

# 基于 STM32 的智能卸压钻孔车的研究

潘佳羽 李振达 王新博 于光远\*

华北理工大学电气工程学院 河北唐山 063210

DOI: 10.12238/ems.v7i3.12301

**[摘要]** 本文提出了一种基于 STM32 的智能卸压钻孔车,旨在为煤矿深部开采提供创新的冲击地压防控解决方案。冲击地压是深部开采中的重大安全隐患,其突发性和破坏性极大地威胁矿井安全和生产效率。传统的卸压方法存在效率低、实时性差等问题。为了提高煤矿开采的安全性,本文设计了一种集成多源传感器、自主导航系统和智能决策模型的钻孔车,通过“实时监测-动态预警-精准卸压”的闭环控制,实现对冲击地压的有效防控。该系统基于 STM32 单片机,采用 PID 控制算法进行钻孔深度和压力的精确控制,同时结合 Hybrid A\* 路径规划算法优化钻孔车的行驶路径,确保在复杂地质环境下高效、安全作业。此外,陀螺仪零点漂移消除算法也被应用于姿态控制系统,确保设备在矿井中能够稳定导航。通过这些算法的集成,系统实现了高效、精准的自动化钻孔作业,保障了矿井作业的安全性与效率。

**[关键词]** STM32; 钻孔卸压; 路径规划; PID; Hybrid A\*

## 一、引言

冲击地压是深部特厚煤层开采中的重大安全隐患,其突发性强、破坏性大,严重威胁矿井安全与生产效率。随着社会的迅速发展,全球范围内对矿产资源的需求量正在逐步增加,长期的高强度采矿活动导致浅部资源匮乏,资源的开发和利用必然逐渐转入深部<sup>[1]</sup>。特厚煤层的开采面临更高的地应力集中风险,尽管近年来智能化技术的发展为冲击地压防治提供了新思路,但目前如钻孔卸压、煤层注水等传统方法仍存在适应性差、效率低、实时性不足等问题。为此本文提出一种智能化矿井防冲卸压机车,旨在为复杂地质条件下的煤矿安全开采提供创新解决方案。

## 二、国内外研究现状

在岩石卸压理论与技术研究领域,岩石卸压技术被视为一种高效的矿山压力管理手段。该技术通过实施岩石预裂、开设卸压孔等措施,有效减弱矿压显现现象,提升矿山作业的安全生产标准。

在实际地下工程和矿山开采等领域方面,国内工程师们也在实际工程中总结出了一些预防冲击地压的有效方法。目前煤岩体卸压的主要方法有爆破卸压、煤层注水、钻孔卸压、定向裂缝等<sup>[4]</sup>。而国外一些发达国家在冲击地压的理论研究方面则提出了一些新颖的理论模型和分析方法,例如电磁辐射监测技术,国外学者 Frid 等分析了电磁辐射参数(频率范围、强度)与微裂纹尺寸和岩石弹性性质的关系,研究了冲击地压危险与电磁辐射信号变化之间的相关性,提出了针对冲击地压的电磁辐射预警方法<sup>[3][4]</sup>。

## 三、总体设计方案

冲击地压智能防控钻孔车主要分为两部分,第一部分为数据采集及传输模块:钻孔车通过 HP10 型硅压阻式压力传感器进行压力数据采集,将采集到的数据通过数据采集卡输送

到上位机中,进行数据实时检测和压力值分析;同时采集到的数据还会发送到 stm32f03c8t6 单片机中,通过蓝牙传输到智能钻孔车的 stm32f429IGT6 单片机中,从而启动小车使到达规定位置。第二部分是机械设计模块:智能钻孔车搭载的机械硬件设计部分包括履带式结构、铝合金外壳和 3 轴自由度钻头。

## 四、机械模块设计

### 4.1 钻孔机构

在钻孔泄压作业中,通常选用镶齿牙轮钻头或金刚石钻头。镶齿牙轮钻头凭借其特殊的牙轮构造与硬质合金齿,能有效破碎岩石;金刚石钻头则利用金刚石的高硬度实现高效钻进。而钻杆作为连接钻头与动力源的关键部件,具备足够的强度和刚性,以此保证扭矩的稳定传递与钻孔的直线度。

钻孔器控制系统具备转速调节功能,依材料特性和钻孔深度实时调整转速,初期可提速,后期或遇硬度变化时降速。

钻孔车机械臂设计涵盖四大关键运动关节:绕 X 轴的俯仰、绕 Y 轴的偏航、绕 Z 轴的自转,以及沿 Z 轴的伸缩。基座选用高强度材料打造,保障稳定性,同时设有旋转平台以实现偏航运动。自转关节则由旋转电机或液压马达驱动,可精确调节钻头角度。

控制系统采用自动模式,自动控制通过单片机完成。传感器系统包括角度传感器、位移传感器和压力传感器,用于实时监测机械臂状态。人机界面配备操作面板和显示屏,便于设置参数和监控钻孔过程。

### 4.2 移动机构

底盘为履带式底盘,履带是由驱动链轮驱动、围绕着驱动链轮、负重轮和诱导轮的柔性链环,由履带板和履带销组成。驱动链轮的动力来源于下箱体中的驱动电机,经过传动

轴传输至驱动链轮。履带销将各履带板连接起来构成链环，履带板的两端有孔，与驱动链轮啮合，中部有诱导齿，用来规正履带，防止在运动过程中产生脱落，诱导轮是从动轮，用于调整履带紧程度提高履带行走系统的越障高度。驱动链轮与履带链节啮合，卷绕履带使其与地面作用产生牵引力，负重轮支承车重并把履带紧压在地面上，使履带与地面保持较大的接触面积，以产生更大的附着力，同时把车体对履带

的运动变为负重轮的滚动。

### 4.3 车身

外壳采用双层结构，外层为铝合金蒙皮，提供外观与基本防护；内层为加强筋结构，以增强外壳刚性。加强筋根据受力分析结果合理布局，如在易受冲击的车头、车尾部位加密加粗。在外壳开设散热孔、通风口，采用百叶窗或导流罩设计，引导气流，为内部设备散热。

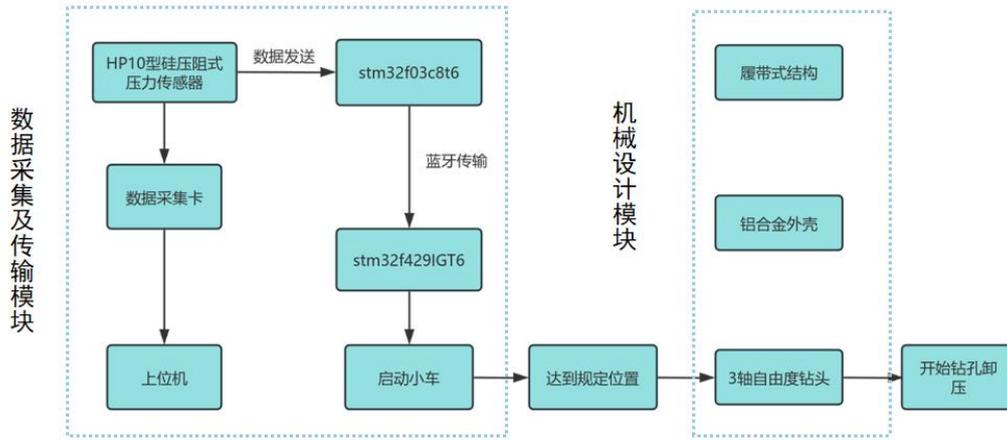


图 1 研究技术路线图

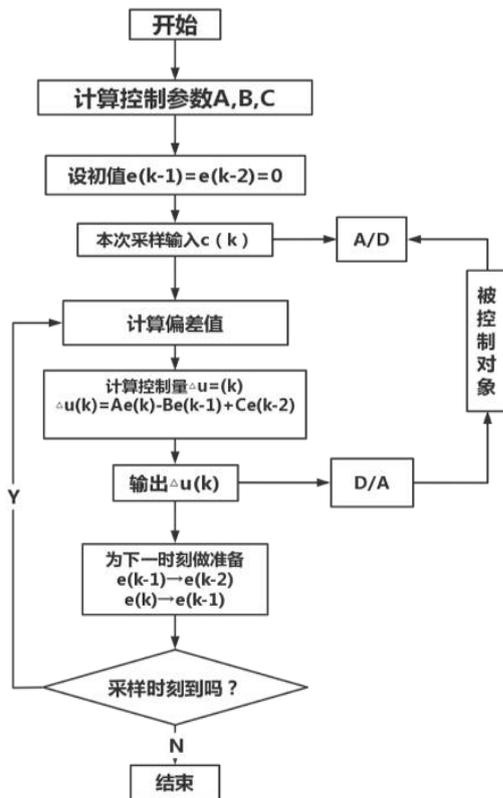


图 2 PID 算法

### 五、PID控制算法

PID 控制算法是一种广泛使用的控制策略，它包括比例

(P)、积分 (I) 和微分 (D) 三个部分，分别用于处理当前误差、累积误差和误差变化率。这种算法结构明了，使用简单，便于调试，并且具有较好的稳定性能。

在数字芯片上，PD 控制算法通常涉及位置和增量两种控制方式。位置控制输出全量，需要高计算能力，而增量控制只需输出被控量的差值，降低了计算复杂性。增量控制的优势包括输出量与过去参量的关联较少，计算简单，且在主芯片故障时可以保持输出不变。

然而，增量控制方式存在一些缺陷，如积分截断可能导致静态误差和溢出响应增大。因此，在设计中需要综合考虑增量控制的优势和缺陷，以达到更好的控制效果。其算法流程图如下图所示。

系统通过确认控制参数及初始值，进行采样并计算目标值与采样值的偏差。得到的控制量增量传递到下一个环节，准备下一时刻的控制。为解决电机超调问题，采用遇限消弱方式，通过实时监测电机电流，当超过限定值时，调整输出量，降低 PWM 占空比，确保电机稳定运转。

### 六、Hybrid A\*路径规划算法

根据 SLAM 社区的 SLAM 建图算法为基础，进行优化减少计算量，增加鲁棒性，路径规划算法以 Hybrid A\*路径规划算法为基础进行优化，获取可以实时规划的路径规划算法。在环境全局地图的基础之上混合 A\*算法在全局网络中依据扩展节点，选择算法中最短节点直至终点，不断迭代。混合 A\*算法也可调整路径规划范围，保留已通过路径，在当前位置基础之上进行二次规划，减少搜索路径，提高计算效率。

## (1) 可行运动点的生成

考虑了机器人运动学因素,将运动分解为三个二维平面,然后分别处理,得到下一次无人机的运动点。

## (2) 构建最优边值问题计算启发式开销

通过计算最优边值问题,考虑了无人机的运动学和动力学特性,计算启发式的开销。

## (3) 节点的扩展及剪枝

比较不同节点的开销,并选择开销最小的节点进行扩展,剪枝高开销的路径。在动力学和运动学的基础上完成路径搜索。

## (4) 控制点的求解

对于前端生成的次优路径,采用等时间 T 采样的方式,得到 K 段路径,每段路径包括首末位置  $p_k$ 、速度  $v_k$  和加速度  $a_k$ 。然后,针对每段路径,使用最小二乘近似方法求解超定方程,以获取相应的控制点。这一过程有助于在给定时间采样的基础上,通过数学建模和求解,得到路径的控制点,进而更好地描述和优化路径的特性。

$$\begin{bmatrix} p_s \\ p_e \\ v_s \\ v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}$$

式中,  $p_s$ ,  $p_e$  为首尾端点位置;  $v_s$ ,  $v_e$  为首尾端点速度;  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  为控制点位置。

## 改进 A\* 算法

由于履带车辆的转向机构操作相对较为困难,难以连续调节转向半径,使得履带车辆运动轨迹显示出曲率变化少、曲率易突变的特点。而传统方法规划的路径曲率连续变化且变化多,不仅导致跟踪效果差,还会使得的拉动操纵杆动作过于频繁,大大缩短转向机构的寿命。为了符合履带车运动规律,且易于控制,减少操纵杆的动作,履带式车辆的运动路径应有着较大的直线占比,转弯部分以固定曲率半径的圆弧连接。

传统 A\* 算法为全局启发式算法,有着良好的搜索最短路径的能力,但只能作为静态全局算法,且路径转折点过多,计算量过大。为了使 A\* 算法所规划路径更满足履带式车辆的实际运动路径需要,本文将对 A\* 算法作出一定的改进。

假设 T 时刻时,履带式车辆前进方向上有半径为  $r$ , 角度为  $90^\circ$  的扇形观察域,此观察域随着履带车辆的前进方向改变而改变,人工势场初步感知出观察域内的障碍与非障碍区域,非障碍区域每个点相对终点的势能为:

$$E_{att} = kd \quad (1)$$

相对障碍的势能为:

$$E_{rep} = \frac{m}{d_2}, d_2 < p_0 \quad (2)$$

其中,  $k$  为引力系数,  $m$  为斥力系数,  $d_1$ ,  $d_2$  分别为非障碍区域点与终点、障碍的距离,  $p_0$  为斥力影响距离。观察域内每个非障碍点的势能为:

$$E = E_{att} + \sum E_{rep} \quad (3)$$

将 T 时刻时人工势场计算所得的势能最低点设为当前 A\* 算法当前的子目标点。

引入人工势场后,复杂的环境相当于被分割为若干简单环境,提高了 A\* 算法规划效率。人工势场为 A\* 算法指出了当前的子目标,使得 A\* 算法具备了未知环境的路径搜索能力。传统人工势场所规划路径质量差,易于陷入局部极值。A\* 算法缩短了路径长度,且可作为陷入极值点时的代替算法,跳出局部极值点。

## 七、结语

智能卸压钻孔车的研究和应用为煤矿深部开采提供了一种新的技术路径,能够有效应对复杂地质条件下的冲击地压问题。通过综合利用 STM32 单片机、传感器技术和路径规划算法,该系统不仅提高了钻孔作业的效率 and 安全性,而且增强了设备在复杂环境下的适应性。未来,随着人工智能、大数据分析等新兴技术的进一步应用,智能卸压钻孔车将在煤矿安全开采领域发挥越来越重要的作用,为保障矿井安全生产提供有力的技术支持。

## [参考文献]

- [1]何满潮.深部软岩工程的研究进展与挑战[J].煤炭学报,2014,39(08):1409-1417.DOI:10.13225/j.cnki.jcscs.2014.9044.
- [2]Frid V.Rockburst hazard forecast by electromagnetic radiation excited by rock fracture[J].Rock mechanics and rock engineering,1997.30(4):229-236.
- [3]狄洋阳.基于深度学习的冲击地压震声电综合预警研究[D].中国矿业大学,2022.DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2022.000118.
- [4]魏全德.巨厚砾岩下特厚煤层冲击地压发生机理及防治研究[D].北京科技大学,2015.
- 作者简介:潘佳羽,女,吉林省白城市,汉族,(2004.12),本科在读,研究方向:测控仪器与技术;  
李振达,男,河北省衡水市,汉族,(2005.10),本科在读,研究方向:机械工程;  
王新博,男,河北省唐山市,满族,(2004.12),本科在读,研究方向:自动化;  
于光远(通讯作者),男,河北省承德市,满族,(1991.1),博士,讲师,研究方向:矿山岩体力学。