



多级航道通过能力的数学模型研究

丁涛, 徐湘文

(武汉理工大学交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 航道承载着具有 OD 点对的船舶组成的交通流, 航道通过能力表示航道的交通承载能力。将多级航道中各港口视为网络模型中的节点, 各航段视为网络模型中的连线, 考虑与航道通过能力密切相关的航道货流 OD 结构, 建立了以任意起点港和终点港之间货流量为变量, 各货流量或货物周转量之和最大为目标函数, 航段通过能力、港口设计通过能力及碍航建筑物通过能力为限制条件的 OD 结构网络模型, 来测算多级航道通过能力。

关键词: 网络模型; 多级航道; 通过能力; OD 结构

中图分类号: U 162.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0090-03

Calculation of multi-stage waterway's transit capacity by mathematical model

DING Tao, XU Xiang-wen

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The waterway is bore with vessels, whose OD points compose the traffic flow. The waterway transit capacity is the waterway bearing capacity of traffic. To study waterway transit capacity, we introduce the network model, regarding the ports as the nodes and the legs as the lines in the network mode. Considering the cargo flow OD structure, which is closely related to the channel transit capacity, we establish the network model with OD structure, in which the cargo flows between the arbitrary original point and destination port is the variables, the sum of all goods flows or freight turnovers is the objective function, subject to the leg transit capacity, port throughput capacity and obstructing transit capacity constraints.

Key words: network model; multi-stage waterway; transit capacity; OD structure

国外关于内河航道通过能力的研究最为著名的是 1969 年在第 22 次国际航运会议上提出的以欧洲标准驳船为计算船型、考虑船只密度增大、航行阻力增加及港口装卸不均衡带来运量折减、船舶减载、减速等因素影响的西德公式^[1]。国内, 杨家琪等通过对航道通过能力的定义及其影响因素的分析, 运用网络理论, 提出了系统测算航道(网)通过能力的数学模型, 并据此提出了各等级航道的通过能力数量级^[2]。王宏达公式^[3]提出了适用于内河航道网及运河等限制性航道通过能力的计算方法。卞艺杰提出了基于船舶交通流的航

道通过能力的概念^[4]。董宇等引入交通流理论与船舶领域概念, 将航道中连续行驶的船舶视为船舶交通流, 对航道通过能力进行了研究^[5]。习朱俊等将跟驰理论引入航道通过能力的计算中, 从微观角度建立了航道通过能力的计算模型^[6]。孟宁等改进了对传统多浅段航道乘潮方式的计算方法, 应用离散事件仿真方法对航道通航条件及影响因素建立航道设计通过能力的计算模型^[7]。

对内河航道通过能力的研究虽然取得了一定进展, 但计算方法大多是已有经验公式, 或根据具体条件推导出一些公式, 部分学者对一些公式

收稿日期: 2013-11-09

作者简介: 丁涛(1964—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事港航与综合物流研究。

做了相应的修正, 试图使其更为接近实际情况, 但没有形成统一规范的模式。现有的航道通过能力计算方法, 均采用测算航道断面通过能力来测算整个航道通过能力, 这种方法只适应于航道等级一致时航道通过能力的计算, 而无法计算在各航段航道等级不一致时航道通过能力。OD 结构网络模型的方法, 可以用来测算多级航道通过能力。

1 多级航道通过能力的表征方式

对于由通过能力(容量)大小不同的航段组成的一条航道而言, 其航道通过能力, 是指考虑航段通过能力限制、港口吞吐能力限制、碍航建筑通过能力限制和航道货流 OD 结构的在单位时间(年、月、日或通航期, 通常以年为时间周期)内的航道总货流量(Q)或总货物周转量(M)。

航道上有 n 个港口, 第 i 个港口到第 j 个港口的货流量为 Q_{ij} ($Q_{ij} \geq 0$), 总货流量为 Q :

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (1)$$

l_{ij} 是第 i 个港口至第 j 个港口的距离, 第 i 个港口到第 j 个港口的货物周转量为 $l_{ij}Q_{ij}$, 总货物周转量为 M :

$$M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}Q_{ij} \quad (2)$$

2 航道通过能力限制

航道通过能力限制包括航段通过能力限制、港口吞吐能力限制、碍航建筑通过能力限制 3 个方面。

2.1 航段通过能力限制

若第 k 航段的最大通过能力为 C_k , 航段通过能力的限制条件为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \leq C_k \quad i \leq k \text{ 且 } j > k, i, j, k \in N^* \quad (3)$$

在毫不妨碍交通的航段中, 标准船舶组成的理想船舶交通流, 在单位时间内通过该航道断面的最大船舶货流量叫做该航段的通过能力, 以载质量表示。根据交通流理论计算的航道理论通过能力 C_k 为:

$$C_k = (swtQ_{\max})/10\ 000 \quad (4)$$

式中: C_k 为航道理论通过能力(万 t/d); s 为航道断面允许并列航行的船舶数; w 为标准船舶吨位; t 为日通航时间; Q_{\max} 为船舶交通流最大流量(艘/h)。其中:

$$Q_{\max} = \begin{cases} v_f K_s & K_m = K_s > \frac{1}{2} K_j \\ \frac{1}{4} \cdot \frac{K_j^2}{K_j - K_s} \cdot v_f & K_s < K_m = \frac{1}{2} K_j \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_f 为船舶畅行速度; K_s 为船舶交通流的转折密度, 即航道中驾驶员可以自由选择航速的最大船舶密度(艘/km); K_j 为船舶交通流的阻塞密度, 即航道上出现拥堵的最小船舶密度(艘/km)。

$$K_s = \frac{1\ 000}{\alpha L_0} \quad (6)$$

$$K_j = \frac{1\ 000}{(1 + \beta) L_0} \quad (7)$$

式中: L_0 为船舶长度; α 为船舶领域长轴参数^[5], 可取 5~6; β 为船舶间距系数, 取 0.5。

2.2 港口吞吐能力限制

若第 m 个港口的最大吞吐能力为 X_m , 港口吞吐量限制条件为:

$$\sum_{i=1}^n Q_{im} + \sum_{j=1}^n Q_{mj} \leq X_m \quad i, j, m \in N^* \quad (8)$$

式中: X_m 一般取港口设计的最大吞吐量。

2.3 碍航建筑物通过能力限制

若第 p 个碍航建筑物的年最大通过能力为 P_p , 碍航建筑物限制条件为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \leq P_p \quad i \leq p \text{ 且 } j > p, i, j, k \in N^* \quad (9)$$

碍航建筑物一般包括桥梁、水电站。

3 航道货流 OD 结构

航道 OD 结构是指航道中的起点港 O 点到终点港 D 点货流量构成的比例关系。根据 OD 结构的可变性, 航道通过能力问题可以分为固定 OD 结构的最大网络流问题和弹性 OD 结构的最大网络流问题。在水路货物运输需求中 OD 之间发生以及发生多少不是任意的, 而是与国家的工业布局、港

口腹地的产业结构、国家的经济发展水平等有着密切关联性。在一个较长时期内，土地利用格局与地区经济活动的变迁，会导致 OD 结构的变化；在较短的时期内，通常认为 OD 货流量分布又是相对固定的。通常所说的现状 OD 货流量是指现阶段的 OD 货流量的分布，在现阶段保持 OD 结构的不变性即固定 OD 结构。

3.1 航道货流 OD 结构的表示

对于多级航道拥有的货流 OD 结构，短期内可认为是固定的。考虑航道 $H = (N, A)$ ，其中 N 是航道结点（港口）集合， A 是有向航段集合。每个有向航段拥有一个固定容量 C 。对于有 n 个港口的多级航道上的货流量 Q 用具有货流 OD 结构的矩阵表示为：

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1n} \\ Q_{21} & Q_{22} & \cdots & Q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \cdots & Q_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： Q_{ij} 表示第 i 个港口到第 j 个港口的货物流量，当 $i = j$ 时， $Q_{ij} = 0$ 。

通过交通调查或 OD 结构推算可获得多级航道上如式(10)的货流 OD 结构，根据式(10)可以得出从结点 i 流入结点 j 的货流量对全部货流量的比

率 P_{ij} ，即 $P_{ij} = \frac{Q_{ij}}{\sum_i \sum_j Q_{ij}}$ ：

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中， $\sum_i \sum_j P_{ij} = 1$ 。

单位 OD 矩阵 P 描述了航道上的货流 OD 结构的比例关系。在某种 OD 结构下，航道的货流量承载能力得到充分发挥，容量达到最大，那么这样的 OD 结构就称为“理想 OD 结构”，此时，OD 结构与航道货流量达成最佳匹配。

可达到最大 OD 货流量 $Q = \{Q_{ij}\}$ 是总货流量 T 与单位 OD 矩阵 P 的乘积，写成

$$Q = TP \quad (12)$$

或者

$$Q_{ij} = TP_{ij} \quad (13)$$

3.2 航道长度限制

多级航道总长 L ，各航段长度是 l_{ij} ，那么，总的距离应满足下列条件：

$$\sum \sum l_{ij} p_{ij} \leq L \quad (14)$$

4 基于 OD 结构网络模型的多级航道通过能力计算模型

多级航道通过能力计算模型用货流量表征为：

$$\begin{cases} \text{Max } Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (i, j, n \in N^*) \\ Q_{ij} = TP_{ij} \\ 0 \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \leq C_k \quad i \leq k \text{ 且 } j > k, i, j, k \in N^* \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n Q_{im} + \sum_{j=1}^n Q_{mj} \leq X_m \quad i, j, m \in N^* \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \leq P_p \quad i \leq p \text{ 且 } j > p, i, j, k \in N^* \\ \sum \sum l_{ij} p_{ij} \leq L \end{cases} \quad (15)$$

用货物周转量表征为：

$$\begin{cases} \text{Max } Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij} Q_{ij} \quad (i, j, n \in N^*) \\ Q_{ij} = TP_{ij} \\ 0 \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \leq C_k \quad i \leq k \text{ 且 } j > k, i, j, k \in N^* \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n Q_{im} + \sum_{j=1}^n Q_{mj} \leq X_m \quad i, j, m \in N^* \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \leq P_p \quad i \leq p \text{ 且 } j > p, i, j, k \in N^* \\ \sum \sum l_{ij} p_{ij} \leq L \end{cases} \quad (16)$$

5 结语

1) 为解决通过能力（容量）大小不同的航段组成的多级航道通过能力的计算问题，本文研究了通过构建 OD 结构网络模型，用货流量和货物周转量来表征航道通过能力。

(下转第 103 页)