

风电安装船主尺度要素统计分析

王春雷¹, 林焰^{*1,2}, 叶超¹, 颀利东¹

(1. 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 船舶主尺度决定了船舶的经济与技术特性,如稳性、操纵性、快速性、载重量、造价等。在船舶设计过程中,确定主尺度是船型方案设计第一阶段,是后续技术设计的重要基础。在对第三代风电安装船特点进行理论分析的基础上,搜集整理了目前世界范围内第三代风电安装船主尺度资料,分析了风电安装船各个主尺度对载重量敏感性的变化规律和特点。结合实践经验,运用统计学方法回归出了一套主尺度计算公式,并进行了稳定性验证,该公式可供船东选择最佳船型尺度时和设计部门进行方案设计时或者进行船型技术经济性能论证时参考。

关键词: 风电安装船;主尺度确定;回归分析;敏感性;载重量

中图分类号: U674.2

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201705007

0 引言

自1991年丹麦建成世界首个海上风电场以来,海上风电发展迅猛,截至2016年底,世界海上风电总装机容量已达14 384 MW^[1]。与陆上风电相比,海上风电场安装和维护环境更为复杂、技术要求更高、涉及层面更广。最初的风电安装设备以起重船和自升式平台为主,但在风电场建设中,或出现了定位精度低、作业环境要求高,或出现了安装效率低、灵活性较差等各种各样的问题^[2-3]。随着对风电安装设备的研究,海上风电领域逐渐出现了具备自升自航能力的第三代风电安装船。

不同风电场、风机厂商,风机型号、尺寸等均存在着差异,因此风电安装船与集装箱船相比,其货物并不是标准的,还应考虑货物尺寸的变化以及最优化等问题;风电安装船可供参照的母型船较少,没有主尺度比的相关统计,亦没有成型的关于主尺度的经验公式或统计公式;尚没有专门的规范和可靠的技术经济评价方法,这使得第三代风电安装船主尺度的确定具有相当的难度。目前,许多学者对化学品船、海监船、渔政船、LNG船和浮吊船等做了主尺度分析与研究^[4-7],但至今还没

有学者对风电安装船的主尺度特点进行研究。本文搜集50余艘风电安装船资料,运用统计学方法,得到风电安装船各个主尺度对载重量的敏感性指数,并基于最小二乘法,在满足较高拟合优度(R^2 较大)的前提下,回归并筛选出一套风电安装船主尺度计算公式。

1 设计规范与设计特点

对自升自航式风电安装船的入级与检验尚是一种挑战。首先,该船以吊装风机为主要任务,是大型起重船;其次,它配备有桩腿升降系统,也是自升式平台的一种;接下来,它需要运输风机、叶片等,因此它又是布置型运输船;最后,随着风电场的深远海化,对船上的人员住宿也提出了一定要求,以“GMS Enterprise”号风电安装船为例,其配备了465 m³的淡水舱,包括船员在内的人员住宿多达150人^[8],所以它也属于客货船的范畴。尽管这些船都有了自己的设计规范和规则,但对风电安装船来说并不能简单地合并。因此,鉴于风电安装船历史短、船型复杂、很多技术问题的研究尚待深入等问题,世界各国至今还没有对其制定专

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-07-26。

基金项目: 海洋可再生能源专项资金资助项目(QDME2013ZB01);工业和信息化部高技术船舶科研计划资助项目(工信部联装[2014]498号);广东省科技计划项目(2015B090904010,2016B090918092)。

作者简介: 王春雷(1992-),男,硕士生,E-mail:wang_chunlei@aliyun.com;林焰*(1963-),男,教授,博士生导师,E-mail:linyanly@dlut.edu.cn。

门的规范. 国外方面, DNV 在 2002 年颁布了适用于自升自航式多功能海洋服务平台的指南——Guidelines for Offshore Structural Reliability^[9]; ABS 制定了 Guide for Building and Classing Liftboats^[10], 并于 2011 年对风电安装船指定了专门的船体符号——IMR. 国内方面, 2012 年 CCS 发布了《海上风机作业平台指南》, 目前该船型主要按照《钢质海船入级规范》^[11]和《海上移动平台入级规范》^[12]对沿海航区的船舶和自升式平台的要求进行设计^[13].

设计一艘新船, 要保证稳性、操纵性、总布置等技术要求, 要满足船坞、码头等限制条件, 还要优化得到最佳的经济和社会营运效益^[14]. 因此, 分析确定风电安装船主尺度要素的限制条件, 理清主尺度要素与船舶性能之间错综复杂的关系至关重要. 作为一种专门的海洋工程船, 风电安装船特定的使用功能决定了其设计特点. 沿船长方向布置的风机、塔架、叶片、直升机平台、舱室等决定着船长. 其次确定船长还要着重考虑对空船重量及造价的影响, 要满足快速性、操纵性以及浮力的需求等. 不同于一般的运输船舶, 风电安装船对稳性、耐波性和总布置的要求较高, 因此其型宽要比同尺度的货船、油船等大很多. 一般风电安装船对型深没有特别苛刻的要求, 但多数情况下, 这种沿海工程船在波浪上的稳性损失对安全极为不利, 而干舷对保证最大复原力臂及稳性消失角等有显著作用, 因此其型深也较大. 吃水主要影响着浮力, 由于风电安装船多呈箱形或驳船型船体, 其吃水一般也就较小.

2 风电安装船主尺度回归

2.1 风电安装船主尺度比范围

通过分析 50 余艘风电安装船的统计资料可以发现其主要尺度比较接近. 表 1 为目前世界各国已建、在建或设计完成的风电安装船主尺度比大致范围, 在已知风电安装船的某一项主尺度时可以用表 1 对其他主尺度进行粗估. 一般船长较大的风电安装船的 L/B 、 L/D 、 L/d 都比较大, 型宽较大的风电安装船 B/D 较大.

2.2 正态性评估

在进行回归分析之前, 首先需要进行数据正态性评估, 使用 SPSS 软件计算风电安装船船长 L 、型宽 B 、型深 D 、吃水 d 、载重量 Z 统计数据的偏度和峰度如表 2 所示.

表 1 风电安装船主尺度比范围
Tab. 1 The principal dimension ratio scope of wind power installation vessel

L/B	L/D	L/d
1.48~3.66	9.92~16.31	13.78~30.35
B/D	B/d	d/D
3.20~7.16	6.00~15.11	0.44~0.79

表 2 统计数据的偏度、峰度
Tab. 2 The skewness and kurtosis of the statistics data

统计量	偏度	偏度的标准误	峰度	峰度的标准误
L	-0.11	0.35	-1.41	0.68
B	0.31	0.35	1.24	0.69
D	0.27	0.35	-1.03	0.68
d	-0.30	0.35	-1.33	0.69
Z	0.22	0.39	-1.28	0.70

从表 2 可以看出, 所统计数据的偏度基本都落在 $[-2\sqrt{6/N}, 2\sqrt{6/N}]$ 内, 峰度基本都落在 $[-2\sqrt{24/N}, 2\sqrt{24/N}]$ 内, 因此可初步认定所统计的数据近似遵从正态分布. 但由于统计资料中存在着相同尺度的型船以及一些特殊的离群值, 各个统计量的正态性并不是很强. 因此针对统计数据的特点, 一方面需要对统计数据进行相关正态化变换或正态化加强后再进行线性回归, 或者进行曲线回归和非线性回归; 另一方面需要检查统计数据中是否存在非常规型船数据, 否则可能会影响模型最后的回归结果. 如“*Inwind*”号风电安装船仅有 3 条桩腿, 它与 4 条或 6 条桩腿的常规船在主尺度和船体形状上有着显著的差别, 因此在进行回归时, 本文对该类特殊船不做过多考虑. 采用统计学中分析残差向量和 cook 距离值的方法判别并剔除掉异常值和影响点后^[15], 剩下 40 余艘风电安装船资料进入下一步研究.

2.3 敏感性分析

考虑到风电安装船设计之初一般只会给出作业海域、所装载风机数量、续航力、人员住宿以及船舶设备、动力装置等, 因此回归时以载重量为出发点. 参考文献^[16]所提出的相对敏感性分析方法, 分别将船长、型宽、型深、吃水指标对载重量的敏感性进行计算和分析, 从而定性地探讨出风电安装船各个主尺度与载重量关系的相对重要程度.

用载重量指标 Z 来表征风电安装船的载重量, 即载重量能力指数. 它与船舶主尺度、总布置方案以及方形系数等其他因素有关. 因此, 可用下

面的函数形式来表达 Z :

$$Z=f(S,O) \tag{1}$$

式中: S 表示风电安装船各个主尺度, O 表示其他与风电安装船载重能力有关的船型系数或参数.

敏感性分析的目的是指从定量分析的角度, 研究 Z 与 S 之间的变化规律. 定义敏感性指数 S_a 如下:

$$S_a=\frac{(S-S^*)/S^*}{(Z-Z^*)/Z^*}=\frac{\Delta S/S^*}{\Delta Z/Z^*} \tag{2}$$

式中: S^* 表示参考型船的主尺度, Z^* 为对应的载重量. 因此, 敏感性指数 S_a 提供了一个衡量载重量因素与主尺度指标之间相对重要程度的一种不确定分析技术, 同时 S_a 绝对值的大小表示敏感性的大小.

本文选择“MPI Resolution”号风电安装船作为基本参考船型, 因其船型尺度适中, 数据的可靠性有所保证, 又因其为世界上第一艘风电安装船, 具有一定的代表性. 其主尺度要素如下^[17]: 船长 130 m, 型宽 38 m, 型深 8 m, 吃水 4.3 m, 载重量 4 875 t.

根据统计数据, 进行风电安装船主尺度与载重量敏感性指数计算与分析. 图 1 中横轴表示不同风电安装船的载重量相较于参考船载重量的比值, 纵轴表示不同风电安装船的船长相较于参考船船长的比值, 图中的斜率表示船长对载重量的敏感性指数.

采用同样的分析方法, 可得到型宽、型深、吃水对载重量的敏感性如图 2~4 所示.

通过比较风电安装船各个主尺度对载重量的敏感性, 可以看出船长对载重量的变化最为敏感, 而型宽对载重量的敏感性最弱(如图 5 所示). 这主要因为风电安装船型宽一般均较大, 不同的风电安装船型宽的离散趋势较弱, 观察统计数据, 其四分位距仅为 4.8 m.

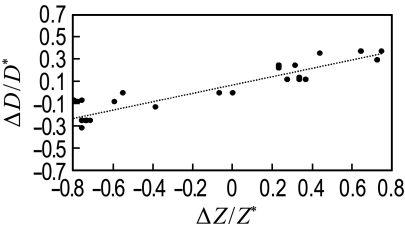


图 3 型深对载重量的敏感性
Fig. 3 The sensitivity of D to deadweight

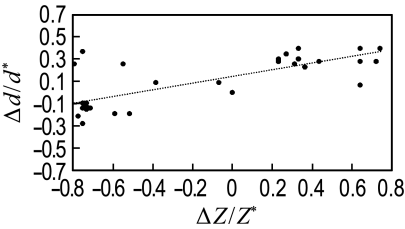


图 4 吃水对载重量的敏感性
Fig. 4 The sensitivity of d to deadweight

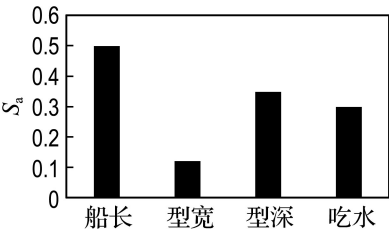


图 5 风电安装船主尺度对载重量的敏感性比较分析

Fig. 5 The comparative analysis of sensitivity of each principal dimension of wind power installation vessel to deadweight

2.4 单变量回归分析

由于风电安装船船长与载重量的关系最为密切, 选定船长和载重量作为回归分析的出发点. 各个参数的回归结果如下(下式中长度单位为 m, 载重量单位为 t), 各关系曲线图见图 6~10.

L 与 Z :
 $L=0.010\ 2Z+66.353;\ R^2=0.95 \tag{3}$

$L=1.272\ 6\sqrt{Z}+32.63;\ R^2=0.96 \tag{4}$

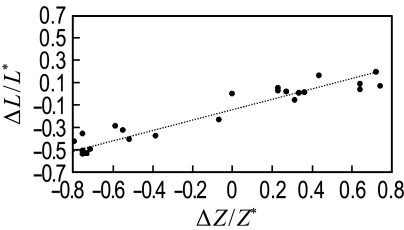


图 1 船长对载重量的敏感性
Fig. 1 The sensitivity of L to deadweight

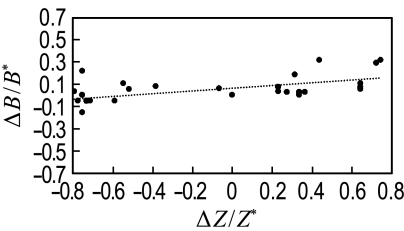


图 2 型宽对载重量的敏感性
Fig. 2 The sensitivity of B to deadweight

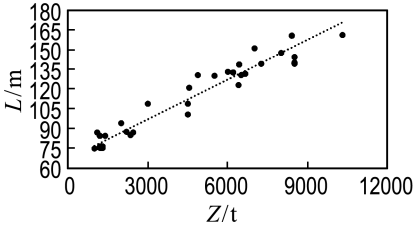


图 6 船长与载重量关系

Fig. 6 The relationship between L and deadweight

B 与 L :

$$B=0.008\ 5L^2-2.137\ 4L+173.74,\quad R^2=0.94;\quad L>100$$
$$B=0.432\ 3L+3.808\ 3,\quad R^2=0.91;\quad L\leqslant 100\quad (5)$$

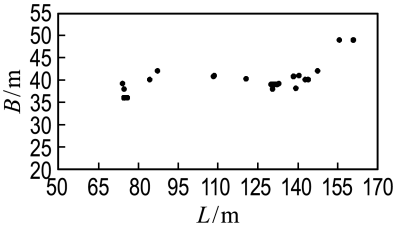


图 7 型宽与船长关系

Fig. 7 The relationship between B and L

D 与 L :

$$D=0.184\ 2L^{0.803\ 8};\quad R^2=0.95\quad (6)$$

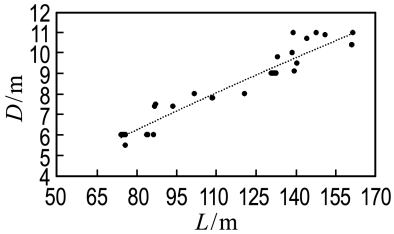


图 8 型深与船长关系

Fig. 8 The relationship between D and L

d 与 L :

$$d=0.031\ 3L+1.337\ 7;\quad R^2=0.94\quad (7)$$

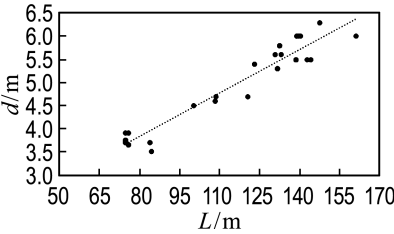


图 9 吃水与船长关系

Fig. 9 The relationship between d and L

d 与 D :

$$d=0.044\ 1D^3-1.210\ 7D^2+11.179D-29.28;\quad R^2=0.92\quad (8)$$

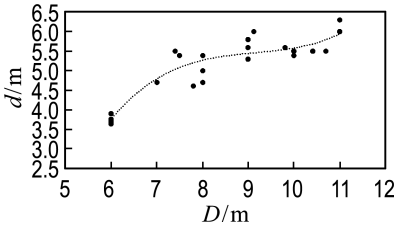


图 10 吃水与型深关系

Fig. 10 The relationship between d and D

分析上述散点图,可以看到船长的分布较为分散,但多集中在 70~90 m 和 120~140 m;型宽分布相对较为集中,多在 35~45 m,且与船舶的大小无必然联系;而吃水多分布在 3.5~4.0 m 和 5.5~6.0 m;从趋势线上可以明显看到大船的型深较大。

2.5 多元回归

采用逐步回归分析的方法并结合上述敏感度分析结果,还可得到以下多元回归模型供设计开发人员参考。

Z 与 L 、 B 、 D 、 d :

$$Z=-4\ 657.35+64.47L-85.64B+730.233D-136.75d;\quad R^2=0.96\quad (9)$$

Z 与 L 、 D :

$$Z=1\ 375.47+123.1L-2\ 349.7D-2.5LD-0.094L^2+173.514D^2;\quad R^2=0.96\quad (10)$$

3 回归模型的可靠性验证实例

在使用上述回归公式时,为便于掌握其误差范围,分别以“*Innovation*”“*MPI Enterprise*”“*GMS Endeavour*”3 艘风电安装船以及大连理工大学为渤海船舶重工设计的风电安装船(渤海方案)为例,对上述回归模型的回归效果进行检验。其主要参数如表 3 所示。

表 3 风电安装船参数指标^[8,17-18]

Tab. 3 Parameters of wind power installation vessel^[8,17-18]

船名	Z/t	L/m	B/m	D/m	d/m
渤海方案	6 500.0	130.0	40.5	9.5	5.40
<i>Innovation</i>	8 000.0	147.5	42.0	11.0	6.30
<i>MPI Enterprise</i>	4 541.9	120.7	40.2	8.0	4.70
<i>GMS Endeavour</i>	1 100.0	76.0	36.0	6.0	3.65

由表 4 可见,本文所提出的统计公式回归结

表 4 模型回归效果检验

Tab. 4 Test of the regression model

%

船名	$L^{(1)}$	$L^{(2)}$	B	D	$d^{(3)}$	$d^{(4)}$	$Z^{(5)}$	$Z^{(6)}$
渤海方案	2.0	4.0	-2.4	-3.00	0.12	1.2	-0.7	-7.10
Innovation	0.3	-0.7	3.3	-7.30	-5.50	-6.5	5.3	7.25
MPI Enterprise	-6.6	-1.9	-1.5	8.50	8.80	11.6	7.5	4.70
GMS Endeavour	2.1	-1.5	1.8	-0.24	1.82	2.3	-5.3	-8.60

注:1) L 采用式(3)计算;2) L 采用式(4)计算;3) d 采用式(7)计算;4) d 采用式(8)计算;5) Z 采用式(9)计算;6) Z 采用式(10)计算.

果的误差基本都在 10%左右的范围内,说明回归效果较为显著,回归模型整体上较为合理,分析、整理出的回归方程具有一定的针对性和代表性.

4 结论与建议

(1)风电安装船主尺度的确定属于布置型船问题.为满足特殊工程作业需要,一般风电安装船方形系数较大(0.6 左右),载重量系数较小(0.3 左右),弗劳德数多在 0.10~0.20.

(2)风电安装船各个主尺度要素相互影响,拟定时要兼顾各种性能,选取适宜的主尺度比.随着海上风电的深远海化,对风电安装船主尺度带来的影响是一方面型宽和型深有所增大,另一方面可能会朝着双甲板发展^[19].

(3)4 艘风电安装船验证表明本文所提出的回归公式的拟合效果较为明显,应用回归分析法来研究风电安装船主尺度要素之间的规律是可行的.今后还可进一步尝试应用多目标规划、神经优化等方法对其主尺度进行研究^[20-22].

(4)影响主尺度要素的因素很多,统计公式的结果反映的只是平均值,比如尽管式(8)拟合效果较好,但对“MPI Enterprise”船的计算结果与实际值相比仍有一定偏差.因此在具体应用过程中,可按照相近的母型船资料进行适当修正.

参考文献:

[1] GWEC. Global wind 2016 report [R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2017.

[2] DANG A, SHIN S C, KIM S Y, *et al.* Comparative evaluation of different offshore wind turbine installation vessels for Korean west-south wind farm [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2017, **9**(1): 45-54.

[3] 大连理工大学船舶与海洋工程设计研究所. 渤海船舶重工风电安装船关键技术研究报告[R]. 大连: 大连理工大学船舶工程学院, 2017.

Marine Design & Research Institute of Dalian

University of Technology. Key technology research report of wind power installation vessel of Bohai shipbuilding heavy industry [R]. Dalian: School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)

[4] 桑松, 林焰, 纪卓尚. 45000 吨化学品运输船主尺度数学模型建立[J]. 船舶工程, 2001(4): 11-13. SANG Song, LIN Yan, JI Zhuoshang. Establishment of math model of 45, 000 dwt chemical tanker's principal dimensions [J]. *Ship Engineering*, 2001(4): 11-13. (in Chinese)

[5] 刘飞, 林焰, 李纳, 等. 海监船与渔政船主尺度模型研究[J]. 舰船科学技术, 2012, **34**(7): 49-54. LIU Fei, LIN Yan, LI Na, *et al.* The regressive analysis of the principal dimensions of the fishery patrols based on single variable [J]. *Ship Science and Technology*, 2012, **34**(7): 49-54. (in Chinese)

[6] 逢金星, 林焰, 纪卓尚. LNG 运输船能效设计指数[J]. 中国造船, 2015, **56**(3): 124-134. PANG Jinxing, LIN Yan, JI Zhuoshang. Energy efficiency design index of LNG carriers [J]. *Shipbuilding of China*, 2015, **56**(3): 124-134. (in Chinese)

[7] JIN Chaoguang, YU Yanyun, WANG Yunlong, *et al.* Notice of retraction model study on the principal dimensions of the revolving floating crane based on SVM [C]// *International Conference on Computer Application and System Modeling*. Piscataway: IEEE, 2010: V13-205-V13-208.

[8] GMS. Our fleet [EB/OL]. [2016-9-18]. <http://www.gmsuae.com/>.

[9] SIGURDSSON G, CRAMER E. Guidelines for offshore structural reliability-application to jack up structures [R]. Oslo: DNV, 2002.

[10] ABS. Guide for Building and Classing Liftboats [M]. Houston: HIS, 2011.

[11] 中国船级社. 钢制海船入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.

CCS. Rules for Classification of Sea-Going Steel Ships [M]. Beijing: China Communications Press, 2016. (in Chinese)

[12] 中国船级社. 海上移动平台入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.

- CCS. **Rules for Classification of Mobile Offshore Units** [M]. Beijing: China Communications Press, 2016. (in Chinese)
- [13] 姚震球, 马义猛, 韩强, 等. 海上风机吊装作业船全船结构强度有限元分析[J]. 船舶力学, 2012, **16**(1/2):136-145.
- YAO Zhenqiu, MA Yimeng, HAN Qiang, *et al.* Whole hull's structural strength analysis of offshore wind turbine installation vessel [J]. **Journal of Ship Mechanics**, 2012, **16**(1/2):136-145. (in Chinese)
- [14] 林焰, 陈明, 王运龙, 等. 船舶设计原理[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2016.
- LIN Yan, CHEN Ming, WANG Yunlong, *et al.* **Principles of Ship Design** [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [15] 王怀亮. 回归诊断在统计数据异常值探测中的应用[J]. 黑龙江对外经贸, 2011(2):118-119.
- WANG Huailiang. Application of regression diagnosis in detection of outliers in statistical data [J]. **HLJ Foreign Economic Relations & Trade**, 2011(2):118-119. (in Chinese)
- [16] SEN D. A study on sensitivity of maneuverability performance on the hydrodynamic coefficients for submerged bodies [J]. **Journal of Ship Research**, 2000, **44**(3):186-196.
- [17] MPI. About MPI offshore's WTIVs [EB/OL]. [2017-07-25]. <http://www.mpi-offshore.com>.
- [18] 大连理工大学船舶与海洋工程设计研究所. 渤海船舶重工风电安装船方案设计报告[R]. 大连: 大连理工大学船舶工程学院, 2017.
- Marine Design & Research Institute of Dalian University of Technology. Research report of wind power installation vessel of Bohai shipbuilding heavy industry [R]. Dalian: School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [19] 大连理工大学. 高装载量、多工况、环保型风电安装船: 105667726A [P]. 2016-06-15.
- Dalian University of Technology. A kind of environmental oriented wind power installation ship, which has large load weight and multi-mode working ability: 105667726A [P]. 2016-06-15. (in Chinese)
- [20] 林焰, 纪卓尚. 船舶主尺度神经优化分析[J]. 中国造船, 1993(4):47-52.
- LIN Yan, JI Zhuoshang. Ship principal dimension analysis by neural optimization [J]. **Shipbuilding of China**, 1993(4):47-52. (in Chinese)
- [21] 郝聚民, 纪卓尚, 戴寅生, 等. 多目标模糊优选法及其在船舶主尺度优选中的应用[J]. 大连理工大学学报, 1998, **38**(4):373-377.
- HAO Jumin, JI Zhuoshang, DAI Yinsheng, *et al.* Multiobjective fuzzy comprehensive assessment and its application to assessment of ship's principal dimensions [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 1998, **38**(4):373-377. (in Chinese)
- [22] LIN Yan, YU Yanyun, GUAN Guan. Research on energy efficiency design index for sea-going LNG carriers [J]. **Journal of Marine Science and Application**, 2014, **13**(4):430-436.

Statistical analysis of principal dimensions of wind power installation vessel

WANG Chunlei¹, LIN Yan^{*1,2}, YE Chao¹, XIE Lidong¹

(1. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology,
 Dalian 116024, China)

Abstract: The ship's principal dimensions determine the economic and technical characteristics of the ship, such as stability, maneuverability, speed, deadweight, cost and so on. In the process of ship design, it is confirmed that the determination of principal dimension is the first stage of ship design, and it is an important foundation for the follow-up technical design. The characteristics of wind power installation vessels (Generation III) are analyzed theoretically, and worldwide information about principal dimensions data of wind power installation vessels at present is collected and sorted. The sensitivity of each principal dimension to deadweight is analyzed. A new solution to hull principal dimensions is regressed based on statistics and practical experience, and its reliability is tested and proven. It can be used as a reference when doing project design by designers or selecting the optimal principal dimensions by shipowners. In addition, it can also help to carry out technical economic performance discussion.

Key words: wind power installation vessel; determination of principal dimensions; regression analysis; sensibility; deadweight