

普通高等教育机电类规划教材

过程控制系统及设计

重庆大学 朱麟章 主编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

过程控制系统及设计

重庆大学 朱麟章 主编

龙怀沛 参编

何离庆

朱 钢

华侨大学 王永初 主审



机械工业出版社

本书是根据1992年全国高等工业学校工业自动化仪表专业教学指导委员会审议的八五规划教材《过程控制系统及设计》教学大纲编写的。内容包括：控制对象的特性与辨识方法，常规单回路控制系统、串级控制系统、均匀控制系统、比值控制系统、前馈控制系统以及选择性控制系统；对直接数字控制系统、集散控制系统、过程控制系统的设计，以及系统抗干扰技术都作了较详细的介绍，使读者对新型控制系统及过程控制系统设计有必要的认识 and 了解。

本书着重于系统的分析、设计和工程应用，力求反映近年来过程控制系统方面的最新发展和新成就，因此本书内容较新，也较全面，并附有较多的参考图表和资料，有利于控制系统的设计和选型。本书除作为检测技术与仪表、工业自动化仪表、过程控制等专业的专业课教材外，也可作为石油、化工、冶金、电站自动化等相近专业的教材，对从事过程控制的工程技术与管理人员也是一本有益的参考书。

过程控制系统及设计

重庆大学 朱麟章 主编

*

责任编辑：王小东 版式设计：王 颖

封面设计：姚 毅 责任校对：姚培新

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张25.75·字数627千字

1993年5月第1版第1次印刷

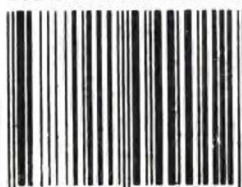
印数 0 001—4 000 定价：20.20元

*

ISBN 7-111-04901-2/TP·307 (课)

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

ISBN 7-111-04901-2



9 787111 049012 >

序

《过程控制系统及设计》是一门理论性与实践性都很强的课程。这本教材是根据工业自动化仪表专业教学指导委员会1992年天津会议上讨论制定的教学大纲编写的。教材内容符合教学大纲要求，较好地反映了过程控制的现代成就。

理论方面，集大系统理论、现代控制理论与经典控制理论等，取材适当，阐述简要，层次分明，并具有工程实用性的内容；实践性方面，包括系统的组成、设计、实施、整定，信号的动、静态匹配，抗干扰措施以及系统投运等十分重要的内容。

本书具有以下特色：

①连续与离散系统有机结合，既注意了常规过程控制的重点叙述，也注意了新控制系统的必要介绍，能适应工业自动化仪表与装置、工业自动化及过程控制等专业的需要。尤其是可编程调节器、可编程控制器与集散控制系统和装置的应用都有较系统的介绍。

②新型控制系统占有较多的比重，这是符合国内生产实际情况的，既有利于学生认识和开拓新的应用领域，也便于工程实际人员参考使用。

③深入浅出，实例丰富，适于教学。

④本书对控制系统的设计，除在专门一章集中重点予以介绍外，在各章中都有恰当叙述和示例，对培养学生实际工作能力大有帮助。由于本书具有较强的工程应用性，也不失为一本自学成材的实用教科书。

我相信本书的出版，对推动“自动化仪表”、“检测技术与仪器”、“工业自动化”等专业教材的改革，都有重要作用；对繁荣过程控制并推动其发展，也会有重大的影响。

王永初

1995. 5. 1

前 言

1992年12月在天津召开的高等工业学校工业自动化仪表专业教学指导委员会审议八五教材规划时,一致认为随着计算机与超大规模集成技术的发展,过程控制理论与技术都有新的进展,特别是计算机控制与集散控制系统发展日新月异,应用日益广泛。因而决定新编专业课教材《过程控制系统及设计》,并重新拟定了教学大纲,要求更新教材内容,增加正被广泛应用的可编程控制系统、集散控制系统、过程控制系统的设计与系统抗干扰等四部分内容。目的是拓宽知识面,提高学生对近代控制论的应用与控制技术新发展的了解,加强对学生实践环节的培养和训练。本书就是根据该大纲编写的。

书中名词术语均按原国家工业仪表总局编印的《工业自动化仪表常用术语》及国家标准局《在全国电气领域全面推行电气制图和图形符号国家标准的通知》所规定的常用术语、符号和各项标准;计量单位一律按国家规定采用国际单位制,必要时在该单位后面加括弧列出沿用的工程制单位。

在编写过程中,得到清华大学、天津大学、山东大学、上海大学、浙江大学、华中理工大学、渝州大学、西安仪表厂、四川仪表十八厂、四川仪表廿二厂、四川仪表四厂、银河仪表厂、上海福克斯波罗(FOXBO-RO)公司、上海康泰克(CONTEC)电子技术公司等的热情关心和支持,对本书内容提出了不少珍贵意见,并在图书资料等方面给以不少的方便。本书主审华侨大学王永初教授对本书的审定及所提出的宝贵意见,不但使本书的编写工作得以顺利完成,还为本书写了序,使本书增色不少。在此一并向关心和支持本书出版的所有单位和个人,特别是为整个编写工作日夜操劳的刘承蓄同志表示最诚挚的感谢!

本书由重庆大学自动化系朱麟章教授主编,并编写第一、二、七章;龙怀沛副教授编写第四、五、六、十章;何离庆副教授编写第八、九章;电气工程系朱钢编写第三、十一章,第八章第一、二节与第六节中的第三段至第八段。限于编者的业务和知识水平,书中难免有不当之处和缺点错误,恳切希望读者提出宝贵的意见和批评指正。

编者

1995. 4

主要符号表

A	面积、峰值、常数、液容(容量系数)		
a	常数、序列幅值、极点、响应(下标)	k_0	比热比系数
B	常数、系数、幅值	L, l	距离、位移量、长度、阀位移
b	常数、截距、零点、闭环(下标)	LS	低值选择器
C	常数、余差、容量、容量系数、阀流通能力	M	序列名、物料量
CF	可信度	MTBF	平均无故障时间
C_v	阀流量系数	m	质量、阶次、递减指数、检测变送器(下标)
C_m	阀额定流量系数	m_{ff}	前馈控制器输入信号
c	常数、控制通道或控制器(下标)	N	周期长度、噪声、描述函数
cov	协方差	N(s)	噪声的拉氏变换
D	系数、微分、干扰信号、控制阀口径	n	递减比、阶次、测量次数、系数、噪声
D_m	公称直径	o	对象(下标)、标准量或额定值(下标)
D_n	n 阶延迟滤波器输出	p	比例、比例带、压力(差)、推理中间接点
D(z)	脉冲传递函数	Δp	压差
D(s)	干扰的拉氏变换	F_r	产生阻塞流压力
d	扰动、预测误差平方和	P_N	方阵
E	预测误差矢量	F_s	液体饱和蒸汽压
e	偏差矢量	F_d	缩流处压力
F_L	压力恢复系数	F_v	阀压降
F_k	液体临界压力比系数	p(x)	概率密度函数
F_p	管件形状修正系数	Q	热量, 推理证据接点
F_R	雷诺修正系数	Q, S	对称正半定常数矩阵
FFC	前馈控制	Q(s)	操纵量拉氏变换
FBC	前馈反馈控制	q	操纵量
FB	反馈控制(下标)	q_m	质量流量
FM	前向建模	q_v	体积流量
IN	逆向建模	R	阻力、比例、回流比、模糊关系
f, FF	前馈控制(下标)	R_x, R_y, R_{xy}	模糊关系矩阵
f	矢量函数	R_{xx}	x 的自相关函数
H, h	高度、液位、焓	R_{xy}	xy 的互相关函数
H	参数模型	S	压降分配比, 分离度
H_g	蒸汽汽化潜热	S_m	阀阻比
HS	高值选择器	S_n	阀总压差比
H(s)	采样保持器拉氏变换	h	液位、焓
H_m(s)	检测、变换拉氏变换	J	准则函数、目标函数
k	常数、系数、静态放大系数、气体绝		

K	系数、常数、放大系数(增益)、弹簧刚度、比例系数、流量比	$y(t)$	被控量变化值
$\mathcal{L}$	拉氏变换	$y'(t)$	被控量一次变量
$U(s)$	控制器输出拉氏变换	$y_s(t)$	阶跃响应值
UPS	不间断电源	$y_p(t)$	脉冲响应值
u	控制器输出、控制量	Z	Z 变换、目标函数、气体压缩系数,
u	输入矢量	$z(s)$	测量值拉氏变换
V	流体体积	z	测量值、随机噪声
v	流速、阀门(下标)	z	观察矢量
W	特性平面、推理目标	α	角度、比例系数、流量系数、实部
$W(s)$	传递函数	β	角度、工作频率(下标)
X	阀全开流量比、输入量变送器的斜率、隶属性	δ	比例度、偏差、 δ 函数
$x(s)$	输入拉氏变换	ε	误差、随机干扰
$x(z)$	输入序列 Z 变换	ζ	阻尼系数、衰减系数
x	控制信号、阶跃信号、最优解	ξ	局部阻力系数、有色噪声
x	状态矢量	ϕ	相位移
x_0	临界压差比	ϕ	观察矢量
Δx	控制器输出变量	ψ	递减率、变量函数
Δx_n	计算机输出增量控制信号	θ	角度、温度、热过程(下标)
s	特征方程的根、算子	$\Delta\theta$	温度差、温度变化
T	时间、时间常数、序列周期、采样周期、热力学温度(K)	λ	热导率、拉格朗日乘子、遗忘因子
t	摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)	λ_{ij}	相对放大系数
U	控制器输出	σ	标准偏差
Y	被控量	σ^2	均方差
$Y(s)$	被控量拉氏变换	v	噪声, 观察噪声
$Y(z)$	被控量 Z 变换	τ	滞后时间, 时间
Y_p	脉冲响应	τ_c	纯滞后
Y_s	阶跃响应	τ_c	容量滞后
y	被控量	ρ	密度
y	输出矢量	ρ_{xy}	相关函数
$y(\infty)$	被控量稳态值	ω	角频率
		χ	比值、阀全开与最大流量比
		Θ	最小二乘估计、温差拉氏变换

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 工业生产过程及控制系统的特点	2
第二节 过程控制系统的发展概况	12
第三节 过程控制系统的组成与类别	16
第四节 过程控制系统的品质指标	20
第二章 过程控制对象的特性	24
第一节 概述	24
第二节 有自平衡能力对象的动态特性	26
第三节 无自平衡能力对象的动态特性	34
第四节 时域法辨识对象的动态特性	37
第五节 频域法辨识对象的动态特性	52
第六节 统计相关法辨识对象的动态特性	54
第七节 最小二乘估计法辨识对象的动态特性	63
本章小结	70
思考题与习题	70
第三章 单回路控制系统	71
第一节 概述	71
第二节 检测与变送器的选择	72
第三节 被控量与操纵量的选择	75
第四节 终端器件	86
第五节 控制器的选型	111
第六节 控制系统的投运与控制器参数整定	118
本章小结	135
思考题与习题	135
第四章 串级控制系统	137
第一节 概述	137
第二节 串级控制系统的特点	140
第三节 串级控制系统的应用范围	148
第四节 串级控制系统的设计	151

第五节 串级控制系统的运行	159
本章小结	164
思考题与习题	164
第五章 比值控制系统	165
第一节 基本概念及结构方案	165
第二节 比值控制系统的设计和实现	170
第三节 比值控制系统的参数整定	176
本章小结	177
思考题与习题	178
第六章 前馈控制系统	179
第一节 前馈控制的基本原理	179
第二节 前馈控制系统的结构形式	181
第三节 前馈控制系统的设计	186
第四节 前馈控制系统的应用及参数整定	190
本章小结	195
思考题与习题	196
第七章 其它控制系统	197
第一节 均匀控制系统	197
第二节 选择性控制系统	203
第三节 分程控制系统	207
第四节 纯滞后过程的常规控制	213
本章小结	217
思考题与习题	218
第八章 直接数字控制系统	219
第一节 基本概念	219
第二节 DDC系统控制算法与控制参数整定	222
第三节 数字控制系统	229
第四节 KMM可编程控制器在过程控制中的应用	241
第五节 可编程控制器(PLC)结构原理及其应用	251
第六节 PLC在过程控制中的应用	269
第七节 PLC高级工具软件简介	280
本章小结	284
思考题与习题	284

第九章 集散控制系统	285	第三节 控制盘的设计	361
第一节 概述	285	第四节 信号及联锁系统设计	370
第二节 典型集散控制系统简介	287	第五节 配管和布线工程设计	383
第三节 集散控制系统的控制管理级	305	第十一章 过程控制系统的抗干	
第四节 集散控制系统的监控级	311	扰与电源	387
第五节 集散控制系统的经营管理级	332	第一节 干扰的来源与途径	387
第六节 数据通信基础	340	第二节 干扰的抑制	389
本章小结	348	第三节 电源	393
思考题与习题	348	第四节 接地	393
第十章 过程控制系统的工程设计	349	本章小结	400
第一节 工程设计的内容及设计方法	349	思考题与习题	400
第二节 控制室的设计	356	参考文献	401

第一章 绪 论

生产过程自动化，一般是指化工、石油、冶金、焦化、电站、造纸、陶瓷、建材、酿造、材料热处理、热力发电等工业生产中连续的，或按一定程序周期进行的生产过程的自动控制。电力拖动或电机运转等过程的自动控制一般不包括在内。以控制理论为基础，针对不同的生产过程（被控对象简称对象或过程）进行检测、变换、显示等，配合执行器与控制阀构成的开环或闭环控制系统，称为常规过程控制系统。大多数情况下采用闭环反馈控制系统(如图1-1所示)，这是最基本的只有一个回路的控制系统。随着电子技术的发展，相继出现了各种比较复杂的多回路控制系统，它们在本世纪中后期对生产过程的自动控制起了重要的作用。由于生产的规模日益增大，过程进行的速度愈来愈快，对控制的质量要求愈来愈高，因此常规过程控制已远远不能满足需要。随着现代控制论的发展，出现了若干高级过程控制系统，但都是在经典控制理论和常规仪表过程控制基础上发展起来的，因此本书将对常规过程控制系统作较详细的论述。

由于计算机与超大规模集成电路的迅速发展，以现代控制理论和计算机为基础，采用数字控制、显示、A/D与D/A转换，配合执行器与控制阀构成的计算机控制系统，在过程控制中得到越来越广泛的应用，其典型结构如图1-2所示。计算机有硬件与软件两大部分，并配以必要的外围设备。最简单的计算机控制可用单片机组成最小系统作为控制系统的核心；较大的计算机控制，则应用工控计算机或更高级的计算机，构成较高级的过程控制系统，如直接数字控制（DDC）系统、可编程控制系统（PLS）与集散控制系统（DCS）等。对此本书也将给以较详细的介绍。

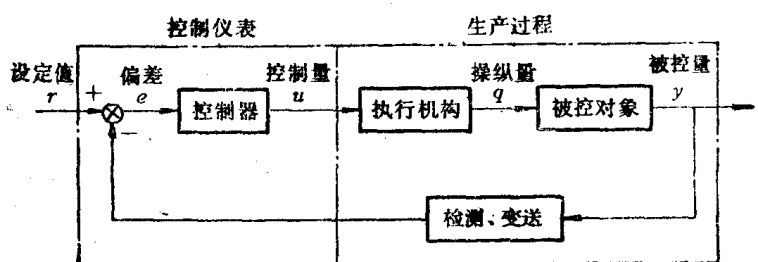


图1-1 常规仪表过程控制系统原理图

由于计算机与超大规模集成电路的迅速发展，以现代控制理论和计算机为基础，采用数字控制、显示、A/D与D/A转换，配合执行器与控制阀构成的计算机控制系统，在过程控制中得到越来越广泛的应用，其典型结构如图1-2所示。计算机有硬件与软件两大部分，并配以必要的外围设备。最简单的计算机控制可用单片机组成最小系统作为控制系统的核心；较大的计算机控制，则应用工控计算机或更高级的计算机，构成较高级的过程控制系统，如直接数字控制（DDC）系统、可编程控制系统（PLS）与集散控制系统（DCS）等。对此本书也将给以较详细的介绍。

由于计算机与超大规模集成电路的迅速发展，以现代控制理论和计算机为基础，采用数字控制、显示、A/D与D/A转换，配合执行器与控制阀构成的计算机控制系统，在过程控制中得到越来越广泛的应用，其典型结构如图1-2所示。计算机有硬件与软件两大部分，并配以必要的外围设备。最简单的计算机控制可用单片机组成最小系统作为控制系统的核心；较大的计算机控制，则应用工控计算机或更高级的计算机，构成较高级的过程控制系统，如直接数字控制（DDC）系统、可编程控制系统（PLS）与集散控制系统（DCS）等。对此本书也将给以较详细的介绍。

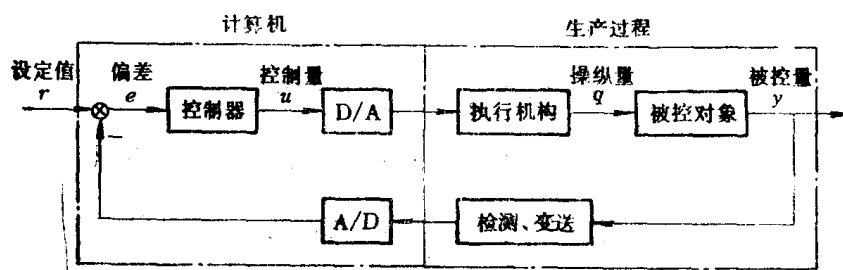


图1-2 过程计算机控制系统原理图

第一节 工业生产过程及控制系统的特点

一、工业生产过程概要及其参数控制意义

生产过程是多种多样的,生产设备的规模与过程进行的方式和方法也完全不同,有的生产过程单一,设备也较简单;有的生产过程复杂且规模庞大。由于生产过程的差别较大,类型很多,这里只能以归类综合方法介绍一些生产过程的有关概况。

热能与电能的传递与转换,是生产过程中最常见的形式,如燃料的燃烧、传热、传质、热交换,气(汽)电锤,以及水泵、风机与压缩机等。能量是以功的形式利用的,热力学第二定律告诉我们,输入或输出的功,无论是热或电,其总和应当相等。由于传输阻力、摩擦阻力及自然散热等造成能量损耗,只有一部分能量可以转换为功,其余转变为热而散失。例如热电站,利用煤燃烧所产生的热能,大约只有不到一半转换为电。而用电起动电动机将电转换为机械能则损耗较小,转换效率较高。转换效率高正是过程控制所追求和应解决的问题。

生产过程中能量从一种介质传给另一种介质的传输过程,即热转换为功或相反的转换过程,是了解和设计过程控制系统所必须具备的基本知识。在生产过程中进行着多种多样的化学分解与聚合等过程,有的在常温或高温下进行,有的在真空或高压下进行…。对这些千差万别的生产过程要求进行有效的控制,以满足低消耗、低成本、高产、优质的目的。必须对它们有所了解,才可能对它进行自动控制。

(一) 传热过程

1. 热交换过程 热交换是在两种流体之间进行的热量转换的最一般的传热过程,有的是两种流体相互混合直接接触传热,有的是被导热壁分开的两种流体之间间接的不接触传热。

直接接触传热的质量与能量的平衡方程为

$$q_{mh} + q_{mc} = q_m \quad (1-1)$$

$$q_{mr}h_r + q_{mc}h_c = q_m h \quad (1-2)$$

式中 q_m ——混合流体的质量流量;

h_r ——热流体的焓;

h_c ——冷流体的焓;

h ——混合流体的焓;

q_{mr} ——输入热流体的质量流量;

q_{mc} ——输入冷流体的质量流量。

联立解以上二式即得混合流体的焓

$$h = h_c + \frac{q_{mr}}{q_{mr} + q_{mc}}(h_r - h_c) \quad (1-3)$$

对于两种比热容相同,又没有相变的流体,上式可以温度差的形式表示

$$T = T_c + \frac{q_{mr}}{q_{mr} + q_{mc}}(T_r - T_c) \quad (1-4)$$

式中 T_r 、 T_c ——分别为热流体与冷流体的温度。

混合体的温度与冷热流体质量比之间的关系是非线性的如图1-3所示。流体的温度随两种流体的质量比而变化,加上温度传感器的纯迟延,非线性更严重。这是大多数温度过程的共

同特性，给温度过程的自动控制带来相当大的困难。混合流体温度 T 的相对放大系数可由式 (1-4) 导出。

$$K_{r,c} = (T - T_c) / (T_r - T_c) = q_{m,r} / (q_{m,r} + q_{m,c}) \quad (1-5)$$

显然，相对放大系数 $K_{r,c}$ 随着流体流经阀门的流量而变。

有导热壁隔离的热交换器，两流体之间的间接热交换热量 Q ，决定于两流体之间的温度差 dt ，并和传热阻力（热导率）有关，即

$$Q = k_i A dt \quad (1-6)$$

式中 k_i ——流体的热导率，

A ——热交换面积。

热交换器的控制目标是温度，流体温度与热量之间的关系，在流体无相变的情况下，逆流热交换器的流体温度关系如图1-4所示。

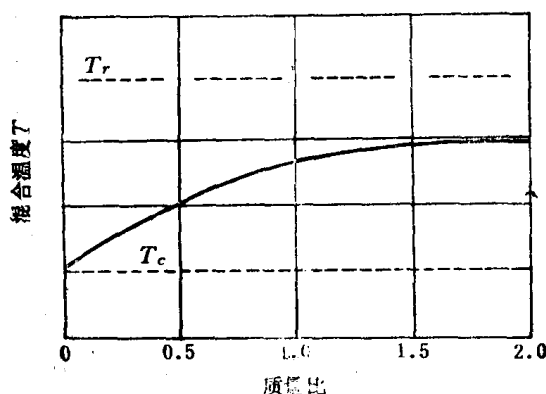


图1-3 混合流体的温度变化

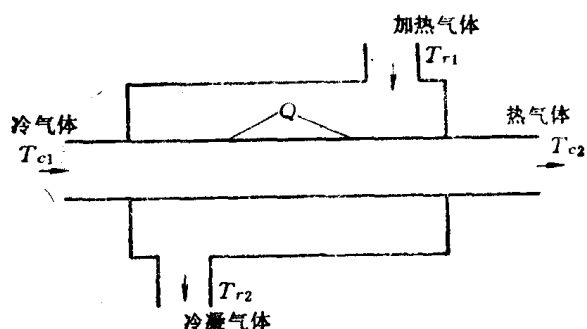


图1-4 逆流热交换器原理图

影响两流体传热的温度差，可以用对数平均值表示。

$$dT_e = \frac{(T_{r1} - T_{c2}) - (T_{r2} - T_{c1})}{\ln [(T_{r1} - T_{c1}) / (T_{r2} - T_{c1})]} \quad (1-7)$$

实际上，为了表示温度之间的关系，用算术平均值表示也足够准确。

$$dT_s = [(T_{r1} - T_{c2}) + (T_{r2} - T_{c1})] / 2 \quad (1-8)$$

当温度差趋近于零时，上式的误差也趋近于零；当温度比为4:1时，误差小于10%。

在式(1-6)~式(1-8)中有传热量 Q 、平均温度 T 、冷热两流体被加热温度 T_{c2} 与 T_{r2} 四个未知数。两个流体流量中，一个是热交换器的负荷，另一个可以调节以控制前一个流体的出口温度，则两个流体温度变化的相互关系可表示为

$$Q = q_{m,r} C_r (T_{r1} - T_{r2}) = q_{m,c} C_c (T_{c2} - T_{c1}) \quad (1-9)$$

联立解式(1-6)~式(1-8)，可求出四个未知数中的任一个，传热量 Q 的解最简单。

$$Q = \frac{T_{r1} - T_{c1}}{1 / (k_i A) + [q_{m,r} C_r + 1 / (q_{m,c} C_c)] / 2} \quad (1-10)$$

式中 C_c 、 C_r ——冷、热流体的热容。

当两流体流量最大时， $T_{r2} = T_{r1}$ ， $T_{c2} = T_{c1}$ ，这时传热量最大

$$Q_{max} = k_i A (T_{r1} - T_{c1}) \quad (1-11)$$

$$\frac{Q}{k_i A (T_{r1} - T_{c1})} = \frac{1}{1 + (k_i A / 2) [1 / (q_{m,r} C_r) + 1 / (q_{m,c} C_c)]} \quad (1-12)$$

传热量与冷流体的关系是非线性的,如图1-5所示。改变流体流量以控制传热量在相当大的范围内是无效的。可把无量纲的温度比表示为流量的函数,即

$$\frac{T_{r1}-T_{r2}}{T_{r1}-T_{c2}} = \frac{1}{q_{mr}C_r/(k_tA) + [1 + q_{mr}C_r/(q_{mc}C_c)/2]}$$

$$\frac{T_{c2}-T_{c1}}{T_{r1}+T_{c1}} = \frac{1}{q_{mc}C_c/(k_tA) + q_{mc}C_c/(q_{mr}C_r)/2}$$

冷流体流量对出口温度的影响如图1-6所示,曲线的斜率随出口温度和负荷 q_m 而变化,在给定温度下应把负荷加倍,调整量 q_{mc} 也应远大于两倍才行。总之,由于传热的有关特性是非线性的,即使在最有利的条件下,采用改变流量的方法进行温度控制,也总是难以令人满意的。

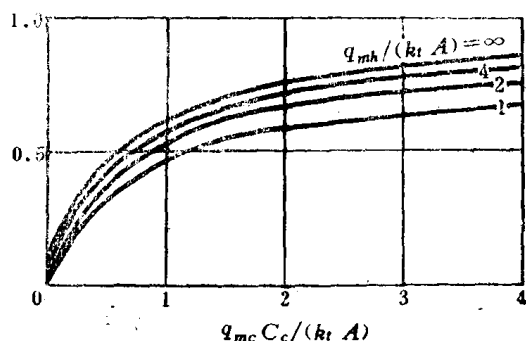


图1-5 改变流体流量对传热量的影响

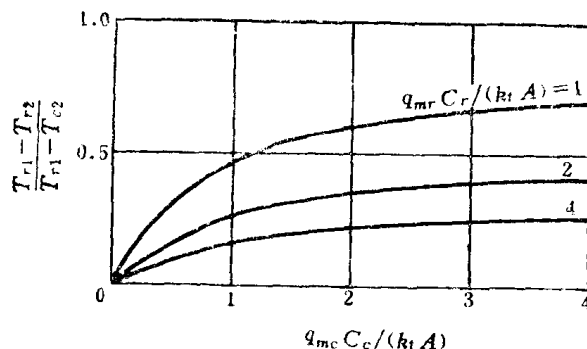


图1-6 改变冷流体流量对出口温度的影响

2. 燃料燃烧过程 燃料与空气混合后进行燃烧,火焰温度高低决定于燃料本身所含有的热量,燃料的发热量 q_f 与燃烧产物的热量 Q 有以下关系。

$$Q = q_{mf}q_f \quad (1-13)$$

式中 q_{mf} ——燃料的质量流量;

q_f ——燃料的发热量。

热量应等于燃料和空气混合燃烧升到火焰温度所必需的量,即

$$Q = q_{mf}c_f(T_f - T_f) + q_{ma}c_a(T_f - T_a) \quad (1-14)$$

式中 c_f ——燃料的平均比热容;

c_a ——空气的平均比热容;

T_f ——燃料进入燃烧器入口温度;

T_a ——空气进入燃烧器入口温度;

T_f ——燃烧火焰温度;

q_{ma} ——空气质量流量。

为了保证完全燃烧,送入的空气量应较理论燃烧所需的空气量多一些,一般以过剩空气系数 $\alpha = q_{mf}/q_{ma}$ 表示,由式(1-1)与式(1-14)可解出火焰温度

$$T_f = \frac{q_f + c_fT_f + \alpha c_aT_a}{c_f + \alpha c_a} \quad (1-15)$$

上式只有燃料与空气都不过量时才是正确的,也只有在此条件下火焰才能达到最高温度。须知空气中的氮气并不参与燃烧,它稀释燃烧气体,不但降低燃烧温度,还会被燃烧废气带走大量热量。如用氧气代替空气, α 值可减小五倍,火焰温度得以大大提高,所以生产中为了

提高火焰温度常采用富氧或纯氧燃烧。为了得到良好的燃烧，天然气需要5%的过量空气，相当于1.1%的过量氧气；燃煤需要的过量空气更大，至少也要10%甚至20%的过量空气，相当于1.9%的过量氧气，原因是煤（即使是粉煤）与空气的混合欠佳。

无论空气过量或不足，都会影响火焰温度，选燃料与空气比作被控参数并不是很适宜的。这种控制是使空气量跟随燃料量的变化，按规定的比例而自动改变。如空气量过多，燃烧废气量增大，会降低火焰温度；如燃料量过多，将在燃烧室内积累或燃烧不完全而延续到烟道中去燃烧，既造成浪费，还有可能烧垮烟道；若在燃烧室积累有过多燃料的情况下点火燃烧，极易引发爆炸，这点在点火燃烧时要特别注意。当空气与燃料混合欠佳或者漏入空气时，燃烧不完全，烟气中的含氧量增多；烟气中的含氧量是燃烧效率最适合的指标，以它作控制参数可获到良好的燃烧效果。但它不如烟气中的CO含量可靠，因为CO不会受燃烧室或烟道漏入空气的影响，但CO的检测没有O₂的检测方便。

燃料燃烧是生产中普遍应用的，如热电厂加热蒸汽的锅炉，冶炼厂各种炼铜、炼铁、炼钢、加热、均热以及各种热处理炉；石油、化工、化纤、建材以及材料加工等工厂各种各样的加热炉、干燥炉、焙烧窑、隧道窑、旋转窑等都需要严格的燃烧控制。

3. 化学过程 化学过程是使两种或几种物料，化合成一种或多种更有价值的产品的反应过程，此反应是否能以合适的速度进行？是否能使物料充分转化为有价值的产品？要寻求最佳的反应条件，并控制此系统保持这些条件。任何化学过程都受许多因素的影响，主反应与副反应的速度，自然都受这些因素的制约。一个反应器的成功与否，很大程度上决定于反应器的设计，它是从生产工艺过程出发，在防止其它因素影响下，力求生产率最高，以决定反应器负荷的大小，保证生产过程稳定而安全。

化学反应器内进行的某些化学反应，在没有任何负荷扰动下，会突然发生变化，猛烈程度足以破坏催化剂，损坏产品，损坏设备，甚至危及人的生命。所以对化学反应基本原理的充分了解，是过程控制工作人员必须做到的。

(1) 化学平衡 在化学反应生成物出现的同时，大多数情况下会产生相当数量的反应物，因为化学反应在一定条件下都是可逆的，由于正反应速度相等，必然存在一个可能使反应停滞不前的平衡状态，此平衡状态决定于多少反应物转化为生成物，并在什么条件下有利于转化物的生成。

例如硫酸是SO₂转化为SO₃的气态反应



这是一个放热反应，生成物对反应物的浓度达到一定的比值时即达到平衡。平衡常数

$$K = \frac{[\text{SO}_3]}{[\text{SO}_2][\text{O}_2]/2} \quad (1-17)$$

平衡常数是温度和催化剂的函数，它表明一定比例的反应物和生成物一起出现，其比值限制了在反应器内所能达到的转化率，提高转化率的途径有：

1) 降低生成物的浓度 如采取冷凝之类的方法，使生成物自反应区排出就可降低生成物的浓度，转化率得以提高。如生成物很容易自反应物中分离出来，如气相或固相生成物自液相反应物中分离出来，或者液相或固相自气相反应物中分离出来，转化率可达100%。

2) 增加反应物的浓度 提高参与反应物的浓度如上式中SO₂与O₂两种物质的浓度或提高其中任一种物质的浓度，都会提高反应物的转化率。

3) 提高反应器内的压力 由于反应器内的压力提高,使反应物的相对分子质量总数(总体积)较生成物的相对分子质量总数大,促进反应正向进行,也会提高转化率。在硫酸生产中平衡常数的分母相对分子质量数比分子相对分子质量数增加得多,转化率提高也多。这就是有的化学反应器在加压下进行的原因。

4) 从反应器中移走热量 放热反应产生的热量要及时移走,并应及时放出生成物,都能提高转化率。因为热量集聚,将使反应器内温度升高,有利于逆向反应。当不断移走热量,使反应在较适合的低温下进行,转化率才能提高。

5) 保持催化剂活性表面积 催化剂不参与化学反应,但能改变平衡常数。它的用途是提供适于反应的条件如酸性,或者是一种能吸附反应物的多孔表面,或者用以建立一种形成最后生成物所必需的中间产物的特征浓度。催化剂通常是以填充在反应器内的固定床上,也可溶解于或悬浮在液相反应的溶剂中,然后从生成物中分离出来并循环使用。金属催化剂可做成筛网或其它适合的形状,横置于反应物流中。快速升降的气体或液体反应物流称为流化床。把粒度均匀的小颗粒催化剂悬浮在反应物流中,对反应物也起催化作用。有时采用某一波长的光线也能催化某些化学反应。无论采用何种方式,反应都是在催化剂表面进行的。有的是放热反应,必须加以冷却,以免催化剂失去活性甚至被破坏。还有大多数催化剂的表面被反应物中的杂质或副成品所污染而失去活性,催化剂被毒化,转化率随之下降。显然催化剂活性表面积决定反应器内随时间变化的转化率。因此应当制订最有效地更换或再活化催化剂的手段,才能保证较高的转化率。

(2) 反应速度 正向或逆向的反应速度均正比于反应物和生成物的浓度,例如前述硫酸反应达到平衡时

$$k_f[\text{SO}_2][\text{O}_2]/2 = k_r[\text{SO}_3] \quad (1-18)$$

式中 k_f ——正向反应速率系数;

k_r ——逆向反应速率系数。

平衡常数则可表示为

$$K = k_f/k_r \quad (1-19)$$

接近平衡状态时,反应物或生成物的浓度变化率就是反应速度。

$$\frac{d[\text{SO}_2]}{dt} = -\frac{d[\text{SO}_3]}{dt} = k_f[\text{SO}_2][\text{O}_2]/2 = k_r[\text{SO}_3] \quad (1-20)$$

上述指数表明,正向反应是1.5级的,逆向反应是1.0级的。如反应物之一如 $[\text{O}_2]$ 过量很多,则反应速度主要取决于另一反应物的浓度,并将趋于1.0级反应。事实上大多数反应都可按一级反应来处理。

大多数反应速度与反应物浓度 x_0 有关。

$$x = x_0 e^{-kt} \quad (1-21)$$

式中 x_0 ——反应物浓度初始值。

可见一级反应的时间常数为 $1/k$,反应速率系数的单位是时间单位的倒数。

反应物变化为生成物 y 的转化率,也是随时间变化的。

$$y = (x_0 - x)/x_0 = 1 - e^{-kt} \quad (1-22)$$

如反应的混合物流过一段没有返混流的反应管需要一定的时间,这种纯迟延起主导作用的活塞流反应器,当反应物的流量为 F ,经过容器的体积为 V ,反应物停留的时间为 V/F ,则容器

出口处的浓度为

$$x = x_0 e^{-kV/F} \quad (1-23)$$

转化率与流量呈指数关系如

$$y = 1 - e^{-kV/F} \quad (1-24)$$

通过搅动使反应物均匀分布的返混流反应器，近似于一个单容积系统，反应速度各处相同。一般说来，活塞流反应器的转化率较返混流反应器高些。转化率与温度的关系曲线最大的斜率发生在 $kV/F = 1$ 处，在稳态下与之相应的转化率为63%和50%。当偏离稳态时，由于传热方面的扰动，温度将使反应率系数的变化超过反应物浓度的变化，也将随温度的增加而超过它在新稳态下的水平，直到反应物浓度相应降低为止，如图1-7所示。在一定温度下，转化率对温度的偏导数就是瞬时转化率，它高于稳态转化率的程度与没有转化的量有关。

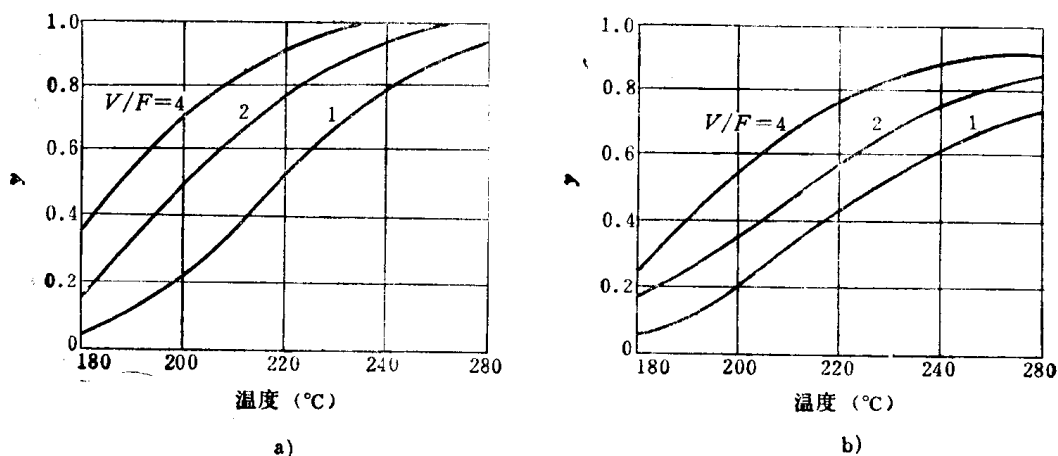


图1-7 反应器转化率与温度的关系曲线

a) 活塞流反应器 b) 返混流反应器

(3) 反应器 反应器有连续与间隙反应器两大类，主要有三种类型。

1) 放热反应器 在反应过程中放出热量，促使反应速度加快的为放热反应器，如果温度失控是很危险的。减少放热量是采用强致冷却的方法将系统的热量充分带走，如图1-8所示。

放热的速率 Q_r 是反应速度 y 与反应热 H_r 的乘积，并且与 y 成正比。只要做到当温度升高时，散热量大于放热量，就能使热平衡恢复。因此设计足够的传热面，放热器可能做成本质稳定的反应器，它可以在不控制温度下运行。通常情况下只须控制冷却水温度就够了。对于不稳定的反应器，必须进行控制，以免热量以不断增长的速度产生漂移，使不稳定的反应器具有静态稳定性。

2) 连续反应器 其供料速度、取出生成物以及供给或排出热量都是连续恒定的化学过程，就是说反应物料的成份与温度分布在时间与空间上都是恒定的。要求在设计条件下运行时，反应物与生成物损失最小。

有些化学反应可以简单地一步就完成，有些由于反应速度很低，反应的可逆性未必有利

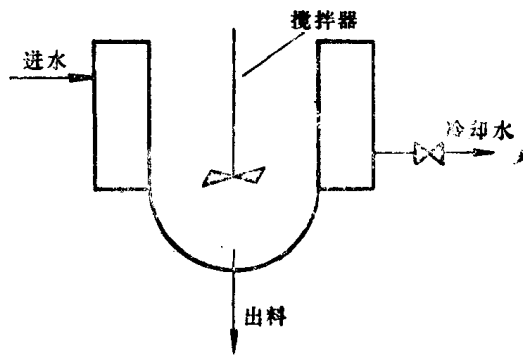


图1-8 放热反应器原理图

于反应,不得不在转化率较低的情况下运行。当转化率不完全时,剩余的反应物必须循环使用,再循环操作与单反应操作差别极大。有些反应是在某种惰性中间媒介(如某种溶剂)中进行的,中间媒介物可以循环使用。有的用生成物来稀释反应物使反应减慢,并把这种稀释生成物再次循环使用,这时反应物随着它一起循环,所以对物料的比例控制比较严格。由于再循环,过程不可能自动趋向平衡,因此终点控制也是不可少的。

3) 间隙反应器 间隙生产一般是将反应物与催化剂装入反应器后,加热到生产操作的温度。反应进行完毕通常要几个小时,然后再加热或冷却到规定的温度,待冷却后出料。

工业间隙反应器主要进行橡胶和各种塑料生产中的聚合反应,分子量的分布情况是聚合反应中的一个重要参数,最易用间隙生产的方式,使聚合反应生成物的粘度变化得到合理控制,聚合反应通常是二级或多级的,决定于形成聚合物时两个或多个单体分子同时发生化学作用的情况,一个二级反应的转化速度与反应物浓度的平方成比例。转化速度也就是生产速度,如果是放热反应,就和放出的热量成正比。一级向二级反应器的转化速度是随时间的延续而减小的,如图1-9所示。

在间隙反应中温度控制最重要,因为放热反应必须先把物料加热升温到反应温度,反应一开始又要注意排走热量,以保持反应温度下的操作维持在最佳状态下,反应进行的时间最好尽可能短。由于反应器容积很大(几千立升),必须加强搅拌,才易于达到控制目的。

4. 精馏过程 精馏是在由许多层塔板构成的精馏塔内进行的,规模较大。由于塔板层数较多,塔内精馏过程作用很慢,而对外界的干扰却很敏感,是一种难以自动控制的过程。通常运行的方针是力求把产品质量维持在技术指标范围内。大多数化工与炼油厂采用的精馏是一种提纯过程,如果要求提纯过度,可能在产品损失,能量消耗和生产能力诸方面都要付极大的代价。一般只要求保持产品成分尽可能接近指标极限,保证产品应有的质量就算较理想的精馏操作。

精馏塔内的塔板数是根据给定的分离度从物质与能量平衡确定的。对已建成的精馏塔再考虑塔板数和平衡状态图并无意义。精馏是一个分离过程,分离需要能量,并与被分离产品的相对成分和相对流量密切相关。由物料平衡可知,对于任一组分而言,其采出量不可能比进塔的量多。显然塔板效率与负荷大小会影响产品质量。总之,能量平衡与物料平衡在蒸馏过程中必须充分考虑,其作用过程如图1-10所示,在稳态下进入与流出精馏塔物料应当平衡

$$F = D + B \quad (1-25)$$

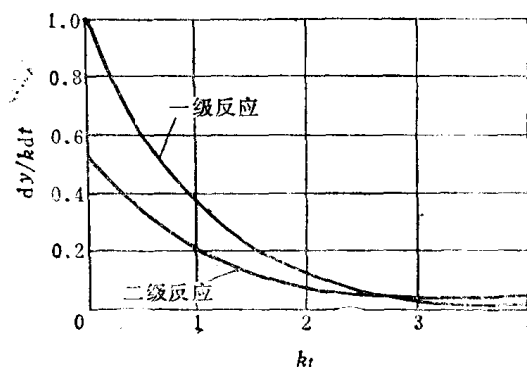


图1-9 一、二级反应的转化速度

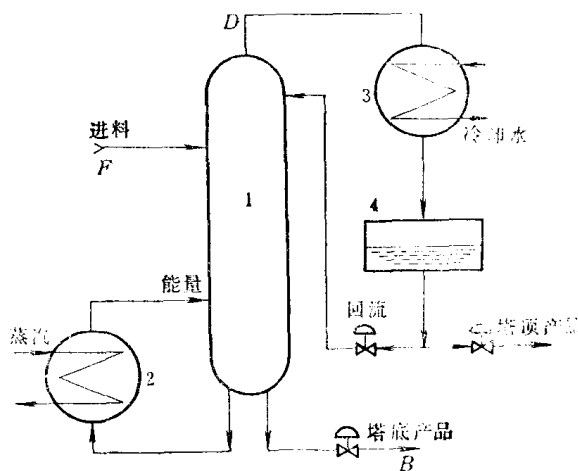


图1-10 精馏过程原理系统图

1—精馏塔 2—蒸汽加热器 3—冷凝器 4—回流