

文章编号: 1000-4653(2022)02-0008-06

# 基于稳定流场重载船舶变速运动的船位轨迹预判

吕锡宝, 王武修

(青岛引航站, 山东 青岛 266106)

**摘要:** 为提高预判变速运动船舶船位轨迹变化的精确性,使其轨迹运行于预设的航线并且抵达目的地,减少不必要的航向和速度调整,有必要对变速运动船舶的纵向和横向位移进行量化。根据流体力学的原理,运用数学推理和运算的方法,得出船舶变速运动在均匀流场时,纵向位移与横向位移的函数关系;推导出船舶停车淌航和加速运动轨迹的函数表达式。结果表明:变速运动的船舶,其船位轨迹是根据流场、船舶操纵参数而变化的曲线,是可以预判的。操船者根据本船的初始速度和流压角,在停车前较精确地调整好船舶的船向,使船舶沿预定的航线驶向目的地;或在加速驶向狭窄航道的计划航线时,根据预判的船舶轨迹,及时调整船舶的航向,使船舶轨迹沿计划航线行驶。实船操纵证实了研究的有效性。

**关键词:** 横向位移;纵向位移;初始速度;初始航向;流压角

中图分类号: K248.105 文献标志码: A

## Track Prediction of Maneuvering Heavily-Loaded Ship in Stationary Flow Field

LYU Xibao, WANG Wuxiu

(Qingdao Maritime Pilots, Qingdao 266106, China)

**Abstract:** Accurate course control of a ship requires Quantitative prediction of the transvers-longitudinal displacement of the ship in maneuvering. This paper derives the formular for calculating the transvers-longitudinal displacement of a ship carrying way with engine stopped or accelerating under the condition of uniform flow field. Analysis shows that the track of a maneuvering ship is decided by the motion parameters of the ship and the flow filed. When a ship is approaching its destination, the navigator can set the course according to its initial speed and the current angle, then, stop the engine and let the ship sail to the destination along desired course. For a ship navigating to a planned narrow channel, similar way is feasible except the engine is running rather than stopped.

**Key words:** transvers displacement; longitudinal displacement; initial speed; initial course; current angle

重载船舶沿狭窄航道航行驶向定点抛锚、入泊,或者在应急情况时,需调整船舶初始态势,使船舶能抵达安全区域以及其由静止状态加速驶向狭窄航道的计划航线,这些有关期待船舶驶向预期位置的操纵,对变速运动的船舶船位轨迹变化的精细判断要求越来越高。加速中的船舶根据本船操纵数据、主机功率和根据流压角算出的横向流速,即可预判船舶的轨迹,进而调整航向及早沿计划航线航行。对于停车淌航减速的船舶,船舶操纵者(船长、引航员)习惯于使用车舵或拖船调整船舶停车后淌航的船位,车舵的频繁使用,不利于船舶主机的安全、控

速和减速;拖船的不必要协助,不符合绿色环保的作业理念。如果不能准确地预判船舶运动趋势,即使频繁使用车、舵和拖船,效果也未必理想;对于失控时的船舶,更有可能错失抢占先机的时间。因此,运动中的船舶停车后,船位轨迹的变化规律对船舶操纵极为重要。邱荷珍等<sup>[1]</sup>分析船舶轨迹的跟踪,阐述船舶在规定的时间内通过轨迹跟踪系统的控制到达原本设定的位置的各类研究,指出轨迹研究的发展方向;冯亮等<sup>[2]</sup>提出船舶运动轨迹的控制方法,研究综合航向控制和航迹控制,介绍控制轨迹的方法和手段;陈金海等<sup>[3]</sup>研究海洋运输船舶运动轨迹

收稿日期: 2021-01-11

作者简介: 吕锡宝(1971—),男,山东青岛人,一级引航员,本科,研究方向为船舶驾驶。E-mail: qdxibao@sina.com

王武修(1964—),男,山东青岛人,高级引航员,本科,研究方向为船舶驾驶。E-mail: 43011062@qq.com

的分析方法,得出根据船舶运动轨迹分析相关信息的方法;郑才士<sup>[4]</sup>提出狭窄航道船舶运动轨迹的预报,阐述船舶运动轨迹的重要意义;XU等<sup>[5]</sup>研究桥区船舶运动轨迹,并分析其安全性;吴松柏<sup>[6]</sup>研究测量船位的方法,给出轨迹与船位变化的关系;郭杰等<sup>[7]</sup>研究船舶轨迹跟踪的自抗控制,从技术上分析控制船舶轨迹的方法。

上述研究主要分析了船舶轨迹对安全的重要意义,以及如何测量、监控和控制。本文采用数学分析的方法,探讨在掌握船舶航行水域流场的情况下,根据本船的操纵数据,如何准确预判船舶变速航行船位变化的轨迹,推导出停车保向淌航的船舶,其船位轨迹是一条指数函数曲线,根据本船的初始位置、目标位置和测得的流压角,通过调整船舶初始航向,使航行目标或航线位于预计的轨迹上;或者船舶如何以某一安全角度入泊。在应对紧急局面时,这也是判断船舶运动趋势的方法。对于一艘重载船舶,与反复使用车舵或拖船通过改向和把定新航向的操纵来调整船位的操作相比,仅使其保向将更容易做到。

加速运动的船舶,其船位轨迹是一条逐渐靠拢于艏向的曲线。熟悉各类船舶的操纵参数,即可预判其加速后的轨迹,进而降低操纵船舶的操纵难度和航行风险,提高船舶航行的安全性和操作的高效性。

## 1 建立船舶变速运动的场景

重载船舶以速度 $v_0$ ,艏向C航行,然后船舶停车后减速淌航或者由静止(如锚泊中的船舶刚刚锚离底)加车加速驶向进入狭窄航道的计划航线,在横向不受水流作用的情况下,船舶将做变速直线运动,船位是时间的函数式;如果船舶横向受稳定流场的作用,船舶将以与艏向夹角为 $\theta$ 的流压角做变速曲线运动,该流压角随船速的变化而改变。船舶所受的水作用合力可分解为纵向分力和横向分力。其中:在纵向上重载船舶受主机推力与水的阻力作用下作变速运动,其即时速度为 $v_x$ ;在横向上船舶受水动力的作用,将以 $v_y$ 作匀速直线运动。每一个时刻 $t$ 都对应船位 $(x, y)$ ,所有船位的连线即为船舶变速运动的轨迹线。

为船舶整个运动过程设立起一个理想的运算场景,以方便从理论上进行推导计算:

- 1) 稳定的流场(流速、流向稳定)。
- 2) 不考虑船舶运动产生的附加质量以及因小角度改变流压角而产生的纵向力和水动力的变化。
- 3) 船舶利用舵或拖船可保向。

4) 不考虑风对船舶的影响。

## 2 船舶的位置变化

### 2.1 停车减速淌航阶段的船位轨迹

#### 2.1.1 船舶纵向上的位移变化 $x$

##### 2.1.1.1 $x$ 与速度 $v_0$ 的变化关系

船舶在水中停车淌航行驶,主要受汹涛阻力和摩擦阻力的作用,速度较快时( $v \geq 3$  kn),受汹涛阻力 $f = mv'$ 的影响较大;速度较慢时( $v < 3$  kn),受摩擦阻力影响大。为便于实践中的运用,可抓主要矛盾,在船舶停车淌航后的降速过程中,主要考虑汹涛阻力对速度的影响。

船舶行驶中纵向上的运动方程为

$$bv^2 = mdv/dt \quad (1)$$

$$v = dx/dt \quad (2)$$

解得

$$x = (m/b) \cdot \ln(v_0/v_t) \quad (3)$$

令

$$m/b = A \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: $v$ 为船舶纵向行驶速度; $v_0$ 为停车时的初始速度; $v_t$ 为即时速度; $x$ 为纵向位移; $b$ 为水阻尼系数。

选取 $v_t = 1/2v_0$ ,即速度减少1/2。可得 $x = A \ln 2$ ,即速度每降低1/2,船舶行驶 $\ln 2$ 个单位 $A$ , $m/b$ 。

##### 2.1.1.2 $x$ 与时间 $t$ 的变化关系

根据式(1)得

$$\begin{cases} -1/v = bt/m + c \\ v|_{t=0} = v_0, c = -1/v_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$x = (m/b) \cdot \ln(bv_0t/m + 1) = A \ln(v_0t/A + 1) \quad (6)$$

##### 2.1.1.3 $A$ 值的确定

$A$ 值对每一特定情况下的船舶,基本是固定的,其与船宽、船长、吃水、海水密度、船舶的流压角和船壳水下湿面积的粗糙度等相关。因此,每艘船舶的 $A$ 值根据一定的特定情况,是在某一个范围内变化的,只是相对固定而已。例如一艘散货船,空载和满载情况的 $A$ 值差别较大,满载值大约是空载值的1.5倍,这主要是因为不同的船舶吃水对应的方形系数 $c_b$ 不同。为便于实际应用,当然也完全符合船舶安全操纵的需求,可选择无风无流的水域,按照船舶类型、船长和吃水对 $A$ 值进行分类统计,结果完全可满足操纵安全的需要。

由式(3)得

$$A = x \cdot \ln^{-1}(v_0/v_t) \quad (7)$$

令

$$v_t = v_0/e \tag{8}$$

则  $A = x \tag{9}$

式(9)中:  $A$  的物理意义为船舶在单位距离内速度连续以  $1/A$  的衰减率减少, 最终所剩余的速度; 船舶速度降低为初始速度的  $1/e$  船舶所行驶的距离。

选定一艘重载船舶, 航行于无风无流的安全水域, 在艏向选择一易测物标, 停车淌航后, 通过雷达观测物标, 记录速度降低  $1/2$  时的  $x$  值, 即可根据式(7)反推出  $A$ , 对多艘同类型船舶进行统计, 即可得出准确的  $A$  值, 对于同类型同尺寸的空载或半载船舶, 也可做相同的统计, 见表 1。

表 1 满载船舶的  $A$  值

船舶类型	船长 $L/n$ mile		
	225 m	300 m	400 m
集装箱船	0.9	1.2	2.1
散货船	2.4	3.2	4.3
油船	2.4	3.2	4.3
LNG 船	0.9	1.2	2.1

$$A = m/b = k_1 c_b \cdot LBD/k_2 BD = kc_b L \tag{10}$$

由式(10)可得出  $A \propto c_b L$ 。

### 2.1.2 船舶横向上的位移变化 $y$

当船舶一舷受水动力作用, 将向相反一舷运动, 直至与流速在船舶横向的分量一致。假设稳定流场的水流在船舶横向的分量为  $v_y$ , 那么停车淌航后, 在航向把定的情况下, 船舶在横向上作速度为  $v_y$  的匀速直线运动, 船舶在横向上的运动方程为

$$y = v_y \cdot t \tag{11}$$

### 2.1.3 横向位移 $Y$ 与纵向位移 $X$ 的关系

根据式(3)和式(11), 有

$$t = (e^{bx/m} - 1) m/bv_0 \tag{12}$$

$$t = y/v_y \tag{13}$$

解得

$$y = (v_y/v_0) \cdot (m/b) \cdot (e^{bx/m} - 1) \tag{14}$$

$$\tan \theta = v_y/v_0 \tag{15}$$

式(15)中:  $\theta$  为停车时的流压角。

$$y = \tan \theta \cdot (m/b) \cdot (e^{bx/m} - 1) = \tan \theta \cdot A \cdot (e^{x/A} - 1) \tag{16}$$

$$y/A = \tan \theta \cdot (e^{x/A} - 1), \text{ 令 } Y = y/A, X = x/A \tag{17}$$

$$Y = \tan \theta (e^X - 1) \tag{18}$$

由式(18)可知: 船舶停车后的运动轨迹是一条

指数函数曲线, 见图 1。图 1 的曲线是一艘 100 m 重载散货船在横向受流的情况下, 停车淌航期间的船位轨迹的标准图像。决定船舶轨迹的因素是停车时的流压角正切  $\tan \theta$  和船舶对应的  $A$  值, 借助数学运算工具, 很容易画出特定船舶在某一海域的淌航轨迹, 根据不同类型或尺寸的船舶, 结果增加  $A$  倍即可。在实际工作中, 操船者很难有精力作如此的计算和描画, 所以, 把式(16)转化为

$$y = \tan \theta \cdot A \cdot (v_0/v_t - 1) \tag{19}$$

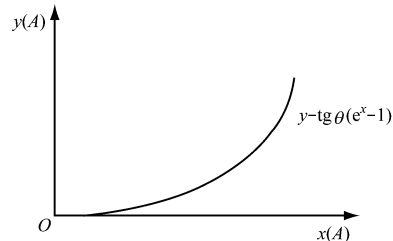


图 1 重载船舶停车轨迹示意

结合式(3), 有

$$x = A \cdot \ln(v_0/v_t) \tag{20}$$

把速度  $v_t$  对应的船位  $P(x, y)$ , 进行连接, 可简便地画出船舶的轨迹。

例如: 取速度每减少  $1/2$  时对应的船位

$$\begin{cases} P(1) (A \cdot \ln 2, \tan \theta \cdot A) \\ P(2) (2A \cdot \ln 2, 3 \tan \theta \cdot A) \\ P(3) (3A \cdot \ln 2, 7 \tan \theta \cdot A) \\ \dots\dots \\ P(n) \{ nA \cdot \ln 2, (2^n - 1) \tan \theta \cdot A \} \end{cases} \tag{21}$$

式(21)中:  $n$  为速度减半的次数  $n = x/(A \cdot \ln 2)$ 。

$$y = [(2^n - 1) \tan \theta / (n \cdot \ln 2)] \cdot x = [2^{x/(A \cdot \ln 2)} - 1] \tan \theta \cdot A \tag{22}$$

式(22)与式(16)是一致的, 只是因为计量单位不同, 所选择的表达形式不同。据此可知船舶停车淌航的船位轨迹是一条相同的指数函数曲线。这条曲线的曲度受流场和船舶的初始速度的影响, 并根据船舶的  $A$  值, 进行放大或缩小。

## 2.2 船舶加速航阶段的船位轨迹

### 2.2.1 $x$ 与时间 $t$ 的变化关系

船舶由静止状态启动, 加车加速航行, 其在纵向上受到主机推动力和水流阻尼力的共同作用, 由于船舶强度和主机安全的要求, 加速的过程是逐步进行的, 在一定主机功率的船舶车钟令下, 主机的推力随着船舶速度的增加在一定区域内逐步降低, 为方便计算, 取该区域内的平均主机推力为  $F$ , 水阻力为  $f = bv^2$ , 其关系式为

$$F - f = mv' \tag{23}$$



于入泊的速度已确定,所以,问题的关键就是确定停车的位置,该位置满足船舶以特定的速度停车后,按预计的入泊角度航向行驶,其轨迹经过入泊位前的预期位置。

假设船舶预计入泊航向为  $OX$ , 预计入泊位置为点  $M$ , 则根据点  $M$  的位置、流压角  $\theta$  和船舶的  $A$  值, 推算出船舶的停车点  $O$ , 船舶抵达点  $O$  后, 调整艏向为  $OX$ , 停车淌航保向, 船舶即可以航向  $OX$  的角度态势入泊, 见图 5。因此, 问题的关键是寻找点  $O(x, y)$ , 该点满足行驶的纵向距离为

$$x = A \cdot \ln(v_0/v_t) \quad (31)$$

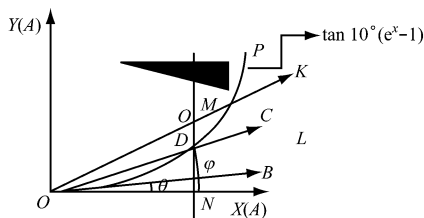


图5 重载泊船舶靠车轨迹示意

横向距离满足

$$y = \tan \theta \cdot A \cdot (v_0/v_t - 1) \quad (32)$$

为方便计算, 通常取  $v_0/v_t = 2$ , 即速度降低 1/2, 即

$$ON = A \cdot \ln 2, ND = NM = A \cdot \tan \theta \quad (33)$$

### 3.1.3 重载船舶加速驶入深水航槽

重载船舶通常由锚地起锚, 慢速驶向引航员登轮点, 然后驶入深水航槽。由于受横向流的作用, 变速运动船舶以某一航向航行的轨迹是一个较复杂的曲线, 船长或引航员通常需反复改变航向, 使船位在计划航线上。根据船舶操纵资料, 一个车钟的最终速度与达到该速度所需要的时间  $t$  及其航行距离  $x$ , 是可查到和估算的。<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} t = 0.004 \times \frac{mv}{f} \\ x = 0.101 \times \frac{mv^2}{f} \end{cases} \quad (34)$$

式(34)中:  $m$  为船舶排水量,  $t$ ;  $v$  为船舶的定常速度,  $kn$ ;  $f$  为船速  $v$  时的阻力  $N$ 。

根据式(34)估算, 可得出船舶在某一航场的达到稳定速度时的船位, 对于抵达该船位前的轨迹, 没有描述。

在电子海图与雷达系统广泛应用条件下, 根据本船的式  $F$ 、 $b$ 、 $m$  值和流压角, 运用式(24)、式(25)、式(29)和式(30), 导航系统可经过计算给出准确的轨迹预测, 从而预判出本船是否能够驶入深水航槽, 减小操船者的心理压力和不必要的航向

调整。

## 3.2 实际操船验证

### 3.2.1 满载船舶驶向定点抛锚

一艘船长 330 m, 吃水 20.5 m 的大型油船自青岛大公岛至一号锚地定点抛锚如图 4 所示。点  $O$  为深水航槽出口的起始点, 该船的  $A = 3.60$  n mile, 船舶出深水航槽, 船位为点  $O$ , 速度为 6 kn, 航向  $285^\circ$ , 右舷来流, 流压角为  $10^\circ$ , 锚位  $M$  距离船位  $O$  为  $x = 2.5$  n mile, 方位  $268^\circ$ ; 根据式(7), 解得抵达锚位  $M$  的速度  $v = 6e^{2.5/3.6} = 3$  kn; 根据式(19) 解得  $y = 0.63$  n mile,  $\varphi = 14^\circ$ 。调整艏向至新航向  $OL$  为  $282^\circ$ 。

即使  $OL$  与  $OK$  夹角为  $14^\circ$ , 船舶以速度 6 kn 航向  $282^\circ$  停车淌航, 保向航行, 则船舶轨迹抵达锚位, 抵达速度为 3 kn。

实操船纵过程, 其电子海图船位轨迹见图 6, 与预判轨迹一致。

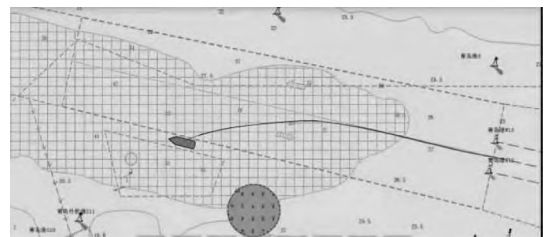


图6 重载船舶青岛港一号锚地定点抛锚电子海图轨迹

### 3.2.2 满载船舶以合理角度靠泊

同样一艘 330 m, 吃水 20.5 m 的大型油船靠青岛港三期油码头如图 5 所示, 预计入泊点  $M$ , 以船艏向为  $OX$ , 入泊速度为 3 kn 的速度入泊。在点  $O(x, y)$  停车, 停车速度为 6 kn, 停车时的初始航向为  $OX$ 。

根据式(19), 解得速度衰减 1/2 时, 有

$$y = A \cdot \tan 10^\circ = 0.63 \quad (35)$$

即地点  $O$ , 满足直线  $OX$  与点  $M$  的距离  $MN = 0.63$  n mile

根据式(3), 有

$$x = A \cdot \ln(v_0/v_t) = 2.50 \quad (36)$$

即纵向距离  $ON$  为 2.50 n mile。

船舶驶抵点  $O(2.50, 0.63)$ , 调整艏向为  $OX$ , 停车保向淌航, 即以预期的态势在点  $M$  入泊。预计驶抵预定点  $O$  时的速度为 6 kn, 右舷来流, 流压角为  $10^\circ$ , 到达点  $M$  速度为 3 kn, 以艏向  $OX$  的航向在点  $M$  入泊。

实操船纵过程, 其电子海图船位轨迹见图 7, 与预判轨迹一致。

### 3.2.3 重载船舶加速驶入深水航槽

一艘 250 m, 吃水 14.5 m, 排水量为 10 万 t 的



图7 重载船舶靠泊青岛港三期油码头电子海图轨迹  
大型矿船由青岛董家口临时锚地起锚,最慢车速向北航道,航道航向为 $318^\circ$ ,本船最慢车速 $5\text{ kn}$ ,船舶所受阻力为 $10^6\text{ N}$ 。

根据式(32),可得到进入航道的船位为

$$m = 10^8\text{ kg}, b = 4 \times 10^4\text{ N}/(\text{m/s})^2, F = 10^6\text{ N}, v_y = 4\text{ kn} \quad (37)$$

根据式(31)与式(25),可预画出船舶加速航行轨迹。

实操船纵过程,其电子海图船位轨迹见图8,与预判轨迹基本一致。



图8 电子海图船位轨迹

## 4 结束语

根据多艘变速运动的船舶实践及统计,可得出以下结论:

1) 每一特定的重载船舶停车淌航,其单位距离内的速度连续衰减率为定值 $1/A$ ,据船舶长度和吃水,可统计出同类船舶的 $A$ 值,同类船舶之间,因受船壳粗糙度的影响,该值略有差异。

2) 重载船舶停车淌航,在横向不受水动力的作用下,其船位轨迹是一条直线,纵向位移是时间的对数函数,即 $x = A \cdot \ln(v_0 t/A + 1)$ 。

3) 重载船舶停车淌航,在横向受水动力作用的情况下,其横向位移 $y$ 是纵向位移 $x$ 的指数函数,船位的轨迹是一条指数曲线,即 $y = \tan \theta \cdot A \cdot (e^{x/A} - 1)$ 。

4) 由静止状态开始加车运动的船舶,其速度与时间的关系为

$$v = \sqrt{F/b} \left( 1 - \frac{2}{1 + e^{t\sqrt{Fb}/m}} \right) \quad (38)$$

其距离与时间的关系为

$$x = -\sqrt{F/b} \cdot t + \frac{2m}{b} \ln \left( \frac{e^{t\sqrt{Fb}/m} + 1}{2} \right) \quad (39)$$

由作图可知:船舶以推力 $F$ 为动力加速前进,其最终将以速度 $\sqrt{F/b}$ 匀速直线行驶,之前做变速曲线运动,起始阶段曲线的曲率较大。

5) 船舶在初始速度 $v_0$ 的状态航行时加速,其速度与时间和距离与时间的关系分别为

$$v = v_0 + \sqrt{(F - bv_0^2)/b} \left[ 1 - \frac{2}{1 + e^{t\sqrt{(F-bv_0^2)b/m}}} \right] \quad (40)$$

$$x = v_0 t - t \sqrt{(F - bv_0^2)/b} + \frac{2m}{b} \ln \left[ \frac{e^{t\sqrt{(F-bv_0^2)b/m}} + 1}{2} \right] \quad (41)$$

重载船舶变速运动船位轨迹规律,对大型重载船舶在定点抛锚和靠泊以及驶向狭窄航道的计划航线,有重要的指导意义。大型油轮、大型散矿船和大型集装箱船,由于其排水量和旋转惯性矩太大,无论减速、加速还是转向,都很缓慢,靠车舵调整显然难度加大。如果行业内总结出相关船舶的 $A$ 值与 $b$ 值,则根据流压角或采用导航仪器智能计算,很容易预计出船舶变速后的轨迹,从而把主要的精力放在船舶的保向上。当然,影响船舶操纵的因素很多,相关数值也在一定的范围内浮动,例如 $A$ 值,在操纵中不能固定地认为是一个定值,在顶流或顺流浅水效应及流压角等不同的情况下,其表现值略有浮动,根据实际情况其值大致在一个稳定的范围,在操纵中一定要取安全的值,留出足够的安全余量,以确保船舶安全。

## 参 考 文 献

- [1] 邱荷珍,王磊,王洪超. 船舶轨迹跟踪研究综述[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(4): 4-8.
- [2] 冯亮,魏军,陈志诚. 船舶轨迹运动控制方法改进研究[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(12): 33-36.
- [3] 陈金海,陆锋,彭国均. 海洋运输船舶轨迹分析研究进展[J]. 中国航海, 2012, 35(3): 53-57.
- [4] 郑才士. 狭窄航道船舶运动轨迹预报[J]. 武汉水运工程学院学报, 1986, 10(3): 105-113.
- [5] XU Y M, LIU M J, ZOU Z J. Comparative Study of Numerical Simulation and Full-Scale Experiment of Ship Trajectory in Bridge Area[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 32(3): 573-576.
- [6] 吴松柏. 测量船位的参数变化平差法[J]. 海洋技术, 1988, 7(2): 89-95.
- [7] 郭杰,刘轶华,马利华. 基于多模态快速非奇异终端滑模的船舶航迹跟踪自抗扰控制[J]. 中国航海, 2020, 43(2): 7-13.
- [8] 赵月林. 船舶操纵[M]. 大连:大连海事大学出版社, 1999: 17-48.