



零件几何误差测量虚拟仿真实验平台的设计

罗彦茹, 王志琼, 陈炳锐*, 刘继明, 张起勋, 刘津彤

(吉林大学 机械与航空航天工程学院, 长春 130022)

摘要: 依托机械精度设计及检测的专业知识和信息技术, 构建虚拟检测几何误差场景, 开发一套具有“学—练—考”三大模块的三坐标几何误差测量虚拟仿真实验教学平台。平台集三坐标测量机的结构、原理、操作、误差评定及数据分析为一体, 以工程实际中常用的减速器下箱体为测量对象, 按照箱体的实际几何形状和表面进行虚拟仿真环境构建, 模拟三坐标测量机的测量原理和工作步骤, 高度还原实训体验。提供在不同的实验条件和操作下的检测数据、数据分析和实验操作, 以及考核生成的考核线上实验报告作为虚拟仿真实验输出。该平台可供学生自主学习, 解决了大型复杂设备测量几何误差实体实验训练不足的问题, 加深学生对理论知识的理解和对前沿科学的探索。

关键词: 虚拟仿真; 几何误差; 机械精度; 测量

中图分类号: G642.423

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230085

Design of Virtual Simulation Experiment Platform for Geometric Error Measurement of Parts

LUO Yanru, WANG Zhiqiong, CHEN Bingkun*, LIU Jiming, ZHANG Qixun, LIU Jintong

(School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the professional knowledge of the mechanical accuracy design and detection and the information technology, the virtual scene of geometric error measurement is constructed, and a set of virtual simulation experimental teaching platform for a three-dimensional geometric error measurement with three modules of learning, practice and examination is developed. The structure, principle, operation, error evaluation and data analysis of the coordinate measuring machine (CMM) are integrated in this platform by taking the lower box of reducer as the measurement object, which is commonly used in the engineering practice. According to the geometric shape and surface of the actual part, a virtual simulation environment is constructed to simulate the measurement principle and work steps of the CMM. The training experience is highly restored. Test data, data analysis and experimental operation under different experimental conditions and operations, and the online test report generated by the assessment as the virtual simulation experiment are taken as experimental output. The platform can be used for students to learn independently. This virtual simulation experiment solves the problem of insufficient training in the physical experiment of measuring geometric errors of a large and complex equipment. Students' understanding of theoretical knowledge has been deepened, and their desire to explore the cutting-edge science has become stronger.

Key words: virtual simulation; geometric error; mechanical accuracy; measure

机械零件的质量直接关系到其在使用过程中的安全性和可靠性, 要严控机械零件的质量^[1-2]。而机械零件几何要素的几何误差则直接影响零件的使用功能和互换性^[3], 几何误差的评定与检测在整个机械零件的精度设计中占有相当大的比重,

因此对相关几何误差知识的理解和对前沿领域的几何误差检测仪器的使用就显得尤为重要。在国家重磅政策支持下, 在互联网、多媒体、人机交互和虚拟现实等信息化技术的催化下, 虚拟仿真实验教学应运而生^[4-11]。教高〔2019〕6号文件

收稿日期: 2023-03-22; 修回日期: 2023-09-11

基金项目: 吉林大学第三批本科“创新示范课程”建设项目; 吉林大学课程思政“学科育人示范课程”项目(SK2022056); 吉林大学本科教学信息化研究与改革实践项目(451220407119)。

作者简介: 罗彦茹(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要从事机械基础教学及机械设计方面的研究。

*通信作者: 陈炳锐(1984-), 女, 博士, 副教授, 主要从事机械精度教学及机械可靠性方面的研究。E-mail: chenbk@jlu.edu.cn

《教育部关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》中明确提出“着力打造一大批具有高阶性、创新性和挑战度的线下、线上、线上线下混合、虚拟仿真和社会实践‘金课’。积极发展‘互联网+教育’、探索智能教育新形态,推动课堂教学革命^[12]。”虚拟仿真实验教学要求在满足教学大纲要求的前提下,合理利用信息化技术,使学生可以在高度仿真的虚拟实验环境下针对虚拟实验对象开展实验。

1 实体实验存在的问题

目前国家级机械虚拟仿真实验教学示范中心下设的机械基础实验教学中心拥有国内先进的桥式三坐标测量机,可用于测量大型高精度机床零部件,已经对本科生的几何误差测量实验开放使用。但线下的实验教学存在以下4个问题。

1) 仪器自身成本和维护费用高,无法大量购置,无法多人同时实验。

2) 所需空间大,实验用空气压缩机、压缩空气干燥机以及实操仪器都要有独立空间,尤其是空气压缩机要置于实验室外,以减少噪声对实验的干扰并降低安全隐患。

3) 有限学时内无法完成所有几何特征项目的检测。

4) 实验过程对操作熟练度要求较高,实验人员误操作会导致仪器零部件损坏甚至无法正常工作。

限于上述问题,线下实验教学无法保障一定数量学生的直接参与和实际操作,学生对专业知识的吸收率不高,难以培养学生的动手操作能力、数据分析的能力和创新实践能力,致使学生对该实验学习的积极性大打折扣。针对这些问题,基于信息技术,结合现有实验资源,建立虚拟仿真实验教学平台,展现实体实验不可视的结构、原理和实验设计。通过虚实结合的实验教学模式,充分发挥两类实验各自的优势,达到以虚展实、以虚验实、以虚补实、以虚代实的目的,进而改善实验教学效果,提升实验教学质量,也为后续的实验提供良好的范式^[13-14]。

本文融合桥式三坐标测量机和信息技术,构建虚拟检测几何误差场景,高度还原实训体验,设计几何误差测量虚拟仿真实验教学平台,旨在

给学生提供集学习、实操、考核和交流一体的交互式平台,也可提高创新实践能力,加深对专业知识理解,增加对前沿科学的探索欲望。

2 实验原理

空间的任意几何量测量都可以转化为对空间点的测量,因此精确进行空间点坐标的采集,是评定任何几何形状及误差的基础^[3]。三坐标测量机可定义为一种具有3个方向位置坐标的探测器,其实验原理是将被测零件装夹在测量空间,精密地测出零件被测要素表面的若干个点的三维空间坐标值,将实际被测要素用空间点集坐标位置近似替代,完成测量的工作。通过最小二乘法或最小包容区域图解法对点集坐标进行拟合,即可进一步确定该被测要素的几何误差值。实验实施路径如图1所示。

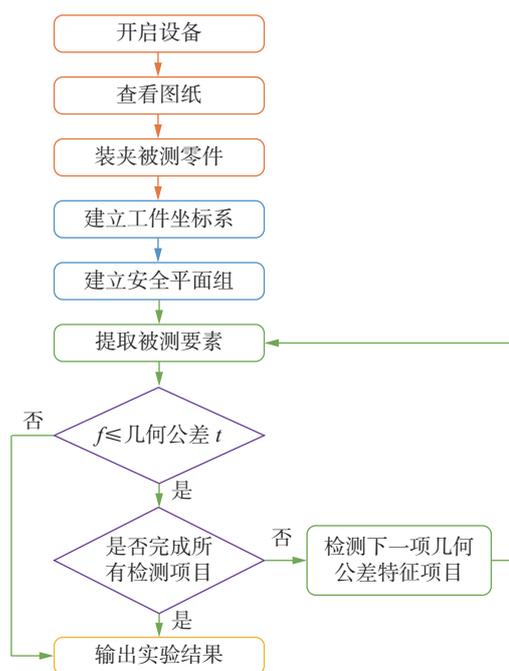


图1 几何误差测量实验实施路径

3 虚拟仿真实验教学平台设计

3.1 设计思路

通过 Unity 3D 等仿真开发引擎对实体实验进行高度还原并仿真,保证机械精度设计课程中几何精度部分的核心要素在虚拟仿真实验中得以完全体现,最终构建以专业知识为理论基础,以虚拟仿真实验平台和实体实验为载体,以提升对专业知识的研究和探索为目标的虚实结合的闭式良

性循环学习模式，满足技能型、应用型和研究型等不同类型学生在认知、掌握和工程化应用等不同学习阶段的需求，实现该实验的共享和辐射效应。

实验课程核心要素具体仿真设计思路如图 2 所示。仿真实验课程核心要素的展示依托实验内容和知识点，充分借助数字虚拟技术如仿真模型、仿真动画、仿真交互操作和在线独立系统等优势，在涵盖课程知识内容的基础上增加了趣味性和互动性。课程实验目的、实验步骤和实验视频功能模块以传统媒体的文本、图片、视频等形式呈现；实验内容、仪器介绍、原理展示和虚拟操作等功能模块在传统多媒体形式的基础上增加仿真模型、仿真动画、交互操作等仿真实验的优势展示形式，增加了实验教学的趣味性和体验感；预习考试、课程预约和报告提交模块借助仿真软件系统的智能化功能，设计成线上系统随机题库选题、信息实时在线提交和后台自动统计评分的模式，极大地提高了实验选课和报告批改的效率，提升了实验预习的效果。

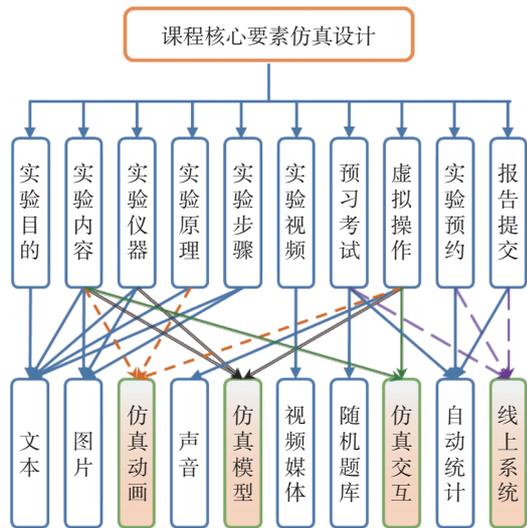


图 2 课程核心要素仿真设计思路

课程核心要素的虚拟仿真设计可以解决实体课堂实验操作时间短、操作不熟练等问题，通过虚拟仿真实验可视的辅助设计(工件坐标系、安全平面组、公差带)使得实体实验抽象难懂的知识点直观体现，极大提升了实验教学效果；虚拟仿真实验融合多模块交互设计和闯关式的操作设计，增加了实验的趣味性，使得专业实验的操作更加直观生动，加深了学生对设备的认知和对理论知识的理解。

3.2 虚拟实验过程教学设计

平台设计秉承以虚育实及多维互动式的理念^[15]，将体验式、案例式、探究式和讨论式等多种教学方法有机融入教学过程设计^[16]，设计了虚拟仿真实验“实训”主界面，如图 3 所示。线上虚拟仿真实验共设计了 3 大功能模块：实验学习模块、实验操作模块和实验考核模块，分别实现以学生为中心的学、练、考 3 重功能，可有效指引学生逐步认识三坐标测量机结构和理解测量原理，明确每一个测量步骤的目的和意义，最终完成实验考核以检验和加强对实验的掌握。实验教学过程设计如图 4 所示。



图 3 虚拟仿真实验“实训”主界面

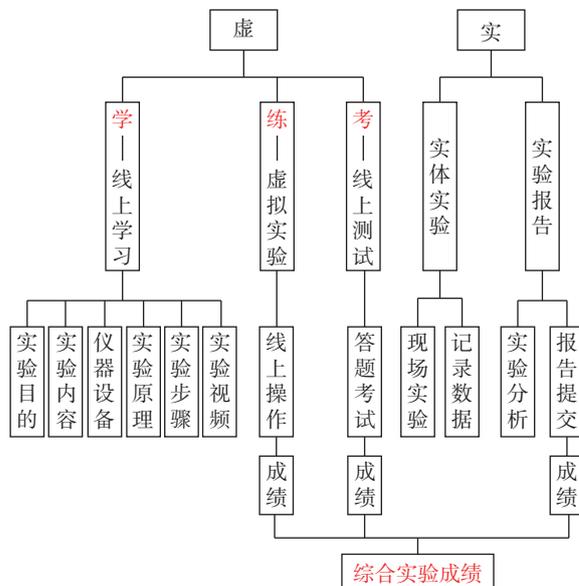


图 4 实验教学过程设计

3.2.1 实验学习模块——学

为便于学生巩固专业知识，快速熟悉设备和实验操作，实验学习模块通过 PPT 讲解和实体操作录制相结合，注重“精”和“简”，将实验目的、实验内容、实验原理、实验要求和实验过程用精练的语言、精准的剪辑进行表达，设计以学

生为中心、以实体几何误差测量实验为背景的微课教学视频。虚拟仿真界面中设计可实现360°视域下的设备认知模块。学生可自行操作虚拟仿真界面,平移、旋转、缩放,移动鼠标至设备任意位置,均可出现该位置的名称及解释,如图5所示。



图5 虚拟仿真实验结构展示界面

3.2.2 实验操作模块——练

实验操作模块的设计充分考虑机械精度专业知识的学习、虚拟仿真实验与实体实验的高度融合。实体实验中的一些复杂结构以虚拟的形式呈现,并将对理论知识的理解融入其中,加深对理论知识的理解,增强实验的体验感和实操性。该模块充分发挥虚拟平台优势,可实现重复性操作,以确保学生可以独立完成实体实验,组内讨论、教师在线指导等步骤可以在此模块运行中同步进行。

虚拟仿真实验平台的“实训”的主界面(见

图3)主要包括虚拟仿真空间、操作步骤栏、提示栏等。设计具有游戏色彩的闯关式操作指引,为枯燥的实验学习增加了趣味性,在交互式界面,学生可根据提示栏的要求,按以下步骤完成实验练习。

1) 开启设备硬件、软件。开启设备包括连通电源和动力气源,气源要求有一定的压力和干燥清洁度,一般先连通电源再连接气源。为此,实验设计了分解的实验操作,学生根据步骤指示和解析,逐步完成设备开启:连接电源开关→开启空气压缩机→开启空气压缩机气阀→开启冷干机→开启三坐标测量机硬件→连通气源,从中理解每一步操作的意义。硬件启动后,开启软件,确保软硬件之间的信号连通,并查看简化后的软件模块,理解各部分的含义和能实现的功能。软件简化设计是基于实体三坐标测量机的复杂软件界面进行的改进设计,将软件的虚拟空间与三坐标硬件测量空间在虚拟界面中融合设计,使得实验操作易于掌握。

2) 安装被测工件,查看图纸,如图6所示,明确待检测的几何特征项目。设计以工程实际应用较广的减速器下箱体为被测对象进行几何误差检测,根据其使用功能和应用范围,确定待检几何特征项目。

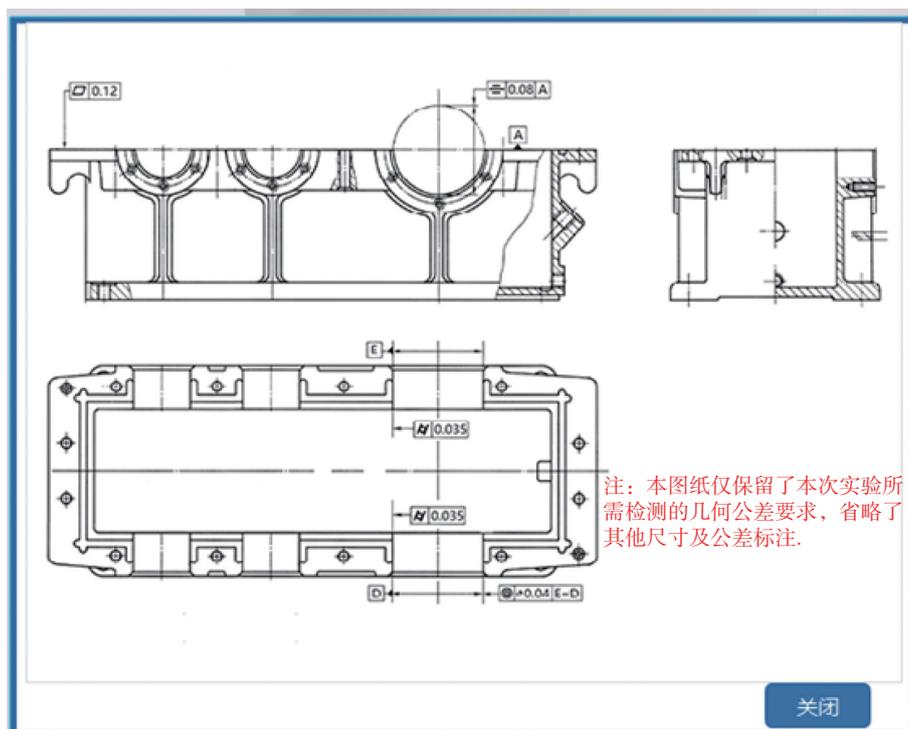


图6 被测工件减速器下箱体设计图

3) 装夹工件。为便于检测，将设计好的夹具通过螺钉连接，将减速器下箱体固定到工作台上。此处设计了安装过程的动画演示，学生点击“安装工件”后，观看演示动画，了解夹具的设计目的，掌握夹具的装夹方法。

4) 建立工件坐标系。该步骤设计的原则是在工件坐标系下建立被测零件上的测量点的坐标，便于批量测量时被测点的坐标位置通用，利于自动测量。操作指引为：在工件上 3 个相互垂直的平面要素 A、B、C 上，分别取 3 个点、2 个点、1 个点，定义 3 个面的交点为工件坐标系原点，3 个面的法线为 X、Y、Z 坐标轴，从而确定工件坐标系，如图 7 所示。

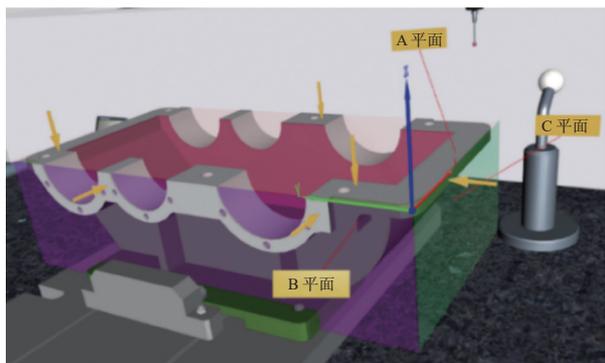


图 7 工件坐标系

5) 建立安全平面组。该步骤的设计意义在于保护设备，防止撞针，即每次测头提取某一个要素后，先将测头移动到安全平面组外，然后从安全平面组外移动到下一个要素的位置，再进行测量。操作指引为：在图中正象限和负象限的两个点提取坐标，构建六面体，将所有要素纳入其中，如图 8 所示。

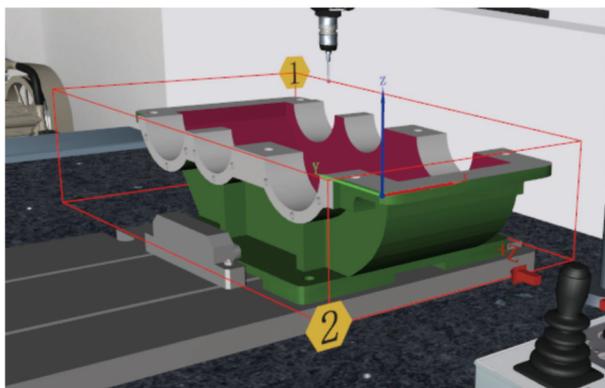


图 8 安全平面组

6) 检测几何特征项目，判定合格与否。操作指引为：基准有无判定→提取被测要素(基准要素)→选择基准(有基准)→导入被测要素(基准要素)→几何特征项目评定→合格性判定。该部分可视化程度高，具有极强的实验沉浸感和真实还原感。其中：

① 提取要素部分设计了可视化辅助标记，可将每个测量点标记出来，便于学生理解提取要素即为提取的坐标点集。几何特征项目评定中需要学生根据图纸的标注输入评定的公差值，并根据评定结果填写误差值，平面度的误差评定及合格性判定如图 9 和图 10 所示。

② 为还原真实的实验，实现与工程实际高度契合，在设计虚拟实验平台时，选择对各类几何误差进行随机赋值，因此学生评定得到的误差值具有差异性，合格性判定结果也随之不同，以平面度误差检测为例，其评定结果显示如图 11 所

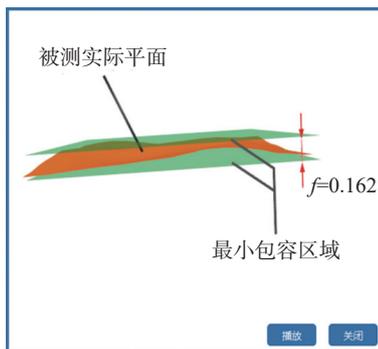


图 9 平面度误差评定



图 10 合格性判定

③ 为还原真实的实验，实现与工程实际高度契合，在设计虚拟实验平台时，选择对各类几何误差进行随机赋值，因此学生评定得到的误差值具有差异性，合格性判定结果也随之不同，以平面度误差检测为例，其评定结果显示如图 11 所

示。这种设计可以使得学生在自主完成实验的过程中,亲身体会误差的不确定性。

③ 误差评定的数据分析部分采用图解法呈现(见图9),可使学生直观体会其评定准则。然而实

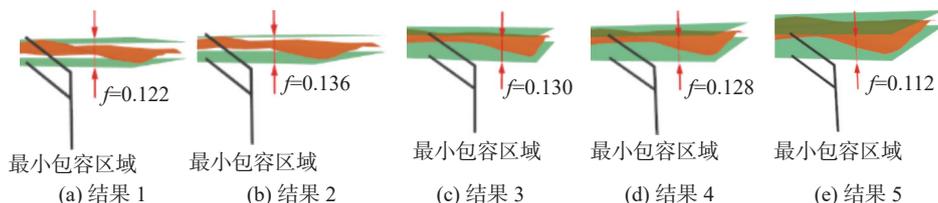


图 11 多次实验中平面度误差评定结果差异图

此外,“练”这一环节实操时具有不确定性,在操作步骤中设计了提示等功能,误操作时会弹出提示,学生了解错误原因后,更正方可继续完成实验。这种“寓教于乐”的实践训练,有利于提高学生的学习积极性。

3.2.3 实验考核模块——考

实验考核模块设计注重实验全过程的加权考核,实现每一步都有“绩”可寻。

首先,有效利用现代信息技术,对每一步实验操作均设计了信息反馈,使得每一步实验操作均具有成绩积分功能,步骤操作正确才能获得积分。完成实验后,分步积分的累加即为“实验操作成绩”,反映了学生对实验操作的掌握程度,有利于学生了解自身的薄弱操作环节,便于下一步有针对性的学习。

其次,设计相关理论和实践知识的综合考核题目,考核题目以随机抽选方式发布,学生需在完成实验操作后进行作答。作答成绩即为“实验考核成绩”,反映了学生对几何误差评定知识的深度掌握情况,有利于教师查看学生对相关知识的综合理解程度。

综合实验成绩由虚拟仿真实验操作成绩、虚拟仿真实验考核成绩、实体实验成绩3部分加权组成,满分均为100分,各部分权重如表1所示。

表 1 综合成绩评定各部分权重

成绩分项	分数	权重	得分
虚拟仿真实验操作成绩		0.35	
虚拟仿真实验考核成绩		0.15	
实体实验成绩		0.50	
综合实验成绩	—	—	

该实验考核体系能够快速反馈学生实践训练的信息,有利于教师后续对重难点进行有针对性

的引导。实际上,最小包容区域法的计算难度非常大,常常是近似求解。故基于该评定准则,引导学生探索编程等多种数学手段进行数据分析,训练了学生的计算能力,也拓宽了解决问题的思维。

的指导。

4 平台应用效果

此实验平台服务专业涵盖:机械工程、智能制造、工程力学、工业工程、车辆工程、工业设计、能源与动力工程、汽车运用工程、汽车服务工程、农业机械化及其自动化。该平台自研发完成并投入使用以来,已为校内1265名学生和校外764名学生提供服务。依托该平台开发的虚拟仿真实验项目已成功获批为省级一流本科课程。

为了全面评估学生和教师对平台应用的满意度,课程组进行了详尽的问卷调查,覆盖了界面可操作性、实验设计以及数据可视化3个重要方面。师生对平台的界面操作性满意度高达92%,实验设计满意度达到95%,而数据可视化方面更是达到了96%的满意度。

通过对零件几何误差测量虚拟仿真实验的深入学习,提高了实体实验的效率和教学质量,赢得了广泛的好评。未来,课程组将继续致力于平台的不断改进,拓展其应用领域,以满足不同学科和专业的需求。

5 结束语

几何误差测量虚拟仿真实验教学平台依托吉林大学国家级机械基础实验示范中心和国家级机械虚拟仿真实验教学示范中心,将机械精度与设计课程、“互联网+”技术、网络多媒体技术及几何误差测量实体实验有机融合,充分发挥虚拟仿真实验的优势。通过动画元素的巧妙融入、可视化辅助要素的指引设计,使实体复杂结构清晰化,使抽象的内容具象化,便于学生深入理解相关知识;多模块交互设计和闯关式的步骤指引,

使得实验操作条理清晰、直观生动,在增加实验趣味性的同时,提升了学生对设备的熟练掌握程度。内容设计以专业知识为基础,高度还原实体实验,充分挖掘实体实验中存在的不足,注重实验原理、过程及考核的细节性设计,系统地阐述了“学—练—考”三位一体的全过程虚拟仿真实验平台设计。该平台的设计不仅在教学中使学生能够自主学习、创新学习,还能促进师生互动,提升学生实训的积极性和操作的稳定性,强化了实训效果,进一步激发了学生的探索创新意识,显著提高了学生的综合能力,加速了实验教学信息化进程。

参考文献

- [1] 周兵兵,王军民,常法庆. 机械加工精度误差及防治措施探讨[J]. 山东工业技术, 2017(8): 36.
- [2] 姚伟德. 典型零件加工质量的分析及质量控制研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(10): 50-51.
- [3] 陈晓华. 机械精度设计与检测[M]. 3版. 长春: 中国质检出版社, 2017.
- [4] 陈力,夏超,沈哲,等. 以实托虚汽车风洞虚拟仿真教学平台设计[J]. 实验技术与管理, 2022, 41(6): 143-147.
- [5] 叶回春,张洪伟,倪向贵,等. 虚拟仿真技术在超精密加工实验教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2021, 40(12): 195-198.
- [6] 熊宏齐. 虚拟仿真实验教学助推理论教学与实验教学的融合改革与创新[J]. 实验室研究与探索, 2020, 37(5): 1-4.
- [7] 赵铭超,孙澄宇. 虚拟仿真实验教学的探索与实践[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(4): 90-93.
- [8] 许少伦,徐青青,齐文娟,等. 虚实结合的电气类专业实验教学体系构建[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(4): 186-190.
- [9] 岳峰丽,蔡玲,张昕,等. 关于虚拟仿真实验教学的一些思考[J]. 中国教育技术装备, 2015(22): 149-150.
- [10] 王志琼,刘广武,刘津彤,等. 多维协同虚拟仿真创新实践教学体系构建[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(5): 197-201.
- [11] 王建华,段建东,姬军鹏,等. 新工科背景下虚拟仿真实验研究与实践[J]. 中国教育信息化, 2021(22): 33-37.
- [12] 郭梦. 疫情防控常态化背景下虚拟现实技术在教育领域的应用研究[J]. 教育传媒研究, 2022(4): 74-76.
- [13] 张宁,赵毅强,兰植博,等. “新工科”背景下关于虚拟仿真实验的几点思考和建议[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(3): 185-188.
- [14] 王洪洲,张乐,段伦超. 大型科学仪器设备开放共享“网格化”效益评价体系的构建与实践[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(11): 264-268.
- [15] 苗森,王志琼,刘津彤,等. 齿轮精度检测虚拟仿真实验教学平台研发与应用[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(7): 145-147.
- [16] 崔岩,司立坤,牛斌. 机械精度实验课程教学改革与实践[J]. 实验室科学, 2018, 21(2): 125-127.

编辑 王燕