



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115320596 A

(43) 申请公布日 2022. 11. 11

(21) 申请号 202210974262.2

(22) 申请日 2022.08.15

(71) 申请人 同济大学

地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

(72) 发明人 胡笏 王浩然 严学润 熊璐

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

专利代理师 叶敏华

(51) Int. Cl.

B60W 30/18 (2012.01)

B60W 50/00 (2006.01)

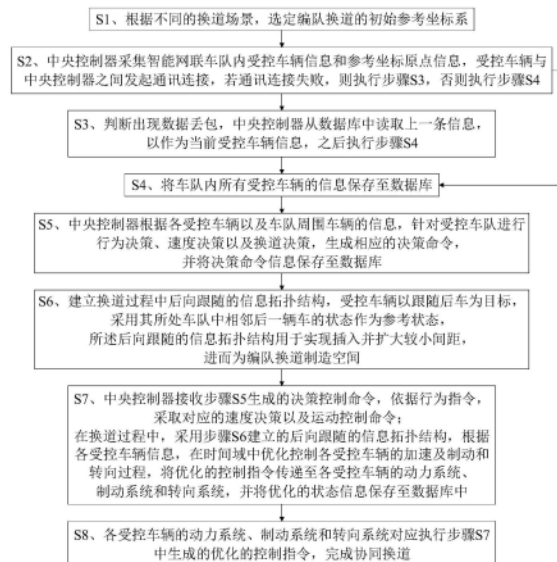
权利要求书5页 说明书12页 附图1页

(54) 发明名称

一种智能网联车队插入式协同换道控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,包括:中央控制器采集智能网联车队内受控车辆信息和参考坐标原点信息,针对受控车队进行行为、速度以及换道决策;建立后向跟随的信息拓扑结构,受控车辆以跟随后车为目标;中央控制器接收决策控制命令,依据行为指令,采取对应的速度决策以及运动控制命令;在换道过程中,采用后向跟随的信息拓扑结构,在时间域中优化控制各受控车辆的加速及制动和转向过程,生成优化的控制指令给各受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统,完成协同换道。与现有技术相比,本发明能使智能网联车队实现插入式协同换道加塞,从而大大提高智能网联车队在高密度交通环境下的换道能力以及在现实交通流中的机动性。



CN 115320596 A

1. 一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、根据不同的换道场景,选定编队换道的初始参考坐标系;

S2、中央控制器采集智能网联车队内受控车辆信息和参考坐标原点信息,受控车辆与中央控制器之间发起通讯连接,若通讯连接失败,则执行步骤S3,否则执行步骤S4;

S3、判断出现数据丢包,中央控制器从数据库中读取上一条信息,以作为当前受控车辆信息,之后执行步骤S4;

S4、将车队内所有受控车辆的信息保存至数据库;

S5、中央控制器根据各受控车辆以及车队周围车辆的信息,针对受控车队进行行为决策、速度决策以及换道决策,生成相应的决策命令,并将决策命令信息保存至数据库;

S6、建立换道过程中后向跟随的信息拓扑结构,受控车辆以跟随后车为目标,采用其所处车队中相邻后一辆车的状态作为参考状态,所述后向跟随的信息拓扑结构用于实现插入并扩大较小间距,进而为编队换道制造空间;

S7、中央控制器接收步骤S5生成的决策控制命令,依据行为指令,采取对应的速度决策以及运动控制命令;

在换道过程中,采用步骤S6建立的后向跟随的信息拓扑结构,根据各受控车辆信息,在时间域中优化控制各受控车辆的加速及制动和转向过程,将优化的控制指令传递至各受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统,并将优化的状态信息保存至数据库中;

S8、各受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统对应执行步骤S7中生成的优化的控制指令,完成协同换道。

2. 根据权利要求1所述的一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,其特征在于,所述步骤S1中,编队换道的初始参考坐标系包括横向相对参考坐标系和纵向相对参考坐标系,所述初始参考坐标系无需在编队运行中全程固定,只需在换道过程中进行明确;

对于在道路上固定位置上进行车队协同换道的场景,以该道路上固定位置为纵向坐标原点,沿道路方向为纵向的正方向;

对于在车流中固定位置进行换道的场景,如利用车流中某一车辆前方可穿越间隙进行换道,以该车辆的位置为纵向坐标原点,沿道路方向为正方向;

横向控制的坐标原点统一设置为道路左侧边缘,以垂直道路方向指向右侧的方向为横向坐标系的正方向;

所述步骤S2中,中央控制器收集的受控车辆信息包括:道路坐标系的纵向位置、横向位置、航偏角,车辆速度、方向盘转角、加速度、轴距、前轮转角;纵向控制参照物的车辆速度以及在道路坐标系下的纵向位置。

3. 根据权利要求1所述的一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,其特征在于,所述步骤S5具体包括以下步骤:

S51、在行为决策部分,中央控制器对受控车队状态进行决策,包括巡航、跟车以及换道状态;

S52、在速度决策部分,中央控制器对车队的参考速度进行决策;

S53、在换道决策部分,中央控制器对车队中的受控车辆进行换道决策,包括寻找换道间隙和进行换道。

4. 根据权利要求3所述的一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,其特征在于,所

述步骤S51具体包括以下步骤:

S511、追踪全局路径,若车队面临强制换道需求,则车队进入换道状态;若不满足强制换道需求,则执行步骤S512;

S512、若车队前方存在车辆,且车队面临随机换道需求,则车队进入换道状态;否则执行步骤S513;

S513、若车队前方存在车辆,则车队进入跟车状态;若车队前方不存在车辆,则车队进入巡航状态。

5. 根据权利要求3所述的一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,其特征在于,所述步骤S52具体包括以下步骤:

S521、当车队处于巡航状态时,车队参考速度为:

$$speed_r^P = v_a^P$$

其中, v_a^P 为车队期望速度;

S522、当车队处于跟车状态时,车队参考速度为:

$$speed_r^P = \min\{v_a^P, v_f^P\}$$

其中, v_f^P 为车队前车的速度;

S523、当车队处于寻找换道间隙状态时,若车队面临随机换道需求,则车队参考速度为:

$$speed_r^P = \min\{v_a^P, v_f^P\}$$

若车队面临强制换道需求,则车队参考速度为:

$$speed_r^P = \min\{v_a^P - v_{g_s}^{dif}, v_f^P\}$$

其中, $v_{g_s}^{dif}$ 为间隙搜寻过程中的期望速度差;

S524、当车队处于换道状态时,则车队参考速度为:

$$speed_r^P = \min\{v_f^g - v_{g_b}^{dif}, v_f^P\}$$

其中, v_f^g 为换道间隙前车的速度, $v_{g_b}^{dif}$ 为换道间隙扩大过程中的期望速度差。

6. 根据权利要求5所述的一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,其特征在于,所述步骤S53具体包括以下步骤:

S531、计算换道间隙后车与受控车辆的安全换道距离:

$$d_s^{l-g} = (t_r^{HV} + t_b) \times v_l^g - \frac{v_l^{g2}}{2a_{min}} + \frac{v^2}{2a_{min}}$$

其中, t_r^{HV} 为人类驾驶反应时间, t_b 为制动延迟, v_l^g 为换道间隙后车速度, v 为受控车辆的速度, a_{min} 是车辆最大减速度;

之后计算换道间隙前车与受控车辆的安全换道距离:

$$d_s^{f-g} = (t_r^{CAV} + t_b) \times v - \frac{v^2}{2a_{min}} + \frac{v_f^g}{2a_{min}}$$

其中, t_r^{CAV} 为智能网联车辆反应时间, v_f^g 为换道间隙前车的速度;

S532、将受控车辆与换道间隙后车、前车的实际距离与相应的安全换道距离进行比较, 如果同时满足受控车辆与换道间隙后车的实际距离 $d^{l-g} \geq d_s^{l-g}$ 以及受控车辆与换道间隙前车的实际距离 $d^{f-g} \geq d_s^{f-g}$, 则受控车辆在当前换道间隙条件下采取换道措施。

7. 根据权利要求1所述的一种智能网联车队插入式协同换道控制方法, 其特征在于, 所述步骤S6具体包括以下步骤:

S61、选择目标车道的一个换道间隙;

S62、操纵车队最后一辆受控车辆采取换道措施进入换道间隙;

S63、减小车队最后一辆受控车辆的速度, 以扩大换道间隙;

S64、操纵车队从最后一辆到第一辆受控车辆相继采取换道措施;

S65、若发生其他车辆切入的情况, 则将该切入的车辆视为换道间隙的前车;

S66、继续操纵被控车辆采取换道措施, 直至车队中所有被控车辆完成换道。

8. 根据权利要求1所述的一种智能网联车队插入式协同换道控制方法, 其特征在于, 所述步骤S7中, 车队中受控车辆的状态信息包括速度、位置、航向、时间, 控制信息包括加速度和前轮偏角;

对各受控车辆的加速、制动和转向过程进行优化的具体过程为:

S71、计算由n辆受控车辆组成的车队的初始状态向量:

$$\phi_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} \left[v^{n-1} - v^n, x^{n-1} - x^n - g_d, \dots, v^j - v^{j+1}, x^j - x^{j+1} - g_d, \dots, v^1 - v^2, \right]^T$$

$$x^1 - x^2 - g_d$$

$$\phi_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} \left[e_\theta^{n-1}, y^{n-1} - y_d^{n-1}, \dots, e_\theta^j, y^j - y_d^j, \dots, e_\theta^1, y^1 - y_d^1 \right]^T$$

其中, $\phi_{x,n}$ 为车队的纵向状态向量, $\phi_{y,n}$ 为车队的横向状态向量, v^j 为第j辆受控车辆的速度, $v^j - v^{j+1}$ 为第j辆受控车辆与第j+1辆受控车辆的相对速度, x^j 为第j辆受控车辆的纵向位置, $x^j - x^{j+1}$ 为第j辆受控车辆与第j+1辆受控车辆的相对纵向位置, g_d 是期望跟驰间距, e_θ^j 是第j辆受控车辆相对于道路方向的航向角误差, y^j 是第j辆受控车辆的横向位置, y_d^j 是第j辆受控车辆的期望横向位置;

车队的初始控制向量为:

$$u_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} [a^{n-1}, \dots, a^j, \dots, a^1]^T$$

$$u_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} [\sigma_f^{n-1}, \dots, \sigma_f^j, \dots, \sigma_f^1]^T$$

其中, $u_{x,n}$ 为车队的纵向控制向量, $u_{y,n}$ 为车队的横向控制向量, a^j 是第j辆受控车辆的加速度, σ_f^j 是车辆的前轮偏角;

S72、计算状态更新方程系数矩阵:

$$\mathbf{A}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & & \\ 1 & 0 & & \\ & \ddots & & \\ & & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (2n-2)} + \mathbf{I}_{(2n-2) \times (2n-2)}$$

$$\mathbf{B}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times \begin{bmatrix} 1 & & & \\ 0 & & & \\ -1 & 1 & & \\ & 0 & & \\ & -1 & \ddots & \\ & & & 1 \\ & & & 0 \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (n-1)}$$

$$\mathbf{C}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times [-1, 0 \cdots, 0]_{(2n-2) \times 1}^T$$

$$\mathbf{A}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & & \\ v & 0 & & \\ & \ddots & & \\ & & 0 & 0 \\ & & v & 0 \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (2n-2)} + \mathbf{I}_{(2n-2) \times (2n-2)}$$

$$\mathbf{B}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times \begin{bmatrix} \frac{v}{L_{fr}} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \frac{v}{L_{fr}} & \\ & & & 0 \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (n-1)}$$

$$\mathbf{C}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times v\kappa [-1, 0, -1, 0 \cdots, -1, 0]_{(2n-2) \times 1}^T$$

其中, $\mathbf{A}_{x,n}, \mathbf{B}_{x,n}, \mathbf{C}_{x,n}$ 是纵向状态更新方程系数矩阵, $\mathbf{A}_{y,n}, \mathbf{B}_{y,n}, \mathbf{C}_{y,n}$ 是横向状态更新方程系数矩阵, d_t 是车辆控制的时间域步长, \mathbf{I} 是单位矩阵, v 是车辆速度, L_{fr} 是车辆的轴距, κ 是道路曲率;

S73、计算成本函数矩阵:

$$\mathbf{Q}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} q_v & & & \\ & q_g & & \\ & & \ddots & \\ & & & q_v \\ & & & & q_g \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

$$\mathbf{R}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} r_a \mathbf{I}_{n \times n}$$

$$\mathbf{Q}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} q_\theta & & & \\ & q_y & & \\ & & \ddots & \\ & & & q_\theta \\ & & & & q_y \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

$$\mathbf{R}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} r_{\sigma} \mathbf{I}_{n \times n}$$

其中, $\mathbf{Q}_{x,n}, \mathbf{R}_{x,n}$ 是纵向控制成本函数矩阵, $\mathbf{Q}_{y,n}, \mathbf{R}_{y,n}$ 是横向控制成本函数矩阵, $q_v, q_g, r_a, q_0, q_y, r_{\sigma}$ 均为正数, 具体是根据车辆控制过程中的控制偏好选取调试;

$$\text{S74、定义最终状态的伴随矩阵 } \bar{\mathbf{Q}}_{N+1} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{Q}, \bar{\mathbf{D}}_{N+1} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{0};$$

S75、逆向计算伴随矩阵;

S76、顺向计算控制向量和状态向量。

9. 根据权利要求8所述的一种智能网联车队插入式协同换道控制方法, 其特征在于, 所述步骤S75具体包括以下步骤:

S751、分别计算:

$$\mathbf{K}_{1i} = (\mathbf{R}_i + \mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{B}_i)^{-1}$$

$$\mathbf{K}_{2i} = -\mathbf{K}_{1i} \mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{A}_i$$

$$\mathbf{K}_{3i} = -\mathbf{K}_{1i} \mathbf{B}_i^T (\bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{C}_i + \bar{\mathbf{D}}_{i+1})$$

$$\mathbf{K}_{4i} = \mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{K}_{2i}$$

$$\mathbf{K}_{5i} = \mathbf{B}_i \mathbf{K}_{3i} + \mathbf{C}_i$$

S752、计算成本函数拟合矩阵 $\mathbf{D}_i = -\mathbf{Q} \phi_{d_i}$, 其中, ϕ_{d_i} 为期望状态量;

S753、分别计算:

$$\bar{\mathbf{Q}}_i = \mathbf{K}_{2i}^T \mathbf{R}_i \mathbf{K}_{2i} + \mathbf{K}_{4i}^T \bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{K}_{4i} + \mathbf{Q}_i$$

$$\bar{\mathbf{D}}_i = \mathbf{K}_{2i}^T \mathbf{R}_i \mathbf{K}_{3i} + \mathbf{K}_{4i}^T \bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{K}_{5i} + \mathbf{K}_{4i}^T \bar{\mathbf{D}}_{i+1} + \mathbf{D}_i$$

其中, $\bar{\mathbf{Q}}_i$ 为成本函数矩阵的伴随矩阵, $\bar{\mathbf{D}}_i$ 为成本函数拟合矩阵的伴随矩阵。

10. 根据权利要求9所述的一种智能网联车队插入式协同换道控制方法, 其特征在于, 所述步骤S76具体包括以下步骤:

S761、根据庞特里亚金极大值原理, 计算控制向量和状态向量:

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{K}_{2i} \phi_i + \mathbf{K}_{3i}$$

$$\phi_{i+1} = \mathbf{K}_{4i} \phi_i + \mathbf{K}_{5i}$$

S762、如果 $u^i > u_{\max}$, 则 $u^i = u_{\max}$;

如果 $u^i < u_{\min}$, 则 $u^i = u_{\min}$;

其中, u_{\max} 和 u_{\min} 分别为控制量的最大值和最小值, u^i 为第 i 步迭代计算的控制量;

S763、如果 $\phi^i > \phi_{\max}$, 则 $\phi^i = \phi_{\max}$;

如果 $\phi^i < \phi_{\min}$, 则 $\phi^i = \phi_{\min}$;

其中, ϕ_{\max} 和 ϕ_{\min} 分别为状态量的最大量和最小值, ϕ^i 为第 i 步迭代计算的状态量。

一种智能网联车队插入式协同换道控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及智能网联车队控制技术领域,尤其是涉及一种智能网联车队插入式协同换道控制方法。

背景技术

[0002] 智能网联汽车搭载了先进的传感器、决策器、控制器、执行器等装置,融合了现代通信技术、网络技术,具备车车、车路通信,车载感知等功能。车载通信设备、车载感知设备使智能网联汽车具备了环境感知的能力,环境感知信息经由决策系统进行决策、从而产生决策命令,控制系统接受决策命令、从而控制车辆的加速及制动和转向过程,最终由车辆执行器完成自动驾驶的控制操作。

[0003] 智能网联汽车协同编队驾驶是智能网联汽车应用中一项关键技术。编队驾驶能够有效改善交通系统的机动性、安全性以及可持续发展性。将多个智能网联汽车组建成车队的形式,能够降低车队内部车辆的跟车间距,从而可以提高近乎一倍的道路通行能力、降低10%到20%的燃油消耗和14%的碳排放。而为了实现智能网联汽车的编队驾驶,往往需要基于完善的智能网联汽车编队控制,即多场景下的多车协同横纵向耦合控制。为实现这一控制目标,目前主要是利用中央控制器通过多车通信技术,采集车队内车辆信息,结合数据信息处理并发送车辆控制指令,从而相应控制车队内部智能网联汽车的加速、制动及转向。

[0004] 然而,当前大部分智能网联汽车协同编队驾驶技术仅考虑纵向层面,这会使得被控车辆在采取换道措施时容易脱离车队,由于仅仅在单车层面上进行横向控制,无法保证编队驾驶的连续性和稳定性。现有技术尽管研究考虑了智能网联汽车编队换道行为,提出了一些智能网联车队换道方法,但现有的智能网联车队换道方法依然存在以下明显缺陷:

[0005] 1. 现有的控制方法中,最突出的问题在于,车队换道对换道间隙以及车队前车和换道间隙前后车辆的速度、加速度等条件要求较高。在高密度交通环境下,换道间隙较小,采用现有的控制方法车队换道成功率很低,从而大大降低了智能网联车队的机动性和对现实交通场景的适应性。

[0006] 2. 现有的控制方法中,车队稳定性没有被验证,被控车辆跟随误差可能沿着车队从头到尾增加,不仅增加碰撞的概率,而且还会造成交通振荡。

[0007] 3. 现有的控制方法计算时间过长且不确定,对硬件造成较大压力,且无法保证算法实时性。

[0008] 4. 现有的控制方法中,车辆横向控制仅以优化当前偏移量或某一位置偏移量为目标,无法实现对未来一段时间内的误差进行整体考量,从而导致控制精度较低,车辆编队容易发生超调摆动的现象。

[0009] 以上缺陷将导致编队驾驶中的车辆无法准确跟随参考目标车辆的轨迹,无法利用高密度交通环境下较小的换道间隙实现智能网联车队协同换道。

发明内容

[0010] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,使车队能够在高密度交通环境下利用较小换道间隙完成车队的换道,从而有效提升车队在高密度交通环境下的换道能力和换道效率。

[0011] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,包括以下步骤:

[0012] S1、根据不同的换道场景,选定编队换道的初始参考坐标系;

[0013] S2、中央控制器采集智能网联车队内受控车辆信息和参考坐标原点信息,受控车辆与中央控制器之间发起通讯连接,若通讯连接失败,则执行步骤S3,否则执行步骤S4;

[0014] S3、判断出现数据丢包,中央控制器从数据库中读取上一条信息,以作为当前受控车辆信息,之后执行步骤S4;

[0015] S4、将车队内所有受控车辆的信息保存至数据库;

[0016] S5、中央控制器根据各受控车辆以及车队周围车辆的信息,针对受控车队进行行为决策、速度决策以及换道决策,生成相应的决策命令,并将决策命令信息保存至数据库;

[0017] S6、建立换道过程中后向跟随的信息拓扑结构,受控车辆以跟随后车为目标,采用其所处车队中相邻后一辆车的状态作为参考状态,所述后向跟随的信息拓扑结构用于实现插入并扩大较小间距,进而为编队换道制造空间;

[0018] S7、中央控制器接收步骤S5生成的决策控制命令,依据行为指令,采取对应的速度决策以及运动控制命令;

[0019] 在换道过程中,采用步骤S6建立的后向跟随的信息拓扑结构,根据各受控车辆信息,在时间域中优化控制各受控车辆的加速及制动和转向过程,将优化的控制指令传递至各受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统,并将优化的状态信息保存至数据库中;

[0020] S8、各受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统对应执行步骤S7中生成的优化的控制指令,完成协同换道。

[0021] 进一步地,所述步骤S1中,编队换道的初始参考坐标系包括横向相对参考坐标系和纵向相对参考坐标系,所述初始参考坐标系无需在编队运行中全程固定,只需在换道过程中进行明确;

[0022] 对于在道路上固定位置上进行车队协同换道的场景,以该道路上固定位置为纵向坐标原点,沿道路方向为纵向的正方向;

[0023] 对于在车流中固定位置进行换道的场景,如利用车流中某一车辆前方可穿越间隙进行换道,以该车辆的位置为纵向坐标原点,沿道路方向为正方向;

[0024] 横向控制的坐标原点统一设置为道路左侧边缘,以垂直道路方向指向右侧的方向为横向坐标系的正方向。

[0025] 进一步地,所述步骤S2中,中央控制器收集的受控车辆信息包括:道路坐标系的纵向位置、横向位置、航偏角,车辆速度、方向盘转角、加速度、轴距、前轮转角;纵向控制参照物的车辆速度以及在道路坐标系下的纵向位置。

[0026] 进一步地,所述步骤S5具体包括以下步骤:

[0027] S51、在行为决策部分,中央控制器对受控车队状态进行决策,包括巡航、跟车以及换道状态;

[0028] S52、在速度决策部分,中央控制器对车队的参考速度进行决策;

[0029] S53、在换道决策部分,中央控制器对车队中的受控车辆进行换道决策,包括寻找换道间隙和进行换道。

[0030] 进一步地,所述步骤S51具体包括以下步骤:

[0031] S511、追踪全局路径,若车队面临强制换道需求,则车队进入换道状态;若不满足强制换道需求,则执行步骤S512;

[0032] S512、若车队前方存在车辆,且车队面临随机换道需求,则车队进入换道状态;否则执行步骤S513;

[0033] S513、若车队前方存在车辆,则车队进入跟车状态;若车队前方不存在车辆,则车队进入巡航状态。

[0034] 进一步地,所述步骤S52具体包括以下步骤:

[0035] S521、当车队处于巡航状态时,车队参考速度为:

$$[0036] \quad speed_r^P = v_d^P$$

[0037] 其中, v_d^P 为车队期望速度;

[0038] S522、当车队处于跟车状态时,车队参考速度为:

$$[0039] \quad speed_r^P = \min\{v_d^P, v_f^P\}$$

[0040] 其中, v_f^P 为车队前车的速度;

[0041] S523、当车队处于寻找换道间隙状态时,若车队面临随机换道需求,则车队参考速度为:

$$[0042] \quad speed_r^P = \min\{v_d^P, v_f^P\}$$

[0043] 若车队面临强制换道需求,则车队参考速度为:

$$[0044] \quad speed_r^P = \min\{v_d^P - v_{g_s}^{dif}, v_f^P\}$$

[0045] 其中, $v_{g_s}^{dif}$ 为间隙搜寻过程中的期望速度差;

[0046] S524、当车队处于换道状态时,则车队参考速度为:

$$[0047] \quad speed_r^P = \min\{v_f^g - v_{g_b}^{dif}, v_f^P\}$$

[0048] 其中, v_f^g 为换道间隙前车的速度, $v_{g_b}^{dif}$ 为换道间隙扩大过程中的期望速度差。

[0049] 进一步地,所述步骤S53具体包括以下步骤:

[0050] S531、计算换道间隙后车与受控车辆的安全换道距离:

$$[0051] \quad d_s^{l-g} = (t_r^{HV} + t_b) \times v_l^g - \frac{v_l^{g2}}{2a_{min}} + \frac{v^2}{2a_{min}}$$

[0052] 其中, t_r^{HV} 为人类驾驶反应时间, t_b 为制动延迟, v_l^g 为换道间隙后车速度, v 为受控车辆的速度, a_{min} 是车辆最大减速度;

[0053] 之后计算换道间隙前车与受控车辆的安全换道距离:

$$[0054] \quad d_s^{f-g} = (t_r^{CAV} + t_b) \times v - \frac{v^2}{2a_{min}} + \frac{v_f^g}{2a_{min}}$$

[0055] 其中, t_r^{CAV} 为智能网联车辆反应时间, v_f^g 为换道间隙前车的速度;

[0056] S532、将受控车辆与换道间隙后车、前车的实际距离与相应的安全换道距离进行比较, 如果同时满足受控车辆与换道间隙后车的实际距离 $d^{l-g} \geq d_s^{l-g}$ 以及受控车辆与换道间隙前车的实际距离 $d^{f-g} \geq d_s^{f-g}$, 则受控车辆在当前换道间隙条件下采取换道措施。

[0057] 进一步地, 所述步骤S6具体包括以下步骤:

[0058] S61、选择目标车道的一个换道间隙;

[0059] S62、操纵车队最后一辆受控车辆采取换道措施进入换道间隙;

[0060] S63、减小车队最后一辆受控车辆的速度, 以扩大换道间隙;

[0061] S64、操纵车队从最后一辆到第一辆受控车辆相继采取换道措施;

[0062] S65、若发生其他车辆切入的情况, 则将该切入的车辆视为换道间隙的前车;

[0063] S66、继续操纵被控车辆采取换道措施, 直至车队中所有被控车辆完成换道。

[0064] 进一步地, 所述步骤S7中, 车队中受控车辆的状态信息包括速度、位置、航向、时间, 控制信息包括加速度和前轮偏角;

[0065] 对各受控车辆的加速、制动和转向过程进行优化的具体过程为:

[0066] S71、计算由n辆受控车辆组成的车队的初始状态向量:

$$[0067] \quad \phi_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} \left[v^{n-1} - v^n, x^{n-1} - x^n - g_d, \dots, v^j - v^{j+1}, x^j - x^{j+1} - g_d, \dots, v^1 - v^2, \right]^T$$

$$x^1 - x^2 - g_d$$

$$[0068] \quad \phi_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} \left[e_{\theta}^{n-1}, y^{n-1} - y_d^{n-1}, \dots, e_{\theta}^j, y^j - y_d^j, \dots, e_{\theta}^1, y^1 - y_d^1 \right]^T$$

[0069] 其中, $\phi_{x,n}$ 为车队的纵向状态向量, $\phi_{y,n}$ 为车队的横向状态向量, v^j 为第j辆受控车辆的速度, $v^j - v^{j+1}$ 为第j辆受控车辆与第j+1辆受控车辆的相对速度, x^j 为第j辆受控车辆的纵向位置, $x^j - x^{j+1}$ 为第j辆受控车辆与第j+1辆受控车辆的相对纵向位置, g_d 是期望跟驰间距, e_{θ}^j 是第j辆受控车辆相对于道路方向的航向角误差, y^j 是第j辆受控车辆的横向位置, y_d^j 是第j辆受控车辆的期望横向位置;

[0070] 车队的初始控制向量为:

$$[0071] \quad \mathbf{u}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} [a^{n-1}, \dots, a^j, \dots, a^1]^T$$

$$[0072] \quad \mathbf{u}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} [\sigma_f^{n-1}, \dots, \sigma_f^j, \dots, \sigma_f^1]^T$$

[0073] 其中, $\mathbf{u}_{x,n}$ 为车队的纵向控制向量, $\mathbf{u}_{y,n}$ 为车队的横向控制向量, a^j 是第j辆受控车辆的加速度, σ_f^j 是车辆的前轮偏角;

[0074] S72、计算状态更新方程系数矩阵:

$$[0075] \quad \mathbf{A}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ & \ddots \\ & & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0 \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (2n-2)} + \mathbf{I}_{(2n-2) \times (2n-2)}$$

$$[0076] \quad \mathbf{B}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 & 1 \\ & 0 \\ & -1 & \ddots \\ & & & 1 \\ & & & & 0 \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (n-1)}$$

$$[0077] \quad \mathbf{C}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times [-1, 0 \cdots, 0]_{(2n-2) \times 1}^T$$

$$[0078] \quad \mathbf{A}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ v & 0 \\ & \ddots \\ & & 0 & 0 \\ & & & v & 0 \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (2n-2)} + \mathbf{I}_{(2n-2) \times (2n-2)}$$

$$[0079] \quad \mathbf{B}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times \begin{bmatrix} \frac{v}{L_{fr}} \\ 0 \\ & \ddots \\ & & \frac{v}{L_{fr}} \\ & & & 0 \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (n-1)}$$

$$[0080] \quad \mathbf{C}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} d_t \times v\kappa[-1, 0, -1, 0 \cdots, -1, 0]_{(2n-2) \times 1}^T$$

[0081] 其中, $\mathbf{A}_{x,n}, \mathbf{B}_{x,n}, \mathbf{C}_{x,n}$ 是纵向状态更新方程系数矩阵, $\mathbf{A}_{y,n}, \mathbf{B}_{y,n}, \mathbf{C}_{y,n}$ 是横向状态更新方程系数矩阵, d_t 是车辆控制的时间域步长, \mathbf{I} 是单位矩阵, v 是车辆速度, L_{fr} 是车辆的轴距, κ 是道路曲率;

[0082] S73、计算成本函数矩阵:

$$[0083] \quad \mathbf{Q}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} q_v & & & \\ & q_g & & \\ & & \ddots & \\ & & & q_v \\ & & & & q_g \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

$$[0084] \quad \mathbf{R}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} r_a \mathbf{I}_{n \times n}$$

$$[0085] \quad \mathbf{Q}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} q_\theta & & & & & \\ & q_y & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & q_\theta & & \\ & & & & q_y & \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & q_\theta \\ & & & & & & & q_y \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

$$[0086] \quad \mathbf{R}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} r_\sigma \mathbf{I}_{n \times n}$$

[0087] 其中, $\mathbf{Q}_{x,n}, \mathbf{R}_{x,n}$ 是纵向控制成本函数矩阵, $\mathbf{Q}_{y,n}, \mathbf{R}_{y,n}$ 是横向控制成本函数矩阵, $q_v, q_g, r_a, q_\theta, q_y, r_o$ 均为正数, 具体是根据车辆控制过程中的控制偏好选取调试;

[0088] S74、定义最终状态的伴随矩阵 $\bar{\mathbf{Q}}_{N+1} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{Q}$, $\bar{\mathbf{D}}_{N+1} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{0}$;

[0089] S75、逆向计算伴随矩阵;

[0090] S76、顺向计算控制向量和状态向量。

[0091] 进一步地, 所述步骤S75具体包括以下步骤:

[0092] S751、分别计算:

$$[0093] \quad \mathbf{K}_{1i} = (\mathbf{R}_i + \mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{B}_i)^{-1}$$

$$[0094] \quad \mathbf{K}_{2i} = -\mathbf{K}_{1i} \mathbf{B}_i^T \bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{A}_i$$

$$[0095] \quad \mathbf{K}_{3i} = -\mathbf{K}_{1i} \mathbf{B}_i^T (\bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{C}_i + \bar{\mathbf{D}}_{i+1})$$

$$[0096] \quad \mathbf{K}_{4i} = \mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{K}_{2i}$$

$$[0097] \quad \mathbf{K}_{5i} = \mathbf{B}_i \mathbf{K}_{3i} + \mathbf{C}_i$$

[0098] S752、计算成本函数拟合矩阵 $\mathbf{D}_i = -\mathbf{Q} \phi_{d_i}$, 其中, ϕ_{d_i} 为期望状态量;

[0099] S753、分别计算:

$$[0100] \quad \bar{\mathbf{Q}}_i = \mathbf{K}_{2i}^T \mathbf{R}_i \mathbf{K}_{2i} + \mathbf{K}_{4i}^T \bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{K}_{4i} + \mathbf{Q}_i$$

$$[0101] \quad \bar{\mathbf{D}}_i = \mathbf{K}_{2i}^T \mathbf{R}_i \mathbf{K}_{3i} + \mathbf{K}_{4i}^T \bar{\mathbf{Q}}_{i+1} \mathbf{K}_{5i} + \mathbf{K}_{4i}^T \bar{\mathbf{D}}_{i+1} + \mathbf{D}_i$$

[0102] 其中, $\bar{\mathbf{Q}}_i$ 为成本函数矩阵的伴随矩阵, $\bar{\mathbf{D}}_i$ 为成本函数拟合矩阵的伴随矩阵。

[0103] 进一步地, 所述步骤S76具体包括以下步骤:

[0104] S761、根据庞特里亚金极大值原理, 计算控制向量和状态向量:

$$[0105] \quad \mathbf{u}_i = \mathbf{K}_{2i} \phi_i + \mathbf{K}_{3i}$$

$$[0106] \quad \phi_{i+1} = \mathbf{K}_{4i} \phi_i + \mathbf{K}_{5i}$$

[0107] S762、如果 $u^i > u_{\max}$, 则 $u^i = u_{\max}$;

[0108] 如果 $u^i < u_{\min}$, 则 $u^i = u_{\min}$;

[0109] 其中, u_{\max} 和 u_{\min} 分别为控制量的最大值和最小值, u^i 为第 i 步迭代计算的控制量;

[0110] S763、如果 $\phi^i > \phi_{\max}$, 则 $\phi^i = \phi_{\max}$;

[0111] 如果 $\phi^i < \phi_{\min}$, 则 $\phi^i = \phi_{\min}$;

[0112] 其中, ϕ_{\max} 和 ϕ_{\min} 分别为状态量的最大量和最小值, ϕ^i 为第 i 步迭代计算的状态量。

[0113] 与现有技术相比, 本发明通过采集车队中受控车辆以及车队周围车辆在坐标系下的信息, 得到车辆的运行状态, 再分别从车辆行为、车队速度以及车辆换道三个部分进行决

策,生成相应决策命令;之后基于该决策命令,采用后向跟随的车队信息拓扑结构,综合考虑受控车辆未来一段时间内的纵横向误差,在时间域内优化纵横向驾驶行为,进而对各受控车辆的加速、制动及转向过程进行优化控制,最终将控制结果输出到受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统,实现协同换道控制过程。本发明中,车队能够实现插入式协同换道,从而使车队能够在高密度交通环境下利用较小换道间隙完成车队的换道,大大提升了车队在高密度交通环境下的换道能力和换道效率,提高了车队在交通流中的机动性。

[0114] 本发明在时间域内考虑车辆在未来一段时间内的误差,能够有效提高车辆在当前状态下的优化控制精度,使编队驾驶中的车辆能够准确跟随参考目标车辆的轨迹;本发明中的控制算法性能具有优越的可靠性和稳健性,即使在交通拥堵情况下仍可以适用,且能保证智能网联车队的稳定性,具有工程应用级别的计算效率,能够降低运算负荷。

附图说明

[0115] 图1为本发明的方法流程示意图。

具体实施方式

[0116] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0117] 实施例

[0118] 如图1所示,一种智能网联车队插入式协同换道控制方法,包括以下步骤:

[0119] S1、根据不同的换道场景,选定编队换道的初始参考坐标系;

[0120] S2、中央控制器采集智能网联车队内受控车辆信息和参考坐标原点信息,受控车辆与中央控制器之间发起通讯连接,若通讯连接失败,则执行步骤S3,否则执行步骤S4;

[0121] S3、判断出现数据丢包,中央控制器从数据库中读取上一条信息,以作为当前受控车辆信息,之后执行步骤S4;

[0122] S4、将车队内所有受控车辆的信息保存至数据库;

[0123] S5、中央控制器根据各受控车辆以及车队周围车辆的信息,针对受控车队进行行为决策、速度决策以及换道决策,生成相应的决策命令,并将决策命令信息保存至数据库;

[0124] S6、建立换道过程中后向跟随的信息拓扑结构,受控车辆以跟随后车为目标,采用其所处车队中相邻后一辆车的状态作为参考状态,所述后向跟随的信息拓扑结构用于实现插入并扩大较小间距,进而为编队换道制造空间;

[0125] S7、中央控制器接收步骤S5生成的决策控制命令,依据行为指令,采取对应的速度决策以及运动控制命令;

[0126] 在换道过程中,采用步骤S6建立的后向跟随的信息拓扑结构,根据各受控车辆信息,在时间域中优化控制各受控车辆的加速及制动和转向过程,将优化的控制指令传递至各受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统,并将优化的状态信息保存至数据库中;

[0127] S8、各受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统对应执行步骤S7中生成的优化的控制指令,完成协同换道。

[0128] 本实施例应用上述技术方案,主要包括以下内容:

[0129] 步骤1、根据不同的换道场景,选定编队换道的初始参考坐标系。

[0130] 在步骤1中,参考坐标系无需在编队运行中全程固定,只需在换道过程中进行明

确。横纵向可分别具有不同的相对参考系,且相对参考系原点可为静止或移动的任何一点。对于在道路上固定位置上进行车队协同换道的场景,以该位置为纵向坐标原点,沿道路方向为纵向的正方向;对于在车流中固定位置进行换道的场景,如利用车流中某一车辆前方可穿越间隙进行换道,以该车辆的位置为纵向坐标原点,沿道路方向为正方向。横向控制的坐标原点统一设置为道路左侧边缘,以垂直道路方向指向右侧的方向为横向坐标系的正方向。

[0131] 步骤2、中央控制器采集智能网联车队内受控车辆和参考坐标原点信息,受控车辆与中央控制器进行通讯。如果通讯失败,进入步骤3,否则,进入步骤4。

[0132] 在步骤2中,中央控制器所收集到的各受控车辆信息包括:道路坐标系的纵向位置、横向位置、航偏角,车辆速度、方向盘转角、加速度、轴距、前轮转角;另外还包括纵向控制参照物的车辆速度以及在道路坐标系下的纵向位置。

[0133] 为了采集到这些信息,本发明所应用的车辆应该具有:车辆信息采集装置、通信装置、车辆数据库、置于车队中任意一个车辆上的中央控制器。

[0134] 本发明中,受控车辆的控制装置连接至受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统。

[0135] 步骤3、判断出现数据丢包,中央控制器从数据库中读取上一条信息,视作当前受控车辆信息,之后进入步骤4。

[0136] 步骤4、将车队内所有受控车辆的信息保存至数据库。

[0137] 步骤5、中央控制器根据各受控车辆以及车队周围车辆的信息,针对受控车队进行行为决策、速度决策以及换道决策,生成相应的决策命令,将决策命令信息保存至数据库。

[0138] 在步骤5中,从车辆行为、车队速度以及车辆换道三个部分进行决策,生成相应的决策命令,包括以下步骤:

[0139] 步骤5.1、在行为决策部分,中央控制器对受控车队状态进行决策,包括巡航、跟车以及换道状态;

[0140] 具体的,中央控制器对受控车队状态(巡航、跟车、换道)的决策判断过程为:

[0141] 步骤5.1.1、追踪全局路径,如果车队面临强制换道需求(如下匝道、转弯等),则车队进入换道状态;如果不满足强制换道需求,则进入步骤5.1.2决策判断;

[0142] 步骤5.1.2、如果车队前方存在车辆,且车队面临随机换道需求(如受缓行车辆阻碍等),则车队进入换道状态;如果上述条件不满足,则进入步骤5.1.3决策判断;

[0143] 步骤5.1.3、如果车队前方存在车辆,则车队进入跟车状态;如果车队前方不存在车辆,则车队进入巡航状态。

[0144] 步骤5.2、在速度决策部分,中央控制器对车队的参考速度进行决策;

[0145] 具体的,车队的参考速度的决策计算过程为:

[0146] 步骤5.2.1、当车队处于巡航状态时,车队参考速度为 $speed_r^p = v_a^p$,其中 v_a^p 是车队期望速度;

[0147] 步骤5.2.2、当车队处于跟车状态时,车队参考速度为 $speed_r^p = \min\{v_a^p, v_f^p\}$,其中 v_f^p 是车队前车的速度;

[0148] 步骤5.2.3、当车队处于寻找换道间隙状态时,如果车队面临随机换道需求(如受

缓行车辆阻碍等), 则车队参考速度为 $speed_r^p = \min\{v_d^p, v_f^p\}$; 如果车队面临强制换道需求 (如下匝道、转弯等追随全局路径的需求), 则车队参考速度为 $speed_r^p = \min\{v_d^p - v_{g-s}^{dif}, v_f^p\}$, 其中 v_{g-s}^{dif} 是间隙搜寻过程中的期望速度差;

[0149] 步骤5.2.4、当车队处于换道状态时, 则车队参考速度为 $speed_r^p = \min\{v_f^g - v_{g-b}^{dif}, v_f^p\}$, 其中 v_f^g 为换道间隙前车的速度, v_{g-b}^{dif} 为换道间隙扩大过程中的期望速度差。

[0150] 步骤5.3、在换道决策部分, 中央控制器对车队中的受控车辆做出换道决策, 包括寻找换道间隙和进行换道;

[0151] 具体的, 车队中的受控车辆采取换道行为的决策过程为:

[0152] 步骤5.3.1、计算换道间隙后车与受控车辆的安全换道距离:

$$[0153] \quad d_s^{l-g} = (t_r^{HV} + t_b) \times v_l^g - \frac{v_l^{g2}}{2a_{min}} + \frac{v^2}{2a_{min}}$$

[0154] 其中, t_r^{HV} 为人类驾驶反应时间, t_b 为制动延迟, v_l^g 为换道间隙后车速度, v 为受控车辆的速度, a_{min} 是车辆最大减速度;

[0155] 计算换道间隙前车与受控车辆的安全换道距离:

$$[0156] \quad d_s^{f-g} = (t_r^{CAV} + t_b) \times v - \frac{v^2}{2a_{min}} + \frac{v_f^g}{2a_{min}}$$

[0157] 其中, t_r^{CAV} 为智能网联车辆反应时间, v_f^g 为换道间隙前车的速度;

[0158] 步骤5.3.2、将受控车辆与换道间隙后车、前车的实际距离与相应的安全换道距离进行比较, 如果同时满足受控车辆与换道间隙后车的实际距离 $d^{l-g} \geq d_s^{l-g}$ 以及受控车辆与换道间隙前车的实际距离 $d^{f-g} \geq d_s^{f-g}$, 则受控车辆在当前换道间隙条件下采取换道措施。

[0159] 步骤6、建立换道过程中的后向跟随的信息拓扑结构, 受控车辆以跟随后车为目标, 采用其所处车队中的后一辆车的状态作为参考状态。该信息拓扑结构能够实现插入并扩大较小间距进而为编队换道制造空间的目的。

[0160] 在步骤6中, 基于后向跟随的信息拓扑结构, 车队采取插入式协同换道加塞的过程具体为:

[0161] 步骤6.1、选择目标车道的一个换道间隙;

[0162] 步骤6.2、操纵车队最后一辆受控车辆采取换道措施进入换道间隙;

[0163] 步骤6.3、减小车队最后一辆受控车辆的速度以扩大换道间隙;

[0164] 步骤6.4、操纵车队从最后一辆到第一辆受控车辆相继采取换道措施;

[0165] 步骤6.5、如果发生其他车辆切入的情况, 则将该切入的车辆视为换道间隙的前车;

[0166] 步骤6.6、继续操纵被控车辆采取换道措施, 直到车队中所有被控车辆完成换道。

[0167] 步骤7、中央控制器接受步骤5生成的决策控制命令, 依据行为指令, 采取对应的速

度决策以及运动控制命令。在换道过程中,采用步骤6建立的后向跟随的信息拓扑结构,根据各受控车辆信息,在时间域中优化控制各受控车辆的加速及制动和转向过程,将优化的控制指令传递至各受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统,将优化的状态信息保存至数据库中。

[0168] 在步骤7中,车队中受控车辆的状态信息包括速度、位置、航向、时间,控制信息包括加速度和前轮偏角;对各受控车辆的加速、制动和转向过程进行优化的内容包括:

[0169] 步骤7.1、计算由n辆受控车辆组成的车队的初始状态向量为:

$$[0170] \quad \boldsymbol{\phi}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} v^{n-1} - v^n, x^{n-1} - x^n - g_d, \dots, v^j - v^{j+1}, x^j - x^{j+1} - g_d, \dots, v^1 - v^2, \\ x^1 - x^2 - g_d \end{bmatrix}^T$$

$$[0171] \quad \boldsymbol{\phi}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} [e_{\theta}^{n-1}, y^{n-1} - y_d^{n-1}, \dots, e_{\theta}^j, y^j - y_d^j, \dots, e_{\theta}^1, y^1 - y_d^1]^T$$

[0172] 其中 $\boldsymbol{\phi}_{x,n}$ 为车队的纵向状态向量, $\boldsymbol{\phi}_{y,n}$ 为车队的横向状态向量, v^j 为第j辆受控车辆的速度,单位m/s; $v^j - v^{j+1}$ 为第j辆受控车辆与第j+1辆受控车辆的相对速度,单位m/s; x^j 为第j辆受控车辆的纵向位置,单位m; $x^j - x^{j+1}$ 为第j辆受控车辆与第j+1辆受控车辆的相对纵向位置,单位m; g_d 是期望跟驰间距,单位m; e_{θ}^j 是第j辆受控车辆相对于道路方向的航向角误差,单位rad; y^j 是第j辆受控车辆的横向位置,单位m; y_d^j 是第j辆受控车辆的期望横向位置,单位m。车队的初始控制向量为 $\boldsymbol{u}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} [a^{n-1}, \dots, a^j, \dots, a^1]^T$, $\boldsymbol{u}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} [\sigma_f^{n-1}, \dots, \sigma_f^j, \dots, \sigma_f^1]^T$, 其中 $\boldsymbol{u}_{x,n}$ 为车队的纵向控制向量, $\boldsymbol{u}_{y,n}$ 为车队的横向控制向量, a^j 是第j辆受控车辆的加速度,单位m/s²; σ_f^j 是车辆的前轮偏角,单位rad;

[0173] 步骤7.2、计算状态更新方程系数矩阵:

$$[0174] \quad \boldsymbol{A}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} \boldsymbol{d}_t \times \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ & \ddots \\ & & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ & & & \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (2n-2)} + \boldsymbol{I}_{(2n-2) \times (2n-2)}$$

$$[0175] \quad \boldsymbol{B}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} \boldsymbol{d}_t \times \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} & \mathbf{1} \\ & \mathbf{0} \\ & -\mathbf{1} & \ddots \\ & & & \mathbf{1} \\ & & & & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (n-1)}$$

$$[0176] \quad \boldsymbol{C}_{x,n} \stackrel{\text{def}}{=} \boldsymbol{d}_t \times [-\mathbf{1}, \mathbf{0} \dots, \mathbf{0}]_{(2n-2) \times 1}^T$$

$$[0177] \quad \boldsymbol{A}_{y,n} \stackrel{\text{def}}{=} \boldsymbol{d}_t \times \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ v & \mathbf{0} \\ & \ddots \\ & & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ & & & v & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(2n-2) \times (2n-2)} + \boldsymbol{I}_{(2n-2) \times (2n-2)}$$

$$\bar{D}_i = K_{2_i}^T R_i K_{3_i} + K_{4_i}^T \bar{Q}_{i+1} K_{5_i} + K_{4_i}^T \bar{D}_{i+1} + D_i。$$

[0198] 步骤7.6、顺向计算控制向量和状态向量。

[0199] 在步骤7.6中,顺向计算控制向量和状态向量包括以下步骤:

[0200] 步骤7.6.1、根据庞特里亚金极大值原理计算控制向量和状态向量:

$$[0201] \quad \mathbf{u}_i = K_{2_i} \boldsymbol{\phi}_i + K_{3_i}$$

$$[0202] \quad \boldsymbol{\phi}_{i+1} = K_{4_i} \boldsymbol{\phi}_i + K_{5_i}$$

[0203] 步骤7.6.2、如果 $u^i > u_{\max}$, 则 $u^i = u_{\max}$; 如果 $u^i < u_{\min}$, 则 $u^i = u_{\min}$; 其中, u_{\max} 和 u_{\min} 分别为控制量的最大值和最小值, u^i 为第 i 步迭代计算的控制量;

[0204] 步骤7.6.3、如果 $\phi^i > \phi_{\max}$, 则 $\phi^i = \phi_{\max}$; 如果 $\phi^i < \phi_{\min}$, 则 $\phi^i = \phi_{\min}$; 其中, ϕ_{\max} 和 ϕ_{\min} 分别为状态量的最大量和最小值, ϕ^i 为第 i 步迭代计算的状态量。

[0205] 步骤8、各受控车辆的动力系统、制动系统和转向系统执行步骤7中的优化的控制指令,之后返回步骤2或停止协同换道控制过程。

[0206] 需要说明的是,本技术方案中,若控制步长设置为0.1秒,则需要每0.1秒确定一个控制量,那么 $d_t = 0.1s$;

[0207] 车队参考速度计算中的 $v_{g_s}^{dif}$ 、 $v_{g_b}^{dif}$ 参数可以根据实际需求主动设定,根据经验,提高 $v_{g_s}^{dif}$ 可以增大强制换道过程中换道间隙搜寻成功的概率,提高 $v_{g_b}^{dif}$ 可以提高扩大换道间隙的速度。本实施例将 $v_{g_s}^{dif}$ 、 $v_{g_b}^{dif}$ 取为3m/s;

[0208] 成本函数矩阵中的 $q_v, q_g, r_a, q_\phi, q_v, r_\delta$ 参数根据实际需要主动设定,根据经验,提高 q_v, q_g, q_ϕ, q_v 大小,有利于车辆迅速达到控制目标,提高 r_a 和 r_δ , 则有利于减小车辆控制振荡。

[0209] 综上所述,本技术方案针对高密度交通环境下车队换道空间不足的现象,提出一种制造空间的智能网联车队协同换道方法。通过采集车队中受控车辆以及车队周围车辆的信息,采用后向跟随的车队信息拓扑结构,从车辆行为、车队速度以及车辆换道三个部分进行决策,在时间域内优化纵横向驾驶行为,即基于相应决策命令,采用后向跟随的车队信息拓扑结构,以车队中相邻后车作为参考目标,协调控制车队内的受控车辆跟随参考目标轨迹,结合受控车辆信息和参考目标信息,通过综合考虑前方一段时间内的误差,在安全跟车、舒适加减速、速度阈值等约束下,利用优化控制原理,优化车队内受控车辆的加速、制动及转向过程,将优化结果传输至受控车辆的动力装置、制动装置和转向转装置。从而使车队能够利用高密度交通环境下较小换道间隙完成车队的换道,由此大大提高了车队在实际交通流中的机动性。本技术方案在时间域内考虑车辆在未来一段时间内的误差,从而提高了车辆在当前状态下优化控制精度。本技术方案的控制算法性能具有可靠性和稳健性、能保证智能网联车队的稳定性、具有工程应用级别的计算效率,且能降低运算负荷。



图1