

基于量子序优化混合算法的输电网规划

李 芸¹, 孟洪斌¹, 李传虎²

(1, 海兴县供电公司, 河北 海兴 061200; 2, 南平电业局, 福建 南平 353000)

摘 要:序优化理论是一种基于绝对随机抽取可行解的优化算法, 最优解具有高概率的可信度。量子算法是一种局部搜索能力强的搜索算法。利用量子算法的强大的局部搜索功能与序优化混合, 构造出随机性和方向性比较平衡的量子序优化混合算法。针对输电网规划这样一个复杂的组合优化问题, 建立相应的数学模型, 采用量子序优化混合算法求解。18 节点系统算例的计算结果表明, 该算法用于电力系统输电网规划问题是可行的和有效的, 所求得最优解具有更高概率的可信度。

关键词:输电网规划; 量子算法; 序优化; 量子序优化算法

Abstract: Ordinal optimization is a kind of optimization algorithm based on the extract feasible solution randomly and absolutely, the optimal solution is the high confidence level. Quantum algorithm is a search algorithm with powerful local search ability. Mixing the powerful local search function of quantum algorithm with ordinal optimization, the quantum ordinal optimization algorithm is constructed with good balance of random and direction. Aiming at the optimal planning of transmission network that is a complex combinatorial optimization problem, the corresponding mathematical model is established, and quantum ordinal optimization algorithm can be used to solve it. The calculation results of 18 node show that this algorithm is feasible and effective when used in transmission expansion network of power system, and the optimal solution has a higher probability of credibility.

Key words: transmission network planning; quantum algorithm; ordinal optimization; quantum ordinal optimization algorithm

中图分类号: TM715 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2011)02-0044-04

0 引 言

输电网规划是规模庞大、计算复杂、带有大量等式和不等式约束条件的非线性离散组合优化问题^[1-2]。其任务是根据规划期间的负荷增长及电源规划方案, 力求在规划期末使电力网络达到一个较理想的结构, 以满足安全经济地传输电能的要求, 同时能够灵活适应系统运行方式的多种变化, 并有利于电网的进一步发展^[3]。

随着计算机技术、系统工程理论、运筹学理论及智能化技术的发展, 人工智能优化算法在输电网规划问题中得到广泛的应用。目前, 输电网规划求解采用的人工智能优化算法主要包括遗传算法 (GA)^[4]、人工鱼群算法 (AFSA)^[5]、禁忌搜索算法 (Tabu)^[6]、模拟植物生长算法^[7]等。这些人工智能算法也经常同数学优化算法结合起来进行规划问题的优化求解。不过遗憾的是, 在解决大规模优化问题时, 计算量及解的稳定性和可信度方面仍然存在一定的局限性。

分析了量子算法和序优化理论的优缺点, 将两种

算法进行了有机结合应用于电力系统输电网规划问题的求解中, 并且对原量子算法进行了改进, 算例结果表明了模型的正确性和混合算法的可行性及有效性。

1 数学模型

输电网的运行费用远小于投资费用, 所以模型中的目标函数只计及线路的建设投资费用, 并满足 N 安全及 N-1 安全两种约束条件。

数学模型如下。

目标函数:

$$\min f = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij}^0 n_{ij} \quad (1)$$

约束条件:

$$P_{gi} - P_{di} - P_i = 0 \quad (2)$$

$$P_i = \sum_{j \in D} b_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij}) \theta_{ij} \quad (3)$$

$$P_{gi} - P_{di} - P'_i = 0 \quad (4)$$

$$P'_i = \sum_{j \in D} b_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij} + n_{ij} - 1) \theta_{ij} \quad (5)$$

$$|P_{mn}| \leq P_{mn}^{\max} (m, n) \in N_L \quad (6)$$

$$|P'_{mn}| \leq P_{mn}^{\max} (m, n) \in N_L \quad (7)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max} \quad (i, j) \in \Omega \quad (8)$$

$$n_{ij}^i + n_{ij}^j \geq 0 \quad (9)$$

式中, c_{ij} , n_{ij}^0 , n_{ij}^{\max} 分别为待建线路 $i \sim j$ 的建设费用、此走廊原有线路数、扩建的线路数和最大可扩建线路数; f 为建设费用总成本; P_{gij} , P_{dij} 分别为节点 i 的发电机出力和节点负荷; P_i , P_i' 分别为节点 i 在网络和安全网络下的有功注入量; b_{ij} 为线路 $i \sim j$ 间的电纳; θ_{ij} 为节点与节点的相角差; P_{mn} , P_{mn}' 分别为任意线路 $m \sim n$ 在 N 网络和 $N-1$ 安全网络下的有功潮流; P_{mn}^{\max} 为线路 $m \sim n$ 的最大有功潮流; Ω 为待选线路集合; D 为与节点 i 相连的所有节点集合; N_L 为系统所有线路集合。

式 (1) 为线路投资成本; 式 (2) 与式 (3) 分别为 N 安全运行条件下潮流约束和节点注入功率; 式 (4) 与式 (5) 分别为安全条件下潮流约束和节点注入功率; 式 (6) 与式 (7) 分别为安全和 $N-1$ 安全运行条件下的线路潮流限制; 式 (8) 为待建线路走廊架线数目约束条件; 式 (9) 为 $N-1$ 条件下待建线路走廊的可加线路数目约束。

2 量子序优化混合算法

2.1 量子算法简介

量子计算的基本特征是量子态的叠加性^[8]。若一个量子系统有 2^n 个量子基态 $|\psi_0\rangle, |\psi_1\rangle, \dots, |\psi_{2^n-1}\rangle$, 则系统的量子态可以表示为这些基态的叠加。 $|\omega_j\rangle$ 的概率幅通常用复数表示。概率幅 ω_j 的模平方 $|\omega_j|^2$ 表示对该量子系统进行测量时测量结果为量子基态 $|\psi_j\rangle$ 的概率, 所有量子基态 $|\psi_j\rangle$ 的概率和为 1。量子并行处理极大地提高了计算的效率, 量子计算的并行性是所有量子算法的基础。

量子算法 (quantum algorithm, QA) 建立在量子态的矢量表达基础上, 其最小的信息单位为量子比特。将量子比特的概率幅表示应用于二进制的编码, 使得一条二进制编码可以表达多个态的叠加。一个量子比特的状态可由两个量子态的叠加表示为

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

式中, $|\psi\rangle, |0\rangle, |1\rangle$ 为量子比特的状态; α, β 为一对复数, 它们满足

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

式中, $|\alpha|^2, |\beta|^2$ 分别表示量子比特处于状态 0 和状态 1 的概率。随着 $|\alpha|^2, |\beta|^2$ 趋于 1 或 0, 量子比特染色体收敛于一个状态, 此时多样性消失, 算法收敛。

量子比特表示同时具有“开发可行解”和“搜索最优解”的特性。

2.2 序优化理论简介

序优化理论 (ordinal optimization, OO) 是由哈佛大学何毓琦教授提出的求解复杂优化问题的有效工具^[9], 具有两个极其重要的特性。

(1) 用序比较代替精确值比较。即只比较解的优劣差异, 而不在乎解之间具体差别。

(2) 目标软化。即当精确求解问题最优解在计算量上不可行或者非常困难时, 从工程角度出发, 最终结果可以放松到足够好解即可。

序优化理论把所有单目标优化问题分为了五种类型并用 OPC (ordered performance curve) 曲线来进行描述, 如图 1 所示。

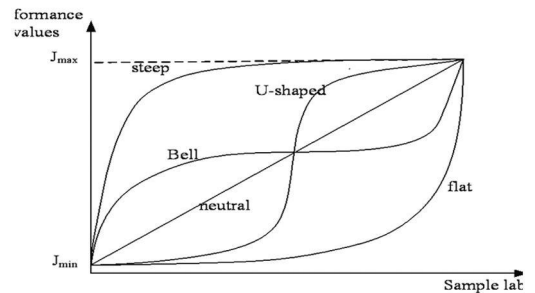


图 1 OPC 曲线类型示意图

OPC 曲线的横坐标为可行解的编号, 纵坐标为可行解对应的目标函数值 J 。

序优化求解一般优化问题可以用以下 4 个步骤来描述。

(1) 形成表征集合 Θ_N 。从整个解空间中随机抽取 N 个可行解构成表征集合 Θ_N , 序优化将对解空间的操作转移到对有限集合 Θ_N 的操作上。

(2) 估计 OPC 曲线, 确定待研究优化问题的类型。对 Θ_N 集合中所有可行解的快速排序, 以排序后的各可行解的序号为横坐标, 其对应的目标函数粗糙评估值为纵坐标画出 OPC 曲线, 根据 OPC 曲线的形状确定该优化问题所属的类型。

(3) 确定需要准确仿真的选定集合 S 。确定 OPC 曲线类型及粗糙评估结果相对于精确值的误差分布情况 ($U \sim [-w, w]$) 的情况后, 根据文献 [10] 中的回归表 1, 可查得参数 α, β, γ 及 η 的回归值, 再根据公式 (10) 求得 S 集合大小 s 。

$$s = \lceil e^{\alpha} k^{\beta} p^{\gamma} + \eta \rceil \quad (10)$$

当确定 OPC 曲线的类型及其对应的参数后, 取排序后表征集合中的前 s 个可行解作为选定集合, 则在集合 S 中将至少以 $\alpha\%$ 的概率包含 k 个足够好解, 一

般取到 95%。

(4) 从集合中选取真实足够好的解。

文献 [10] 通过大量仿真实验已经证明, 对于解空间大小为 10^8 的超大规模优化问题, N 取 1 000 时, S 集合中包含全空间 Θ 的足够好解概率将不小于 94.2 (若要求 $\alpha\% = 95\%$)。

序优化理论详细内容请参见文献 [11]。

2.3 量子序优化混合算法

量子算法是一种随机搜索算法, 局部搜索搜索能力强, 但是搜索的结果缺乏有力的数学理论支持, 结果可信度不能量化的体现。序优化方法所得结果是在完全随机情况下抽取可行解集合中的较优解, 仅有极少数的解有一定的高概率可信度, 研究规划问题或解决实际规划问题, 希望可以获得可信度高的数个方案可供选择, 因此利用量子算法的强大的局部搜索功能与序优化算法混合, 构造出随机性和方向性比较平衡的量子序优化混合算法 (QA00) 应用于输电网规划。

基于以上思路, QA00 求解数学模型的步骤设计如下。

(1) 确定可行解表征集合 Θ_N , 可行解就是经过可行性测试满足约束条件的解, 对 Θ_N 中所有解进行评估。

(2) 根据网络规模大小, 设置合适的量子基态数 n 从而确定满意集合 S 的大小, 计算 S 中各解的目标函数值 (适应值) 并排序。

(3) 将 S 集合中待选方案集作为量子算法的初始基态 $Q(t)$, 取 S 集合中最优进入公告板, 公告板用来记录最优解。

(4) 由 $Q(t)$ 生成 $P(t)$, 评价量子个体的目标函数值, 如果优于公告板状态, 则以自身状态将其取代。

(5) 判断是否满足收敛条件, 若 $t = t_{max}$, 则转步骤 (7); 若 $t < t_{max}$, 则转步骤 (6)。

(6) $t = t + 1$, $\theta_{t+1} = \omega\theta$, 用量子变换门 $U(\theta)$ 更新 $P(t)$, 生成 $Q(t+1)$, 转步骤 (4)。

(7) 输出结果, 停止计算。步骤 (4) 中由 $Q(t)$ 生成 $P(t)$ 的过程是: 在第 t 次迭代中, $Q(t)$ 的第 j 位随机产生一个服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数, 若该随机数大于 $|\alpha_j^{(t)}|^2$, 则 $P(t)$ 中的相应位取 1, 否则取 0。这样, 就可将 $Q(t)$ 转化成二进制编码 $P(t)$ 。

步骤 (6) 中, 常用的量子变换门有: 异或门、受控异或门、Hadamard 变换门和旋转门。所使用的量子旋转门为

$$U(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, θ 为旋转角度, 这样, 每一位量子比特值 $\alpha_i^{(t+1)}$, $\beta_i^{(t+1)}$ 的更新公式为

$$\begin{bmatrix} \alpha_i^{(t+1)} \\ \beta_i^{(t+1)} \end{bmatrix} = U(\theta) \begin{bmatrix} \alpha_i^{(t)} \\ \beta_i^{(t)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

对原量子算法的取值改进为变步长取值方法以取得适当的收敛速度和指导性, 为惯性权重系数, 表示的变化快慢的公式为

$$\omega = \omega_{max} - t(\omega_{max} - \omega_{min}) / t_{max} \quad (13)$$

式中, t 为当前迭代次数; t_{max} 为迭代次数最大值。关于 θ 的取值见表 1。

表 1 中 x_i 为当前染色体的第 i 位; $best_i$ 为当前种群中最优个体的第 i 位; $f(x)$ 为评价函数; γ 为旋转角度的大小, γ 的大小由旋转门中旋转角 θ 赋值, 表 1 中的 $\pm\gamma$ 指以相同的概率取 $+\gamma$ 或 $-\gamma$ 。

3 算例分析

采用数学模型对 IEEE-18 节点系统进行输电网规划, 使用量子序优化混合算法求解模型。原网络图如图 2 所示, 实线代表原有线路, 虚线代表可投建线路。为了满足要求, 设所有线路走廊均可新建 3 回线路, 线路造价为 45 万 / (km · 回)。线路的投资

表 1 旋转门中 θ 的取值

x_i	$best_i$	$f(x) \geq f(best_i)$	θ			
			$\alpha_i \beta_i > 0$	$\alpha_i \beta_i < 0$	$\alpha_i = 0$	$\beta_i = 0$
0	0	true	0	0	0	0
0	0	false	0	0	0	0
0	1	true	$+\gamma$	$-\gamma$	0	$\pm\gamma$
0	1	false	0	0	0	0
1	0	true	$-\gamma$	$+\gamma$	$\pm\gamma$	0
1	0	false	0	0	0	0
1	1	true	$+\gamma$	$-\gamma$	$\pm\gamma$	0
1	1	false	0	0	0	0

贷款年限为 20 年, 贴现率为 8%。

该系统的原始网络结构如图 2 所示。

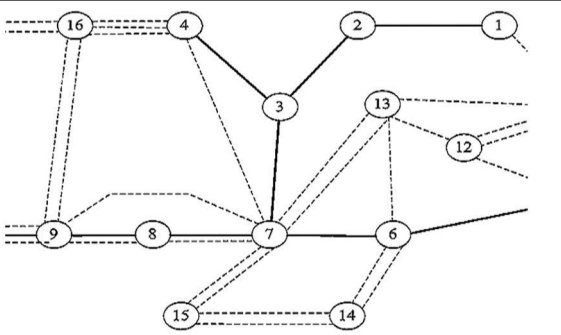


图 2 18 节点系统网络结构

求解该算例的量子序优化混合算法的参数设置为: 序优化抽取可行解数目为 $M=1000$, 计算排序后取前 20 个较优解为量子初始基态, 设定 $\alpha\%=95\%$, 最大旋转角度 $\theta_{\max}=0.5$ 。为了给规划人员较多的选择余地, 本算例输出 3 个规划结果供选择, 规划结果如表 2 所示。

表 2 18 节点系统规划方案比较

方案	新建线路	年投资成本 / 万元
1	1-2, 1-11(2), 4-16, 5-12, 6-13, 6-14(2), 7-8(2), 7-13, 7-15, 8-9(2), 9-10(3), 10-18, 11-12, 14-15(2), 16-17(2), 17-18	12 074
2	1-2, 1-11(2), 4-16, 5-12(2), 6-13(2), 6-14(2), 7-8(2), 7-15, 8-9(2), 9-10(3), 10-18, 11-12, 14-15(2), 16-17(2), 17-18	12 257
3	1-2, 1-11(2), 4-16, 5-12, 6-13(2), 6-14(3), 7-8(2), 8-9(2), 9-10(3), 10-18, 11-12, 14-15(2), 16-17(2), 17-18	12 266

为了比较序优化 (OO)、传统量子算法 (QA) 和量子序优化混合算法 (QA00) 这 3 种算法的求解效果,

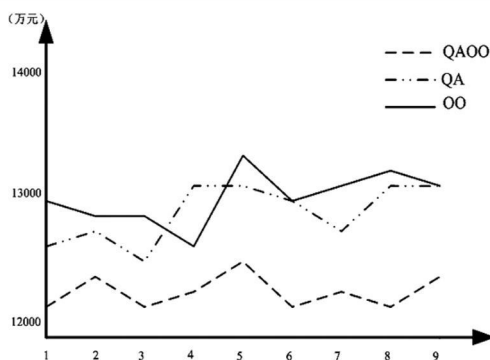


图 3 三种算法运算结果比较曲线图

对以投资成本最小为目标的数学模型求解, 将 3 种算法分别进行 9 次运算, 运算结果曲线图 (横轴为计算次数, 纵轴为方案的投资成本) 如图 3 所示。

由图 3 可见, 混合算法相对于传统的量子算法和序优化理论求解本文模型, 解的精确度有了一定程度的提高, 并且由于序优化的求解结果具有高概率的可信度使得混合算法的求解结果具有采信的价值和工程实用价值。

4 结 语

利用量子算法强大的局部搜索能力与序优化理论结合应用在电力系统输电网规划中, 通过算例求解得到以下结论并对算法的应用前景进行展望。

(1) 数学模型简洁正确, 可以满足为安全和安全运行条件下的输电网规划要求。

(2) 混合算法可以求解输电网规划问题, 对传统量子算法变步长改进措施可行, 搜索结果具有高概率的可信度, 具有采信的价值和工程实用价值。

(3) 对于大规模电网规划问题, 该混合算法的使用有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 麻常辉, 薛禹胜, 鲁庭瑞, 等. 输电规划方法的评述. [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 97-101.
- [2] 程浩忠, 张焰. 电力网络规划的方法与应用 [M]. 上海: 科学技术出版社, 2002.
- [3] 王锡凡. 电力系统规划基础 (第一版) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [4] 刘可真, 陈勇, 束洪春. 基于改进遗传算法的输电网优化规划 [J]. 昆明理工大学学报 (理工版), 2007, 32(1): 31-35.
- [5] 聂宏展, 吕盼, 乔怡, 等. 基于人工鱼群算法的输电网规划 [J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 11-15.
- [6] 王赛一, 王成山. 遗传禁忌混合算法及其在电网规划中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 43-46.
- [7] 赵颖, 罗伟强. 基于改进模拟植物生长算法的输电网扩展规划 [J]. 电力科学与工程, 2009, 25(5): 6-10.
- [8] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 量子进化算法在输电网扩展规划中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(17): 19-23.
- [9] P. B. Luh, D. Chen, L. S. Thakur. An Effective Approach for Job-shop Scheduling with Uncertain Processing Requirements [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(2): 328-339.

(下转第 77 页)

的工作效率、提高供电安全水平、提高供电可靠率及提高为客户服务水平等方面的效益将日益突出。

表 4 规划年度配电网运行指标计算表

序号	主要指标	年度			
		2012	2013	2014	2015
一	规划区域概况				
1	售电量 / $10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$	64.6	71.4	78.7	86.7
2	最大负荷 / (MW)	1 287.1	1 416.2	1 558.9	1 716.8
二	配电网规模	2 012	2 013	2 014	2 015
1	公用配电线路 / 回	51	51	51	51
2	配电站点 / 个	92	92	92	92
3	开关柜 / 面	1186	1 236	1 244	1 256
4	柱上开关 / 台	71	71	71	71
三	规划建设规模	2 012	2 013	2 014	2 015
1	配电线路 / 回	0	0	16	33
2	配电站点 / 个	0	0	16	24
3	开关柜 / 面	0	0	282	501
四	投资规模 / 万元	2 012	2 013	2 014	2 015
1	自动化部分	0	0	1 393	1 674
2	通信部分	67.5	76.2	110.0	359.9
3	开关自动化改造	23.2	23.7	78.3	330.2
4	投资合计	90.7	99.97	1 582.3	2 364.1
五	技术经济指标	2 012	2 013	2 014	2 015
1	配电线路自动化覆盖率 / $\%$	0	0	31.4	64.71
2	配电站点自动化覆盖率 / $\%$	0	0	17.4	26.1
3	开关柜自动化覆盖率 / $\%$	0	0	22.7	39.9
4	建设后理论供电可靠性 / $\%$	99.928	99.316	99.405	99.956
	建设前理论供电可靠性 / $\%$	99.928	99.316	99.403	99.950
5	建设平均停电时间 / $(\text{h}/\text{户})$	6.31	59.92	52.12	3.85
	建设前平均停电时间 / $(\text{h}/\text{户})$	6.31	59.92	52.30	4.38
6	建设后,提高供电可靠性增售电量 / $10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$	0.00	0.00	0.0082	0.0179

8 结论与展望

“十二五”期间,南方电网公司的重点任务之一是“保证安全可靠供电”,力争实现城市客户年平均停电时间不超过 5 h。为切实提高供电质量和可靠性,加强配网自动化建设,广东电网公司近年进行了配网自动化试点建设,但目前的实用化效果没有确定结论。随着“十二五”配网自动化规划的实施,将在以下几个方面推动配网自动化的健康发展。

1)实现配网自动化系统的统一技术管理规范 and 标准,积累配网自动化系统实际的运行经验。

2)推动配网一次设备的改造,如具有电动操作机构、数据采集及通信功能的柱上开关、环网柜等。

3)锻炼配网自动化专业人才,经过培训和实践,培养大量高素质、有经验的配网自动化技术人员。

参考文献

- [1] 中国南方电网公司 110 kV 及以下配电网规划导则 [S].
- [2] 冯雪涛. 城市配电网及其自动化规划研究 [J]. 科技促进发展, 2009(4): 13-14.
- [3] 李胜利, 任军, 黄磊, 等. 城市配网自动化发展分析及其运行管理模式研究 [J]. 电器工业, 2005(5): 51-53.
- [4] 余栋斌. 配网自动化的规划及实施 [J]. 广东科技, 2009(5): 176-177.
- [5] 何启泉. 推动现阶段配网自动化的建设规划 [J]. 广东科技, 2009(5): 106-107.

作者简介:

杨森锋 (1979), 男, 广东人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统调度自动化的研究和管理工作的。

(收稿日期: 2011-02-25)

(上接第 47 页)

- [10] S. Y. Lin, Y. C. Ho. Universal Alignment Probability Revisited [J]. Journal of Optimization Theory and Applications 2002, 113(2): 399-407
- [11] T. W. Edward Lau, Y. C. Ho. Universal Alignment Probabilities and Subset Selection for Ordinal Optimization [J]. Journal of Optimization Theory and Applications 1997, 93(3): 455-489.

作者简介:

李芸 (1970), 女, 助理工程师, 主要研究方向, 电力系统稳定与控制、电力系统输电网规划。

(收稿日期: 2010-12-15)