

BIM 技术在长距浆体管道输送工程中的应用

张明航*

中煤科工集团武汉设计研究院有限公司，湖北武汉，中国

*通讯作者

【摘要】长距离浆体管道输送工程因涉及多专业协同、复杂地形穿越及高精度施工要求，传统设计与管理模式面临协同壁垒、碰撞风险、结构安全及施工管控等多重挑战。本文以典型长距离浆体管道项目为研究对象，系统阐述 BIM 技术在工程中的全流程应用体系：通过 Autodesk BIM 360 构建全专业协同平台，结合 Revit、Bentley STAAD.Pro 等软件实现建筑结构、工艺管道及线路的高精度建模；开展岩土稳定性与管道应力振动分析；进行碰撞检测与施工模拟；依托倾斜摄影与长输管道软件实现复杂地形地质的三维重构与数据集成。实践表明，该技术体系使设计、施工质量与效率显著提升，该案例的实施为同类工程的 BIM 技术落地提供了参考，填补了浆体长输管道三维正向设计的行业空白。

【关键词】BIM 技术；浆体管道；协同设计；施工模拟；数字孪生

【基金项目】中煤科工集团武汉设计研究院有限公司自主研发项目“数字化浆体管道关键技术与 MES 平台开发”（编号：ZZYF202411）

1. 引言

1.1 研究背景与工程意义

长距离浆体管道输送技术作为煤炭、矿业、环保等领域的关键物料转运方式，具有运输效率高、能耗低、环境影响小等优势[1]，已成为我国资源跨区域调配的核心支撑技术之一。如陕煤集团神渭管道输煤项目全长 727 公里，实现千万吨级煤浆的长距离输送，其技术突破标志着我国管道输煤产业化进入国际领先行列。然而，此类工程普遍面临极端复杂的实施条件[2]：线路常穿越山川、河流等复杂地形，需应对裂隙发育、软弱夹层等不良地质；涉及建筑、结构、工艺、岩土等多个专业，设计协同难度大；管道系统承受高压、强磨蚀，钢结构受力与振动控制要求严苛。

随着国家《2016-2020 年建筑业信息化发展纲要》明确提出增强 BIM 技术集成应用能力，BIM 技术已从建筑领域逐步渗透至工业管道工程，成为破解复杂工程难题的核心技术手段。与传统二维设计模式相比，BIM 技术通过构建三维信息模型，实现设计、分析、施工、运维的全生命周期数据贯通[3]。如在中冶南方越南和发冶金管网等项目中，BIM 技术已展现出破解数据壁垒、优化全局规划、提升设计精度的显著价值。但在浆体管道工程领域，由于地形地质复杂度高、管线系统专业性强，BIM 技术的应用仍缺乏成

熟体系，尤其在三维正向设计与大场景数据集成方面存在行业空白。因此，系统研究 BIM 技术在长距离浆体管道工程中的应用路径，对推动行业技术升级具有重要现实意义。

1.2 国内外研究现状

国际上，BIM 技术在长输管道工程中的应用起步较早，主要聚焦于线路优化与风险管控。美国 Bechtel 公司在跨州油气管道项目中，通过 Bentley 系列软件构建三维线路模型，结合地理信息系统（GIS）实现地形与管道的协同设计[4]。欧洲管道研究组织（EPRG）开发的管道应力分析与 BIM 集成系统，有效解决了高压管道振动控制难题[5]。国内方面，BIM 技术在冶金、石化、建筑等工业管道领域已有广泛应用[6-8]。河北生特瑞工程设计有限公司在美乐家中国总部园区设计-采购-施工（EPC）项目中[9]，采用多专业 BIM 正向设计，借助 BIM 主流软件（Revit、Navisworks 等）实现场地、建筑、结构、机电模型的一体化集成。减少设计变更 30% 以上，大大提升了设计及施工效率；河北建工通过“BIM 模型转化-工厂化预制-数字化跟踪”模式[10]，实现管道施工效率提升 30% 的成效。

但现有研究仍存在明显局限：多数应用集中于厂区内管网，针对长距离野外浆体管道的研究较少；对复杂地形地质与管道设计

的耦合分析不足；缺乏覆盖“建模-分析-施工-交付”的全流程技术体系。基于此，本文结合具体工程实践，重点探索 BIM 技术在多专业协同、复杂地形建模、结构应力分析及施工模拟中的集成应用方法。

1.3 研究内容与技术路线

本文以某长距离浆体管道输送项目为依托，重点研究以下内容：①工程核心难点识别与 BIM 技术需求分析；②BIM 软硬件平台构建与建模标准制定；③针对协同设计、碰撞检测、应力振动控制、施工模拟等难点的 BIM 技术解决方案；④应用成效量化评估与实践经验总结。

技术路线遵循“问题导向-方案构建-实践验证-总结展望”的逻辑：首先梳理工程各阶段核心痛点；其次构建“协同平台+专业软件+硬件支撑”的 BIM 应用体系；再通过分专业、分场景的技术落地实现难点破解；最后通过数据对比与案例分析验证成效，提炼技术应用关键要点。

2.长距离浆体管道输送工程核心难点分析

2.1 设计阶段协同与精度难题

长距离浆体管道工程涉及建筑、结构、工艺、岩土、线路等多个专业，传统设计模式下各专业采用独立软件开展工作，数据传递依赖二维图纸，易形成“信息孤岛”。某项目初期因缺乏统一协同机制，出现结构支架与工艺管道冲突、地质参数与线路设计脱节等问题，导致设计变更频繁。同时，浓缩池等大型单体结构配筋复杂，主输送管道需满足高压、强耐磨要求，二维设计难以精准表达空间关系，为后续施工埋下隐患。

2.2 管线与结构碰撞风险突出

工程包含工艺管道、给排水、电气等多类管线，且需穿越栈桥、管廊等钢结构设施。传统设计中，各专业管线布局依赖人工协调，易出现管线交叉重叠、与结构梁冲突、净空不足等问题。统计显示，未采用 BIM 技术的同类项目中，管线碰撞导致的施工返工率高达 35%，严重影响工期与成本控制。

2.3 结构受力与管道振动控制挑战

管道系统运行时承受内压、介质冲击及地形沉降等多重荷载，钢结构栈桥需支撑数百吨管道重量，受力状态复杂。主泵房隔膜泵附近高压管线因介质脉动易产生振动，若与管道固有频率共振，可能导致焊缝开裂、支架失效等安全事故。传统计算方法难以精

准模拟三维空间内的应力分布与振动响应，支架选型与管线走向设计缺乏科学数据支撑。

2.4 施工与线路实施难题

工程线路穿越“三高”环境：高复杂地形、高复杂地质和高复杂社会环境。传统地形图建模精度不足，难以满足管线定位需求；施工阶段需完成大型设备吊装、混凝土浇筑等复杂工序，传统方案设计难以预判施工冲突与安全风险。

3.BIM 技术应用体系构建

3.1 软硬件平台选型与搭建

3.1.1 软件系统集成

根据工程各阶段需求，构建“建模-分析-协同-交付”全链条软件体系（见表 1）。

其中，PDSOFT 作为流程工厂专用设计软件，可实现管道参数化建模，其与 CAESAR II 的无缝接口，解决了传统设计中建模与应力分析数据不同步的问题；FLAC3D 采用显式有限差分法，能精准模拟山体定向钻穿越中的岩土体变形规律，为线路设计提供地质依据。

表 1.全链条软件体系表

应用场景	核心软件	功能作用
建筑结构建模	Revit、Bentley STAAD.Pro	高精度结构建模与受力分析
工艺管道建模	PDSOFT	流程工厂管道建模，与 CAESAR II 接口联动
线路与地质建模	Bentley、 FLAC3D	线路建模与岩土稳定性分析
全专业协同	Autodesk BIM 360	多专业数据共享与冲突协同
碰撞检测	Navisworks	管线与结构碰撞自动识别
施工模拟	Lumion	施工工序动画与吊装路径优化
可视化交付	广联达鸿城 InfraFuser	影视级渲染与多端模型展示

3.1.2 硬件设施支撑

为满足高体量模型处理需求，配置专业化硬件系统：

(1) 高性能图形工作站：搭载英特尔至强 W-3375 处理器、NVIDIA RTX A5000 显卡（24GB 显存）、128GB DDR4 内存及 16TB NVMe 固态硬盘，单台设备可支持 10GB 级模型的实时渲染与编辑。

(2) 服务器集群：部署 2 台华为 RH5885H V5 服务器，采用 RAID10 磁盘阵列，存储带宽达 2GB/s，内置定时备份系统，确保项目数据的安全存储。

(3) 倾斜摄影设备: 采用大疆 P1 多镜头相机, 配备 5 个 2400 万像素镜头, 实现 0.05m 分辨率的地形影像采集, 通过多视影像匹配技术生成高密度点云模型。

3.2 建模标准与协同机制建立

3.2.1 统一建模标准

参照《建筑信息模型应用统一标准》(GB/T 51212) 与《工业金属管道工程施工规范》(GB 50235) [11-12], 制定项目专属建模标准:

(1) 精度等级: 建筑结构模型精度达 LOD300, 管道模型达 LOD350, 包含材质、规格、压力等级等全属性信息。

(2) 命名规则: 采用“专业代码-构件类型-位置编号”三段式命名。

(3) 图层划分: 按“专业-系统-构件”三级划分图层, 共设置建筑、结构、工艺等 8 大类 32 个子图层。

3.2.2 协同工作流程

基于 Autodesk BIM 360 构建“云端-本地”协同架构:

(1) 数据上传: 各专业设计成果实时同步至云端服务器, 形成中央模型库。

(2) 权限管理: 按“专业负责人-设计人员-审核人员”设置三级权限, 确保数据安全。

(3) 冲突预警: 系统每日自动检测跨专业模型冲突, 通过邮件推送预警信息。

(4) 版本控制: 采用“主版本+次版本”编号规则, 保留历史修改记录, 支持版本回溯。

该机制实现了 20 余名设计人员的异地协同, 即使在跨区域办公场景下, 仍能保证数据传递的实时性与准确性。

4. BIM 技术针对工程难点的解决方案

4.1 多专业协同设计优化

针对“各专业协同困难”问题, 通过 Autodesk BIM 360 建立一体化协同平台:

(1) 数据共享: 结构专业将栈桥模型上传至平台后, 工艺专业可直接调取模型进行管道布置, 避免尺寸偏差; 岩土专业的地质勘察数据通过 BIM 模型关联至线路设计, 实现地形与管线的精准匹配。

(2) 实时沟通: 平台内置批注功能, 设计人员可在模型上直接标记问题, 如“此处支架与 DN200 管道冲突”, 相关专业实时接收并响应, 问题解决周期从传统的 3 天缩短至 4 小时。

(3) 标准落地: 将建模标准嵌入平台模板, 当构件命名或精度不符合要求时, 系统自动提示修正, 确保模型质量一致性。

实践表明, 该协同模式使设计冲突数量较传统方法减少 60% 以上, 设计变更率降低 40%, 显著提升设计效率。

4.2 管线与结构碰撞检测

采用“双软件联动”模式实现碰撞风险全维度管控:

(1) 初步检测: 各专业完成建模后, 通过 Autodesk BIM 360 进行跨专业模型整合, 自动识别明显的管线交叉、结构干涉问题, 如浓缩池内预埋管与钢筋骨架的冲突。

(2) 深度检测: 将整合模型导入 Navisworks, 设置碰撞检测规则(如管道间距 $\geq 50\text{mm}$ 、管线与结构净空 $\geq 300\text{mm}$), 软件生成可视化碰撞报告, 标注冲突位置、类型及涉及构件。

(3) 专项检测: 针对主泵输工艺系统, 采用 PDSOFT 单独建模并开展碰撞检查, 结合工艺参数优化管道走向, 解决了隔膜泵出口管线与阀门组的空间冲突问题。

设计人员根据碰撞报告制定优化方案, 如将隔膜泵出口管汇合处通过调整、增设管道支吊架等改变管线标高, 最终消除全部碰撞风险, 使施工阶段管线碰撞返工率降低 90% 以上。

4.3 结构受力与管道振动控制

4.3.1 钢结构受力分析

采用 Bentley STAAD. Pro 对栈桥等关键结构进行精细化分析:

(1) 荷载模拟: 输入管道重量、介质压力、风荷载及地震作用等参数, 建立三维力学模型。

(2) 计算分析: 软件自动生成应力云图与位移曲线, 识别出栈桥跨中部位应力集中问题。

(3) 设计优化: 如将原 H 型钢截面由 H300 \times 150 调整为 H350 \times 175, 优化后跨中应力从 200MPa 降至 155MPa, 满足规范要求。

4.3.2 管道振动与应力控制

通过 PDSOFT 与 CAESAR II 的接口联动, 实现管道应力与振动一体化分析:

(1) 应力计算: 将 PDSOFT 建立的管道模型直接导入 CAESAR II, 计算得出一次应力和二次应力的最大值, 均在设计管材的许用应力范围内。

(2) 振动分析：计算管道系统的固有频率为，发现隔膜泵运行频率接近共振区间，通过调整出口管线走向，将固有频率进行优化，避开共振风险。

(3) 支架设计：根据应力分析结果确定支架间距，并在泵出入口及弯头附近等关键处选用柔性卡箍吸收管道热位移，确保系统稳定运行。

该方案成功解决了主泵房高压管线的振动问题，运行期间管道振动幅值控制在0.5mm以内。

4.4 复杂地形与施工过程模拟

4.4.1 线路三维建模与地质分析

针对“三高”线路难点，构建“倾斜摄影+三维地质+线路设计”一体化模型：

(1) 地形重构：采用无人机倾斜摄影采集线路影像，生成密度达500点/m²的点云模型，转换为OSGB格式的三维地形模型，精度达0.1m，较传统地形图提升3倍。

(2) 地质建模：根据钻孔数据，利用长输管道软件建立三维地质模型，清晰呈现裂隙带、软弱夹层的空间分布，为管线路由选择提供依据。

(3) 线路优化：在Bentley软件中将管道模型与地形、地质模型融合，优化穿越山体的定向钻曲线，将原设计的穿越长度缩短了150m，避开了2处不良地质区。

4.4.2 施工过程可视化模拟

运用Lumion开展施工全流程动画模拟：

(1) 工序模拟：对浓缩池混凝土浇筑进行分仓模拟，发现原方案存在浇筑顺序不合理导致的温度裂缝风险，调整为“从中间向两侧分层浇筑”方案。

(2) 设备吊装：模拟隔膜泵（重量约85吨）的吊装路径，优化起重机站位与吊装半径，避免与周边构筑物碰撞。

(3) 进度管控：将施工进度计划与动画结合，生成4D施工模拟，直观展示各阶段施工内容，为工期管控提供参考。

通过施工模拟提前发现8处潜在问题，制定针对性解决方案，确保施工顺利进行。

4.5 多源数据集成与交付

针对模型数据量大、类型复杂的问题，采用长输管道软件研发的数模集成功能：

(1) 轻量化处理：对倾斜摄影、三维地质等大尺寸模型进行压缩，大幅减少数据总量，支持网页端与移动端流畅浏览。

(2) 数据关联：建立管道构件与地质参

数、施工记录的关联关系，点击模型即可查看管材规格、焊接检测报告等信息。

(3) 自动出图：软件自动提取三维模型信息，生成线路平面图、纵断面图及工程量清单，出图效率较传统方法提升70%。

最终形成包含各类模型的数字化交付成果，为后续运维提供完整数据支撑。

5. BIM技术应用成效

通过与传统设计施工模式对比，BIM技术的应用成效显著（见表2）：

表2. BIM应用成效量化表

评价指标	传统模式	BIM技术模式	提升幅度
设计冲突数量	85处	34处	减少60%
设计变更率	15%	9%	降低40%
管线碰撞返工率	35%	3%	降低91%
结构计算精度	偏差±15%	偏差±5%	提升67%
施工问题发现时效	施工阶段	设计阶段	提前100%
工程量统计误差	±8%	±2%	降低75%

通过BIM技术实现了多项管理提升，施工工期较计划缩短30%，降低了施工成本；数字化交付成果为运维阶段的故障定位、设备更换提供了精准数据，预计可延长管道使用寿命5年以上。

6. 结语与展望

6.1 研究结论

本文通过长距离浆体管道输送工程的BIM技术应用实践，得出以下结论：

(1) 构建的“协同平台+专业软件+硬件支撑”BIM应用体系，可有效破解长距离浆体管道工程的协同设计、碰撞检测、应力控制、施工模拟等核心难点。

(2) 采用Autodesk BIM 360实现全专业数据共享，结合Navisworks与PDSOFT的碰撞检测功能，可大幅降低设计冲突与施工返工率。

(3) 通过Bentley STAAD. Pro与CAESAR II的联动分析，能够精准把控钢结构受力与管道振动风险，保障工程结构安全。

(4) 倾斜摄影与长输管道软件的结合应用，为复杂地形地质条件下的线路设计与数据集成提供了有效解决方案。

该技术体系使项目设计效率、施工质量与经济效益显著提升，成功填补了浆体长输管道三维正向设计的行业空白，为同类工程提供了可复制的标杆范例。

6.2 未来展望

随着数字化技术的持续发展，长距离浆体管道工程的 BIM 应用将向更深层次迈进：

(1) 智能化设计升级：融合人工智能技术，开发管道路由自动优化算法，实现基于地形、地质、成本的多目标优化设计。

(2) 数字孪生深度应用：构建与物理管道同步运行的数字孪生体，整合传感器实时监测数据，实现管道泄漏、振动异常的提前预警与智能诊断。

(3) 国产软件自主创新：目前核心分析软件仍以国外产品为主，未来需加强国产 BIM 软件的研发，突破应力分析、地质建模等关键技术瓶颈。

(4) 全生命周期管理：拓展 BIM 技术在运维阶段的应用，实现设备维护计划自动生成、维修过程可视化指导，构建“设计-施工-运维”全链条数字化管理体系。

长距离浆体管道工程的数字化转型是行业发展的必然趋势，BIM 技术作为核心支撑手段，其应用深度与广度将持续拓展，为我国资源输送工程的安全高效建设提供更强有力的技术保障！

参考文献

[1]李培凤, 杨利国.长距离浆体输送管道安全运行操作控制实践与应用[J].矿业工程, 2023, 21(01): 21-24.
[2]于新胜, 陈益滨.管道输煤技术应用现状及展望[J].煤炭工程, 2020, 52(05): 1-4.

[3]戈旭.基于 BIM 的长输埋地管道健康监测可视化研究[D].大连理工大学硕士学位论文, 2019.
[4]张祎彤.加拿大与美国化石能源合作的复杂性[D].北京外国语大学硕士学位论文, 2025.
[5]谢丽华, 孙志强, 李鹤林.EPRG 三十年管线研究成果总览[J].国外油田工程, 2005, (08): 33-37.
[6]张鹏, 彭培.BIM 技术在油气管道工程建设阶段应用的研究[J].制造业自动化, 2021, 43(04): 63-68.
[7]陈荣香, 冉盈, 唐晖.BIM 技术在某大型新建选矿厂管道设计中的应用[J].工程建设, 2021, 53(07): 39-43.
[8]张风桃, 李志军.BIM 技术在城镇燃气管道工程中的应用[J].工程建设与设计, 2021, (06): 95-97.
[9]王玲.BIM 技术在 EPC 工业建筑中的应用实践[J].智能城市, 2025, (09): 115-118.
[10]尚增军, 刘雪童.基于 BIM 模型的管道工厂化预制[J].安装, 2018, (07): 18-19+22.
[11]李永宏, 刘才, 胡忆洵.《工业金属管道工程施工规范》概要[J].吉林化工学院学报, 2013, 30(03): 35-41.
[12]黄强, 程志军, 叶凌.国标《建筑信息模型应用统一标准》解读[J].建筑, 2017, (09): 18-20.