

“十一五”国家重点图书

普通高等教育制药类专业规划教材

精细化工 和制药过程控制

编著◎刘鸿强 李立新



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

精细化工 和制药过程控制

编著◎刘鸿强 李立新



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

精细化工和制药过程控制/刘鸿强,李立新编著. —上海:华东理工大学出版社,2009. 2

普通高等教育制药专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5628 - 2459 - 6

I. 精… II. ①刘…②李… III. ①精细化工-化工过程-过程控制-高等学校-教材②制药工业-化工过程-过程控制-高等学校-教材 IV. TQ062 TQ460.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 198473 号

普通高等教育制药类专业规划教材

精细化工和制药过程控制

编 著/刘鸿强 李立新

责任编辑/陈新征

责任校对/金慧娟

封面设计/陆丽君

出版发行/华东理工大学出版社

地址:上海市梅陇路 130 号,200237

电话:(021)64250306(营销部)

传真:(021)64252707

网址:www.hdlgpress.com.cn

印 刷/江苏通州市印刷总厂有限公司

开 本/890 mm×1240 mm 1/32

印 张/8.25

字 数/220 千字

版 次/2009 年 2 月第 1 版

印 次/2009 年 2 月第 1 次

印 数/1~3 050 册

书 号/ISBN 978 - 7 - 5628 - 2459 - 6/TQ · 137

定 价/28.00 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)

前 言

从自动化专业的角度来看,在石油化工、钢铁热工、化肥、精细化工、制药、生化、轻化工、材料、食品和三废处理等工业生产装置中,以流量、温度、压力、成分和物位等为主要被控变量的自动控制理论和自动控制技术,都可以归类为“过程控制”。但是从工艺生产和设备的角度来看,制药、精细化工和轻化工生产与大型石油化工企业相比,又有很多特点和区别。例如发酵和间歇批量生产方式就与大型石油化工的连续流程存在明显的不同。毋庸置疑,现代大型石油化工、钢铁制造、化肥生产、发电、输配电等企业,已经普遍实现了全流程的计算机自动控制,大量使用各种监控仪表和在线实时成分分析仪表,应用许多先进复杂的高级自动控制技术,例如专家系统、智能控制、模式识别、模糊控制、人工神经网络、故障诊断和容错控制,等等。更高水平的已经达到了信息通信和管控一体化。相对而言,制药和一些精细化工大多为中小型企业,大量使用模拟量仪表,数字化程度不高,更多地使用一些常规自动控制技术和方法。但是进入 21 世纪以后,现代制药生产过程和一些精细化工、生化、轻化工、三废处理、材料、食品等加工业的工艺和设备越来越复杂,生产周期越来越短,卫生、安全、节能和环保要求越来越高,因此,计算机自动控制也已经越来越多地应用于这些企业的局部单元或全过程生产装置,很多实用的



先进的自动控制技术也被开发了。在一些引进装置的企业中,自动化程度已经不比大型石油化工企业逊色。

虽然最近几十年来,国内外有关过程控制或者化工自动化的专著很多,但是针对制药和精细化工行业的自动控制书籍却不多见。本书在内容上将选择性地介绍一些常用的模拟量仪表,浅近地讲解一些基本的反馈和自动控制理论,重点介绍计算机控制系统和典型精细化工及制药过程化工单元的自动控制方法。本书共分6章。第1章为绪论,主要讨论精细化工及制药生产与自动化的关系、现状和趋势,回顾和讲述自动化仪表及自动控制技术的发展。第2章主要讲解一些基本的自动控制理论和自动控制系统,例如反馈、稳定性、品质指标、PID控制、简单和复杂控制系统。第3章介绍一些现在仍然常用的测量仪表,如变送器、调节器和执行器等模拟量仪表。第4章重点介绍典型化工单元(传递、传质、传热和反应过程)的自动控制方法,包括流量、温度、压力和成分等常用控制方法和复杂控制系统。第5章重点介绍精细化工和发酵、制药生产过程的常用方法和先进控制系统。第6章重点介绍计算机控制系统和研究开发应用实例,如可编程序控制器PLC、集散控制系统DCS和现场总线控制系统FCS。

本书第1~5章及第6章第1,3节由刘鸿强编写,第6章第2,4节由李立新编写。

本书在编写过程中,得到华东理工大学优秀教材出版基金的资助,在此深表谢意!由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,期盼读者不吝赐教。

编 者

2008年10月



内 容 提 要

精细化工和制药生产过程已经大量使用各种监测仪表和高级自动控制技术。尤其是日益普及的计算机控制技术,不仅能大大提高生产过程的产量、收率、节能和安全性,而且使得整个生产装置和集团公司的信息化管理成为可能,从而根据市场信息和市场预测,最优化调度和指导生产过程。

本书从精细化工和制药生产与自动控制技术的相互依存关系出发,介绍常用仪器仪表和自动控制技术的基础知识,最新的集散计算机控制系统(DCS)和其研究开发应用实例,以及未来的现场总线控制系统 FCS。针对精细化工、制药、发酵和间歇生产的若干典型操作单元和生产装置,介绍一些复杂和高级控制技术。

本书可作为高等院校相关专业的高年级本科生教材,也可作为研究生以及精细化工和制药生产等相关专业的科研人员、教师和工程师的参考书。

Contents

第1章 绪论	1
1.1 自动化控制系统的组成和发展	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 自动控制发展史	3
1.1.3 自动控制的领域和分支	5
1.2 过程控制仪表的分类和发展	7
1.2.1 过程控制仪表的动力分类	7
1.2.2 仪表的功能和性能分类	8
1.3 精细化工和制药生产与自动化关系的现状、比较和趋势	9
第2章 自动控制原理基础	12
2.1 概述	12
2.1.1 反馈	12
2.1.2 控制系统的基本概念和基本要求	13
2.2 系统数学描述	15
2.2.1 传递函数	15
2.2.2 拉普拉斯变换	16
2.2.3 方块图运算	20
2.2.4 建立数学模型	24



2.3 线性系统的时域分析	35
2.3.1 控制系统的过渡过程	35
2.3.2 二阶系统的时域分析	39
2.4 线性系统的稳定性分析	43
2.4.1 稳定性的概念	43
2.4.2 劳斯稳定判据	44
2.5 其他控制系统分析、综合方法简介	50
2.5.1 根轨迹法简介	50
2.5.2 频率响应法简介	51
2.5.3 控制系统的综合与补偿简介	52
思考题	54
习题	54
第3章 模拟量信号仪表	57
3.1 检测和控制仪表概述	57
3.2 温度测量和变送	59
3.2.1 热电偶温度计	60
3.2.2 热电阻温度计	64
3.3 压力测量	67
3.3.1 弹性式压力检测	67
3.3.2 应变片式压力检测	69
3.3.3 压阻式压力检测	71
3.3.4 压力表的选择与安装	72
3.4 流量测量	73
3.4.1 容积式流量计	74
3.4.2 节流式流量计	76
3.4.3 浮子式流量计	80
3.4.4 涡轮流量计	82

3.4.5 漩涡(涡街)流量计	83
3.4.6 电磁流量计	84
3.5 物位测量	85
3.5.1 浮力式液位测量	86
3.5.2 静压式液位测量	87
3.5.3 电容式物位测量	88
3.6 制药过程和生化反应的成分测量	89
3.6.1 氧化锆氧量成分测量	91
3.6.2 色谱成分测量	92
3.6.3 pH 的在线测量	94
3.6.4 浊度的检测	96
3.6.5 溶解氧浓度(DO)的在线测量	97
3.6.6 发酵罐内氧气分压的测量	98
3.7 生物传感器	101
3.7.1 生物传感器概述	101
3.7.2 酶传感器	105
3.7.3 微生物传感器	109
3.8 调节器和执行机构	114
3.8.1 调节器的调节规律	114
3.8.2 执行器	122
3.8.3 调节器的正反作用选择	134
思考题	135
习题	136
第4章 典型三传一反过程的自动控制技术	137
4.1 概述	137
4.2 流体输送设备的控制	138
4.2.1 流体输送设备	138



4.2.2 泵的常规控制方案	139
4.2.3 压缩机的控制方案	143
4.2.4 流体输送设备控制实施细节	144
4.3 传热设备的控制	145
4.3.1 传热设备类型和控制目的	145
4.3.2 传热设备的单回路控制方案	146
4.3.3 串级控制	151
4.3.4 前馈-反馈控制	156
4.4 精馏塔控制	161
4.4.1 精馏工艺概述	161
4.4.2 精馏塔的控制要求	163
4.4.3 温度(质量)指标反馈控制	164
4.4.4 按两端质量指标控制	168
4.4.5 复杂控制系统在精馏塔中的应用	170
4.4.6 精馏塔塔压的控制	171
4.4.7 分程控制系统	173
4.5 反应器控制	175
4.5.1 化学反应器概述	175
4.5.2 连续化学反应器的基本控制方案	178
思考题	182
习题	182
第5章 发酵、食品和制药过程控制	183
5.1 概述	183
5.2 发酵过程 pH、溶解氧、消泡和补料控制	183
5.2.1 发酵过程	183
5.2.2 pH 控制	185
5.2.3 溶解氧控制	188

5.2.4 消泡控制	191
5.2.5 补料控制	193
5.3 发酵食品生产过程控制	195
5.3.1 食品加工	195
5.3.2 锅炉设备的自动控制	195
5.3.3 发酵过程的灭菌控制	201
5.4 制药生产过程控制	202
5.4.1 工业制药	202
5.4.2 蒸发器的自动控制	203
5.4.3 结晶器的自动控制	206
5.4.4 维生素 B ₆ 的结晶釜控制	209
思考题	213
习题	213
第6章 过程计算机监控系统	214
6.1 概述	214
6.1.1 计算机监控技术	214
6.1.2 计算机监控系统的组成	215
6.1.3 过程计算机控制系统的常用类型	215
6.2 可编程序控制器(PLC)	217
6.2.1 可编程序控制器的发展历史	217
6.2.2 可编程序控制器的结构	220
6.2.3 可编程序控制器的特点和主要功能	221
6.2.4 可编程序控制器的工作原理	224
6.2.5 可编程序控制器的用户程序简介	225
6.2.6 PLC 编程的基本技巧	228
6.2.7 PLC 与继电器顺序逻辑控制系统的比较	230
6.3 集散控制系统(DCS)	232





6.3.1 集散控制系统的发展和特点	232
6.3.2 TDC—3000 和 TPS 系统概况	236
6.3.3 芳烃模拟移动床的 DCS 控制系统	238
6.3.4 集散控制系统与 PLC 的比较	240
6.4 现场总线控制系统(FCS)	241
6.4.1 现场总线简介	241
6.4.2 现场总线的特点	243
6.4.3 几种主要的现场总线技术	244
6.4.4 现场总线的实质和优点	247
思考题	248
习题	248
参考文献	250

第 1 章 绪 论

1.1 自动化控制系统的组成和发展

1.1.1 引言

自动化是一个诱人的词汇,但是什么是自动化,众说纷纭。按照《辞海》的定义:采用能自动启闭、调节、检查、加工和控制的机器、设备进行各种作业,以代替人工直接操作的措施。这个定义虽然不太专业,又出现了新的需要定义的词汇(如调节、控制),但基本上是明白清晰的。最重要的是“自动启闭和调节”,单单代替人工直接操作属于机械化。一个受到监控的系统也不一定是自动的,如示意图1-1。

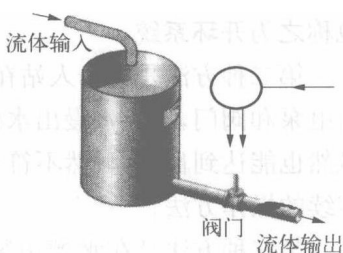


图 1-1 水槽液位

图 1-1 所示是一个简单的控制水槽液位系统。流体连续进入水槽,出水阀门是可调节的。为了保持水槽液位在合适的高度,可以选择若干种方法。

第一种方法是手动调节出水阀门在某个开度,或者人工定时开启电动泵进行排液。它也可以称作是一个受控系统,但对于水槽液位而言却不是一个自动控制系统。如果遥控和定时不恰当,结果很有可能使水漫出水槽,或者水槽里的水被排空。当然它也不可避免地受到外部环境的影响,譬如进水是否稳定。如果进水突然太多或太少,也有可能使水漫出水槽,或者水槽里的水被排空。对于水槽



液位,进水是否稳定是最大的外界干扰因素,如果没有进水阀门控制,意味着进水是不可控的干扰因素。下面用信息方块图表示上述简单水槽液位控制系统,如图 1-2 所示。

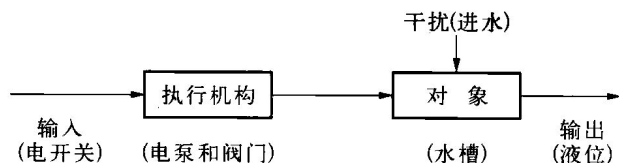


图 1-2 水槽液位开环控制信息方块图

注意,图 1-2 表示的是信息流向,即一个环节(用一个方块表示)对另一个环节的影响和作用,不是物流的真正流向。这里,执行机构的开启使水流出对象(水槽),而不是水流入对象(水槽)。这是一种没有任何检测手段,更没有反馈意义的控制,称之为开环控制,也称之为开环系统。

第二种方法是有个人站在水槽边,看着水槽的液位,决定是否开启电泵和阀门,不让水漫出水槽,或者水槽里的水被排空。这种方法虽然也能达到目的,显然不符合自动化的定义,很难作为一种长时期连续的操作方法。

第三种方法是在水槽边装一个液位传感器,液位信号直接在水槽边显示出来或者传送到控制室,通过仪表显示现场的水槽液位,人们可以遥控电泵和阀门,从而遥控水槽的液位。当然这种方法比第二种方法更好一些。但是还需要人的观察、判断和决策,它也不符合自动化的定义。上述三种方法都属于开环系统。

第四种方法是对第三种方法作进一步改进,用一台控制器(也称为调节器,更复杂的情况也可用计算机)代替人的判断和决策,发出指令,去控制电泵和阀门的开启,从而控制水槽的液位在希望的位置,当然符合自动化的定义,如图 1-3 所示。

图 1-3 与图 1-2 的最大区别是多了一条有传感器的反馈通道,一个比较器(加法器)和一个调节器,构成了一个闭环控制系统。这

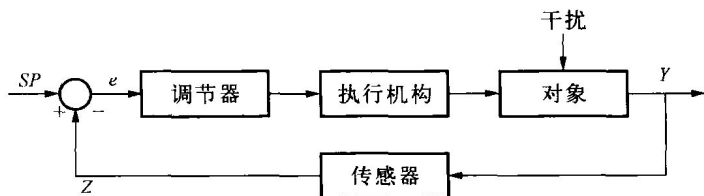


图 1-3 水槽液位闭环控制方块图

里,加法器事实上是一个减法器,也可理解为传感器反馈通道反向后进入加法器,所以也称为**负反馈**。**SP**(set point)称为**给定值**,这里代表希望的水槽液位高度。**Y**是输出,这里是实际的水槽液位状态。**Z**是实际的水槽液位状态通过液位检测仪表变成标准的信号,常用的是电信号。然后反向,与 **SP** 作加法运算,产生一个**偏差信号 e** (实际上 **SP** 和 **Z** 作的是减法运算)。这里调节器代替了人的作用,如果实际的水槽液位状态 **Z** 与希望的水槽液位高度 **SP** 偏差很大,调节器就会一直开启电泵或完全关闭电泵,这取决于 **e** 是正偏差还是负偏差,即实际水槽里的水是多了还是少了。如果实际的水槽液位状态 **Z** 与希望的水槽液位位置 **SP** 偏差 **e** 很小,甚至为零,即实际的水槽液位状态符合希望值,调节器就会使执行机构保持原先的状态不变。注意,不变不是关闭执行机构,而是维持现状。习惯上,把图 1-3 所代表的系统称为**自动控制系统**,或者更确切地称为**单回路控制系统**。这是最简单的情况,更复杂和详细的概念、方法、理论、新技术将在后面的章节中介绍。简单地说,自动控制系统由三部分组成:

- ① “硬件”,指仪器仪表、计算机、网络等;
- ② “软件”,指理论、标准、算法、程序等;
- ③ 被控对象,指自然物体,人为的集合物(社会、经济、工业装置、农业生态等)。

1.1.2 自动控制发展史

自动控制作为独立学科和一级学科,只有几十年的时间。但是从技术应用上看,它的历史悠久,有些甚至能追溯至公元前。从时间上划分,自动化技术的发展大致可分为早期阶段,技术和理论阶段,



信息、计算机网络和机器人等几个阶段。

1. 早期阶段

人类很早就进行了简陋自动化装置的探索,留下了许多记载与传说,这里列举几个较为著名的古代自动检测和自动化装置。中国的指南车是广为流传与记载的古代发明,它始于西汉甚至更早。著名科学家张衡(公元 78—139 年)发明了浑天仪、水运气象台等。大约在公元前 3 世纪—公元前 1 世纪,古希腊人发明了浮球调节装置控制滴水,作为计时的水钟。另外,我国古代传说中的藏宝洞窟、皇室陵墓中安放的各种陷阱和机关,也是早期自动化装置的尝试。诸葛亮发明的木牛流马,可以说是最早的机器宠物。

2. 技术和理论阶段

标志人类社会工业革命开始的是瓦特于 1788 年发明的蒸汽机,它同样也标志着自动化应用技术的开始。具有良好的自动控制系统也是蒸汽机得以成功推广的必要条件之一。在瓦特之前,已有人发明过各种

各样的蒸汽机及相关控制装置,但没有真正有效解决问题。除了机械问题,主要有蒸汽的进气和排气是手动操纵的,造成转速不稳定等原因。瓦特的发明解决了这些问题,其蒸汽机的转速调节系统原理如图 1-4 所示。

如果转速由于蒸汽机负荷波动而下降,与蒸汽机连接的飞球系统的转动速度也下降,离心力减小,飞球相对位置下移,调节杠杆左端下降,

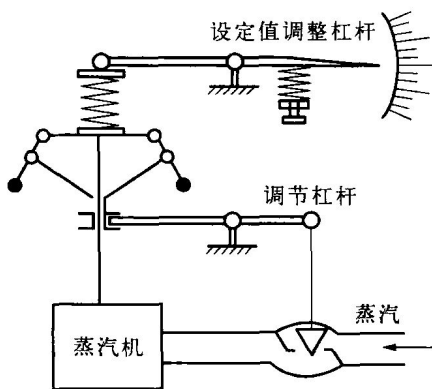


图 1-4 瓦特蒸汽机自动调节系统原理图

使得杠杆右端上升,阀门开度增加,送入蒸汽机的蒸汽量增加,转速回升,反之亦然,从而可使系统的速度得以稳定。这是一个典型的具有负反馈的速度调节系统。它也可以用图 1-3 来表示。

1868年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)发表了著名的关于调节器的论文,对反馈理论进行了深入的研究。同年,法国工程师法尔科发明了反馈调节器。至1920年,反馈理论已广泛地应用于电子放大器中,性能有了较大的改善。1920年,美国出现了PID(比例积分微分)调节器,并应用到化工和炼油过程中。

1948年,维纳编写了《控制论》一书,标志着自动化的理论基础——控制论正式诞生。同年,香农编写了《通讯的数字原理》,标志着信息论的诞生。

到1948年,控制理论的经典部分都已基本提出,如多种有关控制系统稳定性的分析方法、根轨迹法、频率分析法等。1946年,第一台电子计算机ENIAC问世。除了工业革命使自动化获得较为广泛的应用外,特别要提及的是在此之前的第一次和第二次世界大战,极大地激发了自动控制在军事和军工领域的应用。而在战后,自动控制在军事领域取得的成果,不断地转化为民用工业部门,自动控制技术和理论得到了广泛的普及和提高。理工科大学都有自动化系、学科,或开设自动化课程。数学家们也纷纷涌入,对出现的技术问题进行数学描述和理论研究,成果累累。

各种各样的传感器和五花八门的仪器仪表随着电子学、半导体集成电路和化学材料的发展不断涌现,为此,国际上有关组织制定了一系列的标准和规范。

20世纪60年代以后,现代控制理论和现代控制技术蓬勃发展,至今方兴未艾。

3. 信息、计算机网络和机器人阶段

计算机技术的飞速发展,以及大规模集成电路、生物材料等多学科交叉重叠和互联网的普及,大大推动了机器人系统在各行各业的应用。21世纪自动化技术进入了信息、计算机网络与机器人阶段。

1.1.3 自动控制的领域和分支

1. 哲学意义

控制论并不仅仅是工业和工程领域的科学,它也是一种思想,一

