doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.008

籽棉清理机数字孪生监测系统设计与实现

闫文斌[1,2]　张若宇[1,3]　吴　超[1,3]　陈明晓[1,2]　徐健康[1,2]　李玉林[1,2]
(1.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003;2.农业农村部西北农业装备重点实验室,石河子 832003;
3.兵团智慧农场数字化装备技术创新中心,石河子 832003)

摘要:籽棉清理机作为棉花加工的核心设备,在籽棉杂质清理加工过程中,存在设备状态不可视、故障预警被动滞后和运维策略粗放化等问题,制约了棉花加工质量、效率和企业效益的进一步提升。本文引入数字孪生技术,根据籽棉清理机工作原理及结构,构建其数字孪生模型,建立物理空间与虚拟空间的高保真映射机制,利用 Unity 开发了籽棉清理机数字孪生监测系统,实现了籽棉清理机运行状态的实时监测、故障主动预警以及工艺决策实时优化。对系统性能进行评价,结果表明:数据丢包率为 0、CPU 使用率为 5%、GPU 显存平均占用率为 4%、运动仿真帧时均值为 20.416 ms,验证了该系统具有良好的稳定性、可靠性和鲁棒性。

关键词:数字孪生;籽棉清理机;监测系统;故障预警
中图分类号:S24;TP23　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0072-12　　**OSID**:

Design and Implementation of Digital Twin Monitoring System for Seed Cotton Cleaning Machine

YAN Wenbin[1,2]　ZHANG Ruoyu[1,3]　WU Chao[1,3]　CHEN Mingxiao[1,2]　XU Jiankang[1,2]　LI Yulin[1,2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi* 832003, *China*
2. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi* 832003, *China*
3. *Innovation Center for Digital Equipment and Technology for Smart Farms, Shihezi Production and Construction Corps, Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: The seed cotton cleaning machine, as the core of cotton processing, faces operational challenges that limit overall efficiency. These include the inability to monitor equipment status in real time, delayed and passive fault alerts, and loosely defined operation and maintenance strategies during the impurity removal process. Such limitations have constrained further improvements in cotton processing quality, production efficiency, and overall enterprise profitability. To address these issues, digital twin technology was applied to create a virtual replica of the physical seed cotton cleaning machine. Based on a detailed analysis of the machine's operational principles and mechanical structure, a high-fidelity digital twin model was constructed. This model established a dynamic, bidirectional mapping mechanism between the physical machine and its virtual counterpart, enabling seamless data exchange and state synchronization. Using the Unity platform, a comprehensive digital twin monitoring system was developed for the seed cotton cleaning machine. This system integrated real-time data acquisition, simulation, and analysis capabilities. It allowed for real-time monitoring of the machine's operational status, facilitated proactive fault warnings through predictive analytics, and supported dynamic optimization of process decisions based on simulated scenarios. Performance evaluations of the system demonstrated strong stability and reliability with key metrics, including a data packet loss rate of 0, a CPU usage rate of approximately 5%, an average GPU memory occupancy of around 4%, and an average motion simulation frame time of 20.416 ms. The system was verified to possess excellent stability, reliability and robustness.

Key words: digital twin; seed cotton cleaning machine; monitoring system; fault early warning

收稿日期:2025-09-29　修回日期:2025-11-02
基金项目:兵团财政科技计划项目(2020AB006)
作者简介:闫文斌(1999—),男,博士生,主要从事棉花加工机械数智化研究,E-mail:13150493911@163.com
通信作者:李玉林(1979—),男,副教授,主要从事棉花加工机械数智化研究,E-mail:lyl_mac@126.com

0　引言

在棉花预加工环节，籽棉清理机[1]是去除籽棉杂质（如棉杆、铃壳等）的关键设备。学者在探索影响籽棉清杂效率的关键因素方面取得了一定进展[2-4]，但普遍忽视了实际清理过程设备存在状态不可视、故障预警被动化、运维策略粗放化等问题，从而影响棉花加工质量、效率和企业效益。鉴于以上籽棉清理机智能化运维管控的的迫切需求，以及数字孪生技术在制造[5-8]、药物科学[9-10]、建筑[11-12]、化学[13]、农机装备[14]等领域的广泛应用与技术可行性验证，将数字孪生技术引入籽棉清理机，为提升棉花加工质量、降低运维成本、推动棉花产业数字化转型提供创新性解决方案，对籽棉清理装备智能化升级具有重要理论价值与实践指导意义。

数字孪生本质上是对虚拟空间中物理实体的多学科、概率和多维模拟，可将实时变化的动态数据集提升到物理层面的模型，能够在虚拟空间中实时反映物理实体变化，并提供预测功能[15-17]。LI 等[18]提出了一种基于时空级联重构的实时数字孪生虚拟模型构建方法，用于金属管材弯曲中的全场塑性变形监测。YIN 等[19]提出了基于 CMOnlineLib 和 HTML 轻量级网络方法，实现了联合收获机数字孪生模型轻量化处理。GUO 等[20]通过整合理论和数据模型构建了联合收获机脱粒的数字孪生模型。马博文等[21]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。王明辉等[22]通过开发面向行驶状态变化的设施作业底盘数字孪生系统，建立设施作业底盘行驶状态在线预测模型。虽然数字孪生技术在工业领域已取得显著进展并形成了若干典型应用，但仍存在农业机械装备数字孪生监测系统在虚实映射的精准性与同步性不足，多源异构数据采集不全、实时处理能力弱、数字孪生模型在保真度和智能化方面尚有欠缺等问题。

基于此，本研究以籽棉清理机为研究对象，基于数字孪生技术框架，建立籽棉清理机数字孪生模型、多源异构数据融合与虚实映射机制，利用 Unity 平台开发籽棉清理机数字孪生监测系统，以实现对籽棉清理机的远程监测、故障预警和工艺推荐。

1　籽棉清理机数字孪生监测系统总体框架

提出一种籽棉清理机数字孪生监测系统总体框架，包括物理实体层、孪生数据层、虚拟实体层和服务层 4 个部分，如图 1 所示。

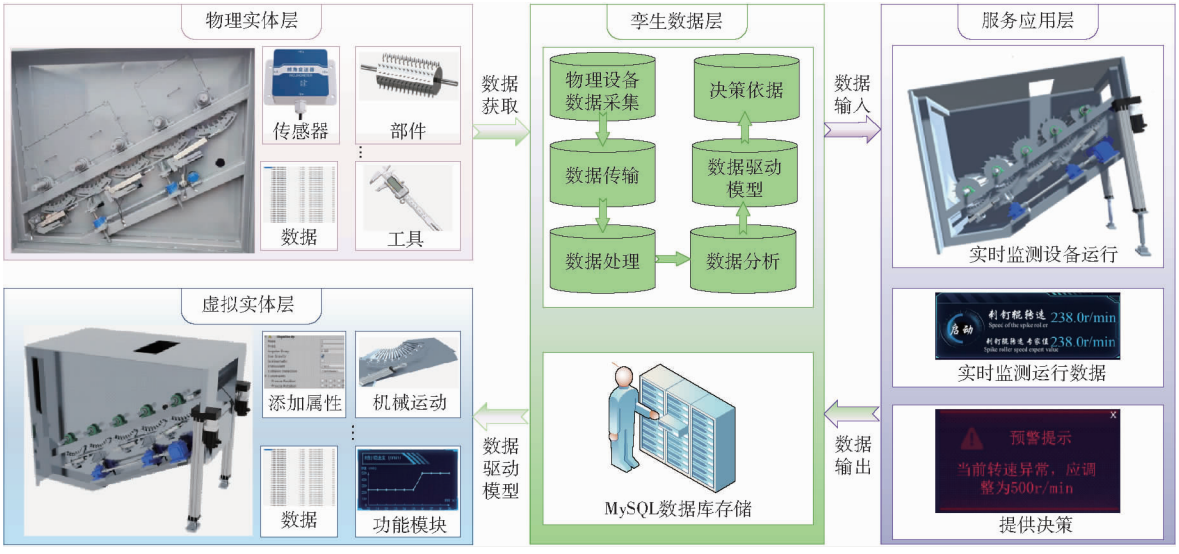


图 1　籽棉清理机数字孪生监测系统总体架构

Fig. 1　Overall architecture of digital twin monitoring system for seed cotton cleaning machine

（1）物理实体层是籽棉清理机设备可视化各类要素的集合，涵盖设备本体、运行环境以及设备实时运行状态等关键信息。物理实体层直接支撑籽棉清理机的基础运行功能。

（2）孪生数据层作为连接物理实体层与虚拟实体层的枢纽，负责汇聚并管理籽棉清理机运行过程中产生的实时数据与历史数据，其核心功能在于通过数据流反映物理实体的当前状态、行为及相关影响因素。

（3）虚拟实体层在虚拟空间中构建籽棉清理机的高保真数字孪生模型，实现对物理实体层的动态映射。其主要功能是模拟和监测籽棉清理机的实时运行状态。

（4）服务应用层是将数字孪生模型与可视化界

面集成一体,完成籽棉清理机实时工况的实时监测,以实映虚。基于实时监测数据,当设备出现异常或故障时,及时预警并提供决策。

2 籽棉清理机数字孪生模型建模

籽棉清理机数字孪生模型是实现籽棉清理机在虚拟空间中实虚映射的基础,从几何结构模型、实体属性模型、行为演化模型以及边界约束模型 4 个维度出发,创建高度仿真的籽棉清理机数字孪生模型,实现在虚拟空间中籽棉清理机内部状态可视。针对高精度模型带来的数据冗余与计算负荷问题,利用 QEM 边坍缩算法为主,顶点聚类和自适应三角形优化技术为辅的混合方法对数字孪生模型进行轻量化处理,构建流程如图 2 所示。

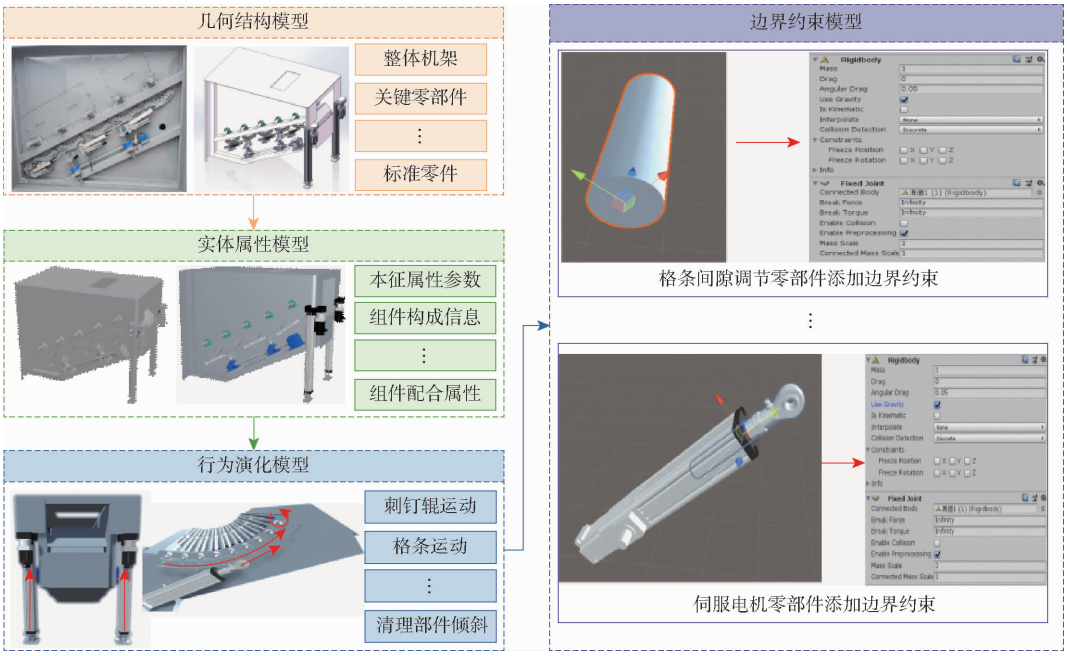


图 2 籽棉清理机数字孪生模型构建流程

Fig. 2 Seed cotton cleaning machine digital twin model construction process

2.1 籽棉清理机结构与工作原理

根据清理籽棉杂质的原理不同,籽棉清理机分为气流式和机械式。本文选取机械式格条间隙可调籽棉清理机,由机架、刺钉辊、格条栅、格条间隙调节机构、倾角调节机构、控制系统等部件组成,如图 3 所示。

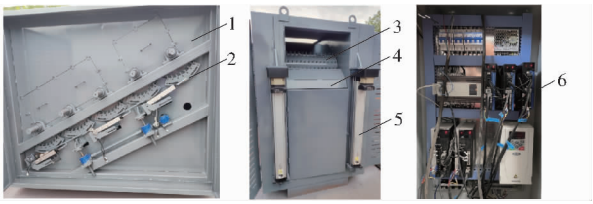


图 3 格条间隙可调式籽棉清理机样机

Fig. 3 Grid gap adjustable seed cotton cleaning machine prototype

1. 机架 2. 格条间隙调节机构 3. 刺钉辊 4. 隔条栅 5. 倾角调节机构 6. 控制系统

机械式籽棉清理机去除杂质工作原理:首先,籽棉从入棉口喂入,掉落到刺钉辊上,在刺钉辊的转动下,将籽棉进行初步开松并带动籽棉开始运动。然后,籽棉与格条栅之间发生击打和冲击,从而进行更深层次的清理。最后,通过振动和冲击的协同作用,使籽棉进一步开松并有效去除籽棉中残留的杂质,如图 4 所示。

2.2 籽棉清理机数字孪生模型构建

2.2.1 几何结构模型构建

为在虚拟空间中实现籽棉清理机物理实体的真实感和高精度可视化,需对籽棉清理机物理设备进行精确的几何结构模型建模。基于现有的格条间隙可调式籽棉清理机物理样机进行零件测绘,得到物理样机的详细参数,进行三维模型构建。将籽棉清理机几何结构模型分为整体机架模型与关键零部件模型,使用 Solidworks 建模软件,分别对其进行特征建模,最后,将各个零件进行装配,构建籽棉清理机的几何结构模型。

2.2.2 实体属性模型构建

基于物理实体参数特征,构建相应的实体属性模型,对每个功能组件建立实体属性模型并根据其相应的属性信息阐述。从属性特征信息维度来看,组件实体属性模型可以分别从本征属性参数 I_{AP_i}、组件构成信息 C_{CI_i}和组件配合属性 C_{FP_i} 3 个方面描述,其数学表达式为

$$EAM = \{I_{AP_i}\}_{i=1}^{m} \oplus \{(C_{CI_i}, C_{FP_i})\}_{i=1}^{n} \quad (1)$$

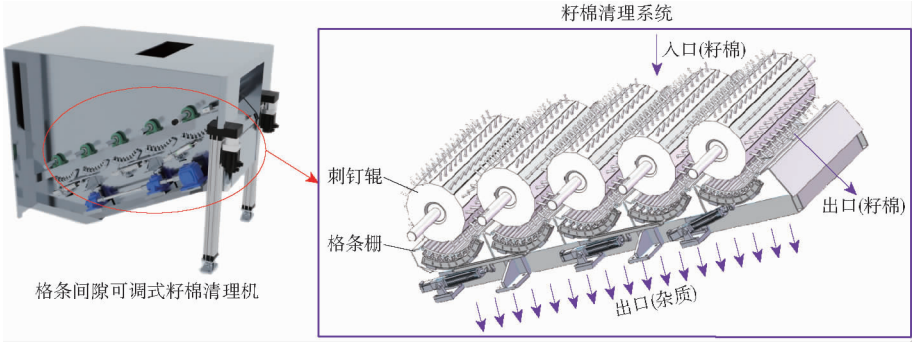


图 4　籽棉清理机工作原理图

Fig. 4　Seed cotton cleaning machine schematic

其中 I_{AP_i} 还包括功能特征参数(Functional characteristic parameter, I_{APF_i})、零件特征参数(Part characteristic parameter, I_{APP_i})以及运行特征参数(Operating characteristic parameter, I_{APO_i}),其数学表达式为

$$I_{AP_i} = I_{APF_i} \cup I_{APP_i} \cup I_{APO_i} \tag{2}$$

其中功能特征参数 I_{APF_i} 包括运行参数和驱动力参数;零件特征参数包括零件 ID、零件尺寸参数、零件名称以及零件种类;运行特征参数表示零部件在籽棉加工过程中所引起的参数变化,包括零件的实时状态、运行时间等数据。

基于以上定义方式,构建组件实体属性模型的组件构成信息 C_{CI_i},包括外壳零部件(Housing component, C_{CIH_i})、功能零部件(Functional component, C_{CIF_i})以及动力部件(Power component, C_{CIP_i}),其数学表达式为

$$C_{CI_i} = C_{CIH_i} \cup C_{CIF_i} \cup C_{CIP_i} \tag{3}$$

在第 i 个组件实体属性模型的属性特征信息中,组件配合属性 C_{FP_i} 是实现籽棉清理机数字孪生的重要信息。通过对第 i 个组件的研究,对组件配合属性进行定义,将其分为固定配合属性(Stationary fit, C_{FPS_i})和动态配合属性(Dynamic fit, C_{FPD_i}),其属性表达式为

$$C_{FP_i} = C_{FPS_i} \cup C_{FPD_i} \tag{4}$$

在籽棉清理机数字孪生模型中,组件配合属性覆盖零部件之间的配合属性,根据功能不同将这些配合分为固定配合属性 C_{FPS_i} 和动态配合属性 C_{FPD_i},通过界定固定配合可以表达该模型各零部件之间的相互配合属性。

综上所述,完成第 i 个组件实体属性模型构建。

2.2.3　行为演化模型构建

为了在虚拟空间中实现籽棉清理机的动态响应、状态演化及交互等动态表征,基于籽棉清理机基础物理行为,构建相应的行为演化模型,对每一个功能组件建立行为演化模型并根据其相应的动态行为表征阐述。模型的行为演化根据不同维度进行划分,包括物理行为 P_B、响应特性 R_H 和触发条件 T_C。其数学表达式为

$$BEM = \{P_B, R_H, T_C\} \tag{5}$$

基于籽棉清理机物理实体的动态行为表征,采用以上方式的建模方法构建行为演化模型,并借助实时采集数据完成数字孪生模型行为演化。数字孪生模型在虚拟空间中的行为演化本质上是其模型几何构型参数的数学变换过程。通过几何构型参数的状态迭代运算,实现模型行为动作变化。该过程涉及的模型迭代变化包括平移映射、缩放运算和旋转变换,其迭代变化基于线性代数与计算机图形学基础理论实现。

选择 Unity 构建数字孪生模型,Unity 实现模型的旋转有 2 种方法,分别为欧拉角旋转和四元数旋转。欧拉角旋转通过绕 3 个正交坐标轴(按 $Z \rightarrow X \rightarrow Y$ 规范顺序)的连续基元旋转角度,表征模型在虚拟空间中方位状态,其中各次旋转均作用于当前局部坐标系,表达式为

$$P_1 = \boldsymbol{R}P \tag{6}$$

其中

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_y \boldsymbol{R}_x \boldsymbol{R}_z \tag{7}$$

式中　$\boldsymbol{R}$——旋转矩阵

P——旋转之前某点位置,为(x, y, z)

P_1——旋转之后某点位置,为(x_1, y_1, z_1)

$\boldsymbol{R}_y$——绕 Y 轴旋转 θ_y 角度旋转矩阵

$\boldsymbol{R}_x$——绕 X 轴旋转 θ_x 角度旋转矩阵

$\boldsymbol{R}_z$——绕 Z 轴旋转 θ_z 角度旋转矩阵

其中,欧拉角旋转存在万向节锁,即因旋转轴重合而丢失自由度、导致旋转失控的现象。采用四元数则可有效规避。

四元数旋转提供了一种更稳定、更高效的方式处理三维模型旋转。四元数 q 定义为

$$q = (w, x, y, z) = \cos\frac{\theta}{2} + \left(u_x \sin\frac{\theta}{2}, u_y \sin\frac{\theta}{2}, u_z \sin\frac{\theta}{2}\right) \tag{8}$$

式中 θ——旋转角度

w——旋转角度一半的余弦值

$\boldsymbol{u}$——旋转轴单位向量，为(u_x, u_y, u_z)

旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 可通过四元数 q 转换得到，表达式为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} 1-2y^2-2z^2 & 2xy-2wz & 2xz+2wy \\ 2xy+2wz & 1-2x^2-2z^2 & 2yz-2wx \\ 2xz-2wy & 2yz+2wx & 1-2x^2-2y^2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

基于上述迭代变化的模型计算方式，可以实现模型在虚拟空间的基本运动变换。构建行为演化模型过程中，各组件的基础物理行为，如刺钉辊旋转、扁格条旋转、清理部倾角变换等多种基础物理行为，采用 C#语言编写的相关脚本实现。

2.2.4 边界约束模型构建

边界约束模型描述籽棉清理机各组件在工作过程的相关约束条件。这些相关约束条件不受其他条件的影响，在籽棉加工过程必须无条件执行。数学表达式为

$$BCM=\{S_C, D_C\} \tag{10}$$

其中

$$S_C=\{L_I, B_I, \cdots\} \tag{11}$$

$$D_C=\{D_I, R_I, C_I, \cdots\} \tag{12}$$

式中 S_C——静态约束 D_C——动态约束

L_I——位置信息 B_I——边界信息

D_I——位移信息 R_I——转动信息

C_I——碰撞信息

2.3 模型轻量化

数字孪生模型为使用三维建模软件所构建的几何结构模型，模型庞大、复杂，会消耗大量计算资源、计算机硬件负载过大、影响模型的实时渲染速度、加载模型速度缓慢、交互延迟等，所以应对建模后的几何结构模型进行模型轻量化处理。现有模型轻量化方法主要包括顶点聚类算法[23]、边坍缩算法[24]和自适应三角形优化技术[25]。为兼顾模型精度与计算效率，针对所构建的几何结构模型提出一种 QEM 边坍缩算法为主、顶点聚类和自适应三角形优化技术为辅的混合方法对数字孪生模型进行轻量化处理。在该方法中，模型轻量化处理分为 3 个主要阶段：模型粗简轻量化、模型深度轻量化和模型增强，如图 5 所示。

模型粗简轻量化阶段主要是通过顶点聚类算法，删除冗余顶点和边，重建三角面片连接，以此达到快速削减顶点数量，为后续模型深度轻量化阶段提供更轻量的模型输入。

模型深度轻量化阶段，对模型的网格顶点和边

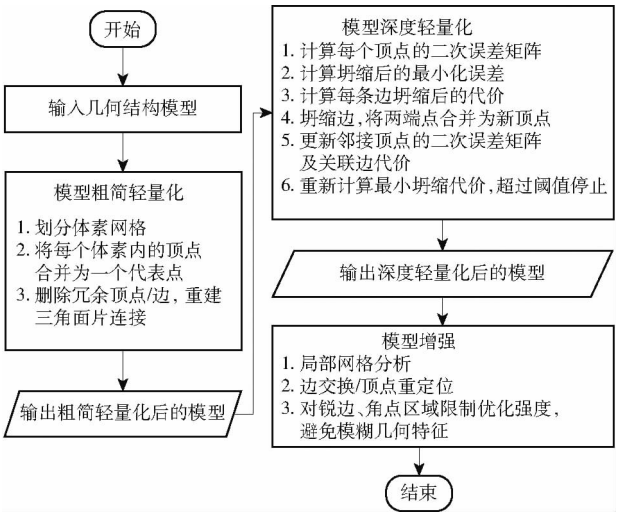


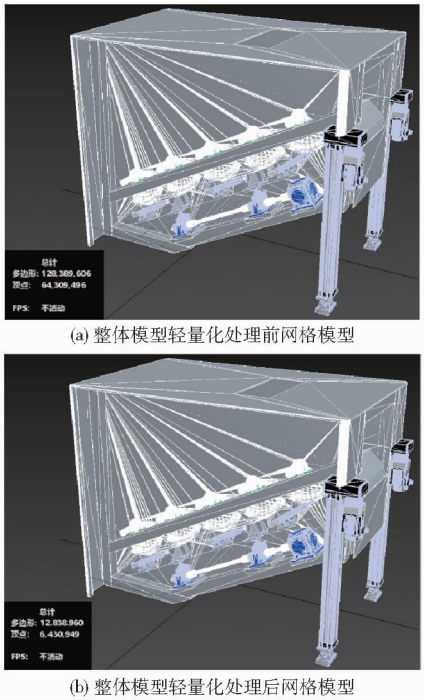
图 5 模型轻量化处理流程

Fig. 5 Model light weighting processing procedure

进行精细简化，结合 QEM 边坍缩算法进行处理，其算法原理是将原始模型不断地进行边坍缩，达到所需的简化度为止。

模型增强阶段主要是对经过 QEM 边坍缩算法后的模型对锐边、角点区域限制优化强度，避免模糊几何特征，消除畸形三角面，提升渲染稳定性。

图 6 为籽棉清理机模型轻量化处理结果。籽棉清理机模型轻量化处理前多边形面数为 128 389 606 个、顶点数为 64 309 496 个，处理后多边形面数为 12 838 960 个、顶点数为 6 430 949 个，多边形面数与顶点数均减小 90%，且模型无误，没有发生塌陷、断开、丢失等情况，达到减小模型复杂程度，提高模型高效运行和流畅的目的。



(a) 整体模型轻量化处理前网格模型

(b) 整体模型轻量化处理后网格模型

图 6 籽棉清理机模型轻量化

Fig. 6 Seed cotton cleaner model lightweight

3　籽棉清理机数字孪生实虚映射

为实现对籽棉清理机的实时监测，需建立物理实体层到虚拟实体层的交互映射。实虚映射的本质是使用物理实体的数据驱动数字孪生模型，实现行为同步、状态同步以及动作同步。

3.1　实虚映射方案

在实现实虚映射的过程中，当服务器端通过传输协议反序列化获取结构化设备数据后，依据设备唯一标识符(ID)实现数据分类，经消息队列推送至实时数据缓存模块完成时序对齐。缓存模块基于设备 ID 触发动态模型匹配机制，从实体-属性-值模型(简称 EVA 模型)中加载目标数据模板，然后，采用声明式解析策略执行特征提取，并进行时空关联持久化存储。数据持久化完成后，通过设备 ID 绑定与规则引擎实现状态分发，通过实时数据驱动模块驱动下游数据引擎更新虚实映射状态，最终构建闭环协同的实虚映射。

根据需求，不同零部件的 EAV 模型含有相同类型的组成部分。该模型采用标准化元数据结构，其核心构成包括零部件标识、零部件运行状态、零部件标签、零部件动作。以籽棉清理机中的刺钉辊零部件为例进行 EAV 模型构建，如图 7 所示。

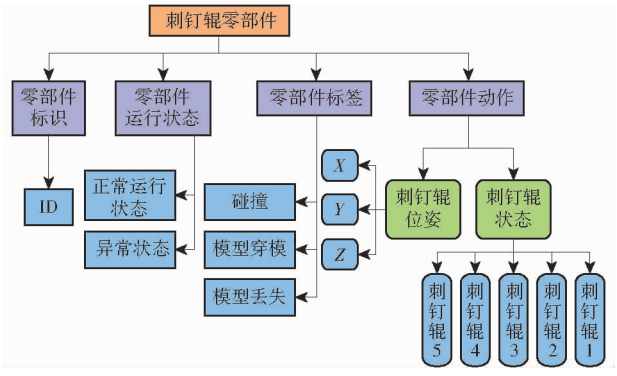


图 7　刺钉辊实体-属性-值模型

Fig. 7　Spiking roll entity - attribute - value model

3.2　数据采集与预处理

所采集数据可分为 2 类：①外部数据，是指原有籽棉清理机控制系统中不存在的数据，在籽棉清理机运行过程中无法直接获取，需外部设备进行采集。外部设备主要为传感器，采集籽棉清理机在运行过程的设备参数，例如清理部件倾斜角度等。②内部数据，是指原籽棉清理机控制系统中存在数据，在籽棉清理机运行过程可直接从控制系统中获取，例如控制刺钉辊的三相异步电机的启停等。

3.2.1　数据采集方式

为实现籽棉清理机物理设备状态数据实时传输至数字孪生监测系统，需采用不同方式采集多种不同类型数据，即多源异构数据需采用不同类型的数据采集方式，其中包括传感器网络采集、自动化设备采集等方式。图 8 为数据采集方案。

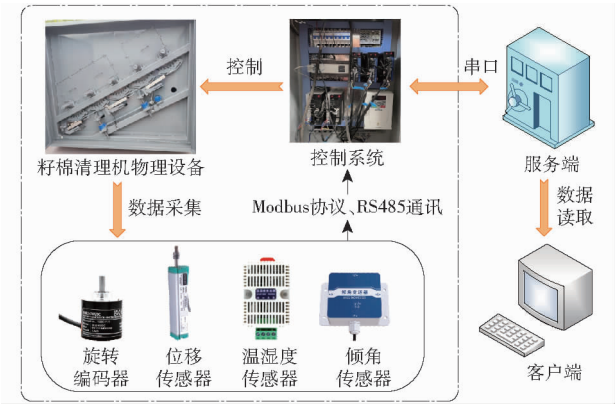


图 8　数据采集方案

Fig. 8　Data collection plan

由籽棉清理机运动可知，内部数据从控制系统直接获取，而控制系统的核心是 PLC，即所需数据从自动化设备 PLC 中获取即可；外部数据刺钉辊转速、格条与格条间间隙、清理部件倾角以及设备内部温湿度，分别由旋转编码器、位移传感器、倾角传感器、温湿度传感器采集，具体传感器安装位置如图 9 所示。

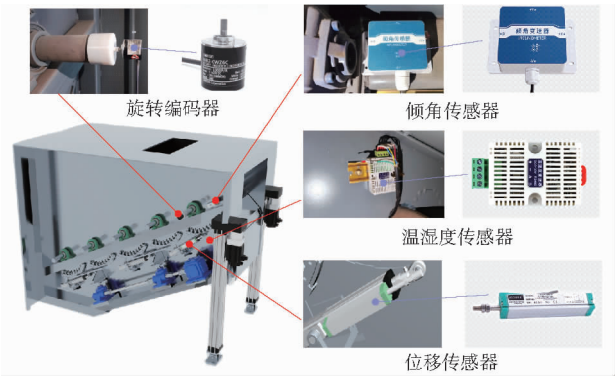


图 9　传感器安装位置分布

Fig. 9　Distribution of sensor installation locations

3.2.2　数据预处理方法

针对籽棉清理机在工作过程情况复杂多变、采集数据多样、硬件缺陷和数据传输不稳定等问题，通过研究籽棉清理机数字孪生实虚映射的不同数据预处理方法，对所采集数据进行预处理，完成籽棉清理机数字孪生模型对物理设备的动态映射。

(1)插值处理。在实时数据采集和传输的过程，数据丢失会对最终结果准确性产生负面影响，尤其是在实现籽棉清理机数字孪生实虚映射高精度数据的应用场合，图 10a 为传感器采集转速真实情况。为解决数据丢失问题，采用拉格朗日插值处理方法对初步通过传感器所采集转速、倾角、位移等数据进行预处理。以刺钉辊转速为例，对所采集的转速使

用拉格朗日插值法进行插值,结果如图 10b 所示。

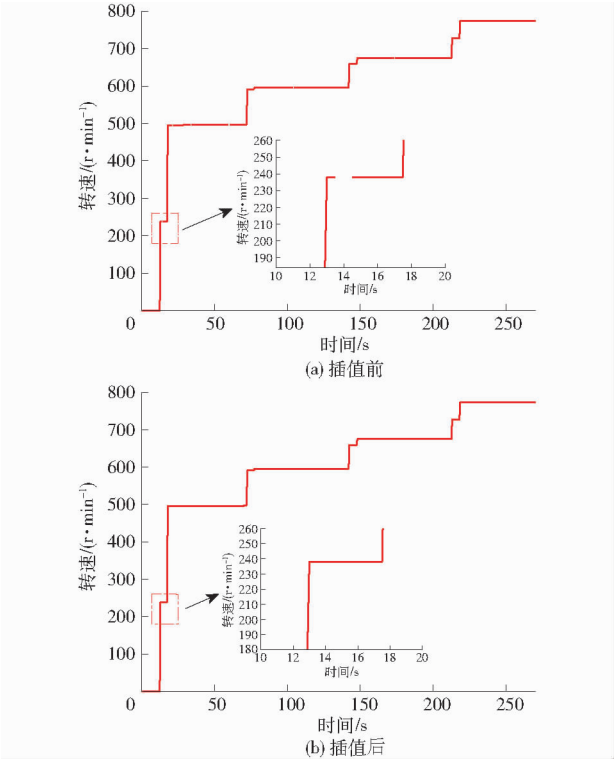


图 10 传感器采集转速变化曲线

Fig. 10 Sensor collected curve of rotational speed variation

(2)去噪处理。在数据采集过程,因为设备自身、环境、采集设备等不可避免因素,籽棉清理机在运行过程采集的数据往往会受到很大影响。为确保数据可靠性和准确性,同时考虑所采集的实时转速数据具有及时响应快速变化、有较明显趋势变化的特点,选择指数加权移动平均滤波(EWMA)对所采集的转速进行处理。指数加权移动平均滤波是一种递归滤波方法,适用于对采集后的数据给予不同权重,能更好地捕捉数据最新变化趋势。

以刺钉辊转速为例,对数据进行 EWMA 滤波,结果如图 11 所示。

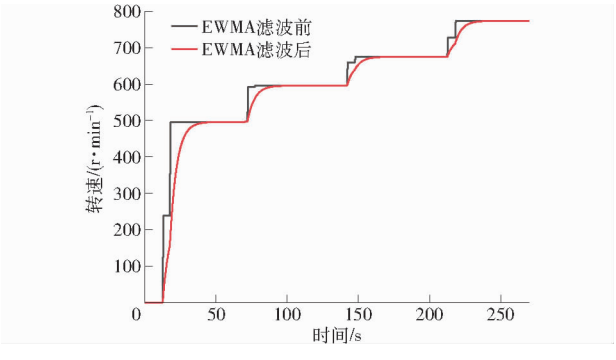


图 11 EWMA 去噪前后刺钉辊转速对比

Fig. 11 Comparison of rotational speed of nail roller before and after EWMA denoising

(3)时效处理。籽棉清理机数字孪生实虚映射涉及到一个动态且实时的过程,整个系统需对各个环节进行精确管理和控制。数据从生成、获取、采集到传输、存储以及最终驱动模型的每一个环节都必须保持高时效性,因此必须采用时效性处理方法对所采集的转速、倾角、位移等数据进行处理。在数据存储过程,对一个完整的数据处理分为数据编号、名称、数值、采集时间和数据品质 5 个部分,数据时效处理流程如图 12 所示。

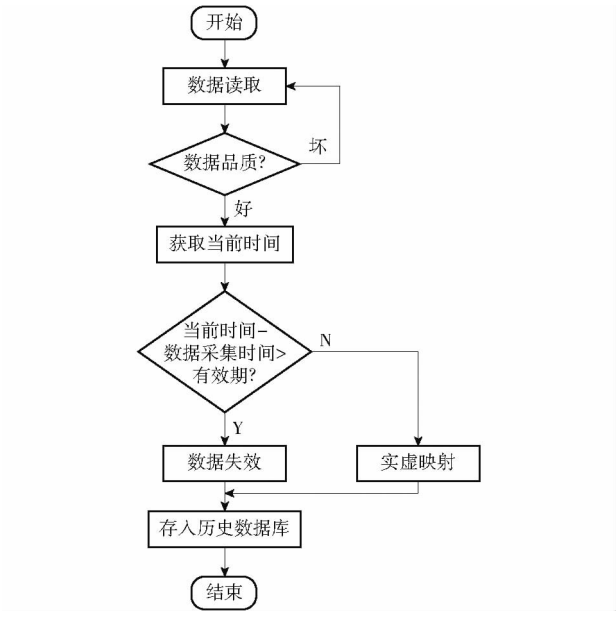


图 12 数据时效处理流程

Fig. 12 Data transmission process based on Modbus

3.3 数据传输

在籽棉清理机数字孪生实虚映射中,采用 Modbus 作为主要传输方式,Modbus 支持多种传输方式,适用不同应用场景。基于 Modbus 原理、数据传输方式和服务器,结合籽棉清理机数字孪生的虚实同步需求,设计的数据传输过程如图 13 所示,通过协议解析将数据进行封装和传输,实现对多源异构的数据管理和访问。

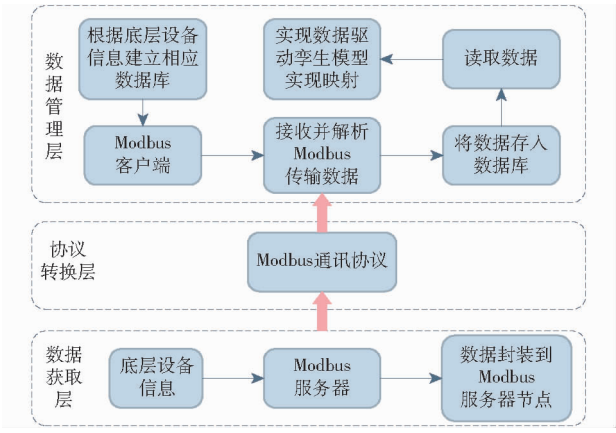


图 13 基于 Modbus 的数据传输过程

Fig. 13 Data transmission process based on Modbus

3.4 数据存储

为动态管理并持久化存储采集数据,需构建结

构化存储系统。MySQL 作为成熟的关系型数据库，其范式化多表架构在存取效率与结构灵活性上兼具优势。系统将设备运行状态和专家经验等数据定期存入对应表单，数据调用时通过 C#脚本向数据库发起请求即可实现实时访问。表 1 为刺钉辊实时运行数据。

表 1　刺钉辊实时运行数据

Tab. 1　Real-time operation data of nail roller

字段名称	字段类型	是否主键	是否允许为空	备注
id	int	是	否	编号
_CIRUNNAME	varchar	否	是	数据名称
_CIRUNVALUE	varchar	否	是	数值
_TIMESTAMP	int	否	是	采集时间
_QUALITY	int	否	是	数据品质

3.5　基于事件驱动的实虚映射机制

在基于事件驱动的实虚映射机制下为实现籽棉清理机物理设备和籽棉清理机数字孪生模型的动态耦合，需在几何结构模型基础上构建 3 层动态表征体系：集成运动学参数等本体特征的物理属性；物理设备实时姿态映射的行为演化；定义状态迁移条件、异常检测阈值等边界约束特征。将它们相互关联和集成，可表达为

$$VCM::=VG+VP+VB+VR \tag{13}$$

$$VP\leftrightarrow VB\leftrightarrow VR\mapsto VG \tag{14}$$

$$PCM\Rightarrow VCM \tag{15}$$

式中　VCM——虚拟模型籽棉清理机

PCM——物理设备籽棉清理机

VG——几何结构模型集合

VP——实体属性模型集合

VB——行为演化模型集合

VR——边界约束模型集合

$\mapsto$——VP、VB 和 VR 在 VG 中进行关联集成

$\Rightarrow$——VCM 和 PCM 之间映射

$\leftrightarrow$——不同模型之间相互连接

为实现籽棉清理机物理设备和籽棉清理机数字孪生模型的动态耦合，采用“条件-事件-行为”模式，通过事件驱动连接整个籽棉清理机工作流程。事件指在受监控实时工况的特定时间范围内，于特定时间点发生的、事实状态的显著变化。事件通过条件来触发，从而引发设定好的行为和操作，提高实虚映射的准确性和效率。实虚映射机制如图 14 所示。

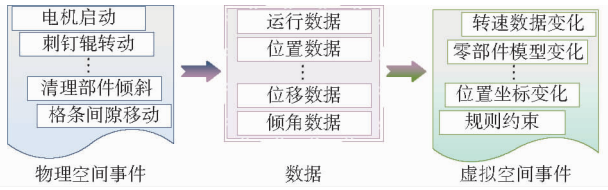


图 14　实虚映射机制

Fig. 14　Real virtual mapping mechanism

4　籽棉清理机数字孪生监测系统设计与实现

4.1　数字孪生监测系统设计

基于构建的籽棉清理机数字孪生模型及实虚映射机制，针对现有籽棉清理机设备状态不可视、故障预警被动化、运维策略粗放化等问题。设计并开发籽棉清理机数字孪生监测系统，实现对籽棉清理机物理设备实时姿态可视化、故障预警与提供工艺调整策略，系统功能如图 15 所示。

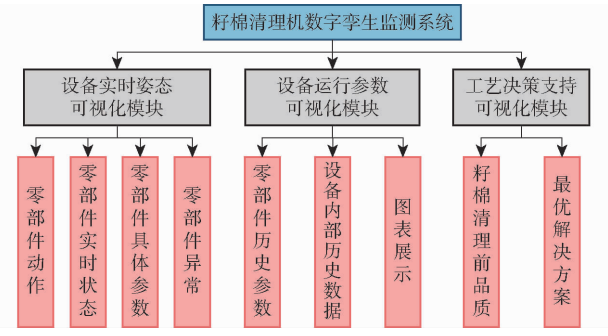


图 15　系统功能

Fig. 15　System function diagram

4.1.1　设备实时姿态可视化模块设计

设备实时姿态可视化模块涉及用户、数字孪生模型、关键零部件以及预警，其主要功能是实时显示从物理设备到数字孪生模型的实时映射、关键零部件实时状态可视化、关键零部件当前具体运行参数、专家数据显示以及零部件预警。将构建的籽棉清理机数字孪生模型嵌入该模块，其设计流程如图 16 所示。

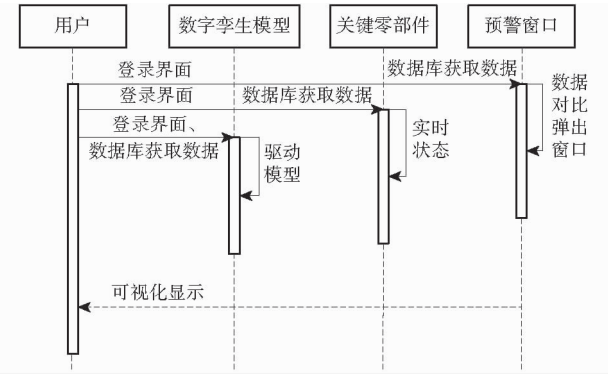


图 16　设备实时姿态可视化模块设计流程

Fig. 16　Device real-time attitude visualization module design flow

4.1.2　设备运行参数可视化模块设计

设备运行参数可视化模块主要作用是将历史运行数据分段，并以折线图形式显示，其设计流程如图 17 所示。

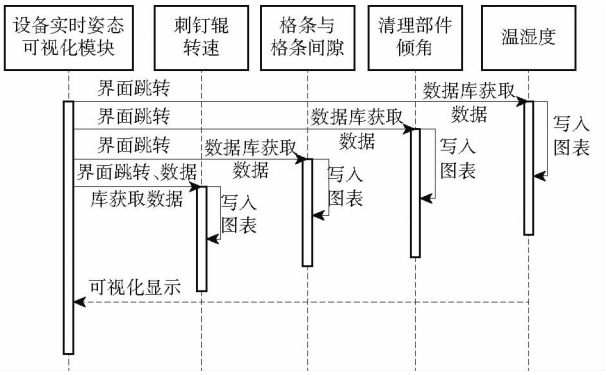


图 17 设备运行参数可视化模块设计流程

Fig. 17 Equipment operation parameters visual module design flow

4.1.3 工艺决策支持可视化模块设计

工艺决策支持可视化模块主要是根据籽棉清理前后品质的不同,提供籽棉清理机工艺决策支持,并将工艺决策进行实时可视化,设计流程如图 18 所示。

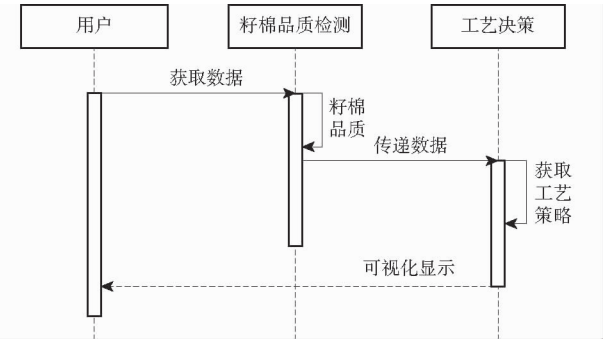


图 18 工艺决策可视化模块设计流程

Fig. 18 Process decision visual module design flow

4.2 数字孪生监测系统实现

4.2.1 监测系统实现

集成数字孪生监测系统,构建籽棉清理机数字孪生模型,基于 Unity 开发引擎平台中虚拟场景,建立服务器-客户端双向通讯,实现刺钉辊转速、格条间隙及清理部件倾角等关键参数的动态耦合。启动籽棉清理机物理设备,利用传感器、PLC 以及 KEPServerEX 6 工业自动化软件实现物理设备相关数据采集并向数字孪生监测系统的低时延传输。利用基于事件驱动的实虚映射机制完成实虚映射,集成后的数字孪生监测系统如图 19 所示。

4.2.2 设备实时姿态可视化实现

通过设计的设备实时姿态可视化模块,解决实际籽棉清理加工过程中,存在籽棉清理机设备状态不可视、设备运行参数不可观测、无法主动预警的问题,实现实时显示物理设备的实时姿态、关键零部件实时状态与具体运行参数、专家库数据以及零部件预警。

用户在使用系统时,可在设备启动后获得设备



图 19 数字孪生监测系统

Fig. 19 Digital twin monitoring system

实时运行状态,当设备出现异常时,弹出预警窗口,调整设备。该模块可视化界面如图 20 所示。



图 20 设备实时姿态可视化界面

Fig. 20 Real-time visual interface for equipment posture

以刺钉辊为例,实时采集刺钉辊转速数据,并不断与所建立的专家数据库中刺钉辊转速进行对比,由表 2 可知,前 11 组数据差距不大,而到第 12 组数据时,刺钉辊转速与专家数据库中刺钉辊转速差距过大,弹出预警窗口,如图 21 所示。

表 2 刺钉辊转速实际值与专家数据库中转速

Tab. 2 Actual value of spike roller speed and expert database spike roller speed data r/min

编号	转速实际值	专家数据库中转速
1	238.026	240
2	238.026	240
3	238.026	240
4	238.026	240
5	238.026	240
6	238.026	240
7	499.504	500
8	499.504	500
9	499.504	500
10	499.504	500
11	499.504	500
12	0	500
13	0	500
14	0	500
15	0	500

4.2.3 设备运行参数可视化实现

现有设备在实际籽棉清理加工过程中,当设备



图 21　系统预警窗口

Fig. 21　System warning window

出现问题时，无法通过实时和历史数据解决寻根问源的问题，通过设计的设备运行参数可视化模块，可实时显示籽棉清理机物理设备在实际工作过程产生的各种运行参数。

用户在使用系统时，设备启动后将历史运行数据以折线图形式呈现，当数据出现异常跳动，判断是否持续发生，若持续发生异常跳动，则用户需分析问题出现原因，并停止设备，当发现问题所在，调整设备重新启动。该模块可视化界面如图 22 所示。



图 22　设备运行参数可视化界面

Fig. 22　Visual interface for displaying equipment operation parameters

4.2.4　工艺决策支持可视化实现

现有籽棉清理设备在籽棉清理加工过程中，运行参数通常采用预设固定模式，即在设备非作业状态下完成参数设置。然而，采收的籽棉因品种、采收方式与采收地区等因素的综合影响，待处理籽棉物理特性与品质指标呈现显著动态变化特征。这种籽棉品质的非稳态特性与籽棉清理设备运行参数配置间存在适配性问题，若不适配，可能会导致过度清理引发的纤维损伤或清理不充分导致杂质残留，而二者均会对最终棉花质量等级产生负面影响。

依据设计的工艺决策支持可视化模块，在进行籽棉清理前，依托前一道工序集成的籽棉品质在线检测系统获取确定籽棉的关键品质参数，系统通过代码编写接口形式，实现数据互通，继而调用专家数据库中的籽棉品质，通过匹配当前籽棉品质与专家数据库中最佳加工运行参数的调整方案，生成适配的参数调整方案，并将该方案以可视化形式提供给用户，为用户获得工艺决策支持。

用户在使用该系统过程中，可在设备启动前获得最佳工艺参数，从而调整设备。该模块可视化界面如图 23 所示。

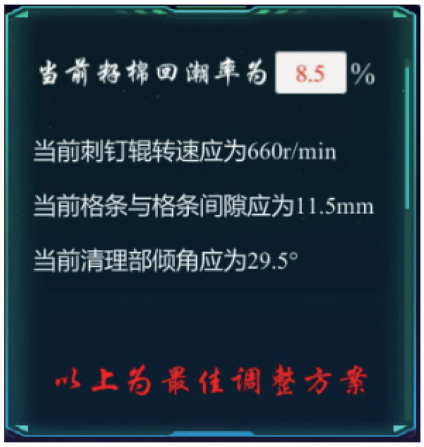


图 23　工艺决策支持可视化界面

Fig. 23　Visualization interface for process decision support

4.3　数字孪生监测系统性能评价

以数据丢包率、CPU 使用率、GPU 显存占用率以及 FPS 帧率稳定性作为评价指标，对监测系统进行量化评价。系统测试结果如表 3 所示，数据丢包率为 0，可以看出系统稳定性较高，且传输延迟较低，系统性验证了数字孪生监测系统的通信性能，可以满足系统需求。

表 3　数字孪生监测系统测试结果

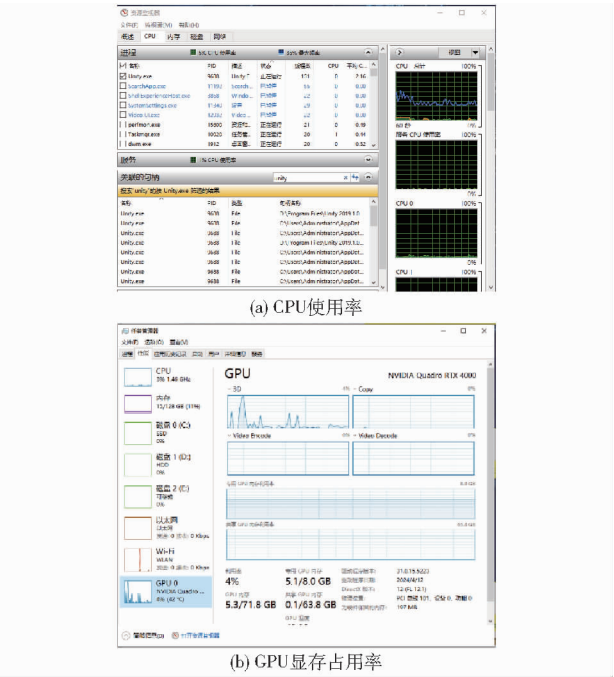
Tab. 3　Availability test of digital twin monitoring system

端口数	数据量	丢包率/%	传输延迟时间/ms
1	10	0	13
3	10	0	28
6	10	0	40
1	50	0	31
3	50	0	60
6	50	0	120

针对数字孪生监测系统的实时交互性能，通过 CPU 使用率、GPU 显存占用率、FPS 帧率稳定性等核心指标开展评价。当系统持续运行时，CPU 使用率与显存占用分配比例分别稳定控制在阈值范围内（CPU 使用率小于等于 60%，GPU 显存占用率小于等于 70%），可有效保障孪生模型的动态同步精度与可视化渲染流畅性。所用 PC 配置包括：CPU 为 Intel(R)Xeon(R)W-2133 CPU@3.60 GHz，GPU 为 NVIDIA Quadro RTX 4000，内存为 128 GB。

如图 24 所示的性能监测数据表明，基于 Unity 构建的籽棉清理机数字孪生监测系统在 PC 端运行期间，其硬件资源占用呈现显著优化特征：CPU 使用率稳定于 5%（峰值小于等于 10%），GPU 显存占用率维持在 4%（极值小于等于 20%），且 2 项指标

的数据维持稳定变化。监测结果验证了该数字孪生监测系统在轻量化架构设计与资源调度算法方面的有效性,为高并发工业场景下实时仿真提供了可靠技术支撑。



(a) CPU使用率

(b) GPU显存占用率

图 24 系统 PC 端的 CPU 使用率和 GPU 显存占用率变化

Fig. 24 Changes in CPU usage and GPU memory occupancy on system's PC end

系统通过多线程数据通道实时同步刺钉辊转速、清理部件倾角、格条与格条间间隙等关键参数,驱动数字孪生模型与实体设备的交互。基于此,设计 20 组控制变量仿真试验,实测结果如表 4 所示,结果表明:籽棉清理机数字孪生监测系统 PC 端软件运动仿真帧时均值为 20.416 ms,且在多源异构数据并发采集时,帧时波动率始终小于等于 3.5%。上述数据从时序一致性与计算稳定性 2 个维度验证了系统鲁棒性,满足工业级实时仿真对时序抖动(小于 25 ms)与资源分配均衡性的严苛要求。

5 结论

(1)针对籽棉清理机内部实时状态不可视的问题,从几何结构模型、实体属性模型、行为演化模型及边界约束模型 4 个维度出发,建立了高度集成、多维度联动的数字孪生模型,实现在虚拟空间中籽棉清理机内部状态可视。针对高精度模型带来的数据冗余与计算负荷问题,采用以 QEM 边坍缩算法为主,顶点聚类和自适应三角形优化技术为辅的混合优化方法对数字孪生模型进行轻量化处理,经试验验证:多边形面数与顶点数均减少约 90%,该处理在显著降低数据量和提升模型加载效率的同时,有效保留了关键几何特征,为籽棉清理机数字孪生系统实时仿真与高效运行提供了重要技术支持。

表 4 系统 PC 端软件运动仿真帧时

Tab. 4 Simulation frame time of system's PC end software for motion simulation ms

序号	帧时均值	序号	帧时均值
1	20.64	11	20.97
2	20.98	12	20.86
3	20.32	13	20.11
4	20.21	14	20.63
5	20.61	15	20.41
6	20.12	16	20.33
7	20.61	17	20.25
8	20.36	18	20.14
9	20.02	19	20.31
10	20.18	20	20.26

(2)为实现物理设备与籽棉清理机数字孪生模型间动态数据的实时同步,提出并实现了面向籽棉清理机的“行为-状态-动作”三维同步实虚映射架构,系统性地整合了从物理设备到孪生模型的全数据链路。提出基于事件驱动的实虚映射机制,建立物理设备与数字孪生模型间的数据链路。开发籽棉清理机数字孪生模型的实虚映射,从行为同步、状态同步及动作同步 3 个维度完成全要素映射,为设备实时监控与智能调控奠定了关键技术基础。

(3)开发了籽棉清理机数字孪生监测系统,并实现系统可视化与性能评价。构建了集设备实时姿态可视化和工艺决策支持等多功能于一体的模块化数字孪生监测系统,实现了从数据采集、处理到三维可视化与决策辅助的全链路集成。系统性能评价结果表明,系统数据丢包率为 0、CPU 使用率为 5%、GPU 显存占用率为 4% 以及运动仿真帧时均值为 20.416 ms,验证了系统稳定性、可靠性与鲁棒性。

参 考 文 献

[1] 刘平, 李亚博, 陈昊婷. 浅谈籽棉清理与双层籽棉清理机[J]. 中国棉花加工, 2019(1): 17-18.

[2] RAJABOV O I, ABROROV A S, MIRZAQULOVA N I, et al. An experimental study of the location of the grid bars cells installed under spiked cylinders in a cotton cleaner from small waste[C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.

[3] RAJABOV O I, KURBONOV F A, ABROROV A S, et al. Selection of the circumferential speed of the spiked cylinders of cotton cleaners-raw from small trash[C]// Journal of Physics: Conference Series, 2021.

[4] SHODIYEV Z, SHOMURODOV A, RAJABOV O. The results of the experimental nature of the vibrations of the grid cotton cleaner[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.
[5] HICKEY B, GACHON C, COSGROVE J. Digital twin—a tool for project management in manufacturing[J]. Procedia Computer Science, 2023, 217: 720 – 727.
[6] LATSOU C, ARIANSYAH D, SALOME L, et al. A unified framework for digital twin development in manufacturing[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 62: 102567.
[7] ZHAO Z, ZHANG Z, NIE Q, et al. Probing a point cloud based expeditious approach with deep learning for constructing digital twin models in shopfloor[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 62: 102748.
[8] ZHANG Y, ZHANG C, YAN J, et al. Rapid construction method of equipment model for discrete manufacturing digital twin workshop system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 75: 102309.
[9] SHAN B, HE Z, MA X, et al. Digital twinning, prediction and multi-objective optimization of an azeotrope system separation process in pharmaceutical manufacturing process[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2024, 203: 109898.
[10] 范春, 徐一涵. 基于数字孪生的防血栓康复训练与临床科研应用[J]. 上海信息化, 2024(1): 38 – 41.
[11] CHACÓN R, POSADA H, RAMONELL C, et al. Digital twinning of building construction processes. Case study: a reinforced concrete cast-in structure[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 84: 108522.
[12] 徐浩文, 刘焰萍, 刘盛伟, 等. 基于数字孪生技术的建筑业高质量发展困境探析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(1): 214 – 216.
[13] QIANG Z, LI X, NING Y, et al. Digital modeling-assisted mesoscale visualization lights up materials science from liquid-to solid-state batteries[J]. Energy Storage Materials, 2023, 63: 102960.
[14] 马若飞, 杜岳峰, 郭大方, 等. 农场数字孪生技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 257 – 277.
MA Ruofei, DU Yuefeng, GUO Dafang, et al. Development status and prospects of farm digital twin technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 257 – 277. (in Chinese)
[15] MOSER A, APPL C, BRUNING S, et al. Mechanistic mathematical models as a basis for digital twins[M]//Digital twins: tools and concepts for smart biomanufacturing. Cham: Springer International Publishing, 2020: 133 – 180.
[16] THOMAS B, SASCHA G, THOMAS A, et al. The concept of digital twin and digital shadow in manufacturing[J]. Procedia CIRP, 2021, 101: 81 – 84.
[17] WU Y, SUN J, YANG G, et al. Research on digital twin based temperature field monitoring system for LNG storage tanks[J]. Measurement, 2023, 215: 112864.
[18] LI J, WANG Z, ZHANG S, et al. Digital-twin virtual model real-time construction via spatio-temporal cascade reconstruction for full-field plastic deformation monitoring in metal tube bending manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2025, 91: 102860.
[19] YIN Y, MA B, MENG Z, et al. Construction method and case study of digital twin system for combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109395.
[20] GUO D, DU Y, WANG L, et al. Digital twin for monitoring threshing performance of combine harvesters[J]. Measurement, 2025, 239: 115411.
[21] 马博文, 刘孟楠, 尹彦鑫, 等. 联合收获机轻量级数字孪生系统构建方法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 108 – 120.
MA Bowen, LIU Mengnan, YIN Yanxin, et al. Construction method and application example of lightweight digital twin system of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 108 – 120. (in Chinese)
[22] 王明辉, 徐健, 周政东, 等. 基于数字孪生的温室作业底盘行驶状态在线监测方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 92 – 104.
WANG Minghui, XU Jian, ZHOU Zhengdong, et al. Online prediction method for greenhouse operation chassis driving status by digital twins-driven[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 92 – 104. (in Chinese)
[23] ROSSIGNAC J, BORREL P. Multi-resolution 3D approximations for rendering complex scenes[M]//Modeling in computer graphics: methods and applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993: 455 – 465.
[24] GARLAND M, HECKBERT P S. Surface simplification using quadric error metrics[C]//Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1997: 209 – 216.
[25] 郭大波, 卢朝阳, 焦卫东. 自适应图像三角化法的新改进[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2007,28(4): 360 – 365.
GUO Dabo, LU Zhaoyang, JIAO Weidong. New improvements of adaptive image triangulation technique[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2007,28(4): 360 – 365. (in Chinese)