



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电气工程及其自动化专业精品教材

*Electrical Engineering
and Automation*

自动化仪表与过程控制

Automation Instrument & Process Control, Sixth Edition

(第6版)

◎ 施仁 刘文江 郑辑光 王勇 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电气工程及其自动化专业精品教材

自动化仪表与过程控制

(第6版)

施仁 刘文江 郑辑光 王勇 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”，主要讨论生产过程自动化中使用的各种检测与控制仪表的工作原理，以及过程控制系统的设计整定方法。

全书分上、下两篇。上篇为自动化仪表部分，介绍最常用的工业检测仪表、调节器、执行器和防爆栅等的工作原理及控制系统集成技术。重点讨论 DDZ—Ⅲ型电动单元组合仪表、YS—1000 可编程序调节器、CS3000 集散控制系统和现场总线控制系统的工作原理及使用方法。下篇为过程控制部分，介绍了过程控制对象动态特性测试方法、单回路及串级调节系统的设计和参数整定方法，以及解耦控制、推理控制及预测控制等先进控制技术，最后介绍了几种典型调节系统在生产过程自动化中的应用实例。

本书可供高等学校自动化专业、电气工程及自动化专业本科生、研究生作为教材或参考书使用，也可供相关专业学生及从事生产过程检测控制的研究及工程技术人员参考使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动化仪表与过程控制 / 施仁等编著. —6 版. —北京: 电子工业出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-121-31956-3

I. ①自… II. ①施… III. ①自动化仪表—高等学校—教材②过程控制—高等学校—教材 IV. ①TH86
②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 139698 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 凌毅 文字编辑: 陈晓莉

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.5 字数: 578 千字

版 次: 1984 年 1 月第 1 版

2018 年 1 月第 6 版

印 次: 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, (010)88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010)88254528, lingyi@phei.com.cn。

前 言

本书是“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”，由“电子信息与电气学科教学指导委员会”及“电气工程及其自动化专业教学分指导委员会”推荐出版。

本教材最初是根据 1977 年恢复高考后，全国工科电子类自动控制专业教材编审委员会制订的教学大纲，由西安交通大学施仁、刘文江编写，国防工业出版社 1980 年出版的《工业自动化仪表与过程控制》全国统编教材。此后，根据国务院关于高等学校教材出版分工的规定，改由电子工业出版社作为全国自动控制专业统编教材出版、发行。多年来被诸多院校广泛采用，也收到不少改进意见。随着自动化、通信与计算机技术的快速发展，本书内容也不断翻新，多次修订，分别于 1984 年（第 1 版）、1991 年（第 2 版）、2003 年（第 3 版）、2006 年（第 4 版）、2011 年（第 5 版）面世。2006 年本书第四版被评为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”、电气工程及其自动化专业精品教材。为适应近年来科技发展和节能环保的需求，本书再次进行了修订，如对模拟调节器的篇幅做了压缩，在数字设备信号互联中介绍了 OPC 技术，在工程应用中增加了火力发电厂的脱硝控制等，作为第 6 版出版。

本教材的参考教学学时数为 60 学时，上、下篇各约 30 学时，其主要内容是：上篇为自动化仪表部分，介绍工业检测仪表、调节器、执行器和防爆栅，以及集散控制系统（DCS）与现场总线控制系统（FCS）的工作原理和系统集成技术。下篇为过程控制部分，介绍控制对象动态特性测试方法、单回路及串级调节系统的设计和参数整定方法，以及解耦控制、推理控制及预测控制等先进控制技术，最后介绍了几种典型控制系统在生产过程自动化中的应用实例。

本教材的自动化仪表部分主要以 DDZ—Ⅲ 型电动单元组合仪表、日本横河公司 YS—1000 可编程序调节器、CS3000 集散控制系统和现场总线控制系统为重点，介绍基本工作原理和使用特点。关于仪表具体结构和调校方法讨论不多。本书下篇为过程控制部分，主要介绍控制对象动态特性测试和数据处理方法，以及控制系统设计和参数整定的一般原理，不针对特定的工艺过程。

本课程是高等学校自动化专业、电气工程专业学生在学完电子技术基础、控制理论、微机原理等课程后开设的专业课程。通过学习本课程，学生可以掌握自动化仪表的工作原理和使用特点，选用通用的工业自动化技术工具，初步具备集成自动控制系统的能力，在深入了解被控对象要求的基础上，对控制系统进行设计、组装、调试和投运。

本教材由施仁编写自动化仪表概述及第 1、第 2、第 4 章，郑辑光编写第 3 章，刘文江编写第 5、第 6、第 7、第 9 章，王勇编写第 8 章，并对第 5~9 章内容进行一定的修改整理。为了方便教学，郑辑光、王勇为本教材制作了电子课件，欢迎任课教师索取（<http://www.hxedu.com.cn>）。

本书编写过程中参考了各种书刊及资料，在此谨向他们表示深切的谢意。由于作者水平有限，书中肯定有不少缺点和不足，请广大读者批评指正。

编者

2017 年 12 月于西安

目 录

上篇 自动化仪表	1
自动化仪表概述	3
0.1 自动化仪表及其发展概况	3
0.2 电动单元组合仪表及其控制系统的组成	4
0.3 仪表的基本技术指标	6
复习思考题	7
第1章 检测仪表	8
1.1 温度检测仪表	8
1.1.1 测量温度的主要方法	8
1.1.2 热电偶	9
1.1.3 热电阻	11
1.1.4 半导体热敏电阻	13
1.1.5 热电偶温度变送器的基本结构	13
1.1.6 DDZ—Ⅲ型热电偶温度变送器的实际线路	17
1.2 压力检测仪表	19
1.2.1 弹性式压力测量元件	20
1.2.2 力平衡式压力(差压)变送器	21
1.2.3 位移式差压(压力)变送器	23
1.2.4 固态测压仪表	26
1.3 流量检测仪表	27
1.3.1 节流式流量计	28
1.3.2 容积式流量计	31
1.3.3 涡轮流量计	32
1.3.4 电磁流量计	33
1.3.5 旋涡式流量计	34
1.4 液位检测仪表	36
1.4.1 浮力式液位计和静压式液位计	36
1.4.2 电容式液位计	37
1.4.3 超声波液位计	38
1.5 成分分析仪表	39
1.5.1 热导式气体分析仪	39
1.5.2 红外线气体分析仪	41
1.5.3 色谱分析仪	43
1.5.4 氧化锆氧分析仪	46
复习思考题	48
第2章 调节器	49
2.1 调节器的调节规律	49

2.2	PID 运算电路	50
2.2.1	比例积分运算电路	51
2.2.2	比例微分运算电路	53
2.2.3	PID 运算电路	55
2.3	PID 调节器的阶跃响应和频率特性	56
2.3.1	PID 调节器的阶跃响应	56
2.3.2	PID 调节器的频率特性	57
2.4	PID 调节器的完整结构	59
2.5	数字控制算法	61
2.5.1	基本 PID 的离散表达式	62
2.5.2	采样周期的选择	63
2.5.3	变形的 PID 控制算法	64
2.5.4	混合过程 PID 算法	67
2.5.5	字长的考虑	68
2.6	可编程序调节器	68
2.6.1	可编程序调节器的电路	69
2.6.2	数字调节器的工作时序	73
2.6.3	用户程序结构及数据格式	75
2.6.4	运算模块	76
2.6.5	控制模块及编程	84
2.6.6	程序的写入和调试	94
2.6.7	数字调节器的通信	96
	复习思考题	97
第 3 章 集散控制系统与现场总线控制系统		98
3.1	集散控制系统的发展及其组成	98
3.1.1	集散控制系统的发展	98
3.1.2	CENTUM CS3000 基本组成	103
3.1.3	CENTUM CS3000 的现场总线网络	106
3.1.4	CENTUM CS3000 子系统的一体化功能	109
3.2	DCS 现场控制站的功能	110
3.2.1	反馈控制功能	111
3.2.2	顺序控制功能	120
3.3	DCS 操作站的功能	129
3.4	现场总线通信技术	135
3.4.1	现场总线技术的发展	136
3.4.2	开放系统互连参考模型	137
3.4.3	HART 通信技术	138
3.4.4	基金会现场总线通信技术	139
3.5	基金会现场总线的用户应用	148
3.5.1	用户应用模块	148
3.5.2	系统管理	159

3.5.3	设备信息文件	160
3.5.4	现场总线控制系统的设计	162
3.6	信息集成的连接桥梁——OPC 技术	164
3.6.1	OPC 技术简介	164
3.6.2	OPC 技术规范	165
3.6.3	OPC 技术应用	166
3.7	典型现场总线控制系统举例	168
3.7.1	现场总线控制系统 System 302 的组成	168
3.7.2	系统 System 302 中现场设备与网络的组态	172
3.7.3	系统 System 302 中人机界面的组态	174
3.8	过程控制系统的其他结构	174
	小结	175
	复习思考题	176
第 4 章	执行器和防爆栅	177
4.1	执行器	177
4.1.1	气动执行器	177
4.1.2	电—气转换器	182
4.1.3	阀门定位器	183
4.1.4	电动执行器	185
4.2	防爆栅	187
4.2.1	安全火花防爆系统的概念	187
4.2.2	安全火花防爆的等级	188
4.2.3	防爆栅的基本工作原理	189
4.2.4	隔离式防爆栅	190
	复习思考题	194
下篇	过程控制	195
第 5 章	过程控制对象动态特性及其数学模型	197
5.1	单容对象动态特性及其数学描述	198
5.1.1	水槽水位的动态特性	198
5.1.2	对象的自衡特性	200
5.2	多容对象的特性、容量滞后、纯滞后	201
5.2.1	双容对象的特性	201
5.2.2	纯滞后	202
5.3	对象特性的实验测定、时域法	203
5.3.1	实验测定方法描述	203
5.3.2	测定动态特性的时域方法	204
5.4	测定动态特性的频域方法	207
5.4.1	正弦波方法	207
5.4.2	频率特性的相关测试法	208
5.4.3	闭路测定法	210
5.5	测定动态特性的统计方法	211

5.5.1	相关分析法识别对象动态特性的原理	211
5.5.2	基于 M 序列信号测定对象的动态特性	213
	复习思考题	224
第 6 章	单回路调节系统的设计及调节器参数整定方法	225
6.1	概述	225
6.2	对象动态特性对调节质量的影响及调节方案的确定	227
6.2.1	干扰通道动态特性对调节质量的影响	227
6.2.2	调节通道动态特性对调节质量的影响	228
6.2.3	调节方案的确定	230
6.3	调节规律对系统动态特性的影响、调节规律的选择	232
6.3.1	在干扰作用下双容对象的比例调节	232
6.3.2	系统调节性能指标、PI、PD 调节作用分析	236
6.3.3	调节规律的选择	241
6.4	调节器参数的实验整定方法	241
6.4.1	稳定边界法	242
6.4.2	反应曲线法	242
6.4.3	衰减曲线法	244
6.4.4	三种整定方法的比较	245
	复习思考题	246
第 7 章	常用过程控制系统	247
7.1	串级调节系统	247
7.1.1	串级调节系统的组成	247
7.1.2	串级调节系统的特点和效果分析	249
7.1.3	调节器的选型和整定方法	251
7.2	比值调节系统	252
7.2.1	比值调节系统的组成原理	252
7.2.2	比值调节系统的整定	254
7.3	均匀调节系统	256
7.3.1	均匀调节系统的组成	256
7.3.2	调节器的选型和参数整定	257
7.4	前馈调节系统	259
7.4.1	前馈控制的工作原理	259
7.4.2	扰动补偿规律及其局限性	260
7.4.3	复合调节系统的特性分析	261
7.4.4	复合调节系统参数的选择	264
7.4.5	自治调节系统	265
7.4.6	自治调节系统解耦装置的综合	267
	复习思考题	269
第 8 章	复杂过程控制系统	270
8.1	多变量解耦控制系统	270
8.1.1	多变量过程的基本描述	270

8.1.2	相对增益与相对增益矩阵	271
8.1.3	解耦控制系统的设计	274
8.1.4	解耦控制中的一些问题	276
8.2	推理控制系统	277
8.2.1	推理控制的基本原理	277
8.2.2	推理—反馈控制系统	279
8.2.3	辅助控制量的选择	279
8.2.4	控制作用的限幅	280
8.3	预测控制系统	280
8.3.1	预测模型	281
8.3.2	参考轨迹	283
8.3.3	控制算法	283
8.3.4	预测控制的优点及存在问题	284
8.3.5	基于 Laguerre 函数的预测控制方法	286
	复习思考题	287
第9章	自动调节系统在生产过程中的应用举例	288
9.1	石油加工蒸馏装置的仪表控制系统	288
9.1.1	石油加工中的仪表控制系统概要	288
9.1.2	蒸馏塔的仪表控制系统	288
9.2	钢铁工业中加热炉的控制系统	294
9.2.1	钢铁生产过程概要	294
9.2.2	加热炉的燃烧控制	295
9.2.3	燃烧控制的串级比值调节系统	297
9.2.4	交叉限幅并联副回路的串级调节	298
9.3	锅炉的自动调节系统	301
9.3.1	汽包水位的调节	302
9.3.2	燃烧过程的调节	305
9.3.3	锅炉控制系统举例	307
9.4	火电机组的脱硝控制系统	309
9.4.1	火力发电厂生产过程	309
9.4.2	烟气脱硝过程	310
9.4.3	烟气脱硝技术	312
9.4.4	基于模型预测控制的烟气脱硝控制系统	315
	复习思考题	317
	参考文献	318

上篇 自动化仪表

自动化仪表是工业企业实现自动化的必要手段和技术工具,各种控制方案和算法都必须借助自动化工具才能实现。随着自动化技术的广泛应用,自动化仪表的需求量很大,已形成一个专门的仪表门类。自动化工程师要设计自动控制系统必须掌握各种自动化仪表的工作原理和性能特点,才能合理地选择和正确地使用,组成性能价格比好的控制系统。

半个多世纪以来,自动化仪表经历了从气动液动仪表、电动仪表、电子式模拟仪表、数字智能仪表,到计算机集散控制系统(DCS)等发展阶段,为各行各业的现代化大规模生产提供了强大的支持。近年来,随着网络通信等相关技术的快速发展,自动化仪表正处于一场重大的变革中,以仪表的全数字化、开放化、网络化为特征的现场总线控制系统(FCS)正在迅猛发展。现场总线把从检测端到执行端的所有自动化仪表通过数字通信连接起来,使控制系统网络化,十分有利于工业企业实现高层次的综合自动化。

自动化仪表与控制理论一样,都是自动化工作者的研究内容。自动化技术工具的进步不仅会推动工业企业自动化水平的提高,还会影响控制理论的研究方向和内容。

本篇内容

- 自动化仪表概述
- 检测仪表
- 调节器
- 集散控制系统与现场总线控制系统
- 执行器和防爆栅

自动化仪表概述

0.1 自动化仪表及其发展概况

看到“仪表”两个字,人们很容易想到电流表、电压表、示波器等实验室中常用的测试仪器。本课程要讨论的不是这些通用仪表,而是讨论工业自动化中,特别是连续生产过程自动化中必需的一类专门的仪器仪表,称为自动化仪表。其中包括对工艺参数进行测量的检测仪表、根据测量值对给定值的偏差按一定的调节规律发出调节命令的调节仪表,以及根据调节仪表的命令对进出生产装置的物料或能量进行控制的执行器等。这些仪表代替人们对生产过程进行测量、控制、监督和保护,是实现生产过程自动化必不可少的技术工具。

对于没有实践经验的自动控制初学者,往往以为控制工程师的工作是,先画出控制方案图,然后自己动手,设计制作一定的测控装置去实现要求的控制算法。不难想象,如果大家都按自己的思路,为各种系统制作专用的测控装置,其规格品种必将是五花八门、互不兼容的。这对于用户来说,其维护和备品备件将是无法解决的问题。为减少仪表品种,便于互换和维护,人们把自动化仪表的外部功能和联络信号进行规范化,即规定若干通用的标准化功能模块,其内部原理和电路可以不同,但外部功能必须相同,此外,它们之间的互连信号标准必须统一。这些规范促进了自动化仪表向通用化发展,大大方便了用户。这样,对控制工程师来说,主要的工作不是自己去制作仪表,而只要熟悉和精通各种现成的自动化仪表的工作原理和性能特点,以便根据不同的测控要求和应用环境,从大量系列化生产的通用型自动化仪表中,合理地选择和正确地使用它们,组成经济、可靠、性能优良的自动控制系统。自动化工程师的主要工作是“系统集成”。

自动化仪表作为一类专门的仪表,最早出现于 20 世纪 40 年代,当时由于石油、化工、电力等工业对自动化的需要,出现了将测量、记录、调节仪表组合在一起的多功能自动化仪表。此后,随着大型工业企业的出现,生产向综合自动化和集中控制的方向发展,人们发现多功能仪表的结构不够灵活,不如将仪表按功能划分,制成若干种能独立完成一定功能的标准单元,各单元间以标准联络信号相互联系,这样,仪表的性能容易提高。在使用中可以根据需要,选择一定的单元,积木式地把仪表组合起来,构成各种复杂程度不同的控制系统。这种积木式的仪表就称为单元组合式仪表。显然,将多功能仪表分解为若干基本单元的做法,无论对仪表厂的大量生产,还是对用户的选用和维护都是有利的。尽管近年来随着自动化仪表由模拟技术向数字技术的发展,仪表的功能结构又重新由单功能向多功能转变,但这种按功能划分标准单元的思路在仪表内部还是被充分地肯定下来。

自动化仪表除了有上述不同的功能结构外,还可根据能源的种类,分为电动、气动等仪表。其中气动仪表的出现比电动仪表早,而且价格便宜,结构简单,特别对石油、化工等易燃易爆的生产现场,具有本质性的安全防爆性能,因而在相当长的一段时间里,一直处于优势地位。但从 20 世纪 60 年代起,由于电动仪表的晶体管化和集成电路化,控制功能日益完备,在使用低电压、小电流时,可在电路及结构上采取严密措施,限制进入易燃易爆场所的能量,从而保证在生产现场不会发生足以引起燃烧或爆炸的“危险火花”。这样,限制电动仪表在易燃易爆场

所使用的一个主要障碍被扫除,电信号比气压信号在传送和处理上的优越性就能得到充分的发挥。大家知道,气压信号传递速度慢,传输距离短,管线安装不便。相比之下,电信号传输、放大、变换、测量都比气压信号方便得多,特别是电动仪表容易和计算机配合使用,实现生产过程的全盘自动化。因此,电动仪表取得了压倒性的优势。

0.2 电动单元组合仪表及其控制系统的组成

我国生产的电动单元组合仪表,到目前为止已有了四代产品,它们分别为:20世纪60年代中期生产的以电子管和磁放大器为主要放大元件的DDZ—I型仪表;70年代初开始生产的以晶体管作为主要放大元件的DDZ—II型仪表;80年代初开始生产的以线性集成电路为主要放大元件、具有安全火花防爆性能的DDZ—III型仪表;以及80年代后期开始生产的以微处理器为核心的数字式智能仪表DDZ—S。这里的“DDZ”是电(Dian)、单(Dan)、组(Zu)三字的汉语拼音文字中第一个字母的组合。这四代产品虽然电路形式和信号标准不同,性能指标和单元划分的方法也不完全一样,但它们实现的控制功能和基本的设计思想是相同的,只要掌握其中一种,其他产品便不难分析。

图0-1是使用电动单元组合式仪表构成简单调节系统的例子,从中可以看到单元划分的原则和各单元的功能。图中,被调量一般是非电的工艺参数,如温度、压力等,必须经过一定的检测元件,将其变换为易于传送和显示的物理量。检测元件还称为敏感元件、传感器、换能器、一次仪表等。被称为换能器的理由是工艺参数在检测元件上进行了能量形式的转换,例如,在使用热电偶测温时,热电偶将温度(热能)转换成了电压(电能)。被称为一次仪表的理由是这些检测元件安装在生产第一线,直接与工艺介质相接触,取得第一次的测量信号。

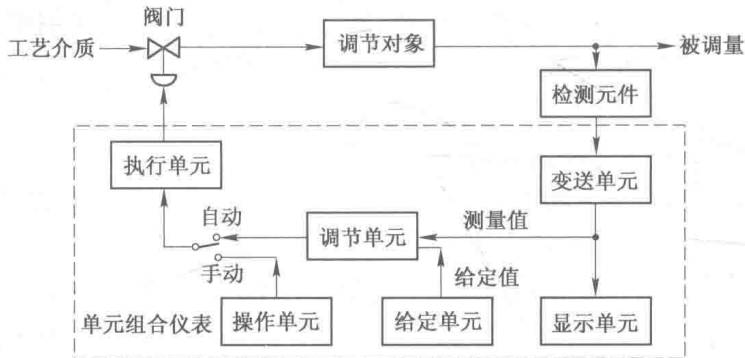


图0-1 用电动单元组合式仪表构成的调节系统

由于检测元件输出的能量很小,一般不能直接驱动显示和调节仪表,必须经过放大或再一的能量转换,才能将检测元件输出的微弱信号变换为能远距离传送的统一标准信号。图0-1中,起上述作用的环节就是变送单元,或称变送器,它有若干不同的类型,与相应的检测元件相配合。

由变送单元输出的统一标准信号,一方面送到显示单元供记录或指示,同时送到调节单元与给定值进行比较。给定值可以由专门的给定单元取得,也可由调节单元内部取得。目前,多数调节单元内部都有设定给定值的装置。调节单元又称调节器,它按比较得出的偏差,以一定的调节规律,如比例、微分、积分等运算关系发出调节信号,通过执行单元改变阀门的开度,控制进入调节对象的工艺介质流量,达到自动调节的目的。

除了图 0-1 中表示的几种基本单元外,在电动单元组合式仪表中,还有实现物理量转换的转换单元,进行加、减、乘、除、乘方、开方等运算的计算单元,以及为保证安全防爆所需的安全单元等。其中,转换单元也是常用的单元,由于目前电动执行器无论在结构、性能、价格及安全方面都不如气动执行器,所以大部分使用电动仪表构成的调节系统中,其执行器却仍然使用气动的。这样,就必须使用电-气转换器,将电动调节仪表输出的电信号转换为气压信号,以推动气动调节阀实现自动调节。安全单元是安全火花型防爆仪表所特有的一种单元,它的作用是在易燃易爆的生产现场周围筑起一道安全栅栏,从电路上对危险场所的线路采取隔离措施,防止高能量电路与现场线路之间的直接接触;同时通过电压、电流的双重限制电路,严格保证进入危险场所的能量在安全范围以内,因而是实现安全火花防爆的关键环节。

如前所述,使用单元组合仪表必须有统一的联络信号。我国电动单元组合仪表中存在两种标准信号制度,在 DDZ—I 型和 DDZ—II 型仪表中采用 $0\sim 10\text{mA}$ 直流电流作为标准信号,而在 DDZ—III 型和 DDZ—S 型仪表中,采用国际上统一^①的 $4\sim 20\text{mA}$ 直流电流作为标准信号。这两种标准都以直流电流作为联络信号。采用直流信号的优点是传输过程中易于和交流感应干扰相区别,且不存在相移问题,可不受传输线中电感、电容和负载性质的限制。采用电流制的优点首先可以不受传输线及负载电阻变化的影响,适于信号的远距离传送;其次由于电动单元组合仪表很多是采用力平衡原理构成的,使用电流信号可直接与磁场作用产生正比于信号的机械力。此外,对于要求电压输入的仪表和元件,只要在电流回路中串联电阻便可得到电压信号,故使用比较灵活。

在这两种信号制度里,零信号和满幅度信号电流大小的选择是这样考虑的:在 DDZ—III 型和 DDZ—S 型仪表中,以 20mA 表示信号的满度值,而以此满度值的 20% 即 4mA 表示零信号。这种称为“活零点”的安排,有利于识别仪表断电、断线等故障,且为现场变送器实现两线制提供了可能性。所谓两线制变送器就是将供电的电源线与信号的传输线合并起来,一共只用两根导线。为便于理解这种两线制变送器的组成原理,图 0-2 给出了一个简单的示意图。图中,被测压力 P 经弹性波纹管转变为电位器 RP_1 的滑动触头位移,产生正比于压力 P 的电压 V_1 ,该电压经运算放大器 A 和晶体管 VT 组成的电流负反馈电路,把 V_1 转变为晶体管的输出电流 I_2 ,它在 $0\sim 16\text{mA}$ 间随被测压力 P 作正比变化。此外,图中还可看到,为了给仪表内的检测和放大电路供电,用了一个 4mA 的恒流电路,它把内部耗电稳定在一个固定的数值上。图中,稳压管 VD_2 除用来稳定内部电路的供电电压外,还调剂内部电路的供电电流。这样,上述两部分电流合计,流过该仪表的总电流在 $4\sim 20\text{mA}$ 间变化,实现了电源线和信号线的合并。

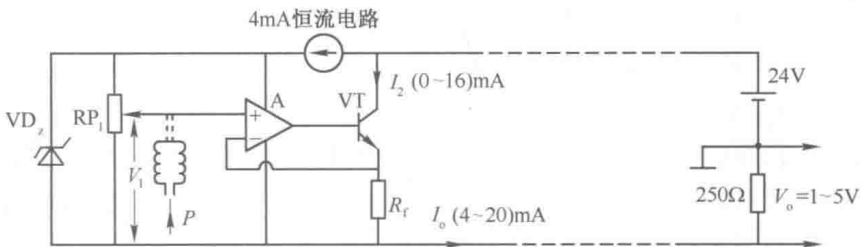


图 0-2 两线制变送器的组成原理

^① 1973 年 4 月国际电工委员会(IEC)通过的标准规定,过程控制系统的模拟信号为直流电流 $4\sim 20\text{mA}$,电压信号为直流 $1\sim 5\text{V}$ 。我国的 DDZ—III 型仪表规定,现场传输信号用 $4\sim 20\text{mA}$ (直流),控制室内各仪表间的联络信号用 $1\sim 5\text{V}$ (直流)。

使用两线制变送器不仅节省电缆,布线方便,且大大有利于安全防爆,因为减少一根通往危险现场的导线,就减少了一个窜进危险能量的通道。由于活零点的表示法具有上述优点,受到普遍的欢迎和广泛的应用。

在上述信号标准里,从安全防爆、减少损耗、节省能量考虑,信号电流的满度值希望选取得小一些。但太小也有困难,因为对于力平衡式仪表,电流小了,产生的电磁力也小,不易保证这些仪表的精度。此外,在采用活零点的仪表中,降低满幅度电流的数值,必然同时降低起点电流的数值。起点电流太小将给两线制仪表带来困难,因为它将要求降低整个仪表在零信号时消耗的总电流。而在目前的元器件水平下,起点电流比 4mA 再小有时将发生困难。因此,目前国际上采用 4~20mA 作为标准信号。

0.3 仪表的基本技术指标

自动化仪表和其他仪表一样,在保证可靠工作的前提下,有如下一些衡量其性能优劣的基本指标。

1. 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真实值的差距,即估计测量值的误差大小。

模拟式仪表的精确度一般不宜用绝对误差(测量值与真实值的差)和相对误差(绝对误差与该点的真实值之比)来表示,因为前者不能体现对不同量程仪表的合理要求,后者很容易引起任何仪表都不能相信的误解。例如,对一只满量程为 100mA 的电流表,在测量零电流时,由于机械摩擦使表针的显示偏离零位而得到 0.2mA 的读数,若按上述相对误差的算法,那么该点的相对误差即为无穷大,似乎这个仪表是完全不能使用的;但在工程人员看来,出现这样的测量误差是很容易理解的,根本不值得大惊小怪,它可能还是一只比较精密的仪表呢!

模拟式仪表的合理精确度,应该以测量范围中最大的绝对误差和该仪表的测量范围之比来衡量,这种比值称为相对(于满量程的)百分误差。例如,某温度计的刻度由 $-50^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$,即其测量范围为 200°C ,若在这个测量范围内,最大测量误差不超过 3°C ,则其相对百分误差 δ 为

$$\delta = \frac{3}{150+50} = 1.5\%$$

仪表工业规定,去掉上式中相对百分误差的“%”,称为仪表的精确度。它划分成若干等级,如 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级、1.5 级、2.5 级等。上述温度计的精确度即为 1.5 级。

仪表的误差还根据使用条件分为基本误差和附加误差两种。基本误差是指仪表在正常工作条件下的最大相对百分误差。若仪表不在规定的正常条件下工作,例如,因周围温度、电源电压等偏高或偏低而引起的额外误差,称为附加误差。仪表的精确度等级是根据其基本误差确定的。

2. 灵敏度和灵敏限

灵敏度表示测量仪表对被测参数变化的敏感程度,常以仪表输出(如指示装置的直线位移或角位移)与引起此输出的被测参数变化量之比表示,即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta a}{\Delta x}$$

式中, Δa 为仪表指示装置的直线位移或角位移; Δx 为被测参数的变化值。

仪表的灵敏度可用增加放大系统的放大倍数来提高。但是, 单纯提高仪表的灵敏度并不一定能提高仪表的精确度, 例如, 把一个电流表的指针接得很长, 虽然可把直线位移的灵敏度提高, 但其读数的精确度并不一定提高。相反, 可能由于平衡状况变坏而精确度反而下降。为了防止这种虚假灵敏度, 常规定仪表读数标尺的分格值不能小于仪表允许误差的绝对值。

仪表的灵敏限, 是指仪表能感受并发生动作的输入量的最小值。

3. 变差

在外界条件不变的情况下, 使用同一仪表对被测参量进行反复测量(正行程和反行程)时, 所产生的最大差值与测量范围之比称为变差。造成变差的原因很多, 例如, 传动机构间存在的间隙和摩擦力、弹性元件的弹性滞后等。在设计和制造仪表时, 必须尽量减小变差的数值。一个仪表的变差越小, 其输出的重复性和稳定性越好。

仪表除静态误差外, 在输入量随时间变化时, 由于仪表内部的惯性和滞后, 还存在动态误差。对自动化仪表来说, 因为它工作在调节系统的闭环之中, 其动态特性不仅影响自身的输出, 还直接影响整个调节系统的调节质量。例如, 在一个调节系统中, 若检测仪表的惯性比调节对象的惯性还大, 那么不仅系统的调节速度被减慢, 而且在过渡过程中检测仪表不能及时反映真实的情况, 被调量可能存在很大的冲击和波动, 但检测仪表的指示却很平稳, 这种虚假的现象会给生产造成严重的损失。因此, 在选用自动化仪表时, 必须对其动态特性予以充分的重视, 根据需要, 尽量减小仪表的惯性和滞后, 使之快速和准确地响应输入量的变化。

复习思考题

- 0-1 自动化仪表是指哪一类仪表? 什么叫单元组合式仪表?
- 0-2 DDZ—II型与DDZ—III型仪表的电压、电流信号传输标准是什么? 在现场与控制室之间采用直流电流传输信号有什么好处?
- 0-3 什么叫两线制变送器? 它与传统的四线制变送器相比有什么优点? 试举例画出两线制变送器的基本结构, 说明其必要的组成部分。
- 0-4 什么是仪表的精确度? 试问一台量程为 $-100^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$ 、精确度为0.5级的测量仪表, 在量程范围内的最大误差为多少?

第 1 章 检测仪表

各种不同的工业企业在实现自动化时需要检测的工艺参数种类很多。例如,在热工过程中,最常遇到的是温度、压力、流量和物位 4 种参数的检测问题;在化工过程中,除上述四大参数外,还需要进行成分分析和某些物理化学性质如密度、黏度、酸度等的测量;在冶金、钢铁、机械工业中,则又需对某些机械参数如质量、力、加速度、位移、厚度等进行检测;在电厂中还有频率、相位、功率因数等电工量需要测定等。显然,要把所有的工艺参数检测方法都讨论是不可能的,下面只对几种比较有普遍性的工艺参数进行示例性的讨论。通过一些典型例子,说明目前采用的主要检测手段和达到的技术水平,介绍组成检测仪表的基本原则和保证可靠工作的一般方法。希望读者在学习了这些有限的例子后,能举一反三,为掌握其他检测仪表打下基础。

1.1 温度检测仪表

温度是工业生产中最基本的工艺参数之一,任何化学反应或物理变化的进程都与温度密切相关,因此温度的测量与控制是生产过程自动化的重要任务之一。

1.1.1 测量温度的主要方法

测量温度的方法虽然很多,但从感受温度的途径来分,有以下两大类:一类是接触式的,即通过测温元件与被测物体的接触而感知物体的温度;另一类是非接触的,即通过接收被测物体发出的辐射热来判断温度。

目前常见的接触式测温仪表有如下几种。

1. 膨胀式温度计

利用固体或液体热胀冷缩的特性测量温度。例如,常见的体温表便是液体膨胀式温度计;利用固体膨胀的,有根据热胀冷缩而使长度变化做成的杆式温度计和利用双金属片受热产生弯曲变形的双金属温度计。

2. 压力式温度计

压力式温度计是根据密封在固定容器内的液体或气体,当温度变化时压力发生变化的特性,将温度的测量转化为压力的测量。它主要由两部分组成:一是温包,由盛液体或气体的感温固定容器构成;二是反映压力变化的弹性元件。

3. 热电偶温度计

根据热电效应,将两种不同的导体接触并构成回路时,若两个接点温度不同,回路中便出现毫伏级的热电动势,该电动势可准确反映温度。