



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118313179 A

(43) 申请公布日 2024. 07. 09

(21) 申请号 202410750831.4

(22) 申请日 2024.06.12

(71) 申请人 宁波朗达科技有限公司

地址 315100 浙江省宁波市鄞州区高新区  
聚贤路587弄15号5#楼028幢21-1

(72) 发明人 应国刚 王康迪 胡洁亮 应柳琪

(74) 专利代理机构 宁波甬心合创知识产权代理  
有限公司 33552

专利代理师 方能祥 郑哲

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

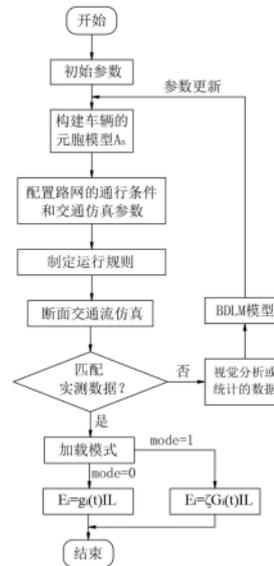
权利要求书4页 说明书15页 附图1页

(54) 发明名称

一种车辆荷载效应模拟方法

(57) 摘要

本申请公开了一种车辆荷载效应模拟方法；步骤为：构建车辆的元胞模型，并配置路网通行条件和交通仿真参数；制定车辆的运行规则，基于制定的规则进行交通仿真模拟并对仿真路段的实际交通数据进行测量统计；在仿真与实测数据相匹配的情况下，对元胞模型在车重加载和轴重加载条件下的荷载效应分别进行计算；在仿真与实测数据不匹配的情况下，对运行参数进行实时更新。本申请的有益效果：本方法通过引入细致的车辆和道路参数，能够更精确地模拟各种交通状况下的车辆行为和相互作用，提高了模拟的详细性和准确性；同时通过使用机器视觉技术和统计数据动态更新仿真参数，能够实时反映道路交通状况的变化，保证仿真结果的时效性和相关性。



1. 一种车辆荷载效应模拟方法,其特征在于,包括如下步骤:

S100: 构建车辆的元胞模型 $A_n = \{P, L, M, W\}$ ,并配置路网通行条件和交通仿真参数;

S200: 制定车辆的运行规则,包括状态更新规则、换道规则和跟驰规则;

S300: 基于制定的规则进行交通仿真模拟并对仿真路段的实际交通数据进行测量统计;

S400: 在仿真数据与实测数据相匹配的情况下,对元胞模型在车重加载和轴重加载条件下的荷载效应分别进行计算;

S500: 在仿真数据与实测数据不匹配的情况下,将元胞模型的初始值作为先验条件,以实测数据为观测数据,采用单变量贝叶斯动态线性模型对元胞模型进行实时更新并重新仿真;

其中, $n$ 表示车辆唯一编号, $P$ 表示元胞运行参数时空矩阵, $L$ 表示车辆位置矩阵, $M$ 表示车辆运动状态矩阵, $W$ 表示车重参数矩阵。

2. 如权利要求1所述的车辆荷载效应模拟方法,其特征在于,元胞运行参数时空矩阵

$P = \{\text{type}, v_L^{\max}, v_{\text{type}}^{\max}, a_{\text{type}}^{\max}, a_{\text{type}}^{\min}, l_n\}$ ;其中, $\text{type}$ 表示车辆类型编号, $v_L^{\max}$ 表示当前车道的最大限速, $v_{\text{type}}^{\max}$ 表示当前车型的最大速度, $a_{\text{type}}^{\max}$ 表示当前车型的最大加速度, $a_{\text{type}}^{\min}$ 表示当前车型的最大刹车加速度, $l_n$ 表示车辆长度;

车辆位置矩阵 $L = \{l_{\text{begin}}, l_{\text{end}}, \text{lane}_{\text{last}}, \text{lane}_{\text{begin}}, \text{lane}_{\text{end}}, \text{lane}_{\text{next}}\}$ ;其中, $l_{\text{begin}}$ 和 $l_{\text{end}}$ 分别表示时步开始和结束时的车辆位置, $\text{lane}_{\text{last}}$ 表示车辆上一次所在车道的编号, $\text{lane}_{\text{begin}}$ 和 $\text{lane}_{\text{end}}$ 分别表示时步开始和结束时车辆所在车道的编号, $\text{lane}_{\text{next}}$ 表示车辆下一次所在车道的编号;

车辆运动状态矩阵 $M = \{v_n, a_n\}$ ;其中, $v_n$ 表示时步开始时车辆速度, $a_n$ 表示时步开始时车辆加速度;

车重参数矩阵 $W = \{G, k, o_f, o_r, d, \dots, d_{k-1}, g, \dots, g_k\}$ ;其中, $G$ 表示车重, $k$ 表示轴数, $o_f$ 和 $o_r$ 分别表示车辆前后悬挂的长度, $d$ 表示轴距, $g$ 表示轴重。

3. 如权利要求2所述的车辆荷载效应模拟方法,其特征在于,路网包括多条不同的路段,对于不同路段的通行条件和交通仿真参数通过环境变量矩阵 $E_m$ 进行表示;

$E_m = \{\text{length}, \text{lane\_num}, v^{\max}, p_{\text{rsd}}, \tau_{\text{type}}, p_{\text{changelane\_m}}, EC_1, \dots, EC_i, \text{mode}\}$ ;

其中, $m$ 表示路段编号, $\text{length}$ 表示 $[1 \times m]$ 路段长度矩阵, $\text{lane\_num}$ 表示 $[1 \times m]$ 路段车道数矩阵, $v^{\max}$ 表示 $[1 \times m]$ 路段最大限速矩阵, $p_{\text{rsd}}$ 表示 $m$ 路段不同车道随机慢化概率, $\tau_{\text{type}}$ 表示不同车型的刹车反应时间, $p_{\text{changelane\_m}}$ 表示 $m$ 路段的换道概率, $EC_i$ 表示第 $i$ 段的效应计算路段, $\text{mode}$ 表示车辆荷载施加方式。

4. 如权利要求3所述的车辆荷载效应模拟方法,其特征在于,对于换道规则的制定包括换道动机、换道条件和换道轨迹的确定;产生换道动机的场景如下:

一是在行驶速度不超过当前路段限速和车辆本身限速的情况下,当与前车间距不满足维持当前车速行驶时产生换道动机;

二是分合流口位置或者桥梁道路养护施工导致局部道路封闭时产生换道动机;

基于换道动机产生的场景,根据车道的数量以及所有车道的交通状况判断出车辆的换

道条件,进而根据换道条件触发车辆的换道、减速或跟驰规则;

对于需要进行换道的车辆,根据设定的换道轨迹进行换道行驶。

5.如权利要求4所述的车辆荷载效应模拟方法,其特征在于,基于换道动机的场景一,当有两条车道时,若车辆满足换道条件将进行换道,否则视情况触发减速或跟驰规则;车辆的换道条件如下:

$$\text{gap}_{n,\text{lane\_end}}(t) > \text{gap}_{n,\text{lane\_begin}}(t);$$

$$\text{gap}_{n+1,\text{lane\_end}}(t) > v_{n+1,\text{lane\_end}}(t) + a_{n+1,\text{lane\_end}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t);$$

$$\text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t) = v_{n+1}(t) \cdot \tau_{n+1} + \frac{v_{n+1}^2(t)}{2a_{n+1,\text{type}}^{\min}} - \frac{v_n^2(t)}{2a_{n,\text{type}}^{\min}};$$

$$\text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane\_m}};$$

其中, $\text{gap}_{n,\text{lane\_begin}}(t)$ 和 $\text{gap}_{n,\text{lane\_end}}(t)$ 分别表示t时刻编号为n的车辆在时步开始和结束时与同车道前车的间距, $\text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆的安全车距, $v_{n+1,\text{lane\_end}}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆在时步结束所在车道上的速度, $a_{n+1,\text{lane\_end}}(t+1)$ 表示t+1时刻编号为n+1的车辆在时步结束所在车道上的加速度, $\tau_{n+1}$ 表示编号为n+1的车辆刹车反应时间, $a_{n,\text{type}}^{\min}$ 表示编号为n的车辆所属车型的最大刹车加速度, $\text{rand}(0,1)$ 表示随机函数。

6.如权利要求4所述的车辆荷载效应模拟方法,其特征在于,基于换道动机的场景一,当有两条以上的车道时,若车辆满足换道条件将进行换道,否则视情况触发减速或跟驰规则;车辆的换道判断公式如下:

$$\text{gap}_{n,\text{right}}(t) > \text{gap}_{n,\text{left}}(t) \quad (1);$$

$$\text{gap}_{n,\text{right}}(t) < \text{gap}_{n,\text{left}}(t) \quad (2);$$

$$\text{gap}_{n,\text{left}}(t) > \text{gap}_{n,\text{mid}}(t) \& \text{gap}_{n,\text{right}}(t) < \text{gap}_{n,\text{mid}}(t) \quad (3);$$

$$\text{gap}_{n,\text{left}}(t) < \text{gap}_{n,\text{mid}}(t) \& \text{gap}_{n,\text{right}}(t) > \text{gap}_{n,\text{mid}}(t) \quad (4);$$

$$\text{gap}_{n,\text{left}}(t) > \text{gap}_{n,\text{mid}}(t) \& \text{gap}_{n,\text{right}}(t) > \text{gap}_{n,\text{mid}}(t) \quad (5);$$

$$\text{gap}_{n+1,\text{right}}(t) > v_{n+1,\text{right}}(t) + a_{n+1,\text{right}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t) \quad (7);$$

$$\text{gap}_{n+1,\text{left}}(t) > v_{n+1,\text{left}}(t) + a_{n+1,\text{left}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t) \quad (8);$$

$$\text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane\_m}} \quad (9);$$

$$\text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane\_left}} \quad (10);$$

$$\text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane\_right}} \quad (11);$$

$$p_{\text{changelane\_left}} < \text{rand}(0,1) < p_{\text{changelane\_right}} \quad (12);$$

$$\text{rand}(0,1) \geq p_{\text{changelane\_right}} \quad (13);$$

若公式(1)和(7)成立,判断出车辆此时位于左侧车道且右侧车道具备超车条件,进而在公式(9)成立时进行向右换道;

若公式(2)和(8)成立,判断出车辆此时位于右侧车道且左侧车道具备超车条件,进而在公式(9)成立时进行向左换道;

若公式(3)、(8)成立,判断出车辆此时位于中间车道且左侧车道具备超车条件,进而在公式(10)成立时进行向左换道;

若公式(4)和(7)成立,判断出车辆此时位于中间车道且右侧车道具备超车条件,进而

在公式(11)成立时进行向右换道；

若公式(5)、(7)、(8)成立,判断出车辆此时位于中间车道且左右侧车道均具备超车调节,进而根据公式(10)、(12)和(13)的成立情况,车辆分别进行向左换道、减速跟驰以及向右换道；

其中, $gap_{n,left}(t)$ 和 $gap_{n,right}(t)$ 分别表示t时刻编号为n的车辆在左右侧车道的跟车间距, $gap_{n,mid}(t)$ 表示编号为n的车辆在中间车道的跟车间距, $v_{n+1,left}(t)$ 和 $v_{n+1,right}(t)$ 分别表示t时刻编号为n+1的车辆在左右侧车道上的速度, $a_{n+1,left}(t+1)$ 和 $a_{n+1,right}(t+1)$ 表示t+1时刻编号为n+1的车辆在左右侧车道上的加速度, $gap_{n+1, safe}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆的安全车距, $rand(0,1)$ 表示随机函数, $p_{changelane\_left}$ 和 $p_{changelane\_right}$ 分别表示向左和向右换道的概率。

7.如权利要求5所述的车辆荷载效应模拟方法,其特征在于,基于换道动机的场景二,判断相邻车道是否具备换道动机场景中双车道的换道条件,若满足则立即进行换道,反之则进行减速停车,直至具备如下换道条件时进行换道；

$$v_n(t+1) = v_n(t) + \max[a_n(t+1), a_{n, type}^{\min}];$$

$$a_n(t+1) = -\frac{v_n^2(t)}{2gap_{limit}(t)} + rand(-1, 0);$$

在车辆进行换道时,若具备让出条件,此时驶入车道的车辆将提前减速让出车位;否则该车辆正常通过,对下一车辆进行减速让出车位;让出条件的判断以及提前减速的公式如下:

$$v_n(t) + 0.5a_n(t+1) - [v_{n+1, lane\_end}(t) + 0.5a_{n+1, lane\_end}(t)] \geq gap_{n+1, safe}(t);$$

$$a_{n+1, lane\_end}(t+1) = \max\left[-\frac{v_{n+1, lane\_end}^2(t)}{2gap_{n+1, lane\_end}(t)}, a_{n+1, type}^{\min}\right];$$

$$v_{n+1, lane\_end}(t+1) = v_{n+1, lane\_end}(t) + a_{n+1, lane\_end}(t+1);$$

其中, $v_{n+1, lane\_end}(t)$ 和 $a_{n+1, lane\_end}(t)$ 分别表示t时刻编号为n+1的车辆在时步结束时的速度和加速度, $gap_{n+1, safe}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆的安全车距, $gap_{n+1, lane\_end}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆在时步结束时与同车道前车的间距, $a_{n, type}^{\min}$ 表示编号为n的车辆所属车型的最大刹车加速度, $gap_{limit}(t)$ 表示车辆在t时刻开始减速的距离。

8.如权利要求4所述的车辆荷载效应模拟方法,其特征在于,在车辆进行换道时,车辆的实时轨迹采用五次多项式进行模拟,具体的实时轨迹 $[x(t), y(t)]$ 表达式如下:

$$x(t) = A_5 t^5 + A_4 t^4 + A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0;$$

$$y(t) = B_5 t^5 + B_4 t^4 + B_3 t^3 + B_2 t^2 + B_1 t + B_0;$$

$$A_0 = x_{sp}; A_1 = v_{sp} \cdot \cos\theta_{sp}; A_2 = 0.5a_{sp} \cdot \cos\theta_{sp};$$

$$A_3 = \frac{10(x_{ep} - x_{sp}) - 6v_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} \cdot t_f - 4v_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} \cdot t_f - 1.5a_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} t_f^2 + 0.5a_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} t_f^2}{t_f^3};$$

$$A_4 = \frac{15(x_{sp} - x_{ep}) + 8v_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} \cdot t_f + 7v_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} \cdot t_f + 1.5a_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} t_f^2 - a_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} t_f^2}{t_f^4};$$

$$A_5 = \frac{6(x_{ep} - x_{sp}) - 3v_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} \cdot t_f - 3v_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} \cdot t_f - 0.5a_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} t_f^2 + 0.5a_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} t_f^2}{t_f^5};$$

$$B_0 = y_{sp}; B_1 = v_{sp} \cdot \sin\theta_{sp}; B_2 = 0.5a_{sp} \cdot \sin\theta_{sp};$$

$$B_3 = \frac{10(y_{ep} - y_{sp}) - 6v_{sp} \cdot \sin\theta_{sp} \cdot t_f - 4v_{ep} \cdot \sin\theta_{ep} \cdot t_f - 1.5a_{sp} \cdot \sin\theta_{sp} t_f^2 + 0.5a_{ep} \cdot \sin\theta_{ep} t_f^2}{t_f^3};$$

$$B_4 = \frac{15(y_{sp} - y_{ep}) + 8v_{sp} \cdot \sin\theta_{sp} \cdot t_f + 7v_{ep} \cdot \sin\theta_{ep} \cdot t_f + 1.5a_{sp} \cdot \sin\theta_{sp} t_f^2 - a_{ep} \cdot \sin\theta_{ep} t_f^2}{t_f^4};$$

$$B_5 = \frac{6(y_{ep} - y_{sp}) - 3v_{sp} \cdot \sin\theta_{sp} \cdot t_f - 3v_{ep} \cdot \sin\theta_{ep} \cdot t_f - 0.5a_{sp} \cdot \sin\theta_{sp} t_f^2 + 0.5a_{ep} \cdot \sin\theta_{ep} t_f^2}{t_f^5};$$

其中,  $(x_{sp}, y_{sp})$  表示车辆的初始坐标位置,  $A$  和  $B$  表示多项式中各项式的常数项,  $v_{sp}$  和  $a_{sp}$  分别表示车辆的初始速度和加速度,  $\theta_{sp}$  表示车辆的初始车身航向角度,  $(x_{ep}, y_{ep})$  表示车辆换道结束时的坐标位置,  $v_{ep}$  和  $a_{ep}$  分别表示车辆换道结束时的速度和加速度,  $\theta_{ep}$  表示车辆换道结束时的车身航向角度,  $t_f$  表示换道持续时间。

9. 如权利要求3-8任一项所述的车辆荷载效应模拟方法, 其特征在于, 跟驰规则的制定包括两个场景, 场景一: 无前车或前车距离较远; 场景二: 前方车辆距离较近且未进行换道; 场景的判断公式如下:

$$\text{gap}_n(t+1) > \min\{v_n(t) + \min[a_n(t+1), a_{type}^{max}], v_L^{max}, v_{type}^{max}\} + r \cdot \text{gap}_{n, safe}(t);$$

若判断公式成立, 车辆处于场景一; 此时车辆倾向于高速行驶, 其行驶模拟规则如下:

$$v_n(t+1) = \min[v_n(t) + a_n(t+1), v_L^{max}, v_{type}^{max}];$$

若考虑车辆随机慢化情形, 其行驶模拟规则如下:

$$v_n(t+1) = v_n(t) + \text{rand}(-0.2, 0) \cdot a_{type}^{max}, \text{rand}(0, 1) \leq p_{rsd};$$

若判断公式不成立, 车辆处于场景二; 此时车辆的行驶模拟规则如下:

$$v_n(t+1) = \min\{v_n(t) + \max[a_n(t+1), a_{type}^{max}], \text{gap}_n(t)\};$$

当前车间距大于安全车距时, 加速度随前车间距变化的规则如下:

$$a_{n+1}(t+1) = -\frac{v_n^2(t)}{2[\text{gap}_n(t) - \text{gap}_{n, safe}(t)]} + \text{rand}(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2});$$

当前车间距小于等于安全车距时, 加速度随前车间距变化的规则如下:

$$a_n(t+1) = a_{type}^{min};$$

其中,  $\text{gap}_n(t+1)$  表示  $t+1$  时刻编号为  $n$  的车辆与同车道前车的间距,  $r$  表示加速时前车距离与安全车距的比值,  $\text{gap}_{n, safe}(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n$  的车辆的安全车距,  $\text{rand}(-0.2, 0)$ 、 $\text{rand}(0, 1)$  以及  $\text{rand}(-1/2, 1/2)$  均表示随机函数。

10. 如权利要求1所述的车辆荷载效应模拟方法, 其特征在于, 基于车重加载条件下, 对效应计算路段  $EC_i$  的荷载效应  $E_i$  的计算公式为:  $E_i = \zeta G_i(t) IL$ ;

基于轴重加载条件下, 对效应计算路段  $EC_i$  的荷载效应  $E_i$  的计算公式为:  $E_i = g_i(t) IL$ ;

其中,  $\zeta$  为修正参数矩阵;  $G_i(t)$  为车重矩阵, 表示  $t$  时刻  $EC_i$  范围内所有车辆的总重;  $IL$  表示影响线矩阵;  $g_i$  为轴重矩阵, 表示  $t$  时刻  $EC_i$  范围内所有车轴的总重。

## 一种车辆荷载效应模拟方法

### 技术领域

[0001] 本申请涉及交通工程技术领域,尤其是涉及一种车辆荷载效应模拟方法。

### 背景技术

[0002] 车辆荷载效应模拟是桥梁承载力评估和疲劳分析的重要内容,准确的车辆荷载效应模拟结果不仅能提升评估结果的置信度,更能为针对性的桥梁管养举措实施提供依据。

[0003] 目前关于车辆荷载效应的模拟方式主要包括两种,一种是从统计的角度出发,用广义帕累托分布、极值分布等概率分布函数描述车辆荷载和荷载效应。另一种是从交通仿真的角度出发,用元胞自动机等方式生成模拟车队直接加载得到车辆荷载效应。前者周期规律明显、外推方便,但微观特征不明显,因而被广泛用于桥梁可靠度分析和剩余寿命预测等趋势性分析任务中。后者荷载微观特征明显,结构响应特征提取便利,被广泛应用于车桥耦合分析、疲劳评估等场景。

[0004] 现有技术提出一种基于模糊决策的连续型元胞自动机模型,为交通流仿真提供了更加准确和精细的建模方法。通过将驾驶员行为特性、跟驰理论、驾驶员视野等因素相继以运行规则和概率密度函数的形式被用于这种连续型元胞自动机的模拟过程中,用于根据历史数据生成稳定的随机车流。这种稳定的随机车流可以满足设计、评估工作的交通仿真和车辆荷载效应模拟需求,但在实时交通分析预测和长期交通运行状态分析等场景下,这种仅靠历史数据生成的随机车流与实测数据不可避免地出现较大差异,进而造成模拟结果失真。针对这一不足,本发明对现有技术进行改进以实现高精度的车辆荷载效应精细化模拟。

### 发明内容

[0005] 本申请的其中一个目的在于提供一种能够解决上述背景技术中至少一个缺陷的车辆荷载效应模拟方法。

[0006] 为达到上述的至少一个目的,本申请采用的技术方案为:一种车辆荷载效应模拟方法,包括如下步骤:

S100:构建车辆的元胞模型 $A_n = \{P, L, M, W\}$ ;并配置路网的通行条件和交通仿真参数;

S200:制定车辆的运行规则,包括状态更新规则、换道规则和跟驰规则;

S300:基于制定的规则进行交通仿真模拟并对仿真路段的实际交通数据进行测量统计;

S400:在仿真数据与实测数据相匹配的情况下,对元胞模型在车重加载和轴重加载条件下的荷载效应分别进行计算;

S500:在仿真数据与实测数据不匹配的情况下,将元胞模型的初始值作为先验条件,以实测数据为观测数据,采用单变量贝叶斯动态线性模型对元胞模型进行实时更新并重新仿真。

[0007] 其中, $n$ 表示车辆唯一编号, $P$ 表示元胞运行参数时空矩阵, $L$ 表示车辆位置矩阵, $M$

表示车辆运动状态矩阵,  $W$ 表示车重参数矩阵。

[0008] 优选的,元胞运行参数时空矩阵  $P=\{\text{type}, v_L^{\max}, v_{\text{type}}^{\max}, a_{\text{type}}^{\max}, a_{\text{type}}^{\min}, l_n\}$ ;其中,  $\text{type}$ 表示车辆类型编号,  $v_L^{\max}$ 表示当前车道的最大限速,  $v_{\text{type}}^{\max}$ 表示当前车型的最大速度,  $a_{\text{type}}^{\max}$ 表示当前车型的最大加速度,  $a_{\text{type}}^{\min}$ 表示当前车型的最大刹车加速度,  $l_n$ 表示车辆长度;

车辆位置矩阵  $L=\{l_{\text{begin}}, l_{\text{end}}, \text{lane}_{\text{last}}, \text{lane}_{\text{begin}}, \text{lane}_{\text{end}}, \text{lane}_{\text{next}}\}$ ;其中,  $l_{\text{begin}}$ 和  $l_{\text{end}}$ 分别表示时步开始和结束时的车辆位置,  $\text{lane}_{\text{last}}$ 表示车辆上一次所在车道的编号,  $\text{lane}_{\text{begin}}$ 和  $\text{lane}_{\text{end}}$ 分别表示时步开始和结束时车辆所在车道的编号,  $\text{lane}_{\text{next}}$ 表示车辆下一次所在车道的编号;

车辆运动状态矩阵  $M=\{v_n, a_n\}$ ;其中,  $v_n$ 表示时步开始时车辆速度,  $a_n$ 表示时步开始时车辆加速度;

[0009] 车重参数矩阵  $W=\{G, k, o_f, o_r, d, \dots, d_{k-1}, g, \dots, g_k\}$ ;其中,  $G$ 表示车重,  $k$ 表示轴数,  $o_f$ 和  $o_r$ 分别表示车辆前后悬挂的长度,  $d$ 表示轴距,  $g$ 表示轴重。

[0010] 优选的,路网包括多条不同的路段,对于不同路段的通行条件和交通仿真参数通过环境变量矩阵  $E_m$ 进行表示;  $E_m=\{\text{length}, \text{lane\_num}, v^{\max}, p_{\text{rsd}}, \tau_{\text{type}}, p_{\text{changelane\_m}}, EC_1, \dots, EC_i, \text{mode}\}$ ;其中,  $m$ 表示路段编号,  $\text{length}$ 表示  $[1 \times m]$ 路段长度矩阵,  $\text{lane\_num}$ 表示  $[1 \times m]$ 路段车道数矩阵,  $v^{\max}$ 表示  $[1 \times m]$ 路段最大限速矩阵,  $p_{\text{rsd}}$ 表示  $m$ 路段不同车道随机慢化概率,  $\tau_{\text{type}}$ 表示不同车型的刹车反应时间,  $p_{\text{changelane\_m}}$ 表示  $m$ 路段的换道概率,  $EC_i$ 表示第  $i$ 段的效应计算路段,  $\text{mode}$ 表示车辆荷载施加方式。

[0011] 优选的,对于换道规则的制定包括换道动机、换道条件和换道轨迹的确定;产生换道动机的场景如下:一是在行驶速度不超过当前路段限速和车辆本身限速的情况下,当与前车间距不满足维持当前车速行驶时产生换道动机;二是分合流口位置或者桥梁道路养护施工导致局部道路封闭时产生换道动机;基于换道动机产生的场景,根据车道的数量以及所有车道的交通状况判断出车辆的换道条件,进而根据换道条件触发车辆的换道、减速或跟驰规则;对于需要进行换道的车辆,根据设定的换道轨迹进行换道行驶。

[0012] 优选的,基于换道动机的场景一,当只有一条车道时,车辆在产生换道动机时将触发减速规则。

[0013] 优选的,基于换道动机的场景一,当有两条车道时,若车辆满足换道条件将进行换道,否则视情况触发减速或跟驰规则;车辆的换道条件如下:

$$\begin{aligned} \text{gap}_{n, \text{lane\_end}}(t) &> \text{gap}_{n, \text{lane\_begin}}(t); \\ \text{gap}_{n+1, \text{lane\_end}}(t) &> v_{n+1, \text{lane\_end}}(t) + a_{n+1, \text{lane\_end}}(t+1) + \text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t); \\ \text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t) &= v_{n+1}(t) \cdot \tau_{n+1} + \frac{v_{n+1}^2(t)}{2a_{n+1, \text{type}}^{\min}} - \frac{v_n^2(t)}{2a_{n, \text{type}}^{\min}}; \\ \text{rand}(0, 1) &\leq p_{\text{changelane\_m}}; \end{aligned}$$

其中,  $\text{gap}_{n, \text{lane\_begin}}(t)$ 和  $\text{gap}_{n, \text{lane\_end}}(t)$ 分别表示  $t$ 时刻编号为  $n$ 的车辆在时步开始和结束时与同车道前车的间距,  $\text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t)$ 表示  $t$ 时刻编号为  $n+1$ 的车辆的安全车距,  $v_{n+1, \text{lane\_end}}(t)$ 表示  $t$ 时刻编号为  $n+1$ 的车辆在时步结束所在车道上的速度,  $a_{n+1, \text{lane\_end}}(t+1)$ 表示  $t+1$ 时刻编号为  $n+1$ 的车辆在时步结束所在车道上的加速度,  $\tau_{n+1}$ 表示编号为  $n+1$ 的车

辆刹车反应时间,  $a_{n, \text{type}}^{\min}$  表示编号为n的车辆所属车型的最大刹车加速度,  $\text{rand}(0, 1)$  表示随机函数。

[0014] 优选的, 基于换道动机的场景一, 当有两条以上的车道时, 若车辆满足换道条件将进行换道, 否则视情况触发减速或跟驰规则; 车辆的换道判断公式如下:

$$\text{gap}_{n, \text{right}}(t) > \text{gap}_{n, \text{left}}(t) \quad (1);$$

$$\text{gap}_{n, \text{right}}(t) < \text{gap}_{n, \text{left}}(t) \quad (2);$$

$$\text{gap}_{n, \text{left}}(t) > \text{gap}_{n, \text{mid}}(t) \& \text{gap}_{n, \text{right}}(t) < \text{gap}_{n, \text{mid}}(t) \quad (3);$$

$$\text{gap}_{n, \text{left}}(t) < \text{gap}_{n, \text{mid}}(t) \& \text{gap}_{n, \text{right}}(t) > \text{gap}_{n, \text{mid}}(t) \quad (4);$$

$$\text{gap}_{n, \text{left}}(t) > \text{gap}_{n, \text{mid}}(t) \& \text{gap}_{n, \text{right}}(t) > \text{gap}_{n, \text{mid}}(t) \quad (5);$$

$$\text{gap}_{n+1, \text{right}}(t) > v_{n+1, \text{right}}(t) + a_{n+1, \text{right}}(t+1) + \text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t) \quad (7);$$

$$\text{gap}_{n+1, \text{left}}(t) > v_{n+1, \text{left}}(t) + a_{n+1, \text{left}}(t+1) + \text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t) \quad (8);$$

$$\text{rand}(0, 1) \leq p_{\text{changelane\_m}} \quad (9);$$

$$\text{rand}(0, 1) \leq p_{\text{changelane\_left}} \quad (10);$$

$$\text{rand}(0, 1) \leq p_{\text{changelane\_right}} \quad (11);$$

$$p_{\text{changelane\_left}} < \text{rand}(0, 1) < p_{\text{changelane\_right}} \quad (12);$$

$$\text{rand}(0, 1) \geq p_{\text{changelane\_right}} \quad (13);$$

若公式(1)和(7)成立, 判断出车辆此时位于左侧车道且右侧车道具备超车条件, 进而在公式(9)成立时进行向右换道; 若公式(2)和(8)成立, 判断出车辆此时位于右侧车道且左侧车道具备超车条件, 进而在公式(9)成立时进行向左换道; 若公式(3)、(8)成立, 判断出车辆此时位于中间车道且左侧车道具备超车条件, 进而在公式(10)成立时进行向左换道; 若公式(4)和(7)成立, 判断出车辆此时位于中间车道且右侧车道具备超车条件, 进而在公式(11)成立时进行向右换道; 若公式(5)、(7)、(8)成立, 判断出车辆此时位于中间车道且左右侧车道均具备超车调节, 进而根据公式(10)、(12)和(13)的成立情况, 车辆分别进行向左换道、减速跟驰以及向右换道;

其中,  $\text{gap}_{n, \text{left}}(t)$  和  $\text{gap}_{n, \text{right}}(t)$  分别表示t时刻编号为n的车辆在左右侧车道的跟车间距,  $\text{gap}_{n, \text{mid}}(t)$  表示编号为n的车辆在中间车道的跟车间距,  $v_{n+1, \text{left}}(t)$  和  $v_{n+1, \text{right}}(t)$  分别表示t时刻编号为n+1的车辆在左右侧车道上的速度,  $a_{n+1, \text{left}}(t+1)$  和  $a_{n+1, \text{right}}(t+1)$  表示t+1时刻编号为n+1的车辆在左右侧车道上的加速度,  $\text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t)$  表示t时刻编号为n+1的车辆的安全车距,  $\text{rand}(0, 1)$  表示随机函数,  $p_{\text{changelane\_left}}$  和  $p_{\text{changelane\_right}}$  分别表示向左和向右换道的概率。

[0015] 优选的, 基于换道动机的场景二, 判断相邻车道是否具备换道动机场景中双车道的换道条件, 若满足则立即进行换道, 反之则进行减速停车, 直至具备如下换道条件时进行换道;

$$v_n(t+1) = v_n(t) + \max[a_n(t+1), a_{n, \text{type}}^{\min}];$$

$$a_n(t+1) = -\frac{v_n^2(t)}{2\text{gap}_{\text{limit}}(t)} + \text{rand}(-1, 0);$$

[0016] 在车辆进行换道时, 若具备让出条件, 此时驶入车道的车辆将提前减速让出车位, 否则该车辆正常通过, 对下一车辆进行减速让出车位; 让出条件的判断以及提前减速的公

式如下:

$$v_n(t) + 0.5a_n(t+1) - [v_{n+1, \text{lane\_end}}(t) + 0.5a_{n+1, \text{lane\_end}}(t)] \geq \text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t);$$

$$a_{n+1, \text{lane\_end}}(t+1) = \max \left[ -\frac{v_{n+1, \text{lane\_end}}^2(t)}{2\text{gap}_{n+1, \text{lane\_end}}(t)}, a_{n+1, \text{type}}^{\min} \right];$$

$$v_{n+1, \text{lane\_end}}(t+1) = v_{n+1, \text{lane\_end}}(t) + a_{n+1, \text{lane\_end}}(t+1);$$

其中,  $v_{n+1, \text{lane\_end}}(t)$  和  $a_{n+1, \text{lane\_end}}(t)$  分别表示  $t$  时刻编号为  $n+1$  的车辆在时步结束时的速度和加速度,  $\text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n+1$  的车辆的安全车距,  $\text{gap}_{n+1, \text{lane\_end}}(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n+1$  的车辆在时步结束时与同车道前车的间距,  $a_n^{\min}$  表示编号为  $n$  的车辆所属车型的最大刹车加速度,  $\text{gap}_{\text{limit}}(t)$  表示车辆在  $t$  时刻开始减速的距离。

[0017] 优选的, 在车辆进行换道时, 车辆的实时轨迹采用五次多项式进行模拟, 具体的实时轨迹  $[x(t), y(t)]$  表达式如下:

$$x(t) = A_5 t^5 + A_4 t^4 + A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0;$$

$$y(t) = B_5 t^5 + B_4 t^4 + B_3 t^3 + B_2 t^2 + B_1 t + B_0;$$

$$A_0 = x_{\text{sp}}; A_1 = v_{\text{sp}} \cdot \cos\theta_{\text{sp}}; A_2 = 0.5a_{\text{sp}} \cdot \cos\theta_{\text{sp}};$$

$$A_3 = \frac{10(x_{\text{ep}} - x_{\text{sp}}) - 6v_{\text{sp}} \cdot \cos\theta_{\text{sp}} \cdot t_f - 4v_{\text{ep}} \cdot \cos\theta_{\text{ep}} \cdot t_f - 1.5a_{\text{sp}} \cdot \cos\theta_{\text{sp}} t_f^2 + 0.5a_{\text{ep}} \cdot \cos\theta_{\text{ep}} t_f^2}{t_f^3};$$

$$A_4 = \frac{15(x_{\text{sp}} - x_{\text{ep}}) + 8v_{\text{sp}} \cdot \cos\theta_{\text{sp}} \cdot t_f + 7v_{\text{ep}} \cdot \cos\theta_{\text{ep}} \cdot t_f + 1.5a_{\text{sp}} \cdot \cos\theta_{\text{sp}} t_f^2 - a_{\text{ep}} \cdot \cos\theta_{\text{ep}} t_f^2}{t_f^4};$$

$$A_5 = \frac{6(x_{\text{ep}} - x_{\text{sp}}) - 3v_{\text{sp}} \cdot \cos\theta_{\text{sp}} \cdot t_f - 3v_{\text{ep}} \cdot \cos\theta_{\text{ep}} \cdot t_f - 0.5a_{\text{sp}} \cdot \cos\theta_{\text{sp}} t_f^2 + 0.5a_{\text{ep}} \cdot \cos\theta_{\text{ep}} t_f^2}{t_f^5};$$

$$B_0 = y_{\text{sp}}; B_1 = v_{\text{sp}} \cdot \sin\theta_{\text{sp}}; B_2 = 0.5a_{\text{sp}} \cdot \sin\theta_{\text{sp}};$$

$$B_3 = \frac{10(y_{\text{ep}} - y_{\text{sp}}) - 6v_{\text{sp}} \cdot \sin\theta_{\text{sp}} \cdot t_f - 4v_{\text{ep}} \cdot \sin\theta_{\text{ep}} \cdot t_f - 1.5a_{\text{sp}} \cdot \sin\theta_{\text{sp}} t_f^2 + 0.5a_{\text{ep}} \cdot \sin\theta_{\text{ep}} t_f^2}{t_f^3};$$

$$B_4 = \frac{15(y_{\text{sp}} - y_{\text{ep}}) + 8v_{\text{sp}} \cdot \sin\theta_{\text{sp}} \cdot t_f + 7v_{\text{ep}} \cdot \sin\theta_{\text{ep}} \cdot t_f + 1.5a_{\text{sp}} \cdot \sin\theta_{\text{sp}} t_f^2 - a_{\text{ep}} \cdot \sin\theta_{\text{ep}} t_f^2}{t_f^4};$$

$$B_5 = \frac{6(y_{\text{ep}} - y_{\text{sp}}) - 3v_{\text{sp}} \cdot \sin\theta_{\text{sp}} \cdot t_f - 3v_{\text{ep}} \cdot \sin\theta_{\text{ep}} \cdot t_f - 0.5a_{\text{sp}} \cdot \sin\theta_{\text{sp}} t_f^2 + 0.5a_{\text{ep}} \cdot \sin\theta_{\text{ep}} t_f^2}{t_f^5};$$

其中,  $(x_{\text{sp}}, y_{\text{sp}})$  表示车辆的初始坐标位置,  $A$  和  $B$  表示多项式中各项式的常数项,  $v_{\text{sp}}$  和  $a_{\text{sp}}$  分别表示车辆的初始速度和加速度,  $\theta_{\text{sp}}$  表示车辆的初始车身航向角度,  $(x_{\text{ep}}, y_{\text{ep}})$  表示车辆换道结束时的坐标位置,  $v_{\text{ep}}$  和  $a_{\text{ep}}$  分别表示车辆换道结束时的速度和加速度,  $\theta_{\text{ep}}$  表示车辆换道结束时的车身航向角度,  $t_f$  表示换道持续时间。

[0018] 优选的, 跟驰规则的制定包括两个场景, 场景一: 无前车或前车距离较远; 场景二: 前方车辆距离较近且未进行换道; 场景的判断公式如下:

$$\text{gap}_n(t+1) > \min\{v_n(t) + \min[a_n(t+1), a_{\text{type}}^{\max}], v_L^{\max}, v_{\text{type}}^{\max}\} + \tau \cdot \text{gap}_{n, \text{safe}}(t);$$

[0019] 若判断公式成立, 车辆处于场景一; 此时车辆倾向于高速行驶, 其行驶模拟规则如下:

$$v_n(t+1) = \min[v_n(t) + a_n(t+1), v_L^{\max}, v_{\text{type}}^{\max}];$$

[0020] 若考虑车辆随机慢化情形, 其行驶模拟规则如下:

$$v_n(t+1) = v_n(t) + \text{rand}(-0.2, 0) \cdot a_{\text{type}}^{\text{max}}, \text{rand}(0, 1) \leq p_{\text{rsd}};$$

[0021] 若判断公式不成立,车辆处于场景二;此时车辆的行驶模拟规则如下:

$$v_n(t+1) = \min\{v_n(t) + \max[a_n(t+1), a_{\text{type}}^{\text{max}}], \text{gap}_n(t)\};$$

[0022] 当前车间距大于安全车距时,加速度随前车间距变化的规则如下:

$$a_{n+1}(t+1) = -\frac{v_n^2(t)}{2[\text{gap}_n(t) - \text{gap}_{n, \text{safe}}(t)]} + \text{rand}\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right);$$

[0023] 当前车间距小于等于安全车距时,加速度随前车间距变化的规则如下:

$$a_n(t+1) = a_{\text{type}}^{\text{min}};$$

其中,  $\text{gap}_n(t+1)$  表示  $t+1$  时刻编号为  $n$  的车辆与同车道前车的间距,  $r$  表示加速时前车距离与安全车距的比值,  $\text{gap}_{n, \text{safe}}(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n$  的车辆的安全车距,  $\text{rand}(-0.2, 0)$ 、 $\text{rand}(0, 1)$  以及  $\text{rand}(-1/2, 1/2)$  均表示随机函数。

[0024] 优选的,基于车重加载条件下,对效应计算路段  $EC_i$  的荷载效应  $E_i$  的计算公式为:  $E_i = \zeta G_i(t) IL$ ; 其中,  $\zeta$  为修正参数矩阵,  $G_i(t)$  为车重矩阵, 表示  $t$  时刻  $EC_i$  范围内所有车辆的总重,  $IL$  表示影响线矩阵;

[0025] 基于轴重加载条件下,对效应计算路段  $EC_i$  的荷载效应  $E_i$  的计算公式为:  $E_i = g_i(t) IL$ ; 其中,  $g_i$  为轴重矩阵, 表示  $t$  时刻  $EC_i$  范围内所有车轴的总重。

[0026] 与现有技术相比,本申请的有益效果在于:

(1) 本方法通过引入细致的车辆和道路参数,能够更精确地模拟各种交通状况下的车辆行为和相互作用,提高了模拟的详细性和准确性。

[0027] (2) 本方法通过使用机器视觉技术和统计数据动态更新仿真参数,能够实时反映道路交通状况的变化,保证仿真结果的时效性和相关性。

[0028] (3) 本方法不仅适用于桥梁和道路的承载力评估,也适用于城市交通规划、道路设计和交通管理等多个领域,具有广泛的应用前景。准确的荷载效应模拟可以帮助工程师和决策者更好地理解桥梁和道路的承载状态,从而做出更合理的维护和加固决策,提高公共安全。

## 附图说明

[0029] 图1为申请的整体工作流程示意图。

## 具体实施方式

[0030] 下面,结合具体实施方式,对本申请做进一步描述,需要说明的是,在不相冲突的前提下,以下描述的各实施例之间或各技术特征之间可以任意组合形成新的实施例。

[0031] 在本申请的描述中,需要说明的是,对于方位词,如有术语“中心”、“横向”、“纵向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”、“顺时针”、“逆时针”等指示方位和位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于叙述本申请和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定方位构造和操作,不能理解为限制本申请的具体保护范围。

[0032] 需要说明的是,本申请的说明书和权利要求书中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。

[0033] 本申请的说明书和权利要求书中的术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形,意图在于覆盖不排他的包含,例如,包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元,而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0034] 本申请的其中一个优选的实施例,如图1所示,一种车辆荷载效应模拟方法,包括如下步骤:

S100:构建车辆的元胞模型 $A_n = \{P, L, M, W\}$ ;并配置路网的通行条件和交通仿真参数。

[0035] S200:制定车辆的运行规则,包括状态更新规则、换道规则和跟驰规则。

[0036] S300:基于制定的规则进行交通仿真模拟并对仿真路段的实际交通数据进行测量统计。

[0037] S400:在仿真数据与实测数据相匹配的情况下,对元胞模型在车重加载和轴重加载条件下的荷载效应分别进行计算。

[0038] S500:在仿真数据与实测数据不匹配的情况下,将元胞模型的初始值作为先验条件,以实测数据为观测数据,采用单变量贝叶斯动态线性模型对元胞模型进行实时更新并重新仿真。

[0039] 其中, $n$ 表示车辆唯一编号, $P$ 表示元胞运行参数时空矩阵, $L$ 表示车辆位置矩阵, $M$ 表示车辆运动状态矩阵, $W$ 表示车重参数矩阵。

[0040] 应当知道的是,荷载效应是指在建筑结构设计中,由荷载作用引起的结构件内产生的内力(如轴力、剪力和弯矩等)、变形和裂缝等的总称。在桥梁和道路等建筑中,主要是车辆行驶所产生的荷载效应;故为了保证桥梁和道路的安全,需要对车辆所引起的荷载效应进行分析计算。

[0041] 而在实际的路网中,由于路况的复杂性以及车辆交通的复杂性,对于特定路段的荷载效应的计算无法或很难直接获得,故通过采用仿真的方式进行荷载效应的计算。具体的说,就是在仿真软件中构建车辆和路网模型,然后给出限定的条件对车辆于路网中的运行状态进行模拟,进而根据车辆的运行参数以及路网的结构性参数来仿真获取对应的荷载效应。当然,为了保证仿真结果的准确性,可以在仿真的过程中将仿真的交通流数据与对应路网的实际交通流数据进行对比,在二者相互匹配的情况在再进行荷载效应的计算。对于路网实际交通流数据的获取,可以通过数车器、机器视觉识别以及道路监控视频等多种方式来得到。为了方便理解,下面可以对本实施例的具体过程进行详细的描述。

[0042] 具体的,如图1所示,通过给定的初始参数来构建车辆的元胞模型;然后对元胞模型的后续仿真过程进行条件约束,条件约束包括对所模拟的路网的交通状态进行约束,以及车辆在实际驾驶过程中所面临的路况场景约束。在给定的条件约束下进行元胞模型的仿真,可以得到元胞模型基于仿真路段的断面交通流数据。在获得仿真数据后,可以和仿真路段通过视觉分析或统计得到的实际交通流统计数据进行匹配;若仿真结果与实测数据相匹配,则说明仿真的结果是准确的,那么可以通过加载相应的模式来获得对应的荷载效应的值;若仿真结果与实测数据不匹配,说明仿真的结果不准确,即元胞模型的参数值无法满足

当前仿真的要求,则可以将元胞模型的初始值作为先验条件,以视觉分析或统计得到的实测数据作为观测数据,利用单变量贝叶斯动态线性模型(BDLM)来对元胞模型的参数进行优化,将优化后的参数重新赋予元胞模型以进行参数的实时更新。在元胞模型完成参数更新后再重新进行仿真,并重复上述过程,直至获得对应的荷载效应值。

[0043] 相比较传统方式,本方法能够实现仿真参数的自动更新;具体的说,即使是同一路段,在不同时刻实时交通状态和交通流变化趋势均有所不同,本方法可以根据机器识别的不同路段、不同时刻的交通流信息对当前路段交通流仿真模型参数进行自动更新,以实现对不同时刻交通荷载信息的准确模拟。通过使用机器视觉技术和统计数据动态更新仿真参数,能够实时反映道路交通状况的变化,保证仿真结果的时效性和相关性。

[0044] 同时,本方法通过引入细致的车辆和道路参数,能够更精确地模拟各种交通状况下的车辆行为和相互作用,可以有效的提高模拟的详细性和准确性。

[0045] 还应当知道的是,本方法不仅适用于桥梁和道路的承载力评估,也适用于城市规划、道路设计和交通管理等多个领域,具有广泛的应用前景。通过准确的荷载效应模拟可以帮助工程师和决策者更好地理解桥梁和道路的承载状态,从而做出更合理的维护和加固决策,提高公共安全。

[0046] 本实施例中,对于元胞模型 $A_n = \{P, L, M, W\}$ 中的元胞运行参数时空矩阵 $P$ ,其主要是对不同车型的性能数据进行标定。一般来说,不同车型所对应的性能参数是不同的,进而在路网中进行运行的状态也是不同的。例如,在相同的车间距下,性能较好的车型由于加速较快,可以顺利进行换道;而性能较差的车型由于加速较慢,可能无法完成换道;故车型对路网交通是存在影响的。

[0047] 具体的,对于元胞运行参数时空矩阵 $P$ 的参数设定为:

$P = \{type, v_l^{max}, v_{type}^{max}, a_{type}^{max}, a_{type}^{min}, l_n\}$ 。其中, $type$ 表示车辆类型编号, $v_l^{max}$ 表示当前车道的最大限速, $v_{type}^{max}$ 表示当前车型的最大速度, $a_{type}^{max}$ 表示当前车型的最大加速度, $a_{type}^{min}$ 表示当前车型的最大刹车加速度, $l_n$ 表示车辆长度。

[0048] 本实施例中,对于元胞模型 $A_n = \{P, L, M, W\}$ 中的车辆位置矩阵 $L$ ,其主要是对车辆在路网中进行行驶的位置参数进行标定;例如车辆在不同时刻所行驶的车道位置等。

[0049] 具体的,对于车辆位置矩阵 $L$ 的参数设定为: $L = \{l_{begin}, l_{end}, lane_{last}, lane_{begin}, lane_{end}, lane_{next}\}$ 。其中, $l_{begin}$ 和 $l_{end}$ 分别表示时步开始和结束时的车辆位置,单位为米; $lane_{last}$ 表示车辆上一次所在车道的编号,可以用1,2,3,……进行编号; $lane_{begin}$ 和 $lane_{end}$ 分别表示时步开始和结束时车辆所在车道的编号,可以用0,1,2,3,……进行表示,0表示车辆处于换道状态,1,2,3,……进行车道编号,编号值越大所对应的车道越靠近道路外侧,相应的车速越低; $lane_{next}$ 表示车辆下一次所在车道的编号,可以用1,2,3,……进行编号。

[0050] 应当知道的是,时步即时间步,是在数值模拟中所使用的一个概念,表示模拟系统在时间上的离散化;在数值模拟中,将问题的时间范围分隔成连续的小时间间隔,每个时间间隔称为一个时间步;可以看作是单位时间。

[0051] 本实施例中,对于元胞模型 $A_n = \{P, L, M, W\}$ 中的车辆运动状态矩阵 $M$ ,其主要是对车辆在行驶过程中的状态进行标定,主要包括速度和加速度。则车辆运动状态矩阵 $M$ 的参数设定为: $M = \{v_n, a_n\}$ ;其中, $v_n$ 表示时步开始时车辆速度, $a_n$ 表示时步开始时车辆加速度。

[0052] 本实施例中,对于元胞模型 $A_n = \{P, L, M, W\}$ 中的车重参数矩阵 $W$ ,其主要是对车辆的自身结构参数进行标定,例如重量和长度等。则车重参数矩阵 $W$ 的参数设定为: $W = \{G, k, o_f, o_r, d, \dots, d_{k-1}, g, \dots, g_k\}$ ;其中, $G$ 表示车重, $k$ 表示轴数, $o_f$ 和 $o_r$ 分别表示车辆前后悬挂的长度, $d$ 表示轴距,则 $d_{k-1}$ 表示第 $k$ 根轴与第 $k-1$ 根轴之间的轴距, $g$ 表示轴重,则 $g_k$ 表示第 $k$ 根轴的重量。

[0053] 可以理解的是,相比较传统方式,本方法基于轴载的荷载效应模拟,以车辆为单位建立元胞模型,在车辆尺寸和交通状态参数的基础上,增设轴数、轴距、轴载参数。从而对元胞模型的格式和内容进行创新,进而实现基于轴载的荷载效应模拟,解决了车重影响线加载直接计算结果偏大的问题。通过引入细致的车辆和道路参数,如轴数、轴距和轴载等,能够更精确地模拟各种交通状况下的车辆行为和相互作用,提高了模拟的详细性和准确性。

[0054] 应当知道的是,路网一般包括有多条不同的路段,对于荷载效应的计算一般是基于某条路段的;故在进行路网的通行条件以及交通仿真参数的配置时需要具体到路段。本实施例中,对于不同路段的通行条件和交通仿真参数可以通过环境变量矩阵 $E_m$ 进行表示; $E_m = \{\text{length}, \text{lane\_num}, v^{\max}, p_{\text{rsd}}, \tau_{\text{type}}, p_{\text{changelane\_m}}, EC_1, \dots, EC_i, \text{mode}\}$ 。

[0055] 其中, $m$ 表示路段编号。

[0056]  $\text{length}$ 表示 $[1 \times m]$ 路段长度矩阵, $\text{length} = [\text{length}_1, \dots, \text{length}_m]$ 。

[0057]  $\text{lane\_num}$ 表示 $[1 \times m]$ 路段车道数矩阵, $\text{lane\_num} = [\text{lane\_num}_1, \dots, \text{lane\_num}_m]$ 。

[0058]  $v^{\max}$ 表示 $[1 \times m]$ 路段最大限速矩阵, $v^{\max} = [v_1^{\max}, \dots, v_m^{\max}]$ 。

[0059]  $p_{\text{rsd}}$ 为 $[1 \times \text{lane\_num}_m]$ 矩阵,表示 $m$ 路段不同车道随机慢化概率,初始值可以根据实际需要自行进行确定,本实施例中初始值均为0.2。

[0060]  $\tau_{\text{type}}$ 为 $[1 \times \text{type}]$ 矩阵,表示不同车型的刹车反应时间,初始值可以根据实际需要自行进行确定,本实施例中初始值均为0.2s。

[0061]  $p_{\text{changelane\_m}}$ 为 $[1 \times \text{lane\_num}_m]$ 矩阵,表示 $m$ 路段的换道概率,各元素的初始值可以根据车道数量进行确定。

[0062]  $EC_i$ 表示第 $i$ 段的效应计算路段,为 $[1 \times 2]$ 矩阵,包括路段起点和终点。

[0063]  $\text{mode}$ 表示当前车辆荷载施加方式,只有0和1两种状态,分别对应车重加载和轴重加载; $\text{mode}=0$ 表示轴重加载, $\text{mode}=1$ 表示车重加载。

[0064] 可以理解的是,由于不同路段的路面情况、车道数量以及道路限速等条件存在差异,进而会对车辆的驾驶行为产生影响。本方法通过差异化的设置不同路段的仿真参数,能够解决传统元胞自动机模型不能适应复杂路段交通仿真任务的难题,进而保障仿真结果的准确可靠。

[0065] 本实施例中,在进行步骤S200时,对于车辆的状态更新规则主要包括位置更新和速度更新;而位置更新包括车辆的自身位置更新和车间距的变化更新。具体的状态更新公式如下:

速度更新公式: $v_n(t+1) = v_n(t) + a_n(t+1) \cdot \Delta t$ ;其中, $\Delta t$ 表示时步, $\Delta t$ 的值为相邻时刻的间隔时间,即 $\Delta t=1$ ,故速度更新公式可以为: $v_n(t+1) = v_n(t) + a_n(t+1)$ ;  $v_n(t+1)$ 表示 $t+1$ 时刻编号为 $n$ 的车辆的速度, $v_n(t)$ 表示 $t$ 时刻编号为 $n$ 的车辆的速度, $a_n(t+1)$ 表示 $t+1$ 时刻编号为 $n$ 的车辆的加速度。后续计算公式中涉及到 $\Delta t$ 的取值均为1且进行省略。

[0066] 位置更新公式： $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t) \cdot \Delta t + 0.5a_n(t+1) \cdot \Delta t^2$ ； $x_n(t+1)$  表示  $t+1$  时刻编号为  $n$  的车辆的位置， $x_n(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n$  的车辆的位置；当  $\Delta t=1$  时， $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t) \cdot \Delta t + 0.5a_n(t+1) \cdot \Delta t^2$ 。

[0067] 相对位置更新公式： $x_{n-1}(t) - x_n(t) = \text{gap}_n(t) + l_{n-1}$ ； $x_{n-1}(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n-1$  的车辆，即同车道的前车的位置， $\text{gap}_n(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n$  的车辆与同车道前车的间距， $l_{n-1}$  表示编号为  $n-1$  的车辆，即同车道的前车的长度。

[0068] 本实施例中，对于换道规则的制定需要考虑车辆为何需要进行换道，当前的路段是否能够进行换道，以及车辆如何进行换道；故换道规则的制定主要包括换道动机、换道条件和换道轨迹的确定。

[0069] 对于换道动机的产生，主要有以下的两种常见的场景。

[0070] 场景一：在行驶速度不超过当前路段限速和车辆本身限速的情况下，当车辆与前车的间距不满足维持当前车速行驶时将产生换道动机。为了方便理解，对于车辆产生换道动机是否符合场景一的判断公式如下所示；在判断公式成立时说明车辆所产生的换道动机符合场景一。

$$[0071] \quad \text{gap}_{n, \text{lane\_begin}}(t) \leq \min[v_n(t) + 0.5a_n(t+1) + l, \min(v_{\text{limit}}^{\text{max}}, v_{\text{type}}^{\text{max}})]。$$

[0072] 其中， $\text{gap}_{n, \text{lane\_begin}}(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n$  的车辆在时步开始时与同车道前车的间距。

[0073] 场景二：在分合流口位置或者由于桥梁道路养护施工导致局部道路封闭等情况下，当前车辆无法通行而被迫产生换道动机。为了方便理解，对于车辆产生换道动机是否符合场景二的判断公式如下所示；在判断公式成立时说明车辆所产生的换道动机符合场景二。

$$[0074] \quad \text{gap}_{n, \text{lane\_begin}}(t) \leq \text{gap}_{\text{limit}}(t)。$$

$$[0075] \quad \text{gap}_{n, \text{lane\_begin}}(t) = \text{length}_m - v_n(t) \cdot \tau_n - \frac{2v_n^2(t)}{a_{n, \text{type}}^{\text{min}}}。$$

[0076] 其中， $\text{gap}_{\text{limit}}(t)$  表示车辆在  $t$  时刻开始减速的距离，具体取值可以根据实际需要自行进行设定，例如可以设初始值为  $100\text{m}$ ； $\text{length}_m$  表示可用车道数量减少的路段里程； $\tau_n$  表示编号为  $n$  的车辆进行刹车的反应时间， $\tau_n$  的值等于  $\tau_{\text{type}}$ ； $a_{n, \text{type}}^{\text{min}}$  表示编号为  $n$  的车辆所属车型的最大刹车加速度。

[0077] 本实施例中，在完成车辆对换道动机的判断后，对于车辆是否能够进行换道，需要根据换道动机产生的场景，当前路段的车道数量以及所有车道的交通状况来判断出车辆的换道条件，进而根据判断出的换道条件来触发车辆的换道、减速或跟驰规则。对于需要进行换道的车辆，根据设定的换道轨迹进行换道行驶。为了方便理解，下面将根据不同的换道动机产生场景对车辆的换道情况进行详细的描述。

[0078] 一、基于上述的换道动机的场景一，车辆主要包括如下所示的三种换道情况。

[0079] 情况一：当对应路段只有一条车道时，无换道条件，故车辆在产生换道动机时将触发减速规则。

[0080] 情况二：当对应路段有两条车道时，若车辆满足换道条件将进行换道，否则视情况触发减速或跟驰规则。对于车辆的换道条件的判断公式如下所示，在下列的判断公式均成

立时,车辆进行换道。

$$[0081] \quad \text{gap}_{n,\text{lane\_end}}(t) > \text{gap}_{n,\text{lane\_begin}}(t)。$$

$$[0082] \quad \text{gap}_{n+1,\text{lane\_end}}(t) > v_{n+1,\text{lane\_end}}(t) + a_{n+1,\text{lane\_end}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)。$$

$$[0083] \quad \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t) = v_{n+1}(t) \cdot \tau_{n+1} + \frac{v_{n+1}^2(t)}{2a_{n+1,\text{type}}^{\min}} - \frac{v_n^2(t)}{2a_{n,\text{type}}^{\min}}。$$

$$[0084] \quad \text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane\_m}}。$$

[0085] 其中, $\text{gap}_{n,\text{lane\_begin}}(t)$ 和 $\text{gap}_{n,\text{lane\_end}}(t)$ 分别表示t时刻编号为n的车辆在时步开始和结束时与同车道前车的间距; $\text{gap}_{n+1,\text{lane\_end}}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆,即相邻车道上位置相近的车辆在时步结束时与同车道前车的间距。 $v_{n+1,\text{lane\_end}}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆在时步结束所在车道上的速度; $a_{n+1,\text{lane\_end}}(t+1)$ 表示t+1时刻编号为n+1的车辆在时步结束所在车道上的加速度; $\text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆的安全车距; $\tau_{n+1}$ 表示编号为n+1的车辆刹车反应时间, $a_{n,\text{type}}^{\min}$ 和 $a_{n+1,\text{type}}^{\min}$ 表示编号为n和n+1的车辆所属车型的最大刹车加速度; $\text{rand}(0,1)$ 表示随机函数,具体可以表示产生随机数在(0,1)范围内的概率, $\text{rand}$ 随机函数的工作原理为本领域技术人员所公知,故不在此进行详细的阐述。

[0086] 应当知道的是,上述判断公式中换道概率 $p_{\text{changelane\_m}}$ 的具体取值可以根据车辆需要进行换道的方向来进行确定。一般来说,右侧车道的车辆行驶速度较低,在车辆的实际道路行驶时偏向于向左侧车道进行换道超车。故在本实施例中,若车辆位于右侧车道进行向左换道时,换道概率 $p_{\text{changelane\_m}}$ 的初始值可以设定为0.7;若车辆位于左侧车道进行向右换道时,换道概率 $p_{\text{changelane\_m}}$ 的初始值可以设定为0.3。

[0087] 情况三:当对应路段有两条以上的车道时,若车辆满足换道条件将进行换道,否则视情况触发减速或跟驰规则。应当知道的是,基于当前的情况三,车辆所处的车道位置情景有三种:一是车辆位于左侧车道,即路段的最左侧,车辆若需要换道只能够向右进行换道;二是车辆位于右侧车道,即路段的最右侧,车辆若需要换道只能够向左进行换道;三是车辆位于中间车道,车辆若需要换道可以向左右两侧进行换道。为了方便理解,下面将根据车辆的位置情况对车辆的换道过程进行详细的描述。

[0088] (1) 车辆位于左侧车道,对于车辆的换道条件的判断公式如下所示。

$$[0089] \quad \text{gap}_{n,\text{right}}(t) > \text{gap}_{n,\text{left}}(t)。$$

$$[0090] \quad \text{gap}_{n+1,\text{right}}(t) > v_{n+1,\text{right}}(t) + a_{n+1,\text{right}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)。$$

$$[0091] \quad \text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane\_m}}。$$

[0092] 在上述的判断公式均成立时,可以判断出车辆的右侧车道具备超车条件,则车辆将进行向右换道。其中, $\text{gap}_{n,\text{left}}(t)$ 和 $\text{gap}_{n,\text{right}}(t)$ 分别表示t时刻编号为n的车辆在左右侧车道的跟车间距; $\text{gap}_{n+1,\text{right}}(t)$ 表示编号为n+1的车辆在右侧车道上的跟车间距; $v_{n+1,\text{right}}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆在右侧车道上的速度; $a_{n+1,\text{right}}(t+1)$ 表示t+1时刻编号为n+1的车辆在右侧车道上的加速度; $\text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)$ 表示t时刻编号为n+1的车辆的安全车距;换道概率 $p_{\text{changelane\_m}}$ 在当前情景下的初始值为0.3。

[0093] (2) 车辆位于右侧车道,对于车辆的换道条件的判断公式如下所示。

$$[0094] \quad \text{gap}_{n,\text{right}}(t) < \text{gap}_{n,\text{left}}(t)。$$

$$[0095] \quad \text{gap}_{n+1,\text{left}}(t) > v_{n+1,\text{left}}(t) + a_{n+1,\text{left}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)。$$

[0096]  $\text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane}_m}$

[0097] 在上述的判断公式均成立时,可以判断出车辆的左侧车道具备超车条件,则车辆将进行向左换道。其中, $\text{gap}_{n,\text{left}}(t)$ 和 $\text{gap}_{n,\text{right}}(t)$ 分别表示 $t$ 时刻编号为 $n$ 的车辆在左右侧车道的跟车间距; $\text{gap}_{n+1,\text{left}}(t)$ 表示编号为 $n+1$ 的车辆在左侧车道上的跟车间距; $v_{n+1,\text{left}}(t)$ 表示 $t$ 时刻编号为 $n+1$ 的车辆在左侧车道上的速度; $a_{n+1,\text{left}}(t+1)$ 表示 $t+1$ 时刻编号为 $n+1$ 的车辆在左侧车道上加速度; $\text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)$ 表示 $t$ 时刻编号为 $n+1$ 的车辆的安全车距;换道概率 $p_{\text{changelane}_m}$ 在当前情景下初始值为0.3。

[0098] (3) 车辆位于中间车道,此时车辆进行换道的可能性有三种,下面将对三种可能性进行详细的描述。

[0099] (3.1) 车辆的左侧车道具备超车条件,而右侧车道不具备超车条件,故车辆在进行换道时进行向左换道,具体的判断公式如下所示。

[0100]  $\text{gap}_{n,\text{left}}(t) > \text{gap}_{n,\text{mid}}(t) \& \text{gap}_{n,\text{right}}(t) < \text{gap}_{n,\text{mid}}(t)$ 。

[0101]  $\text{gap}_{n+1,\text{left}}(t) > v_{n+1,\text{left}}(t) + a_{n+1,\text{left}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)$ 。

[0102]  $\text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane\_left}}$

[0103] 其中, $\text{gap}_{n,\text{mid}}(t)$ 表示 $t$ 时刻编号为 $n$ 的车辆在中间车道的跟车间距; $p_{\text{changelane\_left}}$ 表示车辆向左换道的概率,具体的取值可以根据实际需要自行进行确定,例如可以设初始值为0.7。

[0104] (3.2) 车辆的右侧车道具备超车条件,而左侧车道不具备超车条件,故车辆在进行换道时进行向右换道,具体的判断公式如下所示。

[0105]  $\text{gap}_{n,\text{left}}(t) < \text{gap}_{n,\text{mid}}(t) \& \text{gap}_{n,\text{right}}(t) > \text{gap}_{n,\text{mid}}(t)$ 。

[0106]  $\text{gap}_{n+1,\text{right}}(t) > v_{n+1,\text{right}}(t) + a_{n+1,\text{right}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)$ 。

[0107]  $\text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane\_right}}$

[0108] 其中, $p_{\text{changelane\_right}}$ 表示车辆向右换道的概率,具体的取值可以根据实际需要自行进行确定,例如可以设初始值为0.3。

[0109] (3.3) 车辆的左右侧车道均具备超车条件,具体的判断公式如下所示。

[0110]  $\text{gap}_{n,\text{left}}(t) > \text{gap}_{n,\text{mid}}(t) \& \text{gap}_{n,\text{right}}(t) > \text{gap}_{n,\text{mid}}(t)$ 。

[0111]  $\text{gap}_{n+1,\text{left}}(t) > v_{n+1,\text{left}}(t) + a_{n+1,\text{left}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)$ 。

[0112]  $\text{gap}_{n+1,\text{right}}(t) > v_{n+1,\text{right}}(t) + a_{n+1,\text{right}}(t+1) + \text{gap}_{n+1,\text{safe}}(t)$ 。

[0113] 在上述的三个公式成立的情况下,若随机函数 $\text{rand}(0,1)$ 满足 $\text{rand}(0,1) \leq p_{\text{changelane\_left}}$ ,则车辆将向左进行换道;若随机函数 $\text{rand}(0,1)$ 满足 $\text{rand}(0,1) \geq p_{\text{changelane\_right}}$ ,则车辆将向右进行换道;若随机函数 $\text{rand}(0,1)$ 满足 $p_{\text{changelane\_left}} < \text{rand}(0,1) < p_{\text{changelane\_right}}$ ,则车辆将进行减速跟驰。其中,换道概率 $p_{\text{changelane\_left}}$ 和 $p_{\text{changelane\_right}}$ 的具体取值可以根据实际需要自行进行确定,例如可以设 $p_{\text{changelane\_left}}$ 的初始值为0.4, $p_{\text{changelane\_right}}$ 的初始值为0.7。

[0114] 二、基于上述的换道动机的场景二;在分合流口位置,车辆一般是进行向左或向右进行合流的;在桥梁道路养护施工导致的局部道路封闭位置,一般是对道路的左侧或右侧进行封闭,使得车辆需要向右或向左进行换道。

[0115] 基于上述分析,场景二下的车辆换道情景与场景一中双车道的车辆换道情景相似,故在场景二中对于相邻车道是否具备换道条件的判断过程可以参考场景一中双车道的

换道条件;但区别点在于本场景下无需进行当前车道的车间距判断以及换道概率为1,具体的换道条件的判断公式如下所示。

$$[0116] \quad \text{gap}_{n+1, \text{lane\_end}}(t) > \text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t)。$$

$$[0117] \quad \text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t) = v_{n+1}(t) \cdot \tau_{n+1} + \frac{v_{n+1}^2(t)}{2a_{n+1, \text{type}}^{\min}} - \frac{v_n^2(t)}{2a_n^{\min}}。$$

[0118] 若上述的判断公式成立,则车辆立即进行换道,反之则进行减速停车,直至具备如下换道条件时进行换道。

$$[0119] \quad v_n(t+1) = v_n(t) + \max[a_n(t+1), a_n^{\min, \text{type}}]。$$

$$[0120] \quad a_n(t+1) = -\frac{v_n^2(t)}{2\text{gap}_{\text{limit}}(t)} + \text{rand}(-1, 0)。$$

[0121] 可以理解的是,场景二下道路的交通是比较拥堵的,即交通流是比较大,此时可能存在后车提前于前车进行换道的情况;故在车辆进行换道时,若具备如下的让出条件。此时驶入车道的车辆可以进行提前减速以让出车位为相邻车道前方的车辆提供换道条件;否则该车辆正常通过,对下一车辆进行减速让出车位。让出条件的判断以及提前减速的公式如下所示。

[0122] 让出条件的判断公式:

$$v_n(t) + 0.5a_n(t+1) - [v_{n+1, \text{lane\_end}}(t) + 0.5a_{n+1, \text{lane\_end}}(t)] \geq \text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t)。$$

$$[0123] \quad a_{n+1, \text{lane\_end}}(t+1) = \max\left[-\frac{v_{n+1, \text{lane\_end}}^2(t)}{2\text{gap}_{n+1, \text{lane\_end}}(t)}, a_{n+1, \text{type}}^{\min}\right]。$$

[0124] 提前减速的公式:  $v_{n+1, \text{lane\_end}}(t+1) = v_{n+1, \text{lane\_end}}(t) + a_{n+1, \text{lane\_end}}(t+1)。$

[0125] 其中,  $v_{n+1, \text{lane\_end}}(t)$  和  $a_{n+1, \text{lane\_end}}(t)$  分别表示  $t$  时刻编号为  $n+1$  的车辆在时步结束时的速度和加速度,  $\text{gap}_{n+1, \text{safe}}(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n+1$  的车辆的安全车距,  $\text{gap}_{n+1, \text{lane\_end}}(t)$  表示  $t$  时刻编号为  $n+1$  的车辆在时步结束时与同车道前车的间距,  $a_n^{\min, \text{type}}$  表示编号为  $n$  的车辆所属车型的最大刹车加速度。

[0126] 本实施例中,在车辆进行换道时,可以定义换道车辆的初始位置坐标  $(x_{sp}, y_{sp})$ , 初始速度为  $v_{sp}$ , 初始加速度为  $a_{sp}$ , 初始车车身航向角度为  $\theta_{sp}$ 。在车辆换道结束后,可以定义完成换道的车辆的位置坐标为  $(x_{ep}, y_{ep})$ , 换道结束时的速度为  $v_{ep}$ , 换道结束时的加速度为  $a_{ep}$ , 换道结束时的车身航向角度为  $\theta_{ep}$ 。基于上述的参数,对于车辆在换道过程中的轨迹方程的表达式有多种,本实施例中优选采用通过五次多项式来对车辆在换道过程中的实时轨迹进行表示,具体的实时轨迹  $[x(t), y(t)]$  的表达式如下所示。

$$[0127] \quad x(t) = A_5 t^5 + A_4 t^4 + A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0。$$

$$[0128] \quad y(t) = B_5 t^5 + B_4 t^4 + B_3 t^3 + B_2 t^2 + B_1 t + B_0。$$

$$[0129] \quad A_0 = x_{sp}; A_1 = v_{sp} \cdot \cos\theta_{sp}; A_2 = 0.5a_{sp} \cdot \cos\theta_{sp}。$$

$$[0130] \quad A_3 = \frac{10(x_{ep} - x_{sp}) - 6v_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} \cdot t_f - 4v_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} \cdot t_f - 1.5a_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} t_f^2 + 0.5a_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} t_f^2}{t_f^3}。$$

$$[0131] \quad A_4 = \frac{15(x_{sp} - x_{ep}) + 8v_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} \cdot t_f + 7v_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} \cdot t_f + 1.5a_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} t_f^2 - a_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} t_f^2}{t_f^4}。$$

$$[0132] \quad A_5 = \frac{6(x_{ep}-x_{sp})-3v_{sp} \cdot \cos\theta_{sp} \cdot t_f-3v_{ep} \cdot \cos\theta_{ep} \cdot t_f-0.5a_{sp} \cdot \cos\theta_{sp}t_f^2+0.5a_{ep} \cdot \cos\theta_{ep}t_f^2}{t_f^5}。$$

$$[0133] \quad B_0=y_{sp}; B_1=v_{sp} \cdot \sin\theta_{sp}; B_2=0.5a_{sp} \cdot \sin\theta_{sp}。$$

$$[0134] \quad B_3 = \frac{10(y_{ep}-y_{sp})-6v_{sp} \cdot \sin\theta_{sp} \cdot t_f-4v_{ep} \cdot \sin\theta_{ep} \cdot t_f-1.5a_{sp} \cdot \sin\theta_{sp}t_f^2+0.5a_{ep} \cdot \sin\theta_{ep}t_f^2}{t_f^3}。$$

$$[0135] \quad B_4 = \frac{15(y_{sp}-y_{ep})+8v_{sp} \cdot \sin\theta_{sp} \cdot t_f+7v_{ep} \cdot \sin\theta_{ep} \cdot t_f+1.5a_{sp} \cdot \sin\theta_{sp}t_f^2-a_{ep} \cdot \sin\theta_{ep}t_f^2}{t_f^4}。$$

$$[0136] \quad B_5 = \frac{6(y_{ep}-y_{sp})-3v_{sp} \cdot \sin\theta_{sp} \cdot t_f-3v_{ep} \cdot \sin\theta_{ep} \cdot t_f-0.5a_{sp} \cdot \sin\theta_{sp}t_f^2+0.5a_{ep} \cdot \sin\theta_{ep}t_f^2}{t_f^5}。$$

[0137] 其中,  $x(t)$  表示换道过程中车辆沿行车方向前行的距离;  $y(t)$  表示换道过程中车辆向驶入车道方向的平移距离;  $A$  和  $B$  表示多项式中各项式的常数项;  $t_f$  表示车辆的换道持续时间, 具体的取值可以根据车速进行计算得到, 例如  $t_f=4.9322v_{sp}^{0.2035}$ 。

[0138] 可以理解的是, 为了保证车辆的换道过程顺利进行, 需要对车辆换道前后的位置以及形态变化进行限定。对车辆在行进方向的距离进行限定, 该限定值与车辆的行驶速度有关, 可以设  $x_{ep}-x_{sp}=4.7995v_{sp}^{0.8027}$ 。对车辆在驶入车道方向的平移距离进行限定, 该限定值与车道的宽度有关, 可以设  $y_{ep}-y_{sp}=3.75$ 。可以限定车辆匀速进行换道, 且换道前后车辆均处于平行于车道行驶方向, 则有  $v_{sp}=v_{ep}, a_{sp}=a_{ep}=0, \theta_{sp}=\theta_{ep}=0$ 。

[0139] 本实施例中, 车辆的跟驰规则制定包括两个场景; 场景一: 车辆所行驶的车道无前车或前车距离较远, 则此时车辆无需进行换道, 即车辆进行跟驰; 场景二: 当前所行驶的车道前方车辆距离较近且未进行换道, 此时后车即当前车辆不满足换道条件, 故出于安全考虑需要进行减速和跟驰。对于上述两个场景的判断公式如下所示。

$$[0140] \quad gap_n(t+1) > \min\{v_n(t) + \min[a_n(t+1), a_{type}^{max}], v_L^{max}, v_{type}^{max}\} + r \cdot gap_n, safe(t)。$$

[0141] 其中,  $gap_n(t+1)$  表示  $t+1$  时刻编号为  $n$  的车辆与同车道前车的间距;  $r$  表示加速时前车距离与安全车距的比值, 具体取值可以根据实际需要自行进行确定, 例如可以设初始值为 4。

[0142] (1) 若上述的判断公式成立, 则车辆处于上述跟驰的场景一; 此时车辆倾向于高速行驶, 其行驶模拟规则如下所示。

$$[0143] \quad v_n(t+1) = \min[v_n(t) + a_n(t+1), v_L^{max}, v_{type}^{max}]。$$

[0144] 可以理解的是, 考虑到车辆在行驶过程中的随机慢化情形, 可以对行驶模拟规则进行如下的优化。

$$[0145] \quad v_n(t+1) = v_n(t) + \text{rand}(-0.2, 0) \cdot a_{type}^{max}; \text{rand}(0, 1) \leq p_{rsd}。$$

[0146] 其中,  $\text{rand}(-0.2, 0)$  和  $\text{rand}(0, 1)$  均表示随机函数,  $\text{rand}(-0.2, 0)$  具体表示随机数在  $(-0.2, 0)$  范围内的概率,  $\text{rand}(0, 1)$  具体表示随机数在  $(0, 1)$  范围内的概率。

[0147] (2) 若上述判断公式不成立, 则车辆处于上述跟驰的场景二; 此时车辆的行驶模拟规则如下所示。

$$[0148] \quad v_n(t+1) = \min\{v_n(t) + \max[a_n(t+1), a_{type}^{max}], gap_n(t)\}。$$

[0149] 当前车间距大于安全车距时,车辆可以进行适当的减速,加速度随前车间距变化的规则如下所示。

$$[0150] \quad a_{n+1}(t+1) = -\frac{v_n^2(t)}{2[\text{gap}_n(t)-\text{gap}_{n, \text{safe}}(t)]} + \text{rand}(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2})。$$

[0151] 其中, $\text{gap}_n(t)$ 表示t时刻编号为n的车辆与同车道前车的间距; $\text{gap}_{n, \text{safe}}(t)$ 表示t时刻编号为n的车辆的安全车距; $\text{rand}(-1/2, 1/2)$ 表示随机函数, $\text{rand}(-1/2, 1/2)$ 具体表示随机数在 $(-1/2, 1/2)$ 范围内的概率。

[0152] 当前车间距小于等于安全车距时,车辆需要进行紧急刹车,则加速度随前车间距变化的规则如下所示。

$$[0153] \quad a_n(t+1) = a_{\text{type}}^{\text{min}}。$$

[0154] 本实施例中,由步骤S400可知,在基于车辆的效应计算路段的荷载效应计算时的加载模式主要有两种,一种是车重加载,另一种是轴重加载。应当知道的是,传统方式一般都是基于车重加载模式下的荷载效应的计算,但是车辆的重量是通过车轮传递至路面的,而车辆的前轮车轮的数量以及间距都是通过车轴的间距以及数量来进行体现的。由于轴距和轴数的不同,相同的车重对道路的影响程度是不同的,故在本实施例中为了提高荷载效应计算的准确性,对于效应计算路段的荷载效应计算采用车重和轴重双重加载模式进行计算。为了方便理解,下面将针对两种加载模式的具体计算过程进行详细的描述。

[0155] 具体的,基于车重加载条件下,对效应计算路段 $EC_i$ 的荷载效应 $E_i$ 的计算公式为: $E_i = \zeta G_i(t) IL$ 。其中, $\zeta$ 为修正参数矩阵, $G_i(t)$ 为车重矩阵,表示t时刻 $EC_i$ 范围内所有车辆的总重, $IL$ 表示影响线矩阵。基于轴重加载条件下,对效应计算路段 $EC_i$ 的荷载效应 $E_i$ 的计算公式为: $E_i = g_i(t) IL$ ;其中, $g_i$ 为轴重矩阵,表示t时刻 $EC_i$ 范围内所有车轴的总重。

[0156] 可以理解的是,在进行基于相同车辆的荷载效应的计算时,理论上车重加载模式和轴重加载模式的计算结果是相互对应的;但在实际中可能存在无法准确获得轴重的车辆,对于这类车辆只能进行车重模式下的荷载效应的计算并引入车辆荷载折减系数,即修正参数矩阵 $\zeta$ 。通过引入车辆荷载折减系数,可以更精确的计算车辆荷载效应;针对无法准确测得车辆轴载的情形,采用车辆荷载折减系数 $\times$ 车重 $\times$ 影响线的方式计算荷载效应,能够取得更加准确的荷载效应仿真结果。车辆荷载折减系数的作用是用来折减车重加载的荷载效应,其元素的值为车重影响线加载的效应计算值与轴重影响线加载的效应计算值的比值,可以通过有限元仿真结果回归得到。

[0157] 本实施例中,通过建立参数自动更新机制使得模型仿真参数能够实时反映交通流的变化,从而提高模拟的准确性和实用性。对于参数的自动更新方式有多种,本实施例中优选采用基于实时交通数据的单变量贝叶斯动态线性模型(BDLM)来实现,该模型能够动态调整仿真参数以匹配实测交通流状态,进而减少仿真与实际之间的差异。

[0158] 可以理解的是,利用单变量贝叶斯动态线性模型来进行参数更新的方式为本领域的惯用手段,其具体的工作过程和原理均为本领域技术人员所公知,故不在此进行详细的阐述。当然,为了方便进行理解,可以对单变量贝叶斯动态线性模型的观测方程和状态方程进行简单的描述。

$$[0159] \quad \text{观测方程: } y_T = \mu_T + v_T, v_T \sim N[0, V_T]。$$

$$[0160] \quad \text{状态方程: } \theta_T = [\mu_T, \beta_T]。$$

[0161]  $\mu_T = \mu_{T-1} + \beta_{T-1} + w_{T1}$ 。

[0162]  $\beta_T = \beta_{T-1} + w_{T2}$ 。

[0163]  $w_T = (w_{T1}, w_{T2})^T, w_T \sim N[0, W_T]$ 。

[0164] 其中,  $y_T$  表示车辆运行参数在 T 次更新后的修正值, 运行参数主要包括不同路段不同车道随机慢化概率、换道概率、车辆开始减速距离、换道起终点距离、换道用时、不同车型的刹车反应时间等;  $\theta_T$  表示一个未知参数, 用来描述过程在 T 次更新时的状态;  $\mu_T$  表示截至 T 次更新时观测值的均值;  $\beta_{T-1}$  和  $\beta_T$  分别表示截至 T-1 和 T 次更新时的正态随机变量,  $v_T$  和  $w_T$  均表示截至 T 次更新时的零均值正态随机变量,  $V_T$  和  $W_T$  均表示截至 T 次更新时的方差。

[0165] 以上描述了本申请的基本原理、主要特征和本申请的优点。本行业的技术人员应该了解, 本申请不受上述实施例的限制, 上述实施例和说明书中描述的只是本申请的原理, 在不脱离本申请精神和范围的前提下本申请还会有各种变化和改进, 这些变化和改进都落入要求保护的本申请的范围内。本申请要求的保护范围由所附的权利要求书及其等同物界定。

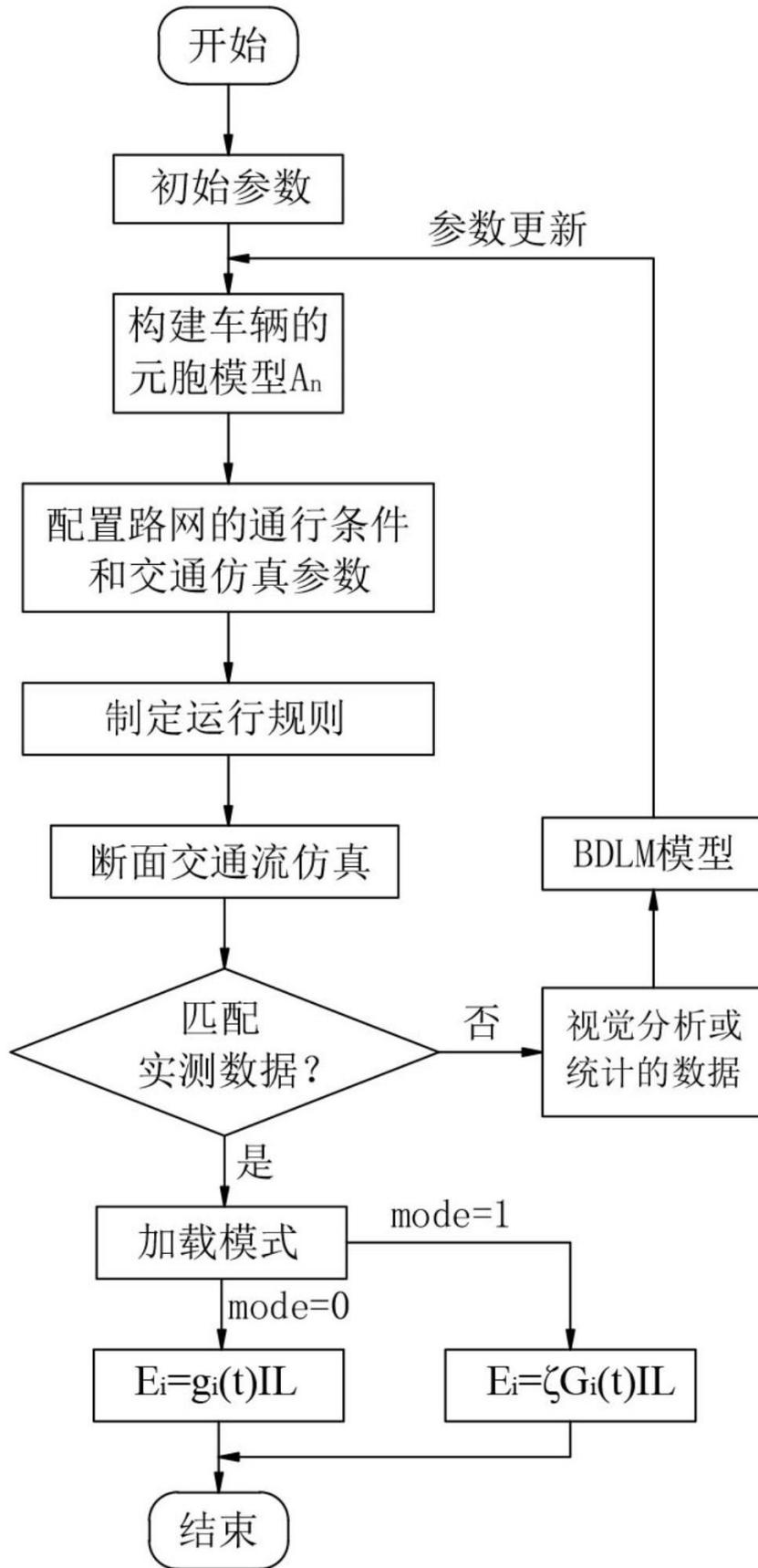


图1