

文章编号: 1002-0268 (2006) 06-0157-05

基于 SIMULINK 的汽车高速行驶姿态的影响因素分析

王国林¹, 杨建¹, 樊旭峰², 陆丹¹

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2 沈阳建筑工程学院 基础部, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 基于 MATLAB/SIMULINK, 以 3 自由度汽车非线性动力学模型为基础, 建立仿真模型对汽车行驶姿态进行仿真研究, 并且模拟了汽车在极限行驶工况下的行驶姿态, 较低的行驶速度, 适当增加侧倾转向系数可以提高汽车的操纵稳定性。前正/后负车轮外倾角可以保证汽车在高速转向/制动时保持一定的恢复横摆力矩, 提高行驶安全性。改变侧倾阻尼系数对高速转向的操纵性影响不大而对行驶的平顺性有较大影响。

关键词: MATLAB/SIMULINK; 横摆角速度; 质心侧偏角; 汽车动力学; 车身侧倾角

中图分类号: U461.6

文献标识码: A

Vehicle Steering Motion Simulation Based on MATLAB/ SIMULINK

WANG Guo-lin¹, YANG Jian¹, FAN Xu-feng², LU Dan¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Jiangsu Zhenjiang 212013, China;

2 Department of Basic Science, Shenyang Architectural and Civil Engineering University, Liaoning Shenyang 1101168, China)

Abstract The dynamical model of a vehicle system with 3 degree is constructed in this paper. The simulation model is also established and the method to simulate the dynamical characteristics of the vehicle system especially in extreme motion is introduced in detail. The relatively low vehicle speed and propriety adding the roll steering coefficient can improve the vehicle handing and stability. The suitable camber angle can support the correspond yaw moment and improve driving safety. Changing the roll damping coefficient has notable effect on the comfortable riding.

Key words: MATLAB/SIMULINK; yaw rate; side slip angle; vehicle dynamic; roll angle

0 前言

汽车的行驶姿态可以由横摆角速度和质心侧偏角来描述^[1]。质心侧偏角定义为汽车实际行进方向与车体纵轴之间的夹角, 表示为质心速度与绝对坐标的夹角与汽车方位角之差。进行汽车操纵稳定性测试重要的因素是所需的方向盘转角和汽车的质心侧偏角, 后者正越来越受到重视^[2]。Shibahata^[3]指出, 在一定条件下车辆不稳定, 发生侧滑和甩尾等现象是由于大质

心侧偏角时恢复横摆力矩减少引起的。通过分析汽车行驶过程中姿态的变化及其影响因素可以预测这些现象的发生。因此进行汽车行驶姿态的研究对提高汽车高速行驶安全性是非常有意义的。国内外学者在这一领域已经开展了大量的研究工作, 然而大量文献都是基于 Bicycle Model 对汽车进行低速的稳态和瞬态分析^[4], 或没有考虑轮胎的非线性^[6]。本文通过 MATLAB/SIMULINK 建立非线性轮胎模型的 3 自由度汽车横摆-侧倾模型, 着重分析在前轮角阶跃输入下汽车

收稿日期: 2005-03-11

作者简介: 王国林 (1965-), 男, 吉林伊通人, 教授, 主要从事载运工具运行安全控制、汽车轮胎力学的研究。(glwang@ujs.edu.cn)

横摆角速度质心侧偏角的影响因素。

1 建立整车双轨动力学模型

1.1 汽车模型

Chul Kim 指出, 3 自由度汽车横摆-侧倾模型即使在高侧向加速度 (大于 0.4 g) 也可以比较真实的反应汽车在高速转向时的姿态变化。因此本文建立考虑汽车车身侧倾转向效应的 3 自由度 (横摆, 侧倾, 质心侧偏) 模型如图 1 所示。并进行了如下假设: 忽略转向系影响, 以前后轮转角为输入; 忽略空气动力的作用; 驱动力不大, 不考虑地面切向力对轮胎侧偏特性的影响; 令车辆坐标系的原点与质心重合, 由达朗伯原理得 3 自由度汽车运动方程。

$$\begin{cases} MV(r+\beta) - M_s h p = -(F_{y1} + F_{y2}) & (\text{沿 } Y \text{ 轴}) \\ I_x \dot{r} + I_y \dot{p} - m_s v h (r+\beta) = \\ - (k_{\phi 1} + k_{\phi 2}) p - (C_{\phi 1} + C_{\phi 2} - m_s g h) \phi & (\text{绕 } X \text{ 轴}) \\ I_z \dot{r} + I_x \dot{p} = -l_f F_{y1} + l_r F_{y2} & (\text{绕 } Z \text{ 轴}) \end{cases} \quad (1)$$

这里, r 为横摆角速度; \dot{r} 为横摆角加速度; β 为质心侧偏角速度; F_{y1}, F_{y2} 为前、后轮侧向力; ϕ 为侧倾角; \dot{p} 为侧倾角速度; \dot{p} 为侧倾角加速度。

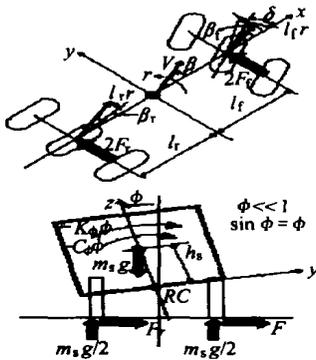


图 1 3 自由度汽车动力学模型

Fig 1 Vehicle dynamical model with 3 DOF

1.2 轮胎模型

在任何整车动力学模型中, 轮胎模型都是一个重要的组成部分。除空气的作用力和重力外, 几乎其他影响地面车辆运动的力和力矩皆由轮胎与地面接触而产生。轮胎的力学模型从早期的由 Bradley 和 Allen 模型到 Fiala 和 G. Gim 等人建立的理论分析模型, 再到 Pacejka 和郭孔辉院士建立的经验和半经验模型已经发展了 60 多年。

本文选用 Pacejka 非线性半经验轮胎模型 (Magic formula), 其一般表达式为^[9]

$$\begin{cases} Y = D \sin(C \arctan(\beta \Phi)) + \Delta S_v \\ \Phi = (1-E)(X + \Delta S_h) + (E/B) \arctan(B(X + \Delta S_h)) \end{cases} \quad (2)$$

魔术公式是用三角函数的组合公式拟合试验轮胎的数据而得到的一套公式, 可表达出轮胎的力学特性, 统一性强, 编程方便, 需拟合的参数少, 各个参数具有较明确的含义, 容易确定参数。无论对纵向力、横向力还是回正力矩, 拟合的精度比较高, 是现在许多汽车动力学仿真软件中应用最广泛的模型。轮胎横向力

$$\begin{cases} F_y = D \sin(C \arctan(B \Phi)) + \Delta S_v \\ \Phi = (1-E)(X + \Delta S_h) + (E/B) \arctan(B(X + \Delta S_h)) \end{cases}$$

其中,

$$\begin{aligned} C &= 1.30 \\ D &= (a_1 F_z + a_2) F_z \\ B &= \left[\frac{a_3 \sin(a_4 \arctan(a_5 F_z))}{CD} \right] (1 - a_{12} |\gamma|) \quad (3) \\ E &= a_6 F_z^2 + a_7 F_z + a_8 \\ \Delta S_h &= a_9 \gamma \\ \Delta S_v &= (a_{10} F_z^2 + a_{11} F_z) \gamma \end{aligned}$$

1.3 建立整车仿真模型

本文采用 MATLAB/SIMULINK 软件进行仿真研究, 仿真采用变步长的积分方法 ode45 法, 仿真时间 $T=10$ s, 最小仿真步长为 0.001 s, 最大仿真步长为 0.01 s, 相对误差限 (Relative Tolerance) 取 1 E-6。以 CA 770 汽车为仿真试验对象, 该车的主要参数见表 1。这里建立的 SIMULINK 模型是对子系统进行封装后可以更改样车结构参数的通用模型。该模型可以实现对汽车横摆角速度、质心侧偏角、侧倾角、侧向加速度、横摆力矩等多个高速行驶状态变量的模拟计算。在子系统中还可以观察在行驶过程中前后轴侧向力侧向速度、位移, 方位角和横摆角的变化, 更改在不同路面轮胎模型的参数。

表 1 符号说明和样车参数

Tab 1 Symbol description and sample parameters

参数名称	符号	量纲	参数值
整车质量	M	kg	3018
悬挂质量	m_s	kg	2685
重心至前轴距	l_f	m	1.84
重心至后轴距	l_r	m	1.88
前悬架侧倾角刚度	$C_{\phi 1}$	$N^\circ \text{ m/rad}$	100548
后悬架侧倾角刚度	$C_{\phi 2}$	$N^\circ \text{ m/rad}$	32732
绕 Z 轴惯性距	I_z	$kg \cdot m^2$	10437
绕 X 轴惯性距	I_x	$kg \cdot m^2$	1960
前悬架侧倾角阻尼	$k_{\phi 1}$	$N^\circ \text{ m}^2/\text{s rad}$	3430
后悬架侧倾角阻尼	$k_{\phi 2}$	$N^\circ \text{ m}^2/\text{s rad}$	3430
前侧倾转向系数	E_f	无量纲	-0.114
后侧倾转向系数	E_r	无量纲	0
惯性积	I_x	$kg \cdot m^2$	0
侧倾力臂	h	m	0.488

2 仿真分析

前轮转角、车速、侧倾转向系数和车轮外倾角的改变会对汽车瞬态响应的品质产生影响。固有圆频率, 阻尼比, 反应时间和超调量是汽车操纵稳定性评价瞬态响应的参数, 通常认为固有圆频率和阻尼比大一些, 超调量小一些汽车具有较好的瞬态响应品质。

图 2、图 3 分别是前轮转角阶跃输入 1° 、 2° 和 3° , 车轮外倾角 0° , 在车速 $V=100$ km/h 的横摆角速度和质心侧偏角的响应曲线。由图可知随着前轮转角的增加汽车质心侧偏角明显增大并开始出现振荡, 固有圆频率及阻尼比减小, 超调量及稳定时间增加, 因此应该避免在高速行驶时候急转方向盘产生大的前轮转角。

图 4、图 5 分别是前轮转角阶跃输入 3° , 车轮外倾角 0° , 在车速 $V=60, 80, 100$ km/h 的横摆角速度和质心侧偏角的响应曲线。由图可知降低汽车行驶速度, 可减小质心侧偏角, 使固有圆频率及阻尼比增加, 超调量及稳定时间减少; 而增加行驶速度, 可使反应时间缩短。因此, 较低的行驶速度使汽车具有较好的瞬态响应特性。

图 6、图 7 是前轮转角阶跃输入 3° , 车轮外倾角 0° , 车速 $V=100$ km/h, 不同侧倾转向系数 $E_r=0, 0.2, 0.3, 0.4$ 的横摆角速度和质心侧偏角的响应曲线。由图可知增加侧倾转向系数, 可以减小质心侧偏角, 固有圆频率, 反应时间和阻尼比, 增加侧倾转向系数增加稳定时间。但是过大的侧倾转向系数不但不能改善操纵运动的性能, 而且会使反应性能严重恶化。

图 8~图 15 是前轮转角阶跃输入 3° , 车速 $V=100$ km/h 匀速行驶, 前后轴车轮分别取不同外倾角时横摆角速度和质心侧偏角的响应曲线。

图 8~图 11 分别是前后轴同取负外倾或正外倾时横摆角速度和质心侧偏角的前轮角阶跃响应曲线。由图可知两种情况都可以减小质心侧偏角改善行驶稳定性。

图 12、图 13 分别是前车轮正、负外倾对应后车轮负、正外倾角的横摆角速度和质心侧偏角在前轮角阶跃下的响应曲线。由图可知前轮正外倾后轮负外倾可以保持较小的质心侧偏角和较好的操纵稳定性。

图 14、图 15 分别是前车轮无外倾/后车轮正、负外倾角和后车轮无外倾/前车轮正、负外倾角的横摆角速

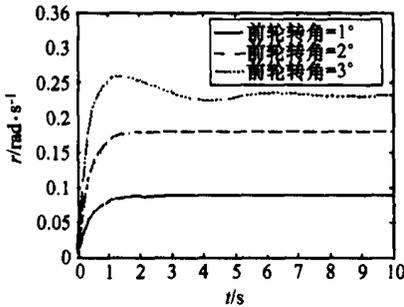


图 2 不同前轮转角阶跃下横摆角速度响应曲线

Fig 2 The yaw rate responses of different steering wheel angle step input

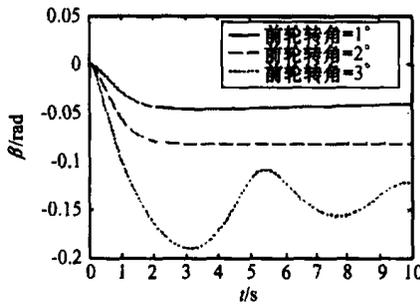


图 3 不同前轮转角阶跃下的质心侧偏角响应曲线

Fig 3 The side slip angle responses of different steering wheel angle step input

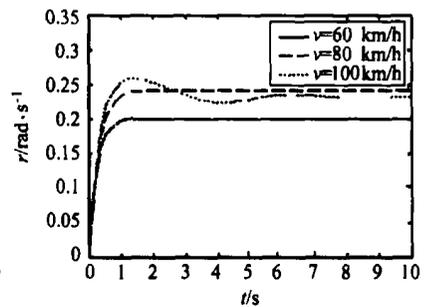


图 4 不同车速的横摆角速度在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 4 The yaw rate responses of different vehicle speeds to the same steering wheel angle step input

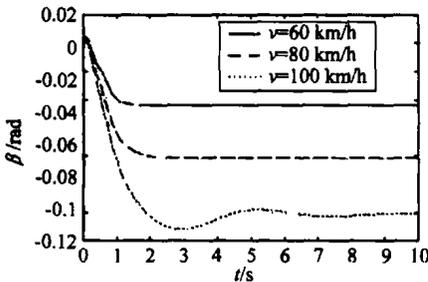


图 5 不同车速的质心侧偏角在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 5 The side slip angle responses of different vehicle speeds to the same steering wheel angle step input

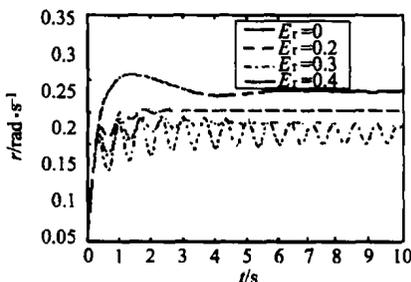


图 6 不同侧倾转向系数的横摆角速度在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 6 The yaw rate responses of different roll steer coefficients to the same steering wheel angle step input

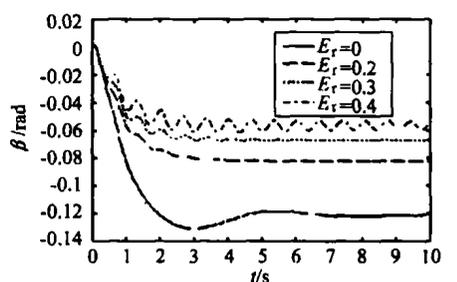


图 7 不同侧倾转向系数的质心侧偏角在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 7 The side slip angle responses of different roll steer coefficients to the same steering wheel angle step input

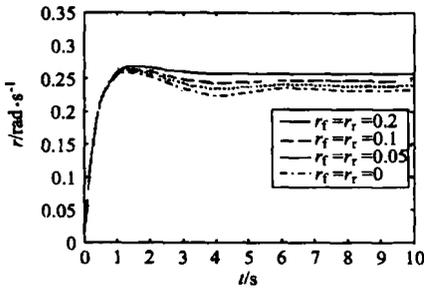


图 8 前后车轮负外倾角的横摆角速度在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 8 The yaw rate responses of different wheel alignment parameter-camber angle (minus) setting to the same steering wheel angle step input

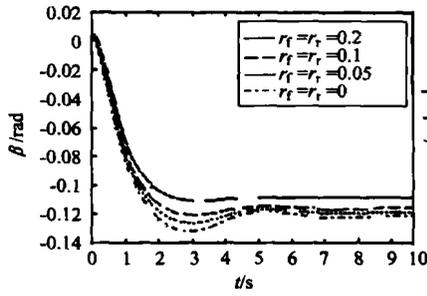


图 9 前后车轮负外倾角的质心侧偏角在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 9 The side slip angle responses of different wheel alignment parameter-camber angle (minus) setting to the same steering wheel angle step input

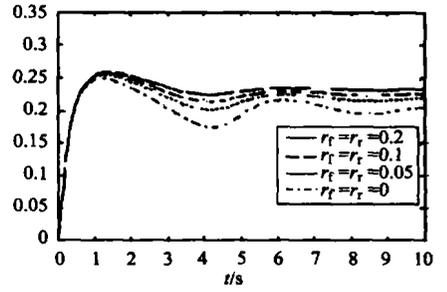


图 10 前后车轮正外倾角的横摆角速度在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 10 The yaw rate responses of different wheel alignment parameter-camber angle (positive) setting to the same steering wheel angle step input

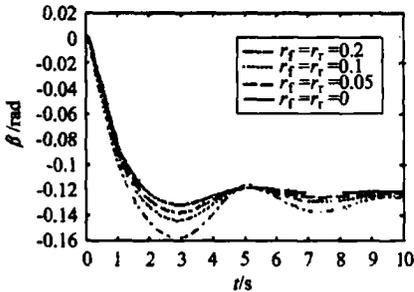


图 11 前后车轮正外倾角的质心侧偏角在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 11 The side slip angle responses of different wheel alignment parameter-camber angle (positive) setting to the same steering wheel angle step input

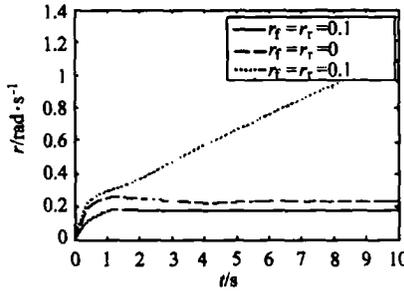


图 12 前车轮正、负外倾/后车轮负、正外倾角的横摆角速度在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 12 The yaw rate responses of different wheel camber angle setting to the same steering wheel angle step input

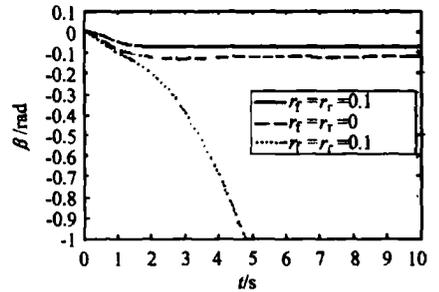


图 13 前车轮正、负外倾/后车轮负、正外倾角的质心侧偏角在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 13 The side slip angle responses of different wheel camber angle setting to the same steering wheel angle step input

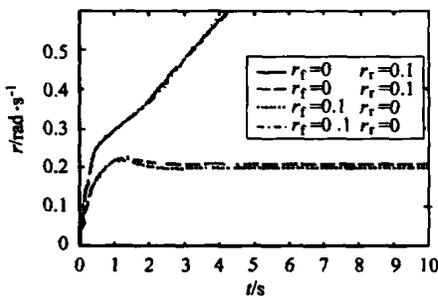


图 14 前车轮无外倾/后车轮正、负外倾角, 后车轮无外倾/前车轮正、负外倾角的横摆角速度在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 14 The yaw rate responses of different wheel camber angle setting to the same steering wheel angle step input

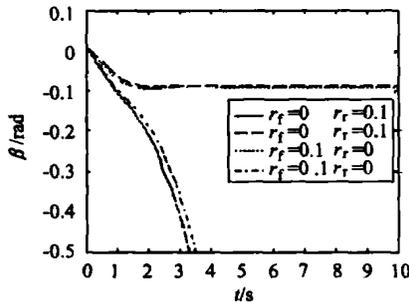


图 15 前车轮无外倾/后车轮正、负外倾角, 后车轮无外倾/前车轮正、负外倾角的质心侧偏角在前轮角阶跃下的响应曲线

Fig 15 The side slip angle responses of different wheel camber angle setting to the same steering wheel angle step input

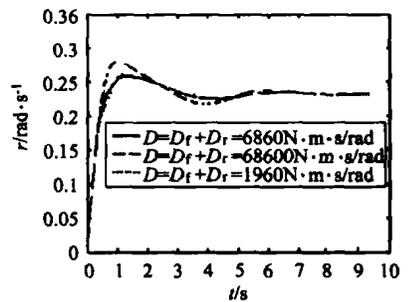


图 16 不同侧倾阻尼系数横摆角速度对前轮角阶跃输入的响应曲线

Fig 16 The yaw rate responses of different roll damping to the same steering wheel angle step input

度与质心侧偏角在前轮角阶跃下的响应曲线。由图可知, 前轮外倾正向变化/后轮外倾无变化, 或前轮外倾无变化/后轮外倾负向变化都以保持较小的质心侧偏角和较好的操纵稳定性。经对比前轮正外倾/后轮负外倾时质心侧偏角最小, 同时对横摆角速度的影响变化不大, 因此这种情况可以使高速转向时汽车保持的恢复横摆力矩最大。在汽车高速转向制动时可以得到同样的仿真结果。

图 16~图 18 是在前轮转角阶跃 3° , 车速 $V=100$ km/h, 车轮外倾角 0° 时, 改变悬挂侧倾阻尼系数对横摆角速度、质心侧偏角和车身侧倾角的影响曲线。由图可知, 相差 35 倍的侧倾阻尼系数对横摆角速度和质心侧偏角的影响却不是很大, 而侧倾角却出现了明显的振荡。因此侧倾阻尼系数的改变对高速转向的操纵性影响不大而对行驶的平顺性有较大影响。

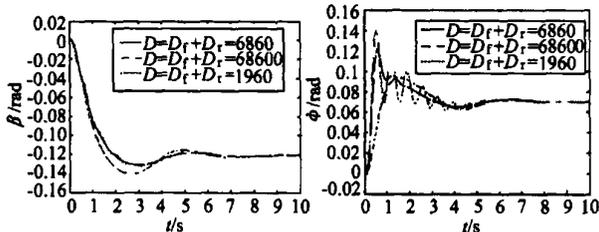


图 17 不同侧倾阻尼系数
质心侧偏角对前轮角
阶跃输入的响应曲线

Fig 17 The slid slip angle
responses of different roll
damping to the same steering
wheel angle step input

图 18 不同侧倾阻尼系数
侧倾角对前轮角阶
跃输入的响应曲线

Fig 18 The roll angle
responses of different roll
damping to the same steering
wheel angle step input

3 结论

通过建立汽车动力学仿真模型, 对汽车在高速转向时的运动特性进行了模拟, 和文献 [4~7] 中的结果相比, 在定性上比较吻合, 取得了较好的效果。由分析可知, 前轮角阶跃输入下车速、侧倾转向系数和车轮外倾角都会对汽车的瞬态响应产生影响。较低的行驶速度, 适当增加侧倾转向系数可以提高汽车的操纵稳定性。前正/后负车轮外倾角可以保证汽车在高速转向/制动时保持一定的恢复横摆力矩, 提高行驶安全性。改变侧倾阻尼系数对高速转向的操纵性影响不大而对行驶的平顺性有较大影响。

参考文献:

- [1] 王德平, 郭孔辉, 宗长富. 车辆动力学稳定性控制的理论研究 [J]. 汽车工程, 2000, 22 (1).
- [2] [德] H-P 威鲁麦特, 孙逢春, 审校. 车辆动力学模拟及其方法 [M]. 北京理工大学出版社, 1998.
- [3] Y. SHIBAHATA. Improvement of Vehicle Maneuverability by Direct Yaw Moment Control [J]. Vehicle System Dynamics, 1993, 22: 465-481.
- [4] 吴思光, 俞明. 车速对汽车瞬态响应的影响 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2000, 28 (6).
- [5] PAUL I. RO. An Accurate Simple Model for Vehicle Handling using Reduced-order Model Techniques [J]. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2001-01-2520.
- [6] SHUICHI TAKANO, MASAO NAGAIB, TETSUO TANIGUCHI, Tadashi Hatanoc. Study on a vehicle dynamics model for improving roll stability [J]. JSAE Review 24, 2003: 149-156.
- [7] H B PACEJKA. The role of tyre dynamic properties [J]. Smart Vehicles. Swets & Zeilinger Publishers, 1995: 55-68.
- [8] 郭孔辉. 汽车操纵稳定性 [M]. 吉林: 人民出版社, 1983.

(上接第 151 页)

控制器符合实际的控制要求, 能够根据上下游的时间占有率、车速及匝道排队长度, 给出适当的入口匝道调节率。

4 结束语

文章所设计的多维可调模糊控制器虽然避开了控制规则的复杂性, 但加权因子的选取主要是根据经验或试验调试确定, 这样势必带有一定的盲目性。因此, 还需要经过实践的检验, 在实践中对加权因子进行寻优, 才会达到更好的控制效果。

参考文献:

- [1] 陈德望, 李灵犀, 刘小明, 等. 城市高速道路交通控制方法研

- 究的回顾与展望 [J]. 信息与控制, 2002, 31 (4): 341-345.
- [2] 丁建梅, 王可崇. 高速公路入口匝道交通模糊控制研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34 (5): 671-674.
- [3] WANG LIXIN. Adaptive fuzzy systems and control [M]. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1994.
- [4] 王亦兵, 韩曾晋, 贺国光. 城市高速公路交通控制综述 [J]. 自动化学报, 1998, 24 (4): 484-496.
- [5] 姜紫峰, 荆便顺, 韩锡令. 高速公路入口匝道控制的仿真研究 [J]. 中国公路学报, 1997, 10 (2): 83-89.
- [6] 徐建闽, 贺敬凯. 高速公路入口匝道模糊控制器的设计 [J]. 控制理论及应用, 2004, 21 (4): 639-642.
- [7] 李士勇. 模糊控制. 神经控制和智能控制论 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [8] 武红幸, 虞鹤松. FUZZY CONTROLLER 算法研究 [J]. 热力发电, 2003 (3): 12-15.
- [9] 谭满春, 徐建闽, 毛宗源. 高速公路入口匝道的模糊逻辑控制 [J]. 华南理工大学学报, 1999, 27 (8): 5-8.