

基于数字孪生的零碳园区虚实融合管控体系研究

纪喜方

渤海大学 锦州市 121013

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16092

[摘要] 当今是数字化经济时代,也是绿色发展的时代,在节能减排和数字化转型的双重驱动下,数字孪生技术正推动着零碳园区从“经验驱动”向“预测调控”跃迁,数字孪生技术利用多重的感知设备和传感器对实体园区进行全方位感知,再根据感知数据通过建模、仿真、渲染三大核心技术创建园区“双胞胎”。数字孪生技术通过数据层、建模层、功能层和运用层四个层次,对园区数据进行采集、标记和管理,模拟园区运作和实时状态并通过预测控制与优化园区管控体系,实现虚实结合的管控,以虚实共生之力重塑城市可持续发展范式。

[关键词] 数字孪生; 零碳园区; 虚实融合; 管控体系

引言

目前全球治理,节能减排,绿色发展已成为经济高质量发展的首要条件。为更好地实现可持续发展和“双碳”目标,实现精准减排,零碳园区已成为实现城市可持续发展的关键抓手。建设零碳园区环境责任与经济效益上的统一,不仅可以有效提升自然环境效益,还能对社会、经济、政策等多重维度起到优化作用。在此大背景下,亟需构建具有中国特色的零碳园区,开展可持续发展模式。数字孪生技术作为一种先进技术手段在近年逐步发展成熟,被诸多领域广泛运用,其核心在于高度还原并实时投射物理实体的状态。通过数字孪生技术构建园区高精度动态镜像,可以实现能源流、碳流、信息流的实时映射与协同优化,达成零碳园区虚实融合的管理体制,以“算法驱动”更好更精准地实现可持续发展。

一、数字孪生与零碳园区融合与优势

数字孪生(Digital Twin),俗称“数字双胞胎”,是跨越现实和虚拟世界的前沿技术,为元宇宙的实现提供坚实的支撑。其概念最早起源于美国密歇根大学 Michael Grieves 教授提出的 PLM(产品生命周期管理)模型中的“与物理产品等价的虚拟数字化表达”^[1]。数字孪生技术依靠着人工智能技术,形成多维感知能力,可以通过多重的感知设备和传感器对环境 and 实体进行感知,而后整合感知形成完整理解。如下图所示,数字孪生技术中的建模、仿真、渲染三大核心

技术协同作用,将现实中的物理实体精准的映射到虚拟空间中,在虚拟空间中创建一个实体的全面数字克隆,并利用物联网技术实时双向交换数据,实现现实与虚拟空间的交互,从而对物理实体进行全方位、可视化、智能化的管理。

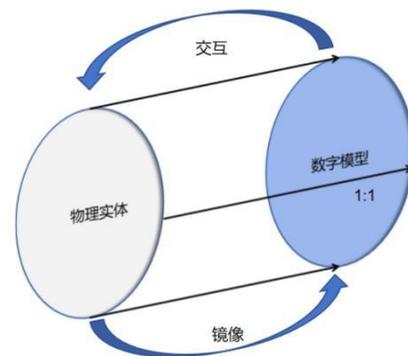


图1 数字孪生概念

数字孪生的本质在于通过编程创建数字模型,这使虚拟现实产品不受任何物理限制,进一步提高创意的发掘和实现,具有无限的可能性^[2]。并且,数字孪生技术强调在虚拟空间对现实实体的精准复制与反馈,具有超真实的合成现实主义、超现实的数字分身体验以及沉浸式交互模型适配等关键性特征,因此多用于对物理实体的精确估算预测和优化决策上。

零碳园区是实现“双碳”目标的重要抓手,绿色低碳园区一般可分为低碳园区、近零碳园区和零碳园区三类,其中零碳园区就是指在特定边界范围内,通过系统性减排与碳中和措施,严格意义上实现动态净碳排放小于等于零的园区。

零碳园区的核心在于构建“能源清洁化、管理智能化、产业低碳化、认证标准化”的生态系统，不仅是减碳技术的试验场，更是区域绿色转型的核心载体。在传统的园区降碳实践中存在着信息离散、信息滞后等情况造成管理效率低下、能源系统优化不到位造成严重浪费等等的情况。而 AI 技术将会成为解决传统园区降碳痛点的重要手段之一，数字孪生技术为园区零碳转型提供了理论框架与方法论工具，将构建实体零碳园区与数字空间零碳园区的实时映射与双向交互机制，通过物联网感知、多源数据融合与动态建模等技术手段，在虚拟园区中复现实体全区的全要素、全过程、全状态特征，形成动态化的数字镜像，将能源系统与碳排放流的可视化、可分析和可优化，从而为碳减排提供精准而高效的决策支持。

二、数字孪生零碳园区的模型构建与运行

构建数字孪生零碳园区模型，如下图所示，首先应梳理零碳园区模型的基因要素，确定园区定位、产业选择和空间布局；确认零碳的综合能源体系、生产系统、能源系统规划以及零碳园区的交通物建基础设施等系统。同时，立足园区建立的目标与范围，确定核心功能需求，包括实时检测能源消耗、碳排放量、设备运行等状态；园区实时数据可视化展示；能源负荷、可再生能源出力、碳排放等预测以及不同策略的效果模拟；以及设备故障、能效异常、碳排放超标等预警与诊断。充分利用物理模型、传感器、园区运行历史等数据，对园区进行多学科、多方位的仿真生成。

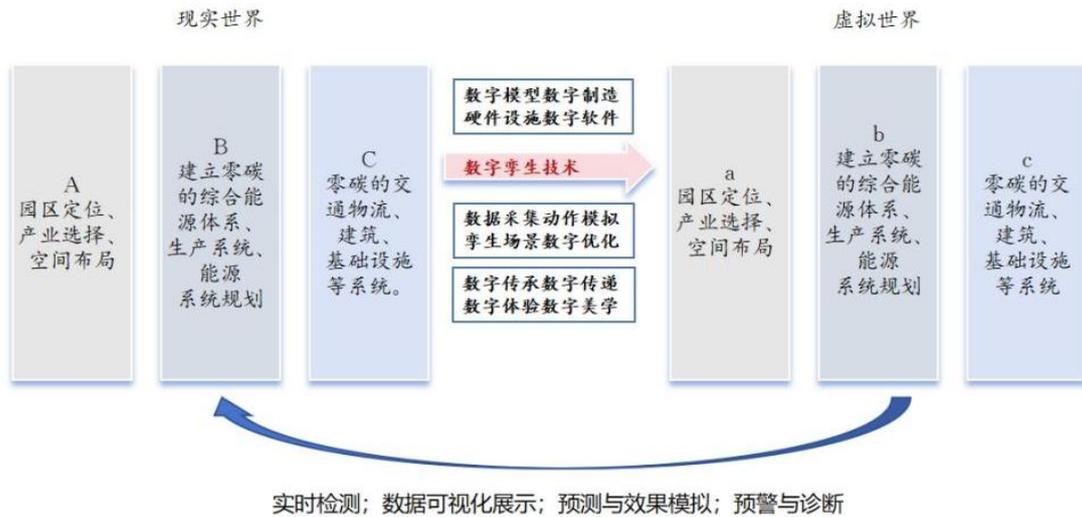


图 2 数字孪生园区模型生成

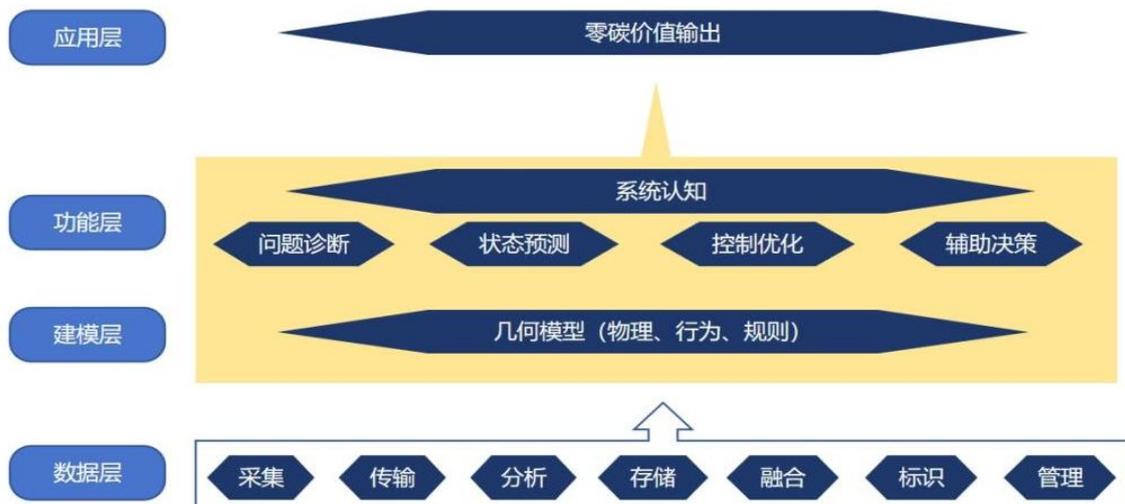


图 3 数字孪生园区模型运行框架

数字孪生助力零碳园区的运行可以分成四个框架结构:数据层、建模层、功能层和运用层。数字孪生始于对园区的数据采集,而后会在系统中生成详细的标记和管理,形成结构化数据池,从而模拟园区运作动作与实时状态并预测状态变化,并基于历史数据和隐性知识对园区未来状态进行预测、控制与优化。由此可见,数字孪生技术加入零碳园区的管控对优化园区运营操作、预测系统性能起到至关重要的作用。

三、数字孪生零碳园区模型的具体应用

(一) 能源消费侧

在能源消耗侧方面,数字孪生技术需要解决的是传统能效管理中数据滞后设备孤岛、策略静态化的痛点,精细化管理和降低终端能耗与碳排放。系统通过可视化技术实时展示各区域、各设备能耗热力图,直观发现高耗能点,自动识别异常能耗;结合历史数据预测未来建筑的冷/热/电负荷需求,提前优化设备启停策略。另外,在交通电气化与智慧充电方面,数字孪生技术基于车辆使用计划、电网负荷等预测,为未来车辆向电网放电提供基础数据和管理平台。

(二) 能源供给侧

零碳园区为优化能源供给,最大化提高清洁能源利用效率和经济性。在可再生能源发电方面,基于AI技术对风光发电功率进行预测,预测精度可达到90%左右,比传统方式预测精度提升5%~10%^[3]。由此通过数字孪生技术的精准预测可以提升可再生能源的利用率,优化预测可再生能源的发电方案。同时,技术模型在预测负荷、可再生能源、能源价格、设备效率等的基础上,实时计算调整各供能设备的启停状态和出力水平,以优化多能系统的运行。

(三) 能源供需互动系统

能源供需互动系统上,零碳园区需在开展用电负荷预测的基础上,优化实现多能互补,实现能源的阶梯型使用。园区可通过数字孪生技术学习算法,高度预测用户的用电负荷,提供优化用能方案,从而节能降费。同时,分层级优化园区

多能互补能源系统,平衡共需,促进共需有效互动。

结语

数字孪生技术、人工智能、物联网等技术的成熟与发展,赋予了零碳园区建设与管理强劲的动力与技术支撑。通过数字孪生技术,可以实时检测能源消耗、碳排放量、设备运行等状态,可视化展示处理实时数据,预测能源负荷、碳排放超标、设备故障等问题并及时给出诊断与策略。数字孪生技术能够超前识别隐患并实施针对性防控措施,优化管理模式,实现运营效率与可持续建设水平的双提升。

[参考文献]

- [1] 龙玉江,李洵,舒彧,等. 数字孪生技术的应用及进展[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(4): 409-414.
 - [2] 汤晓颖,郑秀惠,钟俏,等. 数字孪生视域下醒狮文化IP的可持续设计与传播研究[J]. 包装工程, 2023, 44(14): 436-449.
 - [3] 李硕,张建国,白泉,等. AI赋能园区降碳潜力分析研究[J]. 中国能源, 2022, 44(06): 11-18.
 - [4] 邓建国. 元元媒介与数字孪生:元宇宙的媒介理论透视[J]. 新闻大学, 2022(6): 35-48.
 - [5] 诸葛群碧,张一豪,刘晓敏,等. 光网络智能数字孪生建模理论与技术(特邀)[J]. 光学学报, 2025, 45(13): 129-149.
 - [6] 黄磊,郭熠铭,蒋兴沛,等. 数字孪生技术在航天器环境试验中的应用研究[J]. 机械设计, 2025, 42(S1): 194-200.
 - [7] 蒋庆哲,刘杨,蒲欣宇,等. 零碳园区建设的系统路径、发展模式及治理生态[J]. 中国人口·资源与环境, 2025, 35(05): 13-23.
 - [8] 陈艳波,张宁,李嘉祺,等. 零碳园区研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5496-5517.
- 作者简介:纪喜方(2001.1-)女,满族,辽宁省丹东人,硕士研究生在读,渤海大学,国际中文教育。