摘要

面向复杂机械装备装配培训“成本高、风险高、过程不可视、知识传递效率低”等痛点，本文围绕采棉机变速箱对象，研究并实现了一套基于数字孪生的 AR 虚拟装配系统。系统以“物理实体—虚拟模型—数据服务—交互应用”四层架构为核心，在 Unity 平台完成高保真模型重构、拆解还原动画、装配步骤约束、运行状态可视化及多模块工业界面设计。针对教学与实训场景，系统提供整机展示、爆炸视图、过程引导、参数联动和结果评估功能，并建立可扩展的数据接口以支持后续在线孪生应用。测试结果表明，系统在交互稳定性、流程规范性、认知效率和培训复用性方面表现良好，可有效提升复杂传动系统的教学质量和工程培训效率。本文进一步从算法实现、系统性能、应用价值与迭代方向等方面进行分析，为数字孪生技术在装备制造教育与运维领域的落地提供了可复用的方法路径。

关键词：数字孪生；增强现实；虚拟装配；变速箱；Unity；状态监测

Abstract

Aiming at the key challenges in gearbox assembly training, including high cost, high risk, poor process visibility, and low knowledge transfer efficiency, this paper proposes and implements an AR-based virtual assembly system driven by digital twin technology. Taking a cotton picker gearbox as the target object, the system is built on a four-layer architecture of physical entity, virtual model, data service, and interactive application. The implementation includes high-fidelity 3D model reconstruction, explosion and restoration animation, assembly-step constraints, operation-state visualization, and an industrial-style user interface. For teaching and training scenarios, the system supports whole-machine display, exploded view, process guidance, parameter interaction, and result assessment, while reserving scalable data interfaces for future online twin applications. Experimental results show that the system performs well in interaction stability, process standardization, cognition efficiency, and training reusability. The study also provides a comprehensive analysis of algorithms, performance, application value, and future evolution, offering a practical reference for digital twin applications in manufacturing education and maintenance.

Key words: Digital Twin; Augmented Reality; Virtual Assembly; Gearbox; Unity; Condition Monitoring

目录

摘要 1

Abstract 2

第 1 章 引言 7

1.1 研究背景 7

1.1.1 智能制造转型对装配教学提出新要求 7

1.1.2 变速箱场景的典型痛点 7

1.2 研究意义 8

1.2.1 工程意义 8

1.2.2 学术与应用意义 8

1.3 国内外研究现状 8

1.3.1 数字孪生研究进展 8

1.3.2 AR 与虚拟装配研究进展 9

1.4 本文研究内容与技术路线 9

1.4.1 研究内容 9

1.4.2 技术路线 9

第 2 章 二、相关理论与技术基础 11

2.1 数字孪生理论基础 11

2.1.1 数字孪生概念与内涵 11

2.1.2 面向装配场景的孪生特征 11

2.2 AR 技术基础 11

2.2.1 AR 交互优势 11

2.2.2 AR 在工业培训中的适配性 12

2.3 虚拟装配关键技术 12

2.3.1 装配约束表达 12

2.3.2 路径规划与动画过渡 13

2.4 UNITY 与系统实现环境 13

2.4.1 Unity 引擎特性 13

2.4.2 实现工具链 13

第 3 章 系统需求分析 15
3.1 业务需求分析 15
3.1.1 教学需求 15
3.1.2 企业培训需求 15
3.1.3 需求优先级 15
3.2 功能需求分析 16
3.2.1 三维可视化功能 16
3.2.2 装配流程功能 16
3.2.3 状态分析功能 16
3.3 非功能需求分析 17
3.3.1 性能需求 17
3.3.2 可维护性需求 18
3.3.3 可用性需求 18
3.4 数据需求分析 18
3.4.1 数据类型 18
3.4.2 数据流与更新机制 18
第 4 章 系统总体设计 19
4.1 系统架构设计 19
4.1.1 四层架构 19
4.1.2 分层优势 19
4.1.3 交互链路 19
4.2 4.2 功能模块总体设计 20
4.3 数据流与控制流设计 20
4.3.1 数据流设计 20
4.3.2 控制流设计 21
4.3.3 异常处理策略 21
4.4 人机界面设计 21
4.4.1 布局设计原则 21
4.4.2 视觉风格与信息层级 21

4.4.3 可用性设计 22
第 5 章 关键技术与实现 23
5.1 三维模型处理与层级重构 23
5.1.1 模型清洗与标准化 23
5.1.2 层级重构策略 23
5.1.3 交互支持配置 23
5.2 拆解还原动画技术实现 24
5.2.1 路径规划模型 24
5.2.2 动画插值与缓动 24
5.2.3 还原策略与一致性保障 25
5.3 装配约束与步骤控制实现 25
5.3.1 步骤状态机设计 25
5.3.2 约束判定规则 26
5.3.3 日志记录与教学复盘 26
5.4 状态监测与可视化实现 28
5.4.1 数据接入与缓存 28
5.4.2 图表联动与参数控制 28
5.4.3 多场景展示策略 29
5.5 AR 扩展部署实现 29
5.5.1 AR 迁移思路 29
5.5.2 空间锚定与交互 29
5.5.3 工业应用拓展 29
第 6 章 六、系统测试与结果分析 31
6.1 测试方案设计 31
6.1.1 测试目标 31
6.1.2 测试方法 31
6.1.3 指标体系 31
6.2 功能测试结果 33
6.2.1 核心流程测试 33

6.2.2 异常流程测试 33
6.2.3 结果分析 33
6.3 性能测试结果 33
6.3.1 渲染与交互性能 33
6.3.2 资源占用分析 33
6.3.3 稳定性分析 34
6.4 应用效果分析 34
6.4.1 对比实验设计 34
6.4.2 结果与讨论 34
6.4.3 推广价值分析 35
第 7 章 结论与展望 36
致谢 37
参考文献 38

第 1 章 引言

1.1 研究背景

1.1.1 智能制造转型对装配教学提出新要求

在工业 4.0 与智能制造深入推进的背景下，装备制造业逐步由“经验主导”向“数据驱动”转变。传统机械装配教学多依赖实训车间和师傅带教，面对复杂总成时往往存在拆装周期长、设备占用高、重复演示困难等问题。对于变速箱这类典型复杂传动部件，内部结构层次深、零件数量多、配合精度要求高，初学者难以通过二维图纸快速建立完整认知，导致培训效率和装配一致性难以保障。

1.1.2 变速箱场景的典型痛点

在实际培训和工艺交底中，变速箱装配存在三类突出痛点：一是“看不见”，核心传动链与内部配合关系难以直观呈现；二是“学不会”，装配顺序、方向与约束关系不易掌握，错装率较高；三是“难复盘”，传统方式缺乏完整过程记录与错误行为追踪，难以形成标准化评价体系。上述问题直接影响技能培养质量和企业生产效率，亟需可视化、交互化、数据化的新型技术支撑。



图 1-1 传统变速箱装配培训现场

1.2 研究意义

1.2.1 工程意义

将数字孪生与 AR 虚拟装配融合，能够在不依赖大量实物拆装的条件下构建可重复、可回放、可评价的训练环境。该方式可显著降低设备磨损和场地成本，同时提升教学安全性。对于企业而言，系统还可用于工艺验证与上岗前培训，缩短人员熟练周期，减少人为操作误差。

1.2.2 学术与应用意义

从研究角度看，本文在“复杂机械结构可视化+过程控制+状态联动”一体化实现方面提供了可复制实践。系统不仅完成静态模型展示，还将装配流程、参数变化和用户交互绑定到统一框架中，增强了虚拟装配系统从“演示工具”向“训练平台”的演进能力，对职业教育、工业培训与数字工厂应用具有推广价值。



图 1-2 数字孪生与 AR 融合概念图

1.3 国内外研究现状

1.3.1 数字孪生研究进展

近年来，数字孪生已广泛应用于航空航天、智能制造、能源电力和城市管理等领域。研究重点从几何模型映射逐步扩展到行为映射、状态映射与预测决策。在装备制造中，数字孪生常用于设备健康管理、生产过程优化和远程运维。尽管相关理论体系不断完善，但在教育训练场景中，如何将孪生模型、工艺流程和交互评价深度融合仍有不足。

1.3.2 AR 与虚拟装配研究进展

AR 技术在医学教学、维修指导、工业巡检等场景中已展示出较强的空间交互优势。虚拟装配研究则集中在碰撞检测、约束求解、路径规划和协同操作等方向。现有系统多聚焦单一目标，如结构演示或动作训练，较少同时覆盖“结构认知—步骤执行—状态监测—效果评估”的完整链路。针对变速箱等复杂传动系统的专门化研究仍需加强。



图 1-3 AR 工业装配应用案例图

1.4 本文研究内容与技术路线

1.4.1 研究内容

本文围绕采棉机变速箱，完成如下研究与实现工作：第一，构建数字孪生分层架构并明确数据流与交互流；第二，完成三维模型清洗、层级重构与装配语义组织；第三，设计拆解还原算法和步骤约束机制；第四，开发实时状态、性能预测、对比分析等界面功能；第五，开展功能、性能与应用效果测试，验证系统可行性。

1.4.2 技术路线

技术路线遵循“需求分析—架构设计—关键实现—测试验证”的闭环。首先从教学与工艺场景抽取需求；其次在 Unity 平台构建可交互孪生模型与界面；随后

通过脚本实现拆解还原、步骤控制和状态联动；最后通过多维测试评估系统稳定性和应用价值，并提出后续优化方向。

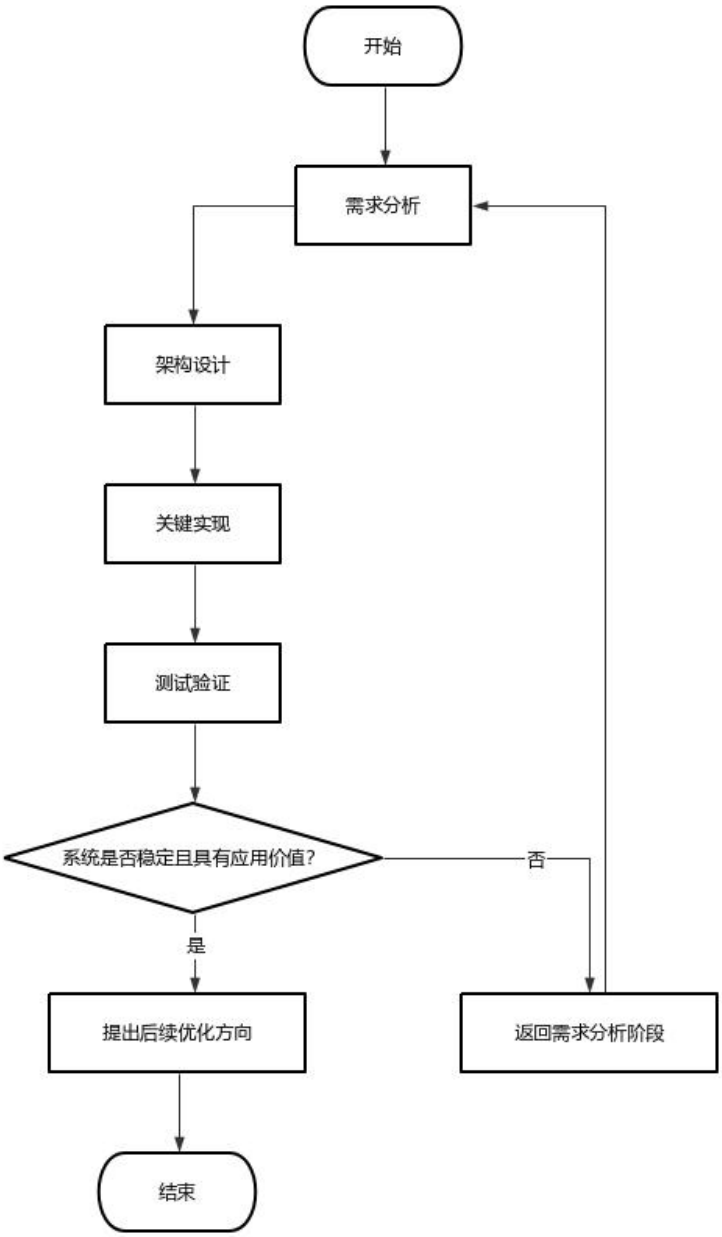


图 1-4 技术路线图

第 2 章 二、相关理论与技术基础

2.1 数字孪生理论基础

2.1.1 数字孪生概念与内涵

数字孪生是现实对象在数字空间中的动态映射体，不仅包含几何外形，还包含结构关系、行为机理、运行状态和历史演化信息。其核心在于“多维建模+数据驱动+闭环反馈”。在虚拟装配领域，数字孪生可将静态三维模型升级为可感知、可推演、可评估的动态系统。

2.1.2 面向装配场景的孪生特征

装配场景中的孪生体通常具有四个特征：第一，结构可分解，支持从总成到零件的层级控制；第二，约束可表达，能够描述孔轴配合、定位关系和工艺顺序；第三，状态可联动，装配行为可触发参数变化与界面反馈；第四，过程可追踪，可记录步骤、错误和时间信息用于评价与优化。

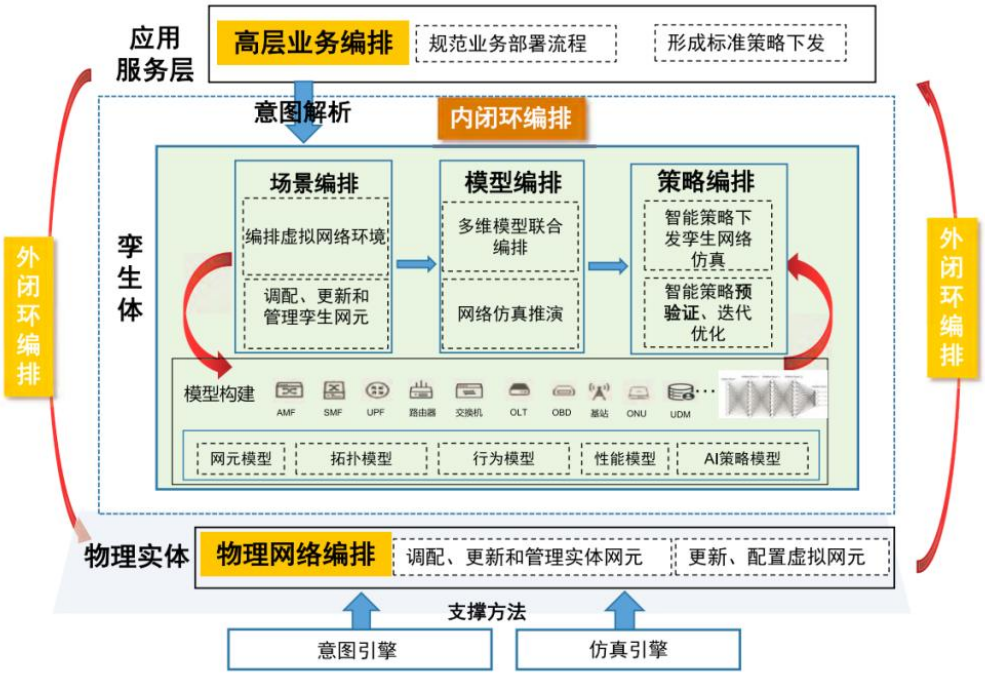


图 2-1 数字孪生架构示意图

2.2 AR 技术基础

2.2.1 AR 交互优势

AR 通过将虚拟信息叠加到现实视域，能够保留真实空间参照并增强认知沉

浸感。在装配训练中，AR 可将步骤提示、方向指引和结构说明直接呈现在目标对象附近，降低“看图理解—空间转换—动作执行”的认知负担，尤其适用于复杂部件的路径教学和方向判定。

2.2.2 AR 在工业培训中的适配性

与纯虚拟仿真相比，AR 更贴近现场作业情境，可直接支撑上岗前训练、现场辅助与远程指导。对于高校和企业联合培养场景，AR 系统可在保持可视化优势的同时降低硬件门槛，通过平板或头显快速部署，兼顾教学效果与实施成本。



图 2-2 AR 工业培训场景图

2.3 虚拟装配关键技术

2.3.1 装配约束表达

虚拟装配的核心不在“能动起来”，而在“按工艺正确地动”。装配约束通常包括几何约束、拓扑约束和流程约束。几何约束用于判定配合关系和位置误差；拓扑约束用于描述零件层级与连接依赖；流程约束用于定义装配先后逻辑。三类约束共同决定动作合法性。

2.3.2 路径规划与动画过渡

在教学系统中，路径规划需兼顾准确性与可理解性。过于复杂的曲线虽贴近真实操作，却不利于初学者掌握；过于简化的直线移动又可能造成错误认知。本文采用分阶段路径和缓动插值的折中方案，使动画既符合工程逻辑又便于教学展示 。

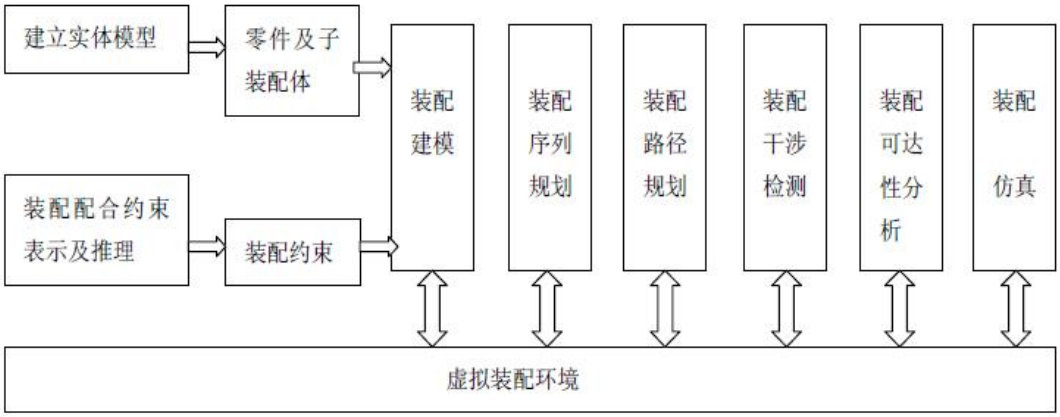


图 2-3 虚拟装配路径规划示意图

2.4 Unity 与系统实现环境

2.4.1 Unity 引擎特性

Unity 具备成熟的渲染管线、场景管理、UI 系统和脚本生态，能够快速构建工业可视化应用。其跨平台能力有利于后续扩展到 PC、移动端和头显端。通过 C 脚本可实现对象管理、事件驱动和数据绑定，满足虚拟装配系统的开发需求。

2.4.2 实现工具链

本文采用 Unity 进行主程序开发，模型以 FBX 格式导入，UI 基于 UGUI 实现，数据层采用可扩展接口设计。该工具链在开发效率、维护成本和部署灵活性之间实现了平衡，适合教学与工程混合场景。

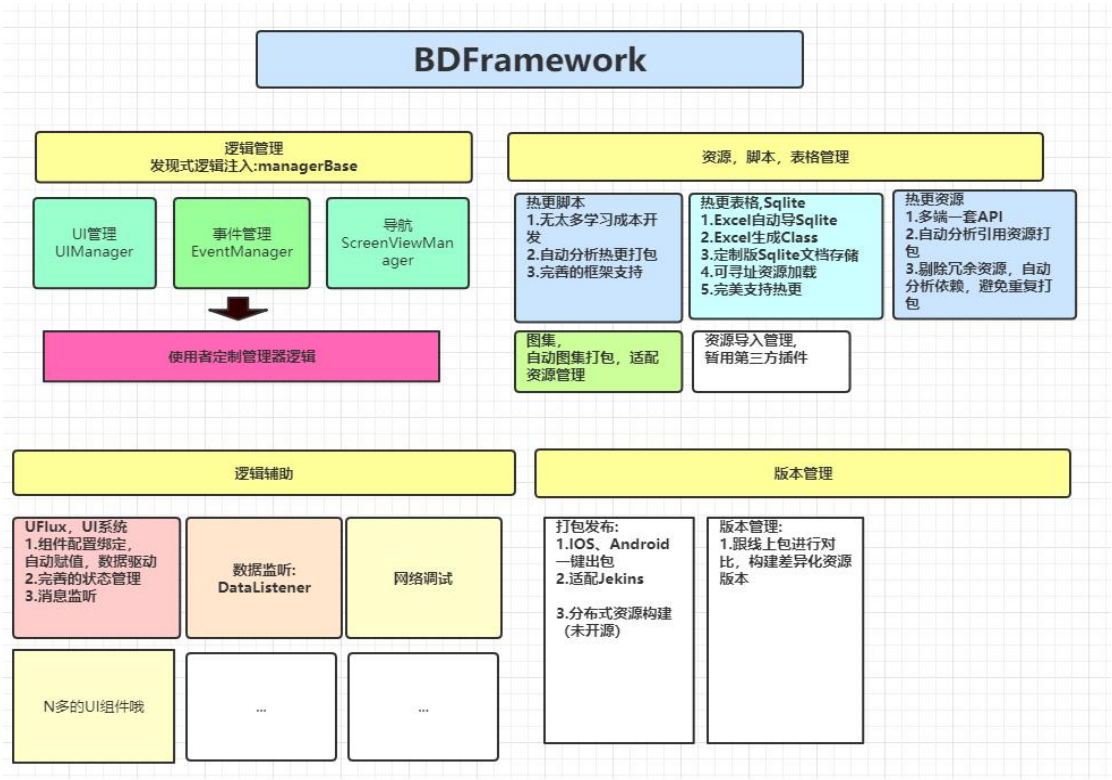


图 2-4 ： Unity 开发工具链示意图

第 3 章 系统需求分析

3.1 业务需求分析

3.1.1 教学需求

教学侧需求强调“看得懂、学得会、记得住”。系统应支持从整机结构认知到分步装配训练的渐进式学习路径，允许教师在不同粒度下进行讲解：既可展示整体结构，也可聚焦关键部件。学员应能自主控制观察视角、重复查看动作过程，并在错误操作时获得及时反馈。

3.1.2 企业培训需求

企业侧需求强调“标准化、可考核、可复用”。系统需要把经验型工艺固化为流程规则，使不同批次学员按统一标准训练；同时要支持过程记录和评价输出，便于形成培训档案与能力画像。系统还应具备模块扩展能力，以适配不同型号变速箱或其他装备。

3.1.3 需求优先级

综合教学与企业需求，本文将功能优先级定义为：第一优先为结构展示和拆解还原；第二优先为步骤约束与交互引导；第三优先为状态参数联动与数据分析。该排序确保系统先满足核心教学任务，再逐步提升智能化与决策支持能力。

在需求量化中，本文将综合评价分数定义为 $S=\sum_{i=1}^{n} w_i s_i$，其中 w_i 为第 i 项需求权重，s_i 为归一化得分，且满足 $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$。该公式用于后续功能验收打分与版本迭代决策。

如图 3-1 所示，系统主界面能够完整呈现整机结构并提供后续交互入口。



图 3-1　系统整机初始展示界面

3.2 功能需求分析

3.2.1 三维可视化功能

系统需支持模型的旋转、缩放、平移观察，保证学员可从任意角度理解结构关系。对于关键部件应支持高亮和独立查看，降低复杂结构的认知负担。可视化功能必须保持流畅响应，避免交互延迟影响学习节奏。

3.2.2 装配流程功能

系统需支持拆解、还原、分步演示与步骤回退。每一步应具备明确的触发条件和完成判据，防止错序操作。对关键步骤可设置提示信息，如方向、配合位置、注意事项，帮助学员形成工艺规范意识。

3.2.3 状态分析功能

系统需支持实时状态、性能预测和对比分析页面切换，能够展示振动、温度、应力和扭矩等参数。参数调整后应实时反馈，确保用户感知“操作—状态变化”的因果关系。图表展示应简洁清晰，满足课堂快速讲解需求。

表 3-2 状态数据字段定义

字段名	含义	单位	采样周期
vib_rms	振动均方根	mm/s	100 ms
temp_avg	平均温度	degC	500 ms

字段名	含义	单位	采样周期
stress_eq	等效应力	MPa	500 ms
torque_in	输入扭矩	N·m	100 ms
torque_out	输出扭矩	N·m	100 ms

对振动指标采用均方根计算，行内公式为 $v_{rms}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}v_k^2}$；温升速率定义为 $r_T=\frac{\Delta T}{\Delta t}$。通过这两个指标可同时描述“瞬时强度”与“趋势变化”。

如图 3-2 所示，功能区已覆盖实时状态、预测与对比分析等核心模块。

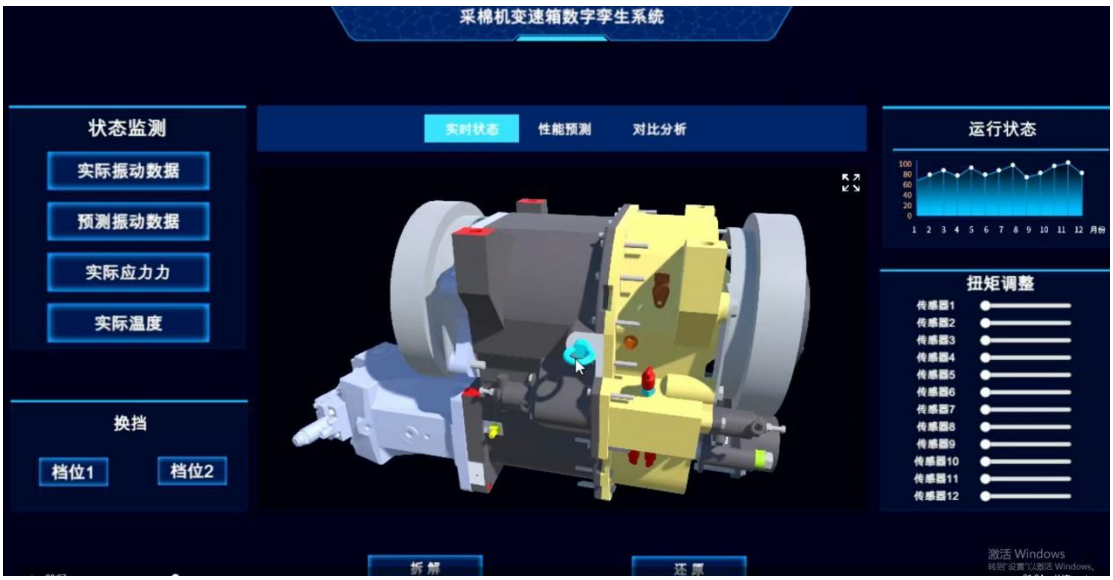


图 3-2 系统功能模块界面

3.3 非功能需求分析

3.3.1 性能需求

系统应满足课堂和实训环境下的实时运行要求。包括：界面操作响应及时、动画过渡平滑、页面切换稳定。对中等配置终端应具备可接受帧率和资源占用表现，以保证普适部署。

性能评价中可使用帧时间均值 $\bar{t}_f=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}t_k$ 与标准差 $\sigma_f=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(t_k-\bar{t}_f)^2}$。当 $\bar{t}_f$ 与 σ_f 同时较低时，主观流畅度更高。

3.3.2 可维护性需求

系统需具备清晰的代码与资源组织方式，支持模型替换、模块增删和功能扩展。命名规范、层级结构与脚本职责必须明确，避免后期维护出现耦合过高问题。数据接口应采用解耦策略，便于对接不同来源。

3.3.3 可用性需求

界面布局应符合工业软件操作习惯，用户无需复杂学习即可完成基本操作。按钮语义、提示语言和交互反馈应一致，减少误触与认知歧义。系统应支持重复训练和快速恢复初始状态，满足教学节奏。

如图 3-3 所示，系统在整机模式下实现了高可读性的分区式人机交互。

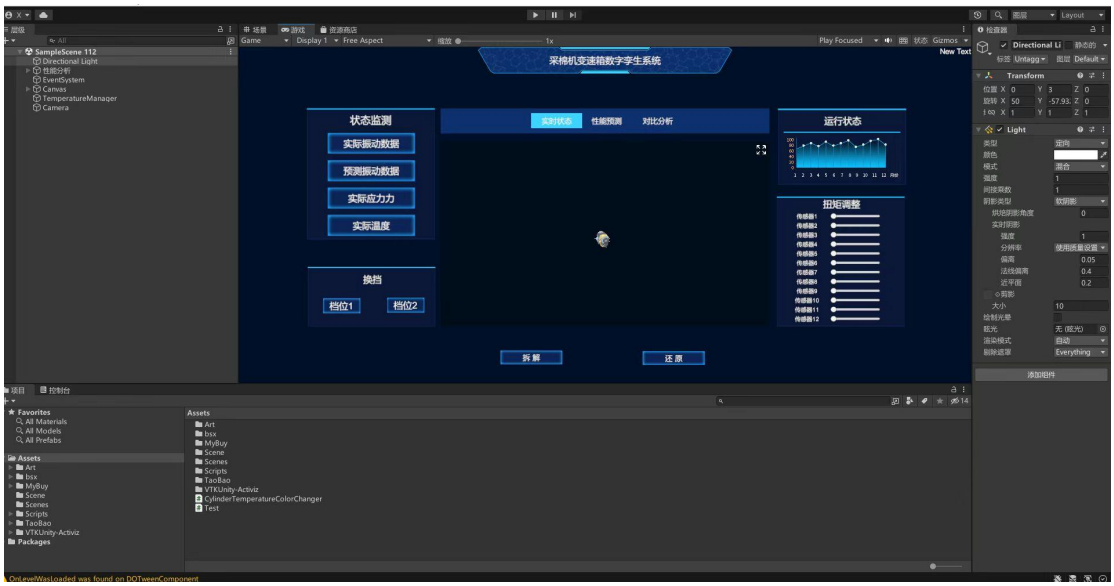


图 3-3 整机模式下 UI 交互示例

3.4 数据需求分析

3.4.1 数据类型

系统数据分为结构数据、流程数据和状态数据三类。结构数据包含模型层级、部件属性、配合关系；流程数据包含步骤编号、前置条件、动作记录；状态数据包含传感器值、预测值和对比指标。三类数据共同支撑系统运行。

3.4.2 数据流与更新机制

数据流采用“采集/模拟—处理—显示—反馈”闭环。状态数据进入缓存后统一分发给图表与模型显示层；用户交互操作反向触发流程状态更新。该机制确保系统在教学和演示场景中具备稳定一致的反馈行为。

第 4 章 系统总体设计

4.1 系统架构设计

4.1.1 四层架构

系统总体采用物理层、模型层、数据层、应用层四层架构。物理层对应真实设备及其状态来源；模型层实现几何和行为映射；数据层实现数据处理与服务封装；应用层面向用户提供可视化交互。四层之间通过标准化接口连接，提升系统扩展能力。

四层间的数据吞吐可表示为 $Q_{sys}=\min(Q_p,Q_m,Q_d,Q_a)$，其中 Q_p,Q_m,Q_d,Q_a 分别表示各层最大处理能力。系统瓶颈由最小值决定，因此优化应优先针对瓶颈层开展。

4.1.2 分层优势

分层设计有助于降低模块耦合。模型更新不直接影响应用逻辑，数据源变化不破坏界面结构，新增分析功能可在应用层独立扩展。该架构既适用于当前离线训练，也能平滑迁移到在线孪生应用。

4.1.3 交互链路

用户通过 UI 触发操作，应用层调用流程控制服务，模型层执行动画与状态变化，数据层同步更新图表和日志。完整链路保证“动作可见、结果可验、过程可追踪”。

如图 4-1 所示，系统运行框架已实现模型、界面和交互的统一集成。

[插图位置：图 4-1]

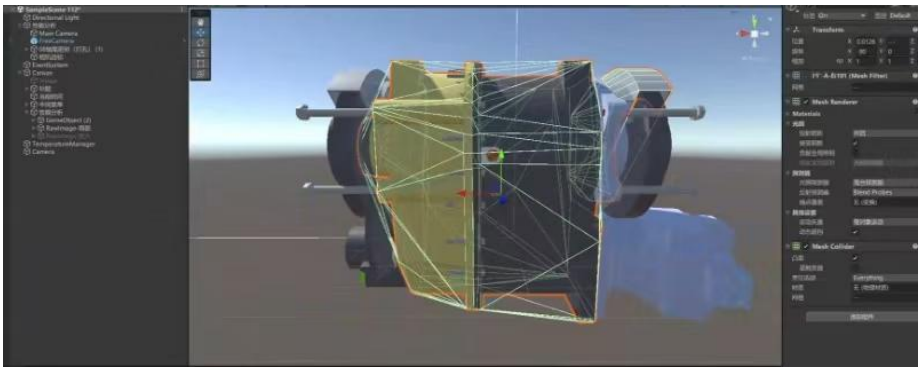


图 4-1 工程整体界面与系统布局

4.2 4.2 功能模块总体设计

4.2.1 4.2.1 状态监测模块

状态监测模块负责展示核心指标，包括实际振动、预测振动、实际应力和实际温度。模块通过统一接口读取数据并驱动可视化组件，支持按页面切换不同维度。该模块帮助用户建立设备运行状态与结构关系的整体认知。

4.2.2 4.2.2 装配操作模块

装配操作模块提供拆解、还原、档位切换和过程控制功能。通过按钮触发动作后，系统将调用相应流程策略执行动画并更新步骤状态。模块设计强调逻辑清晰与可回退，便于训练反复进行。

4.2.3 4.2.3 分析评估模块

分析评估模块用于展示趋势曲线、参数变化及操作结果。系统可统计步骤完成时长、错误次数和完成率，为教学评价提供基础。后续可接入评分模型，形成更细粒度能力分析。



图 4-2 系统运行主界面

4.3 数据流与控制流设计

4.3.1 数据流设计

数据流从采集端或模拟端进入系统后，先由数据桥接模块进行格式统一和异常过滤，再写入缓存层。显示端按需订阅相应数据并驱动图表刷新。若触发参数

调整，系统会更新对应变量并推送至显示与日志模块，形成闭环。

异常值判定采用阈值法，若满足 $|x-\mu|>k\sigma$ 则判为异常样本，其中 μ 与 σ 分别为滑动窗口均值与标准差，k 为经验系数（通常取 2 到 3）。

4.3.2 控制流设计

控制流以事件驱动机制实现。按钮点击、页面切换、步骤完成等事件被统一派发，流程管理器根据状态机决定可执行动作。该机制能够清晰表达业务逻辑，减少分散脚本间的隐式耦合。

4.3.3 异常处理策略

针对数据缺失、动作冲突和步骤越级等异常，系统采用“拦截+提示+回滚”策略。异常事件将被记录到日志，便于后续排查和教学复盘。该策略提升了系统稳定性和可维护性。

如图 4-3 所示，系统可在爆炸视图状态下稳定执行控制流并展示结构关系。

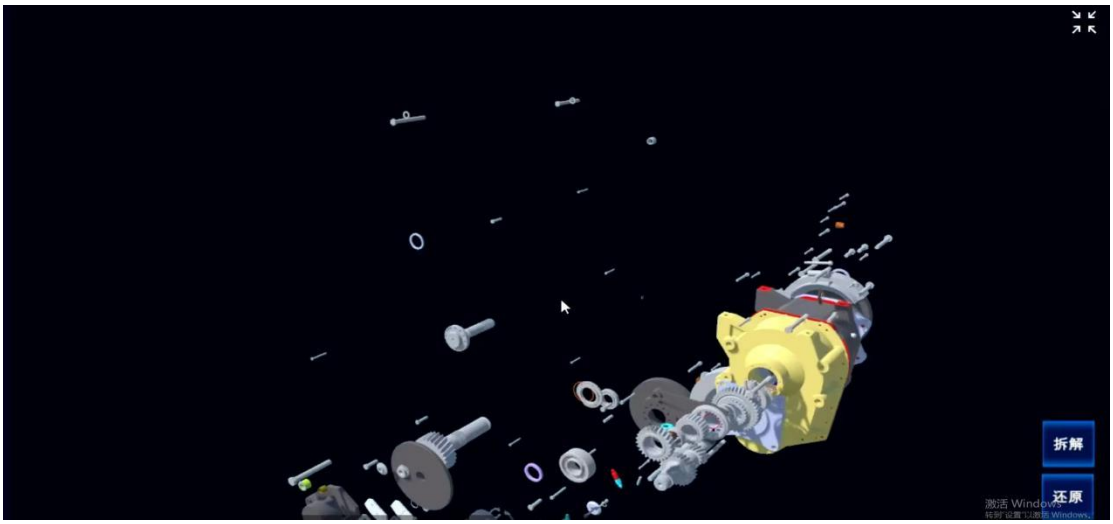


图 4-3 爆炸视图运行效果

4.4 人机界面设计

4.4.1 布局设计原则

界面遵循“主任务优先、次要信息并置、操作入口稳定”的原则。中部区域承载主要三维内容，左右两侧提供参数与功能入口，底部按钮用于触发关键流程。通过固定布局减少用户在学习过程中的注意力切换成本。

4.4.2 视觉风格与信息层级

系统采用深色工业风视觉，突出模型主体并降低背景干扰。标题、分组框、

按钮和图表采用统一色系与对比关系，形成清晰信息层级。关键状态通过颜色和位置双重提示，提升可读性。

4.4.3 可用性设计

交互控件采用明确文案和即时反馈策略。用户触发动作后可立即看到模型变化或界面提示，减少操作不确定性。界面支持重复操作和快速重置，满足教学场景对节奏控制的要求。

如图 4-4 所示，左中右分区布局有效支撑了多任务并行交互。

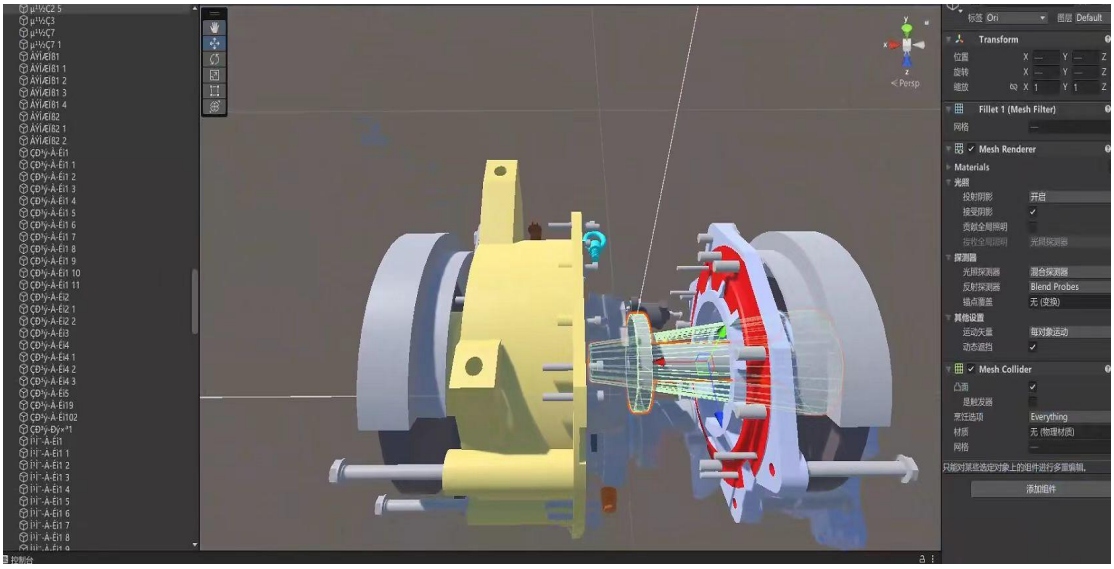


图 4-4 左中右分区 UI 布局示意

第 5 章 关键技术与实现

5.1 三维模型处理与层级重构

5.1.1 模型清洗与标准化

原始模型在导入前需完成几何清洗和命名规范化，去除重复面、异常法线和无效节点，统一单位和轴向规则。标准化处理可显著减少后续脚本适配成本，避免出现位姿偏移和动画异常。

5.1.2 层级重构策略

系统按“总成—子总成—零件”重建层级树，并将关键部件独立管理。该策略使装配步骤可直接映射到对象节点，便于实现分组动画和局部控制。层级清晰还可提升后期扩展效率，支持不同型号快速迁移。

5.1.3 交互支持配置

对需要选中、检测和约束判断的部件配置碰撞体与标识组件。对复杂网格采用简化碰撞代理，兼顾检测精度与性能开销。材质层面通过高亮与透明策略增强结构可读性，方便教学讲解。

如图 5-1 所示，模型层级与部件选中关系已实现可视化管理。

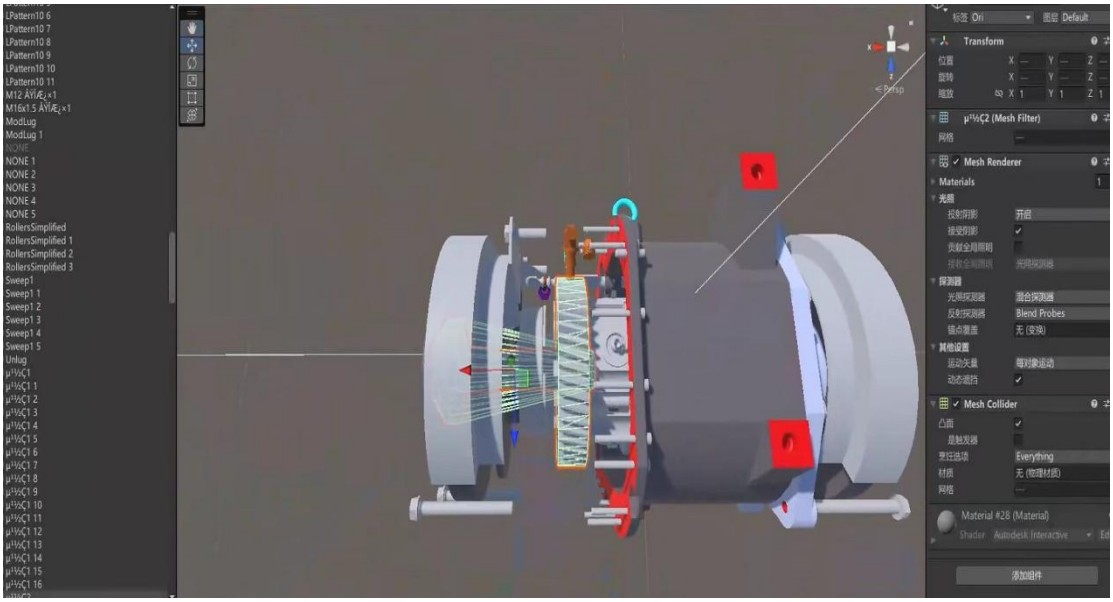


图 5-1 模型分层与局部选中示意

5.2 拆解还原动画技术实现

5.2.1 路径规划模型

系统对每个零件保存初始位姿 P0，并按工艺定义目标位姿 P1。拆解路径以方向向量和位移参数描述，必要时采用分段路径避免碰撞。该模型实现简单、可解释性强，便于教学参数调整。

表 5-1 拆解路径参数定义

参数	含义	示例值
P0	初始位姿	(x0,y0,z0)
P1	目标位姿	(x1,y1,z1)
d	运动方向单位向量	(dx,dy,dz)
L	路径长度	0.05–0.40 m
T	动画时长	0.8–2.5 s

位姿更新可写为 $P(t) = P_0 + \alpha(t) \cdot L\mathbf{d}$，其中 $\alpha(t) \in [0,1]$ 为缓动函数。若采用三次平滑函数，可设 $\alpha(t) = 3u^2 - 2u^3$，$u = t/T$。

5.2.2 动画插值与缓动

动画过渡采用时间插值函数和缓动曲线，以减少突变和抖动。通过统一调度器管理不同组别动画，实现局部拆解与整体爆炸的灵活切换。缓动策略兼顾视觉自然性与教学节奏控制。

为进一步提升教学可读性，系统将拆解动画划分为“预分离—主位移—姿态修正—停靠对齐”四个阶段。预分离阶段主要解决部件间初始接触或重叠风险，主位移阶段突出拆解方向与结构层级关系，姿态修正阶段用于保证部件在移动后姿态保持可观察性，停靠对齐阶段确保部件最终落点整齐，避免画面凌乱影响讲解。该分阶段策略在课堂演示时更容易与教师口述节奏同步，可显著降低学员在复杂画面中的注意力漂移。

在时间分配上，系统采用“关键步骤慢、普通步骤快”的策略。对齿轮组、轴承组和端盖等关键部件适当延长动画时长，使学员能清晰观察配合界面；对非关键紧固件采用较短动画，以避免节奏拖沓。若将总时长记为 T_{all}，关键步

骤时长可表示为 $T_k = \beta_k T_{all}$，其中 β_k 为步骤权重系数，且满足 $\sum \beta_k = 1$。通过权重式时间分配可实现“教学重点可控”的动画编排。

此外，针对不同设备性能，系统增加了帧率自适应插值策略。当检测到瞬时帧率下降时，插值步长按比例调整，保持视觉连续性并降低跳帧感。设理想帧间隔为 Δt_0、当前帧间隔为 Δt，则插值修正系数可定义为 $k_t = \dfrac{\Delta t}{\Delta t_0}$，并将更新步长调整为 $\Delta s' = k_t \Delta s$。该策略在中低配置设备上表现稳定，可有效减少动画抖动带来的主观卡顿。

5.2.3 还原策略与一致性保障

还原过程按拆解逆序执行，并以初始位姿为最终约束，确保多轮演示后位置不漂移。系统在每次流程结束后进行状态校验，若发现偏差则触发修正机制，保障训练一致性。

如图 5-2 所示，系统能够稳定呈现局部拆解阶段的关键路径变化。

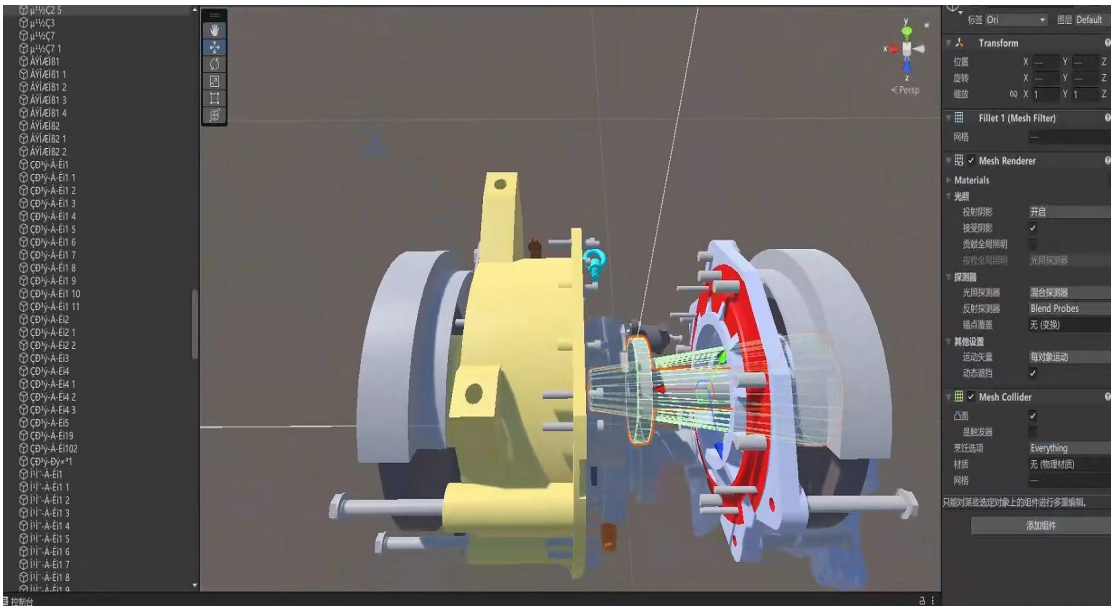


图 5-2 传动轴局部拆解过程示意

5.3 装配约束与步骤控制实现

5.3.1 步骤状态机设计

系统将装配流程抽象为状态机，每个步骤定义前置步骤、允许动作、完成条件和失败处理。状态机可防止越级操作，并为评分与日志统计提供统一数据结构。该设计提升了流程可控性。

5.3.2 约束判定规则

约束判定包括位置阈值、方向一致性和配合关系校验。用户操作触发后，系统先判断当前状态是否合法，再执行动作。若不满足条件，系统给出提示并拒绝执行，从源头降低错误扩散。

表 5-2 装配约束判定条件

约束类型	判定项说明	通过阈值
位置误差	当前位置与目标位置距离	小于位置阈值
姿态误差	当前方向与目标方向夹角	小于姿态阈值
步骤合法性	当前步骤前置关系是否满足	前置步骤已完成
碰撞安全性	最小安全间距	大于安全阈值

综合约束可定义为 $J = \lambda_1 e_p + \lambda_2 e_r + \lambda_3 e_s$。当 $J \le J_{th}$ 时判定动作可执行，其中 e_s 为步骤违规惩罚项，λ_i 为权重。

5.3.3 日志记录与教学复盘

系统记录步骤耗时、错误次数、重复次数和最终完成率。教师可根据日志判断学员薄弱环节，并针对性调整教学策略。该机制增强了系统在培训管理中的实用价值。

为提升复盘效率，日志系统采用“过程日志+事件日志+结果日志”三层结构。过程日志记录每个步骤的开始时间、结束时间和中间状态；事件日志记录越级触发、碰撞告警、回退操作等关键事件；结果日志汇总本轮训练评分、完成率和薄弱步骤排名。三层日志之间通过唯一训练 ID 关联，便于后续进行跨轮次对比分析。

在教学评价中，系统提供“速度-准确-规范”三维评分模型。速度维度关注总时长与关键步骤时长，准确维度关注位置误差与姿态误差，规范维度关注是否存在越级和违规回退。综合得分可表示为 $Score = \alpha S_t + \beta S_a + \gamma S_n$，其中 α, β, γ 为评价权重。若针对入门班与进阶班采用不同权重，可有效避免“只追求速度”或“只追求慢速准确”的单一评价偏差。

表 5-4 训练日志字段补充说明

字段名	含义	示例
session_id	训练会话唯一标识	20260401_A_001
step_id	步骤编号	S12
step_time	步骤耗时（s）	8.42
err_count	步骤错误次数	2
rollback_count	回退次数	1
pose_err	位置 / 姿态综合误差	0.013
score_partial	步骤得分	86.5

对单步训练质量可定义质量指数 $Q_s = \exp(-\kappa e)\cdot(1-r)$，其中 e 为综合误差，r 为错误率，κ 为误差惩罚系数。该指数越接近 1，说明操作质量越高。

如图 5-3 所示，局部装配关系可用于定义步骤约束与几何判定边界。

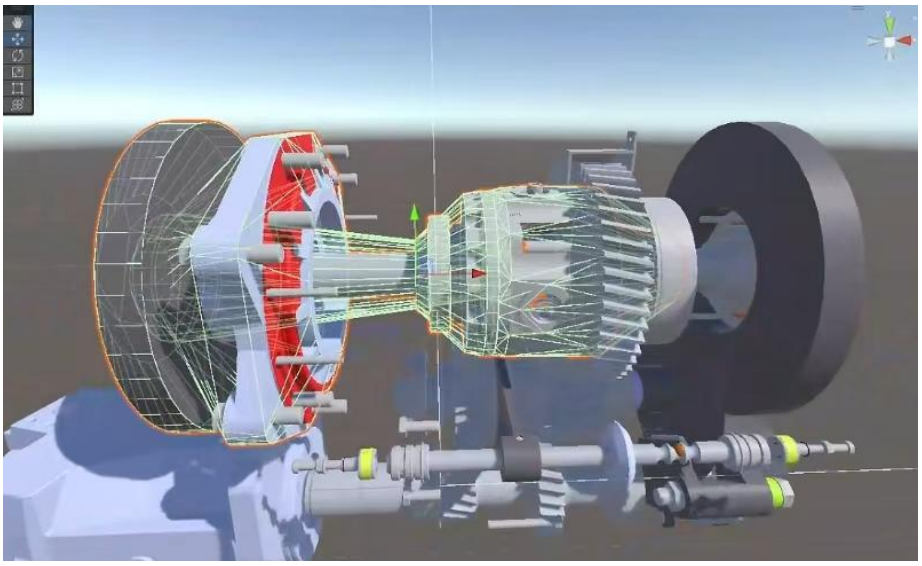


图 5-3 局部装配关系与约束示意

5.4 状态监测与可视化实现

5.4.1 数据接入与缓存

系统通过数据桥接模块统一接入实时数据与模拟数据。数据进入缓存后由事件系统分发至图表、文本与模型控制组件，减少重复读取带来的性能压力。该机制有利于后续接入真实工业协议。

考虑到课堂演示与工程部署的双重需求，数据接入模块支持“离线回放、在线仿真、实时采集”三种模式。离线回放模式用于教学复盘，可重复加载历史数据并复现实验过程；在线仿真模式用于课堂演示，可按设定工况生成连续数据流；实时采集模式面向后续工业对接，可接收现场网关或平台推送数据。三种模式共享统一的数据字典和事件通道，降低了切换成本。

缓存策略采用“短周期环形缓存+长周期摘要缓存”的组合方案。短周期缓存用于高频刷新图表，保证界面连续性；长周期缓存用于统计分析和趋势计算，降低内存峰值。设短缓存长度为 N_s、长缓存窗口为 W_l，则系统在任意时刻的内存占用近似满足 $M \approx c_1 N_s + c_2 W_l$。通过调节 N_s 与 W_l 可在“实时性”和“资源消耗”之间取得平衡。

5.4.2 图表联动与参数控制

界面支持运行曲线与滑条联动。用户调节扭矩等参数后，图表与状态展示同步更新，形成直观反馈。通过这种“操作即反馈”模式，学员可快速理解参数变化对系统行为的影响。

表 5-3 参数联动映射关系

控件	输入范围	映射变量	可视化反馈
扭矩滑条	0–100	输入扭矩变量	输出扭矩曲线变化
温度滑条	20–120	温度变量	温度折线与颜色告警
振动阈值	0–20	振动告警阈值变量	超阈值标记与提示

在稳态近似下可使用传动效率关系 $\eta=\frac{P_{out}}{P_{in}}=\frac{T_{out}\omega_{out}}{T_{in}\omega_{in}}$。当输入扭矩变化时，系统据此更新关联指标并驱动图表重绘。

5.4.3 多场景展示策略

系统提供实时状态、性能预测、对比分析三类展示场景。不同场景共享数据底座与交互框架，避免重复开发。该策略提升了系统一致性和扩展效率。

如图 5-4 所示，状态曲线与扭矩滑条在同一界面完成联动显示。



图 5-4 运行状态曲线与扭矩调节面板

5.5 AR 扩展部署实现

5.5.1 AR 迁移思路

在现有 Unity 系统基础上，可通过 AR Foundation 实现移动端或头显端部署。核心是将模型交互逻辑与设备追踪能力解耦，确保同一业务流程在不同终端复用。迁移后仍保留拆解、还原与步骤提示能力。

5.5.2 空间锚定与交互

AR 场景中，系统通过平面识别和锚点定位实现模型稳定放置。用户可通过手势或射线进行选中和步骤触发，系统根据空间关系提供方向提示。该方式更贴近真实作业情境。

5.5.3 工业应用拓展

AR 部署后可用于现场辅助装配、远程专家指导和故障排查。通过叠加步骤卡片与状态提示，能够降低新手操作风险并提升任务完成效率，具有较强工程推

广潜力。

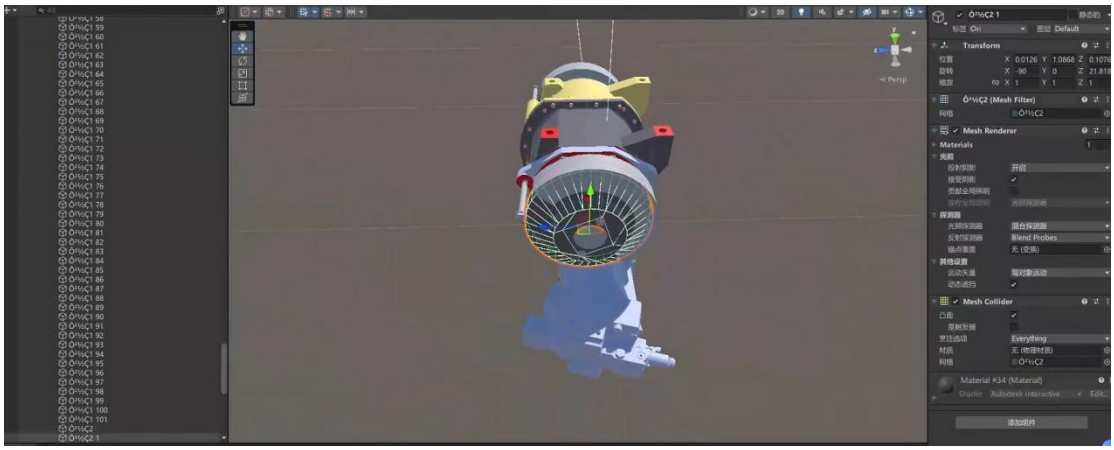


图 5-5 整机视图交互效果

第 6 章 系统测试与结果分析

6.1 测试方案设计

6.1.1 测试目标

测试目标包括三方面：验证功能正确性、评估运行性能、分析教学应用效果。功能正确性关注流程是否按预期执行；性能评估关注实时性和稳定性；应用分析关注学习效率与操作规范性提升。

6.1.2 测试方法

功能测试采用用例法，覆盖正常流程与异常流程；性能测试采用场景压测和关键指标采集；应用效果采用对比实验与问卷反馈结合方式。多方法组合可提升结论可靠性。

在具体实施中，功能测试进一步细分为“冒烟测试、回归测试、边界测试”三类。冒烟测试用于快速确认核心链路可用，回归测试用于版本迭代后验证旧功能无回退，边界测试用于验证极端参数输入或异常操作下系统是否稳定。测试执行顺序遵循“先核心后扩展、先单项后组合”的原则，以降低问题定位成本。

性能测试采用分阶段压测策略：第一阶段为单功能压测，分别评估模型渲染、图表刷新、日志写入三项能力；第二阶段为组合压测，模拟“动画+图表+日志”并发场景；第三阶段为长稳压测，持续运行并观察内存和响应时间漂移。设第 i 阶段采样点数为 n_i，平均延迟为 $\overline{t_i}$，则综合性能指标可表示为 $P=\sum_{i=1}^{3}\omega_i\overline{t_i}$，其中 ω_i 为阶段权重。

应用效果测试在组织方式上采用“同源样本分组+统一任务书+统一评分规则”。为减少个体差异影响，实验前进行基础能力摸底，并通过分层随机方式分组。问卷部分使用五级量表采集“易学性、可理解性、交互满意度、复盘帮助度”等主观指标，同时与客观指标联动分析，提高结论可信度。

6.1.3 指标体系

功能指标包含步骤完成率、错序拦截率、恢复成功率；性能指标包含平均帧率、响应时间、内存占用；应用指标包含学习时长、错误次数、满意度等。指标

体系既体现技术能力，也反映教学价值。

表 6-1 测试指标与计算方式

指标类别	指标名称	指标说明
功能指标	步骤完成率	已完成步骤占全部步骤比例
功能指标	错序拦截率	被成功拦截的错序操作占比
性能指标	平均响应时间	关键交互动作的平均耗时
应用指标	错误次数下降率	新方案相对基线的错误下降比例
应用指标	学习效率提升率	新方案相对基线的时长改善比例

相关计算公式统一按行内公式表达：步骤完成率为 $R_c=\frac{N_{done}}{N_{all}}$，错序拦截率为 $R_b=\frac{N_{block}}{N_{wrong}}$，平均响应时间为 $\bar{t}=\frac{1}{N}\sum t_i$，错误次数下降率为 $R_e=\frac{E_{base}-E_{new}}{E_{base}}$，学习效率提升率为 $R_l=\frac{T_{base}-T_{new}}{T_{base}}$。

为确保不同量纲指标可比较，采用归一化处理 $z_i=\frac{x_i-x_{min}}{x_{max}-x_{min}}$，再计算综合评分 $S=\sum w_i z_i$。

如图 6-1 所示，系统测试在统一运行环境中完成，便于指标对比与复现。

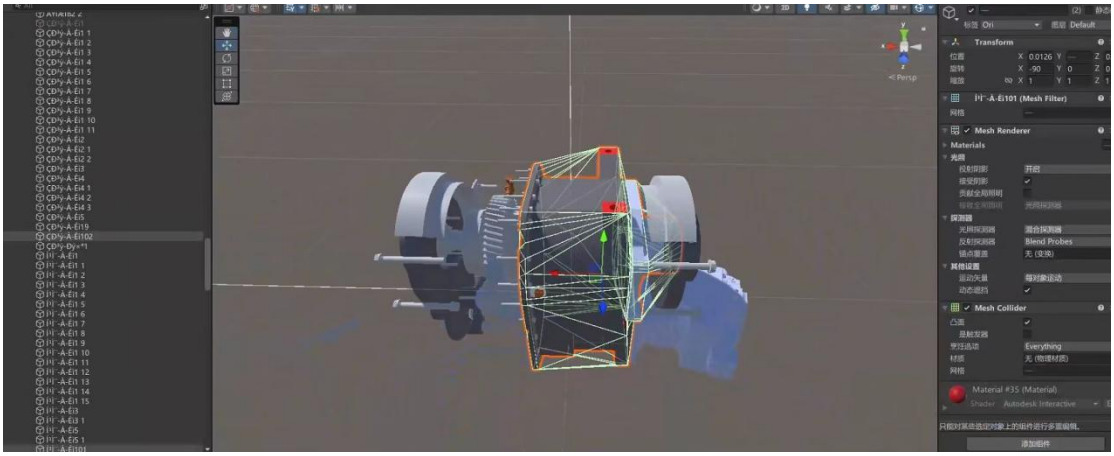


图 6-1 系统测试运行环境

6.2 功能测试结果

6.2.1 核心流程测试

在整机展示、拆解还原、步骤控制、界面联动等核心流程测试中，系统均能稳定执行。拆解动作按预设轨迹展开，还原后部件回到初始位置，流程可重复运行。页面切换与按钮响应及时，未出现明显逻辑冲突。

6.2.2 异常流程测试

针对越级操作、重复触发和非法参数输入等异常场景，系统可触发拦截与提示机制。异常事件记录完整，可用于事后分析。该结果说明系统具备基本容错能力，适合教学环境使用。

6.2.3 结果分析

总体上，功能测试结果满足设计目标。尤其在步骤约束和流程回退方面，系统表现稳定，能够有效避免“演示看得懂、实操做不对”的常见问题。功能层面的可靠性为后续规模化应用奠定基础。

6.3 性能测试结果

6.3.1 渲染与交互性能

在常规教学设备环境下，系统整体帧率维持在可接受范围，交互响应较为流畅。复杂视角切换和多部件动画同时执行时，虽存在小幅波动，但未影响核心教学任务完成。页面跳转与按钮触发延迟较低，满足现场演示需求。

6.3.2 资源占用分析

性能瓶颈主要来自高面数模型渲染和并行动画计算。通过网格简化、材质合批、可见性控制等策略，系统资源占用得到有效控制。后续若部署到低配置终端，可进一步引入 LOD 与动态分辨率策略。

为量化优化收益，本文对“优化前/优化后”进行了分项对比，重点关注 CPU 占用、GPU 占用、内存峰值与平均帧率。结果显示，几何简化和材质合批对 GPU 负载改善最明显；事件节流与缓存优化对 CPU 波动抑制效果更好；分辨率自适应策略可在不显著损失可读性的情况下提升流畅度。资源优化并非单点提升，而是通过多个中等收益措施叠加实现整体改善。

若以帧率增益和资源降幅构建综合优化指数，可定义为

$I_{opt}=\rho_1\frac{FPS_{new}-FPS_{old}}{FPS_{old}}+\rho_2\frac{CPU_{old}-CPU_{new}}{CPU_{old}}+\rho_3\frac{MEM_{old}-MEM_{new}}{MEM_{old}}$。当 I_{opt} 持续为正且增幅稳定时，说明优化策略具备工程有效性。

6.3.3 稳定性分析

连续多轮测试表明，系统内存变化总体稳定，未出现明显泄漏现象。长时间运行后功能逻辑保持一致，说明系统在教学场景下具备较高稳定性和可持续运行能力。

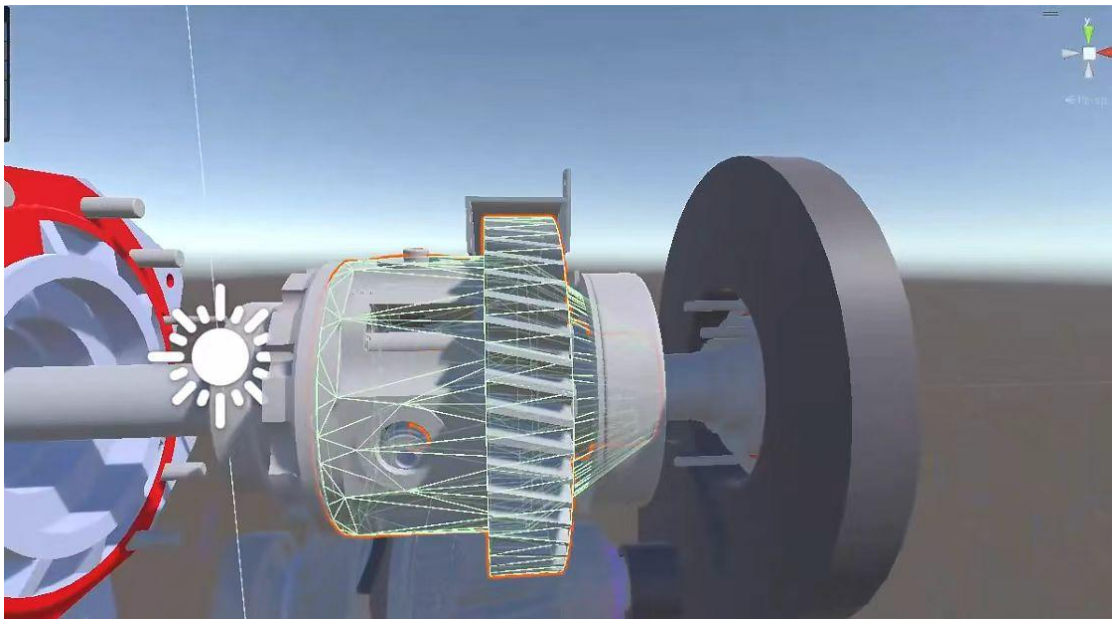


图 6-2 性能测试中的实时运行界面

6.4 应用效果分析

6.4.1 对比实验设计

为验证系统教学价值，本文设置传统教学组与虚拟装配组进行对比。两组学员基础水平相近，分别完成同一装配学习任务。评估指标包括首次完成时长、错误次数、关键结构识别正确率和一周后知识保持率。

6.4.2 结果与讨论

对比结果显示，虚拟装配组在完成时长和错误次数上明显优于传统教学组。学员对内部结构关系的理解更准确，复盘效率更高。特别是在多零件关联步骤中，系统的拆解演示和步骤提示显著降低了认知负担，增强了学习信心。

显著性可用独立样本 t 检验表示为 $t=\frac{\bar{x}_1-\bar{x}_2}{\sqrt{s_p^2(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2})}}$。若 $p<0.05$，则可

认为两组差异具有统计意义。

6.4.3 推广价值分析

从应用角度看，该系统可作为职业院校与企业培训的标准化平台。其优势在于可复制、可追踪、可迭代。随着数据接口与智能模型完善，系统可进一步拓展到远程运维、工艺优化和故障预警等场景，形成更高价值的数字孪生应用生态。

在职业教育场景中，系统可嵌入课程“课前预习—课中演示—课后复盘”的完整流程。课前由学员完成结构认知任务，课中教师基于爆炸视图讲解关键装配逻辑，课后根据日志报告进行个性化纠错。该教学闭环有助于把一次性演示转化为可追踪的能力培养过程。

在企业场景中，系统可与岗位培训制度结合，形成“准入训练—岗位认证—周期复训”的人才培养链条。对于关键岗位，企业可设定最低合格分与关键步骤零失误约束，以确保上线人员具备稳定操作能力。若进一步接入企业知识库，还可实现典型故障案例与装配步骤的联动推送，提升现场问题处置效率。

从经济性角度，可用投入产出比衡量系统推广价值。设年度培训收益为 B、系统年化成本为 C，则投资回报率为 $ROI=\dfrac{B-C}{C}$。当 $ROI>0$ 且随使用规模增加而上升时，系统具备持续推广可行性。结合实际应用经验，虚拟装配系统在“减少实训耗材、缩短培训周期、降低误操作损失”三方面均有明显收益。

第 7 章 结论与展望

本文针对变速箱装配教学与培训难题，提出并实现了基于数字孪生的 AR 虚拟装配系统。系统完成了四层架构设计、模型层级重构、拆解还原动画、步骤约束控制、状态可视化展示与工业风交互界面开发，形成了从结构认知到流程训练的完整技术链路。

后续将重点推进三方面工作：一是深化 AR 端空间交互能力，提升沉浸式装配体验；二是引入机器学习模型增强故障预测与智能评分；三是完善多终端协同机制，支持教师、学员和专家的远程联合训练。

系统可从变速箱场景扩展到减速器、液压系统、发动机等复杂装备，形成通用化虚拟装配平台。结合企业 MES、PLM 或数字工厂平台后，可进一步打通设计、培训、运维数据链路，支撑制造业数字化转型。

未来在平台化演进中，可采用“模型模板化+流程参数化+评价规则组件化”的建设思路。模型模板化用于沉淀通用装配对象结构，流程参数化用于适配不同机型步骤差异，评价规则组件化用于快速配置不同岗位的考核标准。该模式能显著降低新场景接入成本，提高跨项目复用效率。

在技术体系上，还可引入知识图谱与大语言模型辅助功能。知识图谱用于组织“部件-工艺-故障-处置”关系，便于训练过程中的语义检索；大语言模型可用于生成步骤讲解文本、智能问答与错误原因解释，提升系统的人机协同能力。若将语义层能力与现有量化指标结合，可形成“可解释、可量化、可闭环”的下一代虚拟装配训练平台。

致谢

本论文的顺利完成，凝聚了众多师长、同窗与亲友的心血与关怀，在此我致以最诚挚的谢意。首先衷心感谢我的指导老师，从课题选题、研究思路梳理、框架搭建，到实验设计、内容撰写与反复修改，老师始终以严谨的治学态度、深厚的专业素养和耐心细致的指导，为我指明方向、解惑答疑。老师不仅在学术上给予悉心点拨，更在为人治学、求真务实方面为我树立了榜样，使我在专业能力与科研思维上均得到显著提升。同时，感谢学院各位老师在大学期间的悉心授课与谆谆教诲，为我打下扎实的理论基础，也让我具备了独立思考与解决问题的能力。

感谢同窗好友与实验室伙伴们在学习和生活中的陪伴支持，我们相互鼓励、交流探讨、共同进步，在彼此困惑时给予帮助，在压力之下彼此支撑，这段温暖的时光令我难以忘怀。最后，我要向家人致以最深切的感恩，他们始终默默付出、无条件理解与包容，用最朴实的关爱成为我最坚实的精神后盾，让我能够心无旁骛地完成学业与研究。谨以此文献给所有关心、帮助与支持我的人，再次致以最由衷的感谢与祝福。

参考文献

[1]朱琳,曲书平. 基于 VR 技术的烟草包装机推送装置虚拟装配[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2025,41(03):326-335.

[2]佟纪元.平身科斗拱虚拟装配 VR 体验设计研究[D].沈阳航空航天大学,2024.

[3]邓帅.基于 VR 的复杂装备虚拟装配技术研究[D].四川大学,2024.DOI:10.27342/d.cnki.gscdu.2024.000896.

[4]黄力刚,顾满. 农用挖掘机卷筒虚拟装配规划设计与研究——基于 CAM 技术[J].农机化研究,2024,46(06):131-135.

[5]万明远.基于 VR 技术的阵列天线虚拟装配研究[D].南京理工大学,2023.D

[6]王灵利,齐乐华,罗俊,等. VR 技术应用于工程实训课程探究——以西北工业大学的“VR 虚拟装配综合实训课程”为例[J].现代教育技术,2022,32(07):85-92.

[7]刘庆磊.基于 VR 技术的压雪机虚拟装配及运动仿真系统研究[D].河北科技大学,2022.

[8]万由滕.基于 VR 的气动力枪支虚拟装配方法与系统实现研究[D].北京工业大学,2022.

[9]陈磊.基于 VR 的汽车车间设备装配系统的设计与实现[D].沈阳理工大学,2022.

[10]金鹏辉.基于 VR 的办公座椅定制化装配系统平台研发[D].杭州电子科技大学,2022.

[11]张钰,李玮,张利兵,等. VR 技术在机械加工虚拟仿真教学中的应用[J].机械工程师,2022,(01):74-77+80.

[12]汪邓涵,黄秋野. VR 平台下的无人机虚拟装配关键技术研究[J].电子技术与软件工程,2021,(15):21-24.

[13]钟贵强.VR 环境下真实感的虚拟抓取及其评估方法的研究[D].广东工业大学,2022.

[14]陈晨,周建钊,何晓晖,等. 虚拟装配及运动仿真系统设计与实现[J].装备制造技术,2020,(11):52-55.

[15]高霆,朱安庆,胡安超. 基于 VR 技术的船体分段虚拟装焊教学研究[J].教

育教学论坛,2019,(39):188-191.

[16]杨幸雨.基于虚拟现实（VR）的复杂镶拼式注塑模具装配验证技术研究及应用[D].贵州大学,2019.

[17]黄培德.VR 环境下基于虚拟手操作的装配仿真技术研究[D].武汉理工大学,2019.

[18]张海云,杨振宇,赵国勇,等. 基于 VR 的机床虚拟装配实验平台开发[J].智库时代,2018,(47):295-296.

[19]胡安超.基于 VR 技术的船舶分段装配虚拟仿真研究[D].江苏科技大学,2018.

[20]万隆君,涂婉丽,徐轶群,等. 基于 VR 技术的船舶管路装配虚拟仿真系统设计[J].中国造船,2017,58(01):186-192.