

文章编号: 1000-8241(2017)10-1154-08

# 基于模拟退火-蚁群算法的原油管道顺序输送运行优化模型

吕梦芸

中国石油大学(北京)/油气管道输送安全国家工程实验室

**摘要:** 原油管道运行优化研究能够在一定程度上降低管道运行能耗。依据顺序输送原油管道运行工艺,将顺序输送过程中不同步下管道水热力约束、站场运行工艺约束等多类约束条件考虑在内,并严格区分管道内各批次原油的物性差异,以全线输油设备运行能耗最低为目标函数,基于离散时间表达建立数学模型,并采用模拟退火-蚁群算法对模型进行求解。以西部原油管道主干线鄯兰原油管道为例进行计算,并与以往的优化算法进行对比,结果表明:该优化算法的求解效率较高,且求得的运行方案较大幅度地降低了管道的运行能耗,满足现场运行工艺要求,具有较强的适用性。(图4,表3,参26)

**关键词:** 原油管道; 顺序输送; 运行优化; 不同步; 物性差异; 模拟退火-蚁群算法

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.10.009

网络出版时间: 2017-7-28 10:09:41

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20170728.1009.004.html>

## The operation optimization model of crude oil batch transportation pipeline based on the simulated annealing-ant colony algorithm

LYU Mengyun

China University of Petroleum (Beijing)/National Engineering Laboratory for Pipeline Safety

**Abstract:** Operation optimization of crude oil pipeline is conducive to reducing its energy consumption to a certain extent. In this paper, a mathematical model was established in the form of discrete time expression based on the batch transportation process of crude oil pipeline. In this model, various constraint conditions are taken into consideration, such as the pipeline hydrothermal constraint at different time steps and the operation process of the station. The physical property difference between different batches of crude oil in the pipeline is distinguished strictly, and the lowest energy consumption of all oil transportation equipments along the whole pipeline is taken as the objective function. And it is solved by means of the simulated annealing-ant colony algorithm. Then, it was used to calculate the Shanshan-Lanzhou pipeline which is the trunk line in Western Crude Oil Pipeline, and the calculation results were compared with the results of previous optimization algorithms. It is indicated that the simulated annealing-ant colony algorithm is more efficient, and its corresponding operation scheme can decrease the operation energy consumption of pipelines significantly and satisfy the technical requirements of on-site operation, presenting strong applicability. (4 Figures, 3 Tables, 26 References)

**Key words:** crude oil pipeline, batch transportation, operation optimization, different time steps, physical property difference, simulated annealing-ant colony algorithm

近年来,随着原油管道运行管理过程中节能降耗理念的不断深入<sup>[1-3]</sup>,众多学者针对原油管道运行优化问题开展了研究。基于某原油管道运行工艺建立较为简易的非线性数学模型,采用动态规划算法、人工智能算法及启发式方法求解。在中国,李晋等<sup>[4]</sup>针对

加热输送原油管道、张维志等<sup>[5]</sup>针对等温输送管道建立了运行优化数学模型,并采用动态规划算法求解,在一定程度上提高了管道运行的经济性;徐源等<sup>[6]</sup>基于输油泵、加热炉等运行设备的工作特性,建立了热油管道运行优化模型,并且采用增量动态规划算法求解;

宋红波等<sup>[7]</sup>采用模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm, SAA)、杨毅等<sup>[8]</sup>采用模拟退火-遗传算法求解加剂原油管道运行优化模型;左丽丽等<sup>[9-10]</sup>分别针对长呼原油管道、鄯兰原油管道进行了节能优化研究,建立了流量方案、运行方案两级递阶优化模型<sup>[11-12]</sup>,基于流量方案采用不同算法分步优化求解管道开泵与开炉方案。在国外,Zhou等<sup>[13]</sup>针对热油管道建立了计算管道周围土壤温度与传热系数的动态模型,基于此建立了热油管道运行优化模型,并采用粒子群-动态规划混合算法求解;Liu等<sup>[14]</sup>提出了改进遗传算法,并将其应用于热油管道运行优化模型,使管道运行能耗降低5%~9%;Karuppiah等<sup>[15]</sup>针对炼厂前端原油调度问题建立了混合整数非线性规划模型,并提出一种求解非凸、非线性模型的外近似算法;Wang等<sup>[16]</sup>考虑了不同原油输送方式的风险影响因素,针对管道输送及油轮输送等多种运输方式建立了优化模型,采用遗传-蚁群算法求解。

上述模型大多适用于常温或加热混合输送工艺,并未考虑输送过程中管内原油种类的变化。于美玉等<sup>[17-18]</sup>研究了多种原油顺序输送工艺,但其中大多数模型考虑因素不够全面,且为单时步优化数学模型,未将时间考虑到模型中,适用性不高。此外,采用动态规划算法求解,当原油管道较长,热站、泵站数量较多时,计算时间呈指数型增长,求解效率极大降低,甚至产生维数灾难问题。

基于上述研究成果,针对顺序输送原油管道运行工艺<sup>[19-20]</sup>,在已知各时刻管道输送流量与各批次原油种类的基础上,严格区分管内各类原油的物性差异,将顺序输送过程中不同时步下管道水热力约束、站场运行工艺约束等多类约束条件考虑在内,以管道全线运行能耗最低为目标函数建立数学模型。采用模拟退火-蚁群算法进行求解,即在蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)中引入模拟退火思想对其进行改进,在保留原有算法优势的同时,一定程度上提高了所求解的最优性。

## 1 模型建立

### 1.1 模型假设

为了便于数学模型建立与求解,将复杂管道系统合理简化,做出假设:①管内油品为不可压缩流体,忽

略各批次原油输送过程中的体积变化;②水力计算近似为稳态过程,忽略管内流体瞬变带来的影响;③不考虑各批次原油之间的混油段影响;④近似计算全线输送各批次原油物性参数随沿线输送温度的变化,忽略压力变化对其影响;⑤忽略管道结蜡、停输及油流过泵温升等因素的影响。

### 1.2 目标函数

基于离散时间表达式建立模型,模型中包含  $T$  个离散时刻,以  $t = \{1, 2, \dots, T\}$  表示离散时步编号集合;沿线设有  $I$  个站场、 $(I-1)$  段管段,以  $i = \{1, 2, \dots, I\}$  表示各站场及管段编号集合,即第  $i$  站场与第  $(i+1)$  站场之间为第  $i$  管段;每个站场配备  $K_i$  台离心泵,以  $k = \{1, 2, \dots, K_i\}$  表示站场配泵编号集合,对于未配泵的站场,  $K_i = 0$ ;每个站场配备  $N_i$  台加热炉,对于无加热炉的站场,  $N_i = 0$ ;以  $j = \{1, 2, \dots, J\}$  表示输送原油批次编号集合。模型以管道沿线泵站运行耗电量与热站加热炉燃料消耗总和最小为目标函数  $F$ :

$$F = \sum_t \sum_i \Delta \tau_t \left( C_{P_i} E_{P_i,t} + \frac{C_F E_{F_t,i}}{V_C} \right) \quad (1)$$

式中:  $\Delta \tau_t$  为第  $t$  时步步长, h;  $E_{P_i,t}$  为第  $t$  时步第  $i$  站场输油泵运行能耗, kW;  $C_{P_i}$  为第  $i$  站场当地的电价, 元/(kW·h);  $E_{F_t,i}$  为第  $t$  时步第  $i$  站场加热炉运行能耗, kW;  $C_F$  为加热炉燃料价格, 元/kg;  $V_C$  为加热炉燃料热值, J/kg。

### 1.3 约束条件

由于油品输送计划已知,因此各时步下各管段流量、各批次原油物性参数以及各批次位置等均均为已知参数。

#### 1.3.1 泵站约束

对于定转速泵,过泵流量与离心泵扬程、效率之间满足泵特性曲线方程,可以根据输油泵的扬程、效率与流量数据拟合得出具体参数。

$$H_{t,i,k} = a'_{i,k} - b'_{i,k} Q_{t,i}^{2-m} \quad (2)$$

$$\eta_{t,i,k} = a_{i,k} Q_{t,i}^2 + b_{i,k} Q_{t,i} + c_{i,k} \quad (3)$$

式中:  $H_{t,i,k}$  为第  $t$  时步第  $i$  站场第  $k$  台泵的扬程, m;  $Q_{t,i}$  为第  $t$  时步第  $i$  站场过泵流量, 即第  $i$  管段流量,  $m^3/h$ ;  $\eta_{t,i,k}$  为第  $t$  时步第  $i$  站场第  $k$  台泵的工作效率;  $a'_{i,k}$ 、 $b'_{i,k}$  分别为第  $i$  站场第  $k$  台泵的扬程特性参数;  $a_{i,k}$ 、 $b_{i,k}$ 、 $c_{i,k}$  分别为第  $i$  站场第  $k$  台泵的效率方程参数;  $m$  为沿程摩阻计算参数。

第  $t$  时步第  $i$  泵站提供压力  $p_{t,i}$  的表达式为:

$$p_{t,i} = \sum_k (B_{Pr,i,k} \rho_{Gt,i} g H_{t,i,k}) \quad (4)$$

式中： $B_{Pr,i,k}$ 为泵启停二元变量，若第 $t$ 时步第 $i$ 泵站第 $k$ 台泵处于开启状态，则 $B_{Pr,i,k}=1$ ，若处于关闭状态，则 $B_{Pr,i,k}=0$ ； $\rho_{Gt,i}$ 为第 $t$ 时步第 $i$ 泵站的过泵密度， $\text{kg/m}^3$ ； $g$ 为重力加速度， $\text{m/s}^2$ 。

泵站过站油品密度为流经该站场的批次原油的密度：

$$\rho_{Gt,i} = \sum_j \rho_{t,j} B_{Ct,i,j} \quad (5)$$

式中： $\rho_{t,j}$ 为第 $t$ 时步第 $j$ 批次原油密度， $\text{kg/m}^3$ ； $B_{Ct,i,j}$ 为二元参数，若第 $t$ 时步第 $j$ 批次原油正流经第 $i$ 站场，则 $B_{Ct,i,j}=1$ ，否则 $B_{Ct,i,j}=0$ 。

每个站场泵运行的数量应小于该站场配备输油泵总数 $K_i$ 。第 $i$ 泵站输出功率的表达式为：

$$E_{Pr,i} = \sum_k \frac{B_{Pr,i,k} Q_{t,i} \rho_{Gt,i} g H_{t,i,k}}{\eta_{t,i,k}} \quad (6)$$

### 1.3.2 压力约束

依据管道全线能量平衡方程，将管道水力计算过程近似为准稳态过程。计算管段沿程摩阻时严格考虑管段内所输不同批次原油物性参数不同，表达式如下：

$$p_{Fr,i} = \beta g \sum_j L_{t,i,j} \frac{\rho_{t,j} Q_{t,i}^{2-m} U_{t,j}^m}{d_i^{5-m}} \quad (7)$$

式中： $p_{Fr,i}$ 为第 $t$ 时步第 $i$ 管段的沿程摩阻，MPa； $U_{t,j}$ 为第 $t$ 时步第 $j$ 批次油品的运动黏度， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $d_i$ 为第 $i$ 管段的管径，m； $L_{t,i,j}$ 为第 $t$ 时步第 $j$ 批次油品在第 $i$ 管段内的长度，m； $\beta$ 为沿程摩阻计算参数。

管段高程损失为管段起点高程压力与管段终点高程压力之差：

$$p_{Er,i} = (\rho_{Gt,i} E_i - \rho_{Gt,i+1} E_{i+1}) g \quad (8)$$

式中： $p_{Er,i}$ 为第 $t$ 时步第 $i$ 管段的高程压力损失，MPa； $E_i$ 为第 $i$ 站的高程，m。

管段全线压力守恒，即后一站场（第 $i+1$ 站场）进站压力等于前一站场（第 $i$ 站场）进站压力与其提高压力之和减去第 $i$ 管段沿程摩阻与高程压力损失。首站进站压力为给油泵压力 $p_G$ ，且各站场进出站压力需满足对应压力上、下限。

$$p_{Rt,i+1} = p_{Rt,i} + p_{t,i} - p_{Er,i} - p_{Fr,i} \quad (9)$$

$$p_{R\text{min}i} \leq p_{Rt,i} \leq p_{R\text{max}i} \quad (10)$$

$$p_{O\text{min}i} \leq (p_{Rt,i} + p_{t,i}) \leq p_{O\text{max}i} \quad (11)$$

式中： $p_{Rt,i}$ 为第 $t$ 时步第 $i$ 站场进站压力，MPa； $p_{R\text{max}i}$ 、

$p_{R\text{min}i}$ 分别为第 $i$ 站场进站压力的上、下限，MPa； $p_{O\text{max}i}$ 、 $p_{O\text{min}i}$ 分别为第 $i$ 站场出站压力的上、下限，MPa。

### 1.3.3 温度约束

管道沿线温降采用苏霍夫公式进行计算，由于原油长输管道通常为长距离、大管径管道，因此在计算温降时需要将摩擦热作用考虑到模型中<sup>[21]</sup>。

$$T_{Sr,i+1} = T_{0i} + \beta_{t,i} + [T_{L,i} - (T_{0i} + \beta_{t,i})] e^{-\alpha_{t,i} L_i} \quad (12)$$

$$\alpha_{t,i} = \frac{K_i \pi d_i}{G_{t,i} c_i} \quad (13)$$

$$\beta_{t,i} = \frac{g S_{t,i}}{a_{t,i} c_i} \quad (14)$$

式中： $T_{Sr,i}$ 、 $T_{L,i}$ 分别为第 $t$ 时步第 $i$ 站场的进站、出站温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_{0i}$ 为第 $i$ 管段平均地温， $^{\circ}\text{C}$ ； $L_i$ 为第 $i$ 管段管长，m； $\alpha_{t,i}$ 、 $\beta_{t,i}$ 分别为温降计算公式参数，计算 $\beta_{t,i}$ 时，管段水力坡降近似取管段水力坡降平均值； $K_i$ 为第 $i$ 管段的总传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； $G_{t,i}$ 为第 $t$ 时步第 $i$ 管段的质量流量， $\text{kg}/\text{h}$ ； $c_i$ 为第 $i$ 管段输油平均温度下油品比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； $S_{t,i}$ 为第 $i$ 管段起点、终点水力坡降平均值。

管段质量流量与水力坡降平均值计算表达式：

$$G_{t,i} = \sum_j \frac{L_{t,i,j} \rho_{t,j} Q_{t,i}}{L_i} \quad (15)$$

$$S_{t,i} = \beta \frac{Q_{t,i}^{2-m} \left( \sum_j U_{i,j}^{m-1} B_{Ct,i,j} + \sum_j U_{t,j}^{m-1} B_{Ct,i+1,j} \right)}{2 d_i^{5-m}} \quad (16)$$

首站进站温度以及各站进、出站温度需满足温度上下限要求：

$$T_{L\text{min}i} \leq T_{L,i} \leq T_{L\text{max}i} \quad (17)$$

$$T_{S\text{min}i} \leq T_{Sr,i} \leq T_{S\text{max}i} \quad (18)$$

式中： $T_{S\text{max}i}$ 、 $T_{S\text{min}i}$ 分别为第 $i$ 站场进站温度的上、下限， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_{L\text{max}i}$ 、 $T_{L\text{min}i}$ 分别为第 $i$ 站场出站温度的上、下限， $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.3.4 热站约束

热站约束条件可以根据管道实际运行工艺确定，若采用常温顺序输送工艺，则模型中不需要考虑热站约束条件，各站进出站温度相等，加热炉消耗功率为0。

$$T_{L,i} = T_{Sr,i} \quad (19)$$

$$E_{Fr,i} = 0 \quad (20)$$

若采用加热顺序输送工艺，则模型中需要考虑热站约束。第 $t$ 时步第 $i$ 站场总能耗为该站每台加热炉的热负荷与该时步开启加热炉台数的乘积：

$$E_{Fi,i} = q_{t,i} N_{t,i} \quad (21)$$

式中:  $q_{t,i}$  为第  $t$  时步第  $i$  站场单台加热炉热负荷, kW;  $N_{t,i}$  为第  $t$  时步第  $i$  站场开启加热炉台数。

第  $t$  时步第  $i$  站场单台加热炉流量表达式为:

$$Q_{Hi,i} = \frac{Q_{t,i}}{N_{t,i}} \quad (22)$$

每台加热炉的热负荷  $q_{t,i}$  表达式为:

$$q_{t,i} = \frac{\sum_j B_{C_{t,i,j}} c_{t,j} \rho_{t,j} Q_{Hi,i} (T_{L,i} - T_{St,i})}{\eta_{t,i}} \quad (23)$$

式中:  $c_{t,i}$  为第  $t$  时步第  $j$  批次油品比热容, J/(kg·°C);  $\eta_{t,i}$  为第  $t$  时步第  $i$  站场单台加热炉工作效率。

第  $t$  时步第  $i$  站场单台加热炉工作热负荷需满足其上下限要求:

$$q_{\min i} \leq q_{t,i} \leq q_{\max i} \quad (24)$$

式中:  $q_{\max i}$ 、 $q_{\min i}$  分别为第  $i$  站场单台加热炉工作热负荷上、下限, kW。

第  $t$  时步第  $i$  站场开启加热炉台数需要小于加热炉配备总台数  $N_{Fi}$ :

$$N_{t,i} \leq N_{Fi} \quad (25)$$

## 2 模型求解

在所建原油顺序输送管道运行优化模型中, 各时步输油泵及加热炉启停二元变量为核心决策变量, 且全部为离散变量。当管道较长, 站场与各站场配泵、配炉数量较多时, 所建模型规模较大, 离散二元变量数量较多。针对此类大规模组合优化数学模型<sup>[22-23]</sup>, 若采用动态规划等算法求解, 虽然求得方案的运行能耗较低, 但计算效率会极大下降, 不能满足实际生产要求。

蚁群算法作为一种群体智能算法, 具有自组织、正反馈等特点, 求解此类大规模组合优化问题, 具有较高的求解效率, 且所求结果最优性较强<sup>[24]</sup>。但是由于求解初始过程中各路径信息素较少, 求解速度较慢, 因此蚁群算法对初始解依赖性较强。为此, 将模拟退火思想引入蚁群算法求解过程中。首先利用模拟退火算法生成该问题的较优解, 然后将其作为蚁群算法初始解进行迭代求解。当所有人工蚂蚁完成一次遍历生成可行解后, 为了改善所求得可行解质量, 避免陷入局部最优解, 对蚁群算法生成的可行解进行模拟退火操作, 即按照一定邻域函数在原有可行解附近生成一组新的可

行解, 并利用模拟退火思想判断是否接受<sup>[25-26]</sup>。

### 2.1 适应度函数

蚁群算法适应度函数为判断蚂蚁所在位置优劣程度的唯一标准, 因此在很大程度上决定了算法收敛速度以及最优解寻找方向。该模型以原油顺序输送管道全线输油泵和加热炉运行能耗最低为目标函数, 为了满足算法适应度函数必须为最大化函数的要求, 需要对模型原有目标函数进行转化。此外, 还需要加入不满足压力、温度等运行参数上下限约束条件时的惩罚函数。适应度函数  $Y$  的表达式为:

$$Y = A - F + (B_N - 1)M \quad (26)$$

式中:  $A$  为常数, 求解过程中设置不同值以确保  $B_N = 1$  时,  $Y$  处于合适数量级;  $F$  为管道全线运行成本, 元;  $B_N$  为可行解是否满足模型约束条件的二元变量, 若该组可行解满足所有约束条件, 则  $B_N = 1$ , 若有任一约束不满足, 则  $B_N = 0$ ;  $M$  为极大值。

### 2.2 问题转化

蚁群算法通过模拟自然界中蚂蚁寻找食物位置过程中的群体行为来求解数学模型最优解, 因此利用蚁群算法确定鄯兰管道最优运行方案可以对应寻找食物位置的过程。设  $n$  维空间内各维代表管道各个站场, 每维长度代表该站场所有开泵方案或开炉方案总数量。设定  $n$  维空间内每个位置代表管道全线一整套开泵及开炉方案, 将此套运行方案代入适应度函数, 得到该位置食物浓度值, 并以此为依据判断该位置的优劣程度。之后通过人工蚂蚁逐步寻优从而最终得到食物浓度值最高的位置, 即该管道的最优运行方案。

利用模拟退火算法为蚁群算法生成初始解, 首先设置算法基本求解参数, 包括初始温度值  $T_{E0}$ 、温度衰减方程  $f(T_{Em})$ 、每个温度值下的迭代次数  $N_T$  以及迭代停止条件  $S_T$ 。某温度  $T_{Em}$  下, 在上一温度所生成可行解位置附近按照一定邻域函数生成新的管道运行方案, 并代入适应度函数计算。若新运行方案优于原运行方案, 则以此新运行方案替代原运行方案。反之, 则在  $0 \sim 1$  范围内随机生成一个数值, 如果该值小于  $\exp(-\Delta F/T_{Em})$ , 则以新运行方案替代原方案; 如果该值大于  $\exp(-\Delta F/T_{Em})$ , 则保留原运行方案,  $\Delta F$  为新运行方案与原运行方案适应度之差绝对值。逐次迭代直到该温度下的最大迭代次数或满足迭代终止条件, 则结束本温度下的循环计算。之后按照一定方式降低温度, 即  $T_{Em+1} = f(T_{Em})$  进行下一次循环计算。

2.3 求解步骤

采用模拟退火-蚁群算法求解原油顺序输送管道全线最优开泵、开炉方案的具体步骤: ①采用模拟退火算法为所建数学模型生成较优的可行解, 代入适应度函数计算该位置的食物浓度值, 即该运行方案的运行能耗, 并在该位置设置较多信息素; ②设置蚁群算法求解基本参数, 包括蚁群数量、移动时步总数、信息素挥发系数及搜索范围等, 并将人工蚂蚁设置到模拟退火算法求得初始解对应位置; ③蚂蚁开始移动, 根据状态转移概率方程计算各蚂蚁下一步移到附近位置的概率, 完成移动之后, 根据移动前后位置食物浓度值判断其是否移动; ④每个蚂蚁由位置  $x$  转移至位置  $y$  都会释放一定量信息素, 所有蚂蚁完成一次转移之后, 按照信息素计算公式更新各位置信息素值; ⑤对所有蚂蚁完成一次移动后所产生的全线运行方案进行模拟退火操作; ⑥蚂蚁完成所有移动之后, 所找到食物浓度值最高的位置即为模型最优解, 即管道全线最优开泵、开炉方案(图 1)。

3 算例分析

鄯兰原油管道为西部原油管道主干线, 通过首站鄯善站与库鄯线、乌鄯线以及吐哈支线连接, 承担北疆油、塔里油、哈国油及吐哈油的外输任务<sup>[1,10]</sup>, 节能潜力巨大。管道全长 1 562 km, 设有 11 座站场, 包含首站 1 座、中间分输泵站 9 座、分输末站 1 座(表 1、表 2)。目前采用常温顺序输送运行工艺, 顺序输送 LC 型混合原油(简称 LC 原油)、H 型混合原油(简称 H 原油)及 TLM 原油。其中 H 原油在玉门中间站场全部下载并输送至玉门炼厂, 其他两种原油则全部分输至兰州末站并输送至兰州炼厂。首站与中间分输泵站各配备 5 台(4 用 1 备)ZLM IP 530/06 型输油泵(图 2)。

将以上基础数据代入所建原油顺序输送管道运行优化模型, 以 2017 年 1 月鄯兰原油管道批次输油计划为例进行计算, 运行时长 678.5 h, 划分为 114 个时步。由于鄯兰原油管道采用常温顺序输送工艺, 故无需考虑热站约束, 所有站场的加热炉均不开启, 各站进出站温度相等。采用模拟退火-蚁群算法, 运用 Matlab

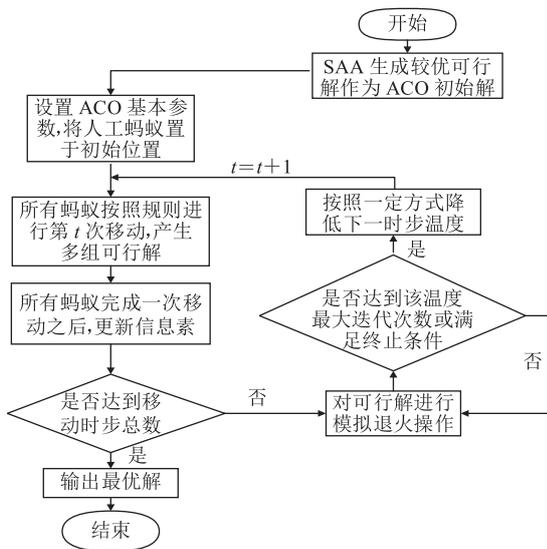


图 1 模拟退火-蚁群算法求解步骤框图

表 1 鄯兰原油管道各管段参数

站场名称	高程/m	站间距/km	管道规格
鄯善	798	0	$\phi 813 \times 7.1$
四堡	705	240	$\phi 813 \times 7.1$
翠玲	960	128	$\phi 813 \times 7.1$
河西	1 535	66	$\phi 813 \times 7.1$
安西	1 360	218	$\phi 813 \times 7.1$
玉门	1 734	104	$\phi 813 \times 7.1$
张掖	1 456.5	285	$\phi 813 \times 7.1$
山丹	1 921	81	$\phi 813 \times 7.1$
西靖	1 783	219	$\phi 813 \times 7.1$
新堡	2 277	72	$\phi 711 \times 7.1$
兰州	1 544	149	$\phi 711 \times 7.1$

表 2 鄯兰原油管道沿线各月平均地温及各段土壤导热系数

管段	土壤导热系数 $/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	距地表以下 1.6 m 处各月平均地温/ $^\circ C$											
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
鄯善—四堡	1.18	8.0	7.7	7.8	12.1	16.4	19.0	22.7	24.0	23.7	22.1	17.0	12.6
四堡—翠玲	1.53	8.4	7.4	7.5	12.3	15.5	16.0	19.4	21.0	20.4	17.8	17.2	13.1
翠玲—河西	1.37	6.3	5.3	5.3	10.8	14.3	13.0	15.7	17.4	17.1	15.0	12.1	9.4
河西—安西	1.24	7.7	6.3	6.3	8.4	12.1	13.0	15.7	17.4	17.1	15.0	13.0	10.6
安西—玉门	1.40	7.1	5.7	5.7	8.2	10.8	13.0	15.7	17.4	17.1	15.0	13.6	10.7
玉门—张掖	1.84	5.7	4.4	4.5	8.0	11.1	13.0	15.7	17.4	17.1	15.0	12.0	9.0
张掖—山丹	2.39	5.2	4.0	4.1	8.2	12.1	13.4	16.1	17.5	17.3	15.2	10.6	7.3
山丹—西靖	2.28	5.0	3.5	3.6	9.0	12.2	12.3	14.8	16.1	16.0	13.9	11.4	7.7
西靖—新堡	2.02	4.5	3.0	3.1	10.0	13.1	13.9	16.2	17.7	17.5	15.7	11.8	7.8
新堡—兰州	2.16	7.6	6.2	6.3	10.0	13.1	13.9	16.2	17.7	17.5	15.7	14.1	11.0

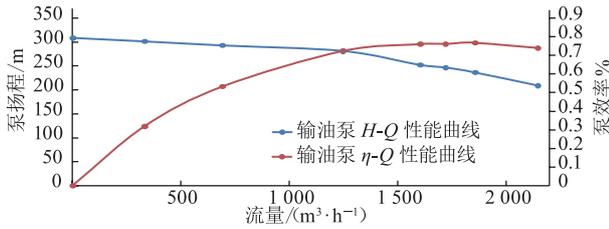


图2 鄯兰原油管道各站输油泵性能曲线

R2014b 软件求解。模拟退火算法:初始温度为 100 ℃, 每个温度值下的迭代次数为 50 次, 温度衰减方程采用目前最常用的线性衰减方式。蚁群算法:蚁群数量为 300 只, 移动时步总数为 200, 信息素挥发系数为 0.9。求解总耗时 374.53 s, 选取部分时刻鄯兰原油管道全线各站场开泵方案(表 3)进行分析。

表3 部分时刻鄯兰原油管道全线各站场开泵方案

站场	不同时刻泵运行台数/台															
	0	30.5 h	78.5 h	121 h	168 h	217 h	246.5 h	293.5 h	336 h	385 h	437.5 h	480 h	528 h	582.5 h	629.5 h	672 h
鄯善	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
四堡	2	3	2	2	1	1	1	1	3	1	1	2	3	1	1	2
翠岭	1	1	0	1	2	1	3	1	0	1	1	1	1	2	3	1
河西	0	0	2	0	1	2	0	1	1	2	3	0	1	1	1	0
安西	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	2
玉门	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
张掖	0	1	0	1	0	2	2	2	1	3	1	0	0	1	1	2
山丹	0	2	1	1	0	1	1	1	2	0	1	0	0	1	0	1
西靖	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	2	0	0	1	2	1
新堡	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0

根据求解结果, 各站进出站压力与温度均能满足约束条件要求。以鄯善首站与玉门分输站为例进行分析(图 3):鄯善首站出站压力、玉门分输站的进站与出站压力均能满足水力约束条件要求。

时间的变化曲线(图 4), 由于玉门等中间站场均不开启加热炉, 并忽略过泵温升因素影响, 因此玉门站进出站温度近似相等。由于所输送各批次原油凝点均在 -5~-20 ℃之间, 各站场进出站温度均在所输原油凝点以上 3~5 ℃, 因此满足热力约束条件要求。

根据鄯善首站出站温度和玉门站进出站温度随

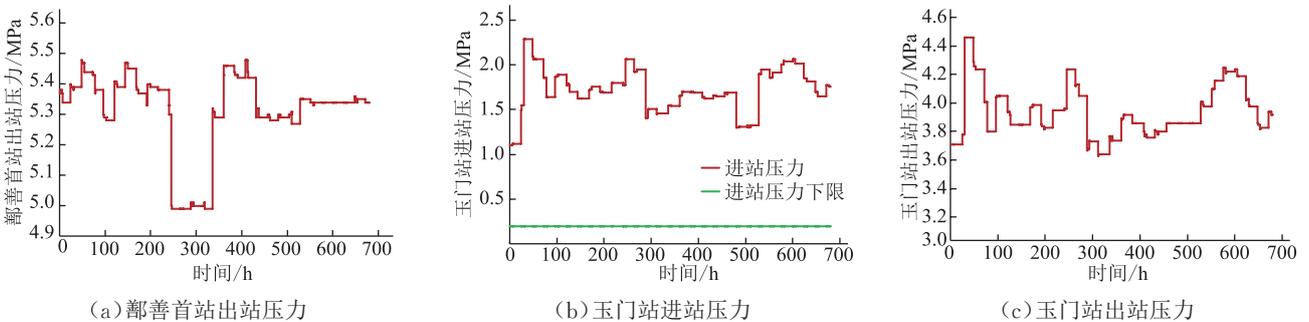


图3 鄯善首站出站压力和玉门站进出站压力随时间的变化曲线

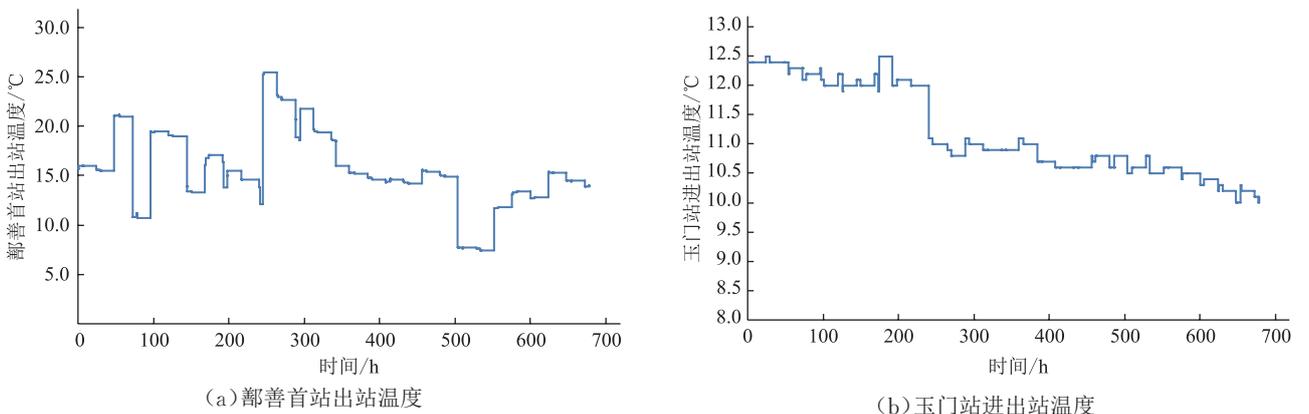


图4 鄯善首站出站温度和玉门站进出站温度随时间的变化曲线

由于鄯兰原油管道采用常温输送运行工艺,加热炉全部关闭,因此,全月全线运行能耗即各泵站输油泵运行耗电量。采用提出的优化方式进行求解,各泵站总耗电量为  $9.621 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,相比现场运行能耗约降低了 10.6%;若采用文献 [7] 的优化方式求解,能耗只能降低约 5.5%;若采用文献 [5] 的优化方式求解,与该优化方式求得的运行方案能耗基本相同,但求解时间大幅度延长。

## 4 结论

(1) 针对原油管道常温或加热顺序输送运行工艺,将各时步下管道水热力约束、泵站、热站运行工艺约束等多类约束条件考虑在内,并严格区分顺序输送过程中各类原油物性差异,以管道全线运行能耗最低为目标函数建立运行优化数学模型,模型的通用性较强。

(2) 采用模拟退火-蚁群算法对模型进行求解,具有较高的计算效率,且计算结果最优性较高,在一定程度上提高了管道运行的经济性,满足现场工艺要求。

### 参考文献:

- [1] 王小龙,张劲军,宇波,等.西部原油管道多品种原油安全高效输送技术[J].油气储运,2014,33(12):1263-1271.  
WANG X L, ZHANG J J, YU B, et al. Technologies for safe and efficient transportation of multiple crudes through the China West Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(12): 1263-1271.
- [2] OLIVEIRA F, NUNES P M, BLAJBERG R, et al. A framework for crude oil scheduling in an integrated terminal-refinery system under supply uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 252(2): 635-645.
- [3] 陈由旺,左丽丽,林冉,等.原油管道能耗测算软件的开发与应用[J].油气储运,2013,32(5):499-503.  
CHEN Y W, ZUO L L, LIN R, et al. Development and application of energy consumption estimate software for crude oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(5): 499-503.
- [4] 李晋,马英利,张静,等.原油管道安全优化运行研究[J].辽宁石油化学大学学报,2009,29(1):48-49,53.  
LI J, MA Y L, ZHANG J, et al. Safe and optimal running of crude oil pipeline[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2009, 29(1): 48-49, 53.
- [5] 张维志,于清澄,张迪.等温输油管道运行方案优化方法及其应用[J].油气储运,2012,31(1):65-67,86.  
ZHANG W Z, YU Q C, ZHANG D. Running scheme optimization for oil pipeline operated at constant temperature[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(1): 65-67, 86.
- [6] 徐源,艾慕阳,赵旭,等.基于增量动态规划法的热油管道优化运行研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2010,32(5):167-172,198.  
XU Y, AI M Y, ZHAO X, et al. Research on the optimal operation of hot oil pipeline based on incremental dynamic programming[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(5): 167-172, 198.
- [7] 宋红波,杨毅.原油管道运行优化技术研究[J].西南石油大学学报,2007,29(增刊1):70-72.  
SONG H B, YANG Y. Optimizing operation of oil pipeline[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(S1): 70-72.
- [8] 杨毅.加剂原油管道运行参数优化研究[J].油气储运,2007,26(11):35-37.  
YANG Y. A study on optimizing operation parameters of oil pipelines with additives[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(11): 35-37.
- [9] 左丽丽,曾春雷,姜勇,等.长呼原油管道月度节能优化方案[J].油气储运,2015,34(5):515-518.  
ZUO L L, ZENG C L, JIANG Y, et al. Program for optimization of monthly energy preservation in the Changqing-Hohehot crude oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(5): 515-518.
- [10] 曾春雷,吴长春,姜勇,等.鄯兰原油管道月最优生产能耗预测[J].油气储运,2014,33(4):437-442.  
ZENG C L, WU C C, JIANG Y, et al. Prediction on the monthly minimum energy consumption for Shanshan-Lanzhou crude oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(4): 437-442.
- [11] 吴长春,严大凡.热油管道稳态运行的两级递阶优化模型[J].石油学报,1989,10(3):112-120.  
WU C C, YAN D F. A two-level hierarchical model for optimizing steady operation of hot oil pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 1989, 10(3): 112-120.

- [12] 吴长春, 严大凡. 热油管道优化运行软件包 HOPOPT 简介[J]. 油气储运, 1992, 11(2): 5-10.  
WU C C, YAN D F. Introduction of HOPOPT software pack for the optimization of thermal oil pipeline operation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1992, 11(2): 5-10.
- [13] ZHOU M, ZHANG Y, JIN S. Dynamic optimization of heated oil pipeline operation using PSO-DE algorithm[J]. Measurement, 2015, 59(1): 344-351.
- [14] LIU E, LI C, YANG L, et al. Research on the optimal energy consumption of oil pipeline[J]. Journal of Environmental Biology, 2015, 36(4): 703-711.
- [15] KARUPPIAH R, FURMAN K C, GROSSMANN I E. Global optimization for scheduling refinery crude oil operations[J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(11): 2745-2766.
- [16] WANG Y, LU J. Optimization of China crude oil transportation network with genetic ant colony algorithm[J]. Information, 2015, 6(3): 467-480.
- [17] 于美玉. 多品种原油管网运输调度问题研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011: 27-31.  
YU M Y. Study on transportation scheduling of pipeline network transporting multiple crude oils[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2011: 27-31.
- [18] 蔡丽秀. 西部原油管道优化运行研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2008: 18-20.  
CAI L X. Operation optimization of the West Crude Oil Pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2008: 18-20.
- [19] 王凯, 张劲军, 宇波. 原油管道差温顺序输送水力-热力耦合计算模型[J]. 油气储运, 2013, 32(2): 143-151.  
WANG K, ZHANG J J, YU B. Hydraulic-thermal coupled model of different temperature batch transportation of crude oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(2): 143-151.
- [20] MANNING W, LIND G. Data analysis and discussion of product interface size on a batched crude oil pipeline[J]. British Journal of Surgery, 2013, 32(2): 143-151.
- [21] HOSHYARGAR V, ASHRAFIZADEH S N. Optimization of flow parameters of heavy crude oil-in-water emulsions through pipelines[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(4): 1600-1611.
- [22] 张劲军, 张文轲, 宇波. 基于 POD 的埋地热油管道停输再启动模拟高效算法[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 167-170.  
ZHANG J J, ZHANG W K, YU B. An efficient algorithm of the proper orthogonal decomposition for the restart computation of buried heated crude pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 167-170.
- [23] ZHANG J, WANG Y, WANG X, et al. Study on optimizing operation of preheating commissioning for waxy crude oil pipelines[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6(2): 1-14.
- [24] TIWARI P K, VIDYARTHI D P. Improved auto control ant colony optimization using lazy ant approach for grid scheduling problem[J]. Future Generation Computer Systems, 2016, 60(5): 78-89.
- [25] 秦军, 董倩倩, 郝天曙. 基于蚁群模拟退火的云任务调度算法改进[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(3): 117-121.  
QIN J, DONG Q Q, HAO T S. Improvement of algorithm for cloud task scheduling based on ant colony optimization and simulated annealing[J]. Computer Technology and Development, 2017, 27(3): 117-121.
- [26] 王迎, 张立毅, 费腾, 等. 求解 TSP 的带混沌扰动的模拟退火蚁群算法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(4): 1067-1070.  
WANG Y, ZHANG L Y, FEI T, et al. Chaotic-simulated annealing ant colony algorithm for TSP[J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(4): 1067-1070.  
(收稿日期: 2017-06-04; 修回日期: 2017-07-23; 编辑: 刘朝阳)

**作者简介:** 吕梦芸, 女, 1993 年生, 在读硕士生, 2015 年毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事含蜡原油流变特性与管输工艺技术的相关研究。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 102249。电话: 18811153611, Email: lmy19930310@126.com