

基于多重约束整合模型的航空油料调运优化

张来顺, 王瑛, 姚 颀, 张 兵

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要 为提高航空油料的调运效率和节约调运成本,提出了基于多重约束整合模型的优化调运方法。在分析航油调运模式及调运基本原则的基础上,对调运问题进行了简化假设。基于网络优化、运输问题等相关理论,对航油调运的路线可靠度约束、费用约束、时间约束和运力约束进行数学描述和模型构建,给出了基于多重约束的整合算法及求解步骤。通过 Dijkstra 算法和表上作业法对所构建的模型进行了实例分析。结果表明该模型准确有效地解决了调运优化问题。

关键词 航空油料;调运问题;多重约束;调运优化;路线可靠度约束

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.03.002

中图分类号 V37;O221.3 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)03-0006-05

油料调运始终是保证油料正常供应和顺利完成飞行任务的关键^[1]。目前我国航油调运存在服务水平较低、调运成本高、效率低等问题。航油调运的优化问题就是从物流系统的总目标出发,对供需情况、路线可靠度、运输费用等进行综合分析,制定出较优的调运方案,从而达到提高油料调运效率的目的。调运的优化过程一般包括路径优化与运费优化,主要研究方法有:路径优化的最短路算法^[2]、遗传算法^[2-3]、基于小生境遗传算法^[4]、寻求受约束条件下运费优化的改进的表上作业法^[5]、基于神经网络的运输问题优化^[6]、基于神经网络的路径优化^[7]、运输基本问题的事件仿真^[8-9]、运输优化问题的离散事件仿真^[10]等传统的运输问题(A运输问题)仅考虑了运输经济性^[11-13],没有考虑运输路线可靠度以及线路的运力限制。本文通过构建整合路线可靠度、费用、时间、运力多重约束的航油调运问题的数学模型及算法,对航油调运问题进行进一步的优化。

1 航空油料调运问题及简化假设

航油调运网络包括油源、后方基地油库和油料消耗单位,其调运网络见图1。油源主要指炼油厂,油料消耗单位为各类机场,油料运输可视具体情况综合运用铁路、水路、公路、航空等运输方式。

基于此航油调运模式及调运基本原则,可对问题作如下简化假设:①炼油厂与后方基地油库间,炼油厂、后方基地油库与机场间的航油供应为直达供应;②确定油料调运的优化目标为:最可靠(安全)调运路线;最短调运时间;最少调运费用。以可靠度为标准确定最优的运输路线后,考虑费用约束和时间约束。③在航油调拨中,炼油厂的油料应被优先提走,其优先级高于后方基地油库。后方基地油库的油料调出量应是需求量与炼油厂供应量之差。

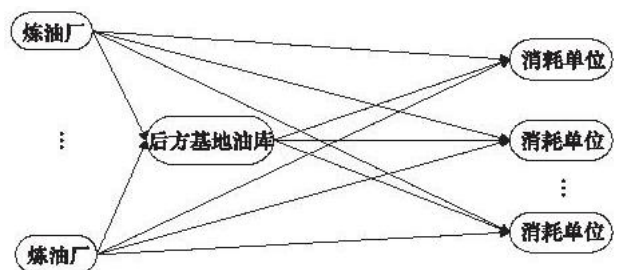


图1 油料调运网络

Fig. 1 Fuel-transportation net

* 收稿日期:2011-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071126)

作者简介:张来顺(1965-),男,北京人,博士生,主要从事油料管理研究. E-mail:zhanglaishun@163.com

设定油料调运问题的变量如下:已知有 m 个炼油厂 A_i ,其可供量分别是 $a_i, i = 1, 2, \dots, m$,供应 n 个需求机场 B_j ,各需求机场的需求量分别是 $b_j, j = 1, 2, \dots, n$ 。

2 多重约束整合模型的构建

2.1 路线可靠度约束

影响运输路线可靠性的因素包括地理状况、气象条件、敌情、防护能力、抢修能力等。可通过专家打分、比较矩阵法、层次分析法确定对路线可靠度的评价,将各种定性的指标转换成可以评价的分值,然后采用线性综合法求得综合分值。以路线可靠度作为运输路线网络的边权建立单目标路线优化模型如下:

设运输路线网络赋权有向图 $N = (V, A)$,发点为 s ,收点为 w ,网络 N 的每条弧 (i, j) 上的路权为可靠度 $\rho_{ij} (\rho_{ij} \in [1, 10])$,见图 2。

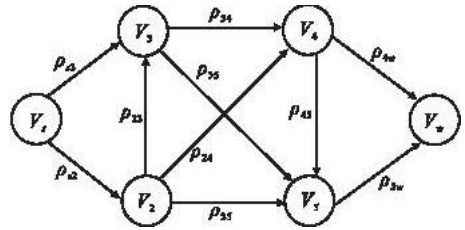


图 2 路线可靠度单路权运输路线网络

Fig. 2 Routine reliability transportation routine net

从 s 到 w 的有向路记为 P_{sw} ,路线 P_{sw} 的可靠度为:

$$\rho(P_{sw}) = \prod_{(i,j) \in P_{sw}} \rho_{ij} \quad (1)$$

两边取对数可得:

$$\lg \rho(P_{sw}) = \sum_{(i,j) \in P_{sw}} (1 - \lg \rho_{ij}) \quad (2)$$

于是路线 P_{sw} 真正的可靠度为 $10^{\sum_{(i,j) \in P_{sw}} (1 - \lg \rho_{ij})}$ 。路线可靠度单目标路线优化问题的数学模型可表示为:

$$\min \rho(P_{sw}) = \sum_{(i,j) \in P_{sw}} (1 - \lg \rho_{ij}) \quad (3)$$

该问题可用最短路的 Dijkstra 算法^[14] 进行求解。

2.2 费用约束

运输问题是线性规划中的一类特殊问题,它以运费最小为目标函数,解决运输计划制定、物资调运中的运费优化问题,可用表上作业法进行求解。在单位运价相同的条件下,运费与运距有一一对应的关系,因此运输问题费用优化的实质是运距优化。设各调出点到各需求机场的单位运输费用为 c_{ij} ,要求总运输费用最小,则油料调运问题可以用如下线型规划模型来表示:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{s. t } \sum_{i=1}^m x_{ij} &= \sum_{j=1}^n b_j \\ x_{ij} &\geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

式中 x_{ij} 为运输决策变量,表示从第 i 个炼油厂到第 j 个需求机场的运输量。

当供大于需即 $\sum_{j=1}^n x_{ij} < a_i$ 时,炼油厂生产的富余油料调至后方基地油库储备,此时在产销平衡表中增加后方基地油库作为需求单位 B_{n+1} ,其调入量为 $\sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n b_j$;当供小于需即 $\sum_{j=1}^n x_{ij} > a_i$ 时,需要从后方基地油库调运储备油料供机场消耗,此时在产销平衡表中增加后方基地油库作为油料调出点 A_{m+1} ,其调出量为 $\sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i$ 。

2.3 时间约束

在某些紧迫情况(如应急作战油料保障)下,航油调运问题变成受时间约束的运输问题。该类问题仍以式(4)为目标函数与约束条件,另外还应满足时间约束条件 $t \leq T$, t 为时间控制值,即实际调运所需时间; T 为时间约束值,即调运所允许的最长时间。

在约束时间具有串联特性(各调出点按次序先后装运油料)的情况下,油料调运时间即为完成总运距的时间;在约束时间具有并联特性(各调出点同时装运油料)的情况下,调出点到接收点所需时间最长的一个调运时间为整个调运所需时间^[10-11]。即:

$$t = \max \left(\frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{K_i} + t_{ij}^* \right) \quad (5)$$

式中: $\frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{K_i}$ 为装卸时间, K_i 为调出点 A_i 的装卸速度; t_{ij}^* 为从调出点到需求单位的运输时间。

这种算法将各调出点的装卸时间统一为 $\sum_{j=1}^n x_{ij}/K_i$, 意即待炼油厂完成生产任务后一次性装运, 延长了调运时长, 增加了突破时间约束的可能性。本文认为首先通过表上作业法求出传统运输问题的最优解, 从而明确调出点与接收点的调运数量。待炼油厂生产的油量满足运价低运输时间长的运输路线上的机场的消耗需求后即可先行安排运输, 不必等待全部完成生产任务后一次性装运。例如 A_1 的产量为 30 t, 通过表上作业法得到调运方案为运往 B_1 10 t、 B_3 20 t, 单位运价分别为 2 千元/t、4 千元/t, 运输时间分别为 10 h、8 h, A_1 的装卸速度为 1, 则待 A_1 完成 10 t 的生产任务后先行运往 B_1 , 调运时间为 $10 + 10 = 20$ h, A_1 到 B_3 的调运时间则为 $10 + 20 + 8 = 38$ h。

2.4 运力约束

在实际情况下, 油料的配送运输往往受到交通运输部门运力的限制, 尤其在应急物流保障条件下航油需求的非线性突变趋势有可能大幅增长。假定交通运输部门在时限 T 内综合采用 k 种运输方式(如公路运输、铁路运输、水路运输等)对需求单位进行油料配送($k = 1, 2, \dots, l$), 对于此类运输问题除了满足时间约束和费用约束外, 还需满足运力约束, 即 $x_{ij} \leq X_k$, x_{ij} 为运量控制值, 即 A_i 到 B_j 的实际运输量; X_k 为运量约束值, 即交通运输部门在 A_i 到 B_j 路线上采用第 k 种运输方式的最大运力。

因为油料是以油罐为载体按罐进行管理, 在调运过程中要求油罐运输载具满载运行并按罐进行运输配送, 其运输量是运输载具容量的整数倍。在允许调运时间内采用第 k 种运输方式进行运输的实际运输量与最大运力分别为 $N_k M_k$ 、 $N'_k M_k$, N_k 、 N'_k 分别为此时的实际运输载具数与最大运输载具数(正整数), M_k 为载具(油罐)的容量。因此该情况下实际运输量与最大运力 x_{ij} 、 X_k 分别为:

$$x_{ij} = N_k M_k; \quad X_k = N'_k M_k \quad (6)$$

2.5 基于多重约束的整合算法

通过考虑以上多重约束, 可利用如下步骤对航油调运问题进行求解:

步骤 1 利用 Dijkstra 算法, 计算每个调出点 A_i 到每个接收点 B_j 之间以路线可靠度为路权最可靠运输路线, 据此可得相应路线上的单位运价;

步骤 2 通过运输问题的表上作业法确定单点间可靠运输路线单位运价后的运输问题的最小费用;

步骤 3 根据调运时间计算方法计算步骤 2 得到的调运方案中有调运量的调出点到接收点的实际调运时间 t_{ij} 与该时间段内的实际运输量 x_{ij} 。对于并联特性的时间约束, 若 $t = \max t_{ij} \leq T$ 且 $x_{ij} \leq X_k$, 终止运算, 得到最优解; 否则转入步骤 4;

步骤 4 如果 $t = \max t_{ij} > T$ 或(且) $x_{ij} > X_k$, 将 $t_{ij} > T$ 或(与) $x_{ij} > X_k$ 处 A_i 到 B_j 的单位运价 c_{ij} 改为 M (任意大正数)^[8], 回到步骤 2。在用表上作业法进行计算时, c_{ij} 为 M 处则不会有调运量。

3 实例分析

假设有 A_1, A_2, A_3 3 个炼油厂对 B_1, B_2, B_3, B_4 共 4 个机场进行航油供应, 各炼油厂的供应量分别为 30 t、35 t、30 t, 各机场的需求量分别为 30 t、40 t、20 t、25 t, 由于需求量大于供应量, 因此还需从后方基地油库(设为 A_4)调油 20 t。通过对运输路线可靠度的评估, 得到以路线可靠度 τ_{ij} 为路权的运输路线网络(其中 $\tau_{ij} = 1 - \lg \rho_{ij}$), 以 A_1 到 B_1 为例, 见图 3。

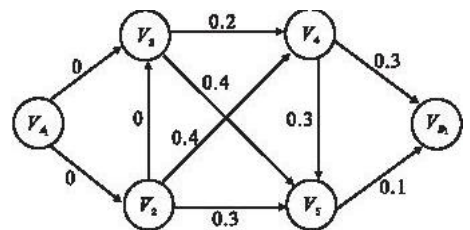


图 3 路线可靠度单路权运输路线网络实例

Fig. 3 Routine reliability single weight transportation routine net example

利用 Dijkstra 算法, 计算 A_1 到 B_1 路线可靠度的最优解, 得到 A_1 到 B_1 的最可靠运输路线为: $V_{A_1} \rightarrow V_2 \rightarrow V_3$

→ V_{B_1} 。该运输路线上的运输单价为3千元/t,将3填入运输问题单位运价表的对应位置。同理可得其他调出和各机场间在最可靠运输路线上的单位运价(千元/t),见表1。从各调出点到各机场的时间见表2,在确定路线上交通运输部门的运力限制见表3。

表1 单位运价表

	B_1	B_2	B_3	B_4
A_1	3	11	3	10
A_2	1	9	2	8
A_3	7	4	10	5
A_4	3	2	7	10

表2 运输时间表

	B_1	B_2	B_3	B_4
A_1	10	2	8	3
A_2	12	3	9	7
A_3	6	15	13	4
A_4	20	13	9	11

通过表上作业法求解上述运输问题,得到最优解见表4,此时总运输费用为40万元。计算实际调运时间见表5,假设调运为并行进行,则须最小时间为42h,若时间约束 $T=40$ h,则将调运时间超出时间约束的最大调运量 x_{24} 对应的单位运价 c_{24} 改为 M ,同时为使各调运量满足运力约束,将 x_{13} 对应的单位运价 c_{13} 改为 M ,通过重新计算得到调运量调整结果见表6,此时运输总费用为39万元。

表3 运力约束表

	B_1	B_2	B_3	B_4
A_1	40	24	18	44
A_2	30	26	36	20
A_3	20	28	48	16
A_4	50	26	20	30

表4 A运输问题表上作业法的调运量

	B_1	B_2	B_3	B_4	供应量
A_1	10		20		30
A_2	20			15	35
A_3		20		10	30
A_4		20			20
需求量	30	40	20	25	

表5 调运时间表

	B_1	B_2	B_3	B_4
A_1	20		38	
A_2	32			42
A_3		35		34
A_4		33		
	B_1	B_2	B_3	B_4

表6 调运量调整表

	B_1	B_2	B_3	B_4	供应量
A_1	15			15	30
A_2	15		20		35
A_3		20		10	30
A_4		20			20
需求量	30	40	20	25	

4 结束语

本文通过构造基于路线可靠度、费用、时间、运力多重约束的航油运输问题求解模型,为解决多目标运输问题或多参数约束线路优化问题提供了一种新的思路,并通过实例分析验证了模型的可行性,为实现油料调运的科学、及时、高效保障提供了有效手段。

参考文献:

[1] 杨建军. 油料调运过程的数学建模[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(5):91-94.
 YANG Jianjun. Modeling of fuel allocation process[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2005,6(5):91-94. (in Chinese)

[2] 吴雨荣,李步军. 赋权多阶段有向图最短路的求法[J]. 淮北煤炭师范学院学报:自然科学版,2007,28(4):23-26.
 WU Yurong, LI Bujun. Several solutions to the shortest path problem of multi-stage weighted directed graph[J]. Journal of Huaibei coal industry teachers college: natural science edition, 2007,28(4):23-26. (in Chinese)

[3] Bakeb B, Yechew A. A genetic algorithm for the vehicle routing problem[J]. Computers operations research, 2003,30(2):787-800.

[4] Zhang Liping, Chai Yueting. Improved genetic algorithm for vehicle routing problem[J]. Systems engineering theory & prac-

tics, 2002, 22 (8): 79 - 84.

- [5] 陈绍顺, 郭乃林, 姜思山. 受时间约束的运输问题的表上作业法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2002, 3(4): 91 - 94.
CHEN Shaoshun, GUO Nailin, JIANG Sishan. Scheduling method in table of transportation problem limited in time[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2002, 3(4): 91 - 94. (in Chinese)
- [6] Basu M. Fuel constrained economic emission load dispatch using hopfield neural networks[J]. Electric power systems research, 2002, 63 (1): 51 - 57.
- [7] Yalcinoz T, Cory B J, Short M J. Hopfield neural network approaches to economic dispatch problems[J]. International journal of electrical power and energy systems, 2001, 23 (6): 435 - 442.
- [8] Lifei Cheng, Duran Marco A. Logistics for world - wide crude oil transportation using discrete event simulation and optimal control[J]. Computers & chemical engineering, 2004, 28: 897 - 911.
- [9] HO Y C, CHIEN S H. A simulation study on the performance of task - determination rules and delivery - dispatching rules for multiple - load AGVs [J]. International journal of production research, 2006, 44(20): 4193 - 4222.
- [10] YingChin Ho, HaoCheng Liu. A simulation study on the performance of pickup - dispatching rules for multiple - load AGVs [J]. Computers & industrial engineering, 2006 (51): 445 - 463.
- [11] 白国仲. B 运输问题及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(11): 97 - 102.
BAI Guozhong. B - Transportation problems[J]. Systems engineering - theory & practice, 1997, 17(11): 97 - 102. (in Chinese)
- [12] 白国仲, 毛经中. C 运输问题[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(7): 91 - 96.
BAI Guozhong, MAO Jingzhong. C - transportation problems[J]. Mathematics in practice and theory, 2004, 34(7): 91 - 96. (in Chinese)
- [13] 白国仲, 毛经中. D 运输问题[J]. 系统工程, 2004, 22(4): 21 - 25.
BAI Guozhong, MAO Jingzhong. D - transportation problems[J]. Systems engineering, 2004, 22(4): 21 - 25. (in Chinese)
- [14] 张锦明, 洪刚, 文锐, 等. Dijkstra 最小短路径算法优化策略[J]. 测绘科学, 2009, 34 (5): 97 - 100.
ZHANG Jiming, HONG Gang, WEN Rui, et al. Optimization strategies of the Dijkstra's shortest route algorithm[J]. Science of surveying and mapping, 2009, 34 (5): 97 - 100. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

Aviation Fuel Transportation Optimization Based on Multi - restriction Model

ZHANG Lai - shun, WANG Ying, YAO Di, ZHANG Bing

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to improve the transportation efficiency and saving transportation cost of aviation fuel, a multi - restriction model - based optimization dispatch method is proposed. On the basis of analyzing the aviation fuel transportation pattern and the basic transportation principles, a simplification of the transportation problem is done. Again based on the related theory of network optimization and transportation problem, a multi - restriction model is established and the mathematical description of reliability restriction, cost restriction, time restriction and transport - capacity restriction is performed, then the algorithm and the solution steps based on multi - restriction are given. An example analysis of the established model is done by using the Dijkstra algorithm and work on table method. The results show that this model is accurate and effective in solving the problem of transportation optimization.

Key words: aviation fuel; transportation problem; multi - restriction model; transportation optimization; transport - reliability restriction