



# 悬链浮筒式多点系泊锚链受力计算

张美林, 孔友南, 王金城

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 悬链浮筒式多点系泊(MBM)是大型油船外海停泊时经常采用的一种离岸系泊方式, 但国内尚无实际应用。针对MBM系统中的主要结构部件锚链进行受力分析, 通过采用悬链线方程, 对自由或约束状况下单条锚链和复合锚链的受力进行理论分析和计算, 总结出一套锚链受力的系统分析方法, 并对中东某MBM工程进行案例计算。结果表明, 提出的理论公式和设计方法可为MBM的锚链设计提供借鉴。

**关键词:** 悬链浮筒式多点系泊; 复合锚链; 自由悬链; 约束悬链

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>26

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0097-07

## Force calculation of anchor chains in multi buoy moorings

ZHANG Mei-lin, KONG You-nan, WANG Jin-cheng

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Multi buoy moorings (MBM) are commonly adopted in offshore mooring for large oil tankers berthing in open seas, but there are no practical applications in China. We carry out the force analysis of anchor chains which are main structural components of an MBM system, analyze and calculate the force of single chain and composite chains under free or constrained condition by catenary equation, summarize a set of systematic analysis method for the force of chains, and apply the method to an MBM project in the Middle East for case calculation. The results show that the proposed theoretical formula and design method can provide references for the anchor chain design of MBM berth.

**Keywords:** multi buoy mooring; composite anchor chain; free catenary; constrained catenary

我国港口经过多年稳步建设和蓬勃发展, 传统固定泊位码头的设计已相当成熟, 达到了国际领先水平。随着港口岸线资源日渐匮乏, 不需要建造固定泊位码头的离岸式系泊系统开始得到港口建设者们的青睐。悬链浮筒式多点系泊(multi buoy moorings, MBM)作为大型油船的离岸系泊形式在国外被广泛采用, 其通过多组系泊腿来系泊船舶, 达到船舶安全驻留停泊水域的目的。每条系泊腿主要包含系泊浮筒、锚链和锚锤, 就其性能而言, 能够保证系泊和采油输油的安全性, 同时可通过浮筒及锚链的上升、下沉和左右移动来缓冲环境对系泊系统作用力的冲击。与传统固定

泊位码头相比, 悬链浮筒式多点系泊主要有以下优势: 投资成本低、建设周期短、抵御环境能力强、疏浚维护工作量少等。

然而, 目前国内对于MBM的整体设计研究几乎是一片空白, 也没有相应的工程案例。锚链作为MBM主要组成部分, 对其进行受力分析计算, 对今后MBM的深入研究十分重要。目前国内仅有以下相近规范和手册对该领域进行介绍:《系泊链》<sup>[1]</sup>对锚链的分类和强度进行规定;《浮式结构物定位系统设计与分析》<sup>[2]</sup>对浮式生产储油卸油装置(FPSO)的离岸定位系泊系统进行分析;《码头结构设计规范》<sup>[3]</sup>和《海港工程设计手册》<sup>[4]</sup>给出了

浮式系泊趸船锚链拉力的简易计算公式。

国外针对 MBM 的研究远远走在前列, 一些欧美国家及国际论坛协会颁布了相应的规范和指导手册。英标 BS 6349-6<sup>[5]</sup>介绍了多浮筒锚泊的不同布置形式, 对各组成部件的设计进行了论述, 给出了锚链悬垂线简要计算表格; 石油公司国际海事论坛(OCIMF)的 *Guidelines for the Design, Operation and Maintenance of Multi Buoy Moorings*<sup>[6]</sup>对多浮筒系泊的结构组成、适用范围、平面布置、荷载计算、系统分析、浮筒设计、锚腿设计、锚锤设计、管汇设计、附属设施设计、安全作业、保养维修等一整套内容给出详细的规定和指导; 此外, 挪威船级社、德国劳氏船级社、美国石油协会等机构颁布的诸多规范和手册也介绍了离岸系泊的相关内容。

本文通过对上述国内外规范和指导手册进行整理提炼, 结合多点系泊锚链的受力特征, 运用悬链线方程对锚链受力进行理论分析计算, 并结合实际工程案例进行计算。本文采用的计算分析方法和结论可为 MBM 在国内未来港口工程的实际应用打下基础。

## 1 锚链受力分析

当船舶处于多点系泊状态时, 系在浮筒上的系泊缆对船舶起到约束作用, 抵抗船舶受到的风、波浪、水流外部环境荷载。缆力同时作用于浮筒, 此时锚链受自身重力和浮力、浮筒牵引力及锚锤反力的情况下, 达到受力平衡状态。从接浮筒点到海底接地点, 锚链成一个悬垂线的形态, 此时系泊腿的锚链可按照悬链线方程进行受力分析和设计。当锚锤不受锚链的垂直上拔力时, 即锚链海底接地点的切线与泥面角度为  $0^\circ$ , 锚链处于自由悬链状态; 当锚锤受锚链的垂直上拔力时, 即锚链海底接地点的切线与泥面角度不为  $0^\circ$ , 锚链处于约束悬链状态。以下对单条锚链和双条复合锚链在上述两种不同状态下的受力分别进行分析计算。

### 1.1 单条锚链(自由悬链状态)

单条锚链处于自由悬链状态,  $a$  和  $c$  点分别为锚链接地点和接浮筒点,  $a$  点处切线方向与海底泥面水平夹角为  $0^\circ$ ,  $c$  点距离海底泥面的高度为  $h$ , 该点处锚链受浮筒的总力为  $T_c$ , 分解为竖向力  $V_c$  和水平力  $H_c$ , 见图 1。

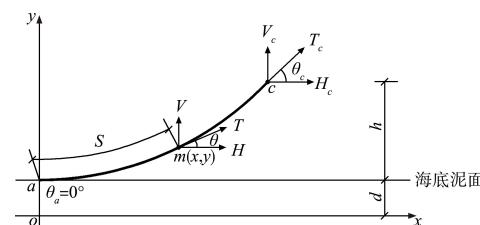


图 1 单条锚链自由悬链状态受力分析

$m(x, y)$  是悬链上任意一点, 其几何和力学特征值可由下列悬链线方程求得:

$$y = d \cdot \operatorname{ch}(\frac{x}{d}) = \frac{H}{\omega} \cdot \operatorname{ch}(\frac{x}{d}) \quad (1)$$

$$x = d \cdot \operatorname{arcch}(\frac{y}{d}) \quad (2)$$

$$\tan \theta = y' = \operatorname{sh}(\frac{x}{d}) \quad (3)$$

$$S = \int_0^x \sqrt{1 + y'^2} dx = d \cdot \operatorname{sh}(\frac{x}{d}) \quad (4)$$

式(4)等式两边平方并加上  $d^2$  整理后得:

$$y = \sqrt{S^2 + d^2} \quad (5)$$

$$T = \frac{H}{\cos \theta} = \omega y \quad (6)$$

$$V = H \tan \theta = \omega S \quad (7)$$

式中:  $y$  为悬链上任意一点的纵坐标;  $x$  为悬链上任意一点的横坐标;  $d$  为  $a$  点至坐标系原点的距离;  $H$  为悬链上任意一点受到的水平力;  $\omega$  为锚链水中单位长度的质量;  $\theta$  为悬链上任意一点切线方向与水平面的夹角;  $S$  为悬链上任意一点距  $a$  点的链长;  $T$  为悬链上任意一点受到的张力;  $V$  为悬链上任意一点受到的竖向力。

### 1.2 单条锚链(约束悬链状态)

单条锚链处于约束悬链状态,  $a$  点处切线方向与海底泥面水平夹角大于  $0^\circ$ , 见图 2。

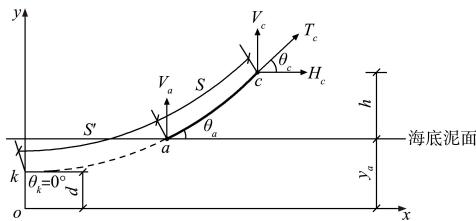


图2 单条锚链约束悬链状态受力分析

假定沿原悬链线延长, 使约束悬链与坐标纵轴相交于  $k$  点, 交点处链条切线方向与水平面的夹角为  $0^\circ$ , 此时整个链条  $ck$  成为新的自由悬链, 则有:

$$d = \frac{H}{\omega} \quad (8)$$

$$V_a = H \tan \theta_a \quad (9)$$

$$S' = \frac{V_a}{\omega} \quad (10)$$

$$y_a^2 = S'^2 + d^2 \quad (11)$$

$$y_c^2 = (S' + S)^2 + d^2 \quad (12)$$

$$y_c = y_a + h \quad (13)$$

式(11)~(13)联立后可得:

$$y_a = S \cdot \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{d^2}{S^2 - h^2}} - \frac{h}{2} \quad (14)$$

$$y_c = y_a + h = S \cdot \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{d^2}{S^2 - h^2}} + \frac{h}{2} \quad (15)$$

式中:  $d$  为  $k$  点至坐标系原点的距离;  $V_a$  为锚链  $a$  点受到的竖向力;  $\theta_a$  为  $a$  点链条切线方向与海底泥面水平夹角;  $S'$ 、 $S$  分别为  $ak$  段、 $ac$  段链长;  $y_a$ 、 $y_c$  分别为  $a$ 、 $c$  点的纵坐标;  $h$  为  $c$  点距离海底泥面的高度;  $H$ 、 $\omega$  意义同前。然后根据悬链线方程, 可求得其他相关参数。

### 1.3 复合锚链(1条自由悬链状态、1条约束悬链状态)

2条锚链  $ab$ 、 $bc$  构成一组复合悬链, 相交于  $b$  点,  $a$  点处切线方向与海底泥面水平夹角为  $0^\circ$ , 见图3(其中  $ab$  段为自由悬链,  $bc$  段为约束悬链)。

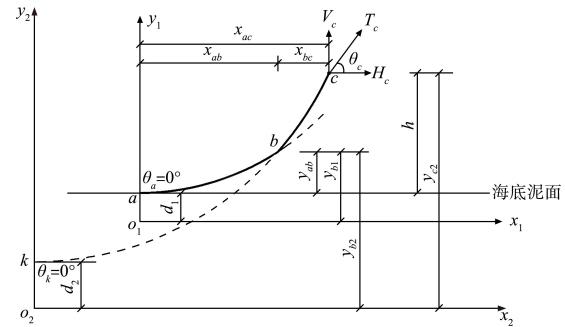


图3 1条自由、1条约束复合锚链悬链状态受力分析

假定  $bc$  沿原悬链线延长, 使得约束悬链与坐标系  $x_2 o_2 y_2$  的纵轴相交于  $k$  点, 交点处链条切线方向与水平面的夹角为  $0^\circ$ , 此时链条  $ck$  成为新的自由悬链, 则有:

$$d_1 = \frac{H}{\omega_1} \quad (16)$$

$$d_2 = \frac{H}{\omega_2} \quad (17)$$

$$y_{b1} = \sqrt{S_{ab}^2 + d_1^2} \quad (18)$$

根据两段悬链的相关性有:

$$S_{bk} = S_{ab} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (19)$$

$$y_{b2} = \sqrt{S_{bk}^2 + d_2^2} \quad (20)$$

$$y_{ab} = y_{b1} - d_1 \quad (21)$$

$$y_{c2} = (y_{b2} - y_{ab}) + h \quad (22)$$

$$S_{ck} = \sqrt{y_{c2}^2 - d_2^2} \quad (23)$$

$$S_{bc} = S_{ck} - S_{bk} \quad (24)$$

$$S_{ac} = S_{ab} + S_{bc} \quad (25)$$

$$x_{ab} = d_1 \cdot \ln \left[ \frac{S_{ab}}{d_1} + \sqrt{\left( \frac{S_{ab}}{d_1} \right)^2 + 1} \right] \quad (26)$$

$$x_{bc} = d_2 \cdot \ln \left[ \frac{S_{bc}}{d_2} + \sqrt{\left( \frac{S_{bc}}{d_2} \right)^2 + 1} \right] \quad (27)$$

式中:  $d_1$  为  $a$  点至坐标系  $x_1 o_1 y_1$  原点的距离;  $d_2$  为  $k$  点至坐标系  $x_2 o_2 y_2$  原点的距离;  $H$  为悬链上任意一点受到的水平力;  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为  $ab$ 、 $bc$  段锚链水中单位长度的质量;  $S_{ab}$ 、 $S_{bk}$ 、 $S_{ck}$ 、 $S_{bc}$ 、 $S_{ac}$  分别为  $ab$ 、 $bk$ 、 $ck$ 、 $bc$ 、 $ac$  段链长;  $y_{b1}$ 、 $y_{b2}$  分别

为  $b$  点在坐标系  $x_1o_1y_1$ 、 $x_2o_2y_2$  中的纵坐标;  $y_{ab}$  为  $ab$  段的垂直距离;  $y_{c2}$  为  $c$  点在坐标系  $x_2o_2y_2$  中的纵坐标;  $h$  为  $c$  点距海底泥面的高度;  $x_{ab}$ 、 $x_{bc}$  分别为  $ab$ 、 $bc$  段的水平距离。然后根据悬链线方程, 可求得其他相关参数。

#### 1.4 复合锚链(2 条约束悬链状态)

2 条锚链  $ab$ 、 $bc$  构成 1 组复合悬链, 相交于  $b$  点,  $a$  点处切线方向与海底泥面水平夹角大于  $0^\circ$ , 见图 4(其中  $ab$  和  $bc$  段均为约束悬链)。

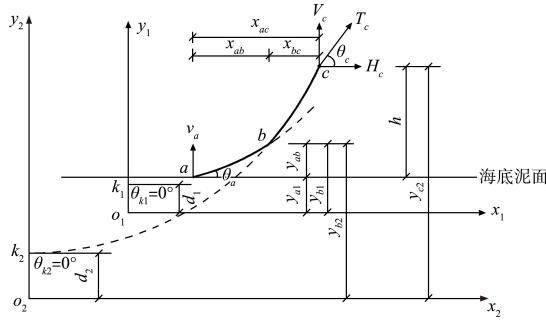


图 4 2 条约束复合锚链悬链状态受力分析

假定  $ab$  沿原悬链线延长, 使约束悬链与坐标系  $x_1o_1y_1$  的纵轴相交于  $k_1$  点, 交点处链条切线方向与水平面的夹角为  $0^\circ$ , 此时链条  $bk_1$  成为新的自由悬链。假定  $bc$  沿原悬链线延长, 使约束悬链与坐标系  $x_2o_2y_2$  的纵轴相交于  $k_2$  点, 交点处链条切线方向与水平面的夹角为  $0^\circ$ , 此时链条  $ck_2$  成为新的自由悬链, 此时  $d_1$ 、 $d_2$  公式与式(16)、(17)相同,  $V_a$  公式与式(9)相同, 其他参数公式:

$$S_{ak_1} = \frac{V_a}{\omega_1} \quad (28)$$

$$y_{a1} = \sqrt{S_{ak_1}^2 + d_1^2} \quad (29)$$

$$y_{b1} = \sqrt{S_{bk_1}^2 + d_1^2} = \sqrt{(S_{ak_1} + S_{ab})^2 + d_1^2} \quad (30)$$

根据两段悬链的相关性有( $y_{c2}$ 、 $S_{ac}$ 、 $x_{ab}$ 、 $x_{bc}$  公式与式(22)、(25)~(27)相同):

$$S_{bk_2} = S_{bk_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (31)$$

$$y_{b2} = \sqrt{S_{bk_2}^2 + d_2^2} \quad (32)$$

$$y_{ab} = y_{b1} - y_{a1} \quad (33)$$

$$S_{ck_2} = \sqrt{y_{c2}^2 - d_2^2} \quad (34)$$

$$S_{bc} = S_{ck_2} - S_{bk_2} \quad (35)$$

式中:  $d_1$  为  $k_1$  点至坐标系  $x_1o_1y_1$  原点的距离;  $d_2$  为  $k_2$  点至坐标系  $x_2o_2y_2$  原点的距离;  $S_{ak_1}$ 、 $S_{ab}$ 、 $S_{bk_1}$ 、 $S_{bk_2}$ 、 $S_{ck_2}$ 、 $S_{bc}$ 、 $S_{ac}$  为  $ak_1$ 、 $ab$ 、 $bk_1$ 、 $bk_2$ 、 $ck_2$ 、 $bc$ 、 $ac$  段链长;  $y_{a1}$  为  $a$  点至坐标系  $x_1o_1y_1$  原点垂直距离; 其他参数同前。然后根据悬链线方程, 可求得其他相关参数。

上述 4 种悬链形式基本涵盖了目前离岸系泊系统中的锚链受力状态, 其中复合锚链在浮筒式多点系泊中运用较多。对于复合锚链而言, 两条锚链的长度  $S_{ab}$  和  $S_{bc}$  互相影响, 在已知其中任何一条锚链长度的情况下, 加上外力、锚链质量、锚点到系泊浮筒的垂直距离等相关参数后, 就能求得另一条锚链的长度。在实际设计中, 首先需要假定任何一条锚链的长度, 然后反推出另一条锚链的长度。在此过程中, 需要运用逐步逼近法、迭代等数学手段。

## 2 工程实际案例

### 2.1 工程概况

中东某离岸式油产品泊位工程拟在外海指定锚泊区域内锚泊大型油船, 然后通过输油管道从船体将燃油引至后方陆域炼油厂。为了满足生产需要, 拟建一个通过多点浮筒系泊的泊位, 泊位平均水深 21.3 m, 系泊停靠最大吨级为 12 万 DWT 油船(设计船型)。

设计船型主尺寸为: 总长 277 m, 型宽 44.7 m, 型深 23.9 m, 满载吃水 16.2 m, 压载吃水 7.6 m。工程区域自然条件见表 1。

表 1 工程区域自然条件

类别	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	波浪		涌浪		流速/(m·s <sup>-1</sup> )	潮高/m
		有效波高/m	周期/s	有效波高/m	周期/s		
2 a—遇	17(30 s 阵风)	1.0	4	1.0	10	0.51	3.5
50 a—遇	35(30 s 阵风)	1.5	5	2.3	10	1.18	3.5

锚泊区域采用 6 浮筒 +1 船锚的布置形式, 5 个浮筒布置在船尾, 1 个浮筒布置在船首右侧, 船首左侧自带船锚装置一套。锚泊区域平面布置和水深分别见图 5、表 2。

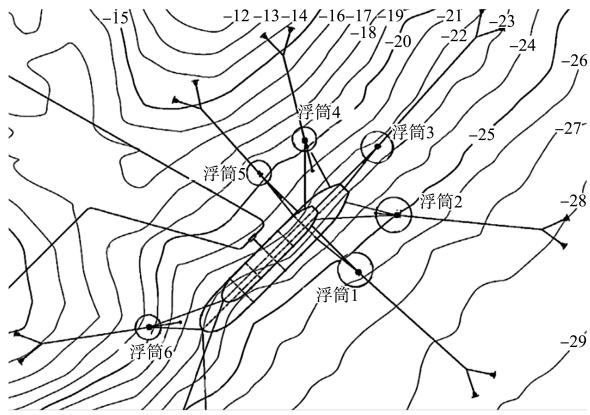


图 5 锚泊区域平面布置 (单位: m)

表 2 锚泊区域水深

位置	$d_{C,dat}/m$	$d_{Tide}/m$	$d_{1-C,dat}/m$	$d_{2-C,dat}/m$
浮筒 1	25.7	29.2	28.5	25.0
浮筒 2	25.0	28.5	28.0	24.5
浮筒 3	22.3	25.8	22.5	22.5
浮筒 4	19.7	23.2	14.0	21.0
浮筒 5	19.8	23.3	14.5	21.0
浮筒 6	19.7	23.2	15.5	21.5

注:  $d_{C,dat}$  为海图基准面时浮筒离海底泥面的水深;  $d_{Tide}$  为最高潮位时浮筒离海底泥面的水深;  $d_{1-C,dat}$  为海图基准面时主锚点离海面的垂直水深;  $d_{2-C,dat}$  为海图基准面时附属锚点离海面的垂直水深。

## 2.2 锚链规格确定

根据 *Guidelines for the Design, Operation and Maintenance of Multi Buoy Moorings* 2.3.6 节所述, 系泊系统各部分的设计均由相应安全因子进行控制, 以保证系泊时绝对的安全可靠。整套系泊腿的设计安全工作荷载为 SWL, 浮筒上快速脱缆钩的极限承载力和锚链的破断力相对 SWL 的安全因子均为 3。本工程 12 万 DWT 油船系泊时, 每个浮筒设置 2 套快速脱缆钩, 每套脱缆钩的极限承载力为 2 000 kN, 共 4 000 kN。计算得到 SWL 为 1 330 kN, 取 1 350 kN, 进而得到锚链的破断力为 4 050 kN。

考虑到一定的富余量, 主锚链选取  $\phi 73$  mm

的 R3 无挡锚链, 由于悬垂段锚链持续的系泊受力以及和海水更强烈的摩擦损耗, 选取  $\phi 78$  mm 的 R3 无挡锚链。浮筒未系泊时, 为了防止其在自然环境荷载的作用下位移过大, 需额外设置一段附属锚链, 安装在主锚链的相反方向, 选取  $\phi 60$  mm 的 R3 无挡锚链。各段锚链特性见表 3, 系泊腿结构见图 6。

表 3 锚链特性

锚链型号	每节质量/t	节长/m
$\phi 78$ mm	3.7	27.5
$\phi 73$ mm	3.2	27.5
$\phi 60$ mm	2.2	27.5

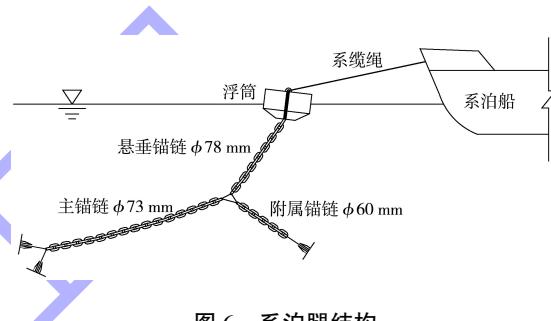
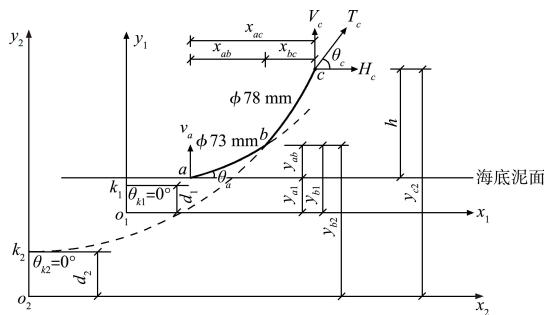


图 6 系泊腿结构

## 2.3 主锚链系统设计

据 *Guidelines for the Design, Operation and Maintenance of Multi Buoy Moorings* 2.5.5 节推荐, 主锚链与海底面的夹角  $\theta_a$  取  $3^\circ$ , 一方面考虑到锚锤能够抵抗较小的上拔力, 充分发挥锚锤在水平和垂直方向上的作用; 另一方面确保在荷载作用下无多余的拖地段, 减小锚链的总长度。此时主锚链系统与 1.4 节复合锚链(2 条约束悬链)相对应, 见图 7。该种不同规格锚链组成的复合锚链形式有以下优势: 在满足荷载要求、使用安全以及不同区域锚链预留量的情况下, 主锚链采用较小的尺寸, 能够节省锚链用量, 提高经济效益; 下部主锚链的长度相对较长, 在减小尺寸的情况下能够降低重力, 在无系泊的自然条件下能够一定程度上减少浮筒吃水。在计算主锚链和悬垂锚链组成的主锚链系统时, 船舶处于系泊状态, 简单起见考虑系泊点受到最大的水平荷载即为系泊腿的安全工作荷载 1 350 kN。



至此, 整个系泊腿锚链的详细参数、尺寸设计已经完毕, 本工程所需锚链型号及长度见表 6。

表 6 本工程所需锚链型号及长度

种类	型号	长度/m
悬垂锚链	φ78 mm	247.5
主锚链	φ73 mm	825.0
附属锚链	φ60 mm	206.4

### 3 结语

1)本文通过研究国内外 MBM 相关的设计规范、指导手册, 总结归纳出 MBM 锚链受力分析的理论计算方法。

2)根据锚链的受力特征, 运用悬链线方程对单条锚链(自由悬链状态)、单条锚链(约束悬链)、复合锚链(1 条自由悬链状态、1 条约束悬链状态)、复合锚链(2 条约束悬链状态)4 大类型进行理论分析和受力计算。

3)重点参照 OCIMF 指导手册和 BS 6349 标准中的相关规定, 对中东某离岸式油产品泊位工程的 MBM 进行了实际案例设计, 将主锚链系统、附属锚链系统的锚链分别进行受力分析计算, 确定了复合锚链中主锚链、悬垂锚链和附属锚链的规格和尺寸。

4)本文提出的锚链受力分析计算方法可指导

实际工程 MBM 的锚链设计, 可为国内 MBM 的发展提供技术支撑和参考。

### 参考文献:

- [1] 江苏亚星锚链股份有限公司, 中国船舶工业综合技术经济研究院, 江南造船(集团)有限责任公司. 系泊链: GB/T 20848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [2] 中海油研究总院. 浮式结构物定位系统设计与分析: SY/T 10040—2016[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [5] British Standards Institution. Maritime structures-part 6: design of inshore moorings and floating structures: BS 6349-6[S]. London: British Standards Institution, 1989.
- [6] Oil Companies International Marine Forum. Guidelines for the design, operation and maintenance of multi-buoy moorings[S]. London: Oil Companies International Marine Forum, 2010.

(本文编辑 王璁)

(上接第 91 页)

### 参考文献:

- [1] 王猛, 马卫忠, 赵谊, 等. 集运鱼系统发展及相关技术问题探讨[J]. 水力发电, 2017, 43(2): 6-9.
- [2] 朱海峰, 刘流, 路波等. 鱼类下行过坝相关工程措施综述[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(10): 33-37.
- [3] 吴天祥. 冲乎尔水电站集运鱼系统设计方案及实施[J]. 广西水利水电, 2016(2): 88-89, 92.
- [4] 吕宏飞, 郭锋远, 王哲, 等. 丰满大坝上游坝面靠船设施设计[J]. 东北水利水电, 2019, 37(8): 6-7.
- [5] 张陆良, 谭平, 朱永刚. 双江口水电站过鱼方案比选分

析[J]. 水利水电技术, 2015, 46(11): 19-22.

- [6] 蒋军, 付晓娜, 师国平. 金沙江向家坝库区运输模式比较[J]. 水运管理, 2017, 39(3): 9-12, 24.
- [7] 熊韬. 长江干线江海直达转载货运模式研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [8] 刘臣. 乌江渡电站泄流对乌江渡码头航行影响[J]. 水运工程, 2017(4): 151-155, 165.
- [9] 刘臣, 于可忱. 电站泄流对乌江渡码头河段航行影响改善研究[J]. 水道港口, 2018, 39(1): 60-66.

(本文编辑 郭雪珍)