
案例 6 多层次、广适用、全方位的精馏综合拓展虚拟仿真实验设计与跨校应用实践

精馏是工业上应用最广泛的分离操作，也是化工原理理论和实践教学中的一项重要内容；另一方面精馏操作是一项综合型很强的单元操作，并把化工的“三传”理论（动量传递、热量传递和质量传递）有机地结合在一起。精馏的实际操作中涉及多种包括易燃、易爆、有毒物质在内的化学产品，物料条件多种多样，同时，由于分离条件和分离目标的不同，精馏还包含了常压、减压、加压等多种不同的操作条件，塔高、塔径、塔内件形式等不同的设备条件。因此精馏的操作存在高危、高毒、高风险的潜在风险，也受若干物性、操作和设备条件控制，精馏的这些特性使其在高校化工类专业学生的实践教学环节受到了很大的局限。而实践教学环节对于培养和提高化工类专业学生的工程实践能力、创新精神和创新能力又不可替代。此外，一些理论知识抽象难于讲解，而且在实际操作中难以呈现。

针对上述问题，天津大学基础实验中心的教学团队以中心的精馏实验装置为基础，以化工过程中基础性和综合型强的精馏单元操作为主线，以 Unity3d 作为 3D 引擎，采用 C#语言并通过 Visual Studio 工具进行程序开发，综合 SVN，Microsoft Project、Adobe Flash、Maya，3D Max 等技术和工具进行项目管理和建模，面向国内外多所院校的学生和科技人员，开发和建设了“**精馏综合拓展 3D 虚拟仿真实验**”。本虚拟仿真实验以学生的发展和需求为中心，以调动学生学习积极性和主动性为抓手，以提高学生实践创新精神和能力为目的，通过身临

其境的实验环境、逼真的流体流动现象、生动的设备拆解动画、动态可调的结构/操作参数和实验物系、自主式和探究式的学习体验、线上线下融合的教学服务和完善的评价体系，使不同地区、类型、层次的用户群体都能掌握精馏的理论、操作和设计。2018 年，该虚拟仿真实验获得了首批国家虚拟仿真实验教学项目认定，在国家虚拟仿真实验教学课程共享平台上的访问量一直名列前茅，总访问量达到了 19 万余次，总实验次数达到了 12 万人次。取得了良好的应用和示范效果。

1. 实验内容和主线

精馏综合拓展 3D 虚拟仿真实验采用软件开发，整个软件系统以精馏单元操作为主线进行展开，包括三个层次七个教学模块。

预设的实验体系为：乙醇-正丙醇、乙醇-水、苯-甲苯等混合物物料，学生可选的精馏塔类型有板式塔和填料塔，流体输送设备可以为不同型号、不同种类的泵，换热器的类型和参数也可以由学生自主选择，根据不同体系的性质，根据学生选择的结果，系统自动调节相应的预设参数。

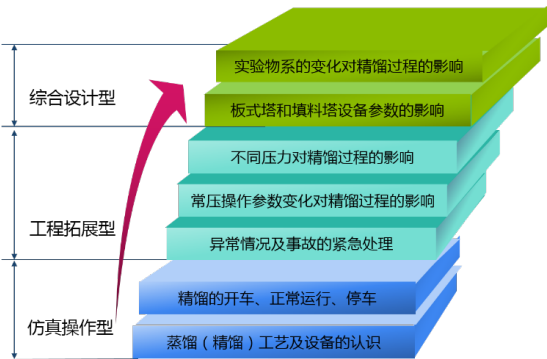


图 1 教学模块递进式三层次结构与七个教学模块

在本实验中，根据学生的需求与知识结构，构建了三层次（仿真

操作型、工程拓展型和综合设计型) 七个教学模块(见图 4) 的实验内容, 使实践教学内容由验证理论向综合应用、研究设计和创新开发延伸, 使不同层次、不同类型的学生都能在本仿真实验中, 根据自己的需要进行自主学习。

本虚拟仿真实验中设置的三个层次在知识水平、能力要求上逐渐提高, 学生可以根据自己的需求进行学习。在教学安排上要求学生在完成一个层次的学习并达到一定要求后, 才能够进入到下一层次的学习, 使学生在在学习过程中有“闯关式”的体验, 既保证了学生每个层次的学习效果, 又可以激发学生的学习热情和兴趣。

仿真操作型包含的教学模块有: 蒸馏(精馏)工艺及设备的认识; 精馏单元操作的开车、正常运行、停车。

工程拓展型包含的教学模块有: 异常情况及事故的紧急处理; 常压单元操作参数变化对精馏过程的影响; 不同压力(加压、减压)对精馏过程的影响。

综合设计型包含的教学模块有: 板式塔和填料塔设备参数对精馏过程的影响; 实验物系的变化对精馏过程的影响。

各个实验教学模块的内容如下。

1.1 蒸馏(精馏)工艺及相关设备的认识

本模块主要包括蒸馏(精馏)工艺的主要原理(图 2)、流程(图 3)、设备及过程特点等, 并拓展介绍相关的流体输送设备和传热流程及设备。

在该模块中, 针对精馏塔的主要部件(如塔板结构、液体分布器

和填料形式等）、塔釜再沸器、塔顶冷凝器、原料输送设备等，通过三维建模，将流体在塔内的流动状况、相变的发生、设备的剖面、拆装和各角度视图进行充分展示（见图 4～图 7），使设备及流程更形象和直观，便于学生学习和理解，以提高学习效果。

在本模块中，还对精馏过程中使用的输送和换热设备泵及换热器进行拓展介绍，有专门的页面将泵和换热器的相关内容进行展示（图 8 和图 9）。学生在学习精馏相关知识的同时，也掌握动量传递和热量传递的相关知识，建立起“三传”之间的相互联系，为实现对整个流程的综合设计打下基础。

通过本模块的学习，学生对精馏过程及相关的传质、传热和流体流动相关过程形成初步认识和了解，方便学生将理论知识与实际设备在知识体系中进行对接，熟悉精馏操作过程的分离原理、主要物料走向、主要设备及流程特点等。



图 2 实验目的和实验原理

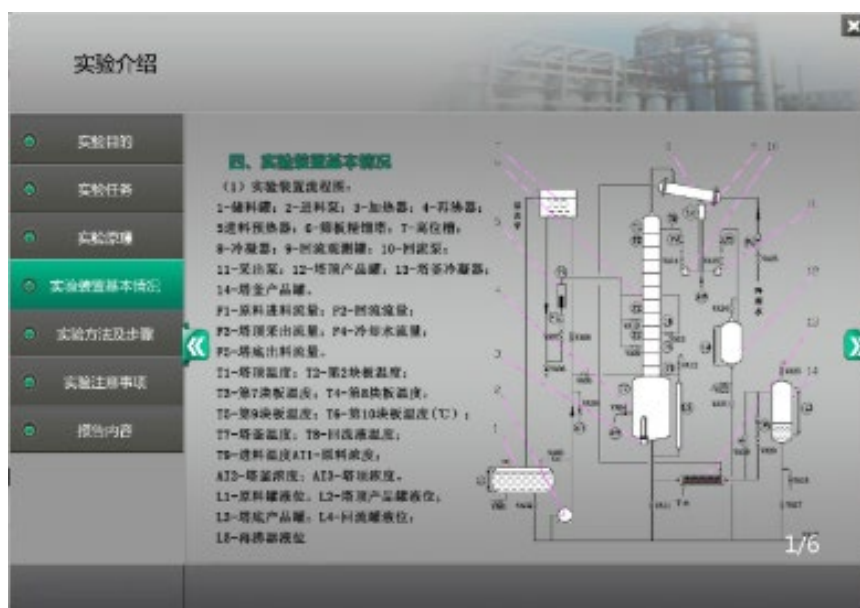


图 3 实验流程图

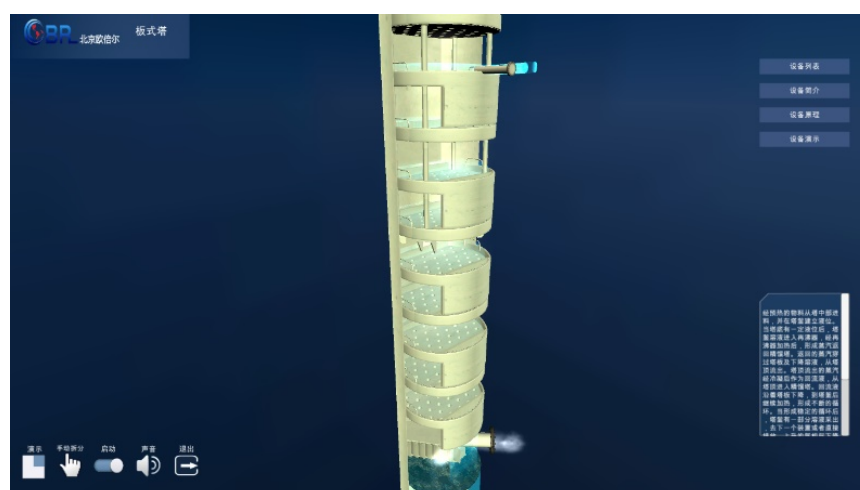


图 4 板式精馏塔操作演示

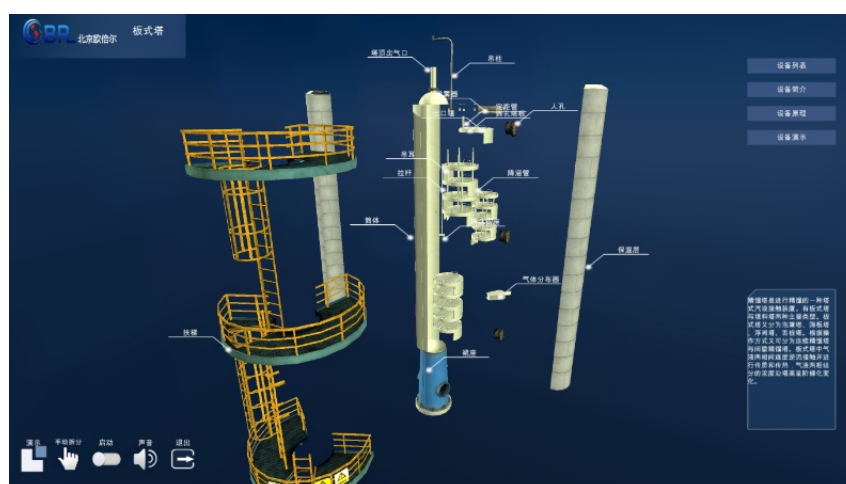




图 6 填料精馏塔操作演示

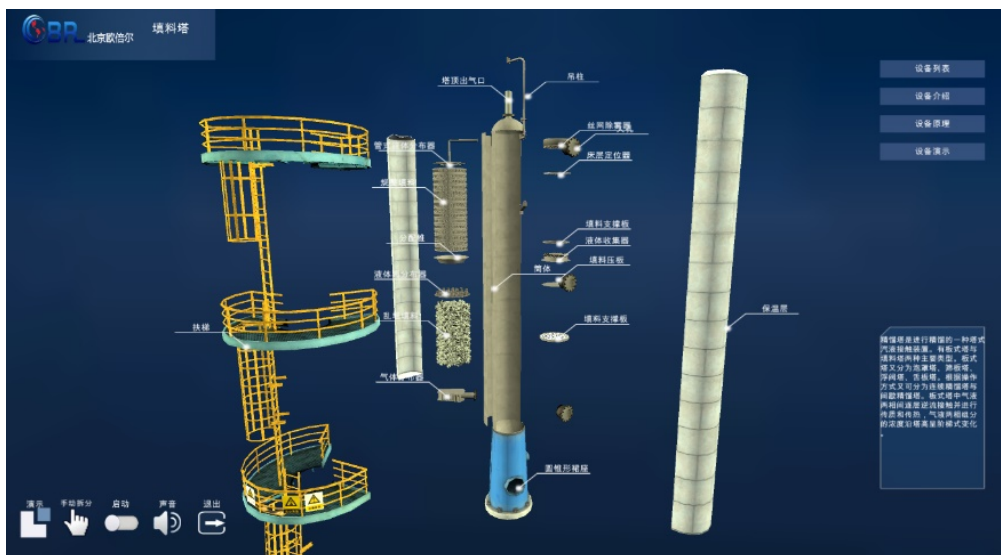


图 7 填料精馏塔内部结构介绍



图 8 换热器结构讲解



图 9 离心泵详细讲解

1.2 精馏单元操作的开车、正常运行、停车

本实验模块的主要目的是让学生掌握精馏设备的开、停车方法及正常运行过程中所需要控制的相关参数等。主界面如图 10~12 所示。在这一单元，采用指导模式和自主操作两种学习方式。指导模式的学习，是学生在软件提示下，进行设备的开停车步骤和正常运行操作。学生也可以选择自主操作模式，自主操作设备的开车、正常运行和停车步骤。系统会根据学生自主操作的正确性和熟练程度，对学生的操作评分，以检验学生对这部分知识的掌握程度。

在本模块中，通过多种技术手段，将精馏单元操作开、停车和正常运行的过程与流程参数以曲线图、柱状图等展现给学生，学生可以直观、生动地了解在操作过程中发生的流动、传热和传质等过程变化，提高实验教学实验对学生的吸引力。该模块系统对学生操作自动评分，学生可重复操作以求获得更高的分数，从而激发学生的学习积极性和主动性。



图 10 精馏综合拓展 3D 虚拟仿真实验装置正视图



图 11 精馏综合拓展 3D 虚拟仿真实验装置后视图



图 12 精馏综合拓展 3D 虚拟仿真实验装置控制及仪表界面

1.3 异常情况及事故的紧急处理

本模块的学习目的是让学生了解精馏操作中各种异常操作现象、产生的原因及处理方法，增加学生的实践经验，提高学生应对紧急突发情况的处理能力。

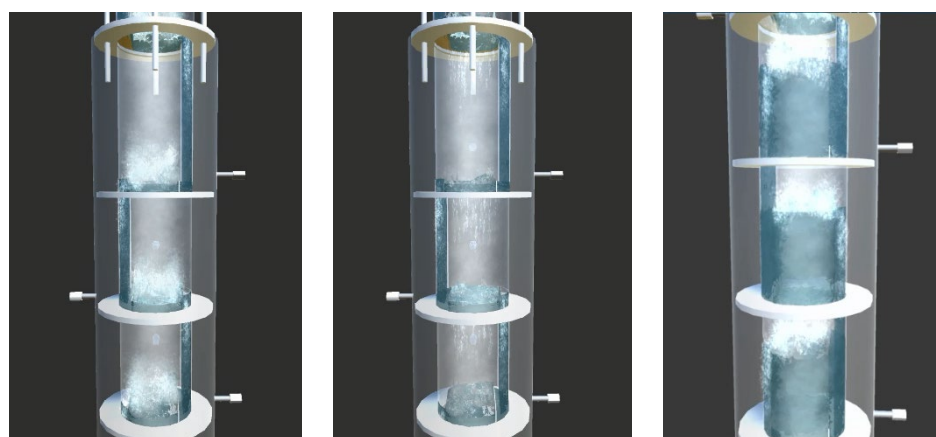
在精馏操作中，一些异常操作现象（如严重液沫夹带、漏液、液泛等，见图 13）会使塔板效率降低甚至使操作无法进行，情况严重甚

至会造成事故发生。这些状况是实际生产过程中要避免发生的，在实际的实践教学过程中，从安全等多方面因素考虑，很难让学生直观了解相关的知识。在本模块中，通过虚拟仿真的方法，采用多媒体、三维建模的手段模拟了这些在实际实验过程中不允许或者不希望出现的现象，对这些现象产生的原因和解决方案进行介绍，以拓展学生的认知范围。

在本模块的教学中，还着力加强对学生安全意识的培养，在异常情况的介绍中，除了介绍异常情况导致的隐患或事故以外，还会对工业生产常用事故进行介绍。如果学生在自主操作过程中没能及时消除隐患，在虚拟仿真界面上会演示异常情况导致的事故发生，以加深学生的印象，提高学生的安全意识。

本模块的学习采用介绍和虚拟操作结合的方式进行。首先，学生进入该模块后，可以自主选择具体的异常项目，了解该种异常情况产生的原因、现象、危害和处理方法，增强学生对于安全、环境等多方面的认识。这一模块的内容采用文字、图片、三维动画、视频结合的方式展现，直观生动。使学生充分认识到所学习内容的重要性和必要性，激发学生的学习热情。之后，可以采用虚拟仿真操作的方法，学生自主选择需要被处理的异常情况，按照规定的紧急处理方案在虚拟仿真装置上进行操作，直至异常情况或事故隐患被排除，生产过程恢复正常。在操作过程中，系统会对学生的操作正确率和熟练程度评分，并指出学生的错误之处，以加深学生的印象，学生为获得满意的成绩可以重复演练，为将来现实操作打下良好的基础。由于采用了虚拟仿

真的实验手段，学生在学习过程中全程无需接触真实设备及实验物料，学习过程安全、环保，杜绝了各种危害的发生。



(a) 雾沫夹带

(b) 漏液

(c) 液泛

图 13 精馏过程中不正常现象的演示

1.4 常压单元操作参数变化对精馏过程的影响

在精馏操作中，过程参数（如塔板温度等）会受到某些因素（如进料热状况、回流比等）的影响而发生变化，而掌握这些变化发生的原理，对于理解精馏操作和保证精馏过程的稳定至关重要。在实际的精馏实验中，由于设备条件的限制，过程参数的稳定需要较长时间。在虚拟仿真实验中，可以便捷地对这些影响精馏过程的因素进行考察，并且将这些过程参数的变化通过系统加速快速显示出来。让学生通过思考、探索、分析、调整的过程参与体验，培养学生分析问题、解决工程问题的能力。

1.5 不同压力（加压、减压）对精馏过程的影响

压力是精馏过程中非常重要的参数之一，精馏塔内总压的改变会对精馏过程中二元物系的气液平衡产生很大的影响，进而会影响到塔

内的温度分布、物料浓度分布和产品的产量、质量，还会影响到精馏塔的结构和设备布置等多个方面。在工业生产中，减压精馏和常压、加压精馏在设备设置、流程布置等方面有很多差异。因此，掌握精馏过程中压力的影响非常必要。

在本模块中，通过虚拟仿真，三维建模的方式，将减压、常压和加压精馏塔在同一界面内进行比较；通过设置不同压力，采用相同物系，相同操作条件，让学生比较在不同操作压力下，塔内过程参数和产品产量、质量的区别；通过设置分离任务，让学生自主选择采用合适的操作压力完成实验。上述教学方法，可以让学生直观地了解不同操作压力对精馏过程的影响，将枯燥生硬的理论知识在三维虚拟仿真的助力下立体化、形象化，使学生建立工程观念，拓展学生的知识领域。

1.6 板式塔和填料塔设备参数对精馏过程的影响

精馏塔设备的设计和 device 参数的调整，如改变塔板数（塔高）、改变填料类型、改变再沸器、冷凝器型式等，是化工单元操作实践教学中很重要的内容。但是在实际的精馏实验中，由于安全因素、实验室空间限制、设备制作改造成本高、耗时长等因素的制约，学生往往没有机会在实验室进行设备的改装和调整。对此，借助虚拟仿真实验技术，可以实现零成本、快速地按照设计或计算得到的参数对设备进行调整，然后在改造后的虚拟实验设备上开展精馏操作，通过虚拟实验来验证设计和计算的正确性，以确定下一步的设计方案。还可以通过针对某一物系设置分离任务，由学生自主选择采用何种精馏设备完

成，并进行相关的可行性、经济性和安全、环保等多方面评估，培养学生的项目管理能力，最终由系统或教师对学生完成任务的过程和效果（包括安全、经济性等）进行考察。通过该模块的学习，学生得到更综合的训练，对于培养学生的研究能力和解决综合复杂工程问题的能力都有很大帮助。

1.7 实验物系的变化对精馏过程的影响

在蒸馏过程中，二元物系通常可以被分为理想物系和非理想物系。这两者的气液平衡相图有很大差异。不同的二元物系在精馏过程中也会表现出不同的分离效果。这部分内容比较抽象，不利于学生的理解和掌握。最好的方法是通过实践，使学生建立从感性到理性的认识。但是在现实实践中，由于某些化学品具有一定的毒性和易燃、易爆的性质，安全隐患大，更换实验物系耗时长、成本高，并且存在化学品保存和处置等诸多问题，所以在精馏实验中很少进行物系的更换，也不会采用有危险性的物系进行实验。在本虚拟仿真实验中，可以安全、便捷、低耗、高效地进行实验物系的更换，见图 14 和图 15。学生可以根据学习要求，自主选择虚拟物系及实验设备进行实验，比较不同物系在同一精馏塔中的过程变化和分离效果。在本教学模块中，可以充分发挥学生的自主性，培养学生分析解决复杂问题的综合能力、创新思维与创新能力。

在本部分内容中，还通过对有毒物系的环境危害性、泄露会引发的环境问题等的相关介绍，增强学生的安全、环保意识，强化对学生社会责任感的培养。



图 14 精馏塔设备参数调整操作界面



图 15 精馏物系调整操作界面

虚拟仿真实验各层次之间采用了“闯关式”的方法，学生只有完成前一层次的学习且达到一定分数后，才能进入到下一层次的学习。不同类型，不同水平的学生可以根据自己的需求决定学习的内容和深度。在完成第一层次的学习之后，学生能够掌握进行精馏实验的基本理论、操作基本方法等，也可以作为学生开展真正实践教学的准入和预演，真正做到虚实结合，以虚补实。一方面保证了学生学习过程的循序渐进，将过程与设备的基础理论掌握扎实后再开始拓展及综合型的学习，保证了学习效果；另一方面，由于学生在自主学习过程中体验到成就感和满足感，激发了学生的学习热情和积极性。

本虚拟仿真实验在内容和学习方法的设置上环环相扣，采用递进式的学习路线，形成了对学生的知识传授、能力培养和素质提高的多层次的教学模式。在每一个环节上都有横向的知识拓展，有针对性的教学设置让每个层次的学生都能够在某一环节将所需了解的知识进行充分的学习与掌握。

在教学过程中，授课教师可以通过教师端在线统计学生在使用虚拟仿真实验系统过程中出现的问题（见图 16～图 18），对于出现次

数多、有代表性的问题，授课教师可以将其带到课堂或实验现场，进行有针对性地讲解和演示，从而实现实验教学的线上线下相结合，虚拟仿真与实验教学的互相促进。

化学化工

虚拟仿真平台

班级管理

仿真软件

共享资源

仿真课程

理论考试

计费统计

仿真课程

当前位置：我的课程 > 20仿真 > 课程详情

返回列表

课程介绍

记录查询

实验报告

学员统计

班级管理

讨论专区

在线答疑

当前课程：化工单元操作虚拟仿真实验

课程基本信息：

课程名称	实验内容	学时	学习情况
单元精馏	正常开车	2.0	已有35人学习
单元精馏	正常操作	2.0	已有34人学习
单元精馏	正常停车	2.0	已有32人学习
单元精馏	停电事故	2.0	已有35人学习
单元精馏	冷却水中断	2.0	已有31人学习
单元精馏	加热蒸汽压力过低	2.0	已有36人学习
单元精馏	加热蒸汽压力过高	2.0	已有36人学习
单元精馏	回流泵P301B故障	2.0	已有38人学习
单元精馏	回流控制阀FV303堵卡	2.0	已有34人学习
单元精馏	进料阀FV301堵卡	2.0	已有42人学习
单元精馏	原料压力波动	2.0	已有30人学习
单元精馏	憋压	2.0	已有34人学习
单元精馏	开车状态	2.0	已有47人学习
单元精馏	正常操作	2.0	已有40人学习
单元精馏	正常操作	2.0	已有40人学习

图 16 各模块学习人数统计

化学化工
虚拟仿真平台

班级管理

仿真软件

共享资源

仿真课程

理论考试

计费统计

仿真课程

当前位置：课程管理 > 2015真 > 记录查询

仿真课程

返回列表

课程评价

记录查询

实验报告

学员统计

班级管理

讨论专区

在线答疑

当前课程：化工单元操作虚拟仿真实验

开始时间： 结束时间：

课程名称：

全部

 软件名称：

全部

 项目名称：

全部

 学生：

全部

 查询 导出

序号	学生姓名	软件名称	项目名称	开始时间	结束时间	学习时长	成绩	状态
1	李文强	单元精馏	正常开车	2017-05-13 18:07:55	2017-05-13 18:30:55	23	95	结束学习
2	罗时皓	单元精馏	正常开车	2017-05-22 10:32:45	2017-05-22 11:05:45	16	90	结束学习
3	王延刚	单元精馏	正常开车	2017-05-13 18:08:13	2017-05-13 19:15:13	19	91	结束学习
4	林昊	单元精馏	正常开车	2017-05-24 15:42:41	2017-05-24 16:08:41	24	90	结束学习
5	孟明峰	单元精馏	正常开车	2017-05-15 17:25:44	2017-05-15 17:54:44	29	80	结束学习
6	于振宇	单元精馏	正常开车	2017-05-11 08:03:12	2017-05-11 08:52:12	49	93	结束学习
7	朱瑞瑞	单元精馏	正常开车	2017-05-25 19:01:18	2017-05-25 19:34:18	33	93	结束学习
8	卢晋宇	单元精馏	正常开车	2017-05-04 13:04:49	2017-05-04 13:12:49	8	91	结束学习
9	徐浩	单元精馏	正常开车	2017-05-08 08:27:11	2017-05-08 09:02:11	35	84	结束学习
10	孙博程	单元精馏	正常开车	2017-05-23 15:36:15	2017-05-23 15:04:15	28	88	结束学习
11	林昊	单元精馏	正常开车	2017-05-18 13:20:23	2017-05-18 14:14:23	54	91	结束学习
12	林昊	单元精馏	正常开车	2017-05-07 13:09:33	2017-05-07 14:11:33	32	96	结束学习

首页 上一页 下一页 尾页 第1页 / 总共1160页, 总共1395条记录, 跳转至第 1 页

图 17 单个实验模块学习情况统计

化学化工

虚拟仿真平台

班级管理

仿真软件

共享资源

仿真课程

理论考试

计费统计

仿真课程

仿真课程

当前位置：课程管理 > 23仿真 > 学员统计

返回列表

课程详情

记录数据

实验报告

学员统计

成绩管理

讨论专区

在线答疑

当前课程：化工单元操作虚拟仿真实验

实验名称：

全部

 软件名称：

全部

 项目名称：

全部

 学生：

全部

重置

序号	学生姓名	软件名称	项目名称	规定学时	完成学时	学习次数	进度
1	陈彦琦	单塔精馏	正常操作	2	1.1	2	55.00%
2	陈彦琦	单塔精馏	正常停车	2	1.6	2	80%
3	陈彦琦	单塔精馏	停电事故	2	1.1	2	55.00%
4	陈彦琦	单塔精馏	冷却水中断	2	0.7	1	35%
5	陈彦琦	单塔精馏	加热蒸汽压力过高	2	1.4	2	70%
6	陈彦琦	单塔精馏	加热蒸汽压力过低	2	3.2	4	160%
7	陈彦琦	单塔精馏	回流泵P201故障	2	0.2	1	10%
8	陈彦琦	单塔精馏	回流泵P201检修	2	2.2	2	110.0%
9	陈彦琦	单塔精馏	进料泵P301检修	2	2.1	2	105%
10	陈彦琦	单塔精馏	原料压力波动	2	3	3	150%
11	陈彦琦	萃取塔	开车初始	2	1.2	1	60%
12	陈彦琦	萃取塔	正常操作	2	0.9	2	45%

首页 上一页 下一页 尾页 第1页, 总共110页, 总共1321条, 跳转到第1 页

图 18 单个学生学习情况统计

2 实验大纲

2.1 实验基本信息：

实验名称：精馏综合拓展虚拟仿真实验

学时：2-10

学时分配： 2 仿真操作型

4 工程拓展型

4 综合设计型

适用专业：化学工程与工艺、制药工程、生物工程、过程装备与控制工程、分子科学与工程、应用化学（工）

适用学生类型：化工相关专业三年级及以上的本、专科、高职高专学生。

先修课程：在进行本虚拟仿真实验之前，学生应掌握高等数学、化工原理、化工热力学的相关知识，并具有一定的实践能力。

教材及主要参考书：

1.《化工原理实验》（第2版），张金利、郭翠梨、胡瑞杰、范

江洋主编，天津大学出版社，2016 年 11 月份出版。

2.《化工基础实验》（第二版），张金利、郭翠梨主编，化学工业出版社，2006 年出版。

3.《化工基础实验指导》，化工基础实验中心自编教材。

2.2 实验简介

精馏是工业上应用最广泛的分离操作，也是化工原理理论和实践教学中的一项重要内容，精馏也是一项综合型很强的单元操作，并把化工的“三传”理论（动量传递、热量传递和质量传递）有机地结合在一起。精馏的实验是一种实践性极强的单元操作实验，是化学工程与工艺学科教学中的重要知识点。本实验是化学工程与工艺、制药工程、生物工程、过程装备与控制工程、分子科学与工程、应用化学(工)等化工相关专业本科生的必修实验。

在本实验中，共分为三个层次（分别为仿真操作型、工程拓展型和综合设计型），七个教学模块。学生在学习过程中，按照从易到难，从认知到体验的过程，从仿真操作型开始，首先进入第一个模块。在完成第一层次的学习并满足一定的要求后，才可以开始下一层次学习。各层次之间采用了“闯关式”的方法。在每一个模块中，由于学习目的和学习内容有所区别，所以实验方法和实验步骤也不尽相同。在每一个模块中，都强调了学生的自主学习意识，由学生自主进行学习和实验操作。可以归纳为三种实验方法，分别为“介绍认知，自主学习”、“指导运行，自主操作”和“任务驱动，自主设计”。

2.3 实验课程目标

1. 使学生加深对精馏单元操作中理论知识的理解。
2. 使学生掌握精馏单元操作的基本步骤与方法。
3. 培养学生运用理论知识分析问题、解决工程实际问题的能力。
4. 提高学生解决复杂化工问题的综合研究能力，培养学生的创新能力。

2.4 实验课程知识点

本项目设置的由浅入深、由易到难的知识点主要有：

1. 精馏单元操作的基本流程和基本工艺；
2. 精馏塔设备的类型、内部结构的特点、功能等；
3. 流体输送设备的类型、结构特点、功能等；
4. 传热设备的类型、结构特点、功能等；
5. 精馏过程开、停车和正常运行的操作步骤；
6. 精馏过程中的异常现象、产生原因以及正常的处理方法；
7. 常压精馏过程中回流比、上升蒸汽量、进料温度等对精馏过程及产品产量、质量的影响；
8. 精馏塔内压力的变化对过程及产品产量、质量的影响；
9. 精馏塔类型、设备参数的变化对精馏过程的影响；
10. 不同的物系在精馏过程中的变化和过程差异等。

2.5 实验内容

仿真操作型（2 学时）：

在第一模块“蒸馏（精馏）工艺及相关设备的认识”中，学生需要首先对精馏的流程说明，设备特点和各部分组成等进行了解，学生点击界面相关区域，会弹出精馏流程、基本原理、设备名称、特点等的相关介绍，学生通过观看视频和动画演示，通过系统的讲解说明，对精馏操作进行整体的了解和认知。接下来学生需要进行精馏塔设备内部结构的了解学习，通过三维虚拟演示，将精馏塔进行拆解，对各部分进行介绍，学生通过系统的介绍，深入了解精馏塔内部的相关构件的功能和特点等。在进行完这些步骤的学习以后，学生需要按照系统要求，自主进行精馏塔部件的拆解操作，按照系统发出的指令，将指定部件从精馏塔上分离出来，进一步加深学生对于精馏塔部件的认知。之后，学生还需要进行流体输送设备、换热器的相关知识学习。

在第二模块“精馏单元操作的开车、正常运行、停车”中，学生要按照要求完成一个完整的精馏单元操作开车、维持正常运行和停车过程，需要完成如下程序：

原料的加入；

回流冷凝系统开启；

加热系统的开启；

精馏塔的全回流操作；

从全回流到部分回流的过渡；

精馏塔回流比的调节与确定；

维持精馏塔连续进料、出料，保持正常运行；

过程参数的测量；

关闭进料泵，停止出料，将精馏塔恢复到全回流操作；

关闭加热系统；

在无上升蒸汽产生后，关闭全塔电源。

其中，每个程序都需要学生进行多个步骤的操作。如第一个程序，原料的加入需要学生完成如下步骤的操作：（1）开启总电源；（2）打开储料罐出口阀；（3）启动进料泵；（4）半开泵回流阀；（5）打开塔釜放空阀；（6）打开塔釜直接进料阀，将物料加入再沸器至液位计 2/3 高度；（7）关闭塔釜直接进料阀；（8）关闭塔釜放空阀；（9）关闭泵回流阀；（10）关闭进料阀；（11）关闭进料泵；（12）关闭储料罐出口阀。

在本模块中，学生需要首先在软件指导模式下完成一遍整个操作程序，共计操作步数为 56 步。使学生能够在系统指导下了解精馏流程开、停车和正常运行的正确步骤。然后学生还需要自主完成操作且系统评分需达到一定分数，才可以进入到下一模块。

在第一层次的两个模块学习完成后，系统会对每个学生的学习效果进行评价，当分数满足一定要求时，学生就可以点击进入第二层次“工程拓展型”的学习模块中进行学习。如果分数不能达到要求，则需要学生继续在第一模块中进行操作，直到分数达到要求后，才算“闯关成功”，才能进入下一层次的学习，见图 19。



图 19 学生分数达标或未达标提示界面

工程拓展型（4 学时）：

在第三模块“异常情况事故的紧急处理”中，学生进入该模块后，需自主选择具体的异常项目，了解该种异常情况产生的原因、现象、危害和处理方法，增强学生对于安全、环境等多方面的认识。之后，采用虚拟仿真操作的方法，学生自主选择需要被处理的异常情况，按照规定的紧急处理方案在虚拟仿真装置上进行操作，直至异常情况或事故隐患被排除，生产过程恢复正常。在操作过程中，系统会对学生的操作正确率和熟练程度评分，并指出学生的错误之处，以加深学生的印象。

在第四模块“常压单元操作参数变化对精馏过程的影响”中，学生需在虚拟仿真实验中，自主选择不同操作参数（如进料热状况、回流比等），考察其对精馏过程的影响，并将过程参数的变化通过系统显示的结果输出到最终的结果中。

在第五模块“不同压力（加压、减压）对精馏过程的影响”中，通过设置不同压力，采用相同物系，相同操作条件，让学生比较在不同操作压力下，塔内过程参数和产品产量、质量的区别；通过设置分离任务，让学生自主选择采用合适的操作压力完成实验。

综合设计型（4 学时）：

在第六个模块“板式塔和填料塔设备参数对精馏过程的影响”中，学生进入到这个模块后，首先需要选择一个实验任务，对某种物系进行一定程度的分离。之后学生需要进行初步计算和设计，在模块的页面内选择诸如精馏塔的类型、填料种类、塔高、塔径、换热器类型、泵的型号等，系统会根据学生的选择生成对应的设备。学生在生成的设备内进行精馏实验，通过实验检验是否能够完成设计任务等。在这个模块中，学生需要按照任务布置-初步计算-设备选择-虚拟操作-结果检验的路线来进行学习，如果达不到任务要求还需要进行反复尝试，直到完成任务为止。系统也会根据学生计算的正确性、实验任务的完成程度以及尝试的次数等进行评分。

在第七个模块“实验物系的变化对精馏过程的影响”中，学生可以根据学习要求，自主选择虚拟物系及实验设备进行实验，比较不同物系在同一精馏塔中的过程变化和分离效果。本模块中学生还需自主观看通过对有毒物系的环境危害性、泄露会引发的环境问题等的相关介绍，增强学生的安全、环保意识，强化对学生社会责任感的培养。

3 实验考核方法

在本虚拟仿真实验项目中，三个层次采用了不同的考核方式。第一层次是为了检验学生对于基础理论和基本操作技能的掌握程度，主要根据学生学习的时间和操作熟练程度进行考核评分；第二层次，主要考核学生分析和解决工程实际问题的能力，包括对安全、环境等综合能力的考察，主要是根据学生能否及时排除异常情况、操作正确与

否、实验结果分析是否合理进行考核评分；第三层次，主要考核学生解决复杂工程问题的综合能力，包括学生社会责任感、经济分析、项目管理等相关能力，主要是根据学生设计计算的结果是否合理、是否完成实验任务等进行评分。

评分考核包含实验操作评分和报告评分两部分。其中操作评分当学生完成实验后由系统自动给出评分；学生完成实验后，系统自动生成空白的实验报告，学生在其中补充和填写相关内容，完成实验报告，指导教师根据实验报告的情况给出学生报告分。实验报告要求原始数据完整、计算正确、手绘的图表规范、条理清楚、结果正确、有分析讨论，符合要求的工程实验报告规范。

4 实验建设过程的组织方式

本实验由天津大学牵头，由天津大学化工学院基础实验中心提供内容建设和教学服务，由北京欧倍尔软件技术开发有限公司协助开发。

天津大学化工学院化工基础实验中心是全国化工类创新人才培养基地的依托单位。2002 年被评为天津市优秀实验室，2005 年成为首批国家级实验教学示范中心，2013 年成为首批国家级虚拟仿真实验教学中心，在教育信息化领域都有多年的建设经验，取得了较好的建设成果。在全国高等教育领域、化工行业和相关区域以及教育信息化领域发挥着引领及示范作用。

北京欧倍尔公司是一家以计算机仿真技术、虚拟现实技术、网络技术的开发与推广应用为核心的高新技术企业，现已与国内上百家大专院校建立了长期合作关系，具有丰富的虚拟仿真项目建设经验和雄

厚的技术开发实力。

5 实验的持续建设服务计划

实验面向高校和社会免费开放并提供教学服务。已完成和持续的建设服务计划如下：

1，面向高校和社会免费开放、提供教学服务：通过在线服务和教学反馈，根据学生使用情况，总结经验，对虚拟仿真实验系统进行改进和完善，并考察考核方式的合理性和实用性。在软件投入运行的一年内虚仿实验已做到基本完善。

2：继续做到面向全国免费开放并持续改进：在开放过程中探索与学生现有课程体系的对接和融合，在提供在线服务的同时继续收集学生的相关反馈，做到在细节上针对不同层次、不同要求的持续改进。

3：实验内容的拓展提升和评价模式的改进：对该项目内容持续更新及对相关内容深度开发，在原有内容基础上增加新的教学内容并免费在线开放，持续收集使用者的反馈，对互动方式、实验成绩的评价体系进行完善，探索培养人才的实验教学新模式、新机制。

4：在持续开放的过程中继续拓展和提高：利用该虚拟仿真项目开设成体系的在线课程，在全国开放使用，优先向中西部高校开放。建设并充分锻炼教学团队，形成一支业务精湛、教学方式灵活、线上线下活跃的团队。同时形成完善的教学评价体系。

5：探索高校间合作机制：将虚拟仿真实验系统建设经验向其他高校推广，探索、建立高校间化工单元操作实验成绩互认、学分转换机制，发挥天津大学化工学科在化工高等教学的示范引领作用。

6. 实验的应用

6.1 实验教学的应用

天津大学自 2018 年起，已经在 8 个学期的教学中将精馏综合拓展虚拟仿真实验列入了投入了化工技术基础实验的教学中，累计实验人数超过 3000 人。



图 20 天津大学虚拟仿真软件和线上教学资源使用操作指南

通过微信问卷、在线答疑、线下座谈等形式，学生普遍认可虚拟仿真的教学形式，认同其实线上实验教学的补充，对三维图形化的操作形式、实验时间空间上便利的操作控制方式给予了较高评价。实验取得了较好的教学效果。

12.虚拟仿真环节你打多少分？ 0~10 分？ [量表题]

本题平均分： 6.15

选项	小计	比例
0	288	17.28%
2	20	1.23%
3	34	1.85%
4	102	6.17%
5	184	11.11%
6	189	11.11%
7	195	11.73%
8	212	12.96%
9	143	8.64%
10	291	17.9%
本题有效填写人次	1653	

15. 你如何评价这次课程中虚拟仿真软件的操作体验： [单选题]

选项	小计	比例
操作体验很差，收获很少	218	12.96%
操作体验一般，收获不大	432	26.54%
操作体验还不错，收获还可以	394	24.07%
操作体验非常好，收获很大	593	36.42%
本题有效填写人次	1637	

16. 这次课程哪个环节对你的学习和理解作用最大： [单选题]

选项	小计	比例
课堂教学	174	10.49%
实操实验	952	58.64%
虚拟仿真	253	15.43%
实验报告	45	2.47%
同伴讨论	159	9.26%
网上搜索	60	3.7%
本题有效填写人次	1643	

图 21 五年来精馏综合拓展虚拟仿真实验问卷汇总

本虚仿实验也用于了共同体内天津科技大学和辽宁石油化工大学以及共同体外的太原工业学院、太原科技大学等十多所的教学，取得了良好的示范效果。

6.2 实验的竞赛应用

经过在通过在不同地区，不同网络条件的多次测试后，自 2017

年开始，精馏综合拓展虚拟仿真实验连续五次用于全国大学生化工实验大赛的虚拟仿真比赛环节，经 300 多所高校上千名同学的使用，取得了优秀的示范效果。



图 6 全国大学生化工实验大赛虚拟仿真比赛环节



图 7 全国大学生化工实验大赛选手虚拟仿真实验操作现场