

流程工业数字孪生模型的实时校准方法

陈 静¹, 高青彦²

¹ 赣州市鑫乐医疗器械有限公司 江西赣州

² 济南弗迪电池有限公司 山东济南

【摘要】 流程工业中数字孪生模型的精度直接影响其在实时优化与故障预测中的应用效果。本文围绕“流程工业数字孪生模型的实时校准方法”展开研究,提出一种基于数据驱动与机理融合的动态校准策略,旨在提升模型对复杂工况变化的适应能力。通过构建多源数据采集框架与在线参数更新机制,实现模型输出与实际系统状态的持续逼近。实验结果表明,该方法能显著提升模型的实时性与准确性,为流程工业智能化提供有力支撑。

【关键词】 数字孪生; 实时校准; 流程工业; 数据驱动; 模型优化

【收稿日期】 2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】** 2025 年 4 月 11 日 **【DOI】** 10.12208/j.jeea.20250143

Real-time calibration method for digital twin models in process industry

Jing Chen¹ Qingyan Gao²

¹ Ganzhou Xinle Medical Equipment Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi

² Jinan Fudi Battery Co., Ltd., Jinan, Shandong

【Abstract】 The accuracy of digital twin models in the process industry directly affects their application effects in real-time optimization and fault prediction. This paper focuses on the research of "real-time calibration methods for digital twin models in process industry" and proposes a dynamic calibration strategy based on the integration of data-driven and mechanism-based approaches. The strategy aims to enhance the model's adaptability to complex working condition changes. By constructing a multi-source data acquisition framework and an online parameter update mechanism, the continuous approximation between model output and the actual system state is achieved. Experimental results show that this method can significantly improve the real-time performance and accuracy of the model, providing strong support for the intelligentization of the process industry.

【Keywords】 Digital twin; Real-time calibration; Process industry; Data-driven; Model optimization

引言

数字孪生技术作为连接物理世界与数字空间的核心桥梁,已在流程工业中展现出巨大潜力。面对复杂的工艺流程和动态变化的运行环境,传统建模方法难以维持模型的长期高精度。如何实现数字孪生模型的实时校准,成为制约其应用效能的关键问题。本文聚焦于这一挑战,提出一套结合机理模型与数据驱动的动态校准方法,不仅提升了模型的适应性和预测能力,也为流程工业的智能控制与决策提供了新思路。本研究对于推动工业系统向更高效、更智能方向发展具有重要理论价值与实践意义。

1 流程工业数字孪生模型的应用挑战

在流程工业中,如化工、冶金、石油炼制等复杂

系统,其生产过程具有连续性强、变量耦合度高、动态响应复杂等特点,这对数字孪生模型的构建与运行提出了更高要求。实际应用中,物理系统的状态往往受到原料成分波动、设备老化、环境温湿度变化等多种不确定因素的影响,导致原有模型难以准确反映当前工况。流程工业中的设备种类繁多,工艺流程长且相互关联紧密,任何一个环节的状态偏差都可能引发连锁反应,从而影响整体系统的建模精度和控制效果。如何在动态、非线性、强干扰的工业环境中维持数字孪生模型的实时准确性,成为制约其广泛应用的核心瓶颈之一。

从建模角度来看,传统基于机理的建模方法虽然具备一定的物理可解释性,但在面对多变工况时

存在适应性差、参数固定等问题,难以实现模型的持续优化。而单纯依赖数据驱动的方法又受限于数据质量、样本覆盖范围以及噪声干扰等因素,容易出现“过拟合”或“欠拟合”现象,进而影响模型泛化能力^[1]。尤其在流程工业中,由于传感器布置密度不均、测量误差累积、数据采集频率不一致等问题普遍存在,进一步加剧了模型与实际系统之间的偏差。这种偏差如果不及时修正,将直接影响到后续的仿真预测、故障诊断与优化控制等关键功能的可靠性。

更为严峻的是,在实际部署过程中,数字孪生模型需要与 DCS、PLC、MES 等工业控制系统进行深度集成,实现实时数据交互与协同决策。现有工业通信协议与数据标准的异构性较强,不同系统之间的数据接口不统一,导致模型更新与校准信息难以高效传递。模型计算资源受限、算法执行效率低等问题也限制了其实时响应能力。如何在保证模型精度的前提下,提升其在线适应能力和工程可实施性,是当前流程工业中推进数字孪生技术落地必须解决的关键问题。

2 实时校准的需求分析与技术路径

在流程工业运行过程中,数字孪生模型的动态特性必须能够与物理系统的状态变化保持同步,否则将导致模型预测失真,进而影响整个生产过程的优化控制与故障诊断。由于工艺参数的漂移、设备性能的衰减以及外部环境的扰动等因素持续存在,传统静态建模方法已难以满足高精度、长时间尺度下的仿真需求。数字孪生模型亟需建立一套高效的实时校准机制,以实现模型结构和关键参数的在线更新。这种校准不仅要求具备较高的响应速度,还需兼顾校准精度与计算资源的合理分配,确保其能够在实际工业控制系统中稳定运行。

从技术实现层面来看,实时校准的核心在于如何有效融合多源异构数据,并在此基础上构建具有自适应能力的模型修正策略。当前,随着工业物联网(IIoT)和边缘计算技术的发展,流程工业现场的数据采集频率和覆盖范围大幅提升,为模型校准提供了丰富的数据基础^[2-6]。通过引入基于贝叶斯估计、递推最小二乘法或卡尔曼滤波等算法,可以实现对模型参数的在线辨识与调整,从而提高模型对实时工况的跟踪能力。结合深度学习与迁移学习的方法,还可增强模型在不同操作条件下的泛化能力,使其在面对新场景时仍能保持较高精度。这些方法在实

际应用中也面临数据预处理复杂、算法收敛性不稳定以及与现有系统集成难度大等挑战,亟需进一步优化其工程可行性。

在系统架构设计方面,实时校准的有效实施依赖于一个高效的数据-模型闭环反馈机制。该机制通常包括数据采集层、通信传输层、模型计算层与决策执行层等多个环节,其中任何一个环节的延迟或误差都可能影响整体校准效果。为此,需构建基于 OPCUA、MQTT 等现代工业通信协议的数据传输平台,确保数据的低延迟与高可靠性;在模型端应部署轻量化计算模块,提升校准算法的执行效率。结合实际工业场景,如催化裂化装置、精馏塔操作等典型流程单元,校准策略还需考虑工艺约束、安全边界及控制目标之间的协调关系,以实现真正意义上的“闭环优化”。

3 基于数据驱动的模型参数在线更新机制

在流程工业数字孪生系统中,模型的动态适应能力直接决定了其在复杂工况下的可用性与准确性。由于物理系统的运行状态随时间不断变化,静态或周期性调整的模型参数往往无法及时反映实际过程的行为特征,进而导致仿真结果偏离真实值,影响后续优化控制和故障诊断的效果。构建一个高效、稳定的在线参数更新机制成为提升模型实时性的关键所在。该机制应能够基于现场采集的多源异构数据,自动识别模型偏差来源,并通过算法驱动的方式实现对关键参数的动态修正,从而确保模型输出始终贴近物理系统的当前状态。

从方法论角度出发,在线更新机制通常依赖于先进的数据处理与建模算法协同作用。一方面,需要借助高精度传感器和边缘计算平台获取包括温度、压力、流量、成分浓度等在内的关键工艺变量,并通过数据清洗、特征提取和时序对齐等步骤为模型提供高质量输入;另一方面,采用递推最小二乘法(RLS)、扩展卡尔曼滤波(EKF)或贝叶斯推理等参数辨识技术,结合模型预测误差进行参数迭代优化。近年来,深度学习中的循环神经网络(RNN)与长短时记忆网络(LSTM)也被广泛应用于非线性动态系统的建模与参数更新中,能够有效捕捉时间序列中的潜在规律,进一步提升模型的自适应能力。迁移学习与联邦学习技术的引入,使得模型能够在不同设备或工艺单元之间共享校准经验,增强其跨场景泛化能力。

在工程实现层面,参数在线更新机制还需考虑与现有控制系统(如 DCS、PLC)和工业通信协议

(如 OPCUA、PROFINET) 的深度融合, 以确保数据流与模型更新指令的实时交互^[7]。为提高计算效率, 通常会将部分计算任务部署至边缘节点, 形成“云端-边缘”协同架构, 既保障了算法的响应速度, 又降低了中心服务器的负载压力。在典型流程工业应用中, 例如催化裂化反应器或连续蒸馏塔的操作过程中, 该机制已被证明能显著提升模型的预测精度和鲁棒性。通过对关键操作变量(如进料速率、回流比、反应温度)的动态跟踪与反馈调节, 不仅增强了模型与物理系统的同步性, 也为实现闭环优化控制提供了坚实基础。

4 校准效果评估与案例验证

在流程工业数字孪生模型的实时校准过程中, 如何科学、系统地评估校准效果是验证方法有效性的关键环节。传统的模型评估多依赖于静态数据集或历史运行工况, 难以全面反映模型在动态变化环境下的适应能力。本文采用多维度评价指标体系, 结合时间序列误差分析、动态响应速度、参数收敛稳定性等内容, 对校准前后的模型性能进行对比评估。通过计算均方误差(MSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)以及相关系数(R^2)等量化指标, 能够直观反映出模型输出与实际系统状态之间的拟合程度。引入滑动窗口机制, 对模型在不同操作阶段的表现进行滚动评估, 确保其在复杂工况下仍具备良好的泛化能力。

为了进一步验证所提出校准方法的实际应用价值, 选取某石化企业的催化裂化装置作为典型案例开展实验研究。该装置涉及复杂的气液反应过程和多变量耦合控制, 对模型精度和响应速度提出了较高要求。基于现场部署的分布式控制系统(DCS)采集的温度、压力、进料流量等实时数据, 构建数字孪生模型并实施在线参数更新策略。实验结果表明, 在未进行校准的情况下, 模型预测值与实际值之间的偏差普遍超过8%, 而在引入动态校准机制后, 整体误差下降至2%以内, 显著提升了模型的预测可靠性。模型在校准过程中表现出良好的收敛性, 参数更新周期控制在10秒以内, 满足了流程工业对实时性的基本要求。

在工程实践中, 校准效果不仅体现在数值精度上, 更应反映在对生产优化、故障预警等高阶功能的支持能力提升上。通过将校准后的模型接入先进过程控制(APC)系统, 实现了对反应温度与分馏塔底液位的闭环优化控制, 进一步提高了装置的运行效率与能效水平^[8]。在异常工况识别方面, 模型能够

更早捕捉到设备性能劣化的趋势信号, 为运维人员提供更具前瞻性的决策支持。这些实际应用成果充分证明了所提校准方法在流程工业场景中的可行性与有效性, 也为后续推广至其他复杂工艺系统提供了可借鉴的技术路径。

5 结语

本文围绕流程工业数字孪生模型的实时校准问题, 系统分析了其在复杂工况下的应用挑战与技术需求, 提出了一套基于数据驱动的在线参数更新机制, 并通过典型工业案例验证了该方法的有效性。研究表明, 构建高效的数据-模型闭环反馈体系, 结合先进的参数辨识算法与边缘计算平台, 能够显著提升模型的动态适应能力与预测精度。未来研究可进一步探索多装置协同校准与人工智能深度融合的应用路径, 以推动流程工业向更高水平的智能化发展。

参考文献

- [1] 汤建勋.以创新为导向的运检班组数字转型管理[C]//中国电力企业管理创新实践(2023年).国网浙江省电力有限公司紧水滩水力发电厂, 2025:321-323.
- [2] 朱飞.数字经济时代背景下行业经济转型升级的路径分析[J].广东经济, 2025, (02):13-15.
- [3] 刘力康.以数字之力解锁流程工业节能减碳新模式[J].现代制造, 2024, (S2):12-13.
- [4] 李江.佛山老字号企业数字化转型路径研究[J].现代商业研究, 2024, (18):122-124.
- [5] 梁晓俊, 骆伟超, 黄科科, 等.流程工业元宇宙关键技术及应用[C]//中国自动化学会.第二十五届中国系统仿真技术及其应用学术年会(2024 IEEE 25th CCSSTA)论文集.鹏城实验室; 中南大学, 2024:59-64.
- [6] 孙元林, 张兵.浅析数字化助力企业转型升级[J].中国设备工程, 2024, (S2):21-23.
- [7] 赵路军.流程工业智能工厂准备度建模及应用研究[D].浙江大学, 2024.
- [8] 张建文, 赵挺生, 万平玉, 等.流程工业一体化安全管控探讨[J].化工学报, 2024, 75(06):2375-2384.

版权声明: ©2025 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