

基于多模式货运方式配流的港区吞吐量预测研究

随新鑫¹, 刘俚宁¹, 汪义路¹, 刘小玲^{1,2*}, 叶骐铭¹, 周旭江³, 叶晓飞^{1,2}

(1.宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2.宁波市港口贸易合作与发展协同创新中心, 浙江 宁波 315211;
3.慈溪市交通运输综合服务中心, 浙江 宁波 315302)

摘要:以货运量调查为基础, 分析货运 OD 特征, 建立考虑道路运输网、内河运输网、海上运输网的多模式货运网络分配模型, 采用 Dijkstra 算法求解和分配影响区内货运需求 OD 点对, 得出多模式网络的运量分布, 并以港区作为枢纽节点, 推算出港区吞吐量大小. 最后, 以慈溪杭州湾港区为例, 应用分配模型推算港区吞吐量. 结果表明: 2025 年慈溪杭州湾港区总吞吐量将达到 51.44×10^6 t, 2030 年慈溪杭州湾港区总吞吐量将达到 62.63×10^6 t, 多模式分配方法为港区建设可行性分析提供了量化方法和决策依据.

关键词: 交通运输工程; 港口吞吐量; 超级网络; Dijkstra 算法

中图分类号: U691.71

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 03-0089-05

随着“一带一路”、长江经济带、大湾区等国家发展战略实施, 沿海地区的新一轮开发与开放迎来重要契机, 亟需配给与之相对应的港区规划、建设与管理水平. 港区吞吐量是港口规划、建设与定位的定量指标, 合理精确预测吞吐量大小可为港区规划、建设与定位提供必要的量化依据和决策支持. 目前港区吞吐量预测已取得了许多研究成果, 如通过宏观与微观影响因素分析, 定性预测吞吐量变化趋势^[1]; 利用回归分析法、时间序列法和灰色模型法建立港口吞吐量和多种影响因素关系预测模型^[2-3]; 尝试应用人工智能法(BP、RBF、EIman 神经网络^[4-9]、支持向量机^[10]、粗糙集等^[11-12])建立基于历年数据的吞吐量预测模型, 积极推演已建港区吞吐量时变规律, 但难以用于新建港口吞吐量量化分析. 然而, 已有港区吞吐量预测方法多集中于定性分析和水运单模式定量分析, 尤其是随着多式联运网络^[13-16]的形成, 海运网络、陆运网络和内河运输网络在空间上逐渐融合成为立体交通网络, 而以多模式综合运输网络为构筑对象的货运流量分配方法还很欠缺, 不利于分析多模式网络容量和性能. 因此, 有必要以多式联运为连

接点, 以多模式综合运输网络为对象, 搭建海上运输、内河运输、陆路运输融合立体交通分层网络模型, 研究货运流量分配与分布情况, 推演港口吞吐量规模, 以满足多模式综合运输网络货运需求预测的实践需要, 为港区吞吐量精确预测提供新思路和新方法, 为港区规划、建设、定位以及发展趋势提供理论依据和技术支持.

1 多网络融合的吞吐量预测方法

1.1 多模式货运超级网络建模

本文所研究的多模式货运网络^[13]包括陆路运输网、内河运输网、海上运输网三类. 如图 1 所示, 立体综合交通网络构筑思路如下:

(1)基于货运数据、专家评选以及运输网络规划, 聚类筛选出货运陆路主干道路、内河航道以及海上航道, 构建货运总网络.

(2)构建各货运方式子网络. 运用图论方法, 分析不同类型货物运输路径的运输方式与运输阻抗, 通过抽象实际道路运输网、内河运输网和海上运输网中的主干路段及交叉口、水运线路和航运线路及交叉枢纽转换为货运子网的节点和弧段, 从

收稿日期: 2021-06-10.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY20E080011); 浙江省公益技术应用研究项目(LGF18E090005); 国家重点研发计划(2017YFE9134700).

第一作者: 随新鑫(1997-), 女, 河北衡水人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划与管理. E-mail: suixinliu123@163.com

*通信作者: 刘小玲(1988-), 女, 浙江宁波人, 博士/讲师, 主要研究方向: 桥梁与隧道工程. E-mail: liuxiaoling@nbu.edu.cn

而搭建陆路运输、内河运输以及海上运输子网。

(3)将港区、道路货运、内河港口等枢纽对应为货运虚拟节点,生成虚拟联运弧,代表不同货运方式之间的多式联运关系,定义运输方式转换的枢纽或节点阻抗,联系形成完整的子网络。

(4)将从起点运输至附近的货运网络节点定义为“上网”,将从网络节点运输至讫点定义为“下网”,“上下”网以虚拟弧(阻抗可根据装卸、等待等消耗资源来确定)方式进行 OD 点对与网络节点的链接。

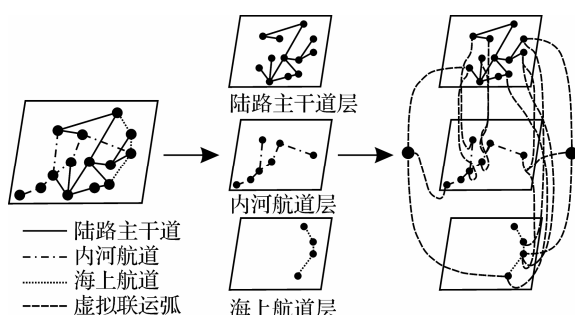


图1 多模式货运超级网络的构建思路

图2则明确了各货运模式子网的构成要素。道路运输网络节点为主干道路交叉口、收费站以及与港口联运点,内河运输网络节点为内河货运港口集散点,海上运输网络节点为海上货运港口集散点。道路运输网络、内河运输网络和海上运输网络边依次为道路路段、内河运输航道区段以及海上运输航道区段。各边均为实链接,统称运输弧。

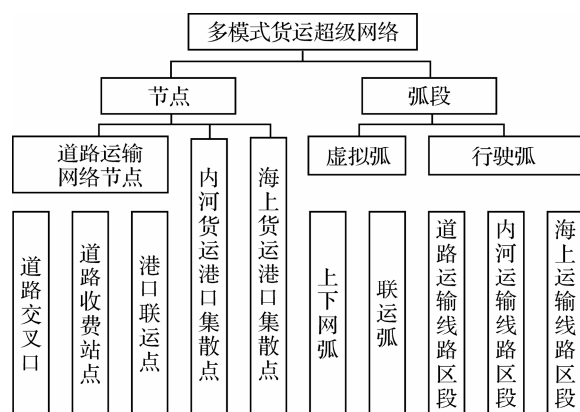


图2 多模式货运超级网络构成要素

针对多式联运行为,通过虚拟联运弧将不同运输网络上的节点连接,以体现货物联运过程。不同于客运和铁路货运,道路货运和水上货运由于其货物编组较为复杂,通常采用直达的运输方式,

故不需要考虑同运输网络之间的跨线路运输。联运弧和上下网弧均为虚链接,统称为虚拟弧。

因此通过节点弧模型,构建如图3所示的多模式货运网络拓扑结构。

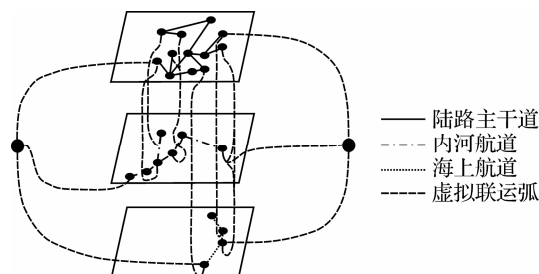


图3 多模式货运超级网络拓扑图

有向图 $G=(N, V, A, B, C)$ 。其中: N 为层数集,表示货运超级网络中的货运模式数,文中有三层。 V 为节点集,包括道路运输网络节点、内河运输网络节点和海上运输网络节点,文中分别用 r 、 w 、 s 表示,即 $V=V_r \cup V_w \cup V_s$ 。 A 为上、下网弧集,分别代表到达以及离开货运网络的上下网过程,用 i 和 o 表示,即 $A=A_i \cup A_o$ 。 B 为运输弧集,表示运输节点间各货运方式的运输区段,文中分别用 r' 、 w' 、 s' 表示道路运输线路区段、内河运输航道区段和海上运输航道区段。即 $B=B_r' \cup B_w' \cup B_s'$ 。 C 为联运弧集,表示货物在不同运输网络间联运。

1.2 多模式货运网络货运量分配方法

通过计算多模式货运超级网络中各弧段的广义成本,设计相应路径选择算法,对整体货运需求进行分配,最终推算出网络上的货运量分布。

1.2.1 广义阻抗模型分析

多模式货运超级网络上的路径由不同运输方式子网上的弧段以及各子网之间的联运虚拟弧构成,可称其为货运超路径。货物运输超路径的广义阻抗计算公式可用下式描述:

$$F_k = V_{\text{VOT}} T_k + C(L_k, P_k), \quad (1)$$

式中, k 表示货运超路径; F_k 为广义成本值; V_{VOT} 为货运时间价值,计算方法为:

$$V_{\text{VOT}} = P / (480D), \quad (2)$$

式中, P 为货物平均收入; D 为运输天数。

T_k 为完成全部货运超路径所需要花费的全部广义阻抗,由各货运阶段所花费的广义时间组成,具体由上下网运输时间 t_n 、站点调整时间 t_m 、联运工作时间 t_w 、货物位移时间 t_s 以及联运惩罚附加值

P' 的加权求和, 计算方法为:

$$T_k = w_n t_n + w_m t_m + w_w t_w + w_s t_s + P'. \quad (3)$$

$C(L_k, P_k)$ 为完成全部货运超路径的货运成本, 与各货运方式所设置的计费方式相关, 一般由货运里程 L_k 以及单位运价 P_k 决定.

针对多模式货运超级网络各组成弧段, 其广义阻抗的计算方法如下:

(1) 运输弧广义阻抗包含货运工具的行驶时间和运输里程费用, 计算方法如下:

$$F_b = V_{\text{TOT}} w_s D_b / v_b + c_b D_b, b \in B_r \cup B_w \cup B_s, \quad (4)$$

式中: F_b 为道路、内河、海上运输弧的广义成本; w_s 为位移时间权重; D_b 为该弧段起终点站的实际行驶里程; v_b 为该弧段对应运输工具的行驶速度; c_b 为该弧段对应运输方式的里程计费标准.

(2) 联运弧广义阻抗包括货物在站的装卸时间、等待时间、联运惩罚附加值以及联运费用, 计算方法为:

$$F_c = V_{\text{TOT}} (w_w (t_{c1} + t_{c2}) + P'_c) + C_c, c \in C, \quad (5)$$

式中: F_c 为联运弧的广义阻抗; w_w 为联运时间权重; t_{c1} 为该站货物装卸时间; t_{c2} 为该站货物装载完成至运输工具发出的等候时间; P'_c 为联运惩罚附加值; C_c 为联运费用支出.

(3) 上下网弧广义阻抗包含上下网运输时间、等待时间以及运输里程费用, 计算方法如下:

$$F_a = V_{\text{TOT}} w_n (D_a / v_a + t_a) + c_a D_a, a \in A_i \cup A_o, \quad (6)$$

式中: F_a 为上下网弧广义阻抗; w_n 为上下网时间权重; D_a 为该弧段起终点站的实际行驶里程; v_a 为该弧段货车的行驶速度; t_a 为起点站或下网站货物装载完成至货车发出的等候时间; c_a 为该弧段货车的里程计费标准.

1.2.2 路径选择与货运量分配算法

Dijkstra 算法用于对货运网络的 OD 点对最优路径搜寻, 步骤如下:

步骤 1 设置已求出最优成本的顶点集合 S 和未确定最优成本的顶点集合 U .

步骤 2 集合 S 中放入源点 s , 剩余顶点放入集合 U . 计算集合 U 中各顶点与源点 s 的阻抗. 距离计算规则: 顶点 a 、 b 相邻, 则成本为 (a, b) 对应金额, 否则成本为 ∞ .

步骤 3 选取与源点 s 成本最优的顶点 k , 将顶点 k 放入集合 S , 同时移除顶点 k .

步骤 4 更新集合 U 中各顶点到源点 s 的阻抗.

步骤 5 重复步骤 3 和步骤 4, 直至全部顶点被放入集合 U .

如图 4 所示, 首先导入初始数据, 其中包含各种货运 OD 数据、多模式运输方式的运输规则、线路等信息; 其次, 依据多模式货运网络阻抗模型, 计算各弧段的广义阻抗; 利用 Dijkstra 算法搜索最优货运 OD 路径, 按全有全无方法进行分配; 然后, 统计各断面、各运输方式货运量分布, 结束分配; 最后, 推算港区相关进出货运流量得出港区吞吐量.

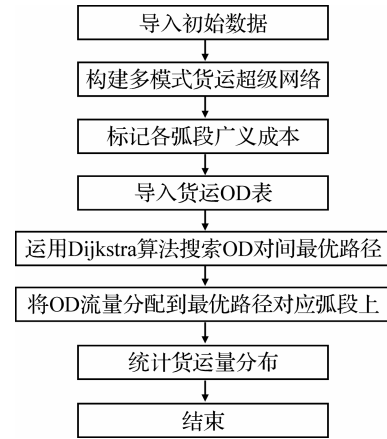


图4 货运量分配流程图

2 实例验证分析

2.1 货物运输 OD 特征分析

2.1.1 慈溪地区发出货物概况

2020 年慈溪地区发出货物共 5.98×10^6 t, 按照货物类型划分主要分为机械设备电器类货物 6.17×10^5 t、矿建材料及水泥类货物 1.71×10^6 t、轻工医药产品类货物 1.56×10^6 t 以及其他货物 2.09×10^6 t, 分别占比 10.34%、28.68%、26.04% 及 34.94%.

2020 年在宁波慈溪地区发出的机械设备电器类货物中, 运输至慈溪本市的机械设备电器货运量占总运量 50.40%, 运输至其他地区中接收货运量最多的是北仑区, 占 44.73%; 在发出的矿建材料及水泥中, 运输至慈溪市本市的货运量占总运量的 50.23%, 运输至其余地区的接收货运量最多的是北仑区, 占 51.81%; 在发出的轻工医药产品中, 运输至慈溪本市的货运量占总运量的 50.40%, 运输至其余地区接收货运量最多的是北仑区, 占

44.73%; 在发出的其他货物中, 运输至慈溪本市的占总运量的 51.16%, 运输至其余地区接收货运量最多的是北仑区, 占 78.30%.

2.1.2 慈溪地区到达货物概况

2020 年慈溪地区到达货物按照货物类型划分主要分为机械设备电器类货物、矿建材料及水泥类货物、轻工医药产品类货物、金属矿石类货物、煤炭及制品类货物、鲜活农产品类货物以及其他货物, 分别占比 9.00%、47.15%、13.90%、0.61%、0.40%、0.36%以及 28.60%.

2020 年在运达慈溪地区的机械设备电器中, 由慈溪本市产生的货运量占总运量的 50%, 其余地区产生货运量最多的是鄞州区, 占 43.37%; 在运达慈溪地区的矿建材料及水泥中, 由慈溪本市产生的货运量占总运量的 26.17%, 其余地区产生货运量最多的是余姚市, 占 77.71%; 在运达慈溪地区的轻工医药产品中, 由慈溪本市产生的货运量占总运量的 91.05%, 其余地区产生货运量最多的是拱墅区, 占 76.61%; 在运达慈溪地区的其他货物中, 由慈溪本市产生的货运量占总运量的 53.54%, 其余地区产生货运量最多的是北仑区, 占 61.20%.

2.2 吞吐量结果分析

对慈溪杭州湾港区周边的道路、内河、航运网络进行抽象和简化, 建立拥有 68 个交通小区和高等级道路路网、内河航道、海运航道以及相应节点组成的多模式综合运输网络, 并以货运调查数据为基础设置 OD 货运量数据. 基于上述数据, 计算杭州湾港区周边的货流分布.

弧段断面货运量统计结果见表 1, 其中, 101~143 为高等级公路网, 301~309 为内河航道网, 401~405 为海运航道网, 分别得到各条海运、内河、公路运输线路上的断面流量, 并统计进出港区流量得到吞吐量预测值. 若杭州湾港区实现江海联运、海公联运等多种联运方式, 分配结果表明, 慈溪杭州湾港区总吞吐量 2025 年将达到 51.44×10^6 t, 2030 年将达到 62.63×10^6 t, 2050 年将达到 153.71×10^6 t. 由此可见, 杭州湾港区预测吞吐量较大, 符合建港要求, 本文提出的多模式货运分配方法为港区建设可行性分析提供了量化方法和决策依据.

分别计算多模式货运网络和单一模式网络下

表 1 路段货运量计算结果

编号	货运量	编号	货运量	编号	货运量
101	963 597	120	2 968 741	139	656 200
102	870 633	121	3 351 648	140	1 168 754
103	1 327 682	122	3 126 934	141	585 183
104	3 463 142	123	1 267 468	142	2 869 312
105	1 097 461	124	1 267 468	143	8 356 076
106	2 248 760	125	865 746	301	5 067 564
107	1 825 745	126	4 509 272	302	3 026 473
108	1 654 875	127	698 431	303	2 154 468
109	3 381 954	128	1 836 847	304	1 896 741
110	6 012 362	129	769 135	305	2 085 739
111	4 175 252	130	651 487	306	1 087 416
112	3 822 769	131	823 641	307	1 026 524
113	1 164 873	132	776 473	308	1 639 815
114	1 002 060	133	1 369 461	309	1 950 611
115	1 670 101	134	1 458 365	401	138 594
116	587 346	135	3 961 067	402	601 865
117	1 257 864	136	3 801 067	403	652 687
118	653 691	137	1 076 584	404	1 216 000
119	2 756 173	138	1 697 200	405	3 603 376

的 MSE、RMSE、MAE、MAPE 值, 由表 2 的可靠性分析可见, 与单一运输模式相比, 多模式货运网络模型的 MSE、RMSE、MAE、MAPE 值均更小, 说明该模型预测精度更高, 能比较精准预测港口的吞吐量, 为吞吐量的预测提供了新的方式.

表 2 多模式货运网络的可靠性分析

货运模式	MSE	RMSE	MAE	MAPE
单一模式网络	0.345 2	0.587 5	0.235 8	0.198 5
多模式货运网络	0.263 5	0.513 3	0.126 4	0.123 7

3 结论

本文以宁波市货运量调查为基础, 分析了货运总量和种类特征, 构建了融合陆路运输、内河运输、海上运输三网的多模式货运网络分配模型, 设计了 Dijkstra 算法求解, 得到多模式货运量分布情况, 推算得出慈溪杭州湾港区吞吐量大小. 结果表明: 2025 年慈溪杭州湾港区总吞吐量将达到 51.44×10^6 t, 预测吞吐量较大. 综合宏观因素并从吞吐量量化值角度评判, 将杭州湾港区纳入宁波舟山港口体系统一规划建设是可行且有重大意义的.

参考文献:

- [1] 刘逸群, 曾鸣. 港口集装箱吞吐量预测方法研究[J]. 物流工程与管理, 2018, 40(8):85-87.
- [2] 韩以伦, 徐新新. 基于 ARIMA 和 GM 模型的青岛港货物吞吐量预测研究[J]. 水道港口, 2019, 40(2):241-248.
- [3] 杜柏松, 艾万政, 胡林燕, 等. 基于优化灰色马尔科夫动态模型的上海港集装箱吞吐量预测[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(1):76-81.
- [4] Ping F F, Fei F X. Multivariant forecasting mode of Guangdong Province Port throughput with genetic algorithms and back propagation neural network[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 96: 1165-1174.
- [5] 朱庆辉, 勾翔宇. 基于小波神经网络的上海港集装箱吞吐量预测[J]. 中国水运, 2019(6):25-27.
- [6] 李长安, 卢雪琴, 吴忠强, 等. 基于蚁群算法优化反向传播神经网络的港口吞吐量预测[J]. 计量学报, 2020, 41(11):1398-1403.
- [7] 李广儒, 朱庆辉. 基于 Elman 神经网络的港口货物吞吐量预测[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(6):8-12.
- [8] 李广儒, 张新, 朱庆辉. 基于 Adaboost 的改进 Elman 神经网络港口吞吐量预测方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(5):1-5.
- [9] 周宇乐. 基于 EMD-ESN-AdaBoost.TSF 组合模型的港口集装箱吞吐量预测[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [10] Niu M F, Hu Y Y, Sun S L, et al. A novel hybrid decomposition-ensemble model based on VMD and HGWO for container throughput forecasting[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 57:163-178.
- [11] 史晓丹. 基于粗糙集与遗传规划的港口吞吐量预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [12] Eskafi M, Kowsari M, Dastgheib A, et al. A model for port throughput forecasting using Bayesian estimation[J]. Maritime Economics & Logistics, 2021, 23(2):348-368.
- [13] 吴丽霞, 王昊, 付旻, 等. 基于超级网络的多模式公共交通网络客流分配技术研究[C]//第十二届中国智能交通年会大会论文集. 常熟, 2017:322-332.
- [14] 潘恒彦, 裴玉龙. 基于多模式交通网络的居民就医可达性研究[J]. 大连交通大学学报, 2020, 41(6):1-5.
- [15] 祝佳祥. 基于超图的多模式交通网络分配建模研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [16] 金英群. 城市多模式公交网络布局结构特性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.

Port throughput forecast based on multi-mode freight distribution

SUI Xinliu¹, LIU Lining¹, WANG Yilu¹, LIU Xiaoling^{1,2*}, YE Qiming¹, ZHOU Xujiang³, YE Xiaofei^{1,2}

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.Ningbo Port Trade Cooperation and Development Collaborative Innovation Center, Ningbo 315211, China;

3.Cixi Transportation Integrated Service Center, Ningbo 315302, China)

Abstract: In this paper, based on the traffic volume survey, and analysis of the freight OD characteristics, a multimodal freight network distribution is modeled by taking into account the road transport network, inland transport network, and maritime transport network. Dijkstra algorithm is used to solve and allocate OD point pairs affecting the area, and the traffic volume distribution of the multi-mode network is built. The port area is taken as the hub node to calculate the throughput size in the port area. Finally, taking the Hangzhou Bay port area as an example, the throughput of the port area is calculated using the proposed allocation model. The results procast that the total throughput of Cixi Hangzhou Bay Port Area will reach 51.44×10^6 t in 2025 and 62.63×10^6 t in 2030 respectively. The multi-mode allocation method provides quantitative method and decision-making basis for the feasibility analysis of port area construction.

Key words: traffic and transportation engineering; port throughput; super network; Dijkstra algorithm

(责任编辑 章践立)