

无级变速汽车的自适应模糊控制研究

王红岩¹, 王立公², 孙冬野³

(1. 装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072; 2. 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100021;

3. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为提高无级变速汽车控制系统对外界负荷扰动和各种运行工况的自适应能力, 本文在简单的无级变速系统模型的基础上, 设计了无级变速汽车的自适应模糊控制系统。所设计的自适应模糊控制系统由参数自调节油门模糊控制器和混合型模糊-PID 的无级变速器速比和制动控制器构成, 该控制系统只与汽车的瞬时运行状态有关而与汽车的参数无关, 因此它对不确定的汽车参数和外界负荷的扰动具有良好的鲁棒性。仿真结果表明所设计的模糊控制系统具有良好的自适应能力。

关键词: 无级变速传动; 自适应模糊控制; 仿真

中图分类号: U463 **文献标识码:** A

Study on the adaptive fuzzy control for CVT vehicle

WANG Hong-yan¹, WANG Li-gong², SUN Dong-ye³

(1. Department of Mechanical Engineering, Armored Force Engineering Academy, Beijing 100072, China;

2. Environment and Energy Source Engineering College, Beijing Polytechnical University, Beijing 100021, China;

3. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the simple CVT (continuously variable transmission) driveline model, an adaptive fuzzy control system for CVT vehicle was designed to improve the adaptability of the control system for CVT vehicle. The adaptive fuzzy control system consisted of a scaling factor self-tuning fuzzy throttle controller, and a hybrid fuzzy-PID CVT ratio and brake controller. The adaptive fuzzy control strategy is independent of vehicle model, and depends only on the instantaneous vehicle states. So it has good robustness to uncertain vehicle parameters and exogenous load disturbance. The simulation results showed that the proposed adaptive fuzzy system has good adaptability.

Key words: CVT; adaptive fuzzy control; simulation

1 前言 (Introduction)

无级变速传动 (CVT) 是汽车理想的传动方式, 装备无级变速器的汽车比装备多档变速器的汽车具有更大的动力性和经济性潜力。随着对汽车燃油经济性和尾气排放要求的不断提高, 人们预测 CVT 车辆的市场占有率会逐年提高^[1,2]。

目前对 CVT 车辆的仿真研究主要集中在简化的 CVT 模型基础上分析模拟车辆系统的动态特性及动力性和经济性能。在控制方法上对 CVT 车辆采用模糊控制的文献报道还较少^[3~7]。

由于汽车和发动机是具有滞后的高阶非线性系统, 其参数随着环境和时间而变化。因此, 为了满足汽车控制性能的要求, 汽车控制器的控制动作应该为汽车运行状态的非线性函数。在实际中, 有经验的

驾驶员可以在各种复杂的环境中很好地驾驶汽车, 自如地决定加、减油门, 确定换挡模式并实现换挡, 这个过程可以用 IF-THEN 规则的语言变量表达式来描述, 而这些规则又可以转换为模糊控制算法来实现模糊控制器的非线性控制动作。但是, 在普通的模糊控制器中, 由于有限的规则数量、固定的隶属函数和控制器参数的限制, 使在有些情况下必要的控制动作不会产生。这时, 这种简单的模糊控制器就不能实现理想的控制目标^[8]。为了克服简单模糊控制器自身能力的不足, 同时提高控制系统对外界负荷的扰动、不确定的车辆参数和各种运行工况的自适应能力和鲁棒性能, 文中提出在油门控制中采用了参数自整定的模糊控制器, 在 CVT 速比控制和制动控制中采用混合型的模糊 PID 控制器。研究表明, 文

中所提出的自适应模糊控制策略使控制系统具有较强的鲁棒性和自适应能力。

2 汽车控制系统模型(Automobile control system model)

文中控制系统的设计是基于一个简单的、具有非线性特征的无级变速系统及汽车的模型基础上,具体模型方程见文献[5~7]。

汽车控制模型包括驾驶员和速比控制器两个部分,其模型框图如图1所示。

图中: F_{brake} 为制动力; ω_e 为发动机转速; T_e 为发动机转矩; v 为车速; α 是油门开度; T_{out} 为传动系统输出转矩; di/dt 为无级变速器速比变化率,其中 i 为变速器速比。

驾驶员被模型化为对油门开度有饱和度限制的PI类模糊控制器^[6]。该控制器基于实际车速与理想车速的差值来调节油门开度,具体模型如下:

$$\begin{cases} \Delta v = v_{\text{desired}} - v_{\text{actual}}, \\ \alpha = \int K_{UT} F[\Delta v, \frac{d\Delta v}{dt}] dt, \\ 0^0 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: v_{desired} 和 v_{actual} 分别为理想车速和实际车速, K_{UT} 是模糊控制器输出的比例因子, $F[\cdot]$ 是控制器输入与输出间的模糊映射关系; α 是油门开度角,它由最大角度 $\alpha_{\max}$ 限定。

驾驶员模型还包括制动控制器,文中的模型将制动力和制动踏板之间的关系简化为线性关系^[6],并且不考虑前后制动器的差别,具体模型为

$$\begin{cases} \Delta v = \max \{ (v_{\text{actual}} - v_{\text{desired}}), 0 \}, \\ X_{\text{brake}} = K_{UB} F[\Delta v, \frac{d\Delta v}{dt}], \\ 0 \leq X_{\text{brake}} \leq 1. \end{cases} \quad (2)$$

其中: K_{UB} 模糊控制器输出比例因子, X_{brake} 是制动踏板的位置量,其最大值为1。制动控制器是PD类型的模糊控制器^[6]。

传动系统的速比控制器是根据汽车运行参数如车速、发动机节气门开度和转速来决定速比变化率的。速比变化率的算法主要是基于试验测得的理想发动机转速和实际测得的发动机转速。速比变化的命令主要考虑三个方面:最佳燃油消耗、最佳加速性能和前二者的折衷。速比控制器具体描述为

$$\begin{cases} \Delta \omega = \omega_{e,\text{desired}} - \omega_{e,\text{actual}}, \\ di/di = K_{UR} F[\Delta \omega, \frac{d\Delta \omega}{dt}]. \end{cases} \quad (3)$$

其中: K_{UR} 是速比控制器输出的比例因子; $\omega_{e,\text{desired}}$ 和 $\omega_{e,\text{actual}}$ 分别为理想和实际的发动机转速,理想的发动机转速模型为油门开度和车速的三维图^[5]。速比控制器也是PD类的模糊控制器^[6]。

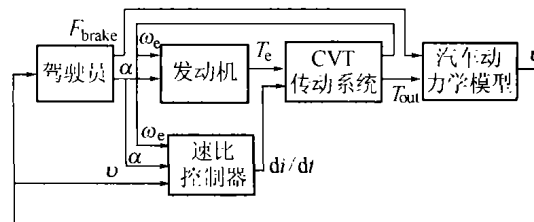


图1 无级变速汽车控制系统框图

Fig. 1 Control system block diagram of CVT-equipped vehicle

以上的模糊控制器均采用 E 和 EC 为输入量, U 为输出量,它们分别被设定为误差 e , 误差变化 ec 和输出 u 的模糊语言变量。其中 E 和 EC 在输入的模糊集合中采用3个模糊化量级,表示为 $\{N, Z, P\}$ 。语言变量 U 在输出模糊集合中采用5个模糊化量级,表示为 $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ 。输入输出量的模糊规一化等级分别设定为 $\{E\} = \{EC\} = \{-1, 0, 1\}$ 和 $\{U\} = \{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$ 。所有输入输出语言变量的隶属函数均定义在 $[-1, 1]$ 区间上,输入和输出的隶属度函数均采用钟形函数,如图2所示。文中采用非线性解模糊算法。模糊控制规则如表1。

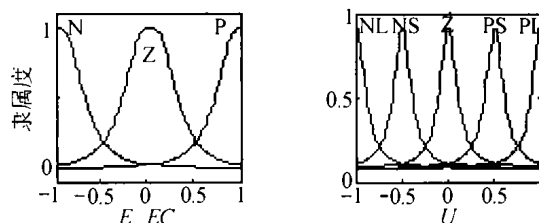


图2 隶属度函数

Fig. 2 Membership function of input and output

表1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rule

U	EC		
	N	Z	P
N	NL	NS	Z
E	Z	NS	PS
P	Z	PS	PL

3 自适应模糊控制系统设计(Adaptive fuzzy control system design)

3.1 参数自整定的油门控制器设计(Scaling factor self-tuning throttle fuzzy controller design)

模糊控制器的整定的方法主要有控制器参数的

在线整定、隶属度函数和模糊控制规则的整定,其中控制器参数的在线自整定更具有实用价值^[8,9].模糊控制器量化因子和比例因子的变化对系统的动态性能和稳定性的影响极大,因此,设计一个油门控制器的参数自整定机构,可以根据汽车的运行状态在每一个采样周期生成更新因子来动态地调整模糊控制器的参数,调节油门控制器的输出.这相当于有经验的驾驶员根据汽车当前的运行状态来控制油门踏板获得汽车的最优性能.图3给出了所设计的参数自整定模糊控制系统的框图,其中模糊控制器输入的量化因子和输出的比例因子均由参数由自整定机构生成的更新因子来在线修正,更新因子的变化是由定义于汽车状态的模糊规则决定的.具体的控制器设计如下.

方程(1)的输出可以表示为离散方程的形式

$$\alpha(i) = K_{IT} T \sum_{t=0}^i F[e_1(i), ec_1(i)]. \quad (4)$$

其中 T 是采样周期.

由于控制器的输出是离散变量,稳态误差就不能严格地消除.只有当采样周期恒定并且比例因子 K_{IT} 足够小时,稳态误差才可以落在一个较小的范围内,但是如果 K_{IT} 太小,系统的动态响应速度会变慢,过渡时间延长.因此,如果在油门控制器输出和对象系统的输入之间以并联的方式插入比例分支,就会提高系统的响应速度,如图3所示,此时油门控制器的输出可以表示为

$$\alpha(t) = K_P F[e_1(t), ec_1(t)] + \int_0^t K_I F[e_1(t), ec_1(t)] dt. \quad (5)$$

从方程(5)和方程(1)的比较来看,比例项加入到控制器中后系统的响应速度可以得到保证,同时当 K_I 选择较小值时还可以保证系统有较高的稳态精度.

由于系统所处的不同的动、静态阶段要求的模糊控制器的量化因子和比例因子是不同的,因此采用固定的模糊控制器参数很难同时获得满意的系统动、静态特性.如果根据汽车运行状态对控制器参数进行在线修正,就会大大改善模糊控制器的性能.具体的参数整定原则如下:当目标车速与实际车速的误差和误差变化较大时,油门控制器的主要作用是减少车速差值,加快动态响应过程,所以要缩小量化

因子 K_{e1} 和 K_{ec1} , 放大 K_I 和 K_P , 使油门控制量取大值;当目标车速与实际车速的误差和误差变化较小时,系统接近稳态,为保证控制精度要对油门控制器的输出进行精细调节,放大量化因子 K_{e1} 和 K_{ec1} , 缩小 K_I 和 K_P , 达到提高分辨率,减小稳态误差的目的.从分析可知, K_{e1} 和 K_{ec1} 与 K_I 和 K_P 的变化趋势恰好相反,因此图3中的更新因子 N 和 M 取互为倒数.

为了提高系统的控制性能,控制器参数和更新因子的变化还要考虑到以下因素:1) 为了降低超调量和缩短稳定时间,同时不影响系统的响应速度,图3中的系数 K_I 应取为较小的值,而系数 K_P 应取为较大的值.较小的系数 K_I 可以避免积分回绕现象并保持系统控制性能在可以接受的范围内^[8].2) 为了提高控制器对外界负荷扰动的鲁棒性,量化因子 K_{e1} 和 K_{ec1} 在稳态情况下要设置为相对较大值,系数 K_I 和 K_P 应设置为相对较小值.

模糊控制器参数的自整定方法也是按模糊控制的方法来实现的.图3中参数自整定机构的更新因子 N 的输入语言变量模糊集合设为{负大(NL),负小(NS),零(ZE),正小(PS),正大(PL)},输入量的归一化区间设定为 $[-1, 1]$, 其量化等级设为 $\{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$, 推论部分的隶属函数采用等距对称的、相邻50%重叠的三角形函数.更新因子 N 输出部分的语言变量模糊集合为{大放(AB),中放(AM),小放(AS),不变(OK),小缩(CS),中缩(CM),大缩(CB)}, N 的数值论域等级划分为 $\{1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8\}$, 其隶属函数如图4所示.参数自整定规则如表2所示.自整定更新因子 N 的模糊推理方法与常规的模糊算法相同.

从以上的分析可知,更新因子是连续的非线性变量,油门控制器的输出取决于更新因子的作用结果,它只与瞬时的车辆状态(车速和车速变化)有关,与车辆的参数无关.因此,该油门控制策略可以提高控制系统对不确定参数和外界负荷扰动的自适应能力和鲁棒性.由于无级变速系统是高阶非线性的耦合系统,各控制变量和状态量之间相互影响和相互作用^[3],在改善油门控制策略的同时,还要考虑到速比控制系统和制动控制系统的改造,以提高系统的综合控制性能.

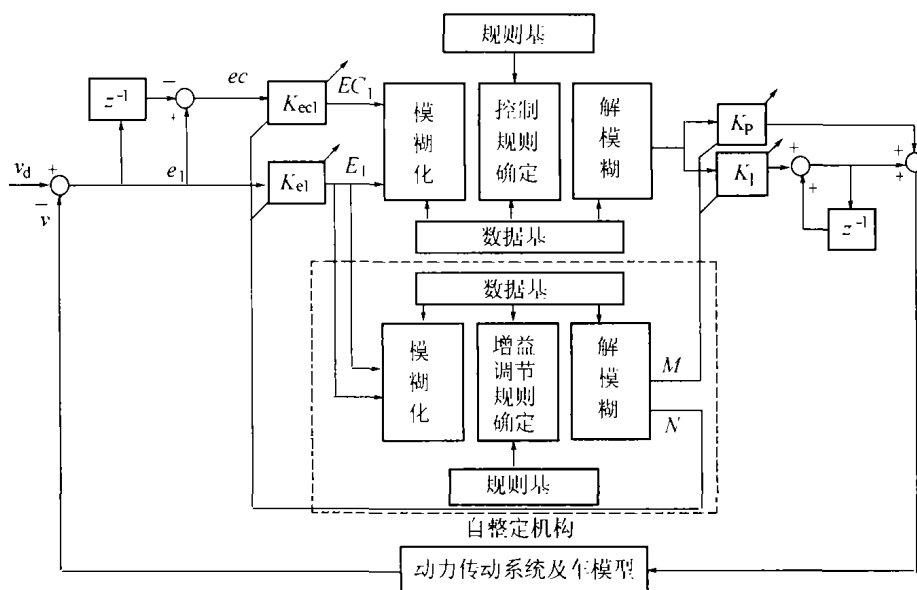


图3 参数自整定模糊控制器框图

Fig. 3 Block diagram of scaling factor self-tuning fuzzy controller

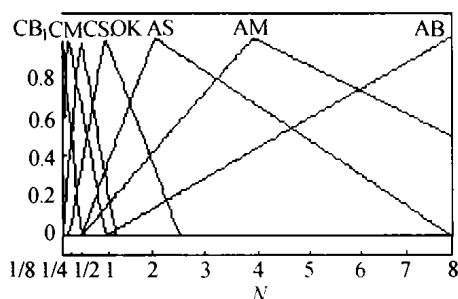


图4 结论部分隶属函数

Fig. 4 Membership function of output

表2 更新因子 \$N\$ 自整定规则

Table 2 Updating factor self-tuning rules

\$N\$	\$EC\$				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	CB	CS	OK	CS	CB
NS	CM	OK	AM	OK	CM
ZE	OK	AM	AB	AM	OK
PS	CM	OK	AM	OK	CM
PB	CB	CS	OK	CS	CB

3.2 混合型模糊-PID 控制器设计 (Hybrid fuzzy-PID controller design)

无级变速汽车的速比和制动器的模糊控制器为PD型控制器^[6],它只具有模糊比例和微分作用而没有模糊积分作用,这造成系统的动态性能较好,静态性能欠佳^[10].因此,为了改善系统的静态性能、提高控制精度,把PI控制引入模糊控制器中构成混合型模糊-PID控制器,利用比例积分控制作用来获得较高的稳态精度和较快的动态响应速度.模糊控制器

和PI控制器采用并联形式组合,控制器的输出是模糊控制和PI控制之和,具体如下:

$$u_2 = u_f + u_i = u_f + K_{i2} \sum e_2. \quad (6)$$

其中 \$e_2(t)\$ 是连续变量,这样 \$u_i = K_{i2} \sum e_2(t)\$ 也是连续变量.这样混合型模糊-PID控制器不仅可以消除极限环的振动,还可以完全消除跟踪误差^[10].

图5给出了速比控制的混合型模糊-PID控制器框图.图中的控制器目标变量是理想发动机转速,它是车速和油门开度的函数.混合型模糊-PID制动控制器结构与速比控制器是一致的,但是制动控制器的输入分别为实际车速和目标车速,具体见方程(2).

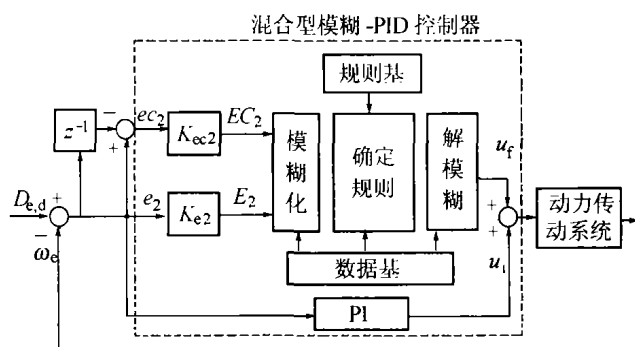


图5 传动系统速比的混合型模糊-PID控制器

Fig. 5 Hybrid fuzzy-PID controller in CVT speed ratio

4 仿真结果 (Simulation results)

为了考察所提出的自适应模糊控制系统的瞬态和稳态性能,验证所提出的控制策略的鲁棒性,文中针对各种运行工况、不确定的外界随机负荷的扰动和不同的系统采样频率以及变车辆参数等情况进行

了仿真研究.在仿真中,不同的运行工况表现为加速、匀速和减速工况,外界随机负荷扰动用外界不确定的道路阻力激励来模拟.仿真结果如图6,7所示.

在图6的仿真结果中,实线和虚线分别表示采用自适应模糊控制和普通模糊控制的仿真结果,其采样周期分别取为0.5 s和0.1 s.从图6的仿真结果可以看出,与采用普通的模糊控制相比,采用自适应模糊控制使系统性能无论是在瞬态工况还是在稳态工况下均有明显改善,特别在外界阻力激励的情况下,油门开度、制动踏板量和CVT速比随外界激励而振动的现象消失,系统的稳定性和适应能力大大提高.仿真结果表明,采用自适应模糊控制使目标车速和实际车速之差的最大值小于2 km/h(采样周期为0.5 s),而采用普通的模糊控制器在外界道路阻力激励的情况下(采样周期也为0.5 s),目标车速和实际车速之差的最大值达到5 km/h,并且有一定幅度的波动.两种控制方法使发动机工作点的运行轨迹如图6所示,结果表明采用自适应模糊控制使发动机能更好地沿发动机目标工作线运行.

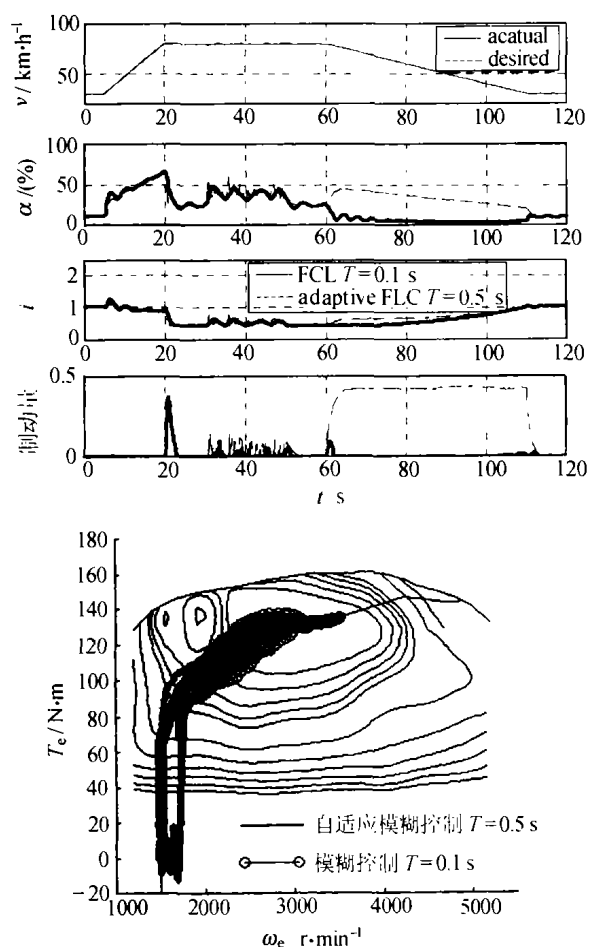


图6 采用自适应模糊控制策略和普通模糊控制策略的仿真结果比较

Fig. 6 Simulation results comparison between adaptive and conventional fuzzy control strategy

为了进一步验证自适应模糊控制策略的鲁棒性能,还对变车辆参数(载重和传动系统效率)的情况进行了研究,结果表明系统的稳定性和控制效果良好^[5].

图7表示在不同的采样周期下油门控制器参数和更新因子 N 的动态变化情况的仿真结果,其中更新因子根据车辆加速、减速和遇到道路阻力激励的情况下动态调节,通过改变模糊控制器的参数来减少油门输出的波动,提高系统的稳定性和适应能力.在仿真中,使用不同的控制器采样周期在相同的运行工况下造成的更新因子变化幅度也不同,采样周期越长,则更新因子的变化幅度越大,采样周期越短,则更新因子的变化幅度越小,这表明采用自适应模糊控制器使控制系统具有更宽的使用范围.图7的仿真结果表明,模糊控制器增益系数的变化范围和数量级与前面的讨论结果是一致的.

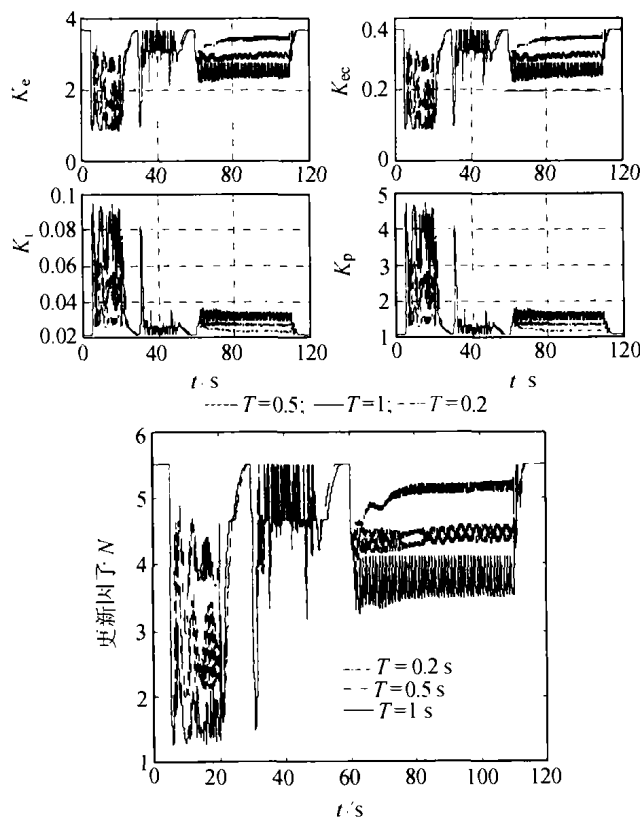


图7 油门控制器的更新因子 N 和动态参数变化的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of dynamic gains of throttle controller and updating factor N

以上的仿真结果表明,文中提出的自适应模糊控制策略在各种情况下均优于普通的模糊控制策略.参数自整定的油门模糊控制器等价于具有动态变参数的普通模糊控制器.

(下转第80页)

vier Science, 2000:166-171.

- [7] WU M, NAKANO M, SHE J H. A model-based expert control strategy using neural networks for the coal blending process in an iron and steel plant [J]. *Expert Systems with Applications*, 1999, 6 (16): 271-281.
- [8] HAGAN M T, DEMOUTH H B, BEALE M H. *Neural Network Design* [M]. Boston: PWS Publishing Company, 1996.
- [9] HAGAN M T, MENHAJ M. Training feed forward network with the Marquardt algorithm [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1994, 5 (6): 989-993.

作者简介:

陈晓方 (1975—),男,在读博士,于2000年在中南工业大学获硕士学位,研究领域为智能优化算法,复杂生产过程建模与优化控制等.E-mail:cx197@163.com;

桂卫华 (1950—),男,1981年研究生毕业于中南大学自动控制工程系,并获得工学硕士学位,1986年至1988年在联邦德国留学,现为中南大学信息工程学院教授,博士生导师,目前主要研究方向是工业大系统递阶和分散控制理论及应用,关联系统分散鲁棒控制的 H_∞ 方法,生产过程控制,复杂系统建模与优化控制;

王雅琳 (1974—),女,工学博士,2001年毕业于中南大学,研究领域为复杂系统建模与优化控制,生产过程控制;

吴敏 (1963—),男,1986年毕业于中南工业大学自动化专业,获工学硕士学位,并留校从事教学和科研工作,1989年至1990年作为访问学者在日本东京工业大学电气工程系进修,1994年起任中南工业大学自动控制工程系教授,1996年至1999年作为客座研究员在日本东京工业大学控制工程系进行国际合作研究,获东京工业大学工学博士学位,现为中南大学控制理论与控制工程博士点博士生导师,主要研究兴趣是:鲁棒控制,非线性控制和过程控制;

阳春华 (1965—),女,教授,工学博士,研究领域为生产过程控制,智能控制理论与应用,复杂系统建模与优化控制.

(上接第74页)

5 结论(Conclusions)

文中设计了由参数自调节的油门模糊控制器和混合型模糊-PID的无级变速器速比和制动控制器构成的自适应模糊控制系统,仿真结果表明,自适应模糊控制策略与普通的模糊控制策略策略相比,无论在稳态还是在瞬态情况下都使控制系统获得了满意的控制效果.

理论分析和仿真结果表明,自适应模糊控制策略可以根据车辆瞬时状况来动态调节油门控制器的参数以满足系统控制性能的要求,其变化与车辆参数无关,这使控制系统的对外界负荷扰动和不确定系统参数的自适应能力和鲁棒性得到了显著的提高.

无级变速汽车的控制性能取决于控制系统综合控制的效果,仿真结果表明,在速比控制系统和制动控制系统中采用混合型模糊PID控制策略后对提高整个系统的稳定性具有极大的作用.

参考文献(References):

- [1] PAUL M. CVTs driving the future of transmission technology [C]// VELDPAUS E F, de JAPER A G. *Proc of Int Congress on Continuously Variable Transmissions*. Bindhoven, Netherlands: Bindhoven University of Technology Press, 1999:1-3.
- [2] LIEBRAND N. Future potential for CVT technology [C]// TANAKA H. *Proc of Int Conf of Continuously Variable Power Transmission*. Yokohama, Japan: Society of Automotive Engineers of Japan, 1996:33-36.
- [3] WANG Hongyan, ZHOU Yunshan, ZHANG Boyng, et al. Research on integrated control strategy of continuously variable transmission for passenger car [C]// LI Liguang. *Proc of IEEE Int Vehicle Electron-*

ics Conference. Changchun, China: Jilin Science and Technology Press, 1999:401-405.

- [4] HONG Chewun. A fuzzy throttle controller for dynamic driving simulation [J]. *Int J of Vehicle Design*, 1995, 16(2/3):203-218.
- [5] ZHANG Boying, WANG Hongyan. Study on cruise fuzzy control for CVT vehicle [C]// *Proc of AVEC'2000 5th Int Symposium on Advanced Vehicle Control*. Ann Arbor, Michigan, USA: [s. n.], 2000:22-24.
- [6] WANG Hongyan, QIN Datong. Design for fuzzy controller of driving simulator of automobile with CVT system [C]// QIN Datong. *Proc of Int Conf on Mechanical Transmission*. Chongqin, China: China Machine Press, 2001:516-520.
- [7] WANG Hongyan, QIN Datong. Study on the fuzzy control strategy for the autopilot system of CVT vehicle [C]// KUBO A. *Proc of JSME Int Conf on Motion and Power Transmission*. Fukuoka, Japan: Japan Society of Mechanical Engineers, 2001:718-723.
- [8] RAJANI M K, NIKHIL P R. A self-tuning fuzzy PI controller [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 115(3):327-338.
- [9] MAEDA M, SHUTA M. A self-tuning fuzzy controller [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 51(2):29-40.
- [10] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1995.
(ZHU Jing. *Theory and Application of Fuzzy Control* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995.)

作者简介:

王红岩 (1965—),男,1998年于吉林工业大学获工学博士学位,现任北京装甲兵工程学院机械工程系车辆室副教授,主要研究方向为车辆动力传动系统的控制与匹配等.E-mail:why_cvt@263.net;

王立公 (1967—),男,1997年于吉林工业大学获工学博士学位,现任北京工业大学环境与能源工程学院副教授,主要研究方向为车辆动力学和车辆动力系统的控制等;

孙冬野 (1967—),男,1997年于吉林工业大学获工学博士学位,现任重庆大学机械传动国家重点实验室副教授,主要研究方向为车辆传动系统以及混合动力传动系统的匹配和控制等.