

文章编号:1001-4373(2010)01-0056-06

# 多式联运运输方式选择的模型和算法

刘 舰, 俞建宁

(兰州交通大学 交通运输学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**在对多式联运运输方式选择问题分析的基础上,运用图论技术构建基于多种运输方式的运输网络.综合考虑了运输成本、运输时效性和运输风险,建立了基于综合运输成本最小和运输风险最小的多目标综合优化模型.通过主要目标法,将模型进行转化.设计了基于克隆增扩的人工免疫算法对问题进行求解.最后通过算例验证了模型和算法的有效性.

**关键词:**多式联运;多目标模型;免疫算法

**中图分类号:**U116

**文献标志码:**A

多式联运是一种以集装箱运输为载体,多种运输方式组合的一种现代运输方式.它的出现和发展对于合理利用运输资源,提高运输效率具有积极的意义.

在联合运输中如何选择合理的运输方式组织运输是重点的研究内容之一,国内外很多学者对此进行了研究. Groothedde<sup>[1]</sup>等人对荷兰的快速货物运输问题进行了研究,认为通过联运枢纽间的合作,可以实现运输的规模经济性从而降低物流成本,提出发展公路-水路联合运输,但是论文没有涉及模型的求解. Chang<sup>[2]</sup>研究了多式联运网络运输的最短路问题,考虑了多商品流、时间窗口的特点,构建了以成本和时间最小的多目标多商品流的模型,选用了松弛和分解技术将问题分解为一系列的容易求解的子问题进行求解.在国内学者中魏际刚与荣朝和<sup>[3]</sup>对我国集装箱多式联运中系统协调问题进行了研究,提出系统协调应该考虑布局、能力、组织、结构、设备、信息、发展等7个方面的内容.张建勇和郭耀煌<sup>[4]</sup>在对多式联运网络具体描述的基础上,从成本最小出发建立了一种联运网络的最优分配模型,但是模型没有考虑运输风险和时效性等因素并且没有对模型的求解进行探讨.贺竹馨、孙林岩<sup>[5]</sup>等从虚拟企业联盟出发研究了多式联运多种运输方式的协调作业,以动态联盟理论为基础,建立了联合运输利益分配模型为联合运输提供了新的思路.

本文研究多式联运方式选择问题时考虑了如下4个方面的因素:1)由于多式联运具有涉及范围广、影响因素多的特点,因此建立多目标规划模型更能反映问题的实质.2)目前的研究中,多将运输成本作为常量考虑.实际上由于各种运输方式均具有明显的规模经济性,因此计算运输成本时考虑了规模经济的特点.3)考虑了运输中的风险因素,通过将运输风险定量分析,从而使模型更具有现实意义.4)考虑了联合运输的及时性要求.

免疫算法是模拟人体免疫系统的工作原理发展而来的一种智能启发式算法,具有对多峰值函数进行多峰值搜索和全局寻优能力.本文采用基于克隆增扩的免疫算法对问题进行求解,以期对多式联运方式协调选择问题进行深入的探讨.

## 1 多式联运网络的构建

### 1.1 问题的描述

货物从发点O至到点D间通过联合运输网络运输.已知该运输网络由若干枢纽结点构成,相邻结点之间有若干种运输方式可供选择,每个枢纽结点可以进行不同运输方式的中转,希望在合同约定的期限内通过选择适合的运输方式、适合的运输路径,安全、经济、便利的送达货物.为了便于建模型做出如下假设:

1) 同批货物在运输过程中不可分割.即一批货

\* 收稿日期:2009-11-20

基金项目:甘肃省自然科学基金(3X051-A25-030)

作者简介:刘 舰(1974-),男,山东菏泽人,副教授,博士生.

物同时经由一种运输方式运输.

2) 货物需在枢纽结点中转,且同批货物在每一枢纽结点最多发生一次转载.

## 1.2 多式联运网络的构建

构造网络  $G(V, E)$ , 其中  $V$  代表枢纽结点集,  $E$  代表枢纽结点间弧集. 由于对任意一条有向弧对应有若干种运输方式提供运输服务, 为了体现多种运输方式运输以及在枢纽节点进行中转的特点将基本网络做如下变换.

1) 除始发和终到结点外将每一个中间枢纽结点按照可用运输方式扩展为若干接入结点和出发结点, 分别代表进入枢纽的运输方式和从枢纽出发的运输方式.

2) 若扩展后同一枢纽结点内的接入结点和出发结点之间以弧相连, 表示在某一枢纽内 2 种运输方式之间可以进行中转作业, 其弧称为中转弧. 若任意相邻枢纽的出发结点和接入结点间有弧相连, 其弧称为运输弧, 表示两枢纽间可选用某种运输方式进行运输.

改造后形成的新网络  $G(V, E)$ .  $V$  代表新的结点集,  $E$  为新的弧集, 且  $E = E_T \cup E_C$ , 其中  $E_T$  为运输弧集,  $E_C$  为中转弧集.

下面通过一个简单的例子说明联运网络的建立. 已知 O-D 间货物采用联运方式运输, 在 P 点进行中转, 其中 O-P, P-D 间均有 2 种不同方式可供选择, 按照以上原则构建的联运网络如图 1 所示.

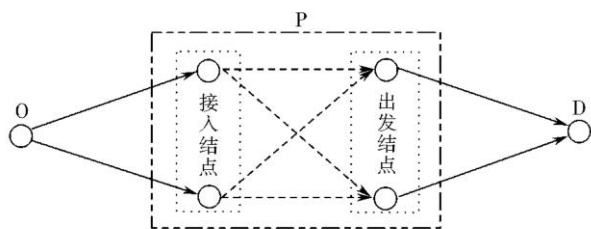


图 1 联运网络图

Fig. 1 The intermodal network

## 2 建立模型

### 2.1 参数和变量

设  $t_{i,j}$  为某批货物在  $(i, j)$  弧的走行时间,  $(i, j) \in E$ .  $e_{i,j}$  为该批货物在中转弧  $(i, j) \in E_C$  走行的中转费用;  $[T_1, T_2]$  为签订的联运合同所约定的交货期限;  $M$  为货物逾期违约费用;  $S$  为早到产生的存储费用;  $RI$  为发送货物的风险因子,  $FM_{i,j}$  为货物通过弧  $(i, j) \in E_T$  运输时的运输方式风险因子,  $TR_{i,j}$

为货物通过弧  $(i, j) \in E_C$  中转时的结合部风险因子,  $(i, j) \in E_C$ .

决策变量:

$$X_{(i,j)} = \begin{cases} 1, & \text{若选择从 } (i, j) \text{ 弧运输 } (i, j) \in E; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

### 2.2 多目标模型的建立

1) 目标 1: 选择运输路径的综合成本最小.

在多式联运中发生的综合成本由在途发生的运输成本、枢纽内由于中转所发生的中转成本和由于运输不及时发生的违约成本 3 部分构成.

在途运输成本和运输的货物品类、采用的运输方式以及走行的运输路径有关. 考虑到运输的规模经济性对于运输成本的实际影响, 借鉴文献[2] 可将运输成本视为基于运输方式、货物、运输距离的分段函数. 设该批货物选择弧  $(i, j) \in E_T$  运输时所适用的第  $r$  范围的单位成本函数为  $C_{i,j}^r$ ,  $r \in R$ ,  $R$  为分段数集. 则该部分成本为  $X_{(i,j)} \sum_{r \in R} C_{i,j}^r$ .

中转成本主要是由于运输方式的变更导致货物在运输过程中发生的倒装、转运、存储等作业而发生的费用. 该部分的费用为  $X_{(i,j)} e_{i,j}$ ,  $(i, j) \in E_C$ .

违约成本主要考虑货物送达的及时性要求, 即按照合同规定的时间范围送达货物. 否则若早到会产生额外的存储费用, 若晚到则会发生逾期的赔偿费用. 该部分费用为:  $\max[0, (T - T_2)M] + \max[0, (T_1 - T)S]$ . 其中,  $T$  为货物的实际运输时间, 且  $T = \sum_{(i,j) \in E} X_{(i,j)} t_{i,j}$ .

目标函数 1 表示为

$$\min F_1 = \sum_{(i,j) \in E_T} X_{(i,j)} C_{i,j}^r + \sum_{(i,j) \in E_C} X_{(i,j)} e_{i,j} + \max[0, (T - T_2)M] + \max[0, (T_1 - T)S] \quad (1)$$

2) 目标 2: 运输风险最小.

运输风险是联运中应该切实考虑的因素, 为了实现对运输风险的定量度量, 借鉴文献[6] 思想, 本文提出联运风险指数的概念实现联运风险的度量. 联运风险指数是对联运中风险进行综合度量的指标, 由发送货物风险因子  $RI$ 、运输方式的风险因子  $FM$ 、结合部的风险因子  $TR$  构成. 发送货物风险因子主要考虑由于货物在运输中由于化学、物理特征的变化所产生的对环境和人员造成的伤害. 运输方式的风险因子主要受到运输线路条件、气候条件、各运输方式现有管理水平的影响. 结合部的风险因子主要考虑各种方式之间的协作程度. 联运风险指数

可以采用综合评价的方法获得.关于联运风险指数的制定将另文介绍,在此不再赘述.

目标函数2表示为

$$\min F_2 = RI + \frac{X(i,j) FM(i,j)}{(i,j) E_T} + \frac{X(i,j) TR(i,j)}{(i,j) E_C} + \frac{X(i,j)}{(i,j) E_C} \quad (2)$$

满足下列约束条件:

保证网络结点的流量平衡

$$X(i,j) - \sum_{j \in V} X(j,i) = \begin{cases} 1, & \text{若 } i = O; \\ -1, & \text{若 } i = D; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3)$$

### 2.3 模型的转化

以上模型为多目标规划模型.在多目标规划模型中由于目标向量的不协调性以及约束条件的存在难于求解,本文采用主要目标法将多目标规划模型转变为单目标规划模型从而便于问题的求解,即在多个目标中确定一个目标作为主要目标.其余目标作为次要目标转化为相应的约束条件,从而将多目标规划模型转变为单目标规划模型,进而得到有效解.

由于在目标1中体现了经济、便利、及时、有效等大量信息,选取目标1作为主要目标.对于目标2中的最小风险,可以通过决策者的实际经验及判断,结合相关数据的分析和比较设定一个可以接受的最大值,使整个运输过程中度量风险指数不大于值,从而将目标函数2转化为一个约束条件.转化后得到如下的单目标规划模型:

$$\min F = F_1 \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} F_2 \\ \text{约束条件(3)} \end{cases} \quad (5)$$

### 3 模型的求解

本文利用克隆选择免疫算法求解多式联运方式选择问题.即选择将目标函数(4)作为抗原,优化解作为抗体,通过亲和力计算、抗体产生的促进和抑制、群体更新等技术得到问题的满意解.相关技术细节及算法步骤如下:

#### 3.1 产生抗体

对于问题的解,采用基于顶点优先权的编码设计抗体的结构.对于一个由  $n$  个结点构成的多式联

运网络,每一个抗体代表一条从节点1出发,终于节点  $N$  的由相继节点组成的路径.抗体由  $N$  位代表结点的基因构成,第一个基因表示是起始点1,最后一个基因表示终点  $N$ .各基因的值由随机产生的  $1 \sim n$  的整数表示优先权,用  $P_{v_i}$  表示.抗体的解码步骤如下:

**Step1** 给网络各结点  $v_i$  随机赋优先权  $P_{v_i}$ .

**Step2** 置  $l = 1, v_l = 1$ .

**Step3** 寻找下一个基因  $v_{l+1}$ .寻找和顶点  $v_l$  相邻的顶点中优先权最大的顶点作为基因加入抗体,  $l = l + 1$ .

**Step4** 若  $l = n$ ,转 Step3,否则转 Step5.

**Step5** 对约束检验抗体若可行,记录该抗体  $x_v$ ,否则转 Step1.

#### 3.2 亲和力计算

亲和力计算包括计算抗原和抗体之间的亲和力以及抗体间的亲和力.抗原和抗体间的亲和力表现了抗体对抗原的匹配程度.为了防止由于目标函数值过大造成亲和力值过小而不利于个体优劣的体现,本文采用公式(6)计算,其中  $K$  为根据目标函数的数量级所确定的正数,其目的在于放大计算的亲和力值.  $AT(x_v)$  表示抗体  $x_v$  和抗原  $F(x_v)$  的亲和力,  $F(x_v)$  为抗体  $x_v$  对应的目标函数值.

$$AT(x_v) = \frac{K}{|F(x_v)|} \quad (6)$$

抗体间的亲和力  $AY(x_v, x_w)$ ,表明了抗体间的相似程度.抗体  $x_v$  和  $x_w$  的亲和力为

$$AY(x_v, x_w) = \frac{1}{1 + H(x_v, x_w)} \quad (7)$$

式中:  $H(x_v, x_w)$  表示两抗体的结合强度.  $H(x_v, x_w)$  采用如下方式度量:

$$H(x_v, x_w) = \sum_{l=1}^{n-1} \begin{cases} = 1, & x_v^l \neq x_w^l; \\ = 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $x_v^l, x_w^l$  为两抗体的第  $l$  位等位基因.

#### 3.3 抗体的浓度

抗体的浓度用于调节抗体的克隆规模.当某些抗体和抗原的亲和力较大时,会被克隆扩增,其浓度会迅速上升.抗体  $x_v$  的浓度为

$$c(x_v) = \frac{1}{n} \sum_{w=1}^n AC(x_v, x_w) \quad (9)$$

其中:

$$AC(x_v, x_w) = \begin{cases} 1, & AY(x_v, x_w) \geq Tac; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (10)$$

$Tac$  为预先设定的抗体亲和力阈值,本文采用

如下方法确定:计算抗体群中任意两抗体的亲和力,然后按照从大到小顺序排序,选择序列的中位数作为  $Tac$ .

3.4 克隆选择算子

在生物免疫系统中由于高适应度低浓度的抗体更加具有生命力,因此通过克隆选择可以尽量保持优良的解被选择进入下一次迭代,从而使算法避免“早熟”.

首先将抗体群  $ABG1$  中的抗体根据其和抗原的亲和力大小降序排列,选择亲和力大于阈值  $AT$  的前  $m$  个抗体进行克隆扩增.亲和力阈值  $AT$  可以根据问题的实际,结合经验设定一个适当的值.本文选取当代亲和力的平均值.按照下式计算总的克隆数:

$$N_c = \sum_{v=1}^m \text{round}[\frac{AT(x_v)}{c(x_v)}] \tag{11}$$

式中:是参数因子.

3.5 算法过程描述

算法实现的具体步骤如下:

Step1 初始化.设  $T = 0$ ,变异率  $P_m$ ,最大迭代次数  $GEN$ ,抗体群规模  $POP$ .

Step2 识别抗原,抗体的编码.

Step3 随机生成一个规模为  $POP$  的抗体群  $ABG$ .

Step4 计算抗体群  $ABG$  中每个抗体对抗原的亲和力  $AT(x_v)$  和抗体之间的亲和力  $AY(x_v, x_w)$ .

Step5 选择抗体和抗原亲和力高的  $POP1$  个抗体形成群体  $ABG1$ .

Step6 计算抗体群体  $ABG1$  中各个抗体的浓度.

Step7 将  $ABG1$  中的抗体按照亲和力由大到

小降序排列,结合抗体浓度选择得到克隆抗体群体  $ABG2$ .

Step8 通过变异算子对克隆抗体群  $ABG2$  进行变异操作,得到  $ABG3$ .

Step9 计算抗体群  $ABG3$  中每个抗体对抗原的亲和力.

Step10 合并抗体群  $ABG$  和  $ABG3$ .选出亲和力和最高的和互不相同的  $POP$  个抗体组成新的抗体群  $ABG$ .

Step11 若  $T = GEN$ ,则  $T = T + 1$ ,转 Step4;否则结束.

4 算例

一批货物选择通过如图 1 所示的联运网络实现从 O-D 点的运输,已知有 3 种运输方式可供选择,合同约定交货时间区间为  $[68, 75]$  小时,单位存储成本为 3,违约成本为 5,发送货物风险因子  $RI$  为 3,以接受的综合风险指数值 = 15 简化后的运行成本/时间和中转成本/时间/运输方式的风险因子/结合部的风险因子如表 1-2 所示,改进后的联运网络图如图 2 所示.

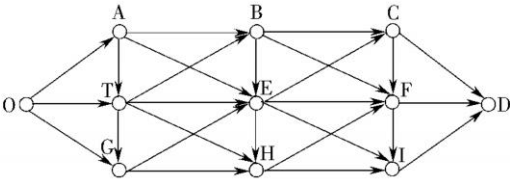


图 2 运输网络图

Fig. 2 The transportation network

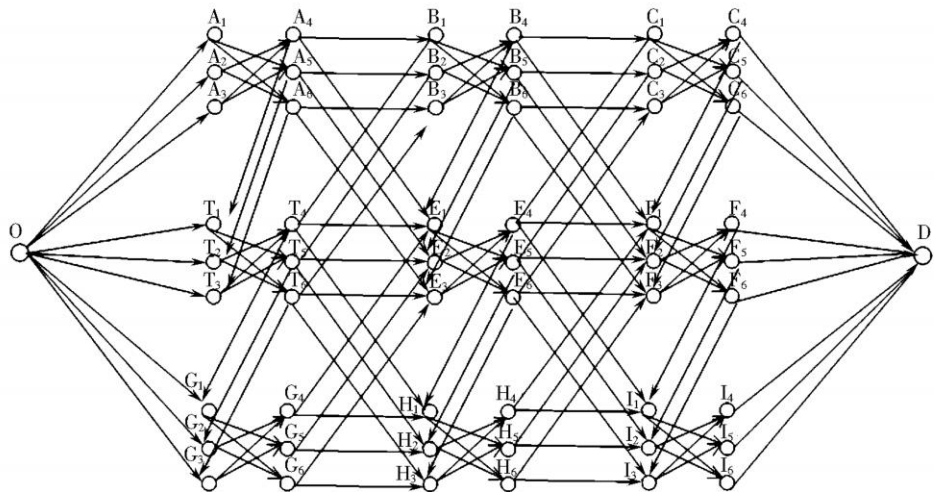


图 3 改进的联运网络

Fig. 3 The improved network

表 1  结点间不同运输方式的运输成本/ 时间/ 运输方式的风险因子

Tab. 1   Transportation cost/ time/ risk factors in different transportation modes

	OA	OT	OG	AB	AT	AE	TB	TG	TE	TH	GE	GH	BC
1	35/ 15/ 2	20/ 10/ 1	18/ 32/ 3	24/ 10/ 1	20/ 10/ 1	25/ 12/ 2	16/ 8/ 2	15/ 8/ 1	18/ 11/ 1	15/ 11/ 1	20/ 10/ 3	22/ 35/ 2	21/ 10/ 1
2	30/ 15/ 1	40/ 20/ 1	16/ 48/ 2	25/ 12/ 1	30/ 12/ 1	32/ 18/ 1	18/ 9/ 3	16/ 9/ 1	22/ 15/ 1	24/ 15/ 1	16/ 19/ 2	18/ 19/ 2	18/ 17/ 1
3	20/ 13/ 1	20/ 14/ 1	20/ 6/ 2	22/ 10/ 1	19/ 10/ 1	23/ 12/ 2	22/ 11/ 2	23/ 10/ 1	21/ 15/ 2	18/ 15/ 1	19/ 18/ 1	25/ 16/ 2	24/ 17/ 1
	BE	BF	EC	EF	EI	EH	HF	HI	CF	CD	FD	FI	ID
1	32/ 30/ 2	26/ 10/ 1	20/ 10/ 2	24/ 10/ 3	20/ 10/ 1	25/ 12/ 2	16/ 8/ 2	15/ 18/ 2	18/ 31/ 1	15/ 31/ 1	20/ 32/ 1	32/ 11/ 1	21/ 10/ 2
2	25/ 17/ 2	25/ 22/ 1	26/ 18/ 2	25/ 12/ 2	30/ 12/ 2	32/ 18/ 2	18/ 9/ 2	16/ 9/ 2	22/ 15/ 1	24/ 15/ 1	16/ 19/ 1	18/ 19/ 2	18/ 17/ 2
3	20/ 14/ 1	20/ 16/ 2	28/ 13/ 2	22/ 10/ 1	19/ 10/ 3	23/ 12/ 2	22/ 11/ 2	23/ 10/ 2	21/ 15/ 1	18/ 15/ 2	19/ 18/ 2	25/ 16/ 2	24/ 17/ 2

表 2  运输方式间的中转成本/ 时间/ 结合部的风险因子

Tab. 2   Transfer cost/ time/ risk factors

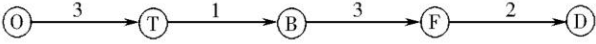
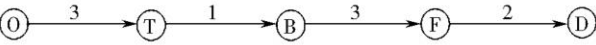
	A			B			C			T			E		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	-	6/ 2/ 3	6/ 1/ 4	-	9/ 3/ 3	7/ 3/ 3	-	8/ 2/ 3	6/ 1/ 3	-	8/ 2/ 2	6/ 1/ 3	-	9/ 3/ 2	7/ 3/ 3
2	5/ 1/ 3	-	9/ 2/ 2	7/ 3/ 2	-	7/ 2/ 2	5/ 2/ 1	-	9/ 2/ 2	5/ 2/ 2	-	9/ 2/ 1	7/ 3/ 2	-	7/ 2/ 1
3	6/ 1/ 1	9/ 2/ 2	-	7/ 2/ 2	7/ 2/ 1	-	6/ 1/ 1	9/ 2/ 2	-	6/ 1/ 2	9/ 2/ 1	-	7/ 2/ 2	7/ 2/ 2	-
	F			G			H			I					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	-	9/ 3/ 1	7/ 3/ 1	-	8/ 2/ 2	6/ 1/ 1	-	9/ 3/ 1	7/ 3/ 1	-	8/ 2/ 1	6/ 1/ 2			
2	7/ 3/ 2	-	7/ 2/ 1	5/ 2/ 1	-	9/ 2/ 1	7/ 3/ 1	-	7/ 2/ 1	5/ 2/ 1	-	9/ 2/ 2			
3	7/ 2/ 2	7/ 2/ 1	-	6/ 1/ 1	9/ 2/ 1	-	7/ 2/ 1	7/ 2/ 1	-	6/ 1/ 1	9/ 2/ 1	-			

算法的参数设置如下:抗体规模 70 ,记忆的最优抗体数为 35 ,变异概率 0.6 ,迭代次数为 70 代,参数 取 0.8 , $K$  取 100. 该算法采用 MinGW GCC 实

现,收敛过程如图 4 所示.同时选用优化软件 Lingo10 ,对问题进行求解得到表 3 的对比结果.

表 3  计算结果

Tab. 3   The result

最优目标值		最佳联运方式组合及路径	
免疫算法	92		
Lingo 软件	92		

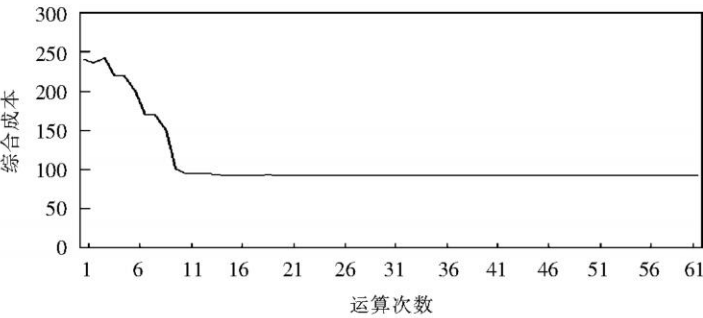


图 4  迭代过程

Fig. 4   The iteration process

通过运算可得如下结果:选择第 3 种运输方式 点,换乘第 3 种运输方式到 F 点,换乘第 2 种运输方

经由路径 O 到 T,然后换乘第 1 种运输方式到 B 式到 D 点.全程时间为 70 ,综合风险指数为6.25 ,最

小成本 92.

## 5 结语

本文研究了多式联运运输方式选择问题,通过联运服务网络的构建,将运输方式的选择连同同径路选择问题统一转换为最短路径问题,综合考虑了成本因素、及时性因素和运输风险因素建立了基于综合成本最小和风险最小的多目标规划模型.针对模型设计了人工免疫算法进行求解,并通过算例进行了验算,通过对比验证了模型和算法的有效性.

## 参考文献:

- [1] Groothedde B, Ruijgrok C. Towards collaborative, intermodal hub networks: A case study in the fast moving consumer goods market [J]. Transportation Research Part E, 2005, 41 (6) : 567-583.
- [2] Chang Tsungsheng. Best routes selection in international intermodal networks [J]. Computers & operations research, 2008, 35 (9) : 2877-2891.
- [3] 魏际刚, 荣朝和. 我国集装箱多式联运系统的协调问题 [J]. 集装箱化, 2002 (2) : 21-24.
- [4] 张建勇, 郭耀煌. 一种多式联运网络的最优分配模式研究 [J]. 铁道学报, 2002, 24 (4) : 114-116.
- [5] 贺竹馨, 孙林岩. 联合运输利益分配策略 [J]. 交通运输工程学报, 2005, 5 (3) : 122-126.
- [6] 任常兴, 吴宗之. 危险品道路运输风险分级指数法研究 [J]. 安全与环境学报, 2006, 6 (4) : 126-129.
- [7] Macharis C, Bontekoning Y M. Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review [J]. European Journal of operational Research, 2004, 153 (2) : 400-416.
- [8] Current J, Ratick S. A model to assess risk, equity and efficiency in facility location and transportation of hazardous materials [J]. Location Science, 1995, 3 (2) : 187-201.
- [9] Modesti P, Sciomachen A. A utility measure for finding multiobjective shortest paths in urban multimodal transportation networks [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 111 (3) : 495-518.
- [10] Shinghal N, Tony Fowkes. Freight model choice and adaptive stated preferences [J]. Transportation Research Part E, 2002, 38 (5) : 367-378.
- [11] 刘建军, 杨浩. 港口枢纽集装箱运输的组织优化研究 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (10) : 99-103.
- [12] 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.

## Optimization Model and Algorithm on Transportation Mode Selection in Intermodal Networks

LIU Jian, YU Jian-ning

(School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** On the basis of the analysis of selecting the best combination of transportation modes for shipment, the improved intermodal network is designed by using the graph-theory technique. Four important characteristics, i. e. multiple objective, in-time transportation, combined cost and transportation risks are taken consideration, and a multiobjective model is then formulated. Furthermore, the multiobjective model is transformed into a single objective model by using prime objective approach. An immune algorithm is introduced on the problem. Finally, a case study is carried out to illustrate the validity of model and approach developed in this paper.

**Key words:** intermodal; multiobjective model; immune algorithm