

高职高专电气自动化技术专业规划教材
GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



传感器与 自动检测技术

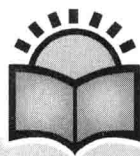
姜秀英 李 駘 姜 涛 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



传感器与 自动检测技术

主 编 姜秀英 李 駸 姜 涛
编 写 刘慧敏 郭素娜 杨敏跃
主 审 孙爱萍 杨振山
魏连荣



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为高职高专电气自动化技术专业规划教材。

全书共分三篇十五个项目。其中：第一篇为传感器与自动检测，主要包括检测技术基本知识、温度检测传感器及仪表、压力检测传感器及仪表、液位检测传感器及仪表、流量检测传感器及仪表、现代新型检测传感器及仪表；第二篇为执行器，主要包括执行器的构成及工作原理、气动执行器、电动执行器；第三篇为常用传感器的应用与制作实训，主要包括温度传感器的应用与制作实训，压力传感器应用与制作实训，光传感器应用与制作实训，气体、声音和湿度传感器的应用与制作实训，各种传感器报警电路制作。

本书可作为高职高专院校电气自动化技术、生产过程自动化技术、机电一体化技术等专业的传感器与自动检测技术项目教学课程的教材，也可作为相关行业生产过程控制工程的培训教材，还可供相关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器与自动检测技术/姜秀英, 李駘, 姜涛主编. —北京:
中国电力出版社, 2009

高职高专电气自动化技术专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8158 - 9

I. 传… II. ①姜…②李…③姜… III. ①传感器—高等学校:
技术学校—教材②自动检测—高等学校: 技术学校—教材
IV. TP212 TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 015828 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

*

2009 年 2 月第一版 2009 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 296 千字

定价 20.00 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

高职高专电气自动化技术专业规划教材

编 委 会

主 任 吕景泉

副主任 狄建雄 凌艺春 谭有广 周乐挺 郁汉琪

秘书长 李兆春

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁学恭 马伯华 王 燕 王 薇 王永红

刘玉娟 刘玉梅 刘保录 孙成普 孙忠献

何 颖 何首贤 张 池 张永飞 张学亮

张跃东 李方园 陆锦军 陈 赵 姚永刚

姚庆文 郭 健 钱金法 常文平 韩 莉

前言

本教材按照 21 世纪人才培养的时代特征, 突出高职高专工程类自动化技术的教育特点, 以培养应用型、技能型人才为目标, 将生产过程中传感器与自动检测技术的新知识、新技能、新检测手段编入教材中。全书以最新的编著方法, 紧密配合“工学结合”的思路; 有给人耳目一新的感受。以专业核心知识与技能一体化为目标; 以传感器与自动检测应用能力为手段; 以传感器实际应用, 制作分析为示范; 结构清晰, 深入浅出, 更便于高职高专学生学习。

本教材重点培养生产过程传感器与自动检测技术应用能力。从教材的内容到形式都独具特色, 采用真实典型的应用实例, 以技能操作为核心, 系统地讲授基本概念及影响传感器与自动检测的主要因素。使本教材突出指导性, 实用性和可操作性, 着重培养学生的动手能力, 训练内容精典, 达到培养具有关键能力和拓展创新型技能人才的目的。

本教材能立足高职高专人才教育培养目标, 结合企业真实过程控制工程应用实例, 遵循主动适应社会发展需要、突出应用性和针对性、加强实践能力培养的原则, 从高职高专院校的实际出发, 精选内容, 突出重点, 力求教材本身的实用性和对高职高专学生的适用性。同时可作为相关行业生产过程控制工程的培训使用教材。

教材有以下突出特点:

(1) 实用性: 教材来源于真实生产实际工程和企业传感器与自动检测技术, 涉及的专业技术面广, 使专业核心技能得到综合运用, 着重培养学生的综合动手能力。

(2) 集理论、实践技能训练与技术应用能力培养为一体, 内容体系新颖, 体现了新世纪高职高专人才教育的培养模式和基本要求。

(3) 将知识点与技能点紧密结合, 注重培养学生实际动手能力和解决实际问题的能力, 突出了高等职业教育的应用特色, 强调以能力为本位与有明确具体的训练制作成果展示。

(4) 教材内容以具体工程为主, 原理尽量少, 充分考虑技能型人才的培养目标。

(5) 案例分析内容覆盖面宽, 选择性强, 可满足不同行业的需求, 得以更好借鉴。

本教材采用一体化教学, 建议按 72~80 学时安排教学。

本教材由天津渤海职业技术学院姜秀英、李骥、姜涛主编; 河北化工医药职业技术学院刘慧敏、孙爱萍; 天津石油职业技术学院郭素娜、杨敏跃; 天津市中河化工有限公司杨振山高级技师参加编写。其中, 项目一由姜秀英撰稿, 项目二由郭素娜撰稿, 项目三由杨敏跃撰稿, 项目四由孙爱萍撰稿, 项目五由姜涛撰稿, 项目六由李骥、杨振山共同撰稿, 第二篇由姜涛、姜秀英共同撰稿; 第三篇传感器的应用与制作实训由李骥与刘慧敏共同撰稿, 全书由李骥负责统稿, 魏连荣老师主审。本书在编写过程中, 得到许多单位、学院和工程技术人员的大力支持与帮助, 表示诚挚感谢!

由于编者水平有限, 书中难免存在不足之处, 恳请广大读者指正。

编者

2009 年 1 月

目 录

前言

第一篇 传感器与自动检测

项目一 检测技术基本知识	1
第一节 传感器	1
第二节 检测电路	2
第三节 工业控制系统基础知识	3
第四节 自动检测技术基本概念	4
第五节 检测仪表技术发展趋势	8
第六节 检测误差分析基础	9
第七节 检测技术及方法分析	10
思考题与习题	14
项目二 温度检测传感器及仪表	15
第一节 温度测量的基本概念	15
第二节 温度传感器的分类与选型	15
第三节 测温传感器典型应用	26
第四节 温度传感器及仪表实训	29
思考题与习题	41
项目三 压力检测传感器及仪表	44
第一节 压力单位及压力检测方法	44
第二节 压力传感器典型应用	56
第三节 压力测量仪表选择、调校及安装实训	57
思考题与习题	69
项目四 液位检测传感器及仪表	70
第一节 物位信号的检测方法与检测元件选择	70
第二节 物位计典型应用	75
第三节 液位检测传感器及仪表选择、调校及安装	77
思考题与习题	87
项目五 流量检测传感器及仪表	88
第一节 流量检测传感器	88
第二节 流量传感器的应用	94
第三节 流量传感器标准装置的校验	94

思考题与习题	102
项目六 现代新型检测传感器及仪表	103
第一节 光电传感器	103
第二节 光纤传感器	111
第三节 超声波传感器	115
思考题与习题	118

第二篇 执 行 器

项目七 执行器的构成及工作原理	119
第一节 执行器分类与比较	119
第二节 执行器基本构成及工作原理	119
项目八 气动执行器	121
第一节 气动执行器基本构成	121
第二节 阀门定位器	122
项目九 电动执行器	123
第一节 电动执行器的构成及原理	123
第二节 伺服放大器的原理、调校及安装	124
第三节 ZKJ-7100 型角行程电动执行机构	127
第四节 智能型直流无刷变频电动执行机构	135
第五节 现场总线技术	141
项目十 调节阀	148
第一节 调节阀工作原理	148
第二节 调节阀结构及分类	148
第三节 调节阀的流量特性	150
第四节 调节阀的流量系数	151
第五节 典型应用（调节型电动蝶阀）	152

第三篇 常用传感器的应用与制作实训

项目十一 温度传感器的应用与制作实训	155
任务一 温度传感器的应用	155
任务二 制作训练	159
项目十二 压力传感器应用与制作实训	161
任务一 压力传感器的应用	161
任务二 制作训练	163
项目十三 光传感器应用与制作实训	165
任务一 光传感器应用	165
任务二 制作训练	166

项目十四	气体、声音和湿度传感器应用与制作实训 ·····	168
任务一	气体、声音和湿度传感器应用·····	168
任务二	制作训练·····	168
任务三	制作训练·····	170
项目十五	各种传感器报警电路制作 ·····	171
任务一	下雨报警器·····	171
任务二	盆花缺水告警器·····	171
任务三	太阳能热水器水满报警器·····	172
任务四	婴儿尿床声光告知器·····	173
任务五	小学生睡眠叫醒器·····	174
任务六	小孩防走失提醒器·····	174
任务七	断线式防盗报警器·····	176
任务八	磁控式防盗报警器·····	176
任务九	光控式防盗报警器·····	177
任务十	煤气炉熄火报警器·····	178
任务十一	熔断器熔断报警器·····	179
任务十二	锅炉缺水、水满告知器·····	179
任务十三	高精度温度报警器·····	180
任务十四	电阻应变式力传感器制作的数显电子秤·····	181
任务十五	温度传感器制作的水开音乐告知器·····	182
任务十六	气敏传感器制作的烟雾报警器·····	183
任务十七	感应式传感器制作的感应式讯响器·····	184
任务十八	声振动传感器制作的电子狗·····	186
参考文献 ·····		188

第一篇 传感器与自动检测

项目一 检测技术基本知识

自动检测技术应用的领域十分广泛，其内容包括传感器技术、误差理论、测试计量技术、抗干扰技术以及电量间相互转换技术等。如何提高检测与控制系统的检测分辨率、精度、稳定性和可靠性是本门课程的方向。在检测与控制系统中，传感器与自动检测技术的作用是信息的提取、转换及处理，是整个系统的基础。如果它们性能不佳，就难以确保整个系统性能的优良。自动检测技术是以研究检测与控制系统中信息的提取、转换及处理的理论和技術为主要内容的一门应用性技术学科。

第一节 传 感 器

传感器 (Transducer) 是一种将被测的非电量转换成电量的装置，是一种获得信息的手段，它在检测与控制系统中占有重要的地位。它获得信息的正确与否，关系到整个检测与控制系统的精度。如果传感器的误差很大，后面的测量电路、放大器、指示仪等设备的精度再高也将难以提高整个检测系统的精度。

近些年来，由于计算机技术突飞猛进的发展和微处理器的广泛应用，使得在国民经济中的任何一个部门中，各种物理量、化学量和生物量形态的信息都可通过计算机来进行正确、及时的处理。但是，首先都需要通过传感器来获得信息。所以，有人把计算机比喻为一个人的大脑，传感器则是人的五官。

因此，传感器是自动检测与控制系统的首要环节。

人们常把传感器、敏感元件、换能器及转换器的概念等同起来。在非电量测量转换技术中，传感器一词是与工业测量联系在一起的，实现非电量转换成电量的器件称为传感器。在水声和超声波等技术中强调的是能量的转换，比如压电元件可以起到机—电或电—机能量的转换作用，所以把可以进行能量转换的器件称为换能器；对于硅太阳能电池来说，也是一种换能器件，它可以把光能转换成电能输出，但在这类器件上强调的是转换效率，习惯上把硅太阳能电池叫做转换器；在电子技术领域，常把能感受信号电子元件称为敏感元件，如热敏元件、光敏元件、磁敏元件和气敏元件等。这些不同的提法反映在不同的技术领域，只是根据器件用途对同一类型的器件使用不同的技术术语而已。这些提法虽然含义有些狭窄，但在大多数情况下并不会产生矛盾，如热敏电阻可称为热敏元件，也可称为温度传感器。又如扬声器，当它作为声检测器件时，它是一个声传感器；如果把它当成喇叭使用，也只能认为它是一个换能或转换器件了。

本教材从广义角度分析研究，传感器是指在电子检测控制设备输入部分中起检测信号作用的器件。

第二节 检测电路

自动检测技术和控制的对象与单片机之间通过测量电路和控制电路相连。如果说单片机是信息处理中心的话,那么测量电路则是信息输入通道,控制电路则是信息输出通道。测量电路也称检测电路,它是检测与控制系统实现检测与控制功能的基本电路,在整个系统中起着十分重要的作用。检测与控制系统的性能在很大程度上取决于检测电路。目前仍广泛使用的一些较为简单的测量仪表并不包含单片机。这些非微机化的测量仪表,其内部的核心电路主要是各种模拟检测电路。

按照检测结果的表示形式,检测电路可分为模拟检测电路和数字检测电路两大类,基本组成分别如图 1-1 和图 1-2 所示。



图 1-1 模拟检测电路的基本组成

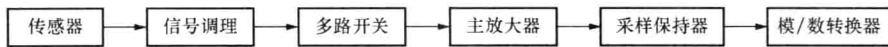


图 1-2 数字检测电路的基本组成

一、模拟检测电路

图 1-1 中,传感器将被测非电量转换为电信号,被测信号一般比较微弱,通常需要先进行放大。有些传感器(如电感式、电容式和交流应变电桥等)输出的是调制过的模拟信号,因此,还需用解调器解调。被测信号中混杂有各种干扰,常常要用滤波器来滤除。有些被测参数比较复杂,往往要进行必要的运算才能获取被测量。为了便于远距离传送、显示或 A/D 转换,常常需要将电压、电流、频率三种形式的模拟电信号进行相互转换。图 1-1 中,被测信号一直是以模拟形式存在和传送的,通道中各个环节都是对模拟信号进行这样或那样的调理,因此,统称为信号调理电路。常规的模拟测量仪表,因为其测量结果是以模拟形式显示,所以,其检测电路(称为模拟测量电路)主要是调理电路。

二、数字检测电路

一些数字化测试仪表特别是微机化检测与控制系统,因为测试结果要用数字形式显示,测试结果要用微机进行处理,所以,其检测电路除了对被测模拟信号进行必要的调理外,还要将模拟信号转换成便于数字显示或微机处理的数字信号。实现模拟信号数字化的电路称为数据采集电路。因此,数字检测测量电路一般由传感器、信号调理电路和数据采集电路三部分组成,如图 1-2 所示。图中构成数据采集电路的多路开关用来对多路模拟信号进行采样;主放大器对采样得到的信号进行程控增益放大或瞬时浮点放大;采样保持器对放大后的信号进行保持;模/数转换器在保持期间将保持的模拟信号电压转换成相应的数字信号电压。如果被测信号的幅度变化范围不大,则图 1-2 中的主放大器可省去。对比图 1-1 与图 1-2 可知,数字检测电路与模拟检测电路的区别在于数字检测电路包含数据采集电路。

第三节 工业控制系统基础知识

任何一个工业控制系统都必然要应用一定的自动检测技术和相应的仪表单元，自动检测技术和仪表两单元是紧密相关和相辅相成的，它们是控制系统的重要基础。检测单元完成对各种过程参数的测量，并实现必要的数据处理；仪表单元则是实现各种控制作用的手段和条件，它将检测得到的数据进行运算处理，并通过相应的单元实现对被控变量的调节。新技术的不断出现，使传统的自动控制系统以及相关的自动检测和仪表技术都发生了很大变化。

一、典型检测仪表控制系统

典型的自动检测仪表控制系统，以化学工业中用天然气做原料生产合成氨的控制系统为例，如图 1-3 所示。天然气在经过脱硫塔时，需要进行控制的参数分别为压力、液位和流量，这将构成 PC、LC 和 FC 三个单参数调节控制系统。

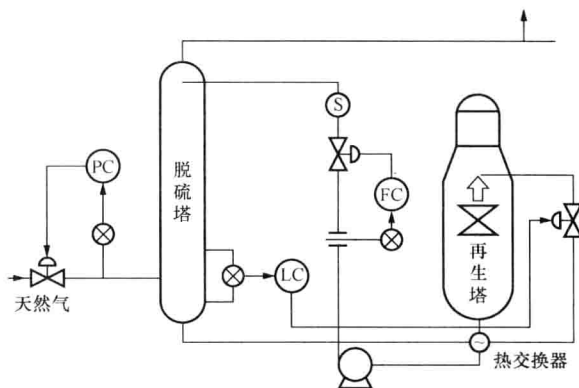


图 1-3 脱硫塔控制系统

例如，实现脱硫塔压力调节控制的单参数控制子系统 PC，该系统的结构框图如图 1-4 所示，进行压力参数检测及实现检测信号转换和传输的单元称为压力变送单元，实现调节控制规律计算的单元称为调节单元，最终实现被控变量控制作用的单元称为执行单元。为了实现调节控制作用，首先测量进入脱硫塔的天然气的压力，检测到的信号经转换后，以标准信号制式传输到实现调节运算的调节单元；调节单元在接收到测量信号后，即与给定单元的设定压力值进行比较，并根据设定的控制规律计算出实现控制调节作用所需的控制信号；为保证能够驱动相应的设备实现对被控变量的调节，控制信号还需借助专用的执行单元机构实现控制信号的转换与保持。

同理，考虑单独实现脱硫塔流量调节控制的情况，控制子系统 FC 的结构框图如图 1-5 所示。图中，流量变送单元是专门用于流量检测信号转换和传输的仪表变送单元，而安全栅的增加则是为了实现安全火花防爆特性。

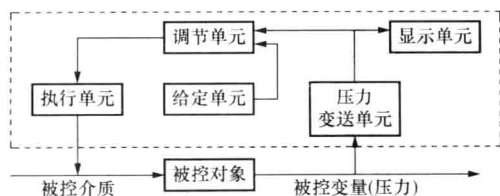


图 1-4 天然气压力控制系统结构框图

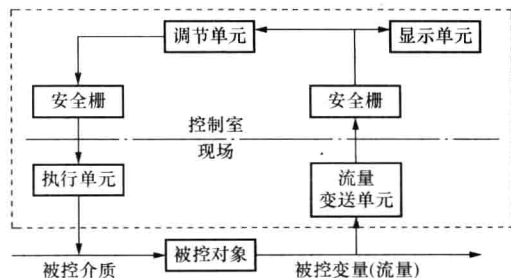


图 1-5 脱硫塔流量控制系统结构框图

在无特殊条件要求下，常规工业检测仪表控制系统的构成基本相同，而与具体采用的仪

表类型无关。这里所说的基本构成包括被控对象、变送单元、显示单元、调节单元、给定单元和执行单元等。由于各控制子系统被控变量的不同，各子系统采用的变送器和调节器的控制规律因而有所不同。

二、检测仪表控制系统结构分析

总结上述几种情况，并由此推广到常规情况下的工业过程控制系统，检测仪表控制系统的一般结构可概括如图 1-6 所示。

显然，图 1-6 所示为一个闭环回路控制系统，只是为了突出被控对象和操作人员，对传统意义上的回路结构进行了适当调整。被控（被测）对象是控制系统的核心，它可以是单输入单输出对象，

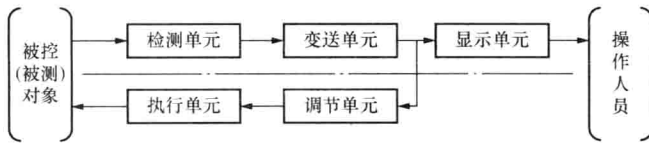


图 1-6 典型工业检测仪表控制系统结构图

即常规的回路控制系统；也可以是多输入多输出对象，此时通常需采用计算机仪表控制系统，如 DDC 直接数字控制系统、DCS 集散控制系统和 FCS 现场总线控制系统。

自动检测技术是控制系统实现控制调节作用的基础，它完成对所有被控变量的直接测量，包括温度、压力、流量、液位、成分等；同时也可实现某些参数的间接测量，如采用信息融合技术实现的测量。

变送单元完成对被测变量信号的转换和传输，其转换结果须符合国际标准的信号制式，即 1~5V DC 或 4~20mA DC 模拟信号或各种仪表控制系统所需的数字信号。

显示单元是控制系统的附属单元，它将检测单元测量获得的有关参数，通过适当的方式显示给操作人员，这些显示方式包括曲线、数字和图像等。

调节单元完成调节控制规律的运算，它将变送器传输来的测量信号与给定值进行比较，并对比较结果进行调节运算，以输出作为控制信号。调节单元采用的常规控制规律包括位式调节和 PID 调节，而 PID 控制规律又根据实际情况的需要产生出了各种不同的改进型。

执行单元是控制系统实施控制策略的执行机构，它负责将调节器的控制输出信号按执行机构的需要产生出相应的信号，以驱动执行机构实现对被控变量的调节作用。通常执行单元分气动、液动和电动三类。

这里需要特别说明的是，图 1-6 所示的只是控制系统的逻辑结构。当采用传统检测和仪表单元构成控制系统时，这种结构与实际系统相同，即图中相关两个单元间采用点对点的连接方式。但是有时检测单元和变送单元及显示单元的界限并不明显，会构成功能组合单元。而在网络化的控制回路系统中，多数检测和仪表单元均通过网络相互连接。

第四节 自动检测技术基本概念

本节介绍自动检测和仪表中常用的基本性能指标，包括测量范围及量程、基本温差、精度等级、灵敏度、分辨率、漂移、可靠性以及抗干扰性能指标等。

一、测量范围、上下限及量程

每个用于测量的仪表都有测量范围，它是该仪表按规定精度测量被测变量的范围。测量范围的最小值和最大值分别称为测量下限和测量上限，简称下限和上限。

仪表的量程可以用来表示其测量范围的大小,是其测量上限值与下限值的代数差,即

$$\text{量程} = \text{测量上限值} - \text{测量下限值} \quad (1-1)$$

使用下限与上限可完全表示仪表的测量范围,也可确定其量程。如一个温度测量仪表的下限值是一 50°C ,上限值是 150°C ,则其测量范围可表示为一 $50\sim 150^{\circ}\text{C}$,量程为 200°C 。由此可见,给出仪表的测量范围便知其上下限及量程,反之只给出仪表的量程,却无法确定其上下限及测量范围。

二、零点迁移和量程迁移

仪表测量范围的另一种表示方法是给出仪表的零点即测量下限值及仪表的量程。由前面的分析可知,只要仪表的零点和量程确定了,其测量范围也就确定了。因而这是一种更为常用的表示方式,其示意图如图 1-7 所示。

在实际使用中,由于测量要求或测量条件的变化,需要改变仪表的零点或量程,为此可以对仪表进行零点和量程的调整。通常将零点的变化称为零点迁移,而量程的变化则称为量程迁移。

以被测变量值相对于量程的百分数为横坐标标记为 X ,以仪表指针位移或转角相对于标尺长度的百分数为纵坐标标记为 Y ,可得到仪表的标尺特性曲线 $X-Y$ 。假设仪表标尺是线性的,其标尺特性曲线可如图 1-7 中的线段 1 所示。

考虑单纯的零点迁移情况,如线段 2 所示,此时仪表量程不变,其斜率亦保持不变,线段 2 只是线段 1 的平移,理论上零点迁移到了原输入值的 -25% ,终点迁移到了原输入值的 75% ,而量程则仍为 100% 。考虑单纯的量程迁移情况如线段 3 所示,此时零点不变,线段仍通过坐标系原点,但斜率发生了变化,理论上量程迁移到了原来的 70% 。

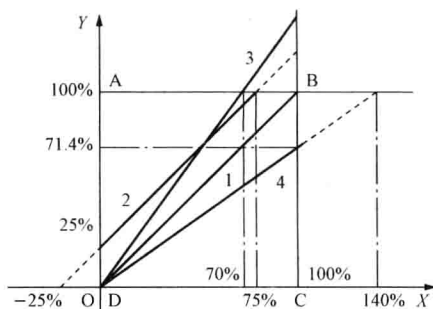


图 1-7 零点迁移和量程迁移示意图

由于受仪表标尺长度和输入通道对输入信号的限制,实际的标尺特性曲线通常只限于正边形 ABCD 内部,即用实线表示部分;虚线部分只是理论上的结果,无实际意义。因此,线段 2 的实际效果是标尺有效使用范围迁移到原来的 $25\%\sim 100\%$,测量范围迁移到原来的 $0\%\sim 75\%$ 。线段 3 的实际效果是标尺仍保持原来有效范围的 $0\%\sim 100\%$,测量范围迁移到了原来的 $0\%\sim 70\%$ 。同理,考虑图中线段 4 所示的量程迁移情况,其理论上零点没有迁移,量程迁移到原来的 140% ;而实际上标尺只保持了原来有效范围的 $0\%\sim 71.4\%$,测量范围则仍为原来的 $0\%\sim 100\%$ 。

零点迁移和量程迁移可以扩大仪表的通用性。但是,在何种条件下可以进行迁移,以及能够有多大的迁移量,还需视具体仪表的结构和性能而定。

三、灵敏度和分辨率

灵敏度是仪表对被测参数变化的灵敏程度,常以在被测参数改变时,经过足够时间仪表指示值达到稳定状态后,仪表输出变化量 ΔY 与引起此变化的输入变化量 ΔU 之比表示,即

$$\text{灵敏度} = \Delta Y / \Delta U \quad (1-2)$$

可见,灵敏度也就是图 1-7 所示标尺特性曲线的斜率。因此,量程迁移就意味着灵敏度的改变;而如果仅仅是零点迁移则灵敏度不变。

由灵敏度的定义表达式 (1-2) 可知, 灵敏度实质上等同于仪表的放大倍数。只是由于 U 和 Y 都有具体量纲, 所以灵敏度也有量纲, 且由 U 和 Y 确定; 而放大倍数没有量纲。所以灵敏度的含义比放大倍数要广泛得多。常容易与仪表灵敏度混淆的是仪表分辨率。它是仪表输出能响应和分辨的最小输入量, 又称仪表灵敏限。分辨率是灵敏度的一种反映, 一般说仪表的灵敏度高, 则其分辨率同样也高。因此实际中通常希望提高仪表的灵敏度, 从而保证其分辨率较好。

在由多个仪表组成的测量或控制系统中, 灵敏度具有可传递性。例如首尾串联的仪表系统 (即前一个仪表的输出是后一个仪表的输入), 其总灵敏度是各仪表灵敏度的乘积。

四、误差

仪表指示装置所显示的被测值称为示值, 它是被测真值的反映。严格地说, 被测真值只是一个理论值, 因为无论采用何种仪表测到的值都有误差。实际中常将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。例如, 使用国家标准计量机构标定过的标准仪表进行测量, 其测量值即可作为约定真值。

示值与公认的约定真值之差称为绝对误差, 即

$$\text{绝对误差} = \text{示值} - \text{约定真值} \quad (1-3)$$

绝对误差通常可简称为误差。误差为正时表示仪表的示值偏大, 反之偏小。绝对误差与约定真值之比称为相对误差, 常用百分数表示, 即

$$\text{相对误差}(\%) = \text{绝对误差} / \text{约定真值} \quad (1-4)$$

虽然用绝对误差占约定真值的百分数来衡量仪表的精度比较合理, 但仪表多应用在测量接近上限值的量, 因而用量程取代式 (1-4) 中的约定真值得到引用误差为

$$\text{引用误差}(\%) = \text{绝对误差} / \text{量程} \quad (1-5)$$

考虑整个量程范围内的最大绝对误差与量程的比值, 则获得仪表的最大引用误差为

$$\text{最大引用误差}(\%) = \text{最大绝对误差} / \text{量程} \quad (1-6)$$

最大引用误差与仪表的具体示值无关, 可以更好地说明仪表测量的精确程度。它是仪表基本误差的主要形式, 是仪表的主要质量指标之一。

仪表在出厂时要规定引用误差的允许值, 简称允许误差。若将仪表的允许误差记为 Q , 最大引用误差记为 Q_{\max} , 则两者之间满足关系

$$Q_{\max} \leq Q \quad (1-7)$$

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。仪表应用时应严格按照规定的环境条件即参比工作条件进行测量, 此时获得的误差称为基本误差; 因此如果在非参比工作条件下进行测量, 此时获得的误差除包含基本误差外, 还会包含额外的误差, 又称附加误差, 即

$$\text{误差} = \text{基本误差} + \text{附加误差} \quad (1-8)$$

以上的讨论基本针对仪表的静态误差, 静态误差是指仪表静止状态时的误差, 或被测量变化十分缓慢时所呈现的误差, 此时不考虑仪表的惯性因素。仪表还存在有动态误差, 动态误差是指仪表因惯性迟延所引起的附加误差, 或变化过程中的误差。仪表静态误差的应用更为普遍。

五、精确度

任何仪表都有一定的误差。因此, 使用仪表时必须先知道该仪表的精确程度, 以便估计测量结果与约定真值的差距, 即估计测量值的大小。仪表的精确度通常是用允许的最大引用

误差去掉百分号 (%) 后的数字来衡量的。

按仪表工业规定, 仪表的精确度划分成若干等级, 简称精度等级, 如 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.5、4 级等。由此可见, 精度等级的数字越小, 精度越高。

仪表精度等级的确定过程如图 1-8 所示。为便于观察和理解, 对其中的偏差做了有意识地放大。图中直线 OA 是理想的输入输出特性曲线, 虚线 3 和 4 是基本误差的下限和上限。在检定或校验过程中所获得的实际特性曲线记为曲线 1 和 2, 其中曲线 1 是输入值由下限值到上限值逐渐增大时获得的, 称为实际上升曲线; 而曲线 2 是输入值由上限值到下限值逐渐减小时获得的, 称为实际下降曲线。由曲线 1 和 2 与直线 OA 的偏差可分别得到最大实际正偏差和负偏差。可见, 曲线 1 和 2 愈接近直线 OA, 即仪表的基本误差限愈小, 仪表的精度等级越高。

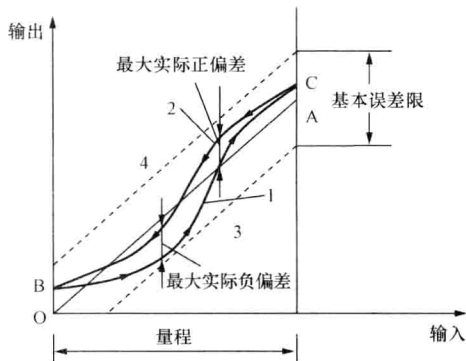


图 1-8 仪表精度等级确定过程示意图

六、滞环、死区和回差

仪表内部的某些元件具有储能效应, 如弹性变形、磁滞现象等, 其作用使仪表检验所得的实际上升曲线和实际下降曲线常出现不重合的情况, 从而使得仪表的特性曲线形成环状, 该种现象即称为滞环效应, 其特性曲线如图 1-9 所示。显然在出现滞环现象时, 仪表的同一输入值常对应多个输出值, 并出现误差。

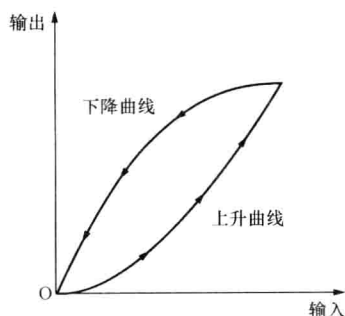


图 1-9 滞环效应特性曲线

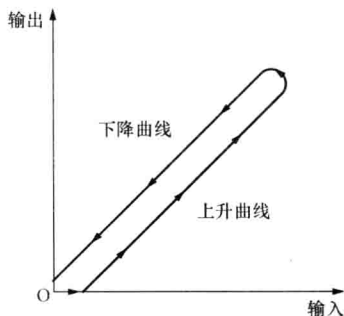


图 1-10 死区效应特性曲线

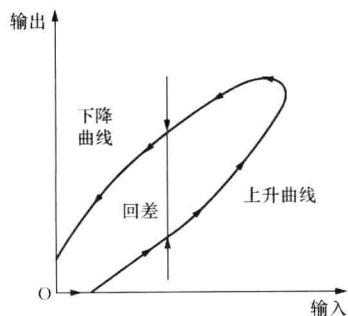


图 1-11 综合效应特性曲线

仪表内部的某些元件具有死区效应, 如传动机构的摩擦和间隙等, 其作用亦可使仪表检验所得的实际上升曲线和实际下降曲线常出现不重合的情况。这种死区效应使得仪表输入在小到一定范围后不足以引起输出的任何变化, 而这一范围则称为死区。考虑仪表特性曲线呈线性关系的情况, 其特性曲线如图 1-10 所示。因此, 存在死区的仪表要求输入值大于某一限度才能引起输出的变化, 死区也称为不灵敏区。理想情况下, 不灵敏区的宽度是灵敏限的 2 倍也可能某个仪表既具有储能效应, 也具有死区效应, 其综合效应将是以上两者的结合, 典型的特性曲线如图 1-11 所示。

在以上各种情况下,实际上升曲线和实际下降曲线间都存在差值,其最大的差值称为回差,亦称变差,或来回变差。

七、重复性和再现性

在同一工作条件下,同方向连续多次对同一输入值进行测量所得的多个输出值之间相互一致的程度称为仪表的重复性,它不包括滞环和死区。例如,在图 1-12 中列出了在同一工作条件下测出的仪表的 3 条实际上升曲线,其重复性就是指这 3 条曲线在同一输入值处的离散程度。

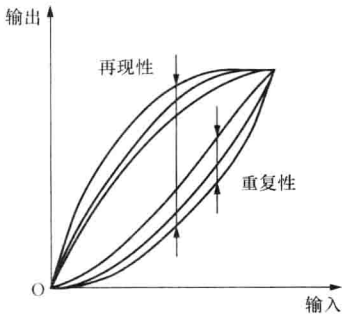


图 1-12 重复性和再现性特性曲线

实际上,某种仪表的重复性常选用上升曲线的最大离散程度和下降曲线的最大离散程度两者中的最大值来表示。

再现性包括滞环和死区,它是仪表实际上升曲线和实际下降曲线之间离散程度的表示,常取两种曲线之间离散程度最大点的值来表示,如图 1-12 中所示。

重复性是衡量仪表不受随机因素影响的能力,再现性是仪表性能稳定的一种标志,因而在评价某种仪表的性能时常同时要求其重复性和再现性。重复性和再现性优良的仪表并不一定精度高,但高精度的优质仪表一定有很好的重复性和再现性。

八、可靠性

表征仪表可靠性的尺度有多种,最基本的是可靠度。它是衡量仪表能够正常工作并发挥其功能的程度。简单地说,如果有 100 台同样的仪表,工作 1000h 后约有 99 台仍能正常工作,则可以说这批仪表工作 1000h 后的可靠度是 99%。

可靠度的应用亦可体现在仪表正常工作和出现故障两个方面。在正常工作方面的体现是仪表平均无故障工作时间。因为仪表常存在的修复多是容易的,因而以相邻两次故障时间间隔的平均值为指标,可很好表示平均无故障工作时间。在出现故障方面的体现是平均故障修复时间,它表示的是仪表修复所用的平均时间,由此可从反面衡量仪表的可靠度。

基于以上分析,综合考虑常规要求,即在要求平均无故障工作时间尽可能长的同时,又要求平均故障修复时间尽可能短,综合评价仪表的可靠性,引出综合性指标有效度。其定义为

$$\text{有效度} = \frac{\text{平均无故障工作时间}}{\text{平均无故障工作时间} + \text{平均故障修复时间}} \quad (1-9)$$

第五节 检测仪表技术发展趋势

工业控制系统中的检测技术和仪表系统,是实现自动控制的基础。随着新技术的不断涌现,特别是先进检测技术、现代传感器技术、计算机技术、网络技术和多媒体技术的出现,给传统式的控制系统甚至计算机控制系统都带来了极大的冲击,并由此引出许多崭新的发展。归纳起来,这些发展包括:

- 1) 成组传感器的复合检测;
- 2) 微机械量检测技术;
- 3) 智能传感器的发展;

- 4) 各种智能仪表的出现;
- 5) 计算机多媒体化的虚拟仪表;
- 6) 传感器、变送器和调节器的网络化产品。

对工业检测仪表控制系统来说, 以上的发展还远不是终点。由这些发展所产生的更深层次的变化正在悄然兴起, 并越来越得到了各行各业的认同。这些深层次的变化包括:

- 1) 控制系统的控制网络化;
- 2) 控制系统的系统扁平化;
- 3) 控制系统的组织重构化;
- 4) 控制系统的工作协调化。

如何针对检测技术和仪表系统提出一系列新的概念和必要的理论, 以面对高新技术的挑战, 并适应当今自动化技术发展的需要, 是目前亟待解决的关键问题。

第六节 检测误差分析基础

人们对物理量或参数进行检测时, 首先要借助一定的检测手段取得必要的测量数据, 而后要对测得的数据进行误差分析或精度分析, 之后才可以进行数据处理。误差分析与选择测量方法是同样重要的, 因为只有掌握了数据的可确定程度才能做出相应的科学的和经济的判断与决策。

通过学习误差分析理论, 可以掌握以下几个要点: ①根据检测目的选择测量精度; ②误差原因分析及误差的表示方法; ③间接检测时误差的传递法则; ④平均值误差的估计以及粗大误差的检验; ⑤根据测量数据推导实验公式等。

一、检测精度

检测或测量的精度是相对而言的。测量地球的直径无法达到以米为单位的测量精度, 但是测量几厘米大小的钢球直径则需要毫米单位的检测精度。现代科学的发展, 使以原子或分子大小的精度进行加工成为现实, 出现了许多精密检测方法。目前光学精密检测仪器精度多已达到了 0.01μ 级。至于微机械加工则要求纳米(10^{-3}nm , 10^{-9}m)级的检测精度。

对于测量精度高的检测方法或仪器, 其要求的使用条件也相对严酷, 如需要恒定的温度、高清洁度等环境条件以及操作人员的技术水平等, 但是相应的测量成本要高, 维护费用大。所以在解决实际问题中不是精度越高越好, 而是要权衡条件, 根据实际需要选择恰当的测量精度。

测量精度可以用误差来表示, 精度低即测量误差大。

二、误差分类

根据误差的特性不同, 可以分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

系统误差是指测量器件或方法引起的有规律的误差, 体现测量值为真值之间的偏差, 如仪器零点误差, 经年变化误差, 温度、电磁场等环境条件引起的误差, 动力源引起的误差等。这种误差的绝对值和符号保持不变, 或测量条件改变误差服从某种函数关系变化。

掌握系统误差产生的原因后, 可以对仪器加以校对, 改变测试环境进行检查, 以便找出