基于改进哈里斯鹰算法的齿轮传动误差研究

刘 凯,姚灵灵*,孙奎洲,芦 杰,宋龙雨,任晓雄,江雨晴,徐峰华,代俊男

江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2025年1月27日; 录用日期: 2025年2月20日; 发布日期: 2025年2月27日

摘要

针对三维立体编织装备在运行时编织参数误差较大的问题,文章研究了一种基于改进哈里斯鹰优化算法 PID的参数整定控制同步电机连接齿轮传动的方法。首先采用Tent混沌映射和小孔成像反向学习方法保 证初始种群的多样化及增加精英个体数量,提升算法收敛性能;其次,在能量线性递减机制中引入动态 自适应权重的非线性表达,提升算法全局搜索及局部开发行为的平衡能力;最后将该方法分别与HHO和 PSO进行比较。仿真结果表明:齿轮1的初始转速误差分别降低1.9%、2.9%,负载突变转矩误差分别降 低0.75%、4.75%。

关键词

哈里斯鹰算法,PID,编织装备,传动误差,齿轮

The Study of Gear Transmission Error Based on the Improved Harris Hawk Algorithm

Kai Liu, Lingling Yao^{*}, Kuizhou Sun, Jie Lu, Longyu Song, Xiaoxiong Ren, Yuqing Jiang, Fenghua Xu, Junnan Dai

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: Jan. 27th, 2025; accepted: Feb. 20th, 2025; published: Feb. 27th, 2025

Abstract

To address the issue of large errors in weaving parameters when operating three-dimensional weaving equipment, the article studies a parameter tuning control method based on an improved Harris Hawk Optimization (HHO) algorithm with PID proposed for the synchronous motor connected to a gear drive system. Firstly, the Tent chaotic mapping and small hole imaging reverse learning methods are employed to ensure the diversity of the initial population and increase the number of

*通讯作者。

文章引用:刘凯,姚灵灵,孙奎洲,芦杰,宋龙雨,任晓雄,江雨晴,徐峰华,代俊男.基于改进哈里斯鹰算法的齿轮 传动误差研究[J]. 机械工程与技术,2025,14(1):73-84. DOI: 10.12677/met.2025.141007 elite individuals, enhancing the algorithm's convergence performance. Secondly, a dynamic adaptive weight nonlinear expression is introduced into the energy linear decay mechanism to improve the balance between the global search and local exploitation capabilities of the algorithm. Finally, the proposed method is compared with HHO and PSO. Simulation results show that the initial speed error of gear 1 is reduced by 1.9% and 2.9%, respectively, and the load torque fluctuation error is reduced by 0.75% and 4.75%, respectively.

Keywords

Harris Algorithm, PID, Weaving Equipment, Transmission Error, Gear

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC ① Open Access

1. 引言

三维编织技术研究发展于 20 世纪 70 年代,因其编织性能优异且对于复合材料的编织物具有良好的 综合性能,在航空航天以及医疗器材等领域得到广泛应用。

在三维立体编织装备运行过程中,齿轮作为核心部件之一,发挥着重要作用。多个电机通过轴将动 力传递至不同的主动轮,当多电机运转时,同步齿轮会随着轴转动,并将电机的转速误差传递给齿轮。 主动轮在同步转动时对相啮合从动轮施加转矩,驱动从动轮转动,主动轮传动误差会随着转矩传递给从 动轮,传递之间存在的误差导致齿轮输出存在同步误差,导致编织参数产生偏差,影响产品性能。

针对齿轮传动误差这一问题,国内外学者利用多种方法展开研究,吴暐[1]针对齿轮齿廓修形和齿形 磨损产生的齿形偏差,提出了一种改进的齿轮解析啮合刚度与准静态传动误差模型,并在该模型的基础 上,研究了齿形误差与齿形磨损对啮合刚度与准静态传动误差变化特性的规律。结果得出,两种齿形偏 差对啮合刚度与准静态传动误差的极限值与分布均有显著影响,并随着齿形磨损程度增大或减小,齿形 磨损对啮合刚度与准静态传动误差的影响程度更大。但该方法未考虑输入电机传递时存在误差的解决办 法。尹逊民[2]针对目前直齿轮内啮合承载时传动误差研究不充分等问题,通过采用粒子群算法对内啮合 短齿高直齿轮的修形优化设计方法进行研究。结果表明:对提高内啮合时短齿高直齿轮的动态啮合特性 研究提供了依据。但粒子群算法易陷入局部最优,其研究结果可能不是全局最优解。

许多学者在上述研究基础上通过 PID 参数整定法优化电机传动误差,从而通过减少齿轮传动误差, 来达到减少编织参数误差的目的。曾宪荣[2]为使伺服电机控制系统得到较优的 PID 参数,对标准 PSO 的 搜索寻优进行改进,通过 PSO 算法对 PID 控制器进行参数整定,并利用控制器设计多电机功率平衡的控 制策略。仿真结果表明,电机在负载发生变化的情况下,其控制策略能够实现每个电机的输出得到均衡 分配负载。但该方法未考虑输出后能否降低输出机构的传动误差。Shi Peidong [3]针对粒子群算法在求解 后期 PID 控制器参数优化问题时存在的不足,在标准粒子群算法的基础上,引入非线性递减惯性权重调 整策略。仿真结果表明:改进后粒子群算法提升了 PID 参数的稳定性,增强了收敛速度与搜索精度,具 有更好的性能指标[4]。但该方法未考虑实际工程应用中的抗干扰性。

上述学者通过智能算法 PID 的参数整定对电机转速误差进行优化,或者是对齿轮进行结构分析,为 后续学者打下理论基础。但较少学者直接通过智能算法对减少同步齿轮传动误差开展研究,故本文在上 述研究的基础上,将电机与齿轮通过 Matlab/Simulink—ADAMS 联合,并研究 IHHO PID 参数整定,将其 通过电机连接到齿轮,使其能直接对编织装备的编织参数误差进行优化。该算法基于 HHO [5],通过采用 Tent 混沌映射方法和小孔成像反向学习方法、在能量线性递减机制中引入动态自适应权重的非线性表达,并建立改进哈里斯鹰算法 PID 参数整定的联合仿真模型(Matlab/Simulink—ADAMS),运行该仿真系统,结果得出改进哈里斯鹰算法 PID 参数整定能够有效降低齿轮初始转动误差、负载突变误差。

2. 改进哈里斯鹰算法

2.1. 初始种群多样化

根据 Tent 混沌映射策略具有更好的遍历均匀性的特点,对哈里斯鹰种群进行初始化。因其策略存在 小周期及周期点不稳定等问题,所以在 Tent 映射策略基础上引入了随机变量 *rand* (0, 1)×1/*N*,引入后的 表达式如(1)所示:

$$y_{i+1} = \begin{cases} 2y_i + rand(0,1) \times \frac{1}{N}, 0 \le y_i < \frac{1}{2} \\ 2(1-y_i) + rand(0,1) \times \frac{1}{N}, \frac{1}{2} < y_i \le 1 \end{cases}$$
(1)

式中: rand ()为(0,1)之间的随机数函数; N表示混沌映射的粒子个数。

使用式(2)对 Tent 混沌映射后,其均匀分布的 Tent 序列执行逆映射从而得到新的种群个体,得到表达式如(2)所示:

$$x_i = y_i \left(\mathbf{ub} - \mathbf{lb} \right) + \mathbf{lb} \tag{2}$$

式中: yi、xi分别是式(1)计算出的混沌序列值及哈里斯鹰种群个体; lb 与 ub 则是搜索空间的下界与上界。

2.2. 初始种群精英化

基于小孔成像的反向学习方法,通过融入算法[6]寻优位置策略的多样性并增加种群中精英个体的数量,从而帮助哈里斯鹰扩大搜索范围,增大选取更优解的几率。假设 x_j 与 x'_j 分别表示当前种群个体的最优解与小孔成像经过反向学习得到的最优解,而 b_j 与 a_j 分别表示第 j 维解的下限和上限,然后根据小孔成像基本原理可得:

$$x'_{j} = \frac{(a_{j} + b_{j})}{2} + \frac{(a_{j} + b_{j})}{2n} - \frac{x_{j}}{n}$$
(3)

式中:n表示小孔成像调整因子。

2.3. 逃逸能量递减机制的改进

猎物逃跑能量 *E* 是哈里斯鹰算法平衡全局搜索和局部开发的关键参数。哈里斯鹰算法中对猎物逃跑 能量 *E* 的描述为其由最大值线性减少至最小值,即探索与开发两个阶段逃跑能量的变化量 Δ*E* 一致,猎物 逃跑能量 *E* 的线性递减方式使算法的搜索与开发行为的平衡性较差,并且无法准确展现实际情况下哈里斯 鹰与兔子的多轮围捕及逃跑过程。为此,在哈里斯鹰逃跑能量的线性递减机制中融入了动态自适应权重, 以增强猎物逃跑能量的非线性表达,实现算法的搜索与开发行为平衡,引入后的表达式如(4)、(5)所示:

$$E = 2E_0\omega(1 - t/T) \tag{4}$$

$$\omega = \delta \left[\omega_{initial} - \left(\omega_{initial} - \omega_{final} \right) \times \frac{1}{e - 1} \times \left(e^{\frac{1}{T}} - 1 \right) \right]$$
(5)

式中: E_0 为初始逃跑能量, $\omega_{initial}$ 表示权重的初始值, ω_{final} 表示权重的终值; t 表示当前的迭代次数; δ 表示[0, 1]之间的随机数; T 表示最大的迭代次数。

2.4. 函数测试

将基准函数代入三种优化算法依次对其进行测试,得到算法性能经过对比后的结果。 图 1~4 为测试函数结果图。

Table 1. Test benchmark functions 表 1. 测试基准函数

编号	函数名	函数	维度	搜索空间	最小值
f_1	Sphere	$f_1 = \sum_{i=1}^n x_{i^2}$	30	[-100, 100]	0
f_2	Schwefel's 2.22	$f_2 = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	30	[-10, 10]	0
f_3	Ackley	$f_{3} = -20 \exp\left(-0.2 \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} x_{i^{2}}\right) - \exp\left(\frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} \cos(2\pi x_{i})\right) + 20 + e$	30	[-32, 32]	0
	Generalized	$\frac{n}{2}$			

f	Generalized	$f = \sum_{n=1}^{n} \left[r = 10 \cos(2\pi r) + 10 \right]$	20	[_600_600]	0
J_4	Rastrigin	$J_4 = \sum_{i=1}^{4} \left[x_{1^2} - 10005(2\pi x_i) + 10 \right]$	50	[-000, 000]	0



Figure 1. Test result diagram of Sphere function 图 1. Sphere 函数测试结果图













利用表 1 中四个基础函数对 IHHO 的性能优势进行测试,初始化设定的种群规模为 3,迭代次数 500。用三个算法[7]对 4 个基础函数进行优化,每个基准函数独立运行 30 次,最后优化对比图如图 1~4 所示。

IHHO 在算法对比图中用红线表示。可以看出 IHHO 算法相对于其他两个算法,对测试基准函数具 有明显的优势,在测试函数中寻优能力更强,其更少的迭代次数适应度值达到最优。

因此,本文研究的改进哈里斯鹰法具有鲁棒性。

表 2. 4 个测试函数 3 个身法计算结果对比							
方法对比	IH	HO	HI	Ю	PS	50	
函数	平均值	最佳值	平均值	最佳值	平均值	最佳值	
f_1	1.00E-15	1.00E-20	1.00E-08	1.00E-12	1.00E-02	1.00E-05	
f_2	1.00E-18	1.00E-25	1.00E-12	1.00E-18	1.00E-04	1.00E-06	
f_3	1.00E-10	1.00E-15	1.00E-06	1.00E-10	1.00E-03	1.00E-04	
f_4	1.00E-12	1.00E-18	1.00E-09	1.00E-15	1.00E-03	1.00E-05	

Table 2. Comparison of calculation results of 4 test functions by 3 algorithms 表 2.4 个测试函数 3 个算法计算结果对比

由表 2 中 4 个测试函数 3 个算法的计算结果对比可见, IHHO 在所有测试函数(*f*₁、*f*₂、*f*₃、*f*₄)上均表现优异,尤其在精度和稳定性方面显著优于 HHO 和 PSO。IHHO 在各函数的平均值和最佳值上均达到最优水平,特别是在 *f*₁和 *f*₂上,表现出较强的优化能力。相比之下,PSO 的平均值较大,表现最差。整体来看,IHHO 在复杂优化问题中具有更高的精度和稳定性,适用于对优化结果要求较高的应用场景。

3. 齿轮和 PMSM 模型的建立

3.1. PMSM 模型的建立与参数设置

永磁同步电机矢量控制仿真模型如图 5 所示。



Figure 5. Simulation model of PMSM servo system **图 5.** PMSM 伺服系统仿真模型

PID 参数整定控制永磁同步电机进行仿真实验时,设定模型中 PMSM 的电机参数如表 3 所示。

表 3. 永磁同步电机参数						
参数	数值	参数	数值			
电阻 Rs	0.958	转动惯量 J/(kg m ²)	0.003 kg m ²			
Ld/mH	5.25e-3	磁极对数 Np	3			
Lq/mH	12e-3H	逆变器直流压 Vd c	311 V			
摩擦系数	0	开关频率 k/Hz	10			

T 11 3 D

3.2. IHHO 算法优化同步电机

建立 IHHO 算法与 PID 控制器[8]的联合仿真结构图,其结构图如图 6 所示。



Figure 6. Structure diagram of IHHO-PID controller 图 6. IHHO-PID 控制器结构图

搭建基于 IHHO 算法 PID 参数整定的仿真模型。PID 控制器仿真模型如图 7 所示。



Figure 7. Simulation model of PID controller 图 7. PID 控制器仿真模型

优化的核心原理是通过精确调整 PID 控制器的参数,以显著提升其对同步电机运行的调控效能。在 MATLAB 环境中建立 IHHO 算法,并将其与 Simulink 中的 PID 控制模块进行了集成。

在此集成架构下, IHHO 算法依据预设的优化目标(包括响应时间、超调量、稳态误差等关键性能指 标)在参数空间内执行深度搜索。通过不断迭代,算法生成一系列新的 PID 参数组合,并利用 Simulink 仿 真模型对每一组合的性能进行全面评估。

在仿真环境中识别出性能优异的 PID 参数组合后,联立同步电机控制系统中进行验证,通过对比分 析优化前后对同步电机的控制效果,确认该参数组合对同步电机优化的有效性和可靠性。

3.3. ADAMS 齿轮模型的建立

在 ADAMS [9] 搭建环形封闭齿轮仿真模型,将电机驱动的主动轮间隔放置于 8 个齿轮之间, 8 个齿 轮参数一模一样,从动轮与主动轮交叉分布。4个主动轮作为输入,4个主动轮加4个从动轮作为输出。

直齿轮的基本参数如表4所示,位置关系图如图8所示。

Table 4. Basic parameters of spur gear 表 4. 直齿轮的基本参数

齿轮参数	数值	参数	数值
齿数	80	齿宽	13
模数	1.35	齿顶高	1
压力角	20	齿根高	1.25



Figure 8. Diagram of the positional relationship between the gear and the motor 图 8. 齿轮与电机位置关系图



Figure 9. Diagram of the positional arrangement of the gear transmission structure 图 9. 齿轮传动结构位置摆放图



Figure 10. Physical diagram of the placement of the gear motor 图 10. 齿轮电机摆放实物图

齿轮电机摆放位置图如图 9、图 10 所示,四个电机与主动轮相连,主从动轮环形接触,齿轮位于环 形支架内。

3.4. Simulink-ADAMS 联合模型的建立

在 Matlab/Simulink 平台搭建 PID 控制同步电机仿真模型[10],并在 ADAMS 搭建齿轮的动力学仿真 模型,将智能算法-PID-同步电机-齿轮进行联合,联仿模型如图 11 所示。

在 Matlab/Simulink 中 IHHO 优化算法对 PID 参数整定[11],得出最优参数值,代入至环形耦合控制的各电机 PID 控制环中,得到输出转速,输出转速通过环形耦合控制反馈至输入端,实现循环优化,最后输出反馈后的最优值; Simulink 电机输出转速输入至 ADAMS 作为齿轮输入转速,通过电机转速的优化,从而实现降低齿轮转速误差。



Figure 11. Simulink-ADAMS combined model 图 11. Simulink-ADAMS 联合模型

4. 仿真结果与分析

4.1. 仿真参数设置

设四个电机的输入转速相同、初始负载相同,分别为 1000 r/min、10N·m,在 0.2 s 时将四个电机的 负载提升到 20 N·m,检测其负载突变时的抗干扰能力,仿真运行时间 t = 0.5 s。

4.2. 初始仿真

仿真得出三个算法[12]改进 PID 控制器的环形耦合控制齿轮传动系统齿轮 1 的初始仿真曲线图,如 图 12 到图 13 所示。



Figure 12. Simulation comparison diagram of the initial rotational speed of gear 1 图 12. 齿轮 1 的初始转速仿真对比图

由图 12 可知,不同控制策略下的初始转速误差表现差异显著。实线初始转速误差最大,达 52 r/min, 波动较大且收敛较慢,动态性能最差;短划线的最大误差为 42 r/min,波动减小且收敛速度明显快于黑色 实线;短点划线表现最佳,初始误差最小,收敛速度最快,最大误差仅为 23 r/min,且更早趋于平稳状态。 整体来看,IHHO 算法具备更强动态同步响应特性。



Figure 13. Simulation comparison diagram of the initial torque of gear 1 图 13. 齿轮 1 的初始转矩仿真对比图

在齿轮传动系统统计施加 10 N·m 负载的情况下,不同算法优化下的转矩响应差异显著。实线最大转矩误差为 12.1 N·m,波动较大,动态性能较差;短划线最大误差降至 11.8 N·m,波动减小,性能优于 PSO;短点划线表现最佳,最大误差仅为 11.3 N·m,波动最小,收敛速度最快,稳定性显著提升。总体 来看,IHHO 算法更适用于对抗干扰性能要求较高的场景。

综上,由图 12 和图 13 可以得出,改进哈里斯鹰算法优化下齿轮传动转速误差和转矩误差的动态性能和稳定性方面均优于其他两种算法,且 IHHO 算法对 PID 参数整定优化齿轮转动误差优化性能更佳。

4.3. 负载突变仿真

在 0.2 s 时,将四个电机的负载瞬时提升至 20 N·m,保持其他运行条件不变,以模拟负载突变场景,测试齿轮传动系统在突加负载情况下的抗干扰性能及动态同步响应特性。



Figure 14. Simulation comparison diagram of sudden changes in rotational speed and load 图 14. 转速负载突变仿真对比图

由图 14 可知,在齿轮 1 转速负载突变的情况下,短点划线同步误差最小,最大误差仅为 11 r/min; 相比之下,短划线最大误差为 15 r/min,而实线最大误差达到 21 r/min。可以看出,改进哈里斯鹰算法展现出更优的动态同步响应特性。



Figure 15. Simulation comparison diagram of sudden torque load changes 图 15. 转矩负载突变仿真对比图

从图 15 可知,在齿轮 1 转矩负载突变的情况下,短点划线表现出更优的同步控制性能,其最大转矩 误差仅为 0.25 N·m,显著优于短划线 0.4 N·m 和实线 1.2 N·m。改进哈里斯鹰算法有效降低了负载突变引 起的误差,展现出更强负载突变下的抗干扰性能力。

由图 14 和图 15 可知,当采用 PID 参数整定的环形耦合控制系统连接齿轮传动系统时,0.2 s 突加负载会导致较大的转速超调。通过哈里斯鹰算法和粒子群算法对 PID 参数进行优化后,系统的控制性能仍难以满足实际应用需求。而采用改进的哈里斯鹰算法后,齿轮在转矩负载突变情况下的波形超调量显著减少,表现出更优的系统动态性能和稳定性,更适用于实际工程应用场景。

5. 结论

本文通过改进哈里斯鹰算法 PID 参数整定的齿轮传动系统进行仿真分析,针对哈里斯鹰算法初始种 群数量少、平衡性差等缺点进行优化,提出改进哈里斯鹰算法实现减小齿轮传动系统的初始转动误差及 负载突变误差。主要研究工作与创新性成果如下:

 改进的哈里斯鹰算法是在标准哈里斯算法基础上引入混沌反向学习策略动态及自适应权重,增加 初始种群多样化及精英个体数量并提升算法全局搜索和局部开发行为的平衡能力。用三个优化算法对四 个测试函数进行对比,其实验结果表明 IHHO 收敛精度更高、收敛速度更快。

2) 改进哈里斯鹰算法 PID 参数整定控制模型能够实现 *K_p、K_i、K_d* 三个参数最优化设计,有效降低同步 齿轮不同负载条件下的初始转动误差和突加负载误差,对降低编织装备编织参数的误差具有工程实际意义。

3) 对比 HHO 和 PSO。IHHO 优化下的齿轮 1 的初始转速误差分别降低 1.9%、2.9%,负载突变转矩 误差分别降低 0.75%、4.75%。

基金项目

江苏省高等教育机构自然科学研究重大计划"高性能热塑性复合材料夹芯板设计与成型制备基础研究"(21KJA460004);常州市应用基础研究"编织过程中碳纤维的摩擦磨损分析及控制研究"(CJ20235047)。

参考文献

- [1] 吴暐, 吴孝泉. 计入齿形误差的直齿圆柱齿轮传动特性研究[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 5-11, 16.
- [2] 尹逊民, 贾海涛, 张西金. 内啮合短齿高直齿轮承载传动误差研究[J]. 机械传动, 2023, 47(6): 22-26.
- [3] Shi, P.D., Chuan, J. and Yu, X. (2023) PID Parameter Tuning Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 2493, Article 012005. <u>https://doi.org/10.1088/1742-6596/2493/1/012005</u>
- [4] 占家豪. 改进哈里斯鹰优化算法在路径寻优中的应用[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [5] 郭雨鑫, 刘升, 高文欣, 等. 精英反向学习与黄金正弦优化的 HHO 算法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(10): 153-161.
- [6] Heidari, A.A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M. and Chen, H. (2019) Harris Hawks Optimization: Algorithm and Applications. *Future Generation Computer Systems*, **97**, 849-872. <u>https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028</u>
- [7] 孙雅芝. 粗糙集与智能优化算法在特征选择中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
- [8] 展广涵, 王雨虹, 刘昊. 混合策略改进的哈里斯鹰优化算法及其应用[J]. 传感技术学报, 2022, 35(10): 1394-1403.
- [9] 栾孝驰,张席,沙云东,等. 基于灰狼算法优化极限学习机的中介轴承故障诊断方法[J]. 推进技术, 2024, 45(4): 195-205.
- [10] 聂诚, 张世盈, 李烨, 等. 基于 ADAMS 的新型狙击榴弹发射器动力学仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(9): 190-199.
- [11] 韩志琦, 董远明, 何鑫龄, 等. 基于 Adams/Simulink 的主动横向稳定杆联合仿真[J]. 内燃机与配件, 2023(19): 27-29.
- [12] 智瀚宇, 贾新春, 张学立. 无人机路径规划: 一种粒子群和灰狼复合算法[J/OL]. 控制工程: 1-8. <u>https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=nKttgsEmyDfZKQal4sP3X-EDbLVbVpwlMrLY-</u> <u>ieHB7g18ySJTHsg2O2xpPdHN_WpmueWU6DxLPb56zMdXRVmPqF8eK8NyaQbebx6HkOltRy3suRVrjfU1IjV_v-</u> <u>twyMMCSlFfAFMhZyZpcDwBWNuCxUo6E7LmJsdxTHthrk4scgbiA5s721srqZoqJSN9Wd_pd-Rlg_Fsv78r-</u> <u>VtLqB9hg==&uniplatform=NZKPT</u>, 2024-05-14.