

基于粒子群算法的汽车自适应巡航控制器设计*

高振海 吴涛 尤洋

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025)

摘要: 提出了一种基于粒子群优化算法的模糊自校正控制器参数优化方法。基于搭建的 Carsim 和 Simulink 联合仿真环境,选取典型优化工况,利用粒子群优化算法对控制器比例因子和隶属度函数形状参数在取值区间内多次随机选值,并重构控制器,发挥算法本身具有的记忆最佳取值点和各点间相互对比机制,以跟踪目标函数为最优,实现对控制器性能优化问题的求解。通过典型工况仿真和实车试验结果表明,该方法优化后的控制器具有更优良的控制性能,可有效降低自适应巡航系统与整车的性能匹配设计工作量,为模糊控制器的参数确定提出了一套可行的研究途径。

关键词: 汽车 自适应巡航控制 模糊自校正控制器 隶属度函数优化 粒子群优化算法

中图分类号: U461.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0011-06

Design of Vehicle Adaptive Cruise Controller Based on PSO Algorithm

Gao Zhenhai Wu Tao You Yang

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Based on particle swarm optimization (PSO) algorithm, a fuzzy self-tuning controller parameters optimization method was developed. With the co-simulation of Carsim and Simulink, typical optimized working conditions were selected. The controller's scaling factor value and the position of membership function shape points were randomly selected to ensure the controller optimal performance. The controller was also reconstructed. Optimum remembering points and contrast mechanism among these points were working in PSO algorithm with the optimum target function. The actual vehicle experiments were carried out under typical working conditions. The experiment results showed that the optimized controller had good control performance, which could decrease the design workload of performance matching between the adaptive cruise control and test vehicle.

Key words: Vehicle Adaptive cruise control Fuzzy self-tuning controller Optimization of membership function Particle swarm optimization algorithm

引言

汽车自适应巡航控制(Adaptive cruise control, ACC)是在传统的定速巡航控制基础上发展起来的新一代汽车驾驶员辅助驾驶系统^[1]。ACC系统通过车载雷达等传感器直接监测汽车前方道路的交通状况,当发现行驶车道前方有其他车辆时,将根据本车与前车之间的相对距离及相对速度等信息,通过对发动机扭矩输出和制动管路压力的主动控制,使

本车与前车保持合适的安全车距,进一步增强高速公路上的行车安全性。然而,对于ACC系统控制算法研发而言,汽车通常具有强非线性、时变、大滞后、强干扰等复杂特性,使得基于离线或在线辨识的线性参考模型难以获得满意的控制效果^[2]。为了更好地解决汽车动力学强非线性问题,研究人员开展了ACC系统模糊控制等智能控制算法研究^[3-5]。但由于不同车型具有各异的非线性和复杂性,对于获得具有较好动稳态特性的模糊控制器仍缺乏简单

高效的设计及参数调整方法。

目前,常用的参数整定方法是粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法亦称微粒群优化算法,它通过群体内部各个粒子的竞争与协作产生强大的群体智能来引导优化^[6-7]。该算法较梯形法具有更强的普遍性,相比单纯形法则无需依赖初值的选取,全局寻优效果好^[8];相比遗传算法,因收敛速度快且不易产生早熟而多应用于模糊控制器设计^[9]。

本文针对建立的汽车自适应巡航模糊自校正控制器参数难以确定的问题,根据控制器参数对汽车ACC系统性能影响的分析,提出应用粒子群优化算法对控制器的3个参数和隶属度函数关键点的优化方法。

1 仿驾驶员行为特性的ACC系统

通过对驾驶员操纵车辆行为特性的研究,提出一种仿驾驶员行为特性模型,该系统划分为信息感知、预瞄决策和控制校正3个环节^[10]。实际上,该系统是将汽车动力学强非线性特性和复杂运动学特性分离开,认为驾驶员依据车辆运动学特性决策行驶轨迹和车辆动力学特性校正控制操作。建立的ACC系统如图1所示。

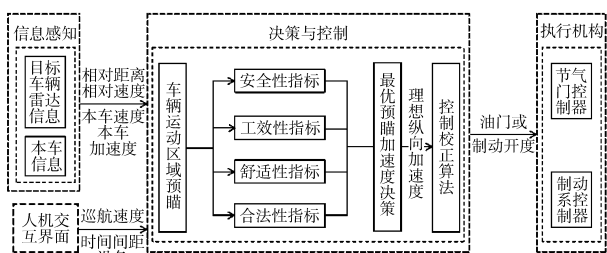


图1 基于驾驶员行为特性的ACC流程框图

Fig.1 ACC flow chart based on driver's behavior characteristic

信息感知环节利用雷达、摄像头和通讯等感知手段向系统提供所需的输入信息^[11-12];预瞄决策环节通过对输入信息的处理得到理想纵向加速度,仅考虑汽车运动学特性;而控制校正环节体现系统对汽车动力学强非线性特性的考虑,只与动力学特性相关^[13]。预瞄决策环节具体计算过程:在预瞄时间 T_p 内,以车辆当前时刻各状态量(车辆的纵向速度以及纵向加速度等)为初始条件,考虑车辆运动应限定在其各项动力学极限性能范围内(如最大速度、纵向加速度变化范围等),根据刚体运动学,计算出车辆以当前时刻可行的纵向加速度变化范围内若干加、减速度行驶 T_p (足够小)后所能达到的位置点集,及其对应各点的预瞄速度、预瞄加速度等。假

定 T_p 内前车保持初始状态行驶,利用初始时刻与前车的相对距离和相对速度可以计算出行驶 T_p 后两车的预瞄相对距离和预瞄相对速度。从模糊决策理论的角度分析,计算出的车辆位置点集为系统待决策集合,确定理想位置点的决策过程属于多目标决策问题。为此建立安全性、工效性、舒适性和合法性4个基本模糊评价指标,选取单极性S函数作为其隶属度函数,得到各位置点的评价指标集,采用逼近于理想解的排序法,系统就可以从位置点集中决策出预期位置点及其理想纵向加速度,其中安全性的评价是基于车辆行驶过程中的理想安全距离 S_a ,其计算公式为^[14]

$$S_a = v_c T_h + \frac{v_c^2 - v_p^2}{2a_{\max}} + d \quad (1)$$

式中 v_c ——本车速度 v_p ——前车速度
 T_h ——驾驶员反应时间
 a_{\max} ——最大制动减速度
 d ——停车时两车应保持的最小车距

2 ACC系统模糊自校正控制器优化设计

建立的ACC模糊自校正控制算法,可根据系统决策模型获得的理想期望加速度,向汽车提供准确的油门或制动控制,使其产生与理想纵向加速度基本一致的实际纵向加速度。

2.1 模糊自校正控制器结构

基于经典模糊控制器,提出多项描述汽车纵向加速度动态响应特性的性能评价指标,并以此实现对经典模糊控制器参数的在线校正^[13]。其控制算法框图如图2所示。其中,最优预瞄加速度与实际加速度的误差 e 及其变化率 e_c 为输入变量, u 为输出变量(正值代表油门踏板增量,负值代表制动踏板增量,可经比例转换为节气门开度和制动压力增量,范围分别为 $[0,1]$ 和 $[0,15 \text{ MPa}]$)。 E_k 为加速度误差因子, C_{EK} 为加速度误差变化率因子, U_k 是踏板增量因子。模糊规则库的制定是根据典型阶跃响应推导的,可以很好地表现输入和输出之间的强非线性

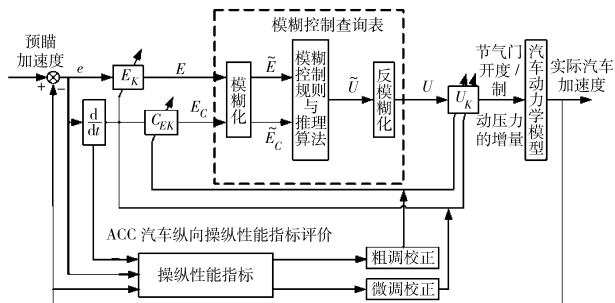


图2 ACC模糊自校正控制算法框图

Fig.2 Flow chart of ACC fuzzy self-tuning controller algorithm

性关系,但具体控制器参数则需要针对不同的控制系统进行相应调整才能达到满意的控制性能。

2.2 基于粒子群的控制器优化

基本的粒子群优化算法的一般步骤为:确定待优化参数;建立目标函数;设置粒子群优化算法中的参数;搭建整个优化过程模型;选取合理的典型工况进行优化。

2.2.1 模糊自校正控制器待优化参数选取

控制器中待优化参数可分为模糊控制比例因子和隶属度函数形状参数。

通过分析控制器的 3 个比例因子参数 E_K 、 C_{EK} 和 U_K 对汽车 ACC 系统性能的影响可知: E_K 越大,在加速度误差变化率所取语言值不变的情况下,相应控制器的输出所取的语言值也越大; C_{EK} 越大,系统有很大的变化趋势,因此会给汽车相对大的输出,以减弱这个变化趋势; U_K 越大,增大了控制器对汽车的输出量,会增加汽车 ACC 系统的响应时间。所以选取 E_K 、 C_{EK} 和 U_K 为待优化参数。

此外,由于模糊控制器输入和输出量的隶属度函数形状选择为三角形,每个输入的 5 条隶属度函数都是对整个取值范围的平均分配,如此表征非线性的车辆动力学特性难免会存在不匹配问题,同样会对整个控制器的性能产生很大影响,因此,为简化控制器设计,提出将加速度误差 e 和误差变化率 e_c 两个输入量对应的模糊控制器隶属度函数的形状参数作为待优化参数。对此 2 个输入共 10 条隶属度函数选取待优化的参数如表 1 所示。

表 1 隶属度函数中待优化的参数

Tab.1 Optimized parameters of membership function

参数	加速度误差 e	误差变化率 e_c
NB	ENB1 = ENB2 = -2、 ENB3、ENB4	ECNB1 = ECNB2 = -8、 ECNB3、ECNB4
NS	ENS1、ENS2、ENS3	ECNS1、ECNS2、ECNS3
ZO	EZO1 = ENB4、EZO2、EZO3	ECZO1 = ECNB4、ECZO2、ECZO3
PS	EPS1 = ENS3、EPS2、EPS3	ECPS1 = ECNS3、ECPS2、ECPS3
PB	EPB1 = EZO3、EPB2、 EPB3 = EPB4 = 2	ECPB1 = ECZO3、ECPB2、 ECPB3 = ECPB4 = 8

2.2.2 建立目标函数和优化流程图

建立的粒子群优化算法目标函数为:理想加速度与实际加速度的误差最小,保证期望汽车的实际加速度能够实时的跟随决策出的理想加速度。整个优化过程的流程如图 3 所示。

2.2.3 配置优化参数

粒子群优化算法中的参数设置如下:最大迭代次数设置为 800 次,初始化粒子个数为 24 个,对于 3 个模糊控制比例因子和 20 个隶属度函数形状参

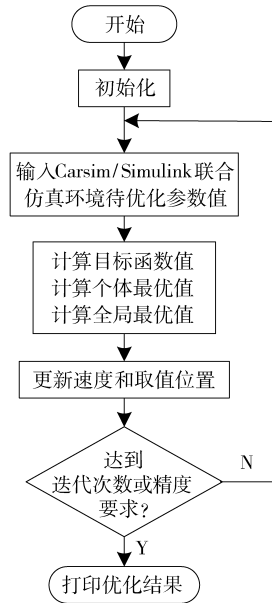


图 3 粒子群优化算法流程图

Fig.3 Flow chart of PSO algorithm

数共 23 个待优化参数的初始化矩阵为 24 行 23 列,加速参数均取 2,终止算法的阈值取 1×10^{-25} ;3 个模糊控制比例因子取值范围分别为 $[1, 7]$ 、 $[1, 7]$ 、 $[3, 15]$ 。而 20 个隶属度函数形状优化参数的取值范围可参照原值适当选取。

2.2.4 汽车 ACC 算法仿真环境模型

建立 Carsim 和 Simulink 汽车 ACC 算法联合仿真程序如图 4 所示。Carsim 模块输出本车和传感器等状态量给在 Simulink 平台搭建的决策层,决策层算得的理想加速度输入到控制校正层,控制校正层算得的控制量作为 Carsim 模块输入。

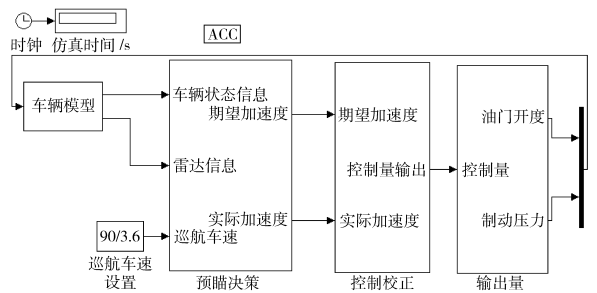


图 4 汽车 ACC 控制模型程序图

Fig.4 Flow chart of vehicle ACC control model

2.2.5 优化工况的选取

考虑到汽车 ACC 系统常用的速度级别和行驶工况,优化的运行工况设置如下:前车 60 km/h 匀速行驶、本车 90 km/h 速度逐渐接近前车;并且雷达探测到前车后,本车开始缓慢减速到与前车速度一致的 60 km/h,进入跟随前车状态;30 s 时刻前车驶离本车道,本车加速至驾驶员设置好的巡航速度 90 km/h 巡航行驶,仿真时间为 60 s。

2.2.6 优化结果

经过粒子群优化算法优化后,得到 E_k 、 C_{EK} 和 U_k 的优化值分别为 3.3、3.7 和 13.3。根据隶属度函数形状参数优化结果重新设置隶属度函数,得到优化后的隶属度函数形状如图 5 所示。

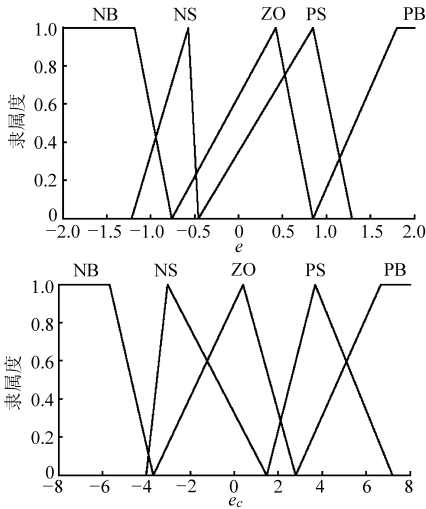


图 5 隶属度函数优化后的形状

Fig.5 Optimized shape of membership function

优化后输入和输出之间的三维关系曲面如图 6 所示。从优化后的隶属度函数形状和曲面可以看出,优化后的函数形状在常用的范围区域比较密集,优化后的曲面更能体现模糊控制器的强非线性控制特性,更加合理。

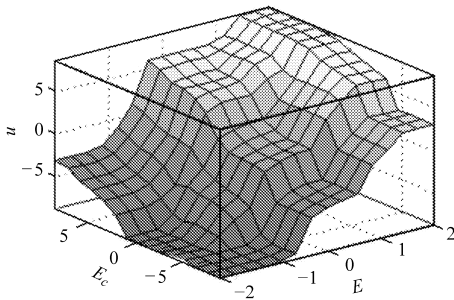


图 6 优化后的输入输出关系曲面

Fig.6 Relationship surfaces of input and output after optimization

3 仿真与试验验证

为验证优化后的模糊自校正控制器的控制性能,通过低速和高速两个速度级别的混合工况,给出初始和优化后两组参数值的模糊自校正控制器的仿真比较。并根据优化结果设置 ACC 系统参数进行实车试验以验证其性能。

3.1 低速工况仿真

低速工况设计如下:初始时车载雷达传感器在其 100 m 探测范围内没有探测到 ACC 车辆行驶车道前方存在前行车辆,ACC 车辆初始速度为 50 km/h,

设定的巡航速度为 70 km/h。此时本车道上距此 ACC 车辆前方 100 m 外行驶另一前行车辆,该车辆初始以 60 km/h 的速度行驶。此后,本车经过加速达到巡航速度后在行驶 30 s 后接近该前行车辆,并开始减速到前车的行驶速度保持跟随行驶。之后,该前行车辆行驶在 60 s 后开始减速,且在 70 s 后匀减速到 50 km/h,本车则跟随前车减速到 50 km/h。行驶 30 s 后,在 100 s 时该前行车辆驶出本车道,此后本车开始加速达到其巡航速度,此后保持该速度匀速行驶,整个行驶过程的车辆速度曲线如图 7 所示。其中 ACC 系统在此混合低速行驶工况下的对车辆进行控制的仿真计算结果如图 8 所示。

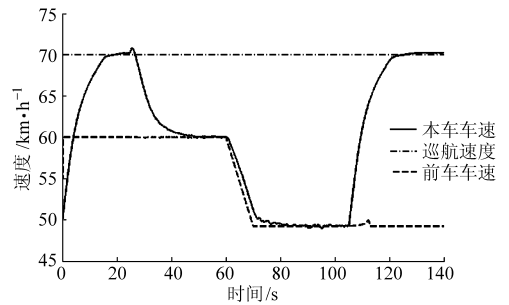


图 7 低速行驶过程中的车辆速度曲线

Fig.7 Vehicle speed curve at low-speed process

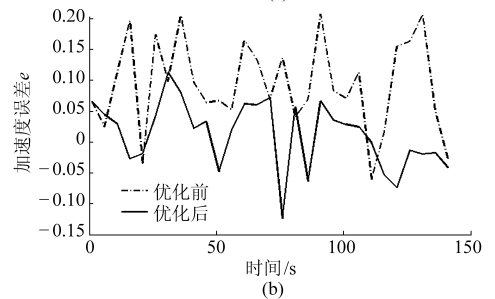
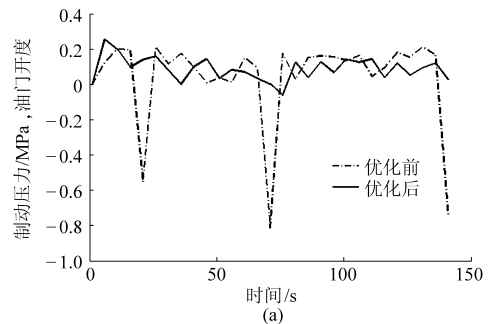


图 8 低速工况油门制动和 e 对比曲线

Fig.8 Contrast curve in low-speed condition

从图 8a 可以看出,优化前后的模糊自校正控制器都可达到低速工况的速度控制效果和目的。但在稳定跟随和定速巡航过程中优化后的油门开度和制动压力曲线更加平稳,振荡更少,速度控制更平滑;而在自由行驶和跟随速度不断变化的前车时,优化后的油门开度和制动压力曲线波动更大,减速时制动和油门配合的利用效率更高,实现了很好的跟随

特性。从图 8b 可以说明,优化后的模糊自校正控制器对混合低速行驶工况的理想加速度跟随性更好,表明控制更平稳。

3.2 高速工况仿真

高速工况设计如下:与低速工况不同,初始时车载雷达传感器在其 100 m 探测范围内没有探测到 ACC 车辆行驶车道前方存在前行车辆,ACC 车辆初始速度 100 km/h,设定的本车巡航速度为 120 km/h;此时本车道上距此 ACC 车辆前方 400 m 处行驶另一前行车辆,该车辆初始以 100 km/h 的速度行驶。此后,本车开始加速达到其设定的巡航速度进入巡航行驶状态。当本车行驶 60 s 后追上前行车辆,由于前行车辆速度低于本车行驶速度,本车开始减速达到前车的速度进入跟随行驶状态。之后,在行驶到 100 s 时前行车辆开始匀加速达到 140 km/h,本车则加速保持跟随行驶状态,当速度跟随到 120 km/h 后本车不再加速,而进入定速巡航行驶状态,整个行驶过程的车辆速度曲线如图 9 所示。其中 ACC 系统在此混合高速行驶工况下的对车辆进行控制的仿真计算结果如图 10 所示。

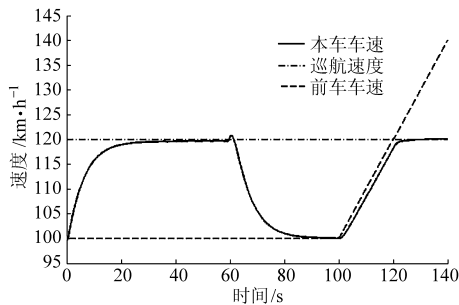


图 9 高速行驶过程中的车辆速度曲线

Fig. 9 Vehicle speed curve at high-speed process

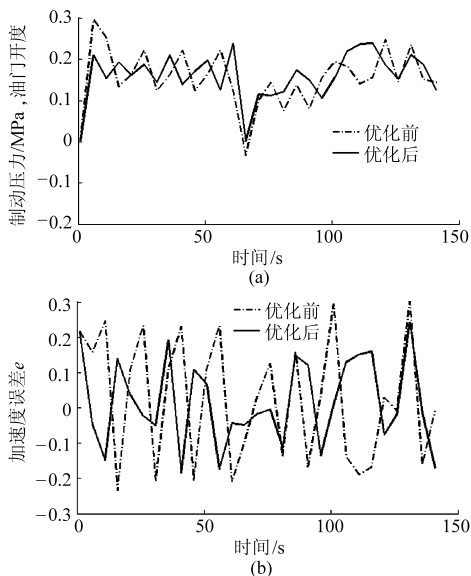


图 10 高速工况油门制动和 e 对比曲线

Fig. 10 Contrast curve in high-speed condition

从仿真结果可知,同低速工况类似,由图 10a 可得优化后的油门开度和制动压力曲线在稳定跟随和定速巡航时更加平稳和合理,振荡更加减少,速度控制更加平滑;而在自由行驶和跟随速度不断变化的前车时,为保证好的跟随特性,优化后的油门开度和制动压力曲线波动加大。从图 10b 可以看出,优化后的模糊自校正控制器对混合高速行驶工况的控制更平稳,理想加速度跟随更好。

3.3 实车试验

实车平台选择自动挡捷达车。在车上分别加装 CORREVIT® S-CE 非接触式光电测速仪和 Crossbow VG700AA 光纤陀螺仪获取本车纵向速度和纵向加速度信息;在车前方车牌位置处加装 ESR 电子多模式扫描雷达获取前车相对距离、相对速度和相对角度信息;执行机构选取 Maxon 电动机,分别利用油门电动机直接控制节气门开度和制动电动机控制制动踏板行程以提供所需制动压力;各传感器信息采集和保存的程序、ACC 控制程序和执行机构控制程序的运算平台选用 PXI-1042Q 型工控机;以上各个传感器、执行机构和设备安装布置示意图如图 11 所示。

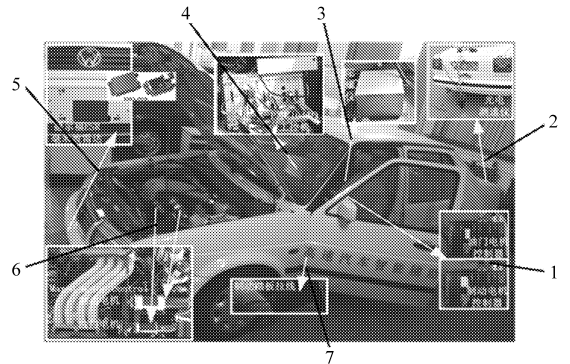


图 11 ACC 系统实车试验平台示意图

Fig. 11 Test platform of ACC system of real vehicle

1. 电动机控制器 2. 光电测速仪 3. 陀螺仪 4. 工控机 5. 雷达 6. 电动机 7. 踏板控制拉线

为了验证 ACC 系统的实车控制效果,设计了本车处于巡航状态、低速前车切入和本车跟随速度不断变化的前车 2 种工况下的实车试验,本车巡航车速为 60 km/h。试验结果曲线如图 12~13 所示。

通过试验的曲线可以看出,ACC 系统能够在巡航工况下有效地控制本车车速保持在巡航速度;而且在跟随和前车切入工况能够随着前车速度的变化,在保证安全距离的情况下,实现系统闭环控制本车车速随动。

4 结束语

建立了 Carsim 和 Simulink 汽车 ACC 算法联合

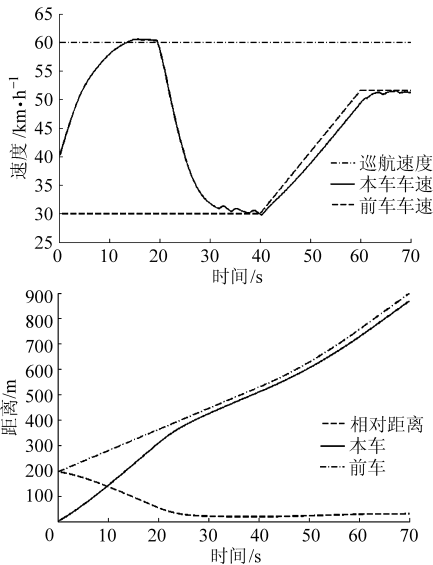


图12 本车处于巡航状态低速前车切入

Fig. 12 Low-speed vehicle cut in cruising vehicle

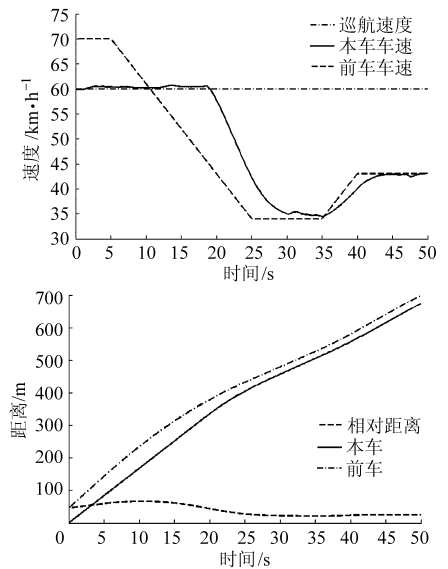


图13 本车跟随速度不断变化的前车

Fig. 13 Vehicle followed vehicle in front with changing speed

仿真环境,利用粒子群优化算法,提出了汽车自适应巡航模糊自校正控制器参数优化方法。采用粒子群优化算法对模糊自校正控制器的3个比例因子和选用的三角形隶属度函数的形状进行优化设计。仿真

结果证明所提出方法的有效性和优化后的模糊自校正控制器的优越性。实车试验结果证明所提方法能够有效避免繁琐的控制器参数调整过程,提高工作效率并可保证ACC系统达到满意的控制效果。

参 考 文 献

- 1 Brackstone M. Car-following: a historical review[J]. Transportation Research Record, 1999, 2(4): 181 ~ 196.
- 2 Poulin E, Pomerleau A, Desbiens A, et al. Development and evaluation of an auto-tuning and adaptive PID controller[J]. Automatica, 1996, 32(1): 71 ~ 82.
- 3 Wang L X. Modeling and control of hierarchical systems with fuzzy system[J]. Automatica, 1997, 33(6): 1 041 ~ 1 053.
- 4 张化光,何希勤. 模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- 5 王树凤,李华师. 四轮转向车辆后轮转角与横摆力矩联合模糊控制[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 14 ~ 19.
Wang Shufeng, Li Huashi. Yaw moment fuzzy control of four-wheel-steering vehicle based on co-simulation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 14 ~ 19. (in Chinese)
- 6 Shi Yuhui, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer[C] // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998: 69 ~ 73.
- 7 Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia, 1995: 1 942 ~ 1 948.
- 8 王云,冯毅雄,谭建荣,等. 基于多目标粒子群算法的柔性作业车间调度优化方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 190 ~ 196.
Wang Yun, Feng Yixiong, Tan Jianrong, et al. Optimization method of flexible job-shop scheduling based on multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 190 ~ 196. (in Chinese)
- 9 郝万军,强文义. 基于粒子群优化的一类模糊控制器设计[J]. 控制与决策, 2007, 22(5): 585 ~ 588.
Hao Wanjuan, Qiang Wenyi. Design of fuzzy controller based on particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2007, 22(5): 585 ~ 588. (in Chinese)
- 10 Guan Hsin, Gao Zhenhai, Guo Konghui, et al. A driver direction control model and its application in the simulation of driver-vehicle-road closed-loop system[C]. SAE Paper 2000-01-2184, 2000.
- 11 Antony Tang, Alice Yip. Collision avoidance timing analysis of DSRC-based vehicles[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(1): 182 ~ 195.
- 12 Rolf Isermann, Roman Mannale, Ken Schmitt. Collision-avoidance systems PRORETA: situation analysis and intervention control[J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(11): 1 236 ~ 1 246.
- 13 Gao Zhenhai, Guo Jian, Deng Guohui. A fuzzy on-line self-tuning control algorithm for vehicle adaptive cruise control system with the simulation of driver behavior[C]. SAE Paper 2009-01-1481, 2009.
- 14 管欣,王景武,高振海. 基于最优预瞄加速度决策的汽车自适应巡航控制系统[J]. 吉林大学学报:工学版, 2004, 34(2): 189 ~ 193.
Guan Xin, Wang Jingwu, Gao Zhenhai. Vehicle adaptive cruise control system based on optimal preview acceleration decision making[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2004, 34(2): 189 ~ 193. (in Chinese)