

虚拟仿真实验平台在过程装备力学基础课程中的应用

蔡玲玲 米沙

(中国石油大学〈北京〉克拉玛依校区工学院, 新疆 克拉玛依 834000)

【摘要】过程装备力学基础作为过程装备与控制工程专业课程体系的重要课程, 因其概念抽象、理论性较强等特点, 传统教学方式难以激发学生学习兴趣, 教学效果达不到预期目的。本文基于 VB 对 ANSYS 进行二次开发, 通过与过程装备力学基础课程中的经典算例模型结合, 建立了过程装备与力学基础虚拟仿真实验平台。该平台对于提高教学效果、激发学生兴趣、满足现代创新型人才培养需求等方面具有重要意义。

【关键词】虚拟仿真实验平台; 过程装备力学基础; 教学改革; 创新实践

一、引言

习近平总书记指出, 当今世界的竞争说到底人才竞争、教育竞争, 要更加重视人才自主培养, 更加重视科学精神、创新能力、批判性思维的培养培育^[1]。在传统工科教育的灌输式理论课堂的影响下, 学生的主动性和创新性相对较低, 很难激发创新兴趣。因此实验教学环节对于提高学生的实践创新能力至关重要。随着互联网信息技术的高速发展, 教育信息化也被广泛应用在各高校的教育教学活动中, 而虚拟仿真实验教学正是网络化技术催生、发展起来的一种全新的实践教学模式, 对理论教学具有很好的补充作用^[2]。

过程装备力学基础课程是针对过程装备与控制工程专业的本科生开设的一门专业基础课。这门课程主要介绍石油化工装备领域内化工机械设计所需的力学基础知识, 使学生通过学习压力容器设计的板、壳等力学理论, 可以掌握与解决化工设备中的应力分析问题。因此, 过程装备力学基础课程是过程装备与控制工程专业基础课和专业课之间的桥梁, 在本科生课程体系中具有重要地位。然而, 过程装备力学基础课程兼具理论性与实验性, 由于受限于石油化工设备的结构工艺复杂、价格昂贵等特点, 在一般高校的实验室内很难建立和现场一样的实验系统^[3,4]。因此, 在现有教学培养环节, 过程装备力学基础课程一般只涉及理论学习, 没有安排实验课时。而课本大篇幅的数学理论推导使学生产生畏难心理, 并认为该课程内容抽象, 难以理解。本项目针对过程装备力学基础理论性强、概念抽象、

知识点枯燥的特点, 基于计算机虚拟仿真技术, 搭建简洁易懂的虚拟仿真平台, 在课堂上进行面向专业特色的经典模型讲解, 将专业工程实践多种教学改革手段引入课堂, 激发了学生的学习热情, 全面提高学生的分析、表达、逻辑推导和应用基本理论解决工程实践问题的能力^[5]。

二、虚拟仿真平台框架与功能

(一) 整体设计思路

过程装备力学基础虚拟实验仿真平台基于 ANSYS 为核心, 采用 Visual Basic 编程语言对 Mechanical APDL 进行封装, 编制可视的 Windows 平台界面。用 VB 打开 ANSYS 软件并调用 APDL 程序, 自动完成网格划分、约束加载及求解计算的工作。图 1 为虚拟实验仿真平台的用户模型选择界面, 该仿真平台主要建立了过程装备力学基础课程中的 4 个经典模型: 厚壁圆筒模型、圆筒自增强模型、实心圆板模型、实心圆环模型。



图 1 过程装备力学基础虚拟实验仿真平台用户模型选择界面

通过借助集成的 Mechanical APDL 有限元软件, 使学生在界面平台上直接输入参数调用 ANSYS 进行前后处理, 并将过程装备力学基础课程中相关力学

分析通过应力云图展示出来，与课本内容进行对照学习，极大地调动学生对于过程装备力学基础课程的学习兴趣。

（二）厚壁圆筒模型

厚壁圆筒应力分析模型是过程装备力学基础课程中的经典物理模型之一，由于厚壁圆筒通常可承受较高的压力，其被广泛应用于化工设备结构中。化工设备中的厚壁圆筒大多只受内压作用，故本文建立的过程装备力学基础虚拟仿真实验平台包含两端封闭同时受轴向刚性约束的受内压作用的厚壁圆筒模型，其用户计算界面及应力分布如图 2 所示。学生可在文本框内分别输入厚壁圆筒的内外半径、所受内压大小、圆筒长度以及圆筒的材料属性，后点击“计算”按钮完成模拟操作。计算完成后点击“云图”按钮来查看厚壁圆筒的应力分布示意图，如图 2 所示。基于该模型中厚壁圆筒应力分布的可视化展示，学生可以在图中清晰地看到厚壁圆筒在承受内压后其环向应力与切向应力沿壁厚方向的分布规律，通过与课本内容进行对照，使学生对拉美公式有了更深的了解。

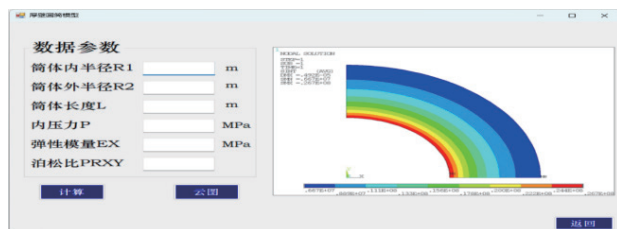


图 2 厚壁圆筒模型用户计算界面

（三）圆筒自增强模型

由于应力沿壁厚分布的不均匀性，当内壁材料发生屈服时，外壁材料远小于屈服极限，这使得筒体材料的强度无法得到充分利用。用增加筒体壁厚的方法来降低内壁面的应力，只在一定范围内有效，当内压力接近或超过材料的许用应力时，增加筒体厚度是无效的。因此在石油、化工等工业中为了提高筒体的弹性承载能力，一般会采用单层厚壁圆筒自增强处理技术。本文建立的过程装备力学基础虚拟仿真实验平台中圆筒自增强模型，其用户界面如图 3 所示。厚壁圆筒的内外半径、所受内压大小、自增强压力大小以及圆筒的材料属性可在文本框内输入，施加的自增强压力大小通过自增强压力计算公式得出，点击“计算”按钮完成模拟操作。计算

完成后点击“云图”按钮后图片框内会展示厚壁圆筒经过自增强技术后的 von Mises 应力分布示意图。通过可视化虚拟仿真模拟平台，学生可以清晰地看到在经过自增强处理后圆筒沿壁厚方向的应力分布趋于均匀，圆筒内壁的弹性承载能力得到提高，从而增强了学生对圆筒自增强过程筒壁的应力和应变分布规律以及对拉美公式和屈服条件的理解。

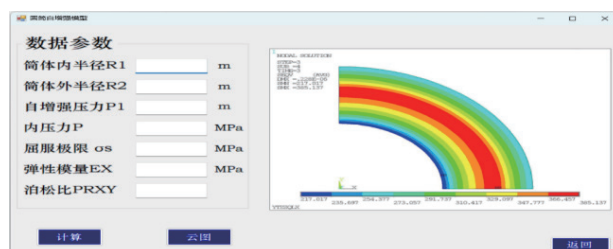


图 3 圆筒自增强用户计算界面

（四）实心圆板模型

在化工设备中，薄板广泛应用于受轴对称载荷的情况。由于薄板通常为圆形，其几何形状、载荷和支撑条件都对称于其中心轴，所以薄板（简称圆板）的内力和变形也是轴对称的。因此，实心圆板的轴对称模型是过程装备力学基础课程中不可或缺的经典模型之一。因此本文建立的过程装备力学基础虚拟仿真实验平台中包含实心圆板模型，如图 4 所示，根据圆板的固定方式不同，学生可在圆板周边约束方式选择界面选择固支约束或简支约束。在确定圆板固定方式后，学生可根据圆板所承受的载荷类型不同，在固支圆板载荷选择界面选择圆板所受均布载荷或集中载荷。对于固支圆板受均布载荷模型用户计算界面如图 4 所示，学生可在该界面的文本框内输入实心圆板的半径、圆板厚度、所受均布载荷大小以及圆板的材料属性，随后点击“计算”按钮开始计算，计算完成后，点击“云图”按钮可在图片框内查看固支约束圆板受均布载荷下其位移矢量图和应力分布图。

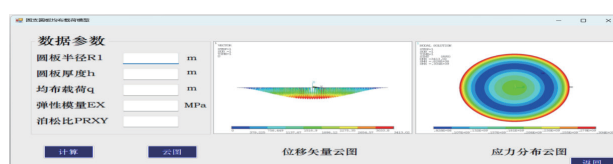


图 4 固支圆板所受均布载荷模型计算界面

为了使学生更好地观察圆板约束方式和所承受载荷类型对圆板应力分布的影响，如图 5 所示，在

施加均布载荷的条件下,对比圆板在周边固支约束和周边简支约束下应力分布规律。由图中可以看到,当圆板承受均匀分布载荷时,周边固支圆板的最大应力在板边缘处,即径向弯曲应力;周边简支圆板的最大应力位于板中心处的两相弯曲应力。学生可以清楚地观察到周边固支圆板在刚度或强度方面都强于周边简支圆板,从而加深学生对承受均布载荷下的圆板应力分析的理解。

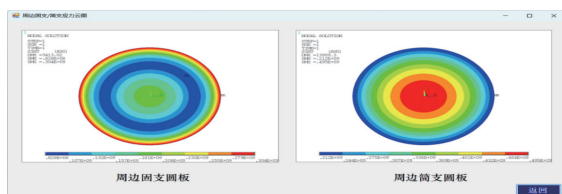


图5 圆板承受均布载荷下周边固支与周边简支应力云图对比界面

(五) 实心环板模型

一般在化工设备中,将中心有圆孔的环形薄板称作环板,环板作为圆板的特例,其承受轴对称载荷的弯曲微分方程与圆板一致。本文在过程装备力学基础虚拟仿真实验平台中设计的实心环板模型为对沿外边缘简支,内边缘固支,板面承受横向均匀载荷的实心环板。学生可在界面的文本框内输入环板的内外环半径大小、均布载荷大小、环板厚度以及环板材料属性。随后点击“计算”按钮完成模拟操作。当计算完成后点击“云图”按钮来查看实心环板承受均布载荷下的位移矢量云图和应力分布示意图,如图6所示。学生通过可视化界面可以清晰地看到环板受到载荷后的变形及应力分布规律,在与课本内容相对照,从而更好地理解用叠加法求环板的应力和变形公式。

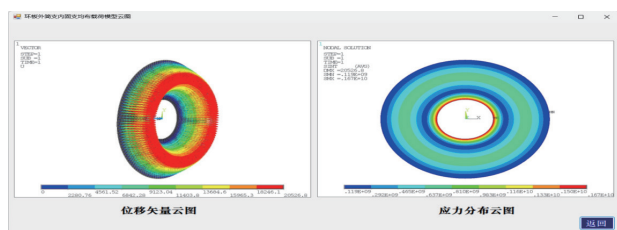


图6 实心环板所受均布载荷模型云图界面

三、虚拟仿真实验平台在过程装备力学基础课程中的应用与优势

本文建立的过程装备力学基础虚拟实验仿真平

台为学生提供了一个直观、清晰认知化工机械设计所需的力学基础知识的有效窗口,为改观传统陈述/推导公式型的教学方法提供了契机。在教学过程中,任课教师可以引导学生在虚拟仿真实验平台上进行实际操作,通过修改相应的关键工况参数,更直观地体会到设计压力容器时板、壳的应力分布情况,从而加深对过程装备力学基础课程知识点的理解。

相对于传统灌输式理论课堂教学方法,使用基于VB的ANSYS二次开发设计的过程装备力学基础仿真模拟实验平台进行辅助教学的优势明显。

(一) 通过虚拟仿真平台提升课堂效果

过程装备力学基础课程作为过程装备与控制工程专业学生重要的专业基础课程,其内容存在大量专业性强的知识点以及繁琐的公式推导,让学生难以理解^[6]。并且传统的填鸭式理论教学使得课堂枯燥乏味,学生难以提起兴趣。通过对2021级教学班同学的问卷统计发现,有77.8%的同学认为过程装备力学基础课程知识点艰涩难懂、听得混乱,对抽象的计算结果难以具体化表现。因此需要通过虚拟仿真实验平台改变现状,由于虚拟仿真实验平台界面简洁清晰、操作简单,即使没有ANSYS使用基础的学生,通过虚拟仿真实验平台界面,也能够快速完成有限元模型的计算求解,并在短时间内获得准确的计算结果。同时,虚拟仿真实验平台通过其良好的可视化效果,可将抽象的理论公式推导结果以应力云图的形式清晰地展现在学生面前,学生可通过自主在仿真平台上修改相应的参数,来查看课程中算例的应力分布结果。运行速度快和良好的可视化效果不仅有效提升了课堂教学效率,也增加了学生对该课程的学习兴趣,并且有利于强化学生对课程知识的理解,为后续内容的学习打好基础。

(二) 通过虚拟仿真提升实验实践能力

通过对2021级教学班同学的问卷统计发现,有55.6%的同学认为过程装备力学基础课程较难的原因在于内容过于理论,缺乏工程应用实训。有66.7%的同学认为增加工程实践经验以及丰富的实验教学可以更有效地帮助理解知识点。但是过程装备与控制工程专业所面对的化工设备的特殊性导致

在高校实验室内无法完全模拟现场实验系统的所有方面,因此过程装备力学基础课程的学习只能通过理论教学进行。在目前高校教育背景下,教师在授课过程中将大多时间花在课程涉及的算例内公式的理论推导过程,对能够反映工程实际问题的计算结果分析与展示部分不太重视,这也导致了学生对抽象的计算过程难以理解,降低了学生的学习兴趣。因此引入虚拟仿真实验平台是高校课程理论教学中的一项重要创新举措,其可以显著提升教学效果、增强学生的理论实践结合能力,并激发学生的自主学习热情^[7]。以圣维南原理为例,利用虚拟仿真平台分析不同边界条件下的应力分布规律,可以深化学生对该原理的理解,同时,通过分析厚壁圆筒在自增强压力作用下的应力和应变分布规律,可以提高学生对拉美公式及屈服条件的领悟。这些实践操作不仅有助于学生巩固理论知识,更能够培养其在实际工程应用中的技能和创新能力,进而推动工程技术的发展与创新。

(三) 利用虚拟仿真增强学生创新实践能力

创新实践教学是过程装备与控制工程专业学生开展科学研究和工程实践的重要环节之一,旨在通过多种教学手段培养学生创新思维 and 实践能力。其中过程装备力学基础是重要的理论基础和技术支撑,扮演着至关重要的角色。针对传统的理论教学容易出现枯燥乏味、难以引发学生兴趣等问题,现代教学可以依托虚拟仿真实验平台,增设具有拓展性的大学生创新项目,采用创新的教学模式,引导学生探究并解决实际问题。例如针对压力容器安全分析,可将课程理论与工程实际问题相结合,通过虚拟仿真实验平台,对容器机械强度进行分析,评估出现裂纹后的寿命等;在分析圆板承受均布载荷集中载荷下的应力分布规律,采用传统的实验加压手段存在操作过程复杂、实验成本高的劣势。而在虚拟仿真平台中可以自由改变载荷强度,不仅可以节约实验成本,保护环境,还可以使学生在实践中不断强化对理论知识的理解和运用能力,提高学生的实际动手能力和解决实际问题的能力。

四、结语

建立过程装备力学基础虚拟仿真实验平台进行

课堂教学,是一种新型的教学方式,并且它在实际教学中得到了越来越多的应用。相对于过程装备力学基础课程传统课堂与实验教学方法,虚拟仿真实验平台具有可视化效果好、计算速度快、界面清晰操作简单、教学成本低廉等优点。它不仅可以发挥学生的主观能动性,培养学生的创新实践能力,而且可以极大地提升学生对过程装备力学基础理论知识与工程实际问题结合的能力。对培养符合国家需要的能源人才具有重要意义。

参考文献:

- [1] 习近平. 在中国科学院第二十次院士大会, 中国工程院第十五次院士大会, 中国科协第十次全国代表大会上的讲话 [N]. 新华社, 2021-05-28.
- [2] 刘亚丰, 余龙江. 虚拟仿真实验教学中心建设理念及发展模式探索 [J]. 实验技术与管理, 2016, 33(04): 108-110.
- [3] 赵敏, 郭兴建, 王江云. 过程装备与控制工程专业仿真实习的教学探索与实践 [J]. 广东化工, 2021, 48(22): 258-259.
- [4] 张万群, 朱平平, 邵伟, 胡万群. 原位变温 X 射线衍射虚拟仿真实验建设与实践 [J]. 大学化学, 2021, 30: 1-11.
- [5] 刘向东, 戴含晖, 陈永平. 基于 LBM 与 MatlabGUI 的流体力学可视化教学与虚拟实验 [J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 102-107.
- [6] 蒋文春, 李国成. 过程设备设计力学基础课研究型教学探讨及案例分析 [J]. 中国教育技术装备, 2009(30): 11-13.
- [7] 吕科锋, 李铮, 胡超, 何静, 胡浩威. 基于虚拟仿真技术的流体力学案例库建设与实践 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2022, 34(08): 242-245.

基金项目: 2022 年度新疆维吾尔自治区教育教育改革和研究项目“《过程装备力学基础》虚拟仿真实验教学建设探索”(No.XJGXPTJG-2022101)

作者简介: 蔡玲玲 (1990-), 女, 浙江衢州人, 工学博士。中国石油大学 (北京) 克拉玛依校区工学院副教授, 主要从事多相流理论与分离技术研究。