数字孪生驱动的天然气 - 新能源化工园区多能流动态优化模型

陈珑

浙江浙能兴源节能科技有限公司

摘要：随着能源转型的加速，天然气－新能源化工园区的多能流高效管理愈发重要。本文提出数字孪生驱动的多能流动态优化模型，阐述数字孪生技术在园区能源系统中的应用框架，构建涵盖天然气、电能、热能等多种能源的流动模型，通过数字孪生体实时映射物理系统状态。利用优化算法对多能流进行动态调度，实现能源高效利用与成本降低。研究成果为化工园区能源智能化管理提供新方法，有助于提升园区能源利用效率与可持续发展能力。

关键词：数字孪生；天然气－新能源化工园区；多能流；动态优化

在全球倡导绿色、可持续发展的大背景下，化工园区作为能源消耗和碳排放的重点区域，其能源系统的优化升级迫在眉睫。传统化工园区能源利用效率低下，多以单一能源为主，对环境造成较大压力[1]。天然气－新能源化工园区融合了天然气这一相对清洁的化石能源以及太阳能、风能等可再生新能源，形成了复杂的多能流系统。

如何有效管理和优化这一系统，实现能源的高效转换、输送与利用，成为亟待解决的问题。

数字孪生技术作为一种新兴的前沿技术，通过在虚拟空间构建与物理实体完全映射的数字模型，能够实时反映物理系统的状态，并对其进行模拟、分析和优化。将数字孪生技术应用于天然气 - 新能源化工园区多能流管理中，是实现能源系统动态优化的新途径。可以整合园区内各类能源信息，准确把握能源流动过程中的复杂动态特性，帮助管理者作出更科学、更及时的决策，从而提升园区的能源利用效率，降低园区运营成本，提高园区能源管理的竞争力，促进园区绿色、低碳、智能化方向的发展。

因此，研究基于数字孪生驱动的天然气 - 新能源化工园区多能流动态优化模型具有重要的理论意义和实际应用价值。

1　天然气 - 新能源化工园区多能流系统架构

1.1　能源输入

天然气－新能源化工园区的能源输入来源广泛、多元。天然气通过长输管道或 LNG 槽车等平稳输送至园区，作为化工生产过程中重要原料和燃料。它具有热值高、燃烧相对清洁等优点，是化工园区能源结构中的重要组成部分。新能源方面，通过大面积铺设的光伏板收集太阳能。光伏系统有集中式和分布式，集中式光伏电站主要建设在园区内的空旷区域，可大规模发电；分布式光伏可安装在园区内建筑物的屋顶等，利用闲置空间。风能利用主要由风力发电机组提供，按照园区所在地的风资源条件，合理规划风电场的布局。

此外，还可能存在其他新能源形式，如生物质能等，通过生物质发电装置或者生物燃气制备设备转化为电能或燃气输入园区能源系统[2]。同时，园区还可与外部电网相连，在自身能源供应不足时从电网购入电能，在能源过剩时向电网售电，实现能源的双向流动与调配，如图 1 所示。

1.2　能源转换

园区内存在多种能源转换设备，以实现不同能源形式之间的相互转化，满足各类化工生产过程以及园区内其他用能需求。燃气轮机和燃气锅炉是天然气主要的转换设备，燃气轮机可将天然气的化学能高效转化为电能和热能，产生的高温废气可通过余热回收装置进一步转换为热能用于供热；燃气锅炉则主要将天然气燃烧产生的热能用于生产工艺加热、园区供暖等。

在新能源转换方面，光伏板将太阳能直接转化为直流电，通过逆变器将直流电转换为交流电后接入园区电网。风力发电机组将风能转化为电能，同样通过电力变换设备接入电网。对于存在生物质能利用的情况，生物质经过发酵等

图 1　天然气 - 新能源化工园区多能流系统架构

过程可产生生物燃气，生物燃气可进入燃气轮机或燃气锅炉进行发电或供热；生物质也可通过燃烧直接驱动蒸汽轮机发电。

此外，还有一些储能设备，如电池储能系统，可将电能储存起来，在能源需求高峰或者新能源发电不足时释放电能，起到调节能源供需平衡的作用，同时也可参与能源转换过程，实现不同时段能源的优化配置 [3]。

1.3　能源分配与输送

园区构建了复杂且高效的能源分配与输送网络，以确保各类能源能够准确、及时地输送到各个用能单元。天然气通过专门的输气管道网络进行输送，管道的管径、压力等参数根据不同区域的用气需求进行合理设计与调控。输气管道网络与各个化工生产装置的用气点以及燃气轮机、燃气锅炉等设备连接，保障天然气的稳定供应。对于电能，园区电网是主要的输送载体。由光伏电站、风力发电场、燃气轮机发电以及从外部电网购入的电能汇集到园区变电站，经过电压变换等处理后，通过配电网输送到各个生产车间、办公区域以及其他用电设备。

在输送过程中，利用智能电网技术对电能的流向、功率等进行实时监测与调控，确保电力供应的可靠性与稳定性。热能输送则通过供热管网实现，燃气锅炉和燃气轮机余热回收产生的热水或蒸汽通过供热管网输送到需要热能的化工生产装置、园区内的建筑物供暖系统等。供热管网配备有温度、压力监测装置以及流量调节阀门，可根据用户的实际需求对热能的输送量进行精确调节，提高热能输送的效率与能源利用的精准度。不同能源的分配与输送网络并非孤立存在，而是通过能源集线器等关键节点相互耦合，实现能源之间的协同调配与优化利用。

1.4　能源消耗

化工园区内的能源消耗主要集中在化工生产过程以及园区内的辅助设施与生活区域。化工生产过程由于工艺复杂、生产规模大，对能源的需求量巨大且种类多样。例如，在石油化工生产中，原油的提炼、裂解等过程需要大量的热能和电能；在合成化工中，化学反应往往需要特定的温度、压力条件，这就依赖于天然气燃烧提供的热能以及电能驱动的搅拌、输送等设备。园区内的辅助设施，如污水处理厂、空气压缩站等，也消耗一定量的电能和热能。污水处理厂的污水提升、曝气、生物处理等环节都需要电能驱动设备运行，同时在污泥处理等过程中可能需要热能。空气压缩站为化工生产提供压缩空气，其运行也需要消耗大量电能。

此外，园区内的办公区域、员工宿舍等生活区域的照明、空调、供暖等也构成了一定的能源消耗。不同区域和设备的能源消耗特性差异较大，有的是连续稳定消耗，有的则呈现间歇性、波动性，这给能源的合理分配与优化调度带来了挑战 [4]。

2　数字孪生技术在园区能源系统中的应用框架

2.1　数据采集与传输

数字孪生驱动的天然气－新能源化工园区多能流优化模型的基础是全面、准确的数据采集与高效的数据传输。在园区内，各类能源生产设备、转换设备、输送管道以及用能终端都安装有大量的传感器。

例如，天然气输送管道上安装有压力传感器、流量传感器，用于实时监测天然气的输送压力和流量；光伏板和风力发电机组配备有光照强度传感器、风速传感器、功率传感器等，可以监测

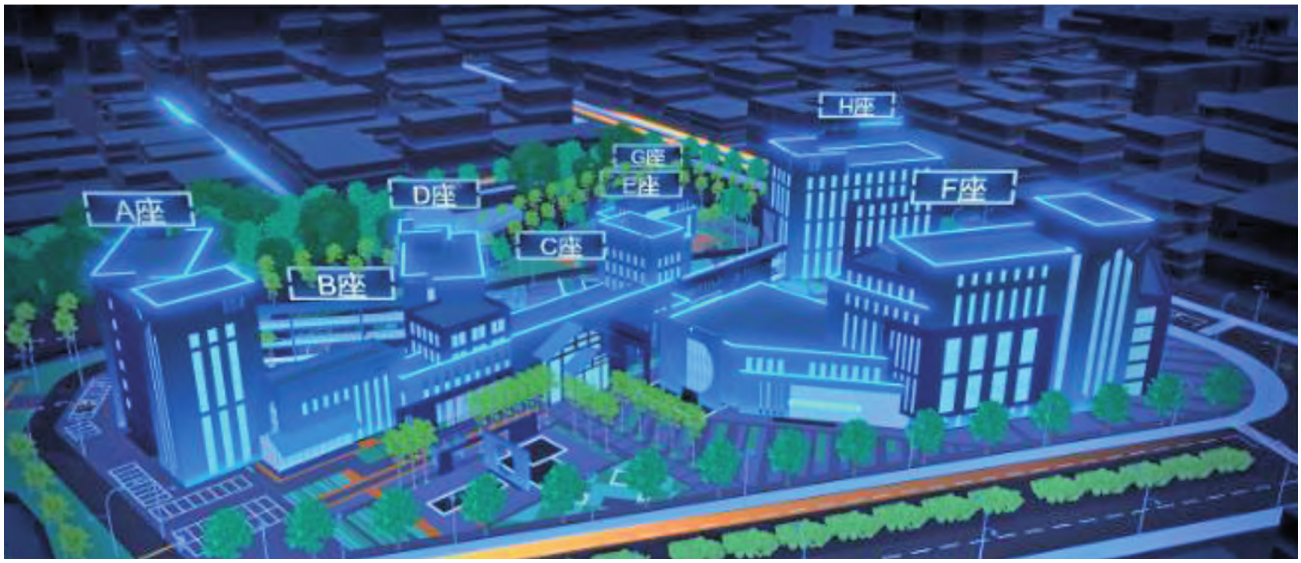

图 2　数字孪生技术在园区能源系统中的应用框架

新能源的发电情况；化工生产装置上安装有温度传感器、压力传感器、电能表等，可采集生产过程中的能源消耗数据。

这些传感器所采集到的数据通过有线或无线通信网络进行传输。有线通信网络如工业以太网，具有稳定性高、数据传输速率快的特点，适用于对数据传输可靠性要求较高的设备之间的数据传输，如园区变电站与关键生产装置之间的数据传输，如图 2 所示。

无线通信网络则包括 Wi-Fi、蓝牙、LoRa 等多种技术，具有部署灵活、成本较低的优势，常用于分布较为分散的传感器数据传输，如分布在园区各处的环境监测传感器数据传输。在数据传输过程中，采用数据加密、校验等技术，确保数据的安全性与完整性，防止数据在传输过程中被篡改或丢失。采集到的数据汇聚到园区的数据中心，为数字孪生模型的构建与运行提供原始数据支持。

2.2　数字孪生模型构建

基于采集到的数据，构建反映园区能源系统物理实体的数字孪生模型。该模型涵盖天然气、电能、热能等多种能源的生产、转换、输送和消耗全过程。对于天然气系统，构建包括气源供应、管道输送、燃气设备运行等环节的模型。气源供应模型根据天然气的开采、储存以及购入情况，模拟天然气的供应能力与稳定性；管道输送模型利用流体力学原理，结合管道的几何参数、压力等数据，模拟天然气在管道中的流动状态，预测压力变化、流量分配等情况；燃气设备运行模型则根据燃气轮机、燃气锅炉等设备的工作原理和运行参数，模拟设备的能源转换效率、输出功率等性能指标。对于电能系统，建立包含发电设备（光伏电站、风力发电厂、燃气轮机发电等）、电网传输以及用电设备的模型。

发电设备选型就是根据新能源的资源条件和设备特性，预测发电功率波动情况；电网传输模型就是根据电力系统分析理论，模拟电能在电网中传输过程，包括电压分布、功率损耗等；用电设备模型就是根据不同设备的用电特性，建立对应的负荷模型，用来分析和预测用电需求。热能系统模型包括热源产生模型（燃气锅炉、余热回收装置等），热网输送模型和热用户模型，模拟热能的产生、输送和消耗，分析供热效率、温度分布等。将这些不同能源子系统的模型进行有机整合与耦合，建立完整的天然气－新能源化工园区能源系统数字孪生模型，如图 3 所示。

2.3　模型实时映射与更新

数字孪生模型与园区能源系统的物

图 3　数字孪生模型构建

理实体保持实时映射关系，能及时反映物理系统的状态变化。随着时间的推移以及能源系统运行状态的改变，模型需要不断更新以保证模型的准确性和有效性。

一方面，利用采集的实时传感器数据对模型进行更新。例如，当光伏电站所在区域的光照强度发生变化时，传感器采集到的光照强度数据实时传输到数字孪生模型中，模型根据这一变化更新光伏板的发电功率预测值；当天然气管道某处发生泄漏导致压力下降时，压力传感器采集到的数据实时传输到模型中，模型随即调整管道内的压力分布和流量分配模拟结果。

另一方面，根据能源系统设备的维护、升级等情况对模型进行更新。当园区内某台燃气轮机进行技术改造后，其能源转换效率、输出功率等性能参数发生改变，将这些新的参数信息输入到数字孪生模型中，对燃气轮机运行模型进行更新，从而使模型能够准确反映设备改造后的运行状态。此外，当园区的能源政策、生产计划等发生变化时，也需要相应地调整数字孪生模型中的相关参数和约束条件，确保模型能够适应能源系统的动态变化，为多能流的优化调度提供可靠依据。

2.4 模拟分析与优化决策

利用构建好的数字孪生模型，对园区能源系统的不同运行场景进行模拟分析。可以模拟在不同新能源发电出力情况下，能源系统如何通过调整天然气发电、储能设备充放电以及与外部电网的交互来满足园区的能源需求，分析这一过程中的能源利用效率、成本变化以及碳排放情况。也可以模拟化工生产装置因生产工艺调整导致能源消耗变化时，能源系统的响应与优化策略。

通过模拟分析，获取大量的运行数据和结果，运用优化算法对多能流进行动态优化决策。优化目标可以包括能源利用效率最大化、能源成本最小化、碳排放最低化等单一目标或多目标组合。常用的优化算法包括遗传算法，粒子群优化算法等，这些算法根据设定的优化目标和约束条件，在数字孪生模型模拟的大量可行解空间中搜索最优解。例如在能源成本最小化的优化目标下，算法根据天然气价格、电价、设备运行成本等因素，结合数字孪生模型模拟的能源流动情况，优化天然气和新能源的发电比例，储能设备的充放电策略以及与外部电网的购电，售电计划，从而为园区能源管理者提供科学合理的能源调度方案，实现园区多能流系统的高效，经济运行[5]。

3 结论

本研究针对天然气－新能源化工园区的多能流管理难点，构建了数字孪生驱动的多能流动态优化模型。通过对园区多能流系统架构的详细剖析，明确能源输入、转换、分配输送及消耗各环节的复杂特性与相互关系。在此基础上，利用数字孪生构建了包括数据采集传输、模型构建、实时映射更新、模拟分析与优化决策等各主要部分的多能流优化应用框架，为多能流优化提供了有力的技术支撑。

多能流模型构建部分分别建立了天然气、电能、热能流动细致而精准的子模型，并通过多能流耦合模型将各类能源紧密关联，体现了园区能源系统的运行全貌。

动态优化算法与策略章节，合理设置能源利用效率最大化，成本最小化，碳排放最低化等多元优化目标，全面分析能源供需，设备运行，能源质量及政策法规等约束条件，进而对比选用了遗传算法，粒子群优化算法等适宜的动态优化算法，并设计了具体的优化策略实施步骤。

研究成果表明，数字孪生驱动多能流动态优化模型可以有效提升天然气－新能源化工园区的能源管理水平。它能够实现能源系统的实时监测与精准模拟，通过动态优化调度大幅度提高能源利用效率，降低能源成本与碳排放，有力推进园区绿色、高效、可持续方向发展。

参考文献：

[1] 蔡巍，孙广宇，杨飞，等．基于网格与域质心权重的自适应 k-means 聚类 GDCW-AKM 算法 [J]. 油气储运，2025(5):1-11.

[2] 常海滨，多堂坤，赵昕铭，等．地下储气库数字孪生框架设计 [J]. 钻采工艺，2025, 48(01):173-179.

[3] 王进峰，张佳祥，王婧，等．虚拟现实技术设计锅炉安全运行数字孪生系统 [J]. 济南大学学报（自然科学版），2025, 39(02):286-290.

[4] 胡月，魏文澜，李玉强，等．基于数字孪生的天然气井多源数据融合温度场分析 [J]. 机电工程技术，2025, 54(01):102-107.

[5] 邱瑞，邹林，冯渝．天然气流量计检定流量智能化调节技术的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量，2024, 44 (20): 167-169.