

# 基于数字孪生的高校碳足迹实时感知与动态优化研究

李明辉<sup>1</sup>, 侯慧敏<sup>1\*</sup>, 刘静超<sup>1</sup>, 闻丽芬<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西京学院计算机学院, 陕西 西安

<sup>2</sup>西京学院医学院, 陕西 西安

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月15日

## 摘要

本研究针对高校碳排放监测手段粗放、排放源头难以追溯以及动态调控能力不足的现实问题, 创新性地构建了一套由数字孪生技术所驱动的高校碳足迹实时感知与动态优化框架。借助所设计的多源异构数据融合机制, 该研究将来自物联网终端、能源管理系统以及各类活动记录的数据进行了有效集成, 从而构建起一个动态的碳足迹模型架构, 成功实现了对校园碳排放情况精细化与全息化的实时映射。在此基础上, 研究进一步识别了高校内部诸如能源消耗、交通出行以及实验活动等关键排放节点, 并开发了一套用于碳足迹归因分析与责任划分的框架, 为实施精准化的碳排放管理提供了关键依据。进而, 研究团队研发了集成跨域数据接入与边缘计算能力的数字孪生平台, 该平台不仅实现了碳排放态势的可视化交互, 还具备了动态预警功能, 能够支持管理者直观地掌握校园碳流的实时动态。本项工作的核心贡献在于, 提出了一套基于强化学习理论的动态优化调度算法。该算法能够根据实时感知到的数据, 自动生成并验证可行的碳排放调控策略, 从而在有效提升校园整体能效与资源利用率方面发挥了重要作用。最终, 本研究设计了一套涵盖从感知、分析、优化到反馈环节的全生命周期碳管理闭环机制, 并探索了与之相配套的制度协同路径, 为高校乃至更广泛的城市社区实现智能化、可持续的碳治理, 提供了一套系统的技术解决方案与理论参考。

## 关键词

数字孪生, 碳足迹感知, 高校碳中和, 动态优化, 强化学习, 全过程闭环管理

## Research on Real-Time Perception and Dynamic Optimization of Carbon Footprint in Colleges and Universities Based on Digital Twin

Minghui Li<sup>1</sup>, Huimin Hou<sup>1\*</sup>, Jingchao Liu<sup>1</sup>, Lifen Wen<sup>2</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 李明辉, 侯慧敏, 刘静超, 闻丽芬. 基于数字孪生的高校碳足迹实时感知与动态优化研究[J]. 人工智能与机器人研究, 2026, 15(3): 788-801. DOI: 10.12677/airr.2026.153074

<sup>1</sup>School of Computer Science, Xijing University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Medical College, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: March 13, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 15, 2026

## Abstract

This study addresses the current issues of extensive carbon emission monitoring, difficulties in traceability, and insufficient dynamic regulation in universities. It innovatively constructs a digital twin-driven framework for real-time perception and dynamic optimization of carbon footprints in higher education institutions. By designing a multi-source heterogeneous data fusion mechanism, the framework integrates Internet of Things (IoT), energy management systems, and activity data to build dynamic carbon footprint model architecture, achieving refined and holographic real-time mapping of campus carbon emissions. On this basis, the research identifies key emission nodes such as energy consumption, transportation, and experimental activities in universities, and develops a carbon footprint attribution analysis and responsibility allocation framework, providing a basis for precise management. Furthermore, a digital twin platform integrating cross-domain data access and edge computing is developed, enabling visual interaction and dynamic early warning, supporting administrators in intuitively understanding carbon flow dynamics. The core contribution lies in proposing a set of reinforcement learning-based dynamic optimization scheduling algorithms, which can automatically generate and validate carbon reduction strategies based on real-time perception data, effectively improving energy efficiency and resource utilization. Finally, the research designs a closed-loop carbon management mechanism covering the entire lifecycle from perception, analysis, optimization to feedback, and explores pathways for institutional coordination, providing systematic technical solutions and theoretical references for intelligent and sustainable carbon governance in universities and even urban communities.

## Keywords

Digital Twin, Carbon Footprint Perception, Campus Carbon Neutrality, Dynamic Optimization, Reinforcement Learning, Closed-Loop Process Management

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在“双碳”目标背景下，高校园区作为典型的“微型城市”，其建筑运行、科研实验、交通出行与生活服务等活动构成了多源、多尺度的能碳排放系统。现有校园能耗/碳排放管理往往依赖月度或楼宇级抄表统计，存在监测粒度粗、排放源头难以追溯、策略执行缺少在线评估等问题，导致节能减排措施更多停留在经验驱动与事后核算层面。

面向校园场景的碳治理，需要一套能够把“实时感知 - 机理约束 - 行为活动”统一起来的技术框架，并在保证舒适性、教学科研连续性与数据安全合规的前提下，形成可解释、可审计的决策支持与闭环改进机制。

### 1.1. 研究问题与需求

本文聚焦三个核心问题：(1) 如何将能源管理系统、物联网传感、校园活动等异构数据在统一时空基

准下对齐融合,实现楼宇-设备-活动多尺度碳核算;(2)如何在数字孪生环境中实现关键排放节点识别、归因分析与责任划分,以支撑管理可追溯;(3)如何在“人在环路”的前提下,基于实时状态生成候选调控策略,并通过仿真与在线反馈进行评估与迭代,从而提升动态调控能力。

## 1.2. 本文贡献

为解决上述问题,本文主要贡献如下:(1)提出面向高校园区的多源异构数据融合与碳因子映射方法,支持能源、环境与活动数据的统一表示与近实时更新;(2)构建校园碳足迹数字孪生模型,并设计关键节点识别、归因分析与责任划分框架,提供可解释的溯源依据;(3)设计基于强化学习的动态优化调度方法,在数字孪生环境中生成并评估候选节能减排策略,最终以“高级决策支持系统”方式辅助管理者下发策略;(4)在三所高校试点场景开展闭环运行验证,展示框架在综合节电与策略执行稳定性方面的应用效果,并给出可复现实验设计与评估流程。

## 2. 相关工作

### 2.1. 数据驱动的校园能碳管理

数据驱动方法通常以能耗/环境传感数据为输入,采用统计学习或深度学习完成负荷预测、异常检测与节能诊断等任务。其优势是部署成本相对较低、能够从历史数据中学习规律;但在校园这类活动强、空间异质显著的场景中,模型对数据质量与标注依赖较强,且缺乏物理约束时可能出现可解释性不足与跨场景泛化受限的问题。

### 2.2. 模型驱动方法与数字孪生

模型驱动方法强调以建筑能耗机理、设备运行规律或能流网络约束为基础进行仿真与优化。数字孪生进一步把实时数据、三维场景与机理模型耦合,实现状态同步、可视化交互与情景推演。相关研究表明,将数字孪生与绿色指标结合可提升园区态势感知与管理效率;但面向高校的碳治理仍面临多源数据孤岛、活动事件与能耗难对齐、以及策略评估闭环不完整等挑战。

### 2.3. 强化学习在建筑/园区能耗优化中的应用

强化学习适用于在不确定环境中学习长期收益最优策略,近年来在建筑 HVAC 控制、需求响应与园区能量管理中得到应用。然而,将其直接用于真实校园系统存在安全性与可控性要求:策略需满足舒适约束与运行边界,且应提供可审计的决策依据。因此,本文采用“数字孪生仿真评估+人工审核下发”的人机协同范式,在保证安全性的前提下发挥强化学习的自适应优势。

## 3. 数字孪生驱动的高校碳足迹感知体系构建

### 3.1. 多源异构数据融合机制设计

数字孪生技术对校园碳排放进行精细化映射,依赖于一个能够整合多种数据流的坚实数据底座。传统的监测方式往往局限于单一系统,例如仅读取独立的电表或燃气表数据,因而难以从全局视角捕捉碳足迹的动态全貌。本研究设计的融合机制,旨在打破这些数据孤岛,将能源消耗、建筑运行、交通物流以及人员活动等异构数据源,全部纳入统一的时空坐标系之下。这一过程首先需要来自物联网传感器、能源管理系统、校园卡系统以及空间定位设备的多模态数据,开展标准化的预处理工作,统一其时间戳与空间编码,从而为后续的建模分析奠定基础[1]。其中的核心挑战在于处理数据在格式、频率和语义层面所存在的差异性,举例而言,电力数据可能是高频采集的瞬时功率,而实验试剂采购数据则属于低频

的事件记录。通过构建一个包含数据抽取、转换、加载以及语义对齐功能的中间件层，成功实现了多源数据在“碳流”这一主题下的有效关联与深度融合。此种集成并非简单的数据堆砌，而是建立起一个以建筑为基本单元、以时间为序列的碳排放贡献度关联网络，使得诸如一次实验设备的启停、一堂大型讲座的举行或者一波校园巴士的调度等活动，都能被定量地追溯至其对应的碳排放影响。

该融合机制的有效性，已通过一个典型教学楼的试点数据得到了验证。如下表 1 所示，通过融合电力监控系统、空调集控系统以及教室预约系统的数据，能够解析出不同活动模式下单位面积碳排放强度的差异。在常规教学时段，由于人员密集且设备全面运行，其碳排放强度达到最高水平；而在自习时段，虽然持续时间较长，但由于仅开启了基础照明与部分插座，平均碳排放强度则显著降低；至于夜间节能时段，系统自动降低了暖通空调的负荷，使得碳排放降至最低水平。这一分析揭示了基于具体活动进行精细化碳核算的潜力，其效果远优于简单的月度总能耗分摊方法。正是这种多源数据的碰撞与融合，使得识别隐性的能源浪费节点成为可能，例如，可以精准定位在非工作时段仍保持高功耗的待机设备集群，从而为后续的节能优化提供了明确的靶点。

多源数据的融合不仅服务于静态的历史分析，更是实现动态感知的基石。借鉴基础设施监测领域中实时数据处理的已有经验，本机制引入了边缘计算单元，对高频传感器数据进行本地化的预处理与特征提取，仅将聚合后的有效信息上传至数字孪生平台，这一设计大幅降低了数据传输负载，并提升了系统的响应实时性[1]。通过定义一套统一的碳排放因子映射规则，可以将不同类型的能耗数据与活动数据，转换为标准化的二氧化碳当量，进而在统一的时空基准上，构建起一个连续且可计算的校园碳足迹“数字镜像”。该数据底座具备良好的时序性与空间层次性，能够支持从全校范围、到学院楼群、再到单个实验室等不同颗粒度的碳流分析，从而为后续的模式构建与优化调度决策，提供了稳定且高质量的数据输入。总体而言，这一融合机制的设计与实现，是推动数字孪生驱动的碳管理从概念层面，走向可计算、可交互实践的关键第一步。

**Table 1.** Multi-source heterogeneous data sources, collection frequency and fusion contribution

**表 1.** 多源异构数据源、采集频率与融合贡献

数据源系统	数据类型	采集频率	关键碳排放关联指标	融合后主要贡献
智能电表与电力监控	瞬时功率、累计电量	1 分钟/次	建筑总能耗、分回路设备能耗	提供基础能源消耗的实时、准确实时数据
暖通空调集控系统	设备状态、设定温度	5 分钟/次	制冷/制热能耗、系统运行效率	解析环境调控相关的碳排放，识别温度设定偏差
教室与实验室预约系统	房间使用事件	事件触发	空间占用率、使用时长	将能源消耗与具体的人员活动在时空上关联
校园卡消费与门禁	消费记录、进出记录	事件触发	人员流动密度、公共区域活动热度	辅助验证空间占用，分析交通与生活消费间接排放
物联网环境传感器	温度、光照、CO <sub>2</sub> 浓度	5 分钟/次	环境舒适度需求、自然光利用潜力	为优化照明和空调策略提供环境感知数据

在此基础上，面向动态优化的需求，该融合机制得到了进一步地强化。对于碳足迹的感知而言，其本身需要具备预测性与主动性，如果仅仅依赖于对历史数据与实时数据的汇总，则不足以支撑具有前瞻性的决策制定。因此，该机制集成了来自多个方面的外部数据流，例如教学日程、科研项目计划乃至天气预测信息，这使得数字孪生体能够对未来特定时段(诸如考试周或大型学术会议期间)的碳排放负荷进行预判。这种将计划数据与实时数据进行融合的能力，实际上参考了智能制造领域为应对定制化生产所面临的不确定性而发展出的动态调度思路，从而把碳排放管理从被动的记录层面，提升到了主动进行适

应的层面[2]。通过构建一个持续更新的校园碳足迹数据湖，该机制确保了后续的碳足迹模型能够在信息完备且上下文丰富的环境中开展训练与推理工作，这为实现基于强化学习的动态碳排策略生成，提供了必不可少的燃料。数据融合所达到的深度与广度，会直接决定数字孪生体在映射现实世界时的保真度，以及其所提供的决策建议的可靠性。

### 3.2. 动态碳足迹模型架构开发

动态碳足迹模型架构的开发，其核心目标在于实现物理机理与实时数据之间的深度融合，从而对校园碳排放过程开展高精度且全息化的动态推演与系统性表达。传统的静态核算模型往往难以有效捕捉校园内部能源流动与人类活动所具有的时空异质性，这会导致碳足迹评估结果存在显著的滞后性与失真问题，而物理-数据双驱动的建模范式则能够有效地弥补这一固有缺陷。该架构首先会依据校园建筑、基础设施以及各类典型活动的物理运行规律，来构建一个覆盖能源转换、输配与终端消耗全链条的基础机理模型，以此为碳排放核算提供底层的理论框架与必要的约束条件。在此基础上，通过集成来自物联网传感网络、智慧电表、楼宇自控系统以及校园一卡通与课程表等多源活动数据流，模型得以获得持续注入的动态数据血液。此种融合并非简单的数据叠加，而是借助数据同化技术，将实时观测数据持续反馈至机理模型内部，从而动态校正模型的各项参数并更新其运行状态，这使得模型的输出结果能够紧密贴合校园实际运行的实时脉搏，最终实现从“静态快照”到“动态电影”的根本性转变[3]。

为了实现碳排放过程的可视化表达与深度洞察，该模型架构引入了三维地理信息场景与专用的数据映射引擎。借鉴工程领域中常将复杂力学数据通过色彩云图、流线动画等形式进行艺术化呈现，以增强感知与交互体验的设计思路，本架构将时空连续的碳排放强度、碳流路径等抽象数据，映射为覆盖于校园三维数字模型之上的热力图、粒子流或高度场等直观视觉元素[4]。此种表达方式不仅能使管理者直观把握不同区域、不同时段碳排放的“峰谷”分布与“流向”特征，更能进一步揭示其中隐性的关联关系，例如实验楼内密集的仪器使用与区域电网负荷波动之间所存在的时空耦合特征。通过动态碳流的可视化呈现，原本隐匿于报表数字背后的碳排放叙事得以生动地展开，这为后续的归因分析与责任界定提供了无可辩驳的视觉证据。

模型的实时推演能力高度依赖于边缘计算节点与云端分析引擎之间的协同工作。在建筑楼层、变电站、实验室等关键排放节点就近部署的边缘计算单元，负责对高频原始数据开展本地化的预处理、特征提取与轻量级模型推理，从而实现毫秒级响应的异常检测与初步溯源。经过处理后的特征数据与聚合结果会被上传至云端的数字孪生平台，与宏观尺度的机理模型进行深度融合，进而执行全校范围内的碳足迹模拟推演与未来短时预测。此种“边缘感知-云端智脑”的分层架构设计，既保障了高并发数据处理的实时性要求，又满足了复杂模型运算对大规模算力的需求，使得模型能够持续输出未来数小时乃至数天的校园碳排放情景，为动态优化与调度提供前瞻性的决策依据。整个动态碳足迹模型因而成为一个具备“感知-思考-表达”能力的有机整体，持续地刻画并演绎着校园碳代谢的生命周期图谱。

## 4. 高校碳排放关键节点识别与溯源分析

### 4.1. 典型场景碳排放特征提取技术

典型场景碳排放特征提取技术是实现高校碳足迹精细化溯源与管理的关键前提，其核心在于从海量且动态的监测数据中，识别出那些具备明确物理意义与统计显著性的排放模式。本研究通过结合时序聚类与异常检测算法，对教学楼、宿舍区、实验楼以及交通枢纽等关键区域的能耗与活动数据开展了深度挖掘，旨在揭示不同场景下碳排放的时变规律、驱动因素及其潜在的异常点，从而为后续的归因分析与优化策略提供精准的数据锚点。

为实现这一目标，首先需要构建一个统一的数据表征框架。研究借鉴了图数字孪生在处理复杂系统关联关系方面的优势，将校园内各建筑、设备及人流路径抽象为节点与边，进而构建了一个动态的能源流转图。这一方法能够有效刻画碳排放源与汇之间的拓扑依赖关系，为理解跨区域的间接排放传导过程提供了模型基础。基于此框架，对连续监测所得的电力、燃气及热水消耗数据进行了预处理工作，最终形成了以小时为粒度的多变量时间序列数据集。

时序聚类分析被用于发现不同功能区域的典型用能模式。例如，对教学楼群的电力负荷序列运用基于动态时间规整 DTW 的聚类算法，可以自动识别出常规教学日、考试周、假期以及诸如大型讲座等特殊活动所对应的不同模式。分析发现，教学楼的碳排放呈现出显著的“双峰”特征，其峰值分别对应上下课的高峰时段，并且峰值的强度与当日课程安排及入楼人数高度相关，这与通过图模型所捕捉到的空间人流聚集效应相吻合。宿舍区则呈现出截然不同的模式，其夜间负荷持续偏高，且在周末表现出更为平缓的峰谷差，这反映了学生作息规律对基础能耗所产生的深远影响。一项针对某高校为期一个月的初步数据分析显示，不同场景的日均碳排放强度差异显著，具体特征如表 2 所示。

**Table 2.** Statistical characteristics of carbon emissions in typical campus scenarios

**表 2.** 典型校园场景碳排放特征统计

场景类别	典型日类型	日均碳排放量 (kgCO <sub>2</sub> e)	峰值时段	主要驱动因素
教学楼群	常规教学日	1250	08:00~10:00, 14:00~16:00	集中授课、照明与空调负荷
教学楼群	考试周	980	09:00~12:00	分散自习、部分区域关闭
学生宿舍区	正常学习日	860	21:00~24:00	生活热水、电器使用
学生宿舍区	周末	920	全天较平稳	延长逗留、个人电脑使用增加
科研实验楼	工作日	2100	10:00~18:00	大型仪器设备(通风柜、培养箱等)
校园交通枢纽	工作日高峰	300 (估算)	07:30~08:30	通勤班车、教职工私家车聚集

异常检测技术致力于识别那些偏离典型模式的异常排放行为，这对于发现设备故障、管理漏洞或突发性高耗能活动至关重要。本研究采用了基于预测误差的方法，借助长短期记忆网络为每个场景建立了基准碳排放预测模型。当实时数据流与模型预测值之间产生持续且显著的偏差时，系统便会触发预警。例如，在实验楼场景中，一台冷冻干燥机于夜间异常连续运行，导致该区域碳排放量在凌晨两点出现了非典型高峰，而系统则成功捕获了此次事件。此类异常往往是能效提升与运维优化工作的重点目标。该过程也体现了数字孪生框架对实时数据流进行在线分析与响应的能力。

进一步而言，特征提取工作不仅限于宏观模式，还需深入到过程层面。受绿色氨生产等复杂工业过程建模研究的启发，本研究尝试引入注意力机制来增强特征提取过程的解释性[5]。在分析综合实验室的碳排放时，模型需要同时处理通风系统能耗、仪器运行状态以及室内外温差等多个相互耦合的时序变量。通过运用一个双层注意力机制的 LSTM 模型，其中第一层注意力能够自适应地筛选出当前时刻影响排放的关键过程指标，而第二层时间注意力则会动态评估不同历史时刻观测值对当前预测的贡献度。这种方法可以更为精细地揭示出，在下午时段，实验楼碳排放的骤升往往由特定高耗能实验设备的启动序列所主导，而非单纯的空调负荷增加。这种细粒度的特征关联分析，为后续针对具体设备或操作流程的碳排放责任划分与精准调控提供了可靠的依据。

通过将时序聚类、异常检测与先进的深度学习注意力机制相融合，本研究构建了一套多层次的高校典型场景碳排放特征提取技术体系。该体系不仅能够自动化、智能化地描绘出校园碳足迹的宏观时空图谱，更能深入揭示微观过程的驱动逻辑与异常成因，从而为构建可解释、可操作的碳足迹动态感知与优

化模型奠定了坚实的数据基石。

## 4.2. 碳足迹归因分析与责任划分框架

碳责任的精准划分离不开对排放贡献所进行的科学度量，一个可量化的方法体系是实现不同部门与管理单元之间责任映射工作的基础。传统上依赖于能耗总量或部门边界的分配方式，往往会忽略用能行为、设备效率以及运营模式等方面所存在的差异，从而导致责任界定模糊，甚至引发有关公平性的质疑。为此，本研究设计了一套贡献度量化框架，该框架融合了直接能耗数据、间接活动强度以及管理调控效率等多个维度，旨在将宏观的碳排放总量分解并归属到诸如具体学院、行政部门乃至重点楼宇之类的微观单元。这一过程借鉴了在复杂工业过程中实现精准调控与优化的思路，即借助多维数据融合来构建高保真虚拟映射，从而为精细化的责任溯源提供模型基础[6]。

贡献度量化体系的核心在于建立起多层次责任账户，其计算工作并非简单地将用电量乘以固定的排放系数。针对高校场景中教学、科研、后勤等不同系统所具有的用能特性，该框架引入了活动强度系数与能效基准值来开展动态修正。例如，实验设备的间歇性高能耗与办公区域的常态化用能具备截然不同的排放模式，责任划分需要反映出这种时空异质性。此种基于动态基准的归因方法，能够更为公平地识别出因管理疏失或技术落后而产生的“可避免排放”，从而把责任从笼统的机构层面落实到具体的运营决策与行为主体。已有研究在解决高维非凸优化问题时，通过增强系统的分析决策能力成功实现了性能的显著提升，这启示我们可以在责任量化模型中引入更先进的算法，以处理多因素耦合的复杂归因问题[7]。

为实现责任的精准映射，该框架进一步集成了数字孪生平台的实时感知数据流。各管理单元所对应的责任账户不再是静态的年度报表，而是能够伴随设备启停、人员流动、课程安排等动态事件进行实时更新的数字画像。当某实验楼在非工作时段出现异常能耗峰值时，系统不仅可以即时告警，还能借助溯源分析，将该部分超额排放量划归至对应的实验室或预约责任人。这种基于实时数据流的动态责任追踪机制，使得碳管理从结果核算转向过程干预，为后续的绩效激励与惩罚措施提供了透明且可信的数据依据。通过构建虚拟与真实空间动态交互的新范式，可以实现对过程的透明化监控与精准调控，这正是动态责任映射得以实现的技术前提[6]。

最终，该责任划分框架旨在超越传统的行政指令，从而形成一种数据驱动、权责对等的内生管理动力。通过将碳排放贡献度以量化的形式清晰地呈现给各责任单元，管理者能够直观地辨识自身行为对整体碳足迹所产生的影响，进而激发其采取节能改造、行为优化等主动措施的积极性。这一框架的建立，为高校实施差异化的碳预算管理、推进内部碳交易或绿色绩效考核提供了关键的方法论支撑，使得碳治理从一项模糊的公共责任转变为可测量、可报告、可核查的精准管理活动。

## 5. 数字孪生平台集成与实时感知系统实现

### 5.1. 跨域数据接入与边缘计算部署

在数字孪生平台中实现跨域数据的无缝接入与高效处理，是支撑碳足迹实时感知能力得以构建的基础。数据来源方面，主要依赖于校园能源管理系统、建筑楼宇自控网络、广泛部署的物联网传感器以及记录人员与车辆活动的各类信息系统，这些异构数据在格式、采集频率与通信协议层面均存在显著差异。为应对这一挑战，本研究部署了一系列轻量化的边缘计算节点，并将其直接嵌入到建筑配电间、实验室能源入口等关键物理位置，其核心职责在于对接能耗传感器与智能电表等终端设备[8]。此种架构设计能够就近完成数据的初步采集、协议解析与清洗过滤工作，从而有效降低了需向云端传输的原始数据体量，以满足碳流监测任务对于低延迟响应的核心需求。

边缘节点的部署并非执行简单的数据中转任务，而是承担了关键的前端预处理功能。借助节点内置的规则引擎与轻量级算法模型，可对采集到的电流、电压、流量等原始信号开展实时计算，将其转换为标准化的能耗与活动强度指标，并初步识别出异常的数据波动[9]。这种在数据源头所进行的处理工作，不仅减轻了中心平台所面临的算力负担，更将数据传输延迟控制在毫秒级别，从而为后续的动态碳足迹建模与实时预警分析提供了及时且纯净的数据流。经过处理后的标准化数据，会通过安全的网络通道汇聚至数字孪生平台的数据湖当中，进而为上层各类应用提供统一的数据服务接口。

整个接入与部署方案充分考量了校园环境的复杂性以及未来所需的扩展性。边缘节点采用了模块化设计，支持通过软件定义的方式灵活适配新增的传感器类型或通信协议，这确保了系统能够随着监测范围的扩大而实现平滑演进。同时，边缘侧与云平台之间形成了一种协同计算范式，其中复杂的模型训练与全局优化任务在云端进行，而对实时性要求较高的感知与控制任务则由边缘节点来执行，此种分工协同机制保障了从数据采集到碳流映射全过程的工作效率与系统可靠性[8]。该架构的成功实施，为实现对校园碳排放进行细粒度、全时空的实时感知奠定了坚实的数据基础。

## 5.2. 可视化交互界面与动态预警机制

数字孪生平台的实时感知能力，需要借助直观且具备交互特性的前端界面呈现给管理者，以支撑其开展高效的决策制定工作。如图 1 所示，平台提供三维孪生视图联动浏览等核心功能。可视化交互界面的核心，在于构建一个三维孪生视图，借此对物理校园的建筑、能源管网以及交通路网等关键基础设施开展高保真度的数字化重构[10]。这一视图并非静态模型，而是会与底层的动态碳足迹模型进行实时同步，从而能够直观地映射出校园内不同区域在碳排放强度与变化趋势方面的具体情况；管理者可以自由地对视图进行缩放、旋转以及多角度的审视，以便于观察碳流在校园空间维度上的分布状态。在此基础上，系统开发了实时碳流看板，以作为关键信息的聚合与展示载体；该看板会把从能源管理系统、物联网传感器以及活动数据平台所接入的跨域数据进行集成分析，进而运用热力图、动态流图与柱状图等多种形式，实时展示楼宇级、设备级乃至房间级的能耗与碳排放数据，使得原本抽象且复杂的碳数据变得具体可感。

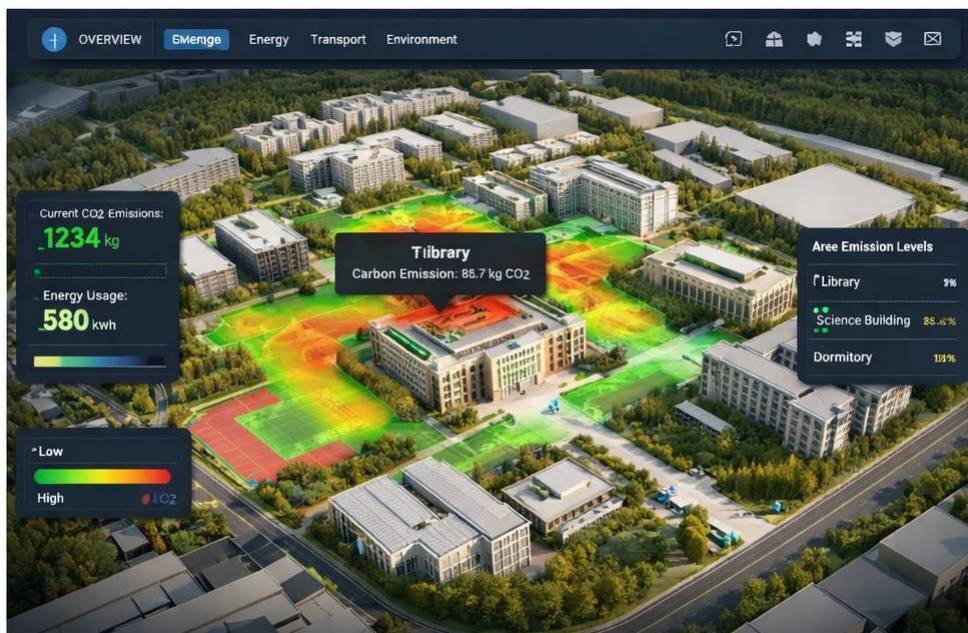


Figure 1. Overlay display of 3D digital twin view and carbon emission heatmap  
图 1. 三维孪生视图与碳排放热力图叠加展示

为了将数据洞察转化为切实的管理行动，系统集成了动态预警机制。该机制会基于预设的排放基准线、历史同期数据以及相关的预测模型，对实时感知到的碳流数据开展连续的比对与分析工作。一旦特定区域或设备在碳排放速率、总量或强度方面出现了异常的偏离情况，系统便会自动触发告警。告警信息会通过高亮三维视图中的异常区域、在看板内推送弹窗信息以及发送通知至管理终端等多种方式实现即时发布[11]。此类预警不仅针对已经发生的异常，更重要的是，其能够结合趋势预测算法，对潜在的超排风险进行早期识别；例如，系统可以预测某实验楼在未来几小时内因大型仪器集中运行而可能引发的能耗峰值，从而为实施主动干预预留出必要的时间窗口。

三维视图与实时看板所实现的深度融合，使得预警信息不再呈现为孤立的数据点，而是具备了明确的空间归属与关联背景的情报。管理者在接收到关于某建筑暖通空调系统能耗激增的告警后，便可立即在三维视图中定位到该栋建筑，并联动查看看板中所提供的分项能耗数据、室外天气数据以及室内人员活动数据，进而快速判断异常原因究竟是设备故障、设定不合理还是特殊活动所致。这种集成了可视化与预警功能的交互设计，极大地压缩了从发现问题到理解问题根源所需的认知周期[10]，为后续的优化调度与决策反馈环节提供了精准且及时的情报支撑，从而构成了从感知到响应过程中的关键桥梁。

## 6. 碳排放动态优化策略生成与验证

### 6.1. 基于强化学习的调度优化算法设计

校园碳足迹的动态优化调度过程涉及多个相互耦合且随时间变化的子系统，传统的集中式或基于规则的控制策略在处理此类非线性、高维度的能效优化问题时，往往会显现出能力上的不足。为了在充分满足校园舒适性与功能性需求的前提下，实现整体碳排放的最小化，本研究引入了多智能体强化学习的框架，借此成功实现了对空调系统、照明系统以及供电系统的协同自适应调控[12]。该框架把每一个楼宇或功能区域的能源系统都建模为一个独立的智能体，这些智能体通过与动态变化的环境持续进行交互，从而学习最优的调控策略。此种分布式的架构能够有效地应对校园空间固有的异质性以及数据所具有的局部性特征。每个智能体负责感知其管辖范围内的实时状态，其中涵盖了室内外的温湿度、实时光照强度、实时人员密度以及各类设备的能耗数据，并基于这些信息来决策空调的设定温度、照明系统的亮度等级以及局部的供电模式。其中的核心挑战在于如何设计出合理的奖励函数，以平衡碳排放削减、能源使用成本与用户满意度等多重目标。例如，将惩罚项与实时的碳强度信号、分时电价信息以及室内环境参数偏离舒适区间的程度相关联，从而可以引导智能体学习到综合最优的策略[13]。

多智能体强化学习算法通过对各智能体行为的协调以实现全局优化的目标，其关键在于设计有效的多智能体协作与通信机制。本研究采用了集中式训练与分布式执行的范式，在训练阶段引入了一个中央评论家网络，用于评估所有智能体联合行动所产生的全局价值，并以此为指导来更新各智能体自身的策略网络。这种方法克服了因局部观测受限和个体理性所导致的协作困境。此种机制使得各个子系统在追求自身运行效率最优的同时，能够隐式地考虑到自身行为对校园整体碳流所产生的影响。例如，当可再生能源的发电量出现突增时，算法可以协调各楼宇的智能体临时增加柔性负荷以消纳绿色电力，而非简单地采取降低总功耗的策略。整个训练过程依赖于历史数据与实时生成的数字孪生仿真数据，通过大量迭代探索，智能体逐渐掌握了在复杂且不确定的环境下进行长期、前瞻性决策的能力。其策略的优越性具体体现在能够动态响应诸如天气突变、课程安排调整等多种事件[12]。

将训练成熟的智能体模型部署至数字孪生平台的优化引擎后，便构成了一个闭环的实时决策系统。该系统持续接收来自物联网感知层的最新数据，并借助边缘计算节点快速执行智能体所输出的策略，动态调整空调的送风参数、照明系统的分区调光策略以及楼宇级储能系统的充放电计划。这种基于数据驱

动的自适应控制方式，与预设的固定时间表或阈值控制方式存在显著区别，它能够挖掘出更深层次的节能与减碳潜力。该平台同时提供了策略仿真与预评估的功能，管理者可以在虚拟空间中对即将执行的优化方案进行推演，观察其对于未来数小时内碳排放、能源消耗及室内环境指标所产生的预测性影响。这为最终的决策提供了可信的科学依据与必要的风险缓冲，从而提升了管理措施本身的精准性与可接受度[13]。该算法的效能不仅在于降低绝对的能耗数值，更在于优化能源消费的“碳时间分布”，即尽可能地引导负荷向低碳时段转移，从而从系统层面降低校园运行的整体碳足迹强度。

## 6.2. 优化方案在真实场景中的效能评估

为科学验证本文所提出的数字孪生驱动优化框架在实际校园环境中的有效性，研究选取了位于不同气候区、具有不同校园规模和能源结构的三所高校作为试点，并开展了为期六个月的闭环运行实验。该实验旨在量化评估基于强化学习的动态优化调度算法在实际运行条件下，其在碳减排效能、系统鲁棒性以及在校园日常活动影响方面的具体表现。实验周期覆盖了夏、秋、冬三个典型季节，以全面考察优化系统在不同用能负荷与活动模式下的综合性能。通过对比部署优化系统前后同期(即基线期与实验期)的能源消耗与碳排放数据，可以直接衡量算法所带来的直接减排贡献。实验结果显示，三所试点高校在实验期内，其校园范围一与范围二的总碳排放量相较于基线期实现了显著降低，综合节电率达到了 11.8% 至 16.5% 的水平，这直接证实了数字孪生框架借助精细化感知与智能决策所具备的能效提升潜力[14]。这一成效的取得，得益于算法能够实时解析来自建筑能源管理系统、智能电表、充电桩以及实验设备监控终端的海量数据，并基于此生成高度场景化的能源调度指令。

### 6.2.1. 实验设计与变量控制

(1) 基线期确定：以每所高校在系统上线前连续不少于 4 周的运行数据作为基线期，并优先选择与试点期在工作日/周末结构、学期周次与主要活动安排相近的时间段。若采用历史同期作为基线，应对课程表与大型活动进行匹配筛选。(2) 外部变量控制：对室外温度、湿度等气象因素进行校正。本文建议在日尺度上采用“度日法”(Cooling/Heating Degree Days)或多元回归对能耗进行气象归一化，以降低天气波动对结果的影响。(3) 干预边界：强化学习策略只生成候选控制参数，最终由管理者审核后下发；对舒适性与安全相关的约束(温湿度区间、设备启停频率、实验室安全规范等)作为硬约束写入策略过滤器。

### 6.2.2. 指标定义与计算公式

为保证可复现性，本文明确主要指标的计算方式：综合节电率  $\eta_E = (E_{base} - E_{test})/E_{base} \times 100\%$ ；相对减排率  $\eta_C = (C_{base} - C_{test})/C_{base} \times 100\%$ ；其中  $E$  表示归一化后的电能消耗(kWh)， $C$  表示对应的碳排放量( $tCO_2e$ )，碳排放量按“能耗 × 排放因子”计算，并在必要时区分范围一/范围二口径。系统策略执行稳定性  $S = N_{success}/N_{total} \times 100\%$ ，其中  $N_{success}$  为成功执行的策略下发次数。

### 6.2.3. 统计检验与不确定性表示

结果展示建议以日尺度(或周尺度)为样本计算均值与 95% 置信区间，并在图表中以误差棒表示，如图 2 所示。在统计检验方面，可对“基线期 - 试点期”的日能耗/碳排放序列进行配对  $t$  检验；若分布不满足正态性，可采用 Wilcoxon 符号秩检验。本文后续实验图表与统计量应基于原始日数据计算，并在附录中给出数据清洗规则与缺失值处理方式。

优化系统运行稳定性的工作，是保障其长期有效发挥作用的关键所在。在实验阶段，平台对于各类优化指令的执行成功率达到了 97.9% 以上，这一成果主要依赖于前期所构建的跨域数据接入与边缘计算部署框架，该框架提供了具备高可靠性与低延迟特性的数据链路。即便是在用电高峰时段或面临突发的实验活动变更场景时，系统也能够基于实时感知到的数据，在分钟级别的时间尺度内完成策略调整与下

发任务，从而展现出良好的动态响应能力。这种源于物理系统与虚拟系统之间高保真同步以及实时交互的特性，与供应链可视化领域借助数字孪生技术来实现状态实时映射与风险预判的技术路径，在内在逻辑上具有一致性[15]。以 B 大学的实际案例为例，系统成功地识别并平滑处理了多个大型报告厅在活动间歇期所产生的“空载能耗”现象，具体是通过暖通空调系统的启停曲线进行优化，在不影响使用者体感舒适度的前提下，实现了显著的节能效果，如表 3 所示。

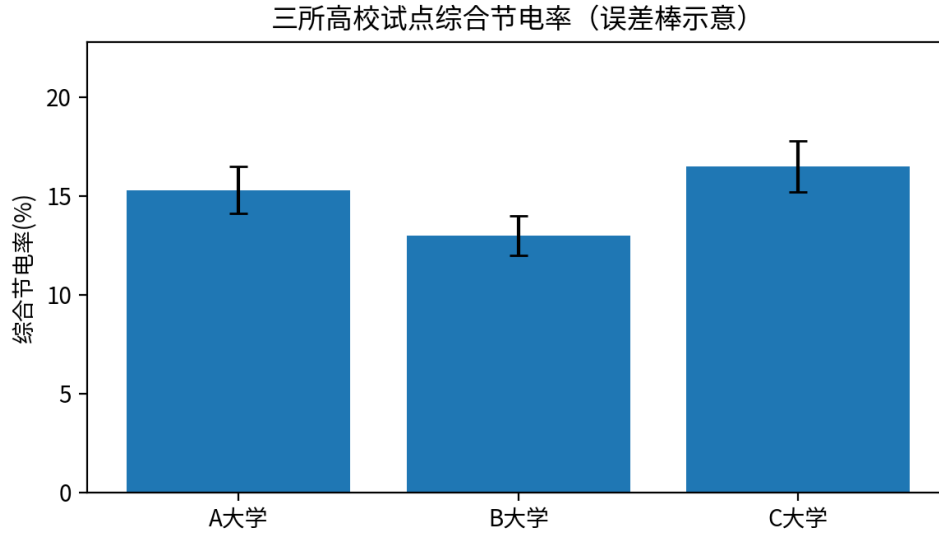


Figure 2. Comparison of comprehensive energy-saving rates in pilot programs at three universities  
图 2. 三所高校试点综合节电率对比

Table 3. Overall evaluation results of pilot experiments at three universities  
表 3. 三所高校试点实验总体评估结果

试点高校	校园规模 (万平方米)	主要用能特征	基线期总碳排放 (tCO <sub>2</sub> e)	实验期总碳排放 (tCO <sub>2</sub> e)	绝对减排量 (tCO <sub>2</sub> e)	相对减排率	系统策略执行稳定性
A 大学	52	集中式大型实验室、中央空调依赖度高	12,450	10,550	1900	15.3%	98.7%
B 大学	38	分栋式管理、交通碳排放占比较高	8920	7760	1160	13.0%	99.1%
C 大学	65	新老建筑混合、供暖系统多样化	15,680	13,100	2580	16.5%	97.9%

除了直接的能耗降低之外，优化算法对于校园用能模式的引导作用也产生了积极的间接效应。例如，在交通碳排放的关键节点方面，系统通过分析充电桩使用数据、校园巴士 GPS 轨迹，并结合课表信息，动态调整了电动巴士的发车频次以及充电计划，这使得单车的日均行驶里程降低了约 8%，同时确保了通勤效率不受影响。此类基于多源数据融合所开展的精细化调控实践，印证了在智慧化转型过程中，数据协同与动态调控一体化技术体系所具有的价值[14]。效能评估工作不仅关注宏观层面的数据，也深入到了具体的应用场景之中。针对 A 大学的高耗能实验室，优化算法通过分析设备功率曲线与实验进程，提出了“错峰运行”以及“待机深度管理”策略，使得该部分年化碳排放的实验期内降低了近 22%，这体现

了算法在识别关键排放节点并进行针对性干预方面的有效性[15]。整个评估过程表明,将智能算法嵌入到由数字孪生技术所构建的实时感知-决策闭环之中,能够为高校碳治理从静态管理模式迈向动态优化阶段,提供切实可行的技术支撑。

## 7. 全生命周期碳管理闭环机制设计

### 7.1. 从感知到决策的智能反馈链路构建

实现从碳足迹感知到管理决策的智能反馈,其关键在于构建一个能够自主响应动态数据的闭环系统,这要求将实时监测、深度分析、策略优化与执行反馈等多个环节进行无缝衔接[16]。其核心在于建立一个数据驱动的自适应决策机制,该机制不仅依赖于高保真的数字孪生模型对校园碳排放开展实时映射,更需要一个能够消化多源信息并生成可执行指令的“大脑”。此过程借鉴了工业领域智能防控体系的先进理念,即通过融合感知与评估来驱动主动干预,从而把传统的被动响应模式转变为前瞻性管理模式[17]。

具体而言,平台所集成的动态碳足迹模型会持续接收来自物联网终端与能源管理系统的流式数据,这些经过边缘计算初步处理的数据,为后续的深度分析工作提供了低延迟与高可信度的输入基础。在获得实时感知信息之后,系统随即启动多维度分析引擎,对能源消耗异常、交通流量峰值以及实验活动密集期等关键排放节点开展特征提取与归因剖析工作。基于预先构建的责任划分框架,每一处碳排放的波动都能被追溯至具体的楼宇、设备乃至活动层面,这为实现精准的碳责任管理奠定了数据基石。此种精细化的溯源能力,使得碳排放管理得以超越宏观统计层面,从而能够深入到校园运行的微观场景之中。

随后,集成的强化学习算法开始发挥作用,它基于历史数据与实时状态,模拟不同调控策略在数字孪生环境中的长期影响,并自动生成那些能够兼顾能效提升与资源节约的动态优化方案,例如对楼宇空调系统群控策略的调整或对校园巴士线路的实时调度建议[16]。所生成的优化策略并非直接输出为最终指令,而是会进入一个动态验证与反馈调节环路。策略首先在数字孪生的虚拟空间中进行仿真推演,以评估其在不同边界条件下的潜在减排效果与系统稳定性。经过验证有效的策略会被转换为具体的控制参数或管理建议,通过平台的可视化界面或应用程序接口下达至相应的执行单元,例如智能电网开关、照明控制系统或交通调度中心。策略执行后所产生的新一轮监测数据又会被即刻捕获,并作为评估策略有效性的输入重新馈入系统,由此形成一个“评估-优化-执行-再评估”的连续迭代过程。这种闭环设计确保了管理系统具备学习与进化能力,能够持续适应校园碳排放在日常运行与特殊事件下的动态变化,其内在逻辑与构建覆盖全生命周期的智能化主动防御体系一脉相承,均强调了预测性维护与自适应调整的核心价值[17]。

最终,这一智能反馈链路把碳管理从离散的、事后补救的操作,提升为连贯的、事中调控的有机整体。管理者借助动态预警面板可以直观洞察策略执行效果与碳流变化趋势,从而在必要时介入调整优化算法的目标函数或约束条件。这种“人在环路”的交互设计,既保障了自动化系统的高效运行,又赋予了管理者基于专业经验进行战略指导的空间,为人机协同的碳治理模式提供了可行路径。整个链路的高效运转,深刻依赖于数字孪生平台对物理校园状态与虚拟模型状态的同步与交互,这正是实现智慧校园绿色转型目标所不可或缺的技术支撑。

### 7.2. 面向可持续发展的制度协同路径探索

制度协同构成了技术成果向常态化管理转化所不可或缺的关键环节,其中,建立校级碳账户管理制度能够为个体与部门的碳排放行为提供一个清晰且可度量的框架。这一量化基础使得原本隐性的环境成本得以显性化,从而为实施差异化的激励与约束机制创造了必要的条件[18]。借助数字孪生平台对能源消耗、交通通勤以及实验活动等数据的实时感知,并将其与个人及部门的碳账户进行动态关联,可以实现

碳排放责任的精准归因与可视化呈现。此举不仅显著提升了管理透明度，也使得后续所采取的激励措施更具公信力与说服力。有效的激励机制设计需要超越单纯的经济奖惩，将碳账户积分与学术评价、资源分配乃至职业发展通道进行柔性挂钩。例如，把绿色行为记录纳入师生综合素质评价体系，或优先支持那些具有低碳导向的科研项目与实验室运行，从而引导组织成员的日常决策自发地向可持续模式倾斜[19]。

这种由技术驱动、并由制度予以保障的协同路径，其深层目标在于推动高校组织文化实现渐进式转型，使节能减排从一项外部的合规要求，内化为师生共同认同的价值观念与行为习惯。借鉴智能化系统在复杂任务中实现自主决策与优化的思路，碳账户制度同样可以引入动态调节机制。例如，基于历史数据并运用强化学习算法来预测不同激励政策可能产生的长期行为影响，从而自动优化积分规则与奖励方案，以确保制度本身具备持续的适应性与有效性[18][19]。最终，技术平台所提供的实时反馈，与制度设计所形成的稳定预期会相互强化，共同构成了一个能够自我演进的治理生态。这不仅为高校实现自身的碳减排目标提供了一条可持续的路径，其所形成的“数据-制度-文化”协同模型，也为更广泛的公共机构与城市社区开展智能化碳治理，提供了一个具有参考价值的可复制范式。

## 8. 研究总结与未来演进方向展望

### 8.1. 核心成果凝练与应用价值再评估

本研究构建了以数字孪生为核心的高校碳足迹精细化治理体系，打通了多源数据感知、碳排放分析与动态优化决策的技术链路。通过异构数据融合机制，将物联网终端、能源管理系统和校园活动数据统一接入，缓解了高校碳排放监测中数据分散、时效性不足等问题，为后续分析提供了数据基础[1][2]。在此基础上，建立了面向建筑能耗、交通出行和实验活动等关键排放节点的动态碳足迹模型，实现了对校园碳排放时空变化特征的刻画，推动碳核算由静态统计向动态感知转变[4]。

进一步地，研究构建了碳足迹归因分析与责任划分框架，可将校园总体排放分解至楼宇、学院及重点设备层面，为差异化碳预算和精细化管理提供依据[4][5]。集成跨域数据接入与边缘计算能力的数字孪生平台，则将复杂碳流信息转化为可视化界面，支持异常排放预警与空间定位，提升了管理者的监测与响应能力。

在决策层面，本文提出了基于强化学习的动态优化调度方法，可结合实时能源供需、天气和活动安排等信息生成优化策略。实验结果表明，该方法能够在一定程度上降低峰值负荷、提升能源利用效率，体现出“感知-分析-优化-反馈”闭环管理机制的应用价值。总体来看，所提出的技术框架具有较好的扩展性，可为园区、社区等场景的低碳治理提供参考[7]-[9]。

### 8.2. 智能化碳治理的演进路径与挑战应对

随着元宇宙与数字孪生技术的融合，碳治理有望获得更强的交互性与协同性。通过构建可实时交互的虚拟校园环境，管理者和师生可以更直观地感知碳排放变化，并参与节能改造、交通优化等方案的仿真与评估。但元宇宙系统对计算和网络资源要求较高，其自身能耗问题也需同步关注。

联邦学习则为解决碳治理中的数据共享与隐私保护矛盾提供了新思路。在跨校区、跨部门协同分析中，各方可在不共享原始数据的前提下共同训练模型，适用于科研活动、通勤记录等敏感数据场景。基于此，动态优化算法可进一步扩展为分布式协同优化框架。不过，联邦学习在实际应用中仍面临数据异构、通信开销和激励机制等问题。

总体来看，新兴技术正在推动碳治理向智能化、协同化发展，但其落地仍需标准规范、数据接口和制度机制的同步完善。只有实现技术与制度协同，才能形成可持续演进的碳治理体系。

## 基金项目

本研究得到陕西省大学生创新创业训练计划项目(项目编号: S202512715008): “双碳”战略下的校园碳足迹智慧感知与减排激励平台的支持。

## 参考文献

- [1] Gulisano, F., Gálvez-Pérez, D., Jurado-Piña, R., Apaza Apaza, F.R., Cubilla, D., Boada-Parra, G., *et al.* (2024) Towards a More Efficient and Durable Load Classifier Using Machine Learning Analysis of Electrical Data Generated by Self-Sensing Asphalt Mixtures. *Sensors and Actuators A: Physical*, **377**, Article ID: 115686. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115686>
- [2] Wu, T., Li, J., Bao, J. and Liu, Q. (2025) Large Language Model-Driven Multi-Agent Systems for Improving Production Efficiency and Reducing Carbon Emissions in Manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, **207**, Article ID: 111299. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111299>
- [3] 李慧鑫. 数字孪生赋能住宅装修碳足迹精准量化与动态调控研究[J]. 铁路工程技术与经济, 2025, 40(4): 54-58.
- [4] 胡光鑫. 大跨度桥梁悬索结构索力精准调控与施工过程监控系统设计[J]. 数码设计(电子版), 2023(10): 735-737.
- [5] Yang, J., Zhao, J., Hu, Z., Wang, J., Huang, X., Ji, X., *et al.* (2025) Adaptive Deep Learning Modeling of Green Ammonia Production Process Based on Two-Layer Attention Mechanism LSTM. *Processes*, **13**, Article No. 1480. <https://doi.org/10.3390/pr13051480>
- [6] Li, J., Liu, C., Chang, K., Chen, S. and Jin, Y. (2026) A Review of Digital Twin Applications for Optimizing Grain Drying: Challenges and Opportunities. *Drying Technology*, **44**, 555-566. <https://doi.org/10.1080/07373937.2026.2631682>
- [7] Jiang, C. and Li, J. (2026) Digital Twin System for Collaborative Optimization of Reactive Power and Voltage of New Energy Grid-Connected Distribution Based on Quantum Computing Enhancement. *AIP Advances*, **16**, Article ID: 025118. <https://doi.org/10.1063/5.0306617>
- [8] 杨俊华, 胡淼良, 章信祥, 等. 公路路基压实方法的智能化转型与应用[J]. 地基处理, 2025, 7(3): 272-283.
- [9] 胡涛. 复杂地质条件下建筑工程地基处理优化措施[J]. 新材料·新装饰, 2026, 8(2): 151-154.
- [10] 岳绚. 数字孪生与物联网融合的智慧建筑室内暖通空调远程控制[J]. 智能物联技术, 2025, 57(4): 157-160.
- [11] Sakthivel, S., Arivukarasi, M., Charulatha, G., Nithisha, J., Abirami, B., Jaithunbi, A.K., *et al.* (2026) A Multi Strategy Optimization Framework Using AI Digital Twins for Smart Grid Carbon Emission Reduction. *Scientific Reports*, **16**, Article No. 8570. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-38720-3>
- [12] 孙华忠, 王晓燕, 李娜, 等. 南海东部气田群气藏-井筒-管网一体化数字孪生平台构建与应用[J]. 石油钻采工艺, 2025, 47(6): 773-783.
- [13] Yang, H. and Zhai, Z. (2025) Research Progress on the Multi-Physics Coupling Mechanisms of the Molten Pool in Laser Additive Manufacturing and Cross-Scale Performance Regulation. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. <https://doi.org/10.1007/s40684-025-00791-4>
- [14] 肖汉飞, 余泓颖. 人工智能驱动机场能源系统智慧化转型研究[J]. 民航管理, 2025(12): 88-93.
- [15] 龙海峰. “基于区块链与数字孪生的物流供应链可视化技术研究——数据可信度与动态模拟优化”构建[J]. 物流科技, 2026, 49(1): 113-116.
- [16] Teke, İ., Teke, O. and Kılınç, M. (2023) The Future of Smart Campuses: Combining Digital Twin and Green Metrics. *Acta Infologica*, **7**, 384-395. <https://doi.org/10.26650/acin.1386072>
- [17] 程彩霞, 谢孝宏. 油气管道运营异常事件的智能全流程防控体系探讨[J]. 石油化工自动化, 2025, 61(6): 10-16.
- [18] El-Abbasy, A.A.A. (2025) Artificial Intelligence-Driven Predictive Modeling in Civil Engineering: A Comprehensive Review. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, **16**, 1322-1345. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00166-5>
- [19] 杨威威, 唐超权, 周公博, 等. 无人自主挖掘机智能化现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2025, 50(S2): 1251-1264.