

汽车驾驶机器人车速跟踪神经网络控制方法

陈 刚¹ 张为公²

1. 南京理工大学, 南京, 210094 2. 东南大学, 南京, 210096

摘要: 为了实现汽车驾驶机器人对给定车速的准确跟踪, 提出了一种驾驶机器人车速跟踪神经网络控制方法。网络模型输入层变量为驾驶机器人油门和制动器、离合器机械腿、换挡机械手的位移; 中间层为隐层, 节点数为 5, 神经元传递函数为正切传递函数; 输出层变量为试验车辆车速, 神经元传递函数为线性传递函数。结果表明, 该方法的收敛速度明显高于梯度下降法的收敛速度, 且达到的控制精度更高, 车速跟踪误差满足国家汽车试验标准的要求。

关键词: 汽车试验; 驾驶机器人; 车速控制; 神经网络

中图分类号: TP273; U467.5

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.026

Speed Control of Vehicle Robot Driver Based on Neural Network

Chen Gang¹ Zhang Weigong²

1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094

2. Southeast University, Nanjing, 210096

Abstract: To realize the vehicle speed tracking of given driving test cycle, a novel speed control method of vehicle robot driver based on neural network was proposed herein. The displacements of throttle pedal, brake pedal, clutch pedal and shift manipulator for vehicle robot driver were used as the input layer variables of the network model. The middle layer of the network model was used as hidden layer, which has five hidden nodes and whose neurons transfer function adopts tangent transfer function. The test vehicle speed was used as the output layer variable of the network model, whose neurons transfer function adopts linear transfer function. Results show that the convergence rate and control accuracy of the proposed method is higher than that of traditional gradient descent method. The vehicle speed tracking errors of the proposed method meet the requirements of China vehicle test standards.

Key words: vehicle test; robot driver; speed control; neural network

0 引言

随着汽车工业的发展, 人们对汽车的性能要求越来越高, 而这需要借助于大量的试验来改进设计。汽车试验中的许多项目, 重复性强、持续时间长、危险性大、工作环境恶劣、循环车速频繁变换, 更适合由机器人来操作。驾驶机器人是在汽车试验中代替人类驾驶员进行驾驶操作的工业机器人。国外驾驶机器人的关键技术还处在保密阶段, 目前只有少数企业拥有该项技术^[1-3]。国内, 东南大学与南京汽车研究所联合研制成功了具有自主知识产权的 DNC-1 型和 DNC-2 型驾驶机器人^[4-7]。利用驾驶机器人进行汽车试验对于减轻试验人员的劳动强度, 节省试验费用, 提高试

验效率, 消除人为因素的影响, 加速汽车研发进度都有重要的意义。

汽车试验对驾驶机器人的基本要求是, 驾驶机器人必须能够跟踪预先设定的循环行驶工况, 即设定的车速—时间曲线, 实现对给定目标车速的跟踪。Muller 等^[8]运用 H_{∞} 控制实现了汽车驾驶机器人的车速控制, 能够有效抑制外界的不确定扰动和汽车参数的不确定性, 但控制参数调整复杂。陈晓冰等^[9]利用变参数 PID 控制方法实现了驾驶机器人的车速跟踪, 但存在调节器参数难以在线整定的缺点, 并且车速波动较大。由于汽车驾驶机器人的车速跟踪控制具有非线性、时变、时滞的特点, 且影响因素较多, 故难以建立其精确的数学模型。传统的 PID 车速控制方法, 若要超调小, 则难以保证快速性的指标; 若要动态响应快, 则超调量必然过大, 且传统的 PID 车速控制方法不具有在线整定控制参数的功能。采用

收稿日期: 2011-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008143); 中国博士后科学基金资助项目(2011M500922); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200802861061); 南京理工大学自主科研专项计划资助项目(2011YBXM43)

Levenberg-Marquandt 算法的改进 BP 神经网络收敛速度快,且具有较强的泛化能力^[10]。为此,本文采用改进 BP 神经网络实现汽车驾驶机器人的车速跟踪控制,设计了用于驾驶机器人的车速控制神经网络模型,并将其与梯度下降法进行误差分析比较,从而验证所提出方法的有效性。

1 系统结构

驾驶机器人可以实现试验车辆的自动驾驶,并无需对试验车辆进行任何改造,按照预先设定的各种速度-时间循环行驶工况的要求进行汽车试验,在驾驶过程中可以自动完成油门机械腿、制动机械腿、离合器机械腿和换挡机械手的协调配合动作。驾驶机器人由换挡机械手、油门机械腿、制动机械腿、离合器机械腿、计算机控制系统、电动驱动系统等组成,采用纯电动驱动的方式,使驾驶机器人的操纵动作能够具有人类驾驶员操纵动作的快速性和柔顺性,满足了汽车驾驶动作快速(如换挡和制动的操纵)、快慢接合(如离合器的操纵)、慢速(如油门的操纵)等运动要求^[5-6]。汽车驾驶机器人的系统结构如图 1 所示。

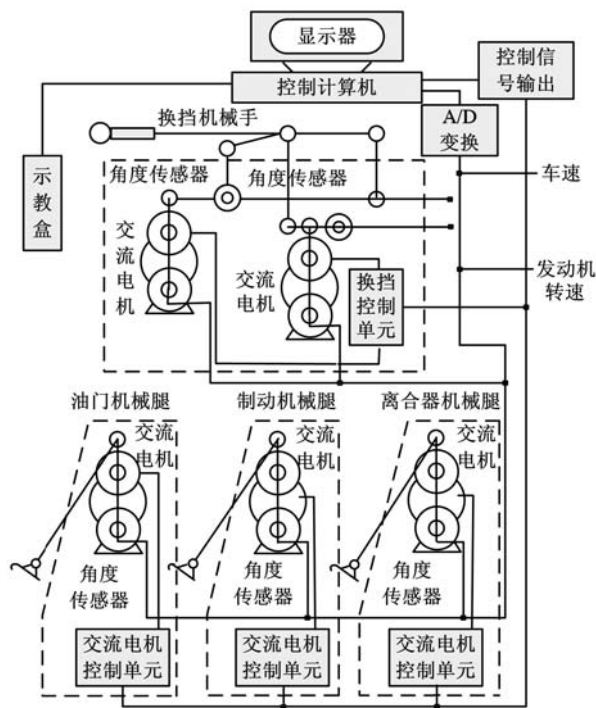


图 1 汽车驾驶机器人系统结构

2 控制方法

标准 BP 神经网络采用梯度下降法训练网络,具有收敛速度慢、易陷入局部极小值等缺点^[11],因此汽车驾驶机器人的车速控制采用改进的 BP 算法。优化算法中,Levenberg-Marquand-

dt 算法是一种非常有效的优化设计方法。该方法中,误差指标定义为

$$\hat{F} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (o_{ij} - \hat{o}_{ij}) \right]^2 = \frac{1}{2} \hat{E}^T \hat{E} \quad (1)$$

$$\hat{E} = (\hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots, \hat{e}_n)^T \quad \hat{e}_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (o_{ik} - \hat{o}_{ik})$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

权值调整公式为

$$w_{t+1} = w_t - (\hat{J}^T \hat{J} + \mu I)^{-1} \hat{J}^T \hat{E} \quad (2)$$

式中, w_t, w_{t+1} 分别为第 t 次和第 $t+1$ 次迭代的网络权值向量; I 为单位矩阵; μ 为比例系数, $\mu > 0$; \hat{J} 为 $n \times p$ 维 Jacobian 矩阵, $\hat{J} = \partial \hat{E} / \partial w$; w 为网络权值向量。

矩阵 \hat{J} 中的第 k 行 $\frac{\partial e_k}{\partial w} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial e_{ik}}{\partial w} e_{ik}$ 。

对于式(1),需对一个 $p \times p$ 维的方阵进行求逆计算,这里根据矩阵求逆公式来解决此问题。

$p \times p$ 维矩阵的求逆方法如下:

若 $A = B^{-1} + CD^{-1}C^T$, 则

$$A^{-1} = B - BC(D + C^T BC)^{-1} B \quad (3)$$

令 $A = \hat{J}^T \hat{J} + \mu I, B = I/\mu, C = \hat{J}^T, D = I$, 则

$$(\hat{J}^T \hat{J} + \mu I)^{-1} = \frac{I}{\mu} - \frac{\hat{J}^T}{\mu^2} (I + \frac{\hat{J} \hat{J}^T}{\mu})^{-1} \hat{J} \quad (4)$$

这时,新的权值调整公式为

$$w_{t+1} = w_t - \left[\frac{I}{\mu} - \frac{\hat{J}^T}{\mu^2} (I + \frac{\hat{J} \hat{J}^T}{\mu})^{-1} \hat{J} \right] \hat{J}^T \hat{E} \quad (5)$$

对于式(5),只需求解一个 $n \times n$ 维矩阵的逆。当网络的输出个数 $n=1$ 时, \hat{J} 为一个 p 维的行向量,式(5)可变为

$$w_{t+1} = w_t - \frac{1}{\mu} (I - \frac{\hat{J}^T \hat{J}}{\mu + \hat{J} \hat{J}^T}) \hat{J}^T \hat{E} \quad (6)$$

根据式(6)进行权值的调整,可以加快矩阵求逆。若网络的输出个数 $n > 1$,则在计算权值的调整量时,可以将网络分解成单输出($n=1$)的网络进行处理。在此过程中,参数的调整主要是通过高斯-牛顿法(当 $m \rightarrow 0$ 时)和梯度下降法(当 $m \rightarrow \infty$ 时)之间光滑的变化来实现的。

建立的汽车驾驶机器人的车速跟踪神经网络控制模型结构如图 2 所示。汽车驾驶机器人的车

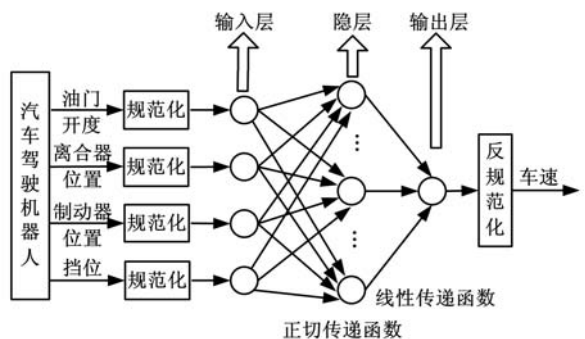


图 2 驾驶机器人车速跟踪神经网络控制模型结构

速跟踪控制神经网络采用三层网络结构的改进 BP 神经网络,网络训练选用基于数值最优化理论的 Levenberg—Marquandt 算法,其神经网络模型结构为 4-5-1。

驾驶机器人车速跟踪控制神经网络输入层变量为驾驶机器人油门和制动器、离合器机械腿、换挡机械手的位移值,即油门开度、离合器位置、制动器位置和挡位。获得输入、输出变量后,对其进行规范化预处理,将数据处理为区间 $[0,1]$ 之间的数据,使那些比较大的数据仍然落在传递函数梯度大的地方,以提高网络训练性能。这里,归一化方法采用如下公式:

$$\hat{x} = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (7)$$

网络中间层为隐层,传递函数采用正切传递函数 $\text{tansig}(\)$ 。网络隐层神经元的数目对网络有一定的影响,神经元太少会造成网络的不适性,神经元太多会引起网络的过适性。根据实验结果和理论分析,最终选取网络隐层节点数为 5。网络输出层变量为车速,传递函数采用线性传递函数 $\text{purelin}(\)$ 。网络输出数据经过反规范化后期处理,得到试验车辆车速。

3 试验与结果分析

3.1 试验验证

为了验证本文提出的汽车驾驶机器人车速跟踪神经网络控制方法的有效性,根据 GB 18352.3—2001《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(II)》所要求的规定标准^[12],在国家客车质量监督检验中心 BOCO NJ 150/80 型底盘测功机上,由驾驶机器人操纵试验车辆进行长时间的排放耐久性 V 型试验。试验车型为 Ford FOCUS 2.0 L 五挡手动变速器轿车。驾驶机器人在试验车辆上的安装及排放耐久性试验现场如图 3 所示。试验过程中,采集汽车驾驶机器人换挡机械手、油门机械腿、离合器机械腿、制动器机械腿以及相应的试验车辆车速的实时数据,获得 264 组样本数据。将这些数据分成 3 个部分,分别用于训练、验证和测试。将数据的 1/4(66 组)用于验证、数据的 1/4(66 组)用于测试,其余的用于训练网络。采用等间隔的方式在原始数据中抽取训练样本数据、验证样本数据和测试样本数据,利用数据对所建 BP 神经网络模型进行训练。试验所得数据需进行归一化处理,以方便用于网络的训练。

3.2 结果分析

建立采用梯度下降法进行网络训练的 BP 神经网络,并将其与本文提出的方法进行对比分析,



(a) 驾驶机器人在试验车辆上的安装图



(b) 汽车排放耐久性试验现场
图 3 驾驶机器人在试验车辆上的安装图及试验现场图

网络训练过程如图 4、图 5 所示。两种方法的网络结构都为三层,网络隐层结点数都为 5。图 4、图 5 中横坐标为训练次数,纵坐标为训练精度,Goal 指训练要达到的目标误差,Performance 指实际达到的训练误差。

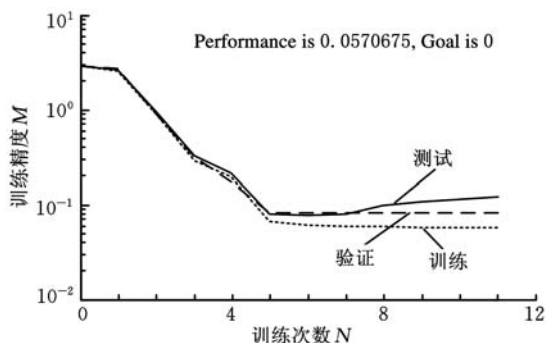


图 4 Levenberg—Marquardt 法网络训练过程

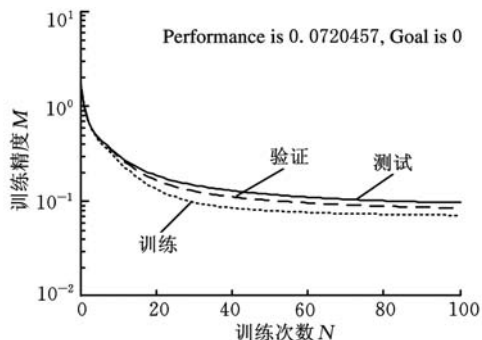


图 5 梯度下降法网络训练过程

由图 4、图 5 可以看出,当 Levenberg—Marquardt 法和梯度下降法的隐层结点数都为 5 时,采用 Levenberg—Marquardt 算法训练车速控制神经网络的收敛速度比采用梯度下降法训练车速控制神经网络的收敛速度要快得多,且采

用 Levenberg-Marquardt 法网络达到的控制精度更高。

将本文方法的训练误差、验证误差和测试误差绘制在一幅图中,如图 6 所示。由图 6 可以看出,随着学习次数的增加,网络误差逐渐减小,并且测试误差和验证误差性质相似,这表明所建的驾驶机器人的车速跟踪 BP 神经网络模型是有效的。

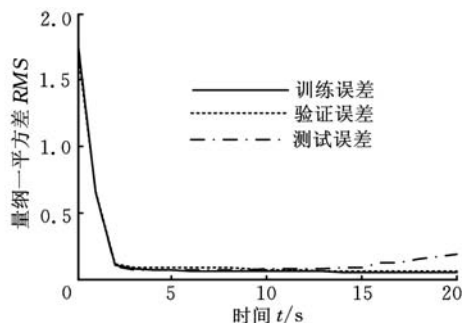


图 6 训练误差、验证误差、测试误差曲线

汽车驾驶机器人的神经网络控制车速跟踪误差曲线见图 7。从图 7 可以看出,所提出的方法能取得对给定车速的良好跟踪控制,车速跟踪控制最大误差为 1.5228km/h,满足国家汽车试验标准的 ± 2 km/h车速跟踪误差范围的要求,再次验证了本文方法的有效性。

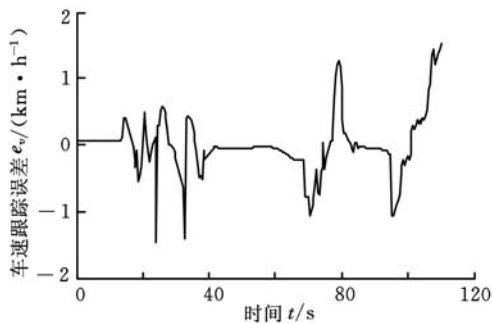


图 7 汽车驾驶机器人神经网络控制车速跟踪误差

4 结论

(1)提出了一种汽车驾驶机器人的车速跟踪神经网络控制方法,设计了用于驾驶机器人的车速控制神经网络模型,并进行了理论分析和试验验证。

(2)经实车试验和误差对比分析可知,采用本文方法的驾驶机器人车速跟踪神经网络控制模型的收敛速度明显高于采用传统的梯度下降法的驾驶机器人车速跟踪神经网络控制模型的收敛速度,且采用本文方法达到的精度明显更高,车速跟踪误差满足国家汽车试验标准的要求,验证了本文理论和方法的有效性。

参考文献:

- [1] Namik H, Inamura T, Stol K. Development of a Robotic Driver for Vehicle Dynamometer Testing [C]//Proceedings of 2006 Australasian Conference on Robotics and Automation. Auckland, New Zealand, 2006:1-9.
- [2] Shoal S, Zybur J P, Grimaudo D W. Robot Driver for Guidance of Automatic Durability Road Test Vehicles[C]//Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium, 1998:1767-1772.
- [3] Thiel W, Grof S, Hohenberg G, et al. Investigations on Robot Driver for Vehicle Exhaust Emission Measurements in Comparison to the Driving Strategies of Human Drivers[C]//International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition. San Francisco, CA, USA, 1998:982642.
- [4] 陈刚,张为公,龚宗洋,等.用于汽车驾驶机器人的车辆性能自学习方法[J].中国机械工程,2010,21(4):491-495.
- [5] 陈刚,张为公,龚宗洋,等.用于驾驶机器人的车速跟踪多机械手协调控制方法[J].中国机械工程,2010,21(6):651-655.
- [6] 张为公,陈晓冰.汽车驾驶机器人关键技术研究[J].江苏大学学报(自然科学版),2005,26(1):20-23.
- [7] Chen Xiaobing, Zhang Weigong. Robot Driver for Vehicle Durability Emission Test on Chassis Dynamometer[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2005, 21(1):33-38.
- [8] Muller K, Leonhard W. Computer Control of a Robotic Driver for Emission Tests[C]//Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. San Diego, USA, 1992:1506-1511.
- [9] 陈晓冰,张为公,张丙军.汽车驾驶机器人车速跟踪控制策略研究[J].中国机械工程,2005,16(18):1669-1673.
- [10] Fritz H. Neural Speed Control for Autonomous Road Vehicles[J]. Control Engineering Practice, 1996, 4(4):507-512.
- [11] 董长虹. MATLAB 神经网络与应用[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2007.
- [12] 国家环境保护总局. GB 18352. 2-2001 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(II)[S]. 北京:中国标准出版社,2001.

(编辑 张洋)

作者简介:陈刚,男,1981年生。南京理工大学机械工程学院讲师、博士。主要研究方向为汽车电子与测控技术、智能控制。发表论文 10 余篇。张为公,男,1959年生。东南大学仪器科学与工程学院教授、博士研究生导师。