

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.033

基于飞蛾扑火算法优化的模糊 PID 控制

周瑞,高红亮,鲍新宇,王勇

(湖北师范大学 电气工程与自动化学院,湖北 黄石 435002)

摘 要:提出了一种基于飞蛾扑火(MFO)算法优化的模糊 PID(FPID)控制器,旨在进一步提升 FPID 控制器在复杂系统中的性能。通过 MFO 算法对 FPID 控制器的量化因子和比例因子进行自适应优化,从而有效改善控制系统的响应速度、稳定性和控制精度。实验验证表明:基于 MFO 算法优化的 FPID 控制器(MFO-FPID)相较于传统 PID 控制及未经优化的 FPID 控制,在性能上取得了显著提升。该方法的通用性较好,可以应用于多种控制系统,为复杂系统的优化控制提供了一种有效的新思路。

关键词:飞蛾扑火算法;模糊 PID 控制;量化因子;比例因子

中图分类号:TP273+.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0177-05

Fuzzy PID Control Based on Mothballing Algorithm Optimization

ZHOU Rui,GAO Hongliang,BAO Xinyu,WANG Yong

(School of Electrical Engineering and Automation,Hubei Normal University,Huangshi 435002,China)

Abstract:This paper designs a fuzzy proportional-integral-differential (FPID) controller based on moth-flame optimization (MFO) algorithm,aiming at further improving the performance of FPID controller in complex systems.The MFO algorithm is used to optimize the quantization factor and scale factor of the FPID controller,so as effectively to improve the response speed,stability and control accuracy of the control system. Experimental verification confirms that the optimized FPID controller based on MFO algorithm (MFO-FPID) achieves significant performance improvement compared with traditional PID control and unoptimized FPID control. The method with good versatility can be applied to a variety of control systems,which provides an effective new idea for the optimal control of complex systems.

Keywords:moth-flame optimization algorithm;fuzzy PID control;quantization factor;scale factor

0 引言

在模糊 PID (fuzzy proportional - integral - differential,FPID)的设计中,设计者的个人因素与控制效果的优劣关系密切,许多学者将智能优化算法引入 FPID,以此尽量避免个人因素给控制系统带来的影响。刘伟玮等^[1]将粒子群算法与 FPID 相结合的方法应用于四旋翼飞行器控制,优化后的飞行器性能获得较大的提升,对实际四旋翼飞行器控制设计具有参考价值。贾伟洋等^[2]提出采用粒子群算法优化 FPID 控制器的相关知识库,利用粒子群算法优化调整隶属度函数等参数,该方法也提高了控制器的性能。李志清等^[3]提出用遗传算法来优化 FPID 控制器参数的策略,优化后的控制器可以有效提升悬架主动控制效果与空气悬架性能。常昊等^[4]使用鲸鱼优化算法优化 FPID 控制器的论域伸缩因子变化系数,优化后的

控制器具有更优秀的阶跃响应性能和同步性能。这些研究取得了较好的成果,也被应用于各个领域。本文使用飞蛾扑火(moth-flame optimization,MFO)算法优化 FPID 的量化因子和比例因子,尽量降低个人因素对 FPID 控制器的影响,提高控制器的性能,为复杂系统提供了有效的新方法。最后通过仿真实验对比得出,MFO-FPID 相比于传统 PID 控制及未经优化的 FPID 控制具有更优秀的控制性能。

1 MFO 算法

MFO 算法是一种新颖的启发式优化算法,其灵感来自于飞蛾扑向火焰的行为^[5]。它模拟了飞蛾在夜晚被光吸引后,向光源飞行的行为^[6]。MFO 算法通过模拟这种行为来实现。该算法具有结构简洁、参数少但可调、易于实现、鲁棒性强等优点,其适用于解决优化问题^[7]。

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2021CFB578,2024AFB837)

第一作者简介:周瑞(2001—),男,湖北天门人,硕士研究生,研究方向为智能控制,154040067@qq.com。

MFO算法中,飞蛾的位置被用作替代变量来表示候选解。 $M_{n,d}$ 为蛾类的种群矩阵,如式(1)所示。

$$M_{n,d} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \cdots & m_{1,d} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \cdots & m_{2,d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} & \cdots & m_{n,d} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 n 为飞蛾的数量; d 为待优化变量的维数^[8]。

假设火焰的集合为 F , $F_{n,d}$ 为第 n 个火焰对应的第 d 个位置,则火焰集合如式(2)所示。

$$F_{n,d} = \begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & \cdots & f_{1,d} \\ f_{2,1} & f_{2,2} & \cdots & f_{2,d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n,1} & f_{n,2} & \cdots & f_{n,d} \end{bmatrix} \quad (2)$$

飞蛾矩阵与火焰矩阵有相同的尺寸。飞蛾对火焰的优化过程可以表示为以下三元组的最优解:

$$M_{FO} = (I, P, T) \quad (3)$$

式中:函数 I 为生成飞蛾的初始位置;函数 P 为更新飞蛾在空间中的位置;函数 T 用来判断算法是否终止,如果满足结束条件则为真,立即终止,如果不满足结束条件则为假,继续执行^[9]。飞蛾搜索过程中,每个飞蛾的位置机制更新如下:

$$S(M_i, F_j) = D_{ij} \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + F_j \quad (4)$$

式中: D_{ij} 为第 i 个飞蛾和第 j 个火焰之间的直线距离; b 为定义的螺旋线形状常数; t 为随机数,取值范围为 $[-1, 1]$ ^[10]。该公式模拟了飞蛾的移动路径,并准确地确定了飞蛾相对于火焰的下一个位置。在这个等式中,参数 t 定义为飞蛾在下一个位置靠近火焰的程度,其中 $t=-1$ 表示飞蛾最靠近火焰,反之 $t=1$ 表示飞蛾最远离火焰^[11]。 D_{ij} 计算公式如下所示:

$$D_{ij} = |F_j - M_i| \quad (5)$$

该算法还提出了在每次迭代过程中自适应调整火焰数量的机制,火焰数量随着迭代的次数增加而减少,从而避免飞蛾陷入局部最优,同时还能以最快的寻优速度获得全局的最优解,焰火数量调整公式如下:

$$f_{\text{lame.no}} = \text{round} \left[N - l \times \frac{N-1}{T} \right] \quad (6)$$

式中: l 为当前迭代的代数; N 为最大的火焰数目; T 为最大的迭代次数。在迭代最后阶段,仅使用最优火焰来更新飞蛾的位置^[12]。

2 MFO-FPID 控制器设计

2.1 FPID 控制器设计

FPID控制器首先需要对模糊化进行初始化,初始化包括论域的确定和隶属度函数的确定^[13]。本文 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为 K_p 、 K_i 和 K_d 的整定值,设定 e 、 e_c 以及 K_p 、 K_i 和 K_d 的各自论域为 $e[-6, 6]$ 、 $e_c[-6, 6]$ 、 $\Delta K_p[-1, 1]$ 、 $\Delta K_i[-1, 1]$ 、 $\Delta K_d[-1, 1]$ 。由于FPID控制器的论域是连续论域,所以选用三角形隶属函数。模糊规则是控制器的核心^[14]。每个模糊子集的变量都将其分为7个模糊集,分别为“PB(正大),PM(正中),PS(正小),ZO(零),NS(负小),NM(负中),NB(负大)”。

解模糊是将模糊推理得到的模糊输出变为具体的数值作为输出^[15],本文使用面积中心法进行解模糊,假设论域 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_4\}$ 是离散的,面积中心计算公式如下:

$$u_{\text{cen}} = \frac{\sum_{j=1}^n u_j A(u_j)}{\sum_{j=1}^n A(u_j)} \quad (7)$$

式中: $A(u_j)$ 为 u_j 处的隶属度; u_{cen} 为模糊集输出值。

FPID控制器的PID控制参数公式设计如下:

$$\begin{cases} K_p^* = K_p + p\Delta K_p \\ K_i^* = K_i + i\Delta K_i \\ K_d^* = K_d + d\Delta K_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: K_p 、 K_i 和 K_d 为PID控制器控制参数的初始值; ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 为模糊控制器的输出变量又称整定值; K_p^* 、 K_i^* 和 K_d^* 为整定后的PID控制参数; p 、 i 和 d 为模糊控制器的比例因子。作为变换系数,比例因子将控制信号从模糊论域转换为物理量,直接影响系统的响应速率和超调量,是FPID重要控制参数^[16]。

量化因子是转换因子,它将系统的物理输入映射到模糊论域上,并可以用来增加或减少输入信号值的范围以适应特定的模糊范围^[17]。其中 K_e 为偏差量化因子, K_{ec} 为偏差变化率量化因子,两者能对系统的调节时间和超调量产生较大的影响,均是FPID的重要控制参数。

比例因子和量化因子是重要的控制参数,然而在控制器设计过程中没有精确的计算公式,受人因素为影响较大。故本文将比例因子和量化因

子作为待优化参数,使用MFO算法对待优化参数进行优化,避免待优化参数受人为因素的影响。

2.2 基于MFO算法优化的FPID控制器

MFO算法采用了群体搜索策略,通过多个飞蛾的搜索和评估,能够更快地找到全局最优解,避

免陷入局部最优解。本文将模糊PID的量化因子和比例因子设为借助飞蛾优化的参数,尽可能减少模糊控制设计中人为因素的影响。MFO算法优化的FPID控制器结构如图1所示。

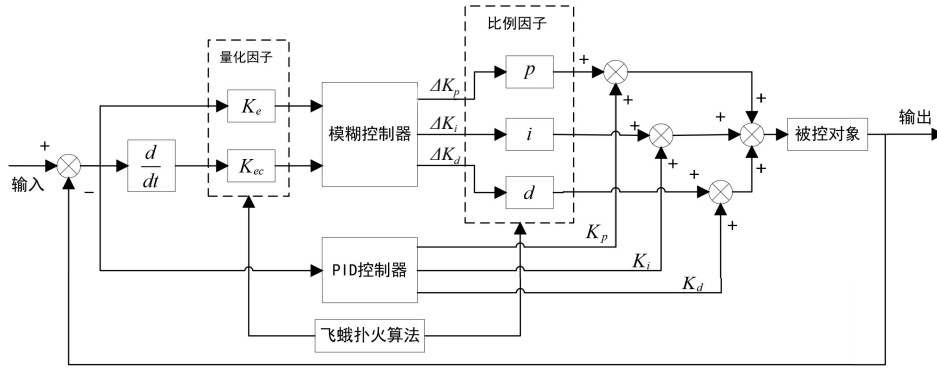


图1 MFO-FPID 控制器结构图

本文使用MFO算法优化模糊控制器的量化因子和比例因子,以ITAE作为目标函数,其函数表达式如下^[18]:

$$J = \int_0^{\infty} t |e| dt \quad (9)$$

式中:\$J\$为目标函数值;\$e\$为误差。将误差\$e\$作为适应度函数输入,以此计算出适应度函数的数值^[19]。

根据上文设计,MFO算法中进行如下设置:设置种群规模\$N=15\$,设置最大迭代寻优次数为100,函数维数设置为5维。MFO算法优化初始控制参数的适应度值曲线如图2所示,优化结果为0.0689。

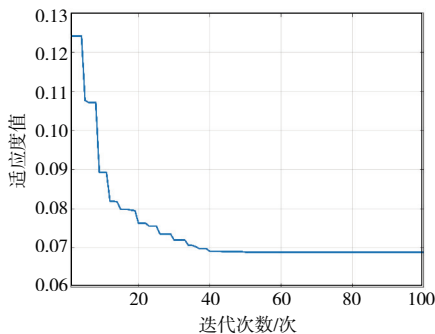


图2 适应度值迭代变化曲线

FPID控制器的量化因子和比例因子随迭代次数变化曲线如图3所示,\$K_e\$、\$K_{ec}\$、\$P\$、\$i\$和\$d\$优化后结果分别:0.010、3.249、10.000、5.673、1.958。

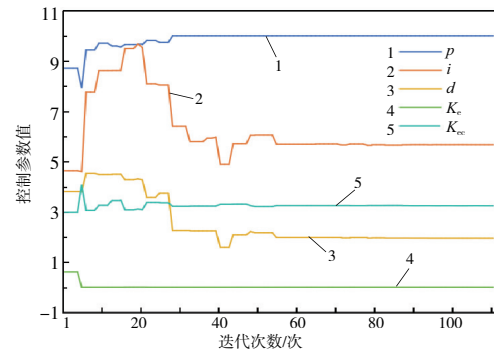


图3 控制参数迭代变化曲线

3 MATLAB 仿真及分析

通过上述MFO-FPID控制器结构图建立的系统仿真模型。利用该仿真模型分别对传统PID控制器、FPID控制器的仿真模型进行对比分析。

系统单位阶跃信号作为输入信号。输出响应曲线显示在模拟示波器中。本文使用2阶系统作为被控对象^[20],该系统如下所示:

$$H(s) = \frac{20}{8s^2 + 6s + 1} \quad (10)$$

PID初始控制参数\$K_p\$、\$K_i\$、\$K_d\$分别设定为4.5、0.15、2.5,并通过MATLAB仿真分析获得实验结果。图4展示了被控对象在单位阶跃信号下使用3种控制方法进行仿真分析的对比结果。以终值的±2%误差范围定义调节时间为前提^[21],对比图显示,三者上升时间并无显著差别,而PID控

制系统有 32.2% 的超调量和系统振荡现象,调节时间为 2.231 s,且 2.231 s 后仍有小幅度振荡现象。FPID 控制系统有 12.8% 的超调量,调节时间为 1.622 s。FPID 控制器通过专家经验制定相应的控制规则,相比于 PID 控制器,其拥有更短的调节时间,更小的振荡幅度,而 MFO-FPID 控制系统调节时间仅为 0.72 s,系统超调量仅为 0.4% 且没有振荡现象。综上所述, MFO-FPID 控制器在抑制超调和振荡等方面都有更好的效果。可以发现,通过利用 MFO 算法对量化和比例因子的全局寻优,能尽可能地降低了 FPID 控制器设计中人为因素的影响,提升了模糊控制系统的控制性能。

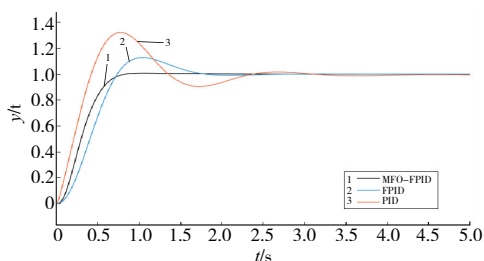


图 4 3 种控制方法的阶跃响应图

如图 5 所示,3 种控制器的控制效果在 5 s 时已达到完全稳定,此时对控制系统施加持续时间为 1 s 的单位阶跃信号作为干扰信号,对系统进行一定的干扰,以测试 PID 控制器、FPID 控制器和 MFO-FPID 控制器的鲁棒性和自适应性。

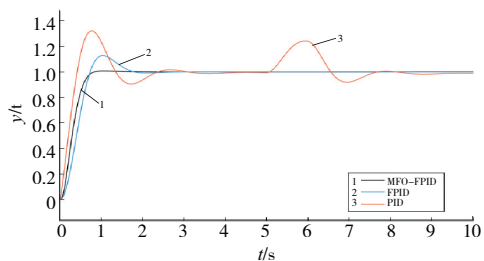


图 5 施加干扰后的阶跃响应图

图 5 清晰地展示了 PID 控制器的鲁棒性和自适应性较差,在施加干扰后,系统出现明显的超调现象,在 7.478 s 时才重新达到稳定状态,且稳定后有短时间的小范围振荡。FPID 和 MFO-FPID 控制器控制的系统受到干扰后均没有明显变化,二者具有良好的鲁棒性和自适应性。但经过 MFO 算法优化的 FPID 控制器在具有良好的鲁棒性和自适应性的基础上,又同时具有更高的稳定性,更短的调节时间和更小超调量。该仿真实验说明 MFO 算法可以提高 FPID 控制器的控制性能

并且能尽可能地避免人为因素的干扰。

4 结语

本文研究了 MFO 算法优化 FPID 控制器的问题。针对 PID 的不具有自适应性和鲁棒性,采用 FPID 控制器,但 FPID 控制器的量化因子和比例因子由个人经验选定,且对控制器控制性能影响较大,故又提出使用新颖的 MFO 算法优化获得 FPID 控制器的量化因子和比例因子,减小人为因素的影响,提高控制性能。该算法相较于传统的粒子群优化算法和遗传算法,具有更强的全局搜索能力和更高的优化效率。将该算法引入 FPID 控制器形成的 MFO-FPID 控制器具有调节快,稳定性高,鲁棒性和自适应性好的优点。在未来的工作中,还可以考虑使用 MFO 算法优化 FPID 的隶属度函数和模糊规则的优化设计,进一步减少人为因素的影响,为复杂系统的优化控制提供一种有效的新思路。

参考文献:

- [1] 刘玮玮,唐路平,王咏婷,等. 粒子群优化模糊 PID 的四旋翼飞行器控制[J]. 自动化与仪表,2022,37(8): 13-18.
- [2] 贾伟洋,杨军,李玥. 基于粒子群算法优化的模糊 PID 控制[C]//2021 年第五届全国集群智能与协同控制大会论文集. 西北工业大学航天学院,2022:205-210.
- [3] 李志清,李美,付丽荣,等. 遗传算法优化的空气悬架模糊 PID 控制[J]. 机械设计与制造,2023(4): 22-25,33.
- [4] 常昊,苏东海,夏制,等. 单叶片吊具鲸鱼优化算法模糊 PID 控制研究[J]. 重型机械,2023(3):52-56.
- [5] 王智慧,代永强,刘欢. 基于改进飞蛾扑火优化算法的奶牛隐性乳腺炎特征选择[J]. 黑龙江畜牧兽医,2024(4):8-16.
- [6] 李志明,莫愿斌,张森. 一种新颖的群智能算法:飞蛾扑火优化算法[J]. 电脑知识与技术,2016,12(31): 172-176.
- [7] 李志明. 飞蛾扑火优化算法在聚类分析中的应用[J]. 计算机技术与发展,2020,30(9):104-108.
- [8] 侯子琪,彭慧春,李继清. 增强型飞蛾扑火优化算法在梯级水库优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电,2025(2):1-20.
- [9] 郝子霖,于华楠,冷贤达,等. 基于电动汽车激励策略的主动配电网日前优化调度[J]. 电网与清洁能源,2024,40(11):129-137.
- [10] 陈振霖,罗亮,郑龙,等. 基于改进飞蛾扑火优化算法的船机桨匹配设计研究[J]. 计算机科学,2024,51(增刊1):69-77.

- [11] 刘亚男,李伟龙,张晓晴,等.基于飞蛾扑火算法的电力系统无功优化控制[J].电气开关,2024,62(5):42-44,48.
- [12] 李泽宏,袁肖峰,肖鹏,等.基于多目标飞蛾扑火算法的水光互补系统优化调度研究[J].长江科学院院报,2024(9):1-10.
- [13] 王勇,邢亮,吴焱明,等.压力机多轴同步驱动的虚拟轴改进型偏差耦合控制方法[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2025,48(4):462-468.
- [14] 丁筱玲,王克林,李军台,等.基于BAS—Smith—Fuzzy PID的物联网水肥控制系统研究[J].中国农机化学报,2025,46(4):240-247.
- [15] 桂贤成,周建平,毛家征,等.基于蚁群优化模糊算法的低压微弧加工电源控制策略研究[J].制造技术与机床,2025(4):1-10.
- [16] 宋栓军,曹佳豪,郭晓虎.手指康复外骨骼的变论域模糊PID控制研究[J].传感器与微系统,2025,44(4):31-34,39.
- [17] 谢文海,谢振宇,许绍瀚,等.非定向磁轴承的模糊RBF神经网络PID控制策略[J].航空动力学报,2025(3):1-14.
- [18] 张荣康,王长军,徐健祥,等.基于鲸鱼优化算法—LSTM神经网络的漏钢预报模型[J].钢铁,2025(4):1-17.
- [19] 张天瑞,祝芳芳,牛慧媛.基于改进哈里斯鹰算法的生鲜品冷链物流路径优化研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2024(11):1-14.
- [20] 屈丹.基于MATLAB的模糊控制参数自寻优设计与仿真[J].光电技术应用,2005,20(2):67-70.
- [21] 谷小兵,李建强,徐贤,等.基于飞蛾扑火算法的浆液循环泵组合优化[J].热能动力工程,2021,36(6):44-50.

收稿日期:2024-03-20

(上接第134页)

- [7] 朱寅鑫,彭文强,罗振兵,等.全叶高合成双射流对大折转角扩压叶栅的影响[J].航空学报,2023,44(12):127734.
- [8] 丁均梁,聂永正,周游天,等.等离子体激励频率对压气机稳定性影响的实验与数值模拟研究[J].推进技术,2019,40(4):786-795.
- [9] 张海灯,李应红,吴云,等.高速压气机叶栅纳秒脉冲等离子体流动控制仿真研究[J].航空学报,2014,35(6):1560-1570.
- [10] 郭彦超,高丽敏,茅晓晨,等.对转压气机中机匣处理的非定常影响[J].航空动力学报,2023,38(3):685-697.
- [11] SAKUMA Y, WATANABE T, HIMENO T, et al. Numerical analysis of flow in a transonic compressor with a single circumferential casing groove; influence of groove location and depth on flow instability [J]. Journal of turbomachinery. 2014,136(3):1-9.
- [12] 郭汉文,金东海,于豪,等.非轴对称端壁对压气机叶栅迎角特性的影响[J].工程热物理学报,2025,46(8):2557-2565.
- [13] 余义红,唐海兵,赵梓旭,等.非轴对称端壁对压气机稳定性的影响分析[J].海军工程大学学报,2020,32(6):67-71,82.
- [14] 彭鸿博,冯远,陶源.串列静子叶片流动机理研究[J].计算机仿真,2023,40(2):33-38.
- [15] 刘志刚,梁俊,凌代军,等.串列叶栅流场特性的试验与数值模拟[J].热能动力工程,2013,28(5):449-454,547-548.
- [16] 曾凌霄,周正贵.载荷分布规律对开槽压气机叶型气动性能的影响[J].机械制造与自动化,2024,53(2):20-24.
- [17] 王浩,张皓光,荆风玉,等.级环境下静叶开槽抑制附面层分离的机理研究[J].航空动力学报,2025,40(6):429-442.
- [18] BENINI E, BIOLLO R, PONZA R. Efficiency enhancement in transonic compressor rotor blades using synthetic jets: a numerical investigation [J]. Applied Energy,2011,88(3):953-962.
- [19] 王若玉,宋彦萍,陈浮,等.变攻角下被动射流旋涡对高速扩压叶栅性能的影响[J].航空动力学报,2018,33(3):729-740.
- [20] 杨凌,韩露,钟兢军.压气机叶片仿鲨鱼鳃开槽对叶栅气动性能的影响[J].推进技术,2023,44(2):101-111.
- [21] 刘恩波,周正贵.叶片开槽对大涵道比风扇的流动控制研究[J].机械制造与自动化,2023,52(3):168-171.
- [22] ZHENG H, ZHOU Z, LIU L. Control of the boundary layer on compressor blade suction surfaces with the momentum jet [J]. The Aeronautical Journal, 2023, 127(1316):1793-1816.

收稿日期:2023-11-14