

# 原油管道顺序输送掺混优化研究

刘斌<sup>1</sup>, 谭若琪<sup>2</sup>, 韩荣甫<sup>1</sup>, 李冰玉<sup>1</sup>, 林文华<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国石油华北油田公司油气工艺研究院, 河北 沧州

<sup>2</sup>长庆工程设计有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年5月19日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年6月26日

## 摘要

**目的意义:** 本研究针对原油管道顺序输送中的掺混优化问题展开研究, 旨在降低管道运行的能耗费用和碳排放量, 促进实现碳达峰和碳中和目标。**方法过程:** 通过建立原油管道顺序输送掺混优化模型, 综合考虑管道黏度准入性、输油泵性能及炼厂接受要求, 计算混合原油的凝点和黏度, 并利用线性模型计算其他物性。优化模型以各批次加权黏度值最低为目标, 通过遗传算法优化求解多品种原油掺混成多批次混合原油的掺混比例, 提升泵效能, 降低能耗。**结果现象:** 实例应用结果表明模型对不同场景和约束条件具有较强的适应性, 可以有效求解复杂的掺混优化问题, 降低输送能耗费用。**结论建议:** 研究结果表明, 通过合理的掺混, 可以显著提升管道运行效率, 降低能耗和碳排放, 为原油管道安全、经济、高效运行提供了有力支持。

## 关键词

原油管道, 掺混输送, 顺序输送, 低能耗

# Optimization of Blending and Batch Transportation Process of Crude Oil Pipeline

Bin Liu<sup>1</sup>, Ruoqi Tan<sup>2</sup>, Rongfu Han<sup>1</sup>, Bingyu Li<sup>1</sup>, Wenhua Lin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Oil & Gas Technology Research Institute of Huabei Oilfield Company, Cangzhou Hebei

<sup>2</sup>Changqing Engineering Design Co. Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: May 19<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 16<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 26<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This study focuses on the optimization of blending in sequential transportation of crude oil pipelines, aiming to reduce the energy consumption costs and carbon emissions of pipeline operations, thus promoting the achievement of carbon peak and carbon neutrality goals. By establishing an optimiza-

**文章引用:** 刘斌, 谭若琪, 韩荣甫, 李冰玉, 林文华. 原油管道顺序输送掺混优化研究[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(2): 262-274. DOI: 10.12677/jogt.2025.472030

tion model for blending in sequential transportation of crude oil pipelines, the study comprehensively considers the viscosity admissibility of the pipeline, the performance of the oil pump, and the refinery acceptance requirements. It calculates the pour point and viscosity of the blended crude oil and uses a linear model to compute other physical properties. The optimization model targets the minimum weighted viscosity value for each batch, employing a genetic algorithm to optimize the blending ratios of multiple types of crude oil into multiple batches of blended crude oil, thereby enhancing pump efficiency and reducing energy consumption. The application of the model in real-world scenarios demonstrates its strong adaptability to different conditions and constraints, effectively solving complex blending optimization problems and reducing transportation energy costs. The results indicate that reasonable blending can significantly improve pipeline operation efficiency, reduce energy consumption and carbon emissions, and provide strong support for the safe, economical, and efficient operation of crude oil pipelines.

## Keywords

Crude Oil Pipeline, Blended Transportation, Sequential Transportation, Low Energy Consumption

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 研究背景

我国是世界第二大石油消费国和第一大石油进口国[1] REF\_Ref201760917\|h [2]。2023年,国内油气生产企业加大开采力度,原油产量稳定在2亿吨,原油消费量增长至7.56亿吨[3],创历史新高,石油市场强劲复苏[4]。作为新开发产能,巴彦油田主力区块兴华1区块建设1座95×104 t/a联合站,接收兴华1区块、临华1区块及吉兰泰来油,并处理成合格油转运外输。吉兰泰联合站来油作为保证管线输量的调节手段,优先在巴彦联合站卸油,与巴彦油田产油一同通过管线输送至原油转运站。试验分析表明巴彦油田兴华、临华主力区块原油凝点在46℃~50℃,凝点较高,纳林湖区块原油凝点居中,吉兰泰凝点较低。吉兰泰油田原油属于高含硫原油,两个油田原油含蜡和胶质、沥青质均较高。巴彦油田原油在0.5%含水率时的原油含盐量均超过300 mg/L。不同原油进入管道外输,管输原油的种类增多、物性波动加大。掺混输送和顺序输送能够在满足炼厂要求的情况下降低能耗。

国外如委内瑞拉、俄罗斯、加拿大等[5]-[7]国家已采用掺混输送方式。国内多条管道也通过实验、仿真软件和运行方案优化进行掺混输送研究,相关研究方法和成果见表1。

**Table 1.** Study and analysis on optimization of some blended crude oil pipelines in China

**表 1.** 国内部分掺混输送原油管道优化研究分析

序号	管道	掺混原油	掺混优化研究方法	掺混优化研究成果
1	西部管网 [8]-[13]	塔里木原油	(1) 实验测试掺混原油物性;	(1) 不同掺混比例原油物性;
		吐哈原油	(2) 停输再启动分析;	(2) 最大停输再启动时间;
		北疆原油	(3) 设备适应性分析;	(3) 离心泵最优工作区域;
		进口哈油等	(4) SPS 软件模拟不同运行工况。	(4) 不同流量下推荐运行方案。
2	兰成线 [14]	长庆原油	(1) 实验测试掺混原油物性;	(1) 不同掺混比例原油物性;
		鄯兰混油	(2) 不同油温和掺混比例下油样胶凝结构强度分析;	(2) 停输再启动时间建议;
			(3) SPS 软件模拟不同运行工况。	(3) 凝点控制的全年掺混方案。

续表

3	津华线 [15]	冀东原油 进口俄油	(1) 罐内、管道掺混试验; (2) 停输再启动分析。	(1) 掺混输送边界条件; (2) 全年掺混输送方案。
4	日东线 [16] [17]	委内瑞拉稠油 中东原油	(1) 实验测试掺混原油物性; (2) 在线黏度计监测; (3) 管道历史异常工况分析。	(1) 出站温度控制掺混原油最大黏度; (2) 定期清管。 (1) 一种掺混比例下的最佳掺混温度;
5	中洛线 [18] [19]	中原原油 普托原油	(1) 实验测试掺混原油物性; (2) 掺混原油物性计算模型优选; (3) 沉降实验; (4) 枚举混输方案并分析。	(2) 推荐适用的掺混原油物性计算模型; (3) 最大停输再启动时间; (4) 全年掺混输送方案。
6	铁锦线 [20]	庆吉原油 进口俄油	(1) 低输量工艺分析; (2) 加热炉能力分析。	(1) 掺混输送工艺方案; (2) 站场改造建议。

目前关于原油掺混优化的研究多集中于炼厂混合原油质量约束或经济性目标，主要优化单个输送或加工批次的掺混比例。尚缺乏综合考虑管道输送安全性、经济性及炼厂质量要求的多批次原油掺混优化研究。随着油田推进，不同区块的原油进入管道，原油掺混顺序输送方式将更广泛应用。如何在保持原油物性稳定并满足炼厂质量要求的前提下进行掺混尤为重要。本研究分析了原油管道准入指标，研究了顺序输送掺混优化问题，建立了考虑管道任务、准入指标和炼厂要求的掺混优化模型，并通过实际算例验证分析。

## 2. 原油管道顺序输送掺混优化研究

### 2.1. 原油管道黏度准入判定指标

当管道输送原油的黏度增大时，由于黏滞摩擦作用，离心泵的性能下降，管道压降增大，原油的流态可能发生改变，为延长离心泵使用寿命、保证压降不超过最大允许压降，考虑管道输送能力及现有工艺条件，计算不同流量下管道的最大允许黏度、分析输送不同黏度下离心泵高效工作区。

明确原油管道对输送原油黏度的要求，以管道工艺条件作为前提，研究管道不同流量下输送各种原油的物性边界，确保管道输送原油的安全性。管道黏度准入判定指标计算流程见图 1。

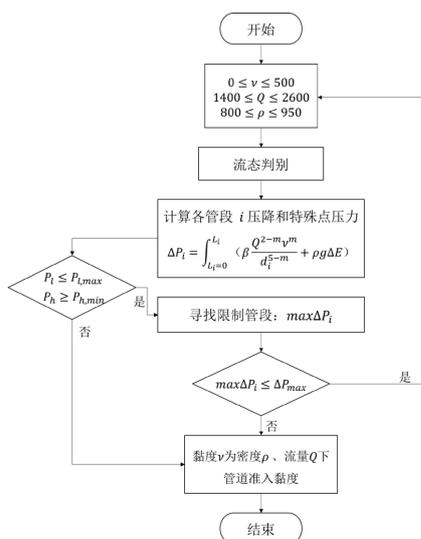


Figure 1. Pipeline viscosity access evaluation index calculation process  
图 1. 管道黏度准入判定指标计算流程

通过黏度准入判定指标计算方法计算某管道的黏度准入判定指标。该管道在不同流量、黏度下站间压降如图 2 所示。在流量 1400 m<sup>3</sup>/h 下, 原油黏度小于 150 mPa·s 时流体处于过渡流态, 压降随黏度增大而增大; 当原油黏度增大到 150~200 mPa·s 时, 流体从过渡流态转变到水力光滑区, 压降随黏度增大而减小; 而当原油黏度增大到 200 mPa·s 以上时, 流态转变到混合摩擦区, 黏滞摩擦作用较水力光滑区增大, 故压降随黏度增大而增大。随着流量增大, 黏度相同时压降增大, 流态转变黏度点后移。

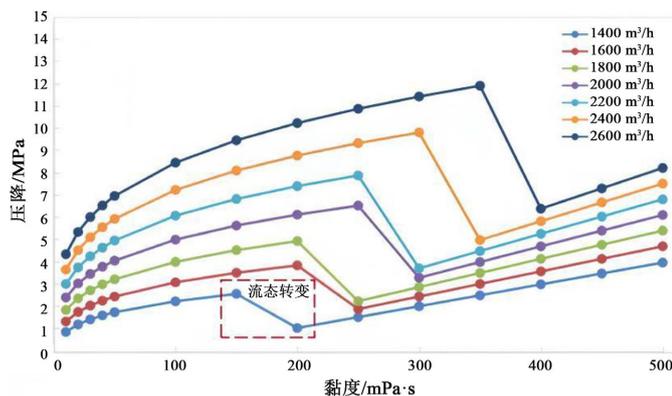


Figure 2. Interstation pressure drop of a certain pipeline under different viscosities  
图 2. 某管道不同黏度下站间压降

## 2.2. 离心泵性能修正

本文采用曹广军[21]提出的美国水力协会的性能换算图的数学表达式进行离心泵性能分析, 分析管道沿线站场离心泵性能, 计算离心泵输送清水、10 mPa·s、20 mPa·s、30 mPa·s、40 mPa·s、50 mPa·s、100 mPa·s、150 mPa·s 原油时的效率特性, 效率特性曲线如图 3 所示, 拟合得到不同黏度下离心泵效率特性曲线数学表达式系数如图 4 所示。可以看出离心泵在输送黏度较大的原油时效率更低, 输送所需能耗费用也就更高, 因此降低原油的黏度一定程度上也可以实现原油管道节能降耗运行, 因此在后文建立管道顺序输送原油掺混优化模型时以各批次混合原油加权黏度值最低作为目标函数。

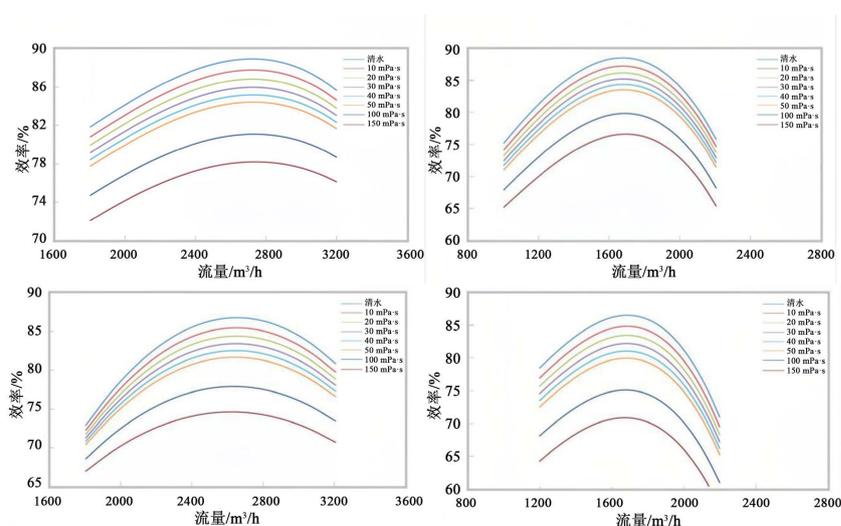
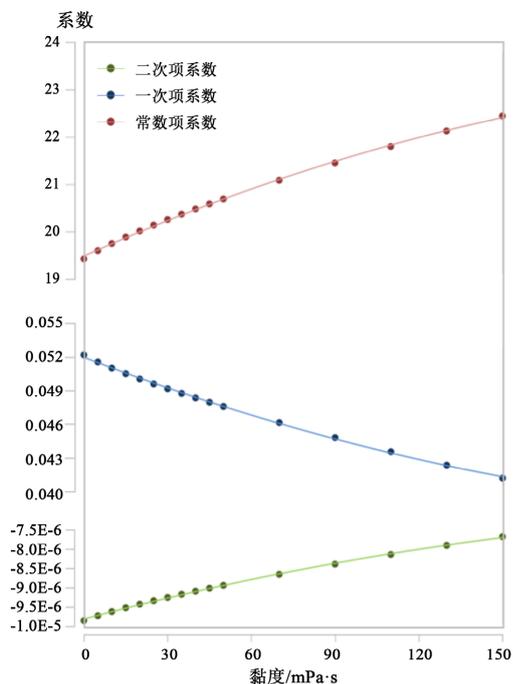


Figure 3. Efficiency characteristic curve of centrifugal pump  
图 3. 离心泵效率特性曲线



**Figure 4.** Mathematical expression coefficient of efficiency characteristic curve of centrifugal pump with different viscosity  
**图 4.** 不同黏度下离心泵效率特性曲线数学表达式系数

### 2.3. 混合原油物性计算模型

如表 2 所示, 根据已知的原油组分物性采用混合原油凝点、黏度计算模型即可得出不同掺混比例下的混合原油物性, 从而节省大量实验工作。本章采用刘天佑模型[22]、Cragoe 修正模型[23]计算混合原油凝点及黏度。刘天佑模型和 Cragoe 修正模型适用多种配比、组分物性差异较大的多组分混合原油凝点、黏度计算, 且不需要混合原油中每两组分等配比黏度的实验数据。混合原油的密度、含硫量及酸值均可采用线性模型计算[24]。

**Table 2.** Physical property calculation model of mixed crude oil  
**表 2.** 混合原油物性计算模型

模型	计算式
凝点计算模型 (刘天佑模型)	$T_s = \sum_{i=1}^n (X_i T_i) + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n (B_{jk} C_{jk} X_j X_k)$ $B_{jk} = 1 - \frac{X_j}{2} + \frac{X_k}{2}$ $C_{jk} = 2(2T_{jk} - T_j - T_k)$
黏度计算模型 (Cragoe 修正模型)	$\mu_s = 5 \times 10^{-4} \exp(1000 \ln 20 / F_m)$ $F_s = \sum_{i=1}^n X_i F_i + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n C_{jk} X_j X_k$ $F_i = (1000 \ln 20) / [\ln \mu_i - \ln (5 \times 10^{-4})]$ $C_{jk} = 0.0302(F_k + F_j) - 16.2404$

续表

密度、含硫量及酸值计算模型

$$\rho_s = \sum_{i=1}^n (X_i \rho_i)$$

$$F_s = \sum_{i=1}^n (X_i F_i)$$

$$Z_s = \sum_{i=1}^n (X_i Z_i)$$

$X_i$  为第  $i$  种组分油体积比,  $X_j$  为高凝点/黏度值原油体积比,  $X_k$  为低凝点/黏度值原油体积比;

$T_i$ 、 $\mu_i$ 、 $\rho_i$ 、 $F_i$ 、 $Z_i$  为第  $i$  种组分油的凝点、黏度、密度、含硫量和酸值;  $T_j$  为高凝点值原油的凝点,  $T_k$  为低凝点值原油的凝点;  $\mu_j$  为高黏度值原油的黏度,  $\mu_k$  为低黏度值原油的黏度。

### 3. 输送周期内原油掺混优化模型建立

已知管道计划输量下的准入条件计划输送的批次数、各批次量要求、各原油基本物性和计划外输量, 优化输送周期各批次的原油掺混方案, 降低计划输送周期内各批次原油加权黏度, 提升离心泵效能以减少能耗, 输送周期内掺混优化模型流程如图 5。

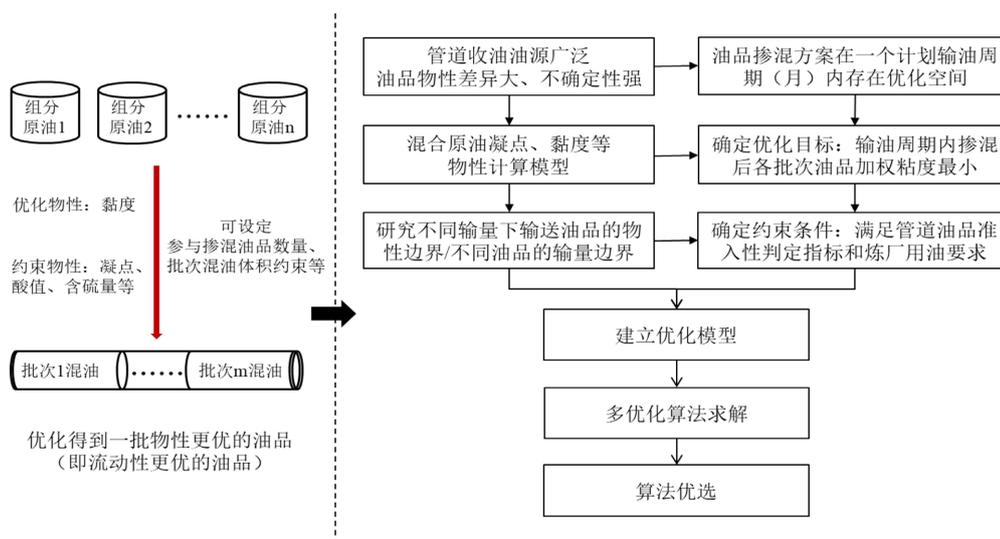


Figure 5. The blending optimization model flow during the transport cycle

图 5. 输送周期内掺混优化模型流程

#### 3.1. 目标函数

建立输送周期内原油掺混优化模型, 以  $Y = \{1, 2, \dots, y_{\max}\}$  表示管道计划输送周期内原油收油种类集合, 周期内总收油量为  $Y_z$ , 以  $S = \{1, 2, \dots, s_{\max}\}$  表示周期内输送混合原油批次种类集合, 各混合原油批次输量为  $Q_s$ 。模型以周期内各批次混合原油加权黏度值为掺混优化评价指标, 目标函数见式(1):

$$\min \mu = \sum_s \omega_s \mu_s \quad (1)$$

式中,  $\mu$  为计划输送周期内各批次混合原油加权黏度值,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\omega_s$  为批次  $s$  混合原油黏度对目标函数的权重,  $\omega_s = Q_s / Y_z$ ;  $\mu_s$  为批次  $s$  混合原油的黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $Q_s$  为批次  $s$  混合原油输量,  $\text{m}^3$ ;  $Y_z$  为计划输送周期内收油(计划输送)总量,  $\text{m}^3$ 。

### 3.2. 约束条件

管道输送计划周期内收油量和收油种类已知, 则顺序输送掺混优化模型的主要约束条件为管输原油的输量约束、各批次混合原油可掺混原油种类约束、原油准入管道的物性限制和炼厂对接收原油的物性约束。

#### 3.2.1. 外输任务约束

各批次混合原油掺混总体积等于计划周期内各原油计划外输体积。

$$\sum_{s,y} Q_s x_{y,s} = \sum_y Y_s = Y_z \quad (2)$$

$$\sum_{s,y} x_{y,s} = 1 \quad (3)$$

式中,  $Q_s$  为批次  $s$  混合原油输量,  $\text{m}^3$ ;  $x_{y,s}$  为批次  $s$  混合原油中原油  $y$  的掺混比例;  $Y_s$  为计划周期内原油  $y$  收油(计划输送)体积,  $\text{m}^3$ 。

#### 3.2.2. 管道准入约束

##### (1) 输量约束

各批次混合原油掺混体积需满足批次混合原油输送体积上、下限要求。

$$Q_{s,\min} \leq Q_s \leq Q_{s,\max} \quad (4)$$

$$0 \leq x_{y,s} \leq 1 \quad (5)$$

式中,  $Q_s$  为批次  $s$  混合原油输量,  $\text{m}^3$ ;  $Q_{s,\min}$  为批次  $s$  混合原油最小允许输量,  $\text{m}^3$ ;  $Q_{s,\max}$  为批次  $s$  混合原油最大允许输量,  $\text{m}^3$ ;  $x_{y,s}$  为批次  $s$  混合原油中原油  $y$  的掺混比例。

##### (2) 物性约束

混合原油凝点、黏度应满足管道准入判定指标要求, 以保证管道安全运行。混合原油凝点应低于管道埋深处最低地温  $3\sim 5^\circ\text{C}$ , 混合原油黏度须满足《输油管道工程设计规范》GB50253-2014 要求, 且满足正常输量范围内管线压力不超过管道允许最大压力。

$$T_s \leq T_{s,\text{in}} \quad (6)$$

$$\mu_s \leq \mu_{s,\text{in}} \quad (7)$$

式中,  $T_s$  为批次  $s$  混合原油凝点,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{s,\text{in}}$  为批次  $s$  混合原油最高准入凝点,  $^\circ\text{C}$ ;  $\mu_s$  为批次  $s$  混合原油黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_{s,\text{in}}$  为批次  $s$  混合原油最大准入黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

#### 3.2.3. 炼厂接收约束

##### (1) 掺混原油种类约束

某些炼厂收油需求不同, 可能不接受某种原油参与掺混的混合原油, 故考虑掺混原油种类约束。

##### (2) 接收原油性质约束

若来油含硫量、酸值较高, 下游炼厂设备无法处理来油, 且对管道、设备腐蚀严重。因此, 各批次混合原油含硫量、酸值需根据下游炼厂配备的常减压处理设备工作范围确定混合原油含硫量上限和酸值上限。

$$F_s \leq F_{l,\text{in}} \quad (8)$$

$$Z_s \leq Z_{l,\text{in}} \quad (9)$$

式中,  $F_s$  为批次  $s$  混合原油含硫量;  $F_{l,\text{in}}$  为炼厂  $l$  接收原油最大允许含硫量;  $Z_s$  为批次  $s$  混合原油酸值,

mgKOH/g;  $Z_{l,in}$  为炼厂  $l$  接收原油最大允许酸值, mgKOH/g。

### 3.3. 决策变量

模型的决策变量为输送周期内各批次混合原油中参与掺混的各原油掺混体积比, 数学描述如式(10)所示。

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1}, x_{2,1}, x_{3,1}, \dots, x_{y,1} \\ x_{1,2}, x_{2,2}, x_{3,2}, \dots, x_{y,2} \\ \vdots \\ x_{1,s}, x_{2,s}, x_{3,s}, \dots, x_{y,s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3.4. 模型求解

在所建的输送周期内原油掺混优化模型中, 各批次混合原油各原油的掺混体积为核心决策变量, 实际生产时批次混合原油数量、参与掺混原油种类较多, 所建模型规模较大, 需要考虑的约束和求解的变量较多, 且为多极值问题, 传统的优化算法求解效果较差, 故采用遗传算法求解。

遗传算法[25]是一种高效的全局随机寻优搜索算法, 受进化论启发, 模拟自然界生物的自然选择和遗传机制, 以“物竞天择, 适者生存”为原则, 将数学模型求解过程转化为生物繁衍进化过程中染色体基因的交叉、变异等操作以进化得到最优种群即最优解。遗传算法只考虑适应度函数的值, 适用于处理不易求得的复杂问题, 全局搜索能力强、鲁棒性强、适于处理复杂问题和并行处理, 遗传算法的计算流程如图6。

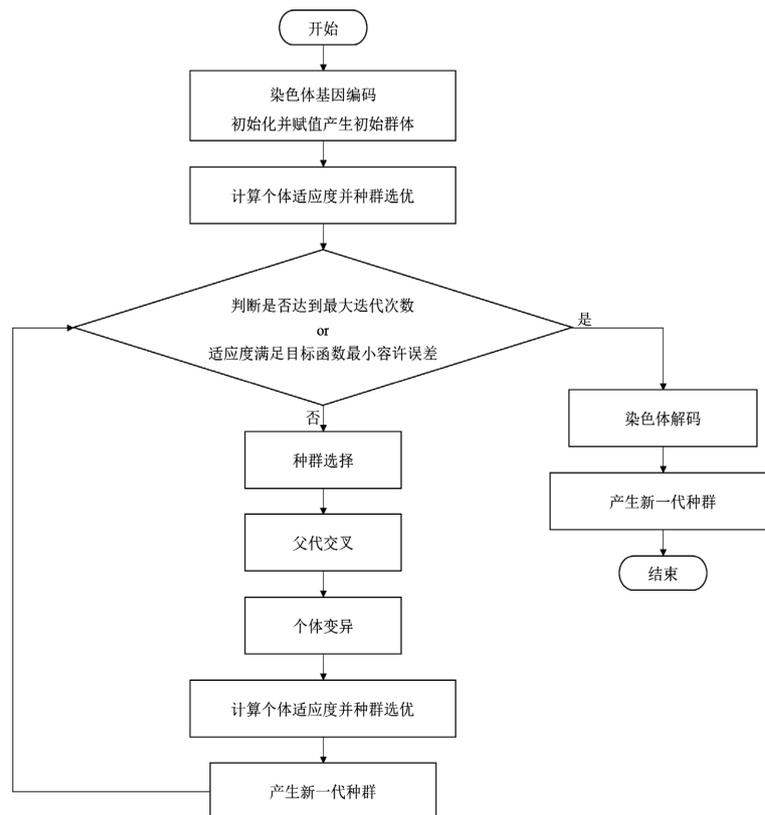


Figure 6. Genetic algorithm calculation flow chart

图6. 遗传算法计算流程图

## 4. 某管道掺混实例

### 4.1. 算例背景

管道计划外输原油计划、输送周期内计划输送流量和炼厂接收混合原油量如表 3 和表 4；管道掺混各原油基本物性见表 5；各炼厂装置接收原油质量要求见表 6，包括对含硫量、酸值的质量要求。

**Table 3.** The crude oil transportation plan outside the pipeline plan and the planned transportation flow during the transportation cycle

**表 3.** 管道计划外输原油计划和输送周期内计划输送流量

原油种类	A 油	B 油	C 油	D 油	总
输量(万吨)	45	60	10	15	130
输送周期内计划输送流量(m <sup>3</sup> /h)				2200	

**Table 4.** Refinery receives blending plan

**表 4.** 炼厂接收混合原油计划

炼厂	甲炼厂 混合原油批次	乙炼厂 混合原油批次	丙炼厂 混合原油批次
炼厂接收混合原油计划(万吨)	80	33	17

**Table 5.** Basic physical properties of crude oil

**表 5.** 原油基本物性

原油种类	A 油	B 油	C 油	D 油
凝点(°C)	-10	-8	-7	12
20°C 密度(kg/m <sup>3</sup> )	870.1	822.2	822.2	853.2
黏度(mPa·s)	7.15	27.02	98.21	197.54
含硫量(%)	0.794	0.049	0.049	0.051
酸值(mgKOH/g)	0.041	0.024	0.027	0.015

**Table 6.** Refinery units receive quality requirements for oil products

**表 6.** 炼厂装置接收原油质量要求

炼厂设备	含硫量(%)	酸值(mgKOH/g)
低硫装置	0.2	0.04
含硫、含酸装置	0.83	1.84

为制定经济、合理的原油管道顺序输送掺混计划，设计了不同约束下 6 个场景，场景具体要求见表 7。

**Table 7.** Different scene design of receiving oil

**表 7.** 不同收油场景

场景序号	约束条件		
	炼厂接收混合原油种类约束	炼厂接收混合原油黏度约束	
场景 0 (实际)	丙炼厂禁止 B 原油、D 原油掺混	乙炼厂黏度 15 mPa·s 以下	丙炼厂黏度 10 mPa·s 以下
场景 1	无	无	无
场景 2	丙炼厂禁止 B 原油、D 原油掺混	无	无
场景 3	无	无	丙炼厂黏度 10 mPa·s 以下
场景 4	丙炼厂禁止 B 原油、D 原油掺混	无	丙炼厂黏度 10 mPa·s 以下

续表

场景 5	无	乙炼厂黏度 15 mPa·s 以下	丙炼厂黏度 10 mPa·s 以下
场景 6	丙炼厂禁止 B 原油、D 原油掺混	乙炼厂黏度 15 mPa·s 以下	丙炼厂黏度 10 mPa·s 以下

## 4.2. 算例分析

### (1) 实际掺混场景与优化掺混场景分析

对比实际掺混场景 0 和场景 6，可以发现黏度降低了 4.56%，这说明模型优化效果较好，而场景 0~场景 5 的黏度普遍低于场景 6，说明当炼厂收油条件放宽时，模型可以优化得到加权黏度更低的原油，详见图 7。

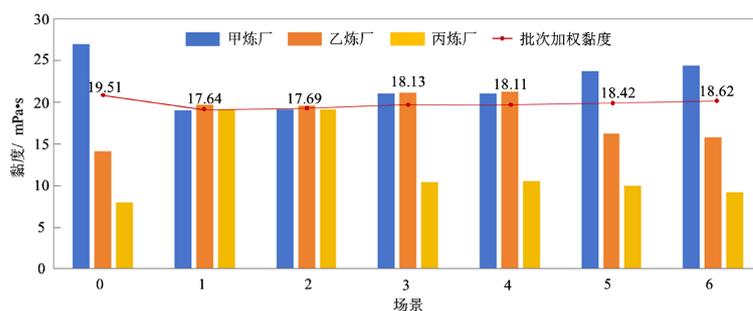


Figure 7. Weighted blended oil viscosity values of each refinery batch under different scenarios  
图 7. 不同场景下各炼厂批次加权混合原油黏度值

Table 8. Mixed oil ratio of each refinery batch under different scenarios

表 8. 不同场景下各炼厂批次混合原油比例

场景	炼厂批次	混合原油比例				各类原油掺混量(万吨)			
		A 油	B 油	C 油	D 油	A 油	B 油	C 油	D 油
场景 0	甲炼厂批次	9:69:10:12	7.52	55.44	7.84	9.20			
	乙炼厂批次	65:13:4:18	21.60	4.56	1.04	5.80			
	丙炼厂批次	93:0:7:0	15.88	0.00	1.12	0.00			
场景 1	甲炼厂批次	28:59:5:8	22.23	47.42	4.00	6.35			
	乙炼厂批次	55:8:15:22	18.04	2.65	4.85	7.46			
	丙炼厂批次	28:58:7:7	4.73	9.93	1.15	1.19			
场景 2	甲炼厂批次	27:59:3:11	22.10	47.84	1.56	8.50			
	乙炼厂批次	40:36:5:19	13.21	12.16	1.13	6.50			
	丙炼厂批次	57:0:43:0	9.69	0.00	7.31	0.00			
场景 3	甲炼厂批次	24:59:9:8	19.65	46.25	7.05	7.05			
	乙炼厂批次	40:30:6:24	13.56	9.58	1.93	7.93			
	丙炼厂批次	75:15:5:5	12.79	2.17	1.02	1.02			
场景 4	甲炼厂批次	22:62:5:11	18.04	49.80	3.70	8.46			
	乙炼厂批次	39:31:10:20	13.06	10.20	3.20	6.54			
	丙炼厂批次	82:0:18:0	13.90	0.00	3.10	0.00			
场景 5	甲炼厂批次	12:73:5:10	9.41	58.62	3.52	8.45			
	乙炼厂批次	64:5:15:16	21.15	1.38	5.21	5.26			
	丙炼厂批次	85:07:08	14.44	0.00	1.27	1.29			
场景 6	甲炼厂批次	17:63:4:16	13.22	50.81	2.76	13.21			
	乙炼厂批次	51:28:15:6	16.98	9.19	5.04	1.79			
	丙炼厂批次	87:0:13:0	14.80	0.00	2.20	0.00			

### (2) 不同约束条件场景分析

如表 8 所示, 第一组场景包括场景 1、场景 3 和场景 5(不考虑炼厂允许参与掺混原油种类约束), 第二组场景包括场景 2、场景 4、场景 6(考虑炼厂允许参与掺混原油种类约束), 两组各场景下各炼厂批次混合原油黏度值均满足炼厂接收混合原油黏度约束, 在考虑或不考虑炼厂允许参与掺混原油种类约束、考虑 1 个或多个炼厂接收混合原油黏度约束的情况下均可以实现优化目标, 这说明掺混优化模型对不同场景和约束条件的适应性较强, 可以求解复杂的实际掺混优化问题。

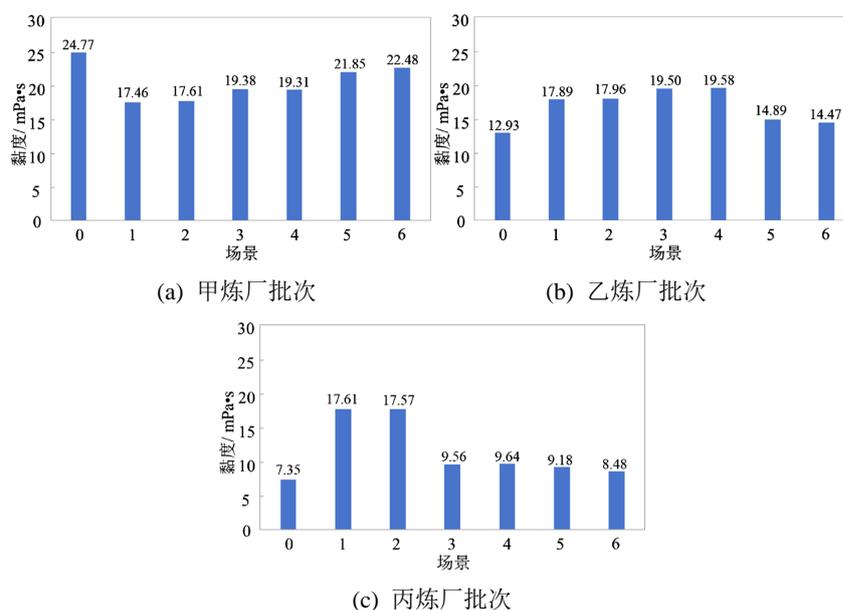


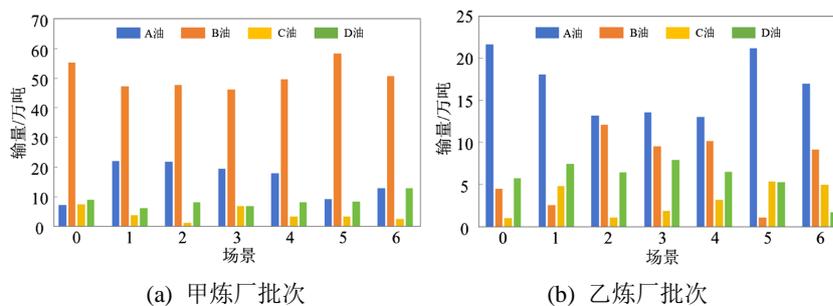
Figure 8. Oil viscosity of each refinery batch in different scenarios

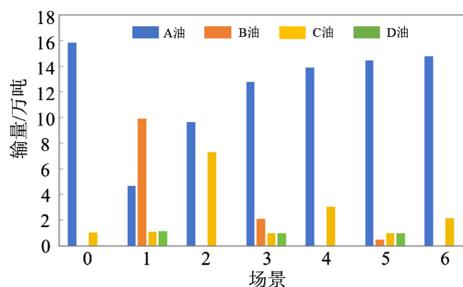
图 8. 不同场景下各炼厂批次混合原油黏度值

### (3) 不同原油掺混量分析

如图 8 所示, 各场景下甲炼厂批次混合原油中 B 油掺混量最大、C 油掺混量最小, 乙炼厂批次混合原油中 A 油掺混量最大, 丙炼厂批次混合原油中除场景 5 外 A 油掺混量最大, 可以看出实际掺混场景与优化掺混场景各炼厂批次混合原油中各类原油掺混量规律基本一致, 掺混优化模型结果符合实际规律。

如图 9 所示, 与场景 0 相比, 场景 1~场景 6 下甲炼厂批次混合原油中性质较好的 A 油掺混量增多, 而乙炼厂、丙炼厂批次混合原油中 A 油掺混量有所减少, 这是因为甲炼厂批次混合原油计划输量较大, 增大该批次混合原油中性质较好的 A 油使批次混合原油黏度值降低, 从而实现输送周期内批次加权黏度值较低的优化目标。





(c) 丙炼厂批次

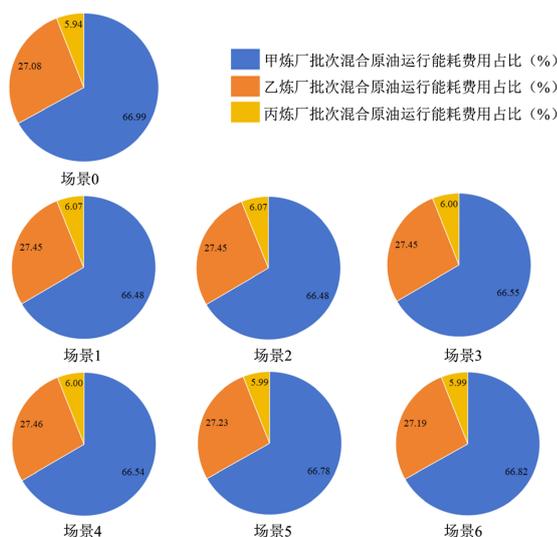
**Figure 9.** Under different scenarios, each refinery batch has different crude oil blending amount  
**图 9.** 不同场景下各炼厂批次混合原油不同原油掺混量

#### (4) 经济性分析

不同场景下输送周期内总能耗费用见表 9, 各炼厂批次混合原油输送能耗费用占总费用比如图 10 所示, 可以看出各场景下输送周期内总能耗费用均有所下降, 甲炼厂批次混合原油输送能耗费用占比降低, 而乙炼厂、丙炼厂批次混合原油输送能耗费用占比增大, 这是因为输送混合原油黏度值越低、运行能耗费用越低, 因此, 模型为使输送周期内批次加权黏度值最小, 会优先优化输量较大的甲炼厂批次混合原油黏度, 符合现场的原油输送期望, 模型优化效果较好。

**Table 9.** Total energy consumption in different scenarios during the transmission cycle  
**表 9.** 不同场景下输送周期内总能耗费用

场景	输送周期内总能耗费用(万元)	输送周期内总费用降低率(%)
场景 0	1288.01	/
场景 1	1275.02	1.01
场景 2	1275.10	1.00
场景 3	1277.86	0.78
场景 4	1277.82	0.79
场景 5	1278.78	0.71
场景 6	1279.39	0.67



**Figure 10.** The proportion of energy consumption of each batch of refinery under different scenarios  
**图 10.** 不同场景下各炼厂批次混合原油运行能耗费用占比

## 5. 总结

本研究主要针对管道顺序输送原油掺混优化问题。掺混优化模型通过调用的基础混合原油物性计算模型,利用刘天佑模型、Cragoe 修正模型计算混合原油的凝点和黏度,其他物性计算模型为线性模型。建立了输送周期内原油掺混优化模型,模型以各批次加权黏度值最低为目标,通过优化各批次混合原油的黏度(流动性)来提升泵的效能,达到节能降耗的目的。掺混优化模型实例应用结果表明掺混优化模型应用对不同场景和约束条件的适应性较强,可以求解复杂的实际掺混优化问题,且优化后得到的混合原油输送能耗费用降低。

## 参考文献

- [1] 谭小芬, 韩剑, 殷无弦. 基于油价冲击分解的国际油价波动对中国工业行业的影响: 1998-2015 [J]. 中国工业经济, 2015(12): 51-66.
- [2] 姜永宏, 穆金旗, 聂禾. 国际石油价格与中国行业股市的风险溢出效应研究[J]. 经济与管理评论, 2019, 35(5): 99-112.
- [3] 余娜. 石油供需同步复苏天然气消费恢复向好[N]. 中国工业报, 2024-03-05(07).
- [4] 余国, 孙秀娟. 2022 能源行业回顾与新型能源体系建设展望——专访中国石油集团经济技术研究院执行董事、党委书记余国[J]. 世界石油工业, 2022, 29(6): 1-12.
- [5] Hasan, S.W., Ghannam, M.T. and Esmail, N. (2010) Heavy Crude Oil Viscosity Reduction and Rheology for Pipeline Transportation. *Fuel*, **89**, 1095-1100. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.021>
- [6] Martínez-Palou, R., Mosqueira, M.d.L., Zapata-Rendón, B., Mar-Juárez, E., Bernal-Huicochea, C., de la Cruz Clavel-López, J., et al. (2011) Transportation of Heavy and Extra-Heavy Crude Oil by Pipeline: A Review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **75**, 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.020>
- [7] Rushd, S., McKibben, M. and Sanders, R.S. (2019) A New Approach to Model Friction Losses in the Water-Assisted Pipeline Transportation of Heavy Oil and Bitumen. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **97**, 2347-2358. <https://doi.org/10.1002/cjce.23492>
- [8] 姚峰, 伍奕, 蒋文学, 等. 三塘湖原油注入鄯-兰管线原油物性研究[J]. 管道技术与设备, 2010(1): 13-16.
- [9] 于涛. 油品混合输送在西部原油管道的应用[J]. 油气储运, 2013, 32(2): 162-165.
- [10] 孙法峰, 于涛, 范华平, 等. 乌鄯线冬季冷热油交替输送运行方案[J]. 油气储运, 2014, 33(5): 567-570.
- [11] 马晨波, 韩善鹏, 陆争光, 等. 乌鄯线掺混输送工艺研究[J]. 油气田地面工程, 2015, 34(10): 33-35.
- [12] 王志瑛. 酒东原油进入西部管道掺混输送方式的可行性研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(17): 64-66.
- [13] 吕政, 薛延军, 邓忠华, 等. 西部原油管道运行节能降耗综合措施研究[J]. 石油石化节能, 2022, 12(12): 12-16.
- [14] 梁博, 张思杨. 兰成原油管道掺混长庆原油常温输送研究[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(10): 90-97.
- [15] 何嘉欢, 王春明, 陆美彤, 等. 津华原油管道掺混常温输送方案与优化[J]. 油气储运, 2022, 41(7): 852-858.
- [16] 徐亮, 艾月乔, 李海娜, 等. 日东原油管道高黏油掺混输送工艺[J]. 油气储运, 2019, 38(9): 1009-1014.
- [17] 李嘉诚. 原油管道掺混输送运行风险分析[J]. 辽宁化工, 2020, 49(1): 80-82.
- [18] 罗会玖, 李静, 王义, 等. 中洛管道混合原油凝点和粘度的测量与计算[J]. 油气储运, 2011, 30(2): 141-143+159+79.
- [19] 王国涛. 中洛线中原原油与普托原油掺混增输方案比选[J]. 油气储运, 2018, 37(10): 1135-1141.
- [20] 王琦. 铁锦线庆吉油与俄油掺混输送方案分析[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(8): 40-41.
- [21] 曹广军, 薛敦松, 李昂, 等. 德国离心油泵粘度换算图及其数学表达式[J]. 工程热物理论, 2002(4): 449-452.
- [22] 刘天佑, 徐诚. 稠油稀释后粘度的计算方法及其改进[J]. 油气储运, 1992(2): 56-60+62.
- [23] 郑云萍, 李勋, 汪玉春, 舒洁, 艾绍平. 混合原油粘温数学模型研究进展[J]. 油气储运, 2010, 29(9): 683-686+13-14.
- [24] 熊小琴, 舒庆, 刘延昌, 杨君. 混合原油密度模型研究及应用[J]. 中国科技论文, 2020, 15(5): 497-501.
- [25] 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+137.