



内河航道航速限速分析

张 帅, 卫家骏

(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: 为提高航道的载运量, 以船舶流量最大为依据, 运用交通流理论和跟驰模型对航道船速进行分析求解。首先根据航道主要船舶比例数据得到航道的标准船载质量, 然后运用 matlab 拟合求出相应的标准船长, 再根据交通流理论和跟驰模型得到最佳的航速设置, 从而实现对船舶航速的优化分析。

关键词: 航道船速; 最大船舶流量; 交通流; 跟驰模型

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0165-03

Ship speed optimization in inland channel

ZHANG Shuai, WEI Jia-jun

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To optimize the ship speed in channel and improve the channel capacity, we analyze the ship speed in channel according to the largest ship flow and adopting the traffic flow theory and car-following model. According to the main ship rates in the channel, we obtain the load of standard vessels, and calculate the length of standard vessels with the fitting curve by matlab. Based on the traffic flow theory and car-following model, we realize the optimal analysis of the ship speed.

Keywords: ship speed in channel; maximum flow of ships; traffic flow; car-following model

随着社会经济的迅速发展, 航运业务日益繁忙, 这对航道、港口提出了越来越高的要求, 而船舶航速就是其中关键问题之一。合适的航速不仅关乎经济发展, 更与人身财产安全息息相关。为了充分利用航道, 在保证安全的前提下提高其运行效率, 我国部分航道采取了最高航速限制, 或者采取“安全航速”的措施。

《国际海上避碰规则》规定了12项判断安全航速的影响因素, 这些因素都是定性描述出安全航速所具有的特点, 并没有明确其定量的确定方法, 而只有定量的船舶航速对驾驶人员才有具体的指导作用。文献[1]主要从避碰角度出发, 依靠船舶会遇频率确定最佳航速; 1993年, 日本林通夫针对高速船研究, 认为高速航行带来的船舶会

遇频率对人收集处理信息能力有影响, 低速航行则会造成船舶避让操纵困难, 使两种危险总和最小的即为最佳航速。我国也陆续提出不同的航速设定方法, 比如: 层次分析法^[2]、模糊理论^[3]、神经网络算法^[4]等。虽然解决了一定环境下的问题, 但是不能准确地定量反映出航道的航速设定方法。

本文通过确定航道标准船型, 利用交通流理论和跟驰模型得出在船舶流量最大时的船舶最优速度, 在保证安全的条件下提高经济效益。

1 标准船载质量的确定

标准船型的确定与航道通航情况及条件密切相关, 本文的标准船是根据特定航道即所求最佳航速的航道而具体设置的。首先根据流量观察得

收稿日期: 2014-09-17

作者简介: 张帅 (1989—), 男, 硕士研究生, 从事交通运输及港口航道研究。

到某航道的船舶流量及主要船型及吨位，从而确定出不同船型的比例，根据加权平均法确定该航道的标准吨位：

$$W = \sum_{i=1}^k W_i P_i \quad (1)$$

式中： k 为航道上主要船型的种类数； W_i 表示第 i 种船舶的载质量吨位 (t)； P_i 为该航道上第 i 种船型的比例。并选取该航道中数量最多、载质量最大的船舶类型作为其标准船的类型。

2 标准船长的确定

标准船长的确定是在得到该航道标准船载质量的前提下，参考 JTS 165—2013《海港总体设计规范》(简称“总体规范”) 对船长及载质量进行二次曲线拟合，由上述所得标准载质量得到标准船长。

1) 油船标准船长与载质量关系的确定。

以吨级作为 x 轴，由《规范》中油船船型尺度可得 x' (万 t) 取值为 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 8, 10, 12, 15, 25, 30)，因 x 跨度过大而点数偏少，可以考虑去掉最后两个较大点，并对其进行归一化处理得到 $x = (0.0024, 0.0048, 0.0071, 0.0119, 0.0238, 0.0475, 0.0713, 0.1188, 0.1900, 0.2375, 0.2850, 0.3563)$ ，取标准船长 (m) 为平均船长 $y = (65, 76, 89, 108, 125, 158, 179, 190, 229, 242, 247, 274)$ ，对其进行多项式拟合 (图 1)。

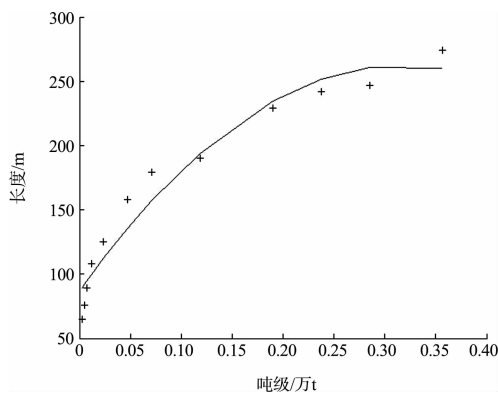


图 1 油船的载质量与长度的函数关系

载质量与长度的函数关系为：

$$y = -1753.3x^2 + 1111x + 86.8 \quad (2)$$

式中： y 为标准船长； x 为归一化标准船载质量所得参数；由图 1 可知该函数能较好地反映两者之

间的关系。

2) 集装箱船的标准船长与载质量关系的确定。

由《规范》可知集装箱的标准船吨级 (万 t) 为 $x' = (0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 12, 15)$ ，其数据较紧凑，故无需舍去，对其进行归一化得 $x = (0.0018, 0.0054, 0.0089, 0.0179, 0.0358, 0.0537, 0.0894, 0.1252, 0.1789, 0.2147, 0.2683)$ ，标准船长 (m) $y = (81, 96, 111, 133, 167, 215, 272, 289, 328, 354, 368)$ ，对 x 与 y 进行多项式拟合得到对应的函数关系式：

$$y = -4685.3x^2 + 2255.8x + 90.3 \quad (3)$$

式中： y 为标准船长； x 为归一化标准船载质量所得参数。由图 2 可知该函数能较好地反映两者之间的关系。

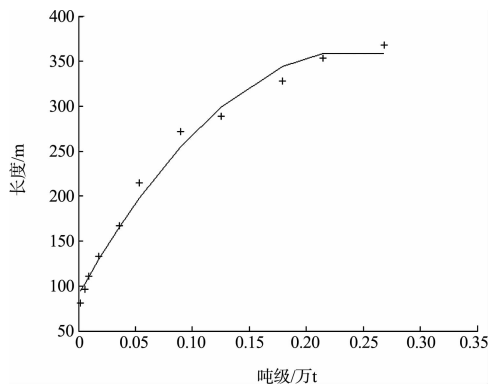


图 2 集装箱船载质量与标准船长的函数关系

综上，对得到的某航道的某类型的标准吨位进行归一化，代入对应的函数关系式中得到相应的标准船长。

3 建立航道航速分析模型

3.1 速度-密度模型的选取及计算

最早的速度-密度模型是 Greenshields 提出的，得出的结论是速度与密度线性相关^[5]，但由于其样本存有缺陷，所以得到的模型并不完善。Greenberg^[5]提出的对数模型能较准确地反映较大密度条件下的情况，本文采取的就是该模型：

$$\bar{v}_s = v_m \ln\left(\frac{k_j}{k}\right) \quad (4)$$

式中： k_j 为阻塞密度； v_m 为流量最大时船舶速度；流量最大时船舶间距 (船长 + 首尾间距) 设为 d (km)，

$d = \frac{1}{k_m}$ 。 v_s 为船舶速度; k 为船舶密度。

微分可得流量最大时

$$k_m = \frac{k_j}{e} \quad (5)$$

式中: k_m 为流量最大时密度 (艘/km)。

3.2 船舶阻塞密度的确定

船舶阻塞 (艘/km) 可由标准船长确定^[6], 其计算公式为:

$$k_j = \frac{1\ 000}{(1 + \beta)L} \quad (6)$$

式中: L 为标准船舶长度 (m); β 为系数, 取 0.5。

3.3 建立线性船舶跟驰模型

Chandler 等^[7]对线性跟驰理论整理, 得出:

$$\ddot{x}_n(t+T) = \lambda [\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t)] \quad (7)$$

式中: $\ddot{x}_n(t+T)$ 为 $t+T$ 时刻时车辆 n 的加速度; $\dot{x}_{n-1}(t)$ 为 t 时刻时车辆 $n-1$ 的速度; $\dot{x}_n(t)$ 为 t 时刻时车辆 n 的速度; 虽然船舶跟驰模型比车辆更加复杂, 但也能在一定程度上反映船舶的动力学过程, 且本文考虑相对理想化的条件下的船舶航道航速。

3.4 计算船头间距变化量

基于式(7), Herman 等^[5]得出局部稳定性条件下的车头变化量(式(8)), 这里考虑局部稳定性, 即跟随船舶对前车速度波动的反应, 关注这两船之间的局部行为, 航道航运通过人工干预对后续船舶进行指挥。

$$\Delta S = \frac{v_2 - v_1}{\lambda} \quad (8)$$

式中: ΔS 为间距变化量; v_2 为跟驰船舶最终速度; v_1 为跟驰船舶初始速度; λ 为驾驶人对刺激反应强度的系数 (s^{-1}), 对于车辆理想取值 $\lambda = 1/(eT)$, T 为反应时间。

4 船速确定

为了避免当前船紧急停车时后船与其相撞, 且保证后续船舶停止时的船舶密度大于阻塞密度, 以防止航道阻塞, 可以得到如下公式:

$$|\Delta S| < d - L - \frac{1}{k_j} \quad (9)$$

式中: d 为流量最大时船舶间距; L 为标准船舶长度。

由于最后船速为 0, 所以 $|\Delta S| = \left| \frac{v_1}{\lambda} \right|$, 可以得到

$$v_1 < 1\ 000\lambda \left(d - \frac{L}{1\ 000} - \frac{1}{k_j} \right) = 1\ 000\lambda \left(\frac{1}{k_m} - \frac{L}{1\ 000} - \frac{1}{k_j} \right) \quad (10)$$

将式(4)代入上式得:

$$v_1 = 1\ 000\lambda \left(\frac{e}{k_j} - \frac{L}{1\ 000} - \frac{1}{k_j} \right) \quad (11)$$

将式(6)代入式(11)整理得

$$v_1 < \lambda L(1.5e - 2.5) \approx 1.577\ 42\lambda L \quad (11)$$

5 实例测试

本文研究思路主要考虑避免相遇时的碰撞危险, 选取广州港作为实例研究, 因为广州港航道基本没有大幅度弯道和居间障碍物情况, 较符合本文的模型思路。经预测广州港 2020 年船舶通航情况见表 1, 其中 1 万吨级以下取指标为 0.5 万 t, 1 万 ~ 3.5 万吨级取指标为 2.25 万 t, 10 万吨级以上取指标 12 万 t, 利用式(1)确定该航道的标准船吨位为 24 666 t, 由于该航道中集装箱船载货量占比最大, 故通过上述集装箱的拟合曲线式(3), 计算得到标准船长 $L = 180.5$ m, 流量最大时船头间距为 736 m。把 L 代入到式(12)得到 $v_1 < 284.7\lambda$, λ 取 $1/T$, 其中 T 通过询问船员、引航员等取平均值为 1.5 min, 得到 $v_1 < 6.15$ kn, 可以看出该速度是比较合理的。

表 1 2020 年广州港船舶通航情况

货类	吨级/t					
	1 万以下	1 万~3.5 万	5 万	7 万	10 万	10 万以上
集装箱	3 190	8 800	4 602	2 985	3 220	1 160
煤炭	521	1 441	1 816	378	220	176
石油	2 074	1 354	1 371	114	16	0
矿石	0	45	47	49	33	76
粮食	2 944	1 338	440	378	0	0
其它	29 670	10 248	889	0	0	0
合计	38 399	23 226	9 165	3 904	3 489	1 412

(下转第 173 页)