



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113515038 B

(45) 授权公告日 2021.11.26

(21) 申请号 202111041182.3

(22) 申请日 2021.09.07

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113515038 A

(43) 申请公布日 2021.10.19

(73) 专利权人 西南交通大学

地址 610031 四川省成都市二环路北一段111号

专利权人 成都交大大数据科技有限公司

(72) 发明人 郑芳芳 侯康宁 刘晓波 唐优华

陆良 白霖涵 周韬

(74) 专利代理机构 北京集智东方知识产权代理有限公司 11578

代理人 刘林 陈攀

(51) Int.Cl.

G05B 11/42 (2006.01)

(56) 对比文件

WO 2019242718 A1, 2019.12.26

CN 111007715 A, 2020.04.14

US 2011098886 A1, 2011.04.28

JP 2017081421 A, 2017.05.18

US 2019315362 A1, 2019.10.17

EP 3552895 A1, 2019.10.16

CN 110329263 A, 2019.10.15

CN 112092815 A, 2020.12.18

CN 110525436 A, 2019.12.03

CN 110297494 A, 2019.10.01

CN 109501799 A, 2019.03.22

CN 103754221 A, 2014.04.30

CN 109085831 A, 2018.12.25

WO 2021102957 A1, 2021.06.03

WO 2020187259 A1, 2020.09.24

王其东等. 基于制动转向协同控制的智能车紧急避障研究.《汽车工程》.2019, (第04期),

(续)

审查员 潘姝安

权利要求书5页 说明书26页 附图4页

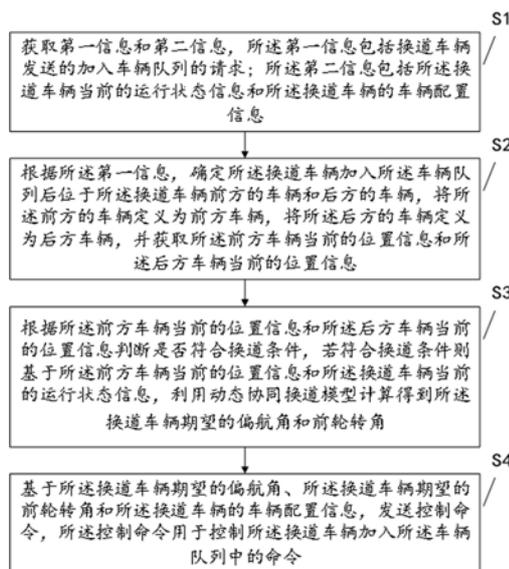
(54) 发明名称

一种车辆换道方法、装置、设备及可读存储介质

(57) 摘要

本发明提供了一种车辆换道方法、装置、设备及可读存储介质,所述方法包括:获取第一信息和第二信息;根据第一信息,确定换道车辆加入车辆队列后位于换道车辆前方的车辆和后方的车辆;根据前方车辆当前的位置信息和后方车辆当前的位置信息判断是否符合换道条件,若符合则规划出换道车辆的期望换道轨迹并计算换道车辆期望的偏航角和前轮转角;基于换道车辆期望的偏航角、换道车辆期望的前轮转角和换道车辆的车辆配置信息,发送控制命令,控制命令用于控制换道车辆加入车辆队列中的命令。本发明提出了一种新的动态协同换道模型,该模型可以随着前方车辆速度的变化实时更新换道路径,既保证了换道的安全性,又提高了换道的灵活

性。



CN 113515038 B

[接上页]

(56) 对比文件

- Jan Loof,等.Automated Lane Changing With a Controlled Steering-Wheel Feedback Torque for Low Lateral Acceleration Purposes.《IEEE Transactions on Intelligent Vehicles》.2019,第4卷(第4期),
张荣辉等.车-车协同下无人驾驶车辆的换道汇入控制方法.《中国公路学报》.2018,(第04期),
Bo-Chiuan Chen,等.Path-Following Steering Controller of Automated Lane Change System with Adaptive Preview Time.《2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics》.2015,
杨刚等.基于车车通信的车辆并行协同自动换道控制.《公路交通科技》.2017,(第01期),
任殿波等.自动化公路系统车队换道变结构控制.《哈尔滨工业大学学报》.2009,(第11期),
Abdussalam Ali Ahmed,等.Vehicle Yaw Rate Control For Lane Change Maneuver Using Fuzzy PID Controller And Neural Network Controller.《2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)》.2020,

1. 一种车辆换道方法,其特征在于,包括:

获取第一信息和第二信息,所述第一信息包括换道车辆发送的加入车辆队列的请求;所述第二信息包括所述换道车辆当前的运行状态信息和所述换道车辆的车辆配置信息;

根据所述第一信息,确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和后方的车辆,将所述前方的车辆定义为前方车辆,将所述后方的车辆定义为后方车辆,并获取所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息;

根据所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息判断是否符合换道条件,若符合换道条件则基于所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,利用动态协同换道模型计算得到所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角;

基于所述换道车辆期望的偏航角、所述换道车辆期望的前轮转角和所述换道车辆的车辆配置信息,发送控制命令,所述控制命令用于控制所述换道车辆加入所述车辆队列中的命令;

其中,通过公式(13)-(18)计算所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角,所述公式(13)-(18)依次为:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_d^0 = y_{TFV}^0 - y_{SV}^0 \\ a_{SV}(t + T_s) = F_{DCPID}(x_{SV}(t), x_{TFV}(t), v_{SV}(t), v_{TFV}(t)) \\ v_{SV}(t + T_s) = v_{SV}(t) + a_{SV}(t + T_s) * T_s, t \in [t_0, t_e] \\ y_r(x_r) = y_{SV}^0 + \frac{y_d^0}{2\pi} \left\{ \frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) - \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \\ x_r \in \left[x_{SV}^0, x_{SV}^0 + v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}} \right] \end{array} \right\} \quad (13)$$

公式(13)中, x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的纵向位置; y_{TFV}^0 表示换道开始时刻目标车道上所述前方车辆的位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; (x_r, y_r) 表示换道车辆的期望位置; t_0 表示换道开始时间; t_e 表示换道结束时间; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在 t 时刻的速度; $v_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在 $t+T_s$ 时刻的速度; $a_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在 $t+T_s$ 时刻的加速度;

$$y_r'(x_r) = \frac{y_d^0}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \quad (14)$$

$$y_r''(x_r) = \frac{\pi a_L}{v_{SV}^2(t)} \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \quad (15)$$

$$K = \frac{y_r''}{(1+y_r'^2)^{3/2}} \quad (16)$$

公式(14) - (16)中, x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在t时刻的速度; x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_r' 表示 y_r 的一阶导数; y_r'' 表示 y_r 的二阶导数; K 表示 y_r 的曲率;

$$\varphi_r = \tan^{-1}(y_r') \quad (17)$$

$$\delta_{fr} = \tan^{-1}(L*K) \quad (18)$$

公式(17) - (18)中, φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; φ_r 和 δ_{fr} 两者均为弧度制, L 表示车辆前后轴之间的距离; y_r' 表示 y_r 的一阶导数。

2. 根据权利要求1所述的车辆换道方法, 其特征在于, 所述根据所述第一信息, 确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和后方的车辆, 包括:

基于所述换道车辆发送的加入所述车辆队列的请求查询得到第一结果, 所述第一结果包括所述换道车辆所要加入的所述车辆队列中每辆车离开所述车辆队列的顺序和所述换道车辆加入所述车辆队列后所述换道车辆离开所述车辆队列的顺序;

基于所述第一结果确定所述换道车辆加入所述车辆队列后, 在所述车辆队列中的相对位置, 根据所述相对位置确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆后方的车辆。

3. 根据权利要求1所述的车辆换道方法, 其特征在于, 所述根据所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息判断是否符合换道条件, 包括:

获取期望安全间距和最小安全距离;

根据所述换道车辆当前的运行状态信息、所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息, 计算得到所述换道车辆最前方与所述前方车辆最后方之间的第一距离和所述换道车辆最后方与所述后方车辆最前方之间的第二距离, 若所述第一距离与所述期望安全间距相等且所述第二距离大于或等于最小安全距离则符合换道条件。

4. 根据权利要求1所述的车辆换道方法, 其特征在于, 所述基于所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息, 利用动态协同换道模型计算得到所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角, 包括:

将分布式串级PID控制算法与正弦函数相结合, 构建所述动态协同换道模型;

基于所述动态协同换道模型、所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息, 得到所述换道车辆的期望换道轨迹, 其中, 所述换道车辆当前的运行状态信息包括所述换道车辆当前的位置、速度和加速度;

基于所述换道车辆的期望换道轨迹, 得到所述换道车辆期望的偏航角和期望的前轮转角。

5. 根据权利要求1所述的车辆换道方法, 其特征在于, 所述基于所述换道车辆期望的偏航角、所述换道车辆期望的前轮转角和所述换道车辆的车辆配置信息, 发送控制命令, 所述控制命令用于控制所述换道车辆加入所述车辆队列中的命令, 包括:

基于所述换道车辆的车辆配置信息、所述换道车辆期望的偏航角和所述换道车辆期望的前轮转角, 利用模型预测控制算法计算得到当前所述换道车辆的前轮转角的增加量;

基于当前所述换道车辆的前轮转角的增加量,控制所述换道车辆加入所述车辆队列中。

6. 根据权利要求5所述的车辆换道方法,其特征在于,所述基于当前所述换道车辆的前轮转角的增加量,控制所述换道车辆加入所述车辆队列中,包括:

基于所述换道车辆的前轮转角的增加量,控制所述换道车辆往所述车辆队列方向移动,得到第二结果,所述第二结果包括所述换道车辆移动后所述换道车辆的运行状态信息和所述换道车辆移动后所述前方车辆的位置信息;

根据所述第二结果和所述动态协同换道模型更新所述换道车辆的期望换道轨迹,并基于更新后的换道轨迹更新所述换道车辆的前轮转角的增加量;

基于更新后的前轮转角的增加量控制所述换道车辆继续往所述车辆队列方向移动,直至所述换道车辆加入到所述车辆队列中,其中所述换道车辆朝所述车辆队列前进方向的中心线与所述车辆队列的中心线重合时,则认定所述换道车辆已加入到所述车辆队列中。

7. 根据权利要求1所述的车辆换道方法,其特征在于,所述获取第一信息和第二信息的同时,还包括:

获取第三信息,所述第三信息包括所述车辆队列中每辆车当前的运行状态信息,所述每辆车当前的运行状态信息包括所述每辆车当前的位置信息、所述每辆车当前的速度和所述每辆车当前的加速度;

基于所述每辆车当前的运行状态信息,利用分布式串级PID纵向控制算法计算得到下一时刻所述每辆车的加速度;

根据所述每辆车当前的运行状态信息和所述下一时刻所述每辆车的加速度计算得到下一时刻每辆车的位置信息和速度;

基于所述下一时刻每辆车的位置信息和速度,控制下一时刻所述每辆车的位置和速度。

8. 一种车辆换道装置,其特征在于,包括:

第一获取模块,用于获取第一信息和第二信息,所述第一信息包括换道车辆发送的加入车辆队列的请求;所述第二信息包括所述换道车辆当前的运行状态信息和所述换道车辆的车辆配置信息;

第一计算模块,用于根据所述第一信息,确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和后方的车辆,将所述前方的车辆定义为前方车辆,将所述后方的车辆定义为后方车辆,并获取所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息;

第二计算模块,用于根据所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息判断是否符合换道条件,若符合换道条件则基于所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,利用动态协同换道模型计算得到所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角;

第一控制模块,用于基于所述换道车辆期望的偏航角、所述换道车辆期望的前轮转角和所述换道车辆的车辆配置信息,发送控制命令,所述控制命令用于控制所述换道车辆加入所述车辆队列中的命令;

其中,通过公式(13)-(18)计算所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角,所述公式

(13) - (18) 依次为:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_d^0 = y_{TFV}^0 - y_{SV}^0 \\ a_{SV}(t + T_s) = F_{DCPID}(x_{SV}(t), x_{TFV}(t), v_{SV}(t), v_{TFV}(t)) \\ v_{SV}(t + T_s) = v_{SV}(t) + a_{SV}(t + T_s) * T_s, t \in [t_0, t_e] \\ y_r(x_r) = y_{SV}^0 + \frac{y_d^0}{2\pi} \left\{ \frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) - \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \\ x_r \in \left[x_{SV}^0, x_{SV}^0 + v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}} \right] \end{array} \right\} \quad (13)$$

公式(13)中, x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的纵向位置; y_{TFV}^0 表示换道开始时刻目标车道上所述前方车辆的位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; (x_r, y_r) 表示换道车辆的期望位置; t_0 表示换道开始时间; t_e 表示换道结束时间; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在t时刻的速度; $v_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在t+ T_s 时刻的速度; $a_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在t+ T_s 时刻的加速度;

$$y_r'(x_r) = \frac{y_d^0}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \quad (14)$$

$$y_r''(x_r) = \frac{\pi a_L}{v_{SV}^2(t)} \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \quad (15)$$

$$K = \frac{y_r''}{(1+y_r'^2)^{3/2}} \quad (16)$$

公式(14) - (16)中, x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在t时刻的速度; x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_r' 表示 y_r 的一阶导数; y_r'' 表示 y_r 的二阶导数; K 表示 y_r 的曲率;

$$\varphi_r = \tan^{-1}(y_r') \quad (17)$$

$$\delta_{fr} = \tan^{-1}(L*K) \quad (18)$$

公式(17) - (18)中, φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; φ_r 和 δ_{fr} 两者均为弧度制, L 表示车辆前后轴之间的距离; y_r' 表示 y_r 的一阶导数。

9. 一种车辆换道设备, 其特征在于, 包括:

存储器, 用于存储计算机程序;

处理器, 用于执行所述计算机程序时实现如权利要求1至7任一项所述车辆换道方法的步骤。

10. 一种可读存储介质, 其特征在于: 所述可读存储介质上存储有计算机程序, 所述计

计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至7任一项所述车辆换道方法的步骤。

一种车辆换道方法、装置、设备及可读存储介质

技术领域

[0001] 本发明涉及交通技术领域,具体而言,涉及一种车辆换道方法、装置、设备及可读存储介质。

背景技术

[0002] 目前,国内外针对自动车队控制的研究大多偏向于队列的纵向控制方面,缺少对横向控制方面的协同换道、动态换道的研究,更缺少两者联合控制算法的研究。同时,现有的自动车编队驾驶研究难以适应复杂交通环境,缺少在微观层面对决策、规划、控制等模块集成算法的研究。

发明内容

[0003] 本发明的目的在于提供一种车辆换道方法、装置、设备及可读存储介质,以改善上述问题。

[0004] 为了实现上述目的,本申请实施例提供了如下技术方案:

[0005] 一方面,本申请实施例提供了一种车辆换道方法,所述方法包括:

[0006] 获取第一信息和第二信息,所述第一信息包括换道车辆发送的加入车辆队列的请求;所述第二信息包括所述换道车辆当前的运行状态信息和所述换道车辆的车辆配置信息;

[0007] 根据所述第一信息,确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和后方的车辆,将所述前方的车辆定义为前方车辆,将所述后方的车辆定义为后方车辆,并获取所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息;

[0008] 根据所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息判断是否符合换道条件,若符合换道条件则基于所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,利用动态协同换道模型计算得到所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角;

[0009] 基于所述换道车辆期望的偏航角、所述换道车辆期望的前轮转角和所述换道车辆的车辆配置信息,发送控制命令,所述控制命令用于控制所述换道车辆加入所述车辆队列中的命令。

[0010] 可选的,所述根据所述第一信息,确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和后方的车辆,包括:

[0011] 基于所述换道车辆发送的加入所述车辆队列的请求查询得到第一结果,所述第一结果包括所述换道车辆所要加入的所述车辆队列中每辆车离开所述车辆队列的顺序和所述换道车辆加入所述车辆队列后所述换道车辆离开所述车辆队列的顺序;

[0012] 基于所述第一结果确定所述换道车辆加入所述车辆队列后,在所述车辆队列中的相对位置,根据所述相对位置确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆后方的车辆。

[0013] 可选的,所述根据所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息

判断是否符合换道条件,包括:

[0014] 获取期望安全间距和最小安全距离;

[0015] 根据所述换道车辆当前的运行状态信息、所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息,计算得到所述换道车辆最前方与所述前方车辆最后方之间的第一距离和所述换道车辆最后方与所述后方车辆最前方之间的第二距离,若所述第一距离与所述期望安全间距相等且所述第二距离大于或等于最小安全距离则符合换道条件。

[0016] 可选的,所述基于所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,利用动态协同换道模型计算得到所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角,包括:

[0017] 将所述分布式串级PID控制算法与正弦函数相结合,构建所述动态协同换道模型;

[0018] 基于所述动态协同换道模型、所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,得到所述换道车辆的期望换道轨迹,其中,所述换道车辆当前的运行状态信息包括所述换道车辆当前的位置、速度和加速度;

[0019] 基于所述换道车辆的期望换道轨迹,得到所述换道车辆期望的偏航角和期望的前轮转角。

[0020] 可选的,所述基于所述换道车辆期望的偏航角、所述换道车辆期望的前轮转角和所述换道车辆的车辆配置信息,发送控制命令,所述控制命令用于控制所述换道车辆加入所述车辆队列中的命令,包括:

[0021] 基于所述换道车辆的车辆配置信息、所述换道车辆期望的偏航角和所述换道车辆期望的前轮转角,利用模型预测控制算法计算得到当前所述换道车辆的前轮转角的增加量;

[0022] 基于当前所述换道车辆的前轮转角的增加量,控制所述换道车辆加入所述车辆队列中。

[0023] 可选的,所述基于当前所述换道车辆的前轮转角的增加量,控制所述换道车辆加入所述车辆队列中,包括:

[0024] 基于所述换道车辆的前轮转角的增加量,控制所述换道车辆往所述车辆队列方向移动,得到第二结果,所述第二结果包括所述换道车辆移动后所述换道车辆的运行状态信息和所述换道车辆移动后所述前方车辆的位置信息;

[0025] 根据所述第二结果和所述动态协同换道模型更新所述换道车辆的期望换道轨迹,并基于更新后的换道轨迹更新所述换道车辆的前轮转角的增加量;

[0026] 基于更新后的前轮转角的增加量控制所述换道车辆继续往所述车辆队列方向移动,直至所述换道车辆加入到所述车辆队列中,其中所述换道车辆朝所述车辆队列前进方向的中心线与所述车辆队列的中心线重合时,则认定所述换道车辆已加入到所述车辆队列中。

[0027] 可选的,所述获取第一信息和第二信息的同时,还包括:

[0028] 获取第三信息,所述第三信息包括所述车辆队列中每辆车当前的运行状态信息,所述每辆车当前的运行状态信息包括所述每辆车当前的位置信息、所述每辆车当前的速度和所述每辆车当前的加速度;

[0029] 基于所述每辆车当前的运行状态信息,利用分布式串级PID纵向控制算法计算得到下一时刻所述每辆车的加速度;

[0030] 根据所述每辆车当前的运行状态信息和所述下一时刻所述每辆车的加速度计算得到下一时刻每辆车的位置信息和速度；

[0031] 基于所述下一时刻每辆车的位置信息和速度，控制下一时刻所述每辆车的位置和速度。

[0032] 可选的，所述基于所述每辆车当前的运行状态信息，利用分布式串级PID纵向控制算法计算得到下一时刻所述每辆车的加速度，包括：

[0033] 通过公式(1) - (10) 计算下一时刻所述每辆车的加速度，所述公式(1) - (10) 依次为：

$$[0034] \quad d_i(k) = x_{i-1}(k) - x_i(k) - l_{i-1} \quad (1)$$

[0035] 公式(1)中， k 表示采样周期数； l_{i-1} 表示第 $i-1$ 辆车的长度； d_i 表示第 i 辆车的前保险杠与第 $i-1$ 辆车的后保险杠之间的测量距离； $x_i(k)$ 表示第 i 辆车在第 k 个采样时刻的位置； $x_{i-1}(k)$ 表示第 $i-1$ 辆车在第 k 个采样时刻的位置，其中第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车相邻且第 $i-1$ 辆车位于第 i 辆车前方；

$$[0036] \quad S_i(k) = d_0 + v_i(k) h_t \quad (2)$$

[0037] 公式(2)中， S_i 表示第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车的期望间距； d_0 表示第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车的的核心安全距离； h_t 表示恒定车头时距；假设所有子系统都具有相同的 d_0 和 h_t ； $v_i(k)$ 表示第 i 辆车在第 k 个采样时刻的速度；

[0038] 间距误差 e_{xi} 和速度误差 \dot{e}_{xi} 被用于衡量控制目标，将其定义为：

$$[0039] \quad \begin{aligned} e_{xi}(k) &= d_i(k) - S_i(k) \\ \dot{e}_{xi}(k) &= v_{i-1}(k) - v_i(k) \end{aligned} \quad (3)$$

[0040] 公式(3)中， k 表示采样周期数； $e_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第 k 个采样时刻的间距误差，其中 $P_{i,i-1}$ 表示第 i 辆车和第 $i-1$ 辆车组成的子系统； $\dot{e}_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第 k 个采样时刻的速度误差； d_i 表示第 i 辆车的前保险杠与第 $i-1$ 辆车的后保险杠之间的测量距离； $v_{i-1}(k)$ 表示第 $i-1$ 辆车在第 k 个采样时刻的速度； $v_i(k)$ 表示第 i 辆车在第 k 个采样时刻的速度； S_i 表示第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车的期望间距；

[0041] $P_{i,i-1}$ 子系统的外环PID控制算法方程为：

$$[0042] \quad \partial_i(k) = K_{px}^i e_{xi}(k) + K_{ix}^i \sum_{j=0}^k e_{xi}(j) + K_{dx}^i [e_{xi}(k) - e_{xi}(k-1)] \quad (4)$$

$$[0043] \quad e_{xi}(k) = d_i(k) - S_i(k) \quad (5)$$

[0044] 公式(4) - (5)中， $\partial_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的外环PID在第 k 个采样时刻的输出； K_{px}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的比例系数； K_{ix}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的积分系数； K_{dx}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的微分系数， $e_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第 k 个采样时刻的间距误差； $e_{xi}(k-1)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第 $k-1$ 个采样时刻的间距误差， $j \in \{0, 1, \dots, k\}$ ；

[0045] $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID控制算法方程为：

$$[0046] \quad u_i(k) = K_{pv}^i e_{vi}(k) + K_{iv}^i \sum_{j=0}^k e_{vi}(j) + K_{dv}^i [e_{vi}(k) - e_{vi}(k-1)] \quad (6)$$

$$[0047] \quad \dot{e}_{xi}(k) = v_{i-1}(k) - v_i(k) \quad (7)$$

$$[0048] \quad e_{vi}(k) = \partial_i(k) - \dot{e}_{xi}(k) \quad (8)$$

[0049] 公式(6) - (8)中, $\dot{e}_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第 k 个采样时刻的速度误差; $e_{vi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第 k 个采样时刻的输入; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第 k 个采样时刻的输出; K_{pv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的比例系数; K_{iv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的积分系数; K_{dv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的微分系数; $j \in \{0, 1, \dots, k\}$ 。

[0050] T_s 代表采样时间, 各个子系统第 $k+1$ 个采样时刻的加速度计算公式为:

$$[0051] \quad a_i(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{\tau_i}\right) a_i(k) + \frac{T_s}{\tau_i} u_i(k) \quad (9)$$

[0052] 公式(9)中, $a_i(k+1)$ 表示第 i 辆车在第 $k+1$ 个采样时刻的加速度; $a_i(k)$ 表示第 i 辆车在第 k 个采样时刻的加速度; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第 k 个采样时刻的输出; τ_i 表示第 i 辆车的纵向动力学惯性滞后;

[0053] 同时, 对每个子系统进行约束, 约束条件如下:

$$[0054] \quad \begin{aligned} u_{min} &\leq u_i(k) \leq u_{max} \\ a_{min} &\leq a_i(k) \leq a_{max} \\ v_{min} &\leq v_i(k) \leq v_{max} \end{aligned} \quad (10)$$

[0055] 公式(10)中, u_{min} 表示控制输出的最小值; u_{max} 表示控制输出的最大值; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第 k 个采样时刻的输出; a_{min} 表示最小加速度; a_{max} 表示最大加速度; v_{min} 是道路上允许的最小速度; v_{max} 是道路上允许的最大速度。

[0056] 可选的, 所述根据所述每辆车当前的运行状态信息和所述下一时刻所述每辆车的加速度计算得到下一时刻每辆车的位置信息和速度, 包括:

[0057] 通过公式(11)和(12)计算下一时刻每辆车的位置信息和速度, 所述公式(11)和(12)为:

$$[0058] \quad v_i(k+1) = a_i(k+1) * T_s \quad (11)$$

$$[0059] \quad x_i(k+1) = v_i(k) * T_s + \frac{1}{2} a_i(k+1) * T_s^2 \quad (12)$$

[0060] 公式(11) - (12)中, T_s 表示采样时间; $a_i(k+1)$ 表示第 i 辆车在第 $k+1$ 个采样时刻的加速度; $v_i(k)$ 表示第 i 辆车在第 k 个采样时刻的速度; $v_i(k+1)$ 表示第 i 辆车在第 $k+1$ 个采样时刻的速度; $x_i(k+1)$ 表示第 i 辆车在第 $k+1$ 个采样时刻的位置。

[0061] 可选的, 所述利用动态协同换道模型计算得到所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角, 包括:

[0062] 通过公式(13) - (18)计算所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角, 所述公式(13) - (18)依次为:

$$[0063] \quad \left\{ \begin{array}{l} y_d^0 = y_{TFV}^0 - y_{SV}^0 \\ a_{SV}(t + T_s) = F_{DCPID}(x_{SV}(t), x_{TFV}(t), v_{SV}(t), v_{TFV}(t)) \\ v_{SV}(t + T_s) = v_{SV}(t) + a_{SV}(t + T_s) * T_s, t \in [t_0, t_e] \\ y_r(x_r) = y_{SV}^0 + \frac{y_d^0}{2\pi} \left\{ \frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) - \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \\ x_r \in \left[x_{SV}^0, x_{SV}^0 + v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}} \right] \end{array} \right. \quad (13)$$

[0064] 公式(13)中, x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的纵向位置; y_{TFV}^0 表示换道开始时刻目标车道上所述前方车辆的位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; (x_r, y_r) 表示换道车辆的期望位置; t_0 表示换道开始时间; t_e 表示换道结束时间; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在 t 时刻的速度; $v_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在 $t+T_s$ 时刻的速度; $a_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在 $t+T_s$ 时刻的加速度;

$$[0065] \quad y_r'(x_r) = \frac{y_d^0}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \quad (14)$$

$$[0066] \quad y_r''(x_r) = \frac{\pi a_L}{v_{SV}^2(t)} \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \quad (15)$$

$$[0067] \quad K = \frac{y_r''}{(1+y_r'^2)^{3/2}} \quad (16)$$

[0068] 公式(14) - (16)中, x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在 t 时刻的速度; x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_r' 表示 y_r 的一阶导数; y_r'' 表示 y_r 的二阶导数; K 表示 y_r 的曲率;

$$[0069] \quad \varphi_r = \tan^{-1}(y_r') \quad (17)$$

$$[0070] \quad \delta_{fr} = \tan^{-1}(L*K) \quad (18)$$

[0071] 公式(17) - (18)中, φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; φ_r 和 δ_{fr} 两者均为弧度制, L 表示车辆前后轴之间的距离; y_r' 表示 y_r 的一阶导数。

[0072] 可选的, 基于所述换道车辆的车辆配置信息、所述换道车辆期望的偏航角和所述换道车辆期望的前轮转角, 利用模型预测控制算法计算得到当前所述换道车辆的前轮转角的增加量, 包括:

[0073] 通过公式(19) - (24) 计算得到当前所述换道车辆的前轮转角的增加量, 公式(19) -

(24) 为:

[0074] 利用三自由度的运动学模型来描述车辆状态,公式为:

$$[0075] \quad [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\varphi}]^T = [\cos \varphi \quad \sin \varphi \quad \tan \delta_f / l]^T \cdot v \quad (19)$$

[0076] 公式(19)中, (x, y) 表示车辆后轴中心坐标; φ 表示车辆偏航角; δ_f 表示车辆前轮转角; l 表示车辆前后轴距; v 表示车辆速度;

$$[0077] \quad \tilde{\Phi}(k+1) = A(k)\tilde{\Phi}(k) + B(k)\Delta\tilde{u}(k) \quad (20)$$

$$[0078] \quad \tilde{\Phi}(k) \triangleq \begin{bmatrix} X(k) - X_r(k) \\ u(k) - u_r(k) \end{bmatrix} \quad (21)$$

[0079] 公式(20) - (21)中, $X = [x \quad y \quad \varphi]^T$ 表示车辆的当前状态; $u = [v \quad \delta_f]^T$ 表示车辆的当前控制变量,其中 v 表示换道车辆的速度, δ_f 表示换道车辆的前轮转角; $X_r = [x_r \quad y_r \quad \varphi_r]^T$ 表示从参考轨迹上获得的期望状态; $u_r = [v_r \quad \delta_{fr}]^T$ 表示从参考轨迹上获得的期望控制变量; x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; v_r 表示换道车辆期望的速度;

[0080] 模型预测控制算法的最小成本函数描述为:

$$[0081] \quad \min J(k) = [\Delta U(k)^T, \varepsilon]^T H(k) [\Delta U(k)^T, \varepsilon] + f^T(k) [\Delta U(k)^T, \varepsilon] \quad (22)$$

$$[0082] \quad H(k) \triangleq \begin{bmatrix} \bar{B}_k^T \bar{Q} \bar{B}_k + \bar{R} & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$f(k)^T = [2\bar{A}_k^T \bar{Q} \bar{B}_k \quad 0]$$

[0083] 约束条件为:

$$[0084] \quad \begin{cases} \Delta U_{min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{max} \\ U_{min} \leq A\Delta U(k) + U(k-1) \leq U_{max} \end{cases} \quad (24)$$

[0085] 公式(22) - (24)中, k 表示采样周期数; $J(k)$ 表示第 k 个采样时刻的成本函数; $\Delta U(k)$ 表示第 k 个采样时刻的控制变量的增量; U_{min} 表示控制变量的最小约束; U_{max} 表示控制变量的最大约束; ΔU_{min} 表示控制变量增量的最小约束值; ΔU_{max} 表示控制变量增量的最大约束值; ε 表示松弛因子; ρ 表示权重系数; \bar{Q} 表示输入状态量的权重矩阵; \bar{R} 表示控制变量增量的权重矩阵; \bar{A}_k 表示输入状态量的预测矩阵; \bar{B}_k 表示控制变量增量的预测矩阵; A 表示约束方程的系数矩阵; $H(k)$ 和 $f(k)$ 均表示二次优化问题标准形式的系数矩阵。

[0086] 第二方面,本申请实施例提供了一种车辆换道装置,所述装置包括第一获取模块、第一计算模块、第二计算模块和第一控制模块。

[0087] 第一获取模块,用于获取第一信息和第二信息,所述第一信息包括换道车辆发送的加入车辆队列的请求;所述第二信息包括所述换道车辆当前的运行状态信息和所述换道车辆的车辆配置信息;

[0088] 第一计算模块,用于根据所述第一信息,确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和后方的车辆,将所述前方的车辆定义为前方车辆,将所述

后方的车辆定义为后方车辆,并获取所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息;

[0089] 第二计算模块,用于根据所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息判断是否符合换道条件,若符合换道条件则基于所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,利用动态协同换道模型计算得到所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角;

[0090] 第一控制模块,用于基于所述换道车辆期望的偏航角、所述换道车辆期望的前轮转角和所述换道车辆的车辆配置信息,发送控制命令,所述控制命令用于控制所述换道车辆加入所述车辆队列中的命令。

[0091] 可选的,所述第一计算模块,包括:

[0092] 查询单元,用于基于所述换道车辆发送的加入所述车辆队列的请求查询得到第一结果,所述第一结果包括所述换道车辆所要加入的所述车辆队列中每辆车离开所述车辆队列的顺序和所述换道车辆加入所述车辆队列后所述换道车辆离开所述车辆队列的顺序;

[0093] 确定单元,用于基于所述第一结果确定所述换道车辆加入所述车辆队列后,在所述车辆队列中的相对位置,根据所述相对位置确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆后方的车辆。

[0094] 可选的,所述第二计算模块,包括:

[0095] 获取单元,用于获取期望安全间距和最小安全距离;

[0096] 第一计算单元,用于根据所述换道车辆当前的运行状态信息、所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息,计算得到所述换道车辆最前方与所述前方车辆最后方之间的第一距离和所述换道车辆最后方与所述后方车辆最前方之间的第二距离,若所述第一距离与所述期望安全间距相等且所述第二距离大于或等于最小安全距离则符合换道条件。

[0097] 可选的,所述第二计算模块,包括:

[0098] 构建单元,用于将所述分布式串级PID控制算法与正弦函数相结合,构建所述动态协同换道模型;

[0099] 第二计算单元,用于基于所述动态协同换道模型、所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,得到所述换道车辆的期望换道轨迹,其中,所述换道车辆当前的运行状态信息包括所述换道车辆当前的位置、速度和加速度;

[0100] 第三计算单元,用于基于所述换道车辆的期望换道轨迹,得到所述换道车辆期望的偏航角和期望的前轮转角。

[0101] 可选的,所述第一控制模块,包括:

[0102] 第四计算单元,用于基于所述换道车辆的车辆配置信息、所述换道车辆期望的偏航角和所述换道车辆期望的前轮转角,利用模型预测控制算法计算得到当前所述换道车辆的前轮转角的增加量;

[0103] 控制单元,用于基于当前所述换道车辆的前轮转角的增加量,控制所述换道车辆加入所述车辆队列中。

[0104] 可选的,所述控制单元,包括:

[0105] 第一控制子单元,用于基于所述换道车辆的前轮转角的增加量,控制所述换道车辆往所述车辆队列方向移动,得到第二结果,所述第二结果包括所述换道车辆移动后所述换道车辆的运行状态信息和所述换道车辆移动后所述前方车辆的位置信息;

[0106] 更新子单元,用于根据所述第二结果和所述动态协同换道模型更新所述换道车辆的期望换道轨迹,并基于更新后的换道轨迹更新所述换道车辆的前轮转角的增加量;

[0107] 第二控制子单元,用于基于更新后的前轮转角的增加量控制所述换道车辆继续往所述车辆队列方向移动,直至所述换道车辆加入到所述车辆队列中,其中所述换道车辆朝所述车辆队列前进方向的中心线与所述车辆队列的中心线重合时,则认定所述换道车辆已加入到所述车辆队列中。

[0108] 可选的,所述装置,还包括:

[0109] 第二获取模块,用于获取第三信息,所述第三信息包括所述车辆队列中每辆车当前的运行状态信息,所述每辆车当前的运行状态信息包括所述每辆车当前的位置信息、所述每辆车当前的速度和所述每辆车当前的加速度;

[0110] 第三计算模块,用于基于所述每辆车当前的运行状态信息,利用分布式串级PID纵向控制算法计算得到下一时刻所述每辆车的加速度;

[0111] 第四计算模块,用于根据所述每辆车当前的运行状态信息和所述下一时刻所述每辆车的加速度计算得到下一时刻每辆车的位置信息和速度;

[0112] 第二控制模块,用于基于所述下一时刻每辆车的位置信息和速度,控制下一时刻所述每辆车的位置和速度。

[0113] 可选的,所述第三计算模块,包括:

[0114] 第五计算单元,用于通过公式(1) - (10)计算下一时刻所述每辆车的加速度,所述公式(1) - (10)依次为:

$$[0115] \quad d_i(k) = x_{i-1}(k) - x_i(k) - l_{i-1} \quad (1)$$

[0116] 公式(1)中, k 表示采样周期数; l_{i-1} 表示第*i*-1辆车的长度; d_i 表示第*i*辆车的前保险杠与第*i*-1辆车的后保险杠之间的测量距离; $x_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的位置; $x_{i-1}(k)$ 表示第*i*-1辆车在第*k*个采样时刻的位置,其中第*i*辆车与第*i*-1辆车相邻且第*i*-1辆车位于第*i*辆车前方;

$$[0117] \quad S_i(k) = d_0 + v_i(k) h_t \quad (2)$$

[0118] 公式(2)中, S_i 表示第*i*辆车与第*i*-1辆车的期望间距; d_0 表示第*i*辆车与第*i*-1辆车的最小安全距离; h_t 表示恒定车头时距;假设所有子系统都具有相同的 d_0 和 h_t ; $v_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的速度;

[0119] 间距误差 e_{xi} 和速度误差 \dot{e}_{xi} 被用于衡量控制目标,将其定义为:

$$[0120] \quad \begin{aligned} e_{xi}(k) &= d_i(k) - S_i(k) \\ \dot{e}_{xi}(k) &= v_{i-1}(k) - v_i(k) \end{aligned} \quad (3)$$

[0121] 公式(3)中, k 表示采样周期数; $e_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的间距误差,其中 $P_{i,i-1}$ 表示第*i*辆车和第*i*-1辆车组成的子系统; $\dot{e}_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的速度误差; d_i 表示第*i*辆车的前保险杠与第*i*-1辆车的后保险杠之间的测量距离; $v_{i-1}(k)$ 表示第*i*-1辆车在第*k*个采样时刻的速度; $v_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的速

度; S_i 表示第*i*辆车与第*i-1*辆车的期望间距;

[0122] $P_{i,i-1}$ 子系统的外环PID控制算法方程为:

$$[0123] \quad \partial_i(k) = K_{px}^i e_{xi}(k) + K_{ix}^i \sum_{j=0}^k e_{xi}(j) + K_{dx}^i [e_{xi}(k) - e_{xi}(k-1)] \quad (4)$$

$$[0124] \quad e_{xi}(k) = d_i(k) - S_i(k) \quad (5)$$

[0125] 公式(4) - (5)中, $\partial_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的外环PID在第*k*个采样时刻的输出; K_{px}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的比例系数; K_{ix}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的积分系数; K_{dx}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的微分系数, $e_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的间距误差; $e_{xi}(k-1)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k-1*个采样时刻的间距误差, $j \in \{0, 1, \dots, k\}$;

[0126] $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID控制算法方程为:

$$[0127] \quad u_i(k) = K_{pv}^i e_{vi}(k) + K_{iv}^i \sum_{j=0}^k e_{vi}(j) + K_{dv}^i [e_{vi}(k) - e_{vi}(k-1)] \quad (6)$$

$$[0128] \quad \dot{e}_{xi}(k) = v_{i-1}(k) - v_i(k) \quad (7)$$

$$[0129] \quad e_{vi}(k) = \partial_i(k) - \dot{e}_{xi}(k) \quad (8)$$

[0130] 公式(6) - (8)中, $\dot{e}_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的速度误差; $e_{vi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第*k*个采样时刻的输入; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第*k*个采样时刻的输出; K_{pv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的比例系数; K_{iv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的积分系数; K_{dv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的微分系数; $j \in \{0, 1, \dots, k\}$;

[0131] T_s 代表采样时间,各个子系统第*k+1*个采样时刻的加速度计算公式为:

$$[0132] \quad a_i(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{\tau_i}\right) a_i(k) + \frac{T_s}{\tau_i} u_i(k) \quad (9)$$

[0133] 公式(9)中, $a_i(k+1)$ 表示第*i*辆车在第*k+1*个采样时刻的加速度; $a_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的加速度; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第*k*个采样时刻的输出; τ_i 表示第*i*辆车的纵向动力学惯性滞后;

[0134] 同时,对每个子系统进行约束,约束条件如下:

$$[0135] \quad \begin{aligned} u_{min} &\leq u_i(k) \leq u_{max} \\ a_{min} &\leq a_i(k) \leq a_{max} \\ v_{min} &\leq v_i(k) \leq v_{max} \end{aligned} \quad (10)$$

[0136] 公式(10)中, u_{min} 表示控制输出的最小值; u_{max} 表示控制输出的最大值; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第*k*个采样时刻的输出; a_{min} 表示最小加速度; a_{max} 表示最大加速度; v_{min} 是道路上允许的最小速度; v_{max} 是道路上允许的最大速度。

[0137] 可选的,所述第四计算模块包括:

[0138] 第六计算单元,用于通过公式(11)和(12)计算下一时刻每辆车的位置信息和速度,所述公式(11)和(12)为:

$$[0139] \quad v_i(k+1) = a_i(k+1) * T_s \quad (11)$$

$$[0140] \quad x_i(k+1) = v_i(k) * T_s + \frac{1}{2} a_i(k+1) * T_s^2 \quad (12)$$

[0141] 公式(11) - (12)中, T_s 表示采样时间; $a_i(k+1)$ 表示第*i*辆车在第*k*+1个采样时刻的加速度; $v_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的速度; $v_i(k+1)$ 表示第*i*辆车在第*k*+1个采样时刻的速度; $x_i(k+1)$ 表示第*i*辆车在第*k*+1个采样时刻的位置。

[0142] 可选的,所述第二计算模块,包括:

[0143] 第七计算单元,用于通过公式(13) - (18)计算所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角,所述公式(13) - (18)依次为:

$$[0144] \quad \left\{ \begin{array}{l} y_d^0 = y_{TFV}^0 - y_{SV}^0 \\ a_{SV}(t+T_s) = F_{DCPID}(x_{SV}(t), x_{TFV}(t), v_{SV}(t), v_{TFV}(t)) \\ v_{SV}(t+T_s) = v_{SV}(t) + a_{SV}(t+T_s) * T_s, t \in [t_0, t_e] \\ y_r(x_r) = y_{SV}^0 + \frac{y_d^0}{2\pi} \left\{ \frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) - \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \\ x_r \in \left[x_{SV}^0, x_{SV}^0 + v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}} \right] \end{array} \right\} \quad (13)$$

[0145] 公式(13)中, x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的纵向位置; y_{TFV}^0 表示换道开始时刻目标车道上所述前方车辆的位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; (x_r, y_r) 表示换道车辆的期望位置; t_0 表示换道开始时间; t_e 表示换道结束时间; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在*t*时刻的速度; $v_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在*t*+ T_s 时刻的速度; $a_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在*t*+ T_s 时刻的加速度;

$$[0146] \quad y_r'(x_r) = \frac{y_d^0}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \quad (14)$$

$$[0147] \quad y_r''(x_r) = \frac{\pi a_L}{v_{SV}^2(t)} \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \quad (15)$$

$$[0148] \quad K = \frac{y_r''}{(1+y_r'^2)^{3/2}} \quad (16)$$

[0149] 公式(14) - (16)中, x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在*t*时刻的速度; x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_r' 表示 y_r 的一阶导数; y_r'' 表示 y_r 的二阶导数; K 表示 y_r 的曲率;

$$[0150] \quad \varphi_r = \tan^{-1}(y_r') \quad (17)$$

[0151] $\delta_{fr} = \tan^{-1}(L \cdot K)$ (18)

[0152] 公式(17) - (18)中, φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; φ_r 和 δ_{fr} 两者均为弧度制, L表示车辆前后轴之间的距离; y_r' 表示 y_r 的一阶导数。

[0153] 可选的, 所述第四计算单元, 包括:

[0154] 计算子单元, 用于通过公式(19) - (24)计算得到当前所述换道车辆的前轮转角的增加量, 公式(19) - (24)为:

[0155] 利用三自由度的运动学模型来描述车辆状态, 公式为:

[0156] $[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\varphi}]^T = [\cos \varphi \ \sin \varphi \ \tan \delta_f / l]^T \cdot v$ (19)

[0157] 公式(19)中, (x, y)表示车辆后轴中心坐标; φ 表示车辆偏航角; δ_f 表示车辆前轮转角; l表示车辆前后轴距离; v表示车辆速度;

[0158] $\tilde{\Phi}(k+1) = A(k)\tilde{\Phi}(k) + B(k)\Delta\tilde{u}(k)$ (20)

[0159] $\tilde{\Phi}(k) \triangleq \begin{bmatrix} X(k) - X_r(k) \\ u(k) - u_r(k) \end{bmatrix}$ (21)

[0160] 公式(20) - (21)中, $X = [x \ y \ \varphi]^T$ 表示车辆的当前状态; $u = [v \ \delta_f]^T$ 表示车辆的当前控制变量, 其中v表示换道车辆的速度, δ_f 表示换道车辆的前轮转角; $X_r = [x_r \ y_r \ \varphi_r]^T$ 表示从参考轨迹上获得的期望状态; $u_r = [v_r \ \delta_{fr}]^T$ 表示从参考轨迹上获得的期望控制变量; x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; v_r 表示换道车辆期望的速度;

[0161] 模型预测控制算法的最小成本函数描述为:

[0162] $\min J(k) = [\Delta U(k)^T, \varepsilon]^T H(k) [\Delta U(k)^T, \varepsilon] + f^T(k) [\Delta U(k)^T, \varepsilon]$ (22)

[0163] $H(k) \triangleq \begin{bmatrix} \bar{B}_k^T \bar{Q} \bar{B}_k + \bar{R} & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix}$
 $f(k)^T = [2\bar{A}_k^T \bar{Q} \bar{B}_k \ 0]$ (23)

[0164] 约束条件为:

[0165] $\begin{cases} \Delta U_{min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{max} \\ U_{min} \leq A\Delta U(k) + U(k-1) \leq U_{max} \end{cases}$ (24)

[0166] 公式(22) - (24)中, k表示采样周期数; J(k)表示第k个采样时刻的成本函数; $\Delta U(k)$ 表示第k个采样时刻的控制变量的增量; U_{min} 表示控制变量的最小约束; U_{max} 表示控制变量的最大约束; ΔU_{min} 表示控制变量增量的最小约束值; ΔU_{max} 表示控制变量增量的最大约束值; ε 表示松弛因子; ρ 表示权重系数; \bar{Q} 表示输入状态量的权重矩阵; \bar{R} 表示控制变量增量的权重矩阵; \bar{A}_k 表示输入状态量的预测矩阵; \bar{B}_k 表示控制变量增量的预测矩阵; A表示约束方程的系数矩阵; H(k)和f(k)均表示二次优化问题标准形式的系数矩阵。

[0167] 第三方面, 本申请实施例提供了一种车辆换道设备, 所述设备包括存储器和处理器。存储器用于存储计算机程序; 处理器用于执行所述计算机程序时实现上述车辆换道方

法的步骤。

[0168] 第四方面,本申请实施例提供了一种可读存储介质,所述可读存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现上述车辆换道方法的步骤。

[0169] 本发明的有益效果为:

[0170] 1、本发明提出了一种分布式串级PID控制算法,包括控制速度误差的内环PID和控制间距误差的外环PID,以执行车辆编队的纵向控制。该算法明确考虑了这两类误差的相关性和耦合性,具有较强的抗干扰能力。

[0171] 2、本发明提出了一种由分布式串级PID控制算法和改进的正弦曲线轨迹规划方法组成的动态协同换道模型。根据分布式串级PID控制算法计算换道车的速度,确保换道安全。然后基于改进的正弦曲线函数规划连续路径,该函数考虑了横向加速度可能引起的乘客不适。此外,改进的正弦函数的重要参数规划加速度的可行域是利用车辆的横摆角速度确定的,改进的正弦函数的参数具有物理意义。

[0172] 3、本发明所提出的动态协同换道模型在惯性滞后方面明确考虑了智能网联车CAV的异质性。还考虑了目标车道上前车速度变化引起的换道不确定性,以及换道车辆与目标车道上车队之间的协同机动。

[0173] 本发明的其他特征和优点将在随后的说明书阐述,并且,部分地从说明书中变得显而易见,或者通过实施本发明实施例了解。本发明的目的和其他优点可通过在所写的说明书、权利要求书、以及附图中所特别指出的结构来实现和获得。

附图说明

[0174] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,应当理解,以下附图仅示出了本发明的某些实施例,因此不应被看作是对范围的限定,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他相关的附图。

[0175] 图1是本发明实施例中所述的车辆换道方法流程示意图;

[0176] 图2是本发明实施例中所述的车辆换道装置结构示意图;

[0177] 图3是本发明实施例中所述的车辆换道设备结构示意图;

[0178] 图4是本发明实施例中所述的各分布式子系统的串级PID控制结构示意图。

具体实施方式

[0179] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。通常在此处附图中描述和示出的本发明实施例的组件可以以各种不同的配置来布置和设计。因此,以下对在附图中提供的本发明的实施例的详细描述并非旨在限制要求保护的本发明的范围,而是仅仅表示本发明的选定实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0180] 应注意到:相似的标号或字母在下面的附图中表示类似项,因此,一旦某一项在一个附图中被定义,则在随后的附图中不需要对其进行进一步定义和解释。同时,在本发明的

描述中,术语“第一”、“第二”等仅用于区分描述,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0181] 实施例1

[0182] 如图1所示,本实施例提供了一种车辆换道方法,该方法包括步骤S1、步骤S2、步骤S3和步骤S4。

[0183] 步骤S1、获取第一信息和第二信息,所述第一信息包括换道车辆发送的加入车辆队列的请求;所述第二信息包括所述换道车辆当前的运行状态信息和所述换道车辆的车辆配置信息;

[0184] 步骤S2、根据所述第一信息,确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和后方的车辆,将所述前方的车辆定义为前方车辆,将所述后方的车辆定义为后方车辆,并获取所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息;

[0185] 步骤S3、根据所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息判断是否符合换道条件,若符合换道条件则基于所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,利用动态协同换道模型计算得到所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角;

[0186] 步骤S4、基于所述换道车辆期望的偏航角、所述换道车辆期望的前轮转角和所述换道车辆的车辆配置信息,发送控制命令,所述控制命令用于控制所述换道车辆加入所述车辆队列中的命令。

[0187] 在本实施例中,所述换道车辆当前的运行状态信息包括所述换道车辆当前的位置、速度和加速度,所述换道车辆的车辆配置信息包括换道车辆的车辆偏航角、前轮转角、前后轴距离和速度;本实施例提出了一种由分布式串级PID控制算法和改进的正弦曲线函数轨迹规划方法组成的动态协同换道模型,该模型中分布式串级PID控制算法考虑目标车道前方车辆速度的波动,确定适当的换道车辆纵向加速度和速度,以确保换道安全;改进的正弦曲线函数考虑了横向加速度可能引起的乘客不适,从而规划出参考轨迹,并实时更新换道车辆的前轮转角的增加量以避免潜在的碰撞,直到换道完成。此外,改进的正弦函数的重要参数规划加速度的可行域是利用车辆的横摆角速度确定的,改进的正弦曲线函数的参数具有物理意义,更易于解释。

[0188] 在本公开的一种具体实施方式中,所述方法,还可以包括步骤S5、步骤S6、步骤S7和步骤S8。

[0189] 步骤S5、获取第三信息,所述第三信息包括所述车辆队列中每辆车当前的运行状态信息,所述每辆车当前的运行状态信息包括所述每辆车当前的位置信息、所述每辆车当前的速度和所述每辆车当前的加速度;

[0190] 步骤S6、基于所述每辆车当前的运行状态信息,利用分布式串级PID纵向控制算法计算得到下一时刻所述每辆车的加速度;

[0191] 步骤S7、根据所述每辆车当前的运行状态信息和所述下一时刻所述每辆车的加速度计算得到下一时刻每辆车的位置信息和速度;

[0192] 步骤S8、基于所述下一时刻每辆车的位置信息和速度,控制下一时刻所述每辆车的位置和速度。

[0193] 在本实施例中,在获取第一信息和第二信息的同时,也会执行步骤S5到步骤S8,通过本实施例中的方法可以实时计算车辆在下一时刻的位置和速度,并通过计算得到的位置

和速度来控制车辆在下一时刻位于计算出来的位置和达到计算出来的速度,通过这种方式可以保证车队里面的车辆始终保持安全的行驶状态;同时,通过实时更新的车队中车辆的位置和行驶速度,进而可以更新出每个时刻所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角,通过这种方式,不仅可以保证车队保持安全行驶的状态,也可以保证换道车辆进行换道时也是安全的,进而更符合实际交通中的换道行为。

[0194] 在本公开的一种具体实施方式中,所述步骤S2,还可以包括步骤S21和步骤S22。

[0195] 步骤S21、基于所述换道车辆发送的加入所述车辆队列的请求查询得到第一结果,所述第一结果包括所述换道车辆所要加入的所述车辆队列中每辆车离开所述车辆队列的顺序和所述换道车辆加入所述车辆队列后所述换道车辆离开所述车辆队列的顺序;

[0196] 步骤S22、基于所述第一结果确定所述换道车辆加入所述车辆队列后,在所述车辆队列中的相对位置,根据所述相对位置确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆后方的车辆。

[0197] 在本实施例中,队列中每辆车的位置顺序通过以下规则确定:高速公路上每辆车离开高速公路的位置是事先可以获取得到的,通过离开位置与当前位置之间的距离用来确定各车辆在队列中的相对位置,其中,距离最小的车辆在队列的末端,距离最大的车辆在队列的前端,根据该规则,可以确定队列中每辆车的位置顺序。通过这种排序规则可以保证队列中最后一辆车总是先离开队列,进而降低了对整个队列系统稳定性的影响。

[0198] 本实施例中可以事先获取到每辆车在队列中的位置,根据换道车辆在队列中的位置就可以确定换道车辆所要插入的位置和换道车辆插入后位于换道车辆前后方的车辆。

[0199] 在本公开的一种具体实施方式中,所述步骤S3,还可以包括步骤S31和步骤S32。

[0200] 步骤S31、获取期望安全间距和最小安全距离;

[0201] 步骤S32、根据所述换道车辆当前的运行状态信息、所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息,计算得到所述换道车辆最前方与所述前方车辆最后方之间的第一距离和所述换道车辆最后方与所述后方车辆最前方之间的第二距离,若所述第一距离与所述期望安全间距相等且所述第二距离大于或等于最小安全距离则符合换道条件。

[0202] 在本实施例中,将符合换道条件时,换道车辆所在的位置定义为换道车辆变道的起点,此时所述后方车辆与换道车辆协同机动满足换变条件,具体为:(1)换道车辆在变道起点后方时需要适当加速,换道车辆在变道起点前方时需要适当减速;(2)所述后方车辆减速,为换道车辆提供安全的变道空间。同时当换道条件满足后,将触发换道,这时所述后方车辆和换道车辆构成一个新的子系统,所述前方车辆和换道车辆构成另一个子系统,通过步骤S5到步骤S8的执行可以确保纵向行驶的安全。然后通过动态协同换道模型进行换道机动,直到整个换道过程完成,在换道过程中可以保证在纵向行驶安全的前提下完成整个换道。

[0203] 在本公开的一种具体实施方式中,所述步骤S3,还可以包括步骤S33、步骤S34和步骤S35。

[0204] 步骤S33、将所述分布式串级PID控制算法与正弦函数相结合,构建所述动态协同换道模型;

[0205] 步骤S34、基于所述动态协同换道模型、所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,得到所述换道车辆的期望换道轨迹,其中,所述换道车辆当前的

运行状态信息包括所述换道车辆当前的位置、速度和加速度；

[0206] 步骤S35、基于所述换道车辆的期望换道轨迹，得到所述换道车辆期望的偏航角和期望的前轮转角。

[0207] 在本公开的一种具体实施方式中，所述步骤S4，还可以包括步骤S41和步骤S42。

[0208] 步骤S41、基于所述换道车辆的车辆配置信息、所述换道车辆期望的偏航角和所述换道车辆期望的前轮转角，利用模型预测控制算法计算得到当前所述换道车辆的前轮转角的增加量；

[0209] 步骤S42、基于当前所述换道车辆的前轮转角的增加量，控制所述换道车辆加入所述车辆队列中。

[0210] 在本公开的一种具体实施方式中，所述步骤S42，还可以包括步骤S421、步骤S422和步骤S423。

[0211] 步骤S421基于所述换道车辆的前轮转角的增加量，控制所述换道车辆往所述车辆队列方向移动，得到第二结果，所述第二结果包括所述换道车辆移动后所述换道车辆的运行状态信息和所述换道车辆移动后所述前方车辆的位置信息；

[0212] 步骤S422、根据所述第二结果和所述动态协同换道模型更新所述换道车辆的期望换道轨迹，并基于更新后的换道轨迹更新所述换道车辆的前轮转角的增加量；

[0213] 步骤S423、基于更新后的前轮转角的增加量控制所述换道车辆继续往所述车辆队列方向移动，直至所述换道车辆加入到所述车辆队列中，其中所述换道车辆朝所述车辆队列前进方向的中心线与所述车辆队列的中心线重合时，则认定所述换道车辆已加入到所述车辆队列中。

[0214] 在本实施例中，当计算出换道车辆当前的前轮转角的增加量时，就会控制换道车辆往所述车辆队列方向移动，移动之后利用步骤S5到步骤S8的方法会计算出每辆车下一时刻的位置和速度，进而会更新所述换道车辆的前轮转角的增加量，不断更新换道车辆的前轮转角的增加量，换道车辆就会逐渐靠近车队，当换道车辆的竖向中心线（朝车队前进方向）与车队的竖向中心线（朝车队前进方向）重合时，则完成换道。通过实时更新换道车辆的前轮转角的增加量（相当于更新换道路径），既保证了换道的安全性，又提高了换道的灵活性。

[0215] 在本公开的一种具体实施方式中，所述步骤S6，还可以包括步骤S61。

[0216] 在本实施例中考虑一个由N个智能网联车（CAV）组成的队列，我们将同一车道上的任意两辆相邻车辆定义为子系统。设 $P_{i,i-1}$ 表示第i-1辆车和第i辆车组成的子系统。 $P_{i,i-1}$ 子系统中后车（也就是第i-1辆车）速度的变化是通过控制算法进行控制来实现的。我们假设队列中的每辆车都可以测量相邻两辆车之间的距离和前车速度，同时设 $x_i(t)$ ， $v_i(t)$ ， $a_i(t)$ 表示第i辆车在t时刻的位置、速度和加速度， $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

[0217] 本实施例提出一种分布式串级PID控制算法对车辆队列进行纵向控制。实际上，分布式串级PID是一种具有内环和外环的双层控制结构。外环PID控制相邻车辆之间的间距，内环PID控制车速。外环的输出作为内环的输入，与内环的反馈值进行比较，形成整个内外环双层控制，各分布式子系统的串级PID控制结构如图4所示。

[0218] 步骤S61、通过公式(1) - (10) 计算下一时刻所述每辆车的加速度，所述公式(1) - (10) 依次为：

[0219] $d_i(k) = x_{i-1}(k) - x_i(k) - l_{i-1} \quad (1)$

[0220] 公式(1)中, k 表示采样周期数; l_{i-1} 表示第*i*-1辆车的长度; d_i 表示第*i*辆车的前保险杠与第*i*-1辆车的后保险杠之间的测量距离; $x_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的位置; $x_{i-1}(k)$ 表示第*i*-1辆车在第*k*个采样时刻的位置,其中第*i*辆车与第*i*-1辆车相邻且第*i*-1辆车位于第*i*辆车前方;

[0221] $S_i(k) = d_0 + v_i(k) h_t \quad (2)$

[0222] 公式(2)中, S_i 表示第*i*辆车与第*i*-1辆车的期望间距; d_0 表示第*i*辆车与第*i*-1辆车的最小安全距离; h_t 表示恒定车头时距;为了简化问题,假设所有子系统都具有相同的 d_0 和 h_t ; $v_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的速度;

[0223] 分布式串级PID控制算法的目标是使各子系统保持期望的间距和一致的速度,并对任何车辆受到的干扰进行快速响应,从而保证整个队列的稳定性,其中,间距误差 e_{xi} 和速度误差 \dot{e}_{xi} 被用于衡量控制目标,将其定义为:

[0224]
$$\begin{aligned} e_{xi}(k) &= d_i(k) - S_i(k) \\ \dot{e}_{xi}(k) &= v_{i-1}(k) - v_i(k) \end{aligned} \quad (3)$$

[0225] 公式(3)中, k 表示采样周期数; $e_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的间距误差,其中 $P_{i,i-1}$ 表示第*i*辆车和第*i*-1辆车组成的子系统; $\dot{e}_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的速度误差; d_i 表示第*i*辆车的前保险杠与第*i*-1辆车的后保险杠之间的测量距离; $v_{i-1}(k)$ 表示第*i*-1辆车在第*k*个采样时刻的速度; $v_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的速度; S_i 表示第*i*辆车与第*i*-1辆车的期望间距;

[0226] $P_{i,i-1}$ 子系统的外环PID控制算法方程为:

[0227] $\partial_i(k) = K_{px}^i e_{xi}(k) + K_{ix}^i \sum_{j=0}^k e_{xi}(j) + K_{dx}^i [e_{xi}(k) - e_{xi}(k-1)] \quad (4)$

[0228] $e_{xi}(k) = d_i(k) - S_i(k) \quad (5)$

[0229] 公式(4) - (5)中, $\partial_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的外环PID在第*k*个采样时刻的输出; K_{px}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的比例系数; K_{ix}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的积分系数; K_{dx}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的微分系数, $e_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的间距误差; $e_{xi}(k-1)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*-1个采样时刻的间距误差, $j \in \{0, 1, \dots, k\}$;

[0230] $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID控制算法方程为:

[0231] $u_i(k) = K_{pv}^i e_{vi}(k) + K_{iv}^i \sum_{j=0}^k e_{vi}(j) + K_{dv}^i [e_{vi}(k) - e_{vi}(k-1)] \quad (6)$

[0232] $\dot{e}_{xi}(k) = v_{i-1}(k) - v_i(k) \quad (7)$

[0233] $e_{vi}(k) = \partial_i(k) - \dot{e}_{xi}(k) \quad (8)$

[0234] 公式(6) - (8)中, $\dot{e}_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的速度误差; $e_{vi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第*k*个采样时刻的输入; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第*k*个采样时刻的输出; K_{pv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的比例系数; K_{iv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环

PID的积分系数; K_{dv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的微分系数; $j \in \{0, 1, \dots, k\}$;

[0235] T_s 代表采样时间,各个子系统第 $k+1$ 个采样时刻的加速度计算公式为:

$$[0236] \quad a_i(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{\tau_i}\right) a_i(k) + \frac{T_s}{\tau_i} u_i(k) \quad (9)$$

[0237] 公式(9)中, $a_i(k+1)$ 表示第 i 辆车在第 $k+1$ 个采样时刻的加速度; $a_i(k)$ 表示第 i 辆车在第 k 个采样时刻的加速度; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第 k 个采样时刻的输出; τ_i 表示第 i 辆车的纵向动力学惯性滞后;

[0238] 同时,对每个子系统进行约束,约束条件如下:

$$[0239] \quad \begin{aligned} u_{min} &\leq u_i(k) \leq u_{max} \\ a_{min} &\leq a_i(k) \leq a_{max} \\ v_{min} &\leq v_i(k) \leq v_{max} \end{aligned} \quad (10)$$

[0240] 公式(10)中, u_{min} 表示控制输出的最小值; u_{max} 表示控制输出的最大值; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第 k 个采样时刻的输出; a_{min} 表示最小加速度; a_{max} 表示最大加速度; v_{min} 是道路上允许的最小速度; v_{max} 是道路上允许的最大速度。

[0241] 其中,公式(10)中的第一个约束考虑车辆性能限制,第二个约束与乘客舒适度有关,第三个约束反映道路状况。本实施例考虑智能网联车的异质性,其中不同的网联车具有不同的惯性滞后值。

[0242] 在本公开的一种具体实施方式中,所述步骤S7,还可以包括步骤S71。

[0243] 步骤S71、通过公式(11)和(12)计算下一时刻每辆车的位置信息和速度,所述公式(11)和(12)为:

$$[0244] \quad v_i(k+1) = a_i(k+1) * T_s \quad (11)$$

$$[0245] \quad x_i(k+1) = v_i(k) * T_s + \frac{1}{2} a_i(k+1) * T_s^2 \quad (12)$$

[0246] 公式(11) - (12)中, T_s 表示采样时间; $a_i(k+1)$ 表示第 i 辆车在第 $k+1$ 个采样时刻的加速度; $v_i(k)$ 表示第 i 辆车在第 k 个采样时刻的速度; $v_i(k+1)$ 表示第 i 辆车在第 $k+1$ 个采样时刻的速度; $x_i(k+1)$ 表示第 i 辆车在第 $k+1$ 个采样时刻的位置。

[0247] 在本公开的一种具体实施方式中,所述步骤S3,还可以包括步骤S36。

[0248] 本实施例将分布式串级PID控制算法与正弦函数相结合,提出了一种新的动态协同换道模型。换道开始后,换道车辆和所述前方车辆被视为一个新的子系统,由分布式串级PID控制算法控制。分布式串级PID控制算法在避免两车碰撞的前提下,通过考虑两车的相对速度和距离,计算换道车辆的加速度,实时更新车速。然后,将速度实时传递到正弦函数模型,以规划动态换道轨迹。在换道过程中,动态协同换道模型可以随着前方车辆速度的变化实时更新换道路径,既保证了换道的安全性,又提高了换道的灵活性。

[0249] 步骤S36、通过公式(13) - (18)计算所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角,所述公式(13) - (18)依次为:

$$[0250] \quad \left\{ \begin{array}{l} y_d^0 = y_{TFV}^0 - y_{SV}^0 \\ a_{SV}(t + T_s) = F_{DCPID}(x_{SV}(t), x_{TFV}(t), v_{SV}(t), v_{TFV}(t)) \\ v_{SV}(t + T_s) = v_{SV}(t) + a_{SV}(t + T_s) * T_s, t \in [t_0, t_e] \\ y_r(x_r) = y_{SV}^0 + \frac{y_d^0}{2\pi} \left\{ \frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) - \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \\ x_r \in \left[x_{SV}^0, x_{SV}^0 + v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}} \right] \end{array} \right. \quad (13)$$

[0251] 公式(13)中, x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的纵向位置; y_{TFV}^0 表示换道开始时刻目标车道上所述前方车辆的位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; (x_r, y_r) 表示换道车辆的期望位置; t_0 表示换道开始时间; t_e 表示换道结束时间; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在 t 时刻的速度; $v_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在 $t+T_s$ 时刻的速度; $a_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在 $t+T_s$ 时刻的加速度;

$$[0252] \quad y_r'(x_r) = \frac{y_d^0}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \quad (14)$$

$$[0253] \quad y_r''(x_r) = \frac{\pi a_L}{v_{SV}^2(t)} \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \quad (15)$$

$$[0254] \quad K = \frac{y_r''}{(1+y_r'^2)^{3/2}} \quad (16)$$

[0255] 公式(14) - (16)中, x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在 t 时刻的速度; x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_r' 表示 y_r 的一阶导数; y_r'' 表示 y_r 的二阶导数; K 表示 y_r 的曲率;

$$[0256] \quad \varphi_r = \tan^{-1}(y_r') \quad (17)$$

$$[0257] \quad \delta_{fr} = \tan^{-1}(L*K) \quad (18)$$

[0258] 公式(17) - (18)中, φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; φ_r 和 δ_{fr} 两者均为弧度制, L 表示车辆前后轴之间的距离; y_r' 表示 y_r 的一阶导数。

[0259] 在本公开的一种具体实施方式中, 所述步骤S41, 还可以包括步骤S411。

[0260] 本实施例中利用模型预测控制算法计算得到每个采样时刻的前轮转角的增加量, 从而完成横向控制的换道过程。

[0261] 步骤S411、通过公式(19) - (24) 计算得到当前所述换道车辆的前轮转角的增加量,

公式(19) - (24)为:

[0262] 为了简化微观车辆控制,我们使用三自由度的运动学模型来描述车辆状态。利用三自由度的运动学模型来描述车辆状态,为公式(19):

$$[0263] \quad [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\varphi}]^T = [\cos \varphi \quad \sin \varphi \quad \tan \delta_f / l]^T \cdot v \quad (19)$$

[0264] 公式(19)中,(x,y)表示车辆后轴中心坐标; φ 表示车辆偏航角; δ_f 表示车辆前轮转角;l表示车辆前后轴距离;v表示车辆速度;

[0265] 采用模型预测控制算法对期望轨迹进行实时跟踪控制,模型预测控制算法的跟踪控制系统描述为公式(20) - (21):

$$[0266] \quad \tilde{\Phi}(k+1) = A(k)\tilde{\Phi}(k) + B(k)\Delta\tilde{u}(k) \quad (20)$$

$$[0267] \quad \tilde{\Phi}(k) \triangleq \begin{bmatrix} X(k) - X_r(k) \\ u(k) - u_r(k) \end{bmatrix} \quad (21)$$

[0268] 公式(20) - (21)中, $X = [x \quad y \quad \varphi]^T$ 表示车辆的当前状态; $u = [v \quad \delta_f]^T$ 表示车辆的当前控制变量,其中v表示换道车辆的速度, δ_f 表示换道车辆的前轮转角; $X_r = [x_r \quad y_r \quad \varphi_r]^T$ 表示从参考轨迹上获得的期望状态; $u_r = [v_r \quad \delta_{fr}]^T$ 表示从参考轨迹上获得的期望控制变量; x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; v_r 表示换道车辆期望的速度;

[0269] 模型预测控制算法的最小成本函数描述为:

$$[0270] \quad \min J(k) = [\Delta U(k)^T, \varepsilon]^T H(k) [\Delta U(k)^T, \varepsilon] + f^T(k) [\Delta U(k)^T, \varepsilon] \quad (22)$$

$$[0271] \quad H(k) \triangleq \begin{bmatrix} \overline{B}_k^T \overline{Q} \overline{B}_k + \overline{R} & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$f(k)^T = [2\overline{A}_k^T \overline{Q} \overline{B}_k \quad 0]$$

[0272] 约束条件为:

$$[0273] \quad \begin{cases} \Delta U_{min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{max} \\ U_{min} \leq A\Delta U(k) + U(k-1) \leq U_{max} \end{cases} \quad (24)$$

[0274] 公式(22) - (24)中,k表示采样周期数;J(k)表示第k个采样时刻的成本函数; $\Delta U(k)$ 表示第k个采样时刻的控制变量的增量(其中控制变量的增量包括换道车辆的速度增量和换道车辆的前轮转角增量); U_{min} 表示控制变量的最小约束; U_{max} 表示控制变量的最大约束; ΔU_{min} 表示控制变量增量的最小约束值; ΔU_{max} 表示控制变量增量的最大约束值; ε 表示松弛因子; ρ 表示权重系数; \overline{Q} 表示输入状态量的权重矩阵; \overline{R} 表示控制变量增量的权重矩阵; \overline{A}_k 表示输入状态量的预测矩阵; \overline{B}_k 表示控制变量增量的预测矩阵;A表示约束方程的系数矩阵;H(k)和f(k)均表示二次优化问题标准形式的系数矩阵,也就是说H(k)表示二次优化问题标准形式的一个系数矩阵,f(k)表示二次优化问题标准形式的另一个系数矩阵;

[0275] 实施例2

[0276] 如图2所示,本实施例提供了一种车辆换道装置,所述装置包括第一获取模块701、

第一计算模块702、第二计算模块703和第一控制模块704。

[0277] 所述第一获取模块701,用于获取第一信息和第二信息,所述第一信息包括换道车辆发送的加入车辆队列的请求;所述第二信息包括所述换道车辆当前的运行状态信息和所述换道车辆的车辆配置信息;

[0278] 所述第一计算模块702,用于根据所述第一信息,确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和后方的车辆,将所述前方的车辆定义为前方车辆,将所述后方的车辆定义为后方车辆,并获取所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息;

[0279] 所述第二计算模块703,用于根据所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息判断是否符合换道条件,若符合换道条件则基于所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,利用动态协同换道模型计算得到所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角;

[0280] 所述第一控制模块704,用于基于所述换道车辆期望的偏航角、所述换道车辆期望的前轮转角和所述换道车辆的车辆配置信息,发送控制命令,所述控制命令用于控制所述换道车辆加入所述车辆队列中的命令。

[0281] 在本公开的一种具体实施方式中,所述装置,还包括第二获取模块705、第三计算模块706、第四计算模块707和第二控制模块708。

[0282] 所述第二获取模块705,用于获取第三信息,所述第三信息包括所述车辆队列中每辆车当前的运行状态信息,所述每辆车当前的运行状态信息包括所述每辆车当前的位置信息、所述每辆车当前的速度和所述每辆车当前的加速度;

[0283] 所述第三计算模块706,用于基于所述每辆车当前的运行状态信息,利用分布式串级PID纵向控制算法计算得到下一时刻所述每辆车的加速度;

[0284] 所述第四计算模块707,用于根据所述每辆车当前的运行状态信息和所述下一时刻所述每辆车的加速度计算得到下一时刻每辆车的位置信息和速度;

[0285] 所述第二控制模块708,用于基于所述下一时刻每辆车的位置信息和速度,控制下一时刻所述每辆车的位置和速度。

[0286] 在本公开的一种具体实施方式中,所述第一计算模块702,还包括查询单元7021和确定单元7022。

[0287] 所述查询单元7021,用于基于所述换道车辆发送的加入所述车辆队列的请求查询得到第一结果,所述第一结果包括所述换道车辆所要加入的所述车辆队列中每辆车离开所述车辆队列的顺序和所述换道车辆加入所述车辆队列后所述换道车辆离开所述车辆队列的顺序;

[0288] 所述确定单元7022,用于基于所述第一结果确定所述换道车辆加入所述车辆队列后,在所述车辆队列中的相对位置,根据所述相对位置确定所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆前方的车辆和所述换道车辆加入所述车辆队列后位于所述换道车辆后方的车辆。

[0289] 在本公开的一种具体实施方式中,所述第二计算模块703,还包括获取单元7031和第一计算单元7032。

[0290] 所述获取单元7031,用于获取期望安全间距和最小安全距离;

[0291] 所述第一计算单元7032,用于根据所述换道车辆当前的运行状态信息、所述前方车辆当前的位置信息和所述后方车辆当前的位置信息,计算得到所述换道车辆最前方与所述前方车辆最后方之间的第一距离和所述换道车辆最后方与所述后方车辆最前方之间的第二距离,若所述第一距离与所述期望安全间距相等且所述第二距离大于或等于最小安全距离则符合换道条件。

[0292] 在本公开的一种具体实施方式中,所述第二计算模块703,还包括构建单元7033、第二计算单元7034和第三计算单元7035。

[0293] 所述构建单元7033,用于将所述分布式串级PID控制算法与正弦函数相结合,构建所述动态协同换道模型;

[0294] 所述第二计算单元7034,用于基于所述动态协同换道模型、所述前方车辆当前的位置信息和所述换道车辆当前的运行状态信息,得到所述换道车辆的期望换道轨迹,其中,所述换道车辆当前的运行状态信息包括所述换道车辆当前的位置、速度和加速度;

[0295] 所述第三计算单元7035,用于基于所述换道车辆的期望换道轨迹,得到所述换道车辆期望的偏航角和期望的前轮转角。

[0296] 在本公开的一种具体实施方式中,所述第一控制模块704,还包括第四计算单元7041和控制单元7042。

[0297] 所述第四计算单元7041,用于基于所述换道车辆的车辆配置信息、所述换道车辆期望的偏航角和所述换道车辆期望的前轮转角,利用模型预测控制算法计算得到当前所述换道车辆前轮转角的增加量;

[0298] 所述控制单元7042,用于基于当前所述换道车辆前轮转角的增加量,控制所述换道车辆加入所述车辆队列中。

[0299] 在本公开的一种具体实施方式中,所述控制单元7042,还包括第一控制子单元70421、更新子单元70422和第二控制子单元70423。

[0300] 所述第一控制子单元70421,用于基于所述当前车辆前轮转角的增加量,控制所述换道车辆往所述车辆队列方向移动,得到第二结果,所述第二结果包括所述换道车辆移动后所述换道车辆的运行状态信息和所述换道车辆移动后所述前方车辆的位置信息;

[0301] 所述更新子单元70422,用于根据所述第二结果和所述动态协同换道模型更新所述换道车辆的期望换道轨迹,并基于更新后的换道轨迹更新所述换道车辆的前轮转角的增加量;

[0302] 所述第二控制子单元70423,用于基于更新后的前轮转角的增加量控制所述换道车辆继续往所述车辆队列方向移动,直至所述换道车辆加入到所述车辆队列中,其中所述换道车辆朝所述车辆队列前进方向的中心线与所述车辆队列的中心线重合时,则认定所述换道车辆已加入到所述车辆队列中。

[0303] 在本公开的一种具体实施方式中,所述第三计算模块706,还包括第五计算单元7061。

[0304] 所述第五计算单元7061,用于通过公式(1)-(10)计算下一时刻所述每辆车的加速度,所述公式(1)-(10)依次为:

$$d_i(k) = x_{i-1}(k) - x_i(k) - l_{i-1} \quad (1)$$

[0306] 公式(1)中, k 表示采样周期数; l_{i-1} 表示第*i*-1辆车的长度; d_i 表示第*i*辆车的前保

保险杠与第*i*-1辆车的后保险杠之间的测量距离; $x_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的位置; $x_{i-1}(k)$ 表示第*i*-1辆车在第*k*个采样时刻的位置,其中第*i*辆车与第*i*-1辆车相邻且第*i*-1辆车位于第*i*辆车前方;

$$[0307] \quad S_i(k) = d_0 + v_i(k) h_t \quad (2)$$

[0308] 公式(2)中, S_i 表示第*i*辆车与第*i*-1辆车的期望间距; d_0 表示第*i*辆车与第*i*-1辆车的最小安全距离; h_t 表示恒定车头时距;假设所有子系统都具有相同的 d_0 和 h_t ; $v_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的速度;

[0309] 间距误差 e_{xi} 和速度误差 \dot{e}_{xi} 被用于衡量控制目标,将其定义为:

$$[0310] \quad \begin{aligned} e_{xi}(k) &= d_i(k) - S_i(k) \\ \dot{e}_{xi}(k) &= v_{i-1}(k) - v_i(k) \end{aligned} \quad (3)$$

[0311] 公式(3)中, k 表示采样周期数; $e_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的间距误差,其中 $P_{i,i-1}$ 表示第*i*辆车和第*i*-1辆车组成的子系统; $\dot{e}_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的速度误差; d_i 表示第*i*辆车的前保险杠与第*i*-1辆车的后保险杠之间的测量距离; $v_{i-1}(k)$ 表示第*i*-1辆车在第*k*个采样时刻的速度; $v_i(k)$ 表示第*i*辆车在第*k*个采样时刻的速度; S_i 表示第*i*辆车与第*i*-1辆车的期望间距;

[0312] $P_{i,i-1}$ 子系统的外环PID控制算法方程为:

$$[0313] \quad \partial_i(k) = K_{px}^i e_{xi}(k) + K_{ix}^i \sum_{j=0}^k e_{xi}(j) + K_{dx}^i [e_{xi}(k) - e_{xi}(k-1)] \quad (4)$$

$$[0314] \quad e_{xi}(k) = d_i(k) - S_i(k) \quad (5)$$

[0315] 公式(4)-(5)中, $\partial_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的外环PID在第*k*个采样时刻的输出; K_{px}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的比例系数; K_{ix}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的积分系数; K_{dx}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统外环PID的微分系数; $e_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的间距误差; $e_{xi}(k-1)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*-1个采样时刻的间距误差, $j \in \{0, 1, \dots, k\}$;

[0316] $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID控制算法方程为:

$$[0317] \quad u_i(k) = K_{pv}^i e_{vi}(k) + K_{iv}^i \sum_{j=0}^k e_{vi}(j) + K_{dv}^i [e_{vi}(k) - e_{vi}(k-1)] \quad (6)$$

$$[0318] \quad \dot{e}_{xi}(k) = v_{i-1}(k) - v_i(k) \quad (7)$$

$$[0319] \quad e_{vi}(k) = \partial_i(k) - \dot{e}_{xi}(k) \quad (8)$$

[0320] 公式(6)-(8)中, $\dot{e}_{xi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统在第*k*个采样时刻的速度误差; $e_{vi}(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第*k*个采样时刻的输入; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第*k*个采样时刻的输出; K_{pv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的比例系数; K_{iv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的积分系数; K_{dv}^i 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统内环PID的微分系数; $j \in \{0, 1, \dots, k\}$;

[0321] T_s 代表采样时间,各个子系统第*k*+1个采样时刻的加速度计算公式为:

$$[0322] \quad a_i(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{\tau_i}\right) a_i(k) + \frac{T_s}{\tau_i} u_i(k) \quad (9)$$

[0323] 公式(9)中, $a_i(k+1)$ 表示第*i*辆车在第*k*+1个采样时刻的加速度; $a_i(k)$ 表示第*i*辆车

在第k个采样时刻的加速度; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第k个采样时刻的输出; τ_i 表示第i辆车的纵向动力学惯性滞后;

[0324] 同时,对每个子系统进行约束,约束条件如下:

$$\begin{aligned} & u_{min} \leq u_i(k) \leq u_{max} \\ [0325] \quad & a_{min} \leq a_i(k) \leq a_{max} \\ & v_{min} \leq v_i(k) \leq v_{max} \end{aligned} \quad (10)$$

[0326] 公式(10)中, u_{min} 表示控制输出的最小值; u_{max} 表示控制输出的最大值; $u_i(k)$ 表示 $P_{i,i-1}$ 子系统的内环PID在第k个采样时刻的输出; a_{min} 表示最小加速度; a_{max} 表示最大加速度; v_{min} 是道路上允许的最小速度; v_{max} 是道路上允许的最大速度。

[0327] 在本公开的一种具体实施方式中,所述第四计算模块707,还包括第六计算单元7071。

[0328] 所述第六计算单元7071,用于通过公式(11)和(12)计算下一时刻每辆车的位置信息和速度,所述公式(11)和(12)为:

$$[0329] \quad v_i(k+1) = a_i(k+1) * T_s \quad a11)$$

$$[0330] \quad x_i(k+1) = v_i(k) * T_s + \frac{1}{2} a_i(k+1) * T_s^2 \quad (12)$$

[0331] 公式(11)-(12)中, T_s 表示采样时间; $a_i(k+1)$ 表示第i辆车在第k+1个采样时刻的加速度; $v_i(k)$ 表示第i辆车在第k个采样时刻的速度; $v_i(k+1)$ 表示第i辆车在第k+1个采样时刻的速度; $x_i(k+1)$ 表示第i辆车在第k+1个采样时刻的位置。

[0332] 在本公开的一种具体实施方式中,所述第二计算模块703,还包括第七计算单元7036。

[0333] 所述第七计算单元7036,用于通过公式(13)-(18)计算所述换道车辆期望的偏航角和前轮转角,所述公式(13)-(18)依次为:

$$[0334] \quad \left\{ \begin{array}{l} y_d^0 = y_{TFV}^0 - y_{SV}^0 \\ a_{SV}(t+T_s) = F_{DCPID}(x_{SV}(t), x_{TFV}(t), v_{SV}(t), v_{TFV}(t)) \\ v_{SV}(t+T_s) = v_{SV}(t) + a_{SV}(t+T_s) * T_s, t \in [t_0, t_e] \\ y_r(x_r) = y_{SV}^0 + \frac{y_d^0}{2\pi} \left\{ \frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) - \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \\ x_r \in \left[x_{SV}^0, x_{SV}^0 + v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}} \right] \end{array} \right. \quad (13)$$

[0335] 公式(13)中, x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的纵向位置; y_{TFV}^0 表示换道开始时刻目标车道上所述前方车辆的位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; (x_r, y_r) 表示换道车辆的期望位置; t_0 表示换道开始时间; t_e 表示换道结束时间; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在t时刻的速度; $v_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在t+ T_s 时刻的速度; $a_{SV}(t+T_s)$ 表示换道车辆在t+ T_s 时刻的加速度;

$$[0336] \quad y_r'(x_r) = \frac{y_d^0}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \right\} \quad (14)$$

$$[0337] \quad y_r''(x_r) = \frac{\pi a_L}{v_{SV}^2(t)} \sin \left[\frac{2\pi}{v_{SV}(t) \sqrt{\frac{2|y_d^0|}{a_L}}} (x_r - x_{SV}^0) \right] \quad (15)$$

$$[0338] \quad K = \frac{y_r''}{(1+y_r'^2)^{3/2}} \quad (16)$$

[0339] 公式(14) - (16)中, x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; y_d^0 表示换道开始时的侧向距离; a_L 表示规划加速度; $v_{SV}(t)$ 表示换道车辆在t时刻的速度; x_{SV}^0 表示换道开始时刻换道车辆的横向位置; y_r' 表示 y_r 的一阶导数; y_r'' 表示 y_r 的二阶导数; K 表示 y_r 的曲率;

$$[0340] \quad \varphi_r = \tan^{-1}(y_r') \quad (17)$$

$$[0341] \quad \delta_{fr} = \tan^{-1}(L*K) \quad (18)$$

[0342] 公式(17) - (18)中, φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; φ_r 和 δ_{fr} 两者均为弧度制, L 表示车辆前后轴之间的距离; y_r' 表示 y_r 的一阶导数。

[0343] 在本公开的一种具体实施方式中, 所述第四计算单元7041, 还包括计算子单元70411。

[0344] 所述计算子单元70411, 用于通过公式(19) - (24)计算得到当前所述换道车辆前轮转角的增加量, 公式(19) - (24)为:

[0345] 利用三自由度的运动学模型来描述车辆状态, 公式为:

$$[0346] \quad [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\varphi}]^T = [\cos \varphi \quad \sin \varphi \quad \tan \delta_f / l]^T \cdot v \quad (19)$$

[0347] 公式(19)中, (x, y) 表示车辆后轴中心坐标; φ 表示车辆偏航角; δ_f 表示车辆前轮转角; l 表示车辆前后轴距; v 表示车辆速度;

$$[0348] \quad \tilde{\Phi}(k+1) = A(k)\tilde{\Phi}(k) + B(k)\Delta\tilde{u}(k) \quad (20)$$

$$[0349] \quad \tilde{\Phi}(k) \triangleq \begin{bmatrix} X(k) - X_r(k) \\ u(k) - u_r(k) \end{bmatrix} \quad (21)$$

[0350] 公式(20) - (21)中, $X = [x \quad y \quad \varphi]^T$ 表示车辆的当前状态; $u = [v \quad \delta_f]^T$ 表示车辆的当前控制变量, 其中 v 表示换道车辆的速度, δ_f 表示换道车辆的前轮转角; $X_r = [x_r \quad y_r \quad \varphi_r]^T$ 表示从参考轨迹上获得的期望状态; $u_r = [v_r \quad \delta_{fr}]^T$ 表示从参考轨迹上获得的期望控制变量; x_r 表示换道车辆的期望纵向位置; y_r 表示换道车辆的期望横向位置; φ_r 表示换道车辆期望的偏航角; δ_{fr} 表示换道车辆期望的前轮转角; v_r 表示换道车辆期

望的速度；

[0351] 模型预测控制算法的最小成本函数描述为：

$$[0352] \quad \min J(k) = [\Delta U(k)^T, \varepsilon]^T H(k) [\Delta U(k)^T, \varepsilon] + f^T(k) [\Delta U(k)^T, \varepsilon] \quad (22)$$

$$[0353] \quad H(k) \triangleq \begin{bmatrix} \bar{B}_k^T \bar{Q} \bar{B}_k + \bar{R} & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$f(k)^T = [2\bar{A}_k^T \bar{Q} \bar{B}_k \quad 0]$$

[0354] 约束条件为：

$$[0355] \quad \begin{cases} \Delta U_{min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{max} \\ U_{min} \leq A\Delta U(k) + U(k-1) \leq U_{max} \end{cases} \quad (24)$$

[0356] 公式(22) - (24)中, k表示采样周期数; J(k)表示第k个采样时刻的成本函数; $\Delta U(k)$ 表示第k个采样时刻的控制变量的增量; U_{min} 表示控制变量的最小约束; U_{max} 表示控制变量的最大约束; ΔU_{min} 表示控制变量增量的最小约束值; ΔU_{max} 表示控制变量增量的最大约束值; ε 表示松弛因子; ρ 表示权重系数; \bar{Q} 表示输入状态量的权重矩阵; \bar{R} 表示控制变量增量的权重矩阵; \bar{A}_k 表示输入状态量的预测矩阵; \bar{B}_k 表示控制变量增量的预测矩阵; A表示约束方程的系数矩阵; H(k)和f(k)均表示二次优化问题标准形式的系数矩阵。

[0357] 需要说明的是,关于上述实施例中的装置,其中各个模块执行操作的具体方式已经在有关该方法的实施例中进行了详细描述,此处将不做详细阐述说明。

[0358] 实施例3

[0359] 相应于上面的方法实施例,本公开实施例还提供了车辆换道设备,下文描述的车辆换道设备与上文描述的车辆换道方法可相互对应参照。

[0360] 图3是根据一示例性实施例示出的车辆换道设备800的框图。如图3所示,该车辆换道设备800可以包括:处理器801,存储器802。该车辆换道设备800还可以包括多媒体组件803,输入/输出(I/O)接口804,以及通信组件805中的一者或多者。

[0361] 其中,处理器801用于控制该车辆换道设备800的整体操作,以完成上述的车辆换道方法中的全部或部分步骤。存储器802用于存储各种类型的数据以支持在该车辆换道设备800的操作,这些数据例如可以包括用于在该车辆换道设备800上操作的任何应用程序或方法的指令,以及应用程序相关的数据,例如联系人数据、收发的消息、图片、音频、视频等等。该存储器802可以由任何类型的易失性或非易失性存储设备或者它们的组合实现,例如静态随机存取存储器(Static Random Access Memory,简称SRAM),电可擦除可编程只读存储器(Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory,简称EEPROM),可擦除可编程只读存储器(Erasable Programmable Read-Only Memory,简称EPROM),可编程只读存储器(Programmable Read-Only Memory,简称PROM),只读存储器(Read-Only Memory,简称ROM),磁存储器,快闪存储器,磁盘或光盘。多媒体组件803可以包括屏幕和音频组件。其中屏幕例如可以是触摸屏,音频组件用于输出和/或输入音频信号。例如,音频组件可以包括一个麦克风,麦克风用于接收外部音频信号。所接收的音频信号可以被进一步存储在存储器802或通过通信组件805发送。音频组件还包括至少一个扬声器,用于输出音频信号。I/O接口804为处理器801和其他接口模块之间提供接口,上述其他接口模块可以是键盘,鼠标,

按钮等。这些按钮可以是虚拟按钮或者实体按钮。通信组件805用于该车辆换道设备800与其他设备之间进行有线或无线通信。无线通信,例如Wi-Fi,蓝牙,近场通信(Near Field Communication,简称NFC),2G、3G或4G,或它们中的一种或几种的组合,因此相应的该通信组件805可以包括:Wi-Fi模块,蓝牙模块,NFC模块。

[0362] 在一示例性实施例中,该车辆换道设备800可以被一个或多个应用专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit,简称ASIC)、数字信号处理器(Digital Signal Processor,简称DSP)、数字信号处理设备(Digital Signal Processing Device,简称DSPD)、可编程逻辑器件(Programmable Logic Device,简称PLD)、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array,简称FPGA)、控制器、微控制器、微处理器或其他电子元件实现,用于执行上述的车辆换道方法。

[0363] 在另一示例性实施例中,还提供了一种包括程序指令的计算机可读存储介质,该程序指令被处理器执行时实现上述的车辆换道方法的步骤。例如,该计算机可读存储介质可以为上述包括程序指令的存储器802,上述程序指令可由该车辆换道设备800的处理器801执行以完成上述的车辆换道方法。

[0364] 实施例4

[0365] 相应于上面的方法实施例,本公开实施例还提供了一种可读存储介质,下文描述的一种可读存储介质与上文描述的车辆换道方法可相互对应参照。

[0366] 一种可读存储介质,可读存储介质上存储有计算机程序,计算机程序被处理器执行时实现上述方法实施例的车辆换道方法的步骤。

[0367] 该可读存储介质具体可以为U盘、移动硬盘、只读存储器(Read-Only Memory, ROM)、随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)、磁碟或者光盘等各种可存储程序代码的可读存储介质。

[0368] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

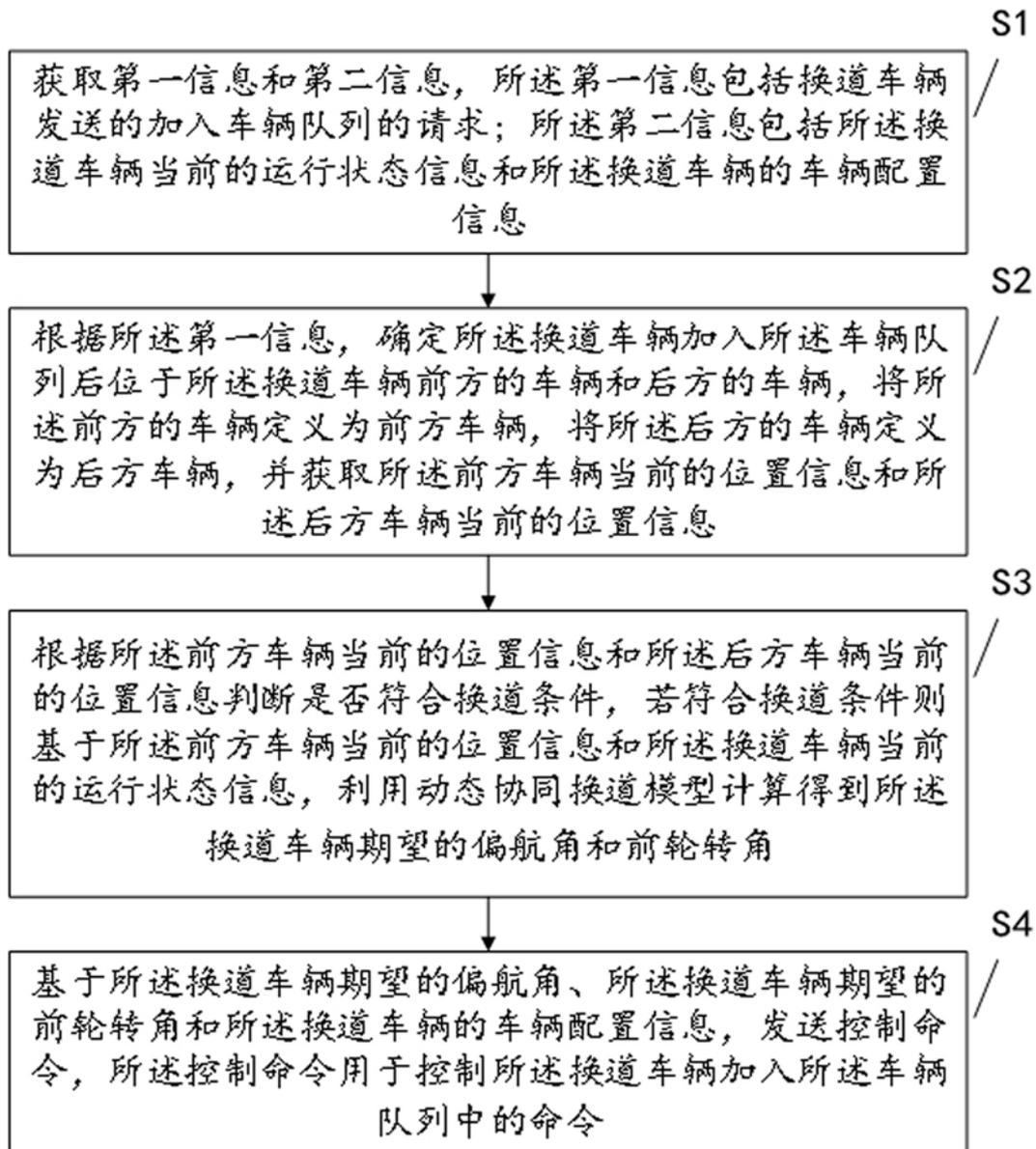


图1

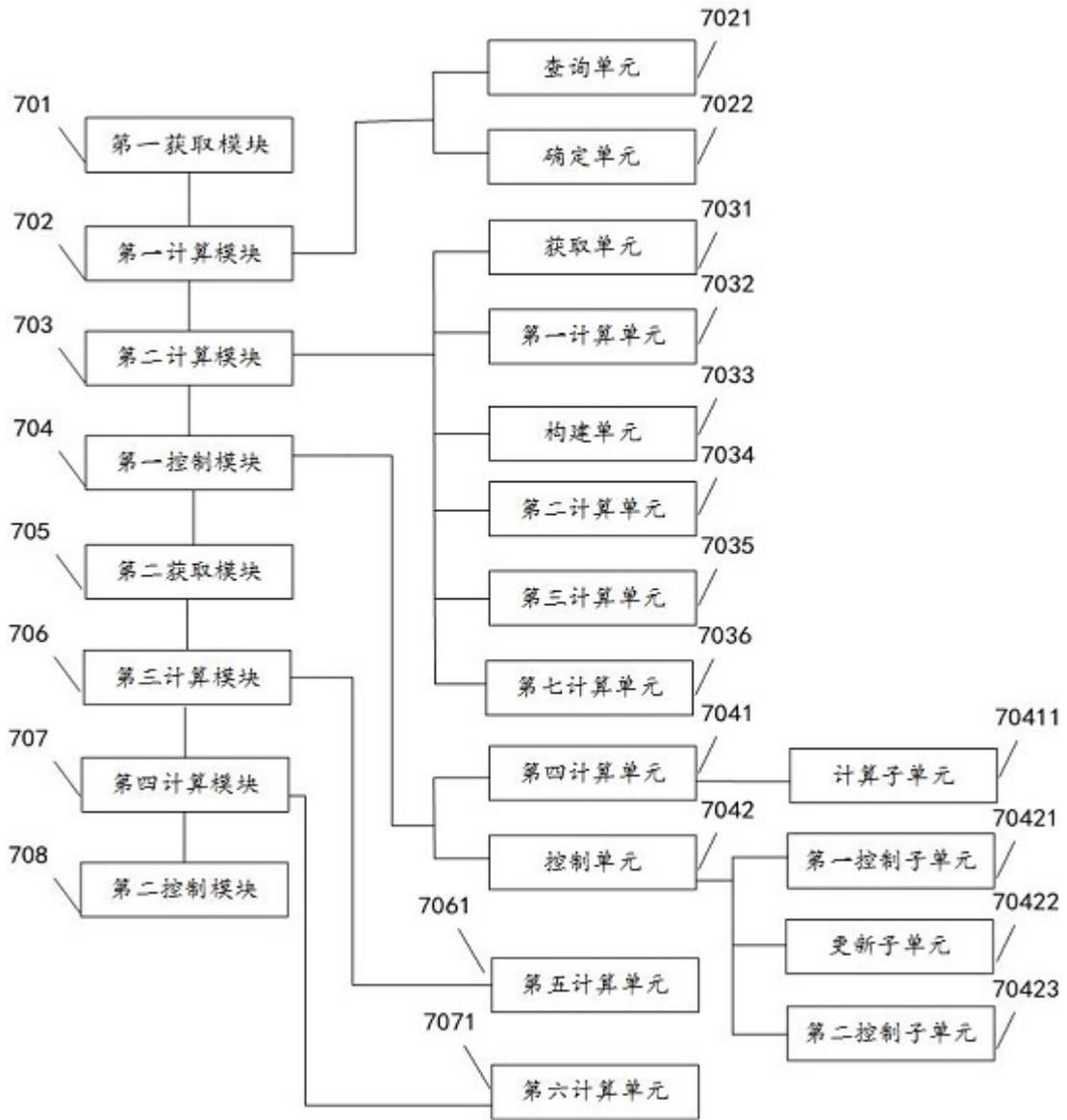


图2

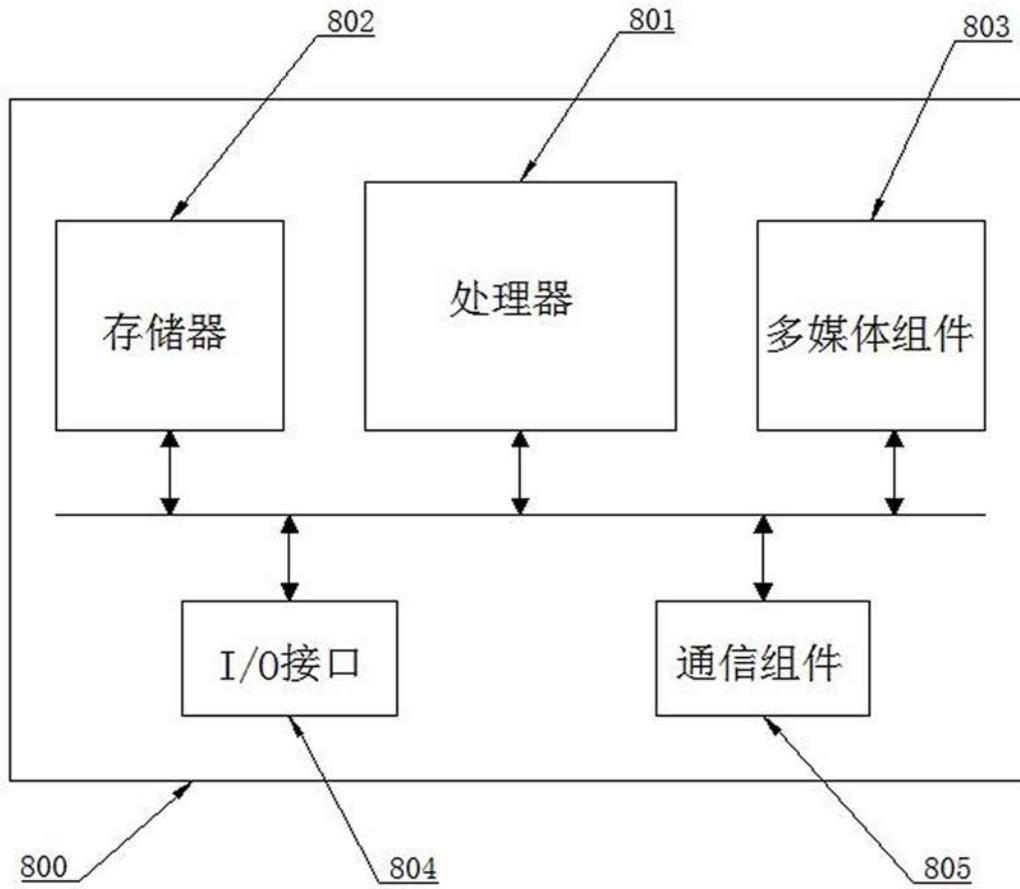


图3

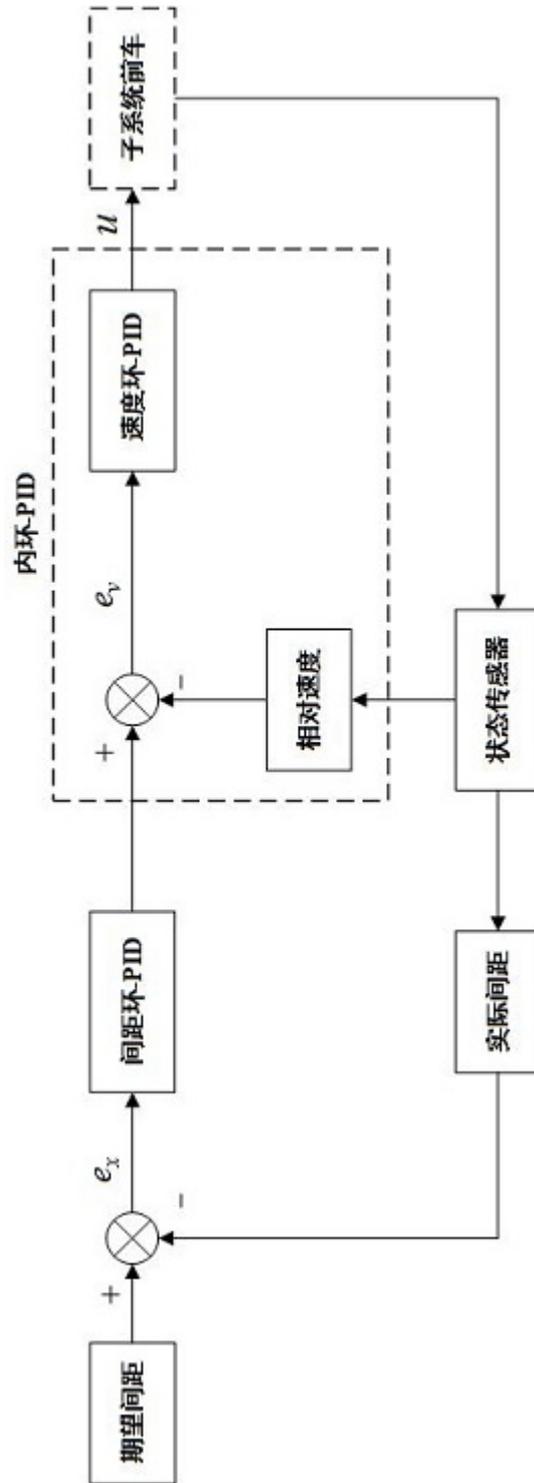


图4