

惯性导航/全站仪组合的掘进机连续定位技术

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: 掘进机在隧道施工中需要实时获取高精度位姿信息以指导掘进方向。单一全站仪定位易受粉尘、水雾遮挡而中断,单一惯性导航存在长时间累积漂移问题。本文提出惯性导航与全站仪组合的掘进机连续定位技术,利用全站仪定期校准惯导累积误差,惯导在全站仪受干扰时提供连续位姿推算。重点研究了组合定位系统设计、误差分析与补偿方法及数据融合关键技术。研究表明,组合定位技术可有效克服单一传感器的局限性,实现掘进机厘米级连续定位,为隧道自动化施工提供可靠的位置服务。

关键词: 惯性导航;全站仪;掘进机;连续定位技术

引言:掘进机在施工过程中需要实时获取机身位置与姿态信息,以指导掘进方向纠偏和管片拼装。传统全站仪自动导向系统测量精度高,但刀盘前方高浓度粉尘、水雾常导致激光束无法有效锁定,造成测量中断。惯性导航系统不受外界环境干扰,可连续输出位姿数据,但随时间推移会产生累积误差漂移。将两者优势互补,以惯导为主提供连续性,以全站仪为修正源定期校准,成为解决掘进机连续定位问题的有效技术路径。本文围绕组合定位系统设计、误差分析及关键技术展开研究。

1 惯性导航与全站仪原理及特性分析

1.1 惯性导航系统原理与特性

惯性导航系统是一种完全自主的导航定位技术,不依赖任何外部信息。其核心部件包括三轴陀螺仪和三轴加速度计。陀螺仪测量掘进机在三维空间中的角速度,通过对角速度积分得到姿态角;加速度计测量掘进机在三个方向上的比力,结合姿态信息进行坐标变换后对加速度积分得到速度,再对速度积分得到位置。惯导系统具有输出连续、数据更新率高、短期精度高、抗干扰能力强等优点。但其根本缺陷在于积分累积误差,陀螺仪零偏误差随时间线性增长导致姿态误差,加速度计零偏误差随时间的二次方增长导致位置误差。在掘进机应用中,惯导可在数分钟内保持厘米级定位精度,随工作延续误差逐渐扩大,需定期修正。

1.2 全站仪原理与特性

全站仪是集测角、测距于一体的高精度测量仪器,广泛应用于隧道施工测量。其工作原理是通过电子测角系统测量目标棱镜的水平角和竖直角,通过激光测距系统测量仪器到棱镜的斜距,利用三角测量原理计算棱镜

的三维坐标。全站仪的主要优点是测量精度高,测角精度可达0.5角秒至1角秒,测距精度可达毫米级,提供绝对坐标基准,不受累积误差影响。但其局限性也十分明显:激光束要求与棱镜之间通视,隧道内粉尘、水雾会严重衰减激光信号;掘进机振动可能导致棱镜晃动影响测量精度;测量为离散点方式,无法连续输出位姿数据。在全断面掘进机施工中,全站仪经常因粉尘遮挡而中断测量,尤其是在刀盘前方区域^[1]。

1.3 惯性导航与全站仪的互补性分析

惯导与全站仪在性能上形成天然互补关系。惯导的优势在于自主性、连续性和抗干扰能力,劣势在于误差随时间累积漂移;全站仪的优势在于绝对定位精度高、无累积误差,劣势在于易受环境干扰而中断测量。两者组合可形成完美的技术闭环:在全站仪正常工作时,利用其高精度绝对坐标校正惯导的累积漂移;在全站仪因粉尘、水雾遮挡而中断时,惯导独立进行航位推算,保持定位连续性;当全站仪恢复测量后,再次校正惯导误差。这种互补关系使组合系统既具备全站仪的高精度绝对基准,又具备惯导的连续输出能力,是解决掘进机复杂工况下连续定位问题的理想方案。此外,两者冗余设计还提高了系统的可靠性。

2 惯性导航/全站仪组合定位系统设计

2.1 组合方式选择

组合导航系统按信息融合深度分为松组合和紧组合两种方式。松组合是指惯导和全站仪各自独立工作,惯导输出完整的位姿信息,全站仪输出位置坐标,两者在数据处理层进行融合。紧组合是将全站仪测量的距离、角度等原始观测数据与惯导数据深度融合。综合考虑掘

进机应用需求,松组合方式更具工程可行性。其优点包括:系统结构简单,惯导与全站仪可独立采购和更换;数据处理量小,对计算资源要求低;工程实现难度低,便于现场维护。具体融合策略为:以惯导为主导航系统,连续输出位姿数据;全站仪作为辅助测量源,定期输出绝对位置坐标;当全站仪输出有效数据时,通过滤波算法估计惯导误差并进行校正;当全站仪数据中断时,系统自动切换至纯惯导模式。

2.2 系统硬件设计

组合定位系统硬件包括惯性测量单元、全站仪、数据采集与处理单元及通信模块四部分。惯性测量单元选用光纤陀螺或高精度MEMS陀螺,根据精度要求与成本权衡选择,安装于掘进机机身中心位置,敏感三轴角速度与加速度。全站仪选用0.5角秒或1角秒级高精度仪器,固定安装于隧道已衬砌段侧壁或专用支架上,配套棱镜组安装于掘进机尾部盾体上。数据采集与处理单元采用工业级嵌入式工控机,负责采集惯导和全站仪数据、执行融合算法、输出定位结果。通信模块负责全站仪与工控机之间的数据传输,可采用串口或以太网方式。系统还需配置高精度授时模块,为各传感器提供统一时间基准。各部件安装时需进行严格标定,确保坐标系统一^[2]。

2.3 系统软件设计

系统软件设计采用模块化架构,分为数据采集模块、惯导解算模块、数据融合模块和输出模块四部分。数据采集模块负责从惯性测量单元读取陀螺和加速度原始数据,从全站仪读取棱镜坐标测量结果,并进行数据格式转换与有效性校验。惯导解算模块执行惯性导航算法,包括初始对准、姿态更新、速度更新和位置更新,输出掘进机的连续位姿信息。数据融合模块是软件核心,实现卡尔曼滤波算法,当全站仪数据有效时进行滤波更新,估计惯导误差并反馈校正;当全站仪数据无效时执行纯惯导递推。输出模块将融合后的位姿结果转换为掘进机刀盘中心坐标、盾尾坐标及三轴姿态角,通过可视化界面实时显示并存储至本地或上传至地面监控中心。

3 误差分析与补偿

3.1 惯性传感器误差

惯性传感器误差是影响组合定位精度的主要因素,可分为确定性误差和随机误差两类。确定性误差包括零偏、标度因数误差和安装误差。零偏是指陀螺仪和加速度计在静止输入时的输出值,可通过实验室标定和温度补偿进行校正。标度因数误差是传感器输出与输入之间的比例偏差,通过标定试验确定校正系数。安装误差指传感器敏感轴与掘进机坐标系之间的角度偏差,通过高

精度安装和矩阵标校修正。随机误差包括角度随机游走和速度随机游走,源于传感器的内部噪声,无法通过标定完全消除,只能通过滤波算法进行抑制。在组合定位系统中,惯导随机误差是导致累积漂移的主要原因,其影响随时间的平方根增长,是误差补偿的重点。

3.2 全站仪测量误差

全站仪测量误差直接影响组合定位的校正精度。其主要来源包括仪器误差、环境误差和目标误差。仪器误差包含测角误差和测距误差,测角误差主要由编码盘精度决定,通常在0.5角秒至2角秒之间;测距误差包括固定误差和比例误差,典型值为毫米级。环境误差包括大气折光改正、温度气压修正等,隧道内温度梯度变化可能引入额外误差。目标误差包括棱镜对中误差、棱镜常数误差及振动导致的棱镜晃动误差。在隧道施工环境中,粉尘和水雾会影响激光测距信号质量,引入随机噪声^[3]。针对上述误差,现场操作中应定期校准全站仪,输入正确的气象参数,采用高精度棱镜并加固安装,必要时可采用多棱镜平均测量策略降低随机误差。

3.3 杆臂效应及补偿

杆臂效应是指在组合定位系统中,惯性测量单元与全站仪棱镜之间存在的空间偏移。由于两者安装位置不同,当掘进机发生角运动时,棱镜的线加速度与惯性测量单元中心的线加速度存在差异,导致误差。杆臂效应的误差量与角速度平方和杆臂长度成正比,在掘进机转向或姿态调整时尤为显著。杆臂补偿的基本方法是精确测量惯性测量单元中心到棱镜中心的三维杆臂向量,在融合算法中建立杆臂误差观测方程,将棱镜测量的位置坐标转换至惯性测量单元中心,或将惯导推算的惯性测量单元中心位置转换至棱镜位置与全站仪测量值进行比较。杆臂向量需在系统安装后进行精密标定,并定期复核以防松动移位。精确的杆臂补偿是保证组合定位精度的关键环节。

3.4 坐标转换误差

组合定位系统涉及多个坐标系之间的转换,坐标转换误差是影响最终定位精度的累积因素。主要坐标系包括惯性测量单元坐标系、掘进机机体坐标系、全站仪测量坐标系和隧道工程独立坐标系。坐标转换需要确定各坐标系之间的旋转矩阵和平移向量。误差来源包括:坐标系定义不明确导致的常数偏差;坐标系标定过程中测量误差引入的随机偏差;掘进机机身弹性变形导致坐标系相对关系变化。为减小坐标转换误差,应采取以下措施:统一坐标系定义标准;采用高精度测量仪器进行坐标系标定;增加标定控制点数量,采用最小二乘平差提

高转换参数精度；对机身变形进行建模补偿。组合导航滤波算法中应增加坐标转换误差状态变量，通过观测更新进行在线估计。

3.5 系统误差标定方法

系统误差标定是保证组合定位精度的基础工作，应在系统投入运行前及定期维护时进行。标定内容包括惯性测量单元确定性误差、杆臂向量、坐标转换参数三大类。惯性测量单元标定采用六位置静态测试方法，将惯导置于不同姿态下采集多组数据，通过最小二乘求解零偏、标度因数和安装误差矩阵。杆臂向量标定采用全站仪直接测量法，使用高精度全站仪分别测量惯性测量单元中心参考点和棱镜中心的三维坐标，计算差值得到杆臂向量。坐标转换参数标定采用控制点法，在掘进机体上布置多个控制点，用全站仪测量其在工程坐标系中的坐标，同时记录其在机体坐标系中的设计坐标，求解转换参数。标定完成后应生成标定参数文件，由融合算法调用。

4 关键技术研究

4.1 惯性导航误差补偿技术

惯性导航误差补偿是提高组合定位系统精度的基础技术。误差补偿分为实验室标定补偿和在线估计补偿两个阶段。实验室标定补偿针对确定性误差，通过高精度转台测试建立陀螺仪和加速度计的零偏、标度因数及安装误差的数学模型，同时建立温度补偿模型，减少温度漂移影响。在线估计补偿针对残差和随机误差，利用卡尔曼滤波器将惯导误差增广为状态变量，在全站仪测量有效时进行误差估计和反馈校正。误差补偿的核心在于误差模型的准确性。常用的惯导误差模型包括速度误差方程、位置误差方程和姿态误差方程。对于掘进机应用，还应考虑特有的运动约束，如掘进机主要沿巷道方向运动，侧向和垂向速度近似为零，可将此作为虚拟观测信息辅助误差补偿^[4]。

4.2 数据融合算法优化

数据融合是组合定位系统的核心技术。卡尔曼滤波是最常用的融合算法，它将惯导的递推结果作为状态预测，全站仪的测量值作为观测更新，通过递推计算估计状态误差并进行校正。针对掘进机应用场景，需对标准卡尔曼滤波进行优化设计。状态变量选择上，应包含位置误差、速度误差、姿态误差、陀螺零偏和加速度计零偏等维度。观测方程设计上，当全站仪数据有效时，将

惯导推算位置与全站仪测量位置之差作为观测向量。滤波参数整定上，系统噪声协方差阵和观测噪声协方差阵需根据传感器性能和环境特性合理设定。针对全站仪测量数据可能存在的粗差，引入抗差卡尔曼滤波，通过残差检验调整观测噪声协方差或降低异常观测权重。

4.3 系统同步与时间校准技术

传感器之间的时间同步是组合定位系统实现精准融合的前提。惯性测量单元和全站仪的数据采样频率不同，惯性测量单元通常达到50赫兹到200赫兹，全站仪测量频率为5赫兹到10赫兹，且存在数据传输延迟。时间同步的目的是将全站仪测量值精确对应到惯导的某个采样时刻，避免时间错位引入误差。硬件同步方面可采用统一的授时模块，为各传感器提供脉冲信号和时间戳基准。软件同步方面采用插值外推方法，对于给定时刻的全站仪测量值，找到相邻两个惯导采样时刻的状态，通过线性插值或更高阶插值计算同步时刻的惯导推算值。同时需测量数据传输延迟，在融合算法中对时间戳进行偏移修正。

结束语

本文针对掘进机在隧道复杂环境下的连续定位需求，研究了惯性导航与全站仪组合定位技术。分析了惯导与全站仪的原理及互补特性，设计了适用于掘进机施工的组合定位系统软硬件方案，系统阐述了惯性传感器误差、全站仪测量误差、杆臂效应及坐标转换等误差来源与补偿方法，探讨了惯导误差补偿、数据融合算法优化及系统时间同步等关键技术。研究表明，惯导与全站仪组合可充分发挥两者优势，实现全站仪高精度绝对基准与惯导连续输出能力的有机结合，为隧道掘进机自动化施工提供高可靠、高精度的连续定位服务。

参考文献

- [1]董伟东,郭浩,罗海波,等.主动铰接型盾构机自动导向系统测量与姿态精密解算方法[J].测绘通报,2022(1):149-154,158.
- [2]许未明,牛光勇.基于激光靶的掘进机位姿测量技术研究[J].自动化应用,2025,66(12):179-182.
- [3]崔加瑞,张礼廉,王茂松,等.基于改进李群卡尔曼滤波的惯性/里程计组合导航方法[J].控制理论与应用,2023,40(12):2179-2186.
- [4]孙森震,荆留杰,李广云,等.悬臂掘进机隧道拉线位姿测量方法[J].测绘通报,2025(5):138-144,151.