

数字孪生技术在体育场馆中的赋能应用、现实困境 与优化策略

张书豪

(湖北大学 体育学院, 湖北 武汉 430062)

摘要: 在国家《“十四五”体育发展规划》《全民健身计划(2021—2025年)》推动体育产业数字化转型的背景下,数字孪生技术与物联网等技术集成应用,已成为体育场馆智慧化升级的关键支撑。本文梳理该技术在体育场馆全流程中的赋能应用:规划建设阶段,通过1:1构建虚拟模型实现数字化管控与施工仿真,优化建设成本与周期;运营管理阶段,从设施运维、能源管理、安全防控等维度提升精细化管理水平,如实时监测设备、动态调节能耗、智能应对突发;赛事服务阶段,以虚拟模拟优化赛事组织,借沉浸式技术增强观赛体验与公平性;用户服务阶段,为健身人群、运动员提供个性化服务支持与战术模拟分析。当前技术应用面临多重困境:技术“碎片化”,核心技术依赖国外且缺乏定制方案;无统一建设标准与全周期监管,数据安全法规滞后;复合型人才短缺,跨学科培养薄弱;运营主体认知不足、大众接受度低,存在“技术本位”倾向。提出技术上建协同体系、强自主研发、推定制方案;制度上定统一标准、完善监管与数据安全保障体系;人才上跨科培养、专项引进、提人员素养;认知上宣技术价值、适配群体需求、重用户导向,为体育场馆智慧化建设提供支撑,助力体育产业数字化转型。

关键词: 数字孪生技术;智慧体育场馆;赋能应用;现实困境;优化策略

Enabling Applications, Practical Challenges, and Optimization Strategies of Digital Twin Technology in Sports Venues

ZHANG Shu-hao

(School of Physical Education, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: Against the backdrop of the digital transformation of the sports industry driven by China's "14th Five-Year Plan for Sports Development" and "National Fitness Program (2021-2025)", the integrated application of digital twin technology and the Internet of Things (IoT) has become a key enabler for smart upgrades in sports venues. This paper examines its empowerment across the entire lifecycle of sports facilities: During planning and construction phases, 1:1 virtual modeling enables digital management and construction simulation, so as to optimize costs and timelines. In operations and management, refined precision is achieved through facility maintenance, energy management, and safety protocols, including real-time equipment monitoring, dynamic energy consumption adjustment, and intelligent emergency response. For event services, virtual simulations enhance organizational efficiency while immersive technologies improve spectator experience and fairness. In user services, personalized support and tactical simulations are provided for fitness enthusiasts and athletes. Challenges in technology application

include: fragmented technical solutions, reliance on foreign core technologies without customized solutions; lack of unified standards and full-cycle supervision with lagging data security regulations; shortage of interdisciplinary professionals and weak cross-disciplinary training; insufficient awareness among operators and low public acceptance with a “technology-centric” bias. Four targeted strategies are proposed: Technologically, establishing collaborative systems, strengthening independent R&D, and promoting customized solutions; Institutionally, setting unified standards, improving supervision and data security safeguards; Talent-wise, cultivating interdisciplinary expertise, recruiting specialized professionals, and enhancing staff competency; Cognitively, promoting technology value, aligning with user needs, and prioritizing user orientation, so as to support venue smart construction and facilitate digital transformation of the sports industry.

Key words: Digital twin technology; Smart sports venues; Enabling applications; Practical challenges; Optimization strategies

1 引言

2021年10月,国家体育总局发布的《“十四五”体育发展规划》明确提出:“推进智慧健身路径、智慧健身步道、智慧体育公园建设;同时,要加快体育场地设施数字化改造,推动不少于1000个体育场馆进行数字化升级改造,打造一批具有示范效应的智慧体育场馆。”2021年,《全民健身计划(2021—2025年)》中指出,“推进体育产业数字化转型,推动数据赋能全产业链协同转型”。推动数字技术与体育产业深度融合,已成为国家战略层面的重要部署。数字技术的崛起为体育场馆转型提供了全新解决方案,通过数字孪生、物联网、大数据等技术的集成应用,体育场馆正从单一物理空间向“虚实融合、智能高效”的智慧服务平台升级。本研究系统梳理数字孪生技术在体育场馆中的应用,深入剖析转型过程中的现实障碍,并提出针对性优化策略,可为体育场馆智慧化建设提供全面且具操作性的理论支撑。

2 数字孪生技术赋能体育场馆的赋能应用

2.1 规划建设阶段:数字化管控施工,优化成本与建设周期

在体育场馆规划设计阶段,可依托数字孪生技术开展三维空间数据感知,收集整理场馆基础信息并构建建筑信息模型库,借助智能感知传感装置将海量数据汇集至数字孪生大数据平台,对场馆建筑结构、服务设施等进行优化^[1]。同时,数字孪生技术还通过1:1还原数字场馆,构建场馆虚拟模型,实现全流程数字化管控,对产品进行虚拟加工与验证,大幅优化了生产流程,缩短生产周期与降低建设成本。在体育场馆建设阶段,可依托数字孪生技术搭建包含传感器网络、操作历史数据库的技术平台,实现施工数据的实时采集与分析,对建设

过程进行可视化监测与管理^[2]。数字模型可对产品进行实时跟踪与监测,保障产品处于良好状态。同时,通过数字孪生技术,可以对建设过程中的突发情况进行提前预测,并给予及时的信息反馈,迅速制定应对措施,保障建设过程高效推进。例如,2022年北京冬奥会短道速滑馆采用建筑信息模型(BIM)与数字孪生技术,实现全过程、高精度的仿真与智能模拟,对线路进行最优化排布,优化了建筑设计,降低了建设成本^[3];黄河X7黄蜡车运用数字孪生等技术,对车辆进行实时制造、模拟与维护^[4]。

2.2 运营管理阶段:精细化管控场馆,实现绿色智能安全运营

数字技术通过物联网、人工智能与大数据的协同应用,实现体育场馆运营管理的精细化与智能化,涵盖设施运维、能源管理、安全防控等核心环节。

在设施运维方面,物联网技术通过在场馆设备(如照明、空调、健身器材)上布设传感器,实时采集运行数据并传输至数字孪生平台;数字孪生技术通过构建场馆运营管理的数字系统,对场馆运行状况进行实时检测与管控,对场馆内部建筑设备进行维护与管理,显著提高场馆运营维护的管理效率。依托BIM技术构建数字孪生模型,结合高性能渲染引擎,实现设施的三维可视化与交互式操作,同时对接实时数据流,实现设施从“静态展示”到“动态孪生”的升级^[5];还可通过数字孪生模型对设施布局及配置进行模拟,评估场馆运行效果与用户体验,为设施规划提供参考^[6]。例如,黄龙体育中心打造的“智慧场馆大脑”,运用数字孪生技术实现了场馆的三维可视化,管理者可对场馆设备进行集中协同管理,实时监测场馆能耗、人员状况等指标,提高了场馆工作效率^[4];北京冬奥会雪车雪橇赛道采用氨气泄漏

在线监测设备，结合高清摄像头与漫反射技术，实现多角度扫描与动态预警，保障设施安全运行^[3]。

在能源管理方面，数字技术通过智能计量、能耗分析与动态调控，推动体育场馆绿色低碳运营。数字孪生平台结合物联网传感器，实时监测场馆内各种环境参数，实现对场馆内设施的智能化管控，整合场馆照明、空调、水循环系统的能耗数据，自动分析并调节能耗数据，优化能源使用；通过数字孪生系统实时监控场馆水资源消耗情况，预测消耗趋势，科学调控系统，同时对垃圾进行智能分类与回收模拟，为场馆低碳运营提供解决方案^[6]。例如，2022年北京冬奥会“冰立方”场馆和短道速滑场地运用数字孪生技术，不仅能实时监测碳排放量，还能预测未来趋势，为场馆的能源管理提供节能保障^[7]；杭州奥体中心体育馆运用三维数字孪生技术搭建24小时水循环系统，实现池水常年不换、保持洁净^[8]。

在安全防控方面，人工智能与视频监控技术结合，借助遍布场馆内外的传感器和摄像头，实现人流密度精确监测、异常行为识别与应急事件处置。数字孪生技术可模拟火灾、结构失稳等各类安全事故场景，评估不同应对方案的效果，制定最优应急措施，还可开展虚拟安全演练，提升安保人员应急处理能力^[9]。在紧急情况发生时，可迅速生成最优逃离路线，通过场馆内显示屏等发布实时信息，引导观众安全撤离。例如，浙江省黄龙体育中心引入数字孪生技术，不仅构建了集赛事运营、场馆运维与服务保障于一体的“智慧大脑”，还强化了应急功能，为突发情况提供最优的疏散逃离路线^[7]。2022年卡塔尔世界杯阿尔赖扬体育场，通过数字孪生与交通仿真技术融合，针对不同用户群体设计分层交通管控方案，划分专属管控区域与路线，避免人流交叉冲突；通过仿真模拟识别交通瓶颈并优化，最终将赛事交通服务水平控制在合理范围，保障紧急疏散通道畅通^[10]。

2.3 赛事服务阶段：全流程支撑赛事组织，提升赛事专业度与观赛体验

数字孪生技术为体育赛事组织与服务提供全流程支持，从赛事筹备、现场运行到赛后复盘，形成闭环式智慧服务体系，提升赛事专业性与观赏性。

在赛事筹备与运行方面，基于数字孪生技术1:1还原比赛场景，可模拟赛事流程、人员调度与资源配置，实时采集各种数据信息并及时反馈，优化赛事组织方案。例如，北京冬奥会通过“数字孪生场馆模拟仿真系统”，对赛事规划过程中不够完善的方案进行仿真实验和改进，

为场馆运行规划等工作方案提供模拟与决策支持，提升赛事运作效率，降低运行成本^[4]；2022年，卡塔尔世界杯阿尔赖扬体育场以数字孪生为核心，构建多群体赛事交通运营体系，普通观众以地铁、接驳巴士等公共交通为主，VVIP、媒体等群体采用专用路线与错峰机制，最终实现赛后90分钟内4万余名观众有序疏散，无拥堵或安全事故发生^[10]；2022年，卡塔尔世界杯采用数字孪生技术构建半自动越位识别系统(SAOT)，通过12个摄像头实时捕捉球员动作，结合AI算法快速判断越位，减少裁判误判，提升赛事公平性^[11]。

在观赛体验方面，借助数字孪生技术，构建虚拟与现实融合的环境，打造沉浸式观赛场景。例如，北京冬奥会冰壶比赛推出“AI战术分析”功能，以动态曲线展示冰壶运动轨迹，帮助观众理解比赛策略，吸引大量新观众^[3]。

2.4 用户服务阶段：精准捕捉个体需求，提供个性化运动与训练服务

数字孪生技术通过精准捕捉用户个体需求，为不同主体提供个性化服务，推动体育场馆向体验型平台转型^[12]。

针对健身人群，数字技术可实现运动数据监测、个性化训练指导与社交互动，为健身爱好者提供沉浸式运动氛围与环境。例如，酷约运动App通过数字孪生技术还原353个现实场景，1:1复刻各种运动环境。同时，用户还可在线上参与“云跑·中国”赛事，与其他用户实时竞技，打造集体育竞技、文化娱乐于一体的虚拟世界，满足健身爱好者的健身与社交需求^[4]。

针对运动员群体，数字孪生技术为运动员提供了模拟比赛环境，可以在虚拟空间练习技术、对手策略；教练员可以通过模拟不同竞技场景，评估战术策略，进而优化比赛方案。例如，中国跳水队通过“3D+AI”训练系统，利用激光雷达构建泳池3D模型，实时捕捉运动员动作并生成三维数字模型，教练与运动员可快速回看动作细节并调整技术，使运动员的训练更加科学高效^[3]；卡塔尔世界杯期间，借助数字孪生技术模拟真实比赛环境与数据，从不同角度分析比赛信息，为球员训练和比赛提供参考与帮助^[11]。

3 数字孪生技术赋能体育场馆的现实困境

3.1 技术困境：融合不足与核心技术依赖

数字技术在体育场馆中的应用存在“碎片化”问题，各技术系统(如物联网、数字孪生、AI)间数据互通性差，形成“信息孤岛”，难以发挥协同效应。体育场馆的各

种控制系统均来自不同供应商,场馆内缺乏统一数据接口,无法实现联动调控,削弱了场馆管理效率。例如,部分场馆的照明控制系统与安保监控系统来自不同制造商,因无统一标准导致二者联动困难,无法根据人流变化动态调整照明与安保部署^[3,8]。同时,我国体育场馆数字技术应用仍依赖国外核心技术,自主研发能力不足,导致技术升级成本高、服务响应滞后。此外,体育场馆类型多样,不同场馆的功能需求与运营模式差异较大,但现有数字技术解决方案多为通用型,不能为不同场馆提供个性化、针对性措施。例如,社区健身中心对低成本、易操作的数字系统需求较高,而大型体育场馆则需要高性能的实时数据管控能力,现有技术难以满足^[8]。数字孪生技术本身还面临核心瓶颈,虚拟模型构建难度大,受多元主体认知水平、技术创新速度等因素制约,数字模型的真实性和实时性难以保证,开源技术“技术碎片”等问题突出。

3.2 制度困境:标准缺失与监管滞后

数字体育场馆建设缺乏统一标准体系,涵盖技术应用、数据管理、服务规范等多个领域,导致行业发展无序。目前,我国尚未出台数字孪生体育场馆建设的国家标准或行业标准,各地区、各企业自行制定技术规范,造成数据格式不统一、系统兼容性差等问题。不同城市的体育场馆数字孪生模型采用不同建模标准,无法实现跨区域数据共享与协同管理^[8]。同时,运营服务规范等制度缺失,部分企业因技术资质不足、安全保障能力欠缺,导致赛事相关安全事件频发。数字孪生技术在体育场馆中的应用涉及用户隐私保护、数据安全等新议题,但现有法律法规与监管机制难以覆盖。现行《体育场馆运营管理办法》等政策文件制定于数字化转型初期,主要针对传统场馆的场地开放、安全管理、服务保障等内容,未涉及数字孪生技术应用中的数据治理、算法监管、虚拟服务规范等新议题。例如,现行政策文件未涉及数字孪生技术应用中的数据治理、算法监管等新内容,监管政策的缺失也使数字技术应用存在潜在风险^[13];对AI辅助判罚、虚拟观赛等场景中的算法公平性、服务可及性,没有对应的监管依据^[8]。

3.3 人才困境:复合型人才培养体系薄弱

数字体育场馆建设需要既精通数字技术,又熟悉体育场馆运营管理的复合型人才,但当前人才供需严重失衡。一方面,数字技术人才对体育行业认知不足,难以设计贴合场馆实际需求的技术方案;另一方面,体育场馆管理人员数字素养欠缺,无法有效运用数字系统开展运营工作。《产业数字人才研究与发展报告(2023)》显示,

当前我国数字人才缺口约为2500万~3000万,且仍在持续扩大,其中体育产业尤其缺乏既精通体育经营与管理,又擅长构建数字技术应用方案的高端人才。例如,北京冬奥会期间,冬奥通信运行指挥中心的78位数字科技专家多来自通信行业,而体育领域专业人才占比极低^[11]。人才培养体系存在明显短板,高校体育类专业仍以传统体育管理、运动训练课程为主,缺乏数字技术相关课程;计算机、大数据等专业则较少涉及体育行业知识,跨学科人才培养机制尚未形成。部分高校虽开设智能体育工程专业,但对数字体育场馆的重视和投入不足,课程设置中与数字技术结合的实践应用性课程偏少,且师资力量薄弱,教师自身数字化知识技能储备不足、对数字技术在体育领域的应用研究不够深入,导致人才培养质量难以满足市场需求^[14]。

3.4 认知困境:理念滞后与“技术本位”倾向

体育场馆运营主体对数字孪生技术的价值认知不足,将其等同于“信息化改造”,仅停留在场馆内的基础功能层面,并未意识到其在能耗管控、应急管理等领域场景中的重要性,投入意愿偏低。尽管部分企业已将数字孪生技术研发确立为战略方向,但仍有部分体育场馆仅借助5G、VR/AR技术开展表面化改造,对数字孪生技术的内涵、应用条件和价值效益存在认知偏差,忽视用户实际需求^[4];大众对新技术接受度不足,部分观众习惯传统观赛模式,对虚拟观赛、智能导航等新场景存在怀疑与抵触心理。同时,老年群体因数字素养不足,难以熟练操作相关系统,致使技术应用覆盖范围受限。更关键的是,技术应用存在“技术本位”倾向,部分场馆只重视“技术先进”,忽视用户实际需求,导致技术与实际应用脱节,使用率偏低。技术在实际应用过程中过度强调效率,并不能结合观众特征提供相应的服务,导致技术应用缺乏温度。

4 数字孪生技术赋能体育场馆的优化策略

4.1 破技术困境:建协同体系、强自研、推定制方案

首先,应构建统一技术协同体系,明确数字孪生技术等系统的数据接口格式、传输协议与联动规则,强制要求新场馆采购具备统一接口的设备,老旧场馆通过加装数据转换模块、升级控制系统逐步实现互联互通。例如,促使人流监测系统与空调、照明系统联动,根据实时人数自动调节能耗;搭建区域性体育场馆数字中枢平台,整合不同场馆数据资源,实现跨系统协同调度。其次,强化核心技术自主研发,支持高校、科研机构与

企业联合攻关，重点突破体育专用数字孪生建模算法、国产体育 AI 芯片等核心技术，对自主研发成果落地的企业给予税收减免、研发补贴等政策支持；建立“国产技术试点”，在中小型场馆优先推广成熟的国产解决方案，降低对国外技术的依赖。最后，推行场景化定制服务，按场馆类型建立需求数据库，鼓励技术企业开发针对性解决方案，如为社区健身中心设计低成本“轻量化数字管理系统”，为大型场馆研发“高性能实时管控平台”。

4.2 解制度困境：定统一标准、全周期监管、保数据安全

一方面，加快统一标准体系建设，由国家体育总局牵头，联合工信部、住建部等部门，制定数字孪生体育场馆建设标准，涵盖技术应用、数据管理、服务规范等核心领域，明确不同类型场馆的技术指标阈值。同时，建立“标准动态更新机制”，结合技术发展与行业需求适时修订标准内容，确保标准的前瞻性与实用性。另一方面，完善监管与法律保障机制，整合政府、行业协会和第三方机构力量，对场馆数字系统的建设、运营进行全周期监管；针对数据安全与隐私保护，出台相关配套政策，明确数据采集范围、存储期限、使用权限，要求场馆采用加密传输、匿名化处理等技术手段保护用户数据，建立数据泄露应急预案。此外，建立跨区域监管协同机制，实现不同区域体育场馆数字系统的监管数据互通，满足跨区域赛事的监管需求。

4.3 补人才困境：跨科培养、引专才、提升人员素养

在人才培养方面，推动高校跨学科教育改革，体育专业增设数字技术相关课程，计算机等理工专业开设体育类选修课程，培养既懂数字技术又懂体育行业的高层次人才；企业与高校合作建立“实习实训基地”，如阿里体育与北京体育大学共建“数字体育场馆人才孵化中心”，让学生参与实际场馆数字系统的设计、运维工作，提升实践操作能力。在人才引进方面，制定“数字体育人才专项引进计划”，对具备数字技术与体育行业双重从业经验的人才，给予住房补贴等优惠政策；从通信、互联网行业引进技术专家，通过“体育行业导师带教”的方式，帮助其快速熟悉体育场馆的运营逻辑。在人才使用方面，建立“数字素养提升计划”，对现有体育场馆管理人员开展定期培训，内容涵盖数字系统操作、数据解读、应急故障处理等；鼓励管理人员主动学习数字技能，同时建立“技术专家+体育运营者”的协同工作机制。

4.4 改认知困境：宣技术价值、适群体、重用户需求

首先，宣传数字孪生技术在能耗优化、应急管理 etc 深度应用场景的价值，提升运营主体的认知水平；推广北京冬奥会场馆、杭州亚运会场馆等智慧场馆的成功经验，组织运营主体实地考察学习。其次，针对不同群体开展精准赋能，针对老年群体，场馆需提供“适老化服务”，耐心教会老年人使用线上预约、智能导航等基础功能；针对年轻群体，引导其感受 VR 观赛、虚拟社交等新场景的魅力，推动传统观赛习惯向数字场景转变。最后，场馆在引入数字技术前需开展用户需求调研，结合自身类型与服务对象设计应用方案；在技术应用过程中，建立用户反馈与建议机制，通过线上问卷、现场访谈等方式收集用户意见，及时优化技术功能；同时，在技术设计中融入人文关怀，针对家庭观众，设置儿童友好型虚拟互动场景，避免技术应用“重效率、轻温度”，确保数字技术真正服务于用户需求，提升使用率与用户满意度。

5 结论

数字孪生技术赋能体育场馆规划建设、运营管理、赛事服务、用户服务全流程，有效推动场馆智慧化转型。但当前技术应用仍面临技术碎片化与核心技术对外依赖、制度标准缺失与监管及安全保障滞后、体育数字复合型人才短缺、运营主体认知不足与技术应用“本位化”等现实问题。对此，需从技术、制度、人才、认知四大维度精准施策：构建统一技术协同体系，强化核心技术自主研发并推行场景化定制方案；制定全国统一的建设标准，完善全周期监管与安全保障机制；推进跨学科人才培养与专项引进，提升场馆从业人员数字素养；加强技术价值宣传，针对不同群体提供精准适配服务，始终坚持用户需求导向。随着数字技术的协同发展，体育场馆将进一步实现虚实场景深度交互，成为体育产业数字化转型的重要载体。

参考文献

- [1] 宁娇荣, 胡振宇, 蔡雨辰. 数字孪生技术在智慧体育场馆中的应用 [J]. 建筑与文化, 2024 (2): 16-17.
- [2] 黄秋瑜, 黄立恒. 数字孪生技术在某体育场馆建筑施工安全管理过程中的应用研究 [J]. 绿色建筑与智能建筑, 2024 (12): 76-78, 113.
- [3] 李晨雅, 杨海燕. 数字孪生技术赋能体育场馆探索

- 与实践 [J]. 体育文化导刊, 2023 (9): 35-40, 54.
- [4] 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, 61.
- [5] 解永生, 赖浩亮, 向刚, 等. 基于数字孪生的体育场馆运营管理平台关键技术研究 [J]. 文体用品与科技, 2025 (20): 104-106.
- [6] 刘伟凇, 宋雪娇. 数字孪生技术在智慧体育场馆中的实践分析 [J]. 文体用品与科技, 2024 (23): 193-195.
- [7] 王爱萍, 范峰. 数字孪生赋能体育场馆智慧化转型的理论架构、制约因素与优化路径 [J]. 上海体育大学学报, 2025, 49 (3): 75-86.
- [8] 高奎亭, 陈家起, 房蕊. 数字孪生体育场馆的体系架构、现实障碍与推进路径 [J]. 武汉体育学院学报, 2024, 58 (6): 25-32.
- [9] 张冠豪. 数字孪生技术在体育场馆运营中的应用 [J]. 数字技术与应用, 2024, 42 (8): 123-125.
- [10] Tahmasseby S, Reddipalayam P S P. Traffic impact assessment for the stadiums hosting FIFA 2022 World Cup in Qatar: a case study [J]. Iran Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering, 2022, 46: 3499-3510.
- [11] 黎镇鹏, 任波. 新时代数字体育赛事的应用场景与发展策略 [J]. 天津体育学院学报, 2024, 39 (2): 168-174.
- [12] Glebova E, Book R, Su Y, et al. Sports venue digital twin technology from a spectator virtual visiting perspective [J]. Frontiers in Sports and Active Living, 2023, 5: 1289140.
- [13] 柴王军, 李杨帆, 李国, 等. 数字技术赋能体育产业高质量发展的逻辑、困境及纾解路径 [J]. 西安体育学院学报, 2022, 39 (3): 292-300.
- [14] 蒋依依, 王石峰, 石鹏飞, 等. 数字赋能北京冬奥会场馆遗产可持续利用研究 [J]. 天津体育学院学报, 2025, 40 (1): 78-85.