电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络车速控制方法及试验验证

陈刚^{1*}, 张为公², 王良模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

* 联系人, E-mail: gang0418@163.com

2017-02-06 收稿, 2017-05-22 修回, 2017-05-25 接受, 2017-07-26 网络版发表

国家自然科学基金(51675281, 51205208)、江苏省六大人才高峰计划(2015-JXQC-003)、江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2015004-02)和中央高校基本科研业务费专项(30916011302, NJ20160037)资助

摘要 为了实现不同驾驶循环工况的精确车速跟踪, 提出了一种电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络车速控制方法. 通过电磁直线作动器直接驱动油门机械腿、制动机械腿、离合器机械腿和换挡机械手, 给出了电磁直驱驾驶机器人控制系统结构和协调运动控制模型. 在此基础上, 设计了电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络车速控制模型, 电磁直驱驾驶机器人油门、制动、离合器机械腿和换挡机械手的位移作为网络模型的输入, 试验车辆的车速作为网络模型的输出. 输入变量的隶属度函数个数都为3, 隶属度函数的类型都采用广义钟形函数, 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. 本文提出的方法与其他控制方法和人类驾驶员的驾驶性能进行了对比分析, 试验验证了提出方法的有效性.

关键词 汽车试验, 电磁直驱, 驾驶机器人, 车速控制, 模糊神经网络

汽车试验测试对于汽车的新产品开发具有极其重要的意义, 一个汽车新车型的定型往往需要大量的试验. 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. 驾驶机器人是在汽车试验中代替人类驾驶员在恶劣环境下进行驾驶操纵的工业机器人. 驾驶机器人的研究与开发已成为国际上本领域的研究热点^[1~4], 比较著名的有美国Froude Consine, Kairos, 日本Horiba, Autopilot, Nissan Motor, Onosokki, Automax, 德国Schenck, Stable, Witt, 英国Mira、ABD等少数几个发达国家拥有该项技术, 其关键技术仍处在保密阶段. 国内掌握该技术的主要有东南大学、南京理工大学^[2,5,6]、上海交通大学^[7]、中国汽车技术研

究中心^[8]等高校和研究机构.

目前国内外驾驶机器人的驱动方式主要有液压驱动^[9]、气电混合驱动^[10]、电动伺服驱动^[6,10]和电磁直驱^[4,5]4种. 吉林大学陈福恩等人^[9]设计了液压自动换挡机械手; 东南大学Chen和Zhang等人^[6,10]设计了气压驱动机械手和“伺服电机+滚珠丝杠”驱动机械手; 新西兰奥克兰大学Nicholas等人^[3]设计了“电机+齿轮齿条”驱动机械手; 德国慕尼黑联邦国防军大学Benedikt等人^[4]研究了直流电机驱动的绳绞车驾驶机器人. 但液压驱动方式需由专门的液压泵系统提供液压油, 使系统故障点增多, 机构复杂, 受温度影响大, 对油的密封性要求高; 气压驱动方式采用气缸进行驱动, 使得执行机构和检测控制系统复杂, 并且气

引用格式: 陈刚, 张为公, 王良模. 电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络车速控制方法及试验验证. 科学通报, 2017, 62: 3514–3524

Chen G, Zhang W G, Wang L M. Fuzzy-neural-network-based speed control method and experiment verification for electromagnetic direct drive robot driver (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3514–3524, doi: 10.1360/N972017-00134

动执行机构难以实现轨迹控制和多点准确定位;电动伺服驱动方式采用“伺服电机/步进电机+滚珠丝杠/齿轮齿条/带轮”进行驱动,但滚珠丝杠有临界速度的限制,并且由于进入和离开滚珠螺母滚道的滚珠的振动,导致滚珠丝杠的运动不够平顺;带轮驱动具有较低的刚度,齿轮齿条驱动通常有间隙和低速性能不佳,并且带轮和齿轮齿条驱动容易受到摩擦和接触间隙所引起的振动。另外,旋转驱动系统的反弹、滞后、空转和抖动等因素影响精度和重复性等性能变量。

相比滚珠丝杠、带轮驱动、齿轮齿条驱动,基于电磁直线作动器的电磁直接驱动能将电能直接转换为直线形式的机械能,无需中间传动环节,有着其他驱动方式无可比拟的优越性,成为机械驱动与传动研究中的发展趋势之一^[11-13]。电磁驱动驾驶机器人的主要结构特征是采用电磁直线执行器直接驱动控制驾驶机器人的油门、制动器、换挡等各个执行机构动作,具有无需驱动传动链、传动高效、结构紧凑等突出优点,能够有效地提高整个系统的定位精度、操控精度、重复性、稳定性、可靠性和动态响应。南京理工大学Chen等人^[5]建立了电磁直驱驾驶机器人物理模型及虚拟样机模型,并进行了初步的操纵机构运动学分析及性能匹配优化。

驾驶机器人必须能够根据设定的驾驶循环行驶工况的要求,实现试验车辆的自动驾驶,完成油门、制动器、离合器和换挡动作的协调配合,是一个模仿人类驾驶员智能和行为的高度自动化系统。Chen等人^[10]运用变参数PID控制实现了驾驶机器人的车速跟踪,但其控制器参数需要预先人工整定,并且车速波动较大。Stefan等人^[14]设计了基于平整度的驾驶机器人车速跟踪控制,但其近似发动机扭矩最大模型不准确,并且在线自适应性差。Nicholas等人^[3]设计了用于自主车辆的驾驶机器人PID控制器,但其精度较低。汽车驾驶机器人系统不仅涉及机器人本体的控制,而且要实现汽车的自动驾驶,具有非线性、时变、时滞的特点,且影响因素较多,难以建立其精确的数学模型。模糊控制和神经控制为解决这类非线性系统的控制提供了新思路。但模糊系统的模糊控制规则非常难以获取,模糊规则的获取来源比较困难,并且缺乏有效的学习机制^[15,16];神经网络对语言信息的处理比较欠缺,不能很好地利用专家经验知识^[17,18];而它们的结合体模糊神经网络(adaptive network-based fuzzy inference system, ANFIS)既具有模糊逻辑

系统善于利用专家语言信息的优点,又具备神经网络强大的自学习能力的优点,通过自适应神经网络学习提炼出模糊规则,能够有效地计算出隶属度函数的最佳参数,然后通过模糊推理建立输入变量和输出变量之间的联系^[19,20]。

本文提出了一种电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络精确车速跟踪控制方法。通过电磁直线作动器直接驱动驾驶机器人油门机械腿、制动机械腿、离合器机械腿和换挡机械手。设计了电磁直驱驾驶机器人控制系统结构和协调运动控制模型,并设计了电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络车速控制模型。提出的方法与其他控制方法和人类驾驶员的驾驶性能进行了对比,试验验证了提出方法的有效性。

1 系统结构

电磁直驱驾驶机器人由油门机械腿、制动器机械腿、离合器机械腿、换挡机械手、计算机控制系统及其驱动装置等组成。电磁直驱驾驶机器人系统结构如图1所示^[5],安装在车辆驾驶室的驾驶机器人执行机构如图2所示。电磁直驱驾驶机器人采用电磁直线作动器作为其驱动装置,它通过电磁直线作动器直接驱动油门机械腿、制动器机械腿、离合器机械腿和换挡机械手,不需要任何中间转换机构。

2 控制方法

2.1 控制系统硬件结构

电磁直驱驾驶机器人控制系统实现油门机械腿、制动机械腿、离合器机械腿和换挡机械手等执行机构运动的信号采集处理和控制在。电磁直驱驾驶机器人控制系统硬件结构如图3所示。

TMS320F2812 DSP(数字信号处理器)芯片作为电磁直驱驾驶机器人控制系统的核心。油门机械腿位置、制动机械腿位置、离合器机械腿位置、换挡机械手位置、电磁直线作动器位置、电磁直线作动器电流、车速和发动机转速等经信号调理和模数转换模块输入到DSP中。接着,根据预先输入到计算机存储器的试验循环工况数据,计算得到电磁直驱驾驶机器人执行机构指令信号。驱动和运动控制模块接收来自DSP的输出控制信号。电磁直驱驾驶机器人采用PWM(脉宽调制)控制及位移和电流双闭环控制策略,通过改变PWM信号的极性和占空比,DSP控制器改

图 1 (网络版彩色)电磁直驱驾驶机器人系统结构. (a) 物理样机模型; (b) 虚拟样机模型. 1, 换挡机械手用电磁直线作动器; 2, 挂挡机械手用电磁直线作动器; 3, 机座; 4, 换挡机械手; 5, 油门机械腿; 6, 油门机械腿用电磁直线作动器; 7, 制动器机械腿; 8, 制动器机械腿用电磁直线作动器; 9, 离合器机械腿; 10, 离合器机械腿用电磁直线作动器

Figure 1 (Color online) Electromagnetic direct drive robot driver system structure. (a) Physical prototype model; (b) virtual prototyping model. 1, Electromagnetic linear actuator for gear selecting manipulator; 2, electromagnetic linear actuator for gear shifting manipulator; 3, mechanic base; 4, shift manipulator; 5, throttle mechanical leg; 6, electromagnetic linear actuator for throttle mechanical leg; 7, brake mechanical leg; 8, electromagnetic linear actuator for brake mechanical leg; 9, clutch mechanical leg; 10, electromagnetic linear actuator for clutch mechanical leg

变电磁直线作动器电流的方向和幅度. 电磁直驱驾驶机器人控制系统实现机器人执行机构的信号测量和运动控制.

2.2 协调控制模型

电磁直驱驾驶机器人协调控制多机械手/腿的力、速度、位移和时间, 使其完成机器人本体的运动控制和车速控制. 在汽车试验中, 电磁直驱驾驶机器人需要跟踪给定的循环驾驶工况, 即车速-时间曲线. 各种驾驶工况能被分解成驻车怠速工况、起步工况、换挡工况、连续工况和变工况等. 驾驶循环工况速度和操纵指令表见表1. 换挡工况包括加速升挡和减速降挡等工况, 连续工况包括加速、恒速、减速、连续变速等工况, 变工况包括加速、减速、加速-恒速、恒速-加速、恒速-减速、减速-恒速、减速-加速等工况.

图 2 (网络版彩色)安装在车辆驾驶室的驾驶机器人执行机构. (a) 俯视图; (b) 侧视图. 1, 转向机械手; 2, 方向盘; 3, 机座; 4, 座椅; 5, 换挡机械手; 6, 离合器机械腿; 7, 离合器踏板; 8, 制动器机械腿; 9, 制动器踏板; 10, 油门机械腿; 11, 油门踏板

Figure 2 (Color online) Robot driver mechanism installed in vehicle cab. (a) Top view; (b) side view. 1, Steering manipulator; 2, steering wheel; 3, mechanical base; 4, seat; 5, shift manipulator; 6, clutch mechanical leg; 7, clutch pedal; 8, brake mechanical leg; 9, brake pedal; 10, throttle mechanical leg; 11, throttle pedal

图 3 (网络版彩色)电磁直驱驾驶机器人控制系统硬件结构

Figure 3 (Color online) Robot driver control system hardware structure

电磁直驱驾驶机器人多机械手协调控制模型结构如图4所示^[2]. 按照驾驶循环工况操纵要求, 每个机械手的运动控制由油门位置控制闭环、制动力控制闭环、离合器速度和离合器位置控制闭环、换挡速度和

表 1 驾驶循环工况速度和操纵指令表

Table 1 Speed and manipulation instruction of driving cycle conditions

时间(s)	操纵	挡位	车速(km h ⁻¹)
0	点火怠速	空挡	0
4	挂入一档	踩离合器挂一档	0
9	起步	一档起步	0
13	换入二挡	2	18
19	换入三挡	3	32
25	加速	3	48
63	等速	3	48
65	减速	3	32
70	加速	3	48
99	等速然后换空挡	空挡	48
109	减速停车	空挡	0
123	挂入一档	踩离合器挂一档	0
127	起步	一档起步	0
132	换入二挡	2	18
137	换入三挡	3	32
143	加速	3	48
209	等速	3	48
211	减速	3	32
216	加速	3	48
284	等速	3	48
287	减速	3	32
291	加速	3	48
313	等速然后换空挡	空挡	48
324	减速停车	空挡	0
338	挂入一档	踩离合器挂一档	0
342	起步	一档起步	0
347	换入二挡	2	18
352	换入三挡	3	32
358	加速	3	48
402	等速	3	48
405	减速	3	32
409	加速	3	48
441	等速然后换空挡	空挡	48
450	减速停车	空挡	0
463	挂入一档	踩离合器挂一档	0
467	起步	一档起步	0
472	换入二挡	2	18
477	换入三挡	3	32
484	加速	3	48
521	等速	3	48
524	减速	3	32
528	加速	3	48
572	等速然后换空挡	空挡	48
581	减速停车	空挡	0
595	怠速	空挡	0
600	试验停止

图 4 (网络版彩色)电磁直驱驾驶机器人多机械手协调控制模型结构
Figure 4 (Color online) Robot driver coordinated control model structure

换挡位置控制闭环. 多机械手运动闭环控制实现油门位置的精确控制, 通过自调整油门位置和挡位、离合器位置和速度实现加速度的精确控制, 并通过自调整挡位、制动力和离合器结合速度的调节实现制动减速度的精确控制. 依据设定的驾驶循环工况车速表和操纵控制指令表, 电磁直驱驾驶机器人实现多机械手的协调控制和车速精确跟踪.

2.3 模糊神经网络车速控制模型

电磁直驱驾驶机器人采用Sugeno模糊神经网络模型对试验车辆车速进行控制, 该模型由前件网络和后件网络组成, 其收敛速度快, 样本需要量少, 其网络结构如图5所示.

前件网络由四层组成.

第一层为输入层, 节点数为4, 对应4个车速控制特征参数油门机械腿位移 x_1 , 制动机械腿位移 x_2 , 离合器机械腿位移 x_3 , 换挡机械手位移 x_4 , 即油门开度、制动开度、离合器开度、挡位.

第二层为模糊化层, 对每个节点运用钟形函数计算其隶属度

$$\mu_i^j = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}}, \quad (1)$$

式中, x 为节点 $i(i=1,2,3,4)$ 的输入; $j=1,2,3,\dots,(n-1)$, n 为模糊规则个数; $\{a_i, b_i, c_i\}$ 是前提参数集, 隶属度函数的形状随着前提参数的改变而变化.

第三层为规则层, 该层用来计算每条规则的激

图5 模糊神经网络结构图

Figure 5 Fuzzy neural network structure

励强度,

$$\alpha_j = \prod \mu_{A_j}(x). \quad (2)$$

第四层为归一化层, 该层用来计算规则的归一化激励强度

$$\bar{\alpha}_j = \frac{\alpha_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j}. \quad (3)$$

后件网络各层的功能与计算如下:

后件网络的输入层比前件网络的输入层多一个节点输入 $x_0=1$, 用来补偿模糊规则后件中的常数项.

后件网络的函数层用来计算每条规则的后件加权重值 y_i , 节点间的权值系数为后件参数, 该层的输出为输入的线性组合,

$$y_j = \rho_0^j + \rho_1^j x_1 + \rho_2^j x_2 + \rho_3^j x_3 + \rho_4^j x_4, \quad (4)$$

式中, ρ_d^j 为权值系数, $d=0,1,2,3,4$.

后件网络的结合层用来归一化后件加权重值,

$$\bar{y}_j = \bar{\alpha}_j \cdot y_j. \quad (5)$$

后件网络的输出层有唯一节点, 该层将输入信号求和, 计算试验车辆车速,

$$\hat{Y} = \sum_{j=1}^n \bar{y}_j. \quad (6)$$

电磁直驱驾驶机器人车速跟踪模糊神经网络控制模型结构如图6所示. 网络模型的输入为驾驶机器人油门、制动器、离合器机械腿和换挡机械手的位移值, 即油门开度、制动器位置、离合器位置和挡位, 它们的隶属函数类型都选用广义钟形函数gbellmf, 隶属度函数个数都为3, 每个输入变量对应三个模糊集合, 因此网络第一层有12个节点; 通过输入变量的模糊集合的组合, 它们组成81条模糊训练规则; 网络模型的输出为试验车辆车速. 输入变量数据分成2个集合, 其中一个集合作为网络训练样本向量, 对建立的模型进行训练, 称为训练集合; 另一个集合用于对训练后的模型进行检验, 称为核对集合. 在进行训练时, 最大训练次数设定为200, 训练算法选用反向传播算法(BP算法)和最小二乘法相结合的混合学习算法(hybrid). 此模型中, ANFIS采用Sugeno模型作为系统模糊推理模型.

3 试验验证

3.1 试验设计

为了验证本文提出的方法的有效性, 根据《GB 18352.3-2005》《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(III, IV)》所要求的规定标准^[21], 在国家客车质量监督检验中心BOCO NJ 150/80型底盘测功机上由电磁直驱驾驶机器人对Ford FOCUS 2.0 L五挡手动变速器汽车进行80000 km排放耐久性V型试验. 安装在试验车辆上的驾驶机器人见图7.

经过车辆结构参数及离合器磨损等车辆特性改变和车辆性能自学习后^[2], 驾驶机器人自动操纵试验车辆. 试验过程中, 采集试验车辆车速、驾驶机器人

图6 (网络版彩色)电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络车速控制模型图

Figure 6 (Color online) Robot driver fuzzy neural network speed control model

图7 (网络版彩色)安装在试验车辆上的驾驶机器人
Figure 7 (Color online) Robot driver installed on test vehicle

换挡机械手和油门、制动器、离合器机械腿的实时数据,得到230组数据.对于训练样本数据的数量选取如果过少则精度不够,但数量过大则会出现过拟合的现象,且影响算法的速度,综合考虑后选取训练样本数据190组,核对样本数据40组,利用数据对所建立的模糊神经网络控制模型进行训练.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 结果与分析

为了检验本文方法的有效性,经训练得到的ANFIS系统输出与给定原初始数据的比较结果和训练过程中的误差如图9和10所示.

由图9可以看出,ANFIS系统输出与给定原初始数据具有较好的一致性.而从图10可以看出,训练数据误差和核对数据误差随着训练次数的增加而同时减小,训练数据的最大均方根误差为0.081,核对数据的最大均方根误差为0.088,说明所建系统模型是有效的.电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络控制的部分试验结果如表2所示.

从表3可以看出,模糊神经网络控制车速与试验循环工况要求的目标车速基本上一致,车速跟踪控制最大误差为0.8926 km/h,满足国家汽车试验标准要求要求的 ± 2 km/h误差范围,再次验证了所建系统模型的有效性.

为了进一步验证本文提出的电磁直驱驾驶机器人控制方法的效果,将人类驾驶员车速跟踪结果^[22]、传统的PID控制驾驶机器人车速跟踪结果与本文方法控制驾驶机器人车速跟踪结果进行对比分析(见图11),车速跟踪误差结果对比如图12所示.

图8 (网络版彩色)驾驶机器人模糊神经网络控制系统输入数据. (a) 驾驶机器人油门、制动器、离合器机械腿控制曲线; (b) 驾驶机器人换挡机械手控制曲线

Figure 8 (Color online) Robot driver fuzzy neural network control system input data. (a) Control curve of the mechanical leg for throttle and brake and clutch; (b) control curve of the shift manipulator

图9 (网络版彩色)ANFIS输出与给定数据的比较

Figure 9 (Color online) Comparison of ANFIS output with given data

从图11和12可以看出,人类驾驶员不能在规定的时间内按照国家试验标准的要求完成汽车试验,车速波动很大,并且人类驾驶员容易受经验、心理、环境和其他因素的影响,人类驾驶员车速跟踪结果的重复性很差,无法满足国家汽车试验标准的要求;PID控制电磁直驱驾驶机器人车速波动较大,尤其在加

图 10 (网络版彩色)训练过程中的误差变化曲线

Figure 10 (Color online) Error curve in training process

速到稳速工况时,车速变化幅度甚至超过 ± 5 km/h,超过了国家汽车试验标准要求的 ± 2 km/h的车速跟踪精度^[21];本文方法控制电磁直驱驾驶机器人车速变

化柔和、波动小,能准确跟踪试验循环工况要求的目标车速,该方法明显提高了车速控制精度,车速跟踪误差在 ± 1 km/h范围内,满足了国家汽车试验标准的要求,试验结果表明本文提出的方法是有效的。

为了进一步验证本文提出的方法的适应性,在底盘测功机上进行了不同驾驶循环工况下的车辆排放耐久性试验。不同循环工况下基于本文提出方法的电磁直驱驾驶机器人车速跟踪结果如图13所示。本文提出的方法与其他方法的控制器特性对比如表3所示^[6,15]。由图13和表3可以看出,采用本文方法的电磁直驱驾驶机器人平顺实现了在各种驾驶循环工况下的车辆起步、加速、换挡、恒速、减速等操作,在自动驾驶过程中,不同驾驶工况之间的过渡平稳,车速跟踪结果具有良好的重复性,再次验证了提出方法的有效性。

表 2 电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络控制试验结果

Table 2 Fuzzy neural control experiment results of electromagnetic direct drive robot driver

样本号	油门开度(%)	制动器位置(%)	离合器位置(%)	挡位	目标车速(km h ⁻¹)	本文方法控制车速(km h ⁻¹)	误差(km h ⁻¹)
1	3.33	0.00	0.00	1	8.46	8.1946	-0.2654
2	23.33	0.00	0.00	1	17.77	18.0798	0.3098
3	15.67	0.00	0.00	1	12.69	13.5826	0.8926
4	18.83	0.00	0.00	2	28.77	28.9925	0.2225
5	21.00	0.00	0.00	2	29.62	30.1217	0.5017
6	13.33	0.00	0.00	2	26.23	25.8732	-0.3568
7	18.33	0.00	0.00	3	38.93	39.1136	0.1836
8	21.67	0.00	0.00	3	40.62	40.5116	-0.1084
9	24.50	0.00	0.00	3	42.31	42.0224	-0.2876
10	19.67	0.00	0.00	4	48.24	48.1841	-0.0559
11	14.71	0.00	0.00	4	48.23	48.3880	0.1580
...	...	...	...	...	...	...	...
230	26.00	0.00	0.00	4	41.55	41.5860	0.0360

图 11 (网络版彩色)驾驶机器人车速跟踪结果。(a) 对比曲线;(b) 对比曲线局部放大图

Figure 11 (Color online) Speed tracking results of robot driver. (a) Comparison curve; (b) partial magnification of comparison curve

图 12 (网络版彩色)驾驶机器人车速跟踪误差对比曲线. (a) PID控制车速跟踪误差; (b) 模糊神经网络控制车速跟踪误差
Figure 12 (Color online) Speed tracking error comparison curve of robot driver. (a) Speed tracking error using PID control; (b) speed tracking error using fuzzy neural network control

图 13 不同循环工况下基于本文提出方法的电磁直驱驾驶机器人车速跟踪结果. (a) 48 km/h驾驶循环工况; (b) 56 km/h驾驶循环工况; (c) 64 km/h驾驶循环工况; (d) 72 km/h驾驶循环工况; (e) 89 km/h驾驶循环工况; (f) 113 km/h驾驶循环工况
Figure 13 Speed tracking results of robot driver using the proposed approach under different cycle conditions. (a) 48 km/h driving cycle conditions; (b) 56 km/h driving cycle conditions; (c) 64 km/h driving cycle conditions; (d) 72 km/h driving cycle conditions; (e) 89 km/h driving cycle conditions; (f) 113 km/h driving cycle conditions

表 3 控制器特性对比

Table 3 Comparison of controller characteristics

控制器	控制器参数	车速跟踪误差 (km/h)	自学习能力	车速抖振	自适应性	可重复性
PID控制	人工调整	± 6	不具备	有	差	差
滑模控制	反复尝试	± 2	差	无	一般	一般
模糊控制	人工经验	± 2	一般	无	好	好
本文方法	在线学习	± 1	非常好	无	非常好	非常好

4 结论

提出了一种电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络精确车速跟踪控制方法. 通过电磁直线作动器直接驱动驾驶机器人油门机械腿、制动机械腿、离合器机械腿和换挡机械手. 设计了电磁直驱驾驶机器人控制系统结构和协调运动控制模型, 以及电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络车速控制模型, 并进行了理论分析和试验验证.

经实车试验和误差对比分析, 本文方法控制驾驶机器人的车速跟踪精度明显高于PID控制驾驶机器人和人类驾驶员的车速跟踪精度, 平顺实现了在各种驾驶循环工况下的车辆起步、加速、换挡、恒速、减速等操纵, 在自动驾驶过程中, 不同驾驶工况之间的过渡平稳, 并实现了对国家汽车试验标准要求的驾驶循环行驶工况的车速跟踪, 车速跟踪结果具有良好的重复性, 试验结果验证了本文理论和方法的有效性.

提出的方法不仅能够充分利用专家经验, 并且

具有在线自学习能力, 能够精确跟踪给定的目标车速, 车速跟踪误差在 ± 1 km/h范围内, 车速跟踪控制最大误差为0.8926 km/h, 满足国家汽车试验标准要求的 ± 2 km/h的车速跟踪精度, 并在各种驾驶循环试验工况下具有良好的适应性, 保证了汽车试验数据的准确度和有效性.

5 将来的工作

由于时间和客观条件的限制, 本文只讨论了电磁直驱驾驶机器人的车速跟踪精度和重复性. 不同驾驶风格、驾驶行为和驾驶习惯对试验结果有影响, 如何通过电磁直驱驾驶机器人实现不同驾驶风格的模拟是将来的一项重要研究工作. 另外, 将来需要进行电磁直驱驾驶机器人操纵手动挡车辆和自动挡车辆的驾驶性能研究. 将电磁直驱驾驶机器人应用于复杂室外环境道路试验和自动驾驶车辆也是一项重要的研究工作.

参考文献

- 1 Nishihata Y, Mizuki J, Akao T, et al. Self-regeneration of a Pd-perovskite catalyst for automotive emissions control. *Nature*, 2002, 418: 164–167
- 2 Chen G, Zhang W G. Hierarchical coordinated control method for unmanned robot applied to automotive test. *IEEE Trans Ind Electron*, 2016, 63: 1039–1051
- 3 Nicholas W, Christopher C, Karl S, et al. Development of a robotic driver for autonomous vehicle following. *Int J Intell Syst T Appl*, 2010, 8: 276–287
- 4 Benedikt A, Elias H, Ferdinand S. Second order sliding modes control for rope winch based automotive driver robot. *Int J Vehicle Des*, 2013, 62: 147–164
- 5 Chen G, Zhang W G. Digital prototyping design of electromagnetic unmanned robot applied to automotive test. *Robot Cim-Int Manuf*, 2015, 32: 54–64
- 6 Chen G, Zhang W G, Zhang X N. Speed tracking control of vehicle robot driver system using multiple sliding surface control schemes. *Int J Adv Robot Syst*, 2013, 10: 1–9
- 7 Shi Z, Zhang W J, Hu K F, et al. Automatic driving robot (in Chinese). Chinese Patent, 201110247651.7, 2011-8-25 [石柱, 张文俊, 胡可凡, 等. 自动驾驶机器人. 中国专利, 201110247651.7, 2011-8-25]
- 8 Chen H, Li W, Qiao S H. Robot driver used for automotive test (in Chinese). Chinese Patent, 201110264909.4, 2011-9-7 [陈弘, 李伟, 乔胜华. 用于汽车试验的驾驶机器人. 中国专利, 201110264909.4, 2011-9-7]
- 9 Chen F E, Gao C F, Duan L N, et al. Test system of capability and life-span of auto synchronizer and its control of handling mechanical hand (in Chinese). *Chin J Constr Mach*, 2004, 2: 108–112 [陈福恩, 高春甫, 段鲁男, 等. 同步器寿命性能测试系统及其操纵机器人手的控制. 中国工程机械学报, 2004, 2: 108–112]
- 10 Chen X B, Zhang W G. Robot driver for vehicle durability emission test on chassis dynamometer. *J Southeast Univ*, 2005, 21: 33–38
- 11 Byeonghun N, Hyunjin C, Kyoungchul K. Design of a direct-driven linear actuator for a high-speed quadruped robot, cheetaroid-I. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2015, 20: 924–933
- 12 Nakata Y, Ide A, Nakemura Y, et al. Hopping by a monopedal robot with a biarticular muscle by compliance control-an application of an electromagnetic linear actuator. *J Robot Mechatron*, 2013, 25: 106–114
- 13 Hamelin P, Bigras P, Beaudry J. Discrete-time state feedback with velocity estimation using a dual observer: Application to an underwater direct-drive grinding robot. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2012, 17: 187–191

- 14 Stefan S, Michael B, Klaus D. Flatness based velocity tracking control of a vehicle on a roller dynamometer using a robotic driver. In: Proceedings of 50th IEEE Conference Decision Control. Orlando: IEEE Control Systems Society, 2011. 7962–7967
- 15 Chen G, Zhang W G. Speed control of vehicle robot driver based on adaptive fuzzy PID control (in Chinese). *Automot Eng*, 2012, 34: 511–516 [陈刚, 张为公. 基于模糊自适应 PID 的汽车驾驶机器人的车速控制. *汽车工程*, 2012, 34: 511–516]
- 16 Uddin M N, Rahman M A. High-speed control of IPMSM drives using improved fuzzy logic algorithms. *IEEE Trans Ind Electron*, 2007, 54: 190–199
- 17 Chen L, Huang C, Jiang H B, et al. Tire lateral-slip characteristics based on agent-neural net (in Chinese). *J Mech Eng*, 2012, 48: 153–158 [陈龙, 黄晨, 江浩斌, 等. 基于智能体——神经网络的轮胎侧偏特性. *机械工程学报*, 2012, 48: 153–158]
- 18 Brandstetter P, Skotnica M. ANN speed controller for induction motor drive with vector control. *Int Rev Electr Eng-IREE*, 2011, 6: 2947–2954
- 19 Chen G, Zhang W G. Fuzzy-Neural-Network-Based shift control method of electromagnetic unmanned robot applied to automotive test. In: Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering. New York: SAGE Publications, 2015. 229: 751–760
- 20 Zhang Y Z, Dong J H. Modeling fuzzy RBF neural network to predict of mechanical properties of welding joints based on fuzzy C-means cluster (in Chinese). *J Mech Eng*, 2014, 50: 58–64 [张永志, 董俊慧. 基于模糊 C 均值聚类的模糊 RBF 神经网络预测焊接接头力学性能建模. *机械工程学报*, 2014, 50: 58–64]
- 21 State Environmental Protection Administration of China. GB 18352.3-2005 Limits and Measurement Methods for Emissions from Light-Duty Vehicle (III, IV) (in Chinese). Beijing: Standards Press of China, 2005 [国家环境保护总局. GB 18352.3-2005 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(III, IV). 北京: 中国标准出版社, 2005]
- 22 Zhan X Q. Research on evaluation technology and correlation between test methods of durability of catalytic converter for motor vehicle (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002 [詹兴泉. 车用催化转化器评价技术及耐久试验方法间相关性研究. 硕士学位论文. 武汉: 武汉理工大学, 2002]

Summary for “电磁直驱驾驶机器人模糊神经网络车速控制方法及试验验证”

Fuzzy-neural-network-based speed control method and experiment verification for electromagnetic direct drive robot driver

CHEN Gang^{1*}, ZHANG WeiGong² & WANG LiangMo¹

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

* Corresponding author, E-mail: gang0418@163.com

Vehicle test has a great significance for the development of new vehicle products. It is necessary for a new type of vehicle stereotypes to conduct a lot of vehicle test. Some vehicle test, such as emission durability test, vehicle performance test, vehicle noise test, high and low temperature environment test, vehicle road test, vehicle bench test, is more suitable for the operation by robot. Robot driver is an intelligent robot that can realize automatic driving under harsh environment in vehicle test instead of a human driver without any modification. Because of the vehicle is not required to be modified, and the vehicle robot driver can be directly installed in the different vehicle cab. The drive way of the vehicle robot driver includes the hydraulic drive, the pneumatic drive and the servo electric drive. The hydraulic drive is steady, but it needs an oil cylinder. It is not easy for the pneumatic drive to accurate positioning and the real-time property. As a driving device of the robot driver, the servo electric drive needs a mechanism of rotary motion into linear motion. Electromagnetic linear motor can solve the shortcomings of three other drive styles. It can improve the transmission efficiency and transmission accuracy, and make the transmission mechanism simple. A control approach of speed in an electromagnetic direct drive robot driver based on fuzzy neural network is proposed in this paper, in order to realize the accurate speed tracking of different driving test cycle conditions. The electromagnetic direct drive robot driver adopts an electromagnetic linear actuator as the driving device in this paper. The throttle mechanical leg, the brake mechanical leg, the clutch mechanical leg and the shift manipulator are directly driven through the electromagnetic linear actuator. The control system structure and the coordinated motion control model of the electromagnetic direct drive robot driver are given. On the basis of this, the speed control model based on fuzzy neural network of the electromagnetic direct drive robot driver is designed. The shift manipulator displacement, the throttle mechanical leg displacement, the clutch mechanical leg displacement and the brake mechanical leg are the input variables of the fuzzy neural network model, and the vehicle speed of the test vehicle is the output variable of the fuzzy neural network model. The number of the input variable membership functions is three, and the type of the input variable membership functions is gbellmf. The fuzzy neural network training algorithm adapts the hybrid learning algorithm combining with back propagation algorithm and least square method. The proposed control method of the electromagnetic direct drive robot driver is experimentally proved and compared with other control methods and with human driver performances. Actual vehicle test results and error comparison analysis show that the vehicle speed tracking accuracy of robot driver using the proposed approach is higher than that of robot driver using PID control method and human driver. Besides, the proposed method has good adaptability under all kinds of driving test cycle, which can ensure the accuracy and effectiveness of vehicle test.

vehicle test, electromagnetic direct drive, robot driver, speed control, fuzzy neural network

doi: 10.1360/N972017-00134