

# 团 体 标 准

T/CAAMM xxxx—20xx

## 智能农机装备数字孪生系统

### 第 4 部分：应用指南

Digital twin system of intelligent agricultural machinery

part 4: Application guidelines

（报批公示稿）

202x-xx-xx 发布

202x-xx-xx 实施

中国农业机械工业协会 发 布



目 次

前言 .....II

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 术语和定义.....1

4 数字孪生应用场景.....2

附录 A：数字孪生驱动的联合收获机脱粒参数优化.....6

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国农业机械工业协会提出。

本文件由中国农业机械工业协会归口。

本文件起草单位：中国农业大学、北京农学院、洛阳智能农业装备研究院有限公司、北京市农林科学院智能装备技术研究中心、中国农业机械化科学研究院集团有限公司、洛阳拖拉机研究所有限公司、北京启维数字科技有限公司。

本文件主要起草人：杜岳峰、郭大方、宋正河、陈度、郭志强、黄胜操、尹彦鑫、周立明、陈凯康、王东青、高辽远、吴传鑫、栗晓宇、温昌凯、武秀恒、乔智、王林泽、吴志康、马若飞。

本文件为首次发布。

# 智能农机装备数字孪生系统 第 4 部分:应用指南

## 1 范围

本文件提供了智能农机装备数字孪生系统（以下简称“数字孪生系统”）在设计制造和运维管控等方面的应用场景。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期的对应版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 41723 自动化系统与集成 复杂产品数字孪生体系架构

GB/T 43441.1 信息技术 数字孪生 第 1 部分：通用要求

## 3 术语和定义

GB/T 43441.1-2023 和 GB/T 41723-2022 界定的术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**虚拟调试** virtual debugging

在农机装备投入使用之前，使用虚拟模型和仿真技术对其进行功能测试、性能调试和故障排查。

### 3.2

**寿命预测** life prediction

通过对农机装备运行数据、使用条件及历史记录的分析，预测设备或关键部件的剩余使用寿命，并指导维护决策，减少设备故障和停机时间。

### 3.3

**故障诊断** fault diagnosis

识别农机装备可能存在的故障或异常状况，定位故障原因，制定修复方案，减少维修成本和停机时间。

### 3.4

**运维管控** operation and maintenance management

通过实时数据采集、虚拟模型构建与分析、预测性维护等手段，提升农机装备的可靠性、生产效

率 and 安全性。

3.5

智能决策 intelligent decision-making

基于数据分析和模型推理，自动生成农机装备操作优化方案的过程。

4 数字孪生系统应用场景

4.1 应用场景概述

数字孪生系统解决智能农机装备全生命周期内的实际问题，主要分为两个方向：

- a) 设计制造方向包括但不限于：产品创新设计、制造过程管理、产品虚拟调试等；
- b) 运维管控方向包括但不限于：可视化监控、危险工况预警、安全操作培训、预测性维护、智能控制决策等。

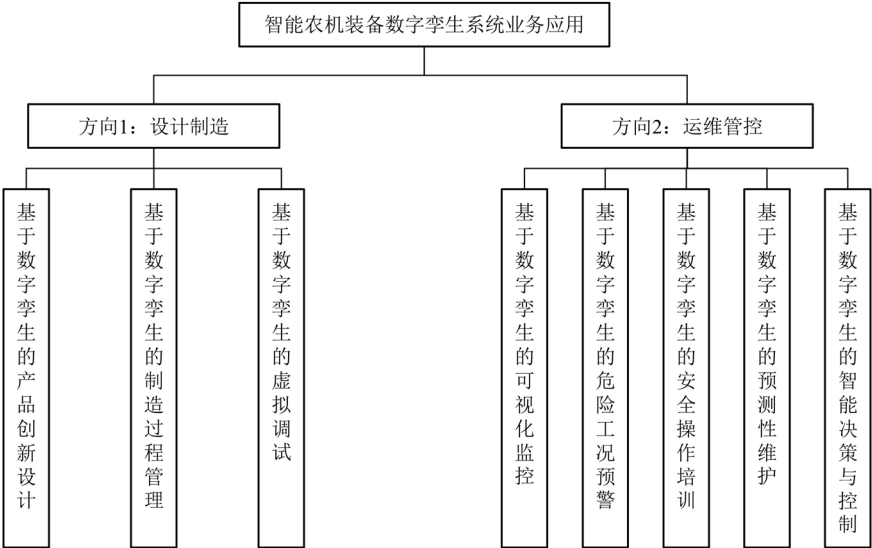


图1 智能农机装备数字孪生系统应用场景

4.2 设计制造方向

4.2.1 概述

数字孪生系统在设计制造阶段可提供持续、精准、高效的数据支撑与模型驱动。推荐的典型应用场景包括但不限于：

- c) 基于数字孪生的产品创新设计：利用数字孪生系统的虚拟模型和积累真实数据，为新品研发和功能迭代提供可靠参考依据，提升产品的农艺适配性、功能完备性与可靠性，实现“精准设计、一次成功”；
- d) 基于数字孪生的制造过程管理：通过数字孪生系统模拟智能农机装备的制造全过程，包括关键零部件加工路径、装配顺序和质量控制节点，实现从虚拟验证到实物制造的闭环优化，提高制造灵活性和精度；

- e) 基于数字孪生的虚拟调试：借助数字孪生搭建虚拟调试平台，实现整机及关键子系统的多物理场仿真与联调测试，满足设备在不同作业模式下的静、动态性能调试与虚拟验证。

#### 4.2.2 基于数字孪生的产品创新设计

面向农机装备多样化、地域化、季节性的作业需求，数字孪生支持实现智能农机装备的快速化和智能化设计，推荐路径包括但不限于：

- a) 基于数字孪生系统积累的田间真实作业数据，构建典型农艺场景库，通过数字孪生虚拟模型仿真，评估不同设计方案在具体环境下的作业表现，解决传统设计中“脱离农情”的问题；
- b) 对接数字孪生系统积累的全生命周期数据，包括作业负载、部件磨损、运行环境与维护记录，分析不同地区/作物/用户的应用特征，反向优化设备结构与控制策略，提高环境适应性和作业稳定性；
- c) 利用人工智能深度挖掘数字孪生系统中积累的大量历史设计数据和使用经验，能够提取设计模式和知识，辅助生成高性能设计方案，实现“知识驱动+数据驱动”的双轮创新；
- d) 结合自然语言处理（NLP）与图神经网络（GNN）技术，解析数字孪生系统中积累的用户反馈、维修报告、农艺作业日志等非结构化文本信息，构建设计需求知识图谱，实现从“用户语言”到“设计语言”的智能转换与优化；
- e) 构建多学科耦合的虚拟样机系统，开展系统级性能仿真与优化迭代，支撑复杂作业环境下的功能验证与设计评估，在不断的模拟迭代过程中设计更加高质量的新型产品，确保装备设计的科学性和可靠性。

#### 4.2.3 基于数字孪生的制造过程管理

农机装备制造面临多品种、小批量、工艺复杂、质量波动等问题，数字孪生系统在制造环节可实现全流程虚拟化与智能化管理，推荐途径包括但不限于：

- a) 在正式投产前，通过数字孪生构建虚拟生产线，模拟关键工艺，识别瓶颈工序与冲突逻辑，优化产线布局和工艺路径，提高工艺稳定性和制造效率；
- b) 实时采集 CNC、焊接机器人、装配工位等制造装备运行数据，对比农机装备数字孪生虚拟模型进行误差分析，实现在线偏差诊断与参数补偿，保障零部件加工一致性和装配精度；
- c) 通过虚拟模型对设备、人工、物料、场地等资源进行柔性建模，模拟多批次订单下的资源调度与工位排产，提升排产效率与产能利用率，适应农机季节性突发订单需求；
- d) 将制造过程中的质量检测数据与数字孪生系统关联，构建从零部件入厂、装配过程、整机出厂到用户交付的质量追踪链条，实现产品质量全过程可视化、可溯源；
- e) 持续积累制造过程中的工艺改进记录、调试经验和缺陷案例，构建面向农机制造的知识图谱，为后续设备改型、产线调整和新工艺开发提供知识支撑；
- f) 建立制造经验共享机制，将专家经验与生产数据沉淀于数字孪生系统，支撑多基地、多团队的工艺标准统一与跨区域制造协同。

#### 4.2.4 基于数字孪生的虚拟调试

针对农机装备作业复杂、调试周期长、试验成本高等问题，数字孪生系统可用于实现全面、精细的虚拟调试。推荐路径包括但不限于：

- a) 构建高保真的整机及关键系统（如动力系统、液压系统、作业装置、车载控制系统等）仿真模型，支持多场景下的作业行为虚拟测试，从而发现潜在的问题并提前解决；

- b) 结合虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术，构建沉浸式的调试环境，支持虚拟驾驶、远程诊断和交互测试。
- c) 实现“人-机-环境”协同调试，通过连接农机控制系统与虚拟模型，进行虚实结合的闭环测试，确保软件策略与传感器响应的一致性，提升整机调校效率；
- d) 支持典型故障情境（如液压过载、GPS 信号丢失、传感器漂移等）的仿真与诊断验证，结合故障树分析（FTA）和模式识别技术，实现早期故障预判与维护策略优化。

#### 4.3 运维管控方向

##### 4.3.1 概述

数字孪生系统可实现装备状态的透明化、运维策略的智能化和服务方式的远程化，推荐的典型应用场景包括但不限于：

- a) 基于数字孪生的可视化监控：通过采集农机装备的作业数据，并与其虚拟模型实时映射，系统支持通过三维模型可视化方式呈现整机或关键子系统的运行状态，实现对设备作业过程的全面感知与精准监控；
- b) 基于数字孪生的危险工况预警：通过实时分析数字孪生系统掌握的关键参数，识别危险工况，实现危险趋势的早期预警与作业风险提示；
- c) 基于数字孪生的安全操作培训：利用数字孪生虚拟模型构建交互式培训平台，实现新手操作手的技能训练与风险感知教育，支持远程化、多场景化教学与考核；
- d) 基于数字孪生的预测性维护：结合实时采集数据与历史运行数据，构建关键部件的寿命衰减模型，实现剩余使用寿命预测和故障预警，同时支持故障复现、故障推理与维护建议生成，提升故障响应效率，降低维保成本，延长设备可用周期。
- e) 基于数字孪生的智能决策与控制：融合作业地形、土壤状态、作物类型和作业任务等信息，动态更新虚拟模型。通过虚拟模型仿真实现评估，对智能农机作业参数进行优化推荐，增强农机对复杂地块与非结构化环境的适应能力。

##### 4.3.2 基于数字孪生的可视化监控

数字孪生系统提供对智能农机装备的实时状态监控功能，能够提高设备的整体管理效率，提升农业生产的智能化水平，推荐的应用场景包括但不限于：

- a) 将采集到的设备运行参数实时映射到虚拟模型，实现整机、部件、作业状态的分层次可视化，便于农场管理人员、运维人员或远程监控中心快速掌握设备运行动态；
- b) 借助 AR/VR 技术，融合虚拟农机模型与现实场景，在实景农田或控制中心中，通过移动终端或穿戴设备实时观察设备运行状态、检测热点区域与风险区域，支持多维度信息融合感知。

##### 4.3.3 基于数字孪生的危险工况预警

农机作业常发生于山地、丘陵、低洼等复杂环境，面临翻车、沉陷、失控等风险。数字孪生可模拟并识别危险工况，进行主动预警与应急响应，推荐的应用场景包括但不限于：

- a) 利用虚拟模型仿真农机装备在作业工况下的响应行为，如模拟斜坡作业时的侧倾风险、湿地作业的陷车可能性，预测设备即将进入的危险状态；
- b) 基于实时监测数据（如横倾角、加速度、油压波动等），结合历史数据训练危险模式识别模型，实现如“翻覆预警”“打滑告警”“负载过载告警”等多维预警输出；



- c) 通过虚拟现实技术，将数字孪生系统中的工况仿真结果以可视化形式展现，操作人员可以通过直观的方式了解设备的当前状态和潜在风险；
- d) 根据预警信息，数字孪生系统可以与农机的控制系统联动，自动生成应急响应预案，自动调节设备运行参数，以避免危险工况的发生，确保设备安全运行；
- e) 基于数字孪生系统积累的数据，建立危险工况案例库，基于每一次报警、处置过程、结果进行归档分析，形成自学习机制，不断优化算法与响应策略。

#### 4.3.4 基于数字孪生的安全操作培训

农机装备操作与维护对人员技能要求高，传统培训手段周期长、效率低。数字孪生可提供高度还原的仿真操作场景，支撑精准培训和高效评估，推荐的应用场景包括但不限于：

- a) 构建从装备启动、作业设定、作业执行到异常应对的完整操作流程模拟，支持人员在“虚拟地块”中反复练习，熟悉不同作物、不同工艺条件下的操作要求；
- b) 对学员操作行为进行数据采集与智能评估，输出包括任务完成时间、油耗控制、作业精度、操作错误次数等关键指标，生成个性化培训报告；
- c) 模拟各类故障场景（如启动失败、液压异常、通信中断等），锻炼学员的应急处置能力，提升实际作业时的应变能力与安全水平；
- d) 构建多机协同作业仿真环境，开展多角色、多设备协同培训（如拖拉机与播种机配合等），提升团队协同能力；
- e) 建立培训闭环管理系统，系统自动归集培训数据、考试结果与培训反馈，为技能晋级、持证上岗、绩效考核提供数据支持。

#### 4.3.5 基于数字孪生的预测性维护

智能农机装备在高强度、多场景的作业过程中，易出现关键部件疲劳损耗、系统突发性故障等问题。传统“事后维修”或“定期保养”方式存在维护成本高、效率低、资源浪费等弊端。通过引入数字孪生系统构建的预测性维护机制，可在设备发生故障前实现风险预判与主动干预，提升农机可靠性与作业连续性。推荐的应用场景包括但不限于：

- a) 基于农机装备的虚拟模型，结合实际运行工况（如振动、温度、负载波动、运行时长等）进行仿真模拟，监测关键零部件在不同工况下的性能变化趋势，识别早期异常征兆，实现维护前置；
- b) 利用数字孪生系统积累的历史运行数据，构建面向变速箱、液压泵、作业机构等典型高故障部件的寿命衰减模型，结合当前使用状态进行剩余使用寿命（RUL）预测，制定精准的维护计划；
- c) 通过引入机器学习、神经网络等智能算法，对传感器数据流进行特征提取与模式识别，实现故障趋势建模与预测报警；
- d) 结合预测模型与实际作业计划，动态生成最优的维保时间窗和工单安排，避免高强度作业期间出现突发性停机，同时降低运维成本与人力压力；
- e) 构建预测性维护知识库，沉淀典型设备、典型工况下的维护经验和应对策略，为运维决策提供知识支撑，支持边缘端快速部署与远程专家系统联动。

#### 4.3.6 基于数字孪生的智能决策与控制

智能农机装备面对的作业环境具有非结构化、时变性强等特点。通过数字孪生系统融合虚拟模型

与作业对象数据、作业环境数据与装备状态数据，可实现智能策略生成和实时控制优化，解决系统适应能力不足的问题，推荐的应用场景包括但不限于：

- a) 数字孪生系统实时采集农机作业各项数据，结合作业区域历史信息与农艺要求，识别当前作业情景，并生成最优的作业决策建议；
- b) 利用数字孪生虚拟模型，模拟智能农机在不同作业条件、作物类型下的响应行为，采用智能优化算法推荐最优参数组合；
- c) 建立“预测-执行-反馈”的闭环调控机制，将实测作业效果与预测仿真结果进行对比分析，系统自动修正控制策略，实现作业速度、滑转率、耗油量等关键性能指标的实时优化与稳定输出。

## 附录 A：数字孪生驱动的大型联合收获机脱粒参数自适应调控应用范例

本附录基于典型玉米收获场景，介绍一种以数字孪生驱动的大型联合收获机脱粒参数自适应调控系统的设计、实施与验证过程。该案例系统性展示了数字孪生技术在智能农机装备中的工程化落地路径，体现“感知—决策—控制”全链路闭环优化能力，具有良好的示范效应和推广价值。

### A.1 应用背景与问题挑战

大型联合收获机是保障粮食收获效率与质量的重要装备。在玉米机械化收获中，籽粒破碎是主要粮食损失来源，而机械脱粒则是造成破碎的关键环节。随着机械设计制造水平的提升，通过改进机械结构提升作业性能的方式正面临边际效益下降，发展自主调控技术成为降低籽粒破碎损失的主要途径。然而，传统脱粒调控方法存在以下不足：

- a) 感知维度单一：无法有效预测脱粒状态变化；
- b) 参数决策适应性差：基于人工经验或静态规则，适应性差；
- c) 执行控制稳定性差：面对工况波动时控制鲁棒性不足。

随着装备复杂性上升、作业场景多变，对系统动态适应能力提出更高要求。数字孪生以虚实融合为基础，具备高保真映射、实时协同与智能优化能力，成为提升脱粒系统性能、减少粮食机收损失的关键技术路径。

### A.2 系统设计与技术架构

以系统工程方法为指导，围绕大型联合收获机低损脱粒调控任务，将系统功能解耦为“感知—决策—控制”三个核心环节，结合虚拟建模、数据融合技术，基于各环节特性分别构建虚拟模型，再集成为一个完整的数字孪生虚拟模型，最终利用数字孪生虚拟模型实现系统的闭环自适应优化控制。总体架构如图 A-1 所示，主要包括以下五个关键要素：

- a) 物理实体：指联合收获机脱粒系统本体及其所处的作业环境，包括滚筒、凹板、驱动系统、控制执行机构，以及用于实时采集喂入量、籽粒破碎率、滚筒负载等作业状态参数的专用传感器等；
- b) 虚拟模型：面向可视化构建三维几何虚拟模型，面向“感知—决策—控制”三个环节分别构建动态感知虚拟模型、智能决策虚拟模型和优化控制虚拟模型。各模型具备动态更新与在线预测能力，支持脱粒过程的虚实同步与行为演化；
- c) 数据与连接：建立物理实体与虚拟模型之间的双向通信机制，通过 CAN 总线、边缘计算和物联网通信，实现作业数据的实时采集、传输、解析与反馈支撑；
- d) 支持服务：提供系统运行的核心支撑能力，包括数据服务、模型服务、系统服务等，保障系统高效协同与稳定运行；
- e) 业务应用：面向实际收获场景，构建涵盖脱粒性能监测、脱粒参数在线优化、速度自适应控制等功能的应用模块，实现对籽粒破碎率与作业速度等关键性能指标的动态优化与调控。

系统以“动态感知—智能决策—优化控制”为运行机制，通过多源数据融合与模型推演，实现对作业状态的动态感知、对最优参数的快速寻优以及对控制行为的自适应调整，从而提升脱粒作业效率、降低籽粒破碎损失，构建智能化、精细化的收获作业模式。



图A-1 面向脱粒的大型联合收获机数字孪生系统框架

A. 3 关键技术与方法路径

A. 3.1 物理实体开发

以某型号大型玉米联合收获机为基础，针对脱粒参数自适应调控的应用需求，进行了系统性物理改装与功能扩展，如图 A-2 所示，具体工作如下：

a) 设备改装与控制能力增强

完成对收获机关键结构单元的电控化改造，实现包括脱粒滚筒转速、凹板间隙、作业速度在内的作业参数可电控调节，为后续模型预测与控制指令执行提供物理接口支撑。同时，优化液压与电控系统的信号传输与执行路径，确保控制精度与响应速度。

b) 关键感知模块集成

围绕脱粒性能、作业效率和负载响应三类指标，设计并安装了多种专用传感装置与关键状态感知部件，构建了作业场状态多维感知体系：

- 籽粒破碎检测装置：基于 YOLO v8n 深度学习算法与 Jetson TX2 边缘计算平台，实现籽粒破碎率的图像识别与自动计算，准确率高达 95.33%，部署于末级谷物升运器出口处；
- 瞬时产量检测装置：基于双单元冲击式检测机构与应变电桥结构，实现玉米瞬时流量测定，精度达 96.24%，用于反映作物分布与收获密度；
- 动态载荷检测模块：在割台输入轴和脱粒滚筒动力链路上分别安装应变片和定制转矩传感器，实时感知作业阻力与运行负载，精度优于满量程的 2%；
- 凹板间隙与速度测量：接入高精度线位移传感器与车轮/滚筒转速传感器，配合 RTK-GNSS 实现作业速度和控制目标的多源定位与对比校验。

c) 传感器网络构建

基于 CAN 总线构建稳定的机载传感器网络，实现整机关键作业参数（如发动机转速、车速、脱粒转速、凹板间隙等）的实时感知与统一采集。专用信号转换模块对模拟信号（如冲击载荷、应变响应等）进行数字化处理并写入总线，实现物理数据的结构化输出。



图A-2 大型玉米联合收获机物理实体开发

A. 3. 2 数字孪生体开发

a) 三维几何虚拟模型开发

构建联合收获机脱粒装置的三维几何虚拟模型，如图 A-3 所示，核心开发内容包括：

- 基于整机 CAD 图纸，复刻整理外观，以及包括喂入通道、脱粒滚筒、凹板结构、风筛系统等在内的关键作业部件；
- 在 Unity3D 中完成整体部件的几何拼装，支持后续仿真与数据可视化展示。



图A-3 三维几何虚拟模型开发

b) 动态感知虚拟模型开发

针对田间作业中脱粒状态动态变化难以准确感知的问题，开发具备预测与推演能力的动态感知虚拟模型，核心开发内容包括：

- 脱粒动力学仿真建模：基于离散元法（DEM）建立作物与脱粒元件相互作用模型；
- 代理建模：引入高斯过程回归（GPR）方法构建 DEM 动力学响应等关键变量的预测模型；
- 数据-机理融合的时序预测模型：基于门控循环单元（GRU）与卷积神经网络（CNN）融合架构，实现物理传感数据与 DEM 模型计算结果的融合，预测破碎率随工况变化的演化趋势。

c) 智能决策虚拟模型开发

针对脱粒参数调节决策依赖人工经验、缺乏全局最优性的问题，开发用于参数优化的智能决策孪生体，核心开发内容包括：

- 问题建模：将滚筒转速、凹板间隙、喂入速度等作业参数决策问题转化为多模态、连续型在

线优化问题；

- 脱粒行为建模：基于历史与实时作业数据构建作业参数与效果之间的非线性关系模型；
- 模型更新：基于在线采集的数据增量学习。

d) 优化控制虚拟模型开发

为解决作业速度与执行精度控制鲁棒性差的问题，构建支持软土环境识别与控制策略自适应更新的控制孪生模型，核心开发内容包括：

- 控制对象建模：基于机理构建联合收获机行驶动力学与轮土互作响应行为模型；
- 在线辨识机制：采用神经网络识别软土类型，结合粒子群优化算法实现参数在线修正。

A.3.3 数据与连接的开发

为实现联合收获机在实际作业中的感知—决策—控制闭环与物理系统与虚拟系统之间的双向数据同步，本系统构建了由联合收获机、边缘终端、雾服务器、云平台组成的“端—边—雾—云”分层协同架构。数据与连接部分的具体开发流程与关键实现方式如下：

a) 架构概览

本案例系统的数据交互体系遵循如表 A-所示的分层架构设计：

表A-1 数据交互架构设计

层级	功能定位	主要作用
端（装备层）	联合收获机+传感器+控制器	负责原始数据采集和控制指令执行
边（边缘终端）	ARM 工控机+本地显示+算法模块	负责本地数据预处理、可视化、短周期控制
雾（雾服务器）	高性能工作站+实时算法+数据缓存	运行数字孪生体、决策算法、提供即时服务
云（云服务器）	云平台+模型库+远程管理接口	提供模型训练、历史分析、版本管理等能力

b) 边缘终端开发

针对联合收获机传统数据通信模块（如 DTU）处理能力不足的问题，研发了一款基于 ARM Cortex-A9 工控机的移动边缘终端，如图 A-4 所示，关键开发特性包括：

- 数据协议解析能力：支持 CAN 总线、RS-232/485 等工业协议的报文解析，将其转换为结构化 JSON 格式数据；
- 数据清洗与预处理能力：内嵌缺失值填补、滤波与异常剔除算法，确保数据质量；
- 断网续传机制：在信号弱区支持本地缓存，网络恢复后自动补传；
- 双向数据适配：支持从服务器获取作业指令并转换为可执行的总线报文；
- 人机交互界面：本地触控显示屏以图形界面方式向操作人员展示速度、转速、籽粒破碎率等关键指标。
- 部署位置示例：工控主机安装于驾驶室后方，显示器置于仪表台，便于驾驶员操作与监控。





图 A-4 边缘终端

c) 雾服务器开发

为满足数字孪生体动态仿真与实时决策需求，系统在农场侧的机房中配备雾服务器，承担边缘与云之间的中继与计算核心角色。开发重点包括：

- 高速通信接口设计：采用 4G/5G 网络连接边缘设备，利用 Socket 服务构建低时延通道；
- 数据库服务集成：构建 MySQL+Redis 双数据库架构，兼顾数据持久化与高速访问；
- 运行虚拟模型和业务应用：部署脱粒过程感知预测模型、作业参数优化模型及作业速度控制模型；
- 可视化管理界面：提供用户登录、设备管理、数据查询、报警推送等模块，如图 A-5 所示。

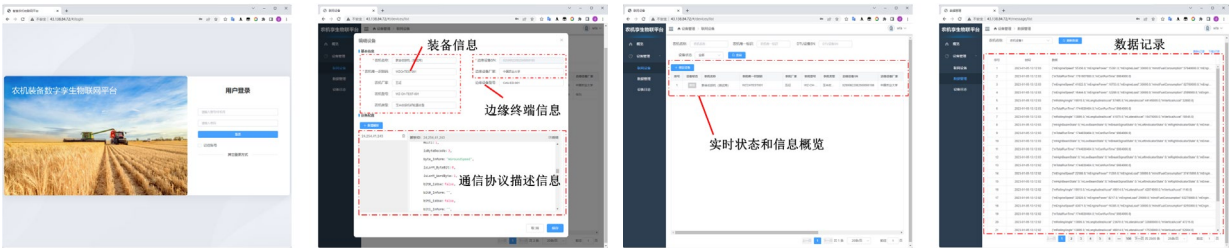


图 A-5 雾服务器 Web 用户界面

d) 云服务器开发

为支持系统持续优化与智能化演进，部署云服务器用于模型迭代和系统配置管理。核心功能包括：

- 模型算法迭代服务：利用作业历史数据重训练感知、优化、控制模型，实现“云→雾”模型下发；
- 系统设备统一管理平台：Web 界面支持对接入设备的远程监管、配置下发和状态监控；
- 用户操作日志与权限控制系统：实现分级访问和操作审计；
- 可扩展计算资源：具备高性能 GPU，支持大规模离线仿真与深度学习训练。

A. 3. 4 支持服务开发

本系统构建了集数据处理、模型服务、控制执行与系统管理于一体的支持服务体系，核心开发内容包括：

a) 数据服务

数据服务模块负责数据从采集到入库全过程的预处理、融合与调度，是实现高质量建模与实时推理的基础保障。主要功能包括：

- 数据接入与格式统一：将来自 CAN 总线、RS232/485、4G 网络等多源通道的数据，统一解析为结构化数据格式（如 JSON），便于后续处理；

- 实时处理算法集成：边缘终端内置缺失值填补、噪声滤波等算法，有效提升数据稳定性和可用性；
- 断网续传与本地缓存：具备短时网络中断情况下的数据本地保存和自动补传机制，保障数据完整性；
- 异构数据库管理：采用 MySQL（持久化存储）+Redis（缓存服务）双引擎架构，既满足高频低延迟调用需求，也支持历史数据的分析与回溯。

#### b) 模型服务

模型服务是实现“以虚映实—以虚优实—以虚控实”的关键环节，支撑数字孪生体的生命周期管理和智能能力落地。功能包括：

- 孪生模型运行与推理：在雾服务器中实时加载感知、决策、控制等核心子模型，驱动数字孪生体虚拟演化；
- 模型调度与版本更新：通过统一接口管理模型版本迭代与部署，实现从云端模型库向雾端本地模型的热替换；
- 模型训练与持续优化：依托云端高性能服务器，整合历史数据进行模型重训练与验证，完成新模型上线；
- 在线推理支持：通过本地轻量级部署方式，实现毫秒级模型调用响应，适应现场作业的实时性需求。

#### c) 系统管理与用户接口服务

- 面向多设备协同与远程监管场景，系统开发了统一的管理平台与用户交互界面：
- Web 可视化平台：提供状态监控、设备接入、作业评价、模型管理等操作界面；
- 用户权限与分级管理：支持不同权限用户访问不同功能模块，提升系统安全性；
- 远程维护与升级支持：通过远程访问实现边缘终端和雾服务器的软件更新与配置下发；
- 接口开放能力：预留标准化 API 接口，可与第三方系统或上位调度平台对接，增强系统集成能力。

### A.3.5 业务应用开发

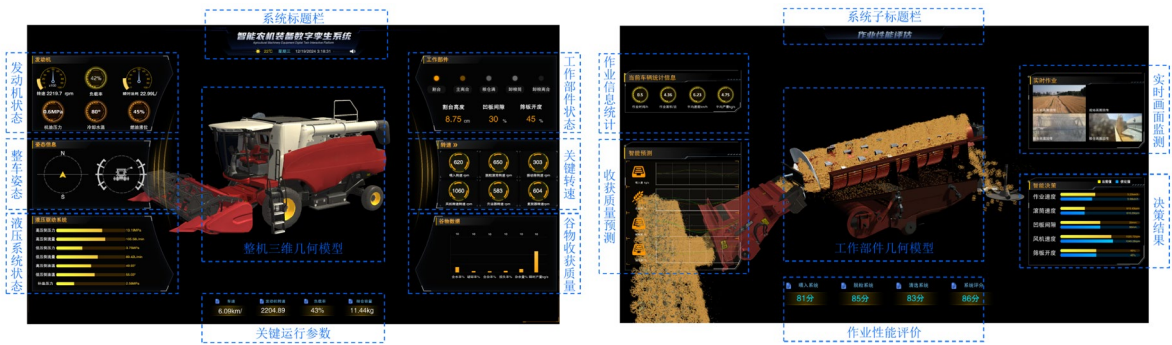
#### a) 基于数字孪生的联合收获机作业状态可视化监测

功能定位：基于 Unity3D 构建响应式界面，后端通过 Socket 与数据库实现数据实时推送。提升作业可视性，辅助操作决策。

本系统可视化平台分为两类主要页面，如图 A-6 所示：

- 实时状态监测页面：展示联合收获机各关键部件（如发动机、液压系统、姿态、脱粒装置等）及作业质量（如产量、籽粒破碎率等）的实时数据，刷新频率为 1Hz，确保驾驶员能够准确掌握设备当前运行状态。
- 作业性能评估页面：汇总作业过程中的统计信息，结合数据分析模型输出性能评分、关键指标预测值及作业参数推荐值，辅助驾驶员进行作业策略调整。





图A-6 基于数字孪生的联合收获机作业状态可视化监测

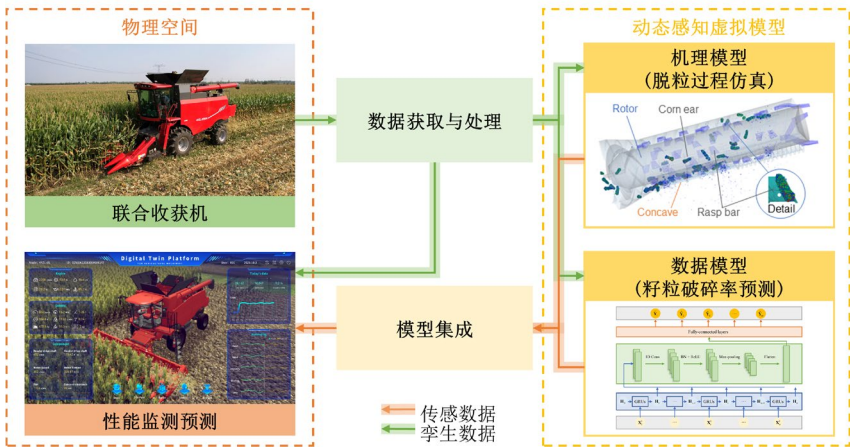
b) 基于数字孪生的脱粒性能动态感知推理

基于数字孪生的动态感知推理方法如下：

- 首先，获取来自大型联合收获机的传感数据，经过预处理后被作为动态感知虚拟模型的输入。
- 然后，动态感知虚拟模型开展实时仿真计算。
- 最后，来自作业现场的传感数据和动态感知虚拟模型仿真得到的数据共同用于辅助监测、预测和改善脱粒性能。

数据驱动的动态感知虚拟模型是整个方法的核心，从机理和数据两个方面被构建。

- 一方面，从理论角度建立了“机械-作物”相互作用模型。在传感器数据驱动下，这些模型进行实时仿真，生成包含更多细节的仿真结果，类似于软传感器。
- 另一方面，采用深度神经网络来揭示数据中的深层次模式，并建立数据模型用于预测未来的谷物破碎率。模型集成方法使得两个模型能够根据特定场景的需求协同工作。
- 总的来说，通过机理模型模拟脱粒过程来丰富信息的维度，通过数据模型预测未来趋势以拓展信息的尺度，二者的结合将促进直接数据的综合利用，从有限现场数据中提取更多的信息。



图A-7 基于数字孪生的脱粒性能动态感知推理

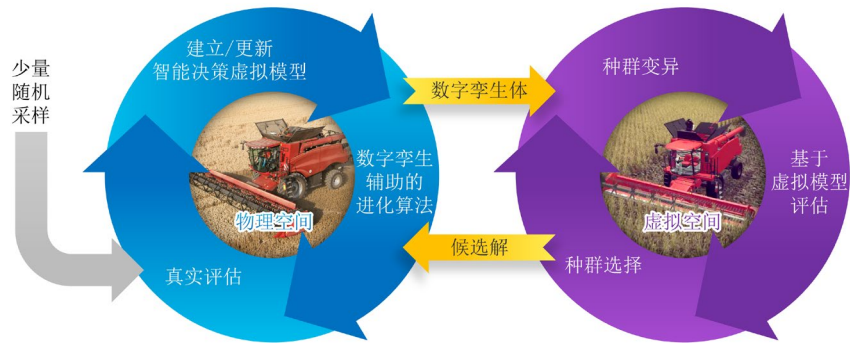
c) 基于数字孪生的脱粒参数在线优化决策

实现了数字孪生辅助的在线优化方法，旨在为大型联合收获机这类具有众多可调节参数的农业机械搜索到最佳设置。如图 A-8 所示，主要包括两个环节：

- 在第一个环节发生在物理空间中，根据来自现场的真实数据快速建立和更新智能决策虚拟模型。智能决策虚拟模型通过近似可调节参数与作业效果间的关系来模拟农机的作业行为。
- 在第二个环节在虚拟空间中进行，智能决策虚拟模型代替真实农机参与可调节参数的进化优

化，称之为数字孪生辅助的进化算法。

在进化优化中，智能决策虚拟模型充当进化计算中的适应度评估函数以支持种群的变异、评估和选择等进化操作。由于智能决策虚拟模型的引入，所以进化计算仅发生在虚拟空间中。进化计算对搜索种群的任何操作都不会对物理空间产生影响，有利于大量的尝试和评估。因此，智能决策虚拟模型被期望于引导搜索方向来提高进化计算的搜索效能，同时减少随机性真实评估可能带来的成本和风险。



图A-8 基于数字孪生的脱粒参数在线优化决策

d) 基于数字孪生的作业速度优化控制

基于数字孪生的作业速度优化控制方法，旨在通过适时更新的优化控制虚拟模型优化控制器参数，改善作业速度控制效果，如图 A-9 所示，方法如下：

- 基于机理建模方法构建了大型联合收获机的优化控制虚拟模型，反映作业速度的响应行为。
- 针对软土地面条件的参数不确定性，提出了一种基于神经网络推理和优化算法搜索的两阶段参数更新方法。
- 在更新后的优化控制虚拟模型的辅助下，采用大爆炸算法优化 PID 控制器参数。
- 模型更新是按需且低频的，而不是基于设定的高频率。仅当物理实体的控制效果偏离预期后，模型更新和控制器优化才会被执行。

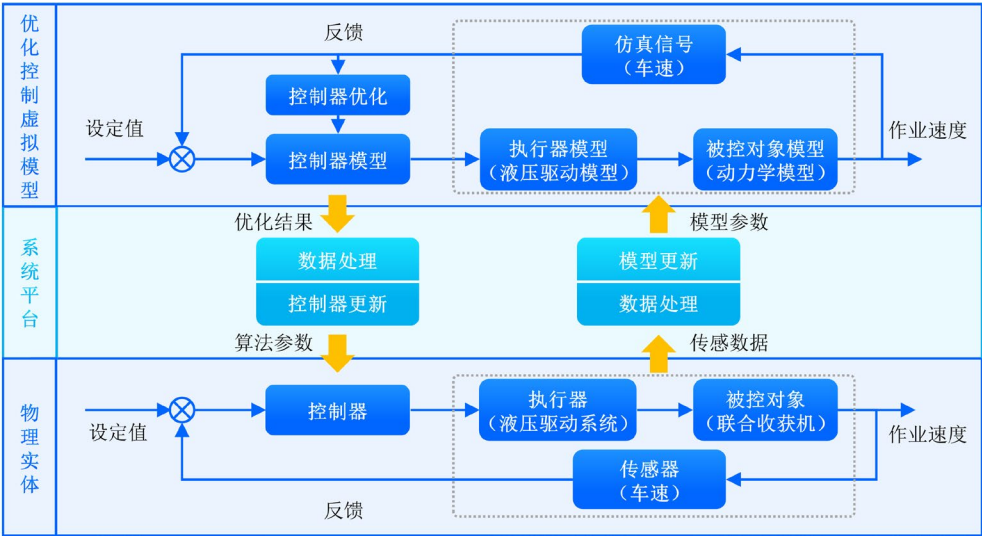


图 A-9 基于数字孪生的作业速度优化控制

e) 基于数字孪生的脱粒参数自适应调控

脱粒参数自适应调控，主要涵盖监测预测、智能决策和优化控制三大功能组件，这些组件分别对

应本节 a)、b)、c)的内容。集成机制如图 A-10 所示，具体如下：

- 首先，动态感知组件实时采集与分析大型联合收获机作业过程中的各项关键数据（如发动机状态、工作部件运转情况、作业质量等），建立对机器状态和作业性能预测能力。这一组件不仅能够反映当前的工作状态，还能预测未来的工作趋势，实现了“以虚映实”，即在虚拟环境中映射实际作业过程。
- 其次，智能决策组件利用从动态感知模块获取的数据，针对当前作业场景和操作参数，通过基于小样本在线数据的建模方法，提供最优的作业参数修正策略和建议。这个过程实现了“以虚优实”，即利用数字孪生体识别改进时机并优化决策。
- 最后，智能控制模块则通过实时反馈控制系统的协同工作，实现机器自动化调整，促进作业效果与效率的提升。该模块体现了“以虚控实”的理念，即通过虚拟模型的调控实际机器作业，实现智能自主的运行。
- 通过这些功能的集成，数字孪生系统能够在虚拟世界中模拟并优化大型联合收获机运行。这不仅推动了虚拟与现实世界的深度融合，也为大型联合收获机的高效、低损、智能作业提供了强有力的支持。

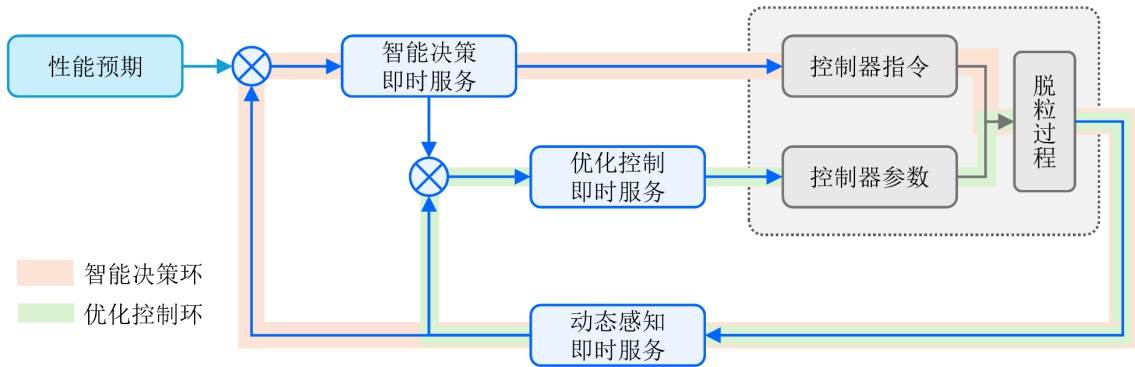


图 A-10 基于数字孪生的脱粒参数自适应调控

#### A.4 系统集成与试验验证

本系统面向联合收获机脱粒作业，构建了基于“云—雾—边—端”协同架构的智能农机装备数字孪生系统。系统集成物联网通信、边缘智能、实时仿真、控制优化等关键技术，形成覆盖数据采集—模型运行—参数优化—控制执行全过程的完整实施形态。

系统集成包括以下核心组成：

- 端（物理层）：联合收获机整机与传感器网络，实现作业状态实时感知；
- 边（边缘计算）：ARM 架构工控机作为边缘终端，实现本地数据解析、显示与传输；
- 雾（雾服务器）：部署虚拟模型与物联平台，实现感知预测、参数优化与智能控制；
- 云（云服务器）：提供模型训练、版本管理与系统配置等支撑服务。

系统在实际田间工况下开展对比试验，验证其性能表现。主要结果如下：

- 作业质量提升显著：与人工经验控制相比，籽粒破碎率下降约 1.5%~1.99%；与传统自动反馈控制相比，下降约 0.57%~0.99%；
- 作业效率明显提升：与自动反馈控制相比，作业速度提升约 0.77~1.17 km/h；
- 运行稳定性良好：在多种地况与作物条件下保持较高控制精度与决策响应能力。

试验结果表明，系统具备良好的工程稳定性和农机作业适应性，显著优化了脱粒性能指标与作业

作业效率，验证了数字孪生系统在实际农机作业中的可行性与优越性。

#### A.5 总结与示范意义

本案例以大型联合收获机为载体，面向脱粒作业中籽粒破碎控制难题，构建了集感知增强、决策优化、控制执行于一体的智能农机装备数字孪生系统，实现了从虚拟建模到实际控制的闭环集成与田间验证，具有重要的研究价值与工程推广意义。

本案例在以下方面形成了典型示范：

- 在理论方法上：提出了“感知—决策—控制”闭环驱动的农机数字孪生建模方法，融合机理模型与数据驱动模型，为农业装备类数字孪生系统开发提供了技术路径参考；
  - 在系统架构上：构建了“云—雾—边—端”多层协同的智能农机数字孪生系统架构，具备良好的扩展性与部署灵活性，适应大田农业的复杂环境需求；
  - 在关键技术上：突破了脱粒过程状态不可测、参数难优化、控制不稳定等技术瓶颈，提出可迁移、可集成的动态建模与控制优化机制；
  - 在应用效果上：实现作业质量与效率双提升，具备实际部署条件，具有良好的应用推广前景。
  - 综上，本案例作为智能农机装备数字孪生系统应用的典型范例，为推动农机装备智能化、网络化、系统化升级提供了有效的工程支撑和范式参考，具有重要的示范意义和行业引导价值。
-