

# 基于数字孪生框架的去中心化烧结流程实时监控系统架构

蔡璇 叶云龙\*

中冶南方武汉钢铁设计研究院有限公司 湖北 武汉 430080

**摘要:** 为推动传统烧结工艺在工业 4.0 背景下的智能化转型,解决传统中心化架构面临的“单点故障”“负载不均”等痛点,本研究以某烧结厂实际智能化项目为应用场景,设计并构建了一套基于数字孪生框架的去中心化烧结流程实时监控系统架构。首先,结合国内外钢铁行业智能化研究现状,剖析去中心化架构思想的核心优势;其次,阐述本研究去中心化架构的设计思路,并详细拆解其核心功能模块;最后,系统说明基于数字孪生框架的整体构建流程。

**关键词:** 去中心化; 烧结; 数字孪生

## 引言

处于工业4.0与智能制造深度融合的发展浪潮中,作为国民经济支柱的钢铁行业,正面临把传统生产模式升级到智能化、高效化模式的迫切要求。数字孪生技术凭借着虚实映射、实时仿真的关键长处,为工业流程监控提供了全新的处理办法,而去中心化架构可有效突破中心化系统存在的性能瓶颈。本研究使数字孪生框架和去中心化思想结合在一起,构建烧结流程实时监控系统架构,意在破除传统监控模式的痛点困境,为钢铁行业烧结工艺实现智能化升级提供可借鉴的实践参考。

## 1 研究目的与意义

### 1.1 研究背景与意义

钢铁工业作为国家经济体系中的关键基础产业,在当今动态发展的宏观经济环境中,正经历着历史性的严峻考验。实施数字化战略转型,已成为该行业突破发展桎梏、升级传统制造工艺、构建现代化产业体系的重要战略选择。数字化转型能够提升生产效率与产品质量、优化资源配置与成本控制、增强综合竞争力、推动绿色可持续发展与人才培养、赋能创新与多元发展<sup>[1]</sup>。

数字孪生是一种通过传感器、数据分析和模拟技术等手段,对现实世界中的物理实体进行建模和仿真,以实现现实世界的实时监控、预测和优化。是实现物理与信息融合的一种有效手段<sup>[2]</sup>。将数字孪生应用到钢铁领域,能够实现工业生产流程在信息空间的高精度仿真建

模。这一技术的应用有助于提升钢铁制造的产品质量,并确保生产全链条的安全可靠运行<sup>[3]</sup>。

相较于传统中心化架构,去中心化系统架构能有效规避单点故障、传输延迟过高、系统鲁棒性不足等问题<sup>[4]</sup>,其优异的抗风险能力与钢铁生产线的连续运行需求高度契合,可避免因单点故障导致的大规模停产损失。

### 1.2 研究目的与内容

本研究旨在设计一套去中心化系统架构体系,并结合数字孪生技术的可视化优势,应用于某烧结厂智能化项目中。通过全程跟踪原料配料、燃料破碎、烧结冷却等核心工艺流程,利用数据采集软件与画面组态技术,实现各阶段工艺与设备工况的实时模拟,以及关键工艺参数的精准计算与趋势预测。

## 2 烧结流程实时监控系统架构

### 2.1 架构功能概述

本系统基于“去中心化”核心思想构建(系统架构见图1),部署多个具备自治能力的数采节点,每个节点可独立从设备层采集烧结生产数据。设备层主要由 PLC(可编程逻辑控制器)与各类智能装备传感器组成,即便单个数采节点发生故障,整体数据采集功能仍不受影响。节点故障检测采用“心跳检测+数据断联”双向判定机制:数据存储层面,每个数采节点独立存储采集数据,通过“数采节点ID+点位号编码+时间戳”的组合方式标识数据点位,即便某个存储节点故障,其余节点仍可持续完成数据存储,待故障节点恢复后,可从其他正常节点同步缺失数据。

分布式服务层部署多个微服务,负责提供数据通信接口与模型计算功能,核心服务包括原料配比计算、

**作者简介:** 蔡璇,女,1979年生,硕士,高级工程师,研究方向为冶金自动化。

**通讯作者:** 叶云龙,男,1998年生,硕士,工程师,研究方向为软件工程, E-mail: 913299786@qq.com。

风箱温度RGB映射、料位预测、BTP 预测、BRP 预测等。各服务向Nacos注册中心完成服务注册，基于SpringCloudGateway的API网关实现路由转发与限流熔断功能，服务间通过MQTT协议进行异步通信。

分布式服务层通过消息服务器与烧结厂数字孪生模型实现数据交互，消息服务器采用冗余部署策略。消息服务器集群采用对等模式，数据随机分发至任意消息服务器节点；当某节点发生故障时，其余节点通过Raft协议同步故障节点的客户端连接信息（含会话状态、订阅关系）与消息数据，确保服务持续运行。烧结厂数字孪生模型用于实时跟踪与渲染烧结全流程核心数据。

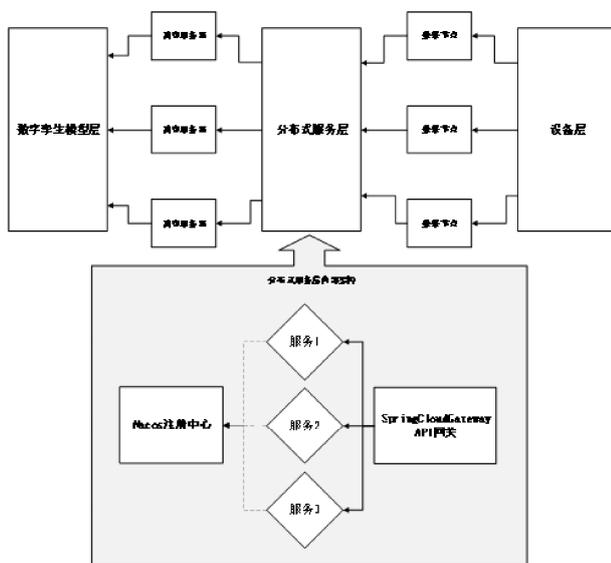


图1 系统架构

## 2.2 架构核心功能详解

### 2.2.1 数采去中心化

每个数采节点作为独立自治单元，具备完整的设备连接、数据采集与本地存储能力，无需依赖中心节点协调。核心逻辑如下：系统初始化阶段，各节点通过预配置的采集器配置信息，独立与PLC设备建立通信；数采节点按照预设采集频率从PLC采集数据，并直接存储至本地时序库，无需经过中心节点转发。

为快速识别节点故障并触发容错机制，本系统采用“心跳检测 + 数据断联”双向判定逻辑：系统所有节点通过分布式消息总线相互通信，实时交换状态信息：

(1) 心跳检测：各节点每5秒向总线发送心跳包，其他节点监听并记录各节点的最新心跳时间。

(2) 数据断联检测：节点每次成功存储一批数据后，向总线发送“数据上传通知”，其他节点记录各节点最新数据存储时间。

系统为心跳检测与数据断联检测分别设置时间间

隔阈值（ $t_1$ 、 $t_2$ ），当最新心跳时间与当前时间的差值（ $\Delta t_1$ ）大于预设阈值  $t_1$ ，且最新数据存储时间与当前时间的差值（ $\Delta t_2$ ）大于预设阈值  $t_2$  时，即判定该节点故障。故障节点将被纳入系统故障节点队列，暂时停止参与数据采集与协同任务；待节点修复并重新恢复心跳后，将从从未发生过故障的正常节点中同步缺失数据，确保数据完整性。

### 2.2.2 分布式服务节点架构

分布式服务节点主要部署多个业务层应用接口，采用微服务架构设计，新的业务接口完成注册中心注册后即可直接接入系统，具备良好的扩展性。各接口与数采节点进行数据通信时，入口API网关会根据各数采节点的当前连接数量，优先选择连接数较少的节点进行新服务对接；各业务服务模块之间通过消息队列实现异步数据通信。

业务服务模块与数字孪生模型之间，通过多个消息服务器节点实现数据通信；当某一消息服务器节点故障时，集群通过Raft协议实现自动恢复，具体流程如下：

(1) 领导者选举：剩余节点通过Raft协议选举产生新的领导者，负责协调集群整体状态。

(2) 数据同步：新领导者将故障节点的客户端会话状态、订阅关系及未消费消息同步至其他正常节点。

(3) 客户端重连：故障节点的客户端检测到连接断开后，自动重连至集群其他正常节点，新节点基于同步的会话状态恢复通信。

## 3 数字孪生框架体系构建

### 3.1 数据采集

数据采集是数字孪生体系构建的基础环节，需明确数据类型、采集频率等关键特性。烧结现场的数据采集主要来源于PLC与第三方智能设备系统间的数据通信。

从PLC采集的烧结数据按工艺划分为配料、燃料破碎、烧结冷却、成品筛分等模块，每个模块的数据独立存储于对应PLC中，且每个PLC配备独立IP地址。数据采集平台通过配置点号表从PLC中采集数据，点号表包含待采集数据的点位地址、数据类型、点位编码等核心信息。数采平台完成点号表配置后，通过设定PLC的IP地址与型号建立通信连接，采集的数据经数据传输层传入平台层数据库进行存储。

### 3.2 二维建模

数字孪生建模被划分为几何、物理、行为、规则4个维度。其中几何模型反映了对对象的几何形状；物理模型反映了对对象的物理属性、特征和约束；行为模型反映了对对象响应外部机制的动态行为。

烧结流程的二维建模对象覆盖整个烧结全流程，包括配料料仓、配料成分、胶带机、混合机、烧结机、风箱、点火器、混合料槽、铺底料槽、环冷机等物理实

体。建模过程严格依据烧结实际生产线布局，对各对象的位置分布进行合理规划与划分（详见图2）



图2 二维组态建模画面

### 3.3 数模关联

数模关联的核心作用是建立数据与目标模型对象之间的映射关系：当点位数据发生更新时，对应的模型对象会实时做出反馈；反之，若对目标模型对象进行操作，也会反向修改对应的点位数据，形成双向数据联动机制。

系统后端通过MQTT协议，将存储在时序库中的数据转发至MQTT Broker，再通过WebSocket桥接技术，将数据实时传入浏览器端的模型对象进行展示；用户的决策数据通过调用后端接口，反向修改对应数据点位的数值。

点位绑定除实现直接的数据显示功能外，还需根据数据特征为模型对象设计行为约束规则。例如，在本系统中，根据风箱温度的不同区间显示对应颜色，根据烧结机机速动态设置轮盘的角速度等。

### 4 总结与展望

本研究基于“去中心化”架构思想，结合数字孪生技术构建了某钢厂烧结流程实时监控系统。在系统架构层面，采用分布式部署方式配置数采节点、微服务及消息服务器等关键节点，通过去中心化思想赋予各节点平等自治权，实现无中心依赖的分布式分治，有效解决了

传统中心化架构存在的“单点故障”“负载不均”等核心问题；在数字孪生框架构建环节，从数据采集、二维建模、数模关联三个核心维度，系统阐述了烧结流程跟踪系统的数字孪生模型构建过程。

基于本研究的现有成果，后续可从两方面进一步深化与拓展：其一，在数字孪生模型精度优化上，可引入多物理场耦合建模（叠加温度场、流场、应力场），结合现场实测数据持续修正物理参数，提升孪生体对料层烧结反应、设备磨损等微观过程的模拟精度；其二，在产业应用延伸上，可推动系统与MES、ERP系统的深度融合，将孪生模型的过程数据转化为生产管理决策依据。

### 参考文献

- [1]孙志刚.数字化转型：钢铁企业可持续发展的新赛道[J].冶金管理,2025,(05):57-59+63.
- [2]陶飞,张萌,程江峰,等.数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J].计算机集成制造系统,2017,23(01):1-9.DOI:10.13196/j.cims.2017.01.001.
- [3]许永泓,杨春节,楼嗣威,等.钢铁行业数字孪生研究现状分析和综述[J].冶金自动化,2023,47(01):10-23.
- [4]郭河川.去中心化存储网络的存储优化技术研究[D].山东大学,2024.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2024.000606.