

基于混沌量子蜜蜂算法的机会约束输电规划

曾鸣, 田廓, 薛松, 邱柳青, 董军

(华北电力大学能源与电力经济研究咨询中心, 北京 102206)

摘要: 电力市场环境下的众多不确定因素具有明显的随机性与模糊性, 且对输电规划会产生重要影响。利用不确定规划理论建立了随机模糊最小最大机会约束输电规划模型, 在最小可能的总投资成本条件下寻找最优规划方案。借鉴蜜蜂觅食与交配行为, 引入混沌优化与量子计算方法, 设计混沌量子蜜蜂算法实现了对上述输电规划问题的求解, 研究给出具体求解步骤, 基于梯度的量子旋转角的计算方法提高解的精度, 利用高斯量子突变保持种群的多样性, 并证明了该算法以概率 1 收敛。通过 30 节点系统测算表明, 混沌量子蜜蜂算法求解机会约束输电规划问题具有收敛速度快、精度高的特点。

关键词: 混沌量子蜜蜂算法; 随机模糊机会约束; 收敛性; 输电规划

Chance constrained transmission planning method based on chaos quantum honey bee algorithm

ZENG Ming, TIAN Kuo, XUE Song, QIU Liu-qing, DONG Jun

(Research Center of Energy and Electricity Economics, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Multitudinous uncertain factors which possess randomness and fuzziness exert a profound influence on transmission planning under the environment of electricity market. The random fuzzy min max chance constrained transmission planning model is established using uncertain planning theory, which means that the best planning scheme is selected under the condition of minimum total investment cost. The problem of transmission planning above is solved using the chaos quantum honey bee algorithm, which uses the foraging and mating behaviour of bees and introduces the method of the chaos optimization and quantum computing. The solving steps are brought forward, the precision of solution being improved based on the computing method of the grad multiple-quantum magic angle spinning, population diversity is retained by use of gauss genic mutation, and the convergence being 1 of this algorithm is proved. Finally, the result of IEEE-30 test system indicates that using the chaos quantum honey bee algorithm to solve the problem of random fuzzy chance constrain transmission planning has the characteristics of faster convergence rate and higher precision.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(No.70671041 and No.70771039) and Beijing Education Commission Cooperation Project.

Key words: chaos quantum honey bee algorithm; random fuzzy chance constrain; convergence; transmission planning

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0001-07

0 引言

输电规划的目的在于以最小成本投入满足电力系统的负荷增长的需要, 以此确定最优网络扩容方案。在电力市场环境下, 输电规划面临众多不确定性因素, 如负荷增长、发电计划、市场竞争以及系统可靠性要求^[1-5]。机会约束规划是处理含有随机变量和模糊变量规划问题的有效手段, 利用机会约束规划思想, 可以实现规划目标以及约束条件不确定

性的定量化模拟^[6-9]。因此, 应用机会约束规划技术研究输电规划问题具有较好的适应性。

国内外关于机会约束规划的输电规划问题的研究, 主要集中于构造机会约束输电规划模型和利用模拟技术对问题进行求解两个方面。文献[10-13]分别研究了基于机会约束规划、模糊机会约束规划和灰度机会约束规划在输电系统规划中的应用。在输电规划模型构造方面, 已有的研究在一定程度上有效地对输电规划中的模糊性和随机性因素做出了理论抽象, 如引入线路功率约束的置信水平^[11], 同时在约束条件中考虑模糊因素和随机因素^[10,12], 进而对功率约束变量进行灰色处理, 构造序列估计目标

基金项目: 国家自然科学基金项目(70671041, 70771039); 北京市教育委员会共建项目专项资助

函数的最大值^[13]。对于机会约束规划的求解算法,大多数研究采用模糊数学理论、灰色理论、神经网络等方法与遗传算法结合进行模拟求解^[10-16],但這些方法存在一定的局限性,主要是由于遗传算法的收敛速度和全局收敛性的固有矛盾造成的。由 Seeley 提出的蜜蜂算法^[17],经过学者的研究发展,人工蜜蜂算法在克服遗传算法中盲目设定交叉概率和变异概率的缺陷方面取得了很好的效果^[18-23]。然而,单纯依靠人工蜜蜂算法寻优,容易产生过早收敛的问题,混沌搜索机制具有随机性、对初始值敏感和遍历性等特点,采用混沌量子计算,在避免搜索陷入局部最优的同时提高搜索精度^[24-27]。

本文基于已有研究成果,建立随机模糊最小最大机会约束输电规划模型,该模型考虑了极大化最大可能的收益。在规划模型求解方面,结合蜜蜂算法和混沌量子优化的优点,提出混沌量子蜜蜂算法,在解决随机模糊机会约束输电规划问题中,该优化算法可以更好地求解优化复杂的不确定性问题,本文给出了该方法的具体计算步骤和求解方法,建立了一种新的基于梯度的量子旋转角的计算方法并利用高斯量子突变保持种群的多样性,为解决输电规划问题提供了新的尝试,并对算法的收敛性进行了证明。最后通过IEEE-30节点测试系统证明了该方法的可行性与有效性。

1 随机模糊机会约束输电系统规划及其模拟

1.1 随机模糊机会约束输电系统规划模型

文献[6]对随机模糊变量的相关概念等已有系统研究。在输电规划中,最主要的不确定因素是新增电源点的选取和发电装机容量以及对各节点新增负荷的预测^[11-13]。本文以线路投资和建造成本最小为目标,建立基于随机模糊机会约束的输电系统规划模型。假设新增电源点的概率为 p ,可能出现的电源点为 i ,该点的预测发电装机容量为 P_{ik} ($k=1, 2, \dots, M$),服从离散型概率分布;可能的装机容量出现的概率为 α_{ik} ;则有: $Pr(x=P_{ik}) = \alpha_{ik}$, $0 < \alpha_{ik} < 1$, $\sum_{k=1}^M \alpha_{ik} = 1$, $k=1, 2, \dots, M$ 。规划期内节点 i 的负荷变化值服从正态分布 $\Delta P_{Di} \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$,则对于新增节点 i ,其负荷为 $P_{Di} = \Delta P_{Di}$ 。

与极大化收益函数乐观值的机会约束规划相对应,本文在建模输电系统规划问题时,研究极大化随机模糊收益的悲观值,即在最小可能的总投资成本中,找出一个最优的解决方案。这种情况下,把随机模糊规划决策系统建模成随机模糊 minmax 机会约束规划模型,

$$\max_x \min_f \bar{f} = \sum_{j=1}^n C_j L_j s_j$$

$$\text{s.t.} \quad \text{Ch}(f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq \bar{f}) (\gamma) \geq \delta \quad (1)$$

$$\text{Ch}(P_L \leq P_{L\max}) (\alpha_j) \geq \beta_j$$

$$B\boldsymbol{\theta} = \mathbf{P}$$

$$P_G \leq P_{G\max}$$

式中: $\text{Ch}(\cdot)$ 为本原机会测度函数; \mathbf{x} 是决策向量; $\boldsymbol{\xi}$ 是随机模糊向量; n 是候选线路的数目; s_j 表示候选线路 j 的 0-1 决策变量, s_j 取 0 或 1 分别表示该线路不包括或包括在规划方案中; C_j 为线路 j 的单位投资成本与运行费用; L_j 为线路 j 的长度; P_L 为支路功率向量; $P_{L\max}$ 为支路输电容量向量; B 为节点导纳矩阵; $\boldsymbol{\theta}$ 为节点电压相角向量; P 为节点净注入功率向量; P_G 为发电机出力向量; $P_{G\max}$ 为发电机出力上限向量; α_j 是指定的置信水平; β_j 为线路 j 功率约束的置信水平。

1.2 随机模糊模拟

对于给定的决策变量 x 和置信水平 α_j 与 β_j , 需要找出 (α, β) -悲观值, 返回给函数 $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 。因此, 设计一个随机模糊模拟来找出 $\text{Ch}\{f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq \bar{f}\} (\alpha \geq \beta)$ 中 \bar{f} 的最小值。显然, (α, β) -悲观值 \bar{f} 必须满足式 (2)。

$$Pr\{\omega \in \Omega \mid \text{Pos}\{f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}(\omega)) \leq \bar{f}\} \geq \beta\} = \alpha \quad (2)$$

解决输电系统规划问题的主要难点是计算随机模糊事件 $\text{Ch}\{P_L \leq P_{L\max}\} (\alpha_j)$ 出现的机会以及随机模糊函数 $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 。在输电系统中, 用解析方法很难或不可能获得这些确切的值。因此, 采用随机模糊模拟来估算这些值。随机模糊模拟的过程如下:

1) 按照概率 Pr 从 Ω 中取样本 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, 并定义式 (3):

$$h(\omega_n) = \begin{cases} 1, & \text{Pos}\{f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}(\omega_n)) \leq \bar{f}\} \geq \beta \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

为一组随机变量序列 (不是随机模糊变量), 对于所有的 n , $n=1, 2, \dots, N$, 都有上式成立且 $E[h(\omega_n)] = \alpha$ 。当 $N \rightarrow \infty$ 时, 由大数定律可得

$$\sum_{n=1}^N h(\omega_n) / N \rightarrow \alpha, \text{ a.s.} \quad (4)$$

需要注意的是: $\sum_{n=1}^N h(\omega_n)$ 只是满足条件 $\text{Pos}\{f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}(\omega_n)) \leq \bar{f}\} \geq \beta$ 的 ω_n 个数的总和;

2) 找出满足 $\text{Pos}\{f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}(\omega_n)) \leq \bar{f}\} \geq \beta$ 的最小值 \bar{f}_n , $n=1, 2, \dots, N$, 分别进行模糊模拟;

3) 令 $[N\alpha]$ 为 αN 的整数部分, \bar{f} 的值可以作为序

列 $\{\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_N\}$ 中第 $[N]$ 个最小元素, 由随机模拟求解

$$\bar{f} = \inf\{f_n \text{Pos}\{f(x, \xi(\omega_n)) \leq \bar{f}_n\}\} \geq \beta, \quad (5)$$

$$n=1, 2, \dots, N;$$

4) 返回序列 $\{\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_N\}$ 中第 $[N]$ 个最小元素;

5) 将步骤 2) ~ 4) 重复 N 次;

6) 返回 \bar{f}_n 的值。

2 混沌量子蜜蜂算法

一个典型的蜜蜂种群包括一个唯一的蜂王、雄蜂和工蜂(侦查蜂)。蜂群用有效的途径协调其觅食活动, 目标是找到丰富的食物来源并获得最好的花蜜。觅食者被同时派遣到多个方向, 以便涵盖更大的搜索范围。侦察蜂随机搜索食物来源, 并从一个食物来源到另一个食物来源。当找到一个滋养丰富的食物来源后, 它返回蜂巢并采取以下三项行为中的一个^[26]: 1) 跳摇摆舞召集更多的觅食者到那个食物来源; 2) 如果食物质量较低, 则放弃这个食物来源, 这样其他的蜜蜂将不用再搜索这里; 3) 不告诉其他蜜蜂, 直接飞往食物来源进行搜索。对优化问题进行解空间的搜索与蜜蜂觅食的过程十分类似。此外, 借鉴蜜蜂交配过程对优化问题进行最优解的求取, 蜂王代表了当前最优解, 雄蜂则是被挑选的测试方案。与蜂王和雄蜂交配产生下一代的繁殖过程类似, 量子交叉为找到更好的解决方案创造了机会。

基于此, 模拟蜜蜂的觅食与交配过程, 建立混沌量子蜜蜂算法来解决随机模糊输电系统规划的复杂不确定性规划问题。使用高斯量子变异保持了生物的多样性, 提高了蜜蜂种群的全面适应性并设计了新的基于梯度的量子旋转角计算方法。在混沌量子蜜蜂算法中, 携带一组量子比特的每一只蜜蜂代表一个解决方案, 混沌优化围绕着选定迄今为止最佳的食物来源对空间进行搜索。在算法的整合过程中, 在被选雄蜂与蜂王之间进行了随机干扰离散量子交叉。

量子的最小信息单元为量子比特(Q-bit), 使用一对实数 (α, β) 定义一个量子位^[25], 则在第 t 次迭代中的第 j 个个体 q_j^t 被定义为:

$$q_j^t = \begin{bmatrix} \alpha_{j1}^t & \alpha_{j2}^t & \dots & \alpha_{jn}^t & \dots & \alpha_{jn}^t \\ \beta_{j1}^t & \beta_{j2}^t & \dots & \beta_{jn}^t & \dots & \beta_{jn}^t \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, α, β 为量子比特的概率幅, 满足归一化条件

$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, $|\alpha|^2$ 给出了量子比特为 0 的概率, $|\beta|^2$ 给出了量子比特为 1 的概率。

定理 1 当混沌量子蜜蜂算法用于 n 维空间的连续优化问题时, 对于每个全局最优解 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 存在相关的 2^n 个量子比特。

证明 从 n 维空间 $R^n = [-1, 1]^n$ 到单位空间的连续优化问题的全局解如下所示,

$$\alpha_i = \frac{x_i - x_i^L}{x_i^U - x_i^L}, 1 \leq i \leq n$$

存在两个量子比特与之相对应,

$$q_1 = \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix}, q_2 = \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \sin(-\arccos \alpha_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_i \\ -\beta_i \end{bmatrix}$$

因此, 对于每个全局最优解 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 存在相应的 2^n 个量子比特。

根据定理 1, 当混沌量子蜜蜂算法用于有 M 个全局最优解的特定优化问题时, 在空间 $R^n = [-1, 1]^n$ 中解的个数可以被扩充到 $2^n M$ 个。这使全局最优解的个数成指数倍增加, 从而提高了获得全局最优解的概率。

3 基于混沌量子蜜蜂算法的输电系统规划问题求解

3.1 求解算法

整合随机模糊模拟与混沌量子蜜蜂算法, 求解随机模糊输电系统机会约束规划问题的算法流程如图 1 所示。具体步骤如下:

1) 设定种群初值。

2) 设定混沌初值。依据 Logistic 映射构建混沌变量,

$$\delta_{i+1} = u\delta_i(1 - \delta_i), i=1, \dots, r; u \in [3.571448, 4] \quad (7)$$

式中, u 为混沌控制参量, 当 $u=4$ 时 Logistic 处于完全混沌状态。输出值 δ_{i+1} 的范围为 $[0, 1]$, 每种情形不重复出现。由 r 混沌变量的第一个量子比特开始, 如式 (8):

$$\alpha_{i_i} = \cos(2\pi\delta_i), \beta_{i_i} = \sin(2\pi\delta_i), i=1, \dots, n \quad (8)$$

选择具有优先级的路径, 并将具有最高优先级的解设为当前最优解。

3) 将每个分向量 $x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$ 划分到 N 个子空间, 并随机分配 N_p 个搜索到第一个分向量的 N 个子空间。第 j 个搜索穿越第一个分向量的第 k_1 个子空间可以表示为:

$$x_{ji} = x_{ji}^L + \frac{x_{ji}^U - x_{ji}^L}{N} \cdot k_1 \quad (9)$$

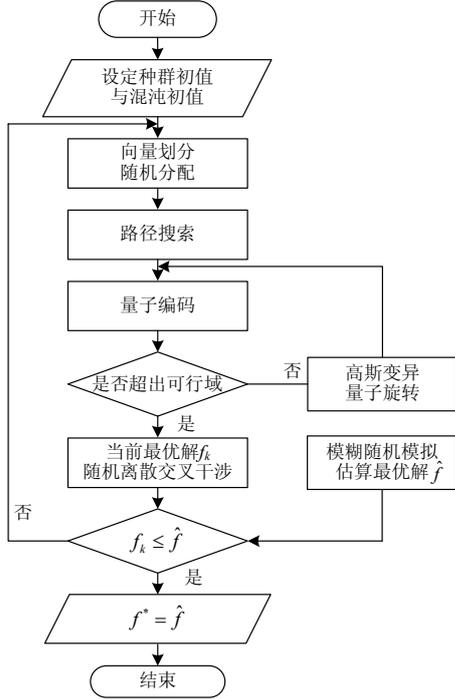


图1 求解随机模糊机会约束问题混沌量子蜜蜂算法流程

Fig.1 Flow of chaos quantum honey bee algorithm on random fuzzy chance constrained problem

4) 从现有的 $(i-1)$ 层到 i 层的 k_i 子空间搜索路径的概率如下,

$$p_{ik}^j(t) = \begin{cases} \frac{[\rho_{ik}(t)]^\alpha \cdot (1/d_{ik})^\beta}{\sum_{r \in S_i^j} [\rho_{ir}(t)]^\alpha \cdot (1/d_{ir})^\beta}, j \in S_i^j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (10)$$

式中: S_i^j 为与向量 i 相连而未被搜索 j 访问的一组位置; d_{ik} 为节点 i 和节点 j 之间的启发式距离; ρ_{ik} 为节点 i 和节点 j 之间的排列系数^[27].

$$\rho_{ik}(t) = \begin{cases} \gamma & k \in F_i(t) \\ 1 - \gamma \cdot \frac{|A_i(t) \cap F_i(t)|}{|A_i(t)| - |A_i(t) \cap F_i(t)|} & k \notin F_i(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: γ 为常数, 且 $0 < \gamma < 1$; $A_i(t)$ 为与节点 i 相连的一组路径; $F_i(t)$ 为从属于节点 i 的一组首选路径。

5) 逐次搜索直到最后一个, 则电源点 i 被搜索到的概率为

$$\mu_i = f_i / \sum_{j=1}^{n_c} f_j \quad (12)$$

6) 用方差 $(\alpha_{ji}^t)^2$ 进行高斯变异

$$\alpha_{ji}^{t+1} = \alpha_{ji}^t + N(0, (\alpha_{ji}^t)^2) \quad (13)$$

$$x_{ji}^{t+1} = x_{i\min}^{t+1} + (x_{i\max}^{t+1} - x_{i\min}^{t+1}) \alpha_{ji}^{t+1}, 1 \leq i \leq n \quad (14)$$

如果超出了解空间的可行域, 则重复如下计算直到解位于可行域内:

$$\alpha_{ji}^{t+1} = \begin{cases} 2 - \alpha_{ji}^{t+1} & \alpha_{ji}^t + N(0, (\alpha_{ji}^t)^2) \geq 1 \\ -2 - \alpha_{ji}^{t+1} & \alpha_{ji}^t + N(0, (\alpha_{ji}^t)^2) \leq -1 \end{cases}$$

如果新的解不如以前的解, 用量子旋转门更新

$[\alpha_{ji}^t, \beta_{ji}^t]^T$,

$$\begin{bmatrix} \alpha_{ji}^{t+1} \\ \beta_{ji}^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\varphi_{ji}^t) & -\sin(\Delta\varphi_{ji}^t) \\ \sin(\Delta\varphi_{ji}^t) & \cos(\Delta\varphi_{ji}^t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{ji}^t \\ \beta_{ji}^t \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\Delta\varphi_{ji}^t = -\text{sgn}(A) \varphi_0 \frac{\|\nabla f_{\max}^t - \nabla f_{\min}^t\|}{\|\nabla f(x_j^t) - \nabla f_{\min}^t\|} \quad (16)$$

式中: φ_0 为初始转角; $\nabla f(x_j^t)$ 为梯度。

7) 对当前最优解进行随机离散交叉干涉

$$\begin{bmatrix} \alpha_{ji}^{t+1} \\ \beta_{ji}^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{cases} [\alpha_{i_i}^t, \beta_{i_i}^t]^T & p_i < \frac{1}{r} \\ \vdots & \vdots \\ [\alpha_{r_i}^t, \beta_{r_i}^t]^T & (r-1)/r \leq p_i < 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中, p_i 为空间间隔 $(0,1)$ 中的随机数。

8) 随机模糊模拟用来估算约束函数的值。检查每个解的概率, 如果解不可行, 重复搜索直到得到可行解。

9) 选择当前最优解 f_k 和当前最优路径 x_k 。如果 $f_k \leq \bar{f}$, 则令 $\bar{f} = f_k$, $\bar{x} = x_k$, 其中 \bar{f} 是全局最优目标函数, \bar{x} 是全局最优解。如果 \bar{x} 比当前最优解更好, 则以它作为新的最优解。

10) 回到步骤 3) 直到所有的迭代完成或达到收敛标准。

11) 输出最优解, 完成算法。

3.2 收敛性证明

用 \mathcal{S} 表示状态空间, x_i 表示种群中第 i 个个体。令 $\mathcal{S}_N = \{A = (x_1, x_2, \dots, x_N), x_i \in \mathcal{S}, 1 < i < N\}$ 表示种群空间, $\mathcal{S}_M = \{(x_1, x_2, \dots, x_N), x_i \in \mathcal{S}, 1 < i < M\}$ 表示搜索空间。

定理 2 蜜蜂算法的状态向量 $(\rho(t), \omega(t), f^*(t))$, $t \geq 1$ 是一个马尔可夫链, 种群序列 $\{A(t), t \geq 0\}$ 是一个有限均匀马尔可夫链。

证明 令 $\rho(t)$ 表示第 t 次迭代所有路径上节点的排列系数, $\omega(t)$ 表示第 t 次迭代的路径向量, $f^*(t)$ 表示第 t 次迭代的最优解。在混沌量子蜜蜂算法中,

蜜蜂状态的变换可以表示为一个随机过程:

$A(t) \xrightarrow{\text{select}} A^1(t) \xrightarrow{\text{chaos search}} A^2(t) \xrightarrow{\text{mutation}} A^3(t) \xrightarrow{\text{crossover}} A(t+1)$,
 既然混沌量子蜜蜂算法采用量子比特且 α_{ji} 的值连续, 从理论上讲状态空间是无限的, 但是在实际的计算过程中, α_{ji} 是有限精确的。假设 α_{ji} 的精确度是 ε , 它的维数是 $V = (\alpha_{ji}^U - \alpha_{ji}^L) / \varepsilon$, 其中 α_{ji}^U 和 α_{ji}^L 分别是 α_{ji} 的上限和下限。在量子比特表示法中 $\alpha_{ji}^U = 1$, $\alpha_{ji}^L = -1$ 。因此, $V = 2/\varepsilon$ 。假设量子比特的长度为 N 且蜜蜂种群的规模为 M , 则种群序列是有限的。种群序列的计算如下,

$$A(t+1) = T(A(t)) = T_c \circ T_m \circ T_s \circ T_p(A(t))$$

其中, T_p, T_s, T_m, T_c 与 t 无关。蜜蜂算法的状态向量 $(\rho(t), \omega(t), f^*(t))$, $t \geq 1$ 仅与 $(\rho(t-1), \omega(t-1), f^*(t-1))$ 有关, 与 t 无关。同时, 解序列如下:

$$x(t+1) = \begin{cases} x_i(t+1) = T_c^i \circ T_m^i \circ T_s^i \circ T_p^i(x(t)), \\ i \leq M-1, x_m(t+1) = x_{i_0}(t) \end{cases}$$

其中 $i_0 = \text{argmin}_j \{f(x_j(t))\}$, 概率变换矩阵为:

$$P\{x, y\} = P\left\{ \begin{array}{l} x(t+1) = y \\ x(t) = x \end{array} \right\} =$$

$$\begin{cases} \prod_{k=1}^M P\{T(x(t))k = yk\} \exists i_0, yM = x_{i_0} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

由上式可知, $A(t+1)$ 只与 $A(t)$ 有关而与 t 无关。因此, 种群序列 $\{A(t), t \geq 0\}$ 是一个有限均匀马尔可夫链。

定理 3 混沌量子蜜蜂算法以概率 1 收敛。

证明 因为 $P\{A(t) \in A^* | A(t-1) \in A^*\} = 1$ 且

$$P\{A(t) \in A^*\} = [1 - P\{A(t-1) \in A^*\}] \cdot P\{A(t) \in A^* | A(t-1) \notin A^*\} + P\{A(t-1) \in A^*\} \cdot P\{A(t) \in A^* | A(t-1) \in A^*\}, t \geq 1$$

由 $P\{A(t) \in A^* | A(t-1) \notin A^*\} \geq d(t-1) \geq 0$ 和

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \prod_{i=0}^t [1 - d(i)] = 0 \text{ 可知, } [1 - P\{A(t) \in A^*\}] \leq$$

$$[1 - d(t-1)] [1 - P\{A(t-1) \in A^*\}], \text{ 则,}$$

$$[1 - P\{A(t) \in A^*\}] \leq [1 - P\{A(0) \in A^*\}] \prod_{i=0}^{t-1} [1 - d(i)],$$

因此有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P\{A(t) \in A^*\} \geq 1 - [1 - P\{A(0) \in A^*\}] \cdot \lim_{t \rightarrow \infty} \prod_{i=0}^{t-1} [1 - d(i)]$$

故: $\lim_{t \rightarrow \infty} P\{A(t) \in A^*\} \geq 1$, 又因为概率值不能大于 1,

因此, $\lim_{t \rightarrow \infty} P\{A(t) \in A^*\} = 1$, 算法以概率 1 收敛。

4 算例分析

为了检验本文提出的混沌量子蜜蜂算法的可行性, 采用 IEEE-30 节点系统进行算例分析^[28], 如图 2 所示。

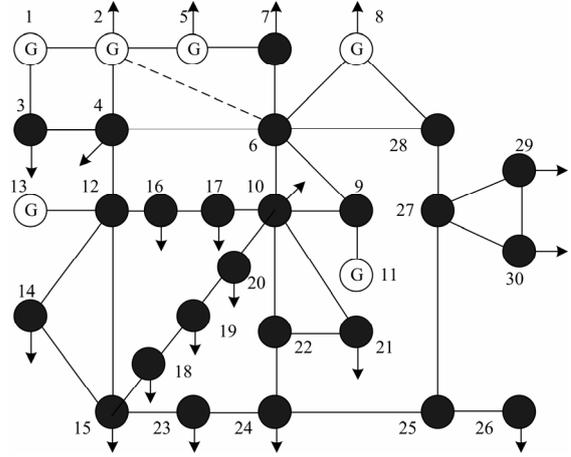


图 2 IEEE-30 节点系统

Fig.2 IEEE-30 bus system

系统中线路已有容量及投资成本如表 1 所示。设规划期内节点 1, 2, 5, 8, 11, 13 为有可能新增装机容量的待选节点, 可能装机容量和运行成本、单位投资成本见表 2; 发电机组 1, 2, 5, 8, 11 和 13 已有的装机容量为 30, 40, 50, 30, 60, 40 MW。

根据算例所提供的基本情景, 分别采用混沌量子蜜蜂算法与常规蜜蜂算法对输电机会约束规划问题进行求解, 以检验其解的收敛性。给定一个置信区间 $[0.85, 0.80]$, 迭代次数为 50 次。图 3 显示了两种算法的收敛速度, 可见混沌量子蜜蜂算法收敛性明显优于常规蜜蜂算法, 且两种方法的最优收敛结果一致, 表明在常规蜜蜂算法中引入混沌量子变量, 有助于提高算法的收敛速度和最优解的获得, 最优解为 12 969.8 万元。

进一步检验机会约束在输电规划中的优点与作用, 分别设置三种方案的置信水平, 考察在不同置信水平条件下方案必选的特点。设置三个方案的置信水平分别为 $[\alpha_j, \beta_j]^T = [0.85, 0.80; 0.90, 0.85; 0.95, 0.90]^T$, 按照本文所建立的最大最小机会约束规划模型, 采用混沌量子蜜蜂算法, 设定种群规模为 100, 迭代次数为 50 次, 最终得到三种规划方案结果如表 3 所示。

优化结果表明, 置信水平为 $[0.85, 0.80]$ 时, 所采取的规划方案总投资成本最小。此时, 需要增容

的电源点为 1 和 8，新增容量分别为 40 MW 和 30 MW，需要新建输电线路 5-7, 6-7, 10-20, 22-24, 8-28，规划总成本为 12 969.8 万元。通过三个方案必选，可以发现置信度的高低直接影响规划成本，即置信度越高，规划成本越高，这样表明选择低成本就要冒高风险，从而反映出机会成本的本质。

表 1 线路已有容量及其投资

Tab.1 Capacity and investment of current line

线路	投资/ (万元/条)	已有容量/ MW	线路	投资/ (万元/条)	已有容量/ MW
1-2	5	30	1-3	5	15
2-4	5	10	3-4	5	10
2-5	6	30	2-6	5	10
4-6	5	10	5-7	7	15
6-7	6	40	6-8	5	25
6-9	7	15	6-10	6	10
9-11	8	60	9-10	9	50
4-12	4	10	12-13	6	40
12-14	—	10	12-15	6	20
12-16	5	10	14-15	—	10
16-17	5	10	15-18	5	10
18-19	5	10	19-20	—	10
10-20	5	10	10-17	—	10
10-21	8	20	10-22	5	10
21-22	—	10	15-23	—	10
22-24	5	10	23-24	—	10
24-25	—	10	25-26	—	10
25-27	—	10	28-27	5	10
27-29	—	10	27-30	—	10
29-30	—	10	8-28	—	10
6-28	5	10	总计	—	650

表 2 IEEE-30 节点系统投资运行参数

Tab.2 Investment and operating parameters of IEEE-30 bus system

节点	新增电源点可能装机容量/MW			运行成本/ (元/MWh)	投资成本/ (元/kW)
1	30	40	50	22.9	3 100
2	30	—	—	32.7	3 200
5	30	—	—	32.7	3 350
8	30	40	—	28.1	3 100
9	30	40	50	30.7	3 900
11	30	40	50	29	3 100
12	30	40	50	30	3 100
13	30	40	50	29	3 000

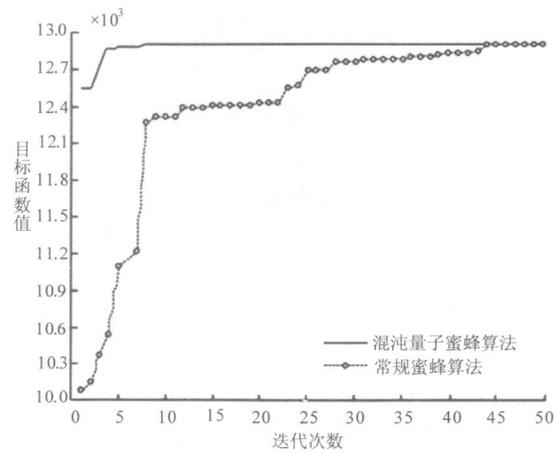


图 3 混沌量子蜜蜂算法与常规蜜蜂算法收敛过程

Fig.3 Convergence process of chaos quantum honey bee algorithm and general honey bee algorithm

表 3 规划方案比较

Tab.3 Comparisons of different planning schemes

方案	新建线路	新增电源点	投资总成本/万元
1	5-7, 6-7, 10-20,	1 (40 MW)	12 969.8
	22-24, 8-28	8 (30 MW)	
2	5-7, 6-7, 9-11,	8 (30 MW)	12 986.5
	10-20, 8-28	11 (50 MW)	
3	5-7, 9-11, 10-20,	8 (30 MW)	12 993.7
	22-24, 8-28	11 (50 MW)	

5 结论

建立了随机模糊最小最大机会约束输电规划模型，借鉴蜜蜂种群觅食及交配的行为，引入混沌量子计算方法，提出了混沌量子蜜蜂算法，用以求解本文提出的输电系统规划问题。研究得到以下结论：

(1) 考虑极大化随机模糊收益的悲观值情况下，建立了随机模糊机会约束输电规划模型，即在最小可能的总投资成本中，寻找最优的解决方案，能够有效兼顾电力市场环境下的众多不确定因素对输电规划的影响作用。

(2) 在常规蜜蜂算法基础上引入混沌量子计算思想，研究了混沌量子蜜蜂算法求解的原理和步骤，基于梯度的量子旋转角的计算方法提高解的精度，利用高斯量子突变保持种群的多样性，证明了混沌量子蜜蜂算法以概率1收敛。

(3) 通过 IEEE-30 节点系统测算表明，混沌量子蜜蜂算法求解机会约束输电规划问题比常规蜜蜂算法收敛速度更快，且规划结果与置信水平的设定密切相关。

参考文献

- [1] Romero R, Monticelli A, Garcia A, et al. Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning[J]. Proc-Gen, Transm, and Distrib, 2000, 149(1): 27-36.
- [2] De I, Silva J, Rider M J, et al. Transmission network expansion planning considering uncertainty in demand[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2006, 21(4): 1565-1573.
- [3] Buygi M O, Balzer G, Shanечи H M. Market-based transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2060-2067.
- [4] Jaeseok Choi, El-Keib A A, Tran T. A fuzzy branch and bound-based transmission system expansion planning for the highest satisfaction level of the decision maker[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 476-484.
- [5] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 2-27.
- [6] 刘宝碇, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 27-42.
- [7] LIU Bao-ding. Fuzzy random chance-constrained programming[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2001, 9 (5) : 713-720.
- [8] Liu B. Random fuzzy dependent-chance programming and its hybrid intelligent algorithm[J]. Information Sciences, 2002, 141 (3) : 259-271.
- [9] Liu Y, Liu B. Expected value operator of random fuzzy variable and random fuzzy expected value models[J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge- Based Systems, 2003, 11 (2) : 195-215.
- [10] 孙燕, 谭瑛, 曾建潮. 求解模糊机会约束规划模型的微粒群算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31 (2) : 376-379.
- SUN Yan, TAN Ying, ZENG Jian-chao. Particle swarm optimization for fuzzy chance constrained programming model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31 (2) : 376-379.
- [11] 杨宁, 文福栓. 基于机会约束规划的输电系统规划方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (14) : 23-27.
- YANG Ning, WEN Fu-shuan. Transmission system expansion planning based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (14) : 23-27.
- [12] 郑连清, 王腾, 娄洪立, 等. 基于模糊机会约束规划的输电系统规划方法[J]. 高电压技术, 2007, 33 (3) : 67-70.
- ZHENG Lian-qing, WANG Teng, LOU Hong-li, et al. Transmission system expansion planning based on fuzzy chance constraint programming[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (3) : 67-70.
- [13] 赵国波, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于灰色机会约束规划的输电系统规划[J]. 电网技术, 2009, 33 (1) : 22-25.
- ZHAO Guo-bo, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan, et al. Power transmission system planning based on grey chance constrained programming[J]. Power System Technology, 2009, 33 (1) : 22-25.
- [14] 吴杰康, 吴强, 陈国通, 等. 基于模糊随机机会约束规划的输电可靠性裕度计算[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (5) : 23-28.
- WU Jie-kang, WU Qiang, CHEN Guo-tong, et al. Fuzzy random chance-constrained programming for quantifying the transmission reliability margin[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (5) : 23-28.
- [15] FANG Hong, CHENG Han-zhong, YING Zhi-wei, et al. Transmission system expansion planning based on stochastic chance constrained programming with security constraints[C]. //Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing(China): 2008: 909-914.
- [16] Yu H, Chung C Y, Wong K P, et al. A chance constrained transmission network expansion planning method with consideration of load and wind farm uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24 (3) : 1-9.
- [17] Seeley T D. The wisdom of the hive: the social physiology of honey bee colonies[M]. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1996.
- [18] Abbass H A. Marriage in honey bees optimization (MBO) : a haplometrosis polygynous swarming approach[C]. //Congress on Evolutionary Computation. Seoul(Korea): 2001: 207-214.
- [19] 孟伟, 韩学东, 洪炳容. 蜜蜂进化型遗传算法[J]. 电子学报, 2006, 34 (7) : 1294-1296.
- MENG Wei, HAN Xue-dong, HONG Bing-rong. Bee evolutionary genetic algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34 (7) : 1294-1296.
- [20] Quan Hai-yan, Shi Xin-ling. On the analysis of performance of the improved artificial-bee-colony algorithm[C]. //Fourth International Conference on Natural Computation. Jinan(China): 2008: 654-658.
- [21] Bahamish H A A, Abdulah R, Salam R A, Protein tertiary structure prediction using artificial bee colony[C]. //Third Asia International Conference on Modelling & Simulation. Bali: 2009: 258-263.
- [22] Pham D T. Optimising neural networks for identification of wood defects using the bees algorithm in industrial informatics[C]. //2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics. Singapore: 2006.
- [23] Basturk B, Karaboga D. An artificial bee colony (ABC) algorithm for numeric function optimization[C]. //IEEE Swarm Intelligence Symposium. Indianapolis(USA): 2006.

(下转第14页 continued on page 14)

参考文献

[1] 苏喆, 陈斌发, 聂继军. 北京电网建设的外部环境分析及对策[J]. 农村电气化, 2009 (3): 5-6.
SU Zhe, CHEN Bin-fa, NIE Ji-jun. Beijing power grid construction of the external environment analysis and countermeasures[J]. Rural electrification, 2009 (3): 5-6.

[2] 李莉. 土地征用的利益均衡研究[D]. 武汉: 中南大学, 2007.
LI Li. The balance of interests in land requisition study[D]. Wuhan: Central South University, 2007.

[3] 韩正华, 周渝慧, 吴俊勇. 基于博弈论的电力市场双边交易智能体谈判策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (1): 20-26.
HAN Zheng-hua, ZHOU Yu-hui, WU Jun-yong. Negotiation strategy based on game theory with agent for bilateral bargaining of power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (1): 20-26.

[4] 邓宏钟. 基于多智能体的整体建模仿真方法及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.
DENG Hong-zhong. The overall multi-agent-based modeling and simulation method and its application[D]. Changsha: University of Defense Technology, 2002.

[5] 叶小平, 胡苏. 冲突环境中中立Agent群体趋向分析与预测[J]. 智能系统学报, 2007, 2 (4): 29-33.
YE Xiao-ping, HU Su. Analysis and prediction of behavioral trends in groups of agents in conflict[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007, 2 (4): 29-33.

[6] 刘贞. 基于信号传递的电力市场竞价机制[J]. 系统工程, 2008, 26 (2): 35-39.
LIU Zhen. The bidding mechanism in power market based on signal transmission[J]. Systems Engineering, 2008, 26 (2): 35-39.

[7] 刘加福. 博弈学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2005: 38-41.
LIU Jia-fu. Game studies[M]. Beijing: China Textile Press, 2005: 38-41.

[8] Drew Fudenberg, Jean Tirole. 博弈论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
Drew Fudenberg, Jean Tirole. Game theory[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2002.

[9] 李霄. 农村土地使用权流转的博弈分析[J]. 农业经济问题, 2003 (12): 4-8.
LI Xiao. The game analysis of the rural land using right exchange[J]. Problem of Agricultural Economy, 2003 (12): 4-8.

[10] 雷震, 邢祖礼. 农村土地征用中的价格博弈分析[J]. 财经科学, 2006 (8): 97-103.
LEI Zhen, XING Zu-li. The analysis of the pricing game in rural land requisition[J]. Finance & Economics, 2006 (8): 97-103.

[11] 李俊颖. 农地征用过程中地方政府与各利益主体博弈的经济学分析[J]. 公共管理, 2008 (3): 174-175.
LI Jun-jie. The process of land expropriation in the interests of local governments, with the main game of economic analysis[J]. Public Administration, 2008 (3): 174-175.

收稿日期: 2009-08-18; 修回日期: 2009-10-03

作者简介:

刘贞 (1973-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为博弈论与实验经济学; E-mail: cqsureness@tom.com
 阎建明 (1968-), 男, 讲师, 研究方向为土地资源管理;
 施於人 (1975-), 男, 讲师, 研究方向为博弈论与实验经济学。

(上接第 7 页 continued from page 7)

[24] Chrisley R. Quantum learning[C]. //The International Symposium on Finnish Association of Artificial Intelligence. Lapland(Europe): 1995.

[25] Narayanan A, Moore M. Quantum-inspired genetic algorithm[C]. //IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Piscatawa(America): 1996.

[26] Yang S Y, Jiao L C. The quantum evolutionary programming[C]. //The 5th International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications. Xi'an(China): 2003.

[27] XUE Han, LI Xun, MA Hong-xu. Random fuzzy chance-constrained programming based on adaptive chaos quantum honey bee algorithm and robustness

analysis[J]. International Journal of Automation and Computing, 2008, 12 (7): 1-8.

[28] 吴际顺, 侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.

收稿日期: 2010-03-03; 修回日期: 2010-10-15

作者简介:

曾鸣 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力经济与优化运行管理方面的研究;
 田廓 (1983-), 男, 博士研究生, 主要从事电力投资与规划方面的研究;
 薛松 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力规划与项目管理方面的研究。E-mail: xuesongbjhd@163.com