

文章编号:1671-5497(2004)03-0362-05

汽车转向操纵的单神经元自适应控制

高振海¹, 李向瑜²

(1. 吉林大学 汽车动态模拟国家重点实验室, 吉林 长春 130022; 2. 吉林大学 汽车工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要:基于汽车操纵稳定性总方差评价方法和神经网络控制理论,建立了汽车转向单神经元自适应PID控制算法。利用操纵稳定性评价中的轨迹跟随误差和方向盘忙碌程度的评价指标,建立了神经元学习的二次型性能指标函数,并采用梯度下降算法实现了单神经元控制器的连接权值的调整。最终采用汽车7自由度非线性动力学模型进行了不同行驶速度下的仿真计算。结果表明:该控制算法可较为精确地控制汽车对预期行驶轨迹的转向运动,并体现出良好的鲁棒性和自适应性。

关键词:车辆工程;操纵稳定性;单神经元;自适应PID控制

中图分类号:U270.1 **文献标识码:**A

Single neuron adaptive control over vehicle steering performance

GAO Zhenhai¹, LI Xiangyu²

(1. State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the total variance analysis on the vehicle steering stability and the neural network control theory, an algorithm of the single neuron adaptive PID control over the vehicle steering stability was proposed. Using the indices of trajectory follow error and steering busyness in evaluation of the steering stability, a quadratic form performance index function for the neuron learning was established and the tuning of the connection weight values of the single neuron controller was realized using the algorithm of gradient descent. With vehicle nonlinear dynamic model of 7 degrees-of-freedom, the simulations under different speeds were made. The results show that this algorithm can control vehicle to follow the pre-given trajectory accurately, and good robustness and adaptability are also shown.

Key words: vehicle engineering; steering stability; single neuron; adaptive PID control

0 引 言

由于汽车轮胎及转向系统都具有高度非线性且参数时变特征,尤其是汽车高速行驶工况下轮胎力学特性体现出严重的非稳态非线性特性,使得按照传统线性最优控制理论建立的汽车转向控制器往往

收稿日期:2003-09-30.

基金项目:高等学校骨干教师计划资助项目(GG580-10183-1995).

作者简介:高振海(1973-),男,副教授,工学博士. E-mail: Gao.zhenhai@ascl.jlu.edu.cn

仅适用于较低车速,无法满足汽车高速行驶的需求^[1]。神经网络控制为解决复杂的非线性、不确定和不确定系统的控制问题提供了一条新的研究途径^[2]。同时,文献[3]中创新性地提出了一个预瞄优化神经网络驾驶员模型。该模型利用了神经网络建模的思路,以跟随误差、操纵负担和翻车风险等人-车闭环系统的汽车操纵稳定性评价指标作为目标函数进行神经网络的训练与学习,取得了较好的轨迹跟随性能,并与实际驾驶员的操纵行为非常相似。目前,PID控制参数的自整定技术中应用较广的是自校正控制,其基本思想是将参数辨识递推算法与各种不同类型控制算法结合,形成一个能够自动校正控制系统参数,从而获得期望闭环控制性能的系统^[4]。但由于严重的非线性动力学特征的存在,使得汽车转向动力学控制系统参数辨识存在着很多问题。为此,作者采用了单神经元自适应PID控制。单神经元是一个具有单层处理单元的神经网络,具有自学习和自适应能力,且结构简单、易于计算^[5]。传统PID控制器由于具有算法简单及可靠性高等优点在工业过程控制中得到普遍应用,但存在着参数整定不良,对运行工况变化适应性不好等问题。两者结合可在一定程度上解决PID控制器参数在线实时整定问题,提高控制系统的鲁棒性和自适应性。神经网络的主要特征是学习,即建立学习规则来修正若干神经元之间的连接权值,从而适应周围环境的变化。单神经元自适应PID控制器的学习规则包括无监督Hebb学习规则、有监督Widrow-Hoff学习规则、有监督Hebb学习规则和二次型性能指标学习规则等^[6]。作者采用了二次型性能指标学习规则,即建立了可反映操纵稳定性优劣的二次型性能指标。通过对该性能指标函数的优化进行连接权值的在线修正,从而更好地保证汽车的操纵稳定性,且避免了传统的自适应控制必须对被控对象进行参数辨识的问题。

1 汽车操纵稳定性闭环评价指标及其二次型性能指标描述

对汽车闭环控制系统而言,汽车的操纵稳定性是评价汽车操纵性能优劣的主要指标。文献[7]中提出了一种基于“总方差评价方法”的人-车闭环系统的操纵稳定性评价指标体系,其总方差的定义为:

$$J = \int_0^{\infty} \frac{x(t) - y(t)}{x_0 - y_0}^2 dt \quad (1)$$

式中: x_0 、 y_0 分别是阶跃输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 的稳态值。

这实际上是建立了一种针对汽车整个行驶过程中状态变化的二次型性能指标的描述。文献[7]提出的汽车操纵稳定性评价指标大致包括轨道跟踪好坏的误差指标(包括轨道误差和方向误差)、驾驶员操纵负担指标(包括方向盘忙碌程度和沉重程度)、翻车危险性指标(包括侧向加速度和侧倾角)和侧滑危险性指标。

参照以上的研究成果并结合单神经元自适应控制和汽车转向控制的特点,作者认为汽车转向控制的原则是使汽车的运动尽可能地与预期轨迹相一致(即最小误差原则),同时必须考虑到减小转向运动的急剧程度(如侧向加速度过大将导致汽车翻车危险性加大,且方向盘转动范围也有一定限制)。由文献[8]可知,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。为此,采用轨道跟随误差(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)2个反应汽车操纵稳定性的二次型性能指标,其表达式分别为:

$$J_1 = \frac{1}{2} \int [y^*(k) - y(k)]^2 \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \int [\delta_{sw}(k) - \delta_{sw}(k-1)]^2 \quad (3)$$

由此可建立汽车转向单神经元控制器的性能指标函数为:

$$J = (PJ_1 + QJ_2) = \frac{1}{2} \{ P[y^*(k) - y(k)]^2 + Q[\delta_{sw}(k) - \delta_{sw}(k-1)]^2 \} \quad (4)$$

式中: $y^*(k)$ 、 $y(k)$ 分别为 k 时刻汽车理想侧向加速度输入和实际侧向加速度输出; $\delta_{sw}(k)$ 、 $\delta_{sw}(k-1)$

分别为 k 和 $k-1$ 时刻的方向盘的转角; P 、 Q 分别为轨道跟随误差和方向盘忙碌程度的加权系数。

2 汽车转向单神经元自适应 PID 控制算法

根据上面建立的性能指标函数,采用梯度下降方法对所建立的汽车操纵稳定性性能指标函数进行优化设计,使之趋于最小,从而实现神经元的连接权值的修正。梯度下降法是一种对某个性能指标函数求其极小值的迭代寻优算法,基本思想是使神经元的连接权值 $w_i(k)$ 的修正沿着 J 减小方向,即:

$$w_i(k-1) = w_i(k) - w_i(k-1) = - \frac{\partial J}{\partial w_i(k-1)} \quad (5)$$

由此参照文献[6],单神经元自适应控制器的具体控制规则和学习算法如下:

$$\begin{aligned} e(k) &= \ddot{y}^*(k) - \ddot{y}(k) \\ x_P(k) &= e(k) - e(k-1) \\ x_I(k) &= e(k) \end{aligned} \quad (6)$$

$$x_D(k) = \ddot{e}(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$$

$$T_{wx}(k-1) = w_P(k-1)x_P(k-1) + w_I(k-1)x_I(k-1) + w_D(k-1)x_D(k-1)$$

$$w_P(k) = w_P(k-1) + \eta_P K [Pb_0 e(k)x_P(k-1) - QKT_{wx}(k-1)x_P(k-1)] \quad (7)$$

$$w_I(k) = w_I(k-1) + \eta_I K [Pb_0 e(k)x_I(k-1) - QKT_{wx}(k-1)x_I(k-1)]$$

$$w_D(k) = w_D(k-1) + \eta_D K [Pb_0 e(k)x_D(k-1) - QKT_{wx}(k-1)x_D(k-1)]$$

$$w_P(k) = w_P(k) / (w_P(k) + w_I(k) + w_D(k))$$

$$w_I(k) = w_I(k) / (w_P(k) + w_I(k) + w_D(k)) \quad (8)$$

$$w_D(k) = w_D(k) / (w_P(k) + w_I(k) + w_D(k))$$

$$\ddot{s}_w(k) = \ddot{s}_w(k-1) + K(w_P(k)x_P(k) + w_I(k)x_I(k) + w_D(k)x_D(k))$$

式中: η_P 、 η_I 、 η_D 分别为比例、积分和微分的学习速率; K 为神经元比例系数; b_0 为初始状态时控制系统的输出响应值。

综上所述,基于操纵稳定性二次型性能指标的汽车转向单神经元自适应控制器的控制流程如图1所示。

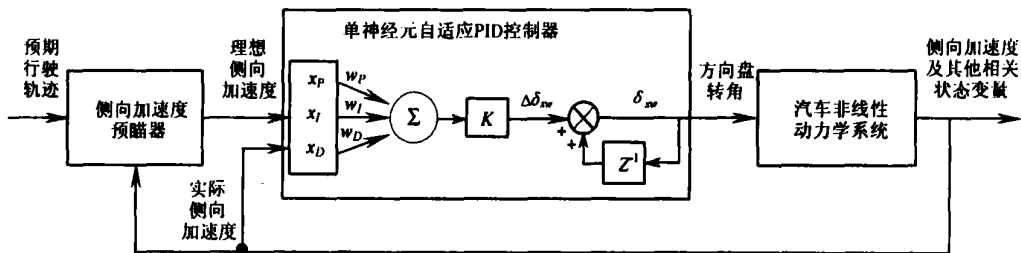


图1 汽车转向单神经元自适应 PID 控制器

Fig. 1 Single neuron adaptive PID controller over vehicle steering

3 仿真计算

在仿真计算中,假定已事先给出一条汽车预期行驶轨迹,同时假定汽车在行驶过程中速度保持不变。根据汽车预期行驶轨迹,作者直接采用文献[9]中介绍的驾驶员单点预瞄策略来确定汽车的理想侧向加速度,并利用汽车7自由度非线性动力学模型进行了从低到高不同车速条件下汽车移线工况(模拟

汽车超车过程) 仿真计算, 如图 2 所示。模型中的 7 自由度是指纵向速度、侧向速度与横摆角速度 3 个整车运动自由度和 4 个车轮的回转运动自由度。同时该模型中还包括了发动机、传动系统(离合器、变速箱、传动轴、主减速器、差速器和半轴)、制动器系统等的简化模型和轮胎力学模型。这样就将控制算法与汽车动力学模型有机地联系起来, 从而满足目前的汽车转向乃至后面的速度控制等算法的仿真需要。为了有效地反映汽车高速行驶时轮胎在纵滑和侧偏联合工况下的力学特性, 在模型中采用了文献[9]提出的统一半经验轮胎模型。汽车动力学模型的具体公式详见文献[10]。

图 3~5 分别为 40、80、120 km/h 的移线工况下汽车重心运动轨迹的仿真曲线。从图中可见: 控制算法可以较好地控制汽车对事先给定的预期轨迹的跟随运动, 其控制效果体现出良好的汽车转向操纵的轨迹跟随性能, 且对速度变化具有较强的鲁棒性和适应性。

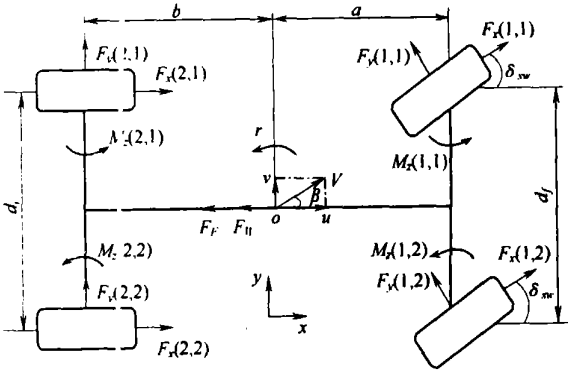


图 2 汽车 7 自由度动力学模型

Fig. 2 Vehicle dynamic model of 7 degrees-of-freedom

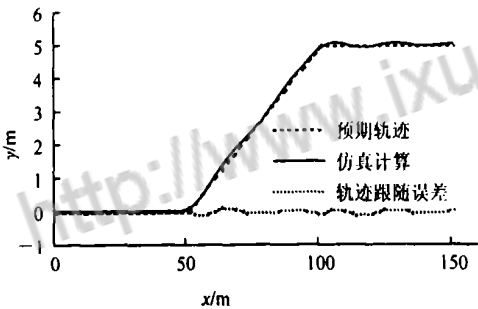


图 3 40 km/h 移线工况仿真

Fig. 3 Simulation of lane change at 40 km/h

从图中的轨迹跟随误差曲线可见: 轨迹跟随误差随着车速增加而有所增大。其原因主要是随着车速增加, 汽车动力学非线性特征越发明显, 从而使得控制的精度有所下降; 同时, 作者所建立的二次型性能指标并非只强调跟随精度, 而是综合考虑了轨迹跟随误差和方向盘忙碌程度。另外, 为了验证算法对速度变化的鲁棒性, 设定在不同车速下控制算法中的各参数 (\$P\$、\$I\$、\$D\$、\$K\$、\$P\$、\$Q\$) 是固定不变的。在后面的研究中将通过仿真计算和场地实验来进行汽车操纵稳定性评价, 最终完成在不同工况下控制参数的优化设计, 实现控制系统的最优控制。

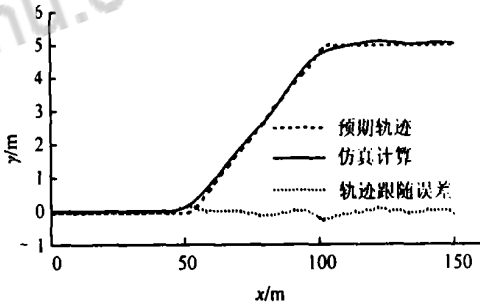


图 4 80 km/h 移线工况仿真

Fig. 4 Simulation of lane change at 80 km/h

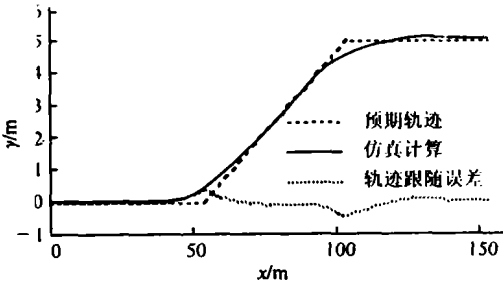


图 5 120 km/h 移线工况仿真

Fig. 5 Simulation of lane change at 120 km/h

4 结 论

针对汽车转向非线性控制问题,基于神经网络控制和操纵稳定性总方差评价方法,提出了基于轨迹跟随误差和方向盘忙碌程度的汽车操纵稳定性二次型性能指标的汽车转向单神经元自适应PID控制算法。算法中根据汽车相对于预期行驶轨迹的偏差(即理想侧向加速度与实际侧向加速度的偏差)和方向盘的忙碌程度(即方向盘转角的变化),建立了汽车操纵稳定性二次型评价指标,并采用了梯度下降算法对所建立的评价指标函数进行了优化设计,实现了单神经元PID控制器的比例-积分-微分三种控制作用的最佳组合,无须对复杂的汽车动力学非线性系统进行辨识即可建立自适应控制。所建立的二次型性能指标物理意义明确,可在一定程度上反映汽车操纵稳定性性能的好坏,且便于控制器的硬件实现。不同行驶速度下汽车移线工况的仿真结果表明,该算法可有效地控制汽车对预期给定轨迹的跟随运动,且体现出较为精确的闭环控制性能和对速度变化的鲁棒性和自适应性。

作者在研究中采用了较为基础的单神经元PID控制方法。目前神经网络控制与内模控制、逆系统控制及模糊控制等的结合都有一些较为成功的应用,在后面的研究中将逐步开展这些控制理论在汽车控制方面的应用研究。同时还将把单神经元PID控制扩展到汽车方向与速度的综合控制中,进行汽车方向与速度的解耦控制算法的研究。

参考文献:

- [1] 周俊,姬长英. 智能车辆横向控制研究[J]. 机器人, 2003, 25(1): 26 - 30.
ZHOU J, JI C Y. Lateral control of intelligent vehicle[J]. Robot, 2003, 25(1): 26 - 30.
- [2] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
XU L N. Neural Network Control[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [3] 郭孔辉,潘峰,马凤军. 预瞄优化神经网络驾驶员模型[J]. 机械工程学报, 2003, 39(1): 26 - 28.
GUO K H, PAN F, MA F J. Preview optimized neural network driver model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(1): 26 - 28.
- [4] 韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1995.
HAN Z J. Adaptive Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [5] 李人厚. 智能控制理论和方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1999.
LI R H. Intelligent Control Theory and Method[M]. Xi'an: Publishing House of Xi'an University, 1999.
- [6] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
TAO Y H. New PID Control and Its Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [7] GUO K H, ZONG C F, KONG F S. Objective evaluation correlated with human judgment—an approach to the optimization of vehicle handling control system[J]. International Journal of Vehicle Design, 2002, 29(1): 96 - 111.
- [8] 管欣,高振海,郭孔辉. 汽车预期轨迹驾驶员模糊决策模型及典型路况仿真[J]. 汽车工程, 2001, 23(1): 13 - 17.
GUAN X, GAO Z H, GUO K H. Driver fuzzy decision model of vehicle preview course and simulation under typical road conditions[J]. Automotive Engineering, 2001, 23(1): 13 - 17.
- [9] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春:吉林科学技术出版社, 1991.
GUO K H. Vehicle Handling Dynamics[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House, 1991.
- [10] 高振海. 智能汽车方向控制系统的研究[D]. 西安:西安交通大学电子信息与工程学院, 2003.
GAO Z H. Research of intelligent vehicle direction control[D]. Xi'an: College of Electric Information and Engineering, Xi'an Jiaotong University, 2003.

(责任编辑 陈永杰)



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
