

文章编号: 1671-251X(2025)01-0126-12

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024090031

# 煤矿主运大巷轮式巡检机器人摇臂式行走机构设计与试验研究

杨瑞<sup>1</sup>, 鲍久圣<sup>1</sup>, 鲍周洋<sup>1</sup>, 阴妍<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 潘国宇<sup>1</sup>, 杨姣<sup>1</sup>, 葛世荣<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116;  
2. 中国矿业大学(北京) 机械与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 目前主运大巷带式输送机巡检机器人主要采用悬挂轨道式巡检方式, 无法巡检位置较低或被遮挡的设备, 难以满足井下巷道及设备的全方位巡检需求。设计了一种基于轮式巡检机器人的摇臂式行走机构, 与轨道式巡检机器人配合使用, 以满足全方位巡检需求。确定了轮式巡检机器人的系统结构, 重点对其行走系统进行了分析, 分别建立了履带式、轮履式、摇臂式 3 种行走机构的量化模型, 利用德尔菲法与网络分析法对行走机构性能进行了综合分析, 结果表明: 基于摇臂式行走机构的机器人移动底盘在井下巷道环境内的行走适应性最佳。对摇臂式行走机构中的关键部件倒 V 型连杆进行静态性能分析, 结果表明: 倒 V 型连杆满足煤矿井下常见的坡道满载、紧急转弯、紧急制动 3 种工况下的强度与刚度需求。面向煤矿井下主运大巷地形特点及运输装备环境, 开展模拟巷道内的机器人巡检试验, 结果表明: 摆臂式轮式巡检机器人在坡道、台阶、沟道的行走测试中均表现出良好的环境适应性, 能够满足对煤矿井下巷道及其内部主要设备的巡检需求。

**关键词:** 主运大巷; 轮式巡检机器人; 巷道巡检; 摆臂式行走机构; 履带式行走机构; 轮履式行走机构; 倒 V 型连杆

中图分类号: TD76

文献标志码: A

Design and experimental research on the rocker arm walking mechanism of the wheeled inspection robot for the main transportation roadway of coal mines

YANG Rui<sup>1</sup>, BAO Jiusheng<sup>1</sup>, BAO Zhouyang<sup>1</sup>, YIN Yan<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, PAN Guoyu<sup>1</sup>,  
YANG Jiao<sup>1</sup>, GE Shirong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Currently, inspection robots for main transport roadway belt conveyors primarily employ a suspended track-based inspection method. However, this approach cannot inspect equipment located in lower or obstructed positions, making it difficult to meet the comprehensive inspection requirements for underground roadways and equipment. A rocker arm walking mechanism for a wheeled inspection robot was designed to complement track-based inspection robots, fulfilling the need for comprehensive inspections. The system structure

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2025-01-09; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金资助项目(BA2023035); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 徐州市在徐高校服务“343”产业发展项目(gx2024002)。

作者简介: 杨瑞(1999—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为煤矿机器人, E-mail: 727160489@qq.com。通信作者: 鲍久圣(1979—), 男, 安徽桐城人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为矿山智能运输与机器人技术, E-mail: cumtbjs@cumt.edu.cn。

引用格式: 杨瑞, 鲍久圣, 鲍周洋, 等. 煤矿主运大巷轮式巡检机器人摇臂式行走机构设计与试验研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(1): 126-137.

YANG Rui, BAO Jiusheng, BAO Zhouyang, et al. Design and experimental research on the rocker arm walking mechanism of the wheeled inspection robot for the main transportation roadway of coal mines[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(1): 126-137.



扫码移动阅读

of the wheeled inspection robot was determined, with a focus on analyzing its walking system. Quantitative models for three walking mechanisms—crawler, wheeled-crawler, and rocker arm—were established. The Delphi method and network analysis were employed for a comprehensive performance evaluation of the walking mechanisms. The results demonstrated that the robot's mobile chassis, based on the rocker arm walking mechanism, had the best adaptability for walking in the underground roadway environment. Static performance analysis of the key component, the inverted V-link, in the rocker arm walking mechanism revealed that the inverted V-link met the strength and stiffness requirements for three typical working conditions in coal mines: full-load ramp, emergency turning, and emergency braking. Considering the terrain features of the main transport roadway and the environment of the transport equipment in coal mines, simulated inspection experiments were conducted in a laboratory roadway. The results showed that the rocker arm wheeled inspection robot exhibited excellent environmental adaptability during walking tests on ramps, steps, and channels, fulfilling the inspection needs for underground roadways and their main equipment in coal mines.

**Key words:** main transport roadway; wheeled inspection robot; roadway inspection; rocker arm walking mechanism; crawler walking mechanism; wheeled-crawler walking mechanism; inverted V-link

## 0 引言

我国是世界第一煤炭大国<sup>[1]</sup>,采用机器人下井代替矿工作业是我国煤矿智能化建设的必由之路<sup>[2]</sup>。目前我国各类煤矿机器人的研发均有所突破,部分已经在井下试运行<sup>[3]</sup>。国家矿山安全监察局发布的《煤矿机器人重点研发目录》<sup>[4]</sup>中明确规划5大类38种煤矿机器人为重点研发方向<sup>[5]</sup>。目前,煤矿井下主运大巷带式输送机巡检机器人的发展和应用已相对成熟,但其仍以悬挂在带式输送机上方的轨道式机器人为主,巡检角度受限于视角,对位置较低或被遮挡的设备无法巡检,如图1所示。因此,亟需改造或设计一种更适合井下跨空间、变环境、可越障的轮式巡检机器人,通过与现有轨道式机器人配合使用,以实现机器人对井下主运大巷及其内部设备的高精度、全方位巡检。

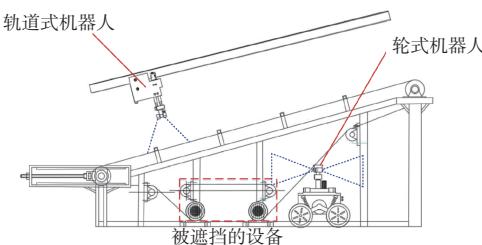


图1 井下全方位巡检

Fig. 1 All-round inspection in underground roadways

在功能方面,煤矿巡检机器人的移动底盘与其他特种机器人的移动底盘并无太大差别,因此现有煤矿巡检机器人多是对适用于非结构化地形中的常规移动底盘的借鉴和优化。针对煤矿机器人的移动底盘,李允旺等<sup>[6]</sup>在常规的轮式、履带式行走机构的基础上进行了推衍与图形拓扑,并将履带式行走机

构引入摇杆式四轮机器人悬架中,得到了双履带式、四履带双摆臂式、六履带四摆臂式及摇杆式履带行走机构,但并未对不同行走机构的性能进行横向比较,也没有给出何种行走机构最适应煤矿井下巡检的结论。赵明辉等<sup>[7]</sup>针对煤矿井下复杂环境,提出一种腿式、履带式相融合的复合移动底盘,但其本质为四摆臂履带式移动底盘的一种变形,在关键结构上仍依赖履带式底盘设计,仅局部添加腿式元素,未深度融合二者优势,因动力不均、稳定性差等问题导致机器人井下适应性不强。刘罡等<sup>[8]</sup>研制出了一种多节履带式行走系统,该行走系统类似于Souryu搜救系列机器人,但其结构和控制十分复杂,也未进行防爆设计。孙国栋等<sup>[9]</sup>对比了现有履带式移动底盘的优缺点,设计了一种W扩展型履带式移动底盘,应用在CUMT-VI型煤矿救援机器人样机上,在比较现有履带式移动底盘的优缺点时仅通过作图法评判机器人通过单级台阶时的位姿状态,评价方法较为单一。蔡李花等<sup>[10]</sup>设计了一种类似于螃蟹的煤矿探测机器人行走机构,并对其直线行走和原地转向步态进行了分析,但该行走机构采用6个驱动电动机,增加了成本、重量、能耗,且未进行防爆设计。李秋生等<sup>[11]</sup>在双摆臂履带式移动底盘的基础上,前后又增加了2个摆臂,以进一步改善底盘的越障效果,但也增加了双摆臂履带式移动底盘的复杂度与操控难度。

理论上,移动底盘越复杂、自由度越多,其地形适应性越好,但是同时也带来了复杂的机器人防爆问题<sup>[12]</sup>。因此,现有的煤矿巡检机器人样机多以简单的移动底盘为主,如Groundhog机器人、Cave Crawler机器人和Numbat机器人都采用了最简单的

轮式移动底盘。巡检机器人移动底盘的研究目标是配置可靠的运动控制方式与合适的行驶机构,提高巡检机器人的运动灵活性。目前尚无合适的行走机构能够满足煤矿井下巡检机器人的实际使用需求。因此,本文结合井下实际工况,设计了一种轮式巡检机器人摇臂式行走机构,以其独特的摇臂式结构实现在煤矿井下台阶、沟道及坡道 3 种典型工况下的灵活运动,以满足煤矿井下巷道全方位巡检需求,并展开巷道模拟试验来验证其合理性。

## 1 井下主运大巷轮式巡检机器人系统设计

当前巷道内的巡检任务以轨道式巡检机器人为主,但是巡检路线固定且存在视觉盲点,需要一种更加灵活机动的轮式巡检机器人来配合使用,以实现对井下主运大巷及其内部设备的全方位巡检。

### 1.1 井下巷道巡检工作特点

煤矿井下巷道布置如图 2 所示,其中主运大巷、辅运大巷和回风大巷是煤矿井下的运输干线<sup>[13]</sup>。巡检机器人在主运大巷内目前只能在轨道上行走,巷道内只有人行道可供移动设备行走。人行道外布置有设备与凹槽<sup>[14]</sup>。根据矿井巷道建设的相关要求,井下人行道宽度至少 1 m。因此,巡检机器人的尺寸应尽可能小。主运大巷环境现场如图 3 所示<sup>[15]</sup>。

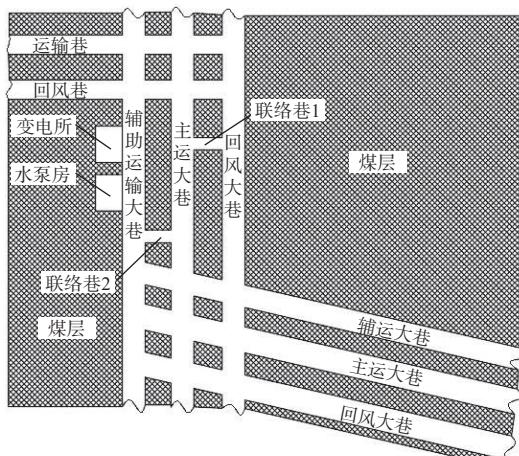


图 2 煤矿井下巷道布置

Fig. 2 Layout of coal mine underground roadway

常见的井下主运大巷主要包括坡道、台阶及沟道 3 种路况,分别对应井下的斜坡道路、单级台阶及排水沟为主的沟道,如图 4 所示。

### 1.2 轮式巡检机器人主体结构设计

根据主运大巷的特点,煤矿井下轮式巡检机器人需要满足以下条件:最高行走速度>3.6 km/h;最大上、下坡角度>20°;最大上、下台阶高度>200 mm;最大跨越沟道宽度≥200 mm;最大跨越沟道深度



图 3 主运大巷环境现场

Fig. 3 On-site environment site of main transport roadway

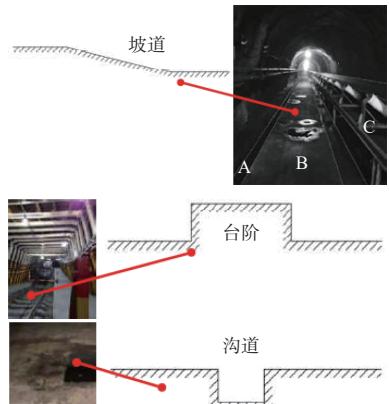


图 4 煤矿巷道特征地形二维图

Fig. 4 2D map of coal mine roadway terrain features

≥200 mm; 机器人外壳需达到井下防爆要求。

本文设计的轮式巡检机器人<sup>[16]</sup>由巡检感知系统、井下行走系统、控制系统、电源供应中心、信号传输系统组成,如图 5 所示。

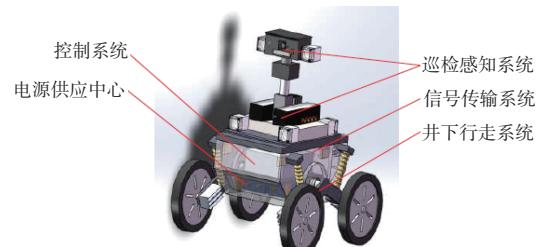


图 5 轮式巡检机器人结构

Fig. 5 Structure of wheeled inspection robot

其中行走系统是实现轮式巡检机器人在井下水平方向全方位巡检的关键,主要包括倒 V 型连杆与驱动电动机。倒 V 型连杆保障巡检机器人在进出巷道遇到台阶时有足够的能力越过台阶;驱动方式采用轮边电动机,即每个车轮旁均安装 1 个电动机,保证轮式巡检机器人在煤矿井下能够灵活移动。

## 2 轮式巡检机器人巷道内行走性能评价分析

为保障巡检机器人能够在井下巷道正常工作,需针对巡检机器人的行走系统进行深入研究。先建立行走系统评价模型,再采用综合分析法对行走系

统性能进行综合评判,以确定何种行走机构在井下适应性最佳。

### 2.1 井下行走系统评价模型建立

从移动底盘行走能力、防爆技术和机构可靠性这3个方面搭建轮式巡检机器人井下行走系统评价量化模型。

#### 2.1.1 行走能力量化模型建立

移动底盘在目标路径中行走,需适应该路径中的常见地形,如坡道、台阶、沟道等<sup>[17]</sup>。巷道巡检机器人在巷道场景下对坡道、台阶、沟道的性能指标的考核情况也是行走能力的参考系数。

##### 1) 履带式行走机构行走能力评估。

当履带式行走机构的前轮与所跨越沟道的边沿接触,即达到沟道的极限位置(图6)。

$$l_1 = \sqrt{\left(\frac{L_1}{2} + R_1\right)^2 + R_1^2} \quad (1)$$

式中: $l_1$ 为跨越沟道的宽度; $L_1$ 为履带式机器人车身长度; $R_1$ 为履带式机器人驱动轮半径。

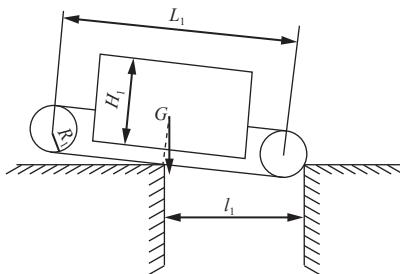


图6 履带式行走机构翻越沟道的极限位置

Fig. 6 Limit position of crawler walking mechanism crossing a channel

在履带式行走机构跨越障碍时,其重心的垂直延长线与台阶边缘处于同一平面,此时达到履带式机器人爬取动作的极限位置,再往前行走将受重力G作用发生倾覆(图7)。

$$h_1 = \left( \frac{L_1}{2} + R_1 \tan \frac{\theta_1}{2} - \frac{H_1}{2} \tan \theta_1 \right) \sin \theta_1 \quad (2)$$

式中: $h_1$ 为履带式行走机构翻越的单级台阶高度; $\theta_1$ 为履带式行走机构的抬升角度; $H_1$ 为履带式行走机构的车身高度。

履带式行走机构理论上能够翻越的单级台阶高度极限应小于其车轮半径,因此,理论台阶高度 $h_1$ 与车轮半径 $R_1$ 中较小者为行走机构翻越台阶的实际高度 $h'_1$ 。

$$h'_1 = \min(R_1, h_1(\theta_1)_{\max}) \quad (3)$$

##### 2) 轮履式行走机构行走能力评估。

当轮履式行走机构的前轮与所跨越沟道的边沿

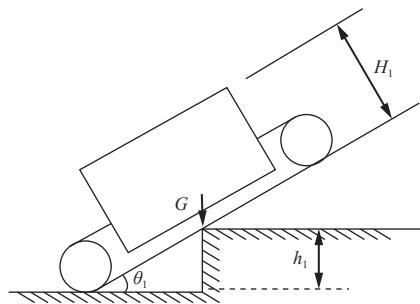


图7 履带式行走系统翻越单级台阶的极限位置

Fig. 7 Limit position of crawler walking system climbing a single-step stair

接触时,达到机器人翻越沟道的极限位置(图8)。

$$l_2 = \sqrt{\left(\frac{L_2}{2} + R_2\right)^2 + R_2^2} \quad (4)$$

式中: $l_2$ 为跨越沟道的宽度; $L_2$ 为轮履式机器人车身长度; $R_2$ 为轮履式机器人驱动轮半径。

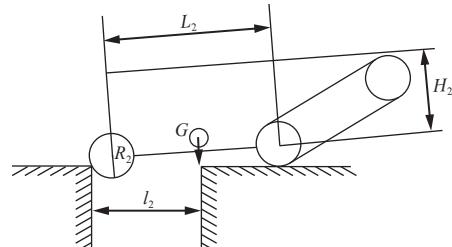


图8 轮履式行走机构跨越沟道的极限位置

Fig. 8 Limit position of wheeled-crawler walking mechanism crossing a channel

在机体跨越障碍时,前轮重心的垂直延长线与台阶边缘处于同一平面,此时达到轮履式行走机构爬取动作的极限位置,再往前行走将受重力G作用发生倾覆(图9)。

$$h_2 = \left( \frac{L_2}{2} + R_2 \tan \frac{\theta_2}{2} - \frac{H_2}{2} \tan \theta_2 \right) \sin \theta_2 \quad (5)$$

式中: $h_2$ 为轮履式行走机构翻越的单级台阶高度; $\theta_2$ 为轮履式行走机构车身抬升角度; $H_2$ 为轮履式行走机构车身高度。

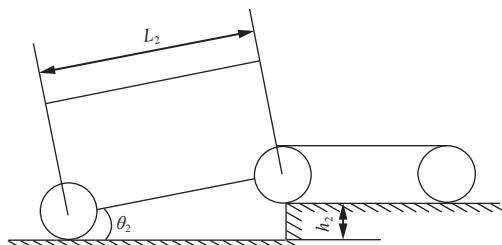


图9 轮履式行走机构跨越单级台阶的极限位置

Fig. 9 Limit position of wheeled-crawler walking mechanism climbing a single-step stair

轮履式行走机构理论上能够翻越的单级台阶极限应小于其车轮半径,因此,理论台阶高度 $h_2$ 与

车轮半径  $R_2$  中较小者为行走机构翻越台阶的实际高度  $h'_2$ 。

$$h'_2 = \min(R_2, h_2(\theta_2)_{\max}) \quad (6)$$

### 3) 摆臂式行走机构行走能力评估。

当揆臂式行走机构的前轮与所跨越沟道的边沿处于同一平面时, 达到机器人翻越沟道的极限位置(图 10)。

$$l_3 = (R_3 + L_{31}) \cos(\theta_{31} + \theta_{32}) \quad (7)$$

式中:  $l_3$  为跨越沟道的宽度;  $R_3$  为揆臂式机器人驱动轮半径;  $L_{31}$  为揆臂杆中心到车轮中心长度;  $\theta_{31}$  为揆臂半径与机器人两车轮连线的夹角;  $\theta_{32}$  为机器人两车轮连线与水平线的夹角。

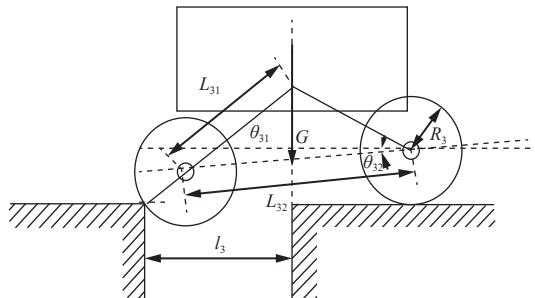


图 10 揆臂式行走机构跨越沟道的极限位置

Fig. 10 Limit position of rocker arm walking mechanism crossing a channel

揆臂式行走机构所能跨越的最大沟道宽度与揆臂式机器人的连杆摇臂长度呈正相关, 连杆长度越长, 所能跨越的沟道宽度越宽。由式(7)可知, 单级台阶高度  $h_3$  是关于  $\theta_{32}$  的函数。

在机体跨越障碍时, 当前轮重心的垂直延长线与台阶边缘处于同一平面, 此时达到揆臂式行走机构爬取动作的极限位置, 继续向前将受重力  $G$  作用发生倾覆(图 11)。

$$h_3 = L_3 \sin \theta_3 \quad (8)$$

式中:  $h_3$  为揆臂式行走机构翻越的单级台阶高度;  $L_3$  为揆臂式行走机构的车身长度;  $\theta_3$  为揆臂式行走机构的抬升角。

由于揆臂式行走机构理论上能够翻越的单级台阶极限应小于其车轮半径。所以, 理论台阶高度  $h_3$  与车轮半径  $R_3$  中较小者为行走机构翻越台阶的实际高度  $h'_3$ 。

$$h'_3 = \min(R_3, h_3(\theta_3)_{\max}) \quad (9)$$

#### 2.1.2 防爆难易评价模型建立

防爆设计会加大车体质量, 导致机器人动力需

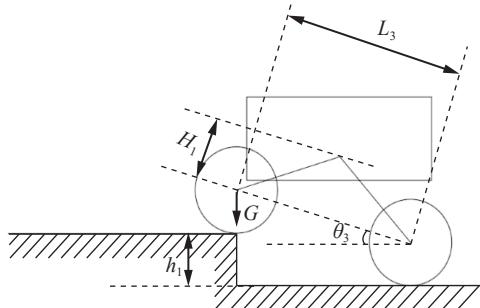


图 11 揆臂式行走系统翻越单级台阶极限位置

Fig. 11 Limit position of rocker arm walking system climbing a single-step stair

求提高, 行走系统性能降低<sup>[18]</sup>。在分析防爆设计对轮式巡检机器人的影响时, 需考虑电动机的使用数量<sup>[19]</sup>。因此, 将轮式巡检机器人驱动电动机数量  $n$  作为防爆难易程度的参考系数。

$$f(n) = n \quad (10)$$

式中  $f(n)$  为机器人防爆难易度评估函数。

#### 2.1.3 可靠性评价模型建立

轮式巡检机器人在煤矿井下凹凸不平的地面上行驶时不可避免发生撞击与跳跃, 这会导致机器人内部产生振动, 因此机器人须具有可靠的结构设计<sup>[20]</sup>; 机器人驱动电动机的数量与机器人的操控难易程度相关, 驱动电动机越多, 机器人操作越容易, 行走精度越高, 机器人也越可靠。

$$j(n) = 2^n - 1 \quad (11)$$

式中  $j(n)$  为可操作性程度评估函数。

机器人结构设计的可靠性采用机器人的离地高度来描述, 离地越高, 机器人的机械可靠性越高。

$$M(h) = h_4/R_q \quad (12)$$

式中:  $M(h)$  为机器人机械可靠性评估函数;  $h_4$  为机器人箱体离地高度;  $R_q$  为驱动轮半径。

综上所述, 驱动轮半径是机器人跨越台阶的限制条件, 离地高度与驱动轮半径的比值能够有效说明机器人在巡检过程中的机械可靠性。

#### 2.2 井下行走系统性能综合评价

##### 2.2.1 常见的综合评价算法

常见的综合评价方法有德尔菲法、人工神经网络、层次分析法、网络分析法、秩和比法等。其各自优缺点见表 1。其中德尔菲法虽然主观性强<sup>[21]</sup>, 但能借助专业人员经验进行初步判断, 且操作相对简便。井下各模型间存在多种耦合关系, 而仅依靠德尔菲法难以全面考虑各因素间的相互关联和影响。网络分析法能通过构建网络模型, 将各因素之间的

关系直观呈现出来,对初期各个影响因素的参数权重进行合理设置。通过网络分析法可以准确分析这些因素的相互作用方式,从而更科学地确定各因素的权重。因此,本文结合网络分析法与德尔菲法作为煤矿井下主运大巷轮式巡检机器人行走系统的性能评价方法。

表1 常见综合评价方法优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of common comprehensive evaluation methods

综合评价方法	优缺点
德尔菲法	判断方法简单,但主观性强
人工神经网络	有较强的自学习能力与容错能力,但训练量大
层次分析法	能够有机结合定性与定量分析,但主观性强
网络分析法	可以考虑不同因素的耦合关系,但计算量大
秩和比法	可以对现有统计资料进行再分析

## 2.2.2 行走系统综合评价量化分析

根据德尔菲法评价标准,对行走能力量化模型、防爆难易评价模型、可靠性评价模型进行赋值,再根据赋值结果进行比较,赋予履带式、轮履式、摇臂式3种系统行走能力、防爆难易及可靠性3种参考权重,最终得到3种行走系统的性能指标,并获得最终的综合性能评价。各种参考条件耦合关系如图12所示。

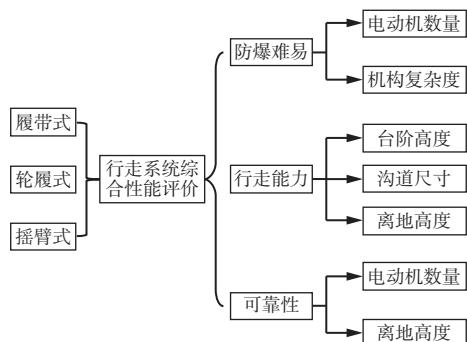


图12 行走系统综合性能评价

Fig. 12 Comprehensive performance evaluation of walking system

1) 行走能力定量计算。选择各系统的外形尺寸为900 mm×600 mm×800 mm,根据煤矿井下的特殊环境得出行走能力基本参数(表2)。

2) 防爆难易量化计算。防爆的难易不仅与行走机构驱动电动机数量相关,还与机器人结构有关(表3)。

3) 可靠性量化计算。行走系统的可靠性与驱动电动机和离地高度相关(表4)。

因为各因素之间具有部分耦合关系,需根据网络分析法有关规定制作递归层次机构模型。递归层次结构是指将复杂系统分解为多个层次,每个层次又可进一步细分,且各层次之间存在递归关系。在

表2 3种行走系统各项行走能力值

Table 2 Walking ability values of three walking systems

行走系统类别	越障高度/mm	跨沟能力/mm	底盘高度/mm	权重
履带式	180	420	120	0.25
轮履式	200	480	240	0.32
摇臂式	200	450	275	0.42

表3 3种行走系统防爆难易量化值

Table 3 Quantified explosion-proof difficulty levels for three walking systems

行走系统类别	电动机数量	车体结构	权重
履带式	4	4	0.35
轮履式	6	6	0.29
摇臂式	4	4	0.36

表4 3种行走系统可靠性量化值

Table 4 Reliability quantization values for three walking systems

行走系统类别	电动机数量	离地高度		权重
		驱动轮半径	离地高度	
履带式	4	0.3	0.29	
轮履式	6	1	0.35	
摇臂式	4	1.8	0.36	

行走系统性能评判中,以行走系统性能为最高层目标,将行走能力、防爆难易、可靠性、可操作性作为下一层的影响因素。每个影响因素又可以进一步细分,防爆难易与可靠性相互影响,行走能力与可操作性相互影响且同时被自身的因素(如单级台阶高度、沟道宽度及底盘高度)影响,这些构成更下一层的因素,以此类推,形成递归结构,如图13所示。

为减少德尔菲法的主观影响,本研究采用问卷的方式,请中国煤炭科工集团太原研究院、中信重工开诚智能专家及煤矿机器人相关研究方向的研究生对机器人行走系统的综合性能进行独立打分评价。依据九级标度法对3个已量化赋值区中的评断角度进行打分并赋予权重(表5)。

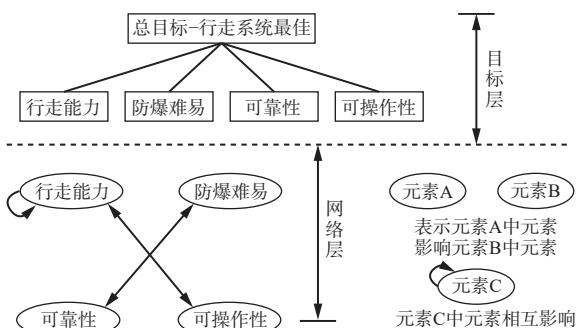


图13 综合分析法递归层次结构模型

Fig. 13 Recursive hierarchy model of comprehensive evaluation method

表 5 九级标度法打分细则

Table 5 Grading rules for nine-level scale method

级别	参考标准
1	同等重要
3	比较重要
5	明显重要
7	强烈重要
9	极端重要

根据网络分析法构建综合评价判断矩阵  $A$ , 其对应的权重分配见表 6。通过计算得判断矩阵  $A$  的特征根最大值  $\lambda_{\max}=3.065$ 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/7 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

表 6 越障系统性能判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of obstacle-crossing system performance

因素	防爆难易	行走能力	可靠性	权重
防爆难易	1	1/3	5	0.34
行走能力	3	1	7	0.59
可靠性	1/5	1/7	1	0.07

判断矩阵是通过两两比较各因素的重要性来构建的, 为了增加评价结果的合理性和可信度, 避免出现逻辑矛盾, 对判断矩阵进行一致性检验。

$$I_C = \frac{\lambda_{\max} - a}{a - 1} = \frac{3.065 - 3}{3 - 1} = 0.0325 \quad (14)$$

式中:  $I_C$  为一致性检测指标;  $a$  为影响因素数量。

根据文献 [22] 得到 1—15 阶指标, 其中 3 阶指标重复 1 000 次, 平均随机一致性指标  $I_R$  为 0.52。则一致性比例  $P$  为

$$P = \frac{I_C}{I_R} = \frac{0.0325}{0.52} = 0.0625 < 0.1$$

当  $P < 0.1$  时, 判断矩阵的一致性是可接受的, 因此, 判断矩阵  $A$  符合指标, 即权重分配符合评价标准, 可继续进行综合分析。

3 种行走系统的最终评价标准见表 7, 可看出摇臂式行走系统权重最高, 较轮履式和履带式行走系统权重分别提高了 14.7%, 44.4%, 说明摇臂式行走机构的井下适应性最佳。

表 7 3 种行走系统的最终评价标准

Table 7 Final evaluation criteria for three walking systems

方案	防爆难易(0.33)	行走能力(0.59)	可靠性(0.1)	权重
履带式	0.35	0.25	0.29	0.27
轮履式	0.29	0.32	0.35	0.34
摇臂式	0.36	0.42	0.36	0.39

### 3 摆臂式行走系统倒 V 型连杆静态性能分析

倒 V 型连杆是煤矿井下巡检机器人行走系统设计过程中极具特色的一个结构, 作为行走系统中受力最复杂的部件, 对其进行静态性能分析是保障机器人运动可靠性的关键。

#### 3.1 倒 V 型连杆的模型建立与简化

倒 V 型连杆在巡检机器人行驶过程中起重要的承载作用。选择 Simulation Premium 进行模型仿真, 在保证连杆机构功能不变的前提下, 去掉防爆箱体后的倒 V 型连杆几何模型如图 14 所示。

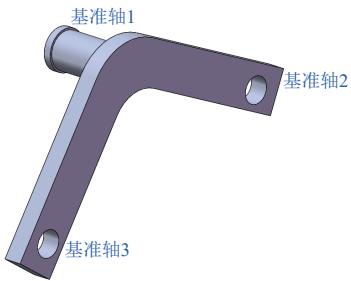


图 14 倒 V 型连杆几何模型

Fig. 14 Geometric model of inverted V-link

#### 3.2 几何模型网格划分

划分网格时, 如果模型的表面比较复杂, 网格曲面可能会过分扭曲, 尤其是受力比较集中的位置, 较差的网格曲面可能会让连杆整体的网格划分出问题。网格划分完成后, 使用 Simulation Premium 对划分好的网格进行检查, 确定连杆的网格划分是否符合 Simulation Premium 有限元划分条件。网格划分完成后的倒 V 型连杆几何模型如图 15 所示。

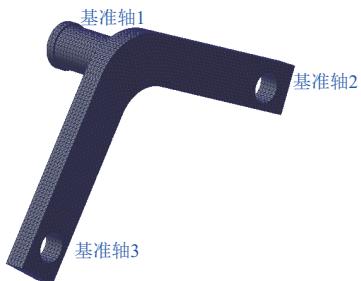


图 15 网格划分完成后的倒 V 型连杆几何模型

Fig. 15 Geometric model of inverted v-link after mesh division

#### 3.3 结构静力学分析

为防止机器人行走系统连杆变形过大而影响机器人正常行走, 选用材料力学中第四强度理论作为连杆在坡道满载、紧急转弯、紧急制动 3 种工况下的强度校核标准, 校核连杆所受应力。

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{b} \quad (15)$$

式中:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别为材料在  $x, y, z$  方向的应力;  $[\sigma]$

为许用应力;  $\sigma_s$  为屈服极限值;  $b$  为动载荷系数。

由于刚度没有明显参考标准,采用最大挠度作为刚度评价标准。

$$d_{\max} \leq [d] \quad (16)$$

$$[d] = 0.004L = 6.4 \text{ mm} \quad (17)$$

式中:  $d_{\max}$  为倒 V 型连杆最大挠度;  $[d]$  为倒 V 型连杆许用挠度;  $L$  为行走系统轴距。

### 3.4 静态载荷与多工况分析

倒 V 型连杆能够满足坡道满载、紧急转弯和紧急制动 3 种工况下的强度与刚度校核,即能满足巷道巡检机器人的使用要求。

经计算,整个行走系统连杆所受的静载荷为 600 kg,在路面行驶时巡检机器人左右两侧受力一致,为垂直方向的力。

$$F_L = F_R = F = mg/2 = 2940 \text{ N} \quad (18)$$

式中:  $F_L$  为连杆左侧受力;  $F_R$  为连杆右侧受力;  $F$  为连杆垂直方向受力;  $m$  为连杆承受的静载荷;  $g$  为重力加速度。

连杆受力部分在两车轮轴附近及转动轴垂直方向,在转动轴上施加 2940 N 的力,通过软件计算得到连杆主要受力面积为 2000 mm<sup>2</sup>。

#### 3.4.1 坡道满载工况分析

巷道巡检机器人在巷道内最大爬坡角为 20°,满载运行载荷系数为 1.5,则连杆所受表面载荷为

$$q = 1.5F/S = 2.205 \text{ MPa} \quad (19)$$

式中  $S$  为连杆的主要受力面积。

坡道满载工况的约束条件:约束连杆转动轴(基准轴 1)的自由度,仅保留连杆转动。在模型中车轴与连杆配合孔上施加载荷,在前后轮配合孔附近施加向后和向前的 1000 N 载荷,同时在基准轴 1 上施加 4410 N 载荷。约束(绿色箭头)与载荷(紫色箭头)添加位置如图 16 所示。坡道满载工况下的连杆应力和位移云图如图 17 所示。

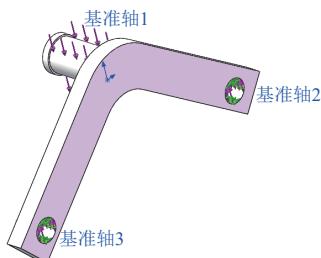


图 16 坡道满载工况下连杆的边界条件与载荷设置

Fig. 16 Boundary conditions and load settings for the link under ramp full-load condition

由图 17 可看出,连杆与车轴配合孔附近受到最

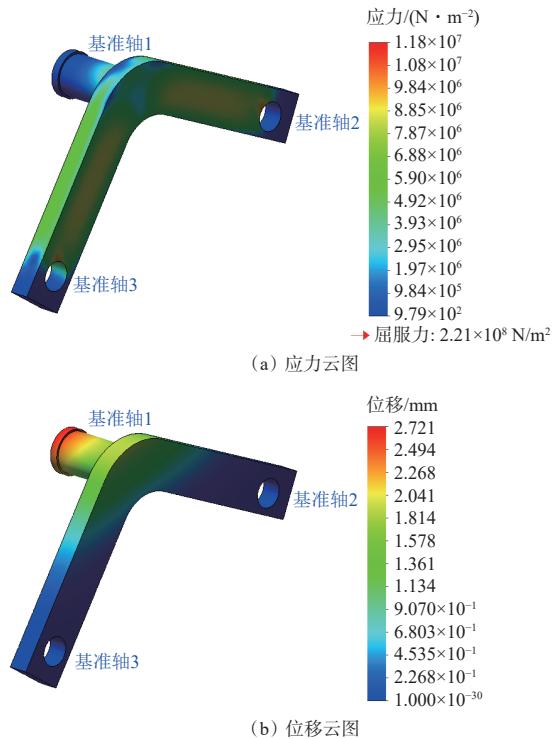


图 17 坡道满载工况下的连杆应力和位移云图

Fig. 17 Stress and displacement cloud maps of the link under ramp full-load condition

大应力为  $5.23 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ , 小于材料屈服应力极限, 满足连杆在满载爬坡状态下的强度校核; 连杆受到的最大位移出现在转动轴(基准轴 1)顶端, 最大变形量为 2.72 mm, 小于 6.4 mm(许用挠度), 满足连杆材料在满载爬坡工况下的刚度校核。说明倒 V 型连杆基本满足爬坡满载工况下的使用要求。

#### 3.4.2 紧急转弯工况分析

紧急转弯工况是模拟巷道巡检机器人在巷道行驶中遇障碍物需转弯进行变速转向的过程。此过程中连杆整体受离心力影响产生应力与形变,左右两侧相对有加速度,取  $0.5F$  作为连杆所受载荷。由于紧急转弯在井下出现的次数不多,因此,取动载荷系数为 1.1。

$$q_x = q_y = 1.1 \times 0.5F/S = 0.8085 \text{ MPa} \quad (20)$$

式中  $q_x, q_y$  分别为水平与垂直方向的载荷。

紧急转弯工况约束条件: 前后车轮固定, 约束倒 V 型连杆前后轮安装位置的自由度, 分别给一个  $0.5F$  的外部载荷; 在转动轴上施加车身载荷 2940 N。约束设置如图 18 所示。紧急转弯工况下连杆的应力和位移云图如图 19 所示。

由图 19 可看出,在连杆与车轴配合孔附近受到的最大应力值为  $10.34 \text{ N/m}^2$ , 小于材料屈服应力极限, 满足连杆材料在紧急转弯工况下的强度校核; 连杆受到的最大位移出现在转动轴(基准轴 1)顶端, 最

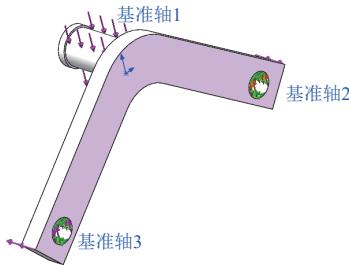
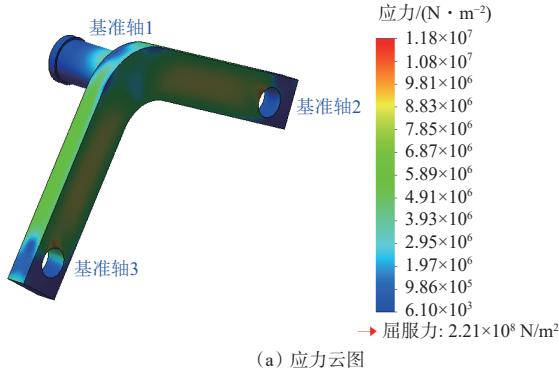
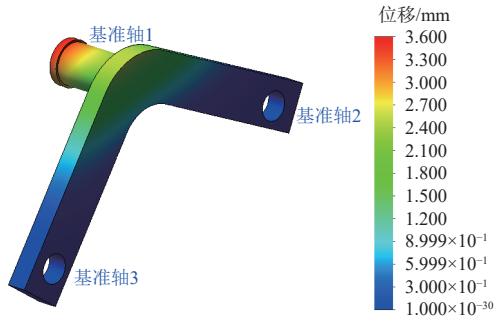


图 18 紧急转弯工况下连杆的边界条件与载荷设置

Fig. 18 Boundary conditions and load settings for the link under emergency turning condition



(a) 应力云图



(b) 位移云图

图 19 紧急转弯工况下连杆的应力和位移云图

Fig. 19 Stress and displacement cloud maps of the link under emergency turning condition

大变形量为 3.6 mm, 小于 6.4 mm(许用挠度), 满足连杆材料在紧急转弯工况下的刚度校核。说明倒 V 型连杆基本满足避障转弯工况下的使用要求。

### 3.4.3 紧急制动工况分析

巡检机器人在巷道内路面满载行驶时会因障碍或巡检故障而进行紧急制动。在紧急制动过程中, 倒 V 型连杆在水平方向上受到 0.7 倍的重力加速度, 垂直方向上受到 0.5 倍的重力加速度。考虑到机器人在巡检过程中出现故障或停靠待机的次数较多, 取 1.3 作为动载荷系数, 则水平与垂直方向的载荷为

$$q_x = 1.3 \times 0.7F/S = 1.338 \text{ MPa} \quad (21)$$

$$q_y = 1.3 \times 0.5F/S = 0.956 \text{ MPa} \quad (22)$$

约束连杆转动轴(基准轴 1)的自由度, 防止转动轴在前后、左右方向晃动, 在前后轮配合孔附近向

前、向后施加 700 N 载荷, 向下施加 500 N 载荷, 同时在基准轴 1 上施加 2 940 N 载荷。约束与载荷添加位置如图 20 所示。紧急制动工况下连杆的应力和位移云图如图 21 所示。

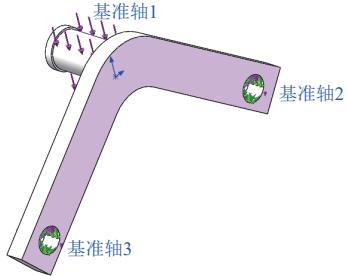
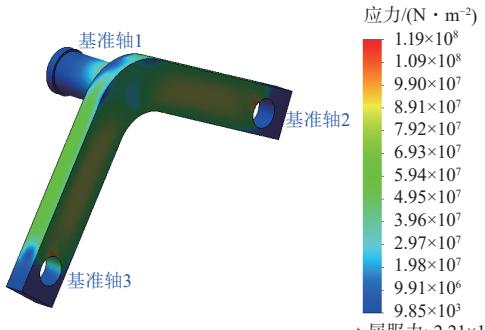
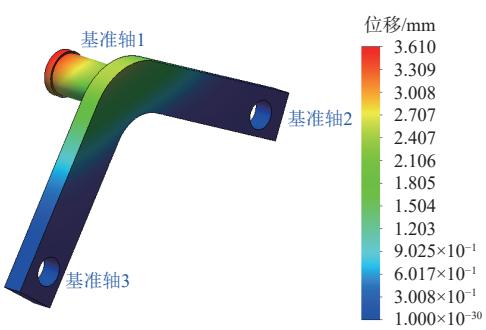


图 20 紧急制动工况下连杆的边界条件与载荷设置

Fig. 20 Boundary conditions and load settings for the link under emergency braking condition



(a) 应力云图



(b) 位移云图

图 21 紧急制动工况下连杆的应力和位移云图

Fig. 21 Stress and displacement cloud maps of the link under emergency braking condition

由图 21 可看出, 连杆与车轴配合孔附近受到最大应力值为 108.3 N/m<sup>2</sup>, 远小于材料的屈服应力极限, 满足连杆材料的强度校核; 连杆受到的最大位移出现在转动轴(基准轴 1)顶端, 最大变形量为 3.61 mm, 小于 6.4 mm(许用挠度), 满足连杆材料在紧急转弯工况下的刚度校核。说明倒 V 型连杆基本满足紧急制动工况下的使用要求。

## 4 巡检机器人行走性能模拟试验

为验证巷道巡检机器人在井下环境运行的可靠性, 本文按照 8:1 的比例搭建了巷道巡检机器人样

机。根据井下巷道特殊地形特征,设计了一条包含坡道、单级台阶及沟道等3种路况的人行道进行测试。

#### 4.1 单级台阶越障试验

巷道巡检机器人单级台阶越障能力测试(图22)主要测试机器人是否会发生倾覆。采用位置信息传感器与质心红外信号发射器相结合的质心捕捉系统Optotrak Certus来监测煤矿井下巷道巡检机器人的重心位置,并对其质心轨迹进行记录,如图23所示。可看出机器人在攀爬台阶过程中,由于机器人是摇臂式结构,一开始质心高度缓慢上升,当机器人完全爬上台阶时,质心处于一个相对短暂的平稳阶段,当机器人越下台阶瞬间,质心高度猛然降低,其波动相对较大。



图22 巡检机器人单级台阶测试

Fig. 22 Inspection robot single-step stair test

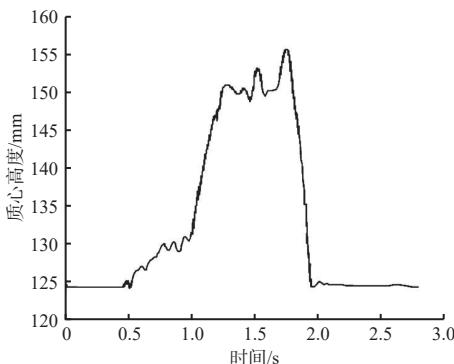


图23 巡检机器人翻越单级台阶的质心高度检测

Fig. 23 Centroid height detection of inspection robot traversing a single step

#### 4.2 沟道越障试验

巡检机器人跨越沟道行走能力测试如图24所示,图中沟道深度为50 mm,高度为50 mm,机器人前轮处于沟道的前边沿时,机器人进入越障阶段,当前轮接触到沟道的另一侧沟道壁时,前轮驱动电动机带动车轮沿沟道壁垂直方向上升,直至车轮抵到另一侧路面,最终前轮完成越障,该过程中质心高度如图25所示。

由图25可看出,在跨越沟道时,机器人质心波动仅10 mm左右,说明机器人具有极佳的减震平衡能力与沟道跨越能力。当机器人前轮落入沟道时,质心先呈断崖式下降,而后在攀爬到沟道另一端的过程中缓慢上升,最终整个机器人顺利攀爬到地面上。



图24 巡检机器人跨越沟道行走能力测试

Fig. 24 Walking ability test of inspection robot crossing a channel

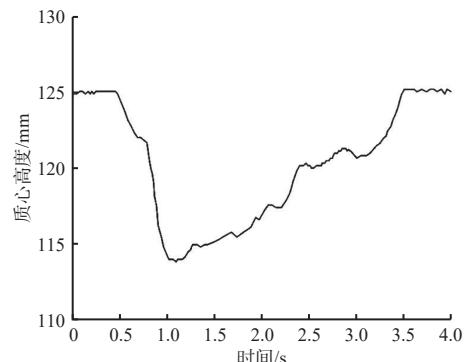


图25 巡检机器人跨越沟道的质心高度检测

Fig. 25 Centroid height detection of inspection robot crossing a channel

#### 4.3 坡道行驶试验

巡检机器人行走机构的爬坡能力测试如图26所示。在井下巷道内选用无轨胶轮车的最大爬坡角度20°作为机器人井下巷道坡度测试的参数,若能通过该条件下的测试,即可验证机器人的爬坡能力。



图26 巡检机器人坡道测试现场

Fig. 26 On-site test of the inspection robot on ramps

机器人在20°的坡道上行驶过程中前后轮电动机电流变化曲线如图27所示,可看出前轮电动机电流波动较小。开始爬坡时,前轮驱动电动机的驱动力较小,不足以完成爬坡过程,此时后轮驱动电动机分担了前驱动轮的阻力矩,随着攀爬时间的推移,后轮电流波动较大,前驱动电动机电流相对平稳且维持较大数值,机器人正常运行,未发生堵转。

通过测试机器人在煤矿井下斜坡、单级台阶及沟道等路况下的性能验证了其满足在煤矿井下主运输巷道内行驶的基本条件。

## 5 结论

1) 在主体结构方面,通过对煤矿井下主运输巷

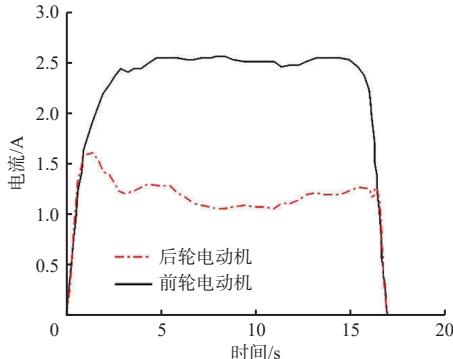


图 27 爬坡过程中前后电动机电流变化曲线

Fig. 27 Current variation curve of front and rear motors during ramp climbing

道巡检场景的分析,确定了机器人的相关性能指标,设计出包含巡检感知系统、井下行走系统、控制系统、电源供应中心及信号传输系统的轮式巡检机器人。其中行走系统通过倒 V 型连杆机构,辅以轮边电动机的驱动方案,保障机器人有足够越障能力的同时可以灵活移动。

2) 在行走性能方面,考虑到井下复杂的场景地形,通过对行走能力、防爆难易及可靠性进行量化,利用德尔菲法与网络分析法对履带式、轮履式、摇臂式 3 种行走机构进行综合评价,最终确定摇臂式行走机构在煤矿井下运行过程中适应性最佳。

3) 在静力校核方面,选择摇臂式行走机构中受力最复杂的倒 V 型连杆作为研究对象,在满载爬坡、紧急转向、紧急制动 3 种特殊工况下,分别对其网格划分并进行边界条件与约束分析,最终得到应力云图,对材料屈服应力与挠度进行校核后确定倒 V 型连杆满足强度与刚度的使用需求。

4) 在模拟巷道方面,搭建煤矿井下全方位巡检机器人试验平台、样机,开展基于摇臂式轮式巡检机器人行走机构巷道地形模拟试验,分别验证其在巷道坡道、沟道、单级台阶方面的表现,绘制机器人在坡道上行驶时前后驱动电动机的电流图,并利用 Optotrak Certus 实现对机器人质心轨迹的捕捉,验证了在轮式巡检机器人摇臂式行走机构在模拟巷道内的行走能力。

#### 参考文献(References):

- [1] 葛世荣,胡而已,裴文良.煤矿机器人体系及关键技术[J].煤炭学报,2020,45(1):455-463.  
GE Shirong, HU Eryi, PEI Wenliang. Classification system and key technology of coal mine robot[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 455-463.
- [2] 马宏伟,王建科,王川伟.煤矿巷道掘进护盾临时支护装置模块化变权模糊评价方法[J].西安科技大学学报,2023, 43(3): 576-585.

报,2023, 43(3): 576-585.

MA Hongwei, WANG Jianke, WANG Chuanwei. Fuzzy evaluation method of modular variable weight for temporary supporting device in coal mine roadway[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(3): 576-585.

- [3] 胡而已,葛世荣.煤矿机器人研发进展与趋势分析[J].智能矿山,2021, 2(1): 59-74.

HU Eryi, GE Shirong. Coal mining robot research progress and trend analysis[J]. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(1): 59-74.

- [4] 国家矿山安全监察局.《煤矿机器人重点研发目录》[EB/OL]. (2019-01-09) [2024-08-03]. [https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tzgg/201901/t20190109\\_349156.shtml](https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tzgg/201901/t20190109_349156.shtml).

National Mine Safety Administration. Catalogue of key research and development of coal mine robots[EB/OL]. (2019-01-09) [2024-08-03]. [https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tzgg/201901/t20190109\\_349156.shtml](https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tzgg/201901/t20190109_349156.shtml).

- [5] 王国法.加快煤矿智能化发展建设智能+绿色煤炭工业新体系[J].中国煤炭工业,2020(4): 8-15.

WANG Guofa. Speed up the intelligent development of coal mines and build a new system of intelligent+green coal industry[J]. China Coal Industry, 2020(4): 8-15.

- [6] 李允旺.矿井救灾机器人行走机构研究[D].徐州:中国矿业大学,2010.

LI Yunwang. Study on mobile mechanisms for rescuerobots in underground coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.

- [7] 赵明辉,闫东,李全,等.矿山搜寻机器人行走机构运动系统的研究[J].煤矿机电,2009(4): 36-38, 41.

ZHAO Minghui, YAN Dong, LI Quan, et al. Research on movement system of travel mechanism of mine searching robot[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2009(4): 36-38, 41.

- [8] 刘罡.多节履带式搜索机器人及其运动策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

LIU Gang. Research on a multi-linked and tracked rescue robot and its motion strategy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

- [9] 孙国栋,李雨潭,朱华.一种新型煤矿救援机器人履带行走机构设计[J].工矿自动化,2015, 41(6): 21-25.

SUN Guodong, LI Yutan, ZHU Hua. Design of a new type of crawler travelling mechanism of coal mine rescue robot[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(6): 21-25.

- [10] 蔡李花,方海峰,高进可,等.煤矿探测机器人行走机构设计与步态分析[J].工矿自动化,2017, 43(6): 47-51.

CAI Lihua, FANG Haifeng, GAO Jinke, et al. Moving mechanism design of mine-used detection robot and its

- gait analysis[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(6):47-51.
- [11] 李秋生, 闫小军. 履带式煤矿救援机器人行走机构研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(10): 199-201.  
LI Qiusheng, YAN Xiaojun. Design of crawler traveling mechanism of coal mine rescue robot[J]. Coal Technology, 2017, 36(10): 199-201.
- [12] 鲍周洋. 煤矿井下巷道全方位巡检轮式机器人设计与研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
BAO Zhouyang. Design and research of wheeled robot for omni-directional inspection of underground roadway in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [13] 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2022.  
State Coal Mine Safety Supervision Bureau. Coal mine safety regulations[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 2022.
- [14] 骆彬. 井下蓄电池无轨胶轮车无人驾驶系统设计研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
LUO Bin. Design and research on unmanned driving system of underground battery trackless rubber-tired vehicle[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [15] 毛浩, 张建安, 解云龙, 等. 张家峁煤矿变电所智能巡检机器人系统设计[J]. 煤矿机械, 2022, 43(4): 18-20.  
MAO Hao, ZHANG Jian'an, XIE Yunlong, et al. Design of intelligent inspection robot system for Zhangjiaomo Coal Mine substation[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(4): 18-20.
- [16] 鲍久圣, 鲍周洋, 阴妍, 等. 一种井下巷道与硐室全方位巡检轮式机器人及其控制方法:202110487271.4[P]. 2021-06-29.  
BAO Jiusheng, BAO Zhouyang, YIN Yan, et al. A wheeled robot for all-round inspection of underground roadway and chamber and its control method: 202110487271.4[P]. 2021-06-29.
- [17] 周丹. 煤矿轮式移动机器人隔爆仓体与控制模式研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.  
ZHOU Dan. Research on explosion-proof compartment and control mode of wheeled mobile robot in coal mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2012.
- [18] 郑学召, 闫兴, 郭军, 等. 煤矿救灾机器人防爆技术研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(9): 13-17.  
ZHENG Xuezao, YAN Xing, GUO Jun, et al. Research on explosion-proof technology for coal mine rescue robot[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9): 13-17.
- [19] 巩固, 朱华. 基于目标识别与避障的煤矿救援机器人自主行走[J]. 南京理工大学学报, 2022, 46(1): 32-39.  
GONG Gu, ZHU Hua. Autonomous walking of coal mine rescue robot based on target recognition and obstacle avoidance[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2022, 46(1): 32-39.
- [20] 宗成国, 王海艳, 于晓. 履带式煤矿搜救机器人机构设计及越障性能分析[J]. 煤炭工程, 2019, 51(10): 123-126.  
ZONG Chengguo, WANG Haiyan, YU Xiao. Structure design and obstacle-surmounting performance analysis about tracked robot of coal mine rescue[J]. Coal Engineering, 2019, 51(10): 123-126.
- [21] 于翠平. 基于德尔菲法的突发公共卫生危机多主体响应指标设计评价[J]. 中国医院, 2022, 26(4): 29-32.  
YU Cuiping. Design and evaluation of multi-agent response indicators for sudden public health emergencies based on Delphi method[J]. Chinese Hospitals, 2022, 26(4): 29-32.
- [22] 洪志国, 李焱, 范植华, 等. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(12): 45-47, 150.  
HONG Zhiguo, LI Yan, FAN Zhihua, et al. Calculation on high-ranked RI of analytic hierarchy process[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(12): 45-47, 150.

(上接第 70 页)

- [18] 张美晨, 张凯, 赵丽娟, 等. 煤岩识别及采煤机自适应控制技术研究进展[J]. 山西焦煤科技, 2023, 47(12): 4-10.  
ZHANG Meichen, ZHANG Kai, ZHAO Lijuan, et al. Research progress of coal and rock identification and adaptive control technology for shearer[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2023, 47(12): 4-10.
- [19] 王鑫, 刘怡明, 王明明, 等. 基于改进模糊 PID 的轮式机器人速度控制器设计[J]. 河北科技大学学报, 2020, 41(1): 50-57.  
WANG Xin, LIU Yiming, WANG Mingming, et al. Design of wheeled robot speed controller based on improved fuzzy PID[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(1): 50-57.
- [20] 张介夫. 纵轴掘进机自动截割成形和恒功率截割控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
ZHANG Jiefu. Research on control system with automatic forming and constant power cutting of a longitudinal axis type roadheader[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [21] 何兴川. 悬臂式掘进机自动截割控制仿真研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.  
HE Xingchuan. Simulation study on the automatic cutting control of boom-type roadheader[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.