

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2017.3.05

模糊 RBF 神经网络 PID 在汽车定速巡航 控制系统应用

张袅娜, 李昊林*

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 结合模糊控制的推理和 RBF 神经网络的自学习能力, 实现对 PID 控制器参数的实时在线整定。仿真结果表明, 该方法可以有效改善汽车巡航系统速度跟随过程中的动态性能和稳定性能。

关键词: 巡航; 模糊控制; RBF 神经网络; PID 整定

中图分类号: U 463.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2017)03-0237-08

Fuzzy RBF neural network PID in cruise control system of automobile

ZHANG Niaona, LI Haolin*

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Fuzzy control reasoning is combined with RBF neural network self-learning to optimize the parameters of PID control in real time. The simulation results indicate that both the dynamic and static performance of the cruise control system are improved.

Key words: cruise control system; fuzzy control; RBF neural network; PID.

0 引言

汽车巡航控制系统(CCS)对预定车速与实际车速之间的偏差进行有效识别,通过控制器对车辆的节气门进行自动调节,实现行驶车速对预定车速的快速稳定跟随,作为一种高效的辅助驾驶

系统,当车辆行驶速度超过某一阈值时,驾驶员即可手动开启车辆的自动巡航驾驶模式。鉴于自动巡航系统的优势,目前,国内外各汽车研发企业已将自动巡航系统作为高档车型的重要配置,但由于车辆在巡航过程中存在较强的非线性,易受到外界干扰的影响,且车辆行驶工况复杂,因此,实

收稿日期: 2016-10-18

基金项目: 吉林省省级经济结构战略调整引导资金专项项目(2014Y126); 长春市科技局重大科技攻关计划项目(14KG095)

作者简介: 张袅娜(1972—),女,汉族,吉林长春人,长春工业大学教授,博士,主要从事非线性系统控制、故障诊断研究,E-mail: zhangniaona@163.com. * 通讯作者: 李昊林(1993—),男,汉族,吉林白山人,长春工业大学硕士研究生,主要从事新能源汽车巡航控制与建模仿真等方向研究,E-mail: 842378030@qq.com.

现对汽车巡航控制系统的优化升级已成为未来汽车行业发展的方向,得到相关汽车控制方面专家的普遍重视^[1-4]。

目前,国内多家科研机构 and 高校企业都对汽车定速巡航控制有一定研究,如刘文彬^[5]通过该方法可以使系统具有较好的精度,响应速度快,系统工作稳定,能够满足汽车巡航系统实际使用要求。李肖含^[6]提出了基于模糊控制的自动巡航控制器,该种控制器可以与传统 ACC 系统控制方法相比,该控制策略有着响应迅速、达到稳态速度快的优势,这也说明了文中所提出的 ACC 系统模糊控制策略都有很好的表现。沈亮^[7]提出了汽车巡航系统的模糊 PID 控制器,经过仿真实验,该方法可以满足对汽车车速的实时控制。

随着自动控制技术的不断发展,人们对汽车巡航系统自动学习能力的需求逐渐增加,模糊 PID 技术虽可以实现预定车速的稳定跟随,但汽车巡航过程中此技术在动态性能上的不足逐渐显现出来,为了有效解决模糊控制不灵活的问题,文中在模糊 PID 控制的基础上引入 RBF 神经网络算法。神经网络算法可以模拟人类神经元对信息处理的方式,并具有一定的自学习和自适应能力,该种算法可以实现对信息的分布式存储,并通过并行协同的方式对信息进行处理,通过模糊 RBF 神经网络的 PID 控制技术有效整合模糊控制的推理能力与 RBF 神经网络的自学习能力,实现在线对 PID 控制参数的整定,使汽车巡航系统得到

更好的动态性能和稳定性能。

1 汽车巡航控制仿真模型的建立

在建立汽车巡航控制系统仿真模型时,需要充分考虑到车辆的物理特性,以求更加全面系统地反映出车辆真实的行驶情况,显著提升系统仿真分析的准确度。在建立汽车巡航系统的仿真模型时,随着模型精度的提高,模型也趋向复杂,这就为系统增加更多的参数辨识压力,因此在满足系统仿真要求的同时应尽可能实现对模型的简化^[8]。

1.1 汽车纵向动力学模型

为了对汽车直线巡航工况进行准确的模拟,文中建立了汽车纵向动力学模型以实现对汽车前行方向上的受力及运动情况进行分析。对汽车行驶中受力情况进行分析可以发现,在这个过程中车辆所受阻力主要包括空气阻力、滚动阻力以及坡道阻力,所受阻力依照汽车力学的平衡方程计算,即可推算出汽车所需要发动机提供的驱动力矩。

在对车辆行驶过程进行分析时,为了简化对复杂受力情况的归算,在误差允许的范围内将整车模型分割成车身、驱动轮及从动轮三个部分,将汽车各方向上所受的力都折算到汽车纵向运动方向上^[9],假设汽车行驶路况上具有良好的附着性,并将汽车轮胎视为刚体,建立汽车行驶过程中的驱动轮与从动轮模型如图 1 所示。

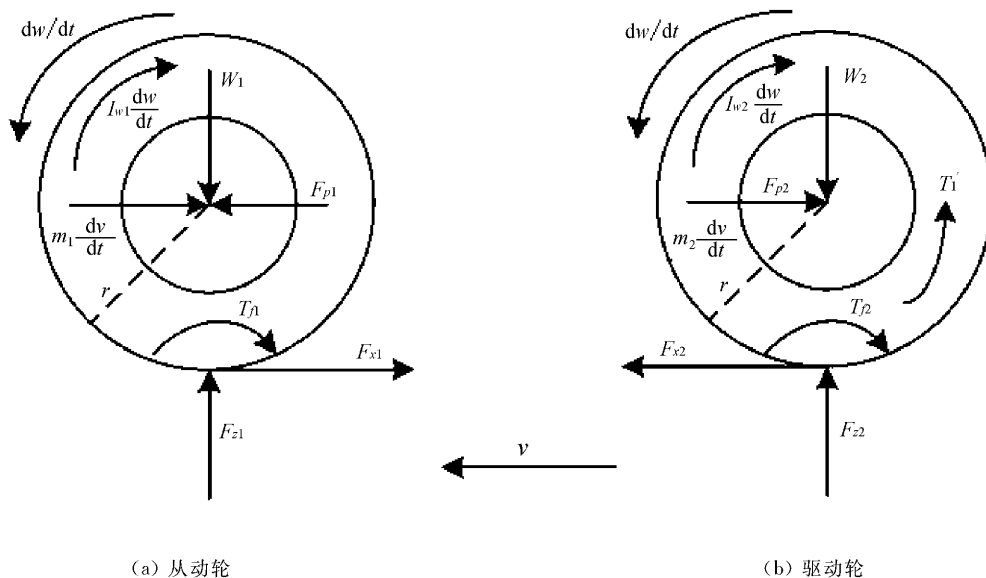


图 1 汽车行驶过程中从动轮及驱动轮受力分析

在对汽车纵向动力学进行建模时, 车辆从动轮、驱动轮及车身质量分别表示为 m_1 、 m_2 和 m_3 , 车轮的半径为 r ; 从动轮和驱动轮在垂直方向上所受到的荷重表示为 W_1 和 W_2 ; 从动轴与驱动轴对从动轮及驱动轮的作用力分别表示为 F_{p1} 和 F_{p2} ; 从动轮和驱动轮受到的滚动阻力分别表示为 F_{R1} 和 F_{R2} , 两轮所受滚动阻力偶矩分别为 T_{f1} 和 T_{f2} ; 地面对从动轮和驱动轮的切向作用力为 F_{x1} 和 F_{x2} , 法向作用力分别为 F_{z1} 和 F_{z2} ; T'_1 为作用在驱动轮上的转矩; dv/dt 为汽车行驶过程中的加速度, $d\omega/dt$ 为车辆的角加速度。

对汽车从动轮进行受力分析可得:

$$F_{p1} = m_1 \frac{dv}{dt} + F_{x1} \quad (1)$$

$$F_{x1} r = I_{w1} \frac{d\omega}{dt} + T_{f1} \quad (2)$$

$$T_{f1} = rF_{f1} \quad (3)$$

由式(1)、式(2)、式(3)联立可推出:

$$F_{p1} = F_{f1} + \left(m_1 + \frac{I_{w1}}{r^2}\right) \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

同理可以推出:

$$F_{x2} = F_{p2} + m_2 \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

$$F_{x2} r = T'_1 - m_2 \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

由此可推出驱动轮上的作用力为:

$$F'_t = F_{p2} + F_{f2} + \left(m_2 + \frac{I_{w2}}{r^2}\right) \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

汽车加速时, 发动机的角加速度可表示为:

$$\frac{d\omega_e}{dt} = i_g i_0 \frac{d\omega}{dt} = i_g i_0 \frac{1}{r} \frac{dv}{dt} \quad (8)$$

进而可以推出驱动轮上的转矩:

$$T'_1 = \left(T_{iq} - I_f \frac{d\omega_e}{dt}\right) i_g i_0 \eta \quad (9)$$

式中: T_{iq} —— 发动机转矩;

I_f —— 发动机的转动惯量。

由式(9)可以推出汽车行驶过程中驱动轮上的驱动力为:

$$F'_t = \frac{T'_1}{r} = \frac{T_{iq} i_g i_0 \eta}{r} - \frac{I_f i_g^2 i_0^2 \eta}{n} \frac{dv}{dt} = F_t - F_{je} \quad (10)$$

接下来对汽车行驶过程中的空气阻力进行分析, 空气阻力的大小可以反映在汽车车身表面压力的变化, 可得空气阻力:

$$F_w = C_D A \frac{\rho_a}{2} u^2 \quad (11)$$

式中: C_D —— 单位面积上的空气阻力;

A —— 汽车的迎风面积;

ρ_a —— 空气的质量密度, 取 $1.226 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$ 。

根据整车的受力平衡条件可得:

$$F_{p2} = F_{p1} + F_w + m_3 \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

将式(4)、式(7)和式(10)代入式(12)整理得:

$$\frac{T_{iq} i_g i_0 \eta}{r} = F_{f1} + F_{f2} + F_w + (m_1 + m_2 + m_3) \frac{dv}{dt} + \left(\frac{I_f i_g i_0 \eta}{r^2} + \frac{I_{w1} + I_{w2}}{r^2}\right) \frac{dv}{dt} \quad (13)$$

对式(13)进行简化, 记

$$m = m_1 + m_2 + m_3$$

$$F_f = F_{f1} + F_{f2}$$

$$\sum I_w = I_{w1} + I_{w2}$$

得下式:

$$\frac{T_{iq} i_g i_0 \eta}{r} = F_{f1} + F_{f2} + F_w + m \left[1 + \frac{1}{m} \frac{I_f i_g^2 i_0^2 \eta}{r^2} + \frac{1}{m} \frac{\sum I_w}{r^2}\right] \frac{dv}{dt} \quad (14)$$

进而可推出汽车在行驶过程中的表达式为:

$$F_t = F_f + F_w + F_g + \delta m \frac{dv}{dt} \quad (15)$$

式中: F_g —— 汽车行驶在坡道上的阻力。

汽车旋转质量换算系数为:

$$\delta = 1 + \frac{1}{m} \frac{I_f i_g^2 i_0^2 \eta}{r^2} + \frac{1}{m} \frac{\sum I_w}{r^2}$$

由式(15)在 Simulink 环境中搭建以汽车驱动力为输入量, 汽车行驶速度为输出量的汽车纵向动力学模型, 其仿真模型如图 2 所示。

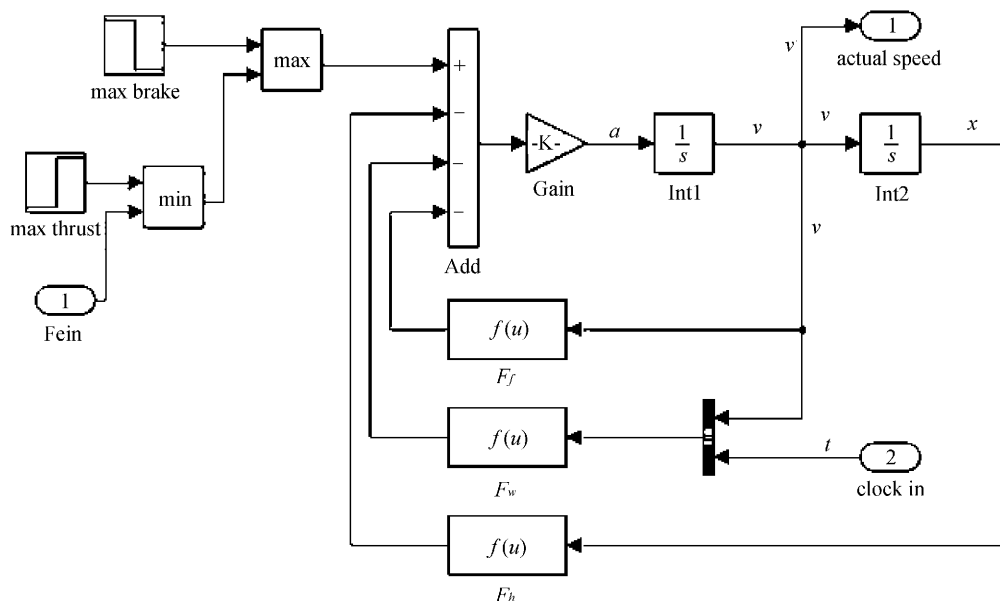


图 2 汽车纵向动力学仿真模型

1.2 节气门执行装置模型

发动机的转矩与发动机转速和节气门开度之间存在函数关系,为了实现对预设车速的稳定跟随,文中将节气门开度作为汽车动力学模型的输入量调节汽车的实际转速,通过建立仿真模型实现对节气门执行工作状态的模拟。汽车节气门执行器选择为脉宽调制(PWM)信号控制的直流电机,即为电子油门系统。该系统由节气门机构、直流电机和位置传感器构成闭环系统,文中采用二

阶振荡系统进行仿真:

$$\alpha_{des} = t_{\alpha 1} \ddot{\alpha} + t_{\alpha 2} \dot{\alpha} + \alpha \quad (16)$$

式中: α_{des} ——汽车节气门的期望开度;

α ——汽车节气门的实际开度;

$t_{\alpha 1}, t_{\alpha 2}$ ——二阶振荡系统常数, $t_{\alpha 1} = 0.01$, $t_{\alpha 2} = 0.1$ 。

按照式(16)在 Simulink 中建立节气门控制器的仿真模型,如图 3 所示。

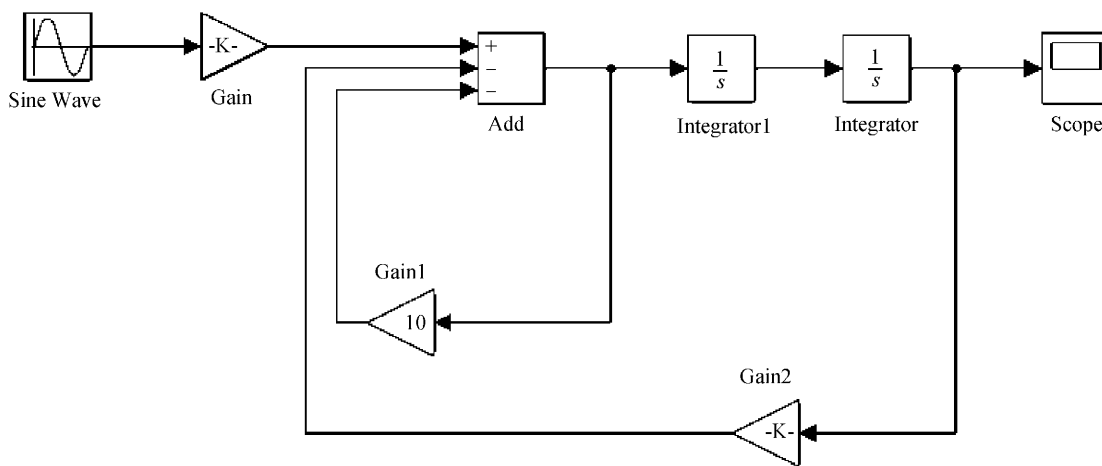


图 3 节气门执行器仿真模型

2 PID 汽车巡航控制器设计

2.1 PID 控制器的设计

汽车巡航系统的 PID 控制是指根据汽车实际车速与预设车速之间的偏差为输入,结合过去的行驶状况,针对目前的驾车状态,预估出未来的行车要求。汽车在行驶的过程中可以由驾驶员设定理想速度或由传感器对前车的车速进行识别,给出当前本车的速度要求,控制器将设定速度与实际车速相对汽车节气门的开度进行调整,实现对实际车速的调整。PID 控制器中包括比例、积分和微分控制,其中比例控制可以根据车速的偏差值调整发动机节气门的开度,从而使实际车速跟进预设车速,文中引入积分控制来保证汽车稳定的行驶状态,将汽车的车速偏差值进行累加,从而加大对控制量的调整,减少车速偏差,另外,微分控制的引入可以对汽车未来的行驶状况进行预估。

设定系统给定值为 $r(t)$,实际输出值为 $y(t)$,则系统的偏差 $e(t) = y(t) - r(t)$,进而可以得到 PID 控制器输出为:

$$u(t) = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_1^0 e(t) dt + \frac{T_d}{dt} de(t) \right\} \quad (17)$$

式中: K_p ——比例参数;

T_i ——积分时间参数;

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) =$$

$$K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (21)$$

由式(21)可知,只要确定比例参数 K_p 、积分时间参数 T_i 和微分时间参数 T_d ,即可计算出该控制器的控制增量。

T_d ——微分时间参数。

离散化处理:采样周期较小的情况下,可以用求和替代积分环节,用差商替换微分环节,进而可以通过近似变化得到:

$$\begin{cases} \int_1^0 e(t) dt \approx K_i \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T_d} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_d} \\ t = kT \end{cases} \quad (18)$$

式中: k ——采样序号, $k=1,2,3,\dots$;

T ——采样周期。

将式(18)代入式(17)中得到离散的 PID 表达式:

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (19)$$

汽车巡航控制系统采样信号类型为数字联系信号,因此可采用增量式 PID 控制算法:

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \quad (20)$$

进而可以推出控制增量如下:

2.2 PID 参数自整定的设计

模糊 RBF 神经网络 PID 控制器的原理框图如图 4 所示。

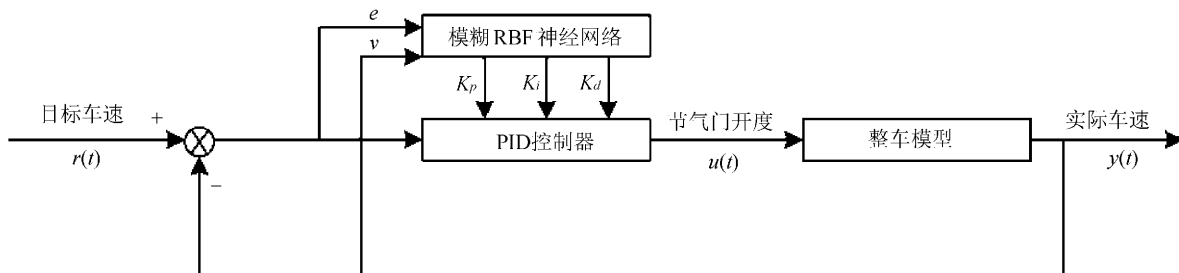


图 4 模糊 RBF 神经网络 PID 原理框图

图中控制系统将目标车速与实际车速之间的偏差 e 和实际车速 v 作为模糊 RBF 神经网络的输入,通过模糊神经网络算法的归算动态调整 PID 控制器的比例参数 K_p 、积分参数 K_i 及微分参数 K_d ,最后 PID 控制器通过对节气门开度的调节实现对目标车速的稳定快速跟随。

通过在模糊 PID 的基础上增加 RBF 神经网络算法,实现对 PID 参数的实时在线整定,并通过 RBF 神经网络的自学习功能不断完成对 PID 参数的优化,有效提升巡航控制系统动态性能和跟随性能。模糊 RBF 神经网络控制模块的功能是通过将目标车速与实际车速之间的偏差 e 和实际车速 v 作为输入,根据输入的变化动态调整 PID 的三个参数,提高 PID 的控制能力,对于模糊 RBF 神经网络的设计采用四层结构,其结构原理如图 5 所示。

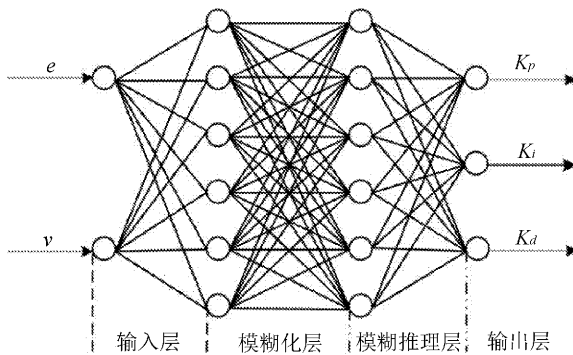


图 5 模糊 RBF 神经网络的原理框图

在模糊 RBF 神经网络的四层结构中:第一层为该模块的两节点输入层,以实现将偏差 e 及实际车速 v 的采集功能;第二层为 6 个节点的模糊化层,以实现将输入参数模糊化功能;第三层为 6 个节点的模糊推理层,以实现根据参数变化推理出 PID 参数整定规则的功能;第四层为 3 个节点的输出层,以实现将算法推理出的参数给定 PID 控制器。

$$\begin{cases} \alpha_j(k) = \alpha(k-1) + \Delta\alpha_j(k) + \partial[\alpha_j(k-1) + \alpha_j(k-2)] \\ \Delta\alpha_j(k) = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha_j} \end{cases} \quad (26)$$

式中: ∂ ——神经网络学习动力因子;

k ——系统迭代代数;

η ——神经网络的学习速率。

为了检验模糊 RBF 神经网络对 PID 参数整

定效果,引入性能指标函数:

$$E = \frac{1}{2} [y'_{\text{out}}(k) - y_{\text{out}}(k)]^2 \quad (27)$$

在输入层中的两个输入参数分别为偏差 e 和实际车速 v ,将这两个参数设定为: $X_1 = e, X_2 = v$ 。该层的活化函数设定为:

$$f_1(x) = x \quad (22)$$

则该层为下一层输出的参数为 X_1 和 X_2 。

在模糊化层中有 6 个节点,因此需要将上层的两个输入划分到 6 个模糊集合中,本层中通过活化函数判断两个参数划分到 6 个集合中的合理程度,该层的活化函数为:

$$f_2(i, j) = \exp\left\{-\frac{[f_i(i) - c_{ij}]^2}{(b_{ij})^2}\right\} \quad (23)$$

式中: c_{ij} ——第 i 个输入变量的第 j 个模糊集合隶属函数的均差;

b_{ij} ——第 i 个输入变量的第 j 个模糊集合隶属函数的标准差。

在模糊推理层中的 6 个节点分别代表着 6 种不同的控制规则,该层中将两个输入所对应模糊量经过匹配得出 PID 参数变化规则,本层中活化函数为:

$$f_3(j) = \prod_{i=1}^N f_2(i, j) \quad (24)$$

$$N = \prod_{i=1}^n n_i$$

在输出层中输出的参数为 PID 控制器的 3 个参数,则 3 个参数的输出为:

$$\begin{cases} K_p = \alpha \cdot f_3 = \sum_{j=1}^N \alpha(1, j) \cdot f_3(j) \\ K_i = \alpha \cdot f_3 = \sum_{j=1}^N \alpha(2, j) \cdot f_3(j) \\ K_d = \alpha \cdot f_3 = \sum_{j=1}^N \alpha(3, j) \cdot f_3(j) \end{cases} \quad (25)$$

式中: α ——模糊推理层与输出层之间的连接权重矩阵。

BRF 神经网络的对非线性时变系统的动态反应主要体现在 α 矩阵的实时调整。模糊 RBF 神经网络对 α 矩阵的修正依靠于:

3 仿真与分析

为了验证模糊 RBF 神经网络 PID 控制在汽车定速巡航过程中的性能,文中在 Matlab 仿真环境下将传统 PID、模糊 PID 及模糊 RBF 神经网络 PID 这 3 种控制算法与汽车纵向动力学模型进行

联合仿真,其中设定整车的质量为 1 000 kg,车辆重心与前轴的水平距离为 1.4 m,车辆重心与后轴的水平距离为 1.6 m,重心距离地面的垂直高度为 0.5 m,汽车迎风面积为 0.6 m²,空气的阻力系数为 0.3,其仿真结构如图 6 所示。

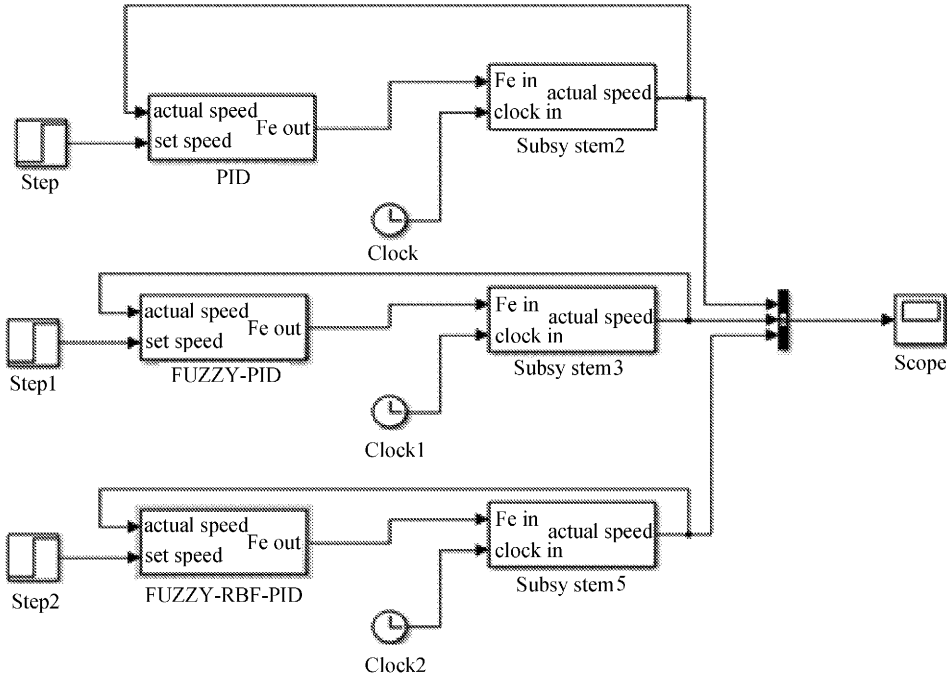


图 6 汽车巡航系统控制算法仿真结构图

在进行仿真的过程中,将传统 PID、模糊 PID 及模糊 RBF 神经网络 PID 参数初值设定为 $K_p = 200$ 、 $K_i = 200$ 、 $K_d = 0.15$,将给定信号 set speed

= 71 作为汽车定速巡航过程中跟随的车速,在相同条件下,基于 3 种不同控制算法的汽车巡航响应曲线如图 7 所示。

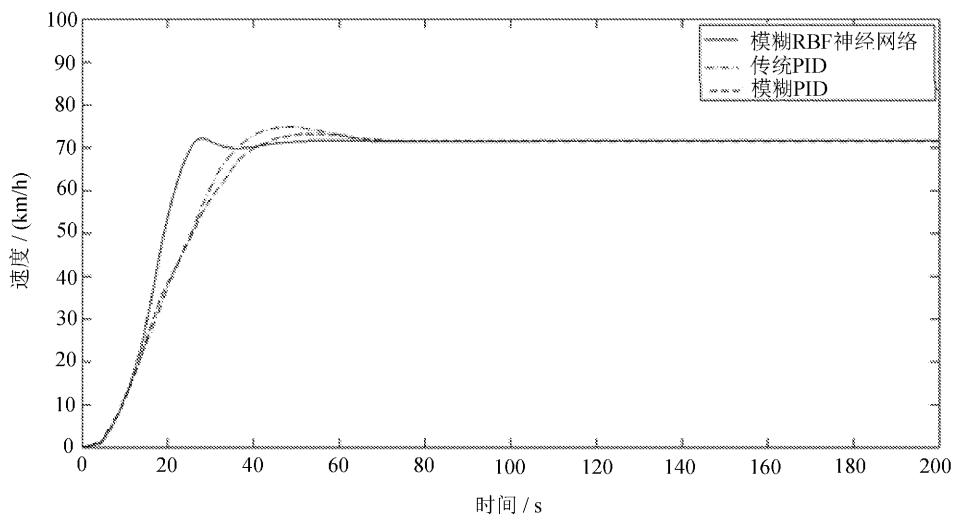


图 7 3 种控制下汽车巡航跟随的响应曲线

由仿真结果可以看出,与传统 PID 及模糊 PID 相比,模糊 RBF 神经网络 PID 具有更好的动态性能,即该方法可以有效提升汽车巡航控制的反应速度,并在一定程度上降低速度跟随过程中的超调量,使车辆在巡航过程中得到更好的速度体验。

4 结 语

将模糊控制的推理能力与 RBF 神经网络的自学习能力进行整合,并应用于汽车定速巡航系统的 PID 控制上。汽车在自动巡航过程中具有典型的时变非线性特性,因此,传统的 PID 控制对于复杂工况下的巡航控制存在缺陷,通过模糊 RBF 神经网络 PID 的引入,可以实现对 PID 这 3 个参数的实时在线整定,使得汽车巡航控制得到更好的动态性能。文中将 3 种不同的控制方法与建立的 7 自由度动力学模型在 Simulink 仿真环境下进行性能验证,其结果表明,该方法在响应时间等方面优于传统 PID 及模糊 PID,改善了汽车巡航过程速度跟随中的动态性能。

参考文献:

- [1] 张强,曲仕茹.车辆自适应巡航控制系统的模糊 PID 实现[J].汽车工程,2008,30(7):569-572.
- [2] 韦亚娟.电液伺服系统的神经网络自整定 PID 控制策略研究[D].秦皇岛:燕山大学,2009.
- [3] 沈承,黄光宏,曹世宏,等.PID 控制系统的参数调节技巧[J].机械工程与自动化,2008(4):155-156.
- [4] 胡克非.定速巡航系统的设计[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [5] 刘文彬,黄伟,刁健,等.基于 PID 控制的汽车定速巡航系统设计与试验[J].内燃机与动力装置,2015(4):29-31,47.
- [6] 李肖含.汽车自适应巡航控制系统模糊控制策略研究[D].北京:北京理工大学,2015.
- [7] 沈亮.汽车巡航控制方法的研究[D].太原:太原理工大学,2013.
- [8] 丰松.基于模糊控制的汽车巡航系统[J].农机使用与维修,2010(6):72-73.
- [9] 韦丽君,陈廷卫,张冰.水田农用车动力总成位置的分析[J].长春工业大学学报:自然科学版,2013,34(3):268-272.