

DOI: 10.3901/JME.2010.20.106

# 预瞄时间自适应的最优预瞄驾驶员模型<sup>\*</sup>

李红志 李 亮 宋 健 于良耀 吴凯辉 张小龙  
(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

**摘要:** 驾驶员模型是汽车动力学仿真和控制算法开发中的重要环节。在极限工况下汽车动力学稳定性仿真与控制中, 为模拟驾驶员在人-车-路复杂系统对汽车的操纵特征, 要求驾驶员模型能够在复杂道路与整车稳定性约束条件下完成驾驶操作, 而不是单纯的路径预瞄跟踪。在最优预瞄驾驶员模型的基础上, 提出一种预瞄时间自适应算法。该算法根据不同的预瞄时间, 预测将来一段时间内车辆运行情况, 并根据所设计的优化函数, 选取合适的预瞄时间使得车辆稳定通过测试路径。对所开发的驾驶员模型进行仿真测试, 结果表明, 预瞄时间自适应的最优预瞄驾驶员模型能够在复杂道路、极限工况、有边界约束条件下完成驾驶操作。

**关键词:** 驾驶员模型 最优预瞄 边界约束 预瞄时间自适应

**中图分类号:** U467.1

## Optimal Preview Control Driver Model with Adaptive Preview Time

LI Hongzhi LI Liang SONG Jian YU Liangyao WU Kaihui ZHANG Xiaolong  
(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** To develop vehicle stability control systems, simulation test is indispensable and driver model is needed in simulation test. In simulation and control of vehicle dynamics near the limit of tire road friction, in order to reflect the characteristics of the maneuver of the driver, the driver model should be used with complicated bounded roads and near the limit of tire road friction, not only following the track. Based on the optimal preview control driver model, an adaptive preview time algorithm is proposed. Different preview time is used for predicting the state of the vehicle in the near future, and the proper preview time is selected on the basis of the designed optimization function. Simulation test of the developed driver model is carried out. The results show that the optimal preview control driver model can fulfill driving operation under the conditions of complicated road, ultimate limits and boundary constraint.

**Key words:** Driver model Optimal preview control Boundary constraint Adaptive preview time

## 0 前言

为开发底盘电子稳定性控制系统, 仿真测试中需要驾驶员模型完成在复杂道路、极限工况且有边界约束(路宽限制)条件下的驾驶操作。早期的驾驶员模型以 PID 控制为代表, 20 世纪 80 年代以最优预瞄控制为代表, 20 世纪 90 年代之后发展出神经网络、模糊控制等驾驶员模型<sup>[1-2]</sup>。其中, 最优预瞄控制驾驶员模型<sup>[3]</sup>由于其原理容易理解, 结构简单, 实现方便且控制精度较高, 应用较为广泛。但是传

统的最优预瞄驾驶员模型没有考虑边界约束, 对驾驶员实际操作过程反映不够充分。

文献[4]给出了根据道路曲率选择预瞄时间的方法。文献[5]给出了一种路径最短的障碍避让的驾驶操作。文献[6]采用模型预测控制实现驾驶操作。文献[7]建立自适应最优预瞄控制驾驶员模型, 通过自适应算法对远近不同位置的位置偏差选取不同权重, 实现比固定权重更好的控制效果。上述方法在边界避让方面获得了一定进展, 但并没有解决复杂路径、极限工况且有边界约束时的驾驶操作问题, 与适用于极限工况和车辆准稳态区域的驾驶员模型存在显著差异。极限工况下转向响应特性发生变化, 因此适用于横向稳定临界区域的驾驶员模型须根据

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50905092)。20091222 收到初稿, 20100511 收到修改稿

汽车横向运动特性自适应修正转向输入特性。

本文提出一种预瞄时间自适应的最优预瞄驾驶员模型。通过计算未来一段时间内的车辆运行情况,以质心横向位置偏差、质心与边界距离、横摆角偏差以及预瞄时间作为优化指标,自适应选取预瞄时间,实现了复杂道路、极限工况且有边界约束条件下汽车的驾驶操作。通过仿真验证了该预瞄时间自适应变化对完成驾驶任务的有效性。

## 1 车辆和轮胎模型

### 1.1 车辆模型

采用 2 自由度车辆模型,考虑到大侧向加速度时的非线性,轮胎模型采用魔术公式<sup>[8]</sup>。不考虑干扰时,2 自由度车辆模型

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u\end{aligned}\quad (1)$$

式中,  $\mathbf{x}$  为系统状态变量,  $u$  为输入量,  $\mathbf{y}$  为观测量,  $\mathbf{A}$  为状态矩阵,  $\mathbf{B}$  为控制矩阵,  $\mathbf{C}$  为输出矩阵,  $\mathbf{D}$  为直接传递矩阵。对于转向控制,输入量  $u$  即为转向输入,  $\mathbf{y}$  为车辆的横向位移,  $\mathbf{D}$  矩阵为 0。

选取状态参量

$$\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T \quad (2)$$

式中,  $x_1$  为车辆横向位移,  $x_2$  为车辆横摆角,  $x_3$  为车速在车辆坐标系  $y$  轴分量,  $x_4$  为横摆角速度。  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$  矩阵分别为

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & v_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-[P(\alpha_f)c_f + P(\alpha_r)c_r]}{mv_x} & \frac{bP(\alpha_r)c_r - aP(\alpha_f)c_f}{mv_x} - v_x \\ 0 & 0 & \frac{bP(\alpha_r)c_r - aP(\alpha_f)c_f}{I_z v_x} & \frac{[-a^2 P(\alpha_f)c_f + b^2 P(\alpha_r)c_r]}{I_z v_x} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{P(\alpha_f)c_f}{m} & \frac{aP(\alpha_f)c_f}{I_z} \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = (1 \ 0 \ 0 \ 0) \quad (5)$$

式中,  $\alpha_f$ 、 $\alpha_r$  分别为前轮侧偏角和后轮侧偏角。

各个参数取值如表 1 所示。

表 1 车辆模型参数及取值

参数	数值
整车质量 $m/\text{kg}$	1 400
绕 $z$ 轴转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 300
质心到前轴距离 $a/\text{m}$	1.25
质心到后轴距离 $b/\text{m}$	1.65
前轮侧偏刚度 $c_f/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	159 677
后轮侧偏刚度 $c_r/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	125 948

$P(\alpha_f)$ 和  $P(\alpha_r)$ 为轮胎力修正系数,根据侧偏角和轮胎特性选取<sup>[9]</sup>

$$P(\alpha_f) = \frac{F_{yf}}{\alpha_f c_f} \quad (6)$$

$$P(\alpha_r) = \frac{F_{yr}}{\alpha_r c_r} \quad (7)$$

式中,  $F_{yf}$ 为前轮侧偏力,  $F_{yr}$ 为后轮侧偏力。

### 1.2 轮胎模型

假设汽车匀速运动,仅需考虑轮胎侧偏力特性。根据魔术公式,侧偏力为<sup>[10]</sup>

$$F_y(\alpha) = D \sin \{ C \arctan [ B \alpha (1 - E) + E \arctan (B \alpha) ] \} \quad (8)$$

式中,  $D$  为峰值因子,  $C$  为形状因子,  $B$  为刚度因子,  $E$  为曲率因子,  $\alpha$  为轮胎侧偏角。具体描述为

$$\begin{cases} C = a_0 \\ D = \mu(a_1 F_z^2 + a_2 F_z) \\ B = \frac{a_3 \sin[2 \arctan(F_z/a_4)]}{CD} \\ E = a_5 F_z + a_6 \end{cases} \quad (9)$$

式中  $F_z$  为垂直载荷,  $\mu$  为路面峰值附着系数,  $a_0$ ,  $a_1, \dots, a_6$  为系数,  $a_0=1.6$ ,  $a_1=-34$ ,  $a_2=1\ 250$ ,  $a_3=2\ 320$ ,  $a_4=12.8$ ,  $a_5=0.005\ 3$ ,  $a_6=0.192\ 5$ 。

取不同的路面峰值附着系数时,前后轮侧偏力和侧偏角关系如图 1 所示。

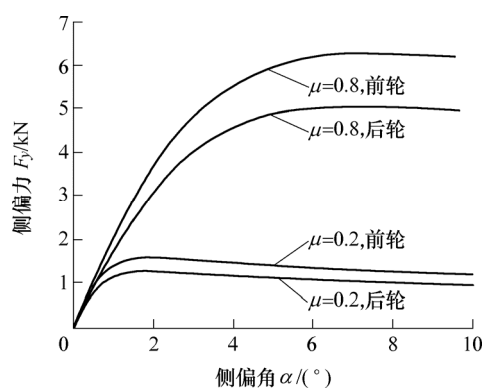


图 1 轮胎侧偏力和侧偏角关系

## 2 最优预瞄驾驶员模型

最优预瞄驾驶员模型由 MACADAM 于 20 世纪 80 年代提出,具有结构简单、鲁棒性好、跟线精度高等优点,得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。最优预瞄驾驶员模型的基本思想是根据预瞄时间内前方道路的位置、车辆状态,依据横向位置偏差建立优化指标函

数, 根据指标函数得到所需的转角, 如图 2 所示。

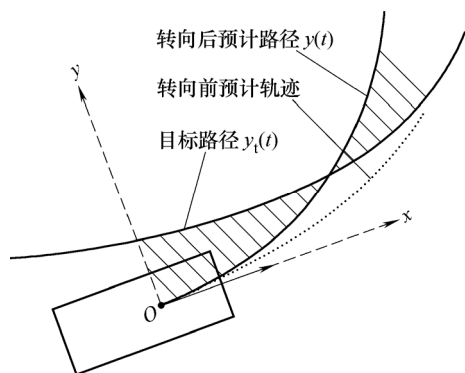


图 2 最优预瞄驾驶员模型

对于式(1)所示的车辆模型, 输入为  $u$  时, 状态  $x$  的变化可以写成

$$\dot{x}(t) = \exp(At)x_0 + \int_0^t \exp(A\eta)Bu d\eta \quad (10)$$

式中,  $x_0$  为  $t=0$  时状态矢量。输出  $y$  可以表达为

$$y(t) = Cx(t) = C\exp(At)x_0 + C\int_0^t \exp(A\eta)Bu d\eta \quad (11)$$

假设目标位置为  $y_t(t)$ , 则横向位置偏差

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T [y_t(t) - y(t)]^2 W(t) dt \quad (12)$$

式中,  $W(t)$  为权函数。最优预瞄驾驶员模型要求优化指标  $J$  取最小值, 从而求解输入  $u$ 。即

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 0 \quad (13)$$

### 3 预瞄时间自适应

#### 3.1 目标路径描述

最优预瞄驾驶员模型需要给定目标路径。简单的目标路径的选取是采用边界中心线方法, 但边界中心线方法会造成目标路径在弯道上出现折线, 跟随这样的目标路径容易造成车辆稳定性恶化。因此, 本文采用低阶曲线将被约束段的中心线平滑连接, 构造连续光滑的目标路径<sup>[11]</sup>。

本文以 ISO3888—1:1999 双移线操作为例<sup>[12]</sup>, 该试验路径设置如图 3 所示, 黑色圆点为桩桶位置。

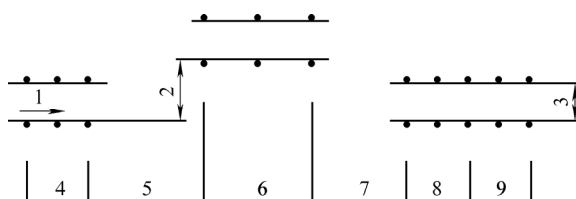


图 3 ISO3888—1:1999 路径设置

1. 行驶方向 2. 车道偏移量 3. 路宽 4. 路段 1 5. 路段 2  
6. 路段 3 7. 路段 4 8. 路段 5 9. 路段 6

图 3 中各路段位置及偏移量如表 2 所示。

路段	长度 $l$	偏移量 $s$	宽度 $b$
1	15	—	$1.1 \times \text{车宽} + 0.25$
2	30	—	—
3	25	3.5	$1.2 \times \text{车宽} + 0.25$
4	25	—	—
5	15	—	$1.3 \times \text{车宽} + 0.25$
6	15	—	$1.3 \times \text{车宽} + 0.25$

目标路径规划方法如下: 有桩桶的路段(路段 1、路段 3、路段 5、路段 6)采用桩桶中心线, 在其他两段(路段 2、路段 4)采用低阶曲线, 保证曲线段和直线段接触位置的斜率相同, 曲率相同。本文采用五次多项式设计路段 2、4, 方程为

$$y = p_5 x^5 + p_4 x^4 + p_3 x^3 + p_2 x^2 + p_1 x + p_0 \quad (14)$$

根据连接点约束条件, 可确定式(14)各项系数, 进而确定目标路径, 如图 4 所示。该目标路径具有连续可导的曲率, 黑色圆点是以车辆质心为参考时的边界约束, 以下为分析方便, 均考虑以质心为参考的边界约束。

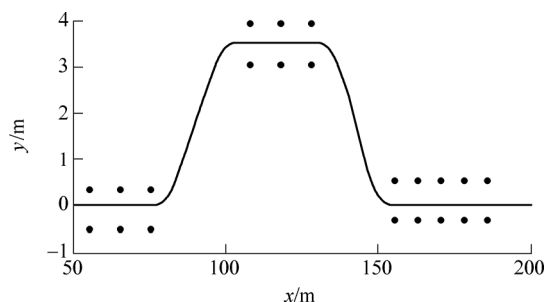


图 4 目标路径

#### 3.2 预瞄时间固定的最优预瞄驾驶员模型

文献[3]给出最优预瞄驾驶员模型之后, 并没有给出复杂工况下预瞄时间的选取方法。在一般的驾驶员模型中, 预瞄时间为一固定值, 取  $0.5 \sim 2.0$  s; 如果车速较低, 汽车横向运动没有进入非线性区间, 固定预瞄时间驾驶员模型均可获得较好的轨迹跟随效果(路径偏差不大)。

当汽车运动在速度较高、轨迹复杂、有边界约束(道路宽度约束)的条件下, 固定预瞄时间驾驶员模型往往难以完成驾驶任务。在有边界约束的条件下, 速度高于一定值之后, 不能求解到满足边界约束的固定的预瞄时间, 如图 5 所示(仿真条件为: 路面峰值附着系数为 0.8, 车速为 130 km/h 时, 采用固定预瞄时间)。取预瞄时间  $t=0.5$  s 时, 轨迹出现振荡; 取预瞄时间  $t=0.8$  s 时, 边界约束段的出入口处出现超出边界的情况; 取预瞄时间  $t=1.2$  s 时, 大部分边界约束段都出现超出边界的现象。 $t$  取其他值也不能完成驾驶任务。因此, 在有边界约束的情况下, 为了提高驾驶员模型的适应性, 驾驶员模型需要采用自适应的预瞄时间。

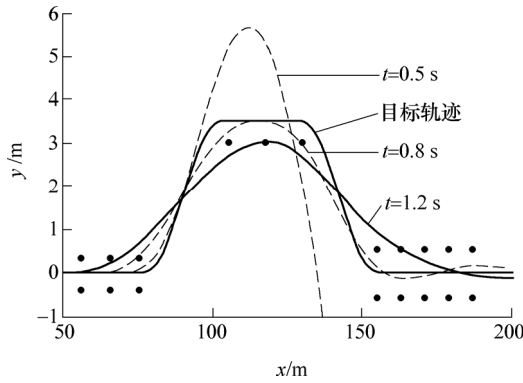


图5 固定不同预瞄时间下的仿真结果

### 3.3 预瞄时间自适应

在研究驾驶员模型时, 通常假设驾驶员能感知车辆状态, 具有预测车辆运动的能力, 能够对控制进行优化处理<sup>[13]</sup>。在某一位置处, 选取不同的预瞄时间  $t_e$ , 计算在时间  $t_1$  内的运行轨迹和目标轨迹之间的偏差, 边界的距离, 时间  $t_1$  结束时的车身横摆角和对应位置处目标轨迹的切线方向的偏差。根据这三者以及推算所采用的预瞄时间  $t_e$  设计相应的优化函数, 根据优化函数选择合适的预瞄时间, 在时间  $t_1$  内按照该预瞄时间进行转向控制。其中轨迹偏差的优化函数设计如下

$$J_1 = \int_0^{t_1} (y_t - y_e)^2 dx \quad (15)$$

式中,  $y_t$  为目标路径,  $y_e$  为预测轨迹。  $t_1$  为模型预测时间, 根据道路特征, 通过反复试算确定: 对于全部轨迹边界约束测试道路, 取 1~2 s; 对于局部边界约束的测试道路, 将约束段和非约束段进行分段,  $t_1$  对应一段道路。

为了满足边界(路宽)约束, 驾驶员模型须设计轨迹和边界位置之间距离的优化函数。其目的是通过该优化函数, 将车辆约束在远离道路边界的位置, 保证汽车安全通过

$$J_2 = \int_0^{t_1} g dx \quad (16)$$

式中,  $g$  为安全性函数, 车辆位置越靠近边界,  $g$  值越大, 其表达式设计为

$$g = \frac{\left| \frac{(y_t - y_e)}{\Delta} \right|}{1 - \left| \frac{(y_t - y_e)}{\Delta} \right|} \quad (17)$$

式中,  $\Delta$  为中心线到边界的距离, 在非边界约束段,  $\Delta \rightarrow +\infty$ 。当  $|y_t - y_e| > \Delta$  时,  $g \rightarrow +\infty$ 。

由于本次推算的结束时刻是下一阶段的开始时刻, 如果下一阶段的开始时刻车辆方向和对位置处的目标轨迹切线方向相差很大, 会使下一阶段的转向控制难度增加。为了减小下一阶段转向控制难度, 需要建立  $t_1$  时刻车身横摆角和对应位置处目标轨迹的切线方向的偏差优化函数

$$J_3 = |\varphi_v - \varphi_r| \quad (18)$$

式中,  $\varphi_v$  表示  $t_1$  时刻车身横摆角,  $\varphi_r$  表示  $t_1$  时刻车所在位置处目标轨迹的切向方向和  $x$  轴的夹角。

预瞄时间选择时, 在一定范围内, 预瞄时间越长, 车辆越容易保持稳定, 但预测计算精度变差。显然, 预瞄时间和整车转向运动的动态响应时间特性相关, 因此可以采用预瞄时间和整车转向运动响应相关的时间的差值作为优化函数

$$J_4 = (t_e - T')^2 \quad (19)$$

式中,  $t_e$  为进行推算时所采用的预瞄时间;  $T'$  为与车辆转向响应特性相关的时间。速度高时  $T'$  可以取到 1 s 或更短, 速度低时则适当增大。

根据式(15)、(16)、(18)、(19), 定义综合优化指标为

$$J = \min(w_1 J_1 + w_2 J_2 + w_3 J_3 + w_4 J_4) \quad (20)$$

式中,  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 、 $w_4$  为权系数, 不同的选取方式对应不同的驾驶风格。比如增大  $w_1$  的取值, 意味着更注重轨迹跟随的位置精度; 增大  $w_2$  的取值, 表示更注重轨迹远离边界; 增大  $w_3$  的取值, 意味着更注重下一阶段的可控性; 而增大  $w_4$  的取值, 意味着更注重取较接近的预瞄时间。通过迭代优化, 可以得到合适的预瞄时间  $t$ 。上述算法如图 6 所示。

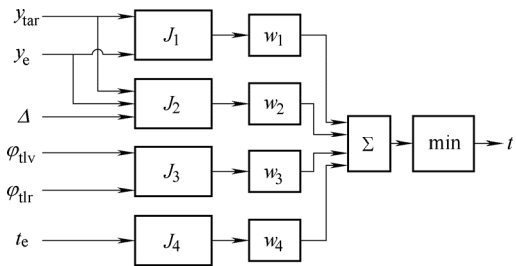


图6 自适应预瞄时间确定逻辑框图

图 7 为采用不同的预瞄时间得到的预测轨迹。在  $x=50$ ,  $y=0$  位置, 根据优化指标  $J$ , 选取预瞄时间为 0.5 s。虽然预瞄时间取 0.4 s 和 0.5 s 都能通过, 但此时预瞄时间都小于  $T'$  (不小于 1 s), 优化函数  $J_4$  会倾向于取接近  $T'$  的值。因为在预瞄时间较短的时候(小于  $T'$ ), 预瞄时间越短, 虽然从轨迹上看, 轨迹偏差越小, 但轮胎力也更接近饱和, 在动态过程中, 不利于后期控制。

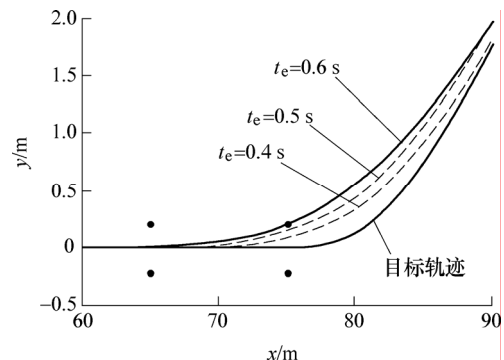
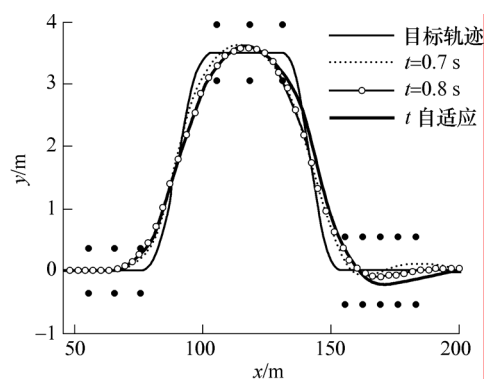


图7 不同预瞄时间对应的运行轨迹

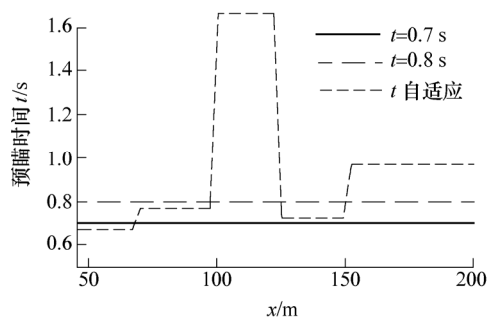
## 4 仿真试验

根据 ISO3888—1:1999 进行双移线试验。设定路面峰值附着系数为 0.8, 进行不同速度下的仿真, 车速参考汽车动力学稳定性控制性能测试中常用测车速。

图 8 为 110 km/h 速度下的仿真结果, 采用固定预瞄时间  $t=0.8$  s 时, 在 75 m 位置超出边界, 采用固定预瞄时间  $t=0.7$  s 时, 在 130 m 位置超出边界。采用自适应的预瞄时间之后, 没有超出边界情况。



(a) 110 km/h 时轨迹



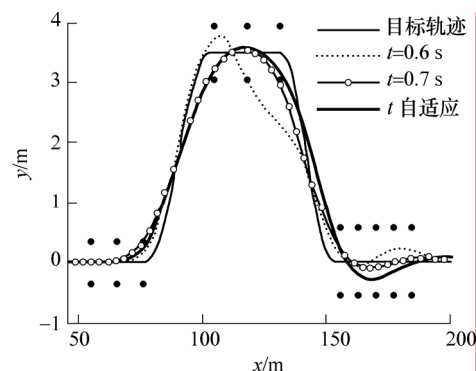
(b) 110 km/h 时预瞄时间

图 8 110 km/h 高附双移线仿真结果

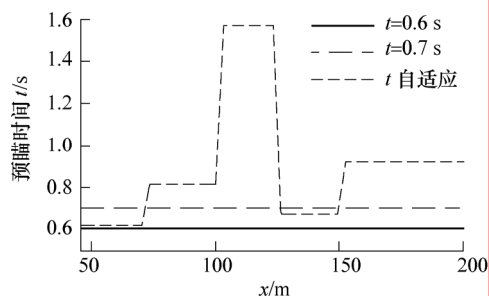
图 9 为 120 km/h 速度下的仿真结果, 采用固定预瞄时间  $t=0.6$  s 时, 在 120~130 m 位置大幅度超出边界, 采用固定预瞄时间  $t=0.7$  s 时, 在 75 m 位置超出边界, 且 130 m 位置附近超出边界。采用自适应的预瞄时间之后, 没有超出边界情况。

图 10 为 130 km/h 速度下的仿真结果, 采用固定预瞄时间  $t=0.6$  s 时, 在 120~130 m 位置大幅度超出边界, 采用固定预瞄时间  $t=0.7$  s 时, 在 130 m 位置附近超出边界, 且 75 m 位置附近超出边界。采用自适应的预瞄时间之后, 没有超出边界情况。

在 110 km/h 时, 汽车保持稳定, 自适应预瞄时间的最优预瞄驾驶员模型虽然比固定预瞄时间模型有一定优势, 但是差别不是特别明显; 随着车速增加(120 km/h 和 130 km/h), 汽车接近极限工况, 自

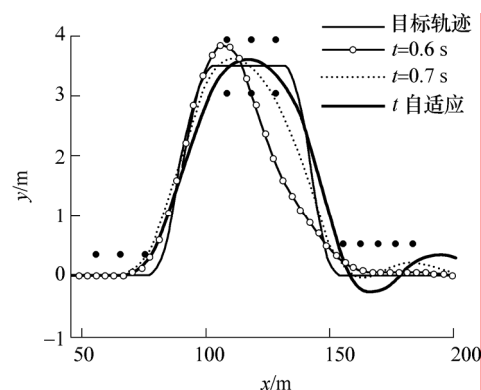


(a) 120 km/h 时轨迹

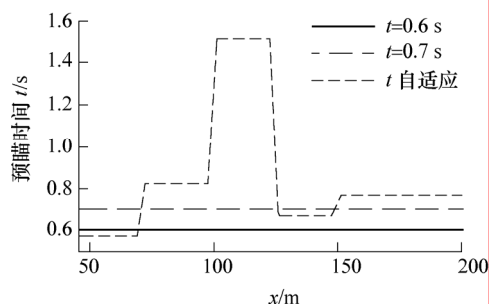


(b) 120 km/h 时预瞄时间

图 9 120 km/h 高附双移线仿真结果



(a) 130 km/h 时轨迹



(b) 130 km/h 时预瞄时间

图 10 130 km/h 高附双移线仿真结果

适应预瞄时间的驾驶员模型体现出明显优势, 在固定预瞄时间的最优预瞄驾驶员模型完全不能满足驾驶任务时, 自适应预瞄时间的驾驶员模型能够完成驾驶任务。固定预瞄时间的驾驶员模型相当于驾驶员驾驶过程中, 不考虑前方路径情况, 总保持固定

的视角, 固定的视角显然不能完全适应变化的路径情况。而自适应预瞄时间的驾驶员模型相当于驾驶员驾驶过程中, 根据前方路径情况, 随时调整到合适的视角, 所以自适应预瞄时间的驾驶员模型能够更好的体现驾驶员的驾驶操作过程, 取得比固定预瞄时间更好的车辆控制效果。采用自适应的预瞄时间的最优预瞄驾驶员模型可以提高极限工况下有边界约束时的通过性。并且越接近极限工况(体现为高速), 自适应预瞄时间的最优预瞄驾驶员模型与固定预瞄时间的驾驶员模型相比效果越明显。

## 5 结论

(1) 建立了预瞄时间自适应优化函数, 基于轨迹偏差、轨迹与边界距离、横摆角偏差、预瞄时间确立优化指标, 进而实现预瞄时间的自适应变化。

(2) 建立的预瞄时间自适应的最优预瞄驾驶员模型, 可以在复杂道路、极限工况且有边界约束时的情况完成驾驶任务。

(3) 预瞄时间自适应驾驶员模型与固定预瞄时间驾驶员模型相比, 更能反映驾驶员操作特性, 且考虑了边界的约束, 能更好地完成边界约束条件下的驾驶任务。将能够更加方便地应用到 ESP 等极限工况下汽车动力学稳定性控制系统的仿真分析中。

## 参 考 文 献

- [1] MACADAM C C. Understanding and modeling the human driver[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2003, 40(1-3): 101-134.
- [2] PLÖCHL M, EDELMANN J. Driver models in automobile dynamics application[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2007, 45(7-8): 699-741.
- [3] MACADAM C C. Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1981(6): 393-399.
- [4] 李英. 方向与速度综合控制驾驶员模型及在 ADAMS 中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2008.  
LI Ying. Direction control and speed control combined driver model and its application to ADAMS[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [5] HATTORI Y, ONO E, HOSOE S. Optimum vehicle trajectory control for obstacle avoidance problem[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, 11(5): 507-512.
- [6] FALCONE P, BORRELLI F, ASGARI J, et al. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(3): 566-580.
- [7] UNGOREN A Y, PENG H. An adaptive lateral preview driver model[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2005, 43(4): 245-260.
- [8] THOMMYPPILLAI M, EVANGELOU S, SHARP R S. Car driving at the limit by adaptive linear optimal preview control[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2009, 47(12): 1535-1550.
- [9] LI Liang, SONG Jian, WANG Huiyi, et al. Fast estimation and compensation of the tyre force in real time control for vehicle dynamic stability control system[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2008, 48(3/4): 208-229.
- [10] PACEJKA H B. Tyre and vehicle dynamics[M]. Oxford: Butterworth Heinemann, 2002.
- [11] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.  
GUO Konghui. Dynamics of Controllability for automobile [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House, 1991.
- [12] International Organization for Standardization. ISO 3888—1 Passenger cars-test track for a severe lane-change manoeuvre[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1999.
- [13] PROKOP G. Modeling human vehicle driving by model predictive online optimization[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2001, 35(1): 19-53.

作者简介: 李红志, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆动力学与控制。

E-mail: ligz03@gmail.com

李亮(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士。主要研究方向为车辆动力学与控制。

E-mail: liangl@tsinghua.edu.cn