

文章编号: 1000-582X(2011)09-001-08

遗传算法优化的方向与速度综合控制驾驶员模型

邓 涛, 孙冬野, 胡丰宾, 罗 勇

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 针对当前驾驶员模型无法体现驾驶操纵熟练程度的缺点, 利用遗传算法的自动寻优能力, 总结驾驶员自学习与驾驶经验特点, 遵循行驶误差最小与体力负担最小原则, 对模糊 PID 比例因子和量化因子进行离线优化设计, 以此模拟驾驶员从生手到熟练驾驶培训过程。构建包括遗传算法优化的方向模糊 PID 与速度模糊综合控制驾驶员模型以及整车行驶动力学模型在内的人-车闭环系统仿真模型, 在纵向速度单向变化、侧向双移线工况与大曲率试验道路典型工况下进行仿真分析。结果表明: 基于遗传算法优化的方向模糊 PID 与速度模糊综合控制模型可以很好地描述驾驶员在纵向加减速操纵特性以及侧向预期轨迹跟随转向驾驶特性, 相比于传统 PID 与模糊 PID 控制, 具有更好的纵向加减速操纵特性与侧向预期轨迹跟随性能。

关键词: 驾驶员; 方向控制; 速度控制; 遗传算法; 模糊 PID

中图分类号: U461.6

文献标志码: A

Direction and speed integrated control driver model optimized by genetic algorithms

DENG Tao, SUN Dong-ye, HU Feng-bin, LUO Yong

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To overcome the shortcoming that driving manipulation qualification can't be embodied by current driver models, the automatic optimization ability of genetic algorithms is adopted to summarize drivers' self-learning features and driving experience, off-line optimize fuzzy PID scale factor and quantization factor by following running error minimum and physical ability-to-pay minimum principle, and simulate the driving training processes from a green hand to a skilled driver. Then a driver-vehicle closed loop system simulation model including direction fuzzy PID optimized by genetic algorithms, speed fuzzy integrated control driver model and entire vehicle riding dynamics model is established, which simulates and analyzes typical modes, such as longitudinal speed one-way variation, lateral double lane and big curvature test road. The simulation results show that the model can well describe drivers' longitudinal acceleration/deceleration manipulating characteristics and lateral desired track following steering riding characteristics. And when it's compared with traditional PID and fuzzy PID, it has better longitudinal acceleration/deceleration manipulating characteristics and lateral desired track following steering riding characteristics.

Key words: driver; direction control; speed control; genetic algorithms; fuzzy PID

收稿日期: 2011-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475066); 重庆市科委攻关项目(2010AC6049)

作者简介: 邓涛(1982-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事车辆动力传动及其综合控制与混合动力电动汽车控制研究。

孙冬野(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail)dysun@cqu.edu.cn。

驾驶员模型包括方向控制、速度控制以及方向与速度综合控制模型。一个能充分正确反映驾驶操纵行为特性的有效且精确的驾驶员模型,对于人-车-路闭环系统操纵稳定性、车辆主动安全性控制以及智能化行驶研究与评价等方面起着至关重要的作用。驾驶员模型研究始于 20 世纪 50 年代,国际上方向控制驾驶员模型的发展主要分为 3 个阶段:补偿跟踪模型、预瞄跟踪模型、智能控制模型。速度控制模型通常用于巡航控制研究中,包括 Yoshimoto 提出的速度控制模型, WadeAllen 等提出的速度控制模型以及 Seto 和 Murakami 等利用 PD 控制方法建立的基于相对距离的速度控制模型^[1-3]。而方向与速度综合控制驾驶员模型的研究主要包括 Yoshimoto 建立的自决策速度的驾驶员预瞄跟随控制模型^[4], Kageyama 等提出的模糊控制驾驶员模型^[5]以及基于神经网络驾驶员模型^[6]。同时一些较为成熟的驾驶员模型已链接到商业化汽车动力学仿真软件中,如 CarSim 中的 Driver Model^[7]、CarMaker 中的 IPG-Driver^[8]、Adams/CAR 中的 Smart Driver^[9]、VI-CarRealTime 中的 VI-Driver^[9]以及 veDYNA 中的 Driver Model^[10-12]。

国内对驾驶员模型的研究主要集中于吉林大学郭孔辉和管欣等人逐步提出的跟随-预瞄系统、最优曲率驾驶员模型、预瞄优化方向控制模型、预瞄优化神经网络驾驶员模型(POANN)、简化的预瞄优化神经网络驾驶员模型(POSANN)、误差分析法模型(EEA)、侧向与纵向综合控制的神经网络驾驶员模型、车速变化时任意跟随路径下的 POSANN 模型以及最速控制模型等^[13]。

当前国内外建立的基于传递函数补偿预瞄、PID 控制、模糊控制、人工神经网络,或是基于商业化软件二次开发的驾驶员模型,都只是尽量反映驾驶行为特性,而对驾驶操纵熟练程度缺乏自适应能力,针对这些控制方法的缺点,笔者提出了基于遗传算法优化的方向与速度综合控制驾驶员模型。利用遗传算法的自动寻优能力,总结驾驶员自学习与驾驶经验特点,遵循行驶误差最小以及体力负担最小原则,对模糊 PID 比例因子和量化因子进行离线调整优化设计,以此模拟真实驾驶员从生手通过驾驶培训而成为熟练驾驶员的整个训练过程,从而体现出驾驶员模型对驾驶操纵熟练程度的自适应能力。并在建立人-车闭环系统仿真模型的基础上,对基于遗传算法优化的驾驶员模型与传统驾驶

员模型的控制效果进行了典型道路工况仿真对比分析。

1 基于遗传算法优化的驾驶员方向模糊 PID 控制

驾驶员观测前方道路时,是以自身即汽车的前进方向作为基准建立一个相对坐标系,在相对坐标中来判断前方的道路与汽车位置的关系,从而决定对汽车的道路输入。驾驶员依据道路信息,经过预瞄,判断出预瞄点的位置,然后依据整车行驶动力学模型计算出汽车即时状态(侧向加速度、纵向加速度、侧向速度、纵向速度、侧向位移与纵向位移)及其前视时间,判断出汽车期望纵向加速度与侧向加速度。经过加速度反馈的遗传模糊 PID 控制的驾驶员校正环节,判断出期望最优曲率,得到期望方向盘转角。考虑驾驶员神经系统的反应滞后和驾驶员手臂与汽车转向盘惯量等的反应滞后环节,得到实际方向盘转角。

1.1 模糊 PID 方向控制

对 PID 控制器中的参数 K_p 、 K_i 和 K_d ,分别用 3 个模糊控制器进行在线实时自整定。模糊控制器的输入变量为汽车期望侧向加速度与实际侧向加速度之间的误差 E 和误差变化率 EC ,将其论域定义为 $[-6, 6]$ 上的离散整数集合: $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$; 3 个模糊控制器的输出分别为 K_p 、 K_i 和 K_d 的调整值。其中 K_p 、 K_i 和 K_d 的论域定义为 $[-7, 7]$ 上的离散整数集合: $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 。误差 E 、误差变化率 EC 、 K_p 、 K_i 和 K_d 在其论域上有 7 个语言变量值{负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZE),正小(PS),正中(PM),正大(PB)}。输入输出变量相应隶属度函数如图 1-5 所示, K_p 、 K_i 和 K_d 的模糊规则如表 1-3 所示。

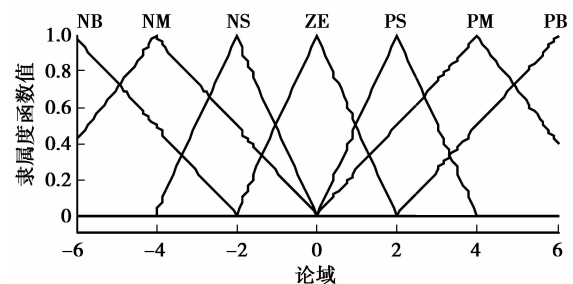


图 1 输入变量 E 的模糊隶属度函数

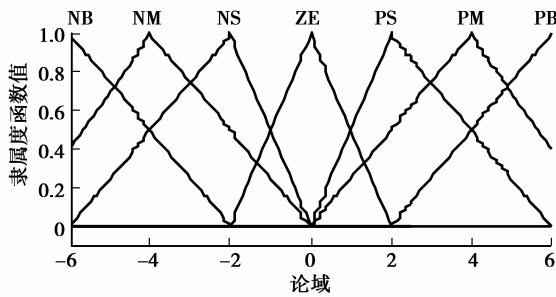


图2 输入变量 EC 的模糊隶属度函数

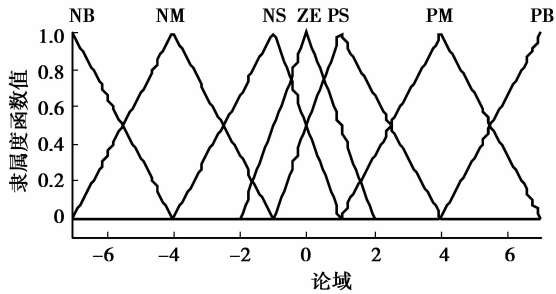


图3 输出变量 K_p 的模糊隶属度函数

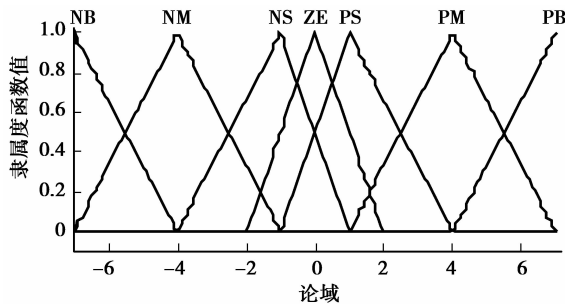


图4 输出变量 K_i 的模糊隶属度函数

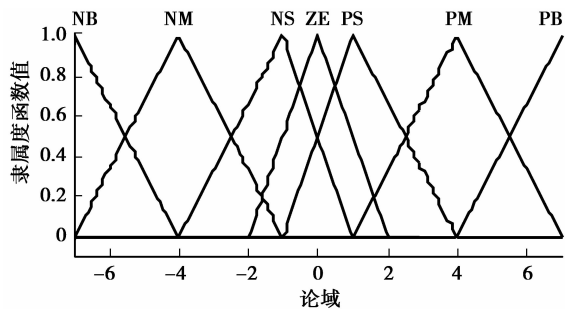


图5 输出变量 K_d 的模糊隶属度函数

表1 K_p 模糊规则表

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NS
NM	PM	PM	PS	ZE	ZE	ZE	NS
NS	PS	PS	PS	ZE	ZE	ZE	NS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	NS	NS	NS	ZE	PM	PM	PM
PM	NS	ZE	ZE	ZE	PM	PS	PS
PB	ZE	ZE	ZE	ZE	PM	PS	PS

表2 K_i 模糊规则表

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	ZE	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	ZE	PS	PS	ZE
NS	PM	PM	PM	ZE	PS	PS	PS
ZE	PS	PS	PS	ZE	PS	PS	PS
PS	ZE	PS	PS	ZE	PB	PM	PB
PM	ZE	PS	PM	ZE	PM	PS	PS
PB	PS	PS	PM	ZE	PM	PS	PS

表3 K_d 模糊规则表

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZE	ZE	ZE	PB	PB
NM	NS	NS	NS	ZE	NS	NS	PM
NS	NB	NB	NM	ZE	NS	PS	PM
ZE	NB	NM	NM	ZE	NS	PS	PM
PS	NM	NM	NS	ZE	NS	PS	PS
PM	NM	NS	NS	ZE	NS	PS	PS
PB	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	PB	PB

1.2 遗传算法优化量化因子和比例因子

利用遗传算法优化模糊控制器时主要涉及下面3种情况:基于量化因子/比例因子的优化,基于隶属度函数的优化,基于控制规则的优化等。通常隶属度函数的修正比较困难的,而且实际应用证明,隶属函数的形状是次要的,关键是隶属函数所包含的论域元素个数和所覆盖的范围。在模糊控制中,当模糊规则和隶属函数确定后,因为控制规则的数量有限,则模糊控制的输出值也是有限的。而当用遗传算法对量化因子和比例因子进行优化调整时,输出的值将不再被限制在原有的数量范围内,从某种程度上说,相当于模糊控制规则数量的增加^[14-16]。因此笔者采用遗传算法对模糊PID控制器的量化因子和比例因子进行寻优。

利用 MATLAB 中的遗传工具箱函数,采用十进制编码方式,分别对自调整模糊 PID 控制器的 K_E 、 K_{EC} 、 K_p 、 K_i 、 K_d 等 5 个参数进行寻优。随机产生 psize 个个体的群体,个体编码方式为实数编码。

控制参数主要包括种群的规模、变量的个数、算法执行的最大代数、执行不同遗传操作的概率以及其他一些辅助性的控制参数等。根据具体情况可以选择不同参数,这里选择:初始群体大小 psize=30,变量个数 nvars=5,最大代数 maxgen=100,交叉概

率 $P_c = 0.85$, 变异概率 $P_m = 0.05$, 当连续若干代最优个体适应度值的平均值与当代最优个体适应度值之差在所要求的范围之内时, 就认为算法已不再具备继续优化能力。

在定车速假设下, 驾驶员对汽车理想预期轨迹的考虑实际上就是对汽车理想侧向加速度的决策和跟随控制, 且方向盘转角的变化与侧向加速度的变化一一对应^[13]。因此, 采用跟随误差(理想侧向加速度与实际侧向加速度的误差)和方向盘忙碌程度(方向盘转角的变化增量), 建立遗传算法性能指标函数为

$$J = \frac{1}{2} \left\{ \omega_1 \left[\frac{\ddot{y}^*(k) - \ddot{y}(k)}{\ddot{y}_{\max} - \ddot{y}_{\min}} \right]^2 + \omega_2 \left[\frac{\delta_{sw}(k) - \delta_{sw}(k-1)}{\Delta\delta_{\max}} \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

式中: $\ddot{y}^*(k)$ 、 $\ddot{y}(k)$ 分别为 k 时刻期望侧向加速度与实际侧向加速度; $\delta_{sw}(k)$ 、 $\delta_{sw}(k-1)$ 分别为 k 和 $k-1$ 时刻的方向盘转角; \ddot{y}_{\max} 、 \ddot{y}_{\min} 分别为最大侧向加速度和最小侧向加速度, 一般取 $\ddot{y}_{\max} = 5 \text{ m/s}^2$, $\ddot{y}_{\min} = -5 \text{ m/s}^2$; $\Delta\delta_{\max}$ 为前后两个时刻方向盘转角的最大增量, 取 12° ; ω_1 、 ω_2 分别为跟随误差和方向盘忙碌程度的加权系数。

公式(1)作为遗传算法优化模糊 PID 方向控制器的适应度函数, 又由于遗传算法是求最大值问题, 故此适应度函数 f_d 应作如下变换:

$$f_d = \frac{1}{1+J}. \quad (2)$$

基于遗传算法优化的模糊 PID 驾驶员方向控制器框图如图 6 所示。

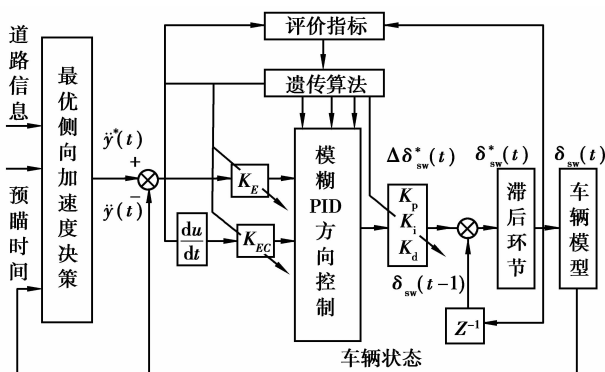


图 6 遗传算法优化的模糊 PID 方向控制模型

2 驾驶员速度模糊控制

驾驶员速度模糊控制系统的输入为车辆期望速

度与实际速度的偏差 Δv_x , 车辆当前实际纵向加速度 a_x , 输出为踏板变化量 Δp , 通过与前一时刻累加, 得到当前踏板开度。加速踏板和制动踏板采用同一个控制器, 当累加之后的踏板开度值为正时, 作为加速度踏板的控制值; 反之, 则作为制动踏板的控制值。

为了使不同模糊集之间的差别能充分表达变量分级后的不同性质, 此处采用 trimf 型与 trapmf 型隶属函数相结合, 利用二分法对变量进行模糊分级。速度偏差范围为 $-1.5 \sim 1.5 \text{ m/s}$, 分为 NB, NM, NS, ZE, PS, PM 和 PB 7 个等级, 设定 ZE 是以 0 为中心、范围为 $[-0.25, 0.25]$, PS 是以 0.25 为中心、范围为 $[0, 0.5]$, PM 的中心为 0.5, 范围为 $[0.25, 1]$, PB 的中心为 1, 范围为 $[0.5, 1.5]$ 。其他变量模糊集的中心及范围的选取类似, 输入输出隶属度函数曲线如图 7-9 所示, 模糊逻辑控制规则如图 10 所示。

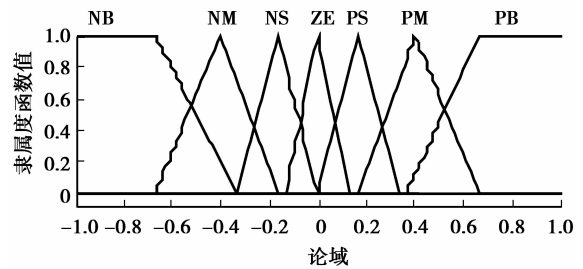


图 7 输入变量 Δv_x 的隶属度函数

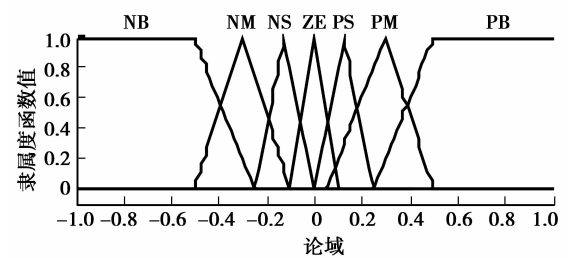


图 8 输入变量 a_x 的隶属度函数

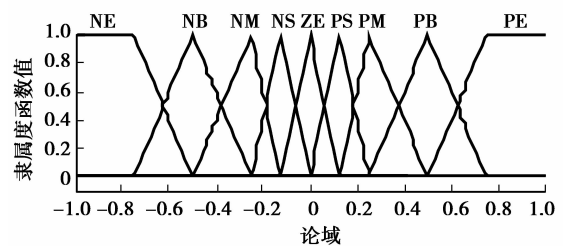


图 9 输出变量 Δp 的隶属度函数

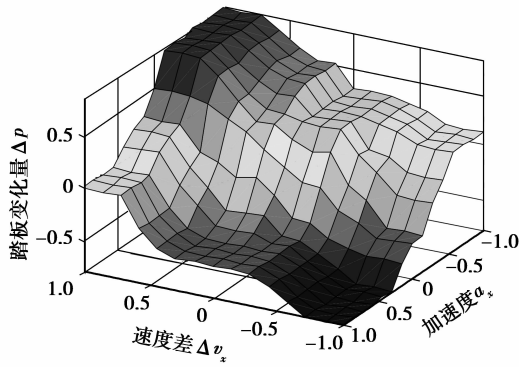


图 10 模糊逻辑控制规则三维图

3 方向与速度综合控制

前面分别利用基于遗传算法优化的模糊 PID 方法控制方向盘转角,模糊方法控制油门开度与制动踏板开度,为实现驾驶员在驾驶过程中根据道路条件信息改变方向盘转角、油门开度与制动踏板开度,以达到对方向与速度综合控制的目的,建立驾驶员方向与速度综合控制模型,如图 11 所示。

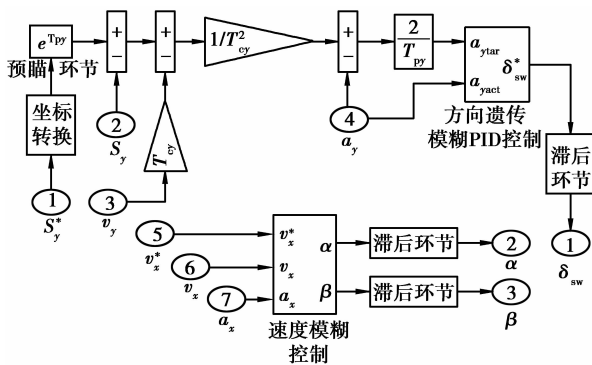


图 11 驾驶员方向与速度综合控制模型

4 人-车闭环建模

驾驶员模型参数的确定不仅需考虑驾驶员自身的行为特性,还需建立正确的整车行驶动力学模型^[17],如图 12 所示。仿真模型由 5 部分组成,包括转向系、发动机及动力传动系、制动系、轮胎与 15 自由度车辆动力学模型等。轮胎模型采用“魔术公式”模型,车辆动力学模型共 15 个自由度,其中车身 6 个,每个车轮上下跳动 1 个,每个车轮转动 1 个,转向盘转角 1 个。

综合上述建立的驾驶员模型与车辆模型,构建人-车闭环系统仿真模型,用于评价驾驶员纵向加减速操纵性能与侧向转向跟随性能,如图 13 所示。

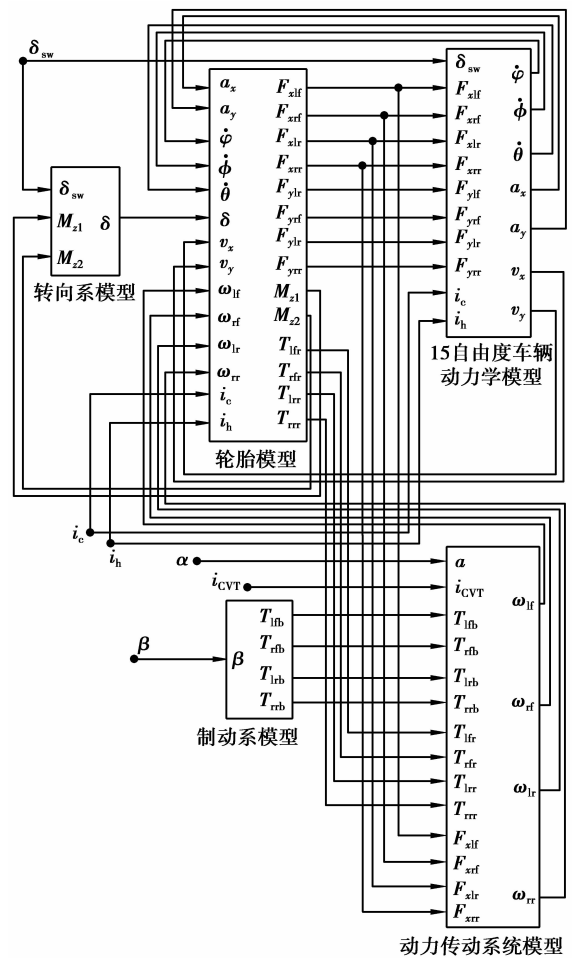


图 12 车辆模型仿真整体框图

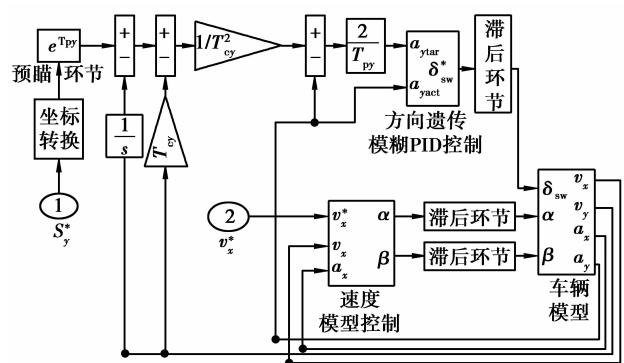


图 13 人-车闭环系统仿真模型

5 仿真分析

5.1 典型工况仿真

为了验证所建立的驾驶员方向与速度综合控制模型,设计典型工况-纵向速度单向变化、侧向双移线仿真工况与大曲率试验道路仿真工况。

5.1.1 纵向速度单向变化、侧向双移线仿真分析

纵向速度单向变化、侧向双移线仿真工况如图 14 所示,参数分别为 $t_1=10\text{ s}$, $t_2=11.8\text{ s}$, $t_3=15\text{ s}$, $t_4=18\text{ s}$, $t_5=23\text{ s}$, $t_6=30\text{ s}$, $v_{x1}=30\text{ m/s}$, $v_{x2}=15\text{ m/s}$, $B=3.5\text{ m}$ 。仿真结果如图 15 所示。

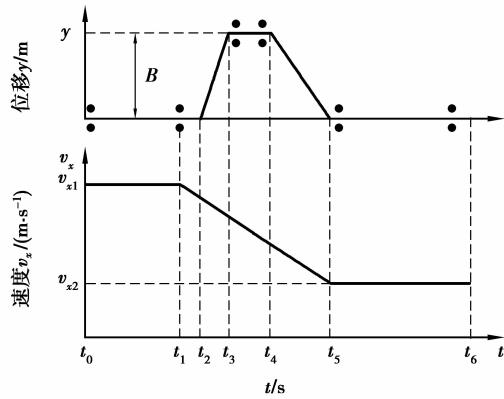


图 14 纵向速度单向变化侧向双移线仿真工况示意图

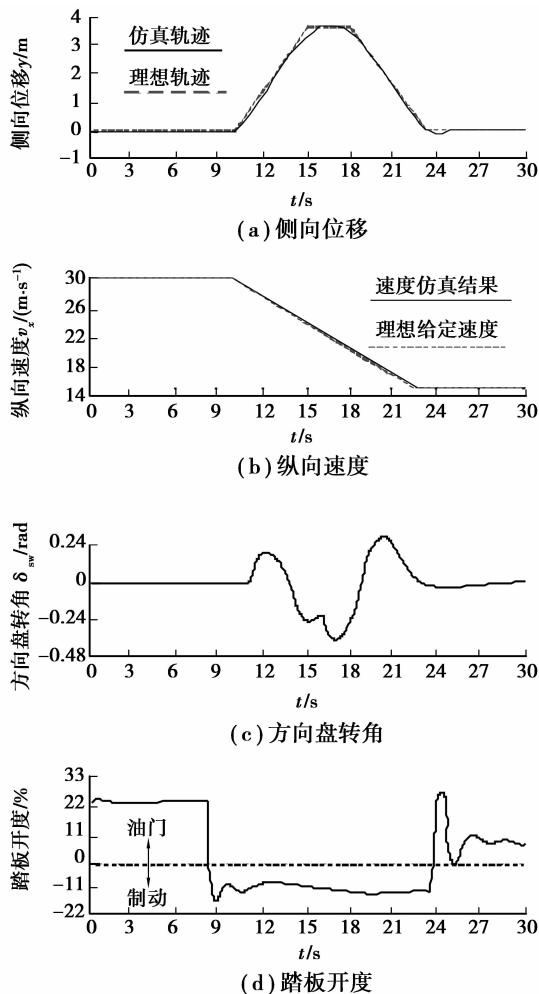


图 15 纵向速度单向变化、侧向双移线仿真结果

由图 15 可知,笔者建立的驾驶员方向与速度综

合控制模型在典型工况下可以很好地描述驾驶员在纵向速度单向变化、侧向双移线试验道路上的减速和转向驾驶特性。

5.1.2 大曲率试验道路仿真分析

大曲率试验道路仿真工况实际上是纵向速度不断变化和侧向位移轨迹跟随 2 种情况的组合,可全面反映驾驶员模型在复杂行驶工况下侧向轨迹跟随能力与纵向速度调节能力,如图 16 所示。参数分别为: $S_1=131.5\text{ m}$, $R_1=13\text{ m}$, $S_2=62.5\text{ m}$, $R_2=19\text{ m}$, $S_3=55\text{ m}$, $R_3=11\text{ m}$, $S_4=47\text{ m}$, $S_5=45\text{ m}$, $R_5=7\text{ m}$, $S_6=47\text{ m}$, $R_6=26\text{ m}$, $S_7=55\text{ m}$, $R_7=20\text{ m}$, $S_8=47\text{ m}$ 。

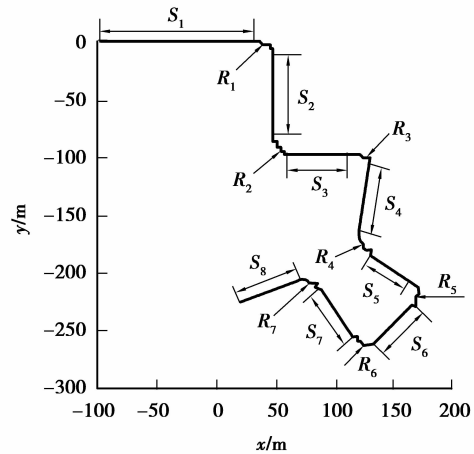


图 16 大曲率试验道路仿真工况示意图

汽车以 80 km/h 的速度驶入后在转第一个弯道之前将速度降至 48 km/h,然后进一步减速以 40 km/h 通过第 3、4、5 弯道后再逐渐加速至 80 km/h 驶出。通过建立的人-车闭环系统的仿真得到方向盘转角、侧向位移、侧向加速度、纵向速度、纵向加速度的仿真结果,如图 17 所示。

可看出,笔者建立的驾驶员方向与速度综合控制模型可以很好地描述驾驶员在纵向速度上的加速减速操纵特性以及侧向预期轨迹跟随的转向驾驶特性。

5.2 不同控制方法比较

在纵向速度单向变化、侧向双移线仿真工况下,对笔者提出的基于遗传算法优化的模糊 PID 方法与传统的 PID、模糊 PID 进行仿真比较,结果如图 18 所示。

由图 18 中仿真结果可知,在侧向位移和纵向速度轨迹跟随效果方面,基于遗传算法优化的模糊 PID 最好,模糊 PID 次之, PID 最差;而且遗传模糊

PID控制的方向盘转角变化与油门/制动踏板变化最为平缓,对汽车的控制最好,更好地达到了预期控制效果,PID控制效果最差。

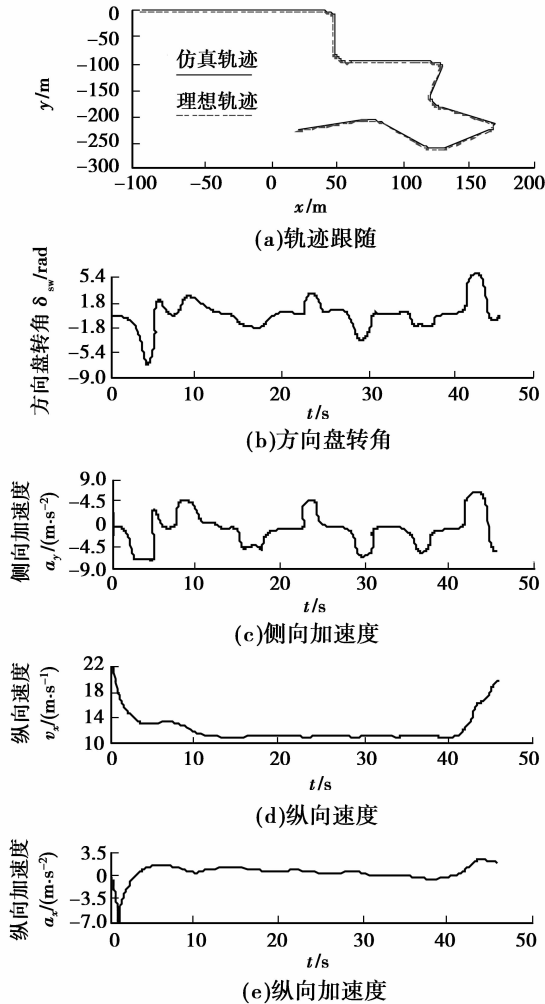


图17 大曲率试验道路仿真结果

另外,根据文献[13]介绍的“总方差评价方法”,选用总体性能指标 J_T 、轨迹跟踪误差指标 J_E 、驾驶操纵负担指标 J_B 、侧滑危险性指标 J_R 这4个指标对以上3种控制方法进行优劣评价,对比结果如表4所示。

表4 3种控制方法的性能评价指标对比

控制方法	评价指标			
	总体性能 J_T	轨迹跟踪误差 J_E	驾驶操纵负担 J_B	侧滑危险性指标 J_R
遗传模糊PID	1.405 1	0.204 6	5.587 2	0.768 6
模糊PID	1.858 3	0.314 3	5.492 4	0.757 4
PID	2.355 6	0.426 2	5.134 5	0.711 3

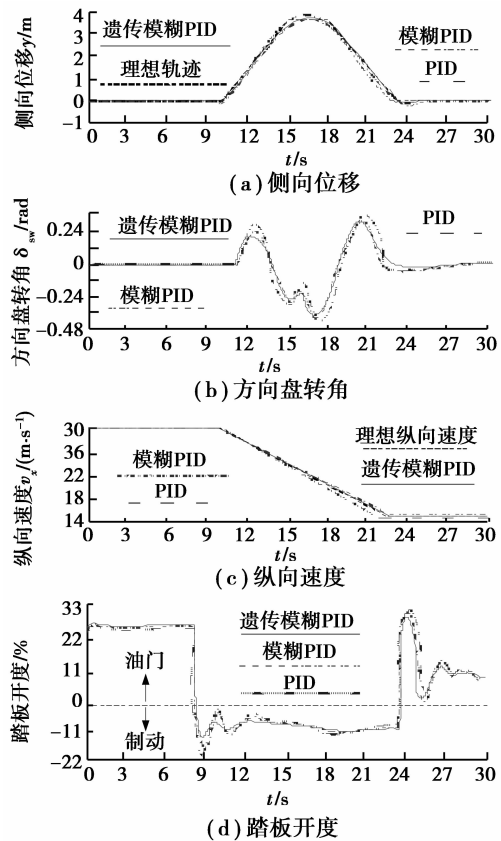


图18 几种不同控制方法仿真比较

由表4可知,遗传算法优化的模糊PID控制方法在总体性能指标 J_T 、轨迹跟踪误差指标 J_E 最小,但驾驶操纵负担指标 J_B 、侧滑危险性指标 J_R 却最大,这可理解成驾驶员为满足轨迹跟踪精度要求而稍微牺牲驾驶操纵负担与侧滑危险性指标为代价的结果。

6 结语

为了体现驾驶员模型对驾驶操纵熟练程度的自适应能力,基于传统控制方法,提出了基于遗传算法优化的方向模糊PID与速度模糊综合控制驾驶员模型,利用遗传算法的自动寻优能力,优化模糊PID比例因子和量化因子。并联立整车行驶动力学模型,构建了人-车闭环系统仿真模型,在典型工况下进行仿真分析比较。结果表明,与传统的PID和模糊PID控制方法相比,遗传算法优化方法在牺牲了较小驾驶操纵负担与侧滑危险性指标为代价的基础上,获得了最小的轨迹跟踪误差指标与总体性能指标,具有更好的纵向加减速操纵特性与侧向预期轨迹跟随性能。笔者所建立的基于遗传算法优化的方向与速度综合控制驾驶员模型虽可体现出驾驶操纵

熟练程度,却无法描述不同驾驶风格类型,下一步需确定驾驶员模型中的数字化参数划分范围以此表征不同驾驶风格,为后续研制开发基于人-车-路闭环的自动变速系统硬件在环仿真平台打下基础。

参考文献:

- [1] WADEALLEN R, GEORGE D P, MARCIA L C. The effect of driving simulator fidelity on training effectiveness [C] // Driving Simulation Conference North America (DSC-NA), September 17-19, 2007, Iowa City, America. [S. l.]: IEEE, 2007: 1-15.
- [2] PARK J, SUNG D, LEE W S. A driving simulator study on adaptive cruise control failure [C] // SICE-ICASE, 2006, October 18-21, 2006, Busan, Korea. [S. l.]: IEEE, 2007: 2138-2141.
- [3] SEO Y B, CHOI J W, DUAN G B. Lateral vehicle control using the CCV mode control [C] // Chinese Control Conference, 2006, August 7-11, 2006, Harbin, China. [S. l.]: IEEE, [2007-01-15]: 41-46.
- [4] KHODAYARI A, GHAFARI A, KASEMI R. Modeling and intelligent control design of car following behavior in real traffic flow [C] // 2010 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, June 28-30, 2010, Singapore. [S. l.]: IEEE, [2010-07-23]: 261-266.
- [5] AVDAGIC Z, CERNICA E, KONJICIA S. Longitudinal vehicle guidance using fuzzy logic [C] // 2006 International Conference on Industrial Technology, December 15-17, 2006, Mumbai, Germany. [S. l.]: IEEE, [2006-06-18]: 893-898.
- [6] ZHANG J Z, ZHANG H T. Vehicle stability sliding mode control based on RBF neural network [C] // 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control, March 27-29, 2010, Shenyang, China. [S. l.]: IEEE, [2010-06-17]: 243-246.
- [7] MARINO R, CINILI F. Input-output decoupling control by measurement feedback in four wheel steering vehicles [J]. Control Systems Technology, 2009, 17(5): 1163-1172.
- [8] LI F Q, WANG J, LIU Z D. On the vehicle stability control for electric vehicle based on control allocation [C] // 2008 Vehicle Power and Propulsion Conference, September 3-5, 2008, Harbin, China. [S. l.]: IEEE, [2008-11-18]: 1-6.
- [9] SCHICK B, KREMER B, HENNING J, et al. Simulation methods to evaluate and verify functions, quality and safety of advanced driver assistance systems [C/OL] // IPG Technology Conference 2008. Ettlinger near karlsruhe, Germany, September 23-24, 2008; impact on IPG: publications 2009 [2009-09-01]. <http://www.ipg.de/Publications-2009.807.0.html>.
- [10] PLOCHL M, EDELMANN J. Driver models in automobile dynamics application [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(7): 699-741.
- [11] CIPELLI M, SCHIEHLEN W, CHELI F. Driver-in-the-loop simulations with parametric car models [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(8): 33-48.
- [12] RIEVELEY R J, MINAKER B, MAURINI M, et al. Development of an advanced driver model and simulation environment for automotive racing [C] // SAE World Congress and Exhibition, April 20-23, 2009, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International, [2009-04-20]: 2009-01-0434.
- [13] 王兵. 驾驶员对汽车方向的自适应控制行为建模研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [14] LOU G H, WU H B. Study of the fuzzy PID control based on genetic algorithm [C] // Chinese Control and Decision Conference, 2009, June 17-19, 2009, Guilin, China. [S. l.]: IEEE, [2009-08-07]: 6110-6112.
- [15] VALARMATHI K, DEVARAJ D, RADHAKRISHNAN T K. A combined genetic algorithm and sugeno fuzzy logic based approach for on-line tuning in ph process [C] // 4th International Conference Intelligent Systems, September 6-8, 2008, Varna, Bulgaria. [S. l.]: IEEE, 2008: 202-207.
- [16] 叶世杰, 肖智, 钟波, 等. 电力经济环境负荷调度的模糊多目标模型 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33(9): 62-68.
YE SHI-JIE, XIAO ZHI, ZHONG BO, et al. Fuzzy multi-objective model for environmental/economic power dispatch [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(9): 62-68.
- [17] ESTERL B, BUTZ T, SIMEON B, et al. Real-time capable vehicle trailer coupling by algorithms for differential algebraic equations [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(9): 819-834.

(编辑 张 苹)