



基于弹性悬链线理论的斜坡式码头趸船系留设施受力计算方法*

周世良, 李泳龙, 李 怡, 郑晓珣
(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 随着三峡枢纽的建成运行, 重庆地区码头作业水文条件的改变以及船舶的大型化对斜坡式码头趸船系留设施提出了更高的要求。为确保港口安全生产, 消除趸船现有系留设施存在的安全隐患, 提出了一种考虑锚链和缆绳的弹性、悬链线的几何特征以及躺底段和贴岸段影响的多根不同方向锚链和缆绳共同作用的斜坡式码头趸船系留设施受力计算方法。结合工程实例, 运用Matlab编程计算, 计算结果符合经验规律, 并与Optimoor软件计算结果吻合, 验证了该方法的实用性和可靠性。

关键词: 悬链线; 斜坡式码头; 趸船; 系留设施; 多点系泊

中图分类号: U 653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0070-06

Calculation method of force on mooring facilities attached to pontoon for sloping wharf based on elastic catenary theory

ZHOU Shi-liang, LI Yong-long, LI Yi, ZHENG Xiao-xun

(College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: With the completion and run of the Three Gorges Project, the change of hydrological conditions for wharf operation and enlargement of ships in Chongqing put forward higher requirements to mooring facilities attached to the pontoon for the sloping wharf. In order to ensure the safety of the port and eliminate security risks of existing mooring facilities attached to the pontoon, we propose a calculation method for the force on mooring facilities attached to the pontoon for the sloping wharf considering the elasticity and geometric characteristics of catenary for the anchor chain and rope, the impact of the part lying in the river bed or bank slope and multiple anchor chains and ropes working together in different directions. Programming calculation based on the practical project using Matlab proves that the calculation result is in accord with the empirical rules and Optimoor, thus it verifies the practicality and reliability of the method.

Key words: catenary; sloping wharf; pontoon; mooring facility; spread mooring

三峡工程建成以后, 川江航运条件得到了大幅度改善。随着水运市场的激烈竞争, 水运企业为降低运输成本、提高经济效益, 在航道条件允许的情况下船舶吨位和载质量大型化已成为趋势, 这就使得很多超过原设计船型的船舶在限定

条件下靠泊码头^[1]。码头超能力靠泊虽然在一定程度上缓解了当前港口基础设施能力不足与港口生产需要的矛盾, 但对码头设施、船舶和港口生产均带来了不同程度的安全隐患^[2]。特别是重庆地区现役的斜坡式码头, 大部分建造年代久远, 其趸

收稿日期: 2013-04-13

*基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(210176); 重庆市港航管理局科技项目(SW2013-27)

作者简介: 周世良(1972—), 男, 博士后, 教授, 从事水工结构、岩土工程方面的研究与教学工作。

船系留设施已经严重不能满足现有水文条件下大型船舶的靠泊需要。因此, 为确保港口生产运营安全, 消除趸船现有系留设施存在的安全隐患, 有必要对斜坡式码头趸船系留设施受力状态进一步深入分析研究。

船舶在靠泊斜坡式码头时, 一般是通过趸船与斜坡道连接, 以供货物装卸运输、旅客或车辆上下^[3]。斜坡式码头趸船的系留, 可按码头靠泊船舶种类与吨位、趸船允许位移量等使用要求和趸船所处的水域限界、水位差、水流、波浪、水底土质等环境条件选用锚链和锚、撑杆系统或定位墩等方式^[4]。重庆地区斜坡式码头趸船比较典型的系留方式是通过缆绳与码头系船设备连接, 同时依靠锚链和锚系留于河床(图1)。

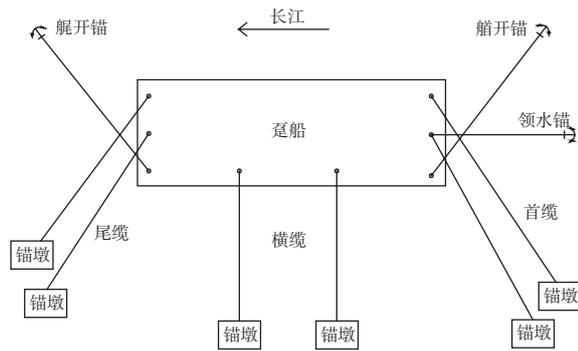


图1 重庆地区斜坡式码头趸船典型系留方式

传统的锚链系泊系统一般采用JTJ 294—1998《斜坡码头及浮码头设计与施工规范》的建议, 按悬链线标准方程计算锚链拉力, 但这种方法忽略了系泊线的弹性变形, 对缆绳并不适用。实际上, 锚链和缆绳既有在自身重力影响下呈现悬链线的几何特征, 又有自身弹性的力学特征。两者的不同之处在于, 锚链的线密度较大, 其回复力主要由其自身的重力产生, 而缆绳的回复力主要由其自身的弹性产生。范会渠^[5]和田小康^[6]考虑了系泊线线密度随弹性变化的变化, 对悬链线标准方程进行了修正, 但仍未考虑到缆绳弹性变形的非线性以及躺底段和贴岸段影响, 不能准确反映趸船系留设施的真实受力状态。因此本文提出一种考虑锚链和缆绳的弹性、悬链线的几何特征以及躺底段和贴岸段影响的多根不同方向锚链和缆

绳共同作用的斜坡式码头趸船系留设施受力计算方法。

1 弹性悬链线理论计算模型

1.1 经典悬链线理论

趸船系留侧视图见图2, 其中AC段为锚链, AB段为躺底段, DF段为缆绳, EF段为贴岸段, 若忽略系泊线的弯曲刚度, 则BC和DE段为悬链线段。

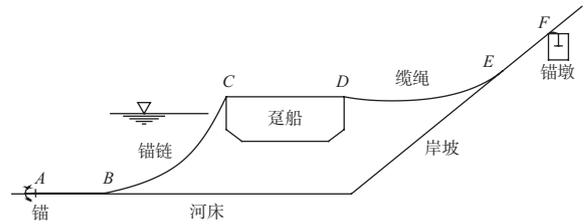


图2 趸船系留侧视图

取悬链线段微段作静力分析, 见图3。设系泊线悬链线段的张力 T 的水平分量为 H , 竖直分量为 V , ds 为微段长度, μ 为系泊线线密度(锚链取线浮密度), g 为重力加速度, 由平衡条件可得:

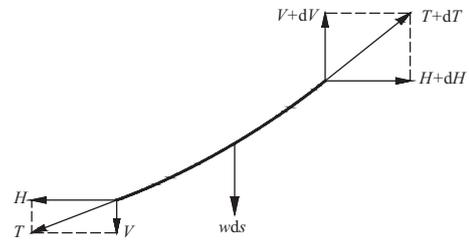


图3 悬链线段微段受力

$$\sum X = 0 \Rightarrow dH = 0 \quad (1)$$

$$\sum Y = 0 \Rightarrow dV = \mu g ds \quad (2)$$

由式(1)可得, H 为常量, 说明系泊线上水平张力处处相等。由式可得, 锚链或缆绳张力的最大值出现在系泊线高程最大处, 这解释了斜坡式码头趸船缆绳断缆位置一般都靠近地牛的现象。

同时由解析几何关系有:

$$V = H \frac{dy}{dx}, ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中即得悬链线标准微分方程:

$$H \frac{d^2 y}{dx^2} = \mu g \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (4)$$

引入变换 $dy/dx=\sinh u$ [5]后整理得:

$$\begin{cases} Hdu = \mu g dx \\ dy/dx = \sinh u \end{cases} \quad (5)$$

当忽略系泊线的弹性, 则 μ 为常数, 以系泊线与水平线相切点(图2中B点)为原点建立直角坐标系时, 显然有:

$$u|_{x=0}=0, y|_{x=0}=0 \quad (6)$$

以式(6)为边界条件对式(5)积分即可得到悬链线标准方程:

$$y = \frac{H}{\mu g} \left(\cosh \frac{\mu g}{H} x - 1 \right) \quad (7)$$

将趸船上系缆点的位置坐标和系泊线线密度代入式(7)即可求得系泊线上的水平张力 H 。

1.2 锚链和缆绳的弹性

三峡成库以后, 码头作业水位的升高和船舶大型化使得锚链和缆绳的长度和张力增加, 其弹性变形不可忽略。锚链和缆绳的弹性取决于材料、尺寸和制造工艺, 有条件时应该通过试验得到张力-变形曲线并进行数值拟合。

缆绳在张力作用下的变形呈现明显的非线性, 在暂无试验数据的情况下可以采用Wilson公式[7]进行计算:

$$T=C_p d^2 \varepsilon^n \quad (8)$$

式中: C_p 为弹性系数; d 为缆绳直径; ε 为应变; n 为表征弹性变形非线性的无量纲参数。对钢缆, $C_p=2.75 \times 10^5$ MPa, $n=1.5$; 对尼龙缆, $C_p=1.56 \times 10^4$ MPa, $n=3$ 。

锚链在张力作用下变形的非线性相对于缆绳没有那么明显, 暂无试验数据时可以忽略泊松效应直接由胡克定律得到张力与应变的线性关系式, 并统一表达为式(8)的形式。根据锚链用钢的弹性模量计算得到: $C_p=3.24 \times 10^5$ MPa, $n=1$ 。

1.3 弹性悬链线理论

设 μ_0 为系泊线初始线密度(锚链取线浮密度), 根据质量守恒定律, 锚链或缆绳在张力作用下受拉伸长, 线密度相应减小。

$$\mu(1+\varepsilon)=\mu_0 \quad (9)$$

同时由解析几何关系有:

$$T = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} H = H \cosh u \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)后再代入式(9)得:

$$\mu [1 + \sqrt{H \cosh u / (C_p d^2)}] = \mu_0 \quad (11)$$

将式(11)代入式(5)中, 并引入变换 $\alpha=H/(\mu_0 g)$ 和 $\beta=H/(C_p d^2)$ 后化简整理得到考虑锚链或缆绳的弹性后系泊线的微分方程:

$$\begin{cases} dx = \alpha [1 + (\beta \cosh u)^{\frac{1}{n}}] du \\ dy/dx = \sinh u \end{cases} \quad (12)$$

从式(12)可以看出: 当 $\beta \rightarrow 0, n \rightarrow 1$ 时, 该方程蜕化为悬链线标准微分方程。无量纲系数 β 和 n 分别为考虑弹性变形和变形的非线性后对悬链线标准微分方程的修正参数, 这是弹性悬链线理论区别于经典悬链线理论的关键之处。修正后锚链和缆绳的弹性以及悬链线的几何特征都得到了体现, 更加符合锚链和缆绳的真实受力状况。

假设锚链或缆绳在 a, b 两点之间悬挂, a 点为趸船上系缆点(图2中C或D点), b 点为锚链与河床交汇点(图2中B点)或缆绳与岸坡交汇点(图2中E点), l, h, G 分别 a, b 为两点间的水平投影长度、竖直投影长度和系泊线总重力, H, V 分别为系泊线上 a 点处的水平张力和竖直张力。则:

$$l=x_b-x_a, h=y_b-y_a \quad (13)$$

$$\sinh u_a = \frac{V}{H}, \sinh u_b = \frac{V-G}{H} \quad (14)$$

由式(13)~(14)对式(12)在区间 (u_a, u_b) 上定积分即可得:

$$\begin{cases} l = \alpha \int_{\operatorname{arsinh}(\frac{V-G}{H})}^{\operatorname{arsinh}(\frac{V}{H})} [1 + (\beta \cosh u)^{\frac{1}{n}}] du \\ h = \alpha \int_{\operatorname{arsinh}(\frac{V-G}{H})}^{\operatorname{arsinh}(\frac{V}{H})} [1 + (\beta \cosh u)^{\frac{1}{n}}] \sinh u du \end{cases} \quad (15)$$

当其他参数为已知时, 通过上式两个方程求出 H, V 就能得到系泊线趸船上系缆点处的张力。式(15)为被积函数中含有双曲函数的变限积分方程组, 具有很强的非线性, 本文运用Matlab软件采用龙格-库塔法(Runge-Kutta)编程计算[8-9], 并以经典悬链线理论计算结果为初值, 调整步长, 最终求得数值解, 算法简单、高效、收敛性强。

通过弹性悬链线理论, 可以将锚链和缆绳简化为非线性弹簧, 在其他参数确定的情况下, 弹

簧提供的弹力仅随着趸船上系缆点位置改变而变化, 而整个系留系统提供的系泊力也随着趸船的运动而不断变化。

1.4 躺底段和贴岸段的处理

船舶抛锚时, 通常设置有足够长度的锚链, 以便有一段躺底锚链, 使锚不产生上拔力^[10], 或者是由于地形的限制, 锚链会有一部分是直接躺在河床上, 而缆绳也有可能有一部分紧贴于岸坡。锚链的躺底段和缆绳的贴岸段显然不符合悬链线理论, 一般可以近似地把这部分视为张力恒定的直线段来计算。关键问题是悬链段与躺底段或贴岸段的分界点随着锚链或缆绳受力不同而不断改变, 在不知道分界点具体位置的情况下, 无法简单地把锚链或缆绳分为两部分来计算。

对于这个问题, 可以先假设河床和岸坡不存在, 按弹性悬链线理论求出锚链或缆绳的系泊线, 然后判断它是否与河床面或岸坡面相交。如果不相交则说明锚链或缆绳没有躺底或贴岸的情况, 如果相交, 则视交点处为新的假想锚固点, 并扣除交点处张力作用下新旧锚固点间直线段锚链或缆绳的重力, 重新按弹性悬链线理论计算新的系泊线。如此循环迭代, 当新旧假想锚固点间的距离小于容许误差 (一般可取 10^{-6} m) 时, 就视该假想锚固点为实际情况下的悬链线段与躺底段或贴岸段的分界点, 并求得系泊线趸船上系缆点处的张力, 具体流程见图4。

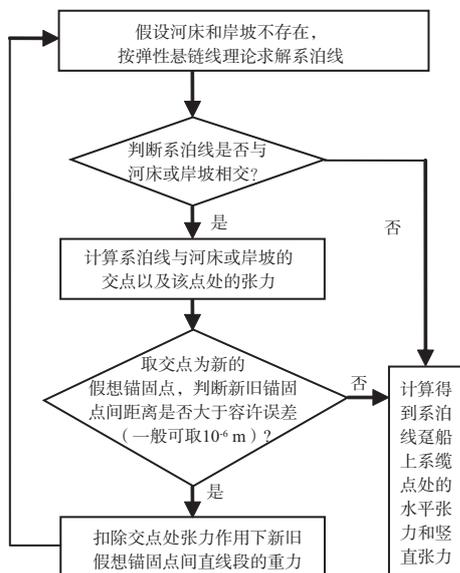


图4 躺底段和贴岸段处理流程

1.5 系留设施的布置与预张力

斜坡式码头趸船为满足装卸作业的要求, 需要通过多根不同方向的锚链和缆绳来系留定位, 这实际上是一个浮式系统的多点系泊问题。多点系泊定位效果较佳, 但其系泊力往往较大。这是因为多点系泊状态的浮体受到系留系统的约束较强, 无法顺着外载荷较自由地移动, 因而作用于浮体的外载荷通常较大。如果要提高定位效果, 使趸船在外载荷作用下只有较小的位移, 则应该增加锚链的直径或张紧缆绳, 但这样必然造成锚链和缆绳的预张力的增加。另外, 根据力学原理, 如果多点系泊系统中诸锚链和缆绳之间的张角较大, 也会导致较大的张力^[11]。趸船的定位效果和锚链和缆绳张力是相互制约的, 实际操作中, 趸船系留设施必须根据需要合理布置, 同时通过收放缆和锚链控制预张力, 在满足码头正常作业的同时, 尽可能减少系留设施承受的荷载, 避免在外载荷作用下出现走锚和断缆等危及码头安全的情况。

1.6 趸船的运动

趸船在外载荷作用下, 将发生横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇6种自由度运动^[12]。当外荷载情况改变时, 趸船上各系缆点的位置坐标随着趸船的运动而改变, 从而引起各锚链和缆绳张力的相应变化, 并最终与外载荷重新达到平衡。

设趸船重心在地面坐标系中的位置向量为 $\mathbf{R}=[x, y, z]$, 各锚抓点和地牛在地面坐标系中的位置向量为 $\mathbf{R}_i=[x_i, y_i, z_i]$, 趸船上系缆点在以船舶重心为原点的船体坐标系中的位置向量为 $\mathbf{R}'_i=[x'_i, y'_i, z'_i]$ 。令 $\boldsymbol{\theta}=[\theta_x, \theta_y, \theta_z]$ 为船体坐标系相对于地面坐标系的欧拉角, 则趸船上系缆点与趸船重心在地面坐标系中的相对位置向量为:

$$\mathbf{R}''_i=[x''_i, y''_i, z''_i]=\begin{bmatrix} 1 & \theta_z & -\theta_y \\ -\theta_z & 1 & \theta_x \\ \theta_y & -\theta_x & 1 \end{bmatrix} \times \mathbf{R}'_i \quad (16)$$

趸船上系缆点与锚抓点或地牛在地面坐标系中的相对位置向量为:

$$\mathbf{R}_{ri}=[x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}]=\mathbf{R}''_i+\mathbf{R}-\mathbf{R}_i \quad (17)$$

由空间几何关系:

$$l_i=\sqrt{x_{ri}^2+y_{ri}^2} \quad h_i=z_{ri} \quad (18)$$

将式(18)代入式(15)中,即得到每根锚链和缆绳的在趸船上系缆点处的张力:

$$T_i = \left[\frac{x_{ri}}{l_i} H_i, \frac{y_{ri}}{l_i} H_i, V_i \right] \quad (19)$$

则整个系留系统对趸船的系泊力为:

$$F_x = \begin{cases} T = \sum T_i \\ M = \sum R_i \times T_i \end{cases} \quad (20)$$

由上式可知,当其他参数为已知时, F_x 完全由 R 和 θ 确定,而 R 和 θ 正好表征趸船的6种自由度运动,其变化量即为趸船的位移和转角。

三峡库区波浪荷载忽略不计,水流力和风荷载也较为稳定,因而趸船的运动相对平缓,可近似视为静力平衡状态,趸船的系泊方程简化为:

$$F_f + F_s + F_x = 0 \quad (21)$$

式中: F_f 和 F_s 分别为船舶承受的风荷载和水流力,可根据经验公式求得。将式(20)代入式(21)迭代求解即可得到各锚链和缆绳的张力。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

重庆某物流有限公司现役架空斜坡式码头设计为3 000吨级多用途泊位,设置两条架空斜坡道,通过钢引桥与前方趸船相连,坡顶设置架空平台。当水位低于172.0 m时,采用汽车直上趸船的浮码头工艺,汽车可沿堆场道路、斜坡道、钢引桥上趸船;当水位超过172.0 m时,汽车到码头前沿182.0 m平台,采用浮吊直接进行装卸作业。趸船为68.4 m × 19.31 m × 3 m × 1.35 m 钢制趸船,配备20 t和40 t浮吊各1台,采用地牛、缆绳、锚链及自带锚系留。趸船系留设施布置见图5,系缆设施和系锚设施的相关参数分别见表1,2。

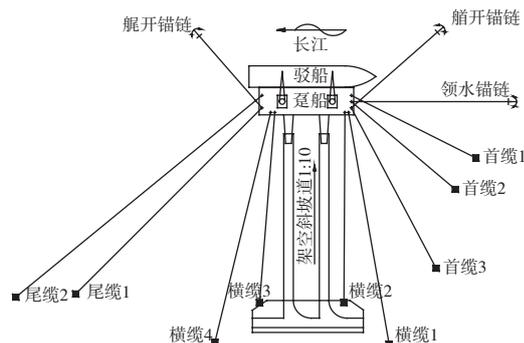


图5 趸船系留设施布置

表1 趸船系缆设施参数

缆绳	地牛位置坐标/m			材质	直径/mm
首缆1	468.426	920.949	164.299	钢缆	32
首缆2	448.973	939.637	165.795	钢缆	32
首缆3	494.892	866.962	173.038	钢缆	32
横缆1	540.134	820.297	179.622	钢缆	28
横缆2	565.200	857.136	170.102	钢缆	28
横缆3	624.111	870.896	169.665	钢缆	28
横缆4	662.173	849.910	177.535	钢缆	28
尾缆1	751.846	907.010	167.812	钢缆	32
尾缆2	794.111	914.114	171.061	钢缆	32

表2 趸船系锚设施参数

锚链	锚链直径/mm	锚链长度	锚链材质	锚质量/kg
领水锚链	32	12节 × 27.5 m/节	2级钢链	2 000
船开锚链	50	10节 × 27.5 m/节	2级钢链	3 000
艉开锚链	38	10节 × 27.5 m/节	2级钢链	2 000

2.2 风荷载和水流力

现以顺流水流和吹开风环境下,3 000吨级驳船在设计中水位满载靠泊为例,按JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[13]计算趸船和靠泊船舶承受的风荷载和水流力。

1) 吹开风作用下趸船和靠泊船舶受到的风荷载按下列公式计算:

$$F_{xw} = 73.6 \times 10^{-5} A_{xw} v_x^2 \xi_1 \xi_2 \quad (22)$$

式中: F_{xw} 为吹开风作用下船舶受到的横向风荷载; A_{xw} 为船体水面以上横向受风面积; v_x 为横向设计风速; ξ_1, ξ_2 分别为风压不均匀折减系数和高度变化修正系数。

控制横向风速取 $v_x = 11$ m/s, 考虑趸船对靠泊船舶的遮掩, 计算得到作用在趸船和靠泊船舶上的横向风荷载分别为9.05和31.92 kN。

2) 顺水水流作用下趸船和靠泊船舶受到的横向力和纵向力按下列公式计算:

$$F_{xsc} = C_{xsc} \frac{\rho}{2} v^2 B' \quad (23)$$

$$F_{ysc} = C_{ysc} \frac{\rho}{2} v^2 S \quad (24)$$

式中: F_{xsc} 为水流对船首横向分力; F_{ysc} 为水流对船舶作用产生的水流力纵向分力; C_{xsc} 为水流力船首横向分力系数; ρ 为水的密度; v 为水流流速; B' 为船舶吃水线以下的横向投影面积; C_{ysc} 为水流力

纵向力分力系数; S 为船舶吃水线以下表面积。

控制水流流速取3 m/s, 考虑趸船和靠泊船舶的相互遮掩, 计算得趸船上水流力的横向和纵向分力分别为6.59和56.74 kN; 靠泊船舶上水流力的横向和纵向分力分别为43.01和163.89 kN。

在此工况下, 风压力和水流荷载共同作用对趸船和靠泊船舶产生的横向合力为 $\sum F_x=90.57$ kN, 纵向合力为 $\sum F_y=220.63$ kN。由于水流力横向分力作用于船首, 靠泊船舶上水流力纵向分力传递作用于趸船离岸侧, 它们对趸船的重心产生逆时针方向的偏航合力矩为 $\sum M=3\ 971.91$ kN·m。

2.3 计算结果分析

根据本文提出的方法, 通过Matlab编程计算, 同时运用系泊系统分析软件Optimoor进行验证, 得到趸船系留设施受力计算结果(表3)。

表3 趸船系留设施受力计算结果对比

系留设施	破断力/kN	承载力/kN	本文方法/kN	Optimoor/kN
首缆1	590	196.67	70.14	68
首缆2	590	196.67	63.84	62
首缆3	590	196.67	68.85	68
横缆1	460	153.33	32.89	32
横缆2	460	153.33	42.48	44
横缆3	460	153.33	2.53	0
横缆4	460	153.33	3.73	0
尾缆1	590	196.67	5.31	0
尾缆2	590	196.67	6.05	0
领水锚链	583	194.33	65.14	64
艏开锚链	1370	456.67	26.42	20
艉开锚链	812	270.67	50.36	47

注: 考虑到锚链或缆绳在松弛-张紧过程冲击张力远大于静态受力, 取破断力的1/3为设计承载力。

从计算结果来看, 跟外荷载合力相对应的缆绳和锚链承受的张力相对较大, 符合经验规律。同时, 各锚链和缆绳的张力均未超过其设计承载力, 说明在该工况下趸船的系留系统是安全可靠的。

本文提出方法的计算结果与Optimoor软件计算结果大致吻合, 唯一明显的差异是Optimoor软件认为松弛的缆绳上张力为零, 但实际上, 缆绳即使在松弛的情况下自身重力也会产生一定的张力, 而本文提出的方法很好地考虑到了这点。

3 结语

1) 全面考虑了锚链和缆绳的弹性、悬链线的几何特征、躺底段和贴岸段影响以及多根不同方向锚链和缆绳的共同作用, 理论清晰, 易于编程实现, 而且精度较高。

2) 采用本文提出的方法计算得到的锚链和缆绳受力结果符合经验规律, 并与Optimoor软件计算结果结果相吻合, 具有一定实用性和可靠性, 可进一步应用于斜坡码头的靠泊能力评估。

3) 系留系统的布置和预张力很大程度上决定了趸船的定位效果和系留设施的最终受力, 在布置系留系统时应综合考虑, 并根据作业环境进行调整。

参考文献:

- [1] 周世良, 陈晓攀, 古西召, 等. 三峡库区斜坡式码头靠泊能力评估方法研究[J]. 水运工程, 2010(5): 103-107.
- [2] 王福奎, 李成, 温连明. 关于码头超能力靠泊问题的研究[J]. 中国水运: 下半月, 2008(6): 16-17.
- [3] 邱驹. 港工建筑物[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- [4] JTJ 294—1998 斜坡码头及浮码头设计与施工规范[S].
- [5] 范会渠. 弹性悬链线方程参数变换法及其工程应用[J]. 力学与实践, 2010(2): 32-34.
- [6] 田小康, 冯小松, 宵高宜. 基于准悬链线理论的舰船缆绳张力计算[J]. 广州航海高等专科学校学报, 2009(1): 18-20.
- [7] Wilson B W. Mooring of ships exposed to waves [R]. USA: Texas A&M University, Technical Report No. 20422, 1960.
- [8] John H. Mathews数值方法(MATLAB版)[M]. 4版. 周璐, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [9] Steven C. Chapra. 工程与科学数值方法的MATLAB实现 [M]. 2版. 唐玲艳, 田尊华, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [10] 胡灵斌, 唐军. 悬链线方程的求解及其应用[J]. 船舶, 2004(1): 18-20.
- [11] 李向群. 多点系泊船舶在波浪中的运动及其系泊力[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 1999(1): 9-15.
- [12] 李殿璞. 船舶运动与建模 [M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [13] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].

(本文编辑 武亚庆)