doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.044

基于最优轨迹跟踪的地下铲运机无人驾驶技术*

李建国^{1,2} 战 凯² 石 峰³ 郭 鑫³ 李恒通³ (1.北京科技大学机械工程学院,北京 100083; 2.北京矿冶研究总院,北京 100160; 3.北矿机电科技有限责任公司,北京 100160)

摘要:结合地下巷道的特殊应用环境,提出了一种基于最优轨迹跟踪的铲运机无人驾驶技术。铲运机在无人驾驶时, 通过车载传感器实时获取其实际的行驶轨迹相对于最优路径轨迹的偏差信息,包括横向位置偏差和航向角偏差,将 偏差信息进行充分融合后,通过实时控制并调整铲运机前后铰接角的大小实现位置和航向角偏差不断趋向于零,以 达到较好的跟踪最优路径轨迹目的。结合实际应用对算法进行了仿真测试,在模拟巷道环境下,利用2m³ 铲运机验 证了该无人驾驶技术,模拟实际环境下的实验结果证明,基于最优轨迹跟踪的方法可实现铲运机的无人驾驶。 关键词:铲运机 无人驾驶 最优轨迹 跟踪

中图分类号:TD525 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)12-0323-06

Auto-driving Technology for Underground Scraper Based on Optimal Trajectory Tracking

Li Jianguo^{1,2} Zhan Kai² Shi Feng³ Guo Xin³ Li Hengtong³

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160, China

3. BRGIMMM Machinery and Electrics Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: As for the special application environment of underground tunnels, an auto-driving technique of unmanned underground scraper was proposed based on optimal trajectory tracking. The core of this method is acquiring horizontal position deviation, course angle deviation through vehicle-sensor while the scraper is under auto-driving in the tunnels, with deviation information being mixed to realize the tendency to zero of deviation by adjusting fore and post splice angle of scraper through real-time control. A navigation coordinate has been set for controlling while the scraper is ready for auto-driving firstly. Then the principle of the controlling algorithm was introduced. How to calculate the horizontal position deviation and course angle deviation was explored in detail with the laser measurement system mounted on the top of the scraper's cab. The deviation was fused integration for the controlling data. The step of real-time controlling algorithm was executed in order to realize unmanned driving of underground scraper with steering systematical movements controlled by output controlling voltage of the valve. Simulation test on the algorithm was carried out combined with practical application. To further verify the feasibility of the algorithm, the method was applied to the real auto-driving control of two-cubic diesel scraper. The experimental result shows that this control algorithm based on deviation fusion can realize the auto-driving of scraper. The auto-driving control system can be adjusted easily and quickly as the control system owns fast tracking speed and realizes balance between fast and smooth without great overshoot and oscillation. Key words: Scraper Auto-driving Optimal trajectory Tracking

*国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA060403、2011AA060408)

收稿日期: 2015-10-08 修回日期: 2015-11-12

作者简介:李建国,博士生,北京矿冶研究总院高级工程师,主要从事运输装备智能化相关技术研究,E-mail: itauto@163.com

引言

大力发展智能化、自动化的地下深部开采装备 成为地下开采装备的发展趋势。铲运机作为采掘运 输一体的无轨装备,其智能化相关技术也成为近年 来的研究热点^[1-3]。智能化的地下铲运机,无需人 员下井在车上驾驶和换班,生产作业时间可以得到 充分保障,配合智能控制技术和先进的状态监控技 术,可显著提升地下开采的效率,并大幅度减小现场 作业人员,从而有效保障人员安全^[4]。现有的铲运 机无人驾驶技术多以通讯技术为依托,辅以多种传 感器进行巷道环境的识别并引导铲运机进行自主行 驶,大多数技术需要在巷道壁进行较多的辅助安装 工作。基于此,本文提出一种基于最优轨迹跟踪的 地下铲运机无人驾驶技术,该方法充分结合巷道的 特性和铲运机的功能特性,工作装置稳定可靠,为智 能化铲运机的应用推广提供理论和技术支持,以期 满足地下开采的实际需求。

1 铲运机无人驾驶技术分析

铲运机无人驾驶,就是铲运机的行走过程中不 需要人为参与,完全依靠自身的传感器实现环境的 检测、自主导航和自主的行走。其中,自主导航技术 是铲运机能够实现无人驾驶的关键^[5-6]。现有技术 条件下,自主导航技术可分为绝对式导航和相对式 导航两种。绝对式导航技术是指铲运机无人驾驶环 境地图的数字信息已经预先存入车载计算机,在数 字地图的坐标系下,设定一条最优路径,控制铲运机 严格遵循这一路径轨迹来运行,这种方法的核心是 铲运机能够通过自身传感器实时感知其位置信 息^[7-8],一种比较实用的方法是利用由短线段构成 的结构化地图来描述巷道情况,该地图是预先人工 驾驶铲运机,通过激光扫描仪扫描巷道生成巷道信 息的数字地图并存入计算机,在导航过程中利用二 维激光扫描仪在线获取巷道数字信息,与计算机中 预存的地图信息进行实时匹配从而进行导航^[9]。 相对式导航技术是指铲运机通过车载传感器主动感 知周围环境的基础设施或者是局部的物体来实现导 航,又称为反应式导航技术,如基于沿巷道壁行走技 术的导航技术是以控制铲运机沿着巷道行驶,且不 碰到墙壁为原则进行导航的一种方法^[10-12],由于该 方法不需要大量外部条件配合而被广泛研究。

本文基于一种轨迹跟踪的方法,无需提前知道 地图的数字信息,属于相对式导航技术,其核心思想 是提前规划一条最优行驶轨迹路线(在地下巷道 中,不考虑巷道周边的人为因素,最优轨迹均为巷道 的中心线),在无人驾驶状态下,通过车载传感器实 时获取当前运动轨迹相对于最优轨迹的偏差信息, 通过偏差计算模型,实时求解偏差进行信息融合后, 用来实时调整铲运机前后铰接角的大小,使得偏差 融合结果不断趋向于零,进而实现铲运机在地下巷 道内的无人驾驶控制。

2 偏差测量与计算

2.1 坐标系定义

铲运机无人驾驶时,需要建立相关坐标系进行 统一的控制。不考虑铲运机垂直路面方向的运动, 以起始点为坐标原点,起始的前进方向为 X 轴,水 平面内垂直前进方向为 Y 轴建立二维坐标系。以 铲斗方向驱动桥的横向中心点作为铲运机的定位中 心点,对应投影到X - Y坐标平面内为Q点,铲运机 最优轨迹为预先规划好的最佳行驶轨迹,如图1中 的曲线1,也是巷道的中心线,实际运动轨迹如图中 的曲线 2, 铲运机实际行驶过程中的航向角 Φ_1 定义 为其前进方向与X轴正向所形成的角度,逆时针方 向为正,顺时针为负,铲运机在最优轨迹曲线上的航 向角 Φ , 定义为铲运机在最优轨迹曲线上的投影点 Q_1 的速度方向和 X 轴正方向形成的角度,目标路径 上的航向角 Φ_1 与铲运机跟踪轨迹航向角 Φ_2 的差 值,定义为航向角偏差 θ ,航向角偏差反映了铲运机 无人驾驶方向与目标路径预定的行驶方向之间的偏 离程度。铲运机跟踪轨迹上 Q 点与目标路径上投 影点的直线距离定义为铲运机的横向位置偏差 δ 。 取在目标路径曲线右侧的偏差为正,反之为负。横 向位置偏差主要反映铲运机在巷道内的横向偏离情 况。设定铲运机前后车体的相对转动角,即铰接角 为 α 。设定逆时针的铰接角 α 为正,反之为负。铲 运机轨迹曲线和轨迹参数定义如图1所示[13-15]。



Fig. 1 Track curves and track parameters

2.2 偏差求解

从坐标系定义和图 1 中可以得出,铲运机无人 驾驶时主要控制 2 个偏差即可实现铲运机无人驾驶 算求解得到。

轨迹曲线 2 实时逼近最优估计路径曲线 1,所以铲 运机无人驾驶时需要实时求解并得出 2 个偏差的具 体数值,本方法通过车载传感器实时测量并进行推

2.2.1 扫描式激光测量

地下巷道环境恶劣,对于偏差的获取主要采用 激光测量系统^[16],该系统工作时从右到左每隔1°扫 描巷道侧壁,扫描180°后又返回从右到左扫描巷道 侧壁,周而复始,每扫描一次返回181个数据,其工 作原理示意图如图2所示。



图 2 激光测量系统 Fig. 2 Laser measurement system

激光扫描仪扫描测量得到 0°光束到 180°光束分 别所对应的 180 个距离信息,理论上,每 2 个光束均 可以计算车辆相对于该光束端点确定的假想巷道壁 的角度偏差,本文以 30°偏差为基准计算,以 0°光束 所对应的距离 L_0 和 30°光束所对应的距离 L_{30} 来计算 偏差,在保持 30°夹角不变的情况下,计算 L_1 和 L_{31} 端 点确定的假想巷道壁的角度偏差,以此类推计算,在 0°~60°区间共有 30 个偏差,考虑到激光测量单点数 据是随着巷道壁的凹凸不平波动的,这些角度偏差计 算值也是波动的,用该系列角度偏差的均值来代表车 辆相对于巷道右侧壁的航向角偏差 θ_R ,可较好克服巷 道凹凸不平的影响,达到数值计算滤波的作用。同理 可求出车辆相对于巷道左侧壁的航向角偏差 θ_L 。将 θ_R 和 θ_L 求均值,得到车辆对巷道中线的航向角偏差 θ ,计算原理图如图 3 所示。





2.2.2 航向角偏差测量计算

由图中几何关系,车辆相对一对光束 L_i和 L_{30+i}端点确定的假想线段的角度偏差可通过三角函数方

程得到

$$\begin{cases} E_{i}E_{i+30} = \sqrt{L_{i}^{2} + L_{30+i}^{2} - 2L_{i}L_{30+i}\cos 30^{\circ}} \\ L_{30+i} = L_{i}^{2} + E_{i}E_{i+30} - 2E_{i}E_{i+30}\cos \eta \\ \theta_{R-1} = \eta - (\pi i/180) - \pi/2 \\ (i = 0, 1, 2, \dots, 30) \end{cases}$$
(1)

定的假想线段的角度偏差

 η 为 $\angle QE_iE_{30+i}, E_iE_{30+i}$ 为 光 束 L_i 和 L_{30+i} 端 点 的 距 离, *i* 代 表 激 光 扫 描 光 束 序 号, 也 代 表 该 光 束 的 角 度, 共 有 30 对 数 据 加 入 θ_{Ri} 角 度 偏 差 的 计 算 。

对角度偏差 θ_{ki}求均值,得到车辆相对于巷道右 侧壁的航向角偏差

$$\theta_{R} = \frac{1}{30} \sum_{i=0}^{30} \arccos \frac{L_{i} - L_{30+i} \cos 30^{\circ}}{E_{i} E_{i+30}} - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi i}{180}$$
(2)

同理可得车辆相对于巷道左侧壁的航向角偏差

$$\theta_{L} = \frac{1}{30} \sum_{i=0}^{30} \arccos \frac{L_{180-i} - L_{150-i} \cos 30^{\circ}}{E_{180-i} E_{150-i}} + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi i}{180}$$
(3)

综合左、右侧巷道壁航向角偏差的计算值,得到 车辆相对巷道中线的航向角偏差

$$\theta = \frac{\theta_R + \theta_L}{2} \tag{4}$$

2.2.3 横向位移偏差实时计算

以巷道中线为当前目标路径,计算每个激光扫 描光束相对于该目标路径垂直方向的投影长度并求 平均值

$$\begin{cases} S_{R} = \frac{1}{30} L_{i} \cos\left(\frac{\pi}{180}i - \theta\right) \\ (i = 0, 1, 2, \dots, 30) \\ S_{L} = \frac{1}{30} L_{i} \cos\left(\frac{\pi}{180}(180 - i) + \theta\right) \\ (i = 150, 151, \dots, 180) \end{cases}$$
(5)

综合左、右侧巷道壁横向位置偏差的计算值,得 到激光扫描中心相对巷道中线的横向位置偏差

$$\delta = \frac{1}{2} (S_R - S_L) \tag{6}$$

3 控制器设计

3.1 控制设计原则

从图 1 可以分析得知,铲运机无人驾驶的目标路 径与实际行驶路径之间的偏差主要有横向位置偏差δ、 航向角偏差θ,基于此自主控制器设计的原则是不断修

$$e = k_1 \delta + k_2 \theta \tag{7}$$

其中 $k_1 + k_2 = 1$ (k_1 , $k_2 \in (0, 1)$)

式中 k₁、k₂ — 横向位置偏差和航向角偏差反馈 系数

铲运机无人驾驶时,正常选取一个适宜的挡位 即可,这样只有转向角是可以控制的变量,因此,对 铲运机行驶轨迹的控制,主要是对铲运机转向角的 实时控制。采用可变参数的 PID 控制。将综合反馈 e 作为控制量输入给 PID 无人驾驶控制器,输出控 制转向油缸的电磁阀,进而控制铲运机转向系统动 作,实现地下铲运机无人驾驶。

3.2 算法实现

结合转向电磁阀运动特性和铲运机车速,该无 人驾驶控制算法如下:

(1)比例系数 K_p、积分系数 K_i和微分系数 K_d为
 给定数值,给定反馈系数 k₁和 k₂,给定采用周期 T。

(2)当 k = 1 时,设定初值 e(k)、e(k-1)和
e(k-2)为0,控制偏差 u(k-1)等于0,即铲运机无
人驾驶开始时默认偏差和控制偏差均为0。

(3) 获取铲运机当前车速 V(k)。

(4) 获取航向角偏差初始值 $\theta(k) = \theta_{\circ}$

(5) 获取横向位置偏差初始值 $\delta(k) = \delta_{\circ}$

(6) 输入铲运机初始 X 轴方向位置 s(k), 取s(1) = 0。

(7) 计算融合反馈

$$e(k) = k_1 \delta(k) + k_2 \theta(k) \tag{8}$$

(8) 融合反馈经 PID 控制器处理后,计算输出 转向控制电压

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$
 (9)

其中 $\Delta u(k) = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) +$

$$K_{d}(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))$$
(10)

式中 u(k-1)——上一采样周期时刻控制电压

 $\Delta u(k)$ ——控制铲运机转向电压的增量

(9) 为下一时刻准备,计算铲运机行驶里程

$$s(k+1) = s(k) + V(k)T$$
(11)

(10)根据行驶里程 s(k+1),计算对应的航向 角偏差和横向位移偏差。

(11) 迭代存储偏差

$$\begin{cases} e(k-1) \longrightarrow e(k-2) \\ e(k) \longrightarrow e(k-1) \\ u(k) \longrightarrow u(k-1) \end{cases}$$

重复上述步骤,即可通过扫描式激光测量系统 实时计算铲运机的偏差,进而输出铲运机转向控制 指令,实现地下铲运机的无人驾驶控制。

双偏差信息融合反馈形成两种控制作用的相互 制约,克服了单一误差反馈控制的局限性,使得控制 系统具有一定的鲁棒特性,根据式(7)保证 k_1 和 k_2 的和为1,当 k_1 变大时,则 k_2 相应变小,通过改变 k_1 和 k_2 的相对大小,可以改变各自偏差在反馈中的各 自权重,方便调节无人驾驶控制系统总的响应特性, 使控制系统既有较快的跟踪速度,又避免过大的超 调和振荡,实现快速与稳定的均衡,具有良好的适应 性和稳定性。

4 实验分析

4.1 仿真

根据上述章节设计的控制算法和控制器设计原 理,对铲运机的无人驾驶轨迹跟踪进行仿真,采用偏 差融合技术的 PID 控制方法,主要控制铲运机转向 角,仿真结构图如图 4 所示,主要模拟仿真上述的控 制算法。由给定的相关参数,采用 Simulink 仿真的 形式模拟激光扫描的实际测量值,利用模拟的数据 进行铲运机偏差计算后,利用上述算法进行控制仿 真。



Fig. 4 Simulation frame of controlling

仿真结果以观察铲运机的行驶轨迹和车身外轮 廓点的轨迹不碰撞巷道壁为成功与否的标志。仿真 时铲运机的结构参数中前后桥中心点与铰接处距离 为1270 mm,车身总长度为7307 mm,车身宽度为 1800 mm,设地下自主铲运机在图5所示的巷道内 行驶。取 K_p =30, K_d =0, K_i =0.6,取横向位置偏 差反馈系数 k_1 =0.4,航向角偏差反馈系数 k_2 = 0.6,取车速为8 km/h,采样周期为0.1 s,初始航向 角偏差和横向位移偏差均为零。为了降低仿真计算 量,左右两侧区域取3对光束进行计算,在地下铲运 机自主行驶范围内,取右侧参与计算的光束对为 0°~30°、10°~40°、20°~50°;左侧参与计算的光束 对为130°~160°、140°~170°、150°~180°。左右光 束对的计算夹角相同都是30°。针对上述参数设 置,运用控制方法进行仿真,地下铲运机行驶轨迹和 车身外廓点轨迹曲线见图5。由图5可见地下铲运 机在直线和拐弯巷道内行驶时,车身重要外廓点的 轨迹基本上是与巷道壁保持比较均匀的间距,仿真 结果表明该方法能够实现铲运机的无人驾驶控制。



Fig. 5 Trajectory tracking and outer points trace curves

当车速变化时,双偏差融合反馈控制与单一横向位置偏差反馈控制效果比较见图 6,取 K_p = 30, K_a = 0, K_i = 0.6,取横向位置偏差反馈系数 k_1 = 0.3,航向角偏差反馈系数 k_2 = 0.7,取车速横向偏差 初始值为 0.6 m,航向角偏差初始值为 0°,转向角初 始值为 0°,车速分别为 2、6、12 km/h。由图 6 可以 看出单一横向位置偏差反馈时对车速变化比较敏 感,当车速较小时超调量加大、稳定性变差,当车速 加大时响应变慢、调整时间延长;双偏差融合反馈控 制能较好地适应车速的大范围变化,与传统的单偏 差控制方法相比,能大大减少控制系统的超调量并 缩短调节时间,自主行驶控制的快速性、稳定性和对 参数变化的适应性均得到显著提高。





4.2 模拟巷道实验

为继续验证算法的可行性,将该方法应用于实

际的2m³柴油铲运机的无人驾驶控制中。在实际 实验中,铰接转向角的获取采用角度传感器实时测 量,铲运机实时的车速获取由变速箱内的传感器通 过总线实时获取。

铲运机的无人驾驶地图设置两段直线段分别为 24 m 和 10 m 和一个转弯段,跟踪的轨迹为巷道中心 线,巷道宽度为 3.8 m。巷道环境采用泡沫塑料板上 涂抹水泥的方式来模拟,考虑到实际巷道内表面坑洼 不平,将泡沫板也人为制作成多个坑坑洼洼的表面。 铲运机驾驶室顶部安装有激光扫描传感器,激光扫描 器为 1°分辨率,180°全扫描,频率为 50 Hz,铲运机主 要通过控制铰接转向油缸的伸缩来达到转向跟踪最 优轨迹的目的,铲运机的无人驾驶速度控制为 1 挡低 速行驶,实际实验如图 7 所示。



图 7 实验现场图 Fig. 7 Test field scene

实际实验时,取系数 $K_p = 56$, $K_d = 0$, $K_i = 0.2$, 取横向位置偏差反馈系数 $k_1 = 0.7$, 航向角偏差反 馈系数 $k_2 = 0.3$, 初始航向角偏差和横向位移偏差 均为零, 实际测试得到行驶跟踪路线轨迹的航向角 偏差(图 8)、横向位移偏差(图 9)以及转向角的实 时变化(图 10)。









从图中看出,该算法可以很好地跟踪规划的最 优轨迹-巷道中心线轨迹,在无人驾驶过程中,铲运 机能够通过不断调整前后铰接角,实时调整自身姿



态和速度,达到按照规划路径行走的无人驾驶目标。 由图 8、9 可看出其航向角偏差和横向位移偏差在较 小的范围内波动,系统具有一定的鲁棒性和稳定性。

5 结束语

以最优轨迹跟踪为基础,结合偏差导航控制算 法,设计了自主导航双变量控制器,以转向角为控制 量,以行驶过程中的横向位移偏差、航向角偏差为反 馈修正量,实现了地下铲运机的无人驾驶控制,并且 在模拟环境下进行了实验,对无人驾驶过程中的航 向角偏差、横向位移偏差进行了分析。实验结果表 明,采用基于最优轨迹跟踪的自主导航双变量控制 算法能够很好地实现无人驾驶功能。

- 診 考 文 献
- 顾洪枢,姜勇,李恒通,等.井下无轨设备的技术新进展[J].矿业装备,2014(7):38-43.
 Gu Hongshu, Jiang Yong, Li Hengtong, et al. Development of underground trackless equipment [J]. Mining Equipment, 2014(7):38-43. (in Chinese)
- 2 饶绮麟,高孟雄.无轨采矿技术与无轨设备的新发展[J].矿业装备,2012(4):36-41.
 Rao Qilin, Gao Mengxiong. Development of underground mining and trackless equipment[J]. Mining Equipment, 2012(4):36-41. (in Chinese)
- 3 成学东,张永彬,冯茂林,等.规模化高效采矿地下无轨设备配套应用研究[J].有色设备,2015(3):41-44,51. Cheng Xuedong, Zhang Yongbin, Feng Maolin, et al. Combination study on underground trackless equipment for efficient mining [J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment,2015(3):41-44,51. (in Chinese)
- 4 张奎杰,李宝顺.基于 WiFi 及无线遥控技术远程控制井下铲运机[J].现代电子技术,2013,36(3):37-39. Zhang Kuijie, Li Baoshun. Remote control underground LHD based on WiFi and wireless remote control technology [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(3):37-39. (in Chinese)
- 5 Joshua A, Marshall, Timothy D, et al. Design and fleld testing of an autonomous underground tramming system [M]. Field and Service Robotics, Springer Tracts in Advanced Robotics, 2008, 42: 521 530.
- 6 李晓梅,贾明涛,李宁,等. 基于模糊控制的井下自主铲运机的安全导航[J]. 矿冶工程,2013,33(4):22-26. Li Xiaomei, Jia Mingtao, Li Ning, et al. Safe navigation of underground autonomous carry scraper based on fuzzy control[J]. Mining Engineering, 2013, 33(4):22-26. (in Chinese)
- 7 Mäkelä H. Overview of LHD navigation without artificial beacons[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2001, 36(1): 21-35.
- 8 Johan Larsson, Mathias Broxvall, Alessandro Saffiotti. A navigation system for automated loaders in underground mines [M] // Field and Service Robotics, Springer Tracts in Advanced Robotics, 2006, 25: 129 – 140.
- 9 Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox. A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3D mapping [C] // Proceedings of the 2000 IEEE Conference on Robotics and Automation, 2000, 4: 321 - 328.
- 10 Roberts J M, Duff E S, Corke P I, et al. Autonomous control of underground mining vehicles using reactive navigation [C] // Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000, 4: 3790 - 3795.
- 11 龙智卓,战凯,顾洪枢,等.基于改进蚁群算法的智能铲运机全局路径规划[J].有色金属:矿山部分,2013,65(2):6-10. Long Zhizhuo, Zhan Kai, Gu Hongshu, et al. Global path planning of intelligent Load-Haul-Dump based on improved ant colony algorithm [J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2013, 65(2):6-10. (in Chinese)
- 12 陈盟,王李管,贾明涛,等.地下铲运机自主导航研究现状及发展趋势 [J].中国安全科学学报,2013,23(3):130-134. Chen Meng, Wang Liguan, Jia Mingtao, et al. An overview of autonomous navigation techniques and development trend for underground LHD[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(3):130-134. (in Chinese)
- 13 马飞,杨皞屾,顾青,等.基于改进A*算法的地下无人铲运机导航路径规划[J].农业机械学报,2015,46(7):303-309. Ma Fei, Yang Haoshen, Gu Qing, et al. Navigation path planning of unmanned underground LHD based on improved A* algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):303-309. (in Chinese)
- 14 Hemami Ahmad, Polotski Vladimir. Path tracking control problem formulation of an LHD loader [J]. The International Journal of Robotics Research, 1998, 17(2): 193 - 199.
- 15 石峰,顾洪枢,战凯,等.典型路径下的地下铲运机行驶轨迹分析[J]. 矿冶,2009,18(2):67-70. Shi Feng, Gu Hongshu, Zhan Kai, et al. Analysis of driving track for LHD on typical path[J]. Mining & Metallurgy, 2009, 18(2):67-70. (in Chinese)
- 16 Chi Hongpeng, Zhan Kai, Shi Boqiang. Automatic guidance of underground mining vehicles using laser sensors [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 27: 142 - 148.