

化工原理

教学指导与内容精要

陈敏恒 潘鹤林 齐鸣斋 编著



化学工业出版社

化工原理

教学指导与内容精要

陈敏恒 潘鹤林 齐晓斋 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

华东理工大学原校长陈敏恒教授多年来坚持为本科生讲授“化工原理”课程，其水平之高、影响之大在当年化工教育界可说是独步一时。由他主编的教材《化工原理》至今仍是各高校化工专业使用教材的首选。

陈敏恒教授孜孜不倦致力于化工原理课程的改革与建设，重视学生的能力培养和学习积极性的调动，对教学内容、教学过程、学生的学习方式都有很深的感悟。近年来，又提出在化工原理的教学中应该着力于帮助学生构筑知识框架的观点。《化工原理教学指导与内容精要》结构与陈敏恒《化工原理》基本一致，全书紧紧围绕“加强学生应用能力方面的培养，适当增强实际工程应用方面知识”的理念，进一步阐释了“以传递过程为主线，面向科学研究，面向工业应用，面向技术经济”的教材编写框架，系统梳理了各章的教学方法指导、教学随笔、教学内容精要。

《化工原理教学指导与内容精要》可作为高等学校化工及相关专业化工原理课程的教学参考书，也可供化工及相关专业部门从事科研、设计和生产的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理教学指导与内容精要/陈敏恒, 潘鹤林, 齐鸣斋
编著. —北京: 化学工业出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-122-29528-6

I. ①化… II. ①陈…②潘…③齐… III. ①化工原理-
高等学校-教学参考资料 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 085488 号

责任编辑: 杜进祥 徐雅妮 丁建华
责任校对: 王 静

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 21 彩插 1 字数 407 千字 2017 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

陈敏恒先生简历



陈敏恒（1933~），教授，浙江诸暨人，化学工程专家，原华东理工大学校长。1953年加入中国共产党。1955年毕业于华东化工学院（今华东理工大学）有机系。历任华东化工学院副教授、教授、化学工程系主任、院长，华东理工大学校长，国务院学位委员会第二届学科评议组成员，中国化学工程学会第一届副理事长。曾出版《化工原理》（第一版~第四版）、《化学反应工程基本原理》、《工业反应器的开发方法》等。

陈敏恒多年来坚持为本科生讲授“化工原理”课程，孜孜不倦致力于化工原理课程的改革与建设，其水平之高、影响之大在当年化工教育界可说是独步一时。由他主编的教材《化工原理》至今仍是各高校化工专业使用教材的首选。



陈敏恒受聘担任顾问教授合影，2005年12月9日



本书作者合影，从左至右，潘鹤林、陈敏恒、齐鸣斋，2017年5月5日

前言

我 1956 年毕业于华东化工学院燃料化学工学专业。至今恰六个十年。

第一个十年是勤奋学习的十年。在从事化工原理教学之余，学习化学反应工程。这十年正是化学反应工程从襁褓到成人的十年，从 1957 年化学反应工程学科（Chemical Reaction Engineering）正式命名，到 1964 年第一本化学反应工程著作问世，我有幸亲历了一门学科建立的全过程。在学习之余，也做些研究，但是，没有什么值得一提的贡献，充其量，只是推动国内反应工程的学习和研究。

第二个十年是受批判的十年。这十年的批判改变了我的业务方向，我放弃了学术的研究，下决心为国家创造财富。

第三个十年是成长的十年。我依靠自己的学术素养做技术开发工作，做了好几个项目，例如，在青岛化工厂做了五年的氯丁二烯开发；受原化工部的委托用了两年时间协助北京燕山石化公司开发丁烯氧化脱氢反应工艺及反应器，并获得国家科技进步二等奖。在实践的基础上，我编写了《化工原理》教材，这本教材后来被评为国家优秀教材；还写了两本小册子《反应工程基本原理》和《工业反应器的开发方法》。我力图改变当时的逐级放大的经验方法，将开发工作置于学科理论和方法论的指导下。

第四个十年是奉献的十年。在十年的校长工作中我完全放弃了正顺利开展的业务工作。对一个无意于官场的“自由主义者”，放弃自己的业务，从事十年之久的行政工作，根本的原因是“奉献”，是在为母校效力。

第五个十年是清算的十年。我用了十年时间，剔骨削肉，为过去的十年作出了交代，也用这十年的时间洗尽了铅华，回归了自己。

第六个十年是重操旧业的十年。我办了个小公司，为企业提供技术服务。最近的十年中为企业建了几套万吨线工业装置，例如，目前国内最先进的香兰素装置、两种不同原料路线的愈创木酚装置，为企业创造了利润，为社会创造着财富。我已是七老八十的高龄，不能再去大海经受惊涛骇浪，也就在湖里追波逐流，颐养晚年了。

20 世纪 80 年代，我在《化工高等教育》杂志上以教学随笔的形式连载了 13 篇文章。前些日华东理工大学化工原理教研组与化学工业出版社商量将这些文章结集出版，征求我的同意。我糊里糊涂地同意了。及至出版社准备付诸实施时，我重看了这些文章，发觉内容实在单薄，自惭形秽，不得不提笔重写。

在重写之时，思考今日的教学与三十年前的教学发生了什么变化，我们的教

学该做哪些调整。

20 世纪 50~60 年代,学习前苏联,大学培养的目标是工程师,化工系培养的是化工厂的工程师,要求他们有足够的知识和技能以适应工厂工作的需要。那时,学生以化工原理课为重头课,课内课外花相当多的时间,为的是胜任未来的工作。当时,师生不厌其烦地在知识和技能(计算)上下工夫。可如今呢?有多少学生在学习时考虑如何适应未来的具体工作的需要?

80 年代,鉴于 Chemical Engineering Science 的长足进步,当时编写的教材学科味重,对化工原理的研究方法给予更多的重视。可如今,化工原理课的学生中有多少未来会从事化工原理的研究工作?他们怎会对这样的内容感兴趣呢?

这是学生学习的主观意愿方面的变化。客观上,实际问题需要很多具体、深入的知识,在课程中是不可能提供的,而在资讯如此发达的今天,完全可以很方便地收集到解决具体问题所需要的资讯。同时,这三十年来,我国在化工设备方面,在单元操作方面,已经有很多专业的设备制造厂,这些厂家的技术人员已经具有相当丰富的知识和经验,与三十年前截然不同,在真要解决具体问题时完全可以请教他们、与他们商量。总之,即便是实际工作,需要的不是有具体知识和技能的人,而是一个“明白人”,能够驾驭问题的人。

鉴于学习的主客观条件发生了如此大的变化,我认为,在化工原理的教学中不可能也不需要求全,应该着力于帮助学生构筑知识框架,以便将来可以用各种知识碎片予以充实和外延。

我一直在考虑,我们在课内孜孜不倦地教给学生的东西,在他们离校时还有多少留在他们的脑海中?如果从这个观点来检验我们的教学,我们会发现我们的教学有多失败。要让这些知识留存在学生的脑海中,就需要在学生学习期间让这些知识“内化”,与他们自己的意识融合,成为他们观察分析事物的观点。

为了达到这个目的,需要做两件事。

一是按这个观点筛选、精简教学内容,尽量避免“节外生枝”。让学生的时间、精力聚焦于建立知识框架。

二是组织好教学内容,分清从属。每个单元操作的内容除工艺目的及其经济性外,不外乎过程的物理化学基础、过程的分析、过程的数学描述、过程的计算。我认为不应当以设计计算为最终目的,而应当以过程分析为中心,让物理化学基础、数学描述和计算(例题和习题)的教学内容为过程分析服务。

我就按这两个观点写了我的新教学随笔、教学方法指导。我所写的就是我希望学生在毕业离校时脑海中能留下的。连同原先的老教学随笔以及教学内容精要汇编成本书。书中可能存在各种疏漏,恳请读者批评指正。

陈敏恒
2017 年 2 月

目 录

绪论

1

0.1 关于教学内容的精选	1
0.2 关于课堂教学的组织	2
0.2.1 吸收操作过程分析	3
0.2.2 过程的数学描述	3
0.2.3 实例分析	4
0.3 关于学生的自主学习	4

第1章 流体流动

6

1.1 教学方法指导	6
1.2 教学随笔	8
1.2.1 流动过程	8
1.2.2 流动阻力问题的研究方法	12
1.3 教学内容精要	16
1.3.1 概述	16
1.3.2 流体静力学	18
1.3.3 流体流动中的守恒原理	19
1.3.4 流体流动的内部结构	22
1.3.5 阻力损失	24
1.3.6 流体输送管路的计算	26
1.3.7 流速和流量的测定	30
1.3.8 非牛顿流体与流动	31

第2章 流体输送机械

33

2.1 教学方法指导	33
2.2 教学随笔	34

2.2.1 流体输送	34
2.2.2 管路对输送机械的要求	34
2.2.3 可调用的工程手段	35
2.2.4 离心泵的工作原理和理论指导	35
2.2.5 离心泵的效率	36
2.3 教学内容精要	37
2.3.1 概述	37
2.3.2 离心泵	37
2.3.3 往复泵	43
2.3.4 其他化工用泵	44
2.3.5 气体输送机械	45

第3章 液体搅拌

50

3.1 教学方法指导	50
3.2 教学随笔	51
3.2.1 液体搅拌	51
3.2.2 混合过程的定性分析	51
3.2.3 搅拌装置的功能	52
3.2.4 搅拌装置的能耗	52
3.2.5 搅拌装置的放大	53
3.3 教学内容精要	53
3.3.1 概述	53
3.3.2 混合机理	55
3.3.3 搅拌器的性能	56
3.3.4 搅拌功率	57
3.3.5 搅拌器的放大	59
3.3.6 其他混合设备	59

第4章 流体通过颗粒层的流动

61

4.1 教学方法指导	61
4.2 教学随笔	63
4.2.1 过程总论	63
4.2.2 理论分析	63

4.2.3 实验检验与修正	65
4.2.4 实际应用	65
4.3 教学内容精要	66
4.3.1 概述	66
4.3.2 颗粒床层的特性	66
4.3.3 流体通过固定床的压降	70
4.3.4 过滤原理及设备	73
4.3.5 过滤过程计算	76
4.3.6 加快过滤速率的途径	82

第5章 颗粒的沉降和流态化

83

5.1 教学方法指导	83
5.2 教学内容精要	85
5.2.1 概述	85
5.2.2 颗粒的沉降运动	85
5.2.3 沉降分离设备	88
5.2.4 固体流态化技术	91
5.2.5 气力输送	94

第6章 传热

95

6.1 教学方法指导	95
6.2 教学随笔	98
6.2.1 传热过程	98
6.2.2 传热过程分析	98
6.2.3 工程处理方法	99
6.2.4 传热基本方程式的推导与应用	100
6.3 教学内容精要	102
6.3.1 概述	102
6.3.2 热传导	103
6.3.3 对流给热	106
6.3.4 沸腾给热与冷凝给热	110
6.3.5 热辐射	114
6.3.6 传热过程的计算	119

6.3.7 换热器	126
-----------------	-----

第7章 蒸发 134

7.1 教学方法指导	134
7.2 教学内容精要	135
7.2.1 概述	135
7.2.2 蒸发设备	136
7.2.3 蒸发辅助设备	139
7.2.4 蒸发操作的经济性和操作方式	139
7.2.5 单效蒸发计算	142
7.2.6 多效蒸发的过程分析	144

第8章 气体吸收 146

8.1 教学方法指导	146
8.2 教学随笔	147
8.2.1 吸收过程	147
8.2.2 完整的工业吸收分离过程	148
8.2.3 吸收分离过程的物理化学原理	148
8.2.4 吸收分离过程的经济性	149
8.2.5 吸收分离过程的工程特征	149
8.3 教学内容精要	150
8.3.1 概述	150
8.3.2 气液相平衡	152
8.3.3 扩散和单相传质	154
8.3.4 相际传质	160
8.3.5 低浓度气体吸收	162
8.3.6 高浓度气体吸收	170
8.3.7 化学吸收	173

第9章 液体精馏 179

9.1 教学方法指导	179
9.2 教学随笔	182

9.2.1	精馏过程	182
9.2.2	精馏过程的相平衡	182
9.2.3	精馏过程中的回流	183
9.2.4	精馏过程的数学描述	184
9.3	教学内容精要	185
9.3.1	蒸馏概述	185
9.3.2	双组分溶液的汽液相平衡	186
9.3.3	平衡蒸馏与简单蒸馏	190
9.3.4	精馏	191
9.3.5	双组分精馏的设计型计算	199
9.3.6	双组分精馏的操作型计算	205
9.3.7	间歇精馏	207
9.3.8	恒沸精馏与萃取精馏	209
9.3.9	多组分精馏基础	210

第 10 章 气液传质设备

217

10.1	教学方法指导	217
10.2	教学随笔	218
10.2.1	气液传质设备	218
10.2.2	设计目标——从需要出发	218
10.2.3	设计原则——从过程规律出发	219
10.2.4	工程因素——从过程分析出发	219
10.2.5	不同的对策	220
10.3	教学内容精要	221
10.3.1	板式塔	221
10.3.2	填料塔	238

第 11 章 液液萃取

246

11.1	教学方法指导	246
11.2	教学随笔	247
11.2.1	萃取过程	247
11.2.2	萃取过程的数学描述	248
11.2.3	工业萃取过程的组织	248

11.2.4 萃取过程动力学与萃取设备	249
11.3 教学内容精要	250
11.3.1 概述	250
11.3.2 液液相平衡	251
11.3.3 萃取过程的计算	256
11.3.4 萃取设备	262
11.3.5 超临界流体萃取和液膜萃取	269

第 12 章 其他传质分离方法

271

12.1 教学方法指导	271
12.1.1 关于结晶	271
12.1.2 关于吸附	272
12.2 教学内容精要	273
12.2.1 结晶	273
12.2.2 吸附分离	279
12.2.3 膜分离	286

第 13 章 热、质同时传递

294

13.1 教学方法指导	294
13.2 教学随笔	295
13.2.1 热、质同时传递过程	295
13.2.2 传递方向可能发生逆转	296
13.2.3 过程的极限	296
13.2.4 过程的计算方法	297
13.3 教学内容精要	297
13.3.1 概述	297
13.3.2 气液直接接触时的传热和传质	298
13.3.3 过程的计算	301

第 14 章 固体干燥

304

14.1 教学方法指导	304
14.2 教学随笔	305

14.2.1	干燥过程	305
14.2.2	水分在气、固两相间的平衡关系	306
14.2.3	湿空气性质	306
14.2.4	干燥过程的数学描述	307
14.3	教学内容精要	307
14.3.1	概述	307
14.3.2	干燥静力学	308
14.3.3	干燥速率与干燥过程计算	312
14.3.4	干燥器	319

绪 论

0.1 关于教学内容的精选

化工原理课程的教学内容,从学科体系上说,应包括化工单元操作、化学反应工程和化工传递过程等三个部分。目前的课程体系,仅局限于各单元操作,反应工程和传递过程都单独设课。在三门课尚未能合并时,化工原理课程的教学应当充分考虑到后两门学科分支的发展,密切与其联系和衔接。从学科的发展历史看,这两门学科分支的发展,曾大大深化了人们对各单元操作的认识,推动了单元操作的发展。例如,返混的概念,起源于反应工程,但其基本观点适用于所有的连续过程,当然也包括单元操作;又如数学模型方法,其产生、发展和成熟,都是近二十年的事,但是,这一方法的基本要素,在化工原理的各个单元操作中,早已应用,只是没有上升到模型方法论的高度贯穿于整个教学过程,这些近代发展的新理论、新概念,理应在化工原理课程的教学内容中有所反映,教育要面向现代化,课程教学内容必须现代化。就化工原理当前教学内容的现代化而言,重要的一点,就是要将近代化学工程学科的发展渗透到各个传统单元操作的教学中去。

现行的化工原理课程教学内容主要围绕各单元操作而展开:每个单元操作又都包括过程和设备两个部分,长期以来,课程教学一直存在着重过程、轻设备的问题。这个问题之所以长期难以解决,根本原因在于教师缺乏生产实际的知识 and 有关流体力学与传递过程的知识,对设备无从进行深入的分析;同时,学生方面也缺乏必要的流体力学基础。虽然,从目前的学科发展水平来说还难以对各种设备均作深入的分析,但是,这并不排斥在教学中选择几个典型的、重要的设备作进一步的分析和讲解,因为这样的分析和讲解是十分必要的,也是可能做到的,如对板式塔等设备,完全可以达到上述的教学要求。

众所周知,各个单元操作都是根据一定的物理或物理化学的原理以达到某个特定的工程目的的。在教学中,要求学生对每个单元操作都应掌握“发展、选择、设计和操作”这四个方面。

所谓“发展”,即是要求学生弄清如何根据某个物理或物理化学原理而发展

成为一个单元操作的。寻本求源，这是教学的核心，也是培养具有创新能力人材的重要一环。就分离操作而言，物性的差异是实现分离的依据，也就是存在可能性，它并非就能直接达到高纯度的分离，也就是可能性与现实性之间，还存在着一定的距离，工程工作者的任务，就在于将可能性变为现实性，“发展”或“开发”的意义，就在于此。同样，颗粒尺寸大小不同，这是颗粒分级的基础，但如何实现清楚的分级？溶解度的差异、挥发度的差异是吸收和精馏过程的基础，但如何实现高纯度的分离？这里就需要工程技术人员调动某种工程手段，以弥合可能性与现实性、弥合过程的内在依据和工程目的之间的间隙。这一点，恰恰就是各单元操作的核心，也是常常在教学中被忽视的。

所谓“选择”，是工程技术人员解决实际问题的必由之路，为了达到或实现某一工程目的，你能否进行过程和设备的合理选择和组合？这是检验人们对各单元操作是否牢固掌握的主要标志。“选择”不是照搬硬套，要“合理”；合理，既意味着科学性，也意味着先进性。

所谓“设计”，这里包含两个方面的含义。一是对已经掌握的过程和设备，能够直接进行设计计算；另一是对并不十分掌握的，则需要通过进行必要的实验，测取有关的设计数据，或进行逐级放大等，因此，除了掌握计算方法外，还需要掌握如何经济有效地组织实验以达到测取设计数据或放大的目的，不同的实验目的，可以通过不同的实验方法予以实现，从这个角度上说，实验是必须以实验的理论予以指导的。

所谓“操作”，这是现场工作人员必备的知识，学生在课内、校内自然难以全面掌握操作知识；但是，在课内、校内应当学会如何根据自己对基本原理的认识而预测操作性能；如何根据基本原理寻找可能出现的各种不正常操作的现象、原因及其可能采取的调节措施。教学过程中应当善于利用操作问题的讨论而检验学生对基本原理掌握的程度以及运用基本原理解决问题的能力。

如何精选课堂教学内容和课外作业内容，我认为，可以尝试从上述的“发展、选择、设计、操作”四个方面着手。

0.2 关于课堂教学的组织

教学内容体系和讲课内容的安排未必相一致。实际上，也只有破除这个“一致性”，才能避免照本宣科式的课堂讲授。如在过程的讲解方面，可以采用如下的程式：

过程分析 → 过程的数学描述 → 实例分析

采用这样的程式，便于体现“定性——定量——应用”三个不同的层次。在过程的分析中，以单元操作的物理或物理化学原理为起点，以工程目的为终点。在分析时，暂时摆脱定量的公式，充分运用思维逻辑和推理，提出问题、讨论问

题、解决问题。这里以吸收的过程分析为例，设计如下的讲解程序。

0.2.1 吸收操作过程分析

——吸收的工程目的：气体混合物的高纯度分离，达到一定纯度的产物或有用物质的回收率；

——吸收所依据的物理化学原理：组分溶解度的差异；

——完整的工业吸收过程：实现高纯度分离的工程手段，把吸收和解吸作为一个整体，介绍各种解吸方法；

——吸收过程的经济性：吸收剂的选择、解吸方法的选择以及基于提高过程经济性而考虑的工业吸收过程的各种变形；

——吸收过程的操作特性和操作参数：温度、压力、吸收剂流量等参数对过程的影响；

——吸收过程的机理：分子扩散和对流传质。

通过上述的过程分析，力图使学生定性地掌握吸收操作全过程，并借此训练学生的思维能力。

0.2.2 过程的数学描述

对任一过程进行数学描述的方法，不外采取控制体、列衡算方程（力平衡方程、热量平衡方程、物料衡算方程）、建立过程的特征方程（本构方程、相平衡方程、传递速率方程），然后联立求解，并将结果整理成便于使用的形式。在讲授时，除介绍上述内容外，着重讲清进行过程的数学描述中所遇到的种种困难以及为了克服这些困难所采用的技巧（包括过程的分解与简化等），借以训练学生的能力。

在化工原理各单元操作中采用了大量的各种工程处理方法，透彻地说清这些处理方法的实质，是课堂教学是否抓住根本的关键所在。工程处理方法的讲解，不外乎包括下列三个方面：

——对过程进行定量描述所遭遇到的困难；

——采用此工程处理方法的基础或前提；

——采用此工程处理方法所欲达到的目的。

例如，引入理论板和板效率的概念，一方面固然是由于板上传质速率问题过于复杂，一时难以弄清，因此，也可以说是出于无奈；另一方面，或者说是更为重要的方面，是为了将过程和设备加以了解。理论板数是纯过程的特征，板效率是设备的特征，这样的分解给予工程实际问题的处理带来极大的方便，使得人们有可能在未确定设备型式之前先进行过程的计算，然后由计算结果确定设备的选型。所以，把塔板上的过程分解成理论板和板效率，是一个巧妙的技巧，是一种科学的工程处理方法。传质单元数和传质单元高度这两个概念的引入也同样是巧