

## 基于小组合作学习的“线上预习–翻转课堂–课后探究”教学模式在化工原理教学中的应用

郝庆兰<sup>1</sup>, 苏俊超<sup>1</sup>, 贾原媛<sup>1</sup>, 刘亚<sup>2</sup>, 滕波涛<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 天津科技大学化工与材料学院, 天津 300457

<sup>2</sup> 浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江 金华 321004

**摘要:** 在化工原理国家一流线上课程与线上线下混合式教学基础上, 开展了基于小组合作学习的线上预习–翻转课堂–课后探究的教学探索。以化工原理精馏单元操作中的塔板数简捷计算为例, 对该教学模式进行阐述。通过班级分组、布置课前思考题, 引导学生带着问题开展线上预习与小组合作学习, 充分发挥了学生学习的主动性, 大幅提高了线上预习、线下翻转课堂的教学效果与效率。通过师生翻转课堂教学与小组合作学习, 使学生掌握了解决复杂工程问题的思路与方法, 培养了学生解决复杂工程问题的能力。通过课后延伸问题与小组合作, 引导学生课后进行学习探究, 学生建立了比现有文献适用范围宽得多的塔板数计算方程, 培养了科学研究与创新能力。化工原理教学实践表明, 基于小组合作学习的“线上预习–翻转课堂–课后探究”是一种较高效、通用性较强的高等工程教育教学模式。

**关键词:** 新工科; 教学模式; 小组合作学习; 线上预习; 翻转课堂; 课后探究

**中图分类号:** G64; O6

## Application of “Online Preview-Flipped Classroom-Home Exploration” Teaching Mode Based on Cooperative Group Learning into Principles of Chemical Engineering

Qinglan Hao<sup>1</sup>, Junchao Su<sup>1</sup>, Yuanyuan Jia<sup>1</sup>, Ya Liu<sup>2</sup>, Botao Teng<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China.

<sup>2</sup> College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang Province, China.

**Abstract:** Based on the online and offline teaching of chemical engineering principles course, we carried out the teaching exploration combined with online preview, flipped classroom and home exploration on the basis of cooperative group learning. This work shows the teaching mode by taking the simple calculation of the tray number of distillation column as an example. On the basis of class grouping and pre-class thinking questions, the teacher guides students to online preview and cooperative group discussion with questions, by which students' learning initiative is ignited, and the teaching effect and efficiency of offline flipped classroom are greatly improved. Through flipped classroom and cooperative group learning, students master the ideas and methods to solve the complex engineering problems in chemical engineering, and can solve the corresponding complex engineering problems. Through extending problems and post-class group cooperation, students are guided to study and explore after class, by which students' scientific research and innovation ability is cultivated. Our teaching experiences indicated that “online

收稿: 2022-11-29; 录用: 2023-01-09; 网络发表: 2023-02-02

\*通讯作者, Email: tbt@tust.edu.cn

基金资助: 教育部第二批新工科项目(E-HGZY2020200)

preview-flipped classroom-home exploration" on the basis of cooperative group learning can be used as a general teaching mode in higher engineering education with high efficiency.

**Key Words:** Emerging engineering education; Teaching mode; Group learning; Online preview; Flipped classroom; Home exploration

## 1 引言

为主动应对新一轮科技革命与产业变革,支撑服务创新驱动发展、实现“中国智造”,2017年教育部发布了《关于开展新工科研究与实践的通知》,明确提出中国高等工程教育要从理论上创新,从政策上完善,在实践中推进和落实,建立中国模式、制定中国标准、形成中国品牌,打造世界工程创新中心和人才高地,实现工程教育强国<sup>[1,2]</sup>。在教学过程中培养学生创新能力与解决复杂工程问题的能力是实现这一目标的基础<sup>[3]</sup>。顾佩华<sup>[4]</sup>提出“持续创新工程教育、教学培养和学习的新技术与手段”是新工科教育核心任务之一。随着慕课与线上教育的兴起,特别是疫情导致的大规模线上教学,探索充分发挥学生学习主动性与线上教学优势、培养学生解决复杂工程问题能力的通用性教学模式既是中国高等工程教育面临的重要挑战,也是高等工程教育的机遇。

化工原理是化学、化工类专业的专业基础课,主要讲解化工生产中的动量、热量与质量传递等单元操作的原理、工艺计算及设备的结构、设计与操作<sup>[5,6]</sup>。近年来,在笔者负责的化工原理国家线上一流课程的基础上开展了线上线下混合式教学的探索,尝试将传统的讲授式教学向发挥学生主动性的翻转课堂模式转变<sup>[7]</sup>。在教学改革过程中,笔者发现探索能够充分发挥线上课程优势,调动学生学习主动性,引导学生分析化工原理中的复杂工程问题,探索解决方案,并在这一过程中培养学生的创新能力与解决复杂工程问题的能力是在新工科背景下化工原理教学要解决的重要课题<sup>[8]</sup>。

为解决这一问题,笔者开展了基于小组合作学习的“线上预习-翻转课堂-课后探究”的教学探索,即基于小组合作,学生在线上预习将要教学的内容,结合课前思考题,通过分组引导学生课前以小组合作的方式对思考题进行讨论和探索,形成一定的认识,进而大幅提高线下翻转课堂的教学效果与效率;在此基础上,通过师生翻转课堂教学与学生课后探究相结合,培养学生的创新能力与解决复杂工程问题的能力。下面以精馏塔塔板数的简捷计算为例说明这一教学模式的应用过程。

## 2 基于小组合作学习的“线上预习-翻转课堂-课后探究”教学模式

小组合作学习是以合作学习小组为基本形式,在教师指导下,通过小组成员合作,发挥集体的力量与积极性,提高个体的学习动力和能力,完成特定教学任务的教学方法<sup>[9]</sup>。笔者所带的化学工程与工艺班级每年约50人,按照性别与往年成绩均衡的原则划分为10个学习小组。为保证小组学习的效果及学生平时成绩考核的公平性,要求每个小组每周至少进行一次思考题讨论,并留有简单的讨论记录;线下翻转课堂教学中的小组讨论成绩作为平时成绩一部分,小组发言人实行轮流制。课后探究亦以小组为基本学习单位,共同开展教师布置的课后延伸问题的探究与讨论,具体“线上预习-翻转课堂-课后探究”教学模式如图1所示。

## 3 基于小组合作学习“线上预习-翻转课堂-课后探究”的教学实践

### 3.1 课前思考题引导学生线上预习与小组合作学习

为保证翻转课堂的教学效果,充分发挥学生学习的主动性,要求学生课前通过笔者负责的国家线上一流课程教学资源预习相应的内容,并给出思考题,要求小组讨论与探究。以精馏塔塔板数的简捷计算为例说明这一教学方法的应用过程。

教师要求线上预习教学内容,并布置如下思考题:

在上次课讲到:在精馏塔逐板法和图解法求解塔板数的过程中发现,对塔顶泡点回流的精馏塔,完成规定的分离任务所需的理论塔板数( $N$ )与物系的相对挥发性( $\alpha$ )、回流比( $R$ )、进料组成( $x_F$ )与热状

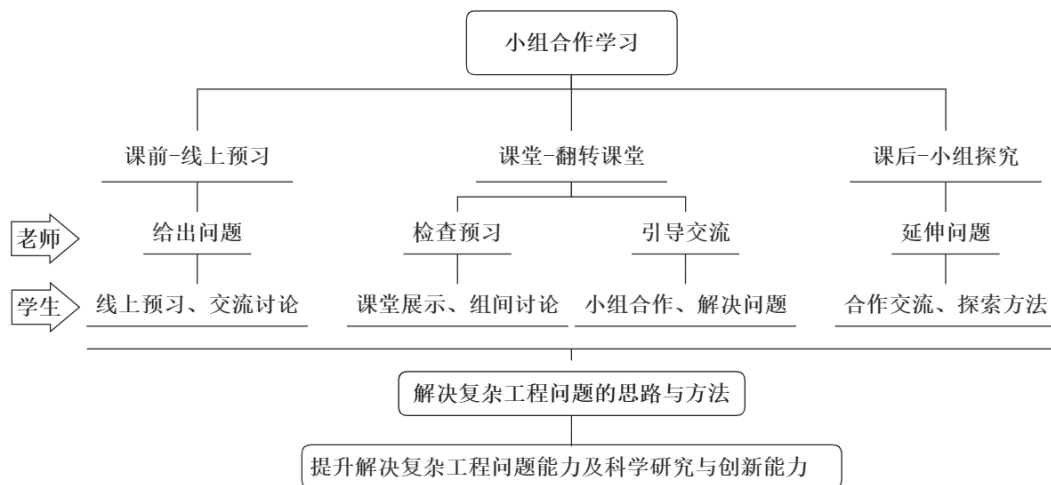


图1 基于小组合作学习的“线上预习-翻转课堂-课后探究”教学模式

态( $q$ )、塔顶轻组分( $x_D$ )与塔釜重组分( $x_W$ )的组成有关, 即 $N=f(\alpha, x_F, q, x_D, x_W, R)$ 。这是一个典型的多变量影响的非线性、隐函数关系式。问题1: 能否用解决流体流动阻力、传热系数的量纲分析法呢?

问题2: 如何建立理论塔板数与回流比的定量关系?

### 3.2 翻转课堂解决复杂工程问题, 培养学生解决复杂工程问题能力

#### 3.2.1 复习前期知识点, 理清知识主脉络, 提出本次课目标

通过课堂师生问答, 教师帮助学生复习精馏概念: 精馏是化工生产中非常重要的单元操作, 该过程可以看作由多块塔板串联组合的多级分离过程, 通过多次部分汽化和部分冷凝, 液体混合物在塔顶得到接近纯的轻组分(精馏段), 在塔釜得到接近纯的重组分(提馏段)<sup>[5]</sup>。在复习精馏原理、理论板概念的基础上, 指出精馏的核心任务之一是对给定的物系、给定的工艺分离要求, 计算完成分离任务所需要的塔板数。教师带领学生针对双组分连续精馏过程塔板数计算进行复习并板书, 理清知识点的主脉络: 通过全塔物料衡算, 解决了精馏塔塔顶的馏出液、进料和釜液的流率与组成间的关系; 通过无进料无采出塔板的物料与热量衡算, 引入恒摩尔流假设; 通过对进料板的物料与热量衡算, 解决了精馏段和提馏段间的气相和液相流率的关系, 同时解释了进料热状态对精馏段和提馏段物料流率的影响; 通过对精馏段和提馏段物料衡算, 获得了精馏塔操作线方程和 $q$ 线方程。在以上知识的基础上, 利用逐板法和图解法求解完成规定的工艺分离任务所需要的理论塔板数。并与学生一起总结并提出问题: 逐板法计算比较繁琐, 图解法在做定性分析时非常方便, 但是两种方法均不能给出对给定物系完成规定分离任务所需理论塔板数的定量关系。指出本次课目标: 寻找完成工艺规定分离任务所需理论塔板数的可能定量关系, 相应课堂板书如图2所示。

#### 3.2.2 引导小组交流, 检查学生预习情况及对思考题的认知

教师提出课前思考题, 引导学生分组交流。从学生交流情况来看, 对于问题1: 完成规定的分离任务所需的理论塔板数 $N=f(\alpha, x_F, q, x_D, x_W, R)$ , 这样的多因素影响的复杂工程问题, 能否用解决流体流动阻力、传热系数的量纲分析法。对这个问题, 多数学习小组无法回答, 因为量纲分析法是上一学期学习的, 学生对该方法的适用范围与应用过程理解不够深入<sup>[10,11]</sup>。教师应指出 $\alpha$ ,  $x_F$ ,  $q$ ,  $x_D$ ,  $x_W$ ,  $R$ 均为无量纲, 塔板数 $N$ 也不是基本量纲, 所以通过量纲分析法将多因素变量简化为几个准数的思路行不通, 加深学生对量纲分析法的理解及问题1的认识。

对于问题2: 如何建立理论塔板数与回流比的定量关系, 大多数学习小组能够根据课前线上预习及讨论给出答案, 即教材用吉利兰图进行求解, 并给出具体步骤: (1) 根据精馏给定的条件计算出最小回流比 $R_{\min}$ ; (2) 由Fenske方程或图解法计算出最少理论板数 $N_{\min}$ ; (3) 计算出吉利兰图中的横坐标

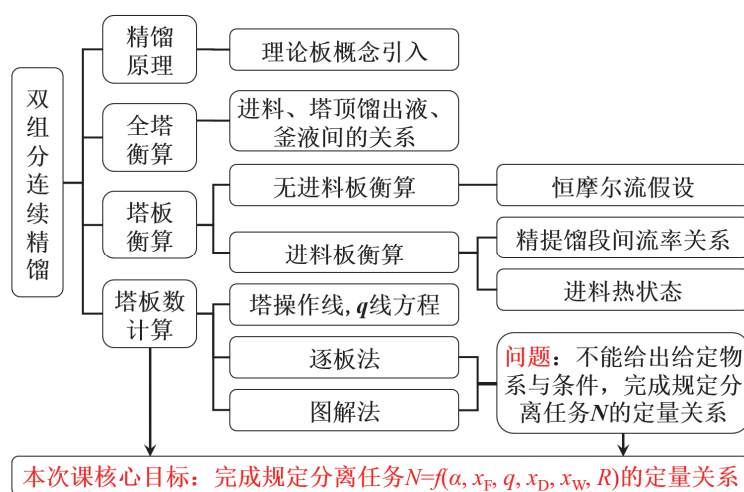


图2 知识脉络与课程目标提出的板书

$X = \frac{R - R_{\min}}{R + 1}$ ; 查吉利兰图, 得到纵坐标  $Y = \frac{N - N_{\min}}{N + 1}$ ; (4) 解得总理论塔板数  $N = \frac{N_{\min} + X}{1 - Y}$ 。这里教师对能够比较准确回答这一问题的学生给予肯定与鼓励。

### 3.2.3 翻转课堂教学, 引导学生知其然并知其所以然

课堂讨论1: 在学生自己讲述利用吉利兰图进行塔板数简捷算法后, 教师引导学生思考, 我们要找的定量关系是  $N = f(\alpha, x_F, q, x_D, x_W, R)$ , 而吉利兰图为什么没有考虑  $\alpha$ 、 $x_F$ 、 $q$ 、 $x_D$ 、 $x_W$  这五个因素?

教师引导学生开展组内思考与讨论  $N_{\min}$  与哪些因素有关系, 然后开展组间交流, 最后教师进行总结: 通过图解法分析发现, 当塔顶馏出液全回流时, 精馏操作线与对角线重合, 此时完成分离任务所需理论板数最少 ( $N_{\min}$ ); 当分离物系确定后 (相对挥发度  $\alpha$  一定),  $N_{\min}$  仅与分离要求 ( $x_D$  与  $x_W$ ) 相关, 如图3(a)所示。同样, 当回流比最小 ( $R_{\min}$ ) 时, 对应的理论塔板数无穷多, 最小回流比与相对挥发度、进料组成及热状态相关, 如图3(b)所示。因此, 完成规定分离任务所需理论板数可以转化为最少理论板数、最小回流比及回流比的函数, 其中最少理论板数可以通过在相平衡线与对角线间作图非常方便地获得; 最小回流比也可以由相平衡线与  $q$  线交点非常便捷地获得。因此,  $N = f(\alpha, x_F, q, x_D, x_W, R)$  的六参数问题简化为  $N = f(N_{\min}, R_{\min}, R)$  的三参数问题。

课堂讨论2: 在此基础上, 再次提出当  $N = f(\alpha, x_F, q, x_D, x_W, R)$  的六参数问题转化为  $N = f(N_{\min}, R_{\min}, R)$  三参数问题, 如何建立他们之间的关系式? 此时再次开展课堂小组讨论, 并进行简单的小组间发言。由于通过课前线上预习, 大部分小组能够提出利用实验的方法建立相应关系式。教师适时抛出提出的文献研究结果: Gilliland<sup>[12]</sup>根据五十多种双组分及多组分精馏的实验数据, 将  $N$  与  $N_{\min}$ 、 $R_{\min}$  与  $R$  进行关联, 在1940年发表了回流比和理论塔板数之间的定量关系图, 称之为吉利兰图, 并提醒学生吉利兰图为双对数坐标, 横坐标为  $\frac{R - R_{\min}}{R + 1}$ , 纵坐标为  $\frac{N - N_{\min}}{N + 1}$ 。利用吉利兰图算法可以方便地由  $R_{\min}$ 、 $N_{\min}$  与  $R$  计算出完成工艺规定分离任务所需的理论塔板数, 因此称之为简捷法。

课堂讨论3: 教师在吉利兰图的基础上, 引导学生思考与讨论, 吉利兰图给出了  $N = f(N_{\min}, R_{\min}, R)$  的隐函数关系, 能否给出明确的函数关系式? 通过小组内课堂讨论及小组间发言, 个别小组能够说出对吉利兰图中的曲线拟合的方法。教师给予鼓励的同时, 给出前人研究结果: Eduljee<sup>[13]</sup>根据

Gilliland的关联图, 经过数学的分析, 于1975年提出了方程  $\frac{N - N_{\min}}{N + 1} = 0.75 \left[ 1 - \left( \frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right)^{0.5667} \right]$ , 并指

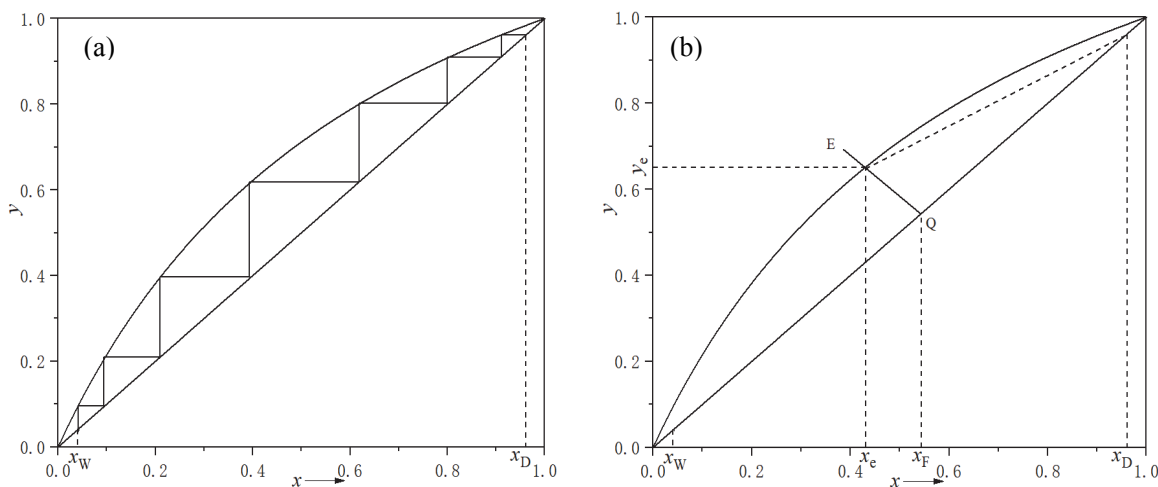


图3 最少理论板 $N_{\min}$  (a)与最小回流比 $R_{\min}$  (b)的图解法计算示意图

出方程适用的范围为:  $0.1 < \left( \frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right) < 0.5$ 。这样就将  $N = f(N_{\min}, R_{\min}, R)$  表达成明确的函数形式。

通过翻转课堂,学生理清了完成分离任务所需理论塔板数与物系性质、进料组成与状态、工艺分离要求的关系,理解了  $N = f(\alpha, x_F, q, x_D, x_W, R)$  的六参数问题转化为  $N = f(N_{\min}, R_{\min}, R)$  三参数的逻辑关系,掌握了化工单元操作解决复杂工程问题的思路与方法,提升了解决复杂工程问题的能力。

### 3.3 课后探究引导学生深入研究,培养学生创新能力

在翻转课堂教学的基础上,教师提出两个研究性问题,引导学有余力的学生课后自主探究。课外引申问题1:有没有其他  $N = f(N_{\min}, R_{\min}, R)$  的方法?并给出参考文献<sup>[14]</sup>。课外引申问题2:Eduljee根据吉利兰图给出的关联式在  $0.1 < \left( \frac{R - R_{\min}}{R + 1} \right) < 0.5$ , 适用范围较窄,能否建立使用范围更广的关联式?这两个问题仍然以学习小组为单位讨论,但不强制要求学习,小组学习结果可以进行课堂汇报,也可以体现在期末综合小论文。

学生的学习创造力是不应被教师和教材内容束缚的,其取得的结果也大大超出了教师的预期。对于问题1:通过小组合作,大部分学生学习了教师给的参考文献中的方法,即Erbar与Maddox在大量实验数据的基础上,在1961年提出的  $\frac{N_{\min}}{N}$ 、 $\frac{R}{R+1}$  与  $\frac{R_{\min}}{R_{\min}+1}$  三参数算图<sup>[14]</sup>。该图以  $\frac{N_{\min}}{N}$  为横坐标,  $\frac{R}{R+1}$  为纵坐标,以  $\frac{R_{\min}}{R_{\min}+1}$  为变量,作不同  $\frac{R_{\min}}{R_{\min}+1}$  值的曲线。部分同学在文献基础上,将模糊的文献数据重新作图,得到较原始文献清晰的Erbar& Maddox算图,如图4所示。

该图使用步骤如下:(1)根据分离物系、进料组成及热状态、分离要求计算  $R_{\min}$ 、 $R$ 、 $N_{\min}$ , 计算  $\frac{R_{\min}}{R_{\min}+1}$ , 并在图中找到对应的曲线;(2)计算  $\frac{R}{R+1}$ , 在图中找到其与  $\frac{R_{\min}}{R_{\min}+1}$  的交点;(3)由交点向横坐标做垂线即得  $\frac{N_{\min}}{N}$  值,进而求出理论塔板数  $N$ 。这种方法也较简捷,广泛应用于精馏塔板数的估算中。

对于问题2:部分学生对吉利兰图进行了不同方程的拟合尝试,个别学生给出拟合方程  $\frac{N - N_{\min}}{N + 1} = -1.058 + 1.657e^{\frac{R - R_{\min}}{2.174(R+1)}} + 0.111e^{\frac{R - R_{\min}}{0.038(R+1)}}$ , 其适用范围为(0.01, 0.95), 基本覆盖了所有  $R$  的范

围, 较文献(0.1, 0.5)范围大很多。该方程在很宽的范围内得到的拟合曲线与原始文献中的吉利兰图几乎完全重合, 如图5所示。该方程可以直接用于捷算法精馏塔板数的计算, 不仅大幅避免了人为查吉利兰图带来的误差与不便, 同时为计算机模拟计算提供了准确的方程。这些课后探究大幅提升了学生对课程学习的热情, 相关结果对精馏塔塔板数计算也具有重要意义。

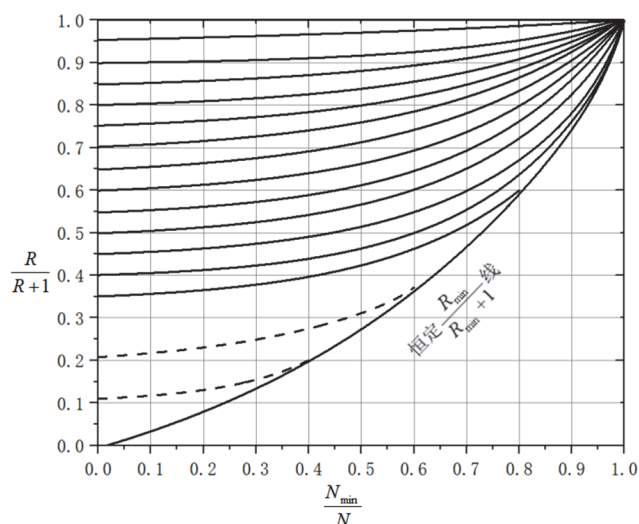


图4 Erbar & Maddox算图

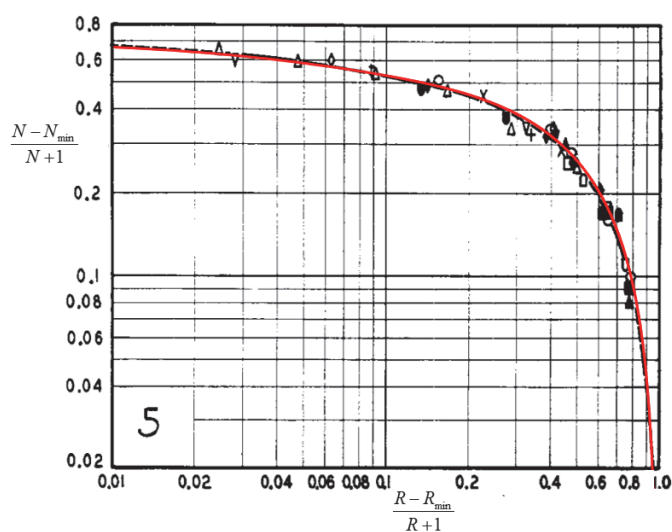


图5 学生拟合方程(红色曲线)与原始文献中的吉利兰图

电子版为彩图

教师通过课后延伸问题引导学生开展进一步的小组合作学习与探究, 充分发挥了学生的积极性与创造力, 并在课堂小组交流或期末综合小论文中进行鼓励与肯定, 培养了学生初步的科学研究能力与创新能力。

#### 4 结语

在化工原理线上线下混合式教学广泛开展的基础上, 笔者在小组合作的基础上开展了“线上预习-翻转课堂-课后探究”的教学探索, 并以化工原理精馏塔塔板数简捷计算为例对该教学模式进行

了阐述。通过班级分组学习,布置课前思考题,引导学生进行教学内容的线上预习与小组合作学习,充分发挥了学生学习的主动性,大幅提高了线下翻转课堂的教学效果与效率;通过师生翻转课堂教学与小组合作学习相结合,使学生掌握了解决复杂工程问题的思路与方法,提升了解决复杂工程问题的能力;通过课后延伸问题,引导学生课后进行小组学习与探究,培养学生的科学研究与创新能力。在知识方面:学生不仅会使用捷算法,更掌握了捷算法建立的理论基础;在能力方面:学生不仅掌握了使用捷算法进行精馏计算的技能,更掌握了解决这类复杂工程问题的思路与方法;在思维方面:学生掌握了解决复杂工程问题的思维方式,明晰了量纲分析法应用范围,当其解决不了问题的时候,知道从哪些角度出发解决多参数影响的复杂工程问题。实践证明,基于小组合作学习的“线上预习-翻转课堂-课后探究”是一种较高效、通用性较强的高等工程教育教学模式。另外,为保证该模式的顺利、高效开展,教师应注意以下四点:(1)教师应做好与该教学模式相适应的教学设计,包括课前合作学习的思考题、翻转课堂的问题、课后探究问题,预习与翻转课堂思考题数量宜精不宜多,题目应紧密围绕教学重点与难点;(2)每周要求一次基于线上预习的小组合作学习;(3)课后探究问题每学期3-5次,同时教师通过线下、线上给予适当指导;(4)线上预习、小组合作讨论、课后探究应与平时成绩和期末综合小论文成绩相结合,及时给予表现优秀学生正反馈,保护学生学习积极性与热情。

### 参 考 文 献

- [1] 教育部高等教育司关于开展新工科研究与实践的通知. [2023-09-14]. [http://www.moe.gov.cn/s78/A08/tongzhi/201702/t20170223\\_297158.html](http://www.moe.gov.cn/s78/A08/tongzhi/201702/t20170223_297158.html)
- [2] 吴爱华, 侯永峰, 杨秋波, 郝杰. 高等工程教育研究, **2017**, No. 1, 1.
- [3] 陈慧, 陈敏. 高等工程教育研究, **2017**, No. 2, 19.
- [4] 顾佩华. 高等工程教育研究, **2017**, No. 6, 1.
- [5] 大连理工大学. 化工原理. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [6] 陈敏恒, 丛德滋, 方图南, 齐鸣斋, 潘鹤林. 化工原理. 第4版. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [7] 刘亚, 曾贤璐, 胡鑫, 蒋永福, 代伟, 郝庆兰, 章康达, 滕波涛. 化学教育(中英文), **2018**, 39 (24), 7.
- [8] 陈敏恒, 方图南, 丛德滋. 化工原理教与学. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [9] 马闯. 沈阳教育学院学报, **2009**, 11 (1), 53.
- [10] 蒋靖. 天津理工学院学报, **1991**, No. 1, 47.
- [11] 滕波涛, 谢坚坚, 冯娜, 刘亚. 化学教育, **2016**, 37 (22), 57.
- [12] Gilliland, E. R. *Ind. Eng. Chem.* **1940**, 32, 1220.
- [13] Eduljee, H. E. *Hydrogen Process* **1975**, 54, 120.
- [14] Erbar, J. H.; Maddox, R. N. *Petrol. Refin.* **1961**, 40 (5), 183.