

悬臂式掘进机可视化自动截割控制系统研究及应用

包艳强 张廷寿 祁亮 闭海云
(中国铁建重工集团股份有限公司 湖南 长沙 410100)

摘要: 针对悬臂式掘进机掘进施工中存在的粉尘大、定位难、隧道成型质量低等问题, 本文对应用于隧道掘进中悬臂式掘进机可视化自动截割控制技术进行了研究。以悬臂式掘进机为例, 介绍了悬臂式掘进机泡沫除尘系统、自动定位系统、路径规划系统、运动控制系统及三维轮廓扫描系统等方面技术原理及作用, 针对性解决悬臂式掘进机施工过程中粉尘大、定位难、隧道成型质量低的问题, 对提升悬臂式掘进机智能化水平具有重要参考意义。

关键词: 悬臂式掘进机; 泡沫除尘; 自动定位; 路径规划; 运动控制; 三维轮廓扫描; 智能

0 引言

随着国家经济的快速发展, 隧道工程及煤矿巷道等施工安全问题日益突出。如何解决安全问题一直是各施工方关注的主要焦点。近年来, 国家大力推动智慧隧道、智慧煤矿等智能化建设, 越来越多的自动化、智能化装备被研制出来并应用于隧道作业现场, 替代人工作业, 进而达到少人化、无人化施工作业。

针对悬臂式掘进机的智能化研究非常多, 例如马宏伟等提出了远程智能测控、智能导航、智能截割和智能协同控制解决方案。谢亚洲针对悬臂式掘进机在实际施工中存在的问题, 对掘进机的定位、定向及自动截割技术进行了研究。庞明等设计了一种具有高精度、远程监控调控的悬臂式掘进机智能控制系统。杜雨馨提出了一种感知掘进机机身空间位姿以及定位截割头的方案。张旭辉等对悬臂式掘进机的远程操控、自动定位、运动控制、数学建模以及故障诊断与监测等方面进行了介绍。张建广基于定位导向、自动截割等智能控制技术, 对掘进机实现智能控制的可能性进行了探讨。

悬臂式掘进机是由中国铁建重工研发的一种综合性隧道掘进设备, 该设备具备切割、行走、装运、除尘等功能, 主要由主机与后配套两部分构成。掘进机工作流程为主机将工作面岩层切割, 然后通过转运机构、运输机将渣石运走。悬臂式掘进机截割头能各个方向自由移动, 切割任意形状截面, 可提高隧道成型质量。悬臂式掘进机装载履带式行走机构, 便于应对各种复杂地质条件。悬臂式掘进机上搭载智能化装置, 可以实现装备自动定位、截割路径规划、自动截割、三维轮廓扫描、实时数据上传等智能化功能, 有效形成了设计、施工到检验的闭环管控, 加强了运行装备管理能力, 极大提升了巷道安全施工智能化管理水平。

本文结合悬臂式掘进机发展现状对可视化自动截割关键技术进行分析和总结, 在分析传统悬臂式掘进机施工存在问

题的基础上, 以悬臂式掘进机为例, 介绍悬臂式掘进机泡沫除尘系统、自动定位系统、路径规划系统、运动控制系统及三维轮廓扫描系统等的技术原理及作用, 实现悬臂式掘进机的定位、定向和断面成形的自动控制, 对提升掘进机智能化水平具有重要意义。

1 传统悬臂掘进机施工存在问题分析

1.1 工作环境恶劣

虽然悬臂式掘进机掘进施工一般都配有除尘风机, 能降低隧道中的粉尘含量, 但除尘风机吸风口与作业面还有一段距离, 持续作业时, 工作面区域的粉尘含量并没有明显改善, 如图 1 所示。司机作业环境充满粉尘, 视野受阻, 看不清断面掘进状况, 往往靠感觉进行截割作业, 截割质量无法保证。

另外, 粉尘大还会影响扫描仪等传感器的工作, 影响全钻仪对隧道轮廓进行扫描和自动定位。

1.2 手动操控误差大

传统施工作业中悬臂式掘进机仍由司机操纵手柄进行截割, 但是手动操控引起的误差大。施工过程中, 隧道岩层环境复杂, 截割头所受阻力变化, 司机面对这种状况, 无法进行精确调整, 使得截割电机容易出现超载和欠载现象, 从而导致工作面出现超挖或欠挖, 影响隧道成型的质量。

综上所述, 传统施工作业面灰尘大, 工作环境恶劣; 手动操控使隧道成型质量低、电机易受损; 视线受阻, 工作效率低。因此, 对悬臂式掘进机的智能控制进行研究很有必要。

2 悬臂式掘进机可视化自动截割控制系统方案

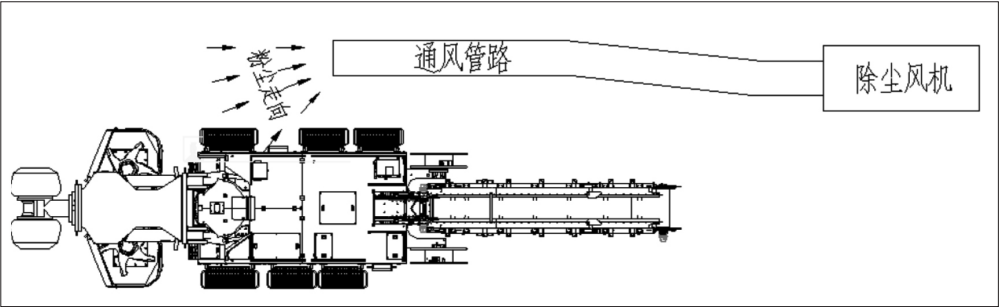


图 1 传统悬臂式掘进机除尘方式



图 2 未使用泡沫除尘



图 3 使用泡沫除尘

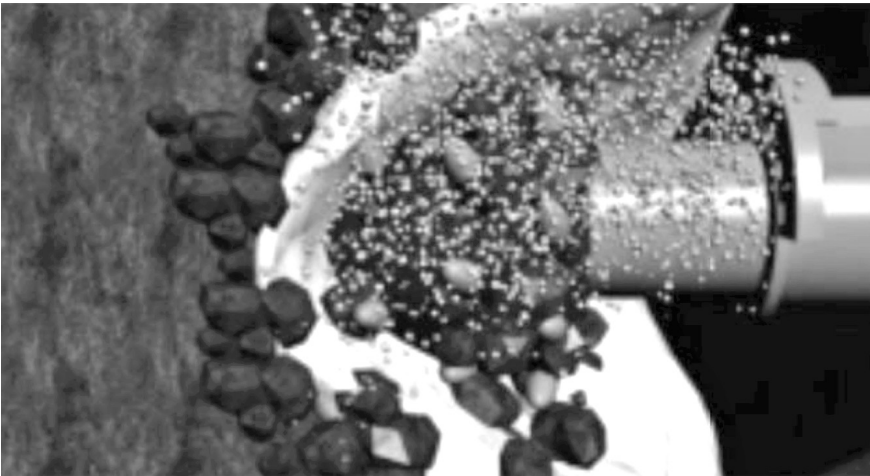


图 4 泡沫除尘原理

2.1 泡沫除尘系统

使用可视化自动截割控制系统需先解决隧道中粉尘大的问题，传统的除尘方式能降低隧道中粉尘含量，但由于除尘风机吸风口与作业面距离较大，持续作业时，工作面区域的粉尘含量无明显改善，未能满足要求。

泡沫除尘系统对源头进行全方位覆盖，有效阻止粉尘向外扩散；除尘效果达到 70% ~ 95%，图 2 为未使用泡沫除尘的工作环境，图 3 为使用泡沫除尘后的工作环境。泡沫除尘的原理是把水、气和发泡剂通过设备混合后，产生大量气、液两相泡沫，经喷头作用在工作面上，形成一个全方位的密闭空间，将粉尘封在其中，从而在源头上解决粉尘（如图 4 所示）。泡沫除尘系统较除尘风机效果更佳。

2.2 可视化自动截割控制系统

2.2.1 悬臂式掘进机自动截割需求分析

悬臂式掘进机实现高效掘进及隧道成形控制，需具备以下要求：

- (1) 巷道断面成形，能截割任何形状断面，截割头需要各个方向自由移动；
- (2) 位姿精确测量，通过各种传感器和处理系统，能够精确判定自身位置；
- (3) 掘进自动控制，对悬臂式掘进机的运动和位置建立数学模型，实现对截割头的精准控制，进而达到全自动控制施工需求；
- (4) 控制方式，考虑隧道环境状况、危险程度、施工状况，需具备远程遥控功能；
- (5) 可靠性高，建立自动监测系统，对整车运行状况进行监测，实现设备诊断与维护，提升设备可靠性及施工效率。

2.2.2 可视化自动截割控制系统组成

可视化自动截割控制系统（如图 5 所示）由自动定位系统、路径规划系统、运动控制系统及轮廓 3D 扫描组成。各系统各司其职、相互协作，共同实现了悬臂式掘进机在隧道下的精准高效作业。

(1) 自动定位系统

悬臂式掘进机采用全站仪加两棱镜及固定在车身的倾角传感器进行精确定位，计算出设备在隧道中的位置与姿态。

悬臂式掘进机利用悬臂回转及俯仰动作控制截割头进行切削作业，实现自动截割作业的首要前提是掘进机需要时刻知道自身所处位置。现有隧道施工机械定位多为单次定位，耗时长、操作复杂，且在掘进机截割作业中单次停车往往不足以对整个断面进行截割，某公司研究了一种两棱镜 + 倾斜仪连续定位系统，系统硬件布置如图 6 所示。

利用全站仪定位是隧道施工中常见定位方法，全站仪通过检测后视棱镜确定自身基准，保证自身基准与巷道基准一致，通过测量和跟踪固定在车身的若干棱镜在隧道坐标系

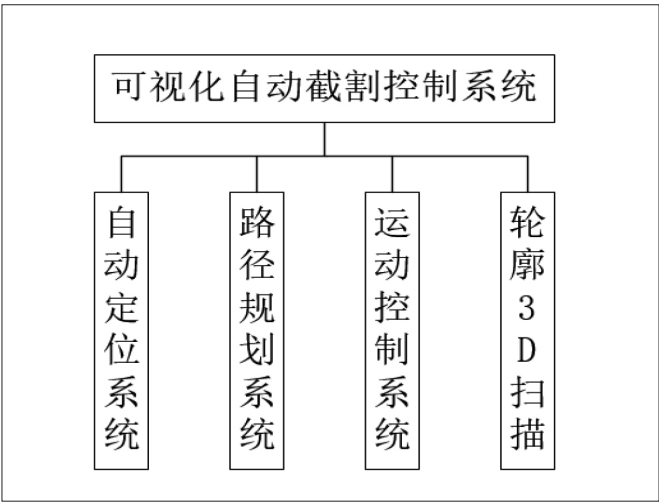


图 5 可视化自动截割系统组成

机械臂运动轨迹的计算，其影响因素众多，计算复杂，是整个控制系统的重点和难点部分。

路径规划系统主要针对臂架及截割头，能够准确计算截割头在空间中的位置及姿态，是路径规划的先决条件。计算截割末端位置及姿态，首先需要建立臂架及截割头数学模型。本文研究的对象 XJH315-ED 悬臂式掘进机臂架及截割头机械结构如图 7 所示，由截割大臂横摆、截割大臂俯仰两关节组成。

利用 D-H 方法建立数学模型，其各关节坐标系如图 8 所示，各坐标系 D-H 参数如下表所示。

(3) 运动控制系统

运动控制系统，负责机械臂运动的具体控制，将路径规划系统的目标付诸实际，控制设备机械臂液压系统，实现自动截割作业。

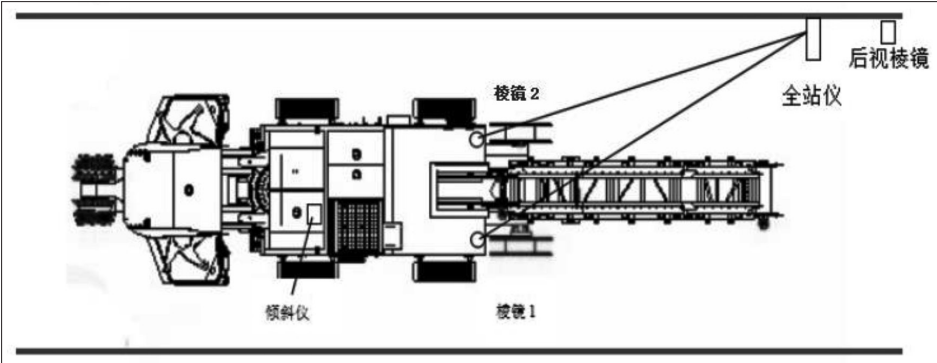


图 6 全站仪安装位置及棱镜布置示意图

运动控制系统主要由工控电脑、控制器、油缸内置行程传感器、编码器、倾斜仪等元器件组成。控制器实时采集各传感器数据并发送至控制系统进行解算。控制系统接收数据后根据设备当前定位，项目设计数据计算出截割路径点集，再通过臂架模型逆解得出各路径点对应关节角度进行依次下发。控制器通过 PID 闭环（如图 9 所示）控制比例阀开启状态，使各关节平稳、准确、快速的达到目标位置。

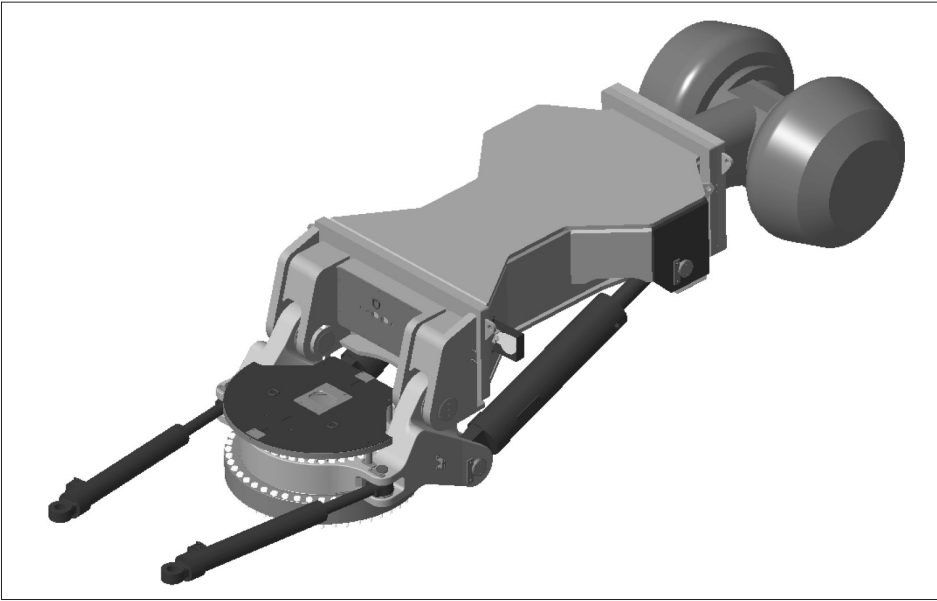


图 7 XJH315 悬臂式掘进机臂架结构三维模型

(4) 轮廓 3D 扫描

轮廓 3D 扫描使用激光扫描仪对隧道轮廓进行扫描，根据台车定位计算出隧道标准轮廓数据及超 / 欠挖数据，指导截割作业。

要实现精准开挖，掘进机需要采集所施工隧道待截割面详细位置信息。首先采用三维激光扫描仪完成对待截割区域的三维扫描，获取该区域相对掘进机坐标系下的点云数据。然后，通过台车定位转换到隧道坐标系下，建立截割区域空间模型，将其与设计数据进行对比（如图 10 所示），统计区域内各点超 / 欠挖信息，对下一掘进循环进行指导作业。

3 结 语

对传统悬臂式掘进机存在问题进行分析和总结，以 XJH315-ED 悬臂式掘进机为例，介绍智能化悬臂式掘进机泡沫除尘、自动定位、数学建模、自动截割、三维轮廓扫描及掘进机状态监测与故障诊断等系统原理及作用，对未来掘进机走向智能化提供了借鉴方向。

中位置结合倾角传感器值计算车身在隧道中的位置和姿态。

(2) 路径规划系统

路径规划系统作为控制系统的核心部分，负责臂架模型的建立与运算，机械臂末端位置运动学正解及自动截割时

表 各坐标系 D-H 参数

坐标系	$\alpha_{i-1} / ^\circ$	α_{i-1} / m	$\theta_i / ^\circ$	d_i / m	关节变量	初始值	范围值
基系	0.5047	-1.5398	0	0.038	0	0	/
1	0	0	θ_1	θ_1	θ_1	0	[-35, +35]
2	-90	0.5	θ_2	0	θ_2	-90	[-53, +32]
3	0.3737	4.91	/	0	/	/	/

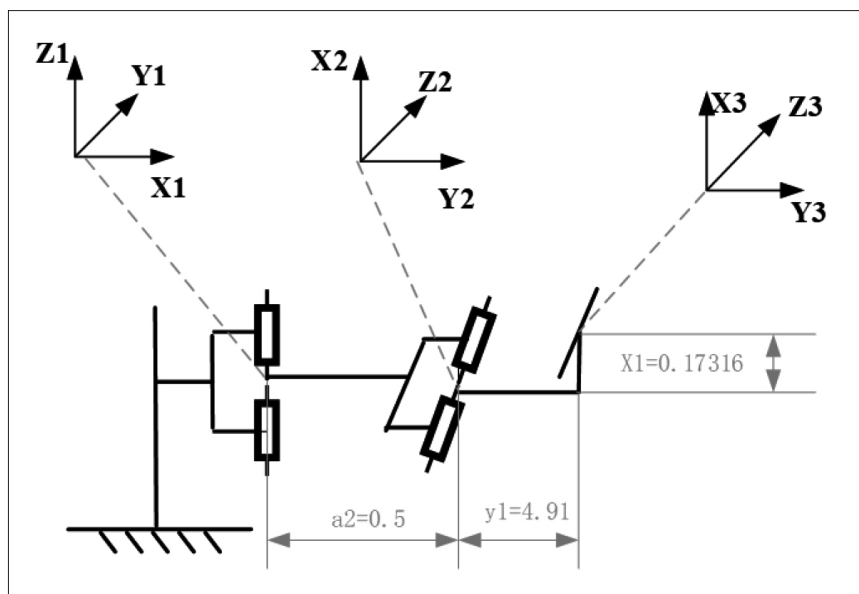


图 8 悬臂式掘进机臂架理想模型

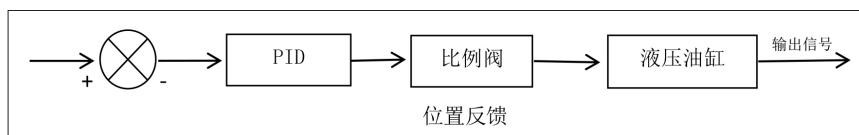


图 9 臂架运动控制闭环

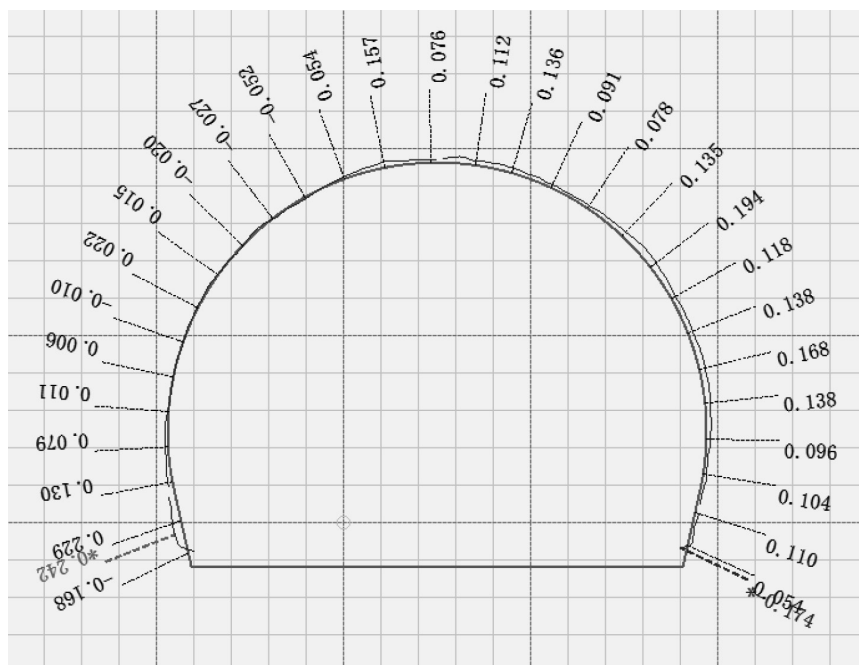


图 10 隧道开挖轮廓与设计轮廓对比示意图

(1) 泡沫除尘系统改善工作环境, 有利于可视化自动截割系统实现掘进机自主完成截割作业。

(2) 较传统悬臂式掘进机施工方法, 可视化自动截割系统可精准识别截割区域各位置超/欠挖情况并及时处理, 并根据设计数据自动规划截割路径, 提高隧道成型质量。

(3) 可视化自动截割系统可实现掘进机自动截割作业,有效减少现场施工人员数量,改善隧道成型质量,提高工作效率。

参考文献:

- [1] 薛景予. 安全工程在煤矿安全管理中的应用[J]. 矿业装备, 2021(01):50-51.
- [2] 王磊. 煤矿井下斜井人车安全技术现状及对策[J]. 煤矿安全, 2020,51(11):146-149.
- [3] 樊红卫, 张旭辉, 曹现刚, 等. 智慧矿山背景下我国煤矿机械故障诊断研究现状与展望[J]. 振动与冲击, 2020,39(24):194-204.
- [4] 梁小军. 煤矿智能化开采技术的创新与管理[J]. 智能城市, 2020,6(22):105-106.
- [5] 马宏伟, 王世斌, 毛清华, 等. 煤矿巷道智能掘进关键共性技术[J]. 煤炭学报, 2021,46(1):310-320.
- [6] 谢亚洲. 悬臂式掘进机智能控制系统研究[D]. 西安科技大学, 2019.
- [7] 庞明. 悬臂式掘进机智能控制系统设计研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020,40(12):145-146.
- [8] 杜雨馨. 矿井悬臂式掘进机位姿感知及定位方法研究[D]. 中国矿业大学, 2019.
- [9] 张旭辉, 刘永伟, 毛清华, 等. 煤矿悬臂式掘进机智能控制技术研究及进展[J]. 重型机械, 2018(02):22-27.
- [10] 张建广. 悬臂式掘进机智能截割控制技术发展现状及关键技术探讨[J]. 煤炭工程, 2015,47(02):89-91.