

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.015

需求不确定条件下内河多式联运网络投资优化

李茜茜, 郭利泉, 龙建成

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章研究需求不确定条件下内河多式联运网络的投资优化问题,以确定网络上内河港口、航道投资扩建规模和时机。首先构建确定性需求下内河多式联运网络投资优化模型,并结合实物期权理论,提出不确定性需求下内河多式联运网络投资优化模型;其次分别设计求解确定性需求下内河多式联运网络投资优化模型的灵敏度分析下降算法、不确定性需求下内河多式联运网络投资优化模型的最小二乘蒙特卡洛模拟算法;最后在长江内河多式联运网络上开展实证算例研究,以验证模型和算法的有效性和实用性。案例结果表明,模型可有效模拟投资决策过程,且设计算法可高效求解模型。

关键词:不确定决策;网络设计;内河多式联运网络;实物期权

中图分类号:F550.83

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)10-1388-08

Research on inland river intermodal network design investments within an uncertain demand environment

LI Xixi, GUO Liqian, LONG Jiancheng

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The problem of inland river intermodal network design investments within an uncertain demand environment is studied to determine the scale and timing of investment and expansion of inland river ports and waterways on the network. Firstly, the network design investment within deterministic demand (NDIDD) model is established. Then, according to real options theory, the network design investment within uncertain demand (NDIUD) model is proposed. Secondly, the sensitivity analysis-based descent and least squares Monte Carlo simulation algorithms are designed to solve the NDIDD and NDIUD models, respectively. Finally, a case study on the inland river intermodal network of the Yangtze River is conducted to verify the models and algorithms. The results of the case study show that the models can simulate the investment decision process and the algorithms can solve the models effectively.

Key words: uncertain decision; network design; inland river intermodal network; real options

0 引言

作为投资少、成本低、耗能少、污染低的运输方式,内河运输在完善现代综合交通运输体系中具有重要作用,积极发展内河运输参与的多式联

运是实现货物高效经济运输的重要手段。但我国内河运输业发展速度仍然较缓,发展水平依然较低。港口吞吐能力及航道通行能力不足导致的港口及航道拥堵、内河航运服务能力低等问题依然突出,因此加快内河港口及航道建设已成为急需

收稿日期:2022-01-16;修回日期:2022-04-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023HG TB0287)

作者简介:李茜茜(1996—),女,安徽阜阳人,合肥工业大学硕士生;

郭利泉(1990—),男,湖北浠水人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师,通信作者,E-mail:guoliquan@hfut.edu.cn;

龙建成(1983—),男,湖南祁东人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

解决的问题。

内河运输需求是派生于贸易需求的,而贸易需求具有不确定性,易受到无法预知的经济贸易波动、气候变化以及突发公共事件等的影响^[1-2]。因此,实施内河港口及航道建设时需考虑需求不确定性的影响,除需确定投资建设的规模外,还需决策出投资建设的时机,以提升投资决策的科学性。

基于上述背景,本文主要研究运输需求不确定条件下内河多式联运网络的投资优化问题,探究内河多式联运网络中港口和航道投资扩建规模和时机问题。目前,已有许多学者研究了网络投资优化问题。对于确定性需求下的网络投资优化问题,文献[3]采用涉及拥挤效应和不动点约束的混合整数非线性、非凸规划模型描述离散多式联运网络设计问题;文献[4]基于参数变分不等式建立具有平衡约束的数学模型,并用混合遗传算法确定多式联运运营商的集装箱运输方案;文献[5]探讨长江沿岸集装箱运输的规模经济,并构建混合整数线性规划模型研究轴辐式网络设计问题。对于不确定需求下网络投资优化问题,文献[6]建立带机会约束的线性模型,以解决当需求为概率分布已知的随机变量时的连续网络设计问题;文献[7]研究考虑需求不确定性的多时段网络设计问题,并将该问题描述为带互补约束的双层随机规划模型;文献[8]利用鲁棒优化的方法建立需求不确定条件下的交通网络设计极小极大模型,并提出相继平均法求解模型。

虽然已有文献研究了网络投资优化问题,但少有研究网络投资扩建时的投资时机问题。目前文献[9]研究网络设计投资的实物期权定价问题并分析网络扩建时的建设时机,但此问题涉及的运输方式单一,且求解算法并不能保证求解到最优。为弥补已有文献的不足,本文将实物期权理论引入需求不确定条件下内河多式联运网络的投资优化问题。首先将确定性需求下网络投资优化问题作为不确定需求下网络投资优化问题的子问题,分别构建确定性和不确定需求下网络投资优化模型;然后设计求解确定性模型的基于灵敏度分析下降算法和求解不确定需求模型的最小二乘蒙特卡洛模拟算法;最后在长江内河多式联运网络上验证模型和算法的有效性和适用性。

1 内河多式联运网络构建

构造由节点和运输路段组成的集装箱内河多

式联运一般网络,模拟集装箱货物在轴辐式内河多式联运网络中的运输状态。在一般网络基础上构造集装箱内河多式联运扩展网络,以描述集装箱在枢纽处的转运过程。

1.1 多式联运一般网络

多式联运一般网络示意图如图 1 所示。一般网络中,运输路段包括公路、铁路及水路,节点包括枢纽节点和非枢纽节点,其中枢纽节点分为枢纽港口节点和枢纽非港口节点。枢纽港口节点为内河运输与公铁转运节点;枢纽非港口节点为公铁转运节点;非枢纽节点为不存在运输方式间转运的节点。

结合图 1,定义一般网络中集合。设一般网络为双向网络 $G(N, A_c)$, 其中: N 为节点集合; A_c 为运输路段集合。设 N_1 为枢纽港口节点集合, N_2 为枢纽非港口节点集合, N_3 为非枢纽节点集合, H 为所有枢纽节点集合, 则有 $H = N_1 \cup N_2$, $N = H \cup N_3$ 。设 O 为集装箱运输起运地 $o (o \in O)$ 的集合, $O \in N$; D 为集装箱运输目的地 $d (d \in D)$ 的集合, $D \in N$; W 为所有 OD 对 $w = (o, d)$ 的集合。设运输路段类型集合为 $M (M = \{m_1, m_2, m_3\})$, 其中 m_1, m_2, m_3 分别表示公路、铁路和水路。设 (i, j, m) 为网络中的某个运输路段 $c (c \in A_c)$, 其含义为运输路段 c 从 $i (i \in N)$ 点 (c 的尾) 以运输方式 $m \in M$ 指向 $j (j \in N)$ 点 (c 的头), 因此运输路段集合可表示为 $A_c \subset \{c = (i, j, m); i, j \in N, m \in M\}$ 。若 c_w 和 A_{c_w} 分别表示本文重点研究的水运路段及其集合, 则有 $A_{c_w} \subset \{c_w = (i, j, m_3); i, j \in N_1\}$, $A_{c_w} \subset A_c$ 。另外, 为描述运输路段在枢纽处流入流出情况, 设 $A_{in}(h)$ 为头指向点为枢纽 $h \in H$ 的运输路段集合, $A_{in}(h) \subset A_c$; $A_{out}(h)$ 为尾流出点为枢纽 $h \in H$ 的运输路段集合, $A_{out}(h) \subset A_c$ 。

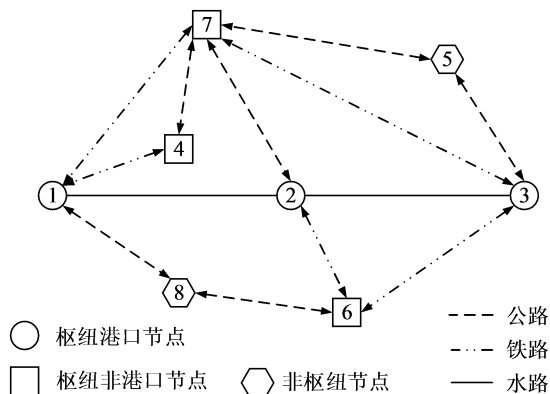


图 1 一般网络示意图

1.2 多式联运扩展网络

基于一般网络,构造可刻画集装箱在枢纽处转运过程的扩展网络。设扩展网络为 $G'(N', A)$, 其中: N' 为节点集合; A 为路段集合。在枢纽 $h \in H$ 处,把集装箱从 $A_{in}(h)$ 中的一条运输路段转运到 $A_{out}(h)$ 中的一条运输路段的转运过程表示为转运路段。由于 $A_{in}(h)$ 中运输路段的头和 $A_{out}(h)$ 中运输路段的尾都为枢纽 h , 此时无法刻画枢纽 h 内的转运过程,需在枢纽内增加虚拟节点以使每条头指向枢纽或尾流出枢纽的运输路段在枢纽内有唯一的头或尾节点表示。在枢纽 $h \in H$ 处,需增加 $|A_{in}(h)|$ 个虚拟头节点和 $|A_{out}(h)|$ 个虚拟尾节点(虚拟头节点与 $A_{in}(h)$ 中运输路段的头一一对应,虚拟尾节点与 $A_{out}(h)$ 中运输路段的尾一一对应)。设 $N_{in}(h)$ 为枢纽 h 处新增虚拟头节点集合, $N_{out}(h)$ 为枢纽 h 处新增虚拟尾节点集合。枢纽 $h \in H$ 处的转运路段可表示为 $t = (i, j)$, 其中 $i \in N_{in}(h)$ 、 $j \in N_{out}(h)$ 。若用 $A(h)$ 、 A_t 分别表示枢纽 $h \in H$ 处转运路段集合和网络中所有转运路段集合, 则有 $A(h) = \{t = (i, j) : i \in N_{in}(h), j \in N_{out}(h)\}$ 、 $A_t = \bigcup_{h \in H} A(h)$ 。对于扩展网络中所有路段集合 A , 它是在一般网络中运输路段集合 A_c 基础上增加转运路段集合 A_t 构成的, 因此 $A_c \cup A_t$ 。对于扩展网络中所有节点集合 N' , 它由一般网络中节点和枢纽处新增虚拟节点组成, 因此 $N' = \bigcup_{h \in H} (N_{in}(h) \cup N_{out}(h)) \cup N$ 。另外, 若 $A(h_w)$ 、 A_{t_w} 分别表示枢纽港口节点 $h_w (h_w \in N_1)$ 处的转运路段集合和网络中所有港口枢纽处转运路段集合, 则有 $A(h_w) = \{t_w = (i, j) : i \in N_{in}(h_w), j \in N_{out}(h_w)\}$ 、 $A_{t_w} = \bigcup_{h_w \in H_1} A(h_w)$, 且 $A_{t_w} \subset A_t$ 。

2 内河多式联运网络投资优化模型

本节构建内河多式联运网络投资优化模型, 以确定水运路段和枢纽港口处转运路段的通行能力扩建规模以及投资扩建时机。由于不确定 OD 需求主要影响投资收益, 因此不确定需求下投资优化问题可看作确定性需求下投资优化问题的扩展。

2.1 确定性需求下网络投资优化模型

确定性需求条件下网络投资优化问题实质上是一个网络设计问题^[9], 本文采用双层规划来构建确定性需求下网络投资优化模型。模型的上层模型是决策者在一定约束条件下以扩展网络的总

阻抗和总投资额之和最小为目标优化水运路段和枢纽港口处转运路段的通行能力; 下层模型是基于多式联运用户均衡准则, 描述集装箱运输的路径选择行为。集合设置如下: P_w 为 OD 对 $w \in W$ 间的路径集合; P 为所有路径构成的集合, $P = \bigcup_{w \in W} p_w$ 。参数设置如下: τ_c^0 为运输路段 $c \in A_c$ 上运输一个集装箱的自由流走行时间, $\tau_c^0 = l_c / s_c$, 其中 l_c 、 s_c 分别为路段长度和路段上集装箱卡车运输速度; τ_t^0 为转运路段 $t \in A_t$ 上转运一个集装箱的自由流处理时间; κ_c 为将一个集装箱转化为一个标准集装箱运输工具的系数; λ_c 为将一个标准集装箱运输工具转化为标准运输工具当量的系数; λ_t 为将一个集装箱转化为一个国际标准箱的系数; B_c 为水运路段 $c_w \in A_{c_w}$ 的单位通行能力投资扩建成本; B_t 为枢纽港口处转运路段 $t_w \in A_{t_w}$ 的单位通行能力投资扩建成本; y_c^0 为运输路段 $c \in A_c$ 的原始通行能力; $y_{c_w}^0$ 、 $y_{c_w}^{\max}$ 为水运路段 $c_w \in A_{c_w}$ 的原始通行能力、通行能力改造的上限; y_t^0 为转运路段 $t \in A_t$ 的原始通行能力; $y_{t_w}^0$ 、 $y_{t_w}^{\max}$ 为枢纽港口处转运路段 $t_w \in A_{t_w}$ 的原始通行能力、通行能力改造的上限; q_w 为 OD 对 $w \in W$ 间的集装箱运输需求。变量设置如下: v_c 、 y_c 为运输路段 $c \in A_c$ 的集装箱流量、通行能力; v_t 、 y_t 为转运路段 $t \in A_t$ 的集装箱流量、通行能力; δ_{cp} 为 0 或 1 变量, 若运输路段 c 在路径 $p \in P$ 上, 则 $\delta_{cp} = 1$, 否则 $\delta_{cp} = 0$; δ_{tp} 为 0 或 1 变量, 若转运路段 t 在路径 $p \in P$ 上, 则 $\delta_{tp} = 1$, 否则 $\delta_{tp} = 0$; f_p 为路径 $p \in P$ 的集装箱流量。

2.1.1 路段阻抗函数

集装箱通过运输路段和转运路段的阻抗由运输费用成本和时间价值成本组成, 且路段上集装箱运输时间可使用 BPR 形式的拥挤时间函数来表示。设 \mathbf{y} 为路段通行能力向量, $\mathbf{v}(\mathbf{y})$ 为路段通行能力决定的路段集装箱流量向量, 则运输路段 $c \in A_c$ 和转运路段 $t \in A_t$ 的阻抗函数可分别表示如下:

$$g_c(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y}) = r_c + \mu_c t_c(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y}) = r_c + \mu_c \left[\tau_c^0 + \tau_c^0 \alpha_c \left(\frac{\kappa_c \lambda_c v_c}{y_c} \right)^{\beta_c} \right] \quad (1)$$

$$g_t(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y}) = r_t + \mu_t t_t(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y}) = r_t + \mu_t t_t \left[\tau_t^0 + \tau_t^0 \alpha_t \left(\frac{\lambda_t v_t}{y_t} \right)^{\beta_t} \right] \quad (2)$$

其中: r_c 、 r_t 分别为 2 种路段运输费用; μ_c 、 μ_t 分别为 2 种路段集装箱运输的时间价值系数; $t_c(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y})$ 、 $t_t(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y})$ 分别为 2 种路段的集装箱

运输时间; $\alpha_c, \beta_c, \alpha_t, \beta_t$ 为待标定参数。

2.1.2 模型结构

确定性需求模型上层模型为以系统总成本最小的连续型网络设计模型,下层模型为实现扩展模型中集装箱用户均衡分配的 Beckmann 模型。下面分别给出上、下层模型的结构。

上层模型结构:

$$\begin{aligned} \min \varphi = & \sum_{c_w \in A_{c_w}} v_{c_w}(\mathbf{y}) g_{c_w}(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y}) + \\ & \sum_{t_w \in A_{t_w}} v_{t_w}(\mathbf{y}) g_{t_w}(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y}) + \\ & \sum_{c \in A_c \setminus A_{c_w}} v_c(\mathbf{y}) g_c(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y}) + \\ & \sum_{t \in A_t \setminus A_{t_w}} v_t(\mathbf{y}) g_t(\mathbf{v}(\mathbf{y}), \mathbf{y}) + \\ & \sum_{t_w \in A_{t_w}} B_t y_{t_w} + \sum_{c_w \in A_{c_w}} B_c y_{c_w} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{s. t. } 0 \leq y_{c_w} \leq y_{c_w}^{\max} - y_{c_w}^0, \quad c_w \in A_{c_w} \quad (4)$$

$$0 \leq y_{t_w} \leq y_{t_w}^{\max} - y_{t_w}^0, \quad t_w \in A_{t_w} \quad (5)$$

模型决策变量为 y_{c_w}, y_{t_w} , 其中: y_{c_w} 为水运路段 $c_w \in A_{c_w}$ 扩建后增加的通行能力; y_{t_w} 为枢纽港口处转运路段 $t_w \in A_{t_w}$ 扩建后增加的通行能力。式(3)为使网络总阻抗和总投资额构成的系统总成本最小的目标函数,其中:第 1 项为水运路段通行时间费用;第 2 项为枢纽港口处转运路段的通行时间费用;第 3 项为公路路段和铁路路段通行时间费用;第 4 项为枢纽非港口处转运路段的通行时间费用;第 5 项为水运路段的扩建费用;第 6 项为枢纽港口处转运路段的扩建费用。目标函数中的路段流量由下层的 UE 分配模型求得。式(4)、式(5)式分别为水运路段的通行能力和枢纽港口处转运路段的通行能力扩增量约束。

下层模型结构:

$$\min \sum_{c \in A_c} \int_0^{v_c} g_c(\omega) d\omega + \sum_{t \in A_t} \int_0^{v_t} g_t(\omega) d\omega \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{p \in P_w} f_p = q_w, \quad \forall w \in W \quad (7)$$

$$v_c = \sum_{p \in P} f_p \delta_{cp}, \quad \forall c \in A_c \quad (8)$$

$$v_t = \sum_{p \in P} f_p \delta_{tp}, \quad \forall t \in A_t \quad (9)$$

$$f_p \geq 0, \quad \forall p \in P \quad (10)$$

其中:式(6)为 UE 分配模型的目标函数;式(7)为 OD 对间各条路径上的集装箱流量之和等于 OD 对间的集装箱流总量;式(8)为各运输路段集装箱流量等于各 OD 对的途径该路段的路径集装箱流量之和;式(9)为各转运路段集装箱流量等于各

OD 对的途径该路段的路径集装箱流量之和;式(10)为集装箱流量非负约束。

2.2 不确定性需求下网络投资优化模型

根据文献[9]的研究,实物期权理论可用于研究需求不确定条件下的交通网络投资规模和时机问题。下面首先模拟不确定集装箱运输需求,然后基于实物期权理论分析不确定集装箱需求影响下的网络投资收益函数,最后给出不确定性需求下的模型结构。

2.2.1 集装箱运输需求

选用几何布朗运动来模拟网络中不确定的集装箱运输需求^[10]。设网络投资优化的计划实施期长度为 T 年,扩建后的水运路段和枢纽港口处转运路段通行能力的有效使用寿命(即收益期)为实施投资后的 P 年内。若 T 被分为 N 个离散时间区间,则每个子区间的长度 $t_n (n \in \{0, 1, \dots, N\})$ 表示实施投资的第 n 年对应的时刻,则第 n 年某个 OD 对 w 满足几何布朗运动的集装箱运输需求 $q_{t_n}^w$ 为:

$$dq_{t_n}^w = \alpha^w q_{t_n}^w dt + \sigma^w q_{t_n}^w dW \quad (11)$$

其中: α^w 为 OD 对 w 的需求变化漂移率; σ^w 为波动率; W 为满足布朗运动的标准维纳过程, $dW = \epsilon \sqrt{dt_n}$, ϵ 服从 $N(0, 1)$ 标准正态分布。

2.2.2 收益函数

在确定需求模型中,由于需求固定不变,因此系统总成本最小的优化目标等同于系统总收益最大。而在不确定需求条件下,水运路段和枢纽港口处转运路段的延迟投资会带来额外的机会收益,系统总成本最小的目标将无法模拟网络投资总收益最大的目标。因此,不确定条件下网络投资优化问题应以考虑了机会收益的系统总收益最大为目标实施优化决策。

若实施投资年为第 n 年,投资收益期为 $(t_n + 1)$ 年至 $(t_n + P)$ 年,收益期内每年收益按照第 n 年的集装箱运输需求 q_{t_n} 计算,则第 n 年实施投资的网络收益函数 π_{t_n} 为:

$$\begin{aligned} \pi_{t_n}(\varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n})) = & \frac{\lambda \{ \varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, 0) - [\varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n}) - m_{t_n}] \}}{1 + \rho} + \\ & \frac{\lambda \{ \varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, 0) - [\varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n}) - m_{t_n}] \}}{(1 + \rho)^2} + \dots + \\ & \frac{\lambda \{ \varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, 0) - [\varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n}) - m_{t_n}] \}}{(1 + \rho)^P} - m_{t_n} = \\ & \lambda \{ \varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, 0) - [\varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n}) - \end{aligned}$$

$$m_{t_n}] \left\} \frac{1}{\rho} \left[1 - \frac{1}{(1+\rho)^P} \right] - m_{t_n} \quad (12)$$

其中: \mathbf{y}_{t_n} 、 $\varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n})$ 分别为通过求解第 n 年的确定性需求模型得到的水运路段通行能力和枢纽港口处转运路段通行能力扩增量向量和网络设计目标值(即最小系统总成本); m_{t_n} 为投资扩建总费用; $\varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n}) - m_{t_n}$ 为网络上集装箱运输总成本; $(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, 0)$ 为不进行网络投资扩建时的系统总成本; λ 为系统节省的运输成本转化为净收益的固定转化率^[9]; ρ 为利率。

当 $t_n = t_0$ 时, 集装箱运输需求为初始运输需求, 利用式(12)求得的 π_{t_n} 是基于传统净现值(net present value, NPV)方法得到的项目投资 NPV。

2.2.3 模型结构

在给出收益函数后, 需进一步研究水运路段和枢纽港口处转运路段的最优投资时机。根据文献[11]的研究, 不确定条件下确定最优投资时机问题可描述为实物期权理论中的最优停止问题。而在求解最优停止问题时, 后向动态规划方法最为常用。因此, 结合收益函数和后向动态规划方法中常用的 Bellman 方程, 可定义确定最优投资时机的收益决策函数:

$$\Phi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n}) = \max\{\pi_{t_n} [\varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n})], (1+\rho)^{-\Delta} E[\Phi(t_{n+1}, \mathbf{q}_{t_{n+1}}, \mathbf{y}_{t_{n+1}})]\} \quad (13)$$

其中: 等式右边的第 1 项 $\pi_{t_n} [\varphi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n})]$ 为 t_n 时刻立即投资的即时收益; 第 2 项 $(1+\rho)^{-\Delta} \times E[\Phi(t_{n+1}, \mathbf{q}_{t_{n+1}}, \mathbf{y}_{t_{n+1}})]$ 为 t_n 时刻延期投资的期望收益。基于该收益决策函数, 决策者可确定 t_n 时刻是立即投资, 还是延期投资。

在得到决策收益函数后, 可构建以投资时刻 t_n 和路段通行能力扩增量向量 \mathbf{y}_{t_n} 为决策变量的不确定需求模型, 即

$$\max Z = E[e^{-\rho t_n} \Phi(t_n, \mathbf{q}_{t_n}, \mathbf{y}_{t_n})] \quad (14)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{n=0}^N t_n = 1 \quad (15)$$

$$\mathbf{0} \leq t_n \mathbf{y}_{t_n} \leq \mathbf{y}_{t_n}^{\max} - \mathbf{y}_{t_n}^0 \quad (16)$$

$$t_n = \{0, 1\}, \forall n \in \{0, 1, \dots, N\} \quad (17)$$

其中: $\mathbf{y}_{t_n}^0$ 为水运路段和枢纽港口处转运路段的初始通行能力向量; $\mathbf{y}_{t_n}^{\max}$ 为水运路段和枢纽港口处转运路段的通行能力改造上限向量; $e^{-\rho t_n}$ 为折现因子。目标函数式(14)表示最大化需求不确定条件下的网络投资优化项目的收益期望值; 式(15)、式(17)表示最优投资时机唯一; 式(16)表示路段通行能力扩增量约束。

3 求解算法

3.1 确定性模型求解算法

根据文献[12]的研究, 确定性模型这类双层规划模型可采用目标函数梯度构造下降方向的下降算法求解。在本文确定确定性模型上层模型目标函数梯度时, 由于 $\mathbf{v}(\mathbf{y})$ 是一个隐函数, 其雅可比矩阵不能直接求导得到, 因此这里在基于下层模型求得的均衡路段流量 $\mathbf{v}(\mathbf{y})$ 基础上, 提出灵敏度下降算法, 该算法通过求得 $\mathbf{v}(\mathbf{y})$ 的雅可比矩阵, 然后求出上层目标函数的梯度, 以实现对整个模型的求解^[13-14]。下面给出灵敏度下降算法主要步骤。

1) 初始化。给定一个初始的枢纽港口处转运路段的通行能力扩建方案 $\mathbf{y}_{t_n}^0$ 和水运路段的通行能力扩建方案 $\mathbf{y}_{t_n}^0$, 置 $\epsilon = 0$ 收敛精度为 $\theta > 0$ 。

2) 求解下层用户均衡问题。利用文献[15]提出的基于路径的贪婪算法求解下层用户均衡分配模型, 得到均衡流量 $\mathbf{v}(\mathbf{y}^\epsilon)$ 。

3) 灵敏度分析。利用灵敏度分析方法计算多式联运网络的均衡流量 $\mathbf{v}(\mathbf{y}^\epsilon)$ 对路段通行能力 \mathbf{y}^ϵ 的微分关系, 即计算隐函数 $\mathbf{v}(\mathbf{y}^\epsilon)$ 的雅可比矩阵 $\nabla_{\mathbf{y}^\epsilon} \mathbf{v}(\mathbf{y}^\epsilon)$, 进一步计算得到上层目标函数的梯度 $\nabla Z(\mathbf{y}^\epsilon)$, 具体算法参考文献[13]。

4) 计算下降方向。利用上层目标函数梯度 $\nabla Z(\mathbf{y}^\epsilon)$ 构造可行下降方向 $\boldsymbol{\omega}^\epsilon$, 其中枢纽非港口处转运路段的通行能力和公路及铁路路段通行能力的下降方向始终为 0。本文采用文献[14]提出的 BFGS 算法确定上层模型的可行下降方向。

5) 更新最优步长。利用最优化问题 $\min_{\lambda} Z(\mathbf{y}^\epsilon + \lambda \boldsymbol{\omega}^\epsilon)$ 做一维搜索确定步长 λ^ϵ 。其中枢纽非港口处转运路段的通行能力和公路及铁路路段通行能力的步长始终为 0。

6) 更新方案。更新枢纽港口处转运路段的通行能力扩建方案 $\mathbf{y}_{t_w}^{\epsilon+1} = \mathbf{y}_{t_w}^\epsilon + \lambda^\epsilon \boldsymbol{\omega}^\epsilon$ 和水运路段的通行能力扩建方案 $\mathbf{y}_{t_w}^{\epsilon+1} = \mathbf{y}_{t_w}^\epsilon + \lambda^\epsilon \boldsymbol{\omega}^\epsilon$ 。

7) 判断收敛。当 $\|\mathbf{y}_{t_w}^{\epsilon+1} - \mathbf{y}_{t_w}^\epsilon\| \leq \theta$ 以及 $\|\mathbf{y}_{t_w}^{\epsilon+1} - \mathbf{y}_{t_w}^\epsilon\| \leq \theta$ 时, 算法终止; 否则, 令 $\epsilon = \epsilon + 1$, 转到步骤 2)。

3.2 不确定模型求解算法

根据文献[9]的研究, 不确定需求模型表征目标函数的收益期望值可看作需求不确定条件下网络投资优化项目的期权价值, 因此对不确定需求模型的求解就是对项目实物期权进行定价的过

程。本文采用最广泛的最小二乘蒙特卡洛模拟算法进行实物期权定价。

3.2.1 集装箱运输需求模拟

设 $p^w(q_0^w, q_1^w, \dots, q_n^w, \dots, q_N^w)$ 为某个 OD 对 w 的一条模拟样本路径,其中 $q_0^w, q_1^w, \dots, q_n^w, \dots, q_N^w$ ($n \in \{0, 1, \dots, N\}$) 分别为 t_0 至 t_N 时刻 OD 对 w 的模拟集装箱运输需求。若给定 t_0 时刻初始集装箱运输需求 q_0^w ,则由式(11)可推导出 t_n 时刻的模拟集装箱运输需求,即

$$q_n^w = \exp \left\{ \ln q_0^w + n \left[\left(\mu^w - \frac{(\sigma^w)^2}{2} \right) \Delta t + \sigma^w \epsilon_{t_n} \sqrt{\Delta t} \right] \right\} \quad (18)$$

其中, μ^w 为利率。

3.2.2 最小二乘蒙特卡洛模拟算法步骤

3.2.2.1 生成样本路径并模拟运输需求

基于蒙特卡洛模拟生成 M 条样本路径,并用 $p_j(q_0^j, q_1^j, \dots, q_N^j)$ 表示第 j ($j \in \{1, 2, \dots, M\}$) 条样本路径,其中 $q_0^j, q_1^j, \dots, q_N^j$ 分别为第 j 条路径上 t_0 至 t_N 时刻所有 OD 对 w 的模拟集装箱运输需求向量。利用式(18)模拟各条路径上任一时刻的集装箱运输需求。

3.2.2.2 确定样本路径收益函数

基于 t_n 时刻的需求 q_n^j ,求解确定性需求模型,得到扩增量向量 y_n^j 和目标值 $\varphi^j(t_n, q_n^j, y_n^j)$ 。进一步求解式(12)得到收益函数 $\pi_n^j[\varphi^j(t_n, q_n^j, y_n^j)]$ 。

3.2.2.3 确定最优投资时机

项目的期权在某个唯一的最优时机执行或永远不执行。设样本路径 p_j 的最优投资时机为 t_j^* ($t_j^* \in \{t_0, t_1, \dots, t_N\}$)。下面给出逆向求解确定 t_j^* 的过程。

1) 初始化 $n=N$,令决策变量 $t_j^* = t_N$,期权收益 $\Phi(t_N^j, q_N^j, y_N^j) = \max\{\pi_N^j[\varphi^j(t_N^j, q_N^j, y_N^j)], 0\}$ 。

2) 令 $n=n-1$ 。

3) 选取 t_n 时刻收益大于 0 的样本路径,以路径的 $\varphi^j(t_n^j, q_{n+1}^j, y_n^j)$ 为自变量, t_{n+1} 时刻收益 $\Phi(t_{n+1}^j, q_{n+1}^j, y_{n+1}^j) = \max\{\pi_{n+1}^j[\varphi_{n+1}^j(t_{n+1}^j, q_{n+1}^j, y_{n+1}^j)], 0\}$ 为因变量进行二次多项式回归,得到如下方程:

$$\Phi(t_{n+1}^j, q_{n+1}^j, y_{n+1}^j) = \alpha_1 + \alpha_2 \varphi^j(t_n^j, q_n^j, y_n^j) + \alpha_3 [\varphi^j(t_n^j, q_n^j, y_n^j)]^2 \quad (19)$$

4) 将 t_n 时刻的 $\varphi^j(t_n^j, q_n^j, y_n^j)$ 代入式(19),

得到 t_{n+1} 时刻式(13)中的期望收益 $E[\Phi^j(t_{n+1}^j, q_{n+1}^j, y_{n+1}^j)]$ 。

5) 比较 t_n 时刻立即执行期权的即时收益 $\pi_n^j[\varphi^j(t_n^j, q_n^j, y_n^j)]$ 与继续持有该期权的折现期望收益 $(1+\rho)^{-\Delta t} E[\Phi(t_{n+1}^j, q_{n+1}^j, y_{n+1}^j)]$ 。若 $(1+\rho)^{-\Delta t} E[\Phi(t_{n+1}^j, q_{n+1}^j, y_{n+1}^j)] \geq \pi_n^j[\varphi^j(t_n^j, q_n^j, y_n^j)]$,则继续持有期权,延期网络投资,模拟路径的 t_j^* 为上一次迭代时最优投资时机;如果 $\pi_n^j[\varphi^j(t_n^j, q_n^j, y_n^j)] > (1+\rho)^{-\Delta t} E[\Phi(t_{n+1}^j, q_{n+1}^j, y_{n+1}^j)]$,那么立即实施网络投资,模拟路径的 $t_j^* = t_n$ 。

6) 若 $n>0$,则转到步骤 2);若 $n=0$ 则循环停止,输出样本路径 p_j 的最优投资时机 t_j^* 和期权收益 $\Phi(t_j^*, q_{t_j^*}^j, y_{t_j^*}^j) = \max\{\pi_{t_j^*}^j[\varphi^j(t_j^*, q_{t_j^*}^j, y_{t_j^*}^j)], 0\}$ 。

3.2.2.4 确定项目的收益期望值

将每条样本路径在最优投资时机的期权收益折现,并取它们的均值作为不确定需求模型的最大收益期望值,即

$$Z = \frac{1}{M} \left[\sum_{j=1}^M e^{-\rho t_j^*} \Phi(t_j^*, q_{t_j^*}^j, y_{t_j^*}^j) \right] \quad (20)$$

4 数值算例

选择以外高桥港、南通港、张家港港、镇江港、南京港、马鞍山港、芜湖港、铜陵港、安庆港、九江港、黄石港、武汉港、岳阳港、荆州港、宜昌港和重庆港为枢纽港口的长江内河多式联运网络开展算例分析。设投资的起始年份为 2019 年,根据《2020—2026 年中国集装箱运输行业市场全景评估及发展规模预测报告》可知,2019 年中国铁路集装箱发运量、公路集装箱运输量和港口集装箱吞吐量总和为 $35\,339 \times 10^4$ TEUs。结合长江内河多式联运网络中城市 GDP 与全国 GDP 比值,得到长江内河多式联运网络集装箱运输总量。再结合《中国投入产出表》各省及城市间货物运输量比重系数,确定出长江内河多式联运网络初始集装箱运输 OD 需求。设任一 OD 需求波动的波动率与漂移率均相同,设漂移率 $\mu^w = 0$ 。网络投资扩建后的水运路段和枢纽港口处转运路段的通行能力的投资收益期 $P=30$ a,且计算投资收益的子区间长度为 1 a。基于文献[13]的研究,收敛精度 θ 设为 10^{-9} 。基于文献[9]的研究,利率 ρ 设为 0.06,系统节省的运输成本转化为净收益的固定转化率 $\lambda=0.1$ 。确定性需求模型参数值参考文献[4]的研究,具体数据见表 1 所列。另外,设

水运路段和枢纽港口处转运路段的通行能力改造的上限分别是在其原始通行能力的基础上加 100×10^3 TEUs。此外,具体的 OD 需求波动率 σ^w 、网络投资优化的计划实施期 T 以及模拟样本路径数 M 在各小节分析中具体设定。

基于上述数据,利用下降算法和最小二乘蒙特卡洛模拟算法在 Visual Studio 2019、MATLAB R2016b 和 CPLEX 12.6 求解器上对两类模型求解。

表 1 确定性需求模型参数值

参数	运输路段取值			参数	转运路段取值
	铁路	公路	水路		
r_c /(元/km)	0.1	0.8	0.2	r_t /(元/h)	100
μ_c /(元/h)	0.1	1.5	0.1	μ_t	5
s_c /(km/h)	33	23	22	τ^0 /h	12
α_c	2.5	2.5	2.5	α_t	2.5
β_c	2	2	2	β_t	2
κ_c	1	2	1	λ_t	1
λ_c	0.25	0.5	0.001	B_t /元	100
B_c /元			50	y_t^0 /(10^4 TEUs)	3
y_c^0 /(10^4 TEUs)	30	20	5		

4.1 最优投资时机分布

设 $M=200, T=5$ a, $\sigma^w=0.35$ 。结合上述已给出的参数值,求解不确定需求模型,模拟样本路径最优投资时机分布见表 2 所列。从表 2 可以看出,当 $T=5$ a 时,模拟样本路径最优投资时机分布在第 2 年的最多(有约 73 条,占比 36.5%),说明在上述参数设置条件下,选择第 2 年实施网络投资最有可能获得最大收益。

将每条样本路径上最优投资时机对应的期权收益值代入式(20),可求得考虑投资机会收益的项目期权价值为 34.5×10^6 元。另外,若不考虑需求不确定条件下的投资机会收益,同样用下降算法求解初始集装箱运输需求下的确定需求模型,得到基于传统 NPV 方法的项目投资收益 NPV 为 32.9×10^6 元。可以发现基于实物期权方法确定的项目期权收益相较于 NPV 值,额外增加了 1.60×10^6 元的收益,涨幅达 4.8%。

出现上述收益增幅的主要原因是传统 NPV 方法假定项目投资实施计划期内的所有投资决策和收益都是确定的,而这仅能评价项目投资初期的情况,并未考虑需求不确定条件下实施投资的机会价值。基于实物期权的项目投资评价方法考虑延期投资所带来的灵活性机会价值,求得的项目期权价值更能模拟出不确定条件下项目投资的真实价值。

表 2 模拟样本路径的最优投资时机分布

最优投资时机	频次	占比/%
1	59	29.5
2	73	36.5
3	33	16.5
4	24	12.0
5	11	5.5

4.2 多式联运网络最优投资扩建方案

本节在 4.1 节中的 200 条模拟路径中选取期权收益最大的路径,给出该条路径所对应的多式联运网络最优投资扩建方案,具体结果见表 3 所列。

表 3 长江内河多式联运网络投资扩建方案

单位: 10^3 TEUs

扩建对象	枢纽港口名称	通行能力的扩增量	扩建对象	起终港口	通行能力的扩增量
枢纽港口处 转运路段	外高桥	94.7	水运路段	外高桥—南通	133.3
	南通	98.6		南通—张家港	96.0
	张家港	35.2		张家港—镇江	61.8
	镇江	28.5		镇江—南京	188.0
	南京	305.2		南京—马鞍山	143.8
	马鞍山	23.7		鞍山—芜湖	76.2
	芜湖	98.0		芜湖—铜陵	48.5
	铜陵	10.3		铜陵—安庆	12.5
	安庆	29.4		安庆—九江	30.3
	九江	39.6		九江—黄石	24.8
	黄石	15.6		黄石—武汉	176.0
	武汉	204.3		武汉—岳阳	107.8
	岳阳	19.5		岳阳—荆州	18.8
	荆州	15.7		荆州—宜昌	24.4
	宜昌	25.4		宜昌—重庆	158.3
	重庆	195.0		重庆—泸州	170.5

从表 3 可以看出,在多式联运网络的水运路段扩建中,通行能力扩增量较大的路段主要为以南京港、武汉港以及重庆港为起终节点的水运路段。另外,枢纽港口处转运路段的通行能力扩增量排名前三的枢纽港口是南京港、武汉港和重庆港,通行能力分别增加了 305.2×10^3 、 204.3×10^3 、 195.0×10^3 TEUs。出现上述结果的主要原因是南京港、武汉港和重庆港是长江内河多式联运网络内的核心港,主要承担了南京都市圈、武汉都市圈以及重庆都市圈间货物的组团运输,3 个港口的通行能力决定了整个多式联运网络的运输效率,在实施网络投资时扩建这 3 个瓶颈核心港以及与它们相连的水运路段是提升网络通行能力的关键。

5 结 论

本文研究需求不确定条件下内河多式联运网络的投资优化问题,以确定内河港口及航道投资扩建规模及时机。构建了确定性需求模型,并提出基于灵敏度的下降算法进行求解。在确定性需求模型基础上,结合实物期权理论,提出了不确定需求模型,并设计了求解模型的最小二乘蒙特卡洛模拟算法。算例结果表明,不确定需求条件下的延期投资可为决策者带来约 4.8% 的灵活性机会价值,实物期权方法考虑了延期投资所带来的灵活性机会价值。此外,加大对南京港、武汉港和重庆港以及与其相连的水运路段的通行能力投资可最大程度提升整个多式联运网络投资的价值。研究结果可为内河运输网络投资优化提供重要理论支撑。但本文研究的网络设计问题是连续型网络设计问题,未来可以研究新建枢纽和航道的离散型网络设计问题。

[参 考 文 献]

- [1] BALLIAUW M, MEERSMAN H, EDDY V D V, et al. Towards improved port capacity investment decisions under uncertainty: a real options approach [J]. *Transport Reviews*, 2019, 39(4): 531-552.
- [2] RANDRIANARISOA L M, ZHANG A. Adaptation to climate change effects and competition between ports: Invest now or later? [J]. *Transportation Research Part B (Methodological)*, 2019, 123: 279-322.
- [3] WANG X C, MENG Q. Discrete intermodal freight transportation network design with route choice behavior of intermodal operators [J]. *Transportation Research Part B (Methodological)*, 2017, 95: 76-104.
- [4] MENG Q, WANG X C. Intermodal hub-and-spoke network design: incorporating multiple stakeholders and multi-type containers [J]. *Transportation Research Part B (Methodological)*, 2011, 45(4): 724-742.
- [5] ZHENG J F, DONG Y. Hub-and-spoke network design for container shipping along the Yangtze River [J]. *Journal of Transport Geography*, 2016, 55(7): 51-57.
- [6] WALLER S, ZILIASKOPOULOS A. Stochastic dynamic network design problem [J]. *Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board*, 2001, 1771: 106-113.
- [7] SATISH V U, GOPAL P. Multi-period transportation network design under demand uncertainty [J]. *Transportation Research Part B (Methodological)*, 2009, 43(6): 625-642.
- [8] 孙华,高自友,龙建成. 不确定 OD 需求下连续交通网络设计的鲁棒优化模型 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(2): 70-76.
- [9] CHOW J Y J, REGAN A C. Real option pricing of network design investments [J]. *Transportation Science*, 2011, 45(1): 50-63.
- [10] STOJKOSKI V, SANDEV T, BASNARKOV L, et al. Generalised geometric Brownian motion: theory and applications to option pricing [J]. *Entropy*, 2020, 22(12): 1432-1432.
- [11] DIXIT R K, PINDYCK R S. *Investment under uncertainty* [M]. New Jersey: Princeton University Press, 2012.
- [12] 四兵锋,高自友. 合理制定铁路客票价格的优化模型及算法 [J]. *管理科学学报*, 2001, 4(2): 45-51.
- [13] 赵顺晶,龙建成. 通勤廊道换乘停车费用优化模型及算法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(9): 2337-2344.
- [14] 赵顺晶,龙建成,丁建勋,等. 两种经营模式下通勤廊道停车换乘选址及停车费用优化 [J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(3): 734-742.
- [15] XIE J, NIE Y, LIU X B. A greedy path-based algorithm for traffic assignment [J]. *Transportation Research Record*, 2018, 2672(48): 36-44.

(责任编辑 张 镗)