# 张力腿式风电机组基础设计的挑战

### 杜宇

(上海东海风力发电有限公司 上海 200433)

摘要:文章通过总结我国首座在规划漂浮式风电场的张力腿式风电机组选型设计所遇到的技术挑战,详细探讨了海上风电张力腿式基础的总体设计、mathieu 不稳定性分析、非线性耦合动力学分析以及开发张力筋腱及其连接装置遇到的困难,并提出相对应的解决方案,可为海上风电机组张力腿式基础设计提供参考。

关键词:张力腿式风电机组;Mathieu 不稳定性;参数振动;非线性耦合;张力筋腱

0 引言

随着海上风资源开发迈向远海区域,漂浮式风 电技术日益成为海上风电行业关注的焦点。目前, 借鉴海上石油开发经验,3种主流的漂浮式基础形 式:半潜式(Semi-submersible),立柱式(Spar)和张 力腿式(TLP)广泛使用在漂浮式风电设计研究中。

研究表明<sup>[1]</sup>,张力腿式风电机组可适应于中、浅 水深条件,单台机组所占用的海域面积也最小,由 于其3个垂向自由度的运动响应极小近乎于固定, 因此具有非常优良的运动性能<sup>[2]</sup>。

目前,工业界已完成了多种形式的张力腿式风 电基础的概念设计,主要可分为多立柱式和单立柱 式两类。荷兰的 Blue H 公司针对大于 50 m 水深 条件,完成了满足装机容量 5~7 MW 风机的张力 腿式基础的设计,平台采用三立柱形式设计,每根 立柱下部连接张力筋腱,并于 2007 年完成了一台试 验机型的安装运行<sup>[3]</sup>。PelaStar<sup>[4]</sup>是单立柱张力腿 式风电机组的典型代表。用于支撑风机塔架的基 础结构由一根立柱下沉至水面以下,3 根延伸腿水 平地安装在立柱底部,延伸腿的外端与锚固海底的 张力筋腱相连。

学术界借鉴海洋石油平台相关技术,对张力腿 式风电机组的载荷计算<sup>[5]</sup>、支撑结构分析<sup>[6]</sup>和动力 学分析方法[7]进行了大量研究。

我国首座规划的漂浮式风电场(水平轴风电机 组)拟考虑采用张力腿式风电机组的技术路线,本 文总结了相关前期研究中张力腿式基础设计所遇 到的诸多挑战。

#### 1 总体设计的挑战

漂浮式结构的主要设计思想是尽量使浮体运动的自振频率避开波浪能量集中的频率范围。传统的张力腿式海洋石油平台的总体设计主要考虑 增大张力筋腱的刚度来增加平台3个垂向自由度的 自振频率,以远离一阶波浪频率以及二阶波浪的高 频范围,避免共振。

对于张力腿式风电机组,由于其水深一般远小 于张力腿石油平台所在的水域(大于 800 m 水深), 张力筋腱的刚度 K 会随着张力筋腱长度 L 的减小 而增加。

$$K = \frac{EA}{L} \tag{1}$$

式中:E 为材料的弹性模量;A 为筋腱的截面积。

通常对于水深 100 m 以内的张力腿式风电机 组来说,3个垂向自由度的自振频率可达 0.3 Hz 以 上,甚至高于 1 Hz。因此,张力腿式风电机组的设 计不会受到太多张力腿式石油平台所受到的困扰, 如弹振和颤振问题。

14

然而,也正是由于张力腿式风电机组服务的水 域较浅,其水平方向的3个自由度的自振频率,如纵 荡方向将更加靠近一阶波浪频率范围。

$$\omega_{11} = \pi \sqrt{\frac{T}{L^2 (m + m_a)}} \tag{2}$$

式中:T为张力筋腱预张力;m为平台整体重量;m<sub>a</sub>为附加质量。

对于 40 m 水深海域的张力腿式风电机组的自振频率甚至可以达到 0.08~0.1 Hz,与波浪一阶频率范围重叠。因此,对于水深不够理想(过浅)的水域,可以考虑将张力筋腱的上锚点尽可能的上移(图 1)以增加张力筋腱的长度 L,降低浮体的自振频率。



图 1 上锚点上移的张力腿式风电机组设计

对于我国较为典型的近海水域(40~50 m 水深 条件)即使匹配上锚点上移方案,浮体的整体自振 周期依然可能接近 20 s,依然存在较大的慢漂共振 的风险。因此,准确评估漂浮式风电机组整体的阻 尼(包括水动力学阻尼和空气动力学阻尼)就显得 非常重要。

上锚点上移也会带来结构稳定性的风险。在 张力腿式风机系统中,浮力等于张力筋腱的拉力及 上部载荷之和。由于浮体系统的频率设计需要,浮 力往往远大于上部风机载荷。如图2所示,若上锚 点上移,浮体底部至上锚点位置之间的筒体结构所 受的挤压力将等于浮力。由于浮力较大,这部分直 接受到浮力挤压的筒体可能出现屈曲稳定性的挑



图 2 浮体受力

战,在设计时要特别注意。

## 2 Mathieu 不稳定性问题

当运动方程的参数呈周期性变化时,如式(3) 中系数 k(t),物体可能出现参数振动的情况,进而 使得动力学系统的时域解发散,这类问题属于 Mathieu 不稳定性问题<sup>[8]</sup>。

$$mx'' + bx' + k(t)x = F(t)$$
(3)

张力腿式风电机组受到风浪荷载作用产生沿 水平方向的偏移,同时会出现平台整体下沉的情况 (图 3)。在这个过程中,张力筋腱的张力会随着平 台的升沉发生周期性变化,而张力腿平台的水平运 动(纵荡或横荡)方程中的 k(t)也会发生周期性变 化,从而激励参数振动。



图 3 张力筋腱受力

相关文献<sup>[9]</sup>将张力腿平台纵荡(横荡)方向运动 学方程中的弹性系数 k(t)转化为一个定常值 k<sub>0</sub>与 一个周期变化值 k<sub>0</sub>.g(t)的和。

$$k(t) = k_0 + k_0 \cdot g(t)$$
 (4)

$$k_{0} = \int_{0}^{T} k(t) dt$$
 (5)

之后,纵荡(横荡)方向的运动学方程变为:

$$(m+m_a)x''+b\dot{x}'+k_0(1+g(t))x=F(t)$$
(6)

式中:b为运动系统的阻尼;F(t)为系统的激振力。 g(t)是非常难以表达的<sup>[9]</sup>,尤其是对于水深较浅的 情况。平台的参数运动响应将不仅与g(t)的最大 值、最小值和平均值有关,也随着 g(t)的时历曲线 的不同而不同。因此,在参数振动的求解中一种研 究思路便是寻求找到系统最为恶劣的运动响应。

相关文献<sup>[9]</sup>使用 Pontragin Maximum Principle 方法给出了张力腿平台参数振动时 x(t) 的最大 幅值:

$$a = \frac{3}{8\lambda_{q}\omega^{2}} \left[ K_{\max} - K_{\min} - \pi \lambda_{l}\omega \right]$$
(7)

式中: $\lambda_1$ 为系统线性阻尼: $\lambda_q$ 为系统平方阻尼: $K_{max}$ 为k(t)最大值; $K_{\min}$ 为k(t)最小值; $\omega$ 为激励频率。 对于随机波浪,由于海洋随机波浪是窄频,可以考 虑用波能谱峰频率来代替ω。

除了张力腿平台的浮体运动会出现 Mathieu 不 稳定性的问题,张力筋腱本身也会出现 Mathieu 不 稳定性问题。但由于张力腿式风电机组的筋腱较 短,其筋腱本身的 Mathieu 不稳定性问题会较张力 腿式石油平台筋腱缓和很多。如果需要分析,可参 考文献[10]所做的分析,同样适用于张力腿式风电 机组的筋腱分析。

非线性耦合方法的响应预报 3

在研究张力腿石油平台的浮体运动响应和张 力筋腱张力预报时可以使用非线性耦合方法进行 预报<sup>[11]</sup>,浮体运动的运动学系统是非线性的。其非 线性主要体现在刚度矩阵的非线性上。对于6个自 由度的张力腿式平台的浮体动力学方程,忽略水动 力黏性阻尼部分,考虑系统的附加质量和辐射阻尼 可用平台所受的辐射波波浪力来表达,并为总波浪 力 $\{F(t)\}$ 的一部分,[M]为浮体 6 个自由度运动的 质量矩阵, $\{X\}$ 为浮体 6 个自由度上的运动响应的 向量写法,则运动学方程可以表达为:

> $\lceil M \rceil \{X''\} + \lceil K \rceil \{X\}$ )

分析[11]可知,刚度矩阵:

$$\begin{bmatrix} K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & 0 & 0 & K_{36} \\ 0 & K_{42} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ K_{51} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix}$$
(9)

非 0 项中,除  $K_{33}$ 以外均为位移 {X}的函数,项 [K]  $\{X\}$ 则为 $\{X\}$ 的非线性函数,这也是非线性耦合分 析法中非线性的来源。

而该方法中的耦合是指在动力学分析过程中 不同自由度之间的耦合,这主要是由于「K ]矩阵中 存在的非零对角线元素。如,当平台受到水平激振 力之后,会出现纵荡响应 X11,但是由于 K31这个系 数,纵荡 X11同时会引起垂荡自由度上的运动响应。 图 3 显示了这种运动,平台整体出现水平位移的同 时会伴随着平台下沉的运动。

所以,使用非线性耦合方法进行仿真时,纵荡 方向上的运动会首先进行计算,并假设平台先发生 水平平移(如图4平台由浅色方框位置水平移动到 粗线方框位置)。在这个过程中张力筋腱会伸长。 由于张力筋腱的刚度非常大(远大于浮力所产生的 静水回复力等效的刚度),因此张力筋腱伸长所产 生的张力增量使平台向下拉,产生下沉运动(图4由 粗线方框位置垂向移动到黑色方框位置)。到达新 的位置后,之前过程(由浅色框到粗线框过程)所产 生的张力筋腱的伸长几乎全部消失,这也是 AQWA 等软件在处理张力筋腱时认为其不伸长的一个 原因。



图 4 纵荡、垂荡耦合

然而这个过程却可能对服务于浅水水域的张

$$= \{F(t)\} \tag{8}$$

力腿式风电机组带来较大的误差。在计算纵荡自 由度的运动时,系统的总回复力由两部分组成,一 个是张力筋腱预张力 T。在水平方向的分量;另一部 分便是张力筋腱的伸长量所产生的张力增量  $\Delta T$  的 水平分量。对于所在海域水深 40 m 左右,承载 4MW 机型的 4 腿张力腿平台,单根张力筋腱的预 张力可达5000~6000t, 而张力筋腱的张力增量在 筋腱倾斜角度为10度时(假设不发生下沉),达到近 130 000 t(理论值,实际不会达到因为下沉作用会使 这个值降低),两者可相差近两个数量级。而在使 用非线性耦合的方法进行时域模拟时,每一时刻都 需要进行纵荡和垂荡的耦合。计算机在这个过程 中是数值处理,先在纵荡的过程中增加一个张力增 量,再在垂荡过程中抵消掉张力增量,由于这个增 量与预张力相比存在数量级上的差异,因此计算机 的计算可能会在每一时刻都保留一定的误差,并不 断累计。因此,对于使用非线性耦合方法进行张力 腿运动学和张力筋腱张力预报时,要特别注意数值 处理程序部分是否可能带来较大误差的风险(每一 步计算的数据是否保留了足够的精度)。

4 张力筋腱及其连接装置的开发

张力腿石油平台所使用的张力筋腱及其连接 装置是海洋工程领域的关键设备,一般是使用钢管 复合材料作为张力筋腱,筋腱的两端通过可以任意 方向摆动的球角接头与海底和平台上的连接装置 相连接,既可以维持筋腱的张力,也可以保证张力 腿平台水平方向3个自由度的运动。

然而,由于水深条件、安装方式、造价成本等方 面的区别,张力腿石油平台上使用的筋腱及其连接 装置一般不被张力腿式风电机组所考虑。目前,国 内外尚未有完全经过样机验证的适用于张力腿式 风电机组的成套张力筋腱及其连接装置,其开发难 度也是张力腿式风电机组技术推广和开发的重要 制约。

目前,国外的一些张力腿式风电机组的概念设 计采用了柔性张力筋腱的方案,主要是考虑使用纤 维绳类制品或钢丝类制品作为筋腱选型材料。然 而,各种方案也存在诸如防腐、抗蠕变、抗磨损、抗 剪能力以及夹具开发等方面的挑战。同时,与筋腱 所匹配的连接装置的开发也需要考虑安装友好性、耐久性、海底环境适应性和服役期更换施工方便性 等方面的影响。由于张力筋腱及其连接装置的开 发存在相当大的挑战,采用张力腿风电技术路线的 海上风电场开发的前期一定要对开发难度进行 把握。

5 结论

张力腿式风电是一种性能优良的漂浮式风电 型式,具有运动性能出众,占用水域小等优势。然 而,张力腿式风电的设计依然存在挑战。

(1)对于中、浅水深条件,张力腿平台的水平自 由度的自振频率会非常靠近波浪能量集中地频率 范围,出现较为明显的共振,这也要求设计师去思 考如何减小共振并对张力腿风电机组的整体阻尼 要有相当精准的把握和判断。

(2)与张力腿石油平台类似,张力腿式风电也 存在 Mathieu 不稳定性问题,由于水深更浅其不稳 定性的影响甚至会更为恶劣。目前,准确预报参数 平台参数振动的幅值较为困难,设计师可通过估算 最为保守的参数振动幅值来判断 Mathieu 不稳定性 对平台造成的影响。

(3)在海洋石油领域,张力腿式平台的动力学 分析可以用非线性耦合的方法进行预报。然而,张 力腿式风电由于所在海域的水深较小,在数值处理 非线性耦合预报时很可能会引入较大的误差,并在 时域模拟过程中不断累积,应特别注意数值方法中 的误差处理。

(4)开发适用于张力腿式风电专用的张力筋腱 及其连接装置是降低张力腿式风电成本的重要途 径,也是大规模推广张力腿式风电的最大的障碍。 到目前为止,国际几家知名公司设计的张力腿式风 电均使用了创新的、不同于海洋石油领域的张力筋 腱和连接装置。然而,由于没有原型样机的布置, 这些创新设计的潜在风险并不能完全排查,给设计 师的选型工作带来了较大的挑战。

#### 参考文献

[1] Bachynski E E, Moan T. Design considerations for tension leg platform wind turbines[J]. Marine Structures, 2012, 29(1):89 -114.

18

- [2] C M Wang, T Utsunomiya, S C Wee, et al. Research on floating wind turbines: a literature survey [J]. Ies Journal Part A Civil & Structural Engineering, 2010, 3(4):267-277.
- [3] European Wind Energy Association.2013 Deep water: the next step for offshore wind energy
- [4] Vita L, Ramachandran G K V, Krieger A, et al. Comparison of Numerical Models and Verification Against Experimental Data, Using Pelastar TLP Concept[C]// ASME 2015, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2015; V009T09A047.
- [5] Matha D, Fischer T, Kuhn M, et al. Model Development and Loads Analysis of a Wind Turbine on a Floating Offshore Tension Leg Platform[J].2010.
- [6] Henderson A R, Argyriadis K, Nichols J, et al. OFFSHORE WIND TURBINES ON TLPS-ASSESSMENT OF FLOATING

SUPPORT STRUCTURES FOR OFFSHORE WIND FARMS IN GERMAN WATERS[C]// Dewek -, German Wind Energy Conference.2010.

- Bae Y H,Kim M H.Rotor-floater-mooring coupled dynamic analysis of mono-column-TLP-type FOWT(Floating Offshore Wind Turbine) [J]. Korean Journal of Sport Biomechanics, 2011,1(1):95-111.
- [8] 王俊荣,谢彬.深水半潜式平台 Mathieu 不稳定问题研究[J].工 程力学,2012,29(10):347-353.
- [9] Patel M H, Witz J A.Compliant offshore structures[J].1991.
- [10] Patel M H, Park H I. Dynamics of tension leg platform tethers at low tension. Part I-Mathieu stability at large parameters
   [J].Marine Structures, 1991, 4(3):257-273.
- [11] Jain A K.Nonlinear coupled response of offshore tension leg platforms to regular wave forces [J]. Ocean Engineering, 1997,24(7):577-592.