

[文章编号] 1007-7405(2017)06-0040-06

# 基于脆弱性的班轮运输网络设计

伍方凌<sup>1</sup>, 邢江波<sup>2</sup>

(1. 集美大学诚毅学院, 福建 厦门 361021; 2. 大连海事大学交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

[摘要] 为了提高班轮运输网络设计的可靠性, 将网络脆弱性引入到轴辐式网络设计中, 借助干扰情景及其相应的干扰成本, 计算轴辐式网络受潜在干扰的影响, 建立整数二次规划模型, 以期确定脆弱性最小的轴辐式网络枢纽港选择方案。通过算例证明, 当干扰发生时, 基于脆弱性的班轮运输网络设计模型能够确定出可行的航线网络, 使得网络脆弱性最小, 即模型可行。

[关键词] 班轮运输; 航线; 脆弱性; 网络设计

[中图分类号] U 692

## Liner Shipping Network Design Based on Vulnerability

WU Fangling<sup>1</sup>, XING Jiangbo<sup>2</sup>

(1. Chengyi University College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** In order to enhance the reliability of liner shipping network design, this paper introduces vulnerability to hub-and-spoke network design. The impact of potential interference on hub-and-spoke network design is calculated using interference scenarios and corresponding costs, and an integer quadratic programming model is established so as to determine the optimal hubs for the hub-and-spoke network with minimum network vulnerability. The result shows that the model established is able to design feasible network with minimum vulnerability under interferences. Therefore, the model is feasible.

**Keywords:** liner shipping; routes; vulnerability; network design

## 0 引言

航线网络设计包含枢纽港选择、支线港配置及航线配船问题, 合理规划航线网络能够有效降低运营成本, 提高市场竞争力。而脆弱性是交通网络的固有性质, 传统的网络设计方法所确定的航线网络在面临扰动时有可能失效。如何考虑不确定性因素的影响, 设计可靠性更高的班轮运输网络, 日益成为班轮运输公司重点关注的问题。Wang 等<sup>[1]</sup>研究了考虑需求不确定的轴辐式班轮运输网络设计问题; An 和 Lo<sup>[2]</sup>研究了考虑随机需求的渡轮服务网络设计问题; Mulder 和 Dekker<sup>[3]</sup>提出了战略性班轮运输网络设计的一种复合解决方法, 并针对需求不确定的案例给出了解决方案; 钟铭等<sup>[4]</sup>则用区间集合来反映需求的不确定性, 建立轴辐式网络区间规划模型, 并利用遗传算法得到最优解。这些文献都集中于考量需求波动性对网络设计的影响, 而未将供给端的运输干扰考虑到网络设计问题中。脆弱性被应用于航运领域的研究近几年刚起步, Hsieh 等<sup>[5-6]</sup>认为港口脆弱性指的是港口基于抵抗力提供

[收稿日期] 2017-03-27

[修回日期] 2017-07-03

[作者简介] 伍方凌 (1991—), 女, 助教, 从事交通运输规划与管理研究, E-mail: wfl496038107@163.com。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

充分作业功能的能力, 以及帮助港口从灾害带来的不良影响中恢复的能力; Ducruet 等<sup>[7]</sup>从网络枢纽港的依赖性, 即主要连接的港口数量来评估班轮网络的脆弱性; Berle 等<sup>[8]</sup>提出 FVA (formal vulnerability assessment) 方法作为海运系统脆弱性的评估框架; Laxe 等<sup>[9]</sup>应用传统的统计方法分析脆弱性, 通过计算该港口与其他港口分享货物的最大份额来获取脆弱性, 也就是说对其他港口依赖性越小的港口, 其脆弱性就越小; 武佩剑<sup>[10]</sup>从不同方面界定了班轮航运网络脆弱性: 重要节点失效对集装箱班轮航运网络拓扑结构、连通性和时间因素的影响。

当前交通网络脆弱性评价大多是基于网络中的节点或边完全失效的情况进行的, 统计指标包括聚类系数、介数、度等, 而在航运服务中, 港口或航段完全失效的情况发生概率很小, 干扰港口服务功能实现的主要是拥堵、罢工等事件, 故而本文设定严重干扰和一般干扰两种情景, 以情景发生概率及干扰成本评估干扰事件对网络的影响程度。当干扰发生, 干扰程度越深造成的后果越严重, 则脆弱性就越高, 反之则越低。本文结合网络脆弱性, 通过衡量班轮运输轴辅式航运网络中各港口的脆弱性进行枢纽港选择, 从而确定使网络脆弱性最低的设计方案。

### 1 问题描述

班轮运输轴辅式网络将网络中港口划分为枢纽港与支线港, 港口之间以干线或支线相连。本文研究单配置轴辅式网络设计问题, 网络形式如图 1 所示。

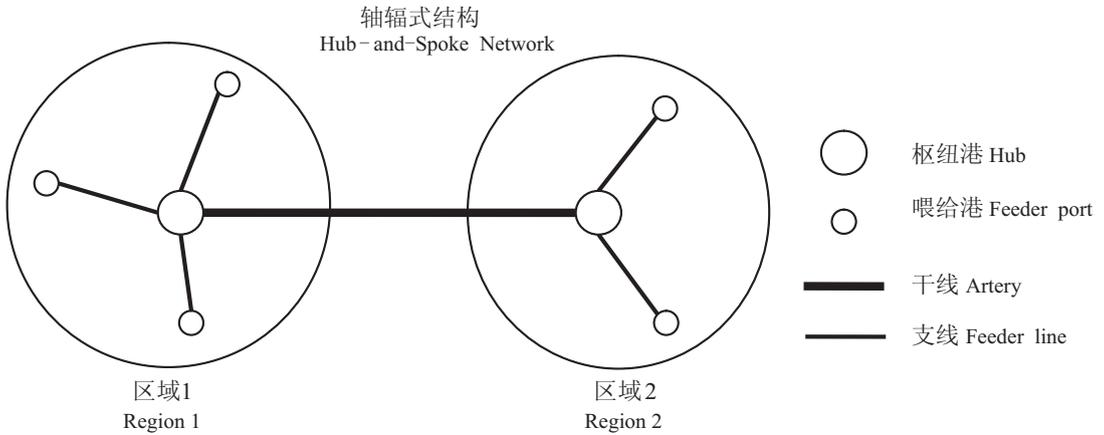


图 1 班轮服务轴辐式网络

Fig. 1 Liner service hub-and-spoke network

假设某班轮公司的集装箱班轮运输业务跨若干区域, 其轴辐式网络可进行地理区域的划分, 所得区域用集合  $I = \{1, \dots, I\}$  表示, 每个区域都有且仅有一个轴辐式结构, 并且假设喂给港只能与枢纽港相连, 即喂给港之间不相通。在区域  $i \in I$  有若干个候选枢纽港, 用集合  $H^i = \{1, \dots, h_i, \dots, n_i\}$  来表示, 假设区域内的候选枢纽港在吞吐能力、港口费用等参数方面相当, 即忽略两港之间可能存在的除干扰概率和成本之外的其他参数差异; 任一区域  $i \in I$  内的支线港已知, 用集合  $K^i = \{1, \dots, k_i, \dots, M_i\}$  表示。

本文的航线网络设计旨在为班轮运输公司确定网络中每个区域的枢纽港, 现考虑网络面临的干扰, 以  $S = \{1, \dots, S\}$  表示干扰情景集合, 要求枢纽港设定方案使得网络脆弱性最低, 其中轴辅式网络脆弱性包含网络中枢纽港脆弱性、干线航段以及支线航段脆弱性。设  $P_{h^i}^s$  和  $C_{h^i}^s$  分别为枢纽港  $h^i$  发生干扰情景  $s \in S$  的概率和干扰成本, 其中干扰概率为港口发生该程度拥堵或罢工事件的统计概率, 以受干扰影响的货值计算干扰成本;  $P_{h^i k^i}^s$  和  $C_{h^i k^i}^s$  分别为支线航段  $(h^i, k^i)$  发生干扰情景  $s \in S$  的概率和成本, 干扰概率为支线航段发生延误的统计概率, 干扰成本为受该支线航段干扰影响的货值;  $P_{h^i h^{i+1}}^s$  和  $C_{h^i h^{i+1}}^s$  分别为干线航段  $(h^i, h^{i+1})$  发生干扰情景  $s \in S$  的概率和成本,  $i = 1, \dots, I - 1$ , 概率及成本的

确定同支线航段。

### 2 数学模型

基于 P - 中位模型, 以脆弱性最小为目标函数建立轴辐式网络设计模型:

$$\min Z = \sum_{i \in I} \sum_{h^i \in H^i} \sum_{s \in S} B_{hi} P_{hi}^s C_{hi}^s + \sum_{i \in I} \sum_{h^i \in H^i} \sum_{k^i \in K^i} \sum_{s \in S} B_{hi} P_{hi}^s C_{h^i k^i}^s + \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{h^i \in H^i} \sum_{h^{i+1} \in H^{i+1}} \sum_{s \in S} B_{hi} B_{h^{i+1}} P_{h^i h^{i+1}}^s C_{h^i h^{i+1}}^s \quad (1)$$

约束条件: 喂给港与枢纽港相连

$$\sum_{h^i \in H^i} B_{hi} = 1, \forall i \in I, B_{hi} \in \{0, 1\}, h^i \in H^i \quad (2)$$

模型的决策变量为二元变量  $B_{hi}$ ,  $B_{h^i}$  等于 1 表示选择候选港  $h^i$  作为区域  $i$  的枢纽港, 否则  $B_{hi}$  为 0。

目标函数 (1) 表示选取枢纽港使得网络整体脆弱性最低, 式中第一项衡量网络中枢纽港的脆弱性, 第二项衡量枢纽港与喂给港之间支线航段的脆弱性, 第三项衡量枢纽港与枢纽港之间干线航段的脆弱性。约束条件限制了每个区域中有且仅有一个候选港口成为枢纽港, 同时限定决策变量  $B_{hi}$  为二元变量。

### 3 算例分析

假设某集装箱公司计划开辟途经大洋洲的亚欧班轮服务网络, 该网络共涉及 6 个区域, 区域内候选枢纽港及喂给港确定, 具体港口信息如下。区域 1: 上海(候选枢纽港), 釜山(候选枢纽港), 大连, 天津, 青岛, 宁波, 光阳, 神户, 横滨, 东京; 区域 2: 香港(候选枢纽港), 盐田(候选枢纽港), 厦门, 赤湾, 高雄, 马尼拉; 区域 3: 新加坡(候选枢纽港), 弗里曼特尔(候选枢纽港), 林查班, 胡志明, 巴生, 雅加达, 阿德莱德, 墨尔本, 悉尼, 布里斯班; 区域 4: 科伦坡(候选枢纽港), 科钦(候选枢纽港), 金奈, 什瓦, 那瓦, 吉大; 区域 5: 塞拉莱(候选枢纽港), 吉达(候选枢纽港), 阿里山, 卡拉奇, 亚喀巴, 索卡那; 区域 6: 南安普顿(候选枢纽港), 鹿特丹(候选枢纽港), 泰晤士, 勒阿弗尔, 泽布吕赫, 安特卫普, 不莱梅, 汉堡。

干扰情景包括严重干扰和一般干扰。假设各区域的候选枢纽港发生严重干扰、一般干扰的概率和相应的成本如表 1 所示。干线航段发生严重干扰、一般干扰的概率和相应的成本如表 2 所示。

表 1 候选枢纽港相关数据

Tab. 1 Relevant data of available hubs

枢纽港 Hub port	干扰概率 Probability of interference		干扰成本/万美元 Cost of interference/Ten thousand US dollar	
	严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference	严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference
	上海 Shanghai	0.010	0.30	150 000
釜山 Busan	0.030	0.20	120 000	7 000
香港 Hong Kong	0.050	0.25	130 000	5 000
盐田 Yantian	0.020	0.15	200 000	8 000
新加坡 Singapore	0.040	0.40	180 000	4 000
弗里曼特尔 Fremantle	0.035	0.10	130 000	3 200
科伦坡 Colombo	0.010	0.10	160 000	5 500
科钦 Cochin	0.020	0.25	190 000	3 800
塞拉莱 Salalah	0.050	0.50	130 000	6 000
吉达 Jeddah	0.020	0.10	110 000	3 500
南安普顿 Southampton	0.045	0.30	200 000	2 000
鹿特丹 Rotterdam	0.008	0.35	150 000	4 100

表2 干线航段相关数据  
Tab.2 Relevant data of arteries

干线航段 Artery	干扰概率		干扰成本/万美元	
	Probability of interference		Cost of interference/Ten thousand US dollar	
	严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference	严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference
上海 Shanghai—香港 Hong Kong	0.001 0	0.10	20 100	2 000
上海 Shanghai—盐田 Yantian	0.002 0	0.11	18 000	2 500
釜山 Busan—香港 Hong Kong	0.002 0	0.13	19 900	3 000
釜山 Busan—盐田 Yantian	0.003 0	0.12	16 000	1 000
香港 Hong Kong—新加坡 Singapore	0.000 8	0.08	22 200	4 000
香港 Hong Kong—弗里曼特尔 Fremantle	0.003 0	0.20	21 000	2 500
盐田 Yantian—新加坡 Singapore	0.002 0	0.10	30 000	3 000
盐田 Yantian—弗里曼特尔 Fremantle	0.003 5	0.30	16 000	1 800
新加坡 Singapore—科伦坡 Colombo	0.010 0	0.40	15 000	2 000
新加坡 Singapore—科钦 Cochin	0.008 0	0.20	19 000	1 200
弗里曼特尔 Fremantle—科伦坡 Colombo	0.006 0	0.25	21 000	2 300
弗里曼特尔 Fremantle—科钦 Cochin	0.006 0	0.30	31 000	2 500
科伦坡 Colombo—塞拉莱 Salalah	0.008 0	0.07	28 000	21 500
科伦坡 Colombo—吉达 Jeddah	0.009 0	0.08	30 000	3 100
科钦 Cochin—塞拉莱 Salalah	0.006 0	0.20	23 000	2 100
科钦 Cochin—吉达 Jeddah	0.010 0	0.30	24 000	2 000
塞拉莱 Salalah—南安普顿 Southampton	0.090 0	0.20	40 000	5 000
塞拉莱 Salalah—鹿特丹 Rotterdam	0.008 0	0.35	36 000	2 500
吉达 Jeddah—南安普顿 Southampton	0.006 0	0.10	38 000	2 100
吉达 Jeddah—鹿特丹 Rotterdam	0.005 0	0.08	26 000	2 500

各区域支线航段发生严重干扰、一般干扰的概率和相应成本如表3所示。

表3 各区域支线航段相关数据  
Tab.3 Relevant data of feeder lines in all regions

支线航段 Feeder line		干扰概率		干扰成本/万美元	
		Probability of interference		Cost of interference/Ten thousand US dollar	
		严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference	严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference
大连 Dalian	上海 Shanghai	0.08	0.2	8 000	900
	釜山 Busan	0.07	0.2	8 000	650
天津 Tianjin	上海 Shanghai	0.07	0.3	7 500	600
	釜山 Busan	0.05	0.3	6 500	340
青岛 Qingdao	上海 Shanghai	0.06	0.3	7 500	800
	釜山 Busan	0.06	0.2	7 000	400
宁波 Ningbo	上海 Shanghai	0.07	0.1	6 500	900
	釜山 Busan	0.04	0.1	6 500	500
光阳 Kwangyang	上海 Shanghai	0.05	0.2	7 000	1 000
	釜山 Busan	0.03	0.1	5 500	350
神户 Kobe	上海 Shanghai	0.07	0.3	8 500	700
	釜山 Busan	0.04	0.3	7 000	520
横滨 Yokohama	上海 Shanghai	0.06	0.3	7 000	450
	釜山 Busan	0.05	0.2	4 200	300

续表

支线航段 Feeder line		干扰概率		干扰成本/万美元	
		Probability of interference		Cost of interference/Ten thousand US dollar	
		严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference	严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference
东京 Tokyo	上海 Shanghai 釜山 Busan	0.09 0.02	0.3 0.2	7 500 4 000	400 230
厦门 Xiamen	香港 Hong Kong 盐田 Yantian	0.07 0.06	0.4 0.2	6 000 6 700	400 300
赤湾 Chiwan	香港 Hong Kong 盐田 Yantian	0.08 0.05	0.4 0.2	6 500 8 000	500 550
高雄 Kaohsiung	香港 Hong Kong 盐田 Yantian	0.06 0.08	0.1 0.2	8 500 6 000	600 300
马尼拉 Manila	香港 Hong Kong 盐田 Yantian	0.05 0.05	0.2 0.3	7 000 6 500	380 400
林查班 Laem Chabang	新加坡 Singapore 弗里曼特尔 Fremantle	0.07 0.05	0.2 0.3	5 500 6 000	350 750
胡志明 Ho Chi Minh	新加坡 Singapore 弗里曼特尔 Fremantle	0.04 0.03	0.2 0.1	6 000 7 000	400 330
巴生 Port Klang	新加坡 Singapore 弗里曼特尔 Fremantle	0.01 0.05	0.1 0.2	5 500 4 000	420 150
雅加达 Jakarta	新加坡 Singapore 弗里曼特尔 Fremantle	0.01 0.03	0.2 0.1	8 000 6 000	620 350
阿德莱德 Adelaide	新加坡 Singapore 弗里曼特尔 Fremantle	0.03 0.03	0.2 0.1	5 200 5 500	340 300
墨尔本 Melbourne	新加坡 Singapore 弗里曼特尔 Fremantle	0.04 0.03	0.3 0.3	4 800 3 500	210 200
悉尼 Sydney	新加坡 Singapore 弗里曼特尔 Fremantle	0.06 0.06	0.3 0.2	6 600 4 000	520 100
布里斯班 Brisbane	新加坡 Singapore 弗里曼特尔 Fremantle	0.01 0.04	0.5 0.2	5 000 8 500	800 550
金奈 Chennai	科伦坡 Colombo 科钦 Cochin	0.08 0.06	0.4 0.3	8 800 7 300	720 550
什瓦 Sheva	科伦坡 Colombo 科钦 Cochin	0.1 0.03	0.5 0.1	7 500 8 000	900 300
那瓦 Nhava	科伦坡 Colombo 科钦 Cochin	0.06 0.02	0.2 0.3	6 000 6 500	450 250
吉大 Chittagong	科伦坡 Colombo 科钦 Cochin	0.04 0.04	0.2 0.6	6 800 5 000	220 400
阿里山 Jebel Ali	塞拉莱 Salalah 吉达 Jeddah	0.01 0.08	0.1 0.3	6 800 4 500	200 100
卡拉奇 Karachi	塞拉莱 Salalah 吉达 Jeddah	0.04 0.04	0.2 0.1	4 500 8 000	260 400
亚喀巴 Aqabah	塞拉莱 Salalah 吉达 Jeddah	0.06 0.02	0.2 0.4	5 000 6 800	300 100
索卡那 Sokhna	塞拉莱 Salalah 吉达 Jeddah	0.04 0.05	0.3 0.3	5 500 5 000	300 400
泰晤士 Thames port	南安普顿 Southampton 鹿特丹 Rotterdam	0.03 0.07	0.2 0.3	7 000 9 000	400 800
勒阿弗尔 Le Havre	南安普顿 Southampton 鹿特丹 Rotterdam	0.04 0.08	0.1 0.3	8 000 5 500	300 500
泽布吕赫 Zeebrugge	南安普顿 Southampton 鹿特丹 Rotterdam	0.05 0.07	0.2 0.3	6 000 7 000	250 600

续表

支线航段 Feeder line		干扰概率		干扰成本/万美元	
		Probability of interference		Cost of interference/Ten thousand US dollar	
		严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference	严重干扰 Severe interference	一般干扰 General interference
安特卫普 Antwerp	南安普顿 Southampton	0.08	0.2	6 500	450
	鹿特丹 Rotterdam	0.06	0.5	5 500	700
不莱梅 Bremerhaven	南安普顿 Southampton	0.09	0.2	6 000	450
	鹿特丹 Rotterdam	0.08	0.4	7 500	800
汉堡 Hamburg	南安普顿 Southampton	0.08	0.3	7 000	350
	鹿特丹 Rotterdam	0.04	0.1	7 500	650

利用 LINGO 11.0 对文中整数二次规划模型进行求解,得到全局最优解的目标值为 40 266.00。该班轮运输公司在目标区域开展集装箱班轮运输服务的最优枢纽港选择方案为区域 1:釜山;区域 2:盐田;区域 3:弗里曼特尔;区域 4:科伦坡;区域 5:吉达;区域 6:鹿特丹。以区域 1 为例,所有喂给港及另一候补枢纽港上海与枢纽港釜山港相连,且不得直接与其他区域港口相连,其他区域同理。该网络设计方案能够最有效地应对干扰,受干扰影响的程度最小。

## 4 结论

本文研究轴辅式网络设计问题中的枢纽港选择问题,基于网络脆弱性的概念,以干扰情景发生的概率及干扰成本计算港口及各航段的脆弱性,进而以网络整体脆弱性最小为目标函数,构建整数二次规划模型。在网络设计时考虑网络可能面临的干扰,以期设计具备抗干扰能力的轴辅式网络,通过算例结果表明,模型在选择脆弱性最低的区域枢纽港方面具有可行性和有效性。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] WANG T, MENG Q, NIU B, et al. Hub-and-spoke liner shipping network design with demand uncertainty [C] // Proc. Of International Forum on Shipping, Ports and Airports [C]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2013: 98-109.
- [2] AN K, LO H K. Ferry service network design with stochastic demand under user equilibrium flows [J]. Transportation Research Part B, 2014, 66: 70-89.
- [3] MULDER J, DEKKER R. Methods for strategic liner shipping network design [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235: 367-377.
- [4] 钟铭, 管峰, 余璇, 等. 集装箱班轮轴辐式网络区间模型 [J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(4): 49-54.
- [5] HSIEH C H. Disaster risk assessment of ports based on the perspective of vulnerability [J]. Nat Hazards, 2014, 74(2): 851-864.
- [6] HSIEH C H, TAI H H, LEE Y N. Port vulnerability assessment from the perspective of critical infrastructure interdependency [J]. Maritime Policy & Management, 2014, 41(6): 589-606.
- [7] DUCRUET C, LEE S W, NG A. Centrality and vulnerability in liner shipping networks: revisiting the Northeast Asian port hierarchy [J]. Maritime Policy & Management, 2010, 37(1): 17-36.
- [8] BERLE O, ASBJORNSELT B E, RICE J B. Formal vulnerability assessment of a maritime transportation system [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96(6): 696-705.
- [9] LAXE F G, SEOANE M J F, MONTES C P. Maritime degree, centrality and vulnerability: port hierarchies and emerging areas in containerized transport (2008—2010) [J]. Journal of Transport Geography, 2012, 24: 33-44.
- [10] 武佩剑. 集装箱班轮航运网络可靠性建模与仿真研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

(责任编辑 陈敏 英文审校 周云龙)