

學術論壇

數字孿生賦能體育場館智慧化轉型的理論架構、制約因素與優化路徑

王愛萍¹, 范峰²

(1. 南京財經大學 體育部, 江蘇 南京 210023; 2. 高等教育出版社, 北京 100029)

摘要: 基於場景理論, 探討數字孿生賦能體育場館智慧化轉型的理論基礎、架構設計、應用場景、現實掣肘以及優化路徑。在闡析數字孿生技術概念及其適用性的基礎上, 依托場景理論論述數字孿生賦能體育場館智慧化轉型的理論基礎, 從空間基礎層、數據信息層、模型功能層、服務應用層和用戶交互層 5 個層面設計數字孿生賦能體育場館智慧化轉型的框架, 從智慧場館管理者和服務對象 2 個視角剖析數字孿生賦能體育場館智慧化轉型的應用場景, 指出政策體系不健全、認知理念滯后、關鍵技術不成熟、數字體育人才缺乏等制約因素, 並提出加強數字孿生體育場館轉型的政策制定、貫徹數字孿生體育場館轉型“以人為本”理念、加強數字孿生體育場館關鍵技術研發力度、提升數字孿生體育場館轉型的人才培養能力等優化路徑。

關鍵詞: 數字孿生; 體育場館; 智慧化轉型; 虛擬空間

中圖分類號: G818 **文獻標志碼:** A **文章編號:** 1000-5498(2025)03-0075-12 **DOI:** 10.16099/j.sus.2024.10.09.0007

黨的二十大報告指出, “促進群眾體育和競技體育全面發展, 加快建設體育強國”^[1]。黨的二十屆三中全會提出“健全促進實體經濟和數字經濟深度融合制度”, 為中國式現代化體育強國建設指明了數字化轉型方向。作為全民健身服務及賽事活動的重要載體, 體育場館的智慧化轉型是大勢所趨。然而, 缺乏統籌規劃以及數字空間與實體空間融合不足成為制約體育場館智慧化轉型的一大難點。數字孿生技術作為連接現實與虛擬世界的橋樑, 為體育場館的智慧化發展提供了全新的解決方案。2019年, 國務院辦公廳發布的《體育強國建設綱要》明確提出, 運用物聯網、雲計算等新一代信息技術, 推動體育場館的智慧化發展, 提升場館運營的效率和服務質量^[2]。2021年10月, 國家體育總局發布的《“十四五”體育發展規劃》明確提出: “推進智慧健身路徑、智慧健身步道、智慧體育公園建設。”^[3] 2021年12月, 國務院印發的《“十四五”數字經濟發展規劃》明確提出, 深化新型智慧城市建設, 因

地制宜構建數字孿生城市^[4]。因此, 如何依托數字孿生技術賦能體育場館智慧化轉型已成為亟待解決的研究課題。當前, 學術界已圍繞智慧體育場館的驅動模式^[5]、建設經驗^[6]、數據治理^[7]等方面進行了初步探索, 揭示了場館智慧化進程中面臨的挑戰, 如標準體系缺失^[8]、業態結構單一^[9]、公眾認知滯后^[10]等。然而, 針對數字孿生賦能體育場館智慧化轉型的理論邏輯與優化路徑仍缺乏系統性研究。鑒於此, 本文以數字孿生賦能體育場館智慧化轉型為核心議題, 深入探討其理論邏輯、架構設計、應用場景、現實困境與優化路徑, 以期為我國體育場館的智慧化轉型提供理論支撐與實踐參考。

1 數字孿生賦能體育場館智慧化轉型的理論基礎

1.1 核心概念

數字孿生是數字經濟發展過程中出現的新型數字

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2025-03-07

第一作者簡介: 王愛萍 (ORCID: 0009-0006-7513-470X), 女, 江蘇溧陽人, 南京財經大學副教授; 研究方向: 體育經濟與管理、體育教育, E-mail: wap83812023@163.com

通信作者簡介: 范峰 (ORCID: 0009-0005-3221-4024), 男, 江蘇無錫人, 高等教育出版社編審, 博士生導師; 研究方向: 體育理論、體育課程與教材建設, E-mail: 21147018@qq.com

技术,被广泛应用于工业与智能制造领域,当前正在成为许多领域数字化转型的重要驱动力^[11]。数字孪生技术概念源自英文“Digital Twin”,简称为DT。具体而言,数字孪生技术是一种集成物理模型、传感器数据、运行历史信息等多源信息的先进信息技术手段,旨在创建物理实体或系统的数字化镜像模型^[12]。其虚拟模型不仅能够实时反映实体在现实世界中的状态和性能,还能通过仿真、分析和预测为实体的运行优化、维护决策、故障预测等提供支持。数字孪生技术的核心理念是通过构建一个与物理世界高度对应的虚拟空间,实现对物理实体全生命周期的监控、管理和优化。数字孪生技术的核心特征在于它能桥接信息与物理系统的鸿沟,实现两者的深度融合。针对体育场馆而言,这项技术不仅全面仿真复刻了场馆的物理环境,还通过收集的数据精准地将物理场馆映射到虚拟场馆、场馆服务与前端展示,从宏观布局到微观细节,各个层面与维度都被按比例细腻重建,从而打造出与现实场馆一一对应的数字化镜像空间。这一映射机制极具活力,实时动态地反映现实世界的每一变动,依托于智能感知传感器的全方位覆盖和高速网络的强力支撑,虚拟空间与实体场馆间建立了实时互动、精准匹配的关系,确保虚拟场景与实际情况的同频更新。

“赋能”是指赋予个人、团队或组织更大的能力和权限,使其能够更自主、有效地行动和决策,进而最大化地发挥其潜力和创造力的过程^[13]。这个概念起源于管理学,与授权紧密相关,但更加强调通过提供资源、教育、支持和自主权来激发内在动力和创新能力。数字孪生赋能是指利用数字孪生技术为特定行业提供一种创新驱动动力,通过构建物理世界与虚拟世界的精准映射和实时交互增强决策能力、优化业务流程、提升产品与服务质量、加速创新周期。数字孪生赋能不仅是一种技术的应用,更是一种思维方式的转变,它促使企业和组织以更加灵活、高效、智能的方式应对复杂多变的市场环境,推动数字化转型和产业升级。数字孪生赋能体育场馆智慧化转型就是通过构建体育场馆的数字孪生体(图1)集成应用物联网、大数据、人工智能等先进技术,实现物理场馆与虚拟空间的实时交互与深度整合,这意味着将体育场馆从传统的物理空间转变为一个高度智能化、数据驱动的综合服务平台,不仅提升了场馆自身的竞争力,也为观众、运动员及赛事组织者创造了前所未有的价值。

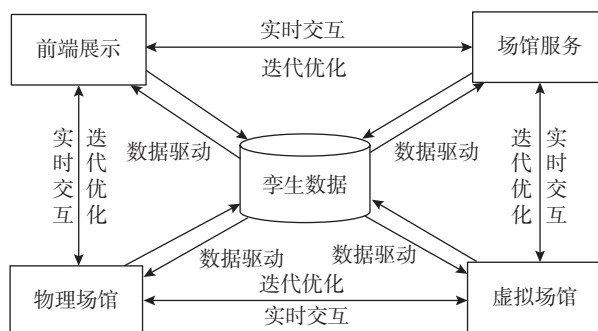


图1 数字孪生赋能体育场馆智慧化转型的概念模型
Figure 1 Conceptual model of digital twin empowering the smart transformation of stadiums

1.2 理论基础及其适应性

场景理论认为,场景是由不同的设施构建而成的空间,这些空间富含象征意义。它们通过融入特定的符号、价值观及文化内涵,实现了具体表现和实际应用,因而与地方的发展进程和社会动态之间形成了紧密的因果联系^[14]。美国芝加哥学派将场景的分析细化为4个关键组成部分:首先是社区,它比国家或城市规模更适中,便于辨识其内外差异;其次是聚集场所,指那些明确可识别且实体存在的建筑空间;再次关注的是个体,场景内不同性别、社会阶层、职业背景和年龄段的人群成为瞩目的焦点;最后是特色活动,它们作为纽带联结所有核心要素。这些要素共同搭建起一个象征性情境,赋予场景以公共属性的特质^[15]。部分学者从主观认知与客观载体2个维度深入探讨场景理论的阐释及其实际应用。时宵等^[16]指出,客观认知体系的场景包含以下5个要素:一是社区;二是舒适物;三是人群;四是前3个因素组合起来的的活动;五是场景所蕴含的价值观。臧航达等^[17]提出,场景的优化策略可围绕3个核心维度展开:真实性、戏剧性和合法性。真实性维度旨在加深用户对其身份的认同感和归属感;戏剧性维度致力于激活用户的创造力与探索精神,鼓励自由创新;合法性维度着重加强用户对本国文化的自信心和认同,从而巩固文化根基。另外需要强调的是,场景不应被视为一个封闭孤立的体系,而应根据实际情况灵活融合多种核心要素与不同维度,以此作为内在驱动力促进其自身发展和进化。

数字孪生技术在推动体育场馆智慧化转型方面发挥着关键作用,其应用场景主要体现在基础设施优化、隐私保护增强以及体育服务创新3个核心领域。首先,在基础设施优化方面,通过数字孪生构建的虚

拟模型能够帮助设计和优化高速稳定的网络环境,确保场馆内全覆盖的高速无线网络,以支持海量数据的实时传输,并利用 AI 图像识别技术对整个场馆进行全方位的视频监控,提高管理效率与安全性。其次,在增强隐私保护方面,数字孪生不仅强调物理层面的安全保障,还特别注重数据安全,确保所有智能系统在数据采集、存储和使用过程中严格遵循相关法律法规;采用先进的加密技术和匿名化处理方法,有效保

护用户隐私信息免遭泄露。最后,在体育服务创新方面,数字孪生技术支持电子票务管理系统,简化购票流程,提供高清赛事直播和多角度回放服务,让观众可以全方位体验比赛精彩瞬间。同时,根据观众的历史观看记录和个人偏好,推送个性化的赛事信息和服务推荐,并借助移动应用或场馆内的智能显示屏为观众提供包括路线导航、餐饮服务在内的全方位智能导览体验(图2)。

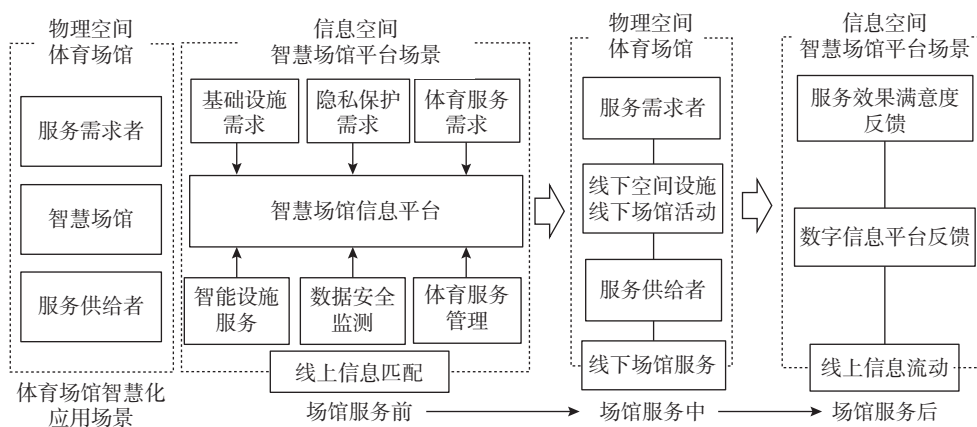


图2 体育场馆智慧化应用场景

Figure 2 Smart application scenarios for stadiums

在场景理论上,智慧体育场馆的构建可以从两方面谈起。一是从主观认知方面看,体育场馆的智慧化发展已经成为连接群众、激发活力的核心地带。借助智能管理与在线预约,用户轻松触及各项设施,深度融合多彩体育生活^[18]。在场馆内,智慧科技与人性化设计交织,为健身人群营造更为舒适的运动环境。面对多样化需求,智慧场馆灵活应对,从适合长者的温和锻炼到激发少年活力的动感项目均能精准匹配,智慧活动如虚拟现实挑战、健康讲座,以科技魅力吸引广泛参与。二是从客观载体方面看,在体育场馆智慧化转型过程中,真实性可视作社会生产生活方式进化的可感实践,例如:智能门禁、自动化清洁、实时数据分析与个性化训练等,每一步革新都紧扣实际需求,精进效率,提升体验;戏剧性可视为设想串联科技与人文的创新空间,新技术催化参与热潮,拓宽社交边界,强化社区纽带;合法性可视作在法治框架下智慧体育场馆物理与数字空间融合的社会技术系统优化,尤其在个人健康数据处理上严循隐私法,透明授权,保障权益。智慧设施构建兼顾安全标准与无障碍设计,实现资源、技术与社会需求的空间优化配置,彰显公平与包容,为可持续发展奠定基石。

由此,以场景理论为基础,顺应数字孪生技术的发展趋势,体育场馆迈向智慧化转型的关键步骤可归纳为四大方面:首先,构建全面的数字孪生模型,实现物理空间与数字空间的精准映射;其次,基础设施的智能化改造,确保场馆具备高效的数据采集与处理能力;再次,建立健全数据安全与隐私保护机制,保障智慧化转型过程中的信息安全;最后,优化体育服务流程与用户体验,通过技术手段提升场馆管理效率与观众满意度。这四大举措共同构成数字孪生赋能体育场馆智慧化转型的应用场景(图3),旨在全方位提升场馆的智能化水平与综合服务能力。

2 数字孪生赋能体育场馆智慧化转型的架构设计

在当今数字化转型的热潮中,体育场馆作为城市文化与体育活动的重要载体,正经历着前所未有的变革。在场景理论的视角下,以数字孪生技术为代表的先进科技助推了体育场馆的智慧化转型,促进了人与场馆之间的深度融合与互动。它通过构建物理世界与虚拟世界的桥梁,为体育场馆的管理和服务提供了全新的视角。参考中国科学院 SAMP 平台的数字孪生实

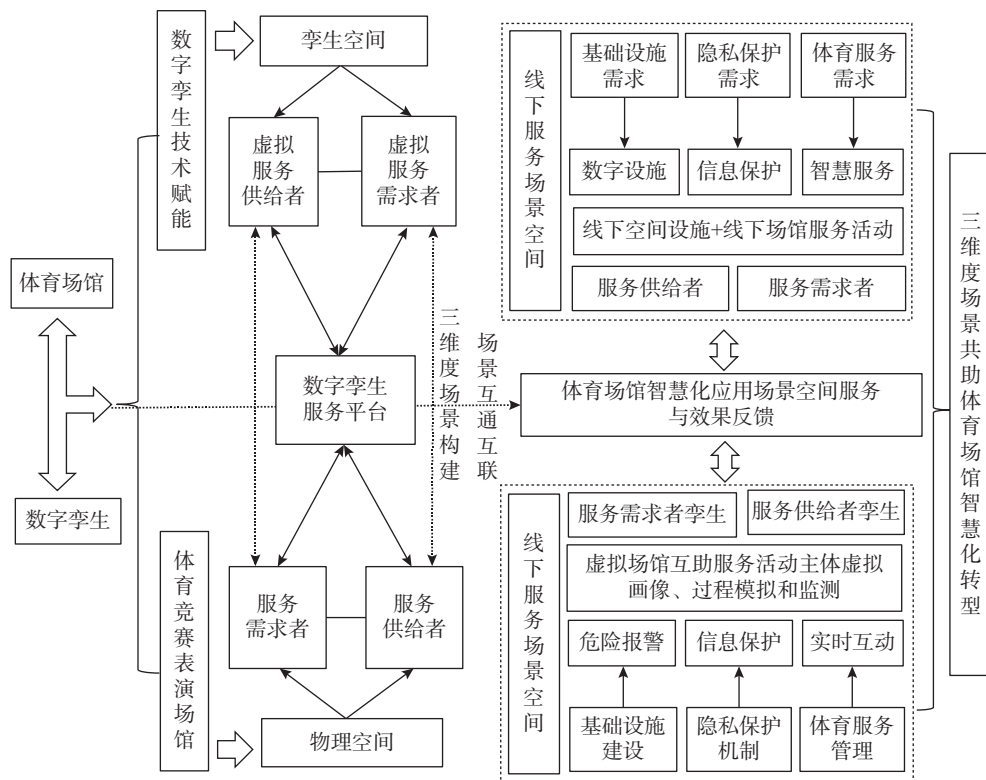


图3 数字孪生赋能后的体育场馆智慧化应用场景

Figure 3 Smart application scenarios of stadiums after the digital twin empowerment

验室模型的7个部分^[19](运维服务层、平台服务层、数据处理层、决策分析层、模型层、物联网层以及物理层)以及华中科技大学的数字孪生校园平台的6个部分(基础设施层、支撑层、数据层、平台层、数字孪生服务层、展示交互层)^[20],同时结合数字孪生技术在体育场馆硬件方面的具体应用实践,考量体育场馆的结构特征、服务对象、设备系统等要素,设计数字孪生赋能体育场馆智慧化转型的架构,如图4所示。

2.1 数字孪生构建体育场馆空间基础层

场景理论指出,场景描绘得越具体详细,主题越独特且鲜明,该场景的吸引力和聚集效应就越强,详细的基础场景设定能够为体验增添“戏剧性”,使用户在参与过程中获得更加深刻的经历。空间基础层作为孪生场馆的“地基”,主要包括场馆内的展品、基础设施、空间环境等各类物理实体,通过GPS定位器、监控设备等将采集到的多源异构数据传输至上层,经过分析处理能够为智慧化服务提供支持。具体来说,空间基础层可以分为物理层和感知层2个方面。物理层包含各类物理实体和感知设备,负责为上层系统采集与传输数据,其主要依赖于监控设备、传感器、Wi-Fi/ZigBee节点等技术手段来识别和感知场馆内的各种对象。感

知层方面包括对到访用户的感知,通过人脸识别、红外线检测等方式识别用户身份,采集用户信息,并提供智能化、个性化的服务。如2022年北京冬奥会场区运用了人工智能技术,成功打造了集智慧交通、智能停车与智慧物流于一体的先进服务体系^[21]。对场馆建筑的感知,以监测环境参数(温度、湿度、光照)为主,支持智能调控空调和灯光设施;对体育资源及设施设备的感知,通过高带宽传输技术实时传输数据,并利用云存储中心对历史存储数据和实时数据进行存储、管理和分析等。如第十四届全运会首推国家级大数据体育赛事,通过全场馆4/5G数字化覆盖,加速信息流通,提供更流畅的直播与真实的观赛体验^[22]。

2.2 数字孪生集成体育场馆数据信息层

基于场景理论,利用数字孪生技术构建体育场馆的虚拟模型,实现实体体育场馆与虚拟场馆间的数据交流。数据信息层作为孪生场馆的“桥梁”,主要负责体育场馆内外各种数据的采集、整合、分析和可视化等,为模型功能层提供坚实的数据基础,进而支持整个场馆的智慧化运作。首先,以数据采集为起点,通过在体育场馆内部的传感器、摄像头等智能设备,实时收集场馆状态数据并上传至数据中心,为数据处理提供基

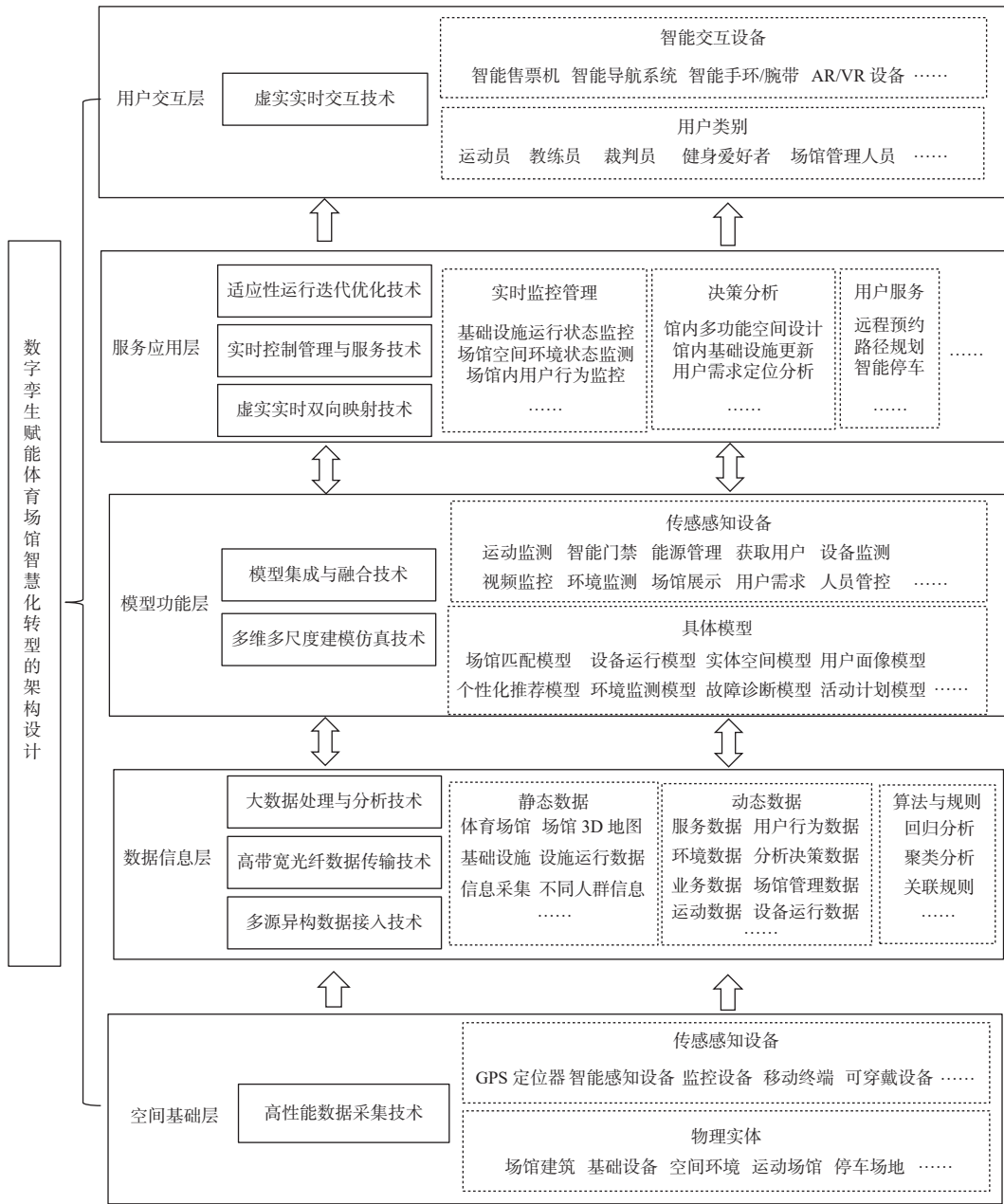


图4 数字孪生赋能体育场智慧化转型的架构设计

Figure 4 Architectural design of digital twin empowering the smart transformation of stadiums

基础素材。其次,以数据整合为要点,将不同来源的数据进行统一整合,消除“数据孤岛”现象,确保数据的一致性和完整性。通过数据整合,可以确保所有数据被统一管理和访问,便于进行后续的数据处理和分析工作。再次,以数据分析为重点,对采集到的原始数据进行清洗、转换和预处理,确保数据的质量和可用性,并利用机器学习、人工智能等技术对处理后的数据进行深入分析,提取有价值的信息。最后,以数据可视化

为终点,将复杂的数据以图表、仪表盘等形式直观展示,帮助管理者快速理解场馆运营状况,为决策提供依

2.3 数字孪生开发体育场模型功能层

场景理论强调环境与人的互动关系,其核心在于理解特定环境中人的行为模式、感知体验和社会互动,因此建立模型功能层可以为用户提供更优质的服务。模型功能层作为孪生场馆的“支柱”,通过构建虚拟模型反映体育场馆的实际运营状态,并基于这些模型进行数据分析、模拟仿真以及预测,从而优化体育场馆的

功能布局,提升观众的服务体验。首先,利用先进的建模技术(如三维建模、系统动力学模型等)创建体育场馆及其内部系统的精确数字表示。这些模型能够捕捉到体育场馆的物理特性、设施布局以及运营流程等细节,为后续的数据分析和模拟仿真提供坚实的基础。如亚洲杯主体育场厦门白鹭体育场,其智慧建造系统创新性地融合了 BIM、物联网及人工智能,成功构建了高度逼真的数字孪生模型,还原度高达 90% 以上。同时利用系统动力学模型从宏观角度模拟场馆的运营过程,如赛事安排、观众流量变化等,帮助管理人员了解整个系统的行为模式。其次,基于历史数据和实时数据,模型功能层利用机器学习等技术进行预测分析,为场馆的日常运营提供前瞻性指导。如通过分析过去的赛事日程和观众到场数据,预测未来某段时间内的人流分布、能源需求等,帮助管理者提前做好准备,以优化资源配置和提升服务质量。

2.4 数字孪生扩展体育场馆服务应用层

场景理论视域下,人群作为构成场景的核心要素,通过感知、体验和参与智慧场馆服务,形成体育场馆服务的用户视角。服务应用层作为孪生场馆的“立面”,通过将数字孪生技术与具体的服务场景相结合,实现体育场馆运营和服务的智能化升级。首先,在智能化运营管理方面,服务应用层通过整合数字孪生技术提供的数据和模型,为体育场馆的日常运营管理提供智能化解决方案。如它可以实现对场馆内人流的实时监控和预测,通过智能算法自动调整安检通道的开放数量,优化观众入场流程,减少排队等待时间。其次,在安全保障管理方面,服务应用层利用数字孪生技术强化体育场馆的安全保障能力。它可以通过模拟不同的紧急情况(如火灾、地震等),预先规划最佳疏散路径和应急预案,提高应急响应的速度和效率。最后,在用户服务方面,服务应用层致力于提升观众的现场体验和参与度,通过移动应用程序为观众提供个性化服务,如美国职业篮球联赛(NBA)萨克拉门托国王队所在的体育馆借手机 App 实现在线购票、智慧停车、观看赛事等,使球迷获得全面升级的数字服务体验^[23]。

2.5 数字孪生优化体育场馆用户交互层

根据场景理论,体育场馆的智慧化服务不仅关注用户基于个人兴趣和场馆需求进行的运动锻炼或观赛体验,还涵盖依据日常作息安排的交互式、碎片化运动过程。用户交互层作为数字孪生场馆的“门

厅”,旨在提升用户体验、增强参与度并提供个性化便捷服务。首先,在用户体验优化层面,通过数字化手段改善用户在体育场馆内的整体感受,如 2023 年杭州亚运会的“智能”办赛理念贯穿场馆设计、竞赛流程与观众体验充分展示了数字孪生与体育场馆融合的高超技艺^[24]。其次,在个性化服务层面,通过数字孪生技术构建的虚拟空间可以实现对体育场馆物理实体的全生命周期监控、管理和优化。如在用户服务方面,数字孪生模型可以通过集成用户的购票记录和观看历史数据,分析出观众的兴趣偏好,从而精准推送符合其兴趣的比赛信息和促销活动。最后,在实时互动层面,通过整合社交媒体平台上的用户反馈数据,数字孪生系统能够迅速调整和优化服务内容。它不仅能收集信息,还能模拟不同的服务改进方案对用户满意度的影响,帮助决策者选择最佳策略,以更好地满足不同用户群体的需求。

3 数字孪生赋能体育场馆智慧化转型的应用场景

场景理论视角下,数字孪生技术赋能体育场馆智慧化转型的应用场景展现出前所未有的可能性。场景理论强调在特定环境中技术如何通过满足个体的需求和期望优化人与环境之间的互动。在此背景下,智慧体育场馆的建设不仅依赖于人工智能、数字孪生、AR/VR/MR、人脸识别等多种先进技术的融合应用,更重要的是,这些技术的应用必须紧密围绕服务对象的实际需求展开。通过构建全新的体育场馆场景,利用智慧化设施拉近用户之间、用户与各种资源、设备以及空间的距离,为用户主体和管理者提供多样化的服务。

3.1 面向服务对象的应用场景

(1)智能化导航系统。智能化导航服务在体育场馆的数字化转型中扮演着核心角色,它集成物联网、人工智能和地理信息系统(GIS)等技术,为用户提供精准、高效的室内外一体化导航服务。首先,在用户层面,智能化导航服务可以为观众提供个性化的路线规划。无论是从场馆外部到达指定入口,还是在场馆内部找到座位、洗手间、餐饮区或其他功能区域,用户只需通过手机 App 即可获得实时指引。其次,在运营管理方面,智能化导航服务有助于场馆方实现资源的动态调配。如西安奥体中心利用 5G 技术,为各类常规赛事提供室内外一体化的高精度指引服务以及资料调配

服务,不仅加强了室内外空间的连接,还实现了体育场馆之间以及场馆内部的及时调整服务,确保场馆各区域的负载均衡^[25]。最后,智能化导航服务还可以与其他智慧化功能深度融合,如与票务系统结合实现“一键导航至座位”,或与商业服务结合推荐沿途商家优惠信息,从而提升用户的综合体验并创造更多商业价值。

(2)信息化服务平台。通过构建统一的数字化服务平台,整合赛事报名、场馆预订和观赛服务等功能,为用户、场馆运营方及相关利益方提供高效、便捷的服务体验。首先,在赛事报名方面,信息化平台依托数字孪生技术实现全流程线上化管理。用户可以通过平台完成赛事信息查询、报名表填写、费用支付等操作,同时平台还能根据用户的运动水平、兴趣偏好等个性化需求推荐适合的赛事。其次,在场馆预订方面,信息化平台提供了智能化解决方案。通过数字孪生模型,用户可以直观了解场馆的空间布局、设施状态以及可用时间,从而快速完成预订流程。最后,在观赛服务方面,信息化平台为观众打造了全方位的数字化体验。从购票到入场指引,再到观赛期间的增值服务(如座位升级、餐饮预订等),平台实现了全流程无缝衔接。如2023年杭州亚运会推出的“亚运元宇宙”平台,提供了诸如亚运知识科普与问答、虚拟竞技、元宇宙观赛等多种创新体验,不仅能够让用户以虚拟人物的身份“参与”热门赛事,还能进行观赛、运动以及城市游览等活动^[26]。

(3)自动化调节服务。为了保证观众在观赛过程中的舒适体验,数字孪生技术通过构建实时感知、智能分析和自动响应的闭环系统,能够根据环境变化和服务需求动态调整场馆内各项设施的状态,为用户提供舒适、便捷的体验。首先,在环境调节方面,数字孪生技术结合物联网传感器,可实时监测场馆内的温度、湿度、空气质量等环境参数,并根据实际情况自动调节空调、通风、照明等系统。其次,在设施管理方面,自动化调节服务实现了对场馆内各类设施的智能化控制。如阿里体育旗下的“橙狮悦动”综合体育馆凭借完善的数字基础设施,实现了对篮球、足球、羽毛球等场地的智能灯光调控,为用户带来了全新的数字化服务体验^[27]。最后,在节能降耗方面,自动化调节服务通过数字孪生平台的能耗数据分析与预测模型,优化能源分配与使用。如在非赛事时段系统可以自动关闭部分区域的照明和空调设备,在赛事高峰期则优先保障

重点区域的能源供应。

(4)精准化训练服务。对于运动员而言,数字孪生技术提供了一个模拟比赛条件的理想训练环境。通过高精度的模型和数据反馈,运动员可以在虚拟空间中练习技巧、战术,甚至模拟对手的策略。如中国跳水梦之队通过对竞赛场馆的建模,形成“3D+AI”跳水训练系统,从而精准预估竞技水平,实现运动员潜能的最优化开发^[28]。对于教练员而言,数字孪生技术为战术设计和团队协作提供了全新工具。教练员可以通过数字孪生平台模拟不同竞赛场景,评估各种战术策略的效果,进而优化比赛方案。如信息科学教授 Barricelli 等通过 SmartFit 软件,结合手动记录的饮食、训练和睡眠等数据,构建了运动员的数字孪生模型^[29]。这一成果使教练员能够预测运动员在训练期间的表现,并依据运动表现的数据分析结果,对运动员的训练计划及日常生活行为方式进行调整和优化。

(5)数字化竞赛服务。数字化竞赛表演服务借助数字孪生技术,构建虚拟与现实深度融合的竞赛表演环境,为观众、运动员及赛事组织者带来全新的体验和服务模式^[30]。首先,在赛事直播领域,数字孪生可以通过高精度的三维建模和实时数据采集生成逼真的虚拟赛场环境。观众不仅能够从传统视角观看比赛,还可以借助 AR/VR 设备获得沉浸式观赛体验。如2020年在上海浦东足球场举办的英雄联盟 S10 总决赛凭借先进的 XR 技术,将现实与虚拟空间深度融合,为观众打造沉浸式观赛体验。其次,赛事组织者也可以利用数字孪生技术实现竞赛流程的智能化管理,包括赛程安排、场地调度以及突发事件应急处理等,确保比赛高效有序地进行。最后,数字化竞赛表演服务还促进了文化创意产业的发展。通过将体育赛事与数字内容创作相结合,如开发虚拟偶像、电竞赛事及相关衍生品,体育场馆能够拓展收入来源,吸引更多年轻群体的关注。

3.2 面向场馆管理者的应用场景

(1)智能设施运维管理。数字孪生平台作为体育场馆智慧化的中枢神经系统,其智能运维管理功能为馆员提供了前所未有的便利。首先,在设施状态监测方面,通过集成场馆内的各种物联网设备,如智能照明、温控系统以及先进的安防监控,数字孪生平台实现了对整个场馆设施运行状态的实时监控。当任何一项设备出现故障时,平台能够立即识别并定位问题所在,

通过可视化界面直观展示给馆员。如在 2022 年北京冬奥会雪车雪橇赛道的建设中, 数字孪生技术赋能的氨气泄漏监测系统运用高清摄像头和漫反射技术, 实现了对多预设点和全角度的自由扫描^[31], 有效保障了运动员和工作人员的生命安全, 为冬奥会的顺利举行构筑起一道坚实的防线。其次, 在多部门协同作业方面, 通过统一的数字孪生平台, 场馆内的不同管理部门(如工程部、安保部、客服部)可以共享设施运行数据, 快速响应各类运维需求, 提升整体协作效率。

(2)智能能源监控管理。在能源管理方面, 数字孪生技术展现了其在节能减排方面的巨大潜力。通过构建高精度的数字孪生模型, 结合物联网、大数据分析和人工智能等技术, 实现对场馆内能源消耗的全面监测、精准分析与优化调控, 从而提升能源利用效率, 降低运营成本, 并推动场馆向绿色可持续发展。特别是在大型赛事期间, 人流量的波动对能源消耗影响显著。数字孪生模型能够根据实时的人流监测数据, 智能调节照明亮度和空调温度, 既保证了观众的舒适度, 又有效降低了电力消耗。如 2022 年北京冬奥会中的短道速滑馆与“冰立方”场馆创新性地应用了数字孪生技术, 通过气体传感器的实时监测, 不仅精准捕捉当前的碳排放数据, 还能预测未来排放趋势, 为场馆的能耗与碳排放管理提供了前瞻性的智能支持^[32]。

(3)紧急事件应急管理。面对不可预知的紧急事件(如火灾、自然灾害或其他突发事件), 数字孪生系统的应急响应能力显得尤为重要。在紧急情况下, 系统一方面能够迅速生成最优疏散路线, 并通过孪生平台向场馆内的显示屏幕、移动应用等发布实时信息, 引导观众和工作人员迅速、安全地撤离现场。另一方面系统还能够实时更新灾情进展, 向救援队伍提供关键信息(如火势蔓延方向、人员聚集点等), 加速救援行动的部署和执行。如浙江省黄龙体育中心在亚运场馆改造的契机下引入数字孪生等技术, 不仅构建了全国首个集赛事运营、场馆运维与服务保障于一体的三维“智慧场馆大脑”, 还特别强化了应急响应功能^[33], 为突发灾害或公共安全事件提供最优疏散路径。

(4)人流分析与安全管理。安全是体育场馆运营的首要任务, 而人流管理是其中的关键环节。借助于遍布场馆内外的传感器和高清摄像头, 数字孪生系统能够实现人流密度的精准监测。通过 AI 算法进行分析, 生成动态热力图, 这使得管理者可以直观了解场

馆各区域的人员密度分布情况, 帮助馆员及时采取措施, 如增设临时出口、调整观众引导路径等, 避免踩踏等安全事故的发生。同时, 在紧急疏散演练或实际突发状况下, 数字孪生平台能够模拟最佳疏散路径, 指导观众有序撤离, 确保生命安全。如 2023 年杭州亚运会通过运用人工智能和数字孪生等技术, 实现了赛事安全质的飞跃, 确保了比赛的公正性和流畅度^[34]。

(5)数据分析与决策管理。通过构建场馆的虚拟映射, 数字孪生平台能够将场馆内的多源异构数据(如人流分布、设施状态、能耗情况等)进行统一整合, 并以直观的可视化形式呈现。这种“一站式”数据展示方式使管理者能够快速掌握场馆的整体运行状况, 从而为后续决策提供清晰依据。如预测高峰时段的人流分布, 从而优化观众引导策略, 避免拥堵, 或是分析能源消耗, 制定节能计划, 实现绿色运营。此外, 数字孪生技术还能模拟不同决策方案的效果, 帮助管理者评估潜在的风险和收益, 做出更加明智的选择。如 2022 年北京冬奥会作为史上首个“数字孪生奥运会”, 借助数字孪生技术进行赛事筹备与运行设计, 极大提升了规划效率与可持续性^[35]。同时, 数字孪生的模拟优化能力为决策者在不确定环境下提供了有力支持, 显著增强了资源配置的合理性, 推动场馆从传统运营向智慧化、精细化方向转变。

4 数字孪生赋能体育场馆智慧化转型的制约因素

4.1 政策体系不健全

我国数字孪生体育场馆起步相对较晚, 在信息化程度、智慧化系统应用、服务理念等方面存在较多问题, 其根本原因在于制度建设不够完善、部门协作不足等^[36]。这一系列问题对实现数字孪生体育场馆产生了显著障碍。一方面, 现行法律法规可能尚未跟上新技术发展的步伐。当前, 我国虽在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》《关于推进“上云用数赋智”行动培育新经济发展实施方案》等多个政策文件中明确提出要增强数字孪生技术在城市建设和管理等领域的应用^[37], 但上述文件多探索数字孪生技术的应用潜力, 并未有立法明确展示数字孪生的风险并提出系统的规制方案。另一方面, 由于缺乏统一的标准和规范, 不同系统间的兼容性和数据共享难以实现, 影响了整个行业的协同发

展。如某场馆的照明控制系统与安保监控系统可能来自不同的制造商,如果没有统一的标准,两者之间的联动就会变得非常困难,从而影响整个系统的效率和效果。

4.2 认知理念滞后

尽管数字孪生技术展现出巨大潜力,但在实际推广过程中仍面临较高的认知门槛。许多场馆管理者对于该技术的实际价值及其对场馆运营带来的益处认识不足,导致投入意愿不高^[38]。这种现象在很大程度上阻碍了数字孪生技术在体育场馆中的广泛应用和发展。一方面,对于场馆管理者而言,数字孪生技术的应用不仅意味着需要对现有设施进行改造升级,还涉及大量的资金投入。由于缺乏对该技术深入了解的机会,很多管理者往往对其持观望态度,担心投资回报周期长、技术风险大且短期内看不到明显的经济效益。另一方面,科技发展应当以人为核心,旨在服务人类社会,而非让人类去适应科技本身。在利用数字孪生技术推动体育场馆智慧化转型的过程中,对技术本身的过度关注导致忽视了最终使用者的感受和期望,如鲨鱼皮泳衣、黄金战靴等“黑科技”产品,在设计和推广过程中往往过分强调其技术特性和性能优势,而忽视了以人为本的核心思想。

4.3 数字孪生关键技术不成熟

数字孪生技术集成了多项核心技术,包括建模、仿真、大数据与人工智能、AR/VR/MR、云计算与边缘计算、物联网等^[39],这些关键技术的应用成熟度限制了体育场馆智慧化转型的进程。首先,在数字孪生模型上,数字孪生技术的核心在于通过虚拟模型精确地模拟物理世界的对象或系统的行为。在体育场馆的应用场景下,这意味着需要准确地捕捉和模拟场馆内的各种动态变化,如人流密度的变化、温度湿度的波动、设施设备的状态等。其次,在处理大量敏感信息时如何保障数据安全也是一个重要议题。体育场馆作为公共场所,会收集大量的个人信息,如2020年加拿大的健身中心遭遇数据泄露事件,导致顾客的姓名、电话号码、家庭住址以及信用卡信息等个人隐私数据被非法获取^[40]。最后,系统的长期稳定运行是确保服务可靠性的基础,但目前的技术方案往往难以兼顾性能与成本之间的平衡。一方面,为了提供流畅的服务体验,数字孪生系统需要具备强大的计算能力和快速的数据处理能力;另一方面,高昂的建设和维护成本又成为推广数

字孪生技术的一大障碍。

4.4 数字体育人才缺乏

推动数字孪生技术在体育场馆的应用,还需要培养一支具备跨界知识背景的专业人才队伍。然而,根据《产业数字人才研究与发展报告(2023)》统计,目前我国数字人才缺口约为2500万~3000万,当前市场数字人才相对稀缺,尤其是能够将技术与业务深度融合的复合型人才更是凤毛麟角^[41]。这种人才的短缺主要体现在两方面:一是掌握数字孪生技术的专业人才数量有限;二是能够将数字孪生技术与体育场馆场景深度融合的人才短缺。首先,数字孪生技术的实现涉及物联网、大数据、人工智能等多个前沿技术领域,而这些领域的专业人才本身就较为稀缺,从而限制了数字孪生体育场馆的发展。其次,体育场馆的运营与管理涉及赛事组织、观众服务、场地维护等多个方面。这就要求人才不仅要精通技术,还要理解体育行业的运作规律和市场需求。如一个成功的数字孪生应用不仅需要准确地模拟场馆内外的各种情况,还需要根据这些模拟结果提出具体的改进建议,以提升观众体验、优化场馆运营效率等。

5 数字孪生赋能体育场馆智慧化转型的优化路径

5.1 加强数字孪生体育场馆转型的政策制定

伴随数字孪生体育场馆的加速推进,对于详尽的行业准则及国家法律法规的需求日益凸显。然而,当前国内针对这一新兴领域的标准化建设工作尚处于相对滞后的状态^[42]。这不仅体现在数字孪生的技术标准制定上,也反映在体育场馆的操作规程与国家监管政策的完善程度方面,亟须加快步伐。首先,从国家顶层设计的角度出发,政府应发挥其宏观调控的优势,针对当前数字孪生体育场馆遇到的资金短缺、技术瓶颈等问题,推出一系列扶持政策(如政策补贴、资金补助等),减轻场馆改造的经济压力。其次,建立健全标准体系,明确数字孪生体育场馆的标准、数据管理规范及用户隐私保护的要求,为数字孪生体育场馆提供清晰的操作指南和法律保障。最后,着眼于全球化背景下的国际合作与交流。通过积极参与国际会议、论坛、展览等活动,建立国际联系,共享数字孪生应用的成功案例和最佳实践,引进先进的技术理念和管理经验,实现技术“引进来”与“走出去”的双向流动。

5.2 贯彻数字孪生体育场馆转型“以人为本”理念

数字孪生体育场馆的核心驱动力在于坚定地贯彻“以人为本”的设计理念,通过对体育场馆进行空间打造,精准地洞察并全方位满足用户的多元化服务需求。但是在体育场馆运行过程中出现了公共服务效率低下、群众供需不匹配等问题^[43],因而需要数字孪生技术进一步精准对接用户需求,实现以人民为中心的服务体系。首先,在提升观众体验上,利用数字孪生技术,可以模拟不同时间段内场馆内外的人流分布情况,优化入场、离场流程,减少拥堵现象。其次,在加强安全管理上,通过数字孪生技术能够实时监控场馆内的安全状况,包括但不限于人流密度、设施运行状态等,一旦发现异常情况(如设备故障、人群聚集过密等),系统可立即发出警报,并指导工作人员采取相应措施,确保活动期间安全性。最后,在绿色环保理念上,体育场馆通过数字孪生技术可实现资源的高效配置与管理,如利用智能能源管理系统自动调节场馆内光照、温湿度,达到节能减排的效果。

5.3 加强数字孪生体育场馆关键技术研发力度

数字孪生体育场馆的建设需要强大的技术支撑,当前,我国数字技术发展迅速,但在体育产业尤其是数字孪生技术的应用上仍处初级阶段,核心技术与自主创新能力不足限制了其与数字经济的协同发展,影响了数字孪生体育场馆的建设^[44]。为此,推动智慧化转型成为关键。首先,促进产学研深度融合,加速技术创新。国家应鼓励科研机构与企业合作,通过共建研发中心、联合实验室等方式,整合学术研究成果和企业实践经验,解决智慧体育场馆建设中的关键技术难题。其次,针对智慧体育场馆的核心需求,集中攻关高精度建模技术,确保数字孪生模型的准确性和真实性。同时深化大数据分析能力,挖掘并利用场馆运营数据的价值,为决策提供支持。最后,实施智慧体育场馆试点示范项目,选择典型体育场馆进行智慧化升级,积累经验与成功案例,逐步实现全面智慧化转型,助力体育事业现代化发展。这一系列措施将为数字孪生体育场馆的发展注入新的活力。

5.4 着力培养数字孪生体育场馆转型人才

数字孪生技术为体育场馆变革带来了前所未有的机遇,但同时也存在一定的挑战,如数字素质不足、创新型人才短缺等问题^[45]严重制约了数字技术与我国体育场馆智慧化转型的进程。因此,要实现体育强国

的目标需建立多元化、专业化的人才队伍支持智慧化转型。首先,整合国家资源强化人才培养。应利用国家级科研机构与政府创新、政策及教育方面的优势,为智慧化转型提供合作机会和支持。其次,深化校企合作激发人才潜力。特别是与计算机科学、电子工程、市场营销等相关专业的高等教育机构和职业学校紧密合作,如快手短视频与北京体育大学探索校企合作人才培养新模式,通过融合共建,培养具备互联网思维的高素质专业人才,为提升我国体育竞赛表演业产业链韧性提供支持。最后,跨界融合,多元引智。体育场馆应打破界限与信息技术、电子工程、管理科学等多个学术领域的专家及组织合作,通过跨学科协同,引入多维度专业人才,推动智慧化转型的全面进步,实现资源的优化配置与协同效应最大化。

作者贡献声明:

王爱萍: 搜集资料,设计论文框架,撰写、修改论文;
范峰: 确定选题,调整论文框架,修改、完善论文。

参考文献

- [1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗: 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告 [M]. 北京: 人民出版社, 2022: 45
- [2] 国务院办公厅关于印发体育强国建设纲要的通知 [EB/OL]. [2024-08-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-09/02/content_5426485.htm
- [3] 体育总局关于印发《“十四五”体育发展规划》的通知 [EB/OL]. [2024-08-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content_5644891.htm
- [4] 国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知 [EB/OL]. [2024-08-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/12/content_5667817.htm
- [5] 傅钢强, 刘东锋. 智慧体育场馆驱动模式与发展路径 [J]. 体育文化导刊, 2020(12): 92-97
- [6] 柴王军, 翟昊敏. 新质生产力驱动体育产业高质量发展的理论逻辑与路径选择 [J]. 天津体育学院学报, 2024, 39(3): 287-294

- [7] 许焰妮,曹靖宜.美国体育场馆融资方式:跨域治理视角的分析[J].体育与科学,2023,44(1):87-96
- [8] 傅钢强,刘东锋.我国体育场馆智慧化转型升级:基本内涵、逻辑演进、关键要素和模式探究[J].体育学刊,2021,28(1):79-84
- [9] 曾播思,张瑶.业态识别与培育:大型体育场馆赛后可持续利用路径探析[J].体育学刊,2024,31(5):37-43
- [10] 唐佳懿,王志华,傅钢强,等.我国智慧社区健身中心的建设模式、关键问题及路径优化[J].体育学研究,2023,37(1):71-81
- [11] 张强,陈元欣.国外智慧体育场馆:转型诉求、实践模式及本土启示[J].西安体育学院学报,2023,40(1):20-27
- [12] 陈元欣,周彪,姬庆.我国体育场馆运营改革的实践进展、推动路径及发展展望[J].西安体育学院学报,2022,39(3):284-291
- [13] 柴王军,巩紫豪,师浩轩,等.数字技术赋能大型体育赛事碳中和的作用机理与实现路径[J].武汉体育学院学报,2023,57(10):12-21
- [14] 汪妍.基于场景理论的数字文化旅游融合发展研究[J].北京航空航天大学学报(社会科学版),2022,35(4):83-89
- [15] 吴军,克拉克.场景理论与城市公共政策:芝加哥学派城市研究最新动态[J].社会科学战线,2014(1):205-212
- [16] 时宵,陈元欣,陈磊,等.体育服务综合体消费场景维度设计与营造策略[J].体育与科学,2024,45(1):106-113
- [17] 臧航达,寇垠.文化场景理论视域下公共图书馆空间建设研究[J].图书馆学研究,2021(2):24-29
- [18] 翟劲草,吴卅.新加坡社区型体育服务综合体分析及启示:以OTH为例[J].体育文化导刊,2022(1):20-25
- [19] 石婷婷,徐建华,张雨浓.数字孪生技术驱动下的智慧图书馆应用场景与体系架构设计[J].情报理论与实践,2021,44(3):149-156
- [20] 王士贤,文坤梅,李俊峰,等.高校数字孪生校园平台设计与建设实践:以华中科技大学为例[J].现代教育技术,2023,33(11):118-126
- [21] 傅钢强,魏歆媚,刘东锋.人工智能赋能体育场馆智慧化转型的基本表征、应用价值及深化路径[J].体育学研究,2021,35(4):20-28
- [22] 孙晋海,王静.“双循环”新发展格局下体育产业数字化转型路径研究[J].沈阳体育学院学报,2022,41(5):103-110
- [23] 黄昌瑞,陈元欣,何凤仙,等.美国大型体育场馆的盈利模式及启示[J].体育文化导刊,2017(12):126-131
- [24] 由文华,邹航,何胜.体育场馆规划设计研究:基于相关学科视角[J].西安体育学院学报,2019,36(6):698-702
- [25] 程新强,柴王军,夏书平.人工智能赋能竞技体育数字化转型的作用机制、应用场景与实现路径[J].武汉体育学院学报,2024,58(11):89-96
- [26] 余思均,熊禄全,李旭,等.从电子竞技到虚拟赛事:中国数字体育赛事的演进历程、现实困境与未来路向[J].体育科学,2024,44(11):15-31
- [27] 廖粤生,王先亮.人工智能助推体育产业高质量发展:时代机遇、现实挑战与应对方略[J].中国体育科技,2024,60(7):79-87
- [28] 吴彰忠,钟亚平,史金田,等.数智赋能科学训练:内涵逻辑、国际经验与本土实践[J].体育学研究,2023,37(1):82-94
- [29] 胡海旭,金成平.智能化时代的个性化训练:机器学习应用研究进展与数字化未来[J].体育学研究,2021,35(4):9-19
- [30] 熊优,黄谦,荀阳,等.数字化赋能体育竞赛表演业的价值、困境与策略[J].体育文化导刊,2023(8):73-79
- [31] 姚小林,王俊.滑雪场馆数字孪生场景构建逻辑与推进策略[J].首都体育学院学报,2023,35(2):166-172
- [32] 李久林,陈利敏,陈彬磊,等.国家速滑馆智慧场馆建设和集成应用研究[J].北京体育大学学报,2022,45(1):13-24
- [33] 潘玮,沈克印.数字经济助推体育产业高质量发展的理论基础、动力机制与实施路径[J].体育学刊,2022,29(3):59-66
- [34] 柴王军,陈元欣,李国,等.“双循环”新发展格局下体育产业阻滞表现、畅通机制与保障措施[J].体育学研究,2021,35(2):20-28
- [35] 田翠翠,肖淑红.数字孪生技术赋能体育产业数字化转型的探索与实践[J].成都体育学院学报,2024,50(3):37-42
- [36] 冯俊翔,郑家鲲.数字技术嵌入全民健身公共服务负效应的形成与消解[J].体育学刊,2024,31(1):29-37
- [37] 闫晴.数字孪生:风险、溯源及规制[J].国家图书馆学刊,2022,31(5):104-112
- [38] 邵雪梅,段娟娟,赵亮,等.数字赋能全民健身公共服务精准供给的实践检视与纾解方略[J].中国体育科技,2024,60(1):10-16
- [39] 梁荣贤,凌征强,于兴尚.数字孪生技术驱动下的新型智慧图书馆建设[J].图书馆,2022(11):51-56
- [40] 傅钢强,晏慧,冯祎中,等.我国智慧体育场馆数据治理体系及联动策略[J].西安体育学院学报,2023,40(2):188-196
- [41] 张亚文,谢翔,张小林.数实融合背景下体育旅游产业数字化转型:动力机制、现实困境与推进策略[J].沈阳体育学院学报,2024,43(2):9-15
- [42] 孙成林,陈元欣,高高.新中国成立70年我国大型体育场馆建设发展研究[J].西安体育学院学报,2019,36(6):655-664
- [43] 陈元欣,方雪默.公共体育场馆不同性质运营主体供给公

- 共服务水平的比较研究 [J]. 体育科学, 2022, 42(8): 85-97
- [44] 柴王军, 王文渤, 师浩轩, 等. 数字经济驱动体育产业供需适配的内在机理与实现路径 [J]. 上海体育学院学报, 2023, 47(10): 88-98
- [45] 潘凯凡, 沈克印. 以数字新质生产力推动体育产业高质量发展的内在机理、阻滞因素与推进策略 [J]. 体育学刊, 2024, 31(2): 7-14

Theoretical Framework, Constraints, and Optimization Path of Digital Twin Empowering Stadiums' Intelligent Transformation

WANG Aiping¹, FAN Feng²

Abstract: Based on the scenario theory, this paper explores the theoretical basis, framework design, application scenarios, practical constraints and optimization paths for digital twin (DT) empowering stadiums' intelligent transformation. With the analysis of the concept and applicability of DT technology, the study discusses the theoretical basis of the stadiums' intelligent transformation by DT based on scenario theory. A smart transformation framework has been designed from the spatial foundation layer, data information layer, model function layer, service application layer and user interaction layer. The smart venue manager and service object have been used to analyze its application scenario. Constraints such as an incomplete policy system, outdated cognitive concepts, immature key technologies, and a lack of digital sports talents are identified. Finally, optimization paths are proposed, that is, strengthening the policy making of the transformation of digital twin stadium, implementing the idea of "people-oriented" in its transformation, strengthening the research and development of key technologies, and improving its personnel training ability, etc.

Keywords: digital twin; stadium; intelligent transformation; virtual space

Authors' addresses: 1. Division of Sports, Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. Higher Education Press, Beijing 100029, China