

ICS 27.160

CCS F12

团 体 标 准

T/CPIA 0056—2024

漂浮式水上光伏发电锚固系统设计规范

Code for design of floating photovoltaic anchoring system

中国光伏行业协会
China Photovoltaic Industry Association

2024 - 03 - 10 发布

2024 - 03 - 15 实施

中国光伏行业协会 发布

目次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 环境荷载计算 2

 4.1 总述 2

 4.2 设计输入 3

 4.3 风荷载 3

 4.4 波浪荷载 6

 4.5 流荷载 7

 4.6 极限环境荷载组合 9

5 锚固系统设计 10

 5.1 总述 10

 5.2 锚固系统设计校核工况 10

 5.3 方阵漂移计算与安全距离校核 11

 5.4 锚固系统强度计算校核 13

 5.5 锚固基础承载力校核 14

 5.6 材料选型与防腐 18

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国光伏行业协会标准化技术委员会提出。

本文件由中国光伏行业协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：阳光水面光伏科技股份有限公司、中国电子技术标准化研究院、北京鉴衡认证中心有限公司、江苏海洋大学、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、大唐国信滨海海上风力发电有限公司、长江勘测规划设计研究有限责任公司、中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司、中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司、中电建湖北电力建设有限公司、中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司、中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、西安热工研究院有限公司、中国海洋石油有限公司。

本文件主要起草人：吴维武、赵书恒、李翔、李其聪、孔剑桥、纪振双、缪泉明、滕楷、姜浩杰、刘海波、张海峰、尚敏帅、柯如洋、徐阳、田鸿翔、郗航、黄海龙。

CPIA

中国光伏行业协会
China Photovoltaic Industry Association

漂浮式水上光伏发电锚固系统设计规范

1 范围

本文件规定了针对漂浮式水上光伏发电锚固系统设计的环境荷载计算方法、锚固设计方法及要点。本文件适用于建设在内陆水域的漂浮式水上光伏项目，为从事水上光伏锚固设计人员提供设计依据。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 33364—2016 海洋工程系泊用钢丝绳

GB 50009—2012 建筑结构荷载规范

JTS 145—2015 港口与航道水文规范

JTS 144—1—2010 港口工程荷载规范

JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范

JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范

JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范

ISO 12944—2017 钢结构防护涂料系统的腐蚀保护 (Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems)

ISO 14713-1: 2009 锌镀层 铁和钢结构中抗腐蚀保护的指南和建议 第1部分:设计和抗腐蚀一般原则 (Zinc coatings—Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures—Part 1: General principles of design and corrosion resistance)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

最大波高 maximum wave height

观测记录中出现的最大波高值或设计重现期内的最大波高值。

3.2

风生流 wind-driven current

由风的切应力作用于水面产生的水流。

3.3

风生浪 wind-driven wave

由风的切应力作用于水面产生的波浪。

3.4

一阶波浪力 first order wave force

由入射波和绕射波共同作用产生的波浪力。一阶波浪力与波幅成正比，其变化频率特征与入射波的频率特征一致。

注：也称波浪激励力 (wave exciting force)。

3.5

平均波浪漂移力 mean wave drift force

波浪二阶力中的定常部分。其值与波幅的平方成正比，其频率特征远低于典型的波浪频率。

3.6

计算流体动力学 computational fluid dynamics; CFD

使用计算机和离散化的数值方法对流体力学问题进行求解，从而可预测流场流动和分布。

3.7

系泊点 mooring point

系泊缆绳与水上光伏方阵的连接点。

3.8

锚固点 anchoring point

系泊缆绳与锚固基础的连接点。

3.9

系泊缆 mooring line

用于限制漂浮方阵运动以保证其所在位置时刻满足设计要求的绳索，一般包括缆绳、连接件以及其他辅助配件。

3.10

重力锚 deadweight anchor

靠锚体自身重力以及锚底部与水底摩擦力提供承载力。

注：材质通常为钢或钢筋混凝土材料。

3.11

桩锚 pile anchor

靠桩体与土体的侧阻力和水平阻力提供承载力。

注：材质通常为碳钢或钢筋混凝土材料。

3.12

列 column

从南（北）侧至北（南）侧依次布置的一排光伏组件。

3.13

行 row

从东（西）侧至西（东）侧依次布置的一排光伏组件。

3.14

背向风 back wind

光伏组件背面所受到的风。

3.15

正向风 forward wind

光伏组件正面所受到的风。

3.16

方位角 azimuth angle

从方阵局部坐标系下的指北方向线起，依顺时针方向到来风、来浪或来流方向线之间的水平夹角。

注：对应的环境条件也称为风向角、浪向角、流向角。

3.17

粘性土 cohesive soil

塑性指数大于10的土。

注：例如黏土、粉质黏土、淤泥质黏土等土质。

3.18

非粘性土 cohesionless soil

粘粒含量少，呈单粒结构，不具有可塑性的土。

注：例如碎石（类）土和砂（类）土。

4 环境荷载计算

4.1 总述

4.1.1 水上光伏电站承受的环境荷载主要有风荷载、波浪荷载、流荷载、雪荷载等。本文件中主要讨论与锚固设计相关的风荷载、流荷载以及波浪荷载的计算方法。对于内陆水域地震荷载和冰荷载对水上

光伏电站锚固系统的影响可忽略不计。

4.1.2 在计算环境荷载时，环境条件重现期通常选取 25 年，不同环境条件的方位角（风向角、浪向角、流向角）的定义见图 1。

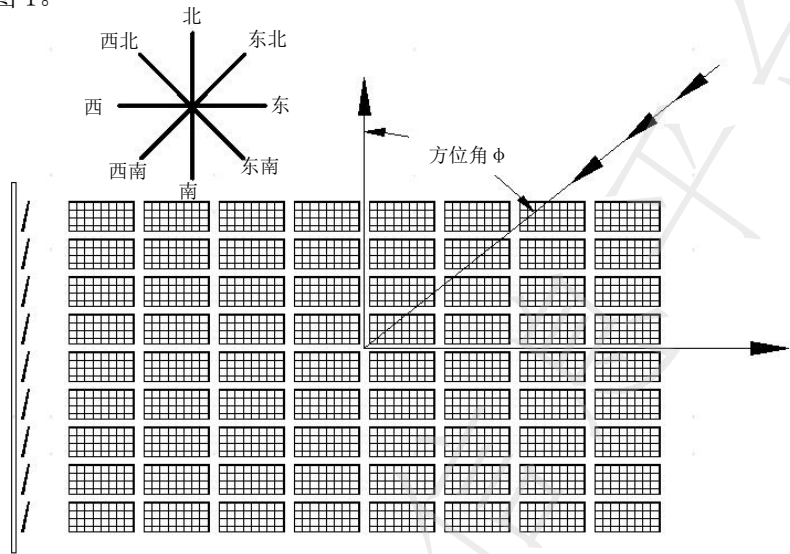


图 1 环境条件方位角

4.2 设计输入

- 4.2.1 本节所述环境条件为影响漂浮式光伏电站设计的自然环境条件，主要包括风、浪、水流、水深、水位落差、潮汐、水底地质等。
- 4.2.2 选取年最大风速数据时，一般应有当地 25 年以上的风速资料；当无法满足时，风速资料不宜少于 10 年。观测数据应考虑其均一性，对不均一数据应结合周边气象站状况等作合理性订正。当缺失风速资料时，可根据 GB 50009—2012 中表 E.5 直接选取对应地区的设计风压。
- 4.2.3 波浪特征要素如波高和周期等应使用专业的观测设备和装置搜集，例如波浪浮标和波浪观测仪等。在缺失实际观测数据的情况下，可利用波浪数值模拟推演模型进行预报，例如 MIKE 21 等，也可以使用经验公式对波浪要素进行估算，具体估算方法参见 JTS 145—2015 中 7.2 的规定。
- 4.2.4 内陆河流流速应由长期观测资料整理分析后确定；内陆湖泊流速可以根据长期观测或风生流数值模拟确定。
- 4.2.5 确定设计最大水深与水位落差时，应结合历史观测资料并考虑雨季和洪期对水深、水位的影响。
- 4.2.6 锚固设计需考虑项目地周边或水底地质条件，在项目地进行地质条件勘测，并将勘测结果作为设计输入资料。
- 4.2.7 锚固设计应考虑光伏区水质和大气环境，应针对光伏区进行水质条件和大气环境数据的收集，将结果作为设计输入条件。

4.3 风荷载

4.3.1 取项目地最大风速作为设计输入参数，通常光伏组件背向风荷载较大，以背向风荷载为计算基础，具体计算思路见图 2。

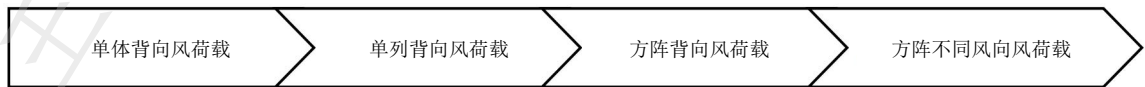


图 2 风荷载计算思路

4.3.2 风荷载计算需要的输入参数见表 1。

表 1 风荷载计算输入参数

计算输入	单位
设计风速（10米高空10分钟平均） U_0	m/s
光伏组件倾角 θ	°
光伏组件面积 A	m ²
浮体水上迎风面积 A_f	m ²
光伏组件体形系数 μ_{s1}	—
列遮蔽系数 C_s	—
方向系数 K	—
地面粗糙度类别	—
计算方阵的行数 N_r	—
计算方阵的列数 N_c	—

4.3.3 单体结构的风荷载计算可参考 GB 50009—2012 中公式 8.1.1-2，垂直作用于结构表面的风荷载标准值应按照公式（1）计算：

$$w_k = \beta_{gz} \mu_{s1} \mu_z w_0 \dots \dots \dots (1)$$

式中：

- w_k ——风荷载标准值，单位为牛顿每平方米（N/m²）；
- β_{gz} ——高度 z 处的阵风系数；
- μ_{s1} ——风荷载局部体形系数；
- μ_z ——风压高度变化系数；
- w_0 ——基本风压，单位为牛顿每平方米（N/m²）。

4.3.4 地面粗糙度指的是水上光伏项目地周围的环境粗糙度可分为 A、B 两类：

- a) A 类指空旷的湖岸及沙漠地区；
- b) 类指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇。

4.3.5 组件阵的风系数 β_{gz} 见表 2。

表 1 阵风系数选取

粗糙度	A类	B类
阵风系数 β_{gz}	1.65	1.70

4.3.6 体型系数 μ_{s1} ，应依据风洞实验结果或经过验证的 CFD 仿真分析结果取值。如无相关数据，可参考以下标准取值，光伏组件倾角小于 10° 时参考值为 1.0，光伏组件倾角大于 10° 小于 30° 时，参考值为 2.0，浮体参考值为 1.3。

4.3.7 风压高度变化系数 μ_z 见表 3。

表 2 高度变化系数选取

粗糙度	A类	B类
高度变化系数 μ_z	1.09	1.00

4.3.8 基本风压根据按公式（2）计算：

$$w_0 = \frac{1}{2} \rho V_0^2 \dots \dots \dots (2)$$

式中：

- w_0 ——基本风压，单位为牛顿每平方米（N/m²）；
- V_0 ——设计风速，单位为米每秒（m/s），取10米高空10分钟的平均风速；
- ρ ——空气密度，单位为千克每立方米（kg/m³）。

4.3.9 作用在单一光伏组件上的背风向水平风荷载 F_h 按公式（3）计算：

$$F_h = A w_k \sin \theta \dots \dots \dots (3)$$

式中：

- F_h ——单一光伏组件上的背风向水平风荷载，单位为牛顿（N）；
- A ——光伏组件面积，单位为平方米（m²）；
- w_k ——风荷载标准值，单位为牛顿每平方米（N/m²）；
- θ ——光伏组件倾角，单位为度（°）。

4.3.10 浮体水面以上部分迎风面积示意图见图3,作用在单一浮体上的背风向水平风荷载 F_f 按公式(4)计算:

$$F_f=A_f \cdot w_k \cdots \cdots (4)$$

式中:
 F_f ——作用在单一浮体上的背风向水平风荷载,单位为牛顿(N);
 A_f ——单块光伏组件对应的浮体水面以上部分迎风面积,单位为平方米(m^2);
 w_k ——作用在浮体结构上的风荷载标准值,单位为牛顿每平方米(N/m^2)。

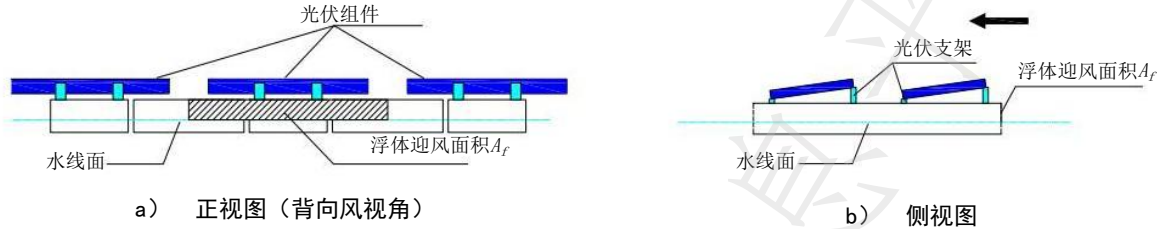


图3 浮体水面以上部分迎风面积示意图

4.3.11 漂浮式水上光伏发电站为阵列式结构,计算列风荷载时应考虑前部结构对后部结构的遮蔽效应(遮蔽系数示意图见图4),通过引入计算参数遮蔽系数 C_s 计算后部结构风荷载。遮蔽系数 C_s 应通过CFD仿真或风洞实验获取,按公式(5)计算:

$$C_s(n)=\frac{F_h(n)}{F_h(1)} \cdots \cdots (5)$$

式中:
 $C_s(n)$ ——第n排的遮蔽系数;
 $F_h(n)$ ——迎风侧第n排的水平风荷载,单位为牛顿(N);
 $F_h(1)$ ——迎风侧第1排的水平风荷载,单位为牛顿(N)。

4.3.12 漂浮式水上光伏阵列背风向风荷载按公式(6)计算:

$$F_c=F_h(1) \times [1+(N_r-1) \times \overline{C_s}]+F_f(1) \times [1+(N_r-1) \times \overline{C_{sf}}] \cdots \cdots (6)$$

式中:
 F_c ——单列背风向风荷载,单位为牛顿(N);
 N_r ——方阵光伏组件的排数;
 $F_h(1)$ ——迎风侧首排光伏组件的水平风荷载,单位为牛顿(N);
 $F_f(1)$ ——迎风侧首排浮体的水平风荷载,单位为牛顿(N);
 $\overline{C_s}$ ——光伏组件遮蔽系数平稳段的平均值;
 $\overline{C_{sf}}$ ——浮体遮蔽系数平稳段的平均值。

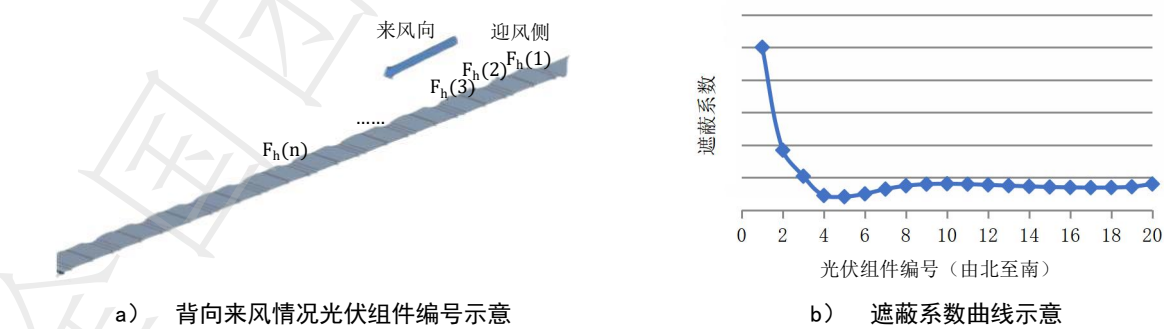


图4 遮蔽系数示意图

4.3.13 方阵整体背风向总荷载 F_N 可根据方阵排布,按公式(7)计算:

$$F_N=F_c \times N_c \cdots \cdots (7)$$

式中:
 F_N ——方阵整体背风向受到的风荷载,单位为牛顿(N);
 F_c ——单列背风向风荷载,单位为牛顿(N);

N_c ——方阵光伏组件列数。

4.3.14 以方阵背向风荷载为基础，通过引入无量纲的方向系数 K 计算不同风向风荷载，按公式（8）：

$$F_{wind}(\phi_1) = F_N \times K(\phi_1) \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$F_{wind}(\phi_1)$ ——对应风向角 ϕ_1 的风荷载，单位为牛顿（N）；

$K(\phi_1)$ ——风荷载方向系数；

ϕ_1 ——风向角，单位为度（°），风向角与方阵的关系见图1。

4.3.15 方向系数 K 与风向、光伏方阵的排布和浮体形式有关，根据 CFD 仿真或风洞实验获得。以背风向为北风时为例，方向系数 K_N 、 K_{NE-N} 、 K_{NE-E} 、 K_E 、 K_{SE-S} 、 K_{SE-E} 、 K_S 分别对应北风时北侧风荷载、东北风时北侧风荷载、东北风时东侧风荷载、东风时东侧风荷载、东南风时东侧风荷载、东南风时南侧风荷载以及南风时南侧风荷载的方向系数见图 5。缺少 CFD 仿真结果及风洞实验数据时，可按推荐值取值，见表 4，东西侧按相同的系数进行计算：

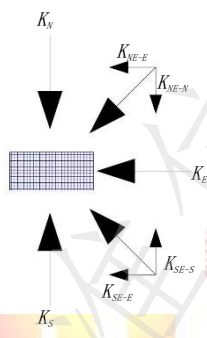


图 5 方向系数主要考虑的方向

表 3 方向系数选取

方向系数 K	K_N	K_{NE-N}	K_{NE-E}	K_E	K_{SE-E}	K_{SE-S}	K_S
系数取值	1.0	1.0	0.4	0.4	0.4	1.0	1.0

4.4 波浪荷载

4.4.1 方阵的波浪荷载由一阶波浪荷载和平均波浪漂移力叠加组成，计算波浪荷载需要的计算输入参数见表 5。

表 4 波浪荷载计算输入参数

计算输入参数	单位
最大波高 H_{max}	m
波浪周期 T	s
有效迎浪长度 $L(\phi_2)$	m

4.4.2 漂浮式水上光伏方阵的设计最大波高较小，根据 Airy 线性波理论，方阵的一阶波浪荷载可按公式（9）计算：

$$F_{ex} = \frac{1}{2} H_{max} F_0(\phi_2, T) \dots\dots\dots (9)$$

式中：

F_{ex} ——方阵的一阶波浪力，单位为牛顿（N）；

H_{max} ——最大波高，单位为米（m）；

F_0 ——单位波幅下的最大波浪荷载，单位为牛顿（N）；

ϕ_2 ——浪向角，单位为度（°）；

T ——波浪周期，单位为秒（s）。

4.4.3 漂浮式水上光伏方阵应考虑平均波浪漂移力作用，平均波浪漂移力可由水动力实验或仿真计算获取，如无相关数据可参考 Maruo 公式（10）计算：

$$F_{drift} = \frac{1}{8} \rho g H_{max}^2 L(\phi_2) \dots\dots\dots (10)$$

式中:

- F_{drift} ——方阵的平均波浪漂移力, 单位为牛顿 (N);
 - ρ ——水密度, 单位为千克每立方米 (kg/m^3);
 - g ——重力加速度, 单位为牛顿每千克 (N/kg);
 - H_{max} ——最大波高, 单位为米 (m);
 - ϕ_2 ——浪向角, 单位为度 ($^\circ$);
 - $L(\phi_2)$ ——方阵的有效迎浪长度, 单位为米 (m), 与浪向角 ϕ_2 相关。
- 方阵有效迎浪长度 $L(\phi_2)$ 的示意图见图6, 可按照公式 (11) 计算:

$$L=L_x\times\cos\phi_2+L_y\times\sin\phi_2 \dots\dots\dots (11)$$

式中:

- L ——方阵有效迎浪长度, 单位为米 (m);
- L_x ——方阵x方向上的迎浪长度, 单位为米 (m);
- L_y ——方阵 y 方向上的迎浪长度, 单位为米 (m);
- ϕ_2 ——浪向角, 单位为度 ($^\circ$);

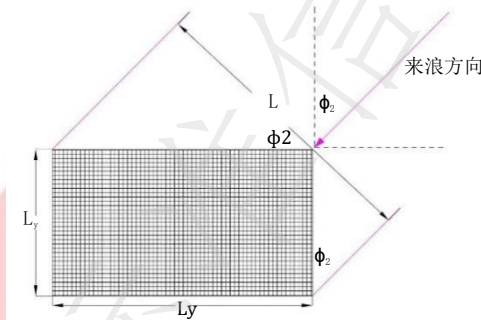


图 6 有效迎浪长度 L 示意图

4.4.4 漂浮式水上光伏方阵总波浪荷载按照公式 (12) 计算:

$$F_{wave}(\phi_2)=F_{ex}(\phi_2)+F_{drift}(\phi_2) \dots\dots\dots (12)$$

式中:

- $F_{wave}(\phi_2)$ ——对应浪向角 ϕ_2 的总波浪荷载最大值, 单位为牛顿 (N);
- $F_{ex}(\phi_2)$ ——对应浪向角的最大一阶波浪荷载, 单位为牛顿 (N);
- $F_{drift}(\phi_2)$ ——对应浪向角的平均波浪漂移力, 单位为牛顿 (N);
- ϕ_2 ——浪向角, 单位为度 ($^\circ$), 定义见图1。

4.5 流荷载

4.5.1 流荷载包含水流对浮体侧壁的水流力和底部的摩擦阻力, 其中水流力计算公式可参考 JTS 144—1—2010, 摩擦力计算公式可参考船体摩擦力规范 1957ITTC。计算中应考虑浮体形状及方阵水面以下湿表面积。

4.5.2 计流荷载需要的计算输入参数见表 6。

表 5 流荷载计算输入参数

计算输入	单位
流速 V	m/s
不同浮体迎流面积 S_i	m^2
不同浮体底面积 S_{fi}	m^2
不同类型浮体数量 N_i	PCS

4.5.3 根据 JTS 144—1—2010 第 13 章公式 13.0.1, 作用于工程结构上的水流力标准值应按公式 (13) 计算:

$$F_c = \frac{1}{2} C_w \rho_w V^2 S \cdots \cdots \cdots (13)$$

式中：
 F_c ——水流力标准值，单位为牛顿（N）；
 C_w ——水流阻力系数；
 ρ_w ——水密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；
 V ——设计流速，单位为米每秒（m/s）；
 S ——计算构件在流向垂直平面上的投影面积，单位为平方米（m²）。

4.5.4 水流阻力系数宜根据 C_w 仿真计算软件或水动力实验获得。如无相关数据可按照来流方向和浮体的形状将计算模型分为两类浮体：迎流侧较长的浮体和迎流侧较短的浮体，见图 7。两类浮体的水流力系数取值不同，迎流侧较长的浮体水流阻力系数 C_{w1} 为 2.32；迎流侧较短的浮体其水流阻力系数见表 7。由于浮体间距和迎流长度会影响水流阻力，可按方形墩流力横向影响系数 m （见表 8）对水流阻力系数进行修正（见图 8）。



图 7 流荷载计算中浮体的分类

4.5.5 上述两类浮体以编号区分为 1 和 2，根据方阵浮体排布设计及方阵浮体吃水深度，应按公式(14)计算总水流力：

$$F_c = \frac{1}{2} C_{w1} m_1 \rho_w V^2 S_1 N_1 + \frac{1}{2} C_{w2} m_2 \rho_w V^2 S_2 N_2 \cdots \cdots \cdots (14)$$

式中：
 C_{w1} 、 C_{w2} ——水流阻力系数；
 m_1 、 m_2 ——两类浮体方形墩流力横向影响系数；
 ρ_w ——水密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；
 V ——设计流速，单位为米每秒（m/s）；
 S_1 、 S_2 ——两类浮体在流向垂直平面上单个浮体的投影面积，单位为平方米（m²）；
 N_1 、 N_2 ——两类浮体的数量，来流方向连续布置的多个浮体视为一个整体。

4.5.6 当计算斜向来流应将流速 V 分解为垂直于方阵边缘的流速 V_x 和 V_y 进行水流力计算。

表 6 迎流侧较短的浮体水流阻力 C_{w2} 系数取值参考

L/B	1.0	1.5	2.0	≤ 3.0
C_{w2}	1.50	1.45	1.30	1.10

注： L 为浮体长度， B 为浮体宽度。

表 7 方形墩流力横向影响系数 m 取值参考

B^*/D^*	4	6	8	10	≥ 12
影响系数 m	1.21	1.08	1.06	1.03	1.00

注： B^* 为浮体净间距， D^* 为浮体迎流长度。

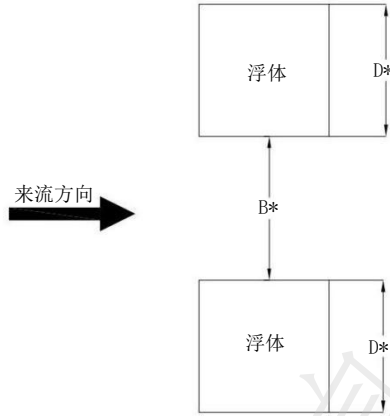


图8 方形墩流力横向影响系数示意图

4.5.7 流体流过物体表面，产生的摩擦阻力值应按公式（15）计算：

$$F_f = \frac{1}{2} C_f \rho_w V^2 S_f \quad (15)$$

式中：

- F_f ——摩擦阻力，单位为牛顿（N）；
- C_f ——摩擦阻力系数，可参考公式（16）计算；
- ρ_w ——水密度，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；
- V ——设计流速，单位为米每秒（ m/s ）；
- S_f ——物体在水线面以下湿表面积，单位为平方米（ m^2 ）。

4.5.8 摩擦阻力系数 C_f 应按公式（16）计算：

$$C_f = \frac{0.075}{(\lg Re - 2)^2} \quad (16)$$

式中：

- C_f ——摩擦阻力系数；
- Re ——雷诺数， $Re = \rho_w V d_c / \mu_w$ ，其中 V 、 ρ_w 、 μ_w 分别为流体的流速、密度与黏性系数， μ_w 可取值为 $1.01 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ， d_c 为一特征长度，一般可取浮体宽度。

4.5.9 湿表面积应按公式（17）计算：

$$S_f = \sum_{i=1}^n S_{fi} \times N_i \quad (17)$$

式中：

- n ——浮体种类；
- S_{fi} ——各种类浮体的单个浮体的底面积，单位为平方米（ m^2 ）；
- N_i ——各种类浮体的数量。

4.5.10 斜向来流时，应对摩擦力进行受力分解到平行和垂直方阵边缘的 X 和 Y 方向。

4.5.11 总流荷载应按照公式（18）计算：

$$F_{cur}(\phi_3) = F_c(\phi_3) + F_f(\phi_3) \quad (18)$$

式中：

- $F_{cur}(\phi_3)$ ——对应流向角 ϕ_3 的总流荷载，单位为牛顿（N）；
- F_c ——水流力标准值，单位为牛顿（N）；
- F_f ——摩擦阻力，单位为牛顿（N）；
- ϕ_3 ——流向角，单位为度（ $^\circ$ ），定义见图1。

4.6 极限环境荷载组合

4.6.1 作用于漂浮光伏电站的极限环境荷载组合值应按照公式（19）计算选取最不利值确定：

$$S = \gamma (\psi_i F_{wind}(\phi_1) + \psi_i F_{wave}(\phi_2) + \psi_i F_{cur}(\phi_3)) \quad (19)$$

式中：

- S ——对应方位角的极限环境荷载组合值，单位为牛顿（N）；

- γ ——分项系数，应不低于1.35；
- ψ ——组合系数，对于主控荷载取1.0，对于非主控荷载取0.7，具体根据不同组合工况选取，见表9；
- $F_{wind}(\phi_1)$ ——对应风向角 ϕ_1 的总风荷载，单位为牛顿（N）；
- $F_{wave}(\phi_2)$ ——对应浪向角 ϕ_2 的总波浪荷载最大值，单位为牛顿（N）；
- $F_{cur}(\phi_3)$ ——对应流向角 ϕ_3 的总流荷载，单位为牛顿（N）；
- ϕ_1 ——风向角，单位为度（°），风向角与方阵的关系见图1。
- ϕ_2 ——浪向角，单位为度（°），定义见图1。
- ϕ_3 ——流向角，单位为度（°），定义见图1。

表 8 荷载组合系数

组合工况	不同工况下不同荷载的组合系数		
	风	浪	流
1（风控制）	1.0	0.7	0.7
2（浪控制）	0.7	1.0	0.7
3（流控制）	0.7	0.7	1.0

4.6.2 除正南（S）、正北（N）、正东（E）、正西（W）四个方向之外，通常还需考虑东北（NE）、东南（SE）、西南（SW）、西北（NW）四个方向，共计八个方向的荷载组合。荷载组合时，选取相同的方位角，即 $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3$ 。

4.6.3 在荷载组合计算中应依次取风、浪、流荷载为主控荷载，选取最不利的荷载组合作为锚固设计依据。

5 锚固系统设计

5.1 总述

漂浮电站的锚固系统是确保漂浮方阵安全的重要系统。锚固形式的常见选型主要有重力锚和桩锚，选型应综合考虑项目地水深、地质条件、施工可行性等因素。锚固系统设计中应考虑水位变化、系泊半径、系泊方式等环境因素。此外，在设计过程中还要考虑项目地大气环境腐蚀强度和水质情况，以确定锚固系统物料材质及对应的防腐方案。漂浮方阵锚固主要设计流程见图9。

5.2 锚固系统设计校核工况

漂浮方阵锚固系统设计应考虑以下两种工况：

- 极限工况（ULS）：考虑锚固系统完整情况下，极限环境荷载作用在漂浮方阵上的工况；
- 偶然工况（ALS）：考虑最危险位置两根缆绳破断后，极限环境荷载作用在漂浮方阵上的工况，最危险位置包括极限工况下缆绳最大张力出现的位置、方阵角隅处或易发生应力集中的位置。

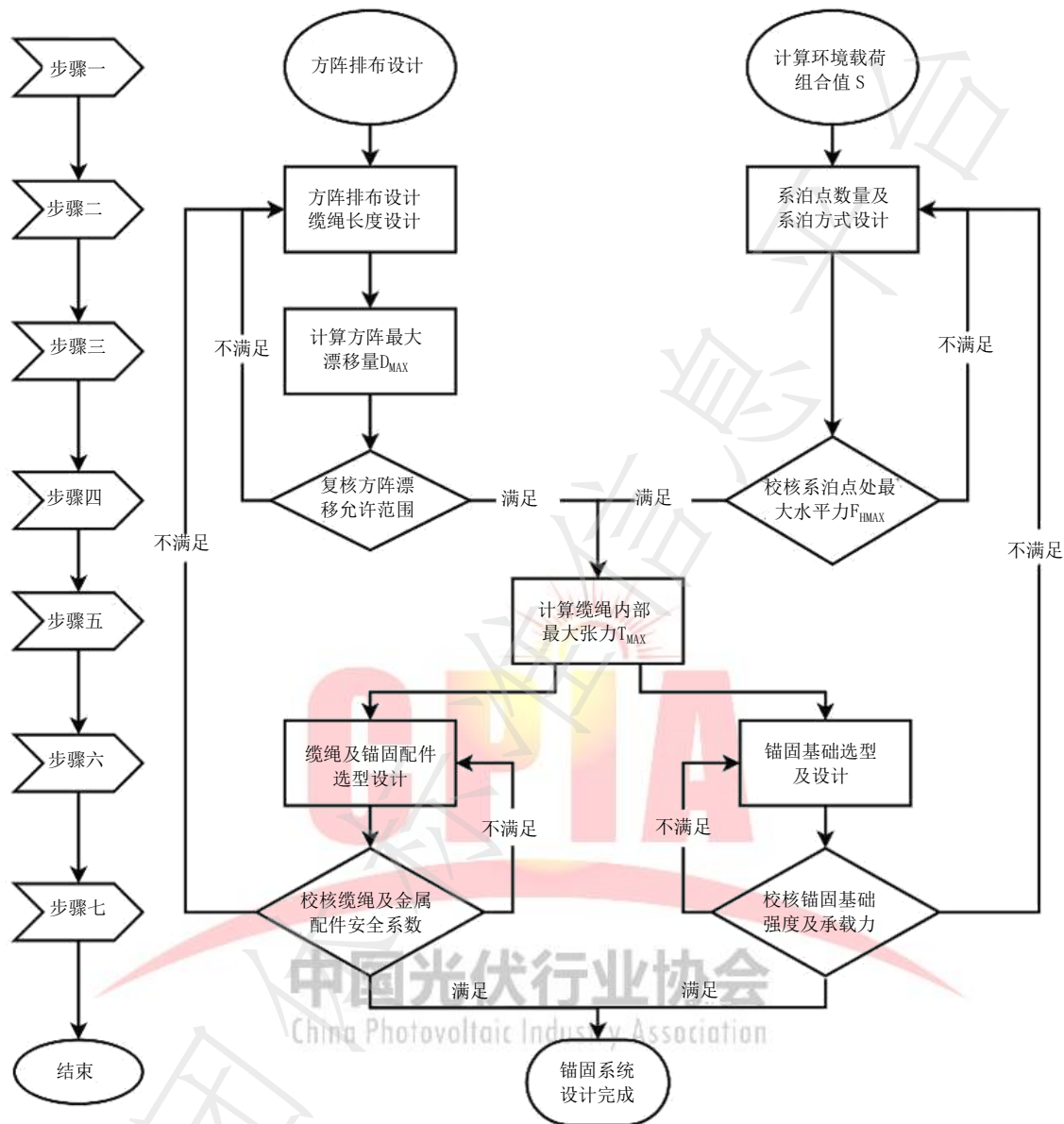


图9 漂浮方阵锚固设计流程图

5.3 方阵漂移计算与安全距离校核

5.3.1 计算方阵漂移所需要的计算输入见表10。

表9 漂移计算输入条件

计算输入	单位
锚点高程与历史水位的最大差值 h_{max}	m
锚点高程与历史水位的最小差值 h_{min}	m
系泊半径 $R(\geq h_{max})$	m
缆绳安装长度 Δl	m

5.3.2 漂浮方阵漂移计算主要分为两种情况：

- a) 锚固点布置在历史最低水位以下，见图10；
- b) 锚固点布置在与历史最高水位相同及以上，见图11。

5.3.3 应按照公式（20）计算最大漂移量并按照公式（21）计算缆绳设计长度：

$$D_{max} = \sqrt{L_r^2 - h_{min}^2} - \sqrt{L_r^2 - h_{max}^2} \dots\dots\dots (20)$$

式中:

- D_{max} ——最大漂移距离, 单位为米 (m);
 L_r ——缆绳设计长度, 单位为米 (m);
 h_{max} ——锚点高程与历史水位的最大差值, 单位为米 (m);
 h_{min} ——锚点高程与历史水位的最小差值, 单位为米 (m)。

$$L_r = \sqrt{R^2 + h_{max}^2} + \Delta l \dots\dots\dots (21)$$

式中:

- L_r ——缆绳设计长度, 单位为米 (m);
 h_{max} ——锚点高程与历史水位的最大差值, 单位为米 (m);
 Δl ——缆绳安装长度, 单位为米 (m), 宜取0.5m~1m; 如锚固形式为沉锚, 应根据水底土质参数计算锚块长期沉降量, 并考虑沉降带来的缆绳长度增加, 如无相关计算参数, 宜取0.5m~1.0m; 如锚固形式为桩锚, 缆绳连接高度应满足通过结构抗倾覆验算, 缆绳连接高度是指安装位置到土表面的距离。如无相关计算参数, 宜取不大于0.5m。
 R ——设计系泊半径, 单位为米 (m)。

5.3.4 应按照 h_{max} 来计算缆绳设计长度。

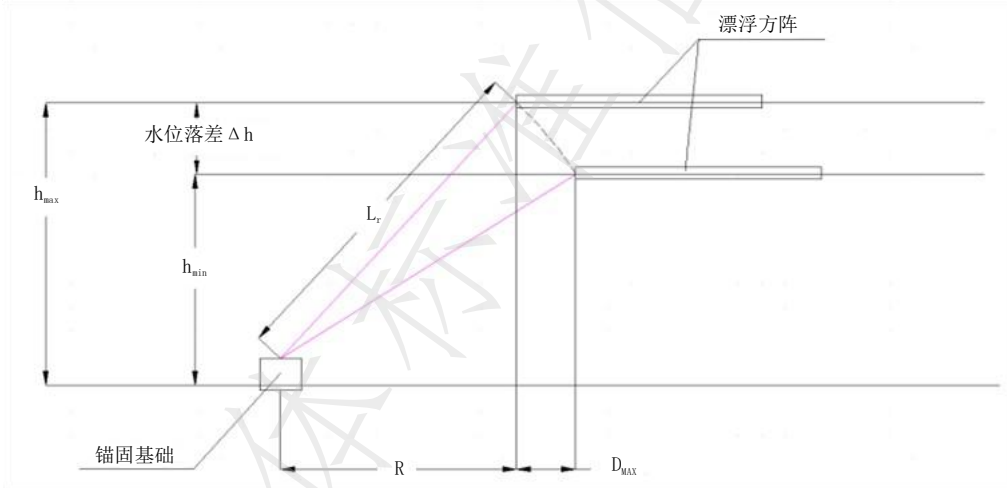


图 10 锚固点布置在历史最低水位以下

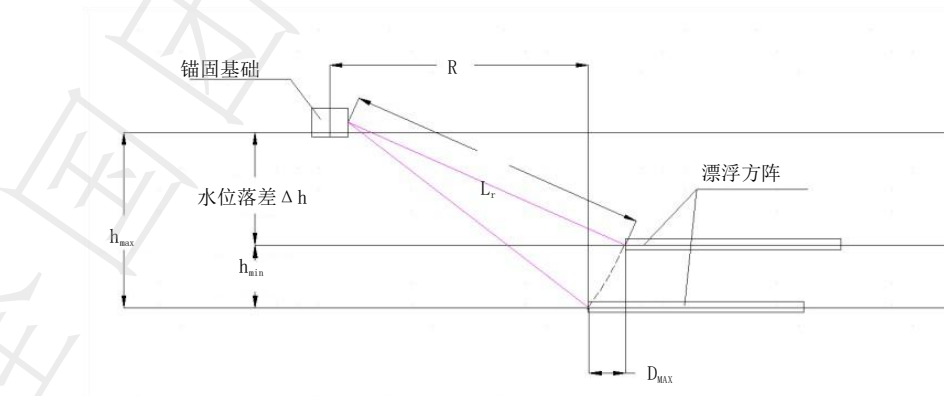


图 11 锚固点布置在历史最高水位以上

5.3.5 方阵的漂移计算主要用于后续设计中安全距离校核, 根据不同项目情况, 安全距离应考虑项目占地 (占水) 范围、周围建筑、堤岸、电缆通道布置、浮船布置、航道、运维通道等因素综合确定。

5.3.6 当锚固系统中含有弹性缆绳时, 应考虑缆绳弹性伸长对漂移量的影响, 建议使用仿真方法精确计算方阵漂移情况。

5.4 锚固系统强度计算校核

- 5.4.1 锚固系统强度校核包含水上系泊点强度校核、缆绳及锚固配件强度校核以及锚固基础强度校核。
5.4.2 漂浮方阵锚固系统强度校核需要的计算输入见表 11。

表 10 强度校核的输入条件

计算输入	单位
部件的强度标准值 R_k	kN
计算环境荷载组合值 S	kN
系泊半径 R	m
漂移距离 D	m
系泊点数量 N_p	PCS
系泊缆绳分散角 α	°
缆绳设计长度 L_r	m

- 5.4.3 强度校核应公式 (22) 进行校核：

$$f_s T \leq R_d \quad (22)$$

式中：

- f_s ——结构强度安全系数，包括缆绳、锚固配件等，宜取2.0；
 T ——应为极限工况与偶然工况计算所得缆绳张力的最大值，单位为牛顿（N）；
 R_d ——结构构件抗力的设计值，单位为牛顿（N）。

- 5.4.4 结构构件抗力的设计值 R_d 按照公式 (23) 计算：

$$R_d = \frac{1}{\gamma_m} R_k \quad (23)$$

式中：

- γ_m ——材料安全系数，对于金属结构可取1.15，对于非金属结构可取1.5；
 R_k ——结构强度标准值，单位为牛顿（N）。

- 5.4.5 不同工况下，方阵单侧的缆绳张力 T 应按照公式 (24)、公式 (25) 计算，见图 12：

$$F_H = \frac{S}{N_p} \quad (24)$$

式中：

- F_H ——方阵单侧每个系泊点处的水平力，单位为牛顿（N）；
 S ——对应方位角的极限环境荷载组合值，单位为牛顿（N）；
 N_p ——方阵单侧系泊点数量。

$$T = \left(\frac{F_H}{R+D} \times L_r \right) / \sin \alpha \quad (25)$$

式中：

- T ——应为极限工况与偶然工况两种工况分别计算的缆绳张力较大值，单位为牛顿（N）；
 F_H ——方阵单侧每个系泊点处的水平力，单位为牛顿（N）；
 R ——设计系泊半径，单位为米（m）；
 D ——计算位置对应的漂移距离，单位为米（m）；
 L_r ——缆绳设计长度，单位为米（m）；
 α ——系泊缆绳分散角度，即缆绳与方阵边缘的空间夹角，单位为度（°）。

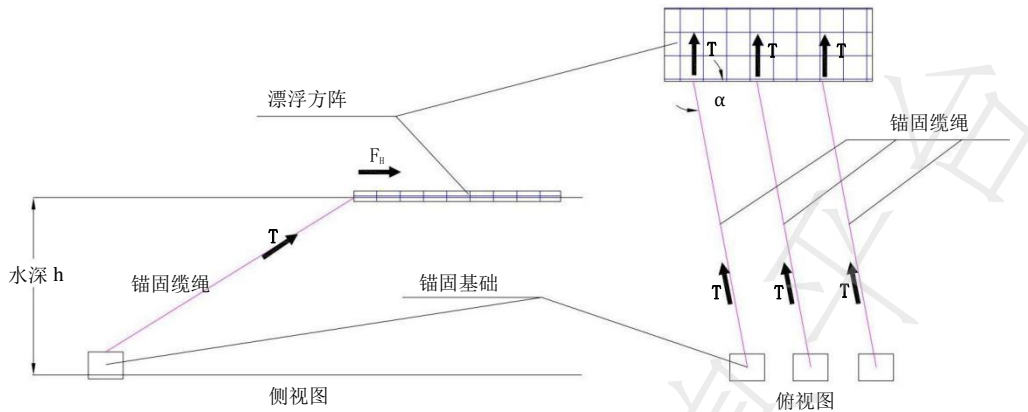


图 12 缆绳张力计算

5.5 锚固基础承载力校核

5.5.1 漂浮光伏电站常见的锚固基础形式有重力锚和桩锚。重力锚结构形式通常为钢筋混凝土重力锚，依靠锚体底部与泥土的摩擦提供水平承载力，依靠自身重量提供垂向承载力。桩锚结构形式有钢管桩和预应力钢筋混凝土空心桩，主要靠锚体与泥土的相互作用提供承载力。

5.5.2 漂浮方阵锚固基础承载力校核需要的计算输入见表 12。

表 11 锚固基础承载力校核输入条件

计算输入	单位
锚固基础承载力标准值 Q_L 、 Q_A	kN
缆绳张力分量 T_L 、 T_A	kN

5.5.3 漂浮方阵锚固基础主要校核水平承载力和垂向抗拔承载力，应按照公式（26）（27）进行校核：

$$T_L \leq R_L \dots\dots\dots (26)$$

式中：

T_L ——缆绳拉力的水平分力，单位为牛顿（N）；
 R_L ——锚固基础水平承载力特征值，单位为牛顿（N）。

$$T_A \leq R_A \dots\dots\dots (27)$$

式中：

T_A ——缆绳拉力的垂向分力，单位为牛顿（N）；
 R_A ——锚固基础抗拔承载力特征值，单位为牛顿（N）。

5.5.4 考虑设计安全系数，锚固基础承载力的特征值 R_L 和 R_A 按照公式（28）（29）确定：

$$R_L = \frac{1}{K_L} Q_{Ls} \dots\dots\dots (28)$$

式中：

R_L ——锚固基础水平承载力特征值，单位为牛顿（N）；
 K_L ——水平承载力安全系数，不同校核工况的取值见表13；
 Q_{Ls} ——锚固基础水平承载力标准值的修正值，单位为牛顿（N）。

$$R_A = \frac{1}{K_A} Q_{As} \dots\dots\dots (29)$$

式中：

R_A ——锚固基础抗拔承载力特征值，单位为牛顿（N）；
 K_A ——垂向承载力安全系数，不同校核工况的取值见表13；
 Q_{As} ——锚固基础抗拔承载力标准值的修正值，单位为牛顿（N）。

表 12 锚固基础承载力校核安全系数选取

设计工况	K_L	K_A
极限工况	1.6	2.0
偶然工况	1.2	1.5

5.5.5 考虑土壤的不确定性，锚固基础承载力的标准值按照公式（30）（31）进行修正：

$$Q_{Ls}=\frac{I}{\gamma_m}Q_L\cdots\cdots\cdots (30)$$

式中：
 Q_{Ls} ——锚固基础水平承载力标准值的修正值，单位为牛顿（N）；
 γ_m ——土壤材料系数，极限工况取值为1.3，偶然工况取值为1.0；
 Q_L ——锚固基础水平承载力标准值，单位为牛顿（N）。

$$Q_{As}=\frac{I}{\gamma_m}Q_A\cdots\cdots\cdots (31)$$

式中：
 Q_{As} ——锚固基础抗拔承载力标准值的修正值，单位为牛顿（N）；
 γ_m ——土壤材料系数，极限工况取值为1.3，偶然工况取值为1.0；
 Q_A ——锚固基础抗拔承载力标准值，单位为牛顿（N）。

5.5.6 重力锚承载力标准值计算需要的计算输入见表 14。

表 13 重力锚承载力计算输入条件

计算输入	单位
表面土层不排水抗剪强度 s_u	kPa
内摩擦角 $\varnothing$	°
重力锚几何尺寸（包括剪力键尺寸）	m
重力锚浮重力	kN
重力锚埋入深度 D_f	m

5.5.7 对于粘性土重力锚的水平承载力标准值宜按照公式（32）进行计算：

$$Q_L=s_uA_b+2s_{ua}D_fB\cdots\cdots\cdots (32)$$

式中：
 s_u ——重力锚底部土层的不排水抗剪强度，单位为千帕（kPa）；
 A_b ——重力锚底面积，单位为平方米（ m^2 ）；
 s_{ua} ——重力锚底部至埋深处的土层的平均不排水抗剪强度，单位为千帕（kPa）；
 D_f ——重力锚埋入深度（如有剪力键，应该包含剪力键入土深度），单位为米（m）；
 B ——重力锚在受拉方向的宽度，单位为米（m）。

5.5.8 对于非粘性土重力锚的水平承载力标准值宜按照公式（33）进行计算：

$$Q_L=\mu[W+\gamma A_bD_{fs}-T_A]+R_p\cdots\cdots\cdots (33)$$

式中：
 Q_L ——锚固基础水平承载力标准值，单位为牛顿（N）；
 μ ——摩擦系数，对于无剪力键的混凝土重力锚可取 $\tan\varnothing$ ，有剪力键的重力锚可取 $\tan(\varnothing-5)$ ， $\varnothing$ 为内摩擦角；
 W ——重力锚浮重，单位为千牛顿（kN）；
 γA_bD_{fs} ——剪力键包围范围内的土浮重，如无剪力键则取0，单位为千牛顿（kN）；
 D_{fs} ——剪力键埋入深度，单位为米（m）；
 γ ——土的浮重度，单位为千牛每立方米（ kN/m^3 ）；
 A_b ——重力锚底面积，单位为平方米（ m^2 ）；
 T_A ——缆绳张力的垂向分量，向上为正，单位为牛顿（N）；
 R_p ——被动土压力，单位为牛顿（N）。

5.5.9 被动土压力宜按照公式（34）计算：

$$R_p=\frac{I}{2}\gamma D_f^2K_pB\cdots\cdots\cdots (34)$$

式中：
 R_p ——被动土压力，单位为牛顿（N）；
 γ ——土的浮重度，单位为千牛顿每立方米（ kN/m^3 ）；
 D_f ——重力锚埋入深度（如有剪力键，应该包含剪力键入土深度），单位为米（m）；
 K_p ——被动土压力系数，可取值 $\tan^2(\frac{\pi}{4}+\frac{\varnothing}{2})$ ， $\varnothing$ 为内摩擦角；

B ——重力锚在受拉方向的宽度，单位为米（m）。

5.5.10 重力锚的抗拔承载力标准值即重力锚的浮重力 W 。

5.5.11 在计算重力锚水平承载力标准值时应考虑水底斜坡对承载力的影响，水底倾角对承载力存在有利影响和不利影响，当锚体在斜坡上滑动趋势与锚绳拉力沿斜坡方向的分力方向相同时为不利情况，此时重力锚的重力作用会降低其承载力，当锚体在斜坡上滑动趋势与锚绳拉力沿斜坡方向的分力方向相反时为有利情况，此时重力锚的重力作用会提高其承载力。

5.5.12 桩锚承载力标准值计算可参考 JGJ 94—2008，5.4.6 节并应按照公式（35）进行计算：

$$Q_A = \sum \lambda_i q_{sik} u_i l_i \dots\dots\dots (35)$$

式中：

- Q_A ——桩基极限抗拔承载力标准值，单位为牛顿（N）；
- u_i ——桩身周长，对于等直径桩取 $u = \pi d$ ， d 为桩径，单位为米（m）；
- l_i ——桩周第 i 层土厚度，单位为米（m）；
- q_{sik} ——桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值，单位为千帕（kPa）；
- λ_i ——抗拔系数，见表15。

表 14 桩锚抗拔系数 λ_i

土类	λ_i 取值
砂土	0.50~0.70
黏性土、粉土	0.70~0.80

注：桩长 l 与桩径 d 之比小于20时， λ_i 取小值。

5.5.13 桩锚的水平承载力特征值可采用下列方法进行评估：

单桩水平承载力的特征值应通过单桩水平静载试验确定，试验方法可按JGJ 106—2014执行。对于钢筋混凝土预制桩、钢桩、桩身正截面配筋率不小于0.65%的灌注桩，可根据静载试验结果取地面处水平位移为10mm(对于水平位移敏感的建筑取水平位移6mm)所对应的荷载的75%为单桩水平承载力特征值。对于桩身配筋率小于0.65%的灌注桩，可取单桩水平静载试验的临界荷载的75%为单桩水平承载力特征值。

5.5.14 当缺少单桩水平静载试验资料时，可按公式（36）估算桩身配筋率小于 0.65%的灌注桩的单桩水平承载力特征值：

$$R_L = \frac{0.75 \alpha \gamma_m f_t W_0}{\nu_m} (1.25 + 22 \rho_g) (1 \pm \frac{\zeta_N N}{\gamma_m f_t A_n}) \dots\dots\dots (36)$$

式中：

- R_L ——桩基水平承载力特征值，单位为牛顿（N）；
- α ——桩的水平变形系数，按公式（37）取值；
- γ_m ——桩截面模量塑性系数，圆形截面取2.0，矩形截面取1.75；
- f_t ——桩身混凝土抗拉强度设计值；
- W_0 ——桩身换算截面受拉边缘的截面模量；
- ν_m ——桩身最大弯矩系数，见表16；
- ρ_g ——桩身配筋率；
- A_n ——桩身换算截面积，圆形截面为： $A_n = \frac{\pi d^2}{4} [1 + (\alpha_E - 1) \rho_g]$ ，其中 α_E 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；
- ζ_N ——桩顶竖向力影响系数，竖向拉力取1.0，竖向压力取0.5；
- N ——桩顶竖向拉力，即 T_A 。

表 15 桩身最大弯矩系数 ν_m 和桩顶水平位移系数 ν_x

桩顶约束情况	桩的换算埋深 αh	ν_m	ν_x
铰接、自由	4	0.768	2.441
	3.5	0.750	2.502
	3	0.703	2.727
	2.8	0.675	2.905
	2.6	0.639	3.163

表 16 桩身最大弯矩系数 ν_m 和桩顶水平位移系数 ν_x (续)

桩顶约束情况	桩的换算埋深 αh	ν_m	ν_x
铰接、自由	2.4	0.601	3.526
注1: 铰接(自由)的 ν_m 系桩身的最大弯矩系数。 注2: 当 $\alpha h > 4$ 时取 $\alpha h = 4.0$ 。			

5.5.15 桩的水平变形系数 α , 按公式 (37) 计算:

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_0}{EI}} \dots\dots\dots (37)$$

式中:
 m —— 桩侧土水平抗力系数的比例系数;
 b_0 —— 桩身的设计宽度, 单位为米 (m);
 EI —— 桩身抗弯刚度。对于钢筋混凝土桩, $EI=0.85E_cI_0$; 其中 E_c 为混凝土弹性截面模量, I_0 为桩身换算截面惯性矩。当为圆形截面时, $I_0=W_0d/2$, d 为桩径, W_0 为桩身换算截面受拉边缘的截面模量, 可按公式 (38) 计算:

$$W_0 = \frac{\pi d}{32} [d^2 + 2((\alpha_E - 1) \rho_g d_0^2)] \dots\dots\dots (38)$$

式中:
 d —— 桩直径, 单位为米 (m);
 α_E —— 钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值;
 ρ_g —— 配筋率;
 d_0 —— 扣除保护层的桩直径, 单位为米 (m)。

5.5.16 桩身设计宽度 b_0 应按公式 (39) 计算:

$$\begin{cases} b_0 = 0.9(1.5d + 0.5), & d \leq 1m \\ b_0 = 0.9(d + 1), & d > 1m \end{cases} \dots\dots\dots (39)$$

式中:
 b_0 —— 桩身设计宽度, 单位为米 (m)
 d —— 桩直径, 单位为米 (m)。

5.5.17 桩侧土水平抗力系数的比例系数 m , 宜通过单桩水平静载试验确定, 当无静载试验资料时可按表 17 取值。

5.5.18 当桩的水平承载力由水平位移控制, 且缺少单桩水平静载试验资料时, 可按公式 (40) 估算预制桩、钢桩、桩身配筋率不小于 0.65% 的灌注桩单桩水平承载力特征值:

$$R_L = \frac{0.75 \alpha^3 EI}{\nu_x} X_{0a} \dots\dots\dots (40)$$

式中:
 R_L —— 桩基水平承载力特征值, 单位为牛顿 (N);
 α —— 桩的水平变形系数, 按公式 (37) 取值;
 EI —— 桩身抗弯刚度;
 X_{0a} —— 桩顶容许水平位移;
 ν_x —— 桩顶水平位移系数, 取值见 JGJ 94—2008, 5.7.2。

表 16 桩侧土水平抗力系数的比例系数

序号	地基土类别	预制桩、钢桩		灌注桩	
		m MN / m ⁴	相应单桩在地面处水平位移 mm	m MN / m ⁴	相应单桩在地面处水平位移 mm
1	淤泥; 淤泥质土; 饱和湿陷性黄土	2~4.5	10	2.5~6	6~12
2	流塑 (IL>1)、软塑 (0.75<IL≤1) 状黏性土; e>0.9 粉土; 松散粉细砂; 松散、稍密填土	4.5~6.0	10	6~14	4~8

表 17 桩侧土水平抗力系数的比例系数（续）

序号	地基土类别	预制桩、钢桩		灌注桩	
		m MN /m ⁴	相应单桩在地 面处水平位移 mm	m MN /m ⁴	相应单桩在地 面处水平位移 mm
3	可塑（ $0.25 < IL \leq 0.75$ ）状黏性土、湿陷性黄土； $e=0.75 \sim 0.9$ 粉土；中密填土；稍密细砂	6.0~10	10	14~35	3~6
4	硬塑（ $0 < IL \leq 0.25$ ）、坚硬（ $IL \leq 0$ ）状黏性土、湿陷性黄土； $e < 0.75$ 粉土；中密的中粗砂；密实老填土	10~22	10	35~100	2~5
5	中密、密实的砾砂、碎石类土	—	—	100~300	1.5~3
注 1：当桩顶水平位移大于表列数值或灌注桩配筋率较高（ $\geq 0.65\%$ ）时， m 值应适当降低；当预制桩的水平向位移小于 10 mm 时， m 值可适当提高；					
注 2：当水平荷载为长期或经常出现的荷载时，应将表列数值乘以 0.4 降低采用；					
注 3：当地基为可液化土层时，应将表列数值乘以相应的土层液化折减系数 ψ_L 。					

5.6 材料选型与防腐

5.6.1 钢丝绳是系泊漂浮方阵常用的缆绳之一，为了便于安装和施工，通常会选用柔性较好的多股钢丝绳。应考虑钢丝绳耐磨性，单股钢丝直径不宜过细。为了提高钢丝绳的防腐性能，可选用镀铝（锌）钢丝绳或采取涂塑工艺，在特殊腐蚀环境也可选用不锈钢钢丝绳，镀铝（锌）钢丝绳的防腐要求可参考 GB/T 33364—2016 执行。

5.6.2 锚链是系泊漂浮方阵常用的缆绳之一，具有耐磨性好、强度高等优点，在锚链选型时需要注意所选产品的强度等级、防腐等级、米重等技术指标，在满足强度要求的情况下，通常选用无档锚链即可，材质可以选用合金钢或不锈钢，对于合金钢其表面防腐处理通常有防锈漆或热镀锌。防锈漆的处理可参考 ISO 12944。热镀锌处理可参考 ISO 14713-1：2009。

5.6.3 纤维绳是近代海洋工程领域常用的缆绳，常见用于系泊的纤维绳有尼龙缆绳、聚酯缆绳、聚丙烯缆绳、超高分子聚乙烯等，其特点是重量轻、耐腐蚀性好、强度高，通常无需进行额外的防腐处理。

5.6.4 锚固系统相关配件例如卸扣、锁具套环、绳夹、浮标等的选型需根据项目具体设计要求决定，应考虑不同配件之间的适配性，浮标的选择要注意其浮力、安装孔的强度及材料的耐老化性能，金属配件的选材可以是合金钢或不锈钢，如果是合金钢需考虑防锈漆或热镀锌的防腐处理，参考的标准同 5.6.2 所述。

锚固基础的选型需根据项目具体设计要求决定，桩锚通常有钢管桩和混凝土预制桩，钢管桩的防腐处理可参考 5.6.2 节所述，混凝土预制桩与混凝土重力锚的防腐要求类似，可参考 JTS 151-2011 中 3.4 的要求执行。