

基于数字孪生的掘锚机自主导航路径规划

郭皇煌

1. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司 山西 太原 030006

2. 山西天地煤机装备有限公司 山西 太原 030006

3. 煤矿采掘机械装备国家工程实验室 山西 太原 030032

摘要：掘锚机是煤矿巷道掘进与锚护一体化施工的核心装备，其自主导航能力直接影响掘进效率与作业安全。针对井下环境复杂多变、传统路径规划方法适应性差的问题，本文提出基于数字孪生的掘锚机自主导航路径规划方法。构建掘锚机-巷道数字孪生模型，实现物理实体与虚拟模型的实时同步；设计全局-局部联动的路径规划策略，全局层规划参考路径，局部层实现动态避障；利用数字孪生体进行路径预推演与优化。研究表明，该方法可有效应对巷道动态障碍与几何约束，为掘锚机智能化导航提供技术支撑。

关键词：数字孪生；掘锚机；自主导航；路径规划

引言：煤矿智能化建设对掘进装备自主作业能力提出了更高要求。掘锚机实现了掘进与锚护一体化，但井下环境复杂多变——顶板下沉、侧帮鼓出、移动设备干扰——传统“预设轨迹+人工干预”的导航模式难以适应动态变化。数字孪生技术通过构建高保真虚拟空间映射，为掘锚机实时感知与自主决策提供了新路径。本文构建掘锚机数字孪生导航系统，研究全局-局部联动的路径规划算法，利用孪生推演优化路径方案，提升掘锚机对复杂环境的适应能力。

1 掘锚机数字孪生导航系统构建

1.1 掘锚机物理实体与感知系统

掘锚机由截割部、锚护部、行走部、装载部及液压系统构成。行走部采用履带式底盘，通过两侧履带差速实现转向，其运动学模型可简化为两轮差速模型。为实现自主导航，掘锚机配置多源感知系统：定位模块采用惯性导航与全站仪组合，提供厘米级位姿信息；环境感知模块配置激光雷达用于巷壁探测与障碍识别，双目相机用于障碍语义理解；状态监测模块采集截割机电流、油压、振动等参数。多源传感器数据经边缘计算网关预处理后，通过井下5G网络上传至孪生系统，采样频率根据数据类型动态调整，位姿数据50赫兹、激光雷达点云10赫兹、状态参数1赫兹，确保孪生模型获得丰富的实时输入。

1.2 数字孪生虚拟空间建模

数字孪生虚拟空间包含几何、物理、行为、数据四类模型。几何模型方面，掘锚机整机采用三维CAD模型，巷道环境模型基于设计参数构建。物理模型涵盖掘锚机动力学模型以及巷道环境演化模型，用于预测顶板

下沉与侧帮鼓出趋势。行为模型描述掘进作业流程及各工况下的设备控制逻辑。数据模型定义多源异构数据的标准化格式与存储方案，采用时序数据库存储实时监测数据，图数据库存储巷道拓扑关系。四类模型通过统一数据接口协同运行，以20赫兹频率同步更新，确保孪生体对物理实体的高保真表征^[1]。

1.3 虚实映射与数据交互

虚实映射的关键在于实时性、同步性与双向可控性。数据传输采用井下5G专网，实测端到端延迟满足掘锚机低速运行下的实时性要求。上行链路传输感知数据，下行链路发送规划指令与虚拟预警信息。位姿同步采用高频插值算法，将实测位姿数据与孪生模型更新频率匹配。状态参数采用变化触发上传策略，仅当变化超过阈值时上传，降低网络负载。边缘计算节点部署于掘锚机车载工控机，负责数据预处理与紧急避障；云端孪生平台负责全局路径规划与推演优化。地面监控中心通过可视化界面实时显示掘锚机位姿与规划轨迹，操作员可远程干预。

1.4 系统总体架构

系统采用四层架构设计。物理层包括掘锚机本体及各类传感器、执行机构。感知层部署于边缘计算节点，负责多源数据采集、滤波降噪及特征提取。孪生层运行于云端服务器，集成几何、物理、行为、数据四类模型，执行状态同步、环境更新、路径推演等功能。应用层面向用户提供路径规划、决策控制、人机交互三大功能模块，其中路径规划模块调用孪生层数据进行规划，决策控制模块生成速度指令下发给物理层执行。四层之间通过标准化接口通信。系统启动时加载巷道先验模型

与掘锚机参数,随后进入运行循环:感知→孪生更新→规划→决策→执行。

2 掘进巷道环境建模与动态更新

2.1 静态环境模型

静态环境模型基于巷道设计参数与地质勘探数据预先构建,包含三部分信息。巷道几何参数包括断面形状、宽度、高度、坡度及水平曲率半径,以参数化曲线描述巷道中心线及两侧边界。支护信息记录锚杆、锚索的布置位置、间距与外露长度,这些区域需在路径规划中设置安全避让距离。禁区区域定义包括设备检修区、材料堆放区及已支护等待区,作为障碍物的先验信息输入。静态模型采用分段线性表示,每10米为一个分段,存储该分段的断面参数与边界方程。当掘锚机向前掘进时,静态模型前方延伸、后方剪裁,始终保持以掘锚机为中心前后各50米的有效范围。静态模型的构建质量直接影响全局路径规划的合理性,要求巷道边界误差及锚杆位置误差控制在合理范围内。对于缺乏精确地质资料的旧巷,可结合激光雷达点云数据反向修正静态模型,实现先验信息与实测数据的融合。

2.2 动态障碍感知与识别

动态障碍感知是环境模型更新的核心输入。激光雷达是主要感知手段,扫描频率10赫兹,探测范围前后20米、左右10米。点云数据经体素滤波降采样后,通过分割算法提取地面与非地面点云,剩余点云采用聚类方法提取障碍物。聚类结果中,对小尺寸噪点予以剔除,对尺寸大于掘锚机通行能力的障碍物标记为不可通行。双目相机用于障碍语义识别,通过目标检测算法识别梭车、胶带机、人员等动态目标,并利用双目视差估计其距离与运动速度。对识别出的动态障碍,采用卡尔曼滤波估计其运动状态,预测未来数秒内的运动轨迹^[2]。地质环境不确定性通过贝叶斯更新量化:巷道变形监测数据实时更新孪生模型中的变形概率分布,当变形量超限时,对应区段的通行空间自动收紧,增加安全裕度。

2.3 环境地图表示

为兼顾全局规划的计算效率与局部规划的精细度,采用混合地图表示策略。栅格地图用于局部规划,以掘锚机为中心实时滚动更新,每个栅格存储占用概率值,取值范围在0到1之间,0表示完全自由,1表示完全占用,中间值表示不同程度的占用可能性。激光雷达点云投射至栅格后采用贝叶斯更新占用概率,动态障碍占据的栅格标记移动属性并存储其运动速度向量。拓扑地图用于全局规划,节点为巷道的关键位置,边为连接节点的可行路径段,存储长度、曲率、平均宽度等信息。拓

扑地图覆盖整条掘进巷道,全局规划在拓扑地图上搜索节点序列,再在节点间栅格地图上细化路径。两种地图根据掘锚机与目标断面的距离进行切换:距离较大时使用纯拓扑规划;距离较小时加载栅格地图进行精细规划。混合策略可将全局规划计算量显著降低。

2.4 数字孪生驱动的环境动态更新

数字孪生驱动的环境更新实现了虚拟环境与物理环境的双向闭环。更新触发机制分为时间触发与事件触发两类。时间触发:每隔固定时间使用最新感知数据刷新孪生环境中的动态障碍,清除已离开感知范围的障碍物记录。事件触发:当激光雷达检测到新障碍物闯入安全距离时,立即触发孪生模型更新并启动路径重规划。巷道形变的动态更新采用预测-校正机制:孪生模型根据历史变形趋势预测未来一段时间的变形量,提前收缩通行空间边界;当实测变形数据回传后,校正预测误差并更新模型参数。更新后的环境模型驱动路径规划模块重新评估当前参考路径的安全性,若安全距离不足则触发局部重规划。孪生模型置信度用于指导规划策略:高置信区按标准安全裕度规划,低置信区额外增加安全裕度。置信度通过模型预测与实测数据的一致性动态计算,随实测数据累积逐步提升。

3 基于数字孪生的路径规划算法

3.1 路径规划问题建模

路径规划问题可描述为:在掘锚机位姿及环境状态构成的可行空间中,寻找从当前位置到目标位置的一条可行控制指令序列,使掘锚机在满足约束的前提下达到最优规划目标。状态变量包括掘锚机的位置坐标、航向角、线速度及角速度。输入控制量包括加速度与角加速度。约束条件包含三个方面:巷道边界约束要求掘锚机机身不得超出巷道边界且与巷帮保持足够安全距离;运动学约束要求转弯半径不小于最小值、最高速度不超过安全限值;避障约束要求与任何障碍物保持安全间距。优化目标综合考虑路径长度、行驶时间及能耗三个因素,采用加权求和方式。权重系数根据作业工况动态调整:快速掘进时侧重行驶时间,过断层破碎带时侧重路径安全性。路径规划问题以固定周期求解一次,生成未来数秒内的参考轨迹。

3.2 全局路径规划:改进A*算法

全局路径规划在拓扑地图上执行,为掘锚机提供从当前位置到目标断面的参考路径。标准A*算法采用八方向网格扩展,无法适应巷道曲率约束,故提出三项改进。第一项改进:节点扩展由网格方向改为沿巷道中心线的曲线扩展,扩展方向为前进与后退,巷道内不允许

横向移动,子节点位置由巷道中心线参数方程计算。第二项改进:启发函数设计为欧氏距离加上曲率惩罚项,曲率惩罚项与路径段弯曲程度相关,避免规划出弯度过大的路径^[3]。第三项改进:节点优先级队列采用二叉堆优化,降低搜索时间复杂度。路径扩展过程中实时检查节点间通行可行性,调用孪生模型快速模拟碰撞风险,存在显著风险则剔除该节点。最终生成的全局路径由一系列路径点构成,采用平滑曲线处理保证曲率连续。全局路径每掘进一段距离或触发重规划条件时重新计算。

3.3 局部路径规划:改进DWA算法

局部路径规划在栅格地图上执行,输出速度指令实现实时避障。标准DWA算法的评价函数仅考虑方位角、速度与障碍距离,不适应动态障碍场景,本文提出三项改进。第一项改进:速度空间采样考虑掘锚机运动学约束,线速度与角速度采样范围根据工况动态调整。第二项改进:预测轨迹评价函数扩充为四项,包括方位角项、速度项、静态障碍距离项及动态障碍距离项。新增的动态障碍距离项计算轨迹与动态障碍预测轨迹的最小时间距离,采用相对速度模型,确保掘锚机不会与运动障碍相遇。第三项改进:权重系数动态调整,靠近动态障碍时增大动态避让优先级。轨迹预测时域取数秒,实时检测碰撞风险。对每组速度生成预测轨迹并计算评价价值,选择最优速度指令输出。单次规划耗时在可接受范围内。

3.4 全局-局部规划联动机制

全局-局部联动机制协调两个规划器,避免局部避障导致大幅偏离全局路径。正常情况下,局部规划器以全局参考路径为目标,计算当前航向与全局路径切线方向的偏差,超限时调整权重。根据掘锚机机身宽度与巷道尺寸综合确定偏离阈值:当局部避障导致掘锚机偏离全局路径超过第一阈值时,触发偏离预警,局部规划器暂停跟踪原路径,改为向临时目标点规划,实现绕行后回归。若偏离持续扩大超过第二阈值,或前方发现全局路径不可通行,触发全局重规划,重新计算当前位置到目标断面的路径。联动机制还负责频率协调:全局规划低频运行,局部规划高频运行。全局规划输出后,向局部规划器传递参考路径点队列及各点期望速度,局部规划器按参考速度前置量调整输出指令,实现平滑跟踪。

3.5 基于数字孪生的规划推演

数字孪生推演是路径规划的仿真前置环节,在实际执行前验证路径方案的可行性。路径规划器生成候选路径后提交至孪生层进行高置信度模拟。孪生模型以当前实测状态为初始条件,按候选路径控制指令驱动虚拟掘锚机运行。模拟过程考虑掘锚机动力学响应延迟、传感器测量噪声、动态障碍运动及巷道变形对通行空间的影响。模拟输出包括碰撞检测结果、通过性指标及路径跟踪误差。多候选路径场景下,孪生模拟并行运行各候选路径,选择综合评分最高的路径执行。推演结果还用于规划器参数自适应调整:若模拟发现频繁触发紧急制动,则降低最大速度;若最小安全距离持续偏大,则适当放宽避障阈值。孪生推演采用并行计算加速,确保不阻塞主规划循环^[4]。另外,推演结果可存储至历史案例库,用于离线分析规划器性能缺陷,辅助人工优化算法参数。长期积累的推演数据还可用于训练机器学习模型,进一步提升路径规划的智能化水平。

结束语

本文针对掘锚机井下自主导航的路径规划问题,提出了基于数字孪生的解决方案。构建了掘锚机数字孪生导航系统四层架构,实现了物理实体与虚拟模型的实时映射;设计了静态模型与动态更新相结合的巷道环境建模方法,利用激光雷达与视觉融合感知动态障碍;提出了改进A*与改进DWA联动的路径规划策略,并通过数字孪生推演实现路径预验证与优化。研究表明,该方法可有效应对巷道动态障碍与几何约束,提升掘锚机对复杂环境的适应能力。后续研究应聚焦多装备协同规划、参数自适应优化及井下现场试验验证。

参考文献

- [1]肖磊.煤矿智能化建设实践及采掘工作面关键技术探索[J].内蒙古煤炭经济,2023(15):145-147.
- [2]许胜利.关于煤矿采掘智能化技术的应用和思考[J].中国设备工程,2026(7):33-34.
- [3]杜鹏程,魏增录,杨熙福,等.煤矿巷道快速掘进技术的优化策略与工程实践研究[J].价值工程,2026,45(3):102-104.
- [4]王佩.煤矿巷道硬岩掘进机截割效率提升技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2026(1):35-37.