

Construction on the Immune Clonal Algorithm for Optimization Research of Emergency Material Scheduling*

Linna Cheng, Deyuan Liu

School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou
Email: chenglinnajiao@126.com

Received: Jan. 18th, 2013; revised: Feb. 25th, 2013; accepted: Mar. 9th, 2013

Copyright © 2013 Linna Cheng, Deyuan Liu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Emergency material scheduling is one of the key links in order to improve the efficiency of the emergency rescue. Combining with the particularity of the emergency material and analyzing the influence of natural factors, accident character and base installation to selecting emergency supplies distribution plan, emergency supplies scheduling optimization model that is based upon more emergencies points and more kinds supplies is constructed. In addition, this issue is solved by the immune clonal algorithm. Taking emergency events of one region as an example, this paper analyzes the influence degree of every emergency points and every road segments. And by using Matlab software, an optimal distribution scheme of emergency supplies is proposed. The results show that the immune clonal algorithm can avoid form the premature convergence problem and is more efficient in optimization of multi-variable function, moreover, it is an efficient method to resolve the problems of emergency supplies distribution.

Keywords: Emergency Materials; Material Distribution; Objective Function Optimization; The Immune Clonal Algorithm

基于免疫克隆算法的应急物资调运优化研究*

成琳娜, 刘德元

兰州交通大学交通运输学院, 兰州
Email: chenglinnajiao@126.com

收稿日期: 2013 年 1 月 18 日; 修回日期: 2013 年 2 月 25 日; 录用日期: 2013 年 3 月 9 日

摘要: 为了提高突发事件应急救援的效率, 应急物资配送优化是应急救援的关键环节之一。本文结合应急物资的特殊性, 分析了自然因素、事故性质和基础设施对应急物资配送方案选择的影响, 构造出多应急点多种类物资条件下应急物资调运优化模型, 并利用免疫克隆算法进行求解。最后, 以某地区应急事件为例, 分析了各应急点及各路段的受影响程度, 采用 Matlab 计算平台, 求解出最优的应急物资配送方案。结果表明: 免疫克隆算法可以避免早熟收敛现象, 能够快速有效地收敛到最优解, 是求解应急物资配送问题的一种有效方法。

关键词: 突发事件; 应急物流; 物资调运; 免疫克隆算法

*基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金(11YJCZH170); 兰州市科技局研政产合作支撑计划项目(2011-1-111); 甘肃省青年科技基金(1208RJA054)。

1. 引言

突发事件应急物资调运优化是一项复杂的系统工程，受到物资种类、基础设施等多种因素的影响。与传统的物资调运相比，应急物资调运有其自身的特点，且该问题已被证明是一个 NP-hard 问题，目前，突发事件应急物资调运已成为政府和有关专家学者们高度关注的热点和难点课题。为此，有关专家学者们做了许多这方面的研究。文献[1]从组织结构和功能体系两方面对应急物流系统进行了初步的设计，并构造出单一条件下的应急物资调运模型；文献[2]建立了应急资源静态单阶段调配优化模型，并对动态资源优化问题进行了讨论；文献[3]同时考虑到物流应急中心供给量、车辆载重和时间限制，利用启发式算法和遗传算法相结合的方法对多出救点的应急物资调度问题进行了研究；文献[4]以运输时间效益最大化为首要目标建立模型，并转化成带有分层的网络流模型。

由于应急物资的特殊性，单从某一处应急点探讨其调运方案的选择，难以满足实际应急需要。此外，从多应急点的角度探讨应急物资的调运，存在多目标、多种类物资等约束，使得该问题的求解非常复杂^[5]。大多既有研究主要探讨如何将应急物资快速有效地从配送中心运往各应急点，而没有涉及多应急点和多种类物资的全程调运问题。鉴于此，本文在既有相关研究成果的基础上，综合考虑应急物资调运优化的特殊性，将应急物流网络转化为带单边硬时间窗的作业过程^[6]，以此建立多应急点和多种类物资共同约束条件下的应急物资调运优化模型，为应急决策者提供一定的理论依据。

2. 应急物资调运优化影响因素分析

1) 自然因素的影响。影响应急物资调运的自然因素主要包括：应急物资自身的属性、应急地区的天气气候状况、道路状况、应急事件发生的季节等。例如，饮水、生活用品、药品等常用应急物资，就要依据它们的不同特性来安排运送的先后次序，同时，灾害事件也会造成不同程度的道路破损，影响应急物资的运送，必须及时掌握运输途径的道路状况，选择最佳的运输路线。

2) 应急事件性质的影响。应急事件的发生时间、种类以及严重程度不同，对应急物资种类和数量的需

求就会不同，也就会影响到应急物资的调运。

3) 基础设施的影响。应急物资配送中心装卸设备的数量、运送车辆的数量以及运输线路的数量都会影响到应急物资的调运。

3. 应急物资调运优化数学模型的构建

3.1. 问题描述

假设 A_1, A_2, \dots, A_n 为 n 个应急物资配送中心， B_1, B_2, \dots, B_m 为 m 个应急点，并设应急事件发生后需要 t 种物资进行救援，第 k 种物资在各配送中心的存储量分别为 $C_{k1}, C_{k2}, \dots, C_{kn}$ ($k=1, 2, \dots, t$)，各应急点对物资 k 的需求量分别为

$D_{k1}, D_{k2}, \dots, D_{km}$ ($k=1, 2, \dots, t$)，且配送中心的物资总量大于等于应急点的总需求量。从配送中心 A_i 到应急点 B_j 运输物资 k 所需的总时间记为

T_{ij}^k ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$)，物资 k 在配送中心 A_i 所需的装载时间为 E_{ki} ，物资 k 在应急点 B_j 所需的卸载时间为 G_{kj} 。假设在不产生延误的情况下，物资 k 从配送中心 A_i 到应急点 B_j 所需的运输时间为 H_{ij}^k ，单位运输费用为 F_{ij}^k ，运送量为 X_{ij}^k 。

影响应急物资调运的随机因素有很多，当某些因素的变化对应急物资调运产生影响时，就会出现应急物资调运的延误现象，为此，本文定义物资 k 在配送中心 A_i 到应急点 B_j 的调运过程中，产生的延误时间为 Y_{ij}^k ，延误系数为 α_{ij}^k 。本文将应急物流网络转化为带单边硬时间窗的作业过程，因此配送每种物资到应急点都存在一个最大时间限制，将其与不产生任何延误条件下的最小配送时间之差定义为机动时间 I_{ij}^k ，并根据不同因素对应急物资调运产生的不同程度的影响，进行对比打分，确定出相对应的 α_{ij}^k ，本文将 α_{ij}^k 定义在 0~1 之间，进而求解出相对应的 Y_{ij}^k ，即 $Y_{ij}^k = \alpha_{ij}^k \cdot I_{ij}^k$ 。

3.2. 约束条件分析

1) 配送中心的物资总量大于等于各应急点的总需求量。考虑到多个地方会同时发生不同程度的应急事件，各应急点所需的应急物资种类和数量也不尽相同，为此，要满足每个应急点的需求。即

$$\sum_{k=1}^t \sum_{i=1}^n C_{ki} \geq \sum_{k=1}^t \sum_{j=1}^m D_{kj} \quad (1)$$

2) 每个配送中心对各种物资的配送量小于等于

存储量。各配送中心的物资存储量都是有限的，因此，要寻求合理的分配方式，在允许条件下使得每个配送中心的物资都能得到充分利用。即

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij}^k \leq \sum_{i=1}^n C_{ki} \quad k=1, 2, \dots, t \quad (2)$$

3) 满足每个应急点对各种物资的需求量。在各种物资存储量有限和多应急点条件下，通过合理分配每种物资的供给量，使得各应急点都能得到及时有效的救援。即

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij}^k = \sum_{j=1}^m D_{kj} \quad k=1, 2, \dots, t \quad (3)$$

4) 运送每种应急物资所需的总时间最小。影响应急物资调运的各种因素会使物资调运产生不同程度的延误，必须尽可能减少延误时间，用最短的时间将物资及时送达应急点。即

$$T_{ij}^k = E_i^k + G_j^k + H_{ij}^k + Y_{ij}^k \quad (4)$$

5) 各种物资的运送量大于 0。

$$X_{ij}^k \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, t \quad (5)$$

3.3. 优化目标函数分析

应急物资的调运优化是一个多目标优化问题。考虑到应急物流的弱经济性和紧急性，本文以配送时间最小作为第一层目标，以较经济的运送方案作为第二层目标，建立优化目标函数。

目标函数 1 表示用最短的时间将所需物资从配送中心运送到事故点：

$$\min T = \max \{T_{ij}^k \mid X_{ij}^k > 0\} \quad (6)$$

目标函数 2 表示在运送时间最短的基础上选择最经济的运送方案：

$$\min F = \max \{F_{ij}^k \cdot X_{ij}^k \mid X_{ij}^k > 0\} \quad (7)$$

4. 免疫克隆算法设计与实现

4.1. 优化目标函数的处理

本文将免疫克隆算法应用于求解应急物资调运的多目标优化问题，为了提高该算法的易操作性，首先，利用信息熵将多目标规划问题转化为单目标规划

问题。熵权法的具体步骤如下^[7-9]：

Step 1: 数据矩阵归一化处理。设有 b 个待分析方案，形成原始指标数据矩阵 $U = (u_{cd})_{b \times 2}$ ，根据式(6)、(7)对其归一化，得到矩阵 $R = (r_{cd})_{b \times 2}$ 。即

$$r_{cd} = \min u_{cd} / \sum_{c=1}^b u_{cd}$$

Step 2: 计算第 c 个因素下第 d 个评价值的比重 p_{cd} 和第 c 个因素的熵值 e_c

$$p_{cd} = r_{cd} / \sum_{c=1}^b r_{cd}, e_c = -f \sum_{c=1}^b p_{cd} \ln p_{cd}$$

若取 $f = 1/\ln b$ ，则 $0 \leq e_c \leq 1$ 。

Step 3: 计算第 c 个因素的差异系数 g_c 和权系数 w_{cd}

$$g_c = 1 - e_c, w_{cd} = g_c / \sum_{c=1}^b g_c$$

基于上述步骤，优化得到的单目标函数为：

$$\min Z = w_1 \max \{T_{ij}^k \mid X_{ij}^k > 0\} + w_2 \max \{F_{ij}^k \cdot X_{ij}^k \mid X_{ij}^k > 0\}$$

4.2. 免疫克隆算法设计

4.2.1. 编码

本文研究的是多种类应急物资的调运优化，编码时应对传统方法进行改进，即所构造的抗体是由 t 段子抗体(每段对应一种应急物资)构成的一个大抗体，第 k 段子抗体表示应急物资 k 由哪几个配送中心运往哪几个事故点。每段子抗体采用自然数编码，用 $1, 2, \dots, n$ 表示配送中心，用 $n+1, n+2, \dots, n+m$ 表示应急点，此时， $n+m$ 个互不重复的自然数的随机排列就构成了一个个体，并对应一种物资调运方案。例如，对于一个有 5 个配送中心、3 个应急点和 3 种应急物资的调运问题，则将 8 个自然数(1~5 为配送中心，6~8 为应急点)随机排列产生的 3 段序列表示为应急物资调运的方案，例如：

$$\begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 5 & 6 & 3 & 7 & 4 & 8 \\ \hline & & & & & & & \\ 2 & 3 & 6 & 1 & 4 & 7 & 5 & 8 \\ \hline & & & & & & & \\ 3 & 4 & 5 & 6 & 1 & 2 & 7 & 8 \\ \hline & & & & & & & \end{array}$$

第1段抗体 (第1种应急物资)
第2段抗体 (第2种应急物资)
第3段抗体 (第3种应急物资)

该抗体表示的调运方案为：第 1 种物资由配送中心 1、2、5 运往应急点 6，由配送中心 3 运往应急点 7，由配送中心 4 运往应急点 8；第 2 种物资由配送中心 2、3 运往应急点 6，由配送中心 1、4 运往应急点 7，由配送中心 5 运往应急点 8；第 3 种物资由配送中心 3、4、5 运往应急点 6，由配送中心 1、2 运往应急点 7、8。

4.2.2. 初始群体的产生

按照上述的编码方法，随机产生 N 个编码长度为 L 的抗体，且 $L = n + m$ ，并将抗体根据其亲和力值按降序排列，得到初始抗体群：

$$Ab = \{Ab_1, Ab_2, \dots, Ab_N\}$$

且 $aff(Ab_{h+1}) > aff(Ab_h), h = 1, 2, \dots, N$ 。其中， $aff(\)$ 为亲和力函数， $aff(Ab_h)$ 为第 h 个抗体对于抗原的亲和力。

任一 Ab_h 由 L 个基因组成，即

$Ab_h = \{Ab_{h1}, Ab_{h2}, \dots, Ab_{hL}\}$ ，其中 $h = 1, 2, \dots, N$ 。每一个基因 Ab_{hx} 是介于 1 到 $n+m$ 之间的自然数，即 $Ab_{hx} \in \{1, 2, \dots, n+m\}$ ，其中 $x \in \{1, 2, \dots, L\}$ ，且每一个抗体 Ab_h 中的基因两两互不相同，即 $Ab_{hx} \neq Ab_{hy}$ 其中 $\{x, y | x \neq y; x, y \in \{1, 2, \dots, L\}\}$ 。

对每个抗体所对应的调运方案，要进行逐一判断，看其是否满足式(1)~(5)。若不满足，则说明该调运方案不可行，重新得出新抗体；若满足，则根据式(6)、(7)计算目标函数值。设抗体 Ab_h 的目标函数值为 Z_h ，为了将目标函数求极小值问题转化为求极大值问题，定义亲和力函数^[10]为：

$$aff(Ab_h) = 1/Z_h$$

4.2.3. 免疫克隆算法的实现步骤^[11]

Step 1: 初始化抗体群 Ab ，随机产生 N 个抗体；

Step 2: 对 Ab 中的抗体按照亲和力值由大至小排列，再对这 N 个抗体进行克隆操作，得到规模为 N_l 的抗体群 Ab_l ；

Step 3: 对 Ab_l 中的抗体，按基因重组概率进行基因重组后，进行克隆删除操作，得到规模为 N_u 的抗体群 Ab_u ；

Step 4: 对 Ab_u 中的抗体按突变概率进行突变操作后，进行克隆删除操作，得到规模为 N_v 的抗体群

Ab_v ；

Step 5: 合并抗体群 Ab 和 Ab_v ，选出亲和力最高且互不相同的 N 个抗体组成抗体群 Ab' ；

Step 6: 随机产生规模为 N_q 的抗体群 Ab_q ，选出亲和力最高的 N_s 个抗体组成抗体群 Ab_s ；

Step 7: 用 Ab_s 代替 Ab' 中亲和力最低的 N_s 个抗体，形成规模为 N 的抗体群 Ab ；

Step 8: 判断是否满足终止条件，不满足则转至 Step 2 继续执行，满足则结束计算。

5. 实例分析

以某地区为例，在不改变各城市区位特性和拓扑结构特性的条件下，将该地区路网抽象为 Sioux-Fall 网络结构，节点 1~3 表示配送中心，节点 4、5 表示应急点，节点 4 处为破坏性地震，需要的应急物资主要有食品(包括饮水)、御寒物资(帐篷、棉被等)、医疗用品；节点 5 处为铁路客货行车事故，需要的应急物资主要有医疗用品、抢修器械、食品。三个应急物资配送中心同时向两个应急点调拨物资，假定每个配送中心都储备有所需的各种物资。原始数据如表 1~表 6 所示。

根据熵权法，确定出加权系数 w_1 和 w_2 分别为 0.875、0.125，即

Table 1. Emergency materials storage of each distribution centers
表 1. 各配送中心的应急物资存储量 C_{ki}

应急物资 k	配送中心 i		
	1	2	3
1) 食品	9000	10,000	9500
2) 医疗用品	4000	3500	4000
3) 御寒物资	2500	2000	3000
4) 抢修器械	15	10	12

Table 2. Demand for emergency supplies of each emergency points
表 2. 各应急点的应急物资需求量 D_{kj}

应急物资 k	应急点 j	
	4	5
1) 食品	19,000	4000
2) 医疗用品	7000	4500
3) 御寒物资	5000	-
4) 抢修器械	-	20

Table 3. Loading time of emergency materials in each distribution centers

表 3. 应急物资在各配送中心的装载时间 E_{ki}

物资 k	配送 i	装载时间		
		1	2	3
1) 食品		0.2	0.3	0.2
2) 医疗用品		0.3	0.4	0.4
3) 御寒物资		0.4	0.4	0.3
4) 抢修器械		0.5	0.4	0.5

Table 4. Discharge time of emergency materials in each emergency points

表 4. 应急物资在各应急点的卸载时间 G_{ki}

物资 k	应急 i	卸载时间	
		4	5
1) 食品		0.1	0.1
2) 医疗用品		0.3	0.3
3) 御寒物资		0.2	-
4) 抢修器械		-	0.4

Table 5. Running time of emergency materials in each zones

表 5. 应急物资在各区间段的运行时间 H_{ij}^k

物资 k	区间	运行时间					
		1~4	1~5	2~4	2~5	3~4	3~5
1) 食品		2	2.5	1.5	2.5	2.5	2.5
2) 医疗用品		3	3.5	3.5	3	2.5	3.5
3) 御寒物资		1.5	-	2	-	1.5	-
4) 抢修器械		-	4	-	4	-	4.5

Table 6. Unit transportation cost of emergency materials in each zones

表 6. 应急物资在各区间段的单位运输费用 F_{ij}^k

物资 k	区间	运输费用					
		1~4	1~5	2~4	2~5	3~4	3~5
1) 食品		1	0.5	1	1	0.5	0.5
2) 医疗用品		2	2.5	2.5	2	2	2
3) 御寒物资		3.5	-	4	-	3.5	-
4) 抢修器械		-	6	-	7	-	6

$$\min Z = 0.875 \max \{T_{ij}^k | X_{ij}^k > 0\} + 0.125 \max \{F_{ij}^k \cdot X_{ij}^k | X_{ij}^k > 0\}$$

由于节点 4 处随着地震会出现极端天气及道路的损坏；节点 5 处会造成铁路行车线路的拥堵及轨道的损坏，而且需要大型的抢修器械。这些都会使得在向节点 4、5 配送应急物资时产生不同程度的延误时间。具体的延误系数在后续计算中根据实际情况进行确定。

本文选取个体种群规模为 20 个、编码长度为 12、交叉概率为 0.6、变异概率为 0.3、浓度阈值为 0.25、提取疫苗概率为 0.3、排斥力和罚值为 0.01、注射疫苗概率为 0.4，最大不进化代数为 20。采用 Matlab 计算平台，将程序运行 50 次，其计算结果如表 7 所示。

得到最佳配送目标函数值为：11254.34。对应的最优配送方案编码如下：

$$\underbrace{1 \ 2 \ 4 \ 3 \ 5 \ 1 \ 3 \ 4 \ 1 \ 2 \ 5}_{\text{食品}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{医疗用品}}$$

$$\underbrace{1 \ 3 \ 4 \ 1 \ 2 \ 5}_{\text{御寒物资}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{抢修器械}}$$

最优配送方案如表 8 所示。

Table 7. Calculation results

表 7. 计算结果

目标函	11254.3	12677.4	12887.4	13007.1	合计
数值	4	6	5	3	
次数	34	8	6	2	50

Table 8. The optimal distribution scheme

表 8. 最优配送方案

	区间	X_{ij}^k	T_{ij}^k	$F_{ij}^k \cdot X_{ij}^k$
食品	2~4	10,000	1.9	10,000
	1~4	9000	2.37	90,000
	3~5	4000	2.8	2000
医疗用品	3~4	4000	3.32	8000
	1~4	3000	3.68	6000
	2~5	3500	3.82	7000
御寒物资	1~5	1000	4.18	2500
	1~4	2500	2.2	8750
抢修器械	3~4	2500	2.3	8750
	2~5	10	4.88	70
	1~5	10	4.96	60

本文通过上述实例对应急物资调运优化模型进行了应用,同时也验证了免疫克隆算法在求解应急物资配送问题方面的有效性。免疫克隆算法通过引入亲合度成熟、克隆和记忆等机理,利用相应的算子保证快速地收敛到全局最优解,并且能够有效地避免早熟收敛现象,是求解应急物资配送问题的一种快速有效的方法。

6. 致谢

本论文在写作过程中遇到了很多的困难和障碍,但都在老师和同学的帮助下度过了。尤其要强烈感谢导师的亲切关怀和悉心指导,他严肃的科学态度,严谨的治学精神,精益求精的工作作风,深深地感染和激励着我,在此谨向导师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。我还要感谢一起学习工作的同学们,正是有了你们的帮助和支持,我才能克服一个个的困难,直至本论文的顺利完成。

最后,再次对关心、帮助我的老师和同学表示衷心地感谢!

参考文献 (References)

- [1] 王杏. 救灾物流中的物资调运模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [2] 王军. 铁路重大突发事件应急资源优化调配问题的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2002.
- [3] 王玲玲. 多出救点应急调度研究[J]. 铁道运输与经济, 2010, 7(32): 47-52.
- [4] 杜洁, 郝妍, 王璐. 多目标应急物流运输问题优化研究[J]. 物理工程与管理, 2010, 4(32): 39-40.
- [5] 花明, 程蕾. 基于解释结构模型的应急物流影响因素研究[J]. 物流科技, 2009, 5: 117-119.
- [6] 汪涛, 吴琳丽. 基于粒子群算法的应急物资调度研究[J]. 军事交通学院学报, 2011, 13(5): 70-74.
- [7] 郑晓薇, 樊华, 武亮亮. 熵权系数法的理论建模分析与并行实现[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(10): 1884-1887.
- [8] B. G. Luis. Avoiding the closure of ports during a national emergency. IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, 2011: 470-474.
- [9] V. Kutkov, E. Buqlova and T. McKenna. Severe deterministic effects of external exposure and intake of radioactive material: Basis for emergency response criteria. Journal of Radiological Protection, 2011, 31(2): 237-253.
- [10] B. Fredrik, L. Jonas. Using live video for information sharing in emergency response work. International Journal of Emergency Management, 2009, 6(3-4): 295-301.
- [11] 马威. 基于免疫克隆算法的多目标 flow shop 生产调度的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.