

海上风电升压站平台高程确定标准的合理性研究

潘晓春

(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:为保证海上风电升压电站建设的经济合理与安全可靠,合理确定海上风电升压电站平台高程十分必要。文中从波浪与潮位的遭遇组合、最大波高取值与现行相关标准的比较、最大波峰高度计算的合理性等方面,全面分析了确定海上风电升压站平台高程各组成项取值标准的合理性,研究认为现行标准明显偏高。建议海上升压站平台底部高程按“100 年一遇极端高水位+重现期 50 年波列累积频率 1% 的最大波峰高度+安全超高”确定。结合工程实例计算分析,按本文建议可使海上升压站平台高程明显降低,从而节省工程造价,还可减轻升压站工程对周边风机的遮蔽影响,以达到多发电量的效果。

关键词:极端高水位;条件概率;波浪累积频率;百分之一大波;最大波峰高度

中图分类号:P752 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-2029(2019)06-0083-06

目前,海上风电升压站底高程的确定主要参考相关的行业规范,依据《浅海钢质固定平台结构与建造技术规范》(SY/T 4094)等规定执行。平台底层甲板高程应按式(1)确定^[1]:

$$T=H+2H_b/3+\Delta \quad (1)$$

式中: T 为平台底层甲板下面的管廊架底面或设备底面高程, m; H 为校核高水位的水面高程, m; H_b 为校核高水位的最大波高, m; Δ 为安全气隙高度,取 1.5 m。

新编标准《风电场工程 110 kV~220 kV 海上升压变电站设计规范》(NB/T 31115-2017)于 2018 年 3 月实施,其第 4.0.12 条规定^[2]如下:

海上升压变电站底层甲板上表面高程应符合以下公式:

$$T \geq H+2H_b/3+\Delta+H_l \quad (2)$$

式中: T 为底层甲板上表面高程, m; H 为 100 年一遇极端高水位, m; H_b 为 100 年一遇的最大波高, m; Δ 为气隙,不小于 1.5 m; H_l 为底层甲板包括梁在内的结构高度, m。

对比可见,标准 NB/T 31115-2017 的规定“脱

胎”于 SY/T 4094-2012,但明确了波高的重现期为 100 年,增加了条文的可操作性。极端/校核高水位的重现期标准根据工程防洪重要性已由相关标准明确规定为 100 年,结构高度取决于结构设计型式,这两项无需争议,但研究者认为其他几项取值标准的合理性值得商榷。

1 波浪与高潮位的遭遇组合问题

1.1 潮位与波浪的成因关系

海洋高潮位一般主要由天文潮和风暴潮增水组成。组成高潮位的天文潮、风暴潮增水分别与波浪构成成因关系^[3-4]。天文潮是有规律性的,和日、地、月的相对位置和距离相关,不受风和浪的影响,因此从成因上讲,天文潮和波浪没有相关性;风暴潮引起的增水随着台风中心附近风速加大、中心气压降低而增大。当台风移近海岸,台风形成的大风持续地正对海岸或海湾吹刮,迫使沿岸海水猛增,海湾内海水雍积,形成风暴潮增水。同时,由于较大的风速引起水面上下波动,形成的波浪也较大。风

暴潮增水和波浪都是受风速、风向、风时影响,是随机事件,可以近似认为都是同一个事件(风)引起的两个结果,亦即风暴潮和波浪属于相关事件。因此,高潮位和波浪具有一定的相关性,但没有必然相容的关系。

在海洋工程的研究领域中,对风、浪、潮、流联合作用的研究主要采用以下两个途径:一为研究风、浪、流联合作用引起的极值响应;另一途径则是研究各种环境因素的联合概率。而这两种途径往往都存在着其各自的缺陷;通过第一种方法所得的 100 年一遇重现期,其相应的风、浪、流数值并不对应于 100 年一遇联合概率中的风、浪、流数值,而联合概率法所得结果也并非单一解,无数个风、浪、流的组合都有可能构成 100 年一遇的联合概率。

因此,目前还缺乏行之有效的途径来处理好潮位与波浪两者间的内在联系。我国堤防工程规范等规定采取设计重现期的潮位与某重现期波浪的简单叠加值,作为堤防设计的主要依据。这样的规定存在着频率概念不清的问题,堤防设计标准往往偏高,导致过高的投资和不必要的浪费^[3-4]。

1.2 设计潮位与设计波浪组合的重现期简析

高潮位和波浪虽没有必然的联系,但具有一定的相关性。有相关性的随机事件的组合概率可按条件概率关系^[5]计算:

$$P(Z \cap W) = P(Z|W)P(W) = P(W|Z)P(Z) \quad (3)$$

目前从定量上来分析高潮位、波浪二者相关性的资料较少。董吉田等^[6]统计过青岛港潮位和小麦岛站波浪关系,如表 1 所示。

表 1 青岛港潮位和小麦岛站波浪同现次数与频率

日期	潮位			合计
	高潮	低潮	平潮	
朔望日	6	13	18	37
上下弦	13	12	25	50
其他日期	13	22	19	54
频率/%	22.7	33.3	43.9	

根据上表, $P(W|Z)=22.7\%$, 则

$$P(Z \cap W) = 22.7\% \times P(Z) \quad (4)$$

当高潮位重现期取 100 年 ($P=1\%$) 时, $P(Z \cap W)=0.227\%$, 相应重现期约 440 年; 当高潮位重现期取 50 年 ($P=2\%$) 时, $P(Z \cap W)=0.454\%$, 相应重现期约 220 年。

需要说明的是, 受资料条件限制, 以上仅属简单量级的分析, 实际上表格里统计的是十分之一大

波 ≥ 2.0 m 的情形, 若再考虑重现期为 100 年一遇的稀遇波浪, 则上述高潮与波浪遭遇的重现期必然更大, 这也是文献认为现行海堤顶部高程设计标准可能过高的概率学原因^[3-4]。

资料所限, 上述浪潮的组合概率分析结果数值上尽管并不十分准确, 但至少可以说明 100 年一遇极端高水位与 100 年一遇设计波浪的遭遇何其稀遇, 其重现期远大于海上升压站环境荷载的设计标准。

综上, 海上升压站平台高程设计标准中的高潮位与波浪重现期均采用 100 年, 其遭遇组合概率远稀于 100 年一遇。

2 最大波高取值与现行相关标准的比较

2.1 最大波高与平均波高的关系

最大波高在波列中显然是一个随机量, 其分布函数决定于波高的分布和波浪个数。朗格—希金就瑞利分布讨论了这个问题, 并在给定波数 50~10 000 的情况下, 导出可能出现的最大波高 1.42~2.15 倍于有效波高 H_s ; 合田建议最大波高 1.6~2.0 倍于有效波高 H_s , 同时认为倍数尚须根据设计波要素置信度、计算精度、建筑物重要性以及破坏极限上的动态特性酌情选择, 在海洋钢结构设计中倍数多取 2.0, 混成式防波堤设计倍数取 1.8^[7]。

为说明 $H_{\max}$ 的量值, 本文按合田建议采用 $H_{\max}=2.0\sim 1.8H_s$ 。满足“双十”原则的海上风电场场址的波浪大多接近深水波, 下文以深水波(相对波高 $H/d=0$)为例进行对比分析。对于深水波, 根据有效波高与平均波高的关系^[8]有:

$$H_{\max}=3.20\sim 2.88\bar{H} \quad (5)$$

2.2 海堤设计标准中波列累积频率

现行海堤工程设计规范^[9]规定, 海堤堤顶高程应根据设计高潮(水)位、波浪爬高及安全加高线性相加确定; 对“允许越浪设计时”海堤波列累积频率取 13%, 对“不允许越浪设计时”海堤波列累积频率取 2%。对于深水波, 根据海港水文规范^[9]等资料, 有:

$$H_{2\%}=2.23\bar{H} \quad (6)$$

对比式(6)与式(5)可知, 海上升压站平台设计波浪标准高于海堤工程波浪标准。

2.3 核电厂厂址设计波浪标准

根据《核电厂工程水文技术规范》(GB/T 50663-2011)第 4.9.10 条的规定^[10], 核电厂厂址设计波浪重

现期取 100 年,波列累积频率标准取百分之一的大波 $H_{\frac{1}{100}}$ 。对于深水波,有:

$$H_{\frac{1}{100}} = 2.66\bar{H} \quad (7)$$

对比式(7)与式(5),可见海上升压站平台设计波浪标准也高于核电厂工程波浪标准。

2.4 港工结构强度计算采用的波浪设计标准

根据现行港工和海堤规范^[8-9],直墙式、墩柱式上部结构和墙身以及斜坡式胸墙和堤顶等部位的强度和稳定性计算的设计波高累积频率取 1%,其他部位波高累积频率取 5%或 13%不等。海上升压站平台一般采用桩基,对应港工规范要求,墩柱、桩柱的强度和稳定性计算的波列累积频率取 1%。

根据现行防波堤设计规范^[11],直立堤设计波高应采用重现期为 50 年,波高累积频率应为 1%;斜坡堤设计波高应采用重现期为 50 年或 25 年,波高累积频率应为 13%。

2.5 电力工程采用的波浪设计标准

综合现行火电厂、变电站、风电场、光伏电站等电力工程的设计标准^[12-16],其防浪设计标准无一不采用“重现期为 50 年波列累积频率 1%”的标准。对于深水波,根据海港水文规范^[9]等资料,有:

$$H_{1\%} = 2.42\bar{H} \quad (8)$$

2.6 各特征波关系综合分析

以深水波为例,综合式(5)~式(8),各深水特征波与平均波高的关系列于表 2。

表 2 深水波各特征波波高与平均波高的关系

特征波/ 平均波高	$\frac{H_{\max}}{\bar{H}}$	$\frac{H_{13\%}}{\bar{H}}$	$\frac{H_{2\%}}{\bar{H}}$	$\frac{H_{\frac{1}{100}}}{\bar{H}}$	$\frac{H_{1\%}}{\bar{H}}$
比值	3.20~ 2.88	1.61	2.23	2.66	2.42
比值之差	0	-1.59~ -1.27	-0.97~ -0.65	-0.54~ -0.22	-0.78~ -0.46

本表意在说明现行各技术标准取值标准的相对大小,对于实际工程中的非深水波,各特征波波高应按实际波高及水深条件计算。

3 最大波峰高度计算的合理性

根据《浅海钢质固定平台结构与建造技术规范》(SY/T 4094-2012)第 3.4.2 条,取“2/3 倍的最大波高”计算作用在升压站平台基础上的最大波峰

高度^[1]。海上平台结构基础若采用圆形桩基,其桩径与波长之比一般小于 0.2,属于小尺度圆桩。

波浪作用于水中桩柱的波峰高度随波浪在桩周上的相位不同而不同,正对来波相位为零的方向波峰高度最大;小尺度桩柱静水面以上波峰高度 $\eta_{\max}$ 的数值,《港口与航道水文规范》(JTS 145-2015)采用二阶波理论 ($d/L > 0.1$) 和椭圆余弦波理论 ($d/L \leq 0.1$) 的计算成果并绘制查算图^[9]。查算图被我国蓄滞洪区建筑工程技术规范直接引用,用于确定近水面安全楼层盖板的底面设计高度^[17]。为便于内插,本文给出了上图的二次方拟合式:

$$\eta_{\max}/H = -0.363(H/d)^2 + 0.6489H/d + 0.5 \quad (9)$$

标准 SY/T 4094 和 NB/T 31115 中,计算波峰高度的倍数 2/3 相当于相对波高 $H/d = 0.31$ 时的取值。这属于相对粗略的经验系数,为避免过于粗略取值,可认为:对于海上升压站小尺度圆桩基础(桩径与波长之比小于 0.2)的最大波峰高度,宜按上述“相位为零时桩柱最大波峰高度查算图”查值计算。对于群桩(桩距与桩径之比小于 4.0)和复杂的基础型式,波峰高度可按现行相关规定^[9]计算。

4 关于“结构高度”与“安全气隙高度”的讨论

根据《风电场工程 110 kV-220 kV 海上升压变电站设计规范》(NB/T 31115-2017)规定,海上升压变电站底层甲板上表面高程还应考虑底层甲板包括梁在内的结构高度。然而,底层甲板(包括梁)接触海水不会对结构安全产生实质性影响。因此,这个要求可能偏于保守。

标准 NB/T 31115-2017 中的气隙高度与 SY/T 4094-2012 相同,取 1.5 m。根据 SY/T 4094-2012 第 3.4.2 条,取“至少 1.5 m 的安全气隙,以防备平台长期采油可能造成地基沉降等不确定因素”。然而,海上升压变电站不会因采油造成地基沉降,且此处称“气隙”并不十分确切。另一方面,考虑到海上升压站远离大陆,工程海域长系列实测资料大多缺乏,极端高水位和设计波浪很难准确计算,有必要考虑一定的安全裕度。

综合考虑上述诸因素,本文建议对海上升压变电站平台确定组成项中的“气隙”改称“安全超高”,并给定 1.0~1.5 m 的取值范围,让勘测设计人员根

据海洋水文设计成果的可靠性等取值。

上述安全超高的建议取值,高于 1 级海堤不允许越浪时 1.0 m 的安全加高^[7],与现行陆上风机基础的 0.5 m 的安全超高^[15]也是相适应的。

5 海上升压站平台高程确定的建议

综合前文分析,最大波高为波群或观测记录中的最大波高值,为瞬时极值^[8];"100 年一遇的极端高水位"与"100 年一遇设计波浪"的遭遇概率是相当稀遇的,再加上"波峰高度"取最大波高计算,如此稀遇事件的"三碰头"进一步提高了事件遭遇的稀遇性。

根据前文分析,"设计波浪重现期 100 年+最大波高 $H_{\max}$ " 的组合标准不但高于海堤或防波堤工程防浪标准,高于现行电力工程防浪标准,甚至高于核电厂厂址防浪设计标准。

本文建议:海上升压站平台底部高程按"100 年一遇极端高水位+重现期 50 年波列累积频率 1% 的最大波峰高度+安全超高"确定。如此处理不但避免了过于极端稀遇事件的组合,也与现行海堤、防波

堤以及电力行业设计规程等相适应。具体条文修改建议如下。

"海上升压站平台底部高程应符合以下公式:

$$T \geq H + kH_b + \Delta$$

式中: T 为底层甲板上表面高程, m; H 为 100 年一遇极端高水位, m; H_b 为极端高水位下重现期为 50 年波列累积频率 1% 的波高, m; Δ 为安全超高,根据海洋水文设计成果的可靠性等因素取 1.0~1.5 m; k 为最大波峰高度与设计波高之比。对于桩径与波长之比小于 0.2 的小尺度桩基,按下式计算:

$$k = -0.363(H_b/d)^2 + 0.6489H_b/d + 0.5, H_b/d \in [0, 0.8]$$

对于复杂基础型式和桩距与桩径之比小于 4.0 的群桩,波峰高度可参照现行标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)相关规定执行。"

6 工程案例

(1) 基础资料

某海上升压站工程基础采用 4 根导管架方案,导管架直径 $D=2$ m,桩距 $l=40$ m。工程海域最大波高的波向为 SE,相应设计波要素列于表 3。

表 3 某海上升压站工程海域设计波要素

波浪重现期/a	$H_{\max}/m$	$H_{0.4\%}/m$	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$\bar{H}/m$	$\bar{T}/s$	L/m	d/m	DIR
100	20.0	15.4	14.3	10.4	6.94	12.1	182.0	31.9	SE
50	19.0	14.6	13.6	9.87	6.55	11.8	175.0		

分别按标准 NB/T 31115-2017 和本文建议,计算作用在桩基础上的波峰高程。为进一步比较,增加"波浪重现期 100 年、波列累积频率 1%"、"波浪重现期 100 年的百分之一大波"下的波峰高程。

(2) 按标准 NB/T 31115-2017 计算

取 100 年一遇的最大波高 $H_{\max}=20.0$ m, $\frac{2}{3}H_{\max}=13.33$ m。

(3) 按本文建议计算

取 50 年一遇波列累积频率 1% 的波高 $H_b=13.6$ m 计算:导管架直径 $D=2$ m,桩距 $l=40$ m。桩径与波长之比 $D/L=2/182.0=0.011<0.2$,属于小尺度桩基;桩距与桩径之比 $l/D=40/2=20>4.0$,按单桩计算。 $H_b/d=13.6/31.9=0.426$; $k=-0.363(H_b/d)^2+0.6489H_b/d+0.5=0.71$; $kH_b=9.66$ m。

(4) 取"波浪重现期 100 年、波列累积频率 1% 的 $H_b=14.3$ m"计算

$H_b/d=14.3/31.9=0.448$; $k=-0.363(H_b/d)^2+0.6489H_b/d+0.5=0.72$; $kH_b=10.30$ m。

(5) 按核电标准计算

不同相对波高下, $H_b=H_{\frac{1}{100}} \approx H_{0.4\%}=15.4$ m。 $H_b/d=15.4/31.9=0.483$; $k=-0.363(H_b/d)^2+0.6489H_b/d+0.5=0.73$; $kH_b=11.24$ m。

(6) 成果汇总

某海上升压站工程波峰高程计算成果汇总情况参见表 4。

表 4 某海上升压站工程波峰高程计算成果汇总

计算标准	NB/T 31115-2017	本文 建议	波浪重现期 100 年、波列 累积频率 1%	核电防 浪标准
波峰高度/m	13.33	9.66	10.30	11.24
差值/m	0	-3.67	-3.03	-2.09

经对比可见,按标准 NB/T 31115-2017 计算的波峰高程高出核电厂址标准 2.09 m 之多。而按本文

的建议,波峰高度降低 3.67 m,高出普通住宅 2.8 m 的楼层高度近 0.9 m,其对应的是波浪重现期为 50 年、波列累积频率 1%。根据前文从波浪与潮位的遭遇成因及组合概率分析、香港特别行政区海堤设计的浪潮组合标准等分析,这样的组合标准满足海上升压站环境荷载标准,也与现行海堤、防波堤、港工结构强度以及电力行业设计规程相适应,是足够安全的。

即便设计波浪重现期取 100 年,对特征波高也应取“波列累积 1%”的波高计算,而不简单按字面取 $H_{\max}$ 。该种条件下,波峰高程可降低 3.03 m,幅度也是可观的。在满足防洪防浪的前提下,将海上升压站平台高程降低,其优势主要有以下几点:

(1) 可以降低工程量及工程造价。以导管架为例,其单价约 1.3 万元/t,缩短 3.67 m,4 根导管架减轻约 150 t,从而节省造价近 200 万元。

(2) 可以降低作为障碍物对周边风资源的削减程度,以便周边风机捕获更多的风能。为降低各等级海缆综合造价,海上升压站大多布设于海上风电场近中央位置,一般采用整体式布置,上部结构为相对高度为 15 m 的箱式结构。以 6.0 MW 风机为例,其轮毂高度 100 m,叶片长度 75 m,海平面至叶尖扫掠最低点的高差为 25 m。按标准 NB/T 31115-2017 确定的平台高程,加上高度为 15 m 的箱式结构,其箱顶高程达 35 m,侵入叶片扫掠范围约 10 m。若按本文建议,侵入叶片扫掠范围约 6.3 m,一定程

度上减轻了升压站对周边风电机组风资源的遮蔽影响,从而可以多发电量。

7 结 论

(1) 海上升压站平台高程设计标准中的高潮位与波浪重现期均采用 100 年,其遭遇组合概率远大于 100 年一遇。

(2) 经与相关技术规程中的波浪设计标准比较,取最大波高作为海上升压站平台高程的设计波浪高于安全要求最高的滨海核电厂址标准,明显偏高。

(3) 取“2/3 倍的最大波高”作为升压站平台基础上的最大波峰高度过于粗略,宜据实际相对波高计算桩柱最大波峰高度。

(4) 建议海上升压站平台底部高程按“100 年一遇极端高水位+重现期 50 年波列累积频率 1%的最大波峰高度+安全超高”确定。

(5) 关于海上升压站平台的确定,相关设计标准应力求概念明确,每一项参与叠加的组成项均应合理可靠,不宜硬性叠加层层加码。起自于技术标准,每个组成环节均取所谓“最不利”层层加码、简单堆砌式的设计应予修正。

(6) 海上风电场风机基础电气设备底座高程等,可以参照本文方法研究合理确定。

参考文献:

- [1] 海洋石油工程专业标准化委员会.SY/T 4094-2012. 浅海钢质固定平台结构设计与建造技术规范[S].北京:石油工业出版社,2013.
- [2] 水电水利规划设计总院.NB/T 31115-2017. 风电场工程 110kV ~ 220kV 海上升压变电站设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [3] 胡煜彬.海堤工程设计中的潮位和波浪组合方法研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [4] 李杰.河口地区潮位与波浪组合频率计算方法的研究[D].南京:河海大学,2006.
- [5] 丛树铮.水科学技术中的概率统计方法[M].北京:科学出版社,2010.
- [6] 董吉田,陈雪英.大风浪过程与高水位联合概率的统计分析[J].海岸工程,1990,9(2):1-7.
- [7] 交通部第一航务工程勘察设计院.海港工程设计手册(上册)[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [8] 交通运输部.JTS 145-2015. 港口与航道水文规范[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [9] 水利部.GB/T 51015-2014. 海堤工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [10] 中国电力企业联合会.GB/T 50663-2011. 核电厂工程水文技术规范[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [11] 交通运输部.JTS 154-1-2011. 防波堤设计与施工规范[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [12] 中国电力企业联合会.GB 50660-2011. 大中型火力发电厂设计规范[S].北京:中国计划出版社,2011.
- [13] 中国电力企业联合会.GB 50049-2011. 小型火力发电厂设计规范[S].北京:中国计划出版社,2011.
- [14] 中国电力企业联合会.DL/T 5056-2007. 变电所总布置设计技术规程[S].北京:中国电力出版社,2008.

- [15] 国家能源局. NB/T 10101-2018. 风电场工程等级划分及设计安全标准[S].北京:中国水利水电出版社,2019.
- [16] 中国电力企业联合会. GB 50797-2012. 光伏发电站设计规范[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [17] 建设部. GB/T 50181-2018. 洪泛区和蓄滞洪区建筑工程技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.

Study on the Rationality of Platform Elevation Standard for Offshore Wind Farm Substation

PAN Xiao-chun

China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu Province, China

Abstract: In order to ensure economic, reasonable and safe construction of offshore wind farm substations, it is necessary to reasonably determine the platform elevation of offshore wind farm substation. From the aspects of the combination of wave and tide levels, the comparison of maximum wave height with current relevant standards is conducted, and the rationality of calculating maximum wave peak height, of determining each component of platform elevation of offshore wind farm substation is comprehensively analyzed. The research shows that the current standard is fairly high. It is suggested that the platform bottom elevation of offshore substation be determined according to the standard "extreme high water level once in 100 years + maximum peak height of 1% cumulative frequency of wave train in 50 years of recurrence period + safe super height". According to the suggestion proposed in this paper, the platform elevation of offshore substation can be decreased obviously, and the engineering cost can be saved. Meanwhile, the shielding effect of substation on surrounding fans is also reduced, which can result in increasing power generation.

Key words: extreme high water level; conditional probability; cumulative frequency of waves; percentile maximum wave; maximum wave peak height