



桥梁主通航孔施工期通航方案及保障措施

赵仓龙

(南通航运职业技术学院航海系, 江苏南通 226010)

摘要: 我国内河水域新建桥梁在对主墩进行施工过程中, 为了确保船舶正常通航, 海事部门要求实行单向通航。因此, 主墩施工期间桥区水域可能出现船舶排队等候过桥的现象, 船舶等候过桥势必增加桥区水域复杂的通航环境, 目前海事部门规定桥区水域(单向通航)航行的船舶之间应保持足够的安全距离。通过建立数学计算模型对桥区水域(单向通航)通航船舶之间安全距离进行量化研究, 探讨出桥区水域船舶之间安全距离计算方法。为海事部门制定桥区水域通航安全管理规定、维护桥区水域良好的通航秩序和船舶过桥安全提供科学的理论依据。

关键词: 桥梁; 施工期; 数学模型; 安全距离

中图分类号: U 442

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0127-05

Navigation scheme and guarantee measures for bridge during construction of main navigation opening

ZHAO Cang-long

(Department of Navigation, Nantong Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: During construction of the main bridge pier in inland waters in China, to guarantee the normal ship navigation, the maritime administration requires one-way traffic. Therefore, during construction of the main pier bridge, ships possibly wait to cross the bridge, and thus inevitably result in the complex navigation environment in the bridge area. At present, enough safety distance between ships is specified by the maritime administration department. A quantitative study on ship navigation safety distance is carried out by establishing a mathematical calculation model of bridge waters (one-way navigation) to provide a scientific theory basis for the maritime administration to work out the navigation safety management regulations and guarantee the safety of navigation environment.

Key words: bridge; construction period; mathematical model; safety distance

随着我国交通现代化的快速发展和长江、珠江等几大主要水系开发力度的逐步加大, 各类跨江、跨海桥梁数量迅猛增加, 航经各水域的船舶尺寸、船舶流密度也逐年增大。而部分桥梁由于所处航段通航环境复杂、桥梁通航孔净空尺度有限, 给船舶的通过能力带来一定的限制。我国内河水域新建桥梁, 其主通航孔大多采取双孔单向通航方式。在对主通航孔处主墩进行施工时, 一般采取两侧同时施工的办法。为了确保航道在主墩施工期间船舶的正常通行, 海事部门要求实行

单向通航。因此, 桥梁主墩施工期间对桥区水域的船舶通过能力带来一定的限制。当桥区施工水域处于通航船舶流高峰期, 可能出现船舶排队等候过桥的现象。目前海事部门规定在新建桥梁桥区水域(单向通航)航道上航行的船舶相互间应保持足够的安全距离, 禁止追越和并列行驶。然而规定足够的安全距离并没有量化, 很笼统, 无法给船舶驾引人员提供量化的安全距离。

如何科学合理地量化桥区单向控制河段通航船舶之间的安全距离已成为桥区水域安全通航重

收稿日期: 2013-11-07

作者简介: 赵仓龙(1983—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为交通环境与安全保障。

要的研究课题之一,目前尚无桥区水域单向控制河段通航船舶之间安全距离量化的方法研究。

科学合理设置船舶等让区,对于提高船舶航行效率和航道单船通过能力具有重要的经济价值。本文尝试就桥区单向控制河段通航船舶之间的安全距离建立数学计算模型(量化分析),得出桥梁主墩施工期间等让船舶之间的安全距离,为海事部门制定桥区水域通航安全管理规定、维护桥区水域良好的通航秩序以及船舶过桥安全操纵提供科学的理论依据。

1 船舶等让方式及等让原则

1) 绝对等让:是指等让船舶采取停车、倒车、锚泊等操纵措施在船舶等让区外等让,待被等让船舶通过单向通航航段后再通过桥区水域。

2) 减速等让:是指等让船舶采取减速措施,在等让区内缓速航行,待被等让船舶单向通过控制航段后再以安全航速通过桥区水域。

为提高航道利用率和船舶航行效率,本文在探讨船舶等让区的设置时采取减速等让的方式,并建立相应的数学模型和提出相应的量化计算方法。船舶采取减速等让原则:①逆流船舶主动等让顺流船舶;②小船主动等让大船;③拟驶进的船舶主动等让正驶出的船舶;④后驶进等让区的船舶主动等让先驶进等让区的船舶。

2 基于船舶等让区数学模型对安全距离量化分析

2.1 影响船舶等让区设置的主要因素

2.1.1 船舶启、制动性能

船舶的启动性能是指船舶在静止状态中开进车,使船舶达到与主机功率相对应的稳定速度所需要的时间和航进距离的性能;船舶的制动性能是指船舶在某种航速下,主机停车或开倒车后,船舶速度为零时所需要的时间和航行距离的性能。船舶的启、制动性能一般用船舶冲程和冲时来表示。船舶的冲程和冲时主要与船速、排水量、船型系数、推进器类型、外界因素(风、流、航道水深等)等有关^[1]。

本文在建立船舶等让区数学模型时,分别要经过减速、加速等运动阶段,减速区和加速区的大小与船舶的启、制动性能密切相关。

2.1.2 安全航速的大小

船舶安全航速应当根据当时的能见度、通航密度、船舶操纵性能和风、浪、流、航路状况以及周围的环境等因素综合确定^[2],即安全航速是由多个“自变量”共同决定的“应变量”,并非定值。由于不同水域的情况不同,各类船舶操纵性能各异,而且天气或能见度情况、通航密度、雷达性能和船员技术水平等因素对安全航速也有一定的影响,无法建立起它们之间的数学模型,难以对安全航速作出定量规定。但是对某一特定的桥区水域可以做出定性规定,并结合实际经验和理论计算规定船舶过桥安全航速作为该水域内的安全航速。

桥区水域设定的安全航速大小直接影响船舶等让区中加速区、减速区和匀速区的大小,即直接影响船舶等让区的大小。本文在选取桥区水域安全航速时,以海事部门规定的船舶过桥安全航速为准。

2.1.3 维持最低舵效船速的大小

本文在建立船舶等让区数学模型时,等让船舶在等待被等让船舶通过单向通航水域的过程中,依次经过了加速、匀速和减速3个运动阶段,其中,维持最低舵效的船速是这3个运动阶段的衔接点。因此,维持最低舵效船速的大小直接影响船舶等让区的大小。

根据内河船舶航行实际经验,人力舵能保持舵效的最低船速为2~3 kn^[3]。本文选取3 kn船速作为船舶维持最低舵效船速来进行计算。

2.1.4 控制船型尺度

由于受桥区水域航道条件和桥梁净空尺度的限制,对通航船舶的尺度也有一定的限制。而控制船舶的尺寸,特别是船舶的长度直接影响船舶等让区的大小。

本文在选取船舶的长度时,以该水域允许通过船舶的最大船长为准。

2.2 船舶等让区数学模型的建立^[1,4-5]

在建立船舶等让区数学模型时（图 1），先假定上行船舶为等让船舶且上行船舶等让区的边界线 L_1 已经确定。

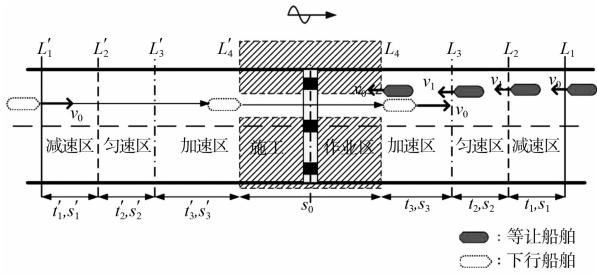


图 1 船舶等让区数学模型

假定等让船舶以桥区水域安全航速 v_0 航行至等让区边界线 L_1 时停车，当船速减小到维持最低舵效的船速 v_1 时，船首到达边界线 L_2 （把 L_1 与 L_2 之间的区域叫做减速区，减速时间和航行距离分别为 t_1 和 s_1 ）；然后船舶以船速 v_1 匀速航行，当被等让船舶以桥区水域安全航速 v_0 航行依次通过上游等让区和单向控制河段，船尾通过单向控制河段的下游边界线 L_4 时，等让船舶船首线到达边界线 L_3 （把 L_2 和 L_3 之间的区域叫做匀速区，匀速时间和距离分别为 t_2 和 s_2 ）；随后，等让船舶开进车，假设船首到达边界线 L_4 时，船舶航速达到桥区水域安全航速 v_0 （把 L_3 和 L_4 之间的区域叫做加速区，加速的时间和距离分别为 t_3 和 s_3 ）。同样，先假定上游船舶为等让船和上游等让区边界线 L'_1 已经确定时，可以依次确定边界线 L'_2 和 L'_3 ，以及减速时间 t'_1 和距离 s'_1 ，匀速时间 t'_2 和距离 s'_2 ，加速时间 t'_3 和距离 s'_3 。

为确保过往船舶安全有序通过桥区水域，防止上下行船舶在单向控制河段会遇，等让船舶至少在到达等让区边界线 L'_1 （或 L_1 ）之前开始采取相应的等让措施。

1) 船舶减速时间 t_1, t'_1 和距离 s_1, s'_1 的确定。

根据船舶停车冲程经验公式，主机停车时，船舶从桥区水域上行安全航速 v_0 至维持最低舵效船速 v_1 时所航行的时间和距离可用下列公式计算：

$$t_1 = c \log_2 \frac{v_0 + U}{v_1} \quad (1)$$

$$s_1 = 0.024c(v_0 + U) \left(1 - \frac{v_1}{v_0 + U}\right) - U \cdot \frac{t_1}{60} \quad (2)$$

同理，
$$t'_1 = c \log_2 \frac{v_0 - U}{v_1} \quad (3)$$

$$s'_1 = 0.024c(v_0 - U) \left(1 - \frac{v_1}{v_0 - U}\right) - U \cdot \frac{t'_1}{60} \quad (4)$$

式中： s_1 为减速冲程（n mile）； t_1 为船舶减速时间（min）； v_0 为桥区水域安全航速（kn）； v_1 为维持最低舵效船速（kn）； U 为水流速度（kn）； c 为减速时间常数，可由表 1 确定^[4]。

表 1 船舶减速时间常数

排水量/万 t	c/min	排水量/万 t	c/min
0.1	1	>5.5 ~ 6.6	11
>0.1 ~ 0.3	2	>6.6 ~ 7.8	12
>0.3 ~ 0.6	3	>7.8 ~ 9.1	13
>0.6 ~ 1.0	4	>9.1 ~ 10.5	14
>1.0 ~ 1.5	5	>10.5 ~ 12.0	15
>1.5 ~ 2.1	6	>12.0 ~ 13.6	16
>2.1 ~ 2.8	7	>13.6 ~ 15.2	17
>2.8 ~ 3.6	8	>15.2 ~ 17.1	18
>3.6 ~ 4.5	9	>17.1 ~ 19.0	19
>4.5 ~ 5.5	10	>19.0 ~ 21.0	20

2) 船舶加速时间 t_3, t'_3 和距离 s_3, s'_3 的确定。

根据船舶的性能，船舶由维持最低舵效船速 v_1 加速到桥区水域安全航速 v_0 时所航行的时间和距离可用下列公式计算船舶加速时间：

$$t_3 = 0.004\Delta\rho_w \cdot \frac{v_0 + U}{R} \quad (5)$$

$$s_3 = 0.101\Delta\rho_w \cdot \frac{(v_0 + U)^2}{R} - 1852U \cdot \frac{t_3}{60} \quad (6)$$

式中： t_3 为启动加速运动时间（min）； s_3 为启动加速运动的距离（m）； Δ 实际排水体积（ m^3 ）； ρ_w 为水的密度（ kg/m^3 ）； R 为实际排水量相对应的船舶阻力（kN）； v_0 为船舶匀速运动时的航速（kn）； U 为水流速度（kn）。

根据船舶操纵理论，船体运动时所受的阻力主要为摩擦阻力，在低速时约占总阻力的 70% ~ 80%。对于表面光洁船体的摩擦阻力 R_f 可按下式

进行估算:

$$R_f = \rho_w g C_f [1 + 0.0043(15 - t)] S v_s^{1.825} \quad (7)$$

船舶在满载情况下以某一船速航行时的总阻力可近似用下列公式进行计算:

$$R \approx 1.25 \rho_w g C_f [1 + 0.0043((15 - t))] S v_s^{1.825} \quad (8)$$

式中: R 为船舶运动时的总阻力 (N); ρ_w 为水的密度 (kg/m^3); g 为重力加速度; t 为水温 ($^\circ\text{C}$); v_s 为船速 (m/s); S 为船体湿表面积 (m^2); C_f 为摩擦阻力系数。船体湿表面积可近似用下列公式计算:

$$S = L_s B \quad (9)$$

式中: L_s 为船舶满载水线长; B 为船宽。

摩擦阻力系数为

$$C_f = 0.1392 + \frac{0.258}{2.68 + L} \quad (10)$$

因此, 根据本文中船舶实际排水量相对应的船舶阻力可按式确定:

$$R \approx 1.25 \rho_w g C_f [1 + 0.0043(15 - t)] S v_0^{1.825} \quad (11)$$

同理:
$$t'_3 \approx 0.004 \Delta \rho_w \cdot \frac{v_0 - U}{R} \quad (12)$$

$$s'_3 \approx 0.101 \Delta \rho_w \cdot \frac{(v_0 - U)^2}{R} + 1.852 U \cdot \frac{t'_3}{60} \quad (13)$$

3) 船舶匀速时间 t_2 , t'_2 和距离 s_2 , s'_2 的求取。

根据前面建立的船舶等让区数学模型和船舶等让原理, 当上行船舶为等让船舶时, 等让船舶经过减速运动和匀速运动两个阶段的时间总和应该等于下行船舶以桥区水域安全航速依次通过上游等让区和单向控制河段航行的时间, 即:

$$t_1 + \frac{s_2}{v_1 - U} = \frac{s'_1 + s'_2 + s'_3 + s_0 + L}{v_0} \quad (14)$$

同理, 当下行船舶为等让船时有:

$$t'_1 + \frac{s'_2}{v_1 + U} = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + s_0 + L}{v_0} \quad (15)$$

通过前面分析, 上述两个方程中, 除 s_2 和 s'_2 为未知数外, 其它均为定量, 令:

$$\begin{cases} s'_1 + s'_3 + s_0 + L = a \\ s_1 + s_3 + s_0 + L = b \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} v_1 - U = c \\ v_1 + U = d \end{cases} \quad (17)$$

通过解公式(14)和公式(15)可得:

$$s_2 = \frac{acv_0 + bcd - cdv_0 t'_1 - cv_0^2 t_1}{v_0^2 - cd} \quad (18)$$

$$s'_2 = \frac{acd + bdv_0 - cdv_0 t_1 - dv_0^2 t'_1}{v_0^2 - cd} \quad (19)$$

则, 匀速时间
$$t_2 = \frac{s_2}{v_1 - U} \quad (20)$$

$$t'_2 = \frac{s'_2}{v_1 + U} \quad (21)$$

通过以上的分析和计算, 在单向控制河段的边界线 L_4 和 L'_4 已经确定的情况下, 可确定船舶等让区的上游和下游的边界线 L'_1 和 L_1 。

2.3 通行船舶尾随距离的确定

当桥区水域内船舶流密度较大时, 船舶应依次等让通过单向控制河段, 因此上行船舶和上行船舶之间、下行船舶和下行船舶之间必须保持一定的安全距离 (这个距离称之为尾随距离)。以上行船舶 (假设为逆流) 为等让船舶为例, 通过建立船舶尾随距离数学模型, 来确定船舶尾随距离 (图 2)。

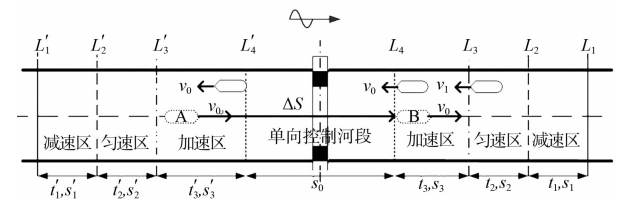


图 2 船舶尾随距离数学模型

根据前面建立的船舶等让区数学模型和等让原理可知, 当被等让船舶 B 以桥区水域安全航速 v_0 通过单向控制河段、船尾到达单向控制河段的边界线 L_4 时, 等让船舶通过加速通过加速区和以桥区水域安全航速 v_0 通过单向控制河段。因此, 尾随船舶 A 与被尾随船舶 B 之间的安全距离 ΔS 至少应为:

$$\Delta S = s_0 + v_0 t_3 + s_0 = 2 s_0 + v_0 t_3 \quad (22)$$

同理, 上行船舶之间的尾随距离 $\Delta s'$ 应满足:

$$\Delta s' = s_0 + v_0 t'_3 + s_0 = 2 s_0 + v_0 t'_3 \quad (23)$$

3 算例

运用本文所建立的船舶等让区数学计算模型和分析各参数的取值方法,以某新建桥梁 X 大桥为例对船舶等让区设置进行计算分析。取桥区水域安全航速 $v_0 = 6 \text{ kn}$, 维持最低舵效的船速 $v_1 = 3 \text{ kn}$, 水流速度 $U = 2.15 \text{ kn}$, 单向控制河段的长度 $S_0 = 227 \text{ m}$, 拟建桥梁所在河段通航船舶吨位为 5 000 吨级, 则船舶减速时间常数 c 取 3 min。

依据公式(1)~(4)可算出减速时间 (t_1, t'_1) 和减速距离 (s_1, s'_1) , 利用公式(5),(6),(12)及(13)可算出加速时间 (t_3, t'_3) 和加速距离 (s_3, s'_3) , 利用公式(18)~(21)可算出船舶匀速时间 (t_2, t'_2) 和距离 (s_2, s'_2) , 计算结果见表 2。

表 2 船舶等让各阶段计算参数

上/下行	等让阶段	时间/min	距离/m
上行	减速阶段 (t_1, s_1)	8.1	149
	匀速阶段 (t_2, s_2)	4.5	119
	加速阶段 (t_3, s_3)	7.4	1 030
上行	减速阶段 (t'_1, s'_1)	1.0	180
	匀速阶段 (t'_2, s'_2)	7.8	1 244
	加速阶段 (t'_3, s'_3)	3.5	572

注: L_S 为船舶满载水线长, 取船长的 90%; t 为水温, 取 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

根据表 2 的结果可以确定拟建 X 大桥船舶等让区的下游边界线和上游边界线分别为: $L_1 = 1\,298 \text{ m}$, $L'_1 = 1\,996 \text{ m}$ 。

拟建 X 大桥下行船舶中, 尾随船舶 A 与被尾随船舶之间安全距离 ΔS , 上行船舶之间的尾随距离 $\Delta S'$ 应满足: $\Delta S = 1\,925 \text{ m}$, $\Delta S' = 1\,202 \text{ m}$ 。

利用上述数学计算模型对拟建 X 大桥主墩施工期间单向通航时船舶等让区进行计算分析, 拟建 X 大桥单向通航下游边界线和上游边界线分别为 $1\,298 \text{ m}$ 和 $1\,996 \text{ m}$, 船舶在进入上下游边界线时应采取减速等措施航行; 船舶通过桥区单向控制河段时下行船舶之间保持的安全距离为 $1\,925 \text{ m}$, 上行船舶之间保持的安全距离为 $1\,202 \text{ m}$ 。

4 通航安全保障措施

1) 为确保施工期桥区水域通航安全, 海事部门应采取限制通航船舶吨位、实行单向通航、限制夜间通航、实施船舶报告制度等管控措施, 并在桥区水域上下游分别设置现场监控点, 安排人员实施全天候水上交通现场管控, 开展船舶交通流的现场组织疏导, 协调船舶有序通过桥区水域, 必要时指挥船舶临时候泊, 确保桥区单向通航措施的有效落实。

2) 船舶进入或通过桥区水域前, 应对主机、辅机、舵、锚、号灯、号型、信号、通讯、导航和系缆状况进行检查, 保持良好技术状态, 并由熟悉该水域情况、技术熟练的驾驶人员驾驶。同时应加强瞭望、控制航速、谨慎操作、遵守主管机关公布的船位报告制等相关规定。

3) 船舶通过桥区单向控制河段时, 禁止追越和并列行驶, 对遇船舶应避免在大桥通航孔水域交会。相互间应保持足够的安全距离, 其安全距离的算法可参考本文的计算模型。

5 结语

船舶通过新建桥梁单向通航水域时会等候过桥且单向通航时船舶之间应满足安全距离, 本文就安全距离及船舶等让区建立数学模型, 对安全距离进行量化。为桥梁主管部门及过往船舶安全通航提供一定的方法依据, 从而确保主墩施工期间上下行船舶有序航行及桥区水域的通航安全。

参考文献:

- [1] 中国海事服务中心. 船舶操纵与避碰(船舶操纵)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [2] 中国海事服务中心. 船舶操纵与避碰(船舶避碰)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [4] 郭国平. 船舶操纵[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [3] 洪碧光, 高孝日, 李强, 等. 港内船舶低速航行时的舵效[J]. 大连海事大学学报, 2010(5): 6-10.
- [5] 赵仓龙. 内河并建桥梁净空宽度数值计算模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.

(本文编辑 武亚庆)