# 基于协同仿真的单轨车辆动力学建模

张宏兵 丁能根 王洪臣

(北京航空航天大学 汽车工程系，北京 100083)

**摘 要**：为研究单轨车辆的动力学特性，建立了驾驶员-车辆闭环协同仿真模型. 该模型由 2 部分组成，其中车辆多体模型采用 Adams 软件建立，而基于“单点预瞄最优曲率模型”理论的驾驶员模型在 Matlab 中建立. 分别设计了双移线和蛇行行驶工况，对模型进行协同仿真. 结果表明该驾驶员-车辆闭环模型可以较好地跟随所设定的路径，证明了模型的合理性. 所建立的协同仿真模型为研究单轨车辆的动力学特性提供了一种有效手段.

**关 键 词**：单轨车辆；计算机仿真；驾驶员-车辆闭环模型

**中图分类号**：U 461.6

**文献标识码**：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)06-0736-03

## Modeling of single track vehicle′s dynamics based on co-simulation

Zhang Hongbing Ding Nenggen Wang Hongchen

(Dept. of Automobile Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract**: To investigate the dynamic characteristics of single track vehicles, a driver-vehicle closed-loop co-simulation model was built. The model consists of two parts: a multi-body dynamic model built in Adams and a driver model built in Matlab based on the theory of 'single point preview optimal curvature model'. The paths for the slalom test and the lane change test were designed respectively according to 'Test procedure for vehicle's handling and stability simulator'. Co-simulations with the driver-vehicle closed-loop co-simulation model were undertaken, and results show that it can well follow the paths. So its rationality could be validated. The co-simulation model built provides an effective measure for research of the dynamic characteristics of single track vehicles.

**Key words**: single track vehicle; computer simulation; driver-vehicle closed-loop model

动力学仿真技术被广泛应用于车辆平顺性和操纵稳定性的研究. 该技术在单轨车辆动力学上的应用不仅可以明显缩短产品开发设计阶段的时间和经费，同时还可以避免极限工况下实验和测试可能出现的危险.

关于单轨车辆的动力学研究一直是学术界研究的一个重点，这是由其在稳定性上存在的固有弱点决定的. 从上世纪 60 年代开始，相继发表了一些关于摩托车操纵稳定性和平顺性分析的论文. 建立单轨车辆动力学模型的方法主要有下面 3 种：

1) 直接建立数学模型，这种方法灵活性较好，但存在建模繁琐、建模效率低等问题. Cossalter 和 Lot[1] 利用拉格朗日方程建立基于自然坐标系下的多体动力学数学模型，通过 Maple 软件进行动力学仿真. Lai Hsien-Chung[2] 用牛顿定律得到包括驾驶员上半身在内的车辆动力学模型；

2) 采用商用软件建立动力学模型，主要特点是建模效率高且不易出错，可以完成复杂模型的仿真，但对模型的特征描述缺乏灵活性，如不能提供合适的驾驶员模型和轮胎模型. 林蔚[3] 建立了一个较详细车辆机械模型但对驾驶员缺乏描述；

3) 将数学建模和采用商业软件建模相结合，可以充分发挥两者的长处.

**收稿日期**：2006-03-30

**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(50475003)

**作者简介**：张宏兵(1982—)，男，山西运城人，硕士生. zhanghb0359@126.com.

本文采用第 3 种建模方法建立人-车闭环模型.首先使用 Adams 建立基本的车辆模型,然后在 Matlab/Simulink 下建立基于"单点预瞄最优曲率模型"[4]理论的驾驶员模型,这样就可以得到协同仿真模型.通过对双移线和蛇行行驶工况的仿真计算,所建的闭环模型对预定路径有较好的跟随能力,验证了协同仿真模型的合理性.

## 1　摩托车模型

所建摩托车模型的几何质量参数主要是来自文献[1]中提供的意大利 Aprilia RSV 1000 型摩托车的数据.

摩托车建模时假设:

1) 摩托车各零部件的弹性变形很小,整车除轮胎外按刚体建模,同时忽略各零件连接处的阻尼;

2) 在建立驾驶员模型时,认为驾驶员的熟练程度很高,对车辆运动状态的感知非常准确灵敏,也没有考虑驾驶员操纵力的限度;

3) 忽略了摩托车的悬架作用;

4) 没有建立链条传动模型,而是直接将驱动或制动力矩加在车轮上.

5) 忽略了发动机等对车辆的激励影响,以一个恒定的驱动力矩来代替.

模型主要包括下面几部分:驾驶员上半身、后摆杆、后总成、前总成、前簧下质量以及前、后轮.其中前总成与前轮、前总成和后总成、后摆杆与后轮都是通过旋转副连接,驾驶员的上半身和后总成之间通过扭簧连接.模型见图 1.

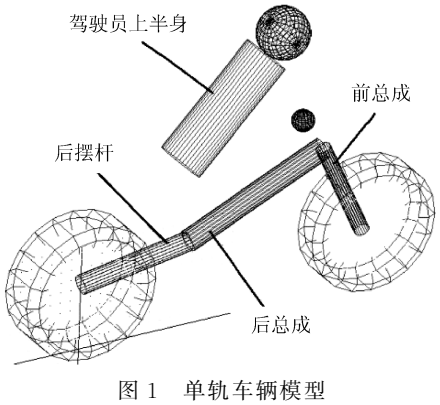


图 1　单轨车辆模型

单轨车辆动力仿真的难点之一是需要一个适合的轮胎模型.轮胎模型已经比较成熟,但往往大多数只适用于双轨车辆.单轨车辆的轮胎侧倾角可以达到 50～55°,对于轮胎的地面反力产生显著影响.双轨车辆的轮胎不会出现这种情况,这就造成单轨车辆和双轨车辆所采用的轮胎模型有明显不同.

本文采用 MF-MC 轮胎模型[5],它是基于魔术公式理论专门用来计算单轨车辆轮胎力的模型.该模型可同时描述轮胎的稳态特性和动态响应特性,使用简单的一阶微分方程描述侧向力、回正力矩以及纵向力的动态响应,参数有明确的物理意义.

作用在摩托车的力包括:驾驶员施加在方向把手上的转向力矩 $M_\delta(t)$、上半身施加于后总成上的扭矩 $M_\varphi(t)$、空气对车辆的阻力、前轮和后轮受到的地面作用力以及驱动力.

## 2　驾驶员模型

研究单轨车辆动力学时,大多数情况下都要考虑驾驶员模型.Bria[6]等人指出,分析单轨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.本文采用的是郭孔辉院士提出的"单点预瞄最优曲率模型".这个理论主要原则就是车辆实际运动的轨迹与预期轨道相一致.

根据单点预瞄理论,可以得到车辆最优的转向角:

$$\delta^* = \arctan\left\{\frac{2L}{(TV)^2}[f(t+T) - y(t) - T\dot{y}(t)]\right\} \tag{1}$$

式中,$\delta^*$ 为理想的转向把手转角;$L$ 为车辆模型的轴距;$y(t)$,$\dot{y}(t)$分别为单轨车辆实际的侧向位置和侧向速度;$T$ 为驾驶员的前视时间;$V$ 为单轨车辆的纵向速度;$f(t)$为预期轨迹.

通过分析单轨车辆在稳态转向时受力情况,得到车身质心最优的侧倾角与转向角的关系:

$$\varphi^* = \arctan\left(\frac{V^2}{Lg}\tan\delta^*\right) \tag{2}$$

式中,$\varphi^*$ 为车辆理想的侧倾角;$g$ 为重力加速度.

模型中,$M_\delta(t)$和 $M_\varphi(t)$的大小是根据转向手把 $\delta^*$,$\varphi^*$,通过比例微分控制(即 PD 控制)计算得到的.具体的 PD 控制算法可以用式(3)表示:

$$\left.\begin{aligned} M_\delta^*(t) &= K_\delta(\delta^* - \delta) + K_{\dot\delta}\dot\delta + \\ &\quad K_{\varphi\mathrm{p}}(\varphi^* - \varphi) + K_{\varphi\mathrm{d}}\dot\varphi \\ M_\varphi^*(t) &= K_\varphi(\varphi^* - \varphi) + K_{\dot\varphi}\dot\varphi \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中,$M_\delta^*(t)$,$M_\varphi^*(t)$分别为不考虑驾驶员迟滞特性时作用在方向把手上的力矩和驾驶员上半身侧倾力矩;$\dot\delta(t)$,$\dot\varphi(t)$分别为转向把手的转向角速度和车辆的侧倾角速度;$K_\delta$,$K_{\dot\delta}$,$K_{\varphi\mathrm{p}}$,$K_{\varphi\mathrm{d}}$为 $M_\delta^*(t)$

PD控制的控制系数；$K_\varphi$，$K_{\dot\varphi}$ 为$M_\varphi^*(t)$PD控制的控制系数.

由于驾驶员肌肉-神经系统存在一定的滞后，可以用 $e^{-\tau s}$ 反映这一特性，其中 $\tau$ 就是迟滞时间. 通过查阅相关资料[7]，取$\tau=0.1$s. 那么控制力矩的表达式应该写成：

$$\left.\begin{aligned} M_\delta(t) &= M_\delta^*(t-\tau) \\ M_\varphi(t) &= M_\varphi^*(t-\tau) \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

驾驶员-车辆闭环控制动力学模型如图2所示，其中“转向力矩PD控制”和“侧倾力矩PD控制”环节分别按式(3)的2个式子确定.

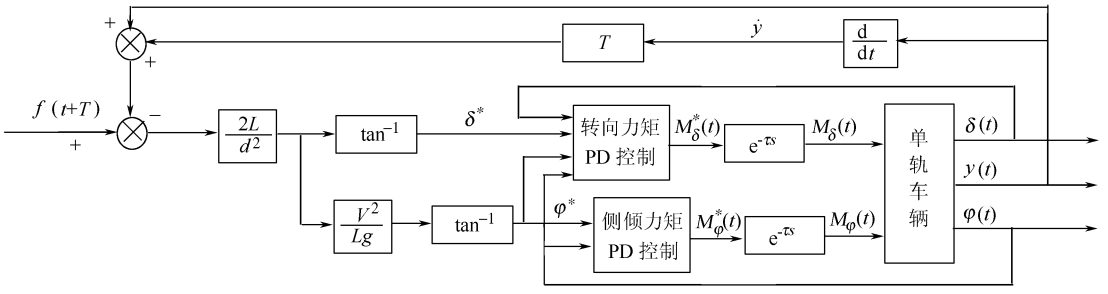


图2 驾驶员-车辆闭环模型

## 3 协同仿真模型及仿真算例

采用Adams下建立多体模型，然后在Matlab/Simulink环境下建立驾驶员控制模型. 两者之间需相互传递车辆运动状态和控制力的参数，具体包括：车辆质心的纵向位置 $x$、车辆质心的横向位置 $y$、车辆质心处的纵向速度 $\dot x$、车辆质心处的侧向速度 $\dot y$、前轮的转向角 $\delta$、转向角速度 $\dot\delta$、车辆的侧倾角 $\varphi$、侧倾角速度 $\dot\varphi$ 以及 $M_\delta$ 和 $M_\varphi$. 协同仿真模型如图3所示.

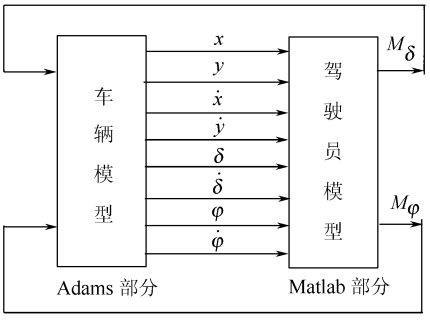


图3 协同仿真模型

为验证人-车闭环模型，参照《汽车操纵稳定性模拟器试验大纲》[8]确定了双移线轨迹和蛇行运动轨迹. 图4～图7为采用闭环模型不同车速下的仿真结果.

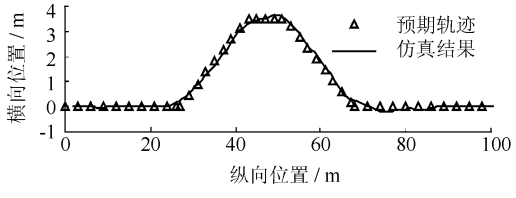


图4 车速10 m/s时双移线行驶轨迹

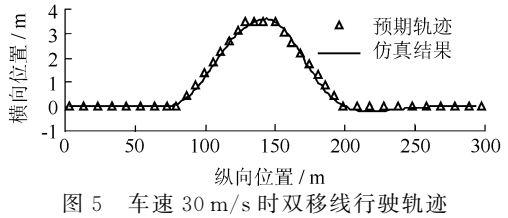


图5 车速30 m/s时双移线行驶轨迹

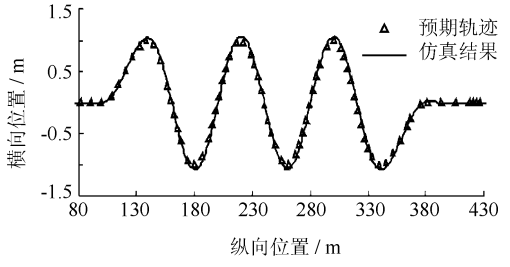


图6 车速10 m/s时蛇行运动行驶轨迹

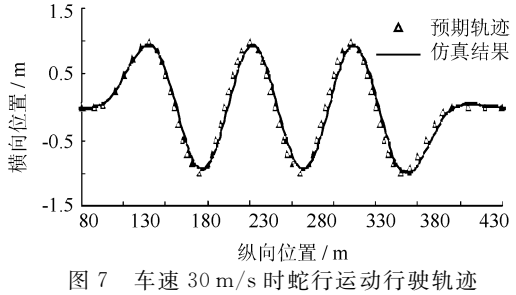


图7 车速30 m/s时蛇行运动行驶轨迹

从上面的仿真结果可以看出所建的人-车闭环模型可以很好地跟随所设定的路径，证明了协同仿真模型是合理的.

## 4 结 论

本文使用驾驶员-车辆闭环协同仿真模型对双移线和蛇行工况进行了仿真，车辆仿真轨迹和

(下转第747页)