

油库选址问题的多目标优化方法*

譙露, 舒勤, 赵克全

(重庆师范大学 数学科学学院, 重庆 401331)

摘要:【目的】研究油料运输过程中油库的最优选址问题。【方法】综合考虑多方面因素,建立以经济成本最小化、用油单位满意度及油库安全性最大化为目标的多目标优化模型,并对模型进行分析。【结果】基于多目标优化问题经典的线性加权标量化方法,引入模拟退火算法对多目标优化模型进行求解。【结论】提出的多目标优化方法能够在较高的安全性和满意度下获得更优的经济成本,为更好解决油库选址提供决策参考。

关键词:油库选址问题;多目标优化;模拟退火算法;满意度刻画

中图分类号: O221.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2023)01-0082-06

近些年来,随着中国成品油使用量的不断增大,如何在成品油运输过程中有效控制成本及提高运输效率,油库作为连接炼油厂与加油站的重要中间环节,它的作用举足轻重。库址选择是油库开设中至关重要的一步,但也十分复杂。库址选择不仅要考虑位置恰当、交通方便、经济环境等基本条件,还要充分考虑安全性,这是由于成品油易燃易爆,极易导致火灾、爆炸事故的发生。油库的选址不仅与石油企业的发展有着直接联系,还关系到油库经营成功与否的决定性因素。油库选址的好坏,直接影响到企业的运营成本及运输效率等,从而影响到市场竞争力,甚至会决定企业的命运。因此油库选址研究具有非常重要的理论与价值。

目前已有一些学者对油库选址问题进行了研究。朱柯等人^[1]根据油库的选址要求和集对分析的基本原理,构建了基于集对分析的油库选址模型;刘光霆等人^[2]将油库选址分为层次分析法分析、DEA 有效性评价及整数规划共 3 个部分,构建了三阶段油库选址模型;熊彪等人^[3]对层次分析法与模糊综合评价的基本原理加以改进,使之适用于油库选址问题的求解,构建了基于层次分析法与模糊综合评价的油库选址模型;仰勇等人^[4]以油料周转量为重点考虑因素,在总周转量最小的前提下,构建了油库选择的鲍摩-瓦尔夫模型;闫华等人^[5]构建了基于 GIS 的油库空间多准则选址模型;程飞等人^[6]基于模糊综合评判思想,对油库选址要素进行分析,构建模糊综合评判指标体系,确定隶属函数及指标权重,建立了油库选址模糊综合评判模型;张卫明等人^[7]针对标准粒子群算法容易陷入局部最优,对粒子的自适应性和惯性权重进行改进,建立了油库选址模型;李横等人^[8]以用油单位满意度最大和油库的安全性最高为决策目标,提出了基于保障程度和安全性的油库多目标优化模拟模型。

目前已有的研究重点考虑物流成本最小,而忽视了油库的安全性以及运输效率;或者考虑运输效率以及安全可靠因素,但忽略了物流成本的因素等,未综合考虑油库的运输效率、安全性以及物流成本等因素。本文综合考虑多类影响因素,建立了以物流成本最小化、用油单位满意度最大化、油库安全性最大化为目标的多目标优化模型。数值实验结果表明:本文提出的多目标优化方法能够在较高的满意度下获得较好的安全性和更经济的成本,为更好地解决油库选址问题提供了新方法,对油库选址的科学决策提供了依据。

* 收稿日期:2022-09-28 修回日期:2022-11-07 网络出版时间:2023-02-23 09:11

资助项目:国家自然科学基金(No. 11991024;No. 12171063);重庆市高校创新研究群体项目(No. CXQT20014);重庆市自然科学基金面上项目(No. cste2021jcyj-msxmX0280);重庆英才计划“包干制”项目(No. CQYC20210302270);重庆市教委科学技术研究项目(No. KJQN202100521)

第一作者简介:譙露,女,研究方向为多目标优化理论与算法,E-mail:1427258562@qq.com;通信作者:赵克全,男,教授,博士生导师,E-mail:kequanz@163.com

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20230222.1358.024.html

1 油库选址问题多目标建模

1.1 问题描述

将油库以及用油单位看作网络中的节点,并假设每个油库 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 的固定建设费用和用油单位 $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ 的需求量已知。要求从 M 个重点地域的备选油库中科学、合理的选择若干个油库负责向用油单位运输油料,使得油库的建设费用以及从油库向用油单位配送油料过程中的运输成本和最小,同时关注油库的安全问题。因为油库主要用于存放用油单位所需的油料,属于着火爆炸高危场所,一旦发生事故将对周边人员和装备造成严重损害,所以必须重视油库的安全问题。除考虑经济目标与安全目标外,还需考虑运输效率,通过用油单位的满意度刻画运输效率。在满足油库数量、运输油料方式等约束条件下,尽可能使得经济成本最小、油库安全性最高、用油单位满意度最大。

1.2 问题假设

- 假设 1 每个用油单位有且仅有 1 个油库为它供油。
- 假设 2 油库到用油单位,采取主动前送油料的运输模式。
- 假设 3 各个备选油库的安全性评价指标已给出。
- 假设 4 油料运输过程中的运输速度相同且已知。

1.3 符号说明

本文符号说明: $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 为油库编号; $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ 为用油单位编号; s_i 为第 i 个油库的安全性; t_{ij} 为第 i 个油库到第 j 个用油单位的油料运输时间; c_i 为第 i 个油库的建设成本; c_{ij} 为第 i 个油库到第 j 个用油单位的单位油料运输成本; d_j 为第 j 个用油单位的需求量; \bar{v} 为运输油料过程中的速度; P 为油库的数量; l_{ij} 为用油单位规定的油料送达时间; L_{ij} 为用油单位规定的最晚油料送达时间; $X_i \in \{0, 1\}$, 1 表示第 i 个油库被选中, 否则为 0; $Y_{ij} \in \{0, 1\}$, 1 表示第 i 个油库与第 j 个用油单位存在保障关系, 否则为 0。

1.4 模型建立

李横等人^[8]考虑的目标首先是满足用油单位的用油需求,其次是尽可能地保证油库的安全,即用油单位满意度最大和油库安全性最高,因此文献[8]中建立以最大化油库安全性和最大化用油单位满意度为目标的油库选址多目标模型。值得注意的是,文献[8]中的油库选址模型只考虑到油库安全性与用油单位满意度两个因素,而在库址选择与油料运输过程中,片面追求效率最大化而忽略成本因素显然是不可行的。因此,本文综合考虑多方面因素,在考虑油库安全性与用油单位满意度的基础上,还考虑成本因素(油库的建设费用以及从油库向用油单位配送油料过程中的运输成本和),建立了以最小化经济成本(即固定成本和运输成本之和)、最大化用油单位满意度及最大化油库的安全性为目标的油库选址多目标优化模型。

同时,为方便刻画用油单位对油库运输油料的满意度,本文引入的满意度函数。假设油库为每一个用油单位运输油料的速度一致,并且用油单位将会给出规定的送达时间与最晚送达时间,若油库在规定时间之前将油料送达,则用油单位的满意度为 1;若油库在规定的送达时间与最晚送达时间之间将油料送达,则用油单位满意度介于 0 到 1 之间;若油库在最晚送达时间之后将油料送达,则用油单位满意度为 0。基于以上分析,本文构造如下满意度函数:

$$S(t_{ij}) = \begin{cases} 1, & t_{ij} \leq l_{ij} \\ \frac{L_{ij} - t_{ij}}{L_{ij} - l_{ij}}, & l_{ij} < t_{ij} \leq L_{ij} \\ 0, & t_{ij} > L_{ij} \end{cases}$$

用油单位对油库运输油料的满意度 S 与油库到用油单位运输油料时间 t_{ij} 之间的趋势关系见图 1。

因此,基于文献[8]的不足,本文建立的油库选址多目标优化模型如下:

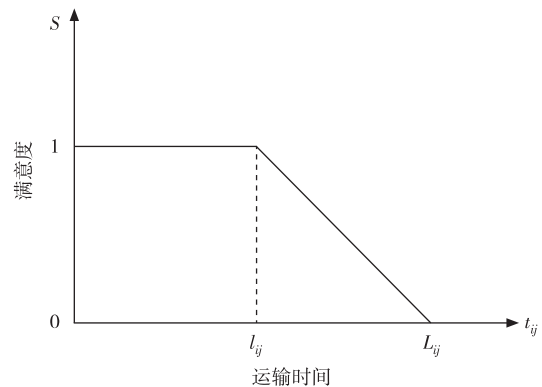


图 1 满意度函数曲线

Fig. 1 Satisfaction function curve

$$\begin{aligned}
 (\text{MOP}) \quad & \min \{f_1, f_2, f_3\} \\
 \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \sum_{i=1}^n X_i = P \\ Y_{ij} \leq X_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\} \\ \sum_{j=1}^m Y_{ij} \geq X_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ \sum_{i=1}^n Y_{ij} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\} \\ X_i \in \{0, 1\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ Y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases}
 \end{aligned}$$

其中: $f_1 = \sum_{i=1}^n c_i X_i + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{ij} d_j t_{ij} \bar{v} Y_{ij}$, $f_2 = -\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n S(t_{ij}) Y_{ij}$, $f_3 = -\sum_{i=1}^n s_i X_i$ 。

3 个目标函数分别表示油库建设的固定成本与从油库向用油单位运输油料过程中的运输成本之和最小化、用油单位的满意度最大化以及油库的安全性最大化。第一个约束条件表示所需的油库数量;第二个约束条件表示只有第 i 个油库被选中,第 j 个用油单位才能由第 i 个油库运输油料;第三个约束条件表示如果第 i 个油库被选中,那么它至少向 1 个用油单位提供油料;第四个约束条件表示每个用油单位仅由 1 个油库配送油料。

2 解性质与求解算法

线性加权和法是处理多目标优化问题的基本标量化方法。本文首先利用多目标优化问题的线性加权和法将(SOP)转化为如下单目标优化模型:

$$\begin{aligned}
 (\text{SOP}) \quad & \min F = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 \\
 \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \lambda_l \in (0, 1), l \in \{1, 2, 3\}, \sum_{l=1}^3 \lambda_l = 1 \\ \sum_{i=1}^n X_i = P \\ Y_{ij} \leq X_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\} \\ \sum_{j=1}^m Y_{ij} \geq X_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ \sum_{i=1}^n Y_{ij} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\} \\ X_i \in \{0, 1\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ Y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases}
 \end{aligned}$$

其中: $f_1 = \sum_{i=1}^n c_i X_i + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{ij} d_j t_{ij} \bar{v} Y_{ij}$, $f_2 = -\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n S(t_{ij}) Y_{ij}$, $f_3 = -\sum_{i=1}^n s_i X_i$ 。

定理 1 若 $\mathbf{X}^* \in \mathbf{R}^n, \mathbf{Y}^* \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 是模型(SOP)的最优解,则 $\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*$ 为多目标模型(MOP)的弱有效解。

证明 设 $\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*$ 是模型(SOP)的最优解。若 $\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*$ 不是多目标模型(MOP)的弱有效解,则存在可行解 $\hat{\mathbf{X}}, \hat{\mathbf{Y}}$, 使得 $f_l(\hat{\mathbf{X}}, \hat{\mathbf{Y}}) < f_l(\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*), l=1, 2, 3$ 。

由 $\lambda \in \mathbf{R}_+^3 - \{0\}$ 可知: $\lambda_l f_l(\hat{\mathbf{X}}, \hat{\mathbf{Y}}) \leq \lambda_l f_l(\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*), l=1, 2, 3$, 且 $\exists k \in \{1, 2, 3\}$, 使得 $\lambda_k f_k(\hat{\mathbf{X}}, \hat{\mathbf{Y}}) < \lambda_k f_k(\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*)$, 从而 $\sum_{l=1}^3 \lambda_l f_l(\hat{\mathbf{X}}, \hat{\mathbf{Y}}) < \sum_{l=1}^3 \lambda_l f_l(\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*)$, 这与模型(SOP₁)的最优解是 $\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*$ 矛盾。故 $\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}^*$ 为多目标优化模型(MOP)的弱有效解。证毕

由于模拟退火算法适用范围广,求得全局最优解的可靠性高,算法搜索策略有利于避免搜索过程陷入局部最优,有利于提高获得全局最优解的可靠性,本文基于模拟退火算法设计(SOP)的求解算法。具体流程图见图 2,算法步骤如下:

- 步骤 1: 给定初始温度 $T=T_0$, 每一个 T 值的迭代次数为 L , 初始化解 $X=X_0$;
- 步骤 2: 对 $k=1,2,\dots,L$ 进行步骤 3 至步骤 7;
- 步骤 3: 根据当前温度产生新解 X' ;
- 步骤 4: 计算目标函数差 $\Delta E=F(X')-F(X)$, 其中 F 为目标函数;
- 步骤 5: 若 $\Delta E < 0$, 则接受 X' 作为新的当前解, 否则以概率 $e^{-\Delta E/T}$ 接受 X' 作为新的当前解;
- 步骤 6: 若连续若干个新解都没有被接受, 则直接输出当前解;
- 步骤 7: 温度 T 逐渐衰减, 然后转至步骤 2。

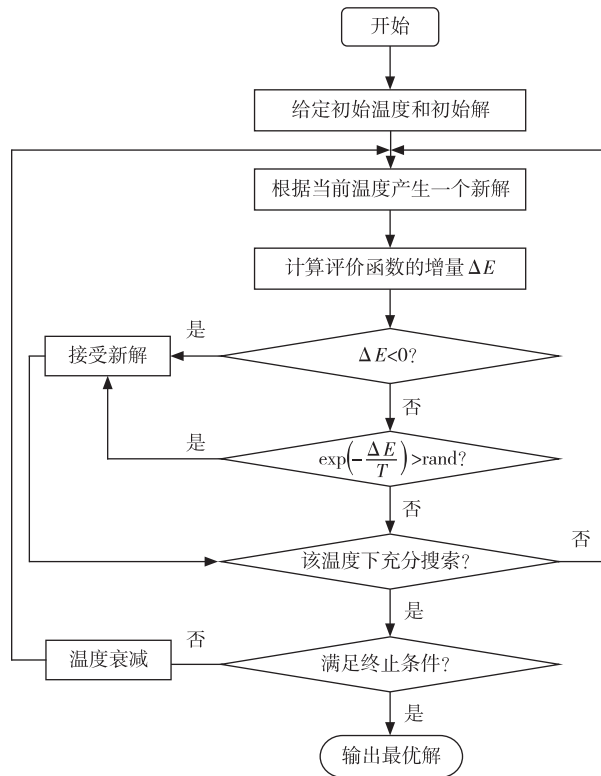


图 2 模拟退火算法流程

Fig. 2 Simulated annealing algorithm flow

3 数值实验

本文利用文献[8]中给出的油库选址问题的相关数据对构建的多目标优化模型进行数值实验。假设有 5 个独立的用油单位, 分别记为 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 , 现从 4 个备选油库中选择 2 个油库, 分别记为 W_1, W_2, W_3, W_4 。已知 5 个用油单位的需求量见表 1, 4 个油库的安全性及建设成本分别见表 2 和表 3, 油库到用油单位的油料运输时间见表 4。

表 1 用油单位的油料需求量

Tab. 1 Oil demand of oil users

万 t

用油单位	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
需求量	0.2	0.2	0.22	0.23	0.15

表 2 油库的安全性系数

Tab. 2 Safety coefficient of oil depot

油库	W_1	W_2	W_3	W_4
安全系数	0.6	0.55	0.4	0.5

表 3 油库的建设成本

Tab. 3 Construction cost of oil depot

万元

油库	W_1	W_2	W_3	W_4
建设成本	0.15	0.13	0.1	0.12

表 4 油库到用油单位的油料运输时间

Tab. 4 Oil transportation time from oil depot to oil users

h

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
W_1	3	1.5	2	3	2.5
W_2	2	2.5	2.5	1.5	1.5
W_3	3.5	3	2	2.5	2
W_4	2	2	3	2.5	3

进一步假设油库与用油单位之间的单位油料运输成本为 $1 \text{ 元} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 油料运输的平均速度为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 用油单位规定的送达时间为 1.7 h , 规定的最晚送达时间为 3.2 h 。利用 Matlab 2019b 软件进行求解, 油库的最优选址与用油单位分配结果(见表 5)及总目标变化趋势(见图 3)。

表 5 油库最优选址与用油单位分配方案

Tab. 5 Optimal location of oil depot and allocation scheme of oil users

油库	用油单位
W_1	C_1, C_2, C_3, C_4
W_2	C_5

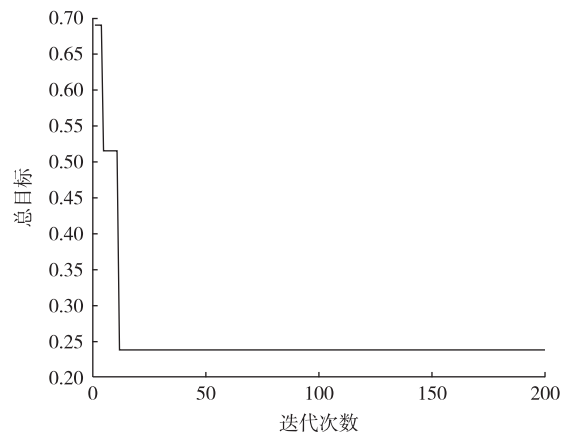


图 3 总目标变化趋势

Fig. 3 Change trend of overall objective

由表 5 可知, 油库最优选址方案为 W_1, W_2 , 其中将第 1、2、3、4 号用油单位分配给 1 号油库, 将第 5 号用油单位分配给 2 号油库。容易计算, 油库的安全性为 $f_3 = 1.15$, 用油单位的满意度为 $f_2 = 3.0667$ 。文献[8]中的最优选址方案 W_2, W_4 , 其中将第 1、2、5 号用油单位分配给 2 号油库, 将 3、4 号用油单位分配给 4 号油库。容易计算此种方案的油库安全性为 $f_3 = 1.05$, 用油单位的满意度为 $f_2 = 2.8667$ 。因此, 本文的最优方案油库的安全性高于文献[8]中最优方案油库的安全性。同时, 用油单位满意度也高于文献[8]中最优方案的用油单位满意度。

4 结论

本文针对油库选址问题, 建立了以油库安全性最高、用油单位满意度最大以及总成本最低为目标的多目标

优化模型,对模型的解性质进行了分析,并提出了模型的求解算法。数值实验表明:本文构建的多目标优化模型在油库安全性和用油单位满意度方面优于文献[8]中的结果,能够为油库选址提供决策参考。基于本文的研究工作,进一步考虑大规模情形和模型的高效全局算法是非常有意义的研究课题。

参考文献:

- [1] 朱柯,雍歧东,徐光勇,等. 基于集对分析的野战油库选址研究[J]. 物流技术,2008,27(5):124-126.
ZHU K, YONG Q D, XU G Y, et al. Location of field oil depot based on set-pair analysis[J]. Logistics Technology, 2008, 27(5): 124-126.
- [2] 刘光霆,何宏,郑冀,等. 三阶段野战油库选址模型研究[J]. 物流技术,2009,28(4):151-153.
LIU G T, HE H, ZHENG J, et al. Research on 3-stage battle field-oil-depot location model[J]. Logistics Technology, 2009, 28(4): 151-153.
- [3] 熊彪,周庆忠. 基于层次分析法与模糊综合评价的野战油库选址研究[J]. 中国储运,2009(6):116-118.
XIONG B, ZHOU Q Z. Study on site selection of field oil depot based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Storage & Transport, 2009(6): 116-118.
- [4] 仰勇,周庆忠,苗强,等. 鲍摩-瓦尔夫模型在野战油库选址中的应用[J]. 后勤工程学院学报,2009,25(4):41-43.
YANG Y, ZHOU Q Z, MIAO Q, et al. The application of Baumol-Wolfe model in the site selecting of the field oil storehouse [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2009, 25(4): 41-43.
- [5] 闫华,李耀,林世岗. 基于 GIS 的野战油库空间多准则选址模型[J]. 中国储运,2014(12):150-152.
YAN H, LI Y, LIN S G. Multi-criteria location model of field oil depot based on GIS[J]. China Storage & Transport, 2014(12): 150-152.
- [6] 程飞,丁国勤,李宁,等. 基于模糊综合评判的野战油库选址优化模型[J]. 四川兵工学报,2015,36(6):53-57.
CHENG F, DING G Q, LI N, et al. Optimized site selection model research of field oil depot based on fuzzy comprehensive assessment[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2015, 36(6): 53-57.
- [7] 张卫明,周庆忠,黎武. 基于改进粒子群算法的野战油库选址优化[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(8):84-87.
ZHANG W M, ZHOU Q Z, LI W. Improved particle swarm optimization based on field oil depot site[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(8): 84-87.
- [8] 李横,苏永东. 联合战役野战油库部署多目标优化模拟模型[J]. 军事运筹与系统工程,2014,28(2):41-44.
LI H, SU Y D. Multi-objective optimization simulation model of joint campaign field oil depot deployment[J]. Military Operations Research and Assessment, 2014, 28(2): 41-44.

Operations Research and Cybernetics

Multi-Objective Optimization Method for Oil Depot Location Problem

QIAO Lu, SHU Qin, ZHAO Kequan

(School of Mathematical Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Purposes] To study the optimal location of oil depot in the process of oil transportation. [Methods] Considering various factors comprehensively, a multi-objective optimization model was established with the objective of minimizing economic cost, maximizing oil unit satisfaction and oil depot security, and the model was analyzed. [Findings] Based on the classical linear weighted quantization method of multi-objective optimization problems, simulated annealing algorithm was introduced to solve the multi-objective optimization model. [Conclusions] The proposed multi-objective optimization method can obtain better economic cost with higher security and satisfaction, which provides a reference for decision-making to better solve the location of oil depot.

Keywords: oil depot location problem; multi-objective optimization; Simulated annealing algorithm; satisfaction

(责任编辑 陈 乔)