

# 桥梁 BIM 轻量化开发技术及其在智慧运维中的应用研究

史喜华 陈胜

林同棣国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆, 401121;

**摘要:** 随着建筑信息模型(BIM)技术在桥梁工程全生命周期中的深入应用, BIM模型的数据量与复杂度急剧增加, 给模型的传输、加载与实时交互带来了巨大挑战。本文针对桥梁智慧运维领域, 系统研究了BIM轻量化开发技术的关键方法、实现路径与实际应用效果。首先分析了桥梁BIM轻量化在运维阶段的特殊需求与技术难点; 然后详细探讨了面向运维的数据压缩、模型简化、LOD管理、动态加载等核心技术; 接着提出了基于微服务的轻量化引擎架构设计与性能优化策略; 最后通过典型工程案例验证了技术在桥梁健康监测中的实际价值。本研究为桥梁智慧运维提供了高效、可靠的轻量化BIM解决方案, 对推动基础设施数字化运维转型具有重要意义。

**关键词:** 建筑信息模型; BIM轻量化; 桥梁智慧运维; 数字孪生

**DOI:** 10.69979/3029-2727.25.04.004

## 1 桥梁智慧运维中的BIM轻量化需求

桥梁作为交通基础设施的核心组成部分, 其安全状态直接关系到公共安全与经济发展。传统桥梁运维主要依赖定期人工巡检与离线数据分析, 存在效率低下、主观性强和响应滞后等固有缺陷。随着物联网(IoT)、大数据和人工智能等技术的发展, 桥梁智慧运维已成为行业必然趋势, 而建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)技术作为数字孪生的理想载体, 在其中扮演着关键角色<sup>[1]</sup>。

然而, 完整桥梁BIM模型通常包含数千万甚至上亿个几何元素, 文件大小可达数十GB。某跨海大桥项目的运维模型显示, 包含所有构件细节的完整模型达到68GB, 即使在高端工作站上也难以流畅操作。这种数据膨胀问题严重制约了BIM在移动巡检、实时监测等智慧运维场景中的应用。具体表现在三个方面: 硬件门槛高——普通运维终端无法承载完整模型; 数据传输慢——现场应急响应受网络带宽限制; 交互体验差——模型浏览与信息查询卡顿明显。

BIM轻量化技术通过有损压缩、模型简化和动态加载等手段, 在保证关键信息完整的前提下大幅降低模型复杂度, 为上述问题提供了解决方案。在桥梁运维领域, 轻量化技术的价值尤为突出: 一方面, 桥梁结构具有线性分布和构件重复性高的特点, 为轻量化处理提供了天然优势;

另一方面, 运维阶段对模型的需求具有明显的场景依赖性——宏观状态评估只需低精度模型, 而损伤定位则需要局部高精度细节<sup>[3]</sup>。

本文聚焦桥梁智慧运维场景, 系统研究BIM轻量化开发技术及其应用方法。第二节将详细分析面向运维的轻量化关键技术; 第三节提出专用轻量化引擎的设计方案; 第四节通过实际案例验证技术效果; 最后展望未来发展趋势。研究成果将为桥梁数字孪生运维系统的构建提供技术支撑, 推动基础设施管理向智能化、精准化方向迈进。

## 2 面向桥梁智慧运维的BIM轻量化关键技术

桥梁运维阶段的BIM轻量化处理需要兼顾几何简化与信息完整性, 其技术需求明显区别于设计与施工阶段。本节将深入剖析适用于桥梁智慧运维的三项核心技术: 异构数据压缩、运维导向的模型简化、动态LOD管理, 为轻量化引擎开发奠定理论基础。

### 2.1 异构数据压缩技术

桥梁运维BIM模型包含多元数据类型, 需采用差异化压缩策略。几何数据方面, 采用改进的谷歌开源Draco算法对桥梁构件分类处理: 主梁、桥塔等主体结构使用8:1压缩比, 保留精确几何; 支座、伸缩缝等关键节点采用5:1压缩比; 栏杆、路灯等附属设施则可压缩至原始大小的10%。测试表明, 这种分级压缩策略可使整体几何数据量减少82%, 而关键构件精度损失控制在3%以内<sup>[2]</sup>。

属性数据压缩对运维尤为重要。桥梁材料性能、检测历史等文本信息采用字典编码与霍夫曼编码结合的方式，建立“构件 ID-属性键-属性值”三层存储结构。某悬索桥项目应用后，属性数据体积从 2.1GB 降至 380MB，查询效率反而提升 40%。针对运维特有的时间序列数据（如传感器读数），采用 Delta 编码与周期性全量存储相结合的策略，在保证精度的前提下使数据量减少 90%。

纹理压缩是另一关键环节。桥梁表面裂纹、锈蚀等病害特征需要通过高清图理展示，传统 JPEG 压缩会导致细节丢失。采用基于 GAN 的智能纹理压缩技术，训练集包含 2000 张桥梁病害图像，生成器网络学习保留关键特征的压缩表示。实际应用显示，该方法可将纹理数据压缩至原始大小的 15%，同时保持 95% 以上的病害识别准确率，完美平衡了视觉效果与存储效率。

## 2.2 运维导向的模型简化策略

桥梁运维对模型精度的需求具有鲜明的区域差异性，需采用智能化简化策略。基于构件重要性评估算法，将桥梁模型划分为三个简化等级：A 级（桥塔基础、拉索锚固区等）保留完整几何；B 级（主梁、拱肋等）允许适度简化；C 级（防撞设施、排水系统等）可大幅简化。该算法综合考虑构件结构功能、失效后果和检测频率三个维度，通过层次分析法（AHP）确定权重。

边折叠简化算法针对桥梁特点进行了优化。对于混凝土桥，优先折叠箱梁内部隔板等不可见面；钢桥则重点保护焊接节点区域；索承式桥梁需特别注意索鞍等传力部位的几何保真。某斜拉桥项目应用显示，优化后的算法使模型面数减少 75%，而关键区域的几何误差控制在 2mm 以内，完全满足运维测量需求<sup>[1]</sup>。

表 1：不同类型桥梁构件的简化策略与精度要求

构件类型	简化算法	允许误差(mm)	信息保留要求	典型简化比例
主梁截面	边折叠	≤5	轮廓尺寸、预应力孔道	60%-70%
桥塔	顶点聚类	≤3	倾斜度、裂缝位置	40%-50%
支座	保护性简化	≤1	位移量、锈蚀状态	20%-30%
拉索	曲线近似	≤10	振动频率、PE 护套状态	50%-60%
桥面铺装	平面化	≤15	平整度、磨损程度	80%-90%

## 2.3 动态 LOD 管理机制

桥梁运维的场景驱动特性要求 LOD (Level of Detail) 系统具备动态调整能力。构建五级 LOD 体系：LOD1（概念模型）用于资产管理；LOD3（精确几何）支持常规检测；LOD5（整合传感器）实现健康监测<sup>[4-5]</sup>。创新性地引入“焦点自适应”机制——当用户选择某构件或系统告警时，自动提升相关区域至 LOD5，其余区域降至 LOD3，内存占用因此减少 60%<sup>[1]</sup>。

视点相关 LOD 技术优化了移动巡检体验。基于视距与视角动态计算各构件的屏幕空间误差（SSE），当 SSE 低于阈值时切换至低精度模型。某高架桥巡检系统应用后，iPad 可流畅浏览 10 公里长的桥梁模型，帧率稳定在 30fps 以上。针对网络条件差的偏远地区，开发了预加载策略，根据巡检路线预测下一步需要的模型区块，提前下载至本地缓存。

LOD 过渡的平滑处理对用户体验至关重要。采用几何变形技术在不同层级间渐变，避免视觉跳跃；属性信息则

实现无缝衔接，无论何种 LOD 下点击构件都能获取完整运维记录。这些细节处理使某大桥运维平台的用户满意度从 3.2 分（5 分制）提升至 4.5 分。

## 3 桥梁运维 BIM 轻量化引擎设计与实现

桥梁运维场景的特殊性要求轻量化引擎具备专业适配性与高性能实时处理能力。本节详细阐述一种面向桥梁智慧运维的 BIM 轻量化引擎架构设计，包括微服务架构、模型处理流水线、渲染优化策略，为工程实践提供系统性解决方案。

### 3.1 微服务架构设计

现代桥梁运维 BIM 轻量化引擎采用分层微服务架构，确保系统的高可用性与可扩展性。基础设施层提供计算、存储与网络资源；核心服务层包含模型转换、轻量化处理、数据同步等独立服务；业务能力层封装检测分析、健康评估等运维专用功能；应用层则面向不同用户角色提供定制界面。这种架构使各服务可独立部署与扩展，微服务化使系统故障恢复时间从原来的小时级缩短至分钟级。

服务网格 (Service Mesh) 技术优化了服务间通信。每个微服务配备 Sidecar 代理, 处理服务发现、负载均衡与熔断机制, 使系统在高峰期仍保持稳定。运维平台特有的任务优先级机制确保应急事件相关服务 (如裂缝报警) 始终获得充足资源。压力测试显示, 该架构可支持 500+ 并发用户同时操作轻量化模型, 满足特大桥梁运维团队的需求<sup>[1]</sup>。

### 3.2 模型处理流水线优化

原始 BIM 模型到轻量化运维模型的转换需要经过多阶段处理。设计高效流水线: 格式解析→几何清洗→构件分类→分级简化→属性提取→压缩编码→空间索引构建。采用 GPU 加速的关键步骤, 如使用 CUDA 实现并行网格简化, 使某斜拉桥模型 (820 万面片) 的处理时间从 CPU 的 45 分钟缩短至 GPU 的 6 分钟。

属性与几何的关联存储是运维查询效率的关键。设计混合存储方案: 频繁访问的基础属性 (如构件 ID、材料) 内嵌于轻量化模型; 详细运维记录 (检测报告、维修历史) 存储在时序数据库中; 空间索引采用改进的 R\*-Tree 结构, 针对桥梁线性特征优化, 使“查找某跨径所有裂缝”类查询的响应时间从秒级降至毫秒级。

### 3.3 实时渲染优化策略

桥梁运维模型的高效可视化面临独特挑战: 需同时展示几何模型、传感器数据与病害标记。基于 WebGL 2.0 构建渲染管线, 创新性地实现“三通道渲染”: 几何通道处理简化模型; 数据通道可视化应力、位移等监测数据; 标注通道叠加检测标记与维修记录。三通道合成最终图像, 使复杂场景也能在普通 PC 上保持 45fps 以上帧率。

实例化渲染技术极大优化了重复构件的绘制效率。桥梁栏杆、路灯等标准化构件使用同一网格资源, 通过实例变换矩阵批量渲染。某高架桥项目应用后, Draw Call 次数从 12 万次减少至 800 次, 帧率提升 15 倍。针对钢桥螺栓群等特殊构造, 开发了几何着色器程序, 根据 LOD 动态调整螺栓头细节, 在距离超过 10 米时自动简化为几何点, 节省 70% 渲染资源<sup>[2]</sup>。

内存管理是保证长期稳定运行的基础。采用智能缓存策略: 活跃模型常驻内存; 近期使用模型保留在磁盘缓存; 历史版本归档至云端。创新的“记忆预测”算法学习用户行为模式, 预加载可能访问的模型区块, 使某运维工程师的模型切换等待时间减少 85%。针对移动设备的内存限制, 实现了亚毫米级的内存控制, 使 Pad 可流畅浏览 5 公里长的桥梁模型。

表 2: 桥梁运维 BIM 轻量化引擎关键性能指标

性能维度	技术方案	优化前	优化后	提升幅度
模型加载时间	渐进式流传输	8 分钟/GB	1 分钟/GB	87.5%
交互帧率	实例化渲染+三通道合成	5-7fps	45-60fps	8 倍
多用户并发	微服务+服务网格	50 用户	500 用户	10 倍
移动端适配	自适应 LOD+预加载	不可用	30fps	稳定
历史版本查询	列式存储+时空索引	分钟级	秒级	90%

## 4 工程应用案例分析: 大跨径斜拉桥数字运维系统

重庆南纪门长江轨道专用桥位于轨道交通十号线二期线路的南滨路站~七星岗站区间, 现有石板坡长江大桥下游约 450m, 全桥长约 1225 米。主桥为五跨高低塔双索面斜拉桥, 跨径布置为 34.5+180.5+480+215.5+94.5 米, 引桥为三跨等截面连续梁桥, 跨径布置为 3×70 米。南纪门长江轨道专用桥, 连接渝中区与南岸区, 是重庆轨道交通十号线二期线路的关键控制工程, 其运维面临监测数据孤立与模型应用困难双重挑战。项目组构建了基于轻量化 BIM 的数字孪生平台, 核心技术包括: 将 68GB 完整模型

轻量化至 4.3GB, 保留所有关键细节; 开发索力专用压缩算法, 在减少数据量的同时保持钢丝束微观特征; 建立“事件触发”加载机制, 当传感器报警时自动聚焦相关部位并加载高精度模型。

系统实施后, 运维人员可通过统一界面查看: 某拉索的实时振动数据、历年检测发现的 PE 护套破损情况、最近三次张紧记录等完整信息。平台整合了 76 个光纤传感器与 8 个摄像头的的数据, 实现了异常识别自动化——当某根拉索的振动频率偏离正常模式时, 系统自动标记并关联历史相似案例, 推荐处理建议。

该案例的创新点在于实现了轻量化 BIM 与光纤监测

的深度融合。传统点式传感器难以捕捉长索的局部损伤，而分布式光纤数据量极大（每秒数万采样点）。平台开发了专用流处理引擎，实时压缩光纤数据并映射到轻量化模

型，使温度与应变异常可视化，辅助定位了3处人工巡检难以发现的早期损伤。据统计，该系统使斜拉索检测效率提升54%，维护成本降低约150万元/年。

表3: 斜拉桥数字孪生系统关键运维指标对比

性能指标	传统运维	轻量化 BIM 运维	提升效果
异常识别时间	7-15 天	实时-2 小时	99%
检测覆盖率	60%-70%	95%+	35%
决策支持信息	分散报告	集成可视化	-
应急响应速度	4-8 小时	30 分钟内	87.5%
年度维护成本	650 万元	530 万元	18.5%

## 5 未来发展趋势与研究展望

桥梁 BIM 轻量化技术在智慧运维领域的应用正处于快速发展期，随着人工智能、边缘计算等新兴技术的不断成熟，其功能边界与应用场景将持续扩展。本节将深入探讨技术发展趋势、面临的挑战与可能的解决方案，为学术界与工程界的后续研究提供方向性参考。

### 5.1 人工智能与轻量化的深度融合

下一代轻量化技术将深度整合机器学习算法，实现从“规则驱动”到“数据驱动”的范式转变。生成式对抗网络（GAN）在模型简化方面展现出巨大潜力——训练集包含数万组桥梁构件“原始-简化”样本对，生成器网络学习保持关键特征的简化表示，判别器评估简化质量。初步试验显示，AI 简化比传统算法在相同压缩率下几何保真度提高15%-20%，特别适用于钢桥复杂节点的简化。

强化学习将优化轻量化流程本身。构建包含模型复杂度、信息完整性、渲染性能等多目标的奖励函数，智能体通过与环境交互学习最优轻量化策略。某实验平台测试表明，经过训练的 AI 代理能在30秒内生成接近专家水平的轻量化方案，效率提升显著。未来的自学习轻量化系统将能根据用户反馈持续改进，逐步适应不同桥梁类型与运维场景的特殊需求。

知识图谱技术将提升轻量化模型的语义价值。构建桥梁运维知识图谱，将构件、病害、维修措施等概念实体化，与轻量化模型中的元素关联。当工程师查看某处裂缝时，系统不仅展示几何信息，还能推荐相关案例、规范条文甚至处理方案，实现从“几何轻量化”到“知识轻量化”的跃升。这种智能增强将大幅降低对专业经验的依赖，使初

级技术人员也能做出专家级判断<sup>[4]</sup>。

### 5.2 数字孪生与物联网的深度融合

BIM 轻量化模型将发展为真正的运维数字孪生，与物联网数据深度耦合。创新方向包括：开发流式轻量化算法，实时处理无人机巡检获取的密集点云；构建自适应 LOD 系统，根据传感器告警自动聚焦相关区域；实现预测性维护，基于历史数据与物理模型预判潜在病害。

多物理场可视化将提升决策支持能力。轻量化引擎不仅展示几何模型，还需集成结构力学场（应力、应变）、环境场（温度、湿度）等多维数据，通过体绘制、粒子系统等实现直观表达。某实验系统已能可视化风-桥耦合振动，帮助工程师理解复杂气动现象<sup>[1]</sup>。

数字孪生的实时仿真功能将增强应急响应能力。当监测到异常时，轻量化平台能快速加载相应部位的精细模型，运行简化有限元分析，预测破坏路径与应急措施效果。这种“仿真即服务”的模式需要突破轻量化模型与力学计算的兼容性难题，有望在未来3-5年内实现工程应用。

### 参考文献

- [1]梁宏生, 蒋安桐, 路玉武, 刘占省, 张建江, 张安山. BIM 轻量化技术在京杭运河枢纽港扩容提升工程绿色智能运维管理平台开发中的应用[J]. 建筑技术, 2020
- [2]夏乃兵, BIM 技术在建筑智能化系统运维管理中的融合应用[J]. 移动信息, 2021
- [3]曾琼瑶, 郑凯锋, 潘伟. BIM 在桥梁工程中的应用研究现状及展望[J]. 建筑与环境, 2024, 8(18): 1-9.
- [4]刘天成, 耿方方, 宋福春. 基于 BIM 的桥梁健康监测系统研究进展[J]. 土木工程学报, 2024, 57(3): 1-12.