DOI：10.19666/j.rlfd.202511079

基于改进粒子群算法的水电机组振荡抑制控制器参数优化

鲍　刚，袁妤燃，许江涛，柯思贤，魏　禾
（三峡大学电气与新能源学院，湖北　宜昌　443002）

［摘　　要］【目的】针对高比例水电机组运行中调速器参数难以合理整定、易诱发超低频振荡的问题，提出一种基于改进粒子群算法的调速器参数优化方法，以提升系统低频振荡抑制能力与运行稳定性。【方法】以典型发电机–水轮机耦合模型为研究对象，构建基于改进粒子群算法（particle swarm optimization，PSO）的参数寻优框架，通过多策略粒子初始化提高初始种群分布均匀性，引入动态多样性增强机制自适应调节搜索过程，避免过早收敛；同时设计稳健适应度函数，将低频振荡特性、调节时间、超调量及稳态误差等关键性能指标统一纳入优化目标，形成面向低频性能的多目标优化模型。【结果】通过对比仿真，将所提方法与传统 PSO、增强型 PSO、鲸鱼优化算法、灰狼优化算法及经验整定法进行系统评估。结果表明，所提出改进 PSO 在超低频振荡抑制方面表现最优，可显著降低振荡幅值与衰减时间，缩短系统调节时间并有效抑制超调，在扰动条件下具有更好的动态稳定性和参数鲁棒性。【结论】所提出的基于改进粒子群算法的调速器参数优化方法能够实现参数的高效、可靠整定，为高比例水电系统超低频振荡抑制提供了一种具有工程可行性的技术方案。

［关　键　词］水电机组；超低频振荡；粒子群优化；分数阶 PID 控制；参数整定

［引用本文格式］鲍刚，袁妤燃，许江涛，等. 基于改进粒子群算法的水电机组振荡抑制控制器参数优化[J]. 热力发电，2026，55(7)：76.　Bao G，Yuan Y R，Xu J T，et al. Parameter optimization for oscillation suppression controller of hydropower units based on an improved particle swarm optimization algorithm[J]. Thermal Power Generation，2026，55(7)：76.

Parameter optimization for oscillation suppression controller of hydropower units based on an improved particle swarm optimization algorithm

Bao Gang，Yuan Yuran，Xu Jiangtao，Ke Sixian，Wei He
(School of Electrical Engineering and New Energy，Three Gorges University，Yichang 443002，China)

Abstract: [Objective] Ultra-low frequency oscillations (ULFOs), typically occurring in the range of 0.1~0.7 Hz, have become a critical stability issue in power systems with a high penetration of hydropower units. In practical operation, inappropriate or poorly tuned governor control parameters may introduce insufficient damping or even negative damping, thereby triggering or amplifying ULFOs. The objective of this study is to develop an effective and engineering-oriented parameter optimization method for hydropower unit governors to enhance low-frequency damping performance and improve dynamic stability under disturbances. [Methods] A governor parameter optimization framework based on an improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed. The method is established on a typical generator–turbine coupled model that captures the hydro-mechanical dynamics of the water diversion system, turbine, and generator. A fractional-order PID (FOPID) controller is adopted to provide higher flexibility and control accuracy compared with conventional integer-order PID controllers. To overcome the limitations of traditional PSO, such as premature convergence and weak global search capability in complex multi-parameter optimization problems, several improvements are introduced. First, a multi-strategy

收 稿 日 期：2025-11-25　修 回 日 期：2026-01-06　接 受 日 期：2026-01-09　网络首发日期：2026-01-28
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（62476153）
Supported by：National Natural Science Foundation of China (62476153)
第一作者简介：鲍刚（1977），男，博士，教授，主要研究方向为电力系统分析与控制、梯级水电站控制与仿真，ctgugangbao@ctgu.Edu.cn。
通信作者简介：袁妤燃（2000），女，硕士研究生，主要研究方向为超低频振荡抑制，水电机组调频，2399012796@qq.com。

particle initialization scheme is employed to enhance the uniformity and diversity of the initial population, providing a more favorable starting point for global exploration. Second, a dynamic diversity enhancement mechanism is developed to monitor population evolution in real time and adaptively adjust the search strategy, thereby preventing stagnation and maintaining exploration ability during iterations. Third, a robust fitness function is constructed by comprehensively integrating key performance indicators, including low-frequency oscillation characteristics, regulation time, overshoot, and steady-state error. These indices are jointly considered to form a multi-objective optimization framework specifically oriented toward low-frequency performance and engineering feasibility. [Results] Comparative simulation studies are carried out to evaluate the effectiveness of the proposed method. The improved PSO-based approach is systematically compared with traditional PSO, enhanced PSO, the whale optimization algorithm (WOA), the grey wolf optimizer (GWO), and an empirical tuning method. Simulation results demonstrate that the proposed method exhibits clear advantages in suppressing ultra-low frequency oscillations. Specifically, the optimized controller significantly reduces oscillation amplitude and damping time, shortens system regulation time, and effectively suppresses response overshoot. Moreover, under external disturbances and parameter variations, the optimized governor shows improved dynamic stability and stronger parameter robustness compared with the benchmark methods. The results indicate that the proposed improved PSO achieves a better balance between convergence efficiency and global optimality, leading to superior overall control performance. [Conclusion] The proposed improved PSO-based governor parameter optimization method effectively enhances low-frequency damping characteristics and mitigates ultra-low frequency oscillations in hydropower units. By combining multi-strategy initialization, dynamic diversity enhancement, and a robust fitness function design, the method achieves reliable and high-quality parameter tuning without modifying hardware structures or higher-level control architectures. The study provides a practical and scalable technical solution for oscillation suppression in hydropower-dominated power systems and offers valuable guidance for engineering applications involving governor parameter tuning under complex operating conditions.

Key words: hydroelectric units; ultra-low frequency oscillation; particle swarm optimization; fractional order PID control; parameter tuning

水力发电作为电力系统中关键的调频与调峰手段，其水轮机调节系统的控制性能直接影响电网频率稳定与供电质量。近年来，随着大型水电基地持续建设及区域电网互联结构日益复杂，水电机组在弱联网、高比例水电外送等特殊工况下，逐渐出现超低频振荡现象，振荡频率多处于 0.1~0.7 Hz 范围内[1-3]。该问题的物理本质源于引水系统的强水力惯性（如水锤效应）与较大水流惯性时间常数，在与电网阻尼不足等因素耦合作用下，引发系统负阻尼振荡。此类振荡不仅威胁机组本身安全运行，还可能进一步影响区域电网频率稳定，已成为制约水电高效消纳与电网可靠运行的关键技术瓶颈。因此，深入研究超低频振荡的抑制方法具有重要理论意义与工程价值。

为有效抑制超低频振荡，需从电网调频控制结构角度进行分析[4-6]。一次调频作为机组的快速频率响应机制，其效果受水轮机水锤效应与水流惯性的制约，若调速器控制参数设置不合理，不仅无法提供正阻尼，而且可能激发或加剧振荡。二次调频则侧重于在更长时间尺度恢复系统频率，其响应速度难以匹配 0.1~0.7 Hz 频段的振荡特性。相比之下，优化调速器控制参数被视为从振荡源头解决问题的直接有效途径。该方法通过精细整定调速器核心控制单元（如 PID 或分数阶 PID（fractional order PID，FOPID）控制器）的参数，在不改变硬件结构或上层控制架构的前提下，直接增强系统阻尼特性，从而提升对超低频振荡的抑制能力，成为当前国内外研究的重点。

在控制器结构方面，传统 PID 控制器因其固定的比例、积分和微分参数，限制了其在复杂工况下的调节能力[7-8]。为了克服这一局限，分数阶 PID 控制器引入了可调的积分和微分阶次，使得控制性能更加灵活和精准，逐渐成为研究热点。文献[9-10]采用花粉传播算法与蜻蜓算法优化 FOPID 控制器，验证了其在多种工况下的优越性能；文献[11-12]进一步结合蝙蝠算法等智能算法，提高了系统的抗干扰性和鲁棒性。在参数优化方面，智能算法得到广泛应用，文献[13]通过粒子群（PSO）算法优化 PID 参数增强系统阻尼，文献[14]提出了兼顾一次调频与阻尼增强的多目标优化策略。近年来，数据驱动方法也在研究中逐渐兴起，文献[15-16]利用深度学习提升控制器的适应性。工程实践方面，文献[17]在云南电网中成功调整 PID 参数，有效抑制了超低频振荡。

然而，现有方法在面对水电机组强非线性、非最小相位特性及复杂工程约束时仍存在不足。传统

粒子群算法等启发式方法易陷入局部最优，收敛精度不足，对复杂约束的处理能力较弱；整数阶 PID 控制器结构受限，难以完全适应水轮机系统的复杂动态。此外，多数方法在初始化多样性、探索与开发平衡以及适应度函数的工程实用性方面设计尚不完善，制约了最终控制性能的提升。

为此，本文提出改进的鲁棒全局粒子群算法用于优化 FOPID 控制器参数，主要创新包括：1）双策略粒子初始化机制，提升初始解质量与多样性；2）动态多样性增强与混合参数调整策略，平衡探索与开发能力；3）稳健适应度函数设计，兼顾动态性能与工程约束。最后通过建立完整数学模型并进行对比仿真，验证了所提方法在抑制超低频振荡方面的优越性。

1 水轮机调节系统

为构建控制器设计与仿真研究的理论基础，需建立水轮机调节系统的线性化数学模型。该系统是典型的机电−水力耦合系统，其输入为频率偏差$\Delta\omega$，输出为发电机功率ΔP_e。各环节的动态特性可由以下传递函数描述。

1）引水系统模型

考虑非弹性水锤效应，其传递函数描述为工作水头偏差 $H(s)$与流量偏差 $Q(s)$之间的关系：

$$G_p(s)=\frac{H(s)}{Q(s)}=-T_w s \tag{1}$$

式中：T_w为水流惯性时间常数。

2）水轮机系统模型

考虑弹性水击效应，其动态特性表征为导叶开度偏差$\Delta Y(s)$到机械功率偏差$\Delta P_m(s)$的传递关系：

$$G_t(s)=\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta Y(s)}=\frac{1}{T_e^2 s^2+2\zeta T_e s+1} \tag{2}$$

式中：T_e为弹性水击的固有周期常数；ζ为阻尼比；$\Delta P_m(s)$为机械功率偏差；$\Delta P_e(s)$为电磁功率偏差。

3）发电机及负载模型

发电机转子运动方程描述机械功率与电磁功率偏差 $\Delta P_m(s)$–$\Delta P_e(s)$到频率偏差 $\Delta\omega$ 的动态过程：

$$G_g(s)=\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_m(s)-\Delta P_e(s)}=\frac{1}{T_a s+e_n} \tag{3}$$

式中：T_a为机组转动惯性时间常数；e_n为负载自调节系数。

4）调速器与执行机构

调速器是抑制频率振荡的核心控制单元，传统方案多采用整数阶 PID 控制器结构（图 1）。

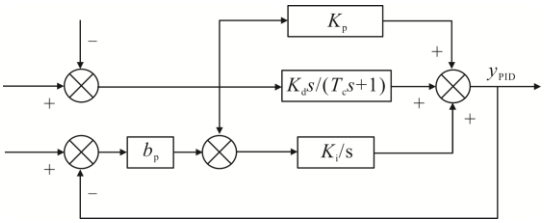


图 1 PID 控制框图

Fig.1 Block diagram of PID control

然而，其固定的参数结构难以充分适应系统的非线性和复杂工况。为此，本文采用自由度更高的 FOPID 控制器，以提升系统的适应性与控制精度。

FOPID 控制器 $G_c(s)$的传递函数为：

$$G_c(s)=K_p+K_i s^{-\lambda}+K_d s^{\mu} \tag{4}$$

式中：K_p、K_i、K_d分别为比例、积分、微分增益；λ和μ为分数阶次。控制器的输入为$\Delta\omega$，输出为导叶开度的控制指令ΔU。图 2 为 FOPID 控制器结构示意[18]。

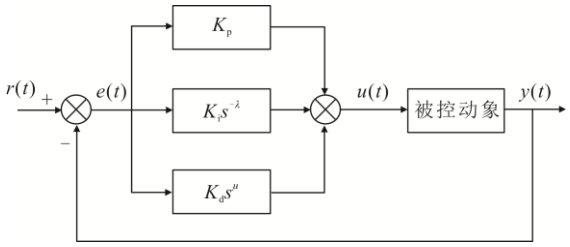


图 2 FOPID 控制器结构示意

Fig.2 Structural diagram of the FOPID controller

伺服机构负责执行控制指令，其动态描述为：

$$G_{servo}(s)=\frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)}=\frac{1}{T_y s+1} \tag{5}$$

式中：T_y为伺服机构时间常数。

2 参数优化策略

PSO 算法奠定了一种高效的协同搜索范式，但其固有的拓扑结构与更新机制限制了其在复杂问题中的全局搜索能力与收敛精度[19]。后续研究的焦点在于如何通过动态策略重构其搜索行为，以打破局部最优的局限。

2.1 传统粒子群算法

PSO 算法本质上是根据群体的随机行为来优化的一种方法，通过粒子的全局最优和个体最优更新粒子自身的速度和位置，不断迭代，从而寻找到最优解[20]。然而，标准 PSO 算法存在易陷入局部最优和收敛精度不高等问题[21-22]。

2.2 双策略粒子初始化机制

传统 PSO 算法通过均匀随机方式生成初始种

群，虽然实现简单，但粒子分布散乱，缺乏导向性，导致初始种群质量较低，增加了陷入局部最优的风险并延缓收敛过程。为提高收敛效率和全局性能，本文提出了一种结合经验引导与空间扩展的双策略粒子初始化机制。

2.2.1 经验引导初始化（策略 A）

该策略基于历史经验或先验知识，将部分粒子初始化于潜在最优区域附近，以提高初始种群的整体质量。其位置生成模型为：

$$x_{i,\mathrm{c}}^{0} = x_{\mathrm{e}} + \sigma_{\mathrm{c}} \times N(0,1) \tag{6}$$

式中：x_{e} 为基于已有先验知识设定的经验参数；$\sigma_{\mathrm{c}}= 0.1\times(x_{\max}-x_{\min})$为保守扰动方差，用于控制粒子在最优区域附近合理偏离范围；$N(0.1)$为标准正态分布。

2.2.2 空间扩展初始化（策略 B）

若单纯依赖经验引导，可能因先验知识不准或不足而使种群陷入局部区域，丧失全局探索能力。为弥补策略 A 的潜在缺陷，策略 B 在搜索空间内进行有导向的扩散分布，旨在主动扩大种群的采样范围，防范过早收敛。其位置生成模型为：

$$x_{i,\mathrm{a}}^{0} = x_{\mathrm{c}} + \sigma_{\mathrm{a}} \times N(0,1) \tag{7}$$

式中：$x_{\mathrm{c}}=0.5\times(x_{\max}-x_{\min})$为参数空间的中心位置；$\sigma_{\mathrm{a}}=0.3\times(x_{\max}-x_{\min})$为激进扰动方差，表示扩展粒子的初始分布范围。

2.2.3 机制优势分析

综上所述，与传统单一初始化方法相比，本文的双策略机制并非简单叠加，而是通过经验引导（策略 A）与空间扩展（策略 B）的协同，从根本上调和了优化过程中“导向性”与“多样性”的内在矛盾。该设计确保了算法在拥有高起点搜索能力的同时，始终保持全局探索潜力，从而为后续优化进程奠定了高效且稳健的坚实基础。

2.3 混合参数动态调整策略

在标准 PSO 中，固定的惯性权重与学习因子难以适应优化的不同阶段，是导致其探索与开发失衡的关键原因之一。为解决此问题，本文引入一种混合参数动态调整策略，对惯性权重与学习因子进行协同调控。

2.3.1 动态惯性权重

为在迭代初期强调全局探索、后期侧重局部开发，采用动态递减的惯性权重策略，其更新方式为：

$$\omega(t) = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})\cdot t}{t_{\max}} \tag{8}$$

式中：$\omega_{\max}$ 与 $\omega_{\min}$ 分别为惯性权重的最大值与最小值；t 与 $t_{\max}$ 分别为当前迭代次数与最大迭代次数。

2.3.2 动态学习因子

单一的惯性权重调整未能调节粒子在“个体认知”与“社会学习”间的平衡。为此，进一步引入时变的学习因子：在迭代初期赋予个体认知因子 c_1 较大值以鼓励探索，随后逐步增大社会学习因子 c_2 以强化群体引导，更新规则如下：

$$c_1(t) = c_{1\max} - \frac{(c_{1\max} - c_{1\min})\cdot t}{t_{\max}} \tag{9}$$

$$c_2(t) = c_{2\min} + \frac{(c_{2\max} - c_{2\min})\cdot t}{t_{\max}} \tag{10}$$

式中：$c_{1\max}$、$c_{1\min}$ 与 $c_{2\max}$、$c_{2\min}$ 分别为 c_1 与 c_2 的取值边界。

2.3.3 策略协同作用

该混合策略通过惯性权重控制算法的整体搜索范围，同时利用学习因子精细调节粒子的学习倾向。二者协同作用，共同平衡了全局探索与局部开发能力，从而有效提升了收敛精度与优化效率。

2.4 动态多样性增强机制

传统 PSO 算法在迭代后期常因种群多样性丧失而陷入局部最优。为主动维持种群的搜索活力，本文设计了一种动态多样性增强机制，通过量化评估、触发判断与恢复策略，有效应对局部最优问题。

2.4.1 改进的多样性度量

传统多样性度量将各维度等同对待，难以反映不同参数对系统性能影响的差异性。为此，本文提出一种基于灵敏度加权的多样性评价指标：

$$D_i = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\sum_{j=1}^{D}\alpha_j (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \tag{11}$$

式中，权重向量α_j用于反映各维度对目标函数的相对重要性。

2.4.2 自适应重启触发机制

为智能判断何时需要干预，设计了一种结合多样性阈值与收敛停滞判断的双条件触发机制。当种群多样性 $D(t)$低于动态衰减的阈值 $D_{\mathrm{t}}(t)$，或全局最优解连续未改进的代数 $S_{\mathrm{c}}(t)$超过最大允许步数 $S_{\max}$ 时，即触发重启：

$$(D(t)<D_{\mathrm{t}}(t)) \text{ 或 } (S_{\mathrm{c}}(t)>S_{\max}) \tag{12}$$

2.4.3 多样性恢复策略

一旦触发重启，将从 3 种策略中择一执行，以平衡探索与开发：

策略 A（全局最优扰动） 在当前最优解邻域内进行精细搜索。

策略 B（精英粒子扰动） 对随机选择的精英粒子进行较大幅度扰动，实现跨区域“跳跃”。

策略 C（全局随机初始化） 将部分粒子重新散布于整个搜索空间，彻底重置搜索状态。

该机制实现了对种群多样性的闭环反馈控制，确保算法在收敛过程中，一旦陷入停滞能自动激活并恢复探索能力。

2.5 稳健适应度函数设计

传统的适应度函数往往权重固定，难以在优化不同阶段灵活调整性能侧重点，且对工程约束的处理能力不足。为此，本文构建了一个融合多目标、动态权重与约束处理的稳健适应度函数，以引导算法获得兼具优异动态性能、稳态精度与工程实用性的控制器参数。

2.5.1 多目标性能整合

为综合评价控制系统的瞬态与稳态性能，选取积分时间绝对误差（δ_{ITAE}）、超调量σ、调节时间 t_{s} 与稳态误差 e_{ss} 4 个关键指标，构建如下归一化目标向量：

$$\boldsymbol{J}=\left[\frac{J_{\mathrm{ITAE}}}{J_{\mathrm{ITAE_{ref}}}},\frac{J_{\sigma}}{J_{\sigma_{\mathrm{ref}}}},\frac{J_{t_{\mathrm{s}}}}{J_{t_{\mathrm{s,ref}}}},\frac{J_{e_{\mathrm{ss}}}}{J_{e_{\mathrm{ss,ref}}}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

式中，各分量由实际值与参考值之比计算，以确保量纲统一。

2.5.2 动态权重调整机制

为在优化前期侧重快速动态（抑制超调、缩短调节时间），在后期侧重稳态精度与误差累积，引入了时变的权重向量。权重随迭代次数动态调整，其更新策略为：

$$\omega_i(t)=f_i(t,T_{\max}),\quad i=1,2,3,4 \tag{14}$$

该设计使优化过程能够自适应地平衡各项性能指标。

2.5.3 约束处理与稳定性保障

在工程实践中，控制器参数需满足一定的运行约束。为避免优化结果偏离实际可行域，本文采用连续可导的软约束函数 $P_{\mathrm{soft}}(x)$处理性能限值。

同时，设置硬性稳定性惩罚项 $P_{\mathrm{hard}}(x)$，对仿真发散或数值异常的情况施加强惩罚，确保优化过程的数值稳健性。

综上，得到稳健适应度函数的最终表达式：

$$F(t)=\sum_{i=1}^{4}\omega_i(t)J_i+P_{\mathrm{soft}}(x)+P_{\mathrm{hard}}(x) \tag{15}$$

该设计确保了优化过程在追求性能最优的同时，兼顾工程实用性与系统稳定性，为控制器参数优化提供了可靠的评价标准。

3 仿真验证

为验证所提改进 PSO 算法与 FOPID 控制器在超低频振荡抑制中的有效性，本节采用仿真案例进行研究，从优化结果、动态性能及收敛特性等多方面进行综合分析。

3.1 机组及调速器模型参数

以典型水轮机−发电机组调频系统为研究对象，其传递函数模型为：

$$G(s)=\frac{1-3.5s}{(1+2.8s)(1+7.0s)(1+0.1s)} \tag{16}$$

该模型包含由水锤效应引入的右半平面零点，呈现典型非最小相位特性。FOPID 控制器采用五阶 Oustaloup 方法在[10^{-3}, 10] rad/s 频段内逼近分数阶算子，离散化采样时间为 0.01 s。

虽然被控对象与闭环为高阶系统，但为便于工程对比与评价，本文在性能指标计算环节采用“二阶主导近似”进行参数推断并给出二阶系统常用指标。这一处理在控制工程中广泛使用，适用于闭环由一对主导共轭极点决定的场景。

3.2 对比算法与评价指标

3.2.1 实验算法配置

为全面评估本文所提改进算法的性能，本文选取多种典型参数优化方法进行对比分析，具体包括以下几类：

粒子群算法[23-24]（PSO） 采用固定惯性权重与学习因子，作为基线算法。

增强全局粒子群算法[25]（enhanced global PSO，EG-PSO） 在 PSO 基础上，引入自适应惯性权重与动态学习因子。

快速经验整定法[26]（simple fast tuning，SFT） 基于经验公式快速设定参数，适用于实时性要求高的场景。

鲁棒全局粒子群算法（robust global PSO，RG-PSO） 为本文所提方法，融合多样性增强与约束处理机制。

为进一步验证本文方法相对于其他启发式优化算法的性能优势，选取近年来在控制参数优化领域中应用较为广泛的鲸鱼优化算法（whale optimization algorithm，WOA）和灰狼优化算法（grey wolf optimizer，GWO）作为补充对比方法。

为保证对比结果的公平性与可重复性，所有随机优化算法均采用相同的种群规模、最大迭代次数及参数约束设置，并在统一的离散化与仿真条件下运行。

3.2.2 性能评价指标与计算

为全面、客观地评估各优化算法的控制效果，本文选取积分时间绝对误差δ_{ITAE}、超调量σ、调节时间 t_{s}、上升时间 t_{r}、稳态误差 e_{ss} 5 项关键时域指标作为评价依据。其中，δ_{ITAE} 数值越小，控制性能越好；超调量不大于 5%；调节时间为进入并保持在±2%稳态误差带内的最短时间；上升时间为响应从10%上升至 90%稳态值所需时间，越小越好；稳态误差不大于 0.2%。

$$\delta_{\mathrm{ITAE}}=\int_0^{\infty}|e(t)|\cdot t\mathrm{d}t \tag{17}$$

式中：$e(t)$为误差函数系数；t 为时间。

在优化过程中，为确保不同算法结果的可比性，对不收敛或违反约束条件的解，统一将其各项性能指标设置为一个足够大的固定惩罚值，以便在结果中清晰区分可行解与无效解。

3.3 计算平台与算法计算效率分析

3.3.1 计算平台与实验设置

为评估不同参数优化算法在工程应用中的计算效率与可实现性，所有仿真与优化程序均在同一计算平台上运行，计算环境配置为：CPU 采用 AMD Ryzen 78845HS 处理器，内存 16.0 GB，操作系统为 Microsoft Windows 11。仿真与优化程序在 MATLAB/Simulink 环境中运行。为保证仿真精度与计算一致性，系统仿真采用固定步长数值积分方法，采样时间设置为 0.01 s。

为降低随机初始化对优化结果的影响，所有随机优化算法在相同的种群规模与最大迭代次数（100 次）设置下独立重复运行 20 次，统计其平均计算性能指标用于对比分析。各算法在仿真过程中均采用一致的模型参数、目标函数与约束条件，以保证对比结果的公平性与可重复性。

3.3.2 运行时间与收敛特性分析

在统一计算平台与相同参数设置下，不同算法完成一次完整优化过程的平均运行时间及其达标情况即计算效率对比见表 1。其中，平均运行时间为算法完成一次完整优化流程的统计结果，用于反映算法完成既定迭代流程的计算代价；“达标情况”指算法是否在多次独立运行中获得满足全部工程约束的可行解。

表 1 计算效率对比

Tab.1 Comparison of computation efficiency between and among different algorithms

算法	平均运行时间/s	达标情况
PSO		未获得有效可行解
EG-PSO	20.455	未获得可行解
SFT	0.025	数值收敛
WOA	849.185	数值收敛但不可行
GWO	877.228	数值收敛但不可行
RG-PSO	18.651	数值收敛

在本文算例所设定的稳定性与性能约束条件下，各算法表现出不同的优化特性。传统 PSO 在多次独立运行中频繁出现发散或违反稳定性约束的情况，未能稳定完成优化过程，因此未统计其平均运行时间。

EG-PSO、WOA 与 GWO 均能够完成数值迭代并给出稳定的运行时间，但其所得最优解在超调量、调节时间或稳态误差等工程约束下未满足可行性要求，属于数值收敛但工程不可行。相比之下，SFT 与本文提出的 RG-PSO 均能够稳定获得满足全部工程约束的可行解，其中 RG-PSO 在保证可行性的同时具有较低的运行时间。

此外，在仿真过程中，各算法的 CPU 与内存资源占用均保持在较低水平，未观察到显著差异，因此本文重点关注运行时间与收敛特性的对比分析。

3.3.3 算法复杂度分析

从理论复杂度角度分析，RG-PSO 在整体框架上与传统 PSO 保持同阶时间复杂度，主要计算量仍由粒子更新与适应度评估过程决定。所引入的多样性增强与重启判断机制仅增加少量辅助计算，不改变算法的复杂度阶数。

在实际工程仿真中，由于无效搜索与重复评估次数的减少，RG-PSO 在多次独立运行中表现出较为稳定的运行时间特性，为后续性能分析提供了基础。

3.4 优化结果与性能分析

3.4.1 控制器参数优化结果

表 2 为不同算法获得的 FOPID 控制器参数优化结果及其约束满足率。其中，“约束满足率”定

义为在多次独立运行中，算法获得满足本文所设定稳定性与动态性能约束的可行解所占比例。由表 2 可以看出，传统 PSO 与 EG-PSO 在复杂约束条件下未能获得可行解，其参数结果以惩罚值形式体现；WOA 与 GWO 虽能够搜索到数值收敛的参数组合，但在超调量、调节时间及稳态误差等工程约束条件下均未获得满足要求的可行解，约束满足率为 0。相比之下，SFT 与本文提出的 RG-PSO 均能够稳定获得满足约束的可行解，其中 RG-PSO 在参数寻优过程中表现出更强的约束处理能力与鲁棒性。

表 2 FOPID 控制器参数优化结果及其约束满足率

Tab.2 Parameter optimization results of the FOPID controller and the constraint satisfaction rates

算法	K_p	K_i	K_d	λ	μ	约束满足率/%
PSO	惩罚值	惩罚值	惩罚值			0
EG-PSO	惩罚值	惩罚值	惩罚值			0
SFT	0.300 0	0.020 0	0.100 0	1.000 0	1.000 0	100
WOA	1.195 8	0.249 7	0.124 2	0.999 6	0.364 8	0
GWO	1.177 8	0.249 7	0.098 7	0.999 6	0.877 0	0
RG-PSO	0.296 4	0.017 8	0.088 9	0.850 0	0.950 0	100

3.4.2 系统性能对比分析

表 3 为不同算法获得的可行控制器在时域性能指标上的表现。由表 3 可以看出，传统 PSO 与 EG-PSO 在本文算例中未获得满足工程约束的可行解，其性能指标未予列出；WOA 与 GWO 虽能够实现数值收敛，但其所得参数组合在超调量、调节时间等至少一项工程性能约束上超限，未形成工程可用的可行解，因此未纳入表 3 的可行解性能对比。相比之下，SFT 与 RG-PSO 均能够稳定获得可行控制器，其中 RG-PSO 在积分时间绝对误差、超调量、调节时间及稳态误差等指标上均优于 SFT，表现出更优的综合动态性能。

表 3 系统性能指标对比（可行解）

Tab.3 Comparison of the system performance indicators (feasible solution)

算法	δ_{TAE}	超调量/%	调节时间/s	上升时间/s	稳态误差
PSO					
EG-PSO					
SFT	15.000 0	2.86	36.30	12.15	0.002
WOA					
GWO					
RG-PSO	10.446 2	1.63	25.08	8.45	0.001

3.5 收敛性与鲁棒性分析

RG-PSO 在 100 代内实现稳定收敛，最终适应度值为 5.032 2，计算时间为 15.2 s，展现出良好的收敛效率。SFT 虽无需迭代，计算迅速，但收敛值显著较高。EG-PSO 与 PSO 因约束处理能力不足而优化失效。

频域分析表明，RG-PSO 设计的控制器具有 ∞ dB 的增益裕度和 92.52°的相位裕度，带宽为 0.002 8 rad/s，在保证稳定性的同时提供了充分的鲁棒性。

3.6 仿真结果分析

3.6.1 时域响应特性分析

为评估控制效果，图 3—图 6 对比了各算法在相同扰动下的时域响应。图 3—图 6 仿真结果表明，在所有获得可行解的对比算法中，RG-PSO 优化得到的 FOPID 控制器在动态响应速度、超调抑制能力及稳态精度等方面均表现出最优的综合性能。

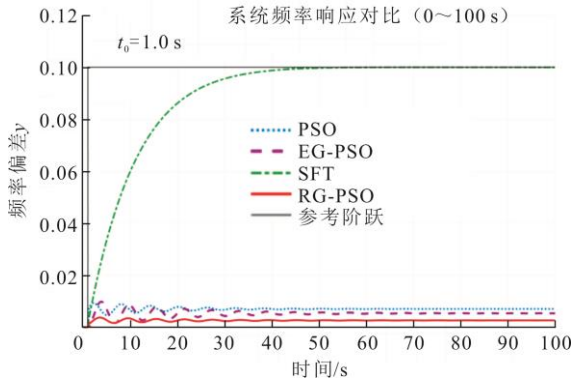


图 3 系统频率响应曲线

Fig.3 Response curves of the system frequency

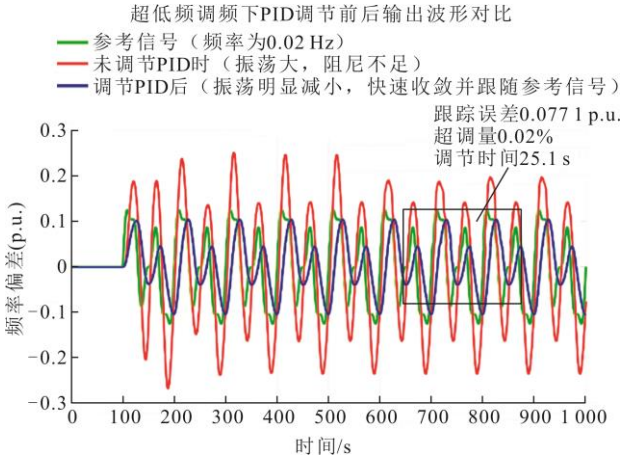


图 4 控制前后频率偏差对比

Fig.4 The frequency deviations before and after control

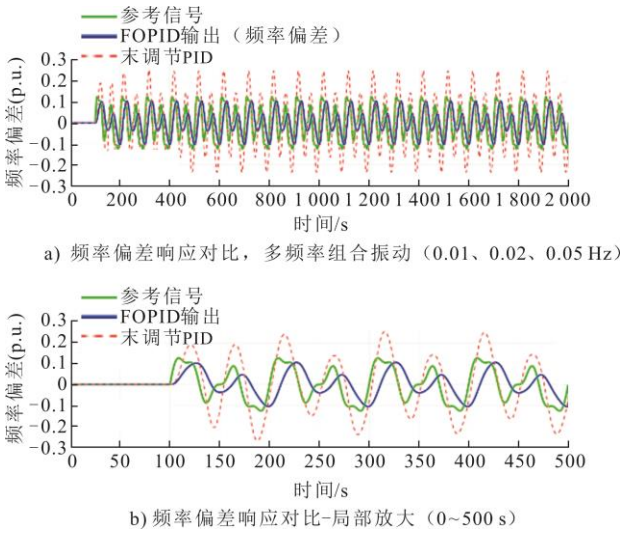


图 5 多频扰动鲁棒性测试

Fig.5 The multi-frequency disturbance robustness testing

具体来看，图 3 显示 RG-PSO 响应曲线最为平滑，超调量最低，收敛迅速，动态与稳态性能优异；PSO 与 EG-PSO 则存在明显振荡和超调，调节时间较长；SFT 虽能稳定但动态性能不足。图 4 进一步表明，RG-PSO 能显著缩短频率恢复时间，有效避免反向调节，而原系统响应迟缓、振荡持续。在多频扰动测试中（图 5），RG-PSO 展现出良好的鲁棒性，响应平滑且始终稳定，而 EG-PSO 与 PSO 出现发散，SFT 调节缓慢。

图 6 从整体响应、初期动态和累计误差 3 个角度进一步验证了 RG-PSO 的优越性：其响应过程平稳、超调极小，能有效抑制非最小相位特性引起的初始偏移，且误差累积速率显著低于其他算法。

综上所述，RG-PSO 优化的 FOPID 控制器在动态响应、稳态精度和鲁棒性方面均显著优于对比方法，有效提升了系统对超低频振荡的抑制能力，具备良好的工程适用性。

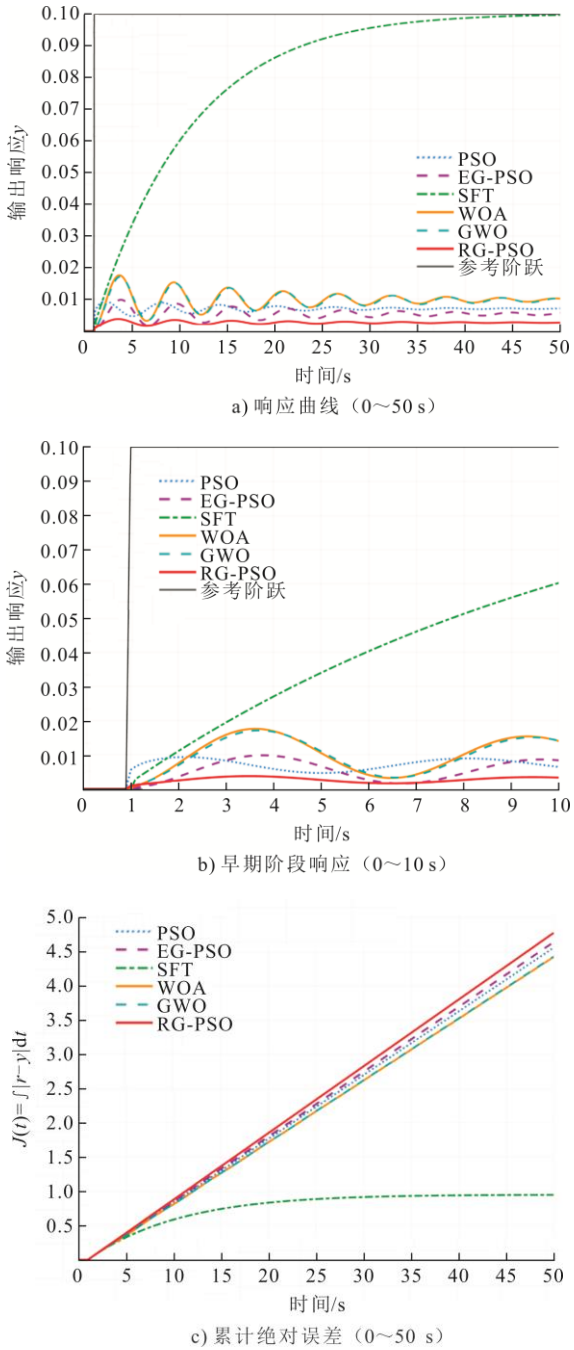


图 6 多算法控制器响应特性对比（含不可行解）

Fig.6 Comparison of response characteristics of multi-algorithm controllers (including infeasible solutions)

3.6.2 频域指标与稳定裕度

为进一步分析不同控制器参数在频域内的稳定性特征，本文计算了各算法对应的增益裕度、相位裕度及系统带宽，表 4 为控制器参数的频域稳定性特征指标，表 4 中当系统在所分析频段内未出现增益交叉时，其增益裕度记为∞ dB。频域指标主要

用于反映系统对参数扰动与模型不确定性的鲁棒性特征。

从表 4 对比结果可以看出，WOA 与 GWO 所得参数对应的相位裕度较低且系统带宽显著增大，稳定裕度不足；PSO 与 EG-PSO 在本文算例中未获得满足工程约束的可行解，其频域结果仅用于分析参数组合的稳定性特征。相比之下，RG-PSO 在获得工程可行解的同时兼顾较大的相位裕度与较小的系统带宽，频域稳定裕度特征更为合理。

表 4 控制器参数的频域稳定性特征指标
Tab.4 Frequency domain stability characteristic indicators of controller parameters

算法	增益裕度/dB	相位裕度/(°)	带宽/(rad s^{-1})	稳定性评价
PSO	∞	94.46	0.031 1	较差
EG-PSO	40.38	94.36	0.014 4	较差
SFT	∞	99.14	0.011 7	良好
WOA	∞	57.49	3.643 9	较差
GWO	∞	37.72	3.711 6	较差
RG-PSO	∞	92.52	0.002 8	优秀

3.7 结果讨论与工程分析

综合时域响应、频域特性及计算效率分析结果可知，在复杂稳定性与性能约束条件下，算法能否稳定获得可行解是衡量其实用性的关键。结果表明，传统 PSO 与 EG-PSO 在本文算例中未获得满足工程约束的可行解；WOA 与 GWO 虽实现数值收敛，但其最优解未能满足动态性能要求。

相比之下，SFT 与本文提出的 RG-PSO 均能够稳定获得可行控制器参数，其中 RG-PSO 在时域性能、频域稳定性及可行解获取稳定性方面均表现更优。

4 结 语

本文提出了一种用于水电机组调速系统振荡抑制的鲁棒全局粒子群优化算法 RG-PSO，并将其应用于 FOPID 控制器参数优化。仿真结果表明，RG-PSO 能够在复杂约束条件下稳定获得满足工程要求的可行解，并在时域性能、频域稳定性及可行解获取稳定性方面优于对比算法。

在保证与传统 PSO 同阶计算复杂度的前提下，RG-PSO 在计算效率与控制性能之间取得了良好平衡，适用于水电机组调速器参数的离线优化与工程整定。

[参 考 文 献]

[1] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑频率稳定的电力电子电源频率控制参数优化方法[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1751.
Wang B C, Sun H D, Li W F, et al. Frequency control parameter optimistic method of converter-interfaced generation considering frequency stability[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1751.

[2] 王淋, 巨云涛, 吴文传, 等. 面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4479.
Wang L, Ju Y T, Wu W C, et al. Optimization design of inertia and damping parameters of virtual synchronous microgrid for improving frequency stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4479.

[3] 刘勤, 余锐, 张宇栋, 等. 高水电占比电网频率振荡抑制技术工程实践及展望[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3840.
Liu Q, Yu R, Zhang Y D, et al. Engineering practice and prospect of frequency oscillation suppression technologies for power systems with high proportion of hydropower[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3840.

[4] 刘子全, 姚伟, 文劲宇, 等. 调速系统频率模态对电网低频振荡的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2978.
Liu Z Q, Yao W, Wen J Y, et al. Influence of governor system and its frequency mode on low frequency oscillations of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2978.

[5] 庄文彬. 水/火力发电系统切换型振荡机理与特性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2023: 1.
Zhuang W B. Mechanism and characteristic analysis of switching-type oscillation in hydro/thermal power generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023: 1.

[6] 王海鑫, 刘铭崎, 董鹤楠, 等. 含高比例新能源的电力系统低频振荡分析与抑制综述[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 152.
Wang H X, Liu M Q, Dong H N, et al. Review on analysis and suppression of low-frequency oscillation in power system with high penetration of renewable energy sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 152.

[7] Mahadev D S, Chatterjee S. A general class of optimal nonlinear resonant controllers of fractional order with time-delay for active vibration control: theory and experiment[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 182: 109580.

[8] 赵景玉, 李志远, 赵弘毅, 等. 高频驱动大功率电动式扬声器的分数阶 PID 控制[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(25): 10782.
Zhao J Y, Li Z Y, Zhao H Y, et al. Fractional-order PID control of a high-frequency-driven high-power electrodynamic loudspeaker[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(25): 10782.

[9] Tirumalasetty C, Naladi R B, Ankit Y, et al. Control of electric machines using flower pollination algorithm based fractional order PID controller[J]. Global Transitions Proceedings, 2021, 2(2): 227.

[10] Çelik E. Design of new fractional order PI-fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems[J]. Soft Computing, 2021, 25: 1193.

［11］Chaib L, Choucha A, Arif S. Optimal design and tuning of novel fractional order PID power system stabilizer using a new metaheuristic bat algorithm[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2017, 8: 113.

［12］梁远哲, 马瑜, 江妍, 等. 基于分数阶混合蝙蝠算法的 Otsu 图像分割[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(11): 3091.
Liang Y Z, Ma Y, Jiang Y, et al. Otsu image segmentation based on a fractional-order hybrid bat algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(11): 3091.

［13］肖灿, 王德林, 李振鹏, 等. 抑制电力系统超低频振荡的水轮机调速器参数优化控制研究[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2135.
Xiao C, Wang D L, Li Z P, et al. Research on parameter optimization control of turbine governor for suppressing ultra-low frequency oscillation in power systems[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2135.

［14］Zhao Z, Yang J, Chung C Y, et al. Performance enhancement of pumped storage units for system frequency support based on a novel small signal model[J]. Energy, 2021, 234: 121207.

［15］Shi Y, Zhou J, Guo W, et al. Nonlinear dynamic characteristics analysis and adaptive avoid vortex-coordinated optimal control of hydropower units under grid connection[J]. Renewable Energy, 2022, 200: 911.

［16］Zhang G Z, Zhao J B, Hu W H, et al. A multiagent deep reinforcement learning-enabled dual-branch damping controller for multimode oscillation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 31(1): 483.

［17］Zhang G, Zhao J, Hu W, et al. Deep reinforcement learning enabled Bi-level robust parameter optimization of hydropower-dominated systems for damping ultra-low frequency oscillation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11: 1770.

［18］刘福才, 王海澎. 分数阶 PID 控制在电动变载荷加载系统中的应用[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(8): 91.
Liu F C, Wang H P. Application of fractional-order PID control in electric variable-load loading system[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(8): 91.

［19］石建平, 李培生, 刘国平, 等. 基于改进粒子群优化算法的混沌系统参数估计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 70.
Shi J P, Li P S, Liu G P, et al. Parameter estimation of chaotic systems based on an improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 70.

［20］许文俊, 王锡淮. 基于变尺度黑洞和种群迁徙的粒子群优化算法[J]. 计算机工程与科学, 2023, 45(11): 2036.
Xu W J, Wang X H. A particle swarm optimization algorithm based on variable-scale black hole and population migration[J]. Computer Engineering & Science, 2023, 45(11): 2036.

［21］董子健, 高洋, 冉宁. 基于改进粒子群算法的间接空冷系统广义预测控制参数优化[J]. 热力发电, 2026, 55(4): 166.
Dong Z J, Gao Y, Ran N. Parameter optimi-zation of generalized predictive control for indirect air-cooling system based on improved particle swarm optimi-zation algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(4): 166.

［22］王炜, 朱蕾, 许存华, 等. 基于分数阶粒子群优化算法的水电机组一次调频参数辨识[J]. 水电能源科学, 2025, 43(3): 186.
Wang W, Zhu L, Xu C H, et al. Primary frequency regulation parameter identification of hydro-electric generating units based on fractional-order particle swarm optimization algorithm[J]. Water Resources and Power, 2025, 43(3): 186.

［23］Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95: International Conference on Neural Networks. 1995: 1942. DOI:10.1109/ICNN.1995.48896.

［24］杨强, 仲卫, 谢善益, 等. 基于粒子群算法优化 PID 的海上风电柔直并网系统调频控制[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8): 144.
Yang Q, Zhong W, Xie S Y, et al. Frequency regulation control of offshore wind power VSC-HVDC grid-connected system using PID optimized by particle swarm algorithm[J]. Automation Technology and Application, 2024, 43(8): 144.

［25］杨斌, 王晓菊, 毛海涛, 等. 基于改进粒子群算法的并联水库联合防洪调度研究[J/OL]. 水文, 1-9 [2025-11-13]. https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20250013.
Yang B, Wang X J, Mao H T, et al. Study on joint flood control dispatching of parallel reservoirs based on improved particle swarm optimization algorithm[J/OL]. Hydrology, 1-9 [2025-11-13]. https:// doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20250013.

［26］李政, 陈楚琦, 曾文杰, 等. 小型压水堆核蒸汽供应控制系统参数多目标优化研究[J]. 核动力工程, 2024, 45(6): 185.
Li Z, Chen C Q, Zeng W J, et al. Multi-objective optimization study of parameter control in nuclear steam supply system of small pressurized water reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(6): 185.

（责任编辑　杜亚勤）