

气固流态化过程的数字孪生系统构建及应用

彭词¹, 赵陆海波^{1,2*}, 宁德军^{1,2*}, 唐志永^{1,2,3,4}

¹中国科学院上海高等研究院 上海

²中国科学院大学 北京

³中国科学技术大学 安徽合肥

⁴安徽师范大学 安徽芜湖

【摘要】本文基于多相流测试、数值仿真和深度学习方法开展了气固流化床数字孪生建模与应用研究。首先,基于气固流化床的工作原理及流程过程,搭建了一种多层次的流化床数字孪生框架;进一步重点在功能应用层分析了数字孪生体在设备故障诊断、参数控制优化等场景下的核心技术以及应用实现路径;最后,从数字孪生体构建的标准化、业务化及可视化等层面总结了气固流化床装置数字孪生技术面临的挑战。本研究可为气固流化床设备的信息化、数字化及运维管控的科学化提供理论参考。

【关键词】气固流化床;数字孪生;多相流测试;数值模拟;深度学习

【基金项目】中国科学院化工冶金低碳变革技术及示范战略性先导科技专项资助(XDA0390501)、国家自然科学基金(批准号:22278418)和中国科学院上海高等研究院院部署基金对本研究的资助。

【收稿日期】2024年5月12日 **【出刊日期】**2024年6月18日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20240013

Construction and application of digital twin system for gas-solid fluidization process

Ci Peng¹, Luhaibo Zhao^{1,2*}, Dejun Ning^{1,2*}, Zhiyong Tang^{1,2,3,4}

¹Shanghai Institute for Advanced Studies, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

³University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui

⁴Anhui Normal University, Wuhu, Anhui

【Abstract】Based on multiphase flow testing, numerical simulation and deep learning methods, digital twin modeling and application research of gas-solid fluidized bed were carried out in this paper. Firstly, based on the working principle and flow process of gas-solid fluidized bed, a multi-level digital twin framework of fluidized bed is built. In the functional application layer, the core technology and application path of digital twin in the scenario of equipment fault diagnosis and parameter control optimization are analyzed. Finally, the challenges of digital twin technology in gas-solid fluidized bed units are summarized from the aspects of standardization, operation and visualization of digital twin construction. This study can provide theoretical reference for the information, digitization and scientific operation and maintenance control of gas-solid fluidized bed equipment.

【Keywords】Gas-solid fluidized bed; Digital twins; Multiphase flow test; Numerical simulation; Deep learning

1 引言

据 GeSI (全球电子可持续发展推进协会) 的研究,工业的数字化智能化技术在未来十年内有潜力通过赋能帮助全球工业领域碳减排 24.2%。数字孪生是实现化工行业“用数赋能”的关键技术途径^[1]。目前数字孪生在能源化工领域的应用研究处于初级阶

段。国内方面,陶飞等提出了一种数字孪生车间概念及实现模式,为数字孪生在生产制造环节落地应用提供了基础理论支撑^[2]。上海交通大学研究团队建立了数字孪生电网的潮流模型,验证了数字孪生电网的技术可行性^[3]。清华大学研究团队利用数字孪生 CloudIEPS 平台,建立了数字孪生综合能源系

*通讯作者: 赵陆海波, 宁德军

统模型, 达到降低了能源系统运行成本的目标^[4]。余斌^[5]等提出了数字孪生可对 1000 万吨常减压示范装置, 年增加高价值轻燃油产品、化工原料中间产品 5 万吨以上, 产生经济效益每年在 2000 万元以上。对 25 万吨/年聚丙烯装置提高产率 8.7%, 带来的经济效益达到 476.8 万元/年。美国 ANSYS 公司提出 ANSYS Twin Builder 技术方案, 创建数字孪生并可快速连接至工业物联网, 用于改善产品性能、降低意外停机风险、优化下一代产品^[6,7]。在产品方面, 达索公司基于数字孪生 3D 交互平台, 利用该平台持续收集的用户反馈信息, 不断改进产品实物的性能^[8]。

作为高耗能的催化裂化、煤气化、多晶硅生产等化工行业的核心主流装备, 流态化反应器的高效数字化、智能化, 是化工行业实现低碳转型和变革发展的瓶颈^[9]。针对传统气固流化床的研究主要侧重于以下几个方面, 机理研究--传统研究将关注气固流化床中发生的物理和化学过程, 包括固体床颗粒的悬浮、混合、沉降, 气体与固体颗粒之间的传质、传热以及化学反应等。通过对流体力学、传质、传热和化学反应等基本原理解析和实验研究, 揭示气固流化床的运行机制以及各种因素对流化床性能的影响^[10]。

实验研究--传统研究还注重对气固流化床的实验研究。通过在实验设备中模拟气固流化床的工作条件, 采集相关数据, 如固相浓度、气体压降、温度分布等, 以验证和验证机理模型的准确性, 并对流化床的性能进行评估^[11-13]。仿真模拟--传统研究也会利用数值方法进行气固流化床的仿真模拟研究。通过建立气固两相流动的数学模型和计算流体力学模型, 模拟气固流化床中的流体力学行为、传质、传热和化学反应等过程。仿真模拟可以提供详细的流场、温度分布和颗粒运动轨迹等信息, 对气固流化床的性能和操作条件进行优化设计和预测^[14-18]。通过实验、机理、仿真的研究, 旨在深入了解气固流化床的基本原理以及因素对其性能的影响。这些研究为气固流化床的优化设计和工业应用提供了理论基础和技术支持。

流态化反应器由于涉及到多组分复杂颗粒体系的流动、传热与传质, 其基于真实工业过程测试和仿真数据同化的数字孪生技术和基于数字孪生镜像

的智能计算分析系统是整个领域低碳化的难点, 需要多相流测试、多尺度仿真与人工智能等多领域的技术集成^[19]。本文致力于构建一种流化床数字孪生体, 可用于气固流化床的实时监测、基于机理模型的优化模拟以及基于深度学习方法的运维异常检测和策略控制优化, 从而建立其可应用于个性化的工业过程降碳增效的数字孪生模型。

2 流化床数字孪生体框架

典型的数字孪生体通用框架从基础物理层到顶层应用层依次可分为系统物理层、数据感知层、仿真模型层与数字孪生功能应用层, 层与层之间、数字孪生体与物理实体之间经由虚实数据的双向传输紧密联系在一起, 每一层的实现均基于前面各层。结合气固流化床实际情况, 确立了如图 1 所示的气固流化床数字孪生体的构件框架。

(1) 数据采集和预处理阶段:

收集流化床实验数据, 包括气固两相的速度、浓度、温度等重要参数; 对实验数据进行预处理, 例如去噪、异常值处理、数据插值等, 以确保数据的质量和完整性。

(2) 数值模拟阶段:

根据流化床的特性和问题需求, 选择适当的数值模型, 如流体力学、传热学和动力学等模型; 进行计算模拟, 采用计算流体力学 (CFD) 等数值方法, 基于所选的数值模型进行流化床的模拟。这一步骤会生成计算模拟的结果数据。

(3) 模型校准和验证阶段:

将计算模拟的结果与实验数据进行比对和验证, 以评估模拟结果的准确性和可靠性; 可能需要调整数值模型中的参数或改进模拟方法, 以提高模拟结果与实验数据的一致性。

(4) 数字孪生体构建阶段:

将经过校准和验证的计算模拟结果作为数字孪生模型的一部分。将实验数据与计算模拟结果进行对应, 以构建数字孪生体的模型。可以使用机器学习或优化方法来构建数字孪生体。

(5) 数字孪生体应用阶段:

使用数字孪生体模型进行不同场景下的流化床行为预测、系统优化等应用。验证数字孪生体的可靠性和适用性, 与实际运行的流化床进行对比和评估。



图 1 气固流化床数字孪生体的构件框架

(6) 结果分析和优化阶段:

分析数字孪生体模型的结果, 提取有关流化床行为和性能的洞察和知识。基于数字孪生体的分析结果, 进行流化床的优化设计和改进, 以提高系统的效率和稳定性。

在每个阶段, 需要综合考虑数值模型、实验数据和实际流化床的特点, 并采用适当的算法和方法

进行处理。此外, 框架中的步骤可以根据具体问题的需求进行调整和扩展。通过流化床数字孪生体框架, 研究人员和工程师可以更全面地理解流化床的行为和性能, 实现实时监测、预测和优化, 并为流化床设计和工艺改进提供更准确的指导。

2.1 系统物理层

系统物理层主要对应气固流化床系统的物理实

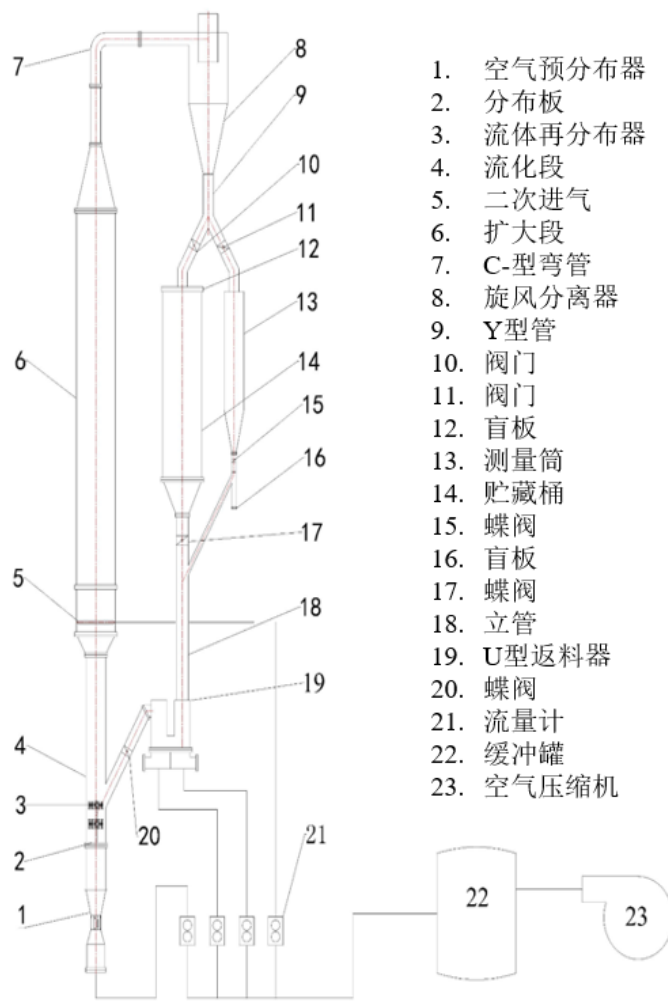
体, 作为系统数据信息源提供系统运行数据及系统环境参数。该装置主要由气固流化床、储气罐、压缩机等部分组成, 其中流化床为气固流化区域, 其基本工作流程如图 2。

首先由鼓风机将空气压缩到储气罐中, 为了防止流化床冷模装置受到压力过大而破裂, 压缩罐中的气体通过减压阀减压后经过转子流量计进入流化床。流化段底部进气口设置有气体预分布室及分布板, 在分布板上铺有一层 200 目的筛网, 使得进气流化段内的气体分布更加均匀。当颗粒流化输送到扩径段后, 为了防止颗粒由于速度降低而导致在扩径段大量地堆积, 扩径段设置有二次进气管, 进一步提高颗粒的运动速度。颗粒经旋风分离器分离后经储料罐储存, 经返料立管进入 U 型返料器。在 U 型返料器设置有两路进气便于颗粒的输送和流化。

2.2 数据感知层

数据感知层基于物理底层进行数据采集、传输工作。由于环境变化和老化等因素的影响, 根据系统理论知识和仿真需求所建立的模型可能存在一定误差。为了实现对气固流化床运行状态的全面在线监控和评估, 需安装各类高精度传感器装置在线获取并分析运行数据, 以实现气固流化状态多维度、全局式和实时性的深度感知, 目前已有采集参数集如表 1。

通过传感器采集实际系统运行过程中的状态信息, 并将其与设备及环境的静态数据、历史运行数据以及离线试验数据等多维度数据进行融合。然后, 对运行数据进行全方位的感知, 建立数据动态关联比对分析, 修正模型状态参数, 以增加模型与实际系统之间的一致性。在这个过程中, 数字孪生体模型的参数和状态将通过迭代和增量方式不断更新, 从而不断提高模型的质量。



1. 空气预分布器
2. 分布板
3. 流体再分布器
4. 流化段
5. 二次进气
6. 扩大段
7. C-型弯管
8. 旋风分离器
9. Y型管
10. 阀门
11. 阀门
12. 盲板
13. 测量筒
14. 贮藏桶
15. 蝶阀
16. 盲板
17. 蝶阀
18. 立管
19. U型返料器
20. 蝶阀
21. 流量计
22. 缓冲罐
23. 空气压缩机

图 2 流化床基本工作流程图

表 1 传感器采集参数集

传感器	测量参数	传感器选型	分布位置
浓度传感器	固体径向分布	电容层析成像 ECT	流化段
压力传感器	轴向压力分布	差压传感器	流化段和扩径段
流量计	进气流量	转子流量计	流化段和返料管

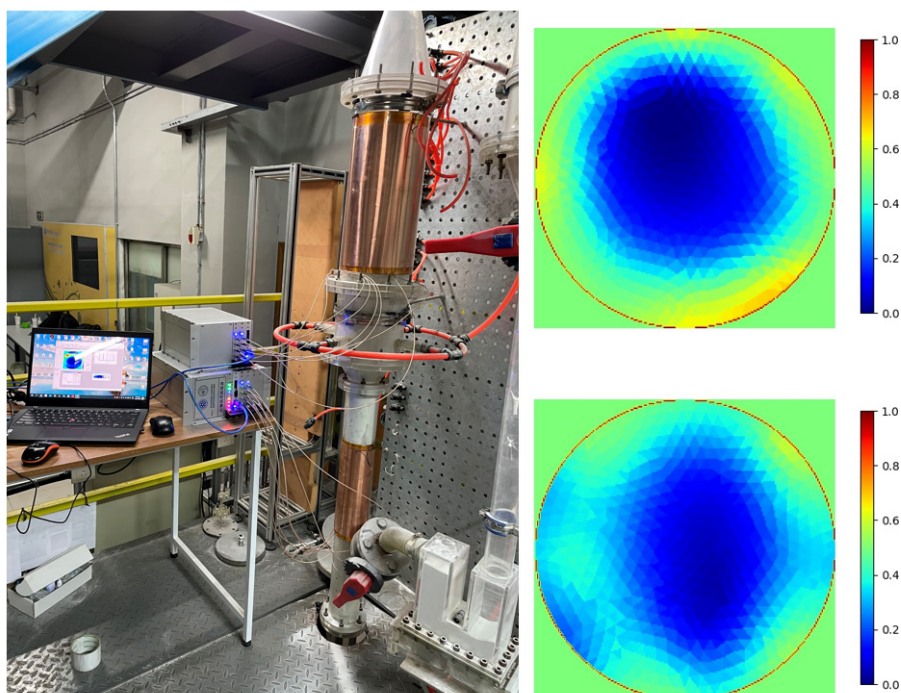


图 3 ECT 传感器安装及测试

以流化段颗粒浓度测试为例，目前对流化段颗粒浓度的测量常用有侵入式的光纤探针及非侵入式的层析成像技术，如图 3 所示 ECT (Electrical Capacitance Tomography) 层析成像模块。在实际应用中，由于 ECT 电容层析成像仪器电极本身具有一定高度，其测量的颗粒浓度为该高度之间的平均浓度数据，进而为数字孪生体提供准确的微观层次流态化数据，并为进一步的人工智能处理提供了机器学习的数据源。

2.3 仿真模型层

仿真模型层基于物理层所得多维度数据，结合流化床工作机制，通过理论模型与数据驱动模型融合的混合建模技术构建流化床数字孪生体，实现对物理流化床的虚拟映射。

气固流化床理论模型主要基于 N-S 方程及气固曳力模型，构成数字孪生体模型的物理特性；数据驱动模型则根据所采运行数据分析处理，从设备各

类状态量数据中挖掘出表征设备运行状态的特征参数，同时避免物理模型计算复杂及模型难以随实际情况灵活变化的问题。

流化床层压力分布是流化床中表征反应器是否稳定运行的关键参数，根据气固两相相互作用的机理可知，压力分布的均匀性和稳定性对于反应效率、传质过程以及固体颗粒的停留时间等都有重要影响。相较于气固浓度分布只能间接测得的参数，压力分布可直接测量，数据获取更加方便准确。而数字孪生技术实现模型准确性和有效性的关键就在于选择可观测且敏感的参数作为特征参数。选择以压力分布为统一变量构建气固流化床数字孪生模型，从而为气固流化床镜像仿真模型的准确性提供保障。典型气固流化床数字孪生仿真模型的建立过程如图 4。在建立具有准确性的气固流化床孪生特性的基础上，结合 ECT 层析成像技术测得固相浓度分布，围绕着设备在运行期间从旋风分离器捕集的粒径分布，将

进一步构建反应稳定性识别、系统运行风险预测数字孪生模型。

镜像仿真模型将气固流化床特性从抽象特性描述转化为有理论和数据分析作支撑依据的数学表达式。根据图 4 和图 5 所示气固流化床数字孪生体建模的构件方法和路线, 可结合气固流化床运行机理以及实验数据率先构建以压力为中心的气固流化床特性。根据压力数据的可测性, 能更加直观通过压力反应流化床运行特性, 降低建模复杂度从而克服传统气固曳力模型通用性差、构建流程复杂的问题, 为数字孪生技术在流化床应用领域研究提供理论和工程价值。

一个功能强大、交互性高、具备可视化效果的数字孪生界面见图 6。在前端方面, 使用 JavaScript 作为脚本语言和 React 作为代码框架, 可以构建出交互性强、响应迅速的用户界面。JavaScript 的灵活性和 React 的组件化开发方式将使得界面开发更加高效和可扩展。此外, 采用 ECharts 作为图表框架, 可以轻松绘制出各类图表, 帮助可视化展示数字孪生数据。为了增加界面的动态效果, 使用了 Unity 作为动效的脚本语言。Unity 拥有丰富的特效库和交互性能, 可以创建出生动、跨平台的动画效果, 提升用户体验。同时, 利用 3DMAX 这一强大的模型工具, 设计和编辑出三维模型, 赋予数字孪生界面更加真

实和具体的展现。在后端方面, 由于 Java 具有广泛的应用领域和强大的生态系统支持, 选择其作为后端脚本语言。Java 可以处理服务器端的逻辑和数据操作, 确保稳定性和安全性。而 MySQL 作为后端数据库则能够高效地存储和管理大量的数据, 满足数字孪生应用对数据存储与检索的需求。

3 气固流化床的数字孪生功能应用

通过各类传感装置实时获取设备运行数据后, 我们可以访问流化床数字孪生模型数据库, 该模型结合运行压力数据、速度流量数据、流化床气固浓度数据和旋风分离器出口粒径分布数据等, 实现了模型驱动和数据驱动的融合。借助这个模型, 我们可以进行设备状态评价和设备故障诊断, 从而实现设备在物理空间和虚拟空间的同步运行与交互比对。通过在线实时获取流化床的运行数据和运行状态评估等信息, 我们可以实现气固流化床的故障诊断、运行控制参数优化。同时, 我们将这些功能封装成服务, 并以应用软件的形式提供给用户使用。

3.1 设备状态评价

在流化床运行期间, 颗粒浓度分布和压降受到多种因素的影响, 包括气固曳力和颗粒与壁面静电作用。局部颗粒浓度分布和压降会随时间变化, 仅仅采用预设操作和固定初始床层高度的模型难以确保流化床设备一直处于最佳工作状态。

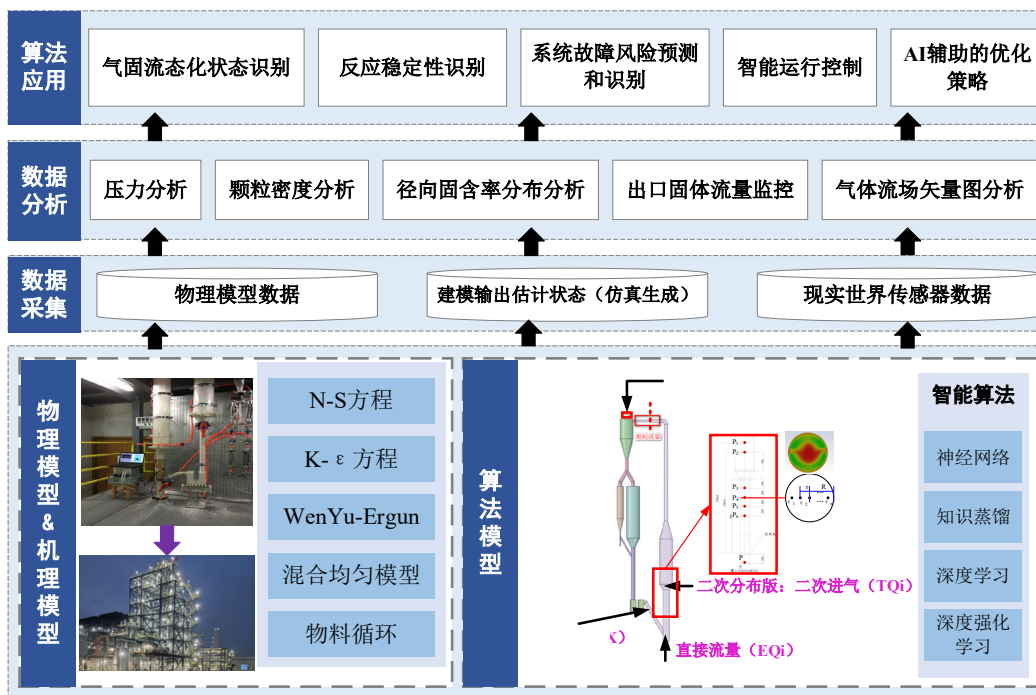


图 4 气固流化床数字孪生体的构建流程图

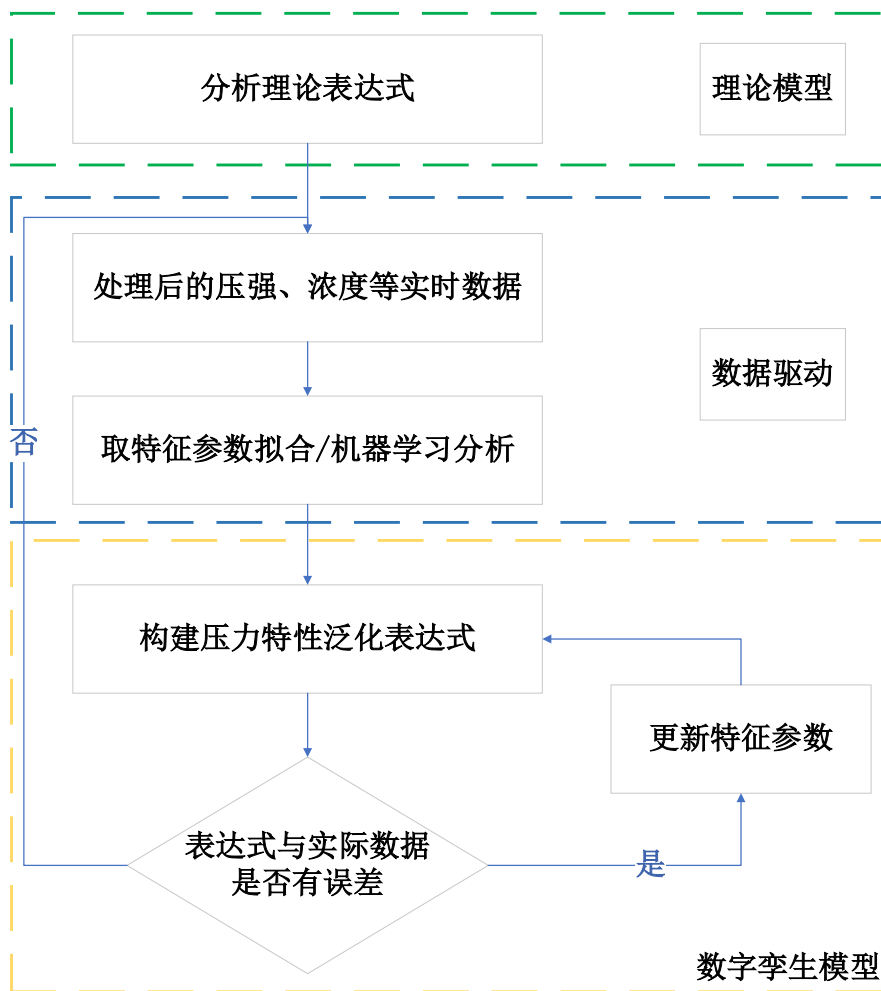


图5 数字孪生模型构建流程

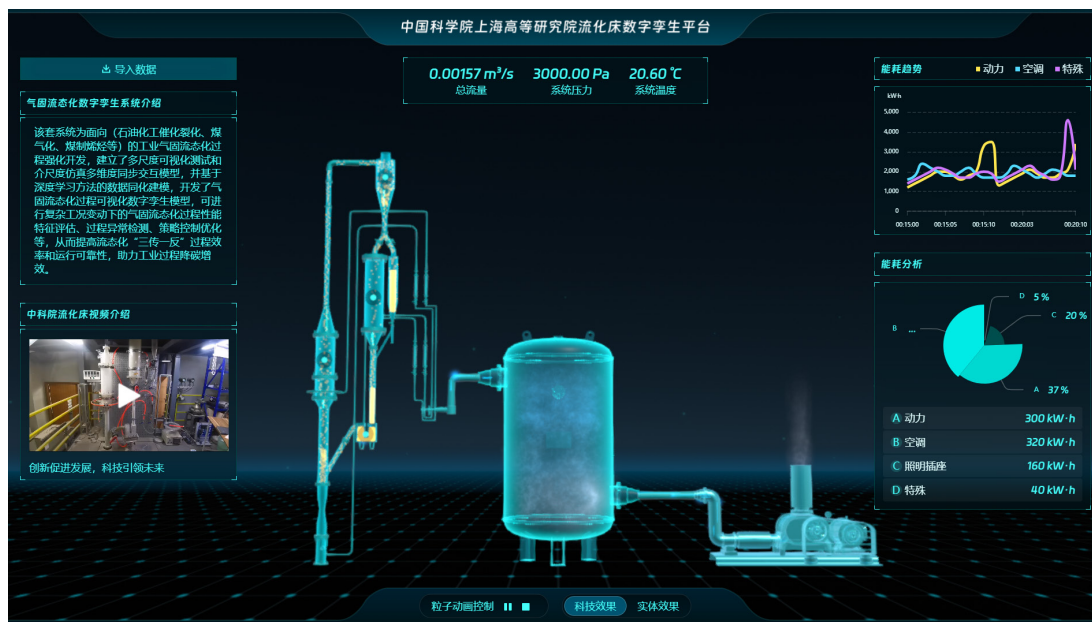


图6 气固流态化床孪生平台架构

基于数字孪生技术, 流化床的实体和数字孪生模型之间可以实现实时数据交互, 使得数字孪生系统能够实时感知系统和环境的变化。通过使用数字孪生校正技术, 模型参数可以自主修正, 以适应真实系统的状态。这样就可以实现流化床运行参数的在线自主校正和优化。数字孪生技术提供了一种高效、实时的方法来跟踪流化床的实际运行情况, 并利用模型对运行参数进行在线调整和优化, 以保持流化床设备处于最佳工作状态。基于多相流测试的实时运行数据评价可以通过对设备中不同相态流体的测试和监测数据进行分析 and 评估。流型测试是其

中的一项重要内容, 它可以用来确定流体在设备内的流动特性、流型转变以及可能存在的压力损失等情况。通过流型测试, 可以及时了解设备内部流体的状态, 并提供参考信息用于设备状态评价。

另外, 反馈调控数值模型可以在实时运行过程中进行工况模拟, 并通过与实际运行数据进行对比, 来评估设备的运行状态。这种数值模型可以基于设备的物理特性和运行参数, 结合现有的运行数据, 进行模拟预测。通过与实际数据的比对, 可以发现异常情况、提前预警潜在故障, 并采取相应的调整措施来优化设备的运行状态。

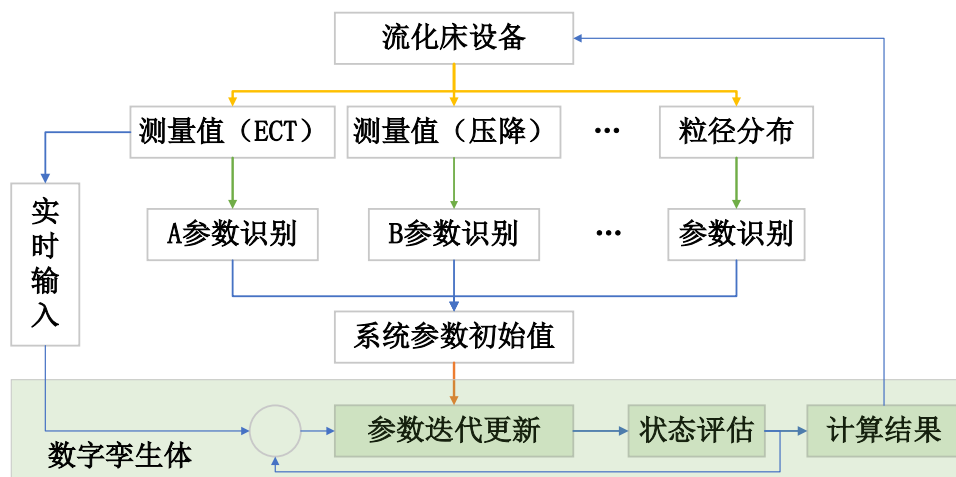


图7 设备状态评价

3.2 设备故障诊断

流化床在实际运行过程中可能出现流化段指标异常、旋风气固分离效率低下等故障, 对反应器性能和可靠性造成影响。例如流化段内分布器布气不均匀引起的气固混合不均匀、压降和反应速率变化等问题, 将会降低催化剂使用寿命并影响产品产率分布。仅凭运维人员经验判断很难准确定位和修复故障, 由于装置的大型化及整体的复杂性, 在流化床正常运行期间对其进行拆解检测会加大运维工作量, 导致生产成本增加。因此, 需要稳健且具备成本效益的方式来确保电解槽运行的可靠性和维护的高效性。当前流化床设备故障诊断领域还鲜有研究, 业界广泛使用的仍是基于模型或数据驱动的方法。但故障建模、监测和诊断涉及影响因素较多, 准确识别故障对于模型构建精度要求较高。利用对物理系统数字仿真的数字孪生新技术, 可实时精确估计流化床反应器工作特性的变化, 基于数字孪生技术

一体化感知监测体系, 对流化床反应器物理实体的运行状态与环境数据实时感知, 实现其在运维阶段的实时监测。设备数字孪生模型在孪生数据的驱动下与物理设备同步运行, 可形成故障诊断等数据, 在此基础上应用机器学习等人工智能算法对数字孪生模型进行仿真计算与数据分析, 将故障诊断模型数据不断迭代优化, 并将实时计算分析所得数据信息与指令反馈给物理实体设备, 自主驱动物理实体设备进行缺陷诊断和故障预警, 快速制定合理运维策略。图8是数字孪生技术在流化床设备故障诊断应用的具体流程图。目前, 基于神经网络的诊断模型被认为具有一定的准确性, 为同时判断故障的严重等级, 可利用组合神经网络的诊断模型。随着进气流量及气固流化床初始料高的变化, 模型中对故障特征参数的判定条件可能会变, 也可能存在故障分析阶段未统计到的新型故障, 诊断模型需要实时更新以增加故障分类并避免误判。

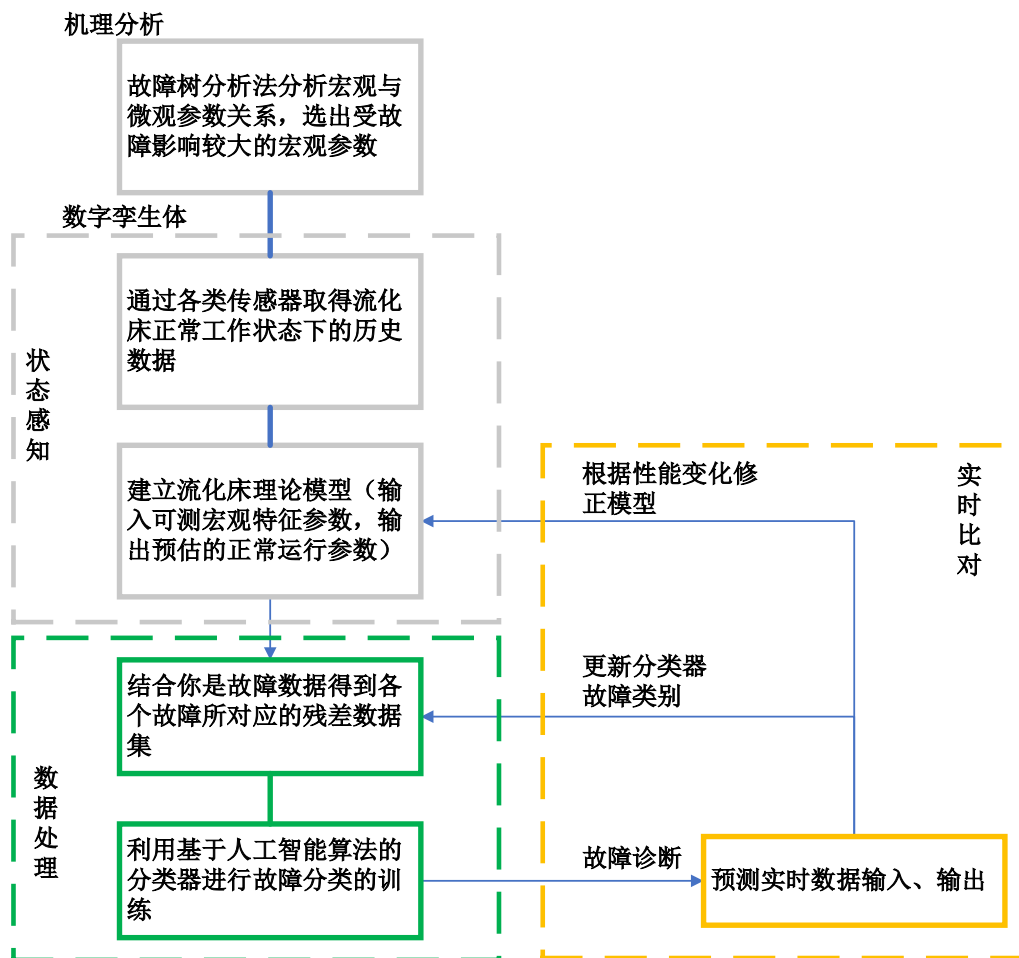


图 8 基于数字孪生的流化床故障诊断

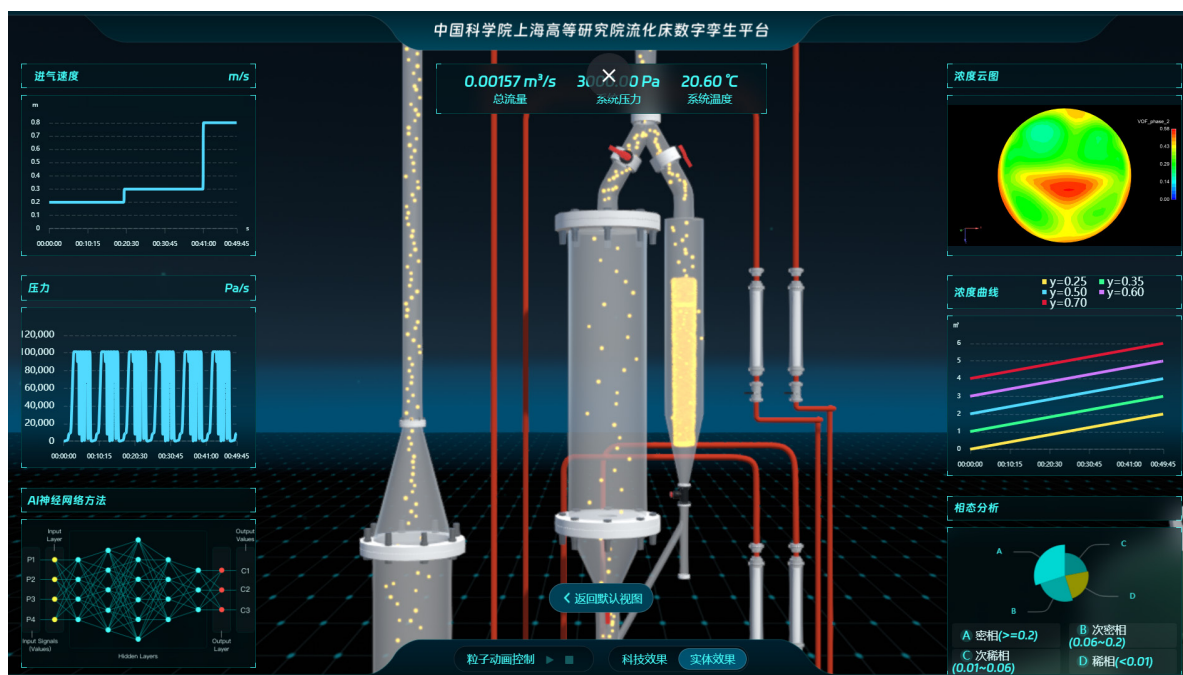


图 9 数字孪生体界面状态

4 结论

数字孪生技术是在数字空间中实现物理实体同步动态映射的新型建模技术, 将其应用于气固流化床设备, 可对系统运行特性与运维管理等情况进行高效分析, 为解决气固流化床设备数字化、智能化及先进运维提供了全新的思路与技术方法。

针对框架顶部功能应用层, 给出了气固流化床数字孪生体在设备故障诊断、运行控制参数整定优化 2 个典型场景下的应用技术路线, 并指出了应用所需的支撑关键技术。

气固流化床数字孪生可以准确模拟和预测气固流化床系统的动态特性和性能, 从而为优化设计和操作提供指导。基于气固流化床数字孪生的故障诊断和预测方法可以提高系统的可靠性和安全性, 最大程度地减少停机时间和维修成本。可以帮助实现实时监测和控制, 通过模型预测和优化算法实现最佳操作策略, 提高能源效率和生产效率。数字孪生技术可以加速气固流化床系统的创新和改进, 通过虚拟试验和参数优化快速获得最佳解决方案。

5 展望

在工程应用中, 气固流化系统数字孪生体及其应用的落地仍面临许多共性问题亟待完善:

数据质量与可靠性: 获取高质量的实时传感器数据, 如压力、温度和流速等参数, 以准确建立数字孪生模型。同时, 确保传输链路的稳定性和数据的可靠性, 以避免误差和不确定性对模型的影响。

模型复杂性与参数化: 气固流化系统具有复杂的动态行为和非线性特性, 建立精确的数字孪生模型需要合适的参数化方法和模型结构选择。如何处理系统的复杂性和变化性, 是需要解决的问题。

不确定性建模: 气固流化系统存在不确定性因素, 如颗粒物性、反应动力学等。数字孪生模型需要对这些不确定性进行建模, 并在模型更新和预测中加以考虑, 以提高模型的准确性和鲁棒性。

实时性与计算性能: 对于实时监测和控制应用, 数字孪生模型需要能够在实时环境下进行计算和优化。如何提高模型的计算效率和实时性, 以适应快速变化的工程应用要求, 是一个关键问题。

模型验证与鲁棒性评估: 数字孪生模型在应用前需要进行验证和评估, 以确保其准确性和鲁棒性。如何有效地进行模型验证和评估, 使得模型能够在

不同操作条件和故障情况下保持良好的性能, 是需要研究的问题。

综合完善以上共性问题, 可以有助于推动气固流化系统数字孪生体及其应用, 提高工程应用的性能和效益。

参考文献

- [1] 肖荣美. 《工业能效提升行动计划》专家解读系列文章之五: 数字化绿色化协同促进工业节能提效. 2022.
- [2] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(01): 1-18.
- [3] 贺兴, 艾芊, 朱天怡等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(06): 2009-2019
- [4] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(01): 1-13.
- [5] 余斌, 朱伟佳. 石化行业数字孪生技术的应用探索[J]. 化工进展, 2019, 38(S1): 278-282.
- [6] Pitchaikani A, P.K., Strandberg M, et al., Liquid cooling applications in twin builder-industrial paper in Tokyo[J]: The 2nd Japanese Modelica Conference. 2018.
- [7] 安世亚太科技股份有限公司数字孪生体实验室, 数字孪生体技术白皮书 (2019) 2019: 北京.
- [8] Fourgeau, E., et al., System Engineering Workbench for Multi-views Systems Methodology with 3DEXPERIENCE Platform. The Aircraft RADAR Use Case[J]. Springer International Publishing, 2016.
- [9] Ge, W., L. Guo, and J. Li, Toward Greener and Smarter Process Industries[J]. Engineering, 2017. 3(2): p. 152-153.
- [10] 金涌, 程易, 白丁荣等. 中国流态化技术研发史略[J]. 化工进展, 2023, 42(06): 2761-2780.
- [11] 杨越林. Beckmann 重排流化床反应器的冷模实验与模拟[D]. 浙江大学, 2022.
- [12] 张海东. 气-固流化床鼓泡-湍动流型转变特性及流动控制研究[D]. 天津大学, 2020.
- [13] 白玲. 流化床稠密气固两相瞬态流动的离散元模拟与高速摄影实验研究[D]. 江苏大学, 2020.
- [14] 王维, 洪坤, 鲁波娜等. 流态化模拟: 基于介尺度结构的多

- 尺度 CFD[J].化工学报,2013,64(01):95-106.
- [15] 高希. 鼓泡和湍动流化床两相流体力学新模型研究[D]. 浙江大学,2013.
- [16] 徐骥,葛蔚,任瑛等.Particle-Mesh Ewald(PME)算法的 GPU 加速[J].计算物理,2010,27(04):548-554.
- [17] 陈飞国,葛蔚,李静海.复杂多相流动分子动力学模拟在 GPU 上的实现[J].中国科学(B 辑:化学),2008(12):1120-1128.
- [18] 吴锦坤. 鼓泡流化床流动特性的直接数值模拟[D].浙江大学,2006.
- [19] Guo, L., J. Wu, and J. Li, Complexity at Mesoscales: A Common Challenge in Developing Artificial Intelligence[J]. Engineering, 2019. 5(5): p. 924-929.

版权声明: ©2024 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/>

