

化学工程手册

6

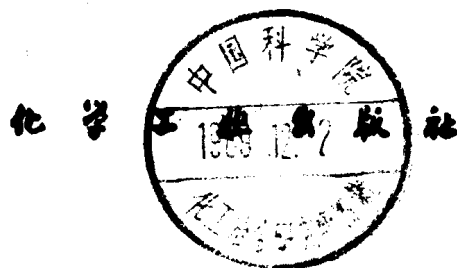
化学工业出版社

8117073  
152  
6=1

# 化学工程手册

6

《化学工程手册》编辑委员会



## 内 容 提 要

《化学工程手册》共26篇，分6卷合订出版。

本卷包括化学反应工程、化工自动控制、化工系统工程。针对化学反应技术开发和反应器设计的目标，全面而扼要地陈述了有关的理论、概念、方法、计算公式；介绍了自动控制理论、自动化技术工具和控制系统的基础知识及其在化工过程自动控制上的应用；介绍了化工系统工程的基本概念和方法，包括化工系统的分析、最优化问题的数学模型、最优化方法、灵敏度分析、可靠性和稳定性等问题。

本书供化工、石油及有关工业部门的设计、研究人员，工厂技术人员及有关院校师生参考。

## 化学工程手册

6

《化学工程手册》编辑委员会

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

化工印刷厂装订

新华书店北京发行所经销

开本787×1092<sup>1/16</sup>印张51字数1,290千字

1989年10月第1版 1989年10月北京第1次印刷

印 数 1—8,000

ISBN 7-5025-0653-5/TQ·388

定 价 24.50元

# 《化学工程手册》编辑委员会

主任 冯伯华  
副主任 陈自新 李步年 苏元复  
汪家鼎 蔡剑秋  
委员 (以姓氏笔划为序)  
卢焕章 区灿棋 邓颂九 朱亚杰  
朱自强 余国琮 时 钧 沈 复  
吴锡军 林纪方 杨友麒 张洪沅  
张剑秋 郑 焯 郭慕孙 傅举孚  
萧成基

26455/06

## 《化学工程手册》编辑人员

郭长生

谢丰毅

施承薇

张红兵

陈逢阳

苗延秀

苗润生

陈志良

陈 丽

郭乃铎

刘小颖

李洪勋

# 序

化学工程是以物理、化学、数学的原理为基础，研究化学工业和其他化学类型工业生产中物质的转化、改变物质的组成、性质和状态的一门工程学科。它出现于19世纪下半叶，至本世纪二十年代，从理论上分析和归纳了化学类型（化工、冶金、轻工、医药、核能……）工业生产的物理和化学变化过程，把复杂的工业生产过程归纳成为数不多的若干个单元操作，从而奠定了其科学基础。在以后的发展历程中，进而相继出现了化工热力学、化学反应工程、传递过程、化工系统工程、化工过程动态学和过程控制等新的分支，使化学工程这门工程学科具备更完整的系统性、统一性，成为化学类型工业生产发展的理论基础，是本世纪化学类型工业持续进展的重要因素。

工业的发展，只有建立在技术进步的基础上，才能有速度、质量和水平。四十年代初，流态化技术应用于石油催化裂化过程，促使石油工业的面貌发生了划时代的变化。用气体扩散法提取铀<sup>235</sup>，从核燃料中提取钚，用精密蒸馏方法从普通水中提取重水；用发酵罐深层培养法大规模生产青霉素；建立在现代化工技术基础上的石油化学工业的兴起等等，——这些使人类生活面貌发生了重大变化。六十年代以来，化工系统工程的形成，系统优化数学模型的建立和电子计算机的应用，为化工装置实现大型化和高度自动化，最合理地利用原料和能源创造了条件，使化学工业的科研、设计、设备制造、生产发展踏上了一个技术上的新台阶。化学工程在发展过程中，既不断丰富本学科的内容，又开发了相关的交叉学科。近年来，生物化学工程分支的发展，为重要的高科技部门生物工程的兴起创造了必要的条件。可见，化学工程学科对于化学类型工业和应用化工技术的部门的技术进步与发展，有着至为重要的作用。

由于化学工程学科对于化工类型生产、科研、设计和教育的普遍重要性，在案头备有一部这一领域得心应手的工具书，是广大化工技术人员众望所趋。1901年，世界上第一部《化学工程手册》在英国问世，引起了人们普遍关注。1934年，美国出版了《化学工程师手册》，此后屡次修订，至1984年已出版第六版，这是一部化学工程学科最有代表性的手册。我国从事化学工程的科技、教育专家们，在五十年代，就曾共商组织编纂我国化学工程手册大计，但由于种种原因，迁延至七十年代末中国化工学会重新恢复活动后方始着手。值得庆幸的是，荟集我国化学工程界专家共同编纂的这部重要巨著终于问世了。手册共分26篇，先分篇陆续印行，为方便读者使用，现合订成六卷出版。这部手册总结了我国化学工程学科在科研、设计和生产领域的成果，向读者提供理论知识、实用方法和数据，也介绍了国外先进技术和发展趋势。希望这部手册对广大化学工程界科技人员的工作和学习有所裨益，能成为读者的良师益友。我相信，该书在配合当前化学工业尽快克服工艺和工程放大设计方面的薄弱环节，尽快消化引进的先进技术，缩短科研成果转化为生产力的时间等方面将会起积极作用，促进化工的发展。

我作为这部手册编纂工作的主要支持者和组织者，谨向《手册》编委会的编委、承担编

写、审校任务的专家、化学工程设计技术中心站、出版社工作人员以及对《手册》编审、出版工作做出贡献的所有同志，致以衷心的感谢，并欢迎广大读者对《手册》的内容和编排提出意见和建议，供将来再版时参考。

冯仲章

1989年5月

# 前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础，并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十年和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化学工业部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤（力）-秒”工程制（MKfS制）。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制（SI），除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会

1979年7月



# 编辑说明

一、《化学工程手册》共26篇，原按篇分册印行，现分为六卷合订出版。

二、《化学工程手册》分篇单行本的编写工作始于1978年，1980年后陆续出版发行，1989年出齐。这次分卷合订本是利用原有纸型进行印刷的，对出版较早的篇章只能进行一定程度的修订，限于增补最必要的新内容，对近期出版的单行本只进行一些涉及技术内容的订正和印刷错误的勘正工作。

三、由于本手册着手编纂和出版时间较早，全书应用的是工程单位制，利用原纸型再印不能作全面修改，特在每卷附我国法定单位换算表，供读者查用。本手册修订再版时将采用法定计量单位。

四、本手册是中国化工学会、化学工业部化学工程设计技术中心和化学工业出版社共同组织的。参加手册编写和审稿工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等二十多个单位，近二百位专家。此外还有其它许多单位和人员提供资料和间接参与手册的工作。

五、囿于条件，本手册中所采用的名词术语和符号可能有不尽统一之处，内容上也可能有重复、遗漏、甚至错误的地方，印刷、装帧等方面也不尽如人意，欢迎读者提出改进意见，在修订时一一予以考虑，以使本手册更臻完善。

# 第24篇 化学反应工程

编写人 陈甘棠 施立才

审校人 陈家镛

3k 455/0601

# 目 录

## 24. 化学反应工程

24.1 总述	24-1	(2) 气-液-固相反应	24-54
24.1.1 化学反应工程和反应器的设计	24-1	参考文献	24-59
24.1.2 化学反应器的基本类别	24-1	24.3 理想流动的反应器	24-60
24.1.3 传递现象和反应动力学	24-2	24.3.1 平推(柱塞)流式反应器(PFR)	24-60
24.1.4 反应器设计的基本方法	24-3	(1) 等温等容的情况	24-60
参考文献	24-4	(2) 等温变容的情况	24-60
24.2 化工反应动力学	24-5	24.3.2 连续流动搅拌(全混)式反应器(CSTR)	24-62
24.2.1 反应速度的定义	24-5	(1) 单釜	24-62
24.2.2 均相反应动力学	24-5	(2) 多釜串联	24-62
(1) 反应速度理论简述	24-5	24.3.3 循环反应器	24-64
(2) 单一反应	24-7	24.3.4 组合式反应器	24-66
(3) 复杂反应	24-9	24.3.5 半连续(或半分批)操作的反应器	24-66
(4) 链锁反应	24-9	(1) 分批式反应器	24-67
(5) 聚合反应	24-12	(2) 平推流式反应器	24-67
(6) 动力学方程和参数的确定	24-23	(3) 连续流通的全混流反应器	24-68
24.2.3 气-固催化反应动力学	24-23	(4) 非等温操作的图解法	24-69
(1) 吸附	24-23	24.3.7 全混釜的热稳定性	24-69
(2) 反应速率式	24-23	24.3.8 反应器型式与操作条件的评选	24-71
(3) 外扩散及总括速率	24-30	(1) 单一反应	24-71
(4) 内扩散	24-31	(2) 复合反应	24-74
(5) 催化剂的失活	24-43	24.3.9 反应器中的搅拌	24-77
(6) 实验方法及数据处理	24-44	(1) 搅拌器	24-77
24.2.4 气-固相非催化反应动力学	24-44	(2) 搅拌功率	24-83
(1) 缩核模型	24-45	(3) 搅拌釜中的传热	24-86
(2) 缩粒模型	24-46	(4) 放大准则	24-90
24.2.5 气-液相反应动力学	24-47	参考文献	24-90
(1) 相间传质理论简述	24-47	24.4 非理想流动	24-91
(2) 反应速度式	24-48	24.4.1 停留时间分布	24-91
(3) 实验测定方法	24-53	24.4.2 流动模型	24-94
(4) 动力学特性与反应器型式的选定	24-53	(1) 分散模型	24-94
24.2.6 其它多相反应的动力学	24-53		
(1) 液-液相反应	24-53		

- (2) 多釜串联模型.....24-103
- (3) 速度分布(对流)模型.....24-105
- (4) 组合模型.....24-109
- 24.4.3 流体的混合态及其对反应的影响  
.....24-113
- 参考文献.....24-115
- 24.5 固定床反应器**.....24-116
- 24.5.1 流体的流动和压降.....24-116
- (1) 固体粒子和床层空隙率.....24-116
- (2) 床层压降.....24-117
- 24.5.2 固定床中的传质和传热.....24-118
- (1) 粒子与流体间的传质.....24-118
- (2) 粒子与流体间的传热.....24-120
- (3) 粒子与流体间的浓度梯度和  
温度梯度.....24-120
- (4) 固定床的有效导热系数.....24-120
- (5) 固定床与器壁间的传热膜  
系数 $h_w$ 及 $h_o$ .....24-123
- 24.5.3 薄层催化剂的反应器计算  
.....24-125
- 24.5.4 等温床的计算.....24-125
- 24.5.5 绝热床的计算.....24-126
- 24.5.6 自己换热式反应器的计算  
.....24-129
- 24.5.7 拟均相二维模型.....24-130
- (1) 基础方程组.....24-130
- (2) 基础方程组的解法.....24-131
- 24.5.8 非均相模型.....24-133
- (1) 粒子与流体间有梯度的一维  
模型.....24-133
- (2) 粒内及粒子与流体间均有梯度  
的一维模型.....24-133
- (3) 非均相二维模型.....24-134
- 24.5.9 模型的选用和参数的影响  
.....24-135
- (1) 从床层径向温度梯度进行的  
判别.....24-135
- (2) 从床层稳定性进行的判别  
.....24-136
- (3) 参数的效应.....24-137
- 参考文献.....24-137
- 24.6 流化床反应器**.....24-138
- 24.6.1 概述.....24-138
- 24.6.2 流化床的流体力学行为.....24-139
- (1) 粒子的流态化性能.....24-139
- (2) 几个特征速度.....24-140
- (3) 床层的膨胀.....24-142
- (4) 气体分布器.....24-144
- (5) 气泡.....24-146
- (6) 乳相的动态.....24-150
- (7) 内部构件的影响.....24-150
- (8) 夹带与扬析.....24-151
- (9) 沉降分离高度与粒子浓度分布  
.....24-151
- (10) 粒子的捕集.....24-153
- 24.6.3 流化床中的传热.....24-160
- (1) 床层与外壁间的给热.....24-160
- (2) 床层与浸没表面间的给热  
.....24-161
- (3) 最大给热系数.....24-165
- (4) 粒子与流体间的给热.....24-165
- 24.6.4 流化床中的传质.....24-166
- (1) 粒子与流体间的传质.....24-166
- (2) 床层与壁或浸没物体间的传质  
.....24-166
- (3) 相间的传质.....24-167
- 24.6.5 流化床反应器的数学模型  
.....24-168
- (1) 概述.....24-168
- (2) 气泡两相模型.....24-169
- (3) 鼓泡床模型.....24-170
- (4) 气泡集团模型.....24-170
- (5) 四区模型.....24-172
- (6) 自由空间模型.....24-174
- 参考文献.....24-174
- 24.7 气-液相反应器**.....24-176
- 24.7.1 结构型式及其选择.....24-174
- 24.7.2 气-液反应器中的传递过程  
.....24-177
- (1) 鼓泡流型.....24-177
- (2) 分布器的开孔率.....24-177
- (3) 气泡尺寸.....24-178
- (4) 气含率.....24-178
- (5) 比表面积.....24-183
- (6) 传质系数.....24-183
- (7) 扩散系数.....24-188
- (8) 气体的溶解度.....24-188
- (9) 鼓泡液中的传热.....24-190

24.7.3 气-液鼓泡系统的返混与流动模型.....24-194	(4) 数学模型.....24-225
(1) 微分型模型.....24-194	24.8.3 三相流化床.....24-227
(2) 阶梯型模型.....24-196	(1) 起始流化液速.....24-228
(3) 流动模型参数的求得.....24-197	(2) 气泡.....24-228
24.7.4 鼓泡反应器的设计计算.....24-203	(3) 床层的膨胀或收缩.....24-228
24.7.5 气-液相生物化学反应器.....24-210	(4) 各相的存留率.....24-229
(1) 生化反应动力学的特征.....24-210	(5) 压降.....24-229
(2) 氧的传质.....24-211	(6) 分散系数.....24-230
(3) 动量传递.....24-212	(7) 气-液传质系数与给热系数.....24-230
(4) 传热问题.....24-212	24.8.4 浆料反应器.....24-231
(5) 生化反应器的混和与流动型态.....24-212	参考文献.....24-232
参考文献.....24-213	24.9 反应装置的最优化.....24-233
24.8 其它的多相流反应器.....24-215	24.9.1 反应装置的稳定性与参数敏感性.....24-233
24.8.1 液-液相反应器.....24-215	24.9.2 反应装置的最优化.....24-235
(1) 分批操作.....24-215	(1) 微分法.....24-235
(2) 并流连续搅拌釜.....24-216	(2) 拉格朗日乘法.....24-236
(3) 逆流操作的连续搅拌釜系统.....24-216	(3) 迭代法(爬山法).....24-237
(4) 并流塔式操作.....24-216	(4) 线性规划法.....24-237
(5) 逆流塔式操作.....24-218	(5) 变分法.....24-238
(6) 有传质阻力时的情况.....24-218	(6) 动态规划法.....24-238
(7) 液-液相反应器的放大.....24-219	(7) 最大(小)值原理法.....24-239
24.8.2 滴流床(或称涓流床).....24-220	参考文献.....24-241
(1) 宏观动力学.....24-220	24.10 反应技术的开发.....24-243
(2) 流体力学的情况.....24-220	24.10.1 反应技术开发的方法.....24-243
(3) 传质系数.....24-223	24.10.2 技术开发各阶段的任务.....24-245

## 25. 化工自动控制

### 概述

25.1 控制理论基础.....25-2	(1) 环节的微分方程.....25-17
25.1.1 自动控制系统概述.....25-2	(2) 传递函数.....25-21
(1) 控制系统的类型及组成.....25-2	(3) 方块图及其变换.....25-24
(2) 静态和动态.....25-5	(4) 信号流图.....25-27
(3) 品质指标.....25-6	25.1.3 线性连续控制系统.....25-30
(4) 广义对象特性及对调节过程品质的影响.....25-7	(1) 时间特性和频率特性.....25-30
(5) 调节器特性及对调节过程品质的影响.....25-10	(2) 开环特性和闭环特性.....25-34
25.1.2 传递函数及方块图.....25-17	(3) 稳定性和稳定裕量.....25-38
	(4) 多变量系统的分析方法.....25-41
	25.1.4 线性离散控制系统.....25-44
	(1) 采样器及保持器.....25-44
	(2) z 变换及脉冲传递函数.....25-47

(3) 线性离散系统的分析方法 .....25-50	(8) 超声波流量计 .....25-97
25.1.5 非线性控制系统 .....25-53	(9) 激光流量计 .....25-98
(1) 非线性特性 .....25-53	(10) 热式质量流量计 .....25-99
(2) 非线性系统的分析方法 .....25-55	(11) 推导式质量流量计 .....25-99
25.1.6 系统辨识及参数估计 .....25-61	(12) 流量测量仪表的选用 .....25-100
(1) 概述 .....25-61	25.2.4 温度测量仪表 .....25-101
(2) 阶跃响应法 .....25-63	(1) 液体膨胀式温度计 .....25-102
(3) 频率响应法 .....25-65	(2) 固体膨胀式温度计 .....25-102
(4) 频谱分析法 .....25-66	(3) 压力式温度计 .....25-103
(5) 相关函数法 .....25-66	(4) 热电阻温度计 .....25-103
(6) 最小二乘参数估计法 .....25-68	(5) 热电偶温度计 .....25-105
25.1.7 最优控制系统 .....25-70	(6) 高温计 .....25-107
(1) 静态及动态最优化 .....25-70	(7) 温度测量仪表的选用 .....25-108
(2) 目标函数和约束条件 .....25-72	25.2.5 化学成分分析仪表 .....25-108
(3) 确定性系统的最优控制 .....25-73	(1) 热导式气体分析器 .....25-109
(4) 最优状态估计及随机最优控制 .....25-76	(2) 磁导式氧气分析器 .....25-110
(5) 自适应控制系统 .....25-79	(3) 红外线气体分析器 .....25-112
参考书目 .....25-81	(4) 电导式分析器 .....25-113
25.2 化工测量仪表 .....25-82	(5) 工业酸度计 .....25-113
25.2.1 压力测量仪表 .....25-82	(6) 工业色谱分析器 .....25-114
(1) 液柱式压力计 .....25-83	(7) 取样及预处理装置 .....25-115
(2) 弹性式压力计 .....25-84	25.2.6 物性测量仪表 .....25-116
(3) 活塞式压力计 .....25-84	(1) 密度计 .....25-116
(4) 应变片式压力计 .....25-85	(2) 湿度计 .....25-118
(5) 热电式真空计 .....25-85	(3) 粘度计 .....25-119
(6) 压力测量仪表的选用 .....25-86	25.2.7 显示仪表 .....25-120
25.2.2 物位测量仪表 .....25-86	(1) 模拟式显示仪表 .....25-120
(1) 浮力式液位计 .....25-87	(2) 数字式显示仪表 .....25-122
(2) 静压式液位计 .....25-87	(3) 屏幕显示 .....25-123
(3) 电容式液位计 .....25-88	(4) 报警装置 .....25-123
(4) 放射性液位计 .....25-89	(5) 巡回检测 .....25-123
(5) 超声波液位计 .....25-90	参考书目 .....25-123
(6) 液位测量仪表的选用 .....25-91	25.3 调节装置 .....25-125
25.2.3 流量测量仪表 .....25-91	25.3.1 调节仪表分类 .....25-125
(1) 椭圆齿轮流量计 .....25-92	25.3.2 气动调节仪表 .....25-125
(2) 差压式流量计 .....25-93	(1) 气动仪表结构上的特点 .....25-125
(3) 转子流量计 .....25-94	(2) 气动仪表的优点 .....25-128
(4) 靶式流量计 .....25-94	(3) 选用气动仪表时应该考虑的 问题 .....25-129
(5) 旋涡流量计 .....25-95	25.3.3 电动调节仪表 .....25-131
(6) 涡轮流量计 .....25-96	(1) 电动调节仪表之发展 .....25-131
(7) 电磁流量计 .....25-96	(2) 模拟式控制仪表 .....25-132
	(3) 数字式控制仪表 .....25-137

(4) 集散系统.....	25-137	25.5.2 串级调节系统.....	25-193
(5) 使用电动仪表的几个问题 .....	25-141	(1) 串级调节系统的概念.....	25-193
25.3.4 常用的几种国产调节仪表 .....	25-147	(2) 串级调节的特点和适用范围 .....	25-193
(1) 过去分类——基地式和单元组 合式.....	25-147	(3) 串级调节系统的应用.....	25-194
(2) 气动调节器.....	25-147	25.5.3 均匀调节系统.....	25-196
(3) 电动调节器.....	25-151	(1) 均匀调节系统的目的要求 .....	25-196
(4) 变送器.....	25-157	(2) 均匀调节系统的型式.....	25-196
(5) 电-气转换器.....	25-158	25.5.4 比值调节系统.....	25-198
(6) 记录仪.....	25-159	(1) 比值调节系统的常用方案 .....	25-198
(7) 其它.....	25-161	(2) 比值调节系统的实施方案及比 值系数的计算.....	25-199
25.3.5 执行器.....	25-162	25.5.5 多冲量调节系统.....	25-201
(1) 电动执行机构.....	25-162	(1) 双冲量调节系统的作用及应用 .....	25-201
(2) 气动执行机构.....	25-164	(2) 三冲量调节系统的作用及应用 .....	25-203
(3) 调节机构.....	25-165	25.5.6 分程调节系统.....	25-205
(4) 阀门定位器.....	25-169	(1) 分程调节系统的作用.....	25-205
参考书目.....	25-171	(2) 分程调节系统的应用.....	25-206
25.4 计算机控制系统.....	25-172	25.5.7 前馈调节系统.....	25-208
25.4.1 计算机控制系统的发展.....	25-172	(1) 前馈调节的概念.....	25-208
25.4.2 计算机控制系统的若干 功能.....	25-172	(2) 前馈调节系统的结构型式 .....	25-209
25.4.3 计算机控制系统的结构.....	25-176	(3) 前馈调节系统的应用.....	25-212
(1) 计算机.....	25-176	25.5.8 选择性调节系统.....	25-214
(2) 单机结构系统.....	25-177	(1) 选择性调节的概念.....	25-214
(3) 多机结构的目的.....	25-178	(2) 选择性调节系统的类型.....	25-214
(4) 前后连接(串联)系统.....	25-178	(3) 积分饱和及防止措施.....	25-216
(5) 并行(双重)系统.....	25-178	(4) 选择性调节系统的应用.....	25-217
(6) 多处理器系统.....	25-179	25.5.9 带有模拟计算装置的调节系统 .....	25-219
(7) 多计算机系统.....	25-180	25.5.10 预估调节系统.....	25-221
(8) 阶层系统.....	25-180	(1) 预估调节的概念.....	25-221
(9) 输入输出接口.....	25-183	(2) 预估调节系统的应用.....	25-222
参考书目.....	25-185	25.5.11 非线性调节系统.....	25-226
25.5 常用控制系统.....	25-186	(1) 非线性调节的概念.....	25-226
25.5.1 简单调节系统.....	25-186	(2) 非线性调节系统的应用.....	25-227
(1) 被调变量及操作变量的选择 .....	25-186	25.5.12 采样调节系统.....	25-229
(2) 调节规律的选择.....	25-187	(1) 采样调节的概念.....	25-229
(3) 调节阀特性的选择.....	25-188	(2) 采样调节的应用.....	25-229
(4) 调节器参数的工程整定.....	25-190	参考书目.....	25-232
(5) 调节系统的投运.....	25-192		

## 25.6 化工过程的自动控制.....25-233

### 25.6.1 化工过程的动态特性.....25-233

- (1) 动态数学模型的类型.....25-233
- (2) 传热设备的动态特性.....25-234
- (3) 传质设备的动态特性.....25-239
- (4) 化学反应器的动态特性.....25-242

### 25.6.2 确定化工单元控制方案的若干原则.....25-244

### 25.6.3 流体输送设备的控制方案.....25-245

- (1) 泵的自动调节.....25-245
- (2) 离心式压缩机的控制方案.....25-248

### 25.6.4 传热设备的控制方案.....25-251

- (1) 一般传热设备的自动调节方案.....25-251

- (2) 管式加热炉的控制.....25-252
- (3) 锅炉设备的控制.....25-253
- (4) 蒸发器的控制.....25-254

### 25.6.5 干燥器的控制方案.....25-256

### 25.6.6 精馏塔的控制方案.....25-257

- (1) 质量指标的选取.....25-257
- (2) 按精馏段指标的控制方案

.....25-259

- (3) 按提馏段指标的控制方案.....25-260

- (4) 压力控制.....25-261

- (5) 内回流及热焓控制.....25-263

- (6) 解耦控制.....25-265

- (7) 前馈控制与推断控制.....25-266

- (8) 浮动压力控制.....25-267

### 25.6.7 化学反应器的控制方案.....25-268

参考书目 .....25-274

## 26. 化工系统工程

### 概述

### 26.1 基本概念.....26-1

- 26.1.1 系统工程的基本概念.....26-1
- 26.1.2 化工系统工程的基本问题.....26-3
- 26.1.3 化工系统工程的基本方法.....26-6

### 26.2 系统的分析 .....26-9

- 26.2.1 系统分析的图论基础.....26-9
- 26.2.2 化工系统的合成 .....26-20
- 26.2.3 化工系统的分解 .....26-24
- 26.2.4 化工系统的模型及模拟 .....26-33

### 26.3 化工系统最优化问题的数学

#### 模型 .....26-68

- 26.3.1 最优化问题数学模型的基本概念.....26-68
- 26.3.2 系统的数学模型 .....26-71
- 26.3.3 最优化的目标函数 .....26-96
- 26.3.4 最优化问题的约束条件.....26-101

### 26.4 化工系统的最优化方法.....26-104

#### 26.4.1 化工系统最优化的概述.....26-104

#### 26.4.2 化工系统的定态最优化方法.....26-113

#### 26.4.3 化工系统的动态最优化方法.....26-155

#### 26.4.4 大型系统的最优化.....26-197

### 26.5 随机系统的最优化.....26-212

#### 26.5.1 基本概念.....26-212

#### 26.5.2 随机过程的数学模型.....26-215

#### 26.5.3 随机系统的最优化.....26-226

### 26.6 化工系统最优化的灵敏度分析、可靠性和稳定性问题.....26-235

#### 26.6.1 化工系统最优化的灵敏度分析.....26-235

#### 26.6.2 化工系统的可靠性分析.....26-257

#### 26.6.3 化工系统的稳定性问题.....26-265

#### 附录 MKfs制和SI制的换算表



## 24.1 总 述

### 24.1.1 化学反应工程和反应器的设计

化学反应工程是一门研究在生产装置中进行化学反应过程的工程科学，它是把反应的化学特性和装置的传递特性有机地结合起来而形成的学科。其主要任务是：

- (1) 对已有的反应过程进行解析，从而进一步改进或强化这些过程，
- (2) 开发新的反应技术和装备，
- (3) 设计反应器。

为此，从事化学反应工程的工作者除需掌握一般的工艺知识外，还需深入了解：

(1) 化学反应动力学——包括均相的、非均相的，催化的与非催化的。这是对反应转化程度进行定量计算的基础。

(2) 化工传递过程——主要是管式、塔式及釜式反应器中物料的流动、混合、传热和传质规律，包括均相的和多相体系。这是解决放大问题的关键。

(3) 数学方法——包括简单过程的数式化，复杂过程的数学模型化和计算方法。这是从定性上升到定量，从经验升华到科学以及进行模拟研究和实现最优化的必要手段。

反应工程的重点是设计反应器。这包括确定：

- 反应器的选型；
- 适用于生产的工艺条件；
- 实现适宜的反应条件所必需采取的技术措施；
- 反应器的结构及工艺尺寸；
- 必要的控制手段。

国内、外已出版的化学反应工程书籍不少。较通用的列于文献[1~15]中可供查考。

### 24.1.2 化学反应器的基本类别

反应器的基本类型如表1.1所示，应根据化学反应的特性来恰当地选型。

表 1-1 化学反应器的类型与特性

型 式	适用的反应	优 缺 点
搅拌槽，一级或多级串联	液相，液-液相，液-固相，气-液固相	适用性大，操作弹性大，连续操作时温度、浓度容易控制，产品质量均一，但高转化率时，反应器容积大
管式	气相，液相	返混小，所需反应器容积较小，比传热面大，但对慢速反应，管要很长，压降大
空塔或搅拌塔	液相，液-液相	结构简单，返混程度与高/径比及搅拌有关，轴向温差大
鼓泡塔或挡板鼓泡塔	气-液相，气-液-固(催化剂或其它)相	气相返混小，但液相返混大，温度较易调节，气体压降大，流速有限制，有挡板可减少返混