

矿用掘进机导航系统优化策略研究

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: 矿用掘进机导航系统对地下工程高效掘进意义重大。本文分析其核心构成, 涵盖导航感知、信号传输、定位解算与控制联动模块。指出系统现存感知精度、信号传输稳定性、定位解算效率、复杂工况适应性及模块协同匹配等问题。针对性提出感知模块优化、信号传输模块优化、定位解算算法优化等策略, 以提升系统性能, 为矿用掘进机导航系统发展提供参考。

关键词: 矿用掘进机; 导航系统; 问题优化; 策略研究

引言: 在地下工程中, 矿用掘进机作为关键设备, 其导航系统直接关乎掘进效率与质量。伴随地下工程规模持续扩大、地质条件愈发复杂, 对导航系统的精度、稳定性及适应性提出了更高要求。然而, 当前矿用掘进机导航系统在感知、传输、定位、工况适应以及模块协同等多个层面存在诸多问题, 这些问题严重制约了系统性能的提升, 进而影响地下工程掘进工作的顺利开展, 因此深入优化该系统具有迫切的现实需求。

1 矿用掘进机导航系统核心构成

1.1 导航感知模块

导航感知模块是系统获取环境信息的基础单元, 通过集成惯性测量单元、激光雷达、超声波传感器及视觉摄像头等设备, 实现对掘进机姿态、速度及周围障碍物的实时监测^[1]。惯性测量单元利用陀螺仪与加速度计组合, 可连续采集掘进机三维运动参数, 为动态定位提供基础数据; 激光雷达通过发射脉冲激光并分析回波信号, 构建高精度点云模型, 精确识别巷道轮廓与障碍物分布; 超声波传感器则用于近距离障碍检测, 弥补激光雷达在粉尘环境下的性能衰减; 视觉摄像头通过图像处理算法提取巷道标志物特征, 辅助验证定位精度。多传感器数据经预处理后形成标准化信息流, 为后续模块提供原始数据支撑。

1.2 信号传输模块

信号传输模块承担数据交互与通信保障功能, 采用有线与无线混合传输架构确保信息实时性。掘进机本体与地面控制中心间通过光纤环网实现高速数据传输, 满足大容量点云数据与视频流的稳定传输需求; 机载设备间采用工业以太网构建局部通信网络, 实现传感器数据与控制指令的低延迟交换; 针对移动部件与固定基座间

的数据传输, 采用滑环或无线通信技术规避线缆缠绕风险。传输协议采用TCP/IP与CAN总线混合模式, 兼顾数据完整性与传输效率, 并通过加密算法保障通信安全性。

1.3 定位解算模块

定位解算模块是系统核心计算单元, 基于多源异构数据融合算法实现掘进机精准定位。该模块采用扩展卡尔曼滤波框架, 将惯性导航数据、激光点云特征及视觉标志物信息进行加权融合, 通过迭代优化降低单一传感器误差累积; 针对地下环境无GPS信号的约束, 引入里程计辅助定位技术, 利用编码器采集的轮速信息修正惯性导航漂移; 同时开发巷道地图匹配算法, 将实时点云与预建BIM模型进行特征比对, 进一步提升定位鲁棒性。解算结果以三维坐标与姿态角形式输出, 精度可达厘米级。

1.4 控制联动模块

控制联动模块根据定位结果生成运动控制指令, 通过电液控制系统驱动掘进机执行机构。该模块内置路径规划算法, 可依据设计断面参数自动生成最优掘进轨迹, 并通过PID控制器实现截割头位置闭环控制; 针对复杂地质条件, 开发自适应掘进策略, 根据岩层硬度动态调整推进速度与截割参数; 同时集成安全防护机制, 当监测到偏离预设路径或遭遇障碍物时, 立即触发紧急制动并报警。控制指令经CAN总线分发至各执行单元, 形成从感知到行动的完整控制闭环。

2 矿用掘进机导航系统现存核心问题

2.1 感知精度相关问题

导航感知模块的精度受地下环境特性影响显著。粉尘浓度过高会导致激光雷达回波信号衰减, 降低点云数据密度, 进而影响障碍物识别准确率; 巷道壁面潮湿或渗水会改变超声波传感器声波传播路径, 造成测距误差;

视觉摄像头在低照度条件下易产生图像模糊,导致标志物特征提取失败。此外,多传感器时空同步误差难以完全消除,惯性测量单元的零偏漂移随时间累积,进一步削弱了动态定位精度^[2]。现有误差补偿算法多基于理想环境假设,对非线性误差与突发干扰的抑制能力有限,难以满足高精度掘进需求。

2.2 信号传输稳定性问题

地下巷道空间狭长且拓扑复杂,信号传输面临多重衰减与干扰。光纤环网虽具备高带宽优势,但弯曲半径限制与接头损耗易导致信号中断;无线通信在金属支护结构密集区域产生多径效应,造成数据包丢失率上升;滑环传输方式因机械磨损引发接触电阻变化,影响电信号完整性。电磁干扰源(如变频电机、电焊设备)的随机出现,会破坏通信协议的抗干扰设计,导致控制指令执行延迟或错误。现有冗余传输机制多采用固定切换策略,缺乏对链路质量的动态评估与自适应优化。

2.3 定位解算效率问题

定位解算模块的计算负载与实时性需求存在矛盾。扩展卡尔曼滤波算法需处理高维状态向量,迭代计算过程消耗大量机载计算资源;巷道地图匹配依赖大规模点云配准,特征提取与相似度计算耗时较长;多源数据融合时,不同传感器采样频率差异导致时间对齐困难,需通过插值处理引入额外计算开销。现有解算框架多采用串行处理模式,未能充分利用多核处理器的并行计算能力,在复杂地质条件下易出现解算延迟,影响控制指令的及时生成。

2.4 复杂工况适应性问题

地下工程地质条件多变,对导航系统鲁棒性提出严格要求。断层带、软弱夹层等地质异常区会导致掘进机振动加剧,破坏惯性测量单元的测量基准;高瓦斯环境对电子设备的防爆性能与散热设计提出特殊要求;巷道断面突变或分支交汇处,预建地图与实际环境的差异会引发定位跳变。现有系统多针对特定工况设计,缺乏对多物理场耦合作用的建模能力,在跨地层掘进或突发地质灾害场景下,定位精度与控制稳定性显著下降。

2.5 模块协同匹配问题

导航系统各模块间存在动态匹配难题。感知模块与定位解算模块的数据更新频率差异,易造成特征关联失效;控制联动模块的指令生成周期与执行机构响应速度不匹配,导致轨迹跟踪偏差;信号传输模块的带宽分配策略未能兼顾实时性与可靠性需求,关键数据(如紧急制动信号)的传输优先级缺乏保障。现有协同机制多采用开环控制架构,缺乏对模块间交互状态的闭环监测与动态

调整能力,在长时运行后易积累误差并引发系统失稳。

3 矿用掘进机导航系统优化策略

3.1 感知模块优化

3.1.1 感知元件选型优化

针对地下环境光照不足、粉尘浓度高、机械振动强等特点,需对传感器类型进行针对性升级^[3]。激光雷达选用905nm波长型号,该波段在煤尘环境中的穿透性优于传统1550nm波长,同时兼顾成本与功耗;视觉传感器采用全局快门CMOS芯片,配合红外补光灯,解决运动模糊与低光照成像问题;惯性测量单元选择光纤陀螺仪替代机械陀螺,将零偏稳定性提升至 $0.01^{\circ}/h$,减少长时间运行导致的姿态漂移;里程计编码器采用磁电式设计,避免金属屑堆积对光电编码器的影响,提升履带行进距离测量精度。

3.1.2 感知信号降噪优化

原始传感器数据包含机械振动、电磁干扰与环境噪声等多类干扰。激光雷达点云数据采用统计滤波与半径滤波组合处理,先通过统计特征剔除离群点,再利用邻域密度差异去除悬浮颗粒噪声;视觉图像经非局部均值去噪后,通过Canny边缘检测提取巷道轮廓特征,抑制煤尘附着导致的纹理干扰;惯性数据采用巴特沃斯低通滤波,截断频率根据掘进机振动频谱分析结果设定为50Hz,保留有效运动信息的同时滤除高频噪声;里程计数据通过卡尔曼滤波与激光里程计进行松耦合融合,修正履带打滑引起的测量误差。

3.2 信号传输模块优化

3.2.1 传输路径优化

采用分层冗余传输架构,感知层数据通过双绞线就近接入边缘计算节点,减少模拟信号长距离传输衰减;中段采用光纤环网构建主传输通道,利用光信号抗电磁干扰特性保障核心数据流稳定性;末端控制指令通过CAN总线直连执行机构,总线终端匹配120 Ω 电阻消除信号反射。传输拓扑采用环形与星形混合结构,当某段光纤断裂时自动切换至备用路径,确保系统连续运行。

3.2.2 抗干扰传输方式优化

电磁干扰源识别结果显示,变频电机与电焊设备是主要干扰源。针对此类场景,传输线缆采用屏蔽双绞线并外套金属软管,屏蔽层接地电阻控制在4 Ω 以下;交换机端口配置802.1QVLAN隔离不同优先级数据,避免广播风暴占用带宽;无线传输部分采用跳频扩频技术,在2.4GHz频段内动态切换信道,跳频速率达1000跳/秒,有效规避持续干扰源。

3.3 定位解算算法优化

3.3.1 解算逻辑优化

传统紧耦合定位依赖迭代计算,实时性难以保障^[4]。改用因子图优化框架,将惯性测量、激光匹配与视觉特征约束转化为因子节点,通过增量式平滑与建图(iSAM2)算法实现实时解算;针对动态障碍物影响,在激光SLAM中引入语义分割模块,通过深度学习识别移动设备与人员,构建动态地图并排除干扰点云;视觉里程计采用光流法与特征点法混合模式,静态场景使用特征点跟踪保证精度,动态场景切换至光流估计提升鲁棒性。

3.3.2 算法复杂度优化

采用模型剪枝与量化技术压缩神经网络规模,视觉语义分割模型参数量减少70%后仍保持92%的mIoU指标;激光点云匹配算法通过体素网格下采样将数据量降低85%,配合ICP算法的点对平面迭代策略,解算时间缩短至原方法的1/3;惯性导航误差补偿模型采用分段线性化近似,将三阶非线性方程转化为多个线性区间,在保证补偿精度的前提下减少浮点运算次数。

3.4 复杂工况适应性优化

3.4.1 极端环境适配优化

针对高瓦斯工况,传感器外壳采用本质安全型设计,电路板涂覆三防漆并填充导热硅脂,工作温度范围扩展至-40℃~+85℃;在渗水巷道中,激光雷达与视觉传感器加装IP67防护罩,内部集成湿度传感器与加热膜,当检测到结露风险时自动启动除湿;针对强振动场景,硬件设计需通过模态分析与结构优化,避免共振导致的元件损坏。针对强振动场景,硬件电路采用四层板设计,关键元件通过环氧树脂灌封固定,振动加速度耐受值提升至20g。这些适配优化措施提高了系统在极端环境下的适应性与可靠性,保障了掘进机的正常运行。

3.4.2 动态工况响应优化

建立工况特征库,通过支持向量机(SVM)分类器实时识别掘进、拐弯、避障等状态;动态响应策略需根据工况严重程度分级处理,例如顶板来压时优先保障设备安全,大块矸石时优化截割效率。当检测到顶板来压时,系统自动切换至低速掘进模式,截割头转速降低40%以减少冲击载荷;遇到大块矸石时,启动分级破碎策略,先调整截割头角度进行预破碎,再恢复正常掘进参数;所有动态响应参数均可通过上位机远程配置,适应不同地质条件下的作业需求。通过动态工况响应优化,提高了系统在复杂地质条件下的应对能力,确保了作业安全与高效。

3.5 系统模块协同优化

3.5.1 模块数据交互优化

定义统一数据接口标准,所有模块采用JSON格式封装数据包,包含时间戳、数据类型与有效载荷三部分;数据分级传输机制通过动态调整采样频率,在保证关键数据实时性的同时降低总线负载。传输频率根据数据重要性分级设置,定位结果以100Hz频率更新,环境温度等辅助信息以1Hz频率传输;建立数据缓存队列,当某模块处理延迟时,其他模块可继续读取缓存数据,避免系统阻塞。这些数据交互优化措施提高了模块间数据传输的效率与可靠性,促进了系统各模块的协同工作。

3.5.2 联动控制逻辑优化

控制指令采用优先级队列管理,安全类指令(如紧急停机)优先级设为最高,在10ms内完成处理;路径跟踪控制引入模型预测控制(MPC)算法,根据未来5秒的预测轨迹提前调整油缸压力,将轨迹跟踪误差控制在±3cm以内;当感知模块检测到障碍物时,控制模块立即冻结当前动作,重新规划路径后再恢复运行,避免传统分级响应机制导致的碰撞风险^[5]。通过联动控制逻辑优化,提高了系统的控制精度与安全性,实现了高效稳定的掘进作业。

结束语

对矿用掘进机导航系统展开全面研究,涵盖核心构成剖析、现存问题挖掘以及优化策略制定。通过从感知模块的元件选型与信号处理,到信号传输模块的路径规划与抗干扰设计,再到定位解算算法的逻辑与复杂度优化等多方面入手,实施一系列针对性优化措施,有效提升了系统在复杂地下环境中的适应性与可靠性,为保障地下工程高效、安全掘进提供了有力支撑,推动了矿用掘进机导航系统技术的进步。

参考文献

- [1]阿不都克优木吐尔洪.煤矿掘进机电设备自动化集中控制技术[J].机械工业标准化与质量,2024(8):37-40.
- [2]蒲林.基于可编程自动化控制器的综采设备智能一体化探索[J].中国矿业,2023,32(S1):217-222.
- [3]李飞,张林,尚宇琦,等.煤矿智能化掘进关键技术研究[J].工矿自动化,2023,49(4):33-41.
- [4]杨琳.矿用综掘机升级改造分析及智能化控制技术研究[J].时代汽车,2025(13):142-144.
- [5]祁世龙.矿用掘进机自适应智能控制掘进工艺的应用研究[J].机械管理开发,2022,37(2):171-172,175.