

DOI: 10.7652/xjtuxb201803017

负荷车电涡流缓速器加载控制系统研究

李忠利, 闫祥海, 周志立

(河南科技大学车辆与交通工程学院, 471003, 河南洛阳)

摘要: 为能更真实反映被试拖拉机牵引特性,对负荷车加载系统进行了改进,建立了负荷车加载系统传递函数模型。以牵引力载荷谱随机信号为输入,采用 BP 神经网络算法对加载系统进行动态加载控制,以输出不同类型的作业载荷。对系统响应特性进行了动态分析,在此基础上进行了道路试验验证,证明加载系统的有效性。在该控制模式下系统仿真载荷输出延迟 0.12 s,最大超调量为 3.1%;路试载荷输出延迟 0.22 s,最大超调量为 4.2%。试验结果表明,BP 神经网络 PID 控制的系统输出载荷对输入载荷具有更好的跟随效果,比传统 PID 控制响应性好,开发的负荷车加载系统输出载荷能够较好再现拖拉机实际牵引载荷。

关键词: 负荷车;加载系统;随机载荷;BP 神经网络;PID 控制

中图分类号: U270.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)03-0126-06

Study on the Eddy Current Retarder Loading Control System of Loading Vehicles

LI Zhongli, YAN Xianghai, ZHOU Zhili

(College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: A loading control system of loading vehicle is improved to be able to effectively reflect the traction performance of a tractor in field work. A mathematical model of the loading vehicle's loading system is established. The input signal of the loading system is the stochastic signal of a field load spectrum. The backpropagation neural network is applied to control the loading system. The output signal of the loading system can simulate different kinds of working loads. The loading system response is analyzed dynamically. On the basis of the above study, the road test of the tractor's traction performance was conducted. In this control mode, the simulation results showed that the system delay time is 0.12 s and maximum overshoot is 3.1%. The road test results showed that the system delay time is 0.22 s and maximum overshoot is 4.2%. Experimental results showed that the system output traction has a good following effect in comparison with the input load. The BP neural net PID algorithm can improve the system's dynamical performance and its control response is better than the traditional PID control. So the output load of the developed loading system can better reproduce the tractive performance for the tested tractor.

Keywords: loading vehicle; loading system; random load; back propagation neural net; PID control

收稿日期: 2017-07-14。 作者简介: 李忠利(1969—),男,副教授;周志立(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: “十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFD0701002-2);河南省重点科技攻关计划资助项目(102102210165);洛阳市重大科技专项资助项目(1001001A)。

网络出版时间: 2017-12-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171214.1653.008.html>

负荷车是拖拉机道路试验中重要的测试设备,通过对被试车实施加载,可完成表示被试车动力性能参数(牵引力、牵引功率及牵引效率等)的测量,以评估被试车性能的优劣。通过控制负荷车加载系统的载荷输出,可在平坦试验路面上再现被试车多种作业状态载荷^[1],对被试车的性能进行评价。

目前,我国农业拖拉机牵引特性试验中,负荷车对被试车的加载方式多为静态加载,采用定距离或定时间的测量方法多次重复试验完成参数的测量。负荷车加载采用柴油机或电涡流缓速器,其中电涡流缓速器由于结构简单、易于远距离控制、载荷输出稳定准确而被广泛采用。国内外学者对电涡流缓速器数学模型、结构参数优化等方面进行了许多研究,但针对拖拉机在实际作业过程中的载荷仿真及加载控制研究相对较少,也没有得到实际应用^[2-6]。

拖拉机牵引特性试验中,为能更接近被试车田间作业工况,需对被试车实施动态加载,重点是仿真田间土壤随机载荷的再现。本研究对负荷车加载系统进行改进,采用 BP 神经网络算法对加载系统进行动态加载控制,以输出不同类型的作业载荷,对系统响应特性进行动态分析,在此基础上进行道路试验验证,证明加载系统的有效性。

1 加载系统组成原理

改进后的负荷车加载系统结构如图 1 所示。

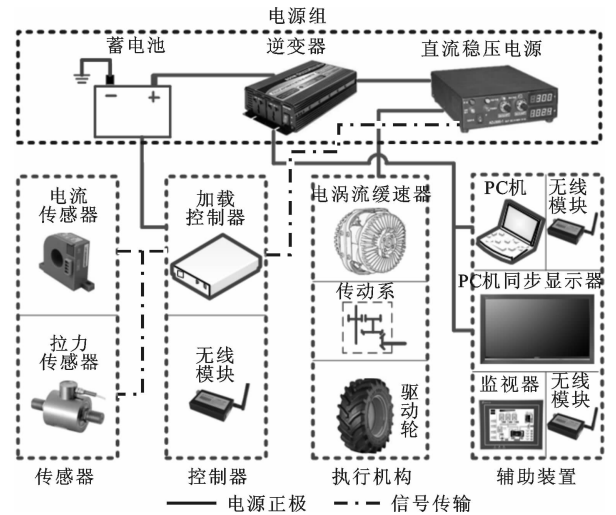


图 1 加载系统结构图

加载系统由电源组、传感器、控制器、执行机构及辅助装置组成,其中电源组包括蓄电池、逆变器和直流稳压电源,分别提供 24 V 直流电、220 V 交流电和 0~30 V 可调直流电。传感器有牵引力传感器和 2 个电流传感器,牵引力传感器测量负荷车输出

载荷,电流传感器用于监测蓄电池充放电状态。控制器由加载控制器和无线模块组成,通过控制直流稳压电源输出电压完成对电涡流缓速器制动转矩的控制。执行机构包括电涡流缓速器、驱动轮及二者之间的传动系,将电涡流缓速器的制动转矩传递到驱动轮。辅助装置由 PC 机、同步显示器、驾驶员监视器和无线模块组成。PC 机显示测试界面,通过无线模块实现加载控制器与监视器间的数据无线传输。同步显示器播放 PC 机界面,方便工作仓其他试验人员了解试验进程,监视器供负荷车驾驶员监视试验过程。图 1 中设备主要技术参数见表 1。

表 1 设备主要技术参数

名称	型号	主要特性
逆变器	JYP-4 000 W	输出功率:4 kW 逆变效率:90%
直流稳压电源		最大功率:6 kW
电流传感器	LHB-100 A	额定电流:100 A 精度:±0.5%
牵引力传感器	BLR-1/10000	规格:100 kN 允许过载能力:20%RL
加载控制器	WLT_T8048_070B_A8	支持 VS2005,VS2008 下的 VC++,VB.net,C# 编程
电涡流缓速器	KBG100	最大电流:56 A 最大转矩:1 kN·m
传动系		传动比:28.22
监视器	WLT_T4827	支持 VS2005,VS2008 下的 VC++,VB.net,C# 编程
无线传输模块	YL-500IW	通信速率为 9 600 bit/s 传输距离≥3 km

2 加载系统模型

加载系统实质上是电涡流缓速器为核心的输出转矩控制系统,加载系统模型由电涡流缓速器模型和传动系模型组成。电涡流缓速器由定子和转子组成,定子上的激磁绕组通电后产生磁场,转子被驱动轮经传动系驱动,产生涡电流,涡电流在磁场中受力,形成电涡流缓速器制动转矩。通过改变输入电压使励磁电流变化调节电涡流缓速器制动转矩。传动系由电涡流缓速器转子盘、万向节、动力输出轴、中央传动、差速器、最终传动、半轴及驱动轮组成。电涡流缓速器经该传动系将制动转矩传至驱动轮,产生制动力。

电涡流缓速器制动转矩与其结构、材料及转速等因素有关,传动系模型涉及到各部件的转动惯量、刚度及扭转振动等因素,为能真实反映加载系统的特性,通过机理建模较为困难,由于该系统为单输入单输出系统,因此本研究采用阶跃响应辨识的实验方法建立了加载系统的数学模型^[7-8]。

试验条件:试验道路为混凝土路面,坡度小于0.5%,大气温度为22℃,气压为100 kPa,环境相对湿度为45%。

试验方案:①负荷车挂入空挡,被试车挂入低Ⅱ挡,由被试车牵引负荷车匀速行驶;②通过控制器加入电压阶跃信号,电涡流缓速器产生制动转矩,记录牵引力传感器数据。测试的试验数据如图2所示。

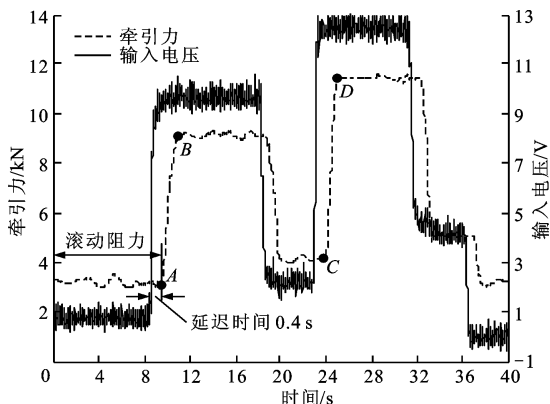


图2 实车试验测试结果

由系统辨识理论知,三元组 $\{U(t), F(t), G(s)\}$ 中,已知其中两个,可求另外一个。 $U(t)$ 表示加载系统控制模型输入, $F(t)$ 表示加载系统输出, $G(s)$ 表示加载系统模型。

图2中在时间为8 s处施加10 V阶跃信号,AB段为牵引力对阶跃信号的瞬态响应,以A点为原点,建立直角坐标系,拟合得到AB段牵引力随时间的变化关系 $F(t)$,分别对电压信号函数和牵引力函数进行了拉氏变换,得到以缓速器电压为输入、牵引力为输出的系统传递函数为

$$G_1(s) = \frac{F_1(s)}{U_1(s)} = \frac{-0.014s^2 + 0.79s - 0.52}{s^2} \quad (1)$$

为检验模型的有效性和适应性,可利用不同时间区段内采集的输入输出数据,建立系统模型,并比较两个模型的特性。为此,在时间为23 s处施加10 V阶跃信号,CD段为牵引力对阶跃信号的瞬态响应,采用与上述相同的方法得到系统的传递函数。

试验得到的两个系统传递函数零点和极点分布基本相符,因此可认为建立的系统模型是可靠的。

由于系统中包括电感引起的电流延迟、牵引装置弹性元件变形引起的延迟等,因此系统传递函数还包含延时环节,由试验中牵引力对缓速器输入电压的响应延迟时间为0.4 s。因此,以缓速器电压为输入、牵引力为输出的系统传递函数为

$$G(s) = \frac{-0.014s^2 + 0.79s - 0.52}{s^2} e^{-0.4s} \quad (2)$$

3 载荷调节 BP 神经网络 PID 控制

3.1 控制算法

PID控制算法无需精确的系统模型,可通过对目标值和实际值的偏差信号进行比例、积分、微分运算得到控制量,完成被控对象控制,其关键是对PID参数的预置。PID控制器输出(控制模型输入) $U(t)$ 与输入 $e(t)$ 的关系为

$$U(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

式中: $e(t)$ 为期望值与实测值之差离散值; K_P 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

负荷车动态加载具有时变性,需实时整定比例、积分和微分参数,输出期望的载荷,传统PID控制器参数自适应能力较弱,而BP神经网络PID可通过在线自学习实时调整表征输出层神经元状态的PID控制器参数 K_P 、 K_I 、 K_D ,得到最佳的PID组合^[9-13],以实现负荷车加载系统实时准确的载荷输出。由于系统目标牵引力输入与反馈信号存在较大延迟,约为0.4 s,可能会导致系统失稳,因此需对系统进行时滞补偿。

Wallace提出最小二乘拟合预测系数的外插预测补偿方法,通过在模型中加入预测补偿模块解决系统失稳问题^[14]。假设有 n 个数据点,则

$$\begin{Bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{n-1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & \cdots & t_0^N \\ 1 & t_1 & t_1^2 & \cdots & t_1^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & t_{n-1} & t_{n-1}^2 & \cdots & t_{n-1}^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{Bmatrix} \quad (4)$$

简写为

$$\bar{X} = [T] \bar{a} \quad (5)$$

采用最小二乘法求得拟合多项式的系数

$$\bar{a} = ([T]^T [T])^{-1} [T]^T \bar{X} \quad (6)$$

预测点值为

$$x' = T_p \bar{a}$$

向前预测向量为

$$T_p = [1 \quad P\Delta t \quad \cdots \quad P^N \Delta t^N]$$

式中: $P\Delta t$ 为向前预测时间, P 为时间因子, Δt 为时

间步长,本文 $P=102.4, \Delta t=1/128\text{ s}$ 。

加载系统控制结构如图 3 所示,通过牵引力传感器的反馈调节可消除由于路面条件不同对系统输出载荷的影响。

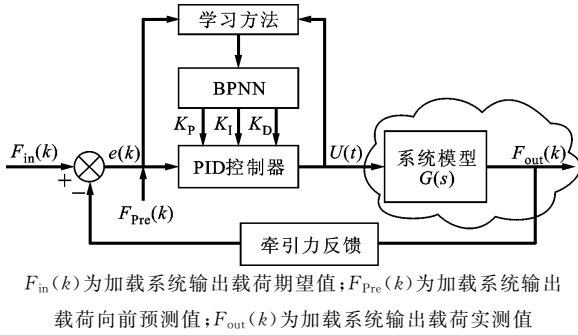
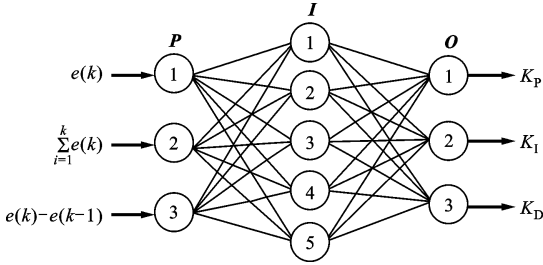


图 3 BP 神经网络 PID 控制系统结构图

BP 神经网络隐含层数为 1,由文献[15]推荐经验公式得隐含层节点数为 4~13 之间的正整数,根据试验确定隐含层节点数为 5,其网络结构模型如图 4 所示。



P 表示输入层;I 表示隐含层;O 表示输出层

图 4 BP 神经网络结构模型

网络输入矢量为

$$\mathbf{P} = [e(k), \sum_{i=1}^k e(i), e(k) - e(k-1)]$$

网络输出矢量为

$$\mathbf{O} = [K_P, K_I, K_D]$$

神经元激活函数为

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (7)$$

网络性能指标函数为

$$H = \frac{1}{2} [F_{in}(k) - F_{out}(k)]^2 = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (8)$$

BP 神经网络在线学习时权值按 H 对加权系数的负梯度方向搜索调整,并附加一个使搜索快速收敛到全局极小的惯性项

$$\Delta\omega(k) = -\eta \frac{\partial H}{\partial \omega} + \alpha \Delta\omega(k-1) \quad (9)$$

式中: $\Delta\omega(k)$ 为第 k 次权值变化量; η 为学习速率; α 为惯性系数。

通过权值的实时调节,使性能指标函数 H 最小,得到最优权值。根据最优权值得出 PID 三控制参数,对缓速器输入电压进行控制,进而使加载系统输出最佳载荷。

设置惯性系数为一定值,以阶跃信号为输入,对不同学习效率的系统输出载荷进行仿真,图 5 为输出载荷响应曲线。

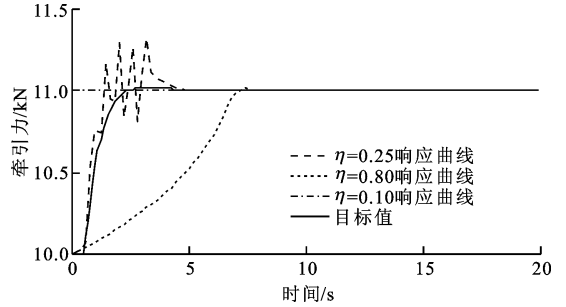


图 5 不同学习效率的系统输出载荷响应曲线

由图 5 可见,随着学习效率的增大,系统响应时间减小,当学习效率过大时,权值调节过大,系统输出载荷会出现较大波动,稳定到目标值的时间会变长。因此,神经网络的学习速率取为 0.25,同理可得惯性系数为 0.05。

3.2 控制性能仿真

采用 MATLAB 对所求得系统传递函数进行离散化处理,以随机信号作为输入,传统 PID 和 BP-PID 为控制算法,对系统的控制性能进行对比仿真,查看系统响应特性,验证 BP-PID 控制算法的有效性。

根据拖拉机田间犁耕实验数据,得到表征随机载荷分布特性、方差等特征的牵引力功率谱密度函数。负荷车随机加载时需利用随机载荷时域模型作为系统输入,为此本研究采用滤波白噪声生成法重构了牵引力时域模型,重构的时域模型只是满足给定频域模型全部特征的一个样本函数。

根据文献[16-17],利用拖拉机田间犁耕作业时的发动机阻转矩(均值为 $81.22\text{ N}\cdot\text{m}$ 、方差为 $249.63(\text{N}\cdot\text{m})^2$)功率谱函数重构了发动机阻转矩时域模型,再将其换算为牵引力时域模型,如图 6 中黑色线波形所示,其均值为 11.49 kN 、方差为 $4.99(\text{kN}\cdot\text{m})^2$ 。

将重构的牵引力时域模型作为系统输入,并进行归一化处理,另选定一组较好参数值(K_P 取值 5, K_I 取值 1.87, K_D 取值 0.3)的传统 PID 控制作对比分析,仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出:加载系统采用 BP-PID 控制较传统 PID 控制载荷输出对输入具有更好的跟随

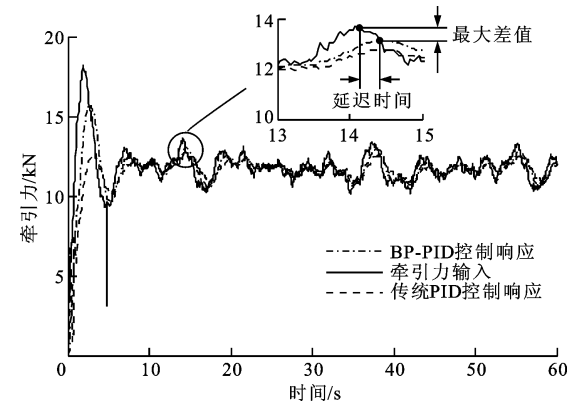


图 6 加载系统对随机信号的仿真响应曲线

效果,过渡过程平稳,系统延迟为 0.12 s,最大超调量为 3.1%。

4 加载系统试验验证

为验证加载系统的控制性能,以东方红 MF554 拖拉机为被试车进行试验。

试验条件:试验路面为混凝土路面,坡度小于 0.5%,被试车带配重,牵引点高度为 580 mm,燃油温度为 20.4℃,冷却液温度为 74.6℃,润滑油温度为 79.2℃,前轮胎气压为 100 kPa,后轮胎气压为 100 kPa,环境温度为 22℃、气压为 100 kPa、相对湿度为 45%,测试挡位为低Ⅱ挡。

试验方案:①负荷车挂入空挡,被试车挂入低Ⅱ挡,由被试车牵引负荷车匀速行驶;②控制器对电涡流缓速器随机加载,被试车油门开度 100%牵引负荷车行驶,记录牵引力传感器信号。

试验现场如图 7 所示,数据显示界面如图 8 所示。



1:负荷车;2:被试车

图 7 加载系统验证试验现场

测试挡位下,系统试验输出载荷对输入载荷的响应曲线如图 9 所示,同时将仿真输出结果与试验结果进行分析。

由图 9 可见:道路验证试验中,加载系统输出载荷对输入载荷跟随效果良好,并与仿真载荷较好吻

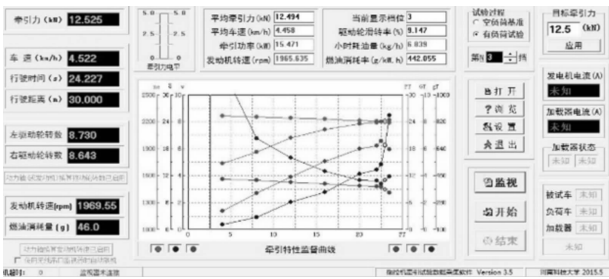


图 8 数据显示界面

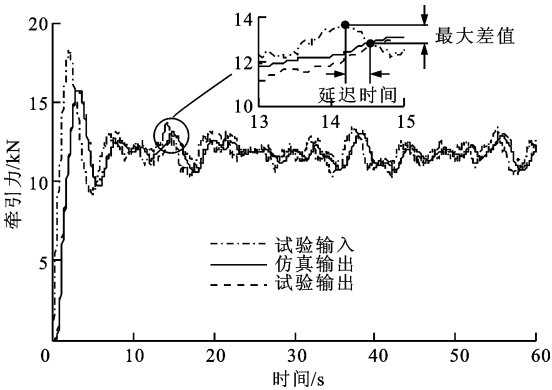


图 9 加载系统对随机信号的试验响应曲线

合。系统延迟 0.22 s,最大超调量为 4.2%,道路试验进一步验证了 BP 神经网络 PID 控制的加载系统输出载荷实时准确。

5 结 论

负荷车加载系统采用 BP 神经网络 PID 控制算法,能有效实现加载控制,较准确再现被试拖拉机田间作业载荷,最大输出载荷为 42~48 kN,适用车速范围为 0~25 km/h。以载荷谱随机信号为输入时,该控制模式下系统仿真载荷输出延迟 0.12 s,最大超调量为 3.1%;道路试验结果与仿真结果吻合,系统载荷输出延迟 0.22 s,最大超调量为 4.2%。该负荷车加载控制系统对拖拉机等车辆动态牵引性能的测试具有一定的实用价值。

参考文献:

[1] 张 硕, 杜岳峰, 朱忠祥, 等. 后轮驱动大功率拖拉机牵引力-滑转率联合自动控制方法 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 47-53.
ZHANG Shuo, DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, et al. Integrated control method of traction & slip ratio for rear-driving high-power tractors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 47-53.
[2] 杨启超, 李连生, 赵远扬, 等. 旋涡压缩机轴向动态

- 间隙的实验测量 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 795-798.
- YANG Qichao, LI Liansheng, ZHAO Yuanyang, et al. Measurement of axial dynamic clearance in scroll compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(7): 795-798.
- [3] BABU G S, SURESH S. Meta-cognitive RBF network and its projection based learning algorithm for classification problems [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(1): 654-666.
- [4] HAYATI M, LOTFI A, KAZIMIERCZUK M K, et al. Generalized design considerations and analysis of class-E amplifier for sinusoidal and square input voltage waveforms [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2015, 62(1): 211-220.
- [5] HERNÁNDEZ-ALVARADO R, GARCÍA-VALDOVINOS L G, SALGADO-JIMÉNEZ T. Neural network-based self-tuning PID control for underwater vehicles [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1429.
- [6] ANWAR S. A parametric model of an eddy current electric machine for automotive braking applications [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(3): 422-427.
- [7] YAN Xianghai, XU Liyou, WANG Yuan. The loading control strategy of the mobile dynamometer vehicle based on neural network PID[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2017 [2017-06-30]. <https://doi.org/10.1155/2017/5658983>.
- [8] 丁锋. 系统辨识: 1 辨识导引 [J]. 南京信息工程大学学报, 2011, 3(1): 1-22.
- DING Feng. System identification: part A Introduction to the identification [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2011, 3(1): 1-22.
- [9] 章军辉, 李庆, 陈大鹏. 基于 BP 神经网络的纵向碰撞安全辅助算法 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(7): 140-147.
- ZHANG Junhui, LI Qing, CHEN Dapeng. Safety assistance algorithm for longitudinal collision avoidance based on BP neural network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(7): 140-147.
- [10] 韩磊, 李锐, 朱会利, 等. 基于 BP 神经网络的土壤养分综合评价模型 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 109-115.
- HAN Lei, LI Rui, ZHU Huili. Comprehensive evaluation model of soil nutrient based on BP neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 109-115.
- [11] 陈月霞, 陈龙, 徐兴, 等. 随机干扰下电控空气悬架整车车身高度控制研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 309-315.
- CHEN Yuexia, CHEN Long, XU Xing, et al. Vehicle height control of electronic-controlled air suspension under random disturbance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 309-315.
- [12] 王洪乐, 王家序, 周青华, 等. 基于 BP 神经网络的数控机床综合误差补偿方法 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(6): 138-146.
- WANG Hongle, WANG Jiaxu, ZHOU Qinghua, et al. Comprehensive error compensation of machine tools based on BP-neural network algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(6): 138-146.
- [13] 汪少华, 窦辉, 孙晓强, 等. 电控空气悬架车高调节与整车姿态控制研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 335-342.
- WANG Shaohua, DOU Hui, SUN Xiaoqiang, et al. Vehicle height adjustment and attitude control of electronically controlled air suspension electronically controlled air suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 335-342.
- [14] WALLACE M I, WAGG D J, NEILD S A. An adaptive polynomial based forward prediction algorithm for multi-actuator real-time dynamic substructuring [J]. Proceedings of the Royal Society, 2005(461): 3807-3826.
- [15] 谢进, 阎开印, 陈永. 基于 BP 神经网络的平面机构连杆运动综合 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 24-27.
- XIE Jin, YAN Kaiyin, CHEN Yong. Synthesis of planar motion generation mechanisms using BP neural networks [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 24-27.
- [16] 方在华, 周志立, 杨铁皂, 等. 拖拉机随机载荷的功率谱函数 [J]. 洛阳工学院学报, 1999, 20(4): 1-4.
- FANG Zaihua, ZHOU Zhili, YANG Tiezao, et al. The power spectral function of the random loads in tractor [J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 1999, 20(4): 1-4.
- [17] 方在华, 周志立, 杨铁皂, 等. 正态随机载荷的计算机仿真 [J]. 洛阳工学院学报, 2000, 21(1): 1-3.
- FANG Zaihua, ZHOU Zhili, YANG Tiezao, et al. Computer simulation for normal random load [J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2000, 21(1): 1-3.

(编辑 荆树蓉 苗凌)