

# 漂浮式水上光伏电站锚泊系统设计方法

刘浩晨, 国 振, 王立忠, 沈侃敏

(浙江省海洋岩土工程与材料重点实验室, 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058)

**摘 要:** 以漂浮式水上光伏电站的锚泊系统设计为研究对象, 提出一种考虑环境水位、荷载变化与系泊定位要求的快速设计方法。该设计方法可确保浮体的运动范围在高、低环境水位工况和极限风压作用下均处于设计容许范围之内, 且锚链的强度和浮体净浮力也满足设计要求。通过一个具体的漂浮式水上光伏工程算例, 对该设计方法进行详细介绍。

**关键词:** 锚泊系统; 漂浮式; 光伏电站; 水位变化; 设计方法

**中图分类号:** TK519

**文献标识码:** A

## 0 引 言

水上光伏相比传统光伏发电优点显著: 可在矿坑、塌陷区、水库、鱼塘等地建造, 节约土地资源; 水面开阔, 光照利用率高; 光伏组件的输出功率随温度的升高而降低<sup>[1]</sup>, 水体对于面板有冷却效果, 能提高约 11% 的发电效率<sup>[2]</sup>; 面板阻隔光照, 降低水体温度, 避免有害藻类的滋生, 净化水体环境<sup>[3]</sup>; 水面光伏发电, 水下养鱼, 可实现渔光互补, 不仅提高了空间利用率还可作为旅游地点, 提高经济效益。目前, 根据光伏组件的支撑方式, 水上光伏电站主要分为水面漂浮式(如图 1<sup>[4]</sup>所示)和桩基承载式两种。当水位较低时(小于 5 m),

可采用桩基承载式<sup>[5]</sup>, 但其工程造价相对较高; 水面漂浮式需事先在底床设置锚块, 在浮体和锚体之间通过一定长度的锚链柔性相连, 可适应水位的季节性变化, 更为经济。

漂浮式水上光伏电站通过多根锚链组成的锚泊系统进行系泊定位, 环境风压荷载和水位变化是影响浮体运动的主要因素。由于水上光伏电站常建造于内陆湖泊水库中, 水深浅且季节性水位变化与总水深的比例关系明显大于海洋中的浮体系泊, 故锚链的张力和整体形态变化十分敏感, 属于浅水环境中的变水位系泊, 对锚泊系统的设计要求很高。漂浮式水上光伏电站主要由锚泊系统(mooring system)、光伏系统(PV system)和漂浮系统(floating system)3 部分组成, 如图 2 所示。漂浮系统多采用圆筒形或方形浮体作为漂浮支架, 用于承受光伏板传递来的重力荷载和水平风压荷载, 支架之间通过刚性或柔性连接以组成漂浮方阵。在运营期内, 需保证漂浮系统的运动范围满足设计要求, 避免与其他浮体碰撞, 此外还需使浮体净浮力、锚链强度和锚体承载力的满足设计要求。针对不同的地质条件, 锚体通常采用海工锚、重力锚或桩锚等。风压荷载和水位变化是导致漂浮系统运动的主要因素:



图1 漂浮式水上光伏电站

Fig. 1 Floating photovoltaic system

收稿日期: 2017-06-23

基金项目: 国际科技合作计划(2015DFE72830); 国家杰出青年科学基金(51325901); 国家自然科学基金(51338009); 浙江省自然科学基金(LY15E090002)

通信作者: 国 振(1982—), 男, 博士、副教授, 主要从事海洋岩土工程、能源岩土工程方面的研究。nehzoug@163.com

1)当水库环境处于低水位时,锚泊系统中的锚链处于松弛状态,部分锚链会平铺在底床上。此时,锚链对上部浮体的约束较小,浮体水平运动幅度大,可能导致浮体之间碰撞受损。

2)当水库环境变为高水位时,浮体随之上浮,锚链受拉张紧且张力急剧增大。若张紧锚链张力的竖向分力过大,可能使浮体因净浮力不够而没入水下,锚链强度和锚体承载力也可能不满足要求。

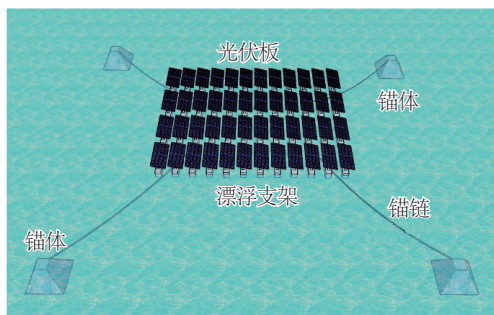


图2 漂浮式水上光伏电站系泊示意图

Fig. 2 Mooring system of floating photovoltaic system

因此针对适用于漂浮式水上光伏电站的锚泊系统设计问题,本文综合考虑水位变化和环境荷载,

提出一套快速设计流程,并基于自行编写程序<sup>[6]</sup>,对水位变化时,锚泊系统中锚链型号与长度选择进行准静态分析,得到满足设计要求的锚链型号和长度。

## 1 设计策略

### 1.1 设计流程

本文提出的设计流程主要分为设计准备、低水位设计和高水位校核 3 个阶段(如图 3 所示),设计之前,首先调研收集:1)当地的环境和地质条件,包括土体抗力参数的选取,设计所需的最大风压荷载、水位及其变化范围等;2)光伏方阵布设型式,进而确定浮体的最大运动范围,锚泊距离及其变化范围;3)系泊锚链的型号、浮体的净浮力要求以及锚体承载力设计值等。然后针对低水位工况,选定锚链种类,设定锚链顶端张力的水平分力等于最大风压荷载,计算此时需抛出的锚链长度,并确保锚链强度、锚体承载力和浮体的净浮力满足设计要求。最后基于低水位工况的计算结果(锚链型号、长度、锚体及浮体结构等),校核此锚泊系统在高水位条件下的工作性能与安全性。逐步改变浮体的水平偏移距离,进行准静态分析。验证锚链的强度、锚体

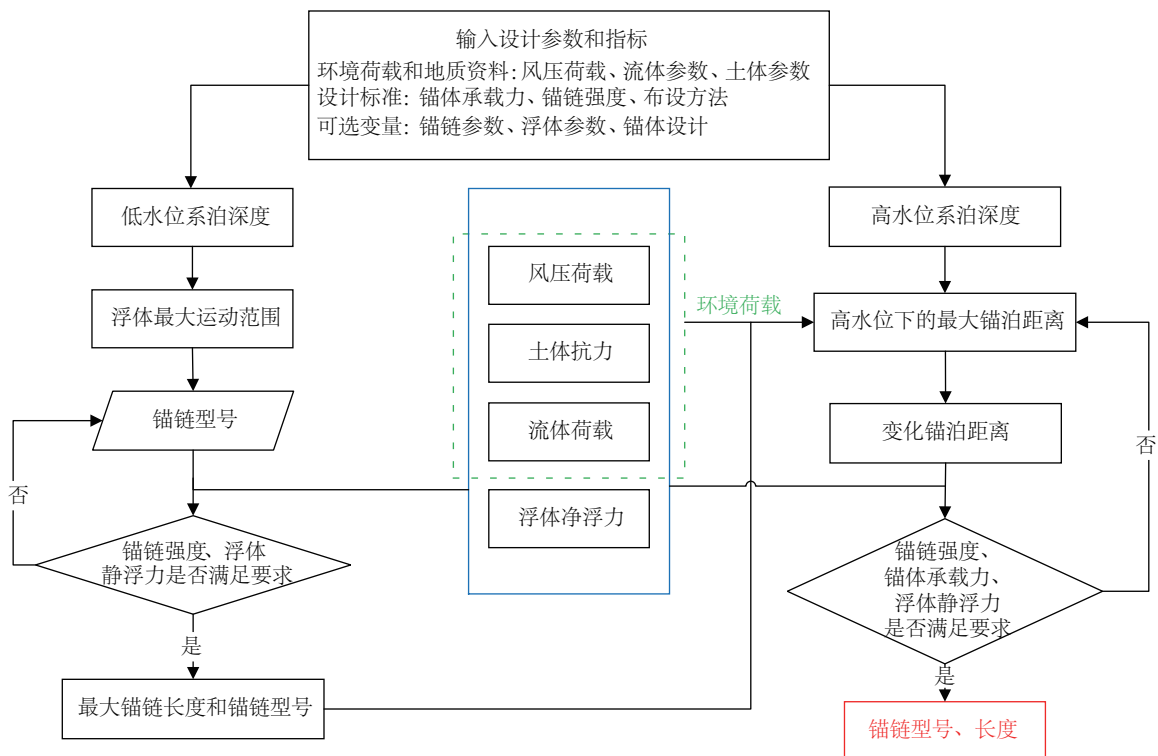


图3 系泊系统设计流程图

Fig. 3 Design procedure of mooring system

承载力和浮体净浮力是否满足要求,若未通过校核,则需针对性改变锚链、锚体或浮体结构,重新进行低水位工况计算。

## 1.2 计算模型及参数选取

系泊锚链可分为土中段和水中段两部分,分别受到土体抗力与流体作用力。对于水中段锚泊线一般采用 Morison 方程进行计算;对于土中段锚泊线,Vivatrat 等<sup>[7]</sup>通过数值迭代求解控制方程,得到埋置段的锚泊线反悬链线形状。Degenkamp 等<sup>[8]</sup>进行了锚泊线的模型试验,对不同类型的锚泊线,获得了法向和切向的土抗力系数。国振等<sup>[6]</sup>、王立忠等<sup>[9,10]</sup>针对张紧式系泊的锚泊线建立二维、三维的准静力分析模型,分析锚泊线与海床接触的可能性。本文采用国振等<sup>[6]</sup>提出的分析模型,首先分别沿锚泊距离、锚体嵌固深度把整根锚链划分成  $n$  个微元段、 $n+1$  个节点的组合,其微元段受力分别如图 4 所示,然后从锚链顶端开始依次迭代,由平衡方程和几何方程可得到锚链的形态和结构内力,然后改变锚泊距离,对锚泊线进行准静态分析。

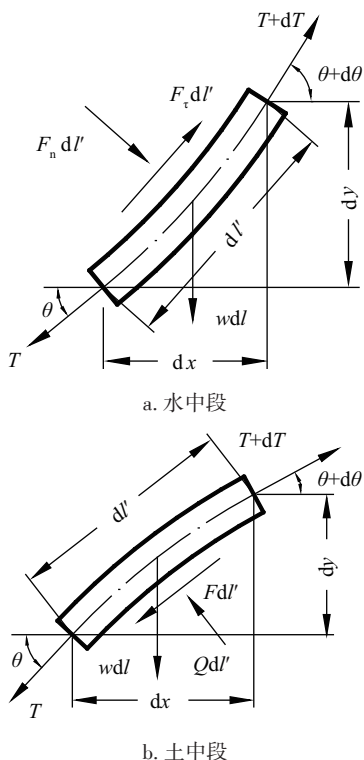


图4 水中段、土中段锚链微元受力示意图

Fig. 4 Forces acting on catenary segments in water or soil

水中段锚链的控制方程:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dl} = w \sin \theta - F_t(1 + T/EA) \\ T \frac{d\theta}{dl} = w \cos \theta + F_n(1 + T/EA) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $T$ ——锚链的张力;  $dl$ ——锚链原始微元长度;  $w$ ——水中段锚链微元的浮重度;  $\theta$ ——锚链微元与水平面的夹角;  $F_n$ 、 $F_t$ ——水中段锚链微元受到的流体的法向力和切向力;  $E$ ——锚链的弹性模量;  $A$ ——锚链的截面积。

土中段锚链的控制方程:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dl} = F(1 + T/EA) + w \sin \theta \\ T \frac{d\theta}{dl} = -Q(1 + T/EA) + w \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $F$ 、 $Q$ ——土体对锚链沿切向与法向的作用力,  $F = (E_t d) f$ ,  $Q = (E_n d) q$ , 其中  $d$  为锚链单链环宽度,  $E_n$ 、 $E_t$  为法向和切向有效宽度系数; 对于软粘土,  $q = N_c S_u$ ,  $f = S_u$ ,  $N_c$  为承载力系数,  $S_u$  为不排水抗剪强度, 本文中取 Degenkamp 等<sup>[8]</sup>给出的正常固结软土中的锚链法向和切向有效宽度参数  $E_n$ 、 $E_t$  的推荐值,  $E_n = 2.5$ 、 $E_t = 8.0$ , 承载力系数  $N_c$  按图 5 所示取值。需要指出, 目前漂浮式水上光伏主要建造在水库中, 本文不考虑水流对锚链的拖曳作用力, 即在计算时  $F_n$ 、 $F_t$  取为零。只有当水库面积很大且在极端天气下产生的波浪不可忽略时, 才考虑水中流速及变化对锚链的作用<sup>[11]</sup>。

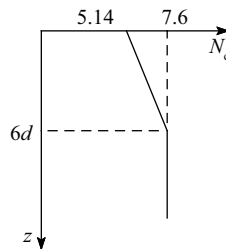


图5 承载力系数  $N_c$

Fig. 5 Bearing capacity factor  $N_c$

## 1.3 锚体选择

在海洋工程中常用的锚体包括拖曳锚、桩锚、吸力锚、动力贯入锚、重力锚等, 表 1 对以上各种锚体进行介绍, 综合考虑施工、造价、承载特性、使用条件等因素, 一般选用重力锚作为承载锚体。

表1 系泊工程中常用锚体介绍

Table 1 Common anchors in mooring engineering

锚体	特点
拖曳锚	通过在锚泊线上施加预张力拖曳锚体至预定深度,安装较复杂;主要承受水平荷载,竖向上拔力下易拔出土体
桩锚	虽能承受水平和竖向荷载,但必须对所安装的位置进行专门设计,而且造价较高
吸力锚	主要应用于粘土型底床,能承受较高的水平和上拔荷载,但其施工复杂、安装费用较高,且常用于永久系泊
动力贯入锚	依靠自重贯入土体,安装成本较低,但缺乏现场实验,适用于深水海域
重力锚	由混凝土块和钢块组成,施工方便,费用相对较低,适用于小型锚泊系统

2 算例分析

本算例为浙江省某水库的漂浮式水上光伏电站项目,该项目包括多个漂浮方阵,部分漂浮方阵的布置型式如图 6 所示。每个方阵通过 4 根锚链与四周的重力锚体连接,以满足其稳定与运动要求。

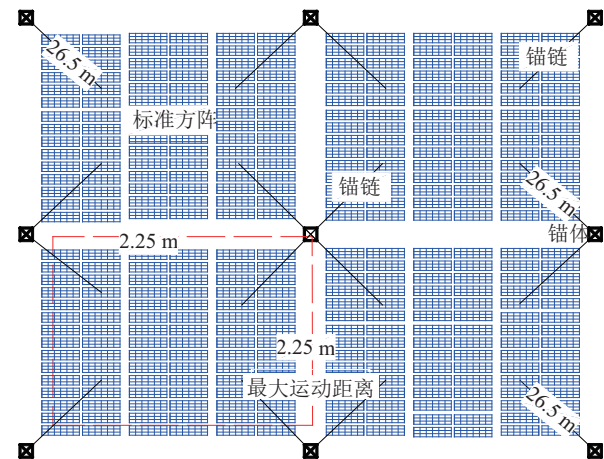


图6 浮体系泊示意

Fig. 6 Mooring of PV array

2.1 设计准备工作

1) 在 1~3 m 内,泥面以下不排水抗剪强度  $S_u = S_{u0}$ 、 $S_{u0} = 3 \text{ kPa}$ 。规范<sup>[12, 13]</sup>要求以该地区 25 a 重现期为标准来计算方阵的基本风压设计值,计算得到水平风压荷载 114.4 kN,水库水位变化范围 1.0~3.5 m。

2) 锚泊半径为 26.5 m,方阵之间的水平净空为 4.5 m,沿锚链方向最不利工况下的最大容许偏移为  $(4.5/2) \times \cos(\pi/4) = 1.59 \text{ m}$ 。

3) 方阵的设计净浮力设计值为 63 kN(已扣除最大下压风荷载、光伏系统及支架自重)。锚体采用重力锚,其水平承载力设计值为 100 kN,锚体在自重

作用下嵌入底床,下部系缆点在泥面以下 0.5 m 处,上部系缆点位于水面处。

4) 拟用锚链为 BM2 型无档锚链<sup>[14]</sup>,公称链径分别为 10.0、20.5 和 30.0 mm,具体参数如表 2 所示。

表2 锚链参数表

Table 2 Mooring chain parameter

公称链径/ mm	破断力 $T_{break}/\text{kN}$	质量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	轴向刚度 $\times 10^7 /$ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
10.0	51.0	2.17	1.03
20.5	217.3	9.12	3.59
30.0	467.5	19.50	7.69

2.2 低水位工况

在风压荷载作用下,浮体会水平运动,满足设计要求时最大的锚泊距离为 28.09 m。采用表 1 中 3 种规格锚链,在锚链顶端水平张力为最大风压荷载的条件下进行计算,获得的锚链整体形态如图 7 所示。随着锚链直径的增加,锚链长度从 28.131、28.134 m 增加到 28.137 m,长度变化并不明显,但其入泥点显著前移,从 7.32、6.73 m 变化到 6.66 m,形态差异大,说明随着锚链直径的增加,底床土体

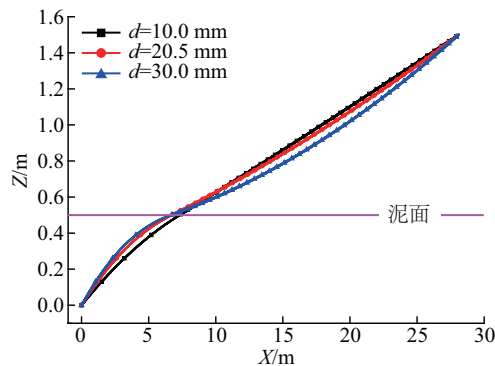


图7 低水位工况下锚链整体形态图

Fig. 7 Chain configuration at low water level



抗力逐渐发挥作用。

锚链沿水深方向的倾角(锚链与水平面间夹角)变化如图 8 所示,水中段锚链倾角较小( $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ )且变化不大,入土后则明显增加(达到  $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$ )。随着锚链直径的增加,倾角的变化更为明显,尤其是在锚眼处的角度,这意味着锚体上的竖向作用力增大,在设计锚体承载力时考虑此提升角度的影响。

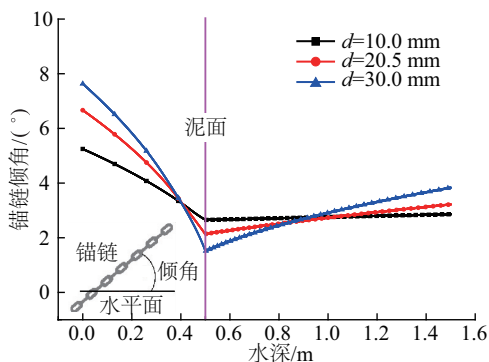


图 8 低水位下锚链沿水深倾角变化

Fig. 8 Chain angle at low water level

锚链的竖向张力沿水深分布如图 9 所示,锚链顶端的最大竖向张力为 6 kN,远小于漂浮方阵的净浮力(63 kN),因此浮体净浮力满足设计要求。但由于此时锚链顶端水平预张力为极限风压荷载,锚链张紧,在锚眼处的竖向张力差异明显,特别是直径为 30 mm 的锚链在锚眼处竖向上拔力达 11 kN,因此在选择锚体时需考虑锚链张力竖向分量对于锚体水平承载力的影响。

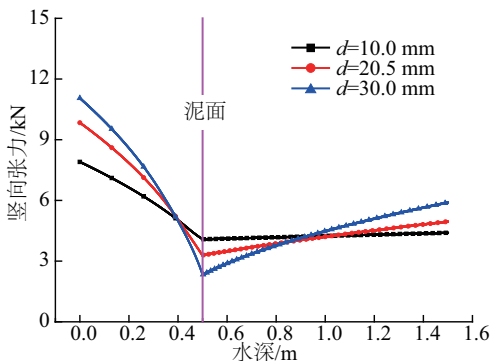


图 9 低水位下锚链竖向张力沿水深竖向分布

Fig. 9 Vertical chain tension at low water level

图 10 是锚链沿水深的张力变化情况。水中段锚链张力几乎不变,其最大值位于锚链顶端系缆处,约为 88.28 kN。由于底床土体抗力作用,锚链在

切入底床后张力迅速衰减,而且锚链直径越大,衰减幅度越显著。锚泊线中最大张力  $T_{\max} < T_d = T_{\text{break}}/Fos$ ,而 API 规范<sup>[15]</sup>中锚泊线准静力分析的安全系数  $Fos$  取 2.0,因此 3 种锚链的最小破断力依次为 25.5、108.6 和 233.8 kN,直径为 20.5 或 30.0 mm 的锚链满足强度需求,锚体承载力也满足要求。虽然锚链直径越大,锚链强度越能满足要求,但锚链自重的增加会导致安装困难,成本也较高。所以综合考虑选择直径为 0.02 m 的锚链,得到满足要求的锚链长度为 28.134 m。

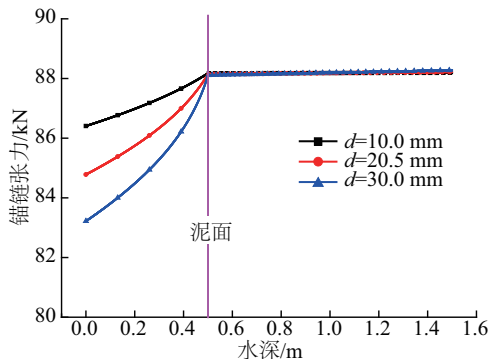


图 10 低水位下锚链沿水深张力分布

Fig. 10 Chain tension at low water level

### 2.3 高水位工况

水位较高时,锚链处于张紧状态,张力对于锚链长度变化异常敏感,并且此时由于锚链倾角较大,锚链作用在浮体上的竖向分力较大,此时必须校核浮体净浮力、锚链强度和锚体承载力是否满足要求。采用低水位工况下求得的锚链型号和长度,水位变化为 3.5 m,计算得到此时的锚泊距离为 26.58 m,改变锚泊半径,使方阵的水平运动范围  $u$  逐渐从 0 m,扩大到 0.53、1.06、1.21、1.28、1.44、1.51 m。进行准静态分析,得到如图 11 所示的锚链形态图,发现随着锚泊距离的增加,平铺段锚链逐渐减少,锚链逐渐被拉直,形态发生显著变化。

图 12 给出了高水位时浮体水平运动过程中的锚链倾角变化情况。可看出,高水位浮体未运动时,部分水中锚链的倾角为  $0^{\circ}$ ,说明该部分锚链平铺在泥面上;随着锚泊距离的增加,水中段和土中段锚链倾角逐渐减小,说明锚链在逐渐收紧,这与图 12 结果相符。当锚泊距离为 27.86 m 时,沿整根锚链的倾角已基本一致,说明此时锚链张力较大,

浮体已很难再运动。

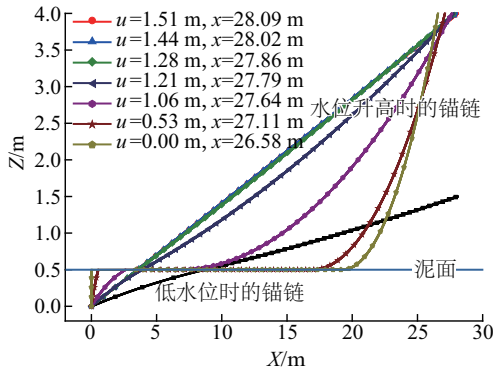


图 11 高水位时锚链整体形态随锚泊半径变化

Fig. 11 Chain configuration at high water level

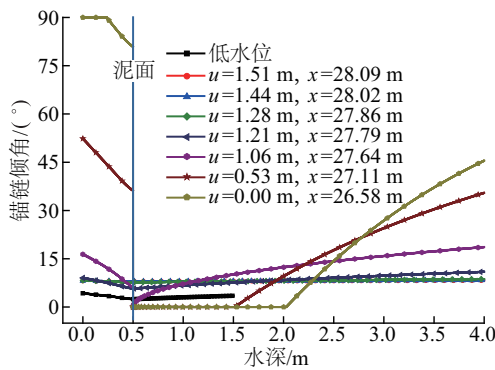
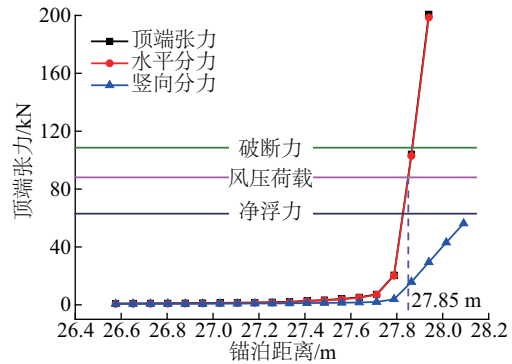


图 12 高水位时沿水深方向的锚链倾角变化

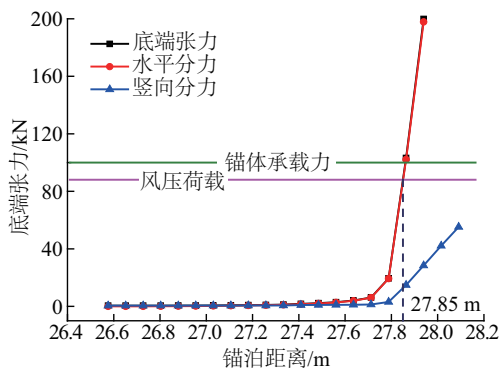
Fig. 12 Chain angle at high water level

图 13a 所示为高水位时随锚泊半径的增大锚链顶端张力的变化情况。在最大风压荷载作用下,锚泊半径不超过 27.85 m,移位幅度不超过 1.25 m,此工况下的锚链张力也未达到破断力,浮体净浮力也满足要求。图 13b 给出了高水位时,锚链底端张力随锚泊半径增大的变化情况。可发现,锚泊距离的增加时,锚链张力和竖向分力都在增加,当锚泊距离增加到 27.85 m 时,底端的张力水平分量并达到锚体水平承载力,而此时锚链的竖向分力约 15 kN,因此设计锚体时,需考虑其对于锚体水平承载力的影响。

综上计算,该算例选择直径为 0.02 m,长度为 28.134 m 的锚链,高水位时浮体最大运动范围为 1.25~1.59 m。此时,浮体净浮力、锚链强度及锚体承载力均满足设计要求。



a. 锚链顶端



b. 锚链底端

图 13 高水位时锚链顶端、底端张力

Fig. 13 Chain tension on fairlead and padeye at high water level

### 3 结 论

针对漂浮式水上光伏电站锚泊系统的变水位系泊设计问题,本文提出一套设计流程,并用自行编写的程序,通过一个具体的算例进行介绍:1)设计准备工作,包括环境荷载和地质条件、设计标准和可选材料等;2)低水位条件下,以极限运动工况为标准,进行锚链设计,使锚链强度和浮体净浮力满足要求;3)高水位下进行设计校核,使用低水位工况计算得到的锚链参数校核水位升高后的锚链强度、浮体净浮力和锚链强度是否满足要求,计算得到极限工况下的浮体最大运动范围。

该方法能迅速确定系泊使用的锚链种类和长度,对于水位变化具有良好的适应性,能广泛应用在工程实践中。另外,需要指出:水位变化时锚眼处锚链倾角提升显著,这将影响锚体承载安全,需对其进行进一步评估;本算例将方阵整体作为研究对象,各漂浮支架间常采用柔性、半柔性连接方式,因此还需进行局部浮力校核,避免方阵系点处产生

漏斗状下陷。

### [参考文献]

- [1] 王宏宇, 王佩明, 李艳红, 等. 水上漂浮式光伏发电系统[J]. 华电技术, 2017, 39(3): 74—76.
- [1] Wang Hongyu, Wang Peiming, Li Yanhong, et al. Floating photovoltaic power generation system [J]. China Huadian Power Technology, 2017, 39(3): 74—76.
- [2] Choi Y K. A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact [J]. International Journal of Software Engineering and Its Applications, 2014, 8(1): 75—84.
- [3] 孙 杰. 水上光伏电站应用技术与解决方案[J]. 太阳能, 2017, (2): 48—51.
- [3] Sun Jie. Application technology and solution of floating photovoltaic power station[J]. Solar Energy, 2007, (2): 48—51.
- [4] 康晓博. 地面、屋顶不够用了?光伏电站开始“水上漂”[DB/OL]. <http://www.gongyetoutiao.com/xw/html/1617.shtml>, 2017-05-20.
- [5] 孙祖峰, 陈佩杭. 漂浮式光伏应用及技术难点简析[J]. 科技创新与应用, 2016, (12): 37—38.
- [5] Sun Zufeng, Chen Peihang. Brief analysis of floating PV applications and technical difficulties[J]. China Science and Technology Innovation and Application, 2016, (12): 37—38.
- [6] 国 振, 王立忠. 吸力锚基础锚泊线准静力分析模型[J]. 海洋工程, 2009, 27(4): 1—9.
- [6] Guo Zhen, Wang Lizhong. Quasi-static analysis model of suction caisson mooring line[J]. China Ocean Engineering, 2009, 27(4): 1—9.
- [7] Vivatrat V, Valent P J, Ponterio A A. The influence of chain friction on anchor pile design[A]. Proceedings of the 14th Annual Offshore Technology Conference [C], Houston, 1982, Paper OTC 4178, 153—163.
- [8] Degenkamp G, Dutta A. Soil resistances to embedded anchor chain in soft clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1989, 115(10): 1420—1438.
- [9] Wang Lizhong, Guo Zhen, Yuan Feng. Quasi-static three-dimensional analysis of suction anchor mooring system[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(13): 1127—1138.
- [10] Wang Lizhong, Guo Zhen, Yuan Feng. Three-dimensional interaction between anchor chain and seabed [J]. Applied Ocean Research, 2010, 32(4): 404—413.
- [11] Trapani K, Redón Santafé M. A review of floating photovoltaic installations: 2007-2013 [J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2015, 23(4): 524—532.
- [12] GB 50797—2012, 光伏电站设计规范[S].
- [12] GB 50797—2012, Photovoltaic power station design specification[S].
- [13] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
- [13] GB 50009—2012, Inspection and quarantine, building structure load code[S].
- [14] GB/T 549—2008, 电焊锚链[S].
- [14] GB/T 549—2008, Electro-welded anchor chains[S].
- [15] API RP- 2SK, Recommended practice for design and analysis of stationkeeping systems for floating structures [S].

## DESIGN METHOD FOR MOORING SYSTEM OF FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Liu Haochen, Guo Zhen, Wang Lizhong, Shen Kanmin

*(Key Laboratory of Offshore Geotechnics and Material of Zhejiang Province, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)*

**Abstract:** This paper analyzes the characteristics of the mooring system applied for floating photovoltaic power station and proposes a rapid design method considering the change of water level, environment load and mooring positioning. This method can make sure the motion range of the floating body less than the allowable range when the water level changes, the strength of the anchor chain and the buoyancy of the floating array meet design requirements under ultimate wind force. The design method is introduced detailed with a practical floating photovoltaic power station as engineering example.

**Keywords:** mooring cables; floating; photovoltaic system; changeable water level; conceptual design