

基于数字孪生技术的钳工课程教学模式创新研究

殷小瑞 李爱玲 白晓 李建阳 宋玮婕

航天工程大学士官学校，中国·北京 102299

摘要：针对传统钳工教学中实训资源不足、安全风险高、操作反馈滞后、个性化教学缺失等问题，本文基于对数字孪生技术“虚实映射、实时交互、数据驱动”核心特性的深度剖析，创新提出了一套闭环教学模式。该模式涵盖“虚拟预训—虚实协同实操—数据复盘—个性化提升”四个环节，实现了钳工操作全流程的数字化映射与动态优化，为解决传统钳工教学面临的问题提供了系统化解决方案，为职业教育实训课程的数字化转型提供了具有实践价值的理论框架和参考样本，助力职业教育在数字化浪潮中实现高质量发展。

关键词：数字孪生；钳工教学；教学模式；虚实协同；职业教育

Research on the Innovation of Teaching Mode for Fitter Courses Based on Digital Twin Technology

Yin Xiaorui, Li Ailing, Bai Xiao, Li Jianyang, Song Weijie

Aviation University of Aeronautics and Astronautics Non-Commissioned Officer Academy, China Beijing 102299

Abstract: Aiming at the problems in traditional fitter teaching, such as insufficient training resources, high safety risks, lagging operation feedback, and lack of personalized teaching, this paper, based on an in-depth analysis of the core characteristics of digital twin technology, namely "virtual - physical mapping, real - time interaction, and data - driven", innovatively proposes a closed - loop teaching mode. This mode includes four links: "virtual pre- training, virtual - physical collaborative practice, data review, and personalized improvement". It realizes the digital mapping and dynamic optimization of the entire process of fitter operations, provides a systematic solution to the problems faced by traditional fitter teaching, offers a theoretical framework and reference sample with practical value for the digital transformation of vocational education training courses, and helps vocational education achieve high - quality development in the digital wave.

Keywords: Digital twin; Fitter teaching; Teaching mode; Virtual - physical collaboration; Vocational education

0 引言

随着智能制造技术的迅猛发展，我国制造业正历经深度变革。这一变革对技术技能人才提出了更高要求，钳工作为机械制造领域的基础工种，其人才培养质量直接影响制造业的技术水平。

当下钳工课程的传统教学模式面临诸多挑战。首先，在教学资源与安全方面，传统实训依托实体耗材与设备，呈现出材料损耗快、维护成本居高的状况，且在操作过程中存在机械伤害风险。其次，在教学过程与评价方面，“教师示范，学生模仿”的传统模式效率低下。且在实训过程中，教师难以实时捕捉每位学生的操作细节，仅能通过最终工件精度进行评价，无法及时纠正过程性错误，缺乏对操作过程的量化评估。此外，学生技能水平差异大，统一化教学难以匹配个性化学习需求。

数字孪生技术为攻克这些困境开辟了新道路。该技术

通过构建虚拟实训环境，实现三大功能：通过高保真虚拟环境，实现零风险实训；借助实时数据采集，实现操作过程的精细化监测；通过数据复盘，为学生生成个性化训练方案。基于此，本研究专注于探寻依托数字孪生技术的钳工课程教学模式创新，构建以数据作驱动、以学生为中心的“四阶段闭环”教学模型。这不仅是应对传统教学痛点的必然选择，更是推动钳工课程向智能化、精准化转型，培养符合智能制造时代要求的复合型技术技能人才的重要举措。

1 基于数字孪生的钳工教学模式设计

为有效破解传统钳工教学的困境，本研究基于数字孪生技术，构建了一个以数据为驱动、以学生为中心的“四阶段闭环”教学模式。该模式贯穿于教学全过程，旨在通过“虚拟预训—虚实协同实操—数据复盘—个性化提升”的递进循环，实现技能培养的精准化、高效化与个性化。

1.1 模式总体框架与核心理念

本模式构建了一个以数字孪生技术为核心的、数据驱动的现代化钳工教学闭环系统。它打破了传统教学的线性流程，形成了一个能够自我优化、循环提升的“教学孪生环”，总体框架如图1所示。该框架主要由四个核心教学阶段和一个底层支撑平台构成。四个阶段的顺畅运转，均依赖于底层的数字孪生教学平台。它作为模式的“大脑”和“神经系统”，通过高保真模型、实时数据传感与智能分析算法，为全流程提供核心支撑，是实现虚实融合与数据驱动的技术基石。

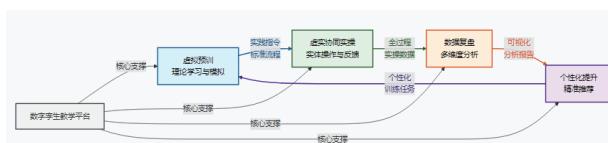


图1 总体框架

基于数字孪生的钳工教学模式核心理念是“虚实融合、数据驱动、闭环赋能”。它不再将数字孪生视为孤立的仿真工具，而是将其作为连接教学各环节的核心纽带，形成一个能够自我演进、持续优化的教学系统。四个核心教学阶段首尾相连，每一个阶段的输出都是下一阶段的输入，同时，后续阶段产生的数据与反馈又反向驱动前一阶段的优化，构成一个螺旋式上升的良性循环，使教学成为一个能够自我演进、持续优化的生命体。“实操数据”与“分析洞察”是驱动循环运行的核心燃料，让教学决策从经验主义走向精准科学。虚拟与实体在教学过程中深度交织，虚拟指导实体，实体反馈数据至虚拟，二者协同作用，使教学效能最大化。

1.2 “四阶段闭环”教学流程设计与实施路径

以下以高职钳工课程中的典型任务——“Y型台阶凹凸体配合件加工”为例，详细阐述四阶段教学模式的具体设计与实施路径。

阶段一：虚拟预习——无风险试错与规范内化

作为闭环教学的起点，这一阶段旨在通过高保真虚拟环境，让学生在零风险、零耗材的前提下，完成对理论知识、操作规范和工艺流程的初步认知与肌肉记忆预形成。如图2所示。

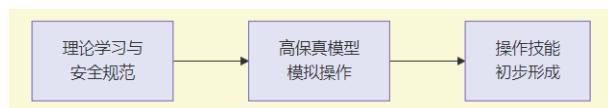


图2 虚拟预习

在具体设计上，数字孪生平台需要提供与实体工位完全一致的虚拟台虎钳、锉刀、钻头、量具等模型，并内置

严格的物理引擎和工艺逻辑规则。以“Y型台阶凹凸体配合件加工”任务为例，实施过程包括三个环节：首先，学生在平台上接收任务图纸与工艺要求，建立完整的任务认知；其次，学生可以在虚拟环境中进行“试错式”自由探索，比如尝试不同的装夹方式，系统会即时给出“装夹不稳，存在安全隐患”等反馈；最后，系统会引导学生按照“划线→钻孔→锯削→粗锉→精锉→检测”的标准流程进行规范训练，对关键技能如锉削的平面度控制，还会提供标准动作轨迹的视觉引导。

这一阶段的教学价值在于，它将传统教学中“教师讲、学生听”的被动模式，转变为“在做中学、在错中悟”的主动探究模式，不仅极大地提升了学习主动性，更将规范意识和成本意识内化于学生的认知体系中。

阶段二：虚实协同实操——实时指导与技能迁移

这一阶段是实现技能从虚拟到实体无缝衔接的关键环节，数字孪生系统在此扮演着“智能教练”的重要角色，为学生提供实时、在线的个性化指导。如图3所示。

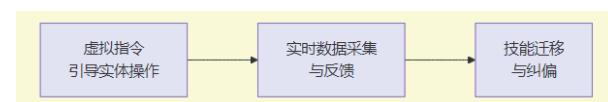


图3 虚实协同实操

在技术实现上，需要在实体工位上部署传感器（如姿态传感器、力传感器）或视觉识别系统，将学生的实体操作实时映射到虚拟模型中，实现虚实状态的同步与交互。在“Y型台阶凹凸体配合件加工”任务中，当学生进行锉削操作时，传感器会精准捕捉其锉刀的运动轨迹、力度与频率等数据。如果系统检测到学生锉削姿势不标准（如身体重心偏移），或用力过猛，会立即通过工位旁的屏幕或AR设备发出“锉刀前倾角过大，请调整至XX度”等警示信息。

此外，系统还提供精度预警功能。在加工过程中，学生可以使用平台集成的虚拟量具对虚拟工件进行实时测量，平台会根据测量数据预测当前加工状态是否会导致最终配合间隙超差，并及时给出调整建议。这种“一对一”的实时精准指导，有效防止了错误动作固化为坏习惯，显著提高了技能迁移的成功率与实训效率。

阶段三：数据复盘——过程与结果的双重诊断

本阶段致力于变革传统的结果评价方式，通过对全过程数据的采集与分析，实现对学习效果的精准诊断与客观评估。如图4所示。



图4 数据复盘

数字孪生平台会自动记录并存储学生在虚拟预训和虚实协同实操中产生的全量数据。在学生完成实体工件加工后,平台会自动生成一份详细的《凹凸件加工学习诊断报告》。这份报告不仅包含工件的最终配合间隙等结果性数据,更重要的是记录了丰富的过程性数据,如:虚拟预训阶段的总耗时与错误次数、实操阶段锉削姿势的规范度评分、各工序时间分布、尺寸精度控制曲线等。

通过对这些数据的深度分析,报告能够精准指出问题所在,比如明确显示“学生在精锉阶段尺寸控制不稳,多次出现修正过量现象,建议加强微量锉削技巧训练”。这种基于数据的诊断方式,使教学评价从依赖教师经验的主观判断,转变为基于数据的客观分析,让师生都能清晰、准确地把握技能掌握的薄弱环节。

阶段四:个性化提升——因材施教精准赋能

基于数据复盘的诊断结果,这一阶段为学生量身定制强化训练方案,完成教学闭环的“最后一公里”。该阶段的设计重点在于:平台需要内置智能推荐算法,能够根据诊断报告,从资源库中自动匹配并推送最适宜的学习资源与训练任务。如图5所示。

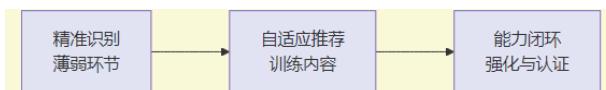


图5 个性化提升

具体实施中,对于在“数据复盘”阶段被诊断出“平面锉削平整度控制能力不足”的学生,平台会自动推送专项虚拟训练任务,如“在虚拟环境中将一块铸铁锉削至平面度0.05mm以内”。同时,系统还会智能推荐相关的理论微课(如“锉削发力技巧”)、名师演示视频等学习资源。

值得注意的是,学生完成个性化提升训练后,其新的训练数据会被系统记录,并再次进入“数据复盘”阶段,形成“诊断-提升-再诊断”的微循环。这种机制确保了学生的技能短板能够得到持续跟踪和有效弥补,真正实现了规模化教育背景下的个性化培养。

1.3 支持系统与保障机制

为了确保该教学模式的顺利实施,需要建立完善的支持系统与保障机制。在师资队伍建设方面,需要制定系统的教师培训计划,重点提升教师的信息化教学能力和数据分析能力。在教学资源建设方面,要建立动态更新机制,

确保虚拟模型和训练任务与企业实际生产技术保持同步。在技术支撑方面,需要建立稳定的运维保障体系,确保数字孪生平台的可靠运行。

2 模式实施的潜在挑战与对策分析

2.1 技术融合深度与数据精准度的挑战

数字孪生教学模式的效能基础,源于高逼真度的虚拟模型与精确的实时数据互动,然而这正是首要的技术难题。具体而言,这些挑战主要体现在两个方面:首先,创建与实体工具、工件物理属性及行为逻辑完全一致的虚拟模型,存在技术复杂、开发周期长、成本高昂等困难。一个失真的模型不仅无法有效指导实践,甚至可能产生误导作用。其次,虚实联动依赖于高精度的传感器或视觉识别系统,在嘈杂的实训环境中稳定、准确地捕捉细微的操作动作,并实现毫秒级的反馈,存在相当大的技术难度。任何数据的延迟或失真都会直接影响“智能教练”的指导价值。

针对这些技术挑战,建议采取“校企协同、分步迭代”的实施路径。院校应当与技术企业建立深度合作关系,共建联合实验室,优先开发教学需求最迫切、应用价值最高的核心技能模块的数字孪生体,在确保核心物理属性准确性的基础上逐步扩展功能。在数据采集方面,可以采取“虚实结合、交叉验证”的技术方案,即在关键工位部署成本可控的传感器,同时辅以关键节点的教师人工复核与系统数据比对,在保证基本精准度的前提下,渐进式地追求更高性能。

2.2 教师角色转型与教学惯性的挑战

教师作为践行者,在教育变革过程中起着关键作用。本模式要求教师从传统的“主导者”转变为“引导者、设计师与分析者”,这一角色转型给教师带来了较大的挑战。深入分析发现,这一挑战主要体现在两个层面:一方面,许多资深教师已经习惯于传统“示范-模仿”的教学流程,面对复杂的技术平台容易产生畏难情绪,形成较强的“教学惯性”;另一方面,新模式要求教师具备较高的数据素养,能够准确解读学习诊断报告,并据此设计个性化的干预策略,这对教师的综合能力提出了全新要求。如果教师无法顺利完成角色蜕变,再先进的数字孪生平台也难免沦为昂贵的摆设。

为了应对上述挑战,必须构建一套“赋能先行、激励跟进”的教师发展体系。学校层面应当组织系统性的数字化教学能力培训,不仅要教授平台操作技能,更要通过工作坊、案例研讨等形式,指导教师如何利用数据报告进行学情分析、如何设计虚实融合的教学活动。同时,需要完

善相应的激励机制,将教师在模式创新中的贡献(如开发数字资源、撰写数据分析案例等)纳入绩效考核与职称评定体系,从制度层面激发教师的内在动力,实现从“要我用”到“我要用”的转变。

2.3 资源建设成本与持续更新的挑战

数字孪生教学模式能否持续发展,很大程度取决于教学资源库的前期搭建及长期的动态化更新,而这需要大量的资金与人力投入。具体而言,高质量三维模型、交互式虚拟实训项目、微课视频等资源的开发,需要持续的资金支持和技术保障。更重要的是,随着生产技术和工艺的快速进步,教学资源必须保持同步更新,否则将很快与产业实际脱节,这就构成了长期的运营压力。对于单个院校而言,往往难以独立承担这一重负。

为了解决资源建设与更新的难题,迫切需要推动“共建共享、开放生态”的资源建设模式。建议由教育主管部门或行业指导委员会牵头,组建“数字孪生钳工教学资源联盟”,汇聚院校、企业与出版社等多方力量,共同制定技术标准、分担开发成本、共享建设成果,避免低水平的重复建设。对于资源更新维护,可以建立一种创新的“众创”机制,鼓励各院校教师根据自身专长,持续贡献更新模块,并给予其相应的知识产权认定与收益分享,从而形成一个充满活力的、能够自我演进的资源生态,确保教学内容的先进性与生命力。

总之,面对这些实施阶段的难题,需技术开发者、教育管理者与一线教师共同努力,以务实的态度、系统的规划和创新的机制,共同扫清障碍,才能真正释放数字孪生技术赋能钳工教学的巨大潜力。

3 研究结论与展望

3.1 研究结论

本研究通过系统性的理论构建和实践探索,建立了基于数字孪生技术的钳工课程“四阶段闭环”教学模式。此创新模式能够切实化解传统钳工教学长期面临的高成本、高风险、难评价等痛点难题。它不仅通过虚拟环境为学生创造了安全的“试错”空间,更重要的是通过实时数据反馈与精准诊断,实现了技能培养从“经验驱动”向“数据

驱动”的根本性转变。该模式的应用将显著提升钳工技能训练的效率和质量,为新时代钳工人才培养提供了切实可行的路径。

3.2 研究局限

尽管本研究取得了一定的成效,但还存在一些需要关注的局限性。首先,所构建的教学模式目前主要停留在理论设计与案例分析层面,尚未经过大规模、长周期的教学实证检验,其有效性和适用性有待进一步验证。其次,该模式对技术平台和数字资源的依赖性较强,在基础设施相对薄弱的院校中推广可能面临较大挑战。此外,当前研究主要聚焦于技能培养层面,对数字孪生技术于职业素养培育、思政引领以及创新精神等更深层面育人目标的推动作用探究,仍较为欠缺,这些都需要在后续研究中加以完善。

3.3 未来展望

基于当前研究的成果和存在的局限性,未来可以从三个维度进行深入探索:首先,推进智能化升级,引入人工智能技术,使系统能够更精准地预测学习难点,自动生成更高效的个性化学习路径,实现从“数据驱动”到“智能赋能”的质变。其次,深化沉浸化体验,通过与增强现实(AR)、虚拟现实(VR)技术的深度融合,打造更具临场感的“元宇宙实训室”,进一步提升学习的沉浸感与实操的真实度。最后,拓展生态化应用,将本模式从钳工课程推广至整个工科专业集群,并依托联盟化建设思路,构建开放、共享、持续进化的职业教育数字孪生教学资源生态体系,为培养适应智能制造时代的卓越工匠奠定坚实基础。

参考文献:

- [1] 董紫君,孙飞云,苏栋.基于数字孪生技术的智慧教学模式创新研究[J].职业技术教育,2023,44(11): 32-37.
- [2] 徐凯.基于数字孪生技术的在线虚拟仿真实训教学研究[J].中国职业技术教育,2022,(28): 68-73.
- [3] 蒋志超.数字孪生在产教融合教学和创新研究中的应用——以深圳市某学院为例[J].工业技术与职业教育,2023,21(2): 1-5.

作者简介:殷小瑞(1989.01-),女,汉族,河南周口人,硕士,讲师,研究方向:机械制造工艺。