

文章编号:1671-251X(2022)S1-0080-04

露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法

刘民强, 高小强, 陈钢

(国家能源集团陕西神延煤炭有限责任公司, 陕西 榆林 719000)

摘要:针对当前无人驾驶技术中感知融合障碍物识别方法易受天气及作业环境影响、无法有效探测弯道、交叉路口障碍物的问题,提出了露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法。① 借鉴城轨信号控制系统对道岔的处理,将单行道、交叉路口等特殊区域视为运输线路上一个可动态分配、独占的资源,当人工驾驶车辆或无人驾驶矿卡的行车轨迹进入单行道、交叉路口等特殊区域时,系统将该路径资源自动分配给该车辆,其他车辆不允许进入该路径资源区域。当占用资源的车辆完全出清资源区域时,该路径资源将被释放。② 为露天矿山所有报告定位作业车辆建立一个安全包络,对作业车辆进行全面的防护。实时判断无人驾驶矿卡的行车轨迹包络与障碍物包络是否相交,若相交则认为障碍物侵入,影响行车安全,将回撤无人驾驶矿卡的行车轨迹终点。若侵入无人驾驶矿卡行车轨迹的障碍物与车辆的距离小于车辆安全制动距离,则直接控制车辆安全制动。③ 当无人驾驶矿卡发生通信故障且超过容忍时间,通过为故障车辆创建障碍物包络的方式保证无人驾驶矿卡的安全。现场试验表明:露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法实现简单,不受天气环境影响,且能在交叉口及弯道处对无人驾驶车辆进行防护,有效地保证了无人驾驶矿卡的行车安全。

关键词:行车轨迹;轨迹安全防护;无人驾驶;安全包络

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Track protection method of unmanned transport vehicle in open-pit mine

LIU Minqiang, GAO Xiaoqiang, CHEN Gang

(CHE Energy Shaanxi Shenyang Coal Co., Ltd., Yulin 719000, China)

0 引言

我国矿山地处偏远,工作强度大,现场环境恶劣,目前国内露天矿山普遍面临用工难和用工成本高的问题。由于作业环境恶劣及现有司机老龄化严重,作业过程中存在潜在生产安全风险^[1]。因此发展露天矿山无人驾驶技术对提高矿山生产作业效率、降低生产成本及保障生产作业安全具有重大意义^[2]。

露天矿山无人驾驶技术由驾驶环境感知、路径规划和车辆控制技术集合而成。通过路径规划算法给运输车辆计算行车轨迹,利用车辆的“眼睛”检测和识别行车轨迹上的障碍物,从而控制车辆行驶并避障。无人驾驶技术很大程度依赖于环境感知的准确性,当前无人驾驶技术中的感知设备主要包括激光雷达、毫米波雷达等,激光雷达具备探测距离远、检测精度高的优势,毫米波雷达可穿透灰尘、不受天气影响,但这 2 种传感器在矿区复杂作业环境中的应用存在以下问题:

(1) 激光雷达易受天气及环境影响,毫米波雷达精度低,且雷达探测距离有限^[3]。

(2) 目前雷达主要装设在车辆前方,用于探测车辆前方一定范围的障碍物,但在弯道及交叉路口,存在探测盲区,无法及时检测识别出冲突车辆。

(3) 由于成本限制,车辆侧方一般不会加装雷达,因此车辆侧方防护较为薄弱,影响会车安全。

(4) 基于多传感器的感知融合算法复杂,误报障碍物导致无人驾驶矿卡停车,影响运营效率及流畅性,需在现场长时间适配和调整参数才能得到较优的效果。

(5) 矿区存在洒水车、平路机等多种协同作业车辆,若所有作业车辆均加装雷达设备则成本高昂。

针对上述问题,本文在城轨信号控制系统车辆防护方法的基础上提出了露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法。该方法充分利用了露天矿山作业的封闭性、运输线路的相对固定及矿区内作业车辆均有定位且已入网的特点,将城轨信号控制系统车辆防护方法与矿山作业相结合,弥补了感知融合障

收稿日期:2022-03-26;编辑:郑海霞。

作者简介:刘民强(1969—),男,陕西神木人,高级工程师,主要从事煤矿开采管理工作,E-mail:10021545@chnenergy.com.cn。

碍物识别方法易受天气及作业环境影响、无法有效探测弯道、交叉路口障碍物的缺点。

1 露天矿山作业与城市轨道交通运营的共同点

露天矿山作业与城市轨道交通运营都具备计划性、组织性和封闭性^[4];车辆在各作业点之间的运输线路相对固定,且车辆在运输过程中需保持有序行驶;作业车辆均装有定位设备且已入网。

在城轨信号控制系统的车辆防护方法的基础上提出了露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法。基于通信的列车自动控制 (Communication Based Train Control System, CBTC) 系统架构如图 1 所示。

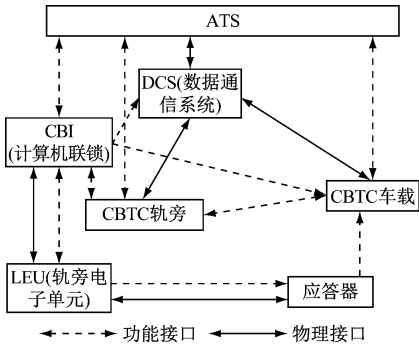


图 1 CBTC 系统架构

在 CBTC 系统中,当列车自动监控 (Automatic Train Supervision,ATS)根据运营计划对列车下发进路请求,联锁根据请求排列进路,轨旁系统则根据进路上的道岔、站台紧急停车按钮、防淹门等设备状态及其他列车位置为列车计算移动授权。移动授权是一段带有运行许可方向的轨道线路,起点为列车车尾位置,终点为离本车最近的危险点位置或进路终点位置。移动授权起终点位置以区段加偏移的形式表达。车载系统根据移动授权终点并查询存储的线路数据计算速度防护区曲线,控制列车在移动授权终点前停车。在 CBTC 系统中,车地之间控制信息数据量虽小,但却保证了列车运营效率及安全。

目前无人驾驶已成为城轨信号系统的发展趋势,国内外已有多条成功运营的城轨无人驾驶线路。因此矿卡无人驾驶系统可借鉴城轨无人驾驶信号控制系统的成熟技术和经验,加速推进矿山智能化。

2 轨迹防护的实现

2.1 线路拓扑

在露天矿山作业区,装载点、卸载点位置更新频繁,且无人驾驶矿卡需精准泊入作业点才能执行装卸作业。因此在作业区,需通过算法为无人驾驶矿卡规划路径轨迹,由车载传感器检测识别障碍物,由车辆自主避障。

将作业点间固定的运输线路制作成存储于设备

的线路数据,无需系统通过路径算法重复计算运输路径,只需根据作业计划评估运输线路上的障碍物,节省了计算资源和时间,如图 2 所示,虚线为作业点运输线路轨迹点数据,node 为运输线路起终点或交叉路口、单行道等特殊区域边界,2 个相邻 node 间为 edge,edge 为一组离散轨迹点的集合,将 edge 作为车辆计算行车轨迹的基本单元。

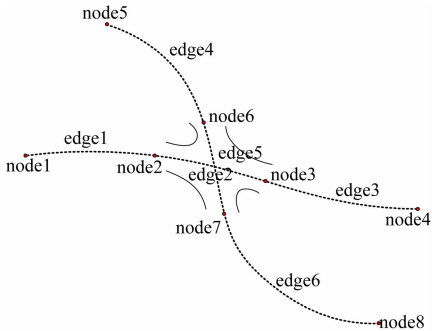


图 2 运输线路拓扑

矿区作业规程通常要求同一时间内只允许一辆车经过单行道、交叉路口等特殊区域,露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法借鉴城轨信号控制系统对道岔的处理,将单行道、交叉路口等特殊区域视为运输线路上一个可动态分配、独占的资源。当人工驾驶车辆或无人驾驶矿卡的行车轨迹进入单行道、交叉路口等特殊区域时,系统将该路径资源自动分配给该车辆,其他车辆不允许进入该路径资源区域。当占用资源的车辆完全出清资源区域时,该路径资源将被释放。通过对路径资源的动态管理,可避免车辆在交叉路口发生碰撞,或在单行道等特殊区域发生堵塞,保证车辆安全的同时提高了运营效率。

当调度为无人驾驶矿卡下发一条从 node1 前往 node4 的作业计划,则系统评估 2 个 node 之间 edge1,edge2,edge3 上的路径资源及障碍物情况。系统将路径上离车辆最近的障碍物和不可使用资源的位置信息以 edge 编号加轨迹点序号的形式发送给车载系统。如交叉路口内的 edge2 和 edge5 是冲突的,在线路数据中建立冲突关系:如路口资源已被从 node1 前往 node4 的车辆先占用,edge2 作为其行车路径的一部分,在车辆驶离 edge2,交叉路口资源才被释放,此时 edge5 才能作为其他车辆的行车路径,以避免车辆在路口发生冲撞。

2.2 车辆安全包络

城轨信号系统为定位报告列车建立安全包络,以消除行车过程中由于各种因素可能导致的安全风险。露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法为露天矿山所有报告定位作业车辆建立一个安全包络,对作业车辆进行全面的防护,如图 3 所示。车辆安全包络考虑车辆的尺寸参数、定位误差、最大加速度、通信延迟时间、线路最大坡度等因素。

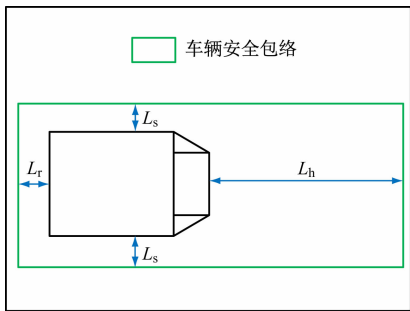


图 3 运输车辆安全包络

由图 3 可看出车辆安全包络是根据车辆轮廓向外延伸相应距离而形成的一个封闭矩形包络,具体计算如下:

- (1) 尾部安全包络为车辆尾部轮廓向后延伸距离 L_r , L_r 为定位误差与车辆最大后溜距离之和。
- (2) 侧方安全包络为车辆两侧轮廓向外延伸距离 L_s , L_s 为定位误差与车辆最大横向控制误差之和。
- (3) 前方安全包络为车辆前方轮廓向前方延伸距离 L_h . L_h 为车辆基于当前速度,并考虑现场最不利因素的安全制动距离。最不利因素包络但不限于定位和控制误差、系统响应和通信延时、线路坡度及湿滑度。

2.3 行车轨迹安全包络

无人驾驶矿卡是根据轨迹点控制车辆行驶。系统根据作业计划与运输路径数据为无人驾驶矿卡计算行车轨迹。各作业点之间一般相距数公里,计算无人驾驶车辆到全局路径终点之间的行车轨迹既无必要,也浪费计算资源和影响运营效率,因此只需评估车辆所在路径前方一定距离内的行车轨迹。前方距离的设定需考虑车辆动力学特性、线路状况、通信故障容忍时间、系统响应时间等因素,保证无人驾驶矿卡在采取安全制动后不会冲出其行车轨迹终点。

无人驾驶矿卡在循迹行驶过程中,需在规划路径两侧根据车辆的尺寸、定位及控制误差、侧倾和安全余量等因素进行延伸,形成一个封闭的安全包络以保证行车安全。轨迹安全包络是本车的安全行车区域,同时也是影响其他无人驾驶车辆行驶的障碍物区域。

露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法在运输线路上能检测及识别的障碍物包括其他定位报告车辆、其他无人驾驶矿卡行车轨迹包络、由路侧感知系统自动创建或由调度人工创建的防护区等。通过实时判断无人驾驶矿卡的行车轨迹包络与障碍物包络是否相交,若相交则认为障碍物侵入,影响行车安全,将回撤无人驾驶矿卡的行车轨迹终点,进而驱动无人驾驶矿卡减速或制动停车,此时回撤的行车轨迹终点与障碍物相距一定安全距离。若侵入无人驾驶矿卡行车轨迹的障碍物与车辆的距离小于车辆安全制动距离,则直接控制车辆安全制动。

2.4 通信故障处理

通信故障在现场作业中为一种常见故障场景。通信故障包括通信中断和通信数据异常。城轨信号控制系统为设备间通信故障设置容忍时间,超过容忍时间则采取导向安全侧的措施。例如列车通信故障时,为故障列车创建防护区域,以保护列车安全。

根据城轨信号控制系统对通信故障列车的处理,当无人驾驶矿卡通信故障超过容忍时间,通过为故障车辆创建障碍物包络方式保证无人驾驶矿卡安全。

- (1) 系统保留通信故障前最后一次行车轨迹数据。
- (2) 系统在最后一次行车轨迹包络的基础上建立障碍物包络。
- (3) 在车辆恢复通信或调度人工干预前,该障碍物包络不会被清除。

车载系统在通信故障时应降速停车,保证车辆不会冲出通信故障前最后一次行车轨迹终点。通信故障无人驾驶矿卡恢复通信后,系统则自动删除障碍物包络,并基于作业计划和更新的车辆定位重新计算行车轨迹安全包络。

3 现场试验

在某露天煤矿试验场地进行了会车、追踪等场景试验。试验车辆 219 车与 10006 车均为小松 930E 型矿用自卸车,10027 车与 10028 车均为徐工 XDE240 型矿用自卸车。其中 219 车为人工驾驶车辆,10006 车、10027 车、10028 车为无人驾驶车辆。

219 车(无行车轨迹)侵入 10006 车的行车轨迹包络如图 4 所示,其中红点为 10006 车的行车轨迹终点。可看出 219 车侵入 10006 车的行车轨迹后,行车轨迹终点回撤,回撤后的轨迹终点与侵入的 219 车保持一定安全距离。

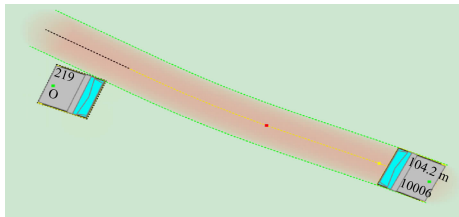


图 4 会车试验

无人驾驶矿卡 10027 车和 10028 车追踪试验如图 5 所示。可看出 10028 车(追踪车辆)的行车轨迹终点为 10027 车车尾后。

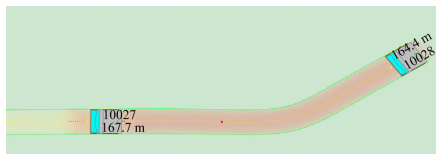


图 5 车辆追踪试验

无人驾驶矿卡 10027 车和 10028 车在弯道追踪

试验如图 6 所示。可看出 10028 车的行车轨迹终点回撤至本车前方不远处。可见露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法能有效地识别弯道处的障碍物。

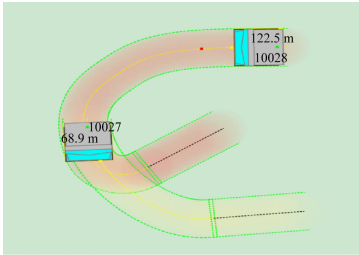


图 6 车辆弯道追踪

4 结语

露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法在城轨信号控制系统车辆防护方法的基础上,将作业点间固定的运输线路制作成存储于设备的线路数据,无需系统通过路径算法重复计算运输路径,通过对路径资源的动态管理,可避免车辆在交叉路口发生碰撞,或在单行道等特殊区域发生堵塞,保证车辆安全的同时提高了运营效率。为露天矿山所有报告定

位作业车辆建立一个安全包络,对作业车辆进行全面的防护。当车辆发生通信故障时,应降速停车,保证车辆不会冲出通信故障前最后一次行车轨迹终点。当恢复通信后,系统则自动删除障碍物包络,并基于作业计划和更新的车辆定位重新计算行车轨迹安全包络。

现场试验表明:露天矿山无人驾驶运输车辆轨迹防护方法实现简单,不受天气环境影响,且能在交叉口及弯道处对无人驾驶车辆进行防护,有效地保证了无人驾驶矿卡的行车安全。

参考文献:

[1] 刘伟芳,吴迪. 国内外露天矿山无人驾驶技术发展现状[J]. 露天采矿技术,2020,35(4):32-34,38.

[2] 闫凌,黄佳德. 矿用卡车无人驾驶系统研究[J]. 工矿自动化,2021,47(4):19-29.

[3] 李宏刚,王云鹏,廖亚萍,等. 无人驾驶矿用运输车辆感知及控制方法[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(11):2335-2344.

[4] 李东林,路向阳,李雷,等. 露天矿山运输无人驾驶系统综述[J]. 机车电传动,2019(2):1-8.