



基于交通波理论的混合水域通航效率研究*

孙玉萍, 吴善刚, 肖英杰, 郑剑, 张浩

(上海海事大学商船学院, 航运仿真技术教育部工程研究中心, 上海 201306)

摘要: 为研究船舶在混合水域内船舶靠离泊作业对其航道通航效率的影响, 以交通波理论为基础, 结合船舶交通流特性, 建立了混合水域船舶交通流波动模型, 进而解释船舶靠离泊作业时船舶交通流的集聚和消散过程, 根据船舶交通量、航速、船舶流密度和靠离泊作业时间, 建立混合水域干扰影响范围与时间计算模型。以福姜沙南水道为例进行模型验证, 进行安全条件下的混合水域船舶通航效率量化研究。

关键词: 混合水域; 通航效率; 交通波模型; 干扰水域; 集结波; 消散波

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0126-05

Navigation efficiency in mixed waters based on traffic wave theory

SUN Yu-ping, WU Shan-gang, XIAO Ying-jie, ZHENG Jian, ZHANG Hao

(Engineering Research Center of Shipping Simulation, Ministry of Education, Merchant Marine College,
Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To study the influence of ship's berthing and departing operation in the mixed waters on its navigable efficiency, we establish the marine traffic flow volatility model in mixed areas based on traffic wave theory and combining with the traffic flow characteristics of the ship to explain further the vessel traffic flow gathering and dissipating process during berthing and departing operations. According to the vessel traffic volume, speed, the current density of the ship and relying on the time from the mooring operations, we establish the mixed-water interference range & time model. Taking the Fujiangsha south channel for example, we carry out a research on the vessel navigation efficiency in mixed waters under the safe condition.

Key words: mixed waters; navigation efficiency; traffic wave model; interference waters; build-wave; evanescent-wave

长江口至南京以下12.5 m的深水航道从太仓上延至南京, 全长约280 km。该段水域内的深水航道资源宝贵, 为充分利用良好的自然条件, 将同一片水域赋予两种不同的功能, 由此造成航道与回旋水域重合的情况越来越多, 使得这类水域的通航局面更加复杂, 影响航道的通过能力^[1]。随着长江下游长江口至南京港船舶交通的日益繁忙, 船舶交通量迅速增长以及船舶类型日趋多样导致该航区内的通航效率问题凸显, 因此船舶通航效率研究的重要性日渐明显。

近年来, 通航安全与通航效率在水上交通领域内备受关注, 国内外学者对此进行了诸多研究和分析, 侧重于根据船舶交通流特征以及航道条件计算航道通过能力。研究分析采用的水上交通流理论主要有确定性排队理论和交通波理论。张蕾^[1]利用现实的航道条件和交通状况, 使用代表船型, 利用仿真分析航道通过能力, 但研究只宏观地提出了改善提高航道通过能力的措施, 没有提出对通航效率的研究; 文元桥等^[2]在交通流特征和船舶行为的基础上研究港口公用航道的通过能

收稿日期: 2013-04-11

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51149001); 上海市教育委员会科研创新项目(11CX49)

作者简介: 孙玉萍(1989—), 女, 硕士研究生, 从事载运工具运用工程研究。

始加速前进时，产生的 u_w 为消散波；当 $\rho_2 > \rho_1$ 时，航道内船舶流密度增加，船舶开始减速前进时，产生的 u_w 为集结波。

2.2 线性 $u-\rho$ 模型下的船舶交通波模型

根据格林希尔的速度-密度线性关系，即

$$v = v_f(1 - \rho/\rho_j) \quad (5)$$

式中： v_f 为船舶自由流速度(km/h)； ρ_j 为船舶流阻塞密度(艘/km)。

$$q = wv_f(1 - \rho/\rho_j)\rho \quad (6)$$

引入船舶流标准化密度 η ，记 $\eta_i = \rho_i/\rho_j$ (7)

将以上关系式代入式(1)，得到交通波的另一形式：

$$\begin{cases} u_w = \frac{(q_2 - q_1)}{w(\rho_2 - \rho_1)} \\ u_w = v_f \left[1 - \left(\frac{\rho_2}{\rho_j} + \frac{\rho_1}{\rho_j} \right) \right] \\ u_w = v_f [1 - (\eta_1 + \eta_2)] \end{cases} \quad (8)$$

由式(6)可知，船舶交通波的波速在线性模型下主要和船舶流密度有关，通过标准化密度可以求出相应的混合水域内交通波波速。

假定在航道内船舶流密度与船舶平均速度成线性关系(图3)。

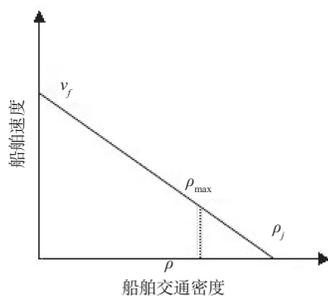


图3 船舶密度与速度关系曲线

在研究航道内交通波模型时，混合水域内船舶流密度的最大值不能达到阻塞密度 ρ_j ，因为在船舶条件以及航道条件的限制下船舶在排队过程中只能按照最低船速行驶，而且船舶之间必须保证安全行驶距离。船舶领域是任何一艘船舶保持航行安全所需的水域。船舶领域的大小或边界位置与后继船舶打算保持的安全通过距离直接有关^[8]。

在具有一定交通量的水域中，如果过分地限制船舶速度，就会增大交通密度；而适当增大交通

流速度，则会减小交通密度，对船舶流通有利。所以应采取合理的船舶速度，保持不太高的船舶密度，对提高交通量和增进航行安全都有益处^[9]。

2.3 航道理论最大密度 ρ_{max}

假定在毫不妨碍交通的航道中，只有相同性能、相同技术数据的船舶而组成的理想的行驶。航道基本通过能力计算公式为：

$$C_b = w\rho_{max}v \quad (9)$$

$$C_b = w \frac{1}{rs}v \quad (10)$$

式中： C_b 为航道基本交通容量； w 为航道宽度； ρ_{max} 为单位水道宽度上的理论最大船舶流密度； v 为船舶平均速度； r, s 为船舶领域的长短半径。

ρ_{max} 指航道中按一定的船舶避碰安全距离紧密排列后的船舶数， ρ_{max} 取决于船舶领域形状和大小以及领域的排列方式。根据日本学者藤井的研究，一般情况下，船舶领域的长轴为 $8L$ ，短轴为 $3.2L$ (L 为船舶长度)，当船舶减速航行于狭窄水域时，领域的长轴将为 $6L$ ，短轴为 $1.6L$ ^[10]。船舶领域有一定限度导致航道中船舶密度有一定限度。

3 集结波与启动波模型特例分析

3.1 集结波分析

考察在双向航道的混合水域内有一艘船舶需要在混合水域中进行靠离泊作业，该船舶靠离泊过程中其他后续船舶将不能通过该混合水域，且后续船舶需要减速前进，并且相互之间需要保持一定的安全距离。此时，船舶列队中的的头号船舶开始减速，并逐渐将船速降到最低，于是便有一个集结波从前向后在船舶队列中传播(图4)。

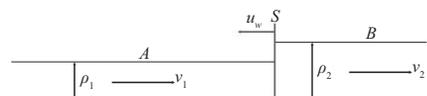


图4 船舶交通流中的集结波

设船队初始行驶平均速度为 v_1 ，船舶流密度为 ρ_1 ，标准化船舶流密度为 η_1 ，集结波传播过后，船队的平均行驶速度变为 v_2 ，船舶流密度变为 ρ_2 ，标准化船舶流密度变为1，于是由式(6)得

$$u_w = -v_f \frac{\rho_1}{\rho_j} \quad (11)$$

式 (11) 表明, 由于船舶在混合水域内靠离泊作业时产生的波阵面以 $-v_f \eta_1$ 的速度沿船队从前向后传播, 表明船舶排队, 负号表示波的传播方向与船队行驶方向相反。由于 v_f 在一定的航行条件下为常数, 所以波的传播速度 u_w 大小主要取决于初始船舶流的密度 ρ_1 。

3.2 消散波分析

混合水域内的需要靠离泊作业的船舶作业完成后, 回旋区域内航道可以正常通行。此时, 之前船舶队列中的头号船舶开始加速前进, 于是就有一个消散波在船队中从前向后传播 (图 5)。

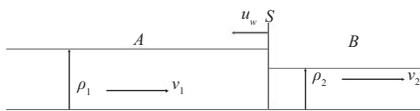


图 5 船舶交通流中的消散波

设船舶减速排队后的平均行驶速度为 v_2 , 船舶流密度为 ρ_2 , 标准化密度为 1, 波传过后, 速度变为 v_1 , 密度变为 ρ_1 , 标准化密度变为 ρ_1/ρ_2 , 则由式(6)得

$$u_w = -(v_f - v_2) \quad (12)$$

船舶刚开始加速产生的交通波为稀疏波, 稀疏波是弱扰动波, 因此 v_2 一般很小, 近似计算中可以忽略不计。于是加速船舶产生的交通波可以近似认为以 v_f 的速度沿船队从前向后传播, 负号表示波的传播方向与船队行驶方向相反, 表明船舶排队消散, 即

$$u_w = -v_f \quad (13)$$

3.3 干扰水域影响模型

根据混合水域内交通波的传播特性, 可以通过图 6 所示的航道干扰水域时空演化图描述混合水域占用后的船舶排队过程, 船舶靠离泊作业发生在 t_A 时刻, 距离为 L 的横断面上, 整个航道全部封堵, 产生集结波 W_{21} ; 在 t_B 时刻, 靠离泊作业完成, 混合水域开放通航, 产生消散波 W_{31} , 在 t_C 时刻, 干扰水域的影响全部消除, 航道内交通流恢复正常。

如图 6, 已知点 $A(t_A, L)$, $B(t_B, L)$, $D(t_C, L)$ 和集结波 W_{21} , 消散波 W_{31} , 根据几何代数关系, 可求出关键节点 C 处的坐标, 从而确

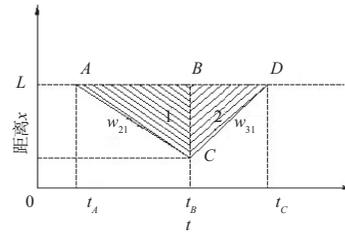


图 6 干扰水域影响时段内的船舶排队过程

定事故的空间交通影响范围和关键事件节点。

$$\begin{cases} L_{BC} = w_{21}(t_B - t_A) \\ L_{BC} = w_{31}(t_C - t_B) \end{cases} \quad (14)$$

$$t_C = \frac{L_{BC}}{w_{31}} + t_B \quad (15)$$

通过混合水域内船舶交通波传播特性分析, 可以得出干扰水域最长影响距离为:

$$L_{\max} = w_{21}(t_B - t_A) \quad (16)$$

干扰水域最长影响时间为:

$$T_{\max} = t_C - t_A \quad (17)$$

为获取混合水域在航道内的位置和船舶靠离泊作业发生的时刻与靠离泊过程需要的时间, 根据模型所计算的干扰水域最长影响距离和时间, 可以快速准确确定干扰水域的时空影响范围, 干扰水域的时空影响范围为水上交通管理决策与分析提供了可靠的依据。

3.4 算例分析

福姜沙南水道 (图 7) 位于福姜沙与东、南侧的陆岸之间, 该水道也是张家港港区, 船舶需要靠离泊作业时, 该混合水域将不能正常通行, 需等靠离泊船舶完成作业后才能安全通过, 考察航道长 3 350 m, 550 m。该水域内航道为单向航道, 简化靠泊过程。

1) 为了方便计算, 将该区域内船长换算为 100 m, 航道宽度取 500 m, 假设船舶靠离泊作业时间单次为 0.5 h, 船舶在该区域内航行的自由流航速 v_f 取 15 kn, 船舶正常航行时航速 v_1 为 12 kn/h, 换算为 22.2 km/h, 船舶减速后其航速 v_2 为 3 kn, 换算为 5.6 km/h, 计算船舶排队长度。 ρ_{\max} 最大船舶流密度:

$$\rho_{\max} = 1/(rs) = 1/(8L \times 3.2L) = 3.9 \text{ 艘/km}$$

$$\rho_{\max} \approx \rho_j$$

$$\rho_1 = \rho_j(1 - v_1/v_f)$$

