

文章编号:1005-0523(2017)02-0078-07

无水港-海港系统集装箱运输网络优化模型

胡文斌, 封学军, 张 艳, 蒋柳鹏, 张 钺

(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:在腹地共享化的背景下,无水港的建设成为海港腹地拓展的重要手段。在分析无水港-海港网络特性的基础上,以无水港-海港系统总成本最优为目标函数,构建无水港-海港运输网络优化模型,并使用LINGO软件对模型进行求解分析,可以解决无水港-海港的网络选址布局问题。无水港的建立有效的降低了从腹地到海港的集装箱运输成本,而成本的减少程度与无水港的建设数目相关,对无水港的合理布局有利于整个无水港-海港系统高效低成本运行。

关键词:无水港-海港系统;集装箱运输;网络优化;无水港选址;规模经济

中图分类号:F550.3;U658

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.02.011

在海港腹地由静态向动态转变的背景下,无水港的建设成为海港向动态腹地延伸的重要工具,其建设有利于沿海港口将服务区域延伸至内陆地区,远离海港的内陆城市货主在无水港完成订舱、报关、报检等手续,极大提高货物的运输效率,减少等待的时间,使得港口物流体系更为畅通。无水港-海港系统的集装箱运输网络问题已成为当前港口研究的热点问题之一,通过构建无水港-海港系统的集装箱运输网络模型,分析无水港-海港之间的运输关系以及无水港的规模和布局,拟解决无水港-海港系统中集装箱运输网络优化的问题。

1 研究综述

目前无水港-海港系统集装箱运输网络研究成果较多,主要集中在无水港-海港系统研究、集装箱运输优化几个方面。Hanaoka等^[1]、Roso等^[2]提出无水港对海港的重要性,随着集装箱运输船舶规模扩大,无水港在海港与内陆腹地之间扮演着一个越来越重要的角色,无水港的存在有利于减轻海港及所在城市的货物拥挤情况,增强对传统腹地以外地区的货源吸引能力,内陆集装箱运输系统因而更加高效。Crainic等^[3]建立了多式联运的属性模型,以总成本最小为目标函数,解决集装箱多式联运的运输问题。Wang等^[4]、Laporte等^[5]建立集装箱运输的分配模型,并分别运用禁忌搜索算法和遗传算法求解,得出集装箱运输网络最佳分配模式。Rahimi等^[6]以运载车辆总公里数最小为目标建立单一无水港选址模型,而后将其扩展到选择多达六个无水港的选址-分配模型,进而解决多个交通节点应该由哪些无水港服务的问题。Jeong等^[7]通过建立整数规划数学模型优化欧洲轴辐式铁路货运网络结构,并利用启发式算法求解模型,确定合适的地点作为集装箱运输枢纽。Feng等^[8]考虑无水港共用和无水港独占两种情况,构建双层规划模型,使用基于贪心法与遗传算法的求解算法,实现区域海港群-无水港系统布局协同优化。Arnold等^[9]讨论了内陆公路-铁路联合运输的问题,文中考虑了铁路成本、转运成本、边界效应、建立枢纽等不同的情况,通过建立线性0-1规划数学模型并利用启发式算法求解,计算在不同运输情况下该地区联合运输份额变化程度不同。Limbourg等^[10]基于p-hub

收稿日期:2016-08-10

作者简介:胡文斌(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为交通运输规划与管理。

通讯作者:封学军(1975—),男,教授,主要研究方向为物流管理与水运经济。

中值问题使用递次求近法解决集装箱运输枢纽选址问题,文中为欧洲轴辐运输网络选出合适的中转枢纽。Correia 等^[11]通过对无水港枢纽操作能力限制的分析,在带容量的单枢纽问题的基础上使用混合整数规划的方式来解决该问题。Mittal 等^[12]以纽约和新泽西的海港—无水港系统为案例,采用两阶段随机分析法对随机需求情况下的内陆集装箱空箱场站分布情况进行分析。Chang^[13]建立包括时间、成本等多因素的多目标规划模型,通过启发式算法求解,得到最优的集装箱运输线路。Racunica 等^[14]建立总成本最低为目标的铁路中转站选址与布局优化模型,并以欧洲轴辐式铁路为例对其优化。Brimberg 等^[15]对算法进行改进,利用变邻域算法解决选址—分配问题。胡辉等^[16]采用 Benders 分解的方法,对多种交通方式下的物流运输网络优化模型的求解算法进行了研究。

综上所述,关于无水港—海港系统以及集装箱运输网络优化的研究较多,主要集中在无水港与海港的作用关系、集装箱运输的优化以及求解算法方面,而关于无水港—海港系统下集装箱运输网络优化研究成果鲜见报端,本文在考虑无水港固定成本、运营成本和货物运输成本的基础上构建无水港选址和货流分配模型,对无水港—海港的集装箱运输网络进行优化研究。

2 模型建立

2.1 问题描述

在无水港—海港集疏运系统网络 $G=(V,E)$ 中, G 表示为无水港—海港集疏运网络, $V=\{V^1, V^2, V^3\}$ 表示运输节点,在该系统中共有三类节点,其中 $V_i^1=\{V_i^1, i=1, 2, \dots, I\}$ 表示 I 个城市节点, $V_j^2 \subseteq V^1=\{V_j^2, j=1, 2, \dots, J\}$ 表示 J 个无水港节点,无水港节点在 I 个城市节点中产生, $V_k^3=\{V_k^3, k=1, 2, \dots, K\}$ 表示 K 个海港节点; E 为节点 V_i, V_j, V_k 之间的弧, E 主要有两种模式,一种是经过无水港枢纽模式,货物自由选择通过公路或者铁路运输至无水港,在无水港内部完成换装、仓储与一关三检后,通过铁路或者公路运输到达沿海港口,即弧 $E_{ijk}=(V_i, V_j, V_k)$;第二种是直达模式,货物直接运输至沿海港口,运输方式从公路或者铁路中自由选择,即弧 $E_{ij}=(V_i, V_j)$ 。本文研究的无水港选址问题是由运输需求点到无水港,再到沿海港口的三级物流网络问题。在备选城市集合中选取一个或者多个城市建设无水港,在无水港和海港之间分配运输需求点的运输需求,达到优化运输节点布局的效果如图 1 所示。

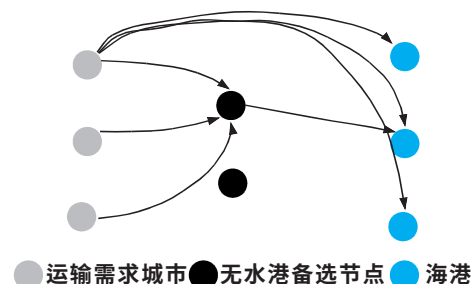


图1 海港—无水港系统布局及网络优化示意图

Fig.1 Schematic diagram of system layout and network optimization in dry port-harbor system

2.2 模型假设

建立模型之前,先做以下假设:

- 1) 无水港节点城市货运需求已知;
- 2) 运输方式存在运量的经济性,运量越大,单位集装箱运输成本越低;
- 3) 无水港—海港系统总体成本包括无水港建设成本、无水港运营成本和无水港—海港系统物流成本;
- 4) 无水港有不同的建设等级,在相应建设等级下其固定建设成本、年运营成本和建设规模范围已知;
- 5) 不考虑货物运输过程中的运输能力限制,假定道路通过能力足够,铁路班列充足;
- 6) 系统内集装箱运输为单向运输,只研究集装箱由运输需求城市运输到海港这一阶段,而反向运输不做研究,故不考虑集装箱运至海港后空箱运回无水港的调用费用。

2.3 模型构建

以系统成本最小为目标函数,建立无水港—海港集疏运优化模型。由假设条件已知,系统成本主要由无水港建设成本、无水港运营成本、系统物流成本构成,系统总成本为

$$C=C_1+C_2+C_3 \quad (1)$$

其中: C 为无水港-海港集疏运总费用; C_1 为无水港建设成本; C_2 为无水港的运营成本; C_3 为无水港-海港系统集疏运的物流成本。

C_1 无水港建设成本。将无水港建设总费用均摊到建设期的每一年可以得到每年的建设成本

$$C_1 = \sum_{k \in K} \sum_{g \in G} f_{gk} \gamma_{gk} \frac{u(1+u)^s}{(1+u)^s - 1} \quad (2)$$

其中: C_1 为无水港建设固定成本; K 为备选无水港口集合; G 为无水港建设等级集合; f_{gk} 为备选城市 k 建立规模等级 g 的无水港的固定成本; s 为无水港建设计算期; u 为资金折现率; γ_{gk} 为决策变量,0-1变量,是否在备选城市 k 建立等级为 g 的无水港,选中则值为1,未选中则值为0。 C_2 为无水港运营成本。备选城市 k 建设等级 g 的无水港每年所需运行成本

$$C_2 = \sum_{k \in K} \sum_{g \in G} r_{gk} \gamma_{gk} \quad (3)$$

其中: C_2 为无水港年运行成本; r_{gk} 为备选城市 k 建立等级 g 的无水港所需的年运行成本; r_{gk} 用分段函数表示如下

$$r_{gk} = \begin{cases} E_g & T_{gk} \leq N_{gk} \\ E_g + M(T_{gk} - N_{gk})^2 & T_{gk} > N_{gk} \end{cases} \quad (4)$$

$$T_{gk} = \sum_{i \in I} Q_{igk} \quad (5)$$

其中: T_{gk} 为备选城市 k 建立等级为 g 的无水港的年集装箱通过量; N_{gk} 为备选城市 k 建立等级为 g 的无水港建议最大通过能力; E_g 为等级为 g 的无水港未超过建议最大规模时的年运营成本。

如果在备选城市 k 建立的等级为 g 的无水港年集装箱通过量超过该无水港建议最大通过能力,则该无水港年运营成本会大幅增加,公式(4)中 M 是一个很大的正整数。

C_3 为无水港-海港系统物流成本。物流成本包含弧 E_{ikj} 和 E_{ij} 上的物流成本,弧 E_{ikj} 上物流成本 C_{ikj} 为货物从运输需求城市到无水港 k 建立等级为 g 的无水港的物流费用和货物从无水港 k 到海港 j 的物流费用; C_{ij} 为弧 E_{ij} 上货物直达港口模式物流成本,包括货物从运输需求城市 i 到海港 j 的物流费用。即

$$C_3 = C_{ij} + C_{ikj} \quad (6)$$

$$C_{ikj} = \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{g \in G} Z_{ikn} Q_{igk} + \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{g \in G} Z_{kjn} Q_{gkj} x_{gkj} \quad (7)$$

$$C_{ij} = \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Z_{ijn} Q_{ij} \quad (8)$$

式(6)~式(8)中: C_{ikj} 为货物无水港运输模式两段物流成本; C_{ij} 为货物海港直达模式物流成本; I 为运输需求城市集合; J 为海港集合; N 为运输方式集合; Z_{ikn} 为运输需求城市以 i 运输方式 n 运送集装箱至无水港备选节点所需的单位集装箱货运成本; Z_{kjn} 为备选城市 k 建设的无水港以运输方式 n 运送集装箱至海港 j 所需的单位集装箱货运成本; Z_{ijn} 为运输需求城市 i 以运输方式 n 运送货物至海港 j 所需的单位集装箱货运成本; x_{gkj} 为运输规模效应系数,取值在0和1之间; Q_{igk} 为运输需求城市 i 到建设等级 g 的无水港备选节点 k 的集装箱货运量; Q_{gkj} 为建设等级 g 的无水港备选节点 k 到港口 j 的集装箱货运量; Q_{ij} 为运输需求城市 i 到海港 j 的集装箱货运量。

故海港-无水港系统目标函数为

$$\text{Min} C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (9)$$

s.t. :

$$\sum_{i \in I} Q_{igk} = \sum_{j \in J} Q_{gkj}, \forall k \in K, \forall g \in G \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{g \in G} Q_{igk} = D_i, \forall i \in I \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{g \in G} Q_{gkj} \leq H_j, \forall j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{g \in G} Q_{gk} \leq 1, \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{g \in G} y_{gk} \leq m \quad (14)$$

$$y_{gk} \in \{0, 1\}, \forall g \in G, \forall k \in K \quad (15)$$

$$Q_{igk}, Q_{gkj}, Q_{ij} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall g \in G \quad (16)$$

式(12)中: D_i 运输需求城市 i 集装箱出口量; H_j 为港口 j 的集装箱建议最大通过能力。

约束(10)表示无水港货物进出平衡;约束(11)表示每个运输需求城市的运输需求都能得到满足;约束(12)表示各无水港口运往某个海港的货物总和不超过该港口的集装箱最大通过能力;约束(13)表示在备选城市处只能选择一个容量等级;约束(14)表示无水港数目限制;约束(15)保证决策变量 y_{gk} 的取值为 0 或者 1;约束(16)定义相应参数为非负的。

关于模型的求解算法,常用的有搜索式和启发式算法,基于计算高效、操作简单等原则,本文选取了非线性规划问题常用求解软件 LINGO 对该模型就行求解。

3 案例分析

本文选取中国福建省无水港—海港系统为案例,选择三明、南平、龙岩、梅州、吉安、赣州、上饶、鹰潭、抚州、萍乡、新余、宜春、南昌、九江、长沙 15 个城市作为运输需求城市;选择福建省集装箱出口能力较大的福州港、厦门港、泉州港作为出口海港;选择规模较大的吉安、赣州、上饶、宜春、南昌、九江、长沙 7 个城市作为无水港备选节点,使用本文所建立的数学模型可以从备选城市中得到合适的无水港选址方案。

数据来源:运输需求城市、无水港备选节点及海港节点间的距离通过 MapInfo 建立海西地区运输网络查到,每个运输需求城市的集装箱出口需求量可通过该城市的出口额计算出,结果如表 1 所示。

表 1 2015 年出口需求城市集装箱出口预测量
Tab.1 Export forecast of container for export demand city in 2015

城市	三明	南平	龙岩	梅州	吉安	赣州	上饶	鹰潭
预测量/TEU	21 625	12 768	29 223	25 764	48 126	38 465	43 318	30 391
城市	抚州	萍乡	新余	宜春	南昌	九江	长沙	总量
预测量/TEU	18 711	14 288	14 401	27 102	97 455	55 951	98 544	576 132

参照国内类似无水港投资运营情况,估算的无水港建设等级及相应运行成本及建议规模范围如表 2 所示。

表 2 无水港等级规模、建设成本和运营成本
Tab.2 The size, construction cost and operating cost of dry port

无水港等级	建设成本/万元	运营成本/万元	建议规模范围/万 TEU
一级	32 000	1 600	9~18
二级	15 000	700	5~9
三级	7 000	400	0~5

港口节点福州港、厦门港和泉州港集装箱建议最大通过能力用该港口 2015 年集装箱吞吐量表示,如表 3 所示。

表 3 2015 年各港口集装箱吞吐量
Tab.3 Container throughput of ports in 2015

港口	福州港	厦门港	泉州港
集装箱吞吐量/万 TEU	177	918	201

集装箱运输规模效应折扣系数 x_{ghj} 是可变的,其大小随着无水港货运量的增大而减少,其取值如表 4 所示。

表 4 集装箱运输规模效应折扣系数取值
Tab.4 The discount factor of container transportation scale effect

x_{ghj} 取值	无水港年集装箱通过量 T_{gh} 取值范围	
	下限/TEU	上限/TEU
0.9	0	49 999
0.8	50 000	99 999
0.7	100 000	149 999
0.6	150 000	—

资金折现率取 8%,建设计算期取 15 年。

逐步增加无水港数目 m , 对应不同的无水港数目 m 分别对海港-无水港集装箱运输网络优化模型进行求解,分别得到相应情况下的系统最小总成本和该成本对应的无水港布局情况及规模选择,从所有情况下中选择成本最低的方案作为最佳选址方案。模型采用 Lingo11.0 求解,求得结果如表 5 所示。

根据计算结果,当 $m=4$ 时,该方案为最优方案,此时在货流合理分配的情况下系统总成本最低,相对于不建立无水港的情况,可节省 8.6% 的系统总成本。

分析计算结果,在不设立内陆无水港的情况下,整个系统的运输成本最高,这表现了海西地区集装箱运输系统中无水港建立的必要性;随着无水港数目不断增加,海西地区集装箱运输系统总成本逐渐下降,但下降程度趋于平缓,说明福建省无水港-海港系统集装箱运输网络布局更加合理;当无水港数目增加到一定程度时,系统总成本反而上升,这是由于无水港数目的增多导致货物分散,集装箱运输规模效应未能很好得体现出来,且无水港的建设及运营成本随着无水港数目增多而增加,导致系统总成本反而上升。

表5 m 取不同值时,海港—无水港系统布局及网络优化模型计算结果
Tab.5 The results of dry port-harbor transportation network optimization model

m 值	无水港分担率/%	系统成本/亿元	无水港布局方案
0	0	14.81	无
1	31.24	14.10	1级无水港:南昌
2	49.22	13.88	1级无水港:宜春、南昌
3	53.42	13.61	1级无水港:宜春、南昌 3级无水港:吉安
4	65.96	13.53	1级无水港:南昌、长沙 3级无水港:赣州、上饶
5	70.66	13.79	1级无水港:南昌、长沙 2级无水港:上饶 3级无水港:赣州、宜春
6	77.12	14.03	1级无水港:南昌、九江 2级无水港:长沙 3级无水港:吉安、赣州、上饶
7	74.37	14.23	1级无水港:长沙 2级无水港:南昌 3级无水港:吉安、赣州、上饶、宜春、九江

4 结论

本文通过构建无水港—海港系统集成网络优化模型,能解决无水港—海港系统中的无水港布局、集装箱运输优化等问题,在货流合理分配的条件下可实现运输成本的大幅减少,丰富了沿海港口的货物来源,同时节省了社会资源。无水港运输模式对于离海港较远的地区尤为适用,而对于大规模货物,集装箱运输的规模经济效应也体现出来,基于无水港的多式联运模式是决策者值得重视的一环。同时,放松模型的基本假设条件,对模型模拟进行细化是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] HANAOKA S, REGMI M B. Promoting intermodal freight transport through the development of dry ports in Asia: An environmental perspective[J]. IATSS Research, 2011, 35(1): 16-23.
- [2] ROSO V, WOXENIUS J, LUMSDEN K. The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland[J]. Journal of Transport Geography, 2009, 17(5): 338-345.
- [3] CRAINIC T G, KIM K H. Intermodal transportation [J]. Handbooks in operations research and management science, 2007, 14: 467-537.
- [4] WANG W F, YUN W Y. Scheduling for inland container truck and train transportation[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 143(2): 349-356.
- [5] LAPORTE G, GENDREAU M, POTVIN J Y, et al. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem[J]. International transactions in operational research, 2000, 7(4-5): 285-300.
- [6] RAHIMI M, ASEF-VAZIRI A, HARRISON R. An inland port location-allocation model for a regional intermodal goods movement system[J]. Maritime Economics & Logistics, 2008, 10(4): 362-379.

- [7] JEONG S J, LEE C G, BOOKBINDER J H. The European freight railway system as a hub-and-spoke network[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2007, 43(6): 523–536.
- [8] FENG X, ZHANG Y, LI Y, et al. A location-allocation model for seaport-dry port system optimization[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013(4): 1–9.
- [9] ARNOLD P, PEETERS D, THOMAS I. Modelling a rail/road intermodal transportation system[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2004, 40(3): 255–270.
- [10] LIMBOURG S, JOURQUIN B. Optimal rail-road container terminal locations on the European network[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(4): 551–563.
- [11] CORREIA I, NICKEL S, SALDANHA-DA-GAMA F. Single-assignment hub location problems with multiple capacity levels[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, 46(8): 1047–1066.
- [12] MITTAL N, BOILE M, BAVEIA A, et al. Determining optimal inland-empty-container depot locations under stochastic demand[J]. *Research in Transportation Economics*, 2013, 42(1): 50–60.
- [13] CHANG T S. Best routes selection in international intermodal networks[J]. *Computers & operations research*, 2008, 35(9): 2877–2891.
- [14] RACUNICA I, WYNTER L. Optimal location of intermodal freight hubs[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2005, 41(5): 453–477.
- [15] BRIMBERG J, HANSEN P, MLADENOVIC N, et al. Improvements and comparison of heuristics for solving the uncapacitated multisource Weber problem[J]. *Operations research*, 2000, 48(3): 444–460.
- [16] 胡辉, 顾丽琴, 倪明. 基于 Benders 分解的多方式物流运输网络优化模型[J]. *华东交通大学学报*, 2015, 32(2): 72–77.

Optimization Model for Container Transportation Network in Dry Port-harbor System

Hu Wenbin, Feng Xuejun, Zhang Yan, Jiang Liupeng, Zhang Cheng

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Under the background of hinterland sharing, the construction of dry port represents an important means to develop harbor hinterland. Based on the analysis of network characteristics of dry port-harbor system, the dry port-harbor transportation network optimization model is established for the optimal objective function of the total cost. Through the solution and analysis of model by LINGO software, the location and layout problems of dry port-harbor network was settled. The construction of dry port can effectively reduce the cost of container transportation from hinterland to harbor, and the reduction in costs is associated with the number of dry ports, which can help to establish a dry port-harbor system with high efficiency and low cost.

Key words: dry port-harbor system; container transportation; network optimization; dry port location; economies of scale

(责任编辑 姜红贵)