

基于 FIPID 的 PST 湿式离合器压力控制方法

张静云^{1,2}, 任亚杰³, 刘晓慧¹, 魏海江¹, 王升升^{2,4*}

(1. 河南科技大学 车辆与交通工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 河南 洛阳 471039; 3. 国有宜阳林场, 河南 洛阳 471632; 4. 河南科技大学 农业装备工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 拖拉机动力换挡过程中湿式离合器油压实际值与目标值存在偏差, 在此采用模糊免疫 PID (Fuzzy Immune PID, FIPID) 控制方法, 以便对离合器油压实现跟随控制。构建湿式离合器驱动执行机构的数学模型, 设计湿式离合器的模糊免疫 PID 控制器, 并基于 MATLAB/Simulink 和 AMESim 平台分别建立控制模型和液压模型, 对接合过程进行仿真分析。仿真结果表明: 在方波信号下, 模糊免疫 PID 的动态响应时间仅为 0.069 s, 正弦信号下的稳态误差为 ± 0.020 1 MPa, 跟踪控制效果优于 PID 与模糊 PID, 实现了离合器压力的有效跟踪控制。在运输工况下, 与 PID 和模糊 PID 相比, 模糊免疫 PID 的最大冲击度分别降低 43%、29%, 滑摩功分别增大 18%、2%。在犁耕工况下, 与 PID 和模糊 PID 相比, 模糊免疫 PID 的最大冲击度分别降低 53%、38%, 滑摩功分别增大 4%、2%。

关键词: 拖拉机; 湿式离合器; 压力控制; 模糊免疫 PID; 换挡冲击度

中图分类号: S219.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-0006(2024)02-0023-05

Pressure Control Method for PST Wet Clutch Based on FIPID

ZHANG Jingyun^{1,2}, REN Yajie³, LIU Xiaohui¹, WEI Haijiang¹, WANG Shengsheng^{2,4}

(1. School of Vehicle and Transportation Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. National Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang 471039, China;

3. State-owned Yiyang Forest Farm, Luoyang 471632, China;

4. School of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: There is a deviation between the actual value and the target value of the oil pressure of the wet clutch during the power shifting process of the tractor. This study adopts the Fuzzy Immune PID (FIPID) control method to achieve follow-up control of the clutch oil pressure. A mathematical model of the wet clutch drive mechanism is constructed, and a Fuzzy Immune PID controller for the wet clutch is designed. Control and hydraulic models are established based on MATLAB/Simulink and AMESim platforms, and simulation analysis is carried out for the engagement process. The simulation results show that under a square wave signal, the Fuzzy Immune PID has a dynamic response time of only 0.069 s, and the steady-state error under a sine wave signal is ± 0.020 1 MPa. The tracking control effect is better than that of PID and Fuzzy PID, achieving effective tracking control of the clutch pressure. Under transportation conditions, compared with PID and Fuzzy PID, the maximum impact degree of the Fuzzy Immune PID is reduced by 43% and 29% respectively, and the sliding friction power is increased by 18% and 2% respectively. Under plowing conditions, compared with PID and Fuzzy PID, the maximum impact degree of the Fuzzy Immune PID is reduced by 53% and 38% respectively, and the sliding friction power is increased by 4% and 2% respectively.

Key words: Tractor; Wet clutch; Pressure control; Fuzzy immune PID; Shift impact

动力换挡技术在农业机械领域被广泛使用。湿式离合器在动力换挡变速箱 (Power shift transmission, PST) 扮演关键角色, 其动态特性直接影响着其性能表现。换挡过程中, 过高或过低的油压都会对换挡品质产生负面影响, 缩短离合器的使用寿命甚至导致损坏离合器。因此, 制定一种合理的油压控

制策略, 对改善和优化 PST 换挡质量至关重要。孙澄宇^[1]在其研究中提出了一种湿式离合器压力分段控制策略, 利用遗传算法优化关键控制参数。张延安^[2]提出了一种基于改进遗传算法的湿式离合器压力无模型自适应控制方法, 有效提升了动力换挡拖拉机换挡质量。曾云鹏^[3]利用遗传算法优化湿式离

合器控制子系统参数,离合器压力响应速度显著提高。

湿式离合器实际工作中,油压常采用PID控制。但拖拉机工况复杂且负载多变,常规PID控制参数尚不能实现自动调整,油压控制效果差,进而影响工作效率。模糊控制在模糊化的过程中,存在着易受人为因素影响、自动生成、调整隶属度函数以及调整模糊规则困难等缺点。

模糊免疫PID控制将免疫控制和PID控制相结合。凭借着极强的鲁棒性、出色的自适应能力和无需精确系统建模的特点,在机器人控制和工业控制等领域已取得了一定的研究成果^[4,5]。这些成果对推动相关领域的技术发展具有重要意义。

本文利用免疫机理和模糊逻辑来进行PID控制参数自适应,在分析湿式离合器接合过程的基础上,设计湿式离合器模糊免疫PID控制器。基于Matlab/Simulink和AMESim平台,构建了湿式离合器控制系统模型和液压模型,进行联合仿真,对比分析PID和模糊PID控制算法,验证本文算法的有效性。

1 湿式离合器仿真建模分析

1.1 电液比例阀数学建模

离合器需要充油时,接通电液比例阀,迅速充油。此时油压恰好能克服离合器回位弹簧的压力。滑磨阶段,通过调节电油压比例阀的流量准确控制离合器油压。需要放油时,调整比例阀的位置,使离合器汽缸中的液压油重新流回油箱中^[6]。

(1) 主阀芯力平衡方程

忽略瞬态液动力和干摩擦力等,比例电磁阀通电后,阀芯受到电磁力、弹簧力、稳态液动力、惯性力和阻尼力等。主阀芯力平衡方程为

$$F_C - P_0 A_s = M_s \ddot{L}_s + D_s \dot{L}_s + F_{SP} + K_s L_s + F_s \quad (1)$$

其中, $F_C = K_f(U - K_v \dot{L}_s)$ (2)

$$F_s = \begin{cases} -2C_d C_v A_e \cos \theta_s P_0 & (0 \leq L_s < h_0) \\ 0 & (h_0 \leq L_s \leq L_D + h_0) \\ 2C_d C_v A_i \cos \theta_s (P_s - P_0) & (h_0 + L_D < L_s \leq L_{SM}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_e(L_s) = nA(d, h_0 - L_s) \\ A_i(L_s) = nA(d, L_s - h_0 - L_D) \end{cases} \quad (4)$$

$$A(d, x) =$$

$$\frac{d^2}{4} \left[\arccos \left(1 - \frac{2x}{d} \right) - 2 \left(1 - \frac{2x}{d} \right) \sqrt{\frac{x}{d} - \left(\frac{x}{d} \right)^2} \right] \quad (5)$$

式中, M_s 为阀芯质量, kg; D_s 为阀芯黏性阻尼系数, $N \cdot s/m$; K_s 为回位弹簧刚度, N/m ; F_C 为电磁力, N ; F_{SP} 为回位弹簧初始压力, N ; P_s 为供油压力, Pa ; P_0 为出口压力, Pa ; A_s 为阀芯作用面积, m^2 ; L_s 为主阀芯位移, m ; F_s 为稳态液动力, N ; K_f 为电磁铁驱动系数, N/V ; K_v 为速度反电动势系数, $V \cdot s/m$; U 为输入电压, V ; h_0 为主阀卸油口初始开口量, m ; L_D 为主阀阀芯进口遮盖量, m ; C_d 为节流孔的流量系数; C_v 为主阀芯流速系数; θ_s 为主阀节流口射流角, rad ; L_{SM} 为主阀阀芯最大位移, m ; A_i 为进口节流面积, m^2 ; A_e 为卸油口节流面积, m^2 ; n 为圆孔式节流孔数量; d 为圆孔式节流孔直径, m ; x 为圆孔式节流口开口量, m 。

(2) 比例阀压力——流量方程

流入比例阀的流量 q_s 为

$$q_s = \begin{cases} \text{sign}(P_s - P_0) C_d A_i \frac{\sqrt{2|P_s - P_0|}}{\rho} & (h_0 + L_D < L_s \leq L_{SM}) \\ 0 & (h_0 \leq L_s \leq L_D + h_0) \\ -C_d A_e \frac{\sqrt{2|P_0|}}{\rho} & (0 \leq L_s < h_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中, ρ 为液压油密度, kg/m^3 。

(3) 比例阀流量连续性方程

不考虑阀门核心和阀门盖间隙的泄漏,主阀门腔中的油的压缩量,部分由流入主阀门腔的流量补偿,其余部分流入离合器油缸。即

$$q_s - q_L = \frac{V_{s0}}{\beta_e} \dot{P}_0 \quad (7)$$

式中, q_L 为缸流量, m^3/s ; V_{s0} 为阀腔容积, m^3 ; β_e 为液体体积弹性模量, Pa 。

1.2 离合器执行机构数学建模

(1) 湿式离合器活塞力平衡方程

在快速充油时,不考虑接合过程中的油道阻力和油道内漏因素,活塞会受到油缸内静压力、旋转离心力、回位弹簧力和活塞密封环摩擦力,则离合器的力平衡方程为^[7]

$$M_L \ddot{x}_L + D_L \dot{x}_L =$$

$$P_L A_L + F_\omega - F_{scal} - K_{CL} x_L - F_{L0} - F_{CL} \quad (8)$$

其中,

$$F_\omega = \frac{\pi \rho}{4} (\alpha_\omega \omega_s)^2 (R_2^2 - R_1^2) (R_2^2 + R_1^2 - 2R_{oi}^2) \quad (9)$$

$$F_{scal} = 2\mu_{scal} b p_L \pi (R_1 + R_2) \quad (10)$$

$$F_{CL} = K_n (x_L - \Delta) (x_L > \Delta) \quad (11)$$

式中, M_L 为活塞等效质量, kg; D_L 为活塞粘性阻尼系数, $N \cdot s/m$; A_L 为活塞作用面积, m^2 ; K_{CL} 为活塞回位弹簧刚度, N/m ; x_L 为活塞位移, m; F_{L0} 为活塞回位弹簧预压力, N; F_{ω} 为活塞离心油压作用力, N; F_{seal} 为活塞密封环摩擦力, N; F_{CL} 为摩擦片压紧力, N; P_L 为油缸压力, Pa; α_{ω} 为滞后系数; ω_s 为油缸角速度, rad/s; R_1 为活塞内半径, m; R_2 为活塞外半径, m; R_{oil} 为离合器进油道旋转半径, m; μ_{seal} 为活塞密封环摩擦因数; b 为活塞密封环宽度, m; K_n 为摩擦片等效刚度, N/m ; Δ 为摩擦片 Kisspoint 点, m。

(2) 离合器油缸压力-流量方程

离合器油缸流量 q_L 为

$$q_L = \text{sign}(P_0 - P_L) C_d \frac{\pi d_L^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_0 - P_L|} \quad (12)$$

式中, d_L 为油缸进油口直径, m。

(3) 离合器油缸流量平衡方程

不考虑密封部分的泄漏, 比例阀门通过离合器油注入汽缸的流量一部分用于油缸容积的变化, 另一部分则为压缩机油的变化量, 其余部分用于补偿通过汽缸的油排放口流出来的离合器油。即

$$q_L = \frac{V_{L0} + A_L x_L}{\beta_e} \dot{P}_L + A_L \dot{x}_L \quad (13)$$

式中, V_{L0} 为油缸初始容积, m^3 。

1.3 发动机数学模型

研究表明, 发动机输出转矩与转速及油门位置呈现一定的函数关系, 其关系式可表示为

$$T_e = f(\vartheta, n_e) \quad (14)$$

式中, ϑ 为发动机油门位置; n_e 为发动机转速, r/min。

2 基于模糊免疫 PID 的湿式离合器压力控制器设计

2.1 免疫 PID 设计

以体液免疫为例, 免疫系统的反馈机理, 如图 1 所示。在此过程中, 可以将细胞和细胞的调节过程与免疫应答中的正反馈和负反馈的调节过程等同。

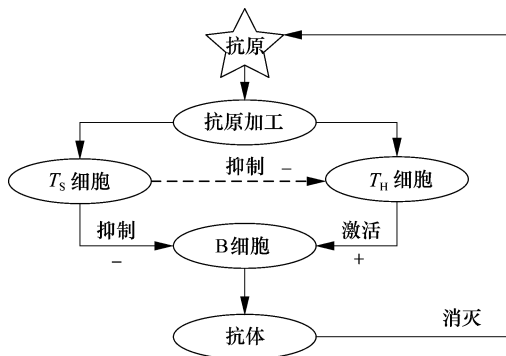


图 1 免疫系统反馈原理图
Fig. 1 Immune Feedback Response Theory

2.2 免疫 PID 控制器设计

根据抑制机理, 主反馈通过免疫机理快速响应抗原, 同时与免疫系统相互协作。结合免疫系统与常规 PID, 构成一种免疫 PID, 即可模拟免疫系统在外界扰动和参数变化时的自适应调整^[8]。

假定第 k 代抗原的数目是 $\varepsilon(k)$, 那么由于抗原刺激而生成的 T_H 细胞的输出量是 $T_H(k)$, T_S 细胞对 B 细胞的作用是 $T_S(k)$, 总刺激是

$$S(k) = T_H(k) - T_S(k) \quad (15)$$

$$\text{其中, } T_H(k) = k_1 \varepsilon(k) \quad (16)$$

$$T_S(k) = k_2 f(S(k), \Delta S(k)) \varepsilon(k) \quad (17)$$

式中, k_1 为 T_H 细胞的促进因子, k_2 为 T_S 细胞的抑制因子。

湿式离合器压力调节系统保证系统稳定和快速消除压力误差的目标与免疫系统的总目标一致。两者的比较见表 1。

表 1 生物免疫系统与压力控制系统比较
Tab. 1 Immune System and Pressure Control System Comparison

生物免疫系统	压力控制系统
第 k 代抗原抗体	第 k 个采样时刻
抗原数量 $\varepsilon(k)$	压力偏差 $e(k)$
总刺激 $S(k)$	控制器输出电压 $u(k)$

通过以上分析, 得到了适合于湿式离合器调压系统的 PID 免疫控制器的基本模型: 压力控制系统的压力偏差 $e(k)$ 类比于生物免疫系统中抗原数量 $\varepsilon(k)$, 因此免疫控制器的输入为 $e(k)$; 以 B 细胞接受的总刺激类 $S(k)$ 比离合器液压比例阀的电压 $u(k)$, 作为免疫控制器的输出。

可得到反馈规律如下:

$$u(k) = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))) e(k) = k_{p1} e(k) \quad (18)$$

式中, $k_{p1} = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$, $K = k_1$ 用于控制响应速度; $\eta = k_2/k_1$ 用于控制响应的稳定性。

增大 η , 可以减少系统超调量, 增加相对稳定性。合理地调整 k_1 和 η 可以同时提升控制系统响应速度并减少系统超调量; 抗体抑制调节函数 $f(\cdot)$ 是关于 B 细胞变换量的非线性函数, 类比到控制系统中, 函数 $f(\cdot)$ 是关于压力控制系统输出电压 $u(k)$ 和输出电压变化 $\Delta u(k)$ 的非线性函数, 也就是 $f(u(k), \Delta u(k))$, 对此函数的构建精度极大地影响控制效果。

根据免疫机制设计了一种新的 P 型控制器, 它是一种能够根据控制结果改变比例函数 $k_{p1} = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$ 的非线性 P 型控制器, 具有很强的适应性。但是, 对于由噪声及非线性扰动导致的控制误差, P 型免疫控制器不能很好地补偿。为此, 本文提出了一种 PID 免疫控制器, 其控制量的增量式为

$$\Delta u(k) = k_{p1}(e(k) - e(k-1) + k_1 e(k) + k_D e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (19)$$

式中, $k_{p1} = k_1(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$ 为比例系统; k_1 为积分系统; k_D 为微分系统。参数 k, η 和非线性函数 $f(\cdot)$ 的选取, 对控制器性能有很大影响。

2.3 模糊免疫 PID 控制器设计

由于动力换挡变速器湿式离合器的压力控制具有非线性、时变、迟滞等特性, 采用模糊免疫 PID 控制策略对其进行控制。在此基础上, 提出了一种新的液压控制方法, 即通过对比例阀的输入电压进行调节, 从而达到对湿式离合器在换挡时的油压进行优化控制的目的。在图2中表示了湿式离合器的压力控制装置。

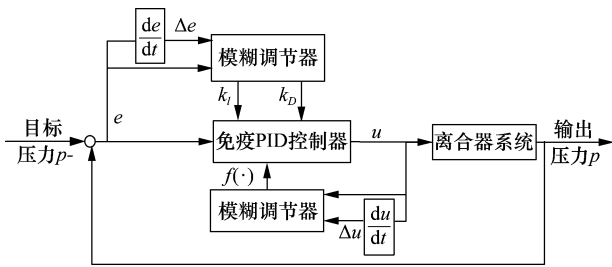


图2 模糊控制器的免疫PID控制结构
Fig.2 Fuzzy Immune PID Control

由于模糊规则本身的特性, 可以利用模糊规则逼近非线性函数 $f(\cdot)$, 输入变量分别为免疫控制器的第 k 个采样时刻控制器输出电压 $u(k)$ 和输出电压变化 $\Delta u(k)$, 输出变量为 $f(\cdot)$, 所使用的输入输出隶属度函数为正三角, 通过两类模糊集合对各输入变量进行模糊化处理, 即“正性”(P)和“负性”(N); 在此基础上, 利用三类模糊集合对输出变量进行模糊化, 即“正数”(P), “零”(Z), “负”(N)。在表2中给出了一种模糊规则, 该规则是按照“细胞受到的刺激越小(大), 其抑制力越大(小)”这一原则来进行的。

表2 模糊规则表
Tab.2 Fuzzy Rule Table

$\Delta u(k)$	$u(k)$	
	P	N
P	N	Z
N	Z	P

本文湿式离合器的模糊免疫 PID 算法采用了如图3所示的子程序。

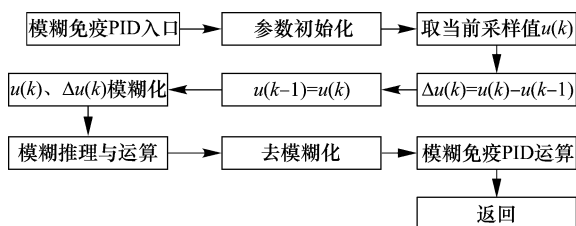


图3 模糊免疫PID子程序流程图
Fig.3 Fuzzy Immune PID Subroutine Flow Chart

3 仿真实证

基于 Matlab/Simulink 的 s-function 模块和 AMESim 的 interface 模块构建了动力换挡拖拉机传动系统联合仿真模型, 包含6个部分: 控制器1、比例减压阀2、供油系统3、负载4、湿式离合器5和发动机6, 如图4所示。主要参数如表3所示。

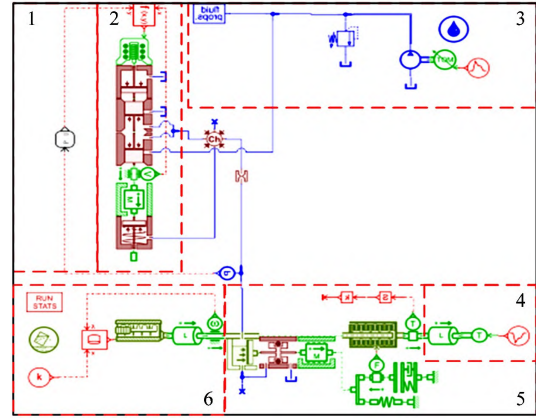


图4 湿式离合器联合仿真模型
Fig.4 Co-simulation Model of Wet Clutch

表3 联合仿真模型主要参数
Tab.3 Key Parameters in Co-simulation Model

参数	数值
供油压力 P_s /MPa	2
液压油密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	850
液压油体积弹性模量 β_e /Pa	1.7×10^9
比例阀工作电压 U /V	0-10
电磁阀速度反电动势系数 K_v /($\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.04
电磁铁驱动系数 K_f /($\text{N} \cdot \text{V}^{-1}$)	15.524
主阀芯质量 M_s /kg	0.02
主阀芯最大位移 L_{SM} /mm	3.13
主阀芯弹簧刚度 K_s /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	1500
主阀芯弹簧预压力 F_{SP} /N	55
主阀圆形节流口直径 d /mm	3
比例阀主阀腔容积 V_{S0} /m ³	2.6×10^{-5}
离合器活塞等效质量 M_L /kg	0.65
湿式离合器活塞外半径 R_2 /mm	62.5
湿式离合器活塞内半径 R_1 /mm	27.5
湿式离合器弹簧刚度 K_{CL} /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	25600
湿式离合器回位弹簧初始力 F_{L0} /N	2150
湿式离合器活塞 Kisspoint 点 Δ /mm	2.8
湿式离合器油缸初始容积 V_{10} /m ³	2.27×10^{-4}
湿式离合器摩擦片片数	6
湿式离合器进油口直径/mm	6
离合器动、静摩擦因数 μ_d, μ_s	0.06, 0.12
主动部分转动惯量 I_m /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1
从动部分转动惯量 I_Y /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	2.1
驱动轮半径/m	0.95
中央传动比	3.8
轮边减速比	4.55
最终传动比	12.35

为了检验在不同工况下, 离合器的压力跟踪效果, 分别用方波与正弦波两种信号作为激励, 其仿真结果见图5和图6。在图5中, 三种控制算法对于方

波信号控制都是有效的。第 1 次正阶跃时,PID 控制的超调量为 0.085 MPa,而模糊 PID 与模糊免疫 PID 均无超调和振荡,但其初始响应分别延迟了 0.12 s、0.127 s。负阶跃时,模糊 PID 与模糊免疫 PID 分别仅需 0.12 s、0.069 s 便能快速响应,并达到期望信号。此时,PID 不能对工况的变化做出快速响应,并调整控制参数。因此,PID 的系统动态响应能力不强。

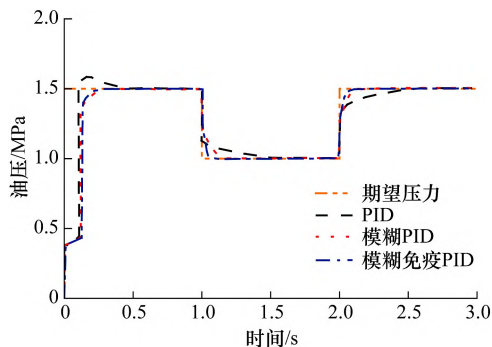


图 5 方波信号跟踪仿真结果

Fig. 5 Key Parameters in Co-simulation Model

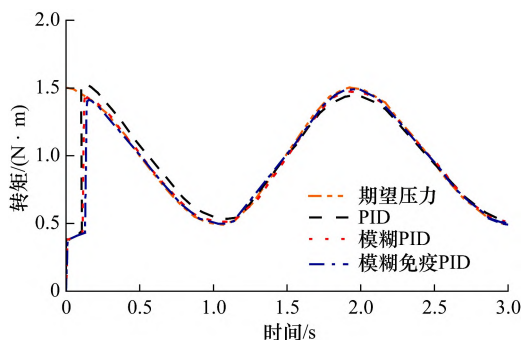


图 6 正弦信号跟踪仿真结果

Fig. 6 Key Parameters in Co-simulation Model

由正弦信号跟踪仿真效果可知模糊免疫 PID 仍存在一定时延,但是具有很好的控制跟随性,稳态跟踪误差范围在 ± 0.0201 MPa,优于 PID 稳态偏差的 ± 0.049 MPa。模糊 PID 的稳延迟时间略低于模糊免疫 PID,但在两种微励信号中,模糊 PID 抗干扰能力表现较差,而模糊免疫 PID 的鲁棒性更好。

设定不同负载扭矩,分别模拟拖拉机运输工况 ($160 \text{ N} \cdot \text{m}$) 和犁耕工况 ($320 \text{ N} \cdot \text{m}$),同时采用 1.5 MPa 离合器压力阶跃信号,对本文算法进行仿真分析以验证其优越性。引入冲击度,滑摩功,磨损量等指标作为评价换挡特性优劣的具体指标。

冲击度是牵引装置纵向加速度的变化速率。冲击度越大,司机的驾驶顿挫感越明显,换挡平顺性越差。计算公式如下

$$j = \frac{da}{dt} = \frac{d^2v}{dt^2} \quad (20)$$

式中, v 为拖拉机速度, m/s 。

湿式离合器工作时,其主、从动件转速由初始状

态逐渐达到同步,该过程为滑摩状态,并且在此过程中会产生滑摩功。计算公式如下

$$W_{fc} = \int_0^{t_i} T_c (\omega_z - \omega_c) dt \quad (21)$$

式中, t_i 为滑摩状态结束时间, s ; T_c 为摩擦转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; ω_z 为主动部分角速度, rad/s ; ω_c 为从动部分角速度, rad/s 。

图 7 和图 8 表示运输工况下,三种不同控制算法下冲击度和滑摩功的仿真结果。由图可以看出在运输工况下,PID、模糊 PID 和模糊免疫 PID 对应最大冲击度分别为 19.4 m/s^3 、 15.5 m/s^3 和 11 m/s^3 ,对应的滑摩功分别为 5038 J 、 5797 J 和 5935 J 。在犁耕工况下,PID、模糊 PID 和模糊免疫 PID 对应最大冲击度分别为 19 m/s^3 、 14.5 m/s^3 和 9 m/s^3 ,对应的滑摩功分别为 7507 J 、 7674 J 和 7805 J 。随着拖拉机负载的增大,离合器主、从动部分的转速差变大,换挡过程中滑摩功随之增加,但冲击度会减小。

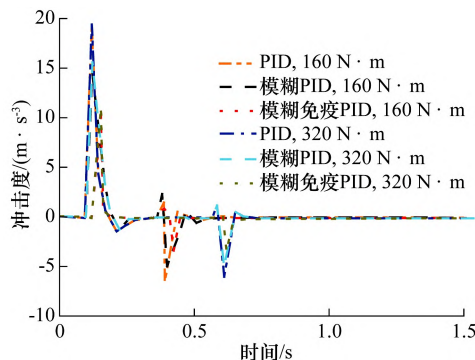


图 7 3 种控制算法的冲击度

Fig. 7 Key Parameters in Co-simulation Model

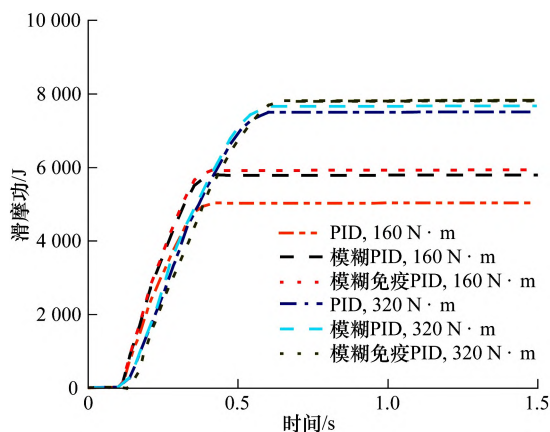


图 8 3 种控制算法的滑摩功

Fig. 8 Key Parameters in Co-simulation Model

4 结论

(1) 模糊免疫 PID 结合了常规 PID 与模糊控制,增强控制器的动态响应特性和稳定性。

(2) 跟踪控制仿真结果显示,标准信号的激励相较于传统 PID 与模糊 PID,模糊免疫 PID 的跟踪

(下转第 59 页)

(2)提出了一种基于 FOC 的永磁同步电机驱动控制方法,构建了电流环、转速环调节器控制参数模型,并搭建基于 PI 调节器的 MATLAB 仿真模型验证了控制方法和模型的正确性。

(3)田间试验表明:作业速度 ≤ 15 km/h,播种合格指数 $\geq 91.79\%$,漏播指数 $\leq 2.42\%$,重播指数 $\leq 5.80\%$,变异系数 $\leq 20.65\%$,播种质量明显优于国标,满足高速播种需求。

参考文献:

- [1] 龚丽农,员玉良,尚书旗,等.小区播种机电控系统设计与试验[J].农业工程学报,2011,27(5):122-126.
- [2] 和贤桃,丁友强,张东兴,等.玉米精量排种器电驱 PID 控制系统设计与性能评价(英文)[J].农业工程学报,2017,33(17):28-33.
- [3] 陈黎卿,解彬彬,李兆东,等.基于双闭环 PID 模糊算法的玉米精量排种控制系统设计[J].农业工程学报,2018,34(9):33-41.
- [4] 丁友强,杨丽,张东兴,等.基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J].农业机械学报,2018,49(8):42-49.
- [5] 王海清,李世孝.基于单电流传感器的永磁同步电机矢量控

制[J].机械研究与应用,2023,36(6):157-161+165.

- [6] 张章,崔明辉,李斌,等.应用于数字 DC-DC 转换器的高分辨率数字脉宽调制器设计[J].电子与信息学报,2020,42(11):2819-2826.
- [7] HARNEFORS L, PIETILÄNEN K, GERTMAR L. Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2001, 48(1):161-168.
- [8] 蒋学程,彭侠夫.小转动惯量 PMSM 电流环二自由度内模控制[J].电机与控制学报,2011,15(8):69-74.
- [9] 杨博,吴伟.基于滑膜变结构控制的轮式机器人控制系统设计仿真[C]//中共沈阳市委,沈阳市人民政府,中国农学会.第十三届沈阳科学学术年会论文集(理工农医).[出版者不详],2016:4.
- [10] GB/T 6973—2005,单粒(精密)播种机试验方法[S].
- [11] NY/T 503—2002,中耕作物单粒(精密)播种机作业质量[S].

(编辑 张晓超)

作者简介:肖跃进(1995-),男,硕士研究生,主要从事精准农业智能装备技术研究。

通信作者:耿端阳(1969-),男,教授,主要从事现代农机装备技术研究。

(上接第 27 页)

控制效果更优。方波信号下,模糊免疫 PID 动态响应速度只有 0.069 s。正弦信号下,模糊免疫 PID 稳态误差仅为 ± 0.020 MPa,实现了离合器压力的有效跟踪控制。

(3)离合器接合仿真结果表明,在运输工况下,与 PID 和模糊 PID 相比,模糊免疫 PID 的最大冲击度分别降低 43%、29%,滑摩功分别增大 18%、2%。在犁耕工况下,与 PID 和模糊 PID 相比,模糊免疫 PID 的最大冲击度分别降低 53%、38%,滑摩功分别增大 4%、2%。模糊免疫 PID 的接合品质更高。

参考文献:

- [1] 孙澄宇,司腾飞,朱明昊,等.基于湿式离合器油压分段控制策略的动力换挡品质优化研究[J].中国农机化学报,2022,43(12):106-112+117.
- [2] 张延安,杜岳峰,孟青峰,等.基于改进遗传算法的拖拉机湿式离合器压力无模型自适应控制[J].吉林大学学报(工学版),2023:1-14.

[3] 曾云鹏.湿式离合器系统建模及压力控制研究[D].长春:吉林大学,2022.

[4] 吴东林,张玉华.农用车辆路径跟踪预瞄控制研究——基于免疫模糊 PID 算法和视觉导航[J].农机化研究,2020,42(11):251-254+263.

[5] 孙浩水,王小平,王晓光,等.基于模糊免疫神经网络 PID 算法的全向底盘控制方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(4):59-65.

[6] 傅生辉,顾进恒,李臻,等.基于 MFAPC 的动力换挡变速箱湿式离合器压力控制方法[J].农业机械学报,2020,51(12):367-376.

[7] 闫祥海,魏海江,刘孟楠,等.基于充油流量与曝气程度的拖拉机动力换向性能研究[J].农业机械学报,2023,54(8):381-393.

[8] 吴滔.全电 AMT 自动变速器试验台的研究[D].长沙:中南林业科技大学,2020.

(编辑 张晓超)

作者简介:张静云(1986-),女,硕士,讲师,主要从事车辆新型传动理论与控制研究。

通信作者:王升升(1986-),男,博士,副教授,主要从事农作物收获理论与装备研究。

(上接第 51 页)

(3)本文提出的试验方法可以实现对拖拉机辅助导航驾驶系统精度的量化评估,对产品质量进行区分。

参考文献:

- [1] T/CAAMM 13—2018,农业机械卫星导航自动驾驶系统前装通用技术条件[S].

(编辑 张晓超)