

DOI : 10.3901/JME.2016.14.106

一类基于轨迹预测的驾驶员方向控制模型^{*}

陈无畏 谈东奎 汪洪波 王家恩 夏 光

(合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009)

摘要：驾驶员方向控制模型在人-车-路闭环系统仿真、驾驶员辅助系统开发和智能汽车控制中具有重要作用。在假设驾驶员具有汽车轨迹预测能力的基础上，提出一类基于轨迹预测的驾驶员方向控制模型。分别假定汽车在将来一段时间内保持恒定的横摆角速度或横摆角加速度，并结合汽车状态参数预测汽车的行驶轨迹，采用期望式、增量式以及期望式与增量式集成的转角决策方法建立5种不同的驾驶员模型。在veDYNA/Simulink联合仿真平台上对各驾驶员模型进行仿真试验，结果表明，增量式驾驶员模型表现出良好的路径跟踪精度和很强的鲁棒性，期望式模型的转向操纵更加平滑，而集成式模型则具备综合优势。在veDYNA/Labview硬件在环实时试验台架上对所提出的驾驶员模型进行模拟试验，所得结论与仿真基本一致。

关键词：轨迹预测；期望式驾驶员模型；增量式驾驶员模型；闭环仿真；硬件在环试验

中图分类号：U461

A Class of Driver Directional Control Model Based on Trajectory Prediction

CHEN Wuwei TAN Dongkui WANG Hongbo WANG Jiaen XIA Guang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract : Driver directional control model is needed in the simulation of driver-vehicle-road closed-loop system, the development of driver assistance systems and the control of intelligent vehicle. Based on the assumption that the driver has the ability to predict the trajectory of the vehicle, a class of driver directional control model based on trajectory prediction is proposed. According to the assumptions that the vehicle keep the yaw rate or yaw acceleration constant in the near future and combining vehicle state parameters, the vehicle motion trajectory is calculated. Five different driver models are formulated according to multiple decision methods of steering angle, consisting of the desired-type, the incremental-type and the integrated-type. Simulation test of the proposed driver models is carried out on the veDYNA/Simulink co-simulation platform, the results show that the incremental-type driver model exhibits good path tracking accuracy and robustness, the desired-type model achieves a better smoothness of steering, and the integrated-type model obtain comprehensive advantages. The proposed driver models are experimentally validated on a veDYNA/Labview-based hardware-in-the-loop real-time test bench, the conclusions are consistent with the simulation conclusions .

Key words : trajectory prediction ; desired-type driver mode ; incremental-type driver model ; closed-loop simulation ; HIL test

0 前言

驾驶员操纵行为及其建模对于人-车-路闭环系统的评价与优化、汽车先进驾驶辅助系统的研究以及智能汽车的控制具有重要意义。近年来，共享控制成为驾驶辅助系统研究的热点，而驾驶员模型在此类系统开发中的作用将更加突出。为了对驾驶员的转向行为进行建模，国内外学者基于不同假设和

理论提出了多种模型^[1-2]。其中，预瞄式驾驶员模型考虑了驾驶员的前视作用，更符合人的驾驶行为且具有更好的鲁棒性，是驾驶员模型研究的核心。MACADAM^[2]提出的最优预瞄控制模型被广泛应用，在此基础上李红志等^[3]又提出预瞄时间自适应的方法。最优预瞄模型被看作是一种特殊的模型预测控制(Model predictive control, MPC)方法^[4]，基于 MPC 的驾驶员模型引起众多学者关注^[5]。尽管该类模型具有良好的性能，但其需要不断地优化目标函数，难以在线实时执行^[6]。SHARP 等^[7]通过对航向角偏差和多个预瞄点处的横向位置偏差进行加权

^{*} 国家自然科学基金资助项目(U1564201, 51375131, 51305118), 20150925 收到初稿, 20160314 收到修改稿

求和来计算转向盘转角,提出一种多点预瞄驾驶员模型。SALVUCCI等^[8]认为驾驶员能够综合考虑汽车前方近点和远点的信息,提出一种两点视觉驾驶员模型。此外,模糊控制^[9]与神经网络^[10]等智能算法也被用于驾驶员转向行为建模。徐进等^[11]提出驾驶员“期望轨迹-期望速度”协同决策模型,用于具有特殊性的赛道驾驶行为模拟。丁海涛等^[12]在“预瞄-跟随”理论的基础上提出单点预瞄的最优预瞄加速度模型,随后通过在方向控制上引入加速度反馈,建立一个具有较强鲁棒性的跟随任意路径的驾驶员模型。最优预瞄加速度模型在估计汽车经过预瞄时间后的侧向位移时,未考虑汽车运动方向的变化,模型的控制性能依赖于驾驶员对汽车特性的掌握程度。而其他建模方法则主要是把驾驶员模型当作控制器来设计,缺乏对人-车系统特性的考虑。

为此,本文在分析驾驶员转向操纵机理的基础上,提出驾驶员具有轨迹预测能力的假设,建立一类基于轨迹预测的单点预瞄驾驶员模型。首先假定汽车在预瞄时间内具有恒定的横摆角速度或横摆角加速度,再根据假设条件和车身状态预测汽车在未来一段时间内的行驶轨迹,进而结合期望路径来决策出理想转向盘转角。在决策转角时,分别采用期望式、增量式以及期望式与增量式集成的计算方式,得到5种基于轨迹预测的驾驶员方向控制模型,并通过仿真和试验分析了各个模型的轨迹跟踪性能。

1 参考车辆模型

为预测汽车在未来一段时间内的运动轨迹,选择二自由度车辆模型作为参考模型,其状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = -\frac{a_1}{mv_x}\beta - \left(1 + \frac{a_2}{mv_x^2}\right)\omega + \frac{2C_f}{mv_x}\delta_f \\ \dot{\omega} = -\frac{a_2}{I_z}\beta - \frac{a_3}{v_x I_z}\omega + \frac{2l_f C_f}{I_z}\delta_f \end{cases} \quad (1)$$

式中, β 为质心侧偏角; ω 为横摆角速度; v_x 为汽车纵向速度; δ_f 为前轮转角; m 为整车质量; I_z 为整车绕铅垂轴转动惯量; C_f, C_r 分别为前、后轮胎等效侧偏刚度; l_f, l_r 为整车质心至前、后轴距离。其中, $a_1 = 2C_f + 2C_r$, $a_2 = 2C_f l_f - 2C_r l_r$, $a_3 = 2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2$ 。若前轮转角保持恒定,汽车的状态将趋于稳态,即 $\dot{\beta} = 0, \dot{\omega} = 0$ 。代入式(1)得到汽车横摆角速度 ω 对转向盘转角 δ_{sw} 的稳态增益为

$$G_\omega = \frac{v_x}{i_{sw} L (1 + K v_x^2)} \quad (2)$$

式中, i_{sw} 为转向盘转角和前轮转角的角传动比; L 为汽车轴距, $L = l_f + l_r$; K 为汽车稳定性因数,其值与汽车参数的关系为

$$K = \frac{m(l_r C_r - l_f C_f)}{2C_r C_f L^2} \quad (3)$$

同样,汽车横摆角速度 β 对 δ_{sw} 的稳态增益为

$$G_\beta = \frac{l_r - \frac{l_f m v_x^2}{2C_r L}}{i_{sw} L (1 + K v_x^2)} \quad (4)$$

易知汽车侧向速度 $v_y = v_x \tan \beta$,汽车侧向加速度 $a_y = \dot{v}_y + v_x \omega$ 。因为稳态时 v_x 不变, $\dot{\beta} = 0$,所以 $\dot{v}_y = 0$,此时有 $a_y = v_x \omega = v_x G_\omega \delta_{sw}$ 。若令 G_{ay} 表示汽车的汽车侧向加速度对 δ_{sw} 的稳态增益,则有 $G_{ay} = v_x G_\omega$ 。可以看出, G_{ay} 实际为汽车向心加速度对 δ_{sw} 的稳态增益。

2 基于轨迹预测的驾驶员模型

2.1 轨迹预测

真实驾驶员都具有一定的汽车轨迹预测能力,其能够感知汽车运动状态并预测汽车在一段时间后的位置。最优预瞄加速度模型在求解最优转角过程中也对汽车的轨迹进行了预测,其假定汽车在未来一段时间内作纵向匀速且侧向匀加速运动,因此其预测的汽车轨迹为二次抛物线。然后根据预瞄时间 t_p 后汽车侧向位移与理想值的关系求解期望的侧向加速度。汽车作纵向匀速且侧向匀加速运动的假设忽略了汽车方向变化的影响,驾驶员应当具有预测更为复杂的汽车轨迹的能力。

假设汽车作平面运动,且汽车的纵向速度在 t_p 内保持不变,则影响汽车行驶轨迹的车身状态主要有纵向速度 v_x 、侧向速度 v_y 、侧向加速度 a_y 、横摆角速度 ω 和横摆角加速度 $\dot{\omega}$ 。为方便描述,定义汽车状态矢量 $x = (v_x, v_y, a_y, \omega, \dot{\omega})^T$ 。若存在某个汽车轨迹预测函数 $P(x)$,能够根据当前时刻的汽车状态 $x(t)$ 计算出汽车经过 t_p 后的侧向位移 $y(t+t_p)$,即有 $y(t+t_p) = P(x(t))$,那么即可通过以下三种方法决策出理想的转向盘转角。

(1) 期望式:如果存在某个汽车状态 x_d ,函数 $P(x)$ 预测该状态下的汽车在 $t+t_p$ 时刻的侧向位移与期望侧向位移 $f(t+t_p)$ 相等,即 $P(x_d) = f(t+t_p)$,则认为 x_d 为期望的汽车状态。

若能求得 x_d , 就可以根据汽车状态参数与转向盘转角之间的增益来确定 δ_{sw}^* 。但 x_d 为矢量且各参数之间相互关联, 往往难以获得所有状态参数的期望值。因此, 可简化为只求解其中一个参数, 并认为其他状态参数从 t 到 $t+t_p$ 保持不变。例如求得期望的横摆角速度为 ω_d , 则理想的转向盘转角为 ω_d/G_ω 。

(2) 增量式: 利用期望式方法求得某个理想的汽车状态之后, 比如期望横摆角速度为 ω_d , 那么当前时刻横摆角速度 ω 与 ω_d 的偏差 $\Delta\omega = \omega_d - \omega$ 。若当前时刻的转向盘转角为 δ_{sw}^0 , 驾驶员此时对汽车施加额外的转向盘转角 $\Delta\delta_{sw}$, 使得该转角增量补偿横摆角速度偏差 $\Delta\omega$, 即有 $\Delta\omega = K_\omega \Delta\delta_{sw}$, K_ω 为反馈系数。进而易得到理想的转向盘转角为

$$\delta_{sw}^* = \delta_{sw}^0 + \Delta\delta_{sw} = \delta_{sw}^0 + \frac{\omega_d - \omega}{K_\omega} \quad (5)$$

也可以直接由 $P(x)$ 求得汽车在 t_p 后的侧向位移 $y(t+t_p)$, 其与理想值 $f(t+t_p)$ 的偏差为 $\Delta y = f(t+t_p) - y(t+t_p)$ 。驾驶员通过对汽车施加额外的转向盘转角以补偿未来时刻的侧向偏差, 即 $\Delta y = K_y \Delta\delta_{sw}$, K_y 为反馈系数。则有

$$\delta_{sw}^* = \delta_{sw}^0 + \frac{f(t+t_p) - y(t+t_p)}{K_y} \quad (6)$$

尽管反馈系数 K_ω 和 K_y 的选择范围较广, 但若考虑汽车处于稳态, 则 $\Delta\omega = G_\omega \Delta\delta_{sw}$, 即 K_ω 可取的名义值为 G_ω 。同样, 稳态时 $\Delta\delta_{sw}$ 产生额外的侧向加速度 $\Delta a_y = G_{ay} \Delta\delta_{sw}$ 来补偿 t_p 后侧向偏差 Δy , 即 $\Delta a_y t_p^2 / 2 = \Delta y$, 则 K_y 可取的名义值为 $G_{ay} t_p^2 / 2$ 。

(3) 期望式与增量式集成: 认为驾驶员决策出的转向角度由两部分组成, 即

$$\delta_{sw}^* = \delta_{sw}^d + \Delta\delta_{sw} \quad (7)$$

式中, δ_{sw}^d 为驾驶员根据驾驶经验决策出的期望转角; $\Delta\delta_{sw}$ 为驾驶员根据汽车实际状态增加的修正转角。 δ_{sw}^d 可由期望式方法计算得到, 它体现了驾驶员对汽车稳态特性的掌握能力, $\Delta\delta_{sw}$ 由增量式方法计算得到, 它体现驾驶员对汽车特性以及驾驶环境改变时的适应能力。

由上述分析可知, 期望式方法认为驾驶员能够根据自身对汽车轨迹的预测及其对汽车响应特性的掌握决策出理想的转向盘转角; 增量式方法认为驾驶员能够根据其对汽车轨迹的预测和汽车状态的感知, 确定出此刻需要修正的额外转角的大小; 而集成方法则是认为驾驶员先决策出理想转角, 再根据

感知的汽车状态校正转角。下文将分别基于恒定横摆角速度和恒定横摆角加速度两个假设来构造汽车轨迹预测函数, 并给出相应的驾驶员方向控制模型。

2.2 恒定横摆角速度假设

假设汽车在未来一段时间内保持不变的横摆角速度 ω , 且由于 v_y 常远小于 v_x , 可认为汽车合速度 $V = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ 的大小保持不变。在该假设条件下, 汽车在未来一段时间内将作匀速圆周运动, 且汽车合速度的方向始终与其轨迹相切。图1描述了所预测的汽车行驶轨迹, 图1中 G 点为汽车当前时刻的质心位置, 而预测汽车经过 t_p 后的质心位置为 C 点, 两点之间的轨迹为半径为 R 的圆弧。 $X-Y$ 为惯性坐标系, M 为汽车轨迹的圆心, θ 为圆弧轨迹所对应的圆心角, P 为目标路径上的预瞄点, 当前时刻汽车的航向角为 ψ 。 X_G-Y_G 为车辆坐标系, Δf 为预瞄点与汽车的侧向偏差, x_{GC} 和 y_{GC} 分别表示汽车在 X_G 轴和 Y_G 轴方向的位移, GB 沿着汽车合速度方向且与汽车轨迹相切于 G 点。

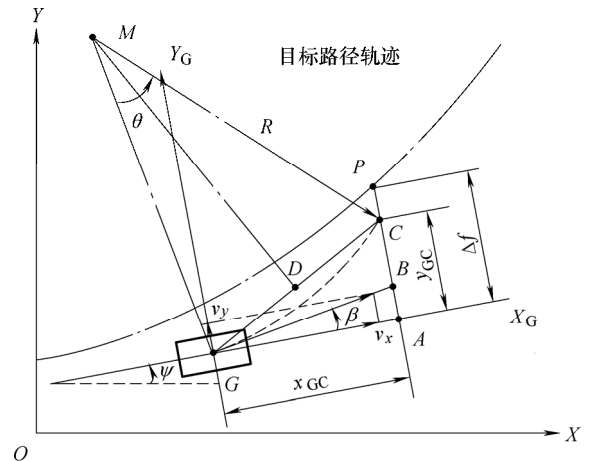


图1 恒定横摆角速度假设下的汽车轨迹预测

由图1可知, $\angle CGA = \angle CGB + \beta$, 而 $\angle CGB$ 为汽车圆弧轨迹的弦切角, 根据弦切角等于其所对应的圆心角的一半的性质, 可得 $\angle CGA = \theta/2 + \beta$ 。那么 C 点的侧向偏差为

$$y_{GC} = \tan\left(\frac{\theta}{2} + \beta\right) x_{GC} \quad (8)$$

首先采用期望式方法来求取当前时刻的理想转向盘转角。经过 t_p 后, 汽车质心的理想位置应该为 P 点, 即图1中 C 点与 P 点重合, $\angle PGA = \angle CGA$, $y_{GC} = \Delta f$ 。根据作匀速圆周运动的假设, 可知圆心角 θ 等于汽车在 t_p 内所转过的角度, 则有 $\theta = \omega t_p$ 。又因为 $v_y \ll v_x$, 则有汽车在 X_G 轴方向的位移 $x_{GC} \approx v_x t_p$ 。若只求解理想的横摆角速度 ω_d , 求解

式(8)可得理想的转向盘转角为

$$\delta_{sw}^* = \frac{\omega_d}{G_\omega} = \frac{2 \left[\arctan \left(\frac{\Delta f}{v_x t_p} \right) - \beta \right]}{t_p G_\omega} \quad (9)$$

如果认为汽车处于稳态转向时满足式(8),则又得到如下关系式

$$\frac{G_\omega \delta_{sw}^* t_p}{2} + G_\beta \delta_{sw}^* = \arctan \left(\frac{\Delta f}{v_x t_p} \right) \quad (10)$$

因此,容易求得理想的转向盘转角为

$$\delta_{sw}^* = \frac{2 \arctan \left(\frac{\Delta f}{v_x t_p} \right)}{G_\omega t_p + 2 G_\beta} \quad (11)$$

在恒定横摆角速度的假设下,运用期望式方法得到式(9)和式(11)两种驾驶员模型。两者的差异在于两者求解的理想汽车状态不同,式(9)是期望横摆角速度,式(11)是期望稳态转向盘转角。再运用增量式方法来计算理想的转向盘转角,由式(8)求得 ω_d 再代入式(7)可得增量式驾驶员方向控制模型为

$$\delta_{sw}^* = \delta_{sw}^0 + \frac{2 \arctan \left(\frac{\Delta f}{v_x t_p} \right) - 2\beta - t_p \omega}{t_p K_\omega} \quad (12)$$

由图1可知,线段AC的长度等于 t_p 后汽车在 Y_G 轴方向的位移 y_{GC} ,线段GC为所预测的圆弧轨迹对应的弦,令 L 表示弦GC的长度,则

$$y_{GC} = L \sin \left(\frac{\theta}{2} + \beta \right) \quad (13)$$

将等腰三角形MCG分成MCD和MDG两个直角三角形,则弦长 L 又可表示为

$$L = 2R \sin \frac{\theta}{2} \quad (14)$$

再根据汽车作匀速圆周运动的假设,有

$$R = \frac{V}{\omega} \quad (15)$$

综合式(13)~(15),可得弦GC的长度为

$$L = \frac{2V}{\omega} \sin \frac{\theta}{2} = \frac{2V t_p}{\omega t_p} \sin \frac{\theta}{2} = V t_p \frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2} \quad (16)$$

根据式(6),运用增量式方法直接对汽车在未来时刻的侧向位移偏差进行补偿所求得理想的转向盘转角转向盘转角为

$$\delta_{sw}^* = \delta_{sw}^0 + \frac{\Delta f - L \sin \left(\frac{\omega t_p}{2} + \beta \right)}{K_y} \quad (17)$$

在计算弦长 L 过程中,由于汽车的横摆角速度 ω 常为零值,易导致式(16)发生运算错误。函数 $\sin x$ 在零点处的泰勒公式展开为

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \cdots + \frac{(-1)^{m-1} x^{2m-1}}{(2m-1)!} + R_{2m}(x) \quad (18)$$

式中, $R_{2m}(x)$ 为拉格朗日余项。由于 $\theta/2$ 通常很小, $\sin(\theta/2)$ 的高阶项和可以忽略不计,保留前两项,将 $\sin(\theta/2) \approx \theta/2 - \theta^3/48$ 代入式(17)可得

$$\delta_{sw}^* = \delta_{sw}^0 + \frac{\Delta f - V t_p \left(1 - \frac{\omega^2 t_p^2}{24} \right) \sin \left(\frac{\omega t_p}{2} + \beta \right)}{K_y} \quad (19)$$

利用式(19)替代式(17)能够避免分母为零所产生的运算错误。若取 $K_\omega = G_\omega$, $K_y = G_{ay} t_p^2 / 2$,并认为 $L \approx v_x t_p$, $\omega t_p / 2 + \beta = \varphi_C \approx \sin(\varphi_C)$, $\Delta f / v_x t_p = \varphi_P \approx \arctan(\varphi_P)$,对式(17)和式(12)的转角增量求解公式作近似化简

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f - L \sin(\varphi_C)}{G_{ay} t_p^2 / 2} &\approx \frac{\Delta f - v_x t_p \varphi_C}{v_x G_\omega t_p^2 / 2} = \\ \frac{2\varphi_P - 2\varphi_C}{t_p G_\omega} &\approx \frac{2 \arctan(\varphi_P) - 2\beta - t_p \omega}{t_p G_\omega} \end{aligned} \quad (20)$$

此时,式(17)和式(12)所求的值是近似相等的。

2.3 恒定横摆角加速度假设

假设汽车在未来一段时间内保持恒定的横摆角加速度 a_ω ,则其轨迹可表示为如下欧拉回旋线

$$\begin{pmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} \int_0^t \cos \left(\frac{a_\omega u^2}{2} \right) du \\ \int_0^t \sin \left(\frac{a_\omega u^2}{2} \right) du \end{pmatrix} \quad (21)$$

式(21)为Fresnel积分,无法直接求出其原函数,其曲线如图2所示。在公路的设计中,回旋线常被用于直线与圆弧或不同半径的圆弧之间的过渡^[13]。由回旋线的性质可知^[14],在 t 时刻汽车的横摆角速度 $\omega = a_\omega t$,汽车行驶轨迹上的切线与 X 轴的夹角 $\phi = a_\omega t^2 / 2$, ϕ 可称作切线角,轨迹的长度 $l = Vt$ 。

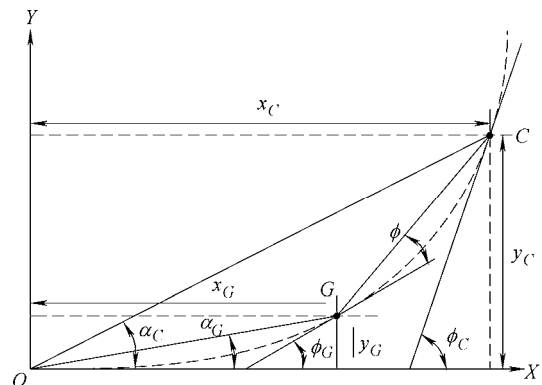


图2 恒定横摆角加速度假设下的汽车轨迹预测

假设汽车当前时刻处于图 2 中的 G 点, C 点为汽车沿回旋线轨迹再行驶 t_p 后的位置。令 l_G 、 l_C 分别表示 OG 和 OC 段轨迹长度, 即有 $l_C - l_G = Vt_C - Vt_G = Vt_p$ 。 ϕ_G 、 ϕ_C 分别是 G 、 C 点的切线角, α_G 、 α_C 为弦偏角。由文献[13]可知, 切线角可近似为弦偏角的三倍, 即 $\phi_C \approx 3\alpha_C$ 、 $\phi_G \approx 3\alpha_G$, 由回旋线的性质可得

$$\phi = \frac{a_\omega l^2}{2V^2} \quad (22)$$

汽车运动轨迹的半径通常较大, 所以其弦偏角 α 很小, 可近似认为 $\tan \alpha \approx \alpha$, 又因为汽车在图 2 中的 X 轴方向上的位移 $x \approx l$, 则有

$$y = x \tan \alpha \approx \frac{\phi l}{3} = \frac{a_\omega l^3}{6V^2} \quad (23)$$

那么弦 GC 与 G 点处切线的夹角 $\Delta\phi$ 近似等于

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \arctan\left(\frac{y_C - y_G}{x_C - x_G}\right) - \phi_G \approx \\ &\frac{\frac{a_\omega l_C^3}{6V^2} - \frac{a_\omega l_G^3}{6V^2}}{l_C - l_G} - \frac{a_\omega l_G^2}{2V^2} = \frac{a_\omega (l_C^2 - 2l_C l_G + l_G^2)}{6V^2} + \\ &\frac{3a_\omega l_C l_G}{6V^2} - \frac{a_\omega l_G^2}{2V^2} = \frac{a_\omega (t_C - t_G)^2}{6} + \\ &\frac{a_\omega (t_C - t_G)t_G}{2} = \frac{a_\omega t_p^2}{6} + \frac{\omega_G t_p}{2} \end{aligned} \quad (24)$$

经过上述推导, 得到 $\Delta\phi$ 与 G 点处汽车的横摆角速度、预瞄时间和横摆角加速度的近似关系式, 当汽车的行驶半径较大时, 该关系式具有较好的近似精度。若在车辆坐标系下考察 C 点相对汽车质心的纵向和横向位移, 可得到与式(8)类似的关系式

$$y_{GC} = \tan(\Delta\phi + \beta)x_{GC} \quad (25)$$

驾驶员期望汽车在预瞄时间后行驶到预瞄点, 即 $y_{GC} = \Delta f$, 同样取 $x_{GC} \approx v_x t_p$, 则有期望的横摆角加速度 a_ω^* 为

$$a_\omega^* = \frac{6 \arctan\left(\frac{\Delta f}{v_x t_p}\right) - 6\beta - 3\omega_G t_p}{t_p^2} \quad (26)$$

由于汽车在稳态时, 其横摆角加速度为零, 因此知道汽车的期望横摆角加速度, 无法直接运用其稳态增益关系求解期望转向盘转角。但是, 期望横摆角加速度 a_ω^* 的积分为期望横摆角速度 ω_d , 即 $\omega_d = \int a_\omega^*$, 所以可根据 a_ω^* 的积分和横摆角速度稳态增益 G_ω 分解出期望转向盘转角。当 $a_\omega^* = 0$ 时, 转向

盘转角趋于恒定值, 汽车趋于稳定状态。因此, 理想的转向盘转角

$$\delta_{sw}^* = \frac{1}{G_\omega} \int \frac{6 \arctan\left(\frac{\Delta f}{v_x t_p}\right) - 6\beta - 3\omega_G t_p}{t_p^2} dt_p \quad (27)$$

2.4 驾驶员方向控制模型

综合上述计算结果, 考虑实际驾驶员的神经反应滞后和动作反应滞后, 并认为驾驶员具有一定的微分校正能力, 得到 5 种不同的驾驶员转向模型, 分别如图 3a~3e 的框图所示。其中, t_d 为神经反应滞后时间, t_h 为动作反应滞后时间, t_c 为微分校正系数。为描述方便, 分别命名为 DMA、DMb、DMc、DMd 和 DMe。其中 DMA、DMb 和 DMc 为期望式驾驶员模型, 分别对应式(11)、(9)和(27), DMd 为增量式驾驶员模型, 对应式(12), 而 DMe 为 DMb 与 DMd 的集成所得。

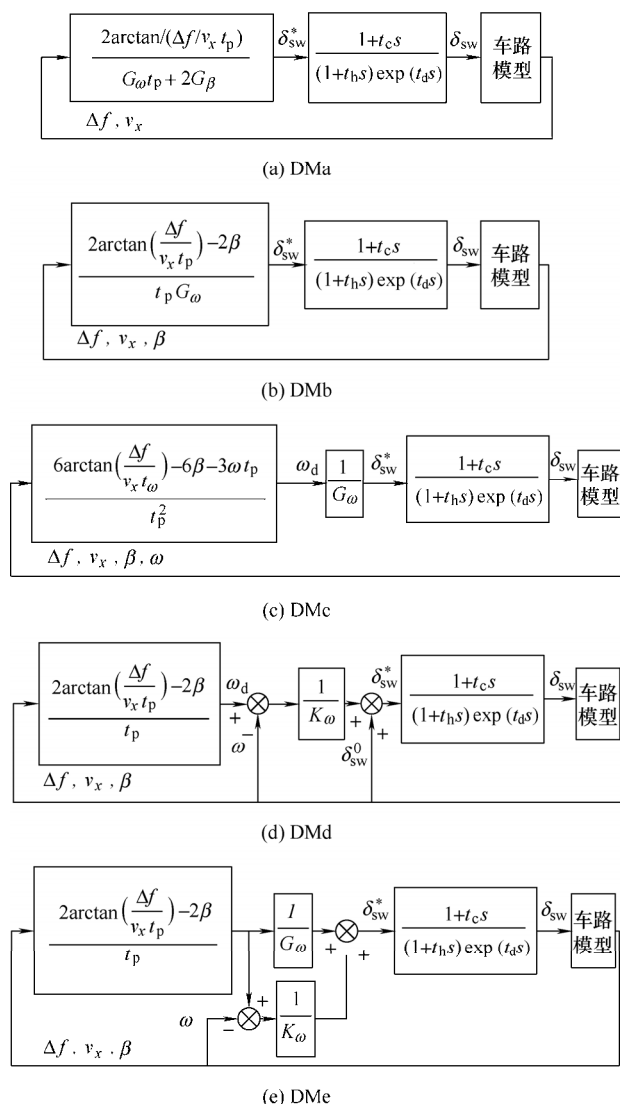


图 3 基于轨迹预测的 5 种驾驶员方向控制模型

3 仿真及结果分析

联合 veDYNA 与 Simulink 搭建车辆模型、虚拟道路以及 5 种驾驶员方向控制模型。驾驶员模型需要获得预瞄点在车辆坐标系下的侧向偏差,但 veDYNA 只输出指定点到道路中心线的距离,因此需要进行转换。设汽车质心的坐标为 (x_G, y_G) , 航向角为 ψ , 预瞄距离 $x_{la} = v_x t_p$ 。那么测量点 (x_C, y_C) 的坐标为 $x_C = x_G + x_{la} \cos \psi$, $y_C = y_G + x_{la} \sin \psi$ 。若测量点到目标路径的距离为 d_{la} , 且测得汽车相对预瞄处路径的航向角偏差为 $\Delta \psi_{la}$, 则驾驶员模型需要的偏差 $\Delta f = d_{la} / \cos \Delta \psi_{la}$, 如图 4 所示。

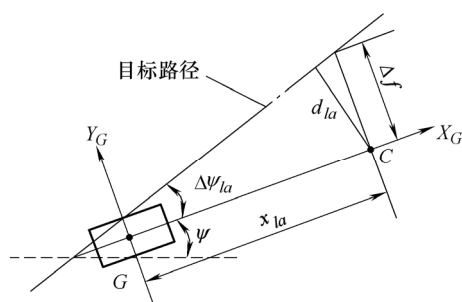


图 4 汽车坐标系下侧向位置偏差计算示意图

仿真所用的车辆模型参数如表 1 所示。以车速 v_x 为自变量, 分别根据式(2)和式(4)计算驾驶员模型参数 G_ω 和 G_β , 并取参数 $K_\omega = G_\omega$ 。当汽车处于非线性工况时, 轮胎侧向力饱和导致轮胎等效侧偏刚度降低, 此时参数 G_ω 和 G_β 将与其真实值不符, 因此分析驾驶员模型在非线性工况下的控制效果可用来检验模型的鲁棒性。为详细评估本文提出的各个驾驶员模型的路径跟踪性能, 进行如下 5 种不同工况的仿真计算。为方便对比, 所有驾驶员模型中的微分参数 $t_c = 0$ s, 预瞄时间 $t_p = 1$ s。

表 1 车辆模型参数表

参数	数值
整车质量 m/kg	1 296
整车绕铅垂轴转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 750
质心到前轴的距离 l_f/m	1.01
质心到后轴的距离 l_r/m	1.56
前轮胎侧偏刚度 $C_{f1}/(\text{N}/\text{rad})$	35 000
后轮胎侧偏刚度 $C_{r1}/(\text{N}/\text{rad})$	42 000
前轮到转向柱的角传动比 i_{sw}	16.5

3.1 直线路径跟踪

汽车以 60 km/h 的车速在直道上行驶, 路面附着系数 $\mu=0.8$, 在 16 s 后驾驶员操纵汽车左移 1 m。仿真工况类似单移线试验, 所得结果如图 5 所示。

该工况下, 5 种模型都能稳定地跟踪目标路径。其中, 模型 DMa、DMb、DMd 和 DMe 的轨迹跟踪误差相近, 汽车横向位置的超调量较小, 航向角平稳。而模型 DMc 的轨迹超调量较大, 相比其他模型其转向盘转角具有较为明显的时滞性。相反, 模型 DMd 的转角振荡频率较高, 表现为一个高度紧张的驾驶员。DMe 则融合了 DMd 与 DMb 两者的特性。

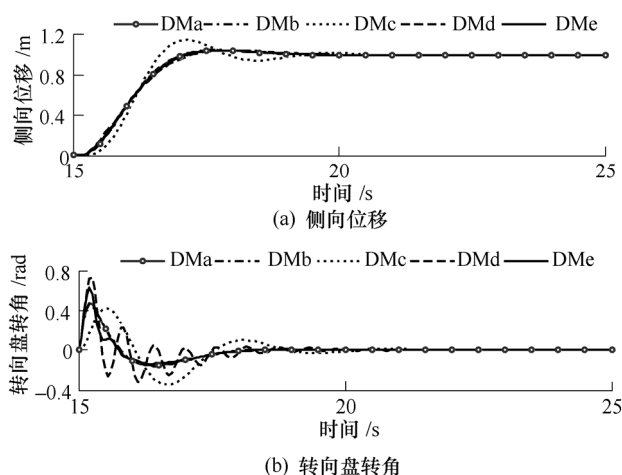


图 5 跟踪直线路径的仿真结果

3.2 圆形路径跟踪

汽车分别以 60 km/h、90 km/h 和 120 km/h 的车速跟踪半径为 180 m 的圆形路径, $\mu=0.8$, 仿真结果如图 6 所示。汽车侧向加速度等于 v_x^2 / R , 因此 a_y 大于 0.4g 的临界车速约为 95 km/h。车速为 60 km/h 时, 汽车状态处于线性区域, 所以模型均能稳定地跟踪圆形轨迹, 且稳态跟踪误差在 ± 0.01 m 之间。当车速为 90 km/h 时, 汽车状态接近非线性区域, 模型 DMa 和 DMb 的侧向偏差增大, 且 DMa 的偏差更大。这是由于轮胎侧向力接近饱和导致 G_ω 和 G_β 与实际值失配, 且 G_β 相比 G_ω 受其影响更大。模型 DMc 的时滞性致使其轨迹收敛缓慢, 模型 DMd 仍然保持很小的侧向偏差。当车速为 120 km/h 时, 汽车完全处于非线性区域, DMa 和 DMb 的侧向偏差更大, 超出 1 m, DMc 的轨迹已经发散, DMd 继续保持着较高的跟踪精度, 偏差小于 0.1 m。可见在极限工况下, DMd 优势明显, 鲁棒性较强。模型 DMe 的侧向偏差始终处于 DMb 和 DMd 之间。

3.3 回旋线路径跟踪

汽车以 60 km/h 的车速跟踪道路曲率呈连续变化的回旋线路径, $\mu=0.8$ 。道路曲率先从 0 增加到 0.012 5, 再减小到 0。汽车跟踪回旋线路径时, 驾驶员需要连续的转动转向盘。由图 7 可知, 所有模型的侧向偏差都较小。尽管模型 DMc 相比其他模

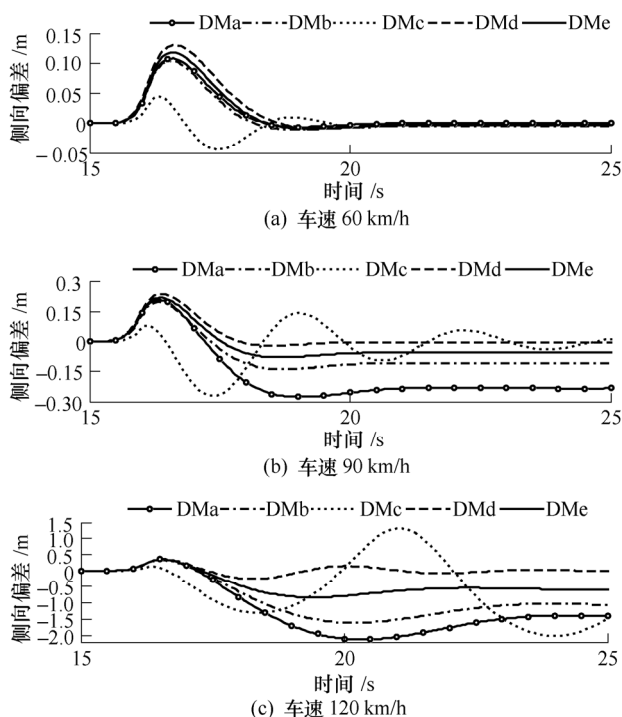


图 6 跟踪圆形路径的仿真结果

型具有时滞特性, 但该模型在跟踪曲率连续且缓慢变化的回旋线路径时却具有最好的跟踪精度。而模型 DMd 过强的转角修正能力却导致其偏差最大, 这是因为跟踪该回旋线路径的理想转向盘转角应该是缓慢且连续变化的。

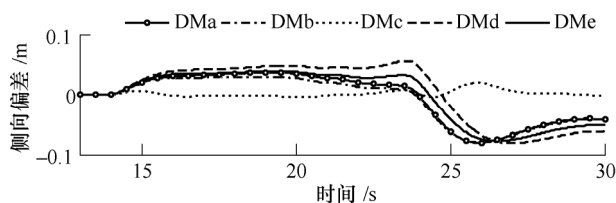


图 7 跟踪回旋线路径的侧向偏差仿真结果

3.4 路面附着系数的影响

汽车以 60 km/h 的车速跟踪双移线路径, 参考 ISO3888-1:1999 双移线试验设置路径尺寸, μ 分别取 0.2、0.4 和 0.8 时的仿真结果如图 8 所示。 $\mu=0.8$ 时所有模型均能有效跟踪双移线轨迹, DMd 的侧向偏差方差最大, DMc 的最小。 $\mu=0.4$ 时各模型的侧向偏差与 $\mu=0.8$ 时类似, 但其中 DMc 的跟踪精度开始变差。 $\mu=0.2$ 时汽车状态容易进入非线性区域, 从而降低模型 DMa 和 DMb 的轨迹跟踪性能, 造成模型 DMc 的跟踪轨迹发散。而此时模型 DMd 的跟踪精度与高附着情况下差别很小, 该模型可以克服轮胎饱和和产生的增益失配问题。集成式模型 DMe 的控制效果介于 DMb 和 DMd 之间。

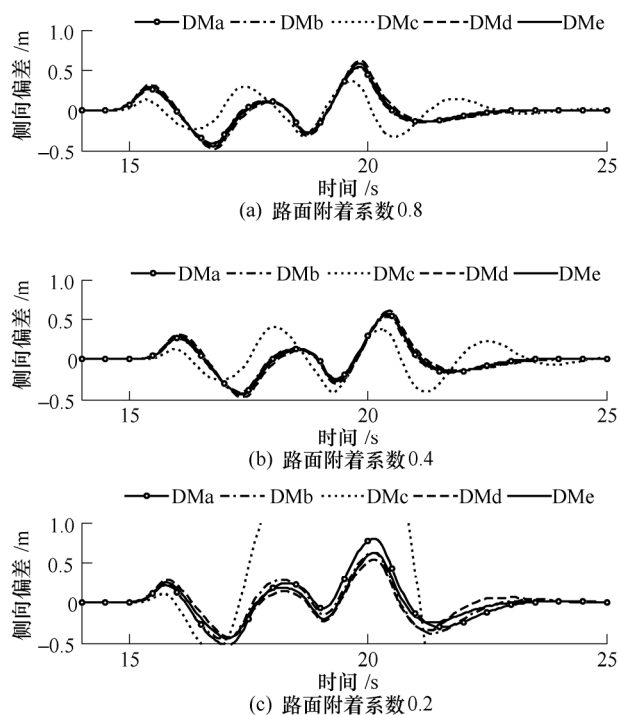


图 8 不同附着系数下对称线路径跟踪仿真结果

3.5 时滞的影响

汽车以 60 km/h 的车速跟踪双移线路径, $\mu=0.8$ 。分别测试一阶惯性时滞 t_h 和纯时滞 t_d 对各模型的影响, t_h 和 t_d 皆分别取 0.2 s、0.4 s, 仿真结果见图 9。对于 DMc, 较大的 t_d 和 t_h 都会使得其跟踪结果变差以至于发散。对于 DMa 和 DMb, t_d 和 t_h 越大它们的跟踪精度亦越差, 且纯时滞对其影响更大。在 $t_d=0.4$ s 时, DMa 和 DMb 的偏差波动明显, 难以快速收敛至零。模型 DMd 对 t_h 具有较强的抑制能力, 且 t_h 越大其控制效果越凸显优势。但 DMd 无法克服纯时滞的影响, $t_d=0.4$ s 时该模型的跟踪轨迹出现发散, 这可能是由于较大的 t_d 导致模型 DMd 产生过大的转向角。而集成式模型 DMe 在各工况下均有较好的控制效果, 且在 $t_d=0.4$ s 时其轨迹跟踪精度远高于其他模型。其原因可能为纯时滞致使模型 DMb 转向不足, DMd 转向过度, 而 DMe 的转角则是 DMb 和 DMd 相互弥补的结果。

由仿真结果可知, 期望式驾驶员模型转向操纵更为平滑, 其中 DMc 更适合跟踪变曲率路径, 但该类模型的控制效果受模型参数和时滞的影响较大。增量式驾驶员模型 DMd 的鲁棒性更强, 在极限工况下依然保持良好的路径跟踪精度, 但其转角波动明显, 无法克服较大纯时滞的影响。集成式模型 DMe 则具有综合优势, 同时弥补前两者劣势, 在纯时滞较大时控制效果优势显著。值得注意的是, 实际驾驶员对汽车状态、车-路偏差、汽车侧向稳态增益的感知具有模糊性, 但仿真中这些参数是精确

的,所以大部分真实驾驶员难以具有如此高的驾驶技能。如果需要模拟更为真实的驾驶员,可以通过调整模型参数或增加状态反馈的不确定性来获得。

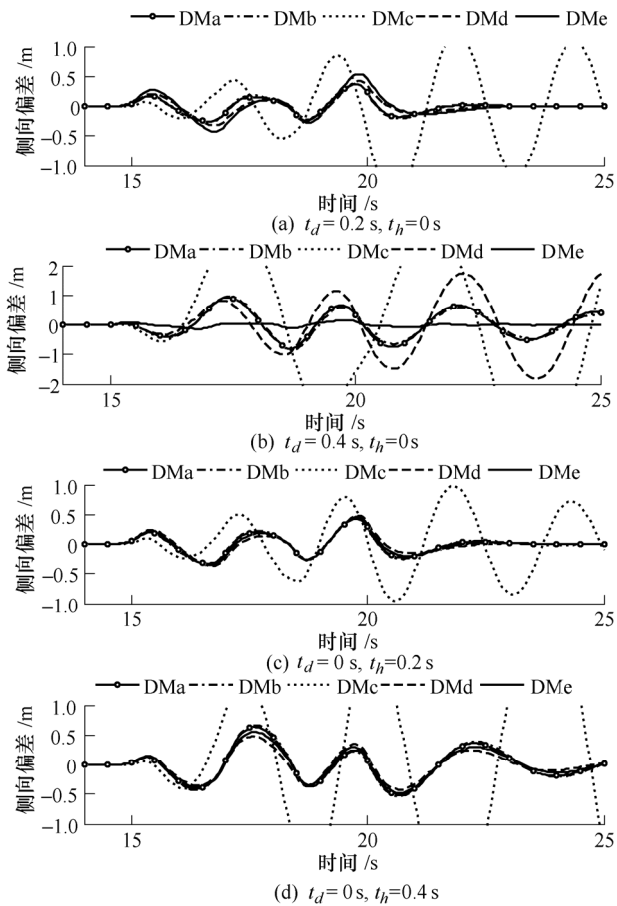


图9 不同时滞下双移线路径跟踪仿真结果

4 硬件在环试验

为了更加准确地分析驾驶员模型的特性,搭建基于 veDYNA 和 LabVIEW 的硬件在环试验台架,利用电动助力转向系统(Electric power steering, EPS)中的电动机来模拟驾驶员的转向行为。由于驾驶员模型输出转角,而电动机输出转矩,为此在模型后面串联神经肌肉系统(Neuromuscular system, NMS),其结构、参数及取值详见文献[15]。根据汽车参数在 veDYNA 中分别建立整车模型和驾驶员模型,设计虚拟道路,并在计算机主机中实时运行。信号的采集与传输程序在 LabVIEW 中设计,由 PXI 目标机执行。目标机利用接口系统采集转向盘转角信号,并将其传送给汽车和驾驶员模型,同时也将 NMS 的输出转矩发送给自主开发的电动机控制器,以模拟驾驶员的转向操纵行为。为了产生汽车转向路感,利用伺服电动机来跟踪车辆模型中的转向阻

力矩。整个平台的试验设备主要有:转向盘转角传感器、带 EPS 的转向管柱、伺服电动机、EPS 电动机驱动及控制电路板、PXI 目标机和计算机主机等,具体如图 10 所示。

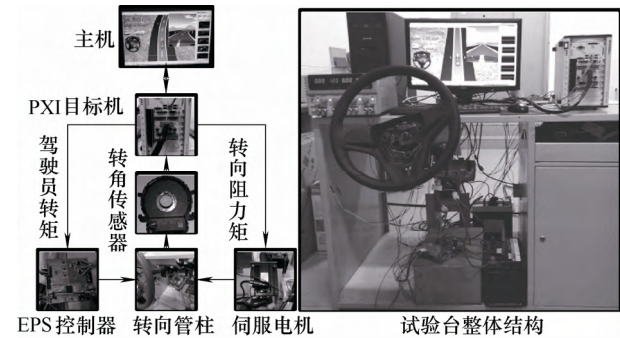


图10 驾驶员模拟硬件在环试验平台

试验工况:虚拟道路由直线、圆弧和回旋线组合而成, $\mu=0.8$,其形状如图 11 所示。该路径最小半径为 60 m,为确保汽车能够通过该复杂道路,且在最弯处让汽车的轮胎进入非线性区域,设计试验车速为 70 km/h。汽车模型的转角为实际转向盘转角,硬件在环使得转角具有一定时滞。

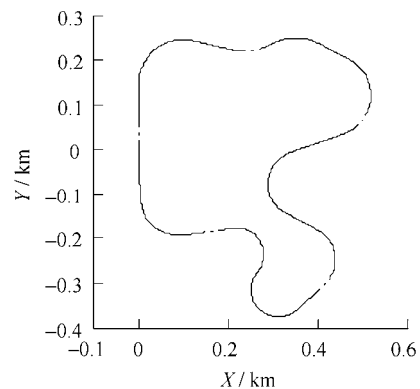


图11 目标路径形状

道路曲率以及侧向偏差、转向盘转角和汽车侧向加速度的试验结果如图 12 所示。在 85 ~ 110 s 时,汽车的最大侧向加速度超过了 0.6g,汽车状态已进入明显的非线性区域,各个模型的路径跟随误差均不同程度的增大。其中,模型 DMA 的瞬时最大侧向偏差为 1.26 m;DMb 略微优于 DMA,最大侧向偏差为 1.16 m;DMc 的转角波动明显,最大侧向偏差超出 1.5 m;模型 DMd 表现出很强的鲁棒性,最大侧向偏差仅为 0.27 m,而 DMe 的最大误差为 0.95 m,介于 DMb 和 DMd 之间,但是其转角较 DMd 更为平滑。可以看出,本文提出的各个驾驶员模型都具有较好的路径跟踪性能,硬件在环试验中各模型表现出的特性同仿真中的基本一致。

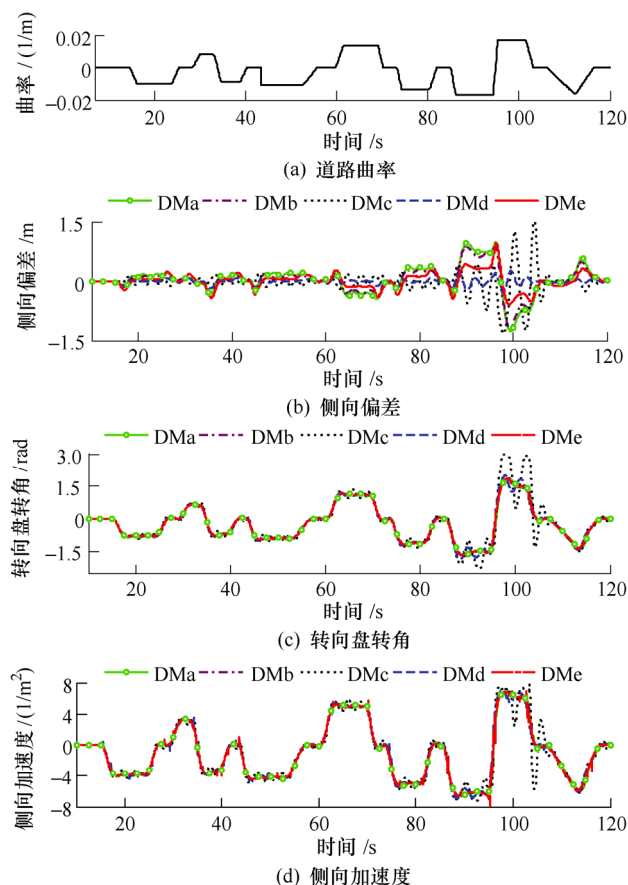


图 12 硬件在环试验结果

5 结论

(1) 本文首先提出驾驶员具有汽车轨迹预测能力的假设, 并认为驾驶员可通过预测汽车未来行驶轨迹来决策出理想转向盘转角, 提出期望式、增量式以及期望式与增量式集成的三种转角决策方法。

(2) 分别假设汽车在未来一段时间保持恒定横摆角速度或恒定横摆角加速度, 根据汽车车身状态参数并结合圆弧和回旋线的几何性质推导汽车在未来时刻的行驶轨迹计算公式。在此基础上, 提出了 5 种驾驶员方向控制模型。

(3) 通过多工况仿真和硬件在环试验对 5 种模型进行对比分析。结果表明, 期望式模型的转向操纵较为平滑, 增量式模型表现出较强的鲁棒性, 而集成式模型则具备综合优势。所设计的驾驶员模型可应用于人-车-路闭环系统仿真与智能汽车控制。

参 考 文 献

- [1] PLÖCHL M, EDELMANN J. Driver models in automobile dynamics application[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(7-8): 699-741.
- [2] MACADAM C C. Understanding and modeling the human driver[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(1-3): 101-134.
- [3] 李红志, 李亮, 宋健, 等. 预瞄时间自适应的最优预瞄驾驶员模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 106-111. LI Hongzhi, LI Liang, SONG Jian, et al. Optimal preview control driver model with adaptive preview time[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 106-111.
- [4] COLE D J, PICK A J, ODHAMS A M C. Predictive and linear quadratic methods for potential application to modelling driver steering control[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(3): 259-284.
- [5] ITO Y, KUBOTA F, KURAHASHI T. Driver steering model based on globally optimal model predictive control[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2014: 1720-1725.
- [6] ZAFEIROPOULOS S, TSOTRAS P. Design of a lane-tracking driver steering assist system and its interaction with a two-point visual driver model[C]//IEEE American Control Conference, June 4-6, 2014, Portland, Oregon, USA, 2014: 3911-3917.
- [7] SHARP R, CASANOVA D, SYMONDS P. A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance results[J]. Vehicle System Dynamics, 2000, 33(5): 289-326.
- [8] SALVUCCI D D, ROB G. A two-point visual control model of steering[J]. Perception, 2004, 33(10): 1233-1248.
- [9] NASIR M, LIM C P, NAHAVANDI S, et al. Inclusion of environmental effects in steering behaviour modelling using fuzzy logic[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(4): 1901-1914.
- [10] LIN Y, TANG P, ZHANG W J, et al. Artificial neural network modelling of driver handling behaviour in a drive-vehicle-environment[J]. International Journal of Vehicle Design, 2005, 37(1): 24-45.
- [11] 徐进, 赵军, 杨奎, 等. 适于复杂赛道的驾驶员“期望轨迹-期望速度”协同决策模型[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(6): 619-630. XU Jin, ZHAO Jun, YANG Kui, et al. Collaborative decision model of driver “desired trajectory-desired speed” applying to complex circuit[J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, 44(6): 619-630.
- [12] 丁海涛, 郭孔辉, 李飞, 等. 基于加速度反馈的任意道

- 路和车速跟随控制驾驶员模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 116-120.
- DING Haitao, GUO Konghui, LI Fei, et al. Arbitrary path and speed following driver model based on vehicle acceleration feedback[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 116-120.
- [13] MEYER C F, GIBSON D W. Route surveying and design[M]. New York: Harper & Row, 1980.
- [14] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M]. New York: Springer, 2011.
- [15] 谈东奎, 陈无畏, 王家恩, 等. 基于人机共享和分层控制的车道偏离辅助系统[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 98-110.
- TAN Dongkui, CHEN Wuwei, WANG Jiaen, et al. Human-machine sharing and hierarchical control based lane departure assistance system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 98-110.
-
- 作者简介: 陈无畏, 男, 1951 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制, 发表论文 200 余篇。
- E-mail: hfgdcjs@126.com
- 谈东奎(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为汽车主动安全技术。
- E-mail: tandongkui@126.com