

DOI: 10.3901/JME.2008.11.220

基于单点预瞄最优曲率模型的单轨车辆 驾驶员模型*

丁能根 冉晓凤 张宏兵

(北京航空航天大学汽车工程系 北京 100083)

摘要: 单轨车辆动力学特性研究一般需要一个合适的驾驶员模型。基于郭孔辉的单点预瞄最优曲率模型,利用车辆转向时的Ackerman几何关系和稳态转向时横垂面内力的平衡分别确定目标转向角和目标侧倾角,建立适用于单轨车辆的驾驶员模型。模型重点考虑了驾驶员的预瞄、驾驶员对转向手把的转向力矩输入、驾驶员上半身在车座上绕通过髋部的纵向轴线转动的侧倾力矩输入以及驾驶员的动作滞后。为使实际转向角和侧倾角跟随目标转向角和目标侧倾角变化,转向力矩和侧倾力矩皆采用PD控制。采用ADAMS软件建立了驾驶员—车辆闭环动力学模型,并按双移线和蛇行两种典型行驶工况进行仿真。仿真结果表明车辆可以很好地跟随所设定的路径,验证了驾驶员模型的合理性。所建立的驾驶员模型适用于单轨车辆—车闭环控制模型的动力学仿真研究。

关键词: 驾驶员模型 单轨车辆 预瞄

中图分类号: U461.6

Driver Model for Single Track Vehicle Based on Single Point Preview Optimal Curvature Model

DING Nenggen RAN Xiaofeng ZHANG Hongbing

(Department of Automobile Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: An appropriate driver model is generally necessary to the investigation of dynamic characteristics of single track vehicles. Based on GUO Konghui's "single point preview optimal curvature model", a driver model applicable to single track vehicle is built, where the target steering angle and target roll angle are determined according to the Ackerman geometry of steering and force equilibrium in the transverse perpendicular plane under steady steering. Special attention is paid to the preview of driver, steering torque input applied on steering handle, roll moment input of the driver's upper body about the longitudinal axis through driver's hip on the seat, and delay of driver's response while modeling. To make sure the steering angle and roll angle trace their target values, PD controllers are designed for the steering torque and roll moment. The driver-vehicle closed-loop model is built by using ADAMS software, and simulation is carried out under two typical driving conditions, i.e. double lane change and slalom. Simulation results show that the vehicle in the model can follow the preset paths well, thereby validating the driver model. The driver model built is suitable for the research of dynamic simulation of single track vehicle utilizing driver-vehicle closed-loop control model.

Key words: Driver model Single track vehicle Preview

0 前言

单轨车辆两轮着地,是一个不平衡系统。仿真单轨车辆的直线行驶工况时,通过转向手把的力矩

反馈输入一般即可保证车辆平衡。但如果仿真其转向工况,仅靠转向手把力矩输入而不加入驾驶员身体的控制,摩托车就会侧翻^[1]。BRIAL等^[2]指出,分析两轮车辆的动力学特性时无法采用开环模型,总需要一个合适的驾驶员模型——大多数情况下是基于某种形式的闭环控制。

虽然LIMEBEER和COSSALTER等^[3-4]国外学

* 国家自然科学基金资助项目(50475003)。20071127收到初稿,20080704收到修改稿

者在研究单轨车辆动力学问题都采用了驾驶员闭环模型，但有关单轨车辆驾驶员模型公开发表的文献很少。文献[3-4]中建立的驾驶员模型只考虑驾驶员对转向手把的转向力矩的输入。文献[5]只考虑驾驶员上半身在车座上绕通过髋部的纵向轴转动的输入。文献[6]则同时考虑驾驶员对转向手把的转向力矩输入和驾驶员上半身在车座上绕通过髋部的纵向轴转动的输入。大部分文献中驾驶员模型的基本控制策略是根据摩托车按照预期路线行驶时需要的侧倾角与仿真时车辆实际侧倾角差值大小来施加 PID 或 PD 控制，且没有考虑驾驶员的前视时间(即预瞄)。摩托车按照预期路线行驶时需要的侧倾角通过试验或者根据稳态转向时力的平衡得到。

在总结国内外单轨车辆驾驶员模型研究成果的基础上，本文将适用于四轮车辆模型的郭孔辉单点预瞄最优曲率模型^[7]推广到单轨车辆模型建立了新的驾驶员模型。该模型考虑了驾驶员预瞄和驾驶员的反应滞后，且驾驶员对转向的控制既包括转向手把输入，又包括驾驶员上半身在车座上绕通过髋部的纵向轴转动的侧倾力矩输入。

1 驾驶员模型

所建立的驾驶员模型符合单轨车辆的特点，是带预瞄且考虑驾驶员的反应滞后的闭环控制模型，适用于道路的方向角变化不大的情况。

驾驶员发出控制车辆方向的指令，都是以一定原则作指导的，其主要目标是使车辆的运动尽可能地与预期的轨道一致。越是熟练的驾驶员，使车辆运动的轨迹与预期轨道的误差越小。这个最小误差也是本文驾驶员模型的控制目标。

在车速很低的情况下，单轨车辆的运动简单地服从于所谓 Ackerman 几何关系，即

$$\frac{1}{R} = \frac{\tan \delta}{L} \tag{1}$$

或当路径方向角不大时

$$\ddot{y} = \frac{v^2}{R} = \frac{\tan \delta}{L} v^2 \tag{2}$$

- 式中 δ ——转向手把的转角
- L ——轴距
- y, \ddot{y} ——车辆横向位置和侧向加速度
- v ——车速
- R ——转弯半径

当车辆稳态转向时，其横垂面内的受力如图 1 所示(后视图)。图 1 中 F_y 、 F_z 分别是地面给轮胎的侧向力和垂直反力， F_a 是侧向惯性力， m 和 G 分别是整车(包括驾驶员)的质量和重力， φ 是车辆侧倾

角。根据力和力矩的平衡不难得到

$$\tan \varphi = \frac{v^2}{Rg} \tag{3}$$

式(1)确定了低速行驶时轨迹曲率与转向手把转角的关系，而式(3)则反映了稳态转向时车辆质心侧倾角与轨迹曲率的简明关系，驾驶员通过驾驶实践逐步掌握。当发现车辆需要以一定的曲率行驶时，通常就很自然地确定一适当转向角，同时通过身体侧倾调整车辆侧倾角使车辆保持稳定行驶。

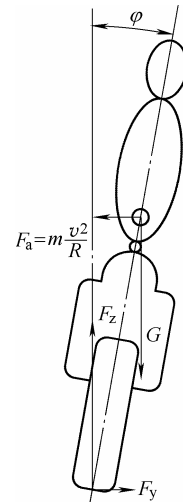


图 1 稳态转向时单轨车辆在横垂面内的受力示意图

如图 2 所示，设单轨车辆在一个预定的路线上行驶，轨道中心线的方程为 $f(t)$ ，并设在所考察的瞬时 t ，汽车具有的即时状态为 $y = y(t)$ ， $\dot{y} = \dot{y}(t)$ 。采用“单点预瞄”假设，即认为驾驶员的目光集中于前方一点处。设驾驶员前视距离为 d ，则相应的前视时间 $T = d/v$ ，驾驶员前视点的横向坐标为 $f(t+T)$ 。若此时选择一个转向角度 δ ，并使车辆质心有一个侧倾角度 φ ，则对应的汽车轨迹曲率为 $1/R$ ，侧向加速度为 $\ddot{y}(t)$ 。这样，经时间 T 之后，在时刻 $t+T$ 汽车的横向位移为

$$y(t+T) = y(t) + T\dot{y}(t) + \frac{T^2}{2}\ddot{y}(t) \tag{4}$$

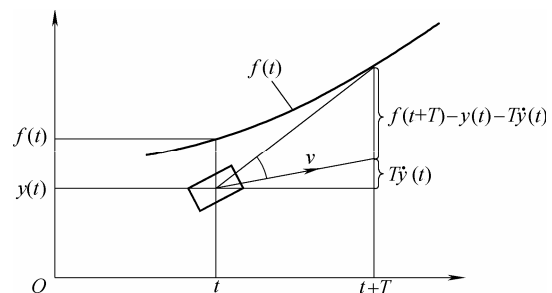


图 2 单点预瞄运动分析示意图

根据前述的“最小误差原则”，驾驶员总是希望选择一个最优的轨迹曲率 $1/R^*$ ，使得汽车在走过

距离 d (经前视时间 T) 后, 其横向位置 $y(t+T)$ 与该处的预期轨道坐标 $f(t+T)$ 相一致。因此, 由式(4)得到最优侧向加速度为

$$\ddot{y}^*(t) = \frac{2}{T^2} [f(t+T) - y(t) - T\dot{y}(t)] \quad (5)$$

由式(2)、(3)和式(5)得转向手把“最优”转向转角 δ^* 和车辆质心“最优”侧倾角 φ^* 分别为

$$\delta^* = \arctan \left\{ \frac{2L}{d^2} [f(t+T) - y(t) - T\dot{y}(t)] \right\} \quad (6)$$

$$\varphi^* = \arctan \left(\frac{v^2}{Lg} \tan \delta^* \right) \quad (7)$$

驾驶员实际操作是通过转向把施加一个力矩 M_δ 、上身侧倾对车辆施加一个侧倾力矩 M_φ , 使转向手把转动 δ^* 且使车辆质心产生侧倾角 φ^* 。本模型中, M_δ 和 M_φ 的大小是根据 δ^* 和 φ^* , 通过 PD 控制计算得到的。

图 3 是驾驶员-摩托车受力分析后视图, 其中 G 是人-车的总重力, G_m 是车辆(包括驾驶员下半身)重力。如果希望车辆向右转, 就希望车辆有一个适当的右倾角, 这就要求驾驶员上身应该先向左侧倾使得摩托车受到一个使之产生向右侧倾趋势的侧倾力矩 M_φ (图 3b)。当车辆到达需要的侧倾角值时, 驾驶员上半身再保持与摩托车零夹角。

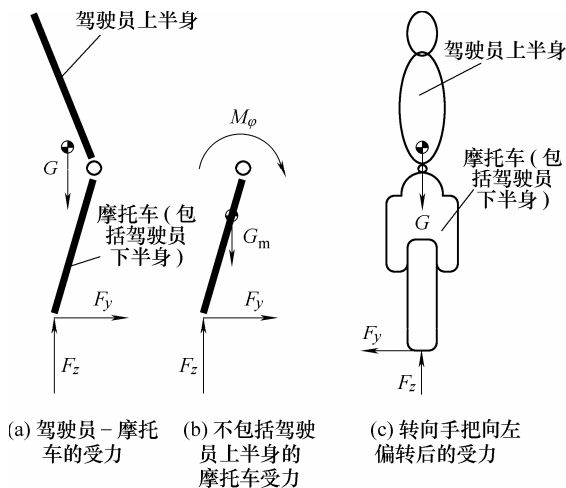


图 3 驾驶员-摩托车受力分析后视图

然而, 要使车辆尽快达到最优侧倾角 φ^* 单靠驾

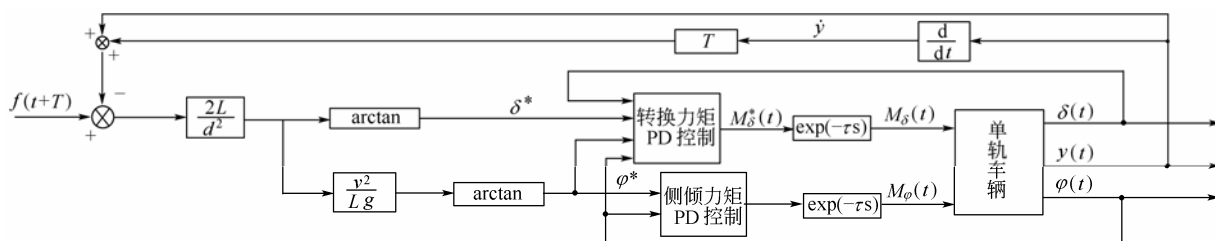


图 4 驾驶员-车辆闭环模型框图

驶员上半身的侧倾是不够的, 需要让转向手把转动一个角度, 使地面给车辆作用的侧向力让车辆尽快达到最优侧倾角 φ^* 。如果想让摩托车向右转, 即希望车辆有一个适当的向右侧的侧倾角, 应当先让转向手把向左转动一个角度, 那么地面会给前轮一个向左的侧向力 F_y , 从驾驶员-摩托车的后面看, 如图 3c 所示, 这个侧向力对人-车质心的力矩使车辆有一个向右侧倾的趋势, 让摩托车尽快到达需要的侧倾角值。当基本到达需要的侧倾角值时, 再使转向手把向右转。

通过以上分析, 驾驶员的力矩输入为

$$\begin{cases} M_\delta^*(t) = K_\delta(\delta^* - \delta) + K_{\dot{\delta}}\dot{\delta} + K_{\varphi p}(\varphi^* - \varphi) + K_{\varphi d}\dot{\varphi} \\ M_\varphi^*(t) = K_\varphi(\varphi^* - \varphi) + K_{\dot{\varphi}}\dot{\varphi} \end{cases} \quad (8)$$

式中 M_δ^*, M_φ^* ——不考虑驾驶员动作滞后情况下的手把转向力矩和车身侧倾力矩

$\dot{\delta}$ ——转向手把转动角速度

$\dot{\varphi}$ ——车辆侧倾的角速度

$K_\delta, K_{\dot{\delta}}, K_{\varphi p}, K_{\varphi d}$ ——转向力矩 PD 控制的反馈系数

$K_\varphi, K_{\dot{\varphi}}$ ——侧倾力矩 PD 控制的反馈系数

但实际上由于驾驶员神经-肌肉系统的动作滞后, 力矩 M_δ^* 和 M_φ^* 要延迟一定时间后才能施加在车辆上。若驾驶员的迟滞时间为 τ , 则 t 时刻车辆输入力矩为

$$\begin{cases} M_\delta(t) = M_\delta^*(t - \tau) \\ M_\varphi(t) = M_\varphi^*(t - \tau) \end{cases} \quad (9)$$

式中 M_δ, M_φ ——考虑驾驶员动作滞后情况下的手把转向力矩和车身侧倾力矩

式(6)~(9)就是本文建立的驾驶员模型, 相应的驾驶员-车辆闭环模型框图如图 4 所示。该图中“转向力矩 PD 控制”和“侧倾力矩 PD 控制”环节代表式(8)中的两个比例微分控制方程。

2 仿真分析结果

前、后轮胎选用针对摩托车的 MF-MC 轮胎模型^[8]，采用动力学仿真软件 ADAMS 建立整个“人—车”多体闭环动力学模型，并按典型工况进行了仿真分析。

图 5 是在双移线工况下的移线轨迹和转向力矩仿真结果。为说明移线过程中驾驶员的转向输入和侧倾输入，图 6 给出了车速 10 m/s 时双移线工况下的车辆转向角和侧倾角仿真结果。需要指出的是，图 5 中第一次移线的开始有一短暂的向右转向，其目的是造成车身左倾以便实现向左转向。

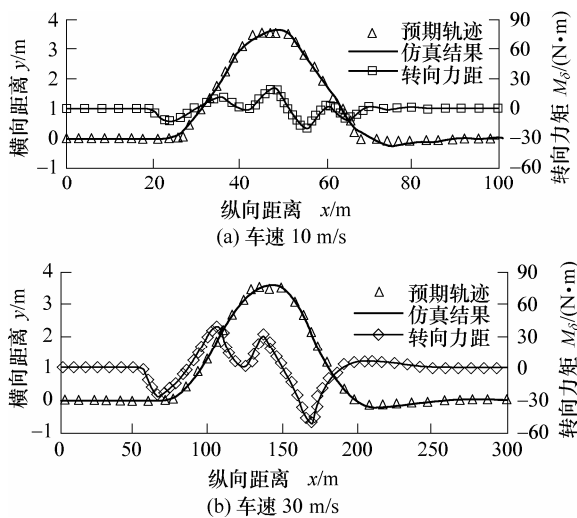


图 5 双移线工况行驶轨迹以及转向力矩仿真结果

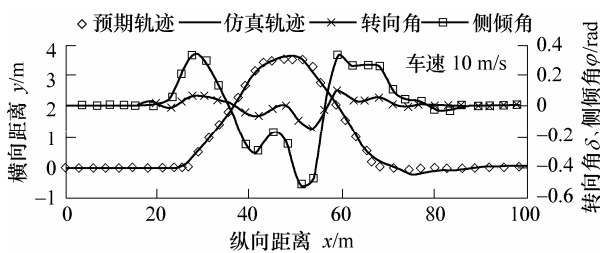


图 6 双移线工况的转向角和侧倾角仿真结果

图 7 显示了蛇行工况行驶的行駛轨迹仿真结果。

从上述移线轨迹曲线可以看出，建立的驾驶员模型可以很好地使车辆按照预期的路线行驶。因此，所建立的驾驶员模型是合理有效的，适用于摩托车人—车闭环控制操纵动力学仿真需要。

3 结论

(1) 以转向手把转角和驾驶员上半身施加于车

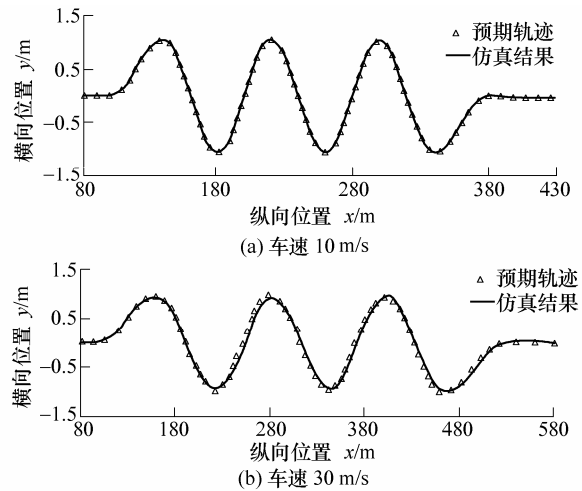


图 7 蛇行工况行驶的行駛轨迹仿真结果

身的侧倾角同时作为输入，符合实际摩托车驾驶员的驾驶操作，可以较好地实现单轨车辆转向操纵控制。

(2) 将“单点预瞄最优曲率模型”推广到单轨车辆，采用转向角和侧倾角 PD 控制，并考虑驾驶员的动作滞后，可得到合理的驾驶员模型。

(3) 所建立的驾驶员模型满足单轨车辆“人—车”闭环控制操纵动力学仿真研究的需要。

(4) 轮胎的侧偏和侧倾都可产生车辆转弯所需要的侧向力，但二者产生的侧向力在转弯的不同阶段所占的比例是一个有待深入研究的问题。

参 考 文 献

- [1] 张学江. 嘉陵摩托车结构 CAE 分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
ZHANG Xuejiang, Jialing motorcycle structure analysis and research by CAE[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [2] BRIAL F, BORTOLUZZI D, CROSSALTER V, et al. Experimental study of motorcycle transfer functions for evaluating handling[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 39(1): 1-25.
- [3] SHARP R S, LIMBEER D J N. A motorcycle model for stability and control analysis[J]. Multibody System Dynamics, 2001, 6(2): 123-135.
- [4] CROSSALTER V, DORIA A, LOT R. Steady turning of two wheel vehicles[J]. Vehicle Syst. Dyn. 1999, 31: 157-181.
- [5] LAI Hsienchung, LIU Jingsin, WANG Lisheng, et al. Design parameters study on the stability and perception of riding comfort of the electrical motorcycles under rider leaning[J]. Mechatronics, 2003(13): 49-76.

(下转第 228 页)