

地下掘进钻机自主导航与智能控制

何巧亮

安百拓(南京)建筑矿山设备有限公司

摘要: 本文对地下掘进钻机自主导航与智能控制进行研究。首先阐述地下掘进钻机在地下工程中的作用与自主导航与智能控制产生的原因。对自主导航技术进行研究: 自主导航技术原理、传感器融合和定位算法等关键技术; 对智能控制技术进行研究: 智能控制系统的组成、机器学习和自适应控制等关键技术; 对系统集成与优化中的问题进行研究, 并提出提高系统稳定性和优化系统效率的优化策略。对安全性和可靠性进行研究: 对安全性要求和标准进行分析、对可靠性的评价与诊断进行介绍。期望为地下掘进钻机自主导航与智能控制的研究与发展提供帮助。

关键词: 地下掘进钻机; 自主导航; 智能控制; 系统优化

一、引言

1.1 地下掘进钻机的重要性

地下掘进钻机作为现代化基础建设工程中的重要施工机械存在, 多应用于隧道及地下工程建设施工、地铁工程施工工程、矿山建设工程等, 施工速度快、施工精准度高是其重要的技术优势, 工程质量和社会效益非常重要, 且复杂工况已不能与传统的施工方式相适应, 不能达到高效率、低成本、高安全性施工的目的, 对于复杂工程规模性施工, 面对复杂危难工况环境, 自动化是地下掘进钻机的重要发展目标, 而地下掘进钻机自主导航及智能控制技术能够解决这一问题。

1.2 自主导航与智能控制技术的兴起

在人工智能、传感器、计算机视觉和机器人等技术迅猛发展下, 无人导航技术和智能控制技术已然走出实验室。传统意义上的掘进设备在地底施工时需要人工控制, 施工过程效率不足、精度不高、施工安全隐患高, 无人导航技术能够控制钻机设备在施工过程中通过各类传感器, 如激光雷达、惯性导航、视觉系统等进行环境扫描和路径计算, 智能控制技术能够结合地质情况自主选择和调整施工参数, 提高施工效率、降低施工风险, 减少了对丰富经验的工程师依赖, 是实现复杂环境中无人或少人施工的关键, 在地下工程领域发挥着不可替代的作用。

二、自主导航技术

2.1 地下掘进钻机自主导航的原理

地下掘进钻机自主导航技术原理在于多传感器信息融合处理, 通过多种传感设备, 如激光雷达、惯性测量单元、摄

像头等, 实时感知周围环境, 并将各传感设备所获数据进行初步处理, 处理后的数据输入到主控单元进行集成分析, 形成精细三维环境模型; 同时, 结合预先规划的掘进路线以及实时感知所获的数据信息, 利用相应的算法进行融合, 形成最优或者次优掘进路径。掘进过程中, 系统会对实际掘进路径和算法规划掘进路线进行比对, 并对掘进姿态及掘进参数进行反馈调整, 从而实现掘进钻机自主沿规划路径掘进的功能, 实现自主导航。

具体说来, 激光雷达通过发射激光束并接收返回信号测量钻机周围物体的距离信息, 生成高精度的点云数据; 惯性测量单元通过测量钻机的加速度和角速度计算出位置和姿态信息, 用于实现精准的定位; 视觉传感器通过摄像头获取周围环境图像, 通过图像处理技术检测障碍物、地质特征等关键信息, 实现更丰富的环境感知。传感器数据在中央处理单元经过滤波、配准、融合等处理, 形成统一且准确的环境模型, 为后续的路径规划和导航控制提供依据。

2.2 关键技术: 传感器融合与定位算法

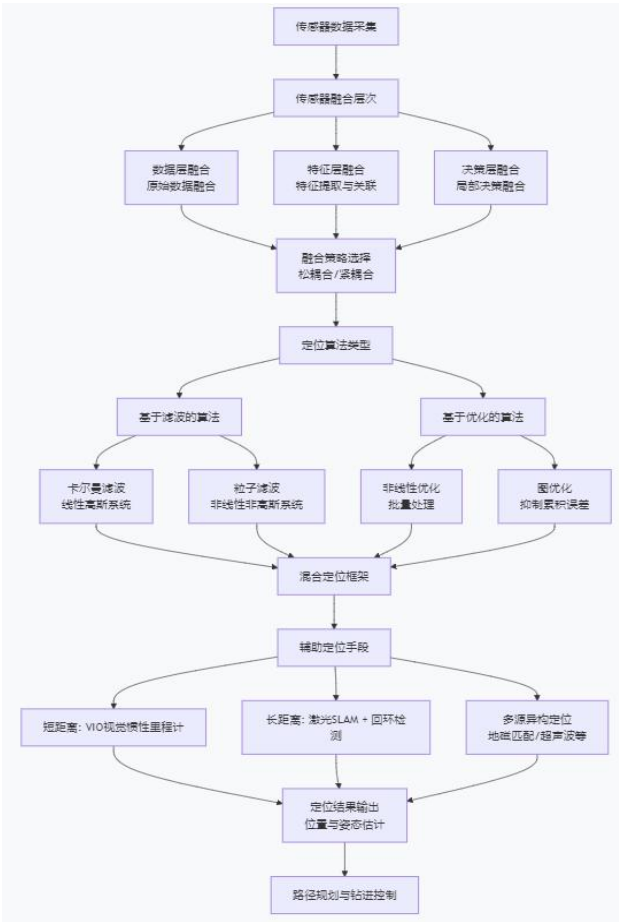
传感器融合是实现地下掘进钻机自主导航的关键技术之一, 通过将激光雷达、惯性测量单元、视觉传感器等多个传感器的数据融合在一起, 能够实现各个传感器之间的优势互补。比如激光雷达具备探测距离远、可实现环境三维建模等优点, 但在复杂环境下容易受到干扰; 惯性测量单元能够提供连续的姿态和运动信息, 但存在累积误差; 视觉传感器能够获取周围环境的丰富纹理信息, 但容易受到光照情况的干扰。通过传感器融合技术, 将多种传感器的数据进行综合,

可以提高对环境的感知精度。

定位算法是将自主导航中的关键部分，根据传感器融合的结果，对钻机在地下空间中的位置和姿态进行准确的估计。其中，最常用的定位算法包括：基于滤波的算法，如卡尔曼滤波、粒子滤波等，以及基于优化的算法，如非线性优化算法等。这些算法通过不断对传感器数据更新和处理，能够做到对钻机进行实时的位置修正和估计，使其能够在复杂的地下环境中准确地获取自身的位置信息，为后续的路径规划和钻进控制打下坚实的基础。同时，为了进一步提升定位的精度和可靠性，还会选用多种辅助的定位技术，如通过地下已知标志点信息进行标定和定位、结合地图进行定位等。

其中，常见的融合层次包括数据层融合、特征层融合及决策层融合等多种方式。数据层融合直接在测量值上进行融合，细节多但运算复杂；特征层融合提取各传感器的特征值，并进行相关处理及融合，减少冗余数据；决策层融合各传感器根据各自测量值各自进行局部决策，最后再进行高级层的融合，灵活性大，鲁棒性强。有时，为了适应具体应用情境，会根据掘进时具体工况选择松耦合的融合层次，比如惯性测量单元、轮式编码器与激光雷达以及摄像头分别针对钻机的移动状态估计与位姿地图构建，选择松耦合的融合方式，二者分别得出结论后，再进行扩展卡曼融合。

定位算法的性能优化方面，基于滤波的算法通过状态空间模型实现递推估计，其中卡尔曼滤波适用于线性高斯系统，而粒子滤波通过蒙特卡洛采样可处理非线性非高斯问题。基于优化的算法则通过构建目标函数实现批量处理，如图优化算法通过将定位问题转化为图结构中的节点位姿估计，可有效抑制误差累积。实际应用中常采用混合定位框架，例如在短距离作业时采用视觉惯性里程计实现高频定位，长距离作业时结合激光 SLAM 构建全局地图，并通过回环检测消除累积误差。针对地下环境特征稀疏的问题，还会引入地磁匹配、超声波测距等辅助定位手段，构建多源异构定位系统。如图一所示：



图一 地下掘进钻机自主导航传感器融合与定位算法技术流程图

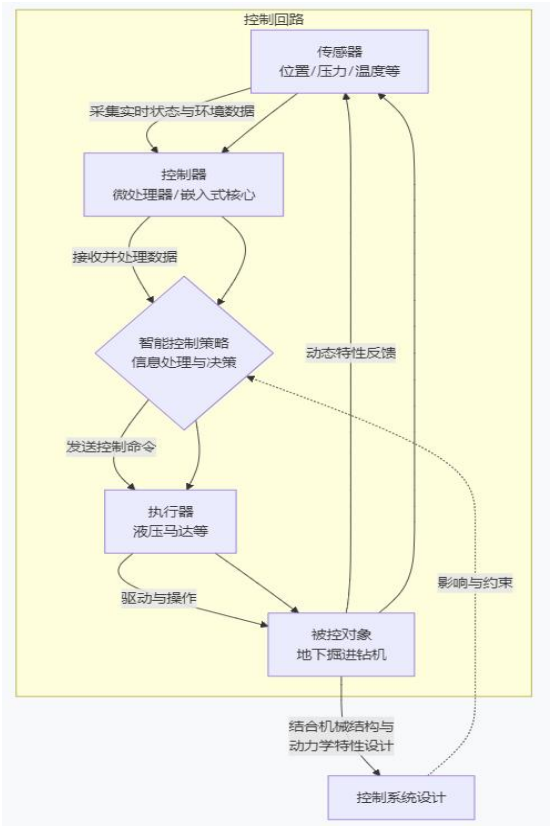
三、智能控制技术

3.1 智能控制系统的组成

智能控制系统是由控制器，执行器，传感器以及被控对象等构成，控制器作为智能控制系统的核心，接收来自传感器的信息，智能控制系统的控制策略将传感器接收到的信息进行处理以向执行器发送控制命令，执行器接收控制命令对被控对象进行相应的操作比如改变钻机钻进速度、方向等。传感器会对被控对象的实时状态、周围环境的变化进行采集发送给智能控制系统的控制器，构成智能控制系统的控制回路，使钻机按预期的目的钻进。

在智能控制系统中，控制器一般是选取性能强大的微处理器或者嵌入式系列，其处理数据能力强、响应速度快，能够满足复杂的地下工况要求。执行器则根据需要定做各种规格及种类的执行器，例如，对钻机动作响应精准度要求高的工况可以选择液压马达驱动；传感器则多种多样，包括位置

传感器、压力传感、温度传感等等；这些装置相互配合，为控制器提供丰富精确的数据。最后一个是被控对象，即地下掘进钻机，掘进钻机的动态特性影响掘进钻机控制效果，因此控制系统设计时要结合掘进钻机的机械结构和动力学特性。如图二所示：



图二 地下掘进钻机智能控制系统组成与信息流拓扑图

3.2 关键技术：机器学习与自适应控制

机器学习在智能控制中也有着不可或缺的作用。通过学习大量的历史数据和实时数据，机器学习算法可以自动识别钻机作业中的各种模式和规律。例如，通过学习不同地质条件下的钻进数据，机器学习算法可以学习到如何调整钻进参数以实现最佳的钻进效率和钻头寿命。自适应控制是在机器学习的基础上，让控制系统根据环境和系统情况的变化，自动调整控制策略。在地下掘进的过程中，地质情况可能会发生变化。自适应控制系统可以实时感知这些变化，并随时调整钻机的钻进速度、扭矩等参数，使钻机始终保持最佳工作状态，提高工作效率和安全性。

机器学习算法有神经网络、支持向量机、决策树等机器学习算法。机器学习算法的选择会对智能控制有一定的影响。

不同的机器学习算法具有不同的优缺点，需要根据实际的应用场景进行选择与优化。例如，神经网络可以对复杂的钻进数据进行处理，具有强大的非线性映射能力，但它需要大量的训练数据和计算资源；支持向量机在小样本情况下具有良好的泛化能力。自适应控制策略需要考虑系统的动态特性以及环境变化的不确定性。自适应控制系统通过不断地调整控制参数，以适应不断变化的工作环境。自适应控制可以通过引入反馈机制和在线学习算法相结合的方式优化其性能。机器学习算法与自适应控制的结合还可以用于故障预测和健康监测，提高钻机的可靠性和维护效率。

在实践中，将机器学习和自适应应用到地下掘进钻机控制系统中，会带来极大的益处。通过机器学习以及自适应控制，智能控制系统也会不断的适应不同地质条件，减少人员干预，节省了操作成本，且智能控制系统可监视钻机实际运行状况，对故障隐患进行提前预知，将故障隐患显示到维修人员面前，避免紧急停止，让钻机利用率更高。除此之外，随着技术的不断创新和发展，机器学习与自适应控制也会与物联网、大数据进行融合，为更加智能、自动控制地下掘进钻机指明道路。

四、系统集成与优化

4.1 集成自主导航与智能控制的挑战

集成自主导航和智能控制面临着诸多挑战。首先，在硬件层面，自主导航中涉及到的各类传感器与智能控制中的执行机构等硬件设备存在了兼容性问题，不同厂家生产的设备之间的数据格式、传输协议等存在差异，两者之间如何进行无缝衔接和协作，确保数据的正确性和实时性需要大量的工作，存在着可能出现数据传输错误或延迟的风险。其次，从软件层面来说，自主导航算法和智能控制算法也需要紧密集成，两种算法之间逻辑和数据处理方式差异，如何确保系统准确导航和智能控制，需要进行大量的研究和调试。同时，地下环境复杂多变，存在了很大的不确定性，如地质条件差异、地下水干扰等因素，会影响到自主导航的定位准确性和智能控制的决策正确性，集成难度大。

4.2 优化策略：提高系统稳定性和效率

在硬件兼容性上，建立统一的硬件接口标准和传输协议，不同的生产厂家生产的传感器按照标准传输数据，减少硬件

间的适配问题,防止数据传输出错延误。在软件算法融合上,一方面组建算法团队,研究自主导航算法、智能控制算法的算法原理、数据处理逻辑,研究两个算法的融合方案;一方面进行大量的仿真实验和真人实验,通过更改算法的参数、算法的逻辑,逐步将两个算法融合起来。在地下复杂环境影响上,引入抗干扰技术、自适应调整技术。例如应用地质勘测仪器提前勘测地下地质环境为自主导航、智能控制提供更精准的信息,再如通过自适应滤波算法滤除地下水等对传感器的干扰数据,提高定位精度、决策精度。建立有效的系统监控预警机制,时刻监测系统的工作状态,出现异常预警并做出调整、修改,提高系统运行的稳定性和效率。

五、安全性与可靠性分析

5.1 安全性要求与标准

对于地下掘进钻机的自主导航与智能控制,安全性的要求和标准是应用中需要关注的方向。首先,要满足国家和行业的相关安全要求和标准,保证设备运行不危害人体和环境的安全,包括机械安全、电器安全、防爆安全等;其次,针对自主导航和智能控制系统制定专门的安全标准和规范,包括系统的响应时间、故障恢复机制、数据传输安全性等,保证系统在地下复杂环境中的健壮性;制定安全管理制度,包括安全培训、安全检查、应急预案等,全面保障地下掘进钻机的安全。

5.2 可靠性评估与故障诊断技术

可靠性分析是提升地下掘进钻机自主导航与智能控制系统可靠性的基础。首先,要建立系统可靠性指标体系,包括系统平均无故障工作时间、故障率、修复率等,对系统可靠性进行综合评估。其次,可以进行故障模式、影响及危害性

分析(FMECA)等,分析系统可能出现故障模式,评估其对系统性能的危害性,并制定针对性的改进措施。再次,故障诊断技术也是提升系统可靠性的有效手段,可以通过引入新传感器技术、数据分析算法等,实时监测系统状态,及时发现潜在故障,并通过智能诊断系统对故障进行准确定位,提供精准的维修方案,缩短故障维修时间,提升系统的可靠性。

结语

在掘进钻机自主化导航、智能控制方面,自主导航技术、智能控制技术、系统集成与优化的研究与进步,掘进钻机的掘进效率和精度变得更加的高效、安全、智能;掘进钻机的自主化导航技术、智能控制技术、系统集成与优化的研究与进步,掘进钻机在复杂的地下环境下适应性和可靠性变得更强;安全可靠性的研究与进步、全面评估和故障诊断技术的进步有效的保证了掘进钻机的可靠性,随着技术的发展掘进钻机在矿山开采、隧道掘进等方面将不可或缺。

参考文献

- [1]岳志宇. 基于机器视觉的悬臂掘进机自动定位与导航技术应用试验[J]. 机械研究与应用, 2023(02):101-104.
- [2]杨丽文. 矿用掘进机自主定位导航控制系统的研究[J]. 机械管理开发, 2022(12):213-215.
- [3]崔建勇. 悬臂式掘进机自主定位导航技术研究 with 试验[J]. 机械管理开发, 2022(03):37-39.
- [4]范柄尧;刘国鹏;赵海伟. 掘进机自动化控制中的关键技术与应用[J]. 煤矿机械, 2024(05):160-162.
- [5]唐奎. 煤矿掘进机智能控制与优化技术研究[J]. 江西煤炭科技, 2024(03):292-294+298.