

化工过程分析与合成课程教学 模式改革与实践*

吴晓琴,雷 杨,郭 立,陈佳玲,李文兵

(武汉科技大学 化学与化工学院,湖北 武汉 430081)

[摘要]基于工程教育专业认证的核心要求和学生素质教育的目标,化工过程分析与合成课程进行了教学模式改革与相应教学内容的建设,通过多层次的教学环节设计,探索以学生为中心的课程教学方法和评价模式,引导学生从整体上把握化工过程,培养学生把握问题本质及分析和解决问题的综合能力,使学生掌握过程分析与合成的方法论。

[关键词]专业认证; 教学模式; 改革探索

Reform and Practice of Teaching Model in the Course of Chemical Process Analysis and Integration

Wu Xiaoqin, Lei Yang, Guo Li, Chen Jialing, Li Wenbing

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Wuhan University of Science
and Technology, Wuhan, Hubei 430081)

Abstract: Based on the core requirements of the engineering education professional certification and the target of the students quality education, this paper discussed the construction of teaching model and corresponding teaching contents in chemical process analysis and integration curriculum. The multi-level teaching link was designed to implement the reform of student-centered curriculum teaching methods and evaluation model, Students could be guided to grasp the chemical process on the basis of the whole process features, and cultivated emphatically with the abilities of grasping the nature of problems and then analyzing and solving problems. Further, the methodology for process analysis and integration could be grasped by students.

Key words: Professional argument; Teaching mode; Improvement and explore

[作者简介] 吴晓琴(1972-),女,教授,博士,副院长。

[通信作者] 吴晓琴, E-mail: wuxiaoqin@wust.edu.cn。

* 基金项目: 武汉科技大学教学研究项目“《化工过程分析与合成》教学体系建设”。

工程教育专业认证基于产出成果倒推的评价体系,要求大学对现行课程进行全面的教学改革,以新的教学范式,按照国际标准培养工程师,从而提高工程技术人才培养质量。

化工过程分析与合成是化学工程与工艺专业的核心课程之一,属于专业教育的第三层级^[1]。该课程以典型的现代化学工艺过程为研究对象、载体和实例,要求学生初步掌握有效组织工艺流程的方法,能够科学确定过程操作条件,实现工艺的高效、平稳运行,并达到所期望的技术、经济、环境和资源目标。该课程还涉及应用辅助软件进行计算的内容,实现了原理学习与计算并重。与传统化工专业课程相比,化工过程分析与合成课程具有很强的综合性和实践性,旨在培养学生的独立思考能力及创新思维,使其在更高层次上系统性、整体性把握化学工程与工艺专业知识。

一、课程发展概况

化工过程分析与合成课程源自武汉科技大学 20 世纪 90 年代后期开设的化工系统工程基础课程。笔者自 2005 年开始讲授该课程,当时该课程为选修课,共 28 学时。随着工程教育专业认证的开展和课程体系的调整,2013 年化工系统工程基础课程更名为化工过程分析与合成课程,并调整为必修课,共 40 学时。该课程的教学经历了从内容驱动和重视投入的传统模式向以学生为中心的模式转变。为了更好地讲授该课程,笔者 2012 年参加了 Aspen Plus 软件培训,为计算实践部分的教学打下基础;2014 年赴美国匹兹堡大学研修 Process Dynamics and Control 课程,学习先进的教学方法。2018 年,该课程被认定为校级双语课。此后,笔者通过借鉴其他院校相关课程的教学经验和观摩在线课程^[2],构建了与本专业相适应的课程内容体系及相应的教学环节,以期适应现代化工发展对学生知识、能力和素质的要求。

二、教学体系建设

课程教学体系建设包括教学内容的完善、教学方法和手段的改革,目标是实现以学生为中心的教学模式的转变^[3]。

(一) 教学材料准备

国内外化工过程分析与合成课程的相关教材很多,在综合考虑教学内容、案例分析、习题量、双语课程要求及学生英语水平等因素的基础上,本课程选择英国曼彻斯特理工大学 Smith 教授编著的 *Chemical Process Design and Integration* 和华南理工大学方利国教授编著的《化工过程系统分析与合成》作为参考教材^[4-5],另外选择两本英文参考书和两本中文参考书作为辅助教材^[6-9],同时选择国家精品课网站上的相关网络公开课作为学习材料^[2]。教材、案例和网络公开课为学生提供了丰富的学习资源,便于他们从不同角度、应用不同方法充分理解课程知识。另外还基于可借鉴的案例素材和公开课资源,结合本专业特色,精心设计了训练案例及课后作业,让学生应用系统方法进行学习,从而更好地掌握课程知识点。

(二) 教学过程设计

本课程的教学过程包括课堂教学和实践教学两部分。课堂教学包括课堂小测(sudden quiz)、目标训练(two-minutes drill)、课后作业(home-work)等教学形式,实践教学环节有对应的课程小设计(project)及 Aspen Plus、MATLAB 等软件的应用实践。

1. 完善教学内容

教学内容共 9 章,分为 4 部分,从过程分析、建模到模型解算、优化及过程合成,根据大纲要求逐一展开。这些内容共同形成了本课程完整的知识体系。在教学中尽量避免过多讲授复杂烦琐的数学推导过程,从物理化学、化工热力学、化工原理、化学反应工程等先导课程的知识点切入,运用微积分及线性代数知识,由浅入深地讲解本课程的知识,并确定知识点学习的目标和深度,从而有效培养学生综合应用知识的能力。如在讲授过程建模时,以最简单的双组分(盐和水)物理混合过程为例推演建模过程,逐步引导学生理解常微分方程的工程意义,并给出 MATLAB 源程序。该体系的建模求解过程不仅能够帮助学生理解作为工程学基础的高等数学如何与专业知识融通,并成为解决工程问题的重要手段和方法;而且能

够帮助学生深刻理解定量化计算的概念,了解工程软件的工作原理。

2. 增加案例训练

案例训练是工程课程的必要组成部分^[10],是帮助学生理解并掌握课程内容的一种有效训

练方法,能够促使学生运用知识解决问题,从而深入理解并掌握知识点。对应各章节的内容,本课程提供了 60 个案例用于学生训练,如表 1 所示。

表 1 课程章节及对应案例

| 章节内容 | 案例名称 |
|-----------------------|--|
| 第一章 绪论 | SK 静态混合器两相流的数值模拟 |
| 第二章 化工过程分析与合成(特征与总策略) | 产品分类与产品生命周期;洋葱模型与苯加氢工艺超结构 |
| 第三章 单元模型 | 气分;混合过程自由度计算;混合槽模型计算;列管式换热器模型;苯吸收流程计算;橙汁浓缩流程计算 |
| 第四章 结构建模 | 合成氨工艺流程结点图;合成氨工艺流程三大结构矩阵(环路矩阵、邻接矩阵、关联矩阵);系统分隔单元串搜索法案例;系统分隔通路搜索法案例;子系统循环流股断裂环路矩阵法案例;子系统循环流股断裂扩展环路矩阵法案例;化工过程模拟收敛方法(2 个案例) |
| 第五章 优化 | 冬天穿衣策略分析;传热保温层厚度优化;管式反应器操作优化;吸收-蒸馏过程设计优化;炼油厂生产计划问题;冷却器最优化设计;换热器序列优化设计(I);换热器序列优化设计(II);Powell 逐向寻优法案例;动态规划案例 |
| 第六章 反应器 | 基于 EP 值确定氯乙烯工业反应路径案例;反应过程三个特征参数计算、比较及分析(基于苯加氢过程);二氯乙烷反应过程分析及计算;乙酸乙酯反应过程分析及计算;氯乙烷反应过程分析及计算;合成氨过程分析及计算;单乙醇胺反应过程分析及计算;叔丁基硫酸氢反应过程分析及计算 |
| 第七章 分离 | 石油加工过程;糖水的溶解与分离;FeCl ₃ 与 TiCl ₄ 的混合与分离;水与正己烷的混合与分离;简单塔分离序列;经验法则下的混合烃分离序列;定量计算混烃分离序列;苯加氢工艺流程计算 |
| 第八章 热集成与能量目标 | 一条冷流股与一条热流股的热集成;多条冷热流股的热集成;基于问题表格算法计算的多条冷热流股能量目标;燃炉模型计算;有过程约束的流股热集成计算;基于总组合曲线的热公用工程选择计算;换热网络的夹点设计方法 |
| 第九章 水和废水最小化 | 单一污染物目标下的节水网络;单一污染物最大水套用目标下水管图法设计节水网络 |
| 研讨课 | 问题重新定义(11 个案例);煤制油反应过程及反应器;分离序列(2 个案例);京博石化 2# 延迟焦化配合加热炉改造的换热流程优化 |

以热公用工程管式炉计算这一典型案例的教学为例,首先分析管式炉结构中各点温度特点,并在总组合曲线上进行正确表达,如图1所示。分析可知,在满足系统能量目标设计的前提下,管式炉热效率受夹点温度及烟气露点温度的强制约,同时受系统规定的最小温度差的影响很大。据此,可以按照以下步骤完成计算过程:(1)确定烟气转换温度并正确标绘在总组合曲线图上;(2)根据系统确定的最小热公用工程,确定管式炉的有效能量,进而计算管式炉提供的总能量;(3)计算燃炉效率。计算过程中涉

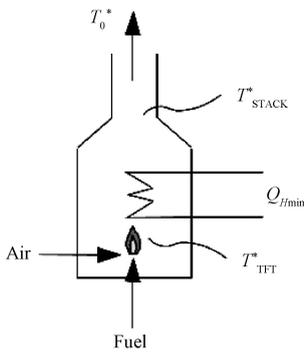


图1 管式炉的简单模型

3. 课堂小测与目标训练

为了检验学生对知识点的掌握情况,本课程设计了课堂小测与目标训练,通常为5道选择题和判断题或一道小综合题,要求学生在5~10分钟内完成,测试成绩计入平时成绩。这种采用不同设问、基于不同角度的训练形式能及时反馈学生对知识点的掌握情况,同时加深学生对知识的理解,使其形成长期记忆。

4. 课堂讨论

以上三种教学方式以教师的主动教学为主,而课堂讨论则以学生的自学为主,该环节是课程建设的核心部分。采用研讨课的形式集中开展课堂讨论,让学生根据授课内容选择研讨主题,并在一周内准备好研讨稿,进行答辩并回答教师小组(4人)的提问,最后提交课程小设计书面报告。本课程教学中共设置了4个研讨主题,分别为问题重新定义、煤制油反应与反应器、分离序列和热

及以下关系式:

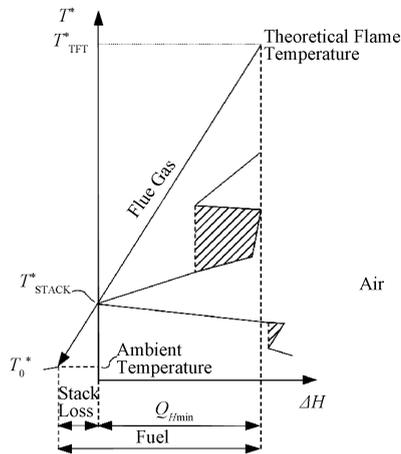
$$\Delta H_{\text{有效}} = Q_{H_{\min}} \quad (1)$$

$$CP_{\text{烟气}} = \Delta H_{\text{有效}} / (T_{\text{TFT}}^* - T_{\text{STACK}}^*) \quad (2)$$

$$\Delta H_{\text{总}} = CP_{\text{烟气}} (T_{\text{TFT}}^* - T_0^*) \quad (3)$$

$$\eta = \Delta H_{\text{有效}} / \Delta H_{\text{总}} \quad (4)$$

计算结果可为管式炉尺寸设计提供基础数据。该分析过程的依据为热量守恒基本原理,计算模型为线性方程。通过案例分析,学生能快速理解管式炉的分析过程,在整体上把握能量输入与系统用能之间的关系,进而理解工艺构成与工艺参数的关系。



集成网络。

问题重新定义的研讨主题选取生活和生产中的11个典型案例,要求学生探索问题本质,指出原方案的不合理之处,并给出解决办法。煤制油反应与反应器的研讨主题契合本专业的煤化工特色,要求学生结合化学反应工程的基本原理,理解煤制油的原理和工艺过程,尤其是从催化剂、反应条件、反应器结构形式等方面全面了解煤制油的反应过程,并深入理解反应器。分离序列的研讨主题要求学生从基于启发式规则的定性分析和基于严格数学模型的定量分析出发,掌握分离序列的确定过程。其中,定性分析环节要求学生根据定性规则制定给定系统的分离序列,定量分析环节以武汉科技大学的国家“外专千人计划”专家、普林斯顿大学化工系教授 Floudas 在1990年发表的论文为案例,要求学生全面理解分离序列优化的数学建模问题,并掌握该模型的实际应

用^[11]。热集成网络的研讨主题选取教学团队成员参加的科研课题“京博石化有限公司2#延迟焦化配合加热炉改造的换热流程优化方案”为案例,让学生通过分析过程的焓损及不合理用能,结合夹点技术原理,对过程换热网络进行梳理,并设计出合理的换热网络。学生利用 Aspen Plus 和 Excel 进行计算和分析,并给出了对应方案,进一步理解了夹点技术。

下面以第一个研讨主题选用的案例为例,介绍研讨课的实施过程。案例:“一家旅馆通过将顶层重新改造为12个小房间来增加客流量,从而增加收入。但由于电梯数量不足,住在顶楼的客人等电梯需要花费大量时间(最初安装电梯时考虑的是顶层住的客人较少)。要求学生针对这个实际问题,设计可行的方案,为旅馆增加一部新电梯。”在进入主题研讨之前,老师先引导学生了解规划相关知识,建立问题本质定义的基本概念,进而对问题进行较为全面的分析。首先,学生详细估算新电梯投资和运行费用:电梯设备费和安装费在10万~15万元之间,每年的日常维护保养费为4000~6000元,年检费为500元,五年一次的大修费用为10000元左右,因此增加新电梯第一年需花费25万元,此后每年需花费8000元用于维护。成本估算表明,增设新电梯会带来较大的成本增加,因此并不是好的解决方案。其次,学生对问题进行客观分析:旅馆的功能较为单一,虽然顶层改造确实增加了收入,但少量顶层客人带来的收入有限,因此从长远的角度来看,旅馆没必要投入大量资金新建一部电梯,而是需要探索其他路径来满足少数顶层客人的需求。最后,学生提出问题切入的角度——电梯角度和顾客角度,并据此提出三种解决方案:一是在电梯口设置简单的娱乐设施;二是给顶层客人住宿价格上的优惠;三是完善电梯运行模式,即一部电梯运行时可优先选择高层停靠,两部电梯运行时可分别设置单层停靠和双层停靠,无人使用时可以在低层和顶层分别停靠。这样的运行模式可以减少顶层客人等电梯的时间。经过进一步比较,学生最终确定解决方案为:不增加电梯,通过合理设计电梯运

行模式满足客人的需求。该问题属于系统工程的规划问题,也是化工过程优化的核心问题之一,化工过程中的换热器序列的优化设计、系统的最佳操作方案、化工园区规划等均属于此类问题。学生通过对该案例进行定性分析并确定解决方案,为后续的学习打下了基础。

研讨课调动了学生的学习主动性,课堂讨论氛围十分热烈,不足之处是人数过多。由于教学时长有限,目前该环节以小组为单位进行考核,不能对每位学生进行单独评价,今后需改进。

(三)设计多层次考评体系

本课程成绩由平时成绩和考试成绩组成,为此设计了多层次考评体系,综合评价学生的学习效果。评价内容包括课堂参与度(10%)、课后作业(20%)、研讨与课程小设计(20%)和考试(50%)。课堂参与度包括课堂小测、目标训练和课堂讨论的参与情况。课堂小测在课堂教学开始的前15分钟进行,采用小试卷进行测评。目标训练是在课堂教学开始时,以客观题的形式检验学生对已学知识的掌握程度,并据此展开有针对性的课堂讲解和讨论。课后作业要求学生独立完成。研讨与课程小设计环节要求学生自由组合成5~6人的小组,运用工程和专业原理及方法针对研讨主题进行讨论,完成研讨报告,并以小组为单位进行答辩,最终提交关于案例的课程小设计书面报告。考试安排在课程结束时进行。

(四)调整教师角色

开展课堂讨论必然要占用课堂授课时间。为了应对这一挑战,教师可以提前准备或做出调整。

第一,教师可以要求学生提前完成相应的准备工作。如教师提出问题,布置预习作业,要求学生通过自主查阅资料或阅读教材及教辅书籍,完成预习报告,带着问题和答案进行课堂学习。教师可以将这些内容作为考点,以提高学生学习的主动性,有效保证课堂讨论质量。

第二,教师确定课堂讨论主题及范围,规定讨论方向,鼓励学生针对具体问题展开讨论,给学生充分的思考时间,让他们自主解决讨论过程中遇到的问题,完成书面讨论报告并得出结论。在讨

论过程中,教师主要扮演引导者角色,把握讨论方向,并适时介入学生讨论,以保证课堂讨论的有效性。为实现教师角色的转变,教学团队设计了多个评价节点,及时反馈学生主动学习的情况并给予评价;采用情境性、个案分析等非传统的评价方式,为学生自主学习提供机会,及时给予学生成长性的反馈和学生自评及互评的机会;鼓励学生提出自己的观点,给予学生犯错、修正和自我调整的机会;设置完善的学习考评方式,注重过程性评价。

第三,教师将研讨主题与课程内容联系起来,保证学生在讨论过程中完成相关内容的学习,强化学习效果。在教学大纲、教案及每章内容的板书中,均会列出需要学生课后阅读的教材章节,进一步保证学生理解课堂讲授的知识点。

第四,教师根据学生讨论结果,在课堂上进行总结和整理,指出讨论的重点及尚未解决的问题,留待下次解决或进行课后答疑和课外讨论。

(五)改变学生学习方式

学习方式改变是实现以学生为中心的教學的基础,所以培养学生独立学习和自我评价的能力很关键。在此过程中,教师要引导学生求知的好奇心,为学生创造良好的学习新知识的环境。除了课堂教学,教师要通过课程群、微信等途径解答学生的问题,并接受学生预约现场答疑;另外,教师要引导学生利用图书馆的资源 and 网上资料,以及对外交流机会进行独立学习;鼓励学生从与同龄人的互动中学习,反思自己的不足;鼓励学生对已形成的结论提出质疑,或对同一问题提出不同观点和解决办法,让学生通过自我评价能力的培养,建立起学习成效自我负责的观念。

(六)组建教研团队

本课程组建了由5位老师组成的教学团队,其中教授1人、副教授2人、讲师2人,年龄范围在30~47岁。经过多年的课程建设与教学实践,教学团队制定了符合教学目标的教學大纲和与各教学环节相适应的教學日历、授课计划、课程设计、试卷评分标准等教學文件,并严格按照教學大纲的要求,每月开展教研活动。在课堂教学期间,

教学团队立足本校专业特色,对每个章节的案例进行讨论,以使案例训练更具针对性。

三、结语

本课程立足于工程教育的核心要求和标准,结合专业特色,设计了多层次的教学环节,实现了教学内容、方法和手段的统一;探索了以学生为中心的教學过程,同时通过多种方式加强学生对课程知识的理解和掌握;基于案例分析和研讨课,引导学生把握问题本质,提高分析和解决问题的能力,掌握发现问题和解决问题的方法论。

(文字编辑:孙昌立)

参考文献:

- [1] 李冰洋,詹逸思.美国一流大学化工专业课程设置研究[J].化工高等教育,2019(3):21-25,89.
- [2] 国家精品课网[EB/OL].<http://www.jingpinke.com>.
- [3] Blumbeg P. Developing learner-centered teaching: a practical guide for faculty[M]. San Francisco: Jossey-Bass, A Wiley Imprint, 2009.
- [4] Smith R. Chemical process: design and integration[M]. New York: McGraw Hill, 2010.
- [5] 方利国.化工过程系统分析与合成[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [6] Kemp I C. Pinch analysis and process integration[M]. 2nd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [7] Gmehling J, Kolbe B, Kleiber M, et al. Chemical thermodynamics for process simulation[M]. Hoboken: Wiley-Vch, 2013.
- [8] 张卫东,孙巍,刘君腾.化工过程分析与合成[M]. 2版.北京:化学工业出版社,2016.
- [9] 姚平经.过程系统工程[M].上海:华东理工大学出版社,2009.
- [10] 黎小辉,牛梦龙,丁亮,等.专业认证背景下化工过程分析与合成课程针对复杂工程问题的教学设计、构建及实施[J].化工高等教育,2019(4):48-52.
- [11] Aggarwal A, Floudas C A. Synthesis of general distillation sequences-nonsharp separations[J]. Computers & Chemical Engineering, 1990, 14(6): 631-653.