



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116225000 A

(43) 申请公布日 2023. 06. 06

(21) 申请号 202310025988.6

(22) 申请日 2023.01.09

(71) 申请人 湖南大学

地址 410082 湖南省长沙市岳麓区麓山南路麓山门

(72) 发明人 胡满江 陈亮 秦兆博 边有钢  
谢国涛 王晓伟 秦洪懋 秦晓辉  
徐彪 丁荣军

(74) 专利代理机构 北京汇智胜知识产权代理事务  
所(普通合伙) 11346

专利代理师 赵立军

(51) Int. Cl.

G05D 1/02 (2020.01)

权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

露天矿山无人驾驶重载车辆及其路径跟踪控制方法和装置

(57) 摘要

本发明公开了一种露天矿山无人驾驶重载车辆及其路径跟踪控制方法和装置,其包括:前进路径跟踪步骤:根据预先设置的路径信息和车辆状态信息,用新Stanley控制器控制露天矿山重载车辆前进时的路径跟踪控制,新Stanley控制器考虑有车辆转向器时滞特性、车辆尺寸和前进行驶速度;后退路径跟踪步骤:用新后轮反馈控制器控制露天矿山重载车辆后退时的路径跟踪控制,新后轮反馈控制器考虑有车辆转向器时滞特性、车辆尺寸和后退行驶速度。本发明能够实现重载车辆前进与后退时的路径跟踪控制,对不同工况下的控制参数进行自适应调整,达到更好的控制效果。



1. 一种露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制方法,其特征在于,包括:

前进路径跟踪步骤:根据预先设置的路径信息和车辆状态信息,用下式(1)所示的新Stanley控制器控制露天矿山重载车辆前进时的路径跟踪控制,新Stanley控制器考虑有车辆转向器时滞特性、车辆尺寸和前进行驶速度:

$$\delta_c = \arctan \left( \frac{-k_{ep}}{v_f} \right) - \varphi_{ep} + \int_0^{\Delta t} \left[ \frac{\tau_\delta k v_f^2 (e_p \dot{v}_f - v_f^2 (\varphi_{ep} + \delta))}{v_f^2 + (k_{ep})} - \tau_\delta c_{rp} v_f \right] dt \quad (1)$$

式中, $\delta_c$ 为前轮转角指令, $e_p$ 为横向距离误差, $v_f$ 为车辆的前进行驶速度, $\varphi_{ep}$ 为角度误差, $\Delta t$ 为系统采样时间, $\tau_\delta$ 为时滞因子, $k$ 为自适应调整控制增益, $\dot{v}_f$ 为车辆的前进加速度, $\delta$ 为车辆的前轮转角, $c_{rp}$ 为最近路径点对应的曲率;

后退路径跟踪步骤:用下式所示的新后轮反馈控制器控制露天矿山重载车辆后退时的路径跟踪控制,新后轮反馈控制器考虑有车辆转向器时滞特性、车辆尺寸和后退行驶速度:

$$\delta_c = \arctan \left\{ L \left( \frac{c_r \cos(\varphi_e)}{1 - c_r e_r} - k_\varphi \varphi_e - k_e e_r \right) \right\} + \int_0^{\Delta t} \frac{\tau_\delta (\dot{c}_r + c_r^2 v_r \varphi_e) \cos \varphi_e - \tau_\delta (c_r - c_r^2 e_r) (\omega - c_r v_r) \varphi_e}{(1 - c_r e_r)^2 + L^2 (c_r - (1 - c_r e_r) (k_\varphi \varphi_e - k_e e_r))^2} dt$$

式中, $\delta_c$ 为前轮转角指令, $L$ 为轴距, $c_r$ 为最近路径点对应曲率, $\dot{c}_r$ 为最近路径点对应曲率的变化率, $\varphi_e$ 为横摆角误差, $e_r$ 为横向距离误差, $k_\varphi$ 为横摆角误差对应的比例因子, $k_e$ 为横向距离误差对应的比例因子, $\tau_\delta$ 为时滞因子, $v_r$ 为正值的车后行驶速度, $\omega$ 为车辆横摆角速度。

2. 如权利要求1所述的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制方法,其特征在于,新Stanley控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性,利用下式(6)至(8)提供的动态选择方法确定预瞄距离 $d_p$ :

$$d_p = \max \{ d_{pv}, d_{pc} \} \quad (6)$$

$$d_{pv} = k_{pv} v_f \Delta t \quad (7)$$

$$d_{pc} = \begin{cases} d_{hc} & c_{rp} > 0.05 \\ d_{mc} & 0.05 \leq c_{rp} \leq 0.05 \\ d_{lc} & c_{rp} < 0.05 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $d_{pv}$ 为根据 $v_f$ 获得的预瞄距离, $k_{pv}$ 为比例因子, $d_{pc}$ 为根据 $c_{rp}$ 标定的预瞄距离, $d_{hc}$ 、 $d_{mc}$ 、 $d_{lc}$ 分别为根据数值不同的 $c_{rp}$ 标定的预瞄距离。

3. 如权利要求2所述的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制方法,其特征在于,新Stanley控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性,利用下式(11)确定自适应调整控制增益 $k$ :

$$k = \begin{cases} \kappa_1 c_{rp} & 0 < |c_{rp}| \leq 0.02 \\ \kappa_1 c_{rp} + \kappa_2 e_p & |c_{rp}| > 0.02 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\kappa_1$ 和 $\kappa_2$ 为无量纲比例因子。

4. 如权利要求1-3中任一项所述的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制方法,其特征在于,新后轮反馈控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性,利用下式(12)提供的动态选择方法确定预瞄距离:

$$d_{pr} = \begin{cases} d_{hr} & c_r > 0.1 \\ d_{mr} & 0.05 \leq c_r \leq 0.1 \\ d_{lr} & c_r < 0.05 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $d_{pr}$ 为根据 $c_{rp}$ 标定的预瞄距离, $d_{hr}$ 、 $d_{mr}$ 、 $d_{lr}$ 分别为根据数值不同的 $c_{rp}$ 标定的预瞄距离。

5. 一种露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制装置,其特征在于,包括:

新Stanley控制器,其用于根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性,控制露天矿山重载车辆前进时的路径跟踪控制,新Stanley控制器考虑有车辆转向器时滞特性,如下式(1)所示:

$$\delta_c = \arctan \left( \frac{-ke_p}{v_f} \right) - \varphi_{ep} + \int_0^{\Delta t} \left[ \frac{\tau_\delta k v_f^2 (e_p \dot{v}_f - v_f^2 (\varphi_{ep} + \delta))}{v_f^2 + (ke_p)} - \tau_\delta c_{rp} v_f \right] dt \quad (1)$$

式中, $\delta_c$ 为前轮转角指令, $e_p$ 为横向距离误差, $v_f$ 为车辆的前进速度, $\varphi_{ep}$ 为角度误差, $\Delta t$ 为系统采样时间, $\tau_\delta$ 为时滞因子, $k$ 为自适应调整控制增益, $\dot{v}_f$ 为车辆的前进加速度, $\delta$ 为车辆的前轮转角, $c_{rp}$ 为最近路径点对应的曲率;

新后轮反馈控制器,其用于控制露天矿山重载车辆后退时的路径跟踪控制,新后轮反馈控制器考虑有车辆转向器时滞特性和车辆后退时的特性,如下式所示:

$$\delta_c = \arctan \left\{ L \left( \frac{c_r \cos(\varphi_e)}{1 - c_r e_r} - k_\varphi \varphi_e - k_e e_r \right) \right\} + \int_0^{\Delta t} \frac{\tau_\delta (\dot{c}_r + c_r^2 v_r \varphi_e) \cos \varphi_e - \tau_\delta (c_r - c_r^2 e_r) (\omega - c_r v_r) \varphi_e}{(1 - c_r e_r)^2 + L^2 (c_r - (1 - c_r e_r) (k_\varphi \varphi_e - k_e e_r))^2} dt$$

式中, $\delta_c$ 为前轮转角指令, $L$ 为轴距, $c_r$ 为最近路径点对应曲率, $\dot{c}_r$ 为最近路径点对应曲率的变化率, $\varphi_e$ 为横摆角误差, $e_r$ 为横向距离误差, $k_\varphi$ 为横摆角误差对应的比例因子, $k_e$ 为横向距离误差对应的比例影子, $\tau_\delta$ 为时滞因子, $v_r$ 为正值的车后行驶速度, $\omega$ 为车辆横摆角速度。

6. 如权利要求5所述的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制装置,其特征在于,新Stanley控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性,利用下式(6)至(8)提供的动态选择方法确定预瞄距离 $d_p$ :

$$d_p = \max \{ d_{pv}, d_{pc} \} \quad (6)$$

$$d_{pv} = k_{pv} v_f \Delta t \quad (7)$$

$$d_{pc} = \begin{cases} d_{hc} & c_{rp} > 0.05 \\ d_{mc} & 0.05 \leq c_{rp} \leq 0.05 \\ d_{lc} & c_{rp} < 0.05 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $d_{pv}$ 为根据 $v_f$ 获得的预瞄距离, $k_{pv}$ 为比例因子, $d_{pc}$ 为根据 $c_{rp}$ 标定的预瞄距离, $d_{hc}$ 、

$d_{mc}$ 、 $d_{lc}$  分别为根据数值不同的  $c_{rp}$  标定的预瞄距离。

7. 如权利要求6所述的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制装置,其特征在於,新 Stanley 控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性,利用下式(11)确定自适应调整控制增益  $k$ :

$$k = \begin{cases} \kappa_1 c_{rp} & 0 < |c_{rp}| \leq 0.02 \\ \kappa_1 c_{rp} + \kappa_2 e_p & |c_{rp}| > 0.02 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\kappa_1$  和  $\kappa_2$  为无量纲比例因子。

8. 如权利要求5-7中任一项所述的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制装置,其特征在於,新后轮反馈控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性,利用下式(12)提供的动态选择方法确定预瞄距离:

$$d_{pr} = \begin{cases} d_{hr} & c_r > 0.1 \\ d_{mr} & 0.05 \leq c_r \leq 0.1 \\ d_{lr} & c_r < 0.05 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $d_{pr}$  为根据  $c_{rp}$  标定的预瞄距离,  $d_{hr}$ 、 $d_{mr}$ 、 $d_{lr}$  分别为根据数值不同的  $c_{rp}$  标定的预瞄距离。

9. 一种露天矿山无人驾驶重载车辆,包括车体,车体的尺寸结构为:车身长度为14.75米,车身宽度为7.44米,前保险杠离地高度为1.42米,轴距为6.35米,前悬长度为4.25米,后悬长度为3.43米,前轮最大转角31度,车辆前进行驶速度范围为0-30千米每小时,车辆后退行驶速度范围为0-10千米每小时;其特征在於,还包括:

惯性导航组合设备,用于获取车辆状态信息;

无人驾驶计算平台,其预先设置有如权利要求5-8中任一项所述的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制装置,计算前轮转角指令  $\delta_c$ ,并将  $\delta_c$  发送到车辆线控接口单元;

线控转向单元,其用于接收通过 can 总线接收  $\delta_c$ ,并按照  $\delta_c$  控制车辆按照期望路径行驶。

10. 如权利要求9所述的露天矿山无人驾驶重载车辆,其特征在於,线控转向单元包括带有电控系统的全液压转向器。

## 露天矿山无人驾驶重载车辆及其路径跟踪控制方法和装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及自动驾驶技术领域,特别是关于一种露天矿山无人驾驶重载车辆及其路径跟踪控制方法和装置。

### 背景技术

[0002] 作为露天矿山无人驾驶系统的关键环节之一,路径跟踪控制性能表现直接影响无人驾驶车辆运行安全和运输效率,具有重要的学术研究意义和社会经济价值。经典路径跟踪控制算法包括PID(Proportional Integral Derivative,比例积分微分控制)、纯追踪、Stanley等。PID控制参数对控制效果有重要影响,理想条件下基于模型对PID参数进行整定可取得最佳效果,但当模型不确定时,其整定通常采取试凑法,工作量大。此外,PID在系统不确定性和外部扰动同时存在时无法进行有针对性地补偿。纯追踪控制算法是一种经典的路径跟踪控制算法,其核心思想是基于车辆单轨模型,以车辆后轴中心为切点,纵向中心线为切线,通过控制前轮转角使自车沿着经过预瞄点的圆弧行驶,是一种基于几何追踪的控制方法。纯追踪算法对道路曲率扰动具有良好的鲁棒性,但其跟踪性能严重依赖于预瞄距离的选择,最优性能难以保障。

[0003] 随着人工智能的发展,许多智能控制算法也被应用于无人驾驶路径跟踪控制领域,如数据驱动、神经网络等。但是,这些智能控制算法控制精度严重依赖海量数据,无法进一步对系统动力学行为进行预测、分析。MPC(Model Predictive Control,模型预测控制)广泛应用于无人驾驶路径跟踪控制,针对矿卡路径跟踪控制也具有显著的优势。模型预测控制器是一个多变量控制器,可以控制矿卡这种复杂的多输入多输出系统。但MPC算法的计算量偏大且所需计算时间较长,而自动驾驶汽车对算法的实时性要求较高,所以很难直接将上述方法用于实车。为解决此工程应用中遇到的切实问题,研究了一种露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制方法及系统。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种露天矿山无人驾驶重载车辆及其路径跟踪控制方法和装置及系统来克服或至少减轻现有技术的上述缺陷中的至少一个。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供一种露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制方法,其包括:

[0006] 前进路径跟踪步骤:根据预先设置的路径信息和车辆状态信息,用下式(1)所示的新Stanley控制器控制露天矿山重载车辆前进时的路径跟踪控制,新Stanley控制器考虑有车辆转向器时滞特性、车辆尺寸和前进行驶速度:

$$[0007] \quad \delta_c = \arctan \left( \frac{-ke_p}{v_f} \right) - \varphi_{ep} + \int_0^{\Delta t} \left[ \frac{\tau_\delta k v_f^2 (e_p \dot{v}_f - v_f^2 (\varphi_{ep} + \delta))}{v_f^2 + (ke_p)} - \tau_\delta c_{rp} v_f \right] dt \quad (1)$$

[0008] 式中, $\delta_c$ 为前轮转角指令, $e_p$ 为横向距离误差, $v_f$ 为车辆的前进行驶速度, $\varphi_{ep}$ 为角度误差, $\Delta t$ 为系统采样时间, $\tau_\delta$ 为时滞因子, $k$ 为自适应调整控制增益, $\dot{v}_f$ 为车辆的前进加

速度,  $\delta$  为车辆的前轮转角,  $C_{rp}$  为最近路径点对应的曲率;

[0009] 后退路径跟踪步骤: 用下式所示的新后轮反馈控制器控制露天矿山重载车辆后退时的路径跟踪控制, 新后轮反馈控制器考虑有车辆转向器时滞特性、车辆尺寸和后退行驶速度:

$$[0010] \quad \delta_c = \arctan \left\{ L \left( \frac{c_r \cos(\varphi_e)}{1 - c_r e_r} - k_\varphi \varphi_e - k_e e_r \right) \right. \\ \left. + \int_0^{\Delta t} \frac{\tau_\delta (\dot{c}_r + c_r^2 v_r \varphi_e) \cos \varphi_e - \tau_\delta (c_r - c_r^2 e_r) (\omega - c_r v_r) \varphi_e}{(1 - c_r e_r)^2 + L^2 (c_r - (1 - c_r e_r) (k_\varphi \varphi_e - k_e e_r))^2} dt \right\}$$

[0011] 式中,  $\delta_c$  为前轮转角指令,  $L$  为轴距,  $c_r$  为最近路径点对应曲率,  $\dot{c}_r$  为最近路径点对应曲率的变化率,  $\varphi_e$  为横摆角误差,  $e_r$  为横向距离误差,  $k_\varphi$  为横摆角误差对应的比例因子,  $k_e$  为横向距离误差对应的比例影子,  $\tau_\delta$  为时滞因子,  $v_r$  为正值的车后行驶速度,  $\omega$  为车辆横摆角速度。

[0012] 进一步地, 新Stanley控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性, 利用下式(6)至(8)提供的动态选择方法确定预瞄距离  $d_p$ :

$$[0013] \quad d_p = \max \{d_{pv}, d_{pc}\} \quad (6)$$

$$[0014] \quad d_{pv} = k_{pv} v_f \Delta t \quad (7)$$

$$[0015] \quad d_{pc} = \begin{cases} d_{hc} & c_{rp} > 0.05 \\ d_{mc} & 0.05 \leq c_{rp} \leq 0.05 \\ d_{lc} & c_{rp} < 0.05 \end{cases} \quad (8)$$

[0016] 式中,  $d_{pv}$  为根据  $v_f$  获得的预瞄距离,  $k_{pv}$  为比例因子,  $d_{pc}$  为根据  $c_{rp}$  标定的预瞄距离,  $d_{hc}$ 、 $d_{mc}$ 、 $d_{lc}$  分别为根据数值不同的  $C_{rp}$  标定的预瞄距离。

[0017] 进一步地, 新Stanley控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性, 利用下式(11)确定自适应调整控制增益  $k$ :

$$[0018] \quad k = \begin{cases} \kappa_1 c_{rp} & 0 < |c_{rp}| \leq 0.02 \\ \kappa_1 c_{rp} + \kappa_2 e_p & |c_{rp}| > 0.02 \end{cases} \quad (11)$$

[0019] 其中,  $\kappa_1$  和  $\kappa_2$  为无量纲比例因子。

[0020] 进一步地, 新后轮反馈控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性, 利用下式(12)提供的动态选择方法确定预瞄距离:

$$[0021] \quad d_{pr} = \begin{cases} d_{hr} & c_r > 0.1 \\ d_{mr} & 0.05 \leq c_r \leq 0.1 \\ d_{lr} & c_r < 0.05 \end{cases} \quad (12)$$

[0022] 式中,  $d_{pr}$  为根据  $C_{rp}$  标定的预瞄距离,  $d_{hr}$ 、 $d_{mr}$ 、 $d_{lr}$  分别为根据数值不同的  $c_{rp}$  标定的预瞄距离。

[0023] 本发明还提供一种露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制装置, 其包括:

[0024] 新Stanley控制器, 其用于根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性, 控制露天矿山重载车辆前进时的路径跟踪控制, 新Stanley控制器考虑有车辆转向器时滞特性, 如

下式(1)所示:

$$[0025] \quad \delta_c = \arctan \left( \frac{-ke_p}{v_f} \right) - \varphi_{ep} + \int_0^{\Delta t} \left[ \frac{\tau_\delta k v_f^2 (e_p \dot{v}_f - v_f^2 (\varphi_{ep} + \delta))}{v_f^2 + (ke_p)} - \tau_\delta c_{rp} v_f \right] dt \quad (1)$$

[0026] 式中,  $\delta_c$  为前轮转角指令,  $e_p$  为横向距离误差,  $v_f$  为车辆的前进速度,  $\varphi_{ep}$  为角度误差,  $\Delta t$  为系统采样时间,  $\tau_\delta$  为时滞因子,  $k$  为自适应调整控制增益,  $\dot{v}_f$  为车辆的前进加速度,  $\delta$  为车辆的前轮转角,  $c_{rp}$  为最近路径点对应的曲率;

[0027] 新后轮反馈控制器, 其用于控制露天矿山重载车辆后退时的路径跟踪控制, 新后轮反馈控制器考虑有车辆转向器时滞特性和车辆后退时的特性, 如下式所示:

$$[0028] \quad \delta_c = \arctan \left\{ L \left( \frac{c_r \cos(\varphi_e)}{1 - c_r e_r} - k_\varphi \varphi_e - k_e e_r \right) \right\} + \int_0^{\Delta t} \frac{\tau_\delta (\dot{c}_r + c_r^2 v_r \varphi_e) \cos \varphi_e - \tau_\delta (c_r - c_r^2 e_r) (\omega - c_r v_r) \varphi_e}{(1 - c_r e_r)^2 + L^2 (c_r - (1 - c_r e_r) (k_\varphi \varphi_e - k_e e_r))^2} dt$$

[0029] 式中,  $\delta_c$  为前轮转角指令,  $L$  为轴距,  $c_r$  为最近路径点对应曲率,  $\dot{c}_r$  为最近路径点对应曲率的变化率,  $\varphi_e$  为横摆角误差,  $e_r$  为横向距离误差,  $k_\varphi$  为横摆角误差对应的比例因子,  $k_e$  为横向距离误差对应的比例影子,  $\tau_\delta$  为时滞因子,  $v_r$  为正值的车后行驶速度,  $\omega$  为车辆横摆角速度。

[0030] 进一步地, 新Stanley控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性, 利用下式(6)至(8)提供的动态选择方法确定预瞄距离  $d_p$ :

$$[0031] \quad d_p = \max \{ d_{pv}, d_{pc} \} \quad (6)$$

$$[0032] \quad d_{pv} = k_{pv} v_f \Delta t \quad (7)$$

$$[0033] \quad d_{pc} = \begin{cases} d_{hc} & c_{rp} > 0.05 \\ d_{mc} & 0.05 \leq c_{rp} \leq 0.05 \\ d_{lc} & c_{rp} < 0.05 \end{cases} \quad (8)$$

[0034] 式中,  $d_{pv}$  为根据  $v_f$  获得的预瞄距离,  $k_{pv}$  为比例因子,  $d_{pc}$  为根据  $c_{rp}$  标定的预瞄距离,  $d_{hc}$ 、 $d_{mc}$ 、 $d_{lc}$  分别为根据数值不同的  $c_{rp}$  标定的预瞄距离。

[0035] 进一步地, 新Stanley控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性, 利用下式(11)确定自适应调整控制增益  $k$ :

$$[0036] \quad k = \begin{cases} \kappa_1 c_{rp} & 0 < |c_{rp}| \leq 0.02 \\ \kappa_1 c_{rp} + \kappa_2 e_p & |c_{rp}| > 0.02 \end{cases} \quad (11)$$

[0037] 其中,  $\kappa_1$  和  $\kappa_2$  为无量纲比例因子。

[0038] 进一步地, 新后轮反馈控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性, 利用下式(12)提供的动态选择方法确定预瞄距离:

$$[0039] \quad d_{pr} = \begin{cases} d_{hr} & c_r > 0.1 \\ d_{mr} & 0.05 \leq c_r \leq 0.1 \\ d_{lr} & c_r < 0.05 \end{cases} \quad (12)$$

[0040] 式中,  $d_{pr}$  为根据  $c_{rp}$  标定的预瞄距离,  $d_{hr}$ 、 $d_{mr}$ 、 $d_{lr}$  分别为根据数值不同的  $c_{rp}$  标定的

预瞄距离。

[0041] 本发明还提供一种露天矿山无人驾驶重载车辆,包括车体,车体的尺寸结构为:车身长度为14.75米,车身宽度为7.44米,前保险杠离地高度为1.42米,轴距为6.35米,前悬长度为4.25米,后悬长度为3.43米,前轮最大转角31度,车辆前进行驶速度范围为0-30千米每小时,车辆后退行驶速度范围为0-10千米每小时;其还包括:

[0042] 惯性导航组合设备,用于获取车辆状态信息;

[0043] 无人驾驶计算平台,其预先设置有如上所述的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制装置,计算前轮转角指令 $\delta_c$ ,并将 $\delta_c$ 发送到车辆线控接口单元;

[0044] 线控转向单元,其用于接收通过can总线接收 $\delta_c$ ,并按照 $\delta_c$ 控制车辆按照期望路径行驶。

[0045] 进一步地,线控转向单元包括带有电控系统的全液压转向器。

[0046] 本发明由于针对露天矿山无人驾驶重载车辆运行工况,考虑了车辆转向器时滞特性,提出了新Stanley控制器和新后轮反馈控制器,实现重载车辆前进与后退时的路径跟踪控制,对不同工况下的控制参数进行自适应调整,达到更好的控制效果。

## 附图说明

[0047] 图1为本发明实施例提供的各模块间的连接关系示意图。

[0048] 图2为本发明适用的露天矿山重载车辆的尺寸结构示意图。

[0049] 图3为本发明实施例提供的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制的框架原理示意图。

## 具体实施方式

[0050] 下面结合附图和实施例对本发明进行详细的描述。

[0051] 本发明实施例提供一种露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制方法及系统,通过考虑重载车辆转向执行器时滞特性,利用Stanley与后轮反馈模型分别设计负责前进与倒车的路径跟踪控制器,针对露天矿山道路环境、重载车辆以及参考轨迹特点进行预瞄与控制参数设置,最后实现露天矿山无人驾驶重载车辆的精确路径跟踪控制。

[0052] 如图1所示,本发明实施例提供的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制方法包括:

[0053] 前进路径跟踪步骤:根据预先设置的路径信息和车辆状态信息,用下式(1)所示的新Stanley控制器控制露天矿山重载车辆前进时的路径跟踪控制,新Stanley控制器考虑有车辆转向器时滞特性、车辆尺寸和前进行驶速度:

$$[0054] \quad \delta_c = \arctan \left( \frac{-ke_p}{v_f} \right) - \varphi_{ep} + \int_0^{\Delta t} \left[ \frac{\tau_\delta k v_f^2 (e_p \dot{v}_f - v_f^2 (\varphi_{ep} + \delta))}{v_f^2 + (ke_p)} - \tau_\delta c_{rp} v_f \right] dt \quad (1)$$

[0055] 式中, $\delta_c$ 为前轮转角指令, $e_p$ 为横向距离误差, $v_f$ 为车辆的前进行驶速度, $\varphi_{ep}$ 为角度误差, $\Delta t$ 为系统采样时间, $\tau_\delta$ 为时滞因子, $\tau_\delta$ 的数值通过标定得到,露天重载车辆的时滞因子约等于1秒, $k$ 为自适应调整控制增益, $\dot{v}_f$ 为车辆的前进加速度, $\delta$ 为车辆的前轮转角, $c_{rp}$ 为最近路径点对应的曲率。

[0056] 后退路径跟踪步骤:用下式所示的新后轮反馈控制器控制露天矿山重载车辆后退时的路径跟踪控制,新后轮反馈控制器考虑有车辆转向器时滞特性、车辆尺寸和后退行驶速度:

$$\delta_c = \arctan \left\{ L \left( \frac{c_r \cos(\varphi_e)}{1 - c_r e_r} - k_\varphi \varphi_e - k_e e_r \right) \right\} + \int_0^{\Delta t} \frac{\tau_\delta (\dot{c}_r + c_r^2 v_r \varphi_e) \cos \varphi_e - \tau_\delta (c_r - c_r^2 e_r) (\omega - c_r v_r) \varphi_e}{(1 - c_r e_r)^2 + L^2 (c_r - (1 - c_r e_r)(k_\varphi \varphi_e - k_e e_r))^2} dt$$

[0058] 式中,  $\delta_c$  为前轮转角指令,  $L$  为轴距,  $c_r$  为最近路径点对应曲率,  $\dot{c}_r$  为最近路径点对应曲率的变化率,  $\varphi_e$  为横摆角误差,  $e_r$  为横向距离误差,  $k_\varphi$  为横摆角误差对应的比例因子, 如下式 (3) 所示,  $k_e$  为横向距离误差对应的比例因子, 如下式 (4) 所示,  $\tau_\delta$  为时滞因子,  $v_r$  为正值的车辆后退行驶速度,  $\omega$  为车辆横摆角速度。

$$k_\varphi = 2\zeta a \quad (3)$$

$$k_e = a^2 \quad (4)$$

[0061] 其中,  $a$  为正数,  $\zeta$  为阻尼系数, 例如:  $\zeta = 1.85$ ,  $a = 0.28$ 。

[0062] 在一个实施例中, 最近路径点对应曲率  $c_r$  的具体数值根据方向盘区分正负。

[0063] 上述实施例中, 最近路径点选择角度约束设置为下式 (5):

$$|\varphi_{des} - \varphi| < \frac{1}{2}\pi \text{ or } |\varphi_{des} - \varphi| > \frac{3}{2}\pi \quad (5)$$

[0065] 其中,  $\varphi_{des}$  为来自路径信息的路径点航向角,  $\varphi$  为来自惯性导航组合系统的车辆横摆角。

[0066] 根据来自惯导的车辆前进行驶速度反馈和来自路径信息的最近路径点的曲率, 通过式 (5) 确定最近路径点, 路径点包含的信息有: 坐标、航向角、曲率、速度。先通过路径点的坐标和航向角信息找到距离最近的路径点, 再用该最近路径点的所有信息进行路径跟踪控制。

[0067] 在一个实施例中, 新Stanley控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性, 利用下式 (6) 至 (8) 提供的动态选择方法确定预瞄距离  $d_p$ :

$$d_p = \max \{d_{pv}, d_{pc}\} \quad (6)$$

$$d_{pv} = k_{pv} v_f \Delta t \quad (7)$$

$$d_{pc} = \begin{cases} d_{hc} & c_{rp} > 0.05 \\ d_{mc} & 0.05 \leq c_{rp} \leq 0.05 \\ d_{lc} & c_{rp} < 0.05 \end{cases} \quad (8)$$

[0071] 式中,  $d_{pv}$  为根据  $v_f$  获得的预瞄距离,  $k_{pv}$  为比例因子, 其数值比如可以取 0.5,  $d_{pc}$  为根据  $c_{rp}$  标定的预瞄距离,  $d_{hc}$ 、 $d_{mc}$ 、 $d_{lc}$  分别为根据数值不同的  $c_{rp}$  标定的预瞄距离。

[0072] 根据预瞄距离  $d_p$  选择预瞄点: 依次向行驶方向遍历路径点, 直至找到一个路径点, 该路径点至最近路径点之间所有已经遍历的路径点间隔加起来大于或等于预瞄距离, 此时该路径点为预瞄点。

[0073] 再利用下式(9)计算角度误差 $\varphi_{ep}$ ,再利用下式(10)计算横向距离误差 $e_p$ :

$$[0074] \quad \varphi_{ep} = \varphi - \varphi_p \quad (9)$$

[0075] 其中, $\varphi$ 为车辆横摆角, $\varphi_p$ 为预瞄点的航向角。

$$[0076] \quad e_p = (x_0 - x_p) \sin(\varphi_p) - (y_0 - y_p) \cos(\varphi_p) \quad (10)$$

[0077] 其中, $x_0$ 和 $y_0$ 分别为全局坐标系下的车辆前轴中心的横、纵坐标, $x_p$ 和 $y_p$ 为全局坐标系下的预瞄点的横、纵坐标。

[0078] 一般情形下, $k$ 可以通过实验标定的具体数值。但是,在一个实施例中,为保证路径跟踪精度,根据预瞄路径点曲率和横向距离误差自适应调整控制增益 $k$ ,如下式(11)所示:

$$[0079] \quad k = \begin{cases} \kappa_1 c_{rp} & 0 < |c_{rp}| \leq 0.02 \\ \kappa_1 c_{rp} + \kappa_2 e_p & |c_{rp}| > 0.02 \end{cases} \quad (11)$$

[0080] 其中, $\kappa_1$ 和 $\kappa_2$ 为无量纲比例因子,二者具体数值通常为经验值,比如: $\kappa_1=12$ , $\kappa_2=0.15$ 。

[0081] 在一个实施例中,新后轮反馈控制器还根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性,利用下式(12)提供的动态选择方法确定预瞄距离:

$$[0082] \quad d_{pr} = \begin{cases} d_{hr} & c_r > 0.1 \\ d_{mr} & 0.05 \leq c_r \leq 0.1 \\ d_{lr} & c_r < 0.05 \end{cases} \quad (12)$$

[0083] 式中, $d_{pr}$ 为根据 $c_{rp}$ 标定的预瞄距离, $d_{hr}$ 、 $d_{mr}$ 、 $d_{lr}$ 分别为根据数值不同的 $c_{rp}$ 标定的预瞄距离。

[0084] 根据预瞄距离 $d_{pr}$ 选择预瞄点,利用下式(13)计算横向距离误差 $e_r$ :

$$[0085] \quad e_r = (x_r - x_{pr}) \sin(\varphi_p) - (y_r - y_{pr}) \cos(\varphi_p) \quad (13)$$

[0086] 其中, $x_r$ 和 $y_r$ 分别为全局坐标系下的车辆后轴中心的横、纵坐标, $x_{pr}$ 和 $y_{pr}$ 为全局坐标系下的预瞄点的横、纵坐标。

[0087] 本发明还提供一种露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制装置,其包括新Stanley控制器和新后轮反馈控制器,其中:

[0088] 新Stanley控制器用于根据露天矿山重载车辆的车辆信息和行驶特性,控制露天矿山重载车辆前进时的路径跟踪控制,新Stanley控制器考虑有车辆转向器时滞特性,如上式(1)所示。

[0089] 新后轮反馈控制器用于控制露天矿山重载车辆后退时的路径跟踪控制,新后轮反馈控制器考虑有车辆转向器时滞特性和车辆后退时的特性,如上式所示。

[0090] 本发明实施例还提供一种露天矿山无人驾驶重载车辆,其包括车体。如图2所示,车体的尺寸结构为:车身长度为14.75米,车身宽度为7.44米,前保险杠离地高度为1.42米,轴距为6.35米,前悬长度为4.25米,后悬长度为3.43米,前轮最大转角31度,车辆前进行驶速度范围为0-30千米每小时,车辆后退行驶速度范围为0-10千米每小时。

[0091] 如图3所示,本发明实施例提供的露天矿山无人驾驶重载车辆还包括惯性导航组合设备、无人驾驶计算平台和线控转向单元,其中:

[0092] 惯性导航组合设备用于获取车辆状态信息；

[0093] 无人驾驶计算平台预先设置有如上述实施例所述的露天矿山无人驾驶重载车辆路径跟踪控制装置，计算前轮转角指令 $\delta_c$ ，并将 $\delta_c$ 发送到车辆线控接口单元。

[0094] 线控转向单元用于接收通过can总线接收 $\delta_c$ ，并按照 $\delta_c$ 控制车辆按照期望路径行驶。在本实施例中，线控转向单元包括带有电控系统的全液压转向器。

[0095] 上述各实施例中的路径跟踪控制器为基于Stanley与后轮反馈算法设计，可替换为“基于车辆动力学模型的路径跟踪控制”。

[0096] 最后需要指出的是：以上实施例仅用以说明本发明的技术方案，而非对其限制。本领域的普通技术人员应当理解：可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分技术特征进行等同替换；这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

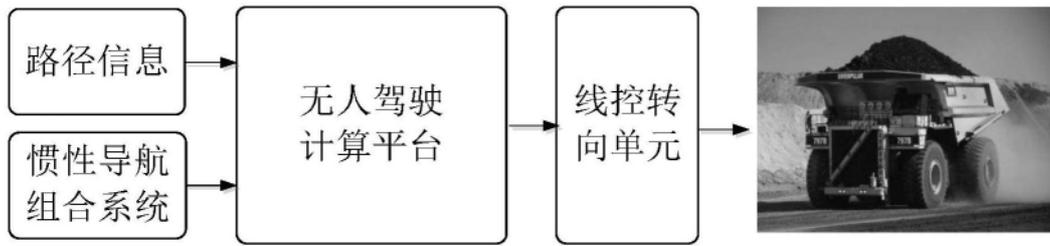


图1

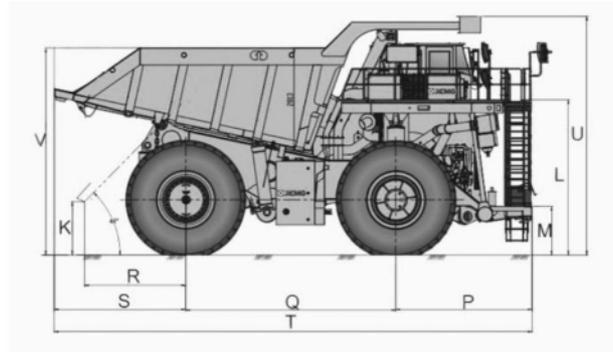


图2

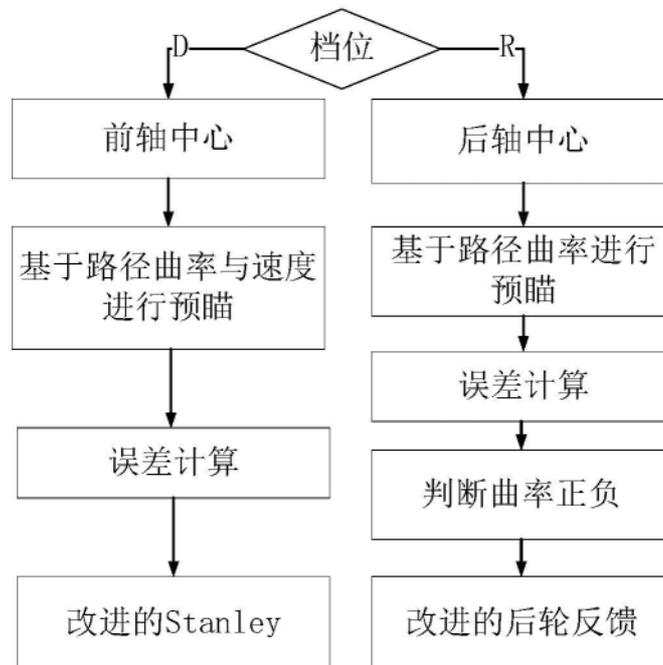


图3