

# 团 体 标 准

T/CAAMM xxxx—20xx

## 智能农机装备数字孪生系统

### 第 1 部分：参考架构

Digital twin system of intelligent agricultural machinery

part 1: Reference architecture

（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 数字孪生系统总体框架.....2

5 数字孪生系统开发流程.....4

6 数字孪生系统开发方法.....5

## 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 1 部分：参考架构

## 1 范围

本文件规定了智能农机装备数字孪生系统（以下简称数字孪生系统）相关的术语和定义、总体框架、开发流程和开发方法。

本文件适用于智能农机装备数字孪生系统的研究、设计与实施。

## 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

GB/T 35273 信息安全技术 个人信息安全规范

## 3 术语和定义

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

### 3.1

**智能农机装备** intelligent agricultural machinery

指融合传感、通信、控制与人工智能等技术，具备环境感知、自主决策、精准作业和智能协同能力的农业机械系统，能够在复杂农业环境中实现作业全过程的高效、智能与可持续运行。

### 3.2

**数字孪生** digital twin

基于农机装备的虚拟模型和多源异构数据融合驱动，通过虚实交互和状态映射同步，实现对农机装备的监测、仿真、评估、预测、优化和控制，进而支持农机装备的自感知、自决策和自优化等功能的实现。

### 3.3

**数字孪生系统** digital twin system

基于数据驱动实现农机装备与其虚拟模型动态交互迭代的系统。

### 3.4

**物理实体 physical entity**

现实世界中的农机装备及其相互关联的各个组成部分。

**3.5****虚拟模型 virtual model**

在虚拟空间中描述农机装备性质、状态或行为的数字化模型。

**3.6****虚实同步 virtual-real synchronization**

虚拟模型与相应农机装备之间的实时耦合,表现为虚拟模型以适当的速率更新至农机装备的状态。

**3.7****仿真 simulation**

基于农机装备虚拟模型的活动,即利用模型复现农机装备作业中发生的关键过程。

**3.8****校验 validation**

对农机装备数字孪生模型的校正和验证过程。校正通过修正模型、仿真及相关数据,使其能够准确反映农机装备的性质、状态或行为;验证是从预期用途出发,评估模型、仿真及相关数据在表征农机装备真实世界时的准确性。

**4 数字孪生系统总体框架****4.1 框架**

数字孪生系统总体框架包括物理实体、虚拟模型、数据与连接、支持服务、业务应用五个要素,如图1所示。

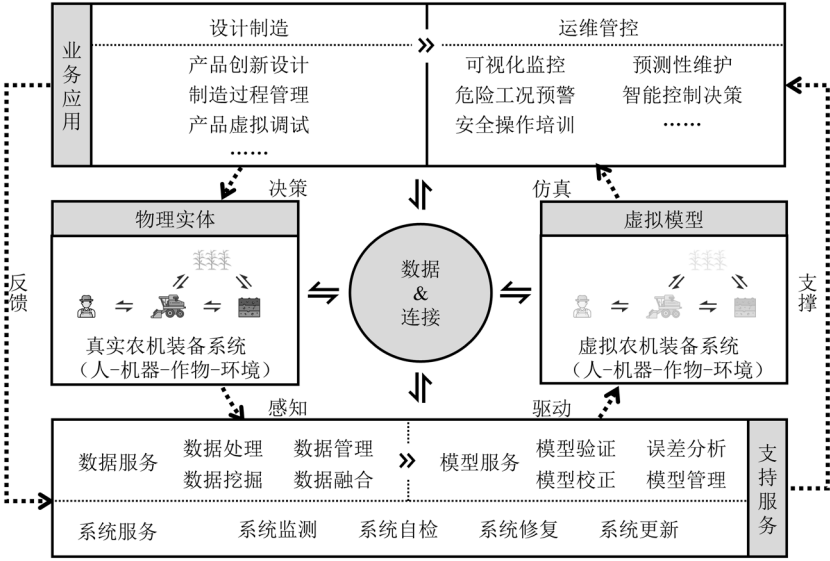


图1 数字孪生系统总体框架

4.2 内容

数字孪生系统总体框架中五个要素的具体内容如下：

- a) **物理实体**：实施数字孪生系统的现实对象，指在真实环境中运作的农机装备系统，包括农机装备本身及与其相关的人员、机器、作物和环境等要素。物理实体的核心功能是感知与执行；
- b) **虚拟模型**：物理实体在虚拟空间中的数字等价物，伴随农机装备系统一同演化。虚拟模型不仅是对物理实体的准确表达，还承载着农机装备的全生命周期信息，用于仿真、分析和优化；
- c) **数据与连接**：数据是驱动和更新虚拟模型的核心依据，连接则是实现各要素间信息交换和协同的基础。数据和连接相互依存，共同支撑整个数字孪生系统的功能与演化，处于框架的核心地位；
- d) **支持服务**：包括保障数字孪生系统稳定运行的各种服务，包括但不限于数据服务、模型服务、系统服务等基础功能，确保数字孪生系统的持续有效性与高效运作；
- e) **业务应用**：基于数字孪生系统的功能，解决农机装备全生命周期内的实际问题，主要分为设计制造和运维管控两个方面，其中设计制造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，运维管控包括但不限于：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。

4.3 机制

农机装备数字孪生系统的运行机制如下：

- a) **物理实体获取感知数据**：农机装备通过传感器和其他感知设备采集实时数据，反映其运行状态、环境变化及作业过程中的各项信息；
- b) **支撑服务进行数据处理与管理**：支撑服务负责对感知数据进行处理、管理、挖掘与融合，确保数据质量。同时，支撑服务还负责对虚拟模型进行验证、校正、更新和管理，确保虚拟模型始终与物理实体的状态同步；
- c) **虚拟模型进行多维度仿真**：根据业务应用需求，虚拟模型对农机装备进行不同尺度、粒度和用途的仿真，涵盖作业优化、性能评估等方面，并将仿真结果反馈至业务应用；

- d) 业务应用进行分析与决策：基于虚拟模型仿真结果，业务应用系统进行分析、预测、优化和决策，支持农机装备在全生命周期内的设计制造与运维管控。最终，这些决策由物理实体实施，以提升作业效率和精准度；
- e) 数据与连接驱动信息交互：所有运行过程中的信息交互均通过数据与连接这一核心介质实现，确保各要素之间的有效协同；
- f) 支撑服务中的系统服务保障数字孪生系统的稳定运行，提供必要的技术支持和资源管理。

## 5 数字孪生系统开发流程

数字孪生系统的开发流程包括 6 个关键步骤：明确开发对象、开发物理实体、开发数据连接、开发支持服务、开发虚拟模型和开发业务应用。每个步骤的主要目标如下：

- a) 明确开发对象：充分调研农机作业需求，明确数字孪生系统建设目标与边界；
- b) 开发物理实体：为农机装备赋能智能化感知与控制能力；
- c) 开发数据连接：构建数据传输通道，实现物理实体与虚拟模型的数据互通；
- d) 开发支持服务：为系统提供数据处理、模型验证与平台稳定性保障；
- e) 开发虚拟模型：构建多维可仿真的数字模型，实现虚实映射；
- f) 开发业务应用：围绕农机全生命周期，实现系统功能落地与价值转化。

### 5.1 明确开发对象

- a) 明确装备：确定构建数字孪生系统的农机装备（如拖拉机、联合收割机、插秧机、喷雾机、无人机等）；
- b) 明确场景：分析典型作业场景，识别关键物理交互因素（如土壤、作物、环境等）；
- c) 明确需求：定义感知、控制与决策所需的数据参数和物理接口。

### 5.2 开发物理实体

以智能农机装备为对象，进行必要的二次开发，提升感知与控制能力，具体任务包括：

- a) 感知能力提升：开发基于现场总线的传感采集系统，实现作业过程中的实时数据获取；
- b) 控制能力提升：若有反馈控制需要，增加线控底盘等，实现精准执行。

### 5.3 开发数据连接

开发数据连接是构建虚实联通的关键步骤，建立农机装备与虚拟模型间的双向通信，具体任务包括但不限于：

- a) 通信终端部署：开发或集成联网终端设备，接入农机装备现场总线；
- b) 物联网平台搭建：建设支持设备接入、注册与管理的农机数字孪生物联网平台；
- c) 实时数据采集：实现对农机运行数据的实时监测、记录与初步处理，积累数据资产。

### 5.4 开发支持服务

开发一系列基础性支撑服务确保系统高效、稳定和可持续运行，具体任务包括但不限于：

- a) 数据服务开发：基于分布式处理平台，设计高效的数据采集、清洗、治理与流处理机制；
- b) 模型服务开发：构建虚实一致性校验与同步机制，保持虚拟模型随实物状态动态更新；



- c) 系统服务开发：提供系统稳定性、容错性支持，确保各组件间的协同运行和信息闭环。

## 5.5 开发虚拟模型

构建与农机装备相对应的虚拟模型，实现仿真与映射，是开发数字孪生系统的核心工作，具体任务包括但不限于：

- a) 建模与集成：集成多源异构信息，采用多种建模技术（如物理建模、数据建模、融合建模等），建立农机装备虚拟模型；
- b) 仿真与可视化：实现模型的实时仿真、状态驱动与可视呈现；
- c) 模型评价与优化：建立模型评估机制，从可信度、保真度和使用便捷性等维度优化虚拟模型。

## 5.6 开发业务应用

业务应用的开发内容由智能农机装备的面临的实际需求决定，主要分为设计制造和运维管控两个方面。

在设计制造方面，包括但不限于：

- a) 产品创新设计：利用数字孪生系统进行农机装备的针对性设计与改进创新，推动产品的功能优化与新型技术的应用；
- b) 制造过程管理：通过数字孪生系统实现对农机装备制造过程的精细管理，提高生产效率和产品质量；
- c) 产品虚拟调试：借助虚拟模型对农机装备进行虚拟调试，提前发现潜在问题，优化设计方案，缩短产品开发周期。

在运维管控方面，包括但不限于：

- a) 可视化监控：实时监测农机装备的运行状态，通过可视化界面呈现各项性能参数，提供直观的操作数据；
- b) 危险工况预警：基于数据分析和模型预测，及时发现农机装备在工作过程中可能出现的危险工况，并进行预警；
- c) 安全操作培训：利用虚拟仿真技术进行农机装备的安全操作培训，模拟不同工况下的操作场景，提升操作人员的应急响应能力；
- d) 预测性维护：通过数据驱动的预测模型对农机装备进行状态监测与分析，提前发现设备故障或性能衰退，规划维护时间，减少停机时间；
- e) 智能控制决策：基于实时数据和优化算法，自动调整农机装备的操作参数，实现智能化决策与控制，提升作业效率和精准度。

## 6 数字孪生系统开发方法

提供了智能农机装备数字孪生系统的开发方法，涵盖物理实体开发、数据连接开发、支持服务开发、虚拟模型开发及业务应用开发 5 个方面内容，旨在为系统建设提供可操作、可实施的参考路径。

### 6.1 物理实体开发

物理实体开发是数字孪生系统构建的基础环节，需确保智能农机装备具备全面的感知能力和可控的执行能力，以支撑物理实体与虚拟模型之间的实时映射和协同控制。

### 6.1.1 感知功能开发

建议按照“设备层-作业层-环境层”进行分层设计感知功能，覆盖农机装备运行状态、作业对象参数和作业环境因素。

- a) 设备层感知参数：位置、位移、速度、液压压力、温度、油耗等；
- b) 作业层感知参数：土壤阻力、作物密度、含水率、成熟度等；
- c) 环境层感知参数：气温、湿度、光照强度、风速等。

传感器配置建议如下：

- a) 选型优先支持 Modbus、CAN、Ethernet/IP 等标准工业通信协议；
- b) 对于无法直接测量的参数，开发软测量模型（如利用电流、振动、声波信号等进行间接估算）；
- c) 传感器布局建议采用拓扑优化算法（如最小覆盖路径算法）降低系统布设复杂度与成本；
- d) 支持模块化布设，便于快速替换与扩展。

### 6.1.2 执行功能开发

为实现智能控制与远程指令响应，建议部署线控底盘系统：

- a) 所有关键执行单元应具备闭环反馈控制能力（如位移、开度、电流、电压等）；
- b) 控制器支持可编程逻辑接口，开放标准化控制指令接口（API/SDK）供数字孪生平台调用。

## 6.2 数据连接开发

数据连接是实现物理实体与虚拟模型双向通信的桥梁，应兼顾网络适应性、协议统一性与数据完整性，从通信系统部署、连接架构设计和通信可靠性保障措施三个方面给出开发建议：

### 6.2.1 连接方案设计

- a) 配置通信终端：建议选用支持 4G/5G、Wi-Fi 的工业级网关与边缘网关设备；
- b) 构建物联网平台：建设支持设备注册、接入、分组、权限管理的物联网管理平台；
- c) 网络协议建议采用轻量化协议如 MQTT、CoAP、AMQP 等，结合通用数据格式如 JSON、XML、Protobuf 等进行封装，确保平台对多源设备的兼容性。

### 6.2.2 连接架构设计

推荐部署“云-雾-边-端”异构计算架构：

- a) 端层：指智能农机装备，部署基础数据采集和执行控制；
- b) 边缘层：部署在智能农机装备或距离接近的位置，承担实时性要求高的运算与控制；
- c) 雾层：部署在农场的服务器上，用于本地即时任务与数据分析；
- d) 云层：部署在远程云服务器上，用于长期建模、复杂仿真与模型训练。

### 6.2.3 连接可靠性保障措施

- a) 弱网环境下，应部署本地缓存机制和冗余同步机制，防止数据丢失；
- b) 建议使用设备接入中间件，统一协议转换和设备注册；
- c) 建立双因子设备认证机制（设备 ID+数字签名），确保设备接入安全性；
- d) 配置数据链路监控机制，对通信状态进行实时监控和预警。

### 6.3 支持服务开发

支持服务是保障数字孪生系统可靠性、可维护性与可扩展性的核心支撑，包括数据服务、模型服务与系统服务。

#### 6.3.1 数据服务

##### a) 数据处理

数据处理环节旨在确保数据输入的准确性、连续性与可用性，建议重点关注以下方面：

- 数据解码：接收来自农机装备的数据，应根据通信协议进行字段解包与语义标准化处理；
- 异常检测：建议设置统计阈值、逻辑约束或滑动窗口机制识别突变、漂移、断点、无效值；
- 缺失修复：可采用线性插值、样条插值、历史均值填补、时序模型预测等方法进行补全；
- 自动化预处理：建议构建自动化的数据预处理流程，涵盖单位换算、格式规范、时间对齐等步骤，便于数据流平滑进入模型训练与仿真模块。

##### b) 数据挖掘

数据挖掘用于探索数据中的潜在规律、行为模式或结构特征，为模型优化与智能决策提供数据支撑。建议实现方式包括：

- 描述性分析：通过分布统计、相关性分析等技术揭示关键变量行为特征，例如通过轨迹数据和操作参数，识别作业重复、漏作或非计划行为；
- 异常行为识别：利用聚类、主成分分析等方法识别异常作业或设备状态，例如利用聚类算法识别典型作业模式（如拖拉机整地/播种/施肥等）；
- 预测建模：构建基于历史数据的预测模型以实现趋势预测或状态估计，例如基于历史作业与天气、土壤数据，预测农机作业效率或风险；
- 特征工程：进行特征选择、交叉特征构建、数据降维处理等，以提升模型精度和解释性，例如针对农机图像识别任务（如病虫害检测），可进行区域纹理特征提取与降维处理。

##### c) 数据融合

数据融合致力于整合多源、异构、时空维度不同的数据流，实现信息增益与关联增强。开发建议包括：

- 多源对齐：建议统一时间戳、空间标识和作业编码规则，实现农机数据、作物数据、环境数据的时空同步；
- 语义融合：可引入知识图谱或标签体系统一变量命名与语义，增强跨设备/跨场景数据可解释性；
- 数据配准与插值：用于图像-位置信息、传感器-作业任务等不同类型数据之间的空间匹配；
- 融合算法应用：针对多维度、多模态信息，推荐使用贝叶斯融合、Dempster-Shafer 证据理论或深度学习等技术进行信息整合。

##### d) 数据管理

数据管理面向整个数据生命周期，保障数据的完整性、安全性、可访问性与可追溯性，建议涵盖以下方面：

- 元数据管理：构建统一的数据目录、数据标签和血缘关系记录，建议使用如 DataHub、Amundsen 等平台；
- 分级存储策略：建议对数据按冷热分级，时效性强的实时作业数据保留在高性能数据库（如 InfluxDB），归档历史作业数据转入分布式存储（如 HDFS/MinIO）；

- 访问权限与审计：结合角色权限（RBAC）系统配置数据访问控制策略，并保留访问日志供审计使用，确保数据在合作社、运营商与政府平台间共享安全，数据存储与传输符合《GB/T 35273》；
- 数据质量监控：建议构建数据质量监测模块，定期检查缺失率、重复率、延迟率等指标，保障数据可靠性；
- 版本管理与数据快照：支持数据集的历史版本记录与快照回溯，便于模型重现与调试。

### 6.3.2 模型服务

#### a) 模型验证

模型验证建议基于虚实比对的方式开展，将实测工况（初始状态、输入条件、外部扰动）注入虚拟模型，获取模拟响应后与物理实体真实响应对比，评估其一致性。常用的误差评估指标包括：

- 数值类响应：均方误差（MSE）、均方根误差（RMSE）等；
- 分类或概率响应：交叉熵、相对熵等；
- 时域特性：上升时间、过冲量、稳态误差等。

为获得综合评估结果，偏差计算建议考虑当前工况与历史场景的叠加影响，采用加权汇总方式表征总体偏差，并设置可接受的误差阈值范围。该范围建议结合场景特点和系统资源能力，通过实验性调优方式获得。

#### b) 误差分析

误差分析可作为模型调优的前置环节，建议将误差归因建模为一个分类问题，采用数学建模、统计分析或机器学习方法，识别各因素对偏差的贡献度。常见的偏差来源包括：模型结构不准确、参数设定偏差、物理实体状态异常、系统平台故障等

条件允许的情况下，可引入因果推理工具（如 DoWhy），构建“偏差→数据源→决策链”因果链条，辅助快速定位误差根因。

#### c) 模型校准

当误差被确认为模型不准确所致时，可通过模型校准策略进行调整。建议流程如下：

- 判断模型假设是否仍适应当前工况；
- 确认影响误差的关键参数；
- 采用启发式优化算法（如遗传算法、粒子群算法、模拟退火等）或参数辨识方法（如递推最小二乘法、卡尔曼滤波等）进行迭代校正。

#### d) 模型管理

在模型不断更新演化过程中，建议构建系统性的模型管理机制。具体可包括以下内容：

- 模型标准化存储：建议使用统一格式（如 FMU、ONNX）便于跨平台集成；
- 模型版本与调用记录管理：追踪模型全生命周期过程；
- 模型库建设：按结构层级或应用场景组织模型资源，支持快速检索与组合；
- 建议引入模型治理策略，包括访问权限、备份恢复、审计日志、资源回收等。

通过上述机制，模型资源可作为“系统资产”被重复利用，支撑系统的长期运行与演化升级。

### 6.3.3 系统服务

#### a) 系统监测

系统监测用于对平台资源、关键组件和运行状态进行实时追踪，建议配置统一的

Prometheus+Grafana 可视化运维监控平台，采集与展示系统运行指标，包括但不限于：

- 资源状态：CPU 使用率、内存占用、磁盘 IO、网络带宽等；
- 服务健康：各子服务可用性、容器状态、响应延迟等；
- 设备连接：终端在线率、通信稳定性；
- 数据流转：消息堆积、吞吐率、采集频率等。

监测结果可用于配置告警阈值，实现运维预警与响应联动。

#### b) 系统自检

系统自检功能用于周期性对平台各模块进行功能性和健康性检测，建议结合如下方式实现：

- 主动探测机制：周期性调用系统接口，检查响应时间、返回值合法性；
- 日志分析机制：对系统运行日志进行采样与关键字段提取，分析错误趋势或性能下降信号；
- 健康探针机制：结合容器平台（如 Kubernetes）配置 Liveness/Readiness 探针，实现自动检测与标记异常状态。

检测结果应自动汇总生成系统运行自检报告，供运维人员参考处理。

#### c) 系统修复

当系统出现异常或故障时，建议支持自恢复机制与容错配置，保障关键服务的连续可用性。可参考以下做法：

- 容器重启与漂移机制：通过容器编排平台（如 Kubernetes）实现异常服务自动重启、节点迁移；
- 服务熔断与降级：引入熔断策略（如 Hystrix、Istio）以避免异常服务扩散影响全系统；
- 数据持久与重发机制：对关键业务数据配置缓存机制与断点续传策略，避免数据丢失；
- 预案切换机制：预置服务镜像或冗余节点，支持一键热切换。

#### d) 系统更新

系统更新能力是实现平台持续演进与功能优化的保障。建议构建版本管理与灰度发布机制，包括：

- 支持模块级别的滚动更新与热部署，避免系统整体停机；
- 引入灰度发布机制，在部分终端上先行部署新版本，收集反馈后再全量推送；
- 支持系统回滚功能，确保在版本异常时快速恢复至稳定版本；
- 记录各模块的更新历史，包含版本号、更新时间、更新内容、影响范围等，便于后期追溯与审计。

## 6.4 虚拟模型开发

### 6.4.1 建模策略

鉴于智能农机作业系统的复杂性，需从几何、物理、行为和规则四个维度，以及时间和空间两个尺度出发，构建多层次、可组合、可交互的虚拟模型。

### 6.4.2 几何模型构建

几何模型主要用于可视化展示农机本体结构、作业场景及其交互过程，建议如下：

- a) 智能农机本体建模：构建智能农机装备主机及其附属机具的 3D 几何外形，包括动力系统、转向机构、悬挂系统等。采用 Unity3D/Unreal Engine 等平台，结合 CAD 图纸或实物测绘建模；
- b) 作业场景重建：引入高分辨率遥感影像、数字高程模型（DEM）、土壤剖面数据等，还原田块地形、作物状态、障碍物分布等现场环境；

- c) 附件库与组合机制：针对农机挂接多样化（如播种、喷药、犁地等），建立标准化的机具模型库，支持多工况快速组合仿真；
- d) 驾驶员与操作界面：建模驾驶员操作动作和座舱界面，模拟人机交互流程与第一人称视角观察，为远程控制与培训提供支撑。

#### 6.4.3 物理模型构建

物理模型是智能农机行为生成的底层支撑，涉及作业过程的力学、动力学等物理机理等，建议建模方式：

- a) 集成 MATLAB、ANSYS、SIMULINK 等已有仿真模块，构建多模块耦合物理模型；
- b) 采用 Modelica 等多领域建模语言，构建一体化智能农机装备物理模型。

#### 6.4.4 行为模型构建

行为模型面向农机在不同输入/扰动下的响应过程，是路径规划、任务分配、作业优化等智能控制的依据：

- a) 动态行为模型：如转向响应模型、作业深度调节模型、油耗变化模型；
- b) 演化行为模型：描述设备老化、效率下降、异常状态的演变轨迹；
- c) 交互行为模型：人-机器-作物-环境相互作用建模，如履带与泥泞田块之间的接触模型、割台与作物植株之间的交互模型等；

建模方式建议如下：

- a) 机理建模：基于理论构建模型，例如机-电-液系统响应行为模型；
- b) 试验回归建模：在特定工况下采集实测数据建立经验性回归模型；
- c) 数据挖掘建模：利用海量作业记录训练模型；
- d) 多模融合策略：多种模型融合使用，提升建模精度，例如数据-机理融合建模。

#### 6.4.5 规则模型构建

规则模型用于限定虚拟农机系统运行边界，防止不合规或不合理的行为模拟出现，支撑智能决策逻辑推理：

- a) 通用规则：如“作业速度不得超限”“转弯半径需符合安全规范”等；
- b) 行业与企业规范：对接国家标准、作业标准、农机作业安全守则等；
- c) 经验型关联规则：如“负载过高→油耗上升+故障率提升”等；
- d) 知识工程支持：通过规则引擎管理作业策略、调度规则、专家系统等，实现可推理、可更新的规则逻辑集成。

#### 6.4.6 空间尺度建模

智能农机系统具有复杂的结构层次，从单个零部件到整机再到作业场景，需构建由小到大的空间映射体系：

- a) 结构层级划分：按照“零件→单元→子系统→整机→多机协同→作业场景”进行建模；
- b) 跨设备协同建模：如多台收割机协同作业场景、植保机+地面农机联合作业流程建模；
- c) 按需精度简化：重点关注对要解决的问题影响最大的部分，简化影响不大或没有影响的部分。

#### 6.4.7 时间尺度建模

农机从研发设计到运行退役存在生命周期演化,每一阶段均产生不同类型的模型数据与行为轨迹:

- a) 生命周期分层:
  - 设计阶段: 概念验证、结构优化、虚拟样机;
  - 制造阶段: 装配模拟、质量检测模型;
  - 运行阶段: 作业记录、运行监控、故障诊断模型;
  - 维护与退役: 性能衰减、更新计划、回收仿真等。
- b) 模型事件管理机制:
  - 记录每一关键事件(如设计迭代、组件更换);
  - 构建时间链条,追踪“设备状态演化→控制策略优化”的演进逻辑;
  - 服务于预测性维护、资产评估与升级建议。

## 6.5 业务应用开发

数字孪生系统的最终目标是支撑智能农机装备在设计制造和运维管控两方面实现效能提升与智能决策。

### 6.5.1 应用需求分析与场景识别

开发前应充分分析农机装备在设计制造与运维管控阶段的业务需求,明确应用目标、服务对象和功能范围,结合数字孪生系统已具备的建模、数据采集与服务接口能力,识别典型应用场景,包括但不限于:

- a) 设计制造: 产品创新设计、制造过程管理、产品虚拟调试;
- b) 运维管控: 状态可视化监控、危险工况预警、安全操作培训、预测性维护、智能控制决策。

### 6.5.2 应用系统架构设计

应结合平台能力与业务场景需求,设计清晰的系统架构,包括前端展示层、业务逻辑层与数据服务层,确保业务应用可集成至统一的数字孪生平台环境中运行。应满足以下要求:

- a) 前端开发可采用 Web 框架或跨平台开发框架;
- b) 后端服务建议基于微服务架构进行开发;
- c) 应用与平台之间的数据通信应采用统一接口协议。

### 6.5.3 功能模块开发方法

应根据业务目标,按模块化原则开发具体功能模块,并实现与虚拟模型、数据服务及仿真平台的联动。开发应包括以下典型方法:

- a) 可视化模块: 调用三维模型、传感数据与作业状态,实现设备状态实时展示;
- b) 仿真交互模块: 接入虚拟模型,支持参数配置、工况切换等;
- c) 预测与预警模块: 基于采集数据与历史样本构建预测模型,支持预警规则配置与告警推送;
- d) 控制决策模块: 集成控制算法或规则库,支持作业策略智能生成与部署;
- e) 培训教学模块: 结合 VR/AR 等技术,实现安全操作与维护技能的交互式培训。

### 6.5.4 安全机制与多终端适配

业务应用应具备良好的安全性与兼容性。开发过程中应:

- a) 建立权限控制机制,建议采用 OAuth2、JWT 等认证授权协议;

- b) 实现用户角色管理与访问控制；
- c) 支持 Web 端、移动端、车载终端等多终端适配，统一交互体验，提升系统可用性。

#### 6.5.5 应用测试与优化迭代

开发完成后，应通过功能测试、性能测试、交互测试等方式对业务应用进行全面验证。具体包括：

- a) 功能正确性验证：对各功能模块进行独立与集成测试；
  - b) 接口联调测试：确保与数据服务、仿真模型及控制平台间的数据交互准确；
  - c) 用户体验评估：结合用户操作路径与反馈意见优化界面交互逻辑；
  - d) 版本迭代更新：构建可持续优化的版本管理与迭代机制。
-