



# 航道设标弯曲半径快速估算方法

朱彬华<sup>1</sup>, 刘作飞<sup>1</sup>, 杜新文<sup>1</sup>, 徐小雯<sup>2</sup>

(1. 长江重庆航道局, 重庆 401120; 2. 长江武汉水上应急救援基地, 湖北 武汉 430014)

**摘要:** 针对航标优化调整后复核航道弯曲半径耗时长的的问题, 基于航道养护现场的特点, 提出航道设标弯曲半径快速估算方法。该方法根据相邻航标作用距离连线、外接圆弧、航宽, 三角函数方程, 并联合坐标系理论而得到。通过正、余弦定理推导, 将航标连线外接圆半径解出。在基于坐标系的基础上利用三角形解析, 将航标连线有遮挡的外接圆半径解算。在3处典型弯曲河段进行设标, 验证航道弯曲半径快速估算的正确性、及时性。研究结果可为现场快速估算弯曲半径, 以及准确、及时核查航道弯曲半径提供参考。

**关键词:** 航道尺度; 弯曲半径; 快速估算

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0113-04

## Fast estimation method for bending radius of channel marking

ZHU Binhua<sup>1</sup>, LIU Zuofei<sup>1</sup>, DU Xinwen<sup>1</sup>, XU Xiaowen<sup>2</sup>

(1. Chongqing Waterway Bureau of the Yangtze River, Chongqing 401120, China;

2. Wuhan Water Emergency Rescue Base on the Yangtze River, Wuhan 430014, China)

**Abstract:** In view of long time-consuming problem of rechecking the bending radius of the channel after optimizing and adjusting the navigation mark, based on the characteristics of the channel maintenance site, a quick estimation method for the bending radius of the channel marking is proposed. The method is obtained based on the connecting line of the adjacent navigation mark action distance, the circumscribed arc, the navigation width, the trigonometric function equation, and the coordinate system theory. Through the derivation of the sine and cosine theorems, the radius of the circumscribed circle of the navigation mark connecting line can be solved. Based on the coordinate system, the radius of the circumscribed circle of the navigation mark connecting line with obstruction can be calculated by using the triangular analysis. The verification of the setting mark in three typical curved river sections has verified the correctness and timeliness of the rapid estimation of the channel bending radius. The results can provide reference for how to quickly estimate the bending radius on site, so as to accurately and timely check the bending radius of the channel.

**Keywords:** channel scale; bending radius; quick estimation

航标设置及优化调整需满足规划确定的航道尺度, 主要包括水深、宽度和弯曲半径等<sup>[1]</sup>, 在航道养护过程中, 为更好地服务地方经济社会发展, 在保证最低规划尺度的基础上, 根据水位变化、水流流态、船舶航行特点, 及时优化调整航标, 进一步提升航道尺度的利用效率。对于航标优化调整后的航道尺度复核, 航道水深可以通过

现场水下测量确定, 航道宽度可通过现场航标连线确定, 但航道弯曲半径无法根据现场测量数据直接确定。实际操作往往需要经过多次测算才能确定合适的标位, 延长调标的时间, 降低了航道养护的效率。

航道弯曲半径是航道中心线的曲率半径, 对于航道弯曲半径的确定, 要考虑船舶或船队的长

收稿日期: 2023-12-13

作者简介: 朱彬华 (1982—), 男, 工程师, 从事航道航标方面工作。

度、回转角大小、操纵性能以及弯道水流条件等多种因素的影响<sup>[2]</sup>。GB 50139—2014《内河通航标准》<sup>[3]</sup>中规定我国内河航道最小弯曲半径，应采用顶推船队长度的3倍、货船长度的4倍、拖带船队最大单船长度的4倍中的最大值<sup>[4]</sup>。目前航道弯曲半径实际长度一般采用几何作图法在航道图或者航行图上量取<sup>[5]</sup>，准确度较高，但运用到航标现场调整变化后的尺度复核上，耗时较长，过程复杂。过往研究多集中在确定航道弯曲半径的方法上，但没有现场快速计算航道弯曲半径方法的相关研究，因此有必要对航道设标弯曲半径快速估算的方法开展研究。

### 1 常规航标配布弯曲半径的确定方法

#### 1.1 航标配布的要求

航标配布应与航运、港口、船型发展以及内河航道建设相协调，与干支交汇处、江海分界处相衔接，并充分利用江河、湖泊等具体航行条件，以及航路布置和船舶航行特点，简洁、明了地標示出安全、经济而又便于船舶航行的航道<sup>[6]</sup>。

航标连续配布航道，其航道界限由距各浮标或岸标处最小安全航行距离的点位连线勾勒而成；航标不连续配布时，其航道界限由设定的航道尺度、功能连续的航标标位处最小安全航行距离组成。

#### 1.2 航道弯曲半径的实际长度量取方法

航道弯曲半径一般采用几何作图法量取。在航道图上以航道界限确定航道中心线，以弯曲航道中心线为圆弧，在圆弧上取3点，其中间一点取在最弯处，另两点取在弯颈附近，依次连接3点形成线段(即圆的2根弦)，作这两条线段的中垂线，其中垂线的交点作为圆点，则圆点至3点中任一点的距离为该河弯段的弯曲半径(通过比例尺换算为实际长度)。

#### 1.3 主要问题

在实际航道养护过程中，每次航标布设及优化调整后，需要采用几何作图法复核弯曲半径，整个过程耗时长，且不能在现场准确、快速地评估弯曲半径是否满足技术要求。

## 2 设标半径计算方法

### 2.1 设标弯曲半径的概念

为便捷快速复核现场设标后的弯曲半径，引入设标弯曲半径的概念，即在突岸处选定3个相邻的航标，由其组成三角形的外接圆半径就是航道设标弯曲半径。外接圆弧度的大小可以直观反映航道的弯曲程度，利用求得的设标弯曲半径值得出航道弯曲半径的近似值，见图1。由定义可知，设标半径取航道边缘数值，而航道弯曲半径取航道中心线数值，所以两者在数值上相差航道宽度的一半。

$$R \approx r + \frac{L}{2} \tag{1}$$

式中： $R$ 为航道弯曲半径， $r$ 为设标弯曲半径， $L$ 为航道宽度。

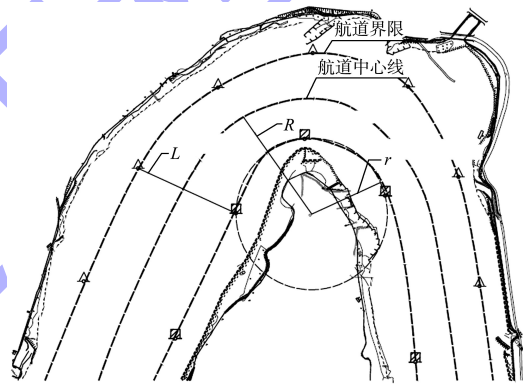


图1 设标弯曲半径

### 2.2 设标弯曲半径的快速计算方法

#### 2.2.1 三航标间无障碍物

设所选择的3个标志点分别为A、B、C，见图2。

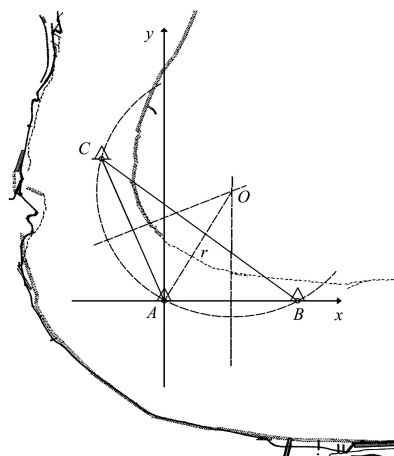


图2 无障碍物  $r$  计算过程

这种情况适用于3个浮标之间的距离可以直接用测距仪测出, 期间没有障碍物的遮挡, 根据余弦定理:

$$\cos\alpha = \frac{b^2+c^2-a^2}{2bc} \quad (2)$$

正弦定理:

$$2r = \frac{a}{\sin\alpha} \quad (3)$$

可得:

$$r = \frac{abc}{\sqrt{(a+b+c)(a+b-c)(b+c-a)(a+c-b)}} \quad (4)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为  $AB$ 、 $BC$ 、 $AC$  间的距离,  $\alpha$  为  $AB$  与  $AC$  间的夹角。

### 2.2.2 三航标间有障碍物

如图3所示,  $AC$  的长度很难测出, 但使用测距仪则容易测出  $AB$ 、 $BC$  的距离, 用角度测量仪测  $\angle ABC$  的角度, 利用三角形解析的相关理论, 同样可以得出设标弯曲半径。

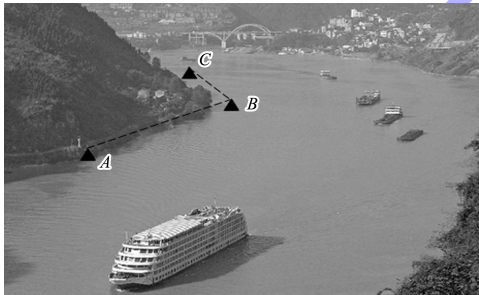


图3 三航标间有障碍

线段  $AB$  的垂直平分线方程为:

$$x = a/2 \quad (5)$$

$C$  点的坐标为  $(c\cos\alpha, c\sin\alpha)$ , 记为  $(x_1, y_1)$  且

$A$  点坐标  $(0,0)$ , 则  $AC$  的垂直平分线方程为:

$$y = -\left(\frac{x_1}{y_1}\right)\left(x - \frac{x_1}{2}\right) + \frac{y_1}{2} \quad (6)$$

可得:

$$y = -\frac{a\cos\alpha}{2\sin\alpha} + c\frac{\cos^2\alpha}{2\sin\alpha} + c\frac{\sin\alpha}{2} \quad (7)$$

所以外接圆圆心  $O$  点坐标为  $\left(\frac{a}{2}, -\frac{a\cos\alpha}{2\sin\alpha} + c\frac{\cos^2\alpha}{2\sin\alpha} + c\frac{\sin\alpha}{2}\right)$ , 记为  $(x_0, y_0)$ , 则线段  $OA$  的长度

即  $r$  为:

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(-\frac{a\cos\alpha}{2\sin\alpha} + c\frac{\cos^2\alpha}{2\sin\alpha} + c\frac{\sin\alpha}{2}\right)^2} \quad (8)$$

### 3 案例分析

选取三角碛、谢家碛、粗柄碛3处弯曲河段为测试水域, 见图4, 3处河段规划的弯曲半径值均为560 m。测算结果见表1。

通过常规几何作图法, 计算出  $R$ 、 $r$  及规定最小弯曲半径, 见表2。

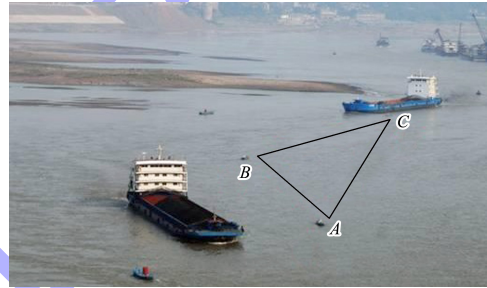


图4 测试水域

表1  $r$  计算结果

水域	AB 距离/m	BC 距离/m	CA 距离/m	$r/m$
三角碛	300	405	675	604.4
谢家碛	530	860	1170	633.0
粗柄碛	300	303	585	621.6

表2 几何作图结果

水域	$r/m$	$L/m$	$R' = r + L/2$ 近似值/m	$R$ 作图量取 弯曲半径/m	最小弯曲 半径/m
三角碛	604.4	52	630.4	634.1	560
谢家碛	633.0	74	670.0	689.3	560
粗柄碛	621.6	92	667.6	645.6	560

由表1、2可以看出, 用  $r$  所求的航道弯曲半径近似值  $R'$  与几何作图测得航道弯曲半径  $R$  误差不大, 且均满足最小弯曲半径的要求。

通过上述方法比较, 航道弯曲半径常规复核方法首先需要找到航道中心线, 再采用几何作图的方式测算出航道的弯曲半径。而  $r$  的计算过程相对简便, 省去作图的环节, 大大缩短了计算时间, 且计算结果与几何作图法相差不大。航道弯曲半径和设标弯曲半径的计算过程见图5。

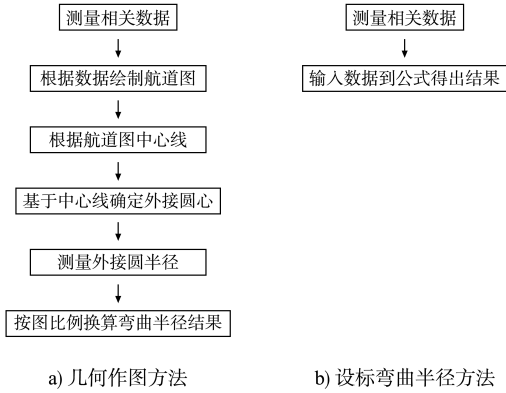


图5 两种方法过程对比

### 4 结论

1) 通过对长江上游3处典型弯曲河段试验性计算, 航道设标弯曲半径  $r$  得到的航道弯曲半径近似值  $R'$  与常规几何作图法测算的航道弯曲半径  $R$  相差不大, 该计算方法可行。

2) 航道设标弯曲半径值简便易求, 满足现场准确、快速地估算航道弯曲半径, 可为航道部门及时掌握航道尺度提供有力的技术支持。

### 参考文献:

[1] 刘均卫, 刘涛. 三峡库区支流常年库区航道通航尺度研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(11): 1711-1719.

[2] 蒋忠绥. 湘江水系航道整治线弯曲半径的计算式和方方法[J]. 水运工程, 1980(1): 29-35.

[3] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[4] 邓年生, 王炳奇. 弯曲航道平面尺度研究[J]. 水运工程, 2004(2): 74-78.

[5] 李志云, 郭国平. 关于弯曲河道对船舶通航影响的研究及对策[J]. 中国水运(理论版), 2007, 5(3): 8-9.

[6] 长江航道规划设计研究院. 内河助航标志: GB 5863—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

( 本文编辑 赵娟)

(上接第112页)

### 5 结论

1) 本文采用组分输运模型和 LES 湍流模型建立的三维集咸坑防咸数值模型能够准确模拟集咸坑内盐水异重流运动过程。

2) 集咸坑深度和体积增大, 对于盐水上溯初期的抑制效果更显著; 但是随着时间延长, 集咸坑深度越大, 盐水上溯的距离和速度反而有所增加。表明修建大深度集咸坑为盐水涌入提供了空间, 盐水异重流动力相对增强, 因此盐水沿河道上溯更远。

3) 集咸坑深度和体积越大, 上引航道盐度和盐淡水交换率越小, 集咸坑防咸效果越好。集咸坑深度大于 10 m, 上引航道盐度低于 0.25‰, 盐淡水交换率低于 53.42%。此时能够保障周边取水工程水质安全, 减少河口船闸建设工程量和工程造价。

### 参考文献:

[1] 周华兴. 河口船闸海水入侵及其防治[J]. 河海科技进

展, 1994(2): 48-55.

[2] INCOM W G. Ship behaviour in locks and lock approaches [R]. Brussels: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2015.

[3] 卢陈, 袁丽蓉, 高时友, 等. 潮汐强度与咸潮上溯距离试验[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 251-257.

[4] YIN X L, HE Y, LU C, et al. Experimental study on front spreading of lock-exchange gravity current with long lock length [J]. Journal of engineering mechanics, 2020, 146(1): 04019113.

[5] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2004.

[6] 李达宏. 平陆运河盐水上溯机制及减盐措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[8] 周华兴, 孙玉萍. 船舶过“海船闸”时盐水入侵量的分析与计算[J]. 海岸工程, 1987 (2): 48-57.

( 本文编辑 王璁)