

基于纯跟踪算法的地下铲运机路径跟踪控制方法

许文浒¹, 贺兵红², 方 略³, 刘志伟⁴
(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:为实现地下铲运机的自动路径跟踪,提出一种基于纯跟踪模型的控制算法。文章通过 MATLAB 平台进行仿真,系统分析关键参数对跟踪精度的影响规律。结果表明:路径曲率是影响横向误差的主要因素,在曲率突变处误差显著增大;行驶速度主要影响跟踪初期的误差峰值,但对稳态误差影响较小;初始位姿偏差仅影响收敛前的暂态过程,不改变稳态精度。进一步利用实际采集的铲运机行驶轨迹进行跟踪测试,验证了该算法在真实工况下的有效性与可行性。本文成果可为地下铲运机的自主导航控制提供理论依据与技术参考。

关键词:路径跟踪控制; 纯跟踪算法; MATLAB 仿真平台

中图分类号:TD422.4

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)07-0007-07

doi:10.13402/j.gcjs.2026.07.072

Path tracking control method for underground load-haul-dump (LHD) vehicles based on pure pursuit algorithm

XU Wenhui¹, HE Binghong², FANG Lue³, LIU Zhiwei⁴
(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: To achieve automatic path tracking of underground load-haul-dump (LHD) vehicles, this paper proposes a control algorithm based on the Pure Pursuit model. MATLAB simulations were conducted to analyze the influence of key parameters on tracking accuracy systematically. The results show that path curvature is the primary factor affecting lateral error, with significant error increases occurring at locations where curvature changes abruptly. Vehicle speed mainly influences the peak error during the initial tracking stage but has little effect on the steady-state error. Initial pose deviation only affects the transient convergence process and does not alter the steady-state tracking accuracy. Furthermore, tracking experiments using actual recorded LHD trajectories were performed to validate the effectiveness and feasibility of the proposed algorithm under real operating conditions. This study provides a theoretical basis and technical reference for autonomous navigation and control of underground LHD vehicles.

Key words: path tracking control; pure pursuit algorithm matlab; MATLAB simulation platform

在现代化矿业与地下工程领域,追求高效且安全的作业模式始终是行业发展的核心驱动力。地下铲运机作为采矿与掘进作业中的核心设备,其凭借卓越的物料搬运能力和对复杂作业环境的强大适应性,在地下开采作业中占据了举足轻重的地位^[1]。随着科技的不断进步与智能化技术的

蓬勃发展,地下铲运机的无人化与智能化转型已成为地下工程装备发展的必然趋势^[2]。

路径跟踪控制是实现地下铲运机自动驾驶的关键技术,其核心在于智能驾驶系统中的路径跟踪控制算法,该算法能够实时调控车辆运动,确保车辆精确沿规划路径行驶。当前,路径跟踪控

收稿日期:2025-10-11

作者简介:许文浒(1994—),男,工程师,从事冶金矿山开采技术研究。

通信作者:叶永飞(1995—),男,工程师,从事岩石力学方面的研究。

制方法众多,涵盖了基于道路几何原理的路径跟踪控制(如纯跟踪控制^[3]、Stanley 控制^[4]等)、基于经典控制理论的路径跟踪控制(如 PID 控制^[5]等),以及基于现代控制理论的路径跟踪控制(如模型预测控制^[6]、最优控制等)。

纯跟踪算法因其开发周期短、成本低廉以及对硬件算力要求不高的特点,受到了学术界的广泛关注与研究。然而,尽管众多学者对传统纯跟踪算法进行了改进,如付景枝等^[7]通过二次多项式表示预估前视距离以提高跟踪精度,胡丹丹等^[8]提出基于代价的滚动预瞄模型以提升特殊初始状态和大曲率道路下的跟踪性能,以及田宇洋等^[9]对 MPC 算法与纯跟踪算法的横向控制进行了对比分析,但现有研究大多聚焦于阿克曼车辆,针对地下铰接式铲运机的路径跟踪算法研究仍显不足。

鉴于此,本文以地下铲运机为研究对象,采用纯跟踪算法对其运行路径进行计算跟踪,并对算法误差进行模拟验证,从而实现了对地下铲运机的路径进行跟踪控制的目的,以期可为地下铲运机的智能化转型提供理论依据。

1 地下铲运机运动建模与路径跟踪算法

1.1 铲运机运动模型

地下铲运机是一种专为地下矿山及隧道工程设计的装载、运输设备。如图 1 所示,它采用铰接式结构,机身灵活转向,能适应狭窄巷道作业。该机以电动机或柴油机为动力,通过液压传动实现无级变速,其全液压随动伺服卷缆系统保护电缆,静液压回路无级变速行走系统提升操作简便性和工作可靠性。



图 1 地下铲运机

通常,铲运机的最高行驶速度被限制在 30 km/h 以内,且其行驶状态可以通过运动学模型

进行较为精确的描述^[10]。铲运机简化模型如图 2 所示,表示铲运机的一种行驶状态。图中: F 、 R 分别为前后轮的中心点, C 为铰接点; (x_f, y_f) 为前轮中心点的坐标, m ; (x_r, y_r) 为后轮中心点的坐标; γ 为铰接角度, rad , 左转为正, 右转为负; β 为点 A 、 B 、 C 构成的夹角, rad ; l_f , l_r 分别为前后轴的 lengths, m , 本文取 1.75 m ; l_d 为点 R 到 A 的直线距离, m ; r 为点 O 到 A 的直线距离, m 。

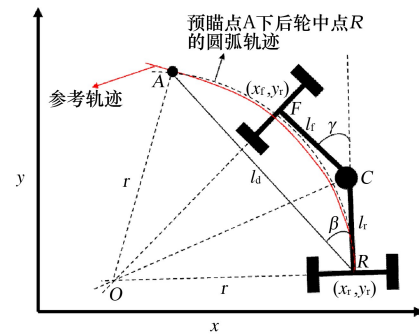


图 2 铲运机运动模型

文献给出了以前轮中心点为参考的铲运机运动模型,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{y}_f \\ \dot{\theta}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_f) & 0 \\ \sin(\theta_f) & 0 \\ \frac{\sin(\gamma)}{l_r + l_f \cos(\gamma)} & \frac{l_r}{l_r + l_f \cos(\gamma)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: v_f 为前轮中心点的速度, m/s ; θ_f 为前轴的航向角, rad 。

本文中纯跟踪法是以后轮中心点作为参考,根据图 2 推导出后轮航向角 θ_r 的变化如式(2)所示:

$$\dot{\theta}_r = \frac{v_f \sin(\gamma) - l_f \dot{\gamma} \cos(\gamma)}{l_r + l_f \cos(\gamma)} \quad (2)$$

式中: θ_r 为后轴的航向角, rad 。

后轮中心点速度 v_r 与前轮中心点速度 v_f 的关系如式(3)所示:

$$v_r = \frac{l_f l_r \dot{\gamma} \sin(\gamma) + [l_f + l_r \cos(\gamma)] v_f}{l_r + l_f \cos(\gamma)} \quad (3)$$

式中: v_r 为后轮中心点的速度, m/s 。

联立等式(2)(3)可得式(4):

$$\dot{\theta}_r = \frac{\sin(\gamma) v_r - l_f \dot{\gamma}}{[l_f + l_r \cos(\gamma)]} \quad (4)$$

因此,可得以后轮中心点为参考的铲运机运

动模型, 如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= \cos(\theta_r) v_r \\ \dot{y}_r &= \sin(\theta_r) v_r \\ \dot{\theta}_r &= \frac{\sin(\gamma)}{l_f + l_r \cos(\gamma)} \dot{\gamma} \\ \dot{\gamma} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

1.2 纯跟踪算法

如图 2 所示, A 为后轮中心点 R 的预瞄点, O 是 R 以圆弧运动到 A 的圆心。 r 为圆的半径, l_d 是 R 到 A 的直线距离, $\angle ARC = \beta$ 。在三角形 ΔORC 中, $CR \cdot RO$, 则满足式(6):

$$\angle AOR = \pi - 2 \frac{\pi}{2} - \beta = 2\beta \quad (6)$$

为了使车辆后轮中心点 R 跟踪圆弧虚线轨迹到达 A 点, 在 ΔORC 中需要满足正弦定理, 如式(7)所示:

$$\frac{l_d}{\sin 2\beta} = \frac{r}{\sin \frac{\pi}{2} - \beta} \quad (7)$$

化简可得式(8):

$$r = \frac{l_d}{2 \sin \beta} \quad (8)$$

在四边形 $ORCF$ 中, 可得铰接角满足式(9):

$$\begin{aligned} \gamma &= \angle FOC + \angle ROC \\ \angle FOC &= \tan^{-1} l_f / r \end{aligned} \quad (9)$$

$$\angle ROC = \tan^{-1} l_r / r$$

联立等式(8)(9), 可得式(10):

$$\gamma = \tan^{-1} 2l_f \sin \beta / l_d + \tan^{-1} 2l_r \sin \beta / l_d \quad (10)$$

其中, l_d 为关于速度的一次多项式, 如式(11)所示:

$$l_d = kv_r + l_0 \quad (11)$$

式中: k 为斜率, 本文中取 0.8; l_0 为截距, m, 本文中取 6.58 m。

2 仿真分析

本节基于 MATLAB 编程的铲运机纯跟踪算法仿真试验测试。试验实施过程中, 铲运机的状态更新是依据运动学模型等式(12)进行的。通过该方法能够系统地评估纯跟踪算法在铲运机运动控

制中的性能表现。

$$\begin{aligned} x_r(t+1) &= x_r(t) + \\ y_r(t+1) &= y_r(t) + \\ \theta_r(t+1) &= \theta_r(t) + \\ \gamma(t+1) &= \gamma(t) + \\ \cos[\theta_r(t)] &= 0 \\ \sin[\theta_r(t)] &= 0 \\ \frac{\sin[\gamma(t)]}{l_f + l_r \cos[\gamma(t)]} &= \frac{l_f}{l_f + l_r \cos[\gamma(t)]} \\ 0 &= 1 \end{aligned} \quad \begin{aligned} &v_r(t) \\ &\dot{\gamma}(t) \\ &dt \end{aligned} \quad (12)$$

式中: t 表示当前时刻, $t+1$ 表示下一时刻。 dt 为时间间隔, 试验控制频率为 10 Hz, dt 取 0.1 s。设置铲运机最大加速度为 0.8 m/s², 铰接角最大角速度为 0.15 rad/s。铲运机其它详细参数见表 1, 纯跟踪算法参数见表 2。

表 1 铲运机详细参数值

长度/m	宽度/m	转向角/(°)	内转弯半径/m	外转弯半径/m
9.968	2.635	-42.5 ~ 42.5	3.179	6.632
加速度/ (m·s ⁻²)	角速度/ (rad·s ⁻¹)	前轴长 度/m	后轴长 度/m	
-0.8 ~ 0.8	-0.15 ~ 0.15	1.75	1.75	

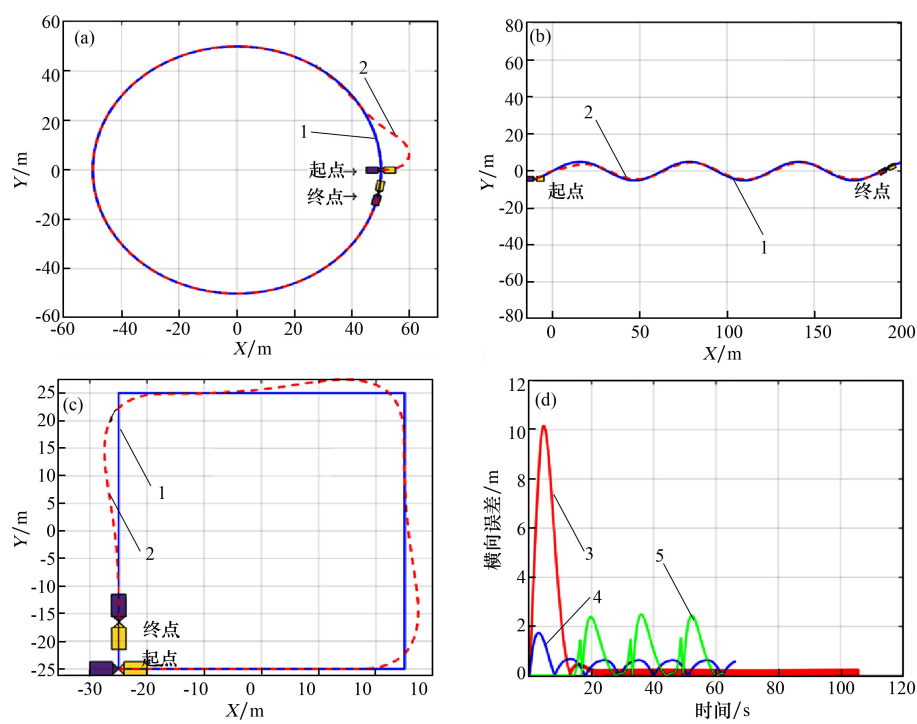
表 2 跟踪算法参数值

控制周期/s	预瞄参数斜率	预瞄参数截距/m
0.1	0.8	6.58

2.1 不同轨迹跟踪仿真

该次试验设计了 3 条不同轨迹。第一条圆形轨迹是以原点为圆形, 半径为 50 m 的圆, 初始位置为(50, 0), 初始航向角与铰接角度均为 0, 如图 3(a) 所示。第二条 sin 轨迹的表达式为 $y = 5 \sin(0.1x)$, $x \in [-10, 200]$, 初始位置为(2.5, 1.24), 初始航向角与铰接角度均为 0, 如图 2(b) 所示。第三条正方形轨迹是以边长为 50 m 的正方形, 初始位置为(-25, -25), 初始航向角与铰接角度均为 0, 如图 2(c) 所示。

图 3 展示了纯跟踪算法在 3 种不同轨迹(圆形、正弦波及正方形)下的跟踪表现, 其中所有轨迹的跟踪速度均被设定为 3 m/s。图中, X 为横向位移, Y 为纵向位移。由图 3 可以看出: 跟踪圆形轨迹时[图 3(a)], 初始航向角误差很大, 导致



(a) 圆型跟踪轨迹；(b) sin 跟踪轨迹；(c) 正方形跟踪轨迹；(d) 3 种轨迹跟踪横向误差
1—参考轨迹；2—跟踪轨迹；3—圆形轨迹；4—sin 轨迹；5—正方形轨迹。

图 3 纯跟踪算法在不同轨迹下的跟踪结果

跟踪初期横向误差较大，最大横向误差达 10.148 m (表 3)，随后横向误差逐渐变小趋于稳定；跟踪 sin 轨迹时[图 3(b)]，铲运机初始状态与参考轨迹相近，其在整个过程中横向误差较为稳定；跟踪正方形轨迹时[图 3(c)]，参考轨迹曲率在直角处的突变，导致每个直角过后的出现横向误差逐渐变大，而后逐渐变小的规律。

表 3 不同轨迹下的横向误差 m

轨迹编号	平均值	最小值	最大值	标准差
1	0.774	0	10.148	2.063
2	0.503	0.003	1.730	0.335
3	0.740	0	2.473	0.838

上述规律可从横向误差图[图 3(d)]中更加清楚地得到：跟踪圆形轨迹横向误差的均方根误差为 2.20 m，最后 10 s 横向误差的平均值为 0.13 m。跟踪 sin 轨迹横向误差的均方根误差为 0.60 m，最后 10 s 横向误差的平均值为 0.41 m。整个过程中横向误差出现规律性的增大变小，变化规律与参考轨迹一致，横向误差最大值出现在 sin 轨迹的波峰或者波谷。跟踪正方形轨迹横向误差的均方根误差为 1.12 m，最后 10 s 横向误差的平均值为 0.82 m。

综上分析可得曲率的变化影响跟踪质量，在曲率变化大的位置附近横向误差大，反之，曲率变化小的位置附近横向误差小且稳定。

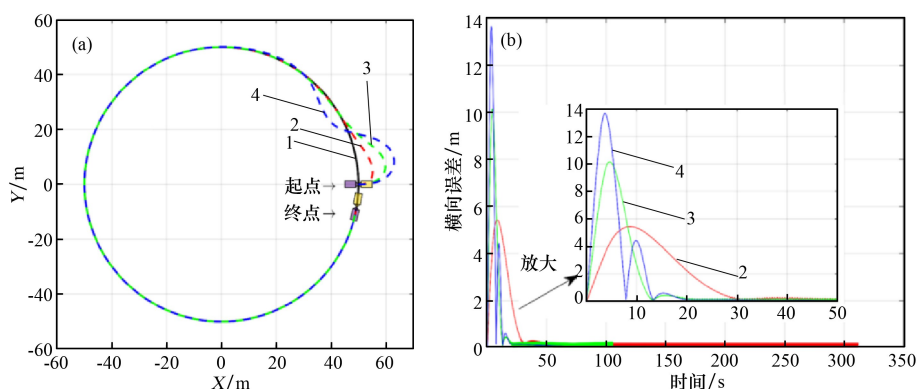
2.2 不同速度跟踪仿真

该次试验以第一条圆形轨迹作为测试的参考轨迹，铲运机初始状态与前试验一致。在图 4 中，展示了纯跟踪算法在 3 种不同速度(1、3、5 m/s)下的跟踪表现。可以明显看出，随着速度的增大，跟踪初期横向误差越大。在整个跟踪过程中，3 种不同速度(1、3、5 m/s)横向误差的均方根误差分别为 1.07、2.20、3.30 m，最后 10 s 横向误差的平均值分别为 0.12、0.13、0.07 m。另外，从表 4 横向误差的平均值、最大值及标准差可以看出，随着速度的增大，横向误差逐渐增大。

表 4 不同速度下的横向误差

速度/ (m·s ⁻¹)	平均 值/m	最小 值/m	最大 值/m	标准 差/m
1	0.394	0	5.430	0.991
3	0.774	0	10.148	2.060
5	1.303	0	13.661	3.032

综上分析可得，随着速度的增大，跟踪初期由于受初始状态误差的影响,横向误差逐渐增大。



(a) 圆形跟踪轨迹; (b) 圆形轨迹跟踪横向误差

1—参考轨迹; 2—速度为 1 m/s; 3—速度为 3 m/s; 4—速度为 5 m/s。

图 4 纯跟踪算法在不同速度下的跟踪结果

当误差达到平稳后, 受速度的影响较跟踪初期更小, 但横向误差也会随着速度的增大而增大。

2.3 不同初始状态跟踪仿真

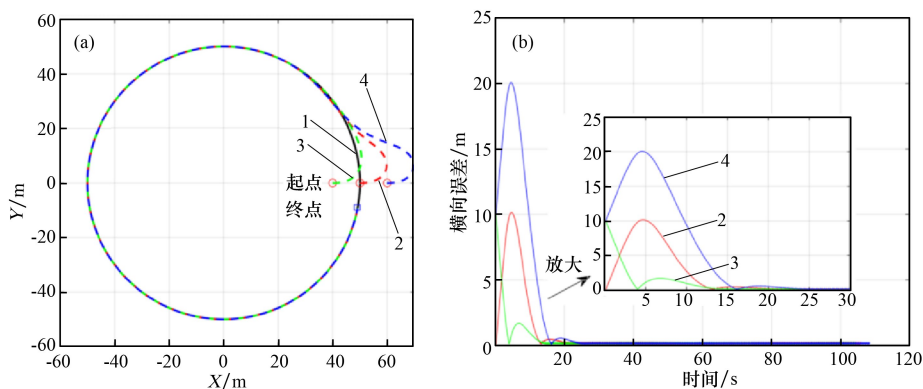
该次试验以第一条圆形轨迹作为测试的参考轨迹, 测试在不同初始状态下纯算法跟踪质量。图 5 展示了纯跟踪算法在 3 种初始位置 $[(50,0)$ 、 $(40,0)$ 及 $(60,0)]$ 下的跟踪表现。可以明显看出, 不同的初始位置对跟踪初期横向误差影响大, 而对稳定后的横向误差影响较小。在整个跟踪过程中, 3 种不同初始位置 $[(50,0)$ 、 $(40,0)$ 及 $(60,0)]$ 横向误差的均方根误差分别为 2.20、1.14 m 及 5.01 m, 最后 10 s 横向误差的平均值均为 0.13 m。另外, 初始位置为 $(40,0)$ 的试验, 初始位置误差与初始车辆航向误差一致, 车辆的运动使得两者可同时减小, 因此其跟踪初期横向误差呈现逐渐减少的效果, 跟踪初期横向误差 10 m 便是跟踪期间最大的横向误差(表 5)。

表 5 不同初始状态下的横向误差

初始位置	平均值/m	最小值/m	最大值/m	标准差/m
$(50,0)$	0.774	0	10.148	2.060
$(40,0)$	0.380	0	10.000	1.073
$(60,0)$	1.303	0	20.078	4.686

综上分析可得, 轨迹跟踪的横向误差在跟踪初期时受初始状态影响较大, 但初始状态对误差平稳后的跟踪影响很小。

需要说明的是, 纯跟踪算法是一种基于车辆几何关系的路径跟踪方法, 其控制规律主要依赖车辆运动学参数(如转向角限制), 与具体设备型号并无直接关系。不同型号地下铲运机之间的差异主要体现在车身尺寸参数上, 本文选取典型型号铲运机参数进行仿真分析, 其结论对具有相似结构特征的地下铲运机具有普遍的参考意义。



(a) 不同初始位置下圆形跟踪轨迹; (b) 不同初始位置下圆形轨迹跟踪横向误差

1—参考轨迹; 2—初始位置 $(50,0)$; 3—初始位置 $(40,0)$; 4—初始位置 $(60,0)$ 。

图 5 纯跟踪算法在不同初始状态下的跟踪结果

3 基于实际工程地下铲运机运行轨迹的跟踪验证

为测试铲运机纯跟踪算法在实际场景中的可行性与性能表现,特地选取了铲运机在甘肃某矿中的实际行驶轨迹作为参考轨迹。

图 6 展示了铲运机在该矿地下环境中不同视角下的状态,图 6(a)~(d)呈现了铲运机在不同位置驻车时的姿态,图 6(b)则展示了铲运机启动后的状态。值得注意的是,从图 6(d)可以观察到,铲运机在巷道两侧的冗余空间相对有限,实际测量值为约 60 cm,这提示铲运机在自动驾驶过程中,横向误差应严格控制在这一范围内。

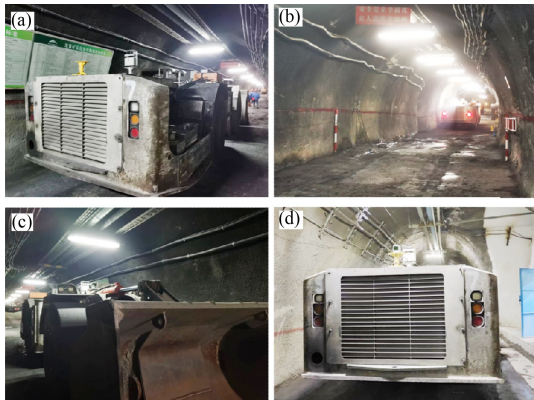
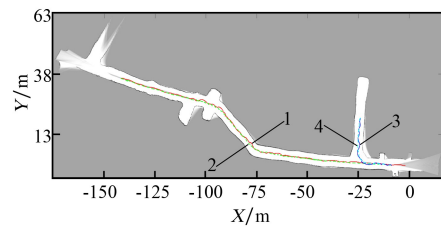


图 6 地下铲运机在巷道中的不同视角

通过 Cartographer^[11]构建了铲运机工作区域的地图,如图 7 所示。在铲运机工作过程中,通过 Cartographer 定位得到铲运机完整进行一次铲、装、卸的工作行驶轨迹(图 7),分别为去装矿路径、装矿返回路径、去卸矿路径及卸矿返回路径。

由于 Cartographer 定位存在误差,图 7 中的行驶轨迹不平滑,首先对图 7 中的 4 条轨迹进行平滑,然后应用了纯跟踪算法对上述 4 条特定的铲运机行



1—去装矿路径; 2—装矿返回路径;
3—去卸矿路径; 4—卸矿返回路径。

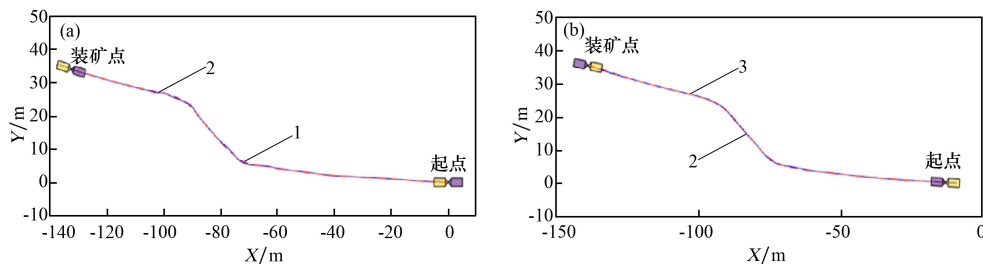
图 7 铲运机工作行驶轨迹

驶轨迹进行了追踪分析,其中纯跟踪算法参数 k (预瞄参数斜率)与 l_0 (预瞄参数截距)分别设定为 0.8 和 2 m。鉴于装矿往返路径的曲率相对较小,设定了 3 m/s 的参考跟踪速度,其追踪效果如图 8 所示。在前往装矿的路径追踪过程中,最大横向误差被记录为 0.35 m [图 10(a)];而在装矿返回的路径追踪中,最大横向误差则减小至 0.26 m [图 10(a)]。

相比之下,卸矿往返路径的曲率较大,因此这里将跟踪参考速度调整至 1 m/s,其追踪效果如图 9 所示。在前往卸矿的路径追踪中,最大横向误差增加至 0.46 m [图 10(c)];而在卸矿返回的路径追踪中,最大横向误差则为 0.42 m [图 10(c)]。

综上所述,采用纯跟踪算法对铲运机实际行驶路径进行追踪时,所得的最大横向误差均小于 0.60 m。这一结果表明,纯跟踪算法在追踪实际铲运机行驶轨迹方面具有可行性和有效性。

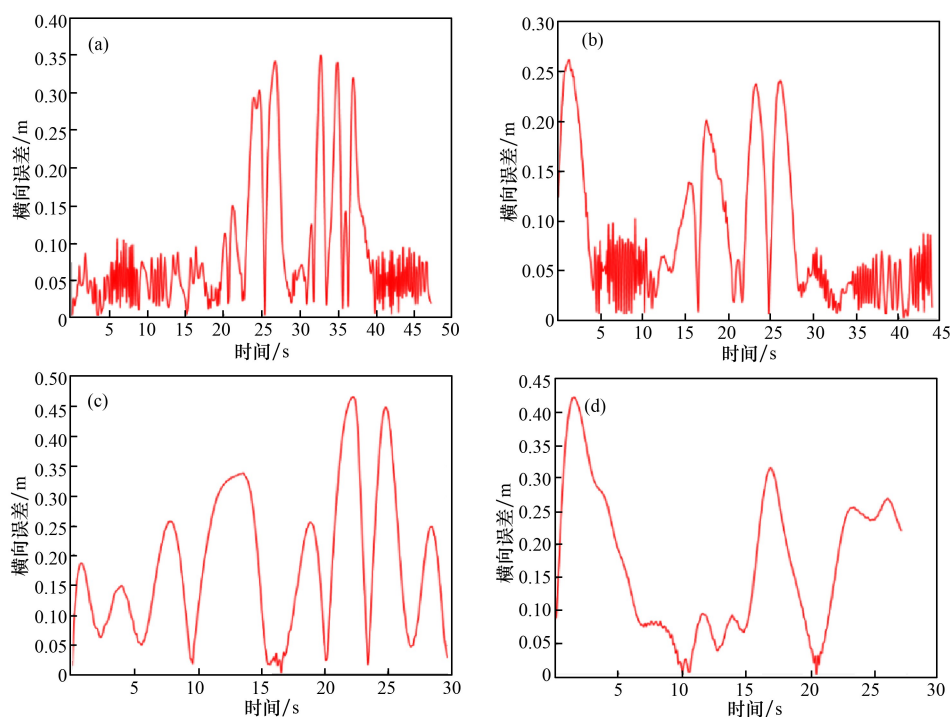
需要注意的是,该算法的局限性在于未考虑车辆动力学特性、侧滑及环境扰动,因此在高速、大曲率或极窄巷道条件下误差可能增大。推广前景方面,纯跟踪算法结构简单、易实现,可作为地下铲运机自主导航的基础控制方法,并可进一步与动力学约束或强化学习方法结合,以提高复杂巷道环境下的跟踪精度和适用性。



(a) 去装矿轨迹; (b) 装矿返回轨迹

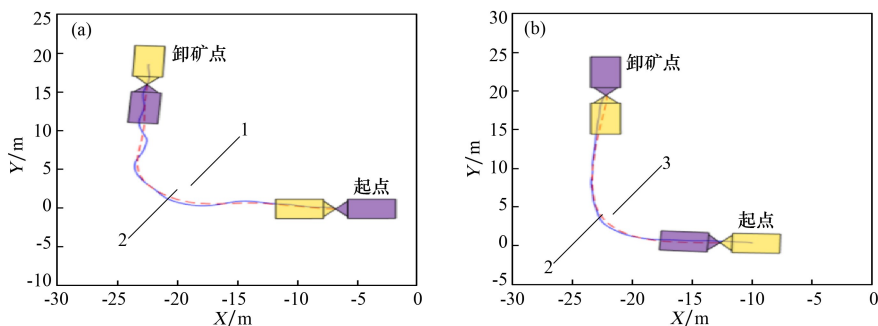
1—去装矿参考轨迹; 2—纯跟踪轨迹; 3—装矿返回参考轨迹。

图 8 装矿返回路径跟踪结果



(a) 去装矿轨迹; (b) 装矿返回轨迹; (c) 去卸矿轨迹; (d) 卸矿返回轨迹

图 9 纯跟踪算法跟踪铲运机行驶轨迹的横向误差



(a) 去卸矿轨迹; (b) 卸矿返回轨迹

1—去卸矿参考轨迹; 2—纯跟踪轨迹; 3—卸矿返回参考轨迹。

图 10 地下铲运机卸矿往返路径跟踪结果

4 结 论

本研究针对地下铲运机, 开发了基于纯跟踪的路径跟踪算法, 并通过仿真试验验证了其有效性, 得出主要结论如下。

(1) 路径曲率变化越大, 铲运机的横向误差越大; 反之, 曲率变化越小, 横向误差越小且更稳定。

(2) 随着速度增加, 跟踪初期的横向误差增大, 但误差稳定后, 速度对横向误差的影响减弱。

(3) 初始状态主要影响跟踪初期的横向误差, 对误差稳定后的跟踪无显著影响。

最后, 通过实际的工程数据测试, 再次证实了纯跟踪算法在追踪铲运机真实行驶轨迹方面的可行性与实用性。本研究为地下铲运机的智能化与自动化操作提供了理论和技术支持, 未来将进一步优化算法, 提升路径跟踪的精度和稳定性。

参考文献:

- [1] 李建国, 战凯. 基于无人装备的地下金属矿智能开采技术[J]. Engineering, 2018, 4(3): 181–203.
- [2] 李国清, 王浩, 侯杰, 等. 地下金属矿山智能化技术进展[J]. 金属矿山, 2021, (11): 1–12.

(下转第 22 页)

梁荷载试验规程》(JTG/T J21—01—2015)要求,说明结构工作性能较好,有一定的安全储备。应变分析中,当右侧偏载和对称荷载作用时,底板测点均处于弹性状态,应变幅度值变化不明显;当称荷载、对称结构、对称点位作用时,测点应变值相近;偏载荷载对左腹板应变影响明显。

(3) 挠度分析,右侧荷载相对于对称荷载,荷载偏载右侧测点挠度增幅较大,最大增幅为 26.15%;荷载左侧测点挠度幅度值减少 16.05%,根据试验结果,建议车辆行驶时避免偏载情况,保证桥梁处于安全工作状态。经过荷载试验,该预应力混凝土连续桥梁的挠度、控制截面的应变等指标,均符合规范要求,暂时不需要维护加固,但考虑偏载情况,应限制单侧重型货车通行,对该桥梁树立限重标识,定期对关键截面进行检测,防患事故。对出现轻微裂缝处,可以采用砂浆,或者细石混凝土或者修补剂填充裂缝并平整表面,使裂缝封闭,保证混凝土的整体性,防止内部钢筋发生锈蚀影响结构性能。

参考文献:

- [1] 滕礼刚,胡康明,陈瑜. 基于无锡桥梁侧翻事故的桥梁全生命周期管理思考[J]. 市政技术, 2020, 38(4): 94-96.
- [2] 陶凤,吕银玲. 湖北高速桥梁侧翻超重又是罪魁祸首? [N]. 北京商报, 2021-12-20(2).

- [3] 田园,于建洋,鲍琪祥. 公路桥梁荷载试验过程控制要点分析[J]. 交通世界, 2019(19): 108-109.
- [4] 刘亦凡. 荷载试验在公路桥梁养护过程中的应用及作用分析[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(7): 244-245.
- [5] 胡静雯. 静载试验在公路桥梁检测中的应用探讨[J]. 青海交通科技, 2021, 33(4): 133-134; 141.
- [6] 梁俊怡. 预应力混凝土桥梁的静载试验研究[J]. 交通世界, 2020(17): 123-125.
- [7] 张守军. 预应力混凝土连续梁桥静载分析与试验研究[J]. 交通世界, 2020(34): 99-101; 131.
- [8] 齐文彬,王海军,王海龙,等. 基于静载试验的某预应力混凝土连续梁桥承载力评估[J]. 河北建筑工程学院学报, 2019, 37(4): 8-13.
- [9] 王燕. 静载试验在桥梁检测中的应用研究[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(2): 149-151.
- [10] 窦俊鹏. 重载铁路预应力混凝土简支 T 梁抗剪性能研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2021.
- [11] 胡晓东. 基于动静载试验铁路混合梁斜拉桥静动力性能研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
- [12] 潘忠岳,包天鹏. 山区大跨斜拉桥荷载试验研究[J]. 工程建设, 2020, 52(8): 78-82.
- [13] 林巍杰,汤宇,彭学军,等. 有限元分析软件在连续梁线形监控中的应用[J]. 工程建设, 2020, 52(11): 52-56.
- [14] 公路桥梁荷载试验规程: JTG/T J21—01—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2016.

(上接第 13 页)

- [3] 刘卫东,张超,江会华,等. 基于改进纯跟踪的低速智能汽车路径跟踪控制[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 10983-10992.
- [4] 王鑫,凌铭,饶启鹏,等. 基于改进 Stanley 算法的无人车路径跟踪融合算法研究[J]. 汽车技术, 2022, (7): 25-31.
- [5] 王兴国,吴伟林,何伟. 基于 PSO 的 LQR 车辆横纵向跟踪控制研究[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(10): 136-142.
- [6] 伊力夏提·伊力哈木江,孟宇,白国星,等. 基于前馈非线性模型预测控制的类车机器人路径跟踪[J]. 工程科学学报, 2025, 47(1): 101-112.
- [7] 付景枝,尹泽凡,刘云平,等. 基于改进纯跟踪算法的

- 无人车路径跟踪研究[J]. 机械设计, 2022, 39(增刊 2): 41-45.
- [8] 胡丹丹,尹鹏飞,牛国臣,等. 基于滚动预瞄模型的纯跟踪算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3787-3793.
- [9] 田宇洋,王金波,庞同嘉. MPC 算法与纯跟踪算法的横向控制策略研究对比[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(8): 58-62.
- [10] 蒋元建. 基于激光雷达的铲运机自动驾驶系统关键技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.
- [11] HESS W, KOHLER D, RAPP H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2016.