A-PDF Split DEMO : Purchase from www.A-PDF.com to remove the watermark

不同P-Y数据对于海上风电机组结构频率影响分析*

王 凡，赵蒙莉，陈晓静，连西岗
（上海电气风电设备有限公司，上海 200241）

摘要：海上风电机组的载荷计算工作首先需要解决整机频率计算问题，以保证整机运行在合理的安全频率范围内。针对这一问题，以 Aeroflex 和 Bladed 两款仿真软件为仿真平台对整机频率进行了仿真计算，建立了基于东海大桥海上风机为研究对象的仿真模型。在分别考虑0.8倍的P-Y数据，1.2倍的P-Y数据以及海底桩基冲刷等情况下，仿真计算了不同海洋桩基环境整机模态频率。将两款仿真软件的模拟分析结果进行横向比较，研究发现两款仿真软件前几阶模态分析结果比较接近，基本吻合，验证了该海上风电机组模型构建准确以及前几阶基础模态分析的准确性。同时模拟分析的研究结果表明，不同桩基情况土壤P-Y值整体倍率小范围改变对于整机基础频率的影响变化不大。

关键词：海上风力发电机组；高桩承台；P-Y数据；模态分析
中图分类号：TM614 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-4551(2012)10-1220-04

Impact analysis of offshore wind turbine structure frequency with different P-Y data

WANG Fan, ZHAO Meng-li, CHEN Xiao-jing, LIAN Xi-gang
(Shanghai Electric Windpower Equipment Co.,Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: The principal work of offshore wind turbine load calculation is the whole turbine modal analysis. The wind turbine operated between the safe and reasonable frequency range must be ensured. Aiming at this problem, based on Aeroflex and Bladed simulation platform simulated the whole offshore turbine frequency, the research model of Donghai bridge offshore was established. Different marine piles environment was considered in the whole turbine modal analysis, 0.8 times P-Y data, 1.2 times P-Y data and subsea piles scoured situation was considered. Two simulation software horizontal comparison results indicate that the model is established properly and the previous orders of modal analysis results are reasonable. The comparison results of the simulation analysis indicate that it is no sense for the whole offshore frequency changed with P-Y data small change.

Key words: offshore wind turbine; high rising structure foundation; P-Y data; modal analysis

0 引 言

随着全球气候变暖与能源紧缺压力增大，发展可再生能源已经成为很多国家的不二之选，可再生能源中，风能又是被认为最具有商业开发价值的能源之一[1]。随着风力发电技术日新月异，风力发电也逐步将战场由陆上转移到海上，海上风场具有更高的年平均风速、更低的湍流强度、更低的风剪切，这些对于风机发电都是有利因素，但是海上风机却面临不利因素，例如波浪和海流额外载荷的影响，海冰、船舶撞击对于风机的安全性构成威胁，而最主要的因素是海上基础的施工难度加大，吊装的难度增大[1-3]。海上风机基础现有形式有单桩式、重力式、导管架式等[4]，而国内现有的海上风电机组大多采用的基础型式是高桩承台，

收稿日期：2012-04-13
基金项目：上海市优秀学科带头人计划资助项目(10XD1420900)
作者简介：王 凡(1981-)，男，江苏盐城人，主要从事风力发电载荷设计方面的研究工作. E-mail:wangfan@shanghai-electric.com

采用此种基础型式的原因主要是考虑到中国海洋环境特有的地层、土壤刚度、沿表深度、海床迁移等因素，而且也综合考虑了中国现有的安装施工技术和设备水平。本研究以中国海上风电独特的高桩承台海上风机为研究对象，分析几种海洋不同土壤P-Y数据变化对于整机频率的影响。

目前国内还没有海上风机设计的规程规范，所以可以参照的规范标准大多来自国外成熟标准[5-8]。国内东海大桥风电场是亚洲第一座大型海上风电场，也是国内为数不多的规模化的海上风电场。国内海上风机的研究工作也处于起步阶段，对于海上风机载荷计算工作以及海上风机整机建模工作，之前也少有涉及，针对国内这种特有的海上基础型式进行整机模态分析工作时也没有比较好的文献可以参照。

本研究以两款通用的风机仿真软件对于某款海上风力发电机组进行海上基础建模并相互校核，并仿真计算0.8倍、1倍、1.2倍P-Y数据时以及桩基冲刷情况下的整机频率，并比较各个情况下的计算结果，对风力发电机组整机模态分析进行探讨和研究，这对于研究海上机组特性也具有一定的参考意义。

1　海上机组仿真建模

本研究使用两款目前市场上通用的风力发电机组仿真计算软件Bladed和Aeroflex分别对于国内特定高桩承台海上基础的海上风机进行了整体建模，Bladed建模可视化效果较好，建模后的海上风机三维效果图如图1所示：包括了风轮、机舱、塔架、基础桩基以及混凝土基础和塔筒连接的过渡段等信息；Aeroflex建模海上风机基础只能以节点形式显示，风机本体基本信息不能立体显示，但已经包含在仿真软件里面，Aeroflex海上基础建模节点图如图2所示。

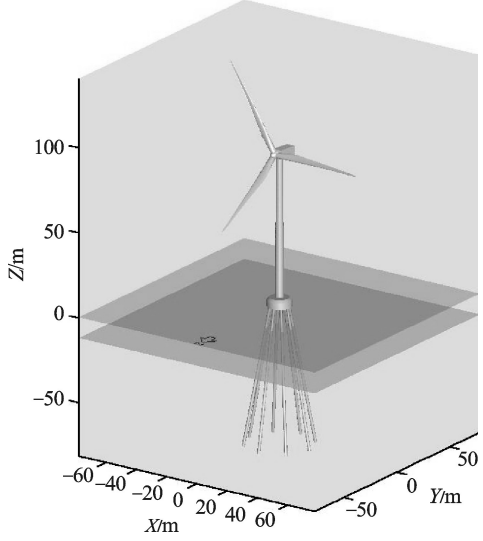


图1　Bladed 海上风机建模效果图

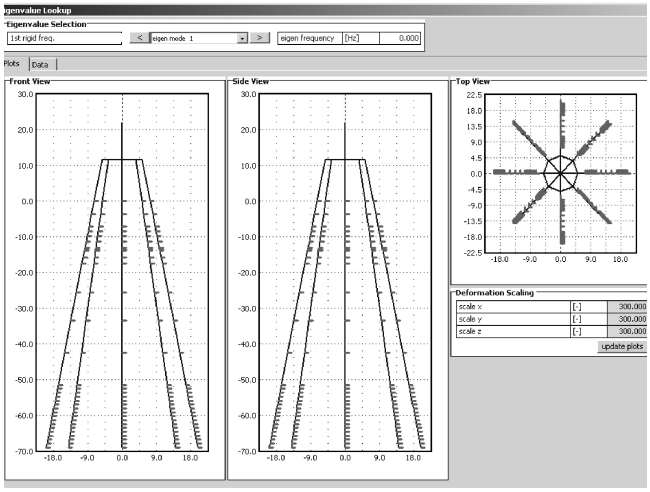


图2　Aeroflex海上基础建模节点图

由于海上风力发电机组属于高耸结构，而风机基础又负责支撑整个风机重量以及承受由风和浪耦合作用的荷载[9]，这一基础除了考虑作为支撑风机正常运行功能外，还要保证构建后的整体结构频率满足风机运行频率范围，以期整机没有大的共振现象发生，所以模态分析是检验是否频率在合理范围内的有效手段，为了使模型更接近实际基础形式本身，本研究在建模时充分考虑了混凝土承台特性、桩基特性（变截面以及灌浆）、桩基质量分布、附加质量，以及风机安装海域海洋土壤分层状况桩基所处环境有无海水浸润等因素，确保模型准确并能很好地仿真实际安装的机组模型。

2　海洋P-Y地质参数

本研究中模拟所使用的P-Y地质参数由设计院根据工程项目地实际勘察得到，最大勘探揭露深度为80.0 m，海底土层分为9大层，具体每层的平均层厚度、压缩系数、压缩模量等参数如表1所示。

具体桩基的P-Y特性示意图[9-10]如图3所示。

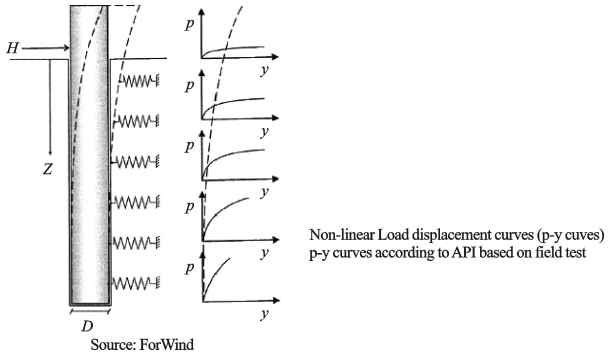


图3　桩身各点的P-Y曲线

3　模态分析仿真计算结果

两款仿真模拟软件Bladed和Aeroflex都可以实现

表1 地层特性表

土层编号	土层名称	平均层厚度/m	压缩系统/MPa^{-1}	压缩模量/MPa	压缩性	孔隙比	密实度	标贯击数
①	淤泥	0.43			高			
③	淤泥质粉质粘土	3.83	0.87	2.77	高	1.32		
④	淤泥质粘土	10.67	1.36	1.89	高	1.514		
⑤	粘土	4.06	0.87	2.75	高	1.218		
⑤	粉质粘土	10.60	0.50	4.35	高	0.984		
⑥	粉质粘土	3.44	0.29	6.35	中	0.753		
$⑦_{1-1}$	粉质粉土	3.75	0.18	10.74	中偏低	0.796	中密	27
$⑦_{1-2}$	粉砂	11.19	0.13	13.73	中偏低	0.757	密实	39.5
$⑦_2$	粉细砂	33.22	0.11	15.73	低	0.694	密实	61.5
$⑨_2$	含砾中粗砂		0.08	20.18	低	0.532	密实	

海上风电机组建模,并可以实现对不同桩基材料、截面尺寸、土壤类型以及海洋水文参数等进行设置。两款仿真软件建模所使用的机组是同一款机组,所使用的海洋环境、基础型式也是同一个特定海域的海洋工况,两款软件建模仿真时应保证两款仿真软件建模所建立的节点和节点连接一一对应,以保证两款软件建立和计算的仿真模型彼此一致。以下所有仿真结果都是在同样阶数和同样模态阻尼系数下得到的,但要注意:在两款仿真软件中模态阻尼系数存在 2π 关系,仿真时需要转换一下阻尼系数。

3.1 同一P-Y数据下仿真结果比较

同一P-Y数据下仿真结果比较如图4所示,从图4中可以看出,两款仿真软件仿真的整机的前几阶频率还是比较接近的,特别是前两阶频率几乎一致,但是高阶频率下两款软件计算差别比较大,在陆上机组中也存在类似问题,可能是软件内部设置差异所致,但是研究者在整机频率计算时比较关心前两阶频率,研究结果说明计算得到的整机低阶频率还是准确的。

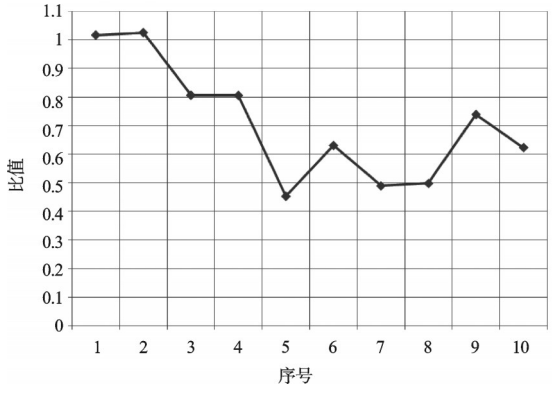


图4 同一P-Y数据条件下Bladed仿真整机基础频率结果和Aeroflex仿真结果比较趋势图

3.2 不同P-Y数据下仿真结果比较

不同P-Y数据下仿真结果比较示意图如图5、图6所示,从比较结果可以看出两款软件仿真计算的 n 阶频率变化趋势都是一致的,而且两款仿真模拟结果对

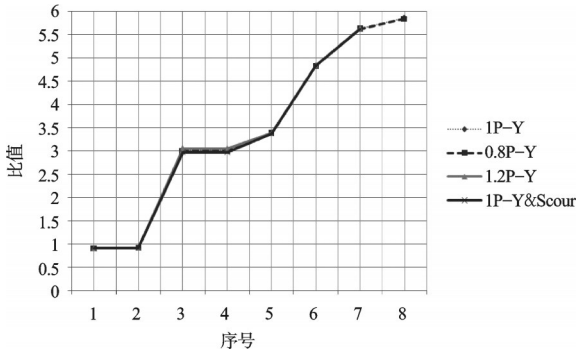


图5 Bladed仿真不同P-Y数据下模态分析结果和最大机组允许运行频率比值结果趋势图

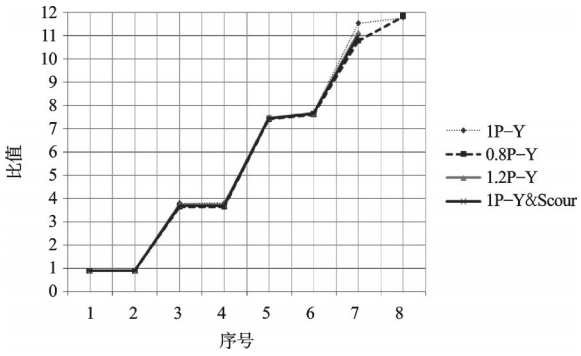


图6 Aeroflex软件仿真不同P-Y数据下模态分析结果和最大机组允许运行频率比值结果趋势图

于P-Y土壤刚度的改变敏感度有限,对于风机设计重点关注的1阶频率,两款仿真软件和机组允许最大运行频率比值都在90%附近,而根据GL规范以及IEC规范要求,考虑计算整机频率不确定性等因素,±5%的置信区间(0.95~1.05)是合理的[5~6],而上述两种方法计算的1阶频率都在合理安全范围内而且比较接近,对于 n 阶频率,两款软件计算出来的结果有所差别,但是趋势一致,两种计算结果表明该款海上机组的基础形式对于海洋土壤P-Y刚度变化不敏感,图5、图6表明,在不同的桩基环境中频率计算结果略有变化,但总体趋势分析仍一致,由于该款海上机组的基础形式采用群桩高桩承台形式,整个基础结构的重心低,整体结构刚度大,稳固性好,不同P-Y土壤数据对其影响很小。

4　结束语

本研究针对某海上风力发电机组在不同P-Y土壤数据条件下进行了模态分析，分析结果显示该款机组基础形式对于P-Y值改变的敏感性不强，通过两款仿真软件计算结果相互校核方式，确立了模型构建的准确性以及机组整体1阶频率的准确性。

我国规模化的海上风电场还比较少，而且江浙沿海等地可开发的海上风电资源非常可观，但是我国对海上风电的研究还未深入，真正意义上的海上整体荷载分析水平也有待提高，仿真过程和仿真结果对海上风力发电机组建模提供了实际指导实例，对风力发电机组海上载荷分析计算也有一定预研作用和借鉴意义。

参考文献(References)：

[1] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京：国防工业出版社，2006.

[2] 林毅峰，李建英，沈　达，等. 东海大桥海上风电场风机地基基础特性及设计[J]. 上海电力，2007(2)：153-157.

[3] 李　炜，陈法波，吕　娜，等. P-Y曲线法在海上风电基础桩土作用计算中的适用性研究[J]. 水力发电，2011，37(10)：96-99.

[4] 黄维平，刘建军，赵战平. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程，2009，27(2)：130-134.

[5] Germanischer Lloyd Wind Energy GmbH. General Certification of Wind Turbine[S]. Germany，2003.

[6] IEC61400-3：2005. Wind turbines-Part3：Design Requirements for Offshore Wind Tturbines[S]. International Electrotechnical Commission，2005.

[7] TONY B，SHARPE D，NICK J，et al. Wind Energy HandBook [M]. England：John Wiley&Sons，Ltd.，2001.

[8] Det Norske Veritas. Offshore Standard DNV-OS-C101：Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. Norway：Det Norse Ventas，2004.

[9] 李雨润，袁晓铭，梁　艳. 桩-液化土相互作用P-Y曲线修正计算方法研究[J]. 岩土工程学报，2009，31(4)：595-599.

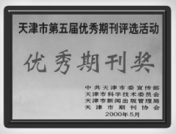
[10] American Petroleum Institute. API RP ZA-WSD-2000，Recommended practice for planning，designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design [S]. Washington：American Petroleum Institute，2000.

[编辑：李　辉]

欢迎订阅《机械设计》杂志

国际标准刊号：ISSN 1001—2354　　国内统一刊号：CN 12—1120 / TH

《机械设计》杂志是中国机械工程学会机械设计分会会刊、中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊，学位与研究生教育指定中文重要期刊，国内外公开发行。本刊已被“中国核心期刊(遴选)数据库”、“中国科技期刊精品数据库”、“中国期刊网”、“中国学术期刊(光盘版)”、“中国学术期刊综合评价数据库”等全文收录。《机械设计》的影响因子在同类科技期刊中名列前茅，并多次荣获天津市一级期刊、天津市优秀期刊奖。本刊为月刊，每月20日出版，A4开本，每期传递信息量近20多万字。



本刊主要栏目：设计领域综述(含动态、方针政策等)；专题论文(含设计方法、CAD、模块化设计、有限元、可靠性、失效分析、优化设计、并行设计、疲劳设计、反求工程、价值工程、人机工程、智能工程、专家系统、机构学、机械动力学、摩擦学、结构、传动、零部件、机电一体化等)；现代装备制造技术与实例分析(含专题论文中各种设计技术，在实际应用中的实例分析与经验)。

国内总发行：天津市邮政报刊发行局　　邮发代号：6—59

国外总发行：中国国际图书贸易总公司　　邮发代号：M7315

订购处：国内各地邮局及本编辑部均可订购，国外可与本社联系

单册订价：10.00元，全年订价：120元

杂志社地址：天津市河北区南口路40号　　邮政编码：300232

电话：(022)27343427　　E-mail：jxsj@chinajournal.net.cn

欢迎订阅·欢迎投稿·欢迎刊登广告