

高等学校“十三五”规划教材

化工原理

廖辉伟 杜怀明 主编



化学工业出版社

高等学校“十三五”规划教材

化工原理

廖辉伟 杜怀明 主编

廖辉伟 西南科技大学

廖辉伟 西南科技大学

李华兰 绵阳师范学院

曾敏平 四川师范大学

黎克忠 重庆三峡学院

廖辉伟 西南科技大学

刘瑾 西南科技大学

杨爱霞 西南科技大学

图书在版编目(CIP)数据

化工原理 / 廖辉伟, 杜怀明主编. — 北京: 化学工业出版社, 2018.10.

ISBN 978-7-132-31820-9

I. ①化… II. ①廖… ②杜… III. ①化工—教材

IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第192328号

责任编辑: 王雪梅

封面设计: 王雪梅

出版发行: 化学工业出版社

地址: 北京市东城区黄城根北街2号

邮编: 100006

电话: 010-63996848

网址: www.cip.com.cn

印刷: 北京印刷厂

定价: 39.00元



化学工业出版社

北京

本书围绕动量、热量和质量三大传递过程的基本原理、基本定律与应用,以传递过程的速率(速度)为重点,从过程衡算、速率和平衡三个方面阐述了化工单元操作的基本原理、计算方法及典型设备,内容包括:流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离和固体流态化、热量传递、蒸馏、气体吸收、蒸发和干燥。

本书各章均编有例题和不同类型的习题,同时对主要设备及原理配置了大量的动画与视频演示,可通过扫描二维码观看。为便于教学,本书还配备了电子教学课件和习题解答,亦可通过扫描二维码获取。

本书可作为高等学校化工类专业及相关专业(如石油、能源化工、制药、生物工程、材料、环境、食品等专业)少课时(70~100学时)化工原理课程的教材;教材中纳入了大量的设计参数、设备设计规范与标准,也可作为科研、设计、过程开发及生产企业技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/廖辉伟,杜怀明主编.—北京:化学工业出版社,2019.10

ISBN 978-7-122-34820-3

I. ①化… II. ①廖…②杜… III. ①化工原理-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第140390号

责任编辑:傅聪智 仇志刚

文字编辑:杨欣欣

责任校对:王素芹

装帧设计:刘丽华

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)

印装:高教社(天津)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张25 $\frac{3}{4}$ 字数675千字 2019年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

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:59.00元

版权所有 违者必究

编写人员名单

主 编：廖辉伟 杜怀明

副主编：刘 瑾 徐慧远 朱学军 李华兰

编写人员（按姓名汉语拼音排序）：

邓秋林	西南科技大学
杜怀明	四川轻化工大学
何 冰	成都师范学院
李 凤	西南科技大学
李鸿波	西南科技大学
李华兰	绵阳师范学院
梁锦平	四川师范大学
梁克忠	重庆三峡学院
廖辉伟	西南科技大学
刘 瑾	西南石油大学
陆爱霞	西南科技大学
任根宽	宜宾学院
时建伟	长江师范学院
吴金婷	西南科技大学
徐慧远	宜宾学院
徐建华	长江师范学院
徐慎颖	宜宾学院
杨 虎	四川轻化工大学
朱学军	攀枝花学院



“化工原理”课程是为化工类专业及相近专业的本科生开设的一门紧密结合工程实际的专业基础课。课程主要介绍化工生产过程中以物理变化为主的单元操作过程及单元设备的基本原理、参数分析和工程计算。

本教材围绕动量、热量和质量三大传递过程的基本原理、基本定律与应用，以传递过程的速率（速度）为重点，从过程衡算、速率和平衡三个方面来阐述单元操作过程及设备。教材内容在遵循先进性、通用性和实用性原则基础上，满足工程教育专业认证要求，符合教育部《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》，注重加强理论基础与工程实际结合，兼顾学科发展，努力培养学生具备解决化工过程复杂问题的专业基础知识、工程素养和创新意识。为此，全书安排绪论、流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离和固体流态化、热量传递、蒸馏、气体吸收、蒸发与干燥等九个章节的学习内容。

在教材的编写中，力求语言精练、表达准确、图表清晰。为了方便教学，使学生能更加清晰、深刻地理解单元操作过程的机理与单元设备的工作原理，本教材配置了大量的动画视频，学生通过手机扫描二维码，便可进入观看，实现在线学习。为便于教学，本教材还配备了电子教学课件和习题解答，可扫描书后二维码，登录化学工业出版社微信公众号获取。

本教材可供化工类专业及相关专业（如石油、应用化学、能源化工、制药、生物工程、材料、环境、食品等专业）学生作为工程专业基础课程教材或教学参考；教材中纳入了大量的设计参数、设备设计规范与标准，也可作为从事科研、设计、过程开发人员及生产企业技术人员的参考书籍。

本教材的编写得到了川渝地区西南科技大学、西南石油大学、四川轻化工大学等11所高校领导及“化工原理”授课教师的鼎力支持，吸收了多位教师丰富的教学经验与成果，使内容安排、阐述方式方法更趋合理，方便学生理解；也得到了北京东方仿真软件技术有限公司及浙江中控科教仪器设备有限公司的积极配合，并提供了部分素材，使教材内容更加生动、形象，更贴近工程实际。在此向以上单位及人员表示由衷感谢！

本教材由西南科技大学廖辉伟、四川轻化工大学杜怀明担任主编，西南石油大学刘瑾、宜宾学院徐慧远、攀枝花学院朱学军、绵阳师范学院李华兰担任副主编。

由于编者水平有限，看待问题、理解问题的角度等因素，书中难免有不妥之处，恳请各位读者海涵并不吝赐教，在此深表感谢！

编者

2019年4月

目录



绪论	1
0.1 “化工原理”课程性质与目标	1
0.1.1 课程的性质	1
0.1.2 课程学习的目标	1
0.2 “化工原理”课程研究对象与特点	2
0.2.1 研究对象——单元操作	2
0.2.2 单元操作的分类	2
0.2.3 单元操作的特点	2
0.3 物理量单位制与量纲	2
0.3.1 单位制	2
0.3.2 物理量的量纲	3
0.4 “化工原理”课程研究的手段与方法	4
0.4.1 研究手段	4
0.4.2 学习与处理问题的方法	6
第1章 流体流动	8
1.1 流体静力学	8
1.1.1 密度	8
1.1.2 流体的静压强	10
1.1.3 流体静力学基本方程式	11
1.2 流体动力学	16
1.2.1 流量与流速	16
1.2.2 连续性方程	17
1.2.3 柏努利方程	18
1.3 流体流动现象	28
1.3.1 流体的黏度	28
1.3.2 流体的流动类型与雷诺数	30
1.3.3 流体在圆管内的速度分布	31
1.3.4 边界层	33
1.4 流体流动阻力	34
1.4.1 流体在直管中的流动阻力	34
1.4.2 局部阻力	40
1.4.3 流体在管路中的总能量损失	43
1.5 管路计算	44
1.5.1 简单管路	44
1.5.2 复杂管路	47
1.6 流速与流量测量	49
1.6.1 皮托测速计	50
1.6.2 文丘里流量计	51
1.6.3 孔板流量计	52
1.6.4 转子流量计	52
习题	54
第2章 流体输送机械	60
2.1 概述	60
2.2 离心泵	61
2.2.1 离心泵的基本结构	61
2.2.2 离心泵的工作原理	63
2.2.3 离心泵的主要性能参数	64
2.2.4 离心泵的特性曲线	65
2.2.5 离心泵的管路特性曲线与 工作点	67
2.2.6 离心泵的安装高度	71
2.2.7 离心泵的类型和选用及安装	

操作.....	74	2.3.5 螺杆泵.....	82
2.3 其他类型液体输送机械.....	76	2.4 气体输送机械.....	84
2.3.1 往复泵.....	76	2.4.1 真空泵.....	84
2.3.2 计量泵.....	78	2.4.2 压缩机.....	86
2.3.3 隔膜泵.....	80	习题	88
2.3.4 齿轮泵.....	81		

第3章 非均相物系的分离和固体流态化 92

3.1 概述.....	92	3.4.6 过滤常数的测定	121
3.2 颗粒及颗粒床层的特性.....	92	3.4.7 滤饼的洗涤	122
3.2.1 单个颗粒的性质.....	92	3.4.8 过滤机及其生产能力	122
3.2.2 混合颗粒的特性.....	93	3.5 离心过滤	129
3.2.3 颗粒床层的特性.....	94	3.5.1 基本概念	129
3.2.4 流体通过床层流动的压降.....	95	3.5.2 离心过滤计算	130
3.3 沉降.....	96	3.5.3 离心过滤设备	130
3.3.1 重力沉降.....	96	3.6 固体流态化	132
3.3.2 重力沉降设备	101	3.6.1 床层的流态化过程	132
3.3.3 离心沉降	104	3.6.2 流化床类似液体的特性	133
3.3.4 离心沉降设备	105	3.6.3 流体通过流化床的阻力	133
3.4 过滤	112	3.6.4 流化床的流化类型与不正常 现象	134
3.4.1 过滤的基本概念	112	3.6.5 流化床的操作范围	135
3.4.2 过滤过程的物料衡算	113	3.6.6 流化床的高度与直径	137
3.4.3 过滤基本方程式	114	3.6.7 气力输送的一般概念	138
3.4.4 恒压过滤	117	3.6.8 气力输送的类型	138
3.4.5 恒速过滤与先恒速后恒压 过滤	119	习题.....	140

第4章 热量传递 145

4.1 概述	145	4.2.3 热导率	150
4.1.1 传热的三种基本方式	145	4.2.4 平壁的热传导	151
4.1.2 传热过程中冷、热流体的接触 方式	146	4.2.5 圆筒壁的定态热传导	153
4.1.3 热源、冷源及其选择	147	4.3 对流传热	155
4.1.4 间壁式换热器的传热过程	148	4.3.1 对流传热过程分析	156
4.2 热传导	149	4.3.2 对流传热速率方程	156
4.2.1 有关热传导的基本概念	149	4.3.3 影响对流传热系数的因素	157
4.2.2 傅里叶定律	150	4.3.4 对流传热系数关联式的 建立	158

4.3.5 无相变时的对流传热系数 ...	159	4.5.2 辐射能力和辐射基本定律 ...	181
4.3.6 冷凝时的对流传热系数	162	4.5.3 两固体间的相互辐射	182
4.3.7 沸腾时的对流传热系数	164	4.6 换热器	185
4.4 传热过程的计算	165	4.6.1 蓄热式换热器	185
4.4.1 热量衡算	165	4.6.2 间壁式换热器	186
4.4.2 总传热速率方程与热阻	166	4.6.3 列管式换热器的设计和 选用	192
4.4.3 平均温差的计算	169	4.6.4 传热过程的强化措施	194
4.4.4 传热面积的计算	175	习题	195
4.5 热辐射	180		
4.5.1 基本概念	180		
第5章 蒸馏	201		
5.1 概述	201	5.5.4 精馏塔的温度分布与 灵敏板	230
5.1.1 蒸馏分离的依据	201	5.6 其他类型的连续精馏和精馏塔 ...	230
5.1.2 蒸馏操作的分类	202	5.6.1 直接蒸汽加热的精馏塔	230
5.2 双组分溶液的气、液两相平衡 ...	203	5.6.2 回收塔	231
5.2.1 相平衡条件和物系的 自由度	203	5.6.3 多股加料的精馏塔	232
5.2.2 拉乌尔 (Raoult) 定律	204	5.6.4 侧线采出的精馏塔	234
5.2.3 气、液两相平衡关系表达 形式	205	5.7 间歇精馏过程	234
5.3 简单蒸馏与平衡蒸馏	207	5.7.1 馏出液组成保持恒定的间歇 精馏	235
5.3.1 简单蒸馏	207	5.7.2 回流比保持恒定的间歇 精馏	237
5.3.2 平衡蒸馏	208	5.8 特殊精馏	240
5.4 精馏	210	5.8.1 萃取精馏	240
5.4.1 精馏流程与原理	210	5.8.2 共沸精馏	242
5.4.2 理论板假设和板效率	211	5.8.3 反应精馏	244
5.4.3 恒摩尔流假设	212	5.9 板式塔	246
5.4.4 加料板与加料热状况	213	5.9.1 板式塔的类型	247
5.5 双组分连续精馏塔的计算	214	5.9.2 板式塔的流体力学性能	250
5.5.1 物料衡算与操作线方程	214	5.9.3 筛板塔的设计	259
5.5.2 双组分精馏塔的设计型 计算	218	5.9.4 板效率	263
5.5.3 双组分精馏塔的操作型分析与 计算	226	习题	265

第 6 章 气体吸收 272

6.1 吸收基本概念 273	6.4.2 吸收过程的总传质速率 方程 290
6.1.1 相组成表示法 273	6.5 吸收塔的计算 295
6.1.2 气体吸收的分类 275	6.5.1 物料衡算和操作线方程 296
6.1.3 吸收剂的选择原则 276	6.5.2 吸收剂用量与最小液气比 ... 297
6.2 气、液相平衡关系与亨利定律 ... 276	6.5.3 吸收塔塔径的计算 299
6.2.1 气、液相平衡关系 277	6.5.4 吸收塔填料层高度的计算 ... 300
6.2.2 亨利定律 278	6.5.5 吸收塔的设计型计算 306
6.2.3 相平衡关系在吸收过程中的 应用 280	6.5.6 强化吸收过程的措施 307
6.3 单相传质 281	6.6 填料塔 309
6.3.1 分子扩散 281	6.6.1 填料与类型 310
6.3.2 分子扩散系数 285	6.6.2 填料塔的流体力学性能与操作 特性 314
6.3.3 单相对流传质机理 287	6.6.3 填料塔的内件 317
6.4 相际对流传质及总传质速率 方程 288	习题 319
6.4.1 相际间的对流传质过程 288	

第 7 章 蒸发 325

7.1 概述 325	7.3.1 多效蒸发流程 332
7.1.1 蒸发操作及其在工业中的 应用 325	7.3.2 多效蒸发的计算 333
7.1.2 蒸发操作的特点 326	7.3.3 蒸汽的经济性与效数选择 ... 338
7.1.3 蒸发操作的分类 326	7.4 蒸发器 339
7.2 单效蒸发与真空蒸发 327	7.4.1 循环型蒸发器 339
7.2.1 单效蒸发设计计算 327	7.4.2 单程型蒸发器 342
7.2.2 蒸发器的生产能力与生产 强度 331	7.4.3 蒸发器的选型与附件 345
7.3 多效蒸发 332	7.4.4 蒸发过程的强化 347
	习题 348

第 8 章 干燥 351

8.1 概述 351	8.2.1 湿空气的性质 352
8.1.1 物料的去湿方法 351	8.2.2 湿空气的湿度图及其应用 ... 358
8.1.2 干燥过程的分类 351	8.3 干燥过程的物料衡算与热量 衡算 359
8.1.3 对流干燥 352	8.3.1 湿物料中的含水量 359
8.2 湿空气的性质与湿度图 352	

8.3.2 干燥过程的物料衡算	360	间 τ	365
8.3.3 干燥系统热量衡算与热效率	361	8.5 干燥器	367
8.4 干燥速率与干燥时间	362	8.5.1 干燥器的基本要求	367
8.4.1 恒定干燥条件下的干燥速率	363	8.5.2 干燥器的分类	368
8.4.2 恒定干燥条件下干燥时		8.5.3 常用的对流式干燥器	369

附录 380

附录 1 常见物理量的单位和量纲 ...	380	附录 10 壁面污垢热阻 (污垢系数)	390
附录 2 某些气体的重要物理性质 ...	383	附录 11 液体与气体黏度共线图 ...	391
附录 3 某些液体的重要物理性质 ...	384	附录 12 气体热导率共线图 (101.3 kPa)	394
附录 4 干空气的物理性质 (101.3MPa)	385	附录 13 液体比热容共线图	394
附录 5 水的物理性质	385	附录 14 离心泵规格 (摘录)	396
附录 6 饱和水蒸气表	386	附录 15 4-72 型离心通风机规格 (摘录)	399
附录 7 某些液体的热导率	388	附录 16 管壳式换热器总传热系数 K 的推荐值	400
附录 8 某些固体材料的热导率	389		
附录 9 常用固体材料的密度和比热容	390		

参考文献 402

电子教学课件和习题解答获取方式 402

主要设备及原理素材资源 (建议在 wifi 环境下扫码观看)

柏努利方程的推导及物理意义	18	汽蚀和气缚现象	71
各种阀门工作原理示意 (1)	42	多级离心泵工作原理	74
各种阀门工作原理示意 (2)	42	单动往复泵工作原理	76
测速计工作原理	50	双动及三动往复泵工作原理与流量曲线	76
文丘里流量计工作原理	51	隔膜泵工作原理	80
孔板流量计工作原理	52	齿轮泵工作原理	81
转子流量计	53	螺杆泵工作原理	82
转子流量计工作原理	53	水环式真空泵工作原理	85
离心泵结构与部件	61	蒸汽喷射泵工作原理	86
叶轮样式与结构	62	降尘室工作原理	101
离心泵工作原理	63		

旋风分离器工作原理.....	106	共沸精馏流程实例.....	242
滤板和滤框.....	123	板式精馏塔.....	247
板框压滤机工作状态.....	123	板式精馏塔工作原理.....	247
叶滤机的构造.....	126	筛板结构.....	249
回转真空过滤机.....	127	吸收与解吸流程.....	273
三足式离心机结构.....	131	填料塔.....	310
卧式刮刀卸料离心机原理.....	131	典型填料.....	311
真空吸引式稀相输送.....	139	单效真空蒸发流程.....	325
低压压送式稀相输送.....	139	并流加料蒸发流程.....	332
蓄热室原理.....	146	逆流加料蒸发流程.....	333
套管式换热器.....	147	平流加料蒸发流程.....	333
列管式换热器.....	147	中央循环管式蒸发器.....	340
逆流传热的温度变化曲线.....	170	外加热式蒸发器.....	341
并流传热的温度变化曲线.....	170	强制循环式蒸发器.....	342
夹套式换热器.....	186	升膜蒸发器.....	343
固定管板式换热器.....	188	降膜蒸发器.....	344
具有补偿圈的换热器.....	188	气流干燥器.....	369
浮头式换热器.....	189	喷雾器结构.....	371
U形管换热器.....	189	喷雾干燥器.....	371
螺旋板式换热器.....	190	流化床干燥器.....	373
简单蒸馏.....	202	单滚筒干燥机.....	374
平衡蒸馏.....	202	双滚筒干燥机.....	374
萃取精馏流程实例.....	241		

绪论

0.1 “化工原理”课程性质与目标

0.1.1 课程的性质

“化工原理”课程是面向工程类专业本科学生开设的一门重要的专业基础课程，是高等数学、物理、物理化学等课程的后继课程。它综合以前所学基础知识解决具体实际工程问题，是一门专业技术课程，在大学教学环节中起到了自然学科向应用学科过渡的桥梁作用，属于工程学科，具有工程性、应用性。作为综合性技术学科的一个重要组成部分，“化工原理”课程主要研究化工生产中各单元操作的基本原理、所用的典型设备结构、工艺尺寸设计和设备的选型等共性问题。作为该课程的教材，本书主要按照流体输送、非均相物系分离、传热、蒸馏、吸收、蒸发、干燥等单元操作来安排章节内容。“化工原理”课程是一门实践性很强的工程学科，在长期的发展过程中形成两种基本研究方法，即实验研究方法（经验法）与数学模型法（半经验半理论方法）。本书所述内容，亦涵盖了这两种研究方法的成果。

0.1.2 课程学习的目标

“化工原理”课程的目标是通过组织教学，使学生研究与掌握化工单元操作过程的基本原理，并能进行过程的选择与分析强化过程的途径；能够针对具体的单元操作进行设备工艺尺寸的计算及设备的选型设计；能够根据生产的不同要求进行操作和调节，并具有一定寻找故障原因及排除故障的能力。

“化工原理”是以三个传递过程——“动量传递”“热量传递”“质量传递”为研究内容。质量传递、热量传递建立在动量传递的基础上。三个传递过程都存在着边界层，边界层中又存在速度梯度、温度梯度、浓度梯度。边界层是阻力所在，消除和减弱边界层特别是层流层的影响，可以提高动量传递、热量传递和质量传递的速率和效率。传递的过程是消除不平衡而达到平衡，平衡（能量平衡、物料平衡、气液平衡、溶解结晶平衡、吸附平衡等）观念贯穿课程始终。过程强化就是提高过程速率，是从提高过程驱动力（速度差、温度差和浓度差）和降低过程阻力两方面实现的。设备的选型是在基于原理的基础上，考虑不同实际过程，以提高速率、效率及经济性为目的而做出选择。“化工原理”课程通过对每一个单元操作主要原理的讲解，启发学生掌握每个单元操作的主要公式，通过分析公式中每个物性参数的意义，让学生思考如果一个参数发生变化，将会导致相关的其他参数发生何种变化及变化的途径与方

向。通过该课程的学习，培养学生分析和解决化工生产单元操作中各种复杂问题的能力，即在科学研究和生产实践中对设备应具有操作管理、设计、强化与过程开发的本领。

0.2 “化工原理”课程研究对象与特点

0.2.1 研究对象——单元操作

任何一种化工产品的生产一般都包括三个步骤：首先要对所选择的生产原料进行预处理，以达到化学反应与产品质量指标的要求；然后将处理合格的原料转移至反应系统中进行化学反应并维持反应的条件，比如温度、压强、进料速率等；最后对产物进行分离提纯。中间步骤即化学反应，是物理化学、无机化学、有机化学、化学反应工程等课程的学习内容。而第一与第三步骤有一个共同的特点，即均为物理性操作。这两个步骤没有（或忽略）化学反应发生，物质在这两个步骤中仅发生了聚集状态、组成、温度、压强等物理参数的变化。这两个步骤中包含的各个环节就叫作单元操作，包括流体输送、加热（或冷却）、蒸馏（或精馏）、吸收、蒸发、干燥等。可见化工产品的生产过程就是由化学反应与若干个串联或并联的单元操作所构成。单元操作的研究包括“过程”和“设备”两个方面的内容，故单元操作又称为化工过程和装备。

“化工原理”课程的研究对象就是各种单元操作。在化工产品的生产过程中，一般会同时存在数个单元操作。这些串联或并联的单位操作之间会相互制约与影响，这样就会使得研究对象非常复杂。对于本科阶段的学生来说，只学习研究各个独立的单元操作。

0.2.2 单元操作的分类

根据单元操作所遵循的基本规律，可将其分为以下三类。

- (1) 动量传递 包括物料的加压、减压和输送，物料的混合，非均相混合物的分离（沉降、过滤），固体流态化等。
- (2) 热量传递 包括传热、冷凝、蒸发等。
- (3) 质量传递 包括蒸馏、吸收、萃取、结晶、干燥等。

0.2.3 单元操作的特点

- ① 均为物理性操作，即只改变物料的状态或物性，并不改变化学性质。
- ② 它们都是化工生产过程中共有的操作，但不同的化工过程中所包含的单元操作数目、名称与排列顺序各异。
- ③ 对同样的工程目的，可采用不同的单元操作来实现。
- ④ 某单元操作用于不同的化工过程，其基本原理并无不同，进行该操作的设备也往往是通用的。具体应用时也要结合各化工过程的特点来考虑，如原材料与产品的理化性质，生产规模等。

0.3 物理量单位制与量纲

0.3.1 单位制

物理量的单位制有厘米-克-秒（CGS）单位制、工程单位制及国际单位制（SI），在不

同的单位体制中规定了不同的基本物理量与基本单位。所谓基本物理量就是研究时为了方便而选定的几个独立的物理量（如长度、时间等）；基本单位就是这些选定的基本物理量的单位。而其他相关的物理量就是导出量，其单位称为导出单位，均由基本单位相乘、除而构成。本教材附录 1 中给出了常见物理量的单位及在不同单位制之间的换算。

CGS 单位制规定了三个基本物理量及基本单位，有长度（单位为 cm）、质量（单位为 g）与时间（单位为 s）。工程单位制也规定了三个基本物理量及基本单位，有长度（单位为 m）、力（单位为 kgf）与时间（单位为 s）。教材普遍使用的单位制是国际单位制（SI）。

SI 有 7 个基本物理量：长度 l ，单位为米（m）；质量 m ，单位为千克（kg）；时间 t ，单位为秒（s）；热力学温度 T ，单位为开尔文（K）；物质的量 n ，单位为摩尔（mol）；电流 I ，单位为安培（A）；发光强度 I_v ，单位为坎德拉（cd）。

SI 有以下主要优点：

- ① 通用性 是一套完整的单位制，适合于各个领域。
- ② 一贯性 数值方程式与相应的量方程式有完全相同的形式。

0.3.2 物理量的量纲

物理量的量纲旧称因次。物理学的研究可以定量地描述各种物理现象，描述中所采用的各类物理量之间有着密切的联系，即它们之间具有确定的函数关系。为了准确地描述这些关系，物理量可分为基本量和导出量，一切导出量均可从基本量中导出，由此建立了所有物理量之间的函数关系，这种关系通常称为量制。以给定量制中基本物理量量纲的幂的乘积表示某物理量量纲的表达式，称为量纲式或量纲积。SI 的 7 个基本物理量长度、质量、时间、热力学温度、物质的量、电流、发光强度的量纲为 L、M、T、 Θ 、N、I、J。物理量 Q 的量纲可以用量纲积 $\dim Q$ 表示。量纲是物理学中的一个重要概念：可以定性地表示出导出量与基本量之间的关系；可以有效地进行单位换算；可以检查物理公式是否正确；可以推知某些物理规律。本教材附录 1 中给出了常见物理量的量纲表示方法。

除基本物理量以外的物理量的量纲，需要根据物理量方程（物理量的定义）进行推导。比如描述流体性质之一的物理量 [动力] 黏度，其定义为

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}}$$

式中， τ 为单位面积上受到的内摩擦力，Pa。内摩擦力不是基本物理量，根据力的定义，为质量与加速度的乘积；加速度也不是基本量，其定义为单位时间内产生的速度差；速度同样不是基本量，其定义为距离（长度）与时间之比。则 τ 的量纲为

$$\dim \tau = \frac{M \frac{(L/T)}{T}}{L^2} = ML^{-1}T^{-2}$$

[动力] 黏度定义中， du/dy 为速度梯度，即垂直于速度方向的单位距离（长度）的速度差，其量纲为

$$\dim \frac{du}{dy} = \frac{(L/T)}{L} = T^{-1}$$

那么，[动力] 黏度的量纲为

$$\dim \mu = \frac{ML^{-1}T^{-2}}{T^{-1}} = ML^{-1}T^{-1}$$

所有量纲指数都等于零的量，其量纲为 1，也常被称为无量纲量。通过物理量之间的一定组合，使一个物理量的量纲积内基本物理量的量纲指数均为零，这样的物理量称为特征数或无量纲数群。特征数是量纲为 1 的量。例如描述流体流道的直径 (d) 与流体黏度 (μ)、密度 (ρ)、速度 (u) 之间的关系的特征数——雷诺数 Re 的定义式为

$$Re = \frac{du\rho}{\mu}$$

其量纲为

$$\dim Re = \dim \frac{du\rho}{\mu} = \frac{L \times LT^{-1} \times ML^{-3}}{ML^{-1}T^{-1}} = M^0 L^0 T^0 = 1$$

0.4 “化工原理”课程研究的手段与方法

0.4.1 研究手段

(1) 物料衡算 物料衡算就是对各单元操作设备中各物料量的变化关系开展计算。在单元操作过程与设备系统中，各组分物料量遵循质量守恒定律。输入系统的物料质量等于从系统输出的物料质量和系统中积累的物料质量。

$$\Sigma F_1 = \Sigma F_0 + F_A$$

式中 F_1 ——进入衡算系统的物料，kg/s；

F_0 ——离开衡算系统的物料，kg/s；

F_A ——停留在衡算系统中的物料，kg/s。

对于衡算的系统，需要根据衡算对象、范围等具体问题来确定，可以是整个生产过程，也可以是某一具体设备。衡算的对象，需要根据研究的目的与内容来确定，可以是选定系统中的所有物料，也可以是具体的某一组分。

化工过程的操作方式可分为间歇操作和连续操作。间歇操作显然是一种时变（或非定态）的操作方式。连续操作传统地视作是一种非时变（或定态）操作，但这只是一种简化的或不得已的处理方法，因为几乎所有的连续过程在严格意义上都不是定态的：过程不可避免地会有扰动，原料状态可能出现变化，催化剂会失活，热交换器会结垢等。即使经过计算机控制，过程的状态还是不断地变化。特别是，实施先进过程控制的结果必然会不断地使原先并非优化的操作向优化的操作状态过渡，连续过程的非定态性质显而易见。通常意义下的定态只是相对的、简化后的或虚拟的，所以称作拟定态更为确切。定态实际上只是非定态的一个特例。

对于定态过程，积累为零，则

$$\Sigma F_1 = \Sigma F_0$$

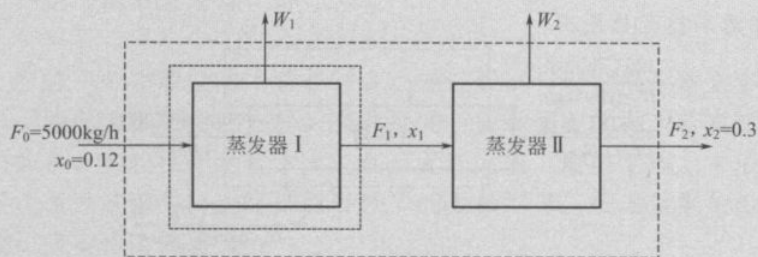
物料衡算步骤：①绘制物流图；②确定衡算对象；③确定衡算基准；④列衡算方程。

【例 0-1】 在两个蒸发器中，每小时将 5000kg 的无机盐水溶液从 12%（质量分数）浓缩到 30%。第二蒸发器比第一蒸发器多蒸出 5% 的水分。试求：

(1) 各蒸发器每小时蒸出水分的量；

(2) 第一蒸发器送出的溶液浓度。

解：首先画一个简易的流程图表示进行的过程，用方框表示设备，输入输出设备的物流方向用箭头表示，然后划定衡算的范围。为求各蒸发器蒸发的水量，以整个流程为衡算范围，用一圈封闭的虚线画出。



例 0-1 附图

F —总物料量； W —蒸发的水量； x —无机盐质量分数

然后选择衡算基准（连续操作以单位时间为基准，间歇操作以一批操作为基准），由于是连续操作，以 1h 为基准。其后确定衡算对象。此题中有两个未知数——蒸发的水量及送出的无机盐溶液量，因此，以不同衡算对象分别对总物料和无机盐列出两个衡算式。

$$F_0 = F_2 + W_1 + W_2 \quad F_0 x_0 = F_2 x_2$$

由题意知

$$W_2 = 1.05W_1$$

解得

$$W_1 = 1463.4 \text{ kg/h} \quad W_2 = 1536.6 \text{ kg/h}$$

求第一个蒸发器送出的溶液浓度，选择第一个蒸发器为衡算范围，分别对无机盐溶液及总物料进行衡算。

$$F_0 x_0 = F_1 x_1 \quad F_0 = W_1 + F_1$$

代入已知数据，解得

$$F_1 = 3536.6 \text{ kg/h}, \quad x_1 = 0.1697 = 16.97\%$$

(2) 能量衡算 能量的形式多种多样，“化工原理”课程所涉及的主要是热量。根据能量守恒和转换定律，任何时间内输入系统的总热量等于系统输出的总热量与损失的热量之和，即

$$\sum Q_1 = \sum Q_0 + Q_L$$

式中 $\sum Q_1$ ——输入系统的总热量，kJ；

$\sum Q_0$ ——系统输出的总热量，kJ；

Q_L ——损失的热量，kJ。

或写成

$$\sum H_1 = \sum H_0 + Q_L$$

式中 $\sum H_1$ ——随物流输入系统的焓，kJ；

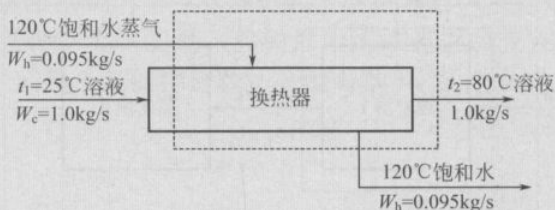
$\sum H_0$ ——随物流带出系统的焓，kJ。

热量衡算的基本方法与物料衡算的方法相同，也必须首先划定衡算范围及衡算基准。热量衡算步骤及要点：①物流图（标明温度、比热容）；②确定衡算体系；③确定衡算基准；④确定衡算物料；⑤确定基准温度（焓值：相对值）；⑥列衡算方程；⑦注意热损失。

此外应注意焓是相对值，因此必须指明基准温度，习惯上选 0°C 为基准温度，并规定 0°C 时液态的焓值为零。

【例 0-2】 在换热器里将平均比热容 (c_{pc}) 为 $3.56 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 的某溶液自 25°C 加热到 80°C ，溶液流量为 1.0 kg/s ，加热介质为 120°C 的饱和水蒸气，其消耗量为 0.095 kg/s ，然后水蒸气冷凝成同温度的饱和水排出。试计算此换热器的热损失占水蒸气所提供热量的百分数。

解：根据题意画出流程图



例 0-2 附图

选定衡算基准，根据题意，确定衡算基准为单位时间（s，秒），在图中虚线范围内作热量衡算。利用附录 6 采用内插法得到 120°C 饱和水蒸气的焓值 H_{h1} 为 2708.9 kJ/kg，从附录 5 中查得 120°C 饱和水的焓值 H_{h2} 为 503.67 kJ/kg。在此系统中输入的总热量 $\sum Q_1$ 、水蒸气带入的热量 Q_1 、溶液带入的热量 Q_2 分别为

$$Q_1 = W_h H_{h1} = 0.095 \times 2708.9 = 257.3 \text{ (kW)}$$

$$Q_2 = W_c c_{pc} (t_1 - 0) = 1.0 \times 3.56 \times (25 - 0) = 89 \text{ (kW)}$$

$$\sum Q_1 = Q_1 + Q_2 = 257.3 + 89 = 346.3 \text{ (kW)}$$

饱和水带出的热量 Q_3 、溶液带出的热量 Q_4 分别为

$$Q_3 = W_h H_{h2} = 0.095 \times 503.67 = 47.8 \text{ (kW)}$$

$$Q_4 = W_c c_{pc} (t_2 - 0) = 1.0 \times 3.56 \times (80 - 0) = 284.8 \text{ (kW)}$$

因此，输出的总热量 $\sum Q_0$

$$\sum Q_0 = Q_3 + Q_4 = 47.8 + 284.8 = 332.6 \text{ (kW)}$$

根据能量衡算式，有

$$\sum Q_1 = \sum Q_0 + Q_L$$

$$Q_L = \sum Q_1 - \sum Q_0 = 346.3 - 332.6 = 13.7 \text{ (kW)}$$

则热量损失的百分数为

$$\frac{Q_L}{Q_1 - Q_3} = \frac{13.7}{257.3 - 47.8} = 6.54\%$$

0.4.2 学习与处理问题的方法

物料衡算、能量衡算、过程的平衡关系、过程速率和经济核算五个基本概念贯穿于各个单元操作的始终。化工过程计算可分为设计型计算和操作型计算两类，处理方法各有特点，但是不管何种计算都是以质量守恒、能量守恒、平衡关系和速率关系为基础的。物料衡算、能量衡算前面已详细介绍，平衡关系（equilibrium relation）可以用来判断过程能否进行，以及进行的方向和能达到的限度。过程的传递速率（rate of transfer process）与推动力成正比，与阻力（resistance）成反比，如同电学中的欧姆定律。为生产定量的某种产品所需要的设备，根据设备的形式和材料的不同，可以有若干设计方案。对同一台设备，所选用的操作参数不同，会影响到设备成本与操作费用。因此，要用经济核算确定最经济的设计方案。

(1) 量纲分析法 量纲分析又称因次分析法，其基础是量纲一致性原则和白金汉（Buckingham）定理（ π 定理）。量纲一致性的原理表明：凡是根据基本物理规律导出的物理方程，其等式左右两边的量纲必然相同。根据白金汉定理，对于任何物理现象或过程，如果存在 n 个变量互为函数关系，而这些变量含有 m 个基本量，可把这 n 个变量转换成为有