

虚拟现实技术在焊接培训领域的应用

吴晔华^{1, 2}, 乔伟^{1, 2}, 孙传钰^{1, 2}, 宋书平^{1, 2}, 李竹渊^{1, 2}, 王晓娜^{1, 2},
田甜^{1, 2}, 王世培^{1, 2}, 卢坤^{1, 2}, 姚舒扬^{1, 2}

1. 中国核工业二三建设有限公司 北京 101300

2. 核工业工程研究设计有限公司 北京 101300

摘要: 随着我国制造业的快速发展, 对焊接技术人才的需求不断增加。但传统焊接培训模式在成本、安全、环保和效率方面存在诸多问题, 难以满足现代产业需求。虚拟现实技术为焊接培训提供一种高效、安全、绿色的解决方案。通过构建沉浸式虚拟环境, 学员可以在无风险的条件下进行焊接操作训练, 显著提升培训效果和资源利用率。探讨了虚拟现实技术在焊接培训中的应用现状与核心技术, 包括力反馈、视觉与听觉反馈、熔池与焊缝模拟、定位技术及焊缝评价技术, 并结合试验数据验证其优越性。研究表明: 虚拟焊接培训不仅提高学员的理论和实践能力, 还有效降低资源消耗与环境污染, 具有广阔的应用前景。未来的发展方向应聚焦于技术优化和多学科融合, 以满足制造业对焊接人才的更高需求。

关键词: 焊接培训; 虚拟现实; 力反馈; 焊缝评价

Application of virtual reality technology in welding training field

WU Yehua^{1, 2}, QIAO Wei^{1, 2}, SUN Chuanyu^{1, 2}, SONG Shuping^{1, 2}, LI Zhuyuan^{1, 2},
WANG Xiaona^{1, 2}, TIAN Tian^{1, 2}, WANG Shipei^{1, 2}, LU Kun^{1, 2}, YAO Shuyang^{1, 2}

1. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China

2. Nuclear Industry Research and Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China

Abstract: With the rapid development of China's manufacturing industry, the demand for welding technology talents is constantly increasing. However, the traditional welding training mode has many problems in terms of cost, safety, environmental protection, and efficiency, which are difficult to meet the needs of modern industries. Virtual reality technology provides an efficient, safe, and green solution for welding training. By building an immersive virtual environment, students can conduct welding operation training under risk-free conditions, significantly improving training effectiveness and resource utilization. Explore the current application status and core technologies of virtual reality technology in welding training, including force feedback, visual and auditory feedback, melt pool and weld simulation, positioning technology, and weld evaluation technology, and verifies its superiority through experimental data. Research has shown that virtual welding training not only improves students' theoretical and practical abilities, but also effectively reduces resource consumption and environmental pollution, with broad application prospects. The future development direction should focus on technological optimization and interdisciplinary integration to meet the higher demand for welding talents in the manufacturing industry.

Keywords: welding training; virtual reality; force feedback; weld evaluation

1 序言

随着国家制造业的发展及产业结构的调整,对焊接技术人员的技能水平和职业素养都有更高的要求。我国的焊接技术人才缺口不断扩大,但传统的焊接培训模式存在着高成本、低效率、高风险及高污染等问题,难以满足现代化产业对焊接人才的需求。虚拟现实技术(Virtual Reality, VR)通过软件生成逼真的声音、图像和其他感觉的模拟环境,为焊接培训领域带来新的思路,它能够帮助学员在虚拟环境中进行训练,有效降低训练的成本及可能存在的安全风险。同时,利用标准化教学流程以及回放功能大幅提高培训的效果。虚拟现实焊接培训的应用不仅提升学员的操作熟练度,也推动职业培训朝智能化、绿色化方向发展。

2 传统焊接培训现状

2.1 传统焊接培训的局限性

焊接培训是培养焊接操作人才的重要手段,但目前大部分企业依然采用传统的“师傅带徒弟”培训方式,这种模式存在多方面问题。首先,培训效率低下。为保证培训效果,通常情况下每位师傅只能同时指导一到两名学员,且培养一名员工从初学到能够独立焊接生产一般至少需要一年的时间,无法满足企业在高峰期对焊接人才需求的快速增长;并且知识更新速度慢,传统模式主要依赖师傅经验传授,理论知识和新技术普及较慢,难以快速适应行业发展需求。其次,资源消耗大。焊工培训期间会消耗大量电力、焊接材料、母材及保护气体;与此同时,培训过程中产生大量烟尘、有毒气体和高热量对环境和学员健康造成危害。此外,培训成本高昂。培训需长期投入大量财力和物力,包括材料、设备和人力资源,给企业带来巨大经济压力。最后,培训安全隐患多。学员在经验不足的情况下容易因误操作而引发事故。上述这些问题限制了传统焊接培训的效率和效果^[1]。焊接培训时产生的烟尘污染如图1所示。

2.2 焊接行业对技术人才的需求分析

随着我国制造业的高速发展,焊接操作人才的需求也不断提高。然而,一方面由于目前国内开设焊接专业的职业学校数量较少,技术应用型本科院校数量更少,导致毕业生数量无法满足社会需求,



图1 焊接培训产生的烟尘污染

存在较大的人才缺口。另一方面,学校课程的设计与企业实际的需求仍存在较大的差异,使得学生在毕业后往往需要经过长时间的再培训才能适应岗位。此外,焊接技术的更新换代速度较快,学校教育往往难以跟上技术发展的步伐,导致学生所学知识与实际应用之间存在脱节。因此,企业对于能够快速适应工作环境、掌握最新焊接技术的员工需求迫切。

3 虚拟现实技术与焊接培训的结合

3.1 虚拟现实技术介绍

虚拟现实技术是一种通过计算机技术创建的模拟环境,使用户能够通过视觉、听觉、触觉等多种感官体验到一个完全沉浸式的虚拟世界。这种技术利用计算机生成的三维动态环境,允许用户在其中活动或与之相互作用,从而产生身临其境的感觉^[2]。基于头盔式显示器的典型虚拟现实系统如图2所示。

3.2 虚拟现实技术在焊接培训领域的发展

虚拟现实技术在焊接培训领域的应用,使学员可以在安全、可控的虚拟环境中进行焊接操作练习,无需担心真实世界中的安全风险和材料成本。学员通过使用VR头盔和手柄,模拟焊接过程中的各种操作,如焊条电弧焊、钨极氩弧焊等。同时,系统能够根据学员的动作实时调整模拟环境中的焊接效果,提供视觉和听觉反馈,增强学习体验的真实感。而且虚拟现实技术还可以结合先进的数据分析模型,如机器学习算法,来分析学员的操作习惯和技能水平,提供个性化的培训建议和改进方案。

在20世纪90年代,随着计算机图形技术和虚拟现实技术的初步发展,一些科研机构开始尝试将虚拟现实技术应用于工业培训,其中包括焊接操作模拟。此阶段的虚拟焊接仍处于实验室研究阶段,

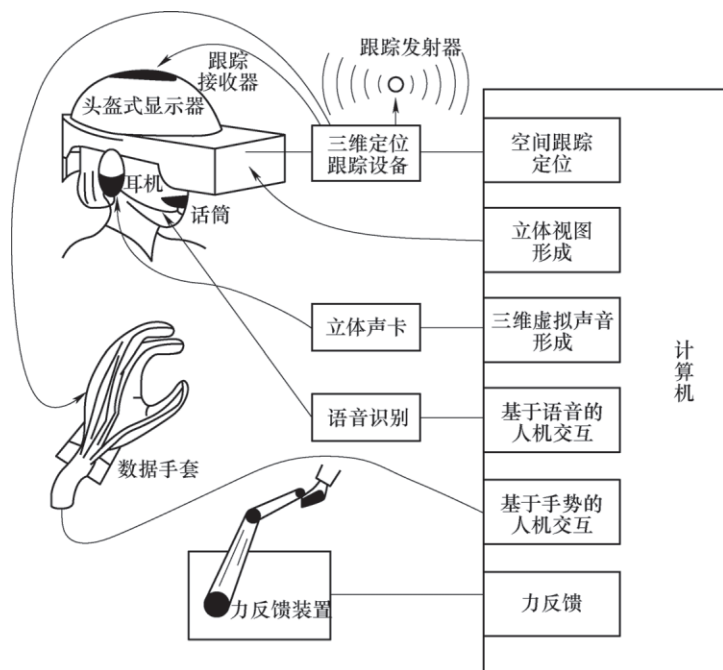


图2 基于头盔式显示器的典型虚拟现实系统

主要关注焊条的熔化过程和熔池的二维运动，因此焊接环境的交互性较低，反馈主要依赖视觉和语音提示。如武传松等^[3]研制的初级焊条电弧焊工训练模拟器，利用该装置不需要焊接设备、焊条和钢板，就可完成对焊工基本操作技术的培训。该装置可以模拟焊条的熔化过程和熔池的二维运动；检测和计算模拟焊条的空间位置和姿态；判断焊工操作是否符合规范，并将电弧声模拟与报警系统及时反馈给焊工，同时记录操作过程中失误的次数。

随着虚拟现实硬件设备的进步及计算机图形处理能力的提升，虚拟焊接逐渐进入初步商用化阶段。2000年左右，一些公司开始推出虚拟焊接培训设备，结合手柄式传感器和焊接模拟工具进行教学。此时的技术能够实现焊接轨迹的简单反馈和评分功能，实现焊接速度、角度等基础技能的训练，但人机交互界面还处于初步发展阶段，用户体验有限。加拿大蒙特利尔的123认证公司^[4]研发了一款名为arc+[®]的焊接模拟器（见图3）。这款模拟器通过3D眼镜在焊接头盔内创建虚拟环境，使操作者能够在模拟的焊接环境中进行训练。该系统利用特殊标记追踪焊枪运动，并结合空间测量技术来定位三维对象，从而实现对焊接过程的精确模拟。

现今，虚拟现实技术在焊接领域的应用越发



图3 arc+[®]焊接模拟器

成熟，虚拟焊接实现焊接熔池动态仿真，可实时模拟焊接过程中的温度变化和金属流动。同时，也能支持多种焊接方法的模拟，如伏能士推出的Welducation Campus平台（见图4），学员可以使用



图4 伏能士Welducation Campus平台

Welducation虚拟焊机练习3种焊接方法,即焊条电弧焊、MIG/MAG焊和TIG焊。另外,还支持焊接分析功能,帮助学员持续跟踪自己的学习进度。

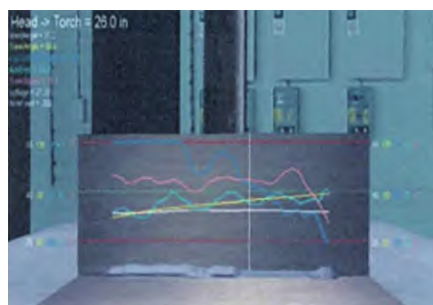
4 虚拟现实技术在焊接培训中的核心技术

4.1 力反馈技术

力觉的再现是一个力反馈的过程,通过利用由计算机控制的机械装置或触觉交互装置来实现。力反馈装置通过驱动装置向使用者输出反馈的作用力,将真实物体被接触或被受力时的状态以力的形式再现到人的手或肢体上来实现力觉的交互^[5]。FAST等^[6]利用人工神经网络方法成功研制出适用于GMAW的SimWeiderTM仿真系统(见图5),其是第一个将触觉技术引入到虚拟焊接领域的系统。



a) 现场实操



b) 系统界面

图5 适用于GMAW的SimWeiderTM仿真系统

黄俊^[7]设计了一种可穿戴的RPR型力反馈焊接机械和SMAW焊接训练软件(见图6),以便增强虚拟焊接训练的真实感。

目前,虽然已有一些力反馈技术应用在虚拟焊接中,但是由于在真实的焊接过程中,操作者能够感受到的力反馈一般是来自电弧的电磁收缩力、斑点压力、爆破力及等离子流力,但其形成过程具有随机性和不确定性,十分复杂,目前技术尚未达到能有效模拟这些感觉的程度。



图6 RPR系统实物

4.2 视觉与听觉反馈技术

由于人的双眼瞳孔之间存在距离,从不同角度观察物体,左右眼成像结果是有差别的,即会产生双目视差。视差反映了物体在场景渲染中的深度信息(相对屏幕平面的距离),结合大脑视觉中枢,就可获得区别物体距离、深度、凹凸的立体感^[8],这就是双目立体视觉系统,如图7所示。虚拟焊接系统也是如此,一般采用3D眼镜或头戴式显示器(HMD)通过两个摄像头获得图像信息,计算出视差,从而显示出一个三维环境,以提供直观的视觉反馈。用户可以通过这些设备观察到焊接过程中的熔池、焊缝和弧光飞溅等现象,从而获得高度仿真的焊接场景。

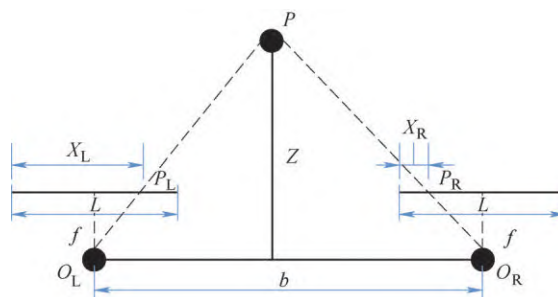


图7 双目立体视觉系统原理

在虚拟焊接中,听觉反馈主要通过模拟焊接过程中的声音来提供给操作者,以增强其沉浸感和操作的真实感。周晖^[9]首先利用麦克风和光电传感器等设备对焊接试验中产生的声光信号进行采集,并对其进行降噪处理;然后再通过试验数据的对比,分析焊接声音特征信号与焊缝几何尺寸的关系;最后再利用神经网络算法建立焊接参数与声光信号的神经网络模型,从而实现对焊接声音和亮度进行模拟。

4.3 熔池与焊缝的模拟

熔池与焊缝的模拟是虚拟焊接的关键步骤，仿真效果的优劣直接影响焊接训练的效果。目前，熔池的外形模拟一般采用数学建模的方法，根据不同的焊接方法选择不同的模型，如高斯热源模型或双椭球热源模型。熔池流动则采用流体力学方程，如纳维-斯托克斯方程来描述熔池的运动状态。焊缝的模拟主要是基于熔池的动态行为，并结合焊接路径和操作参数生成最终的焊缝形态。

张建勋^[10]使用VC++6.0开发平台，结合OpenGL技术，利用网格进行建模，建立熔池和焊缝的几何模型，通过法向量计算加入光照效果，并采用平滑处理使熔池和焊缝在凹陷或生长过程中逼真地再现真实焊接的过程，得到较为逼真的模拟效果。

薛金保等^[11]提供一种单面焊双面成形过程模拟与仿真的网格实现方法，将计算机图形学中的网格法用于焊接熔池与焊缝成形的模拟与仿真，构建以平面三角形网格为基础的焊道、熔池及焊缝模型，结合双椭球模型和高斯热源模型得到熔池凹陷及焊

缝余高生长函数，从而形成凹陷的网格熔池及网格焊缝。经实际运行测试，模拟效果逼真。

盖登宇等^[12]提出组合热源模型，所构造的组合热源表面热源采用高斯型热流分布面热源模型，内部采用双椭球形热源。其中，面热源控制表面熔池，体热源反映熔深方向上深层液体层，其模型模拟的熔池形状与实际焊缝熔合线基本吻合。应用上述热源对马氏体不锈钢平板对接电弧焊的温度场及应力场进行数值模拟。结果表明，使用组合热源进行数值模拟较之单独使用高斯或双椭球形热源的残余应力计算值与实测值吻合度更高。

4.4 定位技术

定位技术在虚拟焊接中至关重要，用于准确捕捉用户操作位置、焊枪移动轨迹及焊接参数，确保系统能够实时反馈和评估用户的操作质量。目前，较为成熟的定位技术有光学定位、激光定位、磁场定位、惯性传感器定位及多种技术混合定位。各种定位技术的优缺点对比见表1。

其中，应用最广泛的是光学定位技术，市场上

表1 各种定位技术优缺点对比

方法	优点	缺点
光学定位	高精度（毫米级），支持多自由度运动捕捉	对环境光线敏感，需要较大的追踪空间和清晰的视野
惯性传感器定位	无需外部设备支持，系统独立性强可用于遮挡环境或狭小空间	存在累积漂移，需要周期性校准精度低于光学追踪
磁场定位	不受视线遮挡的影响，精度较高，延迟低	容易受到金属干扰（尤其是焊接场景中的钢铁环境），工作范围有限
激光定位	精度高，适合焊缝检测和复杂路径追踪	成本高，对安装环境要求较高
多种技术混合定位	抗干扰能力强，提供全方位、多自由度的定位信息	成本高，设备体积大

较为火爆的技术产品如OculusRift、PlayStationVR均采用这种技术^[13]。该技术使用摄像头、红外传感器等设备捕捉焊枪上的标志点或光源位置，通过计算光学信号的空间位置来确定焊枪的实时坐标和角度。这种定位方式能达到毫米级精度，并且支持多自由度运动捕捉。

虽然定位技术已经取得了一定的进展，但仍存在严重的不足之处，如视觉不适问题和定位精度不足等。未来的研究方向包括改进定位算法以提高精度、减少视觉不适，并探索新的交互方式以提升用户体验^[14]。

4.5 焊缝评价技术

虚拟焊接的焊缝评价技术主要涉及深度学习、机器视觉、三维建模和仿真技术。这些技术的应用不仅提高了焊接质量的评估效率和准确性，还为焊接培训和质量控制提供了新的方法。杨志超^[15]对比分析3种深度学习的常用框架，选用TensorFlow框架对缺陷识别网络进行训练与测试，进行多组训练批次、学习率及优化器参数的交叉试验，以提高网络训练的准确性与鲁棒性，最终取得识别准确率高达96.7%，并进行了200张新样本数据集的测试，得到的准确率为96%。

5 虚拟现实技术在焊接培训中的效果评估

和豪涛等^[16]在传统的焊接培训授课中加入虚拟焊接培训,通过对比使用焊接培训系统前后的理论成绩和实操成绩,发现实施新式焊接培训模式后,学生的平均理论成绩为92分,比以往的平均成绩80分提高了12分。在达到对接焊焊接标准要求的情况下,传统的焊接培训模式平均每个学生消耗26对钢板,而采用新式焊接培训模式仅需16对钢板,钢板消耗减少38%,且消耗的保护气体、焊丝等也相应减少。通过问卷调查的形式对学生进行满意度调查,结果表示采用传统焊接培训模式满意度为45%,一般为35%,不满意为20%,采用新式焊接培训模式满意度为68%,一般为27%,不满意为5%,新式焊接培训模式的满意度高于传统焊接培训模式。图8所示为传统培训与新式焊接培训效果对比。

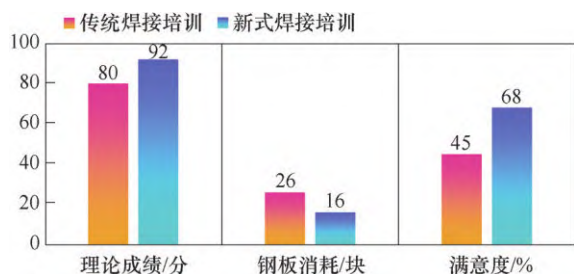


图8 传统焊接培训与新式焊接培训效果对比

张一然等^[17]选取焊接专业两个班级的学生进行课程成绩对比,采用虚拟现实技术授课的实验班的平均分73.26分,明显高于采用传统授课方式的对照班的平均分65.38分。说明在课堂中加入虚拟现实技术有效地提高了学生的总体成绩,无论是对学生掌握理论知识还是提升实操能力都有很大的帮助。

6 结束语

基于虚拟现实技术的焊接培训模式与传统焊接培训模式相比,在培训安全、环境保护、经济效益及技术实现等方面确实具有一些显著的特点和优势,主要体现在以下几个方面。

1) 虚拟现实技术通过构建逼真的虚拟环境,为焊接学员提供安全、经济、高效的培训方式。它不仅能够模拟真实的焊接场景,还能结合视觉、听觉和力反馈技术,提升学员的操作真实感和培训效果。此外,虚拟现实技术的标准化教学流程和数据

回放功能,为个性化培训和技能评估提供强大的技术支持。

2) 虚拟焊接在熔池和焊缝模拟、力反馈技术、定位技术和焊缝评价技术等方面取得显著进展,逐步实现从基础仿真到高精度、高交互性的技术提升。这些技术的结合,使得虚拟焊接可以更加全面地模拟真实的焊接过程,为学员提供更为有效的技能训练。

3) 试验数据表明,与传统焊接培训相比,虚拟焊接培训显著提高学员的理论知识 and 实践操作能力,同时有效减少培训中材料和能源的消耗,降低环境污染和安全风险。学员的学习满意度和参与积极性也显著提升。

4) 当前,虽然虚拟焊接技术已取得显著进展,但在力反馈的真实感模拟、定位精度提升和学员交互体验优化等方面仍有较大改进空间。未来的发展应更加注重虚拟场景的真实感,探索更智能化、更高效的焊接培训解决方案,以更好地满足现代制造业对焊接人才的需求。

综上所述,虚拟现实技术在焊接培训中的应用既是传统培训模式的有力补充,也是未来职业教育绿色化、智能化发展的重要方向。这一技术不仅能推动焊接技术人才培养效率的提升,还能促进制造业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 孙秀春. 浅析虚拟现实焊接设备在电焊工技能考证培训的应用[J]. 时代汽车, 2020 (23): 56-57.
- [2] 张占龙, 罗辞, 何为. 虚拟现实技术概述[J]. 计算机仿真, 2005, 22 (3): 1-3, 7.
- [3] 武传松, 王晓明, 文春明. DMX-1型电子模拟式手弧焊工训练器[J]. 焊接学报, 1992 (2): 67-72.
- [4] CHOQUE C. Selected Papers and Presentations Presented at MODSIM World 2010 Conference and Expo: ARC+ (Registered Trademark) and ARC PC Welding Simulators: Teach Welders with Virtual Interactive 3D Technologies[C]. USA: NASA, 2011
- [5] 谢本凯, 张笑笑, 蔡水涌, 等. 虚拟焊接训练技术研究进展[J]. 焊接, 2022 (5): 43-51.
- [6] FAST K, GIFFORD T, YANCEY R. Virtual training for welding: Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and (下转第62页)

低，表面铝含量较少，清洗态偏多，轧制态最多。

4 结束语

1) 针对1.2mm厚5182-H111铝合金原始冷轧板，不同电极种类的电极寿命不同，其中，C18140电极为43点、C18150电极为48点、C18200电极为61点、C15715电极为38点、C15760电极为83点。由此可知，C15760电极帽的寿命最高。

2) 应用C15760电极开展1.2mm厚5182-H111铝合金板电阻点焊时，获得不同表面状态下的优化焊接参数，其中轧制态板材最优焊接参数为：电极压力3.5kN、焊接电流21kA、焊接时间200ms、保持时间150ms；清洗态板材最优焊接参数为：电极压力3.5kN、焊接电流24kA、焊接时间200ms、保持时间150ms；钝化态板材最优焊接参数为：电极压力3.5kN、焊接电流21kA、焊接时间200ms、保持时间150ms。

3) 应用C15760电极焊接1.2mm厚不同表面状态的5182-H111铝合金时，电极寿命差别明显。其中，轧制态铝合金板电极寿命为83点，清洗态铝合

金板电极寿命为260点，钝化态铝合金板材电极寿命为380点。其中，钝化态铝合金板材的电极寿命最高。

参考文献：

- [1] 张自锋，陈海峰，牛瑶. 提高电阻点焊电极寿命的研究进展与展望[J]. 热加工工艺，2025（11）：7-12.
- [2] 钟昌炽. 退火工艺对纯钨电阻点焊电极显微组织性能及使用寿命的影响[J]. 山西冶金，2021，44（6）：81-82.
- [3] 郑立好，张超群，张庆鑫，等. 铝合金电阻点焊铈铬铜电极的寿命研究[J]. 中国机械工程，2020，31（21）：2632-2637.
- [4] 葛世伟. 关于铝合金电阻点焊电极寿命及烧损机理的研究[J]. 科学技术创新，2019（21）：9-10.
- [5] 杜慧敏，罗震，敖三三，等. 5052铝合金电阻点焊电极形状对电极寿命的影响[J]. 上海交通大学学报，2019，53（6）：708-712.

（收稿日期：20250219）

（上接第51页）

- Augmented Reality[C]. USA: IEEE, 2004: 298-299.
- [7] 黄俊. 具有力反馈的SMAW焊接仿真系统的设计与研究[D]. 南昌：南昌大学，2011.
 - [8] 钟正，陈丽，史会芳，等. 基于触觉反馈的沉浸式虚拟仿真实验设计[J]. 实验科学与技术，2019，17（6）：73-76.
 - [9] 周晖. 湾流氩弧焊实景仿真模拟操作训练系统V1.0[Z]. 武汉：武汉湾流新技术有限公司，2014-06-30.
 - [10] 张建勋. 基于虚拟现实技术的焊接技能培训系统研发及推广[Z]. 青岛：西安交通大学青岛研究院，2016-09-14.
 - [11] 薛金保，张建勋，王启宇，等. 一种单面焊双面成形过程模拟与仿真的网格实现方法：CN201110200564.6 [P]. 2012-03-28.
 - [12] 盖登宇，褚元召，李庆芬，等. 组合热源模型在焊接数值模拟中的应用[J]. 焊接学报，2009，30（5）：61-64.
 - [13] 张亚龙. 光学定位在虚拟现实中的研究与应用[D]. 开封：河南大学，2017.
 - [14] 刘红梅. 面向VR视觉不适的智能位置感知方法研究[D]. 广州：华南理工大学，2022.
 - [15] 杨志超. 面向虚拟焊接质量评估的深度学习方法及应用研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2019.
 - [16] 和豪涛，陈超. 虚拟仿真技术在汽车焊接实训中的应用[J]. 邢台职业技术学院学报，2024，41（3）：58-62.
 - [17] 张一然，王锐，蔡子琳. 基于理虚实一体化的中职《焊接结构生产》教学设计与实践[J]. 吉林工程技术师范学院学报，2023，39（7）：27-30.

（收稿日期：20250217）