

ICS XX.XXX
CCS X XX

CPCIF

中国石油和化学工业联合会团体标准

T/CPCIF 00XX—2022

磷及磷化工 生产领域数字孪生应用
指南

Phosphorus and phosphorus chemical industry—
Application Guide for digital twins in the field of production

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国石油和化学工业联合会 发布

目 录

前 言 3

1 范围 4

2 规范性引用文件 4

3 术语和定义 4

 3.1..... 4

4 缩略语 4

5 基于工业互联网平台的生产领域数字孪生应用体系架构 5

6 磷矿数字孪生三维可视化应用 6

 6.1 综合集控..... 6

 6.1.1 应用功能 6

 6.1.2 技术实现方法 7

 6.2 安监生产..... 7

 6.2.1 应用功能 7

 6.2.2 技术实现方法 8

 6.3 智能掘进..... 8

 6.3.1 应用功能 8

 6.3.2 技术实现方法 8

 6.4 智能开采..... 9

 6.4.1 应用功能 9

 6.4.2 技术实现方法 9

 6.5 智能运输..... 10

 6.5.1 应用功能 10

 6.5.2 技术实现方法 10

 6.6 智能巡检..... 10

 6.6.1 应用功能 11

 6.6.2 技术实现方法 11

7 磷化工数字孪生应用 11

 7.1 物料配方优化..... 11

 7.1.1 应用功能 11

 7.1.2 技术实现方法 12

 7.2 生产运行控制..... 12

 7.2.1 应用功能 12

7.2.2 技术实现方法	13
7.3 工艺优化.....	13
7.3.1 应用功能	13
7.3.2 技术实现方法	13
7.4 设备管理.....	14
7.4.1 应用功能	14
7.4.2 技术实现方法	14
7.5 质量管理.....	14
7.5.1 应用功能	14
7.5.2 技术实现方法	15
参 考 文 献	16

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》的规定起草。

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。

本文件由中国石油和化学工业联合会提出。

本文件由中国石油和化学工业联合会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

磷及磷化工 生产领域数字孪生应用指南

1 范围

本标准是指导我国磷及磷化工企业在生产领域开展数字孪生应用的功能技术性指导规范。

本标准围绕磷及磷化工企业基于工业互联网平台的生产领域数字孪生应用体系架构,对磷矿和磷化工生产领域典型业务场景实现的功能和技术实现方法进行明确,为磷及磷化工行业企业开展数字孪生应用提供参考和指导。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

数字孪生 intelligent plant

数字孪生是现有或将有的物理实体对象的数字模型,通过实测、仿真和数据分析来实时感知、诊断、预测物理实体对象的状态,通过优化和控制指令来调整物理实体对象的行为,通过相关数字模型间的相互学习来进化自身,同时改进利益相关方在物理实体对象生命周期内的决策。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

APP: 应用程序 (Application)

API: 应用程序编程接口 (Application Programming Interface)

CAD: 计算机辅助设计 (Computer Aided Design)

C/S: 客户端/服务器模式 (Client/Server)

DCS: 集散控制系统 (Distributed Control System)

FCS: 现场总线控制系统 (Fieldbus Control System)

GPS: 全球定位系统 (Global Positioning System)

GIS: 地理信息系统 (Geographic Information System)

IaaS: 基础设施即服务 (Infrastructure as a Service)

IoT: 物联网 (Internet of Things)

LIMS: 实验室信息管理系统 (Laboratory Information Management System)

LP: 线性规划 (Linear Program)

MIS: 管理信息系统 (Management Information System)

MES: 制造执行系统 (Manufacturing Execution System)
 MQTT: 消息队列遥测传输 (Message Queuing Telemetry Transport)
 NB-IoT: 窄带物联网 (Narrow Band Internet of Things)
 OPC: 用于过程控制的 OLE (OLE for Process Control)
 PLC: 可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller)
 PaaS: 平台即服务 (Platform as a Service)
 QP: 二次规划 (Quadratic Program)
 RFID: 射频识别 (Radio Frequency Identification)
 SCADA: 数据采集与监视控制系统 (Supervisory Control And Data Acquisition)
 SaaS: 软件即服务 (Software as a Service)
 TSN: 时间敏感网络 (Time Sensitive Networking)
 4G: 第四代通讯技术 (The 4 Generation Mobile Communication Technology)
 5G: 第五代通讯技术 (The 5 Generation Mobile Communication Technology)

5 基于工业互联网平台的生产领域数字孪生应用体系架构

磷及磷化工生产领域数字孪生应用体系架构是一个基于工业互联网平台的通用制造体系模型,是磷及磷化工企业构建、开发、集成生产领域数字孪生应用的基本框架,分为物理层、边缘层、平台层和应用层四层架构,各层的功能定位如图 1。

物理层是生产和控制的终端,包括与巷道掘进、磷矿石开采、主辅运输、通风排水、安全防控、化验分析、工艺数据、设备管理和生产运行控制等业务相关的人、机器和系统,是数据的原始来源。

边缘层靠近磷矿及磷化工生产现场,主要依靠智能传感、PLC/DCS/FCS、SCADA、4G/5G、NB-IoT、TSN 等网络、通信、数据采集与传输技术,大范围、深层次采集生产现场物理层的相关数据,并进行协议转换和边缘计算处理。

平台层是工业互联网应用的核心,底层为基础资源层(IaaS),通过计算、存储、网络、虚拟化等技术,构建平台底层云计算资源池,提供计算、存储和标识解析服务。通用 PaaS 层主要提供接入工业互联网各类设备的管理、IaaS 基础资源的统筹调用和管理、PaaS 层各类算法、模型、应用程序接口(API)运维以及故障恢复功能。工业 PaaS 层包括微服务组件库、应用开发、数字孪生开发、通用 PaaS 服务、数字孪生应用方案的开发等。

应用层是在 PaaS 平台基础上,开发提供磷矿三维可视化和磷化工数字孪生各类应用和解决方案,包括综合集控、安监生产、智能掘进、智能开采、智能运输、智能巡检、物料配方优化、生产运行控制、工艺优化、设备管理、质量管理等。可借助 APP 开发应用实现模型化和软件化,通过调用 APP 实现对制造资源的优化配置,满足不同场景的 APP 应用。

注:磷及磷化工生产领域数字孪生应用基于工业互联网平台的通用功能架构进行构建、开发、集成和展示,本标准重点对磷矿及磷化工生产过程的典型数字孪生应用技术实现方法和实现的功能进行描述,不在对工业互联网平台功能架构的各组成部分进行详细说明,详见工业互联网平台白皮书,中国信息通信研究院,2017。



图 1 磷及磷化工基于工业互联网平台的生产领域数字孪生应用体系架构

6 磷矿数字孪生三维可视化应用

按照磷及磷化工基于工业互联网平台的生产领域数字孪生应用体系架构,对磷矿三维可视化重点业务场景数字孪生应用功能和技术实现方法分别进行说明。

6.1 综合集控

运用数字孪生技术建立综合集控平台架构,进行多部门、多专业、多管理层面的数据集中应用、交互共享和决策支持,实现磷矿地质勘探、巷道掘进、磷矿石开采、主辅运输、通风排水、供液供电、安全防控等业务系统的数据融合与分析决策,磷矿井上下各系统实现“监测、控制、管理”的一体化及智能联动控制。

6.1.1 应用功能

a) 数据采集

数据采集通过设备智能化传感器和控制系统获取,由现场层和边缘层实现。工作面设备众多,传感器数量较多,对各类数据实现实时在线监测、分析和校准功能。同时基于多传感器信息融合,实现传感单元保护、数据存储与分析功能,并自发上报自身信息,形成多维感知节点。

b) 数据交互与决策

构建现场网的多种协同传输方式，使用智能路由，制定合理的信息交互机制，使得数据信息在传输时实现自关联、自调配。构建决策支持系统，调用系统内部功能软件，使模型运行、数据调用和知识推理达到有机统一，提高决策水平和质量。

c) 智能联动控制

结合实际应用需求，拓展智能联动控制系统的快速搭建能力，动态配置不同传感器、设备的快速接口能力，支持场景中无人设备、物流设备、工业机器人的模型可视化，实现远程监测和控制。建立分级别的预警、报警机制，实现相关系统间的联锁、联动控制功能。

6.1.2 技术实现方法

a) 数据感知与采集

综合集控平台的系统集成功能支持不同类型数据源的集成，对开放且使用频率高的数据通信协议制定标准接口，采用适配器方案，将标准接口传递的参数针对特定的数据协议进行适配，通过标准的数据结构对数据进行解析。通过中间件配置工业互联网关所接设备和数据的相关信息，生成配置文件，互联网中间件将配置文件通过 MQTT 通信模块传输并保存至本地，通过协议配置解析模块、数据配置解析模块对配置文件进行解析，获取工业互联网关设备和数据相关信息，启动多协议适配与解析模块，匹配设备类型，启动对应协议库，同设备进行通信交互，完成设备多协议解析。

b) 决策模型构建

集成视频监控、设备运行监测、环境监测以及其他传感器实时上传的监测数据，构建设备研制、改进、定型、维护、效能评估等的多种决策模型，真实再现生产流程、设备运转过程及工作原理，实现设备精密细节、复杂结构、复杂动作的全数据驱动显示。

c) 信息集成与智能联控

采用面向属性对象技术构建智能联控系统，集工程组态、操作、信息管理于一体，将生产系统中所有受控对象及相关信息，集成到综合集控平台。智能联动控制系统采用模块化设计，支持多种标准协议（如 Profibus、Modbus、OPC、IEC104 电力规约等）接口，采用面向属性对象技术，将生产系统中所有受控对象及相关信息统一集成到平台，通过属性链接、定制化的工作界面、安全控制等，保证信息的正确性，并及时做出正确判断。

6.2 安监生产

基于磷矿水、火、瓦斯和顶板等安全监控系统，实现重大危险源在线检测，实时采集重大危险源数据，建立重大危险源指标体系库，运用先进的预警模型，实现对磷矿水、火、瓦斯和顶板等重大危险源的集成管理和超前预警。基于数字孪生智能化服务系统，通过虚实融合的数字化建模，实现设备的智能管控与实时诊断，降低重大危险事故发生率，提高磷矿整体安全管理水平。

6.2.1 应用功能

a) 设备实时监测和健康预测

在工业设备生产过程中，对设备生产运行信息、设备监控信息、设备维护信息以及管理信息实时感知监控，对矿山设备实现运行故障识别、故障实时监测、质量缺陷预测和健康预测功能。

b) 环境安全实时分析

按照磷矿安全要求规程，实时监测井下掘进工作面瓦斯浓度、氧气浓度、风量、温度、湿度等的环境参数。通过采集工作面数据，建立重大危险源指标体系库。将采集到的信息进行实时处理，并进行预测，将预测结果与体系库比对，实现井下掘进工作面的环境安全预警。

c) 辅助安全智能化管理

将 5G 移动通讯技术融入到支持异构协议的物联网融合通信网络系统，实现实时定位与三维 GIS、视频智能识别与联动、辅助运输与智能化调度。

6.2.2 技术实现方法

a) 数字化建模

结合矿山运行机理特点，围绕“人-机-环”生产要素的孪生模型设计方法与交互机制，建立矿山设备参数、工艺数据、运行环境等各项指标数据间的机理模型，并生成矿山数字孪生虚拟模型，实现在线预测产品质量趋势，以及设备的生产状态。

b) 故障特征提取

通过大数据建模、计算分析和深度学习技术，对矿山设备故障诊断及健康预测进行表征，并给出相应的预防措施和解决方案。通过故障分析及预测，优化设备维修计划，通过设备劣化倾向分析，提出预测性维修建议，减小关键设备的非计划停机时间，避免安全事故的发生。

c) 环境安全场景数字孪生模型建立

以磷矿实际生产场景中的物理实体特征、运行机理、演化规律为基础，结合 GPS 信息理论、在线监测与状态判别技术、虚拟仿真与虚实融合交互技术，建立环境安全场景数字孪生模型，实现环境安全场景的在线感知与状态分析、交互在线与干预预测、智能决策与协同管控、安全态势分析与预警。

6.3 智能掘进

应用智能探测、自动定向及导航、巷道断面自动截割成形、自动锚护、高效除尘、数字孪生等先进技术与装备，使掘进工作面生产系统具有智能感知、自主决策和自动控制功能，实现掘进工作面远程集控，系统高效协同运行的目标。

6.3.1 应用功能

a) 智能导航

将掘进系统导航信息与三维动态地质模型进行有效融合，满足成型巷道在空间位置上的使用要求，实现掘进定向、掘进机定位以及掘进系统协同作业。

b) 智能截割

实现截割作业的程序化控制，可以在外界工况变动的情况下及时调整截割参数，实现截割参数与环境、装运系统动态自配准。基于遗传算法计算出自适应截割方法，优化截割参数，提高截割的安全性和高效性。

c) 实时监测与控制

通过各种传感器以及视频、通讯设备对矿山生产动态信息进行实时在线监测。对智能定形截割、智能导航、人员安全预警、环境安全预警、设备故障预警、关键部位视频监控，实现远程一键开启、关键部位远程视频监控、异常状态远程人工干预的目标。

d) 远程虚拟控制

解决地面和井下远程集控中心对掘进工作面“人-机-环”协同、自主管控问题，实现多机协同控制、设备状态可视监控与健康诊断、环境智能检测、主动安全防护、无线数据网络管理、供配电等功能。采用超限处理、区间报警、设备姿态调整、区间停车等多种控制方式，实现系统自调性、自组织性和自稳定性。

6.3.2 技术实现方法

a) 边缘感知和模型构建

通过对掘进工作面地质条件、掘进环境、装备状况、围岩状态的在线感知，构建掘进工作面高精度

三维动态地质模型。根据掘进过程中实际地质信息对模型进行修正，将装备状态监测参数、超前探测参数、巷道成型质量与三维地质模型进行有效融合，为磷矿开采的截割、支护工作提供数据支撑。

b) 行为控制模型构建

基于巷道围岩时效控制技术，围岩失稳判据、锚杆支护承载特性、磷岩截割载荷特性等截割、支护的作用机理及特性，构建装备行为控制模型。将采集到的各类传感器数据汇聚并引入由装备行为准则为支撑的掘进决策控制平台中，基于大数据分析、人工智能等技术，形成决策思想。

c) 状态分析模型建立

基于多源感知信息，以设备多场景下运行规律和状态演变规律为基础，结合数字孪生、故障预测与健康管理、人工智能和大数据挖掘等技术，建立运行机理、经验知识、数据深度特征融合、设备状态分析模型，实现矿山机电系统运行状态知识表达、异常工况状态在线识别和关键部件内部状态预测分析。

d) 掘进系统虚拟模型动态修正

地面远程监控层将采集到的本地掘进系统的各种信息收集整理，建立磷矿巷道系统三维虚拟模型和掘进系统运动学模型，将掘进系统的传感器数据实时反馈给虚拟掘进系统，运用数字孪生驱动技术对掘进系统虚拟模型进行动态修正，实现掘进系统的远程虚实同步控制。

6.4 智能开采

通过三维激光扫描技术，对作业场景和环境进行高精度建模，结合先进控制技术，配合智能控制软件，使用大型的机械设备进行高效开采。利用远程可视化技术实时监控作业情况，对现场进行干预，也可根据智能自适应系统进行智能分析和决策。

6.4.1 应用功能

a) 远程可视化开采

通过工作面场景可视化技术，将工作面环境与装备的实际状态迅速、直观地展现给位于安全位置的远程开采人员，开采人员根据观察得到的信息进行决策并对开采过程进行干预，保证开采人员作业环境的安全和作业的高效。

b) 智能化开采

以智能控制软件为核心，通过采矿机记忆截割、液压支架跟机自动化等先进技术，确保割煤、推溜、移架、运输、降尘等开采操作智能化运行。

c) 自适应开采

智能自适应开采技术模式依赖于综采成套装备及自动化技术，通过感知技术形成对矿井环境和施工装备状态的认知，通过系统集成控制技术实现对执行装备的操控。采取“感知-分析-决策-控制”全自动化开采策略，利用机器视觉、多源信息融合与三维物理仿真等技术对所采集数据进行智能分析，实现自适应开采。

6.4.2 技术实现方法

a) 地下场景建模

对地质勘察、设计、施工及城市规划、管理中各种地下空间地理分布信息进行数据采集、存储、管理和分析，通过虚拟现实技术、三维地质建模技术和三维激光扫描技术，对作业场景和环境建模，实现地质体、矿产等的可视化和信息化。

b) 远程机械设备连接与控制

基于 Internet 远程串口通信，与通讯对象之间通过串口进行远距离通讯。远程通过网络将操作参数传入主控机，主控机通过串口将数据发送至下位机，同时现场的传感器也可以将采集数据实时返回至

控制机，基于液压支架自动化等先进技术，实现智能化运行。

c) 自适应开采

通过采矿装备精确导航、定位技术、复杂工况计算机视觉识别技术和磷矿大数据技术等实现矿山智能感知。基于 5G 技术等，实现掘进、运输、提升、排水、通风、地质信息、经营管理等环节的智能协同。通过机器学习对现场实时数据进行样本归纳、类比推理分析，实现知识挖掘、计算和持续迭代更新，体现适应性、动态性和演化性的智能体理性决策特征，自动给出方案并持续优化方案生成，实现自适应开采。

6.5 智能运输

磷矿智能辅助运输系统以车辆精确定位信息、车载智能终端为基础，辅助井下信号灯控制系统、智能调度系统、语音调度系统和地理信息系统，实现车辆监控、指令下达、运输任务调配、失速保护、报警管理、应急响应等功能。斜井轨道运输利用精确定位、智能视频等技术，实现人车分离、自动道岔变换等功能。辅助车辆智能调度管理主要针对井下轨道运输、无轨胶轮车等运输方式，实现物料运输、人员运输等辅助运输车辆的智能管控、智能规划路径与智能调度。

6.5.1 应用功能

a) 智能运输

通过信息技术、通信技术、控制技术、传感器技术和系统综合技术，并应用于地面交通系统和互联网云服务系统，实现运输过程的实时可视化管控。

b) 设备物联

以智能车载终端为核心，依托井下位置服务和无线通信网络，实现矿井中的任何物品通过互联网相连接，实现互联互通。

c) 智能调度

通过运输系统的智能调度功能实现远距离连续传输以及特殊路段运输。

d) 转运自动化

针对不同矿井生产环境差异较大的问题，智能运输系统从各矿井实际环境出发，自动选用合适的运输设备和辅助运输设备，实现转运自动化。

6.5.2 技术实现方法

a) 设备信息交换与通讯

按照约定的协议，通过 RFID、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备，使矿井中的任何物品与互联网相连接，进行信息交换和通讯，实现智能化识别、定位、追踪、监控和管理。

b) 调度在线优化

通过车载智能感知与控制系统的多传感融合技术，实现障碍物感知。通过域控制器实现车辆自动避障行驶与路径优化。通过双模转向电动无轨胶轮车控制系统实现上层域控制器与底层线控系统通信，实现车辆基于预瞄轨迹点的横向与纵向控制。

c) 矿井下辅助运输管控一体化技术

基于工业互联网架构的矿井下辅助运输管控一体化技术和一体化通信定位网络，采用 workflow、智能报表、GIS 地图等组件，实现基于二维、三维地图的辅助运输一体化管控应用，包括车辆调度、物资管控、转运自动化、运输管理等。

6.6 智能巡检

磷矿智能巡检包括对生产环境、生产设备和工作人员生产行为进行的巡检，在巡检过程中及时发现

设备安全隐患，减少设备问题引起的停产。

6.6.1 应用功能

a) 生产环境的智能巡检

针对不同生产事故的特点，对各类建筑进行建模实现物理虚拟映射，通过物联网技术对建筑物的智能元素实现远程监测管理，通过数字孪生模型驱动磷矿生产环境的智能巡检工作。

b) 生产设备的智能巡检

通过数字孪生模型和人工神经网络，对生产设备进行实时健康巡检检测。通过计算机视觉系统和生产现场的各类传感器对生产设备进行实时检测，驱动工业机器人进行故障设备的及时维修与更换维护。

c) 生产人员的安全智能巡检

通过对生产现场人员活动情况的实时跟踪，基于大数据分析技术，构建生产人员生产行为的数字孪生模型，实现生产人员的安全智能巡检。

6.6.2 技术实现方法

a) 矿山信息的管理和整合

集成 MIS、CAD、GIS 和三维可视化技术，在统一的时间坐标和空间框架下，对现场生产信息、海量异质的地理信息、地质信息、采掘工程信息、危险源信息、设备分布等矿山信息，进行全面、高效和有序的管理和整合。

b) 矿区地面地下生产结构虚拟场景的构建

基于建立的地质模型、设施设备模型、管网模型等，建立矿区地面地下生产结构的虚拟场景。有效组织和管理矿区地形、道路、河流、水体、建筑、植被、巷道、硐室、钻孔、地质构造、工作面、采空区、设备、管线、地层，以及各类监测监控真实对象，将开采现场与数字地球融为一体。

c) 大数据分析与挖掘技术的应用

通过各系统空间信息数据和矿区地面地下生产结构虚拟场景信息的集成，结合视频智能分析、智能定位、智能研判、大数据技术，基于地理信息系统，对巡检设备、机器人、人员、告警事件等要素的位置、类型、状态等信息进行直观展示和分析，基于专业的模型算法，对巡检工单、巡检问题、设备问题等核心数据进行多维度可视化分析。

7 磷化工数字孪生应用

按照磷及磷化工基于工业互联网平台的生产领域数字孪生应用体系架构，对磷化工生产领域重点业务场景数字孪生应用功能和技术实现方法进行说明。

7.1 物料配方优化

根据生产特定产品的需求，生产特定产品所需要的相关物料和操作信息为产品的生产配方。根据产品生产过程中的规格、抗冲强度、用途等特点，建立产品模型和配方数据库，以及生产特定产品的配方模板和产品切换逻辑模板，提供产品切换的优化操作策略，减少产品切换时间，降低过渡料，从而达到降低生产成本，提高生产效率的要求。

7.1.1 应用功能

a) 产品配方管理与牌号切换

产品配方管理与牌号切换系统主要实现质量指标的预测计算、建立产品的配方模板和产品切换逻辑

模板，实现产品切换的优化操作策略功能。

b) 质量指标及操作约束估计

在产品生产的过程中，有些过程约束及质量指标无法实时测量，为实现平稳牌号切换需采用软测量技术实现过程约束及质量指标的在线估计，主要软测量在线计算包括：反应器内氢气实时浓度、反应器内催化剂实时浓度、反应器内助催化剂实时浓度、粉料熔融指数、粉料等规度、粉料抗冲强度、循环汽露点温度等。

c) 牌号自动切换

根据机理模型和软测量模型，建立不同牌号切换逻辑和操作优化条件，形成不同牌号生产的数字孪生模型，缩短牌号任意转换的时间，减少过渡料，保证反应器在过渡过程中的安全性，防止爆聚，过渡过程结束后，反应器达到新牌号的理想稳态。

7.1.2 技术实现方法

a) 建立关键质量软测量模型

建立等规度、抗冲强度、用途等指标的机理模型以及数据驱动的软测量模型。

b) 建立物料配方数据库

建立所属生产牌号的物料配方模型库，形成物料配方模板和数据库。

c) 建立产品配方模板

根据现场情况及工艺机理分析，构建包含催化剂信息、工艺温度、压力、进料物流、各个变量的操作上下限以及其它工艺设定的产品配方模板，也可以根据一个牌号的工艺控制所需要的内容建立一个模板，并以此作为配方模板。

d) 建立不同牌号产品切换逻辑和操作优化模式

根据机理模型和软测量模型，建立不同牌号切换逻辑和操作优化条件，形成不同牌号生产的数字孪生模型。通过物料配方数字孪生系统，提供服务接口，集成工业互联网平台进行运行展示。

7.2 生产运行控制

在工业互联网平台的基础上，以数字孪生系统的动态实测虚拟空间多维模型为基础，兼前馈、反馈、滚动优化为一体，在装置操作平稳的基础上，在每一个运行周期（一般为 1 分钟）根据装置约束条件，通过稳态优化（LP 或 QP）算法寻找装置效益最佳操作点，并通过动态控制器驱动装置平稳的向最佳操作点靠近，实现卡边操作，以提高高价值产品收率、降低装置能耗之目的。

7.2.1 应用功能

a) 生产过程变量预报

基于建立的生产过程数字孪生模型集，实现生产过程的实时模拟仿真及变量预报，提供在虚拟空间对实际生产过程的实时仿真和预报功能。

b) 产品质量实时预报与评价

在虚拟空间，根据原料状况与产品质量管理需求，从数字孪生模型集中选取对应的预报模型实现产品质量实时预报与评价。基于数字孪生模型集中的预测控制模型，通过闭环控制仿真形式进行优化控制预报，包括对被控变量控制效果的预报和装置经济指标变化的预报。根据操作方案的变化以及对关键非线性相关变量的自动判断，在模型集的多个预测控制模型之间进行自动智能切换，从而实现控制系统的数字孪生，并基于演示平台进行展示。

c) 产品质量预报和优化控制预报

基于生产过程及其控制系统的数字孪生，实现基于数字孪生模型集的产品质量预报和优化控制预报，并基于预报进行操作决策。在物理空间，实现对实体装置的产品质量实时计算和优化控制。基于工

业互联网平台，根据虚拟空间的操作决策结果，选择匹配目前生产状况的模型和参数，以及未来对模型和参数的操作切换方案，从而实现虚拟空间在模型、参数和操作上对物理空间过程生产运行的指导。

7.2.2 技术实现方法

a) 构建生产过程数字孪生模型集

面向生产过程运行的不同操作方案，包括不同原料方案、不同产品方案、不同操作条件，建立适用于每个工作方案下的产品质量预报模型和预测控制模型，构成完备的生产过程数字孪生模型集，基于物理空间产品质量化验数据对模型性能进行实时评价、实时更新。

b) 构建虚拟空间控制系统的数字孪生

虚拟空间的控制系统根据原料与产品质量管理所给出的当前操作方案，基于数字孪生模型集中对应当前操作方案的产品质量预报模型，进行产品质量实时预报。基于数字孪生模型集中的预测控制模型，通过闭环控制仿真形式进行优化控制预报，包括对被控变量控制效果的预报和装置经济指标变化的预报。

c) 产品质量预报模型的实时更新

原料与产品质量管理根据产品质量预报和产品质量化验结果，针对模型失配对产品质量预报模型进行再学习，进而对产品质量预报模型进行更新，对物理空间的产品质量预报模型进行指导。

7.3 工艺优化

最优化生产和操作是企业追求的生产目标。通过各岗位的规范操作和协同工作，保证生产过程的平稳运行。这种工作模式的实现，需要采用较为完善的基于模型参数的智能化拟合技术来建立精准的装置全流程模型，实现实际生产流程在虚拟空间中的重构，通过虚拟空间模拟仿真结果与物理空间操作优化的交互，为装置实际生产优化运行提供指导。

7.3.1 应用功能

a) 数据调和

基于工业互联网平台采集的 DCS、MES、LIMS 等海量数据信息，采用数据调和和技术，减小误差的影响，提高测量数据的质量。根据不同流程特性建立有针对性的物料平衡、能量平衡数据调和方案，为虚拟空间模型仿真提供良好的数据基础。

b) 生产装置数字孪生

基于数据接口技术，集成虚拟空间模型与物理实体装置运行数据，形成生产装置数字孪生，通过开发人机交互界面，利用模型对实际过程进行仿真测算，评估关键操作条件对实际生产单元产品收率、性质等关键指标的影响，评估结果通过工业互联网平台进行输出和展示。

c) 生产装置优化操作

利用数字孪生模型和智能优化算法，根据物理空间装置实际优化目标需求进行装置操作优化并给出工艺参数优化方案，通过工业互联网平台发布到上位机或工程师站，提升虚拟空间模型应用深度和广度，及时为生产装置优化操作提供建议。

7.3.2 技术实现方法

a) 数据调和和技术

磷化企业生产过程系统数据是过程控制与优化的基础。通过仪表测量获取过程数据不仅存在随机误差而且有时还存在显著误差，直接影响过程控制与优化的准确性。采用数据调和与显著误差检测技术，调整测量数据，剔除显著误差，减小随机误差的影响，提高测量数据的质量是过程控制与优化实现过程

中重要的环节。

b) 建立过程数字孪生模型

基于生产过程工艺原理和物理空间装置运行特性建立过程数字孪生模型,实现虚拟空间的仿真模型自动获取和处理生产数据、模型自动校正以及模型预测值和物理空间实测值的对比验证展示,提升数字孪生模型的准确性。

c) 反应动力学与反应过程建模

反应动力学建模,主要决定于对各个反应的速率描述是否准确,而决定反应速率的关键在于指前因子和活化能两个动力学参数;反应过程建模,对一个稳态操作的塔,按严格法建立的数学模型包括组分物料平衡方程、相平衡方程、摩尔分率加和方程、总包物料平衡方程和焓平衡方程。针对每块塔板进行这些平衡的计算即可形成整个塔的严格模型,最终输出准确的产品流量和组成信息。

7.4 设备管理

应用边缘计算、大数据、人工智能、IoT 技术以及工业设备机理模型与算法,建设设备智能化应用平台,实现设备运行状态监测、智能故障预警、故障诊断与在线分析功能。

7.4.1 应用功能

a) 设备运行状态监测

建立覆盖工厂关键设备的传感网络,实现对工厂关键设备运行状态的全面监测。

b) 智能故障预警

利用大数据和数据模型分析技术,进行设备的动态模拟,实现智能故障预警和故障预测分析。

c) 故障诊断与在线分析

搭建可视化环境,利用专家的知识与经验,实现故障诊断与在线分析。

7.4.2 技术实现方法

a) 数据采集与处理

通过传感器与边缘计算设备安装设计,实现对设备振动、温度、转速等信号或数据的采集、数据预处理、特征提取、状态报警、数据传输、数据存储等。

b) 构建设备仿真模型

应用三维建模技术构建设备仿真模型,实现设备传感器空间部署、部件测点阈值、设备运行状态的虚拟化映射。

c) 建立多时空尺度数字孪生模型

通过大数据、人工智能以及设备机理等模型求解技术,对设备部件的分频特征、设备相关工艺等数据进行数据分析、挖掘、自学习,建立一维的阈值模型、二维的关联模型、多维的故障数据工程分析模型以及基于神经网络的故障诊断模型。

d) 设备智能化应用平台建设

基于设备智能化应用平台进行智能诊断系统、数据中心、智能监测系统、业务系统、客户端系统的建设。

7.5 质量管理

基于工业互联网平台数字孪生应用对产品质量管理的总体要求,对装置或工艺单元的运行关键指标和质量指标进行管理,对生产装置实施过程智能控制和产率优化,并实现主要产品牌号自动切换。

7.5.1 应用功能

a) 先进质量控制指标评估

通过六西格玛管理体系进行质量控制指标评估，计算过程能力指数和工艺过程性能参数，基于过程稳定性判据评估质量控制指标，计算控制限与报警限，对比分析过程能力指数和工艺过程性能参数，构建以统计控制为核心的先进质量控制指标评估系统。

b) 多变量质量预测

将采样时间为几秒或几分钟的辅助变量，对需要经过一段时间的人工化验才能得到，存在长时间延迟和滞后的主导变量，利用快速采样的辅助变量提供对主导变量的实时估计，为多变量质量预测提供实时的预测值。

c) 质量指标的闭环卡边控制

质量控制指标计算通过基于机理动态模型的线性和非线性软测量技术完成。软测量技术可以实现生产过程重要的不可实测变量以及产品重量指标的计算，为操作人员提供实时计算结果，指导操作。同时为智能控制提供支持，实现质量指标的闭环卡边控制，提高质量平稳性、节能降耗。

7.5.2 技术实现方法

a) 数据采集

基于实时数据库、LIMS 系统、MES 和 DCS 系统数据，开发数据接口，实时采集生产过程数据，选择相关生产变量形成数据共享与交换中心，为产品质量管理提供数据服务。

b) 无缺陷的过程设计

通过系统地、集成地采用质量改进流程，实现无缺陷的过程设计，并对现有过程进行定义、测量、分析、改进和评价，消除过程缺陷和变异。

c) 质量控制指标软测量建模

在线实时计算过程控制的产品质量指标，根据在线分析仪的在线分析结果或实验室采样化验分析结果构建在线校正系统，校正软测量系统的模型参数或调整其零点，从而提高计算结果的准确性。

d) 构建多变量预估控制器

预测控制算法是使用过程模型来控制对象未来行为的一类计算机算法，其基本原理通过预测模型、滚动优化和反馈校正三个基本要素的运行进行体现。

参 考 文 献

- [1] 工业互联网平台白皮书//工业互联网产业联盟、中国信息通信研究院，2017
 - [2] 数字孪生体技术白皮书（2020 年版）//安世亚太科技股份有限公司、数字孪生体实验室
 - [3] 数字孪生及其应用探索//北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院、北京理工大学 机械与车辆学院、东南大学 机械工程学院
-