

基于工业互联网平台的流程行业生产线

数字孪生应用案例

一、项目背景

1、企业简介

恒力石化股份有限公司是世界 500 强企业恒力集团的核心上市子公司，于 2016 年在上海证券交易所主板上市。恒力集团 2019 年总营收 5567 亿元，现位列世界 500 强第 181 位、中国企业 500 强第 46 位、中国民营企业 500 强第 8 位、中国制造业企业 500 强第 13 位，获国务院颁发的“国家科技进步奖”和“全国就业先进企业”等殊荣。

公司具备国家高新技术企业资质，行业创新核心技术专利达 146 项，牵头工信部智能制造新模式应用项目，公司所在大连市为上年度国务院表扬激励的工业稳增长和转型升级成效明显市。

目前，恒力石化在工业互联网基础建设方面已初见成效，现已实现生产自动化、DCS 闭环控制全覆盖；基础网络、通信、调度、广播等系统已实现“融合通信”，视频监控系统实现了厂区无死角式全覆盖；ERP、MES、设备管理、安环、LIMS 等上层应用系统已经进入深化应用阶段。

2、项目情况

基于工业互联网平台的流程行业生产线数字孪生系统，建设周期 2019.6-2021.12，实施单位为恒力石化股份有限公司、国

家工业信息安全发展研究中心、中国化工经济技术发展中心、北京航空航天大学、北京化工大学、北京绥通科技发展有限公司、苏州恒力智能科技有限公司、中科数智（北京）科技有限公司、恒力石化（大连）炼化有限公司、恒力石化（大连）有限公司、恒力石化（大连）化工有限公司。项目立项的必要性如下：

一是智能制造战略落地与创新性应用的需要

实现智能制造是世界制造业转型升级的重大趋势，但践行智能制造研究与实施中的重点和难点是如何解决物理世界和信息世界之间交互与共融。基于工业互联网平台的数字孪生生产线通过物理生产线与虚拟生产线的双向真实映射与实时交互，达成生产线生产和管控最优，是智能制造战略真正落地的抓手，是智能制造创新性应用的新模式。

二是流程行业转型升级与高质量发展的要求

流程行业中的石化行业具有安全形势严峻、环保标准严格、人工成本高以及能耗物耗成本高等特点，行业转型升级需求迫切。基于工业互联网平台的数字孪生生产线系统，能够将生产线的信息世界与物理世界深度融合，实现企业“人、机、料、法、环、测”全要素的智能感知互联、实时交互与控制，支撑企业智能协作和提供更加精准的服务，加快转型升级。

三是石化企业提质增效与可持续发展的需要

受新能源应用和市场影响，石化企业正走向“炼油化工化”，面向燃料油的大批量的生产模式转向多品种小批量化工生产模

式。基于工业互联网平台，建立面向原料、产品需求、公用工程约束频繁变化的炼油生产过程数字孪生系统，能够适应“炼油化工化”新模式，实现石化企业提质增效、安全平稳运行的可持续发展目标。

围绕流程行业智能化转型升级的迫切需求，首先完善基于工业互联网平台的流程行业生产线数字孪生系统体系架构，并以此为指导，面向流程行业产品与生产线感知、分析、决策和执行等过程建立数字孪生对象模型。通过研究信息物理融合计算方法，提升多时空尺度模型的统一计算求解能力，时间尺度覆盖秒、分、小时，空间尺度覆盖设备、工序、产线、数字孪生系统，优化关键工艺性能指标的模型预测功能。在此功能的基础上，进一步完善支持物料配方优化、工艺参数设计与仿真、生产过程建模与控制、设备故障诊断与远程运维等关键场景应用的数字孪生解决方案，服务石化等流程行业。

生产线数字孪生系统的目标是通过物理生产线与虚拟生产线的双向真实映射与实时交互，达成生产线生产和管控最优。要实现该目标，需要以生产实时数据为驱动、数字孪生模型为引擎、数字孪生应用为抓手。

二、 项目实施

依托工业互联网平台，基于工业互联网平台的流程行业生产线数字孪生系统提供基于数字孪生技术的物料配方优化、工艺参数设计与仿真、生产过程建模与控制、产品质量管理、设备故障

诊断与远程运维、腐蚀管理 6 个解决方案。

（一） 物料配方优化

物料配方解决方案适用于原料、产品需求变化较多的生产线，主要方法为多模型优化控制和质量卡边优化。

多模型优化控制一般用于生产过程非线性、原料性质变化、负荷变化、产品加工方案等对软测量模型和控制模型参数有较大影响时，能够提高优化的适应性，解决多样化的原料来源和产品需求问题。通过对优化性能、控制（动态调节）性能、模型预估性能和过程干扰性能进行分析和报告，控制工程师可以根据这些结果来确定控制器性能的改变并改善控制器性能，如下图所示：

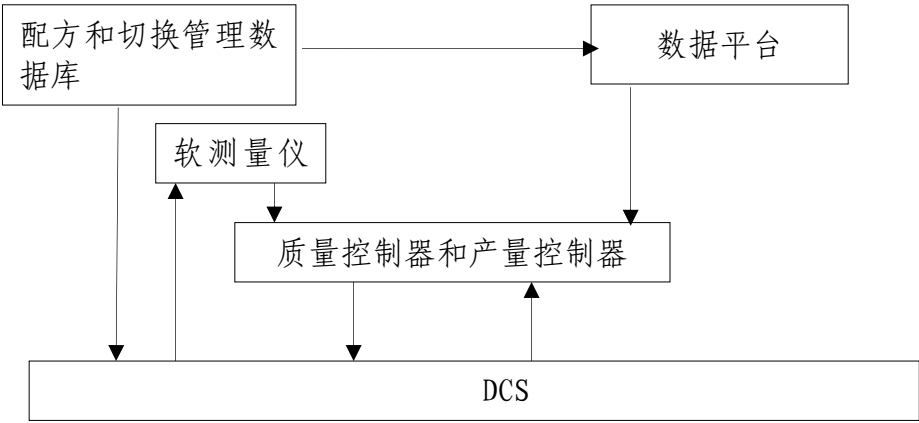


图 1 数字孪生系统物料配方优化解决方案示意图

但石化生产过程物料变化频繁、装置耦合复杂、多层次运行，物质转化和能量传递机理复杂，传统的机理建模往往难以精确描述复杂过程物质流和能量流耦合、传递与反应等关系；数据驱动的建模由于缺乏过程单元内部结构和机理信

息，严重依赖于数据样本的数量和质量，难以对过程机理进行深层次的分析 and 解释。但是，机理分析有利于抓住过程的本质特征和主要矛盾，获得有效的模型结构；数据驱动的方法则可以自动获取潜藏在数据中的信息和知识。

本解决方案综合二者的优点，采用人工智能方法挖掘海量工业数据内在的知识信息，建立融合数据和机理分析的混合模型，解决石油化工生产过程模型随原料和产品加工方案变化的难题，开发出面向原料、产品需求变化的石油化工生产过程数字孪生模型，对优化性能、控制（动态调节）性能、模型预估性能和过程干扰性能进行分析和报告，控制工程师可以根据这些结果来确定控制器性能的改变并改善控制器性能。方案如下图：

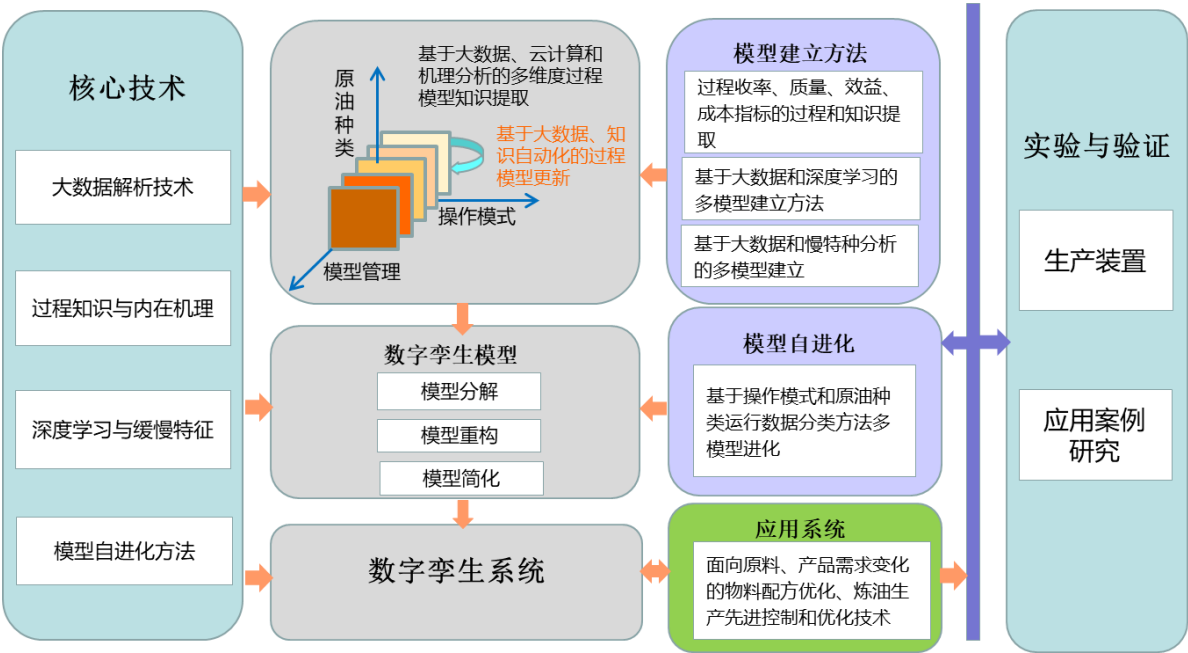


图 2 炼油过程多维度多层次知识提取和模型描述体系和模型建立示意图

基于面向原料、产品需求频繁变化的多模型描述体系和

模型学习方法，本方案在优化控制中实现产品质量指标、控制模型的多模型切换控制，并实现卡边优化。方案如下图所示：

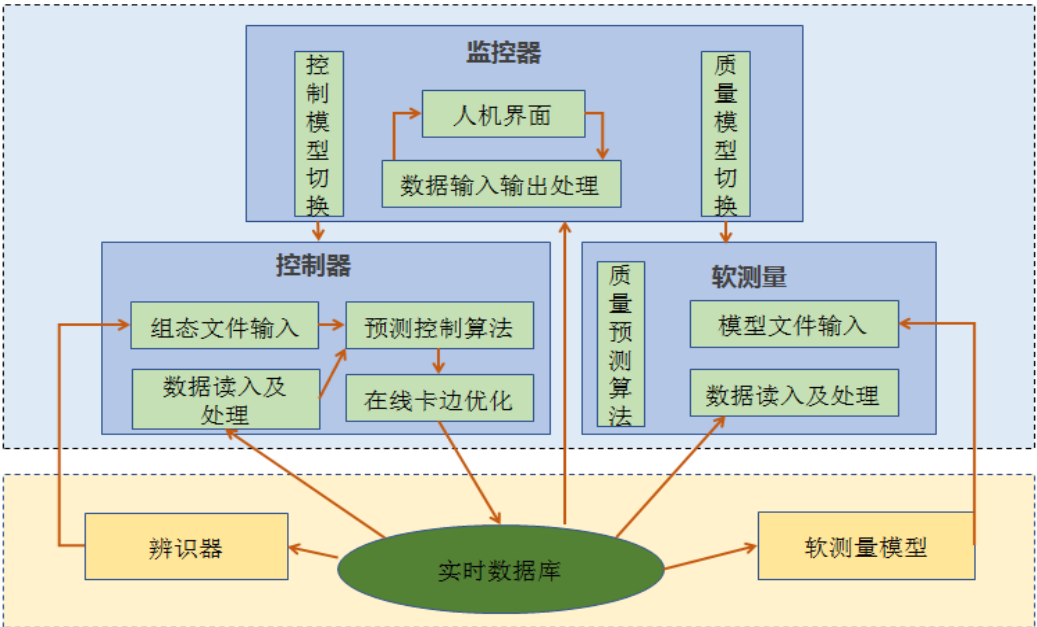


图 3 面向原料、产品需求变化的在线多模型优化控制和质量卡边优化示意图

1. 案例定位

覆盖内容	应用对象	■ 资产级（设备/产品） □ 车间级 □ 企业级
	应用深度	□ 描述 □ 诊断 ■ 预测 □ 处置
	应用领域	□ 设计 ■ 生产 □ 管理 □ 运维 □ 设计制造一体化 □ 全生命周期
	行业	■ 流程行业：聚丙烯产品生产流程 □ 多品种小批量离散行业：

		☐ 少品种大批量离散行业： _____ ☐ 建筑 ☐ 交通 ☐ _____
	重点技术	涉及的单一领域技术或融合技术 ☐ 仿真 ☐ IOT ☐ AI ☐ 仿真+IOT ☐ 仿真+AI ☐ IOT+AI ☒ 仿真+IOT+AI 统一数据/模型语义语法技术 ☐ 管理壳 ☒ 信息模型 ☐ MBD/MBSE/MBE _____ 其他 ☐ 虚拟调试 ☐ 数字线程 ☒ 面向对象描述 ☐ 创成式设计 ☐ 机电一体化 _____

2. 案例优势分析

本案例依托工业互联网平台，融合过程机理和装置运行特性，建设具有良好精度的软测量模型，实现实际生产流程在虚拟空间中的孪生，利用智能优化算法求解熔融指数和等规度最优参数，虚拟空间模拟仿真结果与物理空间操作优化的交互，为装置实际生产进行牌号切换提供优化运行指导。

牌号切换是一项复杂的过程，各种生产变量之间存在强烈的关联和耦合，操作者需要调节多种生产操作条件的方法来达到牌

号切换的目的。在过渡过程中会造成原料和能量的损失，减少过渡时间和过渡料量是牌号切换的优化目标。

本案例根据陶氏化学 Unipol 聚丙烯流化床生产工艺的原理，将聚丙烯气相流化床工艺的 109 种牌号产品性质和生产条件进行收集，构建了聚丙烯牌号产品数据库，为各牌号的聚丙烯产品之间的切换建立了配方模板，并以多种形式将聚丙烯牌号关键指标进行展示。

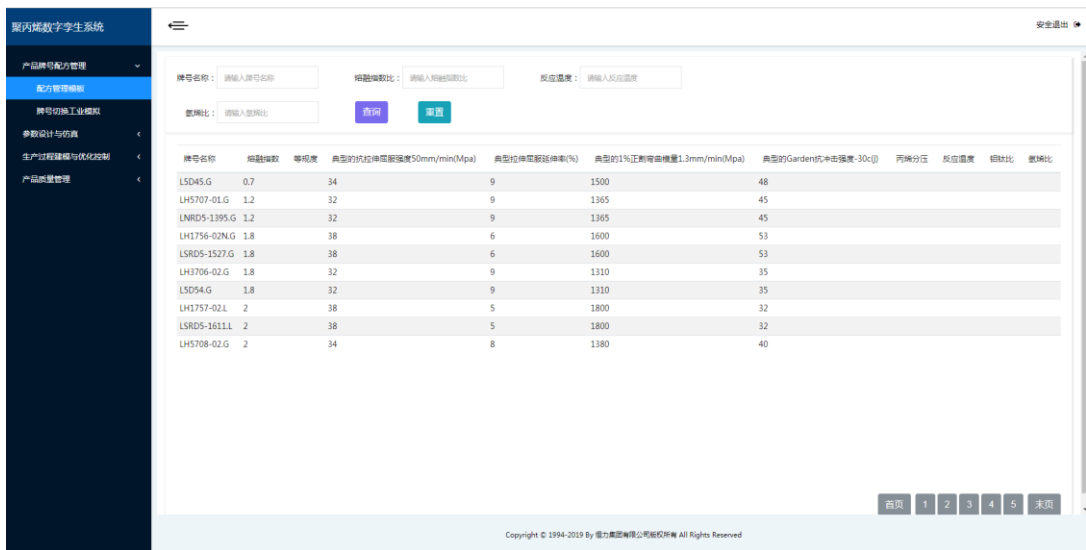


图 4 牌号数据库查询界面

3. 实施步骤及路径

本案例依托于恒力工业互联网平台，利用 java spring 框架结合 HTML 和 JS 技术自主研发了基于 B/S 架构聚丙烯装置的牌号管理与配方优化系统，旨在对聚丙烯牌号切换的过渡过程进行仿真，使工艺用户能够了解牌号切换时关键参数的变化轨迹，深刻理解切换过渡过程各工艺变量对熔融指数和等规指数两个产品决定性指标的影响。重点开发了聚丙烯气相流化床系统静态机理模型，并通过梯度下降，PSO 等优化技术对熔融指数、等规度机

理方程组进行优化求解，从而构建了熔融指数和等规度的软测量模型。本案例对牌号切换的过渡过程进行推演从而可以优化操作，减少过渡产品进而提高经济效益。

(1) 建立聚丙烯关键质量指标软测量模型。

依据聚丙烯反应机理，通过 ip21 数据库接口，lims 数据库接口获取聚丙烯装置的生产数据和产品质量分析数据。将获取的数据构建成输入输出数据集，利用梯度下降和 PSO 优化技术辨识出熔融指数、等规度指标的机理模型。

(2) 建立聚丙烯物产品牌号数据库

调研并收集 Unipol 工艺包中的 109 种牌号的产品性质和操作条件数据，将这些数据存入聚丙烯孪生系统配置的 mysql 数据库中开发牌号管理数据系统实现支持数据增、改、删、查的人机交互功能。

(3) 建立聚丙烯牌号模板和操作切换轨迹演示

根据 Unipol 聚丙烯装置工艺包的操作条件，建立各个牌号的配方模板。实现牌号切换人机交互界面，切换过程中将配方模板数据输入聚合反应静态机理模型，利用机理模型对牌号切换过程进行仿真，并以趋势图的形式将仿真结果进行展示，辅助进行生产过程牌号切换操作优化，减少过渡周期，降低过渡过程的成本消耗，提高收益。

4. 案例推广应用价值

聚合物反应系统牌号管理具有潜在价值的应用系统，工业聚

丙烯装置，通过改变其操作条件，可以生产各种牌号的聚丙烯产品。当从一种牌号切换到另一种牌号时，切换时间长，将产生大量附加值低的过渡产品。如果利用程序使过渡过程时间和过渡料数量减至最小是一个十分重要的研究内容。建立聚丙烯反应器的动态机理模型，结合配方模板模拟，可以实时的预报聚丙烯的熔融指数，等规度等重要产品质量指标的切换趋势，从而对于工艺人员优化牌号切换操作具有重要的指导作用。并可以在此基础上，提高对产品牌号切换过程进行的优化控制，提高专用料的生产量，进而提高装置的经济效益。因此基于工业互联网的聚丙烯的牌号管理与配方管理数字孪生系统是具有潜在的推广价值与市场价值的。

（二）工艺参数设计与仿真

工艺参数设计与与仿真解决方案依赖于过程的数据模型，模型参数的准确性影响化工过程数学模型的精确度，而化工过程的数学模型往往是非线性的，这些非线性方程中的参数有些是无法测量或是非常难测量的，尤其是针对具有多单元、多生产线的工艺流程的装置。

因此，需要采用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，本方案结合初始化反应动力学参数，并通过智能感知、采集获取生产过程操作数据，基于数字孪生系统，使用流程模拟软件建立通用的石化行业高精度、自适应、自学习的数字孪生过程模型，指导工厂工艺参数调整与

设计。方案如下图所示：

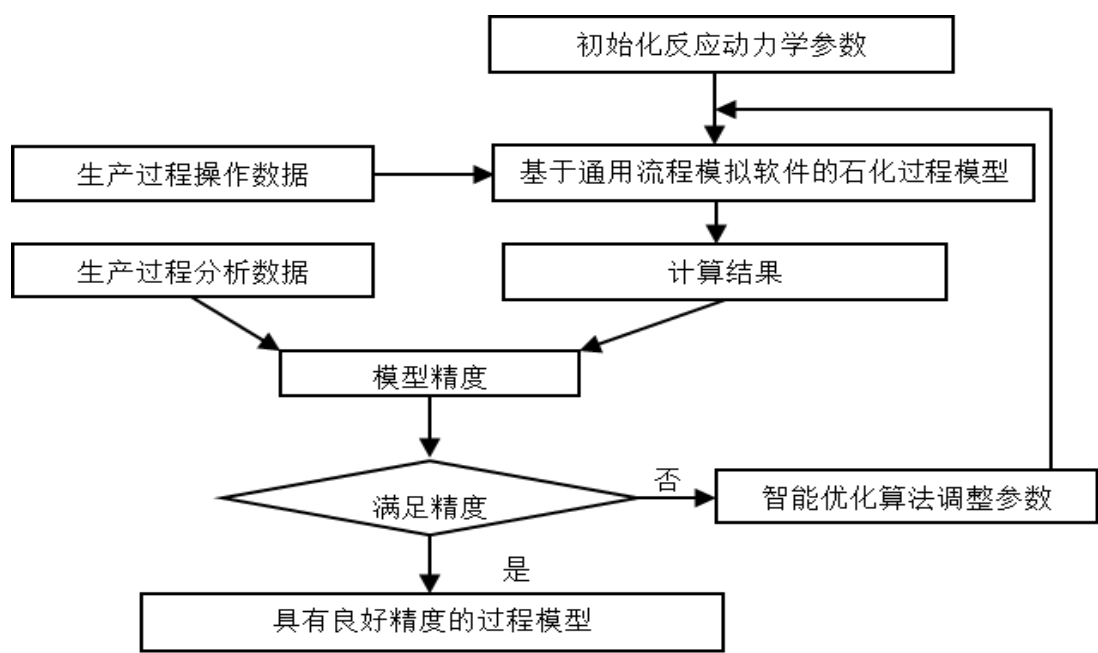


图 5 数字孪生系统工艺参数设计与仿真模型建立解决方案示意图

1. 案例定位

覆盖内容	应用对象	☐ 资产级（设备/产品） ☒ 车间级 ☐ 企业级
	应用深度	☒ 描述 ☐ 诊断 ☒ 预测 ☐ 处置
	应用领域	☐ 设计 ☒ 生产 ☐ 管理 ☐ 运维 ☐ 设计制造一体化 ☐ 全生命周期
	行业	☐ 流程行业： <u>PTA 生产过程</u> ☐ 多品种小批量离散行业： _____

		☐ 少品种大批量离散行业： _____ ☐ 建筑 ☐ 交通 ☐ _____
	重点技术	涉及的单一领域技术或融合技术 ☒ 仿真 ☐ IOT ☐ AI ☐ 仿真+IOT ☒ 仿真+AI ☐ IOT+AI ☐ 仿真+IOT+AI 统一数据/模型语义语法技术 ☐ 管理壳 ☐ 信息模型 ☐ MBD/MBSE/MBE 其他 ☐ 虚拟调试 ☐ 数字线程 ☐ 面向对象描述 ☐ 创成式设计 ☐ 机电一体化 _____

2. 案例优势分析

PTA 生产线的数字孪生方案自下而上依次是装置和基础模型层、操作优化层。装置实时数据通过数据接口送至机理模型层，结合智能算法对模型关键参数进行校正，给模型准确度提供了基本保证。在模型基础上，结合操作条件敏感度分析，建立各操作条件与关键产品的产量或性质之间的非线性对应关系，并对关键信息进行实时预测。同时采用智能优化算法对当前工况进行优化，找到满足约束的最佳操作条件并用图形化界面输出。

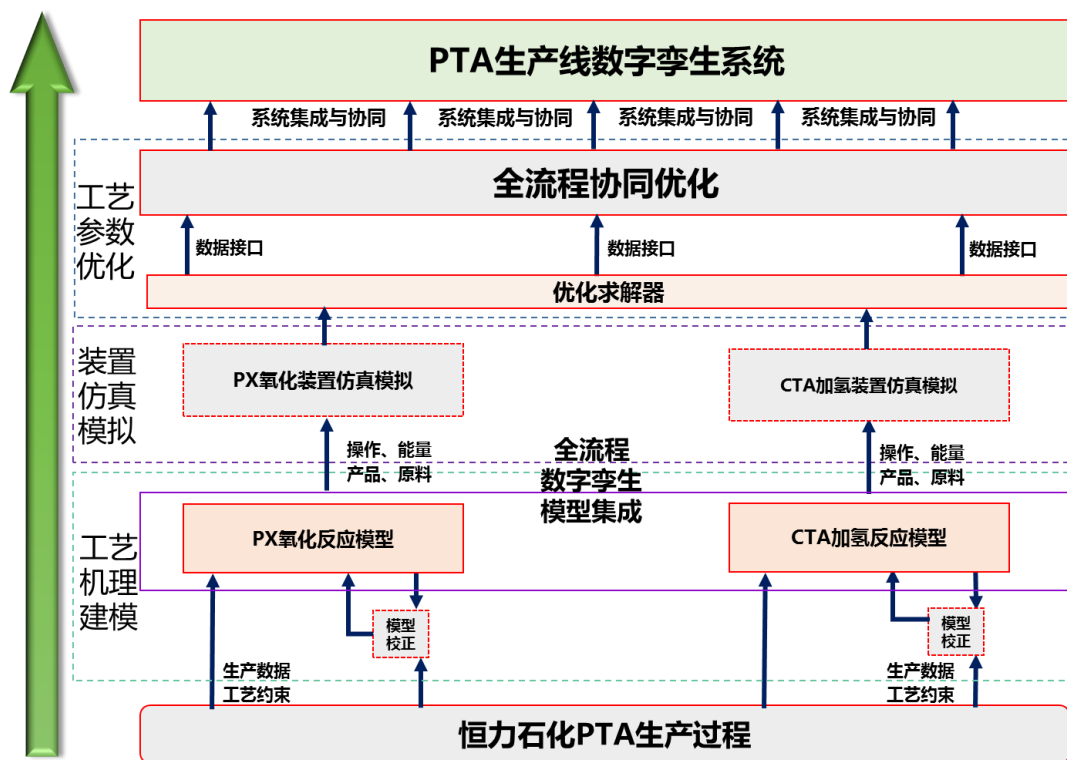


图 6 PTA 生产线数字孪生方案示意图

(1) 数字孪生模型层

该层的主要功能是提供氧化和加氢装置的机理模型和机理模型参数校正。

装置的机理模型是化工过程的一种数学表达，其核心在于化工过程的传质、传热和反应基本原理，可用于预测不同工艺条件下装置的运行状态、产品性质和收率等。一般来说，PTA 装置主要包括 PX 氧化和 CTA 加氢精制等单元。其中反应装置是 PTA 装置的核心，氧化反应主要功能在于将 PX 原料转化为 CTA，加氢精制反应主要功能在于将 CTA 转化为 PTA 产品。

反应装置机理模型的核心动力学一般是基于小试实验得到，因而往往难以直接移植到工业装置中。准确的工业级机理模型必须以工业运行数据为基础，对关键动力学参数进行修正。PTA 装

置在实际操作过程中，操作工况的改变虽不会改变过程机理，但对催化剂的要求、反应过程的传质、传热平衡影响较大，一套固定的动力学参数通常无法对各种工况完全描述准确。在模型运行过程中，通过实时采集装置运行数据与模型计算结果进行比较，以误差作为反馈，实时对模型关键参数进行校正，使 PTA 装置数字孪生模型的准确性大大提高。

准确的装置模型是优化技术的基础，也是核心。基于机理开发的装置模型依赖于对过程的深入理解，包括各操作条件间相互关系、对过程的影响以及定量描述等，使得模型符合实际工艺过程，为下一步装置关键信息实时预测提供准确、有效的模型基础。

（2）工艺操作参数优化

工艺操作参数优化的功能主要是考虑装置运行过程中各单元之间的联系和约束，如加氢精制结晶器蒸汽与预热蒸汽的供应关系等，采用智能优化方法使 PTA 装置整体在满足产品合格率的情况下实现目标产品收率或效益最大化。

根据 PTA 装置关键指标最优化为目标要求，需要根据不同单元在不同的运行状况下的约束模型对 PTA 装置进行优化。由于 PTA 装置涉及的关键单元多，某个单元的操作条件变化会对上下游装置带来很大影响，在运行过程中，随着运行时间的推移和工业装置及工艺特性变化，各单元的约束条件也在实时的发生变化。PTA 装置的优化需要同时优化变量筛选、目标计算、优化算法等。

3. 实施步骤及路径

给出具体的项目实施步骤，分析每个实施步骤的实施细节，涵盖运用的具体技术及使用的软硬件工具。

本案例从恒力石化 PTA 生产过程以及工业互联网平台建设需求出发，针对 PTA 生产过程数字孪生模型和全流程优化控制中存在的问题，对 PTA 装置实施融合机理和运行特性的全流程智能优化技术，真实再现工艺装置的流程信息，实现对工艺装置的可视化的洞察，包括对能量、质量的平衡、物流组成、操作条件、性能指标的了解，对不同工况的仿真和预测，对实时生产操作条件指导等，重点研发了 PTA 装置数字孪生建模、模型自动校正与实时仿真、工艺参数操作优化技术，从而帮助企业的各个部门实现多方位的协作，实现企业的安全稳定长周期满负荷优化运行，实现企业生产的最大经济效益，提高竞争力。

（1）PTA 装置机理模型开发

根据恒力石化 PTA 生产装置的具体工艺流程，采用 .net core 框架自主开发 PX 氧化和 CTA 加氢精制的机理建模，实现装置生产模拟。具体内容如下：

- i. 机理模型构建：基于氧化反应过程和加氢精制反应过程基本原理和装置特性建立能反映原料性质、工艺参数与产品性质之间关系的全流程机理模型。
- ii. 模型自动校正：在机理模型基础上，基于装置实时运行数据，根据模拟计算预测结果与实际运行数据之间的偏

差，调用智能优化算法，以偏差最小化为优化目标，获得模型最佳参数。

（2）生产装置实时仿真与工艺参数操作优化

在工艺机理模型自动校正和运行数据实时更新的基础上，实现装置模型实时仿真。同时，对影响生产过程的关键变量进行辨识，结合市场信息，构建效益最大化目标函数，并确定约束范围，利用高效的智能优化方法实现工艺操作参数优化。

- i. 通过机理模型自动校正，实现模型实时仿真，并与实际运行结果进行实时对比展示。
- ii. 全流程关键影响因素辨识与效益模型：基于过程模型和实际运行数据，采用主元分析方法、灵敏度分析方法结合专家经验知识，从大规模数据中辨识出影响过程关键指标的变量并确定其变化范围，在此基础上，综合装置实际运行信息，建立工艺指标最优化模型。
- iii. 装置操作优化：从经济效益角度出发，根据实际装置情况和当前 PTA 产品价格，在不同的进料以及工艺参数条件下通过模型和优化算法优化得到价值最大化的装置相应操作条件。对产品关键指标、装置能耗进行预测，并与当前产品质量、装置能耗的实际值比较，累计得到模型的偏差小时平均值，同时结合当前产品价格，以最大化净利润为目标，获得最优装置操作条件，并根据模型的偏差平均值对操作条件进行校正，校正后的结果经过

限幅处理后，作为装置操作优化的参考值。

（3）PTA 全流程数字孪生工业互联网平台构建

在 PTA 全流程数字孪生模型、优化方法的基础上，开发工业互联网平台，实现以下功能：

i. 数字孪生模型构建与在线滚动校正

开发 PTA 氧化和加氢工段的机理模型，通过接口技术将实时数据库、LIMS 数据等现场数据接入模型，调用智能优化算法，实现机理模型在线自动校正，提升单装置和全流程模型的准确性。

ii. 工艺流程操作参数优化

以单装置/全流程效益最大化或单位能耗最小化等为指标构建优化目标函数，开发适应工业海量数据的高效优化器，可根据目标函数和指定操作变量、约束条件，调用机理模型进行求解，并输出优化后的操作条件，提升企业生产效益。

iii. 结果发布

在上述功能基础上，开发结果发布的功能，采集 DCS 实时数据、LIMS 数据等现场数据，采用接口技术将数据送入模型，通过模型参数优化程序等实现模型的实时校正。在准确模型的基础上，通过调用优化器优化过程操作条件。同时，将上述信息显示并发布到工业互联网平台。

（4）案例展示

PTA 仿真优化系统主要包括两部分，第一部分是模型仿真，主要用来验证模型在长周期运行下的精度和自动校正功能。第二部分是装置操作优化，主要以装置关键指标为优化目标，装置的温度、压力、进料量等变量为操作条件，装置瓶颈为约束条件，调用自主开发的智能优化器进行优化，并输出优化结果和优化后的操作方案。

i. 仿真系统

仿真系统以机理模型为核心，采用接口技术将现场工艺数据实时送入模型中，并将模型计算结果与实际结果进行对比。当工况发生变化时，自动触发模型校正机制，对模型关键参数进行校正，保证模型在长周期运行中的准确性，为优化系统提供准确的模型基础。

仿真系统的部分结果对比如下图所示，图中给出了氧化过程产品关键指标 4-CBA 含量的模拟输出结果和实际结果的对比曲线，可以看出，模型模拟结果与实际结果非常接近，且在长期运行情况下能够及时对模型参数进行校正。



图 7 氧化过程出口 4-CBA 质量分数对比曲线示意图

ii. 操作优化系统

获取实时数据
初始化
优化

装置选择: 恒力PTA加氢

目标函数: 负荷最大

迭代次数: 3

初始化开始
 初始化:取数中...
 初始化:模型计算中...
 初始化:模型计算完成...
 初始化:获取初始化结果...
 初始化结束

完成!

操作条件						
变量名	单位	当前值	优化值	下限	上限	选择
对苯二甲酸	t/h	115.9756	--	0	0	☒
水	t/h	295.8097	--	295.8097	295.8097	☐
氢气	kg/h	46.6387	--	46.6387	46.6387	☐
反应器压力	Mpa	7.9398	--	7.9398	7.9398	☐
反应器温度	C	285.1069	--	0	0	☒

图 8 操作优化系统示意图

操作优化系统同样以机理模型为核心，采用接口技术与智能优化算法求解器集成。工艺人员可以按需给定操作条件、约束条件的上下限，调整优化迭代次数，最终通过优化器调用模型求解计算出最优的操作条件。操作优化系统的部分界面如上图所示，其中，包括操

作条件上下限的输入、约束条件的输入、优化目标选择等权限，可以进行调整和模拟。优化求解采用一键式求解，优化结果采用报表形式输出，下图为工艺员在以氧化装置醋酸单耗最小为目标，以进料量和反应温度为操作条件进行的优化求解结果，可以看出，优化结果给出了优化后的关键变量操作方式和优化结果，能够使醋酸单耗下降 0.31kg/t.PTA, 极大地方便了操作人员优化方案的设计和编制。对工艺生产操作优化具有指导作用。

恒力氧化优化报表										
优化时间	2020/5/15 13:05		单位	优化前	优化迭代1	优化迭代2	优化迭代3	差值		
优化目标	1.00									
*	(1)醋酸燃烧单耗最小	kg/t	35.12	35.12	34.85	34.81	-0.31			
	(2)PX单耗最小	kg/t	655.48	655.48	655.40	655.39	-0.09			
优化约束									约束下限	约束上限
*	尾气预测值	%v	2.73	2.73	2.76	2.74	0.01		0.00	0.00
*	M1-423A-4-CBA	mg/kg	2467.16	2467.16	2467.17	2467.17	0.00		0.00	0.00
优化变量									变量下限	变量上限
*	浆料一进口流量	t/h	91.01	91.01	92.26	94.61	3.60		90.00	100.00
*	浆料二进口流量	t/h	318.47	318.47	318.47	318.47	0.00		318.47	318.47
*	反应器温度	C	197.44	197.44	197.19	197.15	-0.28		190.00	200.00
*	结晶器二温度	C	187.93	187.93	188.68	188.82	0.89		180.00	190.00
关键操作参数	空气流量	t/h	50.94	50.94	50.94	50.94	0.00		50.94	50.94
	空气流量	t/h	55.50	55.50	55.50	55.50	0.00		55.50	55.50
	空气流量	t/h	55.49	55.49	55.49	55.49	0.00		55.49	55.49
	空气流量	t/h	55.52	55.52	55.52	55.52	0.00		55.52	55.52
	空气流量	t/h	55.53	55.53	55.53	55.53	0.00		55.53	55.53
	空气流量	t/h	56.00	56.00	56.00	56.00	0.00		56.00	56.00
	空气流量	t/h	55.47	55.47	55.47	55.47	0.00		55.47	55.47
	空气流量	t/h	55.49	55.49	55.49	55.49	0.00		55.49	55.49
关键产品收率										
*	尾二氧化碳预测值	%v	1.48	1.48	1.45	1.41	-0.06			
*	尾一氧化碳预测值	%v	0.34	0.34	0.31	0.27	-0.07			

图 9 报表展示图

4. 案例推广应用价值

本案例在流程工业特别是石化行业具有较大的推广价值。开展流程工业的过程建模优化技术是企业进一步深化认识流程生产过程的规律、提高装置运行效率、实现节能降耗的根本需求，这对我国目前大型石油化工装置普遍采用国外引进技术，缺乏核

心技术的现状而言，具有重要意义；我国石油化工行业的物耗能耗指标和发达国家先进水平相比，尚存在很大的下降空间，针对现有装置、现有生产过程，在运行过程中对装置进行优化和调整，改善资源利用效率，减少运行中的物耗能耗，对加工量大，流程复杂的炼化行业实现资源与效益最大化具有重要作用；由于技术保密和商业目的，国外的流程模拟优化软件包价格昂贵，并且，一个许可证只能在一台电脑上使用。只要建立相应装置工艺过程的机理模型，本案例的研究成果根据实际过程机理和现场装置情况修改即可移植到其它工艺过程中去，具有很强的在相关行业中的推广应用价值。

（三）生产过程建模与控制

通用的生产过程建模与控制解决方案，包括数据采集、大数据处理、机理建模/数据建模、可视化、离线和实时优化、控制系统。

本方案采用先进的建模、多变量模型预测控制(MPC)、软测量技术等手段，对装置或工艺单元进行多变量协调优化控制。具体技术实现是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，以实现卡边操作，

从而提高高价值产品收率、降低装置能耗之目的。方案如下图所示：

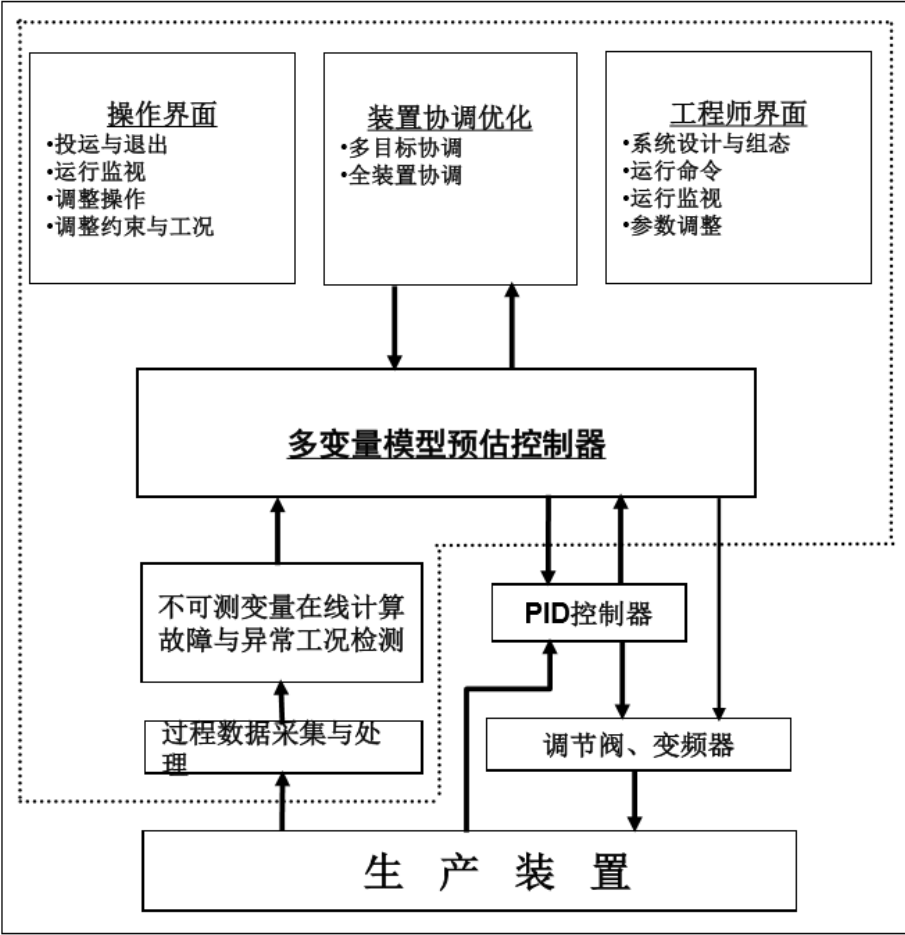


图 10 数字孪生系统生产过程建模与控制建模通用解决方案示意图

1. 案例定位

覆盖内容	应用对象	☐ 资产级（设备/产品） ☒ 车间级 ☐ 企业级
	应用深度	☐ 描述 ☐ 诊断 ☒ 预测 ☐ 处置
	应用领域	☐ 设计 ☒ 生产 ☐ 管理 ☐ 运维 ☐ 设计制造一体化

		☐ 全生命周期
	行业	☒ 流程行业: <u> 炼油（常减压装置） </u> ☐ 多品种小批量离散行业: _____ ☐ 少品种大批量离散行业: _____ ☐ 建筑 ☐ 交通 ☐ _____
	重点技术	涉及的单一领域技术或融合技术 ☐ 仿真 ☐ IOT ☐ AI ☐ 仿真+IOT ☒ 仿真+AI ☐ IOT+AI ☐ 仿真+IOT+AI 统一数据/模型语义语法技术 ☐ 管理壳 ☐ 信息模型 ☐ MBD/MBSE/MBE 其他 ☐ 虚拟调试 ☐ 数字线程 ☐ 面向对象描述 ☐ 创成式设计 ☐ 机电一体化 _____

2. 案例优势分析

本案例通过先进的建模、多变量模型预测控制（MPC）、软测量技术等手段，对装置或工艺单元进行多变量协调优化控制。具体技术实现是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，以实现卡边操作，从而提高高价值产品收率、降低装置能耗。

通过建设高仿真度的生产过程建模与控制仿真平台，依托工业互联网和云服务平台，实现产品质量建模、优化控制建模、闭环优化控制仿真、产品质量预报和管理等各个环节在虚拟空间中的全流程覆盖，形成虚拟空间的数字孪生系统，实现虚拟空间与物理空间的实时交互，最终为装置优化控制提供有效指导并形成信息闭环。

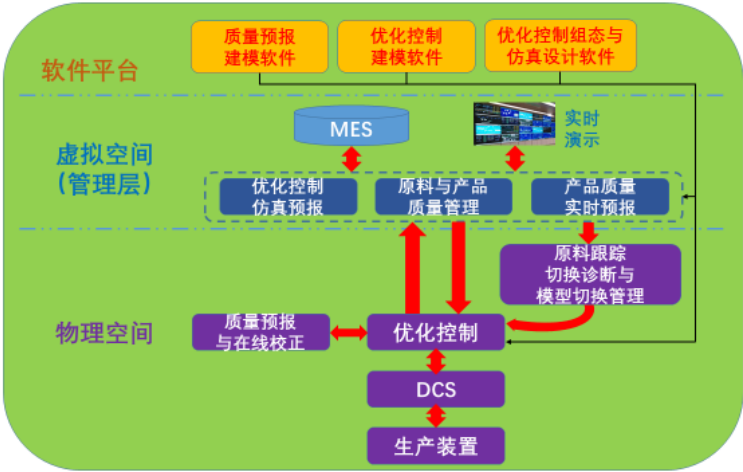


图 11

数字孪生系统的特色技术包括：

（1）面向生产过程运行的不同操作方案，包括不同原料方案（如常减压装置原油性质不同）、不同产品方案（如常减压装置产品优化为多出 PX、多出航空煤油或者多出乙烯裂解料等化工轻油方案，聚丙烯装置不同聚丙烯牌号生产）、不同操作条件

(如常减压装置产品的干点指标要求变化,装置的关键非线性相关变量变化),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,并基于演示平台进行展示和仿真比较优化操作方案,对物理空间的应用进行指导。

(2) 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。

(3) 在虚拟空间,根据原油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。

(4) 使用上述生产过程的数字孪生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。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。

3. 实施步骤及路径

给出具体的项目实施步骤，分析每个实施步骤的实施细节，涵盖运用的具体技术及使用的软硬件工具。

1) 开发云服务模式的生产过程产品质量建模、动态控制建模和控制器设计工具软件

采用 B/S 结构的基于 ASP.net 的云服务程序方式实现产品质量模型建模软件、预测控制模型建模软件、预测控制参数组态与离线仿真软件等工具软件，实现人机交互的建模与仿真，辅助进行生产过程优化控制系统的设计，用于产品质量预报和管理。

各软件的主要功能点包括：

a) 产品质量建模

按照已经制定的软测量模型方案，从上传的数据文件中读取生产过程历史数据和产品质量化验历史数据，实现数据自动清洗，



图 12 变量曲线折线图

并基于慢特征回归、深度学习等先进建模方法建立动态软测量模型。



动态模型训练

模型选择方法: ☒ 默认 ☐ 自定义

分割比例: 训练集 : 测试集

4.00 : 1

分割方法: ☒ 均匀 ☐ 有序 ☐ 随机

建模方法: ☐ 最小二乘 (LS) ☒ 偏最小二乘 (PLS)

☐ 支持向量机 (SVM)

☐ 深度学习 (DNN)

取消 确定

图 13 动态模型训练

保存所建立的模型，并将建模过程在训练集、测试集上的计算结果保存到文件。

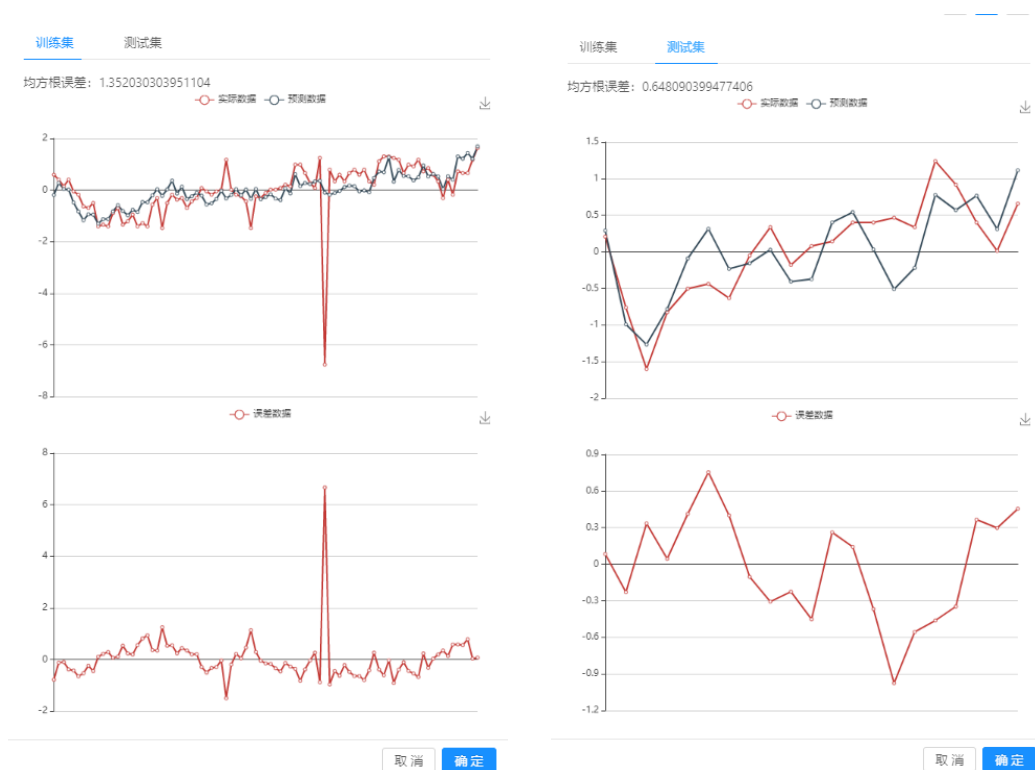


图 14 动态模型训练集、测试集

b) 预测控制建模

按照已经制定的动态控制模型方案，从上传的数据文件中读取生产过程历史数据和产品质量软测量历史数据，按照被控变量、操作变量、干扰变量分类

模型结构设置 (Case1)

变量	FC101_SP	FC151_SP	FC201_SP	FC203_SP
AC162	☒	☒	☐	☒
AC212	☐	☒	☒	☒
AC221A	☒	☒	☐	☒

< 1 >

取消 确定

图 15 模型结构设置

之后，按照生产方案（如果生产过程非线性比较强，还要按生产工况的关键变量分区域）分成多个数据集，分别进行自动数据清洗，利用稀疏学习等新的辨识建模方法进行过程辨识，先后建立 FIR 和传递函数形式的动态控制模型集。



图 16 动态控制模型集

c) 闭环控制组态与仿真:

使用已建立的动态控制模型集，对控制变量常规参数进行组态，之后对模型集面向不同的生产方案的各个模型分别进行控制、优化参数的设计和组态。

是否关键变量: False

性能比: 1

优化目标: 50

预测块数: 5

允差限: 0

最大向上增量: 1

最大向下增量: 1

是否关键变量: False

优化目标: 50

预测块数: 5

运行信息

CV设定值: 50

控制开关:

设定值控制: False

运行信息

MV切除时状态: 1

控制开关:

控制状态: 0

取消 确定

取消 确定

图 17

基于当前的工况（各变量最新的历史数据）和通过界面给出的未来的生产方案和操作条件，使用对应的动态控制模型和参数（如果未来的生产方案有变化，那么对应有模型和参数的切换），对闭环控制进行仿真，推演未来的各被控变量及经济指标的变化趋势。

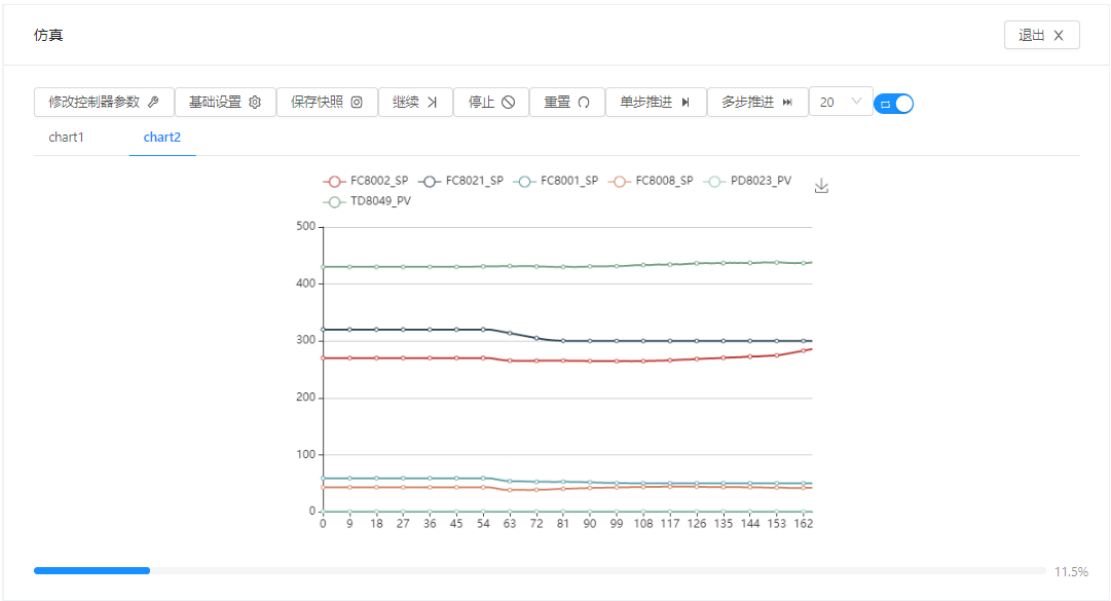


图 18

基于这些未来的控制效果和经济指标方面的预测，对物理空间实体的控制模型和参数切换给出指导建议。

2) 数字孪生系统

a) 生产过程数字孪生

基于动态控制建模工具软件，建立生产过程的数字孪生，即预测控制模型。

建模采用多模型方案，多模型的划分依据包括：

原料方案不同：常减压装置的原油性质不同，反映在进料为多种原油按一定配比混合而成，原油品种及其配比发生变化。

产品方案不同：常减压装置产品进行卡边优化，如果航空煤油产品价值比较高，则优化方向为航空煤油的初馏点尽可能低，干点尽可能高；如果石脑油生产 PX，柴油经加氢裂化生产乙烯裂解料等化工轻油，这些产品价值更高，则优化方向相反。聚丙烯装置生产多种牌号的聚丙烯产品，牌号不同则生产过程的特性不同。

操作条件不同：常减压装置产品如柴油的干点指标厂控要求发生变化，装置的关键非线性相关变量。

面向这些不同的条件变化，分析其对生产过程动态特性的影响，建立适用于每个操作方案下的产品质量预报模型和预测控制模型，从而构成生产过程的数字孪生模型集。

b) 控制系统的数字孪生

基于控制器设计工具软件，建立控制系统结构和参数，实现

控制系统的数字孪生，根据原油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，从而构成了控制系统的数字孪生。

c) 基于数字孪生的预报并对物理空间进行指导

基于数字孪生的产品质量预报用于显示产品质量变量的计算结果，并与化验值进行对比和统计分析，其中关键的产品质量预报如下图所示

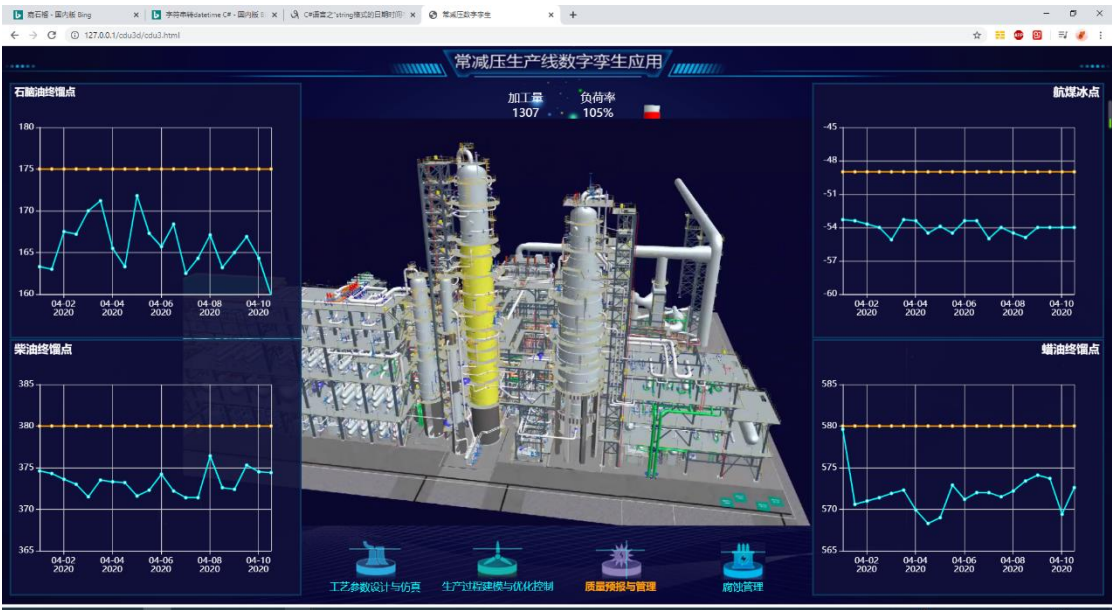


图 19

全部的产品质量预报则如下图所示：

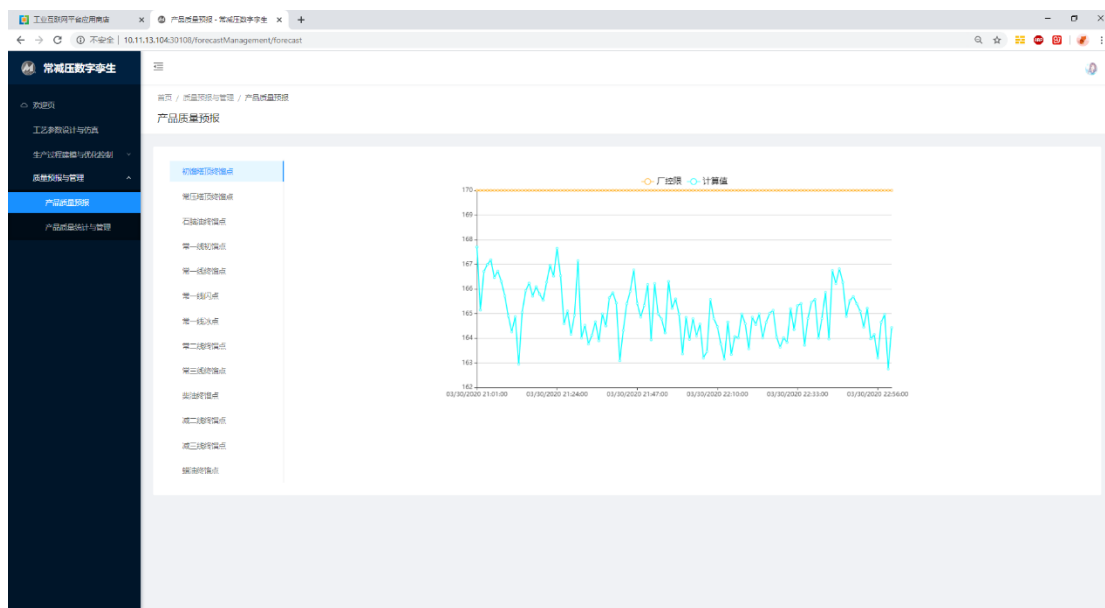


图 20

曲线图显示了不同产品质量变量的实时仿真计算曲线（周期为 1 分钟）及与厂控限的安全裕量。

同时展示了不同产品质量变量的仿真计算曲线、化验值曲线及与厂控限的安全裕量，用于对生产操作的产品质量裕量进行优化调整。



图 21

基于数字孪生的优化控制仿真预报根据原油与产品质量管

理所给出的操作方案（即优化控制仿真预报的参数）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适时自动切换。例如，常减压进料的配比计划在 1 小时后发生变化，那么未来模型切换时间和切换前后的闭环控制效果、对装置经济指标的影响都可以通过虚拟空间的控制仿真进行推演。如下图所示。

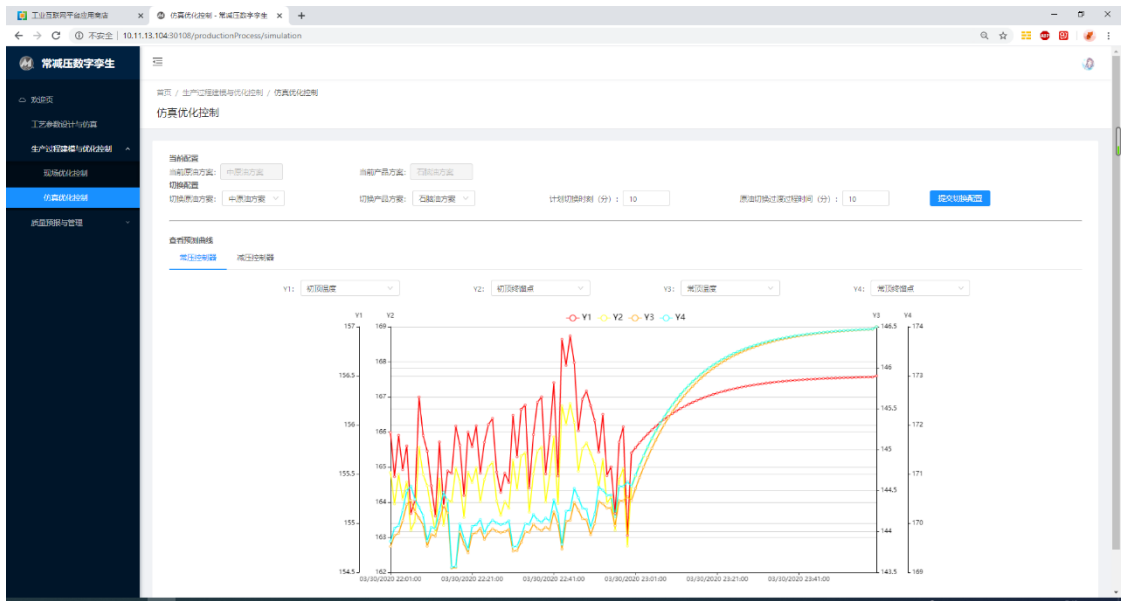


图 22

原油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。

使用上述生产过程的数字孪生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。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的指导。

4. 案例推广应用价值

若本案例有向其他行业或领域推广的经验，描述一下具体的推广场景。若未形成推广应用，分析一下潜在的规模推广价值。本案例面向流程行业不同流程使用了虚拟空间多时空尺度模型，用于建立数字孪生系统的模型。

从炼油生产过程全局出发，提出了全流程集成优化控制与调度优化的综合解决思路，给出一种面向原油性质分类和有限操作优化模式的多维模型描述结构。该模型描述体系按原油性质和有限种操作优化模式分类建模，使原来随机问题转换为工程意义上的确定性建模问题。基于该多维关键产品质量控制指标预报模型、优化控制模型描述体系，基于大数据解析、深度学习、人工智能、建模等技术实现高精度、高可靠性的产品质量估计和预报、优化控制数字孪生对象模型建立，解决过程模型随原料和产品加工方案变化的难题，达到提高装置高价值产品收率、节能降耗、安全平稳运行的目标，并为实现炼化一体化生产过程全流程集成优化控制与计划调度优化的综合解决方案提供基础。本案例的研究成果根据实际过程机理和现场装置情况修改即可移植到其它生产装置中去，具有很强的推广应用价值。

（四）产品质量管理

本方案充分利用先进的自动采集、分析检验仪器设备，构建基于工业互联网平台的产品质量管理体系，通过实时的数据采集与传输，将产品实时的质量参数同步至数字孪生系统构建的多时空尺度预测模型中，通过理论模型的分析获取产品质量偏差，进行卡边优化，实现产品质量的最优管理。

通过对原材料选购、入厂、加工、产品出厂到用户服务的所有环节质量的监控，建立物料走向模型、物料质量传递模型、物料质量与工艺参数相关性模型，实现“实验室基础—质量监控—质量追溯—质量预测”一体化功能。方案如下图所示：

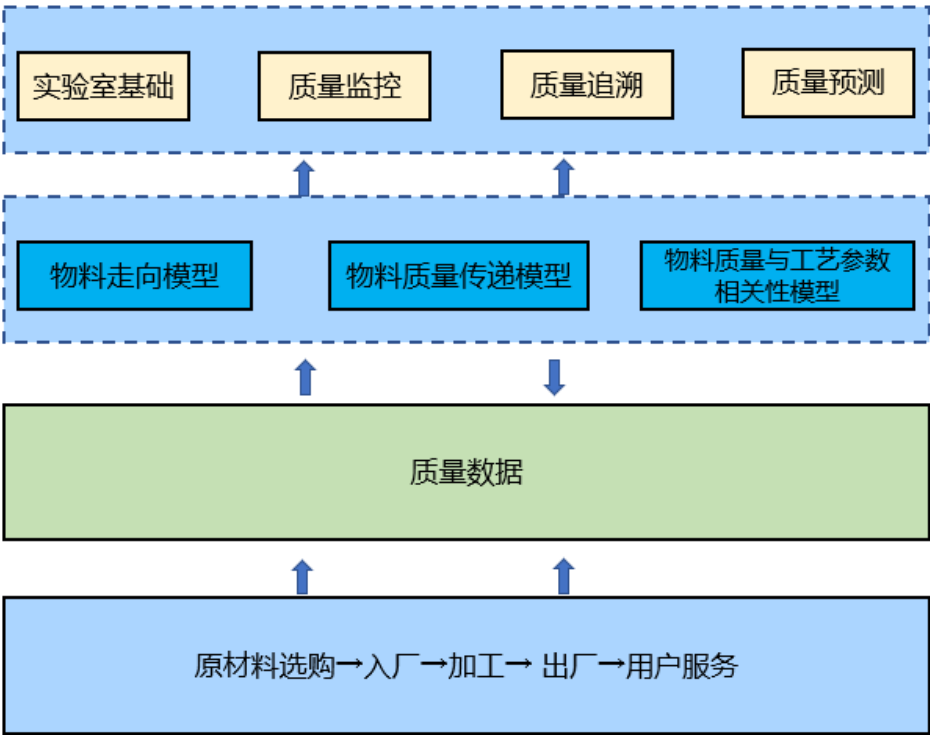


图 23 数字孪生系统质量管理解决方案图

1. 案例定位

覆	应用对象	■ 资产级（设备/产品）
---	------	--------------

盖 内 容		☐ 车间级 ☐ 企业级
	应用深度	☐ 描述 ☐ 诊断 ☒ 预测 ☐ 处置
	应用领域	☐ 设计 ☒ 生产 ☐ 管理 ☐ 运维 ☐ 设计制造一体化 ☐ 全生命周期
	行业	☒ 流程行业： <u>聚丙烯产品生产流程</u> ☐ 多品种小批量离散行业： _____ ☐ 少品种大批量离散行业： _____ ☐ 建筑 ☐ 交通 ☐ _____
	重点技术	涉及的单一领域技术或融合技术 ☐ 仿真 ☐ IOT ☐ AI ☐ 仿真+IOT ☐ 仿真+AI ☐ IOT+AI ☒ 仿真+IOT+AI 统一数据/模型语义语法技术 ☐ 管理壳 ☒ 信息模型 ☐ MBD/MBSE/MBE _____ 其他 ☐ 虚拟调试 ☐ 数字线程 ☒ 面向对象描述 ☐ 创成式设计 ☐ 机电一体化 _____

2. 案例优势分析

（一） 基于六西格玛质量管理体系的生产过程统计

六西格玛管理是一套成熟的质量管理体系，这套体系通过持续改进产品、服务和过程的质量，实现用户满意。它通过系统地、集成地采用质量改进流程，实现无缺陷的过程设计，并对现有过程进行过程定义、测量、分析、改进和评价，消除过程缺陷和变异，从而提高质量和服务，降低成本。该系统可以探索出影响关键产品特性的因素，并确定少数的关键因素，对其优化。

统计过程控制是现代化工业生产中确保产品质量和可靠性的核心方法之一，而过程能力指数则是度量一个工业过程能力的重要指标。研究过程能力指数的前提条件就是过程要处于统计控制状态，其中的某些变量是可以检测的，这个过程中采集的数据的分布不应该是随意变化的，应该服从某单一分布通常为正态分布，或至少接近正态分布，且检测变量的观察值是相互独立的从实用的角度出发，通常情况下，要求检测变量服从正态分布。对于过程质量控制主要考虑以下两个重要指标。

工艺过程生产能力（Cpk: Process capability）定义为一个稳定过程的固有变差的总范围，以 6σ 来表述，它反映的是过程的固有能能力。它的基本特征为：(1) 过程处于统计稳定状态；(2) 过程的各测量值服从正态分布；(3) 测量变差相对

较小；(4) 仅由于普通原因产生的过程变差，可以通过 R / d_2 来估算。

工艺过程性能（**Ppk: Process Performance**）定义的是一个过程变差的总范围，以 $6\hat{\sigma}_s$ 来表述，反映的是当前过程的状态。它的基本特征为：(1) 可以随时反映实时过程的性能；(2) 当前的过程状态不一定很清晰；(3) 过程变差包括了普通和特殊两种原因所造成的变差原因，可用样本标准偏差 S 来估算。

（二）基于数据驱动产品质量指标软测量监测模型

在实施智能控制时，需要对产品的质量指标进行闭环控制，但由于经济或技术的原因（如在线分析仪价格昂贵，或者在恶劣的工作环境下无法正常工作），这些质量指标难以进行在线测量，只能通过离线实验室分析得到分析值。但是实验室分析数据往往存在长时间滞后的问题，无法满足在线实时控制和优化操作的要求。

以本项目聚丙烯装置为例，在线实时计算的质量指标主要有：熔融指数、等规度、堆积密度、铝、钛、铝等。以上指标计算通过数据建模服务软件来完成，该软件基于 LSTM 神经网络的数据驱动模型对目标指标进行预报。

无论采用何种方法建立的软测量模型，都是基于现场采集得到的数据经过优化建模而得，但生产装置在实际运行过程中，随着操作条件的变化，其过程对象特性不可避免地发

生变化和漂移，所以依据过去工况建立的模型在对后面的参数进行估计时可能会存在一定的误差。为使计算结果趋于真值，必须对模型在实际使用过程中进行在线校正以提高模型的计算精度。

3. 实施步骤及路径

本案例依托于恒力工业互联网平台，利用 java spring 框架结合 HTML 和 JS 技术自主研发了基于 B/S 架构聚丙烯装置的产品质量管理体系旨在辅助工艺人员实现对于生产过程的平稳操作进而提高产品质量的合格率和降低因为生产波动而引起的物能耗。

1) 开发过程质量管理服务软件

将聚丙烯生产过程的统计控制与六西格玛管理体系相结合，通过实时计算出的工艺过程生产能力指数 C_{pk} 、工艺过程性能指数 P_{pk} 、控制限与报警限的分析值，针对生产过程平稳控制给出指导建议。

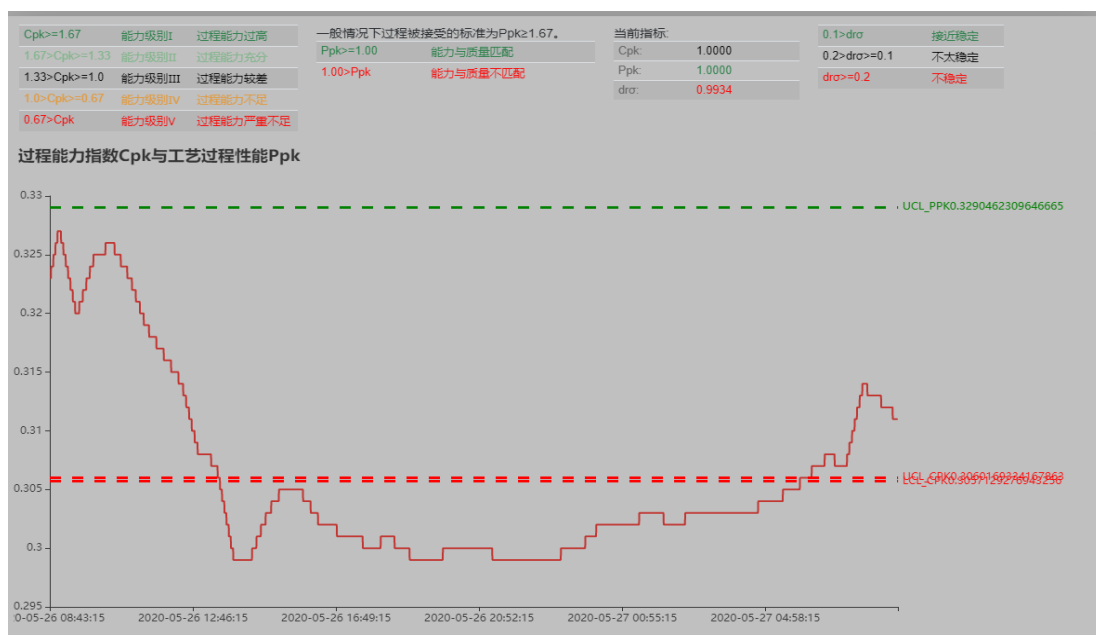


图 24 生产过程质量管理

2) 开发数据建模软测量服务软件

在产品质量管理过程中，熔融指数、等规度、堆积密度、铝、钛、氯等以上指标难以进行在线测量，只能通过离线实验室分析得到分析值。但是实验室分析数据往往存在长时间滞后的问题，无法满足在线实时控制和优化操作的要求。

该软件采用基于LSTM神经网络的数据驱动模型实现对于熔融指数、等规度、堆积密度、铝、钛、氯等产品质量指标的软测量。从而保证了工艺人员可以在整个产品的生产过程中对于质量指标的实时监控，从而能满足用户对于实时控制质量指标的需求，有效的提高产品质量，降低成本消耗。

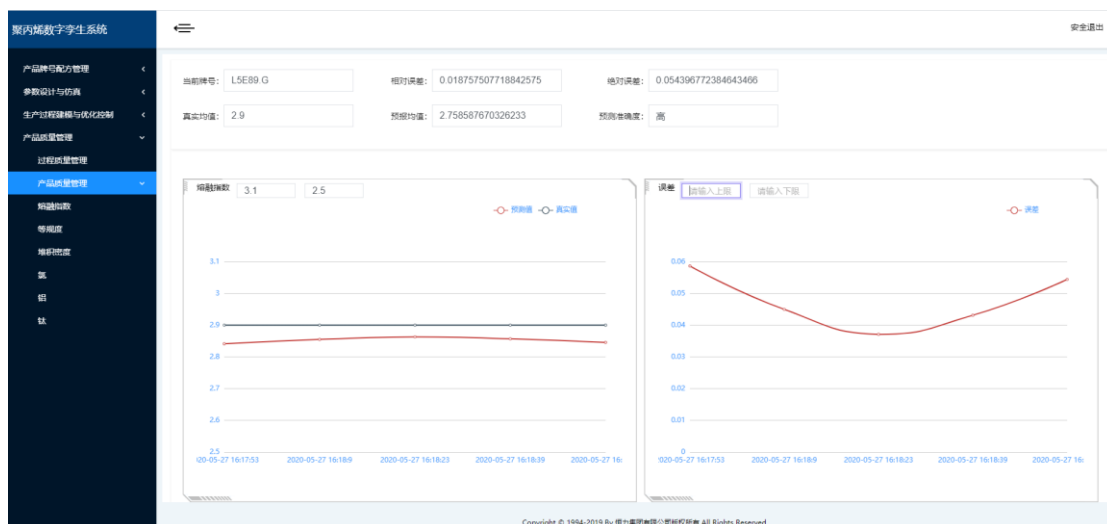


图 25 产品质量管理界面

3) 数字孪生系统产品质量管理系统

a) 生产过程质量管理

将物理空间的 DCS 组态镜像表示在孪生空间中，通过生产数据库 ip21 数据接口以 1 次/分钟的频率取得相应 DCS 点位数据，通过接口调用质量管理服务软件对此点位的生产数据进行实时质量管理，通过实时计算出的工艺过程生产能力指数 C_{pk} 、工艺过程性能指数 P_{pk} 、控制限与报警限的分析值，针对生产过程平稳控制给出指导建议。

b) 产品质量管理

通过生产数据库 ip21 历史数据接口和 LIMS 接口获取开工至今的相应 DCS 点位历史生产数据和产品质量分析数据，接着将获取的生产数据与质量分析数据以时间相同为条件进行数据对齐形成数据集，然后调用产品质量管理服务软件对熔融指数、等规度、堆积密度、铝、钛、氯等产品质量指标进行实时软测量并可视化展示软测量结果。为使计算结果趋于真值，必须对模型在实

际使用过程中进行在线校正以提高模型的计算精度。

4. 案例推广应用价值

本案例所采用的统计过程控制是一种数理统计方法应用于质量管理的过程控制工具。

统计过程控制是小概率事件原理的应用，连续假设检验理论应用于观测值落入控制限内的判断。应用于区分正常波动和异常波动，并对异常波动的预警以便采取措施。当过程受控时，过程特性一般服从稳定的随机分布；但是失控时，过程分布将发生改变。正是利用过程波动的统计规律性对过程进行分析控制的。对异常波动的及时预警是统计过程控制最大特点，预警原理应用对检测数据进行统计分析能够区分生产过程中产品质量的正常波动和异常波动。

在工业的产品生产中即使操原材料、操作人员、生产设备、加工过程、测量方法、生产环境等到条件相同。生产出来每一批产品的质量特性的实际值也并不完全相同，产品的质量特性总是存在差异，这就是质量特性的波动。将统计过程控制与六西格玛质量管理体系相结合能更好的对制造业产品生产的整个生命周期进行质量管控，可以实现生产过程中各生产条件的平稳运行，进而实现降低能耗，物耗，提高收益的效果。同时，也可以保证产品性质的稳定保证产品具有较高的合格率，因此本案例具有较好的工业推广价值。

（五）设备故障诊断与远程运维

本方案在工业互联网平台的基础上，应用了边缘计算技术、工业大数据技术、人工智能技术、IoT 技术，从传感器采集数据中提取特征的趋势曲线，通过大数据分析、挖掘能力和机器学习，提高数字孪生系统设备诊断模型精确性，为技术专家掌握及维护系统运行及提升系统诊断能力提供技术手段，实现设备故障诊断管理水平，降低工厂资产的运营风险。

本方案以及数字孪生系统的工业设备机理模型与算法，实现设备在线状态监测、故障监测与自动诊断、设备趋势预测等核心功能，提升设备管理的感知控制能力、故障诊断能力、预测能力、分析优化能力、决策能力。方案功能架构图如下所示：



图 26 数字孪生系统设备故障诊断与远程运维模块功能架构图

1. 案例定位

覆盖内容	应用对象	☒ 资产级（设备/产品） ☒ 车间级 ☒ 企业级
	应用深度	☒ 描述 ☒ 诊断 ☒ 预测 ☐ 处置
	应用领域	☐ 设计 ☒ 生产 ☒ 管理 ☒ 运维 ☐ 设计制造一体化 ☐ 全生命周期
	行业	☒ 流程行业： <u>PTA 装置</u> ☐ 多品种小批量离散行业： _____ ☐ 少品种大批量离散行业： _____ ☐ 建筑 ☐ 交通 ☐ _____
	重点技术	涉及的单一领域技术或融合技术 ☐ 仿真 ☐ IOT ☐ AI ☐ 仿真+IOT ☐ 仿真+AI ☐ IOT+AI ☒ 仿真+IOT+AI 统一数据/模型语义语法技术 ☐ 管理壳 ☒ 信息模型 ☐ MBD/MBSE/MBE _____ 其他 ☐ 虚拟调试 ☐ 数字线程

		■ 面向对象描述 □ 创成式设计 □ 机电一体化
--	--	---

2. 案例优势分析

动设备数字孪生应用方案融合了机械工程、信号处理、工业大数据、机器学习、数字孪生以及工业 4G 等相关技术，可实现大机组、高危泵以及其他重要设备状态自动分析与跟踪、故障诊断与预警，精准把握设备全生命周期状态的变迁，提升动设备管理的效率与水平，促进设备管理由事后维护、周期维护，向智能化的预知维护转变。

运用数字孪生技术如下：

1) 边缘计算技术

边缘计算设备主要功能包括设备运行状态信息的采集、分析、特征提取、状态报警以及数据管理等，同时支持多种方式数据远程传输，把数据映射到设备对象的数字孪生体，是设备故障诊断与远程维护的基础。边缘计算技术是基于机械工程、信号处理、4G 传输等相关技术，实现设备就地连续不断的数据采集、计算、分析、实时的状态判断及智能传输，在大大增加边缘侧计算数据量的同时，减少了传输的数据量，降低中心服务器的计算及存储压力，同时不遗漏关键数据。

2) 数字孪生

设备故障诊断与远程运维数字孪生应用，将物理设备构建一

个可视的、多时空尺度的数字化孪生对象，实现直观、快速、全面、精准地掌握设备的状态。设备的数字化孪生对象是通过结构、时间、空间、颜色、尺度、形状等可视化要素对物理设备进行描述，形成物理模型，模型融合工业大数据、设备机理模型与算法、行业标准、自学习、人工智能、边缘计算等技术形成设备的数字孪生体，数据驱动对设备的智能监测，实现数字系统与物理系统之间基于数据自动流动的状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的闭环赋能体系，通过对设备状态的评价，掌握企业实时生产状态。

下图为一个典型的设备全貌的数字化孪生可视化状态监测方案。

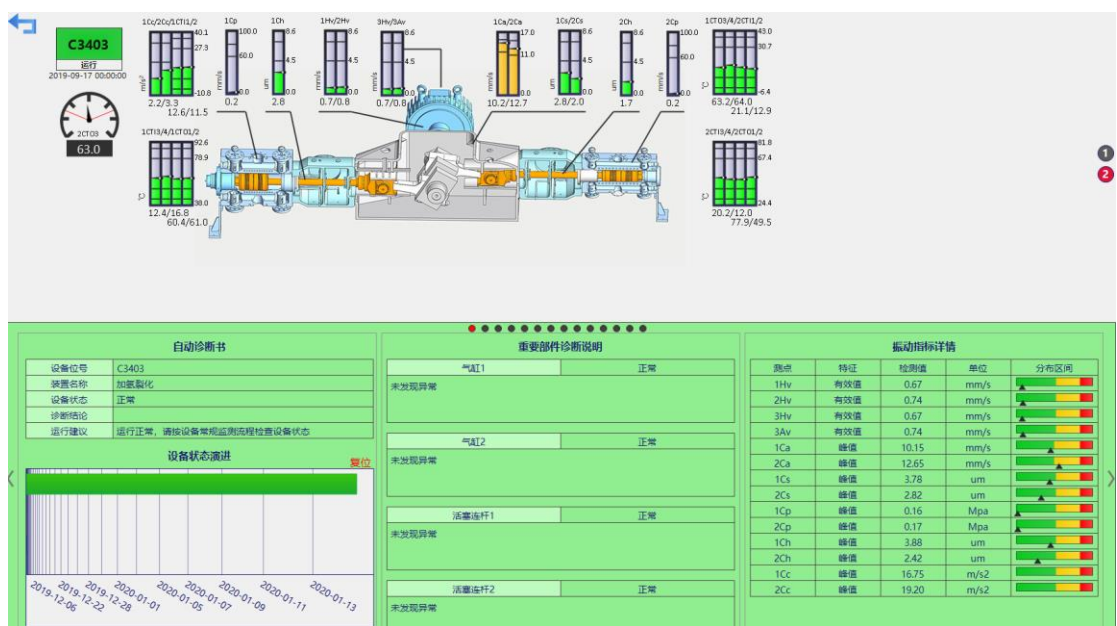


图 27

3) 基于工业大数据自学习模型的状态监测

针对各类设备，利用工业大数据技术对设备相关的历史工艺数据、振动数据进行统计分析、自学习建模，实现在线对设备状

态进行监测。传统设备的监测阈值是由设计定义，标准比较通用，难以适应不同结构、不同工艺环境、不同运行历史等设备行为状态；而现场技术人员根据经验自定义，缺乏数据以及相关技术支持，因此设备故障报警误报与漏报严重。通过对设备相关的历史工艺数据、振动数据进行统计分析、挖掘、自学习建模，可以实现对设备与流程状态进行预知。

下图是对设备相关工艺数据进行趋势分析、挖掘、建模方案：

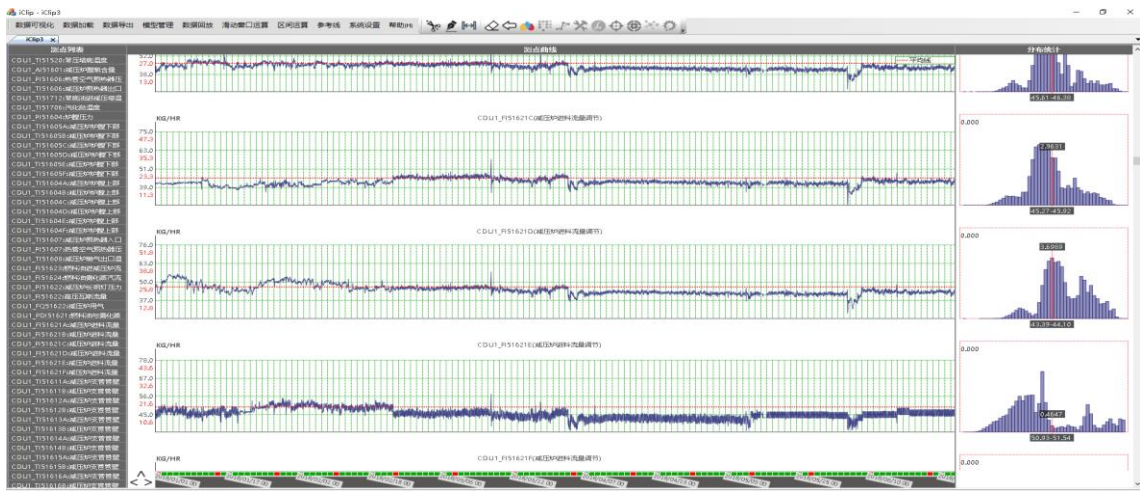


图 28

4) 故障预警及自动诊断

设备数字孪生对故障预警与诊断的精确度，是决定其应用效能的关键指标。精确度越高，越可以更准确实时地反映设备的状态，从而提升工厂设备预警及自动诊断水平。系统内置国内外设备监测专业的技术标准、部件参数、数学模型等，并根据不同设备的类型、结构及运行特点，设计了相应的监测与故障诊断模型。每台设备监测与诊断智能模型多达 300 余个，如同 300 个专业工程师 24 小时不间断对一台设备状态进行实时诊断，侦测设备状态变迁与早期故障征兆。设备监测与诊断模式由传统的依赖人工

向智能化、小样本向大样本、少特征向多特征、单时刻向全周期、黑盒子向可视化方向发展，降低误报与漏报。

下图为往复式压缩机气缸工作模型的数字化孪生实例：

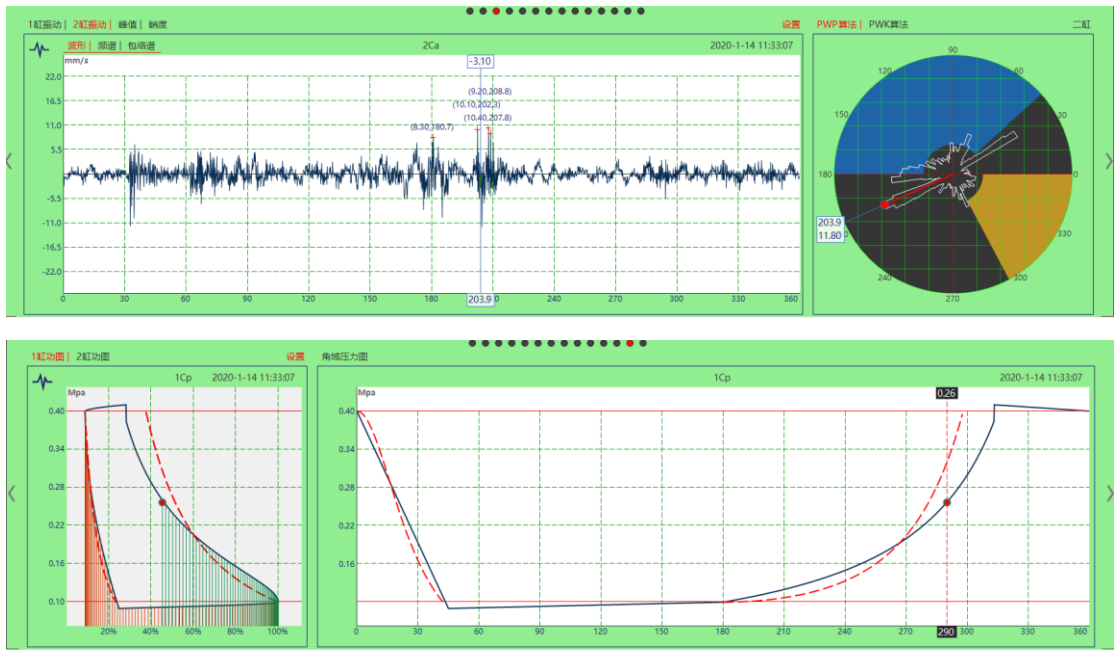


图 29

3. 实施步骤及路径

方案实施步骤及路径：

- 1) 动设备结构及所在工艺流程分析。
- 2) 传感器、边缘计算、传输网络安装。

使用的软硬件工具：边缘计算设备

- 3) 系统安装，初始化设备测点、部件、模型以及相关属性参数。

使用的软硬件工具：ISEA 建模工具。

- 4) 试运行，阈值自学习适应，模型自学习修正。

使用的软硬件工具：ISEA 工业大数据分析、处理、建模工具；ISEA 平台软件；

5) 验收及投用。

4. 案例推广应用价值

动设备作为工业的动力来源，设备健康是企业正常生产的保证，在流程行业一些核心关键设备，产生非计划停机，企业将面临全面停产或部分停产，损失巨大，因此案例在流程行业进行推广应用为迫切需求。案例推广到其他行业，例如离散行业，在国家推行数字化转型与智能化发展的大环境下，设备智能监测及故障诊断为智能化发展中最为薄弱的环节之一，客户逐步开始重视这方面的投入，随着边缘计算、大数据、5G 技术、工业互联网等相关技术的发展，终端数据的采集接入变得更加便利，进而案例推广应用具备了非常好的基础条件，同时也展现出非常广阔的应用空间。

（六）腐蚀管理

本方案基于物理空间实体数字孪生模型层涵盖资产全生命周期的属性数据，结合物理空间实体的模型的空间位置，对资产腐蚀进行相应的管理，包括腐蚀回路划分、抽取、检测点规划、检测实施及记录、定点测厚点标识及测厚数据管理等工作。

基于工业互联网平台，物理空间实体数字孪生模型集成了装置设计资料、采购资料以及介质属性与生产实时数据，虚拟空间多维模型可根据 RBI 分析结果，进行智能预警，从

而指导设计全面腐蚀管理策略、制定检测优化方案，以低成本完成腐蚀管理与规划。数据集成示意图如下：

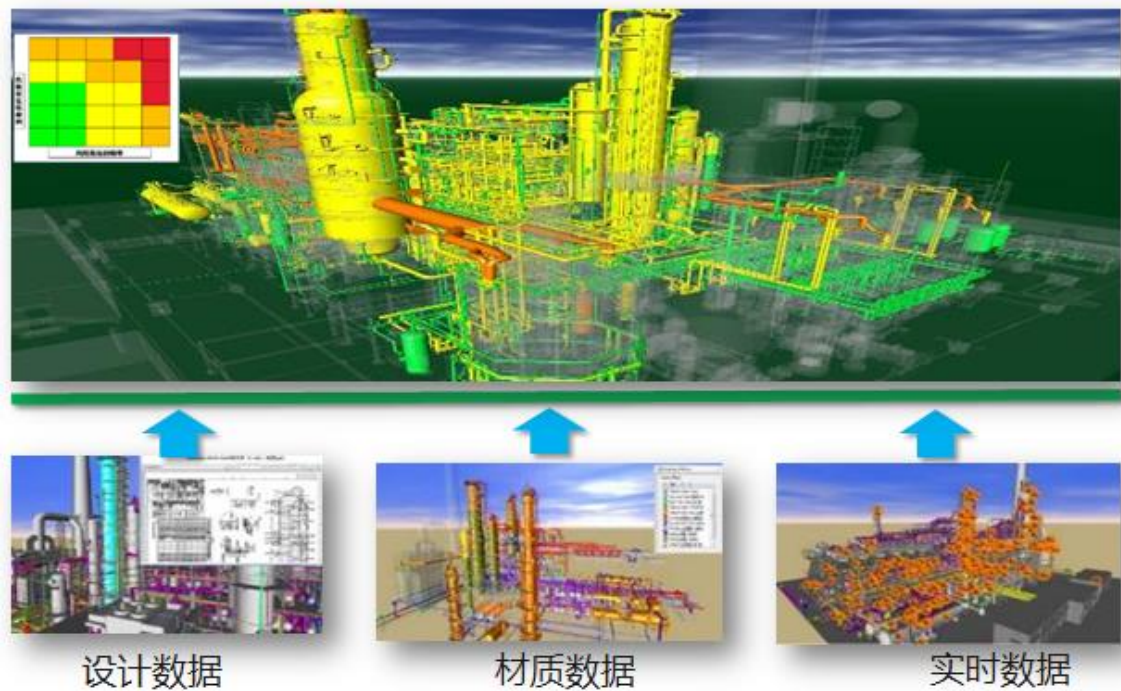


图 30 数字孪生系统物理空间实体模型层数据集成及展示效果示意图

1. 案例定位

覆盖内容	应用对象	☐ 资产级（设备/产品） ☒ 车间级 ☐ 企业级
	应用深度	☐ 描述 ☐ 诊断 ☒ 预测 ☐ 处置
	应用领域	☐ 设计 ☐ 生产 ☐ 管理 ☒ 运维 ☐ 设计制造一体化 ☐ 全生命周期
	行业	☒ 流程行业：_____石化流程行业_____ ☐ 多品种小批量离散行业：_____ ☐ 少品种大批量离散行业：_____ ☐ 建筑 ☐ 交通 ☐ _____
	重点技术	涉及的单一领域技术或融合技术 ☐ 仿真 ☒ IOT ☐ AI ☐ 仿真+IOT ☐ 仿真+AI ☐ IOT+AI ☐ 仿真+IOT+AI 统一数据/模型语义语法技术 ☐ 管理壳 ☒ 信息模型 ☐ MBD/MBSE/MBE _____ 其他 ☐ 虚拟调试 ☐ 数字线程 ☐ 面向对象描述 ☐ 创成式设计 ☐ 机电一体化 ☐ 场景数据融合_____

2. 案例优势分析

腐蚀损伤一直是影响炼化企业静设备完整性，乃至生产装置安全稳定长周期运行的主要因素之一。为有效提升设备完整性管理，腐蚀管理技术在虚拟模型上的集成优化也已成为国外先进技术的发展潮流和最佳实践。

本项目运用智能的三维建模技术和开放的数据集成技术，对装置腐蚀回路建立三维智能虚拟现实模型，模型集成资产的全生命周期数据以及分散在各应用系统中的资产、腐蚀监测、文档等业务数据，实现三维智能模型与腐蚀管理业务的融合。

（1）物理空间实体模型数字孪生技术

方案采用物理空间实体模型数字孪生技术构建虚拟模型，提出物理空间实体模型层、虚拟空间多维模型层建模方法，采用孪生数据驱动的时变动态模型映射机制，实现模型对腐蚀机理、设备运行空间、时间多维动态描述。

模型涵盖资产全生命周期的属性数据，结合物理空间实体模型的空间位置，融合装置设计资料、采购资料以及介质属性与生产实时数据、运行历史数据、检维修数据等，在虚拟模型上可根据 RBI 分析结果，进行智能预警，从而指导设计全面腐蚀管理策略、制定检测优化方案，以低成本完成腐蚀管理与规划。

在虚拟模型上可以很方便对资产腐蚀进行相应的管理，包括腐蚀回路划分、抽取、检测点规划、检测实施及记录、定点测厚点标识及测厚数据管理等工作，实现数据与空间位置的统一，为

腐蚀分析带来极大方便。

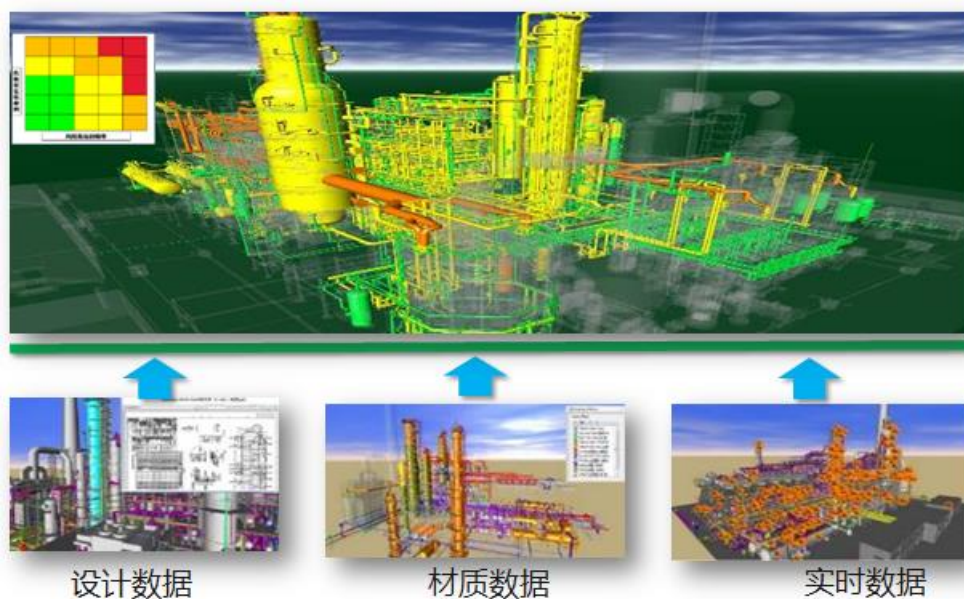


图 31 数字孪生系统物理空间实体模型层数据集成及展示效果示意图

(2) 动态 RBI 数字孪生技术

综合考虑装置运行工况、设备运行数据及设备腐蚀在线监测数据，建立基于实时数据分析的承压设备动态风险分析模型。通过大量的常减压装置失效模式数据库、风险分布数据库、失效案例数据库，结合操作工艺变化，对设备进行动态风险分析，实时掌握高风险设备的风险波动情况，为承压设备提供实时动态的风险分析与预警，解决传统运维由被动防控转变为主动防控，从根本上预防和避免事故的发生，保障装置长周期安全稳定运营。

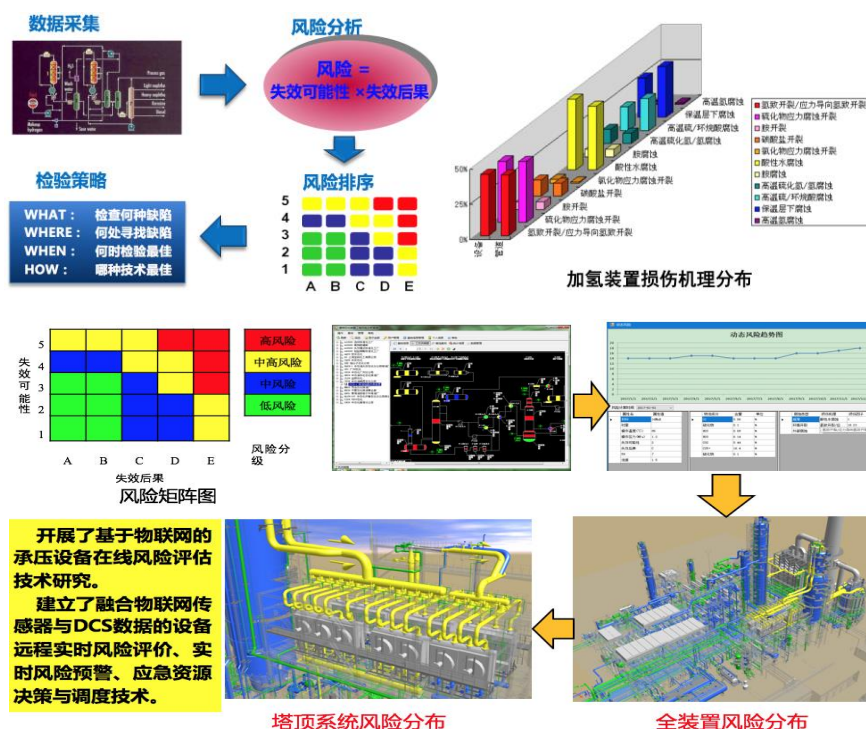


图 32 基于多源数据融合的动态 RBI 分析技术

3. 实施步骤及路径

本项目具体内实施步骤如下:

(1) 模型解析与转换

三维模型作为数字化工厂最重要的数据源之一，模型转换技术有非常重要的地位。

常减压装置设计模型采用的是 PDMS 模型，本方案的三维模型的转换技术遵循 ISO15926 的标准框架，在转换过程中确保模型在图形、属性、颜色、资产树等关键管理要素无损失。三维模型转换技术同时遵循工程级三维数字化孪生系统的管理要求，经多模型坐标统一、模型拼接，生成虚拟三维模型。

(2) 资产属性信息孪生

本项目资产信息孪生提供了一套较完整的解决方案，以工厂对象为载体，采用以虚拟资产为索引的方式构建资产数据中心方案，形成以三维模型为核心的数字化资产信息模型，包括设计、制造、安装、运行、维护数据等全生命周期的动静数据集，这样，让数字孪生工厂系统不仅实现对实体资产三维外形的数字化，更实现了资产全生命周期数据的有效管理，实现了真正资产的数字孪生。

（3）建立模型与相应静态数据关联关系

通过工厂对象的唯一编号信息关联该对象在设计、采购、施工各个阶段的静态数据信息。

（4）文档数据关联

解析文档关联关系，开发文档关联接口，以工厂对象为维度，关联工厂设计阶段、采购阶段、建设阶段的图纸资料、技术说明、数据表、材料表等文档信息，实现接受移交的文档关联关系。

（5）动态数据集成

一个完整的数字化资产模型除了上述静态信息外，还包括运营维护阶段的动态数据。动态数据集成是以工厂对象为载体，集成 MES 系统、LIMS 系统、测厚系统、动态 RBI 系统、腐蚀系统、设备管理系统等。

（6）动态 RBI 分析

针对高风险设备的类型及全生命周期中可能的失效模

式，以 RBI 评估数据库、检验检测数据库、失效案例库等为基础，结合特征安全参量监测，对设备的动态风险进行分析，实时掌握高风险设备的风险情况，保障高风险设备的安全。

4. 案例推广应用价值

长期以来我国炼化行业工作重点是保障工艺的正常进行，但在复杂工况、工艺波动等条件下装置的长周期运行要求不断提高，对装置及设备安全带来严峻挑战。针对近年来发生的涉及装置的设备事故进行分析发现，传统的以定期检验为主的设备安全保障技术已经不能完全适应设备长周期安全的要求。

本项目以 3D 数字化平台为基础，将相关设备运行参数、操作工艺参数及设备监测参数等数据以一定的逻辑关系组织起来，结合对设备特征安全参量的检测监测、设备完整性分析，从而实现设备运行的动态风险分析与控制、完整性监测，失效的早期预警，实现高风险设备的精准风险控制，提高针对性和效率，保障装置的安全，是近年来石化流程装置设备运维技术的发展方向，具有非常重要的推广应用价值。

三、实施效果

目前项目在实施阶段，效益成果的定性定量分析也在不断深入，根据目前的项目进度和实施情况，初步展现的实施效果如下：

1. 建立面向流程行业生产线的感知、优化、控制、诊断和决策等过程的数字孪生对象模型 1000 余个；

2. 形成多时空尺度模型的统计计算求解能力，时间尺度覆盖秒、分、小时，空间尺度覆盖设备、工序、产线。数字孪生系统实现关键工艺性能指标的模型预测，预测提前时间不少于 20 分钟，预测精度不低于 90%；实现异常工况的模型预测，预测提前时间不少于 15 分钟，误报率和漏报率均不低于 5%（与实际现场数据对比）。

3. 生产线的孪生对象支持单向、双向以及一对多的数据同步与交换，具有闭环控制功能，关键性能指标控制误差小于 1%，形成可视化虚拟生产线，与现场生产线平行运行；

4. 形成 3 条数字孪生示范生产线。

本项目实施有助于推动国家和地方规划制定的发展目标的实现，对于提升制造业基于大数据的智能决策能力，提高产品质量，实现社会效益、企业效益和环境效益三个同步发展，调整产业结构，深化改革开放，实现行业创新具有重要意义，实施效果也会逐渐完善。