



天然弯曲河道跨河建筑物跨度确定方法*

刘 虎, 徐艳军, 艾万政

(浙江海洋大学 港航学院, 浙江 舟山 316000)

摘要: 研究天然弯道(不考虑潮流影响), 以航道宽度作为弯道跨河建筑物的最小跨度, 提出弯道跨河建筑物最小跨度的确定方法。结果表明, 天然弯道跨河建筑物的最小跨度与船舶的航迹带宽度、风致漂移量、流致漂移量和建筑物墩部紊流范围密切相关。航迹带宽度、风致漂移量、流致漂移量和建筑物墩部紊流范围越大, 弯道跨河建筑物的最小跨度也越大。从通航安全角度出发, 提出天然弯道流致漂移量、建筑物墩部紊流范围和弯道跨河建筑物最小跨度的数学计算模型。

关键词: 水路运输; 弯曲航道; 跨度; 理论分析; 数学模型

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0067-04

Determination method of span of construction crossing natural curve river

LIU Hu, XU Yan-jun, AI Wan-zheng

(Port and Navigation School of Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

Abstract: The determination method of the span of construction crossing curved river is researched. The research results show that the span of construction crossing natural curved river is closely related with ship track width, ship drift distance induced by flow, ship drift distance induced by wind, turbulent range of construction pier etc. The more are the above factors, the larger is the span of construction crossing curved river. And the mathematical modes of ship drift distance induced by transverse flow in curved channel, turbulent range of construction pier, the minimum span of construction crossing natural curved river are put forward.

Keywords: water transportation; curved channel; span; theoretical analysis; mathematical model

天然弯曲河道与顺直河道相比, 河槽水势复杂。由于受到惯性离心力的作用, 弯道除了有纵向流速以外, 还存在面流流向凹岸, 底流流向凸岸的横向环流^[1-2]。底部浑浊的环流将大量泥沙输向凸岸, 使凸岸存在大量的浅点, 对航行产生影响。循缓流上驶的船舶, 由于过于靠拢, 会发生阻力增大、船首向偏摆, 甚至搁浅。弯曲河道的流态本身复杂, 如果在弯曲航道上建设桥梁等跨河建筑物, 建筑物墩部又会产生紊流漩涡区, 对

船舶航行又会产生进一步的不利影响。如黄石长江大桥附近的弯道水域, 由于船舶密度大和驾驶人员疏忽, 导致该水域碰撞事故不断, 仅在1993年4月16日—9月16日的154 d中, 就发生撞桥事故16起, 沉船9艘, 直接经济损失数百万元。因此建有跨河建筑物的弯曲河道通航安全问题, 一直受到相关科研人员的重视, 尤其是跨河建筑物的跨度, 由于其与航道宽度密切相连, 更是关注的焦点。弯道跨河建筑物的跨度应以航道的通

收稿日期: 2016-06-07

***基金项目:** 浙江省科技厅项目(2017C33173)

作者简介: 刘虎(1982—), 男, 硕士, 讲师, 从事船舶通航安全与保障研究。

航宽度作为设计标准,跨度不应小于航道的通航宽度,否则会影响船舶的安全通航。因此,弯曲航道通航宽度是确定跨河建筑物最低跨度的依据。GB 50139—2014《内河通航标准》明确指出“内河航道弯曲段的宽度应在直线段航道宽度的基础上加宽,其加宽值应通过分析计算或试验研究确定”,但究竟加宽多少,标准中并没有明确界定。中国、法国、前苏联、加拿大等国的航道规范都提出了弯曲航道宽度加宽值的具体计算公式,但是从这些公式结构来看,主要是从弯道曲率半径、代表船型尺度和对应顺直航道宽度等角度考虑,并没有充分考虑弯道环流对船舶操纵的影响。而事实上,弯道环流会促使船舶产生横向漂移,横向漂移量是确定航道宽度的重要指标之一。长江航道规划设计院对矩形断面单弯进行船模试验,结果表明,运用我国航道规范计算的弯曲航道宽度加宽值均偏小,不能满足航行要求^[3]。王巧洋^[4]采用概化连续弯道水槽水流试验与遥控船模试验相结合的方法,分析船舶在概化连续弯道中航行时的漂角、漂距及对应的航迹带宽度、加宽值,并根据试验数据导出相应的漂角及加宽值计算公式。虽然从漂角、漂距角度较好地考虑了弯道环流对船舶运动的影响,但是忽视了弯道环流对不同吃水船舶的作用。刘明俊等^[5]从船舶过弯甩尾角度出发,导出船舶过弯所需航道宽度加宽值,但仅是从船舶过弯操纵性讨论,也没有充分考虑弯道环流对航道宽度加宽值的影响。因此,有必要结合船舶的操纵性、弯道特殊水流特性研究天然弯道(不考虑潮流影响)的航道宽度,以便确定弯道跨河建筑物的最小跨度,为跨河建筑物设计提供依据。

2 弯道航宽影响因素

为了确保船舶能安全过弯,建有跨河建筑物的天然弯道宽度应包括以下因素:船舶的航迹带宽度、船间间距、船与建筑物墩部的最小距离、弯道附加宽度等^[6-7]。其中船舶的航迹带宽度、船间间距可参考 GB 50139—2014《内河通航标准》的相关要求取值。而船与建筑物墩部的最小距离、

弯道附加宽度在我国标准中没有明确界定,需要进行科学探讨。对于弯道而言,在确定其附加宽度时,最重要的是要考虑弯道横向环流所引起的流致漂移量以及风作用于船体所引起的风致漂移量。

2.1 流致漂移

建立一个以航道宽度方向为横坐标(x)、航道轴线方向为纵坐标(y)的坐标系,如图1所示。根据以上坐标系,可求得船舶在弯曲航道中的流致漂移量 B_1 为:

$$B_1 = u_x S / u_y \quad (1)$$

式中: $u_x = u_c \sin\beta + u_s \sin\alpha$, 其中 u_c 为流速, u_s 为船速, α 为偏航角, β 为流向角; S 为弯曲航道的长度; $u_y = u_c \cos\beta + u_s \cos\alpha$ 。

对于有跨河建筑物的航道而言,船舶在距离该建筑物 500 m 远的地方就应做好通过准备,且此时应该是摆正船位,因此 S 可考虑取 500 m。对于弯道而言,弯道横向环流流速 u_t 是影响流致漂移的主要因素。如果认为弯道横流垂直作用在船体上,则 $\beta = 90^\circ$ 。如果只考虑作用在船体上的平均弯道流速 u_d , 式(1)可进一步简化为:

$$B_1 = (u_d + u_s \sin\alpha) S / (u_s \cos\alpha) \quad (2)$$

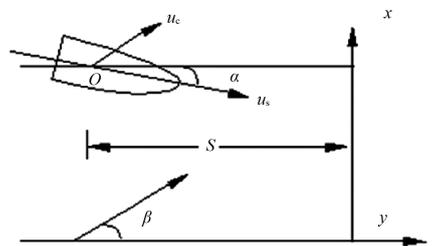


图1 船舶流致漂移示意

为了进一步确定弯道船舶的流致漂移量,有必要研究弯道环流。在弯道水流中,取高度为 H 的单位底面积水柱进行分析,如图2a)所示。图2a)表明 ΔP 和 F 沿垂线的分布情况,其中 ΔP 为水面横比降所引起的水柱两侧的压力差, F 为水柱因曲线运动所形成的惯性离心力。由于水柱两侧压强差 $\rho g J_y$ (ρ 为水的密度, J_y 为弯道水流横比降) 沿水深分布为常数,单位体积水体的惯性离心力为 $\rho u^2 / r$ (ρ 为水的密度, u 为水柱某一高度处水流的纵向流速, r 为弯道曲率半

径) 沿水深分布与纵向流速的垂线分布相似。 F 与 ΔP 共同作用所形成的合力矩如图 2b) 所示。在此力矩的作用下, 上层水体流向凹岸, 下层水体流向凸岸, 形成横向环流。横向环流 u_r 的形态如图 2c) 所示。

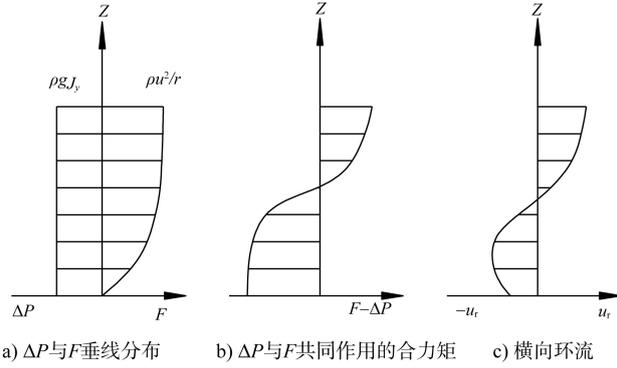


图 2 环流的形成

通过分析弯道单位水体的受力, 结合水流运动控制方程, 可得到弯道横向流速公式。但横向环流 u_r 与弯道纵向流速、水深、弯道曲率、河床糙率等众多因素相关, 很难完全从理论上得到其准确的公式, 目前所得的弯道环流公式, 大多是半经验半理论公式, 因为这些公式的形式相对简单且有较强的工程应用价值。天然弯道 (不考虑潮流的影响) 可考虑选用式(3)研究弯道横流^[8]:

$$u_r = 4.8 \sqrt{\frac{H}{r}} u [(y) - 0.44 (y)^{1.286} - 0.307] \quad (3)$$

式中: u 为弯道纵向平均流速; H 为弯道水深; $y = z/H$ 为相对水深 (这里的水深起算点是从河底开始); r 为弯道曲率。弯道横流的面流和底流的流向相反, 因此对于不同吃水的船舶, 作用在船体上的平均横流流速不同, 而作用在船体上的平均横流流速正是导致流致漂移量的关键参数。天然弯道可按照式(4)确定作用在吃水为 d 的船舶上的弯道横流平均流速:

$$u_d = \frac{H}{d} \int_{(H-d)/H}^1 u_r dy \quad (4)$$

式中: u_d 为作用在吃水为 d 的船舶上的平均弯道横流流速。联合式(3)和式(4)可得:

$$u_d = \frac{uH}{d} \sqrt{\frac{H}{r}} \left[0.91 \left(\frac{H-d}{H} \right)^{2.29} + 1.49 \left(\frac{H-d}{H} \right) - 2.4 \left(\frac{H-d}{H} \right)^2 \right] \quad (5)$$

根据式(5), 如果已知某弯道的曲率、平均纵向流速、弯道水深和船舶吃水, 则天然弯道作用在船体上的平均横流流速就基本确定。表 1 计算了弯道纵向平均流速为 5 m/s, 作用在不同吃水船舶上的弯道横流平均流速以及船速为 18.5 km/h, 偏航角为 5° , 吃水为 11 m 时的船舶流致漂移量。由表 1 可以看出, 当船舶吃水和水深不变时, u_d 随弯道曲率的增大而减小; 当弯道曲率和船舶吃水不变时, u_d 随弯道水深的增加而增加; 当弯道曲率和水深不变时, u_d 随吃水的增加而减小。因此在宽度不足的弯曲航道, 适当增加船舶吃水, 增加航道的曲率半径, 对船舶的航行安全有利。

表 1 不同情况下的 u_d 及 B_1

r/m	H/m	$u_d/(m/s)$				B_1 ($d=11\text{ m}$)
		$d=5\text{ m}$	$d=7\text{ m}$	$d=9\text{ m}$	$d=11\text{ m}$	
500	10	0.47	0.29	0.11		
	15	0.74	0.61	0.47	0.32	74.96
	20	0.95	0.84	0.72	0.60	102.28
800	10	0.37	0.23	0.08		
	15	0.59	0.48	0.37	0.25	68.13
	20	0.75	0.66	0.57	0.48	90.57
1 000	10	0.33	0.21	0.07		
	15	0.53	0.43	0.33	0.23	66.18
	20	0.67	0.59	0.51	0.43	85.70

表 1 还表明, 弯道横向流速所引起的漂移量较大, 在布置弯曲航道宽度时, 是个不容忽视的因子。由式(2)可知, 船速越高, 弯道环流引起的漂移量越小, 这一结论与《船舶操纵》中的船速越高船舶的保向性越好的结论一致; 偏航角越大, 流致漂移量也越大。因此在弯道中, 船舶应尽可能保持在航道轴线航行, 以免发生触岸危险。

2.2 风致漂移

船舶在航行中受风影响情况下的漂移量 B_2 可用下式计算:

$$B_2 = K (B_a/B_w)^{1/2} e^{-0.14v_s} v_a S \cos(180^\circ - \alpha) / |u_s \cos \alpha + u_d \cos \beta| \quad (6)$$

式中: K 为系数, 一般取为 0.038 ~ 0.041; B_a 为船体水线上侧受风面积 (m^2); B_w 为船体水线下侧

面积(m^2), 该值可根据船长和吃水来确定; v_s 为风中船速(km/h); v_a 为相对风速(m/s)。在弯道中如果考虑横流与船体的夹角 β 为 90° , 则 $u_d \cos\beta$ 为 0, 式(6)可进一步简化。当 2 000 t 船在风速 6 级(13.8 m/s), 风中船速 $v_s = 11.1$ km/h, 船速 $u_s = 5.77$ km/h, 偏航角 α 为 3° 时, 运用式(6)计算可知, 风致漂移量在 25 m 左右。

2.3 船与建筑物墩部最小距离

建筑物墩部存在大量的紊流漩涡区, 在漩涡区内, 水流条件复杂(图 3), 复杂的水流不但会对船舶产生吸引作用, 而且在此区域内, 船舶的保向性和旋回性都较差。因此在确定弯曲航道的宽度时, 一般应将建筑物墩部排除在航道宽度之外。运用 RNG $k-\varepsilon$ 模型对建筑物墩部的紊流漩涡区范围进行数值模拟, 可得到如图 4 所示的曲线。

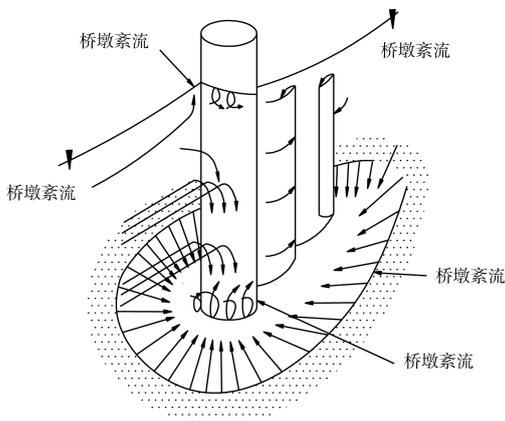
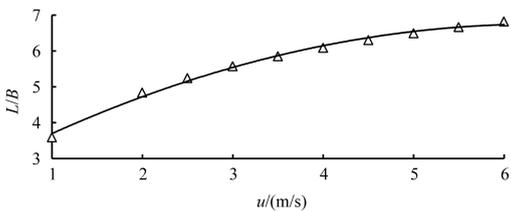


图 3 桥墩紊流漩涡



注: u 为坐标是断面纵向流速(m/s); B 为建筑物迎流面的最大宽度(m); L 为建筑物墩部紊流范围(m)。

图 4 紊流漩涡区范围与流速关系

图 4 中的拟合曲线可得到桥墩紊流漩涡区范围的如下经验表达式:

$$L/B = -0.1046u^2 + 1.3398u + 2.4583 \quad (7)$$

式(7)的应用范围为: $u = 1 \sim 6$ m/s, $B = 0.5 \sim 5$ m。天然河流的流速范围大多在 $1 \sim 6$ m/s, 建筑物墩部的迎流面宽度也大多在 $0.5 \sim 5$ m。虽然式(7)是个量纲不统一的经验公式, 但在实际工程应用中, 可用该公式大致计算建筑物墩部的紊流漩涡区范围。

3 跨河建筑物最小跨度

跨河建筑物的跨度不能小于可航水域的宽度。也可以说弯曲航道的宽度即是跨河建筑物的最小跨度。对于天然弯道的单向通航航路, 其宽度应满足下式的要求:

$$B_s = B_1 + B_2 + B_m + 2L \quad (8)$$

式中: B_s 为单向航路的航迹带宽度; B_m 为代表船型所占的航迹带宽度, 此宽度可按照 GB 50139—2014《内河通航标准》的要求进行取值。对于双向航路而言, 式(8)中的 B_m 应该由上水和下水船的航迹带宽度之和表示, 同时在式(8)中还应增加船间间距(船间间距也可按照我国标准的要求进行取值)。例如, 某弯曲河道的曲率半径为 1 000 m, 水深 15 m, 纵向流速 5 m/s, 吃水 9 m 的万吨级船舶在 6 级风情况下以 18.5 km/h 航速保持 $3^\circ \sim 5^\circ$ 的偏航角单向通过桥区(桥墩直径为 2 m), 按照式(8)的计算结果航道宽度在 170 m 左右, 这也说明, 对于此单向航道而言, 其上空的跨河建筑物跨度不应小于 170 m。

4 结论

- 1) 对于弯道而言, 跨河建筑物跨度应考虑桥墩紊流区范围、风致漂移量和流致漂移量等因素。
- 2) 结合天然弯道水流特性, 提出了桥墩紊流区范围、风致漂移量和流致漂移量的计算方法。天然河流跨河建筑物墩部紊流区范围时可按照公式(7)计算; 流致漂移量时可按照公式(5)和公式(2)计算; 风致漂移量时可按照公式(6)进行计算。

3) 在缺乏实船试验数据时, 可初步按式(8)确定天然弯道跨河建筑物的最小跨度。