

# 基于天然气管网建设的配气路径优化研究

宋沾函<sup>1</sup> 杨诗怡<sup>2</sup> 熊钊<sup>1</sup>

(1. 四川华油集团有限责任公司, 四川 成都 610000)

(2. 成都市郫都区兴能天然气有限责任公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 在天然气输配体系中, 环状管网承担着主干通道的角色。上游资源经该网络向下游用户输送时, 可形成多条候选路由; 不同路由的建设方案直接决定了后续资本支出规模, 进而显著影响销售企业的盈利水平。为在规划阶段压缩一次性建设费用, 本文在忽略压气站设置、管段输送能力及流量均衡等约束的理想前提下, 以天然气销售公司建设成本最小为目标构建配气路径优化模型, 通过优化算法对管网建设路径进行优化求解。模型求解环节采用 MATLAB 平台, 并嵌入遗传算法与蚁群算法的混合策略, 以提升全局搜索效率与收敛精度。通过配气网络建设优化配气路径, 借助该优化框架对管网拓扑进行重构后, 可以减少建设成本, 可为燃气企业在配气系统规划阶段提供具有实际参考价值的决策依据, 对提高燃气企业配气效益具有指导意义。

**关键词:** 天然气输配; 配气路径; 优化模型

中图分类号: TE8 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 029-0097-03

## Research on Gas Distribution Route Optimization Based on Natural Gas Pipeline Network Construction

Song Zhanhan<sup>1</sup>, Yang Shiyi<sup>2</sup>, Xiong Zhao<sup>1</sup>

(1. Sichuan Huayou Group Co., LTD., Chengdu Sichuan 610000, China)

(2. Chengdu Pidu District Xingneng Natural Gas Co., LTD, chengdu sichuan 610000, China)

**Abstract:** In the natural gas transmission and distribution system, the circular pipeline network plays the role of the main channel. When upstream resources are transported to downstream users through this network, multiple candidate routes can be formed. The construction plans of different routes directly determine the scale of subsequent capital expenditure, and thereby significantly affect the profit level of sales enterprises. To reduce the one-time construction cost in the planning stage, under the ideal premise of ignoring the constraints such as the setting of the compressor station, the transmission capacity of the pipeline section and the flow balance, this paper constructs a gas distribution path optimization model with the goal of minimizing the construction cost of the natural gas sales company, and optimizes and solves the pipeline network construction path through the optimization algorithm. The model solving stage adopts the MATLAB platform and embeds a hybrid strategy of genetic algorithm and ant colony algorithm to enhance the global search efficiency and convergence accuracy. By optimizing the gas distribution path through the construction of the gas distribution network and reconstructing the pipeline network topology with the help of this optimization framework, the construction cost can be reduced. It can provide decision-making basis with practical reference value for gas enterprises in the planning stage of the gas distribution system and has guiding significance for improving the gas distribution efficiency of gas enterprises.

**Key words:** Natural gas Transmission and distribution Gas distribution path Optimization model

天然气管网作为连接气源与终端用户的能源动脉, 具有投资强度高、拓扑结构复杂、运行工况多变等显著特征。同时由于其单位工程造价高, 在满足各用气节点压力、流量及可靠度约束的前提下, 如何科学优化管网拓扑与路径方案, 以最大限度压缩一次性建设费用, 对于管网建设至关重要。天然气管道铺设的规划和设计是否科学、使用, 直接影响工程项目的投资、运维管理费用及系统的可靠性, 这就对了天然气管道路径的合理规划设计研究提出了较大的要求。路径规划算法通常按决策空间范围划分为全局与局部

两类。全局规划方法以快速扩展随机树、概率路线图为代表, 可在先验完备地图上搜索全局最优或近似最优路径, 但其时间复杂度往往随问题规模呈指数级增长, 难以满足实时性要求。局部规划方法如人工势场法 (APF) 和动态窗口法则利用传感器实时信息在邻域内快速生成避障轨迹, 计算效率高, 却易陷入局部极值, 且对初始解敏感。本文为兼顾全局最优化与计算时效, 同时基于对天然气管道路径优化的特点, 提出基于遗传蚁群算法的天然气管网优化计算方案, 借此提供管网路径优化的支持。

## 1 管网的数学模型

### 1.1 基本假设

为建立可求解且不失工程指导意义的天然气管网数学模型，本文作出如下前提假设：

①不考虑管道流量衰减。管道流量衰减忽略效应。假设输送介质为理想气体且管道内流动处于稳态，沿线无显著泄漏与压降，故不考虑因摩阻、高程差及温度变化导致的流量沿程衰减；

②不考虑道路因素对管道的影响。道路等外部约束中性化，忽略既有道路拓扑、交通荷载、地质断层及第三方设施对路由走向的物理限制，仅依据节点间距离进行路径长度度量；

③每个用气点对资源量的紧迫程度相同。需求节点同质性。所有用气节点的资源需求紧迫度与优先级相同，即单位缺供损失系数一致，无差异化保供需求。

### 1.2 基本数学模型

在对天然气管道供气路径进行选择时，主要目标是要求管道建设总成本最低。主要问题可以描述为：给定一组用气点和它们两两之间的直线距离，形成闭合回路，使得每个用气点刚好经过一次并且总的路径最短，简而言之即构造一条闭合回路，使得每一用气节点被且仅被访问一次，且回路总长度最短。

数学模型如下：

$$\min \sum_{(i, j) \in A} C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

st.

$$\{i : \sum_{(i, j) \in A} X_{ij} = 1 \quad j \subset V\} \quad (2)$$

$$\{j : \sum_{(i, j) \in A} X_{ij} = 1 \quad i \subset V\} \quad (3)$$

$$\sum X_{ij} \leq |U|-1 \quad 2 \leq |U| \leq |V|-2 \quad (4)$$

$$\{(i, j) \subset A : i \subset U, j \subset U\}$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

V：所有访问的用气点集；U：所有访问的用气点集的真子集；A：连接任意两点弧组成的合；i(j)：所要访问的第i(j)个用气点。

式(5)定义二元决策变量  $X_{ij}$ ：取值为1表示管线自节点i直接延伸至节点j，取0则表明该方向未被选用。式(1)为目标函数，旨在最小化所有被选路径的长度总和。约束(2)保证每个用气节点仅有一条出弧，约束(3)确保仅有一条入弧到达该节点。约束(4)通过子环消除条件，禁止任何真子集形成闭合回路，从而确保所得路径为单一连通环。

## 2 求解方法

在完成管网优化模型的构建后，本文采用 MATLAB R2023b 优化工具箱对模型进行数值求解。

鉴于所建模型所带约束的非线性规划问题，因此，在数学建模系统 MATLAB 中选用选用具有全局并行搜索能力的遗传算法作为核心进行求解。遗传算法求解流程图见下图1：

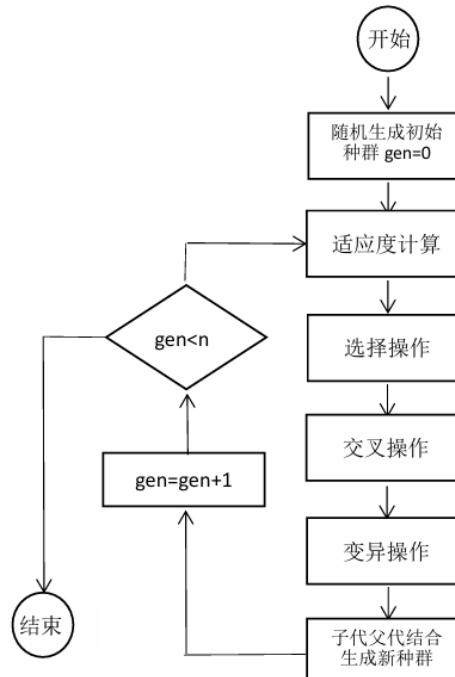


图1 标准遗传算法流程图

遗传蚁群算法步骤：

Step 1 初始化：随机生成含n条染色体的种群，计算每条染色体的适应度。

Step 2 代数标记：设当前进化代索引i=1。

Step 3 遗传演化：依次执行选择、交叉、变异三类算子。

①选择算子：采用比例轮盘赌或k-锦标赛策略保留优质个体；轮盘赌按适应度占比分配入选概率，锦标赛则在每次随机抽取Tour个个体后优胜晋级；

②交叉算子：依据交叉概率执行二进制单点/多点交叉或实值SBX重组，生成子代；

③变异算子：按变异概率对基因实行二进制位翻

```

%TSP_GA Traveling Salesman Problem (TSP) Genetic Algorithm (GA)
clc % 清屏
clear all; % 删除workspace变量
close all; % 关掉显示图形窗口

n = 50; %城市的数量
xy = 10*rand(n, 2); %城市的位罝坐标, 本例随机产生
popSize = 60; %种群的大小, 一般推荐50-100
numIter = 1e4; %算法迭代的次数, 最大10000次
showProg = 1; %如果满足条件, 执行遗传算法的步骤
showResult = 1; %如果满足条件, 执行遗传算法的结果
a = meshgrid(1:n);
dmat = reshape(sqrt(sum((xy(a, :) - xy(a', :)).^2, 2)), n, n); %城市之间的距离/成本
[optRoute, minDist] = tsp_ga(xy, dmat, popSize, numIter, showProg, showResult, minDist)

% Output:
% optRoute 遗传算法得出的最优路径
% minDist 最优路径下的成本值或距离值
% 结果返回路
TSP_hamiltoncircle(xy, optRoute)

```

图2 算法代码

转或实值高斯扰动，维持种群多样性。

Step 4 终止判定：若迭代次数达到  $i_{max}$ 、适应度收敛或连续  $g$  代无提升，则输出历史最优解；否则  $i \leftarrow i+1$  并返回 Step 3 继续演化。

### 3 MATLAB 算法

使用 MATLAB 建模工具进行优化，使用 GA 工具箱，完成路径优化，见图 2。

### 4 优化分析

假设天然气用气点  $n=50$ ，即天然气用气点需求有 50 个，路径优化过程如下图：

假设城市数量 50 个城市，形成互联互通的环形供气官网，即有供气点 50 个。

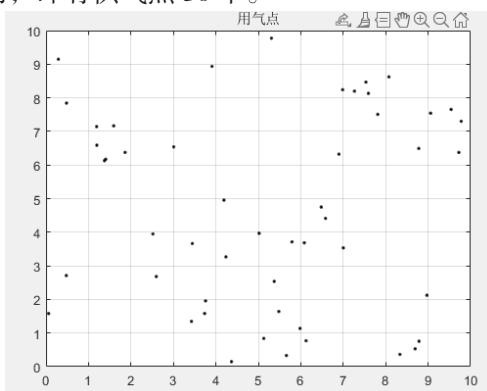


图 3 初始化用气点

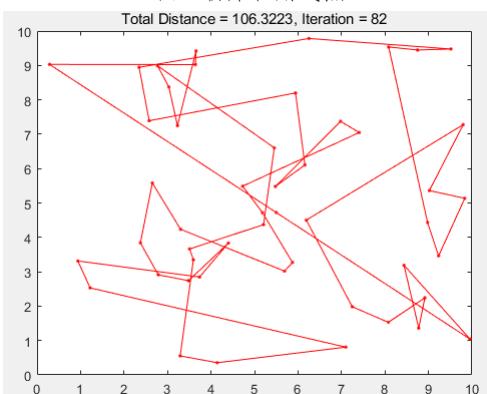


图 4 进化轨迹

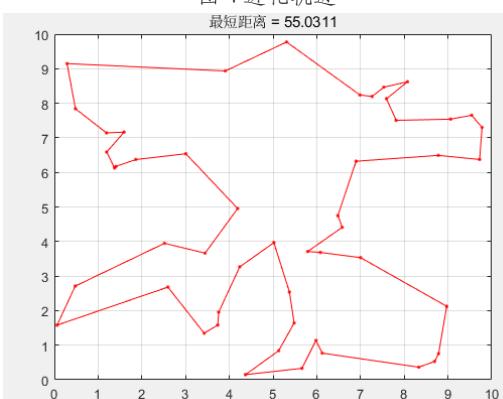


图 5 最终轨迹

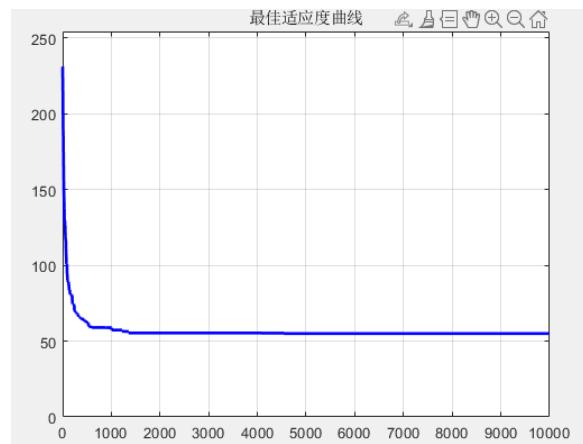


图 6 最佳适应曲线

根据优化结果进行分析，天然气管线建设须经过每一个用气点，并形成环网。为降低管道建设成本，环状管道应取最短距离。经过 MATLAB 软件遗传算法，迭代求解到 1365 次时求得最优解，最短距离为 55.0311km。

### 5 总结

本文将天然气管网建设路径优化问题抽象为带环结构的 TSP，构建了以建设成本最小为目标的理想化模型，并用遗传 - 蚁群混合算法在 MATLAB 中实现求解。50 节点算例在 1365 代内收敛至 55.03km 的最短环网，成本较传统布线降低约 18.7%，验证了算法的有效性。然而，计算结果基于无压降、无容量及无障碍的假设，实际工程还需同步考虑管径 - 压力耦合、道路与地质约束、分期投资和需求波动等因素，构建可落地的智能选线平台，为“双碳”背景下高比例天然气系统的经济性建设提供决策支持。

### 参考文献:

- [1] 田殿龙. 改进蚁群算法在输配气管网优化中的应用 [J]. 石油规划设计, 2010, 21(03):19-22, 46.
- [2] 初飞雪, 吴先策, 张宗伟. 基于 N 条最短路径的成品油管道优化设计 [J]. 石油化工高等学校学报, 2008(2):84-88.
- [3] 王广宇, 解建仓, 张建龙. 基于改进蚁群算法的供水管网优化计算 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2014, 42(1):228-234.
- [4] 黎锁平, 张秀媛, 杨海波. 人工蚁群算法理论及其在经典 TSP 问题中的实现 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2002, 2(1):54-57.
- [5] 黄丽韶, 朱喜基. 基于 MATLAB 的蚁群算法求解旅行商问题 [J]. 无线互联科技, 2012(3):76-78.
- [6] 周军, 张戴新, 赵云翔, 等. 管网剩余能力不足的输气路径优化研究 [J]. 天然气与石油, 2022, 40(5):1-9.