元件，它把管道内的流体流量转换成差压信号（ $\Delta p = p_1 - p_2$ ），这是能量形式的一次转换，即把流体的动能转换成静压能（势能）；2 为差压变送器，它把差压信号转换成标准电流信号（0~10mA DC 或 4~20mA DC），这是能量形式的二次转换；3 为电流信号的传输线，将安装在现场的变送器信号，传输到控制室；4 为开方器，将输入信号作开方处理后输出，其输出信号与流体流量呈线性关系，便于后面显示仪表显示；5 为显示仪表，通常由测量电路和显示装置两部分组成；所以该检测系统除被测对象外，由包括检测元件和显示装置在内的完整的六部分组成。若该系统不用开方器 4（处理环节），而把差压变送器的信号直接送显示仪表显示，也是可以的，不过此时显示仪表的流量刻度只能是非线性（开方关系）的，故这个流量检测系统除被测对象外，由包括检测元件和显示装置在内的五部分组成。

当检测系统在进行测量时，首先是通过检测元件、变送器、传输、处理四部分把被测变量的能量形式经过多次转换，变成了与被测变量成一定对应关系（例如线性关系）的电信号或气信号或其他信号，这就是检测系统中的第一过程；下面要进行的是将经多次转换过的信号通过测量电路（或测量装置）和显示装置，进行测量单位的比较过程，即第二过程，这第二过程往往由显示仪表完成。

2. 检测仪表

检测仪表是实现参数检测过程的重要一环，是组成检测系统必不可少的部分，它往往是检测过程中的一部分或全部。例如用水银温度计检测某一容器（对象）温度，组成温度检测系统时，除被测对象外，它包括了检测元件（水银）和显示装置（玻璃刻度）在内的能直接进行参数检测的全过程。又例如用热电偶和数字显示仪表配合检测某一对象的温度时，则热电偶为检测元件，而数字显示仪表只是检测过程中测量电路和显示装置两部分，而不包括检测元件、变换等其他部分，所以该仪表只是测量过程中的一部分。

检测仪表就其本身的结构而言，无论是模拟式还是数字式，一般都具有变换、比较（测量装置）和显示装置三部分。而其变换部分往往是由若干个环节按一定方式连接而成，根据连接方式的不同，有两种结构形式。

（1）开环结构 开环结构仪表的特点是：全部信息变换只沿着一个方向进行，如图 1-3 所示。其中 x 为输入量， y 为输出量， $K_1, K_2, \dots, K_n$ 为各环节的传递系数， $u_0, u_1, \dots, u_n$ 分别为作用于各环节的干扰。由于开环结构仪表是由多个环节串联而成，因此仪表的相对误差等于各环节相对误差之和，即

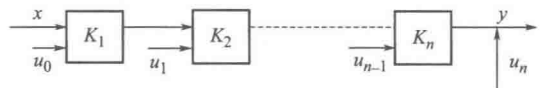


图 1-3 开环结构仪表框图

数， $u_0, u_1, \dots, u_n$ 分别为作用于各环节的干扰。由于开环结构仪表是由多个环节串联而成，因此仪表的相对误差等于各环节相对误差之和，即

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1-1)$$

式中， δ 为仪表的相对误差； δ_i 为各环节的相对误差。

仪表的灵敏度等于各环节灵敏度之积，即

$$S = S_1 S_2 \dots S_n = \prod_{i=1}^n S_i \quad (1-2)$$

式中， S 为仪表的灵敏度； S_i 为各环节的灵敏度。

下面对开环结构仪表作一简要讨论：由图 1-3 可知，仪表的输出 y 不仅与各环节的传递系数 $K_1, K_2, \dots, K_n$ 以及输入量 x 有关，还受各个环节干扰 $u_0, u_1, \dots, u_n$ 的影响，除非提高各环节抗外界干扰的能力，否则开环结构仪表很难获得高精度。该结构一般为简易仪表，如数显表、弹簧管压力表等。

由式(1-1)、式(1-2)可知：若要增加仪表灵敏度 S ，必须增加环节的个数或增大环节的灵敏度 S_i 。增加环节个数，仪表的相对误差 δ 必增大；若不增加环节个数，而提高环节灵敏度，则对应较小的输入信号，就能得到相同的指针偏转，故仪表对应的测量范围必减小；若绝对误差不变，仪表相对误差 δ 必将随着增大。因此开环仪表在增加灵敏度的同时，仪表的相对误差也相应增大，从而降低了仪表精度。另一方面由于灵敏度增加，仪表的稳定性将大大降低，为了保证仪表具有较好的稳定性，则开环结构仪表的灵敏度不易做得很高。一般来说在同一量程的条件下，灵敏度高的仪表精度不一定都高；但精度高的仪表，灵敏度都是比较高的。

(2) 闭环结构 闭环结构仪表有两个通道，一为正向通道，一为反馈通道，其结构如图 1-4 所示。其中 x 为输入量， y 为输出量； Δx 为正向通道输入量， y 为输出量；反馈通道输入量为 y ，输出量为 x_f 。 $K_1, K_2, \dots, K_n$ 为正向通道各环节的传递系数（或称放大倍数）， $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 为反馈通道各环节的传递系数。则正向通道的总传递系数 $K = \prod_{i=1}^n K_i$ ，反馈通道的总传递系数为 $\beta = \prod_{i=1}^m \beta_i$ 。

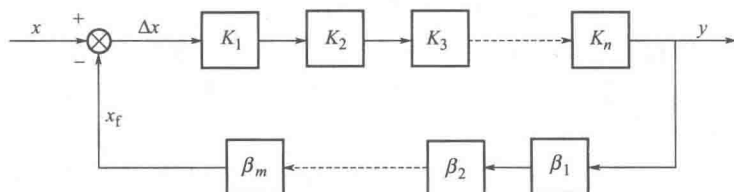


图 1-4 闭环结构仪表框图

由图 1-4 可知

$$\Delta x = x - x_f$$

$$x_f = \beta y$$

$$y = K \Delta x = K(x - x_f) = Kx - K\beta y$$

所以

$$\frac{y}{x} = \frac{K}{1 + K\beta} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \beta}$$

当 $K \gg 1$ 时，则

$$y \doteq \frac{1}{\beta} x \quad (1-3)$$

由式(1-3)可知：对于闭环结构仪表，若正向通道总传递系数 K 足够大，则闭环结构仪表的特性取决于反馈通道的倒特性，而主通道各环节性能的改变不会影响仪表的输出 y 。这为设计、制造仪表带来了很多好处，只要精心挑选元器件制作反馈通道，而对主通道不必苛求，就可以较方便地（相对开环而言）获得高精度和高灵敏度的仪表。

不难推导闭环结构仪表的相对误差为

$$\delta \doteq -\delta_f \quad (1-4)$$

式中, δ_f 为反馈通道的相对误差。

闭环结构仪表的灵敏度为

$$S \doteq 1/S_f \quad (1-5)$$

式中, S_f 为反馈通道灵敏度 (β)。有关 δ 、 S 的详细推导请参见第四章第一节。

由式(1-4)、式(1-5)可知: 闭环结构仪表在正向通道总传递系数足够大的情况下, 采用较小的反馈通道灵敏度 S (β), 即 $\beta < 1$, 就可获得较高的仪表灵敏度, 而仪表的相对误差却可以大大减小。这就是闭环结构仪表可以较易获得高精度、高灵敏度的原因所在。

三、检测仪表的基本性能

仪表的基本性能, 是指评定仪表品质的几个质量指标。

1. 精度 (精确度, 也叫准确度)

(1) 相对百分误差 在用检测仪表对过程参数进行检测时, 总伴随着有误差产生, 即在检测过程中, 不仅需要知道仪表的指示值, 还应该知道该指示值接近参数真实值的准确程度, 以便估计指示值 (测量值) 的误差大小, 常用相对百分误差 δ 表示, 即

$$\delta = \frac{x - x_0}{\text{测量范围上限值} - \text{测量范围下限值}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中, x 为被测变量的测量值; x_0 为被测变量的标准值; $x - x_0 = \Delta x$ 为绝对误差; (测量范围上限值 - 测量范围下限值) 为仪表测量范围。

由式(1-6)可知: 仪表的相对百分误差 δ , 不仅与绝对误差有关, 还与仪表的测量范围有关。

(2) 精度 仪表精度通常是用仪表相对百分误差 δ 的大小来衡量的。

〈仪表精度等级 (仪表精确度等级)〉是指仪表在规定的工作条件下, 允许的最大相对百分误差。按照国家统一规定所划分的等级有: $\dots, 0.05, 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0, \dots$, 所谓 1 级表, 即该仪表允许的最大相对百分误差为 1%, 其余类推。

精度等级的表示方法: 如 1 级为 $\textcircled{1.0}$ 或 $\triangle$, 其余同。

【例 1-1】有一台测压仪表, 其标尺范围为 $0 \sim 500 \text{ kPa}$, 已知其绝对误差最大值 $\Delta p_{\max} = 4 \text{ kPa}$, 求该仪表的精度等级。

解 先计算

$$\delta_{\max} = \frac{4}{500 - 0} \times 100\% = 0.8\%$$

该仪表的最大误差大于 0.5%, 而小于 1%, 按仪表精度等级的划分, 该仪表的精度为 1 级。

现根据测量的需要, 仪表的测量范围改为 $200 \sim 400 \text{ kPa}$, 仪表的绝对误差不变, 此时仪表的最大相对百分误差

$$\delta_{\max} = \frac{4}{400 - 200} \times 100\% = 2\%$$

故该仪表的精度等级为 2.5 级。同时也说明, 仪表的绝对误差相等, 测量范围大的仪表精度高, 反之仪表精度低。

2. 变差 (回差)

在外界条件不变的情况下, 使用同一仪表对某一参数进行正反行程 (即逐渐由小到大和

逐渐由大到小)测量时,对应于同一被测值所得的仪表示值不等,两者之差即为变差的绝对值,如图 1-5 所示。变差的大小,取在同一被测变量值下正反特性间仪表指示值的最大绝对误差 $\Delta''_{\max}$ 与仪表标尺范围之比的百分数表示,即

$$\text{变差} = \frac{\Delta''_{\max}}{\text{测量范围上限值} - \text{测量范围下限值}} \times 100\% \quad (1-7)$$

造成仪表变差的原因很多,如传动机构的间隙,运动部件的摩擦,弹性元件的弹性滞后等,因此在仪表设计时,应在选材上,加工精度上给予较多考虑,尽量减小变差。

3. 非线性误差

对于理论上具有线性特性的检测仪表,往往由于各种因素的影响,使其实际特性偏离线性,如图 1-6 所示。非线性误差则是衡量实际特性偏离线性程度的指标,它取实际值与理论值之间的绝对误差的最大值 $\Delta'_{\max}$ 和仪表测量范围之比的百分数,即

$$\text{非线性误差} = \frac{\Delta'_{\max}}{\text{测量范围上限值} - \text{测量范围下限值}} \times 100\% \quad (1-8)$$

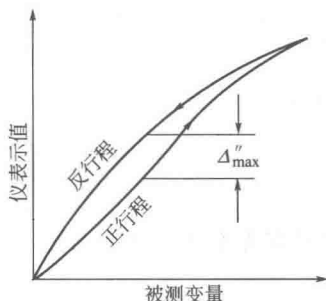


图 1-5 仪表的变差特性

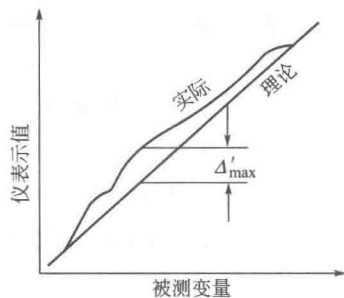


图 1-6 非线性误差特性曲线

4. 灵敏度和灵敏限

灵敏度是表征检测仪表对被测参数变化的灵敏程度,是指仪表在对应单位参数变化时,其指示的稳态位移或转角,即

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (1-9)$$

式中, S 为仪表灵敏度; $\Delta\alpha$ 为仪表指针的直线位移或转角; Δx 为被测变量的变化值。

检测仪表的灵敏度可以用增大环节的放大倍数来提高;若仅加大灵敏度,而不改变仪表基本性能,来企图提高仪表精度是不合理的,反而可能出现似乎灵敏度很高,但精度实际上却下降的虚假现象。为防止该现象,通常规定仪表标尺的最小分格值不能小于仪表允许误差的绝对值。

灵敏限 即引起仪表示值可见变化的被测变量的最小变化值。一般来说,仪表灵敏限值应不大于仪表允许误差绝对值的一半。

5. 动态误差

上面所介绍的用来表示仪表精度的相对百分误差、变差、非线性误差都是稳态(静态)误差。动态误差是指检测系统受外扰动作用后,被测变量处于变动状态下仪表示值与参数实际值之间的差异。引起该误差的原因是由于检测元件和检测系统中各种运动惯性以及能量形式转换需要时间所造成的。衡量各种运动惯性的大小,以及能量传递的快慢常采用时间常数 T 和传递滞后时间(纯滞后时间) τ 两个参数表示。

(1) 时间常数 T 例如采用热电偶和自动平衡式显示仪表组成测温系统, 若被测变量有一阶跃变化, 则记录仪表所显示出来的响应曲线将按一定规律变化, 如图 1-7 所示, 其中 T 为热电偶与自动平衡仪表的时间常数。若 T 越大, 则响应曲线上升越慢, 动态误差存在时间越长; 反之, 曲线上上升越快, 动态误差存在时间越短。在检测系统设计中, 总是把 T 取得小一些。

(2) 传递滞后 (纯滞后) 时间 τ 在成分分析系统中, 由于存在较长的取样管线和预处理环节, 故有纯滞后时间 τ , 如图 1-8 所示。在纯滞后时间 τ 内, 动态误差 Δ_1 最大, 且一直延续到 τ 时间结束; 像时间常数 T 对动态误差的影响是逐渐减少的。故在检测系统中 τ 的不利影响远远超过时间常数 T 的影响, 应引起足够的重视, 使 τ 越小越好。

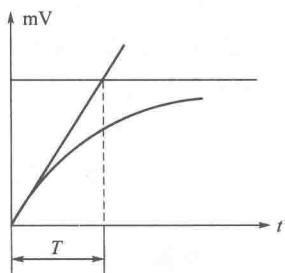


图 1-7 测温系统的响应曲线

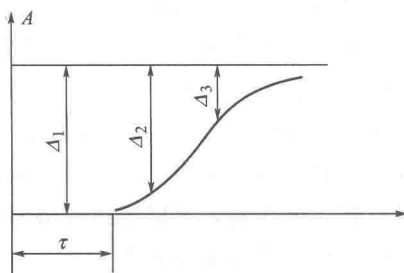


图 1-8 成分分析仪组成检测系统的反应曲线

第二节 误差的产生及分类

一、概述

在对各种生产过程的参数进行检测时, 总包括有能量形式的一次或多次转换过程, 以及测量单位的比较过程。如果这些过程是在理想的环境、条件下进行, 即假若一切影响因素都不存在, 则检测将是十分精确的。但是这种理想的环境和条件实际上是不存在的, 例如用检测元件对被测变量进行测量时, 势必伴随着各种形式的转换原理, 但这种转换往往不是十分精确, 而是某种程度近似, 如金属铂在 $0 \sim 630.74^\circ\text{C}$ 范围内, 电阻值与温度的关系可用下式表示

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1-10)$$

但有的资料在同样温度范围内, 却又用

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (1-11)$$

表示, 因此无论式(1-10)或式(1-11)都是一种近似, 铂电阻就是利用该原理检测温度, 所以总是存在一定的转换误差; 又例如用节流法检测管道内的气体流量时, 通常采用下式

$$M = \alpha \varepsilon a \sqrt{2\rho_1 \Delta p} \quad (1-12)$$

或

$$Q = \alpha \varepsilon a \sqrt{\frac{2}{\rho_1} \Delta p} \quad (1-13)$$

式中, M 为质量流量; Q 为体积流量; ρ_1 为气体密度, 它受工作状态下的温度、压力影响。若根据式(1-12)或式(1-13), 在设定的工作状态下 (T_1, p_1) 设计流量检测元件, 但利用该检测元件进行实际测量时, 其实际工作条件往往偏离设计时的工作状态 (T_1, p_1), 因而对应的气体密度 ρ_1 也必然改变, 所以最后测出的质量流量或体积流量都将产生附加误差; 再看式(1-12)或式(1-13)中的 a , 它是节流装置的开孔截面积, 是一个常数, 当节流装置

用来测量污垢流体流量时,经过一段时间的使用,其开孔处将逐渐受到磨损,除 a 将变大外,开孔处的形状也将发生变化,这都会产生检测误差,这种误差与以上两种误差不同,它是使用一段时间后逐渐产生的。除上述原因外,还有检测元件的安装位置、方法,以及被测对象、测量者本身,都不同程度地受到本身和周围各种因素的影响,而使检测产生误差,这样就会产生各种类型的误差,它们对检测系统的影响又是各不相同的,下面就误差产生的原因、分类及其处理方法分别予以讨论。

二、误差产生分类

1. 按误差出现的规律分类

(1) 系统误差 按一定规律(如线性、多项式、周期性等函数规律)变化的误差,或是指对同一参数进行多次重复测量时所出现的数值大小和符号都相同的误差称为系统误差,前者为变值误差(规律误差),后者为恒值误差。引起系统误差的原因是检测元件转换原理不十分精确;仪表本身材料、零部件、工艺上的缺陷;测试工作中使用仪表的方法不正确;测量者有不良的读数习惯等等。因为系统误差是有一定的规律,它总可归结为一个或几个因素的函数,只要找出其影响因素,引入相应的校正值,该系统误差就可以消除或减小;而对于恒值误差的系统误差,可以通过仪表零点调整之。

(2) 随机误差(也叫偶然误差) 在消除了上述误差之后,对同一参数进行多次测量,每次的测量结果彼此仍不完全相同,每一个测量值与被测变量的真实值之间或多或少仍然存在着差别。这是由于某种人们尚未认识的原因或目前尚无法控制的某些因素(例如电子热噪声干扰)所引起的,或者是由于某些偶然因素所引起,其数值大小和性质都不固定,难以估计,但其总体服从一定的统计规律。它不能通过校正的方法加以消除。但可从理论上估计其对检测结果的影响。

(3) 缓变误差 缓变误差是指经过一段时间使用后,仪表出现数值上随时间缓慢变化的误差。引起的原因:是由于零部件的老化、检测元件的磨损等所造成。例如检测流量的孔板孔口的磨蚀,电子元器件的老化,机械零件内部应力变化所引起的变形等。

该误差特点:是缓慢单调变化,需要不断校正。而系统误差一般只要一次校正即可。

(4) 疏忽误差 是一种显然与事实不符的误差,没有任何规律可循。这是由于操作者粗枝大叶,过度疲劳以及精神不专注所造成,其检测结果毫无意义,应尽量避免。

2. 按误差因次(单位)分类

(1) 绝对误差

$$\Delta = x - l \quad (1-14)$$

式中, Δ 为绝对误差; x 为测量值; l 为真值。

绝对误差不能作为仪表测量精度的比较尺度。例如一台测温仪表,其测量范围为 $0 \sim 500^\circ\text{C}$,出现的最大绝对误差 $\Delta_{\max} = 2.5^\circ\text{C}$;而另有一台测温仪表,其测量范围为 $0 \sim 100^\circ\text{C}$,出现的最大绝对误差 $\Delta_{\max} = 1^\circ\text{C}$,这并不能说后一台仪表较前面一台仪表精度高。

(2) 相对误差 相对误差通常有三种表示方法,即相对百分误差(有的资料叫引用相对误差)、实际相对误差和标称相对误差。

$$\begin{aligned} \text{相对百分误差} \quad \delta_1 &= \frac{\Delta}{\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}} \times 100\% \\ &= \frac{x - l}{\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-15)$$

$$\text{实际相对误差} \quad \delta_2 = \frac{\Delta}{l} \times 100\% \quad (1-16)$$

$$\text{标称相对误差} \quad \delta_3 = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1-17)$$

式中, Δ 为绝对误差; l 为真值; x 为测量值。

在自动化仪表中, 通常以最大相对百分误差来定义仪表精度等级。

3. 按使用时工作条件分类

(1) 基本误差 是指仪表在规定的正常工作条件下 (例如电源电压交流 $220\text{V} \pm 5\%$, 温度 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, 湿度小于 80% , 电源频率 $50\text{Hz} \pm 1\text{Hz}$ 等) 所产生的误差, 一般用相对百分误差表示。

(2) 附加误差 当仪表使用时偏离规定的正常工作条件所产生的误差 (基本误差除外) 称为附加误差。例如当仪表的电源电压超出规定的 $220\text{V} \pm 5\%$ 时, 或仪表所处环境湿度大于规定的湿度时就将产生附加误差, 通常附加误差应叠加到基本误差上。又如概述中所介绍的, 用节流法检测气体流量, 在规定的工作条件 T_1 、 ρ_1 状态下设计节流元件, 但实际工作时, 气体处于 T_2 、 ρ_2 状态下, 此时气体流量必然产生附加误差; 不过该误差具有一定规律性, 也符合系统误差的条件, 故可以通过计算予以补偿。

4. 按误差的状态分类

(1) 静态 (稳态) 误差 当被测量处于稳定不变时的测量误差, 本章主要讨论该误差。

(2) 动态误差 当被测量处于变化过程中, 检测所产生的瞬时误差。

第三节 误差处理的基本方法

一、误差分析

由上面讨论可知: 缓变误差是由于仪表内部元器件老化和检测元件的磨蚀所致, 它可以通过更换元器件, 或用不断校正的方法予以消除更正; 疏忽误差是人为造成的, 可用加强责任感予以避免。而系统误差是按一定规律变化的误差, 可以通过分析计算并加以处理, 使其影响减到最小, 但总难以完全消除; 随机误差是一些人们尚未完全认识的原因或目前尚无法控制的某些因素所致, 例如电子热噪声、间隙、摩擦等所引起。这两种误差就是检测误差的两大来源, 下面将予以分析讨论。

1. 系统误差分析

系统误差是服从一定函数规律的误差, 设检测原理的函数转换关系如下

$$y = f(x, u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (1-18)$$

式中, y 为检测 (或仪表) 输出; x 为被测量; $u_1, u_2, \dots, u_m$ 为检测系统 (或仪表) 的各种参量和外界因素。

当被测量 x 没有变化 ($\Delta x = 0$), 而各参量有 $\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_m$ 的变化时, 则将引起检测 (或仪表) 误差 Δy 。且

$$y + \Delta y = f(x, u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2, \dots, u_m + \Delta u_m) \quad (1-19)$$

式(1-19)右端按泰勒级数展开时, 取第一项略去后面的高次项得

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial u_1} \Delta u_1 + \frac{\partial f}{\partial u_2} \Delta u_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial u_m} \Delta u_m \quad (1-20)$$