

基于 QBP - PID 的履带式作业机全向调平控制研究

孙泽宇^{1,2} 夏长高³ 蒋 俞³ 郭逸凡¹ 汪若尘³

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏林海动力机械集团有限公司, 泰州 225300;

3. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对丘陵山区农业机械作业时的机身倾角变化大、工作品质和作业安全性差等问题,以履带式作业机为研究对象,设计了一种基于“3 层车架”的液压全向调平系统,并提出了复合 Q 学习-BP 神经网络-PID (QBP - PID) 的全向调平控制策略。首先,给出了全向调平整机结构方案和工作原理,在此基础上,建立了包含全向调平系统的履带式作业机整机动力学模型。然后,针对 PID 控制参数难以整定的问题,通过 BP 神经网络对 PID 控制参数进行实时更新,并引入 Q 学习算法对神经网络连接权值进行在线更新,建立了全向调平复合 QBP - PID 控制器。仿真结果表明,QBP - PID 控制下,20°横向调平时间为 2.8 s,25°纵向调平时间为 3.2 s,相较于 PID 与 BP - PID 控制,减小了调平时间,并且未出现超调量。最后,进行横坡路面和纵坡路面的整机试验,与仿真结果相比,横向和纵向调平时间误差为 0.6 s 和 0.4 s,且平地路面机身倾角小于 1.5°,满足丘陵山区农业机械调平性能需求。

关键词: 履带式作业机; 全向调平; 丘陵山区; QBP - PID; 整机试验

中图分类号: S233.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298 (2023) 12-0397-10

OSID:



Omnidirectional Leveling Control of Crawler Machine
Based on QBP - PID

SUN Zeyu^{1,2} XIA Changgao³ JIANG Yu³ GUO Yifan¹ WANG Ruochen³

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Jiangsu Linhai Power Machinery Group Company, Taizhou 225300, China

3. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A hydraulic omnidirectional leveling system was designed based on “three-layer frame” and a composite Q-learning - BP neural network - PID (QBP - PID) omnidirectional leveling control algorithm was proposed, and the crawler machine was taken as the research object. Firstly, the structural scheme and working principle of the whole omnidirectional leveling machine were given. On this basis, a dynamic model of the entire crawler machine, including the omnidirectional leveling system, was established. Then aiming at the problem that PID control parameters were difficult to be adjusted, an omnidirectional leveling compound QBP - PID controller was established. The PID control parameters were updated in real time through the BP neural network, and the Q-learning algorithm was introduced to update the neural network connection weights online. Results of simulation showed that the leveling time under QBP - PID control was 2.8 s for 20° transverse leveling and 3.2 s for 25° longitudinal leveling. Compared with PID and BP - PID control, the leveling time was reduced, and no overshoot occurred. In the end, the complete machine test on transverse slope road and longitudinal slope road was carried out. Compared with the simulation results, the errors of transverse and longitudinal leveling time were 0.6 s and 0.4 s. And the body inclination angle on the horizontal ground was less than 1.5°, which satisfied the leveling performance demand of hilly mountainous agricultural machinery.

Key words: crawler machine; omnidirectional leveling; hilly mountainous area; QBP - PID; complete machine test

收稿日期: 2023 - 05 - 08 修回日期: 2023 - 08 - 09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0700400) 和江苏大学农业装备学部项目 (NZXB20210101)

作者简介: 孙泽宇 (1987—), 男, 讲师, 江苏林海动力机械集团有限公司博士后, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: szy060@163.com

通信作者: 汪若尘 (1977—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆动态性能模拟与控制研究, E-mail: wr@ujs.edu.cn

0 引言

我国丘陵山区县级行政区数量约占全国总数的2/3,耕地面积约占全国的65%^[1]。丘陵山区地形崎岖,坡度大,农业机械在丘陵山区作业时,需对机身姿态进行调平,提高工作稳定性。国内外对农业机械的底盘调平机构设计与控制策略开发等关键技术进行了相关研究,并取得了诸多成果^[2-7]。美国 John Deere 公司、意大利 D'Amico 公司等针对农业收获机设计了机身自动调平系统用以改善作业姿态^[8-10]。李林林等^[11]为坡地作业联合收获机研发了一种自动调平系统,可适应复杂的地形变化。王涛等^[12]设计了一种高度可自动调节的悬挂机构,在陡坡作业时,具有较强的越障能力。齐文超等^[13-14]开发了一种山地拖拉机姿态调整机构,并设计了复合 PID 姿态控制策略。金生等^[15]设计了一种自调平果园作业平台,通过位置式 PID 调整货箱倾角。范永奎等^[16]设计了一种姿态可调的拖拉机电液悬挂仿形控制系统,并设计了基于带死区的经典 PID 控制方法。彭凯等^[17]为履带式旋耕机设计了调平机构和控制系统,以信号处理后的旋耕机倾角为自适应 PID 控制作为输入,液压油缸控制量作为输出。杨福增团队^[18-20]设计了具备车身和农具自动调平的履带式山地拖拉机,并设计了调平系统的 PID 控制器。尽管当前在农业机械调平方面取得了一定的成果,但面向丘陵山区的作业机调平系统设计与研发仍处于起步阶段,并且调平策略仍以经典 PID 控制为主,调平性能有限。本文针对丘陵山区履带式作业机设计一种新型液压全向调平系统,并提出复合 Q 学习-BP 神经网络-PID(QBP-PID)机身姿态复合控制策略,进行仿真验证和整机试验。

1 履带式作业机全向调平系统方案设计

1.1 全向调平整机结构

丘陵山区作业机要求具备体积小、质量小等特点,同时调平角度应大于20°。由于履带式作业机整机长度大于宽度,底盘纵向结构布置空间更大,从而相对于横向而言能够达到更大的调平角度,因此,本文设计的调平系统能够实现横向20°、纵向25°的机身调平。全向调平履带式作业机的整体结构方案如图1所示,由3部分组成,分别为作业设备、调平系统和行驶系统。作业设备包括喷药设备、灌溉设备、运输货架或其他可拆卸式设备。其中,调平系统是实

现丘陵山区履带式作业机全向调平的核心执行机构。调平系统采用基于“3层车架”结构的全向调平方案,上层车架为履带式作业机机身,下层车架为履带式作

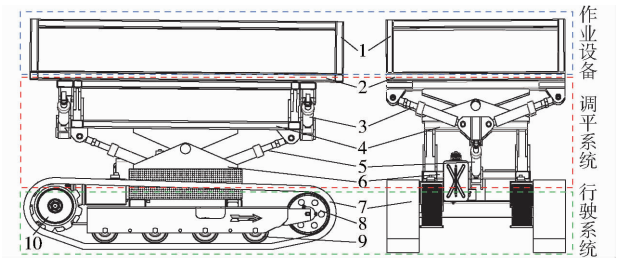


图1 履带式作业机整机结构示意图

Fig.1 Whole structure diagram of crawler machine

1. 运输货架 2. 上层车架 3. 横向调平油缸 4. 中间车架
5. 纵向调平油缸 6. 下层车架 7. 履带 8. 张紧轮 9. 支撑轮
10. 驱动轮

1.2 液压系统工作原理

如图2所示,液压调平系统主要包括油箱、安全阀、液压泵、电动机、稳压阀、开关阀、电磁比例换向阀和液压油缸等部件。液压调平系统通过伺服阀来控制油液流入或流出液压油缸,当控制电流为正时,高压源将油液压入液压油缸,控制电流为负时,油液方向相反,且各液压油缸通过开关阀对油路进行通断控制。UFL、UFR、URL 和 URR 分别表示负责机身横向调平的左前、右前、左后和右后4个横向调平油缸;V_UFL、V_UFR、V_URL 和 V_URR 分别表示左前、右前、左后和右后4个横向调平油缸的三位四通电磁比例换向阀;O_UFL、O_UFR、O_URL 和 O_URR 分别表示4个横向调平油缸油路的开关电磁阀;DF 和 DR 分别表示纵向调平前后2个液压油缸;V_DF 和 V_DR 分别表示前后2个纵向调平油缸的三位四通电磁比例换向阀;O_DF 和 O_DR 分别表示前后2个纵向调平油缸油路的开关电磁阀。对于横向调平,通过电磁比例换向阀 V_UFL、V_UFR、V_URL 和 V_URR 控制液压油缸 UFL、URL、UFR、URR 的进出油,当 UFL、URL 无杆腔和 UFR、URR 有杆腔进油,UFL、URL 有杆腔和 UFR、URR 无杆腔出油时,机身左端升高,反之则右端升

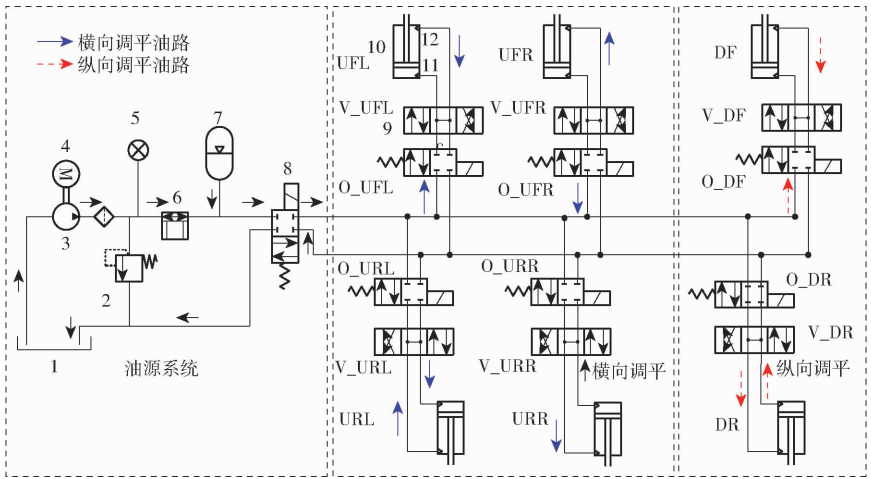


图 2 液压系统工作原理图

Fig. 2 Hydraulic system working principle diagram

1. 油箱 2. 安全阀 3. 液压泵 4. 电动机 5. 油压表 6. 稳压阀 7. 蓄能器 8. 开关阀
9. 电磁比例换向阀 10. 液压油缸 11. 有杆腔 12. 无杆腔

高;纵向调平时,通过电磁比例换向阀 V_DF、V_DR 控制液压油缸 DF 和 DR 的进出油,当 DF 无杆腔和 DR 有杆腔进油,DF 有杆腔和 DR 无杆腔出油时,机身前端升高,反之则后端升高。

1.3 液压系统回路设计

表 1 为全向调平履带式作业机的主要技术参数。为保证液压油缸负载能力与整机安全性,要求横向调平液压油缸最大外部载荷不小于 25 000 N,纵向调平液压油缸最大外部载荷不小于 35 000 N。对于双作用单活塞杆液压油缸,在调平过程中液压油缸始终处于受压状态,液压油缸的主动输出力 F 可表示为

$$F = p_1 A_1 - p_2 A_2$$

(1)

其中

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D^2$$

(2)

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

(3)

- 式中
- A_1 ——无杆腔活塞有效作用面积,mm²
- A_2 ——有杆腔活塞有效作用面积,mm²
- p_1 ——液压油缸工作腔压力,MPa
- p_2 ——液压油缸回油腔压力,MPa
- D ——活塞直径,mm
- d ——活塞杆直径,mm

表 1 整机结构参数

Tab. 1 Structural parameters of entire machine

参数	数值
整机质量/kg	758
最大承载质量/kg	300
最大行驶速度/(km·h ⁻¹)	5
横向调平层高度/m	0.22
纵向调平层高度/m	0.24
底盘高度/m	0.40

初设液压油缸工作腔压力 p_1 为 10 MPa,液压油缸回油腔压力 p_2 为 0 MPa,根据式(1)可得液压油缸内径为

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi p_1}}$$

(4)

根据《机械设计手册》,液压油缸活塞杆直径为

$$d = 0.7D$$

(5)

由式(1)、(4)可得,横向调平液压油缸内径为 56.4 mm,活塞缸直径为 39.5 mm,纵向调平液压油缸内径为 66.8 mm,活塞杆直径为 46.8 mm,最终根据国家标准 GB/T 2348—1993 选取横向调平液压油缸内径为 63 mm,活塞杆直径 45 mm;纵向调平液压油缸内径 80 mm,活塞缸直径 56 mm。

根据液压油缸内径和活塞杆直径,确定系统工作压力 p 为

$$p = \frac{4F}{\pi D^2} \approx 7 \text{ MPa}$$

(6)

液压系统工作流量 Q 为

$$Q = \frac{\pi (D^2 - d^2) v}{4}$$

(7)

式中

v ——活塞杆快速伸出速度,mm/s

取 $v = 300 \text{ mm/s}$,求得液压系统工作流量为 46 L/min。

由系统工作压力,可求得液压泵工作压力 p_p 为

$$p_p \geq p_1 + \sum \Delta p$$

(8)

式中

$\sum \Delta p$ ——液压泵到液压油缸间的管路压力损失,取 0.5 MPa

由系统工作流量 Q ,可求得液压泵流量 Q_p 为

$$Q_p \geq KQ$$

(9)

式中 K ——泄漏系数,取 1.2

根据式(8)、(9),确定液压泵工作压力大于

7.5 MPa,工作流量大于 56 L/min。

2 履带式作业机整机动力学模型构建

2.1 液压油缸模型建立

为提高模型的真实性与精确性,本文基于 AMEsim 建立液压油缸物理模型以及整机机械模型。液压油缸模型构建过程中,忽略电磁比例阀的油液泄漏,将电磁比例阀节流面积与节流阀口设为理想线性关系,并将液压系统弹性模量设为常数,通过 AMEsim 建立液压油缸模型如图 3 所示。

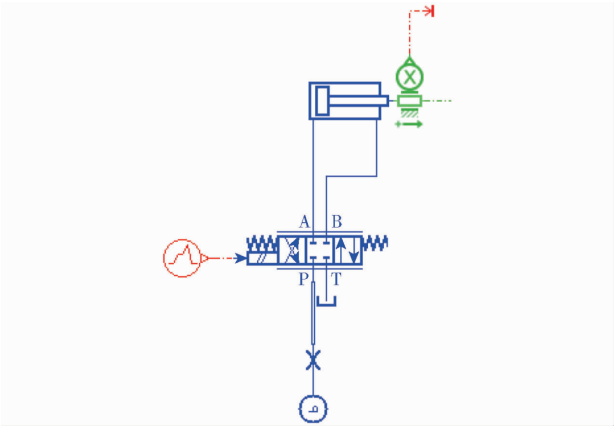


图 3 液压油缸模型

Fig. 3 Hydraulic cylinder model

模型中各个液压油缸的技术参数如表 2 所示。

表 2 液压油缸技术参数

Tab.2 Hydraulic cylinder technical parameters

参数	横向	纵向
液压油缸直径/mm	63	80
液压油缸活塞杆直径/mm	45	56
有杆端活塞面积/mm ²	2 155	3 436
无杆端活塞面积/mm ²	4 364	5 027
液压油预充压力/MPa	1	1
油液密度/(kg·m ⁻³)	850	850
油液运动粘度/(mm ² ·s ⁻¹)	180	180
油液体积模量/MPa	1 300	1 300

2.2 车架机械模型建立

全向调平系统采用“3 层车架”结构,在 AMEsim 中建立车架的机械模型。通过 AMEsim 的 3D 机械库建立履带式作业机“3 层车架”刚体模型,包括刚体固定副、旋转副、移动副、液压油缸运动副、万向节副等,并以运动学连接方式将上层车架与中间车架相连。其中,为了控制液压油缸的旋转运动,在液压油缸的旋转关节添加旋转副模型;为了使上层车架和中间车架在调平过程中能保持水平,在上层车架与中间车架之间添加旋转副,并在液压油缸运动副中设置活塞杆的移动副约束;通过刚体固定副将纵向调平液压油缸模型与下层车架相连。履带式作业

机“3 层车架”模型装配过程中改变局部参考系的初始位置,以适应机身上的外部约束。将初始位置设置为接近所需解的位置,通过锁定适当的欧拉角或局部框架的初始位置,并施加一定结构约束条件,从而对应于双层车架旋转角度和液压油缸初始位置下的锁定参数。为了避免锁定过多的自由度使系统变得超静态,锁定重心相对于局部 z 轴的旋转,分别围绕 y 轴和 z 轴释放旋转约束,使上层车架能够随着 4 个横向调平油缸的运动横向旋转,以此实现横向调平,中间车架能够随着 2 个纵向调平油缸纵向旋转,以此实现纵向调平,车架机械模型如图 4 所示。

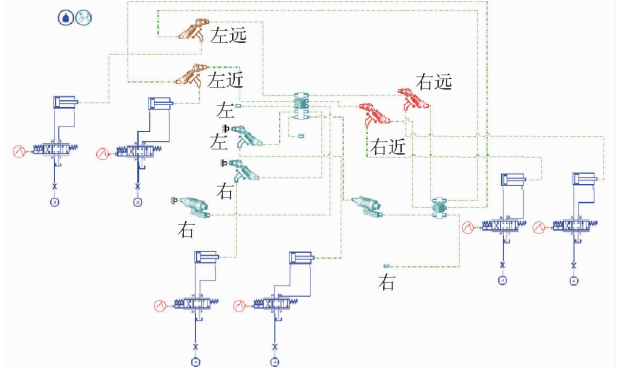


图 4 车架机械模型

Fig. 4 Frame mechanical model

2.3 底盘机械模型建立

考虑到履带模型的构建需要添加较多的约束条件,导致仿真计算需要大量时间求解,因此,在建模过程中忽略履带,直接对支重轮与地面建立接触约束。支重轮与地面的接触通过 2 个接触模型实现:球-平面模型,表示与平坦地面的接触;球-盒子模型,表示与坡地路面的接触。图 5 为底盘机械模型,支重轮通过铰接臂连接到底盘,模型红色部分表示铰接臂和底盘之间的枢轴。发动机的扭矩通过一系列齿轮传递给驱动轮,其中,齿轮由机械旋转节点构建。

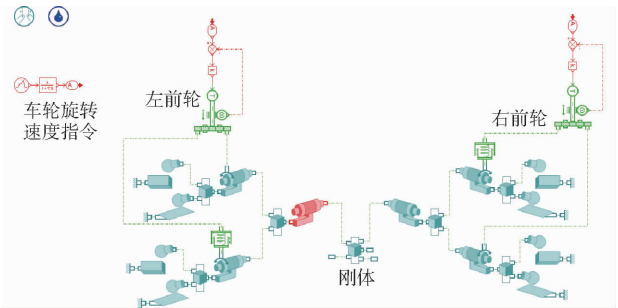


图 5 底盘机械模型

Fig. 5 Chassis mechanical model

3 QBP - PID 复合控制策略设计

经典 PID 控制的难点在于比例、积分和微分增

益的参数设计,并且参数确定后无法进行在线调整,使得其控制效果无法适应于环境变化^[21-22]。本文利用 BP 神经网络的自学习能力,对 PID 的控制参数进行实时更新,解决 PID 的参数整定难题^[23-25]。然而 BP-PID 由于神经网络的引入使得算法训练时间较长,并且神经网络各层神经元之间的连接权值难以确定,限制了算法的性能。本文结合 BP 神经网络与 Q 学习算法设计了一种基于 QBP-PID 的履带式作业机全向调平复合控制算法。Q 学习无需考虑具体模型,自主探索能力强,能够有效进行参数搜索整定^[26-27],而 BP 神经网络具备自主学习能力,能够实现模型非线性映射,引入 BP 神经网络以在线实时优化 PID 控制参数,同时通过 Q 学习算法实时更新 BP 神经网络连接权值,3 种算法复合形成的 QBP-PID 控制算法能够解决传统 PID 控制参数适应差的问题,同时保留 PID 控制的可靠性。

履带作业机全向调平系统的 QBP-PID 机身姿态控制算法结构如图 6 所示, $Y_d(k)$ 为理想的机身倾角信号, $y(k)$ 为实际的作业机机身倾角信号, $e(k)$ 为机身倾角误差, $u(k)$ 为调平系统电磁阀控制信号。QBP-PID 根据机身倾角误差 $e(k)$ 在线实时修正 BP 神经网络连接权值,并输出最优 PID 控制参数,最后控制调平系统液压油缸伸缩,从而实现履带式作业机机身姿态控制。

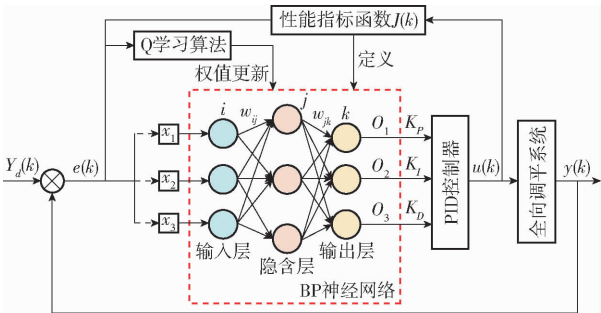


图 6 履带式作业机 QBP-PID 机身姿态控制器

结构示意图

Fig. 6 Crawler QBP-PID body attitude controller structure

经典 PID^[28] 的控制率表达式为

$$u(t)=K_p e(t)+K_i \int e(t) \mathrm{d} t+K_d \frac{\mathrm{d} e(t)}{\mathrm{d} t} \quad(10)$$

式中 K_p ——比例增益
 K_i ——积分增益
 K_d ——微分增益

对连续时间 PID 方程两边同时求导,离散化后可以得到离散时间 BP-PID 的控制率表达式为

$$u(k)=u(k-1)+K_p(e(k)-e(k-1))+\frac{K_i T}{2}(e(k)+e(k-1))+K_d(e(k)-2 e(k-1)+e(k-2)) \quad(11)$$

式中 T ——采样周期

将调平系统的系统方程写为

$$y(k+1)=\phi(y(k), u(k)) \quad(12)$$

式中 $\phi(\cdot)$ ——调平系统控制函数

BP 神经网络采用 3-6-3 共 3 层结构,输入层节点为 3 个,隐含层为一层共 6 个节点,输出层共 3 个节点。输入层 3 个节点为 $x_i(i=1,2,3)$,将 $e(k)$ 、 $e(k)-e(k-1)$ 、 $e(k)-2 e(k-1)+e(k-2)$ 归一化处理后作为输入 x_i 。输出层节点数目与实际被控对象有关,神经网络隐含层输出为 $Q_j(k)$,对应 PID 控制的 3 个控制参数,输出层输出为 $Q_k(k)$,计算式为

$$O_k(k)=f_2\left(\sum_{j=1}^6 w_{jk} O_j(k)-\theta_k\right) \quad(13)$$

$$O_j(k)=f_1\left(\sum_{i=1}^3 w_{ij} x_i-\theta_j\right) \quad(14)$$

式中 w_{ij} ——输入层与隐含层神经元节点的连接权值
 w_{jk} ——输出层与隐含层神经元节点的连接权值
 θ_j ——隐含层第 j 个神经元偏置
 θ_k ——输出层第 k 个神经元偏置
 $f_1(\cdot)$ 、 $f_2(\cdot)$ ——激活函数

选择 Sigmod 函数作为激活函数,其表达式为

$$f_1(x)=\frac{2}{1+e^x}-1 \quad(15)$$

$$f_2(x)=\frac{1}{1+e^x} \quad(16)$$

QBP-PID 的控制增益为

$$\left\{\begin{array}{l} K_p=O_1 \\ K_i=O_2 \\ K_d=O_3 \end{array}\right. \quad(17)$$

Q 学习算法的值函数 Q 迭代方程式可写为

$$Q\left(s_k, a_k\right)=\gamma \max Q\left(s_{k+1}, a\right)+R\left(s_{k+1}, s_k\right) \quad(18)$$

式中 $Q\left(s_{k+1}, a\right)$ ——状态 s_{k+1} 下的最大值函数
 $R\left(s_{k+1}, s_k\right)$ ——对动作 a_k 作出的奖赏数值
 γ ——折扣因子

对于履带式作业机全向调平控制系统,将性能指标函数 J 定义为

$$J=\sum_k J_k=\sum_k e^{\mathrm{T}}(k+1) Q e(k+1)+u^{\mathrm{T}}(k) R u(k) \quad(19)$$

式中 Q 、 R ——连接权值矩阵

采用梯度下降法^[29]更新 BP 神经网络的连接权值 $w_{jk}(k)$ 和 $w_{ij}(k)$ 为

$$\begin{cases} w_{jk}(k+1) = w_{jk}(k) - \eta(1 - \xi(k)) \frac{\partial J_k}{\partial w_{jk}(k)} + \xi(k) \frac{\partial J_k}{\partial w_{jk}(k)} \\ w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) - \eta(1 - \xi(k)) \frac{\partial J_k}{\partial w_{ij}(k)} + \xi(k) \frac{\partial J_k}{\partial w_{ij}(k)} \end{cases} \quad (20)$$

式中 η ——学习速率, $\eta > 0$
 $\xi(k)$ ——动量项因子, $0 < \xi(k) < 1$
动力项因子 $\xi(k)$ 的作用相当于一个阻尼因子, 能够抑制学习过程的频繁振荡, 提高学习效率。Q 学习算法设计中, 将动量项因子修正项 Δr 作为动作集, QBP-PID 的输入 $x_i (i=1,2,3)$ 作为状态集。采用自然对数衰减定义动量项因子, 动量项因子修正式为

$$\xi(k) = \begin{cases} \xi_0 \Delta r & (0 \leq \Delta r < 1) \\ \xi_0 (\Delta r - |\Delta r|) & (\Delta r \geq 1) \end{cases} \quad (21)$$

其中 $\Delta r = \exp(e(k))$ (22)
式中 ξ_0 ——动量项因子初始值, $0 \leq \xi_0 < 1$

对于 Q 学习算法, 奖惩函数决定最优动作序列, 通过设置与输入相关的奖惩函数, 确定每一时刻下的行动策略。机身倾角误差 $e(k) = 0^\circ$ 为理想控制效果, 因此将误差 $e(k)$ 减小作为奖励, 并向该方向进行调整学习, 反之, 将误差增大设为惩罚, 向相反方向调整学习。将奖赏函数定义为

$$R_i = -(e(k) - 0)^2 \quad (23)$$

完成奖赏函数、输入、输出和动作集设计后, 按照相应迭代步骤实现 QBP-PID 的在线实时参数搜集和动态优化, 具体流程如图 7 所示。

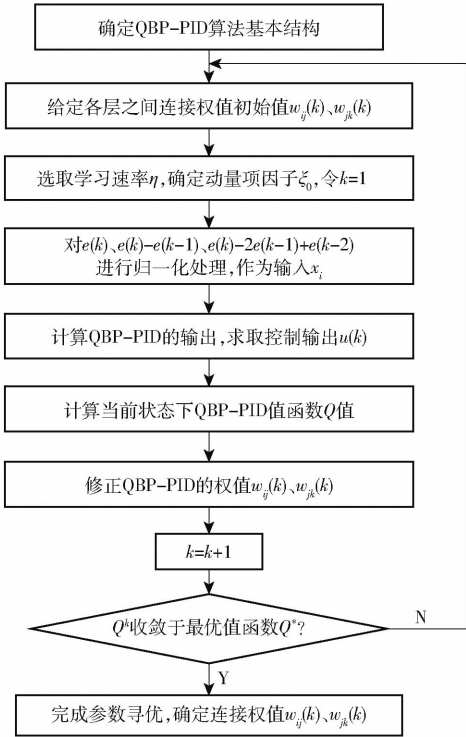


图 7 QBP-PID 参数动态优化流程图

Fig. 7 QBP-PID parameter dynamic optimization process

4 全向调平性能仿真分析

基于 Matlab/Simulink 仿真环境, 编写 S 函数建立履带式作业机 QBP-PID 机身姿态复合控制器, 同时基于 AMESim 建立液压调平系统和整机机械系统模型, 以机身倾角信号为控制器输入, 调平系统液压油缸电磁阀控制信号为控制器输出, 搭建履带式作业机全向调平控制系统的 Simulink-AMESim 联合仿真平台。AMESim 整机模型将分别输出履带式作业机的横向和纵向机身倾角信号, 期望机身横/纵倾角设为 0° , 由此得到 2 个方向上的倾角误差 $e(k)$, 并输入 QBP-PID 控制器, 控制器运算后输出各调平系统液压油缸控制信号, 使得机身倾角误差 $e(k)$ 趋近于 0° , 由此完成履带式作业机的机身姿态控制。仿真前, 由 AMESim 建立斜坡路面, 设定履带式作业机初始时刻停留在斜坡。为验证本文所设计 QBP-PID 的控制性能, 在算法模型中还建立 PID 与 BP-PID 控制器用以对比, 并采用试错法得到控制参数如表 3 所示。

表 3 控制参数设置

Tab. 3 Control parameter setting

参数	PID 控制参数		BP-PID/QBP-PID 控制	
	横向调平	纵向调平	参数初始值	
K_p	1.4	0.8	1.5	1.0
K_i	0.7	0.3	0.5	0.5
K_D	0.4	0.5	0	0

4.1 横向调平

设定初始横向坡度为 20° , 仿真时间为 10 s。图 8 为横向调平时的液压油缸运动和机身横向倾角的变化曲线。由图 8a 可以看出, 开始调平时, 液压油缸活塞杆位移较快, 之后趋于平缓, PID 控制下活塞杆在 0.8 s 时位移达到最大, 为 0.036 m, BP-PID 控制下活塞杆在 1.1 s 位移达到最大, 为 0.033 m, 而 QBP-PID 控制下活塞杆位移则持续增大, 最终均稳定在 0.033 m, 不再发生变化。根据图 8b 可知, 刚开始调平时的液压油缸速度较大, PID 控制下活塞杆速度达到 0.291 m/s, BP-PID 控制下活塞杆速度达到 0.287 m/s, QBP-PID 控制下活塞杆速度为 0.136 m/s, 之后, 速度逐渐减小, 机身水平后, 活塞杆速度为零。由图 8c 可以看出, PID 控制下机身横向调平时间为 3.5 s, 倾角超调量为 2.3° , BP-PID 控制下机身横向调平时间为 3.3 s, 倾角超调量为 1.1° , 而 QBP-PID 算法控制下机身横向调平时间减小到 2.8 s, 并且未出现超调量, 这表明所设计控制算法能够实现机身 20° 横向调平,

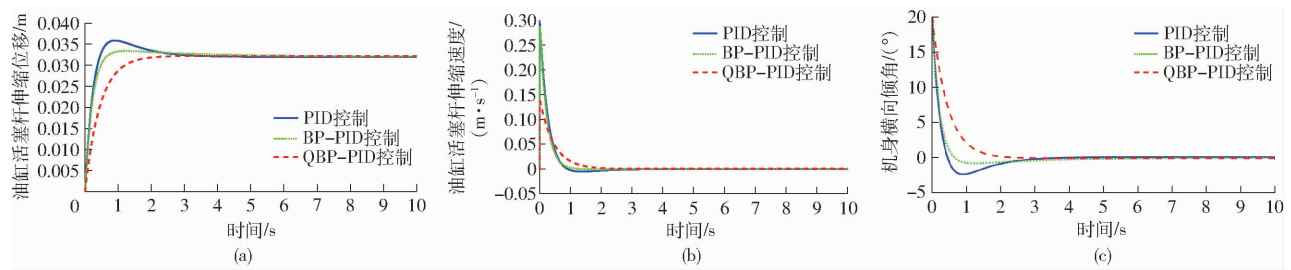


图 8 横向调平性能
Fig. 8 Lateral leveling performance

调平性能优于 PID 与 BP - PID 控制。

4.2 纵向调平

纵向调平仿真将初始坡度设定为 25°, 仿真时间为 10 s, 仿真结果如图 9 所示。由图 9a 可以看出, PID 控制下活塞杆在 1 s 时位移达到最大, 为 0.054 m, BP - PID 控制下活塞杆在 1.3 s 时位移达到最大, 为 0.051 m, 在 4.6 s 时稳定在 0.046 m, 而 QBP - PID 控制下活塞杆位移则持续增大, 最终均稳定在 0.046 m。由图 9b 可以看出, 刚开始调平时液压油缸速度较大, PID 控制下活塞杆速度达

0.262 m/s, BP - PID 控制下活塞杆速度达 0.241 m/s, QBP - PID 控制下活塞杆速度为 0.176 m/s, 之后, 速度逐渐减小至零。根据图 9c 可知, PID 控制下机身纵向调平时间为 4.4 s, 倾角超调量为 3.6°, BP - PID 控制下机身纵向调平时间为 4.3 s, 倾角超调量为 1.6°, 而 QBP - PID 算法控制下机身纵向调平时间减小到 3.2 s, 并且未出现超调量, 这说明所设计控制算法能够实现机身 25°纵向调平, 且调平性能优于 PID 与 BP - PID 控制。

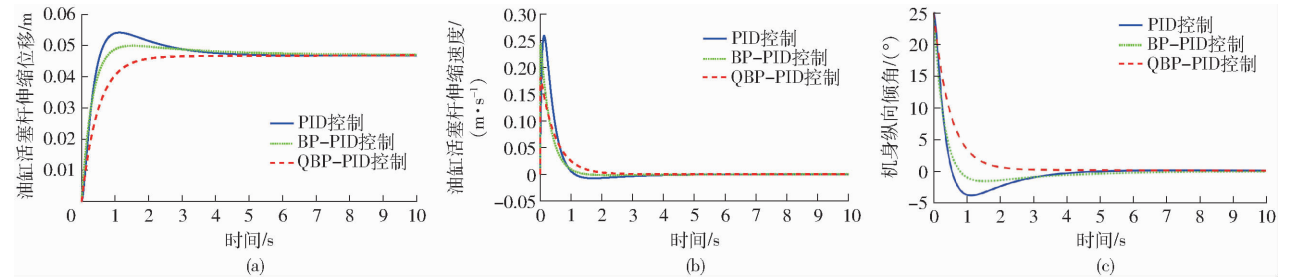


图 9 纵向调平性能
Fig. 9 Longitudinal leveling performance

5 试验

试验场地为某测试坡地, 全向调平履带式作业机样机采用星普 195 立式柴油发动机, 额定功率 9.2 kW, 最大行驶车速 5 km/h。机身安装双轴高精度数字 (RS485) ZCT2xxM - LBT - Ax - H5 - 460xB 型传感器, 实时采集机身横/纵向倾角信息, 调平系统主控制器为 STM32F103VET6, 由 CAN 总线读取传感器发出的信号, 并将控制信号发送到液压油缸比例阀。

5.1 横坡路面

横坡路面包括履带式作业机的静态试验和动态试验, 试验现场如图 10 所示。图 11a 为静止在 20°横坡上, 启动 QBP - PID 算法时的机身倾角变化, 可以看到调平时间为 3.4 s。动态测试中, 将未调平时的机身倾角变化作为比较对象以验证调平性能。调平前后的履带式作业机机身横向倾角变化如图 11b、11c 所示。可以看出, 在进入坡地时, 坡地



图 10 横坡试验现场
Fig. 10 Lateral slope test

较陡, 机身横向倾角变化较大, 最大达到 18.5° (11.5 s 时), 之后坡度有所下降。调平控制下, 最大坡度时的横向倾角为 16.4°, 并在之后迅速调平。图 11d、11e 为动态调平时的 QBP - PID 的控制参数与液压油缸比例阀控制电流变化情况, 可以看出, 控制参数与控制电流随着机身横向倾角变大而变大, 从而调整液压油缸伸缩速度, 实现机身快速调平。总体而言, 在横向坡度变化较大时, 履带式作业机能够迅速调平, 且在平地路面 (0 ~ 8 s) 以及坡度变化

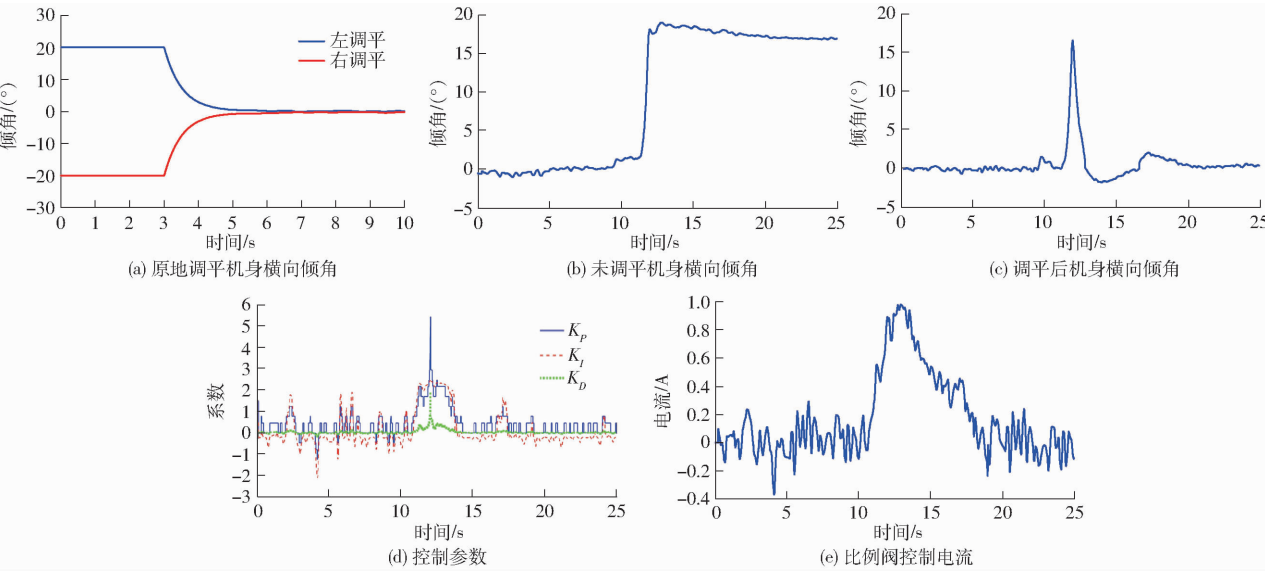


图 11 横向倾角与控制参数

Fig. 11 Body lateral inclination and control parameters

较缓时(20~25 s),横向机身倾角误差小于1.5°。

5.2 纵坡路面

纵坡路面试验现场如图 12 所示。静态试验下,履带式作业机静止在 25°纵坡上,启动 QBP-PID 算法时的机身倾角变化如图 13a 所示,可以看到调平



图 12 纵坡试验现场

Fig. 12 Longitudinal slope test

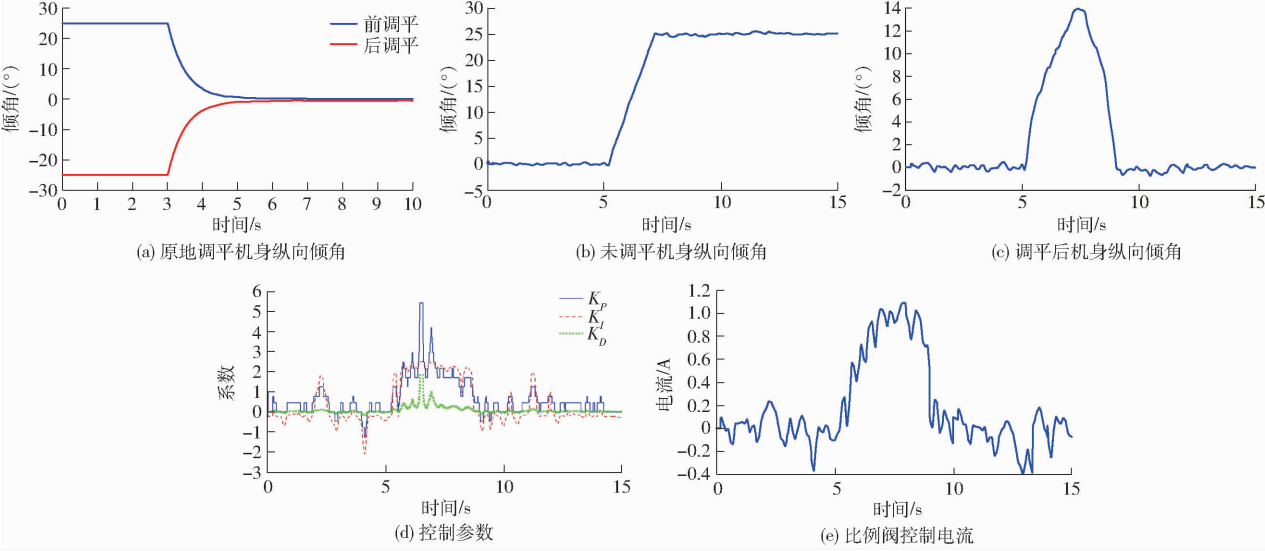


图 13 纵向倾角与控制参数

Fig. 13 Body longitudinal inclination and control parameters

时间为 3.6 s。动态试验下,调平前后的履带式作业机机身纵向倾角变化如图 13b、13c 所示。可以看出,在进入坡地时(5.1 s 时),机身纵向倾角变化较大,7 s 时,机身纵向倾角大致维持在 25°。调平控制下,最大坡度时纵向倾角为 13.8°,并且在 9.2 s 时机身纵向倾角调至水平。图 13d、13e 为动态调平时 QBP-PID 的控制参数变化与液压油缸比例阀控制电流信号,与横向调平相同,控制参数与控制电流与纵向机身倾角具有相同的变化趋势,从而实现纵向倾角的迅速调平。总体而言,在纵向坡度变化较大时,履带式作业机能够迅速调平,且在平地路面(0~8 s)的纵向倾角误差小于 1.5°。

表 4 为履带式作业机原地调平仿真与试验的结果对比,可以看到,样机试验的横向调平时间比

表 4 仿真与试验结果对比

Tab.4 Comparison of simulation and experimental results

项目	横向调平	纵向调平	平地机身
	时间/s	时间/s	倾角/(°)
仿真值	2.8	3.2	0
试验值	3.4	3.6	<1.5

仿真大 0.6 s,纵向调平时间比仿真大 0.4 s,这是由仿真中忽略了液压油缸活塞杆的摩擦阻力等因素造成的。此外,仿真中平地路面下机身倾角为 0°,试验下机身倾角幅值未超过 1.5°,是因为仿真中的平地路面坡度为理想的 0°,而自然平地路面存在一定起伏。总体来说,所设计全向调平系统能够在 4 s 内完成机身横/纵向自调平,平地路面机身倾角小于 1.5°,满足丘陵山区作业机的调平性能需求。

6 结论

(1)仿真结果表明,车身横向初始倾角为 20°时,QBP - PID 控制下调平时间为 2.8 s;车身纵向初始倾角为 25°时,QBP - PID 控制下调平时间为 3.2 s,横纵向调平时间均小于 PID 控制与 BP - PID 控制,并且未出现超调量,验证了所设计 QBP - PID 算法的先进性。

(2)试验结果表明,在静态试验下,原地横向和纵向调平时间为 2.8 s 和 3.2 s,与仿真结果误差分别为 0.6 s 和 0.4 s,在可接受范围内。动态试验下,当爬上陡坡时,机身倾角较大,之后迅速调平,平地路面上机身倾角小于 1.5°。整机试验验证了履带式作业机全向调平系统的工作有效性和稳定性,满足丘陵山区复杂路面作业需求。

参 考 文 献

[1] 张富贵,吕小莲,杨华兵,等. 基于模糊 PID 的山地拖拉机调平控制系统的设计[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023,49(1):121 - 126.
ZHANG Fugui,LÜ Xiaolian,YANG Huabing, et al. Design of leveling system for mountain tractor based on fuzzy PID[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(1): 121 - 126. (in Chinese)

[2] AHMADI I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances (model development) [J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(5): 339 - 346.

[3] 吴勇,王建军,苏明慧,等. 国外农机化发展历程及拖拉机发展现状[J]. 农业机械,2016(6):53 - 57.
WU Yong, WANG Jianjun, SU Minghui, et al. The development history of agricultural mechanization abroad and the current situation of tractor development[J]. Farm Machinery, 2016(6): 53 - 57. (in Chinese)

[4] 于泳超,康峰,郑永军,等. 果园高位自动调平作业平台设计及仿真[J]. 北京林业大学学报,2021,43(2):150 - 159.
YU Yongchao, KANG Feng, ZHENG Yongjun, et al. Design and simulation of the automatic-leveling high-position platform in orchards[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 150 - 159. (in Chinese)

[5] 王晓燕,邓博,谭丁杨,等. 无驱动式自动调平水田埋杆起浆整地机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12):20 - 31.
WANG Xiaoyan, DENG Bo, TAN Dingyang, et al. Design and experiment of undriven soil puddling machine with improved auto-leveling and straw-burying design for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 20 - 31. (in Chinese)

[6] 印祥,安家豪,王显,等. 高地隙施药机喷杆自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):98 - 105,15.
YIN Xiang, AN Jiahao, WANG Xian, et al. Design and test of automatic beam leveling system for high-learance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 98 - 105, 15. (in Chinese)

[7] 周志艳,周铭杰,陈羽立,等. 喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统研究[J]. 农业机械学报,2022,53(12):70 - 79.
ZHOU Zhiyan, ZHOU Mingjie, CHEN Yuli, et al. Automatic leveling control system of rotors hovering spray boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 70 - 79. (in Chinese)

[8] 胡炼,林潮兴,罗锡文,等. 农机具自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(8):15 - 20.
HU Lian, LIN Chaoxing, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling control system of agricultural implements [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 15 - 20. (in Chinese)

[9] 李钊,樊桂菊,张昊,等. 农机具自动调平现状及趋势分析[J]. 中国农机化学报,2019,40(4):48 - 53.
LI Zhao, FAN Guiju, ZHANG Hao, et al. Analysis on the present situation and tendency of automatic leveling in agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 48 - 53. (in Chinese)

[10] 吴帆,蒋蘋,胡文武,等. 牵引式作业机具自动调平控制系统的研究[J]. 河南农业大学学报,2020,54(3):439 - 445.
WU Fan,JIANG Pin,HU Wenwu, et al. Research on the automatic leveling control system of the tractor[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(3): 439 - 445. (in Chinese)

[11] 李林林,邓干然,林卫国,等. 农业机械自动调平技术发展现状与趋势[J]. 现代农业装备,2021,42(5):2 - 7,35.
LI Linlin, DENG Ganran, LIN Weiguo, et al. Development status and trend of agricultural machinery automatic leveling technology[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42(5): 2 - 7, 35. (in Chinese)

[12] 王涛,杨福增,王元杰. 山地拖拉机机身自动调平控制系统的设计[J]. 农机化研究,2014,36(7):232 - 235,44.
WANG Tao, YANG Fuzeng, WANG Yuanjie. Design of body automatic leveling control system of hillside tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014, 36(7): 232 - 235, 44. (in Chinese)

- [13] 齐文超,李彦明,张锦辉,等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J]. 农业机械学报,2019,50(10): 17-23,34.
QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 17-23, 34. (in Chinese)
- [14] 张锦辉,李彦明,齐文超,等. 基于神经网络 PID 的丘陵山地拖拉机姿态同步控制系统[J]. 农业机械学报,2020,51(12):356-366.
ZHANG Jinhui, LI Yanming, QI Wenchao, et al. Synchronous control system of tractor attitude in hills and mountains based on neural network PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 356-366. (in Chinese)
- [15] 金生,蒋蘋,杨俊朗,等. 货箱自适应调平果园作业平台设计与试验[J]. 江西农业大学学报,2022,44(3):714-724.
JIN Sheng, JIANG Pin, YANG Junlang, et al. Design and testing of adaptive levelling orchard working platform for cargo box [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(3): 714-724. (in Chinese)
- [16] 范永奎,翟志强,朱忠祥,等. 丘陵山地拖拉机电液悬挂仿形控制系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):517-524.
FAN Yongkui, ZHAI Zhiqiang, ZHU Zhongxiang, et al. Electro-hydraulic hitch terrain-adaptive control system for hillside tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 517-524. (in Chinese)
- [17] 彭凯,蒋蘋,胡文武,等. 旋耕机三点悬挂机具调平机构的研制与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2015,41(6):676-679.
PENG Kai, JIANG Pin, HU Wenwu, et al. Design and test on the leveling mechanism of three point linkage for rotary tiller [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2015, 41(6): 676-679. (in Chinese)
- [18] 潘冠廷,杨福增,孙景彬,等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):374-383.
PAN Guanting, YANG Fuzeng, SUN Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 374-383. (in Chinese)
- [19] 孙景彬,楚国评,潘冠廷,等. 遥控全向调平山地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):358-369.
SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358-369. (in Chinese)
- [20] 杨福增,王瀚麟,孙景彬,等. 山地履带拖拉机与农具姿态协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(1): 414-422.
YANG Fuzeng, NIU Hanlin, SUN Jingbin, et al. Design and experiment of attitude cooperative control system of mountain crawler tractor and farm tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 414-422. (in Chinese)
- [21] 荆学东,潘翔,汪洋涛. 农药喷洒四轴飞行器的模糊 PID 姿态控制[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(5):454-460.
JING Xuedong, PAN Xiang, WANG Zetao. Attitude control of pesticide spraying quadrotor aircraft based on fuzzy PID[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(5): 454-460. (in Chinese)
- [22] 古志,曾云,李敏,等. 基于 SOA 的水轮机调速系统 PID 参数优化[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(6):583-588.
GU Zhi, ZENG Yun, LI Min, et al. Optimization of PID parameters of hydraulic turbine governing system based on SOA[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(6): 583-588. (in Chinese)
- [23] 孙文峰,刘海洋,王润涛,等. 基于神经网络整定的 PID 控制变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12):55-64,94.
SUN Wenfeng, LIU Haiyang, WANG Runtao, et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 55-64, 94. (in Chinese)
- [24] 张荣丹,梁春英,李普,等. 基于 Simulink 仿真的施肥机模糊神经网络 PID 控制方法[J]. 南方农机,2023,54(7):17-20,3.
ZHANG Rongdan, LIANG Chunying, LI Pu, et al. PID control method of fuzzy neural network of fertilizer spreader based on Simulink[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 17-20, 3. (in Chinese)
- [25] 穆洪云,罗艳蕾,杜威,等. 基于 BP-PID 的双液压油缸电液同步控制仿真研究[J]. 液压气动与密封,2022,42(9): 14-18,3.
MU Hongyun, LUO Yanlei, DU Wei, et al. Simulation research on synchronous control of double hydraulic cylinder based on BP-PID[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2022, 42(9): 14-18, 3. (in Chinese)
- [26] SHUPRAJHAA T, SUJIT S K, SRINIVASAN K. Reinforcement learning based adaptive PID controller design for control of linear/nonlinear unstable processes[J]. Applied Soft Computing, 2022, 128: 109450.
- [27] 乔通,周洲,程鑫,等. 基于 Q-学习的底盘测功机自适应 PID 控制模型[J]. 计算机技术与发展,2022,32(5):117-122.
QIAO Tong, ZHOU Zhou, CHENG Xin, et al. Adaptive PID control model of chassis dynamometer based on Q-learning[J]. Computer Technology and Development, 2022, 32(5): 117-122. (in Chinese)
- [28] 樊桂菊,王永振,张晓辉,等. 果园升降平台自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(11):38-46.
FAN Guiju, WANG Yongzhen, ZHANG Xiaohui, et al. Design and experiment of automatic leveling control system for orchards lifting platform[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 38-46. (in Chinese)
- [29] 王宏志,王婷婷,胡黄水,等. 基于 Q 学习优化 BP 神经网络的 BLDCM 转速 PID 控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(6):2280-2286.
WANG Hongzhi, WANG Tingting, HU Huangshui, et al. PID control based on BP neural network optimized by Q-learning for speed control of BLDCM[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 2280-2286. (in Chinese)