



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114299755 A

(43) 申请公布日 2022. 04. 08

(21) 申请号 202111539448.7

(22) 申请日 2021.12.14

(71) 申请人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼2号

(72) 发明人 吴任飞 芮一康 陆文琦 李林恒 冉斌 曲栩

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 徐莹

(51) Int. Cl.

G08G 1/16 (2006.01)

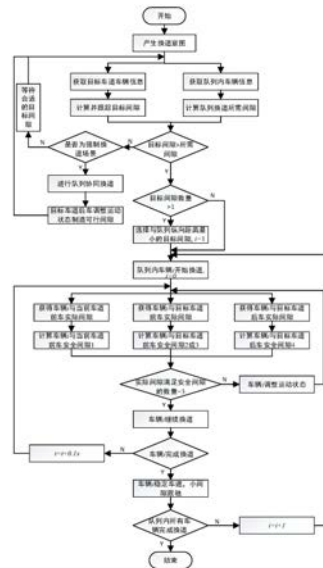
权利要求书4页 说明书11页 附图3页

(54) 发明名称

一种智能网联队列换道方法

(57) 摘要

本发明公开了一种智能网联队列换道方法,包括:产生队列换道意图;计算目标车道车辆动态间隙;计算队列换道所需间隙;判断目标车道车辆动态间隙是否大于队列换道所需间隙,若大于则选择此间隙作为换道目标间隙;若没有则判断是否属于强制换道,若是则目标车道车辆协助实现队列协同换道;若不是,则等待下一个间隙;队列内车辆逐个开始换道,获得换道车辆与各车辆的实际距离间隙,并计算换道车辆与各车辆的安全间隙,若各实际距离间隙全部满足了计算的安全间隙,则继续进行换道,否则调整换道车辆的运动状态;待所有队列内车辆逐个实现换道,则队列换道完成。本发明可有效实现队列整体换道,为智能网联队列实现安全、稳定地换道提供支撑。



CN 114299755 A

1. 一种智能网联队列换道方法,其特征在于,包括如下步骤:

S1: 队列在行驶过程中,产生队列换道意图;

S2: 通过车路协同技术获得目标车道上队列前后范围内存在的车辆数量、车辆位置信息和各车辆的运动状态,计算并跟踪目标车道车辆之间的动态间隙;

S3: 根据车路协同技术或者队列内部通信获得队列内车辆数量、车辆位置信息和各车辆的运动状态,计算队列换道所需间隙;

S4: 在目标车道上队列前后范围内,判断目标车道车辆之间的动态间隙是否大于队列换道所需间隙,若大于则选择此间隙作为换道目标间隙,转S5;若没有满足此条件的目标车道车辆之间的动态间隙,则判断此时队列换道是否属于强制换道,若是则目标车道车辆协助实现队列协同换道;若不是,则队列等待下一个适合换道的间隙再进行换道,转S2;

S5: 队列内车辆逐个开始换道:获得换道车辆与当前车道前方车辆、目标车道前方车辆和目标车道后方车辆之间的实际距离间隙,并计算换道车辆与当前车道前方车辆之间的安全间隙、换道车辆与目标车道前方车辆之间的安全间隙、换道车辆与目标车道后方车辆之间的安全间隙,若获得的各实际距离间隙全部满足了所述计算的三种安全间隙,则继续进行换道,否则调整换道车辆的运动状态以满足各安全间隙要求;

S6: 在队列内换道车辆实现在目标车道上水平行驶后,换道车辆调整运动状态,实现小间隙队列跟驰行驶;

S7: 待所有队列内车辆逐个实现以上步骤,则队列换道完成。

2. 根据权利要求1所述的智能网联队列换道方法,其特征在于,所述步骤S3计算队列换道所需间隙,具体为:

S3-1: 计算跟驰时队列内车辆*i*与其前方车辆之间的动态间隙:

$$D_i = L_i^{IPF} + L_{i-1}^{IPF}, \text{其中 } n > i \geq 2$$

$$L_i^{IPF} = \frac{1}{2} M_i \gamma \tau \cdot e^{-\beta a_i + \alpha v_i} \cdot \left( -\sqrt{E_v^2 - 4 M_i^2 \lambda \gamma} + E_v \right)$$

$$L_{i-1}^{IPF} = \frac{1}{2} M_{i-1} \gamma \tau \cdot e^{\beta a_{i-1} + \alpha v_{i-1}} \cdot \left( -\sqrt{E_v^2 - 4 M_{i-1}^2 \lambda \gamma} + E_v \right)$$

式中, $D_i$ 为队列内第*i*辆车在跟驰过程中与前方车辆所需保持的安全间隙, $n$ 为队列内车辆的数量;IPF表示队列车辆关系下的安全距离评估, $E_v$ 为队列关系下距离风险评估的阈值; $L_i^{IPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离下界, $L_{i-1}^{IPF}$ 表示车辆*i*的队列前方车辆*i-1*在行驶方向后方的安全距离下界, $a_i$ 和 $a_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的行驶加速度, $v_i$ 和 $v_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的行驶速度; $\alpha$ 和 $\tau$ 是与速度和车道宽度相关的常数, $\lambda$ 和 $\beta$ 分别是与虚拟质量和顺时针夹角相关的常数, $\gamma$ 表示队列车辆关系下车辆整体性相关的常数; $M_i$ 和 $M_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的虚拟质量,其具体公式如下:

$$M_i = m_i (1.566 \times 10^{-14} v_i^{6.687} + 0.3345)$$

式中, $m_i$ 是车辆*i*的实际质量, $v_i$ 是车辆*i*当前的行驶速度;

S3-2: 计算跟驰时队列头车与目标车道前方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙,若无前方车辆则所需间隙为0m;

$$D_1 = L_1^{RPF} + L_f^{RPF}$$

$$L_1^{RPF} = M_1 \lambda \frac{e^{-\beta a_1 + \alpha v_1}}{\tau E_r}$$

$$L_f^{RPF} = M_f \lambda \frac{e^{\beta a_f + \alpha v_f}}{\tau E_r}$$

式中,  $D_1$  表示队列头车与目标车道前方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙, RPF 表示非队列车辆关系下的安全距离评估,  $E_r$  为非队列关系下距离风险评估的阈值;  $L_1^{RPF}$  表示队列头车行驶方向前方的安全距离,  $L_f^{RPF}$  表示队列头车的目标车道前方车辆在行驶方向后方的安全距离,  $a_1$  和  $a_f$  分别表示队列头车和目标车道前方车辆的行驶加速度,  $v_1$  和  $v_f$  分别表示队列头车和目标车道前方车辆的行驶速度,  $M_1$  和  $M_f$  分别表示队列头车和目标车道前方车辆的虚拟质量;

S3-3: 计算跟驰时队列尾车与目标车道后方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙, 若无后方车辆则所需间隙为 0m;

$$D_r = L_r^{RPF} + L_n^{RPF}$$

$$L_r^{RPF} = M_r \lambda \frac{e^{-\beta a_r + \alpha v_r}}{\tau E_r}$$

$$L_n^{RPF} = M_n \lambda \frac{e^{\beta a_n + \alpha v_n}}{\tau E_r}$$

式中,  $D_r$  表示队列尾车与目标车道后方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙,  $L_r^{RPF}$  表示目标车道后方车辆行驶方向前方的安全距离,  $L_n^{RPF}$  表示队列尾车行驶方向后方的安全距离,  $a_r$  和  $a_n$  分别表示目标车道后方车辆与队列尾车的行驶加速度,  $v_r$  和  $v_n$  分别表示目标车道后方车辆与队列尾车的行驶速度,  $M_r$  和  $M_n$  分别表示目标车道后方车辆与队列尾车的虚拟质量;

S3-4: 计算队列换道所需间隙:

$$D_{lane} = D_1 + \sum_{i=2}^n D_i + D_r$$

式中,  $D_{lane}$  为队列换道所需的安全间隙,  $D_1$  表示队列头车与目标车道前方车辆之间所需保持的安全间隙,  $D_i$  表示队列内车辆  $i$  与前方车辆之间所需保持的安全间隙,  $D_r$  表示队列尾车与目标车道后方车辆之间所需保持的安全间隙。

3. 根据权利要求 1 所述的智能网联队列换道方法, 其特征在于, 所述步骤 S4 中判断目标车道车辆动态间隙是否大于队列换道所需间隙, 包括: 若存在一个满足此条件的目标车道车辆动态间隙, 则选择此间隙作为换道目标间隙, 转 S5; 若存在多个满足此条件的目标车道车辆动态间隙, 则选择纵向距离最近的间隙作为换道目标间隙, 转 S5。

4. 根据权利要求 1 所述的智能网联队列换道方法, 其特征在于, 所述步骤 S5 中计算换道车辆与目标车道前方车辆之间的安全间隙, 包括: 判断目标车道前方车辆是否为换道车辆所在队列内部车辆, 并分别计算当目标车道前方车辆为非队列内部车辆或队列内部车辆时

的安全间隙。

5. 根据权利要求1或4所述的智能网联队列换道方法,其特征在于,所述步骤S5中计算换道车辆的各安全间隙,具体为:

S5-1: 计算换道时队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间所需保持的安全间隙1;

$$H_i^1 = L_i^{RPF} \cdot \cos\theta_i + L_f^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_f}{2}$$

$$\text{其中, } L_i^{RPF} = M_i \lambda \frac{e^{-\beta a_i \cos\theta_i + a v_i}}{\tau E_r}, L_f^{RPF} = M_f \lambda \frac{e^{\beta a_f + a v_f}}{\tau E_r}$$

式中, $H_i^1$ 表示队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间所需保持的安全间隙1,RPF表示非队列车辆关系下的安全距离评估, $E_r$ 为非队列关系下距离风险评估的阈值; $L_i^{RPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离, $L_f^{RPF}$ 表示车辆*i*的前方车辆在行驶方向后方的安全距离, $\theta_i$ 表示车辆*i*在换道过程中的转向角, $L_i$ 和 $L_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的车长, $a_i$ 和 $a_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的行驶加速度, $v_i$ 和 $v_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的行驶速度, $M_i$ 和 $M_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的虚拟质量; $\alpha$ 和 $\tau$ 是与速度和车道宽度相关的常数; $\lambda$ 和 $\beta$ 分别是与虚拟质量和顺时针夹角相关的常数;

S5-2: 计算换道时队列中第*i*辆车与目标车道前方车辆之间所需保持的安全间隙;

S5-2.1: 当目标车道前方车辆为非队列车辆时,计算队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆的安全间隙2:

$$H_i^2 = L_i^{RPF} \cdot \cos\theta_i + L_f^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_f}{2}$$

$$\text{其中, } L_i^{RPF} = M_i \lambda \frac{e^{-\beta a_i \cos\theta_i + a v_i}}{\tau E_r}, L_f^{RPF} = M_f \lambda \frac{e^{\beta a_f + a v_f}}{\tau E_r}$$

式中, $H_i^2$ 表示队列中第*i*辆车与作为非队列车辆的目标车道前方车辆之间所需保持的安全间隙2, $L_i^{RPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离, $L_f^{RPF}$ 表示车辆*i*的目标车道前方车辆行驶方向后方的安全距离, $\theta_i$ 表示车辆*i*在换道过程中的转向角, $L_i$ 和 $L_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的车长, $a_i$ 和 $a_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的行驶加速度, $v_i$ 和 $v_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的行驶速度, $M_i$ 和 $M_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的虚拟质量;

S5-2.2: 当目标车道前方车辆同为队列内部车辆时,计算队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间所需保持的安全间隙3,此时的安全要求为间隙维持在区间 $[H_{imin}^3, H_{imax}^3]$ 中,

其中安全间隙下界 $H_{imin}^3$ 计算公式如下:

$$H_{imin}^3 = L_{imin}^{IPF} \cdot \cos\theta_i + L_{i-1min}^{IPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_{i-1}}{2}$$

$$\text{其中, } L_{imin}^{IPF} = \frac{1}{2} M_i \gamma \tau \cdot e^{-\beta a_i \cos\theta_i + a v_i} \cdot \left( -\sqrt{E_v^2 - 4M_i^2 \lambda \gamma} + E_v \right),$$

$$L_{i-1}^{IPF} = \frac{1}{2} M_{i-1} \gamma \tau \cdot e^{\beta a_{i-1} + \alpha v_{i-1}} \cdot (-\sqrt{E_v^2 - 4M_{i-1}^2 \lambda \gamma} + E_v)$$

式中,  $H_{i \min}^3$  表示队列中第  $i$  辆车与当前车道前方车辆之间的安全间隙 3 的安全下界, IPF 表示队列车辆关系下的安全距离评估,  $E_v$  为队列关系下距离风险评估的阈值;  $L_{i \min}^{IPF}$  表示车辆  $i$  行驶方向前方的安全距离下界,  $\theta_i$  表示车辆  $i$  在换道过程中的转向角,  $L_{i-1 \min}^{IPF}$  表示车辆  $i$  的队列前方车辆  $i-1$  在行驶方向后方的安全距离下界,  $L_i$  和  $L_{i-1}$  分别表示车辆  $i$  和队列前方车辆  $i-1$  的车长,  $a_i$  和  $a_{i-1}$  分别表示车辆  $i$  和队列前方车辆  $i-1$  的行驶加速度,  $v_i$  和  $v_{i-1}$  分别表示车辆  $i$  和队列前方车辆  $i-1$  的行驶速度,  $M_i$  和  $M_{i-1}$  分别表示车辆  $i$  和队列前方车辆  $i-1$  的虚拟质量;

其中安全间隙上界  $H_{i \max}^3$  计算公式如下:

$$H_{i \max}^3 = L_{i \max}^{IPF} \cdot \cos \theta_i + L_{i-1 \max}^{IPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos \theta_i + \frac{L_{i-1}}{2}$$

$$\text{其中, } L_{i \max}^{IPF} = \frac{1}{2} M_i \gamma \tau \cdot e^{-\beta a_i \cos \theta_i + \alpha v_i} \cdot \left( \sqrt{E_v^2 - 4M_i^2 \lambda \gamma} + E_v \right),$$

$$L_{i-1 \max}^{IPF} = \frac{1}{2} M_{i-1} \gamma \tau \cdot e^{\beta a_{i-1} + \alpha v_{i-1}} \cdot \left( \sqrt{E_v^2 - 4M_{i-1}^2 \lambda \gamma} + E_v \right)$$

式中,  $H_{i \max}^3$  表示队列中第  $i$  辆车与当前车道前方车辆之间安全间隙 3 的安全上界,  $L_{i \max}^{IPF}$  表示车辆  $i$  行驶方向前方的安全距离上界,  $L_{i-1 \max}^{IPF}$  表示车辆  $i$  的队列前方车辆  $i-1$  在行驶方向后方的安全距离上界;

S5-3: 计算换道时队列中第  $i$  辆车与目标车道后方车辆之间所需保持的安全间隙 4:

$$H_i^4 = \begin{cases} L_i^{RPF} \cdot \cos \theta_i + L_r^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos \theta_i + \frac{L_r}{2} + \sum_i^{n-1} D_{i+1} & (i \neq n) \\ L_i^{RPF} \cdot \cos \theta_i + L_r^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos \theta_i + \frac{L_r}{2} & (i = n) \end{cases}$$

$$\text{其中, } L_r^{RPF} = M_r \lambda \frac{e^{-\beta a_r + \alpha v_r}}{\tau E_r}, \quad L_i^{RPF} = M_i \lambda \frac{e^{\beta a_i \cos \theta_i + \alpha v_i}}{\tau E_r}$$

式中,  $H_i^4$  表示队列中第  $i$  辆车与目标车道后方车辆之间所需保持的安全间隙 4,  $D_{i+1}$  表示队列内各车辆  $i+1$  与前方同队列车辆  $i$  之间的动态安全间隙, RPF 表示非队列车辆关系下的安全距离评估,  $E_r$  为非队列关系下距离风险评估的阈值;  $L_r^{RPF}$  表示车辆  $i$  的后方车辆在行驶方向前方的安全距离,  $L_i^{RPF}$  表示车辆  $i$  行驶方向后方的安全距离,  $n$  为队列内车辆的数量,  $\theta_i$  表示车辆  $i$  在换道过程中的转向角,  $L_i$  和  $L_r$  分别表示车辆  $i$  和目标车道后方车辆的车长,  $a_i$  和  $a_r$  分别表示车辆  $i$  和目标车道后方车辆的行驶加速度,  $v_i$  和  $v_r$  分别表示车辆  $i$  和目标车道后方车辆的行驶速度,  $M_i$  和  $M_r$  分别表示车辆  $i$  和目标车道后方车辆的虚拟质量。

## 一种智能网联队列换道方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种智能网联队列换道方法,属于智能网联汽车的技术领域。

### 背景技术

[0002] 随着运输需求的逐渐增加,汽车保有量和里程数不断攀升,随之而来的是交通事故的频发。然而智能网联技术的发展给交通安全和效率提供了新的机会,网智能网联车队由于其能有效提高驾驶安全性、减少车辆运行阻力、提高交通通信效率,并且可以减少能耗和尾气污染,因此逐渐成为研究热点。

[0003] 队列换道是队列行驶中不可避免需要解决的问题,队列换道远远复杂于单车换道,因此对换道的流程和安全间隙计算具有较高的要求。目前,高速公路上队列进行换道的相关技术采用了不同的换道流程来实现换道,相似的是需要队列重新编组,队列内通过先超车然后变道的方式,流程复杂并且超车带来的碰撞风险大;同时现有技术中多重于流程的设计,缺少对队列换道安全间隙的深入研究,安全间隙在不同的主体间和不同的运动状态下不是一个定值,因此需要对安全间隙进行分主体和状态进行不同分析。

[0004] 现有技术中,公开号为CN 111824147A的中国发明专利公开了一种队列换道的方法,该方法包括如下步骤:1)根据车队前进方向,依次对车辆进行编号 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_x$ …… $V_n$ ,队列行驶车速为 $v$ ;2) $V_x$ 判断与目标车道内后方车辆是否满足安全距离;3)车辆 $V_x$ 变道以后,其余的车辆 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ …… $V_n$ 形成新队列;4)新队列的尾车 $V_n$ ,与车辆 $V_x$ ,保持水平距离,避免在目标车道内被超车;5) $V_1$ 判断与目标车道内前方车辆是否满足安全距离;6)确认目标车道内无其他车辆;7)条件同时满足时,新队列集体换道8)将完成换道的状态进行反馈操作。然而上述方法要求队列集体进行换道,在实际应用过程中要求苛刻,难以实现,通常以逐个换道的方式进行整体队列的换道;另外上述方法要求队列换道需要满足安全距离,然而队列内车辆间的安全距离和队列车辆与外部车辆间的安全距离存在差别,缺少对安全距离进行深入设计。

### 发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题在于克服现有方法在队列换道时无法对安全间隙进行分主体和状态进行不同分析,缺少对队列换道安全间隙的深入研究,而提供一种智能网联队列换道方法,为智能网联队列安全、稳定换道提供技术支持和保障。

[0006] 本发明具体采用以下技术方案解决上述技术问题:

[0007] 一种智能网联队列换道方法,包括如下步骤:

[0008] S1:队列在行驶过程中,产生队列换道意图;

[0009] S2:通过车路协同技术获得目标车道上队列前后范围内存在的车辆数量、车辆位置信息和各车辆的运动状态,计算并跟踪目标车道车辆之间的动态间隙;

[0010] S3:根据车路协同技术或者队列内部通信获得队列内车辆数量、车辆位置信息和各车辆的运动状态,计算队列换道所需间隙;

[0011] S4:在目标车道上队列前后范围内,判断目标车道车辆之间的动态间隙是否大于队列换道所需间隙,若大于则选择此间隙作为换道目标间隙,转S5;若没有满足此条件的目标车道车辆之间的动态间隙,则判断此时队列换道是否属于强制换道,若是则目标车道车辆协助实现队列协同换道;若不是,则队列等待下一个适合换道的间隙再进行换道,转S2;

[0012] S5:队列内车辆逐个开始换道:获得换道车辆与当前车道前方车辆、目标车道前方车辆和目标车道后方车辆之间的实际距离间隙,并计算换道车辆与当前车道前方车辆之间的安全间隙、换道车辆与目标车道前方车辆之间的安全间隙、换道车辆与目标车道后方车辆之间的安全间隙,若获得的各实际距离间隙全部满足了所述计算的三种安全间隙,则继续进行换道,否则调整换道车辆的运动状态以满足各安全间隙要求;

[0013] S6:在队列内换道车辆实现在目标车道上水平行驶后,换道车辆调整运动状态,实现小间隙队列跟驰行驶;

[0014] S7:待所有队列内车辆逐个实现以上步骤,则队列换道完成。

[0015] 进一步地,作为本发明的一种优选方案,所述步骤S3计算队列换道所需间隙,具体为:

[0016] S3-1:计算跟驰时队列内车辆*i*与其前方车辆之间的动态间隙:

$$[0017] \quad D_i = L_i^{IPF} + L_{i-1}^{IPF}, \text{其中 } n > i \geq 2$$

$$[0018] \quad L_i^{IPF} = \frac{1}{2} M_i \gamma \tau \cdot e^{-\beta a_i + \alpha v_i} \cdot (-\sqrt{E_v^2 - 4M_i^2 \lambda \gamma} + E_v)$$

$$[0019] \quad L_{i-1}^{IPF} = \frac{1}{2} M_{i-1} \gamma \tau \cdot e^{\beta a_{i-1} + \alpha v_{i-1}} \cdot (-\sqrt{E_v^2 - 4M_{i-1}^2 \lambda \gamma} + E_v)$$

[0020] 式中, $D_i$ 为队列内第*i*辆车在跟驰过程中与前方车辆所需保持的安全间隙, $n$ 为队列内车辆的数量,IPF表示队列车辆关系下的安全距离评估, $E_v$ 为队列关系下距离风险评估的阈值; $L_i^{IPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离下界, $L_{i-1}^{IPF}$ 表示车辆*i*的队列前方车辆*i-1*在行驶方向后方的安全距离下界, $a_i$ 和 $a_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的行驶加速度, $v_i$ 和 $v_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的行驶速度; $\alpha$ 和 $\tau$ 是与速度和车道宽度相关的常数, $\lambda$ 和 $\beta$ 分别是与虚拟质量和顺时针夹角相关的常数, $\gamma$ 表示队列车辆关系下车辆整体性相关的常数; $M_i$ 和 $M_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的虚拟质量,其具体公式如下:

$$[0021] \quad M_i = m_i (1.566 \times 10^{-14} v_i^{6.687} + 0.3345)$$

[0022] 式中, $m_i$ 是车辆*i*的实际质量, $v_i$ 是车辆*i*当前的行驶速度;

[0023] S3-2:计算跟驰时队列头车与目标车道前方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙,若无前方车辆则所需间隙为0m;

$$[0024] \quad D_1 = L_1^{RPF} + L_f^{RPF}$$

$$[0025] \quad L_1^{RPF} = M_1 \lambda \frac{e^{-\beta a_1 + \alpha v_1}}{\tau E_r}$$

$$[0026] \quad L_f^{RPF} = M_f \lambda \frac{e^{\beta a_f + \alpha v_f}}{\tau E_r}$$

[0027] 式中,  $D_1$  表示队列头车与目标车道前方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙, RPF表示非队列车辆关系下的安全距离评估,  $E_r$  为非队列关系下距离风险评估的阈值;  $L_1^{RPF}$  表示队列头车行驶方向前方的安全距离,  $L_f^{RPF}$  表示队列头车的目标车道前方车辆在行驶方向后方的安全距离,  $a_1$  和  $a_f$  分别表示队列头车和目标车道前方车辆的行驶加速度,  $v_1$  和  $v_f$  分别表示队列头车和目标车道前方车辆的行驶速度,  $M_1$  和  $M_f$  分别表示队列头车和目标车道前方车辆的虚拟质量;

[0028] S3-3: 计算跟驰时队列尾车与目标车道后方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙, 若无后方车辆则所需间隙为0m;

$$[0029] \quad D_r = L_r^{RPF} + L_n^{RPF}$$

$$[0030] \quad L_r^{RPF} = M_r \lambda \frac{e^{-\beta a_r + \alpha v_r}}{\tau E_r}$$

$$[0031] \quad L_n^{RPF} = M_n \lambda \frac{e^{\beta a_n + \alpha v_n}}{\tau E_r}$$

[0032] 式中,  $D_r$  表示队列尾车与目标车道后方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙,  $L_r^{RPF}$  表示队列目标车道后方车辆行驶方向前方的安全距离,  $L_n^{RPF}$  表示队列尾车行驶方向后方的安全距离,  $a_r$  和  $a_n$  分别表示目标车道后方车辆与队列尾车的行驶加速度,  $v_r$  和  $v_n$  分别表示目标车道后方车辆与队列尾车的行驶速度,  $M_r$  和  $M_n$  分别表示目标车道后方车辆与队列尾车的虚拟质量;

[0033] S3-4: 计算队列换道所需间隙:

$$[0034] \quad D_{lane} = D_1 + \sum_{i=2}^n D_i + D_r$$

[0035] 式中,  $D_{lane}$  为队列换道所需的安全间隙,  $D_1$  表示队列头车与目标车道前方车辆之间所需保持的安全间隙,  $D_i$  表示队列内车辆  $i$  与前方车辆之间所需保持的安全间隙,  $D_r$  表示队列尾车与目标车道后方车辆之间所需保持的安全间隙。

[0036] 进一步地, 作为本发明的一种优选方案, 所述步骤S4中判断目标车道车辆动态间隙是否大于队列换道所需间隙, 包括: 若存在一个满足此条件的目标车道车辆动态间隙, 则选择此间隙作为换道目标间隙, 转S5; 若存在多个满足此条件的目标车道车辆动态间隙, 则选择纵向距离最近的间隙作为换道目标间隙, 转S5。

[0037] 进一步地, 作为本发明的一种优选方案, 所述步骤S5中计算换道车辆与目标车道前方车辆之间的安全间隙, 包括: 判断目标车道前方车辆是否为换道车辆所在队列内部车辆, 并分别计算当目标车道前方车辆为非队列内部车辆或队列内部车辆时的安全间隙。

[0038] 进一步地, 作为本发明的一种优选方案, 所述步骤S5中计算换道车辆的各安全间隙, 具体为:

[0039] S5-1: 计算换道时队列中第  $i$  辆车与当前车道前方车辆之间所需保持的安全间隙 1;

$$[0040] \quad H_i^1 = L_i^{RPF} \cdot \cos\theta_i + L_f^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_f}{2}$$



[0041] 其中,  $L_i^{RPF} = M_i \lambda \frac{e^{-\beta a_i \cos \theta_i + \alpha v_i}}{\tau E_r}$ ,  $L_f^{RPF} = M_f \lambda \frac{e^{\beta a_f + \alpha v_f}}{\tau E_r}$

[0042] 式中,  $H_i^1$ 表示队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间所需保持的安全间隙1, RPF表示非队列车辆关系下的安全距离评估,  $E_r$ 为非队列关系下距离风险评估的阈值;  $L_i^{RPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离,  $L_f^{RPF}$ 表示车辆*i*的前方车辆在行驶方向后方的安全距离,  $\theta_i$ 表示车辆*i*在换道过程中的转向角,  $L_i$ 和 $L_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的车长,  $a_i$ 和 $a_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的行驶加速度,  $v_i$ 和 $v_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的行驶速度,  $M_i$ 和 $M_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的虚拟质量;  $\alpha$ 和 $\tau$ 是与速度和车道宽度相关的常数;  $\lambda$ 和 $\beta$ 分别是与虚拟质量和顺时针夹角相关的常数;

[0043] S5-2: 计算换道时队列中第*i*辆车与目标车道前方车辆之间所需保持的安全间隙;

[0044] S5-2.1: 当目标车道前方车辆为非队列车辆时, 计算队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆的安全间隙2:

[0045]  $H_i^2 = L_i^{RPF} \cdot \cos \theta_i + L_f^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos \theta_i + \frac{L_f}{2}$

[0046] 其中,  $L_i^{RPF} = M_i \lambda \frac{e^{-\beta a_i \cos \theta_i + \alpha v_i}}{\tau E_r}$ ,  $L_f^{RPF} = M_f \lambda \frac{e^{\beta a_f + \alpha v_f}}{\tau E_r}$

[0047] 式中,  $H_i^2$ 表示队列中第*i*辆车与作为非队列车辆的目标车道前方车辆之间所需保持的安全间隙2,  $L_i^{RPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离,  $L_f^{RPF}$ 表示车辆*i*的目标车道前方车辆行驶方向后方的安全距离,  $\theta_i$ 表示车辆*i*在换道过程中的转向角,  $L_i$ 和 $L_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的车长,  $a_i$ 和 $a_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的行驶加速度,  $v_i$ 和 $v_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的行驶速度,  $M_i$ 和 $M_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的虚拟质量;

[0048] S5-2.2: 当目标车道前方车辆同为队列内部车辆时, 计算队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间所需保持的安全间隙3, 此时的安全要求为间隙维持在区间 $[H_{imin}^3, H_{imax}^3]$ 中, 其中安全间隙下界 $H_{imin}^3$ 计算公式如下:

[0049]  $H_{imin}^3 = L_{i \min}^{IPF} \cdot \cos \theta_i + L_{i-1 \min}^{IPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos \theta_i + \frac{L_{i-1}}{2}$

[0050] 其中,  $L_{i \min}^{IPF} = \frac{1}{2} M_i \gamma \tau \cdot e^{-\beta a_i \cos \theta_i + \alpha v_i} \cdot (-\sqrt{E_v^2 - 4M_i^2 \lambda \gamma} + E_v)$ ,

[0051]  $L_{i-1 \min}^{IPF} = \frac{1}{2} M_{i-1} \gamma \tau \cdot e^{\beta a_{i-1} + \alpha v_{i-1}} \cdot (-\sqrt{E_v^2 - 4M_{i-1}^2 \lambda \gamma} + E_v)$

[0052] 式中,  $H_{imin}^3$ 表示队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间的安全间隙3的安全下界, IPF表示队列车辆关系下的安全距离评估,  $E_v$ 为队列关系下距离风险评估的阈值;  $L_{i \min}^{IPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离下界,  $\theta_i$ 表示车辆*i*在换道过程中的转向角,  $L_{i-1 \min}^{IPF}$ 表示车辆*i*的队列前方车辆*i-1*在行驶方向后方的安全距离下界,  $L_i$ 和 $L_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的车长,  $a_i$ 和 $a_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的行驶加速

度,  $v_i$  和  $v_{i-1}$  分别表示车辆  $i$  和队列前方车辆  $i-1$  的行驶速度,  $M_i$  和  $M_{i-1}$  分别表示车辆  $i$  和队列前方车辆  $i-1$  的虚拟质量;

[0053] 其中安全间隙上界  $H_{imax}^3$  计算公式如下:

$$[0054] \quad H_{imax}^3 = L_i^{IPF \max} \cdot \cos\theta_i + L_{i-1}^{IPF \max} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_{i-1}}{2}$$

$$[0055] \quad \text{其中, } L_i^{IPF \max} = \frac{1}{2} M_i \gamma \tau \cdot e^{-\beta a_i \cos\theta_i + a v_i} \cdot \left( \sqrt{E_v^2 - 4 M_i^2 \lambda \gamma + E_v} \right),$$

$$[0056] \quad L_{i-1}^{IPF \max} = \frac{1}{2} M_{i-1} \gamma \tau \cdot e^{\beta a_{i-1} + a v_{i-1}} \cdot \left( \sqrt{E_v^2 - 4 M_{i-1}^2 \lambda \gamma + E_v} \right)$$

[0057] 式中,  $H_{imax}^3$  表示队列中第  $i$  辆车与当前车道前方车辆之间安全间隙 3 的安全上界,  $L_i^{IPF \max}$  表示车辆  $i$  行驶方向前方的安全距离上界,  $L_{i-1}^{IPF \max}$  表示车辆  $i$  的队列前方车辆  $i-1$  在行驶方向后方的安全距离上界;

[0058] S5-3: 计算换道时队列中第  $i$  辆车与目标车道后方车辆之间所需保持的安全间隙 4:

$$[0059] \quad H_i^4 = \begin{cases} L_i^{RPF} \cdot \cos\theta_i + L_r^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_r}{2} + \sum_i^{n-1} D_{i+1} & (i \neq n) \\ L_i^{RPF} \cdot \cos\theta_i + L_r^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_r}{2} & (i = n) \end{cases}$$

$$[0060] \quad \text{其中, } L_r^{RPF} = M_r \lambda \frac{e^{-\beta a_r + a v_r}}{\tau E_r}, \quad L_i^{RPF} = M_i \lambda \frac{e^{\beta a_i \cos\theta_i + a v_i}}{\tau E_r}$$

[0061] 式中,  $H_i^4$  表示队列中第  $i$  辆车与目标车道后方车辆之间所需保持的安全间隙 4,  $D_{i+1}$  表示队列内各车辆  $i+1$  与前方同队列车辆  $i$  之间的动态安全间隙, RPF 表示非队列车辆关系下的安全距离评估,  $E_r$  为非队列关系下距离风险评估的阈值;  $L_r^{RPF}$  表示车辆  $i$  的后方车辆在行驶方向前方的安全距离,  $L_i^{RPF}$  表示车辆  $i$  行驶方向后方的安全距离,  $n$  为队列内车辆的数量,  $\theta_i$  表示车辆  $i$  在换道过程中的转向角,  $L_i$  和  $L_r$  分别表示车辆  $i$  和目标车道后方车辆的车长,  $a_i$  和  $a_r$  分别表示车辆  $i$  和目标车道后方车辆的行驶加速度,  $v_i$  和  $v_r$  分别表示车辆  $i$  和目标车道后方车辆的行驶速度,  $N_i$  和  $N_r$  分别表示车辆  $i$  和目标车道后方车辆的虚拟质量。

[0062] 本发明采用上述技术方案, 能产生如下技术效果:

[0063] 本发明的方法, 结合车路协同下队列自动驾驶的现实情况, 在队列产生换道意图后, 首先筛选目标车道是否存在的间隙, 其次设计了队列和非队列车辆在跟驰下不同的安全间隙计算方式, 得出队列整体换道所需的安全间隙供目标车道可行间隙的选择; 在队列内车辆逐个换道过程中, 对单个换道车辆与当前车道前方车辆、目标车道前方车辆和目标车道后方车辆之间的间隙进行分析得出不同车辆关系下的安全间隙计算方式, 为车辆在换道时的间隙控制提供安全阈值; 安全间隙满足后进行队列车辆逐个换道, 计算换道场景下队列关系和非队列关系车辆间的安全间隙, 在换道过程中以 0.1s 为步长间隙安全校验, 并进行适当的运动状态调整, 驶入目标车道后调整运动状态到小间隙跟驰; 最终实现队列换

道完成。

[0064] 与现有技术相比,本发明的方法,设计了队列内车辆逐个换道实现队列整体换道的换道流程;并将队列车辆之间的安全间隙与非队列车辆之间的安全间隙进行了区分,同时在跟驰场景和换道场景下分别进行了分析,提供相应的安全间隙计算方式为队列车辆轨迹规划提供安全校验标准,为智能网联队列实现安全、稳定地换道提供支撑。同时,本发明方法计算流程清晰、计算简单,在保证换道安全性的前提下拥有较快的计算速度。

### 附图说明

- [0065] 图1为本发明实施例的方法流程图。  
 [0066] 图2为本发明实施例中高速公路上某路段上队列换道意图生成的场景图。  
 [0067] 图3本发明实施例中队列可换道场景图。  
 [0068] 图4本发明实施例中队列在不同运动状态-换道安全间隙曲线图。  
 [0069] 图5本发明实施例中队列内头车换道场景图。  
 [0070] 图6本发明实施例中队列内中间车辆换道场景图。

### 具体实施方式

[0071] 下面结合具体实施例,进一步阐明本发明,应理解这些实施例仅用于说明本发明而并不用于限制本发明的范围,在阅读了本发明之后,本领域技术人员对本发明的各种等价形式的修改均落于本申请所附权利要求所限定的范围。

[0072] 如图1所示,本发明涉及一种智能网联队列换道方法,主要包括如下步骤:

[0073] S1:队列在行驶过程中,由于追求更高的安全性或行驶速度,产生队列换道意图。

[0074] S2:通过车路协同技术获得目标车道上队列前后范围内存在的车辆数量、车辆位置信息和各车辆的运动状态,计算并跟踪目标车道各个车辆之间的动态间隙;其中,各车辆的运动状态包括车辆的速度、加速度信息。

[0075] S3:根据车路协同技术或者队列内部通信获得队列内车辆数量、车辆位置信息和各车辆的运动状态,其中各车辆的运动状态包括速度、加速度信息,计算队列换道所需间隙,具体如下:

[0076] S3-1:计算跟驰时队列内车辆*i*与其前方车辆之间的动态间隙:

$$[0077] \quad D_i = L_i^{IPF} + L_{i-1}^{IPF}, \text{其中 } n > i \geq 2$$

$$[0078] \quad L_i^{IPF} = \frac{1}{2} M_i \gamma \tau \cdot e^{-\beta a_i + \alpha v_i} \cdot (-\sqrt{E_v^2 - 4M_i^2 \lambda \gamma} + E_v)$$

$$[0079] \quad L_{i-1}^{IPF} = \frac{1}{2} M_{i-1} \gamma \tau \cdot e^{\beta a_{i-1} + \alpha v_{i-1}} \cdot (-\sqrt{E_v^2 - 4M_{i-1}^2 \lambda \gamma} + E_v)$$

[0080] 式中, $D_i$ 为队列内第*i*辆车在跟驰过程中与前方车辆所需保持的安全间隙, $n$ 为队列内车辆的数量,IPF表示队列车辆关系下的安全距离评估, $E_v$ 为队列关系下距离风险评估的阈值; $L_i^{IPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离下界, $L_{i-1}^{IPF}$ 表示车辆*i*的队列前方车辆*i-1*在行驶方向后方的安全距离下界, $a_i$ 和 $a_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的行驶加速度, $v_i$ 和 $v_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的行驶速度; $M_i$ 和 $M_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列

前方车辆*i*-1的虚拟质量,其具体公式如下:

$$[0081] \quad M_i = m_i (1.566 \times 10^{-14} v_i^{6.687} + 0.3345)$$

[0082] 式中, $m_i$ 是车辆*i*的实际质量, $v_i$ 是车辆*i*当前的行驶速度。

[0083] 另外, $a$ 和 $\tau$ 是与速度和车道宽度相关的常数,这里 $\alpha$ 取值0.074, $\tau$ 取值2.699, $\lambda$ 和 $\beta$ 分别是与虚拟质量和顺时针夹角相关的常数,这里 $\lambda$ 取值0.061, $\beta$ 取值0.233, $\gamma$ 表示队列车辆关系下车辆整体性相关的常数,这里 $\gamma$ 取值0.000401853。

[0084] S3-2:计算跟驰时队列头车与目标车道前方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙,若无前方车辆则所需间隙为0m;

$$[0085] \quad D_1 = L_1^{RPF} + L_f^{RPF}$$

$$[0086] \quad L_1^{RPF} = M_1 \lambda \frac{e^{-\beta a_1 + \alpha v_1}}{\tau E_r}$$

$$[0087] \quad L_f^{RPF} = M_f \lambda \frac{e^{\beta a_f + \alpha v_f}}{\tau E_r}$$

[0088] 式中, $D_1$ 表示队列头车与目标车道前方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙,RPF表示非队列车辆关系下的安全距离评估, $E_r$ 为非队列关系下距离风险评估的阈值;

$L_1^{RPF}$ 表示队列头车行驶方向前方的安全距离, $L_f^{RPF}$ 表示队列头车的目标车道前方车辆Front Vehicle在行驶方向后方的安全距离, $a_1$ 和 $a_f$ 分别表示队列头车和目标车道前方车辆的行驶加速度, $v_1$ 和 $v_f$ 分别表示队列头车和目标车道前方车辆的行驶速度, $M_1$ 和 $M_f$ 分别表示队列头车和目标车道前方车辆的虚拟质量;

[0089] S3-3:计算跟驰时队列尾车与目标车道后方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙,若无后方车辆则所需间隙为0m;

$$[0090] \quad D_r = L_r^{RPF} + L_n^{RPF}$$

$$[0091] \quad L_r^{RPF} = M_r \lambda \frac{e^{-\beta a_r + \alpha v_r}}{\tau E_r}$$

$$[0092] \quad L_n^{RPF} = M_n \lambda \frac{e^{\beta a_n + \alpha v_n}}{\tau E_r}$$

[0093] 式中, $D_r$ 表示队列尾车与目标车道后方车辆之间为行驶安全所需保持的安全间隙, $L_r^{RPF}$ 表示队列目标车道后方车辆Rear Vehicle行驶方向前方的安全距离, $L_n^{RPF}$ 表示队列尾车行驶方向后方的安全距离, $a_r$ 和 $a_n$ 分别表示目标车道后方车辆与队列尾车的行驶加速度, $v_r$ 和 $v_n$ 分别表示目标车道后方车辆与队列尾车的行驶速度, $M_r$ 和 $M_n$ 分别表示目标车道后方车辆与队列尾车的虚拟质量;

[0094] S3-4:计算队列换道所需间隙:

$$[0095] \quad D_{lane} = D_1 + \sum_{i=2}^n D_i + D_r$$

[0096] 式中, $D_{lane}$ 为队列换道所需的安全间隙, $D_1$ 表示队列头车与目标车道前方车辆之间所需保持的安全间隙, $D_i$ 表示队列内车辆*i*与前方车辆之间所需保持的安全间隙, $D_r$ 表示队

列尾车与目标车道后方车辆之间所需保持的安全间隙。

[0097] S4:在目标车道上队列前后范围内,判断目标车道车辆之间的动态间隙是否大于队列换道所需间隙,若大于则选择此间隙作为换道目标间隙,转S5;若没有满足此条件的目标车道车辆之间的动态间隙,则判断此时队列换道是否属于强制换道,所述强制换道包括前方事故、前方障碍物、前方进出匝道等场景下队列必须进行换道等,若是则目标车道车辆协助实现队列协同换道,即目标车道后方车辆进行减速,增加间隙致队列换道需求间隙的大小;若不是,则队列等待下一个适合换道的间隙再进行换道,转S2;

[0098] 其中,所述步骤S4中判断目标车道车辆动态间隙是否大于队列换道所需间隙,包括:若存在一个满足此条件的目标车道车辆动态间隙,则选择此间隙作为换道目标间隙,转S5;若存在多个满足此条件的目标车道车辆动态间隙,则选择纵向距离最近的间隙作为换道目标间隙,转S5。

[0099] S5:队列内车辆逐个开始换道:队列中第*i*辆车*t*时刻换道,获得换道车辆*i*与当前车道前方车辆、目标车道前方车辆和目标车道后方车辆之间的实际距离间隙,并计算换道车辆*i*与当前车道前方车辆之间的安全间隙1、换道车辆与目标车道前方车辆之间的安全间隙2或安全间隙3、换道车辆与目标车道后方车辆之间的安全间隙4,若获得的各实际距离间隙全部满足了所述计算的三种安全间隙,则继续进行换道,否则调整换道车辆*i*的运动状态以满足各安全间隙要求;所述换道时安全间隙计算方式如下:

[0100] S5-1:计算换道时队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间所需保持的安全间隙1;

$$[0101] \quad H_i^1 = L_i^{RPF} \cdot \cos\theta_i + L_f^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_f}{2}$$

$$[0102] \quad \text{其中, } L_i^{RPF} = M_i \lambda \frac{e^{-\beta a_i \cos\theta_i + a v_i}}{\tau E_r}, \quad L_f^{RPF} = M_f \lambda \frac{e^{\beta a_f + a v_f}}{\tau E_r}$$

[0103] 式中, $H_i^1$ 表示队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间所需保持的安全间隙1,RPF表示非队列车辆关系下的安全距离评估, $E_r$ 为非队列关系下距离风险评估的阈值,这里取值2; $L_i^{RPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离, $L_f^{RPF}$ 表示车辆*i*的前方车辆Front Vehicle在行驶方向后方的安全距离, $\theta_i$ 表示车辆*i*在换道过程中的转向角, $L_i$ 和 $L_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的车长, $a_i$ 和 $a_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的行驶加速度, $v_i$ 和 $v_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的行驶速度, $M_i$ 和 $M_f$ 分别表示车辆*i*和前方车辆的虚拟质量。

[0104] 另外, $\alpha$ 和 $\tau$ 是与速度和车道宽度相关的常数,这里 $\alpha$ 取值0.074, $\tau$ 取值2.699, $\lambda$ 和 $\beta$ 分别是与虚拟质量和顺时针夹角相关的常数,这里 $\lambda$ 取值0.061, $\beta$ 取值0.233。

[0105] S5-2:计算换道时队列中第*i*辆车与目标车道前方车辆之间所需保持的安全间隙;

[0106] S5-2.1:目标车道前方车辆为非队列车辆时,计算队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆的安全间隙2。

$$[0107] \quad H_i^2 = L_i^{RPF} \cdot \cos\theta_i + L_f^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_f}{2}$$

$$[0108] \quad \text{其中, } L_i^{RPF} = M_i \lambda \frac{e^{-\beta a_i \cos\theta_i + a v_i}}{\tau E_r}, \quad L_f^{RPF} = M_f \lambda \frac{e^{\beta a_f + a v_f}}{\tau E_r}$$

[0109] 式中,  $H_i^2$ 表示队列中第*i*辆车与作为非队列车辆的目标车道前方车辆之间所需保持的安全间隙2,  $L_i^{IPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离,  $L_f^{RPF}$ 表示车辆*i*的目标车道前方车辆行驶方向后方的安全距离,  $\theta_i$ 表示车辆*i*在换道过程中的转向角,  $L_i$ 和 $L_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的车长,  $a_i$ 和 $a_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的行驶加速度,  $v_i$ 和 $v_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的行驶速度,  $M_i$ 和 $M_f$ 分别表示车辆*i*和目标车道前方车辆的虚拟质量。

[0110] S5-2.2:目标车道前方车辆同为换道车辆所在队列内部车辆时,计算队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆的安全间隙3,此时的安全要求为间隙维持在区间 $[H_{imin}^3, H_{imax}^3]$ 中,

[0111] 其中安全间隙下界 $H_{imin}^3$ 计算公式如下:

$$[0112] \quad H_{imin}^3 = L_i^{IPF} \cdot \cos\theta_i + L_{i-1}^{IPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_{i-1}}{2}$$

$$[0113] \quad \text{其中, } L_i^{IPF} \cdot \cos\theta_i = \frac{1}{2} M_i \gamma \tau \cdot e^{-\beta a_i \cos\theta_i + a v_i} \cdot (-\sqrt{E_v^2 - 4 M_i^2 \lambda \gamma + E_v}),$$

$$[0114] \quad L_{i-1}^{IPF} = \frac{1}{2} M_{i-1} \gamma \tau \cdot e^{\beta a_{i-1} + a v_{i-1}} \cdot (-\sqrt{E_v^2 - 4 M_{i-1}^2 \lambda \gamma + E_v})$$

[0115] 式中,  $H_{imin}^3$ 表示队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间的安全间隙3的安全下界, IPF表示队列车辆关系下的安全距离评估,  $E_v$ 为队列关系下距离风险评估的阈值,这里取值2;  $L_i^{IPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离下界,  $\theta_i$ 表示车辆*i*在换道过程中的转向角,  $L_{i-1}^{IPF}$ 表示车辆*i*的队列前方车辆*i-1*在行驶方向后方的安全距离下界,  $L_i$ 和 $L_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的车长,  $a_i$ 和 $a_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的行驶加速度,  $v_i$ 和 $v_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的行驶速度,  $M_i$ 和 $M_{i-1}$ 分别表示车辆*i*和队列前方车辆*i-1*的虚拟质量。

[0116] 另外,  $a$ 和 $\tau$ 是与速度和车道宽度相关的常数,这里 $a$ 取值0.074,  $\tau$ 取值2.699,  $\lambda$ 和 $\beta$ 分别是与虚拟质量和顺时针夹角相关的常数,这里 $\lambda$ 取值0.061,  $\beta$ 取值0.233;  $\gamma$ 表示队列车辆关系下车辆整体性相关的常数,这里 $\gamma$ 取值0.000401853。

[0117] 其中安全间隙上界 $H_{imax}^3$ 计算公式如下:

$$[0118] \quad H_{imax}^3 = L_i^{IPF} \cdot \cos\theta_i + L_{i-1}^{IPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_{i-1}}{2}$$

$$[0119] \quad \text{其中, } L_i^{IPF} \cdot \cos\theta_i = \frac{1}{2} M_i \gamma \tau \cdot e^{-\beta a_i \cos\theta_i + a v_i} \cdot \left( \sqrt{E_v^2 - 4 M_i^2 \lambda \gamma + E_v} \right),$$

$$[0120] \quad L_{i-1}^{IPF} = \frac{1}{2} M_{i-1} \gamma \tau \cdot e^{\beta a_{i-1} + a v_{i-1}} \cdot \left( \sqrt{E_v^2 - 4 M_{i-1}^2 \lambda \gamma + E_v} \right)$$

[0121] 式中,  $H_{imax}^3$ 表示队列中第*i*辆车与当前车道前方车辆之间的安全间隙3的安全上界,  $L_i^{IPF}$ 表示车辆*i*行驶方向前方的安全距离上界,  $L_{i-1}^{IPF}$ 表示车辆*i*的队列前方车辆

$i-1$ 在行驶方向后方的安全距离上界。

[0122] S5-3:计算换道时队列中第 $i$ 辆车与目标车道后方车辆间须保持的安全间隙 $4$ ;

$$[0123] \quad H_i^4 = \begin{cases} L_i^{RPF} \cdot \cos\theta_i + L_r^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_r}{2} + \sum_i^{n-1} D_{i+1} & (i \neq n) \\ L_i^{RPF} \cdot \cos\theta_i + L_r^{RPF} - \frac{L_i}{2} \cdot \cos\theta_i + \frac{L_r}{2} & (i = n) \end{cases}$$

$$[0124] \quad \text{其中, } L_r^{RPF} = M_r \lambda \frac{e^{-\beta a_r + \alpha v_r}}{\tau E_r}, \quad L_i^{RPF} = M_i \lambda \frac{e^{\beta a_i \cos\theta_i + \alpha v_i}}{\tau E_r}$$

[0125] 式中,  $H_i^4$ 表示队列中第 $i$ 辆车与目标车道后方车辆之间所需保持的安全间隙 $4$ ,  $D_{i+1}$ 表示队列内各车辆 $i+1$ 与前方同队列车辆 $i$ 之间的动态安全间隙, RPF表示非队列车辆关系下的安全距离评估,  $E_r$ 为非队列关系下距离风险评估的阈值;  $L_r^{RPF}$ 表示车辆 $i$ 的后方车辆在行驶方向前方的安全距离,  $L_i^{RPF}$ 表示车辆 $i$ 行驶方向后方的安全距离,  $n$ 为队列内车辆的数量,  $\theta_i$ 表示车辆 $i$ 在换道过程中的转向角,  $L_i$ 和 $L_r$ 分别表示车辆 $i$ 和目标车道后方车辆的车长,  $a_i$ 和 $a_r$ 分别表示车辆 $i$ 和目标车道后方车辆的行驶加速度,  $v_i$ 和 $v_r$ 分别表示车辆 $i$ 和目标车道后方车辆的行驶速度,  $M_i$ 和 $M_r$ 分别表示车辆 $i$ 和目标车道后方车辆的虚拟质量。

[0126] S6:判断车辆 $i$ 是否已实现在目标车道上水平行驶, 未完成则 $t = t + 0.1s$ , 转S5-1, 完成, 则车辆 $i$ 稳定运动状态, 进行小间隙队列跟驰行驶, 由此在队列内换道车辆实现在目标车道上水平行驶后, 换道车辆调整运动状态, 实现小间隙队列跟驰行驶。

[0127] S7:判断是否队列内所有车辆完成了换道, 未完成则 $i = i + 1$ , 转S5, 均完成则队列换道结束, 即待所有队列内车辆逐个实现以上步骤, 则队列换道完成。

[0128] 因此, 本发明方法将队列车辆之间的安全间隙与非队列车辆之间的安全间隙进行了区分, 设计了队列内车辆逐个换道的流程, 可有效准确的实现队列的整体换道。

[0129] 为了验证本发明方法可有效的实现队列的整体换道, 下面用结合一个验证例进行说明本发明。

[0130] 如图2所示, 本验证例中高速公路上某路段有一队列和各社会车辆在行驶, 白色车辆为队列车辆, 灰色车辆为非队列车辆, 队列正以20m/s的速度进行匀速行驶, 在当前车道行驶前方存在施工路段, 非队列车辆①、⑥、⑦、⑧均已20m/s的速度进行匀速行驶, 队列进行换道的具体流程如下:

[0131] S1:为了避让前方施工区域, 队列产生向左侧车道进行换道的意图。

[0132] S2:通过队列外部通信得到目标车道车辆数为3, 皆以20m/s的速度匀速行驶, 目标车道上的车辆①和车辆⑦两车之间间隙为61.36m, 车辆⑦和车辆⑧两车之间间隙为25.97m。

[0133] S3:通过队列内部通信得到本队列由四辆车②、③、④、⑤组成, 队列内车辆均以20m/s的速度进行匀速行驶, 取距离风险评估阈值为2, 根据公式得到队列内车辆间距为16.04m, 队列头车与其目标车道前方车辆之间为行驶安全所需保持的间隙为40.0m, 队列尾车与其目标车道后方车辆之间为行驶安全所需保持的间隙为39.85m, 由此得到队列换道所需间隙为127.98m。

[0134] S4:判断跟踪的目标车道车辆动态间隙均小于队列换道所需间隙, 两个间隙

61.36m和25.97m均小于127.98m,说明没有可行间隙供以换道,但是此时队列换道是为了避让前方施工区域,属于强制换道,所以车辆⑦辅助队列协同换道,车辆⑦和后续车辆⑧进行减速,如图3所示,使得车辆①与车辆⑦之间的距离达到127.98m。

[0135] 同时,给出了该队列与其目标车道前后非队列车辆即车辆①和⑦在不同速度和加速度下的队列换道安全间隙计算结果,如图4所示,随着车辆①和⑦与队列速度差的增加,即车辆①和⑦运动速度越比队列行驶速度快,则队列换道需要的换道间隙越大;车辆①和⑦运动速度越比队列行驶速度慢,则队列换道需要的换道间隙越小;并且在队列选用不同加速时,不论队列与周围车辆速度差为多少,在相同的速度差情况下,随着换道的加速度减小,换道所需要维持的间隙更小,该具体数值可为智能网联队列车辆的速度决策提供参考依据。

[0136] S5:队列头车进行换道,如图5所示,根据公式计算得到队列头车需要与当前车道前方车辆之间的安全间隙为40.0m,与目标车道前方车辆之间的安全间隙为40.0m,与目标车道后方车辆之间的安全间隙为87.98m,如果获取的队列头车的三个实际距离间隙均满足计算出的三个安全间隙,则继续进行换道,否则调整车辆的运动状态以致满足各安全间隙要求。

[0137] 判断每0.1s判断车辆是不是完成了换道,即车辆已在目标车道上无转向角地行驶,未完成则继续步骤S5,完成了则车辆稳定运动状态,进行小间隙队列跟驰行驶,开始队列内下一个车辆进行换道,如图6场景,根据公式计算得到队列车辆需要与当前车道前方车辆保持的安全间隙为40.0m,与目标车道前方车辆安全间隙的区间为[16.044115, 44.881565]m,与目标车道后方车辆的安全间隙为71.94m,如果实际间隙均满足相应的安全间隙,则继续进行换道,否则调整车辆的运动状态以致满足各安全间隙要求。

[0138] S6:在队列内换道车辆实现在目标车道上水平行驶后,换道车辆调整运动状态,实现小间隙队列跟驰行驶。

[0139] S7:判断是否队列内所有车辆完成了换道,若未完成则继续步骤S5,若队列内所有车辆均完成换道则队列换道结束。

[0140] 综上,本发明方法设计了队列内车辆逐个换道实现队列整体换道的换道流程,并将队列车辆之间的安全间隙与非队列车辆之间的安全间隙进行了区分,同时在跟驰场景和换道场景下分别进行了分析,提供相应的安全间隙计算方式为队列车辆轨迹规划提供安全校验标准,为智能网联队列实现安全、稳定地换道提供支撑。同时,本发明方法计算流程清晰、计算简单,在保证换道安全性的前提下拥有较快的计算速度。

[0141] 上面结合附图对本发明的实施方式作了详细说明,但是本发明并不限于上述实施方式,在本领域普通技术人员所具备的知识范围内,还可以在不脱离本发明宗旨的前提下做出各种变化。



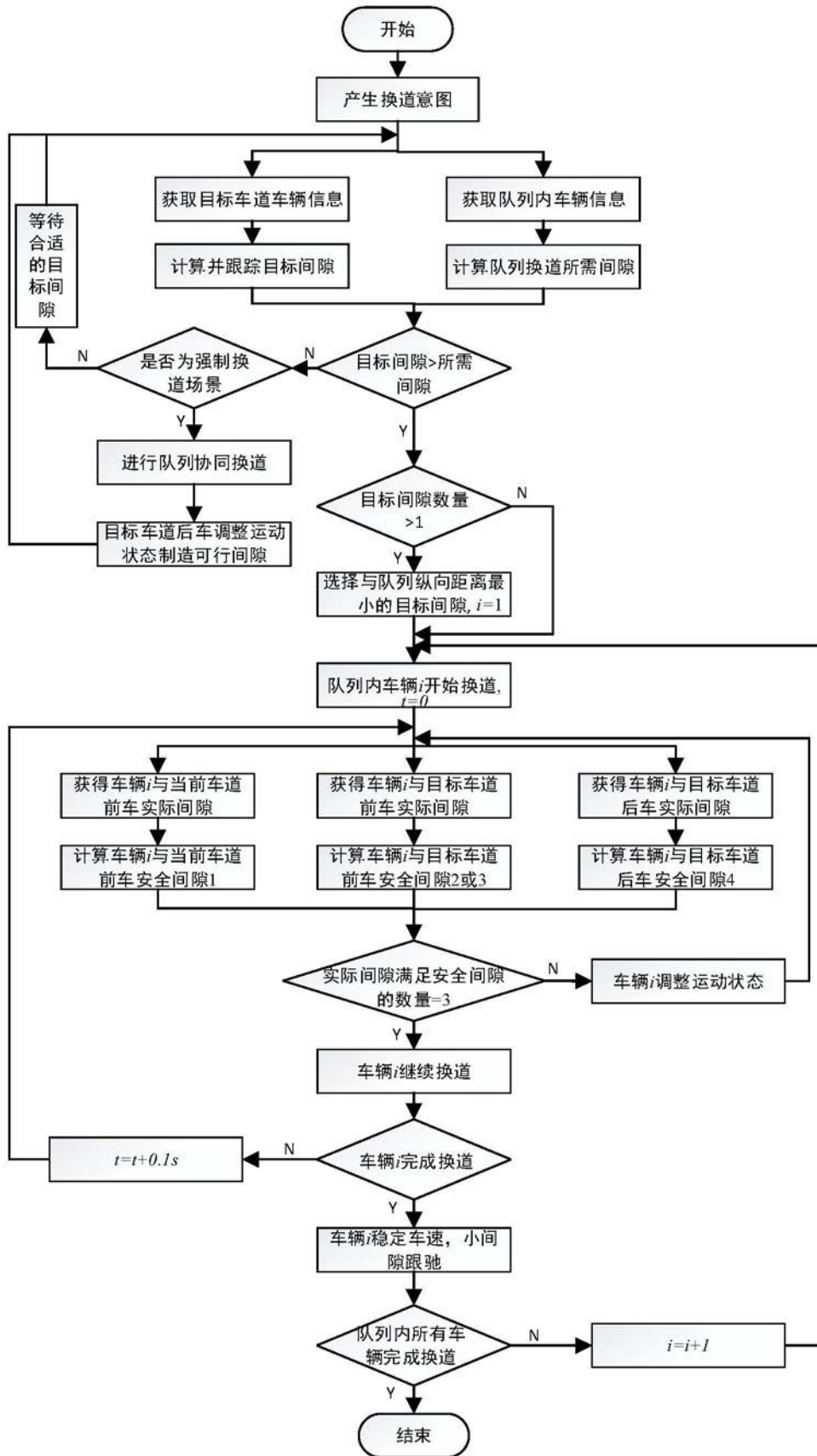


图1

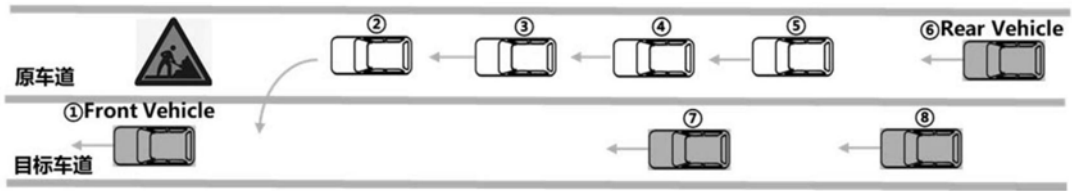


图2

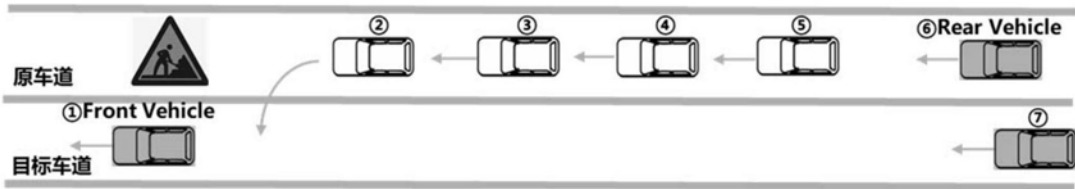


图3

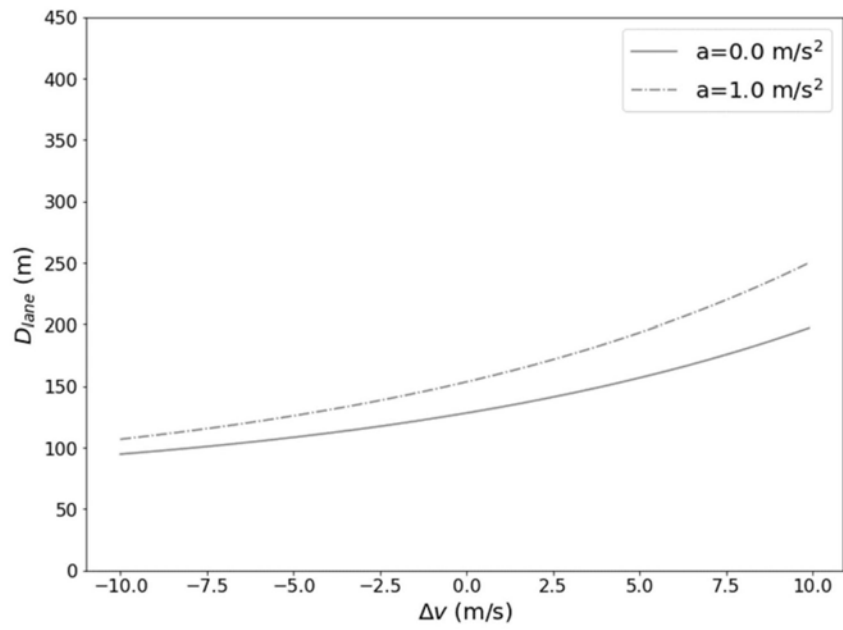


图4

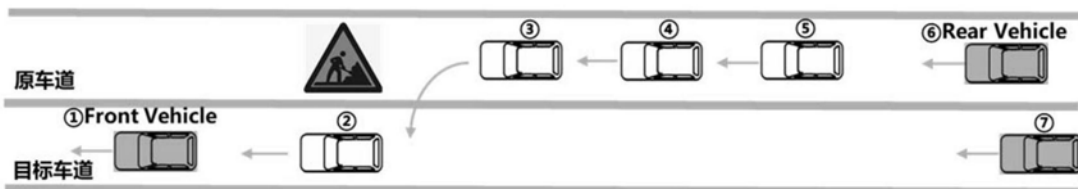


图5

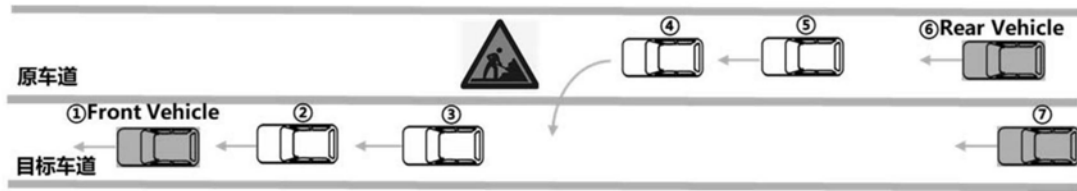


图6