

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.003

驾驶员自适应转向控制行为建模*

沈 岷 谭运生 李舜酩 毕海墨

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 人类驾驶员具有优秀的自适应转向能力,但转向过程涉及到复杂的人车交互,难以运用传统的动力学系统理论对其进行分析。通过对驾驶员转向行为的人-车闭环稳定性研究,发现驾驶员不仅能从汽车的线性动力学特性中学习控制汽车行驶方向的技能,还可结合自身的生理限制形成内部参考模型,用于适应汽车动力学变化。据此形成一种建立驾驶员自适应转向控制的方法。汽车变道仿真结果表明:该方法能有效地实现驾驶员的转向任务,并对汽车动力学参数的变化具有良好的适应性。

关键词: 驾驶员 车辆 自适应 转向控制 建模

中图分类号: U471.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0012-05

Modeling Driver's Adaptive Steering Control Behavior

Shen Huan Tan Yunsheng Li Shunming Bi Haimo

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Human driver exhibited excellent adaptive capability when perform steering. However, it is difficult to analyze this adaptive ability with traditional dynamics system, since the steering course concerns a complex course of driver-vehicle interaction. The investigating of driver-vehicle closed-loop stability was conducted. It can be found that drivers can utilize the linear dynamics characteristic to acquire the skill of controlling the driving direction. Besides, this skill can combine with physical limitations to form an internal reference model, which can be employed by drivers to adapt to the variable dynamics conditions. Based on above results, a adaptive steering control method was proposed. The lane change simulation experimental result indicated that the proposed method not only can realize the drivers' steering task effectively, but also present good adaptability under the altered dynamics conditions.

Key words: Driver Vehicle Adaptivity Steering control Modeling

引言

智能交通系统、智能汽车以及其他主动安全技术被用于改善驾驶安全性^[1~2]。总体上,研究主要针对纵向和横向两类控制任务。纵向控制主要用于将前后汽车之间的相对距离保持在安全范围内;而横向控制则通过调整方向盘来适应道路曲率的变化。驾驶员建模作为这些研究的基础,近年来获得了长足的发展^[3~4]。

早期,McRuer^[5~6]作了大量的工作,将飞行员-飞机闭环系统的研究成果推广到汽车上。虽然没有

考虑驾驶员的前视作用,且系统参数需要靠大量的统计试验来确定,但这些工作为后期的研究奠定了坚实的基础。随后,人们先后提出了几种基于预瞄的驾驶员转向控制模型,比较典型的有预瞄-跟随理论^[7]、最优预瞄模型^[8],以及在此基础上改进或发展出的模型,如自适应侧向预瞄模型^[9]。因为这些模型主要用于评价汽车的操稳性,所以驾驶员被视为产生转向指令的最优控制器来设计。

本文从汽车侧向动力学分析入手并结合驾驶员的生理限制,研究建立真实驾驶员自适应转向行为模型的方法,提出将驾驶员的转向行为看作预瞄校

收稿日期:2012-10-16 修回日期:2012-11-05

*国家自然科学基金资助项目(11202096)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(56XNA12020)

作者简介:沈岷,讲师,博士,主要从事智能与自主系统技术研究,E-mail: huan_shen@nuaa.edu.cn

正与自适应反馈控制2个环节的交互过程,以期获得良好的控制效果。

1 车辆模型

驾驶员通过转动方向盘来控制汽车的行驶方向,继而实现各种转向行为。为分析汽车在转向角输入下的响应特性,建立线性二自由度汽车侧向动力学模型^[10]

$$mv(\dot{\beta} + \dot{\psi}) = c_f \left(\delta - \beta - \frac{l_f}{v} \dot{\psi} \right) + c_r \left(\frac{l_r}{v} \dot{\psi} - \beta \right) \quad (1)$$

$$I_z \ddot{\psi} = c_f \left(\delta - \beta - \frac{l_f}{v} \dot{\psi} \right) l_f - c_r \left(\frac{l_r}{v} \dot{\psi} - \beta \right) l_r \quad (2)$$

式中 m ——整车质量 v ——车速
 I_z ——横摆转动惯量 ψ ——横摆角
 δ ——前轮转角 β ——整车质心侧偏角
 l_f, l_r ——整车质心到前、后轴的距离
 c_f, c_r ——前、后轮的等效侧偏刚度

由式(2)求出 β 和 $\dot{\beta}$ 代入式(1),整理得

$$\ddot{\psi} + k_1 \dot{\psi} + k_0 \psi = l_1 \dot{\delta} + l_0 \delta \quad (3)$$

$$\text{其中 } k_0 = \frac{l_r c_r - l_f c_f}{I_z} + \frac{c_f c_r L^2}{mv^2 I_z} \quad l_0 = \frac{L c_f c_r}{mv I_z}$$

$$k_1 = \frac{l_f^2 c_f + l_r^2 c_r}{v I_z} + \frac{c_f + c_r}{mv} \quad l_1 = \frac{l_f c_f}{I_z}$$

式中 L ——轴距

令 $\gamma = \dot{\psi}$,式(3)则转换为横摆角速度 γ 的二阶非齐次线性微分方程形式,即

$$\ddot{\gamma} + k_1 \dot{\gamma} + k_0 \gamma = l_1 \dot{\delta} + l_0 \delta \quad (4)$$

对式(4)进行拉普拉斯变换,有

$$\frac{\gamma}{\delta} = G_v(s) = \frac{l_1 s + l_0}{s^2 + k_1 s + k_0} \quad (5)$$

式中 s ——拉普拉斯算子

式(5)描述了横摆角速度 γ 与前轮转角 δ 之间的传递关系。

2 自适应转向控制行为建模

2.1 驾驶员前馈预瞄校正

当驾驶员需要变道时,首先是将视线转移到期望轨迹上(图1所示的预瞄点)。此时,视线方向与当前汽车的行驶方向(横摆角)会形成一个预瞄偏差角 θ ,研究表明驾驶员通常利用预瞄偏差角 θ 作为控制转向的线索^[9]。

若从人-车闭环系统的角度分析,转向任务可由图2所示的基本控制结构来描述。图2中 $G_d(s)$ 表示驾驶员根据预瞄偏差角 θ 调整方向盘转角的传递

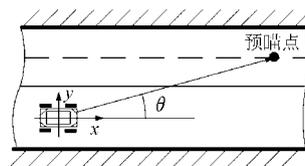


图1 变道示意图

Fig. 1 Diagram of lane change

函数, $e^{-\tau s}$ 为驾驶员神经系统反应延时, $1/(T_h s + 1)$ 表示驾驶员手臂惯性的滞后,其中的 τ 和 T_h 为相应的延时时间常数,而 $G_v(s)$ 则表示式(5)描述的前轮转角 δ 与汽车横摆角 γ 的传递关系。

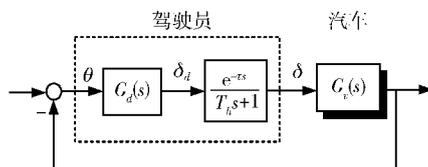


图2 人车闭环系统

Fig. 2 Driver-vehicle closed-loop system

McRuer的试验研究表明:理想的人-车闭环系统,其开环传递特性在交叉频率附近应具有约为 -20 dB/dec 的斜率^[5-6]。为满足这一特性,并考虑神经延时的影响,令人-车闭环系统的开环传递函数等于 $\omega_c e^{-\tau s}/s$,即图2所示的人-车闭环系统的输入、输出关系满足

$$G_d(s) \frac{e^{-\tau s}}{T_h s + 1} G_v(s) = \frac{\omega_c}{s} e^{-\tau s} \quad (6)$$

式中 ω_c ——人-车闭环系统的截止频率

由式(6)可得等式两边都包含神经延时环节 $e^{-\tau s}$ 。根据数学知识,该环节因为被约去而无法显式地考虑神经延时因素。若从人的生理角度理解,人的神经延时由生理限制所决定,即控制的系统总是存在一定的滞后。研究表明:正常驾驶员的反应滞后因人而异,一般在 $0.1 \sim 0.3 \text{ s}$ 之间^[4]。因为延时环节只会改变相位的大小,不会引起幅值发生变化,而系统截止频率 ω_c 决定着系统的频响带宽。如果将系统带宽与延时一并考虑,可以认为延时大小与系统带宽近似地存在反比关系。也就是说:在系统稳定的前提下,增加延时环节将会降低系统带宽。因此,式(6)完全可以通过系统截止频率间接地考虑驾驶员神经滞后的问题。

将式(5)代入式(6),并进行适当变换,求得驾驶员校正环节 $G_d(s)$ 的表达式为

$$G_d(s) = \frac{\omega_c T_h s^3 + (T_h k_1 + 1) s^2 + (T_h k_0 + k_1) s + k_0}{s(l_1 s + l_0)} \quad (7)$$

式(7)虽然无法直观地分析出驾驶员是如何调整方向盘的,但将式(7)右边部分进行泰勒展开,略

去四次以上高阶项,有

$$G_d(s) \approx \omega_c \left\{ \frac{k_1}{l_0} + k_0 \left(\frac{T_h}{l_0} - \frac{l_1}{l_0^2} \right) + \frac{k_0}{l_0 s} + \left[\frac{1}{l_0} + k_0 \left(\frac{l_1^2}{l_0^3} - \frac{l_1 T_h}{l_0^2} \right) + k_1 \left(\frac{T_h}{l_0} - \frac{l_1}{l_0^2} \right) \right] s \right\} \quad (8)$$

令

$$f_0 = \frac{k_1}{l_0} + k_0 \left(\frac{T_h}{l_0} - \frac{l_1}{l_0^2} \right) \quad f_1 = \frac{k_0}{l_0}$$

$$f_2 = \frac{1}{l_0} + k_0 \left(\frac{l_1^2}{l_0^3} - \frac{l_1 T_h}{l_0^2} \right) + k_1 \left(\frac{T_h}{l_0} - \frac{l_1}{l_0^2} \right)$$

可得

$$G_d(s) = \omega_c \left(f_0 + f_1 \frac{1}{s} + f_2 s \right) \quad (9)$$

式(9)右边括号中包含比例、积分和微分3个环节,结合起来相当于PID控制器的结构。 ω_c 由系统的神经延时限制。对驾驶员而言,该式表明:驾驶员在驾驶技能学习中,需要从输入信号、输入信号变化率以及输入信号历史信息中学习调整方向盘;表达式中的各项参数均与汽车动力学特性有关,表明驾驶员需要通过驾驶练习来适应这些参数。

2.2 驾驶员对汽车不确定参数的反馈适应

驾驶员校正环节是在线性汽车模型基础上推导

出来的,而实际汽车的特性参数往往存在一些不确定性,如承载人数不同会导致质量发生变动等。驾驶员通过已掌握的驾驶经验来适应汽车不确定参数变化的影响。令

$$k_0^* = k_0 + \Delta k_0 \quad (10)$$

$$k_1^* = k_1 + \Delta k_1 \quad (11)$$

$$l_0^* = l_0 + \Delta l_0 \quad (12)$$

式中 $\Delta k_0, \Delta k_1, \Delta l_0$ ——被控对象的不确定因素

k_0^*, k_1^*, l_0^* ——被控对象的真实参数

将式(10)~(12)代入式(4),有

$$\ddot{\gamma} + k_1^* \dot{\gamma} + k_0^* \gamma = l_0^* \delta + \Delta k_1 \dot{\gamma} + \Delta k_0 \gamma - \Delta l_0 \delta \quad (13)$$

从式(13)可以看出,如果存在不确定项的干扰,直接使用驾驶员校正环节输出的方向盘转角 δ 不能准确地控制汽车转向。为研究驾驶员对这些不确定因素的自适应性,本文采用前馈与反馈相结合的转向控制结构(图3)。利用驾驶员已经掌握理想汽车运动规律,以及实际驾驶过程中汽车的状态反馈信息估计不确定项,并修正方向盘转角以实现更加准确的转向控制。

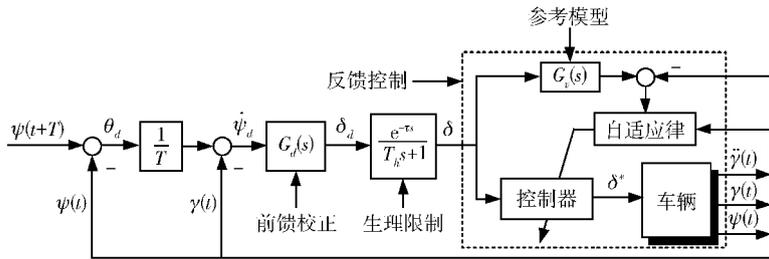


图3 前馈加反馈的转向控制原理框图

Fig. 3 Steering control structure of feedforward and feedback

若驾驶员经过长期的驾驶学习,掌握了 $G_e(s)$ 描述的线性动力学特性,记作参考模型

$$\dot{\gamma}_m + k_1 \dot{\gamma}_m + k_0 \gamma_m = l_0 \delta \quad (14)$$

而实际的传递过程为

$$\dot{\gamma} + k_1^* \dot{\gamma} + k_0^* \gamma = l_0^* \delta \quad (15)$$

定义广义误差 $e = \gamma_m - \gamma$,并将式(14)、(15)相减,得误差方程

$$\ddot{e} + k_1 \dot{e} + k_0 e = -\Delta l_0 \delta + \Delta k_1 \dot{\gamma} + \Delta k_0 \gamma \quad (16)$$

令

$$\dot{l}_0 = -\Delta l_0 \quad \dot{k}_0 = \Delta k_0 \quad \dot{k}_1 = \Delta k_1$$

得

$$\ddot{e} + k_1 \dot{e} + k_0 e = \dot{l}_0 \delta + \dot{k}_1 \dot{\gamma} + \dot{k}_0 \gamma \quad (17)$$

定义不确定参数向量 φ 和广义误差向量 ε 分别为

$$\varphi = (\dot{k}_0, \dot{k}_1, \dot{l}_0) \quad \varepsilon = (e, \dot{e})$$

将式(17)写为矩阵形式

$$\dot{\varepsilon} = A\varepsilon + B + C \quad (18)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_0 & -k_1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{k}_0 \gamma + \dot{k}_1 \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{l}_0 \delta \end{bmatrix}$$

取李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} (\varepsilon^T P \varepsilon + \varphi^T A \varphi) \quad (19)$$

其中

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \quad p_{12} = p_{21}$$

$$A = \text{diag}(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2)$$

式中 P —— 2×2 正定对称矩阵

A ——三维正定对角矩阵

对式(19)求导,有

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \varepsilon^T (PA + A^T P) \varepsilon + \dot{k}_0 [\lambda_0 \dot{k}_0 + (ep_{12} + \dot{e}p_{22}) \gamma] + \dot{k}_1 [\lambda_1 \dot{k}_1 + (ep_{12} + \dot{e}p_{22}) \dot{\gamma}] + \dot{l}_0 [\lambda_2 \dot{l}_0 + (ep_{12} + \dot{e}p_{22}) \delta] \quad (20)$$

取自适应律

$$\dot{k}_0 = -\frac{(ep_{12} + \dot{e}p_{22}) \gamma}{\lambda_0} \quad (21)$$

$$\dot{\tilde{k}}_1 = -\frac{(ep_{12} + \dot{e}p_{22})\dot{\gamma}}{\lambda_1} \quad (22)$$

$$\dot{\tilde{l}}_0 = -\frac{(ep_{12} + \dot{e}p_{22})\delta}{\lambda_2} \quad (23)$$

并将式(21)~(23)代入式(20),有

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\boldsymbol{\varepsilon}^T(\mathbf{PA} + \mathbf{A}^T\mathbf{P})\boldsymbol{\varepsilon} \quad (24)$$

令
$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{2k_0} + \frac{1+k_0}{2k_1} & \frac{1}{2k_0} \\ \frac{1}{2k_0} & \frac{1+k_0}{2k_0k_1} \end{bmatrix} \quad (25)$$

并代入式(24),得

$$\dot{V} = -\frac{1}{2}\boldsymbol{\varepsilon}^T\mathbf{I}\boldsymbol{\varepsilon} \leq 0 \quad (26)$$

式(26)表明:当取控制律式(21)~(23)时,闭环系统满足渐进稳定条件。

结合式(13)和式(21)~(23)可得修正后的前轮转角

$$\delta^* = \frac{l_0\delta + \Delta k_1\dot{\gamma} + \Delta k_0\gamma}{l_0 + \Delta l_0} \quad (27)$$

3 仿真结果与分析

基于 CarSim 仿真平台对驾驶员变道行为进行了数值模拟,该平台是专业的汽车动力学仿真软件,可确保仿真与实车试验结果具有很好的吻合度。驾驶员的前馈校正环节 $G_d(s)$ 按照式(9)确定,其中与汽车有关的参数均取自该仿真软件中包含试验车型名义值。参数为: $m = 1\,715\text{ kg}$, $I_z = 2\,697\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $L = 2.54\text{ m}$, $l_f = 1.07\text{ m}$, $l_r = 1.47\text{ m}$, $v = 120\text{ km/h}$, 转向系统的角传递比为 20,前、后轮的等效侧偏刚度分别为 $c_f = 89\,733\text{ N/rad}$ 和 $c_r = 114\,100\text{ N/rad}$ 。手臂惯性延时根据前人的研究结果,取 $T_h = 0.1\text{ s}$ 。

反馈控制律按照式(21)~(23)确定,相应参数分别取 $\lambda_0 = 35, \lambda_1 = 100, \lambda_2 = 50$ 。

为确定驾驶员的神经滞后时间 τ 和系统截止频率 ω_c ,首先考察人-车系统的频响特性。根据图 3 所示,将驾驶员前馈校正环节、驾驶员神经延时和手臂惯性(图中称生理限制)以及参考模型这 3 个部分串联起来,代入以上确定的各参数,其频响特性可由图 4 给出的伯德图表示。

从图 4 中可以看出,延时环节的引入不会改变系统的增益,但会影响系统的相位。因而,在 τ 分别取不同值时,幅值相互重叠,且都具有 -20 dB/dec 的斜率,表明系统具有良好的瞬态性能,但相位滞后有所区别。当 ω_c 取 2.5 rad/s 时,只要神经延时 τ 处于正常范围内,即 $0.1 \sim 0.3\text{ s}$ 之间,系统都具有充足的稳定裕度,但 ω_c 取 6 rad/s ,神经延时 τ 取 0.3 s 时系统的裕度已经接近稳定边缘。即,针对特定的驾驶员,神经延时 τ 是一定的,那么该驾驶员所能提供的确保系统稳定的最大系统带宽也是一定的。

根据以上分析,并参照文献[6]的试验数据,在仿真环节中 ω_c 取 2.5 rad/s ,神经延时 τ 取 0.15 s ,以确保系统具有足够的带宽及相位稳定裕度。同时,为验证系统反馈环节的效果,将汽车的实际参数在以上名义参数的基础上适当修改。即,在整车质量的基础上增加 5 名乘客的质量,每人按 80 kg 计算,折合总质量增加 400 kg ;并将前、后轮的等效刚度降低 15% 以模拟轮胎的不确定因素。假设道路宽度为 3 m ,变道时刻定在 2 s 处,汽车高速变道时的仿真结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,有无反馈系统都能够完成变道任务,表明本文提出的预瞄校正环节有效地实现对汽车方向的控制。有反馈的情况优于无

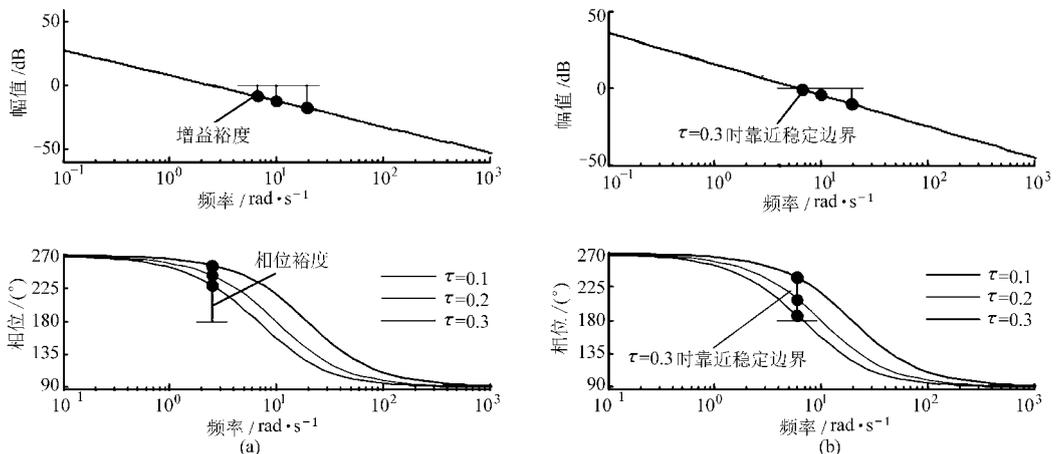


图 4 人-车系统的开环传递特性

Fig. 4 Open-loop transfer characteristics of driver-vehicle system

(a) $\omega_c = 2.5\text{ rad/s}$ (b) $\omega_c = 6\text{ rad/s}$

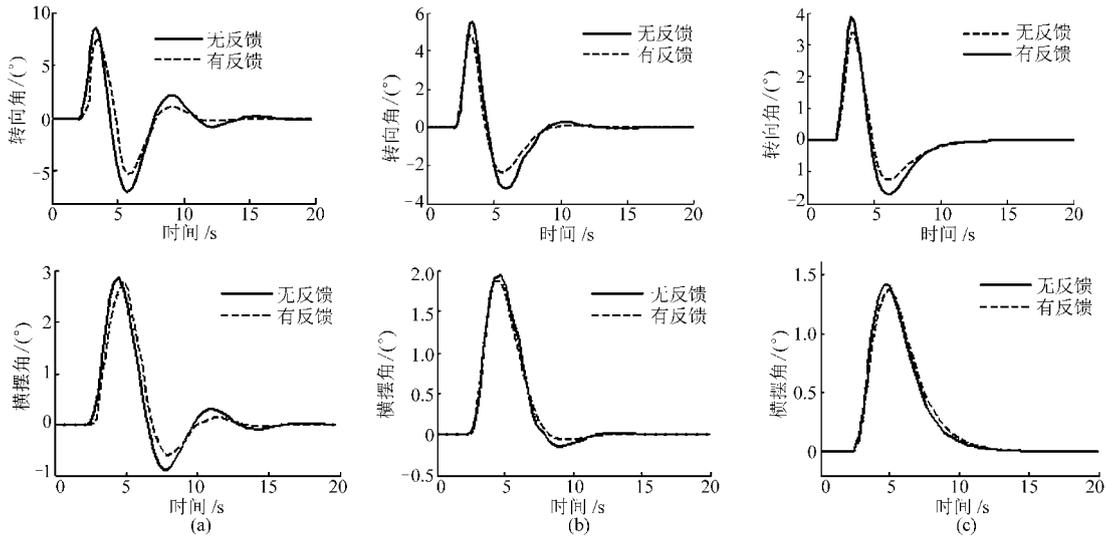


图5 汽车高速变道结果

Fig.5 Results of vehicle high-speed lane change

(a) 预瞄时间 $T=1.2$ s (b) 预瞄时间 $T=1.5$ s (c) 预瞄时间 $T=1.8$ s

反馈的情况,表现为前轮转角减小,震荡明显降低,瞬态性提高,表明驾驶员能够通过反馈来提高对汽车动力学不确定性的适应性。另外,随着预瞄时间的增加,变道过程的平稳性有所提高,这与实际也是吻合的。当驾驶员希望快速变道时,自然会选择小的预瞄时间以快速转向,因而超调的幅度也会增大;而变道急切程度较弱时,则会看得较远一些,由于转向较为缓慢,过渡自然会比较平稳。以上结果表明:本文给出的驾驶员前馈校正环节能有效地用于控制汽车方向,当系统参数发生变化时,驾驶员可通过反馈来修正控制量以改善控制效果。

4 结论

(1) 利用汽车侧向动力学特性和驾驶员自身的生理限制一起构成逆动力学结构,以前馈逆模的方式可有效且稳定地用于控制汽车的行驶方向。

(2) 当汽车参数发生变化或存在其他不确定因素时,利用汽车动力学特性和汽车反馈的状态参数来联合修正逆动力学结构,获得更加准确的方向盘转角,体现出驾驶员的自适应特点。

(3) 研究结果对理解和分析人类驾驶员的自适应转向行为,以及进一步对驾驶员学习转向驾驶技能的研究具有一定的指导和借鉴价值。

参 考 文 献

- 李舜酩,沈垠,毛建国,等. 智能车辆发展及其关键技术展望[J]. 传感器与微系统,2009,28(1):1~4.
Li Shunning, Shen Huan, Mao Jianguo, et al. Intelligent vehicle development and key technologies foresight[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2009,28(1):1~4. (in Chinese)
- 郭景华,胡平,李琳辉,等. 智能车辆横向混合切换控制器设计[J]. 农业机械学报,2012,43(2):1~5.
Guo Jinghua, Hu Ping, Li Linhui, et al. Mixed lateral controller design for intelligent vehicle based on switching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):1~5. (in Chinese)
- Plöchl M, Edelmann J. Driver models in automobile dynamics application[J]. Vehicle System Dynamics,2007,45(7):699~741.
- Macadam C C. Understanding and modeling the human driver[J]. Vehicle System Dynamics,2003,40(1):101~134.
- McRuer D T, Allen R W, Klein R H. New results in driver steering control models[J]. Human Factors,1977,19(4):381~397.
- McRuer D T, Weir D H. Theory of manual vehicular control[J]. Ergonomics,1969,12(4):599~633.
- Guo K, Guan H. Modelling of driver/vehicle directional control system[J]. Vehicle System Dynamics,1993,22(3):141~184.
- MacAdam C C. An optimal preview control for linear systems[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980,102(3):188~190.
- Ungoren A Y, Peng H. An adaptive lateral preview driver model[J]. Vehicle System Dynamics,2005,43(4):245~259.
- 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理[M]. 南京:江苏科学技术出版社,2011.