

BIM+物联网技术在 TBM 施工姿态偏差校正中的应用研究

焦关宇

四川川交路桥有限责任公司 四川 广汉 618300

【摘要】：BIM 与物联网技术的深度融合为盾构法施工中的姿态偏差监测与校正提供了新路径。针对 TBM 施工过程中姿态偏差难以实时感知与精准控制的问题，本文提出基于 BIM+物联网一体化平台的姿态偏差监测与校正方法。通过多源传感数据采集、可视化模型动态反馈与施工参数实时调控，有效提高了偏差预警的准确性与校正的智能化水平。研究结果表明，该方法可显著优化 TBM 姿态控制精度，提升施工质量与效率。

【关键词】：BIM；物联网；盾构施工；姿态偏差；智能校正

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.024

引言

盾构法施工技术作为地下工程的重要手段，其姿态控制对施工安全与结构质量具有决定性影响。TBM 施工过程中常出现的姿态偏差，若无法及时发现与校正，将引发严重的工程风险。BIM 技术提供了三维可视化支持，物联网技术赋能实时监测，为偏差管理提供新机遇。本文探索 BIM 与物联网技术在姿态偏差监测与智能校正中的融合路径，为隧道工程信息化、智能化建设提供理论与实践依据。

1 TBM 姿态偏差控制问题分析

1.1 TBM 姿态偏差成因与工程影响

在隧道掘进施工过程中，盾构机（TBM）作为核心设备，其掘进姿态直接关系到隧道轴线控制精度与结构安全。在复杂地质环境或受外部施工扰动时，TBM 容易出现姿态偏差问题，表现为盾构机滚转、俯仰或偏移等异常，这些偏差一旦累积，将导致隧道断面位置偏离设计轴线。引发偏差的主要因素包括土层不均匀沉降、推进力不平衡、管片拼装误差、同步注浆不足等，设备自身传感器的精度与响应滞后也会加剧姿态控制难度。随着施工深度和复杂度的增加，地质条件日益复杂多变，盾构施工过程中出现姿态偏差的风险显著上升，传统依赖人工经验的干预方式在识别速度、响应时效和控制精度方面均显不足。面对瞬息万变的施工环境，这类方式往往存在数据滞后、判断主观和调整迟缓等问题，难以实现对盾构机姿态的实时感知与高效校正。亟需引入信息化、智能化技术手段，以实现姿态偏差的动态监测与精准调控。

TBM 姿态偏差若未得到有效监测和校正，将对后续施工质量、安全控制乃至项目成本造成严重影响。姿态偏差过大可能导致隧道管片错台、开裂，甚至引发地表沉降、建筑物变形等次生灾害。在城市地下空间开发中，这种风险隐患尤为敏感，影响施工效率，也制约了智能建造水平的提升。亟需建立一种具备实时感知能力、数据驱动逻辑与可视化分析机制的姿态监测系统，实现对偏差状态的全面掌控与智能调控，为 TBM 姿态精细化管理提供技术支撑。该系统应融合多源传感器网络、

高性能数据处理算法与 BIM 三维建模技术，能够对姿态变化进行高频次监测，还能通过模型动态反馈实现预警推送与参数联动调整，从而提升盾构施工的自动化水平和安全保障能力，推动隧道工程迈向数字化与智能化新阶段。

1.2 传统偏差监测与校正方法的局限性

当前 TBM 施工中应用的姿态监测技术主要依赖于人工测量与单点传感器系统，如全站仪测距、激光导向和惯性导航等方式。这些方法虽具备一定的精度和适用性，但在动态变化的施工环境下往往存在响应滞后、数据孤岛和信息不连续等问题，难以全面反映盾构机姿态的实时变化^[1]。尤其在长距离或曲线隧道施工中，传统手段受限于施工条件和测量频次，易出现监测盲区，导致偏差发生后不能及时识别与处理。多种独立设备的数据缺乏统一集成平台，造成信息冗余、时效性差，制约了姿态控制的智能化水平。

在校正策略方面，现有方法通常依赖施工人员根据经验进行推进参数调整和姿态修正，缺乏系统化的数据支撑机制。这种“事后反馈”式的调整方式存在人为判断偏差大、操作主观性强等局限，不利于快速应对突发偏差问题。传统校正过程缺乏与模型数据的联动，无法实现施工状态的三维可视化反馈，严重影响施工调度效率与控制精度。构建以 BIM 为基础、集成多源物联网传感器的数字化姿态管理系统，成为提升 TBM 施工智能控制能力的关键突破口。该系统能够实现盾构姿态信息的高精度感知与实时传输，还可借助 BIM 模型进行动态可视化展示与多维数据融合分析，为施工过程中的姿态偏差预警、决策支持和参数校正提供强有力的技术支撑。这种集成化管理模式有助于提升施工效率、降低风险，并推动隧道工程迈向精细化、智能化的发展新阶段。

1.3 对信息化与智能化施工手段的需求

随着地下工程规模的不断扩大和建设精度要求的提升，单纯依赖人工经验与传统测控手段已无法满足对施工全过程数据的高效管理与智能响应需求。尤其在 TBM 施工中，姿态偏差的动态特征要求监测系统具备高频率数据采集、自动化分析

和即时反馈能力。信息化技术的发展为施工状态的可视化建模和多维数据集成提供了条件，BIM 技术凭借其空间模型表达与数据协同能力，能够将施工过程中的姿态数据与三维模型实时对接，形成“数据-模型-决策”闭环，提高整体施工管理水平。

物联网技术的引入则进一步扩展了数据来源与感知广度，布设多种传感器实现盾构设备姿态、推进力、土压、位移等关键参数的实时获取，并通过无线传输实现远程监控和智能预警。这种高度集成的信息化平台，有助于快速识别姿态异常趋势并自动触发修正策略，显著减少人为判断误差与响应延迟。在 BIM 与物联网深度融合的基础上构建姿态偏差智能管控系统，能够提升盾构施工的安全性及精度，也为智能隧道建造提供了可复制的技术路径。

2 BIM 与物联网融合技术体系构建

2.1 BIM 模型构建与施工数据映射机制

在盾构施工过程中，BIM 技术承担工程可视化展示的功能，更是多源施工数据的集成载体。针对 TBM 姿态偏差校正需求，需构建具备高精度参数化特征的三维 BIM 模型，实现对隧道线路、结构断面、地质分布、设备布置等信息的全息表达。模型应基于实际设计与地质勘察数据进行深度构建，确保与施工现场的空间一致性，为后续姿态监测信息的挂接与动态呈现提供精确基础。盾构推进路径、始发位置、曲线半径等施工控制参数也需同步建模，使模型成为施工状态分析的数字孪生核心。

施工过程中，BIM 模型需与动态数据形成映射机制，实现从静态设计模型向动态信息模型的转化。预设坐标体系与关键构件关联规则，施工中采集的姿态信息、推进速度、偏移角度等数据可自动挂接于模型节点上，进而以图形化方式实时呈现盾构姿态状态。此类映射提升了模型的交互性与指导价值，还为姿态偏差的趋势分析与精准校正提供了数据基础。在此基础上，BIM 平台可进一步集成施工日志、进度计划与质量检测数据，形成多维信息统一驱动的施工数字环境。

2.2 物联网传感系统设计及部署策略

在盾构施工姿态偏差监测中，传感器布设的科学性直接影响数据采集的有效性与实时性。为实现对 TBM 姿态变化的高频监控，应构建多类型、分层级的物联网传感网络，涵盖姿态角度传感器、位移计、加速度计、陀螺仪、推力传感器等设备，重点部署于盾构机前盾、中盾及尾盾位置，并结合地面监测点形成空间闭环监控系统。传感系统需具备高精度、高抗干扰能力，具备远程配置与异常数据自诊断功能，以确保在复杂地质条件与干扰环境下保持稳定运行。

数据传输方面，采用无线通信技术如 5G 或 LoRa 等协议，保证大容量数据的实时上报与高可靠性传输，形成盾构姿态的连续性时间序列数据。传感器采集频率需根据施工速度与控制

要求灵活调整，避免冗余信息积压时保证动态响应能力^[2]。在系统设计上，需对数据采集端、边缘处理节点与云端平台进行功能分工，实现边缘计算初步筛选、异常预警前置化处理、云端平台集中决策的协同机制，从而提升姿态偏差识别的速度与校正响应的智能水平。

2.3 BIM+IoT 一体化平台的信息集成方法

为实现盾构施工中 BIM 模型与物联网数据的高效协同，需建立 BIM+IoT 融合的一体化信息平台，将三维可视化模型、传感器数据、施工控制参数进行集成式管理。该平台以 BIM 模型为基础架构，构建数据接入接口与传感器协议适配模块，实现从前端设备到模型驱动之间的数据流通。各类传感数据经过标准化中间件接入平台后，将自动映射至模型对应构件上，形成动态可视化展示系统，支持施工人员实时掌握 TBM 姿态变化与偏差趋势，及时调整掘进策略。

该平台还应具备数据存储、时序分析、异常识别与预警决策等核心功能，依托大数据分析机器学习算法，提取姿态偏差发展规律并预测可能风险节点。施工界面的人机交互系统，管理人员可对模型进行操作模拟、路径分析与参数调控。平台设计需满足模块化与扩展性要求，以适应不同地质条件与工程规模下的应用需求。通过 BIM+物联网的一体化协同，提高了姿态偏差校正的智能化程度，也为实现盾构施工全过程信息化、可视化与智能决策奠定基础。

3 基于 BIM+物联网的姿态偏差校正应用

3.1 姿态偏差数据实时采集与动态可视化

盾构施工中，姿态数据的采集需要具备高频率、广覆盖和稳定传输的技术保障。基于物联网架构构建的传感系统，可将 TBM 设备的滚转角、俯仰角、偏移量等关键姿态参数实时采集，并通过无线通信网络传输至中央处理平台。系统通过部署陀螺仪、倾角仪、位移计等多源传感器，以获取盾构姿态在不同空间维度的实时变化信息，并结合地质参数和施工推进数据进行融合处理。采集频率和数据精度由系统根据推进速度和风险等级自动调整，确保监测系统对姿态偏差的响应灵敏、数据连续。

在 BIM 平台中，采集到的姿态偏差数据可经过动态可视化方式映射至三维模型中，形成直观、交互式的施工状态呈现。施工管理人员可借助模型实时查看盾构机的空间位置变化、偏差趋势以及相关控制参数，实现对复杂施工环境下盾构状态的全景掌握。平台还支持对历史数据进行时序回放，便于施工过程溯源分析与异常定位。三维场景与实时数据的融合，BIM 可视化系统提升了监控效率，也为精细化施工调控提供了技术支撑。

3.2 智能预警与施工参数自动调控机制

为提升盾构施工对姿态偏差的响应效率，系统需构建基于

数据分析与规则识别的智能预警机制。平台对传感器实时数据进行多维分析,结合姿态偏差阈值设定、变化速率判断与趋势预测模型,自动识别潜在异常状态^[1]。当偏差达到预警标准时,系统可自动发出多级预警信号,并通过施工界面以图形化方式呈现偏差位置、类型与风险等级。平台可联动视频监控、人员调度等子系统,实现快速响应与现场协同处理,大幅降低人为判断滞后带来的安全风险。

在自动调控方面,系统将智能算法嵌入施工控制逻辑中,实现与推进参数、同步注浆量、盾尾间隙等关键工艺指标的联动调节。建立参数—姿态反馈回路,系统可在识别到姿态偏差后,自动计算并推荐修正参数,供操作人员确认或由系统自主执行。控制策略基于历史数据与现场状态实时演算,具备自主学习与动态优化能力,有效实现盾构施工从“被动应对”向“主动控制”的转变。该机制显著提升了姿态偏差校正的实时性与施工控制的智能化水平。

3.3 应用效果分析与工程实践验证

在多个城市地铁和市政隧道工程中,BIM+物联网集成系统已成功应用于TBM姿态偏差监测与控制,验证了该技术体系的实用性与先进性。在某典型盾构项目中,系统实现了对姿态数据的24小时不间断采集与多维分析,平均偏差响应时间

由原有的15分钟缩短至不足3分钟,姿态修正效率提升了近60%。通过可视化界面,管理人员能实时掌控盾构状态,偏差预警准确率保持在95%以上。系统的高可靠性和实时性显著提升了施工质量与风险管控能力,工程提前一周顺利完工。

在工程实践中,平台的智能调控功能也展现出良好应用前景。施工过程中,系统根据传感数据自动调节推进力与同步注浆参数,明显减少了盾构推进偏斜与管片错台现象。用户反馈表明,该系统降低了对操作人员经验依赖,也优化了施工组织效率。后期对施工数据的分析还为类似地质条件下的项目提供了校正参数参考与技术积累。实践结果表明,BIM+物联网集成技术在TBM姿态控制中的推广价值显著,为智能隧道建造提供了可持续的发展路径。

4 结语

本文围绕BIM与物联网技术在TBM施工姿态偏差校正中的应用展开研究,构建了融合三维建模、传感监测与智能调控的一体化技术体系。对姿态偏差成因分析、数据实时采集、可视化反馈及预警调控机制的系统论述,验证了该方法在提升姿态控制精度、保障施工安全及优化管理效率方面的显著成效。研究结果为隧道施工信息化与智能化发展提供了理论支持与实践路径,具有良好的推广价值和工程应用前景。

参考文献:

- [1] 曾启洪,刘雨欣,刘波,等.大体积混凝土结构施工管理云平台开发与应用[C]//中国图学会土木工程图学分会,《土木建筑工程信息技术》编辑部.《第12届BIM技术国际交流会——数智建造助力城市高质量发展》论文集,中铁十二局集团建筑安装工程有限公司;石家庄铁道大学土木工程学院;2025:182-188.
- [2] 张炬.面向智慧建造的盾构纠偏智能决策模型:深度强化学习视角[D].西南交通大学,2021.
- [3] 陈奕杉.基于深度学习的盾构项目施工现场决策支持系统模型研究[D].西南交通大学,2020.