

doi:10.3969/j.issn.1001-0505.2010.06.044

区域综合交通枢纽布局双层规划模型

刘 强¹ 陆化普¹ 王庆云²

(¹ 清华大学土木工程系, 北京 100084)

(² 国家发展改革委员会交通运输司, 北京 100824)

摘要: 为了提高综合交通系统的运行效率,通过构建区域不同运输方式间随机配流模型,建立了区域综合交通枢纽布局双层规划模型。该模型运用系统工程的建模思想,从区域综合交通枢纽与交通网络之间的动态关系出发,考虑一定建设投资费用及环境承载力和能源消耗等约束条件;既保证用户的广义费用最低,同时使整个运输系统的社会效益最大。以京津冀区域为例,并以京津冀区域城际客运铁路网规划调查数据为基础,同时辅以一定量的交通调查,进行数据校核及模型参数的标定,验证建立模型的合理性及遗传模拟退火算法求解该模型的优越性。结果说明该模型对实现各种运输方式有效衔接具有较好的辅助决策支持。

关键词: 枢纽布局;区域交通网络资源;双层规划模型

中图分类号: U115 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2010)06-1358-06

Bi-level programming model for regional integrated transportation hub layout

Liu Qiang¹ Lu Huapu¹ Wang Qingyun²

(¹ Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(² Department of Transportation, National Development and Reform Commission, Beijing 100824, China)

Abstract: By designing an intermodal stochastic equilibrium assignment model for regional transportation, a bi-level programming model is developed for improving the operational efficiency of integrated transportation system. In this model the constraints such as budget, environment carrying capacity, and energy consumption, etc., are taken into account, and the dynamic interactions between transportation hubs and transportation network are considered synchronously. The model can represent two different interest entities of transportation hub: users and hub decision-makers, and ensure both a minimum user generalized cost and a maximum of social benefit in the system. Taking Beijing-Tianjin-Hebei area for instance, the model parameters was calibrated by using the Beijing-Tianjin-Hebei intercity passenger rail survey and other supplementary traffic survey data, and the rationality of the model and the advantages of using the genetic simulated annealing as the solution algorithm was further validated. Results show that the model can be a promising approach to support the assistant decision-making on integrating different modes at the regional level.

Key words: transportation hub layout; regional transportation network resources; bi-level programming model

区域综合交通枢纽的空间布局是区域综合交通运输系统规划的一项重要内容,其布局的合理与否决定了枢纽系统乃至整个区域交通运输系统的运行效率。由于我国交通长期实行分方式管理,部

门之间缺乏沟通协调的有效机制保障,致使各种交通运输网络及枢纽的规划布局、建设、管理等很难做到统筹协调和一体化运作,严重影响了运输系统整体效率的提高和运输资源的优化配置^[1-2]。

收稿日期: 2009-08-26。作者简介: 刘强(1980—),男,博士;陆化普(联系人),男,博士,教授,博士生导师,luhp@mail.tsinghua.edu.cn。

基金项目: 国家发展改革委员会交通运输司课题资助项目。

引文格式: 刘强,陆化普,王庆云. 区域综合交通枢纽布局双层规划模型[J]. 东南大学学报:自然科学版,2010,40(6):1358-1363. [doi: 10.3969/j.issn.1001-0505.2010.06.044]

目前关于区域综合交通枢纽布局的研究很少涉及,现有的交通枢纽规划布局研究^[3-8]主要是从静态和抽象的角度研究单一交通方式枢纽场站的规划布局,忽略了枢纽所在的交通运输网络的动态变化与枢纽布局二者间的相互联系和影响,也就是未能从综合交通系统的角度来研究枢纽的规划布局问题,通过引导交通需求者和运营者的微观行为,最大限度地协调各种运输方式的场站布局,以实现综合运输系统社会效益最大化的宏观目标.并且现有模型和方法研究也主要集中在城市各种交通枢纽的站场布局上,如运筹学模型与方法、数学物理模型和效益成本分析法^[9-12]等.因此,本文采用系统的分析思想,通过建立反映综合交通枢纽布局与运输网络客货流量动态关系的双层规划模型,研究区域综合交通枢纽的布局问题,为各种运输方式协调发展提供辅助决策支持.

1 双层规划模型

1.1 建模思路

区域综合交通枢纽布局与城市交通枢纽布局有很大的不同,区域综合交通枢纽布局是在区域交通的重要节点集合中,从整个交通运输系统的角度,综合考虑各种运输方式的技术特性和主要客货流流量,选择最优的交通节点城市,协调各种运输方式的网络布局,使得综合运输系统的社会效益最大化,同时方便旅客和货物的旅行和中转.

由于区域综合交通枢纽的布局实际是一项重要的决策问题,在此决策过程中,存在着供给(决策部门)和需求(用户包括旅客和货主)2个主体,两者之间既相互作用又相互影响.因此,本文采用双层规划模型来研究区域综合交通枢纽的规划布局问题,其中上层规划模型是从系统的角度也就是从决策部门的角度,在一定的建设费用投资及环境承载力和能源消耗等约束条件下,使得整个交通运输系统社会效益最大;下层规划模型是从旅客和货主的角度,使旅客和货主的广义费用最低,选择行为符合用户最优准则.

1.2 模型假设

为了便于建模,作以下假设:① 无论是旅客还是货主,假设其总是趋向于选择效用最大的运输方式,并且以效用最大原则来实现交通分配和方式划分的结合.② 各种运输方式的效用及其特征与用户的选择行为特征有关.

1.3 模型结构

1.3.1 上层模型

上层规划模型可描述为在允许的投资范围内及环境承载力和能源消耗等约束条件下,整个运输系统的社会效益最大.具体模型如下:

$$\begin{aligned} \max F = & \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m p_i^s q_{i1}^s L_i^s + \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \xi_i^s q_{i1}^s L_i^s + \\ & \sum_n \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \chi_n \lambda_n^{in}(v_i^s) q_{i1}^s L_i^s + \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \varphi \delta_i^s q_{i1}^s L_i^s - \\ & \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m p_i^s q_i^s L_i^s - \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \xi_i^s q_i^s L_i^s - \sum_n \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \chi_n \cdot \\ & \lambda_n^{in}(v_i^s) q_i^s L_i^s - \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \varphi \delta_i^s q_i^s L_i^s - \sum_{j=1}^n X_j Y_j \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n X_j Y_j \leq B \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m q_i^s = Q, \quad \forall s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \lambda_n^{in} q_i^s L_i^s \leq P_{n\max} \quad (4)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \delta_i^s q_i^s L_i^s \leq H_{\max} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_j \geq 1 \quad Y_j \in \{0,1\}; \quad q_i^s \geq 0 \quad (6)$$

式中, p_i^s 为区域第 s 个 OD 对之间第 i 种运输方式的客(货)运平均运价; t_i^s 为第 i 种运输方式在 OD 对 s 之间的旅行时间; ξ_i^s 为旅行的时间费用; $\lambda_n^{in}(v_i^s)$ 为第 i 种运输方式在 OD 对 s 之间以速度 v_i^s 行驶时的第 n 种污染物的排放量函数, $n = 1, 2, 3$ 分别表示 CO, NO_x 和 HC; χ_n 为治理第 n 种污染物的单位费用; δ_i^s 为第 i 种运输方式的单位能耗; φ 为能源消耗的经济转化系数; q_{i1}^s 为未规划设置枢纽时第 s 个 OD 对之间运输方式 i 初始分配的客(货)流量($s \in S, S$ 为区域 OD 对集合); q_i^s 为第 s 个 OD 对之间运输方式 i 的客(货)流量($s \in S$),由下层规划模型求得; L_i^s 为运输方式 i 在第 s 个 OD 对之间的运输距离; X_j 为选择 j 地规划设置综合交通枢纽的固定投资; Y_j 为 0-1 变量,在 j 地规划布设综合交通枢纽时, $Y_j = 1$,否则为 0.

约束条件(2)保证修建的综合交通枢纽的费用不超过其投资总额, B 为在 j 地规划设置枢纽的总投资预算;约束条件(3)保证 OD 对之间各种分方式的客(货)流量与总的客(货)流量相等;约束条件(4)保证每种污染物排放量小于其排放量的限值, $P_{n\max}$ 为第 n 种污染物排放量的限值;约束条件(5)保证能源消耗的总值小于其限制, H_{\max} 为能源消耗的限值;约束条件(6)保证至少规划布设一个综合交通枢纽,第 2 个约束为变量的 0-1 约束,第 3 个约束为变量的非负约束.

1.3.2 下层模型

下层规划模型可描述为在多模式运输竞争条件下,客(货)流量在各种运输方式之间的分配,其实质是综合交通网络的平衡配流问题.但由于在区域综合交通网络中各种运输方式都有各自固定的

运行线路,一般情况下,区域各种运输方式客(货)流量分配不存在路径的选择问题,而只存在交通方式的选择问题.因此,下层规划模型也就是从旅客和货主的角度,选择广义费用最小的运输方式.

由于在实际出行中,用户对通道内的各种运输方式的交通状况未必完全准确地了解,且用户的选择行为也未必一致,同时还有一些难以量化的因素.因此,为了能够真实地反映用户的选择行为,使得配流结果更能符合实际情况,本文通过设计区域综合交通网络随机配流模型来描述用户的交通方式选择过程,即

$$\min Z(q_s^i) = \frac{1}{\theta} \sum_s \sum_i q_s^i \ln q_s^i + \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \int_0^{q_s^i} f(w) dw \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^m q_s^i = Q_s, & \forall i = 1, 2, \dots, m; s \in S \\ q_s^i \geq 0 & \forall i = 1, 2, \dots, m; s \in S \end{cases} \quad (8)$$

式中, θ 为非负的校正参数; $Z(q_s^i)$ 为优化目标函数; 函数 f 为不同运输方式的广义费用函数, 在这个函数中不同运输方式的客(货)流量是自变量.

1.4 区域不同运输方式间随机配流模型的证明

在市场经济条件下,无论是旅客运输还是货物运输本质上都可认为是一种消费行为,即旅客和货主向运输企业购买运输服务,以实现旅客和货物空间位移.考虑到旅客和货主总是希望选择效用最大(广义费用最小)的运输方式,但各种运输方式的效用值受许多不确定性因素影响而难以估计是个随机变量,且具有相应的概率密度函数.如果 OD 对 s 间第 i 种运输方式被选择的概率是 P_s^i , 则

$$P_s^i = P_s^i(c_s) = \Pr(c_s^i \leq c_s^l, \forall l \neq i \in m | c_s) \quad (10)$$

式中, c_s^i 为第 s 个 OD 对之间第 i 种运输方式客(货)运平均单位运输费用.

由随机用户平衡配流的定义可知,在平衡状态下,某个 OD 对之间所有已被选用的运输方式,并不一定有相同的实际运输费用,而只满足条件

$$q_s^i = Q_s P_s^i \quad \forall i, s \quad (11)$$

式中,运输方式客(货)流量 q_s^i 与 P_s^i 有关, P_s^i 与估计运输费用大小有关,而各种运输方式估计运输费用是个随机变量,并且实际运输费用又是客(货)流量的函数,如此循环,达到随机用户平衡配流模型(SUE)的条件.

直接去求解 SUE 条件模型是十分困难的,为此,构造对等的数学规划模型,通过检查该数学规划的一阶条件来证明其解与 SUE 条件等价以及解的唯一性.

1.4.1 等价性条件证明

模型(7)是一个带线性等式和非负值约束的极小值问题,其拉格朗日函数为

$$L(q, \eta, \delta) = Z(q_s^i) + \eta_s \left(Q_s - \sum_{i=1}^m q_s^i \right) = \frac{1}{\theta} \sum_s \sum_i q_s^i \ln q_s^i + \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \int_0^{q_s^i} f(w) dw + \eta_s \left(Q_s - \sum_{i=1}^m q_s^i \right) \quad (12)$$

式中, η_s 为 Lagrange 乘子. 下层规划模型取极值的一阶必要条件为 $\frac{\partial L}{\partial q_s^i} = 0, \frac{\partial L}{\partial \eta_s} = 0, q_s^i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m, s \in S$, 由此可推出

$$q_s^i = \exp(\theta \eta_s - 1) \exp(-\theta c_s^i) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m q_s^i = Q_s \quad (14)$$

进而可得

$$q_s^i = Q_s \frac{\exp(-\theta c_s^i)}{\sum_{k \in m} \exp(-\theta c_s^k)} \quad \forall i \in m \quad (15)$$

这样,由模型(7)求出的交通流模式同时满足 SUE 条件和流量守恒约束.因此,通过求模型(7)的极小值可得到 SUE 交通流模式.

1.4.2 解的唯一性证明

记 $Z(q_s^i) = Z_1(q_s^i) + Z_2(q_s^i)$, 其中

$$Z_1(q_s^i) = \frac{1}{\theta} \sum_s \sum_i q_s^i \ln q_s^i \quad (16)$$

$$Z_2(q_s^i) = \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^m \int_0^{q_s^i} f(w) dw \quad (17)$$

$Z_1(q_s^i)$ 的 Hessian 矩阵 $\nabla^2 Z_1(q_s^i)$ 为

$$\nabla^2 Z_1(q_s^i) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\theta q_s^1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\theta q_s^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\theta q_s^m} \end{bmatrix} \quad (18)$$

由于 $\nabla^2 Z_1(q_s^i)$ 是正定的,因此, $Z_1(q_s^i)$ 是严格凸函数. 由于 $Z_2(q_s^i)$ 是客(货)流量 q_s^i 的凸函数,所以 2 项之和 $Z(q_s^i)$ 也是严格凸函数. 又由于约束是线性的,可视为凹函数,根据非线性规划理论,可知问题(7) ~ (9) 是严格凸规划,有唯一的全局最优解.

1.5 模型参数说明

根据文献[13]确定的治理各种运输方式空气污染物排放所需的资金方法,取 CO, NO₂, C_xH_y 的治理费用分别为 92.7, 3 100, 7 750 元/kg, 其中 NO_x 的治理费用近似用 NO₂ 替代.

由于用燃煤消耗来计算能源消耗,因此能源消耗成本可参照能源价格直接计算^[1]。

考虑到运输服务对象的性质差异,必须对旅客和货物的时间价值分别进行分析计算。本文通过区域旅客运输统计数据及区域内旅客的 SP 调查结果推算旅客的出行行为时间价值,在此基础上,确定区域内利用各种运输方式旅客的平均时间价值。

考虑到货物的时间价值体现在由于加快物质周转和社会再生产而带来的经济利益上,根据 1993 年国家计委颁布的《建设项目经济评价方法与参数》,我国货物节约在途时间的效益计算公式为

$$B_{hs} = \frac{P_r Q_h r T}{24 \times 365} \quad (19)$$

式中, P_r 为在途货物的单价; Q_h 为拟建项目上的货运量; r 为社会折现率; T 为项目节约的运输时间。

由于平均每吨货物的时间价值是由在途货物的平均价格和社会折现率所决定的,单位货物的时间价值计算公式为

$$V_h = \frac{P_r r}{365 \times 24} \quad (20)$$

2 双层规划模型求解算法

由于双层规划问题大多是非凸的,所以很难得到全局最优解。因此,本文采用遗传模拟退火算法来求解区域综合交通网络布局双层规划模型。首先根据下层模型的分配结果,对上层模型进行枢纽布局优化;其次将优化的枢纽布局反馈到下层模型重新进行客(货)流分配;如此反复迭代,最后有望收敛到双层规划的近优解。算法流程如图 1 所示。

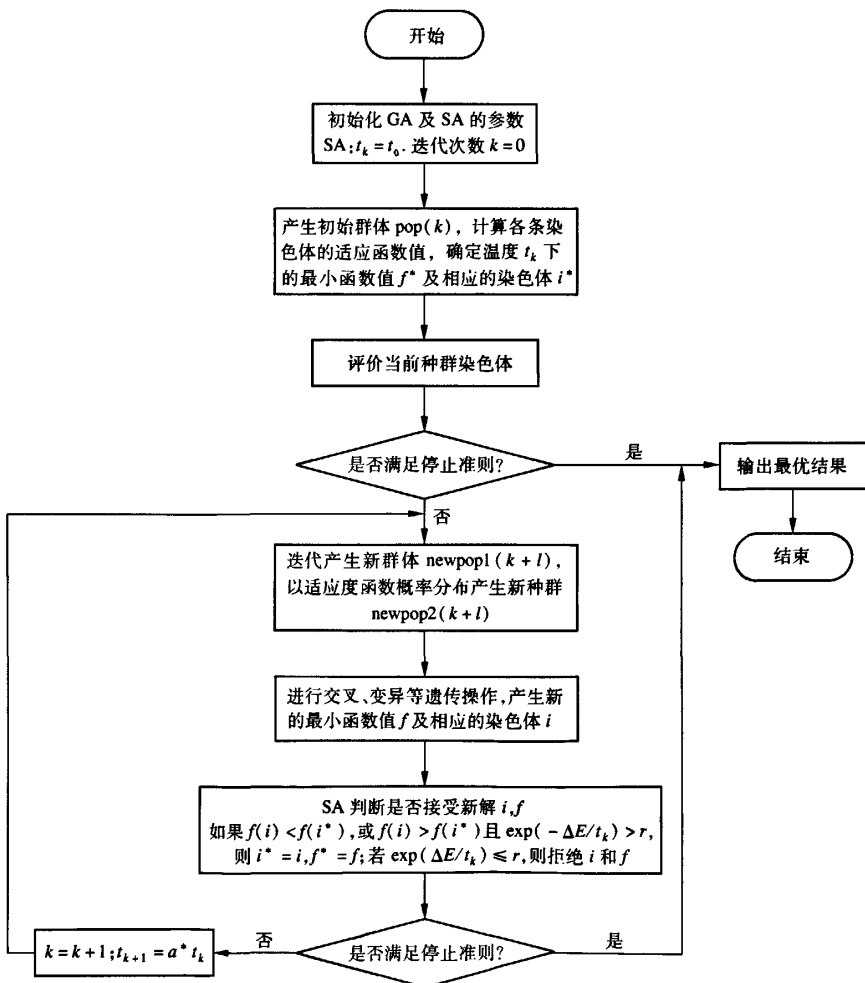


图 1 遗传模拟退火算法流程图

3 实例分析

本文选取京津冀地区为研究对象,以清华大学交通研究所承担的国家综合运输网规划及铁道第三勘察设计研究承担的环渤海京津冀地区城际客运铁路网规划研究的调查数据为基础,同时辅以一定量的交通调查,进行数据的校合及模型参数的标定与计算分析,验证所建立模型的合理性及采用遗传模拟退火算法求解该模型的优越性.考虑到数据的可获性,实例仅考虑铁路和公路 2 种运输方式.

3.1 节点层次划分

以京津冀区域 13 个地市为节点研究对象,根据节点的聚类分析法,将这 13 个节点划分为重要节点、较重要节点、一般节点 3 个层次,具体划分情况如表 1 所示.

表 1 各节点层次结构

重要节点		较重要节点		一般节点	
北京	天津	保定	邢台	衡水	张家口
石家庄	唐山	秦皇岛	邯郸	廊坊	承德
		沧州			

3.2 节点重要度计算

计算得到各节点的重要度如表 2 所示^[1].

表 2 各节点重要度计算值

节点名称	重要度	节点名称	重要度	节点名称	重要度
北京	5.361	秦皇岛	2.116	廊坊	1.089
天津	3.512	保定	2.011	衡水	1.059
石家庄	2.507	邯郸	1.830	张家口	0.913
唐山	2.237	沧州	1.427	承德	0.631
		邢台	1.263		

3.3 模型求解

本文采用基于优先权的编码技术. 设 $\Omega = \{1, 2, \dots, n\}$, 用 $p_i \in \Omega$ 表示枢纽 i 的优先权. p_i 满足 $p_i \neq p_j (p_i, p_j \in \Omega, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n)$. 则基于优先权的染色体编码为 $[p_1, p_2, \dots, p_n]$. 对于模型 (1), 需要确定的变量为 Y_j , 因此, 如果选择优先权最高的前 P 个基因, 则令所对应的枢纽 j 的 $Y_j = 1$, 其余 $n - P$ 个基因所对应的枢纽 j 的 $Y_j = 0$.

对于生成满足条件的染色体, 随机选择 2 个位置进行元素交换, 并根据算法进行调整, 使其成为满足要求的新染色体, 直至达到满足种群规模的染色体数.

由于区域综合交通枢纽布局模型以实现整个运输系统的社会效益最大化为目标, 因此, 选用加速适应度函数

$$f_i(t_k) = \exp\left[-\frac{f_i(t_k) - f_{\min}}{t_k}\right] \quad (21)$$

式中, $f_i(t_k)$ 为状态 i 在温度为 t_k 时的目标值, i 为当代群体中的一个染色体且 $i \in \text{pop}(k)$.

经过试算, 区域综合交通枢纽布局优化的运行参数分别取为: 群体规模 $M = 80$, 算法执行的最大代数 G_{\max} 取 200, 交叉概率 $p_c = 0.6$, 而变异概率 p_m 采用确定性准则, 即

$$p_m = 0.7 - 0.15 \times \frac{G_{\text{cur}}}{G_{\max}} \quad (22)$$

式中, G_{cur} 表示当前遗传代数. 此外, 在遗传算法中加入了模拟退火算子, 取初始退火温度为 10, 衰减系数为 0.85.

当算法的当前进化代数大于预先设置的一个允许的最大遗传代数时, 算法结束.

3.4 模型结果分析

根据上述算法, 在 Matlab 环境下通过编程求解京津冀地区综合交通枢纽布局规划问题. 在代数为第 8 代时, 得到近优解, 如表 3 所示. 此时, 适应度最高的染色体编码是 1, 4, 7, 10, 2, 9, 5, 3, 6, 11, 13, 8, 12 这一组, 即选择 1, 4, 7 节点 (分别为: 北京、天津和石家庄) 作为京津冀区域综合交通枢纽设置点的方案社会效用最大. 此结果与国家中长期综合交通网规划综合交通枢纽方案相比, 综合交通枢纽个数低于国家规划方案 (北京、天津、石家庄、秦皇岛、唐山). 原因在于本文利用双层规划模型研究综合枢纽布局时, 主要考虑建设费用最省、能源消耗以及环境污染最少. 而实际的区域综合交通枢纽布局规划时, 除了考虑上述目标外, 还必须考虑交通建设对经济的带动作用, 规划的超前性等方面的意义.

表 3 计算结果

第 8 代父个体	交叉位置	染色体编码	适应度/ 10^{-5}
(2,4)	1	14710295361113812	1.861 791
(6,2)	1	14510231176138912	1.765 140
(1,4)	1	14510231176138912	1.765 140
(1,4)	1	14510231176138912	1.765 140
(5,1)	2	14510231176138912	1.763 125
(2,9)	1	14510231176138912	1.763 125
(2,11)	2	14510231176138912	1.762 608
(2,10)	2	14510231176138912	1.765 140
(6,2)	2	14572311106138912	1.739 123
(3,7)	2	14572311106138912	1.753 316

此外, 如果采用遗传算法求解该模型, 其进化

代数达100次才能达到相同的计算结果.由此可看出,采用遗传模拟退火算法可以大大缩短进化代数,节约运算时间,提高运算效率.并且在同等进化代数的情况下,遗传模拟退火算法的计算结果比遗传算法的计算结果好.

4 结语

在分析传统枢纽布局研究存在问题的基础上,通过设计区域内不同运输方式之间的随机均衡配流模型,建立了能反映供需双方相互作用的、有别于传统静态模型的区域综合交通枢纽布局双层规划动态模型.通过案例分析,验证了所建立模型的合理性,对实现各种运输方式的有效衔接具有较好的辅助决策支持.由于本文所建立的双层规划模型未考虑各种运输方式的能力限制问题且模型的参数较多,因此,加入能力限制约束,对其进行灵敏度分析,并设计相应的求解算法以及探索方便有效的模型参数校正方法是需要进一步研究的问题.

参考文献 (References)

- [1] 刘强. 区域交通网络资源优化配置辅助决策理论与方法研究[D]. 北京:清华大学土木工程系, 2007.
- [2] 陆化普, 刘强, 焦朋朋. 区域综合交通网络布局理论及其应用[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2006.
- [3] Baumol W J, Wolfe P. A warehouse-location problem [J]. *Operations Research*, 1958, 6(2):252-263.
- [4] Rodriguez V, Alvarez M J, Barcos L. Hub location under capacity constraints [J]. *Transportation Research Part E*. 2007, 43:495-505
- [5] Aykin T. On the location of hub facilities [J]. *Transportation Science*, 1988, 22(2):155-157.
- [6] O'Kelly M E. The location of interacting hub facilities [J]. *Transportation Science*, 1986, 20(2):92-106.
- [7] Hamacher H W, Labbe M, Nickel S, et al. Adapting polyhedral properties from facility to hub location problems [J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2004, 145(1):104-116.
- [8] Labbe M, Yaman H, Gourdin E. A branch and cut algorithm for hub location problems with single assignment [J]. *Mathematical Programming*, 2005, 102(2):371-405.
- [9] 杨兆升. 交通运输系统规划[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.
- [10] 陆化普, 陈宏峰, 袁虹, 等. 综合交通枢纽规划——基础理论与温州的规划实践[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.
- [11] 胡思继. 综合运输工程学[M]. 北京:清华大学出版, 2005.
- [12] 胡列格, 刘中, 杨明. 交通枢纽与港站[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- [13] Nakamura H. *Social economic evaluation of road investment* [M]. Tokyo: Toyo Keizai Sinho Sya, 1997.