



基于区间建模的新能源电网无功优化策略

王中夫

引用本文:

王中夫. 基于区间建模的新能源电网无功优化策略[J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 95–106.

WANG Zhongfu. Reactive Power Optimization Strategy of Power Grid Incorporating Renewable Energy Based on Interval Modeling[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(4): 95–106.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于SA-PSO的风电消纳经济性动态规划分析](#)

Research on Dynamic Economic Dispatch of Grid-connected Wind Power Based on SA-PSO Algorithm

南方能源建设. 2019, 6(3): 92–97 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.016>

[电池储能系统对微电网运行特性的改善作用研究](#)

Operation Performances Enhancement of Micro-grid by Battery Energy Storage System

南方能源建设. 2015, 2(2): 35–40 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.006>

[基于电网经济效率评估的发电和输电协调规划方法研究](#)

Research on the Coordination Planning Method of Power Generation and Transmission Based on Economic Efficiency Assessment of Power Grid

南方能源建设. 2020, 7(3): 38–45 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.005>

[± 200 MVar STATCOM保护策略配置与优化](#)

Relay Protection Strategies Composition and Optimization of ± 200 MVar STATCOM

南方能源建设. 2015, 2(z1): 60–65 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.013>

[含分布式电源的配电网重构](#)

Reconfiguration of Distribution Network with Distributed Generation

南方能源建设. 2015, 2(2): 46–51 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.008>

基于区间建模的新能源电网无功优化策略

王中夫[✉]

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 新能源发电具有间歇性和随机性, 其功率为不确定性数据, 会造成电网电压和频率的变化, 对电力系统安全运行构成威胁。为保证大规模新能源并网后电网电压的安全, 考虑新能源发电波动不确定性, 提出一种基于区间建模的新能源电网无功优化策略。[方法] 该策略采用区间数描述无功优化模型中的不确定参数, 进而建立区间无功优化模型, 采用基于优化场景的区间潮流算法求解区间潮流方程, 获取状态变量区间, 确定控制变量的可行性, 在此基础上采用改进的粒子群优化算法求解区间无功优化模型, 在粒子群算法中加入局部搜索环节和离散变量交叉处理操作以提高算法寻优能力。为了验证所提方法的有效性和优越性, 分别采用 IEEE 14 节点和 IEEE 30 节点算例进行仿真计算, 与自适应遗传算法和普通粒子群算法进行对比分析。[结果] 仿真结果表明: 与自适应遗传算法和普通粒子群算法相比, 采用改进粒子群的区间无功优化策略具有更快的收敛速度, 更强的寻优能力, 并且可有效处理模型中离散变量。[结论] 所提策略可有效解决区间无功优化问题, 能保障大规模新能源并网后电网电压的运行安全。

关键词: 区间优化; 无功电压控制; 区间潮流; 改进粒子群算法; 优化场景法

中图分类号: TM7; TM74

文献标志码:

文章编号: 2095-8676(2021)04-0095-12

开放科学(资源服务)二维码:



Reactive Power Optimization Strategy of Power Grid Incorporating Renewable Energy Based on Interval Modeling

WANG Zhongfu[✉]

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] New energy power generation is intermittent and random, and its power is uncertain data, which will cause changes in grid voltage and frequency, thus pose a threat to the safe operation of the power system. In order to ensure the safety of grid voltage after large-scale new energy grid connection, considering the uncertainty of new energy generation, a reactive power optimization strategy of power grid incorporating renewable energy based on interval modeling is proposed. [Method] This strategy used interval to describe uncertain parameters in reactive power optimization model, and then established interval reactive power optimization model. The interval power flow algorithm based on optimization scenario was used to solve the interval power flow equation, thus obtaining the interval of state variables and determining the feasibility of control variables. On this basis, the improved particle swarm optimization algorithm was used to solve the interval reactive power optimization model, and the local search method and discrete variable cross-processing operation were added to the particle swarm optimization algorithm to improve optimization ability. In order to verify the effectiveness and superiority of the proposed method, IEEE 14 - bus and IEEE 30 - bus examples were used for simulation, and the proposed algorithm was compared with the adaptive genetic algorithm and the ordinary particle swarm optimization algorithm. [Result] The simulation results show that compared with adaptive genetic algorithm and ordinary particle swarm optimization algorithm, the improved particle swarm interval reactive power optimization strategy has a faster convergence speed, stronger optimization capabilities, and can effectively solve the discrete variables in the model. [Conclusion] Our data suggest that the proposed strategy can effectively solve the interval reactive power optimization problem and ensure the operation safety of grid voltage after large-scale new energy grid connection.

收稿日期: 2021-05-10 修回日期: 2021-06-10

基金项目: 中国能建广东院科技项目“分散式风电技术与经济模型研究”(EV04951W)

Key words: interval optimization; reactive voltage control; interval power flow; improved particle swarm optimization; optimized scenario method

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

传统的无功优化问题通常为确定性优化问题,该优化问题关系到系统的安全性和经济性^[1],但电力系统本质上具有不确定性,这种不确定性包括网络结构、负荷功率等,尤其是在如今大力发展新能源的情况下,光伏、风电等的间歇性出力,使这种不确定性越来越无法被忽略。这些不确定因素的存在,使电力系统运行在安全限范围附近,电压越限和崩溃更有可能发生。对系统进行不确定性无功优化(Uncertain reactive power optimization, URPO),可以提高系统的电压稳定裕度,使电压保持在期望的范围内,并降低网损。

针对不确定性无功优化问题,国内外学者做了大量研究并得到了许多新的成果。目前求解该问题的方法主要包括随机规划法、鲁棒优化法和区间优化法。在随机规划法中,不确定参数为随机变量,需分析其概率分布,建立无功优化的期望模型,采用智能算法进行求解,文献[2]提出一种基于数据驱动的两阶段随机规划模型,将主问题分解为子问题并行求解,文献[3]的两阶段随机规划模型中,采用场景替换概率机会约束,虽然上述方法在一定程度上简化了模型求解,但仍需要大量数据样本,且两阶段最优无法保证全局的最优。文献[4]提出一种多目标的无功优化调度问题,同时考虑有功损耗和电压偏差最小化,使用蒙特卡洛模拟近似不确定参数的概率分布,采用NSGA-II优化算法求解,该方法需要大量数据且模拟时间较长,求解效率有待提高。

鲁棒优化法只需给定不确定集,不需要假设概率分布函数。文献[5]采用一种改进的交替方向乘子法求解两级分布式鲁棒优化模型,需要一系列线性约束逼近二阶锥潮流约束,线性近似无法准确反映系统运行情况,方案可行性难以保证。在提高算法精度上,文献[6]提出了一种考虑不确定PV积分的有源配电网多周期无功优化的二阶锥松弛分解算法,二阶锥优化虽比线性化近似更加精确,但本质仍为近似逼近,模型精度仍然有待提高。

区间无功优化(interval uncertainty reactive

power optimization, RPOIU)将不确定性数据表示成区间,具有建模方式简单,无需凸化或近似处理的优点。目前有采用区间线性近似的算法求解区间无功优化模型,通过区间泰勒展开一次线性逼近区间潮流方程^[7],虽提高了模型的求解效率,但是求解精度无法保证,因此文献[8]提出一种基于区间序列二次规划的无功优化算法提高模型的逼近精度,然而随着输入数据波动区间变大,该算法的收敛效果会变差,为了解决这个问题,文献[9]提出了一种基于安全限定义的区间无功优化算法。求解区间无功优化的另一思路是采用智能算法,文献[10]采用自适应遗传算法(adaptive genetic algorithm, AGA)求解区间无功优化模型,添加罚函数处理模型中的约束条件。遗传算法可有效处理离散变量,文献[11]采取多种群遗传算法优化求解含特殊负荷的不确定性配电网动态无功优化模型,通过移民操作增强寻优性能。文献[12]将遗传算法的适应度函数值进行改进,采用自适应的交叉和变异概率,与区间算术相结合,进行动态无功优化。文献[13]采用改进的NSGA-II算法求解含风电和光伏出力的无功优化模型,获得了较快的收敛速度。但是对于较大系统,遗传算法往往会遇到早熟收敛和收敛性能差的缺点。相对于遗传算法,粒子群算法原理简单,更易于实现,目前方法大多都是对粒子群算法进行改进,对惯性权重进行调整求解无功优化模型^[14-16]。文献[17]将区间数应用于不确定性无功优化模型,采用粒子群算法进行求解,但是求解区间潮流方程所采用的Kraczyk_Moore区间迭代法求解精度较差,且常规粒子群算法容易陷入局部最优,同时缺乏处理离散变量的能力。

为克服现有不确定性无功优化算法的缺点,本文提出了一种基于区间建模的新能源电网无功优化算法。具体是用区间数描述新能源发电的不确定性,建立区间无功优化模型。为求解该模型,先采用优化场景法求解区间潮流方程,处理模型中非线性等式约束和区间数据,获取状态变量区间;然后

对现有粒子群算法进行改进，增加局部寻优环节，提高算法寻优能力，并采用改进的粒子群算法(improved partical swarm optimization, IPSO)处理区间无功优化模型中的控制变量，获得能保障新能源电网电压安全的无功电压控制策略。通过采用IEEE 14节点和IEEE 30节点系统进行仿真分析，并与现有的算法进行对比，验证本文所提策略的有效性和优越性。

1 建立新能源电网区间无功电压控制模型

无功优化是一种电压控制手段，系统的安全性和经济性是该优化问题的共同目标，在满足一定的物理约束和安全约束的条件下，通过改变发电机机端电压、变压器分接头变比和无功补偿装置来找到最优的无功电压分布。考虑不确定因素，无功优化问题是一个不确定性的非线性规划问题。

将不确定性数据用区间表示，状态变量(负荷电压、电压相角、发电机无功出力)视为区间，控制变量(变压器变比、无功补偿、发电机机端电压)视为实数，建立区间无功电压控制模型。网损为目标函数，目的使运行成本最小；潮流方程、物理及设备约束作为约束条件，保证系统在约束范围内安全运行，假设负荷和发电机有功出力在相应区间范围内变化，则极坐标形式下的区间无功电压控制模型可以表示为如下形式：

1) 目标函数

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{i \in S_j} \sum_{j \in S} V_i V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (1)$$

式中：

S ——所有节点集合；

$\theta_{i,j}$ —— $\theta_i - \theta_j$ ；

P_{loss} ——电网有功损耗；

V_i, V_j ——节点电压幅值；

$G_{i,j}$ ——节点导纳矩阵元素实部。

2) 约束条件

$$\begin{cases} \hat{P}_{Gi} - P_{Li} - P_i = 0, i \in S'_G \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i = 0, i \in S'_G \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} -\hat{P}_{Li} - P_i = 0, i \in S_L \\ Q_{Gi} - \hat{Q}_{Li} - Q_i = 0, i \in S_L \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - P_i = 0, i \in S_{Gs} \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i = 0, i \in S_{Gs} \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, i \in S_G \quad (5)$$

$$Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max}, i \in S_C \quad (6)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, i \in S_G \cup S_L \quad (7)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, i \in S_{Gs} \quad (8)$$

$$T_l^{\min} \leq T_l \leq T_l^{\max}, l \in S_T \quad (9)$$

$$P_i = V_i \sum_{j \in S} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in S} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

式(2)为发电机节点潮流方程约束，式(3)为负荷节点潮流方程约束，式(4)为平衡节点潮流方程约束，其为等式约束条件，其中 P_i, Q_i 由式(10)和(11)给出。式(5)为发电机无功出力约束，式(6)为无功补偿输出功率约束，式(7)为节点电压约束，式(8)为平衡机有功出力约束，式(9)为变压器变比约束，这些为不等式约束。

式中：

S'_G ——所有不包含平衡节点的新能源发电机节点；

S_G ——所有发电机节点；

S_L ——负荷节点；

S_{Gs} ——平衡节点，一般只含一个平衡节点；

S_C ——带有无功补偿电容节点；

S_T ——变压器支路。

式(2)中：

\hat{P}_{Gi} ——节点 i 的发电机有功出力，其值为区间，可表示为 $\hat{P}_{Gi} = [P_{Gi}, \overline{P}_{Gi}]$ ；

P_{Li} ——发电机节点 i 的有功负荷；

Q_{Gi} ——节点 i 的发电机无功出力；

Q_{Li} ——发电机节点 i 的无功负荷。

式(3)中：

\hat{P}_{Li} ——负荷节点 i 的有功负荷区间，可表示为 $\hat{P}_{Li} = [P_{Li}, \overline{P}_{Li}]$ ；

\hat{Q}_{Li} ——负荷节点 i 的无功负荷区间，可表示为 $\hat{Q}_{Li} = [Q_{Li}, \overline{Q}_{Li}]$ ；

Q_{Ci} ——节点 i 的无功补偿容量，若无补偿， $Q_{Ci} = 0$ 。

式(4)中：

P_{Gi} ——平衡机有功出力；

Q_{Gi} ——平衡机无功出力。由于发电厂负荷一般比较平稳，式(2)和式(4)中平衡节点和发电

机节点的有功、无功负荷为确定性数据；

P_i ——节点*i*的有功功率；

Q_i ——节点*i*的无功功率；

T_l ——变压器变比；

B_{ij} ——节点导纳矩阵元素的虚部；

Q_{Gi}^{\min} ——发电机节点*i*无功出力的下限；

Q_{Gi}^{\max} ——发电机节点*i*无功出力的上限；

Q_{Gi}^{\min} ——节点*i*无功补偿容量的下限；

Q_{Gi}^{\max} ——节点*i*无功补偿容量的上限；

V_i^{\min} ——节点*i*电压幅值的下限；

V_i^{\max} ——节点*i*电压幅值的上限；

P_{Gi}^{\min} ——平衡机组有功出力的下限；

P_{Gi}^{\max} ——平衡机组有功出力的上限；

T_l^{\min} ——变压器变比的下限；

T_l^{\max} ——变压器变比的上限。

3) 数学模型

将上述目标函数和约束条件采用向量和函数表示，式(1)~式(11)的区间无功优化模型可以表示为以下数学形式：

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{X}, \mathbf{u}) &= [f^L, f^U] \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{X}, \mathbf{u}) = [\mathbf{h}^L, \mathbf{h}^U] \\ \mathbf{g}^{\min} \leq \mathbf{g}(\mathbf{X}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{g}^{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式中：

$f(\mathbf{X}, \mathbf{u})$ ——网络损耗；

$[f^L, f^U]$ ——目标函数求解结果（网络损耗）的区间形式；

$\mathbf{h}(\mathbf{X}, \mathbf{u})$ ——潮流方程等式约束函数；

$[\mathbf{h}^L, \mathbf{h}^U]$ ——式(2)~(4)中的节点注入功率区间向量，对于确定性的注入功率， $\mathbf{h}^L = \mathbf{h}^U$ ；

$\mathbf{g}(\mathbf{X}, \mathbf{u})$ ——所有不等式约束，包括系统约束和运行安全约束；

\mathbf{X} ——状态变量；

\mathbf{u} ——控制变量。

假设节点编号排列顺序为：平衡节点（1号），发电机节点（2~*m*），负荷节点（*m*+1~*n*）。*n*为系统所有节点个数，*m*为发电机节点数（包含平衡节点），*r*为无功补偿装置节点数，*k*为变压器台数，将含有无功补偿装置的负荷节点放在负荷节点的前一部分，则含有无功补偿装置的负荷节点编号为 *m*+1~*m*+*r*。

根据上述排列顺序，可以得到状态变量：

$$\mathbf{X} = [P_{G1} Q_{G1} \cdots Q_{Gm} V_{m+1} \cdots V_n \theta_2 \cdots \theta_n]^T \quad (13)$$

控制变量：

$$\mathbf{u} = [V_2 \cdots V_m Q_{Cm+1} \cdots Q_{Cm+r} T_1 \cdots T_k]^T \quad (14)$$

式中：

\mathbf{X} ——一个区间向量，无法通过控制手段维持稳定，其值随着输入功率和控制变量的值变化；

\mathbf{u} ——一个实数矢量，发电机母线电压可以通过调节励磁来维持稳定，变压器变比和无功补偿可以人工控制；

P_{G1} ——平衡节点有功出力；

$Q_{G1} \cdots Q_{Gm}$ ——所有发电机无功出力；

$V_{m+1} \cdots V_n$ ——负荷节点电压幅值；

$\theta_2 \cdots \theta_n$ ——除平衡节点外的节点电压相角；

$V_2 \cdots V_m$ ——发电机节点电压（不含平衡节点）；

$Q_{Cm+1} \cdots Q_{Cm+r}$ ——节点无功补偿容量；

$T_1 \cdots T_k$ ——变压器变比。

在式(12)中，按照节点编号顺序重新列写潮流方程等式约束条件，则 $[\mathbf{h}^L, \mathbf{h}^U]$ 可以表示为如下形式：

$$[\mathbf{h}^L, \mathbf{h}^U] = \begin{bmatrix} P_{G1} - P_{L1} \\ [P_{Gi}, \overline{P_{Gi}}] - P_{Li}, i = 2, \dots, m \\ -[P_{Li}, \overline{P_{Li}}], i = m+1, \dots, n \\ Q_{Gi} - Q_{Li}, i = 1, \dots, m \\ Q_{Gi} - [Q_{Li}, \overline{Q_{Li}}], i = m+1 \sim n \end{bmatrix} \quad (15)$$

上述表明区间无功优化模型是一个离散非凸的多目标非线性整数规划模型，其难点在于解决目标函数及约束条件中的区间变量。我们提出一种改进的粒子群算法求解区间无功优化模型。

2 基于改进粒子群的区间无功优化算法

2.1 区间潮流计算

为了求解区间无功优化模型，需要先求解区间潮流方程约束这一最复杂的区间非线性项，区间潮流的精度会直接影响到区间无功优化算法的结果，目前的区间数学和仿射方法都可以求解区间潮流，但是精度和算法效率上还存在着一些不足，为了提高精度和算法效率，本文采用一种基于优化场景法

(optimizing-scenarios method, OSM)^[18]的区间潮流算法。

基于OSM的区间潮流算法通过建立优化模型,直接获取潮流变量的区间。该模型为在所有可能的场景下,建立以潮流变量为目标函数(包括节点电压幅值、电压相角或传输功率)的最大化和最小化优化模型,通过场景寻优,可以得到各期望目标的上界和下界。

假设潮流方程表示为 $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = [\mathbf{h}^L, \mathbf{h}^U]$,其中 $[\mathbf{h}^L, \mathbf{h}^U]$ 和 \mathbf{x} 分别为输入功率数据区间和区间潮流变量,根据极值定理,可以发现:每一个潮流变量 x 都对应一个场景 $\xi \in [\mathbf{h}^L, \mathbf{h}^U]$,通过求解 $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \xi$ 可得到 \mathbf{x} ;一定存在一个特定的场景 $\xi_{\min}^{(i)}$,使得 \mathbf{x} 中的每一个 x_i 取到所有场景中的最小值 x_i^{\min} ,同样存在 $\xi_{\max}^{(i)}$,使 x_i 取到最大值 x_i^{\max} , $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ 为 x_i 在输入数据 $[\mathbf{h}^L, \mathbf{h}^U]$ 上变化的区间。因此,求解区间潮流模型相当于搜索每一个潮流变量 x_i 对应的 $\xi_{\min}^{(i)}$ 和 $\xi_{\max}^{(i)}$,以获得区间 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ 。

将场景 ξ 看作是在区间 $[\mathbf{h}^L, \mathbf{h}^U]$ 内变化的变量,则对 x_i 可构造最大化和最小化目标函数的优化模型

$$\begin{aligned} \min x_i \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \xi \\ \mathbf{h}^L \leq \xi \leq \mathbf{h}^U \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

和

$$\begin{aligned} \max x_i \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \xi \\ \mathbf{h}^L \leq \xi \leq \mathbf{h}^U \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

式中:

x_i ——负荷节点电压幅值或非平衡节点电压相角。

将 P_{ij} 替换 x_i 作为目标函数可获得传输功率区间:

$$P_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - G_{ij} V_i^2 \quad (18)$$

模型(16)和(17)为连续的非线性规划,可采用内点法求解。

2.2 改进的粒子群算法

1) 传统粒子群算法

PSO算法是一种进化计算技术,通过群体中个体之间的协作和信息共享来找到最优解。该算法模拟鸟群的觅食行为,将问题的搜索空间类比于鸟类的飞行空间,将每只鸟抽象为“粒子”,优化所需要寻找的最优解则等同于要寻找的食物。所有粒子

都有一个由被优化函数决定的适应值(fitness value),每个粒子还有一个速度决定他们运动的方向和距离。PSO初始化为一群随机粒子,然后通过迭代找到最优解,在每一次迭代中,存在一个粒子本身找到的个体极值最优解pBest和整个种群找到的全局极值最优解gBest,粒子们通过跟踪两个“极值”来更新自己的位置。

每个粒子在 n 维空间中,位置表示为矢量 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,飞行速度表示为矢量 $V_i = (v_1, v_2, \dots, v_n)$,粒子们通过追随极值进行更新的公式如下:

速度更新:

$$V_i = V_i + c1 \times \text{rand}() \times (p\text{Best}_i - X_i) + c2 \times \text{rand}() \times (g\text{Best} - X_i) \quad (19)$$

式中:

$c1$ 、 $c2$ ——学习因子,通常取 $c1 = c2 = 2$;

$\text{rand}()$ —— $[0, 1]$ 之间的随机数;

每个粒子速度限制范围为 $[-V_{\max}, V_{\max}]$ 。

位置更新:

$$X_i = X_i + V_i \quad (20)$$

为了提高搜索的准确性,SHI^[19]等人对速度更新公式进行了修正,引入惯性权重因子:

$$V_i = \omega \times V_i + c1 \times \text{rand}() \times (p\text{Best}_i - X_i) + c2 \times \text{rand}() \times (g\text{Best} - X_i) \quad (21)$$

式中:

ω ——惯性因子,其值可以动态改变,目前较多的是采用线性递减权值(linearly decreasing weight, LDW)策略。

$$\omega(t) = (\omega_{\text{ini}} - \omega_{\text{end}})(G - t)/G + \omega_{\text{end}} \quad (22)$$

式中:

ω_{ini} ——初始惯性权值,一般取0.9;

ω_{end} ——迭代至最大代数时惯性权值,一般取0.4;

G ——最大迭代次数;

t ——当前代数。

2) 改进粒子群算法

a) 添加局部搜索

粒子群优化算法是一种全局优化算法,随机初始化种群,具备较强的全局搜索能力,且搜索速度较快,但是不能充分利用系统中的反馈信息,局部寻优能力不足,粒子邻域内的最优值往往被忽略,

容易陷入局部最优。为了克服这个问题,我们在粒子群算法中添加局部搜索,通过粒子邻域内的局部信息,以期找到可能存在的更优解,改进策略如图1所示。通过采用这种添加局部寻优的粒子群算法,很好地平衡了全局寻优和局部寻优之间的关系,使算法在保证收敛和收敛速度的同时,避免陷入局部最优,提高了算法精度。

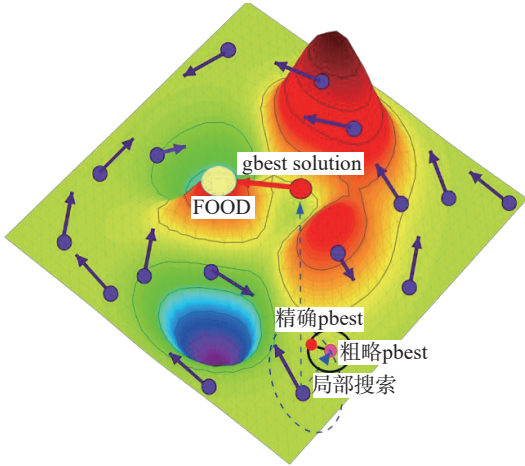


图1 粒子群算法改进策略

Fig. 1 Improved strategy of PSO

此改进方法的基本思想是在每一次迭代中,粒子本身找到个体极值之后,继续在一个小邻域内进行局部搜索,以期望能找到更优解,在每个粒子个体找到最优解之后,再进行全局搜索,找到目前为止最好的全局最优解。粒子进行局部搜索找到的新的个体最优解的表达式为:

$$pbest = \begin{cases} pbest + \omega \cdot step \cdot rand(), & rand < 0.5 \\ pbest - \omega \cdot step \cdot rand(), & else \end{cases} \quad (23)$$

式中:

step ——局部搜索的初始步长;

ω ——惯性权重因子,采用线性递减权值策略,其值可以动态改变。

b) 离散变量的处理

变压器变比和无功补偿电容均为离散变量,而上述普通粒子群算法的粒子初始位置、更新速度都是连续函数,并没有考虑离散变量的处理。遗传算法直接对可行解编码操作,可方便处理离散变量,因此本文采用遗传算法优化离散变量。

在粒子群算法中引入离散变量的交叉操作,分别将粒子个体与本身进行交叉,粒子与个体最优值 pbest 进行交叉,粒子与全局最优值 gbest 进行交叉。

假设需要进行处理的离散变量为 u^i , 与之进行交叉操作的个体为 u^j , 则其交叉方式如式(24)所示:

$$u^{is} = \begin{cases} cu^{i\max}, & \text{与自身交叉} \\ cu^i + (1-c)u^j, & \text{与极值个体交叉} \end{cases} \quad (24)$$

式中:

c ——区间 $[0, 1]$ 中随机产生的一个数;

$u^{i\max}$ ——变压器和电容器步长个数最大值。

对交叉操作的结果取整,替换群体中相应的个体,即 u^{is} 替换 u^i 。

2.3 模型求解步骤

粒子群算法具有并行性,可以对群体中的多个个体同时进行处理。在模型求解中,变量分为状态变量和控制变量,控制变量的值形成无功电压控制策略,因此粒子群算法的微粒由一组控制变量组成,且都有一个区间网损值与之相对应,为了简化多目标问题,可取网损中点值 Pl_m 作为目标函数,同时可作为评价每个微粒的适应度函数值。潮流计算得到的状态变量的范围可以被改进粒子群算法用于不等式约束的判断。

基于改进粒子群算法的总体思路是,先产生初始粒子群,包括随机位置和速度;再对每一组控制变量,判断其对应的状态变量区间是否满足约束条件;然后寻找每个微粒的 pbest,在 pbest 的搜寻过程中,加入局部搜索,提高搜索精度;之后寻找到目前为止的 gbest;一次迭代完成后调整微粒的速度和位置。重复上述操作,到达最大迭代次数时,停止迭代,输出最后一次迭代的 gbest,即为区间无功优化问题的最优解。

根据上述思路,基于改进粒子群算法的区间无功优化算法步骤如下所示:

1) 参数设置。包括粒子群算法最大迭代次数 Size; 粒子群规模 M ; 个体学习因子 c_1 ; 全局学习因子 c_2 ; 惯性权重初始值 ω_{ini} 和终止值 ω_{end} ; 内点法收敛精度 ε 和中心参数 σ 。

2) 随机模拟产生满足控制变量约束的连续和离散变量作为初始种群,通过区间潮流算法判断状态变量 X 是否满足约束条件,如果满足则保留,如果不满足,在目标函数中添加罚函数项:

$$p(X) = \begin{cases} (x^{\min} - \bar{X})^2, & \bar{X} < x^{\min} \\ 0, & \bar{X} \geq x^{\min} \text{ 且 } \bar{X} \leq x^{\max} \\ (\bar{X} - x^{\max})^2, & \bar{X} > x^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

式中：

$$X = [\underline{X}, \bar{X}]。$$

则区间无功优化模型中的不等式约束条件 $g^{\min} \leq g(X, u) \leq g^{\max}$ 的罚函数为

$$p(g(X, u)) = \sum_i p(g_i(X, u)) \quad (26)$$

3) 确定微粒的初始位置、速度和适应值。微粒的初始位置由添加罚函数的目标函数随机产生，初始速度取为初始位置的1/2。每个微粒 s 的适应度函数值取为带有罚函数项的区间网损中点值 $Pl_m(s)$

$$fpbest(s) = Pl_m(s) + p(g_s(X, u)) \quad (27)$$

4) 将每个粒子当前位置的适应值 $y(i)$ 与其历史最佳位置的适应值做比较，如果更好，则用当前位置更新历史最佳位置。

$$y(i) = Pl_m(i) + p(g_i(X, u)) \quad (28)$$

5) 在初步找到个体最佳位置之后，查找在该位置邻域内是否存在比初步搜寻解更优的位置，如果存在更优位置，则用该位置更新之前找到的 $pbest$ ，如果不存在更优位置，则保留原 $pbest$ 。

6) 将每个粒子历史最优适应值与群体内全局最优位置的适应值做比较，如果更好，用其更新全局最优位置。

7) 更新粒子的速度和位置。

8) 重复第三步~第七步，直至达到最大迭代次数。

通过以上步骤可以获得满足约束条件并使网损中点值最小的无功优化模型的电压控制策略，算法流程图如图2所示。

3 算例分析

为了验证本文所提方法的有效性和优越性，采用 IEEE 14 节点和 IEEE 30 节点进行算例分析。对算例中节点编号进行重新排序为：平衡节点，发电机节点，负荷节点。参数采用标幺值，基准功率 100 MVA。在区间潮流计算中，罚函数的惩罚系数 $\beta=10\ 000$ ，对于优化场景中的内点法，其参数设置为收敛精度 $\varepsilon=10^{-6}$ ，中心参数 $\delta=0.1$ 。

1) IEEE 14 节点

本算例将改进粒子群算法与自适应遗传算法对比。IEEE 14 节点系统包含 17 条传输线路，5 台发电机（1 台平衡机组和 4 台新能源发电机组），3 台

变压器和 1 个无功补偿装置。新能源发电机组有功出力区间如表 1 所示，负荷节点的有功和无功波动区间如表 2 所示。其中，变压器变比范围为 0.9~1.1 p.u.，步长为 0.05；无功补偿电容投切范围为 0~0.5 p.u.，步长为 0.1。负荷节点电压范围设为 0.9~1.1 p.u.。粒子群算法和遗传算法的最大迭代次数 $Size=120$ ，种群规模 $M=50$ ，改进粒子群算法中 $c_1=c_2=2$ ， $\omega_{im}=0.9$ ， $\omega_{end}=0.1$ ；自适应遗传算法中个体间的初始变异概率 $P_m^0=0.9$ ，初始交叉概率 $P_c^0=0.8$ ，罚函数在目标函数的惩罚系数 $\beta=100$ 。

根据上述参数设置，采用改进粒子群算法和自适应遗传算法求解区间无功优化模型，在得到无功电压控制策略之后，采用区间潮流算法获取状态变量的区间，如图 3 和图 4 所示。

图 3 表示负荷节点电压区间，从图中可知两种方法得到的电压控制策略均可保证节点电压范围在安全限以内，同时改进粒子群算法得到的负荷节点电压范围上下边界值均大于自适应遗传算法。图 4 表示发电机无功出力区间，可知两种方法均可保证无功出力在安全范围内。

两种区间无功优化算法的迭代收敛过程如图 5 所示。从图中可知两种算法最终均会收敛到期望目标，其中改进粒子群算法寻优能力更强，目标网损值更小。同时表 3 给出了两种算法得到的目标函数的具体值，从表中可以发现改进粒子群算法得到的网损中点值更小，具有更高的求解精度。

在实际中，不同的天气情况对应着不同的输入数据波动范围，为了测试模型在功率数据大幅度波动时的适应能力，设置负荷和发电机组有功出力波动区间范围如表 4 和表 5 所示。

在上述波动范围内，设置自适应遗传算法中目标函数的惩罚系数 $\beta=1\ 000$ ，两种算法得到的状态变量区间如图 6 和图 7 所示，迭代收敛过程如图 8 所示。

从图 6 和图 7 中可以看出，在输入数据大幅度波动区间下，该模型和策略仍可保证节点电压及发电机无功出力均在安全范围内，因此可验证模型在保证系统安全性方面具有较强的适应能力。从图 8 可以看出，在输入数据大范围波动下，模型可以正常求解且最终达到收敛，同样改进粒子群算法寻优效果更佳，因此文章所提区间无功优化策略可广泛

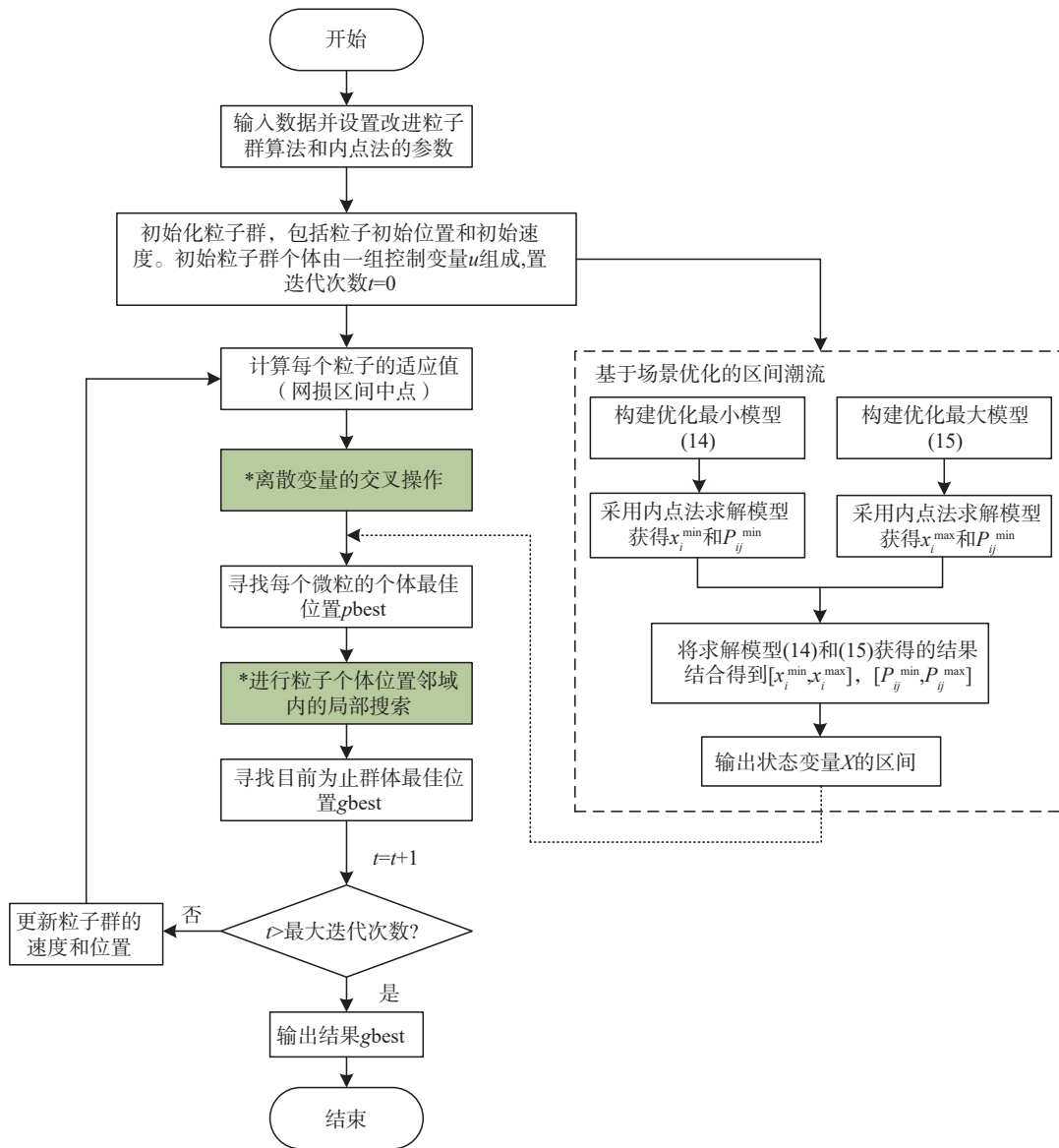


图2 基于改进粒子群的区间无功优化算法流程

Fig. 2 Interval reactive power optimization algorithm flow based on IPSO

表 1 IEEE 14 系统新能源发电机组有功出力区间(p.u.)

Tab. 1 Active power output interval of new energy generator in IEEE 14 system (p. u.)

节点编号	新能源机组有功出力区间
2	[0. 24, 0. 36]
3	[0. 16, 0. 24]
6	[0. 16, 0. 24]
8	[0. 144, 0. 216]

表 2 IEEE 14 节点系统有功和无功负荷波动区间(p.u.)

Tab. 2 Active and reactive load intervals in IEEE 14 system

节点编号	有功负荷区间	无功负荷区间
4	[0. 382 4, 0. 573 6]	[-0. 046 8, -0. 031 2]
5	[0. 060 8, 0. 091 2]	[0. 012 8, 0. 019 2]
7	0	0
9	[0. 236 0, 0. 354 0]	[0. 132 8, 0. 199 2]
10	[0. 072 0, 0. 108 0]	[0. 046 4, 0. 069 6]
11	[0. 028 0, 0. 042 0]	[0. 012 8, 0. 019 2]
12	[0. 048 8, 0. 073 2]	[0. 012 8, 0. 019 2]
13	[0. 108 0, 0. 162 0]	[0. 046 4, 0. 069 6]
14	[0. 119 2, 0. 178 8]	[0. 04, 0. 06]

适应各种输入功率区间，具有较强的适应性和有效性。

2) IEEE 30 节点

IEEE30 节点系统有 37 条传输线路，6 台发电机

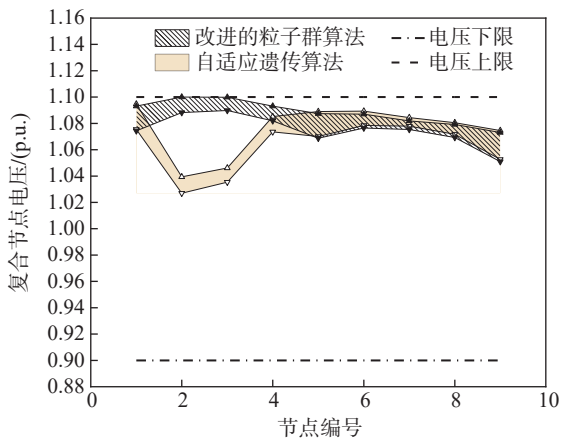


图 3 基于改进粒子群和自适应遗传算法的不确定性无功优化算法优化后的负荷节点电压区间

Fig. 3 Optimized voltage range of load nodes by IPSO and AGA

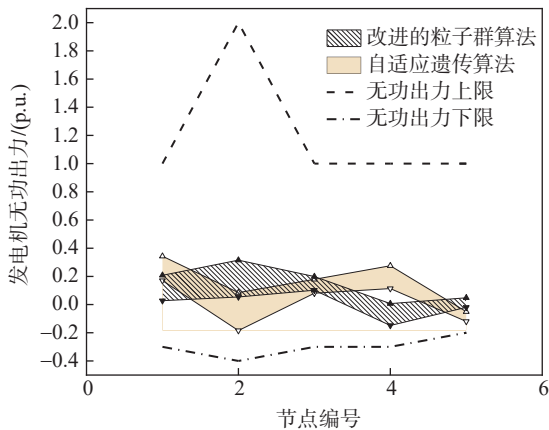


图 4 基于改进粒子群和自适应遗传算法的不确定性无功优化算法优化后的发电机无功出力区间

Fig. 4 Reactive power output interval of generator by IPSO and AGA

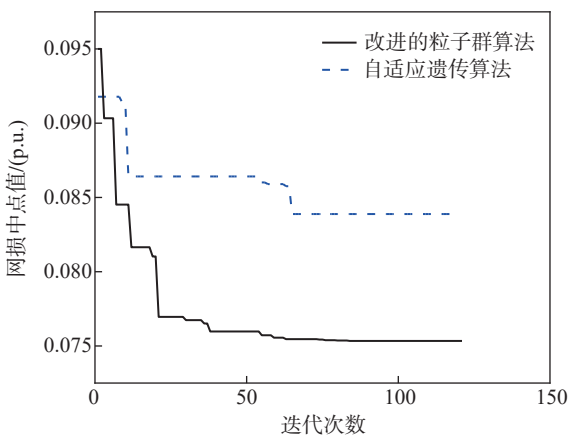


图 5 两种区间无功优化算法迭代过程

Fig. 5 Iterative process of interval reactive power optimization algorithm based on IPSO and AGA

表 3 两种区间无功优化算法得到的目标函数值

Tab. 3 Objective function value of IPSO and AGA

优化方法	网损中点值/(p. u.)
改进粒子群的区间无功优化	0.075 3
自适应遗传算法区间无功优化	0.083 9

表 4 IEEE 14 系统新能源发电机组有功出力大幅度波动区间

Tab. 4 The large fluctuation range of active power output of new energy generator set in IEEE 14 system p. u.

节点编号	新能源机组有功出力区间
2	[0.18, 0.42]
3	[0.12, 0.28]
6	[0.12, 0.28]
8	[0.108, 0.252]

表 5 IEEE 14 节点系统有功和无功负荷大幅度波动区间

Tab. 5 The large fluctuation range of active and reactive load in IEEE 14 system p. u.

节点编号	有功负荷区间	无功负荷区间
4	[0.286 8, 0.669 2]	[-0.054 6, -0.023 4]
5	[0.045 6, 0.106 4]	[0.009 6, 0.022 4]
7	0	0
9	[0.177 0, 0.413 0]	[0.099 6, 0.232 4]
10	[0.054 0, 0.126 0]	[0.034 8, 0.081 2]
11	[0.021 0, 0.049 0]	[0.009 6, 0.022 4]
12	[0.036 6, 0.085 4]	[0.009 6, 0.022 4]
13	[0.081 0, 0.189 0]	[0.034 8, 0.081 2]
14	[0.089 4, 0.208 6]	[0.03, 0.07]

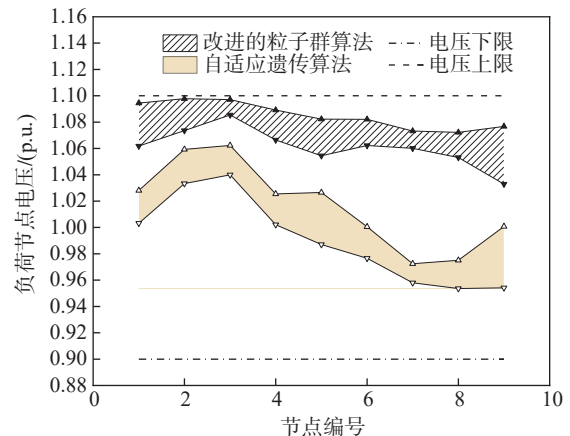


图 6 大幅度波动区间下两种优化算法优化后的负荷节点电压区间

Fig. 6 Optimized voltage range of load nodes by IPSO and AGA in large fluctuation range of input data

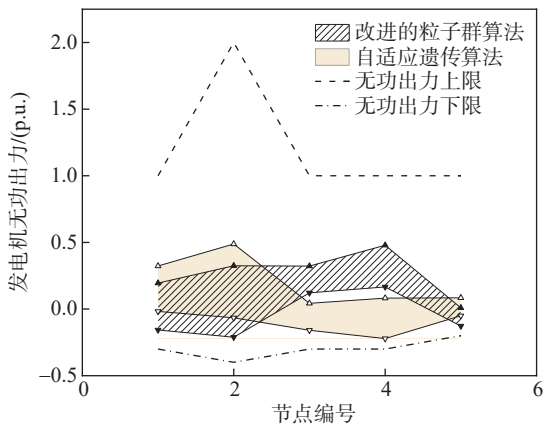


图 7 大幅度波动区间下两种优化算法优化后的发电机无功出力区间

Fig. 7 Reactive power output interval of generator by IPSO and AGA in large fluctuation range of input data

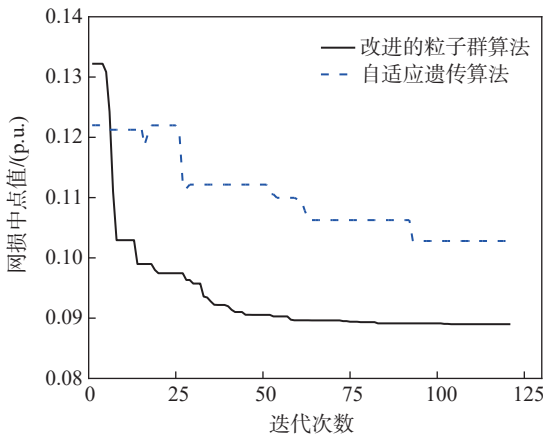


图 8 大幅度波动区间下两种区间无功优化算法迭代过程
Fig. 8 Iterative process of interval reactive power optimization algorithm based on IPSO and AGA in large fluctuation range of input data

(1 台平衡机组, 5 台新能源发电机组), 4 台变压器和 2 个无功补偿装置, 拓扑结构如图 9 所示, 新能源发电机组有功出力区间如表 4 所示。其中, 变压器变比范围为 0.9~1.1 p.u., 步长为 0.05; 节点 10 处无功补偿电容投切范围为 0~0.5 p.u., 步长为 0.1; 节点 24 处无功补偿电容投切范围为 0~0.1 p.u., 步长为 0.02; 负荷节点电压范围为 0.95~1.05 p.u。

根据上述参数设置, 采用改进粒子群区间无功优化算法求解 IEEE 30 节点下的不确定无功优化模型, 与普通粒子群算法进行对比。在优化后的无功电压控制策略下, 采用区间潮流算法得到状态变量区间如图 10 和图 11 所示。图 10 为负荷节点电压 (p.u.) 区间, 图 11 为发电机无功出力区间 (p.u.)。

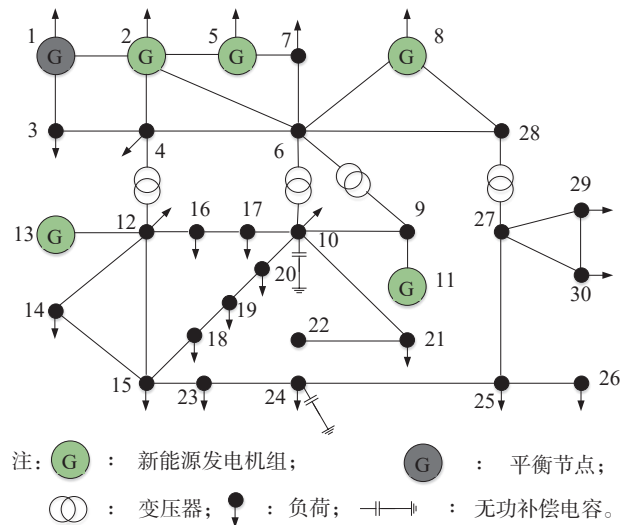


图 9 IEEE 30 节点系统拓扑结构图
Fig. 9 IEEE 30-node system topology diagram

表 4 IEEE 30 系统新能源发电机组有功出力区间
Tab. 4 Active power output interval of new energy generator in IEEE 30 system

节点编号	新能源机组有功出力区间
2	[0.64, 0.96]
5	[0.40, 0.60]
8	[0.16, 0.24]
11	[0.16, 0.24]
13	[0.16, 0.24]

从图中可知, 两种方法得到的负荷节点电压和发电机无功出力区间均在安全限范围以内, 这是由于区间无功优化算法判断约束条件时可保证状态变量区间满足约束。另外, 普通粒子群算法得到的电压和发电机无功出力区间范围在大部分节点处更宽, 说明结果更保守。图 12 为两种算法迭代收敛过程, 相比之下改进粒子群算法收敛速度更快, 从两种算法迭代达到收敛时的局部放大图可以明显地看出, 改进粒子群算法优化得到的目标函数值更小, 具有更高的求解精度, 总体寻优效果更佳。

表 5 给出了两种算法得到的具体目标函数值, 可以发现改进的粒子群算法求得的网损中点值更小, 寻优能力更强。

综上所述, 文章所提基于区间建模的新能源电网无功优化策略具有较强的适应性和有效性, 可适应不同输入数据区间波动范围, 适应不同新能源电网系统; 同时该策略中所采用的改进粒子群算法相

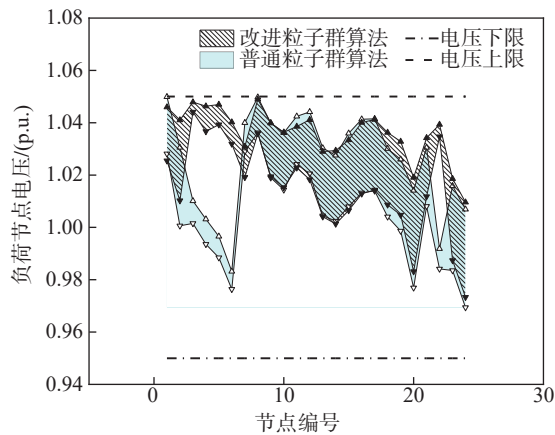


图 10 基于改进粒子群算法和普通粒子群算法的区间无功优化算法优化后的负荷节点电压区间

Fig. 10 Optimized voltage range of load nodes by IPSO and PSO

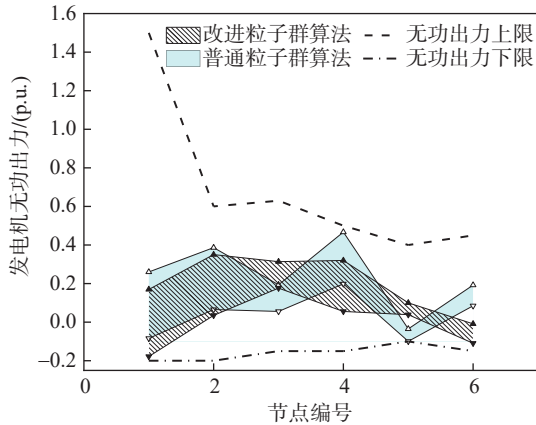


图 11 基于改进粒子群算法和普通粒子群算法的区间无功优化算法优化后的发电机无功出力区间

Fig. 11 Reactive power output interval of generator by IPSO and PSO

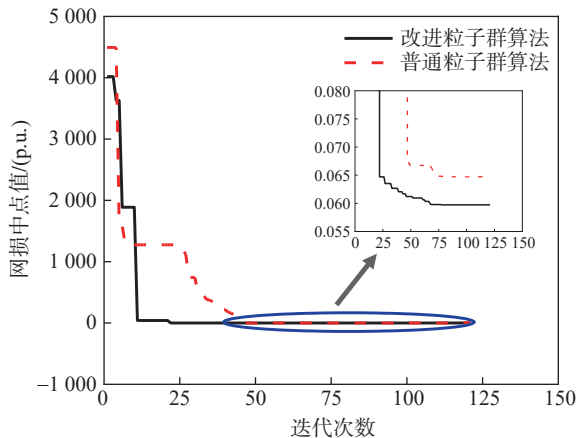


图 12 两种粒子群区间无功优化算法迭代过程

Fig. 12 Iterative process of interval reactive power optimization algorithm based on IPSO and PSO

表 5 两种区间无功优化算法得到的目标函数值

Tab. 5 Objective function value of IPSO and PSO

优化方法	网损中点值/(p. u.)
改进粒子群的区间无功优化	0.059 74
普通粒子群的区间无功优化	0.064 73

比于自适应遗传算法和普通粒子群算法都具有更优的收敛性能和寻优能力，得到的目标函数值更小，验证了该策略的优越性。

4 结 论

本文提出了一种基于区间建模的新能源电网无功优化策略，采用改进粒子群的区间无功优化算法，解决大规模新能源并网条件下的不确定性无功优化问题。首先构造了将不确定性数据用区间表示的区间无功电压控制模型，状态变量为区间，控制变量为实数变量；然后提出了一种改进的粒子群算法求解区间无功优化模型，在这之前采用基于场景优化的区间潮流计算获取状态变量的区间，这些变量区间在粒子群算法中用于约束条件的判断。粒子群算法具有较强的全局搜索能力，相比于遗传算法操作更简单，收敛速度更快，但是局部搜索能力不足，容易陷入局部最优，所以对粒子群算法进行改进，在个体极值的搜索中添加局部搜索过程，提高算法的寻优能力；同时采用遗传算法的交叉操作加入对离散变量的处理。仿真结果和分析表明，所提出的改进粒子群区间无功优化策略具有较强的适应性，且比自适应遗传算法和普通粒子群算法的收敛性能更好，寻优能力更强，可有效求解区间无功优化模型和处理模型中的离散变量。

参考文献：

- [1] MOKARI M, MORADI M H. Security constraint optimal reactive power dispatch under uncertainty in a wind integrated power system [C]//Politecnico di Torino. International Universities Power Engineering Conference, Turin, Italy, September 1-4, 2020. Turin: IEEE, 2020: 1-6.
- [2] DING T, YANG Q, YANG Y, et al. A data-driven stochastic reactive power optimization considering uncertainties in active distribution networks and decomposition method [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4994-5004.
- [3] SARASWAT A, UCHENIYA R, GUPTA Y. Two-stage stochastic optimization for reactive power dispatch with wind power uncertainties [C]//Amity University. International Conference on Computation, Automation and Knowledge Manage-

- ment, Dubai, United Arab Emirates, January 9-10, 2020. Dubai: IEEE, 2020: 332-337.
- [4] KEERIO M U, ALI A, SALEEM M, et al. Multi-objective optimal reactive power dispatch considering probabilistic load demand along with wind and solar power integration [C]//ACM Singapore Chapter. International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems, Bangkok, Thailand, September 15-18, 2020. Bangkok: IEEE, 2020: 502-507.
- [5] GAO H, WANG J, LIU Y, et al. An improved ADMM-based distributed optimal operation model of AC/DC hybrid distribution network considering wind power uncertainties [J]. IEEE Systems Journal, 2020, PP(99): 1-11.
- [6] LIU S, DING T, BIE Z, et al. A second order cone based relaxation and decomposition algorithm for multi-period reactive power optimization considering uncertain PV integration in active distribution networks [C]//International Association on Environment and Electrical Engineering. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, Milan, Italy, June 6-9, 2017. Milan: IEEE, 2017: 1-6.
- [7] ZHANG C, CHEN H, LIANG Z, et al. Reactive power optimization under interval uncertainty by the linear approximation method and its modified method [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4587-4600.
- [8] ZHANG C, CHEN H, SHI K, et al. A multi-time reactive power optimization under interval uncertainty of renewable power generation by an interval sequential quadratic programming method [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1086-1097.
- [9] ZHANG C, CHEN H, HUA D, et al. Solution of interval reactive power optimization model through defining security limits [C]//Chinese Society for Electrical Engineering. International Conference on Power System Technology, Guangzhou, China, November 6-8, 2018. Guangzhou: IEEE, 2018: 1384-1389.
- [10] ZHANG C, CHEN H, NGAN H, et al. Solution of reactive power optimisation including interval uncertainty using genetic algorithm [J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(15): 3657-3664.
- [11] 欧阳森, 杨家豪, 安晓华, 等. 基于时段解耦的含特殊负荷的配电网动态无功优化 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 97-106.
- OUYANG S, YANG J H, AN X H, et al. Dynamic reactive power optimization of distribution network containing special load based on time decoupling [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 97-106.
- [12] 高峰, 赵莹, 朱伟民, 等. 基于区间算术的含光伏电站的电网动态无功优化 [J]. 电气应用, 2016, 35(6): 37-41.
- GAO F, ZHAO Y, ZHU W M, et al. Dynamic reactive power optimization of power grid with photovoltaic power station based on interval algorithm [J]. Electrotechnical Application, 2016, 35(6): 37-41.
- [13] 张晓英, 张艺, 王琨, 等. 基于改进NSGA-II算法的含分布式电源配电网无功优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 55-64.
- ZHANG X Y, ZHANG Y, WANG K, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generations based on improved NSGA-II algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 55-64.
- [14] 黄博, 曾驰宇, 王全胜, 等. 一种求解电力系统无功优化的改进粒子群算法 [J]. 电工技术, 2020(12): 107-109.
- HUANG B, ZENG C Y, WANG Q S, et al. An improved particle swarm optimization algorithm for reactive power optimization of power system [J]. Electric Engineering, 2020(12): 107-109.
- [15] 苏福清, 匡洪海, 钟浩, 等. 基于柯西变异改进粒子群算法的无功优化 [J]. 电气工程学报, 2021, 16(1): 55-61.
- SU F Q, KUANG H H, ZHONG H, et al. Reactive power optimization based on Cauchy mutation and improved adaptive particle swarm optimization [J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(1): 55-61.
- [16] 邓长虹, 马庆, 肖永, 等. 基于自学习迁移粒子群算法及高斯罚函数的无功优化方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3341-3346.
- DENG C H, MA Q, XIAO Y, et al. Reactive power optimization based on self-learning migration particle swarm optimization and Gaussian penalty function [J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3341-3346.
- [17] 张勇军, 苏杰和, 羿应棋. 基于区间算术的含分布式电源电网无功优化方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 21-26.
- ZHANG Y J, SU J H, YI Y Q. Reactive power optimization based on interval arithmetic with distributed power grid [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 21-26.
- [18] ZHANG C, CHEN H, SHI K, et al. An interval power flow analysis through optimizing-scenarios method [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5217-5226.
- [19] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]//Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, Anchorage, Alaska, May 4-9, 1998. Alaska: IEEE, 2002: 69-73.

作者简介:



王中夫

王中夫 (通信作者)

1992-, 男, 江西吉安人, 工程师, 华南理工大学电力系统及其自动化硕士, 主要研究方向为综合能源设计及应用 (e-mail) wangzhongfu@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)