

基于改进粒子群算法的电力系统无功优化

李芳, 李伯群, 崔阳

(辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051)

摘要:为提高电力系统无功优化的经济性与运行稳定性,提出了一种改进的粒子群算法(particle swarm optimization, PSO),用于实现配电网无功优化调度。以网损和运行成本最小为目标函数,构建包含传统电容器组与无功补偿器出力的无功优化模型。通过引入精英竞角领导策略与驱动扰动机制,增强算法全局搜索能力与收敛性能,并采用 Sigmoid 函数动态调整惯性权重,使粒子在解空间分布更为均匀,有效克服传统 PSO 易早熟收敛的缺陷。此外,定义一种特殊拥挤距离度量方式,保持解的分布性与多样性。在多模态多目标测试函数上的实验表明,该算法能够稳定获取大量分布均匀的帕累托最优解。基于 IEEE 14 节点系统的仿真验证进一步表明,所提方法在无功优化中具有明显优势,可提供多种分布均匀且多样化的无功补偿方案,显著降低网损并改善电压质量,为配电网优化运行提供有效决策支持。

关键词:多目标无功优化;粒子群优化算法;运行成本;有功功率;非支配排序

Reactive Power Optimization of Power System Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

LI Fang, LI Boqun, CUI Yang

(School of Electronics and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning,
Liaoning Anshan 114051, China)

Abstract: For improving the economic performance and operation stability of reactive power optimization in power systems, an improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed to achieve reactive power optimization dispatching in distribution networks. Taking the minimum network loss and operating cost as the objective functions, a reactive power optimization model including the output of traditional capacitor bank and reactive power compensators is constructed. By introducing the elite competitive leadership strategy and the driving perturbation mechanism, the global search ability and convergence performance of the algorithm are enhanced. Moreover, the Sigmoid function is adopted to dynamically adjust the inertia weight and make the particle distribution in the solution space more uniform, which effectively overcomes the defect of premature convergence of traditional PSO. In addition, a special crowding distance measurement mode is defined, which can maintain the distribution and diversity of solutions. The experiments on multimodal and multi-objective test functions show that this algorithm can stably obtain a large number of uniformly distributed Pareto optimal solutions. The simulation verification based on the IEEE 14-node system further indicates that the proposed method has obvious advantages in reactive power optimization. It can provide a variety of uniformly distributed and diverse reactive power compensation schemes, significantly reduce network losses and improve voltage quality, as well as provide effective decision support for the optimal operation of distribution network.

Keywords: multi-objective reactive power optimization; particle swarm optimization algorithm; operating cost; lossy power; non-dominated ordering

收稿日期:2025-10-11; 修回日期:2025-11-10

基金项目:辽宁省教育厅科研项目(LJKMZ20220655)。

Project Supported by Scientific Research Project of the Department of Education of Liaoning Province(LJKMZ20220655)。

0 引言

电力系统的稳定性与经济性在现代电力工程中至关重要,其中无功功率的优化分配是实现这一目标的关键环节。无功功率不仅影响电网的电压稳定性,直接关系到输电线路的损耗与系统的运行效率。因此,如何高效地优化电力系统中的无功功率分配,成为研究者和工程师们亟待解决的重要课题^[1]。

电力系统的稳定性与经济性高度依赖于无功功率的优化分配,该环节直接影响电网电压水平和运行效率。传统方法如线性规划和动态规划虽曾广泛应用,但在大规模复杂系统中逐渐出现计算效率低、精度不足等问题^[2]。为此,各类智能优化算法被引入以提高无功优化性能。例如,文献[3]利用遗传算法进一步逼近全局最优;文献[4]采用自适应聚焦粒子群算法(adaptive focusing particle swarm optimization, AFPSO),结合静态电压稳定指标建立优化模型,提升了系统性能。PSO 算法因其参数简单、全局搜索能力强而备受关注。

近年来,多种改进 PSO 算法被提出以应对复杂优化问题。文献[5]基于奇异值分解与多策略自适应 PSO 有效确定了无功补偿节点与容量,在 IEEE 118 节点系统中实现 38.6% 的降损率提升;文献[6]通过分解策略和“多点”变异增强了解集多样性,并结合非支配排序维护精英解存档;文献[7]以网损最小为目标改进 PSO,在 IEEE 30 节点系统中验证了其优越性。这些成果表明改进 PSO 在无功优化中具有良好的适用性。

文中基于电力系统实际运行情况,制定了新的目标函数。旨在形成一种高效的多目标粒子群优化算法,以实现电力系统中无功功率的优化分配。通过改进 PSO 算法,提出一种新颖的无功优化策略。通过改进策略,对测试函数的仿真对比结果进行分析,验证了改进算法在收敛性和解的多样性方面的优越性。最后结合实际电力系统的无功功率优化需求,将该算法应用在电力无功优化问题中。

1 电网无功优化模型

由于进行了无功补偿,可使补偿点以前的线路中通过的无功电流减小,从而使线路的供电能力增加,减少损耗。

1)可降低的线路损耗

$$\Delta P_{\text{补偿后}} = \Delta P \frac{0.67^2}{0.95^2} \approx 0.5 \Delta P \quad (1)$$

总之,增加无功补偿后会减少无功在电网中流

动,其主要目的是降低线损,其次,能很好地改善电压质量,从而提高供电企业的经济效益^[8-10]。

2)改善电压质量

$$\Delta U = 3 \frac{PR + QXL}{U} \quad (2)$$

潮流计算模型主要用于分析和优化电力系统中的无功功率分布,旨在提升其经济性、可靠性和稳定性。系统优化问题可通过基础数学模型来描述,该模型包含目标函数、等式约束条件及不等式约束条件。无功补偿系统结构图见图 1。

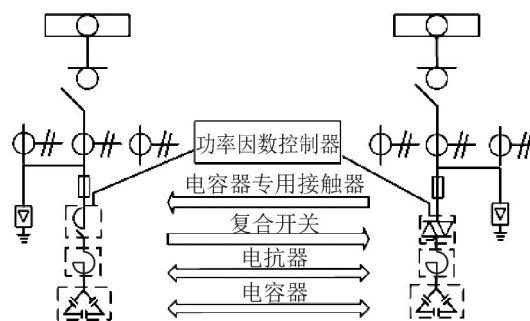


图1 无功补偿系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of reactive power compensation system

1.1 目标函数

无功功率优化同时兼顾有功功率损耗与运行成本,为构建目标函数奠定基础。在实际应用中,成本控制成为决定性因素,对优化结果产生显著影响^[11-13]。

1.1.1 运行成本

电力系统的无功优化考虑系统经济运行成本最少为目标函数 C , 公式为

$$C = \sum_{j \in NC} C_{cj}(Q_{cj}) + \sum_{i \in NG} [C_{gpi}(P_{Gi}) + C_{gqi}(Q_{Gi})] \quad (3)$$

式中: NC 代表带有无功补偿器的节点数量; NG 代表发电机节点的数量; $C_{cj}(Q_{cj})$ 表示节点 j 的无功补偿器的运行成本函数; 而 $C_{gqi}(Q_{Gi})$ 则表示节点 j 的有功发电成本函数; $C_{gpi}(P_{Gi})$ 表示节点 i 的无功发电成本函数。

1.1.2 有功损耗

从经济角度出发考虑有功功率最小为目标函数 F , 公式为

$$\min F = \min \sum_{k=1}^n G_{ij} [u_i^2 + u_j^2 - 2u_i u_j \cos(\delta_j - \delta_i)] \quad (4)$$

式中: n 表示网络中的总支路数量; G_{ij} 是支路 ij 的导纳; u_i 和 u_j 分别是节点 ij 的电压值; 而 δ_i 和 δ_j 则是节点 i 和 j 的相位角。

1.2 潮流方程

模型同时纳入了等式约束与不等式约束,其中等式约束满足潮流方程。该潮流方程整合了有功功率与无功功率平衡方程,确保系统中发电、输电与用电三者间的平衡关系^[14]。变量列表见表1。

表1 变量列表
Table 1 List of variables

变量	类型	描述
u_i	控制量	发电机电压
T_i	控制量(离散)	负载母线电压
Q_{Gi}	控制量	发电机的无功输出
Q_{Di}	控制量	功率补偿容量
v_i	状态量	节点电压幅值
s_{ij}	状态量	线路功率

1) 有功功率平衡方程

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (5)$$

式中: P_{Gi} 为节点处发电机的有功输出功率; P_{Di} 为节点 i 的有功负荷; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 与 j 之间的电压相位差; G_{ij} 和 B_{ij} 为节点导纳矩阵的实部与虚部。

2) 无功功率平衡方程

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (6)$$

式中: Q_{Gi} 为节点 i 处发电机的无功输出功率; Q_{Di} 为该节点的无功负载功率。

1.3 约束条件

目标函数的约束条件需要考虑到节点处的电压,发电机的无功输出应在上下限之间,控制变量和状态变量的上下界。

$$\begin{cases} u_{i \min} \leq u_i \leq u_{i \max} \\ Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \\ Q_{Ci \min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci \max} \\ T_{i \min} \leq T_i \leq T_{i \max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $u_{i \max}$ 和 $u_{i \min}$ 为节点 i 电压的最大和最小值; Q_{Gi} 为节点 i 发电机的无功输出; $Q_{Gi \max}$ 和 $Q_{Gi \min}$ 为其无功输出的上下限; Q_{Ci} 为第 i 个无功补偿装置的无功补偿能力; $Q_{Ci \max}$ 和 $Q_{Ci \min}$ 分别为该装置的上下限; T_i 为第 i 台有载调压变压器的变比; $T_{i \max}$ 和 $T_{i \min}$ 分别为该变压器变比可调节的最大和最小值。

2 改进的粒子群优化算法

PSO 算法可与帕累托前沿方法结合以识别非支配解—即当优化一个目标需要以另一个目标为代价时,从而促进最优权衡分析^[15-21]。

1) 方案比较:通过帕累托支配关系对比各方案的优劣。当方案 x_1 在所有优化目标上均不劣于方案 x_2 ,且至少在一个目标上优于 x_2 时,则称 x_1 支配 x_2 。

2) 方案存储:采用外部存档机制存储帕累托最优解集,并通过定期更新来维持解集的多样性与收敛性。

2.1 觅食行为

粒子群算法借鉴了鸟类集群觅食的行为模式,通过群体协作与信息共享显著提升搜索效率。鸟类既通过移动和信号传递食物位置,分工保障安全,部分成员负责搜寻;另一些则警惕捕食者。这种行为通过个体粒子的位置和速度更新,将这些原理完美融入算法体系。引入了一个额外的变量来表达个体位置和速度的更新,公式为

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_1 [P_{id}(t) - x_{id}(t)] + c_2 r_2 [P_{gd}(t) - x_{id}(t)] \quad (8)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (9)$$

式中: $v_{id}(t)$ 和 $x_{id}(t)$ 表示一只鸟(一个粒子 i)在 t 时刻的速度和位置; ω 是惯性权重,控制粒子的前进速度; c_1 和 c_2 表示学习因子,影响粒子向个体最优和全局最优移动的程度; r_1 、 r_2 为随机数,增加了算法的随机性; $P_{id}(t)$ 和 $P_{gd}(t)$ 分别为当前第 i 个粒子的最优解(个体最优解)和到当前迭代次数为止所有粒子找到的最佳解(全局最优解);粒子根据自身的经验(个体最佳位置 P_{best})和群体的经验(全局最佳位置 g_{best})进行搜索,从而寻找最优解^[22]。粒子在空间中的搜索过程如图2所示。

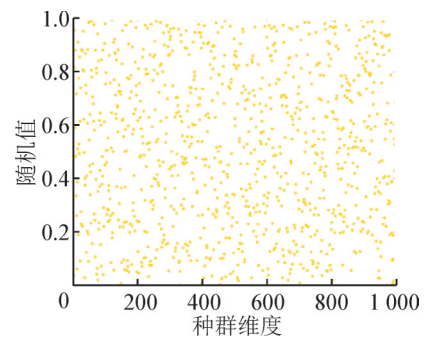


图2 粒子在空间中的搜索过程图
Fig. 2 Diagram of the particle search process in space

2.2 聚集行为

粒子在搜索过程中会倾向于靠近其他粒子,特别是表现较好的粒子。这种行为有助于提高搜索的效率,增强粒子之间的协作,从而加速收敛到最优解。这种行为主要有两种表现:一是对每个粒子,用它的适应度值 $fit(i)$ 和个体最优值 $p_{best}(i)$ 比

较。如果 $fit(i) < p_{best}(i)$, 则用 $fit(i)$ 替换掉 $p_{best}(i)$ 。二是对每个粒子, 用它的适应度值 $fit(i)$ 和全体最优值 $g_{best}(i)$ 比较。如果 $fit(i) < p_{best}(i)$, 则用 $fit(i)$ 替换 $g_{best}(i)$ 。粒子在空间中的聚集图如图3所示。

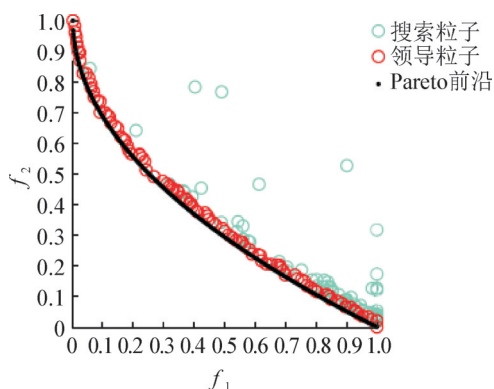


图3 粒子在空间中的聚集图
Fig. 3 Aggregation diagram of particles in space

2.3 精英竞角领导策略

在选择 leader 时, 采用竞争机制策略, 结合欧氏距离来选 leader 粒子。先计算外部档案里粒子间的欧氏距离, 确定每个粒子 i 与最接近粒子 j 的距离, 把前 5% 的粒子归为候选领导粒子合集, 保障种群多样性。接着把粒子分成优秀和非优秀两类, 随机选定候选领导粒子 a 和 b , 依据当前粒子与 a 、 b 的夹角确定学习方向: 优秀粒子向夹角小的粒子学习, 非优秀粒子向夹角大的粒子学习, 以此丰富飞行轨迹, 增强寻优效果^[23]。竞争领导粒子图见图4。

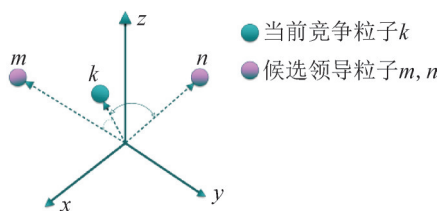


图4 竞争领导粒子图
Fig. 4 Competitive leadership particle diagram

2.4 惯性权重的Sigmoid调度策略

在该策略中, 使用 Sigmoid 函数, 在 PSO 中, 可以将当前迭代次数 t 映射到一个新的范围来调整惯性权重, 能够自适应地调整惯性权重, 使其在优化初期保持较高的值, 以促进探索, 随着迭代次数逐渐增大, 惯性权重逐渐减小, 增强对局部最优解的利用。公式为

$$S(t) = \frac{1}{1 + e^{-k(t-t_0)}} \quad (10)$$

式中: t 为当前迭代次数; k 为控制函数斜率的参数, 适当减小使权重变化更加平缓, 逐渐过渡; t_0 是

Sigmoid 函数的中心点, 通常设置为总迭代次数的一半。Sigmoid 函数的输出值在 0 到 1 之间。在 PSO 中, 惯性权重可以根据 Sigmoid 函数计算公式为

$$w(t) = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min})S(t) \quad (11)$$

式中: $w_{\max}$ 为惯性权重, 一般取[0.4, 0.9]之间的数; $S(t)$ 是 Sigmoid 函数的输出。

惯性权重 ω 改进前后对比如图5所示。

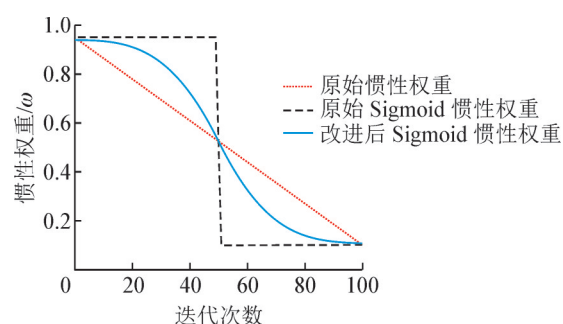


图5 惯性权重 ω 改进前后对比图
Fig. 5 Comparison diagram of inertial weighting before and after improvement

通过改进, 初始阶段较高的惯性权重促进粒子的广泛探索, 而随着迭代的进行, 权重逐渐减小, 从而提高了粒子对已发现最优解的利用效率。这种动态调整可以有效地提高 PSO 的收敛速度以及优化性能^[24]。

2.5 多样性维护策略

一种分层拥挤度策略, 通过将解集划分为不同层级并应用差异化的拥挤度计算方法, 有效提升了种群的多样性与分布均匀性。外部存档(即帕累托前沿)中的解根据其目标值或属性被分配至不同层级, 并通过拥挤度计算与分层维护机制的结合, 共同保证全局和局部范围内的分布均匀性。该策略还能够随优化过程动态调整, 以适应解集结构的变化。假设存在一个包含 N 个解的解集 S , 目标函数 $f_1, f_2, \dots, f_n$, 针对目标 f_k 取值范围 $[f_k^{\min}, f_k^{\max}]$ 被划分为若干区段 $[f_k^{\min} + (l-1) \cdot \Delta_k, f_k^{\min} + \Delta_k \cdot l]$, $l = 1, 2, \dots, L$ 。

使用 K 均值聚类算法将解集 S 将种群划分为 K 个簇: $C_1, C_2, \dots, C_k$, 每个簇 C_i 对应一个层级^[25]。

在分层拥挤策略中, 拥挤度计算被划分为全局拥挤度和局部拥挤度: 全局拥挤度用于评估解在整个解集中的分布密度, 根据全局拥挤度对整个解集进行分层修剪, 并优先保留拥挤度较大的解。对于解 i , 其全局拥挤度 CD_i^{global} 的公式为

$$CD_i^{\text{global}} = \sum_{m=1}^M \frac{f_m(i+1) - f_m(i-1)}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (12)$$

式中: $f_m(i+1)$ 和 $f_m(i-1)$ 分别为解 i 在目标 m 上相邻解的客观值; $f_m^{\max}$ 与 $f_m^{\min}$ 分别为目标 m 的上下限值; M 为目标函数的数量^[26]。

局部拥挤度用于评估给定层级内解的分布密度,并根据该指标在每一层级内进行修剪,以确保解在各层级内均匀分布。对于层级 l 中解 i 的局部拥挤度,公式为

$$CD_i^{\text{local}} = \sum_{j \in SL} d_{ij} \quad (13)$$

式中: SL 为层级 l 中的解集合, d_{ij} 为解 i 与解 j 之间的欧几里得范数距离。

粒子分层拥挤度如图 6 所示。

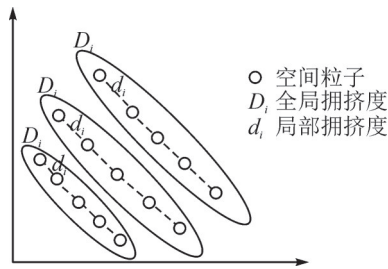


图6 粒子分层拥挤度

Fig. 6 Particle layer crowding degree

2.6 驱动扰动机制

为确保搜索过程能够更全面地探索解空间,避免过早陷入局部最优解,提出了一种基于粒子类型的扰动更新策略。这种扰动的引入增强了算法的鲁棒性,使其能够在不断变化的环境和条件下找到更优的解决方案;粒子在搜索空间的过程中容易受到外界扰动,使得粒子不易搜索到真实的 Pareto 前沿面,该策略能够对此做出回应并更新自己的位置。扰动更新的具体公式为

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_1 [P_{id}(t) - x_{id}(t)] + c_2 r_2 [P_{gd}(t) - x_{id}(t)] + c_3 r_3 [P_{fd}(t) - x_{id}(t)] \quad (14)$$

$$c_3 = \frac{c_1 + c_2}{2} \quad (15)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1), \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad d = 1, 2, \dots, D \quad (16)$$

式中: $P_{fd}(f \neq i)$ 为扰动粒子,扰动粒子根据粒子的种类进行选择,通过将扰动更新后的粒子与当前的领导粒子进行非支配比较,选取占优的粒子^[27]。

改进的算法融合了粒子群优化技术的优点和多目标优化的方法,致力于探索一组 Pareto 最优解。在此过程中,每个解(即粒子)在搜索空间中持续调整其位置和速度,从而达到多个目标之间的平衡;关键在于动态更新粒子的状态,并通过维护一个高效

的 Pareto 存档来保存迄今为止发现的最优解集^[28]。搜索粒子更新聚集图如图 7 所示。

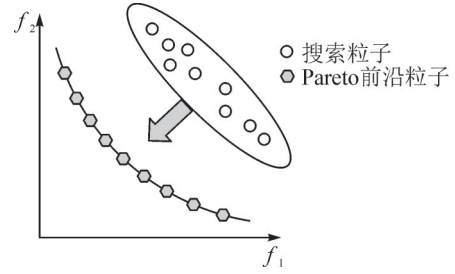


图7 搜索粒子更新聚集图

Fig. 7 Search particle update aggregation diagram

2.7 改进的粒子群算法流程

通过求解模型来实现多目标无功优化,求解所使用的方法为改进粒子群算法。算法流程包括计算当前位置和速度;计算适应度,更新最优值;推入改进策略;继续更新最优等,流程见图 8。多目标无功优化目的是求解集是一组非劣解集^[29-32]。

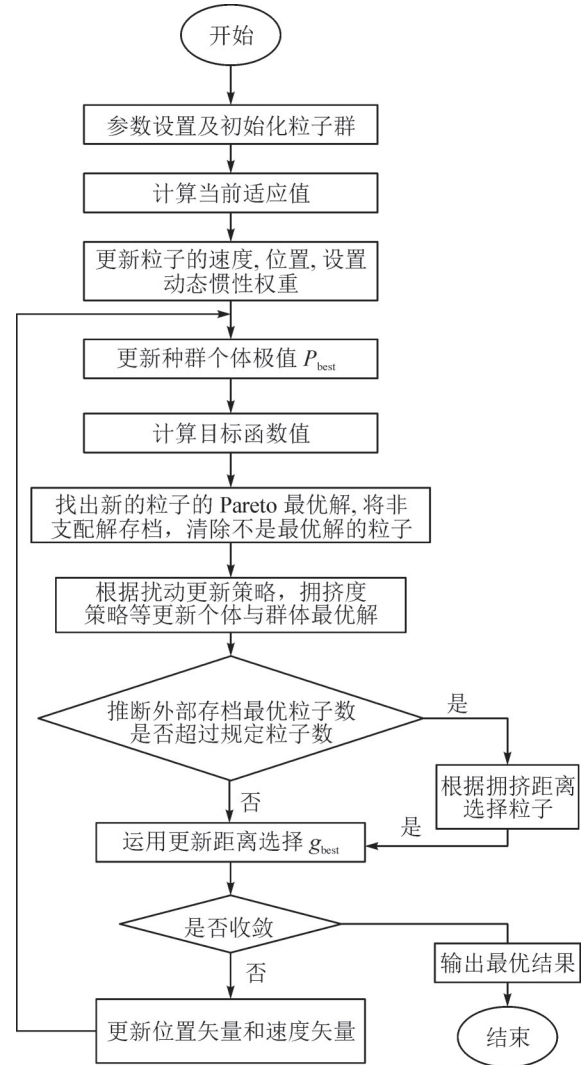


图8 改进算法优化的流程图

Fig. 8 Flowchart of the improved algorithm

3 性能测试

为验证算法的有效性和适用性,将该算法与多目标优化算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA - II)、多目标进化算法(multi - objective evolutionary algorithm based on decomposition, MOEA/D)和标准粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)应用于经典测试函数,统称为其他算法,以评估其解决多目标问题的能力。实验中,群体数量为 100,迭代次数为 100。使用超体积指标(hypervolume indicator, HV)和反世代距离(inverted generational distance, IGD)来评价多目标算法的收敛性和多样性。HV 越大、IGD 越小,算法性能越优。并选取 ZDT₁、ZDT₂、ZDT₃、DTLZ₁、DTLZ₄、DTLZ₇ 6 种测试函数,对改进的算法 LMMOPSO 和其他算法在 Pareto 前沿上进行测试验证^[33]。

表2 测试函数仿真结果
Table 2 Test function simulation results

测试函数	应用算法	HV 均值	IGD 均值
ZDT ₁	NSGA-II	0.710 6	0.010 5
	MOEA/D	0.711 4	0.010 7
	MOPSO	0.701 8	0.016 1
	LMMOPSO	0.713 4	0.012 0
ZDT ₂	NSGA-II	0.428 5	0.008 7
	MOEA/D	0.440 2	0.007 9
	MOPSO	0.435 0	0.011 9
	LMMOPSO	0.433 5	0.010 8
ZDT ₃	NSGA-II	0.593 8	0.014 4
	MOEA/D	0.620 2	0.034 6
	MOPSO	0.600 5	0.015 3
	LMMOPSO	0.596 6	0.010 2
DTLZ ₁	NSGA-II	0.773 5	0.049 8
	MOEA/D	0.756 5	0.089 3
	MOPSO	0.741 9	0.063 1
	LMMOPSO	0.792 1	0.052 1
DTLZ ₄	NSGA-II	0.518 6	0.107 2
	MOEA/D	0.539 8	0.079 6
	MOPSO	0.490 7	0.135 3
	LMMOPSO	0.552 2	0.064 5
DTLZ ₇	NSGA-II	0.265 5	0.115 0
	MOEA/D	0.242 1	0.183 0
	MOPSO	0.265 6	0.097 8
	LMMOPSO	0.273 9	0.084 4

LMMOPSO 算法在测试函数上的 Pareto 前沿见图 9,从图 9 可以看出,改进算法在帕累托前沿收敛性方面表现卓越,通过均匀的解分布逼近真实前沿。该算法收敛速度快,且能保持解之间的均匀间距,避免了传统算法中常见的解聚集或分布不均现象。对比实验证实了其稳定性和高效性,凸显了该算法在实际工程应用和多样化优化方案中的潜力^[34]。

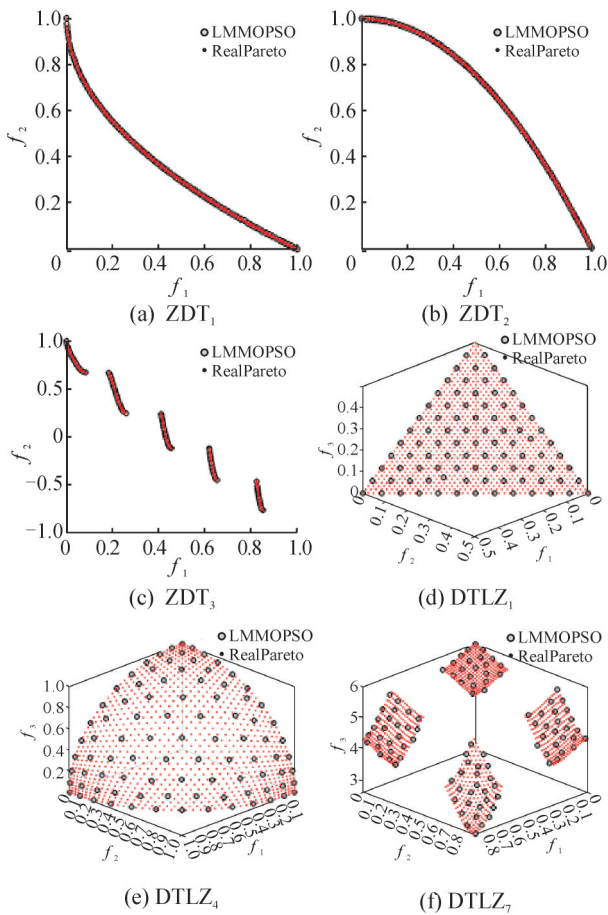


图9 LMMOPSO 算法在测试函数上的 Pareto 前沿图
Fig. 9 The Pareto frontier map of the LMMOPSO algorithm on the test function

4 仿真研究

为测试 LMMOPSO 算法在无功优化中的性能,应用仿真考虑运行成本与网损两个优化目标。采用包含 20 条线路、5 台发电机和 11 个负荷的 IEEE 14 节点系统进行验证。节点 1 为平衡节点;2、3、6 节点是发电节点;节点 9 与节点 14 配置并联电容器,其余 10 个节点是负荷节点。具体配置系统结构图如图 10 所示。

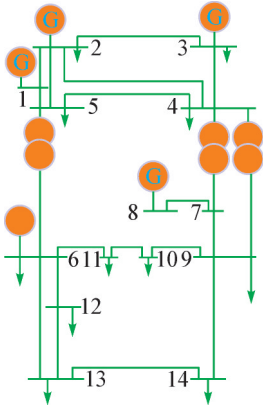
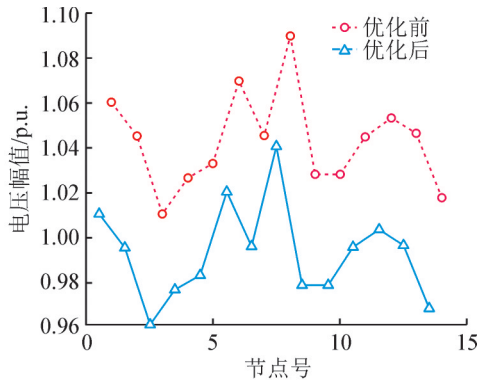
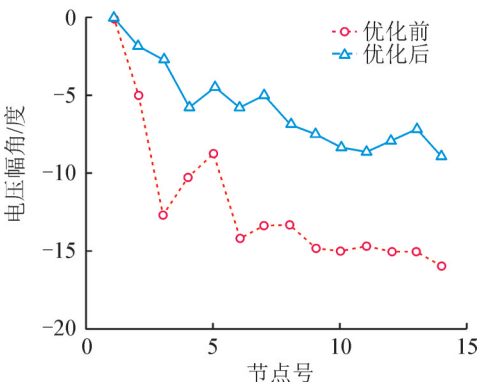


图10 IEEE 14节点系统
Fig. 10 IEEE 14-node system

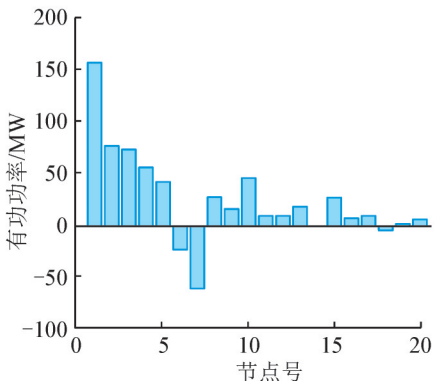
以 IEEE 14 节点系统的电压分布和线路功率流作为约束条件, LMMOPSO 算法对电力系统进行优化, 以分析功率损耗(kW)与运行成本(百万美元)之间的权衡关系。图 11 展示了优化前后的电压分布曲线, 节点配置曲线以及线路功率流曲线的优化前后变化。



(a) IEEE 14 节点系统电压分布



(b) IEEE 14 节点系统相角分布



(c) IEEE 14 节点系统线路功率电流

图 11 IEEE 14 节点系统电压、相角及功率分布
Fig. 11 Voltage, phase angle and power distribution in the IEEE 14-node system

在电力系统中, 电压幅值常以标么值(p.u.)表示, 1 p.u. 对应额定电压。如图 11(a)所示, LMMOPSO 算法展现出优异的电压调节能力, 将所有节点电压稳定在 IEEE 标准范围(0.95~1.05 p.u.)

内, 波动幅度降低 5%, 优化后系统减少了远距离输电, 降低线路总阻抗, 实现了更合理的电压分布。如图 11(b)所示, 相位角曲线中局部陡峭波动通常表示线路拥塞或功率分配不均, 通过 LMMOPSO 优化后, 调整发电机出力和负荷分布, 网损降低, 相位角更接近参考值, 最大相位角差显著缩小, 缓解波动。通过潮流计算(图 11(c))可评估系统潮流状态和线路负载, 判断是否存在过载, 以及电功率是否能够从发电机高效传输至负荷节点。

LMMOPSO 算法及对比算法优化后的收敛曲线如图 12 所示。对于两目标无功优化问题(目标 f_1 与 f_2), LMMOPSO 算法所得的帕累托前沿形状与 ZDT₁ 测试函数相近, 反映出两个目标间存在显著权衡关系。该算法在解集的收敛性和稳定性方面优于传统 MOPSO 等算法, 可有效协调运行成本与系统功率损耗之间的平衡。

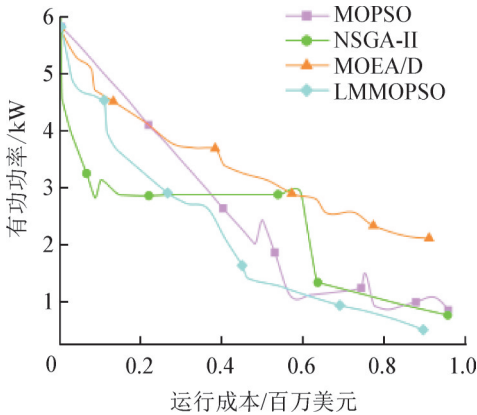


图 12 LMMOPSO 算法及对比算法优化后的收敛曲线
Fig. 12 The convergence curves of the LMMOPSO algorithm and the comparison algorithm after optimization

5 结语

针对提出的 LMMOPSO 算法, 在无功优化应用中, 改进算法展现出了快速收敛能力与稳定的功率损耗扰动特性, 有效降低系统功率损耗和运行补偿成本, 并优化电压稳定性分布。该算法实现改进结论如下:

1) 采用多模态系列测试函数及性能指标将 LMMOPSO 算法与其他 3 种算法进行比较, 验证了改进算法的优越性。

2) 在 IEEE 14 节点网络中, 该算法能清楚显示出网损与运行成本这两个目标存在矛盾关系, 能够在解空间中获得收敛性良好的近似 Pareto 前沿; 在无功补偿后, 系统电压有显著的支撑, 明显改善网损大小和电压质量。

3) 针对粒子群的全局搜索性能差的问题, 文中

采用精英竞角领导策略与驱动扰动机制以及 Sigmoid 函数动态调整惯性权重,提出了一种改进的多目标粒子群优化算法。但当前研究聚焦于网损与运行成本优化,对继电保护配合及系统停电时限等因素的分析仍显不足。后续将进一步构建更精准、贴合实际应用的建模方法。

参考文献

- [1] 李伟龙. 基于改进 PSO 的配电网无功优化研究[J]. 电气开关, 2024, 62(6):45-47.
LI Weilong. Research on reactive power optimization of distribution network based on improved PSO[J]. Electric Switcher, 2024, 62(6):45-47.
- [2] 黄浩,黄咏乐,彭翔. 电力系统无功优化的智能算法研究与应用[J]. 环境技术, 2024, 42(12):210-213.
HUANG Hao, HUANG Yongle, PENG Xiang. Research and application of intelligent algorithms for reactive power optimization in power systems[J]. Environmental Technology, 2024, 42(12):210-213.
- [3] 周双喜,郑智,鲁宗相,等. 基于多种群遗传算法的无功规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6):66-71.
ZHOU Shuangxi, ZHENG Zhi, LU Zongxiang, et al. New reactive power planning based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2007, 19(6):66-71.
- [4] 刘述奎,李奇,陈维荣,等. 改进粒子群优化算法在电力系统多目标无功优化中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11):31-36.
LIU Shukui, LI Qi, CHEN Weirong, et al. Multi-objective reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11):31-36.
- [5] 陈春萌,梁英,张舒捷. 基于多策略自适应粒子群算法的电网无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4):102-108.
CHEN Chunmeng, LIANG Ying, ZHANG Shujie. Reactive power optimization of power grid based on multi-strategy adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):102-108.
- [6] 杨景明,侯新培,崔慧慧,等. 基于融合多策略改进的多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2018, 33(2):226-234.
YANG Jingming, HOU Xinpei, CUI Huihui, et al. Improved multi-objective particle swarm optimization algorithm based on integrating multiply strategies[J]. Control and Decision, 2018, 33(2):226-234.
- [7] 邹帅,姬嘉明,杨旭东,等. 改进 PSO 算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(24):77-80.
ZOU Shuai, JI Jiaming, YANG Xudong, et al. Application of improved PSO algorithm in power system reactive power optimization[J]. Information and Computers(Theoretical Edition), 2021, 33(24):77-80.
- [8] 张志成. 基于鲸鱼算法的配电网无功补偿配置优化方法[J]. 电气技术与经济, 2025(3):214-216.
ZHANG Zhicheng. Reactive power compensation configuration optimization method for distribution networks based on whale algorithm[J]. Electrical Equipment and Economy, 2025(3):214-216.
- [9] 张虹,张泽熙,李亚洲,等. 基于分布式信息交互的微电网多智能楼宇区间滚动 P2P 电能交易策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(13):4292-4305.
ZHANG Hong, ZHANG Zexi, LI Yazhou, et al. A rolling P2P energy trading strategy based on distributed information interaction for multi-intelligent buildings in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(13):4292-4305.
- [10] 凌峰,郁从丽,袁一凡,等. 基于改进遗传算法的低压配电网无功补偿自动优化方法[J]. 自动化应用, 2024, 65(15):258-259.
LING Feng, YU Congli, YUAN Yifan, et al. Automatic optimization method of reactive power compensation of low-voltage distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Automation Application, 2024, 65(15):258-259.
- [11] 程玉,何之倬,王子畅,等. 基于遗传算法的光储 VSG 控制系统无功优化策略[J]. 电力与能源, 2025, 46(2):179-182.
CHENG Yu, HE Zhizhuo, WANG Zichang, et al. Reactive power optimization strategy for PV-storage VSG control system based on genetic algorithm[J]. Power & Energy, 2025, 46(2):179-182.
- [12] 王琳语. 一种基于改进 PSO 算法的配电网无功优化研究[J]. 东北电力技术, 2025, 46(4):44-47.
WANG Linyu. Research on reactive power optimization of distribution network based on improved PSO algorithm[J]. Northeast Electric Power Technology, 2025, 46(4):44-47.
- [13] 许田阳,李文转,范凯迪,等. 基于分层粒子群优化算法的用户侧电力调峰配置模型[J]. 电工技术, 2023(5):40-42.
XU Tianyang, LI Wenzhuan, FAN Kaidi, et al. User side power peak shaving configuration model based on hierarchical particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Engineering, 2023(5):40-42.
- [14] 熊军华,赵迪迪,刘国庆. 基于多目标粒子群算法的配电网无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(3):26-32.
XIONG Junhua, ZHAO Didi, LIU Guoqing. Reactive power optimization of distribution network based on multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(3):26-32.

- jective particle swarm optimization[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(3):26-32.
- [15] 窦迅, 邓叶航, 王顺江, 等. 基于改进多智能体深度确定策略梯度算法的配电网无功协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(8):79-86.
- DOU Xun, DENG Yehang, WANG Shunjiang, et al. Reactive power coordination optimization scheduling of distribution network based on improved multi-agent deep deterministic policy gradient algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(8):79-86.
- [16] 赵晶晶, 朱炯达, 刘帅, 等. 基于集群划分的配电网多时间尺度分布式有功-无功协同优化方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10):57-66.
- ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LIU Shuai, et al. Multi-timescale distributed active and reactive power coordinated optimization method of distributed network based on cluster division[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10):57-66.
- [17] 傅国斌, 孙海斌, 王海亭, 等. 含高渗透率新能源电力系统多目标无功优化方法[J]. 高压电器, 2025, 61(5):291-301.
- FU Guobin, SUN Haibin, WANG Haiting, et al. Multi-objective reactive power optimization method for new energy power systems with high permeability[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5):291-301.
- [18] 杜晓东, 李晓明, 韩思宁, 等. 基于线性化潮流模型的配电网电压无功控制策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4):41-47.
- DU Xiaodong, LI Xiaoming, HAN Sining, et al. Volt/var control strategy of distribution network based on linearized power flow model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4):41-47.
- [19] 丁璨, 李江, 袁召, 等. 基于MOPSO算法的超导限流器结构参数优化[J]. 高压电器, 2024, 60(11):209-216.
- DING Can, LI Jiang, YUAN Zhao, et al. Structural parameter optimization of superconducting current limiter based on MOPSO algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11):209-216.
- [20] 乔立同, 汪挺, 刘剑宁, 等. 考虑源网荷储协调互动的配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5):146-151.
- QIAO Litong, WANG Ting, LIU Jianning, et al. Distribution network reactive power optimization considering generation network load storage interaction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5):146-151.
- [21] 蔡黎, 向丽红, 晏娟, 等. 引入PID反馈的SHAEKF算法估算电池SOC[J]. 电池, 2024, 54(1):47-51.
- CAI Li, XIANG Lihong, YAN Juan, et al. Introduction of SHAEKF algorithm with PID feedback for estimating battery SOC[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2024, 54(1):47-51.
- [22] 吴桐. 基于Q学习超启发算法的农村配电网无功补偿配置容量优化[J]. 电工技术, 2025(11):104-106.
- WU Tong. Capacity optimization of reactive power compensation configuration in rural distribution networks based on Q-learning super heuristic algorithm[J]. Electric Engineering, 2025(11):104-106.
- [23] 马凡烁, 于惠钧, 李嘉轩, 等. 基于改进红嘴蓝鹊优化算法的光储配电网无功优化方法[J]. 湖南电力, 2025, 45(3):95-102.
- MA Fanshuo, YU Huijun, LI Jiaxuan, et al. Reactive power optimization method of photovoltaic energy storage distribution network based on improved red-billed blue magpie optimization algorithm[J]. Hunan Electric Power, 2025, 45(3):95-102.
- [24] 徐涛, 李互刚, 杨龙雨, 等. 注意力机制和多目标粒子群混合驱动的配电网无功优化[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(7):146-154.
- XU Tao, LI Hugang, YANG Longyu, et al. Hybrid-driven reactive power optimization for distribution networks driven by attentional mechanisms and multi-objective particle swarms[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2024, 40(7):146-154.
- [25] 赵晏淇, 李伯群, 张春宇, 等. 基于改进海鸥优化算法的热连轧板带轧制规程优化[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(11):97-104.
- ZHAO Yanqi, LI Baiqun, ZHANG Chunyu, et al. Optimization of hot continuous rolled strip rolling schedule based on improved seagull optimization algorithm[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(11):97-104.
- [26] 刘振超, 苑迎春, 王克俭, 等. 融合特征权重与改进粒子群优化的特征选择算法[J]. 计算机工程与科学, 2024, 46(2):282-291.
- LIU Zhenchao, YUAN Yingchun, WANG Kejian, et al. Feature selection algorithm based on feature weights and improved particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Science, 2024, 46(2):282-291.
- [27] 杨铎炯, 俞靖一, 葛俊, 等. 海上风电场自适应多目标无功优化控制策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3):121-129.
- YANG Duotong, YU Jingyi, GE Jun, et al. Adaptive multi-objective reactive power optimization control strategy for offshore wind farms[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2024, 43(3):121-129.
- [28] 高金兰, 刁楠, 侯学才, 等. 基于改进粒子群算法的主动配电网无功优化[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(11):19-23.
- GAO Jinlan, DIAO Nan, HOU Xuecai, et al. Reactive power optimization of active distribution network based on improved particle swarm algorithm[J]. Techniques of Auto-

- mation and Applications, 2024, 43(11):19-23.
- [29]高家元,黄帅,姜飞,等.弱电网下基于比例权重的控制环参数自适应调整并网逆变器稳定性提升方法[J].电工技术学报,2024,39(24):7846-7859.
- GAO Jiayuan, HUANG Shuai, JIANG Fei, et al. Stability improvement method of grid-connected inverter based on proportional weight control loop parameters adaptive adjustment under weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(24):7846-7859.
- [30]徐曼,丁然,王德胜,等.考虑风电场并网性能差异的风电集群有功控制策略优化[J].浙江电力,2024,43(10):85-92.
- XU Man, DING Ran, WANG Desheng, et al. Optimization of an active control strategy for wind farm clusters considering their integration performance difference[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(10):85-92.
- [31]杨葆鑫,邢文奇,刘鹏飞,等.基于直流电压前馈的构网型光伏稳定性优化控制策略[J].高压电器,2024,60(12):213-222.
- YANG Baoxin, XING Wenqi, LIU Pengfei, et al. Optimal control strategy of stability for grid-forming photovoltaic based on DC voltage feedforward[J]. High voltage apparatus, 2024, 60(12):213-222.
- [32]龚凯,肖晃庆,张展,等.新能源并网换流器的自适应混合同步控制及其小信号稳定性分析[J].浙江电力,2024,43(11):3-14.
- GONG Kai, XIAO Huangqing, ZHANG Zhan, et al. Adaptive hybrid synchronization control of grid-connected converters in renewable power plants and its small-signal stability analysis[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11):3-14.
- [33]徐婕,俞斌,白隆,等.基于前推回代法的含DG配电网无功优化[J].自动化与仪表,2024,39(11):13-17.
- XU Jie, YU Bin, BAI Long, et al. Reactive power optimization of distribution network with DG based on forward pushback generation method[J]. Automation & Instrumentation, 2024, 39(11):13-17.
- [34]尚磊,唐王倩云,苏适,等.构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压[J].电力工程技术,2024,43(2):83-93.
- SHANG Lei, TANG Wangqianyun, SU Shi, et al. Suppression of transient overvoltage in renewable energy transmission terminal by grid-forming based reactive power compensation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2):83-93.

作者简介:

李芳(1997—),女,硕士,研究方向为电力系统自动化,配电网多目标无功优化、智能优化算法。E-mail:2477406063@qq.com。

李伯群(1970—),男,教授,研究方向为轧钢自动化、智能优化算法等。E-mail:lbqhylyxab@163.com。

崔阳(1985—),女,副教授,研究方向为非线性系统控制、多智能体系统控制、全驱系统理论及应用。