



## “互联网+”发酵工程实操与虚拟仿真中试实验室平台的设计与探索

倪芳 刘洋\* 熊强 朱本伟 江凌 Matthaw Jay Malkmes

南京工业大学食品与轻工学院 轻工技术与工程实验教学与实践教育中心 江苏 南京 211816

**摘要:** 发酵工程是理工科高校生物工程学科领域的核心课程之一, 是一门应用性、实践性极强的专业课程。该课程传统的实践模式已无法满足当前高校对大学生工程素质教育的需求。随着信息技术、自控技术的飞速发展, 多层次、跨学科的“互联网+”教学已成为现今高等教育人才培养的新模式。本文中的发酵工程实操与虚拟仿真中试实验室平台以工程学为技术手段, 通过“互联网+”将虚拟现实(virtual reality, VR)技术、信息自动化控制技术、数据库与发酵过程控制有机地结合在一起, 构建一个“虚实”结合的“多维”工程中试实验室平台, 并以此作为抓手开展食品发酵技能训练课程工程素质教育教学的创新与探索。初步建设成果与前期教学效果表明, 该实验室平台的建设对发酵工程及相关专业学生的实践动手能力有明显的提高, 为后期建设积累了宝贵的经验及大量有价值的工程实训数据。

**关键词:** 互联网+, 发酵工程实操, 虚拟仿真

## Exploration and construction of Internet Plus fermentation engineering practice and virtual simulation pilot laboratory platform

NI Fang LIU Yang\* XIONG Qiang ZHU Ben-Wei JIANG Ling  
Matthaw Jay Malkmes

Centre for Experimental Teaching and Practical Education of Light Industry Technology and Engineering, College of Food Science and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China

**Abstract:** Fermentation Engineering is one of the core courses in the field of bioengineering in colleges and universities of science and engineering. It is an applied and practical professional course, and the traditional application of this course has been unable to meet the current needs of college students looking for quality engineering education. With the rapid development of information technology and automatic control technology, multi-level and interdisciplinary “Internet Plus” teaching has become a new mode of talent training in higher education. In this paper, the fermentation engineering practice and virtual simulation pilot laboratory platform takes engineering as a technical means-combining VR technology,

**Foundation item:** School-Level Teaching Reform Project of Nanjing Tech University in 2019 ([2019] 108)

\***Corresponding author:** Tel: 86-25-58139430; E-mail: legendly2002@163.com

**Received:** 13-01-2020; **Accepted:** 21-05-2020; **Published online:** 02-07-2020

基金项目: 南京工业大学 2019 年校级教改项目(南工教[2019] 108 号)

\*通信作者: Tel: 025-58139430; E-mail: legendly2002@163.com

收稿日期: 2020-01-13; 接受日期: 2020-05-21; 网络首发日期: 2020-07-02

information automation control technology, and database and fermentation process controlling through “Internet Plus”; Constructing a “multi-dimensional” engineering laboratory pilot platform with the combination of “virtual reality”, and using it for innovation and exploration toward building quality education and teaching in the Food Fermentation Skills Training Course of fermentation engineering specialty. The results of the preliminary construction and the earlier teaching results show that the construction of the laboratory platform has a clear improvement in the practical ability of the fermentation engineering and related professional students, and has accumulated valuable experience and immeasurable engineering training data for later construction.

**Keywords:** Internet Plus, Fermentation engineering practice, Virtual simulation

发酵工程是利用微生物进行大规模生产的技术,是微生物学与工程学结合、服务于生物制造产业的核心技术,也是以产品为导向的一门应用型学科<sup>[1]</sup>。我国是一个发酵需求大国,发酵产业已渗入国民经济的方方面面,旺盛的人才需求使得国内如江南大学、华东理工大学、华南理工大学、天津科技大学、陕西科技大学、四川大学等众多高等院校纷纷在生物工程等专业中开设“发酵工程”课程,并将发酵工程及相关理论作为核心专业课程,为食品、医药和环境工程等领域培养急需的工程应用型人才。

然而,国内很多高校由于受到实验场地、资金以及课时限定等条件的制约,只能以传统实验课的模式来培养生物工程及相关专业的学生,即以分散的单元操作或简单的认识实习来完成该类课程的工程实践教学。在这种模式下,学生不仅很难掌握一个完整的发酵工艺过程操作,而且对于核心环节的发酵过程控制也缺乏有效的实践,难以形成“实践→理论→实践”的认知回路,造成学生的基本实践技能不扎实,缺乏对发酵工程应用探究的主动性<sup>[2]</sup>。

针对上述问题,作者团队集中了学科群内多位具有丰富的工程实践、企业培训、实验实习指导经验的教师与企业导师,以实验室环境为基础,对现有的发酵设备进行局部改造,同时借助虚拟现实(virtual reality, VR)技术的可视化、直观性等特点,利用“互联网+”技术将虚拟仿真单元操作融入到真实的发酵设备实操过程中,最大程度

地还原真实的发酵生产工作环境。这一教改实践不仅大大提升了实践场所的安全系数,培养了学生的操作规范性,消除了他们对于操控中大型发酵设备的陌生感和恐惧感;而且使其对发酵过程控制有了更为直观的认识,取得了良好的教学效果。为此,我们总结了教学改革中的一些经验供同行参考,以期形成有推广意义的实践教学平台,为强化学生的工程能力探索一条可行之路。

## 1 VR技术在发酵实践教学中的应用

VR技术是由诸多跨领域多学科交叉而构建的一种新型信息技术,能有效模拟人在自然环境中视、听、动等行为的高级人-机交互技术<sup>[3]</sup>。当前,由于国家对高校实验室及实践场所的安全问题极为重视,因此,很多受条件制约无法实施的实践活动可以通过VR来实现。近年来,VR技术在高校教学改革实践中逐渐成为一个研究热点<sup>[4-6]</sup>,国内一批具有发酵专业的高校相继建立了与发酵相关的虚拟仿真实验室或实验项目<sup>[7]</sup>。如华东理工大学的糖化酶催化啤酒发酵工艺虚拟仿真实验、华中农业大学的固态白酒发酵的工艺原理和生物学本质探究虚拟仿真实验、广西大学的啤酒工艺虚拟仿真实验教学等,这些高校通过虚拟仿真的应用获得了许多突出的教研成果<sup>[8]</sup>。有鉴于此,我们在虚心学习同行成功经验的同时,也根据自身专业特点有针对性地引入VR技术用于相关的课程实践改革,进行了一些初步的探索,取得了良好的教学效果。

食品发酵技能训练是食品科学与工程及相关专业的一门传统的实践课程,该课程有 32 学时,如何在有限的学时里让学生掌握发酵操作的基本知识,是我们一直思考的问题。在平台建设前,学生基本上都是通过分组在固定的实验室内集中学习 5 L 台式发酵罐的操作,然后再进行大肠杆菌发酵,计算体积溶氧系数( $K_La$ )和物料衡算,发酵类型基本上都是统一的分批发酵。在这种教学模式下,学生在动手实践过程中只是简单地验证结果,很少去思考例如转速、通气量、温度等操作变量对发酵过程的溶解氧(dissolved oxygen, DO)有什么样的影响,绝大多数学生在学习过程中还停留在记忆、领会、模拟等低阶认知水平阶段,既不能满足人才培养目标的需要,也不符合“以学生为中心”和“成果导向教育”(outcome based education, OBE)的教学理念。

在发酵实践教学平台建设过程中,我们尝试将发酵过程控制 VR 系统的单元操作功能应用于该课程教学改革中,学生可以反复地、探索性地使用 VR 软件模拟发酵过程中的某一环节,可以直观地看到不同操作产生的差异化现象和结果,不必担心因为操作失误而带来的潜在危险。例如,让学生在 VR 中模拟中试实验室发酵罐的空消

和实消的操作,逼真的界面设计会让学生有身临其境的感觉,逐渐消除他们对真实设备的陌生感(图 1)。在进行发酵罐空消操作中,其中一个步骤涉及到蒸汽管路阀门和发酵罐夹套排气阀门的开合操作。针对这一操作,学生可以在 VR 系统的辅助下进行模拟操作,开错阀门时系统会提示;阀门开合量不当造成夹套内蒸汽量不够而不能起到空消的效果时,系统同样也会给出提示。同时,我们在设计这段 VR 操作时将阀门操作数值化,即针对阀门的开合度,在操作手势旁给出具体的开合数值,使学生能够明确阀门开合度与通入蒸汽量之间的对应关系。通过类似的单元操作模拟,学生能够循序渐进地掌握全部发酵操作过程。这种类似游戏过关性质的操作风格,成为激发学生互相比赛去追求准确操作和更好的操作成绩的动力。还有学生会根据发酵理论知识对空消和实消的操作主动提出自己的想法,在模拟机上进行操作验证,并与指导老师展开讨论,这些学生已经达到分析、综合、评价等高阶认知阶段。就目前的教学效果来看,基于 VR 技术所带来的教学变革是传统教学手段无法企及的,这也证明我们在平台中嵌入虚拟仿真实验室的设计是卓有成效的<sup>[7]</sup>。

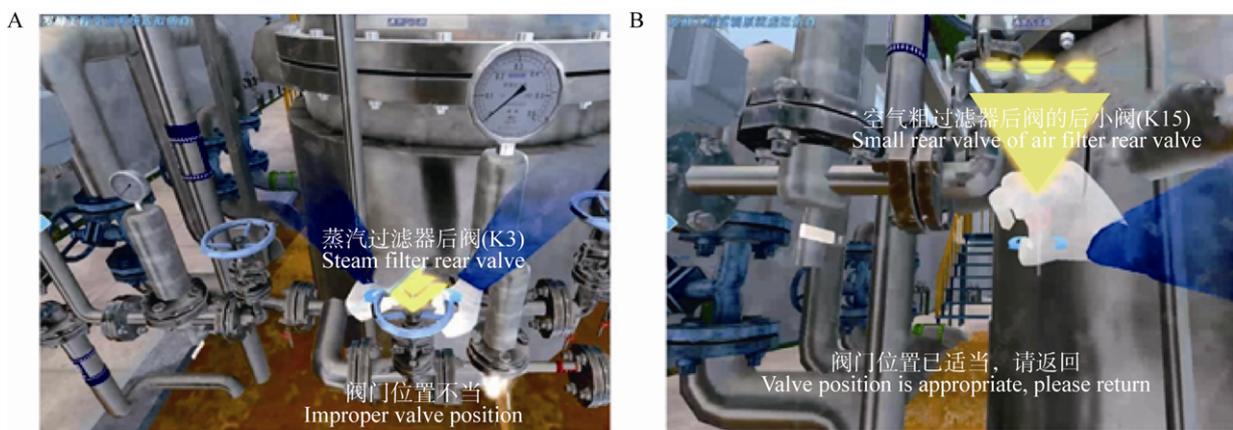


图 1 发酵实消虚拟仿真操作过程中蒸汽过滤器阀门调节(A)与空气过滤阀门调节(B)

Figure 1 Steam filter valve regulation (A) and air filter valve regulation (B) during virtual simulation operation for fermentation

## 2 “互联网+”技术的引入对发酵实践课程教学的影响与践行

“互联网+”是创新 2.0 大背景下互联网发展的新业态,也是知识社会创新 2.0 推动下的互联网形态演进及其催生的经济社会发展新形态<sup>[9-10]</sup>。某种意义上说,“互联网+”是以大数据为基础、以多媒体网络信息化技术为平台的新型技术产业生态。“互联网+”的最大优势在于大数据支持下的信息资源共享。“互联网+”运用在发酵工程相关专业实践课程教学的优势在于,通过网络载体,将传统模式下若干分散的、单一的发酵工艺实验室终端所形成的一个个“信息孤岛”以大数据的形式,通过嵌入式 VR 的中控系统转化为共享实操平台。我们在平台建设过程中尝试引入这样的概念,最终目标是建成一个较为全面的工程实训平台数据链。在食品发酵技能训练课程教学实践中,学生在平台上通过选择预设的某个产品种类或发酵类型,进行对应的工艺过程控制实操学习与训练,这种相对开放的实训方式极大地丰富了实训课程的内容,打破了一个发酵工艺或一个发酵类型“经久不变”的模式,大大提升了学生参与实训的主动性和积极性,并激发了学生钻研的兴趣。同时,所有实训终端所产生的操作结果形成大数据汇总到服务器中,供实训指导教师进行分析比对,这不仅有利于判断哪一类发酵工艺(类型)或单元操作是学生掌握的难点,而且还能够不断完善实训方案,指导学生全面掌握发酵工程的工艺控制过程。

## 3 基于“互联网+”的 VR 技术与发酵实操相结合的教学实践

尽管基于“互联网+”的 VR 技术给我们的实践教学带来了前所未有的改变,但这种教学手段仍然有一定的局限性。首先,学生通过 VR 模拟真实发酵单元操作,对于某些产品(比如红酒、啤酒、聚谷氨酸等)的发酵工艺或某一发酵类型(例如分批发酵、连续发酵或分批补料发酵)有了较为全面的认识和掌握,但 VR 毕竟不能从本质上代替真实操

作,因为单一的模拟发酵操作容易造成“虚实脱节”。而且,我们在教学实践中发现,当学生们进入中试实验室,面对真实的发酵设备、复杂的管路和众多的控制节点时,往往会出现手忙脚乱、无所适从的情况。比如:每一条管路里应该走什么介质、如何判断每一个阀门的作用、如何控制阀门的开合量、控制顺序是什么、面对突发情况应当如何处理等。基于这些实际操作上的问题,我们在平台建设过程中依托“互联网+”技术,尝试将 VR 模拟的单元操作嵌入到真实发酵实操过程中,并在食品发酵技能训练课程中做进一步的教学实践改革。

### 3.1 “安全第一、虚实兼并”的实践教学设计

在食品发酵技能训练课程实践教学设计中,实操环节是面向现有发酵中试实验室中真实的发酵设备及其控制部件进行人工操作。我们秉承“虚实结合、安全第一”的平台建设理念,做了以下教学设计:(1) 构建 3D 工艺布局模型(图 2),再对发酵设备实物系统中所有管路、电路的控制单元或控制节点阀门进行改造,安装各类角度位移传感器。学生按照单元操作流程对发酵设备进行不添加物料、不通入热交换介质的空载操作。例如,在实消单元操作过程中,学生若要完成一整套的实消操作,就需要在中试设备上完成手动蒸汽阀、手动冷却阀、冷却水阀、排污手动阀、排水阀、过滤排气等若干阀门实操动作。那么如何让学生清楚地知道自己的操作是否正确并符合规范呢?我们用 VR 仿真终端来替代一部分危险系数较高的操作环节,学生可以在仿真终端看到虚拟管道内物料、蒸汽、热水、冷水、循环水、污水等介质在其对物理发酵设备(发酵设备上有对应的物理按钮或阀门)的实操行为下流动的方向;虚拟压力表指针、温度传感器的变化情况,系统会辅助判断学生对设备进行实消操作是否符合规定要求,进而帮助学生掌握发酵中试设备是如何进行实消,并在学生实操完毕后会对其每一步的操作给出评判。

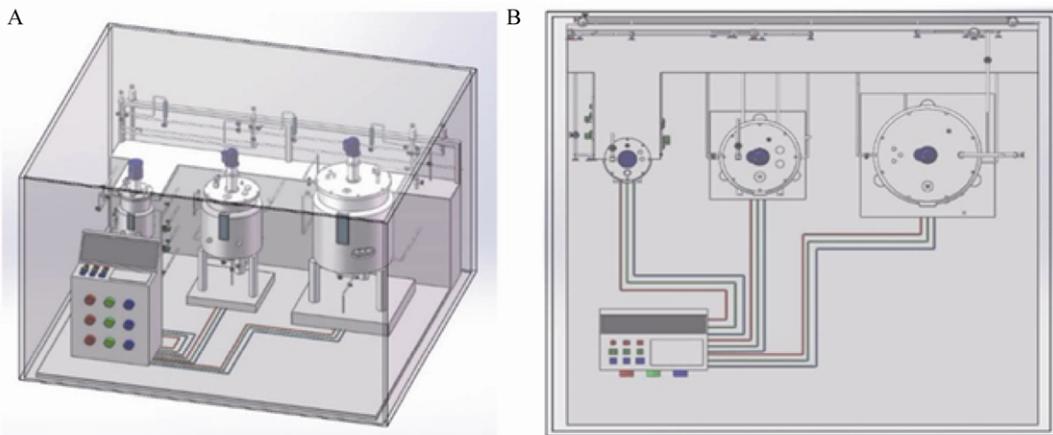


图2 发酵实操工艺布局 3D 模型(A)与发酵实操通讯线缆布局图(B)

Figure 2 Distribution of fermentation practice process 3D model (A) and cable layout of fermentation practice communication (B)

这样的教学设计可以满足学生反复操作的需求,不用担心操作失误可能造成的安全事故,这种循序渐进的实操训练,能够增强学生的实践信心,提高学生参与实践教学的积极性。

### 3.2 突破传统,打造创新型发酵工程实践平台教学模式

立足“互联网+”的概念,打造实操与 VR 仿真结合的发酵工程中试实验室云平台,突破传统的发酵工程及相关专业课程的一维实践教学模式,我们建立了可视化、数字化、移动化的交互式多维实训模式(图 3)。

在教学改革的实践中,我们将现有的发酵基础实验室、发酵中试实验室、虚拟实验室以及发酵控制终端利用“互联网+”技术组成一个云交互式的多维实践教学平台,实现由“点”到“线”到“面”的实践教学手段的突破,即从分散的单元操作(点)到固定发酵工艺过程控制的操作(线),再到不同发酵类型的过控操作(面),增加了学生在技能训练过程中的可选择项。VR 技术的嵌入使得设备实操不再是简单死板的技能训练,既提高了实操的安全性,又增加了操作的趣味性,使学生从原来的灌输式实践学习进入循序渐进的递增式实践学习模式。这得益于我们在平台设计之初就考虑不能将 VR 模拟和设备的实操分割开来,

而是将现有的 VR 系统进行单元操作模块化改动之后,嵌入到发酵设备的中控系统中,与对应的实操动作相结合,形成设备与 VR 软件之间即时响应的交互式实操模式,这在我们以往教学中前所未有的。

在完成实操技能训练课时基本要求的前提下,我们还注重打造平台进行实践教学的创新性。通过引导学生利用课余时间通过资料查阅制定某个发酵工艺,在教师的指导下,利用平台开展与发酵工程相关的大学生创新实验项目。以红酒酿造为例,我们预先在中控 VR 系统中导入通用型红酒酿造分批发酵的部分基础参数,学生通过计算设定的工艺参数进行单元实操,如果设定偏离了预设正常发酵的参数范围,那么系统会记录下学生实操行为的同时,仿真页面上会出现酒体颜色不正常的警示(图 4)。这样学生就会思考他所设定的发酵参数是否合理。以此类推,我们将整个工艺过程拆分为灭菌、浸渍、主发酵、倒罐、乳酸-苹果酸发酵等若干段单元操作。学生可以有针对性地对红酒酿造工艺的每个单元进行实操训练,直至完全掌握红酒的通用发酵工艺流程。我们相信,随着平台建设的深入,可供学生和老师使用的发酵实操模型会越来越多,最终满足各类发酵工艺实操训练的需求。



图 3 发酵工程中试实验室平台建设模式图

Figure 3 Construction model of medium scale test laboratory platform for fermentation engineering

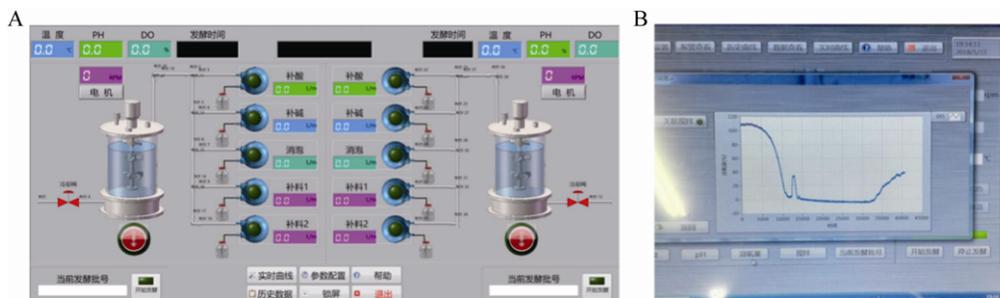


图 4 中控系统实操界面(A)与数据记录界面(B)

Figure 4 Operation interface of central control system (A) and data recording interface (B)

### 3.3 便捷、客观的在线考核模式

为了客观地检验学生学习的效果,我们设计了在线考核的方式,即将考核过程与单元实操进行关联。同时,这种在线考核模式可以支持学生在规定的时段进行预约考试。考核系统在题库中引用学生操作过的发酵实操过程单元操作,每个单元操作有完善的评分考核点与评分量化数值,随机生成实操考核题目。除此之外,该考核

系统还涵盖整个实操过程中安全应急措施操作考核,目的是考察操作者在面对发酵设备异常状态下的处置策略,提高学生的实践生产安全意识;将操作时间纳入考核评分指标,每个单元操作的考核有严格的时间设定。这样设置的目的在于要求学生加强平时实操技能训练,达到熟能生巧的水平,在这种考核方式设定下可以培养学生严格的操作习惯,达到技能训练的教学目的。

表 1 平台建设前后发酵工程相关课程实训与实验考核成绩对比

Table 1 Comparison of practical training and experimental examination results of fermentation engineering related courses before and after platform construction

考核项目 Examination item	Grade	Grade	Grade
	2015	2016	2017
5 L 台式发酵罐实操独立完成人数比 The ratio of students who independently completed the operation of the 5 L fermenter system (%)	40.00	80.83	88.48
50 L 中试发酵系统实操独立完成人数比 The ratio of students who independently completed the operation of the 50 L pilot scale -fermenter system (%)	1.74	55.00	65.71
发酵技能训练考核平均成绩 The average score of fermentation skills training assessment	73.5	86.2	91.6
食品微生物学发酵相关综合性、设计性实验平均成绩 The average score of Food microbiology fermentation related comprehensive, design experiments	81.5	84.5	90.7

## 4 “互联网+”背景下发酵工程实操与虚拟仿真中试实验室平台建设的成效

### 4.1 平台建设前后实践课程教学效果分析

平台建设以来已经完成了两个教学周期的实践。在对两个年级的教学改革实践中，我们以平台为基础，注重对中试发酵设备的实际动手操作。嵌入式 VR 系统的引入，极大地保证了实践过程的安全性，让每个参与发酵技能训练课程实践的学生都能够触摸到真实设备，至少能独立完成一个完整的单元操作。我院 2016 级、2017 级食品

科学与工程专业的近 225 名本科生通过该平台的实操培训后，其中约 60% 的学生能够独立完成 150–300 L 的中试发酵系统中两个或两个以上的单元操作，80% 以上参与平台训练的学生能够独立使用 5–10 L 的发酵罐，与该课程传统实践教学模式培养的 2015 级学生相比较发酵理论与操控水平均有明显的提高(表 1)，同时，发酵技能训练考核均分 16 级、17 级与 15 级相比分别提高了 17.28%、24.63%；在食品微生物学实验课程中，与发酵相关的综合性、设计性实验均分 16 级、17 级与 15 级相比分别提高了 3.69%、11.29% (图 5、6)，教学效果明显提高。

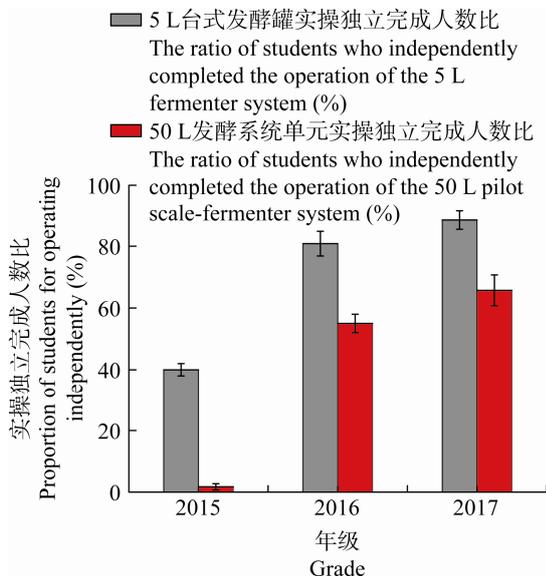


图 5 平台建设前后发酵工程相关实训实操考核成绩对比

Figure 5 Comparison of actual training test results of fermentation engineering before and after platform construction

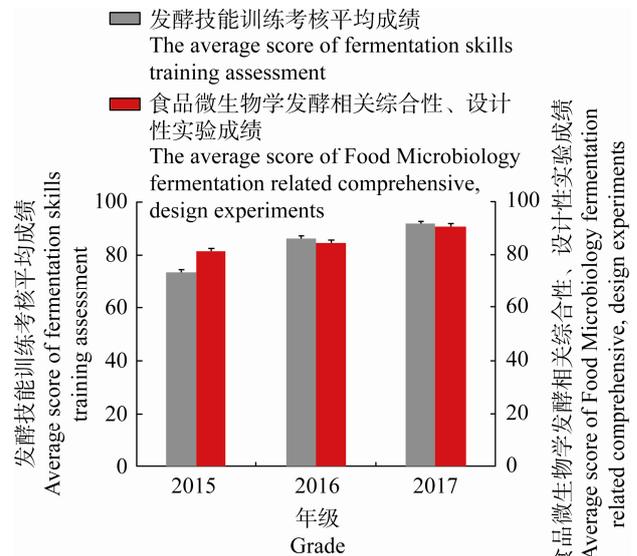


图 6 平台建设前后发酵工程相关课程综合、设计性实验考核成绩对比

Figure 6 Comparison of test results of fermentation engineering related courses before and after platform construction

## 4.2 平台建设过程中的成果孵化

平台的建设与新的实践教学模式的应用,极大地提高了我院学生的发酵工程实操技能和创新意识。为提升学生的参与度,将平台的实践教学效能最大化,我们依托平台积极引导学生开展大学生创新创业计划,效果显著。仅2019年,我院食品工程和食品安全专业学生以此方向申请大学生创新创业训练计划2项,获学科竞赛优秀奖1项;平台建设2年来,虚拟仿真实验项目获得了南京工业大学校级重点资助1项,并积极申报国家级虚拟仿真实验项目。同时在教学改革方面也取得了一些成果,申请并获得校级重点及一般立项各1项、专利2项。团队教师获得首届南京工业大学教学创新大赛一等奖荣誉并遴选参加第五届“西交利物浦”全国大学教学创新大赛。

## 5 结语

人才培养是高校办学的核心任务,而实践教学是本科人才培养中的重要环节。为了提高实践教学水平和学生的工程实践能力,我们优选出一些具有典型生物发酵特征的生产工艺流程,结合目前国内主流发酵罐生产企业的工艺控制布局,依托日趋成熟的“互联网+”技术,提出了嵌入式VR与发酵实操交互式工程实训平台的建设理念。通过前期建设,已完成实操平台及相关软件的研发并逐步投入到实践教学活动中,学生的工程能力得到有效的提升,师生反馈效果良好。我们相信,随着教育理念的进步和现代化教学手段的引入,以及平台建设的不断完善,将对实践教学模式的改革发挥越来越积极的作用,为培养高水平、创新型的工程技术人才提供可持续发展动力。

## REFERENCES

- [1] Zhang SL. Principle of Fermentation Engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 1 (in Chinese)
- [2] 张嗣良. 发酵工程原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 1
- [2] Li XY, Xue M. Reformation and reflection of the experimental course of fermentation engineering[J]. Journal of Chongqing University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2012, 31(5): 91-93 (in Chinese)
- [2] 李晓英, 薛梅. 发酵工程实验教学的改革与思考[J]. 重庆文理学院学报: 自然科学版, 2012, 31(5): 91-93
- [3] Li LZ. Virtual reality technology and its application[J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2019(3): 30-31 (in Chinese)
- [3] 李良志. 虚拟现实技术及其应用探究[J]. 中国科技纵横, 2019(3): 30-31
- [4] Shan OY, Peng N. Exploring intelligent higher education of law: moot court based on VR and AI technology[C]. Proceedings of the 2019 International Conference on Pedagogy, Communication and Sociology (ICPCS 2019), 2019(5): 166-169
- [5] Krapichler C, Haubner M, Engelbrecht R, et al. VR interaction techniques for medical imaging applications[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1998, 56(1): 65-74
- [6] Wang P. Application research of 3D VR technology in environmental art design[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(12): 168-171 (in Chinese)
- [6] 王鹏. 三维虚拟VR技术在环境艺术设计中的应用研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(12): 168-171
- [7] Shi YH. A brief discussion on the development of virtual reality technology[J]. Chinese Information, 2019(1): 20 (in Chinese)
- [7] 石宇航. 浅谈虚拟现实的发展现状及应用[J]. 中文信息, 2019(1): 20
- [8] Ministry of Education of the People's Republic of China. Notice on publication of the results of the first national virtual simulation experimental teaching project from ministry of education[A]. No. [2018] 6, 2018-06-05 (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国教育部. 教育部关于公布首批国家虚拟仿真实验教学项目认定结果的通知[A]. 教高函[2018] 6号, 2018-06-05
- [9] Shen W. Study and practice of O2O integration teaching model in the era of "Internet +"[C]. 2019 4<sup>th</sup> International Conference on Education Science and Development (ICESD 2019), 2019
- [10] Zhang B, Peng P. Research on the development of education resources for the Internet Plus universities in the national health field[J]. Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 2017, 13(8): 5085-5093