

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.01.022

考虑换道约束空间的车辆换道模型研究

王崇伦, 李振龙, 陈阳舟, 代桂平

(北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

摘要: 为进一步提高换道安全性, 根据不同换道需求给出四种换道情形。针对不同类型司机在不同换道情形下对安全距离的敏感度不同, 提出了一种新的基于不同速度及不同司机类型的最小安全距离模型——动态椭圆最小安全距离模型。在此基础上, 运用车辆运动学理论, 生成换道约束空间。通过 Matlab 仿真对比发现, 该模型较之传统最小安全距离模型在相应情形下的约束空间具有更高的安全性和灵活性。然后利用摄像机标定方法对北京市朝阳区西大望路的实际换道拍摄的图像进行处理, 获取了双车道、低速情况下实际换道轨迹。并在换道约束空间下, 以更加适合双车道、低速换道环境的圆弧换道轨迹为基础生成换道轨迹, 最后采用回旋曲线解决了圆弧换道模型的侧向加速度过大, 曲率不连续等问题。

关键词: 交通工程; 车辆换道模型; 回旋曲线; 约束空间; 最小安全距离

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 01-0121-07

Research on Lane-changing Models Considering Restricted Space

WANG Chonglun, LI Zhenlong, CHEN Yangzhou, DAI Guiping

(School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to further improve the security of lane-changing, depending on the different demands of lane-changing, four kinds of lane-changing situation were given. In allusion to the different sensitivities of different drivers to safe distance in four kinds of lane-changing situation, a new model of lane-changing minimum safety distance based on different speeds and different types of driver, which is called dynamic ellipse model of minimum safe distance was put forward. On this basis, the restricted space was created by applying vehicle kinematics theory. Through Matlab simulation comparison, it is found that the presented model is safer and more flexible in the same situation of restricted space compared to the traditional model of minimum safe distance. In order to get the actual lane-changing trajectory in the case of two-lane and low velocity, the method of camera calibration was used to process the actual images of lane-changing in West Dawang Road, Chaoyang District, Beijing. At precondition of considering of restricted space, the lane-changing trajectory based on arc lane-changing trajectory more suited to dual carriageway lane-changing and low speed environment was generated. Finally, clothoid curve was used to solve some defects such as too high lateral acceleration and noncontinuous curvature profile of the path.

Key words: traffic engineering; lane-changing model; clothoid curve; restricted space; minimum safe distance

0 引言

车辆换道模型在车辆辅助驾驶系统中有着举足

轻重的作用, 近年来, 虽然智能车辆公路系统 (IVHS) 已经对自动换道系统进行了大量的研究, 但是相对于目前研究的比较成熟的车辆跟驰模型,

收稿日期: 2011-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60774037); 国家自然科学基金青年基金项目 (60904069)

作者简介: 王崇伦 (1986-), 男, 山东日照人, 硕士研究生. (allenmin758@hotmail.com)

车辆换道模型更加的复杂,目前的研究还是不够充分。对于换道轨迹要保证它的快速性,光滑性和安全性,除了要考虑对车辆的纵横向控制这一复杂的问题外,换道环境、司机类型以及道路情况也是不容忽视的因素。国外研究人员分别从不同的方面对车辆换道过程进行了研究^[1-2]。提出了诸如 GIPPS 模型、MITS IM 模型、CORSIM 模型和 SITRAS 模型等经典的换道模型。国内学者对 Chowdhury 提出的 STCA 换道模型和基于微观个体规则的元胞自动机模型在多车道交通流的研究取得了不错的成果^[3]。但是这些模型大多基于传统的安全距离模型,侧重于换道需求产生和对换道间隙检测等决策过程的分析,而对在不同换道环境以及不同司机类型情况下,换道安全距离模型对换道安全性的影响探究较少。

本文在前人研究的基础上,针对车辆换道安全距离模型对换道轨迹产生及换道安全性的影响进行了积极有益的探索。主要包括以下几部分:第1部分讨论并给出了在不同需求和不同相对速度下的4种换道情形并介绍了本文的主要研究内容;第2部分首先将司机类型进行分类,针对某一种换道情形,给出了在考虑不同司机类型情况下的新的最小安全距离模型;第3部分对比分析新的最小安全距离模型与文献中的最小安全距离模型,在新的最小安全距离模型基础上生成换道约束空间。第4部分获取双车道、低速情况下车辆换道实际轨迹,在换道约束空间的约束下生成具有更高换道需求的双车道、低速情况下的换道轨迹,并利用 clothoid 回旋曲线的方法解决了圆弧换道轨迹初始曲率不连续和加速度过大等问题;第5部分给出本文结论。

1 不同换道情形的分类

为更好的保证换道的安全性,以降低发生交通事故的可能性。我们首先明确换道车辆在换道起始阶段所处的换道环境,如图1所示。

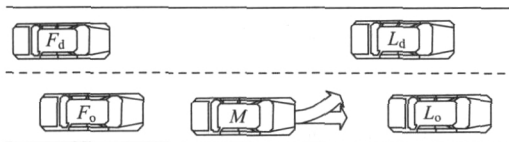


图1 换道初始时刻车辆的位置关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vehicle ubiety at start of lane-changing

图中, M 为换道车辆, L_o 为本车道前车, L_d 为目标车道前车, F_o 为本车道后车, F_d 为目标车道

后车。

假定换道车辆 M 速度为 V_M , F_d 的速度为 V_{Fd} , 根据不同换道车辆的需求及其所处的换道环境,换道车辆可采取以下4种换道情形的任何一种:

- (1) $V_M < V_{Fd}$, M 加速换道到 F_d 前面;
- (2) $V_M > V_{Fd}$, M 以恒定速度换道到 F_d 前面;
- (3) $V_M < V_{Fd}$, M 以恒定速度换道到 F_d 后面;
- (4) $V_M > V_{Fd}$, M 减速或等待换道到 F_d 后面。

类似的换道情形分类在欧洲的一些项目中已经有应用。例如,欧洲的 SAFESPOT 和 PREVENT 项目的实施不但改善了道路的安全性,而且截止到2010年使得事故发生率降低了一半^[4]。本文的研究重点是在分析以上换道情形的前提下,对车辆最小安全距离模型和换道轨迹模型进行探讨,考虑车辆已产生换道需求并准备开始,生成换道轨迹。车辆换道流程图如图2所示。

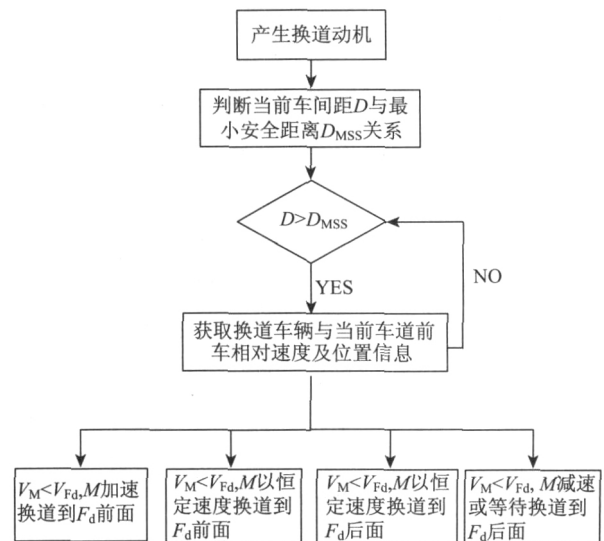


图2 车辆换道流程框图

Fig. 2 Flow chart of lane-changing

2 考虑不同司机类型的最小安全距离模型

2.1 不同司机类型分类

换道安全距离模型对于换道车辆的安全性至关重要,文献^[5]通过分析换道时车辆的运动关系,使用最小安全距离作为安全换道的指标,并将安全车距的计算与车辆的当前速度,到达临界碰撞点的时间,两车的相对速度、加速度关联起来。我们知道司机类型对换道时机的选择以及换道轨迹的生成起着决定性作用,不同的司机面对同样的换道环境会有不同的反应和决策,司机类型同样也决定着安全距离的判断。我们知道对于车辆的换道行为与司

机类型有着相当大的关系,而这种关系大多体现在不同司机类型对于换道安全性的不同反应,本文根据文献[6]将司机分为以下5个不同类型(不同的司机类型我们用 T_d 值来表示):

- ①保守型: $T_d = 0.1$;
- ②谨慎型: $T_d = 0.3$;
- ③常规型: $T_d = 0.5$;
- ④激进型: $T_d = 0.7$;
- ⑤冒险型: $T_d = 0.9$ 。

T_d 值主要体现的是对当前换道环境安全性的可接受度,也就是对于同一换道情形,不同类型的司机选择换道的概率。

2.2 基于不同司机类型的椭圆车辆模型

在分析车辆换道时,曾经有学者将车辆看作质点,但是从微观分析上来讲,显然将车辆处理成为质点是不合理的,还有一些学者将车辆抽象成为一个矩形,但是对于矩形来说,很难与实际的车辆相协调,现在用的比较多的方法是用一个圆圈将车辆包含起来,即传统圆的方法。但是这种方法也有很大的局限性,把很多的非车辆区域包含进来,而且与驾驶员换道行为不符,同时也不便算法的扩展。针对这些问题,有学者考虑用动态圆的方法将车辆包含起来的方法[9],即以车辆的宽度为直径画圆,该圆扫过的一定距离构成的区域来构建车辆的几何模型,车的圆心随着车长按照线性函数 $\lambda \in [0, 1]$ 变化。动态圆的圆心位置方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} x = x_0 + \lambda(x_n - x_0) \\ y = y_0 + \lambda(y_n - y_0) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, x_0 、 x_n 为最前端和最后端圆心横坐标; y_0 、 y_n 为最前端和最后端圆心纵坐标。

动态圆的方法在模型的灵活性和合理性上相对于传统方法都有了很好的改进。但是它还是有其局限性,在建立动态圆时,对于动态圆的半径选取车辆宽度显得相对不灵活,而且动态圆半径大小变化会对覆盖车辆的动态圆的纵向和横向产生相同的影响度,而对于运行中的不同类型的车辆或者说同一类型的车辆在不同道路环境下以及不同速度下车辆碰撞的潜在危险性在纵向和横向是不同的。基于以上分析,本文提出动态椭圆来覆盖车辆区域的方法,即通过用纵向的长半轴 L_a 和横向的短半轴 L_b 的大小来表达不同的潜在危险性。如图3所示。

本文取对于换道安全影响较大的椭圆模型的长半轴 L_a 如式(2)所示。

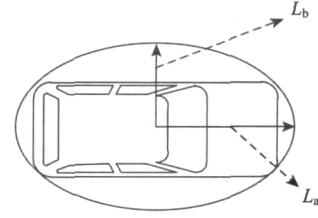


图3 椭圆模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ellipse model

$$L_a = \frac{L}{2} + (1 - T_d) \frac{L}{W} \frac{V_{Lo}}{V_M}, \quad (2)$$

式中, L 为车辆长度; T_d 为司机类型值; V_{Lo} 为本车道前车速度; V_M 为换道车辆的速度; W 为车宽。

2.3 换道时最小纵向安全距离模型设计

车辆换道最小安全距离,与车辆的当前速度,到达临界碰撞点的时间,两车的相对速度、加速度,以及司机类型相关联,本文有如下结论:

(1) 若两车的相对速度 $V_r = V_M - V_{Lo}$ 小于0,随着时间 t 增加,两者间距在扩大,对于换道车辆 M 来说不可能和前方车辆相撞,于是最小安全距离 D_{MSS} 可以看做是0。

(2) 若两车的相对速度 $V_r = V_M - V_{Lo}$ 小于0,随着时间 t 增加,两者间距保持不变,于是最小安全距离 D_{MSS} 可以看做是取决于司机类型的椭圆模型,如(3)式所示。

$$D_{MSS} = (1 - T_d) \frac{L}{W} \frac{V_M}{V_{Lo}}. \quad (3)$$

(3) 若两车的相对速度 $V_r = V_M - V_{Lo}$ 大于0,随着时间 t 增加,两者间距在缩小,则最小安全距离不但要考虑两车的相对速度和加速度还要考虑不同司机类型以及换道的初始速度。设计该种情形下的最小安全距离模型,我们假定司机反应之后以最大减速度进行减速,其加速度为 $-a_{max}$ 。于是我们有如式(4)的推导:

$$V_M(0) \tau - \int_0^\tau V_{Lo}(\xi) d\xi + \int_0^\tau \int_0^\sigma [a_M(\xi) - a_{Lo}(\xi)] d\xi d\sigma = D_{MSS} - (1 - T_d) \frac{L}{W} \frac{V_M(t)}{V_{Lo}(t)}, \quad (4)$$

进而推导得该种情形下的车辆最小安全距离模型为如式(5)所示:

$$D_{MSS} = V_M(0) \tau - \int_0^\tau V_{Lo}(\xi) d\xi + (1 - T_d) \frac{L}{W} \frac{V_M(t)}{V_{Lo}(t)} + \int_0^\tau \int_0^\sigma [a_M(\xi) - a_{Lo}(\xi)] d\xi d\sigma, \quad (5)$$

于是本文的车辆换道最小安全距离模型如式(6)

所示:

$$D_{MSS} = \begin{cases} 0, & V_M - V_{Lo} < 0, \\ (1 - T_d)^{\frac{L}{W}} \frac{V_M}{V_{Lo}}, & V_M - V_{Lo} = 0, \\ V_M(0) \tau - \int_0^{\tau} V_{Lo}(\xi) d\xi + (1 - T_d)^{\frac{L}{W}} \frac{V_M(t)}{V_{Lo}(t)} + \int_0^{t_p} \int_0^{\sigma} [a_M(\xi) - a_{Lo}(\xi)] d\xi d\sigma, & V_M - V_{Lo} > 0, \end{cases} \quad (6)$$

式中, τ 为司机反应时间; t_p 为换道车辆到达碰撞点时间; T_d 司机类型。

3 基于最小安全距离的换道约束空间设计

3.1 对比最小安全距离

文献 [6] 对换道车辆在换道过程中与相关车辆的最小安全距离进行了全面的分析, 并且提出了换道车辆与各个相关车辆的最小安全距离模型。这里我们针对换道初始阶段换道车辆与本车道前车间的最小安全距离进行对比分析。在该文献中提出的换道模型如式 (7) 所示。

$$D_{MSS} = \max \int_0^t \int_0^{\sigma} (a_{Lo}(t) - a_M(t)) dt d\sigma + (V_M(0) - V_{Lo}(0)) t, t \in [0, t_p], \quad (7)$$

式中, t_p 为车辆到达碰撞点的时间; $a_{Lo}(t)$ 为本车道前车加速度; $a_M(t)$ 为换道车辆的加速度。

我们假定, 本车道前车做 5 m/s 的匀速直线运动, 换道车辆速度做变加速运动, 并在换道开始阶段满足 $V_M > V_{Lo}$, 司机反应时间为 $\tau = 0.3$ s, 考虑车辆在相同初始相对速度情况下, 以最大的减速度 -3.2 m/s^2 做减速运动, 最小安全距离与司机类型的关系如图 4 所示。

由上可知, 对于相同换道环境下, 对于不同的司机类型, 本文的最小安全距离会有所不同, 相对更加灵活, 而文献 [7] 中的最小安全距离模型在不同的司机类型下, 由于没有考虑驾驶员因素, 似的最小安全距离始终保持不变, 这与实际不符。

3.2 换道约束空间的设计

在设计换道约束空间之前, 我们先做以下假设:

- ①车辆为刚体。
- ②车轮的滚动不存在滑动摩擦。
- ③换道为非自由换道。

换道约束空间生成的基本原理是: 换道需求产生后, 司机会考虑实施换道, 而在转向阶段, 危险

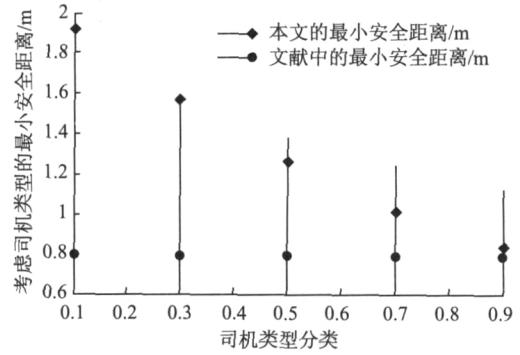


图4 最小安全距离与司机类型的关系

Fig. 4 Relation between minimum safe distance and type of drivers

性更大的车辆为目标车道前车 L_o 。所以实施换道前必然要考虑换道车辆 M 和本车道前方车辆 L_o 的安全间距, 保证车间距大于最小安全距离 D_{MSS} 。另外, 目标车道后车 F_d 也是对换道成功与否具有重大影响的车辆。假设换道车辆 M 按照目前运行状态以及车间距到达与前车 L_o 的碰撞点的时间为 t_p , 则在此时间内, 本车道前车 L_o 的位移如式 (8) 所示:

$$D_{Lo} = \int_0^{t_p} V_{Lo}(\xi) d\xi, \quad (8)$$

目标车道后车 F_d 走的距离如式 (9) 所示:

$$D_{Fd} = \int_0^{t_p} V_{Fd}(\xi) d\xi, \quad (9)$$

换道车辆 M 的位移如式 (10) 所示:

$$D_M = \int_0^{t_p} V_M(\xi) d\xi. \quad (10)$$

以目标车道后车 F_d 的位移与换道车辆 M 的临界碰撞点和 M 车的起始点为圆弧上的点, 得到换道约束空间的上面边界。以在时间 t_p 内 M 位移的终点和 M 车的换道起始点为另一圆弧上的点, 得到换道约束空间的下面边界。换道约束空间的生成方法如图 5 所示。

假设换道环境的所有车全是同一类型的车, 首先建立如图 4 所示坐标系, 设 O 点坐标为: $O(x_M, y_M)$, 则 O' 点坐标为: $O'(x_M, y_M + L)$, O_1 点坐标为: $O_1(x_M, y_1)$, O_2 点坐标为: $O_2(x_M, y_2)$, 圆 O_1 过 O' 点, 圆 O_2 过 O 点, 另外他们还分别过点 P_1 和 P_2 , 图 4 中 P_1 、 P_2 点坐标分别为: $P_1(D_{Fd} - D_1, D_2)$, $P_2(D_M, L)$, 其中, D_1 为初始时刻换道车辆 M 与目标车道后车 F_d 的纵向距离。 D_2 为换道车辆 M 到达与 F_d 的临界碰撞点的横向位移。 L 为车辆长度。于是对于 $O'P_1$ 圆弧方程满足式 (11) 所示关系:

$$(x - x_M)^2 + (y - y_1)^2 = R_1^2, \quad (11)$$

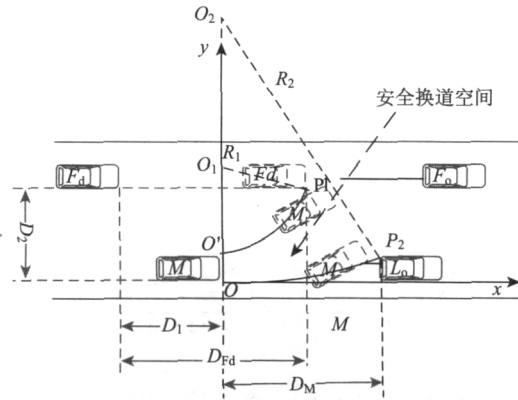


图5 换道约束空间生成

Fig. 5 Generation of lane-changing restricted space

式中, $R_1^2 = (y_1 - D_2 - y_M)^2 + (D_{fd} - D_1)^2$, 分别将 O' 点和 P_1 点坐标带入 (11) 式即可得到 $O' - P_1$ 圆弧方程。同样, 对于 $O - P_2$ 圆弧方程满足式 (12) 所示关系:

$$(x - x_M)^2 + (y - y_2)^2 = R_2^2, \quad (12)$$

式中, $R_2^2 = (y_2 - L - y_M)^2 + D_M^2$, 分别将 O 点和 P_2 点坐标带入式 (11) 式即可得到 $O - P_2$ 圆弧方程。

4 基于约束空间车辆换道模型分析

文献 [8] 中, 对传统的换道模型进行了分析, 如等速偏移换道轨迹, 圆弧换道轨迹, 基于 $\sin$ 函数换道轨迹等。但等速偏移换道轨迹在实际车辆控制中是不可实现的, 圆弧换道轨迹在圆弧和直线相接处曲率是不连续的, 而 $\sin$ 函数换道轨迹曲线的曲率极大值出现在换道的初始时刻和和终点时刻, 此时侧向加速度为最大, 这在实际的换道轨迹中是要避免的。

在实际的换道行为中, 双车道和多车道的换道轨迹过程划分不同, 如文献 [9] 的分析, 对于多车道环境, 车辆在换道过程中总有一段时刻车轮转角和方向角差为零, 所以对多车道环境下的换道可划分为转向, 直线加速, 并道 3 部分。这里我们对具有更强的换道需求的拥堵、低速情况下的换道进行研究, 为得出更加符合该种情况下实际换道模型, 我们在北京市朝阳区西大望路进行了实际换道过程的拍摄实验, 并对拍摄的图像利用摄像机标定的方法进行处理, 从而获得在某速度下的实际换道轨迹。此种方法比文献 [8] 中提到的航拍精确度更高, 更有利于分析换道轨迹特点。

图 6 为实际车辆换道情形, 其中红色框标记的车辆为换道车辆。单车道宽度为 4.075 m, 该道路为

3 车道, 但是本文只研究 2 车道的情况, 即由中间车道换到两边车道。



图6 车辆实际换道情形

Fig. 6 Situation of actual lane-changing

由张正友摄像机标定方法得到该车实际换道轨迹, 如图 7 所示。

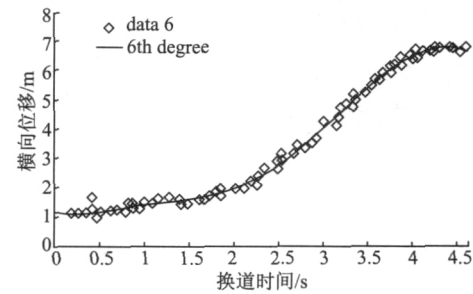


图7 利用摄像机标定获取的车辆实际换道轨迹

Fig. 7 Actual lane-changing trajectory obtained by camera calibration

图 6 中, 换道开始阶段由于换道车辆受到临车道前方车辆的影响, 在原车道缓慢行驶等待换道时机, 大约在 1.5 s 后车辆开始换道。大约经过 3.5 s 后完成换道。图 8 为车辆换道过程的横向速度曲线。由其横向速度曲线可知, 低速拥堵情况下的换道与圆弧换道曲线特点相似, 故本文考虑采用圆弧换道曲线为基本换道轨迹, 并尝试解决圆弧换道轨迹横向加速度过大以及在两圆弧相接的部分存在跃变的问题。

根据文献 [1], 圆弧换道轨迹换道的车辆横向位移为 $y_d(t)$ 满足如式 (13) 所示方程:

$$y_d(t) = \begin{cases} \rho(1 - \cos(v_x t / \rho)), & 0 \leq t < t_c, \\ \rho\{1 + \cos[v_x(t_{end} - t) / \rho] - 2\cos(v_x t_c / \rho)\}, & t_c < t < t_{end}, \end{cases} \quad (13)$$

式中, ρ 为圆弧的曲率半径; v_x 为车辆的纵向速度; t_c 为经过第 1 段圆弧的时间; t_{end} 为换道时间。

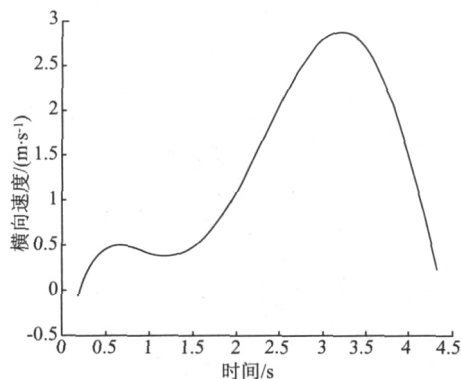


图8 换道车辆横向速度曲线

Fig. 8 Lateral velocity curve of lane-changing

圆弧换道轨迹的曲率变化如图9所示。该换道轨迹的曲率在切点处存在跳变,这意味着车辆在连续运动过程中方向盘要出现跳变^[1],在换道过程中是必须要避免的。因此在生成换道轨迹时我们需要考虑将轨迹做平滑处理。

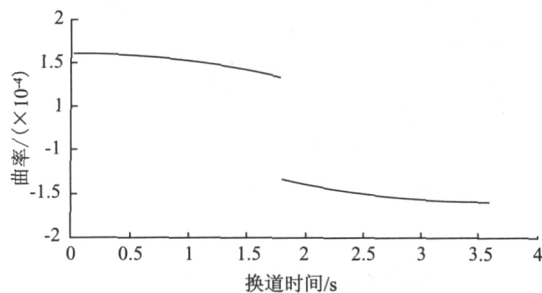


图9 圆弧换道轨迹的曲率变化

Fig. 9 Curvature change of arc lane-changing trajectory

Clothoid 曲线的主要特征是随着曲线的变化它的半径是不变的,而它的曲率随着弧长线性变化。定义可以转化为以下公式:

$$R \cdot l = A^2,$$

式中, R 为半径; l 为弧长。

$$c(s) = k \cdot s + c_i,$$

式中, c 为曲率; k 为曲率的变化率; c_i 为曲率的初始值。这表明曲率的变化率是固定的^[12]。

早在2003年丰田第二代普锐斯的IPA(智能泊车系统)的开发中就应用Clothoid回旋曲线。采用回旋曲线不但能生成曲率连续的光滑轨迹曲线,而且很容易的计算操舵角。故本文考虑将Clothoid回旋曲线缓和曲线使用,从而解决圆弧换道轨迹两圆弧相接处曲率不连续的问题。图10所示为经Clothoid回旋曲线处理的换道轨迹曲率。

为获得更高的换道安全性,在换道轨迹生成时,我们考虑式(9)和(10)决定的换道约束空间,

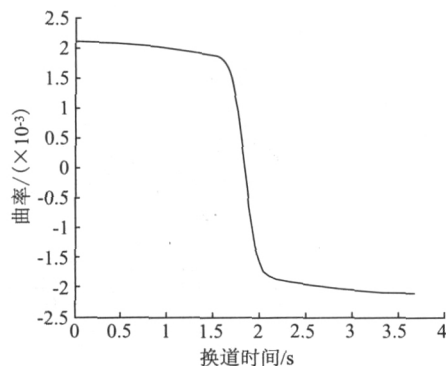


图10 Clothoid 曲线缓冲后的曲率变化

Fig. 10 Curvature change after buffered by Clothoid curve

以Matlab作为仿真开发平台,选取双车道宽度为8.150 m,换道车辆的纵向初速度为4.2 m/s。在考虑本文最小安全距离模型情况下,在约束空间内生成换道轨迹,图11即为经Clothoid回旋曲线处理之后的换道轨迹。在此情况下,换道时间为4.6 s左右。

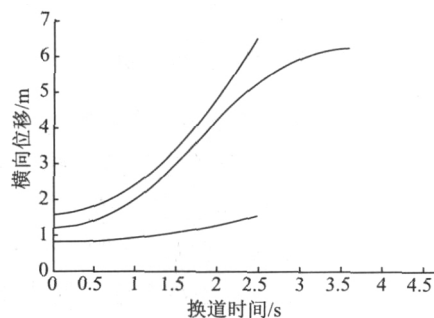


图11 约束空间内生成换道轨迹

Fig. 11 Generation of lane-changing trajectory in restricted space

5 结论

针对不同司机类型建立椭圆模型,并利用椭圆模型提出了新的最小安全距离模型。并且在此基础上给出了换道约束空间的计算方法,并对北京市朝阳区西大望路的实际换道过程拍摄的图像进行处理,利用摄像机标定的方法得到车辆实际换道轨迹,并对比实际轨迹与传统换道模型的轨迹与速度,提出以圆弧换道轨迹为基础在约束空间的基础上生成换道轨迹,并给出了采用Clothoid回旋曲线优化换道轨迹的解决方法,并在两车道的情况下,生成了在快速性、安全性和舒适性都满足的光滑的换道轨迹。

在快速和慢速情况下的不同换道轨迹和邻车道不同类型司机配合换道与否对交通流的影响有待进

一步探讨。

参考文献:

References:

- [1] LUDMANN J, NEUNZIG D, WEILKES M. Traffic Simulation with Consideration of Driver Models, Theory and Examples [J]. Vehicle System Dynamics, 1997, 27 (3): 200-205.
- [2] HIDAS P. Modeling Lane-changing and Merging in Microscopic Traffic Simulation [J]. Transportation Research Part C, 2002, 10 (5): 351-371.
- [3] 王永明,周磊山,吕永波. 基于元胞自动机交通流模型的车辆换道规则 [J]. 中国公路学报, 2008, 21 (1): 89-93.
WANG Yongming, ZHOU Leishan, Lü Yongbo. Lane-changing Rules Based on Cellular Automaton Traffic Flow Model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (1): 89-93.
- [4] NARANJO J E, GONZÁLEZ C, GARCIA R, et al. Lane Change Fuzzy Control in Autonomous Vehicles for the Overtaking Maneuver [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9 (3): 438-450.
- [5] 王江锋,邵春福,闫学东,等. 基于虚拟现实的车辆换道最小安全距离研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (8): 109-113.
WANG Jiangfeng, SHAO Chunfu, YAN Xuedong, et al. Research on Minimum Safety Distance of Lane-changing Based on Virtual Reality [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (8): 109-113.
- [6] LI Lingxi, WANG Feiyue. The Automated Lane-Changing Model of Intelligent Vehicle Highway Systems [C] // The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Singapore: IEEE, 2002: 216-218.
- [7] 王荣本,游峰,崔高健,等. 车辆安全换道分析 [J]. 吉林大学学报:工学版, 2005, 35 (2): 179-182.
WANG Rongben, YOU Feng, CUI Gaojian, et al. Analysis on Lane-changing Safety of Vehicle [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35 (2): 179-182.
- [8] 李玮,高德芝,段建民. 智能车辆自由换道模型研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (2): 119-123.
LI Wei, GAO Dezhi, DUAN Jianmin. Research on Lane Change Model for Intelligent Vehicles [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (2): 119-123.
- [9] WENGJ Y, COHEN P, HEMIONM. Camera Calibration with Distortion Model and Accuracy Evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14 (10): 965-980.
- [10] 游峰. 智能车辆自动换道与自动超车控制方法的研究 [J]. 吉林: 吉林大学, 2005.
YOU Feng. Study on Autonomous Lane-changing and Autonomous Overtaking Control Method of Intelligent Vehicle [J]. Jilin: Jilin University, 2005.
- [11] 宋金泽,戴斌,单恩忠,等. 融合动力学约束的自主平行泊车轨迹生成方法 [J]. 中南大学学报:自然科学版, 2009, 40 (增1): 135-141.
SONG Jinze, DAI Bin, SHAN Enzhong, et al. Trajectory Planning Approach of Autonomous Parallel Parking with Kinodynamic Constraints [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2009, 40 (S1): 135-141.
- [12] SANCHEZ-REYES J, CHACO J M. Polynomial Approximation to Clothoids via S-power Series [J]. Computer-Aided Design, 2003, 35 (14): 1305-1313.

(上接第113页)

- [1] 戴鸿哲,王伟. 结构可靠性分析的拟蒙特卡罗方法 [J]. 航空学报, 2009, 30 (4): 666-671.
DAI Hongzhe, WANG Wei. Quasi-Monte Carlo Method for Structural Reliability Analysis [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30 (4): 666-671.
- [2] NIEDERREITER H. Random Number Generation and Quasi-Monte Carlo Method [M]. Philadelphia: SIAM, 1992.
- [3] HUA L G, WANG Y. Applications of Number Theory to Numerical Analysis [M]. Berlin: Springer, 1981.
- [4] GUO Dong, WANG Xiaodong, QMC Filtering in Nonlinear Dynamic Systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54 (6): 2087-2098.