

面向数字孪生的智慧校园研究与设计

李璐颖¹, 陈平², 王兴建¹, 李春晓¹

(1.北京师范大学信息化建设办公室, 北京 100875; 2.北京师范大学科研院, 北京 100875)

摘要: 随着教育领域数字化转型的加速, 数字孪生技术为智慧校园的发展提供了新的视角和方法。基于此, 综合评述了数字孪生技术的发展前景以及在教育行业应用现状, 探索其在智慧校园建设中的潜力; 明确了数字孪生智慧校园的概念内涵和应用特征, 提出了面向数字孪生的智慧校园逻辑模型, 进一步地细化形成“六横三纵”的技术架构, 并深入探讨了实现该架构所需的关键技术。基于数字化转型成熟度标准, 所提架构为数字孪生智慧校园的发展提出了三阶段演进路径, 旨在为智慧校园的规划与实施提供理论支持和实践指导, 赋能教育领域的新质校园建设。

关键词: 数字孪生; 智慧校园; 教育数字化转型; 技术架构; 演进路径

中图分类号: TP311; G434

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024235

Research and design of smart campus for digital twins

LI Luying¹, CHEN Ping², WANG Xingjian¹, LI Chunxiao¹

1. Center of Information & Network Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. Administration for Research and Development, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: With the acceleration of digital transformation in education, digital twin technology provides new perspectives and methods for the development of smart campuses. The development prospects of digital twin technology and its current applications within the education sector were comprehensively reviewed, along with its potential contributions to the construction of smart campuses. The conceptual connotation and application characteristics of digital twin smart campuses were clarified, and a logical model oriented towards digital twins was proposed. The technical architecture, characterized as “six horizontal and three vertical” was further refined, and an in-depth discussion of the key technologies necessary to implement this architecture was provided. A three-stage evolution path for the development of digital twin smart campuses was also outlined. This framework aims to offer theoretical support and practical guidance for smart campus planning and implementation, thereby empowering the construction of high-quality educational campuses in the field of education.

Keywords: digital twin, smart campus, educational digital transformation, technology architecture, evolutionary path

0 引言

党的二十大报告提出的高质量发展目标, 以及“数字中国”建设的顶层设计, 为我国经济社会发展指明了方向。作为一项战略性前沿技术, 数字孪生 (DT, digital twin) 技术被纳入《“十四五”信

息化规划》中, 显示了其在推动创新、释放数字生产力方面的关键作用。2024年5月, 国家发展改革委、国家数据局、财政部、自然资源部联合印发《关于深化智慧城市发展推进城市全域数字化转型的指导意见》, 阐明了数字孪生技术在智慧城市建

收稿日期: 2024-10-26

通信作者: 陈平, chenping@bnu.edu.cn

基金项目: 国家气象局卫星气象中心基金资助项目(No.ZQC-H14187); 高校督导数字化系统设计研究与软件开发(No.20241168)

Foundation Items: The Satellite Meteorological Centre of the National Meteorological Administration (No.ZQC-H14187), Design Research and Software Development of Digital System for Supervision in Higher Education (No.20241168).

设中的应用前景, 强调了其在推动城市全域数字化转型中的重要性。

智慧校园作为智慧城市的重要组成部分, 探索和构建面向数字孪生的智慧校园承载着深远的战略价值。高校信息化经过多年建设, 已在校园网络基础设施覆盖、物联感应设备部署、业务平台系统建设、高性能计算、数据一张表治理等方面取得了显著进展, 为数字孪生智慧校园的建设奠定了技术基础。但在追求更高质量发展过程中, 也面临着绿色低碳校园建设、跨区域多校区管理、教育科研模式融合创新以及国际化发展等多重挑战。

在数字化转型和双一流发展背景下, 本文探讨了数字孪生智慧校园的概念、特点与应用场景, 提出双向实时交互的数字孪生校园逻辑模型和“六横三纵”技术架构并深入分析其关键技术。基于数字化转型成熟度标准, 提出了数字孪生智慧校园的三步走演进路径, 旨在为智慧校园的建设提供了理论依据, 为教育信息化工作者提供思路参考。

1 数字孪生技术

1.1 技术发展: 从概念到实践

数字孪生技术于 2003 年由美国密歇根大学的 Michael Grieves 教授在产品生命周期管理 (PLM) [1] 课程中首次提出。最初, 这一概念被用于描述物理产品在数字世界中的精确映射, 主要服务于航空领域 [2], 以支持复杂系统的模拟和分析。随着工业 4.0 的兴起, 数字孪生技术在制造业的应用迅速扩展, 成为智能制造的关键技术之一 [3]。基于计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助工程 (CAE)、计算机辅助制造 (CAM) 等技术, 数字孪生在生产线模拟、设备维护和生产过程优化等方面发挥了重要作用。物联网 (IoT) 技术的普及极大地丰富了数字孪生的数据来源, 而大数据 (BD) 技术的应用则使得这些海量数据的处理和分析成为可能, 5G 边缘云计算技术 (5G+MEC) 的结合, 进一步提升了数据的实时处理速度, 为数字孪生技术在交通 [4]、能源 [5]、医疗 [6]、农业 [7] 等更广泛领域的应用提供了强有力的技术支撑。在建筑信息模型 (BIM)、城市信息模型 (CIM)、地理信息系统 (GIS) 等技术的推动下, 数字孪生技术开始融入智慧城市的建设之中, 为城市规划和管理提供了全新的视角和工具。雄安新区 [8] 的示范性探索, 展示

了数字孪生技术的应用效果。

近年来, 数字孪生与人工智能 (AI)、机器学习 (ML)、虚拟现实 (VR) 和增强现实 (AR) 等技术的集成, 扩展了其应用范围, 研究集中在数字孪生引擎、数字孪生业务建模、数字孪生机理模型应用、数字孪生 AI 智能化发展等方面, 不断推动数字孪生技术从理论创新到实践应用。

在标准化研究领域, 数字孪生技术已经成为国际标准化组织 (ISO)、国际电工委员会 (IEC)、国际电信联盟 (ITU) 以及电气电子工程师学会 (IEEE) 的焦点。这些组织通过其下属的多个工作组, 已发布了一系列关键标准 [9-12]。这些标准在概念界定、术语规范、应用案例、能力框架等方面为数字孪生技术的实施提供了全面的指导, 极大地促进了其在全球范围内的广泛应用和深入推广。

中国的标准化工作同样取得了显著进展。全国信息技术标准化技术委员会 (TC28) 和全国自动化系统与集成标准化技术委员会 (TC159) 已正式发布 GB/T 43441.1-2023 和 GB/T 41723-2022 两项国家标准, 聚焦数字孪生技术的通用要求和架构设计。此外, 还有多项数字孪生国家标准正在起草和编制过程中, 这些新标准将涵盖技术、集成、测试、安全等多个方面, 推动行业应用的兼容性和效率。

数字孪生技术在学术界、产业界的广泛关注和快速发展, 都标志着其未来将发挥重要作用。高校作为新质生产力的孵化器和人才培养的基地, 肩负着推动科技进步和社会发展的责任, 应当紧跟数字孪生技术的发展步伐, 积极参与数字孪生校园建设的相关工作中, 培养具备数字孪生技术知识和技能的人才, 做好技术储备和战略布局。

1.2 数字孪生教育应用场景

数字孪生技术在教育数字化中也展现出巨大的应用潜力, 覆盖了校园管理、教育教学、科研创新等多个领域。

校园管理方面, Kim 等 [13] 提出了基于数字孪生技术的智慧校园碳排放优化方案, 为校园节能减排提供了创新方法。Azfar 等 [14] 探讨了数字孪生技术在校园车辆检测和跟踪的应用。Chen 等 [15] 展示了数字孪生在可视化和管理工作环境方面的应用。Tang 等 [16] 提出一种基于数字孪生的校园智能决策系统, 用于实时监控和管理校园资源。Meschini 等 [17] 使用数字孪生技术管理和运营分散在多个地

区的校区资产。

教育教学领域, Hang 等^[18]的研究表明, 个性化的数字孪生学习空间对提升学习体验和教育质量方面具有积极影响。Sepasgozar^[19]强调了在工程领域的远程教育中运用数字孪生的潜力。Zhang 等^[20]提出数字孪生在辅助和激励教师工作方面的作用。艾兴等^[21]进一步拓展了数字孪生学习者的概念, 为学习者动态数据的映射和分析提供了新的理论基础。李海峰等^[22]以美国的加州大学、瑞士的应用科学大学和芬兰的坦佩雷大学为例, 研究了其数字孪生教育应用模式。

科研创新方面, Razzaq 等^[23]提出基于深度学习的数字孪生教室框架, 以促进教学效果。张艳丰等^[24]对应用数字孪生技术的智慧图书馆服务模式进行了深入研究, 为图书馆服务的创新提供了实践指导。张帆等^[25]研究在虚拟仿真实验教学中的孪生实验室建设, 为实验室教学的现代化提供了新方案。黄音等^[26]从跨学科研究与合作的角度出发, 探讨了数字孪生技术在促进校企融合中的应用。

随着技术的不断进步和创新, 数字孪生智慧校园的应用场景将日益丰富, 为教育领域带来更多的创新思路和解决方案, 推动教育模式的革新和教育质量的提升。

2 数字孪生智慧校园概念和模型

2.1 数字孪生智慧校园概念内涵

数字孪生的概念依然在不断地演进与变化中。张霖^[27]对数字孪生所涉及的众多概念进行了梳理, 发现其指向的主体类型多样, 涵盖了数字模型、建模过程、仿真技术以及虚实映射等多个方面。目前尚未就其概念达成一个明确且统一的认识。鉴于此, 在进行数字孪生智慧校园的设计和 implement 之前, 明确其概念、逻辑模型和应用特征显得尤为重要, 有助于统一各方对数字孪生的理解, 也为后续的研究和实践提供指导和参考。

黄荣怀等^[28]在综合众多研究者对智慧校园内涵的深入探讨后, 归纳出五大关键特征: 构建一个全面感知的智能物理环境, 实现无缝互通的高效网络通信, 依托海量数据支持进行决策, 营造开放且可拓展的空间环境, 并提供个性化的智能化教学服务以满足师生需求。数字孪生智慧校园可以看作智慧校园的演进和深化, 继承了其智能化服务的核

心, 同时具备高度集成的实时数据感知交互和三维可视化能力, 极大地拓宽了校园数字化应用的深度和广度。

数字孪生智慧校园的核心在于构建一个与现实校园实时同步的系统性虚拟数字副本。在这一概念下, 面向数字孪生的智慧校园建设, 是以校园发展的教学、科研、管理、服务需求为驱动, 通过融合创新运用数据技术、计算机技术、通信技术等新一代技术, 将现实校园中的空间、环境、设备、人员和服务等关键要素转化为全面数字化的孪生模型, 形成一套协同的虚拟数字副本。这些模型不仅能够被创建, 还能被模拟、评估和管理, 从而实现对关键要素的实时性展示、监测、分析、决策和管控, 达到提升教学体验、优化资源配置, 并增强校园整体运营效率的效果。

2.2 逻辑模型

对于数字孪生概念模型的设计, Grieves 等^[1]的 PLM 模型和陶飞等^[29]的五维模型是最为广泛运用的理论基础。PLM 模型涵盖了实体空间、虚拟空间、实体到虚拟的数据流、虚拟到实体的信息流, 以及虚拟子空间等要素, 如图 1 所示, 该模型有效地阐述了信息镜像的理念。

五维模型在 PLM 基础上, 从理论方面进一步扩展了数字孪生的内涵, 增加了服务和数据 2 个维度, 构建了包括物理实体 (PE)、虚拟实体 (VE)、服务 (Ss)、孪生数据 (DD) 和各组成部分间连接 (CN) 的一个通用参考架构, 如图 2 所示, 可表示为

$$M_{DT} = (PE, VE, Ss, DD, CN) \quad (1)$$

在探索概念应用的过程时可以发现, PLM 模型的双向数据和信息链需要进一步细化来实现具体的实施策略: 五维概念模型中, PE 与 VE 之间的连接 CN_PV 在概念层面得以明确, 但在实际操作层面, 仍然依赖于数据交换来实现其效果。因此, 基于 PLM 和五维概念模型, 结合前述数字孪生智慧校园的概念内涵, 本文提出了一种面向数字孪生智慧校园的逻辑模型, 旨在提供一种实践导向的参考框架, 促进概念的 implementation 和操作, 如图 3 所示。该模型由 4 个部分组成, 包括现实校园 (RC, real campus)、孪生校园 (TC, twin campus)、数字孪生过程 (DTP, digital twin process) 以及它们之间的双向连接。其中, DTP 可以进一步细分为数据融合层和孪生能力层, 以确保数据的深度整合, 同时实现与孪

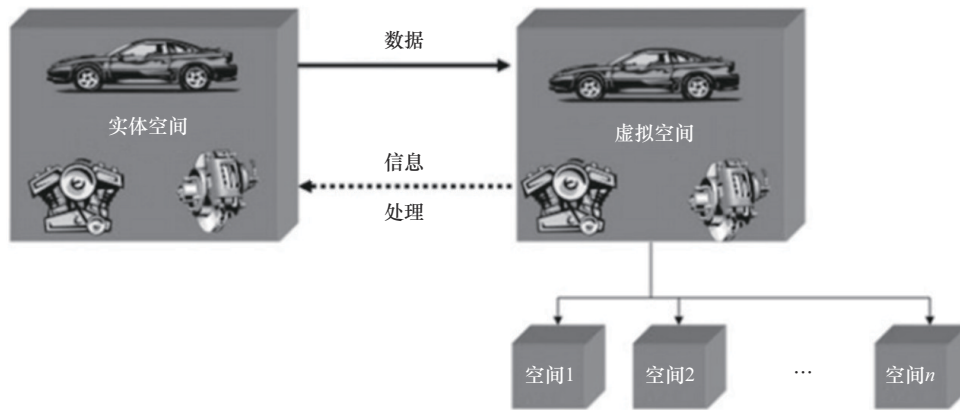


图1 PLM概念模型

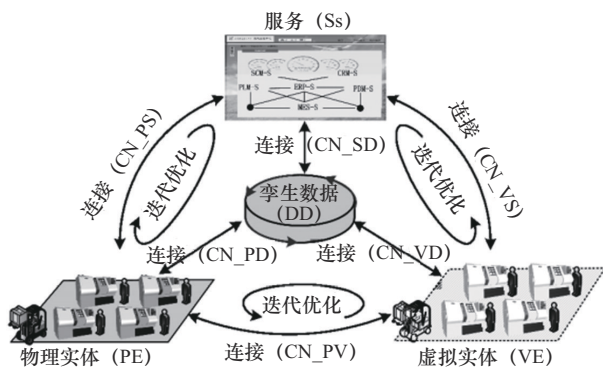


图2 数字孪生五维模型

生模型的松耦合协同，赋予系统更大的灵活性。

现实校园通过部署泛在感知设备 (US, ubiquitous sensing)，实时收集校园内各类关键要素的信息，并将其传输至数字孪生过程。在数据融合层，采集的数据被整合和处理，为孪生能力层提供输入。孪生能力层则负责创建、管理和使用各类数字模型，

实现现实校园到孪生校园的映射，即“以实映虚”。

孪生校园通过人机交互 (HCI, human-computer interaction) 与数字孪生过程相连，使得用户能够与数字孪生体进行交互。孪生能力层根据交互指令，提供展示、监测、分析、决策、管控等能力。最终形成以数字指令作用于现实校园的各要素，达到智能控制效果，即“以虚控实”。

2.3 应用特征

数字孪生智慧校园的应用特征体现在全要素数字化、以实映虚、以虚控实、泛在感知和人机交互 5 个方面。

1) 全要素数字化：不仅包括对物理实体的数字化，还涵盖了将这些实体及其相关流程、服务和活动的数字化，即从校园建筑、设施、环境到师生、业务的关键要素，将所有人-物-事通过数字孪生技术进行数字化表达，形成一个全面的数字校园

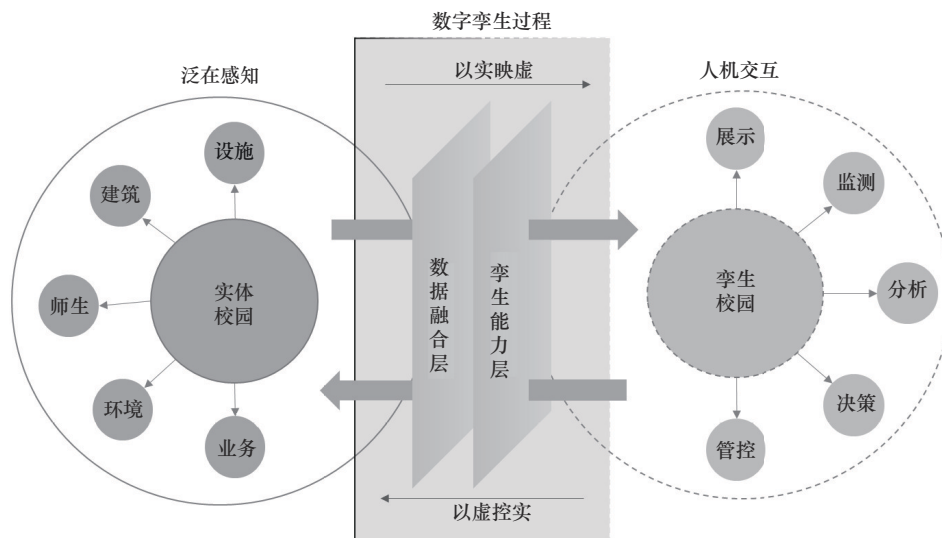


图3 面向数字孪生的智慧校园逻辑模型

模型。

2) 以实映虚: 通过数字孪生过程, 智慧校园将收集到的现实校园数据转化为数字模型, 实时映射到校园的数字孪生体, 使校园管理者和用户能够在孪生校园环境中观察和分析校园的实时状态。

3) 以虚控实: 借助数字孪生能力, 管理者可以模拟不同的校园管理策略和操作, 预测其在校园中的显示效果, 使校园管理者和用户能够通过与数字孪生体的交互对现实校园进行同步控制和操作。

4) 泛在感知: 智慧校园利用物联网设备、传感器和应用程序接口 (API, application programming interface), 实现对现实校园内各关键要素的实时监控和数据采集。这些设备无须人为干预就能够自动感知环境变化、设备状态和用户行为, 为孪生校园提供全面的数据支持。

5) 人机交互: 与泛在感知的自动获取不同, 数字孪生校园的人机交互是用户主动性的, 通过移动应用、VR/AR、运动捕捉等人机交互设备, 生成交互指令, 优化和控制物理校园实体与活动过程。

3 技术架构设计与关键技术

3.1 技术架构设计

在面向数字孪生的智慧校园逻辑模型及应用特

征基础上, 进一步分层细化其技术要素, 构建“六横三纵”式的数字孪生智慧校园技术架构, 如图 4 所示。

架构的“六横”部分自下而上依次是实体要素层、泛在感知层、数据融合层、孪生能力层、人机交互层和孪生应用层, 具体介绍如下。

实体要素层负责对校园内所有参与数字孪生建模的对象进行精确识别和管理。这包括但不限于建筑结构、教学设备、环境条件、人员活动和业务流程。通过这一层次, 确保了数字孪生模型的基础清单的完整性。

泛在感知层利用物联网设备和信息系统 API, 实现对实体要素层中各类对象的实时监控和数据收集。状态信息、使用情况和操作日志等数据通过网络通信技术被实时汇聚, 为后续数据处理提供原始输入。

数据融合层采集自泛在感知层的多源数据被统一整合和处理。通过数据 ETL、归一化、编目和集市化, 确保数据的一致性和可用性, 为上层应用提供清晰、统一的数据视图。

孪生能力层是数字孪生智慧校园的核心, 基于高性能计算和各类模型算法, 实现孪生校园的数字孪生体模型构建和可视化, 并对模型生命周期和功

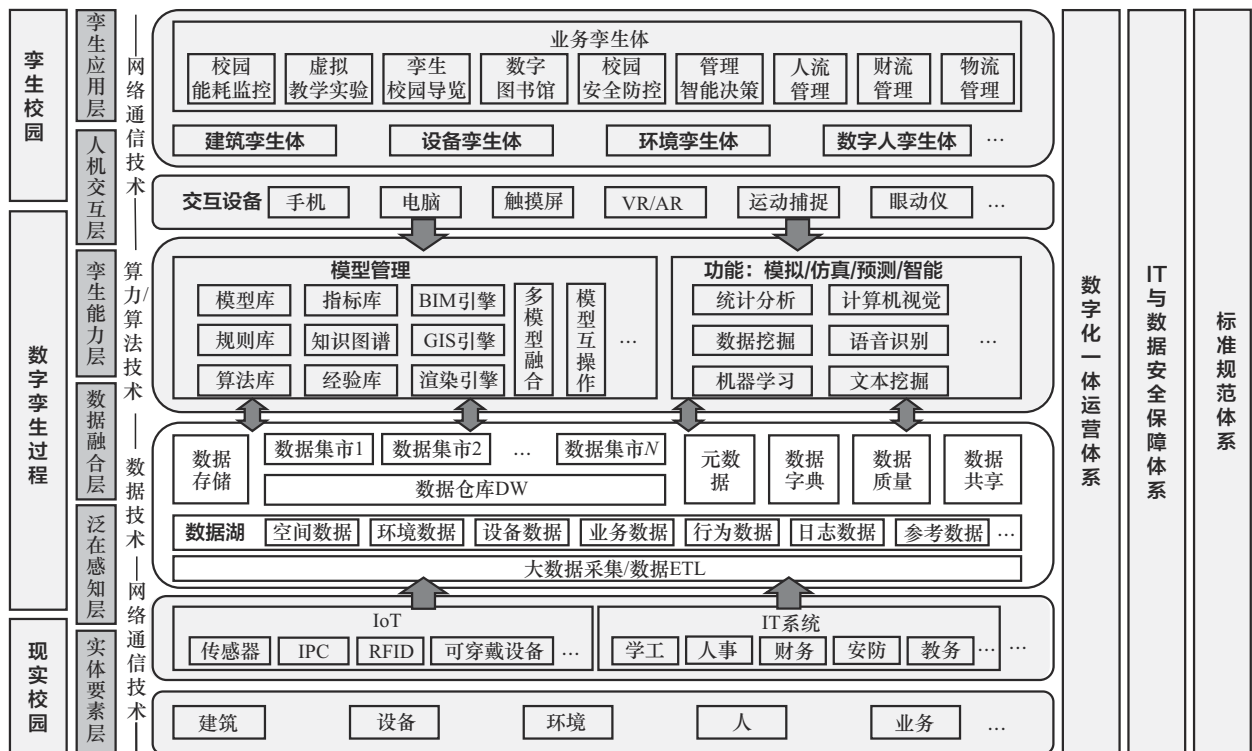


图 4 数字孪生智慧校园技术架构

能进行管理。

人机交互层通过互动设备支持师生与数字孪生校园的直观交互,增强用户体验,也为校园管理提供直接的反馈和控制机制。

孪生应用层包括各类数字孪生体的可视化展示和业务服务应用,如虚拟教学、实验室、图书和能源管理、安全监控等。这些应用直接服务于校园的日常运营和管理。

在数字孪生智慧校园的建设中,层次间的协同性和安全性是至关重要的。“三纵”部分代表架构中贯穿始终的三大支撑体系,包括标准规范体系、IT与数据安全保障体系以及数字化一体运营体系。

标准规范体系的作用是确保数字孪生智慧校园中各层级之间的数据和信息能够按照统一的数据格式、通信协议和接口标准进行交换和共享,促进不同组件之间的互操作性。标准规范体系还涉及数据质量控制、元数据管理等方面,确保数据的准确性、一致性和可追溯性。

IT与数据安全保障体系是数字孪生智慧校园稳定运行的基石,从技术、人员、制度、流程为孪生校园的系统安全、网络安全、数据保护和隐私保护等多个方面提供全面的安全保障。

数字化一体运营模式依托一体化集中运营平台,促进校园内各个部门或单位之间的资源整合和流程协同,实现资源共享和流程优化,从而提高校园管理的集约化和效率。

3.2 关键技术

在数字孪生校园架构中,数据技术、算力技术、算法技术和通信技术是构建数字孪生校园技术的关键。

3.2.1 数据——多源数据融合

多源数据融合是数字孪生智慧校园的基础。在数字孪生校园中,数据来自不同单位的信息系统和不同物联感知设备,类型包括结构化数据、半结构化数据和非结构化数据等。这些数据的格式、精度和时效性各不相同,需要通过大数据技术进行融合和优化。多源数据融合治理不仅涉及数据的清洗、转换和集成,还涉及数据质量管理和字典建设,以及为应用服务的数据集市构建。基于有效的数据融合治理,数字孪生系统才能实现统一、可靠和可扩展的数据环境,为数字孪生体的生成和使用提供可信的数据基础。

3.2.2 算力——高性能计算

高性能计算是数字孪生系统的大脑,它为复杂系统的数据处理和智能分析提供了强大的计算能力。数字孪生系统需要处理大量的实时数据、历史数据和模拟数据。高性能计算平台通常包括云计算中心、边缘计算和专用计算硬件,能够实现大规模并行计算、分布式计算等复杂任务。随着计算技术的发展,量子计算也正在逐步行业应用化,这将极大地扩展计算能力,为数字孪生系统的复杂系统建模和决策支持提供更为强大的计算资源。

3.2.3 算法——数字孪生模型

数字孪生体算法是数字孪生系统的核心,它涉及建筑、人物和业务的数字化映射和可视化。数字孪生体的构建不仅关注物理对象的外观和形状,还深入其机理和状态流转。高质量的模型算法对于提升系统的精确度和实时性具有极大的促进作用。与其他行业中数字孪生主要关注事、物的孪生模型不同,数字孪生智慧校园扩展到了数字人孪生体。数字人代表了一种更高级而复杂的数字孪生形态,它们不仅模拟人的形态特征,更要模拟人的行为模式和决策过程,用于预测个体或群体的行为反应,对提升校园的群体事件管理和个性化服务等提供了新的视角和解决方案。

3.2.4 通信——实时同步

数据同步通信的能力是数字孪生智慧校园实现实时动态反应的关键。通过使用新一代通信技术,例如5G和时间敏感网络(TSN, time-sensitive networking),可以提高带宽、降低时延、减少抖动,确保从现实校园捕获的数据能够迅速且准确地同步到数字孪生体中。这种高效的数据传输不仅促进了虚拟环境对现实情况的即时映射,而且使得从孪生校园发出的交互指令能够被实时反馈至物理世界,从而实现校园物理环境的精确控制和优化。

4 演进路线

能力成熟度模型(CMM, capability maturity model)是一种广泛认可的评估工具,用于衡量特定领域如软件工程、系统工程等的成熟度和能力水平。依据全国信息技术标准化技术委员会发布的国家标准GB/T 43439-2023《信息技术服务 数字化转型 成熟度模型与评估》,成熟度被划分为5个等级,覆盖组织、技术、资源、数字化运营、数字化生

产、数字化服务等 7 个关键能力域。

在这一标准的指导下,本文提出面向数字孪生的智慧校园建设三阶段演进策略,如图 5 所示,从管理、技术、运营三大能力域,包括规划、标准、人才、网络、数据、算法、算力、应用、运营 9 个层级分步骤实施,提供一种从“可视级”到“可用级”再到“可控级”的渐进式路线,为面向数字孪生的智慧校园建设提供参考。“可视级”侧重于通过数字孪生技术实现校园实体要素的直观呈现;“可用级”阶段进一步增强数字孪生模型功能,并扩大业务应用场景;“可控级”阶段通过高度集成的智能模型群实现对校园运营的全面控制与优化。

4.1 第一阶段:静态建模(可视级)

在孪生校园建设的起始阶段,主要目标是实现校园实体的数字化建模,包括建筑、设施和环境等,实现静态展示。关键管理活动包括:确定目标愿景、制定规划;建立数据标准和通信协议;制定师生数字化培训计划。关键技术活动包括:网络全覆盖,感知设备和信息系统部分接入;盘点校园的系统信息和感知数据,建立数据目录;初步构建校

园建筑、设备和环境的数字孪生体模型,实现几何级可视化展示;配置必要的计算资源,满足初期数据处理和分析需求。关键运营活动包括:开发可视级孪生应用;建立运营团队。此阶段的挑战在于服务数字孪生的数据治理,需要解决多源异构数据的融合问题,确保数据的一致性和准确性。

4.2 第二阶段:以虚映实(可用级)

随着基础建设的完成,第二阶段的目标是实现校园业务的数字化建模,包括流程、活动等,实现动态过程的实时监测。这一阶段的关键管理活动包括:促进虚实融合,依照规划步骤建设;制定详细的技术标准和操作规程,促进校园内部标准化;培养孪生校园研发和运营人才。关键技术活动包括:网络速度满足需要,感知设备和信息系统全部接入;建立数字孪生数据体系,面向业务和事件构建数据集市;构建业务孪生体模型,实现校园的机理级可视化展示;计算能力达到准实时级别。关键运营活动包括:开发业务孪生应用;优化运营流程,集约化运营;此阶段的挑战在于提高孪生模型的准确性和可靠性。

成熟度	L1	L2	L3	L4	L5
目标	组织应具备转型意识,开始对实施数字化转型的基础和条件进行规划,在运营、生产、服务等业务领域基于内外部需求开展数字化转型探索工作。	组织应对数字化转型的组织、技术、数据和资源进行规划,完成局部业务的数据收集、整合与应用,初步具备基于数据的运营和优化能力。	组织应具备数字化转型总体规划并有序实施,完成关键业务的系统集成和数据交互,在运营、生产和服务领域实现基于数据的效率提升。	组织应将数据作为支撑运营、生产和服务关键领域业务能力提升优化的核心要素,构建算法和模型为业务的相关方提供数据智能体验。	组织应基于数据持续推动业务活动的优化和创新,实现内外部能力、资源和市场等多要素融合,构建独特生态价值。
演进步骤	第一阶段:可视级		第二阶段:可用级		第三阶段:可控级
管理	规划	•确定数字孪生智慧校园的愿景和目标,制定规划蓝图	•不断完善物理空间和数字空间的融合规划,按照规划步骤依次建设		•打造双向实时的数字孪生校园,实现全面数字化转型
	标准	•建立基础的数据标准和通信协议,确保系统间的兼容性	•制定详细的技术标准和操作流程,推动校园内部标准化		•标准制定实施:对外输出经验,推动行业标准建设
	人才	•制定培训计划,提升师生的数字技能	•培养自有孪生校园运营和建模人才		•建立相关的学科体系,输出高层次人才
技术	网络	•网络基本全覆盖,感知设备和信息系统部分接入	•网速进一步提升,感知设备和信息系统全面接入		•网络满足实时交互需求,感知设备泛化
	数据	•盘点和整合基本信息和感知数据,建立数据目录	•建立数据体系,数据集中并构建面向业务和事件的数据集市。		•数据流协同使用顺畅,形成有效资产,推动对外开放
	算法	•构建建筑、设备、环境的数字孪生体,实现几何级可视化展示	•构建业务孪生体,实现机理级可视化展示,可完成动态监测、统计分析等功能		•构建数字孪生体,借助AI实现时空仿真、智能预测等模型工功能
	算力	•配置必要的计算资源,满足初期数据处理和分析需求	•扩展计算资源,实现准实时处理		•提供强大的计算支持,实现实时效果
运营	应用	•开发基于可视空间数字孪生应用,如校园导览、建筑能耗管理、重点设备监控等。	•扩展基于业务的数字孪生应用,包括智能教室、仿真实验室、数字图书馆等		•实现校园服务的全面孪生同步
	运营	•建立运营团队,负责系统维护和技术支持	•优化整体运营流程,开展集约化运营		•一体化运营,高度集中智能运维

图5 面向数字孪生的智慧校园演进路线

4.3 第三阶段:以实控虚(可控级)

在上述阶段的基础上,第三阶段致力于实现校园的智能化模拟和控制。这一阶段的关键管理活动包括:打造双向实时校园,促进数字化转型;标准和经验输出;输出高层次人才。关键活动包括:泛化感知设备部署;数据流协同顺畅,按需调用,提供对外开放能力,促进校际、城际互联;构建数字孪生体模型,对实体和业务模型开展时空仿真、智能预测等,形成集成化的模型群;计算能力达到实时级别,增强数字孪生体与物理实体的交互。此阶段的挑战在于实现实体模型功能的智能化,以及面向数字人的行为模型预测。

三阶段的演进路线不仅符合国家标准的指导原则,也体现了数字孪生智慧校园在数字化转型过程中从基础走向智能的逐步深化与完善,为数字校园的智能化、精细化提供了路径和方法论支持。

5 结束语

本文回顾数字孪生技术的发展过程,阐述了数字孪生技术在智慧校园建设中的应用前景,揭示了其在促进教育资源优化配置以及推动创新教育服务方面的潜力。提出数字孪生智慧校园的概念内涵,并构建了逻辑模型。通过进一步细化,延伸出“六横三纵”式的技术架构,识别并强调了架构中的关键技术要素。最后为指导实践,提出了一个三阶段的演进策略,为数字孪生智慧校园的规划与建设过程提供分步实施的参考。笔者期望与教育工作者、技术专家和决策者探讨和协作,促进更多关于数字孪生技术在智慧校园中的深入研究,共同推动教育数字化转型和融合创新,实现教育模式的升级发展。

参考文献:

- [1] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer International Publishing, 2016: 85-113.
- [2] NAIR P B, KEANE A J. Stochastic reduced basis methods[J]. AIAA Journal, 2002, 40(8): 1653-1664.
- [3] 李浩, 王昊琪, 刘根, 等. 工业数字孪生系统的概念、系统结构与运行模式[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(12): 3373-3390.
LI H, WANG H Q, LIU G, et al. Concept, system structure and operating mode of industrial digital twin system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(12): 3373-3390.
- [4] 伍朝辉, 刘振正, 石可, 等. 交通场景数字孪生构建与虚实融合应用研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(2): 295-305.
- [5] WU Z H, LIU Z Z, SHI K, et al. Review on the construction and application of digital twins in transportation scenes[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(2): 295-305.
- [6] ARRAÑO-VARGAS F, KONSTANTINOOU G. Modular design and real-time simulators toward power system digital twins implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(1): 52-61.
- [7] PESHKOVA M, YUMASHEVA V, RUDENKO E, et al. Digital twin concept: Healthcare, education, research[J]. Journal of Pathology Informatics, 2023, 14: 100313.
- [8] PURCELL W, NEUBAUER T. Digital twins in agriculture: a state-of-the-art review[J]. Smart Agricultural Technology, 2023, 3: 100094.
- [9] 周瑜, 刘春成. 雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新[J]. 城市发展研究, 2018, 25(10): 60-67.
ZHOU Y, LIU C C. The logic and innovation of building digital twin city in Xiong' an new area[J]. Urban Development Studies, 2018, 25(10): 60-67.
- [10] ISO. Digital twin - concepts and terminology: ISO/IEC 30173: 2023[S]. 2023.
- [11] ISO. Internet of things (IoT) and digital twin - vocabulary: ISO/IEC 20924: 2024[S]. 2024.
- [12] ITU-T. Digital twin network-requirements and architecture: Y.3090[S]. 2022.
- [13] ITU-T. Requirements and capabilities of a digital twin system for smart cities: Y.4600[S]. 2022.
- [14] KIM J B, WANG F, KHANNA S, et al. Digital twin framework for smart campus to reduce greenhouse gas emission[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Smart World Congress (SWC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-8.
- [15] AZFAR T, WANG C Y, KE R M, et al. Incorporating vehicle detection algorithms via edge computing on a campus digital twin model[C]//Proceedings of the International Conference on Transportation and Development. Reston: American Society of Civil Engineers, 2023: 400-409.
- [16] CHEN K C, CHANG Y T, HSIEH S H. A digital twin platform based on 3D building models and smart IoT for a climate-resilient campus: a case study of national Taiwan university[C]//Proceedings of the Computing in Civil Engineering. Reston: American Society of Civil Engineers, 2024: 553-561.
- [17] TANG T L, WU Y J, SUN S F, et al. Campus intelligent decision system based on digital twin[C]//Proceedings of the 2024 27th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1663-1668.
- [18] MESCHINI S, PELLEGRINI L, LOCATELLI M, et al. Toward cognitive digital twins using a BIM-GIS asset management system for a diffused university[J]. Frontiers in Built Environment, 2022, DOI: 10.3389/fbuil.2022.959475.
- [19] ZHANG Y, PANG L Y, WANG D Y, et al. Influences of digital twin technology on learning effect[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2022, 15(4): 140-145.
- [20] SEPASGOZAR S. Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: a case of construction management and engineering[J]. Applied Sciences, 2020; 10(13): 4678.
- [21] ZHANG Y B, LIANG R H, WEI L, et al. A digital twin of instructor in higher education[C]//Proceedings of the 2022 8th Annual International

- Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 866-870.
- [21] 艾兴, 张玉. 从数字画像到数字孪生体: 数智融合驱动下数字孪生学习者构建新探[J]. 远程教育杂志, 2021, 39(1): 41-50.
AI X, ZHANG Y. From digital portrait to digital twin: a new exploration of the construction of digital twin learner driven by the integration of big data and artificial intelligence[J]. Journal of Distance Education, 2021, 39(1): 41-50.
- [22] 李海峰, 王炜. 数字孪生教育应用的教学模式探究: 基于美国、瑞士和芬兰数字孪生教育应用的案例分析[J]. 现代教育技术, 2021, 31(7): 12-20.
LI H F, WANG W. Research on the teaching model of the education application of digital twin—a case analysis based on the education application of digital twin in the United States, Switzerland, and Finland[J]. Modern Educational Technology, 2021, 31(7): 12-20.
- [23] RAZZAQ S, SHAH B, IQBAL F, et al. DeepClassRooms: a deep learning based digital twin framework for on-campus class rooms[J]. Neural Computing & Applications, 2023, 35(11): 8017-8026.
- [24] 张艳丰, 欧志梅. 数字孪生技术驱动下智慧图书馆场景化服务模式研究[J]. 情报理论与实践, 2022, 45(8): 47-53.
ZHANG Y F, OU Z M. Research on the scenario-based service mode of smart libraries driven by digital twin technology[J]. Information Studies (Theory & Application), 2022, 45(8): 47-53.
- [25] 张帆, 曾励, 任皓, 等. 基于数字孪生的混合实践教学模式研究[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(2): 241-244.
ZHANG F, ZENG L, REN H, et al. Research of mixed practices teaching model based on digital twin[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(2): 241-244.
- [26] 黄音, 毛莉莎, 庞燕, 等. 基于数字孪生技术的校企合作实践教学创新模式研究[J]. 高等工程教育研究, 2021(4): 105-110, 117.
HUANG Y, MAO L S, PANG Y, et al. Research on innovative school-enterprise cooperation practice teaching modes based on digital twin technology[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2021(4): 105-110, 117.
- [27] 张霖. 关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 1-10.
ZHANG L. Cold thinking about digital twinning and the modeling and simulation technology behind it[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 1-10.
- [28] 黄荣怀, 张进宝, 胡永斌, 等. 智慧校园: 数字校园发展的必然趋势[J]. 开放教育研究, 2012, 18(4): 12-17.
HUANG R H, ZHANG J B, HU Y B, et al. Smart campus: the developing trends of digital campus[J]. Open Education Research, 2012, 18(4): 12-17.
- [29] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.

[作者简介]



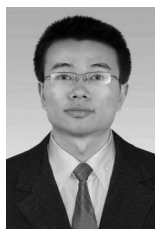
李璐颖 (1985-), 女, 江苏江都人, 博士, 北京师范大学高级工程师, 主要研究方向为教育数字化、数据治理、大数据技术、在线教育等。



陈平 (1974-), 男, 四川达州人, 博士, 北京师范大学教授级高级工程师, 主要研究方向为大数据建模、数字校园规划。



王兴建 (1985-), 男, 湖北宜昌人, 北京师范大学高级工程师, 主要研究方向为网络前沿技术、计算机应用。



李春晓 (1987-), 男, 河北衡水人, 博士, 北京师范大学工程师, 主要研究方向为大数据分析、人工智能、信息安全、区块链。