

多级多受灾点连续消耗应急物资调度优化策略

张力丹¹, 李超¹, 陈飙松^{*1}, 李杰²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 佛山市雅洁源科技有限公司, 广东 佛山 528200)

摘要: 灾后应急救援十分关键,特别是多地同时受灾情况下.为此,考虑将灾民安置与物资运输一体化规划,建立连续消耗多级应急物资调配数学模型.在此基础上,以应急系统施救成本和施救不及时损失为目标函数构建优化模型,并应用遗传算法(GA)和序列线性规划(SLP)算法相结合策略对物资调配进行优化.构造四级救灾物资调配算例模拟救灾过程.数值结果表明,使用GA全局寻优结合SLP局部寻优策略相较单一优化算法能有效找到更优解.所提出的优化策略可为灾后多级多受灾点连续消耗应急物资调度提供可行方案.

关键词: 应急物资分配调度;遗传算法(GA);序列线性规划(SLP)算法;多级多受灾点;连续消耗

中图分类号: N945.25

文献标识码: A

doi:10.7511/dllgxb201705010

0 引言

近年来,突发事件的频繁发生对公众生命与财产安全造成了严重危害.此类事件持续时间越长,受害者受到的威胁就越大.因此,灾害发生后,及时安置受灾群众并高效地将分散的应急物资集中于有消耗需求的地点具有重要意义,可极大地避免伤亡和损失^[1].

众多学者针对物资调配问题进行了相关研究.潘郁等^[2]运用粒子群法求解单一事故爆发点的应急物资调度问题. Zhang等^[3]采用二叉空间分割树改进变异机制的遗传算法,解决多种应急物资针对单一事故爆发点分配问题. Ren等^[4]在特定交通网络中,构造多种应急物资分配的多周期动态模型,并用混合遗传算法进行求解.针对日益重要的多级分配问题,陈莹珍等^[5]将进化差分方法应用于多受灾点自救互救问题当中.庞海云等^[6]采用粒子群法以损失最小为单一目标,考虑外部物资集散中心与灾区附近配送中心相合作进行应急物资调配的问题.研究工作已从多点对单点救援发展到多点对多点救援,问题更复杂且更

面向具体需求.

在算法方面,此类问题多用新式智能算法,但由于其设计变量较多,求解规模较大,单一的智能优化算法可能搜索不到令人满意的结果,如粒子群法处理较大规模的问题(尤其是复杂多峰问题)时,易陷入早熟收敛并且对学习因子与惯性系数等参数具有一定的依赖性.遗传算法求解规模较大的问题时需要增加交叉变异概率,但会导致算法局部搜索能力较差^[7].因此,很多学者致力于改进智能算法以求得更优解.如潘郁等^[2]和庞海云等^[6]使用了改进的粒子群法;Hu等^[8]、Ko等^[9]和Gen等^[10]将遗传算法改进求解应急物资调度问题;张天骄等^[11]将遗传算法与蚁群算法相结合,使得前者为后者提供更好的信息素分配.但对于设计变量数目更加庞大的算例,运用智能算法需要增加种群数量^[12],这使得基于种群更替的智能算法迭代过程变得更为冗长且对算法参数的选择具有较强的依赖性,有时易陷入局部收敛.因此,在智能算法中引入局部搜索机制以增强算法性能是十分必要的^[13-14].

在众多学者的研究成果基础上,本文在模型

的构建与求解算法的选择方面进行进一步的探索,在构建模型方面做出如下改进:(1)考虑到灾难通常多点爆发,构建了国家、省、市、县分级多点的连续消耗应急物资调配模型.(2)考虑到灾民安置点应当为可以乘车辆抵达,或者靠近交通枢纽,能提供物资和服务的地方^[15],本文设置灾民安置与物资运输一体化的救助点,边消耗边出运,省去一些物资中转的复杂流程,从而将应急物资快速高效地集中于灾民手中.(3)救灾过程中不仅要考虑应急过程是否经济,更重要的是能够有效地减少生命与财产损失.为此,本文以应急系统施救成本和施救不及时损失为双重目标来优化得出应急物资调配的合理方案.在算法方面,本文考虑将遗传算法(genetic algorithm,GA)全局寻优与序列线性规划(sequential linear programming,SLP)算法局部寻优相结合求解此类大型应急物资调配问题.并通过数值算例表明,使用GA结合SLP寻优策略相较单一优化算法能有效找到更优解.

1 问题描述与优化模型

1.1 多级多受灾点物资调配的问题描述

当多地爆发灾害后,应及时设立省、市、县级(一、二、三级)近交通枢纽的灾民安置救助点(图1),为灾民提供必要的医疗服务、水和生活用品等.问题要求全国多地出救点向第一级救助点进行物资运输.物资调配过程中,在满足每级每点灾民需求的同时其余物资向下一级救助点出运.在应急物资缺失允许事后补足的条件下,尽可能满足应急地点的连续消耗并使得应急出救活动成本与损失最小,从而使应急物资层层满足灾民需求,

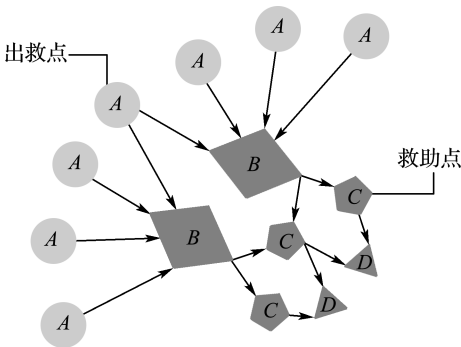


图 1 应急物资调配模型

Fig. 1 Emergency resources distribution and scheduling model

并在此基础上合理安排各出救点以及灾民安置救助点的物资出运量及路线.

设 $A_\alpha (\alpha = 1, 2, \cdots, p)$ 为全国的出救点, $B_\beta (\beta = 1, 2, \cdots, q)$ 为省级的救助点, $C_\gamma (\gamma = 1, 2, \cdots, r)$ 为市级的救助点, $D_\lambda (\lambda = 1, 2, \cdots, u)$ 为县级的救助点. 其中 p 代表全国的出救点个数, q, r, u 分别代表省、市、县级的救助点个数. 物资由 $\mathbf{A} = (A_1 \ A_2 \ \cdots \ A_{p-1} \ A_p)$ 向 $\mathbf{B} = (B_1 \ B_2 \ \cdots \ B_{q-1} \ B_q)$ 同时出运, 当有物资到达 B_β 时, 其在自我消耗物资的同时向市级救助点 $\mathbf{C} = (C_1 \ C_2 \ \cdots \ C_{r-1} \ C_r)$ 同时出运; 当有物资到达 C_γ 时, 其在自我消耗物资的同时向县级救助点 $\mathbf{D} = (D_1 \ D_2 \ \cdots \ D_{u-1} \ D_u)$ 同时出运, D_λ 只消耗物资不出运.

1.2 多级多受灾点物资调配优化模型的建立

设某点相邻两批物资到达的时间间隔为一个物资消耗周期(运输周期). 从发生灾害到各级救助点第1次有物资到达时, 因施救不及时而造成的损失无法避免, 因此不予考虑^[2]. 根据上文的问题描述建立优化模型:

A 组有 $p \times q$ 个设计变量, 分别表示其向 B 组每一个救助点出运的物资量, 设 x_{A_α, B_β} 为 A 组第 α 出救点向 B 组第 β 救助点运输的物资量.

$$\mathbf{x}_{A, B_\beta} = (x_{A_1, B_\beta} \ x_{A_2, B_\beta} \ \cdots \ x_{A_{p-1}, B_\beta} \ x_{A_p, B_\beta})$$

B 组有 $p \times q \times r$ 个设计变量, 分别表示当有物资到达 B 组时(物资总批次为出救点个数 p), B 组每一个救助点向 C 组每一个救助点出运的物资量, 设 $x_{\eta, B_\beta, C_\gamma} (\eta = 1, 2, \cdots, p)$ 为 B 组第 β 救助点在接到第 η 次物资补给后, 消耗物资同时向 C 组第 γ 救助点运输的物资量.

$$\mathbf{x}_{B, C_\gamma} = \begin{pmatrix} x_{1, B_1, C_\gamma} & x_{1, B_2, C_\gamma} & \cdots & x_{1, B_{q-1}, C_\gamma} & x_{1, B_q, C_\gamma} \\ x_{2, B_1, C_\gamma} & x_{2, B_2, C_\gamma} & \cdots & x_{2, B_{q-1}, C_\gamma} & x_{2, B_q, C_\gamma} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_{p-1, B_1, C_\gamma} & x_{p-1, B_2, C_\gamma} & \cdots & x_{p-1, B_{q-1}, C_\gamma} & x_{p-1, B_q, C_\gamma} \\ x_{p, B_1, C_\gamma} & x_{p, B_2, C_\gamma} & \cdots & x_{p, B_{q-1}, C_\gamma} & x_{p, B_q, C_\gamma} \end{pmatrix}$$

C 组有 $p \times q \times r \times u$ 个设计变量, 分别表示当有物资到达 C 组时(物资总批次为出救点个数与 B 组救助点个数乘积 $p \times q$), C 组每一个救助点向 D 组每一个救助点出运的物资量. 设 $x_{\xi, C_\gamma, D_\lambda} (\xi = 1, 2, \cdots, p \times q)$ 为 C 组第 γ 救助点在接到第 ξ 次物资补给后, 消耗物资同时向 D 组第 λ 救助点运输的物资量.

$$\boldsymbol{x}_{C,D_{\lambda}} = \begin{pmatrix} x_{1,C_1,D_{\lambda}} & x_{1,C_2,D_{\lambda}} & \cdots & x_{1,C_{r-1},D_{\lambda}} & x_{1,C_r,D_{\lambda}} \\ x_{2,C_1,D_{\lambda}} & x_{2,C_2,D_{\lambda}} & \cdots & x_{2,C_{r-1},D_{\lambda}} & x_{2,C_r,D_{\lambda}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_{p \times q-1,C_1,D_{\lambda}} & x_{p \times q-1,C_2,D_{\lambda}} & \cdots & x_{p \times q-1,C_{r-1},D_{\lambda}} & x_{p \times q-1,C_r,D_{\lambda}} \\ x_{p \times q,C_1,D_{\lambda}} & x_{p \times q,C_2,D_{\lambda}} & \cdots & x_{p \times q,C_{r-1},D_{\lambda}} & x_{p \times q,C_r,D_{\lambda}} \end{pmatrix}$$

目标函数：

$$\begin{aligned} \min Y_o = Z + K = & \sum_{\beta=1}^q \sum_{a=1}^p F_{A_a,B_{\beta}} x_{A_a,B_{\beta}} + \\ & \sum_{\eta=1}^p \sum_{\gamma=1}^r \sum_{\beta=1}^q F_{B_{\beta},C_{\gamma}} x_{\eta,B_{\beta},C_{\gamma}} + \\ & \sum_{\xi=1}^{p \times q} \sum_{\lambda=1}^u \sum_{\gamma=1}^r F_{C_{\gamma},D_{\lambda}} x_{\xi,C_{\gamma},D_{\lambda}} + \\ & \sum_{\beta=1}^q \sum_{i=1}^p K_{i,A,B_{\beta}} + \sum_{\gamma=1}^r \sum_{j=1}^{p \times q} K_{j,B,C_{\gamma}} + \\ & \sum_{\lambda=1}^u \sum_{l=1}^{p \times q \times r} K_{l,C,D_{\lambda}} \end{aligned} \tag{1}$$

式中： Z 为物资调配过程中的成本； K 为救灾过程中的总损失费用； $K_{i,A,B_{\beta}}$ 为 A 组出救点向 B 组第 β 救助点出救时在运输周期 $[t_{i-1,B_{\beta}}, t_{i,B_{\beta}})$ ($i=1,2,\cdots,p$) 中物资缺失的损失费用； $K_{j,B,C_{\gamma}}$ 为 B 组救助点向 C 组第 γ 救助点出救时在运输周期 $[t_{j-1,C_{\gamma}}, t_{j,C_{\gamma}})$ ($j=1,2,\cdots,p \times q$) 中物资缺失的损失费用； $K_{l,C,D_{\lambda}}$ 为 C 组救助点向 D 组第 λ 救助点出救时在运输周期 $[t_{l-1,D_{\lambda}}, t_{l,D_{\lambda}})$ ($l=1,2,\cdots,p \times q \times r$) 中物资缺失的损失费用； $F_{A_a,B}$ 为从 A_a 到 B 组出救时的单位成本(包括物资成本、运输成本、采购成本、存储成本等)， $F_{B_{\beta},C}$ 为从 B_{β} 到 C 组出救时的单位成本， $F_{C_{\gamma},D}$ 为从 C_{γ} 到 D 组出救时的单位成本。

物资需求约束条件：

$$\begin{aligned} 0 \leq x_{A_a,B_{\beta}} & \leq x_{A_a}^{\max} \\ 0 \leq x_{\eta,B_{\beta},C_{\gamma}} & \leq x_{B_{\beta}}^{\max} \\ 0 \leq x_{\xi,C_{\gamma},D_{\lambda}} & \leq x_{C_{\gamma}}^{\max} \end{aligned} \tag{2}$$

应急时间约束条件：

$$t_A \leq t_A^f; t_B \leq t_B^f; t_C \leq t_C^f \tag{3}$$

其中 $x_{A_a}^{\max}$ 、 $x_{B_{\beta}}^{\max}$ 、 $x_{C_{\gamma}}^{\max}$ 为 A、B、C 组第 α 、 β 、 γ 出救点最大物资出运量； t_A 、 t_B 、 t_C 表示每组应急活动时间， t_A^f 、 t_B^f 、 t_C^f 表示每组应急活动终止时间。

当某级某点在以一定的速度消耗应急物资并向下一级出运时，考虑到其在某时刻出现物资缺失应加入损失费用，用一个单位价格物资缺失单位时间的惩罚费用比 P 提高负消耗所占比重，将

其加入到目标函数中以尽量避免物资缺失。某级某点的损失费用如下：

情况 1 在某运输周期开始时应急物资为负消耗，物资补给后仍为负消耗，如图 2 所示。图中 G 为救助点当前物资量， x_{τ} 表示任意设计变量(补给物资量)。其惩罚费用为

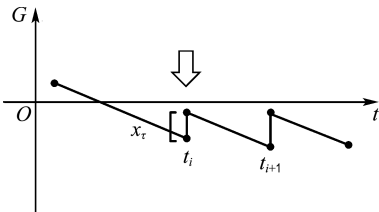


图 2 物资补给消耗过程 1

Fig. 2 The first figure of the process of resources consumption and supplement

A 组向 B 组运输时：

$$\begin{aligned} K_{i-1,A,B_{\beta}} = & -P \times F_{A,B}^i \int_{t_{i-1,B_{\beta}}}^{t_{i,B_{\beta}}} [G_{B_{\beta}}(t_{i-1,B_{\beta}}) - v_b t] dt = \\ & -P \times F_{A,B}^i \left[G_{B_{\beta}}(t_{i-1,B_{\beta}})(t_{i,B_{\beta}} - t_{i-1,B_{\beta}}) - \frac{1}{2} v_b (t_{i,B_{\beta}}^2 - t_{i-1,B_{\beta}}^2) \right] \end{aligned} \tag{4}$$

B 组向 C 组运输时：

$$\begin{aligned} K_{j-1,B,C_{\gamma}} = & -P \times F_{B,C}^j \int_{t_{j-1,C_{\gamma}}}^{t_{j,C_{\gamma}}} [G_{C_{\gamma}}(t_{j-1,C_{\gamma}}) - v_c t] dt = \\ & -P \times F_{B,C}^j \left[G_{C_{\gamma}}(t_{j-1,C_{\gamma}})(t_{j,C_{\gamma}} - t_{j-1,C_{\gamma}}) - \frac{1}{2} v_c (t_{j,C_{\gamma}}^2 - t_{j-1,C_{\gamma}}^2) \right] \end{aligned} \tag{5}$$

C 组向 D 组运输时：

$$\begin{aligned} K_{l-1,C,D_{\lambda}} = & -P \times F_{C,D}^l \int_{t_{l-1,D_{\lambda}}}^{t_{l,D_{\lambda}}} [G_{D_{\lambda}}(t_{l-1,D_{\lambda}}) - v_d t] dt = \\ & -P \times F_{C,D}^l \left[G_{D_{\lambda}}(t_{l-1,D_{\lambda}})(t_{l,D_{\lambda}} - t_{l-1,D_{\lambda}}) - \frac{1}{2} v_d (t_{l,D_{\lambda}}^2 - t_{l-1,D_{\lambda}}^2) \right] \end{aligned} \tag{6}$$

式中： $F_{A,B}^i \in \{F_{A_a,B}\}$ ，需判断 i 周期，A 组进行出救的出救点 A_a ； $F_{B,C}^j \in \{F_{B_{\beta},C}\}$ ，需判断 j 周期，B

组进行出救的救助点 B_β ; $F_{C,D}^l \in \{F_{C_\gamma,D}\}$, 需判断 l 周期, C 组进行出救的救助点 C_γ . $G_{B_\beta}(t)$ 、 $G_{C_\gamma}(t)$ 、 $G_{D_\lambda}(t)$ 为 t 时刻 B、C、D 组 β 、 γ 、 λ 点的物资存存量. v_b 、 v_c 、 v_d 为 A、B、C 组物资的消耗速率. $t_{i,B_\beta}(t_{i-1,B_\beta} < t_{i,B_\beta}; i=1,2,\cdots,p)$ 为第 i 消耗周期中 A 组到 B 组第 β 救助点的时间; $t_{j,C_\gamma}(t_{j-1,C_\gamma} < t_{j,C_\gamma}; j=1,2,\cdots,p \times q)$ 为第 j 消耗周期中 B 组到 C 组第 γ 救助点的时间; $t_{l,D_\lambda}(t_{l-1,D_\lambda} < t_{l,D_\lambda}; l=1,2,\cdots,p \times q \times r)$ 为第 l 消耗周期中 C 组到 D 组第 λ 救助点的时间.

情况 2 在一个物资消耗周期内, 某一时间点出现了应急物资为 0 的情况, 如图 3 所示, 此时在下一批应急物资到达之前, 将出现负消耗, 其损失费用为

A 组向 B 组运输时:

$$K_{i-1,A,B_\beta} = P \times F_{A,B}^i \int_{t_{i,B_\beta}^0}^{t_{i,B_\beta}} v_b t dt = \frac{1}{2} P \times F_{A,B}^i \times v_b [t_{i,B_\beta}^2 - (t_{i,B_\beta}^0)^2] \quad (7)$$

B 组向 C 组运输时:

$$K_{j-1,B,C_\gamma} = P \times F_{B,C}^j \int_{t_{j,C_\gamma}^0}^{t_{j,C_\gamma}} v_c t dt = \frac{1}{2} P \times F_{B,C}^j \times v_c [t_{j,C_\gamma}^2 - (t_{j,C_\gamma}^0)^2] \quad (8)$$

C 组向 D 组运输时:

$$K_{l-1,C,D_\lambda} = P \times F_{C,D}^l \int_{t_{l,D_\lambda}^0}^{t_{l,D_\lambda}} v_d t dt = \frac{1}{2} P \times F_{C,D}^l \times v_d [t_{l,D_\lambda}^2 - (t_{l,D_\lambda}^0)^2] \quad (9)$$

其中 t_{i,B_β}^0 、 t_{j,C_γ}^0 、 t_{l,D_λ}^0 分别为一个运输周期中应急物资为 0 的时刻, 具体表达形式如下:

$$\sum_{\nu=1}^i x_{\nu,B_\beta} = v_b (t_{i,B_\beta}^0 - t_{1,B_\beta}), \quad t_{i,B_\beta}^0 = \frac{1}{v_b} \sum_{\nu=1}^i x_{\nu,B_\beta} + t_{1,B_\beta} \quad (10)$$

$$\sum_{\varphi=1}^j x_{\varphi,C_\gamma} = v_c (t_{j,C_\gamma}^0 - t_{1,C_\gamma}), \quad t_{j,C_\gamma}^0 = \frac{1}{v_c} \sum_{\varphi=1}^j x_{\varphi,C_\gamma} + t_{1,C_\gamma} \quad (11)$$

$$\sum_{\delta=1}^l x_{\delta,D_\lambda} = v_d (t_{l,D_\lambda}^0 - t_{1,D_\lambda}), \quad t_{l,D_\lambda}^0 = \frac{1}{v_d} \sum_{\delta=1}^l x_{\delta,D_\lambda} + t_{1,D_\lambda} \quad (12)$$

其中 $x_{\nu,B_\beta} (\nu=1,2,\cdots,p)$ 为 A 组向 B 组第 β 救助点出运的第 ν 个运输周期中出运的物资量, 由

x_{A,B_β} 按出运时间顺序排序得到. $x_{\varphi,C_\gamma} (\varphi=1,2,\cdots,p \times q)$ 为 B 组向 C 组第 γ 救助点出运的第 φ 个运输周期中出运的物资量, 由 x_{B,C_γ} 按出运时间顺序排序得到. $x_{\delta,D_\lambda} (\delta=1,2,\cdots,p \times q \times r)$ 为 C 组向 D 组第 λ 救助点出运的第 δ 个运输周期中出运的物资量, 由 x_{C,D_λ} 按出运时间顺序排序得到.

$G(t)$ 在每个积分中表示该运输周期的起始量, 虽不同时刻值不同, 但在积分公式中均为常量, 具体表达形式如下:

$$G_{B_\beta}(t_i) = \sum_{\nu=1}^i x_{\nu,B_\beta} - v_b (t_{i,B_\beta} - t_{1,B_\beta}) - \sum_{\nu=1}^i E_{\nu,B_\beta} \quad (13)$$

$$G_{C_\gamma}(t_j) = \sum_{\varphi=1}^j x_{\varphi,C_\gamma} - v_c (t_{j,C_\gamma} - t_{1,C_\gamma}) - \sum_{\varphi=1}^j E_{\varphi,C_\gamma} \quad (14)$$

$$G_{D_\lambda}(t_l) = \sum_{\delta=1}^l x_{\delta,D_\lambda} - v_d (t_{l,D_\lambda} - t_{1,D_\lambda}) \quad (15)$$

其中 E_{ν,B_β} 为 B 组第 β 救助点在第 ν 次有物资到达时向 C 组 r 个救助点出运物资的总和:

$$E_{\nu,B_\beta} = \sum_{\gamma=1}^r x_{\nu,B_\beta,C_\gamma}; \nu=1,2,\cdots,p, \beta=1,2,\cdots,q$$

E_{φ,C_γ} 为 C 组第 γ 救助点在第 φ 次有物资到达时向 D 组 u 个救助点出运物资的总和:

$$E_{\varphi,C_\gamma} = \sum_{\lambda=1}^u x_{\varphi,C_\gamma,D_\lambda}; \varphi=1,2,\cdots,p \times q, \gamma=1,2,\cdots,r$$

综上所述, 损失费用可概括为负消耗物资的运输成本乘以惩罚费用 P , 其表示当一个单位价格的物资缺失单位时间时, 需要运输 P 倍的物资才能弥补当前的损失.

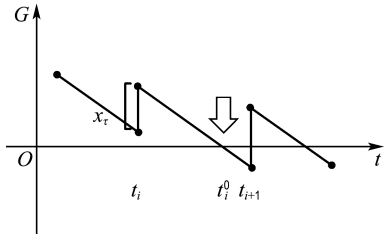


图 3 物资补给消耗过程 2

Fig. 3 The second figure of the process of resources consumption and supplement

2 GA/SLP 求解算法

2.1 求解算法简介

GA/SLP 混合算法通过将 0 阶智能算法与

基于梯度的数学规划法相结合,二者分别发挥各自优势,取长补短,使其在求解多变量、大规模问题时得到更优结果. 本文将 GA^[16]与 SLP 相结合的主要原因有:(1)GA 虽然具有较强的全局搜索能力且不依赖于梯度,但在求解后期,容易进入早熟收敛. 而 SLP 虽对初值敏感,但初值选取越接近最优,其优化结果越令人满意. 因此将 GA 收敛值代入 SLP 中继续寻优恰好可以发挥二者特长. (2)本文所计算模型为多级多受灾点连续性应急物资消耗问题,此类问题具有上百个设计变量,使得 GA 种群数目较为庞大,由于传统 GA 依赖于设计变量编码解码,其过程较为冗长,GA 迭代次数较多后,收敛缓慢,此时引入 SLP 避免编码解码过程,加快迭代速度,并使问题收敛于更优解. (3)结合多种优化机制的混合算法在求解性能上也优于采用单一优化机制的原有算法^[10].

2.2 求解算法具体实现

(1)构造设计变量数组 $\mathbf{x}_{A,B_\beta} (\beta=1,2,\cdots,q)$, $\mathbf{x}_{B,C_\gamma} (\gamma=1,2,\cdots,r)$, $\mathbf{x}_{C,D_\lambda} (\lambda=1,2,\cdots,u)$.

$$\mathbf{t}_{B,C_\gamma} = \begin{pmatrix} t_{1,B_1} + t_{B_1,C_\gamma} & t_{2,B_1} + t_{B_1,C_\gamma} & \cdots & t_{p-1,B_1} + t_{B_1,C_\gamma} & t_{p,B_1} + t_{B_1,C_\gamma} \\ t_{1,B_2} + t_{B_2,C_\gamma} & t_{2,B_2} + t_{B_2,C_\gamma} & \cdots & t_{p-1,B_2} + t_{B_2,C_\gamma} & t_{p,B_2} + t_{B_2,C_\gamma} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ t_{1,B_{q-1}} + t_{B_{q-1},C_\gamma} & t_{2,B_{q-1}} + t_{B_{q-1},C_\gamma} & \cdots & t_{p-1,B_{q-1}} + t_{B_{q-1},C_\gamma} & t_{p,B_{q-1}} + t_{B_{q-1},C_\gamma} \\ t_{1,B_q} + t_{B_q,C_\gamma} & t_{2,B_q} + t_{B_q,C_\gamma} & \cdots & t_{p-1,B_q} + t_{B_q,C_\gamma} & t_{p,B_q} + t_{B_q,C_\gamma} \end{pmatrix}$$

将 $\mathbf{t}_{B,C_\gamma}$ 中所有元素从小到大排列组成矩阵 $\mathbf{t}_B^s$ 中第 γ 行. $\mathbf{t}_B^s$ 为 $r \times (p \times q)$ 时间矩阵:

$$\mathbf{t}_B^s = \begin{pmatrix} t_{1,C_1} & t_{2,C_1} & \cdots & t_{p \times q - 1,C_1} & t_{p \times q,C_1} \\ t_{1,C_2} & t_{2,C_2} & \cdots & t_{p \times q - 1,C_2} & t_{p \times q,C_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ t_{1,C_{r-1}} & t_{2,C_{r-1}} & \cdots & t_{p \times q - 1,C_{r-1}} & t_{p \times q,C_{r-1}} \\ t_{1,C_r} & t_{2,C_r} & \cdots & t_{p \times q - 1,C_r} & t_{p \times q,C_r} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{t}_{C,D_\lambda} = \begin{pmatrix} t_{1,C_1} + t_{C_1,D_\lambda} & t_{2,C_1} + t_{C_1,D_\lambda} & \cdots & t_{p \times q - 1,C_1} + t_{C_1,D_\lambda} & t_{p \times q,C_1} + t_{C_1,D_\lambda} \\ t_{1,C_2} + t_{C_2,D_\lambda} & t_{2,C_2} + t_{C_2,D_\lambda} & \cdots & t_{p \times q - 1,C_2} + t_{C_2,D_\lambda} & t_{p \times q,C_2} + t_{C_2,D_\lambda} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ t_{1,C_{r-1}} + t_{C_{r-1},D_\lambda} & t_{2,C_{r-1}} + t_{C_{r-1},D_\lambda} & \cdots & t_{p \times q - 1,C_{r-1}} + t_{C_{r-1},D_\lambda} & t_{p \times q,C_{r-1}} + t_{C_{r-1},D_\lambda} \\ t_{1,C_r} + t_{C_r,D_\lambda} & t_{2,C_r} + t_{C_r,D_\lambda} & \cdots & t_{p \times q - 1,C_r} + t_{C_r,D_\lambda} & t_{p \times q,C_r} + t_{C_r,D_\lambda} \end{pmatrix}$$

(2)将每组的出运时间由已知量计算后由小到大排列.

A 组: $t_{A_\alpha,B_\beta} (\alpha=1,2,\cdots,p; \beta=1,2,\cdots,q)$ 为 A 组第 α 出救点向 B 组第 β 救助点运输物资时所消耗的时间. 将 β 固定的同时将 t_{A_α,B_β} 由小到大排列得到 $\beta \times \alpha$ 时间矩阵:

$$\mathbf{t}_A^s = \begin{pmatrix} t_{1,B_1} & t_{2,B_1} & \cdots & t_{p-1,B_1} & t_{p,B_1} \\ t_{1,B_2} & t_{2,B_2} & \cdots & t_{p-1,B_2} & t_{p,B_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ t_{1,B_{q-1}} & t_{2,B_{q-1}} & \cdots & t_{p-1,B_{q-1}} & t_{p,B_{q-1}} \\ t_{1,B_q} & t_{2,B_q} & \cdots & t_{p-1,B_q} & t_{p,B_q} \end{pmatrix}$$

其中 $t_{i-1,B_\beta} < t_{i,B_\beta} (i=1,2,\cdots,p; \beta=1,2,\cdots,q)$, 即每一行均为从小到大排列.

B 组: $t_{B_\beta,C_\gamma} (\beta=1,2,\cdots,q; \gamma=1,2,\cdots,r)$ 为 B 组第 β 救助点向 C 组第 γ 救助点运输物资时所消耗的时间. 将 γ 固定,并将 B 组向 C 组出救时间与 A 组向 B 组出救时间分别对应相加:

其中 $t_{j-1,C_\gamma} < t_{j,C_\gamma} (\gamma=1,2,\cdots,r; j=1,2,\cdots,p \times q)$, 即每一行均为从小到大排列.

C 组: $t_{C_\gamma,D_\lambda} (\gamma=1,2,\cdots,r; \lambda=1,2,\cdots,u)$ 为 C 组第 γ 救助点向 D 组第 λ 救助点运输物资时所消耗的时间. 将 λ 固定,并将 C 组向 D 组出救时间与 A 组向 C 组出救时间分别对应相加:

将 t_{c,D_λ} 中所有元素从小到大排列组成矩阵 t_c^s 中第 λ 行. t_c^s 为 $u \times (p \times q \times r)$ 时间矩阵:

$$t_c^s = \begin{pmatrix} t_{1,D_1} & t_{2,D_1} & \cdots & t_{p \times q \times r-1,D_1} & t_{p \times q \times r,D_1} \\ t_{1,D_2} & t_{2,D_2} & \cdots & t_{p \times q \times r-1,D_2} & t_{p \times q \times r,D_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ t_{1,D_u} & t_{2,D_u} & \cdots & t_{p \times q \times r-1,D_u} & t_{p \times q \times r,D_u} \end{pmatrix}$$

其中 $t_{l-1,D_\lambda} < t_{l,D_\lambda}$ ($\lambda=1,2,\cdots,u;l=1,2,\cdots,p \times q \times r$), 即每一行均为从小到大排列.

(3) 将 $x_{A,B_\beta}, x_{B,C_\gamma}, x_{C,D_\lambda}$ 分别根据 t_A^s, t_B^s, t_C^s 中每行的顺序重新排序得到, 其分量分别为

$$\begin{aligned} x_{B_\beta} &= (x_{1,B_\beta} \quad x_{2,B_\beta} \quad \cdots \quad x_{p-1,B_\beta} \quad x_{p,B_\beta}) \\ x_{C_\gamma} &= (x_{1,C_\gamma} \quad x_{2,C_\gamma} \quad \cdots \quad x_{p \times q-1,C_\gamma} \quad x_{p \times q,C_\gamma}) \\ x_{D_\lambda} &= (x_{1,D_\lambda} \quad x_{2,D_\lambda} \quad \cdots \quad x_{p \times q \times r-1,D_\lambda} \quad x_{p \times q \times r,D_\lambda}) \end{aligned}$$

(4) 由式(13)~(15)计算各救助点当前物资量.

(5) 由式(7)~(9)计算每个消耗周期物资不足的惩罚成本.

(6) 由式(1)构造目标函数.

(7) 代入如图 4 所示算法流程, 其中随机初始化满足式(2)条件, $x_{\max}$ 表示最大出运量.

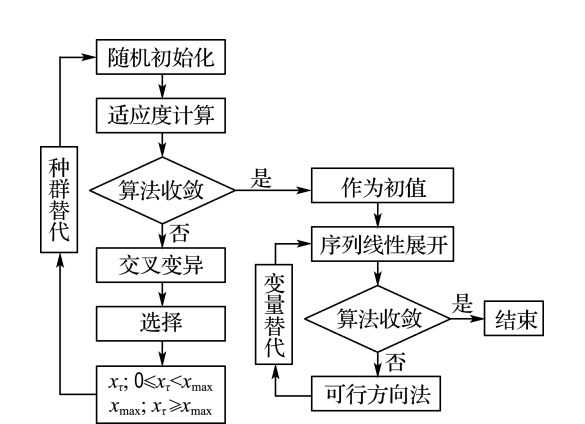


图 4 GA/SLP 算法流程

Fig. 4 GA/SLP algorithm flow

3 数值算例与结果分析

3.1 原始数据

为了考察上述模型及算法, 构造以下算例. 多地爆发灾难就近设立 2 个省级救助点、3 个市级救助点、2 个县级救助点, 由灾难爆发地周边 10 个出救点对其进行应急物资运输. 各出救点由于自身存储条件与能力限制具有其最大出运量, 向救助点的运输费用因距离、可选择的运输方式等各有不同, 为表明模型的通用性其最大出运量、出

运成本由计算机随机生成. 为保证应急救援及时进行, 应对救助活动总时长加以限制. 根据国家级出救点、省、市、县级救助点的距离差异, 设置各级地点应急活动终止时间分别为 $t_A^f = 1\ 000, t_B^f = 1\ 200, t_C^f = 1\ 350, t_f^{\max} = \max\{t_A^f, t_B^f, t_C^f\}$, 每级地点的运输时间需在应急活动终止时间范围内以保证救助的时效性. 原始数据列于表 1~3 中. 在定义各级救助点物资消耗速度时, 考虑将较多受灾群众安置于省级救助点且其要向下一级多点进行物资分配, 因此将其消耗速度定义为市级与县级各点的 2 倍, 即 $v_b = 1.0, v_c = 0.5, v_d = 0.5$, 单位价格缺失惩罚费用比 P 考虑 5 倍惩罚. 在选择 GA 时, 参数方面参考 De Jong^[7]、张鼎逆等^[17] 的研究, 种群数目取 80, 变异概率取 0.02, 交叉概率取 0.95.

表 1 A 组原始数据

Tab. 1 The original data of group A

α	t_{A_α,B_1}	t_{A_α,B_2}	$x_{A_\alpha}^{\max}$	$F_{A_\alpha,B}$
1	6.526	710.680	1 700.71	0.070 3
2	104.275	316.592	1 534.64	0.271 8
3	201.781	239.099	1 920.79	0.940 0
4	220.659	8.366	985.73	0.029 5
5	266.235	606.706	1 590.21	0.394 8
6	474.015	752.079	1 423.41	0.007 8
7	640.440	168.445	1 619.15	0.390 5
8	831.891	47.684	1 196.80	0.907 1
9	913.849	914.102	988.08	0.307 9
10	941.702	462.811	967.60	0.643 8

表 2 B 组原始数据

Tab. 2 The original data of group B

β	t_{B_β,C_1}	t_{B_β,C_2}	t_{B_β,C_3}	$x_{B_\beta}^{\max}$	$F_{B_\beta,C}$
1	145.115	3.175	169.370	668.73	0.216 6
2	68.257	57.850	92.544	476.74	0.092 4

表 3 C 组原始数据

Tab. 3 The original data of group C

γ	t_{C_γ,D_1}	t_{C_γ,D_2}	$x_{C_\gamma}^{\max}$	$F_{C_\gamma,D}$
1	20.891	103.997	347.96	0.080 1
2	102.874	130.174	492.82	0.763 2
3	118.809	105.799	280.67	0.356 8

3.2 结果分析

通过优化求解, 得到 $A_1, A_2, \cdots, A_{10}$ 的物资出运量, 列于表 4. 结果表明, 此算例的解决方案无须所有出救点全部出救, 只需 A_1, A_2, A_4, A_5, A_6 、

A_7 共 6 个出救点即可满足要求。

优化得到的 B_1 、 B_2 每次有物资到达后向 C 组每个救助点出运的物资量列于表 5.0 表示该点该次只需自行消耗而无须向下一级救助点进行出运。 B_1 救助点出运总量为 3 250.35,接收总量为 6 018.61; B_2 救助点出运总量为 3 767.27,接收总量为 5 282.48.由此可知,B 组每个救助点接收总量远大于出运总量.从表中可以看出,方案保证了每个消耗周期 B 组 2 个救助点至少有一个向 C 组某点进行了出运以满足需求,这样的出救安排较为合理.

优化得到 C_1 、 C_2 、 C_3 每次有物资到达后向 D 组每个救助点出运的物资量列于表 6. C_1 救助点出运总量为 1 225.70,接收总量为 2 613.79; C_2 救助点出运总量为 939.61,接收总量为 2 711.24; C_3 救助点出运总量为 634.09,接收总量为 1 692.59.由此可知,C 组每个救助点在应急过程中接收总量远大于出运总量.从表中可以看出,大多情况下,C 组 3 个救助点在每个周期均有一个向 D 组某点运输,但由于 D 组规模小、人数少、消耗速率低,且无须向下一级救助点进行出运,在应急中间过程中,D 组某点接收到物资满足自身需求时,允许 C 组 3 个救助点均不向其出运,因此表中出现较多 0 也是较为合理的.

综上所述,出救点由最初设定的 10 个优化为 6 个,且 B 组、C 组救助点在每个运输周期是否出运及其出运量也进行了优化安排,形成了边消耗边出运的多级应急救助模型,既节约了成本减少了物资的浪费,又尽量将损失降低以达到物资满

足灾民需求的目的.此外,对于应急物资调度模型优化得到的所有设计变量均未超出约束范围,优化结果较为合理.图 5 描述了各点在各自第 1 个消耗周期的出运过程:所有出救点同时出运,但到达先后顺序不同,其中 A_1 、 A_4 分别为到达 B_1 、 B_2 的第 1 批物资.

表 4 A 组优化结果
Tab.4 The optimization result of group A

x_{A_1,B_1}	x_{A_1,B_2}	x_{A_1}
1 570.87	1 313.16	2 884.03
x_{A_2,B_1}	x_{A_2,B_2}	x_{A_2}
1 069.85	799.93	1 869.78
x_{A_3,B_1}	x_{A_3,B_2}	x_{A_3}
0	0	0
x_{A_4,B_1}	x_{A_4,B_2}	x_{A_4}
788.19	907.95	1 696.14
x_{A_5,B_1}	x_{A_5,B_2}	x_{A_5}
562.43	308.91	871.34
x_{A_6,B_1}	x_{A_6,B_2}	x_{A_6}
1 306.34	1 341.96	2 648.30
x_{A_7,B_1}	x_{A_7,B_2}	x_{A_7}
720.93	610.57	1 331.50
x_{A_8,B_1}	x_{A_8,B_2}	x_{A_8}
0	0	0
x_{A_9,B_1}	x_{A_9,B_2}	x_{A_9}
0	0	0
x_{A_{10},B_1}	x_{A_{10},B_2}	$x_{A_{10}}$
0	0	0

表 5 B 组优化结果
Tab.5 The optimization result of group B

x_{1,B_1,C_1}	x_{2,B_1,C_1}	x_{3,B_1,C_1}	x_{4,B_1,C_1}	x_{5,B_1,C_1}	x_{6,B_1,C_1}	x_{7,B_1,C_1}	x_{8,B_1,C_1}	x_{9,B_1,C_1}	x_{10,B_1,C_1}	x_{B_1,C_1}
0	141.91	0	4.05	179.34	182.69	0	375.18	0	0	883.17
x_{1,B_2,C_1}	x_{2,B_2,C_1}	x_{3,B_2,C_1}	x_{4,B_2,C_1}	x_{5,B_2,C_1}	x_{6,B_2,C_1}	x_{7,B_2,C_1}	x_{8,B_2,C_1}	x_{9,B_2,C_1}	x_{10,B_2,C_1}	x_{B_2,C_1}
49.16	168.93	179.39	57.27	0	11.06	305.56	349.39	315.23	294.63	1 730.62
x_{1,B_1,C_2}	x_{2,B_1,C_2}	x_{3,B_1,C_2}	x_{4,B_1,C_2}	x_{5,B_1,C_2}	x_{6,B_1,C_2}	x_{7,B_1,C_2}	x_{8,B_1,C_2}	x_{9,B_1,C_2}	x_{10,B_1,C_2}	x_{B_1,C_2}
178.55	314.19	181.33	0.82	0	8.13	227.22	147.11	382.08	211.19	1 650.62
x_{1,B_2,C_2}	x_{2,B_2,C_2}	x_{3,B_2,C_2}	x_{4,B_2,C_2}	x_{5,B_2,C_2}	x_{6,B_2,C_2}	x_{7,B_2,C_2}	x_{8,B_2,C_2}	x_{9,B_2,C_2}	x_{10,B_2,C_2}	x_{B_2,C_2}
0	172.97	0	154.40	81.10	104.60	287.34	6.53	242.35	11.33	1 060.62
x_{1,B_1,C_3}	x_{2,B_1,C_3}	x_{3,B_1,C_3}	x_{4,B_1,C_3}	x_{5,B_1,C_3}	x_{6,B_1,C_3}	x_{7,B_1,C_3}	x_{8,B_1,C_3}	x_{9,B_1,C_3}	x_{10,B_1,C_3}	x_{B_1,C_3}
0	162.29	0	0	64.07	173.01	103.46	0	0	213.73	716.56
x_{1,B_2,C_3}	x_{2,B_2,C_3}	x_{3,B_2,C_3}	x_{4,B_2,C_3}	x_{5,B_2,C_3}	x_{6,B_2,C_3}	x_{7,B_2,C_3}	x_{8,B_2,C_3}	x_{9,B_2,C_3}	x_{10,B_2,C_3}	x_{B_2,C_3}
21.26	118.19	188.79	20.43	172.62	188.37	18.84	109.30	116.27	21.96	976.03

表 6 C 组优化结果
Tab. 6 The optimization result of group C

x_{1,C_1,D_1}	x_{2,C_1,D_1}	x_{3,C_1,D_1}	x_{4,C_1,D_1}	x_{5,C_1,D_1}	x_{6,C_1,D_1}	x_{7,C_1,D_1}	x_{8,C_1,D_1}	x_{9,C_1,D_1}	x_{10,C_1,D_1}	x_{C_1,D_1}
27.95	44.49	9.96	18.10	23.53	10.64	22.22	36.01	21.81	10.54	
x_{11,C_1,D_1}	x_{12,C_1,D_1}	x_{13,C_1,D_1}	x_{14,C_1,D_1}	x_{15,C_1,D_1}	x_{16,C_1,D_1}	x_{17,C_1,D_1}	x_{18,C_1,D_1}	x_{19,C_1,D_1}	x_{20,C_1,D_1}	989.06
167.35	233.56	17.52	21.87	19.05	204.07	15.28	64.92	0	20.19	
x_{1,C_2,D_1}	x_{2,C_2,D_1}	x_{3,C_2,D_1}	x_{4,C_2,D_1}	x_{5,C_2,D_1}	x_{6,C_2,D_1}	x_{7,C_2,D_1}	x_{8,C_2,D_1}	x_{9,C_2,D_1}	x_{10,C_2,D_1}	x_{C_2,D_1}
0	0	0	0	0	0	0.51	0	0	2.45	
x_{11,C_2,D_1}	x_{12,C_2,D_1}	x_{13,C_2,D_1}	x_{14,C_2,D_1}	x_{15,C_2,D_1}	x_{16,C_2,D_1}	x_{17,C_2,D_1}	x_{18,C_2,D_1}	x_{19,C_2,D_1}	x_{20,C_2,D_1}	5.43
0	0	0	2.47	0	0	0	0	0	0	
x_{1,C_3,D_1}	x_{2,C_3,D_1}	x_{3,C_3,D_1}	x_{4,C_3,D_1}	x_{5,C_3,D_1}	x_{6,C_3,D_1}	x_{7,C_3,D_1}	x_{8,C_3,D_1}	x_{9,C_3,D_1}	x_{10,C_3,D_1}	x_{C_3,D_1}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
x_{11,C_3,D_1}	x_{12,C_3,D_1}	x_{13,C_3,D_1}	x_{14,C_3,D_1}	x_{15,C_3,D_1}	x_{16,C_3,D_1}	x_{17,C_3,D_1}	x_{18,C_3,D_1}	x_{19,C_3,D_1}	x_{20,C_3,D_1}	5.71
4.47	0	0	0	0	0	0	0	0	1.24	
x_{1,C_1,D_2}	x_{2,C_1,D_2}	x_{3,C_1,D_2}	x_{4,C_1,D_2}	x_{5,C_1,D_2}	x_{6,C_1,D_2}	x_{7,C_1,D_2}	x_{8,C_1,D_2}	x_{9,C_1,D_2}	x_{10,C_1,D_2}	x_{C_1,D_2}
0	0	21.38	0	0	0	0	19.75	5.29	0	
x_{11,C_1,D_2}	x_{12,C_1,D_2}	x_{13,C_1,D_2}	x_{14,C_1,D_2}	x_{15,C_1,D_2}	x_{16,C_1,D_2}	x_{17,C_1,D_2}	x_{18,C_1,D_2}	x_{19,C_1,D_2}	x_{20,C_1,D_2}	236.64
1.21	0	0	189.01	0	0	0	0	0	0	
x_{1,C_2,D_2}	x_{2,C_2,D_2}	x_{3,C_2,D_2}	x_{4,C_2,D_2}	x_{5,C_2,D_2}	x_{6,C_2,D_2}	x_{7,C_2,D_2}	x_{8,C_2,D_2}	x_{9,C_2,D_2}	x_{10,C_2,D_2}	x_{C_2,D_2}
114.64	11.01	0	0	113.38	0	151.95	0	21.70	0	
x_{11,C_2,D_2}	x_{12,C_2,D_2}	x_{13,C_2,D_2}	x_{14,C_2,D_2}	x_{15,C_2,D_2}	x_{16,C_2,D_2}	x_{17,C_2,D_2}	x_{18,C_2,D_2}	x_{19,C_2,D_2}	x_{20,C_2,D_2}	934.18
0	0	0	0	129.02	0	0	279.53	112.95	0	
x_{1,C_3,D_2}	x_{2,C_3,D_2}	x_{3,C_3,D_2}	x_{4,C_3,D_2}	x_{5,C_3,D_2}	x_{6,C_3,D_2}	x_{7,C_3,D_2}	x_{8,C_3,D_2}	x_{9,C_3,D_2}	x_{10,C_3,D_2}	x_{C_3,D_2}
0	0	0	0	65.90	0	110.65	0	0	7.90	
x_{11,C_3,D_2}	x_{12,C_3,D_2}	x_{13,C_3,D_2}	x_{14,C_3,D_2}	x_{15,C_3,D_2}	x_{16,C_3,D_2}	x_{17,C_3,D_2}	x_{18,C_3,D_2}	x_{19,C_3,D_2}	x_{20,C_3,D_2}	628.38
23.56	23.59	128.55	0	0	1.07	162.95	104.21	0	0	

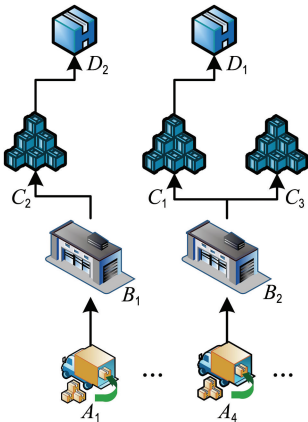


图 5 第 1 个消耗周期物资运输流程
Fig. 5 The first consumption period resources distribution flow

本文就 GA 迭代 1~1 000 次的结果作为初值代入 SLP 进行求解,如图 6 所示,图中 n 表示迭代次数, Y_0 表示目标函数。在 GA 迭代次数较少时,其提供的初值离目标值最优解较远,SLP 求解出的结果跳跃性较大。当 GA 趋于收敛时,

SLP 的结果趋于稳定,求解的效果较优。因此表明,使用 GA 的收敛值作为 SLP 的初值是合理的。

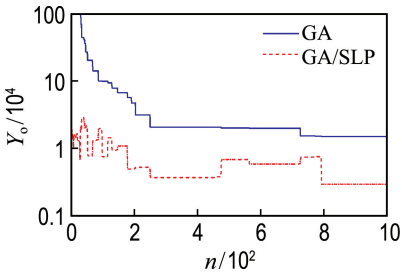
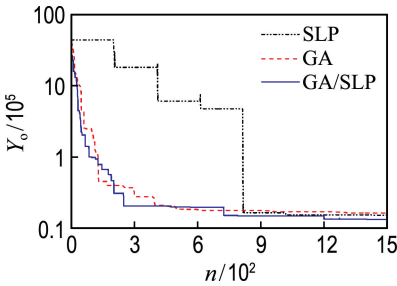


图 6 GA 对 SLP 的影响
Fig. 6 The influence of GA on SLP

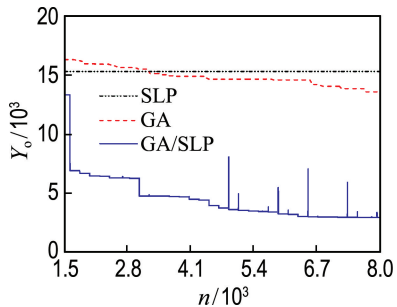
本文将单纯使用 GA、SLP 与 GA/SLP 进行求解对比,如图 7 所示。本文针对的模型为多级多受灾点应急物资调度问题,问题求解开始时由于所有出救点均进行出救活动其初始成本较高,优化过程中逐渐略去不经济的出救点,成本逐渐降低,期间优化过程跨度较大,优化复杂程度较高。

单纯使用 GA 时(图 7(a)),GA 在前 300 次

迭代时优化效率较高,下降坡度较大,其后便趋于平稳,从 800 次迭代开始,目标函数变化幅度已很小,此时继续使用 GA,虽然目标函数有继续下降趋势,但其坡度较缓、效率较低,由于模型设计变量较多,其耗费大量的时间却无法得到满意的结果.单纯使用 SLP 时(图 7(a)),其优化趋势为阶梯型,在前 800 次迭代时目标函数下降幅度较大,但其后在迭代次数约为 1 000 时,便达到收敛不再变化.此种收敛状态只是得到局部最优,由于多级多救灾点问题具有大规模性与复杂性,其初值选取往往离最优值较远,因此单纯的 SLP 在此种优化模型下,很难得到较为满意的解.当 GA 与 SLP 联合进行求解时,GA 迭代 1 000 次(已趋于收敛)代入 SLP 继续求解,由图 7(b)可以看出,在引入 SLP 后本来已趋于平缓的曲线产生阶梯式下降,其值与之前收敛值相比具有明显差异.这表明混合算法可以得到更优解,且符合模型已知条件,其最终优化结果为 2 930.62.



(a) 算法迭代过程 1



(b) 算法迭代过程 2

图 7 算法迭代结果

Fig. 7 The result of algorithm iteration

4 结 论

(1)本文提出了以设置集灾民安置点与物资运输于一体的多层级救助点的方式来进行应急物资连续消耗分配调度的数学模型,以应急系统施救成本和施救不及时损失为目标函数构建了优化模型.

(2)应用 GA 和 SLP 相结合策略对上百个设计

变量的大规模物资调配测试算例进行优化,合理地安排出救点及各级灾民安置点的物资出运量与路线.

(3)算例证明了 GA 与 SLP 联合寻优可以得到更优解.本文提出的优化策略能为灾后多级多受灾点连续消耗应急物资调度提供更好的方案.

参考文献:

- [1] YU Xianyu, ZHANG Yulin. The emergency scheduling engineering in single resource center [J]. **Systems Engineering Procedia**, 2012, **5**:107-112.
- [2] 潘 郁,余 佳,达庆利. 基于粒子群算法的连续性消耗应急物资调度[J]. **系统工程学报**, 2007, **22**(5):556-560.
PAN Yu, YU Jia, DA Qingli. Emergency resources scheduling on continuous consumption system based on particle swarm optimization [J]. **Journal of Systems Engineering**, 2007, **22**(5):556-560. (in Chinese)
- [3] ZHANG Liming, LIN Yuhua, YANG Guofeng, et al. Emergency resources scheduling based on adaptively mutate genetic algorithm [J]. **Computers in Human Behavior**, 2011, **27**(5):1493-1498.
- [4] REN Xide, ZHU Jiangming, HUANG Jun. Multi-period dynamic model for emergency resource dispatching problem in uncertain traffic network [J]. **Systems Engineering Procedia**, 2012, **5**:37-42.
- [5] 陈莹珍,赵秋红. 基于公平原则的应急物资分配模型与算法[J]. **系统工程理论与实践**, 2015, **35**(12):3065-3073.
CHEN Yingzhen, ZHAO QiuHong. The model and algorithm for emergency supplies distribution based on fairness [J]. **Systems Engineering — Theory & Practice**, 2015, **35**(12):3065-3073. (in Chinese)
- [6] 庞海云,刘 南,吴 桥. 应急物资运输与分配决策模型及其改进粒子群优化算法[J]. **控制与决策**, 2012, **27**(6):871-874, 880.
PANG Haiyun, LIU Nan, WU Qiao. Decision-making model for transportation and distribution of emergency materials and its modified particle swarm optimization algorithm [J]. **Control and Decision**, 2012, **27**(6):871-874, 880. (in Chinese)
- [7] DE JONG K A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems [D]. Ann Arbor: University of Michigan Ann Arbor, 1975.
- [8] HU Feihu, BAI Weihao, TIAN Chaohui. Research on scheduling emergency supplies featuring hierarchical linkage based on genetic algorithm [C] // **International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications (MEITA**

- 2015). Paris: Atlantis Press, 2015.
- [9] KO Y D, SONG B D, HWANG H. Location, capacity and capability design of emergency medical centers with multiple emergency diseases [J]. **Computers and Industrial Engineering**, 2016, **101**: 10-20.
- [10] GEN M, GAO J, LIN L. Multistage-based genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problem [M] // **Intelligent and Evolutionary Systems**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 183-196.
- [11] 张天骄, 李济生, 李 晶, 等. 基于混合蚁群优化的天地一体化调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, **38**(7):1555-1562.
- ZHANG Tianjiao, LI Jisheng, LI Jing, *et al.* Space-ground integrated scheduling based on the hybrid ant colony optimization [J]. **Systems Engineering and Electronics**, 2016, **38**(7): 1555-1562. (in Chinese)
- [12] PONNAMBALAM S G, JAWAHAR N, KUMAR B. Estimation of optimum genetic control parameters for job shop scheduling [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2002, **19**(3):224-234.
- [13] KARTHIKEYAN S, ASOKAN P, NICKOLAS S, *et al.* A hybrid discrete firefly algorithm for solving multi-objective flexible job shop scheduling problems [J]. **International Journal of Bio-Inspired Computation**, 2015, **7**(6):386-401.
- [14] LI Junqing, PAN Quanke, LIANG Y C. An effective hybrid tabu search algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problems [J]. **Computers and Industrial Engineering**, 2010, **59**(4): 647-662.
- [15] 中国地震应急搜救中心. 灾民安置[M] // 地震安全手册. 北京:地震出版社, 2009.
- National Earthquake Response Support Service. Resettlement of displaced persons [M] // **Earthquake Safety Check List**. Beijing: Seismological Press, 2009. (in Chinese)
- [16] GOLDBERG D E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning** [M]. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [17] 张鼎逆, 刘 毅. 基于改进遗传算法和序列二次规划的再入轨迹优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, **48**(1):161-167.
- ZHANG Dingni, LIU Yi. Reentry trajectory optimization based on improved genetic algorithm and sequential quadratic programming [J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2014, **48**(1):161-167. (in Chinese)

Optimization strategy of emergency resources scheduling of hierarchical multiple disaster sites during continuous consumption

ZHANG Lidan¹, LI Chao¹, CHEN Biaosong^{*1}, LI Jie²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Foshan Yajieyuan Science and Technology Co., Ltd., Foshan 528200, China)

Abstract: After disaster, the emergency rescue is the key problem, especially when multiple sites are attacked. Considering an integrated scheduling issue of the victim shelter and the resources transportation, a mathematical model of scheduling and distribution of hierarchical emergency resources during continuous consumption is established. And then, an optimization model is presented, in which the objective is comprised of the rescue costs and the losses from lacking timely succor. Subsequently the genetic algorithm (GA) combined with sequential linear programming (SLP) algorithm is employed to solve the optimization model. A numerical example of a four-level resources scheduling is generated to simulate the progress of relieving the disaster. The numerical example verifies that GA combined with SLP can find a better solution, for the global search ability of GA is refined by the local search ability of SLP. The optimization strategy presented can provide a suitable resource scheduling solution in this field.

Key words: scheduling and distribution of emergency resources; genetic algorithm (GA); sequential linear programming (SLP) algorithm; hierarchical multiple disaster sites; continuous consumption