基于 Unity3D 的蜂场数字孪生系统设计与实现

张平川[1*]，樊思彤[1]，王 宇[2]

[1]河南科技学院计算机科学与技术学院 河南新乡
[2]河南科技学院机电学院 河南新乡

【摘要】随着智慧农业和数字孪生技术的快速发展，传统蜂场依赖人工巡查和分散记录的管理方式已难以满足可视化、实时性和智能化需求。本文基于 Unity3D 游戏引擎，设计并实现了一套蜂场数字孪生虚拟仿真系统。系统以真实养蜂场为原型，构建包含管理中心、研学中心、智能蜂箱区及蜂群繁育中心的三维虚拟场景，利用 UGUI 实现蜂群状态、环境参数、产量统计及收支信息的可视化展示；以 MySQL 数据库统一管理蜂场业务数据，并结合 JSON 数据解析及高德地图 API 扩展数据来源，当前数据以数据库预设与人工录入为主，通过刷新操作实现界面数据的同步更新；同时集成场景漫游、天气时间仿真、远程视频监控等交互功能。经测试，系统在空载状态下平均帧率可达 60 FPS 以上，各功能模块运行稳定，达到预期设计目标，为中小型蜂场的数字化管理与科普研学展示提供了可行的技术参考，也为后续接入真实传感数据、构建完整实时采集链路提供了可视化框架。

【关键词】数字孪生；Unity3D；蜂场虚拟仿真；MySQL

【基金项目】河南省科技厅科技攻关项目（262102210098）：基于多模态大模型的蜜蜂行为智能解析与健康预警系统研发与推广

【收稿日期】2026 年 9 月 25 日 【出刊日期】2026 年 10 月 23 日 【DOI】10.12208/j.itss.20260001

Design and implementation of apiary digital twin system based on Unity3D

Pingchuan Zhang[1], Sitong Fan[1], Yu Wang[2]*

[1]College of Computer Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan
[2]College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan

【**Abstract**】With the rapid development of smart agriculture and digital twin technology, the traditional apiary management mode relying on manual inspection and decentralized recording can no longer meet the demands for visualization, real-time monitoring and intelligence. This paper designs and implements an apiary digital twin virtual simulation system based on the Unity3D game engine. Taking a real apiary as the prototype, the system constructs a 3D virtual scene including a management center, study center, smart hive area and bee colony breeding center. UGUI is used to visualize bee colony status, environmental parameters, yield statistics and revenue information. MySQL database is adopted for unified management of apiary business data, and JSON data parsing and Gaode Map API are integrated to expand data sources. At present, the data mainly comes from database presets and manual entry, and the interface data is updated synchronously through refresh operations. In addition, interactive functions such as scene roaming, weather and time simulation, and remote video surveillance are integrated. Tests show that the average frame rate exceeds 60 FPS under no-load conditions, all functional modules operate stably, and the design objectives are achieved, providing a feasible technical reference for digital management and popular science exhibition of small and medium-sized apiaries, as well as a visualization framework for subsequently accessing real sensor data and building a complete real-time data collection chain.

【**Keywords**】Digital twin; Unity3D; Apiary virtual simulation; MySQL

*通讯作者：张平川

1 引言

随着智慧农业和数字农业的发展，农业生产管理正在向着信息化、可视化和智能化的方向发展[1]，在现代农业中占据重要地位的智慧农业利用农业大数据采集、存储和分析的技术手段使传统的农业种植方式转变为现代化高效的农业生产方式[2]。传统的养蜂主要是由人去观察蜂群的状态、巢内的情况以及蜂蜜的产量等，这种管理模式缺乏可视化、数据滞后并且不能进行远距离监控。而通过物联网技术的智能蜂箱可以监测到蜂群的身体情况并给养蜂者提供建议帮助养蜂场实现现代化的目标[3]，而且该设备为自主供电更有利于推广使用具有很好的应用前景[4]。

数字孪生技术能够通过虚拟模型对物理对象进行映射和表达，实现数据交互、状态展示和仿真分析等功能[5]。农业数字孪生研究表明，该技术可用于农业生产过程的数据映射、状态监测和可视化管理[6]。智慧农场数字孪生研究进一步说明，数字孪生能够将农业对象、数据模型和应用服务进行结合[7]。我国学者从总体上介绍了什么是农业数字孪生、它的架构是什么、它有哪些应用等内容并提出了一些建设性意见[8]。在蜂业相关研究中，蜂群行为监测方法为蜂场状态识别和数字化管理提供了理论参考[9]。

本文以 Unity3D 为开发工具搭建一个蜂场数字孪生虚拟仿真系统，旨在实现蜂场真实环境高度复现、实时数据展示、身临其境的操作感以及数据库管理等目的。此系统的开发有利于推动智慧养蜂行业的发展方向更加贴近智能化，同时对后续相关技术的研究与发展起到良好的指导作用。

2 相关技术

数字孪生是基于三维建模、数据交互和仿真分析等方法建立实体与虚拟模型联系的一种数字化技术[5]。陶等人认为，数字孪生能够利用数据驱动方法优化产品的设计、生产和使用过程[10]；Qi 和 Tao 从数字孪生与大数据协同角度探讨了其在智能制造中的应用[11]；Fuller 等人从技术、实施问题及研究方向等方面对数字孪生进行了介绍[12]；Jones 等人系统总结了数字孪生的定义及主要特点[13]。本系统以实际蜂场为物理实体，以 Unity3D 构建的三维蜂场模型为虚拟模型，并利用 MySQL 数据库、JSON 文件及高德地图 API 实现数据接入，通过前端界面、场景漫游、天气仿真和视频监控等功能构建蜂场数字孪生虚拟仿真系统。

系统的三维交互部分基于 Unity3D 引擎开发。该引擎支持跨平台发布，使用 C#编写脚本，并通过 GameObject、Component 组件化机制组织功能逻辑，场景构建、实时交互等开发需求均在此基础上实现。物体移动、相机控制、动画播放与数据交互等常用功能，通过在对应组件上挂载脚本即可完成。界面层采用 Unity 内置的 UGUI 系统，Button、Text、Image、Panel、ScrollView 等常用控件均由其提供。借助事件系统处理界面交互，配合 Animator 实现动画效果，系统所需的数据可视化界面由此得以搭建。数据存储选用 MySQL。作为一种开源的关系型数据库管理系统，它足以满足蜂场业务这类中小规模数据的存储与管理需要。业务数据统一存放于 twintest 单表，以 name-value 键值对的形式组织，便于 Unity 端读取及界面绑定。外部数据接入通过 UnityWebRequest 完成，接口返回的 JSON 数据可直接解析使用；高德地图 API 则用于地理信息展示。

3 系统总体设计

3.1 系统总体架构

系统整体上划分为数据层、逻辑层与展示层，架构如图 1 所示。数据层的职责是存储蜂场业务数据并接入外部数据，具体实现依赖 MySQL 数据库、网络 JSON 接口和高德地图 API。逻辑层在 Unity3D 的 C#脚本上实现，主要完成数据的读取、解析与分发，功能控制也集中在这一层。展示层面向用户，借助三维虚拟场景与 UGUI 界面呈现蜂场运行状态，并支持相应的交互操作。

3.2 功能模块设计

从系统功能需求来看，本系统主要包括场景展示、交互仿真、数据处理、视频监控和系统管理五个模块[14]。各模块相互独立，并通过数据传输和界面联动实现协同工作，为蜂场三维展示、数据交互和远程监控等功能提供支持[15]。

系统由场景展示、交互仿真、数据处理、视频监控和系统管理五个模块组成，分别实现蜂场三维场景展示、交互仿真、数据处理与更新、视频监控及系统控制等功能，各模块协同实现蜂场三维展示、数据可视化和远程监控。系统功能模块结构如图 2 所示。

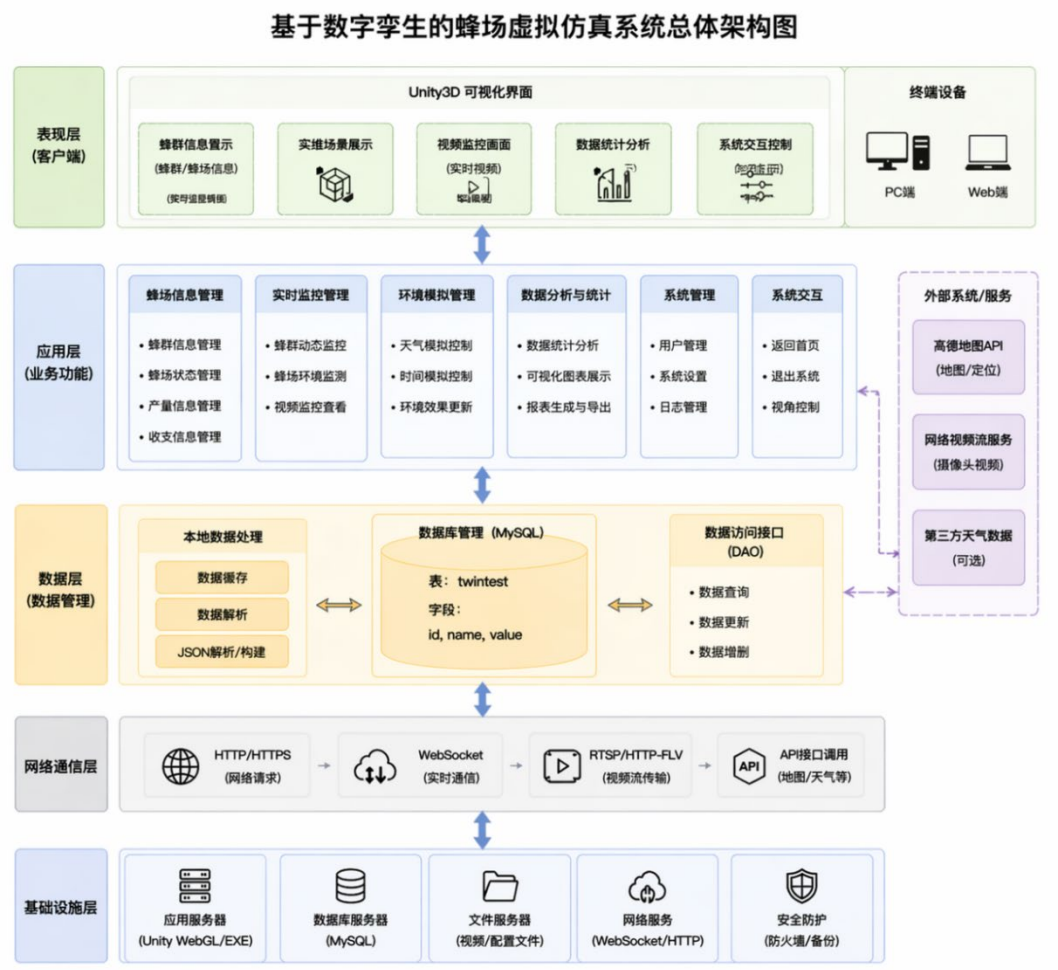

图 1　蜂场数字孪生系统总体架构

图 2　蜂场数字孪生虚拟仿真系统功能模块结构图

4 系统实现

4.1 三维场景与可视化界面

开发环境方面，系统以 Unity 2022 为主，业务逻辑使用 C#编写。三维场景按照实际蜂场的空间布局进行规划，覆盖蜂场管理中心、蜂场研学中心、智能蜂箱区与蜂群繁育中心等区域。场景构建以 Unity 的地形工具为基础，基本几何体、材质、灯光和天空盒等资源也参与其中。为改善运行效率，场景对象按层次组织，冗余资源被尽量减少，渲染负担也得到相应控制。

界面使用 UGUI 构建，三维场景、蜂群信息、环境监测、产量统计、蜂箱负载和收支信息等内容被划分为若干模块，分区布局于同一界面。交互上借助 Button、Panel、Text 等控件和动画组件，实现面板滑动、缩放、显示与隐藏等效果，用户在同一界面即可完成场景浏览与数据查看。

4.2 交互与环境仿真

系统通过自定义摄像机控制脚本实现三维场景漫游。用户可使用键盘 WASD 进行前后左右移动，使用鼠标完成视角旋转，并通过滚轮实现远近缩放，同时支持不同观察视角切换。该方式能够满足对蜂场整体布局和局部蜂箱区域的浏览需求。

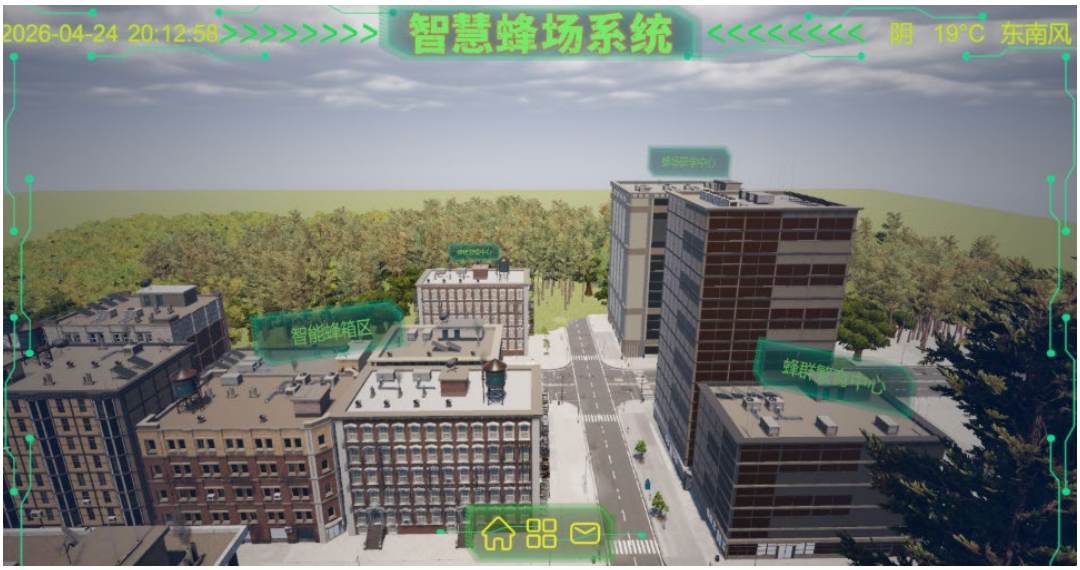

图 3 智慧蜂场系统主场景与主界面效果

图 4 场景漫游与视角控制功能界面

环境仿真主要由灯光、天空盒和粒子系统协同完成。晴天、阴天和雨天通过调整光照强度、天空盒效果及雨滴粒子进行区分；时间模拟则通过改变光照方向、亮度、色温及天空盒明暗程度表现一天内的环境变化。为兼顾效果与运行效率，系统对粒子数量、光照和材质进行适当控制，避免环境特效对场景漫游造成明显影响。

4.3 数据存储与交互

系统采用 MySQL 保存蜂群信息、蜂场监测、产量、蜂箱负载和收支等业务数据。考虑到当前系统主要承担数据展示和界面联动任务，数据库采用 twintest 单表结构，以 id、name 和 value 三个字段组织数据。其中 name 用于标识指标名称，value 保存指标数值，Unity 端读取数据后依据 name 完成数据分类并绑定至对应 UI 控件。该结构简单，便于当前系统的数据查询和指标扩展。

系统启动后建立 Unity 与 MySQL 之间的连接，查询 twintest 表中的数据，并将查询结果转换为 Unity 可用的数据类型。程序根据 name 字段将数据分配至不同功能面板；当通过数据库管理工具修改数据并重新执行刷新操作时，前端能够读取更新后的数值。此外，系统使用 UnityWebRequest 获取网络 JSON 数据并进行序列化、反序列化处理，同时调用高德地图 API 显示蜂场位置，从而补充外部环境和空间信息。

采用单表及 name-value 键值对结构，主要基于以下考虑：本系统业务指标数量有限（蜂群状态、环境参数、产量统计、蜂箱负载、收支信息等），且指标集合随需求调整而动态变化，键值对结构无需为新增指标修改表结构，仅需追加记录，扩展成本低；系统以三维展示与教学仿真为主要场景，数据更新频率低、并发访问量小，单表即可满足查询与刷新需求，而多表规范化会增加关联查询、事务维护与 Unity 端解析的复杂度，与系统轻量化的定位不符。value 字段采用 VARCHAR（20）而非数值类型，是考虑到该字段需同时承载数值型指标（如蜜蜂数量、环境评分、收入）与文本型描述信息，统一使用字符串可避免类型不一致导致的解析异常；当前指标的数值位数均不超过 20 字符，且数据主要服务界面显示而非高频数值计算，经解析即可满足展示需求，故在实现简洁性上作出此取舍。后续若接入真实传感数据或需统计计算，可在读取时转换数值类型，或将字段调整为 DECIMAL 等数值类型，并按指标维度重构为规范化多表结构。

表 1　twintest 数据表结构设计

字段名	数据类型	长度	约束	字段说明
id	INT	11	PRIMARY KEY, AUTO_INCREMENT, NOT NULL	数据编号，用于唯一标识每条记录
name	VARCHAR	50	NOT NULL	数据名称或指标名称
value	VARCHAR	20	NOT NULL	数据对应的具体数值

图 5　蜂场业务数据可视化界面

4.4 远程数据监控

系统在三维虚拟场景之外增加网络视频监控功能。通过 Unity 视频播放组件连接现场网络摄像头的视频流，在独立监控区域显示现场画面，并提供视频加载、播放、暂停和关闭等基本操作。该模块不改变三维场景本身，而是将现场视频作为虚拟场景的补充信息，使用户能够同时了解蜂场空间布局和现场情况。

5 系统测试与结果分析

5.1 测试环境与方法

为验证系统功能完整性和运行稳定性，在 Windows 10 64 位环境下进行测试。硬件配置为 Intel Core i5-12400F 处理器、16 GB DDR4 3200 MHz 内存、NVIDIA GTX 1650 4 GB 显卡和 512 GB NVMe 固态硬盘，软件环境为 Unity 2022.3.10f1、MySQL 8.0 及 Navicat。测试主要包括场景漫游、天气模拟、时间模拟、数据可视化、数据库同步和视频监控等功能，并进一步记录平均帧率、内存占用、CPU 占用率和加载时间。

5.2 功能测试

测试结果表明，场景漫游、天气与时间模拟、数据库数据展示及视频监控等功能均能够按照设计要求运行。在数据同步测试中，通过修改 twintest 表中的“蜜蜂数量”“蜂箱 1 环境评分”“蜂场收入”等数据并重新刷新，前端相应数据能够随之更新，说明数据库与 UI 之间的数据传递过程能够满足系统当前需求。

5.3 性能测试

为验证系统运行效率，本文从帧率、内存占用、中央处理器（Central Processing Unit, CPU）占用率和加载时间等方面进行性能测试。测试结果如表 3 所示。

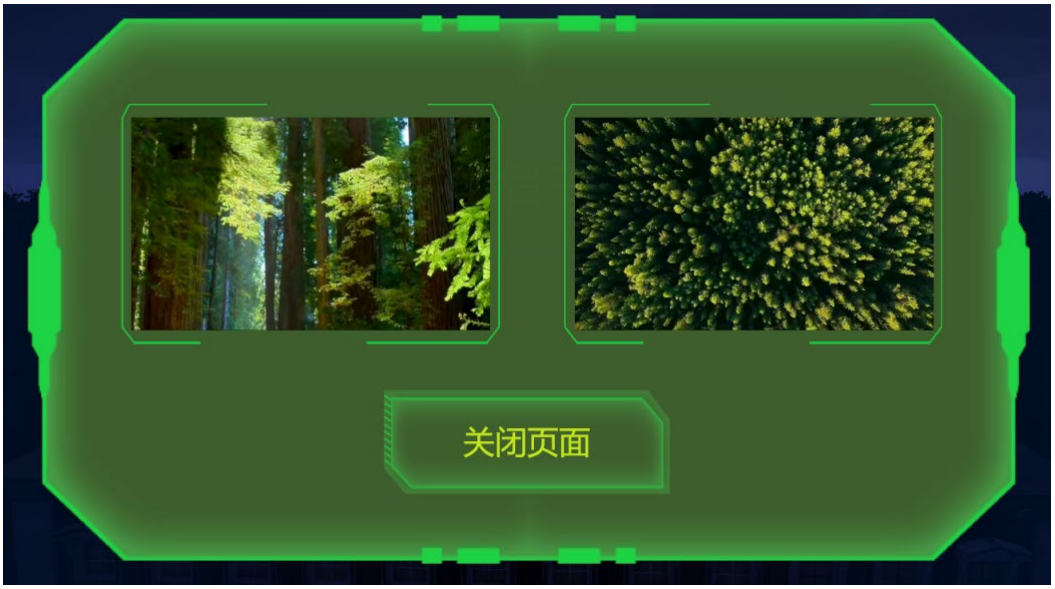

图 6 远程视频监控界面

表 2 系统功能测试结果

测试模块	测试内容	预期结果	测试结果
场景漫游	WASD 移动、鼠标旋转、滚轮缩放、视角切换	摄像机移动正常，视角切换流畅	通过
天气模拟	开启、关闭和切换天气效果	天气效果正常显示，切换无明显卡顿	通过
时间模拟	调整场景光照和时间变化	场景明暗变化正常	通过
视频监控	打开、播放和关闭监控画面	视频画面正常加载和关闭	通过
第一人称漫游	进入/退出漫游	正常切换	通过
数据修改验证	Navicat 修改数据→UI 更新	数值同步一致	通过
UI 界面动画	面板滑入/滑出、淡入淡出	动画流畅、无错位	通过

表 3　系统性能测试结果

测试项目	空载状态	满载状态	测试结果
平均帧率（Frames Per Second, FPS）	60FPS 以上	40FPS 以上	运行流畅
内存占用	约 1.1GB	约 1.5GB	占用合理
CPU 占用率	约 15%	约 30%	负载正常
主场景加载时间	3—5s	3—5s	加载正常
数据初始化时间	2s 以内	2s 以内	响应较快
视频监控加载时间	约 1s	约 1s	加载正常

由表可知，系统在正常运行和功能满载状态下均能保持较稳定的运行效果，未出现明显卡顿、加载超时或程序无响应等情况，能够满足蜂场数字孪生虚拟仿真系统的基本运行需求。

6 结论

本文针对蜂场数字化管理和可视化展示需求，设计并实现了一套基于 Unity3D 的蜂场数字孪生虚拟仿真系统。系统以三维蜂场场景为载体，将场景漫游、天气与时间模拟、业务数据可视化、数据库管理和远程视频监控进行集成，并通过三层架构组织系统功能。MySQL 与 twintest 单表结构实现了蜂群、环境、产量、负载和收支等数据的统一管理，JSON 数据交互和高德地图 API 进一步扩展了系统的数据来源和空间信息展示能力。测试结果表明，系统主要功能运行正常，在测试硬件环境下具有较好的运行流畅性，基本满足蜂场可视化管理、展示和教学演示需求。

目前系统仍存在一定局限：蜂场业务数据主要来自数据库预设或人工修改，尚未形成真实传感器到虚拟场景的完整实时采集链路；蜂群行为仍以基础信息展示和场景模拟为主，缺少对个体行为和异常状态的深入分析；系统目前主要面向 PC 端。后续可结合物联网传感器和无线通信技术接入真实环境数据，并进一步引入蜂群行为识别与数据分析方法，逐步提高系统的实际监测能力。

参考文献

[1] 赵春江.智慧农业的发展现状与未来展望[J].华南农业大学学报,2021,42(6):1-7.

[2] 孙忠富,杜克明,郑飞翔,等.智慧农业大数据关键技术研究进展与未来展望[J].农业机械学报,2024,55(11):1-18.

[3] Zheng Y,Cao X,Xu S,et al.Intelligent beehive monitoring system based on internet of things and colony state analysis[J].Smart Agricultural Technology,2024,9:100584.

[4] Ntawuzumunsi E,Kumaran S,Sibomana L.Self-Powered Smart Beehive Monitoring and Control System (SBMaCS) [J].Sensors,2021,21(10):3522.

[5] Madni A M,Madni C C.The fusion of AI and digital twins[J].Nature Computational Science,2023,3(4):280-282.

[6] Purcell W,Neubauer T.Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review[J].Smart Agricultural Technology, 2023,3:100094.

[7] Verdouw C,Tekinerdogan B,Beulens A,et al.Digital twins in smart farming[J]. Agricultural Systems,2021,189: 103046.

[8] 张旭艺,孙晓,杨鹏,等.农业数字孪生概念内涵、技术框架与应用进展[J].中国农业资源与区划,2025,46(11):196-207.

[9] 王强,李建国,张锋,等.基于机器视觉的蜜蜂行为实时监测与健康状态识别[J].农业工程学报,2023,39(12):142-151.

[10] 陶飞,张萌,程江峰,等.数字孪生五维模型及细分行业应用实践趋势[J].计算机集成制造系统,2023,29(11):3535-3546.

[11] Qinglin Q ,Fei T .Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison[J].IEEE Access,2018,63585-3593.

[12] Fuller A ,Fan Z ,Day C , et al.Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research[J].IEEE

Access,2020,8: 108952-108971.

[13] Jones D,Snider C,Nassehi A,et al.Characterising the Digital Twin: A systematic literature review[J].CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,2020,29(Pt A):36-52.

[14] 王红军,林俊强,邹湘军,等.基于数字孪生的果园虚拟交互系统构建[J].系统仿真学报,2024,36(6):1493-1508.

[15] 汪恒,余宏杰.数字孪生智能温室可视化监控系统设计与实现[J].数字农业与智能农机,2024(4):14-17.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS