



普通高等教育“十五”国家级规划教材

自动检测技术与装置

第二版

张宏建 黄志尧 周洪亮 冀海峰 编著



化学工业出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

自动检测技术与装置

第二版

张宏建 黄志尧 周洪亮 冀海峰 编著



化学工业出版社

·北京·

本书以信息为主线,从信息的获取、变换与处理和输出与显示等角度来介绍检测技术、检测仪表和检测系统。本书首先介绍检测技术的一般概念和检测仪表的共性知识,包括测量误差、准确度等;然后介绍各种检测元件的检测原理和使用特点;接着重点介绍各种常见参数的检测方法和检测仪表;最后简单介绍检测技术的最新进展,包括软测量技术和图像检测技术等。

本书可以作为高等学校自动化、测控技术与仪器、电子信息工程、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化等相关专业的教材,也可以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

自动检测技术与装置/张宏建,黄志尧,周洪亮,冀海峰
编著. —2版. —北京:化学工业出版社,2010.9
普通高等教育“十五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-09249-6

I. 自… II. ①张…②黄…③周…④冀… III. 自动检测-
高等学校-教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 146165 号

责任编辑:唐旭华
责任校对:宋夏

文字编辑:郝英华
装帧设计:杨北

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:化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张20 字数524千字 2010年8月北京第2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: 38.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

本书第一版自2004年出版以来得到了广大读者的关注，荣获第八届中国石油和化学工业优秀教材奖一等奖，使用量也较大。现根据读者的反馈意见以及科学技术的最新发展，经修订编写了第二版。与第一版相比，第二版对部分章节作了调整，如删去原书的第4章（检测技术中的信息处理与传输技术）、第3章的3.8节（变送器），其中的部分内容插入到相关章节中；对原书的第2章2.1节（检测技术的原理与方法）、第3章的3.1节（检测仪表的构成和设计方法）、3.5节（流量检测仪表）、3.9节（显示记录仪表与装置）以及第5章（现代检测技术）做了较大的调整；对其他章节也作了相应的修改。第二版尽量保持第一版的特点和体系，但努力在内容上更丰富、体系上更完整。

本书以广义信息论为主线，从检测元件和检测仪表角度，介绍和讨论有关信息的获取、信息的变换、信息的处理和信息的显示等方面的技术。

根据笔者多年来的教学实践体会，在结合本书教学时采用自学讨论式这样的一种教学方式较为合适。课堂教学主要讲一些有关检测技术及仪表的共性问题，然后布置思考题与习题，让学生在习题和回答思考题的过程中看书，参考其他教材，学生之间相互讨论；教师选择部分有代表性的思考题让学生上台来回答、讨论甚至争论，最后教师进行归纳和总结。有条件的教师可以引导学生根据自己的爱好和特点撰写小论文、小报告。通过这样的教学活动，可以提高学生的学习积极性和学习兴趣，保证教学质量和教学效果。在教学内容安排上，教师可以根据专业特点选择本书的章节。对于自动化等相关专业，建议选择本书的第1、第2和第3章作为教学重点内容，第4章作为选学内容。

本书内容已制作成用于多媒体教学的电子课件，并将免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用，如有需要可联系：cipedu@163.com。

参加第二版修订工作并负责第1章编写的有张宏建；第2章有周洪亮、张宏建；第3章有黄志尧、张宏建；第4章有冀海峰。全书由张宏建整理定稿。

由于水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

2010年7月于杭州浙大求是园

第一版前言

本书是为高等学校自动化专业编写的国家“十五”规划教材，也可以作为测控技术与仪器等相关专业开设的“传感技术”、“检测技术”等专业课程的教材。随着信息技术的飞速发展，信息的获取、信息的处理、信息的传输、信息的显示已成为信息领域的关键技术。基于这个思想，本书以广义信息论为主线，介绍和讨论自动检测技术和自动化仪表中的信息技术。本书的主要特点有：

(1) 力求将最新的传感技术、仪表技术及信息传输和处理技术等及时反映在教材中，同时还增加了软测量、图像检测和虚拟检测等现代检测技术；

(2) 以信息为主线，围绕信息的获取、信息的变换、信息的处理、信息的传输和信息的显示等方面来讨论检测技术与检测系统；

(3) 将传感技术与检测技术和自动化仪表结合起来，读者在通过本书的学习后不仅能理解一个个独立的传感器的原理，而且可以掌握由传感器及其他环节（仪表）构成的完整的检测系统。

根据作者多年来的教学实践的体会，在结合本书教学时采用自学讨论这样的一种教学方式较为合适。课堂教学主要讲一些有关检测技术及仪表的共性问题，然后布置思考题和习题，让学生在习题和回答思考题的过程中看书，参考其他教材，学生之间相互讨论；教师可选择部分有代表性的思考题让学生上讲台来回答、讨论甚至争论，最后教师进行归纳和总结。如有条件，教师可以引导学生根据自己的爱好和特点撰写小论文、小报告。通过这样的教学活动，可以提高学生的学习积极性和学习兴趣，保证教学质量和教学效果。在教学内容安排上，教师可以根据专业特点选择本教材的章节。对于自动化专业，建议将本书的第1、第2和第3章作为教学重点内容，第4、第5章作为选学内容。

本书内容已制作成用于多媒体教学的电子课件，并将免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用，如有需要可联系：txh@cip.com.cn。另外，与本书配套的《检测控制仪表学习指导》已经出版，该书收集了大量的例题与习题，给出了例题分析、题解与习题答案，欢迎广大师生及读者选用。

参加本书编写的有：第1章张宏建、戴克中、杨先麟；第2章张志君、张宏建；第3章张宏建、戴克中、冀海峰、韩雪飞；第4章蒙建波；第5章冀海峰、张志君。全书由张宏建整理定稿，韩雪飞和程路也参加了部分章节的整理工作。全书由李海青教授审定。

虽然编者对书稿作了多次校核，但由于水平有限，书中难免存在问题和错误，恳请读者批评指正。

编者

2004年4月于杭州浙大求是园

目 录

1 检测技术基础	1
1.1 检测技术的基本概念	1
1.2 检测仪表的基本概念	1
1.2.1 检测仪表的定义	1
1.2.2 检测仪表的分类	3
1.2.3 检测仪表的基本性能	6
1.3 测量误差的理论基础	9
1.3.1 测量误差的分类与测量不确定度	10
1.3.2 误差的估计和评价处理方法	12
1.3.3 消除和减少误差的一般方法	19
思考题与习题	22
参考文献	22
2 检测技术与检测元件	23
2.1 检测技术的一般原理	23
2.1.1 参数检测的一般方法	23
2.1.2 敏感元件	25
2.2 机械式检测元件	25
2.2.1 弹性式检测元件	26
2.2.2 其他机械式检测元件	31
2.2.3 机械式检测元件的应用	32
2.3 电阻式检测元件	32
2.3.1 应变式检测元件	33
2.3.2 热电阻检测元件	39
2.3.3 其他电阻式检测元件	42
2.4 电容式检测元件	44
2.4.1 电容检测元件的工作原理	45
2.4.2 电容元件的结构和特性	45
2.4.3 电容式检测元件的温度补偿及抗干扰问题	48
2.4.4 电容式检测元件的应用	50
2.5 热电式检测元件	50
2.5.1 热电偶检测元件	50
2.5.2 晶体管温度检测元件	54
2.6 压电式检测元件	55
2.6.1 压电效应与压电材料	55
2.6.2 压电式检测元件的等效电路及连接方式	57
2.6.3 压电式检测元件的误差	58
2.6.4 压电式检测元件的应用	59

2.7	光电式检测元件	60
2.7.1	光电效应	60
2.7.2	光电器件的基本特性	60
2.7.3	光敏元件及特性	61
2.7.4	光电式检测元件的应用	65
2.8	磁电式检测元件	66
2.8.1	磁电感应式检测元件	66
2.8.2	霍尔检测元件	70
2.9	磁弹性式检测元件	73
2.9.1	磁弹性效应	73
2.9.2	磁弹性式检测元件的结构及工作原理	74
2.10	核辐射式检测元件	77
2.10.1	放射源	77
2.10.2	探测器	79
2.10.3	核辐射式检测元件的应用	84
	思考题与习题	84
	参考文献	85
3	检测仪表	86
3.1	检测仪表的构成和设计方法	86
3.1.1	检测仪表的组成	86
3.1.2	检测仪表的设计方法	87
3.1.3	检测仪表中常见的信号变换方法	96
3.1.4	检测仪表常用非线性补偿方法	112
3.1.5	检测仪表常用信号传输方式和标准	113
3.2	温度检测仪表	116
3.2.1	概述	116
3.2.2	热电偶温度计	118
3.2.3	热电阻温度计	124
3.2.4	其他接触式温度检测仪表	127
3.2.5	非接触式温度检测仪表	130
3.2.6	温度检测仪表的使用	134
3.3	压力检测仪表	135
3.3.1	概述	135
3.3.2	液体压力计	137
3.3.3	弹性式压力检测仪表	139
3.3.4	电远传式压力检测仪表	141
3.3.5	物性型压力传感器	148
3.3.6	压力检测仪表的使用	151
3.4	物位检测仪表	155
3.4.1	概述	155
3.4.2	静压式液位计	156
3.4.3	浮力式液位计	160

3.4.4	电容式物位计	160
3.4.5	超声波物位计	162
3.4.6	射线式物位计	165
3.4.7	微波物位计	167
3.4.8	磁致伸缩式液位计	168
3.4.9	物位检测的使用	169
3.5	流量检测仪表	170
3.5.1	概述	170
3.5.2	节流式流量计	172
3.5.3	转子流量计	180
3.5.4	涡街流量计	183
3.5.5	电磁流量计	185
3.5.6	容积式流量计	188
3.5.7	质量流量计	190
3.5.8	涡轮流量计	192
3.5.9	超声波流量计	193
3.5.10	多相流流量测量方法	195
3.5.11	流量检测仪表的使用	198
3.6	气体成分分析仪表	199
3.6.1	概述	199
3.6.2	氧量分析仪	200
3.6.3	热导式气体分析仪	202
3.6.4	红外式气体分析仪	204
3.6.5	色谱仪	206
3.6.6	气体成分分析仪表的使用	210
3.7	机械量测量仪表	211
3.7.1	概述	211
3.7.2	位移测量仪表	211
3.7.3	厚度测量仪表	213
3.7.4	力测量仪表	216
3.7.5	转矩测量仪表	216
3.7.6	振动与加速度测量仪表	217
3.7.7	转速表	219
3.8	显示装置与仪表	220
3.8.1	概述	220
3.8.2	模拟显示仪表	222
3.8.3	数字式显示仪表	233
3.9	检测仪表的检定	236
3.9.1	检测仪表检定的一般要求和方法	237
3.9.2	检测仪表的检定	242
	思考题与习题	250
	参考文献	252

4 现代检测技术	254
4.1 软测量技术	254
4.1.1 软测量技术的概念	254
4.1.2 软测量技术的数学描述	255
4.1.3 软测量的结构和实现步骤	255
4.1.4 影响软测量技术的因素	256
4.1.5 软测量模型建模方法	258
4.1.6 软测量技术应用举例-基于相关分析的软测量	265
4.2 图像检测系统	268
4.2.1 图像检测系统的构成	269
4.2.2 数字图像处理技术	272
4.3 过程层析成像	281
4.3.1 过程层析成像技术的特点及其构成	283
4.3.2 过程层析成像的基本原理	284
4.3.3 过程层析成像技术在两相流参数测量中的应用	285
思考题与习题	287
参考文献	288
附录 1 热电偶的分度表	289
附录 2 主要热电偶的参考函数和逆函数	304
附录 3 热电阻分度表	307
附录 4 压力单位换算表	311
附录 5 节流件和管道常用材质的热膨胀系数	312

1 检测技术基础

1.1 检测技术的基本概念

检测是一种获得信息的过程。我们人类时刻都在用自己的五官感受周围的声音、图像、气味等大量信息，由于这些信息的获取，不断丰富人的知识。事实上，世界上几乎所有的生物都有检测周围环境信息的器官，这些器官是生物赖以生存的必要条件。

在科学研究、工业生产和军事等领域中，检测是必不可少的过程。例如，在自动控制系统中，检测是其中一个非常重要的环节。典型的闭环控制系统中的控制器是根据给定值与被控变量（经测量变送）之间的差值，经一定的运算形成输出去控制操纵变量，如图 1.1 所示。控制器输出值的变化使被控变量逐渐接近给定值，直到两者相等。可以看出，如果没有检测手段检测出被控变量的变化，就不可能组成一个自动控制系统；如果被控变量的检测误差很大，那么这个控制系统就不可能实现精确的控制；如果测量变送单元的滞后较大，就得不到高质量的控制效果。

通常所讲的检测是指使用专门的工具，通过实验和计算，进行比较，找出被测参数的量值或判定被测参数的有无。也就是说，检测的结果可能是一个具体的量值，也可以是一个“有”或者“无”的信息。而完全以确定被测对象量值为目的的操作称为“测量”。由于二者有相同之处，所以在本书的文字描述中会根据需要有时用“检测”，有时用“测量”。

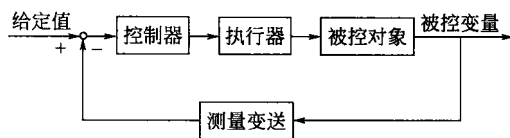


图 1.1 闭环控制系统框图

检测技术是研究如何获取被测参数信息的一门科学，涉及数学、物理学、化学、生物学、材料学、机械学、电子学、信息学和计算机科学等很多学科。因此，这些学科的进展都会不同程度地推进检测技术的发展。

1.2 检测仪表的基本概念

1.2.1 检测仪表的定义

(1) 检测仪表

一般来说，检测的过程就是用敏感元件将被测参数的信息转换成另一种形式的信息，通过显示或其他形式被人们所认识。所以敏感元件和显示装置构成了检测仪表的主要组成部分，如图 1.2 所示。有的敏感元件的输出不能在显示装置上直接显示，而需要经过一定的变换后显示。电动检测仪表一般还配有必要的硬件和软件进行相关的处理。测量电路与显示装置配套使用，使显示的数值直接对应被测参数的大小。

一般来说，一台检测仪表是一个相对独立使用的整体，它能实现某个参数的检测。即一台仪表能测一个参数，这也就是传统意义上的“一一对应”。例如，用电压表可以测量电压，

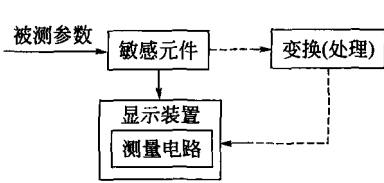


图 1.2 检测仪表的组成框图

用温度计可以测量温度。

(2) 检测系统

迄今为止，并不是所有参数的检测都能用单台检测仪表就能实现，有些参数的检测需采用多个检测仪表，并通过一定的数学模型运算后才能得到。例如，在测量电功率时，需要用一只电流表和一只电压表接入被测电路中，把电流表和电压表的读数相乘后才能得到电功率。这种利用若干个检测仪表实现某一个或多个参数测量所构成的系统称为检测系统，如图 1.3 所示。因此，检测仪表是检测系统的基本单元，一台检测仪表本身可以构成一个检测系统，也可以是系统中的一个环节。

检测系统并不都是由检测仪表所构成，有时，一个检测系统是由若干个敏感元件以及相应的信号变换、传输和处理以及显示装置等部分组成，如图 1.4 所示。

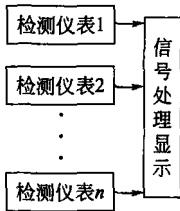


图 1.3 由若干个检测仪表组成的检测系统框图

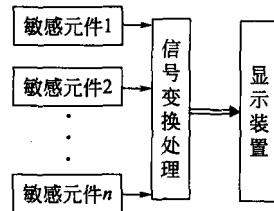


图 1.4 由若干个敏感元件组成的检测系统框图

随着科学技术的不断发展，有些专用的检测系统已被集成化，并把它们集成为一台检测仪表，这种检测仪表称为多参数检测仪表。因此，检测仪表与检测系统之间没有很明显的界限。检测仪表或检测系统和它们必需的辅助设备所构成的总体称检测装置。

(3) 相关术语

在学习检测技术过程中，除了检测仪表外，经常会看到其他一些与检测有关的专用名称，如传感器、变送器等。为了便于今后的学习，以下介绍本书的主要名称术语。

① 敏感元件 (sensor) 也称检测元件，是一种能够灵敏地感受被测参数并将被测参数的变化转换成另一种物理量的变化的元件。例如，用铜丝绕制而成的铜电阻能感受其周围温度的升降而引起电阻值的增减，所以铜电阻是一种敏感元件。又由于它能感受温度的变化，故称这种铜电阻为温度敏感元件。某种参数的敏感元件应该并且只对被测参数敏感，而对其他参数不敏感。

② 传感器 (transducer) 它能直接感受被测参数，并将被测参数的变化转换成一种易于传送的物理量。很显然，有些传感器就是一个简单的敏感元件，例如上面提到的铜电阻。由于很多敏感元件对被测参数的响应输出不便于远传，因此需要对敏感元件的输出进行信号变换，使之具有远传功能。这种信号变换可以是机械式的、气动式的，更多的是电动式的。例如作为检测压力常用的膜片（详见后面章节有关内容）是一种压力敏感元件，虽然它能感受压力的变化并引起膜片的形变（位移），但由于该位移量非常小（一般为微米级），不便于向远方传送，所以它只是一个敏感元件，不是传感器。如果该膜片与一固定极板构成一对电容器极板，则膜片中心的位移将引起电容器电容量的变化，这样他们就构成了输出响应是电容量的压力传感器。

目前，绝大部分的传感器的输出是电量形式，如电势（电压）、电流、电荷、电阻、电容、电感、电脉冲（频率）等。有的传感器的输出则是气压（压缩空气）或光强形式。

③ 变送器 (transmitter) 这是一种特殊的传感器, 它使用的是统一的动力源, 而且输出也是一种标准信号。所谓标准信号是指信号的形式和数值范围都符合国际统一的标准。目前, 变送器输出的标准信号有: 4~20mA 直流电流 (Ⅲ型仪表); 0~10mA 直流电流 (Ⅱ型仪表); 0~5V 直流电压以及 20~100kPa 空气压力 (气动仪表)。

④ 被测参数 (measured parameter) 也称被测量, 是指用敏感元件直接感受的测量参数。

⑤ 待测参数 (parameter to be measured) 也称待测量, 是指需要获取的测量参数。在大多数情况下, 被测参数就是待测参数, 例如用铜电阻测量温度, 温度既是被测参数, 也是待测参数。但在间接测量中, 两者就有不同的含义。

⑥ 直接测量 (direct measurement) 指不必测量与待测参数有函数关系的其他量, 而能直接得到待测参数的量值。在这种情况下, 被测参数就是待测参数。

⑦ 间接测量 (indirect measurement) 通过测量与待测参数有函数关系 (甚至没有函数关系) 的其他量, 经一定的数学处理才能得到待测参数的量值。在这种情况下, 被测参数一般就不是待测参数。例如, 通过测量长度确定矩形面积, 长度是被测量, 面积是待测量, 这种通过用长度测量来获得面积的方法称为间接测量。

1.2.2 检测仪表的分类

检测仪表有各种分类方法, 以下是常见的分类方法。

① 按被测参数分类, 每个检测仪表一般被用来测量某个特定的参数, 根据这些被测参数的不同, 检测仪表可分为: 温度检测仪表 (简称温度仪表)、压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表等, 它们分别用来测量温度、压力、流量和物位等参数。

② 按对被测参数的响应形式分类, 检测仪表可分为连续式检测仪表和开关式检测仪表。前者是指检测仪表的输出值随被测参数的变化按比例地连续改变。例如, 常见的水银温度计, 当温度计附近温度发生变化时, 温度计中的水银因热胀冷缩而导致水银高度的连续变化, 改变了温度计的读数, 因此这是一种连续式的检测仪表。开关式检测仪表是指在被测参数整个变化范围内其输出响应只有两种状态, 这两种状态可以是电路的“通”或“断”, 可以是电压或空气压力的“高”或“低”。例如, 冰箱压缩机的间歇启动; 电饭煲的自动保温等都是利用开关式的温度仪表实现的。

③ 按仪表中使用的能源和主要信息的类型分类, 检测仪表可分为机械式仪表、电式仪表、气式仪表和光式仪表。

机械式仪表一般不需要使用外部能源, 通常利用敏感元件的位移带动仪表的传动机构, 使指针产生偏转, 通过仪表盘上的刻度显示被测参数的大小。这种仪表一般安装在现场, 属就地显示仪表。

电式仪表又称电动仪表, 这类检测仪表用电源作为仪表能源, 其输出信号也是电信号。现在绝大部分使用的检测仪表都为电式仪表, 因为电式仪表所需电源容易得到, 输出信号可以方便地传输和显示; 信号的远传采用导线, 成本较低。

气式仪表多用压缩空气作为仪表能源和信号的传递。由于仪表中没有使用电源, 这类仪表可以使用在周围环境有易燃易爆气体或粉尘的场所。但是用压缩空气传递信号, 滞后比较大; 传递信号的气管路上任何泄露或堵塞都会导致信号的衰减或消失。

光式仪表是近年来发展起来的新型检测仪表, 它不仅有气式仪表的优点, 而且信号传递的速度非常快。目前, 光电结合形成了新的光电式仪表, 它充分利用了光的良好抗干扰和电绝缘隔离能力, 以及电的易放大和处理能力强的特点, 实现仪表的信号处理、信号隔离、信号传输和信号显示。

④ 按是否具有远传功能分类,检测仪表可分为就地显示仪表和远传式仪表。有些检测仪表的敏感元件与显示是一个整体,例如,日常生活中经常看到的玻璃温度计;有些检测仪表的敏感元件将被测参数转换成位移量,而位移的变化进一步通过机构装置带动指针或机械计数装置直接指示被测参数的大小,例如,家用的水表、电表,把这类仪表称为就地显示仪表。就地显示仪表的特点是显示装置与敏感元件做成一个整体,使用时不能分离,仪表一般不具有其他形式的输出功能。

远传式仪表是指显示装置可以远离敏感元件。在这种检测仪表中,敏感元件在信息变换后,进一步进行信号的放大和转换,使之形成可以远传的信号。远传信号的形式一般有空气压力、电压、电流、电抗、光强等。随着科学技术的发展,远传信号还可以是无线的。为了便于现场观察和维护,有些远传式的检测仪表不仅能将信号远传,在远距离显示被测参数值,而且在就地也有相应的显示装置。

⑤ 按信号的输出(显示)形式分类,检测仪表可分为模拟式仪表和数字式仪表。模拟式仪表是指仪表的输出或显示是一个模拟量,人们通常看到的带指针式显示的仪表,如指针式的电压表、电流表等,均为模拟式仪表。数字式仪表是指仪表的显示直接以数字(或数码)的形式给出,或是以二进制等编码形式输出和传输。由于目前绝大多数的敏感元件、传感器以及变送器都是模拟式的,所以在数字式仪表中一般要有模/数(A/D)转换器件,实现从模拟信号到数字信号的变换。也有一些传感器的输出直接是数字量,而不需要A/D转换,例如,用来测风速的风速仪将风速转换成叶片的转动速度,而叶片每转动一周,风速仪就输出一个脉冲,其频率正比于风速的大小。随着计算机技术的应用日益普遍,数字式仪表将迅速增多。另外,为了满足使用者的需要,有些仪表既有数字功能,又有模拟式仪表的功能。例如,现在使用的很多变送器除了有现场数字显示(参数设定)功能外,还能产生可以远传的4~20mA的模拟信号。这类仪表一般也归到数字仪表,但严格说应该是数字-模拟混合型仪表。20世纪90年代发展起来的总线式仪表被认为是全数字式的仪表。

⑥ 按应用的场所,检测仪表也有各种分类方法。根据安装场所有无易燃易爆气体及危险程度,检测仪表有普通型、隔爆型及本安型。普通型仪表不考虑防爆措施,只能用在非易燃易爆场所;隔爆型仪表在内部电路和周围易燃介质之间采取了隔爆措施,允许使用在有一定危险性的环境里;本安型仪表依靠特殊设计的电路保证在正常工作及意外故障状态下都不会引起燃爆事故,可用在易燃易爆严重的场所。对隔爆型和本安型仪表的具体要求以及相应的等级详见国家有关标准的规定。

根据使用的领域,检测仪表有民用的、工业用的和军事用的。民用仪表一般在常温、常压下工作,对仪表的准确度要求较低。工业用仪表由于应用场合的千差万别,一般对仪表的被测对象的温度、压力、腐蚀性有各自的规定,从而出现了许多系列性仪表,如耐高温仪表、耐腐蚀仪表、防水仪表等。工业用仪表一般对仪表准确度和可靠性均有较高的要求。军事用仪表的性能有更高的要求,除了工业用仪表中要考虑的各种因素外,还要特别考虑仪表的抗震性能,抗电磁干扰的性能,另外还要求仪表有很高的可靠性和较短的响应时间。

⑦ 按仪表的结构形式分类,检测仪表可分为开环结构仪表和闭环结构仪表。由于结构形式的不同,这两类仪表的性能有较大的差别。下面分别作一介绍。

(1) 开环结构仪表

图1.5是开环结构仪表的框图。这种仪表由若干个环节串联组成,进入仪表的信息和变换只沿一个方向传递,每个环节的传递函数 $K_i(i=1,2,\dots,n)$ (在只考虑静态情况下,为放大倍数 K_i)都与输出量 y 有关,同时,每个环节上的干扰 u_i 也直接影响输出量。只有当每个环节的准确度都很高,抗干扰能力较强时,整个仪表的测量准确度才能得到保证。因此开

环结构的仪表一般为简易仪表，准确度较低。

从图 1.5 中可看出开环结构仪表的传递函数 K 为各环节传递函数之积，即

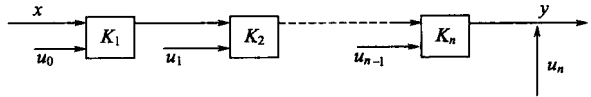


图 1.5 开环结构仪表框图

$$K = K_1 K_2 \cdots K_n = \prod_{i=1}^n K_i \quad (1.1)$$

假设仪表误差是由各环节传递函数误差引起的，设各环节的相对误差为 δ_{K_i} ，则整台仪表的相对误差 δ 等于各环节相对误差之和，即

$$\delta = \delta_{K_1} + \delta_{K_2} + \cdots + \delta_{K_n} = \sum_{i=1}^n \delta_{K_i} \quad (1.2)$$

这进一步说明整个仪表的误差取决于各个环节的误差。环节越多，误差也越不容易控制。

(2) 闭环结构仪表

图 1.6 是闭环结构仪表的框图，闭环式仪表也称平衡变换式仪表。

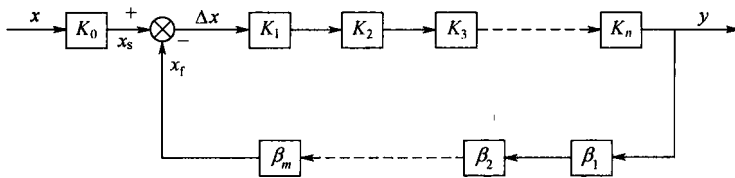


图 1.6 闭环结构仪表框图

被测参数 x 在经过检测元件变换后作为闭环系统的输入量 x_s ，并和反馈量 x_r 相比较。产生的偏差 Δx 为闭环系统正向通道的输入量；仪表的输出是 y 。 K_1, K_2, \dots, K_n 和 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 分别为正向通道和反馈通道的传递系数。根据反馈理论，仪表输出 y 与被测参数 x 之间有以下关系

$$y = \frac{KK_0}{1 + K\beta} x = \frac{K_0}{\beta \left(\frac{1}{K\beta} + 1 \right)} x \quad (1.3)$$

式中， $K = \prod_{i=1}^n K_i$ 为正向通道的总传递函数； K_0 为检测元件的传递函数； $\beta = \prod_{i=1}^m \beta_i$ 为反馈通道的总传递函数。当 $K\beta \gg 1$ 时，有

$$y \approx \frac{K_0}{\beta} x \quad (1.4)$$

由此可以进一步推出，闭环结构仪表的相对误差 δ 为

$$\delta = \delta_{K_0} - \delta_\beta \quad (1.5)$$

式中， δ_{K_0} 为检测元件的相对误差； δ_β 为反馈通道的相对误差。

由上述公式可知，如果闭环结构仪表的正向总传递函数 K 很大（一般总能满足），则仪表特性主要取决于反馈通道的特性，正向通道各环节的性能对仪表的输出影响很小。因此，在仪表制造中，只要精心制作反馈通道就可以获得较高的准确度和灵敏度。但是，由式 (1.5) 也可知，闭环结构仪表的相对误差与检测元件的误差直接有关，其误差无法通过仪表构成闭环来减少。

闭环结构的仪表虽然可获得较高的准确度和灵敏度，但如果仪表设计不当，易产生输出的不稳定。

1.2.3 检测仪表的基本性能

评定检测仪表的技术性能有很多质量指标，以下是常用的一些术语。

(1) 测量范围和量程

每台检测仪表都有一个测量范围，仪表工作在这个范围内，可以保证仪表不会被损坏，而且仪表输出值的准确度能符合所规定的值。这个范围的最小值和最大值分别称为仪表的测量下限和测量上限。测量上限和测量下限的代数差称为仪表的量程，即

$$\text{量程} = \text{测量上限值} - \text{测量下限值}$$

例如，一台温度检测仪表的测量上限值是 1000°C ，下限值是 -100°C ，则其测量范围为 $-100 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，量程为 1100°C 。

仪表的量程在检测仪表中是一个非常重要概念，它除了表示测量范围以外，还与它的准确度、准确度等级有关系，与仪表的选用也有关系。

(2) 输入-输出特性

检测仪表的输入-输出特性主要包括仪表的灵敏度、死区、线性度、回差等。

① 灵敏度 灵敏度 S 是检测仪表对被测量变化的灵敏程度，常以在被测量改变时，经过足够时间检测仪表输出值达到稳定状态后，仪表输出变化量 Δy 与引起此变化的输入变化量 Δx 之比表示，即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.6)$$

可以看出，灵敏度就是仪表输入-输出特性曲线的斜率。灵敏度高的仪表表示在相同输入时具有较大的输出信号，或者从仪表示值中可读得较多的有效位数。对于线性的检测仪表，灵敏度 S 为恒定常数；而对于非线性的检测仪表， S 值与输入值 x 有关。灵敏度实质上是个有量纲的放大倍数，它具有可传递性，对于一组串联使用的仪表，其总灵敏度是各个仪表的灵敏度之积。

检测仪表的灵敏度可以用增大仪表的放大倍数来提高，但仅加大灵敏度而不改变仪表的基本性能实际上并不能提高仪表的准确度。同时，检测仪表的输出也并非越大越好，对于变送器而言，由于输出范围是一定的，量程越小，变送器的整体灵敏度就越高；量程越大，则灵敏度就越低。

② 死区 是指检测仪表输入量的变化不致引起输出量可察觉变化的有限区间。引起死区的原因主要有电路的偏置不当、机械传动中的摩擦和间隙等。

死区也叫“不灵敏区”，在这个区间内，仪表的灵敏度为零。由于不灵敏区的存在，导致被测参数的有限变化不易被检测到。但是，有时却故意要将仪表的死区适当调大，以防止仪表的输出随输入量的变化过大或过快。

③ 线性度 各种检测仪表的输入-输出特性曲线最好具有线性特性，以便于信号间的转换和显示，利于提高仪表的整体准确度。仪表的线性度是表示仪表的输入-输出特性曲线对相应理论直线的偏离程度。一般地，具有线性特性的检测仪表，往往由于各种因素的影响，使其实际的特性偏离线性，如图 1.7 所示。衡量实际特性偏离线性的程度用非线性误差来表示，它是实际值与理论值之间的绝对误差的最大值 Δ'_{\max} 与仪表量程比的百分数，即

$$\text{非线性误差} = \frac{\Delta'_{\max}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (1.7)$$

④ 回差 回差也称变差，是指检测仪表在全量程范围内对于同一被测量在其上升和下降时对应输出值间的最大误差，如图 1.8 所示。由于特性曲线像环状一样，回差有时也称为“滞环”。回差的存在使得检测仪表在同一被测量时有不止一个的输出值，从而出现误差。引

起仪表出现回差的原因是仪表元件的吸收能量，例如，运动部件的摩擦、弹性元件的弹性滞后、磁性元件的磁滞损耗等。因此，仪表的死区也是产生回差的一个因素。仪表的回差用同一被测量的对应输出值间的最大差值 Δ''_{\max} 与仪表量程比的百分数表示，即

$$\text{回差} = \frac{\Delta''_{\max}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (1.8)$$

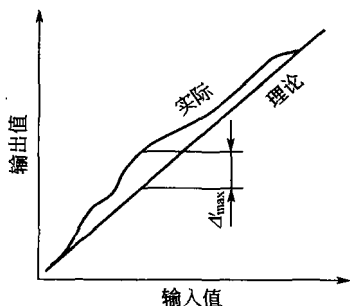


图 1.7 检测仪表的非线性误差

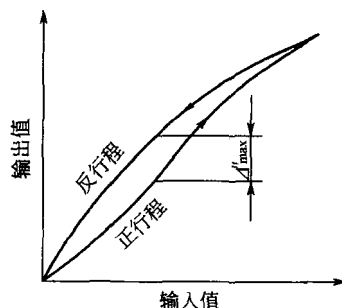


图 1.8 检测仪表的回差

(3) 误差

检测仪表的误差是由多种原因引起的，除了前面所述的回差、非线性误差外，还有很多描述仪表误差的术语。

① 绝对误差 仪表输出值与被测参数真值之间的差值，即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.9)$$

式中， Δx 为绝对误差； x 为仪表的输出值； x_0 为被测参数的真值。由于真值不能得到，实际上是用标准仪表（准确度等级更高的仪表）的测量结果作为约定真值。检测仪表在各输出值的绝对误差是不一样的。

② 相对误差 仪表的绝对误差与约定真值比的百分数，即

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.10)$$

式中， δ 为仪表的相对误差。因为检测仪表在应用时被测量不宜过小，一般希望接近于仪表的上限值，所以对于检测仪表较多的采用“引用误差”代替相对误差。

③ 引用误差 仪表的绝对误差与仪表的量程比的百分数，也用 δ 表示，即

$$\delta = \frac{\Delta x}{\text{量程}} \times 100\% \quad (1.11)$$

④ 仪表基本误差 在标准条件下，仪表全量程范围内各输出值误差中最大的绝对误差称为仪表的基本误差。由于仪表在各输出值的绝对误差是不一样的，而对于给定的一台仪表，其仪表基本误差只有一个，因此，仪表基本误差是表征仪表准确度的一个重要指标，并且仪表的准确度等的定义也以此为基础。

⑤ 仪表满刻度相对误差 仪表基本误差与仪表量程比的百分数。它在数值上就是仪表的准确度。

⑥ 允许误差 这是仪表制造单位为仪表设定的一个误差限值，其大小稍大于仪表基本误差。仪表在正常使用时误差不应超过仪表的允许误差。为了合理地显示检测仪表的输出，通常规定仪表标尺的最小分格值或数字显示值不能小于仪表允许误差的绝对值。

(4) 准确度与准确度等级

判定仪表测量精确性的主要指标是它的准确度，其定义是“仪表给出接近于真值的响应

能力”。知道了仪表的准确度就可以估计测量结果与约定真值的差距。仪表的准确度通常是用仪表满刻度相对误差的大小来衡量。准确度常常也称精度或精确度。

按照国家有关标准的规定，仪表的准确度划分为若干等级，称准确度等级。国家统一规定所划分的等级有…，0.05, 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0, …。仪表的准确度等级按以下方法确定，首先用仪表满刻度相对误差略去其百分号（%）作为仪表的准确度，再根据国家统一划分的准确度等级，选其中数值上最接近又比准确度大的准确度等级作为该仪表的准确度等级。准确度等级的数字越小，仪表的准确度越高，或者说仪表的测量误差越小。

【例 1.1】 有一台压力仪表，其量程为 100kPa，经检验发现仪表的基本误差为 0.6kPa。问这台压力仪表的准确度为多少？准确度等级又为多少？

解 由题意可以算出仪表满刻度相对误差为 0.6%，略去其百分号，则该压力仪表的准确度为 0.6。由于 0.6 大于准确度等级中的 0.5，而小于 1.0，所以该仪表的准确度等级应为 1.0 级。

【例 1.2】 拟对某压力容器的压力进行测量，正常压力在 150kPa 左右，要求压力测量误差不大于 4.5kPa，问应选择什么样的压力检测仪表才能满足测量要求。

解 由题意，选择的压力仪表的基本误差应小于 4.5kPa 才能满足测量要求。另一方面，压力检测仪表的量程一般应比正常被测压力大 30% 以上，可选择压力仪表的量程为 250kPa，则仪表满刻度相对误差应小于 $4.5/250 = 1.8\%$ ，从而选择的压力仪表的准确度等级应为 1.5。

如压力仪表的量程改选为 400kPa，则同理可以算得其准确度等级应为 1.0。

由此可知，在基本误差不变的前提下，仪表的量程越大，准确度越高，反之越低。

(5) 动态响应特性

前面介绍的各种仪表误差或仪表准确度等都是指仪表的稳态（静态）特性，仪表的动态响应特性则反映仪表输出值跟随被测量随时间变化的能力。一般应用被测量初始值为零作单位阶跃变化时，仪表输出值达到或接近稳定值的时间进行评价。如果规定仪表输出值变化量达到稳定值的 63.2%，则所需要的时间称仪表的响应时间，也称仪表的时间常数，如图 1.9 中的 T 。这个时间短，说明仪表的动态响应特性好。

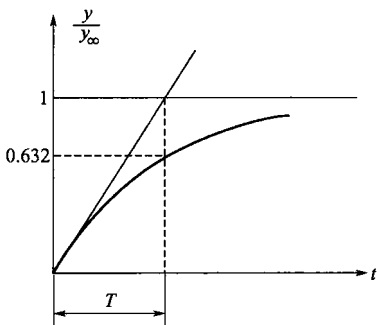


图 1.9 仪表的动态响应曲线

准确度高的仪表不一定动态响应特性好，反之亦然。而且很多仪表由于其敏感元件以及制造的原因，准确度和动态响应特性之间有一定的矛盾，二者不能兼得。

(6) 稳定性

检测仪表的稳定性可以从两个方面来描述，时间稳定性和工作条件变化稳定性。

① 时间稳定性 它表示在工作条件保持恒定时，仪表输出值在一段时间内随机变动量的大小。

② 工作条件稳定性 它表示仪表在规定的工作条件内某个条件的变化对仪表输出的影响。以仪表的供电电压影响为例，如果仪表规定的使用电源电压为 $(220 \pm 20)V$ AC，则实际电压在 200~240V AC 内可用电源每变化 1V 时仪表输出值的变化量来表示仪表对电源电压的稳定性。

(7) 重复性与再现性

① 重复性 在相同的测量条件下，对同一被测量，按同一方向（由小到大或由大到小）