

# 大水深离岸型海上测风塔整体有限元分析

周 颖, 吴海明, 齐志诚

(中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

**摘要:**我国目前没有可直接运用于大水深、工程环境复杂的海上测风塔的设计技术标准。根据我国《港口工程地基规范》及相关工程技术标准,利用通用有限元结构软件分析了测风塔结构受力;同时依据国际通用的美国石油行业《海上固定平台入级与建造规范》(即 API RP 2A 规范),利用海工结构有限元分析软件对测风塔进行了结构分析。计算分析内容包括:测风塔多种设计荷载、多种设计工况、关键节点位移、杆件内力和疲劳分析等。两种计算结果基本一致,均能满足相应规范要求,说明所选取的设计参数较为合理,相关的工程设计经验可为类似工程及海上风电场建设提供参考借鉴。

**关键词:**测风塔; 风场; 疲劳分析; 海上风电

**中图法分类号:** TM614

**文献标志码:** A

**DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.09.003

相较于陆上风力发电,海上风力发电具有年发电量大,占用土地资源少等优点,是战略性新兴产业的重要内容,也是风电产业发展的技术制高点。建设海上风电场,首先要获得不同高度处的准确风资源参数,需要在海上建造测风塔。

海洋环境的复杂性和测风设备的运行要求,使测风塔的设计比常规的陆地工程复杂很多。目前,我国已建成的海上测风塔很少,且主要位于较浅水域。由于我国尚无这方面专门的技术标准,在设计中多参照《港口工程地基规范》<sup>[1]</sup>及陆上相关技术标准进行。

某海上测风塔工程距离海岸约 27 km,水域深度约 22.5 m,是大水深离岸型海洋工程项目。为确保测风塔安全可靠、经济适用,设计者参照《港口工程地基规范》和美国石油行业规范《海上固定平台入级与建造规范》<sup>[2]</sup>(即 API RP 2A 规范)及相关工程技术标准,利用通用有限元结构分析软件和海工结构有限元分析软件分别建立整体结构模型,从测风塔多种设计荷载、多种设计工况、关键节点位移和杆件内力等几个方面进行计算分析和研究,所取得的工程设计经验可为类似工程及海上风电场建设提供参考借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 工程地质

拟建测风塔塔址处 60.00 m 深度范围内的地层按其成因可分为 9 层:①层为粉、细砂,分布于海域表层,厚 4.80 m;②层为粉质黏土,厚约 4.50 m;③层为黏土,厚约 3.10 m;④层为粉质黏土,厚约 4.60 m;⑤层为粉质黏土,厚约 7.70 m;⑥层为粉砂,厚约 6.90 m;⑦层为粉质黏土、黏土互层,厚约 13.60 m;⑧层为粉质黏土,厚约 7.00 m;⑨层为粉质黏土,厚约 7.80 m。

### 1.2 水文条件

工点海区内潮流一般为不规则半日潮流,以往复流为主,涨落潮流方向基本与海流一致,实测潮流流速范围为 0~0.79 m/s。余流方向以西南流(SW)为主,最大流速为 0.5 m/s,表层余流大于底层余流。波浪玫瑰花图见图 1,波浪要素统计见表 1。

### 1.3 测风塔结构形式

测风塔上部结构采用自立式,塔高 100 m,塔架截面采用四边形桁架结构形式。测风塔下部基础采用钢

筋混凝土高桩承台,承台为8.0 m×8.0 m见方,厚1.7 m的C40混凝土结构,4根桩径为1.4 m的钢管桩作为基桩,桩长为70 m,斜桩6:1。

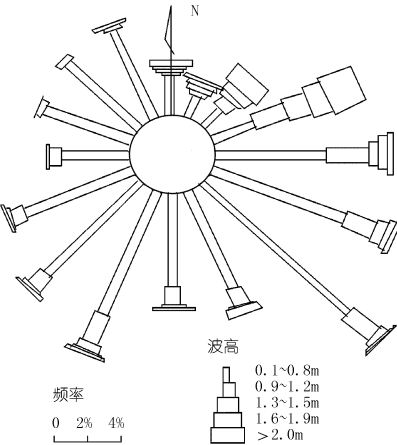


图 1 波浪玫瑰图

表 1 测风塔处波浪要素统计(最不利方向 SE)

重现期/a	波高/m			周期/s
	$H_{1\%}$	$H_{4\%}$	$H_{13\%}$	
100	6.49	5.45	4.31	8.3
50	5.81	4.87	3.86	7.9

2 设计荷载

测风塔设计考虑的荷载主要包括自重、风荷载、波浪力、水流力、冰压力、船舶或漂浮物撞击力及地震力等。

(1) 风荷载。10 m 高度处的平均风速计算结果见表 2。

(2) 波浪力。根据《海港水文规范》<sup>[3]</sup>,按波浪要素计算波流对桩基的作用,波浪力计算的水位分别采用极端高水位 3.62 m 和极端低水位 -1.53 m,波高取设计波高 5.81 m。

表 2 平均风速计算结果

重现期/a	不同时间的风速/(m·s <sup>-1</sup> )	
	1 min	10 min
1	22.8	18.4
50	37.45	30.2

(3) 水流力。根据《港口工程荷载规范》<sup>[4]</sup>,水流力计算的设计流速为 0.84 m/s。

(4) 船舶(或漂浮物)撞击力按 200 kN 计算。

(5) 冰压力。经调研,本海域等深线 10 m 外没有冰,只有浮冰,冰温 0℃,极限冰压 750 kPa,冰温系数取 1.0。

(6) 海生物。海生物密度取值 1.3 t/m<sup>3</sup>。

(7) 地震力。抗震设防烈度为Ⅶ度。

(8) 风速仪、风向标等自重取 0.5 kN,集中力作用于外伸横梁末端。

(9) 飞溅区范围和腐蚀余量。飞溅区范围为高程 -1.6~3.8 m,腐蚀余量取 0.5 mm/a。

3 控制标准

3.1 变形控制标准

由于没有测风塔相关的基础设计专业标准,参考《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)和《高耸结构设计规范》(GBJ50135-2006)的有关规定确定变形控制标准<sup>[5-6]</sup>。测风塔结构承受风荷载为动荷载,且承受水平荷载较大,考虑到海上测风塔水平位移对其正常测风功能影响有限,基础的最大倾斜可按 0.5% 控制。高耸结构水平位移限值为  $H/75$ ,即 1 300 mm。

3.2 结构应力控制标准

该工程设计年限为 20 a,桩基础钢筋混凝土承台应力应满足《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)等相关规范要求。桩基础钢管桩采用 Q345B 型钢材,结构应力应满足《钢结构设计规范》(GB50017)等相关规范要求。

4 结构受力分析

结构受力分析首先采用通用有限元软件进行。计算的荷载工况组合按照承载能力极限状态组合和正常使用极限状态标准组合确定,然后,参照 API RP 2A 规范相关内容,按对结构产生最不利影响的相互荷载条件重新定义了荷载组合,并利用海工结构有限元分析软件进行计算。最后,将两次计算结果进行比较,以确定合理可行的设计方案。

4.1 结构计算假定

计算的关键在于水平荷载作用下桩土计算模型的选取及结构整体的空间分析。计算时采用假想嵌固点法假定,桩入土一定深度处视为假想嵌固点,结构分析时不再考虑土的影响。刚性固定端位于设计泥面垂直向下  $T$  处。设计泥面的位置在自然泥面下的距离要按照地质条件来决定。 $T$  值按照下列经验公式来确定:对淤泥  $T = (7 \sim 8.5) D$ ,对硬黏土  $T = (3.5 \sim 4.5) D$ ,当缺乏土壤资料时  $T = 6D$ ,其中,  $D$  为桩腿的外径。在结构的总体静力分析中,桩基础用等效桩模拟,等效桩的长度取 5 倍桩径。

4.2 通用有限元分析

采用通用有限元结构分析与设计软件进行结构整

体计算。上部结构塔架用空间梁单元模拟,承台模拟成块单元,节点按刚性节点处理。整体计算模型见图 2。

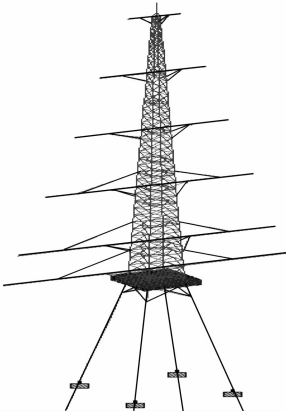


图 2 测风塔整体计算模型

荷载工况组合主要采用了以下组合。

4.2.1 承载能力极限状态持久组合

- (1)  $1.2G + 1.4WF(NOICE) + 1.5 \times 0.7(I + WAVE + BOAT + FLOATINGICE)$
- (2)  $1.2G + 1.4WF(ICE) + 1.5 \times 0.7(I + WAVE + BOAT + FLOATINGICE)$
- (3)  $1.2G + 1.4W45(NOICE) + 1.5 \times 0.7(I + WAVE + BOAT + FLOATINGICE)$
- (4)  $1.2G + 1.4W45(ICE) + 1.5 \times 0.7(I + WAVE + BOAT + FLOATINGICE)$

4.2.2 正常使用极限状态标准组合

- (1)  $G + WF(NOICE)$
- (2)  $G + WF(ICE)$
- (3)  $G + W45(NOICE)$
- (4)  $G + W45(ICE)$
- (5)  $G + WF(NOICE) + I + WAVE + BOAT + FLOATINGICE$
- (6)  $G + WF(ICE) + I + WAVE + BOAT + FLOATINGICE$
- (7)  $G + W45(NOICE) + I + WAVE + BOAT + FLOATINGICE$
- (8)  $G + W45(ICE) + I + WAVE + BOAT + FLOATINGICE$

其中:  $G$  为重力,  $I$  为裹冰的竖向荷载,  $WF$  为正面风荷载,  $W45$  为 45° 风向风荷载,  $ICE/NOICE$  为裹冰/无冰状态,  $WAVE$  为波流力,  $BOAT$  为船舶撞击荷载,  $FLOATINGICE$  为浮冰撞击荷载;字母前面的系数为各荷载的分项系数。

塔顶代表节点最大位移发生在工况组合(7)时,

为 571.998 mm。桩顶代表节点最大位移发生在工况组合(1)时,为 146.14 mm。海底泥面代表节点最大位移发生在工况组合(1)时,为 19.651 mm。

由于代表单元应力数据较多,此文不再赘列,其中混凝土单元应力计算结果满足《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)等相关规范要求,上部塔架及钢管桩应力均满足《钢结构设计规范》(GB50017)等相关规范要求。

4.3 海工结构有限元分析

海工结构有限元分析软件精于海上平台失效的非线性结构分析以及风、海流、海浪和地震引起的动态响应分析。在利用该软件进行结构整体分析计算时,塔架用空间梁单元模拟,承台按板单元模拟,节点按刚性节点处理。主要分析在各种极端环境工况下,上部塔桅和下部腿桩基础的节点位移、杆件内力(应力)、节点冲剪等内容<sup>[7-9]</sup>。

对于极端风暴条件、操作条件,风力的作用方向与波浪、流的作用方向一致。本工程极端风暴条件波流选择 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° 八个方向,其方向定义见图 3。

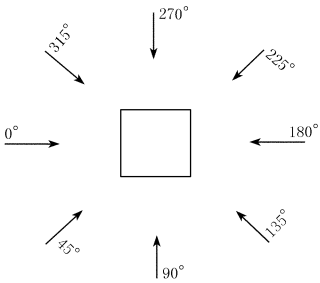


图 3 风力作用方向

根据 API RP 2A 21st 的规定,平台应按对结构产生最不利影响的相互荷载条件进行设计。荷载条件应包括环境荷载中相应的固定荷载和活荷载。本次设计中极端风暴荷载条件下的荷载组合系数见表 3。表中,  $APP$  表示附属结构的重量(塔桅爬梯重量);  $LIVE$  表示活荷载,包括设备中储备的液体、消耗品、人员活动等,设备未占区域按 2.5 kN/m<sup>2</sup> 考虑;  $BOAT$  表示靠船力;  $DEDS$  表示平台结构自重;工况 SW00 ~ SW31 是极端风速荷载,工况 SC00 ~ SC31 是极端环境荷载条件下波流作用。波流荷载根据 API RP 2A 21st 计算。

桩顶及桩腿泥面高程处 3 个结构关键节点最大位移见表 4,代表梁最大内力见表 5,构件长细比较核见表 6。

各桩顶节点、梁单元分组冲剪应力  $UC$  值均小于

表 3 极端风暴荷载条件下的荷载组合系数

基本 工况	DEDS	SW00	SC00 (0°)	SW45	SC45 (45°)	SW09	SC09 (90°)	SW15	SC15 (135°)	SW18	SC18 (180°)	SW22	SC22 (210°)	SW27	SC27 (270°)	SW31	SC31 (315°)	APP	LIVE	BOAT
STM1	1.15	2.5	1															1.76	0.75	1.1
STM2	1.15			2.5	1													1.76	0.75	1.1
STM3	1.15					2.5	1											1.76	0.75	1.1
STM4	1.15							2.5	1									1.76	0.75	1.1
STM5	1.15									2.5	1							1.76	0.75	1.1
STM6	1.15											2.5	1					1.76	0.75	1.1
STM7	1.15													2.5	1			1.76	0.75	1.1
STM8	1.15															2.5	1	1.76	0.75	1.1

1.0,可知节点冲剪应力、平台尺寸可以满足规范要求。

1,说明结构满足疲劳设计要求,结构是安全可靠的。

表 4 代表节点最大位移

位置	工况组合	位移/mm		
		X	Y	Z
塔顶	STM1	549	0.1	8.6
桩顶	STM1	44.9	0.3	-0.18
泥面	STM3	4.47	1.8	-0.5

表 5 代表梁单元最大内力

位置	工况 组合	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ (kN·m <sup>-1</sup> )
水平支撑	STM1	24.8	0.18	-0.38
上部斜撑	STM1	-30.5	0.25	0
下部斜撑	STM1	-28.4	0.21	0
桩顶	STM1	669	0.79	1.85
泥面	STM3	2403	341	765

表 6 构件材料及长细比校核

位置	截面 尺寸	计算 长度/m	回转半径/ mm	长细比	长细比 允许值
顶柱	Ø114×8	2.50	37.6	66	150
斜撑	Ø60×4	2.63	19.8	133	150
底柱	Ø351×18	2.50	118	21	150
桩顶到泥面	Ø1400×20	29.70	490	61	150

4.4 疲劳分析

测风塔直接承受动力荷载往复作用,上部钢构件及大直径钢管桩的节点处存在一定的应力集中现象,需进行疲劳分析。参照《海上固定平台入级与建造规范》<sup>[2]</sup>,钢结构的疲劳分析采取  $S-N$  曲线。该曲线考虑了目前国内相关大型钢结构制作的工艺水平,并在结构疲劳计算过程中考虑 1.5 倍应力集中系数,评估测风塔上部结构及钢管桩基础关键节点部位累积疲劳损伤情况。计算中提取钢结构应力集中区域等关键部位的节点,包括上部构件变截面段、上部构件底部、钢管桩顶、钢管桩海床面附近等相关节点,计算其累积疲劳损伤情况,结果详见表 7。

从结果看,测风塔关键节点累积疲劳损伤远小于

表 7 关键部位疲劳损伤计算结果

关键部位	累积疲劳损伤比 $\sum Di$ (各部位最大值)
区域 A (上部构件变截面段)	0.08878
区域 B (上部构件底部)	0.02453
区域 C (钢管桩顶)	0.03465
区域 D (钢管桩海床面)	0.05662

5 结 语

对比该工程采用的两种行业规范的计算结果,发现均能满足相应规范要求,计算结论基本一致,说明该测风塔结构设计充分考虑了海洋工程的特点,计算分析选择了合理的设计荷载工况,结构受力合理。在关键节点位移方面,依据《港口工程地基规范》的计算值相对偏大,最大值幅值约在 4%,在桩顶位置位移差异较明显。

参考文献:

[1] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 港口工程地基规范, JTS 147-1-2010[S]. 北京:人民交通出版社,2010.

[2] American Petroleum Institute. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design[S]. 21st ed. ,2007.

[3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港水文规范 JTS 145-2-2013[S]. 北京:人民交通出版社,2010.

[4] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 港口工程荷载规范 JTS 147-1-2010[S]. 北京:人民交通出版社,2010.

[5] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范 GB 50010-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[6] 北京钢铁设计研究总院. 钢结构设计规范, GB50017-2003[S]. 北京:中国计划出版社,2003.

[7] 顾晓鲁,钱鸿缙,刘惠珊,汪时敏主编. 地基与基础(第三版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

[8] 杨树耕. 有限元分析软件 Ansys 在海洋工程中的应用[J]. 中国海洋平台,2000,(2):15-16.

[9] 海上采油工程手册.[M]. 北京:石油工业出版社,2001.

(编辑:郑毅)

另外,右岸电站由于属于南方电网,一旦直流系统出现故障切机,就会存在孤岛运行的危害。因此,根据电站孤岛运行的要求,必须从 110 kV 变电站的 10 kV 母线新增一回 10 kV 电缆线路至右岸的厂用电 15 段母线,以作为右岸电站孤岛运行的备用电源。

## 5 后续永久厂用电设计的几点建议

(1) 由于后续电站仍就分属云南和四川两省,电源将分别送往不同的 2 个电网,因此在设计厂用电时,必须充分考虑到 2 个电网的特点,完善孤岛运行供电方案,且在施工前期就必须先行考虑到各种状态下的供电可靠性。

(2) 充分利用已经建成的施工期电网,除利用其

作为电站备用电源外,为了节省投资,还应利用其完善的构架和网络以及各种箱式变电站,以满足永久照明和永久水厂等的供电要求。

(3) 充分利用施工期 110 kV 变电站和 35 kV 变电站,特别是 35 kV 的跨江线路,以节省改造费用;同时,还应合理利用原有资源,除了必要的改造以外,应尽量利用原有变压器和开关柜。

(4) 由于厂用电和备用电源保护非常复杂和繁琐,存在第一、第二,甚至第三备用电源投入的问题,因此,在设计厂用电和备用电源时,应充分考虑永久电源和施工期电源的结合和利用,尽量简化备用电源的数量,合理设计柴油发电机的容量。

(编辑:赵秋云)

## Discussion on optimization of temporary and permanent power supply and distribution system of Xiluodu Hydropower Station

YU Wenqiu, JIN Kun, TANG Dunhao

(Electrical and Mechanical Engineering Department, China Three Gorges Corporation, Chengdu 610042, China)

**Abstract:** The design and planning of the permanent plant auxiliary power system of Xiluodu Hydropower Station and the constitution and layout of the temporary power supply system in construction period were systematically introduced. According to the characteristics of the power supply system of Xiluodu Hydropower Station, the optimization scheme for mutual utilization between the permanent plant auxiliary power generation and the temporary power supply in construction period were summarized in terms of the renovation of the 110kV substation, the standby power supply of underground powerhouses at the left and right bank. The suggestions on the follow-up design and the planning of the permanent plant auxiliary power system were summed up and put forward, which affords reference for design and construction of plant auxiliary power system of other large-scale hydropower stations.

**Key words:** temporary power system in construction period; permanent plant auxiliary power system; optimization scheme of power supply and distribution; Xiluodu Hydropower Station

(上接第 12 页)

## Analysis of offshore anemometer tower in deep water by finite element method

ZHOU Ying, WU Haiming, QI Zhicheng

(PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

**Abstract:** In China, there is no technical standard for the engineering design of wind measurement tower in deep sea water with complicated engineering condition. To ensure the safety and reliability of anemometer tower of offshore wind power plants, general FEM software is employed to analyze the structural stress of anemometer tower under the guidance of Chinese Technical Standard for Port Engineering firstly; then a professional marine structure FEM software is employed to conduct the structure analysis for the anemometer tower based on the APIRP 2A, a USA petroleum industry standard. The structure analysis work consists of multiple designed loading, multiple cases, key nodes displacement, element internal force and fatigue analysis. The two calculation results show consistence and both satisfy the relevant requirements specified in the technical standards. The parameters adopted in design are reasonable and the experience in the design of this project can provide reference for the design and construction of similar offshore wind power plants in future.

**Key words:** anemometer towers; wind farm; fatigue analysis; offshore wind projects