



基于停船视距的船舶领域模型研究

李 瀛¹, 张 玮²

(1. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 目前已有船舶领域模型具体取值依赖大量实测资料, 缺乏理论定量研究。针对长江下游航道条件和船舶特性, 基于道路交通工程中停车视距的概念, 提出了航道中停船视距的概念。分析船舶制动加速度特性, 探讨船舶领域模型长轴取值。研究表明: 航道中停船视距由反应距离、制动距离以及安全距离3部分组成; 当前船的制动加速度为后船的4倍时, 船舶领域长轴取值为2.6~3.9倍船长, 与已有进江海船的推荐值3.0~4.0倍船长基本吻合; 船舶领域长轴取值具有一定的速度敏感性。

关键词: 停船视距; 制动加速度; 船舶领域

中图分类号: U 697.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0036-05

On model about ship domain based on stopping sight distance

LI Ying¹, ZHANG Wei²

(1. Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, Wuhan 430011, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: At present, value-taking of existing models of ship domain depends on the measured data or experimental data and it is lack of theory about quantitative study. According to the channel condition and ship characteristics of the lower Yangtze River, based on the concept of stopping sight distance to traffic engineering, we propose the concept of stopping sight distance to waterway engineering, analyze the braking accelerations of ship, and discuss the value of major axis about ship domain. The result indicates that that ship domain to waterway engineering is composed of reaction distance, breaking distance and safe distance. When the braking acceleration of the ship behind is three or four times as much as the ship ahead, the value of major axis about ship domain is 2.9 to 3.8 times of the ship length. The results is basically anastigmatic with the recommended values.

Key words: stopping sight distance; braking acceleration; ship domain

船舶在航行过程中, 为了保证安全, 船舶之间总要保持一段安全距离。每艘船舶周围, 需要一个安全缓冲区域, 他船进入本船的安全缓冲区域内, 一般就认为有碰撞的危险。当航道达到最大交通密度时, 船舶之间保持一定的安全距离航行以避免发生碰撞, 其中安全距离就是船舶安全行驶的最小距离, 也就是船舶避碰领域, 又称船

舶领域, 其值对船舶安全航行影响重大^[1]。同时, 在研究航道通过能力和船舶会遇时, 船舶领域也是需要考虑的一个重要因素, 因此对船舶领域的研究是非常有必要的。

目前比较重要的船舶领域模型包括日本学者提出的藤井模型^[2], 英国学者提出的Goodwin模型^[3-4]、Davis模型^[5]、内河船舶领域模型^[6]等。藤井模型

收稿日期: 2013-05-09

作者简介: 李瀛(1986—), 女, 助理工程师, 主要从事水运工程规划方面的工作。

是通过对日本沿海水域海上交通调查并对船舶相对位置的二维频率分布分析研究, 提出船舶领域的模型, 然后通过长期对日本沿海水道交通实况的观察, 提出船舶领域具体尺寸。Goodwin模型是基于海上交通调查及在雷达模拟器上利用船员培训机所做的大量避碰试验, 研究并建立的开阔水域的船舶领域模型。Davis模型是在Goodwin模型的基础上加以改进, 使其便于实际应用。国外学者提出的模型多是基于本国特定水域的研究, 分析大量实测或试验资料, 且多应用于海上开阔水域。内河船舶领域模型主要考虑受限制航道的通航情况, 船舶航速低、船舶规模较小, 同时其取值同国外模型一样通过实船试验和数据分析计算得到, 对进江海船船舶领域长轴推荐值为3~4倍船长。长江下游河段, 江宽水深, 对船舶的限制较小, 且船舶航行速度较快, 已有内河船舶领域模型的适用性有待考证。

针对长江下游航道条件及船舶状况, 本文拟基于道路交通工程中停车视距的概念, 结合对船舶制动时的加速度的分析, 推导船舶领域长轴组成, 并结合实例计算验证。

1 停船视距的提出

在道路交通工程中, 为了保证汽车在行驶时驾驶员看到前方车辆或障碍物时, 能够及时停车所需要的最短距离, 称为停车视距。停车视距包括反应距离、制动距离和安全距离3部分。类似地, 船舶在航道中航行时, 后船在跟随前船的运行中同样需要保持一定的停船视距, 因此定义停船视距 S 为:

$$S=S_0+S_1+S_2 \quad (1)$$

式中: S_0 为两船之间的安全距离, 是指后船停住后, 其船头至前船船尾的距离, 在道路交通工程中通常取5~10 m, 约为1~2倍车长。取船舶航行速度20 km/h, 汽车速度80 km/h, 考虑船舶航行速度与汽车速度的比值, 取船舶安全间距为1/4倍船长 $l_{\text{船}}$; S_1 指驾驶员发现前方障碍物, 经过判断决定采取制动措施的那一瞬间到制动器真正开始起作用的瞬间船舶所行驶的距离; S_2 为后船制动距离,

是指船舶从制动生效到船舶完全停住, 这段时间所行驶的距离, 考虑匀减速制动情况, 则

$$S_2=v^2/(2a) \quad (2)$$

$$S=S_1+v^2/(2a)+0.25l_{\text{船}} \quad (3)$$

式中: v 是后船初始行驶速度; a 是后船制动加速度。

2 反应距离分析

在道路交通工程中, 驾驶员在采取制动措施前, 一般根据前后车之间车距的急剧减少来判断并做出反应。反应距离 S_r 通常由车速 v_0 与驾驶员反应时间 t 的乘积计算, t 一般取值为1.5 s。

在船舶航行过程中, 前后船之间间距不会在极短时间内明显改变, 难以用相同的方法来计算船舶驾驶员的反应距离。在道路工程中, 建议行车速度与两车间距存在数值上相等的关系, 试通过研究道路上车辆驾驶员的反应距离与前后车间距的比例从而应用到船舶驾驶中, 即船舶驾驶员的反应距离与船舶停车视距存在如下关系:

$$S_1=k_0S \quad (4)$$

式中: k_0 是反应距离与船舶间距之比。在道路交通工程中, 建议行车速度与两车间距关系为: 60 km/h, 60 m; 80 km/h, 80 m。通过对不同车速的小车计算反应距离与停车视距的比值上限为42%。参考道路工程经验, 航道中 k_0 上限取42%。

结合式(3)和式(4), 可得:

$$S = \left(\frac{v^2}{2a} + 0.25l_{\text{船}} \right) \cdot \frac{1}{1-k_0} \quad (5)$$

3 船舶制动加速度分析

船舶在静水中航行时, 船舶相对于水流以及空气以船速 v 运动, 且船舶所受到的水流力和风荷载与航行方向相反, 船舶的受力情况见图1, 据船舶受力分析, 船舶制动加速度为:

$$a = \frac{F+f_1+f_2}{m} \quad (6)$$

式中: F 是船舶制动力; f_1 是风荷载; f_2 是水流力; m 是船舶质量。其中各项又可以表示为:

$$F=P/v \quad (7)$$

$$f_1=k_1v_{\text{风}}^2 \quad (8)$$

$$f_2 = k_2 v^2 \quad (9)$$

式中： P 是船舶功率； v 是船舶初速度； k_1, k_2 分别为风荷载、水流力相应的系数。

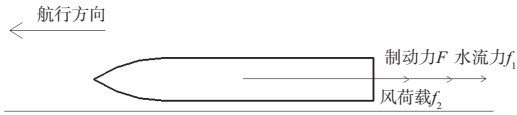


图1 船舶受力分析

将式(7)~(9)代入式(6)整理得：

$$a = \frac{P/v + k_1 v_{风}^2 + k_2 v^2}{m} = f(v) \quad (10)$$

1) 风荷载计算。

根据《港口工程荷载规范》相关计算公式推导可得风流荷载系数：

$$k_1 = 10^{(-0.107 + 0.621 \lg DW)} \times 49.0 \zeta \quad (11)$$

式中： A 是船体水面以上受风面积(m^2)； ζ 是风压不均匀折减系数； DW 是船舶载质量(t)。

2) 水流荷载计算。

同样根据《港口工程荷载规范》相关计算公式推导可得水流荷载系数：

$$k_2 = (0.046 Re^{-0.134} + b) \rho (1.7 l_{船} D + C_b l_{船} B) / 2 \quad (12)$$

式中： ρ 是水的密度； Re 是水流对船舶作用的雷诺系数； b 是系数； $l_{船}$ 是船舶长度； D 是船舶吃水； B 是船舶宽度； C_b 是船舶方形系数。

4 船舶领域理论分析

根据定义，船舶领域长轴长度 L 由船舶停船视距及船长组成(图2)，具体可表示为：

$$L = S + l_{船} \quad (13)$$

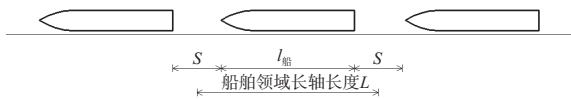


图2 船舶领域长轴示意图

表1 不同吨位船舶的船舶领域长轴

船舶吨级(DWT)/t	500	1 000	2 000	3 000	5 000	10 000	20 000	30 000	40 000	50 000
船舶领域长轴上限/ $l_{船}$	4.2	4.6	4.0	4.6	4.1	3.7	4.6	3.9	3.9	3.8

6 分析讨论

6.1 关于水流流速

在船舶制动加速度分析中，暂未考虑水流速

在最大停船视距的计算中，后船制动距离的计算尤为关键。结合式(10)和制动距离计算公式，得：

$$S_2 = \frac{v^3}{2 \times \frac{P + k_1 v_{风}^2 v + k_2 v^3}{m}} \quad (14)$$

对船速进行求导运算得到 $S_2' > 0$ ， S_2 是关于船速 v 的增函数。由前面讨论可知， S_1 也是关于船速 v 的增函数，因此船舶领域 L 是关于船速 v 的增函数，结合式(13)可得：

$$L_{max} = \frac{v_{max}^2}{2a_1} \cdot \frac{1}{1 - k_0} + l_{船} \quad (15)$$

5 实例计算

船舶在长江航行时，静水航行速度取值区间为3~6 m/s。反应距离与船舶间距的比例 k_0 取为42%。

以1万吨级散货船为例，参照《港口工程荷载规范》对各参数取值，分别代入式(11)和(12)中计算得到风荷载系数 k_1 和水流力系数 k_2 ，在不考虑水流速度对船速的情况下，相关计算如下：船舶静水速度为6 m/s，水流速度为2 m/s，船舶长度为150 m，船舶宽度为20 m，船舶满载吃水8.5 m，水流密度1.0 t/m³，风荷载系数 $k_1=0.091$ ，水流力系数 $k_2=2.84 \times 10^4$ ，船舶主机功率为3 088 W，船舶满载质量为16 442 t，船舶领域长度为3.8 $l_{船}$ 。在船舶制动加速度分析中，船舶在受到水流力的同时也受到风荷载的作用，经计算，风荷载的系数约为0.093，仅为水流力系数的1/10 000，因此可忽略其对船舶制动的影响。

同理分别计算500吨级、1 000吨级、2 000吨级、3 000吨级、5 000吨、10 000吨级和20 000吨级船舶相应的船舶领域(表1)。从表1可知，对于不同吨级的船舶，在不考虑水流速度的情况下，船舶领域长轴上限为3.7~4.6倍船长。

度对船速的影响。在长江下游，水流速度通常取2 m/s。考虑水流流速后，船舶与水流相对速度发生变化，船舶制动加速度模型为：

$$a = \frac{P/(v + v_{水}) + k_2(v + v_{水})^2}{m} \quad (16)$$

相应地, 船舶制动距离和船舶领域纵长发生变化。相关计算结果见表2。

表2 上下行时不同吨位船舶的船舶领域长轴

船舶吨级 (DWT)/t	上行船舶领域 长轴上限/ $l_{船}$	下行船舶领域 长轴上限/ $l_{船}$
500	3.2	4.6
1 000	3.7	5.0
2 000	2.9	4.5
3 000	3.5	5.2
5 000	2.8	4.8
10 000	2.7	4.3
20 000	3.3	5.2
30 000	2.7	4.6
40 000	2.8	4.5
50 000	2.6	4.5

考虑水流流速后, 船舶领域纵长上行为2.6~3.7倍船长, 下行为4.3~5.2倍船长, 水流流速对船舶领域纵长有一定的影响。

表3 不同吨位船舶船舶领域长轴

船舶吨级(DWT)/t	$a_1=2a$		$a_1=3a$		$a_1=4a$	
	上行船舶领域长轴 上限/ $l_{船}$	下行船舶领域长轴 上限/ $l_{船}$	上行船舶领域长轴 上限/ $l_{船}$	下行船舶领域长轴 上限/ $l_{船}$	上行船舶领域长轴 上限/ $l_{船}$	下行船舶领域长轴 上限/ $l_{船}$
500	2.3	3.0	2.6	3.5	2.8	3.8
1 000	2.6	3.2	2.9	3.8	3.1	4.1
2 000	2.2	3.0	2.4	3.5	2.5	3.7
3 000	2.5	3.3	2.8	3.9	3.0	4.3
5 000	2.1	3.1	2.3	3.7	2.5	4.0
10 000	2.1	2.9	2.3	3.3	2.4	3.6
20 000	2.4	3.3	2.7	3.9	2.8	4.3
30 000	2.1	3.0	2.3	3.5	2.4	3.8
40 000	2.1	3.0	2.3	3.5	2.5	3.7
50 000	2.0	3.0	2.2	3.5	2.3	3.7

注: $v_{船}=6 \text{ m/s}$ 。

①前船制动加速度为后船的2倍, 上行船舶领域长轴取值范围为2.0~2.6倍船长, 均值为2.2倍船长; 下行船舶领域长轴取值为3.0~3.3倍船长, 均值为3.1倍船长, 船舶领域纵长可取为2.2~3.1倍船长。

②前船制动加速度为后船的3倍, 上行船舶领域长轴取值范围为2.2~3.9倍船长, 均值为2.5倍船长; 下行船舶领域长轴取值为3.3~3.9倍船长, 均值为3.6倍船长, 船舶领域纵长可取为2.5~3.6倍船长。

6.2 考虑前船制动加速度

在实例计算中, 均假定前船急停, 未考虑其制动距离, 使得船舶领域长轴的计算值偏于安全。若适当考虑前船的制动距离 S_3 , 求得的船舶领域长轴的取值会相应减小, 且减小的值即为前船的制动距离。考虑前船制动距离后的停船视距为:

$$S=k_0S+0.25l_{船}+v^2/(2a)-v_1^2/(2a_1) \quad (17)$$

式中: v_1 是前船行驶速度; a_1 是前船制动加速度。

假定前后船初始行驶速度相同, 则有:

$$S=k_0S+0.25l_{船}+v^2/(2a)-v^2/(2a_1) \quad (18)$$

对于式(18)可以按以下几种情况分别加以讨论:

1) 前船的制动加速度小于后船的加速度时, 两船永远不会相撞, 不予考虑。

2) 前后船的制动加速度相同时, 此时所需视距最小: $S_{min}=0.25l_{船}$ 。

3) 前船的制动加速度大于后船的加速度时, 此时所需视距最大。表3为分别考虑前船的制动加速度为后船的2倍、3倍时, 船舶领域长轴的取值范围的变化。

③前船制动加速度为后船的4倍, 上行船舶领域长轴取值范围为2.3~3.1倍船长, 均值为2.6倍船长; 下行船舶领域长轴取值为3.7~4.3倍船长, 均值为3.9倍船长, 船舶领域纵长可取为2.6~3.9倍船长。

考虑前船的制动距离后, 船舶领域长轴取值减小。随着前船制动加速度的增大, 前船制动距离减小, 船舶领域取值随之增加。当前船加速度取为后船加速的4倍时, 船舶领域的取值与内河船

船舶领域模型提出的进江海船舶领域推荐值3~4倍船长基本一致。

6.3 速度敏感性分析

上述计算中,船舶航行速度均取6 m/s。船舶在实际运行中由于船舶大小、性能不同以及航行

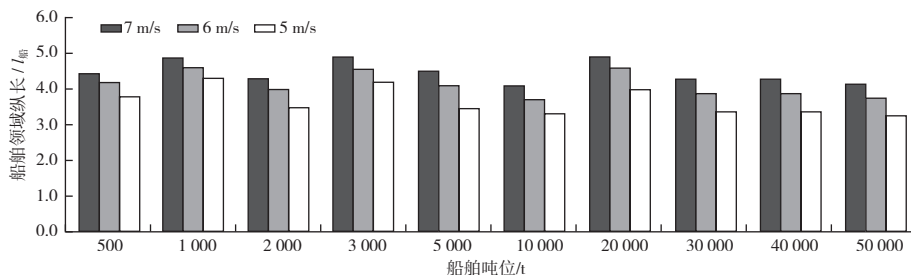


图3 不同船速对应船舶领域长轴(上行)

船速为7 m/s时,船舶领域纵长为4.2~4.9倍船长;船速为6 m/s时,船舶领域纵长为3.7~4.6倍船长;船速为5 m/s时,船舶领域纵长为3.3~4.2倍船长。船速的改变对船舶领域纵长的有一定影响,随着船速的增大,所需船舶领域纵长增大。

7 结语

1) 本文基于道路交通工程中停车视距的概念提出了航道中停船视距的概念。停船视距由反应距离、制动距离以及前后船之间的最小间隙3部分组成,其中最重要的组成部分为制动距离。

2) 在制动距离的计算中,假定制动加速度为一定值。经公式推导,得知制动距离是关于船速的增函数,当船速取最大值时,可得到最大制动距离,因此以初始船速计算出的初始制动加速度作为船舶制动过程中的恒定加速度计算,偏于安全。

3) 船舶航行过程中影响制动的因素主要包括船舶本身制动力、水流力以及风荷载,且风荷载系数小于水流力系数的0.001%,因此风荷载对船舶制动的影响可以忽略不计。

4) 船舶领域长轴取值由停船视距和船长组成,停船视距偏安全时,船舶领域长轴取值亦偏于安全,不考虑水流速度与前船制动时,计算出船舶领域长轴取值范围为3.7~4.6倍船长。

5) 在停船视距的计算中,仅考虑了后船在紧急制动过程中所行驶的距离,实际上在后船的制动过程中,前船亦有一定的制动距离。当前船制动加速度小于和等于后船制动加速度时,两船永

远不可能发生碰撞,当前船制动加速度大于后船制动加速度时,分别考虑前船制动加速度为后船制动加速度的2倍、3倍和4倍,计算船舶领域长轴取值,得知当考虑前船制动加速度为后船制动加速度的4倍时,船舶领域长轴的取值为2.6~3.9倍船长,与内河船舶领域三维模型所推荐的3~4倍船长较为吻合。

环境的影响,船速会有一些的差异。在船舶领域理论分析中,证明船舶领域长轴是关于船速的增函数,下面分别在不考虑前船制动及水流的情况下以船速为5, 6, 7 m/s对不同吨级船舶计算船舶领域大小(图3)。

改变船速对船舶领域长轴取值有一定影响,所得船舶领域纵长具有一定的速度敏感性。

7) 仅对船舶领域纵长进行了分型,短轴上尚缺乏相关研究。

参考文献:

- [1] 徐婷婷. 不同安全条件下的航道通过能力研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [2] 藤井弥平. 海上交通工程学[M]. 东京: 海文堂, 1981: 22-38.
- [3] Goodwin E M. Determination of ship domain size proceedings of international conference on mathematical aspects of marine traffic[M]. London: Academic Press, 1977: 103-427.
- [4] Goodwin E M. A statistical study of ship domain[J]. The Journal of Navigation, 1975, 28(3): 328-344.
- [5] Davis P V, Doveand M J, Stoekel C T. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas[J]. The Journal of Navigation, 1980(2): 215-222.
- [6] 童亮. 苏南运河岸线控制利用的理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2006: 12-17.