

文章编号: 1000-8241(2018)05-0515-07

三维地形下环枝状复合型集输管网拓扑结构优化

王博弘 梁永图 张浩然 何国玺 廖绮

中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室

摘要: 集输管网拓扑结构优化是油气田地面集输系统优化的一个重要组成部分,不同的拓扑结构将直接影响集输系统建设开发的经济效益。目前,集输管网的拓扑结构优化研究多集中于枝状管网、放射状管网、环状管网等单种管网连接形式,对一环带数枝的环枝状组合形式的复合型集输管网优化研究较少。为此,提出了新的优化方法,其以一种寻找最优环的方法为基础,将各井口就近插入环网,形成一环带数枝的环枝状复合型管网。以管网总费用最少为目标函数,考虑地形起伏等因素对管道走向的影响,研究了环枝状复合型集输管网在三维地形下的拓扑结构优化问题,并提出了耦合遗传算法和A*算法的方法求解模型。利用已有文献中的某煤层气田集输管网作为算例进行验证,结果表明:优化后的管网连接方式可以减少环枝状集输管网连接长度,降低集输管网建设的投资费用,且该方法不仅可以实现二维平面上的优化,在对地形进行模拟仿真后,也可用于三维地形下的管网优化。(图4,表1,参26)

关键词: 环枝状复合型集输管网; 遗传算法; A*算法; 优化; 三维地形

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.05.006

Topology optimization of composite looped-dendritic gathering pipeline network in 3D terrain

WANG Bohong, LIANG Yongtu, ZHANG Haoran, HE Guoxi, LIAO Qi

Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum (Beijing)

Abstract: Topological optimization of gathering pipeline network is an important part of the optimization of surface gathering and transportation system in oil and gas fields, and different topological structures have direct effect on the economic benefits of construction and development of gathering systems. At present, the researches on the topological optimization of gathering and transportation pipeline network focus on the dendritic pipeline network, radial pipeline network and loop pipeline network, but less on the optimization of composite gathering and transportation pipeline network with one loop connecting with multiple branches. In this paper, a new optimization method was developed based on a method of searching the optimal loop. In this method, each wellhead is interpolated into its nearest loop network to form a composite looped-dendritic pipeline network with one loop connecting with multiple branches. Then, the effects of multiple factors (e.g. topographic relief) on the pipeline route were taken into consideration to study the topological optimization of composite looped-dendritic pipeline network at 3D terrain with the least pipeline cost as the objective function and the related gathering conditions as the constraints. Besides, a new algorithm combining the coupling genetic algorithm with the A* algorithm was proposed to resolve the optimization model. Finally, the gathering and transportation pipeline network of a certain CBM field described in the literature was taken as an example for model verification. It is shown that the connection length of looped-dendritic gathering pipeline network is cut down and investment cost of the network construction is reduced by virtue of the pipeline network connection pattern that is optimized by using this new method. This method can not only be used to realize the optimization on two-dimensional plane, but also be used for the optimization at 3D terrain after the terrain is simulated. (4 Figures, 1 Table, 26 References)

Key words: composite looped-dendritic gathering pipeline network, genetic algorithm, A* algorithm, optimization, 3D terrain

在油气集输管网规划设计中,采用优化技术确定合理的网络拓扑结构可以获得较好的经济效益^[1-3]。随着油气田的开发与建设,复合型管网开始应用于油气田集输系统。复合型管网的结构设计是新建管网优化设计过程中的关键,一般是以管网总长最小或管网建设总投资最小为目标,在满足节点及管段的压力和流量约束下,求得最优管网拓扑结构^[2,4-8]。以往研究大多针对枝状管网、放射状管网或环状管网等单种管网布局方式^[9-11],目前尚无文献对一环带数枝的环枝结合的复合型管网优化进行讨论。枝状管网与环状管网各自特点鲜明,将二者结合发挥各自优点,是一种更有利于油气田开发的管网形式。

基于此,梅永贵等^[12]将三维GIS与仿真模拟软件对接,实现了煤层气集输系统的模拟与优化。周军等^[13]采用遗传算法对地形起伏条件下的枝状管网布局进行了优化。何国玺等^[14]采用粒子群算法对三维地形下的管道路径进行了优化。针对以上现状,提出一种考虑三维地形的环枝状复合型集输管网优化方法。

1 不同类型管网特点及优化现状

1.1 枝状管网

枝状管网有一条干线和若干支线,一般又可分为将相邻的几口井串联后汇入干管的普通枝状管网和先将相邻的井口通过支管连入汇点后再汇入干线的“枝上枝”管网^[15-16]。枝状管网在工程造价方面比较经济,但存在局部地区发生故障会影响整个区域的缺陷^[17]。

枝状管网优化求解方法一般分为图论算法和智能算法。图论中常采用Prim算法、Kruskal算法、Dijkstra算法。王洪元等^[18]以集输管网干线的最小造价为目标函数,采用Kruskal算法确定管网最优布局,结合蚁群算法优化参数方案,对放射状气田集输管网进行了优化。智能算法求解管网优化问题也很广泛。李自力等^[4]以管网投资最小为目标,建立了树状气田集输管网全局优化数学模型,采用双重编码遗传算法进行求解。柯文奇^[19]采用粒子群算法研究了油田开发中后期管网加密时的放射状管网建设投资问题。陈坤明等^[20]将单亲遗传算法和深度优先搜索算法相结合,对树状连接的油气田干支线管网优化问题进行求解。Zhang等^[21]建立了MILP模型,并使用商用求解器Gurobi,求得串接管网和星状管网的最佳连接方式。

1.2 环状管网

油气田集输环状管网一般是一个封闭的环,井口产物可以通过一条或多条管道输送,在环状管网上适当位置引出干线至中央处理站。环状管网具有调度方便、压力稳定、局部发生事故时影响面小的优点。环状管网压降较小,能够充分利用压力增加集输半径,提高管网运行的可靠性^[1]。相应地,环状管网的长度一般大于枝状管网,环状管网承压较高,管材用量多,相应的施工费用也大于枝状管网^[17]。

环状管网优化初期研究大多是在管网拓扑结构确定的情况下对管径进行优化^[22],而后开始出现环状管网拓扑结构优化研究。类似于枝状管网,环状管网的优化求解一般也分为图论算法和智能算法。孙健^[23]运用图论思想,建立了以管网投资最小为目标的环形集输管网布局优化模型。战红等^[24]针对注水系统环状管网,以投资最小为目标函数,采用二进制编码和整数编码相结合的双重编码遗传算法进行优化设计。

2 数学模型

2.1 优化方法

环枝状油气集输管网优化首先应该寻找最优环网连接方案,而后将各井口就近插入环网形成环枝状管网。该方法适用于解决文献[1]所描述的集输干线布置成环状,周围井场通过集输支线就近插入集输干线的环枝状管网的优化问题。

对于一个即将新建管网的区块,首先选取区块中心点,以中心点为基准,做从中心点到各井口点的射线,将中心点到井口的每条线段分成 u_1 段,每小段的长度为 Δu_i (i 为井口编号),并将射线的延长段也按每小段 Δu_i 的长度分成 u_2 段。在此基础上,以各条线段接入环网的位置序号为决策变量,按顺时针或逆时针顺序依次对各个井的接入位置进行决策;完成全部决策后,将各接入点连接成环,再将各井口连接到最近的环网组成环枝状网络,并做适当调整(图1)。

2.2 目标函数

以环枝管网总费用最小为目标函数:

$$\min f = \sum_i \sum_j \sigma_{i,j} L_{i,j} C_{D_{i,j}} + \sum_k L_k C_{D_k} \quad i \in N, j \in N, i \neq j, k \in N \quad (1)$$

$$L_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (2)$$

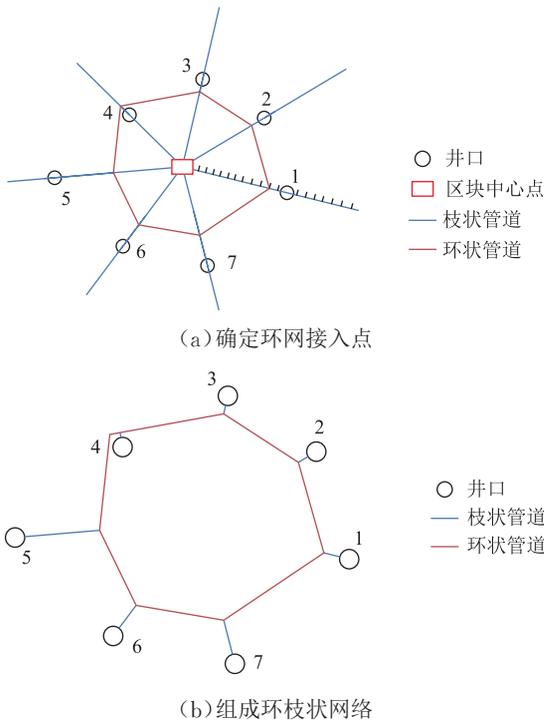


图1 油气集输环枝状管网优化方法过程示意图

$$L_k = \sqrt{(cx_k - x_k)^2 + (cy_k - y_k)^2 + (cz_k - z_k)^2} \quad (3)$$

式中: f 为管网总费用, 10^4 元; $\sigma_{i,j}$ 为环网上的第 i 节点与第 j 节点之间管道连接二元变量, $\sigma_{i,j}=1$ 时表示第 i 节点与第 j 节点处于连接状态, $\sigma_{i,j}=0$ 时表示第 i 节点与第 j 节点未处于连接状态; $L_{i,j}$ 为环网长度, km; L_k 为枝网长度, km; $C_{D_{i,j}}$ 为环网第 i 节点到第 j 节点之间管道管径为 D 时的单位长度管道建设费用, 10^4 元; C_{D_k} 为第 k 井口接入环网管道管径为 D 时的单位长度管道建设费用, 10^4 元; x_i, y_i, z_i 分别为环网上的第 i 节点的 x, y, z 坐标; x_j, y_j, z_j 分别为环网上的第 j 节点的 x, y, z 坐标; cx_k, cy_k, cz_k 分别为第 k 井口的 x, y, z 坐标; x_k, y_k, z_k 分别为与第 k 井口对应的环网上的节点 x, y, z 坐标; N 为模型中井口编号的集合。

2.3 约束条件

2.3.1 节点流量平衡

对于接入环网的任一节点, 其流入流量应等于流出流量:

$$q_{Si} = q_{Wi} \quad (4)$$

式中: q_{Si} 为流入第 i 节点的流量, m^3/h ; q_{Wi} 为流出第 i 节点的流量, m^3/h 。

2.3.2 进站压力约束

中央处理站前的入口压力不能小于最小允许进站压力, 即:

$$p_m \geq p_{\min m} \quad (5)$$

式中: p_m 为第 m 座中央处理站的进站压力, MPa; $p_{\min m}$ 为第 m 座中央处理站的最小允许进站压力, MPa。

2.3.3 管道承压约束

对于任意节点间管段, 管段的起点压力为管段中的最大压力, 其不能大于管段所能承受压力的上限:

$$\sigma_{i,j} p_{i,j} \leq \sigma_{i,j} p_{\max i,j} \quad (6)$$

式中: $p_{i,j}$ 为第 i 节点与第 j 节点之间管道的压力, MPa; $p_{\max i,j}$ 为第 i 节点与第 j 节点之间管道所能承受压力的上限, MPa。

2.3.4 角度约束

对于环网中任意节点前后的管段, 不允许管道夹角小于最小允许转角 θ_{\min} 的情况出现:

$$\sum_i \sum_j \sigma_{i,j} \sigma_{j,l} \theta_{i,j,l} > \theta_{\min} \quad (7)$$

式中: $\theta_{i,j,l}$ 为管段 ij 与管段 jl 之间的转向角, $(^\circ)$ 。

2.3.5 环网接入约束

每个井口都需要接入环网, 因此每个节点都需要与其他两个节点相连, 即:

$$\sum_j \sigma_{i,j} = 2, i \neq j \quad (8)$$

2.3.6 管径集合约束

各条管道管径应在可供选择的管径范围之内。

$$D_{i,j} \in I_e, D_k \in I_e \quad (9)$$

式中: I_e 为可选管径集合, mm。

2.4 模型分析

模型中存在 3 个主要难点: ①各井可选环网接入点的组合众多; ②求得各接入点位置后, 需确定一个路径最短的闭环; ③需确定各井口接入环网的最优路径。以上 3 个难点均属于组合优化问题, 已被证明是 NP (Non-deterministic Polynomial) 难问题。采用传统优化算法很难适应 NP 难问题, 因此需选用智能算法求解。但如果单纯采用遗传算法等智能算法求解, 解得的路径可以实现二维平面的优化, 但无法保证三维空间内也是最优路径。因此, 提出采用耦合遗传算法和 A* 算法的方法求解该问题。

3 模型求解

采用耦合遗传算法和 A* 算法的方法求解, 其基本思想是: 利用遗传算法生成种群, 确定环网上各井口

接入点的位置;利用 A* 算法获取路径最优解,将其作为种群的适应度,再代入遗传算法生成下一代种群。

3.1 基因编码和解码

编码和解码是指解和染色体之间的相互转换,是应用遗传算法的首要 and 关键问题。环枝状管网优化问题需要寻找一个环网中心点,并为每一口井选择一个合适的接入管网的位置,为此,环枝状管网优化编码由两部分组成:①中心点位置坐标染色体;②井口接入环网坐标染色体,用于确定每一口井与环网之间的距离,即各射线上最优接入环网份数。融合以上两部分编码,形成一条染色体,即为环枝状管网优化问题的一个可行解。

在选取最优中心点和接入点时不受 z 方向高程坐标的影响,可以先将三维地形沿 z 方向投影到平面二维坐标系中,中心点的位置坐标分为 x 轴和 y 轴,即用两段基因描述编码的第 1 部分。对于编码的第 2 部分,共有 N 个井口,即在管网中有 N 个接入点,需要确定 N 条射线上最优接入环网份数。因此,将这两类决策变量采用二进制编码方法编成一条长度为 $(N+2)b$ 的染色体,其中, b 为能计算最大编号的最短二进制长度。

解码时先根据第 1 部分基因串确定中心点位置的十进制坐标,然后依据第 2 部分基因串确定各射线上环网接入位置,最后按顺时针或逆时针顺序依次连接各接入位置,从而产生可行的管网铺设方案。

3.2 初始种群产生

初始种群是由 v 个长度为 $(N+2)b$ 的染色体数字串组成的群体, v 为种群数量,种群中每一个染色体的长度与中心点的坐标维度和井口数是对应的。初始种群中的染色体数字串都是随机生成的,遗传算法以初始种群作为第一代种群开始迭代。

3.3 适应度函数设计

适应度函数是遗传算法中衡量个体优劣的唯一标准,根据实际问题的不同,函数具有不同的形式。以最短管网长度为目标函数,其适应度函数为:

$$f = \sum_i \sum_j \sigma_{i,j} L_{i,j} C_{D_{i,j}} + \sum_k L_k C_{D_k} \quad (10)$$

对每次产生的种群进行约束条件检验,若不符合约束,则增加一个惩罚值。

3.4 遗传操作

采用轮盘赌法进行基因复制交叉操作,设置一定

的变异概率。在进行杂交操作时,规定每次操作每条基因最多只能进行一次杂交和变异操作。杂交步骤为随机选择两个没有进行杂交的基因,随机选择杂交编码的个数以及位置,进行编码互换。变异步骤为随机选择一个没有进行变异的基因,随机选择变异的个数以及位置,将其编码进行 0-1 互换。

将完成杂交和变异操作的染色体定义为子代,对子代进行适应度计算,选取父代和子代中最优的 v 个染色体,作为下一次遗传操作的父代。采用该方法可以显著提升收敛速度。

3.5 A* 算法求解最短路径

A* 算法是一种典型的启发式搜索算法^[25-26],常用于二维和三维地形的路径寻优。在考虑三维地形的情况下,两点之间的最优距离不一定是几何上的直线,因此需要在选取环网接入点后,对相连接入点之间以及井口到环网之间的距离进行优化。A* 算法采用以下启发式估价函数:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (11)$$

式中: $f(n)$ 为节点 n 的估价函数; $g(n)$ 为当前节点到节点 n 的实际路径长度; $h(n)$ 为节点 n 到终点的估算路径长度。

采用该算法对三维情况下的最优连接路径进行计算,而后计算管网总费用,并评估新老染色体,进行下一步遗传操作。

3.6 收敛条件判断

设计的遗传算法收敛条件为在一定步长内不再有更优的管网连接方式染色体产生,满足条件后算法则停止迭代,输出适应度值最大的最优个体(图 2)。

4 计算实例

选取文献[1]中煤层气田某一区域 23 口井(截取相对坐标)作为研究对象(图 3a),采用所提出的算法进行计算(图 3b)。

在管网布置优化中,遗传计算初始种群规模为 500,遗传终止代数设为 150,将交叉概率选为 0.7,变异概率选为 0.3。由于角度约束对最后结果的影响较大,因此通过设置较高的变异概率,可以生成更多组新的解,避免陷入局部最优。

根据优化模型计算结果(表 1),与文献[1]数据相比,管道总长度下降了 7.72%,管道总费用下降了

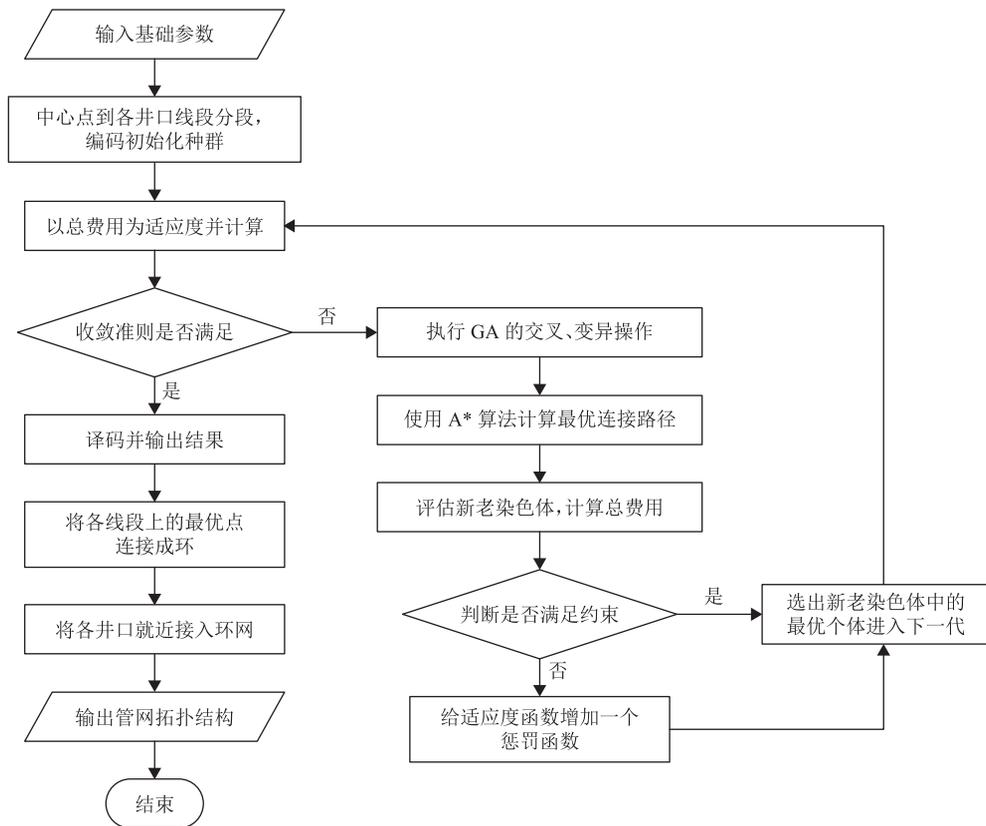


图2 油气集输环枝状管网优化算法流程图

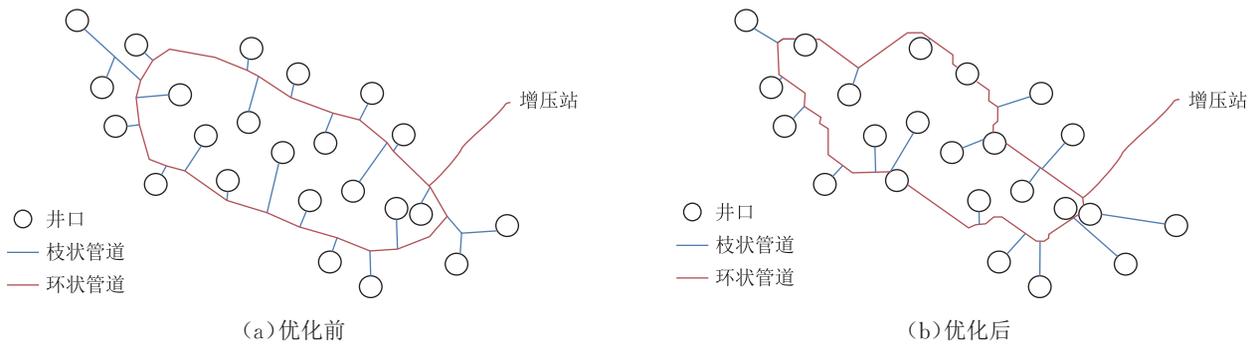


图3 文献 [1] 管网优化前后连接示意图

表1 不同连接形式下的管网长度、费用对比

对比项目	环状管长 /km	枝状管长 /km	总管长 /km	总费用 /(10^4 元)
文献 [1] 管网	2.115	2.396	4.511	72.04
优化管网	2.438	1.724	4.163	66.95

7.06%, 优化效果良好。在可靠性方面,井口直接连在环上,可靠性较原管网更优。

该优化方法不仅可以实现二维平面上的优化,也可用于三维地形下的优化。在离散点地形数据的基础上,利用3次B样条曲线插值的方法对三维地形进行模拟仿真^[14],得到网格上各点的高程。在虚拟的三维地形下对文献 [1] 管网进行优化后,得到管网的三维布局(图4)。

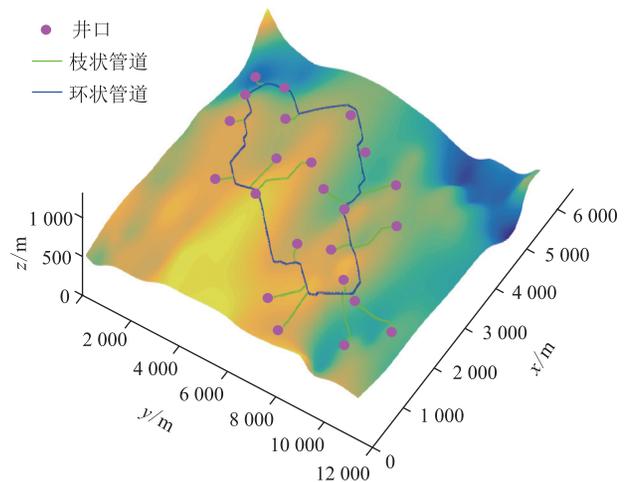


图4 文献 [1] 管网优化后的三维布局图

5 结论

对集输管网常采用的枝状和环状管网的特点进行了分析,提出一种新的考虑三维地形的环枝状复合型集输管网优化的方法,以管道总费用最小为目标函数,在转向角等约束下,基于耦合遗传算法和A*算法对模型进行求解。算例优化结果表明,所提出的优化方法可以减少管网长度、降低建设费用。

参考文献:

- [1] 蒋洪,张黎,任广欣,等.煤层气地面集输管网优化[J].天然气与石油,2013,31(1):8-12.
JIANG H, ZHANG L, REN G X, et al. Optimization of coalbed methane (CBM) surface gathering and transportation pipeline network[J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(1): 8-12.
- [2] 刘扬,关晓晶.环形集输管网拓扑优化设计[J].天然气工业,1993,13(2):71-74.
LIU Y, GUAN X J. Topology optimization design of ring gathering pipeline network[J]. Natural Gas Industry, 1993, 13(2): 71-74.
- [3] 葛翠琴.天然气集输管网优化[D].大庆:大庆石油学院,2007:20-39.
GE C C. Optimization of gas gathering pipe network[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2007: 20-39.
- [4] 李自力,孙云峰,张子波,等.普光高含硫气田集输管网优化[J].石油学报,2011,32(5):872-876.
LI Z L, SUN Y F, ZHANG Z B, et al. Optimization design of a gathering pipe network of natural gas with high H₂S from the Puguang gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 872-876.
- [5] 李自力,孙云峰,张子波,等.基于遗传算法的气田集输管网整体优化方法[J].天然气工业,2011,31(8):86-89.
LI Z L, SUN Y F, ZHANG Z B, et al. A global optimization method based on genetic algorithms for gas gathering pipeline network in a gas field[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8): 86-89.
- [6] 魏立新,刘扬.油气集输系统障碍拓扑布局优化设计方法[J].石油学报,2006,27(6):120-124.
WEI L X, LIU Y. Obstacle topological layout optimization design of oil gas gathering and transferring system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 120-124.
- [7] 潘红丽,杨鸿雁.气田地面集输管网系统的优化设计[J].油气储运,2002,21(4):14-18.
PAN H L, YANG H Y. The optimal design of gas gathering network system of ground engineering[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2002, 21(4): 14-18.
- [8] 周荣敏,林性粹.用基于整数编码的改进遗传算法进行环状管网优化设计[J].灌溉排水学报,2001,20(3):49-52.
ZHOU R M, LIN X C. Application of an improved genetic algorithms with interger code in optimal design of loop pipe network[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2001, 20(3): 49-52.
- [9] 梁永图,张浩然,马晶,等.油气田集输管网系统优化研究进展[J].油气储运,2016,35(7):685-690.
LIANG Y T, ZHANG H R, MA J, et al. Advances in optimization study of oil and gas field gathering pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(7): 685-690.
- [10] 许继凯,刘刚,陈雷,等.基于蚁群算法的油气集输管网井组优化[J].油气储运,2016,35(11):1230-1234.
XU J K, LIU G, CHEN L, et al. Well group optimization of oil and gas gathering pipeline network based on ant colony algorithm[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(11): 1230-1234.
- [11] DUAN Z, LIAO Q, WU M, et al. Optimization of pipeline network structure of cbm fields considering three-dimensional geographical factors[C]. Calgary: Proceedings of the 11th International Pipeline Conference, 2016: IPC2016-64020.
- [12] 梅永贵,郭简,王景悦,等.沁水煤层气集输管网三维地理信息系统的设计[J].油气储运,2015,34(12):1328-1332.
MEI Y G, GUO J, WANG J Y, et al. Design of 3D GIS for coal-bed methane (CBM) gathering pipeline network in the Qinshui Basin[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(12): 1328-1332.
- [13] 周军,李晓平,温凯,等.地形起伏条件下的枝状管网布局优化[J].油气田地面工程,2013,32(11):3-4.
ZHOU J, LI X P, WEN K, et al. The layout optimization of dendritic pipeline network under the condition of terrain ups and downs[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2013, 32(11): 3-4.
- [14] 何国玺,梁永图,方利民,等.考虑三维地形及障碍的煤层气田集输系统布局优化[J].油气储运,2016,35(6):638-647.

- HE G X, LIANG Y T, FANG L M, et al. Optimization of gathering system in CBM filed considering the three dimensional terrain and obstacles[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(6): 638-647.
- [15] 胡楠, 胡世杰, 蒋皓, 等. 煤层气田地面集输方式以及增压方式优化[J]. 煤气与热力, 2011, 31(9): 6-9.
- HU N, HU S J, JIANG H, et al. Optimization of surface gathering modes and boosting modes in coal-bed methane field[J]. Gas & Heat, 2011, 31(9): 6-9.
- [16] 许茜, 薛岗, 王红霞, 等. 沁水盆地煤层气田樊庄区块采气管网的优化[J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 91-93.
- XU Q, XUE G, WANG H X, et al. Optimization of flow line network: Case history of the Fanzhuang Block in the coalbed methane gas fields, Qinshui Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 91-93.
- [17] 申晋峰. 枝状管网与环状管网的技术经济评价[J]. 油气储运, 2001, 20(11): 30-32.
- SHEN J F. Technical and economic evaluation of branch pipe network and ring network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(11): 30-32.
- [18] 王洪元, 卜莹, 潘操. 基于遗传蚁群算法的气田集输管网优化方法[J]. 计算机与应用化学, 2012, 29(12): 1495-1498.
- WANG H Y, BU Y, PAN C. An optimization method based on GA-ACA for gas gathering pipeline network in a gas field[J]. Computer and Applied Chemistry, 2012, 29(12): 1495-1498.
- [19] 柯文奇. 基于粒子群算法原油集输管网优化[J]. 石油规划设计, 2010, 21(1): 15-17.
- KE W Q. Optimization of crude oil gathering and transportation pipeline network based on particle swarm optimization algorithm[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2010, 21(1): 15-17.
- [20] 陈坤明, 简朝明, 刘松泉, 等. 单亲遗传和深度优先搜索算法的集输管网优化[J]. 油气田地面工程, 2012, 31(8): 34-35.
- CHEN K M, JIAN Z M, LIU S Q, et al. Single parent genetic algorithm and depth first search algorithm for the optimization of the gathering and transportation pipeline network[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2012, 31(8): 34-35.
- [21] ZHANG H R, LIANG Y T, ZHANG W, et al. A unified MILP model for topological structure of production well gathering pipeline network[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2017, 152: 284-293.
- [22] 朱家松, 龚健雅, 郑皓. 遗传算法在管网优化设计中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(3): 363-367.
- ZHU J S, GONG J Y, ZHENG H. Application of genetic algorithm to water distribution system design optimization[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(3): 363-367.
- [23] 孙健. 环形油气集输管网布局优化设计[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010: 16-23.
- SUN J. Optimization of cyclic gathering pipeline network[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010: 16-23.
- [24] 战红, 杨建军, 代晓东. 环状管网优化设计的双重编码混合遗传算法[J]. 石油机械, 2008, 36(10): 27-31.
- ZHAN H, YANG J J, DAI X D. Hybrid genetic algorithm for optimal design of circular pipe network[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(10): 27-31.
- [25] SEET B, LIU G, LEE B S, et al. A-STAR: A mobile ad hoc routing strategy for metropolis vehicular communications[C]. Athens: International Conference on Research in Networking, 2004: 989-999.
- [26] BELL M G H. Hyperstar: A multi-path Astar algorithm for risk averse vehicle navigation[J]. Transportation Research Part B, 2008, 43(1): 97-107.
- (收稿日期: 2017-02-25; 修回日期: 2018-03-29; 编辑: 潘红丽)
- 基金项目:** 山西省自然科学基金资助项目“煤层气地面集输系统优化设计与运行控制”, 2014012012。
- 作者简介:** 王博弘, 男, 1993年生, 在读博士生, 2016年毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事长输管道与油气田集输相关技术研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 13260436516, Email: wbh93@qq.com
- 通讯作者:** 梁永图, 男, 1971年生, 教授, 2009年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事长输管道与油气田集输相关技术研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 13910970411, Email: liangyt21st@163.com