

汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制方法^{*}

陈刚¹ 张为公² 常思勤¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 东南大学仪器科学与工程学院, 南京 210096)

【摘要】 为了实现汽车驾驶机器人挡位决策的智能化,提出了一种驾驶机器人模糊神经网络换挡控制方法。模糊神经网络模型的输入为驾驶机器人油门机械腿的位移、试验车辆的车速和加速度,模型的输出为挡位。输入变量的隶属函数都为3个,类型都采用广义钟形函数 gbellmf,网络训练算法选用反向传播算法和最小二乘法相结合的混合学习算法。仿真结果表明,汽车驾驶机器人模糊神经网络控制仿真挡位与试验挡位基本一致,该方法可根据操作工况环境实现正确的汽车驾驶机器人挡位控制。

关键词: 汽车试验 驾驶机器人 换挡控制 模糊神经网络

中图分类号: TP273; TP242.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)06-0006-06

Shift Control Method of Vehicle Robot Driver Based on Fuzzy Neural Network

Chen Gang¹ Zhang Weigong² Chang Siqin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract

In order to realize the intelligent shift of robot driver, a shift control method of vehicle robot driver based on fuzzy neural network (FNN) was proposed. The displacement of throttle pedal for robot driver, speed and acceleration of test vehicle were used as the input of FNN model, and shift was used as the output of FNN model. The number of membership functions was three, and the type of membership functions was gbellmf (generalized bell membership function). The hybrid learning algorithm that combined back propagation algorithm with least square method was applied to train the model. Simulation results demonstrated that the results of simulation shift for robot driver using FNN control had a good consistency with the results of experimental shift. Furthermore, the proposed method could realize the gear-selection of robot driver correctly with the changes of operation environment.

Key words Vehicle test, Robot driver, Shift control, Fuzzy neural network

引言

随着汽车工业的发展,对汽车的性能要求越来越高,这需要借助于大量的试验来改进设计。而汽车试验中的许多项目,由于重复性强、持续时间长、危险性大、工作环境恶劣,更适合由机器人来操作^[1]。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,目前只有少数几个发达国家拥有该项技术^[2-5]。国内主要有东南大学与南

京汽车研究所联合研制的 DNC-1 型和 DNC-2 型驾驶机器人^[6-7]。

汽车驾驶机器人操纵试验车辆进行汽车试验的过程中,需要不断的进行换挡。为了使驾驶机器人达到熟练驾驶员的驾驶水平,应使汽车驾驶机器人具备良好的换挡品质,这需要驾驶机器人在最佳换挡点进行换挡。驾驶机器人的换挡控制是汽车驾驶机器人的关键技术,国外还处于保密阶段,国内也鲜见报道。汽车驾驶机器人换挡的操纵很大程度上取决于驾驶员的经验知识,这种经验性的操纵往往具

收稿日期: 2010-07-12 修回日期: 2010-09-09

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BAG13A04)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200802861061)

作者简介: 陈刚,讲师,博士,主要从事汽车电子与测控技术研究, E-mail: gang0418@163.com

有其他控制方法无法比拟的控制效果。传统的控制理论以被控对象的解析模型为基础对汽车驾驶机器人实施自动控制,但由于模型的复杂性、结构的不确定性,使控制效果不够理想。神经网络可以模拟人类对知识的处理和对经验的记忆机制,利用学习得到的知识进行联想分析,通过学习调整各神经元的权值与阈值从而更新系统;而模糊系统可以表达人类驾驶员操作的经验知识,并且容易实现。模糊神经网络(adaptive network-based fuzzy inference system, 简称ANFIS)是一种两者有机结合的系统,既能充分发挥两者的优点,又可弥补各自的不足^[8-10]。因此本文采用模糊神经网络控制实现汽车驾驶机器人挡位决策的智能化,提出一种驾驶机器人模糊神经网络换挡控制方法,设计用于驾驶机器人的换挡模糊神经网络模型和模糊神经网络换挡控制器。

1 驾驶机器人系统结构

汽车驾驶机器人在不改变试验车辆的基础上代替试验人员驾驶汽车,按照预先设定的车速-时间曲线要求进行汽车试验,完成油门、制动、离合器、换挡机械手的协调配合工作。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,使机器人的操作具有人类试验人员肌肉的快速性和柔顺性,满足了汽车驾驶动作快速(如换挡、制动)、快慢接合(如离合器)、慢速(如油门)等运动要求^[6]。汽车驾驶机器人的系统结构如图1所示。其中,油门机械腿采用交流电动机伺服控制方式,以实现油门的高精度定位。制动机械腿采用交流伺服电动机驱动,通过自调节制动力大小实现对制动减速度的控制。离合器机械腿采用交流伺服电动机驱动,实现离合器机械腿回收速度的调节,满足起步和换挡过程中离合器动作的快慢要求。换挡机械手是汽车驾驶机器人系统的关键执行部件,它采用七连杆两自由度闭链机构,其内部结构如图2所示。

七连杆两自由度闭链换挡机械手由选换挡连杆机构、角度检测和运动控制3部分组成。其中,选换挡连杆机构可以简化为如图3所示,图中 P 点为变速器换挡杆的固定点,选挡伺服电动机通过滚珠丝杠驱动杆 DO_2 绕 O_2 旋转运动,角度为 θ_{21} ,挂挡伺服电动机通过滚珠丝杠驱动杆 EO_3 绕 O_3 旋转运动,角度为 θ_{31} , P 点的运动轨迹(即变速器操作杆的轨迹)与 θ_{21} 和 θ_{31} 的变化以及各个连杆的长度有关;利用选挡角度传感器和挂挡角度传感器测得换挡机械手当前转角坐标值,根据角位移确定换挡机械手的空

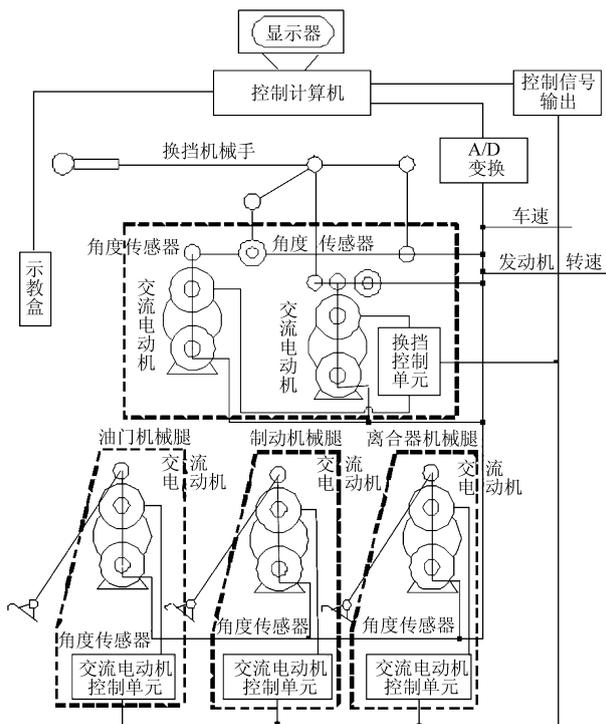


图1 汽车驾驶机器人系统结构原理图

Fig. 1 System configuration diagram of vehicle robot driver

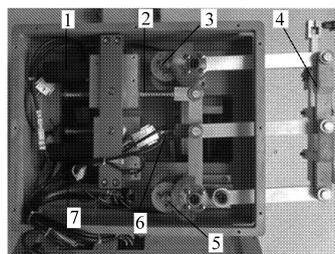


图2 汽车驾驶机器人换挡机械手内部结构图

Fig. 2 Internal structure of shift manipulator for vehicle robot driver

1. 选挡电动机
2. 滚珠丝杠
3. 选挡角度传感器
4. 选换挡连杆机构
5. 挂挡角度传感器
6. 滚珠丝杠
7. 挂挡电动机

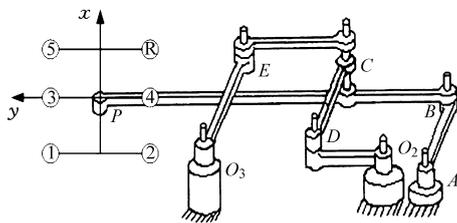


图3 换挡机械手选换挡连杆机构简图

Fig. 3 Diagram of shift manipulator linkage

间位移坐标,在不需要对汽车换挡机构进行改造的前提下,实现选挡和挂挡两个方向运动的机械解耦,最终实现对驾驶机器人换挡机械手的精确控制;汽车驾驶机器人执行机构驱动系统均选用日本安川交流伺服电动机,型号为SGMAH02A,其额定功率200 W,额定转速3 000 r/min,最高转速5 000 r/min,额定转矩0.637 N·m,瞬时最大转矩1.91 N·m。要

实现选挡和挂挡运动控制的解耦,就要保证在挂挡和摘挡时,只控制挂挡伺服电动机旋转,选挡伺服电动机保持静止不动;在选挡时,只控制选挡伺服电动机旋转,挂挡伺服电动机保持静止不动。

2 驾驶机器人模糊神经网络换挡控制方法

2.1 模糊神经网络结构

模糊神经网络是利用人工神经网络的学习训练机制,按照外部环境的变化实时修正模糊系统的隶属函数形状及模糊规则,以达到对外部环境的自适应。模糊神经网络具有普通模糊系统所不具备的知识自动获取机制,同时也保留了模糊系统的模糊信息处理能力和人工神经网络的并行分布处理、高度鲁棒性和容错性、分布存储、非线性逼近等特性。模糊神经网络的结构如图4所示,其同一层的每个节点具有相似的功能。

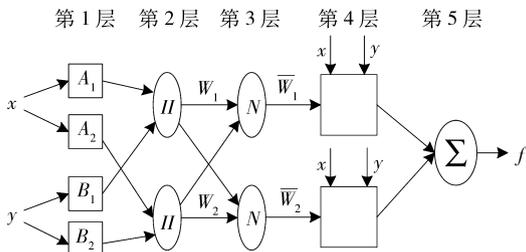


图4 模糊神经网络结构图

Fig.4 Structure of fuzzy neural network

第1层:负责输入信号的模糊化,这一层的每个节点*i*是一个有节点函数的自适应节点,即

$$O_i^1 = \begin{cases} \mu_{A_i}(x) & (i=1,2) \\ \mu_{B_{i-2}}(y) & (i=3,4) \end{cases} \quad (1)$$

式中 x, y ——节点*i*的输入

A_i, B_{i-2} ——与节点函数值相关的语言变量

O_i^1 ——模糊集 A_1, A_2, B_1, B_2 的隶属函数

$\mu_{A_i}(x), \mu_{B_{i-2}}(y)$ —— x, y 属于 A_i, B_{i-2} 的程度

隶属函数可以是任意合适的参数化隶属函数,通常选用钟形函数

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^{2b_i}} \quad (2)$$

式中, $\{a_i, b_i, c_i\}$ 为前提参数,隶属函数的形状随这些参数的改变而改变。

第2层:该层的节点在图4中用II表示,这一层的节点负责将所有输入信号相乘,其乘积输出为

$$O_i^2 = W_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad (i=1,2) \quad (3)$$

式中,“ \times ”表示任何满足T规范的AND算子,每个节点的输出代表一条规则的适应度。

第3层:该层的节点在图4中用N表示,第*i*个

节点计算第*i*条规则的适应度 W_i 与所有规则的适应度 W 之和的比值,即

$$O_i^3 = \bar{W}_i = \frac{W_i}{W} = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad (i=1,2) \quad (4)$$

第4层:第*i*个节点输出为

$$O_i^4 = \bar{W}_i f_i = \bar{W}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (i=1,2) \quad (5)$$

式中, $\{p_i, q_i, r_i\}$ 为该节点的参数集,该层的参数称为结论参数。

第5层:该层计算所有传来信号之和作为总输出,即

$$O_i^5 = \sum_i \bar{W}_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i} \quad (i=1,2) \quad (6)$$

2.2 混合学习算法

模糊神经网络使用一给定的输入输出数据集来构建模糊推理系统,其隶属函数参数采用反向传播方法(back propagation,简称BP算法)与最小二乘法相结合的混合学习算法进行调节,允许模糊系统用要建模的数据进行学习,使隶属函数适应输入输出数据,因此与模糊推理系统和神经网络系统相比,ANFIS既可以表达模糊语言变量,又具有学习功能。混合学习算法的步骤如下:

(1)确定前提参数的初始值,用最小二乘法计算结论参数。给定前提参数后,ANFIS的输出可以表示成结论参数的线性组合。由式(5)得

$$f = \frac{W_1}{W_1 + W_2} f_1 + \frac{W_2}{W_1 + W_2} f_2 = \bar{W}_1 f_1 + \bar{W}_2 f_2 = (\bar{W}_1 x) p_1 + (\bar{W}_1 y) q_1 + (\bar{W}_1) r_1 + (\bar{W}_2 x) p_2 + (\bar{W}_2 y) q_2 + (\bar{W}_2) r_2 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \quad (7)$$

式中,列向量 \mathbf{X} 的元素构成结论参数集合 $\{p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2\}$,若已有 P 组输入输出数据对,且给定前提参数,则 $\mathbf{A}, \mathbf{X}, \mathbf{f}$ 分别为 $P \times 6, 6 \times 1, P \times 1$ 矩阵。样本数据个数远大于未知参数的个数 ($P \gg 6$),使用最小二乘法得到均方误差最小 ($\min \|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{f}\|$) 意义下的结论向量的最佳估计

$$\mathbf{X}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{f} \quad (8)$$

(2)根据步骤(1)得到的结论参数进行误差计算。采用前馈神经网络中的BP算法,将误差由输出端反向传到输入端,用梯度下降法更新前提参数,从而改变隶属函数的形状。

2.3 驾驶机器人模糊神经网络换挡控制设计

利用模糊神经网络实现汽车驾驶机器人换挡的自动控制,主要是利用驾驶员的经验及其他专家的知识,使驾驶机器人在换挡过程中能够考虑更多的因素和指标,力求使汽车驾驶机器人的挡位选择与人的操纵过程相似。这种控制方法的优势在于控制

器具有学习功能,从而可以对不明确的对象进行学习式控制。利用模糊神经网络建模,不必对过程或对象内部进行分析,只要用测得的过程输入输出数据对模糊神经网络进行训练,就可获得其输入输出特性与实际过程等价的汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制模型。汽车驾驶机器人换挡模糊神经网络模型结构如图 5 所示。

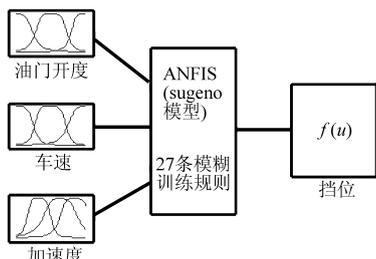


图 5 汽车驾驶机器人换挡模糊神经网络模型

Fig. 5 Shift fuzzy neural network model of vehicle robot driver

网络模型的输入为汽车驾驶机器人油门机械腿的位移(即油门开度)、试验车辆的车速和加速度(即试验车辆车速的导数),网络模型的输出为挡位。在进行训练时,输入变量的隶属函数类型都选用广义钟形函数 gbellmf,隶属函数都为 3 个,隶属函数参数的调整采用混合学习算法,训练误差限设定为零,最大训练次数设定为 800。

汽车驾驶机器人换挡自动控制应在保证最佳动力性的同时,兼顾良好的燃油经济性。具体实现方法是驾驶机器人根据试验车辆运行状况,包括油门开度、车速、加速度、循环行驶工况以及换挡规律,选择合适的挡位,以实现整车最佳动力性及最佳燃油经济性换挡规律。汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制器结构如图 6 所示。

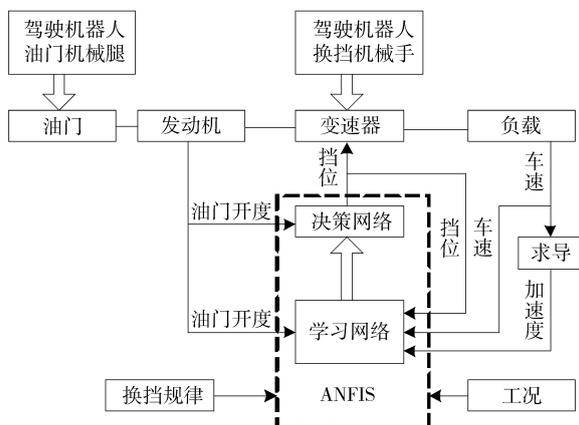


图 6 汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制器原理图

Fig. 6 Schematic of fuzzy neural network shift controller for vehicle robot driver

学习网络不断地采集系统运行状态,调整更新网络的权值。输入输出变量的隶属函数形状将随着

运行状态的不断改变而改变,适应外部工况的变化。调整成功后将各个权值送入决策网络,通过模糊运算得出挡位值,驱动汽车驾驶机器人进行换挡。整个系统具有自学习功能,并且对外部工况具有适应性。

3 试验与结果分析

3.1 试验验证

为了验证所提出的驾驶机器人模糊神经网络换挡控制方法的效果,根据相关标准^[11],在国家客车质量监督检验中心(重庆)BOCO NJ 150/80 型底盘测功机上由驾驶机器人对 Ford FOCUS 2.0 L 汽车进行长时间的排放耐久性 V 型试验。驾驶机器人在试验车辆上的安装图如图 7 所示。

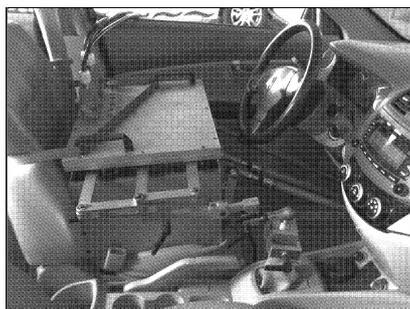


图 7 驾驶机器人在试验车辆上的安装图

Fig. 7 Vehicle robot driver fixed on test vehicle

试验过程中,实时采集汽车驾驶机器人油门机械腿、试验车辆车速和驾驶机器人换挡机械手的实时数据,得到 277 组数据。将试验数据分成训练数据集(233 组)和核对数据集(44 组),训练数据集用于建模,而核对数据集用于模型验证,这样得到的模型对训练数据无偏,并对新的数据有较好的泛化性能。驾驶机器人模糊神经网络控制系统输入数据如图 8 所示。

3.2 结果分析

经训练得到的 ANFIS 系统仿真输出挡位与试验数据输出挡位的比较结果如图 9 所示,训练过程中的误差变化曲线如图 10 所示。

由图 9 可以看出,ANFIS 系统仿真输出挡位与试验数据输出挡位基本一致,从而证明了该 ANFIS 换挡控制系统的正确性和有效性。从图 10 可以看出,训练数据误差和核对数据误差随训练次数的增加同时减小,训练数据最大均方根误差为 0.091 8,核对数据的最大均方根误差为 0.167 8,说明所建系统模型是有效的。汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制误差如图 11 所示,换挡控制的部分试验结果如表 1 所示。

从图 11 和表 1 可以看出,汽车驾驶机器人模糊神经网络控制挡位与试验输出挡位基本上是一致

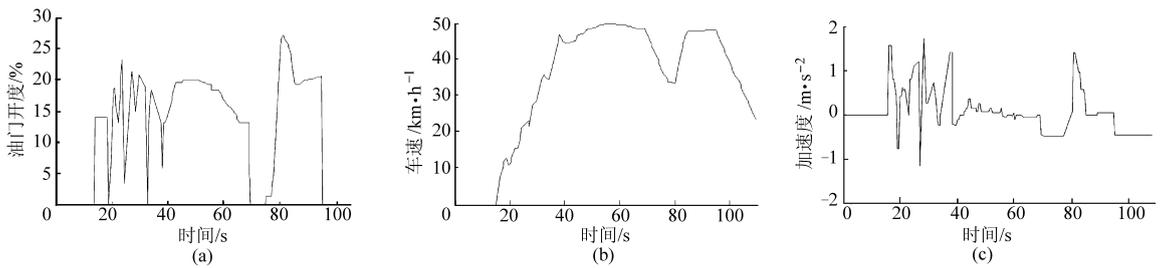


图8 驾驶机器人模糊神经网络换挡控制系统输入数据

Fig. 8 Input data of fuzzy neural shift control system for robot driver

(a) 油门开度 (b) 车速 (c) 加速度

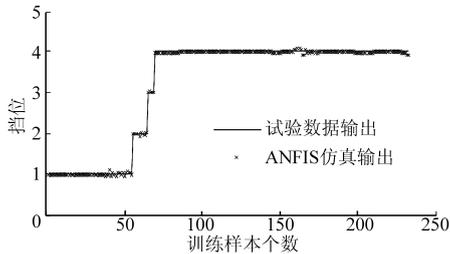


图9 ANFIS仿真输出挡位与试验数据输出挡位的比较

Fig. 9 Comparison of ANFIS simulation shift and experimental shift

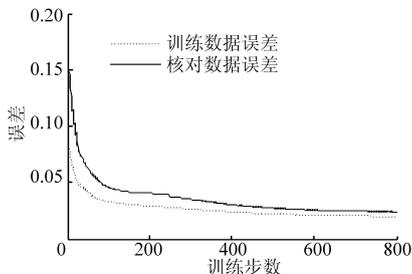


图10 训练过程中的误差变化曲线

Fig. 10 Error curves of training process

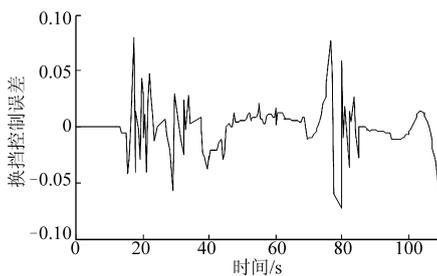


图11 汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制误差曲线

Fig. 11 Error curves of fuzzy neural shift control for vehicle robot driver

表1 汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制试验结果

Tab. 1 Experimental results of fuzzy neural shift control for vehicle robot driver

样本号	油门开度 /%	车速 /km·h ⁻¹	加速度 /m·s ⁻²	试验挡位	仿真挡位	误差
1	14.00	11.76	0.78	1	1.015 3	0.015 3
2	18.33	11.76	0.39	1	0.991 2	-0.008 8
3	21.33	22.94	1.17	2	2.007 9	0.007 9
4	13.33	35.00	-0.27	3	2.997 0	-0.003 0
5	16.67	34.59	-0.27	3	3.028 5	0.028 5
6	20.00	46.53	0.12	4	3.999 3	-0.000 7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
277	19.75	49.35	0.04	4	4.006 0	0.006 0

的,驾驶机器人模糊神经网络换挡控制的最大误差为 0.079 7,完全能够达到汽车驾驶机器人挡位决策的目的,再次验证了本文控制方法的有效性。

4 结论

(1)提出了一种汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制方法,设计了用于驾驶机器人系统的换挡模糊神经网络模型和模糊神经网络换挡控制器,并进行了理论分析和试验验证。

(2)仿真结果表明,驾驶机器人模糊神经网络控制仿真挡位与试验挡位基本保持一致,该方法可根据操作工况环境实现正确的驾驶机器人挡位控制,实现了汽车驾驶机器人挡位决策的智能化,验证了本文方法的有效性和精确性。

参 考 文 献

- 陈刚,张为公,龚宗洋,等. 汽车驾驶机器人多机械手协调控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(9): 1 836 ~ 1 840.
Chen Gang, Zhang Weigong, Gong Zongyang, et al. Coordinated control of multiple manipulators for vehicle robot driver[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(9): 1 836 ~ 1 840. (in Chinese)
- Wolfgang Thiel, Stefan Grof, Gunter Hohenberg, et al. Investigations on robot driver for vehicle exhaust emission measurements in comparison to the driving strategies of human drivers[C]. SAE Paper 982642, 1998.
- Shoval S, Zybyrt 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: 1 767 ~ 1 772.

- 4 Hazim Namik, Tokushu Inamura, Karl Stol. 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.
- 5 Kai Muller, Werner Leonhard. Computer control of a robotic driver for emission tests [C] // Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. San Diego, America, 1992: 1 506 ~ 1 511.
- 6 张为公, 陈晓冰. 汽车驾驶机器人关键技术[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(1): 20~23.
Zhang Weigong, Chen Xiaobing. Key technologies of vehicle robot driver[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005, 26(1): 20~23. (in Chinese)
- 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 Roger Jang. ANFIS: adaptive network-based fuzzy inference systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(3): 665~685.
- 9 王学峰, 许纯新, 赵克利, 等. 工程机械模糊神经网络挡位控制试验研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 1~5.
Wang Xuefeng, Xu Chunxin, Zhao Keli, et al. Experimental study on gear-shifting control of construction machine based on fuzzy neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 1~5. (in Chinese)
- 10 王卓, 赵丁选, 龚捷. 工程车辆挡位决策的自适应神经网络模糊推理系统[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 1~4.
Wang Zhuo, Zhao Dingxuan, Gong Jie. Adaptive neuro-fuzzy inference system of engineering vehicle shift decision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 1~4. (in Chinese)
- 11 GB 18352.2—2001 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(II) [S].
- 12 张小龙, 宋健, 冯能莲, 等. 汽车道路试验测试方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 38~44.
Zhang Xiaolong, Song Jian, Feng Nenglian, et al. Research progress of measurement method for vehicle road way test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 38~44. (in Chinese)

(上接第 15 页)

参 考 文 献

- 1 Chan C C, Wong Y S, Bouscayrol A. Powering sustainable mobility: roadmaps of electric, hybrid and fuel cell vehicles [C] // Proceedings of the IEEE, 2009, 97(4): 603~607.
- 2 Miller J M, Everett M. An assessment of ultra-capacitors as the power cache in Toyota THS-II, GM-Allison AHS-2 and Ford FHS hybrid propulsion systems [C] // APEC 2005, Twentieth Annual IEEE, 2005: 481~490.
- 3 张金柱. 丰田第二代混合动力系统(THS-II) [J]. 内燃机, 2005(3): 6~9.
Zhang Jinzhu. Second generation of Toyota hybrid system (THS-II) [J]. Internal Combustion Engines, 2005(3): 6~9. (in Chinese)
- 4 James H, Alan H, David F. General motors front wheel drive two-mode hybrid transmission [C]. SAE Paper 2009-01-0508, 2009.
- 5 刘钊, 赵世琴, 黄宗益. 用杠杆模拟法建立行星变速器动力学模型 [J]. 汽车工程, 2000, 22(4): 274~277.
Liu Zhao, Zhao Shiqin, Huang Zongyi. Dynamic modeling of planetary transmission by lever analogy [J]. Automotive Engineering, 2000, 22(4): 274~277. (in Chinese)
- 6 Beniord H L, Leising M B. The lever analogy: a new tool in transmission analysis [C]. SAE Paper 810102, 1981.
- 7 Wu J S, Chen C H. Torsional vibration analysis of gear-branched systems by finite element method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 240(1): 159~182.