

往复流条件下灯浮标回旋运动的参数估计

陈麒龙¹, 毛新健²

(1. 集美大学理学院, 福建 厦门 361021; 2. 交通运输部东海航海保障中心上海航标处, 上海 201208)

[摘要] 为了分析往复流条件下的灯浮标回旋运动规律, 先提出以回旋中心和回旋半径作为定量描述灯浮标回旋运动的参数, 然后提出基于核密度的参数估计模型。实验结果表明: 在往复流条件下回旋半径参数估计值的波动周期与往复流的周期具有统计上的一致性, 参数估计值有效。为了定量描述往复流条件下灯浮标安全领域对航道的占用程度, 进而优化灯浮标配布, 提出基于回旋半径的航道占用率算法。实验结果表明: 在往复流条件下此算法能够有效度量灯浮标安全领域对航道的占用程度, 有助于分析和优化灯浮标配布。

[关键词] 灯浮标; 参数估计; 核密度估计; 回旋运动

[中图分类号] O 212.1; U 644.8

Parameter Estimation of Light Buoy Cyclotron Motion in Reverse Tidal Stream

CHEN Qilong¹, MAO Xinjian²

(1. School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Shanghai Aids to Navigation Department of
Donghai Navigation Safety Administration MOT, Shanghai 201208, China)

Abstract: In order to analyze the cyclotron motion pattern of a light buoy in reverse tidal stream, the cyclotron center and cyclotron radius are used as parameters to quantify the cyclotron motion of the light buoy, then a parameter estimation model based on kernel density is proposed. The experimental results show that the fluctuation cycle of cyclotron radius parameter estimation is statistically consistent with that of the reverse tidal stream, and the parameter estimation is effective. In order to quantify the occupation rate of the light buoy safety field to the fairway in reverse tidal stream, and then optimize the light buoy distribution, a fairway occupancy algorithm based on cyclotron radius is proposed. The experimental results show that this algorithm can effectively measure the occupation rate of the light buoy safety field to the fairway in reverse tidal stream, which is helpful to analyze and optimize the light buoy distribution.

Keywords: light buoy; parameter estimation; kernel density estimation; cyclotron motion

0 引言

灯浮标的系碇结构由沉石和锚链组成。沉石起到海底固定作用, 锚链长度通常按照 3 倍水深配置, 富余的锚链起到伸缩调节和增加海底附着力的作用, 但是会导致灯浮标在回旋半径内漂移^[1-2]。

[收稿日期] 2020-03-10

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41501490); 集美大学航海学院船舶辅助导航技术国家地方联合工程研究中心开放基金项目

[作者简介] 陈麒龙(1988—), 男, 助理实验师, 从事数据建模与应用统计方向的研究。

如果灯浮标回旋半径过大,就会占用航道。因此,量化灯浮标回旋运动对航道的影响有助于优化灯浮标配布,为灯浮标位置调整提供参考数据。文献 [1] 用欧氏距离计算灯浮标的理论回旋半径,以灯浮标安全领域边界与航道中心线的垂直距离作为灯浮标回旋运动对航道占用的度量^[1]。然而,从安装在灯浮标上的远程测控装置逐小时传回的位置数据(经度、纬度)观测到的情况是:在往复流条件下,回旋区域边界点之间的距离大于 2 倍理论回旋半径。说明以欧氏距离计算回旋半径误差较大,需要研究更为合理的算法。因此,本文先提出定量描述往复流条件下灯浮标回旋运动的参数,然后提出基于核密度的参数估计模型。为了度量往复流条件下灯浮标安全领域对航道的占用程度,进而优化灯浮标配布,提出基于回旋半径的航道占用率算法。

1 灯浮标回旋运动参数估计

1.1 参数设计

潮流是灯浮标回旋运动的主要外力,潮流对灯浮标的作用是持续且具有周期性的。往复流是随着涨、落潮,流向相反或基本相反的潮流,受其影响的灯浮标回旋运动所形成的区域是一个近似椭圆形的不规则区域。因此,以回旋中心和回旋半径作为往复流条件下定量描述灯浮标回旋运动的参数。

1) 回旋中心参数指灯浮标回旋区域大概率的中心点;2) 回旋半径参数指每日所有的灯浮标位置与回旋中心距离最大的数值,用于度量每日的灯浮标回旋区域的边界,对于近似椭圆形的回旋区域,回旋半径相当于长轴半径。

1.2 参数估计建模

1.2.1 核密度估计原理

设 x_1, x_2, \dots, x_n 是取自一元连续总体的样本,在任意点 x 处的总体密度函数 $f(x)$ 的核密度估计定义为: $\hat{f}(x) = (1/nh) \sum_{i=1}^n K((x - X_i)/h)$, $K(u)$ 称为核函数, $u = (x - X_i)/h$, h 称为窗宽。为了保证 $\hat{f}(x)$ 作为密度函数估计的合理性,必须满足 $K(u) \geq 0$, $\int_{-\infty}^{+\infty} K(u) du = 1$, 即要求核函数 $K(u)$ 是某个分布的密度函数。

本文的 $K(u)$ 选用高斯核函数,即: $K(u) = \exp(u^2/2)/\sqrt{2\pi}$ 。窗宽 h 的取值会影响到 $\hat{f}(x)$ 的光滑程度, h 越小,核估计的偏差越小,但是方差越大;反之, h 增大,则核估计的方差变小,偏差却增大;所以,最佳窗宽 h 必须在核估计的偏差和方差之间作权衡,使积分均方误差达到最小^[3];当核函数 $K(u)$ 是高斯核函数时,最优窗宽 $\hat{h} = 1.06\sigma n^{-1/5}$,在实际应用中 σ 由样本标准差来代替。

如果 (x_1, x_2, \dots, x_n) 是 d 维向量,在任意 x 处的总体密度函数 $f(x)$ 的核密度估计定义为: $\hat{f}_d(x) = (1/n h^d) \sum_{i=1}^n K((x - X_i)/h)$, $K(u)$ 是定义在 d 维空间上的核函数, $u = (x - X_i)/h$, h 称为窗宽^[4]。本文的 $K(u)$ 选用多维标准正态密度函数,即: $K(u) = (2\pi)^{-d/2} \exp(-u^T u/2)$, 最优窗宽 $\hat{h} = \{4/(d+2)\}^{1/(d+4)} n^{-1/(d+4)}$ 。

1.2.2 建模步骤

1) 将 n 天的逐小时灯浮标位置数据作为变量,用 x 表示; x_{ij} 表示第 i 天第 j 时的灯浮标位置, $1 \leq i \leq n$, $0 \leq j \leq 23$; 估计灯浮标位置变量 x 的二维概率密度函数 $\hat{f}_{d=2}(x)$ 。

2) 回旋中心参数的点估计。设 $\hat{f}_{d=2}(x)$ 是多峰分布, m 个峰的概率密度值为 y_1, y_2, \dots, y_m , 对应的变量值为 x_1, x_2, \dots, x_m ; 第 k 个变量值 x_k 的权重 $w_k = y_k / \sum_{k=1}^m y_k$; 加权均值 $\bar{x} = \sum_{k=1}^m x_k w_k$; 以加权均值 \bar{x} 作为回旋中心参数的点估计,可以削弱低概率密度的变量值对参数估计值的影响。

3) 回旋半径参数的点估计。 r_i 表示第 i 天的回旋半径点估计, $r_i = \max\{L(x_{ij}, \bar{x})\}$, $0 \leq j \leq 23$;

$L(x_{ij}, \bar{x})$ 表示第 i 天第 j 时的灯浮标位置 x_{ij} 与回旋中心 \bar{x} 的地表距离; $\max\{L(x_{ij}, \bar{x})\}$ 表示第 i 天所有灯浮标位置与回旋中心的地表距离的最大值。

1.3 参数估计值有效性实证分析

1) 实验数据来源

灯浮标的位置数据是由安装于灯浮标上的远程测控装置内的 GPS 模块逐小时采集并上传到航标远程测控系统。洋山港主航道的 Y4#灯浮标在 20191101—20191231 期间的逐小时位置数据取自上海航标处的航标远程测控系统。

潮汐和潮流数据取自海洋出版社出版的《2019 潮汐表》(国家海洋信息中心编), 潮汐数据取与 Y4#灯浮标最近的滩浒潮汐预报点的数据; 潮流数据取与 Y4#灯浮标最近的杭州湾口潮流预报点的数据。Y4#灯浮标所在水域的潮流属于不规则半日潮, 潮流流速较大, 潮流运动呈现明显的往复流; 流速随涨、落潮呈周期性变化, 在转流后 3 h 达到当日最大流速; 日最大流速的变化规律与潮汐交替出现大潮日和小潮日的周期规律一致, 在大潮日达到“大潮最大流速”, 在小潮日达到“小潮最大流速”, 大潮周期和小潮周期的平均值为 14.8 d。

2) Y4#灯浮标回旋运动的参数估计

Y4#灯浮标位置的概率密度呈多峰分布如图 1 所示。以概率密度峰值的加权均值 (E122.282 616 25°, N30.542 940 85°) 作为回旋中心估计值, 然后计算每日的回旋半径估计值, 如图 2 所示。

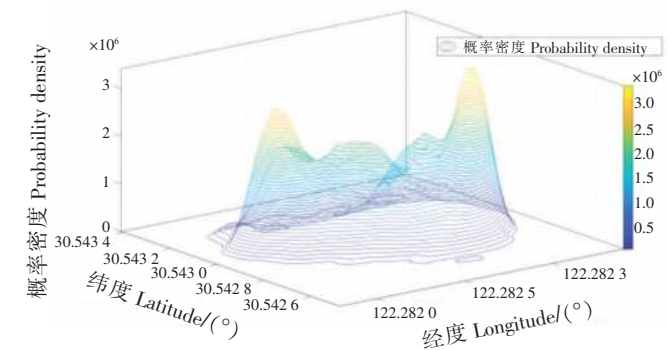


图 1 Y4# 灯浮标位置的概率密度分布

Fig.1 Probability density distribution of Y4# light buoy position

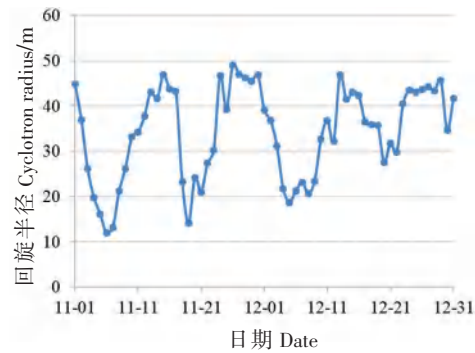


图 2 Y4# 灯浮标回旋半径时间序列

Fig2 Y4# light buoy cyclotron radius time series

3) Y4#灯浮标回旋运动参数估计值有效性检验

Y4#灯浮标回旋运动的主要外力是往复流作用力, 由 n 个回旋半径估计值所组成的回旋半径时间序列 $\{r_t\} (1 \leq t \leq n)$ 应当能够反映往复流的周期性波动规律, 即: $\{r_t\}$ 呈周期性涨落, 且波峰和波谷的周期在统计上应当接近 14.8 d。

如表 1 所示, Y4#灯浮标回旋半径的波峰平均周期为 14.0 d, 波谷平均周期为 15.0 d, 波峰周期和波谷周期的平均值为 14.5 d, 接近 14.8 d, 表明回旋半径的波动周期与往复流周期具有统计上的一致性。

4) Y4#灯浮的回旋半径波动规律分析

根据中心极限定理, 当样本量大于 30 时, 回旋半径样本均值经过标准化后应当近似服从标准正态分布。检验方法是: 对连续 61 d 的回旋半径估计值进行 49 次简单随机抽样, 每次抽样的样本容量为 40, 将 49 个样本均值标准化后使用 Kolmogorov-Smirnov 检

表 1 Y4#灯浮标回旋半径时间序列波动周期

Tab.1 Fluctuation cycle of Y4# light buoy cyclotron radius time series

波 Wave	日期 Date	周期 Cycle/d	平均周期 Average Cycle/d
波峰 Peak	11 - 16		14.0
	11 - 29	13	
	12 - 16	17	
	12 - 28	12	
波谷 Valley	11 - 05	-	15.0
	11 - 20	15	
	12 - 05	15	
	12 - 20	15	

验法来检验是否服从标准正态分布，检验原理如下。

原假设：回旋半径样本均值服从正态分布；

备择假设：回旋半径样本均值不服从正态分布；

统计量 $D = |F_n(x_{(i)}) - F_0(x_{(i)})|_{\max}, 1 \leq i \leq n$ 。其中： $F_0(x)$ 是正态分布函数； $F_n(x)$ 表示一组随机样本的累积概率函数； D 表示 $F_0(x)$ 与 $F_n(x)$ 差距的最大值；取显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，用 p -value 表示实际观测的显著性水平，当实际观测值 $D < D_\alpha$ 或 p -value $< \alpha$ ，则拒绝原假设，反之则不拒绝原假设。如果回旋半径样本均值近似服从正态分布，且是周期性波动的，则说明回旋半径数值的波动规律是沿着总体均值作周期性波动。

当显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时，49 个样本均值的 Kolmogorov-Smirnov 检验的统计量 $D = 0.060\ 852$ ， p -value $= 0.988\ 4$ ， p -value $> \alpha$ ，不拒绝原假设（回旋半径样本均值服从正态分布）。

图 3 中叉号位置的数值为 48.21 m，是回旋半径总体均值的点估计，回旋半径数值的波动规律是：沿着 48.21 m 作周期性波动，交替出现波峰和波谷。

5) 实验结论

以 Y4#灯浮标为例证明了灯浮标回旋半径的波动周期与往复流周期具有统计上的一致性，基于核密度的回旋中心和回旋半径参数估计值能够有效反映灯浮标回旋运动规律。Y4#灯浮标回旋半径的总体均值点估计和 Kolmogorov-Smirnov 检验，证明了 Y4#灯浮标回旋半径的波动规律是：沿着回旋半径的总体均值作周期性波动，交替出现波峰和波谷。

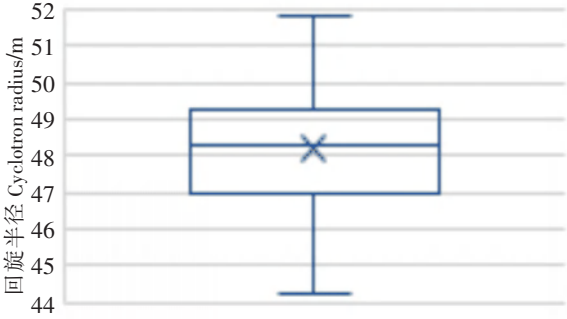


图 3 Y4# 灯浮标回旋半径样本均值箱线图
Fig.3 Boxplot of Y4# light buoy cyclotron radius sample mean

2 灯浮标安全领域占用航道的定量分析

灯浮标安全领域是指船舶为了避碰，在灯浮标的回旋区域之外保持足够的避碰距离所形成的区域。在灯浮标安全领域之外行驶的船舶不会碰撞灯浮标，在灯浮标安全领域之内行驶的船舶由于避碰距离不足，有可能碰撞灯浮标。灯浮标安全领域对航道的占用程度可以衡量灯浮标回旋运动对航道的影响。灯浮标回旋半径可以用于推算灯浮标安全领域对航道的占用率，有助于分析和优化灯浮标配布。

2.1 占用率算法

回旋半径是一个变量，用于度量某日灯浮标回旋区域的边界。最大回旋半径是指回旋半径变量所能到达的最大值。估计最大回旋半径的方法是：估计回旋半径变量 r 的概率密度函数 $\hat{f}(r)$ 。将累积概率为 1 时的变量值作为最大回旋半径估计值 \hat{r} ， \hat{r} 表示在回旋半径变量值波动的情况下可能出现的最大回旋半径的数值。

设灯浮标最大回旋半径为 \hat{r} ，船舶避碰距离为 d 。灯浮标安全领域半径 R 的计算公式：

$$R = \hat{r} + d。$$
(1)

在墨卡托投影坐标系中，航道边界线与灯浮标安全领域的交点为 $A(x_1, y_1)$ 和 $B(x_2, y_2)$ ，如图 4 所示。航道边界线斜率 k 的计算公式：

$$k = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)。$$
(2)

以 A 和 B 为端点形成的线段称为弦长 AB ，计算公式：

$$AB = |x_1 - x_2| \sqrt{1 + k^2}。$$
(3)

灯浮标的回旋中心点 O 与弦长 AB 之间的垂线与 AB 相交于点 E ，以点 O 和点 E 为端点形成的线段称为弦心距 OE ，计算公式：

$$OE = \sqrt{R^2 - (AB/2)^2} \quad (4)$$

线段 OA 、 OB 和弦长 AB 所形成的三角形称为弦心三角形, 其面积计算公式为:

$$S_{AOB} = AB/2 \times OE = AB \sqrt{R^2 - (AB/2)^2} / 2. \quad (5)$$

线段 OA 、 OB 和弧 \widehat{AB} 所形成的扇形的面积计算公式为:

$$S_{OAB} = \pi R^2 \arcsin(AB/2R)/180^\circ \quad (6)$$

用阴影部分表示的灯浮标安全领域与单侧航道相交的区域,其面积计算公式为:

$$S_{AB} = S_{OAB} - S_{AOB} = \pi R^2 \arcsin[AB/(2R)]/180 - (AB/2) \sqrt{R^2 - (AB/2)^2} \quad (7)$$

航道宽度为 W ，单侧航道的宽度为 $W/2$ ，单侧航道在灯浮标附近区域的面积计算公式为：

$$S_o = W \times AB/2_o \quad (8)$$

灯浮标安全领域对航道的占用率用 Z 表示, Z 越大表示灯浮标安全领域与航道的重叠区域越大, 计算公式:

$$Z = S_{AB}/S_o = \pi R^2 \arcsin[AB/(2R)]/(90W \cdot AB) - \sqrt{R^2 - (AB/2)^2}/W. \quad (9)$$

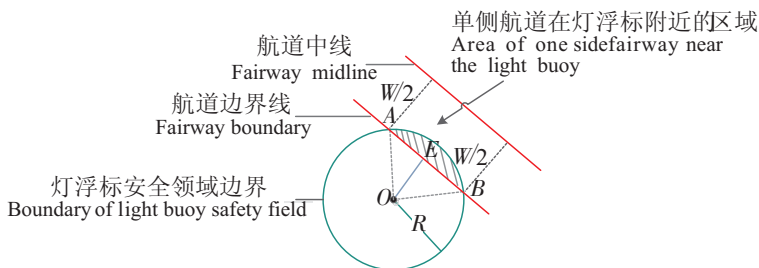


图 4 灯浮标安全领域与单侧航道相交示意图

Fig.4 Schematic diagram of intersection between light buoy safe field and one side fairway

2.2 实例分析

1) Y4#灯浮标安全领域对航道的占用率计算

以 Y4#灯浮标为例,回旋半径的概率密度分布如图 5 所示,当回旋半径到达 72.41 m 时,累积概率为 1。所以,取 72.41 m 作为 Y4#灯浮标最大回旋半径的估计值。船舶与灯浮标必须保持至少 40 m 的避碰距离,因此 Y4#灯浮标安全领域半径 $R = 112.41$ m。

已知洋山港主航道在 Y4#灯浮标附近区域的宽度 $W=800\text{ m}$ ，在墨卡托投影坐标系中，航道边界与安全领域的两个交点坐标分别是： $A(13\ 612\ 332.73, 3\ 573\ 562.28)$ 和 $B(13\ 612\ 548.31, 3\ 573\ 527.86)$ ，根据以上公式计算得到航道占用率 $Z=0.16$ 。

2) 分析与建议

Y4#灯浮标附近航道边界水域的水深为 19.3 m, 水深条件较好, 常有船舶在航道边界附近行驶。在 20191101—20191231 期间, 经过 Y4#灯浮标所在的单侧航道的船舶共计 1 249 艘次, 其中有 274 艘次从 Y4#灯浮标安全领域内经过。Y4#灯浮标安全领域对航道的占用率达 0.16, 途经的船舶中有 21.9% 的船舶与 Y4#灯浮标之间的避碰距离不足 40 m。建议将 Y4#灯浮标沿垂直航道边界线向外移动 113 m, 确保航道边界附近行驶的船舶与 Y4#灯浮标之间有足够的避碰距离。

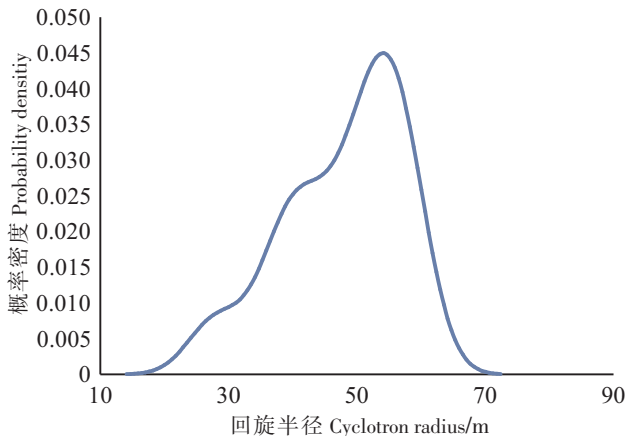


图 5 Y4# 灯浮标回旋半径的概率密度分布

Fig.5 Probability density distribution of Y4# light buoy cyclotron radius

3 结论

为了分析往复流条件下的灯浮标回旋运动规律,先提出以回旋中心和回旋半径作为定量描述灯浮标回旋运动的参数,然后提出基于核密度的参数估计模型,并以洋山港主航道 Y4#灯浮标为例,证明了参数估计值能够反映灯浮标回旋运动规律。为了定量描述往复流条件下灯浮标安全领域对航道的占用程度,进而优化灯浮标配布,提出基于回旋半径的航道占用率算法,以洋山港主航道 Y4#灯浮标为例,证明了此算法能够有效度量灯浮标安全领域对航道的占用程度,然后结合途经灯浮标的船舶统计数据,分析灯浮标回旋运动对航道和船舶的影响,最后提出调整灯浮标配布的建议。下一步将继续研究回转流水域、非典型潮汐潮流水域的灯浮标回旋运动规律和参数估计模型。

[参 考 文 献]

- [1] 李维运. 航标回旋半径对航道影响的研究 [C] //2008—2009 年船舶通信导航论文集. 中国航海学会, 2009: 89-90.
- [2] 曹钜旋. 灯浮标系碇结构的改进探讨 [C] //绿色船舶与海洋装备创新发展及产业化论坛论文集. 中国科学技术协会, 2012: 23-28.
- [3] 杨楠, 周峥, 陈道君, 等. 基于非参数核密度估计的风功率波动性概率密度建模方法 [J]. 太阳能学报, 2019, 40(7): 2028-2035.
- [4] 扈海波, 张西雅, 王瑛. 基于二维高斯核密度方法的多空间尺度地闪密度推算 [J]. 自然灾害学报, 2019, 28(5): 172-180.
- [5] ANDREW HARVEY, VITALIY ORYSHCHENKO. Kernel density estimation for time series data [J]. International Journal of Forecasting, 2012, 28(1): 3-14.
- [6] YADAV R, RAJ S, PRADHAN A K. Real-time event classification in power system with renewables using kernel density estimation and deep neural network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6849-6859.
- [7] 王学民. 关于样本均值的抽样分布能否作正态近似的探讨 [J]. 统计研究, 2005(7): 75-78.
- [8] 关丽红, 李映红. 随机序列几乎处处中心极限定理的注记 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2018, 56(2): 306-310.
- [9] 殷加珏, 赵冬梅. 基于全概率风险度量的电力系统备用风险评估方法 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 156-162.
- [10] 朱华平, 温新, 戴炳业, 等. 基于核密度估计的饮用水安全风险评价 [J]. 中国食品学报, 2009, 9(5): 207-211.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)