

## 需求不确定下 P-Hub 公路客运综合枢纽选址研究\*

龙思, 黄晴, 郭权

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 枢纽选址问题在交通电信领域广泛存在, 枢纽决策往往受到外界因素的干扰, 这一问题涉及长期的战略决策, 而未来的资金与需求随着时间而变化, 要获得准确的需求数据很困难, 如何建立不确定性模型提高枢纽选址时不确定因素的调节能力一直是学者的研究课题。文中在考虑需求不确定的情境下研究城市综合客运交通枢纽的选择, 提出无容量的 P-Hub 选址问题, 客流量不确定性以不确性集合的形式表现, 建立期望成本最小化和  $\alpha$ -成本期望最小化 2 种不确定规划模型, 在相应约束条件下分别使期望成本和  $\alpha$ -成本最小, 并利用粒子群算法对模型进行求解。

**关键词:** 公路运输; 客运; 综合枢纽选址; 需求不确定; P-Hub

中图分类号: U492.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)06-0022-07

枢纽选址问题研究以运输网络为背景, 运输网络由交错的起始点与目的点连接组成, 在这样的系统中, OD 间的直接运输既不实际也没有成本效应。针对枢纽选址问题, Sibel A. A. 等对其研究方向进行了讨论, 包括 P-Hub 枢纽问题和含固定费用的枢纽选址问题; Puerto J. 等在枢纽有容量约束的条件下研究单分配中值问题, 通过预处理过程解决变量, 并通过增加有效不等式组合来强化模型; Sibel A. A. 等考虑不确定性因素进行枢纽选址, 不确定性来源于枢纽建设成本和 OD 间流量需求两方面; 熊孝娟等对外界因素造成流量的不确定性进行建模, 解决枢纽网络在面对干扰时的调节能力问题; 王达等建立基于乘客需求的综合客运枢纽信息重要度模型, 提高客运枢纽的服务水平; 刘杰等分析交通枢纽客流量的变化特点, 建立城市交通枢纽短期客流量组合预测模型; 杨年等对容量分配下空铁联运网络设计进行研究, 优化枢纽的运营能力; 康凯等针对弹性需求下枢纽选址, 考虑特定枢纽的随机生效模式, 从博弈论角度提出一种能实现平战网络性能权衡的枢纽选址策略。现有研究只考虑 OD 间的流量需求不确定性, 未考虑枢纽换乘系数对需求的影响; 将单分配和多分配枢纽选址问题分别考虑, 研究不具有针对性, 各个角度的研究均不够透彻; 未对不确定性与确定性进行比较分析。为此, 该文在 OD 需求不

确定的情境下, 提出无容量的 P-Hub 选址问题, 流量不确定性以不确性集合形式表现, 建立 2 种不确定规划模型, 将不确定转化为相应的分布函数, 在相应约束条件下分别使期望成本和  $\alpha$ -成本最小, 并用算例对模型进行验证。

## 1 模型建立

### 1.1 问题描述

枢纽在运输网络中是从起点到终点进行流量收集和分配的设施, 在运输网络中起到产生规模经济的作用。P-Hub 选址的目的是在运输网络中选  $P$  个枢纽, 使 OD 上的流量经过这些枢纽的运输费用最小。该文讨论无容量限制的多分配 P-Hub 枢纽选址问题的鲁棒性, 非枢纽间不能直接链接。

在运输网络中, 客流量集中到枢纽, 通过枢纽间的集中运输实现规模经济。之前的研究中, 各 OD 间的客流量已知, 解决 P-Hub 枢纽选址问题的关键是处理需求不确定性。而现实生活中需求很大程度上会受到外界因素的影响。因此, 在传统 P-Hub 枢纽问题的基础上考虑需求不确定性因素对运输成本鲁棒性进行分析。

### 1.2 模型假设

对模型作如下假设: 1) 运输方式单一; 2) 运输网络规模较小; 3) 网络中运输车辆充足; 4) 不确定系数具有独立性。

\* 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2019JJ40306); 长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(kfj180401)

### 1.3 模型构建

为表示事件发生的置信度,引入不确定测度。

定义1(不确定测度):设 $\Gamma$ 为一个非空集合, $L$ 为 $\Gamma$ 上的 $\sigma$ -代数, $L$ 中的每个元素 $\Lambda$ 为一个事件,则称 $M$ 为不确定测度,称三元组 $(\Gamma, L, M)$ 为一个不确定空间。事件 $\Lambda$ 的不确定测度是对事件 $\Lambda$ 发生的不确定大小的度量。根据不确定测度的定义,以 $M\{\Lambda\}$ 表示 $\Lambda$ 发生的机会,如果 $M\{\Lambda\}$ 满足以下公理,则称为不确定测度:1) 常规性。对全集 $\Lambda$ ,有 $M\{\Lambda\}=1$ 。2) 单调性。只要 $\Lambda_1 \subset \Lambda_2$ ,则有 $M\{\Lambda_1\} \leq M\{\Lambda_2\}$ 。3) 自对偶性。对于任意事件 $\Lambda$ ,都有 $M\{\Lambda\} + M\{\Lambda^c\} = 1$ 。4) 序列可加性。对任意可列的事件序列 $\{\Lambda_i\}$ , $M\{\bigcup_{i=1}^{\infty} \Lambda_i\} \leq \sum_{i=1}^{\infty} M\{\Lambda_i\}$ 均成立。5) 乘积定理。令 $(\Gamma_k, L_k, M_k), k=1, 2, \dots$ 为不确定空间,记 $\Gamma_k = \Gamma_1 \times \Gamma_2 \times \dots, L_k = L_1 \times L_2 \times \dots$ ,不确定乘积测度 $M$ 满足 $M\{\prod_{k=1}^{\infty} \Lambda_k\} \leq \prod_{k=1}^{\infty} M_k\{\Lambda_k\}$ 。

定义2(不确定变量):一个不确定变量是从三元空间到实数集的可测函数,即对于任意实数的Borel集 $B$ ,集合 $\{\xi \in B\} = \{\gamma \in \Gamma \mid \xi(\gamma) \in B\}$ 为一个事件。

定义3:如果不确定分布 $\Phi(x)$ 对 $X$ 是连续且严格单调递增函数,在 $0 < \Phi(x) < 1$ 时,称其为正态分布, $\lim_{x \rightarrow -\infty} \Phi(x) = 0, \lim_{x \rightarrow +\infty} \Phi(x) = 1$ 成立。

定义4:设 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 是不确定变量,如果对于任意的Borel集 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 满足 $M\{\bigcap_{i=1}^n \{\xi_i \in B_i\}\} \leq \prod_{i=1}^n M\{\xi_i \in B_i\}$ ,则称 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 是相互独立的。

引理1:设 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 是不确定自变量, $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ 为其对应的不确定分布,如果 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 对 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 单调递增,则称 $\xi = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 为具有逆不确定分布的不确定变量,且有 $\Psi^{-1}(\alpha) = f(\Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(\alpha))$ 。

定义5:不确定变量 $\xi$ 的期望值由式(1)计算。

$$E[\xi] = \int_0^{+\infty} M\{\xi \geq x\} dx - \int_{-\infty}^0 M\{\xi \leq x\} dx \quad (1)$$

引理2:设 $\xi$ 是一个不确定变量,其不确定性服从正态分布,若期望值 $E(\xi)$ 存在,则有 $E[\xi] = \int_0^1 \Phi^{-1}(\alpha) d\alpha$ 。

引理3:假设 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 分别是具有不确定性分布的自变量, $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ 为其对应的分布函数,若 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 相对于 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 严格单调递增,则不确定变量的期望值 $\xi = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 可由式(2)计算。

$$E[\xi](\alpha) = \int_0^1 f(\Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(\alpha)) d\alpha \quad (2)$$

例如:设 $a < b < c$ ,若一个不确定变量 $\xi$ 的不确定分布服从 $Z$ 分布(之字形分布) $\xi = Z(a, b, c)$ ,则:

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x-a)/2(b-a), & a < x \leq b \\ (x+c-2b)/2(c-b), & b < x \leq c \\ 1, & x > c \end{cases}$$

$$\Phi^{-1}(\alpha) = \begin{cases} (1-2\alpha)a + 2\alpha b, & 0 < \alpha < 0.5 \\ (2-2\alpha)b + (2\alpha-1)c, & 0.5 \leq \alpha < 1 \end{cases}$$

当 $\alpha = 0.9$ 时, $\Phi^{-1}(0.9) = 0.2b + 0.8c, E[\xi] = (a + 2b + c)/4$ 。

### 1.4 不确定模型建立

由于P-Hub选址问题与P-median公式类似,也被称为P-Hub中值问题。设有 $n$ 个节点,每个节点都可以是出发点、目的地或潜在的枢纽选择点。从 $n$ 个节点中选择 $P$ 个枢纽,所有枢纽节点彼此连接。每个非枢纽节点完全连接到单个枢纽,2个非枢纽节点之间不直接连接。为便于描述,对参数进行设置,设 $i$ 为节点, $\xi_i$ 为假定不确定变量的始发地 $i$ 到目的地 $j$ 的流量, $c_{ik}$ 为非枢纽节点 $i$ 到枢纽节点 $k$ 的单位运输成本, $f_k$ 为枢纽位于节点 $k$ 时的建设固定成本, $\varphi$ 为枢纽间长途移动系数, $\lambda$ 为出发点 $i$ 运输到枢纽的成本系数, $\beta$ 为枢纽分配到目的地的成本系数,取 $\lambda = \beta = 1$ ,仅考虑枢纽换乘系数的影响。P-Hub枢纽选址问题的决策变量为:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 分配给枢纽 } k \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

如果 $x_{kk}$ 的值为1,表示节点 $k$ 被分配给自己,也就是说节点 $k$ 实际上是一个枢纽节点。总成本由固定成本、将节点 $i$ 连接到枢纽节点的成本、将目的地节点连接至枢纽节点的成本、枢纽之间连接成本组成,有:

$$x = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}$$

$$\xi = \begin{pmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \cdots & \xi_{1n} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \cdots & \xi_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \xi_{n1} & \xi_{n2} & \cdots & \xi_{nn} \end{pmatrix}$$

总成本如下:

$$\begin{aligned} f(x, \xi) &= \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n x_{ik} c_{ik} \left( \sum_{j=1}^n \xi_{ij} \right) + \\ &\beta \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ik} c_{ik} \left( \sum_{j=1}^n \xi_{ij} \right) + \\ &\varphi \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n x_{ik} x_{jm} \xi_{ij} c_{km} \\ f(x, \xi) &= \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_{ij} \cdot \\ &\sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n x_{ik} x_{jm} (\lambda c_{ik} + \varphi c_{km} + \beta c_{mj}) \end{aligned}$$

为便于分析,令

$$g_{ij}(x) = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n x_{ik} x_{jm} (\lambda c_{ik} + \varphi c_{km} + \beta c_{mj})$$

### 1.4.1 期望成本最小化模型

不确定变量的度量通常采用期望值,即不确定测度意义下的平均值。根据这一准则,具有不确定流的 P-Hub 枢纽选址问题的最小期望成本为:

$$(ECMM) \begin{cases} \min E[f(x, \xi)] \\ \sum_{k=1}^n x_{kk} = p \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{k=1}^n x_{ik} = 1; i = 1, 2, \dots, n \\ x_{ik} \in \{0, 1\}; i, k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $E$  为不确定变量的期望算子。

式(3)的约束中,第一个公式表示要求选择精确的  $P$  个枢纽点,第二个公式表示确保每个节点被分配给一个且仅分配给一个枢纽,第三个公式表示标准完整性约束。

引理 4:假设所有的  $\xi_{ij}$  都是独立的不确定变量,且不确定分布为  $\Phi_{ij}$ ,可将式(3)转化为等效模型(4)。

$$(ECMM) \begin{cases} \min \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_{ij}(x) \cdot \\ \int_0^1 \Phi^{-1}(\alpha) d\alpha \\ \sum_{k=1}^n x_{kk} = p \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{k=1}^n x_{ik} = 1; i = 1, 2, \dots, n \\ x_{ik} \in \{0, 1\}; i, k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

对于任意的  $i, j$  对,  $g_{ij}(x) \geq 0$ , 设  $S = \{(i', j'): g_{i'j'}(x) > 0\}$ , 则总成本为:

$$f(x, \xi) = \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{(i', j') \in S} \xi_{i'j'} g_{i'j'}(x) \quad (5)$$

式(5)在  $(i', j') \in S$  内是关于  $\xi_{i'j'}$  的严格递增函数,因为所有的  $\xi_{ij}$  都是独立的,  $\xi_{i'j'}$  也是独立的,由引理 3 可得:

$$E[f(x, \xi)] = \int_0^1 \left( \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{(i', j') \in S} \Phi_{i'j'}^{-1}(\alpha) \cdot g_{ij}(x) \right) d\alpha$$

加上与  $\Phi_{ij}^{-1}(\alpha) g_{ij}(x)$  相对应的  $\xi_{ij} g_{ij}(x)$ ,  $g_{ij}(x) = 0$ , 可得:

$$\begin{aligned} E[f(x, \xi)] &= \int_0^1 \left( \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Phi_{ij}^{-1}(\alpha) \cdot g_{ij}(x) \right) d\alpha \\ &= \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_{ij}(x) \cdot \int_0^1 \Phi^{-1}(\alpha) d\alpha \end{aligned}$$

在定理 4 的条件下,从引理 2 可得:

$$E[f(x, \xi)] = \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E[\xi_{ij}] g_{ij}(x)$$

由于  $E[\xi_{ij}]$  是所有  $i$  和  $j$  的一个精确期望值,模型(4)本质上是一个经典的无容量的 P-hub 枢纽选址模型,不存在不确定性。

### 1.4.2 $\alpha$ -成本期望最小化模型

文献[14]将机会约束规划引入不确定决策系统建模中,文献[15-16]讨论了不确定条件的约束规划的优化。根据这一模型准则,建立在给定置信水平下使成本最小化即  $\alpha$ -成本最小化模型( $\alpha$ -CMM):

$$(\alpha-CMM) \begin{cases} \min \bar{C} \\ \left\{ \begin{aligned} &M\{f(x, \xi) \leq \bar{C}\} \geq \alpha \\ &\sum_{k=1}^n x_{kk} = p \\ &\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1; i = 1, 2, \dots, n \\ &x_{ik} \in \{0, 1\}; i, k = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\alpha \in (0, 1)$ , 为预先确定的置信水平;  $\bar{C}$  为  $\alpha$ -成本,其作用是确保总成本  $f(x, \xi)$  小于等于  $\bar{C}$  的概率大于等于  $\alpha$ 。

引理 5:假设所有的  $\xi_{ij}$  是具有规则不确定性分

布的自变量  $\Phi_{ij}$ , 可将  $\alpha$ -CMM 模型转化为等效模型(7)。

$$(\alpha - CMM) \left\{ \begin{array}{l} \min \bar{C} \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_{ij}(x) \cdot \\ \Phi_{ij}^{-1}(\alpha) \leq \bar{C} \\ \sum_{k=1}^n x_{kk} = p \\ \sum_{k=1}^n x_{ik} = 1; i = 1, 2, \dots, n \\ x_{ik} \in \{0, 1\}; i, k = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (7)$$

根据不确定性分布的定义,有:

$$\Psi_{f(x, \xi)}(\bar{C}) = M\{f(x, \xi) \leq \bar{C}\} \geq \alpha \quad (8)$$

式(8)等价于  $\Psi_{f(x, \xi)}^{-1}(\alpha) \leq \bar{C}$ , 其中  $\Psi_{f(x, \xi)}$  和  $\Psi_{f(x, \xi)}^{-1}$  分别为  $f(x, \xi)$  的不确定分布和逆不确定分布。根据引理 1, 有:

$$\Psi_{f(x, \xi)}^{-1}(\alpha) = \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_{ij}(x) \Phi_{ij}^{-1}(\alpha)$$

为了简化,将  $X$  按照下式进行描述:

$$X = \{x \mid \sum_{k=1}^n x_{kk} = p; \sum_{k=1}^n x_{ik} = 1, \text{且 } x_{ik} \in \{0, 1\}; i, k = 1, 2, \dots, n\}$$

如果  $\xi_{ij}$  为某些特定类型的不确定分布,则有以下推论:

推论 1: 如果  $\xi_{ij} = Z(a_{ij}, b_{ij}, d_{ij})$  是  $Z$  的不确定变量,则模型(7)可写成:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \bar{C} \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_{ij}(x) \cdot \\ [(2-2\alpha)b_{ij} + (2\alpha-1)d_{ij}] \leq \bar{C} \\ x \in X \end{array} \right. \quad (0.5 \leq \alpha \leq 1) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \bar{C} \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^n f_k x_{kk} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_{ij}(x) \cdot \\ [(1-2\alpha)a_{ij} + 2\alpha b_{ij}] \leq \bar{C} \\ x \in X \end{array} \right. \quad (0 < \alpha < 0.5) \end{array} \right.$$

模型参数如下:  $W_{ij}$  表示起点  $i$  到目的地点  $j$  的总需求量,即经过枢纽的总需求;  $x_{ijkm}$  表示由  $i$  到  $j$  经过枢纽  $k, m$  的流量。

## 2 算法设计

采用 MATLAB 编写粒子群算法对模型进行求解。粒子群算法通过设计一种无质量的粒子来模拟鸟群中的鸟,粒子仅具有速度和位置两个属性,速度代表移动的快慢,位置代表移动的方向。每个粒子在搜索空间中单独搜寻最优解,将其记为当前个体极值,并将个体极值与整个粒子群里的其他粒子共享,找到最优的那个个体极值作为整个粒子群的当前全局最优解。粒子群中的所有粒子根据自己找到的当前个体极值和整个粒子群共享的当前全局最优解来调整自己的速度和位置。

PSO 初始化为一群随机粒子(随机解),然后通过迭代找到最优解。在每次迭代中,粒子通过跟踪 2 个极值( $pbest, gbest$ )来更新自己。在找到 2 个最优值后,粒子通过下式更新自己的速度和位置:

$$v_i = v_i + c_1 \times rand() \times (pbest_i - x_i) + c_2 \times rand() \times (gbest_i - x_i)$$

$$x_i = x_i + v_i$$

$$v_i = w \times v_i + c_1 \times rand() \times (pbest_i - x_i) + c_2 \times rand() \times (gbest_i - x_i)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  为群中粒子总数;  $v_i$  为粒子速度,如果  $v_i$  大于  $v_i$  的最大值  $v_{max}$  (大于 0),则  $v_i = v_{max}$ ;  $rand()$  为介于 (0, 1) 之间的随机数;  $x_i$  为粒子当前位置;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子,  $c_1 = 1.5, c_2 = 2.0$ ;  $w$  为惯性因子,其值为非负,  $w = 0.99$ 。

## 3 算例分析

下面通过算例分析,检验上述模型的有效性。采用《从统计看民航 2004》中的数据,考虑 20 个待选枢纽节点,每个节点的建设固定成本与 GPS 坐标定位见表 1。假设节点之间运输单位成本与节点间距离成比例,设  $c_{ik} = 10 \times d_{ik}, c_{ik} = c_{ki}$ , 即单位成本矩阵是对称的。起点  $i$  与终点  $j$  之间的流量不确定,表 2 为待选枢纽节点之间的不确定需求流量,

表 1 部分城市的直角坐标值与枢纽固定成本值

城市编号	X	Y	枢纽固定成本 F/元
N1	116.395 645 0	39.929 985 78	478.957 924
N2	125.313 642 4	43.898 337 61	774.842 802
N3	104.067 923 5	30.679 942 85	473.810 696
N4	106.530 635 0	29.544 606 11	671.636 154

表3为待选节点之间需求流量期望值(由引理3计算得出),即用期望成本最小化模型计算的期望值。如数据(45,48,50)表示从起点1到终点2的曲折不确定流量,48为最可能的流量,45为最小流量,50为最大流量。当然曲折不确定流量也可以是确定的数值,常数可看成特殊的曲折不确定流量,即服从 $Z(b,b,b)$ 分布。表4为运用 $\alpha$ -成本最小化模型计算得出的节点间需求流量期望值。

节点之间的实际距离由下式计算:

$$d = R \arccos\left(\frac{\overrightarrow{OA} \cdot \overrightarrow{OB}}{|\overrightarrow{OA}| \cdot |\overrightarrow{OB}|}\right)$$

化简得  $d = R \arccos[\cos(x_1 - x_2) \cos y_1 \cos y_2 + \sin y_1 \sin y_2]$ 。其中  $A, B$  两点的地理坐标分别为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ , 过  $A, B$  两点的大圆的劣弧长即为两点的实际距离。 $R = 6\,370$  km 为地球半径。计算结果见表5、表6。

表2 部分城市间的不确定需求流量

人次

城市编号	不确定需求流量				
	N1	N2	N3	N4	N5
N1	0	(45,48,50)	(109,111,120)	(41,45,48)	(71,74,77)
N2	(45,48,50)	0	(30,34,37)	(15,18,21)	(3,4,7)
N3	(109,111,120)	(30,34,37)	0	(15,18,22)	(3,5,8)
N4	(41,45,48)	(15,18,21)	(15,18,22)	0	(3,4,6)
N5	(71,74,77)	(3,4,7)	(3,5,8)	(3,4,6)	0

表3 部分城市间的需求流量期望值

人次

城市编号	需求流量期望值							
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
N1	0.00	47.75	112.75	44.75	74.00	152.00	61.50	75.25
N2	47.75	0.00	33.75	18.00	4.50	21.50	26.25	15.00
N3	112.75	33.75	0.00	18.25	5.50	72.00	17.00	16.25
N4	44.75	18.00	18.25	0.00	4.25	49.25	21.25	3.25
N5	74.00	4.50	5.50	4.25	0.00	22.25	5.50	17.00

表4  $\alpha=0.8$  时部分城市间的需求流量期望值

人次

城市编号	需求流量期望值							
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
N1	0.0	49.2	116.4	46.8	75.8	153.2	62.8	77.4
N2	49.2	0.0	35.8	19.8	5.8	22.8	27.8	16.8
N3	116.4	35.8	0.0	20.4	6.8	73.8	18.2	17.8
N4	46.8	19.8	20.4	0.0	4.0	50.8	22.8	4.2

表5 ECMM 模型的计算结果

枢纽换乘系数 $\psi$	$P=3$ 时的计算结果		$P=4$ 时的计算结果		$P=5$ 时的计算结果	
	运输成本/元	枢纽点号	运输成本/元	枢纽点号	运输成本/元	枢纽点号
0.7	728 801 545.6	3,11,13	622 163 928.6	3,9,11,12	662 125 054.3	3,9,11,12,13
0.8	736 511 004.6	5,8,12	650 893 272.6	3,9,11,12	698 120 825.1	3,9,11,12,13
0.9	763 019 113.9	3,9,12	679 622 616.6	3,9,11,12	730 619 240.0	1,3,11,13,20

表6  $\alpha$ -CMM 模型的计算结果( $\psi=0.8$ )

置信水平 $\alpha$	$P=3$ 时的计算结果		$P=4$ 时的计算结果		$P=5$ 时的计算结果	
	运输成本/元	枢纽点号	运输成本/元	枢纽点号	运输成本/元	枢纽点号
0.2	702 492 149.8	3,11,20	612 027 885.0	3,9,11,12	612 221 689.8	3,9,11,12,20
0.3	716 059 218.3	1,5,18	622 163 488.2	3,9,11,12	620 478 885.6	3,9,11,12,20
0.4	746 836 252.0	3,9,11	632 299 091.3	3,9,11,12	622 163 928.6	3,11,12,13,17
0.7	786 520 876.2	12,13,15	709 465 214.1	1,3,11,13	694 792 596.4	3,8,9,11,12
0.8	805 875 318.0	12,13,15	736 192 765.0	3,9,11,20	697 398 274.3	3,9,11,12,20
0.9	807 065 399.0	3,9,12	765 506 093.5	3,9,11,12	708 612 903.4	3,9,11,12,17

由表 5、表 6 可知:对于期望成本最小化模型,枢纽换乘系数  $\psi$  增大时,期望成本增大;系数固定不变时,网络总成本值随着枢纽数量的增多而减少;  $P=4$  时,网络总成本最小。对于  $\alpha$ -成本最小化模型,枢纽数值一定时,成本值随着成本置信水平  $\alpha$  的增大而增大。如图 1、图 2 所示,  $P=4$ 、 $\psi=0.8$  与  $P=4$ 、 $\psi=0.8$ 、 $\alpha=0.9$  所选的枢纽点是一致的,表明不确定模型具有稳定性;  $P=4$  时,  $\psi=0.8$  与  $\psi=0.9$  的结果一致。而根据表 6,除  $\alpha=0.7$  和  $\alpha=0.8$  外,其余置信水平状态下所得枢纽皆为  $[3,9,11,12]$ ,说明所建立的模型具有鲁棒性。

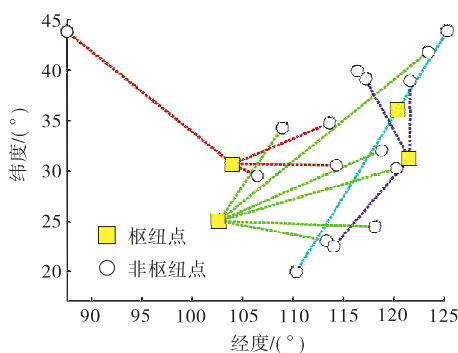


图 1  $P=4$ 、 $\psi=0.8$  时的结果

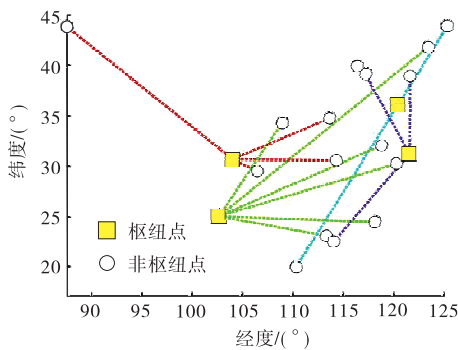


图 2  $P=4$ 、 $\psi=0.8$ 、 $\alpha=0.9$  时的结果

采取的粒子群算法收敛速度快,迭代 100 次时已收敛(见图 3)。图 4、图 5 为两模型的运输成本计

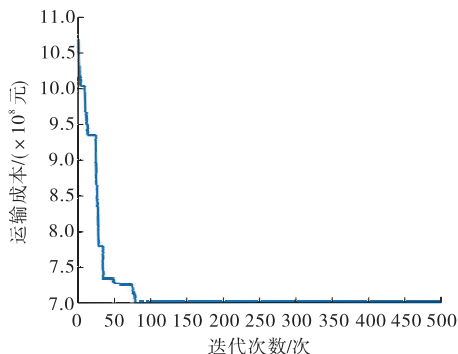


图 3 粒子群算法的收敛速度

算结果,图 6 为不同枢纽数对应的运输成本结果与标准模型结果的比较。

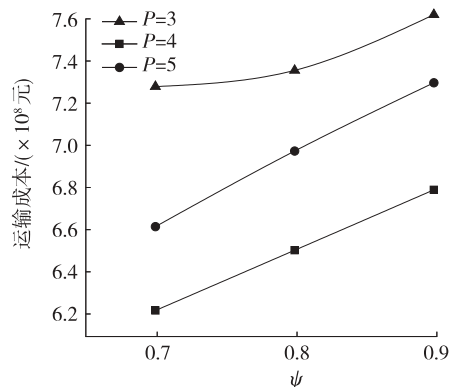


图 4 期望成本模型枢纽-成本图

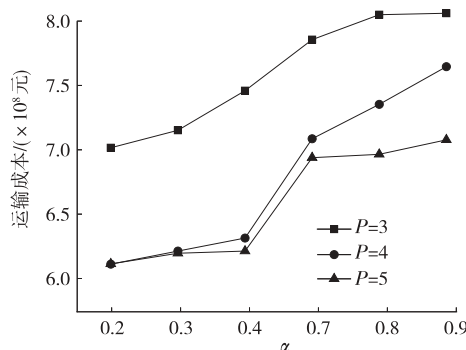


图 5  $\alpha$ -成本模型枢纽-成本图

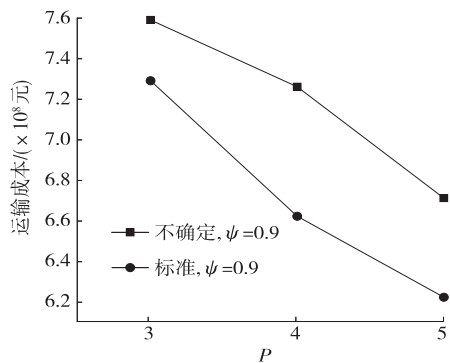


图 6 需求不确定与需求确定的比较

### 4 结论

针对需求不确定的 P-Hub 选址问题,建立期望成本最小化模型与  $\alpha$ -成本最小化模型,将不确定的需求流量转换为不确定变量的期望值,并设计粒子群算法对模型进行求解。结论如下:

- (1) 满足最优解时,需求不确定性不会导致枢纽位置发生较大改变,即使改变,也是邻近枢纽间的移动。

(2) 枢纽位置的细微变化可削减需求不确定性对运输成本的影响,并获得成本节约。将运量需求不确定性因素考虑到运输网络中,相对于运量需求确定的情况更具有使用和研究价值。

#### 参考文献:

- [1] SIBEL A A,BAHAR Y K.Network hub location problems:The state of the art[J].European Journal of Operational Research,2008,190(1):1-21.
- [2] PUERTO J, RAMOS A B,RODRIGUEZ A M, et al. Ordered median hub location problems with capacity constraints[J].Transportation Research Part C(Emerging Technologies),2016,70:142-156.
- [3] SIBEL A A,STEFAN N,FRANCISCO S G.Hub location under uncertainty[J].Transportation Research Part B(Methodological),2012,46(4):529-543.
- [4] 熊孝娟,张李浩,林国龙.基于多面体不确定性需求的鲁棒枢纽选址研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(11):2487-2494.
- [5] 王达,陈尚和,张智勇.基于乘客需求的综合客运枢纽信息重要度模型[J].交通信息与安全,2016,34(2):75-80+100.
- [6] 刘杰,衡玉明,赵辉,等.城市交通枢纽短期客流量的组合预测模型[J].交通信息与安全,2014,32(2):41-44+49.
- [7] 杨年,朱金福.枢纽容量分配下的空铁联运网络设计

- [J].交通信息与安全,2012,30(1):134-138.
- [8] 康凯,毕海玲,张旭涛.弹性视角下战略投送网络枢纽选址策略[J].系统工程,2018,36(3):151-154.
- [9] 高欣.不确定测度及其应用[D].北京:清华大学,2009.
- [10] LIU B.Some research problems in uncertainty theory[J].Journal of Uncertain Systems,2009,3(1):3-10.
- [11] AHMAD Hosseini,WADBRO E.Connectivity reliability in uncertain networks with stability analysis[J].Expert Systems with Applications,2016,57:337-344.
- [12] LIU B.Uncertain risk analysis and uncertain reliability analysis[J].Journal of Uncertain Systems,2010,4(3):163-170.
- [13] LIU Y,HA M.Expected value of function of uncertain variables[J].Journal of Uncertain Systems,2010,4(3):181-186.
- [14] CHARNES A,COOPER W W. Constrained-chance programming[J].Management Science,1959,6(1):73-79.
- [15] 刘波,王彧斐,冯霄.不确定条件下的过程系统优化研究进展[J].计算机与应用化学,2019,36(6):672-679.
- [16] 龚荷珊,张鹏,彭璧玉.具有现实约束的不确定均值一机会投资组合决策[J].模糊系统与数学,2018,32(3):94-110.

收稿日期:2020-10-21

(上接第21页)

分析团风县未来交通发展的内外影响因素,在此基础上提出团风县未来交通发展战略目标,并从通道建设、路网建设、增强服务、加强管养等方面提出团风县综合交通的发展策略,具有较强的理论指导和实际意义。但还存在一些不足,未来应重点关注综合交通客观发展与策略研究的吻合性,进一步量化研究SWOT分析法的科学性及其合理性。

#### 参考文献:

- [1] 黄芳.基于SWOT分析的重庆市农村客运发展策略研究[J].交通科技与经济,2021,23(2):68-74.
- [2] 李敏.基于SWOT分析的大学生职业生涯规划的研究[D].南宁:广西师范大学,2016.
- [3] 袁牧,张晓光,杨明.SWOT分析在城市战略规划中的应用和创新[J].城市规划,2017(4):53-58.
- [4] 申彧,陈伟琪.AHP-SWOT分析在福建省环罗源湾区域发展定位中的应用[J].环境科学与管理,2019,34

- (11):164-167.
- [5] 朱汉桥.建设交通强国示范区 打造新时代九省通衢[J].交通运输部管理干部学院学报,2019,29(4):16-19.
- [6] 雷闯,通讯员.湖北获批交通强国建设试点[N].湖北日报,2020-07-06(1).
- [7] 任俊学,王芳.农村物流网络节点体系建设中乡镇物流节点重要度评估研究[J].公路与汽运,2019(4):57-61.
- [8] 冯辉.长三角区域一体化下江苏交通运输发展的思考[J].公路与汽运,2020(3):21-24.
- [9] 单丽辉,张柱庭,袁保安,等.嘉峪关市综合交通运输发展展望[J].西部交通科技,2015(1):78-81.
- [10] 周小山.基于SWOT分析的交通发展策略研究:以上海虹桥商务区为例[J].上海城市规划,2013(1):116-120.
- [11] 王吉双.Z市“十二五”综合交通发展规划研究[D].合肥:合肥工业大学,2011.

收稿日期:2021-04-07