

文章编号: 1000-8241(2020)06-0714-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



老油田滚动开发过程中的集输管网拓扑优化

孙健飞¹ 罗佳² 梁永图¹

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院·城市油气输配技术北京市重点实验室;

2. 青海油田采油一厂基建项目中心

摘要: 针对老油田开发后期旧区块井口加密和新区块新井接入导致的管网拓扑结构变化问题,建立了集输管网滚动开发的布局优化模型。模型考虑了管道水力和计量站计量能力的约束,以新建管道的总长度最短为目标函数,采用改良的 Prime 算法对模型进行求解,实现了老油田滚动开发过程中的管网拓扑优化。以某老油田为例,对其滚动开发中管网连接结构进行计算,得到了优化后的集输管网拓扑结构、新建管道长度、新建计量站的位置及个数,并与文献的优化结果进行对比分析,验证了优化模型和算法的适用性和可靠性,可为老油田滚动开发过程中集输管网的设计提供相关指导。(图 5,表 1,参 21)

关键词: 滚动开发; 集输管网系统; 改良的 Prime 算法; 管网拓扑优化

中图分类号: TE863

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.06.018

Optimization of gathering pipeline network topology in rolling development of old oilfields

SUN Jianfei¹, LUO Jia², LIANG Yongtu

1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)//Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology; 2. Construction Project Center of Qinghai Oilfield No.1 Oil Production Plant

Abstract: The layout optimization model for rolling development of gathering pipeline network was built against the problem of network topology changes caused by the increasing wellheads in old blocks and the new wells addition in new blocks in the late development of old oil fields. Taking into consideration the constraints of pipeline hydraulics and metering capacity of metering stations in the model, the improved Prime algorithm was adopted to solve the model with the shortest total length of newly-constructed pipelines as the objective function, and therefore complete the topology optimization of the pipeline network in the rolling development process of the old oil fields. Finally, the connection structure of the pipeline network in the rolling development of an old oil field was calculated, and the optimized topology structure of the gathering pipeline network, the length of new pipelines, the location and number of new metering stations were obtained. After comparing and analyzing the optimization results with the literature, the applicability and reliability of the model and algorithm were well verified that they could provide relevant guidance for the design of the gathering pipeline network in the rolling development of the old oil field. (5 Figures, 1 Table, 21 References)

Key words: rolling development, gathering pipeline network system, improved Prime algorithm, pipeline network topology optimization

集输管网系统作为油田地面工程的重要组成部分,其设计不仅要适应油田的开发规模和相应布局,还需要考虑系统自身的经济性及可靠性^[1]。在油田开发后期,由于井口含水率上升,造成井口压力下降,计

量站使用效率降低^[2]。为解决以上问题,一般会在开采加密井的同时将新探明区块的油井接入现有管网系统,但这样必然会造成管网连接方式及运行参数的改变。目前中国多数主要油田(如大庆油田、胜利油田)

已经进入开发后期,其加密井的连接方式及新建计量站位置的确定成为管网系统设计优化的难题。

集输管网系统中的流量压力数据属于连续变量,而管径及连接方式属于离散变量,同时管网系统的连接方式会随着井口数量呈指数增长,因此,集输管网系统拓扑优化问题属于同时包含离散变量和连续变量的NP难(Non-deterministic Polynomia-Hard)问题^[3]。早在上世纪70年代,国外已采用动态规划方法对集输管网进行优化,但是在已知管网中大部分参数的情况下对其他参数进行求解,所得到的结果并不是全局最优解^[4-5]。随着智能算法的出现,管网优化问题有了新的求解思路,目前常用的管网优化智能算法有遗传算法^[6-10]、模拟退火算法^[11-12]及蚁群算法^[13]等。Shau等^[6]以管网建设投资最小为目标函数建立了一种管网优化模型,并采用遗传算法求解,虽然不能保证得到全局最优解,但是能够在短时间内得到一个可行解。Sanaye等^[7]以管网建设投资最小为目标函数建立模型,模型中考虑了管网布局、管道直径及压力站的数量和位置,通过遗传算法在较短时间得到了全局最优解。Marcoulaki等^[11]考虑管网系统的建造、运行、维护等方面限制及相关成本对管网系统进行设计,采用模拟退火算法进行求解,得到了收敛于全局最优值附近的一组最终解。Uster等^[14]以总投资最小为目标函数建立了混合整数非线性优化模型,采用在线MINLP求解器进行求解,得到了管网连接方式和压气站位置。魏立新^[15]将遗传算法、分级优化及模拟退火相结合,以管网系统建设投资最小为目标函数对管网系统进行优化;冷建成等^[16]以原油集输费用最小为目标函数建立了管网优化设计模型,并采用神经网络算法求解,但其求解的稳定性受初始参数的影响较大。以上研究虽然都提出了集输管网的具体优化模型及求解方法,但是多为针对已有油井和计量站组的优化问题,并未涉及滚动开发中新井的接入及新计量站的建立问题。

综上,目前管网的拓扑优化模型通常只以新建管网系统为研究对象,对于老油田滚动开发过程中的管网系统拓扑优化问题考虑较少,具有一定的局限性。因此,有必要基于已有的管网结构,在考虑接入新井和新建计量站两个因素的前提下,建立集输管网拓扑优化模型,由此确定老油田在开发后期的集输管网最优布局。

1 集输管网连接结构

管网连接结构一般分为枝状、放射状、环状3种,此外还有采用多种连接结构组合的方式,如放射状-枝状、放射状-环状等。管网连接结构对管网系统优化模型的建立及模型求解算法影响重大^[17-18]。

枝状管网(图1)的布局如同树枝状,其干线一般位于主要产区的中心,油井通过管道连接至干线,再将油品输送至计量站和联合站。枝状管网适用于管网分布范围大、油井产量较高、油藏面积呈狭长状的油田,且适用于单井集油流程^[19]。放射状管网(图2)一般有多条集油干线,干线上某一点呈现放射状连接至井口,适用于面积较大、油井较多、地面被分割的油田^[19]。放射状管网比枝状管网运行稳定性高,但是由于管道总长度比枝状管网长,其建设成本较高。在老油田滚动开发中,为了将新区块的新井和老区块的加密井尽可能地接入原本的管网系统中,对已有管网的改动相对较小,因此,优化模型采用的管网连接方式为放射状-枝状。

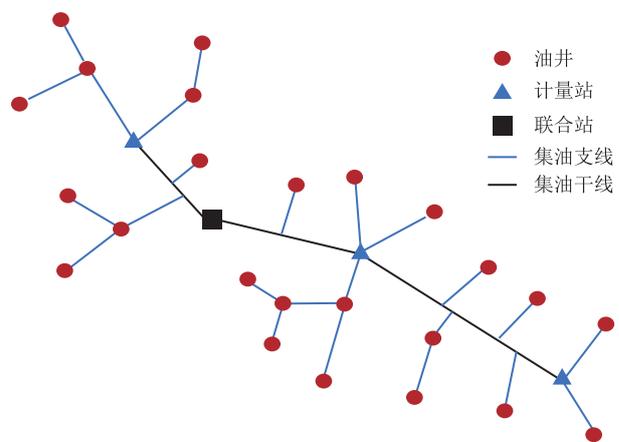


图1 枝状管网连接结构示意图

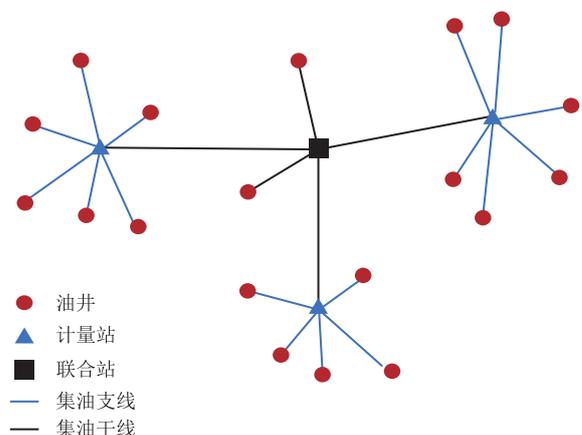


图2 放射状管网连接结构示意图

2 老油田滚动开发集输管网优化模型

由于油田开发规模的扩大,集输管网系统自身的连接结构需要做出相应改变,即对管网的拓扑结构进行优化。模型的优化对象为井口至井口或计量站之间的连接结构,对于计量站至联合站之间的管道,由于管道较长且费用较高则不予考虑。

2.1 模型假设

模型的假设条件为:①井口与井口、井口与计量站之间均采用直线连接;②不考虑井口与井口、井口与计量站之间的高度差异。

2.2 模型建立

老油田滚动开发过程中,由于新井的接入,集输管网呈现出组合型管网连接方式,即新井可连接至计量站也可连接至其他井。以 $I = \{1, 2, \dots, i_{\max}\}$ 表示研究区域内所有油井的集合, i 为油井编号;以 $J = \{1, 2, \dots, j_{\max}\}$ 表示研究区域内所有计量站的集合, j 为计量站编号。

在老油田滚动开发过程中,只考虑新井的接入,以新建管道总长度最小为目标函数,建立老油田滚动开发集输管网拓扑优化数学模型,其目标函数为:

$$\min L = \sum_i \left[\sum_j x_{i,j} (1 - y_{i,j}) l_{i,j} + \sum_k x_{i,k} (1 - y_{i,k}) l_{i,k} \right] \quad (1)$$

式中: L 为新建管道总长度, m ; k 为油井编号,取值满足 $k \in I$ 且 $k \neq i$; $x_{i,j}$ 、 $y_{i,j}$ 、 $x_{i,k}$ 、 $y_{i,k}$ 均为 0、1 变量, $x_{i,j} = 1$ 表示第 i 个油井与第 j 个计量站相连; $x_{i,j} = 0$ 表示第 i 个油井与第 j 个计量站不相连; $x_{i,k} = 1$ 表示第 i 个油井与第 k 个油井相连,且油从第 i 个油井流向第 k 个油井; $x_{i,k} = 0$ 表示第 i 个油井与第 k 个油井不相连或者第 i 个油井与第 k 个油井相连,但油从第 k 个油井流向第 i 个油井; $y_{i,j} = 1$ 表示第 i 个油井与第 j 个计量站之间原本已有管道; $y_{i,j} = 0$ 表示第 i 个油井与第 j 个计量站之间原本没有管道; $y_{i,k} = 1$ 表示第 i 个油井与第 k 个油井之间原本已有管道; $y_{i,k} = 0$ 表示第 i 个油井与第 k 个油井之间原本没有管道; $l_{i,j}$ 为第 i 个油井到第 j 个计量站之间的距离, m , 且 $l_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, 其中 x_i 、 y_i 分别为第 i 个油井的 x 坐标、 y 坐标, m ; x_j 、 y_j 分别为第 j 个计量站的 x 坐标、 y 坐标, m ; $l_{i,k}$ 为第 i 个油井到第 k 个油井之间的距离, m , 且 $l_{i,k} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$, 其中 x_k 、 y_k 分别为第 k 个油井的 x 坐标、 y 坐标, m 。

2.3 约束条件

2.3.1 计量能力约束

集输管网中每个计量站都有其计量上限,因此每个计量站连接的油井数目都不得超过其自身的计量上限,其表达式为:

$$\sum_i \left(x_{i,j} + \sum_k x_{i,k} \right) \leq a_j \quad (2)$$

式中: a_j 为第 j 个计量站的计量上限。

2.3.2 唯一性约束

每个油井只能与一个计量站或油井相连,其表达式为:

$$\sum_k x_{i,k} + \sum_j x_{i,j} = 1 \quad (3)$$

2.3.3 压力约束

井口到其最终连接的计量站之间的压降不得高于井口压力与最低进站压力的差值,其表达式为:

$$p_{i,j} \leq p_i - p_j \quad (4)$$

式中: p_i 为第 i 个油井的井口压力, MPa ; p_j 为第 j 个计量站的最低进站压力, MPa ; $p_{i,j}$ 为第 i 个油井到第 j 个计量站之间的压降, MPa 。

采用布拉修斯方程分段计算压降:

$$-\frac{dp}{dx} = \lambda \frac{\rho_m v_m}{D} \quad (5)$$

$$\lambda = C Re^{-n} \quad (6)$$

$$Re = \frac{v_m D}{\mu} \quad (7)$$

$$\rho_m = \rho_o \varepsilon_o + \rho_w (1 - \varepsilon_o) \quad (8)$$

式中: p 为压降, MPa ; ρ_m 为油水混合物密度, kg/m^3 。 ρ_o 、 ρ_w 分别为油、水的密度, kg/m^3 。 ε_o 为油水混合物中油的体积分数。 D 为管径, m ; v_m 为油水混合物流速, m/s 。 μ 为油水混合物运动黏度, m^2/s 。 Re 为油水混合物雷诺数。 C 、 n 为参数,当流态为层流时, $C=64$, $n=1$; 当流态为紊流时, $C=0.3164$, $n=0.25$ 。

2.3.4 管径约束

新建管道的管径必须为标准规格,其表达式为:

$$\sum_j x_{i,j} D_{i,j} + \sum_k x_{i,k} D_{i,k} \in D \quad (9)$$

式中: $D_{i,j}$ 为第 i 个油井到第 j 个计量站的管道的直径,若无管道连接则为 0, m ; $D_{i,k}$ 为第 i 个油井到第 k 个油井的管道的直径,若无管道连接则为 0; D 为可选管径的集合。

3 模型求解

3.1 Prime 算法

集输管网系统的连接问题可以认为是一种最小生成树问题,该类问题的特点是连接结构的个数随节点个数迅速增长,因此无法采用穷举法找到最优的布局,而采用 Kruskal 算法或 Prime 算法则可在较短时间内解决该问题。对于拥有 $n(n > 10)$ 个节点的集合,如果采用穷举法共需要对超过 887 548 725 种连接方法进行计算比较,但采用 Prime 算法仅需进行 n 次连接即可以找到最优布局,大大加快了该类最小生成树的求解速度^[20-21], Prime 算法的具体步骤为:①在所有节点中找到已连接的节点和未连接的节点,将已连接的节点归于已连接集合,未连接的节点归于未连接集合,如果没有已连接的节点则随机选取某个节点作为已连接节点的集合;②计算未连接集合中所有节点与已连接集合中所有节点的距离,找到最短距离以及其所对应的已连接集合和未连接集合中的节点,将这两个节点相互连接,如果有多个相同的最短距离,则任意选择其中一组进行连接;③将步骤②中得到的未连接集合的节点从未连接集合中删除并加入已连接集合中;④重复步骤②和步骤③,直至未连接集合中没有节点。

Prime 算法虽然可以快速确定复杂的集输管网最优布局,但是集输管网的连接问题并不只是单纯的最小生成树问题,必须同时考虑压力及计量站计量能力的约束,即单纯基于 Prime 算法得到的管网布局并不一定能够同时满足式(2)、式(4)的约束条件。因此,必须在基于 Prime 算法的同时考虑管网水力约束,建立老油田滚动开发过程中集输管网拓扑优化模型。

3.2 基于 Prime 算法的管网布局优化

为确定老油田滚动开发过程中管网最优拓扑结构,对 Prime 算法做出改进,改进后的步骤为:①基于老油田现有的集输管网拓扑结构,将旧油井按照其所属的计量站划分为 N 个旧井组;②考虑压力和计量站计量能力的约束,基于 Prime 算法将新井连接至旧井组中;③检验步骤②中新井所接入的井组是否为满足约束条件下距离其最近的井组,若满足约束条件则连接至该井组,若不满足则选择其他井组;④对于无法接入旧井组的新井,随机选择 1 个新井和与其距离最近的新井构成新井组,然后重复执行步骤①~③,直至完成剩余所有新井的连接。

对于新建计量站坐标的计算采用井组中各个井坐标的算术平均值,其表达式为:

$$\begin{cases} x_j' = \frac{\sum_i x_i'}{q_j} \\ y_j' = \frac{\sum_i y_i'}{q_j} \end{cases} \quad (10)$$

式中: x_j' 、 y_j' 分别为第 j 个新建计量站的 x 坐标、 y 坐标; x_i' 、 y_i' 分别为新建计量站所辖井组中第 i 个油井的 x 坐标、 y 坐标; q_j 为第 j 个新建计量站所辖的井组中井的数目。

综上得到基于改进的 Prime 算法的管网拓扑优化流程图(图 3)。

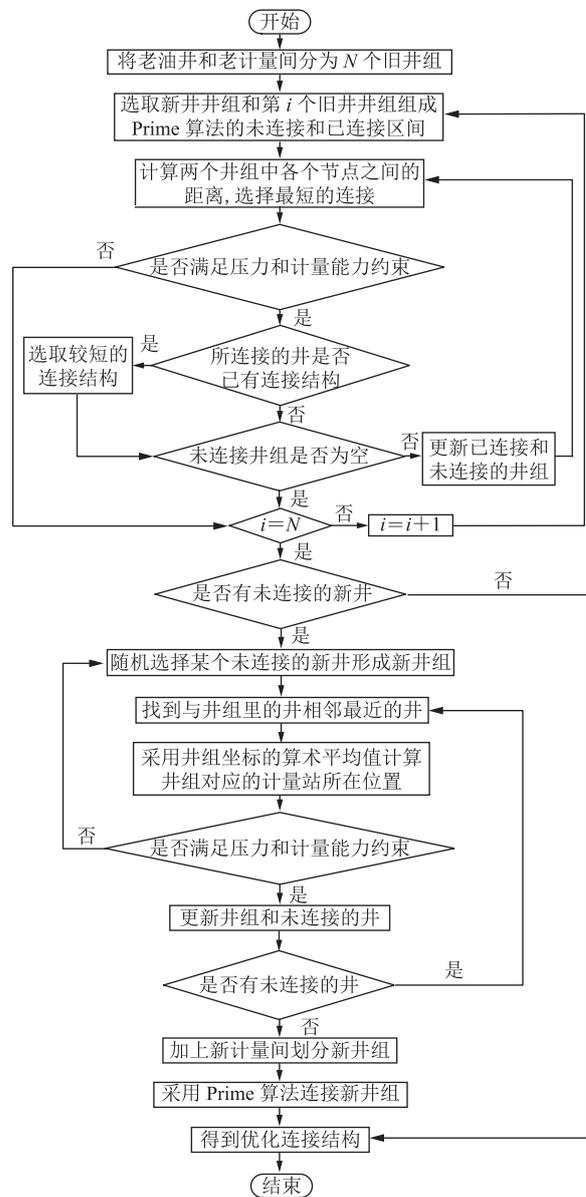


图 3 基于改进的 Prime 算法的管网拓扑优化流程图

4 算例

4.1 基础数据

以中国某老油田为例,验证改进的 Prime 算法的适用性和可靠性。该油田已开发的油井采用放射状集输管

网连接(图4,各图形之间的距离未按各地点之间实际距离等比例缩小,仅表示相对远近;旧计量站旁边“<>”中的数字表示该计量站所能连接的最大井数,即计量站的计量上限),包括67口旧油井(H1~H67)、9个计量站(M1~M9),30口新探明加密井(H68~H97)。

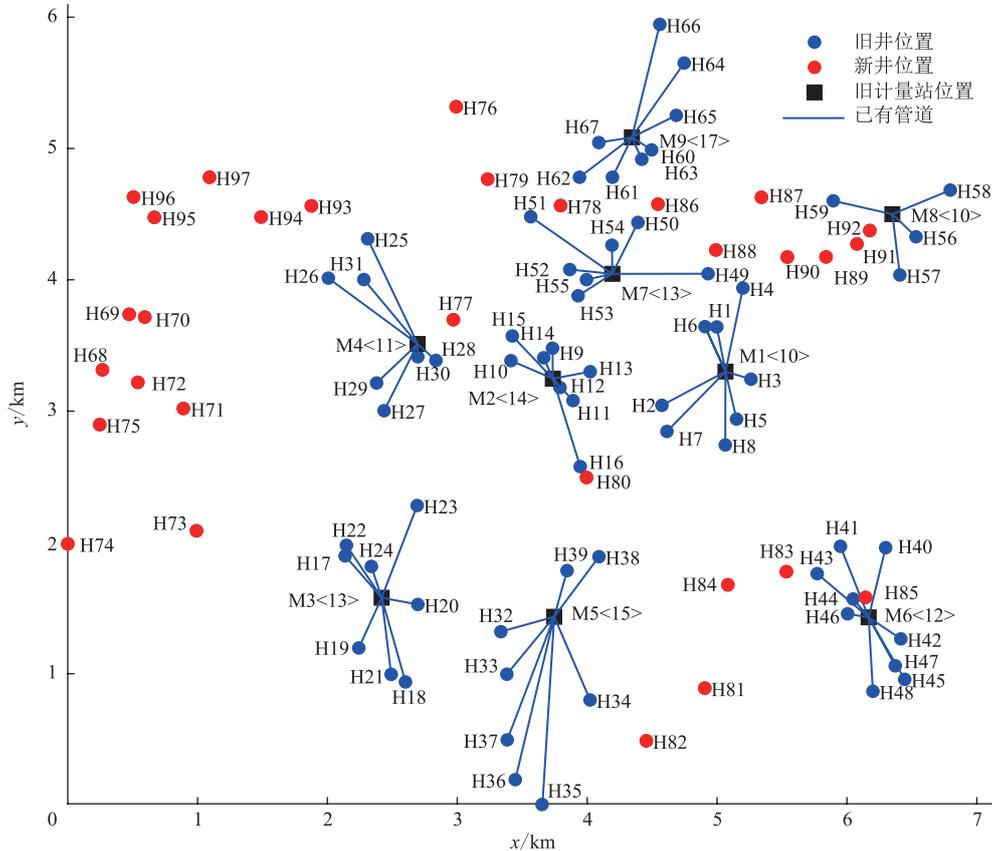


图4 某老油田原管网拓扑结构及新探明加密井位置坐标图

4.2 优化结果

采用改进的 Prime 算法的管网优化模型对该管网进行拓扑优化,得到优化后的新建管道走向及长度(表1)、管网布局(图5)及1座新建计量站(M10)。新建计量站的坐标为(0.393 3, 3.537 0),新建管道

总长 11.64 km。为了评价管网布局的优化结果,针对相同算例,与文献[2]中管网优化模型的结果进行了对比,文献[2]优化后的管网为放射状拓扑结构,其优化后的结果为新建计量站3个,新建管道总长 29.15 km。由此可见,利用改进的 Prime 算法得到的集输管网不

表1 采用改进 Prime 算法的管网优化模型得到的新建管道走向及长度

管道起始段	长度/km	管道起始段	长度/km	管道起始段	长度/km
H68—M10	0.256 2	H78—H51	0.245 2	H88—H49	0.190 5
H69—M10	0.215 3	H79—H51	0.438 8	H89—H91	0.257 7
H70—H69	0.121 8	H80—H16	0.096 5	H90—H89	0.298 0
H71—H72	0.403 0	H81—H82	0.602 7	H91—H92	0.142 1
H72—H68	0.289 0	H82—H34	0.533 1	H92—M8	0.213 8
H73—H22	1.160 2	H83—H44	0.237 5	H93—H25	0.500 6
H74—H75	0.940 7	H84—H83	0.462 0	H94—H93	0.396 2
H75—H75	0.417 5	H85—H43	0.095 8	H95—H70	0.762 8
H76—H79	0.601 8	H86—H50	0.208 0	H96—H95	0.223 4
H77—M4	0.331 1	H87—H90	0.496 6	H97—H94	0.499 9

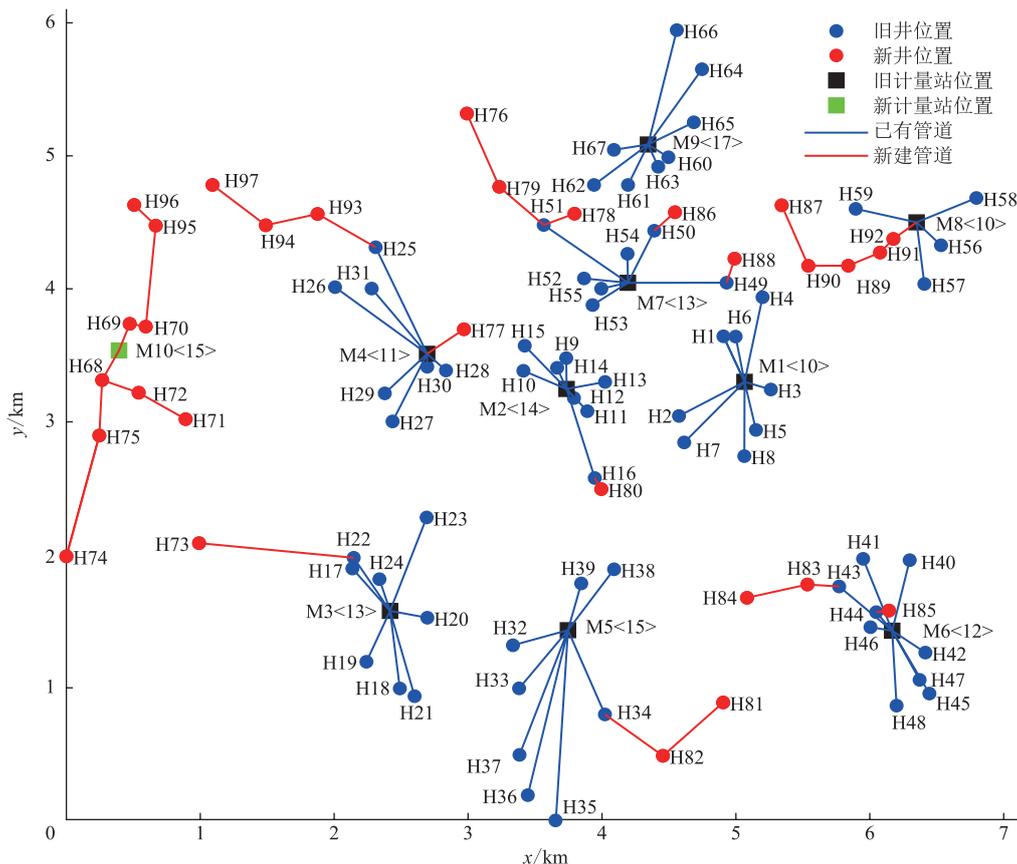


图5 采用改进 Prime 算法的管网优化模型优化后的管网拓扑结构坐标图

仅长度更短,新建计量站数目也更少。因此,在不考虑单位长度管道造价差异的情况下,改进的 Prime 算法优化得到的管网结构更经济合理。

5 结论

针对老油田在生产开发后期管网拓扑结构确定的问题,提出了老油田滚动开发过程中的集输管网拓扑优化模型。相较于传统模型,新模型考虑了原管网的结构,计量站的新建及新区块油井与旧区块加密井的接入等因素,并结合集输管网系统的基本约束条件改进了 Prime 算法,实现了对已有老油田管网的拓扑优化。对比优化结果可见,改进 Prime 算法计算得到的管网总长度更短,新建计量站更少,管网结构更加经济合理,能够为老油田生产开发后期的集输管网建设提供指导。

参考文献:

[1] 周彦霞. 大庆采油九厂集输系统优化研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007: 1-6.
ZHOU Y X. Gathering and transporting system optimization

and research of the No.9 production plant in Daqing[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2007: 1-6.

[2] 梁永图,王继慧,何国玺,黄凯. 老油田集输系统改造管网拓扑优化[J]. 油气储运, 2014, 33(9): 971-975.
LIANG Y T, WANG J H, HE G X, HUANG K. Topological optimization of pipeline network in the gathering system of old oilfield[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(9): 971-975.
[3] DANDY G C, SIMPSON A R, MURPHY L J. An improved genetic algorithm for pipe network optimization[J]. Water Resources Research, 1996, 32(2): 449-458.
[4] CHURCHILL S W, CHURCHILL SW. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes[J]. Chemical Engineering, 1977, 84(24): 91-92.
[5] MARTCH H B, MCCALL N J. Optimization of the design and operation of natural gas pipeline systems[C]. San Antonio: Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, 1972: 8-11.
[6] SHAU H M, LIN B L, HUANG W C. Genetic algorithms for design of pipe network systems[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2005, 13(2): 116-124.

- [7] SANAYE S, MAHMOUDIMEHR J. Optimal design of a natural gas transmission network layout[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2013, 91(12): 2465-2476.
- [8] SRIVASTAVA S, SAHU O P. On the role of overlapping factor in FBMC-SMT system[J]. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 2015, 7(3): 31-37.
- [9] 杜培恩, 陈新果, 李欣泽, 李晓平. 基于动态规划法与改进遗传算法的管网稳态运行优化[J]. *油气储运*, 2018, 37(3): 285-290.
- DU P W, CHEN X G, LI X Z, LI X P. Steady-state operation optimization of pipeline network based on dynamic programming method and advanced genetic algorithm[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2018, 37(3): 285-290.
- [10] ISKANDAR H, ARIEF A, RAJAGOPALAN S. A novel application of genetic algorithm for synthesizing optimal water reuse network with multiple objectives[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 100: 39-56.
- [11] MARCOULAKI E C, PAPAZOGLOU I A, PIXOPOULOU N. Integrated framework for the design of pipeline systems using stochastic optimisation and GIS tools[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, 90(12): 2209-2222.
- [12] HE G X, CHEN D, LIAO K X, SUN J F, NIE S M. A methodology for the optimal design of gathering pipeline system in old oilfield during its phased development process[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 130: 14-34.
- [13] 许继凯, 刘刚, 陈雷, 徐睿好. 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, XU R Y. 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.
- [14] UESTER H, DILAVEROGLU S. Optimization for design and operation of natural gas transmission networks[J]. *Applied Energy*, 2014, 133(15): 56-69.
- [15] 魏立新. 基于智能计算的油田地面管网优化技术研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2005: 67-75.
- WEI L X. Study on optimization technology for oilfield surface pipeline network based on intelligence computation[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2005: 67-75.
- [16] 冷建成, 刘扬, 赵洪激. 基于神经网络方法的油气集输管网拓扑优化设计[J]. *石油规划设计*, 2001, 12(6): 7-9.
- LENG J C, LIU Y, ZHAO H J. Topology optimization design of oil and gas pipe network based on neural network[J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 2001, 12(6): 7-9.
- [17] 罗鹏飞. 天然气集输管网优化研究[J]. *化学工程与装备*, 2015(4): 99-100.
- LUO P F. Natural gas pipe network optimization research[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2015(4): 99-100.
- [18] OCONDI C. Method and apparatus for measuring and controlling the flow of fluids from coal seam gas wells: US6446014[P]. 2003-09-03.
- [19] 蒋洪, 张黎, 任广欣, 陈思锐. 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, CHEN S D. Optimization of CBM ground transportation pipeline network[J]. *Natural Gas and Oil*, 2013, 31(1): 8-12.
- [20] 孟荣章, 李书文. 大型气田集输管网布局优化[J]. *石油规划设计*, 1998, 9(2): 16-18.
- MENG R Z, LI S W. Optimization of gathering and distribution network layout in large gas fields[J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 1998, 9(2): 16-18.
- [21] 李书文. 气田网络优化布局初探[J]. *天然气工业*, 1989, 9(5): 68-72.
- LI S W. Preliminary study on optimized layout of gas network[J]. *Natural Gas Industry*, 1989, 9(5): 68-72.
- (收稿日期: 2017-12-03; 修回日期: 2020-04-10; 编辑: 张雪琴)
-
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“成品油供应链物流系统优化及供给侧可靠性研究”, 51874325。
- 作者简介:** 孙健飞, 男, 1995年生, 在读硕士生, 2017年毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气田集输相关技术研究。地址: 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京), 102249。电话: 13241810837。Email: 752940949@qq.com
- 通信作者:** 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, 现主要从事长输油气管道与油气田集输相关技术的教学与研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京), 102249。电话: 13910970411。Email: liangyt21st@163.com