

区际救援物资中转调度的多目标优化问题研究

李周清,马祖军

LI Zhou-qing, MA Zu-jun

西南交通大学 物流学院,成都 610031

School of Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

E-mail: zzzq8088@126.com

LI Zhou-qing, MA Zu-jun. Multi-objective optimization problem in transshipment scheduling of inter-regional relief materials. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(12): 28-31.

Abstract: Based on the scheduling problem of large-scale, long distance and varieties relief materials in inter-regional joint allocation and transportation, a multi-objective optimization model for transshipment scheduling is developed to minimize the total travel time and transportation costs. And a multi-objective co-evolutionary genetic algorithm is also proposed to solve the model. Finally, the validity of the model and algorithm is demonstrated by a numerical example, and the results show that many Pareto optimal solutions can be effectively obtained.

Key words: relief materials; transshipment node; scheduling optimization; multi-objective genetic algorithm

摘要:针对大规模、远距离和多品种的区际救援物资联动调运问题,以区际救援物资送达受灾城市总时间最短和总成本最小为目标,建立了一个区际救援物资中转调度的多目标优化模型,并设计了一种多目标协进化遗传算法。算例分析验证了该算法能够较好地获取问题的 Pareto 最优解。

关键词:救援物资; 中转网点; 优化调度; 多目标遗传算法

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.12.008 **文章编号:** 1002-8331(2010)12-0028-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** O221.3

1 引言

应急物流是在特殊条件下发生的物流活动,其根本目的就是实现对突发事件的应急物资保障。按照应急分级响应机制,各级政府负责启动应急物流预案,合理调拨由动用储备、强制征用、紧急采购与突击生产、社会捐赠和国际援助等多种途径筹集的应急物资;合理组织运输,采取必要措施,协调、疏导或消除不利于应急处置工作的因素和障碍,以便应急物资在最短的时间内,以最快的速度、最安全的方式运输到灾区^[1]。因此,合理规划应急响应阶段储备物资的紧急调运,以及危机持续期间各种救援物资的分阶段调运,可以在很大程度上减少应急物流运作的盲目性,从而提高应急物流的保障效益和效率。

有关应急物资调运问题的研究,Ardekan 对墨西哥城大地震发生后的灾后救援与重建工作进行了研究,提出救援物资的运输需要优化管理,以提高运作效率,并且进一步指出救援物资运输及其相关活动过程中所面临的问题是应急管理的重要组成部分以及灾后重建的关键^[2]。Wael 把灾害后引起的救援物资运输及人员疏散的情况归属于联合路径分配与指派问题^[3]。Barbarosoglu 则提出一个两阶段多运输方式、多种类物资的网络流模型用于解决救援物资的运输计划^[4]。上述文献的研究背

景都是基于应急物流与商业物流同步发展的基础上,因而一些商业物流中的先进物流理念和运作方式能得以充分的应用和执行。文献[5]分析指出我国现有的救灾管理体系中,救灾物资主要来源于中央救灾物资储备库和未受灾地区的社会捐赠,并指出因救灾储备中心布局不合理,使得物资保障成本较高,容易出现救灾物资供需失衡等问题,从而设计了一个由救灾物资收集中心、物资配送中心、救助中心组成的三级结构的救灾物流配送系统,但没有建立有效的救灾物资优化调度模型。为此,从我国救灾物资分散储备和管理的实情出发,针对大规模、远距离和多品种的区际救援物资联动调运问题,以协同救援运作、有效整合众多应急力量的角度,建立区际救援物资中转调度的多目标优化模型,弥补应急物流中出现的救灾物资需求信息传递缓慢,需求拆分与组配不合理等问题,从而发挥联动应急救援的协同效应,增强和提高各级政府间协同应急响应效率和效果。

2 模型的建立

2.1 问题描述

大规模区际救援物资的联动调运中,供应点可分为两类:纯供应点和中转供应点。中转供应点接收过远区际政府供应的

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.70771094);中国博士后科学基金资助项目(China Postdoctoral Science Foundation under Grant No.20090450637);四川省青年科技基金项目(No.09ZQ026-021);教育部人文社会科学基金项目(No.08JC630067)。

作者简介:李周清(1976-),博士生,研究方向:物流战略规划与系统优化、应急管理;马祖军(1974-),教授,博士生导师,研究方向:物流系统优化、应急管理、逆向物流。

收稿日期: 2010-01-22 **修回日期:** 2010-03-10

救灾物资,按照灾区应急指挥中心提供的需求信息,利用闲置公共资源,把多渠道筹集的多类救援物资合理拆分与组配后,根据灾情的发展变化,接受应急调度派遣,分阶段、持续有序地运输到受灾城市。设有 m 个区际纯供应点和 n 个中转供应点联动调运 h 类救援物资到 l 个受灾城市,纯供应点的物资到达中转供应点后,与中转供应点的物资经共同中转作业后(短暂存储、拆分与组配、装卸搬运等)运输到受灾城市;并考虑中转供应点组织接收以及暂存救援物资所发生的固定费用,使得整个调运系统的总成本和运输时间最小化。

建模之前作如下假设:(1)每个中转供应点的中转作业费用函数和固定费用函数已知;(2)纯供应点到中转供应点的单位运输成本已知;(3)中转供应点到受灾城市的单位运输成本已知;(4)纯供应点和中转供应点的第 h 类物资供应量已知;(5)中转供应点的仓库容量已知;(6)各受灾城市的第 h 类物资需求量已知;(7)从纯供应点到中转供应点,以及从中转供应点到受灾城市批量组织物资运输的时间函数已知(可根据相关运输管理部门的统计数据建立),并假定可以通过交通管制等措施消除不利于任务完成的阻碍因素。

2.2 建立模型

(1)设置变量与参数

h ——救援物资种类, $h=1, 2, \dots, p$;

i ——区际纯供应点, $i=1, 2, \dots, m$;

j ——中转供应点, $j=1, 2, \dots, n$;

k ——受灾城市, $k=1, 2, \dots, l$;

S_{hi} ——区际纯供应点 i 的第 h 类物资供应量, $h=1, 2, \dots, p, i=1, 2, \dots, m$;

V_{hj} ——中转供应点 j 的第 h 类物资供应量, $h=1, 2, \dots, p$;

U_j ——中转供应点 j 的容量限制, $j=1, 2, \dots, n$;

Z_{hj} ——中转供应点 j 的第 h 类物资通过量, $h=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n$;

D_{hk} ——受灾城市 k 的第 h 类物资需求量, $h=1, 2, \dots, p, k=1, 2, \dots, l$;

X_{hij} ——从区际纯供应点 i 运输到中转供应点 j 的第 h 类物资数量, $h=1, 2, \dots, p, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$;

Y_{hjk} ——从中转供应点 j 运输到受灾城市 k 的第 h 类物资数量, $h=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, l$;

c_{hij} ——从区际纯供应点 i 到中转供应点 j 运输第 h 类物资的单位运输费用, $h=1, 2, \dots, p, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$;

d_{hjk} ——从中转供应点 j 到受灾城市 k 运输第 h 类物资的单位运输费用, $h=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, l$;

W_{hj} ——中转供应点 j 的第 h 类物资每单位通过量的变动费用(如仓库管理费或装卸搬运费等,与中转供应点的某类物资通过量的规模有关), $h=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n$;

F_{hj} ——第 h 类物资在中转供应点 j 期间的平均固定费用, $h=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n$;

a_{hj} ——中转供应点 j 的第 h 类物资流量指数, $0 < a_{hj} < 1$, 中转供应点的规模越大,单位变动费用越小, $h=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n$;

T_{ij} ——常态下从纯供应点 i 到中转供应点 j 组织大批量运输所需的平均时间, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$;

T_{ij}^* ——非常态下(比如某段弧采取交通管制)从纯供应点 i 到中转供应点 j 组织大批量运输所需的平均时间, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$;

T_{jk} ——常态下从中转供应点 j 到受灾城市 k 组织大批量运输所需的平均时间, $j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, l$;

T_{jk}^* ——非常态下(比如某段弧采取交通管制)从中转供应点 j 到受灾城市 k 组织大批量运输所需的平均时间, $j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, l$;

$$x_{hij} = \begin{cases} 1 & \text{弧}(i, j) \text{ 上有流量通过} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$h=1, 2, \dots, p, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$$

$$y_{hjk} = \begin{cases} 1 & \text{弧}(j, k) \text{ 上有流量通过} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$h=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, l$$

(2)目标函数

$$\min z1 = \sum_{h=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{hij} X_{hij} + \sum_{h=1}^p \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l d_{hjk} Y_{hjk} + \sum_{h=1}^p \sum_{j=1}^n W_{hj} (Z_{hj})^{a_{hj}} \cdot \text{sign}(Z_{hj}) + \sum_{h=1}^p \sum_{j=1}^n F_{hj} (Z_{hj}) \quad (1)$$

$$\min z2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{ij} \left(\sum_{h=1}^p X_{hij} \right) \cdot x_{hij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l T_{jk} \left(\sum_{h=1}^p Y_{hjk} \right) \cdot y_{hjk} \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{h=1}^p \sum_{j=1}^n X_{hij} = \sum_{h=1}^p S_{hi} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$\sum_{h=1}^p \sum_{i=1}^m X_{hij} + \sum_{h=1}^p V_{hj} = \sum_{h=1}^p Z_{hj} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{h=1}^p Z_{hj} = \sum_{h=1}^p \sum_{k=1}^l Y_{hjk} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{h=1}^p \sum_{j=1}^n Y_{hjk} = \sum_{h=1}^p D_{hk} \quad k=1, 2, \dots, l \quad (6)$$

$$\sum_{h=1}^p Z_{hj} \leq U_j \quad j=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\text{sign}(Z_{hj}) = \begin{cases} 1 & Z_{hj} > V_{hj} \\ 0 & Z_{hj} = V_{hj} \end{cases} \quad (8)$$

$$F_{hj}(Z_{hj}) = \begin{cases} 0 & \text{若 } Z_{hj} = V_{hj} \\ F_{hj} & \text{若 } V_{hj} < Z_{hj} \end{cases} \quad h=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$T_{ij} \left(\sum_{h=1}^p X_{hij} \right) = \begin{cases} T_{ij} & \text{若 } 0 < \sum_{h=1}^p X_{hij} \leq A \\ T_{ij}^* & \text{若 } A < \sum_{h=1}^p X_{hij} \end{cases} \quad (10)$$

$h=1, 2, \dots, p, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n, A$ 为一常量

$$T_{jk} \left(\sum_{h=1}^p Y_{hjk} \right) = \begin{cases} T_{jk} & \text{若 } 0 < \sum_{h=1}^p Y_{hjk} \leq B \\ T_{jk}^* & \text{若 } B < \sum_{h=1}^p Y_{hjk} \end{cases} \quad (11)$$

$h=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, l, B$ 为一常量

$$\begin{cases} X_{hij}, Y_{hjk}, Z_{hj}, W_{hj}, F_{hj} \geq 0 \\ T_{ij}, T_{ij}^*, T_{jk}, T_{jk}^* \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$h=1, 2, \dots, p, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, l$

这是一个多目标非线性规划模型,且属于多品种、非线性网点费用的转运问题。其中,目标函数(1)和(2)分别表示整个区际救援物资调运系统的运作成本与运输时间最小化。式(3)~式(6)是平衡转运约束条件,其中式(4)满足了中转兼供应源的双重角色。式(7)是各中转供应点的流量限制约束。式(8)为符

号函数,表示有纯供应点的某种物资通过时才计算中转点的作业费用,否则中转点只当作一般供应点处理而不计算作业费用。式(9)是中转供应点的平均固定费用,是一个关于节点流量的分段函数;式(10)表示从纯供应点到中转供应点组织大批量物资运输的平均时间,是一个关于弧流量的分段函数;式(11)表示从中转供应点到受灾城市组织大批量物资运输的平均时间,也是一个关于弧流量的分段函数;式(12)为非负变量约束。

3 模型求解算法

近年,有许多关于解决运输问题的进化方法的研究。Vignaux 和 Michalewicz 等首先讨论了运用遗传算法来解决线性和非线性运输问题,利用矩阵来构造染色体的表示,并设计了基于矩阵的杂交和变异^[6-8]。Yang 和 Gen 将 Michalewicz 的工作推广到双准则线性运输问题和双准则三维运输问题。求解线性多目标运输问题的常规方法是在决策空间或目标空间产生非劣端点,根据这一思路,他们用遗传算法寻找非劣点集合,并用自适应移动线技术建立一种求加权和的方法,迫使遗传算子搜索目标空间中的 Pareto 解的集合^[9]。

针对上述区际救援物资中转调度的多目标非线性优化问题,结合 Yang 和 Gen 设计的方法,在约束条件处理上采取协进化思想的约束处理技术。协进化原理就是算法中采用多种群,或者将一个种群分为多个部分,各种群在各自独立进化的同时相互间共享和交互信息,各种群不仅利用从外界获取的信息来指导自身的搜索,同时还把探索得到的经验与其他种群分享,从而使整个系统协同进化,直到获得最优解^[10]。另外,鉴于多品种、非线性转运问题的复杂度,染色体往往是一个维数较大的稀疏矩阵,为缩减无效变异次数来提高全局收敛速度,将费用矩阵用于变异算子运作的参照标杆。至此,设计了一种运用矩阵编码,实行多种群模块化操作,加入变异参照标杆的多目标协进化遗传算法,并通过 MATLAB 的矩阵运算功能获取问题的 Pareto 最优解。该算法思路如下:

(1) 参数设置

设定种群大小 pop_size , 变异率 p_m , 交叉率 p_c 和最大代数 max_gen , $E=[]$, 并设定最大规模 \bar{E} 。

(2) 染色体编码

采用矩阵编码方法,一个解矩阵代表一个染色体。利用协进化原理采用多种群,每个种群(解矩阵)根据纯供应点和中转供应点分解为两个子矩阵模块,其中,纯供应点子矩阵由 m 个、中转供应点子矩阵由 n 个“嵌入式”模块组成。纯供应点子矩阵的每个模块有 $n \times p$ 行 l 列,代表 p 种物资通过 n 个中转供应点运往 l 个受灾城市;中转供应点子矩阵的每个模块有 p 行 l 列,表示中转供应点的自有物资直接运往 l 个受灾城市。这样设计可以对某一个“嵌入式”模块或者子矩阵模块参照费用矩阵单独进行变异操作,使得整个解矩阵可以信息共享。

(3) 初始化

随机产生初始解矩阵 $X_p=(x_{hjk}^p)$, $p=1, 2, \dots, pop_size$; X_p 表示第 p 个染色体, x_{hjk} 是相应的决策变量。在集合 $\{1, 2, \dots, (pmn+pn)\}$ 中随机产生一个数 s , 计算其行和列, 并按照运输平衡条件进行赋值, 然后修改供应和需求数据, 这一过程直到集合 $\{1, 2, \dots, (pmn+pn)\}$ 为空。

(4) 交叉

产生 $[0, 1]$ 之间的随机数 $r_p, p=1, 2, \dots, pop_size$; 如果 $r_p < p_c$,

则 X_p 选作交叉的双亲。例如, 亲体 X_1 和 X_2 选作交叉, 杂交算子将产生两个子代 A 和 B , 其中:

$$\begin{cases} A=c_1 \cdot X_1+c_2 \cdot X_2 \\ B=c_1 \cdot X_2+c_2 \cdot X_1 \end{cases} \quad c_1, c_2 \geq 0; c_1+c_2=1$$

(5) 变异

①产生 $[0, 1]$ 之间的随机数 $r_p, p=1, 2, \dots, pop_size$; 如果 $r_p < p_m$, 则 X_p 选作变异的双亲;

②任选 p 行和 q 列, 建立子矩阵;

③参照费用矩阵中的对应元素, 根据目标函数值的最小化或最大化取向, 决定子矩阵对角顶点元素变异的方向, 如果所选取的子矩阵参照费用矩阵变异会与目标函数值的取向背离, 则放弃本次变异操作;

④对子矩阵重新赋值, 以满足子矩阵的约束;

⑤用子矩阵中的新元素替换矩阵 X_p 中的相应元素, 以产生后代 X_p^* 。

(6) 非线性费用模块

根据解矩阵的两个子矩阵模块计算各中转供应点的流量, 利用中转作业费用函数和固定费用函数进行非线性费用处理。

(7) 修改集合 E

①计算双亲和后代 X_p 的每个染色体的目标值: $z^p=(z^1, z^2)$, 其中, $z^1=\min z_1, z^2=\min z_2$;

②通过向集合 E 中增加新的非劣解并按照成员的拥挤距离, 保留拥挤距离最大的 \bar{E} 个成员。

③确定集合 E 中新的特殊点 (z_{\min}^1, z_{\max}^2) 和 (z_{\max}^1, z_{\min}^2) 。

(8) 评估

计算双亲和后代 X_p 每个染色体的适值: $eval(X_p)=\alpha z^1+\beta z^2$, 其中, $\alpha=|z_{\max}^2-z_{\min}^2|, \beta=|z_{\max}^1-z_{\min}^1|$ 。

(9) 选择

在双亲和后代中选择最好的 pop_size 个染色体以产生下一代。

(10) 终止条件

如果 $t=max_gen$, 则停止; 否则令 $t=t+1$, 转步骤(4)。

4 算例分析

因目前在物资调度问题的研究中, 还没有同时嵌入中转网点运作规模函数和弧流量分段函数的算例, 由此, 设计如下算例: 设有一项调运任务, 5 个区际纯供应点和 3 个中转供应点, 联动调运 3 类救援物资到 10 个受灾城市, 纯供应点的物资与中转供应点的物资须经共同作业后运往灾区城市。有关函数、参数与变量如下(算例中的已知变量由 MATLAB 自带函数 $randint()$ 随机生成):

$$F_{ij}(Z_{ij})= \begin{cases} 0 & \text{若 } Z_{i1}=3\ 000 \\ 10\ 000 & \text{若 } 3\ 000 < Z_{i1} \\ 0 & \text{若 } Z_{i2}=2\ 300 \\ 12\ 000 & \text{若 } 2\ 300 < Z_{i2} \\ 0 & \text{若 } Z_{i3}=2\ 700 \\ 15\ 000 & \text{若 } 2\ 700 < Z_{i3} \\ 0 & \text{若 } Z_{i2}=3\ 500 \\ 12\ 000 & \text{若 } 3\ 500 < Z_{i2} \\ 0 & \text{若 } Z_{i2}=2\ 500 \\ 10\ 000 & \text{若 } 2\ 500 < Z_{i2} \\ 0 & \text{若 } Z_{i2}=3\ 000 \\ 14\ 000 & \text{若 } 3\ 000 < Z_{i2} \\ 0 & \text{若 } Z_{i3}=2\ 500 \\ 10\ 000 & \text{若 } 2\ 500 < Z_{i3} \\ 0 & \text{若 } Z_{i3}=4\ 500 \\ 15\ 000 & \text{若 } 4\ 500 < Z_{i3} \\ 0 & \text{若 } Z_{i3}=1\ 000 \\ 13\ 000 & \text{若 } 1\ 000 < Z_{i3} \end{cases}$$

$$W_{ij}Z_{ij}^{a_{ij}}= \begin{cases} 3\ 500Z_{i1}^{a_{i1}} & 3\ 000Z_{i2}^{a_{i2}} & 2\ 500Z_{i3}^{a_{i3}} \\ 2\ 000Z_{i1}^{a_{i1}} & 2\ 000Z_{i2}^{a_{i2}} & 3\ 000Z_{i3}^{a_{i3}} \\ 2\ 500Z_{i1}^{a_{i1}} & 2\ 500Z_{i2}^{a_{i2}} & 3\ 000Z_{i3}^{a_{i3}} \end{cases} \quad \text{取值 } a_{ij}=0.5$$

$$T_{ij} \left(\sum_{h=1}^p X_{hij} \right) = \begin{cases} T_{ij}^* & \text{若 } 0 < \sum_{h=1}^p X_{hij} \leq 3000 \\ T_{ij}^s & \text{若 } \sum_{h=1}^p X_{hij} > 3000 \end{cases} \quad T_{ij}^* = \begin{pmatrix} 15 & 18 & 20 \\ 12 & 17 & 15 \\ 15 & 12 & 10 \\ 13 & 11 & 18 \\ 15 & 14 & 15 \end{pmatrix}$$

$$T_{jk} \left(\sum_{h=1}^p Y_{hjk} \right) = \begin{cases} T_{jk}^* & \text{若 } 0 < \sum_{h=1}^p Y_{hjk} \leq 3000 \\ T_{jk}^s & \text{若 } \sum_{h=1}^p Y_{hjk} > 3000 \end{cases}$$

$$T_{jk}^* = \begin{pmatrix} 17 & 15 & 13 & 11 & 12 & 16 & 12 & 14 & 13 & 10 \\ 13 & 11 & 15 & 16 & 18 & 10 & 12 & 10 & 12 & 14 \\ 14 & 12 & 13 & 13 & 12 & 13 & 11 & 17 & 15 & 13 \end{pmatrix}$$

$$S_{hk} = \begin{pmatrix} 1000 & 1500 & 1600 & 2000 & 1300 \\ 2000 & 1500 & 2000 & 2000 & 1700 \\ 2000 & 1000 & 1400 & 2000 & 2000 \end{pmatrix}$$

$$V_{hj} = \begin{pmatrix} 3000 & 3500 & 2500 \\ 2300 & 2500 & 4500 \\ 2700 & 3000 & 1000 \end{pmatrix} \quad U_j = \begin{pmatrix} 20000 & 20000 & 20000 \end{pmatrix}$$

$$D_{hk} = \begin{pmatrix} 1800 & 2000 & 2500 & 1200 & 2000 & 1400 & 1500 & 1000 & 1500 & 1500 \\ 2000 & 2000 & 1400 & 1300 & 2000 & 3000 & 1500 & 2000 & 1500 & 1800 \\ 1200 & 2000 & 1600 & 1000 & 1000 & 1600 & 1000 & 1000 & 2000 & 2700 \end{pmatrix}$$

$$c_{hij}^{h=1} = \begin{pmatrix} 20 & 24 & 18 \\ 15 & 22 & 20 \\ 12 & 17 & 23 \\ 14 & 24 & 18 \\ 23 & 19 & 16 \end{pmatrix} \quad c_{hij}^{h=2} = \begin{pmatrix} 16 & 18 & 20 \\ 15 & 25 & 20 \\ 16 & 18 & 23 \\ 18 & 25 & 15 \\ 20 & 15 & 10 \end{pmatrix} \quad c_{hij}^{h=3} = \begin{pmatrix} 13 & 15 & 15 \\ 18 & 23 & 20 \\ 12 & 15 & 20 \\ 15 & 22 & 15 \\ 15 & 18 & 15 \end{pmatrix}$$

$$d_{hjk}^{h=1} = \begin{pmatrix} 12 & 10 & 15 & 12 & 11 & 17 & 15 & 18 & 20 & 15 \\ 10 & 12 & 14 & 15 & 12 & 16 & 17 & 18 & 22 & 16 \\ 11 & 13 & 14 & 16 & 18 & 20 & 21 & 25 & 16 & 15 \end{pmatrix}$$

$$d_{hjk}^{h=2} = \begin{pmatrix} 10 & 10 & 12 & 18 & 14 & 15 & 18 & 15 & 20 & 25 \\ 15 & 12 & 18 & 12 & 12 & 16 & 20 & 15 & 25 & 12 \\ 15 & 15 & 18 & 20 & 12 & 25 & 22 & 22 & 15 & 15 \end{pmatrix}$$

$$d_{hjk}^{h=3} = \begin{pmatrix} 12 & 11 & 10 & 15 & 14 & 15 & 20 & 15 & 10 & 15 \\ 15 & 10 & 16 & 10 & 12 & 18 & 15 & 10 & 15 & 12 \\ 12 & 15 & 15 & 15 & 18 & 22 & 18 & 20 & 25 & 20 \end{pmatrix}$$

多目标协进化遗传算法的参数设置如下:种群规模定为 20,最大代数 500,交叉率 $p_c=0.4$,杂交比例为 $c_1=0.2$ 及 $c_2=0.8$,变异率 $p_m=0.2$,变异比例为 50%,最大规模 $\bar{E}=20$ 。

用 MATLAB R2009a 编程求解非线性多目标救援物资的中转优化调度模型,在 Intel Core 2 CPU 和 2 GB 内存的微机上对测试算例进行求解,随机运行 5 次,平均计算时间为 12.48 min。图 1 是由多目标协进化遗传算法求得的救援物资中转调度模型的 Pareto 最优解。其中,两个端点是 $(1.5004 \times 10^6, 1055)$ 和 $(1.7265 \times 10^6, 801)$ 。

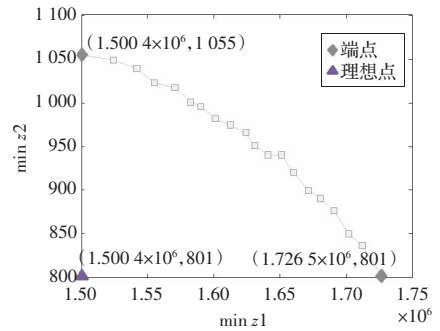


图 1 多目标救援物资中转调度模型的 Pareto 最优解

图 2 和图 3 分别是目标 1 与目标 2 最优时的救援物资调运安排。从图中可知,目标 1 最优时,纯供应点的一类物资从中转点 2 和 3 转运,三类物资从中转点 1 和 2 转运,而二类物资全部从中转点 1 转运,这体现了在考虑非线性节点费用情况下,集中化的规模运作能带来成本的节约。图中黑实线弧表示该路段可能需要采取诸如交通管制等非常规措施才能完成此

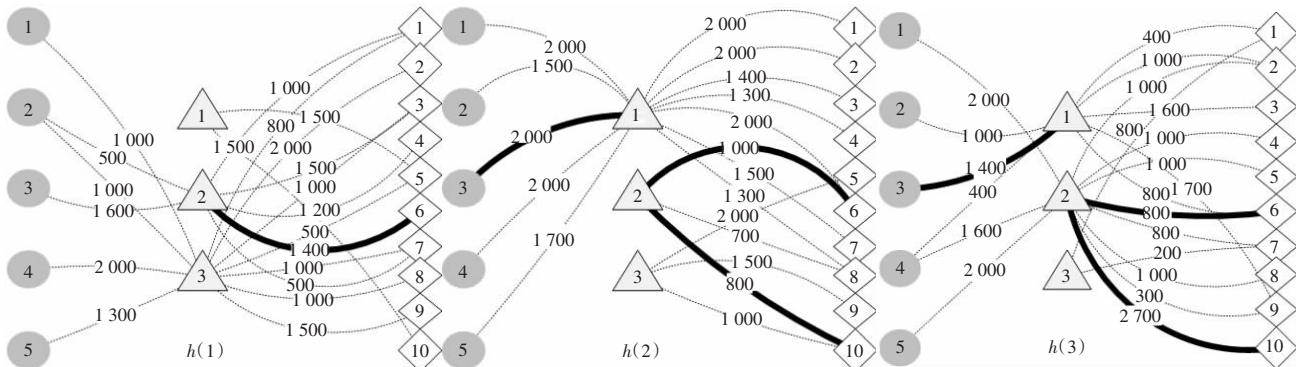


图 2 目标 1 最优时的救援物资调运安排 ($\min z_1=1.5004 \times 10^6, \min z_2=984$)

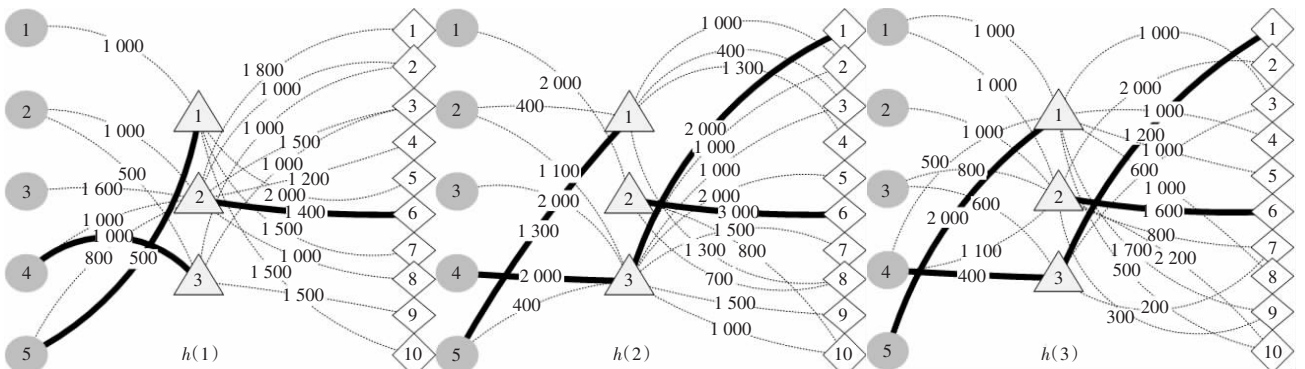


图 3 目标 2 最优时的救援物资调运安排 ($\min z_1=1.7125 \times 10^6, \min z_2=801$)