

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.10.016

姚丽萍, 陈阳, 戴卓辰, 等. 基于模型预测控制的静液压变速器转速控制研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(10): 188-199.

基于模型预测控制的静液压变速器转速控制研究

姚丽萍^{1,2}, 陈阳¹, 戴卓辰¹, 张军辉¹, 李明生^{1,2}, 谢守勇^{1,2}

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 丘陵山区农业装备重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 为提高静液压变速器(HST)控制系统的自适应性和鲁棒性, 结合模型预测控制(MPC)与粒子群优化(PSO)算法对 HST 转速控制性能进行仿真和实验研究。首先, 基于状态扩展空间方程建立 HST 的预测模型, 引入 PSO 确定 MPC 的最佳超参数, 获得综合性能指标最佳的模型预测控制器模型。然后, 对 HST 进行阶跃响应与加减速控制仿真, 同时搭建静液压传动实验平台对模型预测控制 HST 的可行性进行验证。结果表明: 在阶跃响应和期望转速突变条件下, 模型预测控制 HST 的输出转速均在较短时间内稳定在期望转速附近, 且超调量最大不超过 5%, 具有较好的静态特性。期望转速突变时, MPC 亦能快速准确地调控变量泵的排量, 使马达转速迅速达到新的稳定状态, 且调控过程的转速波动较小。所得实验结果与仿真结果一致, 表明 MPC 在 HST 转速控制方面具有可行性。最后, 针对更为复杂的工况(变化的输入功率、多变的期望转速以及突变的外部负载), 采用仿真手段研究了 MPC 对 HST 的转速控制性能。结果表明: 在复杂工况下, MPC 亦能使 HST 具有较好的静动态特性, 其转速波动得到有效降低, 马达输出转速能稳定在期望值附近。

关键词: 模型预测控制; 粒子群优化算法; 静液压变速器;
转速控制

中图分类号: S219.5

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2024)10-0188-12



Research on Speed Control of Hydrostatic Transmission Based on Model Predictive Control

YAO Liping^{1,2}, CHEN Yang¹, DAI Zhuochen¹,
ZHANG Junhui¹, LI Mingsheng^{1,2}, XIE Shouyong^{1,2}

1. College of Engineering Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Agriculture Equipment for Hilly and Mountainous Regions, Chongqing 400715, China

收稿日期: 2023-03-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52105276); 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2021jsex-gksbX0002); 中央高校基本科研业务费项目(XDJK2019B060).

作者简介: 姚丽萍, 博士, 副教授, 主要从事流体力学、静液压系统传动与控制研究。

通信作者: 谢守勇, 博士, 教授。

Abstract: In order to improve the adaptability and robustness of the hydrostatic transmission (HST) control system, for the first time, Model Predictive Control (MPC) and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm were combined in the present study to control the speed of HST by using the simulation and experiment methods. First, the prediction model of HST was established based on the expanded space state equation. The PSO was applied to determine the optimal hyperparameters of MPC, and the MPC controller model with the best comprehensive performance index was obtained. Then, the step response and acceleration/deceleration control on the HST were carried out by using the numerical simulation test. Meanwhile, the corresponding experimental platform was built to verify the feasibility of the above numerical method. The results indicate that by applying the MPC, the output speed of the HST can be stabilized near the target value in a short period of time, and the maximum overshoot did not exceed 5%, which made the HST have good static characteristics. When the expected speed suddenly changes, the MPC can quickly and accurately regulate the displacement of the variable pump, so that the motor speed can quickly reach a new stable state, and the speed fluctuation in the control process is small. The experimental results obtained in this study are consistent with the simulation results. The results indicate that it is feasible to control HST by using MPC. Finally, the performance of HST with MPC illustrate that the MPC also makes HST have better static and dynamic characteristics under complex working conditions (the variable input power, the variable expected speed and the sudden external load). Meanwhile its speed fluctuation is effectively reduced and the corresponding motor output speed of HST stabilizes around the expected value.

Key words: Model Predictive Control (MPC); Particle Swarm Optimization Algorithm(PSO); Hydrostatic Transmission (HST); speed control

静液压变速器(Hydrostatic Transmission, HST)因其具有无极变速、变矩等特点,被广泛应用于农业机械和部分工程机械中^[1]。在农业机械现代化发展的新形势下,如何进一步提高 HST 的自适应性和鲁棒性,成为农业机械中 HST 发展的研究重点。

HST 是一种典型的时变非线性、高耦合性系统,存在较大程度的参数变化和时变负载干扰,其传统控制方法包括电液伺服控制^[2]、PID(Proportion Integration Differentiation)控制^[3]、模糊控制等^[4-9]。现有控制算法的控制性能受环境影响较大、对非线性系统的控制效果一般,不易满足系统的控制需求,亟需更为先进的控制方法。模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)是一类新型计算机控制算法,它可根据控制过程的历史信息预测被控系统当前和将来的输入、输出,是一种基于模型预测的启发式控制算法^[10]。相比传统控制方法, MPC 设计简单、易于实现,并且对模型要求较低,适用于不易建立精确数学模型且比较复杂的被控系统。该方法一出现就受到国内外工程界的广泛关注^[11-14]。

文献[15-16]报道了引入 MPC 的无人机和机器人可以朝着期望轨迹平稳地运动。赵树恩等^[17]将基于显式模型预测控制的多目标自适应巡航控制方法应用到传统汽车中,有效地提高了其自适应巡航控制的实时性。韩玲等^[18]提出以实现离合器接合一致为目标的模型预测控制策略,使离合器能够在目标时刻完成充油过程,降低汽车起步冲击。康铭鑫等^[19]提出了一种基于观测器的模型预测控制策略,实现了汽车发动机转矩的快速且精确的实时跟踪控制。汪勇等^[20]提出了一种基于神经网络的新型非线性模型预测控制方法,使得变旋翼转速直升机的涡轴发动机的超调量相比 PID 控制减少 50%。Dang 等^[21]引入模型预测控制方法对多输入的静液压传动系统进行变速控制研究,结果表明系统在外外部干扰下能保持较好的鲁棒性和控制精度。

目前, MPC 在其他工程领域中已有相关研究报道^[22-24],但面向 HST 转速控制方面的研究鲜有,亟需进一步深入。基于此,本文首次引入 MPC 并结合粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)对 HST 的转速控制性能进行仿真和实验研究。首先使用扩展后的状态空间模型对 HST 进行数学建模,获得

预测模型,引入 PSO 对预测模型中的超参数进行寻优;然后结合仿真与台架实验对 MPC 在 HST 控制中的可靠性进行验证;在此基础上,研究 MPC 在更复杂的工况下(变化的输入功率、多变的期望转速以及突变的外部负载)对 HST 转速的控制效果.

1 静液压变速器建模

本文所采用的静液压变速器是变量泵-定量马达结构(图 1),除泵和马达外,其他元件的结构和功能对 HST 的输出转速影响较小^[25],通过调节变量泵的排量即可实现马达的转速控制.

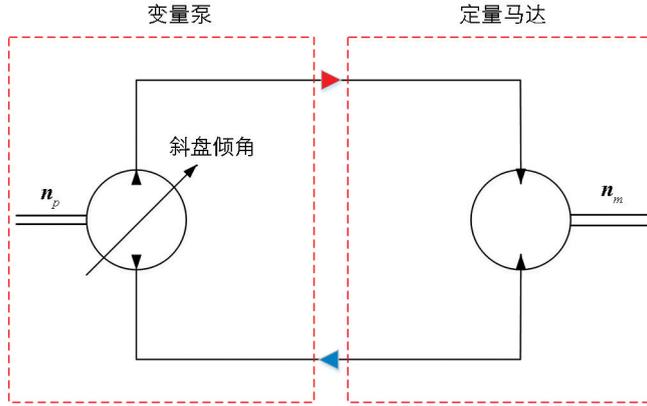


图 1 变量泵-定量马达系统简图

1.1 基本参数方程

变量泵的排量方程为:

$$T_P \dot{q}_P + q_P = k_P u_P \quad (1)$$

式中: T_P 为时间常数; q_P 为泵的排量; k_P 为泵的比例系数; u_P 为泵的控制电压.

考虑油液泄露的变量泵流量方程为:

$$Q_P = n_P q_P - (C_{iP} + C_{eP})P \quad (2)$$

式中: Q_P 为泵的流量; n_P 为泵的转速; P 为高压油腔压力; C_{iP} 为泵的内泄露系数; C_{eP} 为泵的外泄露系数.

定量马达的流量方程为:

$$Q'_P = (C_{im} + C_{em})P + n_m q_m + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

式中: Q'_P 为定量马达的流量; C_{im} 为马达的内泄露系数; C_{em} 为马达的外泄露系数; n_m 为马达输出转速; q_m 为马达排量; V_0 为压力油腔总容积; β_e 为油液的体积弹性系数.

马达转矩平衡方程为:

$$q_m P = J \frac{dn_m}{dt} + B n_m + T_l \quad (4)$$

式中: J 为马达负载折算到马达轴上的等效转动惯量; B 为黏性阻尼系数; T_l 为负载力矩.

1.2 状态空间方程

联立式(1) - (4),即可建立 HST 的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{q}_P = -\frac{1}{T_P} q_P + \frac{k_P}{T_P} u_P \\ \dot{P} = -\frac{(C_{im} + C_{em} + C_{iP} + C_{eP})\beta_e}{V_0} P - \frac{\beta_e}{V_0} q_m n_m + \frac{\beta_e}{V_0} n_P q_P \\ \dot{n}_m = -\frac{1}{J} q_m P - \frac{B}{J} n_m - \frac{T_l}{J} \end{cases} \quad (5)$$

令 $x_1 = q_p$, $x_2 = P$, $x_3 = n_m$ 为系统的状态变量, 则式(5)可写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 x_1 + b u_p \\ \dot{x}_2 = -a_2 x_2 - a_3 x_3 + a_4 x_1 \\ \dot{x}_3 = -a_5 x_2 - a_6 x_3 - d \end{cases} \quad (6)$$

其中, $a_1 = \frac{1}{T_p}$, $a_2 = \frac{(C_{im} + C_{em} + C_{iP} + C_{eP})\beta_e}{V_0}$, $a_3 = \frac{\beta_e q_m}{V_0}$, $a_4 = \frac{\beta_e n_p}{V_0}$, $a_5 = \frac{q_m}{J}$, $a_6 = \frac{B}{J}$, $b = \frac{k_p}{T_p}$, $d = \frac{T_l}{J}$.

由式(6)可知, 除了 HST 内油液性质参数, 马达转速的主要影响因素有变量泵的排量、马达负载力矩以及液压回路中油液的泄露, 其中突变的外界负载在建模时作为附加项单独表示, 油液泄露通过泄露系数表示, 变量泵的排量则通过泵的斜盘倾角控制.

基于式(6)推导 HST 的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(x)\mathbf{x} + \mathbf{g}(x)u \\ y = \mathbf{h}(x)\mathbf{x} \end{cases} = \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & 0 \\ a_4 & -a_2 & -a_3 \\ 0 & -a_5 & -a_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y = [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{x} 为中间变量矩阵; y 为输出变量; $\mathbf{f}(x)$ 、 $\mathbf{g}(x)$ 分别为与中间变量有关的系数矩阵.

2 基于粒子群优化算法的模型预测控制

本文所采用 MPC 主要包括模型预测、滚动优化和反馈校正 3 个过程.

2.1 建立状态空间的预测模型

预测模型能反映整个被控系统运行的真实状态, 可为滚动优化及反馈校正过程提供参考, 包括非参数化^[11, 26-32]和参数化模型 2 种. 本文采用基于参数化的 HST 状态空间模型, 以设计参数为状态变量, 通过改变参数值来构建并更新模型, 基本过程如下:

对于 HST 单输入单输出调速系统, 其状态空间方程的连续性模型为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u = \mathbf{f}(x)\mathbf{x} + \mathbf{g}(x)u \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{h}(x)\mathbf{x} \end{cases}$$

离散化后, 可得,

$$\begin{cases} x(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d u(k) \\ y(k) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x}(k)$ 为 n 维状态变量 (n 为中间变量个数); \mathbf{A}_d , \mathbf{B}_d 和 \mathbf{C}_d 为 $n \times n$, $n \times 1$ 和 $1 \times n$ 维矩阵.

假设系统的预测时域为 N_p , 控制时域为 N_m , 则 k 时刻预测时域 N_p ($N_p > N_m$) 内的状态变量的预测值为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1 | k) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d u(k) \\ \mathbf{x}(k+2 | k) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k+1 | k) + \mathbf{B}_d u(k+1) \\ \vdots \\ \mathbf{x}(k+N_p | k) = \mathbf{A}_d^{N_p} \mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_d^{N_p-1} \mathbf{B}_d u(k) + \mathbf{A}_d^{N_p-2} \mathbf{B}_d u(k+1) + \cdots + \mathbf{A}_d^{N_p-N_m} \mathbf{B}_d u(k+N_m-1) \end{cases} \quad (9)$$

被控系统的预测输出值为:

$$\begin{cases} y(k+1|k) = C_d A_d x(k) + C_d B_d u(k) \\ \vdots \\ y(k+N_p|k) = C_d A_d^{N_p} x(k) + C_d A_d^{N_p-1} B_d u(k) + C_d A_d^{N_p-2} B_d u(k+1) + \\ \cdots + C_d A_d^{N_p-N_m} B_d u(k+N_m-1) \end{cases} \quad (10)$$

联立式(9)和(10),可推得预测时域内被控系统输出预测值的通用公式为:

$$Y = Fx(k) + GU \quad (11)$$

式中:

$$Y = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ \vdots \\ y(k+N_p|k) \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} C_d A_d \\ C_d A_d^2 \\ \vdots \\ C_d A_d^{N_p} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N_m-1) \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} C_d B_d & \cdots & 0 & 0 \\ C_d A_d B_d & C_d B_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_d A_d^{N_p-1} B_d & C_d A_d^{N_p-2} B_d & \cdots & C_d A_d^{N_p-N_m} B_d \end{bmatrix}$$

G 为 $N_p \times N_m$ 维矩阵.

新的状态空间模型通过 $k+1$ 时刻和 k 时刻的状态变量和输出值式(8)求差得到,相应模型表示为:

$$\begin{cases} x_u(k+1) = A_u x_u(k) + B_u \Delta u(k) \\ y(k) = C_u x_u(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $x_u(k) = \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix}$, $A_u = \begin{bmatrix} A_d & o_d^T \\ C_d A_d & 1 \end{bmatrix}$, $B_u = \begin{bmatrix} B_d \\ C_d B_d \end{bmatrix}$, $C_u = [o_d \quad 1]$; o_d 为与 Δx 相同维度的零向量,

$$\Delta x(k) = A_d \Delta x(k-1) + B_d \Delta u(k-1).$$

2.2 采用 PSO 进行滚动优化

2.2.1 滚动优化

MPC 是一种局部优化的控制算法,其优化策略如图 2. 区别于全局优化算法,它在每一时刻 k 就要确定从该时刻起的 N_m 个控制增量 $\Delta u(k)$, $\Delta u(k+1)$, \cdots , $\Delta u(k+N_m-1)$,使得预测模型在未来 N_p 个时刻的输出预测值尽可能接近期望值.

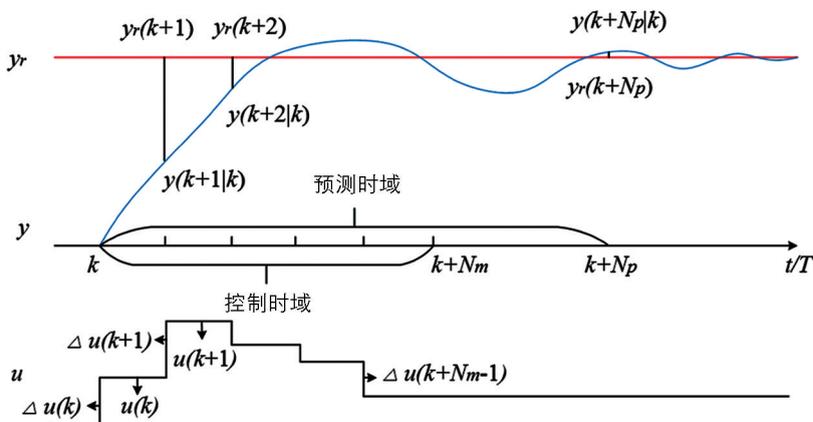


图 2 MPC 在 k 时刻的优化策略

MPC 的性能优化指标函数为:

$$J_e = (Y_r - Y)^T R_s (Y_r - Y) + \Delta U^T R \Delta U \tag{13}$$

式中: Y_r 为期望值矩阵 (维数和 Y 相同); R 为控制权重矩阵 (N_p 纬度的单位向量); $R_s^T = \overbrace{[1 \ 1 \ \dots \ 1]}^{N_p} y_r(k) = \overline{R_s^T} y_r(k)$, 为误差权重矩阵。

将式(11) 带入式(13) 中可得:

$$J_e = [Y_r - Fx_u(k)]^T R_s [Y_r - Fx_u(k)] - 2\Delta U^T G^T R_s [Y_r - Fx(k)] + \Delta U^T (G^T R_s G + R) \Delta U \tag{14}$$

令 J_e 对 ΔU 的偏导最小, 获得最佳控制增量:

$$\Delta U = (G^T G + R)^{-1} G^T \overline{R_s} y_r(k) - (G^T G + R)^{-1} G^T Fx(k) \tag{15}$$

此外, 基于式(12) 和式(15), 被控系统在 $k+1$ 时刻的状态预测值表示为:

$$x_u(k+1) = (A_u - B_u K_s) x_u(k) + B_u K_r y_r(k) = A_u x_u(k) + B_u \Delta u(k) \tag{16}$$

式中: K_s 和 K_r 分别为 $(G^T G + R)^{-1} G^T F_u$ 和 $(G^T G + R)^{-1} G^T \overline{R_s}$ 的首行元素,

$$F_u = \begin{bmatrix} C_u A_u \\ \vdots \\ C_u A_u^{N_p} \end{bmatrix}$$

鉴于矩阵 F_u 中 $C_u A_u$ 的特殊结构, F_u 最后 1 列的元素均为 1, 于是 K_s 可描述为 $K_s = [K_x K_r] \cdot K_x$ 即为与状态变量相关的反馈增益, K_r 为与被控系统输出相关的反馈增益. 相应状态扩展的 MPC 控制框图如图 3.

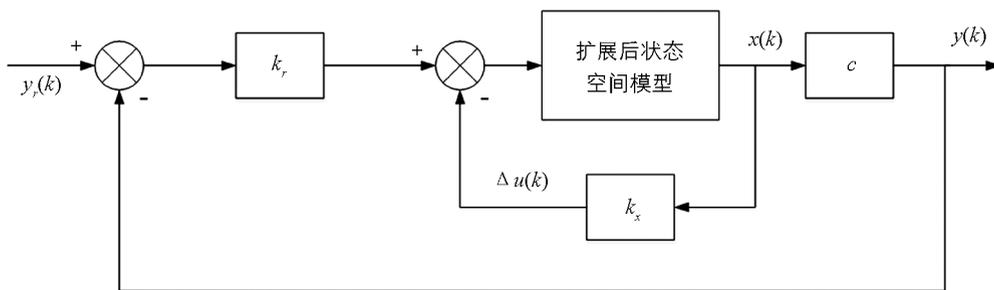


图 3 状态扩展的 MPC 控制框图

2.2.2 粒子群优化算法

由式(8) 至式(16) 可知, 预测时域和控制时域 (超参数) 是影响 MPC 优化速度和精度的关键因素. 人工找寻最优的超参数会耗费大量的精力, 而粒子群优化算法则可借助计算机自动找寻最优超参数, 能有效提高计算效率. 本文采用粒子群优化算法对 MPC 中的预测时域和控制时域进行参数寻优.

所引入的粒子速度和位置更新公式为:

$$\begin{cases} v_i^d = \omega v_i^{d-1} + c_1 r_1 (p \text{ best}_i - x_i^{d-1}) + c_2 r_2 (g \text{ best} - x_i^{d-1}) \\ x_i^d = x_i^{d-1} + v_i^{d-1} \end{cases} \tag{17}$$

式中: v_i^d 为第 d 次迭代时粒子 i 的速度; x_i^d 为第 d 次迭代时粒子 i 的位移; ω 为惯性权重, 调节收敛性; c_1, c_2 为加速度常数, 调节学习最大步长; r_1, r_2 为随机数, 增加搜索随机性; $p \text{ best}_i$ 为第 i 个粒子的最优位置; $g \text{ best}$ 为第 i 次迭代时整个粒子群内的最优位置.

为明确 MPC 系统性能是否达到最佳, 本文选取 2 个参数作为最优目标, 即控制系统的超调量和系统达到稳定的时间. 综合优化指标为:

$$f = a_1 f_1 + a_2 f_2 \tag{18}$$

式中: a_1, a_2 为比重 ($a_1 + a_2 = 1$); f_1, f_2 为系统超调量和系统达到稳定的时间.

2.3 反馈校正

模型的预测输出与系统的真实输出会存在误差, 为了提高模型的精确性, 需要引入反馈进行误差校

正. 相应的校正公式为:

$$\begin{aligned} e(k+1) &= \tilde{y}(k+1) - y(k+1|k) \\ \mathbf{y}_{\text{cor}}(k+1) &= \mathbf{Y} + \mathbf{h}e(k+1) \end{aligned} \quad (19)$$

式中: \tilde{y} 为 $k+1$ 时刻被控系统的真实输出; \mathbf{y}_{cor} 为 $k+1$ 时刻反馈校正后的预测值矩阵; \mathbf{h} 为校正向量矩阵, 维数为 N_p .

3 仿真及实验验证

3.1 MPC 与传统控制方法的对比研究

为验证 MPC 对 HST 的转速控制优势, 本文对比研究了传统 PID 控制、模糊控制以及 MPC 对 HST 马达输出转速的影响, 相应的仿真结果如图 4. 从图 4 可以看出, 3 种控制方法均能在 0.69 s 左右使马达转速稳定在设定值: 传统 PID 控制的响应速度最快, 但超调量也最大, 为 11.92%; 模糊控制的响应速度次之, 超调量为 7.42%; 模型预测控制(MPC)的响应速度虽相对较慢, 但其超调量最小, 为 1.42%, 且振荡周期最短. 仿真结果表明, 与传统 PID 控制和模糊控制结果相比, MPC 的响应虽相对较慢但无多余扰动, 可极大增强系统的安全性, 具有潜在优势.

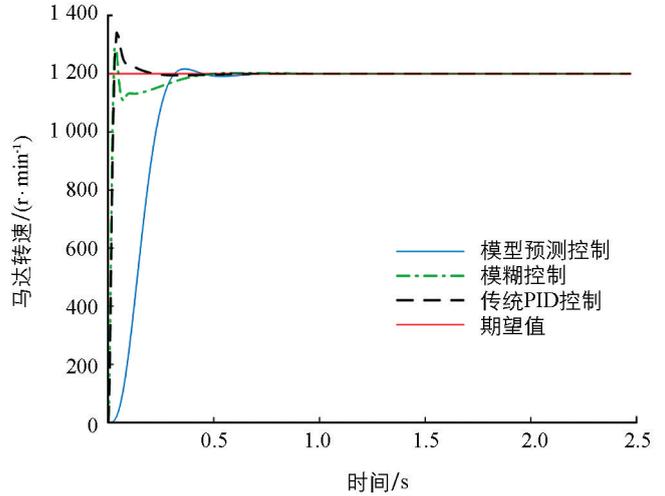


图 4 3 种控制方法的 HST 马达输出转速曲线

3.2 静液压传动实验平台

为验证模型预测控制策略对 HST 转速控制效果及其可行性, 本文搭建了静液压传动实验平台(图 5). 该平台使用 STM32F407ZGT6 作为控制系统的主控芯片, 动力装置选用可变频的三相异步电动机, 传动装置选用贵州中航力源液压股份有限公司生产的 LY-HPVMF-23-L-02C 型静液压变速器, 反馈装置和控制装置则通过霍尔式转速传感器、绝对值编码器和步进电机实现, 主要参数如表 1. 基于该静液压传动实验平台, 本文采用仿真和台架实验对比研究了 MPC 对 HST 的转速控制效果, 即空载启动、转速阶跃响应和加减速状态复杂工况下的工作性能.

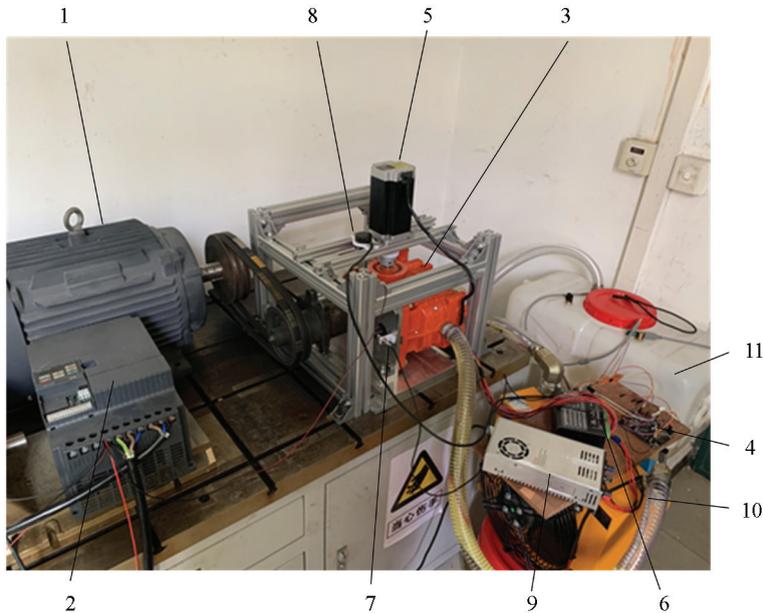
表 1 静液压变速器的主要参数

参数	数值	参数	数值
泵排量 $q_p / (\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$	24	泵的比例系数 $k_p / (\text{m}^3 \cdot \text{r}^{-1} \cdot \text{V}^{-1})$	8×10^{-7}
泵的调控电压 u_p / V	30	总泄漏系数 $C / (\text{m}^5 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1})$	2×10^{-11}
体积弹性系数 β_c / Pa	7×10^8	等效转动惯量 $J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3.1
压力油腔容积 V_0 / m^3	2×10^{-3}	黏性阻尼系数 $B / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1})$	0.37

3.3 实验结果及分析

3.3.1 阶跃响应过程控制

采用仿真和台架实验对比研究了 HST 系统从空载启动到期望转速过程中 MPC 的控制效果. 基于 Matlab 环境建立 HST 的状态空间模型和 MPC 控制系统, 在预测时域 N_p 为 28 和控制时域 N_m 为 12 的最佳超参数下, 系统从空载启动到期望转速为 500 r/min 的过程中, 马达输出转速曲线如图 6.



1. 三相异步电动机; 2. 变频器; 3. HST; 4. 单片机; 5. 步进电机; 6. 步进电机驱动器; 7. 霍尔式转速传感器; 8. 绝对值编码器; 9. 开关电源; 10. 散热器; 11. 油箱。

图 5 静液压传动实验平台

从图 6 的仿真结果曲线可以看出, MPC 能在短时间内使 HST 的马达输出转速迅速提高, 系统的超调量为 2.24% (时间为 0.43 s), 且系统在 1.03 s 时达到稳定状态。调控过程中, 通过滚动优化可以使 HST 的马达输出转速快速增加, 并以较小的转速波动达到稳定状态。与仿真结果相比, 台架实验所得 HST 的马达输出转速增长较为缓慢, 在启动后 1.15 s 时达到 500 r/min 的期望值, 系统超调量为 1.6%; 在 2.11 s 时马达输出转速达到相对稳定状态, 并在期望转速附近波动, 波动范围小于 1.6%。对比分析结果可知, MPC 控制 HST 的台架实验结果和仿真结果一致, MPC 能使马达转速快速平稳地增长, 系统以较小的超调量达到稳定状态, 并能抑制系统稳态时的转速波动, 提高系统的静动态特性。

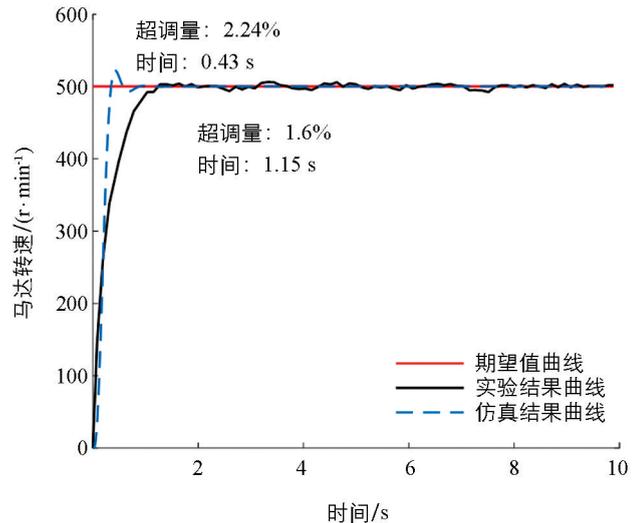


图 6 HST 马达输出转速曲线

3.3.2 转速突变过程控制

为验证 MPC 对 HST 的控制效果, 本文进一步研究了马达转速突变工况下, 基于 MPC 的 HST 对期望转速的跟踪能力。实验中设置电动机以 1 200 r/min 的转速恒定输出, HST 启动时的期望转速为 300 r/min, 在 HST 工作 8 s 后使期望转速突增为 500 r/min。图 7 为期望转速增加下的 HST 马达输出转速曲线。

从图 7 的仿真结果曲线可以看出, MPC 具有良好的控制性能, 启动时超调量为 4.4% (时间为 0.51 s), 马达转速在 1.17 s 达到稳定状态, 使系统在转速稳定阶段有较好的静态特性; 期望转速突增后, 控制系统亦具有较好的动态特性, 即变换过程迅速且无明显波动, 在 9.13 s 使系统重新达到新的稳定状态。相比仿真结果, 台架实验中马达输出转速于 1.91 s 在 300 r/min 的期望转速附近周期性波动, 系统超调量为 5.37%; 而在转速突增阶段, HST 的马达转速在 1.64 s 内即可平稳快速地达到期望值 500 r/min, 超调量降低为 1.42%。从图 7 还可以看出, 实验结果曲线在低转速阶段比高转速

阶段的马达输出转速波动大,其原因在于 HST 在较低转速下工作时,对应的变量泵的斜盘只有很小的调节范围,与较高的工作转速相比,步进电机在相同的步距角下调节斜盘所产生的转速变化更大.

由图 8 中的仿真结果曲线可知, HST 在 1.15 s 内使马达输出转速从零达到期望值 600 r/min 并稳定;当期望转速突降为 400 r/min 时,马达输出转速亦能在调整后的 1.13 s 内快速达到设定值并进入新的稳定状态.在台架实验中, HST 无论在启动还是减速阶段, MPC 都能使 HST 快速做出响应,减小系统的超调量,使马达转速平稳迅速地达到设定值.在系统的稳定工作阶段, MPC 亦能有效抑制马达转速波动,提高系统的静态特性.

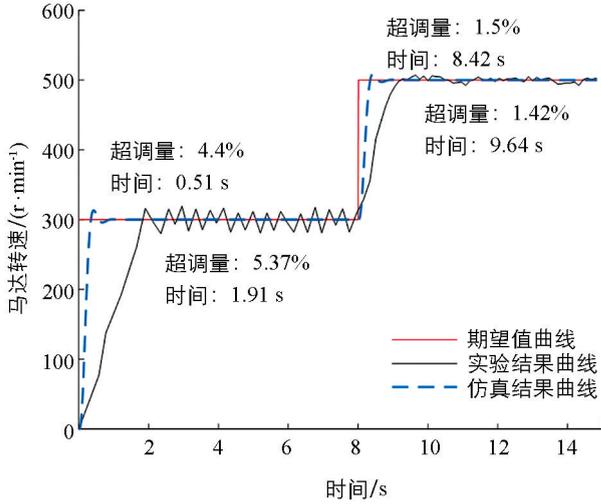


图 7 期望转速增加下的 HST 马达输出转速曲线

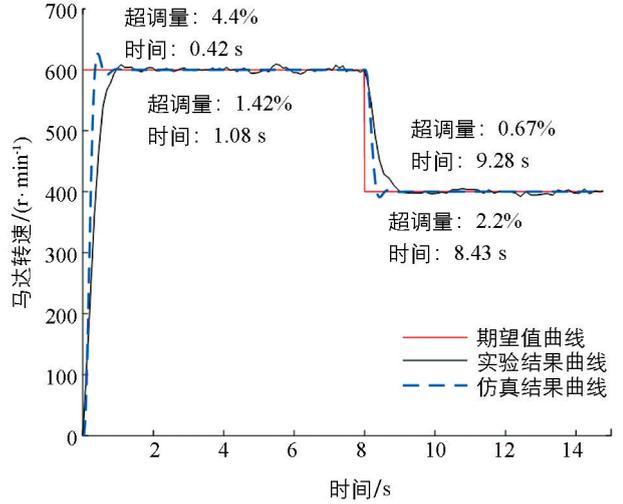


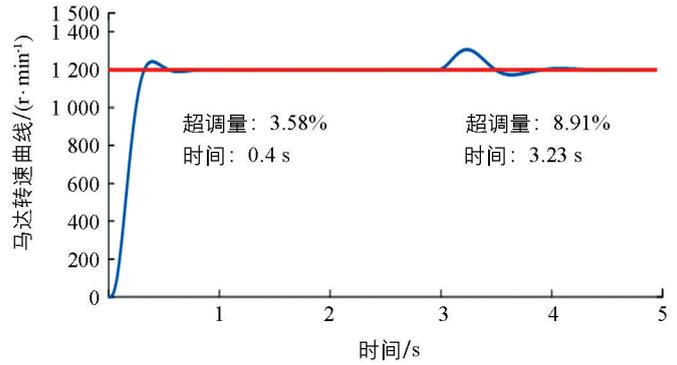
图 8 期望转速减小下的 HST 马达输出转速曲线

以上研究结果表明,在阶跃响应和加减速工况下,实验结果与仿真结果一致,表明 MPC 可对 HST 转速进行有效控制,其不但能提高系统的静动态特性,使系统具有良好的自适应能力,还能抑制调控过程中产生的转速波动,增强系统的鲁棒性.

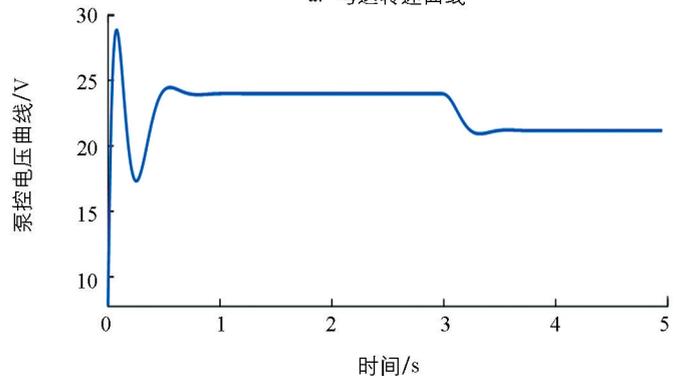
3.4 复杂工况下的仿真结果及分析

基于以上的对比验证,本文进一步研究了复杂工况下 MPC 对 HST 输出转速的控制性能,即变化的输入功率、多变的期望转速和突变的外部负载.当遇到大负载时,即 HST 的输入功率增大的工况下,研究 MPC 对 HST 马达输出转速稳定性的影响. HST 以 1 500 r/min 的输入转速启动,相应的转速突变仿真结果如图 9.

从图 9 中可以看出,系统能在 1 200 r/min 的期望转速下稳定工作.在 3 s 时,输入转速增加到 1 700 r/min,系统仍然能在 1 200 r/min 的期望转速下运行.由式(5)可知,随着输入转速(与输入功率成正比)的增大,相同泵排



a. 马达转速曲线



b. 泵控电压曲线

图 9 泵输入转速突变条件下的仿真图

量下的马达转速也随之增大. 为维持不变的马达转速, 控制器应减小泵的排量, 以满足在负载突变的情况下转速恒定的要求. 研究表明, MPC 控制器在 HST 的输入功率增大时, 能在短时间内以较小的转速波动使马达转速稳定不变, 降低对输出转速造成的影响.

为验证系统的抗干扰能力, 将外部负载作为干扰加入到系统中. 考虑到实际工作中的外部负载是通过车轮传递给 HST 输出轴, 会受到车轮和 HST 输出轴的轴径影响^[33]. 本文引入负载 T_l 与等效转动惯量 J 综合描述外部负载, 作为系统的干扰项 $d = T_l/J$. 图 10 是在等效转动惯量分别为 3.1, 5.1, 8.1, 11.1 kg/m² 时马达输出转速曲线, 不同干扰下的系统性能指标见表 2. 从图 10 可以看出, 等效转动惯量对系统的响应速度、超调量、稳定时间都有一定的影响, 且等效转动惯量越大, 控制系统的静态性能越差. 由式(4)可知, HST 的等效转动惯量越大, 其输出轴的转动力矩也就越大, 马达进出口的压差变大, 相同转速下所需泵的排量也就增大, 因此, 控制马达加速的时间变长. 在系统稳定工作 3 s 后, 将 HST 的外部负载由 0 增加为 50 N·m, 此时, 等效转动惯量越大的马达转速波动反而越小. 出现该现象的原因在于相同的负载条件下, 转动惯量越大, 干扰越小, 对系统造成的影响也就越小. 该数值结果与理论分析一致, 表明当系统遇到干扰时, MPC 仍能使马达转速较好地跟踪设定值, 快速达到稳定, 使系统具有良好的鲁棒性.

表 2 不同干扰下的系统性能指标

等效转动惯量/(kg·m ⁻²)	3.1	5.1	8.1	11.1
超调量/%	3.5	5.2	4.7	3.1
达到稳定的时间/s	0.81	1.05	1.31	1.52
负载突变下的最大转速误差/(r·min ⁻¹)	35	27	21	18

在 HST 工作的 5 s 内, 设置马达的期望转速以 200 r/min 的步长, 由零逐步增加到 1 000 r/min, 研究得到 HST 的马达输出转速追踪曲线(图 11). 由图 11 可知, 无论在低转速还是高转速下, MPC 都能使 HST 的马达输出转速平稳地跟随期望值, 并在 1 s 内完成调控过程, 使系统达到稳定状态. 研究表明, 对于变化频繁的工作转速要求, MPC 能快速调节变量泵的排量, 使 HST 以较小超调量完成转速变化过程.

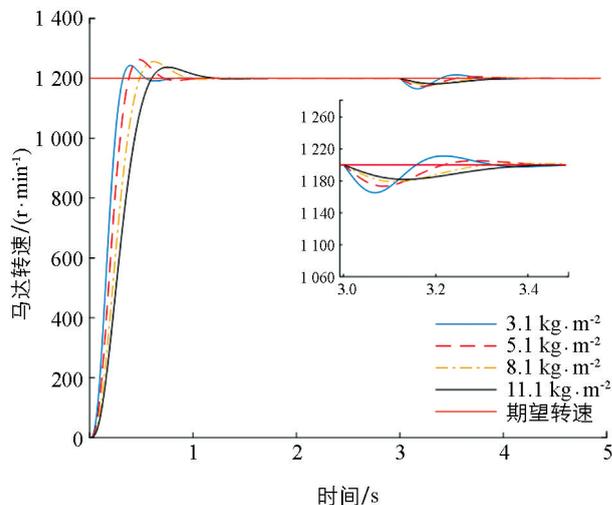


图 10 不同干扰下马达输出转速曲线

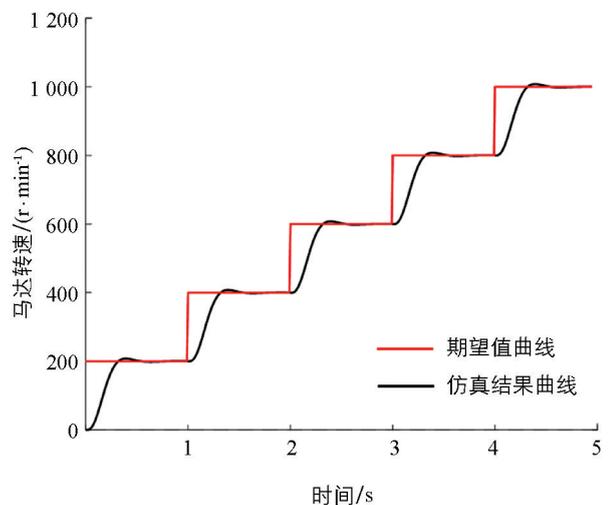


图 11 马达转速追踪曲线

4 结论

本文引入模型预测控制(MPC)算法对 HST 的转速控制进行仿真和实验研究. 首先基于扩展后的状态

空间方程建立了 HST 的数学模型, 并采用粒子群优化算法(PSO)对 MPC 中的预测时域和控制时域进行参数寻优, 得到综合性能指标最佳的 MPC 控制器模型; 然后结合仿真和台架实验验证 MPC 对 HST 控制的有效性; 最后研究了复杂工况下 MPC 对 HST 的控制性能. 主要研究结果如下:

1) 采用仿真与台架实验研究得到的 MPC 对 HST 转速控制效果一致. 结果表明, 在不同阶跃转速下启动时, MPC 控制的 HST 都能以较小的超调量快速地达到期望转速, 并以较小的转速波动进入稳定状态; 针对马达输出转速突变的工况, MPC 能快速响应, 调控过程准确且迅速, 使 HST 能在短时间内重新进入新的稳定状态.

2) 复杂工况下的仿真研究结果表明, MPC 能在原动机的输入功率变化时保持 HST 的输出转速恒定不变; 能在负载突变时稳定 HST 的输出转速, 抑制因负载变化而产生的转速波动, 增强系统的鲁棒性; MPC 能在不同的期望转速下使 HST 的马达输出转速平稳地跟随期望值, 使系统具有良好的静动态特性.

参考文献:

- [1] 朱镇. 液压机械无级变速器性能优化研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [2] 田晋跃, 于英. 车辆静液压传动特性研究 [J]. 农业机械学报, 2002, 33(4): 32-34.
- [3] 左德龙. 静液压传动控制系统的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [4] 李和言, 陈宝瑞, 马彪, 等. 高速履带车辆静液传动模糊自适应 PID 同步控制 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 16-19, 45.
- [5] 陈宝瑞, 马彪, 李和言, 等. 高速履带车辆静液传动改进模糊控制 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 18-21.
- [6] 王岩, 付永领, 牛建军. 变量泵-变量马达自适应控制算法研究 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1173-1175, 1179.
- [7] 王岩. 变量泵控制变量马达系统建模及控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(1): 41-46.
- [8] 杨磊, 马彪, 李和言, 等. 液压驱动装甲履带车辆转向特性仿真研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31(6): 663-668.
- [9] 杨磊, 马彪, 李和言. 高速履带车辆静液驱动转向控制策略 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 14-19.
- [10] 钱积新, 赵均, 徐祖华. 预测控制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [11] 王晓海, 孟秀云, 李传旭. 基于 MPC 的无人机航迹跟踪控制器设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 191-198.
- [12] 赵熙临, 殷丽娟. 基于状态扩展的双反馈模型预测控制技术的研究 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(3): 591-597.
- [13] HUANG Y J, WANG H, KHAJEPOUR A, et al. A Novel Local Motion Planning Framework for Autonomous Vehicles based on Resistance Network and Model Predictive Control [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 55-66.
- [14] NAM H, CHOI W, AHN C. Model Predictive Control for Evasive Steering of an Autonomous Vehicle [J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(5): 1033-1042.
- [15] 梁天骄, 陈晓明, 杨朝旭, 等. 舰载无人机滑行轨迹控制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(2): 289-296.
- [16] 白国星, 刘丽, 孟宇, 等. 基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(09): 47-52, 60.
- [17] 赵树恩, 冷姚, 邵毅明. 车辆多目标自适应巡航显式模型预测控制 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 206-216.
- [18] 韩玲, 刘鸿祥, 曹越, 等. 基于模型预测控制的无级变速起步优化控制策略 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(15): 1765-1771.
- [19] 康铭鑫, 李长平, 刘腾飞. 基于观测器的发动机转矩跟踪模型预测控制 [J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 791-798.
- [20] 汪勇, 张海波, 杜紫岩, 等. 一种变旋翼转速直升机/涡轴发动机非线性模型预测控制方法研究 [J]. 推进技术, 2019, 40(10): 2334-2342.
- [21] DANG N D, ASCHEMANN H. Application Study of Newton-Raphson-Type Nonlinear MPC for Hydrostatic Transmissions Under Disturbance and System Uncertainty [J]. System Theory, Control and Computing Journal, 2021, 1(1):

21-29.

- [22] 张万枝, 白文静, 吕钊钦, 等. 线性时变模型预测控制器提高农业车辆导航路径自动跟踪精度 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 104-111.
- [23] 张亮修, 吴光强, 郭晓晓. 自主车辆线性时变模型预测路径跟踪控制 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1595-1603.
- [24] 徐广飞, 陈美舟, 苗河泉, 等. 基于模型预测控制的农机主从跟随作业控制方法 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 11-20.
- [25] 夏光, 夏岩, 唐希雯, 等. 采用滑转率-阻力区间划分法的拖拉机双传动系统调速控制 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 47-55.
- [26] 何潜, 何攻, 陈力, 等. 并网逆变器三矢量模型预测直接功率控制 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 192-202.
- [27] WANG W, HENRIKSEN R. Generalized Predictive Control of Nonlinear Systems of the Hammerstein form [J]. Modeling, Identification and Control, 1994, 15(4): 253.
- [28] SZNAIER M. Computational Complexity Analysis of Set Membership Identification of Hammerstein and Wiener Systems [J]. Automatica, 2009, 45(3): 701-705.
- [29] ŁAWRYŃCZUK M. Nonlinear Predictive Control for Hammerstein-wiener Systems [J]. ISA Transactions, 2015, 55: 49-62.
- [30] ZHENG Q, WANG Y, SUN F, et al. Aero-engine Direct Thrust Control with Nonlinear Model Predictive Control based on Linearized Deep Neural Network Predictor [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2020, 234(3): 330-337.
- [31] WU Z, RINCON D, CHRISTOFIDES P D, et al. Process Structure-based Recurrent Neural Network Modeling for Model Predictive Control of Nonlinear Processes [J]. Journal of Process Control, 2020, 89: 74-84.
- [32] PATAN K. Two Stage Neural Network Modelling for Robust Model Predictive Control [J]. ISA Transactions, 2018, 72: 56-65.
- [33] 高有山, 权龙, 黄家海, 等. 轴向柱塞液压马达机械液压耦合仿真分析 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 395-400, 394.

责任编辑 周仁惠