

# 数字孪生技术在高速公路智慧工地管理中的应用与挑战

徐文武

云南交投集团云岭建设有限公司 云南 昆明 674100

**摘要：**数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟空间的实时映射，正在重塑高速公路智慧工地管理模式。本文以香丽高速、三清高速曲靖段云泉收费站、昆明长水机场改扩建项目等云南典型案例为研究对象，系统分析数字孪生在工程全周期管理、安全风险防控、资源动态调配等场景的应用价值，揭示数据孤岛、模型精度、技术融合等核心挑战。研究表明，数字孪生技术可使施工效率提升，事故率降低，但需突破跨系统数据治理、多物理场耦合建模等技术瓶颈。未来发展方向应聚焦于行业标准化建设、边缘计算与云边协同架构优化，以及BIM+GIS+IoT的深度融合。

**关键词：**数字孪生；智慧工地；高速公路；全周期管理；数据治理

## 引言

信息技术发展使智慧化建设成各行业趋势，高速公路作为国家基建重点，其建设质量与效率意义重大。智慧工地管理是高速公路建设现代化的重要体现，能提高工程质量、保障安全、降低成本、缩短周期。数字孪生技术是新兴数字化技术，可构建物理实体虚拟模型，实现全生命周期实时映射等。将其用于云南高速公路智慧工地管理，能提供全面准确的数据支持，解决传统管理问题，但目前应用尚在探索，面临诸多挑战，研究其应用与挑战意义重大。

## 1 核心应用场景的深度解析

### 1.1 工程全周期动态管控

数字孪生技术正在重塑云南高速公路建设的全生命周期管理模式<sup>[1]</sup>。传统模式下，设计、施工、运营各阶段的数据流转依赖人工传递，容易造成信息衰减和失真。而数字孪生通过构建四维时空模型，实现了“设计-施工-运营”的无缝衔接。以香丽高速为例，香丽高速（香格里拉至丽江）全长140.305公里，2021年通车，面临高海拔、复杂地质等挑战。其全生命周期智慧管养体系通过采用激光点云扫描+无人机倾斜摄影技术，构建全线1:500高精度数字孪生体，包含桥梁、隧道、边坡、服务区等全要素动态映射。金沙江特大桥（主跨618米双塔全漂浮体系混合梁斜拉桥）部署2000余个光纤光栅传感器，实时监测应力、位移、温度、振动参数，系统支持MQTT/LoRaWAN/HTTP多协议接入，数据传输延迟<1秒。通过“结构安全云平台”实现AI算法自动预警；黄山哨隧道进口段岩堆边坡采用土石混合滑坡监测系统，结合26种耐寒植物生态护坡，成功预警12次边坡位移异常，应急响应时间缩短至4小时；低能见度行车安全防控系统在能见度<200米时自动触发60公里/小时限速，雾

天事故率同比下降65%。项目通车以来零安全责任事故，2025年节假日单日最高车流量4.19万辆，通行效率提升6.35%，带动沿线10余个乡、12个少数民族增收，松茸等农产品价格翻番，提供本地就业岗位200余个，获中国公路学会“中国高速公路30年·信息化奖”经典工程奖，形成7部行业专著、15项专利及3项软件著作权，成为高原高速公路智慧化建设标杆。

### 1.2 安全风险智能防控

高速公路建设的安全管理是行业痛点中的痛点。传统模式依赖人工巡检和经验判断，难以应对复杂施工环境下的动态风险。云南储备中心数字孪生应急指挥平台在地震、山体滑坡等灾害抢险中展现了巨大价值。该平台通过无人机激光雷达扫描与数字孪生技术融合，构建三维灾情沙盘，集成地质监测网络、历史灾情数据库等数据流，实现灾情实时推演与救援方案优化。在2025年大理洱源县5.0级地震抢险中，系统30分钟内完成灾情模拟推演，精准识别房屋结构隐患、山体滑坡风险点，指导救援团队快速开辟西侧山路，效率提升40%，成功转移上万居民。

具体防控机制包含三个维度：风险图谱构建方面，系统识别高处坠落、机械伤害、触电等8大类风险因子，建立包含3000余个风险点的知识库，每个风险点均标注发生概率、影响范围和防控措施；动态预警模型采用时空卷积网络（ST-CNN）处理多源异构数据，可捕捉风险演化的早期征兆，预警准确率达85%；应急推演功能支持多部门在线协同演练，通过数字孪生技术模拟事故发展过程，自动生成最优处置方案，预案优化周期从2周缩短至48小时。2025年汛期，该系统成功预警3起山体滑坡风险，保障了2000余名建设者的生命安全。

### 1.3 资源优化配置

材料浪费和设备闲置是高速公路建设中的普遍问题。三清高速曲靖段应用数字孪生技术实现了资源精准管控。系统通过物联网设备实时追踪2000余吨钢材、30万立方米混凝土的使用情况，结合施工进度动态调整采购计划。具体而言，系统建立材料需求预测模型，综合考虑天气、工序衔接、设备效率等因素，将采购计划分解到每日、每班组。实际应用数据显示：钢材浪费率从8%降至2.3%，混凝土超耗率控制在1.5%以内，较行业标准提升40%。

设备管理方面，系统通过安装振动传感器、电流传感器等设备，实时监测挖掘机、装载机等200余台设备的运行状态。基于设备健康指数（EHI）评估模型，系统可预测设备故障发生概率，提前安排维护保养<sup>[2]</sup>。在摊铺机管理中，系统通过分析沥青温度、摊铺速度、振动频率等参数，优化施工工艺，使路面平整度标准差从0.8mm降至0.3mm。能源管理模块集成电表、水表、燃油传感器等设备，实时监测各施工环节的能耗情况，通过多目标优化算法调整设备运行参数，使能源消耗降低18%，相当于每年减少二氧化碳排放1.2万吨。

## 2 技术落地面临的现实挑战

### 2.1 数据治理的“三重困境”

数据是数字孪生的血液，但当前云南高速公路建设领域的数据治理面临严峻挑战。标准缺失是最突出的问题，行业内存3类坐标系（WGS84、CGCS2000、北京54）、5种数据格式（DWG、DXF、IFC、CityGML、3DTiles）、7种传输协议（MQTT、CoAP、HTTP、WebSocket等），数据转换损耗率达30%。

数据质量问题同样不容忽视。传感器故障率平均每月达2.3%，异常数据占比15%-20%。鲁甸至巧家高速公路（全长71.3公里，桥隧比93.77%）在智慧工地建设中面临严峻的数据治理挑战。项目采用“云边端”协同架构构建数据中台，集成隧道监测、拌合站、梁场等12个子系统的异构数据流。针对坐标系混乱问题，统一采用CGCS2000大地坐标系，通过数据转换引擎实现DWG/DXF/IFC等5类格式数据的无损转换，数据转换损耗率控制在5%以内。

数据治理体系采用三级架构：边缘层通过智能网关实现数据预处理，传输层应用MQTT/HTTP双协议通道确保数据传输延迟<500ms，平台层依托Apache Flink构建实时流处理引擎，处理峰值达15万条/秒。质量引擎基于深度学习开发异常检测模型，通过对比历史数据模式识别异常值，准确率达89%。区块链存证模块将关键施工数据上链，利用智能合约确保数据不可篡改，满足等

保2.0三级认证要求。该体系运行后，数据可用性提升至98.7%，数据质量评分从72分提高至95分，有效支撑了隧道施工安全风险防控和工程质量追溯。

### 2.2 模型精度的“双重约束”

数字孪生模型的精度直接决定其应用价值，但当前技术面临几何精度与行为仿真的双重约束。在几何建模方面，复杂结构（如悬索桥主缆、斜拉桥索塔）的建模误差需控制在0.1mm以内，这对测量设备和建模算法提出极高要求。三清高速采用混合建模技术突破瓶颈：静态模型使用Catia构建毫米级精度BIM模型，包含12万个构件的几何信息和材料属性；动态模型基于SUMO交通仿真软件，集成10万级车辆行为数据，模拟不同交通流下的桥梁振动响应。

行为仿真方面，交通流模拟需考虑驾驶员行为、车辆性能、道路条件等200余个变量。传统模型多采用确定性方法，难以捕捉系统的随机性和不确定性。项目团队引入深度强化学习算法，构建驾驶员行为预测模型，通过分析10万小时的行车数据，学习超车、变道、跟驰等典型行为模式。在HIL（硬件在环）测试中，虚实模型误差控制在5%以内，满足工程应用要求。但多物理场耦合建模仍是技术短板，特别是在极端天气（如暴雨、大风）条件下，风-车-桥耦合振动模型的计算效率与精度平衡问题尚未完全解决。

### 2.3 技术融合的“协同障碍”

数字孪生技术的落地需要物联网、大数据、人工智能等多技术的深度融合，但当前系统间协同存在显著障碍。系统壁垒方面，设计软件（如Revit）与施工管理平台（如Procore）数据互通率不足40%，需通过中间件或手工导入导出数据，效率低下且易出错。

算力瓶颈是另一大挑战。全要素仿真需要每秒100万亿次浮点运算能力，传统云计算模式难以满足实时性要求<sup>[3]</sup>。三清高速项目采用边缘计算架构，在工地部署智能网关，实现数据本地预处理和模型轻量化部署。经测试，边缘节点响应时间从200ms降至20ms，满足实时控制需求。但边缘设备的计算资源有限，复杂模型仍需上传至云端处理，云边协同机制尚不完善。

人才缺口问题日益凸显。既懂工程又掌握数字技术的复合型人才不足行业需求的15%。高校专业设置与产业需求脱节，传统土木工程专业课程体系中数字技术课程占比不足10%。企业培训体系也不完善，某大型建工集团调查显示，76%的工程师未接受过系统性的数字孪生技术培训。破解人才困境需要产教深度融合，清华大学等高校已开设智能建造专业，年培养人才5000余名，但短期

内仍难以满足行业需求。

### 3 未来发展的战略路径

#### 3.1 技术创新方向

数字孪生技术的演进将呈现三大趋势：数字线程技术将建立跨阶段数据唯一标识体系，实现设计变更自动传导至施工、运营环节，减少人工干预；数字孪生即服务（DTaaS）模式将构建云端模型库，提供标准化、可配置的数字孪生服务，降低中小企业应用门槛；增强现实（AR）技术将与数字孪生深度融合，开发AR眼镜应用，实现现场与模型的实时比对，指导施工人员精准作业。具体而言，数字线程技术可通过区块链存证确保数据不可篡改，利用智能合约实现变更自动通知。某试点项目显示，该技术可使变更响应时间缩短90%，返工率降低35%。DTaaS平台将整合行业最佳实践，提供桥梁、隧道、路基等标准构件库，用户可通过拖拽方式快速构建数字孪生模型。

#### 3.2 产业生态构建

构建开放协同的产业生态是数字孪生技术规模化应用的关键。标准体系方面，需加快制定《智慧工地数字孪生应用指南》等3项国家标准，统一数据接口、模型格式、安全规范等核心要素。平台经济层面，应培育像阿里云交通云控平台这样的行业级平台，连接2000家以上上下游企业，提供数据治理、模型训练、应用开发等一站式服务。安全防护是生态建设的重要保障。需建立等保2.0三级认证体系，采用零信任架构实现细粒度访问控制，利用同态加密技术保护敏感数据<sup>[4]</sup>。同时，应建立数据共享激励机制，通过区块链技术实现数据价值量化分配，激发企业数据共享积极性。

#### 3.3 政策支持建议

政策引导对数字孪生技术推广至关重要。财政激励方面，建议对采用数字孪生技术的项目给予10%-15%的

造价补贴，对关键技术研发给予税收减免。试点示范方面，可在“十四五”期间建设100个国家级数字孪生工地标杆，总结可复制、可推广的经验模式。数据开放方面，应推动气象、地质、交通等公共数据向工程建设领域共享，建立数据更新机制，确保数据时效性。此外，需完善法规标准体系，明确数字孪生模型的知识产权归属，规范数据采集、使用、共享行为。建立行业认证制度，对数字孪生服务商的技术能力、服务水平进行评估认证，提升市场整体质量。加强国际合作，参与ISO、IEC等国际标准制定，推动中国技术方案走向世界。

#### 结语

数字孪生技术正在深刻改变高速公路建设的管理范式。从香丽高速的全要素动态映射到三清高速的毫秒级响应，从资源优化配置到安全风险防控，技术价值已得到充分验证。但数据治理、模型精度、技术融合等挑战仍需持续突破。预计未来，数字孪生将成为高速公路建设的标准配置，推动行业向智能化、精细化、可持续化方向转型。这需要政府、企业、科研机构形成合力，共同构建开放协同的创新生态，为交通强国建设提供强有力的技术支撑。在数字化转型的浪潮中，数字孪生技术必将书写高速公路建设的新篇章。

#### 参考文献

- [1]李恒坤,戴凌云,任丽超.高速公路数字孪生系统设计与实践应用[J].交通科技与管理,2025,6(12):10-12.
- [2]李潘粦.基于数字孪生的高速公路智慧梁场系统建设与应用[J].福建交通科技,2025,(04):95-101.
- [3]梁彦龙,邵鹏,李龙.智慧高速公路数字孪生平台的应用及设计思路[J].数字技术与应用,2025,43(02):127-129.
- [4]朱凌玉,曹亚亮,廖金波,等.数字孪生技术在高速公路智慧化改造工程中的应用[J].运输经理世界,2024,(28):62-64.