

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.01.005

伏亮明, 钟耀, 罗成喜, 等. 海上电气平台动力模型试验设计[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 33-37. (FU Liang-ming, ZHONG Yao, LUO Cheng-xi, et al. Design of dynamic model test for offshore substation platform[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1):33-37.)

海上电气平台动力模型试验设计

伏亮明¹, 钟耀¹, 罗成喜¹, 刘小松¹, 孙锦龙², 刘德才²

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 2. 大唐山东发电有限公司, 山东 青岛 266061)

摘要: 为了满足海上大型风电场的开发需求,有必要建立系统的海上电气平台设计和安全评价体系,其有效性需要通过海上电气平台整体结构动力模型试验进行验证。联合考虑弹性相似律和弗劳德数(Froude)相似得到水弹性相似律,以水弹性相似律为基础得到电气平台各参数之间的相似关系,完成海上电气平台整体结构试验模型的设计。在海上电气平台动力模型试验中引入水弹性相似律保证了结构原型与模型间的动力特性以及水环境的相似关系;并通过引入牛顿相似律对冰荷载进行了相似转换。采用海洋平台分析软件 SACS 分别建立海上电气平台原型和模型的有限元数值模型,开展原型和模型结构响应分析和动力特性分析,同时依据数值分析结果对水弹性相似律进行了验证。

关键词: 海上电气平台; 水弹性相似律; 弹性相似律; 弗劳德数相似; 牛顿相似律; 动力模型试验

中图分类号: P752;U656.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)01-0033-05

随着海上风电的发展,对于海上电气平台的安全设计提出了更高的要求。海上电气平台面临多种复杂的环境荷载共同作用,如风、波浪、海流、海水冲刷等,此外,在某些具体海域布置海上电气平台时还需要考虑海冰和地震的影响。研究表明,在渤海湾海域,冰对海上结构物的作用要大于波浪和风的作用,因此冰荷载是该海域海上结构物的控制荷载^[1]。冰排对海上结构物的作用破坏形式一般分为挤压破坏、屈曲破坏和弯曲破坏三种。一般以挤压破坏的冰力最大,弯曲破坏的冰力最小,大小可差几倍。R.G.Bea等^[2]对传统的钢质导管架平台在强震下的地震反应进行了分析。李世龙等^[3-4]研究了导管架平台在波浪荷载作用下的动力响应以及波浪和海流联合作用下的动力响应,为导管架平台在海洋环境荷载作用下整体强度状况提供了一种可供选择的实用计算方法。

在复杂环境荷载的组合作用下,如何确保电气平台的安全、保证电气设备的正常运行,是进行近海风电场建设的关键问题之一。因此,有必要开展近海电气平台在风、波浪、海冰、地震等荷载共同作用下的数值仿真分析和物理模型试验。国内鲜有开展海上电气平台动力模型试验,然而针对类似结构如海上石油钻井平台、海上风机、海上储油罐平台,已经开展过动力模型试验。王国栋等^[5]针对 JZ220_2MUQ 型导管架平台进行了相似模型试验研究。李牧轩^[6]开展了海上储油平台的动力模型试验研究。王文华等^[7]开展了海洋环境联合作用下的海上风机的动力模型试验研究。李桐魁^[8]主要分析了设计冰条件下冰力模型试验结果,并与原设计冰力进行了比较。

本文以水弹性相似律作为海上电气平台整体结构试验模型设计的理论依据;根据牛顿相似律,对海上电气平台冰荷载进行相似转换,保证海上电气平台原型与模型动力响应之间的相似关系;最后采用数值仿真方

收稿日期: 2014-07-18

基金项目: 国家高新技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA051704)

作者简介: 伏亮明(1964-),男,湖南湘阴人,教授级高级工程师,主要从事水利水电工程建筑设计工作。

E-mail: Fu_Liangming@126.com

法,对结构原型和模型进行动力响应分析,并且对水弹性相似律进行验证。

1 动力模型试验相似关系

1.1 水弹性相似律

结构动力试验应该满足弹性相似律^[9]:

$$\lambda_\rho \lambda_A \lambda \lambda_u \lambda_t^{-2} = \lambda_l \lambda_E \lambda_u \lambda^{-3} \quad (1)$$

式中: λ_ρ 为密度比尺; λ_A 为截面面积比尺; λ 为几何比尺; λ_u 为变形比尺; λ_t 为时间比尺; λ_l 为截面惯性矩比尺; λ_E 为弹模比尺。

海上电气平台基础结构以弯曲振动为主,在保证截面弯曲刚度相似的条件可将弹性相似律写为:

$$\lambda_t^2 = \lambda^4 \lambda_\rho \lambda_E^{-1} \lambda_r^{-2} \quad (2)$$

式中: λ_r 为惯性半径比尺。

波浪荷载作为海上电气平台的主要荷载,模型试验必须要考虑。因此需要同时考虑弗劳德数相似^[10]:

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda} \quad (3)$$

式中: λ_v 为流速比尺。

考虑到加速度比尺 $\lambda_g = 1$, 可得:

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda} \quad (4)$$

同时满足弹性相似律和弗劳德数相似,将式(2)和(4)联立,可得:

$$\lambda^3 \lambda_r^{-2} = \lambda_E \quad (5)$$

式(5)为考虑了弯曲刚度相似的水弹性相似律。水弹性相似律的建立为海上电气平台动力模型设计提供了理论基础。

根据牛顿相似律^[11],有

$$\lambda_F = \lambda^2 \lambda_v^2 \lambda_\rho = \lambda^3 \quad (6)$$

式中: λ_F 为力的比尺。

这也就意味着动力过程中所有作用力的比值都应保持一致,并等于一个常数。

1.2 基本参数相似关系

以水弹性相似律为基础,通过理论推导可以得到基本参数的相似关系(见表1)。

表 1 基本参数相似关系

Tab. 1 Similarity relations of basic parameters

参数	长度	面积	体积	密度	质量	速度	时间	力	力矩	应力
量纲	[L]	[L ²]	[L ³]	[ML ³]	[M]	[LT ⁻¹]	[T]	[MLT ⁻²]	[ML ² T ⁻²]	[ML ⁻¹ T ⁻²]
相似关系	λ	λ_A	$\lambda \lambda_A$	$\lambda_\rho = 1$	$\lambda_\rho \lambda \lambda_A$	$\sqrt{\lambda}$	$\sqrt{\lambda}$	λ^3	λ^4	$\lambda^4 \lambda_\rho \lambda_l^{-1}$

2 动力试验模型设计

2.1 动力试验模型设计

结构原型材料为钢材,其弹性模量为 206 GPa,模型材料拟选用有机玻璃,其弹性模量经材料试验测量为 3.85 GPa,由此可得弹模比尺为 53.50。综合考虑大连理工大学的水下地震和波流模拟系统的能力以及相关的水文条件,初步拟定几何比尺为 30。根据式(5)计算得惯性半径比尺为 22.464。式(5)为保证截面弯曲刚度相似条件下的水弹性相似律,对于结构的截面尺寸而言不必满足严格的几何相似关系,这为试验模型的设计和加工提供了很大的便利。参考我国某海域海上风电场电气平台(基本参数见图1),依据水弹性相似律确定海上电气平台结构动力试验模型的基本尺寸(见图2)。

电气平台上部结构由 4 层甲板组成:底层甲板用于安放附属设备;1 层和 2 层甲板安放电气设备;3 层甲板为直升机甲板。构成甲板的主梁和次梁为工字钢,如果按照几何比尺进行相似转换,则腹板厚度过小。为了便于模型加工,甲板的主梁和次梁在保证各方向弯曲刚度相似的条件下进行相似转换,得到等效矩形截

面。对于电气设备, 考虑质量和重心位置相似, 用铅块进行模拟。

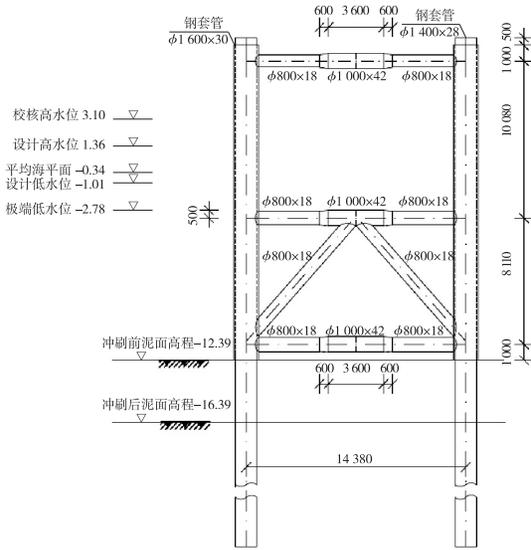


图 1 平台支撑结构原型示意(单位:高程,m;其他,mm)

Fig. 1 Prototype of substructure of offshore substation platform (unit: elevation in m, others in mm)

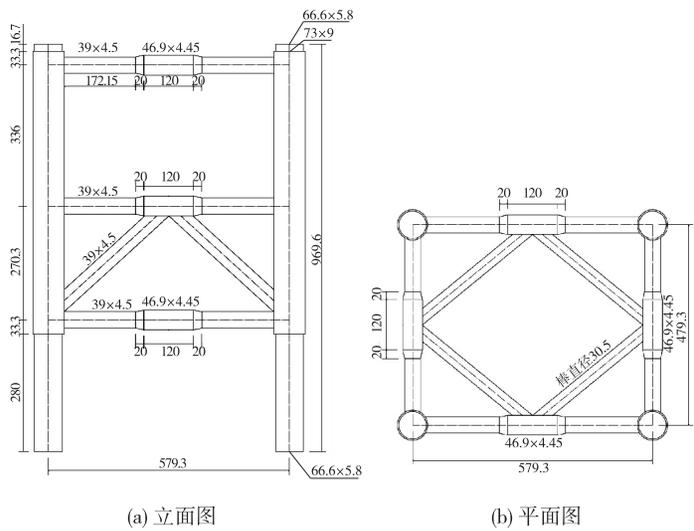


图 2 平台支撑结构模型(单位:mm)

Fig. 2 A model of substructure of offshore substation platform (unit: mm)

2.2 试验环境荷载参数

按照表 1 中相似比尺进行环境荷载参数转换, 模型的设计风速为: 高程 10 m, 持续时间 10 min 时, 50 年一遇、5 年一遇、1 年一遇和多年平均的重现期风速分别为 7.17, 4.97, 3.89 和 1.75 m/s。模型的设计水位与设计波浪参数见表 2。

表 2 模型的设计水位与设计波浪参数

Tab. 2 Design parameters of water level and design wave of a model

水位	对应水深/m	波浪重现期/a	$H_{1\%}$ /m	\bar{T} /s	L /m
极端高潮位(0.043 6 m)	0.470	50	0.160	1.110	2.757
设计高潮位(0.023 6 m)	0.450	5	0.124	1.026	2.347
设计低潮位(-0.022 5 m)	0.404	1	0.092	0.909	1.738
极端低潮位(-0.044 m)	0.382	50	0.091	0.907	1.730
		5	0.071	0.893	1.387

注: $H_{1\%}$ 为超越概率为 1% 时的波高, \bar{T} 为平均周期, L 为波长。

对于某些海上电气平台而言, 冰荷载可能成为控制荷载。为了研究电气平台在海冰作用下的动力响应, 本试验拟采用大连理工大学研发的 DUT-1 模型冰进行模拟。参考我国某海域具体海冰资料依据速度相似比尺, 得到作用于试验模型的平均冰速为 9 cm/s, 最大试验冰速为 20 cm/s, 模型冰的抗压强度为 70 kPa。

3 相似关系验证

使用有限元分析软件系统 SACS 分别建立海上平台结构原型和模型的有限元数值模型, 对于原型结构中的桩土相互作用部分, 采用等效桩方法进行模拟。以考虑桩土相互作用模型与考虑等效桩模型分别计算的基频相等作为条件, 确定等效桩长度为 6 倍桩径。基于等效桩模型建立电气平台原型和模型的有限元模

型,其中原型的有限元模型如图 3 所示。

分别对海上电气平台的原型和模型进行动力特性计算,得到前 10 阶频率(见表 3)。根据频率相似关系,将“模型频率”转化为原型的“相似频率”,与“原型频率”进行对比,前 3 阶频率的相对误差分别为 1.073%, 0.828% 和 1.137%。前 3 阶振型以整体弯曲变形为主,考虑到试验模型是按照弯曲刚度相似的原则建立,由相对误差可以看出,模型中引入的假设和简化并没有影响电气平台的整体动力特性,相似关系是合理和准确的。对于以扭转变形为主的部分高阶模态,可能会引起较大的误差。

在重现期为 50 年的冰荷载作用下,在 SACS 中对结构原型和试验模型进行分析,得到各节点内力,对比结果见表 4。通过表 4 可以看出,基于水弹性相似律所得的基本参数的相似关系得到了验证,这说明由水弹性相似律得到结构动力试验结果是合理的。

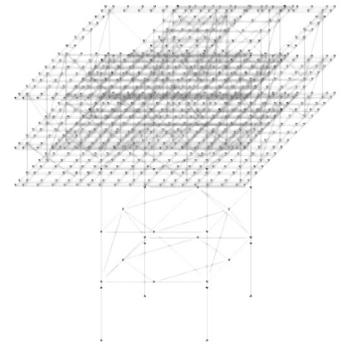


图 3 海上电气平台有限元模型
Fig. 3 An FE model for offshore substation platform

表 3 动力试验模型前 10 阶频率

Tab. 3 Modes of a dynamical model from 1st to 10th frequency

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
原型频率	0.768	0.849	0.888	2.927	3.207	3.426	3.542	5.091	5.208	5.300
模型频率	4.252	4.691	4.921	18.484	19.314	20.075	20.557	27.998	28.835	29.256
相似频率	0.776	0.856	0.898	3.375	3.526	3.665	3.753	5.112	5.264	5.341

表 4 相似律验证

Tab. 4 Validation of similarity

101 节点	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	201C 节点	F_x/kN	F_z/kN	F_z/kN
模型内力	0.05	0	0.02	模型内力	0.04	0	0
原型内力	1 284.51	0.24	606.93	原型内力	1 005.92	2.2	8.94
转换内力	0.048	0	0.022	转换内力	0.037	0	0
相对误差	5.10%	0	11.00%	相对误差	7.40%	0	0

4 结 语

基于水弹性相似律,同时考虑模型加工的需要引入了弯曲刚度相似,实现了海上电气平台动力试验的物理模型设计。使用 SACS,分别建立原型和模型的数值仿真模型,开展动力特性研究,由计算结果可以看出,按照抗弯刚度相似原理建立的试验模型,以弯曲为主的低阶阵型能够很好地满足相似关系。为后续开展海上电气平台在波浪、海流、地震和海冰作用下动力模型试验打下了可信的理论基础。

参 考 文 献:

- [1] 金书成, 杨炎华. 冰荷载对导管架海洋平台的作用研究[J]. 中国海洋平台, 2010(5): 15-19. (JIN Shu-cheng, YANG Yan-hua. Study on the effect of ice loads on the offshore jacket platform[J]. China Offshore Platform, 2010(5): 15-19. (in Chinese))
- [2] BEA R G, AKKY M R, AUDIBERT J M E. Earthquake response of offshore platforms [J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(2): 377-400.
- [3] 李世龙, 吴家鸣, 刘昊宇. 波浪载荷作用下的导管架平台动力响应分析[J]. 海洋技术, 2013(2): 66-72. (LI Shi-long, WU Jia-ming, LIU Hao-yu. Structural analysis of jacket platform under the action of wave[J]. Ocean Technology, 2013(2): 66-

- 72.(in Chinese))
- [4] 李世龙,吴家鸣.波浪、海流载荷作用下导管架平台的结构响应分析[J]. 广东造船, 2012(6): 41-44.(LI Shi-long, WU Jia-ming. Structural analysis of jacket platform under the action of wave and current[J]. Guangdong Shipbuilding, 2012(6): 41-44.(in Chinese))
- [5] 王国栋,赵宏林,段梦兰,等. JZ20-2MUQ型导管架平台相似模型设计研究[J]. 石油矿场机械, 2011(11): 1-5.(WANG Guo-dong, ZHAO Hong-lin, DUAN Meng-lan, et al. Reserch on design for similar model of JZ20_ZMUQ jacket platform[J]. Oil Field Equipment, 2011(11): 1-5.(in Chinese))
- [6] 李牧轩. 储油罐平台动力模型试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (LI Mu-xuan. Study on dynamic model tests of offshore jacket platform with storage tank[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.(in Chinese))
- [7] 王文华,李昕,王滨,等. 海上风机整体结构动力模型试验设计[J]. 水力发电, 2014, 40(5): 77-80. (WANG Wen-hua, LI Xin, WANG Bin, et al. Design of dynamic model test of offshore wind turbine[J]. Water Power, 2014, 40(5): 77-80.(in Chinese))
- [8] 李桐魁.辽东湾平台冰力模型试验研究[J]. 中国海上油气: 工程, 1994(6): 15-21, 32.(LI Tong-kui. Model tests research on the ice force on the platform in Liaodong bay[J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 1994(6): 15-21, 32.(in Chinese))
- [9] 林皋,朱彤,林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000(1): 1-8. (LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similarity technique for dynamic structural model test[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000(1): 1-8.(in Chinese))
- [10] CHAKRABARTI S. Physical model testing of floating offshore structures[C]//Proc Int Symp Dynamic Positioning Conference. 1998: 1-32.
- [11] 林皋. 研究拱坝震动的模型相似律[J]. 水利学报, 1958(1): 79-104. (LIN Gao. Similarity relationship of arch dam dynamical model test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1958(1): 79-104.(in Chinese))

Design of dynamic model test for offshore substation platform

FU Liang-ming¹, ZHONG Yao¹, LUO Cheng-xi¹, LIU Xiao-song¹, SUN Jin-long², LIU De-cai²

(1. Powerchina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 2. Datang Shandong Power Generation Co., Ltd., Qingdao 266061, China)

Abstract: The design and safety evaluation system of offshore substation platform should be established to satisfy the developing requirement of large-scale offshore wind farm. It's availability can be verified by model test. Combining the elastic similarity and Froude similarity, the hydro-elastic similarity can be obtained. Based on it, the similar relations among the parameters can be obtained so as to help finishing the design of dynamic model of an offshore substation platform. In the model test, the hydro-elastic similarity is used to ensure the similarity relation of dynamic characteristics and wave loads between prototype and model. Also, the Newton similarity is employed to fulfill the similarity relationship of the ice loads. Using SACS, the finite element models of offshore substation prototype and model are established to analyze the structural responses and dynamic characteristics of them. Compared with the numerical results of prototype and mode test, the hydro-elastic similarity is validated.

Key words: offshore substation platform; hydroelasticity similarity; elastic similarity law; Froude similarity; Newton similarity law; dynamic model test