

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.018

漂浮式海上风力机全机结构自振特性仿真

柯世堂 胡 丰 曹九发 王同光

(南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室,南京,210016)

摘要:针对漂浮式海上风力机全机结构的动力特性问题,以某 3 MW 漂浮式海上风力机系统为例,基于有限元方法分析了系统自振频率和振型的分布特征,并进行漂浮式海上风力机全机自振特性的参数分析,最后给出全机结构基频和倾覆频率的计算公式。分析表明,漂浮式海上风力机系统自振频率非常低且分布密集。系统基频与拉索锚固深度以及叶片长度呈线性递减关系,与浮筒半径呈反比,与拉索的总截面面积以及塔架高度呈二次曲线关系。倾覆频率与参数的关系则牵涉高次项,较上述关系更为复杂。文中给出的拟合公式计算值与有限元值吻合较好,说明其在预测漂浮式海上风力机系统自振频率方面具有较高可信度。

关键词:漂浮式海上风力机;有限元方法;自振频率;参数分析;拟合公式

中图分类号:TK83;TU279.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)04-0595-07

Simulation Study on Dynamic Characteristic of Floating Offshore Wind Turbine Systems

Ke Shitang, Hu Feng, Cao Jiufa, Wang Tongguang

(Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to study the natural vibration characteristics of floating offshore wind turbine systems, the finite element method is used. Taking a 3 MW floating offshore wind turbine for example, the distribution of mode shapes and the parameter analysis of the natural frequencies and are investigated. The calculation equations used to estimate the fundamental frequency and the overturning frequency are fitted based on a series of parametric analyses. The results show that the fundamental frequency is directly proportional to the anchorage depth of the inhaul cable and the blade length, and inversely proportional to the buoy radius. The fundamental frequency also has a quadratic relationship with the total cross-sectional area of the inhaul cable and the tower height. The relationship between the overturning frequency and parameters involves high-order term, so it is more complicated. The good agreement between the results from the fitting equation and the results from the finite element method indicates that the fitting equation has a high credibility in predicting the natural frequencies of floating offshore wind turbines.

Key words: floating offshore wind turbine; finite element method; natural frequency; parameter analysis; fitting equation

风力发电是海上风能最有效的利用方式之一, 漂浮式海上风力机作为一种新颖的结构体系,因其

基金项目:国家重点基础研究计划(“九七三”计划)(2014CB046200)资助项目;国家自然科学基金(51208254)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目;江苏省自然科学基金(BK2012390)资助项目;中国博士后科学基金(2015T80551)资助项目。

收稿日期:2014-10-15;**修订日期:**2015-04-28

通信作者:柯世堂,男,博士,副教授,E-mail:keshitang@163.com。

适用于较深海域且安装简易、造价较低,近年来受到广泛关注^[1-2]。挪威在2009年建立了世界首座漂浮式海上风力发电机组,日本在2011年福岛核电站事故后已新建漂浮式海上风力发电机组,中国在东海已初步尝试了漂浮式海上风力发电机组技术,目前有部分海上组合式漂浮风力发电机组即将投运。由于漂浮式风力机系统是由叶片、机舱、塔架、浮筒、拉索等多个部件组成的有机整体,结构的自振特性十分复杂,加之其受工作环境的影响较大,如风、波浪、地震的作用等,动力分析愈发复杂,因而距离其大规模应用仍有待深入研究,尤其是对此类结构体系动力特性的研究和结构形式的优化。

鉴于此,对漂浮式海上风力机系统自振特性的研究具有重要工程意义,在已有的研究中,多数是对漂浮式海上风力机系统的概念设计^[3-5](见图1),文献[6]对漂浮式海上风力机系统进行了动力学仿真分析,文献[7]对陆上风力发电塔系统的自振特性做了深入分析,但针对漂浮式海上风力机系统自振特性分布及预测的研究甚少。

本文采用有限元方法,建立了50余组不同尺寸的漂浮式海上风力机系统模型,分析了叶片长度、塔高、浮筒半径、拉索总截面面积和拉索锚固深度对自振特性的影响,最后给出了基频和倾覆频率的拟合公式,并与有限元的计算值进行比较验证。主要研究结论可为海上漂浮式风力机系统的动力设计提供科学依据。

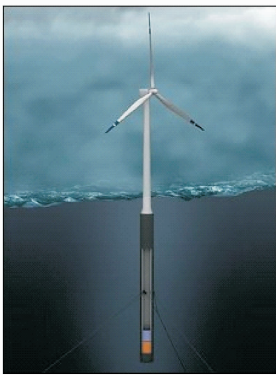


图1 漂浮式海上风力机设计图

Fig. 1 Design of floating offshore wind turbine

1 漂浮式风力机有限元建模

漂浮式海上风力发电系统是一种新型的结构形式,在安装时只需将拉索锚固系统安装到位,整个系统即可自动漂浮使得拉索张紧,随之投入使用。简单实用、造价低、适用范围广。

本文以某3 MW漂浮式海上风力发电机为基

准进行ANSYS建模。塔架为高耸结构,高85 m,底径6.4 m,顶径3.7 m,底壁厚40 mm,顶壁厚24 mm。该部分采用SHELL63单元模拟。机舱内部结构较为复杂,对其进行简化处理,采用BEAM189单元建模,机舱长10 m,宽3.6 m,高4 m。叶片采用三桨叶形式,夹角 120° ,叶长47.5 m,宽1.5 m,厚0.45 m,因长度远大于厚度,属薄壳结构,故亦采用SHELL63单元模拟。浮筒部分与塔架类似,采用SHELL63单元模拟,高30 m,半径4 m,厚30 mm,浮筒与塔架之间有高为0.5 m的变截面部分,底部需封口,建模时将浮筒的浮力作为预应力预先施加到结构中。拉索全部位于海面以下,平衡主体结构所受外力,只受拉而不受压,属柔性结构。因LINK10单元拥有独特的双线性刚度矩阵,受压时单元刚度消失,文献[8]采用LINK10单元建立了实际拉索的三维空间参数振动模型,对拉索进行了瞬态动力分析,计算结果与实际情况基本吻合,故本文采用LINK10单元模拟拉索。拉索底端与海底固结,上端与浮筒单元节点形成刚域连接,两层索长分别为64.0、89.4 m,横截面积 0.03 m^2 ,其锚固深度为80 m。建模时,为简化计算,塔架部分材料取Q345钢。整个模型共有2 321个单元,完整的有限元模型见图2。

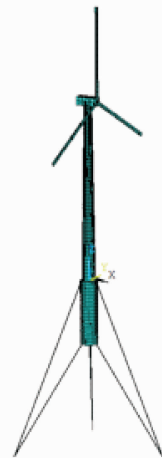


图2 漂浮式海上风力机有限元模型

Fig. 2 Finite element model of floating offshore wind turbine

文献[9,10]表明,考虑风力机叶片的转动对系统低阶的自振频率影响较小,随着模态阶数的增大,忽略叶片转动引起的离心力效应带来的误差相对比较明显。考虑到海上漂浮式风力机系统属于柔度较大、基频较低的结构,因此本文忽略叶片的转动效应。

2 漂浮式海上风力机系统自振特性

对该 3 MW 漂浮式海上风力机系统进行自振特性分析,图 3 给出系统前 50 阶模态中的主要 10 阶模态示意图。

由该系统的振型图可知:第 1 阶振型为塔架弯曲伴随着叶片的前后舞动变形,其中以塔架变形为主;第 2 阶振型表现为塔身微弯,并有小的扭转,叶片前后舞动相对第一阶要明显;第 3 阶振型为塔架的左右弯曲和叶片左右摆振耦合;第 4 阶为叶片的平面外扭转和平面内摆振耦合;第 5 阶是倾覆频率,塔架和叶片整体失稳;第 6 阶表现为塔身左右弯曲和叶片的平面内扭转;第 21 阶结构出现塔筒的“鼓胀”;第 31 阶表现为浮筒的“鼓胀”。该结构的前 50 阶频率递增且分布密集,第 50 阶的频率在 10 Hz 左右。分析表明,当模态阶数逐渐增大时,塔架自身的变形更加突出且愈显复杂,相反地,叶片的摆振和舞动现象逐渐减弱,说明海上漂浮式风力机系统的抗风或抗震动力分析时应该考虑塔架

和叶片的耦合变形,动力特性分析结论对海上漂浮式风力机系统的动力分析具有重要意义。

对比文献[2]的研究结果可知,漂浮式海上风力机系统各阶自振频率明显低于陆上风力机系统,基频只有 0.107 Hz,约为陆上风机系统的一半,原因在于漂浮式海上风力机系统采用了不同的基础形式,使得结构变得更柔,因此该结构形式较陆上风机系统更利于抗震,但这对结构抗风提出了考验,而风力机的主旨又在于利用风力,二者相互矛盾,解决这个问题可从下文第 3 节的参数分析中找到一些突破口。另一方面,对比海上漂浮风机系统和陆上风机系统的振型可知,二者塔架及以上部分的各阶振型基本一致,设计时可互为参照。

有限元分析中网格密度会对计算结果产生影响,文献[11]表明,网格密度在 $3.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$, $2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$, $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 和 $0.9\text{ m} \times 0.9\text{ m}$ 时,计算的结果十分接近,本文采用的网格密度为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,在此范围之内,忽略网格密度对计算结果的影响。

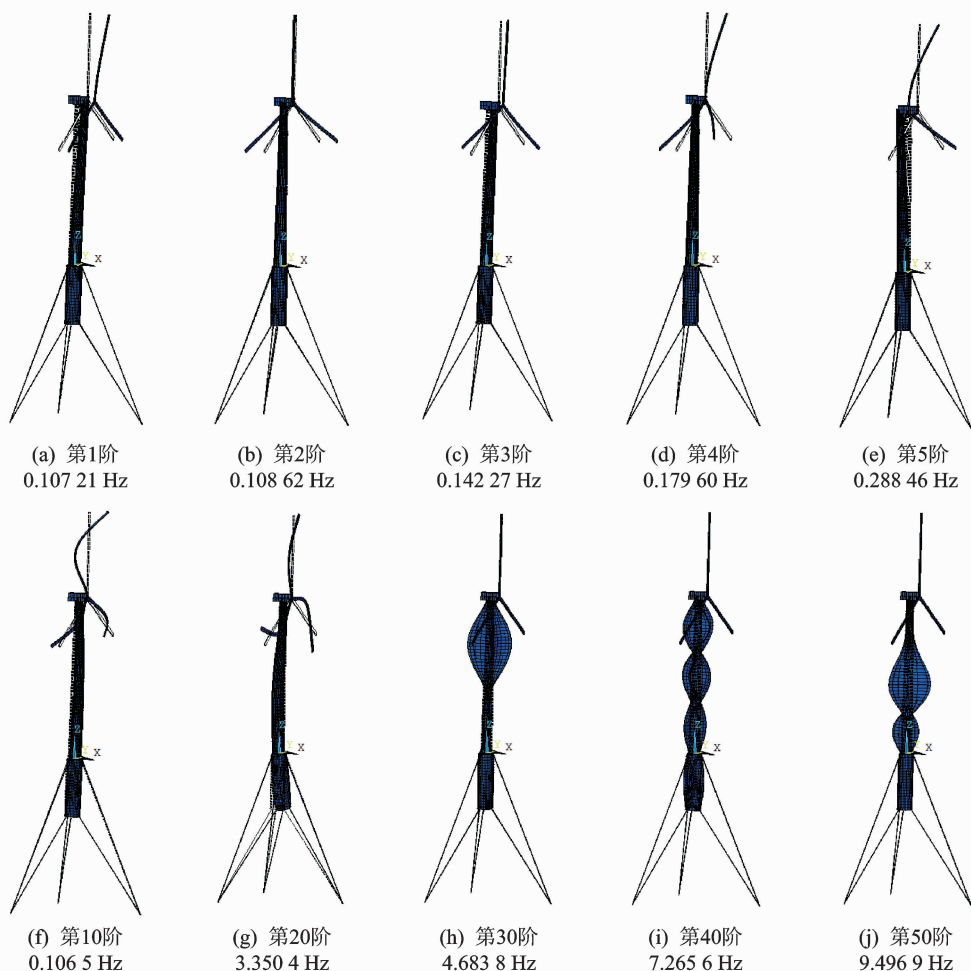


图 3 漂浮式海上风力发电机的振型和频率

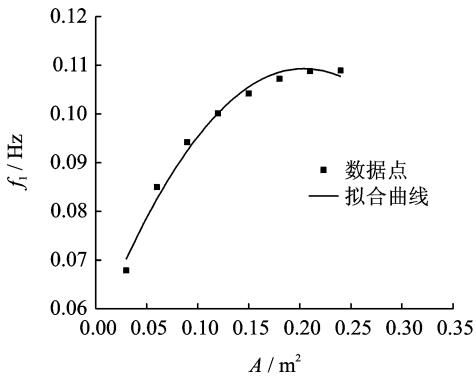
Fig. 3 Mode shapes and frequencies of floating offshore wind turbine

3 漂浮式海上风力机系统参数分析

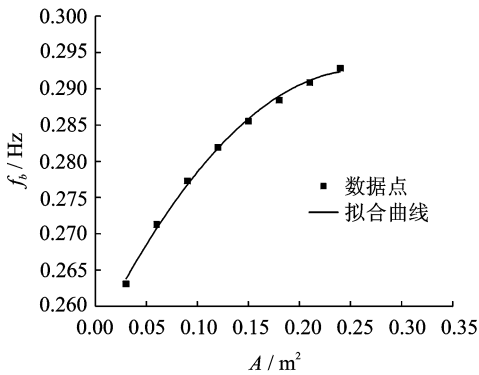
影响漂浮式海上风力机自振频率的主要参数有:拉索的总截面积、塔高、拉索锚固深度、叶片长度和浮筒半径。以第1节设计的3 MW风力机作为基准,分析各参数与基频、倾覆频率之间的关系。已有研究表明,对于风力机系统各个参数之间的关联性影响在可接受范围之内,因此本文忽略此影响。

3.1 拉索总截面积的影响

对基准模型采用控制变量法,仅对拉索截面积 A 作调整,分析其对结构自振频率的影响。一根拉索的截面面积通常为 $0.005 \sim 0.04 \text{ m}^2$,等间距取8组数据进行计算,图4给出了拉索的总截面积与基频 f_1 以及倾覆频率 f_b 之间的关系。



(a) 拉索总截面积与基频的关系



(b) 拉索总截面积与倾覆频率的关系

图4 拉索的总截面积与自振频率的关系

Fig. 4 Relationship between total cross-sectional area of cable and natural frequency

由图4的二次拟合曲线可知,随着拉索总截面积的增加,自振频率随之增加,但影响越来越小,总体上呈二次上升曲线关系。

通过多次拟合试算研究表明, $A^{1/4}$ 与 f_b 呈线性关系,后者随着前者的增加线性增大,如图5所示。这一结论对于最后的拟合公式非常重要,正是采用

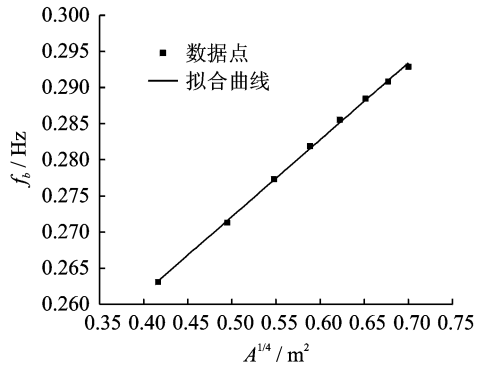


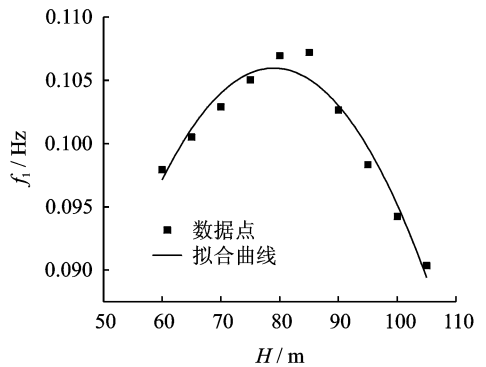
图5 拉索的总截面积与倾覆频率的关系

Fig. 5 Relationship between total cross-sectional area of cable and overturning frequency

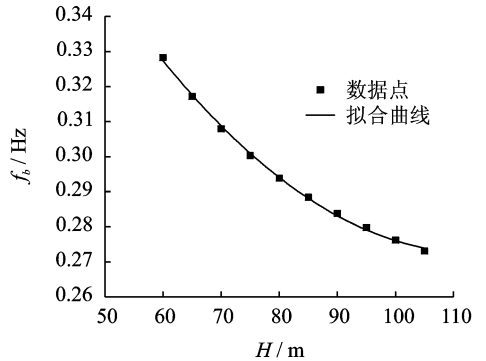
了这种特殊的线性关系,使得公式变得更加简洁美观。

3.2 塔架高度的影响

采用控制变量法,塔高 H 的取值范围设定为 $60 \sim 105 \text{ m}$,等间距取10组数据进行计算,在对高耸结构的已有研究^[12-13]中,已得出高度对结构的影响非常显著的结论,且基本呈二次曲线关系。图6给出了塔架高度和自振频率之间的关系曲线。



(a) 塔架高度与基频的关系



(b) 塔架高度与倾覆频率的关系

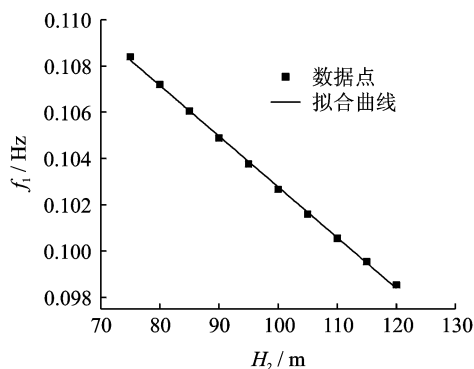
图6 塔架高度与自振频率的关系

Fig. 6 Relationship between tower height and natural frequency

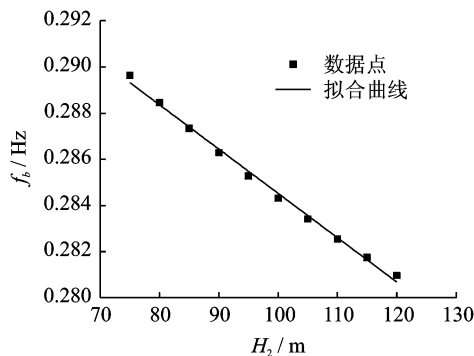
由图 6 可知,漂浮式海上风力机系统的高度对结构的影响与其他高耸结构基本一致。在一定范围内,高度增加,基频上升,随后急剧下降,而倾覆频率一直随高度的增加而减小。二者基本上均呈二次曲线关系。

3.3 拉索锚固深度的影响

拉索是海上漂浮式风力机系统的创新之处,利用了海上有浮力这一特点进行的独创设计,使漂浮式风力机在较深海域的应用变得可能。以 3 MW 风力机为基准,锚固深度 H_2 从 75~120 m 等间距变化 10 次,图 7 为对应的拟合曲线。



(a) 拉索锚固深度与基频的关系



(b) 拉索锚固深度与倾覆频率的关系

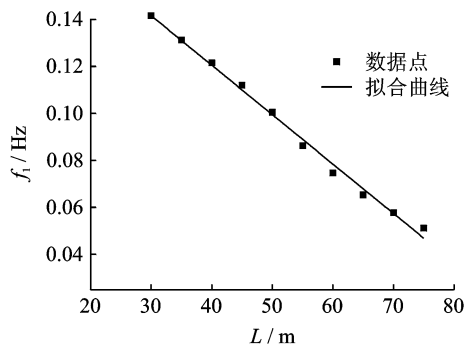
图 7 拉索锚固深度与自振频率的关系

Fig. 7 Relationship between anchorage depth and natural frequency

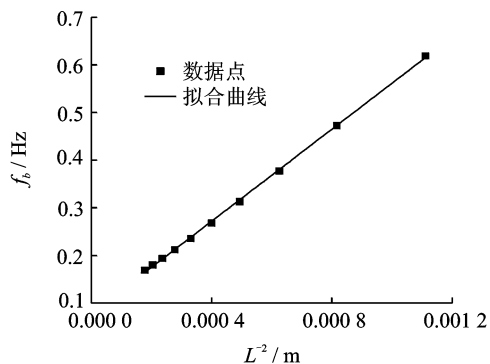
从图 7 中可以看出,随着锚固深度的增加,结构的基频和倾覆频率都在线性减小,由此可见,这种基础形式只能适用于一定水深范围之内,如果水深过大,那么这种基础形式显然是不适用的。

3.4 叶片长度的影响

叶片是风力发电机的核心部分,只有叶片有效转动才能使机械能转化为电能,因此叶片对结构自振频率的影响需要深入研究。采用和上述同样的方法,叶片长度 L 的变化范围取 30~75 m,等间距变化得到 10 组数据进行计算,结果如图 8 所示。



(a) 叶片长度与基频的关系



(b) 叶片长度与倾覆频率的关系

图 8 叶片长度与自振频率的关系

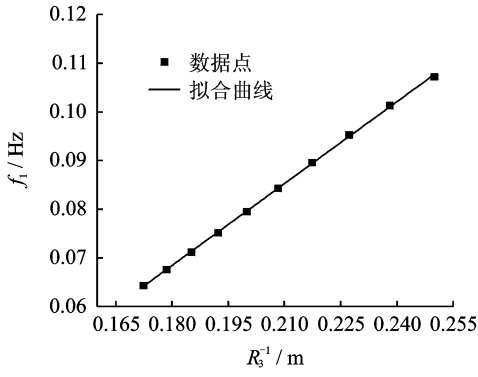
Fig. 8 Relationship between blade length and natural frequency

由图 8 可知,随着叶长增加,基频线性减小,因此设计时叶片不能盲目过长。最初的研究表明,叶长和倾覆频率呈明显的四次方关系,而且吻合度非常好,说明叶长在一定范围内增加会使得倾覆频率急剧下降,超出该范围,则影响不明显。但是,这样处理会使得经验公式显得拖沓冗长。反复研究表明, f_b 和 L^{-2} 呈线性关系,亦即 f_b 和 L^2 呈反比,这样处理亦可以取得满意的效果。

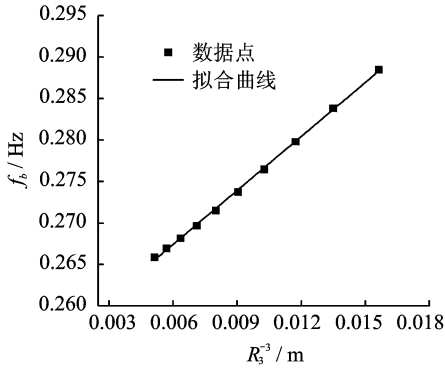
3.5 浮筒半径的影响

浮筒给发电机提供了浮力,使拉索绷紧,是一个重要的部分,其尺寸需保证相应的浮力,仍以上述设计为基准,使浮筒半径 R_3 在 4~5.8 m 内均匀变化,对这 10 组数据进行计算并拟合,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,基频与浮筒半径呈反比例关系,也就是,浮筒半径越大,基频越低,漂浮式海上风力发电机需要足够的浮力,因而需要较大的浮筒半径,但不能使半径过大而使结构频率过低。与 3.4 节中数据处理一样。研究表明,倾覆频率 f_b 与 R_3^{-3} 成正比,即 f_b 与 R_3^3 呈反比。



(a) 浮筒半径与基频的关系



(b) 浮筒半径与倾覆频率的关系

图9 浮筒半径与自振频率的关系

Fig. 9 Relationship between buoy radius and natural frequency

4 自振频率的拟合公式

由参数分析可以得到:基频与拉索锚固深度以及叶片长度呈线性关系,与拉索总截面面积以及塔高呈二次曲线关系,与浮筒半径呈反比;倾覆频率和 $A^{1/4}$, H_2, L^{-2} 以及 R_3^{-3} 呈线性关系,与 H 呈二次曲线关系。根据这些关系,应用约束最小二乘法拟合出基频和倾覆频率的公式

$$f_1 = 2.91(-H_2 + 647.86)(-L + 97.25) \cdot \frac{(A^2 - 0.42A - 0.05)(H^2 - 159.42H + 2437.12)}{(R_3 - 1.08)} \cdot 10^{-8} \quad (1)$$

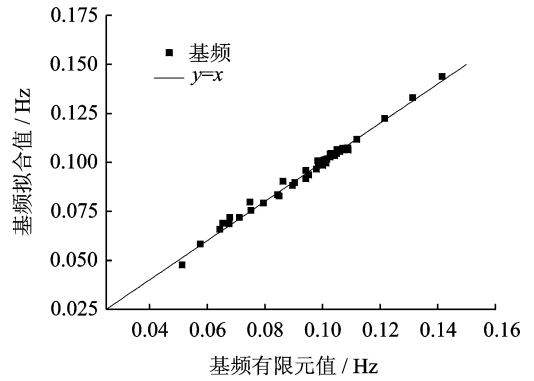
$$f_b = 0.1 + 0.04 \sqrt[4]{A} \cdot \frac{(H^2 - 242.93H + 32563.92)(-H_2 + 1317.59)}{(L^2 + 365.62)(R_3^3 + 1102.75)} \quad (2)$$

式中所有参数单位均为国际单位制,第3节的参数分析取了5个关键变量,其他变量纳入主要变化参数,例如浮筒高度并入塔高,浮筒及塔架厚度并入拉索总截面面积,因此本文考虑参数较为全面。由

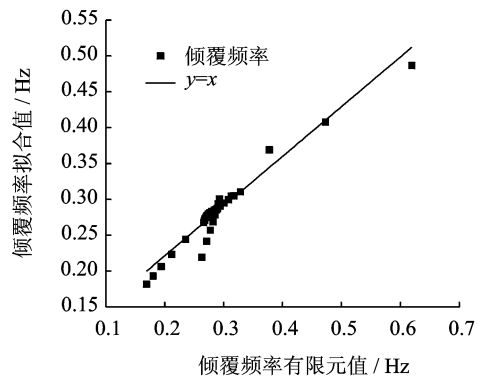
参数分析可知,式(1,2)的使用范围为:高度60~105 m,叶长30~75 m,该范围基本涵盖了1.2~5 MW的常用漂浮式海上风力机系统各部件的取值。

式(1,2)是在48组有限元分析结果基础上拟合得到的,基频公式拟合的相关系数 $R^2 = 0.98$,倾覆频率公式拟合的相关系数为 $R^2 = 0.97$,拟合结果非常精确。通过拟合公式的物理含义可知,若需提高基频,可减小浮筒埋深、叶长和浮筒半径。

图10给出了拟合公式和有限元计算值的对比曲线,其中系统基频的拟合值和有限元结果吻合,倾覆频率拟合值和有限元结果稍有误差,但均在可接受的范围内。因此可以认为本文的拟合公式具有很好的可信度和稳定性,能用于海上漂浮式风力机系统的初步设计。



(a) 基频有限元值与拟合值的比较



(b) 倾覆频率有限元值与拟合值的比较

图10 自振频率拟合值与有限元计算值的比较
Fig. 10 Fitting value of natural frequency compared with finite element value

5 结论

通过漂浮式海上风力发电机全机结构的有限元一体化建模,并对其进行动力特性和参数分析,得出的主要结论如下:

(1) 漂浮式海上风力机系统自振频率较陆上风

力机系统要低且分布更加密集,低阶振型主要表现为塔架和叶片的耦合变形,高阶振型以塔架复杂变形为主,叶片的摆振和舞动现象逐渐减弱。这一结论要求在海上漂浮式风力机系统的抗风抗震分析中一定要考虑塔架和叶片的耦合模态。

(2)基频与拉索锚固深度和叶片长度呈线性递减关系,与浮筒半径呈反比,与拉索的总截面面积和塔架高度呈二次曲线关系;倾覆频率与影响参数的关系呈现高次项,较基频拟合公式更为复杂。

(3)本文给出的拟合公式具有很好的可信度和稳定性,可用于1.2~5 MW海上漂浮式风力机系统抗风或抗震动力分析的初步估算。

参考文献:

- [1] 金志昊,范宣华,苏先轹,等. 风力机叶片顺风向风致振动研究[J]. 南京航空航天大学学报,2011,43(5):677-681.
Jin Zhibao, Fan Xuanhua, Su Xianyue. Research on blade wind-induced vibration in wind direction[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011,43(5):677-681.
- [2] 楚晨晖,陈少林,柯世堂. 风力发电机高塔系统的自振特性及参数分析[J]. 电力建设,2013,34(1):16-20.
Chu Chenhui, Chen Shaolin, Ke Shitang. Natural vibration characteristics and parameter analysis of wind turbine systems[J]. Electric Power Construction, 2013,34(1):16-20.
- [3] 许波峰,王同光. 基于自由涡尾迹法和面元法全耦合风力机气动特性计算[J]. 南京航空航天大学学报,2011,43(5):592-597.
Xu Bofeng, Wang Tongguang. Wind turbine aerodynamic performance prediction based on free-wake/panel model coupled method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011,43(5):592-597.
- [4] 杨先碧. 漂浮在大海上的风力发电机[J]. 现代物理知识,2009,21(4):56-57.
Yang Xianbi. The wind turbines floating on the sea [J]. Modern Physics, 2009,21(4):56-57.
- [5] Zhang Liang, Wu Haitao, Jing Fengmei, et al. Study on offshore floating wind turbine and its development[J]. Ocean Technology, 2010,29(4):122-126.
- [6] Wang Lei, He Yulin, Jin Xin, et al. Dynamic simulation analysis of floating wind turbine[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012,43(4):1309-1314.
- [7] 张艳娟,楼梦麟. 风力发电塔的自振特性分析[J]. 应用力学学报,2010,27(3):626-629.
Zhang Yanjuan, Lou Menglin. Natural vibration characteristic of wind turbine towers [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010,27(3):626-629.
- [8] 王涛. 斜拉桥拉索参数振动的理论与数值分析[D]. 成都:西南交通大学,2009.
Wang Tao. Theoretical and numerical analysis on the parametric vibration of cables in cable-stayed bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [9] Kusiak A, Li W, Song Z. Dynamic control of wind turbines[J]. Renewable Energy, 2010,35(2):456-463.
- [10] Roddier D, Cermelli C, Aubault A. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2009,31(4):1-32.
- [11] Byrne B W, Houlsby G T. Foundations for offshore wind turbines[J]. The Royal Society, 2003(1286):2909-2930.
- [12] Foti D, Diaferio M, Giannoccaro N I, et al. Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower[J]. NDT & E International, 2012,47:88-95.
- [13] Li B, Chen B, Xia C. Dynamic energy of a large scale transmission tower subjected to wind excitations [C]//2010 International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC 2010). [S. l.]: IEEE, 2010:V6-228-V6-231.