

岳光,潘玉田.突发地震灾害中无人驾驶救援车伺服控制系统研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1366-1371.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1366

YUE Guang,PAN Yutian.On the Servo Control System of Unmanned Rescue Vehicle in Sudden Earthquake Disasters[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(6):1366-1371.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1366

突发地震灾害中无人驾驶救援车 伺服控制系统研究

岳光,潘玉田

(中北大学机电工程学院,山西太原 030051)

摘要:针对当前采用PID控制器控制无人驾驶救援车伺服系统时存在的轨迹跟踪精度不高,误差控制性能较差,灵活性、平稳性和安全性能不佳等问题,提出并设计基于BP神经网络整定PID控制器的无人驾驶救援车伺服控制系统,建立突发地震灾害中无人驾驶救援车伺服控制系统驱动模型,并以此模型作为被控对象;根据系统期望输出值与实际输出值构成的控制偏差获得PID控制规律,并通过调节PID控制器控制参数实现系统控制,在此基础上,采用BP神经网络通过对无人驾驶救援车伺服控制系统性能的学习,构建基于BP神经网络整定的PID控制器,并采用梯度下降法修正控制器加权系数,通过在线调整BP神经网络加权系数即可实现控制器的自适应调整,控制突发地震灾害中无人驾驶救援车实施救援。实验结果表明,设计的基于BP神经网络整定PID控制器的无人驾驶救援车伺服系统可有效提高轨迹跟踪精度,具有较好的灵活性,且能够保证驾驶员的安全和车辆平稳行驶。

关键词:突发地震灾害;无人驾驶;救援车;伺服控制系统

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)06-1366-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1366

On the Servo Control System of Unmanned Rescue Vehicle in Sudden Earthquake Disasters

YUE Guang, PAN Yutian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: Today, the PID controller is used to control the servo system of unmanned rescue vehicles, but it has a number of problems, i.e., the trajectory tracking accuracy is not high, the error control performance is poor, and the flexibility, stability, and safety performance are not good. In this work, we propose and design a servo system for unmanned rescue vehicles based on the BP-neural-network-tuning PID controller. Then, we establish a drive model for the servo control system of the unmanned rescue vehicle in sudden earthquake disasters. We obtained the PID control law based on the control deviation and realized system control by adjusting the parameters of the

收稿日期: 2018-08-20

基金项目: “973”国家重点基础研究发展规划前期项目(2011CB612204);山西省重点研发计划(指南)项目(201603D121040-1)

第一作者简介: 岳光(1983-),男,河北南和人,博士研究生,助理工程师,研究方向:武器系统设计、无人化控制、控制理论与控制工程方向。E-mail: yueqidong88@126.com。

PID controller. On this basis, we constructed a PID controller based on BP-neural-network-tuning, and use the gradient descent method to correct the weighting coefficient of the controller. By adjusting the weighting coefficient of the BP neural network online, the controller can be adaptively adjusted to control an unmanned rescue vehicle in sudden earthquake disasters. The experimental results show that the servo system of the designed unmanned rescue vehicle based on a BP-neural-network-tuning PID controller can effectively improve the trajectory tracking accuracy, improve flexibility, and ensure the safety of the driver and smooth operation of the vehicle.

Keywords: sudden earthquake disaster; unmanned; rescue vehicle; servo control system

0 引言

突发地震是一种相当复杂且危害性较大、波及范围广的自然灾害,由其引发的火灾、水灾、放射性有毒气体泄漏、瘟疫等次生灾害也会给人类正常社会活动带来巨大危害^[1]。因此加强突发地震灾害的实时监测和提前预报工作,提高灾后紧急救援速度和准确性势在必行。当突发地震灾害发生后,采用科学有效的救援方法以及足够先进的救援设备实施救援,营救灾害中的幸存者,尽量降低人员伤亡和财产损失是突发地震灾害救援的首要任务。但突发地震发生后,由于其破坏性较大,使得救援环境极其恶劣,加大了救援难度,有些救援环境甚至会威胁到救援人员的生命安全。伴随着多功能传感器的研发和无人驾驶技术的提高,大大提高了突发地震灾害中无人驾驶救援车辆的装备配置性能,通过利用无人驾驶救援车辆收集、分析和传送突发地震受灾区域的信息,科学合理部署救援方案具有明显优势^[2]。

无人驾驶救援车从技术角度看已经比较成熟。其优点是成本低、易操纵、具有高度灵活性,能够携带一些重要的设备在特殊环境下完成特殊任务,比如突发地震监测、突发地震现场数据采集、事态跟踪、紧急救援等。在执行特殊任务时,一般不会造成人员伤亡,生存能力强、机动性能好、使用方便,在处理突发地震类自然灾害、事故灾难以及社会安全事件等方面能发挥重要作用^[3]。无人驾驶救援车救援在国内某些地方已经被列入了正常的救援规划中,在近几年很多相关报道中,某某救援演习中无人驾驶救援车扮演了重要角色。在未来无人驾驶救援车也将继续在各类救灾救援应用中发挥自己的长处。伺服控制系统是无人驾驶救援车机电一体化设备的重要组成部分,研究无人驾驶救援车伺服控制系统,对及时采集突发地震灾害现场数据、跟踪事件发展态势,实现紧急救援具有重要现实意义^[4]。

文献[5]提出并设计了基于图像的无人驾驶救

援车伺服控制系统,在图像空间中利用无人驾驶救援车的运动学方程推导出了其误差方程,并设计了无人驾驶救援车伺服控制系统的位置控制器、滑模观测器以及主控制器,利用图像矩作为输入控制指令控制无人驾驶救援车的驾驶方向和目标跟踪。但该系统存在轨迹跟踪精度不高、误差控制性能较差的缺点。文献[6]提出并设计了基于单神经元PI控制器的无人驾驶救援车伺服控制系统,硬件部分设计了SICK绝对式多圈编码器作为无人驾驶救援车转动位置检测装置,将检测结果输入到无人驾驶救援车伺服控制系统中形成闭环控制;在软件部分利用FPGA实现无人驾驶救援车伺服控制系统设计。但该系统存在灵活性、平稳性和安全性能不佳等问题。

为了改善上述系统存在的缺点与不足,提出并设计了基于BP神经网络整定PID控制器的无人驾驶救援车伺服控制系统

1 突发地震灾害中无人驾驶救援车伺服控制系统研究

1.1 无人驾驶救援车伺服控制系统驱动模型

设计突发地震灾害中无人驾驶救援车伺服控制系统的首要前提是建立驱动模型,假设 s 表示系统给定信号; L_a 和 R_a 分别表示无人驾驶救援车力矩电机的电枢电感和电枢电阻; K_m 表示无人驾驶救援车电磁力矩系数; J_m 表示救援车力矩电机转动惯量; J_L 表示救援车负载转动惯量; D_m 表示救援车粘性阻尼系数; D_L 表示无人驾驶救援车伺服控制系统框架的粘性阻尼系数; K_{12} 表示救援车及其伺服控制系统框架的耦合刚度,在分析被控对象理论上,建立无人驾驶救援车伺服控制系统驱动模型,并以此模型作为被控对象进行后续分析^[7]。计算公式如下:

$$G(s) = G_1(s) + G_2(s) + G_3(s) \quad (1)$$

$$G_1(s) = \frac{K_m}{L_a s + R_a} \quad (2)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{J_m} \left(s^2 + \frac{J_m}{J_L} s + \frac{K_{12}}{J_m} \right) / \left[\left(\frac{D_m}{J_m} + \frac{J_m}{J_L} + 1 \right) s^2 + \left(\frac{K_{12}}{J_m} + \frac{K_{12}}{J_L} + \frac{D_m}{J_m} \frac{D_L}{J_L} \right) s + \frac{(D_m + D_L) K_{12}}{J_m J_L} \right] \quad (3)$$

$$G_3(s) = \frac{K_{12}}{J_L s^2 + D_L s + K_{12}} \quad (4)$$

图1所示为无人驾驶救援车伺服控制系统驱动模型框架。其中 U_r 代表模型参考指令电压; K_p 代表模型功率放大器的放大系数; K_c 代表模型力矩电机的反电势参量; θ_m 和 θ_L 分别代表模型力矩电机转角和负载转角。

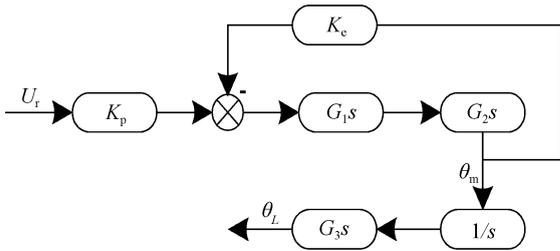


图1 无人驾驶救援车伺服控制系统驱动模型框架
Fig.1 Driver model framework of servo control system of unmanned rescue vehicle

1.2 无人驾驶救援车伺服控制系统设计

根据无人驾驶救援车伺服电机的电流方程、电压方程、磁链方程以及运动方程,采用BP神经网络结构,构建无人驾驶救援车伺服控制系统数学模型^[8] $L(s)$ (图2)。

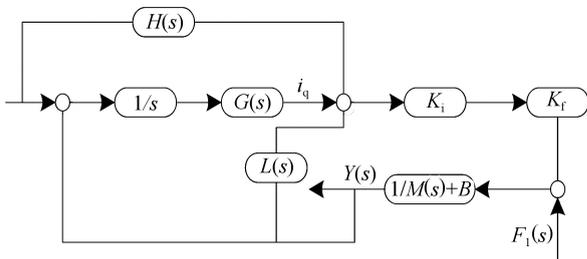


图2 无人驾驶救援车伺服控制系统数学模型
Fig.2 Mathematical model of servo control system of unmanned rescue vehicle

图2中, i_q 表示无人驾驶救援车电机 q 轴电流; $Y(s)$ 表示救援车电机转速; $F_1(s)$ 表示救援车电机负载阻力; $M(s)$ 表示电机转子质量; B 表示救援车电机转动摩擦系数; K_i 和 K_f 分别表示救援车电机等效电流控制器积分增益系数和推力系数; $L(s)$ 表示无人驾驶救援车伺服控制系统数学模型。根据上述参数和模型,设计以下无人驾驶救援车伺服系统

控制器 $K(s)$, 使得电机 d 轴电流 $i_d = 0$, 同时采用矢量控制保证电机定子电流与电机定子磁场在空间正交。

$$K(s) = [H(s), G(s), -L(s)] \quad (5)$$

其中: $H(s)$ 表示系统控制器 $K(s)$ 的自适应率。

1.3 基于BP神经网络的系统控制器设计

(1) 无人驾驶救援车伺服系统PID控制

PID控制是模拟突发地震灾害中无人驾驶救援车伺服控制系统中控制器最常用的, 通常情况下在 t 时刻PID控制其根据系统期望输出值 r_{in} 与系统实际输出值 $y_{out}(t)$ 构成控制偏差 $e(t)$ 。其计算公式为:

$$e(t) = r_{in}(t) - y_{out}(t) \quad (6)$$

则可得PID控制器的控制规律为:

$$u(t) = K_p(e(t)) + K_d \frac{1}{T_1} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{K_i dt} \quad (7)$$

其中: d 表示无人驾驶救援车电机的 d 轴; K_p 和 K_d 分别表示系统PID控制器的比例系数和微分增益系数; T_1 和 T_D 分别表示系统PID控制器的积分时间常数和微分时间常数。

利用上述控制规律, 通过调节PID控制器比例系数、积分增益系数和微分增益系数即可实现地震灾害中无人驾驶救援车伺服控制系统PID控制^[9]。

(2) 基于BP神经网络的PID控制器整定

在计算得到PID控制器控制规律基础上, 采用BP神经网络通过对无人驾驶救援车伺服控制系统性能的学习, 建立具有自适应学习能力的新的系统控制器^[10]。

无人驾驶救援车伺服控制系统控制器包括PID控制器和BP神经网络结构两部分(图3)。

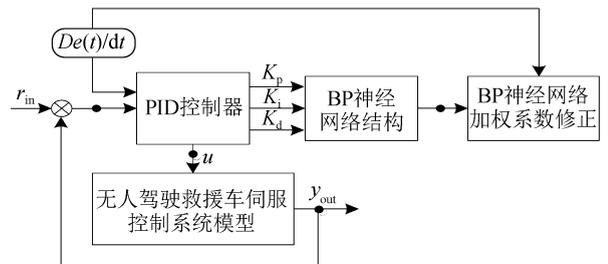


图3 无人驾驶救援车伺服控制系统控制器设计
Fig.3 Controller design of servo control system of unmanned rescue vehicle

(1) 无人驾驶救援车伺服控制系统PID控制器; 通过调节PID控制器比例系数 K_p 、积分增益系数 K_i 和微分增益系数 K_d 实现无人驾驶救援车伺服控制系统的闭环控制;

(2) BP 神经网络结构:根据无人驾驶救援车伺服控制系统的实际运行状态实时调整 PID 控制器的三个控制参数,通过对控制参数的加权调节以及 BP 神经网络的自适应学习,使得无人驾驶救援车伺服控制系统的某项指标(如响应、准确性等)达到最优,同时使得 BP 神经网络结构输出层神经元的输出状态与 PID 控制器的三个控制参数一一对应。

研究采用具有三层结构的 BP 神经网络(图 4),分别计算 BP 神经网络的输入层输入 $O_j^{(3)}(k)$ 、隐含层输入 $net_i^{(2)}(k)$ 和输出 $O_j^{(2)}(k)$,以及输出层的输入 $net_i^{(3)}(k)$ 和输出 $O_l^{(3)}(k)$ 。其计算公式分别如下:

$$O_j^{(1)} = x(j) (j = 1, 2, L, N) \quad (8)$$

$$net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^N \omega_{ij}^{(2)} O_j^{(1)} \quad (9)$$

$$O_j^{(2)}(k) = f(net_i^{(2)}(k)), i = 1, 2, L, Q \quad (10)$$

$$net_i^{(3)}(k) = \sum_{j=0}^Q \omega_{ij}^{(3)} O_j^{(2)} \quad (11)$$

$$O_l^{(3)}(k) = g(net_i^{(3)}(k)), l = 1, 2, 3 \quad (12)$$

$$\begin{cases} O_j^{(1)} = K_p \\ O_j^{(2)}(k) = K_i \\ O_l^{(3)}(k) = K_d \end{cases} \quad (13)$$

其中:上角标(1)、(2)、(3)分别表示 BP 神经网络结构中输入层 i 、隐含层 j 和输出层 l ; $\omega_{ij}^{(2)}$ 和 $\omega_{ij}^{(3)}$ 分别表示 BP 神经网络隐含层和输出层的加权系数; N 、 Q 分别表示网络输入层和隐含层输入量个数; $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 分别表示网络隐含层和输出层神经元活化函数。

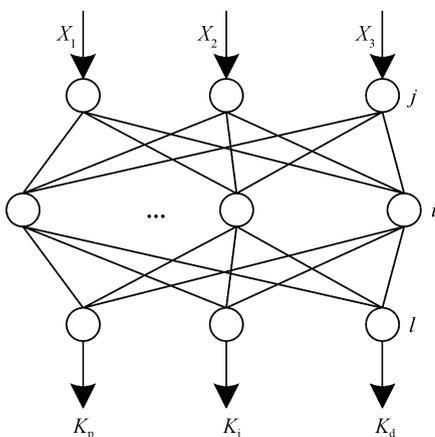


图 4 三层 BP 神经网络结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the structure of the three-layer BP neural network

根据上述计算构建 k 时刻无人驾驶救援车伺服控制系统性能目标函数 $E(k)$ 。其计算公式为:

$$E(k) = \frac{1}{2} [r_{in}(k) - y_{out}(k)]^2 \quad (14)$$

在上述计算基础上,采用梯度下降法修正 BP 神经网络 PID 控制器的加权系数,即通过无人驾驶救援车伺服控制系统性能目标函数 $E(k)$ 搜索和调整控制器加权系数负方向,同时通过调整梯度下降法的学习速度改善系统控制精度,则可得修正后系统输出层和隐含层的加权系数 $\Delta\omega_{li}^{(3)}(k)$ 和 $\Delta\omega_{ij}^{(2)}(k)$,通过在线调整 BP 神经网络加权系数即可实现无人驾驶救援车伺服控制系统 PID 控制器的自适应调整,控制突发地震灾害中无人驾驶救援车实施救援。

$$\Delta\omega_{li}^{(3)}(k) = \alpha \Delta \omega_{li}^{(3)}(k-1) + \delta_i^{(3)} O_j^{(2)}(k) \quad (15)$$

$$\Delta\omega_{ij}^{(2)}(k) = \alpha \Delta \omega_{ij}^{(2)}(k-1) + \delta_i^{(2)} O_j^{(1)}(k) \quad (16)$$

$$\delta_i^{(3)} = e(k) \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial y_{out}(k)}{\partial r_{in}(k)} \cdot \frac{\partial r_{in}(k)}{\partial O_j^{(3)}(k)} \cdot g'(net_i^{(3)}(k)) \right] \quad (17)$$

$$\delta_i^{(2)} = f'(net_i^{(2)}(k)) \sum_{l=1}^3 \delta_l^{(3)} \omega_{ij}^{(3)}(k) \quad (18)$$

其中: η 表示 BP 神经网络的学习速率; α 表示无人驾驶救援车伺服控制系统惯性系数。

2 系统应用性能测试与结果分析

基于以上理论分析结果,在 Matlab 软件平台下进行系统模拟测试。设置实验参数:突发地震灾害中无人驾驶救援车电机的额定功率为 2.2 kW, 220 V, 60 Hz, 救援车电机的额定负载为 20 N/m, $\eta = 0.65$, $J_m = 3 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $B = 1 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 设 BP 神经网络整定参数 K_p 、 K_i 和 K_d 分别为 60.3、0.60 和 1,使无人驾驶救援车伺服控制系统响应性能和轨迹跟踪准确性能最优,采样时间间隔为 1 ms,模拟实验持续 12 s。

图 5 和图 6 分别给出了采用 PID 控制器和基于 BP 神经网络整定 PID 控制器跟踪某一信号的轨迹

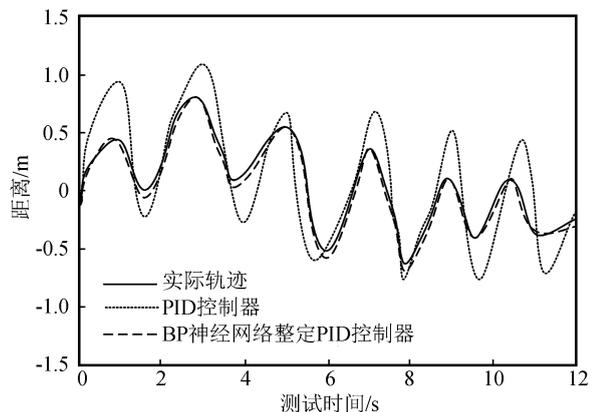


图 5 无人驾驶救援车轨迹跟踪变化情况

Fig.5 Tracking changes of unmanned rescue vehicle

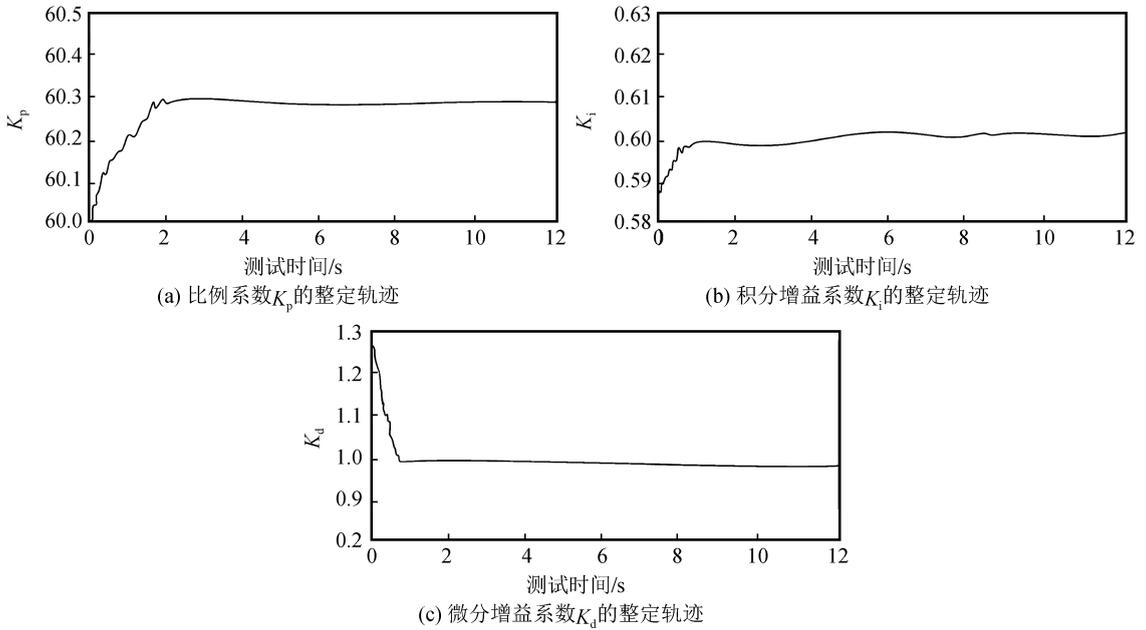


图6 基于BP神经网络的PID控制器整定轨迹变化

Fig.6 Tuning trajectory changes of PID controller based on BP neural network

变化情况、比例系数 K_p 、积分增益系数 K_i 和微分增益系数 K_d 整定轨迹和轨迹跟踪误差变化情况。

根据图5可以看出,经过BP神经网络整定后的无人驾驶救援车伺服控制系统PID控制器对给定目标信号的轨迹跟踪结果与实际轨迹基本吻合。与图7中未能经过整定的PID控制器跟踪情况相比,轨迹跟踪误差较小,系统输出误差以较快的速度稳定在了0处,能够实现对救援车伺服控制系统的误差控制。且根据图6所示的无人驾驶救援车伺服控制系统PID控制器、比例系数 K_p 、积分增益系数 K_i 和微分增益系数 K_d 整定轨迹可以看出,这三个控制参数在较短的时间内即可收敛到使无人驾驶救

援车伺服控制系统响应性能和轨迹跟踪准确性能最优的稳定值 $K_p=60.3$ 、 $K_i=0.60$ 、 $K_d=1.0$ 。

图8和图9分别给出了突发地震灾害中无人驾驶救援车高速工况下方向盘转角变化情况和横摆角速度变化情况。

观察图8的实验结果可以看出,采用未经过整定的PID控制器控制高速工况下的无人驾驶救援车方向盘转角,需要超过1s的时间才能使方向盘回正,采用经过BP神经网络整定后的PID控制器,只需要0.5s左右的时间即可使方向盘回正,这对于突发地震灾害发生现场路况较差情况下保证驾驶员的安全,避免车辆发生事故更具有优越性。

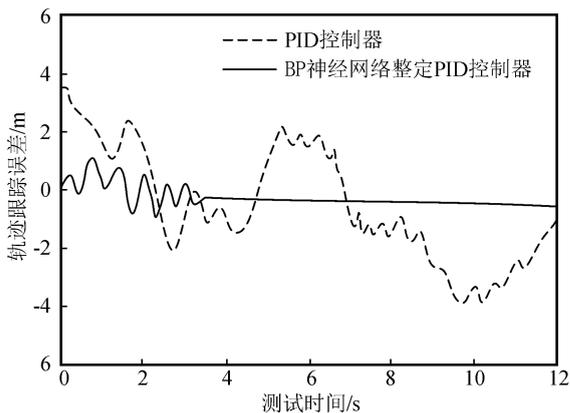


图7 PID控制器整定前后轨迹跟踪误差变化
Fig.7 Change of trajectory tracking error before and after PID controller tuning

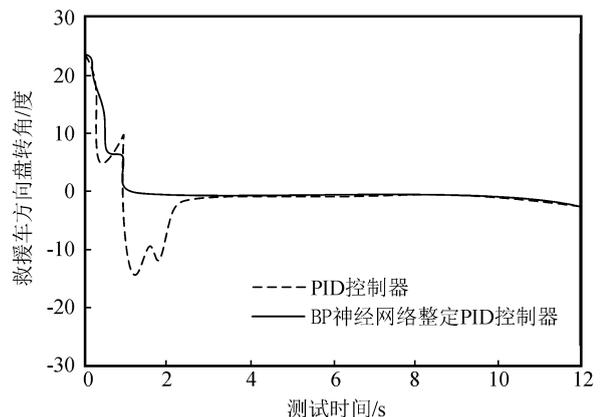


图8 无人驾驶救援车高速工况下方向盘转角变化
Fig.8 Steering wheel angle change of unmanned rescue vehicle under high speed cenalition

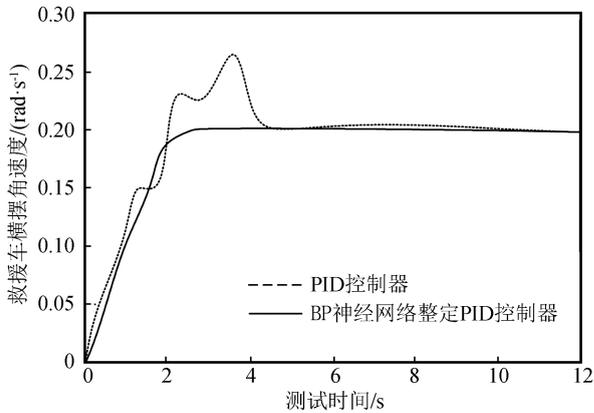


图 9 无人驾驶救援车高速工况下横摆角速度变化

Fig.9 Change of yaw rate of unmanned rescue vehicle under the high speed condition

车辆转弯时的横摆角速度变化情况能够反映控制器的灵敏度。观察图 9 的实验结果可以发现,经过 BP 神经网络整定后的 PID 控制器控制无人驾驶救援车横摆角速度,相比于未经整定的 PID 控制器能够使得车辆横摆角速度尽快恢复平稳,较好地抑制了救援车辆的方向盘振荡,大大提高了救援车辆的驾驶平稳性和安全性能。

3 结论

无人驾驶技术在抢险救灾方面的优势引发国内外学者争先研究,并取得了一定成果。本文研究提出并设计了基于 BP 神经网络整定 PID 控制器的无人驾驶救援车伺服系统,其能够有效利用 BP 神经网络的快速学习能力实现传统 PID 控制器控制参数调节,使得无人驾驶救援车伺服控制系统的某项指标(如响应、准确性等)达到最优,通过系统性能模拟测试,证明设计系统具有较好的灵活性、平稳性和安全性,能提高目标轨迹跟踪精度,较好地控制轨迹跟踪误差,适用于突发地震灾害中的抢险救援。

参考文献(References)

[1] 李国梁,张合新,扈晓翔,等.基于事件触发机制的推力矢量控制伺服控制系统设计[J].固体火箭技术,2016,39(2):269-274.
LI Guoliang,ZHANG Hexin,HU Xiaoxiang,et al.Design of Event-triggered Servo Control Systems for Thrust Vector Control[J].Journal of Solid Rocket Technology,2016,39(2):269-274.

[2] 杜金祥,张华君.一种新型全液压矫直机多神经元 PID 伺服控制器设计与研究[J].机床与液压,2018,46(7):50-54.
DU Jinxiang,ZHANG Huajun.Design and Research of a New Type of Multi Neuron PID Servo Controller of Full Hydraulic Straighter[J].Machine Tool & Hydraulics,2018,46(7):50-54.

[3] 李蒙,石泳,刘莉.基于鲁棒 H_{∞} 的无人机飞行控制系统设计及实现[J].北京理工大学学报,2016,36(8):807-812.
LI Meng,SHI Yong,LIU Li.Development of UAV Autopilot Based on Robust H_{∞} Theory[J].Transactions of Beijing Institute of Technology,2016,36(8):807-812.

[4] 张加庆.基于大数据的地震损失价值评估模型设计[J].地震工程学报,2018,40(2):356-362.
ZHANG Jiaqing.Design of Earthquake Loss Value Evaluation Model Based on Big Data[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(2):356-362.

[5] 刘锦涛,高丽,吴文海,等.垂直起降无人机基于图像的目标跟踪控制[J].控制理论与应用,2017,34(6):723-731.
LIU Jintao,GAO Li,WU Wenhai,et al.Image-based Target Tracking Control for Vertical Take-off and Landing UAVs[J].Control Theory & Applications,2017,34(6):723-731.

[6] 陈年,李唐,史晓勇,等.基于单神经元 PI 的转台伺服控制系统设计与应用[J].电机与控制应用,2017,44(4):60-63.
CHEN Nian,LI Tang,SHI Xiaoyong,et al.Design and Application of Servo Control System Based on Single Neuron PI[J].Electric Machines & Control Application,2017,44(4):60-63.

[7] 冯旭刚,章家岩,徐培民,等.基于预测函数控制的液压振动伺服系统控制器设计[J].振动工程学报,2017,30(3):389-396.
FENG Xugang,ZHANG Jiayan,XU Peimin,et al.PFC Optimization Control Strategy Research on Hydraulic Vibration Servo System[J].Journal of Vibration Engineering,2017,30(3):389-396.

[8] 时盛春.地震灾后区域无人机 GPS 遥感定位技术研究[J].地震工程学报,2018,40(2):350-355.
SHI Shengchun.GPS Remote Sensing Positioning Technology for Unmanned Aerial Vehicle in Post-earthquake Area[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(2):350-355.

[9] 王苏洲,舒志兵,李照.基于 STM32+CPLD 全数字同步伺服驱动器设计与实现[J].电机与控制应用,2017,44(4):74-79.
WANG Suzhou,SHU Zhibing,LI Zhao.Design and Implementation of Digital Synchronous Servo Driver Based on STM32 and CPLD[J].Electric Machines & Control Application,2017,44(4):74-79.

[10] 刘胜,刘江华.基于搜索者优先算法的伺服系统 PID 控制器设计[J].控制工程,2017,24(11):2189-2194.
LIU Sheng,LIU Jianghua.Design of PID Controller in Servo Systems Based on Seeker Optimization Algorithm[J].Control Engineering of China,2017,24(11):2189-2194.