doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.010

联合收获机轻量级数字孪生系统构建方法研究

马博文^{1,2} 刘孟楠² 尹彦鑫^{2,3} 孟志军^{2,3} 张 宾¹ 张亚伟¹ 温昌凯^{2,3} 张安琪⁴

(1. 中国农业大学工学院,北京 100083; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室,北京 100097; 3. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097; 4. 北京市农林科学院信息技术研究中心,北京 100097)

摘要:针对现有农机装备数字孪生系统开发难度大、配置要求高以及资源占用过高的问题,提出基于轻量级网络的 联合收获机数字孪生系统构建方法,包含物理、虚拟、数据交互、模型计算以及人机交互等多个子系统的实现方法。 基于数字孪生的技术特点和联合收获机的作业特性,设计了一种基于 JavaScript 语言的轻量级数字孪生系统框架。 通过采用 Solidworks 和 CMdevelopment kit 工具进行数字孪生系统的模型轻量化处理及坐标系整合,实现了在不影 响模型精度和功能的前提下,显著降低系统对硬件要求和内存占用量。以雷沃 GM100 型联合收获机为对象,开发 基于轻量级网络的联合收获机数字孪生系统,为联合收获机孪生系统性能分析、实时监控、瞬时计算以及远程操纵 提供联合仿真、分析以及验证平台。为验证数字孪生系统性能和功能,开展了孪生系统性能测试及油耗预测实验。 实验结果表明,在数据更新频率 20 Hz 下,响应时间在 78 ms 以内,内存占用量在 331 MB 以内;性能测试中,系统在 运行状态下 CPU 和 GPU 的平均占用率分别为 17% 和 30%;即使在高强度操作下,系统帧率仍可保持在 75.6 f/s; 在正常作业下油耗预测模型平均误差为 0.34 L/h,平均相对误差仅为 2.51%。本系统提供了一种低成本、高效率 的数字孪生轻量化构建方案。

关键词:联合收获机;数字孪生;轻量级;运动逻辑建模;齐次矩阵 中图分类号:S24;TP272 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2024)05-0108-13



Construction Method and Application Example of Lightweight Digital Twin System of Combine Harvester

MA Bowen^{1,2} LIU Mengnan² YIN Yanxin^{2,3} MENG Zhijun^{2,3} ZHANG Bin¹ ZHANG Yawei¹ WEN Changkai^{2,3} ZHANG Anqi⁴

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Beijing 100097, China

3. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097, China

4. Information Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Aiming at the problems of the existing agricultural equipment digital twin system development difficulty, high configuration requirements and poor portability, a lightweight network-based digital twin system construction method for combine harvester was proposed, which contained the realization of multiple subsystems such as physical, virtual, data interaction, model computation and human-computer interaction. Based on the technical characteristics of digital twin and the operational characteristics of combine harvester, a lightweight digital twin system framework was designed based on JavaScript language. By adopting Solidworks and CMdevelopment kit tools for the model lightweight processing and coordinate system integration of the digital twin system, it achieved a significant reduction of the system's hardware requirements and memory occupation without affecting the model's accuracy and functionality. The lightweight network-based combine harvester digital twin system was developed by using a Lovol GM100 combine harvester as an object to provide a joint simulation, analysis, and validation platform for

收稿日期: 2024-02-01 修回日期: 2024-03-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD200050302)、智能农业动力装备全国重点实验室开放课题项目(SKLIAPE2023005)和国家自 然科学基金面上项目(32171907)

作者简介:马博文(1998—),男,硕士生,主要从事数字孪生系统技术研究,E-mail: mabowenz@163.com

通信作者: 尹彦鑫(1984—),男,副研究员,博士,主要从事智能农机装备技术研究,E-mail: yinyx@ nercita. org. cn

performance analysis, real-time monitoring, instantaneous computation, and remote manipulation of the combine harvester digital twin system. To verify the performance and functionality of the digital twin system, twin system performance tests and fuel consumption prediction experiments were conducted. Tests showed that the response speed was within 78 ms at a data update frequency of 20 Hz, and the memory occupation was within 331 MB in the performance test, and the average occupancy of the system's CPU and GPU in the running state was 17% and 30%, respectively; and the system's frame rate can be maintained at 75.6 f/s even under high-intensity operation. Under normal operation, the average error of the fuel consumption prediction model was 0.34 L/h, with an average relative error of only 2.51%. This system can provide a low-cost, high-efficiency digital twin lightweight construction scheme, which provided a useful reference for the further promotion and application of digital twins in the field of agricultural equipment.

Key words: combine harvester; digital twin; lightweight; motion logic modeling; homogeneous matrix

0 引言

随着信息技术的发展和工业化的深入,联合收获机正逐步向智能化、信息化转型^[1-3]。联合收获机的应用不仅可以降低劳动成本和劳动强度^[4],还能大幅提升收获作业的效率^[5]。然而,随着联合收获机的信息化管理水平以及联合收获机间的信息交互透明度的提升,也面临着优化作业质量控制、故障预警诊断和精准预测油耗等一系列新的挑战^[6]。此外,当前科研实验中的管理系统及实验台架使用时,在时间、空间和实验数据量方面存在一定的局限性,这些限制阻碍了农业机械的快速、高效研发。

数字孪生(Digital twin)技术作为一种先进的模 拟工具,为复杂系统提供了一种数字化的虚拟映射, 能够精准模拟孪生体的行为^[7-8]。通过实时的数据 交换,实时反映其对应物理实体的状态和行为,甚至 预测未来发展趋势^[9-10]。

近年来,数字孪生技术在农业领域受到了广泛 的关注,国内外众多学者已取得了显著的研究成果。 LIN 等^[11]研究了数字孪生技术在智能农业机械设 备设计中的应用和提高农业机械的智能化水平,促 进了技术创新和智能农业机械化产业的标准化。 DOROKHOV 等^[12] 创建农业机械的数字孪生体并进 行了测试,可以在不需要物理制造的情况下,有效地 测试和优化农业机械,从而降低了物理测试的成本 和时间。SLEDKOV 等^[13]针对农业机械在恶劣环境 下的加速磨损问题,提出了一种创新的数字孪生模 型。该模型能够优化农业机械的修复与恢复过程, 减少材料成本,并为组织工作提供最佳解决方案。 ZHANG 等^[14] 通过部署拖拉机、中央服务器和物联 网平台,开发了一个智能农业机械设备的数字孪生 服务平台,并以大功率拖拉机耕作为例来验证方法 的有效性。该平台能够准确预测拖拉机耕作质量, 准确率达到96.65%。顾生浩等[15]明确了农业数字 孪生系统的背景、概念、内涵、基本组成及其技术优 势。强调了农业数字孪生系统在实现农业数字化转型升级中的作用,提出了我国在这一领域的应用方向和发展路径。郭大方等^[16]提出了一个基于云-雾-边-端协同架构的农业装备数字孪生系统。通过实验,成功开发了一个针对籽粒直收型玉米联合收获机的数字孪生原型系统,该系统能够执行模型预测、更新、实时监测和优化决策等功能。实验结果显示,该系统能有效提高预测效果,显著降低籽粒破碎率。张延安等^[17]引入了一种数字孪生驱动的时变比例积分自适应控制方法解决高功率动力换挡拖拉机中湿式离合器压力控制。研究结果表明,数字孪生系统可以快速更新并准确描述离合器液压系统,与传统的 PID 控制方法相比,提高了离合器压力的响应速度和鲁棒性。

综上所述,数字孪生技术在构建远程监视系统 方面已取得显著成果^[18-20]。然而,多数数字孪生系 统依赖于现有的大型物理引擎^[21-22],这不仅提高了 开发的门槛和系统配置要求,还降低了开发效率和 系统的可移植性。

因此,针对现有农机装备数字孪生系统开发难 度大、配置要求高以及资源占用过大的限制,本文提 出一种基于轻量级网络的联合收获机数字孪生系统 构建方法,包含物理、虚拟、数据交互、模型计算以及 人机交互等多个子系统的实现方法。旨在保障数字 孪生系统基本功能的实现和资源使用的优化。实现 联合收获机作业参数匹配、故障预警诊断以及实时 油耗预测等关键功能,解决实体农机实验面临的时 间、空间以及实验数据量限制问题。

1 联合收获机数字孪生系统核心概念

本文基于数字孪生技术,提出了一种创新的联 合收获机数字孪生系统五维模型概念,旨在构建一 个综合、高效的联合收获机数字孪生系统。该系统 涵盖了物理收获机、虚拟收获机、数据交互系统、模 型计算系统和人机交互系统,各组成部分相互协作, 确保系统整体的协同和高效运行。其详细开发流程 如图1所示。



for combine harvesters

物理收获机集成:物理收获机是指数字孪生系 统的实体部分,包含联合收获机的所有物理结构和 功能组件。这些组件不仅涉及机械结构,还包括一 系列先进的传感器和执行器,用于实现精确的作业 控制和反馈。物理收获机的设计和实现考虑了机械 工程学、物理学和传感技术,以确保其在复杂的农业 环境中能够稳定和高效地运行。

虚拟收获机的精确映射:虚拟收获机在数字孪 生系统中扮演着最重要角色。利用三维建模技术和 计算机图形学,实现了对物理收获机的高度精确数 字化映射。该模型不仅精确复现了物理收获机的结 构,还能通过计算机图形学实现模拟其运行状态和 性能,为操作者提供了一个功能强大的模拟和分析 工具。

数据交互系统架构是物理收获机和虚拟收获机 之间信息传递的桥梁,采用了最新的5G通信和数 据处理技术。不仅实现数据的高速传输和实时更 新,还确保了数据安全性和可靠性。这一系统的设 计和实现体现了物联网和网络工程的综合应用。

模型计算系统:通过数学模型和算法实现虚拟 环境与物理实体的精确模拟,持续数据反馈与实时 修正,具有强大的预测能力。该系统综合应用人工 神经网络、监督学习和集成学习等计算方法,提高了 农业机械操作效率和安全性。

人机交互系统的用户友好设计:提供了一个直

观且易于操作的界面,使用户能够有效地监控和控制虚拟模型。该系统的人机交互设计考虑了易用性和效率,包括直观的图形界面、实时反馈机制和自适应控制策略,以提升用户体验和操作效率。

这一流程为联合收获机轻量级数字孪生系统的 多维互联互通奠定了基础,解决了数字孪生系统多 维度信息的连接问题,为数字孪生系统的开发流程 提供了理论基础。

2 联合收获机数字孪生系统设计框架

本研究根据数字孪生技术为联合收获机构建了 一个多维度、多层次的综合数字孪生平台。该平台 侧重于实现系统模型的高效构建、操作系统的简便 性以及高度灵活的编程接口。通过 JavaScript 和 HTML 实现一个轻量级的数字孪生平台,优化虚拟 收获机建模,加强模型处理能力,并提供直观的人机 交互体验。本文将详细阐述联合收获机数字孪生系 统关键组成部分的构建方法。

2.1 物理收获机

在数字孪生系统的构建中,对联合收获机的物 理实体及其工况参数进行精确监控至关重要。通过 对联合收获机的各个部件进行详细分类,并构建了 一套全面的工况参数采集系统,本研究确保了数字 孪生模型能够实时、准确地反映联合收获机的运行 状态。

物理收获机包括实体零部件结构、特征参数和 物理属性。考虑到数字孪生系统在构建时的多种需 求,本研究对联合收获机的物理实体基于其运动特 性将其划分为以下5大类:①无运动部件,包括机身 框架、支撑结构等。②单一运动部件,包括皮带轮、 送粮轮、风机轮及主传动轴等。③复合运动部件,包 括拨禾轮、拨齿和后轮等。④循环运动部件,包括筛 板、上粮筛板、皮带和链条等。⑤往返运动部件,包 括振对筛、割刀等。

为确保数字孪生模型能够准确反映联合收获机 的实时工况,构建了一套工况参数采集系统,如图 2 所示。该系统由一系列高精度传感器组成,如轮速 传感器、角度传感器、扭矩传感器、油量传感器、GPS 定位模块、雷达模块和视觉传感器等。这些传感器 的安装位置和类型经过选择和测试,以确保能够精 确捕捉机器运行状态的关键参数。

此外,还采用了基于 STM32F103C8T6 型单片机 设计的数据采集器,具有串口、CAN 总线等多种通 信功能,不仅可以实时采集多源传感器数据,还可对 数据进行初步分析。其中数据采集器硬件构成图如 图 3 所示。



Fig. 2 Combine harvester sensor arrangement



Fig. 3 Data collector hardware diagram

2.2 虚拟收获机

通过虚拟收获机的高精度建模能够实现联合收 获机运行状态的三维可视化,为用户提供直观且全 面的信息。为实现基于物理收获机的实时映射,需 要构建高精度的联合收获机三维模型,以及对联合 收获机所有运动部件进行运动逻辑建模,确保模型 的准确性和实用性。

2.2.1 三维建模与映射

虚拟收获机是对联合收获机物理特征的高度复 现。本研究通过实地数据采集,获取联合收获机的 详细物理特征,包括位置、几何尺寸、材质和运动学 特性。本研究通过 Solidworks 和 3DMAX 等三维建 模软件构建联合收获机的高保真几何模型。这一过 程不仅涉及模型的几何构建,还包括材质属性和动 态特性的模拟,以确保虚拟模型能够真实地反映物 理收获机的状态。图4 为联合收获机三维模型。

几何建模:每个零部件的三维形状都经过仔细 测量和建模,以确保尺寸精度和细节真实性。例如, 支撑结构的每个弯曲角度,以及传动系统中每个齿 轮,均需在虚拟环境中精确建模。

材质特性与动态行为:材料属性的设定确保外 观的真实感和材料的物理特性,如质量、强度和耐磨 性。此外,对于诸如皮带轮、振动筛等需要运动的部 件,应精确模拟动态行为,以便于在虚拟环境中实现 功能预测和性能分析。

软件协同开发:Solidworks 和 3DMAX 的联合使 用增强了模型创建的多功能性和效率,如自动化设 计的参数化功能、复杂曲面的处理能力。

多层次组织结构:本研究采用多层次模型组织 结构,从宏观到微观逐层深入。顶层展示收获机整 体结构和外观;中层聚焦于各主要组件,如拨禾轮、 驾驶室;底层则揭示这些组件的内部零部件,如过桥 齿轮和轴承。

通过精确建模和数据整合,实现了数字孪生平 台系统性能的全方位展现,提高了模型准确性和实 时映射效率,增强了整个数字孪生系统的实用性和 可靠性。



2.2.2 运动逻辑建模

为了实现对每个运动部件的精准运动映射,本 研究采用 JavaScript 语言对虚拟收获机的各个零部 件进行运动逻辑建模。分析联合收获机关键部件的 运动特性,将联合收获机的运动零部件的基本运动 细分为单一运动和复合运动。

为了实现这些运动的精确模拟,集成了 Web3D 和 CMOline 引擎,确保三维图形的高精度处理与运动控制。运动部件通过一个 4 × 4 齐次矩阵进行描述,能够精确描述三维空间中的旋转和平移运动^[23]。

(1)单一运动

在收获机的工作过程中,大部分零部件的运动 特性可以被归纳为单一运动。这种单一运动特指除 了由发动机主导的基本平移之外,零部件仅表现出 单一的运动模式。例如,纵轴流滚筒、破碎机构和风 机在操作时,它们的主要运动特性都是围绕一个固 定轴进行的旋转。

本文根据运动特性,将零部件的单一运动模型 细分为4种基本模式:绕X轴旋转、绕Y轴旋转、绕 Z轴旋转和平移运动。通过采用4×4齐次矩阵描 述零部件的单一运动,在该矩阵中,用前3行3列的 矩阵元素描述物体的旋转,第4列矩阵元素描述物 体的平移,每种旋转模式都有特定的数学描述公式,即

$$\boldsymbol{M}_{d} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{d} & \boldsymbol{T}_{d} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{1} \end{bmatrix}$$
(1)

式中 M_d——单一运动的运动矩阵

 R_{d} ——单一运动的旋转矩阵 T_{d} ——单一运动的位移矩阵

(2)复合运动

在收获机的工作过程中,部分零部件的运动特 性可以被归纳为复合的运动特性。这种复合运动指 的是,除了由发动机主导的基本平移外,零部件还会 表现其他多种运动模式。为了精确描述这种复合运 动,需要综合考虑零部件的空间运动情况。零部件 的复合运动需要通过各种单一运动的链式矩阵乘法 实现多物体系统的复杂运动模拟。零部件的复合运 动特性可表示为

$$M = R(\alpha) \times R(\beta) \times T(t_x, t_y, t_z)$$
 (2)
式中 M ——复合运动矩阵
 $R(\alpha)$ ——第1个旋转角旋转矩阵
 $R(\beta)$ ——第2个旋转角旋转矩阵
 T ——零部件平移矩阵
 t_x ——零部件 X 轴方向位移
 t_y ——零部件 Z 轴方向位移

α----第1个旋转矩阵旋转角

β-----第2个旋转矩阵旋转角

具体来讲,以拨齿为例,它不仅在自身轴线上旋转,还围绕支架的轴进行旋转。第1个轴是拨齿本身的中心轴,负责其主要的旋转动作;而第2个轴则 是支架轴,使拨禾轮能够在更广泛的空间范围内运动。采用矩阵 *M*,构建三维空间拨齿的复合运动模型。式(2)中的α为拨禾轮支架旋转角,β为拨禾轮旋转角,则拨齿中心坐标为

$$M_{r} = \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 & L_{1}\sin\frac{\theta_{1}\pi}{180} + L_{2}\sin\frac{\theta_{2}\pi}{180} \\ \cos\alpha\sin\beta & \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha & L_{1}\cos\frac{\theta_{1}\pi}{180} + L_{2}\cos\frac{\theta_{2}\pi}{180} \\ \sin\alpha\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(3)

式中
$$L_1$$
——拨禾轮原点到支架原点距离
 L_2 ——拨齿坐标原点到坐标原点距离
 θ_1 ——拨禾轮相对整体的旋转角度
 θ_2 ——拨齿相对拨禾轮的旋转角度

2.3 数据交互系统

数据交互系统的核心环节包括数据传递和数据 实时同步。其中,数据实时同步是确保实现物理实 体和虚拟实体互联互通;数据实时通过高速网络技 术,旨在实现物理联合收获机与虚拟模型之间的数 据交换和同步,从而确保系统的高效运行和实时 监控。

2.3.1 数据传递机制

为确保数字孪生系统中数据的实时、高效和 安全传输,本文构建了一个数据传递环节,如图 5 所示。



在平台架构中,本研究通过4G/5G网络,数据 终端将收集到的数据上传至中央数据库;采用 JavaScript 构建了高效灵活的数据接口,实现与数字 孪生模型的无缝连接。利用 AJAX 和 Node. js,与数 据库建立连接,实现数据实时反馈和监控。通过上 述接口将数据传递至人机交互系统,人机交互系统 将接收到的实时数据计算出相应零部件的运动指 令。这些指令通过运动逻辑模型驱动数字孪生模型 中对应的零部件,从而实现了物理实体的运动状态 与虚拟模型的同步运行。这种策略不仅提升了数据 传输效率,还为数字孪生系统提供了坚实的数据支 持和保障。

图 6 为物理实体数据传递到云端数据库过程中 的数据交互机制。由图 6 可知,联合收获机在对传 感器数据进行收集和预处理后,根据自定义的通信 协议对获得的转速、扭矩、位置和速度等数据进行封 装。每个封装的数据包数据被分配到一个唯一的序 列号,并暂时存储在联合收获机的本地内存中,然后 通过4G/5G网络上传到云服务器平台。云服务平 台在接收到数据包后,会验证数据和对应的序列号, 然后将确认的序列号反馈给联合收获机,并指示其 从本地存储中删除已成功传输的数据包。如果联合 收获机在规定时间内没有收到云服务平台的序列号 确认,系统将推断该数据包未成功传输。在这种情 况下,联合收获机会重新发送该数据包,直到收到云 服务平台的确认响应为止。



Fig. 6 Data interchange mechanism diagram

2.3.2 数据实时同步机制

为实现联合收获机数字孪生系统的互联互通, 构建了一套数据实时同步机制,这一机制主要包括 数据上传与存储、数据接口、实时交互、安全性和数 据保护,具体内容为:

(1)数据上传与存储。联合收获机数据终端通过 5G 网络将物理系统的传感器收集到的数据通过 WebSocket 技术实时上传至中央数据库。这些数据 包括联合收获机的操作信息、状态参数和环境数据。

(2)数据接口。在虚拟系统端通过 JavaScript 和 Node. js 构建的数据接口支持数字孪生系统的前 后端的异步通信,允许系统实时接收并处理来自物 理设备的数据请求。

(3)实时交互。在实现物理系统与虚拟系统之间的同步运行过程中,核心在于将实时数据转换为数字孪生系统中各零部件的动作驱动。

通过 2.2 节建立的运动逻辑模型,结合 4 × 4 齐 次矩阵和 CMOnline 虚拟引擎,实现基于实时数据的 零部件运动驱动。在接收到实时数据后,系统通过 运动逻辑模型和联合收获机传动关系计算出零部件 的新位置和旋转状态,然后利用虚拟引擎更新虚拟 模型中的零部件状态,从而实现与物理联合收获 机的同步运动。这一过程中,4×4齐次矩阵的应 用允许复杂的运动变换和精确的位置控制,而虚 拟引擎提供了必要的三维图形处理和动画控制能 力,确保了虚拟系统能够实时反映物理系统的动 态变化。

(4)安全性和数据保护:数据安全性在整个交 互过程中至关重要。为此,系统采用加密技术 (TLS/SSL)来保护数据传输过程中的安全性。此 外,数据库还采用了多重数据备份和恢复机制,以防 止数据丢失或损坏。

通过这些综合的数据交互与同步机制,数字孪 生系统在数据处理的效率、实时性和安全性方面都 得到了显著提升。

2.4 模型计算系统

数字孪生系统模型计算系统的核心任务之一是 通过构建数学模型,利用先进算法,结合实时数据和 历史数据,支持联合收获机的模拟、预测和决策,实 现实时油耗预测、故障预警诊断、作业参数匹配等功 能。详细的算法实施和分析流程图参见图7,展示 了模型计算系统的整体框架。



Fig. 7 Model calculation system flowchart

在联合收获机的实时油耗预测方面,采用了人 工神经网络技术,特别是 BP 神经网络。该网络通 过建立包含多个隐藏层的复杂结构,能够识别并学 习数据中的复杂模式和关系,从而准确实时预测油 耗的相关数据。此方法不仅能够实时监控联合收获 机油耗相关的关键指标,而且有助于优化整个收获 机的动力输出策略,提升能源利用效率。

在联合收获机的故障预警诊断方面,采用了集 成学习算法,特别是轻量级梯度提升机(LightGBM) 算法。该算法通过构建梯度单边采样和直方图优化 来提高预测准确性,能够通过对实时数据的分析,及 时发现潜在的维护问题,并为维护决策提供数据 支持。

在联合收获机的作业参数匹配环节中,采用监督学习算法,特别是随机森林算法。该算法通过多 个决策树的预测结果,提升了系统整体的判断准确 度和可靠性。算法的应用优化了操作参数,适配了 多样的作业环境和作物类型,进而提升作业效率和 精度。

通过这些计算方法和技术,数字孪生系统可以 实现包括健康监测、作业控制、工况监管和性能预测 在内的多项关键功能,提升了农业机械的操作效率 和安全性。

2.5 人机交互系统

数字孪生系统的人机交互界面为用户提供了一个直观、高效的操作平台,使用户可实时与虚拟场景交互。本研究采用 HTML 和 JavaScript 语言开发用 户界面,利用 HTML 提供基础的结构和内容,而 JavaScript 处理用户交互和数据处理。为了实现联 合收获机的三维场景渲染,采用了 WebGL 3D 技术, 并通过 CMOnline 库增强了系统的场景管理能力。 设计的人机交互界面应具备以下核心功能:

(1)三维展示界面。利用图形渲染技术,为用 户提供了一个直观的三维展示界面,使其可以清晰 地观察虚拟收获机的各个部分和整体结构。用户可 以进行视图转换,对图形进行拖拉、旋转,从而获得 更多维度的视角。

(2)实时数据监控。设计一个实时的数据监控 平台,使用户可以即时地了解虚拟收获机的关键数 据和运行状态。专门设计的数据栏用于显示主要的 实时数据,并可以通过这些数据直接驱动虚拟收 获机。

(3)历史数据重现。用户可以方便地查询和分析历史数据,这对于系统的优化和调整具有重要意义。用户可以直接读取本地的历史数据文件,并根据这些历史数据驱动虚拟收获机。

(4)零部件显示与控制。用户可以查看和控制 虚拟收获机的各个零部件,确保系统的稳定运行。 用户还可以选择零件、部件进行单独显示和隐藏。

(5)零部件控制。用户可以为主要部件设置需 要的转速,从而进行模拟控制。

通过上述功能的细致设计和实现,使数字孪生 系统能够更好地满足实际应用的需求,为用户提供 一个高效、可靠的操作平台。

3 数字孪生系统轻量化关键技术

为了应对现有数字孪生系统在高性能物理硬件 要求方面的限制,并降低成本,通过采用先进的图形 处理和数据优化技术,有效地减小了模型的内存占 用和处理负担,确保了在不牺牲模型精度和功能的 情况下,模型能够适应各种计算环境,从而为广泛的 用户提供了易于接入和使用的数字孪生解决方案。

3.1 模型轻量化处理技术

模型轻量化是确保虚拟场景流畅展示的关键^[24-25]。采用 Solidworks 和 CMdevelopment kit v1.0 (北京圜晖科技有限公司)进行虚拟收获机的轻量化处理,旨在实现模型数据的高效、可控转换。这一过程显著降低了内存占用量,并优化了模型在





Fig. 8 Model lightweighting process flowchart

(1)模型简化技术。采取了针对性的图形简化 策略。对于不需要精细描述的零部件(如螺栓等), 通过简化为基本几何形状的方法,例如将其表示为 简单的圆柱体。此外,对于一些对系统功能和精度 影响不大的非关键零部件(如发动机的气缸等)进 行合理删减。这种有选择性的简化和优化,旨在降 低模型的整体复杂度,同时确保不损害数字孪生模 型的核心功能和真实性。

(2)纹理压缩方法。纹理映射是模型真实感的 关键,但高分辨率纹理图像会占用大量存储空间。 因此,使用 DXT 压缩算法,将纹理图像进行无损或 接近无损的压缩,大幅减少文件大小,同时保持了纹 理质量。

(3) 层级优化。层级细节模型技术被用于动态 优化模型的细节水平。在用户远离模型时,会使用 简化的模型版本,而当用户接近时,则切换到高细节 版本。这种方法显著提高了场景的渲染速度,尤其 是在用户浏览大型模型时。

为进一步优化数字孪生系统性能,特别引入 CMdevelopment kit 工具包,实现模型数据的高效、可 控转换。该工具包可以直接集成并嵌入 Solidworks 平台,允许模型直接进行大幅压缩处理,显著降低内 存占用,达到超过 80%的压缩效果。此外,该工具 包支持将模型转换为.cle 文件格式,使之能够适应 不同的网络环境和设备兼容性,显著提高用户体验。 这种数据压缩和格式转换的技术不仅优化了系统的 运行效率,还确保了模型在不同网络环境和各类设 备上的兼容性和流畅性,从而显著提升了用户体验。

利用这些轻量化技术能够精确控制模型的数据

大小和性能表现。模型在轻量化后能够保持其外观、功能和运动学特性的真实性,以及在多种终端设备上快速加载,满足数字孪生系统对实时性的高标准要求。

3.2 坐标系与模型整合技术

在虚拟收获机模型的构建过程中,坐标系和原 点的精准设计确保了模型的准确性。本研究采用 Solidworks 2021 实现坐标统一,以适应模型的运动 特性和多维数据分析的需求。

坐标系设计与优化:在 Solidworks 2021 环境下 针对联合收获机的运动特性,进行坐标系设计。基 于联合收获机各部件的运动学特性,为每个关键零 部件建立了独立的坐标系,以避免控制不同零部件 时出现不可控运动。图9为部分零部件坐标系图。



Fig. 9 Component coordinate system design

坐标原点变换过程应考虑数字孪生系统对实时 性和精确性的要求。通过设定全局基准面,并重新 设计各运动部件的坐标原点,确保了模型在数字孪 生平台中的一致性和数据的精确对应。对于一些复 杂运动部件,特别采用了坐标变换方法,以提高其在 虚拟环境中的运动准确性,实现对零部件的更为简 洁和精准的控制。设零部件原坐标点为(*x*_l,*y*_l,*z*_l), 坐标转换后的坐标点为(*x*_g,*y*_g,*z*_g),则坐标转换公 式为

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$$
(4)

式中 R——坐标点转换的旋转矩阵

n_x——坐标点转换 X 轴方向位移

n,——坐标点转换 Y 轴方向位移

n_z——坐标点转换 Z 轴方向位移

数字孪生系统在处理复杂的运动逻辑时,对于 零部件的坐标原点变换,一个有效的方法是通过旋 转矩阵 R 和平移向量来实现坐标原点变化,进而简 化计算过程。以拨齿为例,传统方法中拨齿的坐标 变换需要考虑其相对于割台梁、拨禾轮以及自身摆 动的综合运动,计算量巨大。通过将拨齿的坐标原 点平移到拨禾轮的几何中心,可以显著简化拨齿的 运动逻辑,将其简化为跟随割台梁位置和拨齿自身 摆动的运动。这种方法显著减少了所需的计算量, 从而提高了整个数字孪生系统处理复杂运动逻辑的 能力。

在模型整合阶段,针对联合收获机中相对固定 的部件,如机身框架和驾驶室,进行了模型合并工 作。这一步骤旨在简化整体模型的数据结构,使其 更加易于管理和检索。通过这种方式,不仅提高了 模型的处理速度,也为系统的维护和升级提供了 便利。

4 应用实例与性能验证

4.1 孪生系统应用实例

为验证本文提出的联合收获机数字孪生系统构 建方法的可行性,针对雷沃 GM100 型单筒纵轴流轮 式联合收获机,构建了一套基于轻量级网络的联合 收获机数字孪生系统。具体内容为:

(1)系统开发与优化。针对系统软件,依托 Solidworks 2021 完成孪生系统虚拟模型的三维构 建,使用 CMProfession 1.0 进行模型轻量化,使用 Visual Studio Code 作为主要的开发平台,支持高效 的编程和设计工作。针对硬件配置,选用高性能的 Nvidia RTX 3080 和 Intel Core i9 - 10900K 处理器, 32 GB RAM,以确保数据处理和模型渲染的高效率。 此外,为了保证数据传输的实时性和稳定性,系统采 用 1 Gb/s 以太网连接。

(2)物理与虚拟模型同步。在物理实体方面, 使用物理传感器系统记录和分析雷沃 GM100 型联 合收获机,以保证数字孪生模型的真实性和准确性。 对于虚拟模型,使用 CMdevelopment kit 软件和手动 标定优化原始三维模型,模型的三角片面数降低 90%以上,同时保持了细节精确度,提高了系统响应 速度。

(3)轻量化优化:通过 CMdevelopment kit 软件 初步压缩虚拟模型和人工方式优化模型结构。将模 型的零部件从原先的 4 000 多个减少至 119 个;三 角片面数由 4.5×10⁷大幅降低至 8.0×10⁶;收获机 模型的内存占用量也从 743 MB 减少至 22.3 MB。

(4)高级数据采集与交互:采用 LabWindows CVI 平台开发数据采集系统,配合专用的平板计算 机和通信模块,实现了收获机数据的实时传输和处 理。在人机交互方面,基于 Visual Studio Code 开发 的可视化平台,利用 HTML 和 CSS 技术,为用户提 供了包括 3D 模型展示、历史数据回放、实时数据监 控等多功能交互界面。

通过综合利用这些先进技术搭建的数字孪生平 台不仅在技术层面展示了高度的先进性和实用性, 还在实际应用中展现了其在数据处理、模型展示和 用户交互方面的卓越性能。联合收获机数字孪生系统网页端如图 10 所示。



图 10 联合收获机数字孪生系统网页端

Fig. 10 Web side of digital twin system for combine harvesters

4.2 孪生系统性能验证

2023 年 6 月在北京市小汤山国家精密农业研究示范基地采用雷沃 GM100 型联合收获机开展田间实验。实验参照 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 实验方法》中的方法开展,图 11 为实验现场。



图 11 田间实验现场 Fig. 11 Field test situation

4.2.1 三维可视化监控功能测试

本研究在国家农业信息化工程技术研究中心进行,旨在细致评估数字孪生系统在农业机械管理中的性能,特别是在模拟实际田间操作条件下的响应 速度和资源占用。具体实验步骤为:

(1)田间模拟启动与同步。在实验开始阶段, 使用数字孪生平台远程启动雷沃 GM100 型联合收 获机。此时,数字孪生平台同步激活,以监控和记录 收获机的每一个动作和状态。

(2)高频数据输入与处理。系统在数据输入频 率 20 Hz 下运行,处理包括位置、速度、油耗等关键 操作参数的模拟数据流。通过数据处理单元,以确 保信息的快速解码和分析。通过传感器系统和实时 数据传输技术,收获机的各项参数和操作等动态信 息被实时捕捉并上传至数字孪生系统。

(3)用户交互与控制测试。通过键盘和鼠标操 作数字孪生平台,测试系统在模拟实际田间操作条 件下的用户交互性和控制灵活性。实验中,操作员 使用键盘和鼠标控制虚拟模型的不同视角和放大, 同时评估系统的响应速度和操作的流畅性。 为综合衡量联合收获机轻量级数字孪生系统的 性能,针对数字孪生系统的响应速度、资源占用、 CPU、GPU 以及运行帧率进行测试,并与基于 Unity3D 引擎构建的数字孪生系统进行性能比较。 具体结果如图 12 所示。



图 12 测试结果表明,在数据输入频率 20 Hz 下,轻量级数字孪生系统的响应时间保持在 78 ms 以内,平均响应时间在 71.6 ms;Unity3D 数字孪生 系统的响应时间保持在 170 ms 以内,平均响应时间 在 157.1 ms。资源占用方面的分析显示,轻量级数 字孪生系统在整个测试过程中的内存占用量均维持 在 331 MB 以内,平均内存占用量为 304.7 MB; Unity3D 数字孪生系统内存占用量为 304.7 MB; Unity3D 数字孪生系统内存占用量为 1 202.9 MB。实 验结果表明,轻量级数字孪生系统在处理实际田间 操作数据时能够保持良好的响应速度,同时有效控 制资源占用。

图 13 展示了数字孪生系统运行过程中的不同 阶段,图中区域1 表示系统待机状态;区域2 表示网 页接口激活阶段;区域3 表示数字孪生系统启动和 运行阶段;区域4 表示系统关闭过程。性能测试结 果显示,轻量级数字孪生系统启动时间为9 s; Unity3D 数字孪生系统启动时间为16 s。在轻量级 数字孪生系统运行期间,CPU 的平均占用率为 17%,GPU 的占用率为30%;在 Unity3D 数字孪生 系统运行期间,CPU 的平均占用率为16%,GPU 的 占用率则为94%。

实验结果表明,轻量级数字孪生系统在运行时 对计算资源的占用相对较低,其在动态操作条件下 具有高效性能和优化的资源管理能力。



图 13 数字孪生系统 CPU 与 GPU 占用率对比 Fig. 13 Comparison charts of CPU and GPU occupancy graph for digital twin system

4.2.2 虚实映射同步功能测试

为验证联合收获机数字孪生系统中物理系统与 虚拟系统同步运行过程的有效性,本研究开展了数 字孪生系统转速同步性实验。

实验通过对比物理实体中发动机、脱粒滚筒、 升运器和清选风机等关键部件传感器捕获的实时 转速数据,与数字孪生系统中零部件实时映射的 转速数据进行同步性分析。此外,通过测试同步 运行时的数字孪生系统的运行帧率,进一步验证 数字孪生系统运行时的同步性和准确性,实验结 果如图 14 所示。



实验结果表明,将数字孪生模型中的螺旋输送

器、滚筒和清选风机转速与物理联合收获机实际转 速绘制在时域坐标系中,两者的转速曲线几乎一致。

在低压力测试环境中,数字孪生系统在简单互 联互通状态下实现了平均帧率142.6 f/s;中压力测 试环境下,在测试员每秒1次的操作频率下,系统维 持了平均帧率113.8 f/s;而在高压力环境下,在测 试员每秒超过3次的操作频率下,系统平均帧率稳 定在75.6 f/s。

以上实验表明物理实体与数字孪生模型之间的 高度一致性,成功验证了数字孪生系统的同步运行 效率和准确性。

4.2.3 运行状态重现功能测试

对数字孪生系统的运行状态重现功能进行了 测试,以验证其准确性和实用性。实验目的是通 过调用存储在数据库中的历史数据,来复现收获 机运行状态,并与实际运行时记录的数据进行对 比,从而确保数据一致性和系统准确性。具体实 验步骤为:

(1)数据采集与存储。在联合收获机的实际运 行过程中,收集关键运行数据如位置、速度、转速等, 并实时上传至 MySQL 数据库。数据库记录了收获 机的实时运行参数,并在运行结束后保存了整个作 业过程中的数据。

(2)历史数据重现。实验中,用户通过系统控制面板选择要重现的特定历史数据段。系统随后调用这些历史数据,模拟重现联合收获机的运行状态。例如:用户输入"2023/7/2 07:10:53"作为查询的起始时间点,系统则根据这一时间点调用对应的历史数据。

(3)数据准确性验证。完成历史状态的重现后,系统将重现时产生的新数据与调用的历史数据进行对比,检验两者是否一致。一致性验证的重点在于观察是否每个运行参数(联合收获机的位置、速度等)在历史数据与重现数据中保持相同。

历史数据再现完成后,将数据库中存储的对应 时间段的历史数据与动作重现产生的实时数据进行 对比,两者设备运动产生的数据一致,重现动作与历 史动作相同,系统的历史重现功能准确。

表1为联合收获机数据库存储的部分历史运行 数据。

车速/	航向角/	滚筒转速/	滚筒扭矩/	过桥转速/	过桥扭矩/	风机转速/	油耗/
$(km \cdot h^{-1})$	(°)	$(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$	(N•m)	(r•min ⁻¹)	(N•m)	(r•min ⁻¹)	$(L \cdot h^{-1})$
1. 585	+00.00	1 146	-0.3	543	- 25. 2	2 283	12.95
1.513	+00.04	1 141	0.1	539	-25.4	2 275	12.6
1.485	+00.15	1 134	0.1	543	-26.3	2 278	12.7
1.541	+00.32	1 126	0.1	544	-23.0	2 275	13.05
1.567	+00.36	1 134	-0.1	534	- 25. 1	2 284	12.95
1.465	+00.46	1 136	0.2	542	- 26. 1	2 278	13.10
1.491	+00.54	1 136	0.2	541	-25.5	2 278	12.45
1.435	+00.63	1 146	0.1	539	-24.5	2 282	12.55
1.539	+00.59	1 138	0.3	538	- 24. 9	2 276	13.35
1.424	+00.60	1 136	-0.3	543	-24.5	2 272	13.15
1. 548	+00.69	1 136	0.3	539	-25.6	2 276	12.8
1.58	+00.71	1 136	-0.2	543	-23.6	2 282	12.6
1.441	+00.68	1 136	-0.3	539	- 25. 5	2 284	12.8
1.558	-00.41	1 136	0.3	539	-25.2	2 281	13.35
1.661	-00.41	1 136	-0.1	543	-23.1	2 275	12.95

表 1 联合收获机数据库数据 Tab. 1 Combine harvester database data

4.2.4 油耗预测功能测试

为了验证联合收获机数字孪生系统的可行性和 油耗预测模型的准确性,开展了小麦收获实验。收 获实验工况分为空载、标准密度收获以及增密收获 3种。空载为联合收获机发动机直线行驶、不收获 情况。标准密度收获为联合收获机正常满幅作业。 增密收获为联合收获机在两倍密度下收获作业。每 个工况重复实验5次。在收获过程中,联合收获机 作业速度严格控制,从0km/h逐渐加速,最终达到 8km/h。图15为实时油耗预测结果。

油耗预测值与真实值之间均方误差(MSE)、均 方根误差(RMSE)和决定系数(R²)如表2所示。

由图 15、表 2 可知, 空载条件下, 联合收获机油 耗预测值与实际值的最小误差为 0.008 L/h, 最大误 差为 0.87 L/h, 平均误差为 0.28 L/h, 平均相对误差 为 1.56%。标准密度收获条件下, 联合收获机油耗



表 2 油耗预测性能评估结果

Tab. 2 Fuel consumption prediction evaluation

负载情况	$MSE/(L^2 \cdot h^{-2})$	$RMSE/(L \cdot h^{-1})$	R^2
空载	0.10	0.35	0.939
标准密度收获	0.16	0.40	0.913
增密收获	0.11	0.33	0.925

预测值与实际值的最小误差为 0.02 L/h,最大误差 为 0.88 L/h,平均误差为 0.34 L/h,平均相对误差为 2.51%。在增密收获条件下,联合收获机油耗预测 值与实际值的最小误差为 0.055 L/h,最大误差为 0.71 L/h,平均误差减少 0.32 L/h,平均相对误差为 1.51%。3 种收获负载条件下,油耗预测均方误差 均低于 0.2 L²/h²,均方根误差最大值均低于 0.4 L/h, 并且,预测模型拟合油耗的 R²均超过 0.91。

由此可见,该预测模型可准确计算瞬时油耗,并 对油耗变化具备较好的敏感性。

5 结论

(1)针对现有农机装备数字孪生系统开发难度

大、配置要求高以及资源占用过高的问题,提出 一种基于 JavaScript 语言、Web3D 和 CMOline 引 擎的轻量级五维联合收获机数字孪生系统。该 系统通过运动逻辑建模,实现了联合收获机运行 状态的高精度仿真和实时监控,显著提高了作业 效率。

(2)为降低内存占用量和提高网页端加载速 度,通过 Solidworks 和 CMdevelopment kit 工具实现 了对模型数据结构的轻量化处理。通过坐标统一和 模型整合等技术,确保了虚拟模型的准确性与高效 管理。轻量化技术的应用不仅提高了系统性能,还 增强了其在不同网络环境和设备上的兼容性和流 畅性。

(3)针对雷沃 GM100 型单筒纵轴流轮式联合 收获机,构建了一套轻量级网络的联合收获机数字 孪生系统。性能测试显示,该系统在数据更新频率 20 Hz下,保持响应时间在 78 ms 以内,且内存占用 量不超过 331 MB;油耗预测实验正常作业下平均误 差为 0.34 L/h,平均相对误差为 2.51%。

参考文献

[1] 赵春江,范贝贝,李瑾. 农业机器人技术进展、挑战与趋势[J/OL]. 智慧农业(中英文), 2024: 1-15. DOI:10.12.133/j. smartag. SA202312030.

ZHAO Chunjiang, FAN Beibei, LI Jin. Agricultural robots: technology progress, challenges and trends [J/OL]. Smart Agriculture, 2024: 1-15. DOI:10.12.133/j. smartag. SA202312030. (in Chinese)

- [2] 谢斌,武仲斌,毛恩荣.农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J].农业机械学报,2018,49(8):1-17.
 - XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. (in Chinese)
- [3] 赵博,张巍朋,苑严伟,等.农业装备运维与作业服务管理信息化技术研究进展[J].农业机械学报,2023,54(12):1-26.
 ZHAO Bo, ZHANG Weipeng, YUAN Yanwei, et al. Research progress in information technology for agricultural equipment maintenance and operation service management [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12):1-26. (in Chinese)
- [4] 张漫,季宇寒,李世超,等.农业机械导航技术研究进展[J].农业机械学报,2020,51(4):1-18.
 ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4):1-18. (in Chinese)
- [5] 刘成良,林洪振,李彦明,等.农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J].农业机械学报,2020,51(1):1-18. LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):1-18. (in Chinese)
- [6] 郭大方,杜岳峰,武秀恒,等.农机装备数字孪生:从概念到应用[J].智慧农业(中英文),2023,5(2):149-160. GUO Dafang, DU Yuefeng, WU Xiuheng, et al. Digital twin for agricultural machinery: from concept to application[J].Smart Agriculture, 2023, 5(2): 149-160. (in Chinese)

[7]	李浩,陶飞,王昊琪,等. 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J]. 计算机集成制造系统,
	2019, 25(6): 1320 – 1336.
	LI Hao, TAO Fei, WANG Haoqi, et al. Integration framework and key technologies of complex product design-manufacturing
	based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1320-1336. (in Chinese)
[8]	陶飞,刘蔚然,刘检华,等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1):1-18.
	TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration [J]. Computer Integrated
	Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18. (in Chinese)
[9]	庄存波,刘检华,熊辉,等.产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J].计算机集成制造系统,2017,23(4):

- 753 768.
 ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753 768. (in Chinese)
- [10] 陶飞,刘蔚然,张萌,等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
 TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18. (in Chinese)
- [11] LIN J, CHEN X. Application of digital design technology in the design of intelligent agricultural machinery and equipment[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2024, 9(1): 42 - 54.
- [12] DOROKHOV A S, PAVKIN D Y, YUROCHKA S S. Digital twin technology in agriculture: prospects for use[J]. Agricultural Engineering, 2023, 14(4): 14-25.
- [13] SLEDKOV Y G, KHOROSHKO L L, KUZNETSOV P M, et al. The digital twin for agricultural machinery restoration processes[J]. Engineering Technologies and Systems, 2021, 4(31): 530-543.
- [14] ZHANG Y, DU Y, YANG Z, et al. Construction method of high-horsepower tractor digital twin[J]. Digital Twin, 2022(2): 24-36.
- [15] 顾生浩,卢宪菊,王勇健,等. 数字孪生系统在农业生产中的应用探讨[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 82-89.
 GU Shenghao, LU Xianju, WANG Yongjian, et al. Application of agricultural digital twin system in crop production system
 [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(10): 82-89. (in Chinese)
- [16] 郭大方,杜岳峰,栗晓宇,等. 云-雾-边-端协同的农业装备数字孪生系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 133-141.
 GUO Dafang, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Digital twin system for agricultural machinery with cloud fog edge terminal architecture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 133-141. (in Chinese)
- [17] 张延安,杜岳峰,毛恩荣,等. 基于数字孪生的大马力拖拉机湿式离合器压力控制方法研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(13): 268-279.

ZHANG Yan'an, DU Yuefeng, MAO Enrong, et al. Pressure control method of wet clutch in high-powered tractor based on digital twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(13): 268 - 279. (in Chinese)

- [18] 周成,孙恺庭,李江,等. 基于数字孪生的车间三维可视化监控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(3): 758-768.
 ZHOU Cheng, SUN Kaiting, LI Jiang, et al. Workshop 3D visual monitoring system based on digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(3): 758-768. (in Chinese)
- [19] 李炜,朱德利,王青,等. 监测生长状态和环境响应的作物数字孪生系统研究综述[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(6):90-105.

LI Wei, ZHU Deli, WANG Qing, et al. Research review on crop digital twin system for monitoring growth status and environmental response[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(6): 90 - 105. (in Chinese)

- [20] 熊祥盛,许静,陈平录. 基于数字孪生的农业耕作监控系统[J]. 农业技术与装备, 2022(3): 78-80.
 XIONG Xiangsheng, XU Jing, CHEN Pinglu. Agricultural farming monitoring system based on digital twin[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022(3): 78-80. (in Chinese)
- [21] 王文明,侯春来,武振宇,等. 海洋无隔水管修井的数字孪生框架与可视化交互[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2):423-431.

WANG Wenning, HOU Chunlai, WU Zhenyu, et al. Frame and visualization for digital twin of marine riserless well intervention [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 423-431. (in Chinese)

[22] 刘怀兰,赵文杰,李世壮,等. 数字孪生车间机器人虚实驱动系统构建方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(21): 2623 – 2632.

LIU Huailan, ZHANG Wenjie, LI Shizhuang, et al. Construction method of virtual-real drive systems for robots in digital twin workshops [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(21): 2623 - 2632. (in Chinese)

- [23] 吴博,梁循,张树森,等. 图神经网络前沿进展与应用[J]. 计算机学报, 2022, 45(1): 35-68.
 WU Bo, LIANG Xun, ZHANG Shusen, et al. Advances and applications in graph neural network[J]. Chinese Journal of Computers, 2022, 45(1): 35-68. (in Chinese)
- [24] 林之钊,黄惠.从单幅图像生成人物三维动画[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2022, 34(9): 1341-1350.
 LIN Zhizhao, HUANG Hui. 3D character animation generation from a single image[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2022, 34(9): 1341-1350. (in Chinese)
- [25] 于瑞云,苏展,谢青,等. 基于空间分割的人体模型骨骼提取算法[J]. 计算机学报, 2019, 42(9): 2049 2061. YU Ruiyun, SU Zhan, XIE Qing, et al. Skeleton extraction of character model based on space segmentation[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(9): 2049 - 2061. (in Chinese)