改进类电磁机制算法在多目标动态电网规划中的应用

付 锦，王先洪，欧智乐，苏旭辉，赵廷刚

(四川省电力公司南充供电公司，四川 南充 637000)

摘要：基于动态规划思想，提出将类电磁机制（Electromagnetism-Like Mechanism，ELM）算法应用于多目标动态电网规划。消除了总矢量力对距离的过分倚重，并借鉴被动聚集思想，提升了种群移动模型的抗扰动和全局寻优能力。在权重、局部搜索、变异等环节均采用自适应策略来改善寻优速度，利用精英策略提高收敛效率。通过增设的马尔科夫性约束，避免了架线复拆。采用加权法和罚函数法，将描述电网经济性、可靠性、静态 *N*–1 安全的多目标进行统一度量，以体现规划方案的综合满意度。通过对 19 节点、46 节点系统进行十进制编码测试，结果验证了该算法能有效地解决多目标动态电网规划。与遗传算法相比，改进的 ELM 在寻优效率和容错性方面具有明显优势。

关键词：动态电网规划；类电磁机制；多目标优化；动态规划模型；多阶段；自适应

Application of improved electromagnetism-like mechanism in multi-objective dynamic power network planning

FU Jin, WANG Xian-hong, OU Zhi-le, SU Xu-hui, ZHAO Ting-gang

(Nanchong Power Supply Company, Sichuan Electric Power Corporation, Nanchong 637000, China)

Abstract: Based on the dynamic programming, the electromagnetism-like mechanism algorithm is applied to multi-objective dynamic planning. It eliminates the over-dependence of the total force vector on the distance, and by drawing lessons from passive congregation thought, enhances the anti-disturbance and global optimization ability of the population mobility model. In the sectors of weight, local search, and mutation, the adaptive strategy is used to improve the searching speed, and the elitist strategy is used to improve the convergence efficiency. By adding the Markov constraints, the re-dismantling of lines is avoided. Using the weighted method and penalty function method, multiple objectives describing the grid economy, reliability, and static N-1 security are measured in a unified manner to reflect the overall satisfaction of the plan. Applying decimal coding to 19-bus and 46-bus system, the results show that the algorithm can effectively solve the multi-objective dynamic grid planning. Compared with the genetic algorithm, the improved ELM has obvious advantages in searching efficiency and fault-tolerance.

Key words: dynamic power network planning; electromagnetism-like mechanism (ELM); multi-objective optimization; dynamic planning model; multi-stage; self-adaptive

中图分类号： TM715 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)03-0094-06

0 引言

单阶段静态规划仅立足于目标年所需的信息，对方案的过渡性不予考究，不能据实反映电网建设的动态过程，将导致方案在规划期的局部时间内不能满足电力需求[1]。相反，动态规划则是把规划期拆分为若干阶段，并逐阶段实施规划。其中，各阶段性方案需同时满足本阶段的和整个规划期内的约束条件，相邻的阶段性方案相互牵制，并最终影响着整体性最优方案的实现[2]。对于这样一个离散性、多峰状、非线性的大规模组合优化问题，文献[2-5]研究表明，只有借助现代启发式优化方法才能得到很好的解决。

电力市场化和资源优化配置使电网得以不断地互联，其优化目标、方案的数量将随其结构的复杂化而成倍增长。所以，电网规划必须统筹考虑，合理兼顾电网运营时的经济效益和社会效益，实施全面统一规划。为此，文中建立了能够描述电网经济性、可靠性、静态 *N*–1 安全的多目标模型，避免因规划缺陷带来的电网输电阻塞、停电损失、输电瓶颈等问题[6-7]。并以动态规划思想为基础，于其中首次嵌入 ELM 算法予以求解，这为电网规划提供了

新的解决方法。

ELM 模拟了处于静电场内的带电粒子之间库仑力的相互作用机制，属于随机全局智能优化算法[8-11]。与其他智能算法相比，具有原理清晰、参数少、可离散化、效率高等优点。同时，文章通过改进策略，提高了其寻优性能。以 19 节点和 46 节点系统作为试验测试对象，验证了本文模型及算法的正确性和有效性。

1　多目标动态电网规划的模型

1.1 经济性目标模型及其约束

方案的经济性仍是衡量其优劣的主要方面。本文构建的目标模型涵盖了电网投资、固定运行费、网络损耗、检修维护费四个方面的经济性，表达如下[2-5]

$$\begin{cases} f_1=\sum_{k=1}^{N_s}\eta(k)(k_1+k_2)\sum_{d=1}^{N_k}\alpha_d^k x_d^k \\ f_2=\sum_{k=1}^{N_s}\eta(k)\{C_k T_{kl}\sum_{j=1}^{N_{Lk}}(\frac{P_j}{U_{jN}})^2 R_j+\sum_{i=1}^{N_k}\tau_d^k x_d^k\} \end{cases} \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\ \begin{cases} \tilde{S}_i=\dot{U}_i\sum_{j=1}^{\Phi_{sk}}\dot{Y}_{ij}^*\dot{U}_j^*;\left|\Delta U_i\%\right|<\Delta U_{i\max} \\ P_{Gi}\leqslant P_{GNi},\left|P_{ij}\right|\leqslant P_{ij\max};0\leqslant x_d^{k+1}\leqslant x_{d\max}-x_d^k \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\eta(k)=(1+r)^{1-y(k)}，且\ y(k)=\sum_{i=1}^{k}y(i) \tag{3}$$

式中：f_1 代表固定成本；f_2 代表可变成本；N_s 为规划年限内实施的阶段总数；$y(k)$为规划初期到第 k 阶段末的总年数；$y(i)$为第 i 阶段内包含的年数；r 是折旧年限为 $y(k)$时的资金贴现率；k_1 为净现值指数；k_2 为固定运行费用率；x_d^k、α_d^k、τ_d^k 分别为第 k 阶段中在可架设线路走廊 d 上新建线路回数、单位造价、检修维护费；N_k、C_k、T_{kl} 分别为第 k 阶段中的可架线走廊数、网损电价、第 l 种负荷水平下的持续时间；N_{Lk} 为从初始网络到第 k 阶段末的线路总回数；P_j、U_{jN}、R_j 分别为正常运行时在支路 j 上的有功功率、额定电压和电阻。$\tilde{S}_i$、$\dot{U}_i$、$\dot{U}_j^*$、$\dot{Y}_{ij}^*$ 分别为节点 i 的复功率、节点 i 的电压相量、节点 j 的电压相量共轭值、节点 i 与 j 的支路导纳共轭值；Φ_{sk} 为从初始网络到第 k 阶段末的网络总节点数；$\Delta U_i\%$、$\Delta U_{i\max}$ 为节点 i 的电压降及其最大允许电压降；P_{Gi}、P_{GNi} 为发电机节点 i 的有功及其额定值；P_j、$P_{j\max}$ 为支路 j 上的有功及其极限值；$x_{d\max}$ 为可架线走廊 d 上的最大架线回数。

式(2)展示了 x_d^k 的马尔科夫性约束：第 k 阶段中已架设的待选线路，在后续阶段中将不再重复架设，并延续至整个规划期末，避免了“架线复拆”现象[4]。

1.2 可靠性估算模型

需求侧的停电损失以经济性指标的形式反映了系统的供电可靠性。其可靠性估算模型为[3]

$$f_3=\sum_{k=1}^{N_s}\sum_{l\in S_{LD}}P_l T_l\sum_{i=1}^{L_{nk}}[(p_i\div\sum_{i=1}^{L_{nk}}p_i)\times\sum_{j=1}^{S_{hq}+S_{Hq}}\frac{C_{CCDF(t_{ij})}}{t_{ij}}\times \sum_{q\in S_F}L_{q,l}\prod_{j\in S_{hq}}P_{q,j}\prod_{r\in S_{Hq}}(1-P_{q,r})] \tag{4}$$

式中：S_{LD}、P_l 分别为系统的负荷水平集合及其出现第 l 种负荷水平的概率；T_l 为第 l 种负荷水平的持续时间；p_i 为负荷点 i 的总负荷；L_{nk} 为从初始网络到第 k 阶段末电网结构中的负荷点总数；S_F 为系统的故障事件集合；S_{hq}、S_{Hq} 为发生故障 q 时，系统中的故障、正常设备集合；t_{ij} 为设备 j 故障时，导致负荷节点 i 的停电时间；设备 j、r 在故障 q 时的停运率分别为 $P_{q,j}$、$P_{q,r}$；$L_{q,l}$ 为第 l 种负荷水平下当发生故障 q 时的系统切负荷量；负荷节点 i 在停电时间 t_{ij} 内的综合负荷单位缺电损失为 $C_{CCDF(t_{ij})}$。

1.3 静态 N-1 安全模型

本文通过元件轮断式作业构建静态安全分析的预想故障集，并校验电网 N-1 潮流中各线路过载程度来避免电网稳定性事故。模型为

$$P_{\text{punish}}=\sum_{k=1}^{N_s}M_k\sum_{l=0}^{N_{Fk}}\sum_{j=1}^{N_{Lk}}\max[(\left|P_j^{(l)}\right|-P_{j\max}^{(l)}),0]^2 \tag{5}$$

式中：M_k 为第 k 阶段的惩罚系数；N_{Lk}、N_{Fk} 为从初始网络到第 k 阶段末的线路总回数及 N-1 校核时需开断的独立回路总数；在断开第 l 条线路时，支路 j 上的有功及其极限值分别为 $P_j^{(l)}$、$P_{j\max}^{(l)}$。

1.4 多目标模型归一化

以上各目标是相互冲突的。为此，本文选取加权法来寻求合理的权系统，用同一尺度将多个目标进行了协调，进而统一度量所得电网规划方案的优劣。

$$\max\ f=(\sum_{i=1}^{3}\lambda_i f_i+P_{\text{punish}})^{-1} \tag{6}$$

且权系数 λ_i 需满足下述方程组。

$$\begin{cases} a=\sum_{j=1}^{3}\lambda_j f_{i,j}, 1=\sum_{j=1}^{3}\lambda_j, i=1,2,3 \\ \text{and } f_{i,i}=\min_{\boldsymbol{X}\in \boldsymbol{A}_{m\times n}} f_i(\boldsymbol{X})=f_i(\boldsymbol{X}^i), f_{i,j}=f_j(\boldsymbol{X}^i)_{i\neq j} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$f_i(\bullet)$、$f_j(\bullet)$为目标函数；$\boldsymbol{A}_{m\times n}$ 为 $f_i(\bullet)$的矩阵形式解域；$\boldsymbol{X}^i$ 为可使 $f_i(\bullet)$达到最小的解。在式(7)中，若有多个 $\boldsymbol{X}^i$ 能使 $f_i(\bullet)$达到最小，还需进一步从中找出使 $f_j(\bullet)$也为最优的解。

2 基本 ELM 及其改进

2.1 ELM 的基本原理

ELM 算法拥有记忆、反馈机制，能避免搜索迂回，有助于快速发现优化问题的解。寻优过程中，算法将优化问题的解描述为带电粒子，并凭借带电粒子所带电荷量的大小来衡量解的优劣度。基本寻优公式为[3-5]

$$\boldsymbol{X}_i^{(t+1)}=\boldsymbol{X}_i^{(t)}+\frac{\omega \boldsymbol{F}_i^{(t)}\boldsymbol{R}}{\left\|\boldsymbol{F}_i^{(t)}\right\|}，\omega\in N_{\text{rand}}(0,1) \tag{8}$$

其中

$$\boldsymbol{F}_i^{(t)}=\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{m}\begin{cases} q_i^{(t)}q_j^{(t)}(\boldsymbol{X}_j^{(t)}-\boldsymbol{X}_i^{(t)})H^2, f(\boldsymbol{X}_j^{(t)})<f(\boldsymbol{X}_i^{(t)}) \\ q_i^{(t)}q_j^{(t)}(\boldsymbol{X}_i^{(t)}-\boldsymbol{X}_j^{(t)})H^2, f(\boldsymbol{X}_j^{(t)})\geqslant f(\boldsymbol{X}_i^{(t)}) \end{cases} \tag{9}$$

$$H=\left\|\boldsymbol{X}_j^{(t)}-\boldsymbol{X}_i^{(t)}\right\|^{-1} \tag{10}$$

$$q_i^{(t)}=\exp\left\{-n\frac{f(\boldsymbol{X}_i^{(t)})-f(\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{(t)})}{\sum_{i=1}^{m}[f(\boldsymbol{X}_i^{(t)})-f(\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{(t)})]}\right\} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{cases} \boldsymbol{U}_i^{(t)}-\boldsymbol{X}_i^{(t)}, & \boldsymbol{F}_i^{(t)}>0 \\ \boldsymbol{X}_i^{(t)}-\boldsymbol{L}_i^{(t)}, & \boldsymbol{F}_i^{(t)}\leqslant 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中：m 为种群粒子总数；n 为粒子维数；$\boldsymbol{X}_i^{(t)}$ 为第 t 次迭代中第 i 个粒子；$\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{(t)}$ 为评价函数值最好的粒子；$q_i^{(t)}$ 为 $\boldsymbol{X}_i^{(t)}$ 所带的电荷量，它描述了 $\boldsymbol{X}_i^{(t)}$ 与 $\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{(t)}$ 的接近程度，该值越大表明 $\boldsymbol{X}_i^{(t)}$ 越接近 $\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{(t)}$；$f(\bullet)$为粒子的评价函数；$\|\bullet\|$为向量的 2-范数；$\boldsymbol{F}_i^{(t)}$ 为 $\boldsymbol{X}_i^{(t)}$ 的总矢量力，它描述了 $\boldsymbol{X}_i^{(t)}$ 在种群中受力的大小和性质，当 $f(\boldsymbol{X}_j^{(t)})<f(\boldsymbol{X}_i^{(t)})$时，粒子 $\boldsymbol{X}_j^{(t)}$、$\boldsymbol{X}_i^{(t)}$ 之间的作用力为吸引力，否则为排斥力；$N_{\text{rand}}()$为随机函数。$\boldsymbol{R}$ 为种群越界搜索约束；$\boldsymbol{U}_i^{(t)}$、$\boldsymbol{L}_i^{(t)}$ 分别为 $\boldsymbol{X}_i^{(t)}$ 的上、下限。

2.2 改进策略

2.2.1 抗干扰聚集型种群移动

ELM 的吸引和排斥机理是一种邻域搜索行为，群体中的个体在其总矢量力的作用下向着优化区域聚集。但种群的移动范围有限，很难大范围地开拓新的解域。为此，将文献[3]的被动聚集思想描述为群体中单个粒子对其他粒子的影响，即用这个粒子来拓展新的解域。同时，考虑到粒子的总矢量力对距离过分倚重，即总矢量力与距离的平方成反比，可能弱化向最优值方向的移动。为消除这些影响，改进式(8)为

$$\boldsymbol{X}_i^{(t+1)}=\boldsymbol{X}_i^{(t)}+\frac{\omega \boldsymbol{F}_i^{(t)}H^{-1}\boldsymbol{R}}{\left\|\boldsymbol{F}_i^{(t)}H^{-1}\right\|+\delta}+\frac{c\chi \boldsymbol{F}_{ir}^{(t)}H^{-1}\boldsymbol{R}}{\left\|\boldsymbol{F}_{ir}^{(t)}H^{-1}\right\|+\delta} \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{F}_{ir}^{(t)}$ 为粒子 i 对随机粒子 r 的作用力；c 为被动聚集因子，若 $f(\boldsymbol{X}_r^{(t)})>f(\boldsymbol{X}_i^{(t)})$，其值为正，否则为负；$\chi\in N_{\text{rand}}(0,1)$；电网规划具有整数离散性，$\delta$ 为避免算法因$\|\bullet\|$为零而终止运行的抗干扰因子[12-14]。

2.2.2 权重自适应控制

权重因子的随机性会导致算法在迭代后期不收敛。为协调算法的全局和局部搜索，提高其的收敛性能，令 ω 自适应控制函数为

$$\omega=(1-q_i^{(t)})\sin(\frac{\pi}{2\sqrt{t}})\zeta，\zeta\in N_{\text{rand}}(0,1) \tag{14}$$

随着迭代的推进，种群在最优粒子附近的随机扰动也相应减弱，有利于动态地逼近最优解。

2.2.3 局部自适应搜索

ELM 局部搜索速度较快，但仅限于小范围的邻域搜索，不易逃逸多峰值函数的局部极值点，易出现早熟收敛。为使算法得到预期的收敛速度和寻优效果，设计的搜索范围动态缩减法[14]为

1）定义第 t 次迭代种群的平均适应度函数为

$$f(t)=\sum_{i=1}^{m}\frac{f(\boldsymbol{X}_i^{(t)})}{m} \tag{15}$$

2）对粒子 $\boldsymbol{X}_i^{(t)}$，令

$$\boldsymbol{Y}_i^{(t)}=\begin{cases} \boldsymbol{X}_i^{(t)}+\zeta(\boldsymbol{U}_i^{(t)}-\boldsymbol{X}_i^{(t)})\varphi(t), & \zeta\in(0.5,1) \\ \boldsymbol{X}_i^{(t)}-\zeta(\boldsymbol{X}_i^{(t)}-\boldsymbol{L}_i^{(t)})\varphi(t), & \zeta\in(0,0.5) \end{cases} \tag{16}$$

式中：$\varphi(t)=[1-\exp(f(\boldsymbol{X}_{\text{best}}^{(t)})-f(t))]$，$\varphi(t)\in(0,1]$；$\zeta\in N_{\text{rand}}(0,1)$。

3）计算 $f(\boldsymbol{Y}_i^{(t)})$，若 $f(\boldsymbol{Y}_i^{(t)})<f(\boldsymbol{X}_i^{(t)})$，则 $\boldsymbol{X}_i^{(t)}=\boldsymbol{Y}_i^{(t)}$，局部搜索停止；否则转至步骤 2)。

2.2.4 精英策略

为留存种群优良品质和提高收敛效率，利用基于矢量矩的概率选择法，优先选出当前种群中相当量的有较高电荷量的粒子，并随机补充被剔除的粒子，构成新种群为下次进化奠基。

2.2.5 自适应高斯变异

高斯变异机制可令 ELM 种群获得分布性和多样性，避免其阻滞于局部最优和收敛震荡[15]。

$$\boldsymbol{X}_i^{(t)\prime} = \boldsymbol{X}_i^{(t)} + \boldsymbol{N}(0, d_\sigma^{(t)}) \tag{17}$$

其中

$$d_\sigma^{(t)} = [1 - P(\boldsymbol{X}_i^{(t)})]\exp(\left|1 - q_i^{(t)}\right|)(m+t)^{-1} \tag{18}$$

式中，$\boldsymbol{N}(0, d_\sigma^{(t)})$ 表示均值为 0、方差为 σ 的高斯噪声。

3 IELM 在多目标动态电网规划中的实现

3.1 编码决策变量

因电网规划的整数离散性，本文采用可缩小寻优空间、编码容量大的十进制方式对决策变量编码

$$\boldsymbol{X}_i^{(t)} = (x_{i1}^{(t)}, x_{i2}^{(t)}, x_{i3}^{(t)}, \cdots, x_{id}^{(t)}, \cdots, x_{in}^{(t)}) \tag{19}$$

式中，$x_{id}^{(t)}$ 表示在第 t 次迭代的粒子 i 中，可架线走廊 d 上的新架线路回数。

3.2 变量等概率离散化及其越界处理

针对动态电网规划具有的整数离散性，需对每一代新产生种群进行如下变量等概率离散化处理

$$\boldsymbol{X}_i^{(t+1)} = M_{\text{Round}}(\boldsymbol{X}_i^{(t)} + \boldsymbol{V}_i^{(t)}) \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{V}_i^{(t)}$ 对应于式（13）中括号里的部分；$M_{\text{Round}}(\bullet)$ 为取整函数，定义为：粒子的维分量按四舍五入将其转化为整数；若其越出上/下界，则分别取为上/下界。

3.3 等概率初始化种群

为使初始种群满足决策变量的约束条件，并保证其分布均匀、可行、多样、具有一定的可行域覆盖率，种群等概率初始化的具体操作为

$$\boldsymbol{X}_i^{(t)} = M_{\text{Round}}[\boldsymbol{L}_i^{(t)} + (\boldsymbol{U}_i^{(t)} - \boldsymbol{L}_i^{(t)})N_{\text{rand}}(0,1)] \tag{21}$$

反复运用式(21)，可得到由 m 个体和个体变量为 n 所构成的整数矩阵 $\boldsymbol{A}_{m\times n}$。

3.4 收敛判据

当以给定的迭代次数 T 作为收敛判据时，其大小的设置将左右算法的效率和全局最优解的获取。因此，为避免算法阻滞于局部极值点，除设置最大停滞代数 $T_{\max}$ 外，本文还采用种群性能差异作为判据[3]。

$$\Delta q^{(t)} = \sum_{i=1}^{m}\{\frac{\min[(q_{\text{best}}^{(t)} - q_i^{(t)}), \varepsilon]}{m}\} \leqslant \varepsilon \tag{22}$$

3.5 动态电网规划求解流程

如图 1 所示，$\boldsymbol{X}_k$ 为第 k 阶段末的规划方案，描述了该阶段末的网络结构；$U_k(\boldsymbol{X}_{k-1})$、$D_k(\boldsymbol{X}_k)$ 为第 k 阶段的阶段性决策、允许决策集合，表示在规划过程处于某个阶段时，基于此前某种电网结构，可做出不同选择；$\boldsymbol{X}_{k+1}=T_{k+1}(\boldsymbol{X}_k,\boldsymbol{U}_{k+1})$ 为电网结构转移法则，即以 $\boldsymbol{X}_k$ 为基础，所作出的 U_{k+1} 最终决定了 $\boldsymbol{X}_{k+1}$；$V_k(\boldsymbol{X}_{k-1},\boldsymbol{U}_k)$ 为第 k 阶段作出决策 U_k 的阶段性效益函数；$f_k(\boldsymbol{X}_k)$ 表示从第 k 阶段开始到全部阶段实施为止的规划过程中，采取最优策略所得到的目标函数值。$\boldsymbol{X}_k^*$、U_k^* 为第 k 阶段末的最优规划方案、最优阶段性决策。

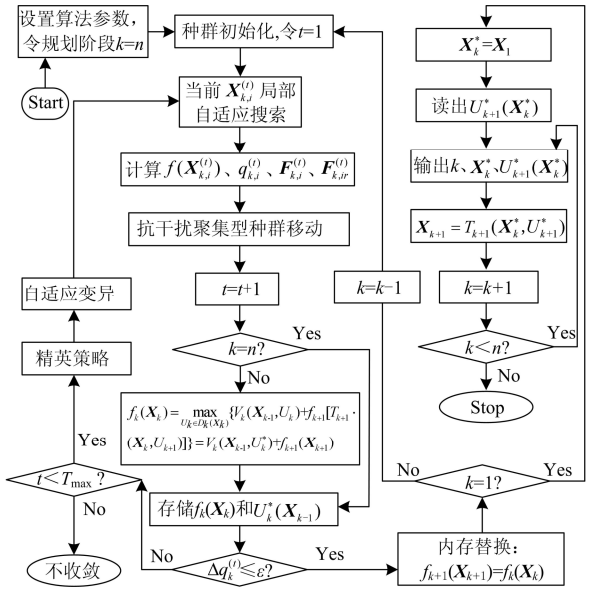

图 1 多目标动态电网规划流程

Fig. 1 Process of multi-objective dynamic power network planning

4 算例分析

本文的主要测试对象如图 2 所示。该系统现有 19 个节点、33 回线路，分四阶段规划，每阶段一年，分别对 12 条输电走廊进行规划。用作对比试验的 46 节点系统为巴西南部电网，系统现有 46 条输电走廊，分三阶段规划，分别为 2010~2013 年、2013~2015 年、2015~2018 年，规划目标年将增至 76 条输电走廊。两测试系统的节点和支路参数信息参见文献[4-5，16]。两个测试系统的经济性和可靠性指标均采用文献[3]中的数值。19 节点系统的动态规划结果列于表 1。

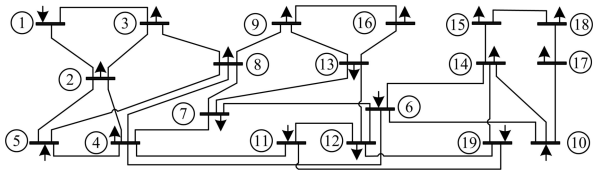

图 2 19 节点系统的拓扑结构

Fig. 2 Topology of the 19-bus system

表 1 19 节点系统的最优规划方案及部分 Pareto 方案对比

Table 1 Comparison between the optimal planning scheme and Pareto scheme of the 19-bus system

规划阶段与对比	最优规划方案		本文获得的 Pareto 方案	
	基于 IELM	文献[16] 基于 GA	方案 1	方案 2
阶段 1	2-5，4-5[2]，4-6，5-8	4-5，4-6，5-8[2]	2-5，4-5[2]，4-6，5-8	2-5，4-5[2]，4-6，5-8
阶段 2	2-3，4-5，4-6	5-8，2-4	2-3，4-5，4-6	2-3，4-5，4-6
阶段 3	2-3，2-4，5-8	2-3[2]，2-5，4-6	2-3，2-4，2-5	2-3，5-8，4-11
阶段 4	2-5，4-11	2-3，4-5	5-8，4-11	2-5，2-4
静态投资	720.20	719.00	720.20	720.20
动态投资	653.78	649.92	650.85	655.74
维护成本	49.03	——	48.81	49.18
运行成本	168.27	——	170.55	167.77
缺电成本	89.48	缺电	91.17	92.48
N-1 校验	满足	不满足	满足	满足

注：表中的[2]表示新架设 2 回线路；计算运行成本时，考虑电压为 U_B=230 kV，电阻为电抗的1/6；成本与投资的单位：万元；Pareto 方案为 IELM 剔除的次优方案集，它易使 ELM 陷入局部最优、早熟收敛，与文中最优方案具有一定可比性。

表 1 中，本文最优方案在第一、二阶段主要解决了 5、6 号节点的电力送出，以及 3、8 号节点的电力需求；第三、四阶段进一步确保了 5、11 号节点的电力送出，以及 3、8 号节点的负荷需求，并优化了系统的网架结构，满足 *N*-1 校验。而文献[16]的规划方案，虽然其投资偏少，但在第一、二阶段不能在 *N*-1 情况下保证 5、6 号节点的功率外送，电力需求得不到满足，系统存在缺电损失；在第四阶段，却又因多架设一回“2-3”线路，使得系统左边部分出现冗余，右边部分的联系却稍显薄弱。此外，Pareto 方案的静态投资和最优方案虽然一致，但存在输电阻塞、缺电损失的劣势，其总投资相对偏高，易被本文的局部自适应搜索和精英策略环节剔除。

为验证 IELM 在多目标动态电网规划问题应用中的有效性，令权重系统为 λ_1=0.5，λ_2=0.2，λ_3=0.3 时，采用 GA、IELM 算法，分别对 19 节点系统和 46 节点系统进行求解。其运行结果对比如表 2、图 3 所示。

由表 2 和图 3 可知，IELM 解决了算法在进化后期的收敛振荡问题，比 GA 具有更高的收敛性和寻优效率。当GA的种群规模和迭代次数设定为ELM算法的两倍或更多时，仍然难以逃逸局部最优；而 IELM 的初始种群规模和迭代次数都较少，这大大地节省了存储空间和运行时间，然而其获优率却明显优于 GA，具有更高容错性。

表 2 两种算法的性能对比

Table 2 Algorithm performance comparison between two methods

测试项目	19 节点系统		46 节点系统	
	GA	IELM	GA	IELM
种群规模	40	20	80	20
迭代次数	60	20	80	20
运算次数	20	20	20	20
收敛次数	12	20	9	20
平均运行时间/s	257	12	583	18
最优解首次出现/代	36~45	12~17	52~67	18~23
获优率/%	82	100	78	100

注：获优率为运算结束后的最优方案总数占总运算次数的百分比。

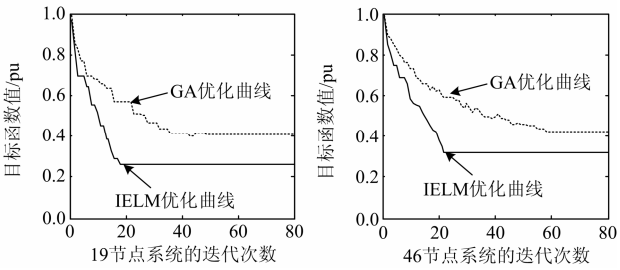

图 3 不同测试系统下算法的收敛曲线对比

Fig. 3 Comparison of the convergence of the algorithm under different test systems

5　结语

1）IELM 适于求解多阶段、多峰值、高维数的多目标动态电网优化规划，推动了智能优化电网规划方法的发展，具有工程实用价值。

2）本文以阶段性约束和规划期内约束对动态电网规划的可行域进行限定，并虑及了“架线复拆”情况，更贴近实际规划。同时考虑了各阶段性方案的可行性和它们之间的衔接，且整体性最优方案也并非各阶段性最优方案的组合。

参考文献

[1]　刘旭娜, 肖先勇, 汪颖, 等. 用户友好电网规划模型与方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 196-202.
LIU Xu-na, XIAO Xian-yong, WANG Ying, et al. The study of programming model and method of customer friendly power network[J]. Power System Protection and

Control, 2010, 38(23): 196-202.

[2] 王茜, 张粒子, 舒隽, 等. 基于阈值选择策略的改进混合蛙跳算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 34-39.
WANG Qian, ZHANG Li-zi, SHU Jun, et al. Application of improved shuffled frog leaping algorithm based on threshold selection strategy in transmission network planning[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 34-39.

[3] 付锦, 周步祥, 王学友, 等. 改进仿电磁学算法在多目标电网规划中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 141-146.
FU Jin, ZHOU Bu-xiang, WANG Xue-you, et al. Application of improved electromagnetism-like mechanism in multi-objective power network planning[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 141-146.

[4] 王淳, 万卫, 程虹, 等. 多阶段输电网络最优规划的模拟植物生长算法[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 937-942.
WANG Chun, WAN Wei, CHENG Hong, et al. Plant growth simulation algorithm for the optimal multistage transmission network planning[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 937-942.

[5] 韩晓慧, 王联国. 输电网优化规划模型及算法分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 143-148, 154.
HAN Xiao-hui, WANG Lian-guo. Review of transmission network optimal planning model and algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 143-148, 154.

[6] 顾洁, 秦玥, 包海龙, 等. 基于熵权与系统动力学的配电网规划动态综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 76-83.
GU Jie, QIN Yue, BAO Hai-long, et al. Comprehensive and dynamic evaluation of the distribution network planning based on entropy weight and system dynamics[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 76-83.

[7] 何永秀, 朱茳, 罗涛, 等. 城市电网规划自然灾害风险评价研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 205-210.
HE Yong-xiu, ZHU Jiang, LUO Tao, et al. Risk assessment of natural disaster in urban electric power network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 205-210.

[8] Birbil S I, Fang S C. An electromagnetism-like mechanism for global optimization[J]. Journal of Global Optimization, 2003, 25(3): 263-282.

[9] 何永秀, 王巍, 杨卫红, 等. 基于盲数理论的配电网接线方式评价[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 139-143.
HE Yong-xiu, WANG Wei, YANG Wei-hong, et al. Assessment of connection mode in distribution network based on blind number theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 139-143.

[10] Yurtkuran A, Emele A new hybrid electromagnetism-like algorithm for capacitated vehicle routing problems[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(4): 3427-3433.

[11] WANG Yu-ping, DANG Chuang-yin. An evolutionary algorithm for global optimization based on level-set evolution and latin squares[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2007, 11(5): 579-595.

[12] 李鑫滨, 朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 137-143.
LI Xin-bin, ZHU Qing-jun. Application of improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 137-143.

[13] 王学友, 周步祥, 付锦, 等. 分布式电源优化配置的仿电磁学算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4): 134-138.
WANG Xue-you, ZHOU Bu-xiang, FU Jin, et al. Electro-magnetism-like mechanism based on optimal placement of dis-tributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(4): 134-138.

[14] Birbil S L, Fang S C, Sheu R L. On the convergence of a population-based global optimization algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2004, 30(2): 301-318.

[15] 白晶, 尹怡欣, 郝智红. 基于变论域变步长 LMS 算法的自适应逆控制系统稳定性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 59-64.
BAI Jing, YIN Yi-xin, HAO Zhi-hong. Investigation on the stability of adaptive inverse control system based of variable region variable step size LMS algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 59-64.

[16] 毛玉宾, 王秀丽, 王锡凡. 多阶段输电网络最优规划的遗传算法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 13-19.
MAO Yu-bin, WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Genetic algorithm for the optimal multistage transmission network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(12): 13-19.

收稿日期：2013-05-19；　　修回日期：2013-06-29

作者简介：

付　锦(1985-)，男，硕士，助理工程师，主要从事自动化及继电保护研究；E-mail：fujindequanpin@163.com

王先洪（1981-），男，本科，助理工程师，主要从事自动化及继电保护研究；

欧智乐（1983-），男，本科，工程师，主要从事自动化及继电保护研究。