

## 多阶段网络扩张投资模型研究<sup>①</sup>

马云峰<sup>1</sup>, 杨超<sup>2</sup>, 杨珺<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学管理学院, 武汉 430081; 2. 华中科技大学管理学院, 武汉 430074)

**摘要:** 在总体网络布局规划完成的前提下分析网络各边的构建时间和先后顺序. 在给定的规划网络  $G(V, A, C)$  中, 有  $r$  对 O-D 用户流, 在总的网络建设费用、维护费用及用户流成本最小的目标下分析各阶段投资方案的选择问题. 模型以各种费用的现值为基础讨论了模型的变化情况, 并给出了基于贪婪的启发式算法. 最后以巩义市道路网的建设规划为例进行了分析, 实例显示, 该模型和算法为巩义市的道路网规划节约了数千万元的社会成本, 增加了近亿元的直接社会经济收益.

**关键词:** 网络扩张; 模型; 多阶段投资; 算法

**中图分类号:** O22   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1007-9807(2008)04-0024-06

### 0 引言

随着科学决策在政府及企业中受到越来越多的重视, 在一定战略目标的指导下, 常常会提前制定出网络的总体规划. 这种总体规划的制定, 一般是以总的战略目标为基础, 以定性分析为主得出来的结论, 而对于网络的某个新边何时进行投资建设最多只能给出模糊的规定. 这类网络包括城市交通网、物流运输网、信息网、自来水网、电网、煤汽管道网等等, 其中最具有代表性的是城市交通网络. 网络新边的建设时间合理与否不仅涉及到网络建设及维护成本的高低, 而且会影响整个网络运行效率, 因此明确确定在哪一阶段(时间)增加网络的哪一条边有十分重要的意义. 显然, 这一问题可以归入网络设计(Network Design, ND)或者说是网络布局规划及网络扩张的范畴.

过去的几十年里, 网络布局及规划问题一直是人们讨论的热点. LeBanc 等<sup>[1]</sup>首先对离散网络设计问题(DNDP)进行了研究, Poorzahedy 和 Turnquist<sup>[2]</sup>提出了 DNDP 问题的整数规划模型的

典型近似算法; Chao Yang 等<sup>[3-5]</sup>、Jianzhong Zhang 等<sup>[6,7]</sup>和杨超、朱云<sup>[8]</sup>在网络扩张问题和算法方面进行了大量的研究, Hai Yang 等<sup>[9]</sup>对用户 O-D 矩阵的估计方面积累了许多模型和算法, 杨超等<sup>[10,11]</sup>在最短路和用户流方面形成了一些有用的方法; Scarf 和 Martin<sup>[12]</sup>以电网为例讨论了网络系统结构维护和替代模型的框架.

许多研究人员发现道路网的利用效率不高<sup>[13]</sup>, 这势必增加了道路网络不必要的运行成本, 尽管可以利用交通控制和诱导的办法来改善这一情况<sup>[14]</sup>, 但如果能尽量避免道路网利用效率不高的情况才是最好的治本方法. 本文提出多阶段网络投资问题(multi-stage investment problem of network structure, MIPNS), 研究在网络框架确定后网络各边的投资顺序及投资时间, 讨论在总的网络建设费用、维护费用及用户流成本最小的目标下考虑各阶段投资方案的选择问题, 目的是使网络投资更加有效, 尽量减少发生规划后网络利用率不高的浪费情况.

① 收稿日期: 2004-09-13; 修订日期: 2005-01-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70271027); 武汉科技大学科学研究发展基金重点资助项目(2006XZ9); 武汉科技大学博士科研启动基金资助项目(060067).

作者简介: 马云峰(1972—), 男, 吉林蛟河人, 博士. Email: mayunfermat@163.com

### 1 模型的建立

设  $G(V,A,C)$  是给定的网络,  $V = \{1,2,\dots,n\}$  是  $G(V,A,C)$  中所有结点的集合;  $A = \{a_1,a_2,\dots,a_m\}$  是  $G(V,A,C)$  中所有边的集合, 包括已建成边  $\bar{A}$  和未建成边  $\underline{A}$  两个子集;  $C$  是  $G(V,A,C)$  中边的费用集合, 包括固定费用  $C_F$  和变动费用  $C_V$  两个子集. 假设规划期内给定  $r$  个 O-D 用户流, 各期 O-D 用户流矩阵可以通过某种精确的方法, 如交通网络中较成熟理论中的出行方式划分模型、出行生成模型及出行分布模型等, 能够较准确地进行预测, 在预测期内各期单位用户流在网络中单位距离的运行费用、各边的建设费用(固定费用)及变动费用(维护和使用费用)等也是可以预测的, 同时假设网络容量在各期内都是可以满足要求的, 不存在有用户流因网络拥挤而走不通的问题, 差别是不同用户流的效率高低不同. 不论对于何种网络, 这些假设在现状预测技术和规划技术的水平下都是容易实现的. 首先, 在只考虑网络未建成边的固定费用和变动费用的情况下, 不考虑容量限制和资金的时间价值时建立的整数规划模型(P1)表达式如下

$$(P1) \min \sum_t \sum_i \left( \sum_i Q_i^t s_i^l N^t \varphi^t + \sum_j V_j z_j^h \right) + \sum_j F_j \tag{1}$$

$$\text{s. t. } \sum_l N^l = 1 \tag{2}$$

$$z_j^h \leq z_j^{l,t+1} \quad \forall l, \forall j, t=1,2,\dots,h-1 \tag{3}$$

$$z_j^h \leq N^l \quad \forall l, j, t \tag{4}$$

$$z_j^{l,h} = 1 \quad \forall l, j \tag{5}$$

$$N^l = 0,1 \quad \forall l \tag{6}$$

$$z_j^h = 0,1 \quad \forall l, j, t \tag{7}$$

式中:  $Q_i^t$  为第  $t$  阶段网络第  $i$  个 O-D 用户流的流量;  $s_i^l$  为在第  $l$  个网络投资方案中第  $t$  阶段网络第  $i$  个 O-D 用户流的最短行程时间的路程距离;  $N^l =$

$$\begin{cases} 1 & \text{采用 } l \text{ 方案} \\ 0 & \text{不采用 } l \text{ 方案} \end{cases}; z_j^h = \begin{cases} 1 & l \text{ 方案中在第 } t \text{ 阶段} \\ & \text{边 } j \text{ 可用(已建成)}; \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$h$  为网络投资的阶段数;  $\varphi^t$  为在第  $t$  阶段的单位用户流在网络中单位距离的运行费用;  $V_j$  为网络第  $j$  条边每期的变动费用;  $F_j$  为网络第  $j$  条边固定投资

费用.

模型(P1)的目标函数式(1)是使总的网络建设费用、维护费用及用户 O-D 流成本最小; 约束式(2)是在众多的投资方案中只选一个最优方案; 约束式(3)是保证在本期投资的网络边可以在下期使用, 并不需要再行投资; 约束式(4)是使选中的方案中建设网络的某个边; 约束式(5)表示在最后一期中将没有建设的边全部投资建设, 这可能会建设了网络中不必要的边, 但是一般网络的总体规划是滚动进行的, 在没有到达最后一期时新的规划就会出台, 可以保证避免因环境的较大变化所造成的网络资源浪费或供给的不足; 约束式(6)和约束式(7)是 0-1 整数约束.

由于模型(P1)没有考虑资金的时间价值, 在规划期跨度较长或银行折现率较高时就会失去准确性, 所以要在目标函数中加入折现率进行调整. 事实上, 不同类型网络边的固定资产投资在不同的时期是不同的, 道路交通网络中有同样功能或容量的边所需投资随时间的发展有增长的趋势, 而信息网络同样功能或容量的边随时间的推移有明显的下降趋势, 当然, 这些都是可以较准确地进行预测的. 假定第  $t$  期对第  $j$  条边的建设所需固定投资为  $F_j^t$ , 第  $t$  期第  $j$  条边的变动费用为  $V_j^t$ , 预测期内的银行折现率为  $\lambda$ , 则模型(P1)变为模型(P2)

$$(P2) \min \sum_t \sum_i \left( \sum_i \frac{Q_i^t s_i^l N^t \varphi^t}{(1+\lambda)^t} + \sum_j \frac{V_j^t z_j^h + F_j^t (z_j^h - z_j^{l,t-1})}{(1+\lambda)^t} \right) \tag{8}$$

$$\text{s. t. } \sum_l N^l = 1 \tag{9}$$

$$z_j^h \leq z_j^{l,t+1} \quad \forall l, \forall j, t=1,2,\dots,h-1 \tag{10}$$

$$z_j^h \leq N^l \quad \forall l, j, t \tag{11}$$

$$z_j^{l,h} = 1 \quad \forall l, j \tag{12}$$

$$z_j^{l,0} = 0 \quad \forall l, j \tag{13}$$

$$N^l = 0,1 \quad \forall l \tag{14}$$

$$z_j^h = 0,1 \quad \forall l, j, t \tag{15}$$

除了目标函数上的变化外, 模型(P2)比(P1)增加了约束式(13), 或者说是设定一个初始值, 用以保证第 1 期建设的边所花费的固定成本计入目标值. 模型(P1)和(P2)适用于不拥挤或者用户流与边的容量没有关系的网络, 但大多

数网络是拥挤的,否则就可能意味着网络利用率较低,建设过于超前.因此模型的设计还要考虑拥挤网络的情况,也就是并不是每个O-D用户流都走最短路.考虑到一般网络中O-D流量都是可分的,本文分若干次将其加载到网络中,每次加载都重新计算网络路权并重新计算最短路,若用 $Q_i^k$ 表示第*i*个用户流第*t*期第*k*次加载的流量,用 $s_i^{hk}$ 表示*l*方案中第*i*个用户流第*t*期第*k*次加载流量的最短路距离,则模型(P1)、(P2)的目标函数式(1)、式(8)分别变为模型(P3)和(P4)的目标函数式(16)和式(17),对应的约束条件不变.

$$(P3) \min \sum_t \sum_i \left( \sum_k Q_i^k s_i^{hk} N^t \varphi^t + \sum_j V_j z_j^h \right) + \sum_j F_j \quad (16)$$

$$(P4) \min \sum_t \sum_i \left( \sum_k \frac{Q_i^k s_i^{hk} N^t \varphi^t}{(1+\lambda)^t} + \sum_j \frac{V_j z_j^h + F_j (z_j^h - z_j^{t-1})}{(1+\lambda)^t} \right) \quad (17)$$

若预测期内各期折现率不是一致的,可令 $\lambda^t$ 表示第*t*期银行折现率,则目标函数式(8)和(17)可分别调整为目标函数式(18)和(19),同理,对应的约束条件不变.

$$(P5) \min \sum_t \sum_i \left( \sum_k \frac{Q_i^k s_i^{hk} N^t \varphi^t}{\prod (1+\lambda^t)} + \sum_j \frac{V_j z_j^h + F_j (z_j^h - z_j^{t-1})}{\prod (1+\lambda^t)} \right) \quad (18)$$

$$(P6) \min \sum_t \sum_i \left( \sum_k \frac{Q_i^k s_i^{hk} N^t \varphi^t}{\prod (1+\lambda^t)} + \sum_j \frac{V_j z_j^h + F_j (z_j^h - z_j^{t-1})}{\prod (1+\lambda^t)} \right) \quad (19)$$

## 2 算法分析

模型(P2)、(P4)、(P5)和(P6)是在(P1)和(P3)的基础上考虑了资金的折现,但不论采用何种方法进行折现计算都是在原问题的基础上进行一个多项式转换,因此并不会显著增加问题的计算复杂性,所以在求解算法上并没有本质的区别.

这些问题中的各种输入变量的个数除备选方案外都是现代计算机可以接受的,备选方案个数的确定可以用定性的方法如AHP法进行预定,这时输入变量的个数不会过多,从而使计算时间可以接受,也就是说可以利用分枝定界法甚至枚举法进行计算来求得最优解.如果用定性方法不能确定备选方案,就要用全枚举法,会产生 $\left(\sum_{x=0}^m \binom{m}{x}\right)^{h-1} = 2^{m \times (h-1)}$ 个备选方案,这样庞大的输入变量个数会使现有的求解整数规划的精确算法对于稍大一点的MINPS几乎是无用的.因此,本文给出基于贪婪的启发式算法.在无向图 $G(V,A,C)$ 中有*r*对O-D用户流,*m*个规划建设边,*n*个结点,计划*h*期内建完,每期流量加载次数为*p*次.

各符号定义如下:

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ , 是*G*的边集,  $|A| = m$ ;

*I*是*G*中O-D用户流编号的下标集,  $|I| = r$ ; *J*是边集*A*中边的编号的下标集,  $|J| = m$ ; *K*是用户流加载次数编号的下标集,  $|K| = p$ ;

$\bar{J}, \underline{J}$ 分别表示已建成边的编号下标集和已经规划但未建设边的编号下标集,显然 $\bar{J}$ 和 $\underline{J}$ 满足 $\bar{J} \cup \underline{J} = J, \bar{J} \cap \underline{J} = \emptyset$ ;

$\bar{A} = \{a_j = 1 \mid \forall j \in \bar{J}\}$ 为已建成边集,  $\underline{A} = \{a_j = 1 \mid \forall j \in \underline{J}\}$ 为已规划但未建成边集;

$\bar{G}(V, \bar{A}, C)$ 为已建成边构成的网络,  $\tilde{G}(V, \bar{A}, \underline{A}, C)$ 为在*G*中增加边 $a_\tau, \tau \in \underline{J}$ 构成的临时网络,其中 $\bar{A}_\tau = \bar{A} \cup \{a_\tau\}, \tau \in \underline{J}$ ;

*T*是规划年的上标集,  $|T| = h$ ;

$z_j^t = 1$ 表示第*t*期修建第*j*条边或已建成第*j*条边,否则 $z_j^t = 0, \forall j \in J, \forall t \in T$ ;

$s_i^k$ 表示第*i*个用户流在第*k*次加载到当前网络中的最短行程时间的路程距离,  $\forall i \in I, \forall k \in K$ ;

$c_j^t$ 为网络*G*中第*j*条边在第*t*期建设第*j*条边发生的变动成本和分摊到第*t*期的固定成本之和的现值,  $\forall j \in J, \forall t \in T$ ;

$\alpha_k$ 示第*k*次加载用户流的比例,  $\forall k \in K$ ,显然 $\sum_k \alpha_k = 1$ ;

$Q_i^t$ 表示第*i*个用户流第*t*期的流量,  $\forall i \in I$ ,

$\forall k \in K;$

$\varphi^t$  在第  $t$  阶段的单位用户流在网络中单位距离的运行费用;

求解 MINPS 的启发式算法:

第1步 初始化.  $t = 1$ ; 令  $z_j^t = 0 \forall j \in \underline{J}$ , 令  $z_j^t = 1 \forall j \in \bar{J}$ ;

第2步 如果  $t = h$  或  $\underline{J} = \emptyset$ , 转到第8步, 否则执行下一步;

第3步 在  $\bar{G}(V, \bar{A}, C)$  中求  $s_i^k, \forall i \in I, \forall k \in K$ ;

第4步 计算  $\Phi^u = \sum_k \sum_i Q_i^k \alpha_k s_i^k \phi^t$ ;

第5步 在  $\tilde{G}(V, \bar{A}_\tau, C), \forall \tau \in \underline{J}$  中求  $s_i^k, \forall i \in I, \forall k \in K$ ;

第6步  $\Phi = \min_{\tau \in \underline{J}} \sum_k \sum_i Q_i^k \alpha_k s_i^k \phi^t$ ;

第7步 若  $\Phi^u - \Phi \geq c_\tau^t$  且  $\underline{J} \neq \emptyset$

则  $\bar{A} = \bar{A} \cup \{a_\tau\}, \underline{A} = \underline{A} - \{a_\tau\}, \bar{J} = \bar{J} \cup \{\tau\}, \underline{J} = \underline{J} - \{\tau\}$ , 转第3步;

否则,  $t = t + 1$ , 转第2步;

第8步  $z_j^t = 1, \forall j \in \underline{J}$ ; 结束.

本算法最多循环  $h$  次, 每次搜索使网络运行成本最小的新边最多  $m$  次, 每次搜索要  $k$  次加载用户流, 每次加载要计算 1 次路权和最短路长, 所以算法所用的计算时间最多为  $O(hmkn^3)$ . 为尽可能地靠近最优解, 要根据投资问题的特点对算法中的参数进行必要调整, 比如可以将  $c_j^t$  乘以 1 个大于 0 小于 1 的系数, 甚至可以是零, 以免算法过早收敛, 最好能结合定性方法进行干预和调整, 在经过几次调整后在其中取最佳值可找到理想的解.

### 3 案例应用

用本文的模型和算法研究了河南省巩义市交通网络投资规划. 巩义市 2001—2020 年的总体规划的路网中有 537 个路段, 其中有 198 个为新规划路段, 将规划期(从 2005 到 2020 年) 按年分为 16 个阶段. 依据总体规划的人口、经济布局, 将巩义市分成 28 个交通小区和 12 个主要交通出入口, 得到 1 560 个用户流 O-D 对, 在模型计算过程中将预测得到的 O-D 流按 20%、20%、15%、13%、10%、8%、5%、4%、3%、2% 分 10 次分配到路段中,

即  $p = 10$ .

在延误函数的确定上以美国联邦公路局路阻模型为基础, 见式(20)

$$t = t_0 \left[ 1 + \gamma \left( \frac{V}{C} \right)^\zeta \right] \quad (20)$$

其中  $V/C$  是路段饱和程度, 是某路段实际通行量和通行能力的比值. 经过与实际调查数据对比较核, 取路阻模型参数  $\gamma = 0.18, \zeta = 4$ .

O-D 用户流数据用乌尔希斯重力模型为分解依据, 在参数设计和拟合上分小区到小区、小区到出入口、出入口到出入口 3 种情况讨论. 乌尔希斯 (Vorthees) 重力模型形式为

$$T_{ij} = \frac{P_i A_j f(t_{ij})}{\sum_j A_j f(t_{ij})} \quad (21)$$

式中:  $T_{ij}$  为  $i$  区到  $j$  区的出行量;  $P_i$  为  $i$  区的发生量;  $A_j$  为  $j$  区的吸引量;  $t_{ij}$  为  $i$  区到  $j$  区的出行阻抗;  $f(t_{ij})$  为交通阻抗函数, 通常有  $t_{ij}^{-\alpha}$  和  $e^{-\beta t_{ij}}$  等形式, 其中  $e$  为自然对数的底.

模型中交通阻抗函数本文采用  $e^{-\beta t_{ij}^\alpha}$  的形式, 根据对现状 OD 的检验和其他城市的经验取参数  $\beta = 1.2, \alpha = 0.2$ . 模型中  $t_{ij}$  用时间来标定, 代表  $i$  区到  $j$  区的出行时间, 是  $i$  区到  $j$  区所经过各路段上所用时间之和, 通过用时间表示的路阻函数来计算. 对于小区到出入口及出入口到出入口的与阻抗关系不大的 OD 交通流量, 交通阻抗函数  $f(t_{ij}) = 1$ , 即取参数  $\beta = 0$ .

模型的其它参数如折现率  $\lambda^t$ 、单位距离运行费用  $\varphi^t$  等见表 1. 路段的建设成本和维护费用根据道路面积和地质特征来确定.

利用上文的模型及算法进行编程计算, 经过十余次调整后取得了满意的结果, 目标值优于单纯的专家法 4.2%. 结合上面模型及算法的模型综合法求得总运行成本为 157.35 亿元, 比单纯的专家法 164.32 亿元节约 4.239% (见图 1); 规划期内直接经济效益可增加 8 千余万元 (见图 1), 包括汽油、折旧、易损件和行程时间的节约. 通过本文的算法和专家法结合得到的方案使得巩义市 2005 年到 2020 年 16 年的城市道路投资方案取得显著的社会经济效益 (见图 1 和表 2), 交通需求可以得到较好的满足.

表1 巩义市规划期内特征年的交通数据及部分模型参数

Table 1 Some traffic data and model parameters in counted year during the planning period of Gongyi City

特征年	2007	2012	2020	平均
人口/千人	315	384	440	379.7
出行次数/次·人 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	1.7	1.9	2.3	1.97
出行量/千人次·d <sup>-1</sup>	535.5	729.6	1 012	759
机动车出行量/千pcu次·d <sup>-1</sup>	310	466	671	482
单位距离运行费用φ'/元pcu·km <sup>-1</sup>	0.75	0.92	1.1	0.92
折现率λ' (%)	8	7	6	7

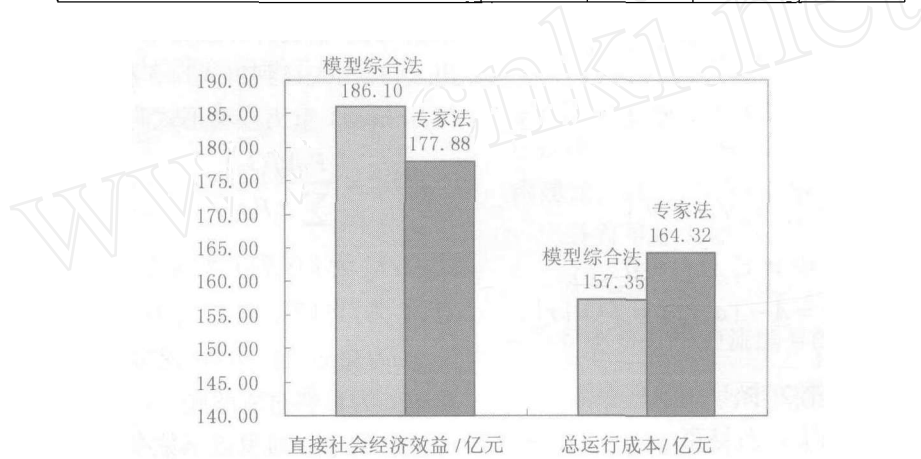


图1 巩义市路网建设规划专家法和模型方法的总运行成本和直接经济效益对比

Fig. 1 The comparison of total operation cost and direct social revenue between the Expert Methods and the Model Approach of the road network planning of Gongyi City

表2 巩义市道路投资规划的投资回报情况

Table 2 The expected outcome of the investment revenue in Gongyi road planning

平均投资回收期/年	平均每期投资效益净现值/亿元	平均内部收益率 (%)
5.03	1.85	23.07

#### 4 进一步的研究

由于巩义市在2001—2020年的规划要经历跨越式发展,有充足的资金保证,所以本文的研究中没有考虑预算的限制,而在很多情况下资金预算是有限的,因此有必要在模型中考虑对预算的约束.如果每期的投资总额受到预算的限制,假设第*t*期的预算为*B<sup>t</sup>*,则在各问题(P1)和(P3)中再分别加入约束(22)、在各问题(P2)和(P4)中再分别加入约束(23)、在各问题(P5)和(P6)中再分别加入约束(24)即可.

$$\sum_j (V_j z_j^t + F_j(z_j^t - z_j^{t-1})) \leq B^t \quad (22)$$

$$\sum_j \frac{V_j z_j^t + F_j(z_j^t - z_j^{t-1})}{(1 + \lambda)^t} \leq B^t \quad (23)$$

$$\sum_j \frac{V_j z_j^t + F_j(z_j^t - z_j^{t-1})}{\prod_t (1 + \lambda^t)} \leq B^t \quad (24)$$

很显然,增加预算约束的情况后,每一期的计划都属于一个背包问题,所以整个问题是多重背包问题,既然背包问题是NP困难问题,那么带预算约束时的多阶段网络投资问题也是NP困难问题.增加预算约束后只要将算法的第7步进行累加记录并作有无超出预算的判断即可.

鉴于本问题的参数很多,且基本全部由预测

得到,如 O-D 流量、银行折现率、单位距离运行费用、网络各边在不同阶段的建设成本和维护费用等。尽管有很多成熟的预测方法来预测这些参数,仍不可避免地出现较大的误差,因此各种预测误差对模型计算结果的影响也即模型结果对各参数的敏感性也是值得探讨的课题,此外,各种参数误差之间的相互作用是叠加放大还是相互抵消,是

相互独立还是有较大的相关性,都是值得进一步研究的问题。

由于问题的困难性,决定了近似算法在解决此类问题的重要作用,在以后的研究中将讨论禁忌搜索算法和遗传算法在此问题中的应用,0-1 变量非常适合遗传编码,相信将二者结合会取得更好的效果。

#### 参考文献:

- [1] LeBlanc L J. An algorithm for the discrete network design problem[J]. *Transportation Science*, 1975, 9: 183—199.
- [2] Poorzahedy P, Turnquist M A. Approximate algorithms for the discrete network design problem[J]. *Transportation Research B*, 1982, 16: 45—56.
- [3] Yang Chao, Zhang Jiangzhong. Inverse maximum capacity problems[J]. *OR Spektrum*, 1998, 20: 97—100.
- [4] Yang Chao, Zhang Jiangzhong. A constrained maximum capacity paths problem on network[J]. *International Journal of Computer and Mathematics*, 1998, 70: 19—33.
- [5] Yang Chao. Two general methods for inverse optimization problems[J]. *Applied Mathematics Letters*, 1999, 12: 69—72.
- [6] Zhang J, Liu Z. A further study on inverse linear programming problems[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1999, 106: 345—359.
- [7] Zhang Jiangzhong, Yang Chao, Lin Yixun. A class of bottleneck expansion problems[J]. *Computers & Operations Research*, 2001, 28: 505—519.
- [8] 杨超, 朱云. 一类网络系统中的容量扩张问题[J]. *华中科技大学学报*, 2001, 29(1): 102—104.  
Yang Chao, Zhu Yun. Capacity expansion of network system[J]. *Journal Huazhong University of Sciences & Technology*, 2001, 29(1): 102—104. (in Chinese)
- [9] Hai Yang, Qiang Meng, Bell M G H. Simultaneous estimation of the origin-destination matrices and travel-cost coefficient for congested networks in a stochastic user equilibrium[J]. *Transportation Research*, 2001, 35(2): 107—123.
- [10] 杨超, 孙静娟. 一类变形的反最短路问题[J]. *武汉理工大学学报*, 2001, 23(3): 87—89.  
Yang Chao, Sun Jingjuan. A variation of the inverse shortest paths problem[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2001, 23(3): 87—89. (in Chinese)
- [11] 杨超, 马云峰, 杨珺. 一类带容量限制的服务站选址问题[J]. *系统工程*, 2004, 22(1): 19—23.  
Yang Chao, Ma Yunfeng, Yang Jun. Locating service facility constrained by capacity[J]. *System's Engineering*, 2004, 22(1): 19—23. (in Chinese)
- [12] Scarf P A, Martin H H. A framework for maintenance and replacement of a network structured system[J]. *International Journal of Production Economics*, 2001, 69: 287—296.
- [13] 吴文祥, 黄海军. 平行路径网络中信息对交通行为的影响研究[J]. *管理科学学报*, 2003, 6(2): 12—16.  
Wu Wenxiang, Huang Haijun. Study on behavior impacts caused by travel information systems in parallel route network[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2003, 6(2): 12—16. (in Chinese)
- [14] 马寿峰, 李艳君, 贺国光. 城市交通控制与诱导协调模式的系统分析[J]. *管理科学学报*, 2003, 6(3): 71—78.  
Ma Shoufeng, Li Yanjun, He Guoguang. System analysis for coordination modes between urban traffic control and vehicle route guidance[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2003, 6(3): 71—78. (in Chinese)

(下转第 51 页)

## Study on optimal capacity investment strategies for firms with many investment opportunities

HUANG Chao<sup>1,2</sup>, DA Qing-li<sup>2</sup>

1. School of Economics & Management, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Economics & Management, Southeast University, Nanjing 210096, China

**Abstract:** Differing from other papers that study investment strategies by considering only one investment opportunity, this article examines the effect of many investment opportunities on optimal capacity investment strategies of firms, the investment timing model and capacity choice model are built up through real option. The result shows that firm will hold high capacity investment option and make investment earlier, and the final capacity scale will be larger as well when it has many capacity investment opportunities.

**Key word:** investment opportunity; capacity investment option; continuous investment

(上接第29页)

## Study on multi-stage investment model of network expansion

MA Yun-feng<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>2</sup>, YANG Jun<sup>2</sup>

1. School of Management, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430081, China;
2. School of Management, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** This paper discusses the construction time table and the sequence of each arc of network based on the condition that the network layout planning has been finished. Given a planning network  $G(V, A, C)$  with  $r$  known origin-destination pairs of customer flows, the options of investment schemes in each period is evaluated with the goal of minimizing the total construction cost, maintenance cost and customer flow cost of the whole network. How the model changes when the present value of all kinds of costs changes is discussed, and a greedy heuristic algorithm is put forward to solve the problem as well. A case study of the planning on Gongyi street network is illustrated briefly in section 3, which shows several thousands Yuan of social costs has saved and almost 85 million Yuan of direct social value would have been created according to our model and algorithm.

**Key words:** network expansion; model; multi-stage investment; algorithm