

基于激光雷达与改进 AI 算法的 露天矿自卸卡车防撞技术

张世新¹, 樊九林¹, 李伟东², 刘崇明²

(1. 华电煤业集团数智技术有限公司, 北京 100088;
2. 内蒙古华通瑞盛能源有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017099)

摘要: 露天矿自卸卡车在载重突变时, 滑模变结构控制会引发液压制动系统抖振, 该现象会导致自卸卡车与障碍物的包围盒重叠判断困难, 延长碰撞监测系统的检测响应时间。对此问题, 提出基于激光雷达与改进 AI 算法的露天矿自卸卡车防撞技术。该技术采用单束激光点云空间邻域联合分割法, 在栅格地图中区分出自卸卡车周边障碍物和地面点, 并通过坐标变换矩阵标定激光雷达与矿卡位置。采用 AI 算法中的包围盒算法, 在栅格地图中进行自卸卡车与障碍物的碰撞检测, 通过改进的混合层次包围盒算法对自卸卡车与障碍物的包围盒重叠进行碰撞检测判断, 快速排除不可能发生碰撞的检测对象; 若可能产生碰撞, 则使用级联控动的停车策略主动停车, 实现自卸卡车的防撞操作。实验结果表明: 利用该技术, 自卸卡车能在短时间内有效躲避周边障碍物并到达目标点, 且碰撞检测响应时间降低至 35.4 ms, 有效降低了露天矿自卸卡车的碰撞风险。

关键词: 激光雷达; 自卸卡车; 碰撞检测; 包围盒算法; AI 算法; 级联制动

中图分类号: TD619 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0112-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.02.05

露天矿自卸卡车(简称“矿卡”)在露天矿山专门用于执行岩石土方剥离及矿石运输的重任; 通过与其他采矿设备的配合, 可提高露天矿山的生产效率^[1]。一旦矿卡在工作中出现碰撞事故, 不但会造成驾驶人员伤亡, 也会为露天矿山的财产带来损失, 所以对矿卡防撞技术的研究尤为重要。

通过激光扫描雷达与 STM32 主控芯片的紧密结合, 以及高速视觉采集处理机构的辅助, 可完成对智能车辆周围环境的全面感知和处理^{[2]227}; 但激光扫描雷达的波长较小, 易受空气中阻碍激光传输的微小颗粒物的干扰, 导致雷达无法准确获取障碍物的位置, 从而影响车辆防撞系统预判的准确性。限制车辆运动状态的同时, 在车辆外形为矩形的基础上构建虚拟安全边界预防碰撞, 通过构建多个代价函数分别评估换道的安全性、驾驶的舒适性以及跟车的效率, 在待选换道轨迹优化中采用 fmincon 函数, 使车辆系统通过不断地循环调用换道轨迹规划模块, 可实现车辆预防碰撞的同时抵达预定的目标位置^{[3]621}; 但 fmincon 函数的计算过程相对耗时, 在处理大规模问题时,

若未按时做出决策, 会影响车辆防碰撞预警的及时性。结合行驶意图识别构建轨迹预测模型, 在混合包围盒碰撞检测算法基础上, 通过预设的最小安全距离和最大冲突距离进行初步碰撞辨别, 可实现自动驾驶车辆的防撞检测^{[4]10}; 但混合包围盒算法无法在所有情况下都提供紧密的包围盒, 特别是在车辆形状复杂或运动状态多变的情况下, 会导致算法在检测潜在碰撞时产生误报或漏报, 从而影响防碰撞检测的准确性。经过采样区域优化的轨迹规划策略, 在将周围区域细分为基础代价和障碍代价区域并得出代价值后, 根据代价值对周围区域点进行筛选并排列检测, 选择成功通过碰撞检测的轨迹作为最优轨迹, 可实现车辆轨迹障碍物的规避^[5]; 但在候选轨迹中进行碰撞检测时, 车辆所依赖的传感器数据一旦存在噪声和不确定性, 会导致感知到的障碍物位置和形状不完全准确, 进而可能导致碰撞检测的误报或漏报, 影响轨迹规划的有效性和安全性。

综上所述, 笔者提出基于激光雷达与改进 AI 算法的露天矿自卸卡车防撞技术, 旨在提高露天

收稿日期: 2025-02-26

第一作者简介: 张世新(1999—), 男, 辽宁朝阳人, 学士, 助理工程师, 主要从事露天矿山安全研究。

矿自卸卡车的避障能力以及运输效率。

1 露天矿自卸卡车防撞技术设计

1.1 矿卡地面点障碍物区分

当激光线遇到露天矿道路上的矿石、矿车、树丛,及土块等障碍物时,激光点相对于雷达中心的位置、探测距离所构成的几何图形会出现起伏^[6-7]。通过网格(Grid)信息和余弦值的变化,可有效区分地面点与障碍物点。

通过激光点云空间邻近区域划分法滤除矿卡地面点的障碍物信息。图1展示了激光雷达扫描的坐标 $O-XYZ$,激光雷达的中心点用 O 表示,激光雷达右侧为 X 轴,前方为 Y 轴,上方为 Z 轴。在坐标系中, A 、 B 、 C 三点位于同一条扫描线上,坐标分别为 (A_x, A_y, A_z) 、 (B_x, B_y, B_z) 、 (C_x, C_y, C_z) 。

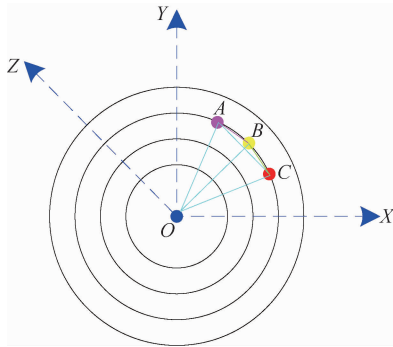


图1 激光雷达扫描展示图

Fig. 1 LiDAR scanning display

其中点 A 与点 B 间的间隔点数与点 B 与点 C 间的间隔点数相同,且间隔点数的具体数值可以根据实验环境的不同而有所调整,由此可得:

$$\begin{aligned}
 |OA| &= \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}, \\
 |OB| &= \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \\
 |OC| &= \sqrt{C_x^2 + C_y^2 + C_z^2}, \\
 |AB| &= \sqrt{(A_x - B_x)^2 + (A_y - B_y)^2 + (A_z - B_z)^2}, \\
 |BC| &= \sqrt{(B_x - C_x)^2 + (B_y - C_y)^2 + (B_z - C_z)^2}, \\
 |AC| &= \sqrt{(A_x - C_x)^2 + (A_y - C_y)^2 + (A_z - C_z)^2}, \\
 \cos \angle ABC &= \frac{|AB|^2 + |BC|^2 - |AC|^2}{2|AB| \cdot |BC|}, \\
 \text{Value}_1 &= \frac{|OB|}{|OA|}, \text{Value}_2 = \frac{|OB|}{|OC|}, \\
 \text{Grid} &= \begin{cases} 1, & \text{Value}_2 < m_1 \text{ 或 } \text{Value}_2 < m_2, \\ 0, & \text{其他} \end{cases}
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, m_1 和 m_2 为网格Grid值的阈值参数。假设露天矿地面处于水平状态,在矿卡上的激光雷达每一圈扫描线上,所有与 A 、 B 、 C 相似的连续或等间隔的点所构成的三角形应当大致相同,且从原点 O 到 A 、 B 、 C 的距离(即激光雷达扫描点的径向距离)也应当相近。设定矿卡地面共有5个大小不一的障碍物,应用本方法进行地面点障碍物区分,结果见图2。可以看出,本方法有效识别并区分出了所有的障碍物,区分准确性较佳。

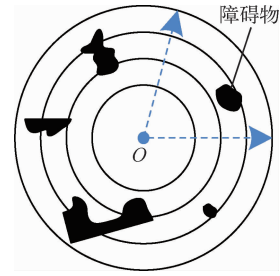


图2 矿卡地面点障碍物区分结果

Fig. 2 Obstacle discrimination results of dump truck ground point

1.2 地面点与障碍物区分下的矿卡位置标定

通过标定激光雷达与矿卡的位置,可进行后续碰撞检测,其核心目的在于确定一个坐标变换矩阵,这个矩阵能够将激光雷达坐标系中的点转换到矿卡自身坐标系中^[8]。在矿卡顶部安装激光雷达,并且其坐标轴方向与矿卡坐标轴方向被预先设定为一致,方便数据处理。 X 轴指向矿卡车头前进方向; Z 轴与地面成 90° ,指向矿卡的正上方;而 Y 轴则根据右手定则确定,与 Z 轴和 X 轴相互垂直,使得激光雷达的数据能够直观反映矿卡周围的环境信息(图3)。

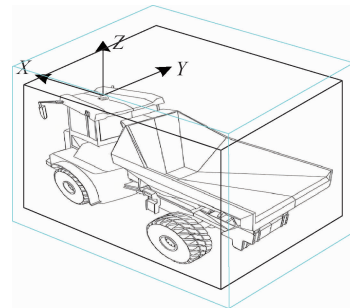


图3 露天矿自卸卡车位置标定

Fig. 3 Location calibration of dump truck in open pit mine

在激光雷达与矿卡位置标定的基础上,采用 AI 算法中的包围盒算法实现矿卡的碰撞检测。为提高矿卡碰撞检测的可靠性,矿卡通常会将原始的 AABB 包围盒按一定比例进行放大。其优势是即使矿卡在实际行驶过程中存在一些测量误差或动态变化(如矿卡颠簸导致的轻微位置偏移),放大的包围盒仍可提供足够的安全裕量,以确保矿卡能及时检测到潜在的碰撞风险并采取相应的避障措施。

1.3 基于露天矿卡位置的框架碰撞检测

为提高碰撞检测的高效性,对传统包围盒碰撞检测算法加以改进,设计混合包围盒碰撞检测算法对矿卡进行防撞技术检测。利用从上向下的策略,为矿卡及碰撞检测的对象构建一个混合包围盒结构^[9-10]。该结构被明确划分为 2 层:W 层采用轴对齐包围盒(AABB)进行划分,而 E 层则使用了定向包围盒(OBB)。将三维激光雷达与矿卡精确标定至同一坐标系,且具有同样的坐标轴方向,则矿卡仅需配备 AABB 包围盒即可。而对于碰撞检测对象,则分别构建 AABB 和 OBB 两种包围盒,以充分利用各自的优势^[11-12]。对于相同物体,最多仅需执行 2 次包围盒间的碰撞检测:先在 AABB 与 AABB 之间进行碰撞检测,以便剔除那些明显不可能发生碰撞的情况^[13];再在 AABB 与 OBB 之间进行碰撞检测,进一步验证潜在的碰撞事件。

1.3.1 AABB 与 AABB 之间的碰撞检测

保持激光雷达的坐标轴与碰撞检测对象包围盒的各轴指向一致,通过分离轴定理(Separating Axis Theorem, SAT)判别矿卡与碰撞检测对象是否会发生碰撞^[14]。将激光束从不同角度扫描到碰撞检测对象上,矿卡与碰撞检测对象的投影若不重合,则矿卡与碰撞检测对象不会相撞,所以 AABB 碰撞检测的核心原理在于辨别矿卡与碰撞检测对象的包围盒在三维空间坐标轴(即 X 轴、Y 轴和 Z 轴)上的投影是否发生重叠。若这 2 个包围盒在所有 3 个轴向上的投影均发生重叠,就可以断定它们之间发生了碰撞;反之,如果在任何一个轴向上的投影均没有重叠,则可排除它们之间发生碰撞的可能性。

1.3.2 AABB 与 OBB 之间的碰撞检测

采用分离轴定理对 AABB 与 OBB 包围盒进行碰撞检测的场景中^[15],假定矿卡和碰撞检测对

象的包围盒分别为 M 和 N,其中 M_i 和 N_i ($i=1, 2, 3$) 分别代表矿卡和碰撞检测对象包围盒 M 和 N 在 3 个坐标轴(通常是 X 轴、Y 轴和 Z 轴)上长度、宽度和高度的一半; F_i 、 G_i 代表包围盒 M 和 N 在对应轴上的单位向量; T 是从包围盒 M 的中心指向包围盒 N 的中心的向量; L 代表分离轴的方向向量; φ_M 、 φ_N 代表包围盒 M 和 N 在分离轴 L 上各自投影长度的一半之和; $|Tg_L|$ 则为包围盒 M 到 N 在分离轴上的投影长度,则可推导出以下公式:

$$\varphi_M = \sum_{i=1}^3 |M_i F_i \cdot L|, \quad (2)$$

$$\varphi_N = \sum_{i=1}^3 |N_i G_i \cdot L|. \quad (3)$$

假若 $|Tg_L| > \varphi_M + \varphi_N$,表明包围盒 M 和 N 在分离轴上的投影没有重叠,判定没有发生碰撞;如果投影重叠,则需要继续判断在其他分离轴上的包围盒投影是否重叠,以确定是否发生碰撞。

1.4 基于框架碰撞检测结果分阶段制动策略

当矿卡采用混合包围盒碰撞检测算法进行碰撞检测时,一旦检测出前方障碍物无法避让且即将发生碰撞,矿卡需要紧急停车^[16];而矿卡这类大型惯性系统遇到前方障碍物需要紧急停车时,如果采用急刹,很容易导致车辆失稳,造成矿卡侧翻或者前翻,增加事故风险。为避免此类事故发生,可采用更平稳的停车策略,如 AEBS(Advanced Emergency Braking System)控制算法,也称为级联制动^[17]。当矿卡在遇到障碍物时,以刹车制动性能参数(a_{brake})进行减速停车,停车时间通过相对车速(V_{rel})求出:

$$S_{\text{stop}} = S_0 + \frac{V_{\text{rel}}}{a_{\text{brake}}}, \quad (4)$$

式中: S_0 为应对在矿卡执行刹车时,由于执行器、系统等延迟而预留的时间。

为规避矿卡急刹停车所带来的潜在风险方面,级联制动系统采取了分阶段响应方法^[18],设置 3 个关键的碰撞时间 TTC(Time To Collision)阈值: TTC1、TTC2 和 TTC3。这 3 个阈值分别标志着不同阶段矿卡制动措施启动的时机,对应输出分阶段制动策略。

阶段 1: 当系统预测到停车所需时间低于 TTC1(设定为 2.5 s)时, AEBS(高级紧急制动系统)会首先向车载控制系统发出停车警告信号^[19],提前通知驾驶员即将面临的紧急状况,以

便有时间做出初步反应。

阶段 2:若停车时间进一步缩短至 TTC2(设定为 1.5 s)以下,AEBS 则升级其响应措施,向车载控制系统发送部分制动指令。此时,系统会启动制动装置,施加约为 60%的制动力,以减缓车速,为最终的停车动作做准备。这一步骤属于制动干预的初级阶段,旨在通过温和的方式逐步降低车速,减少急刹车的可能性。

阶段 3:当停车时间紧迫至 TTC3(设定为 0.5 s)以内时,AEBS 将采取最为果断的措施,向车载控制系统发出全制动指令^[20]。此时,系统会施加 100%的制动力,确保车辆能够在最短时间内安全停下。这一步骤是制动干预的最高级别,旨在紧急情况下最大限度地保护矿卡的安全。

综上,通过精准的时间阈值划分和分阶段制动措施的实施,实现对紧急制动情况的有效应对,降低了因急刹停车而引发的风险。

2 实验与结果分析

以某露天矿的自卸卡车为实验对象,该露天矿场的年开采量 3 000 万吨,单程运输距离为 3~5 km,坡度为 8%~12%;矿区内常有挖掘机、推土机、其他运输车辆等设备同时作业,碰撞风险较大。矿场内的自卸卡车通常满载矿石或土方,载重可达数十吨至数百吨,对其制动和转向性能要求高。

露天矿自卸卡车所处实验环境见图 4。实验所用的自卸卡车型号与搭载的激光雷达参数见表 1。



图 4 露天矿自卸卡车实验环境

Fig. 4 Test environment of open-pit dump truck

2.1 防撞检测的时效性

为验证本方法矿卡防撞检测的时效性,对基于激光雷达点云的方法^{[2]227-230}、基于虚拟安全边

界的方法^{[3]621-629}、基于轨迹预测与冲突检测的方法^{[4]20}及本方法(基于激光雷达与改进 AI 算法的方法),进行了在碰撞检测响应时间及激光雷达光束的分辨率对比,结果见表 2。

表 1 自卸卡车型号与搭载的激光雷达参数

Table 1 Dump truck models and LiDAR parameters

设备	参数
自卸卡车	型号:易控智驾 ET70M
	技术路线:增程混动
	货箱容积:平装 70 m ³
	额定载重:70 t
	最高车速:45 km/h
	整车尺寸:11 585 mm(长)×4 320 mm(宽)×4 950 mm(高)
激光雷达	型号:VelodyneHDL-64E
	雷达线束:64 线
	探测距离:100 m
	测量精度:2 cm
	视场角:水平 360°,垂直 26.8°(+2°至-24.8°)
	输出速率:130 万点/s
	工作电压:10~32 VDC
	功耗:60 W
	波长:905 nm

表 2 不同方法进行碰撞检测结果

Table 2 Results of collision detection by different methods

方法	分辨率/Hz	碰撞检测响应时间/ms
基于激光雷达点云的方法	23.7	69.3
基于虚拟安全边界的方法	28.2	55.7
基于轨迹预测与冲突检测的方法	26.4	52.6
基于激光雷达与改进 AI 算法的方法	34.5	35.4

从表 2 可看出,与其他方法相比,本方法的碰撞检测响应时间小,分辨率高。本方法能够更快速对矿卡周边障碍物进行碰撞检测,提高了矿卡的避障能力,为驾驶人员驾驶矿卡的安全提供更好的保障。

2.2 规避障碍物的有效性

为验证本方法规避障碍物的有效性,选取 3 辆矿卡在激光雷达构建的 20 km×20 km 的三维

地图上,从指定位置出发到达目的点;将栅格宽度设置为矿卡宽度一半,矿卡采用本方法进行避障到达目的点的路线见图 5。可以看出,3 辆矿卡在三维地图中均成功避障并到达目的点。本方法可有效对矿卡周边的障碍物进行避障,提高了矿卡

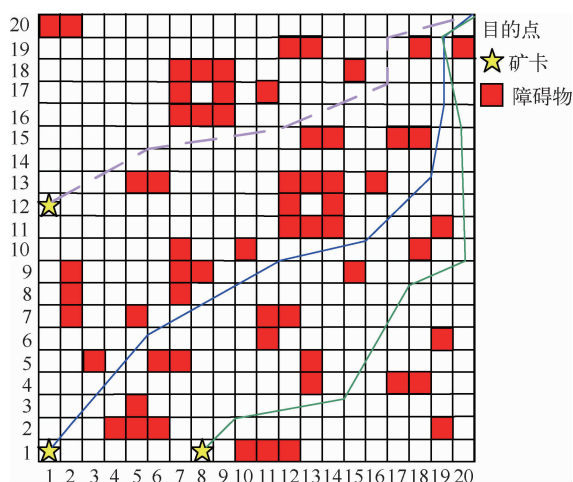


图 5 栅格地图中矿卡避障路线图

Fig. 5 Obstacle avoidance roadmap of dump truck in raster map

防撞技术的准确性,降低了露天矿山矿卡事故的发生率,并提高了运输效率。

2.3 矿卡分阶段制动策略对比

矿卡以 20 m/s 匀速行驶,前方 100 m 有一行驶载人车辆同样以 20 m/s 的速度相向而来;对矿卡的行驶速度、距载人车辆的距离、标识位及矿卡的油门开度与电制动力的百分比进行实验,验证本方法是否能够在相撞前主动停车。结果见图 6。

从图 6(a)中可看出,矿卡与行驶的载人车辆距离越来越近,并且在安全距离内停在载人车辆前。从图 6(b)中可看出,矿卡在两车相撞前车速降至 0,表明矿卡已主动停车,在 1.5~2.0 s 时车速有短暂提升,表明该时段主动停车的标识信号未被激活,矿卡未能持续有效地执行停车指令,导致车速出现了不应有的增加。结合图 6(c)和图 6(d)可看出,当激活 TTC2 时,制动系统施加 60%制动力;当激活 TTC3 时,制动系统施加 100%的电制动力(即全制动),且油门和制动系统两者互斥,说明使用本方法能有效避让与露天矿自卸卡车相向行驶的车辆,降低与车辆发生碰撞的风险。

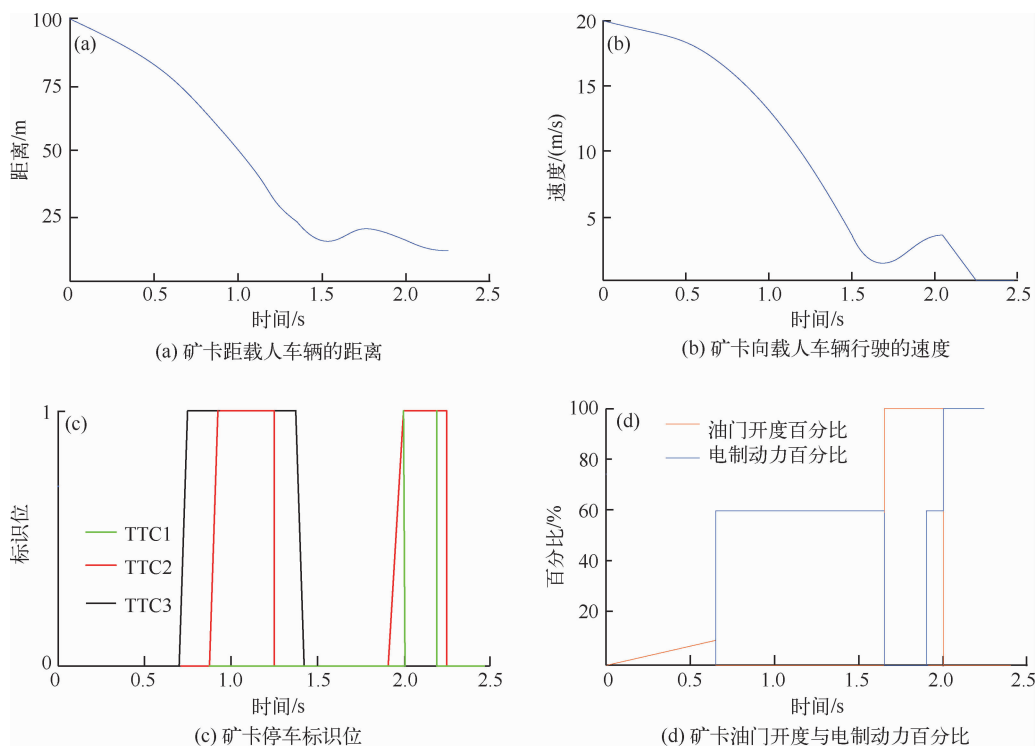


图 6 矿卡分阶段制动实验结果

Fig. 6 Experimental results of staged braking of dump truck

3 结论

基于激光雷达与改进 AI 算法的露天矿自卸卡车防撞技术,激光雷达测量精度高、环境感知能力强,可为矿卡碰撞检测提供良好的检测基础;混合包围盒碰撞检测方法结合了多种包围盒类型的优点,依据物体的不同几何特征选用最合适的包围盒,提高了碰撞检测的准确性,确保了露天矿自卸卡车防撞技术的可靠性。

参考文献:

- [1] 黄佳德,刘勇,邓穆坤,等.露天矿场无人驾驶自卸车路径规划方法研究[J].煤炭科学技术,2024,52(8):182-191.
HUANG Jiade, LIU Yong, DENG Mukun, et al. Research on path planning methods for autonomous dump trucks in open-pit mines[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8):182-191(in Chinese).
- [2] 赵玲峰,周晖.基于激光雷达点云数据的汽车智能防撞系统设计[J].机械设计与研究,2023,39(6):227-230.
ZHAO Lingfeng, ZHOU Hui. Design of automobile intelligent collision avoidance system based on laser radar point cloud data[J]. Machine Design and Research, 2023, 39(6):227-230(in Chinese).
- [3] 江浩斌,洪阳珂,冯张棋,等.基于虚拟安全边界的智能车辆动态换道轨迹规划[J].江苏大学学报:自然科学版,2023,44(6):621-629.
JIANG Haobin, HONG Yangke, FENG Zhangqi, et al. Dynamic lane-changing trajectory planning of intelligent vehicle based on virtual safety boundary[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2023, 44(6):621-629(in Chinese).
- [4] 费蓉,马梦阳,张晓,等.基于轨迹预测与冲突检测的自动驾驶碰撞检测模型[J].计算机工程,2023,49(7):10-20.
FEI Rong, MA Mengyang, ZHANG Xiao, et al. Collision detection model for autonomous driving based on trajectory prediction and conflict detection[J]. Computer Engineering, 2023, 49(7):10-20(in Chinese).
- [5] 张利鹏,苏泰,严勇.基于采样区域优化的智能车辆轨迹规划方法[J].机械工程学报,2022,58(14):276-287.
ZHANG Lipeng, SU Tai, YAN Yong. Trajectory planning method of intelligent vehicle based on sampling area optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14):276-287(in Chinese).
- [6] 史岩岩.矿用卡车无人驾驶感知技术的设计与应用[J].工矿自动化,2022,48(S2):94-97.
SHI Yanyan. Design and application of unmanned driving sensing technology for mining trucks[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(S2):94-97(in Chinese).
- [7] 蒋博,马燕新,万建伟,等.基于半球形邻域的激光雷达点云局部特征提取[J].信号处理,2022,38(2):329-339.
JIANG Bo, MA Yanxin, WAN Jianwei, et al. Local feature extraction of lidar point cloud based on hemisphere neighborhood[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(2):329-339(in Chinese).
- [8] 王亚波,靳玉良,张亚,等.基于激光雷达的结构化道路障碍物检测方法[J].中国惯性技术学报,2023,31(6):593-600.
WANG Yabo, JIN Yuiang, ZHANG Ya, et al. Structured road obstacle detection method based on Lidar[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(6):593-600(in Chinese).
- [9] HRICA J K, BELLANCA J L, BENBOURENANE I, et al. A rapid review of collision avoidance and warning technologies for mining haul trucks[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022, 39(4):1357-1389.
- [10] 张然,杨子辉,孙国民,等.用于连续碰撞检测的线性动态分离轴算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2024,36(10):1647-1652.
ZHANG Ran, YANG Zihui, SUN Guomin, et al. Linear dynamic separating axis algorithm for continuous collision detection[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2024, 36(10):1647-1652(in Chinese).
- [11] 刘润逸,诸峰,王健,等.基于深度学习的空间尘埃碰撞实时自动检测[J].地球物理学报,2023,66(2):485-493.
LIU Runyi, ZHU Feng, WANG Jian, et al. Real-time automatic detection of signals triggered by space dust's impact based on deep learning[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(2):485-493(in Chinese).
- [12] 林义忠,杜柳明,谢震鹏,等.基于惯性预测的机器人变刚度碰撞检测系统[J].仪表技术与传感器,2024(6):72-78.
LIN Yizhong, DU Liuming, XIE Zhenpeng, et al. Robotic variable stiffness collision detection system

- based on inertia prediction[J]. Instrument Technique and Sensor, 2024(6):72-78(in Chinese).
- [13] 林菲, 邹玲, 张聪. 基于混合层次包围盒的快速碰撞检测算法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(9): 454-457.
LING Fei, ZOU Ling, ZHANG Cong. Fast collision detection algorithm based on hybrid hierarchical bounding box[J]. Computer Simulation, 2023, 40(9):454-457(in Chinese).
- [14] 王宇, 马琳娟, 张福泉, 等. 基于量子蚁群算法的虚拟现实碰撞检测方法[J]. 南京理工大学学报, 2022, 46(6):735-741.
WANG Yu, MA Linjuan, ZHANG Fuquan, et al. Collision detection in virtual reality based on quantum ant colony algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2022, 46(6):735-741(in Chinese).
- [15] 靳雁霞, 乔星宇, 张翎, 等. 布料与刚体模型间的空间网格碰撞检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2024, 29(10):3144-3156.
JIN Yanxia, QIAO Xingyu, ZHANG Ling, et al. Collision detection method between fabric and complex models in a space mesh[J]. Journal of Image and Graphics, 2024, 29(10):3144-3156(in Chinese).
- [16] 陈志发, 余贵珍, 张传莹, 等. 露天矿区无人驾驶行车风险评估及防控策略仿真研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4):1782-1797.
CHEN Zhifa, YU Guizhen, ZHANG Chuanying, et al. Driving risk assessment and prevention strategies for autonomous vehicle in open-pits[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4):1782-1797(in Chinese).
- [17] 段顺昌, 白先旭, 石琴, 等. 汽车自动紧急制动系统控制策略的预期功能安全设计[J]. 汽车工程, 2022, 44(9):1305-1317.
DUAN Shunchang, BAI Xianxu, SHI Qin, et al. The design of the safety of the intended functionality of the control strategies for vehicle automatic emergency braking system[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(9):1305-1317(in Chinese).
- [18] 刘富佳, 杨小娟, 许书权, 等. 基于维修大数据的营运客车安全部件可靠性分析[J]. 公路交通科技, 2023, 40(11):229-236.
LIU Fujia, YANG Xiaojuan, XU Shuquan, et al. An analysis on reliability of commercial bus safety parts based on maintenance big data[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(11):229-236(in Chinese).
- [19] 张顺, 周娟. 基于 STPA 与模糊 BN 的新能源汽车安全性分析方法研究[J]. 现代电子技术, 2024, 47(8):18-24.
ZHANG Shun, ZHOU Juan. Research on new energy vehicle safety analysis method based on STPA and fuzzy Bayesian network[J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(8):18-24(in Chinese).
- [20] 王敦, 章慧彬, 张凯虹, 等. 基于 AEC 标准的汽车芯片可靠性测试方法研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(14):103-106.
WANG Dun, ZHANG Huibin, ZHANG Kaihong, et al. Study on reliability test method of automotive chips based on AEC standard[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(14):103-106(in Chinese).

(下转第 158 页)

