

海上测风塔整体耦合风荷载计算

李聪, 马兆荣, 刘晋超, 刘东华

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州, 510663)

摘要: 风荷载是海上测风塔受到的主要荷载之一, 其设计取值与测风塔的安全性、经济性密切相关。测风塔风荷载通常根据《建筑结构荷载规范》建立单独上部模型进行分析。为了更加真实地模拟测风塔风荷载, 采用了测风塔上、下部整体耦合模型, 通过数值方法进行分析, 并与通常采用的规范估算方法进行对比。针对风荷载与结构自振频率之间的相互影响关系, 提出了迭代求解风振系数的方法。通过对比分析计算, 发现数值计算得出的风荷载量值比相同输入条件下规范法计算的结果小 6%~26%。

关键词: 海上测风塔; 风荷载; 耦合分析; 地基刚度; 模态分析

中图分类号: TK81

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0086-05

Full-coupled Wind Load Calculation of Offshore Wind Measurement Mast

LI Cong, MA Zhaorong, LIU Jinchao, LIU Donghua

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Wind load is one of the dominating loads for offshore wind measurement mast, whose applied amount relates closely to safety and economical efficiency. A traditional wind load model includes merely an isolated upper mast, and calculation is based on the standard of *Load Code for the Design of Building Structures*. To give a better simulation of wind load, a full-coupled model containing both the upper mast and lower foundation was built for numerical analysis, then a comparison with code method was made. To deal with the close loop relationship between wind load and natural frequency, iteration was introduced to solve for wind vibration coefficient. Through comparison, it was found that with identical input, wind load calculated by numerical method is 6%~26% smaller than those from code method.

Key words: offshore wind measurement mast; wind load; coupled analysis; foundation stiffness; mode analysis

为获取海上风电场风能资源, 以便为风电场建设条件评估提供准确数据, 通常在场址中需要树立 1 座不小于 100 m 高的测风塔^[1]。塔架的使用年限一般为 3~5 年^[2], 属于临时结构, 在设计中既要保证安全性, 又要避免过度保守。由于风荷载是海上测风塔承受的主要荷载, 故对其进行准确计算是测风塔结构设计中的一个重要环节^[3]。

通常海上测风塔计算是根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》(以下简称建规)对上部塔架单独计算风荷载^[4-6], 但完整的测风塔应包括: 桩基、支撑结构和上部塔架, 而随着水深的增加, 下

部支撑结构的刚度及阻尼对上部塔架的分析影响较大。本文建议利用海工专用软件 SACS, 进行整体耦合分析。整体结构模型如图 1 所示, 其中虚线三角形为泥面, 包含泥面以下的桩基部分。

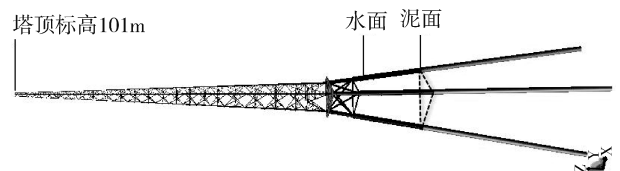


图 1 计算模型

Fig. 1 Model for Calculation

1 风压计算

建规中规定风荷载标准值 w_k 按下式计算^[7]:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

式中: β_z 为高度 z 处的风振系数; μ_s 为各塔段的风荷载体型系数; μ_z 为对应高度的风压高度变化系数; w_0 为基本风压, kN/m^2 。

基本风压可按以下两种方法确定, 取较小值:

1) 根据测风塔附近海域海面上方 10 m 处实测统计意义上的 50 年一遇风速值 v_0 进行换算:

$$w_0 = v_0^2 / 1600 \quad (2)$$

2) 根据建规附图 E. 6. 3 全国基本风压分布图选取, 并考虑测风塔距离海岸的距离进行调整。

SACS 自动对水面以上的构件以及用户定义的受风面积计算风荷载, 各构件或受风面积上的风压 p 按下式计算:

$$p = 0.00338V^2C_hC_s \quad (3)$$

式中: V 为构件处的风速, 由相应高度处的风切变函数值得到; C_h 为高度系数, 仅当使用 ABS 规范时存在; C_s 为形状系数, 对圆管取 0.5, 对其他构件和平面取 1.5; 系数 0.00338 对参数单位制和空气密度进行了考虑。

1.1 体型系数

不同的上部塔架设计体型系数取值均不同, 且具有一定随意性^[8-10], 建规按挡风系数 φ 查表插值得到单角钢塔的体型系数 μ_s 。其中 $\varphi = A_n/A$, A_n 为塔架杆件和节点的挡风净投影面积, A 为塔架的轮廓面积。

计算时, 投影面积均按迎风的一个塔面计算, 而建规要求对于三角形截面的塔架, 考虑如图 2 所示的三个风荷载作用方向:

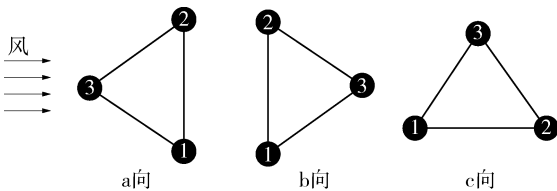


图 2 风荷载施加方向

Fig. 2 Direction of Wind Load

三个方向上迎风面塔架构件的投影面积均不相同。

对于由钢管和角钢共同构成的塔架, 需依据各塔段参数 $\mu_z \cdot w_0 d^2$ 的大小作一定修正。SACS 中对每一个构件分别采用形状系数, 更加准确。

1.2 风切变

风速沿高度分布方面, SACS 依据 API 规范, 有:

$$V_z = V_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^{\frac{1}{XX}} \quad (4)$$

式中: V_z 为构件处的风速; V_r 为参考高度处的风速; z 为构件所处位置相对于海面的高度; z_r 为参考高度相对于海面的距离, 取 10 m; XX 是控制风速分布曲线形状的参数, 计算中该参数设置为 AP08, 即 $XX=8$ 。

建规中的风压高度变化系数 μ_z 取决于气流流场下表面的粗糙度, 用于将参考高度处的基本风压修正为计算高度处的基本风压。风速剖面表达式为:

$$v_z = v_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (5)$$

本工程中的地面粗糙度分类属于最光滑的 A 类, 即近海海面和海岛、海面、湖岸及沙漠地区, 指数 α 应取为 0.12。对 0.12 取倒数, 即 $1/0.12 \approx 8.33$, 可见与式(4)中的 $XX=8$ 相当接近, 可认为 SACS 与建规在风速沿高度分布上的考虑基本一致。

1.3 风振系数

建规中规定对于基本自振周期 T_1 大于 0.25 s 的各种高耸结构, 应考虑风压脉动对结构产生顺风向风振的影响。测风塔属于一般高耸钢结构, 基本自振周期可以按 $0.013H$ 估算, 若计算高度为 100 m, 则 T_1 约为 1.3 s, 属于应考虑顺风向风振的范畴。对于塔架这类一般竖向悬臂型结构, 可仅考虑结构第一振型的影响。

由式(3)可见, SACS 的风荷载计算没有考虑风振, 得出的结果偏危险。对此, 可按照建规详细计算风振系数, 并对 SACS 海况文件的风荷载输入进行修正。

风振系数计算的参数关系如图 3 所示。由图 3 可见, 各计算高度处的风振系数大小与结构的 1 阶自振频率有关。

2 风荷载计算

风压计算的最终目的是得到风荷载, SACS 海况文件的输入修正方式也需要依据风荷载计算原理确定。

SACS 认为风荷载垂直于构件或受风面积, 具体按下式计算:

$$F = pA \sin \alpha \quad (6)$$

式中: A 为受风面积或构件在荷载方向上的投影面积; α 为风向与构件轴线或受风面积之间的夹角。

对于圆截面的构件, 程序认为风荷载与风向相同。SACS 对风荷载的计算具体到每个构件和受风面积。

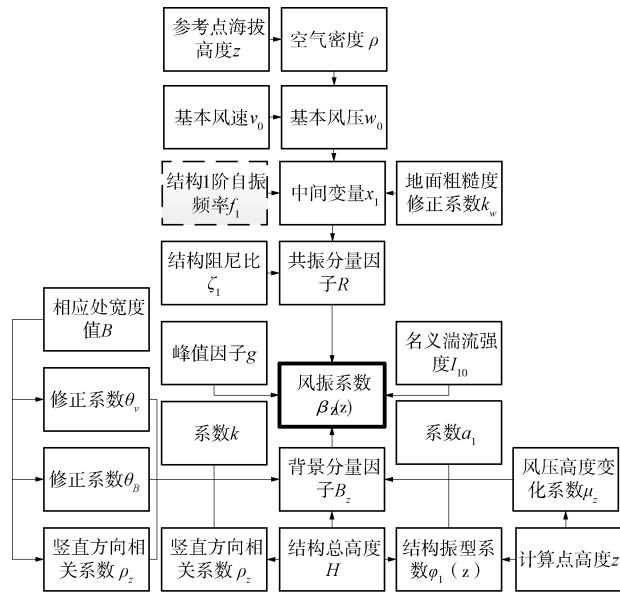


图3 风振系数计算流程

Fig. 3 Calculation of Wind Vibration Coefficient

建规中风荷载的算法是用风压标准值 w_k 乘以塔架迎风面的投影面积，思路与程序相似。但由于是分塔段整体估算，结果往往偏于保守。

2.1 SACS 输入修正

在建规和 SACS 计算风压的公式中，风速均以平方项的形式出现。由于风速是海况文件 WIND 卡片中控制风荷载的最有效参数，因此为了使 SACS 计算的风压值包含风振的影响，可将输入风速乘以风振系数的开方。

在进行具体的模态分析之前，先假定测风塔的 1 阶自振频率按 $0.013H$ 估算，得到 $1.26s$ 。以极端高水位、极端风速的情况为例，得到风振系数沿高度的分布如图 4 所示：

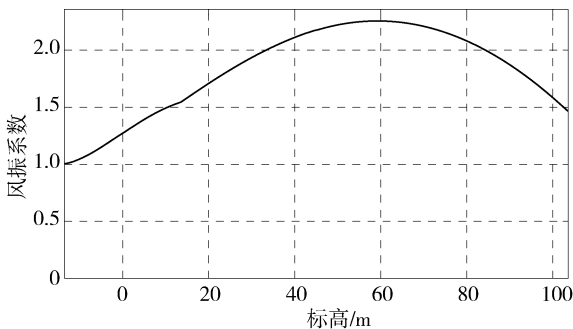


图4 风振系数沿高度分布

Fig. 4 Distribution of Wind Vibration Coefficient Along Height

SACS 中风场整体的风速大小只能由参考高度处的风速控制，沿高度方向的速度分布由 (4) 式决

定。为了在计算总的基础剪力时体现风振系数沿高度的变化，应通过加权平均法计算风振系数对水面处的平均值。在某一高度处，风荷载与该处的风速平方 V_i^2 、受风面积成正比。假定各高度处的受风面积与该处的宽度 B_i 成正比，则平均风振系数 $\bar{\beta}_z$ 的计算公式如下：

$$\bar{\beta}_z = \frac{\sum \beta_{zi} B_i V_i^2}{\sum B_i V_i^2} \quad (7)$$

式中： B_i 的插值点为水面向上以 1m 为步长，直至塔顶； V_i 由式(4)计算。

2.2 风荷载与结构自振周期的相互影响

桩顶位移与水平荷载之间的关系普遍如图 5 所示^[11]：

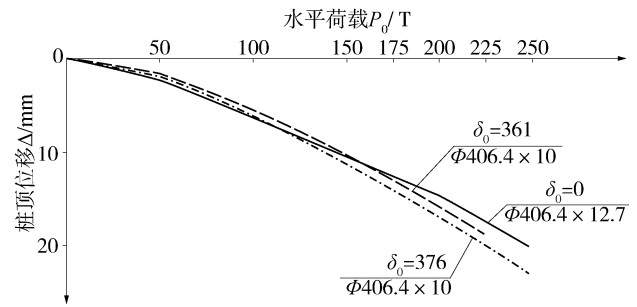


图5 桩顶位移与水平荷载的关系

Fig. 5 Relationship between Pile Head Displacement and Horizontal Load

可见，桩基础在受到水平荷载的作用时，桩顶位移曲线随着荷载增大逐渐变陡，刚度变小，从而导致桩基对测风塔基础和上部塔架整体的约束作用弱化，自振频率降低。从前面的分析可知，若输入风速偏小，地基荷载将偏小，刚度偏大，得出的自振频率偏大，则风振系数偏大，使下一步计算的风速偏大。故风荷载和结构自振周期之间的关系是双向的，且具备迭代收敛的条件。计算流程见图 6：

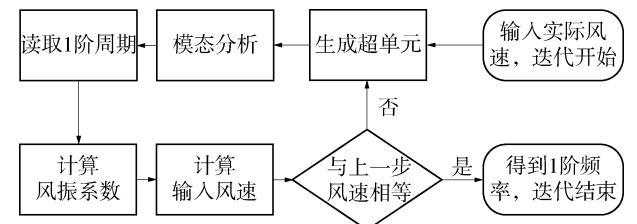


图6 1 阶周期迭代过程

Fig. 6 Iteration for Natural Frequency

第一步迭代中认为风振系数为 1，直接用实际

风速加载, 软件根据结构所承受的荷载计算泥面处桩头各自由度上的位移, 从而将非线性的桩土相互作用线性化为桩头刚度矩阵, 即生成超单元。结构整体的模态分析在地基超单元的约束下进行, 得到该荷载水平下的1阶自振周期, 用于平均风振系数的计算。

计算经平均风振系数修正的输入风速值, 重新对结构加载, 反复迭代计算。迭代的结束条件是后一步计算得出的修正风速与前一步相同, 对输入风速相等的判断精度为 ± 0.1 m/s, 达到风荷载与结构自振周期之间的闭环吻合。

某工程极端工况的风速为40 m/s, 各迭代步参数见表1, 自振周期的迭代收敛情况见图7。

可见, 在当前的收敛精度标准下, 只需要3步迭代即可得到稳定的自振频率值。收敛值1.38 s与由经验公式计算的1.26 s之间存在一定差距, 应以实际结构的计算值作为计算输入。

表1 1阶周期迭代参数

Table 1 Parameters in Natural Frequency Iteration

迭代步	一阶周期/s	输入风速/(m/s)	平均风振系数
1	1.262 5	40.0	1.00
2	1.379 7	56.9	2.02
3	1.379 5	56.9	2.02

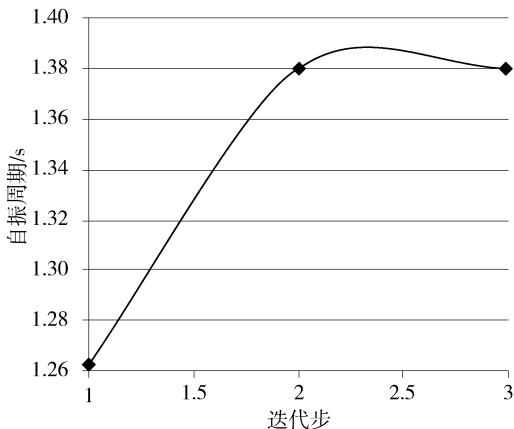


图7 1阶周期迭代收敛情况

Fig. 7 Convergence of Natural Frequency Iteration

迭代结果反映该实际风速下与结构、桩基相适应的平均风振系数。

从结构的动力特性角度来看, 风振系数的计算方式分为考虑下部结构和不考虑下部结构两种。若不考虑下部结构, 结构的总高度降低, 模型自振周

期变小, 频率增大, 脉动风荷载的共振分量因子 R 减小, 导致计算得出的顺风向风振系数偏小, 风荷载考虑偏于危险。

根据建规, 单独考虑上部塔架, 平均风振系数取值为1.7, 小于迭代得到的2.02。

3 计算结果对比

风荷载施加方向的定义参照图2。根据软件计算结果, 1号腿和2号腿的最危险工况是极端高水位+极端c向风, 3号腿的最危险工况是极端高水位+极端b向风, 计算结果对比见表2。

表中 F_x 和 F_y 的正方向参考图1中的坐标轴, F_z 正值表示拉力, 负值表示压力。三腿上的荷载方向和大小均有较好的对应关系, 各分量的计算结果均较建规方法有不同程度的减小。相对误差是SACS结果相对于建规结果的相对偏差百分比。虽然风振系数取值大于建规方法、风速沿高度的分布相似, 程序计算的风荷载仍较建规结果小6%到26%, 可见在考虑同样的风速对基本风压的影响、风振系数、结构体型系数、风压随高度变化的情况下, 建规公式体系会得出较为保守的结果。

表2 计算结果对比

Table 2 Comparison of Calculation Result

腿号	F_x /kN	F_y /kN	F_z /kN
建规-1	231.78	93.68	2 245.74
SACS-1	208.68	75.51	2 114.29
相对误差	-10%	-19%	-6%
建规-2	265.88	-113.37	-2 919.82
SACS-2	232.16	-89.39	-2 458.41
相对误差	-13%	-21%	-16%
建规-3	0.00	374.41	-3 765.05
SACS-3	-0.23	280.99	-2 803.66
相对误差	—	-25%	-26%

极端b向风时荷载和结构形式均关于3号腿对称, 故建规计算中3号腿的 F_x 荷载分量为零。而数值模型中由于塔架节点坐标值精度的原因, 该荷载分量近似为零。

4 结论

1) SACS计算风压值需要人为补充风振系数的影响, 但对形状系数的考虑细化到每个构件, 风速沿高度分布规律及基本风压考虑因素与建规相似。

2)风振系数由结构的1阶自振频率等众多属性参数共同决定,且随着计算点高度的变化有不同取值。文中按基础剪力作用求加权平均值,用于SACS输入风速的修正。

3)风荷载和结构自振频率在桩土作用非线性条件下具有相互影响的关系,可采用迭代法求解控制工况下的平均风振系数,迭代过程具有良好的收敛性。

4)程序计算得出的平均风振系数偏于安全,但由于构件体型系数和局部风速的计算更加细致,风荷载计算结果仍相对于建规方法降低6%~26%。

参考文献:

- [1] 邢占清,杨锋,赵卫全.响水风电场海上测风塔设计与施工[J].水利水电技术,2009,40(3):81-87.
XING Zhanqing, YANG Feng, ZHAO Weiquan. Design and Construction of Offshore Anemometer Tower for Xiangshui Wind Farm [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(3): 81-87.
- [2] 郝俊涛,朱庆东.海上测风塔上部结构设计[J].武汉大学学报(工学版),2010,43(增刊):115-117.
HAO Juntao, ZHU Qingdong. Superstructural Design of a Tower for Wind Measurement on Sea [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(Supp): 115-117.
- [3] 吴继亮,刘超.海上测风塔塔架设计的关键点分析[J].钢结构,2013,28(3):47-50.
WU Jiliang, LIU Chao. Analysis of the Key Points of Tower Designing for the Offshore Anemometer Tower [J]. Steel Construction, 2013, 28(3): 47-50.
- [4] 王淼,杨朝辉,祝亮,等.浅海沙洲地区海上测风塔基础设计与施工研究[J].太阳能学报,2013,30(4):586-590.
WANG Miao, YANG Zhaohui, ZHU Liang, et al. Study of Foundation Design and Construction of Offshore Anemometer Tower in Shallow Sandbar Area [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 30(4): 586-590.
- [5] 李近元,张吉,王淼,等.南日岛海域海上自立型测风塔设计施工技术探讨[J].海洋科学,2013,37(2):95-100.
LI Jinyuan, ZHANG Ji, WANG Miao, et al. Investigation of Design and Construction Technology of Offshore Anemometer Tower in the Vicinity of Nanri Island [J]. Marine Science, 2013, 37(2): 95-100.
- [6] 郑杰.黄海海域某海上测风塔工程设计[J].中国高新技术企业,2014(25):9-15.
- [7] GB 50009—2012,建筑结构荷载规范[S].
- [8] 唐东洋,万庆宇,张蓉,等.钢质平台海上测风塔基础结构及稳定性分析[J].船海工程,2013,42(5):171-175.
TANG Dongyang, WAN Qingyu, ZHANG Rong, et al. Analysis of Strength and Stability of the Steel Platform Offshore Wind Tower Foundation [J]. Ship & Ocean Engineering, 2013, 42(5): 171-175.
- [9] 王淼,张曦文,吴涛,等.潮间带地区海上测风塔基础的设计与施工[J].施工技术,2013,45(增刊):412-415.
WANG Miao, ZHANG Xiwen, WU Tao, et al. Design and Construction of Offshore Anemometer Tower Foundation in Shallow Sandbar Area [J]. Construction Technology, 2013, 42(Supp): 412-415.
- [10] 李海波,周卫,郭俊玲.北方海域海上测风塔设计与施工[J].风能,2011(10):70-74.
- [11] 李国豪.关于桩的水平位移、内力和承载力的分析[J].上海力学,1980(1):1-10.
LI Guohao. Analysis of Horizontal Displacements, Internal Forces and Load-carrying Capacity of Piles [J]. Shanghai Mechanics, 1980(1): 1-10.

(责任编辑 高春萌)

订 阅

《南方能源建设》的办刊宗旨立足于为能源行业尤其是电力行业工程建设提供技术支持和信息服务,推广新理论、新技术的工程应用,提高我国能源建设质量和技术水平。主要面向全国能源行业尤其是电力行业设计、建设、制造等企业、以及相关的研究机构 and 高等院校的广大工程技术人员、管理人员、专家学者等。本刊设有能源资讯、专家论坛、规划咨询、勘测设计、施工建设、装备制造、工程管理、投资运营、运行维护、案例分析、简讯、特约评论和特约专稿等栏目,将优先报道低碳环保、节能减排等技术研究和工程应用以及风能、太阳能、生物质能、海洋能等可再生能源的技术研究及工程建设。

出版周期:季刊(季末25号) 订阅年价:60元
国内刊号:CN 44-1715/TK 国际刊号:ISSN 2095-8676
联系电话:020-3211683 传真:020-32117518
期刊网站: <http://nynf.cbpt.cnki.net>