

道路几何设计对IDM模型跟驰行为的影响

覃频频¹, 裴世康¹, 杨春兰¹, 孟强², 万千³

(1. 广西大学 机械工程学院, 南宁 530004; 2. 吉林大学 汽车学院, 长春 130012; 3. 华蓝设计(集团)有限公司, 南宁 530004)

摘要: 考虑道路几何设计参数转弯半径、超高、坡度对车辆跟驰行为的影响, 对车辆跟驰智能驾驶员模型(IDM)进行了改进. 结合二自由度车辆动力学模型, 利用 Matlab/Simulink 建立改进后的跟驰模型并进行仿真. 仿真分析发现: 在具有转弯、超高和坡度的道路上, 改进后的模型, 其跟驰车辆车头时距增大, 行驶速度减小, 保证了车辆行驶的安全性; 车辆横摆角速度和侧向速度随半径和超高的增加而减小, 保证了汽车操纵稳定性. 结果表明, 改进后的模型能够更准确地描述道路几何设计对车辆跟驰行为的影响.

关键词: 交通工程; 跟驰行为; 车辆动力学; 智能驾驶员模型; 道路几何设计

Influence of Road Geometrics on Car-following of the Intelligent Driver Model

QIN Pin-pin¹, PEI Shi-kang¹, YANG Chun-lan¹, MENG Qiang², WAN Qian³

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

3. Hua Lan Design (group)CO., LTD. Nanning 530004, China)

Abstract: An improvement of Intelligent Drive Model (IDM) considering the influence of road geometrics (slope, curve and superelevation) on car-following is established. Combining the two degree freedom vehicle dynamics model, the car-following simulation of the improved IDM is carried out by using Matlab/Simulink. The simulation results show that the improved IDM following car's headway increases and speed decreases in the road with turning, super-elevation and some certain downhill or uphill gradient, which ensures the car-following safety. It is also found that the yaw rate and lateral velocity decrease with superelevation and radius increasing at certain gradients, which ensures the handling stability of the following car. The research results indicate that the modified IDM can more precisely response to the influence of gradients, radius and super-elevation than non-modified IDM.

Keywords: traffic engineering; car-following; vehicle dynamics; intelligent driver model (IDM); road geometrics

0 引言

车辆跟驰理论是运用动力学方法, 研究在无法超车的单车道上车辆列队行驶时, 后车跟随前车行驶状态的一种理论^[1]. 车辆跟驰模型的研究对

于了解和认识交通流的特性, 进而把这些了解和认识应用于交通规划、交通管理与控制, 充分发挥交通设施的功效, 解决交通问题有着极其重要的意义^[2].

收稿日期: 2017-06-02

修回日期: 2017-08-07

录用日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(51478113); 广西自然科学基金/Guangxi Natural Science Foundation(2015GXNSFAA139280).

作者简介: 覃频频(1975-), 女, 广西柳州人, 副教授, 博士.

*通信作者: qpinyin@gxu.edu.cn

早在1950年Reuschel A.就已经开始研究交通流中车辆列队运行状态,1953年Pipes L. A.建立了车辆跟驰模型并给出了解析结果.此后,各国研究学者从不同角度建立、完善了车辆跟驰模型.有代表性的如Newell模型,Bando等的最优速度模型,Gipps模型,GM模型和NETSI模型等^[3-5].早年的线性、非线性等模型均不能简单、准确、统一地表达各种交通状态及车流行驶状态下车辆的跟驰行为.2002年,Helbing等在广义力模型基础上,提出了一个只需要少数有明确意义的参数的智能驾驶员模型(Intelligent Driver Model, IDM)^[6-7].该模型是目前最简单、完整和无事故模型,和经验符合很好且易于标定,能够用统一的模型形式描述不同交通流状态下,所有的单车道的驾驶员跟驰行为^[8-9].但驾驶行为是一个多信息、多通道的复杂处理过程,模型未充分考虑不同的道路设计几何条件对跟驰车辆行为的影响^[10-11].

近几年来,无人驾驶汽车技术发展迅速,实现车与车,车与基础设施及人类活动之间的交互通信必将是未来无人驾驶的发展方向^[12-13].但由于无人驾驶技术的复杂性,从安全角度出发,采用仿真手段研究无人驾驶对交通流的影响是当前研究的重要手段.智能驾驶员模型已经被用来仿真无人驾驶情况下的交通流,研究基本都假设交通流中的车辆为直线跟驰,未考虑道路几何设计对车辆跟驰行为的影响.为此,本文对智能驾驶员模型进行改进,结合二自由度车辆动力学模型,通过仿真研究道路几何设计(如坡度、转弯、超高等)对IDM模型车辆跟驰行为的影响.

1 IDM模型

1.1 基本模型

IDM模型描述单辆车的位置和速度.对于车辆 n ,设 x_n 为 t 时刻的位移, v_n 为 t 时刻的速度,前车 $n-1$ 与跟车 n 的车头时距 $s_n = x_{n-1} - x_n - l_{n-1}$,前后车速度差 $\Delta v_n = v_n - v_{n-1}$,车辆的动态特性用两个微分方程来表示.

$$\dot{x}_n = \frac{dx_n}{dt} = v_n \quad (1)$$

$$\dot{v}_n = \frac{dv_n}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: $s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0 + v_n T + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{ab}}$; v_0 表示车辆在自由交通流的期望速度; s_0 表示最小的期望车间距; T 表示反应时间; a 表示最大加速度, b 表示舒适制动减速度, δ 表示加速度指数.

1.2 模型特性

IDM跟车公式可以分为自由流状态(\dot{v}_n^{free})和相互作用状态(\dot{v}_n^{int})两部分.

$$v_n = \dot{v}_n^{\text{free}} + \dot{v}_n^{\text{int}} \quad (3)$$

$$\dot{v}_n^{\text{free}} = a \left(1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta \right) \quad (4)$$

$$\dot{v}_n^{\text{int}} = -a \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 = -a \left(\frac{s_0 + v_n T + (v_n \Delta v_n) / (2\sqrt{ab})}{s_n} \right)^2 \quad (5)$$

自由流状态,后车与前车的间距 s_n 较大, $\left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \rightarrow 0$,加速度由自由流状态决定.当低速时加速度接近最大加速度 a ,因此单车道的自由流跟驰车辆速度 v_n 将逐渐接近期望速度 v_0 .此时,IDM模型退化为式(4).两车速度差较大时,后车以较高的速度接近前车,相互作用大小决定于 $-a(v_n \Delta v_n)^2 / (2\sqrt{ab} s_n)^2 = -(v_n \Delta v_n)^2 / (4b s_n^2)$.

密集交通流状态下,车辆间速度差异微小且间距较小,相互作用约等于 $-a(s_0 + v_n T)^2 / s_n^2$,它类似于一个排斥力使小间距迅速扩大为一个平衡间距.由此可见,IDM模型可以将各种交通流状态下的车辆跟驰行为,用统一的模型较自然、连贯地进行描述.

2 模型改进

车辆在具有弯度、超高的道路上,最小转弯半径的计算公式为

$$R = \frac{V^2}{127(\mu + i)} \quad (6)$$

式中: V 表示设计时速(km/h); μ 表示横向力系数; i 表示路面横坡度,即道路超高, $i = \tan \theta_e$,对双向横坡的路面弯道外侧行驶时用“-”号,在内侧行驶时用“+”号; R 表示平曲线半径(m).

汽车曲线安全行驶时速度 $v \leq V =$

$\sqrt{127 \cdot R(\mu + i)}$,跟驰车辆在曲线行驶时与直线行驶不同,由于转弯的影响,跟驰行为与直线时存在差异.

在原模型的基础上,加入曲率半径的影响.

$$a_n(t) = a_{\max} \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right] \left(1 + \beta \frac{R_0}{R} \right) \quad (7)$$

式中: R_0 表示汽车转弯行驶所需的最小安全转弯半径; R 表示道路曲率半径; β 表示与 R_0 有关的常数.

在弯道上,当前车减速行驶时,跟驰车辆对前车的反应比直线行驶更加敏感^[14],此时 $\beta > 0$,与 R_0 有关, R_0 越大, β 越小,即曲线对跟驰行为的影响越小;反之,则越大.此外,半径 R 越大,驾驶员的敏感性越弱,当道路为直线时, $R \rightarrow \infty$,此时 $\beta \frac{R_0}{R} \rightarrow 0$, $(1 + \beta \frac{R_0}{R}) \rightarrow 1$,与原模型相同.

前车加速行驶时,跟驰车辆对前车的反应比在直线上弱,此时 $\beta < 0$, R 越大,驾驶员的敏感性越强,即加速反应越强,驾驶员会以一个相对较大的加速度行驶,但低于直线上的加速度;反之,则较弱^[14].当 $R \rightarrow \infty$ 时,此时 $\beta \frac{R_0}{R} \rightarrow 0$, $(1 + \beta \frac{R_0}{R}) \rightarrow 1$,与原模型相同.

汽车在平直路面行驶时,车辆受到合外力为 $F = ma_x$.汽车上坡时的受力情况如图1所示.

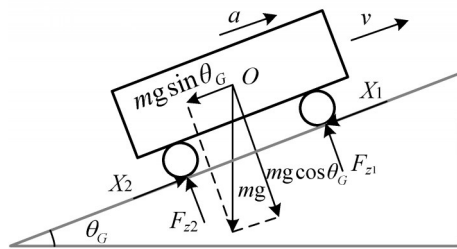


图1 汽车在直线坡道上行驶受力示意图

Fig. 1 A car driving on a straight ramp

图1中跟驰车辆以低于原有模型给出的加速度 a_x 行驶,由牛顿经典动力学得出

$$F = ma_x - mg \sin \theta_c \quad (8)$$

式中: θ_c 较小时有 $\sin \theta_c \approx \tan \theta_c = \frac{G}{100}$, $G/100$ 为坡度,上坡时 G 取正值.

此时,实际的加速度变为

$$a'_x = F/m = a_x - g \frac{G}{100} \quad (9)$$

所以,最终改进后的IDM模型为

$$a_n(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right] \left(1 + \beta \frac{R_0}{R} \right) - g \cdot \frac{G}{100} \quad (10)$$

式中: $s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0 + v_n T + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{ab}}$.

3 轮胎转角

车辆转弯时,输入转角为 δ_f ,如图2所示.

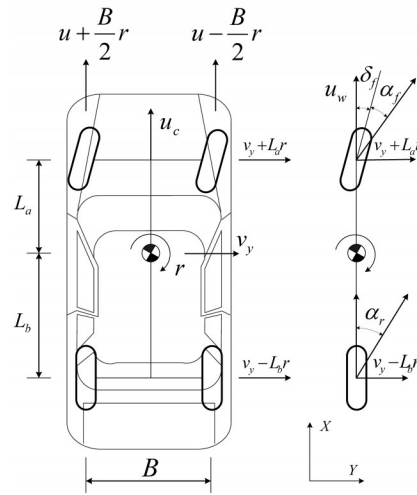


图2 前后轮侧偏角及简化二自由度车辆受力示意图

Fig. 2 Sketch of front and rear wheel sideslip angle and simplified two degree of freedom vehicle

如果车辆的前进速度为 u_c ,横摆角速度为 r ,车轮的前进速度 $u_w = u_c \pm \frac{B}{2}r$,其中 B 为轮距.实际中 $u_c \gg \frac{B}{2}r$,可以近似认为 $u_w = u_c$.

单轨模型中,前轮的侧向速度为

$$v_f = v_y + L_a r \quad (11)$$

后轮的侧向速度为

$$v_r = v_y - L_b r \quad (12)$$

轮胎前轮的侧偏角: $\alpha_f = \tan^{-1} \left(\frac{v_y + L_a r}{u_c} \right) - \delta_f$,后

轮的侧偏角 $\alpha_r = \tan^{-1} \left(\frac{v_y - L_b r}{u_c} \right)$.当 α 较小时,可近似认为 $\tan \alpha = \alpha$,则

$$\alpha_f = \frac{v_y + L_a r}{u_c} - \delta_f \quad (13)$$

$$\alpha_r = \frac{v_y - L_b r}{u_c} \quad (14)$$

在具有超高的弯道上,如图3所示,曲线半径

与旋转半径不等,旋转半径为

$$R' = \frac{R}{\cos \theta_e} = R \sec \theta_e \quad (15)$$

此时,前转向轮的实际转角为^[15]

$$\delta = \frac{L}{R} + \alpha_f - \alpha_r \quad (16)$$

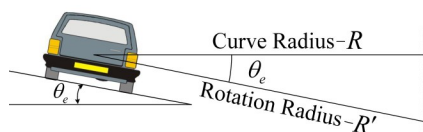


图3 具有超高的弯道曲线半径和旋转半径

Fig. 3 Rotation radius and curve radius for super-elevated curve

若前轴2个轮胎的侧向力合力为 F_{cf} ,后轴2个轮胎的侧向合力为 F_{cr} ,则有

$$F_c = F_{cf} + F_{cr} = m \frac{v^2}{R} - mg \cdot \tan \theta_e = m \frac{v^2}{R} - mg \frac{e}{100} \quad (17)$$

式中: $e/100$ 为超高值,道路曲线内侧 e 取正值。

如图4所示,车辆稳态转向,横摆角加速度近似为0或 $M_z = I\omega$ 相对较小时,可忽略不计,根据力矩平衡,则有

$$\frac{F_{cf}}{F_{cr}} = \frac{L_b}{L_a} \Rightarrow \frac{F_{cf}}{F_{cf} + F_{cr}} = \frac{L_b}{L_a + L_b} = \frac{L_b}{L} \quad (18)$$

前后轴的侧向力为

$$F_{cf} = \frac{L_b}{L} \left(\frac{mv^2}{R} - mg \frac{e}{100} \right) \quad (19)$$

$$F_{cr} = \frac{L_a}{L} \left(\frac{mv^2}{R} - mg \frac{e}{100} \right) \quad (20)$$

在线性操纵动力学分析中,假定轮胎载荷 F_z 为恒定,且偏角 α 较小,所以只需已知 $\alpha=0$ 时的斜率 C_α ^[16]。在这种情况下,侧向力为

$$F_c = -C_\alpha \alpha \quad (21)$$

式中:系数 C_α 值总为正,定义为某特定垂直载荷下的轮胎侧偏刚度。

联立式(11)~式(21)可得轮胎输入转角为

$$\delta = \frac{L}{R} - \left(\frac{L_b}{C_{cf}} - \frac{L_a}{C_{cr}} \right) \cdot \frac{m}{L} \left(\frac{v^2}{R} - mg \frac{e}{100} \right) \quad (22)$$

4 仿真实验

在具有转弯、超高及坡度的道路上,利用

Matlab/Simulink对原有模型及改进后的模型进行仿真实验,对比改进后的模型与原模型仿真实验结果,验证改进后的模型是否能够更好地描述车辆跟驰行为。实验中假设前车的位置,加速度等信号能够顺利地传递给后车,后车根据这些信息判断车距并调整速度、加速度等响应。仿真模型如图5所示。

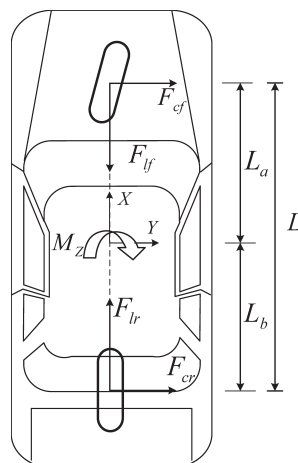


图4 在具有超高的道路稳态转弯时车辆受力示意图

Fig. 4 Moment balance about z-axis in a steady turn on a super-elevated curve

4.1 基本仿真参数设定

车辆参数:整车质量1 833 kg,转动惯量 $I_z = 2 765 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,质心距前轴距离1.402 m,轴距 $L = 3.048 \text{ m}$,车身长度 $l = 5 \text{ m}$,前轮总侧偏刚度 $C_{cf} = -229 180 \text{ N/rad}$,后轮总侧偏刚度 $C_{cr} = -229 180 \text{ N/rad}$ 。

4.2 IDM模型参数

取期望车速120 km/h,安全时间间距 $T = 1 \text{ s}$,拥堵交通流最小车间距 $s_0 = 2 \text{ m}$,期望的最大加速 $a = 1.0 \text{ m/s}^2$,制动舒适减速度 $b = 1.5 \text{ m/s}^2$,加速度指数 $\delta = 4$ ^[9]。

4.3 仿真工况设定

根据公路路线设计规范(JTGD20-2006)^[17],设置转弯半径 $R = 180 \text{ m}$, $\beta = \pm 0.5$,转弯弯道总长度180 m(约400~580 m),缓和曲线—圆曲线—缓和曲线比例为1:1:1,设计车速60 km/h,转弯时长控制在11 s左右,初始车速80 km/h,车头距与速度有关,初始车距设为30 m^[18]。根据不同道路转弯半径、超高(2%~8%)及坡度(0~9%),仿真分析车辆跟驰

行为和车辆操纵稳定性.

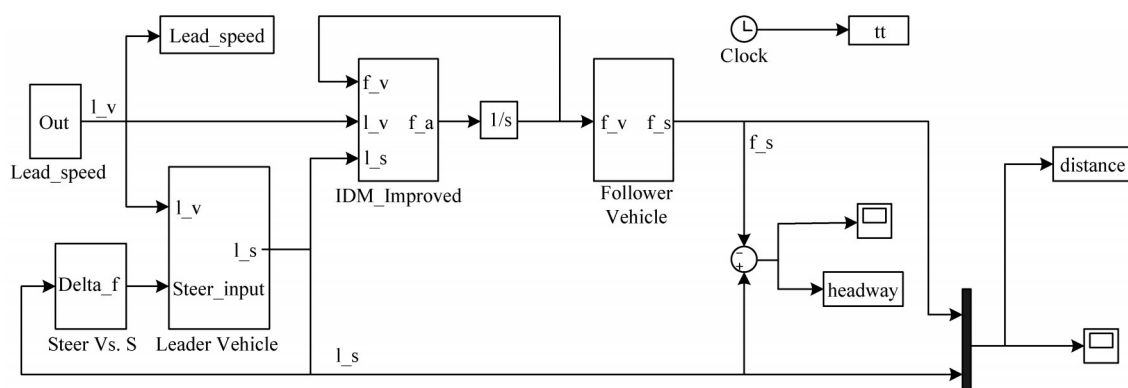


图5 Simulink 建立的车辆跟驰模型

Fig. 5 Established car-following model by Simulink

4.4 实验

(1) 汽车在转弯半径 180 m, 坡度为 0, 超高 (2%~8%) 道路上行驶, 观察模型改变前后速度、车头时距、横摆角速度、侧向速度及跟驰效果的变化.

仿真结果如图 6~图 9 所示. 由于 IDM 模型是基于加速度的驾驶员模型, 由改进后的模型定义可知, 当汽车弯道行驶时, 若头车的加速度没有变化即匀速行驶, $(1 + \beta \frac{R_0}{R})$ 值为 1, 不起作用; 当头车有加速度变化时才有作用, 符合车辆加速特性和弯道跟车安全性. 由图 7 可知, 模型改进后, 当半径一定时, 超高越大车头时距越小, 但影响较小. 由图 8 和图 9 可知, 超高越大横摆角越小、侧向速度越小, 但影响较小, 跟驰行为较稳定.

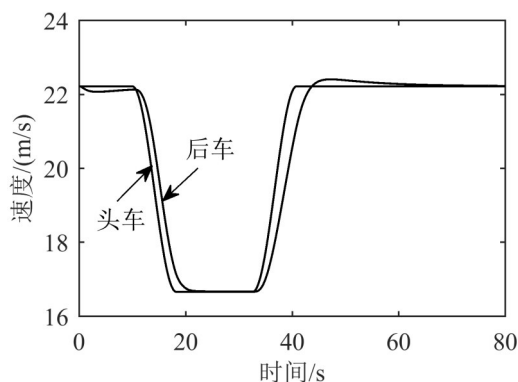


图6 速度曲线($R=180\text{ m}, e=2\sim 8, G=0$)

Fig. 6 Velocity curve($R=180\text{ m}, e=2\sim 8, G=0$)

(2) 模型改进后, 汽车在弯道半径 180~240 m, 超高为 2%, 坡度为零的道路上行驶, 观察模型改

变前后速度、车头时距、横摆角速度、侧向速度及跟驰效果的变化.

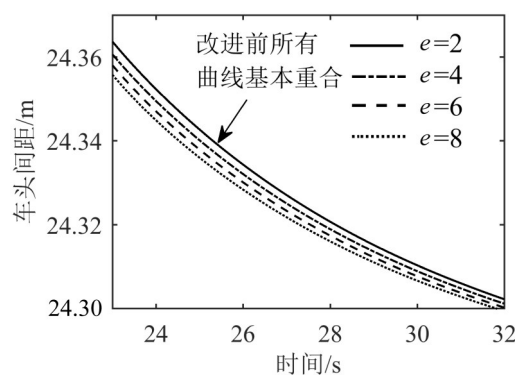


图7 前后车车头时距曲线(局部)

Fig. 7 Part of the headway curve (local)

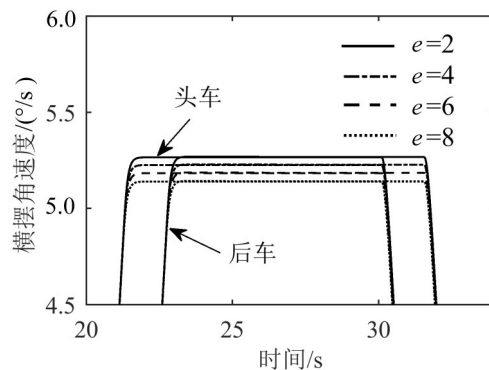


图8 横摆角速度

Fig. 8 Yaw rate

仿真结果如图 10~图 14 所示. 由图 11 可知改进后的模型, 半径影响车头时距, 半径越大, 车头时距越小, 当半径趋于无限即直线行驶时, 与原模型相同. 但由于汽车在单独的曲线行驶时基本保持匀速行驶, 小半径差对车头时距影响并不明显, 只有

在半径相差较大时才会有明显影响.由图12和图13可知,半径越大,车辆横摆角速度和侧向速度越小,最终横摆角越小,符合实际.图14表明前后车车辆轨迹重合,跟驰效果良好.

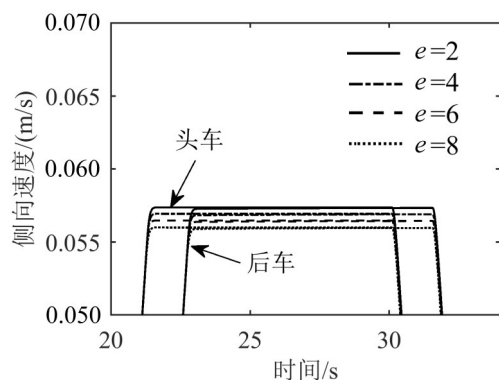


图9 侧向速度
Fig. 9 Lateral velocity

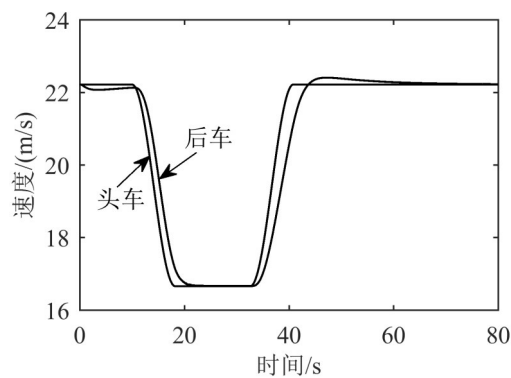


图10 速度曲线($R=180\sim 240\text{ m}, e=2, G=0$)
Fig. 10 Velocity curve($R=180\sim 240\text{ m}, e=2, G=0$)

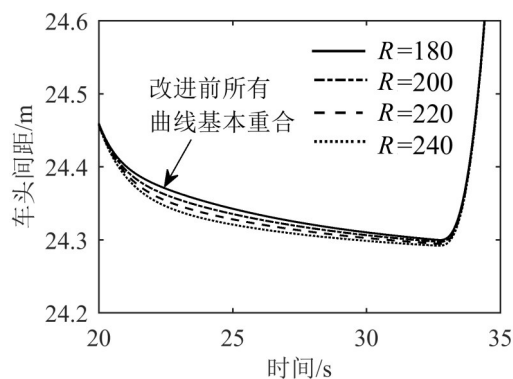


图11 前后车车头时距(局部)
Fig. 11 Part of the headway (local)

(3) 在半径180 m, 超高2%, 坡度0~9%道路上仿真实验, 观察模型改变前后速度、车头时距、跟驰效果的变化.

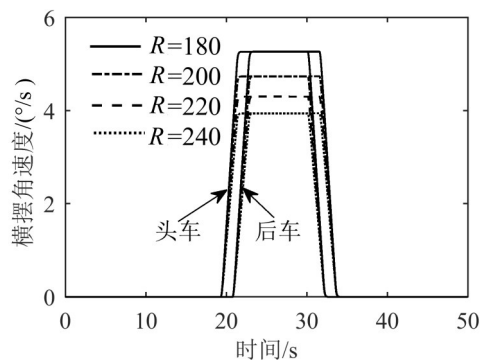


图12 横摆角速度
Fig. 12 Yaw rate

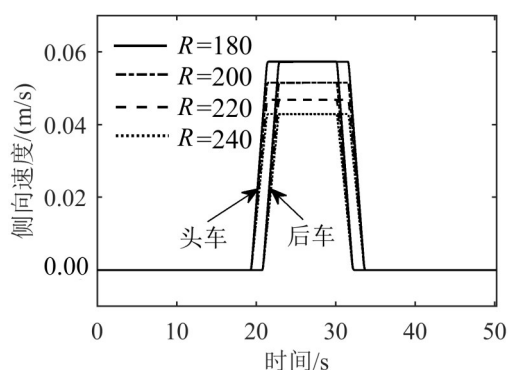


图13 侧向速度
Fig. 13 Lateral velocity

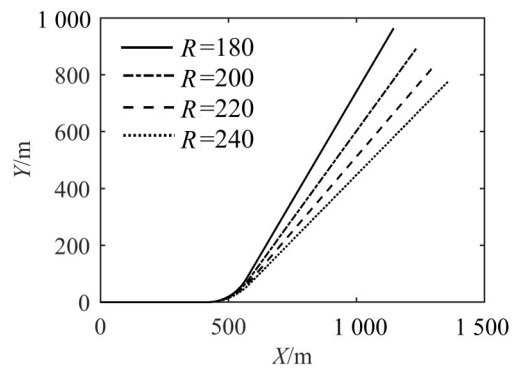


图14 车辆行驶轨迹坐标曲线
Fig. 14 Coordinate of vehicle traveling trajectory

实验结果如图15~图17所示.图15和图16表明,原有跟驰模型在具有弯度、超高及坡度的道路上,后车的跟驰行为曲线在不同道路参数时完全重合,车辆的跟驰行为与直线行驶无异.在相同道路设施条件下,改进后的模型在坡度发生变化时跟驰距离也发生变化,坡度越大,跟驰距离越大,符合车辆安全驾驶要求,且跟驰稳定,坐标轨迹曲线如图17所示.

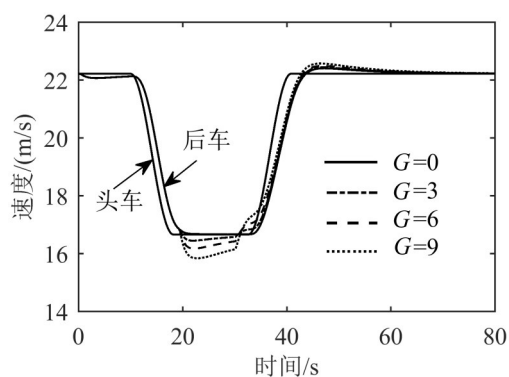
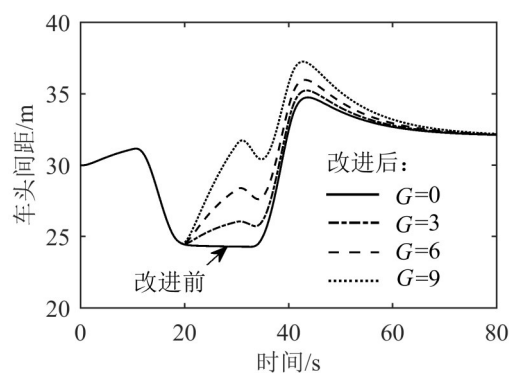
图15 速度曲线($R=180\text{ m}, e=2, G=0\sim 9$)Fig. 15 Velocity curve($R=180\text{ m}, e=2, G=0\sim 9$)

图16 前后车车头时距

Fig. 16 Front and rear vehicle's headway

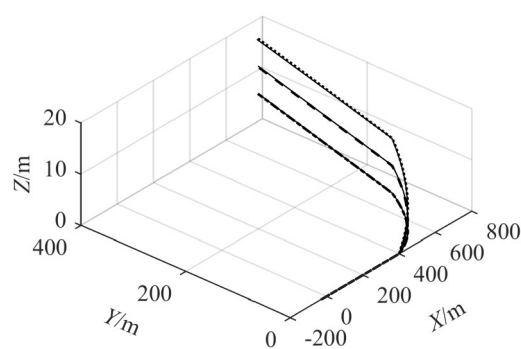
图17 车辆行驶轨迹坐标($G=3, 6, 9$)

Fig. 17 Coordinate of vehicle traveling trajectory

5 结论

本文考虑道路几何设计参数转弯半径、超高、坡度对车辆跟驰行为的影响,改进了IDM模型,并利用Matlab/Simulink进行了改进后模型的仿真实验.仿真结果表明,转弯半径、超高、坡度都不同程度影响车辆跟驰行为和车辆操纵特性,改进后的模型能够更符合实际地反映道路几何设计对车辆跟驰行为的影响,为将改进后的IDM模型用于

无人驾驶交通流仿真的后续研究提供了理论模型支持.

参考文献:

- [1] 吴芳, 马昌喜. 交通工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014. [WU F, MA C X. Traffic engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2014.]
- [2] 刘运通, 石建军, 熊辉. 交通系统仿真技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. [LIU Y T, SHI J J, XIONG H. Traffic system simulation technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.]
- [3] BANDO M, HASEBE K, NAKANISHI K, et al. Phenomenological study of dynamical model of traffic flow[J]. Journal De Physique I, 1995, 5 (11): 1389-1399.
- [4] GIPPS P G. A behavioral car-following model for computer simulation[J]. Transportation Research Part B Methodological, 1981, 15(2): 105-111.
- [5] ARMED K I. Modeling driver's acceleration and lane changing behavior[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [6] HELBING D, HENNECKE A, SHVETSOV V, et al. Micro- and Macro-Simulation of freeway traffic[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2002, 35(PII S0895-7177(01)00180-75-6): 517-547.
- [7] HELBING D, TILCH B. Generalized force model of traffic dynamics[J]. Physical Review E, 1998, 58(1): 133-138.
- [8] 朱山江, 屈山, 史其信. 对智能驾驶员模型的改进及其应用[J]. 中南公路工程, 2006, 31(3): 135-139. [ZHU S J, QU S, SHI Q X. Improvement for intelligent driver model and its application[J]. Central South Highway Engineering, 2006, 31(3): 135-139.]
- [9] TREIBER M, KESTING A. Traffic flow dynamics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [10] 张伟, 王武宏, 沈中杰, 等. 考虑驾驶员的多信息处理和通道判断能力时车辆跟驰模型的改进[J]. 交通运输系统工程与信息, 2004, 4(1): 104-108. [ZHANG W, WANG W H, SHEN Z J, et al. Improvement of car following model with driver's multi-typed information system and multi-ruled decision-making mechanism[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2004, 4(1): 104-108.]
- [11] ZIDEK K, KOUBEK T, PROCHAZKA D, et al. Assistance system for traffic signs inventory[J]. Enterprise & the Competitive Environment, 2015, 63 (6): 2197-2204.
- [12] 王世峰, 戴祥, 徐宁, 等. 无人驾驶汽车环境感知技术综述[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017,

- 40(1): 1-6. [WANG S F, DAI X, XU N, et al. Overview on environment perception technology for unmanned ground vehicle[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 40(1): 1-6.]
- [13] 陈慧岩, 熊光明, 龚建伟, 等. 无人驾驶汽车概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014. [CHEN H Y, XIONG G M, GONG J W, et al. Introduction to self-driving car[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.]
- [14] 王浩, 马寿峰. 适用于弯度与坡度的跟驰模型及其仿真研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 106-111. [WANG H, MA S F. Car-following model and simulation with curves and slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 106-111.]
- [15] 余志生, 夏群生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014. [YU Z S, XIA Q S. Automobile theory[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2014.]
- [16] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. [YU F, LIN Y. Vehicle system dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.]
- [17] 中交第一公路勘察设计研究院. 公路路线设计规范(JTG D20-2006)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006. [CCCC First Highway Consultants. Specification for design of highway route[S]. Beijing: China Communications Press, 2006.]
- [18] 杨龙海, 赵顺, 徐洪. 基于改进优化速度函数的跟驰模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(2): 41-46. [YANG L H, ZHAO S, XU H. Car-following model based on the modified optimal velocity function[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(2): 41-46.]

~~~~~

上接第62页

- [4] FELISA M, ZANI P. Robust monocular lane detection in urban environments[C]. Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2010: 591-596.
- [5] MCCALL J C, TRIVEDI M M. Video-based lane estimation and tracking for driver assistance: survey, system, and evaluation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(1): 20-37.
- [6] MAIRE F, BIGDELI A. Obstacle-free range determination for rail track maintenance vehicles[C]. International Conference on Control Automation Robotics & Vision. IEEE, 2010: 2172-2178.
- [7] WOHLFEIL J. Vision based rail track and switch recognition for self-localization of trains in a rail network[C]. Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2011: 1025-1030.
- [8] NASSU B T, UKAI M. A Vision-based approach for rail extraction and its application in a camera pan-tilt control system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(4): 1763-1771.
- [9] KALELI F, AKGUL Y S. Vision-based railroad track extraction using dynamic programming[C]. International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2009: 1-6.
- [10] BADINO H, FRANKE W, MESTER R. Free space computation using stochastic occupancy grids and dynamic programming[C]. Proc. Int'l Conf. Computer Vision, Workshop Dynamical Vision, 2007.
- [11] 唐湘娜, 王耀南. 铁轨表面缺陷的视觉检测与识别算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(3): 25-30. [TANG X N, WANG Y N. Visual inspection and classification algorithm of rail surface defect[J]. Computer Engineering, 2013, 39(3): 25-30.]
- [12] 吴禄慎, 李彧雯, 陈华伟, 等. 基于图像区域划分的轨道缺陷自动检测技术研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(5): 594-599. [WU L S, LI Y W, CHEN H W, et al. Research on rail defects automatic detection technology based on image region partition[J]. Laser and Infrared, 2012, 42(5): 594-599.]
- [13] 闵永智, 殷超, 党建武, 等. 基于图像色相值突变特征的钢轨区域快速识别方法[J]. 交通运输工程学报, 2016(1): 46-54. [MIN Y Z, YIN C, DANG J W, et al. Fast recognition method of rail region based on hue value mutation feature of image[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016(1): 46-54.]
- [14] 郭保青, 许西宁, 余祖俊. 单幅轨距图像中轨道特征识别与定位方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4): 309-314. [GUO B Q, XU X N, YU Z J. Research on recognition and positioning method of rail landmark in single gauge image[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(4): 309-314.]
- [15] GAVRILA D M. A Bayesian, exemplar-based approach to hierarchical shape matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2007, 29(8): 1408.