



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406884

引用格式:尹可强,周威,黄志祥,等.综掘巷道协同运锚车送架作业稳定性分析[J].科学技术与工程,2025,25(15):6275-6280.

Yin Keqiang, Zhou Wei, Huang Zhixiang, et al. Stability analysis of supporting frame operation of cooperative anchor truck in fully mechanized excavation roadway[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6275-6280.

矿冶工程

综掘巷道协同运锚车送架作业稳定性分析

尹可强^{1,2}, 周威², 黄志祥², 韩晓龙^{1,2}, 邓海顺^{1,2*}

(1. 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 淮南 232001; 2. 安徽理工大学机电工程学院, 淮南 232001)

摘要 为解决综掘巷道掘锚比例失衡与单体运输困难的问题,设计一种综掘巷道协同运锚车,基于 ADAMS 建立了协同运锚车的运动学模型,对高效送架作业进行轨迹规划,并分析承接装置与支护单体前移过程中各支腿的力学特性和极限送架距离。结果表明:支护单体前移过程中,当四条支腿全支撑时,前支腿的受力和力矩分别增加 196% 和 195%,后支腿的受力和力矩分别从 73.5 kN 和 238 kN·m 减小至 0,极限送架距离为 15.3 m,满足送架的设计要求;当三腿支撑而右后支腿无支撑的特殊工况时,左前支腿的受力和力矩分别增加 566% 和 572%,左后支腿的受力和力矩分别从 145 kN 和 462 kN·m 减小至 0,右前支腿恒定的受力和力矩为 150.8 kN 和 569.4 kN·m,极限送架距离为 14.99 m。可见在三腿支撑而右后支腿无支撑的特殊工况下,协同运锚车的极限送架距离超过掘进机的最大长度,满足高效送架要求。

关键词 综掘;超前支护;巷道协同运锚车;送架稳定性

中图分类号 TD421; 文献标志码 A

Stability Analysis of Supporting Frame Operation of Cooperative Anchor Truck in Fully Mechanized Excavation Roadway

YIN Ke-qiang^{1,2}, ZHOU Wei², HUANG Zhi-xiang², HAN Xiao-long^{1,2}, DENG Hai-shun^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Digital and Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Huainan 232001, China;

2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

[Abstract] In order to solve the problem of unbalanced ratio of excavation and anchor and the difficulty of single transportation in fully mechanized excavation roadway, a cooperative anchor truck for fully mechanized excavation roadway was designed. Based on ADAMS, the kinematics model of the cooperative anchor truck was established, and the trajectory planning of the efficient support operation was carried out. The mechanical characteristics and ultimate support distance of each leg during the forward movement of the supporting device and the supporting monomer were analyzed. The results show that during the forward movement of the supporting monomer, when the four legs are fully supported, the force and moment of the front leg increase by 196% and 195% respectively, and the force and moment of the rear leg decrease from 73.5 kN and 238 kN·m to 0 respectively. The limit distance of the support is 15.3 m, which meets the design requirements of the support. When the three legs are supported and the right rear leg is not supported, the force and torque of the left front leg are increased by 566% and 572% respectively, and the force and torque of the left rear leg are reduced from 145 kN and 462 kN·m to 0 respectively. The constant force and torque of the right front leg are 150.8 kN and 569.4 kN·m, and the limit distance is 14.99 m. It can be seen that under the special working condition of three-leg support and no support for the right rear leg, the limit distance of the cooperative transport anchor vehicle exceeds the maximum length of the roadheader, which meets the requirements of efficient support.

[Keywords] comprehensive excavation; advance support; tunnel collaborative anchor transport vehicle; delivery stability

随着煤矿开采装备的不断更新,综采工作面的速度越来越快,中国大多数矿山都面临着采掘比例失衡的问题^[1]。煤炭开采深度不断提高,开采环境

异常的复杂^[2-3]。巷道掘进是煤炭开采的先期基础性工程,故巷道掘进效率低下已成为深部矿井高效开采的主要制约因素^[4]。深部矿井地压极高,导致

收稿日期:2024-09-13 修订日期:2024-11-17

基金项目:国家自然科学基金(51575002);矿山智能技术与装备科研创新团队项目(2022AH010052)

第一作者:尹可强(2000—),男,汉族,安徽淮南人,硕士研究生。研究方向:矿山机械。E-mail:ykq13170209065@163.com。

* 通信作者:邓海顺(1978—),男,汉族,安徽桐城人,博士,教授。研究方向:矿山机械。E-mail:dhs1998@163.com。

巷道支护难度骤升,且掘进支护技术和设备一直未有本质突破,仍然采用先掘后支的顺序作业方式,掘进机开机率不足 30%^[5]。自移式锚支护协同作业装备可以有效地解决上述问题,但自移式锚支护协同作业装备存在重复支护顶板、支护距离较短和移动速度慢的问题,因此,研究高效运输、无重复支撑的支护单体对巷道的快速掘进具有重要意义。

为解决支护单体运输存在安全性差、工作效率低和工人工作强度大等难题,许多学者对支护单体的高效运输进行了研究。翟明华等^[6]提出循环前移式巷道门式液压支架机械手搬运临时支护系统,可将门式液压支架沿掘进机周围的狭小空间从机后快速搬至掘进机前,循环自移时间为 10~15 min,效率较低。李悦等^[7]提出一种钻锚运输车,通过托举梁将临时支架运输至掘进机身上的承接轨道,用于掘进、支护协同并行作业,但运输时间需要 6 min。周威等^[8]提出了综掘巷道锚护协助车,分析协助车空载或满载状态下的 3 种危险工况,并无分析送架时的稳定性。贾志军^[9]提出一种综掘巷道无重复临时支护装备,通过双门式结构将支护支架运输至迎头巷道,但总体结构较大,空间利用率较低。Krauze 等^[10]建立综掘巷道的支护体系,模块化安装和运输组装从而实现连续作业。宋如海^[11]提出平行作业式快速掘进支护系统,通过掘进机上的运输装置将支护单体运输至迎头巷道,从而实现快速掘进。宋凯^[12]提出一种护盾运输机构,由升降机械臂将支护单体进行运输。

针对掘支锚协同作业系统中支护单体运输困难,设计一种协同运锚车,建立协同运锚车送架工作的力学模型,通过 ADAMS 建立动力学模型,分析协同运锚车高效送架工况下的稳定性,旨在为提高掘进工作面运输超前支护至迎头的安全高效运输提供设计依据。

1 综掘协同运锚车工作原理

在掘进作业时,为防止迎头巷道发生冒顶事故,故需要对空顶进行支护。支护单体为门式支架,在支护作业时整体跨“骑”在掘进机上方,将操作工人和掘进机等设备保护在支护单体内。在一线工人完成永久支护工作后,综掘巷道协同运锚车将最后方的支护单体运输到巷道迎头位置。在支护单体到达预定位置后,支护单体的横向、支撑和侧帮液压缸开始工作可将单体撑开,从而对巷道空顶处进行支撑,完成对整个巷道迎头的超前支护工作,如图 1 所示。

在送架作业中,综掘巷道协同运锚车采用四条

支腿来保持整车的稳定,此为初始状态。送架作业可以分为两个阶段:第一阶段为驱动承载装置移动到滑台的最前端;第二阶段为大臂上的液压缸推动臂架移动将支护单体送到迎头巷道,如图 2 所示。

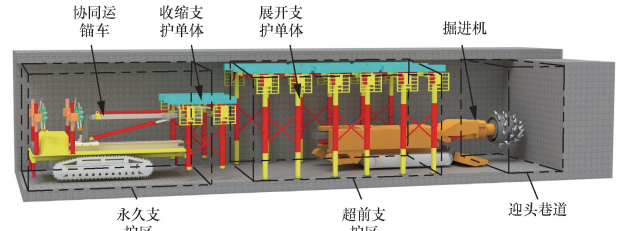


图 1 巷道协同运锚车送架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of collaborative anchor truck delivery in tunnels

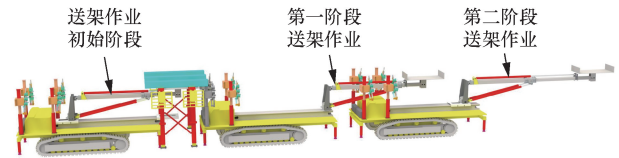


图 2 综掘巷道协同运锚车送架作业过程

Fig. 2 Process of collaborative anchor transport and frame delivery in comprehensive excavation tunnels

2 力学特性分析及送架轨迹设计

以协同运锚车的右边履带的中心为原点 o , 设纵向中心线为 X 轴, 垂直 X 轴且指向左侧履带为 Y 轴正向, 设垂直于 XY 面过 o 的坐标线为 Z 轴, 如图 3 所示。通过测量, 协同运锚车坐标尺寸, 如表 1 所示。

表 1 协同运锚车坐标参数

Table 1 Coordinate parameters of collaborative anchor vehicle

物理量	数值
轴距 L/mm	3 600
履带宽 B/mm	2 600
设备高度 H/mm	3 400
大臂离原点的纵向距离 b/mm	1 275
大臂离地距离 h_1/mm	2 250
承接装置与大臂垂直距离 h_2/mm	335

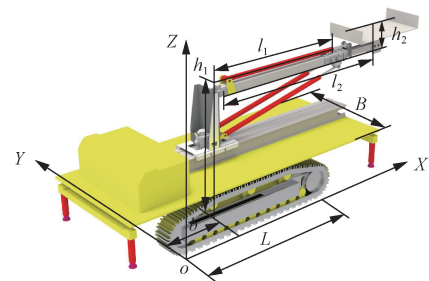


图 3 协同运锚车坐标

Fig. 3 Coordinate of collaborative anchor vehicle

2.1 支腿力学分析

如图4所示以承载中心为坐标原点,底盘纵向中心线为X,过o点垂直于X轴的坐标线为Y。设前面两支腿连线到回转中心o点的距离为l₃后面两支腿连线至o点的距离为l₄,非回转部分的重力为F_{G1},重心作用点在O₄(x₄,y₄);回转部分的重力为F_{G2},重心作用点在O₅(x₅,y₅)至回转中心的距离为R,假设车体重心坐标为O₀=(x₀,y₀,z₀),大臂O₁=(x₁,y₁,z₁),小臂O₂=(x₂,y₂,z₂),承接平台O₃=(x₃,y₃,z₃)^[13-14]。

大臂伸出的中心线与X轴的夹角为θ₁,协同运锚车的重心在平面的位置坐标为

$$\begin{cases} x_5 = \cos\theta_1 \\ y_5 = \sin\theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

运架作业时,合重心在水平面的坐标位置为G(x₀,y₀),即

$$x_0 = \frac{F_{G1}x_4 + F_{G2}R\cos\theta_1}{F_G} \quad (2)$$

$$y_0 = \frac{F_{G1}y_4 + F_{G2}R\sin\theta_1}{F_G} \quad (3)$$

式中:F_G为总重量,kg。

故合重心轨迹方程为

$$\left(x_0 - \frac{F_{G1}x_4}{F_G}\right)^2 + \left(y_0 - \frac{F_{G1}y_4}{F_G}\right)^2 = \left(\frac{F_{G2}R}{F_G}\right)^2 \quad (4)$$

用F_A、F_B、F_C、F_D表示4个支腿的支撑力,故根据力矩平衡原则ΣM_{AB}=0,ΣM_{CD}=0,ΣM_{AD}=0,可得

$$M_{AB} = F_C l + F_D l = F_G (l_3 + x_0) \quad (5)$$

$$M_{CD} = F_A l + F_B l = F_G (l_4 - x_0) \quad (6)$$

$$M_{AD} = F_B h_B + F_C h_C = F_G h_G \quad (7)$$

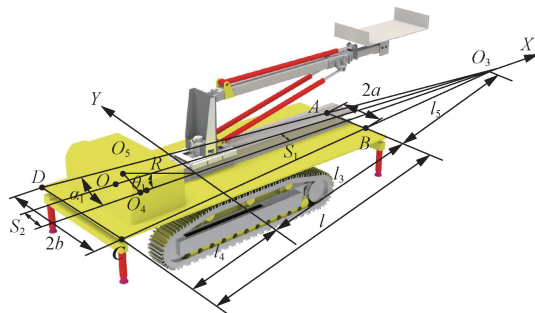


图4 支腿受力特性

Fig.4 Force characteristics of supporting legs

式中:h_B、h_C、h_G为点B、C和G到线段AD的距离。

协同运锚车的重心O与4个支腿在同一水平面,F_A和F_B的合力在AB线上,F_C和F_D的合力在CD线上,如图4所示。由图4可得

$$\tan\alpha_1 = \frac{b-a}{l} \quad (8)$$

$$\tan\alpha_1 = \frac{a}{l_5} \quad (9)$$

当合重心O的位置坐标为(x₀,y₀)时,可得

$$\frac{S_1}{l_5} = \frac{y_0}{x_0 + l_3 + l_5} \quad (10)$$

$$\frac{S_2}{l_5 + l} = \frac{y_0}{x_0 + l_3 + l_5} \quad (11)$$

联立式(4)~式(11)可得

$$F_A = \frac{a + S_1}{2a} F_{AB} = \frac{a + S_1}{2a} \frac{l_4 - x_0}{l} F_G \quad (12)$$

$$F_B = \frac{a - S_1}{2a} F_{AB} = \frac{a - S_1}{2a} \frac{l_4 - x_0}{l} F_G \quad (13)$$

$$F_C = \frac{b + S_2}{2b} F_{CD} = \frac{b + S_2}{2b} \frac{l_3 + x_0}{l} F_G \quad (14)$$

$$F_D = \frac{b - S_2}{2b} F_{CD} = \frac{b - S_2}{2b} \frac{l_3 + x_0}{l} F_G \quad (15)$$

由支腿的支撑反力计算可得,当F_C和F_D一者或同时为0时,协同运锚车可能发生倾覆。

2.2 送架轨迹设计

第一阶段送架作业,当支护单体前移时,此时协同运锚车整车重心前移,则承载装置对协同运锚车的前支腿受力是不断变化的。第二阶段送架作业,大臂上的液压缸推动小臂向前运动。

以EBZ260H悬臂式掘进机为例,机长为11.7m,为实现高效送架的目的,30s内将支护单体运送至迎头巷道,故对送架作业进行轨迹设计,如表2所示。

通过Adams进行仿真分析,对支护单体进行运动轨迹仿真结果如图5所示。

3 协同运锚车常规送架作业整车稳定性分析

3.1 全支撑常规送架作业稳定性分析

通过Adams建立协同运锚车送架过程的动力学仿真,协同运锚车添加自身重力,4个支腿分别设置接触力。

表2 送架作业的运动轨迹

Table 2 Motion trajectory of rack delivery operation

时间	t ₁ = 0 ~ 1 s	t ₂ = 1 ~ 8 s	t ₃ = 8 ~ 9 s	t ₄ = 9 ~ 10 s	t ₅ = 10 ~ 29 s	t ₆ = 29 ~ 30 s
运动状态	a ₁ t ₁ ² /2	v ₁ t ₂	a ₂ t ₃ ² /2	a ₃ t ₄ ² /2	v ₂ t ₅	a ₄ t ₆ ² /2
a/(m·s ⁻²)	a ₁ = 0.5		a ₂ = -0.5	a ₃ = 150		a ₄ = -150
v/(m·s ⁻¹)		v ₁ = 0.5			v ₂ = 150	

如图6所示,前支腿和后支腿初始受力分别为76.9 kN和73.5 kN,前支腿受力持续增大,而后支腿受力持续减少,当到达30 s时受力达到最大,前支腿和后支腿最终受力为114.1 kN和37.6 kN,故不会发生倾覆。

随着承载装置的送架作业,前支腿和后支腿初始力矩分别为294 kN·m和238 kN·m,前支腿的力矩不断增大,而后支腿的力矩不断减小,前支腿和后支腿的最终力矩为433 kN·m和121 kN·m。

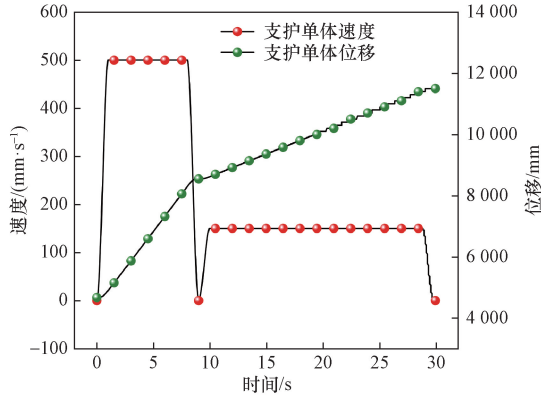
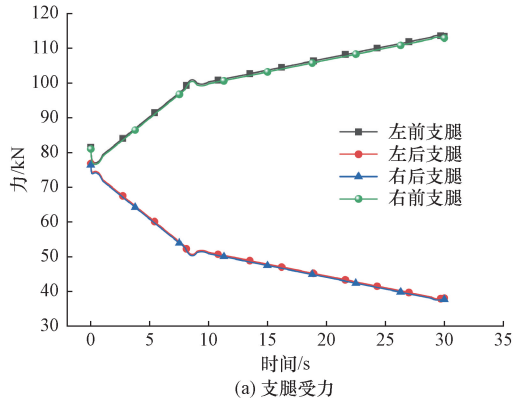
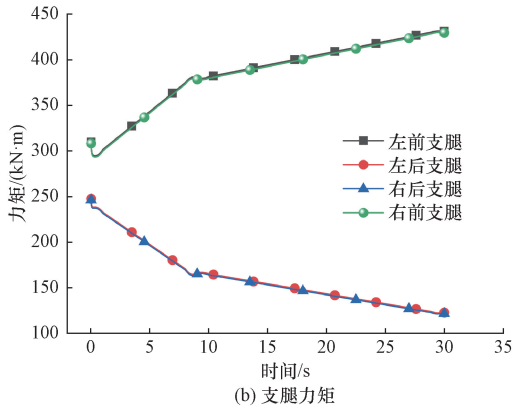


图5 全支撑送架支护单体仿真结果

Fig. 5 Simulation results of single support unit for fully supported frame delivery operation



(a) 支腿受力



(b) 支腿力矩

图6 全支撑送架支腿力和力矩仿真结果

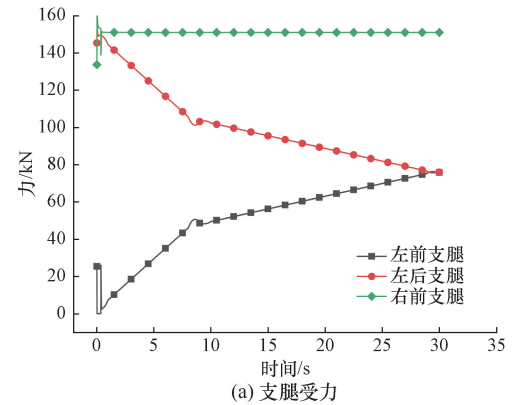
Fig. 6 Simulation results of leg force and torque for fully supported frame delivery

3.2 三腿支撑常规送架作业稳定性分析

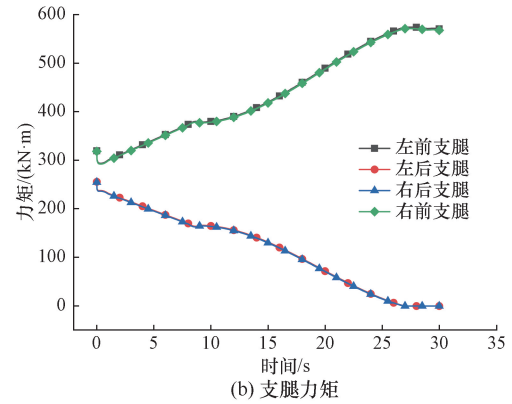
在送架作业过程中,协同运锚车的后支腿可能会因为巷道底板平整度不高,出现一个支腿不受力的工况,故需要对此进行仿真验证。

如图7所示,当承载装置的送架作业时,左前支腿受力持续增大,最大值为75.7 kN;左后支腿持续减小,最小值为75.9 kN;右前支腿几乎恒定一个常值为151 kN。

随着承载装置的送架作业,左前支腿初始力矩为100 kN·m,持续增大,最大值为287.4 kN·m;左后支腿初始力矩为100 kN·m,持续减小,最小值为244.1 kN·m;右前支腿几乎恒定一个常值为572.7 kN·m。



(a) 支腿受力



(b) 支腿力矩

图7 三腿支撑送架支腿力和力矩仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the force and torque of the three leg support for frame delivery

4 协同运锚车极限距离送架作业

通过分析送架作业仿真结果,协同运锚车在常规送架作业中是不会发生倾覆,故后续假设综掘巷道协同运锚车的大臂向前伸展,直至综掘巷道协同运锚车发生失稳现象为止^[15]。

4.1 全支撑最远距离送架作业稳定性分析

通过 Adams 建立协同运锚车送架过程的动力学仿真,协同运锚车添加自身重力,运动部分添加3

个平移副和两个驱动。

如图 8 所示,在最远距离送架作业,支护单体高度分量保持不变,在发生倾覆时,支护单体位移竖直分量发生改变,故可知协同运锚车在 26.6 s 发生倾覆,此时的位移变化值为 15.3 m。

最远距离送架作业中,前支腿最大受力为 151.2 kN,最大力矩 573.2 kN·m,后支腿最小受力和最小力矩均为 0,如图 9 所示。

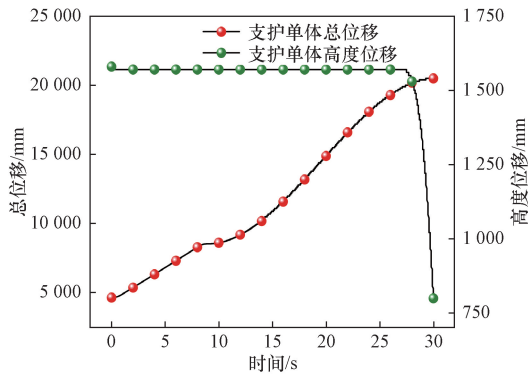
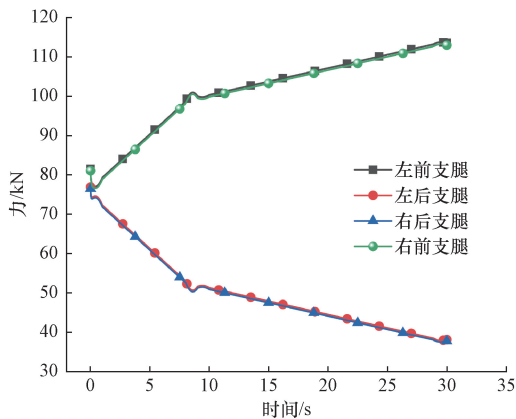
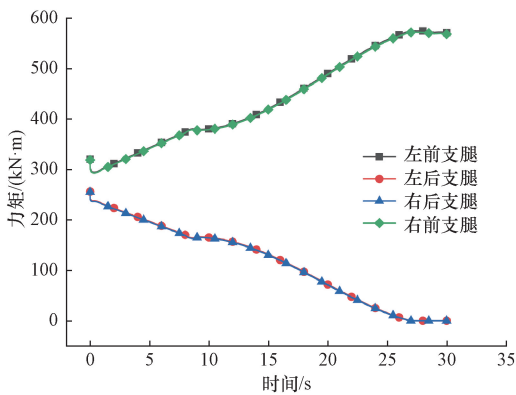


图 8 全支撑最远距离送架支护单体仿真结果

Fig. 8 Simulation results of the longest distance frame support single unit with full support



(a) 支腿受力



(b) 支腿力矩

图 9 全支撑最远距离送架支腿力和力矩仿真结果
Fig. 9 Simulation results of the maximum distance support leg force and torque for fully supported rack delivery

4.2 三腿支撑最远距离送架作业稳定性分析

在送架作业最远距离的过程中,协同运锚车的后支腿可能会因为巷道底板平整度不高,出现一个支腿不受力的工况,故需要对此进行仿真验证。

如图 10 所示,在发生倾覆时高度位移发生改变,故协同运锚车在 27 s 时发生倾覆,此时的位移变化为 15 m。

如图 11 所示,在最远距离送架作业第二阶段中,左前支腿持续增大,一直到与右前支腿近乎等值

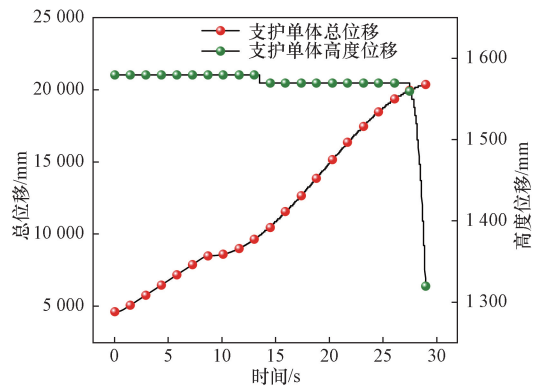
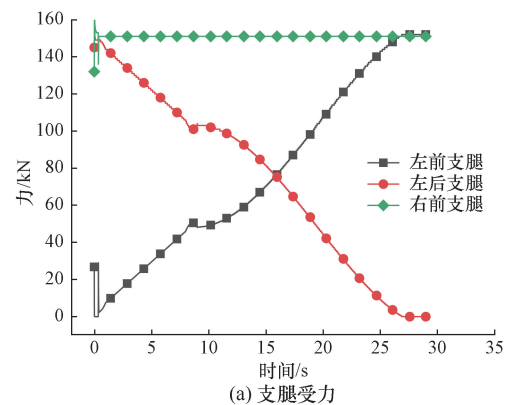
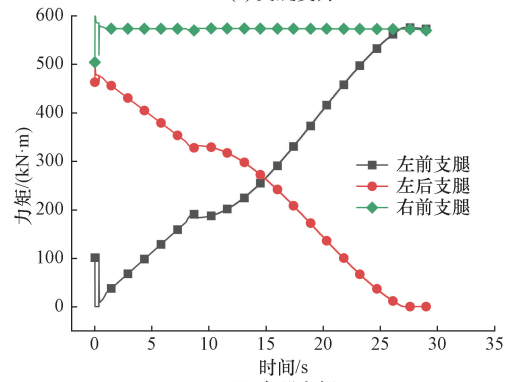


图 10 三腿支撑最远距离送架支护单体仿真结果

Fig. 10 Motion curve of the support unit for the longest distance frame delivery operation with three leg support



(a) 支腿受力



(b) 支腿力矩

图 11 三腿支撑最远距离送架支腿力和力矩仿真结果
Fig. 11 Simulation results of the maximum distance support leg force and torque for three leg support

为 151.7 kN; 左后支腿持续减小, 直至为 0; 右前支腿受力恒定一个常值为 150.8 kN。

随着承载装置的送架作业, 左前支腿力矩持续增大, 最大值为 572.3 kN·m; 左后支腿力矩随着时间的递增而减小, 直至为 0; 右前支腿力矩几乎恒定一个常值为 569.4 kN·m。

5 结论

(1) 为实现协同运锚车高效送架目的, 对运动轨迹进行设计, 通过仿真得到在 30 s 可将单体支护运送至迎头巷道进行超前支护。

(2) 当 4 条支腿全支撑时, 前支腿的受力和力矩分别从 76.9 kN 和 294 kN·m 增加至 151.2 kN 和 573.2 kN·m, 后支腿的受力和力矩分别从 73.5 kN 和 238 kN·m 减小至 0, 极限送架距离为 15.3 m。仿真结果符合设计要求。

(3) 当三腿支撑而右后支腿无支撑时, 左前支腿的受力和力矩分别从 26.8 kN 和 100 kN·m 增加至 151.7 kN 和 572.3 kN·m, 左后支腿的受力和力矩分别从 145 kN 和 462 kN·m 减小至 0, 右前支腿恒定的受力和力矩为 150.8 kN 和 569.4 kN·m, 极限送架距离为 14.99 m。极限送架距离超过了掘进机机身长度。

(4) 由两种工况下高效运架仿真的极限送架距离, 验证了协同运锚车高效运架时的稳定性满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] 王虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40a[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1815-1820.
Wang Hong. The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1815-1820.
- [2] 李兵, 陈永春, 安士凯, 等. 采动覆岩注浆离层力学结构模型及稳定性预测方法; 以张集煤矿为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(22): 9324-9333.
Li Bing, Chen Yongchun, An Shikai, et al. Mechanical structure model and stability prediction method of mining-induced overburden grouting layer separation; taking Zhangji Coal Mine as an example [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(22): 9324-9333.
- [3] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825-1845.
Yuan Liang, Wang Enyuan, Ma Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825-1845.
- [4] 康红普, 姜鹏飞, 王子越, 等. 煤巷钻锚一体化快速掘进技术与装备及应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 131-151.
Kang Hongpu, Jiang Pengfei, Wang Ziyue, et al. Coal roadway rapid driving technology and equipment with integrated drilling and
- anchoring and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 131-151.
- [5] 王国法, 张良, 李首滨, 等. 煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 34-53.
Wang Guofa, Zhang Liang, Li Shoubin, et al. Progresses in theory and technological development of unmanned smart mining system [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 34-53.
- [6] 翟明华, 张道福, 胡善超, 等. 综掘巷道循环前移式临时支护系统研制[J]. 煤矿机械, 2023, 44(8): 58-60.
Zhai Minghua, Zhang Daofu, Hu Shanchao, et al. Development of a circulating forward temporary support system for comprehensive excavation tunnels [J]. Journal of Coal Mining Machinery, 2023, 44(8): 58-60.
- [7] 李悦, 张阳玉, 王东杰, 等. 综掘巷道快速掘进工艺及钻锚运输车结构设计[J]. 煤矿机械, 2021, 42(10): 99-101.
Li Yue, Zhang Yangyu, Wang Dongjie, et al. Rapid driving technology of fully-mechanized heading roadway and structural design of bolting carrier vehicle[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(10): 99-101.
- [8] 周威, 邓海顺, 贾志军. 综掘巷道锚护协作机的稳定性分析[J]. 煤炭技术, 2023, 42(12): 229-232.
Zhou Wei, Deng Haishun, Jia Zhijun, et al. Stability analysis of anchor support cooperative machine in comprehensive excavation tunnel[J]. Coal Technology, 2023, 42(12): 229-232.
- [9] 贾志军. 综掘巷道无重复临时支护装备特性分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
Jia Zhijun. Analysis on characteristics of non-repeated temporary support equipment in fully mechanized roadway[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023.
- [10] Krauze K, Boloz L, Mucha K, et al. The mechanized supporting system in tunnelling operations [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103929.
- [11] 宋如海. 平行作业式快速掘进支护系统: CN201620746820. X [P]. 2017-03-22.
Song Ruhai. Parallel operation rapid excavation support system: CN201620746820. X [P]. 2017-03-22.
- [12] 宋凯. 一种长距离掘进和支护的煤矿巷道掘进方法及设备: CN202410234518. 5 [P]. 2024-05-10.
Song Kai. A method and equipment for long-distance excavation and support of coal mine tunnels: CN202410234518. 5 [P]. 2024-05-10.
- [13] 郑兰霞, 胡修池. 一种新的汽车起重机支腿受力计算方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2004(4): 49-51.
Zheng Lanxia, Hu Xiuchi. A new calculating method for the force in supporting legs of mobile crane[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2004(4): 49-51.
- [14] 王金东. 一种喷浆机械手支腿最大支反力计算方法[J]. 中国工程机械学报, 2015, 13(3): 242-247.
Wang Jindong. Calculation method of maximum outrigger supporting reactions for shotcrete manipulators [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2015, 13(3): 242-247.
- [15] 雷翔霄, 唐春霞, 胡璇. 床椅一体化机器人设计与实现[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(17): 7177-7184.
Lei Xiangxiao, Tang Chunxia, Hu Xuan. Design and implementation of an integrated bed and chair robot [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(17): 7177-7184.