

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407959

基于 NRBO 算法优化的模糊 PID 轴承预紧力控制^{*}

李学军¹ 黎耀强¹ 蒋玲莉¹ 李家皇¹ 张 茜²

(1. 佛山大学机电工程与自动化学院 佛山 528000; 2. 瓦房店轴承集团有限责任公司 大连 116399)

摘 要:合适的预紧力可以使轴承系统达到减少系统振动和噪音、提高轴承刚度的目的,为满足轴承预紧力控制的需要,提出了基于牛顿-拉夫森优化算法(NRBO)优化模糊 PID 的预紧力控制策略。首先,确定轴承预紧力液压加载的方式以及建立传递函数;其次,结合 AMESim/Smilink 的联合仿真模型,并与常规 PID、模糊 PID、粒子群算法(PSO)优化模糊 PID 进行了仿真对比;最后,开展了试验验证。仿真结果表明,NRBO 算法优化模糊 PID 对比常规 PID、模糊 PID 和 PSO 算法优化模糊 PID 超调量分别减少 42.93%、27.78%、13.91%,调节时间分别减少了 3.2、3.1、1.6 s。试验结果表明,轻载、中载、重载的径向力作用下,NRBO 优化模糊 PID 控制器相比于常规 PID 控制器,调节时间分别减少 5.3、10.4、4.5 s,超调量分别减少 43.78%、52.52%、72.36%;相比于模糊 PID 控制器调节时间分别减少 2.7、5.2、2.6 s,超调量分别减少 29.62%、46.24%、59.52%;相比 PSO 算法优化模糊 PID 控制器调节时间分别减少 1.7、3.2、2.3 s,超调量分别减少 17.38%、30.02%、55.42%。表明了 NRBO 优化模糊 PID 控制器拥有更快、更精确的控制效果,能够很好的实现预紧力的精确施加。

关键词: 轴承预紧力;NRBO 算法;模糊 PID;预紧力控制

中图分类号: TN06;TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Bearing preload control based on fuzzy PID controller optimized by NRBO algorithm

Li Xunjun¹ Li Yaoqiang¹ Jiang Linli¹ Li Jiahuang¹ Zhang Xi²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Wafangdian Bearing Group Corp., Ltd., Dalian 116399, China)

Abstract: Appropriate preload can make the bearing system achieve the purpose of reducing system vibration and noise and improving bearing stiffness. In order to meet the needs of bearing preload control, a preload control strategy based on NRBO algorithm to optimize fuzzy PID is proposed. Firstly, the hydraulic loading method of bearing preload is determined and the transfer function is established. Secondly, combined with the co-simulation model of AMESim/Smilink, and compared with conventional PID, fuzzy PID, PSO optimized fuzzy PID. Finally, the experimental verification is carried out. The simulation results show that the overshoot of fuzzy PID optimized by NRBO algorithm is reduced by 42.93%, 27.78% and 13.91% respectively compared with conventional PID, fuzzy PID and PSO algorithm, and the adjustment time is reduced by 3, 2.3 and 1.6 s respectively. The test results show that under the radial force of light load, medium load and heavy load, compared with the conventional PID controller, the NRBO optimized fuzzy PID controller reduces the adjustment time by 5.3, 10.4 and 4.5 s respectively, and the overshoot is reduced by 43.78%, 52.52% and 72.36% respectively. Compared with the fuzzy PID controller, the adjustment time is reduced by 2.7, 5.2 and 2.6 s respectively, and the overshoot is reduced by 29.62%, 46.24% and 59.52% respectively. Compared with the PSO algorithm to optimize the fuzzy PID controller, the adjustment time is reduced by 1.7, 3.2, 2.3 s, and the overshoot is reduced by 17.38%, 30.02%, and 55.42%, respectively. It shows that the NRBO optimized fuzzy PID controller has faster and more accurate control effect, and can achieve accurate application of preload.

Keywords: bearing preload; NRBO algorithm; fuzzy PID; pre-tightening force control

收稿日期:2024-11-15 Received Date: 2024-11-15

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(52275094)、广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金重点项目(2024B1515120033)、广东省普通高校创新团队项目(2023KCXTD031)资助

0 引 言

预紧力是指滚动轴承在安装过程中施加一定的轴向力,使轴承滚动体与滚道紧密接触产生预变形。合适的预紧力可以使轴承系统达到减少系统振动和噪音、提高轴承刚度的目的^[1];但随着系统温度的升高,轴承发热膨胀导致初始预紧力急剧增大,从而导致轴承系统旋转精度降低、轴承寿命缩短^[2]。因此,轴承预紧力的主动控制和精准控制是轴承达到最优服役性能的关键之一。为此国内外学者对轴承预紧力主动控制技术开展了大量的研究,李颂华等^[3]基于压电陶瓷提出了一种具有适配性强、响应快、分辨率高等优点的主轴预紧力智能调控组件。Ciou 等^[4]研制压电执行器和斜面垫圈的主轴预紧控制机构,控制轴承预紧力。Hu 等^[5]设计了一种基于双比例积分 (PI) 控制压电陶瓷的预紧机构,控制主轴轴承系统预紧力。

总的来说,现有的轴承预紧力主动预紧方式一般采用机械、液压、电动 3 种方式;其中液压加载具有高精度、响应速度快、高功率等特点被广泛应用;但也存在一定的不足,例如泄露、死区、大小载荷无法同时精确加载等问题^[6]。针对以轴承预紧力液压加载方式,诸多学者开展了相关研究,杨芳等^[7]提出设计了一种复合轴向力加载装置,并设计状态扩张器与非线性 PID 控制器结合的控制策略。张行^[8]设计了一种基于随机配置网络 (stochastic configuration networks, SCN)-扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 的核主泵油润滑轴承试验台液压加载系统的反步滑模控制器,该控制方法精度更高,鲁棒性更强。Fan 等^[9]提出一种基于液压轴承试验台架设计,开发了一种带有模糊逻辑可选软开关的 PI 控制器,具有较快的响应和收敛速度。目前,液压系统控制方法有很多,由于 PID 控制具有方便、简单等特点,仍在被广泛使用。但液压系统具有非线性、易受干扰等特点,传统的 PID 控制在某些应用场合并不能满足控制的需求。模糊 PID 控制器结合了模糊逻辑和常规 PID 控制器的优点,具有较好的鲁棒性,并不需要精确的数学模型;对复杂的控制系统具有良好的控制能力,但是其模糊控制规则对结果有较大影响,依靠经验很难获的最优结果。目前,许多学者通过优化算法对模糊 PID 控制器进一步优化以提升其控制效果。王刚锋等^[10]通过改进粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 对量化因子和比例因子进行优化,结果显示该方法使管廊吊具系统运行稳定,响应速度更快。阳鑫等^[11]提出了一种改进的粒子群优化模糊 PID 算法,有效解决了模糊 PID 控制过度依赖专家经验、缺少动态性能的缺点。杨洪涛等^[12]提出了一种基于蜣螂算法 (dung beetle optimizer, DBO) 优

化模糊 PID 量化因子与比例因子的高低温试验箱温控方法,结果表明该方法明显减少系统调节时间、超调量,有更好的控制效果。Fu 等^[13]通过流浪狮群算法 (stray lion swarm optimization, SLSO) 优化模糊 PID 的模糊规则以及隶属度函数,该方法能有效抑制桥式起重机运行过程中的负载摆动问题。这些优化算法各有优劣,但往往存在收敛速度与精度相互冲突,尤其在复杂优化问题中难以平衡全局探索与局部开发。

牛 顿-拉 夫 森 优 化 算 法 (newton-raphson-based optimizer, NBRO) 2024 年被提出^[14],其收敛速度、收敛精度以及全局能力均表现出优越性能。论文针对轴承预紧力控制问题,为提高轴承预紧力的控制效果,本文结合液压加载方式,通过提出一种基于 NRBO 算法优化模糊 PID 量化因子与比例因子的方法。其算法的迭代收敛性能及全局寻优能力较快较好,用于优化模糊 PID 控制器的比例因子与量化因子,得到较好的控制效果。首先,确定轴承预紧力液压加载的方式以及建立传递函数;其次,结合 AMESim 与 Smilink 建立仿真模型,并与常规 PID、PSO 优化模糊 PID 进行对比仿真;最后,进行试验验证。结果显示,NRBO 优化模糊 PID 的控制策略,进一步提高了基于液压加载下轴承预紧力加载系统的稳定性。

1 预紧力液压加载系统设计与数学建模

1.1 预紧力加载系统设计

预紧力加载原理如图 1 所示。叶片泵输出的压力油经单向阀、滤油器,通过溢流阀按工作需要调整压力后进入比例减压阀,比例减压阀接受到控制系统的指令作用下连续输出油压,推动油缸向试验轴承施加预紧力;然后压力传感器向控制系统传电信号,控制系统经过处理,重新输出电信号,形成闭环控制。

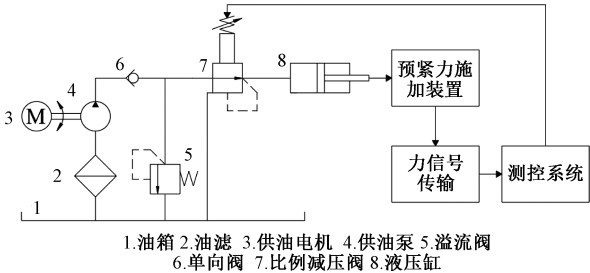


图 1 预紧力加载系统原理

Fig. 1 Principle of preload loading system

1.2 比例减压阀传递函数建立

比例减压阀的受控制器输入 u 的影响,产生相应的压力 p 输出,使比例减压阀的阀芯产生相应的位移,表示为一阶线性微分方程:

$$\tau_v \dot{x}_v + x_v = K_1 u \quad (1)$$

式中: τ_v 为比例减压阀的时间常数; K_1 为比例减压阀的增益。式(1)作拉式变换,可得:

$$\frac{X_v(s)}{U(s)} = \frac{K_1}{\tau_v s + 1} \quad (2)$$

1.3 液压缸传递函数建立

液压缸由缸体、柱塞(活塞)、密封件等组成,主要通过液压油或压缩空气驱动柱塞(活塞)在缸体内做直线往复运动,从而实现机械部件的力的传递^[15]。

在该系统中,比例减压阀的线性化流量方程为:

$$q_L = K_q x_v - K_c p_L \quad (3)$$

式中: K_q 为滑阀的流量系数; K_c 滑阀的流量压力系数; x_v 为阀芯位移。

非对称缸的流量连续方程为:

$$q_L = A_{p1} \frac{d^2 x_p}{dt^2} + C_{vp} p_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \cdot \frac{dp_L}{dt} \quad (4)$$

式中: A_{p1} 为液压缸的无杆腔面积; x_p 为液压缸的位移; C_{vp} 为液压缸总泄漏系数; V_t 为总压缩体积; β_e 为有效体积弹性模量; p_L 为负载压力。

假定负载仅为质量、弹性力以及阻尼,液压缸与负载的力平衡方程为:

$$F = A_{p1} p_L = m_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + K x_p \quad (5)$$

式中: m_t 为负载总质量; B_p 为系统的粘性阻尼系数; K 为负载刚度; F 为液压缸输出力。

联立式(3)~(5)并简化得液压缸的传递函数为:

$$\frac{F(s)}{X_v(s)} = \frac{\frac{A_{p1} K_q}{K_{ce}} \left(\frac{s^2}{\omega_m^2} + 1 \right)}{\left(\frac{s}{\omega_r} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi_0}{\omega_0} s + 1 \right)} \quad (6)$$

式中: ω_m 为负载的固有频率, $\omega_m = \sqrt{\frac{K}{m_t}}$; ω_r 为惯性环节

转折频率, $\omega_r = \frac{K_{ce}}{A_{p1}^2} \left(\frac{1}{K_h} + \frac{1}{K} \right)^{-1}$; ω_0 为系统弹簧耦合刚度

与负载质量形成固有频率, $\omega_0 = \omega_m \sqrt{1 + \frac{K_h}{K}}$; ξ_0 为阻尼

比, $\xi_0 = \frac{1}{\omega_0} \frac{4\beta_e K_{ce}}{V_t [1 + K/K_h]}$; K_{ce} 为泄漏的总流量压力系

数, $K_{ce} = C_{vp} + K_c$; K_h 为液压弹簧刚度, $K_h = \frac{4\beta_e A_{p1}^2}{V_t K}$ 。

1.4 力传感器传递函数

在系统中,力传感器的传递函数简化为比例环节:

$$K_f = \frac{U_f(s)}{F(s)} \quad (7)$$

式中: $U_f(s)$ 为传感器的输出电压; K_f 为压力反馈系数。

通过式(2)、(6)和(7),可构建预紧力控制系统如图2所示。

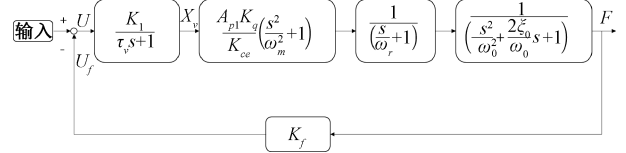


图2 预紧力闭环控制系统传递函数框图

Fig. 2 Transfer function block diagram of pre-tightening force closed-loop control system

2 基于 NRBO 优化模糊 PID 控制器设计

2.1 模糊 PID 控制器

模糊 PID 控制器是将常规 PID 控制与模糊逻辑控制的优点,利用模糊推理来调整 PID 控制器的参数,从而实现更有效的控制^[16]。模糊 PID 控制器的工作原理,以误差 E 以及误差变化率 Ec 作为输入,通过量化、模糊化、模糊规则推理与决策、解模糊以及比例因子作用的过程,输出 PID 控制器的 3 个参数的修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,从而优化控制效果。模糊整定 PID 原理如下^[17]:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为 PID 控制器传统整定的初始值。

建立模糊控制规则表的基本原则是当误差大或较大时,选取控制量以尽快消除误差为主;而当误差较小时,选取控制量要注意防止超调,以系统的稳定性为主要出发点。 E 和 Ec 的模糊集合为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 论域为 $[6, -6]$, K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊集合为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 论域为 $[3, -3]$, 综合考虑系统的动态响应要求,结合文献[18-19]制定模糊规则控制表,如表1所示。

2.2 NBRO 算法优化模糊 PID 参数

NRBO 由 Sowmya 等发表,通过使用向量集定义解空间,采用牛顿-拉夫森搜索规则 (newton-raphson search rule, NRSR) 以及陷阱避免算子 (trap avoidance operator, TAO) 来搜索解空间。

1) 种群初始化

初始化种群的生成规则如下:

$$x_j^n = lb + rand \times (ub - lb) \quad (9)$$

式中: x_j 表示第 n 个总体的第 j 个维度的位置, $lb \leq x_j \leq ub$; lb 、 ub 分别表示上界和下界; $rand$ 表示 $(0, 1)$ 之间的随机数。

表 1 模糊规则控制表
Table 1 Fuzzy rule control table

E_c		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E								
NB		PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM		PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS		PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO		PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS		PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM		PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB		ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

所有维度种群的矩阵为:

$$X_n = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_{dim}^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_{dim}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{N_p} & x_2^{N_p} & \cdots & x_{dim}^{N_p} \end{bmatrix}_{N_p \times dim} \tag{10}$$

2) 牛顿-拉夫森搜索规则 (Newton-Raphson search rule, NRSR)

NRSR 是整个算法的核心,是基于牛顿法 (NRM) 的概念提出的,促进勘探趋势并加快收敛速度。在搜索过程中, NRSR 的计算公式为:

$$NRSR = randn \times \frac{(y_w - y_b) \times \Delta x}{2 \times (y_w + y_b - 2 \times x_n)} \tag{11}$$

式中: $randn$ 为均值为 0、方差为 1 的正态分布随机数; x_n 为当前位置; Δx 为扰动量; y_w 和 y_b 为使用 Z_{n+1} 和 x_n 生成的两个矢量位置。

其中, y_w 、 y_b 、 Z_{n+1} 分别表示为:

$$y_w = r_1 \times (Mean(Z_{n+1} + x_n) + r_1 \times \Delta x) \tag{12}$$

$$y_b = r_1 \times (Mean(Z_{n+1} + x_n) + r_1 \times \Delta x) \tag{13}$$

式中: r_1 为 (0,1) 之间的随机数。

$$Z_{n+1} = x_n - \frac{(X_w - X_b) \times \Delta x}{2 \times (X_w + X_b - 2 \times x_n)} \tag{14}$$

式中: X_w 和 X_b 分别表示最差位置和最佳位置。

当前位置的矢量更新为:

$$X_n^{IT} = x_n^{IT} - randn \times \frac{(y_w - y_b) \times \Delta x}{2 \times (y_w + y_b - 2 \times x_n)} + (a \times (X_b - X_n^{IT}) + b \times (X_1^{IT} - X_2^{IT})) \tag{15}$$

式中: IT 为迭代次数; r_1 和 r_2 为是从总体中随机选择的不同整数且并不相等; a 和 b 为 (0,1) 之间的随机数。

通过最佳位置矢量 X_b 代替当前位置矢量构造新矢量:

$$X2_n^{IT} = X_b - randn \times \frac{(y_w - y_b) \times \Delta x}{2 \times (y_w + y_b - 2 \times x_n)} + (a \times (X_b - X_n^{IT}) + b \times (X_1^{IT} - X_2^{IT})) \tag{16}$$

在搜寻过程中,算法通过式 (17) 更新位置。

$$X_n^{IT+1} = r_2 \times (r_2 \times X1_n^{IT} + (1 - r_2) \times X2_n^{IT}) + (1 - r_2) \times X3_n^{IT} \tag{17}$$

$$X3_n^{IT} = X_n^{IT} - \delta \times (X2_n^{IT} - X1_n^{IT}) \tag{18}$$

式中: r_2 为 (0,1) 之间的随机数; δ 为自适应系数。

3) 陷阱避免算子 (TAO)

TAO 是 ahmadanfar 等^[20]改进和增强的优化方式,通过用 TAO 可以显著改变的 X_n^{IT+1} 位置。通过结合最佳位置 X_b 和当前矢量位置 X_n^{IT} ,它产生了一个具有增强质量 X_{TAO}^{IT} 的解决方案,如果 $rand$ 的值小于 DF,则使用如式 (19)~(21) 所示公式产生解 X_{TAO}^{IT} ,其中 DF 为控制 NRBO 性能的决定因子。

$$X_{TAO}^{IT} = X_n^{IT+1} + \theta_1 \times (\mu_1 \times x_b - \mu_2 \times X_n^{IT}) + \theta_2 \times \delta \times (\mu_1 \times Mean(X^{IT}) - \mu_2 \times X_n^{IT}), \mu_1 < 0.5 \tag{19}$$

$$X_{TAO}^{IT} = x_b + \theta_1 \times (\mu_1 \times x_b - \mu_2 \times X_n^{IT}) + \theta_2 \times \delta \times (\mu_1 \times Mean(X^{IT}) - \mu_2 \times X_n^{IT}), \text{其他} \tag{20}$$

$$X_n^{IT+1} = X_{TAO}^{IT} \tag{21}$$

式中: θ_1 和 θ_2 分别为 (-1,1) 和 (-0.5,0.5) 之间的均匀随机数; μ_1 和 μ_2 是随机数。

$$\mu_1 = \begin{cases} 3 \times rand, & \Delta < 0.5 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \tag{22}$$

$$\mu_2 = \begin{cases} rand, & \Delta < 0.5 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \tag{23}$$

式中: $rand$ 表示 (0,1) 之间的随机数; Δ 表示 (0,1) 之间的数。

4) NRBO 优化算法优化 PID 具体实现

本文设计的基于 NRBO 优化的模糊 PID 控制器具体原理如图 3 所示,首先利用 NBRO 对模糊控制系统的量化因子和比例因子进行优化,再通过模糊控制器的模糊化和反模糊化对信号进行处理,进一步提高系统的控制能力。图中 K_1 、 K_2 、 K_3 为比例因子, K_e 、 K_{ec} 为量化因子, r 为输入信号, e 为偏差, u 为控制信号, y 为输出信号。

采用 NRBO 优化算法优化 PID 的参数具体流程如下:

步骤 1) 初始化种群。给定种群数量、维度等参数,

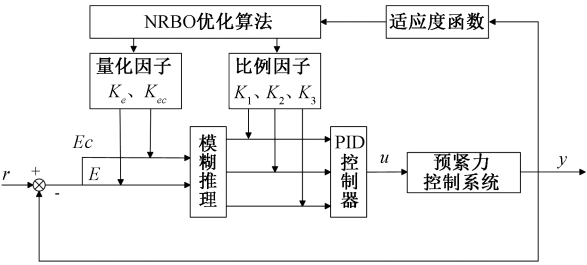


图 3 NRBO 优化模糊 PID 控制器原理
Fig. 3 Principle diagram of NRBO
optimized fuzzy PID controller

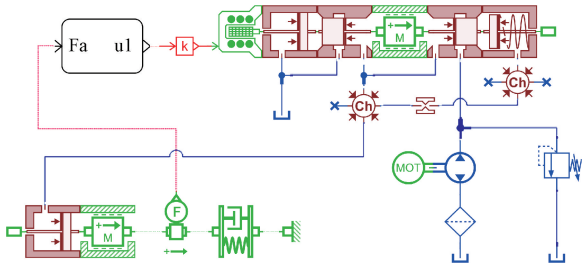


图 4 AMESim 预紧力液压系统
Fig. 4 AMESim preload hydraulic system

确定迭代次数、系统的传递函数、PID 的适应度函数以及 DF 值。

步骤 2) 确定量化因子以及比例因子的最佳位置 X_b 和最差位置 X_w 、确定随机数 r_1 、 r_2 。

步骤 3) 根据式 (11) 确定 NSRS 的值,通过式 (15)、(16) 确定 $X1_n^{IT}$ 、 $X2_n^{IT}$ 的位置,并根据式 (18) 确定 $X3_n^{IT}$,通过式 (17) 更新位置。

步骤 4) 如果当 $rand < DF$ 时,根据式 (19) ~ (21) 更新下一个位置 X_n^{IT+1} ,并更新最佳位置 X_b 和最差位置 X_w ,否则,按照步骤 3) 更新最佳位置 X_b 和最差位置 X_w 。此时最佳位置 X_b 即为当前迭代次数下量化因子与比例因子的最优值,最后若满足最小适应度值或达到最大迭代次数,则输出最佳位置参数(最佳量化因子与比例因子);否则进入步骤 2) 继续更新最佳位置。

3 预紧力闭环回路控制仿真分析

3.1 NRBO 优化模糊 PID 控制器仿真参数设置

为验证 NRBO 优化模糊 PID 参数效果,与常规 PID、模糊 PID 以及 PSO 优化模糊 PID 方法进行比较。

常规 PID 的初始值通过 Simulink 的 PID 模块进行自整定,PID 的初始值 $K_p = 40.15$ 、 $K_i = 19.41$ 、 $K_d = 0.24$;并同时应用到其余 3 个算法的初始值。为了方便比较,优化算法实验中的参数统一设置为种群数量为 50,迭代次数为 30;设定模糊控制器量化因子迭代范围 $K_e \in [0, 50]$ 、 $K_{ec} \in [0, 50]$,设定比例因子迭代范围 $K_p \in [0, 50]$ 、 $K_i \in [0, 50]$ 、 $K_d \in [0, 10]$,适用度函数采用 ITAE(时间乘以绝对误差积分),该方法系统阻尼效果较好,瞬态响应速度也较快,并能有效抑制系统的小偏差。

3.2 仿真模型及参数设置

通过 AMESim 软件,根据上述公式对预紧力液压系统进行了整体建模,如图 4 所示。

根据设计要求,液压系统参数设置如表 2 所示。

表 2 液压系统参数

参数	数值	单位
供油压力	6×10^6	Pa
液压缸直径	225.5×10^{-3}	m
负载质量	800	kg
电机转速	5 000	r/min
液压油密度	872	kg/m^3

对于预紧力液压控制部分,通过设置 Simulink 与 AMESim 连通接口,进行联合仿真计算,搭建 Simulink 模型如图 5 所示,NRBO 模糊控制 PID 结构如图 6 所示。

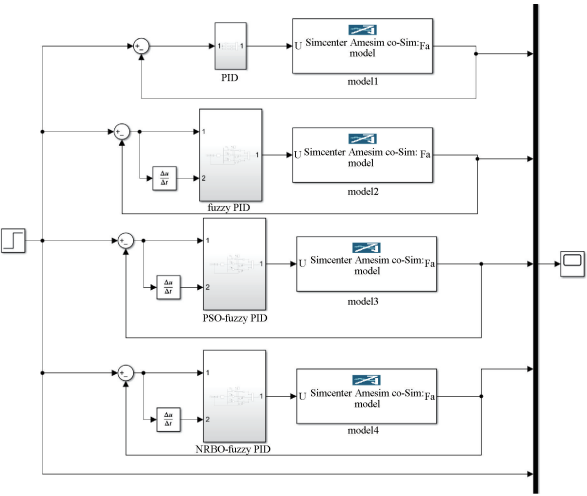


图 5 Simulink 控制模型
Fig. 5 Simulink control model

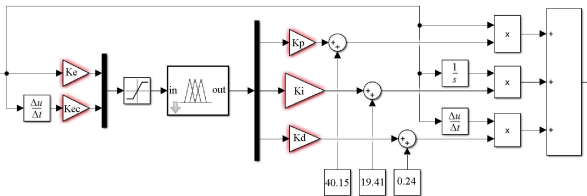


图 6 NRBO 优化模糊 PID 控制器
Fig. 6 NRBO optimized fuzzy PID controller

3.3 结果分析

为 NRBO 算法优化模糊 PID 的效果进行性能测试,对比 PSO 优化模糊 PID 与 NRBO 优化模糊 PID 的迭代结果。如图 7(a) 所示,PSO-模糊 PID 初始适应值较高,较长的迭代过程中逐步优化,适应值呈现出多次下降的阶梯状变化,可能处于局部最优状态;如图 7(b) 所示, NRBO-模糊 PID 则在较少的迭代次数中迅速收敛,表现出更快的优化速度和更低的最终适应值,说明 NRBO 算法在此场景下的优化效果更为高效。

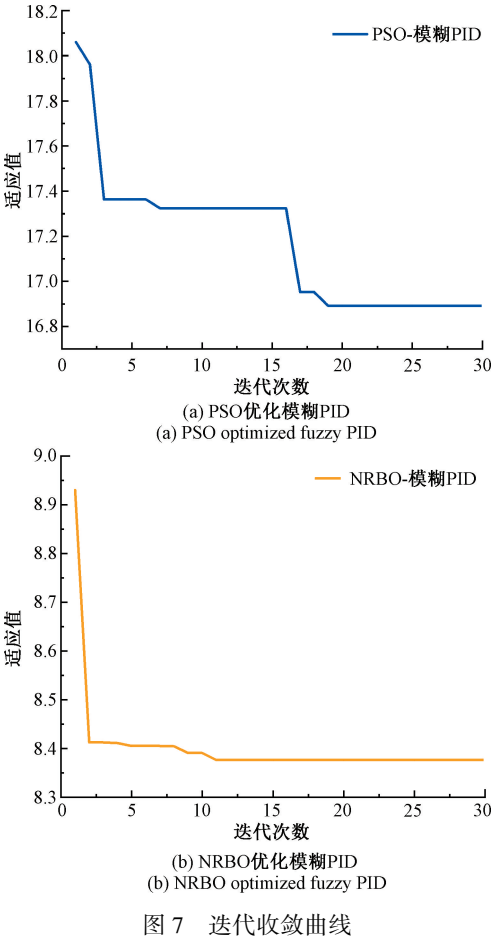


图 7 迭代收敛曲线

输入指令为 10KN 的阶跃信号,常规 PID、模糊 PID、PSO 优化 PID、NRBO 优化 PID 的阶跃响应结果如图 8 所示。分析仿真实验数据曲线,可以的到性能指标如表 3 所示,NRBO 算法优化模糊 PID 对比常规 PID、模糊 PID 和 PSO 算法优化模糊 PID 超调量分别减少 42.93%、27.78%、13.91%,调节时间分别减少了 3、2.3、1.6 s。综上所述,NRBO 优化模糊 PID 控制器相对于其余 3 种控制方式在稳定性和响应特性上都表现较优。

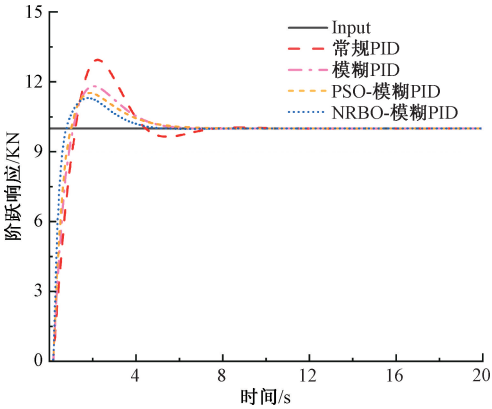


图 8 阶跃响应
Fig. 8 Step response

表 3 算法仿真性能指标

Table 3 Preload hydraulic control system index		
控制方法	超调量/%	调节时间/s
常规 PID	22.78	11.2
模糊 PID	18	10.5
PSO 算法优化模糊 PID	15.1	9.8
NRBO 算法优化模糊 PID	13	8.2

4 试验

试验台主体结构如图 9 所示,试验台的尺寸为 1 600 cm×1 100 cm×1 600 cm。试验台的结构由动力系统、润滑系统、电器控制系统、加载系统等结构组成。轴承试验台具备多项工况监测功能,包括温度检测、轴承内外圈位移监测、预紧力监测、径向力监测和振动监测等。按照设计要求,监测界面能够实时显示温度、压力、振动、位移等信息。

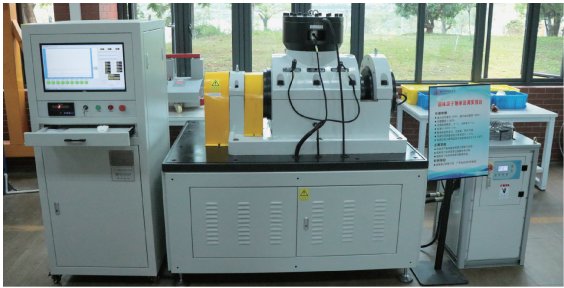


图 9 滚动轴承装调试验台

Fig. 9 Rolling bearing assembly and adjustment test bench

将 NRBO 算法优化的模糊 PID 应用到滚动轴承装调试验台施加轴承预紧力进行试验;试验对象是圆锥滚子轴承,考虑轴承在轻载、中载、重载下的预紧力控制效果;

根据试验轴承取轻载、中载、重载分别为 20、40、80 kN,对应的预紧力值分别为 6、12、24 kN,轴承转速为 200 r/min。

常规 PID、模糊 PID、PSO 优化模糊 PID 和 NRBO 优化模糊 PID 4 种控制方式轻载下预紧力加载结果如图 10(a) 所示,对应的超调量和调节时间分别为 56.33%、45%、38.33%、31.67% 和 19.1、16.5、15.5、13.8 s;中载下预紧力加载结果如图 10(b) 所示,对应的超调量调节时间分别为 44.25%、39.08%、30.12%、21.01%和 18.7、13.5、11.5、8.3 s;重载下预紧力加载结果如图 10(c) 所示,对应的超调量调节时间分别为 15.45%、10.55%、9.58%、4.27%和 7.5、7.1、6.8、4.5 s,具体结果如表 4 所示。在轻载、中载和重载 3 个工况下,NRBO 优化模糊 PID 控制器相比于常规 PID 控制器控制轴承预紧力调节时间分别减少 5.3、10.4、4.5 s,超调量分别减少 43.78%、52.52%、72.36%;相比于模糊 PID 控制器调节时间分别减少 2.7、5.2、2.6 s,超调量分别减少 29.62%、46.24%、59.52%;相比于 PSO 优化模糊 PID 控制器调节时间分别减少 1.7、3.2、2.3 s,超调量分别减少 17.38%、30.02%、55.42%。

综上,在不同负载条件下,NRBO 模糊 PID 控制相较于常规 PID 控制、模糊 PID 控制器和 PSO 优化模糊 PID 控制在超调和振荡抑制方面表现得更加优越。在轻载和中载条件下,由于液压机械的特性,小载荷控制过程所需时间较长,NRBO 模糊 PID 控制表现出更为突出的稳定性和响应特性。在重载情况下,NRBO 模糊 PID 几乎能完全消除振荡并准确跟踪输入信号,表现出极高的控制性能。

表 4 试验性能指标

Table 4 Test performance indicators

工况	控制方法	超调量/%	调节时间/s
轻载	常规 PID	56.33	19.1
	模糊 PID	45	16.5
	PSO 算法优化模糊 PID	38.33	15.5
	NRBO 算法优化模糊 PID	31.67	13.8
中载	常规 PID	44.25	18.7
	模糊 PID	39.08	13.5
	PSO 算法优化模糊 PID	30.12	11.5
	NRBO 算法优化模糊 PID	21.01	8.3
重载	常规 PID	15.45	7.5
	模糊 PID	10.55	7.1
	PSO 算法优化模糊 PID	9.58	6.8
	NRBO 算法优化模糊 PID	4.27	4.5

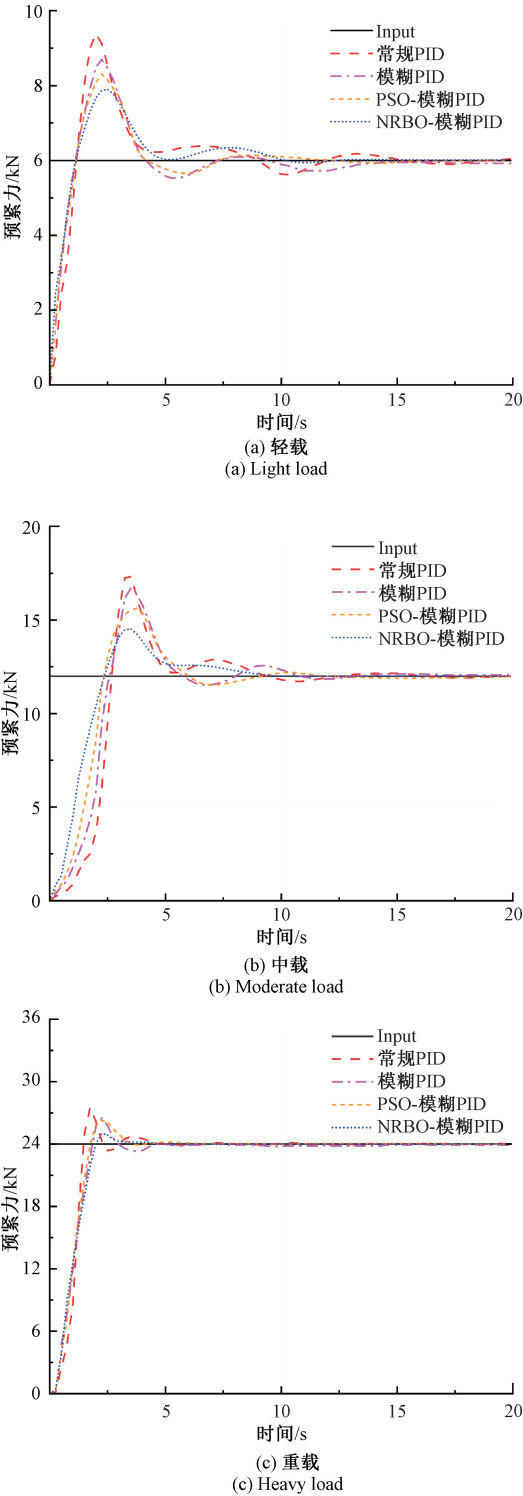


图 10 最佳预紧力控制效果
Fig. 10 Best preload control effect

5 结 论

滚动轴承预紧力的精确控制是轴承高服役性能的保证,基于模糊控制液压加载是应用最为广泛的方式,现有

模糊控制优化方法难以兼顾控制速度与精度问题,文章采用基于 NRBO 算法优化的模糊 PID 主动控制策略,通过构建液压加载系统的传递函数模型,将 NRBO 算法应用于模糊控制器的参数优化过程,实现了量化因子和比例因子的自适应整定,突破了现有优化算法控制速度与精度难以兼顾问题,有效解决液压系统控制过程中非线性及易受影响的难点,提高了液压系统的响应速度,为滚动轴承预紧力的实现精准控制提供了一种可行方法,与常规 PID、模糊 PID 和 PSO 优化模糊 PID 3 种控制方式进行对比,综合各项性能指标, NRBO 算法优化的模糊 PID 控制器在响应时间、调节时间、超调量等方面均展现出更明显的优势。但 NRBO 算法计算复杂度高、不同场景下的训练成本高和部署成本大,而且液压系统需要额外的设备,部署空间成本大;未来重点突破算法轻量化技术,开发面向边缘计算的嵌入式版本,并开发更轻便的滚动轴承预紧力加载装置,提升工程适用性。

参考文献

- [1] 刘志峰,孙海明.电主轴滚动轴承轴向预紧技术综述[J].中国机械工程,2018,29(14):1711-1723,1763.
LIU ZH F, SUN H M. Summary of axial preload technology for motorized spindle rolling bearings [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (14): 1711-1723,1763.
- [2] 曹正,康梓秦,樊中鼎,等.基于动力学模型的滚动轴承磨损特性分析[J].仪器仪表学报,2023,44(8):218-227.
CAO ZH, KANG Z Q, FAN ZH D, et al. Analysis of wear characteristics of rolling bearings based on dynamic model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(8):218-227.
- [3] 李颂华,高鹏,王永华,等.主轴轴承预紧力智能调控组件设计及性能分析[J].组合机床与自动化加工技术,2023(10):164-168.
LI S H, GAO P, WANG Y H, et al. Design and performance analysis of spindle bearing preload intelligent control component [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023 (10): 164-168.
- [4] CIOU Y S, LEE C Y. Controllable preload spindle with a piezoelectric actuator for machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 139:60-63.
- [5] HU G, ZHANG D, GAO W, et al. Study on variable pressure/position preload spindle-bearing system by using piezoelectric actuators under close-loop control [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018,125:68-88.
- [6] 谢红杰,宋文博,王国强.具有压力反馈的电磁比例阀死区补偿策略设计[J].机械设计与制造,2025(5):167-170.
XIE H J, SONG W B, WANG G Q. Design of dead zone compensation strategy for electromagnetic proportional valve with pressure feedback [J]. Machinery Design & Manufacture, 2025(5):167-170.
- [7] 杨芳,司东宏,马喜强,等.复合轴向力加载装置设计与力控制[J].中国机械工程,2021,32(11):1315-1320,1329.
YANG F, SI D H, MA X Q, et al. Composite axial force loading device design and force control [J]. China Mechanical Engineering, 2021,32(11):1315-1320,1329.
- [8] 张行.核主泵轴承试验台液压加载控制系统研究与实现[D].沈阳:沈阳工业大学,2023.
ZHANG X. Research and implementation of hydraulic loading control system for nuclear main pump bearing test bench [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [9] FAN B Q, LEE K M, OUYANG X P, et al. Soft-switchable dual-PI controlled axial loading system for high-speed EMU axle-box bearing test rig [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12):7370-7381.
- [10] 王刚锋,杨军康,侯润锋,等.基于改进 PSO 模糊 PID 的管廊吊具同步控制[J].液压与气动,2023,47(12):115-123.
WANG G F, YANG J K, HOU R F, et al. Synchronous control of pipe gallery spreader based on improved PSO fuzzy PID [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(12):115-123.
- [11] 阳鑫,张劲,刘志.改进粒子群模糊 PID 算法对污水处理曝气控制的优化[J].科学技术与工程,2025,25(7):3064-3070.
YANG X, ZHANG J, LIU ZH. Optimization of aeration control of sewage treatment by improved particle swarm fuzzy PID algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2025,25(7):3064-3070.
- [12] 杨洪涛,金磊,姜西祥,等.基于 DBO 优化模糊 PID 的高低温试验箱温度控制方法[J].电子测量与仪器学报,2024,38(10):235-243.
YANG H T, JIN L, JIANG X X, et al. Temperature control method of high and low temperature test chamber based on DBO optimized fuzzy PID [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10):235-243.
- [13] FU J, LIU J, XIE D, et al. Application of fuzzy PID based on stray lion swarm optimization algorithm in

- overhead crane system control[J]. Mathematics, 2023, 11(9): 2170.
- [14] RAVICHANDRAN S, MANOHARAN P, PRADEEP J. Newton-Raphson-based optimizer: A new population-based metaheuristic algorithm for continuous optimization problems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 128:107532.
- [15] 张阳,刘英豪,高强,等. 高水基数字比例阀控电液位置伺服系统建模与控制[J]. 液压与气动, 2025, 49(1): 124-131.
- ZHANG Y, LIU Y H, GAO Q, et al. Modeling and control of high water-based digital proportional valve controlled electro-hydraulic position servo system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2025, 49(1): 124-131.
- [16] 王宏涛,蒋清泽,张强,等. 轨迹跟踪的混合编码遗传优化模糊 PID 控制策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(7): 1076-1082.
- WANG H T, JIANG Q Z, ZHANG Q, et al. Hybrid coding genetic optimization fuzzy PID control strategy for trajectory tracking[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(7): 1076-1082.
- [17] 刘运忠,姜宏,章翔峰. 基于 PSO 优化的模糊 PID 恒力控制研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(9): 16-22.
- LIU Y ZH, JIANG H, ZHANG X F. Research on fuzzy PID constant force control based on PSO optimization[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(9): 16-22.
- [18] 张绍坤,沈加明,胡燕海,等. 基于 GAPSO 优化的注塑机注射速度模糊 PID 控制器[J]. 计算机工程, 2025, 51(5): 239-248.
- ZHANG SH K, SHEN J M, HU Y H, et al. Fuzzy PID controller for injection speed of injection molding machine based on GAPSO optimization[J]. Engineering with Computers, 2025, 51(5): 239-248.
- [19] 董佳鑫,胡晓兵,杜玲羽,等. 轴向柱塞泵变量机构的控制特性与优化研究[J]. 机床与液压, 2025, 53(5): 107-113.

DONG J X, HU X B, DU L Y, et al. Research on control characteristics and optimization of variable displacement mechanism of axial piston pump[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(5): 107-113.

- [20] AHMADIANFAR I, BOZORG-HADDAD O, CHU X. Gradient-based optimizer: A new metaheuristic optimization algorithm[J]. Information Sciences, 2020, 540: 131-159.

作者简介



E-mail: hnkjdxlj@163.com

Li Xuejun received his B. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 1991, M. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 1996 and Ph. D. degree from Central South University in 2003, respectively. Now he is a professor in Foshan University. His main research interests include Mechanical dynamics and fault diagnosis and high-end equipment health management and intelligent maintenance.



E-mail: linlyjiang@163.com

Jiang Lingli (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2003, M. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2007 and Ph. D. degree from Central South University in 2010, respectively. Now she is a professor in Foshan University. Her main research interests include Mechanical dynamics and fault diagnosis and high-end equipment health management and intelligent maintenance.

李学军, 1991 年于湖南科技大学获得学士学位, 1996 年于河南理工大学获得硕士学位, 2003 年于中南大学获得博士学位, 现为佛山大学教授, 主要研究方向为机械动力学与故障诊断、高端装备健康管理与智能维护。

蒋玲莉 (通信作者), 2003 年于湖南科技大学获得学士学位, 2007 年于湖南科技大学获得硕士学位, 2010 年于中南大学获得博士学位, 现为佛山大学教授, 主要研究方向为机械动力学与故障诊断、高端装备健康管理与智能维护。