

文章编号:1001-4500(2009)05-0011-06

# 水平动载作用下桶基周围砂层液化特性的数值模拟

李 驰<sup>1</sup>, 鲁晓兵<sup>2</sup>, 王淑云<sup>2</sup>

(1. 内蒙古工业大学,呼和浩特 010051; 2. 中国科学院力学研究所,北京 100080)

**摘 要:** 针对水平动载作用下桶基周围饱和砂层中液化度的变化和液化后的残余强度进行了数值模拟,分析了动载特性和土性参数对砂层中液化度的影响,以及动载作用下砂层中孔压的累积和轴向应变的变化特性。获得了砂层在不同轴向应变破坏标准下的液化强度曲线,以及桶基周围砂层不出现液化的临界动载振幅值、液化出现的应变门限值等数据。通过与饱和砂层动三轴试验结果比较,文中计算结果与试验结果接近。

**关键词:** 液化特性;临界动荷载;应变门限值;等效动冰载

**中图分类号:** TE319 **文献标识码:** A

## NUMERICAL SIMULATING ON THE LIQUEFACTION CHARACTERISTICS OF SATURATED SAND AROUND BUCKET FOUNDATIONS UNDER HORIZONTAL DYNAMIC LOADS

LI Chi<sup>1</sup>, LU Xiao-bing<sup>2</sup>, WANG Shu-yun<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The development of liquefaction degree and residual strength of sand layer around bucket foundations under horizontal dynamic loads are simulated. The effects of dynamic load characteristics (frequency and amplitude) and soil properties on liquefaction degree are investigated, and the accumulation of pore pressure and variation of axial strain are studied, and the curves of liquefaction strength under different failure criterions of strain are obtained. It is shown that the critical amplitude of vibration is 0.08m and strain threshold value is 2.0%. The calculated results are close to the experimental results.

**Key words:** liquefaction characteristic; critical dynamic loads; strain threshold values; horizontal dynamic loads

## 0 引言

动载作用下饱和砂层的液化问题是一个古老又年轻的课题。随着海洋资源的开发利用和近海重力式采油平台的迅速发展,研究砂层液化特性以及循环荷载作用下平台地基的动力稳定性,是海洋土层动力反应分析中的一项重要内容,对海洋平台的设计有着重要的意义。

文献[1]的研究结果表明,液化出现的关键在于孔隙水压是否能够在短时间内得到累积,使得土颗粒间有效应力降低甚至丧失。早期的液化研究主要是液化产生的条件、液化机理以及液化判定等问题。随着研究的深入,人们越来越关注于液化程度的预测和液化后危害性的评价<sup>[2-3]</sup>。文献[4]中引入液化度的概念来

收稿日期:2009-04-13

基金项目:中科院、中海油联合重大项目(kjcx2-SW-L03-01)

作者简介:李驰(1973-),女,博士,教授,从事土动力学方面的教学和科研工作。

判定土层液化后强度降低的程度,并将液化度定义为超孔隙水压力与上覆初始有效应力的比值。已有的研究成果表明,桶形基础或桩基础周围土层在动载作用下的液化或软化,只出现在一定区域内而并不是整个区域<sup>[5-6]</sup>。

本文针对桶形基础在水平动载下饱和砂层的液化度及其影响因素进行了数值模拟。分析一定动载作用下砂层的液化度和液化后残余强度,获得不同轴向应变破坏标准时液化强度曲线,以及不使砂层出现液化时的临界动载幅值、液化出现时应变门槛值的大小等数据。与饱和砂层动三轴试验结果比较,本文计算结果与试验结果接近。该计算结果可为评价海洋动载下砂层的液化和液化后的危害性提供参考。

## 1 砂层数值计算模型

### 1.1 计算模型的建立

设地基土为有限深、水平方向以桶基侧壁为边界的半无限的饱和砂层。砂层为水和土骨架两相介质,考虑动力计算耦合渗流运动条件。饱和砂层顶部初始水头为 0,底面为不透水层,初始孔隙水压呈线性变化。

参考海洋动载特性以及海洋结构物的动力反应研究结果<sup>[7-8]</sup>,建立饱和砂层的平面应变计算模型。即设饱和砂层顶部自由,土底面施加垂直约束,将给定频率、振幅呈线性变化的正弦式动载直接施加于饱和砂层左侧边界处(即桶基侧壁处),并沿深度用给定的位移函数来模拟动载作用下结构物与砂层的相互作用载荷。首先考虑土体在侧限状态下,初始应力逐渐达到平衡。然后放开左侧约束(底面仍然设置垂直约束,右侧面为无反射边界),在砂层左侧边界处输入动载时程,按照平面应变计算模型,研究砂层在  $x-z$  平面内的应力及变形。为了减小桶基高度和宽度对计算结果的影响,以下计算中用土层相对深度 ( $z/h$ ) 和土层相对宽度 ( $x/h$ ) 来反映动力响应沿土层深度和土层宽度的分布情况。

### 1.2 计算参数的确定

计算中,土骨架采用 Finn 模型(M-C 模型),孔隙水按照各向同性弹性模型考虑。参考文献[7]中砂层的弹性模量为  $2.6 \times 10^8$  Pa,泊松比为 0.3,内摩擦角为  $36.5^\circ$ ,砂层密度为  $1600 \text{ kg/m}^3$ 。孔隙率为 0.4,干密度为  $1728 \text{ kg/m}^3$ ,比奥系数设为 1.0,渗透系数为  $1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ,水的体积模量为  $2 \times 10^9$  Pa,水的密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,孔隙比  $e = 0.40$ 。

按照 Finn 模型,利用 Byrne 方程计算孔压的应变增量模式,见公式(1)。依据饱和砂层不排水动三轴试验结果<sup>[6-7]</sup>,砂土相对密度为 0.54。按照公式(2)、(3)确定 Finn 模型中的计算参数。其中,剪应力门槛值取为 0,最小时间步取为 50。

$$\frac{\Delta v}{v} = c_1 \exp(-c_2 (\frac{\Delta \tau}{\sigma'})^n) \quad (1)$$

$$c_1 = 7600 \times (D_r)^{-2.5} \quad (2)$$

$$c_2 = \frac{0.4}{c_1} \quad (3)$$

式中:  $\frac{\Delta v}{v}$  为体积增量;  $\Delta \tau$  为循环剪应变幅值;  $c_1$ 、 $c_2$  为计算参数,不变量;  $D_r$  为砂土相对密度。

## 2 液化度及其影响因素

### 2.1 砂层中的液化度分布

图 1 为载荷时程,动载频率为 1.0 Hz,动载振幅自土顶到土底逐渐减小,土顶振幅 16cm,土底振幅为 0。通过数值模拟,可知不同断面处液化度随深度和宽度的变化(见图 2):在离左侧一定距离处,自土顶面到土底面液化度逐渐减小,土顶面位置处 ( $x = 0, z = h$ ) 的液化度最大为 0.70,土底面位置处 ( $x = 0, z = 0.2h$ ) 液化度最小为 0.06,在深度  $0.6h \sim z \sim h$  范围内液化度较大。一定深度处,自土层左侧边界随距离的增加,液化度逐渐减小,在  $x > 0.85h$  后,液化度迅速减小。在距土层左侧边界一倍桶高位置处,土顶面处 ( $x = h, z = h$ ) 液化度为 0.2,土底面处 ( $x = h, z = 0.2h$ ) 液化度仅为 0.01。在  $x > 3.0h$  后,动载作用的影响可以忽略不

计。所以,当等效动冰载作用于土层左侧边界时,由于动载的作用在砂层中可能引起液化的区域是  $0 \leq x \leq h, 0.6h \leq z \leq h$ 。液化度最大的位置出现在土层左侧边界土顶位置处,此时,液化度为 0.70,砂层中超孔隙水压力为上覆有效应力的 70%,而砂层中尚余的有效应力为上覆有效应力的 30%,即液化后砂层中残余强度为初始值的 30%。

### 2.2 动载频率与振幅对土层液化度的影响

在不同动载频率和不同动载振幅作用下,引起饱和和砂层强度降低的幅度是不同的。图 3(a) 为不同动载频率作用时(土顶面振幅为 16cm,土底面振幅为 0)土左侧边界处液化度沿土层深度的分布情况。从图中可以看出,当动载频率小于 1.0 Hz 时,随着动载频率的增

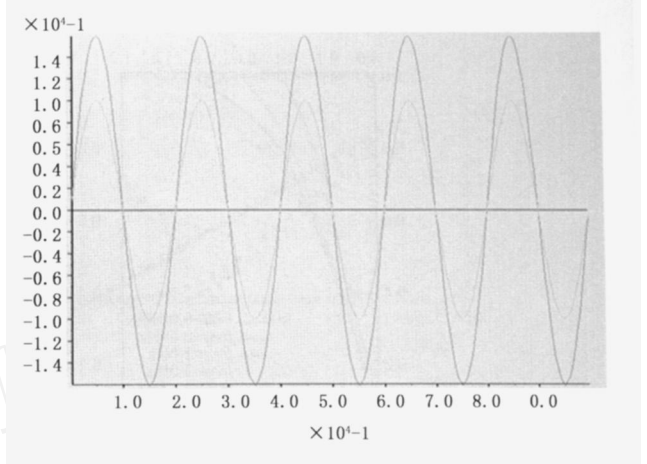


图 1 载荷时程

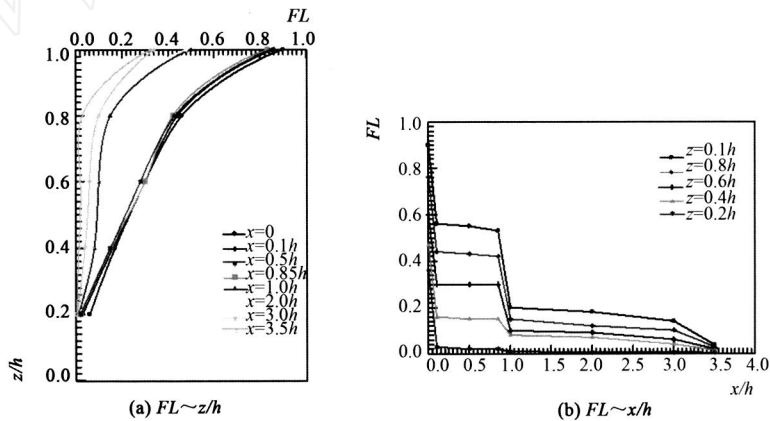


图 2 液化度随土层深度和宽度的变化

加,土中孔隙水来不及排出,孔隙水压力会在短时间内得到累积,土体容易液化,且液化度在土顶面附近有较大幅度的增加;当动载频率大于 1.0 Hz 时(如图 3(a)中虚线),在土顶面处液化度接近于 1.0,但过大的动载频率使孔隙水压力的累积只出现在土顶面附近,随土层深度的增加孔隙水压力得不到累积,到达土底面时液化度接近于 0。图 3(b) 为不同动载振幅作用时(动载频率 1.0 Hz)土左侧边界处液化度沿土层深度的分布情况。从图中可知,随着动载振幅的增加,液化度增大,在土顶附近 ( $0.6h \leq z \leq 1.0h$ ) 增加的幅度较大。

### 2.3 土性参数对土层液化度的影响

本节主要考察弹性模量对土层液化度的影响。由图 3(c) 可以看出,土骨架弹性模量越低,孔压增长的速度越快,致使土骨架强度(有效应力)衰减越快,越容易达到液化,且液化度也越大。如图 3(c) 所示,当土骨架的弹性模量由  $5 \times 10^8$  Pa 衰减到  $5 \times 10^7$  Pa 时,土顶面处的液化度会由 0.7 迅速增加到 0.9。

## 3 饱和砂层液化强度的数值模拟

### 3.1 动三轴试验简介

在饱和砂土室内动三轴试验中采用 2 种加载方式: 应力控制方式,即施加等应力,测量孔压和应变。以轴向应变达到 1%、3%、5%、8%、10% 时对应的循环次数,求得液化的临界动应力为 15%,液化出现轴向应变的门槛值为 2.5%; 应变控制方式,即施加等应变,测得孔压随时间的变化,求得土体液化后的残余应力。具体的试验步骤和试验结果详见文献[9]。

### 3.2 孔压时程的数值模拟

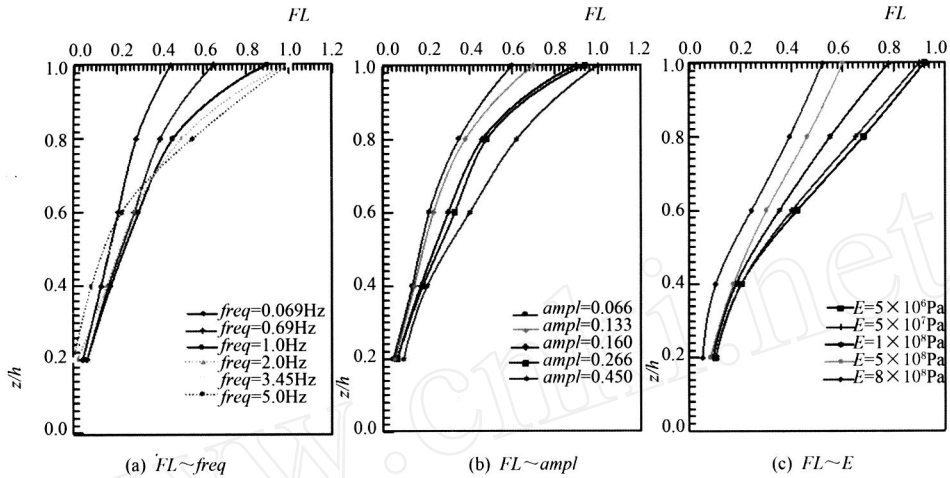


图 3 荷载作用边界处液化度沿土层深度方向的分布及其影响因素

不同动载幅值和不同动载频率下砂层中孔隙水压力的时程变化计算结果如图 4 所示。从图 4(a) 中可以看出,动载振幅越大,砂层中孔隙水压力上升越快;图 4(b)中可以看出过大的动载频率或过小的动载频率作用下,砂层中孔隙水压力都不会出现明显的累积效应,砂层中很难有超孔隙水压力的出现。只有当动载频率在一定范围内,孔隙水压力短时间内得不到消散时,才会使土中形成超孔隙水压力。孔隙水压力上升,土中有效应力减小,则砂层中就会出现不同程度的液化现象。

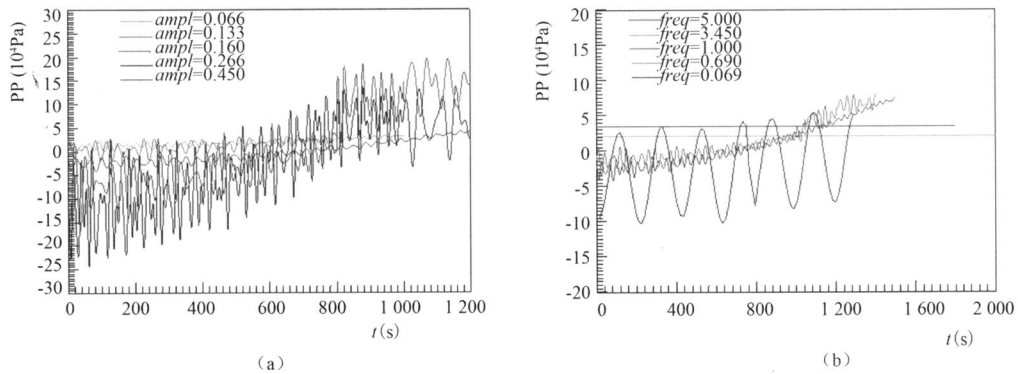


图 4 不同动载振幅和动载频率下孔隙水压力时程

### 3.3 轴向应变时程的数值模拟

不同动载振幅和不同动载频率下砂层中轴向应变的时程变化如图 5 所示。从图 5 可以看出,当动载频率一定时,动载振幅越大,土体轴向应变随时间延长增加幅度越大;当动载频率小于 1.0Hz 时,轴向应变的时程变化很接近。但在过大的动载频率作用下,土体轴向应变在初期发展缓慢。

孔隙水压力与轴向应变的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,孔隙水压力和轴向应变之间存在相关关系,即当轴向应变小于 2.0% 时,随着轴向应变的增加,孔压迅速增大;当轴向应变大于 2.0% 时,随着轴向应变的增加,孔隙压力基本保持不变。这说明轴向应变小于与大于 2.0% 时所引起的体应变不同,当小于 2.0% 时土体发生剪缩,剪切产生体积压缩,使得孔隙水压力排不出去而导致孔压上升,并且动载振幅越大、频率越小,孔压在初期上升越快;当轴向应变大于 2.0% 时,土体出现液化,孔压不再发展。随后,土体液化导致强度降低,虽可以出现较大的应变,但孔压不再上升。因此,2.0% 为液化出现的应变门槛值,动三轴试验中应变门槛值为 2.5%,二者接近。

### 3.4 土层液化强度曲线的确定

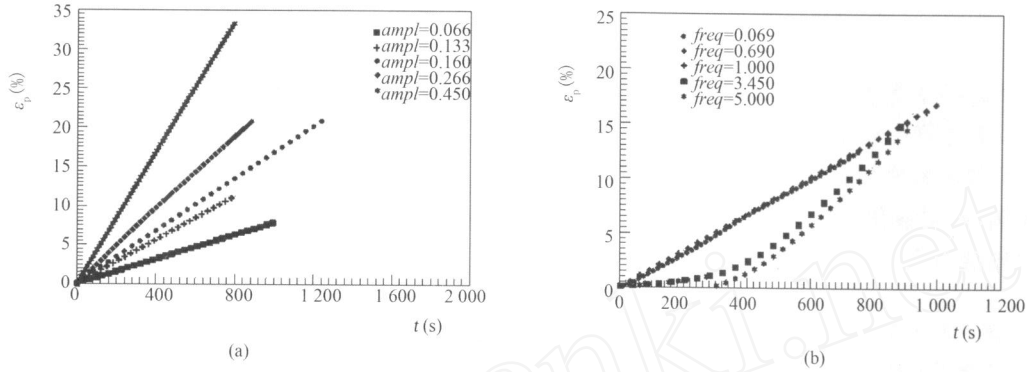


图 5 不同动载振幅和动载频率下轴向应变历程

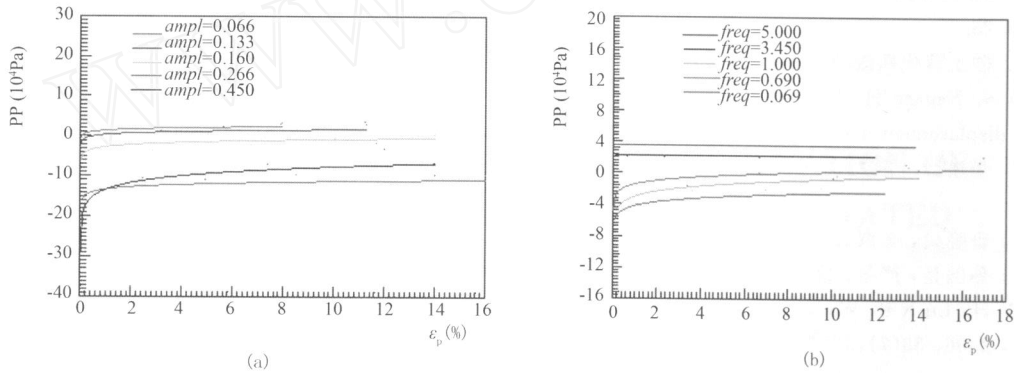


图 6 不同动载振幅和动载频率下孔隙水压力与轴向应变的关系

为确定不同动载振幅和不同动载频率下饱和土体达到破坏时的循环破坏振次(即确定砂层的液化强度曲线),需求得当轴向应变达到 1%、3%、5%、8%、10%时,动载振幅和动载频率对循环破坏振次的关系(见图 7)。从图 7 可以看出,当动载频率一定时,随动载振幅的加大,如要达到确定的破坏标准,所需的循环破坏振次应越小;当动载振幅一定时,随动载频率的减小,如要达到确定的应变破坏标准,所需的循环破坏振次也应越小。当动载频率为 1.0 Hz 时(接近动冰载频率),饱和砂层发生液化的临界动载振幅为 0.08m。

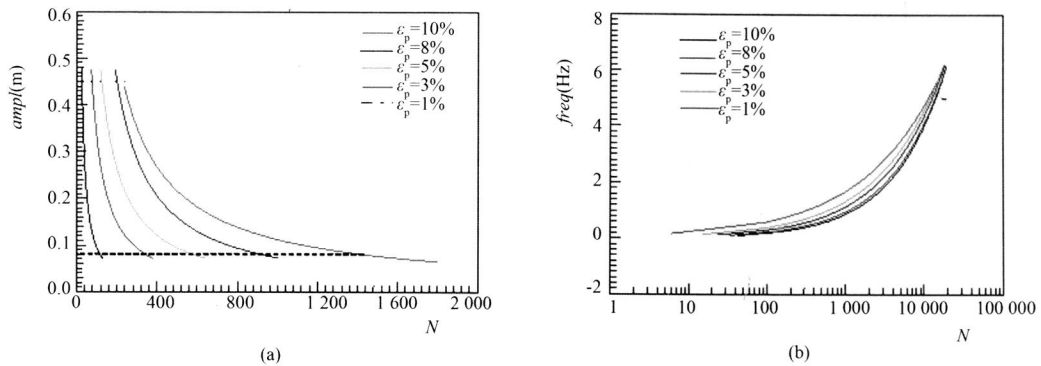


图 7 不同轴向应变下动载振幅和动载频率与循环振次的关系

### 4 结论

(1) 饱和砂层液化的出现,取决于砂层中是否发生超孔隙水压的累积效应。当动载振幅越大、动载频率

越大(频率范围不大于1.0Hz)、土骨架强度越弱时,砂层中孔隙水压力上升越快,土体越容易液化,液化度越大。

(2) 当动载频率为1.0Hz、振幅为0.16m时,动三轴试验获得的土层液化度约为0.80,液化后残余强度约为15%;数值计算中获得的土层液化度约为0.70,液化后残余强度约为30%。

(3) 当动载振幅增加、频率减小时,达到破坏时所需的循环破坏振次应越少。以等效动冰载作用于砂层左侧边界为例,砂层液化出现的临界动载幅值为0.08m,应变门槛值为2.0%,相同动载作用下动三轴试验确定应变门槛值为2.5%,二者非常接近。

### 参考文献

- [1] 谢定义. 饱和砂土液化的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 92-98.
- [2] 刘汉龙, Iai S. 国际岩土工程抗震设计新标准概述[A]. 第七届全国土动力学学术会议论文集, 北京:清华大学出版社, 2006:14-25.
- [3] 陈育民. 砂土液化后流动大变形试验与计算方法研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [4] Yasuda S, Nagase H, Kiku H, Uchida Y. The mechanism and a simplified procedure for the analysis of permanent ground displacement due to liquefaction [J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 149-160.
- [5] 鲁晓兵, 张建红, 王淑云. 水平动载作用下桶形基础周围土体软化的离心机模拟[J]. 中国海洋平台, 2004, 19(6): 7-11.
- [6] 张金来, 鲁晓兵, 王淑云. 水平动载下饱和砂土地基液化区扩展[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 8-10.
- [7] 张建红, 孙国亮, 严冬, 鲁晓兵. 海洋平台吸力式基础的土工离心机模拟与分析[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 90-97.
- [8] Wang Y H, Lu X B, Wang S Y. The response of bucket foundation under horizontal dynamic loading[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(7): 964-973.

### (上接第10页)

- [3] Michler-Cieluch T, Krause G, Buck B H. Reflections on integrating operation and maintenance activities of offshore wind farms and mariculture [J]. Ocean & Coastal Management, 2009, 52(1): 57-68.
- [4] Breton S P, Moe G. Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America [J]. Renewable Energy, 2009, 34(3): 646-654.
- [5] Cameron A. On the cusp-an update of the state of the offshore wind market [J]. Renewable Energy World, 2007, 10(2): 22-35.
- [6] Wang Z X, Jiang C W, Ai Q, Wang C M. The key technology of offshore wind farm and its new development in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1): 216-222.
- [7] Mike Scot, et al. Offshore wind installation ships: gaming the market [R]. New Energy Finance, 11 April 2008.
- [8] ODE Ltd. Installation Vessel Capability Study [R]. Crown, 2006, 2.
- [9] BVG Associates. Uk Offshore Wind-Moving up a Gear [R]. BWEA, 2007.
- [10] Back to Sea [J]. Cranes Today, 2007, 11.
- [11] Harland and Wolff Licences Ltd. Offshore Wind Transport And Installation Vessel [R]. Crown, 2001.
- [12] 叶宇, 何炎平, 葛川, 杜鹏飞. 海上风电机组构成、安装方式及典型安装船型[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(5): 39-44.
- [13] 张崧, 谭家华. 海上风电场风机安装概述[J]. 中国海洋平台, 2009, 24(3): 35-41.
- [14] Douglas-Westwood Ltd. Transnational Offshore Wind Supply Chain Study [R]. POWER, 2006, 5.
- [15] Zaijier M B, et al. Starting point and Methodology of Cost Optimisation for the Conceptual Design of DOWEC[R]. Section Wind Energy, Delft, 2000, 3.
- [16] Bulder B H, Bauer P, et al. The ICORASS Feasibility Study [R]. ECN Wind Energy, 2007, 2.
- [17] Westwood A, Hopwood D. Husum welcomes offshore sector [J]. Renewable Energy Focus, 2008, 9(5): 20-22.
- [18] ODE Ltd. Study Of The Costs Of Offshore Wind Generation[R]. Crown, 2007.