



高等院校“十一五”规划教材

石油化工仪表 及自动化

主 编 郑明方 杨长春
副主编 江小玲 荆胜南

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

内 容 提 要

全书以工业过程控制系统为主线,介绍了过程参数检测仪表及控制装置、简单控制系统、复杂控制系统、DCS 以及典型单元过程控制应用实例。

全书共分 7 章,力求以理论联系实际为原则,简明扼要,通俗易懂,努力使技术先进性与工程实用性相融合。

本书可作为工科院校的石油化工、能源、轻工等专业的教材或教学参考书;也可作为应用型本科院校自动化等相关专业的教材或教学参考书。另外,亦可作为工艺操作人员及自动化从业人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

石油化工仪表及自动化 / 郑明方主编. —北京: 中国石化出版社, 2009
ISBN 978 - 7 - 80229 - 999 - 3

I. 石… II. 郑… III. 石油化工 - 化工仪表 - 自动控制
系统 IV. TE967

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 122460 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京科信印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 20.25 印张 508 千字

2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

定价: 45.00 元



第1章 概论	(1)
1.1 石油化工过程控制基本概念	(1)
1.1.1 自动控制系统的基本组成及方块图	(1)
1.1.2 工艺管道及控制流程图	(4)
1.1.3 控制系统的分类	(6)
1.2 石油化工过程控制对象的特性	(7)
1.2.1 有自平衡能力对象	(8)
1.2.2 无自平衡能力对象	(13)
1.3 石油化工控制系统的过渡过程和品质指标	(14)
1.3.1 控制系统的静态与动态	(14)
1.3.2 控制系统的过渡过程	(14)
1.3.3 控制系统的品质指标	(16)
习题与思考题	(18)
第2章 石油化工过程测量仪表	(20)
2.1 概述	(20)
2.1.1 检测过程与测量误差	(20)
2.1.2 测量仪表的性能指标	(21)
2.1.3 测量仪表的基本组成及变送器	(24)
2.1.4 测量仪表的分类	(28)
2.2 温度检测及仪表	(29)
2.2.1 温度检测方法及其基本概念	(29)
2.2.2 膨胀式温度计	(30)
2.2.3 热电偶温度计	(32)
2.2.4 热电阻温度计	(39)
2.2.5 高温检测仪表	(41)
2.2.6 温度显示仪表	(42)
2.2.7 温度检测仪表的选用和安装	(46)
2.3 流量检测及仪表	(47)
2.3.1 流量测量方法及其基本概念	(47)
2.3.2 差压式流量计	(48)
2.3.3 转子流量计	(53)
2.3.4 容积式流量计	(56)
2.3.5 其他流量计	(59)
2.4 压力检测及仪表	(67)
2.4.1 压力单位及测压仪表	(67)
2.4.2 弹性式压力计	(68)

2.4.3 电气式压力计	(70)
2.4.4 智能型压力变送器	(75)
2.4.5 压力计的选用及安装	(77)
2.5 物位检测及仪表	(79)
2.5.1 浮力式液位计	(80)
2.5.2 其他物位计	(84)
2.6 成分检测	(87)
2.6.1 成分分析方法	(87)
2.6.2 工业用成分分析仪表	(94)
2.6.3 湿度传感器	(97)
习题与思考题	(99)
第3章 控制器与执行器	(102)
3.1 基本控制规律	(102)
3.1.1 位式控制	(103)
3.1.2 比例控制	(104)
3.1.3 积分控制	(105)
3.1.4 微分控制	(106)
3.2 智能控制器	(107)
3.2.1 控制器的发展历史	(108)
3.2.2 智能控制器的构成和工作原理	(110)
3.3 可编程控制器	(116)
3.3.1 可编程控制器概述	(116)
3.3.2 可编程控制器的硬件结构	(120)
3.3.3 可编程控制器的工作原理	(122)
3.3.4 PLC 程序设计基础	(126)
3.3.5 西门子 S7-200 系列可编程控制器	(129)
3.4 执行器和防爆栅	(140)
3.4.1 气动执行器	(140)
3.4.2 电-气转换器	(145)
3.4.3 阀门定位器	(146)
3.4.4 电动执行器	(148)
3.4.5 防爆栅	(148)
习题与思考题	(151)
第4章 简单控制系统	(152)
4.1 简单控制系统组成及分析	(152)
4.2 简单控制系统的设计	(153)
4.2.1 被控变量的选择	(153)
4.2.2 操纵变量的选择	(155)
4.2.3 检测仪表对系统的影响	(157)
4.2.4 控制阀的选择	(159)

4.2.5 控制器控制规律的选择及正反作用的确定	(162)
4.3 控制器参数的工程整定	(165)
4.3.1 经验凑试法	(165)
4.3.2 临界比例度法	(166)
4.3.3 衰减曲线法	(167)
习题与思考题	(168)
第5章 复杂控制系统	(170)
5.1 串级控制系统	(170)
5.1.1 组成原理	(170)
5.1.2 控制过程	(171)
5.1.3 系统特点	(172)
5.1.4 控制系统设计	(173)
5.1.5 串级控制系统的工程整定方法	(175)
5.2 均匀控制系统	(175)
5.2.1 均匀控制系统原理	(175)
5.2.2 均匀控制系统方案	(176)
5.3 比值控制系统	(178)
5.3.1 比值控制系统的类型	(178)
5.3.2 比值控制系统的实施	(181)
5.4 前馈控制系统	(182)
5.4.1 前馈控制系统结构形式	(183)
5.4.2 前馈控制系统应用场合	(184)
5.5 分程控制系统	(185)
5.5.1 分程控制系统的原理	(185)
5.5.2 分程控制系统的应用	(185)
5.6 选择性控制系统	(187)
5.6.1 选择性控制系统分类	(188)
5.6.2 选择性控制系统设计	(191)
习题与思考题	(192)
第6章 集散控制系统与现场总线控制系统	(194)
6.1 集散控制系统(DCS)	(194)
6.1.1 集散控制系统的组成	(196)
6.1.2 集散控制系统的特点	(198)
6.1.3 集散控制系统的基本功能	(199)
6.1.4 集散控制系统的性能指标	(209)
6.1.5 SUPCONJX-300X 简介	(211)
6.1.6 集散控制系统的工程实例	(218)
6.1.7 集散控制系统的监控操作	(226)
6.1.8 集散控制系统的安装、调试与维护	(233)
6.2 现场总线控制系统(FCS)	(237)

6.2.1 现场总线的特点	(242)
6.2.2 基金会现场总线(FF)	(246)
6.2.3 Profibus 现场总线	(250)
6.2.4 EPA 实时以太网	(256)
6.2.5 HART 通信协议	(260)
6.2.6 Modbus 通信协议	(261)
6.2.7 FCS 与 DCS 的集成	(262)
第7章 典型石油化工过程单元控制	(265)
7.1 流体输送设备的控制	(265)
7.1.1 泵和压缩机的基本控制	(265)
7.1.2 离心压缩机的防喘振控制	(270)
7.2 火力发电厂生产过程的控制	(273)
7.2.1 锅炉设备的控制	(273)
7.2.2 单元机组负荷控制系统	(281)
7.3 精馏塔的控制	(283)
7.3.1 精馏塔控制要求及扰动分析	(283)
7.3.2 精馏塔被控变量的选择	(285)
7.3.3 精馏塔的整体控制方案	(288)
7.4 炼油工业生产过程控制	(293)
7.4.1 常减压	(293)
7.4.2 催化裂化	(295)
7.4.3 催化重整	(297)
7.4.4 油品调合	(300)
附录一 常用压力表规格及型号	(306)
附录二 镍铬-铜镍热电偶分度表	(307)
附录三 铂铑₁₀-铂热电偶分度表	(307)
附录四 镍铬-镍硅热电偶分度表	(312)
附录五 铂电阻分度表	(315)
附录六 铜电阻(Cu100)分度表	(317)

第1章 概 论

1.1 石油化工过程控制基本概念

1.1.1 自动控制系统的基本组成及方块图

自动控制系统是在人工控制的基础上产生和发展起来的,下面以生产过程中最常见的液位控制为例来介绍控制系统的基本组成。图1-1所示是一个液体储槽,在生产中常用来作为一般的中间容器或成品罐。从前一个工序来的物料连续不断地流入槽中,而槽中的液体又送至下一工序进行加工或包装。当流入量 Q_i (或流出量 Q_o)波动时会引起槽内液位的波动,严重时会造成溢出或抽空。解决这个问题的最简单办法是:以储槽液位为操作指标,以改变出口阀门开度为控制手段,如图1-1(a)所示。当液位上升时,将出口阀门开大,液位上升越多,阀门开得越大;反之,当液位下降时,则关小出口阀门,液位下降越多,阀门关得越小。为了使液位上升和下降都有足够的余地,选择玻璃管液位计指示值中间的某一点为正常工作时的液位高度,通过改变出口阀门开度而使液位保持在这一高度上,这样就不会出现储槽中液位过高而溢至槽外,或使储槽内液体抽空而发生事故的现象。归纳起来,如图1-1(b)所示,操作人员所进行的工作有三方面:

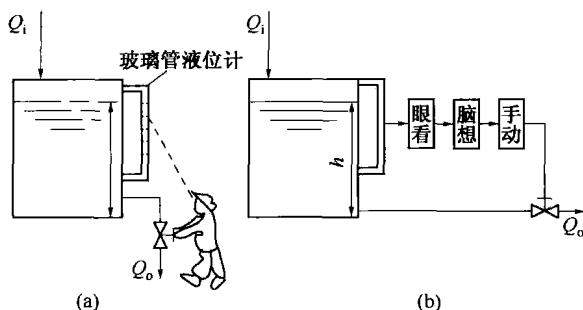


图1-1 液位人工控制

(1) 检测。用眼睛观察玻璃管液位计(测量元件)中液位的高低,并通过神经系统告诉大脑。

(2) 运算(思考)、命令。大脑根据眼睛看到的液位高度,加以思考并与要求的液位值进行比较,得出偏差的大小和正负,然后根据经验,经思考、决策后发出命令。

(3) 执行。根据大脑发出的命令,通过手去改变阀门开度,以改变出口流量 Q_o ,从而使液位保持在所需高度上。

眼、脑、手三个器官,分别担负了检测、运算和执行三个作用,来完成测量、求偏差、操纵阀门以纠正偏差的全过程。由于人工控制受到人的生理上的限制,因此在控制速度和准确度上都满足不了大型现代化生产的需要。为了提高控制准确度和减轻劳动强度,可用一套自动化装置来代替上述人工操作,用检测元件与变送器取代眼睛,自动控制器取代大脑,自动控制阀取代手,这样就由人工控制变为自动控制了。液位储槽和自动化装置一起构成了一个自动控制系统,如图1-2所示。

在研究自动控制系统时，为了能更清楚地表示出一个自动控制系统中各个组成环节之间的相互影响和信号联系，便于对系统分析研究，一般都用方块图来表示控制系统的组成。例如图 1-2 的液位自动控制系统可以用图 1-3 的方块图来表示。每个环节表示组成系统的一个部分，称为“环节”。两个方块之间用一条带有箭头的线条表示其信号的相互关系，箭头指向方块表示为这个环节的输入，箭头离开方块表示为这个环节的输出。线旁的字母表示相互间的作用信号。

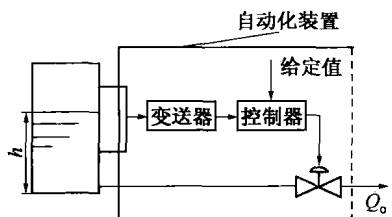


图 1-2 液位自动控制系统

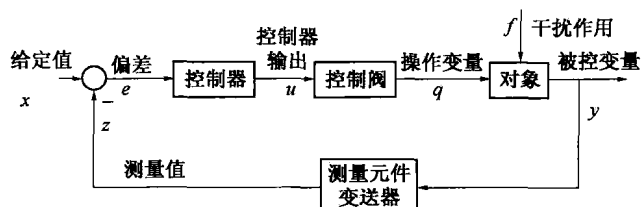


图 1-3 液位自动控制系统方块图

图 1-2 的储槽在图 1-3 中用一个“对象”方块来表示，其液位就是生产过程中所要保持恒定的变量，在自动控制系统中称为被控变量，用 y 来表示。在方块图中，被控变量 y 就是对象的输出。影响被控变量 y 的因素来自进料流量的改变，这种引起被控变量波动的外来因素，在自动控制系统中称为干扰作用（扰动作用），用 f 表示。干扰作用是作用于对象的输入信号。与此同时，出料流量的改变是由于控制阀动作所致，如果用一方块表示控制阀，那么，出料流量即为“控制阀”方块的输出信号。出料流量的变化也是影响液位变化的因素，所以也是作用对象的输入信号。出料流量信号 q 在方块图中把控制阀和对象连接在一起。

储槽液位信号是测量元件及变送的输入信号，而变送器的输出信号 z 进入比较机构与工艺上希望保持的被控变量数值，即给定值（设定值） x 进行比较，得出偏差信号 e ($e = x - z$)，并送往控制器。比较机构实际上只是控制器的一个组成部分，不是一个独立的仪表，在图中把它单独画出来（一般方块图中是以 $\bigcirc$ 或 $\oplus$ 表示），为的是能更清楚地说明其比较作用。控制器根据偏差信号的大小，按一定的规律运算后，发出信号 u 送至控制阀，使控制阀的开度发生变化，从而改变出料流量以克服干扰对被控变量（液位）的影响。控制阀的开度变化起着控制作用。具体实现控制作用的变量叫做操纵变量，如图 1-3 中流过控制阀的出料流量就是操纵变量。用来实现控制作用的物料一般称为操纵介质或操纵剂，如上述中的流过控制阀的流体就是操纵介质。

由此可见，过程控制系统由以下几部分组成：

(1) 被控对象

被控对象是指被控制的生产设备或装置，常见的被控对象有锅炉、加热炉、分馏塔、反应釜、干燥炉、压缩机、旋转窑等生产设备，或储存物料的槽、罐以及传送物料的管段等。当生产工艺过程中需要控制的参数只有一个，如电阻加热炉炉温控制的被控量只有炉温一个参数，则生产设备与被控对象是一致的；当需要控制的参数不止一个，其特性互不相同，应各有一套可能是互相关联的控制系统，这样的生产设备其被控对象就不止一个，应对其中的不同过程分别作不同的分析和处理。

(2) 检测元件和变送器

反映生产过程的工艺参数大多不止一个，一般都需用不同的检测元件进行自动检测，

才能了解生产过程进行的状态，以获得可靠的控制信息。需要进行自动控制的参数称为被控量，上例中的水位就是被控量，被控量往往就是对象的输出量。当系统只有一个被控量，则只有一个控制回路，称为单回路控制系统，也称单变量控制系统。当系统不只一个被控量，则不止一个控制回路，称为多回路控制系统，也称多变量控制系统。一个生产设备需要控制的回路数不一定和它的过程参数数目完全相同，因为有些参数并不需要进行自动控制，只需进行检测、显示就可以了。

被控量由检测元件进行检测，当其输出不是电学量，或虽然是电学量，但不是4~20mA信号时，必须采用变送器将其转换为统一的标准电信号。如果是气动仪表，都应转换为20~100kPa的气动信号。检测元件或变送器的输出就是被控量的测量值。

(3) 控制器

控制器也称调节器，它接收检测元件或变送器送来的信息——被控量。当其符合生产工艺要求时，控制器的输出保持不变，否则控制器的输出会发生变化，对系统施加控制作用。使被控量发生变化的任何作用称为扰动。扰动一经产生，控制器就发出控制命令，对系统施加控制作用，使被控量回到设定值。

按生产工艺要求给被控量规定一个参考值，称为设定值 r ，这就是经过控制系统的自动控制作用被控量应保持的正常参数值。在过程控制系统中，被控量的测量值 z 由系统的输出端反馈到系统的输入端，与设定值 r 比较后得到偏差值 $e=r-z$ ，就是控制器的输入信号。当 $r>z$ 时，称为正偏差；当 $r<z$ 时，称为负偏差。应当指出，这种规定与仪表厂校验控制器所规定的正负偏差正好相反，这点在实际工作中要特别注意。

(4) 控制阀

由控制器发出的控制信号，通过电动或气动执行器产生的位移量 l 驱动控制阀门，以改变输入对象的操纵量 q ，使被控量受到控制。控制阀是控制系统的终端部件，阀门的输出特性决定于阀门本身的结构，有的与输入信号呈线性关系，有的则呈对数或其他曲线关系。详细情况将在后面章节中进行介绍。

对于一个完整的过程控制系统，除自动控制回路外，应备有一套手动控制回路，以便在自动控制系统因故障而失效后或在某些紧急情况下，对系统进行手动遥控。另外，还应有一套必要的信号显示、通信、联络、联锁以及自动保护等设施，才能充分地保证生产过程的顺利进行和保障人身与设备的安全。

最后应当指出，控制器是根据被控量测量值与设定值进行比较得出的偏差值对被控对象进行控制的。对象的输出信号即控制系统的输出，通过检测与变送器的作用，将输出信号反馈到系统的输入端，构成一个闭环控制回路，简称闭环。如果系统的输出信号只是被检测和显示，并不反馈到系统的输入端，则是一个没有闭合的开环控制系统，简称开环。开环系统只按对象的输入量变化进行控制，即使系统是稳定的，其控制品质也较低。

在闭环控制回路中，可能有两种形式的反馈：正反馈与负反馈。正反馈的作用会扩大不平衡量，是不稳定的。如采用正反馈控制室内温度，当温度超过设定值时，系统会增加热量，使室温升高；当温度低于设定值时，它又减少热量，使室温进一步降低。具有正反馈的控制回路，总是将被控量锁定在高端或低端的极值状态下，这种性质不符合控制目的。如采用负反馈，其作用与正反馈相反，总是力求恢复到平衡温度，即保持在规定的设定值范围内。具有负反馈(包括前馈)作用的回路，一般称为反馈控制系统。这种系统能密切监视和控制被控对象输出量的变化，抗干扰能力强，能有效地克服特性变化的影响，有一定

的自适应能力，因而控制品质较高，是应用最广、研究最多的控制系统。

1.1.2 工艺管道及控制流程图

在工艺流程确定以后，工艺人员和自控设计人员应共同研究确定控制方案。控制方案的确定包括流程中各测量点的选择、控制系统的确定及有关自动信号、联锁保护系统的设计等。在控制方案确定以后，根据工艺设计给出的流程图，按其流程顺序标注出相应的测量点、控制点、控制系统及自动信号与联锁保护系统等，便成了工艺管道及控制流程图（PID图）。

图1-4是乙烯生产过程中脱乙烷塔的工艺管道及控制流程图。为了说明问题方便，对实际的工艺过程及控制方案都做了部分修改。从脱甲烷塔出来的釜液进入脱乙烷塔脱除乙烷。从脱乙烷塔顶出来的碳二馏分经塔顶冷凝器冷凝后，部分作为回流，其余则去乙炔加氢反应器进行加氢反应。从脱乙烷底出来的釜液部分经再沸器后返回塔底，其余则去脱丙烷塔脱除丙烷。

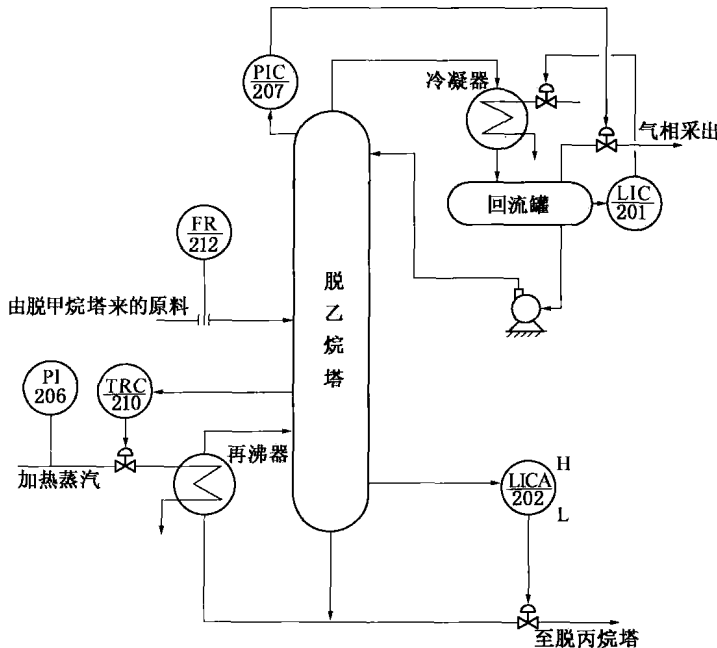


图1-4 脱乙烷塔的工艺管道及控制流程图举例

在绘制PID图时，图中所采用的图例符号要按有关的技术规定进行，可参见标准HG/T 20505-2000《过程测量与控制仪表的功能标志及图形符号》。下面结合图1-4对其中一些常用的统一规定做简要介绍：

(1) 图形符号

① 测量点（包括检出元件、取样点）

是由工艺设备轮廓线或工艺管线引到仪表圆圈的连接线的起点，一般无特定的图形符号，如图1-5所示。图1-4中的塔顶取压点和加热蒸汽管线上的取压点都属于这种情形。

必要时，检测元件也可以用象形或图形符号表示。例如流量检测采用孔板时，检测点也可用图1-4中脱乙烷塔的进料管线上的符号表示。

② 连接线

通用的仪表信号线均以细实线表示。连接线表示交叉及相接时，采用图1-6的形式。

必要时也可用加箭头的方式表示信号的方向。在需要时，信号线也可按气信号、电信号、导压毛细管等采用不同的表示方式以示区别。

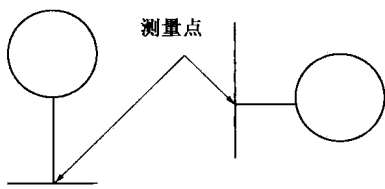


图 1-5 测量点表示

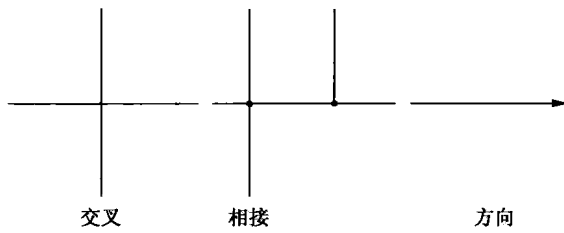


图 1-6 仪表连线表示

③ 仪表(包括检测、显示、控制)的图形符号

仪表的图形符号是一个细实线圆圈，直径约 10mm，对于不同的仪表安装位置的图形符号如表 1-1 所示。

表 1-1 仪表安装位置的图形符号表示

序号	安 装 位 置	图 形 符 号	备 注	序号	安 装 位 置	图 形 符 号	备 注
1	就地安装 仪表			3	就地仪表盘面 安装仪表		
			嵌在管道中	4	集中仪表盘后 安装仪表		
2	集中仪表盘面 安装仪表			5	就地仪表盘后 安装仪表		

对于处理两个或两个以上被测变量，具有相同或不同功能的复式仪表时，可用两个相切的圆或分别用细实线圆与细虚线圆相切表示(测量点在图纸上距离较远或不在同一图纸上)，如图 1-7 所示。

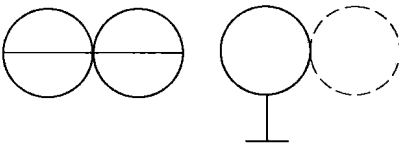


图 1-7 复式仪表的表示法

(2) 字母代号

在控制流程图中，用来表示仪表的小圆圈的上半圆内，一般写有两位(或两位以上)字母，第一位字母表示被测变量，后继字母表示仪表的功能，常用被测变量和仪表功能的字母代号见表 1-2。

如图 1-4 所示在塔顶的压力控制系统中，PIC-207 的第一位字母 P 表示被测变量为压力，第二位字母 I 表示具有指示功能，第三位 C 表示具有控制功能。因此，PIC 就表示一台具有指示功能的压力控制器。该控制系统是通过改变气相采出量来维持塔压稳定的。同样，回流罐液位控制系统中的 LIC-201 是一台具有指示功能的液位控制器，它是通过改变进入冷凝器冷剂量来维持回流罐中液位稳定的。

在塔下部的温度控制系统中，TRC-210 表示一台具有记录功能的温度控制器，它是通过改变进入再沸器的中热蒸汽量来维持塔底温度恒定的。当一台仪表同时具有指示、记录功能时，只需标注字母代号“R”，不标“I”，所以 TRC-210 可以同时具有指示、记录功能。同样，在进料管线上，FR-212 可以表示同时具有指示、记录功能的流量仪表。

在塔底的液位控制系统中，LICA - 202 代表一台具有指示、报警功能的液位控制器，它是通过改变塔底采出量来维持塔釜液位稳定的。仪表圆圈外标有“H”、“L”字母，表示该仪表同时具有高、低限报警，在塔釜液位过高或过低时，会发出声、光报警信号。

表 1-2 仪表功能字母代号

字母	第一位字母		后继字母	字母	第一位字母		后继字母
	被测变量	修饰词	功能		被测变量	修饰词	功能
A	分析	差	报警	P	压力或真空	积分、累积	积分、累积
C	电导率		检测元件	Q	数量或件数		记录或打印
D	密度			R	放射性		开关、联锁
E	电压			S	速度或频率		传送
F	流量	比(分数)	指示	T	温度	安全	阀、挡板、百叶窗
I	电流		自动手动操作器	V	黏度		套管
K	时间或时间程度			W	力		继电器或计算器
L	物位			Y	供选用		驱支、执行或未分类
M	水分或湿度			Z	位置		的终端执行机构

(3) 仪表位号

在检测、控制系统中，构成一个回路的每个仪表(或元件)都应有自己的仪表位号。仪表位号是由字母代号组合和阿位伯数字编号两部分组成。字母代号的含义前面已经解释过。阿位伯数字编号写在圆圈的下半部，其第一位数字表示工段号，后续数字(二位或三位数字)表示仪表序号。图 1-4 中仪表的数字编号第一位都是 2，表示脱乙烷塔在乙烯生产中属于第二工段。通过控制流程图可以看出，其上每台仪表的测量点位置、被测变量、仪表功能、工段号、仪表序号、安装位置等。如图 1-4 中的 PI-206 表示测量点在加热蒸汽管线上的蒸汽压力指示仪表，该仪表为就地安装，工段号为 2，仪表序号为 06。而 TRC-210 表示同一工段的一台温度记录控制控制仪，其温度的测量点在塔的下部，仪表安装在集中仪表盘面上。

1.1.3 控制系统的分类

控制系统由于其分类方式方法的不同，出现了不同的名称。按所控制的参数来分，有温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、液位控制系统等；按控制系统所处理的信号来分，有模拟控制系统与数字控制系统；按是否采用计算机来分，有常规仪表过程控制系统与计算机控制系统，计算机控制系统还可分为 DDC、DCS 和现场总线系统；按控制系统所完成的功能来分，有串级控制系统、均匀控制系统、自适应控制系统等；按其控制动作规律来分，有比例控制系统，比例、积分控制系统，比例、积分、微分控制系统等；按控制系统组成回路的情况来分，有单回路控制系统与多回路控制系统、或开环控制系统与闭环控制系统等。

以上这些分类只反映了不同控制系统某一方面的特点，视具体情况可以采用不同的分类方法，其中并无原则的规定。

过程控制主要是研究反馈控制系统的特性，按设定值的形式不同，可将过程控制系统分为以下三类：

(1) 定值控制系统

在工业生产过程中，大多要求将被控量保持在规定的范围内变化，以保持生产过程

平稳地顺利进行。此规定值就是控制器的设定值，前述锅炉水位控制就是要使水位保持在规定值允许的波动范围以内变化，满足锅炉内蒸汽蒸发量和给水平衡关系。只要被控量在设定值范围内波动，控制系统的工作就是正常的。在定值控制系统中，设定值是固定不变的，引起系统产生变化的是扰动信号，可以认为以扰动量为输入的系统为定值控制系统，这种控制系统是应用最多的一种。

(2) 随动控制系统

对于有的生产过程，其被控量是变化的，即控制系统的设定值不是定值，而是无规律变化的，自动控制的目的是要使被控量相当准确而及时地跟随设定值的变化。例如，加热炉的燃料与空气的混合比控制，燃料量是按工艺过程的需要而设定的，这个设定值又随生产流程的要求而自动或手动改变。也就是说，燃料量在变化，控制系统就要使空气量跟随燃料量的变化，自动按预先规定的比例而相应地增减空气量，以保证燃料合理而经济地燃烧，这就是随动控制系统。自动平衡记录仪的平衡机构就是跟随被测信号的变化自动达到平衡位置，是一种典型的随运控制系统。

(3) 程序控制系统

程序控制系统的设定值是按生产工艺的要求有规律变化的，自动控制的目的在于使被控量按规定的程序自动进行，以保证生产过程顺利完成。如工业炉、干燥窑等周期作业的加热设备，一般包含加热—升温—保温，然后逐渐缓慢地降温程序，设定值按此程序自动地改变，控制系统就按该设定程序自动地进行下去，直到整个程序运行结束为止，从而达到程序控制目的。

1.2 石油化工过程控制对象的特性

石油化工过程控制对象(简称被控对象或对象)是过程控制系统的主体，全部控制装置都是为它服务的，并按照过程控制对象的特性和要求进行设计及调试。系统的控制质量在很大程度上取决于对象的特性。因此，研究过程控制对象的动态特性是分析、设计、整定过程控制系统的基础。

过程控制对象生产过程几乎都离不开物质或能量的流动(能量常以某种流体作为载体)，可将对象视为一个隔离体，从外部流入对象内部的物质或能量称为流入量，从对象内部流出的物质或能量称为流出量。显然，只有当流入量与流出量保持平衡时，对象才会处于稳定平衡的工况。平衡关系一旦遇到破坏，就必然会反映在某一个量的变化上。例如，液位变化就反映物质平衡关系遭到破坏，温度变化则反映热量平衡遭到破坏。实际上，这种平衡关系的破坏是经常发生且难以避免的。过程控制系统常要求将温度、压力、液位等表征平衡关系的物理量保持在其设定值上，这就必须随时控制流入量或流出量。在一般情况下，实施这种控制的执行器就是调节阀，它不仅适用于流入量或流出量是物质流的情况，也适用于流入量或流出量是能量流的情况。

过程控制对象的另一特点是，它们大多属慢变过程(即被控量的变化比较缓慢)，时间尺度往往以若干分钟甚至小时计。在现代工业生产过程中，生产规模不同，工艺要求各异，产品品种多样，过程控制中被控对象形式是多种多样的，有些生产过程(热工过程)是在较大的设备中进行的，这些对象往往具有较大的储蓄容积，而流入、流出量的份额只能是有限值，这就使得被控制量的变化过程不可能很快。

从阶跃响应曲线看,大多数被控对象动态特性的特点是:被控量的变化通常是不振荡的、单调的、有迟延和惯性的。对象典型的阶跃响应曲线有两类,如图1-8所示。当扰动发生后,被控量一开始并不立刻有显著的变化,这表明对象对扰动的响应有迟延和惯性。而在最后阶段被控量可能达到新的平衡,如图1-8(a)所示,这样的对象称为有自平衡能力对象。被控量也可能不断变化无法进入新的平衡态,而其变化速度趋近某一定值,如图1-8(b)所示,则称为无自平衡能力对象。对象是否具有自平衡能力,是由对象的结构特点决定的。由于大多数过程控制对象阶跃响应具有上述特点,常可用其阶跃响应曲线上的几个特征参数值来表示对象动态特性。

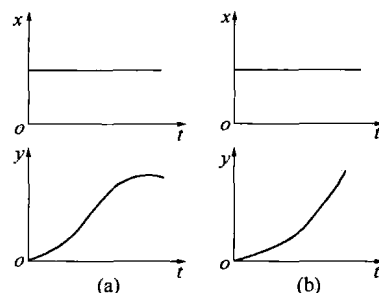


图1-8 对象的阶跃响应曲线

1.2.1 有自平衡能力对象

1. 动态特性

现以单容水箱为例,讨论有自平衡能力对象的动态特性。

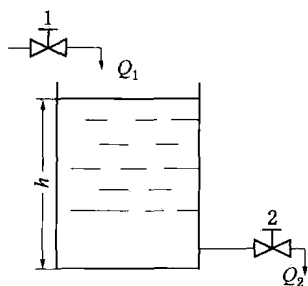


图1-9 单容水箱

图1-9是一个水箱,水经过阀门1不断地注入水槽,水槽内的水又通过阀门2不断流出。工艺上要求水槽的液位 h 保持一定数值。在这里,水槽就是被控对象,液位 h 就是被控变量。如果阀门2的开度保持不变,而阀门1的开度变化是引起液位变化的干扰因素。那么,这里所指的对象特性,就可以反映出当阀门1的开度变化时,液位 h 是如何变化的。在这种情况下,对象的输入量是流入水槽的流量 Q_1 ,对象的输出量是液位 h 。据此可以推导出表征 h 与 Q_1 之间关系的数学表达式。

在生产过程中,最基本的关系是物料平衡和能量平衡。当单位时间内流入对象的物料(或能量)不等于流出对象的物料(或能量)时,表征对象物料(或能量)蓄存量的参数就要随时间而变化。因此,描述它们之间关系的微分方程式可表示为

对象物料蓄存量的变化率 = 单位时间流入对象的物料 - 单位时间流出对象的物料

上式中的物料量也可以表示为能量。

若图1-9的水槽截面积为 A ,当流入水槽的流量 Q_1 等于流出水槽的流量 Q_2 时,系统处于平衡状态,即静态。这时,液位 h 保持不变。

假定某一时刻 Q_1 有了变化,不再等于 Q_2 ,于是 h 也就随之变化,从水槽的物料平衡角度,可以找出 h 与 Q_1 的关系,这是推导表征 h 与 Q_1 关系的微分方程式的根据。

在用微分方程式来描述对象特性时,往往着眼于一些量的变化,而不注重这些量的初始值。所以,在推导方程的过程中,假定 Q_1 、 Q_2 、 h 都代表它们偏离初始平衡状态的变化值。

如果在很短一段时间 dt 内,由于 Q_1 不等于 Q_2 ,引起液位变化了 dh 。此时,流入和流出水槽的水量之差 $(Q_1 - Q_2)dt$ 应该等于水槽内增加(或减少)的水量 Adh ,即

$$(Q_1 - Q_2)dt = Adh \quad (1-1)$$

上式就是微分方程式的一种形式。在这个式子中,还不能一目了然地看出 h 与 Q_1 的关系。因为在水槽出水阀2开度不变的情况下,随着 h 的变化, Q_2 也会变化。 h 越大,静压头

越大, Q_2 也会越大。也就是说, 在式(1-1)中, Q_1 、 Q_2 、 h 都是时间的变量, 如何消去中间变量 Q_2 , 得出 h 与 Q_1 的关系式呢?

如果考虑变化量很微小(由于在自动控制系统中, 各个变量都是在它们的额定值附近做微小的波动, 因此做这样的假定是允许的), 可以近似认为 Q_2 与 h 成正比, 与出水阀的阻力系数 R_s 成反比, 即

$$Q_2 = \frac{h}{R_s} \quad (1-2)$$

将此关系式代入式(1-1), 便有

$$\left(Q_1 - \frac{h}{R_s}\right)dt = Adh \quad (1-3)$$

移项整理后可得

$$AR_s \frac{dh}{dt} + h = R_s Q_1 \quad (1-4)$$

$$\text{令} \quad T = AR_s \quad (1-5)$$

$$K = R_s \quad (1-6)$$

代入式(1-4), 便有

$$T \frac{dh}{dt} + h = KQ_1 \quad (1-7)$$

这就是用来描述简单的水槽对象特性的微分方程式。它是一阶常系数微分方程式, 式中 T 称时间常数, K 称放大系数。

2. 描述对象特性的参数

对象的特性可以通过其数学模型来描述, 但是为了研究问题方便起见, 在实际工作中, 常用下面三个物理量来表示对象的特性。这些物理量, 称为对象的特性参数。

(1) 放大系数 K

对于如图 1-9 所示的简单水槽对象, 当流入流量 Q_1 有一定的阶跃变化后, 液位 h 也会有相应的变化, 但最后会稳定在某一数值上。如果我们将流量 Q_1 的变化看作对象的输入, 而液位 h 的变化看作对象的输出。那么, 在稳定状态时, 对象一定的输入就对应着一定的输出, 这种特性称为对象的静态特性。

假定 Q_1 的变化量用 ΔQ_1 表示, h 的变化量用 Δh 表示。在一定的 ΔQ_1 下, h 的变化情况如图 1-10 所示。在重新达到稳定状态后, 一定的 ΔQ_1 对应着一定的 Δh 值。

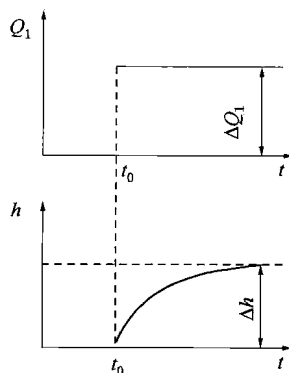


图 1-10 水槽液位的变化曲线

$$\text{令} \quad K = \frac{\Delta h}{\Delta Q_1}$$

$$\text{则} \quad \Delta h = K \Delta Q_1 \quad (1-8)$$

K 在数值上等于对象重新稳定后的输出变化量与输入变化量之比。其意义可以理解为: 如果有一定的输入变化量 ΔQ_1 , 通过对象就被放大了 K 倍变为输出变化量 Δh , 则称 K 为对象的放大系数。

对象的放大系数 K 越大, 表示对象的输入量有一定变化时, 对输出量的影响越大。在工艺生产中, 常常会发现有的阀门对生产影响很大, 开度稍微变化就会引起对象输出量大

幅度的变化,甚至造成事故;有的阀门则相反,开度的变化对生产的影响很小。这说明在一个设备上,各种量的变化对被控变量的影响是不一样的。换句话说,就是各种量与被控变量之间的放大系数有大有小。放大系数越大,被控变量对这个量的变化就越灵敏,这在选择自动控制方案时是需要考虑的。

(2) 时间常数 T

从大量的生产实践中发现,有的对象受到干扰后,被控变量变化很快,较迅速地达到了稳态值;有的对象在受到干扰后,惯性很大,被控变量要经过很长时间才能达到新的稳态值。从图 1-11 中可以看到,截面积很大的水槽与截面积很小的水槽相比,当进口流量改变同样一个数值时,截面积小的水槽液位变化很快,并迅速趋向新的稳态值。而截面积大的水槽惰性大,液位变化慢,须经过很长时间才能稳定。同样道理,夹套蒸汽加热的反应器与直接蒸汽加热的反应器相比,当蒸汽流量变化时,直接蒸汽加热的反应器内反应物的温度变化就比夹套加热的反应器来得快[如图 1-11(b)所示]。如何定量地表示对象的这种特性呢?在自动化领域中,往往用时间常数 T 来表示。时间常数越大,表示对象受到干扰作用后,被控变量变化得越慢,到达新的稳态值所需的时间越长。

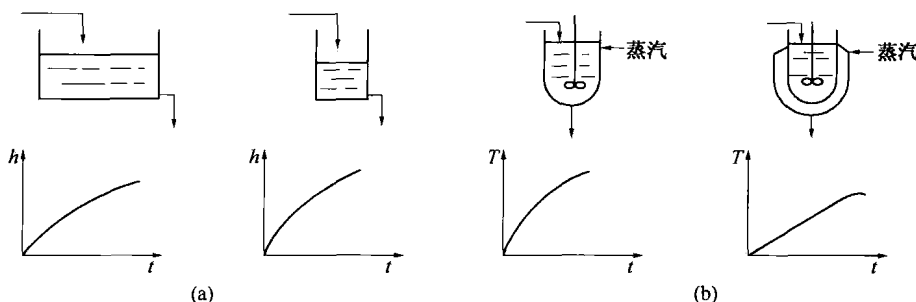


图 1-11 不同时间常数对象的反应曲线

为了进一步理解放大系数 K 与时间常数 T 的物理意义,下面结合图 1-9 所示的水槽例子,来进一步加以说明。

由前面的推导可知,简单水槽的对象特性可由式(1-7)来表示,即

$$T \frac{dh}{dt} + h = KQ_1$$

假定 Q_1 为阶跃作用, $t < 0$ 时, $Q_1 = 0$; $t \geq 0$ 时, $Q_1 = A$, 如图 1-12(a) 所示。为了求得在 Q_1 作用下 h 的变化规律,可以对上述微分方程式求解,得

$$h(t) = KA(1 - e^{-t/T}) \quad (1-9)$$

上式就是对象在受到阶跃作用 $Q_1 = A$ 后,被控变量 h 随时间变化的规律,称为被控变量过渡过程的函数表达式。根据式(1-7)可以画出 $h \sim t$ 曲线,称为阶跃反应曲线或飞升曲线,如图 1-12(b) 所示。

从图 1-12 反应曲线可以看出,对象受到阶跃作用后,被控变量就发生变化,当 $t \rightarrow \infty$ 时,被控变量不再变化而达到了新的稳态值 $h(\infty)$,这时由式(1-7)可得

$$h(\infty) = KA \text{ 或 } K = \frac{h(\infty)}{A} \quad (1-10)$$

这就是说, K 是对象受到阶跃输入作用后,被控变量新的稳态值与所加的输入量之比,故是对象的放大系数。它表示对象受到输入作用后,重新达到平衡状态时的性能,是不随

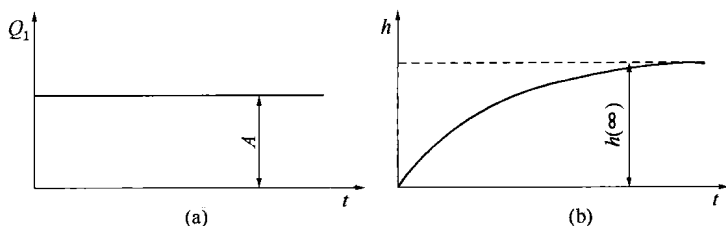


图 1-12 反应曲线

时间而变的, 所以是对象的静态性能。

对于简单水槽对象, 由式(1-6)可知, $K = R_s$, 即放大系数只与出水阀的阻力有关, 当阀的开度一定时, 放大系数就是一个常数。

下面再来讨论时间常数 T 的物理意义。将 $t = T$ 代入式(1-9), 就可以求得

$$h(T) = KA(1 - e^{-1}) = 0.632KA \quad (1-11)$$

将式(1-10)代入式(1-11)得

$$h(T) = 0.632h(\infty) \quad (1-12)$$

这就是说, 当对象受到阶跃输入后, 被控变量达到新的稳态值的 63.2% 所需的时间, 就是时间常数 T , 实际工作中, 常用这种方法求取时间常数。显然, 时间常数越大, 被控变量的变化也越慢, 达到新的稳态值所需的时间也越大。在图 1-13 中, 四条曲线分别表示对象的时间常数为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 时, 在相同的阶跃输入作用下被控变量的反应曲线。假定它们的稳态输出值均是相同的(图中为 100)。显然, 由图可以看出, $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$ 。时间常数大的对象(例 T_4 所表示的对象), 对输入的反应比较慢, 一般也可以认为它的惯性要大一些。

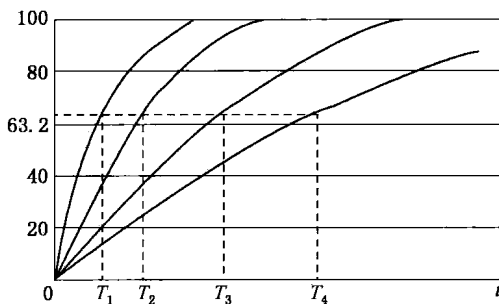


图 1-13 不同时间常数下的反应曲线

(3) 滞后时间

前面介绍的简单水槽对象在受到输入作用后, 被控变量立即以较快的速度开始变化, 如图 2-11 所示。这是一阶对象在阶跃输入作用下的反应曲线。这种对象用时间常数 T 和放大系数 K 两个参数就可以完全描述了它们的特性。但是有的对象, 在受到输入作用后, 被控变量却不能立即而迅速地变化, 这种现象称为滞后现象。根据滞后性质的不同, 可分为两类, 即传递滞后和容量滞后。

(1) 传递滞后

又叫纯滞后, 一般用 τ_0 表示。 τ_0 的产生一般是由于介质的输送需要一段时间而引起的。例如图 1-14(a) 所示的溶解槽, 料斗中的固体用皮带输送机送至加料口。在料斗加大送料量后, 固体溶质需等输送机将其送到加料口并落入槽中后, 才会影响溶液浓度。当以料斗的加料量作为对象的输入, 溶液浓度作为输出时, 其反应曲线如图 1-14(b) 所示。

图中所示的 τ_0 为皮带输送机将固体溶质由加料斗输送到溶解槽所需要的时间, 称为纯滞后时间。显然, 纯滞后时间 τ_0 与皮带输送机的传送速度 v 和传送距离 L 的下关系为

$$\tau_0 = \frac{L}{v} \quad (1-13)$$