

基于 EM 算法的树状注水管网优化设计

齐晗兵, 王美薇, 王莉莉, 王秋实, 赵文浩
(东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 针对油田系统中的树状注水管网的拓扑优化问题,以最小管网造价为目标函数,以站、间、井的隶属关系惟一性及服务能力等为约束条件,建立优化数学模型。尝试利用一种新型优化算法——类电磁机制算法对模型进行求解,该方法以站、间的空间位置作为带电粒子,在若干带电粒子形成的电场中,粒子受力移动以更新管网的拓扑结构及站、间规模,实现对管网造价的优化。运用实例进行优化验证,优化后的管网造价与原管网的布局造价相比降低了 15.28%,充分表明了 EM 算法在油田树状注水管网拓扑优化方面的有效性。

关键词: 树状注水管网; 拓扑优化; 类电磁机制算法; 管网优化

中图分类号: TV732.4; TU991.36

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0147-04

Optimal design of pipeline network of tree type water injection based on EM algorithm

QI Hanbing, WANG Meiwei, WANG Lili, WANG Qiushi, ZHAO Wenhao

(School of Architecture and Civil Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Aiming at the topology optimization problem of pipeline network of tree type water injection in oilfield system, the paper took the minimum network cost as objective function and the uniqueness of subordinate relations of station, room and well, and service capability and so on as constraint condition to establish an optimization mathematical model. A new kind of optimization algorithm – the electromagnetism – like mechanism algorithm was taken so as to solve the model. The method took the spatial locations of water injection stations and water distribution stations as charged particle. In the electric field formed by a number of charged particles, the particles moved to update the pipeline network's topology structure and the scales of water injection stations and water distribution stations under force, then achieved the optimization for network's cost was. The validation of instance showed that the optimized network cost decreased by 15.28% compared with the original cost. The result indicated the availability of electromagnetism – like mechanism algorithm on the topology optimization of tree type water injection pipeline network.

Key words: pipeline network of tree type water injection; topology optimization; the EM algorithm; optimal design of pipeline network

随着大部分油田进入高含水开发阶段,注水驱油成为目前陆上油田应用最广泛,也是最为重要的采油方式之一,这使得油田注水系统在石油开发过程中扮演着重要角色,而合理优化注水管网布局可以大大降低注水系统的投资成本,又为降低注水采油的能耗奠定了坚实的基础。

注水管网拓扑优化设计问题是涉及离散变量、

连续变量的大型非线性优化问题,该问题是布局 – 分配问题的扩充,已被证明为非确定多项式问题^[1]。文献[2-5]在对管网拓扑优化设计上以管线路径及部分构筑物造价为研究对象,采用了粒子群算法、Prime 算法为优化算法。类电磁机制 (Electromagnetism – like Mechanism) 算法是近年出现的一类智能优化算法,它具有寻优机制简单、搜索能力强、

收稿日期: 2014-12-04; 修回日期: 2015-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51274071)

作者简介: 齐晗兵 (1975-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士, 研究方向: 油气田地面管网系统优化、长输管道传热计算、油气储运系统节能。

通讯作者: 王莉莉 (1975-), 女, 黑龙江拜泉人, 副教授, 研究方向: 油气田地面管网系统优化。

所需资源少及收敛速度快等优点^[6],国内外的研究学者对 EM 算法进行了研究,文献[7-8]将 EM 算法与其他算法结合,能更好地求解了调度运行方面的问题。文献[9]采用 EM 算法求解多目标优化问题,证明了其在求解多目标问题方面的可行性。文献[10-11]利用标准函数对 EM 算法与遗传算法、模拟退火算法、BP 算法进行了测试,测试结果显示 EM 算法更优。本文在国内外专家学者的研究基础上,在油田系统庞大投资的背景下,考虑新兴的 EM 算法的优越性,尝试将 EM 算法应用于油田树状注水管网拓扑优化问题上,寻求在满足油田树状注水管网拓扑特性的基础上使其初始投资最低的解决方法,对降低石油开采成本,减小油田能耗以及提高经济效益有着重要意义。

1 树状注水管网优化模型

1.1 目标函数

目标函数是符合管网运行安全条件下的最小管网造价,其中包括注水站与配水间的造价费用和各级站间连接管线造价费用,其中注水站的造价采用的是配水间的平均标准,所以其造价费用为其所有下辖配水间造价的费用总和^[12],同时树状管网中也存在配水间由同级站供水的情况,即配水间每管辖一座同级站费用增加 10 万元。可用下式表示:

$$\min F(\delta, U) = 2 \sum_{i \in S_b} C_i E_i + \sum_{i \in S_d} A_i + \sum_{i \in \{S_a, S_b\}} \sum_{j \in \{S_b, S_c\}} \delta_{ij} L_{ij} W_{ij} \quad (1)$$

式中: δ 为节点隶属关系向量, $\delta = \{\delta_{ij} \mid \delta_{ij} \in (0, 1), i \in \{S_a, S_b\}, j \in \{S_b, S_c\}\}$,若 $\delta_{ij} = 1$ 表示节点 i 隶属于节点 j 或节点 i 与节点 j 重合,否则 $\delta_{ij} = 0$; U 为注水井几何位置集合, $U = \{U_i \mid U_i = (x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, c\}$; c 为注水井数量,口; C_i 为第 i 个配水间的建设费用平均到其管辖的注水井的平均费用,万元; E_i 为第 i 个配水间管辖的注水井的数量,口; L_{ij} 为在不考虑障碍约束的条件下,两构筑物之间的直线距离,km; A_i 为第 i 座配水间为同级配水间供水增加的造价费用,万元; W_{ij} 为注水管的单位造价,万元; S_a, S_b, S_c 分别为管网范围内注水站、配水间、注水井的编号集合; S_d 为为同级站供水的配水间号集合。

1.2 约束条件

(1) 隶属关系约束

$$E_i = \sum_{j \in S_c} \delta_{ij} \quad i \in S_b \quad (2)$$

式中:配水间管辖注水井数应等于节点隶属关系向

量之和,且节点隶属关系向量只能等于 0 或者 1。

(2) 服务能力约束

$$(D_i)_{\min} \leq D_i \leq (D_i)_{\max}$$

$$(G_j)_{\min} \leq G_j \leq (G_j)_{\max}$$

$$i \in S_a, j \in S_b \quad (3)$$

式中: D_i, G_j 分别为第 i 个注水站管辖的配水间数量和第 j 个配水间管辖的注水井数量; $(D_i)_{\min}, (D_i)_{\max}, (G_j)_{\min}, (G_j)_{\max}$ 分别为第 i 个注水站和第 j 个配水间管辖能力的最小和最大数量。

(3) 几何位置约束

$$V_i \in V \quad T_j \in T \quad i \in S_a, j \in S_b \quad (4)$$

式中: V_i, T_j 分别表示第 i 个注水站或第 j 个配水间必须在可行范围 V 或 T 内建设。

2 类电磁机制算法求解模型

2.1 EM 算法的基本原理

类电磁机制算法是由 Birbil 等^[13-14]在 2003 年提出的,他们受到电场中带电粒子之间的相互吸引-排斥机制的启发,将该自然行为模型应用于优化设计领域。EM 算法的基本原理如图 1 所示,将优化问题在多维空间中的解比作电场中的带电粒子, q_2 是当前的最优粒子, q_1 次之,则 q_2 对 q_1 和 q_3 产生吸引力, q_1 排斥 q_2 ,吸引 q_3 , q_3 对 q_1 和 q_2 均产生排斥力,然后通过分力的矢量加和得到 3 个粒子受到的合力及运动方向,由图中可以看出,3 个粒子的运动方向基本一致,均朝着 q_2 代表的最优粒子的方向运动,通过这样的反复受力运动,直到所有粒子均移动到最优解的位置,互相的作用力为 0,运动即停止,从而得到最优解。

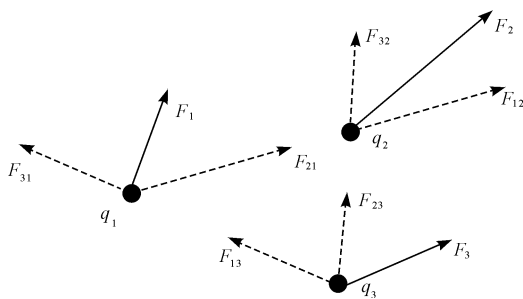


图 1 EM 算法基本原理图

2.2 算法的步骤

EM 算法的数学模型可以分成以下几部分:

(1) 初始化。在 EM 优化算法中,问题域存在于 d 维空间中,设求解范围内注水井数为 W ,对应几何位置为 $w_i(x_i, y_i)$ ($i = 1, 2, \dots, W$)。在可行域中产生 r 组含有 m 个点的随机点集集合 $\{z'_1, z'_2, \dots, z'_m\}$, r 为

选定整数, m 为随机整数, 其中 $z'_i = (z'_1, z'_2, z'_3, \dots, z'_d)$, 这里将每组解称之为一个粒子, 则 r 组解就作为初始解集。确定初始的隶属关系后, 计算出每个粒子对应的目标函数, 目标函数值最优的粒子即为当前最优粒子, 用 z_{best} 表示。

(2) 局部搜索。初始解集是按照随机机制产生的, 由于可行范围较大, 产生的解集随机性过强, 采用局部搜索方式在初始解集的基础上小范围调整点集位置, 取得目标函数相对较优的二代解集, 及新的 z_{best} 。

选取禁忌搜索机制作为局部搜索方法, 首先生成 $\{z_1^i, z_2^i, \dots, z_m^i\}$ 的邻域 $N(g^i, \sigma)$, σ 为任意正数。然后从 $N(g^i, \sigma)$ 中选取几组解作为 $\{z_1^i, z_2^i, \dots, z_m^i\}$ 的候选解集 $team(s_i)$, 并求取 $team(s_i)$ 对应的目标函数值, 选择其中优解 S_{igood} , 比较 $F(S_{igood}, i)$ 与 $F(\{z_1^i, z_2^i, \dots, z_m^i\})$, 前者优则 S_{igood} 替代 $\{z_1^i, z_2^i, \dots, z_m^i\}$, 否则不交换。

(3) 电量与合力的计算。在确定了初始解集后, 就需要更新粒子的几何位置来改变当前的规划布局, 以寻求更优的解来获得最终的拓扑管网。在更新粒子的几何位置前需要计算出每一组解的电荷量及在空间中的受力情况。每一个解作为空间中的带电粒子, 其电荷量可通过粒子的目标函数计算, 通过公式(5)可以看出, 粒子对应的目标函数值越优, 其电荷量越大, 在后续计算中产生的吸引或排斥力也就越大。

$$Q^i = \text{EXP}[-d(F(z^i) - F(z_{best})) / \sum_{k=1}^r (F(z^k) - F(z_{best}))]$$

(5)

在计算完粒子的电荷量后, 根据电磁理论的叠加原理: 空间中的粒子受到其他粒子施加的电磁力与粒子间距离成反比与它们的电荷量乘积成正比。则作用在粒子 z^i 上的合力 RF^i 计算如公式(6)所示。在粒子受力情况的分析中, 由于目标函数值越优, 产生的引力就越大, 而 z_{best} 对应的目标函数值在本次迭代中是最优的, 因此它会吸引着种群中其他粒子朝着一个当前较优的方向移动。

$$(RF)^i = \sum_{j \neq i}^r Q^i Q^j (z^j - z^i) / \|z^j - z^i\|^2,$$

if $F(z^j) < F(z^i)$

(6)

$$(RF)^i = \sum_{j \neq i}^r Q^i Q^j (z^i - z^j) / \|z^j - z^i\|^2,$$

if $F(z^j) \geq F(z^i)$

(7)

(4) 粒子的移动。计算完合力后的粒子, 就会在

合力作用下开始移动。选取一个随机的步长 λ , 该步长 λ 在 $[0, 1]$ 上均匀分布, 粒子每一步的移动公式如下:

$$z^{i'} = z^i + (RNG)\lambda(RF)^i / \|(RF)^i\|$$

(8)

这样每个粒子的位置都得到了更新, 也就完成了一次迭代过程。

(5) 结束准则。EM 算法的结束准则一般可分为两种, 一种是采用最大迭代次数为结束准则, 当迭代次数达到设置的最大迭代次数 M 时, 即停止迭代, 跳出循环; 另一种是在多次迭代之后当前最优粒子 z_{best} 不发生改变后, 迭代过程即结束。

3 实例分析

大庆油田某区块的注水管网系统的拓扑连接现状如图 2 所示, 共有 63 口注水井(编号 1~63), 设置有 8 座配水间(编号 i~viii), 1 座注水站(编号 i), 将现有网络拓扑形态通过本文建立的模型规划为树状网络, 更改其拓扑结构, 上下级隶属关系, 站、间几何位置及确定其建设投资。

EM 算法的设计参数: 粒子的寻优上限: $x_{up} = 80$, $y_{up} = 70$, 局部搜索迭代次数 $I = 50$, 全局迭代次数 $M = 500$, 全局搜索次数 $t = 8$, 粒子种群规模为 10, 终止精度 $P = 0.001$ 。配水间造价采用表 1 中的标准, 大庆油田管道造价见表 2, 根据区块的规模, 选取的管径主要为 60, 76, 168, 219 mm。优化后的拓扑结构如图 3 所示。迭代过程中计算了不同拓扑结构的管网建设投资, 在满足约束条件(2)~(4)后, 得到如图 4 所示全局迭代次数 $M = 500$ 时, 配水间数从 3~10 的管网造价寻优收敛曲线, 从图中可知当配水间数为 5 时, 程序迭代运行的收敛情况最优。

表 1 配水间造价与管辖井数关系表

管辖井数 $n/\text{口}$	$0 \leq n \leq 5$	$5 < n \leq 10$	$10 < n \leq 20$
每口井造价 C/万元	5	4	3.25

采用本文建立的数学模型, 利用 EM 算法对大庆油田某区块进行拓扑优化, 得到了新拓扑结构的配水间数及位置以及注水站位置, 具体数据见表 3。重新布局为树状管网后某区块的建设投资为 744.07 万元, 比原有的管网投资 878.25 万元降低了 15.28%, 可见 EM 算法在油田树状管网优化领域的可行性及优越性。

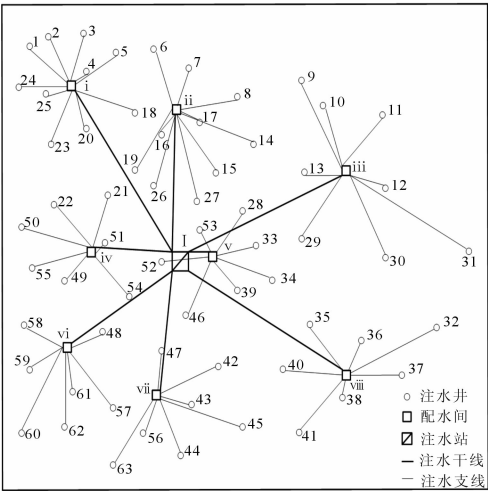


图2 注水管网拓朴现状图

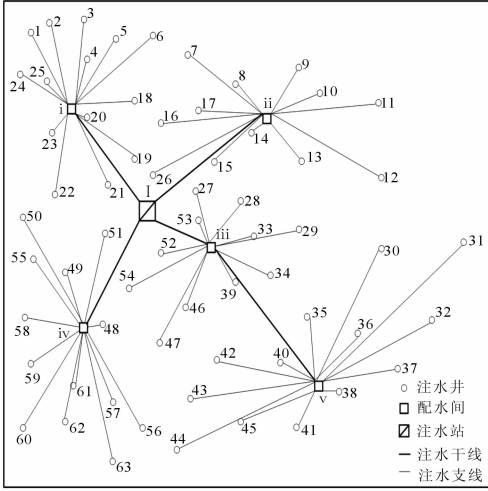


图3 优化后管网拓朴图

表2 管道造价表

管径/mm	60	76	89	114	168	219	245	273
管道造价/(万元·km ⁻¹)	18.69	22.09	25.59	33.83	56.90	81.85	100.16	128.74

表3 优化后站、间参数表

配水间					注水站
i	ii	iii	iv	v	I
(10.30,54.42)	(42.54,53.04)	(12.32,21.37)	(33.35,33.47)	(51.10,12.52)	(22.90,39.07)

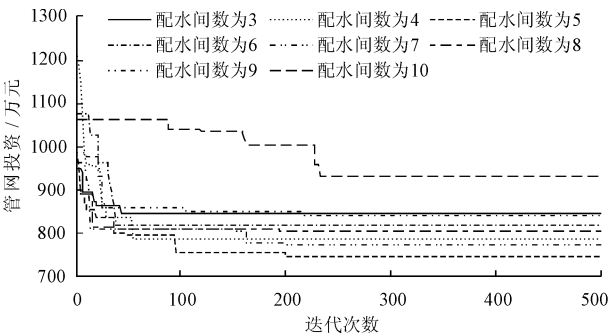


图4 管网造价寻优收敛曲线

4 结 语

(1)建立了油田树状注水管网优化的数学模型,在模型的建立过程中,忽略了站、间、井的占地面积及空间高度,将3者简化为平面中的点。将类电磁机制算法引入油田树状注水管网拓朴优化领域中,将简化后的站、间比作电场中的带电粒子,通过目标函数的计算获得粒子的电荷量及相对运动方向,并模拟电场中带电粒子的受力形式不断更新站、间几何位置,直到获得最优位置。

(2)以管网的站、间位置为优化变量,以管网最

低造价为目标函数,以站、间服务能力及树状管网的布局特性来约束优化过程。寻找电场中的最优粒子,确定最优粒子存在的区域,使其余粒子均朝着最优粒子所在区域移动,逐渐缩小区域,最终所有粒子聚集于一点,即获得管网的最优拓朴结构。与现有管网拓朴结构对比,结果表明使用类电磁机制算法可以有效地优化油田树状管网拓朴结构,降低其建设投资。

参考文献:

[1] 魏立新,刘扬,付云霞,等. 油气集输系统新增产能建设拓朴优化方法研究[J]. 石油工程建设, 2003, 29 (1): 5-8.

[2] 任伟建,黄晶,杨有为,等. 基于改进粒子群算法的油田注水管网优化设计[J]. 科学技术与工程, 2009, 9 (11): 2929-2933.

[3] 薛英文,文倩倩. 基于粒子群算法的污水管网优化设计[J]. 中国农村水利水电, 2010 (8): 40-42.

[4] 向华,罗颖. 基于粒子群优化算法的树状注水管网拓朴优化[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8 (9): 76-78.

- [8] 姚文艺,冉大川,陈江南,等. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. 水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [9] 何旭强,张勃,孙力伟,等. 气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率[J]. 生态学杂志,2012,31(11):2884-2890.
- [10] 陈利群,刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学,2007,27(4):559-565.
- [11] 穆兴民,高鹏,巴桑赤烈,等. 应用流量历时曲线分析黄土高原水利水保措施对河川径流的影响[J]. 地球科学进展,2008,23(4):382-389.
- [12] 裴益轩,郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报,2001(1):21-23.
- [13] 王文圣,丁晶,金菊良. 随机水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [14] Bazargan-Lari M R, Kerachian R, Afshar H, et al. Developing an optimal valve closing rule curve for real-time pressure control in pipes[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013,27(1):215-225.
- [15] 王金花,张胜利,孙伟营,等. 皇甫川流域近期水土保持措施减沙效益分析[J]. 中国水土保持,2011(3):57-60.
- [16] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Yoshiki S, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities[J]. Global and Planetary Change, 2007, 57(3-4):331-354.
- [17] 赵广举,穆兴民,温仲明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析[J]. 中国水土保持科学, 2013,11(4):1-8.
- [18] 姚允龙,吕宪国,王蕾,等. 气候变化对挠力河径流量的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2009,21(6):153-159.
- [19] 杨强,覃志豪,王涛,等. 榆林地区1970-2010年气候因子变化特征分析[J]. 干旱区地理,2012,35(5):695-707.
- [20] 孙天青,张鑫,梁学玉,等. 秃尾河径流特性及人类活动对径流的影响分析[J]. 人民长江,2010,41(8):47-50.
- [21] 姚文艺,徐建华,冉大川,等. 黄河流域水沙变化情势分析与评价[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011.

(上接第150页)

- [5] 殷桂琴,张公社,刘志军,等. 树枝状注水管网布局优化设计方法研究[J]. 断块油气田, 2007, 13(5):58-60.
- [6] 姜建国,刘永青,刘梦楠,等. 类电磁机制算法研究与改进[J]. 计算力学学报, 2014, 31(1):135-140.
- [7] Debels D, De Reyck B, Leus R, et al. A hybrid scatter search/electromagnetism meta-heuristic for project scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(2):638-653.
- [8] Wu Peitsang, Yang Wenhung, Wei Naichief. An electromagnetism algorithm of neural network analysis: an application to textile retail operation[J]. Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 2004, 21(1):59-67.
- [9] Tsou Ching-Shih, Kao Chia-Hung. An electromagnetism-like meta-heuristic for multi-objective optimization [C]// Evolutionary Computation, IEEE Congress, 2006.
- [10] 魏巍. 类电磁机制的全局优化算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
- [11] 袁琨. 基于类电磁机制的神经网络训练算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
- [12] 武晓勇. 基于改进蚁群算法的油田注水管网规划设计研究[D]. 大庆:东北石油大学,2011.
- [13] Birbil S I, Fang S C. An electromagnetism-like mechanism for global optimization[J]. Journal of Global Optimization, 2003, 25(3):263-282.
- [14] Birbil S I. Stochastic Global Optimization Techniques [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2002.