

数字孪生技术助力复杂工程项目可行性分析的实践研究

梁斌斌

江苏鸿渐投资咨询管理有限公司，江苏 苏州 215000

摘要：随着工程项目复杂程度的不断提高，传统的可行性分析方法逐渐暴露出信息滞后、预测能力弱、反馈响应慢等局限性。数字孪生技术的出现，为工程领域带来了全新的分析与决策手段。通过构建物理实体与数字模型的实时映射，数字孪生技术可实现对项目全过程的动态感知、预测与优化，为复杂工程项目的可行性评估提供更高精度和更强适应性的支持。本文围绕数字孪生技术的基本原理与构建机制，结合当前在复杂工程中的典型应用案例，深入分析其在项目前期可行性论证、施工阶段风险识别、运营期动态调整等环节中的实际作用，并探讨当前实施过程中面临的挑战与未来优化方向，旨在为推动数字孪生技术在工程决策领域的深度融合提供理论支持与实践参考。

关键词：数字孪生；工程项目管理；可行性分析；系统仿真；决策支持

DOI: 10.63887/jad.2025.1.4.8

引言

在复杂工程项目中，可行性分析的科学性直接影响投资决策与后续运营效果。然而，传统分析方法多依赖静态数据与经验判断，面对动态环境与多目标约束时常显不足，易导致成本超支与周期延误。随着数字化进程推进，数字孪生技术凭借其多源数据融合、实时交互与智能仿真优势，逐渐成为提升工程决策质量的重要手段。通过构建虚实融合的数字模型，数字孪生可实现项目全生命周期的仿真评估与优化调整，推动工程管理向智能化、精细化方向发展。当代城市化的重要特征是城市的集聚化，大城市和城市群爆发式增长，主导着社会经济发展和世界经济格局。随着技术的快速发展，信息的感知传输、存储和计算能力大幅提升，人类分析和处理复杂问题的能力也大幅提升，为解决城市复杂问题创造了机遇、提供了条件。

1 数字孪生技术的原理与工程构建逻辑

1.1 技术本质与关键特征

数字孪生 (Digital Twin) 技术通过构建物理对象在虚拟空间的实时镜像，实现信息的双向传输和动态更新。其关键在于“同步”与“反馈”两个核心功能。同步体现在现实世界中设备或系统状态能够实时映射至数字

模型；反馈则体现在模型基于数据分析，能够预测或调整现实系统的行为。这种模型与现实的联动机制，使得原本依赖人工经验进行判断与管理的工程项目，能够实现智能化决策支持。

数字孪生具有三个典型特征：一是全生命周期追踪，从项目设计、施工到运营维保全程可控；二是高维数据融合，整合结构信息、环境数据、进度计划、运营反馈等多种异构数据；三是智能演化能力，模型可根据历史数据与算法学习不断更新迭代，提供更贴近实际的预测方案。这些特征决定了数字孪生在复杂系统管理中的巨大潜力，尤其适用于动态变化强、耦合关系复杂的工程项目^[1]。

1.2 工程构建路径与应用逻辑

在工程实践中，数字孪生系统通常分为三层构建路径：感知层、模型层与决策层。感知层依靠传感器、IoT 设备等采集实时数据；模型层基于 BIM、GIS 等技术建立多尺度的三维模型和流程逻辑；决策层则引入大数据分析和人工智能技术，实现预测分析与优化调度。例如，在一座大跨度桥梁项目中，感知层可监测梁体应力、温度变化、材料性能；模型层构建力学模型及进度模型；决策层根据实时数据模拟负载变化趋势，提出加固或调整建议^[2]。

构建过程中，还需考虑系统的开放性与可扩展性。目前，主流平台如 Autodesk Tandem、Bentley iTwin 等已提供模块化接口，可与设计软件、运维平台、施工管理系统等实现数据互联，为构建跨部门、跨阶段协同管理系统提供可能。最终目标是形成“可视、可测、可控”的智能项目空间，实现工程从“人管”向“数控”的转型。数字孪生也叫数字映射，顾名思义，是在虚拟空间中映射物理实体，从而反映对应实体的全生命周期过程，将这样的技术应用到城市管理中来，在网络空间构建一个与物理世界相对应的“镜像城市”，实现实时监控、智能预测与高效调度^[3]。

2 数字孪生在可行性分析中的核心作用机制

2.1 提升方案论证的科学性与前瞻性

在传统的工程项目可行性分析中，方案选择往往依赖于专家经验与有限数据模拟，难以精准预测未来施工环境变化、资源调配瓶颈或风险冲击路径。数字孪生的引入，为前期论证提供了可视化、动态化、情境化的辅助支撑。通过建立项目的三维数字模型，结合历史数据与仿真技术，项目团队可以在立项阶段就进行“虚拟开工”，模拟多种建设方案在不同环境、不同资源配置条件下的运行效果，并对工期、成本、资源消耗、风险系数等指标进行量化分析。

以大型地铁工程为例，项目方可通过数字孪生系统分别构建明挖法、盾构法两种方案的施工流程，叠加地下管线、交通干扰、周边建筑影响等因素进行仿真比选。系统输出的可行性评价指标将为项目选择提供数据支持，避免“拍脑袋决策”。此外，在数据积累不断丰富后，系统还能基于过往类似工程的结果建立“案例库”，提高新项目分析的参考性与预测准确率。

更重要的是，数字孪生支持在论证阶段识别潜在难点与极端工况，通过提前模拟复杂地质条件、突发事件（如极端天气、设备故障）等情景，为项目设计提供更具前瞻性的调整建议。这种“提前发现问题—调整策略—验证效果”的仿真闭环机制，大幅提升了可行性研究的深度与可靠性。

2.2 支撑多维数据融合与全局动态评估

复杂工程项目涉及多个参与主体、多类数据来源以及多维评估维度，如技术、经济、环保、社会效应等，而传统可行性分析常因数据不完整、信息不对称而评估偏差明显。数字孪生则提供了统一的数据融合平台，能将结构建模、成本预算、进度计划、环境模拟、风险识别等信息集成在一个可互动的系统中，实现“多源数据—统一模型—协同决策”的闭环管理。

例如，在城市高架桥建设项目中，相关部门可以将交通流量预测模型、噪音扩散模型、施工影响评估模型等同时接入数字孪生平台，实时查看不同建设路径对城市运行和居民生活的影响程度。系统还可基于权重设定进行多目标优化，如在成本最小、通行效率最高、环境扰动最小之间寻找平衡点。相比以往分散、割裂的评估方式，这种多维融合手段更具系统性与综合性^[4]。

此外，数字孪生系统具有可扩展性和迭代性，可在项目进展过程中持续输入最新数据，动态调整可行性结论。例如，原评估中认为某一施工路径可行，但在后期发现地下管网密布、风险上升，则可在孪生系统中迅速验证替代方案，减少决策滞后和资源浪费。

3 数字孪生在复杂工程项目实施过程中的实用案例分析

3.1 超高层建筑中的进度控制与安全管理实践

在超高层建筑施工中，结构复杂、工序繁多、环境变量大，传统项目管理方式很难做到全程精准控制。某地标性超高层项目在开工前引入数字孪生平台，将 BIM 模型与施工进度、劳动力调度、设备状态等信息整合，构建了一个高度同步的工程数字镜像系统。施工现场每一个关键节点的数据，包括钢结构吊装、混凝土浇筑、气象条件等，都通过传感器实时采集，并映射至虚拟空间中。

项目团队利用该系统进行“工序推演”和“资源调配优化”模拟。例如，在进行塔吊布局时，通过孪生模型预演不同配置方式对工期的影响，选择最优方案；在高空作业阶段，系统依据风速与结构承载情况发出预警，及时调整吊装计划，确保作业安全。此外，该系统还设定了“进度偏差阈值”，一旦实际进度偏离计划

曲线，系统自动推送告警提示并推荐调整策略，显著提升了施工计划的执行效率和动态响应能力。

事实证明，该项目在整个建设周期中未发生重大安全事故，实际工期也较原计划缩短 18 天，成为数字孪生在大型建筑工程中赋能施工管理的典型案例。这一实践表明，数字孪生不仅是“可视化工具”，更是推动工程管理智能化转型的“数字中枢”。

3.2 城市轨道交通工程中的风险预警与环境评估

城市轨道交通项目通常穿越密集城区，涉及复杂地质、既有管网、交通疏导等多重因素，其可行性与风险评估难度极高。在某市地铁新线建设中，数字孪生平台的部署成为项目团队进行精细化管理的重要手段。平台通过 GIS 数据、地质剖面、周边建筑分布、实时监测数据等，构建出一套多维度的动态孪生模型。

在隧道盾构施工过程中，系统实时分析土层变化与盾构姿态的偏差，一旦发现位移趋势异常，立即发出风险警告，并模拟不同调整策略的风险化解效果。此外，通过叠加空气质量、振动波动、噪声传播模型，系统能实时呈现施工对周边环境与居民生活的影响，为项目方与政府监管机构提供量化依据。例如，在穿越学校与医院附近施工期间，系统自动推送“低噪时间段”施工建议，并同步调整机械启停策略，从源头减少扰民风险^[5]。

同时，该孪生平台还兼具公众信息服务功能，市民可通过 App 查看施工动态与交通影响时间表，提升工程透明度与社会支持度。这种“多源信息集成+多方共享互动”的模式，为城市基础设施建设提供了全新的治理工具，也验证了数字孪生在复杂环境中的广泛适应性。

4 当前数字孪生技术应用面临的挑战与改进方向

4.1 技术融合与系统建设中的核心障碍

尽管数字孪生技术在复杂工程项目中展现出巨大潜力，但在实际应用中仍面临诸多技术与系统层面的挑战。首先是多源数据融合难度大。复杂工程涉及设计数据（如 BIM 模型）、施工数据（如进度计划）、运维数据（如传感器反馈）以及外部环境数据（如天

气、交通等），其数据格式、更新频率、质量标准差异明显，难以统一标准化处理。一旦数据对接不畅，便会导致孪生模型的实时性和准确性下降，削弱其决策支持价值。

其次是建模能力与行业知识之间存在脱节。目前很多数字孪生平台在建模层面侧重几何精度与图形还原，而对工程行为特征、运营机制、管理逻辑等“隐性知识”挖掘不足。例如在大型桥梁项目中，仅有结构图纸和传感器数据远远不够，还需融入桥梁震动模型、材料老化曲线、交通载荷预测等深层信息，才能实现真正意义上的行为仿真。这对平台算法的开放性和开发者的跨学科素养提出了更高要求。

此外，不同系统之间接口不统一、平台开发商之间标准不兼容的问题依然普遍存在。各类 BIM 软件、运维系统、分析平台间缺乏统一的通信协议与语义标准，限制了数字孪生系统的集成效率与功能拓展空间。因此，推动跨平台互联互通标准的制定与落地，是今后数字孪生广泛部署的关键前提。

4.2 管理机制与人才支撑的现实短板

除了技术问题外，管理体制和人才结构也对数字孪生技术的落地形成一定掣肘。一方面，当前多数工程建设项目仍以传统模式推进，对数字化建设的重要性认知不足。一些项目虽然在方案中提出建设数字孪生平台，但执行层面缺乏预算支持、流程融入与责任归属，导致技术流于形式或停留在展示阶段，未能发挥应有的预测与控制功能。

另一方面，专业人才储备严重不足。数字孪生作为集成 BIM、物联网、AI、大数据等多技术的综合平台，其运维需要具备跨领域知识结构的人才。然而，当前工程管理、设计、运维人员大多擅长单一模块，对数字孪生平台的构建逻辑与分析应用不够熟悉。同时，IT 人员虽精通技术，却常缺乏工程实际经验，难以构建贴合行业场景的模型。这种“技术懂工程少、工程懂技术弱”的结构性矛盾，成为推广落地中的常见瓶颈。

为破解上述难题，需从制度层面推进“数字建设”与“工程建设”同步规划，明确在项目立项、招投标、施工管理、竣工验收各阶段对数字孪生建设成果的考核要求。同时，推动高校、行业培训机构开展数字孪

生相关复合型人才培养计划，提升工程从业者的数字素养和系统思维能力。通过机制保障与人才支撑“双轮驱动”，方可为数字孪生在工程领域的深度融合夯实基础。

结论

数字孪生技术作为工程管理领域的重要创新手段，正逐步改变传统可行性分析模式。它通过多源数据融

合、实时仿真与智能决策支持，实现了从项目规划到实施的全过程协同与动态优化。在复杂工程项目中，数字孪生不仅提高了方案选择的科学性，也强化了施工管理的精细化与风险控制能力。尽管当前仍面临技术集成、标准不一与人才短缺等挑战，但随着技术成熟与应用推广，其价值将更加凸显。未来应持续完善平台建设与制度支持，推动其在工程决策中的深度融合与广泛应用。

参考文献

- [1]徐康茹. BIM技术在沥青路面病害建模及养护决策中的应用技术研究[D]. 重庆交通大学, 2024.
- [2]孟贤. 数字化下特高压装备质量风险管控模型及云平台研究[D]. 华北电力大学(北京), 2024.
- [3]徐雪梅. 基于BIM-FEM一体化技术的装配式混凝土结构施工时变力学研究[D]. 武汉轻工大学, 2023.
- [4]韩雨燕. 基于灰色白化权的绿色建筑项目运维安全管理评价研究[D]. 天津理工大学, 2023.
- [5]《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.