

文章编号: 1002-0268 (2004) 11-0093-05

微观仿真中车辆换道的行为分析和建模

杨建国, 王金梅, 李庆丰, 王兆安

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 传统换道模型存在的两个缺陷: 一是缺乏正常换道可实现区间的研究; 二是忽略了换道过程中前轮转向角为 0° 的阶段。本文对正常换道的可实现区间的探讨, 为换道是否需要倒车配合提供判断依据。修正了传统的 2 段式和 3 段式换道模型, 将换道过程分为扭角、靠拢、收角、调整等 4 个阶段。用仿真实验证实本文提出的换道规则的可操作性。对中国西安城市道路上实际换道的拍摄图像进行分析, 证明了该模型的正确性。

关键词: 微观仿真; 换道; 建模

中图分类号: U491

文献标识码: A

Behavior Analysis and Modeling of Lane Change in Traffic Micro-simulation

YANG Jian-guo, WANG Jin-mei, LI Qing-feng, WANG Zhao-an

(Institute of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Shaanxi Xi'an, 710049, China)

Abstract: Two defects in the present models are pointed out in this paper: the first one is that there is lack of research about the attainable area of Normal Lane Change (NLC), the second one is that the phase in which the front wheel turning angle of 0° is ignored in the process of lane change. And the attainable area of NLC is discussed, which provides rules for deciding if vehicle reversing is necessary. The traditional two-phases and three-phases model have been improved in this paper. The process of lane change is divided into four phases including turning-angle, closing, counter-turning-angle, and adjustment. The maneuverability of lane change rules represented in this paper has been confirmed by simulation experiment. The rationality of the model is testified by analyzing the actual images of lane change in urban road, Xi'an, China.

Key words: Traffic micro-simulation; Lane change; Modeling

车辆排队、拥堵、消散、事故发生和超车等过程往往伴随有换道过程, 用计算机实现换道过程, 即换道模型。在无视觉开环行为、换道安全时间、换道条件等方面, 国内外学者对交通微观仿真中换道模型进行了大量的研究。已有的研究为实现换道模型提供了大量有价值的结论, 但是也存在如下缺陷。

首先, 缺乏正常换道可实现区间的研究。期望的换道是否可以不通过倒车而能直接实现, 这个问题可以用“正常换道的可实现区间”来表达。而在目前的研究成果中, 并未涉及这个内容。其次, 忽略了换道过程中前轮转向角为 0° 的阶段。现有研究普遍将换道过程在时间上划分为 2 段或 3 段^[1, 2, 3], 将换道中的前轮转向角近似认为是一个正弦波, 缺少一定时期的前

轮转向角为 0° 的阶段。对车辆轨迹的拍摄结果表明, 几乎每个换道过程都有一个明显的前轮转向角为 0° 的阶段。

本文首先依据车辆轨迹简化算法, 分析了理论换道和正常换道的区别, 给出了正常换道的可实现区间的计算公式, 这个公式可以作为模型中是否需要倒车的判断依据。然后描述了驾驶员换道的行为特征, 将整个换道过程划分为 4 个阶段: 扭角阶段、靠拢阶段、收角阶段和调整阶段, 同时分析了各个阶段中的关键参数。4 阶段划分和参数分析为换道模型的构建打下了基础。最后, 通过 Matlab 仿真实验, 实现了在上述新思路指导下的换道模型构建。对城市路段上车辆实际换道过程的无告知拍摄实验和数据分析, 证实

了 4 阶段划分的正确性。

1 正常换道 (Normal Lane Change: NLC) 的可实现区间

换道是一种驾驶行为, 当行为前后车身航向角不变, 而车身航向线不是同一条线, 都称为换道。我们称这样的换道为理论换道。理论换道的起点固定, 其终点可以是除去换道前车身航向线上的任何点。并且, 任意给定起点 A , 终点 B , 车辆可以通过若干次掉头, 实现理论换道。

正常换道 (NLC) 是对理论换道给以下 3 个实际约束条件形成的。即: 在换道中, ①不允许中途倒车; ②不允许瞬间航向角的绝对值大于 90° ; ③除了终点以外, 轨迹中不允许有车身航向角相同而车身航向线不重合的点存在。

实现换道的条件分为基本条件和环境条件。文献 [4] 给出的环境条件是: 符合相邻车道使用规定, 具有足够的换道空档, 而在挤车换道中能做出后车会安全让车的判断。本文研究的正常换道的可实现区间属于基本换道条件, 是依据车身轴距, 在无干涉的情况下, 求解车辆在正常换道时换道目标点的可实现区域。首先判断目标换道点是否在可实现区间内, 如果在此区间内, 则启动正常换道, 包括进一步判断是否满足文献 [4] 指出的环境条件。否则, 车辆将通过倒车配合实现换道。

图 1 是对理论换道和正常换道的举例。在理论换道中, A 是起点, F 是终点。实现 $A \rightarrow F$ 换道, 可以有多种方式, 但是不可能实现任何一种正常换道。 $A \rightarrow d \rightarrow F$ 路线, 必须通过倒车实现, 不满足条件①。满足条件①的路线是 $A \rightarrow B \rightarrow b \rightarrow F$, 由半圆和直行完成。从 B 点开始车身航向角 $\alpha_1 > 90^\circ$, 不满足条件②。另外, 在一个随意的轨迹 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$ 中, E 点不满足条件③。

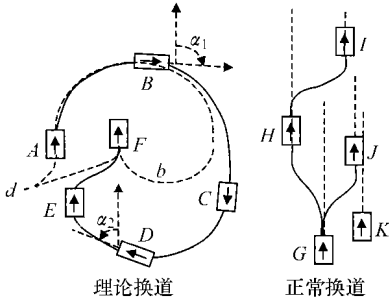


图 1 理论换道和正常换道

图 1 右边是几种正常换道, 如 $G \rightarrow H$, $G \rightarrow J$, $H \rightarrow I$ 。而 $G \rightarrow H \rightarrow I$ 也是一个换道, 但由于中间的 H

不满足条件③, 也不是正常换道。

可以得出如下结论: 在 $X-Y$ 平面上, 换道起点固定为 $O(0, 0)$, 换道前航向角为 0° , 车辆最小转弯半径为 $R_{\min}$ 。如果 F 点满足正常换道终点要求, 则 F 点坐标 (x_{NLC}, y_{NLC}) 满足下式

$$\begin{cases} y_{NLC} \geq 2R_{\min}, & \text{当 } |x_{NLC}| \geq 2R_{\min} \\ y_{NLC} \geq 2R_{\min} \sin\left(\arccos\left[1 - \frac{x_{NLC}}{2R_{\min}}\right]\right), & \text{当 } |x_{NLC}| < 2R_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

图 2 中灰色区域是根据式 (1) 得到的满足正常换道条件的终点位置集合。其中上、左、右 3 个方向的锯齿线表示可实现区间没有边界。图中 D 点落在可实现区间之外, 说明从 O 点到 D 点, 无法实现正常换道。曲线 $OEGI$ 是最小转弯半径取如图所示的值时, 获得的可实现区间边界。曲线 OJ 是一个更大的最小转弯半径车辆获得的可实现区间边界。可以看出, 最小转弯半径越大, 正常换道不可实现区域就越大。由于车身轴距与最小转弯半径成正比^[4], 因此, 车身轴距越大, 换道越不灵活。这与现实是吻合的。

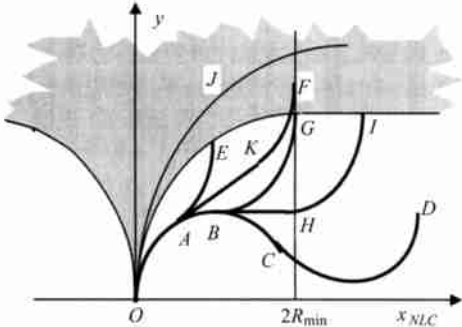


图 2 正常换道的可实现区间

2 正常换道过程的 4 阶段划分

驾驶员换道时往往采取 4 个步骤: (1) 通过方向盘转向将车身航向角扭到一个合适的角度; (2) 在前轮 0° 转向的情况下将车辆移动到合适的目标换道位置; (3) 通过方向盘反转将车身航向角回收到初始状态; (4) 如果与目标位置有少量差异, 可以通过方向盘抖动, 进行适当调节。

建模时相应可划分为 4 个阶段。将其命名为扭角阶段、靠拢阶段、收角阶段和调整阶段。分析中, 假设车辆换道是由左道换向右道。相反的过程除方向角正负区别外, 具有相同的分析结论。其中, 车辆前轮转向角用 β 表示, 正值表示右转, α 为车身航向角, 正值表示右偏。

2.1 扭角阶段

换道时首先使前轮转向角右偏一个角度 β , 使车辆获得期望的车身航向角度。在车辆到达期望的航向角之前的阶段称为扭角阶段。如图 3 所示。本阶段结束时车辆将以期望的航向角度进入靠拢阶段, 这个角度称为靠拢航向角, 用 α_{close} 表示。

在建模中, 扭角阶段使用如下参数:

(1) 前轮转向角 β

这个角度的大小直接影响扭角阶段进入靠拢阶段的快慢。驾驶员必须转过一定的角度才可以实现换道; 同时, 驾驶员不希望做最大的转向动作, 文献 [5] 称之为轻便性指标。最终的 β 是上述行为动力和行为阻力的合力决定的, 最大值为 25.9° 。

(2) 扭角持续时间 t

前轮转向角 β 、车身航向角 α 通常是一个时变量, $\alpha = \int \beta dt$ (见文献 [2] 图 1)。在进入靠拢阶段时, β 回归到 0° 。当靠拢航向角 α_{close} 确定, 那么 β 与完成扭角的时间成近似的反比关系。

(3) 靠拢航行角 α_{close}

在图 3 中看出, 在靠拢阶段, 车辆沿着靠拢航向角直线运行。

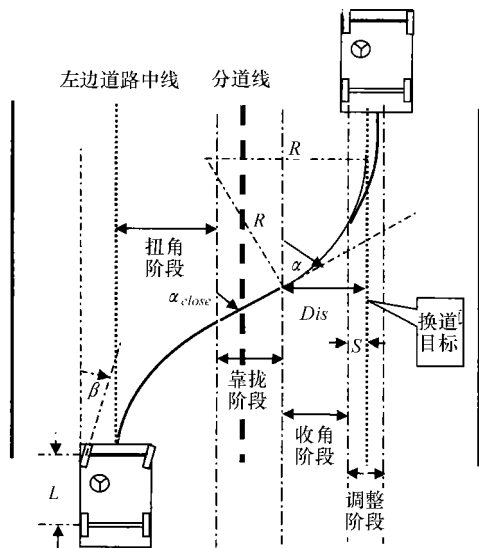


图 3 换道过程示意图

2.2 靠拢阶段

在靠拢阶段, 车辆只需要沿着扭角阶段确定的靠拢航向角直行。换道间距越大, 或者靠拢航向角越小, 都可以产生或者延长靠拢阶段。在换道间距极小或者靠拢航向角极大, 都会造成靠拢阶段的缩小或者消失。文献 [1]、[3] 之所以忽略了靠拢阶段的存在, 可能就是这个原因。

靠拢阶段消失的条件是: 当驾驶员刚刚把车身扭

到合适的角度, 发现他必须立即反转方向盘, 进入收角阶段。图 2 中, OAE 、 $OABG$ 都是没有靠拢阶段的换道轨迹。

2.3 收角阶段

在靠拢阶段的后期, 驾驶员左转方向盘, 完成车辆航向的收角 (使航向角为 0° , 平行于运行航线), 进入收角阶段。收角阶段的建模, 只用到一个关键量——收角距离 Dis 。它是收角开始的位置和换道目标之间的横向距离。收角距离 Dis 有一个最小值, 标注为 Dis_{min} , 定义是: 在距离换道目标 Dis_{min} 处, 如果前轮转向角为最大值, 刚好能够在换道目标处实现收角。或者说, 当收角开始处与换道目标的距离小于 Dis_{min} , 即便将前轮转到最大, 也无法在换道目标前实现车身角度的归零。根据分析, 当车辆轴距为 L , 如图 3, 则转弯半径的简化计算公式为

$$R = L \tan \beta \quad (2)$$

取 $\beta_{max} = 25.9^\circ$, 最小转弯半径 R_{min} 为

$$R_{min} = L \tan(\beta_{max}) \approx 2L \quad (3)$$

图 3 所示, 当目前车身航向角为 α , 则与前轮转向角有关的收角距离为

$$Dis = R - R \times \cos \alpha = L \times (1 - \cos \alpha) \tan \beta \quad (4)$$

当驾驶员期望以最大前轮转向角完成收角, 则最小收角距离 Dis_{min} 为

$$Dis_{min} = L \times (1 - \cos \alpha) \tan(\beta_{max}) = 2L \times (1 - \cos \alpha) \quad (5)$$

2.4 调整阶段

对于驾驶员来说, 换道目标是一个模糊的区间, 这个区间的中线为换道目标线、宽度为 $2S$ 。车辆一旦进入这个区间, 则自动进入调整阶段。这个阶段, 车身航向角可能已经归零, 可能还没有归零, 也可能为负值。因此, 调整阶段的目的是航向角的归零和前轮转向角的归零。

在微观模型中, 调整阶段通常是在几个步长内就可以完成。

2.5 本文阶段划分方法的特点

现有研究普遍认同图 4 所示的文献 [3]、[1] 的两种划分方法。本文强调了靠拢阶段的存在。

传统方法中强调, 换道中前轮转向角为一个正弦波过程。由于没有考虑靠拢阶段, Phase1 和 Phase2 之间, 是方向盘右偏直接向左偏的连续过程。

本文提出的正常换道, 包括具有靠拢阶段的换道行为。在正常换道中, 如果根据传统的 3 段式划分, 就相当于增加“无靠拢阶段”的约束条件。

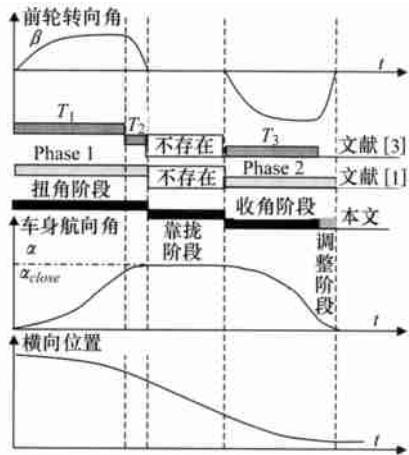


图 4 换道阶段划分方法示意图

3 仿真实验

关于换道的 4 阶段划分以及建模，我们用 Matlab5.3 进行了仿真。一个右换道过程设定 6 个参数， x 方向初始位置 o_x 、 x 方向终点位置 t_x 、靠拢航向角 α_close 、前轮转向角 β 、车身轴距 $length$ 、车速 v ，形成了 m 文件函数 $f030910$ 。输入 6 个参数，进行 4 阶段换道计算，输出换道轨迹数组。

图 5 是 4 条换道轨迹，其 x 方向初始位置间距为 10m，终点位置都是初始位置右边 3m，这是常见的相邻车道间距。每条轨迹上的 3 个五角星，将整个轨迹划分为 4 个阶段。

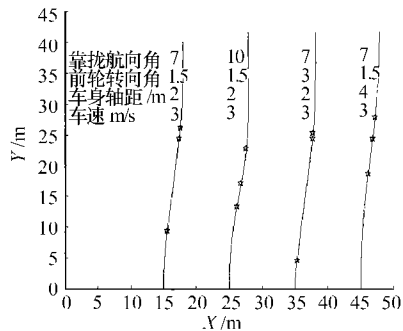


图 5 仿真实现的换道轨迹：参数改变带来的影响

左边第一条换道轨迹参数为：靠拢航向角 7° 、前轮转向角 1.5° ，车身轴距 2m，车速 3m/s 。这是一组小型轿车常见的参数，将这条轨迹定为参照轨迹。从中明显地看出扭角阶段、靠拢阶段、收角阶段和调整阶段的存在。

第二条换道轨迹的靠拢航向角改为 10° 靠拢航向角增大，推迟了进入靠拢阶段的时间，缩短了靠拢阶段距离，扭角和收角两个阶段更为明显，换道的纵向距离较短。

第三条换道轨迹的前轮转向角改为 3° 。由于加大

了转向角度，减少了进入靠拢阶段的时间。这条轨迹的靠拢阶段很长，而扭角和收角阶段则很短。

第四条换道轨迹的轴距由 2m 变为 4m。轴距加长使得转弯半径增大，车身航向角达到 7° 需要更长的时间，换道过程较为迟缓。

4 阶段划分的仿真实验结果，与本文实际拍摄的换道轨迹相比，是吻合的。

4 城市道路实际换道过程拍摄分析

为验证本文提出的换道模型的 4 阶段划分的正确性，作者在西安市城区道路上进行了实际换道过程的无告知拍摄实验，并对拍摄的图像进行了数据分析。

4.1 实验条件

- (1) 拍摄目标：咸宁西路和兴庆南路交叉口，由南向北路段，两车道变三车道处。
- (2) 设备：SONY—TRV18E 数码摄像机，30 帧 / s。
- (3) 摄像机位置：交叉口东北角翠庭大厦顶层。
- (4) 拍摄时间：2002 年 12 月 10 日，下午 16:25-16:50。

4.2 实验方法

- (1) 固定摄像机，对目标区域进行连续拍摄，形成大约 25min 的连续图象。
- (2) 截取 11 组单个车辆的换道图像。根据车速不同，每组图像大约有 200~300 帧图片构成。
- (3) 在每组图片中，间隔 5 帧取 1 帧，捕捉该时刻的车辆位置信息。记录全部换道过程的车辆位置，并将其描记在一帧换道区域内无车辆的图片中，形成实际拍摄图的原始换道轨迹，如图 6 所示。

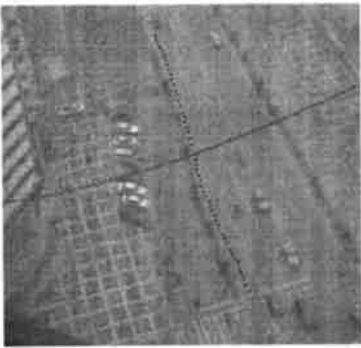


图 6 原始换道轨迹

(4) 由于视角影响，图 6 的位置点不能直接描记轨迹，必须对原始换道轨迹进行透射变换^[9]（本文中的透射变换对文献 [6] 方法进行了修改），得到平面轨迹图，并进行倾斜和截取，获得图 7。

(5) 在图 7 所示的倾斜后截取图上，用鼠标点击

出轨迹点坐标，记录形成一组换道轨迹。

(6) 重复得到 11 组换道轨迹，利用 Excel 绘图工具，得出图 8 所示的最终轨迹图。

4.3 实验分析

4.3.1 证实靠拢阶段的存在

车辆靠已经产生倾斜的车身航向角，实现换道的横向移动行为。在图 8 中，我们用 P_1 和 P_2 标注靠拢阶段的起点和终点。从图上可以看出，靠拢阶段确实存在。

表 1 最后一行是靠拢阶段的横向移动距离与换道总横向移动距离的比值。表明了靠拢阶段不仅存在，而且很明显。

4.3.2 靠拢航向角的测量

按照图 8 标记的靠拢阶

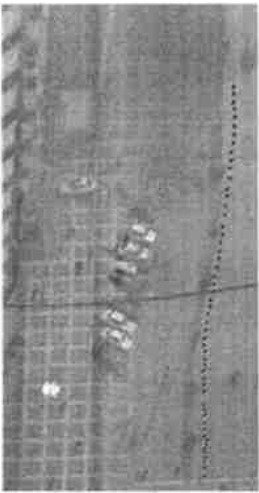


图 7 变换后图

4.3.3 数据误差

图 8 中，车辆运行轨迹出现了一些异常变化，如图中箭头所指位置，这是由于实验数据存在误差。误差的主要来源为：①拍摄图像的模糊，导致人工捕捉车辆特定位置出现差异；②人工操纵鼠标定位不准确；③透射变换带来的误差。

5 结论

本文是为实现微观车辆模型中决策机的复杂决策思想而进行的阶段研究。其中关于正常换道的可实现区间研究，为换道中是否需要倒车提供了判断依据。将换道合理地分为 4 个阶段，为车辆模型实现逼真地换道打下了良好的基础，在车辆排队换道、拥堵、消散、超车中具有重要价值。本文的研究成果是一个可以被调用的、功能独立的模型，在几乎所有的换道动作中都可以使用，具有较强的实用性。

参考文献:

[1] Guy Wallis, etc. An Unexpected Role for Visual Feedback in Vehicle Steering Control [J]. Current Biology 2002, 12: 295-299.
[2] Salvucci D D, Liu A. The Time Course of a Lane Change: Driver Control and Eye-movement Behavior [J]. Transportation Research Part F, 2002 (5): 123-132.
[3] Van Winsum W, etc. Lane Change Manoeuvres and Safety Margins [J]. Transportation Research Part F, 1999 (2): 139-149.
[4] 邹智军, 杨东援. 微观交通仿真中的车道变换模型 [J]. 中国公路学报, 2002, 15 (2): 105-108.
[5] 高振海, 管欣, 郭孔辉. 驾驶员方向控制模型及在汽车智能驾驶研究中的应用 [J]. 中国公路学报, 2000, 13 (3): 106-109.
[6] 安玮, 李宏, 徐晖, 孙仲康. 模式识别中的透射变换与仿射变换 [J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21 (1): 55-60.

图 8 最终轨迹图的其中 6 幅段，参照图 3 靠拢阶段靠拢航向角定义，并计算 α_{close} 如表 1。

表 1 靠拢阶段靠拢航向角的测量

图 8 中分图号	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
起点坐标 h_m	0.6, 30.2	1.25	0.31	0.208	1.2, 19.05	15.2
终点坐标 h_m	2.2, 39.5	2.5, 38.5	3.425	3.475	3.33	2.431.6
航向角 $\alpha_{close}/(^{\circ})$	9.76	6.34	14.6	6.41	7.33	6.61
总横向移动 h_m	3.2	4	4.3	4	3.3	3
横向移动比/%	50	38	70	75	55	63