

自动化国家级特色专业系列规划教材

过程控制工程实验

冯毅萍 仲玉芳 曹 峥 编著



化学工业出版社

自动化国家级特色专业系列规划教材

过程控制工程实验

冯毅萍 仲玉芳 曹 峥 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分6章。第1章简要介绍了实验涉及的过程控制工程基础知识；第2~4章是常规过程控制实验部分，分为过程动态特性测试及建模实验、单回路过程控制实验及复杂过程控制实验；第5章为计算机过程控制实验部分，设计了五种典型的计算机过程控制应用实例；第6章是复杂流程对象先进控制实验。每个实验后均附有思考题。

本书可作为普通高等院校自动化等相关专业学生的教材，也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制工程实验/冯毅萍, 仲玉芳, 曹峥编著.
北京: 化学工业出版社, 2013.6

自动化国家级特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-122-16956-3

I. ①过… II. ①冯…②仲…③曹… III. ①过程
控制-实验-高等学校-教材 IV. ①TP273-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第070733号

责任编辑: 郝英华 唐旭华

装帧设计: 张 辉

责任校对: 战河红

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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张9¼ 字数220千字 2013年9月北京第1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: 25.00 元

版权所有 违者必究

自动化国家级特色专业系列规划教材 指导委员会

孙优贤 吴 澄 郑南宁 柴天佑
俞金寿 周东华 李少远 王红卫
陈 虹 荣 冈 苏宏业

总 序

随着工业化、信息化进程的不断加快,“以信息化带动工业化、以工业化促进信息化”已成为推动我国工业产业可持续发展、建立现代产业体系战略举措,自动化正是承载两化融合乃至社会发展的核心。自动化既是工业化发展的技术支撑和根本保障,也是信息化发展的主要载体和发展目标,自动化的发展和应用水平在很大程度上成为一个国家和社会现代工业文明的重要标志之一。从传统的化工、炼油、冶金、制药、机械、电力等产业,到能源、材料、环境、军事、国防等新兴战略发展领域,社会发展的各个方面均和自动化息息相关,自动化无处不在。

本系列教材是在建设浙江大学自动化国家级特色专业的过程中,围绕自动化人才培养目标,针对新时期自动化专业的知识体系,为培养新一代的自动化后备人才而编写的,体现了我们在特色专业建设过程中的一些思考与研究成果。

浙江大学控制系自动化专业在人才培养方面有着悠久的历史,其前身是浙江大学于1956年创立的化工自动化专业,这也是我国第一个化工自动化专业。1961年该专业开始培养研究生,1981年以浙江大学化工自动化专业为基础建立的“工业自动化”学科点被国务院学位委员会批准为首批博士学位授予点,1984年开始培养博士研究生,1988年被原国家教委批准为国家重点学科,1989年确定为博士后流动站,同年成立了工业控制技术国家重点实验室,1992年原国家计委批准成立了工业自动化国家工程研究中心,2007年启动了由国家教育部和国家外专局资助的高等学校学科创新引智计划(“111”引智计划)。经过50多年的传承和发展,浙江大学自动化专业建立了完整的高等教育人才培养体系,沉积了深厚的文化底蕴,其高层次人才培养的整体实力在国内外享有盛誉。

作为知识传播和文化遗产的重要载体,浙江大学自动化专业一贯重视教材的建设工作,历史上曾经出版过很多优秀的教材和著作,对我国的自动化及相关专业的人才培养起到了引领作用。当前,加强工程教育是高等学校工科人才培养的主要指导方针,浙江大学自动化专业正是在教育部卓越工程师教育培养计划的指导下,对自动化专业的培养主线、知识体系和培养模式进行重新布局和优化,对核心课程教学内容进行了系统性重新组编,力求做到理论和实践相结合,知识目标和能力目标相统一,使该系列教材能和研讨式、探究式教学方法和手段相适应。

本系列教材涉及范围包括自动控制原理、控制工程、检测和传感、网络通信、信号和信息处理、建模与仿真、计算机控制、自动化综合实验等方面,所有成果都是在传承老一辈教育家智慧的基础上,结合当前的社会需求,经过长期的教学实践积累形成的。大部分教材和其前身在我国自动化及相关专业的培养中都具有较大的影响,例如《过程控制工程》的前身是过程控制的经典教材之一、王骥程先生编写的《化工过程控制工程》。已出版的教材,既有国家“九五”重点教材,也有国家“十五”、“十一五”规划教材,多数教材或其前身曾获得过国家级教学成果奖或省部级优秀教材奖。

本系列教材主要面向自动化（含化工、电气、机械、能源工程及自动化等）、计算机科学和技术、航空航天工程等学科和专业有关的高年级本科生和研究生，以及工作于相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我希望，这套教材既能为在校本科生和研究生的知识拓展提供学习参考，也能为广大科技工作者的知识更新提供指导帮助。

本系列教材的出版得到了很多国内知名学者和专家的悉心指导和帮助，在此我代表系列教材的作者向他们表示诚挚的谢意。同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持，并热忱欢迎提出批评和意见。



2011 年 6 月

前言

自动化是一门工程实践性很强的学科，许多知识只有通过动手实践才能真正掌握，本专业的学生除了要进行系统的自动化理论学习掌握基础理论知识外，还必须得到必要的实践能力培养，其中实验是一个很重要的环节。

“过程控制工程实验”是面向自动化专业高年级本科生开设的综合性专业实验课程，其目的是在传统过程控制实验基础上逐步增加开放性实验内容，让学有余力的学生参与开放性的实验任务，激发创造性和学习热情，提高学生的动手能力。本书以工业生产过程的自动控制系统实施为主线，结合实验装置条件提出了实验的基本要求和任务，学生应在实验前熟悉实验装置条件和实验任务，提出实验方案（包括提出实验设备和装置，选取测试手段，提出实验方法），并进行实验准备（确定人员分工、确定多次测定参数的控制范围，列好记录用的数据表格，检查实验设备，调校仪表等），指导老师认可后方可进行实验，实验结束后应认真整理数据，分析结果，写出实验报告。整个系统采用开放性平台结构，让学生可以自己设计各种实验方案，通过实验检验自己设计的成败得失。

本书是“十二五”普通高等教育本科规划教材《过程控制工程》（第三版）（书号 978-7-122-14946-6）一书的配套实验指导书，是在原浙江大学控制科学与工程学系“自动化实验讲义”的基础上整理而成的，共分 6 章。第 1 章简要介绍了实验涉及的过程控制工程基础知识；第 2~4 章是常规过程控制实验部分，分为过程动态特性测试及建模实验、单回路过程控制实验及复杂过程控制实验，覆盖了常规过程控制工程的基础内容；第 5 章为计算机过程控制实验部分，设计了五种典型的计算机过程控制应用实例，可以作为计算机控制系统设计实践的参考内容；第 6 章是复杂流程对象先进控制实验，属于过程控制工程提高性实验内容，在前面装置级过程控制的基础上拓宽到流程级过程控制的范畴，通过一套典型的化工换热流程对象实验装置介绍了流程级过程控制的难点及解决方法，以及先进控制系统的基本概念及实施过程，并给出了一套完整的实验案例，供读者参考。

本书在内容选取上力求体现浙江大学控制科学与工程学系原有过程控制工程实验的精华，在编写上力争做到概念清楚，深入浅出，每个实验后面都有思考题。由于本书涉及内容广泛，因此，在选用本书作为教材时，可以根据不同需求进行实验内容的组合。对于本科自动化专业，建议将本书的第 1~4 章作为教学重点内容，第 5 章作为系统设计实践内容，第 6 章作为提高性实验选学，也可以供相关专业研究生高级实验参考。

参加本书编写的有：第 1 章冯毅萍；第 2~4 章仲玉芳、冯毅萍；第 5 章冯毅萍、仲玉芳、曹峥；第 6 章冯毅萍、曹峥。全书由冯毅萍整理定稿，仲玉芳、曹峥也参与了全书的整理工作。

本书在编写过程中，一直得到浙江大学控制科学与工程学系广大教师的关心，王树青教授、荣冈教授、张光新教授、戴连奎教授、胡赤鹰高工等对书中内容提出了许多宝贵意见，在此向他们表示衷心的感谢。由于作者水平有限，书中不足之处，恳请读者批评指正。

编著者

2013 年 7 月于浙大求是园

目 录

实验安全注意事项	1
1 过程控制工程预备知识	3
1.1 常规过程控制系统	3
1.2 复杂过程控制系统	16
1.3 计算机过程控制系统	22
2 过程动态特性及建模实验	26
2.1 CS4000 高级过程控制实验装置	26
2.2 单容水箱液位动态特性测试实验	35
2.3 双容水箱液位动态特性测试实验	40
2.4 加热水箱温度动态特性测试实验	43
2.5 滞后对象动态特性测试实验	45
3 单回路过程控制实验	48
3.1 加热水箱温度位式控制实验	48
3.2 单容水箱液位控制实验	51
3.3 双容水箱液位控制实验	54
3.4 加热水箱水温控制实验	57
3.5 流量控制实验	59
4 复杂过程控制实验	62
4.1 双容水箱液位串级控制实验	62
4.2 液位-流量串级控制实验	65
4.3 单闭环流量比值控制实验	66
4.4 双闭环流量比值控制实验	69
4.5 液位前馈-反馈控制实验	71
4.6 加热水箱温度滞后控制实验	75
5 计算机过程控制系统实验	78
5.1 计算机集散控制系统实验	78
5.2 工控组态软件基本实验	96
5.3 可编程序控制器实验	102
5.4 基于组态王及 PLC 的计算机控制 实验	107
5.5 计算机控制系统控制器设计研究实验	124
6 复杂流程对象先进控制实验	125
6.1 化工流程型过程控制实验装置	125
6.2 化工流程型对象建模及常规控制研究 实验	130
6.3 化工流程型对象换热器解耦控制 实验	131
6.4 化工流程型对象先进控制提高实验	134
参考文献	138

实验安全注意事项

实验室是高校进行实验教学和科学研究的重要场所，也是对在校学生进行综合素质教育，培养动手能力和创新能力的基地。

实验安全与否不光关系到实验教学和科学研究能否顺利开展，实验设备能否免受损失，更重要的是关系到师生的人身安全。

实验室安全事故的表现形式和危害类型多种多样，后果也各不相同。结合本专业实验室的特点，主要注意以下安全事项。

(1) 防止触电

由于实验室的每个装置都通以 220V 甚至 380V 的电压，因此在实验进行当中要特别当心，避免人为触电。

① 当装置通电或正在运行时，请不要进行任何维护、维修操作，不要打开机柜后门、接线箱盖子、变频器前盖板等，否则会发生触电的危险。

② 即使电源处于断开状态，除维护、维修外，请不要接触任何具有超过安全电压的裸露端子，否则接触各种带电回路可能造成触电事故。

③ 请不要用湿手操作设定各种旋钮及按键，以防止触电。

④ 对于电缆，请不要损伤它，不要对它加过重的应力，使它承载重物或对它钳压。否则可能会导致触电。

⑤ 对于温度加热装置，严禁无水空烧，一定要保证液面在安全刻度以上才能进行实验。

(2) 防止烫伤

① 不要接触热水管道和加热罐的外壁，避免高温烫伤。

② 请尽量控制水温在 50℃ 以下，以免高温烫伤和损坏测温仪表。

(3) 防止高压容器发生爆炸

① 压力实验装置上的压力罐本身符合安全标准，通入的压缩空气的压力也远低于安全容限，但通入压缩空气的压力罐严禁任何方式的敲击。

② 压力容器严禁超温、超压运行。

③ 严禁带压拆卸压紧螺栓。

(4) 防止损坏

① 打开压力装置上转子流量计前的进气手阀时，要动作轻缓，否则会损坏转子流量计。

② 在加热罐水位没有达到一定高度时，不要启动控制柜面板上的电源开关，否则可能损坏加热器。该系统虽然增加了硬件的联锁保护，但是在操作时也要注意。

③ 系统发生故障时或者闻到装置发出异常气味时，请立即断开电源。否则系统可能因电流过大导致火灾。

④ 确认电缆与正确的端子相连接，保证正负极性的正确。否则，可能会发生爆裂、损

坏等事故。

⑤ 系统应远离可燃物体，实验室严禁使用明火。

⑥ 实验装置应按照严格的顺序通电和断电，否则可能导致仪表损坏。一般实验装置通电前应先关闭装置上的各个仪表的电源，再接通总电源，然后再根据需要接通所需仪表的电源；断电时应先关闭各个仪表的电源再切断总电源。

⑦ 有不明确的地方应咨询指导老师后再进行操作，切勿盲目操作。

1

过程控制工程预备知识

1.1 常规过程控制系统

1.1.1 简单控制系统（单回路控制系统）

简单控制系统是由被控对象，一个测量元件及变送器，一个控制器和一个执行器所组成的单回路负反馈控制系统，其特点是结构简单，易于实现，适应性强，应用广泛，约占实际控制回路的 85% 以上。在简单控制系统的基础上，各种复杂控制系统发展起来。在工业过程计算机控制系统中，也往往把它作为最底层的控制回路。下面通过实例来分析简单控制系统的组成及工作原理。

【例 1-1】 温度控制系统

如图 1-1 所示的是蒸汽加热器的温度自动控制系统，它由蒸汽加热器、温度变送器、温度控制器和蒸汽流量控制阀组成。控制的目标是保持流体出口温度恒定。当进料流量或温度等因素的变化引起出口物料的温度变化时，通过温度变送器测得温度的变化，并将其信号送至温度控制器与给定值进行比较，温度控制器根据其偏差信号进行运算后将控制命令送至控制阀，以改变蒸汽量来维持出口温度。

【例 1-2】 流量控制系统

如图 1-2 所示为一流量控制系统。它由管路系统、孔板和差压变送器、流量控制器和流量控制阀组成。控制的目标是保持流量恒定。当管道其他部分阻力发生变化或有其他扰动时，流量将偏离设定值。利用孔板作为检测元件，把孔板上、下游的静压用连接导管接至差压变送器，将流量信号转化为标准电流信号；该信号送至流量控制器与给定值进行比较，流量控制器根据其偏差信号进行运算后将控制命令送至控制阀，改变阀门开度，就调整了管道中流体的阻力，从而影响了流量，使流量维持在设定值。

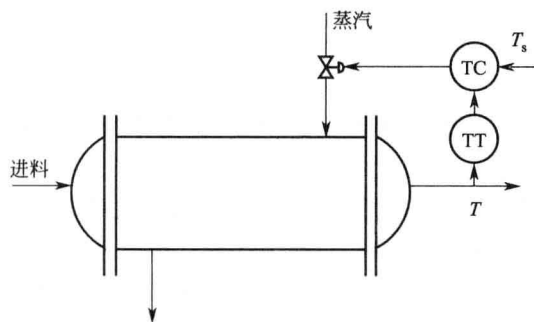


图 1-1 蒸汽加热器温度控制系统

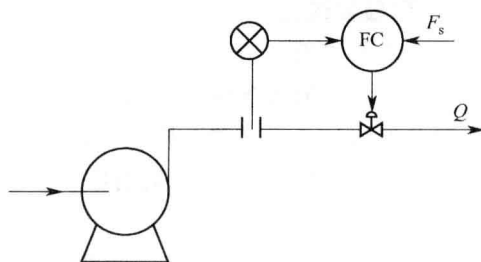


图 1-2 流量控制系统

由上例可见，简单控制系统一般由下列基本单元组成。

① 被控对象：指被控制的生产设备或装置。针对以上二例，分别是蒸汽加热器、管路系统。被控对象需要控制的变量称为被控变量，上述各例中为温度、流量。

② 测量变送器：测量被控变量，并按一定的规律将其转换为标准信号的输出，作为测量值。Ⅱ型、Ⅲ型及气动仪表的标准信号范围分别为 $0\sim 10\text{mA}$ 、 $4\sim 20\text{mA}$ 及 $0.02\sim 0.1\text{MPa}$ 。

③ 执行器：常用的是调节阀。接受控制器来的信号去直接改变操纵变量。操纵变量是被控对象的某输入变量，通过操作这个变量可克服扰动对被控变量的影响，通常是由执行器控制的某工艺流量。

④ 控制器：也称调节器。将被控变量的设定值与测量值进行比较得出偏差信号按一定控制规律作用后给出控制信号。

单回路控制系统的方块图如图 1-3 所示。



图 1-3 单回路控制系统方块图

为了设计好一个单回路控制系统，并能很好地满足控制质量的要求，就必须很好地了解具体的生产工艺，掌握生产过程的规律性，正确地选择被控变量和操纵变量，以便确定合理的控制方案。

选择被控变量时一般要遵循下列原则。

① 应能代表一定的工艺操作指标或能反映工艺操作状态，经常受到一些干扰影响，需要通过调节作用来维持恒定的变量。它们一般都是工艺过程中比较重要的变量。

② 应能被测量出来并具有足够大的灵敏度。如无法获得直接指标信号，或其测量和变送信号滞后很大时可选择与直接指标有单值对应关系的间接指标作为被控变量。

③ 被控变量应是独立可控的。

操纵变量的选择主要有以下原则。

① 应是可控的，一般应比其他干扰对被控变量的影响更加灵敏。为此应通过合理选择操纵变量使控制通道的放大系数适当大，时间常数适当小（但不宜过小，否则易引起震荡），纯滞后时间尽量小，而使干扰通道的放大系数尽可能小，时间常数尽可能大。

② 还要考虑工艺的合理性与生产的经济性。

1.1.2 测量变送器

(1) 测量误差

由仪表读得的被测值与被测真值之间总是存在一定的差距，这一差距就称为测量误差。测量误差有两种表示方法，即绝对误差和相对误差。

① 绝对误差。绝对误差是指仪表指示值 x_i 和被测量的真值 x_t 之间的差值的绝对值，即

$$\Delta = |x_i - x_t| \quad (1-1)$$

实际上真值是无法真正得到的，通常采用标准仪表（精确度较高）的测量值 x_0 代替 x_t ，即

$$\Delta = |x_i - x_0| \quad (1-2)$$

式中， Δ 为绝对误差； x_i 为测量仪表的读数值； x_0 为标准仪表的读数值。

仪表的绝对误差在测量范围内的各点上是不相同的。常说的“绝对误差”是指绝对误差中的最大值 $\Delta_{\max}$ 。

② 相对误差。相对误差等于某一点的绝对误差 Δ 与标准仪表在这一点指示值 x_0 之比, 即

$$y = \frac{\Delta}{x_0} \quad (1-3)$$

式中, y 为仪表在 x_0 处的相对误差。

(2) 仪表的性能指标

一台仪表性能的优劣, 在工程上可用精确度 (简称精度)、变差、灵敏度、分辨率、线性度及反应时间等指标来衡量。

仪表的精度是用来表示仪表测量结果的可靠程度的。仪表的精度不仅与绝对误差有关, 而且还与仪表的测量范围有关。工业上经常将绝对误差折合成仪表测量范围的百分数表示, 称为相对百分误差 (亦称仪表引用误差) δ , 即

$$\delta = \frac{\Delta}{\text{测量范围上限值} - \text{测量范围下限值}} \times 100\% \quad (1-4)$$

仪表的测量范围上限值与下限值之差, 称为该仪表的量程。

根据仪表的使用要求, 规定一个在正常情况下允许的最大误差, 这个允许的最大误差叫允许误差。允许误差一般用相对百分比误差来表示, 即某一台仪表的允许误差是指在规定的正常情况下允许的相对百分误差的最大值, 即

$$\delta_{\text{允}} = \frac{\Delta_{\max}}{\text{仪表的量程}} \quad (1-5)$$

仪表的 $\delta_{\text{允}}$ 越小, 表示它的精度越高。仪表的精度等级是按照国家统一规定的允许误差大小来划分的。仪表的精度等级是将仪表的允许误差的“ $\pm$ ”号及“ $\%$ ”号去掉后的数值, 以一定的符号形式标示在仪表的标尺板上, 如 1.0 外加一个圆圈或三角形。如果某台仪表的允许误差为 $\pm 1.5\%$, 则该仪表的精度等级为 1.5 级。目前我国生产的仪表常用的精度等级有 0.005、0.02、0.05、0.1、0.2、0.4 (0.35)、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0 等。

(3) 压力检测仪表

依据转换原理的不同, 压力检测仪表主要有四大类: 液柱式压力计、弹性式压力计、电气式压力计和活塞式压力计。

液柱式压力计是根据流体静力学原理将被测压力转换成液柱高度进行测量的。按其结构形式的不同, 有 U 形管压力计、单管压力计和斜管压力计等。这类压力计结构简单、使用方便, 但其精度受工作液的毛细管作用、密度及视差等因素的影响, 测量范围较窄, 一般用来测量较低的压力、真空度或压力差。

弹性式压力计是将被测压力转换成弹性元件变形的位移进行测量的。例如弹簧管压力计、波纹管压力计及膜片式压力计等。

电气式压力计是通过机械和电气元件将被测压力转换成电量 (如电压、电流、频率等) 来进行测量的。例如各种压力传感器和压力变送器。

活塞式压力计是根据水压机液体传送压力的原理, 将被测压力转换成活塞上所加平衡砝码的重量来进行测量的。它的测量精度很高, 允许误差可小到 $0.05\% \sim 0.02\%$ 。一般作为标准型压力测量仪器来检验其他类型的压力计。

工业上常用的压力仪表主要是弹性式压力仪表和电气式压力仪表。压力表的选用应根据

工艺生产过程对压力测量的要求, 结合其他各方面的情况加以全面的考虑和具体的分析, 以保证仪表正常工作及安全生产。

(4) 温度检测仪表

温度是表征物体冷热程度的物理量, 是各种工业生产和科学实验中最普遍而重要的操作参数。温度不能直接测量, 只能借助于冷热不同的物体之间的热交换, 以及物体的某些物理性质随冷热程度不同而变化的特性来加以间接测量。按检测温度时测温元件是否与被测介质接触, 可把温度测量仪表分为接触式和非接触式两大类。工业上常用的温度测量仪表为热电偶温度计和热电阻温度计。

(5) 流量检测仪表

测量流量的方法很多, 其测量原理和所用的仪表结构形式各不相同。速度式流量计, 例如差压式流量计、转子流量计、电磁流量计、涡轮流量计、堰式流量计等, 是以测量流体在管道内的流速作为测量依据来计算流量的。容积式流量计, 例如椭圆齿轮流量计、腰轮流量计、活塞式流量计等, 是以单位时间内所排出流体的固定容积的数目作为测量依据来计算流量的。而质量流量计是以测量流体流过的质量为依据的, 分为直接式和间接式两种。直接式质量流量计直接测量质量流量, 例如量热式、角动量式、陀螺式和科里奥利力式等质量流量计。间接式质量流量计是用密度与容积流量经过运算求得质量流量的。质量流量计的测量精度不受流体的温度、压力、黏度等变化影响, 是一种发展中的流量测量仪表。

(6) 物位检测仪表

玻璃管液位计、玻璃板液位计等直读式物位仪表根据流体力学的连通性原理; 差压式液位计是根据液柱或物料堆积对某定点产生压力的原理, 可分为压力式和差压式两类。浮力式液位计是利用浮子的高度随液位变化而变化, 或液体对沉浸于液体中的浮子 (或沉桶) 的浮力随液位高度而变化的原理, 可分为浮子式、浮球式和沉桶式等几种。电磁式物位仪表可分为电阻式 (即电极式)、电容式和电感式等几种。

(7) 显示仪表

显示仪表将生产过程中各种参数进行指示、记录或累积, 按照显示的方式来分, 可分为模拟式、数字式和屏幕显示式三种。

模拟式显示仪表以仪表指针 (或记录笔) 的线性位移或角位移来模拟显示被测参数的连续变化。这类仪表由于要使用磁电偏转机构或机电式伺服机构, 因此测量速度较慢、测量精度低、难以准确读数。但由于其结构简单、工作可靠、价廉且又能反映出被测参数的变化趋势, 因而目前大量地应用于工业生产中。

数字式显示仪表是直接以数字形式显示被测参数大小的仪表。其特点是测量速度快、精度高、读数直观准确, 便于和计算机等数字化装置联用, 因而近年来得到迅速发展。

屏幕显示仪表是一种与计算机联用的新型显示装置, 可以把生产过程中的工艺参数以文字、符号和图形等形式在屏幕上显示出来, 具有直观、新颖等特点, 随着计算机技术的发展, 具有广阔的应用前景。

1.1.3 控制器

控制器的作用是将被控变量的测量值与给定值 (设定值) 进行比较, 然后对比较后得到的偏差信号进行比例、积分、微分等运算, 并将运算结果以一定的信号形式送往执行器, 以实现对被控变量的自动控制。

所谓控制器的控制规律是指控制器的输出信号 p 与输入偏差 e 之间的关系, 即

$$p=f(e)=f(z-x) \quad (1-6)$$

式中, z 为控制器的输入测量值信号; x 为控制器的设定值信号。

常用的控制规律有位式控制、比例控制 (P)、积分控制 (I)、微分控制 (D) 以及它们的组合控制规律 (PI、PD、PID) 等。

(1) 模拟式控制器

模拟式控制器的信号形式为连续的模拟信号。一般由输入电路、给定电路、PID 运算电路、自动与手动 (包括硬手动和软手动两种) 切换电路、输出电路及指示电路等组成。控制器接收来自变送器的测量信号 (4~20mA 或 1~5V), 在输入电路中与给定值进行比较, 得出偏差信号。然后在 PD 与 PI 电路中进行 PID 运算, 最后由输出电路转换为 4~20mA 直流电流输出。控制器的给定值可由“内给定”或“外给定”两种方式取得, 用切换开关进行选择。当控制器工作于“内给定”方式时, 给定电压由控制器内部的高精度稳压电源取得。当控制器需要由计算机或另外的控制器供给给定信号时, 开关切换到“外给定”位置上, 由外来的 4~20mA 电流流过 250Ω 精密电阻产生 1~5V 的给定电压。

(2) 数字式控制器

数字式控制器与模拟式控制器的构成原理和工作方式有根本的差别, 但从仪表总的功能和输入输出关系来看, 由于数字式控制器备有模-数 (A/D) 和数-模 (D/A) 转换器件, 因此两者并无外在的明显差异。

(3) 智能型控制器

智能型控制器是数字式控制器智能化的发展, 以微处理器为控制核心, 其控制规律算法可根据需要由用户自己编程, 而且可以随时擦除改写以适应系统的变化。在一台智能型控制器上, 能够实现相当于模拟仪表的各种运算器 (加、减、乘、除、开方及逻辑运算) 和 PID 控制器的功能, 并可进行高、低值选择, 同时还配有与上位计算机通信联系的标准接口, 能够灵活地适应各种各样的过程控制。智能控制器本身还具有通信及自诊断功能, 发生故障时可快速查出故障部位, 便于排除故障。

(4) 可编程序控制器 (PLC)

可编程序控制器采用典型的微型计算机结构, 包括中央处理器 CPU、存储器和输入、输出接口电路等。其内部采用总线结构, 进行数据和指令的传输。由于可通过软件来改变控制方式和逻辑规律, 所以具有功能丰富、可靠性强, 可灵活组成集散系统或纳入局部网络等特点。与微型计算机系统相比, 它具有可靠性高、组态灵活、编程简单、直接面向应用现场、使用方便等优点。所以可编程序控制器系统 (PLC) 已经广泛应用于石油、化工、电力、钢铁、机械等各行各业。并形成了逻辑控制和连续控制功能日益融合的趋势, 现代大型 PLC 都配有 PID 子程序或 PID 模块, 可实现单回路控制与各种复杂控制。

1.1.4 执行器

执行器是自动控制系统中的一个重要的组成部分。它的作用是接收控制器送来的控制信号, 改变被控介质的流量, 从而将被控变量维持在工艺要求的数值上或在一定的范围内。

执行器按其使用能源形式可分为气动、电动、液动三大类。气动执行器用压缩空气作为能源, 其特点是结构简单、动作可靠、平稳、输出推力较大、维修方便、防火防爆、价格低廉, 因此广泛应用于化工、炼油等生产过程中。在采用电动仪表或计算机控制时, 只要经过电-气转换器或电-气阀门定位器将电信号转换为 0.02~0.1MPa 的标准气压信号, 也可以使用气动执行器。而电动执行器的能源取用方便, 信号传递迅速, 在油田中也在大量使用。

气动执行器由执行机构和控制机构两大部分组成。执行机构分为活塞式和薄膜式两种。活塞式执行机构的推力较大, 主要适用于大口径、高压降控制阀和蝶阀的推动装置。薄膜式执行机构最为常用, 它可以用做一般控制阀的推动装置, 组成气动薄膜式执行机构, 习惯上称为气动薄膜控制阀。它的结构简单、价格便宜、维修方便、应用广泛。

控制机构即控制阀, 实际上是一个局部阻力可以改变的节流元件。通过阀杆上部与执行机构相连, 下部与阀芯相连。由于阀芯在阀体内移动, 改变了阀芯与阀座之间的流通面积, 即改变了阀的阻力系数, 被控介质的流量也就相应地改变, 从而达到控制工艺参数的目的。主要有直通单座阀、直通双座阀、角形阀、三通阀、蝶阀(翻板阀)、隔膜阀、笼式阀(套筒阀)、凸轮挠曲阀(偏心旋转阀)、球阀等。

电动执行器接收来自控制器的 4~20mA 的直流电流信号, 并将其转换成相应的角位移或直行程位移, 去操纵阀门、挡板等控制机构, 以实现自动控制。电动执行器有角行程、直行程和多转式等类型。角行程电动执行机构以电动机为动力元件, 将输入的直流电流信号转换为相应的角位移, 这种执行机构用于操纵蝶阀、挡板之类的旋转式控制阀。直行程执行机构接收输入的直流电流信号后, 使电动机转动, 然后经减速器减速并转换为直线位移输出, 去操纵单座、双座、三通等各种控制阀和其他直线式控制机构。多转式电动执行机构主要用来开启和关闭闸阀、截止阀等多转式阀门。电动执行机构不仅可与控制器配合实现自动控制, 还可以通过操纵器实现控制系统的自动控制和手动控制的相互切换。当操纵器的切换开关置于手动操纵位置时, 由正、反操作按钮直接控制电动机的电源, 以实现执行机构输出轴的正转或反转, 进行遥控手动操作。

(1) 控制阀的流量特性

控制阀的流量特性是指被控介质流过阀门的相对流量与阀门的相对开度(相对位移)之间的关系, 即

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = f\left(\frac{l}{L}\right) \quad (1-7)$$

式中, 相对流量 $Q/Q_{\max}$ 为控制阀某一开度时的流量与全开时的流量 $Q_{\max}$ 之比; 相对开度 l/L 为控制阀某一开度行程 l 与全开行程 L 之比。

流量特性通常有两种形式, 即理想流量特性和工作流量特性。理想流量特性: 指在控制阀前后压差保持不变的条件下得到的流量特性。它取决于阀芯的形状, 主要有直线、等百分比(对数)、抛物线及快开等几种。

直线流量特性是指控制阀的相对流量与相对开度成直线关系, 即单位位移所引起的流量变化是常数。可表示为

$$\frac{d\left(\frac{Q}{Q_{\max}}\right)}{d\left(\frac{l}{L}\right)} = K \quad (1-8)$$

式中, K 为常数, 即控制阀的放大系数 K_V 。由式(1-8)可推得其相对流量与相对位移之间的关系

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \left[1 + (R-1) \frac{l}{L} \right] \quad (1-9)$$

式中, R 为可调比, 是控制阀所能控制的最大流量 $Q_{\max}$ 与最小流量 $Q_{\min}$ (一般是 $Q_{\max}$ 的 2%~5%) 的比值。国产控制阀的理想可调比为 30 (隔膜阀为 10)。

直线流量特性控制阀的特点：由于放大系数 K_V 是一个常数，不论阀杆原来在什么位置，只要阀杆作相同的变化，流量也作相同的变化。因此，直线控制阀在开度较小时流量相对变化量大，这时灵敏度过高，控制作用过强，易产生振荡，对控制不利；在开度较大时相对流量变化量小，这时灵敏度又太低，控制作用缓慢。因此直线控制阀在大开度和小开度的情况下控制性能都较差，不宜用于负荷变化大的场合。

等百分比流量特性是指单位相对开度变化所引起的相对流量变化与该点的相对流量成正比关系，即控制阀的放大系数 K_V 随相对流量的增加而增大。可表示为

$$\frac{d(Q_{\max})}{d\left(\frac{l}{L}\right)} = K \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (1-10)$$

由上式可推得其相对流量与相对位移之间的关系

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = R \left(\frac{l}{L} \right) \quad (1-11)$$

等百分比流量特性控制阀的放大系数 K_V 随相对开度的增大而增大。因此，在同样的开度变化量下，相对流量小时，其变化量也小，控制平稳缓和；相对流量大时，其变化量也大，控制灵敏有效。

抛物线流量特性是指阀的相对流量与相对开度之间成抛物线关系。可表示为

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \left[1 + (\sqrt{R} - 1) \frac{l}{L} \right]^2 \quad (1-12)$$

它介于直线特性与等百分比特性之间。

快开流量特性是在开度小时就有较大的流量，随着开度的增大，流量很快就达到最大，随后再增大开度时流量的变化就很小了，因此称为快开特性。具有快开流量特性的控制阀适用于迅速启闭的切断阀或双位控制系统。

(2) 控制阀的选择

选用控制阀时，一般要根据被控介质的特点（即温度、压力、腐蚀性、黏度等）、控制要求、安装地点等因素，参考各种类型控制阀的特点合理地选用。在具体选用时，一般应考虑下面几个主要问题。

① 控制阀结构与特性的选择。控制阀的结构形式主要是根据工艺条件，如温度、压力及介质的物理、化学特性（如腐蚀性、黏度等）来选择。例如强腐蚀性介质可采用隔膜阀，高温介质可选用带翅形散热片的结构形式等。

控制阀的流量特性一般是先按控制系统的特点来选择阀的希望流量特性，然后再考虑工艺配管情况来选择相应的理想流量特性。使控制阀在具体的管道系统中，畸变后的工作流量特性能满足控制系统对它的要求。目前使用较多的是等百分比流量特性。

② 气开式与气关式的选择。气动执行器有气开式与气关式两种型式。有信号时阀关，无信号时阀开的为气关式，反之为气开式。由于执行机构有正、反作用，控制阀也有正、反装，因此气动执行器的气关或气开可由此组合而成。

气开、气关的选择原则：当仪表供气系统发生故障或控制信号突然中断时，应保证生产设备安全和操作人员的安全。如果阀处于打开位置时危害性小，则应选择气关式；反之，则应选择气开式。

③ 控制阀口径的选择。控制阀口径选择得合适与否将会直接影响控制效果。口径选得过小，会使流经控制阀的介质达不到所需的最大流量。在大的扰动情况下，系统会因介质流