

数字化技术在化工设计中的应用研究

梁寒冰

中国电子系统工程第四建设有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]数字化技术正在对化工行业的设计范式进行深刻的改变, 促使化工设计由经验驱动变为数据驱动。对化工设计中使用的主要的数字化技术进行梳理, 包括三维数字化建模、智能仿真分析与设计优化、数字化交付等。经过研究发现, 数字化技术可以明显提高设计精度和质量、有利于多专业协同工作、可以降低工程造价和工期控制、还可以加强化工装置的全生命周期管理。就目前存在的数据孤岛、标准规范不统一、复合型人才缺乏等主要问题, 提出完善数字化设计平台建设、推进多源数据整合与标准化管理、加强人才队伍建设与技术创新的优化措施, 探寻数字孪生和人工智能深度融合的途径, 从而给化工设计数字化转型给予参照。

[关键词]数字化技术; 化工设计; 协同设计

DOI: 10.64635/ja.2026.1379

中图分类号: TQ02

文献标识码: A

Research on the Application of Digital Technology in Chemical Engineering Design

Liang Hanbing

China Electronics System Engineering No. 4 Construction Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050000, China

Abstract: Digital technology is profoundly changing the design paradigm of the chemical industry, driving chemical engineering design from experience-based decision-making toward data-driven design. This paper reviews the major digital technologies applied in chemical engineering design, including three-dimensional digital modeling, intelligent simulation analysis and design optimization, and digital delivery. The study finds that digital technology can significantly improve design accuracy and quality, facilitate multidisciplinary collaboration, reduce engineering costs and construction-period risks, and strengthen full life-cycle management of chemical plants. In response to major existing problems such as data silos, inconsistent standards and specifications, and a shortage of interdisciplinary professionals, this paper proposes optimization measures including improving the construction of digital design platforms, promoting multi-source data integration and standardized management, and strengthening talent team development and technological innovation. It also explores pathways for the deep integration of digital twins and artificial intelligence, thereby providing reference for the digital transformation of chemical engineering design.

Keywords: digital technology; chemical engineering design; collaborative design

引言

化工设计是化学工业由实验室研究走向工业化生产的中间环节, 它牵涉到工艺路线的选择, 设备选型和布置, 管道设计, 安全评价等诸多学科和专业领域之间的系统整合工作。传统的化工设计是以二维图纸为载体, 依靠设计人员的经验来做出判断, 存在设计周期长、专业协作难、数据重复利用率低等弊端。随着数字中国战略的不断推进, 以大数据、人工智能、云计算和数字孪生为代表的技术逐渐融入到化工工程的设计全过程当中, 给破解上述困境赋予了技术上的支持。工程设计数字化转型由原来的数字化

交付向智能工厂建设转变, 助力石油化工企业达成智能化发展战略, 依靠标准先行、平台筑基、场景驱动这三条途径, 完成由经验驱动到数据驱动的转变。对化工设计中数字化技术的应用模式及价值实现途径进行系统的探究, 对于促进我国化工行业高质量发展有着十分重要的理论和实践意义。

1 数字化技术在化工设计中的应用概述

数字化技术在化工设计中是从计算机辅助绘图发展为全生命周期数字化集成的过程。20 世纪 90 年代, AutoCAD 等二维绘图软件的应用使手工绘图向计算机绘

制迈出了第一步,但是各个专业的信息仍然处在孤立的状态。进入 21 世纪以后,以 SmartPlant 3D、PDMS、AVEVA E3D 为代表的三维工厂设计软件逐渐被推广应用,三维建模技术也逐渐应用于设备布置、管道设计等各个领域,设计可视化水平明显提高。工程设计数字化转型由原来的数字化交付转向智能工厂建设,使石油化工企业实现智能化发展战略,采用标准先行、平台筑基、场景驱动的方式,实现从经验驱动到数据驱动的转变^[1]。目前化工设计中数字技术已经应用到工艺模拟和优化、三维协同设计、智能 PID 设计、数字化交付等各个方面。化工过程智能设计就是利用人工智能、机器学习以及模型化等手段,对化工过程的设计过程进行模拟和优化,在保证过程稳定的同时也提高了设计的质量和效率,从而达到更加快速、更智能的设计决策和创新的目的。本文以智能化工集成系统为研究对象,主要从化工数字工厂的设计和数字化交付、虚拟工厂的设计和数字孪生、智能工厂的建设三个方面进行论述,对化工设计全流程中数字化技术的应用进行了系统的阐述。

2 数字化技术在化工设计中的关键应用

2.1 三维数字化建模与工厂布置设计

三维数字化建模属于化工数字化设计的关键技术。三维设计以及数字化交付已经成为提高工程设计效率和质量的主要方式。利用三维建模软件,设计人员可以在虚拟空间中创建出与实体工厂一一对应的数字化模型,包含设备、管道、结构、仪表等全部要素的信息。智能化石化静设备三维协同设计系统可以提高工作效率、工作质量,工作效率比传统二维图绘制模式软件设计提高了 50%以上。

工厂布置设计中三维数字化建模的优势更加明显。传统的二维图纸不能直接体现设备和管道的空间位置关系,设计冲突一般出现在施工阶段才被发现,造成大量的返工。三维模型具备沉浸式漫游以及自动碰撞检测的功能,设计人员可以在施工之前就找到并解决管道同结构之间的干涉问题。千万吨级数字化炼厂等大型项目中,框架结构杆件数量达数百万级,传统的手动建模方式下单根杆件耗时长,万件级模型需要多人多日才能完成,资源浪费严重^[2]。为了克服上述缺点,行业内逐步推广应用基于 PKPM 结构设计软件与 PDMS (Plant Design Management System) 等三维配管软件之间的数据接口技术。该接口可以将 PKPM 已经完成的结构分析模型(杆件坐标、截面信息等)直接导入到 PDMS 中,不需要重新建模。该接口可以将型钢、焊接 H 型钢、混凝土构件等各种截面类型的 2000

多种数据映射和转换成模型传递的空间误差控制在毫米级。该技术路线把结构分析同三维设计有机地融合起来,大大加快了建模的速度并提高了建模的精确度。采用智能工艺管道及仪表流程图设计系统,把逻辑关系嵌入到图形元素当中,使图纸信息和数据库动态联系起来。在智能 PID 设计环境下,当工艺流程发生变化的时候,只需要修改数据源,所有的 PID 图纸以及报表就会自动更新,不会出现由于人工修改造成的版本混乱和数据不一致的情况。

2.2 智能仿真分析与设计优化应用

智能仿真分析属于化工设计优化的主要手段。利用 Aspen Plus、PRO/II 等流程模拟软件可以对复杂的化工工艺做深层次的热力学分析和物料衡算。在设计阶段,利用建立的严格的数学模型,可以对不同的操作条件下能耗、转化率和分离效率等进行灵敏度分析,从而得到最佳的工艺参数。化工过程稳态和动态模拟的基本概念、方法、工具,即建立过程模型、选择模拟软件等,是化工过程模拟与优化的核心课程内容。工艺设计优化时,仿真分析可以起到如下三个作用,其一为稳态模拟来确定最佳的操作条件以及设备参数,其二为动态模拟来模拟开停车、事故工况和负荷变化下的系统响应,检验控制方案的可行性,其三为基于仿真结果的经济评价和能耗分析,实现多目标综合优化。利用可视化的方式呈现化工过程中反应速率、转化率、选择性等重要的参数,可以加深学习者对于计算思维以及 AI 技术在化学化工设计中实际运用的认识。

安全设计中仿真分析起着非常重要的作用。利用 VR 技术再现高危工艺场景,在 HAZOP 分析会议中使专家能更清楚地发现危险和操作风险。可视化的交互体验加深了设计审查的深度和广度。装置级数字孪生技术把实时数据交互动态更新数字孪生体,将工艺、设备、应急、环保等各个应用场景下多元的数据融合起来,实现了装置运行状态的全息感知、智能分析、超前预警、动态模拟。

3 数字化技术在化工设计中的应用价值分析

3.1 提高设计质量与设计精度

数字化技术依靠三维建模以及智能仿真,从一开始就在设计品质方面给予保证。自动碰撞检测功能可以在管道和结构之间产生干涉之前就及时发出警告,从而降低现场出现变更单、返工率的可能性。三维模型的空间精度可以控制到毫米级,可以很好地避免传统的二维图纸上出现的尺寸标注错误、信息遗漏等现象。在一个平台上实现全专业三维协同设计,使三维工厂模型、工程文档、属性数据等互相联系、集成起来,提高工程质量。采用数据库驱动

方式对图纸进行设计，可以保证图纸信息的一致性，流程模拟可以在设计阶段检验工艺方案是否可行、经济合理，防止因为设计失误造成的后期整改。

3.2 提升多专业协同设计效率

化工设计包含工艺、管道、设备、土建、电气、仪表等各个专业，传统的串行工作方式造成各个专业之间信息传递滞后，设计返工频繁。依靠多专业在线协同平台打破土建、设备、管道等各专业之间的信息壁垒，使设计质量、出图效率大大提高。协同设计平台中各个专业可以同时进行设计工作，实时共享模型数据，任一专业的变更会立即同步到其它有关的专业上。数字化交付标准发布实施之后，给所有的工程参与方赋予了共同遵照的标准，规整了交付内容和进程，改善了交付品质，削减了项目间的沟通成本，数据交换成本以及信息搜集和整合成本。

3.3 优化工程建设成本与进度管理

数字化技术对成本、进度的管理有诸多优势。在设计阶段，三维模型可以自动统计材料用量，给采购计划提供准确的依据，防止出现材料浪费或者短缺的情况。智能化石化静设备三维协同设计系统工作效率比传统的二维图绘制模式提高了 50%以上，大大缩短了设计周期。缩短了数字化工厂建设周期，提高了资产管理效益。施工阶段利用三维模型进行施工模拟，可以提前发现施工难点，改善施工方案，减少现场签证和返工^[3]。可视化设计大大减少现场变更单和返工率，并且利用多专业在线协同平台缩短项目建设周期。根据行业实践数据可知，用数字化设计的大型化工项目设计返工率可以降低 40%以上，设计周期可以缩短约 30%。

3.4 增强化工装置全生命周期管理能力

数字化交付打通了设计、采购、施工和运维之间的数据链，形成全生命周期的数据资产，给工厂投运后的智能巡检、预测性维修以及先进过程控制打下了良好的数据基础。设计阶段所得到的三维模型、属性数据、文档资料等全部被集中起来形成一个数字资产，并且和现实的工厂一一对应。数据可直接上传到业主的资产管理系统当中，给运维阶段的设备管理、检修规划、安全培训等提供准确的几何及物理信息。这样一种贯穿于设计、采购、施工和运维全过程的数据连续性，从根本上消除了由于信息断层而造成的管理难题。伴随着数字孪生技术的不断发展，设计数据同运营实时数据能够形成闭环，从而推动装置性能不断得到改善。数字化技术在化工设计各个阶段的使用场景以及带来的预期效益可以归纳到表 1 中。

表 1 数字化技术在化工设计各阶段的核心应用与效益

设计阶段	核心数字化技术	主要应用场景	预期效益
概念设计	流程模拟、AI 辅助方案生成	工艺路线比选、物料衡算、能量分析	缩短方案论证周期 30%以上
基础设计	智能 PID、三维建模	PID 智能设计、设备布置初排	减少图纸版本混乱，提升设计一致性
详细设计	三维协同设计、碰撞检测	全专业并行建模、自动干涉检查	降低设计返工率 40%以上
施工准备	数字化交付、施工模拟	材料统计、施工方案优化、虚拟预演	减少现场签证，缩短建设周期
运维阶段	数字孪生、预测性维护	实时数据映射、故障预警、智能巡检	提升资产运维效率，延长装置寿命

4 数字化技术在化工设计中的应用优化策略

4.1 完善数字化设计平台建设

数字化设计平台属于实现全专业协同、数据贯通的基础性设施。目前许多设计企业还存在着软件工具分散、平台功能不全、不同软件之间数据兼容性差等状况。应该加快创建包含智能 PID 设计、三维建模、流程模拟、材料统计、数字化交付等在内的综合性设计平台。工程公司应当利用信息化、数字化以及集成化这些技术手段来创建集成的设计平台，把全部的专业三维协同设计放在同一个平台上进行。平台建设要重视同主流工程软件的兼容性，防止因为工具壁垒造成数据的流失。利用仿真系统和智能运营平台来达到生产调度优化的目的，提高故障预测能力。

4.2 推进多源数据集成与标准化管理

数据标准化为数字化设计打下了基础。在梳理了《石油化工工程数字化交付标准》和 PID、智能 PID 有关条款的基础上，对智能 PID 在数字化交付之后的应用进行了研究。严格按照《石油化工工程数字化交付标准》等规范文件的要求，统一数据格式、命名规则、交付内容和流程。GB/T 47120-2026 压力容器数字化交付规范已经正式施行，化工设备领域数字化交付标准体系也基本上形成起来。设计企业应当创建内部数据管理规范，保证设计数据的准确无误、完备齐全、可追踪，从而为之后的数字化交付以及智能工厂创建构筑起数据根基。

4.3 加强数字化设计人才培养与技术创新

数字化设计转型依靠复合型人才的支持。化工设计人员不仅要掌握化工专业知识，还要有三维建模、流程模拟、数据分析等数字化技能。面向新工科，重视跨专业融合交叉，用化工过程、先进控制、科学计算等专业知识来培养学生的跨专业思维以及解决复杂化工问题的能力。高校方

面要改善课程体系,把化工过程模拟和优化,机器学习在化工中的应用等纳入教学计划。将人工智能、化工数字课程、化工流程模拟、三维工程制图等内容纳入教学计划,融入课程体系,培养以工艺创新、工程设计、数字孪生等学科为基础的高素质创新型人才。企业层面要创建分层分类的培训体系,就不同的岗位人员展开数字化工具应用培训,并且加强同高校、科研机构之间的产学研合作,推进关键技术攻关。

4.4 深化数字孪生与智能化设计融合应用

数字孪生、人工智能属于化工设计迈向智能化的关键走向。数字孪生技术由原来的静态几何模型变成了现在的动态机理模型加实时数据。在设计阶段可以采用数字孪生技术建立动态仿真的模型,对装置在不同的工况下运行情况进行模拟,从而得到最佳设计方案。运维阶段数字孪生体可以同实时运行数据对接起来,从而达到故障预估、性能评判以及操作改良的目的。机器学习算法以及常用技术,结合化工领域的实际案例,研究机器学习在化工过程优化、故障诊断等各方面的应用。人工智能技术可以对工艺方案推荐、设备参数优化、设计图纸智能审查等起到辅助的作用,从而使设计由原来的全部人工完成转变为人机协作设计的过程。

5 结语

数字化技术的应用使化工设计理念、方法、流程发生改变。数字化技术从三维建模、智能仿真分析、协同设计平台、全生命周期数据管理等各个方面贯穿整个化工设计过程,大幅度提高了化工设计的质量、协同效率以及项目综合效益。但是目前的数字化应用还存在着数据孤岛、标准体系不健全、复合型人才缺乏等问题。未来要继续完善平台建设、推进数据标准化、加强人才培养、深化智能技术融合,使化工设计向着智能化、精细化、协同化不断前进,为我国化工行业高质量发展给予技术支撑。

[参考文献]

- [1]韩卫国.基于石油化工工程设计的数智化应用实践[J].炼油技术与工程,2025,55(7):1-4.
- [2]张华,罗那.《石油化工工程数字化交付标准》解析与实施[J].石油化工设计,2023,40(2):47-52.
- [3]宋彬.化工行业智能工厂建设的实践与思考[J].化工设计,2023,33(6):32-38.

作者简介:梁寒冰(1996.10—),毕业院校:华北理工大学,所学专业:石油工程,当前就职单位:中国电子系统工程第四建设有限公司,职务:设计师,职称级别:初级。