

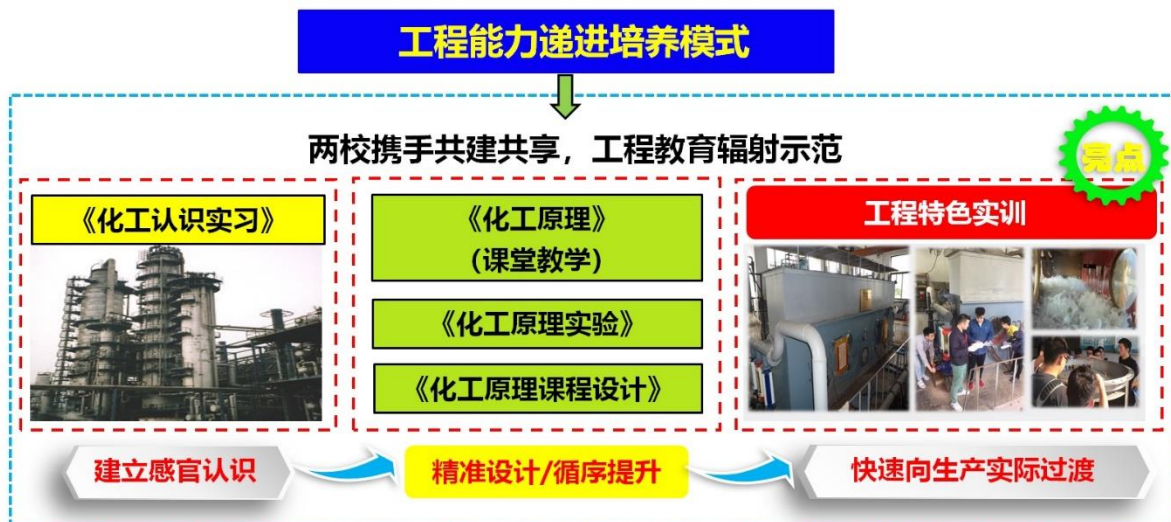
六、课程体系改革成果

1. 拓展更新课程体系结构



《化工原理》作为化工学科最核心的专业基础课，工程特色鲜明，是理论联系生产的桥梁。原有《化工原理》课程体系通常只包括《化工原理》、《化工原理实验》和《化工原理课程设计》（分别独立设课）。在课堂教学之前，学生尚未对现场装置建立感官认识，课堂工程资源匮乏，不易展示工程案例和设备教学；而在实验和设计环节中，设计型、研究型与综合性实践教学比例偏低，与实际生产脱节，学生也缺乏主动思考、综合判断的工程能力培训体系。原有课程体系难以适应能源工程的发展和转型。

因此，本课程体系需要融入新的教学环节。其中，《化工认识实习》开设于《化工原理》之前，会让学生对现场生产有广泛了解。我们可以利用这门课的特点为《化工原理》进行必要铺垫，特别是根据《化工原理》知识模块精准设计构思《化工认识实习》内容，使之更好地为讲授单元过程原理和设备知识服务。同时，工程特色教学是由理论向生产过渡的“捷径”。传统《化工原理》实验和课程设计仅针对具体单元操作，而工业生产则至少将几个甚至十几个单元过程集成。进一步开展大型综合工程实验和工业仿真，可以向学生提供面向企业的工程实践途径，同时还能拓展学生的专业视野、培养科研创新精神，使之快速适应石油加工、煤化工、天然气化工等能源工业需求。



2. 新教学知识体系建设成果

(1) 科研成果转化为教学知识模块



建校初期，曹本熹院士、沈复教授、时铭显院士开创本课程的同时开发了引领行业的过程强化技术，并成为现代分离技术的奠基人；新一代领军人物卢春喜教授、刘艳升教授解决了工业上诸多“卡脖子”问题，实现技术的良好传承。



目前，团队拥有催化裂化、流态化、精馏及塔设备知名专家，积累了丰富工程经验，获得 2 项国家奖、33 项省部级奖，创新成果在国内 182 套工业装置成功应用，经济效益累计 156.86 亿元，这些科研成果已经成功转化为教学知识模块。其中，卢春喜教授和刘梦溪教授开发的气固分离过程强化技术，已成功的在国内不同规模的 127 套催化裂化工业装置获得应用，累计经济效益 133.5 亿元，获得了国家科技进步二等奖和教育 部科技进步二等奖。这部分成果转化为中气固分离和流态化章节内容。

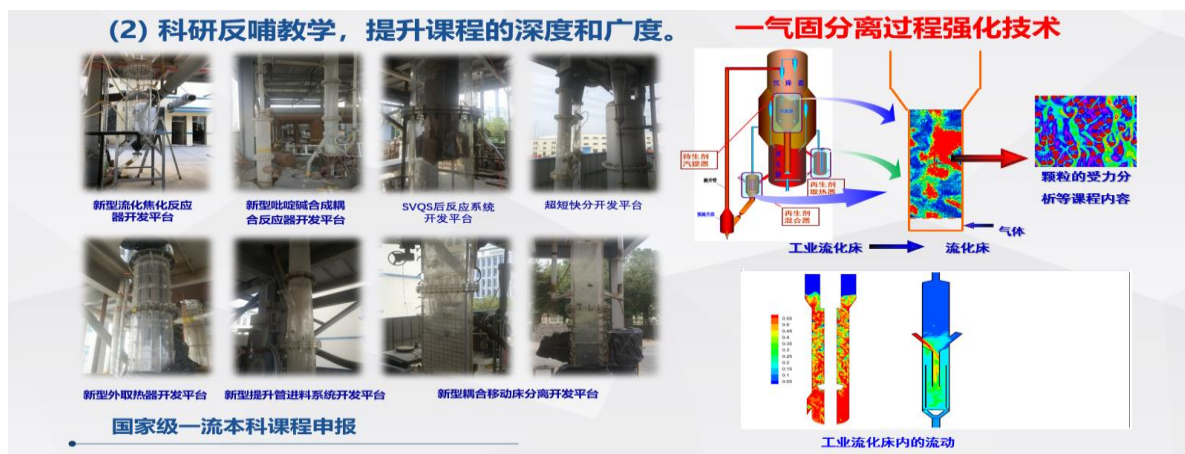


图 1. 将科研成果（流态化与气固分离）与教学内容的融合

刘艳升教授和曹睿副教授开发的精馏过程强化技术，成功的在国内不同规模的 55 套常减压、催化主馏塔等工业装置获得应用，累计经济效益 23.36 亿元，获得了中国石化联合会的技术发明一等奖。这部分成果成功地转化为精馏和塔设备单元模块。此外，团队还有多项在水循环和换热网络方面的成果成功地转化为教学单元知识模块。

(2) 科研反哺教学，提升课程的深度和广度。

一传质过程强化技术



已成功应用于55套工业装置，累计经济效益达23.36亿元。



国家级一流本科课程申报

图 2. 将科研成果（精馏+塔设备）与教学内容的融合

(2) 提升认识打造一流教学知识体系

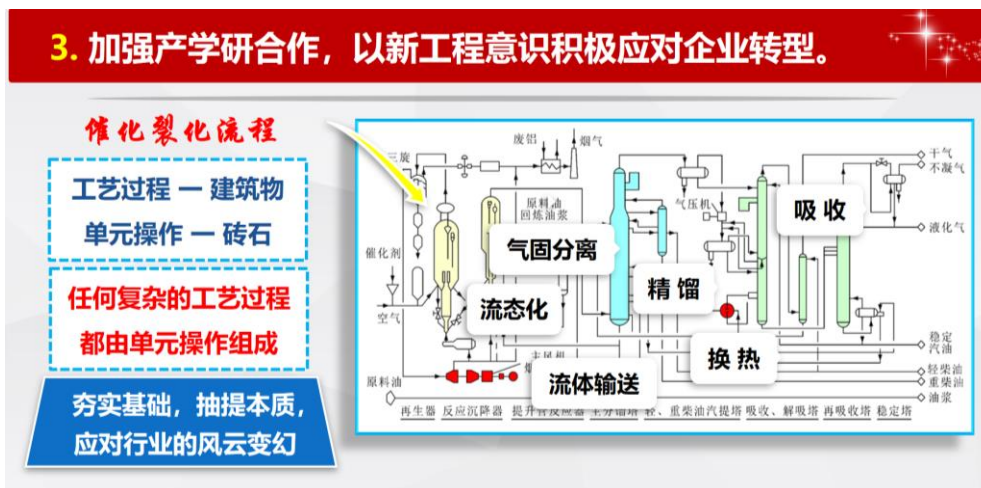
以“三传”为主线，类比学习各单元操作，建立课程体系的逻辑关系。

化工原理	教学内容		
	动量传递	流体流动	流体输送设备
	热量传递	传热	换热器
	机械分离	非均相分离、固体流态化	过滤机、流化床、旋风分离器
	质量传递	蒸馏 气体吸收 液-液萃取	气(液)-液传质设备
	热-质传递过程	干燥	干燥器

《化工原理》的章节内容很多，为了加强章节之间的联系，让学生更好地理解单元过程本质，引入“场一流”理论、“相控制”理论抽提单元过程本质。依据“场-流理论”，将产生传递推动力的流场描述为场，将推动力下产生的传递物流称之为流，使得动量传递、热量传递和传质具有可类比性。以“场-流理论”描述下的“三传”为主线，可以清晰梳理课程框架，将传热单元调整到流动单元之后、机械分离和气固内容合并，建立合理的知识体系逻辑关系。同时，依据“相界面控制理论”可以将气液相间的传递动力学获得更本质的描述，强调自由相界面的产生形式和界面特点是传递速率的控制因素，从而结合工艺和设备内容实现单元过程强化。

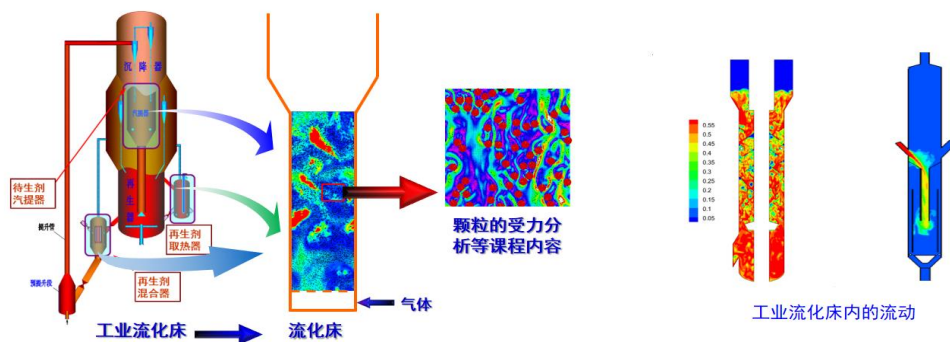


通过类比学习，以质点运动作为三种传递过程的本质运动根源，从传递过程的动力学和热力学方面描述各单元操作过程的共性和个性特征，让学生由基础知识中把握关键内核，融入一流的学科知识，积极探索单元过程原理的科学本质。



单元操作是《化工原理》课程的基础和核心，为了使建立各单元操作间的联系。我们以典型的化工生产流程为例，让学生明白，工艺过程就像建筑物，单元操作就像砖石，任何复杂的工艺过程都是由单元操作组成的。工艺中会涉及流态化、气固分离、精馏、流体输送、换热、吸收等单元操作，这些单元过程不仅可以用在催化裂化，也可以用在 CO₂ 制甲醇。

在多相流教育部工程中心和重质油国家重点实验室科研平台的强大支撑下，将雄厚的科研成果转化为教学资源优势，创立传质、流态化及气固分离、热集成等单元过程强化技术。其中，团队提出的 VQS 高效快分、组合汽提等最新技术、理论板数 EFRC 和 EFSC 解析算法（在国外 TOP 期刊 CES 和 IECR 上发表）等最新理论充实教学知识体系，使学生了解科学前沿、树立过程强化提高能效的创新理念。



案例：理论板数的计算方法：由逐板计算 → EFRC法

第五节 双组分连续精馏塔

五、设计型计算^[124]

(一) 理论板数的计算

2. 图解法 (McCabe-Thiele法)

进料板：第四块

$N_T=5.6$ 块

分凝器、再沸器
相当于一块理论板

第五节 双组分连续精馏塔

3. 指数函数严格算法 (EFRC法)

CHANG

CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE

第五节 双组分连续精馏塔的计算

3. 指数函数严格算法 (EFRC法)

exponential function

$$Z_n \rightarrow Z_{n-1} \cdots Z_1 \rightarrow Z_1 \Rightarrow Z_{i+1} = k Z_i$$

$$Z_{i+1} = k^n$$

$$Z_i = \frac{x_i + U}{x_i + V}$$

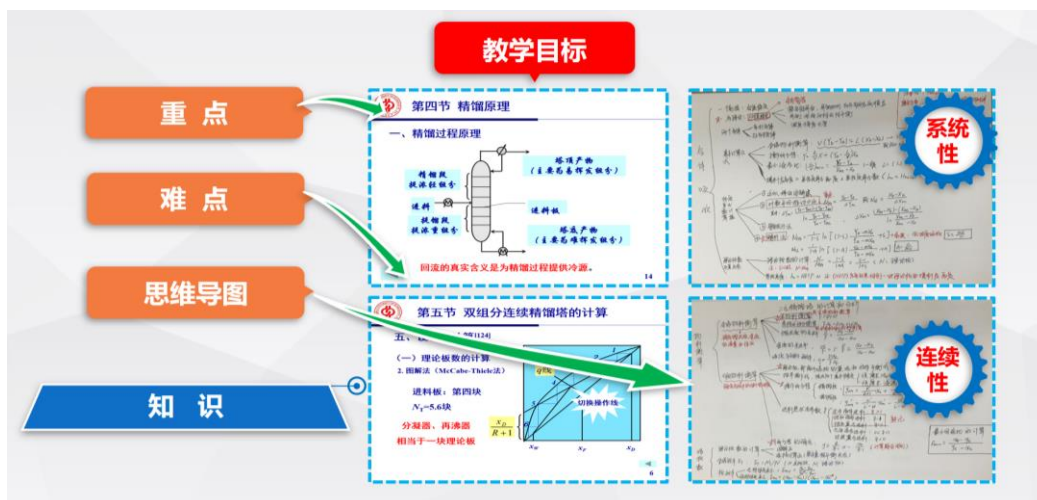
non-linear function

$$N_R = \frac{\lg(Z_n / Z_1) + 1}{\lg K} = \frac{\lg \left(\frac{x_w + U}{x_w + V} / \frac{x_d + U}{x_d + V} \right) + 1}{\lg K}$$

$$N_S = \frac{\lg(Z_n / Z_1)}{\lg K} = \frac{\lg \left(\frac{x_w + U}{x_w + V} / \frac{x_d + U}{x_d + V} \right)}{\lg K}$$

逐板法可用 EFRC法代替。

在传授知识时，不仅要告诉学生重点和难点，还要求他们画出思维导图（见下图），保持知识的系统性和连续性。将“工装一体化”思想和解决工程放大的“相似论”等工程研究方法论以及类比、演绎等学习方法论引入教学。



改革内容包括理论、技术、方法论，以科学前沿和高新技术重塑知识模块，实现了单元过程知识体系的整体升华。

3. 工程特色实训平台

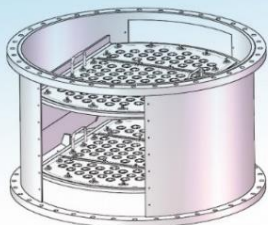
(1) 工业规模实物模型平台

① 6400×800×9000 mm 全国最大冷态实验塔



② $\Phi 1200 \times 1500\text{mm}$ 不锈钢标准工业浮阀塔模型

工业规模蒸馏塔段模型平台简介



一、《化工原理课程设计》的教学特点

《化工原理课程设计》是《化工原理》教学中最重要的实践环节，“塔盘设计”部分是核心设计内容之一。为了增强学生对现场设备和实际生产过程的了解，对工业塔板建立直接的感性认识，中国石油大学（北京）化工学院结合石油院校的科研和教学专业优势，设计制作了具有工业规模、结构和尺寸的 $\Phi 1200$ 浮阀塔板模型。该模型的建立可以弥补学生对工业设备认识的空白，培养学生的工程概念和解决工程实际问题的能力。

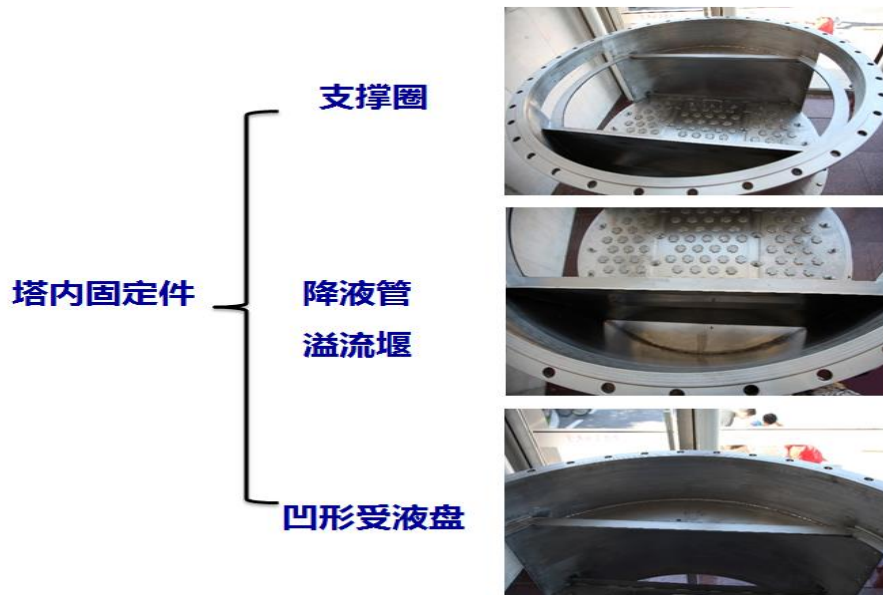
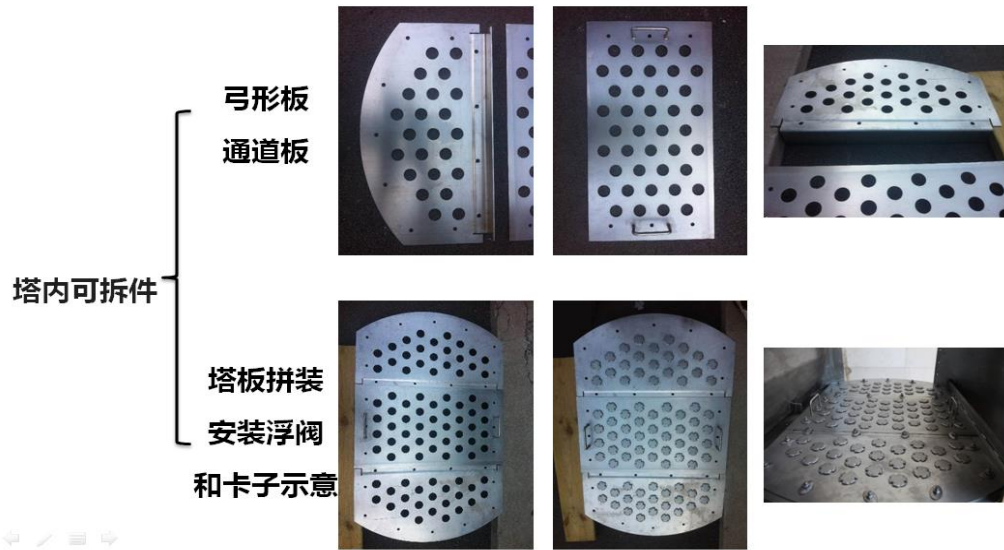
二、工业浮阀塔板模型的特点

模型塔段内设有两类主体塔内件：可拆件和固定件。可拆件包括塔盘板，包括通道板、矩形板和弓形板，板上装有浮阀和卡子连接件；固定件包括降液板、溢流堰、受液盘等；此外塔内还设有塔板支撑件（支撑圈、支撑梁）等。


三、建立该工业模型的作用

- 1、使学生了解塔板及其他内构件的结构、尺寸、以及主要设计参数，如塔径、板间距、堰长、堰高、降液管面积、底隙、开孔率、浮阀排布等；
- 2、通过对塔板块等零部件的拆装演示，使学生了解塔内件安装的工程实施过程；
- 3、模型完全按照工业标准设计，使学生对塔板连接件、支撑件，以及相关机械构件的工程细节获得深入的认识。
- 4、使学生建立“工装一体化”思想，了解工艺、设备并行设计过程。





③ $\Phi 100 \times 6000\text{mm}$ 大型撬装多功能循环流化床:



多功能流化床特色实验装置

实验装置简介

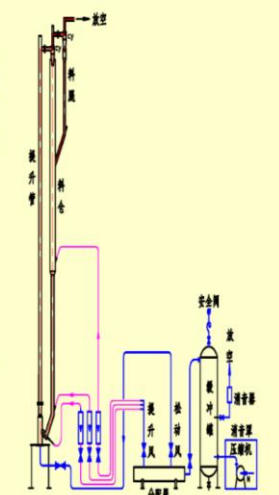
多功能流化床特色实验装置是为化工原理(本科)、流化化(研究生)课程和大学生科技创新而设置的大型撬装实验平台。装置中床层流型涵盖气给流化至气力输送等一系列床型,可根据实验要求设计多个不同实验,从而实现在一套装置中进行多床型、多任务的实验目的。

测量系统

1. FXC-II 32型流化床压力检测仪
2. Canon LBP-129型激光打印机
3. Great Wall笔记本电脑

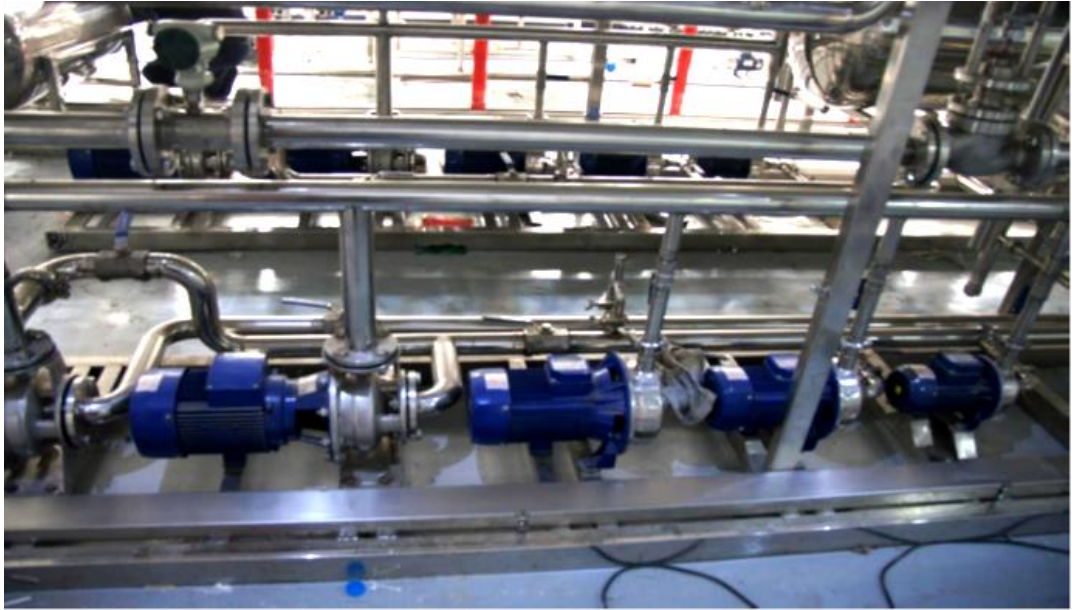
实验内容

1. 提升管、料仓、料腿压力梯度的测量
2. 鼓泡床、湍流床、输送床等床型内轴向密度分布的测量
3. 旋风分离器压降的测量
4. 全装置压力测量及其平衡



④ $\Phi 500 \times 7000\text{mm}$ 新型流化焦化反应器:





(2) 工业仿真平台

① 3D 塔设备仿真和流态化动态模拟:

用 SolidWorks 软件绘制 “ $\Phi 1200$ 工业仿真浮阀塔模型”

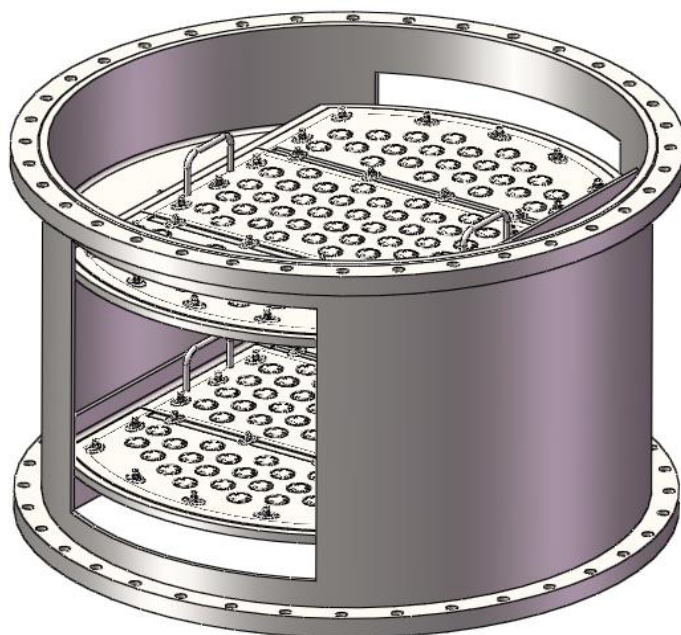
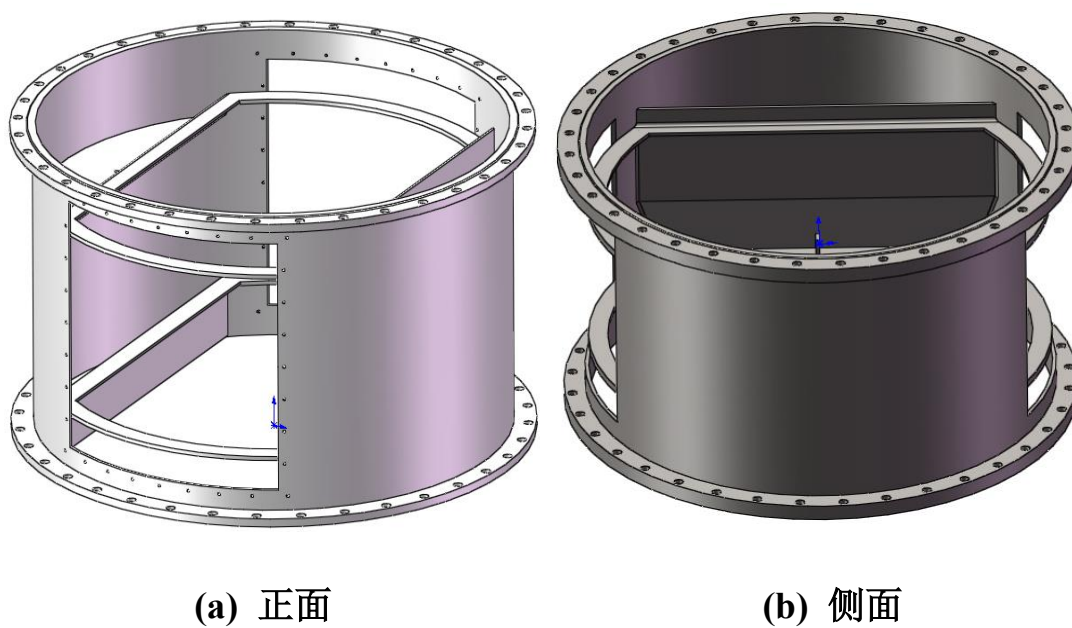


图1 塔设备的整体效果图



(a) 正面

(b) 侧面

图2 安装溢流装置和支撑件的塔段整体效果图

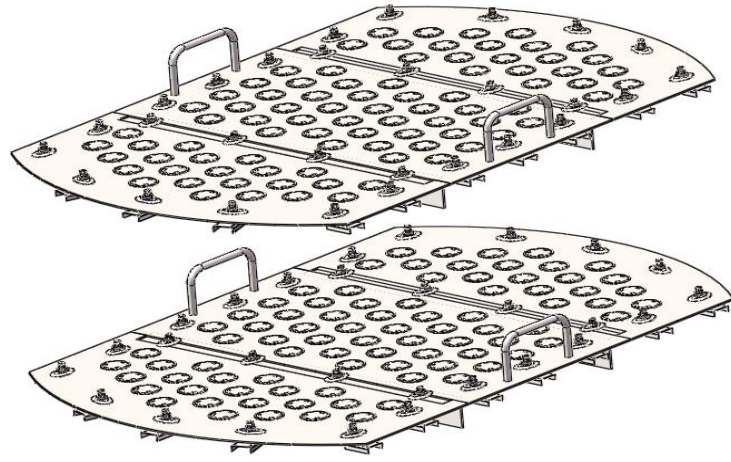
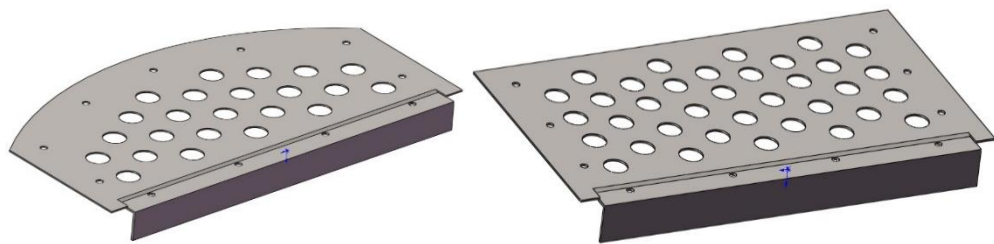
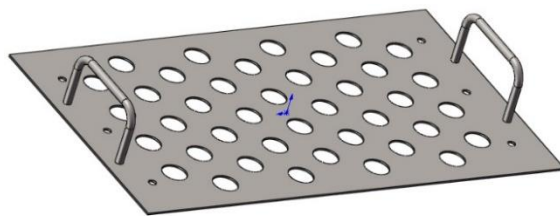


图3 塔板鼓泡区的整体组装效果图



(a) 弓形板

(b) 矩形板



(c) 通道板

图4 塔盘板的3D设计效果图

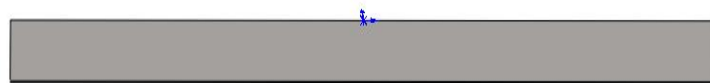


图5 溢流堰设计效果图

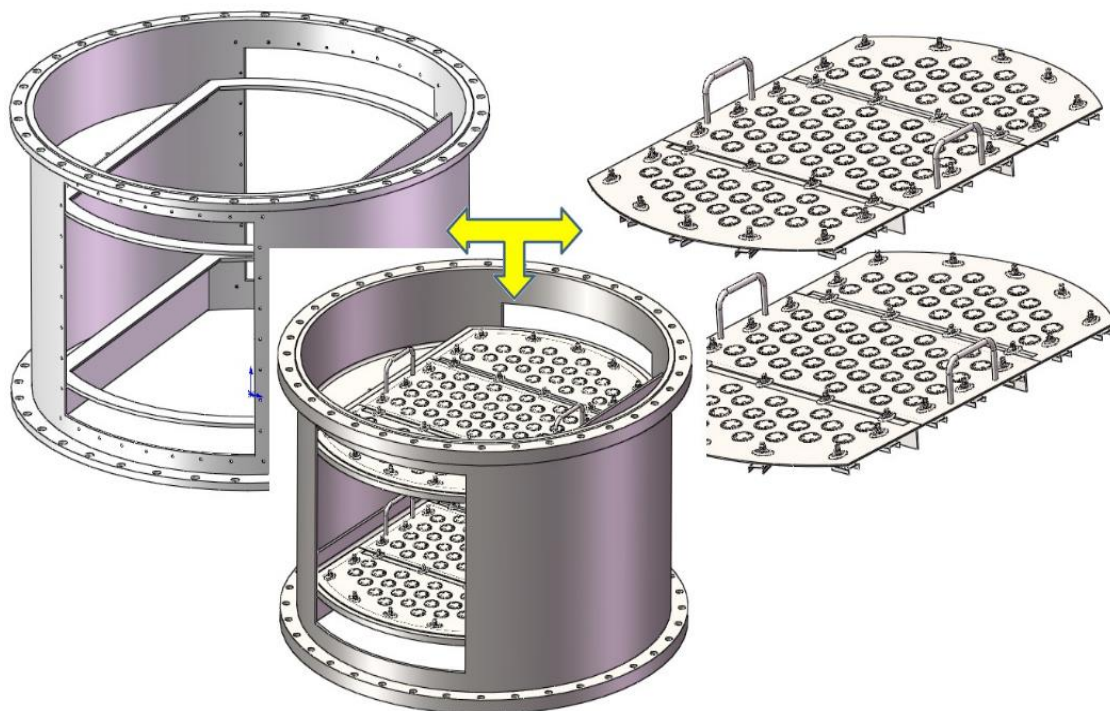
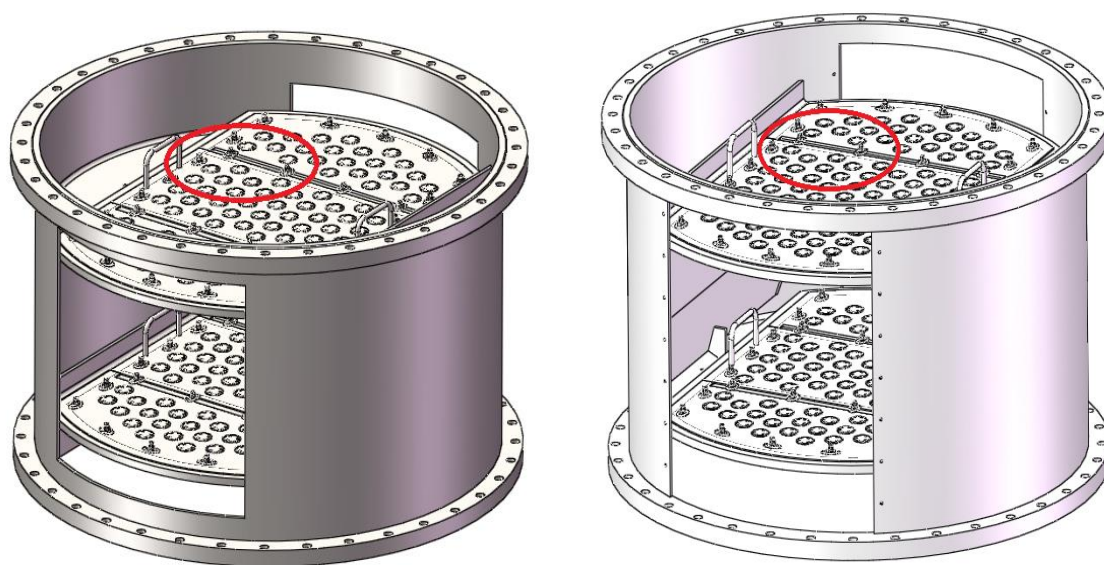


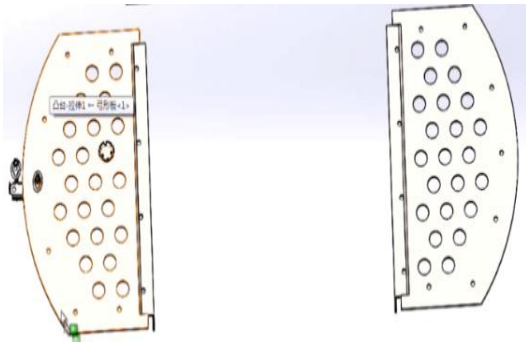
图6 塔段的整体安装过程



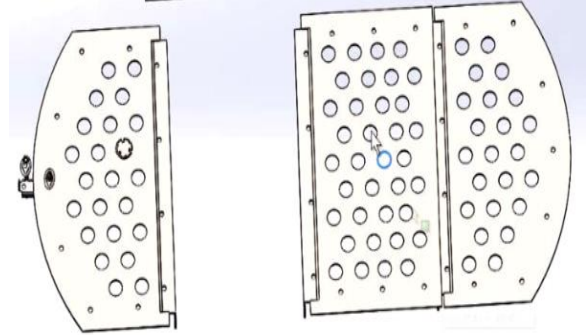
(a) 叉排

(b) 局部顺排

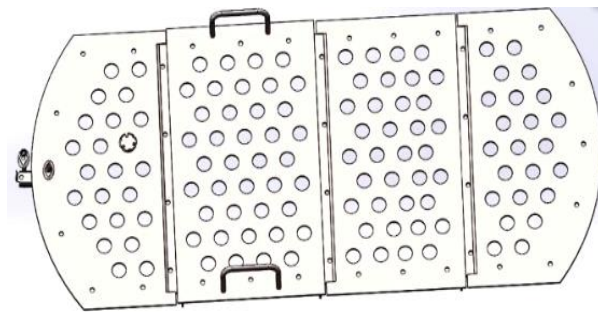
图7 塔设备的整体组装对比图



(a) 第一步：安装弓形板

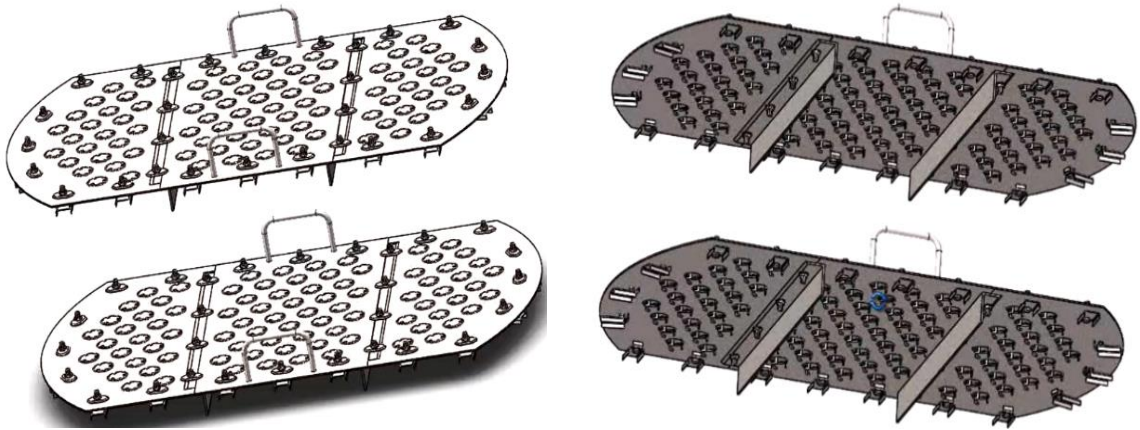


(b) 第二步：安装矩形板



(c) 第三步：安装通道板

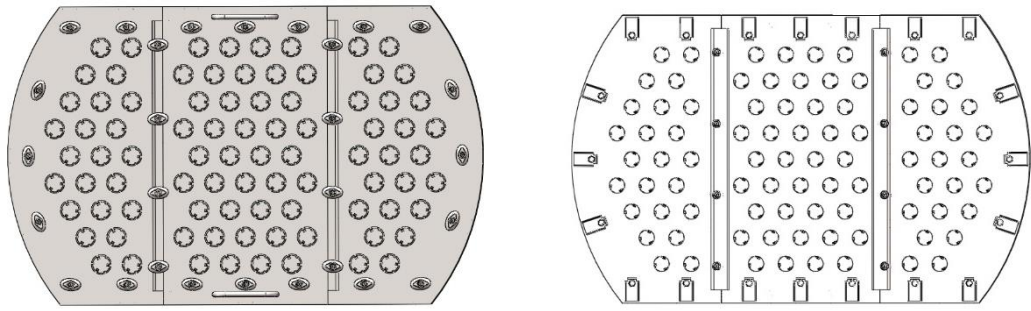
图 8 塔盘板在鼓泡区安装过程



(a)浮阀塔板的组装效果（正面）

(b)浮阀塔板的组装效果（背面）

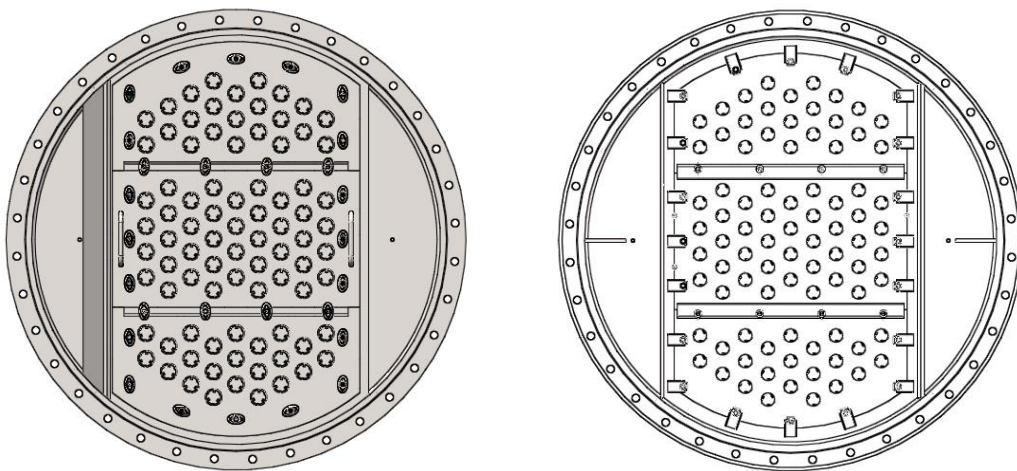
图 9 浮阀塔板的整体组装图



(a) 俯视图

(b) 仰视图

图 10 塔盘板的整体组装平面图



(a) 俯视图

(b) 仰视图

图 11 塔段的整体组装平面图

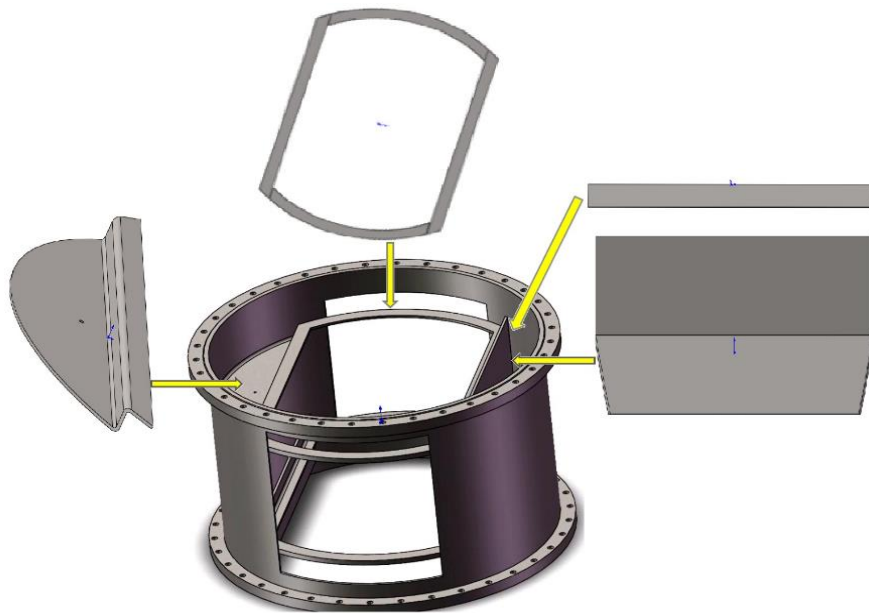


图 12 溢流装置（固定件）在塔内的安装过程

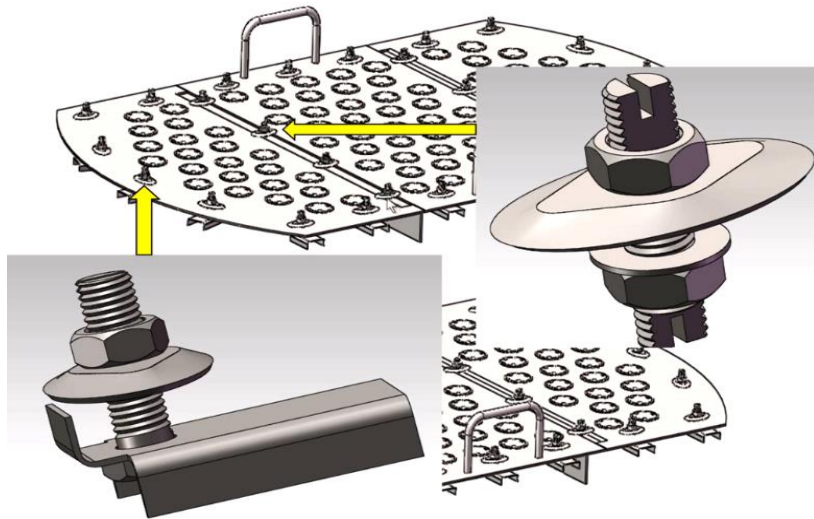


图 13 K 型和 SLB 型卡子组合件在塔盘板上的安装位置

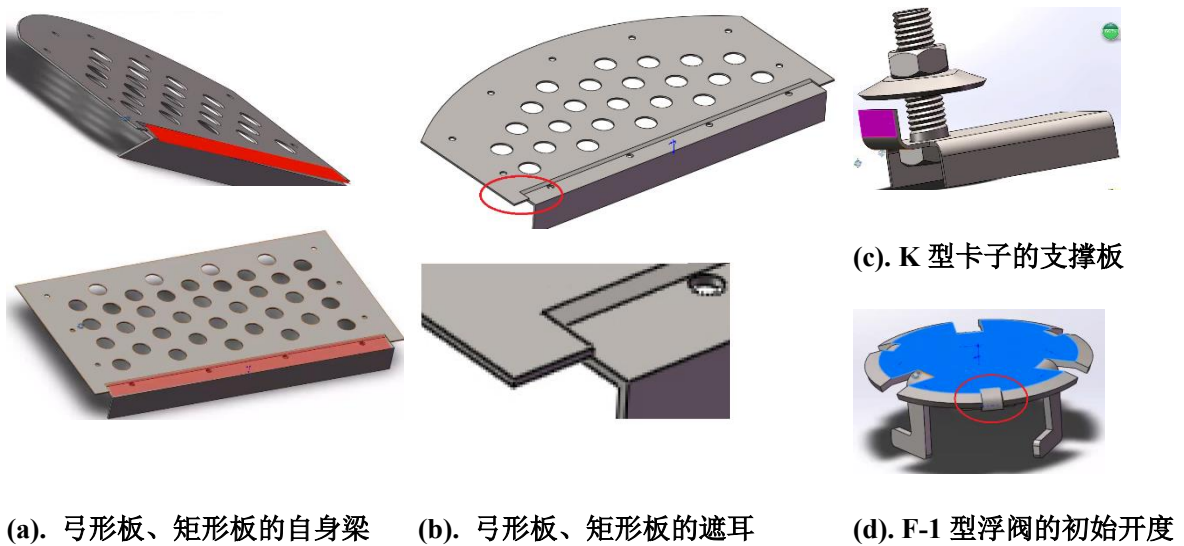


图 14 塔内件的细节动态展示

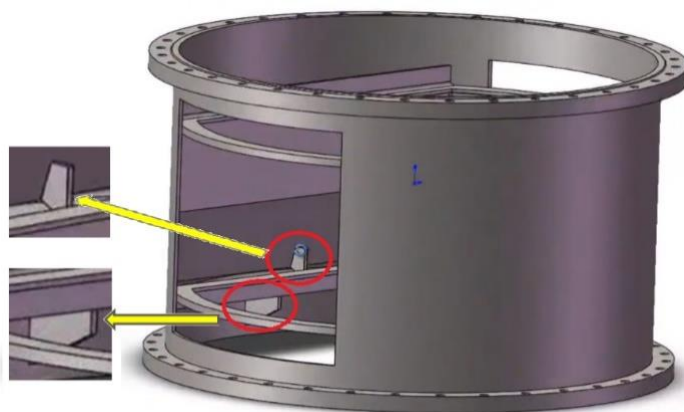


图 15 支撑筋板的动态安装展示

仿真动画与立体透视图

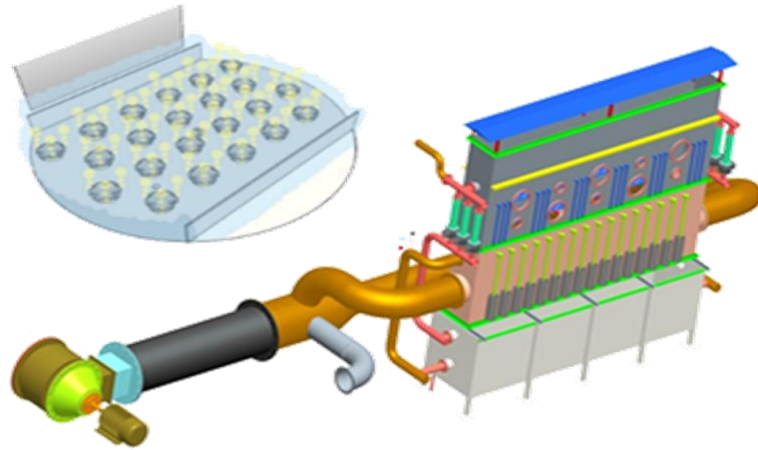


图 16 平面塔设备的立体透视图

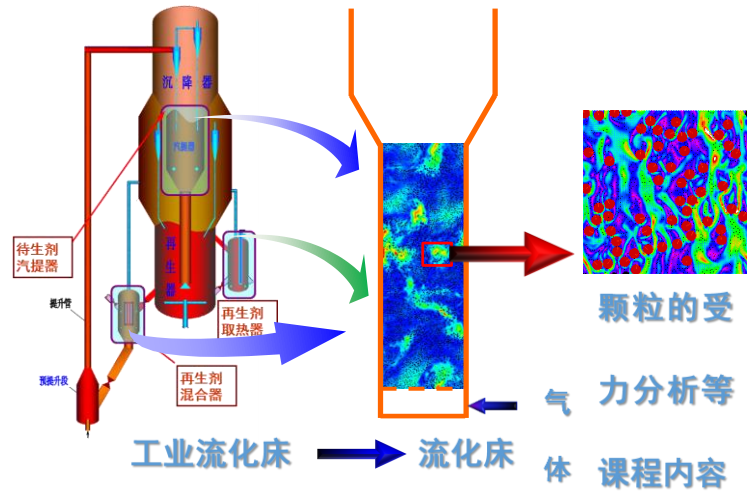


图 17 流态化和气固分离仿真装置动画

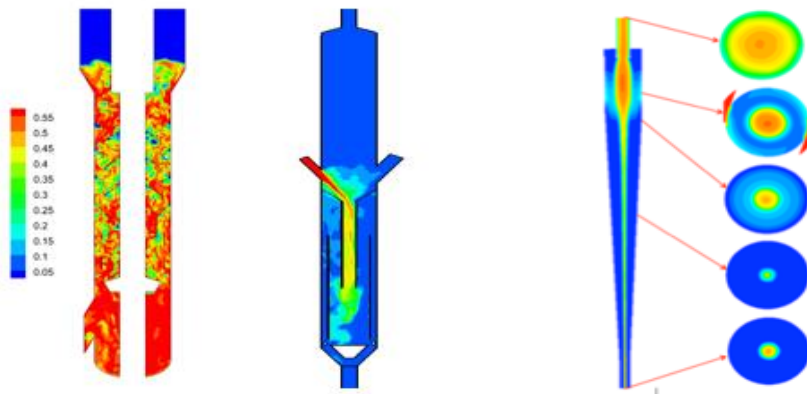


图 18 设备的 3D 动态模拟效果

② 工业流程仿真学习：

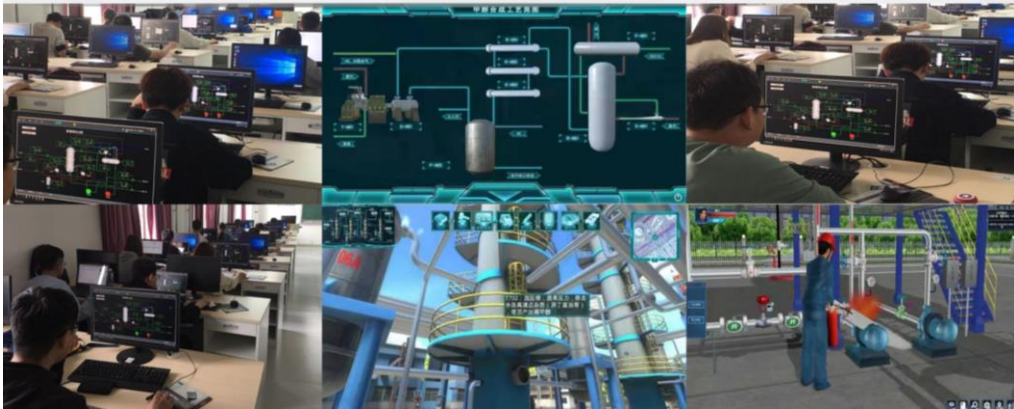


图 19 学生学习仿真系统



图 20 甲醇合成工艺简图

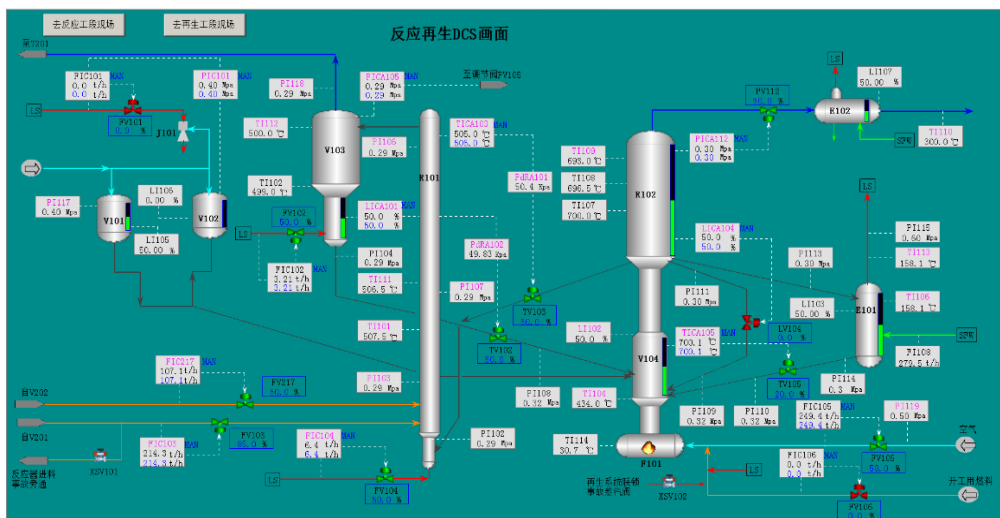


图 21 “流程仿真商业软件”的 DCS 控制系统界面展示

(3) 《化工原理课程设计指导书》

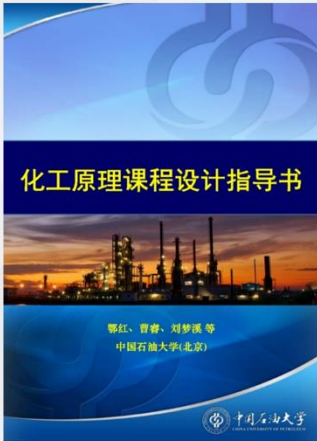


图1 《化工原理课程设计指导书》

全塔负荷性能图（节选）

塔板负荷性能图把塔板自身结构对应的适宜操作范围与工艺条件有机地结合起来，可以简单、直观地判断塔板操作状况，一直以来都是我国塔设备设计和操作分析的主流方法。该技术只能对单板的负荷性能逐一进行分析，而对全塔评价不够直观。因此，我们拓展开发了基于全塔的负荷性能图分析技术，能从整个系统的角度来分析装置性能的优劣，讨论设计和操作瓶颈，不仅可用于板式塔，还能推广到填料塔。全塔负荷性能图便于多方案对比；可以直接对塔设备工艺模拟结果的适应性进行评价，容易发现设计瓶颈，并提出相应的改造措施。该方法图形绘制灵活、简便，单指标技术无需编程，尤其适用于初步设计和本科生课程设计。通过反复调整设计条件，分析装置操作情况及弹性，体会设计变化或生产波动对实际效果的影响，将十分有助于他们向工程上的过渡。

三. 《化工原理课程设计指导书》— 规范化工程教学



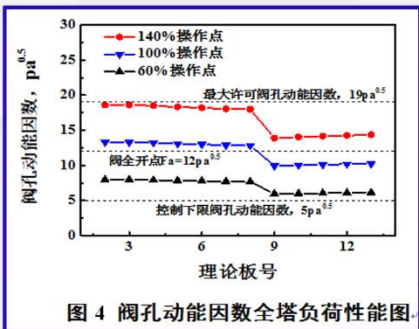



图 4 阀孔动能因数全塔负荷性能图



**全塔负荷性能图技术
(全国首创)**

→

工装一体化思想

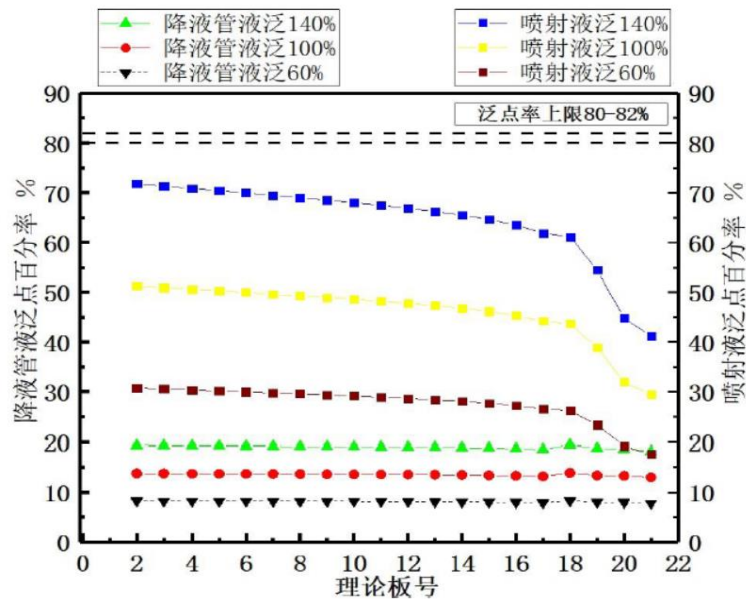
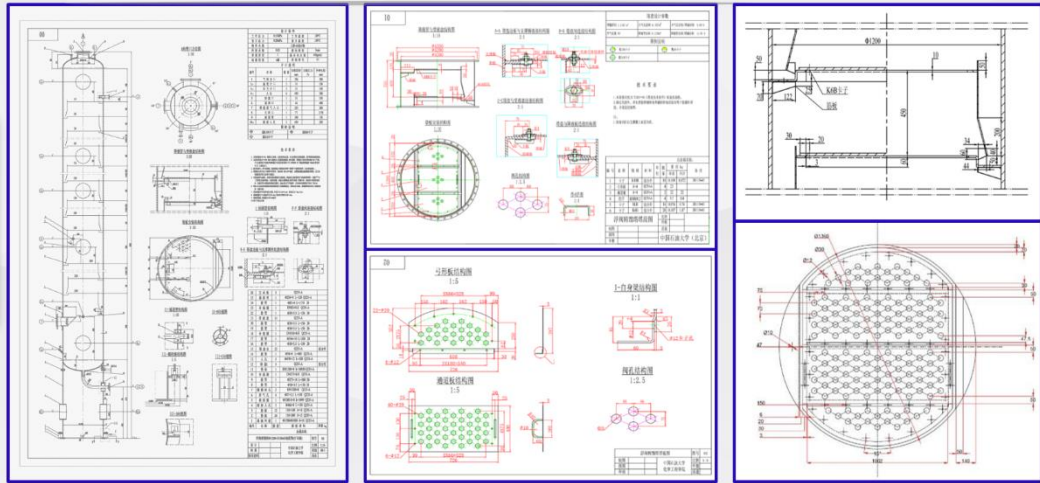


图 5-4 降液管液泛和喷射液泛的全塔负荷性能图

四. 规范化工程教学 (2. “化工设备标准示范图集” 教学版和完整版)

标准样图



四. 规范化工程教学 (2. “化工设备标准示范图集” 教学版和完整版)

设计标准

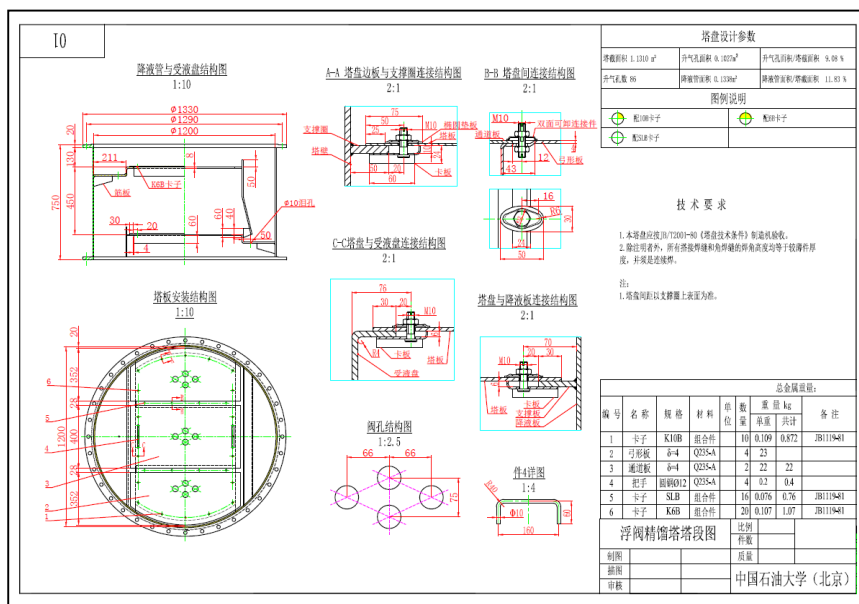
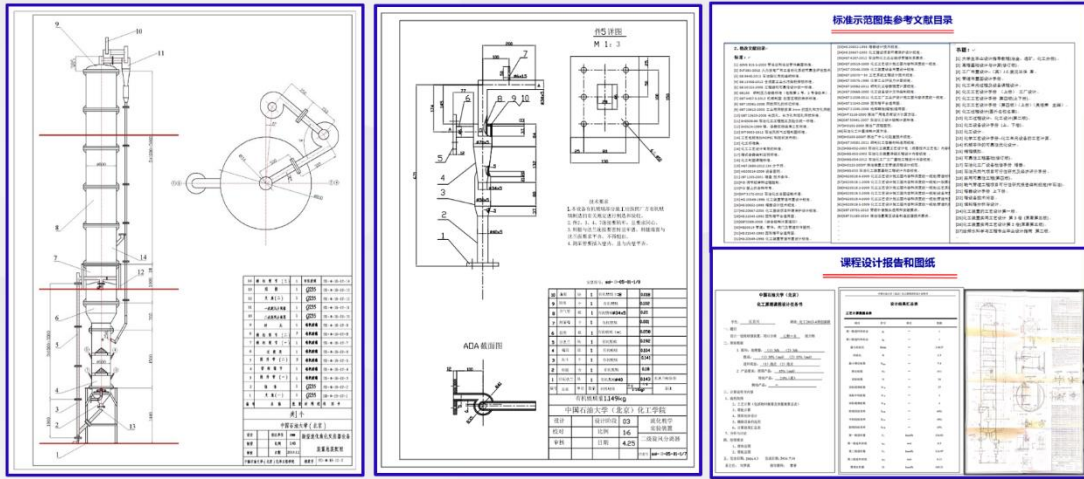


图2 “工业蒸馏塔标准示范图(工业版)”—塔段主视图和俯视图

标准示范图集参考文献目录

2. 教改文献目录 ⁴⁾		书籍： ⁴⁾
标准：⁴⁾ [1] ASME B16.5-2003 管法兰和法兰管件美国标准。 [2] DLT 261-2012 火力发电厂热工自动化系统可靠性评估技术。 [3] GB 9948-2013 石油裂化用无缝钢管标准。 [4] GB 13458-2013 合成氨工业水污染物排放标准。 [5] GB 50153-2008 工程结构可靠性设计统一标准。 [6] GB150 钢制压力容器标准 (包括第 1 号, 2 号修改单)。 [7] GBT 4457.5-2013 机械制图 制图区域的表示标准。 [8] GBT 10061-2008 筛网筛孔的标记标准。 [9] GBT 10612-2003 工业用筛板板厚 3mm 的圆孔和方孔筛板。 [10] GBT 12620-2008 长圆孔、长方孔和圆孔筛板标准。 [11] SH3508-96 石油化工工程施工及验收统一标准。 [12] SH3524-1999 塔、容器现场组焊工艺标准。 [13] SY/T 0003-2012 石油天然气工程制图标准。 [14] 工艺包规范(SINOPEC 科技部发布版)。 [15] 化工标准集。 [16] 化工工艺设计常用的标准。 [17] 塔式容器编制说明标准。 [18] 化工制图课程标准。 [19] HGT 2690-2012 13X 分子筛。 [20] HG20519-2009 设备图例。 [21] JBT 1205-2001 塔盘 技术条件。 [22] PID 调节规律和过程控制。 [23] PID 图上的各种符号。 [24] SH/T 3172-2012 石油化工总图运输术语。 [25] HG 20549-1998 化工装置管道布置设计标准。 [26] HG 20652-1998 塔器设计技术规定。 [27] HG 20667-2005 化工建设项目环境保护设计规定。 [28] HG 21543-1992 圆形塔平台通用图。 [29] GBT 2589-2008 《综合能耗计算通则》。 [30] HG20519 管道、管件、阀门及管道附件图例。 [31] HG 21543-1992 圆形塔平台通用图。 [32] HG 20549-1998 化工装置管道布置设计规定。 [33] HG 20652-1998 塔器设计技术规定。 [34] HG 20667-2005 化工建设项目环境保护设计规定。 [35] HGT 4287-2012 石油和化工企业能源管理体系要求。 [36] HGT 20519-2009 化工工艺设计施工内容和深度统一规定。 [37] HGT 20546-2009 化工装置设备布置设计规定。 [38] HGT 20570-95 工艺系统工程设计技术规定。 [39] HGT 20575-1995 化学工业炉设计施工内容和深度统一规定。 [40] HGT 20582-2011 钢制化工容器强度计算规定。 [41] HGT 20668-2000 化工设备设计文件编制规定。 [42] HGT 21536-2011 化工工业炉设计施工内容和深度统一规定。 [43] HGT 21543-2009 圆形塔平台通用图。 [44] HGT 21545-2006 地脚螺栓(螺栓)通用图。 [45] SH/T 3116-2000 炼油厂用电负荷设计计算方法。 [46] GBT 50441-2007 石油化工设计概算计算标准。 [47] SH3101-2000 炼油厂流程图例。 [48] 石油化工业量消耗计算方法。 [49] SH3103-2000 炼油厂中心化验室技术规定。 [50] HGT 20581-2011 钢制化工容器材料选用规定。 [51] SHHG-052-2003 石油化工装置工艺设计包(成套技术工艺包)内容。 [52] SHHG-053-2003 石油化工装置详细工程设计内容规定。 [53] SHHG-054-2012 石油化工厂厂址设计内容规定。 [54] SH3122-2007 炼油装置工艺管道流程设计规定。 [55] SHHG-033 石油化工装置基础工程设计内容规定。 [56] HG20519.6-2009 化工工艺设计施工内容和深度统一规定(管道材料)。 [57] HG20519.1-2009 化工工艺设计施工内容和深度统一规定(一般塔)。 [58] HG20519.2-2009 化工工艺设计施工内容和深度统一规定(工艺系统)。 [59] HG20519.3-2009 化工工艺设计施工内容和深度统一规定(设备布置)。 [60] HG20519.4-2009 化工工艺设计施工内容和深度统一规定(管道布置)。 [61] HG20519.5-2009 化工工艺设计施工内容和深度统一规定(管道材料)。 [62] GBT 29751-2013 管接头接头选用和安装要求。 [63] GBT 31183-2014 炼油临氢高压设备制造制造技术要求。		[1] 大学生毕业设计指导教程(冶金、选矿、化工分册)。 [2] 高塔基础设计与计算(修订版)。 [3] 工厂布置设计-(英) J.C. 麦克兰保 著。 [4] 管道布置图设计手册。 [5] 化工单元过程及设备课程设计。 [6] 化工工艺设计手册 (上册) 工厂设计。 [7] 化工工艺设计手册 第四版(上下册)。 [8] 化工工艺设计手册 (第四版) (上册) (吴德荣 主编)。 [9] 化工过程设计(国外名校名著)。 [10] 化工过程设计: 化工设计(第二版)。 [11] 化工过程设计(国外名校名著)。 [12] 化工设计。 [13] 化学工艺设计手册-化工单元设备的工艺计算。 [14] 机械零件的可靠性优化设计。 [15] 槽罐设计。 [16] 可靠性工程基础(修订版)。 [17] 石油化工厂设备检修手册 塔器。 [18] 石油天然气项目可行性研究及经济评价手册。 [19] 实用可靠性工程(第四版)。 [20] 输气管道工程项目可行性研究报告编制规定(中石油)。 [21] 塔器设计手册 上下册。 [22] 塔器设计技术问题。 [23] 填料塔分析与设计。 [24] 化工装置的工艺设计第一册。 [25] 化工装置实用工艺设计 第 3 卷(原著第三版)。 [26] 化工装置实用工艺设计 第 2 卷(原著第三版)。 [27] 给排水科学与工程专业毕业设计指南 第二版。

图 6 “工业蒸馏塔标准示范图集”参考文献目录

课程设计报告和图纸

<p style="text-align: center;">中国石油大学(北京) 化工原理课程设计任务书</p> <p>学生: <u>张嘉兴</u> 班级: <u>化工2013-4 创新班</u></p> <p>一、题目 设计一连续精馏装置, 用以分离 <u>乙醇-水</u> 混合物</p> <p>二、原始数据</p> <p>1. 原料: 处理量: (1) <u>5th</u> (2) <u>3th</u> 组成: (1) <u>50% (mol)</u> (2) <u>15% (mol)</u> 进料状态: (1) <u>泡点</u> (2) <u>泡点</u></p> <p>2. 产品要求: 塔顶产品: <u>85% (mol)</u> 塔底产品: <u>2.0% (质)</u> 侧线产品: <u>—</u></p> <p>三、计算说明书内容</p> <p>1. 流程图 2. 工艺计算 (包括物料衡算及热量衡算总表) 3. 塔板计算 4. 塔体初步设计 5. 辅助设备的选用 6. 计算结果汇总表</p> <p>7. 分析与讨论</p> <p>四、绘图要求</p> <p>1. 塔体总图 2. 塔板总图</p> <p>五、发出日期: 2016.6.3 完成日期: 2016.7.10 系主任: <u>刘梦溪</u> 指导教师: <u>曹春</u></p>	<p style="text-align: center;">中国石油大学(北京)化工原理课程设计说明书</p> <p style="text-align: center;">设计结果汇总表</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>项目</th> <th>符号</th> <th>单位</th> <th>数据</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>第一股进料热状态</td><td>q_1</td><td>—</td><td>1</td></tr> <tr><td>第二股进料热状态</td><td>q_2</td><td>—</td><td>1</td></tr> <tr><td>最小回流比</td><td>R_{min}</td><td>—</td><td>1.8837</td></tr> <tr><td>回流比</td><td>R</td><td>—</td><td>2.7</td></tr> <tr><td>最小理论板数</td><td>N_{min}</td><td>—</td><td>7.4</td></tr> <tr><td>理论板数</td><td>N_T</td><td>—</td><td>19.1</td></tr> <tr><td>实际板数</td><td>N</td><td>—</td><td>34</td></tr> <tr><td>实际精馏板数</td><td>N_d</td><td>—</td><td>27</td></tr> <tr><td>实际中间板数</td><td>N_m</td><td>—</td><td>3</td></tr> <tr><td>实际提馏板数</td><td>N_b</td><td>—</td><td>4</td></tr> <tr><td>精馏段板效率</td><td>E_{Td}</td><td>—</td><td>64%</td></tr> <tr><td>中间段板效率</td><td>E_{Tm}</td><td>—</td><td>50%</td></tr> <tr><td>提馏段板效率</td><td>E_{Tb}</td><td>—</td><td>45%</td></tr> <tr><td>第一股进料量</td><td>F_1</td><td>kmol/h</td><td>156.03</td></tr> <tr><td>第一股进料浓度</td><td>x_{F1}</td><td>mol</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>第二股进料量</td><td>F_2</td><td>kmol/h</td><td>134.97</td></tr> <tr><td>第二股进料浓度</td><td>x_{F2}</td><td>mol</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>塔顶出料量</td><td>D</td><td>kmol/h</td><td>109.21</td></tr> </tbody> </table>	项目	符号	单位	数据	第一股进料热状态	q_1	—	1	第二股进料热状态	q_2	—	1	最小回流比	R_{min}	—	1.8837	回流比	R	—	2.7	最小理论板数	N_{min}	—	7.4	理论板数	N_T	—	19.1	实际板数	N	—	34	实际精馏板数	N_d	—	27	实际中间板数	N_m	—	3	实际提馏板数	N_b	—	4	精馏段板效率	E_{Td}	—	64%	中间段板效率	E_{Tm}	—	50%	提馏段板效率	E_{Tb}	—	45%	第一股进料量	F_1	kmol/h	156.03	第一股进料浓度	x_{F1}	mol	0.5	第二股进料量	F_2	kmol/h	134.97	第二股进料浓度	x_{F2}	mol	0.15	塔顶出料量	D	kmol/h	109.21	
项目	符号	单位	数据																																																																											
第一股进料热状态	q_1	—	1																																																																											
第二股进料热状态	q_2	—	1																																																																											
最小回流比	R_{min}	—	1.8837																																																																											
回流比	R	—	2.7																																																																											
最小理论板数	N_{min}	—	7.4																																																																											
理论板数	N_T	—	19.1																																																																											
实际板数	N	—	34																																																																											
实际精馏板数	N_d	—	27																																																																											
实际中间板数	N_m	—	3																																																																											
实际提馏板数	N_b	—	4																																																																											
精馏段板效率	E_{Td}	—	64%																																																																											
中间段板效率	E_{Tm}	—	50%																																																																											
提馏段板效率	E_{Tb}	—	45%																																																																											
第一股进料量	F_1	kmol/h	156.03																																																																											
第一股进料浓度	x_{F1}	mol	0.5																																																																											
第二股进料量	F_2	kmol/h	134.97																																																																											
第二股进料浓度	x_{F2}	mol	0.15																																																																											
塔顶出料量	D	kmol/h	109.21																																																																											

图 7 《化工原理课程设计》学生设计报告和图纸