

化工过程 自控原理及应用

(第二版)

吴嘉麟 编著

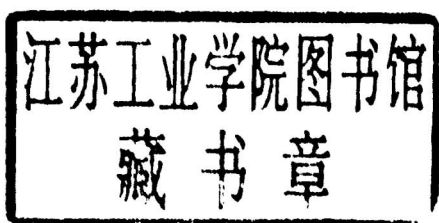
华南理工大学出版社

化工过程自控原理及应用

(第二版)

吴嘉麟 编著

周春晖 审稿



华南理工大学出版社

再版前言

本书1987年出版,1990年第2次印刷。它是化工系各专业本科生用书,属于基本原理与实践类型的教材,为部分高等学校采用。由于改用国际单位(SI),我校决定再版。

再版的内容稍有调整:(1)为贯彻专业教学指导委员会领导的“化工自动化及仪表课程核心组”于1990年宁波会议制订的课程基本要求,再版时突出了电动仪表的应用举例,相应削弱了气动仪表,补充了控制系统投运等内容,使本书包容了课程的基本要求。(2)新写了绪论,介绍本学科发展概况等。(3)在每章之末给出相当数量的练习与思考题,在第五章末提供了1个大作业题,以辅助教学。(4)考虑到化工系学生今后工作中,在研究过程设备、工艺操作、过程控制时,会应用到计算机仿真技术,历届学生对仿真练习也很有兴趣,再版时增加了仿真篇幅。(5)篇幅和学时是有限制的,权衡之后,不得不将频率响应分析法等内容删去。

根据本课程的特点,再版编写的准则仍然是:重视理论基础而不太深,意在学以致用;具有广度而不铺开,篇幅力求紧凑;保持系统性而不求全面,只能择其重点;刻意求新而不过量,切合学生基础。本书正文以讲授为主,控制仪表择重点讲授,检测仪表指导自学。

本书从名称到内容改革较大,它得到历届校、系领导支持,同行教授老师们的赞同和采用才能有二次出版。特别是承蒙周春晖教授审稿,提了宝贵意见,并为一版写了序(再版仍用),这不仅是对本书的支持,也为本课程指出了改革方向。黄用桓教授对再版提了极好的建议,给予很多帮助。在此向他们深深地致以谢意。

本书两次出版,先后得到蒋国彪、冯景贤、董新法、方利国讲师们的热情协助,在此表示感谢。

还有那些医德高尚、医术精湛的教授、专家和医务工作者们,他们三次从病魔手里拯救了我的生命。关心我的许多领导和师生们,朋友们以及悉心照料我的亲人们,给我温暖和力量,使我能够再次执笔写作,我由衷地感激他们!现仅以此书奉献给拯救我,关心我,帮助过我的人们!

作 者

1991年10月

序

在化工生产过程自动化的发展历程中,50年代以前,自动化工作都是按经验的或半经验的方式设计和选用常规仪表及调节器进行的。早期多就地检测及控制,后期使用了气动或电动单元组合调节器达到了全厂集中控制和管理的水平。50年代后期出现数字计算机控制的尝试,开始颇有雨后春笋之势,各大化工企业都争购计算机进行试验,但到70年代后期的20年中,试验纷纷失败,连连下马。除了直接数字控制外,其他成就很少,而直接数字控制只不过是数字机代替常规集中控制而已。到70年代末期,由于小型及微型计算机的问世,可靠性及价格都大大改善,这才又引起了计算机的应用高潮,出现了20年来化工过程自动化的第一个飞跃。目前在先进国家中,没有计算机控制的化工过程新设计,已经不容易找到了。

在这20年里,化工自动化停滞不前的原因虽然很多,最主要的是工艺工程师不熟悉自动控制和系统分析,同时计算机工作者更不熟悉如何分析化工过程。因而20年中的工作大多在盲目的状态下进行。虽然这一时期控制理论有较快的发展,但很少能被实际工作者所了解和应用。70年代后期起,生产厂家及计算机制造厂家才发现症结所在,争相招聘能够对工艺生产进行系统分析,并能编制计算机程序的技术人员,也出现了兼有这两种技能的工程设计公司。跟着生产过程自动化才有很快的发展。

我国在这方面是很有远见的。早在50年代就创办了化工自动化专业,开展生产工艺的动态及系统分析。随着计算机的出现,也逐步具有编程和开发软件的能力。这很可以成为仪表制造厂与化工厂之间有用的桥梁。遗憾的是这一优势没有得到发挥,并且在工作中还常常受到不必要的阻力。举一个实例来说明:在一次对一流体流量波动很大的换热器设计讨论中,控制技术人员提出应按最大流量进行换热面积设计的建议,尽被工艺设计人员强行按平均处理量设计的所谓标准规程所否定,造成了生产中潜伏着先天性不可控的因素。

从以上可以看出,一般化工专业的学生必须学习一点有一定深度的控制理论及实践,其迫切程度已经到刻不容缓了。很高兴地知道,吴嘉麟同志在加强化工工艺类专业学生的控制理论及实践方面做了很多工作,并编写了《化工过程自控原理及应用》一书。看了油印稿及修改稿后,认为这本书深度广度都适中,读后会使得工艺类学生对控制有一定的了解,可以填平存在工艺与控制技术人员之间存在着的鸿沟,这对加快实现化工生产过程的自动化会有很大的帮助。

周春晖

1987年4月1日

目 录

绪 论	(1)
第一章 化工过程自动控制导论	(2)
第一节 化工过程控制概述	(2)
第二节 控制系统的组成及硬件	(6)
第三节 自动控制系统的分类	(11)
第四节 控制系统设计概述	(13)
练习与思考	(21)
第二章 对象和其他环节的动态特性	(22)
第一节 动态特性的意义	(22)
第二节 一阶对象与环节的动态特性	(24)
第三节 二阶对象与环节的动态特性	(29)
第四节 环节和对象的纯滞后特性	(34)
第五节 高阶特性	(35)
练习与思考	(37)
第三章 拉普拉斯变换和传递函数	(38)
第一节 拉普拉斯变换的基本概念	(38)
第二节 拉氏变换及反变换	(39)
第三节 传递函数	(43)
第四节 方块图	(50)
练习与思考	(58)
第四章 系统的时域分析法	(60)
第一节 一阶系统的响应	(60)
第二节 二阶系统的响应	(63)
第三节 劳斯稳定判据	(69)
第四节 二阶系统过渡过程质量指标的计算方法	(72)
第五节 控制规律对系统响应的影响	(74)
练习与思考	(82)
第五章 单回路控制	(83)
第一节 被控变量的确定	(84)
第二节 自由度	(86)
第三节 操作变量的确定	(92)
第四节 测量变送及信号传递	(99)
第五节 气动调节阀的选择	(101)

第六节 控制器的设计.....	(105)
第七节 自控系统实施方案与投运.....	(111)
练习与思考.....	(116)
大作业.....	(116)
第六章 多回路控制 (一)	(118)
第一节 串级控制.....	(118)
第二节 均匀控制.....	(132)
第三节 分程控制.....	(137)
第四节 选择性控制.....	(142)
练习与思考.....	(148)
第七章 多回路控制 (二)	(150)
第一节 前馈控制.....	(150)
第二节 比值控制.....	(158)
第三节 具有大纯滞后过程的控制.....	(166)
第四节 适应性控制.....	(170)
第五节 推理控制.....	(174)
第六节 全厂控制系统设计概论.....	(177)
练习与思考.....	(191)
第八章 典型单元操作的控制	(193)
第一节 流体输送设备的控制.....	(193)
第二节 传热设备的控制.....	(199)
第三节 精馏塔的控制.....	(204)
第四节 反应器的控制.....	(212)
第五节 锅炉设备的控制.....	(219)
练习与思考.....	(226)
第九章 计算机仿真与控制	(227)
第一节 过程、系统的计算机仿真.....	(227)
第二节 计算机控制系统简介.....	(242)
练习与思考.....	(249)
附录 I 自控系统常用符号和图号	(250)
附录 II 自动检测仪表	(252)
附录 III 自动控制仪表	(285)
一、电动单元组合仪表.....	(287)
二、气动单元组合仪表.....	(293)
附录 IV 拉普拉斯变换表	(297)
参考资料	(300)

绪 论

《化工过程自控原理及应用》是化学工程系一门必修的技术基础课程。它包括自动控制原理、过程控制技术、自动化仪表和控制机等工具。自动控制是为化工过程生产服务的，学科的发展和课程内容都是和生产过程密切结合的。

本世纪 40 年代的化工厂，自动控制系统是较少的，控制器是简单的，大多数还是人工操作，所以操作工人较多。那时为消除操作单元之间的相互干扰，稳定过程生产，采用大容积的缓冲器。

到 50 年代初，随着劳动力费用和设备成本的增涨，工厂设备向着大容量、高性能发展，这时自动控制成为不可缺少的手段了。虽然那时自控设计是凭经验法则进行的，但也给工厂带来明显的经济效益，减轻劳动强度和改善工人的操作环境条件。

60 年代化学工程师开始把控制原理和动态分析应用于化工过程控制上，大多数技术来自航空和电气领域。这时工厂为了便于实现自动控制，获取较大效益，修改和开发生产过程，把一间工厂里许多单元当作一个大单元来考虑，全部小单元间的相互作用包括在内，研究对策以实现全厂自动控制，这就叫做系统工程。于是，控制技术方面开发出防喘振、人工智能和专家系统等等。

70 年代以来能源价格上涨，生产过程向单机、高效、节能发展。为了降低能耗，增加能量的再利用，许多车间设计复杂化，相互干扰因素随之增加，这对化学工程师和自控工程师来说是严峻的挑战。他们都要运用动态分析工具建立数学模型，研究和开发工艺过程、设备性能和控制系统。微机的问世也给研究和设计工作提供了更灵活的工具。

80 年代计算机仿真技术由研究室进入工厂。以微机为核心的仿真器，可把生产过程、自动控制系统、工艺开停车、各种事故的发生和处理措施等等输入仿真器。利用仿真器研究优化生产过程和自控系统，以及培训操作人员等，这样就大大减少现场试验对生产的干扰。也可以专门用于自控，或设备（如离心式压缩机）、或优化工厂等研究。

自动控制工具方面，由最早的基地式开始，之后是单元组合式，电子组装式控制器。结构上由大到小，功能上由简单到智能。由于微机的面世，由大型工业控制机高度集中控制模式，变为适应于不同过程的积木式分级控制模式，叫做集散型控制系统。这期间把电脑引入控制器，扩展运算等功能开发出智能型和可编程型控制器。

在自动控制理论方面，由经典的线性控制理论，发展到现代控制论。

目前，化工厂 70~80% 的控制系统虽然仍是简单的，使用传统的经验法则和技术，然而 20~30% 却是复杂系统，要求工程师们必须具有更多的知识，付出更大的精力。这正是保证化学工业高度发展所需要的。

展望 2000 年，自控理论和技术将继续发展来对付多输入多输出过程。自动控制工具朝着品种齐全，精确可靠，方便使用方向发展。精细化工等规模不大产值甚高的工厂，愈加依靠自控手段保证产品质量。间歇过程控制日益得到重视，更多地用电脑代替继电元件了。化工过程控制的远景是灿烂的。

第一章 化工过程自动控制导论

第一节 化工过程控制概述

化工过程控制是指化工、炼油等化工类型生产过程的自动控制,简称为过程控制。从初级的仪表控制到过程控制是个跃进,它是化学工业发展的结果。化工过程日趋强化,生产操作要求日益提高,讲究高产、保质、节能、安全、经济效益等,这些目标是仪表控制所不能满足的。化工厂的特点是过程单元(换热器、反应器、蒸馏塔、吸收塔、蒸发器、贮槽、泵等)科学的组合。工厂的生产目标,是把原材料以最经济的方法转变成合格的产品。所以,今天的化学工程师的任务,是在掌握新工艺新设备的同时,还需要针对生产过程,按照生产目标,运用控制理论和控制技术完成生产任务。

工厂生产须满足以下要求:

安全 化工厂的安全是首要的。化工生产中有高温、高压、易燃、易爆、腐蚀、有毒和刺激性异味等情况。必须注意人身安全和持续促进经济发展。因此,温度、压力、化学成分等工艺参数必须维持在规定范围内。例如设计某加压反应器在 1MPa 压力下操作,就需要有一个控制系统保持其压力不超过 1MPa 以避免发生爆炸。

产品规格 工厂的最终产品,其产量和质量都要符合用户要求或政府规定的规格。例如要求每年生产 30 万吨乙烯,纯度 99.5%。

遵守环境保护规章 环境保护法规定了工厂排入大气的 SO_2 量和其他有害成分的含量,也规定了排入江河湖泊及海洋的废水质量。工厂必须检测和控制有害成分的含量,做到不违章排放。

操作制约 工厂使用的各种单元设备都有其内在的约束。例如,蒸馏塔不能液泛;中间贮槽贮罐不能溢出或流干;催化反应器的温度不能超过上限,以免烧毁触媒等。

经济效益 工厂生产必须符合市场条件,即有可利用的原料、能源、资金和劳动力,生产出适销产品,价格又不高于同类产品。因此,要求把操作条件控制在最低成本,就是高产、保质、节能、低消耗,达到最大利润的“最优”水平。

为满足以上要求,需要自动控制做到对生产操作过程连续地监视和控制,排除外界干扰,使生产操作平稳进行,保证实现工艺操作目标。这就要合理地将自动控制装置(测量装置、控制器、执行器、计算机等)和单元设备组合起来,加上人的参与(设计者、工厂操作者)共同完成生产任务。

满足生产要求的具体操作,就是把生产过程中关键的工艺参数(温度、压力、成分、流量、液位等)控制在期望值上。现举例说明过程控制的概念。

例如图 1-1 所示带搅拌槽式盘管加热器。进入加热器的物料流量为 $F, \text{m}^3/\text{h}$,进料温度为 $\theta_1^\circ\text{C}$;在器内被蒸汽加热到 $\theta^\circ\text{C}$ 温度流出,出口流量为 $F, \text{m}^3/\text{h}$;加热蒸汽流量为 $F_s, \text{kg}/\text{h}$ 。

在搅拌作用下,器内温度是相同的并且等于出口温度 θ 。

此加热器的操作目标是:保持出口温度 θ 和贮量 V 在期望值上。

实际生产中对加热器来说,往往遇到负荷变化而表现在上游或下游流量变化,或进料温度发生改变,于是引起出口温度 θ 和流量 F 波动,这是加热器受到外界干扰影响的结果。现假定进料量 F_i 或进料温度 θ_i 发生变化,干扰了操作的稳定,以致 θ 和 V 偏离了给定值。为此,需某种自动控制系统消除干扰影响,使 θ 和 V 回到期望值。

在图 1-2 中有一套自动控制装置,当 F_i 或 θ_i 变化时,能保持出口温度 θ 稳定。一支热电偶测量器内温度,将温度信号送到基地式控制器的比较机构为负信号,与给定值 θ_s 为正的信号相减,得出差值 $e = \theta_s - \theta$ 称偏差。如果 $e < 0$,即 $\theta > \theta_s$,控制器发出信号关小蒸汽阀,减少供热。反之,当 $e > 0$, $\theta < \theta_s$ 时,控制器使阀门开大。显然,当 $\theta = \theta_s$,即 $e = 0$ 时,控制器无事可做。保持原来的输出,不去改变蒸汽阀的开度。当干扰作用于控制过程,直接测量主要变量(此例为 θ) 构成的系统叫做反馈控制系统。期望值是工艺生产指标规定的数值,由人在控制器上设定后叫给定值,用 θ_s 表示。

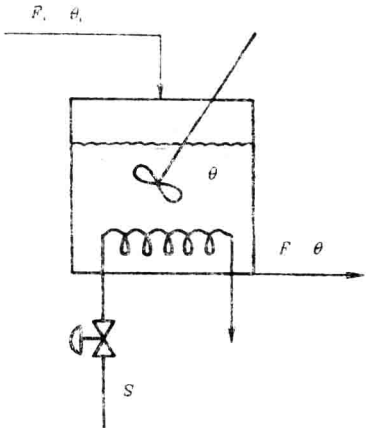


图 1-1 搅拌槽式加热器

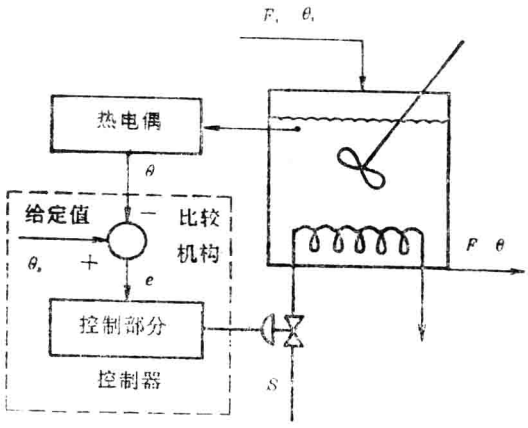


图 1-2 搅拌加热器反馈温度控制

图 1-3 是保持 θ 稳定在期望值的另一方案。

假定干扰因素是进料温度 θ_i 经常波动,采取直接测量 θ_i , 控制器根据干扰因素 θ_i 的变化开关蒸汽阀门,这样的控制模式叫做前馈控制。我们看到前馈控制是不等干扰影响到过程的温度 θ 。只要测量到 θ_i 的变化即作出相应的控制作用。有关反馈和前馈以后还要详细探讨,但必须指出,在今后学习中你会明白,反馈是主要的、根本的,前馈在目前是起补偿作用的。

为使图 1-1 中加热器贮量 V 一定,也就

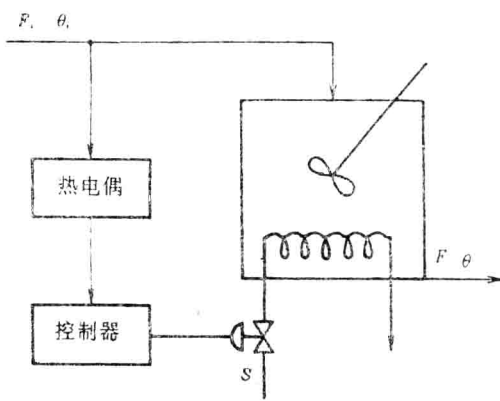


图 1-3 搅拌加热器前馈温度控制

是保持它的液位 h 在一定高度, 因为它是等截面的贮槽。只从控制液位而言与一般贮槽相同, 故放在贮槽液位控制一起讨论。再者还要观察出口端的具体情况, 是阀门或是泵。

图 1-4 (a) 贮槽的操作目标是保持液体贮量 V 恒定, 即液位 h 恒定。操作稳定时, $F_i = F$, $h = h_s$, h_s 代表期望值。设当 t_0 时间流入量 F_i 突然增至 F_i' , 液位 h 上升。出口阀门开度未变, 而阀前静压液位增大使流出量相应增大, 及至 $F = F_i'$ 时, 过程达到新的稳定状态, 而 $h > h_s$, 如图 1-4 (b) 所示。这种没有控制器作用而能在干扰后自动达到新稳定的过程, 称它有自平衡特性, 尽管液位并不能回到 h_s , 见图 1-4 (b) 液位的响应曲线。

操作目标要求贮量一定, 液位应回复到初始的给定值 h_s , 所以仍需要控制器作用。如图 1-4 (c) 所示, 差压变送器连续测量液位, 控制器根据偏差 $e = h_s - h$ 值操纵控制阀门, 改变流出量 F 保持 h 稳定 (即 V 稳定)。图 1-4 (d) 是将控制阀装在入口端, 同样能够维持 h 在干扰后回复到给定值。

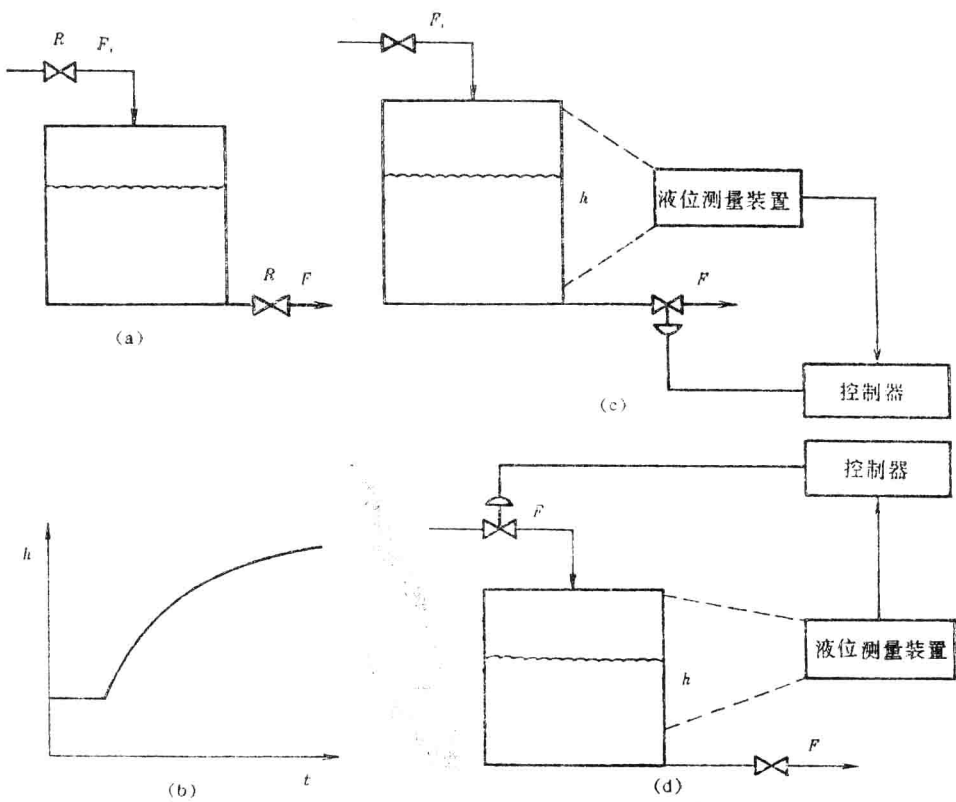


图 1-4 贮槽及其液位控制
(a) 贮槽; (b) 自衡响应; (c) 调节流出量控制液位; (d) 调节输入量控制液位

图 1-5 (a) 所示贮槽和图 1-4 (a) 是不同的, 它的出料是由泵送出的, 流出量是恒定的。不受液位影响。平衡时 $F_i = F$ (F 是泵送量), $h = h_s$ 。一旦干扰发生影响, 如 F_i 增大或减少, 因流出量不变化, 最终将使液体溢出或抽干。该贮槽输出液位 h 对输入干扰 F_i

的响应曲线见图 1-5 (b)，是不会达到稳定的。这种情况称它为无自衡特性。显然，欲达到操作目标保持贮量 V 为一定值，必须加以控制，其控制图见图 1-5 (c)。

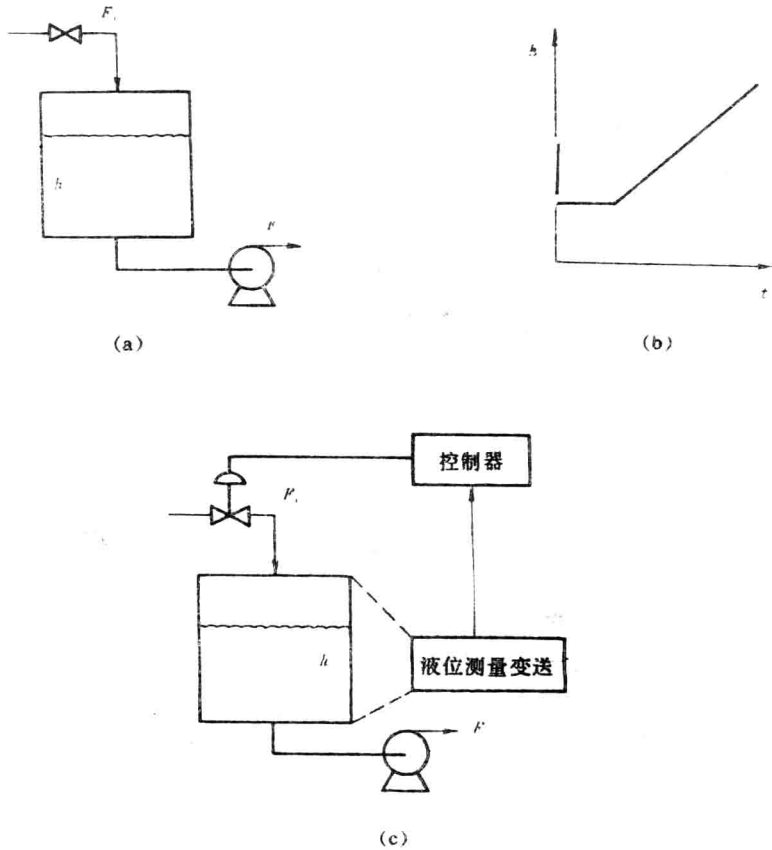
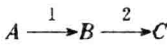


图 1-5 另一贮槽液位控制

图 1-4 (c) 和 (d) 与图 1-5 (c) 所示，它们都是直接测量输出变量液位作为控制的依据，所以这些都是反馈控制系统。

图 1-6 所示是一个批量生产的间歇反应器。其反应顺序为



假定 1、2 两步反应都是动力学为一阶的吸热反应。所需热量由夹套蒸汽提供，期望产品是 B ，废料是 C 。间歇反应器操作的经济目标是每一次反应时间 T_R 内利润最大值 Φ ，也可以这样表示，

$$\text{最大值 } \Phi = \int_0^{T_R} \{ [\text{产品 } B \text{ 售出收入}] - [\text{原料 } A \text{ 成本} + \text{蒸汽成本}] \} dt$$

由上式可见，决定利润最大值 Φ 的唯一变量是随时间不断变化的蒸汽流量 F_s ，它影响反应温度，期望的反应速率和副反应。那末，我们的工作了解蒸汽量怎样变化，可获得利润最大值 Φ 。现进行如下分析：

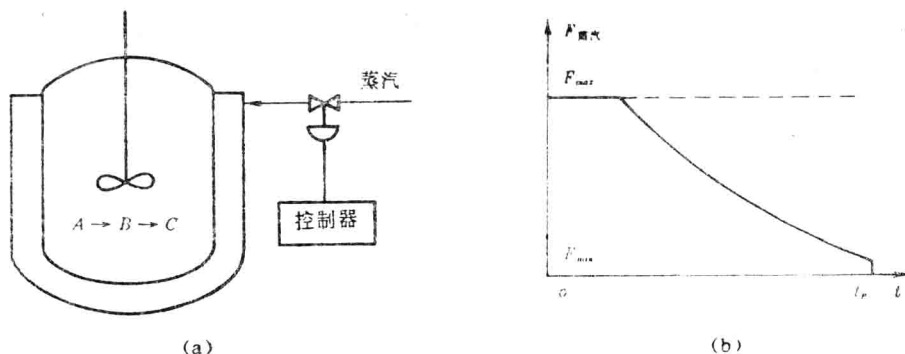


图 1-6 间歇反应器

假如整个反应时间 t_R 内 $F_{st}(t)$ 保持最大值，反应温度可能达最大值。起初，浓度 C_A 大时，则 B 的产量高，消耗的蒸汽量也大。随着 B 的增加， C 的产生也增多。到了反应时间将近结束时，温度必定下降，所需蒸汽量减少，如图 1-6 (b) 所示。

假如整个反应时间内蒸汽量保持最小值（如 $F_{st}(t) = 0$ ），几乎不会消耗蒸汽，可是也没有产品 B 产生。

由分析可知，在反应时间 t_R 内， $F_{st}(t)$ 是在最大值与最小值之间，并且应当按利润最大值 Φ 变化，以达最优操作。

通过以上举例，大致说明自动控制的作用是：

第一，消除外界干扰对过程操作的影响。

第二，保证过程稳定。为保证产量、质量、安全、制约和利润等，必须不断消除外界干扰，保持过程操作稳定，将主要工艺参数稳定在期望值上。

第三，实现最优操作，获取利润最大值 Φ 。

第二节 控制系统的组成及硬件

化工过程控制中反馈控制是主要的根本的。今后探讨问题都是指反馈控制，否则另加说明。简单控制系统由四个基本环节组成，随其复杂程度组成环节有所增加。控制系统的组成常用方块图表示，无论多么复杂的系统包括多少环节，都能排列有序地表达出环节之间的关系和系统概貌。所以说方块图是简明而有效的工具。

一、控制系统的组成方块图

图 1-2 反馈控制系统的方块图见图 1-7。这是简单的控制系统方块图，它由四个最基本环节组成，即测量装置、控制器、执行器和控制过程。每个环节用一个方块表示，前三个环节总称为自控装置，是通用型的工业自动控制仪表及装置，与控制过程组合起来便构成一个控制系统。从方块图看，测量装置将被控变量的测量值送回到控制器中的比较机构，形成了反馈闭环形式。闭环的意思是指在环内任一点沿箭头方向前进，最终回到原处。所以反馈控制是闭环控制系统。

反馈控制系统是这样工作的，当干扰 d 或给定值 y 改变破坏原来的稳定态，测量与

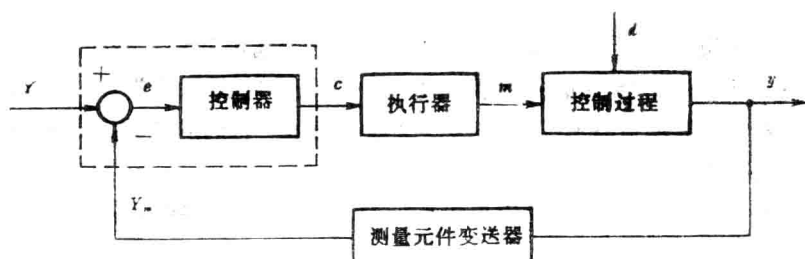


图 1-7 反馈控制系统方块图

变送环节将 y 值转换成测量值 y_m 反馈到比较机构，得出偏差值 $e \neq 0$ ，控制器按偏差的正负大小，进行某种规律的运算后发出控制信号 c ，执行器执行 c 信号而改变操作变量 m 值，施加控制作用于控制过程，消除干扰影响，使被控变量 y 回复稳定。若输入 d 或 y 不变化，系统处于稳态，输出 y 是稳定的。

图 1-3 前馈控制的方块图如图 1-8 所示。干扰因素通过干扰通道施加破坏稳定的作用于控制过程，测量装置（也可能用变送器）将干扰的测量值送到前馈控制器，控制器按干扰量发出控制信号，执行器改变操作变量 m 通过调节通道施加控制作用（或称校正作用）于过程，以消除干扰影响，使输出被控变量 y 稳定。由图 1-8 可见，干扰通道和调节通道是并联的开环形式。所以，前馈控制是开环控制系统。

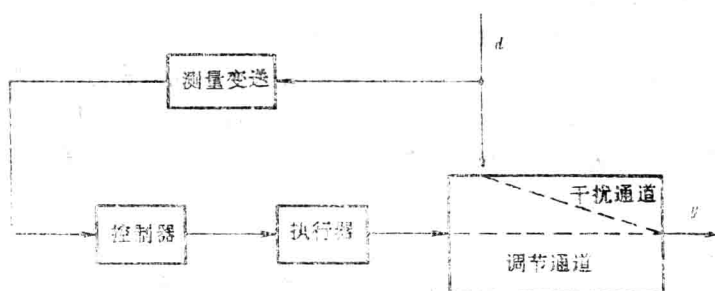


图 1-8 前馈控制系统方块图

前馈控制的工作情况，当干扰发生变化为测量装置获知时，即将干扰信号送到控制器，并不管被控变量是否受到影响（往往尚未受到干扰影响）。前馈控制器按本身规律发出信号，执行器执行控制信号使操作变量针对干扰量变化，以提前消除干扰影响，使被控变量不波动或极小波动。当然这是理想的控制效果。关于前馈控制在后面有专门一节探讨。

作为控制系统的组成还有信号传输线。在方块图中就是带箭头的线段，在实际装置中是电线或压缩空气管，它是传递电的或气的信号线。信号线把各环节的相互关系表达明确。由方块图可见，每个环节至少有输入和输出信号各一个，每个信号都有名称和符号。

二、控制系统的信号和变量

控制过程有二个输入：干扰 d 和操作变量 m ；有一个输出变量：被控变量 y 。

比较机构有二个输入：给定值 y_s 和测量值 y_m ；有一个输出：偏差 $e = y_s - y_m$ 。

就图 1-7 而言，其他环节各有一个输入一个输出信号，它们的名称和符号注在图中。

复杂系统中其他环节的输入信号可能多于一。

整个控制系统有二个输入：给定值和干扰；有一个输出是被控变量。

现将主要变量和信号介绍如下：

1. 被控变量 y

亦称被调参数。它往往是具体体现操作目标的工艺参数，如温度、压力、流量、液位、成分。被控变量可分为二类：

可测量被控变量 可从控制过程直接测量而得的变量，如温度、压力、流量、液位等。

不可测被控变量 它的值无法直接测量，或者尚无相应的变送器，或测量滞后大，或测量信号灵敏度低。遇此情况，须通过测量控制过程其他输出量估算不可测被控变量。如成分和物性。

工业色谱给成分自动控制开创新天地，但投资和使用都存在困难。所以成分和物性变送器有待继续开发。

2. 干扰 d

是外界影响控制过程被控变量波动因素的总称。最常发生的干扰因素为负荷改变，触媒老化，气候变化，环境条件的改变等。干扰对过程的稳定是起破坏作用的，是客观存在要发生的，不能避免它的影响，只能设计合适的控制系统消除它的影响。干扰的数量视具体控制过程而定，往往不止一个。干扰发生的时间和形式（阶跃式，缓和式…）是随机的。每个干扰因素从不同地点进入控制系统，经过各自干扰通道以不同程度影响着过程。

3. 操作变量 m

亦称调节参数。它是消除干扰影响具体实现控制作用的变量。在化工厂、炼油厂大多数情况下就是流过控制阀的物料流量，或者由触发器控制的电压乃至电流。

操作变量 m 的箭头信号永远指向过程，它是过程的输入变量。这不表示物料是由过程流出或流入，请不要把工艺流程物料传递和控制系统的信号传递混淆。

例如图 1-4 (c) 和 (d)，控制阀安装位置一个在入口一个在出口，这是二个不同的控制方案。而控制阀开度变化，改变了进料量和出料量，它们都是施加控制作用于贮槽，使被控变量 h 稳定，其功能是相同的。所以，操作变量是过程的输入，其箭头指向过程。则图 1-4 (c) 和 (d) 的控制系统方块图是相同的，见图 1-9。

4. 给定值 y_s

是体现被控变量期望值的信号。凡控制器都有比较机构，比较机构必有设定给定值的部件。由人工在控制器上设定的给定值叫内给定，没有人工重新设定，其值固定不变。单元组合式仪表和新型控制器还可接受其他仪表或计算机送来的信号作为给定值（内给

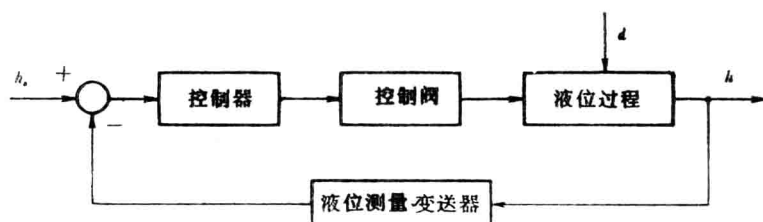


图 1-9 图 1-1 (c)、(d) 液位控制系统方块图

定切断不用) 叫外给定, 外给定的值是变化的。

5. 测量值 y_m

是被控变量转换成能与给定值相减的信号。如把温度变成 mV 或 Ω , 压力变成角位移或线位移等物理量送到基地式控制器的比较机构。对于单元组合仪表, 测量值必须是仪表的统一信号, 4~20mA, 0~10mA, 20~100kPa 气压信号等。变送器就是把测量元件得出的物理量, 再转换成上述一种统一信号 y_m 送至比较机构与同形式的 y_s 相减。

对单元组合仪表而言, y_m 、 y_s 、 e 、 c 等信号都是上述某一种仪表统一信号, 唯有 m 是物料流量或电量等。

三、控制系统的组成环节

1. 控制过程

简称过程亦称对象。它是指所控制的生产过程及设备, 如换热器、反应器、吸收塔、蒸馏塔、槽、泵、压缩机等。

2. 测量与变送

即测量元件与变送器。前面已经阐述的基地式控制器, 只需测量元件, 而单元组合仪表还须经过变送器, 将测量元件所得物理量转换成统一的仪表信号。测量与变送是工业的“眼睛”, 时刻监视着生产过程的状态; 它是控制系统的依据, 所以要求测量准确、及时、灵敏。常用的测量元件与变送器有:

测量温度 热电偶、热电阻、温度变送器。

测量流量 孔板等节流元件配差压变送器、旋涡流量变送器、转子流量变送器、靶式流量变送器等。

测量压力 弹性元件制成的高、中、低压力变送器、霍尔压力变送器等。

测量液位 差压变送器, 液位变送器等。

测量成分 工业色谱仪。

3. 控制器

亦称调节器。它包括一个比较机构, 在控制理论和方块图中, 给定值为正, 测量值为负, 偏差 $e = y_s - y_m$ 。而实际工作中控制器的输入 $e = y_m - y_s$, y_m 为正, y_s 为负, 这是习惯用法, 请注意。比较机构不是独立环节但有独立的比较功能, 故用小圆圈表示, 放在

控制器前面。控制器依据输入偏差正负大小，按本身的控制规律发出控制信号 c 给执行器。

目前工业控制器的控制规律有：比例、积分、微分，还有前馈，应用最多的是前三种规律。所谓控制规律，是指控制器的输出信号与输入偏差之间的关系。

比例控制规律 (P) 控制器的输出 $c(t)$ 与输入 $e(t)$ 成比例。其数学表达式为

$$c(t) = K_e e(t) + C_0 \quad (1-1)$$

其中 K_e ——控制器的比例增益亦称比例系数。 K_e 是表示比例作用强弱的参数，有一个可调范围。

C_0 ——控制器的基本信号。当 $e=0$ 时它的输出信号。

积分控制规律 (I) 控制器的输出与输入偏差的积分成比例。其数学表达式为

$$c(t) = \frac{K_e}{T_I} \int_0^t e(t) dt + C_0 \quad (1-2)$$

其中 T_I ——是积分时间，以 (分) 表示。有一个可调范围。

微分控制规律 (D) 控制器的输出与输入偏差的变化速度成比例。其数学表达式为

$$c(t) = K_e T_D \frac{de}{dt} + C_0 \quad (1-3)$$

其中 T_D ——是微分时间，以 (分) 表示，有一个可调范围。

同样的输入偏差 e ，送入不同控制规律的控制器，它们的输出是不相同的。

工业控制器常用这三种规律的组合，P、PI、PD、PID。组合时是各种规律的叠加，保留各自的规律，数学式是相加的。

4. 执行器

包括执行机构和调节机构两部分。如执行机构是伺服电机，调节机构是阀门、串联工作共称执行器。这是轻化工和硅酸盐工业常用的。化工和炼油厂多使用气动执行器。执行机构和调节机构合为一个整体称为气动薄膜调节阀，亦称控制阀。

5. 显示仪表

一般能指示、记录和图象表示控制系统的状态。如被控变量、给定值、阀位的指示。在前馈控制中可显示干扰量。显示仪表是实施控制方案常用的仪表，但是它不具有控制功能。作为显示功能有时在测量仪表、变送器和控制器里附有显示部分，系统方块图一般不画出显示仪表。

指示仪表有：动圈式指示仪、色带指示仪是模拟量指示，还有数字显示仪，以及附在新型集散型控制器上的光柱指示机构。

记录仪有：自动平衡记录仪，打印机。

还有集散型仪表配套电视机，控制系统轮廓、系统的重要变量和参数同时显示。

6. 计算机

计算机用作过程控制的工具是个大的飞跃，在 50 年代末和 60 年代初用到过程控制，称为工业控制机。从计算机控制的结构特点分有直接数字控制 (DDC)，监督管理控制 (SCC)，和分级控制 (Hierarchical Control) 用计算机。

近几年随着电子工业发展出现了微型机，它成本低，使用方便灵活，能提高控制水

平，解决了工业控制机使用中的许多矛盾，大有推广趋势。微型机最小系统见图 1-10，它只有少数几片集成电路构成，安装在一块印刷电路板上，故称单板机。

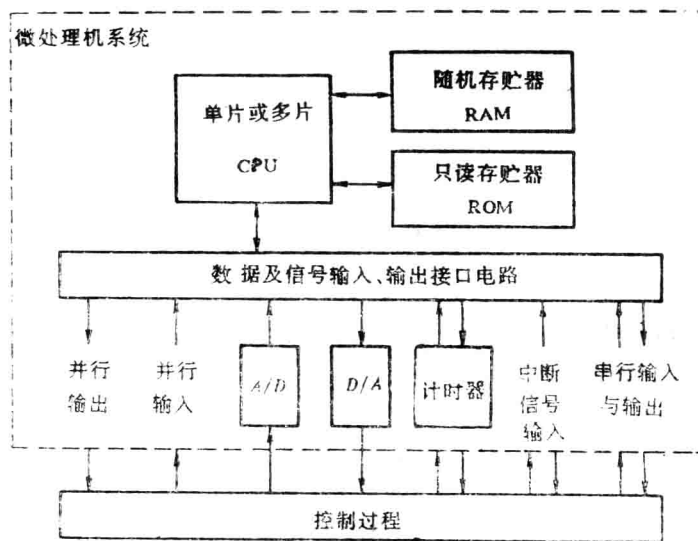


图 1-10 微型机控制系统的基本结构图

单板机不同于一般计算机控制，在确定控制过程和控制规律之后，系统运行程序写在只读存储器 ROM 中，RAM 可作为数据处理的暂存单元及堆栈。采用数据与信号输入、输出电路供实时控制之需。当控制过程有连续信号发送和接收时，可用 A/D 和 D/A 转换电路。计时器用作实时控制的记时标准。当控制过程需要向 CPU 发出中断申请，要求实时处理时，因而设有中断信号输入使 CPU 转向为控制过程服务的程序。

单板机代替 DDC 级工作，即直接控制阀门操作，成本低，简单可靠，易于应用。单板机有通用型和专用型。此外，还有以微处理器为基本单元的集散型控制器，可编程控制器、智能式控制器等。这些新型仪表的控制规律和功能比 PID 控制器大大扩展了。

第三节 自动控制系统分类

自动控制系统有许多分类方法，现介绍几种常用的方法。

一、按被控变量的给定值分类

1. 定值控制系统

是指被控变量的给定值恒定的控制系统。系统的输入是干扰，控制目的是消除干扰影响，维持被控变量在给定值上。给定值是根据工艺期望值设定的。这是化工炼油过程