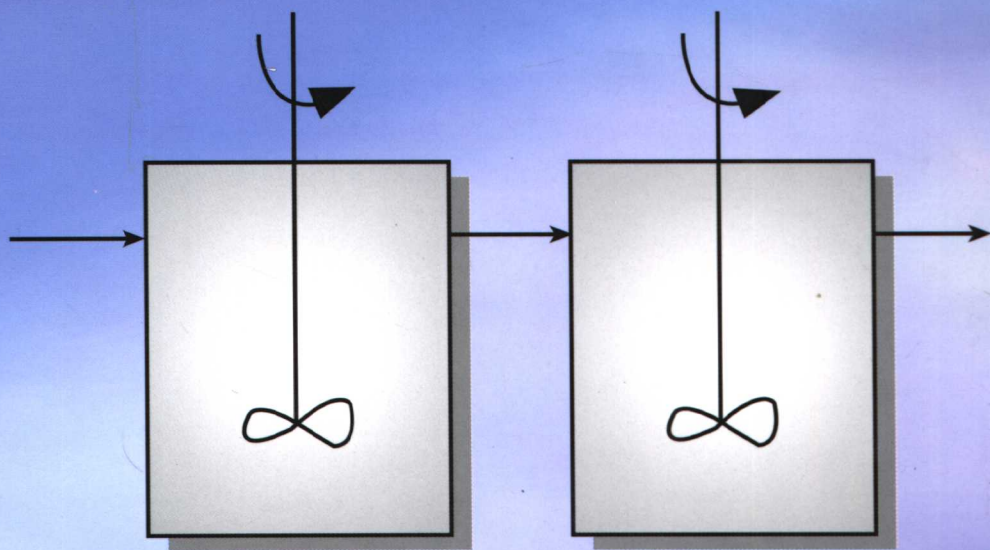


罗康碧 罗明河 李沪萍 编著



反应工程原理



科学出版社
www.sciencep.com

反应工程原理

罗康碧 罗明河 李沪萍 编著

内 容 简 介

本书是根据教育部1998年4月《面向21世纪“化学工程与工艺”专业培养方案》的教学要求编写的,仅在编排顺序上有所不同,内容上也略有增减。本书在介绍流体流动模型及化工动力学的基础上主要讨论了反应器的设计和应用。主要内容包括:化学反应动力学、停留时间分布与流动模型、均相反应器、气固相催化反应动力学、绝热式固定床气固相催化反应器、连续换热式气固催化反应器、气液相反应器、流固相非催化反应器和聚合反应器。与国内同类教材相比,条理清晰,内容新颖,突出少而精思想,能以较少的课时(40~80学时)达到更好的教学效果。

本书可作为高等学校化工类专业本科(含专科)教材,也可供化工、生物、冶金等领域的生产、科研和设计工作的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

反应工程原理/罗康碧,罗明河,李沪萍编著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-014802-9

I. 反… II. ①罗…②罗…③李… III. 化学反应工程-高等学校-教材 IV. TQ03

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第006543号

责任编辑:李 锋 袁 琦 / 责任校对:钟 洋
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2005年3月第一次印刷 印张: 22

印数: 1—3 000 字数: 410 000

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

本书是根据教育部 1998 年 4 月《面向 21 世纪“化学工程与工艺”专业培养方案》的教学要求编写的，仅在编排顺序上有所不同，内容上也略有增减。针对全国普通院校化工类专业本科教学计划的情况，教材内容按 40~80 学时编写，具体执行时可适当选择，有的内容不必讲解，可供自学参考。

本书以培养基础厚、专业广、能力强、素质高的化工创新人才为目标。在贯彻“少而精”原则的基础上注意删繁就简，重点放在化工专业领域内共性的基本问题上。同时为体现其教学性，首先着重阐明基本概念和基本原理，然后结合生产实际，详细地论述了各种常用反应器的设计计算方法，并附有例题和习题，以帮助读者应用所学的原理去分析和解决实际问题。

全书共分十章：第一至第三章着重介绍基础知识和化学反应工程的基本原理，第四至第十章分析典型反应器的特性和设计。其中第三、四、八、十章由罗康碧编著，第一、二、五、六、七章由罗明河编著，第九章和全书的插图由李沪萍编著和绘制。

毋庸讳言，本书在编写过程中吸收和借鉴了近年来国内外相关教材中的许多好内容和好经验，增添了一些反应工程研究方面的最新成果，但这些内容和成果一般都尽可能加以“同化”，以便保持我国在长期教学工作中形成的循序渐进、由浅入深，注意教学内容的条理性、系统性和逻辑性等优良传统。在着重介绍反应工程基本原理的同时，突出地介绍了返混、预混合、质量传递和热量传递等工程因素（即物理过程）对反应结果的影响，强调指出工程因素通过影响反应浓度与温度而改变反应结果，使读者了解反应过程中的分解与综合，个性与共性间的关系，从而增强分析和解决工程问题的能力，所以本书除可作为教材外，还可供化工、生物、冶金等领域的生产、科研和设计工作的工程技术人员参考使用。

由于编者水平有限，缺点、错误在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

编著者

2005 年 1 月

主要符号表

英语字母	C_p	比定压热容	
A	组分；传热面积；下标；单位产量的经费	D	综合扩散系数
A_R	填充床横截面积；鼓泡塔横截面积	D_a	丹克莱尔准数
a	化学计量系数；比相界面；以单位液相体积为基准的相界面面积；活性表面	D_e	有效扩散系数
a_c	单位填充床体积内填料的总表面积	D_G	气相扩散系数
a_d	与动态持液量相对应的单位填充床体积的动态相界面面积	D_K	努森扩散系数
a_{GL}	气液比相界面	D_L	液相扩散系数
a_m	单位质量催化剂颗粒的有效外表面积	D_l	轴向扩散系数
a_p	有效比相界面	D_r	径向扩散系数
a_r	传热比表面积	D_R	催化床直径
a_s	填料的比表面积	d	直径
a_{st}	与静态持液量相对应的单位填充床的相界面面积	d_a	等面积相当直径
a_t	鼓泡塔内气液混合物总相界面面积；冷管外径	d_b	气泡直径
a_w	单位填料体积的润湿面积	d_e	床层当量直径
B	组分	d_i	第 i 级分的气泡长短轴直径平均值
Bi_m	拜俄特数	d_o	气体分布器喷孔直径
Bo	朋特数	d_p	颗粒直径；填料的名义尺寸
b	化学计量系数；筛孔净宽	d_{rs}	质量比表面积平均直径
c	浓度；系数；校正系数	d_s	等比表面积相当直径
c'_{EL}	临界浓度	d_t	反应管（器）直径
c_D	阻力系数	d_v	等体积相当直径
		E	活化能
		$E(\tau)$	停留时间分布密度
		F	组分；摩尔流量
		$F(\tau)$	停留时间分布函数
		$F_n(j)$	数均聚合度分布
		Fr	弗劳德数
		f	静态与动态比表面的吸收速率之比；体积分数校正系数；摩

	擦系数; 引发效率	\bar{M}_v	黏均相对分子质量
f'	摩擦系数	\bar{M}_w	重均相对分子质量
f_m	修正摩擦系数	\bar{M}_z	Z均相对分子质量
$f_n(j)$	瞬间数均聚合度分布	m	质量
G	质量流速; 气相	m_i	冷管根数
Ga	伽利略数	N	扩散通量; 槽数
g	重力加速度	n	反应总级数; 物质的量; 组分数; 气泡数; 微孔数; 管子数
H	高度; 溶解度系数	p	压强; 组分; 聚合物
ΔH	焓差	Δp	压降; 阻力
ΔH_r	反应热效应	P^*	自由基
h	总传热系数	$[P^*]$	活性链的总浓度
h'	校正系数	$[P]$	死聚体的浓度
I	惰性组分; 引发剂	$[P_j]$	聚合度为 j 的分子的浓度
I_0	零阶一类变型贝塞尔函数	Pe	贝克莱数
(I)	光的强度	Pr	普朗特准数
J	组分; J 因子	\bar{P}_n	数均聚合度
K	液体模数; 总传热系数; 开氏温度	\bar{P}_v	黏均聚合度
K_G	气相总传质系数	\bar{P}_w	重均聚合度
K_L	液相总传质系数	\bar{P}_z	Z均聚合度
K_p	化学平衡常数	p	分压; 化学计量系数
K_s	表面反应平衡常数	\bar{p}_n	瞬间数均聚合度
K_i	i 组分的吸附平衡常数	\bar{p}_w	瞬间重均聚合度
k	速率常数	\bar{p}_z	瞬间 Z 均聚合度
k_G	气膜传质系数	Q	组分; 传热量; 体积流量
k_L	液膜传质系数	q_q	移热速率
k_0	指前因子或频率因子	q_r	放热速率
L	组分; 长度; 距离; 液相; 厚度	R	半径; 宏观反应速率; 中间化合物
l	化学计量系数; 坐标距离	Re	雷诺准数
Δl	步长	Re_m	修正雷诺准数
M	相对分子质量; 组分; 示踪物总量; 单体	R_g	摩尔气体常数
\sqrt{M}	液膜转化系数	r	本征反应速率; 吸附速率; 孔半径; 径向坐标
\bar{M}_n	数均相对分子质量	S	瞬时选择性; 相界面; 反应表

	面积; 溶剂		
S_e	床层比表面积	希腊语字母	
S_g	颗粒比表面积	α	反应级数; 给热系数; 比速率; 表面不均匀系数; 吸附质分子的覆盖面积; 单位反应时间能耗
S_p	颗粒外表面积	α_F	设备折旧费
S_v	固相或催化剂的比外表面积	α_0	单位辅助时间能耗
S_v	空速	β	反应级数; 增强因子; 表面不均匀系数; 循环比; 换热系数
Sh	舍伍德准数	γ	反应级数
Sc	施密特准数	δ	厚度; 后备系数; 实验误差
\bar{S}	总选择性	δ_A	膨胀因子
T	温度 (K)	ϵ	空隙率; 孔隙率
t	温度 (°C); 时间	ϵ_A	膨胀率
t'	辅助时间	ϵ_G	气含率
u	线速度	η	容积效率; 效率因子; 有效因子
u_b	单个气泡上升速度	θ	覆盖率; 无因次逗留时间
$u_{0(G,L)}$	空塔线速度; 喷孔气速	θ_v	空位率
u_0	流体的平均流速	Δ	绝热温升
u_s	滑动速度	λ	反应级数; 导热系数; 平均自由程
V	物料体积; 扩散体积; 体积流量	μ	黏度
V_g	孔容积	μ_i	i 次矩, $i=0, 1, 2, \dots$
V_m	饱和和吸附量	ν	运动黏度; 化学计量系数
V_p	颗粒体积	ρ	密度
V_R	反应体积	σ	活性中心; 方差; 表面张力
W	质量流速; 质量; 质量分数	τ	时间; 接触时间; 停留时间; 空时; 曲折因子
We	韦伯准数	τ_M	平均停留时间
$W(j)$	重均聚合度分布	ϕ	反应物料流量与总原料流量之比
$w(j)$	瞬间重均聚合度分布	ϕ_L	平均生产强度
X	反应率; 固相反应率; 液相摩尔比	φ	西勒模数; 装填系数
X_M	聚合率		
x	液相摩尔分数; 颗粒的质量分数		
Y	收率; 气相物质的量比		
y	摩尔分数		
Z	压缩因子; 厚度; 高度; 杂质		

φ_s	颗粒的形状系数	H	传热
ψ	系数	h	横截面
ξ	扬析系数	I	内扩散
下标		i	进口
0	初始态, 进料; 标准状况	l	轴向; 液相
A, B, ...	不同组分	L	液相主体; 液体
a	吸附	m	全混流; 平均
ad	绝热	max	极大值
b	气泡; 床层; 化学计量系数	min	极小值
c	浓度; 冷流体; 中心	opt	最佳
D	传质; 扩散	P	压力
d	脱附	p	平推流; 颗粒; 分压
e	有效	r	径向
eq	平衡	s	颗粒; 面积; 固相; 球体; 表面
f	出口; 完全; 流体	t	总量
G	气相; 气体	V	体积
g	气相主体	x	外扩散

目 录

前言

主要符号表

第一章 绪论	1
1.1 化学反应工程学的历史沿革和发展趋势	1
1.2 化学反应工程学的内容与任务	2
1.2.1 反应器的分析与设计	2
1.2.2 反应器的优化	2
1.2.3 反应器的放大	3
1.3 化学反应工程学的研究方法	3
1.3.1 模型的分类	3
1.3.2 建立模型的一般程序	3
1.3.3 模型的内容	4
1.4 化学反应及化学反应器的分类	5
1.4.1 化学反应的工程分类	5
1.4.2 工业化学反应器的分类	6
1.5 化学反应的反应率、收率及选择性	8
1.5.1 反应率(转化率或变换率) X_A	9
1.5.2 收率 Y	9
1.5.3 选择性	9
1.6 化学反应器设计的一般原则及方法	10
第二章 化学反应动力学	12
2.1 化学反应速率	12
2.1.1 间歇过程	12
2.1.2 连续过程	14
2.2 化学反应速率方程式	15
2.2.1 简单反应	16
2.2.2 复合反应	17
2.3 化学反应速率方程式的变换与积分	18
2.3.1 恒容过程	18
2.3.2 变容过程	19
2.4 复合反应的动力学分析	22
2.4.1 平行反应	22

2.4.2 连串反应	24
2.5 反应速率的浓度效应	26
2.5.1 不可逆反应	26
2.5.2 可逆反应	27
2.5.3 自催化反应	28
2.6 反应速率的温度效应	28
2.6.1 反应速率常数	29
2.6.2 温度对反应速率的影响	33
习题	37
第三章 停留时间分布与流动模型	39
3.1 停留时间分布	39
3.1.1 概述	39
3.1.2 停留时间分布的定量描述	40
3.1.3 停留时间分布的数字特征	41
3.1.4 停留时间分布的实验测定	42
3.1.5 停留时间分布的应用	46
3.2 理想流动模型	47
3.2.1 理想置换模型	47
3.2.2 理想混合模型	49
3.3 非理想流动模型	50
3.3.1 非理想流动现象	50
3.3.2 非理想流动模型	52
3.4 返混及其影响	61
3.4.1 反应器内物料的混合现象	61
3.4.2 返混对化学反应的影响	62
3.4.3 返混的利弊与限制	64
习题	65
第四章 均相反应器	67
4.1 间歇槽式反应器	67
4.1.1 反应时间的计算	67
4.1.2 反应体积的计算	69
4.1.3 最优反应时间	71
4.1.4 间歇反应器的热量衡算	72
4.2 半间歇槽式反应器	74
4.3 连续搅拌槽式反应器	77

4.3.1 基础设计方程	77
4.3.2 连续搅拌槽式反应器的热量衡算	80
4.4 多级串联组合的连续槽式反应器	81
4.4.1 多级串联连续槽式反应器的计算	82
4.4.2 多级串联连续槽式反应器的优化	85
4.5 连续搅拌槽式反应器的热稳定性	88
4.5.1 稳定操作条件	88
4.5.2 操作参数对热稳定性的影响	89
4.5.3 热稳定性对传热温差的限制	90
4.6 管式反应器	93
4.6.1 基础设计方程	93
4.6.2 等温管式反应器的计算	94
4.6.3 管式反应器的热量衡算	98
4.6.4 管式反应器的最佳温度序列	100
4.7 具有循环流的管式反应器	103
4.8 反应器形式与操作方式的筛选	106
4.8.1 反应体积的比较	106
4.8.2 反应选择性的比较	112
习题	115
第五章 气固相催化反应动力学	118
5.1 气固相催化反应本征动力学	119
5.1.1 化学吸附与脱附	119
5.1.2 表面化学反应	123
5.1.3 气固相催化反应的本征速率方程式	123
5.2 实验室反应器及动力学数据的处理	129
5.2.1 实验室反应器	129
5.2.2 动力学模型的建立	132
5.2.3 动力学模型的筛选	132
5.2.4 动力学模型参数的确定	134
5.3 气固相催化反应宏观动力学	138
5.3.1 气固相催化反应过程的速率	139
5.3.2 宏观速率方程式	140
5.4 固体颗粒的表征	142
5.4.1 固体颗粒的相当直径及形状系数	142
5.4.2 固定床的空隙率和当量直径	144

5.4.3	催化剂颗粒的比表面积、孔容积、孔径、孔隙率和密度	146
5.5	固定床反应器内的传递特性	148
5.5.1	流体流动特性及床层压降的计算	148
5.5.2	固定床中流体与颗粒间的传质及传热	153
5.5.3	固定床中的传热	159
5.5.4	固定床中的传质与混合	162
5.6	多孔催化剂颗粒内的扩散过程	163
5.6.1	气体在多孔催化剂内的扩散	163
5.6.2	等温内扩散效率因子的计算	166
5.6.3	内外扩散都有影响时的效率因子 η	170
5.6.4	内扩散对反应过程的影响	171
5.7	传质影响的判断与消除	174
5.7.1	外扩散影响的判断与消除	174
5.7.2	内扩散影响的判断与消除	175
	习题	176
第六章	绝热式固定床气固相催化反应器	180
6.1	固定床气固相催化反应器的数学模型	181
6.2	气固相催化反应的最佳操作参数	183
6.2.1	可逆放热反应的最佳温度	183
6.2.2	其他最佳操作参数	185
6.3	单段绝热式催化反应器	186
6.3.1	绝热温升	187
6.3.2	单段绝热催化床反应体积的计算	188
6.3.3	单段绝热催化床的最佳进口温度	192
6.4	多段绝热催化反应器	193
6.4.1	多段间接换热式反应器	193
6.4.2	多段原料气直接冷激式反应器	202
6.4.3	多段非原料气直接冷激式反应器	205
	习题	207
第七章	连续换热式气固催化反应器	209
7.1	换热式反应器的分类及工艺特征	209
7.1.1	外热式反应器	209
7.1.2	自热式反应器	210
7.2	连续换热式气固相催化反应器的数学模型及求解	212
7.2.1	数学模型的建立	212

7.2.2 数学模型的求解	215
7.2.3 设计实例	216
7.3 换热式固定床催化反应器的热稳定性及参数敏感性	224
7.3.1 热稳定性	224
7.3.2 参数敏感性	226
7.4 固定床气固相催化反应器结构设计中的几个问题	228
习题	229
第八章 气液相反应器	231
8.1 双膜理论及气液反应类型	231
8.1.1 双膜模型及气液反应过程	231
8.1.2 几种典型气液反应	233
8.2 气液反应宏观动力学基础方程	234
8.2.1 极慢反应的速率表达式	235
8.2.2 极快反应的速率表达式	236
8.2.3 中间速率反应的速率表达式	239
8.3 气液反应的几个重要参数	243
8.3.1 液膜转化系数	243
8.3.2 增强因子	244
8.3.3 有效因子	245
8.4 气液反应器简介	247
8.4.1 气液反应器的主要类型	247
8.4.2 气液反应器的特性与选型	249
8.5 填料反应塔	250
8.5.1 传递特性	251
8.5.2 填料反应塔的设计	254
8.6 鼓泡反应器	262
8.6.1 简介	262
8.6.2 鼓泡反应器的传递特性	263
8.6.3 鼓泡反应器的设计	277
习题	281
第九章 流固相非催化反应器	283
9.1 流固相反应模型	283
9.1.1 反应的速率机理	283
9.1.2 流固相非催化反应的物理模型	284
9.2 粒径不变的缩芯模型	285

9.2.1	物理模型	285
9.2.2	宏观速率方程的通用式	287
9.2.3	几种特殊情况下的反应速率式	290
9.3	粒径缩小的缩芯模型	291
9.3.1	速率方程的通用式	292
9.3.2	几种特殊情况下的反应速率式	293
9.4	控制步骤的判别	294
9.4.1	改变操作条件	294
9.4.2	代入公式判别	297
9.5	流固相非催化反应器的计算	298
9.5.1	固体颗粒呈理想置换流动	298
9.5.2	固体颗粒呈理想混合流动	300
	习题	305
第十章	聚合反应器	307
10.1	聚合反应的动力学分析	307
10.1.1	聚合反应的类别	307
10.1.2	聚合物的分子结构、聚合度、相对分子质量和相对分子 质量分布	308
10.2	均相自由基聚合反应	311
10.2.1	自由基聚合的反应动力学基础	311
10.2.2	平均聚合度	315
10.2.3	聚合度分布	316
10.3	逐步聚合反应	321
10.3.1	逐步聚合反应动力学	321
10.3.2	线型缩聚物的聚合度分布	323
10.4	聚合方法与设备	325
10.4.1	聚合方法	325
10.4.2	聚合设备	327
10.5	聚合反应器的分析与设计	328
	习题	332
	参考文献	334

第一章 绪 论

反应工程原理是化学反应工程学的核心内容，而化学反应工程学是使化学反应实现工业化的一门学科。因此，化学反应工程的研究，一方面要认识、判断各种类型化学反应的化学热力学和动力学规律；另一方面还要归纳各种物理因素（即工程因素）对化学反应过程的影响，然后综合和总结出一些具有普遍意义的观点和概念，用以指导工业反应过程的生产 and 开发研究。本书将阐述化学反应工程中最基本的概念和理论，提供反应工程的基本研究方法，讨论反应器的设计和优化，以使化工专业的学生和从事化工生产和化工技术开发研究的科技人员掌握必要的化学反应工程知识。本章将主要介绍化学反应工程学的发展趋势、内容、任务和研究方法，并介绍化学反应器设计的一般原则及方法。

1.1 化学反应工程学的历史沿革和发展趋势

化工生产过程是物理过程和化学过程相组成的综合体。在 20 世纪 30 年代以前，化学工程学的研究主要集中在传热、传质和动量传递方面的所谓化工单元操作上，基本上属于物理过程的研究。直到 1937 年，德国科学家丹克莱尔 (Danköbler) 在“Der Chemie Ingeniem”第三卷中才谈到了扩散、流动与传递对化学反应收率的影响问题，该书也成了化学反应工程的先导。1947 年，前苏联学者弗兰克-卡明涅茨基 (Фрэнк-Камнецкий) 在所著的《化学动力学的扩散和传递》一书中就流动、扩散和热现象对化学反应的影响作了重要的论述。同年，Hougen 与 Watson 在编写的“Chemical Process Principles”第三卷中阐述了化学动力学与催化过程，该书成为化学反应工程的首批专著之一，对化学反应工程学的发展起到了巨大的推动作用。

40 年代以后，原子能工业的发展提出了高倍率放大反应器的问題，推动了对工业化学反应器的研究。50 年代后，石油化学工业的发展使反应器规模不断扩大，促进了化学反应特性与传递特性的研究，特别是对流体的流动与混合，流体元在反应器内的停留时间分布和宏观动力学等方面的研究成果为化学反应工程学奠定了基础。于是在 1957 年荷兰阿姆斯特丹举行的欧洲第一届化学反应工程会议上，正式确立了“化学反应工程学”这一学科的名称。

60 年代后，数学模型方法在化学反应工程的研究中日益深入。70 年代前后相继出现了全面、系统地论述化学反应工程学的专著和教材如《气液反应器》、

《气液固三相反应器设计》等，这些著作的出版标志着化学反应工程学日趋成熟。1970年在美国华盛顿举行了第一次国际化学反应工程学会，此后每隔两年举行一次，促进了化学反应工程学的迅速发展。特别是电子计算机的应用，使许多化学反应工程问题得以定量化，解决了不少复杂反应器的设计与控制问题，使化学反应工程的理论和方法日臻完善。80年代后，随着高新技术的发展和应用（如微电子器件、光导纤维、新材料及生物技术的应用等），扩大了化学反应工程研究的领域，使化学反应工程形成了新的分支，如生化反应工程、聚合反应工程和电化学反应工程等，把化学反应工程的研究推到了一个崭新的阶段。

1.2 化学反应工程学的内容与任务

化学反应工程学的内容可概括为化工动力学和反应器的设计与分析两个方面。

化工动力学主要研究在工业生产条件下，化学反应进行的机理和速率。由于生产中化学反应过程不仅包含化学现象，而且包括传递现象，即质量、热量和动量传递，所以化工动力学研究的就是通常所说的“三传一反”。而在不同的反应器内，传递过程和影响化学动力学的主要因素——温度和浓度的变化规律是各不相同的，所以反应工程学的另一任务就是研究反应器内这些因素的变化规律，找出最优工况和最好的反应器型式，以获得最大的经济效益。这也就是反应器设计与分析的内涵。

具体地讲，化学反应工程学的任务应包括反应器的设计、优化及放大三个方面。

1.2.1 反应器的分析与设计

反应器的分析就是根据化学反应工程的基本原理，针对各类反应器的共性问题加以剖析，找出影响反应器性能的主要因素，研究薄弱环节和强化措施，为反应器的最佳操作和设计提供依据。其实质是分析质量、热量和动量传递对化学反应的影响。

进行反应器分析的目的之一是设计反应器，它包括反应器的选型、反应器结构的设计以及反应器大小的确定等几个部分。

1.2.2 反应器的优化

反应器的优化包括操作的优化和设计的优化。其中设计优化是工业反应过程优化的基础，其实质是要求化学反应速率和反应选择性最佳、能耗最低及安全生产。通常是整个系统的优化和生产过程的优化，牵涉面很广，影响因素极多。本

书主要研究单体反应器的优化问题，此时目标函数通常是反应器尺寸的大小，即设备投资的大小。当然这种优化也是在一定的约束条件下来进行的（如成本、投资及环保条件等）。

1.2.3 反应器的放大

反应器的放大就是要把实验室规模和小规模生产的反应器放大成大规模工业生产的反应器，这是化学反应工程学最重要、最困难的任务。

1.3 化学反应工程学的研究方法

化学反应工程学的基本研究方法是数学模拟法，其实质是用数学模型来分析和研究化学反应工程问题。所谓数学模型就是用数学语言来表达过程中各变量之间关系的方程式。

1.3.1 模型分类

数学模型一般分为两大类：一类是从过程的机理出发推导而得的机理模型；另一类是从实验数据出发归纳而得到的经验模型。机理模型反映了过程的本质，可以外推使用。而经验模型是在一定的实验条件下得出的，不宜大幅度外推使用。因为经验性的东西有一定的局限性，超出了实验数据所归纳的范围就不一定可靠。但是目前由于认识水平的限制，对许多过程的实质还不清楚，所以经验模型仍被广泛使用。

1.3.2 建立模型的一般程序

1. 建立简化物理模型

对复杂的反应过程按等效性原则进行合理简化，设想一个模型代替实体。当然简化必须合理，简化模型既要反映过程的实质，又要便于数学描述、求解和满足使用。

2. 建立数学模型

由简化的物理模型和相关的已知原理写出模型的数学方程及初始边界条件。

3. 求解模型并用来讨论反应过程的特殊规律

必须指出，实验是模型研究的基础，所以实验必须准确，否则模型是不可信的。其次工业反应器模型的建立不是一次完成的，必须通过模型的建立、筛选、