

# 海岸滩涂风电场建设工程保障策略探讨

李志刚, 郑峰, 肖斌

(解放军理工大学工程兵工程学院野战工程系, 南京 210007)

**[摘要]** 根据海岸滩涂和浅水海域风电场建设及运行维护工程保障的需求,提出了一系列的工程保障方案,主要包括:适应于潮上带滩涂风电场的系列道路构筑方案、适应于潮间带滩涂风电场的承压浮箱及浮箱栈桥保障方案、适应于潮下带5 m以上水深风电场的浅吃水自升式海上风电场工程平台以及风电场运行维护期间的两栖进入方案,并对这些方案的适应性、可行性及技术要点进行了探讨。提出的系列工程保障方案针对潮上带、潮间带至潮下带不同滩涂区域对施工工程技术的要求,以系列技术保障措施分段保障,较好地解决了海岸滩涂及浅水海域风电场建设的工程保障问题。

**[关键词]** 风力发电;海上风电场;滩涂;工程保障

**[中图分类号]** TK89 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)11-0060-06

## 1 前言

随着风电开发规模的扩大,陆上风电受土地资源、风资源、噪声与环境等因素的制约越来越明显。海上风电场建设逐渐成为可再生能源开发的新方向和新动力。但海上风电场建设的工程技术问题和陆上相比较为突出,其最主要的问题是物资和材料的运输、基础施工、风机吊装及风电场运行维护。对于滩涂风电场来说,这些问题尤为突出<sup>[1]</sup>。

## 2 海岸滩涂风电场建设工程保障面临的挑战

### 2.1 我国东部沿海海岸滩涂资源丰富

我国东部沿海海岸滩涂资源丰富,以江苏省盐城市为例,该市位于江苏沿海中部,东濒黄海,海岸线长582 km,沿海滩涂面积 $45.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中潮上带 $16.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,潮间带 $15.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,辐射沙洲 $12.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[2]</sup>。

### 2.2 海岸滩涂地质状况对风电场建设、运行的影响

物料运输、基础施工、风机吊装及风电场的运行维护是滩涂风电开发面临的最为核心的四大技术难

题,由于施工受气象、水文、地质、冲刷等多种自然条件的影响,施工环境极为恶劣。风电场区在涨潮时被水淹没,退潮时露出陆地,既不能用海上浮吊也不能使用陆上起重机械,导致常规的水陆施工设备均无法在该环境下进行施工作业。所以,潮间带海上风电场基础施工,需要使用专门为潮间带环境而设计的施工工艺和施工设备<sup>[3]</sup>。

潮间带风电场建成之后,在一日两潮,有水无水交替的环境下长期运行。因此,对风机及基础的运行维护存在同样的问题。涨潮时,水浅,可用小型船只到达,但是如不能在落潮之前结束维护工作,就无法返回。当落潮时发生故障则只能动用价格昂贵的直升飞机到达。

### 2.3 沿海风电场建设需求

目前,我国沿海风电场建设规划区域大都位于沿海滩涂。主要集中在两个区域:一是位于滩涂的潮上带或围垦区;二是位于潮间带和潮下带的滩涂。以江苏盐城市为例,在建与规划的沿海风电项目装机容量共约有1 000 MW<sup>[4]</sup>,且大部分规划项目都在工程船只不能作业的潮间带及辐射沙洲海域。

**[收稿日期]** 2010-07-23

**[基金项目]** 中国工程院土木、水利与建筑工程学部重点咨询项目“海上风电场建设重大工程问题研究”(2008-XZ-05)

**[作者简介]** 李志刚(1961—),男,陕西乾县人,解放军理工大学教授,主要研究方向为渡河(海)工程;E-mail:richardleenj@163.com

### 3 海岸滩涂风电场建设及运行维护工程保障方案

#### 3.1 潮上带滩涂风电场工程保障方案

潮上带滩涂风电场建设工程保障采用系列的滩涂通道构筑器材及筑路技术,一般可根据建设费用、建设工期和后期维修进入费用的比较,选用构筑永久性道路和构筑临时通道的工程保障方案。

##### 3.1.1 构筑永久性道路方案

在辐射沙洲上构筑永久性道路,筑路材料运输距离远,一次性投入较大,道路施工周期较长,永久道路及构筑施工过程对滩涂湿地的生态环境影响较大。但可采取相应的技术措施减少投入,当前技术成熟的可用于在滩涂上构筑永久性道路的工程措施为:直接对作为道路地基的滩涂采用化学固化处理,以便形成道路基础,并对直接取于滩涂的构筑路堤的材料进行化学改性,使其适应需要。同时,利用土工合成材料对地基和路堤进行排水及加固处理,提高其在滩涂软基上的稳定性。采取构筑永久性道路方案的滩涂风电场后期运行维护进入方式和陆上风电场相同<sup>[5]</sup>。

##### 3.1.2 构筑临时通道方案

构筑临时性通道是根据滩涂风电场内风机建设位置变化的需要,利用可撤收重复使用的土工材料和通道器材构筑临时通道。构筑临时通道一次性投入较小,通道施工周期较短,工程完成后通道构筑器材即可撤收完毕,对滩涂湿地的生态环境影响较小。其工程措施为:当滩涂承载力较低时,利用可撤收重复使用的土工材料直接铺设在滩涂地基上对通道基础进行加强,再使用由合成材料或金属材料制造的具有一定强度和刚度的专用通道器材在经加强的地基上构筑临时通道。也可直接使用强度和刚度较高的专用通道器材在滩涂上铺设构筑通道。当一个风机点建设完毕,即可撤收向新的作业点重新构筑。以构筑临时通道方案建设的滩涂风电场,在后期运行维护进入方式上,需要采用具有滩涂越野能力的特种车辆进入方案。

专用滩涂通道器材的通道模块由具有一定强度和刚度的箱形钢结构模块组成,模块能够纵向连接长,横向连接加宽,可用于构筑多车道通道及软基上的工作平台。为了方便通道器材的运输及铺设作业,可将多个通道模块预先连接成通道单元。临时通道的构筑作业如图 1 所示,通道构筑作业从硬岸

至软基滩涂进行,通道构筑由通道单元运输车辆及作业吊车配合作业,作业时根据要求对通道单元进行连接接长及横向加宽作业<sup>[6]</sup>。

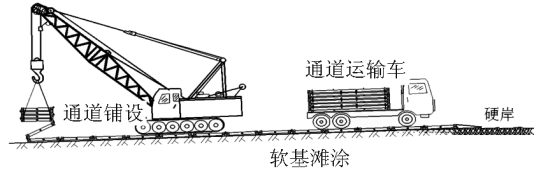


图 1 临时通道构筑作业示意图

Fig. 1 Temporary passage construction work diagram

##### 3.1.3 土工合成材料器材临时通道

土工合成材料具有优良的工程特性,广泛地应用于软基处理。此类通道器材是以土工合成材料专门设计制造的结构物,具有重量轻、强度高、运输铺设施工方便的特点。土工合成材料具有隔泥透水的作用,适用于在潮水浸泡的海岸滩涂及有泥、有水的软基上构筑通道。土工合成材料韧性大,经利用碳素纤维等构件加强后在软基上的承载能力大大提高,可用于构筑海岸滩涂风电场建设的重载通道<sup>[7]</sup>。

##### 3.1.4 作业点临时施工平台方案

根据作业点滩涂的承载力的情况,利用通道器材构筑扩大的临时基础施工及风机吊装作业平台,平台与道路或临时通道相连接。

#### 3.2 潮间带滩涂风电场工程保障方案

潮间带滩涂风电场的建设地带周期性地被海水浸泡,造成潮间带滩涂地质承载力比潮上带滩涂更低。潮间带滩涂的接近方式有两种:一种是当潮间带滩涂离陆岸较近时,从陆上通过潮上带滩涂构筑通道接近;一种是当潮间带滩涂离陆岸较远,且能够从海上利用浅吃水海上运输工具接近时,则从海上接近。潮间带滩涂风电场建设地带通常不适合建造永久性道路。一般来说,适合于潮上带滩涂临时通道的技术方案不能满足车辆在潮间带滩涂的通过性要求。潮间带滩涂风电场建设及运行维护通道保障方案有以下几种。

1) 承压浮箱通道及浮游栈桥方案。承压浮箱是一种模块化的浮箱器材,其主体尺度以陆上运输车辆的最大可运输尺度为限,在平面尺度上一般可按标准集装箱设计,在高度上则应满足浮箱浮游状态工作时风电设备运输产生的最大吃水。利用能够坐滩承压的浮箱器材拼组构筑的浮箱通道,在潮水降低时通道坐滩承压,形成滩涂通道,在潮水涨高大

于浮箱的静载吃水时,浮箱通道浮起,形成浮游栈桥,浮游栈桥可向较深的海域延伸,直至能够和浅吃水海上运输工具相接。承压浮箱通道及浮游栈桥方案可采用从陆上通过临时通道构筑或从海上以浮游的方式构筑。承压浮箱器材运输方便、作业简便,可根据要求拼组成任意宽度的通道或承压浮箱吊装平台<sup>[8]</sup>(见图2)。

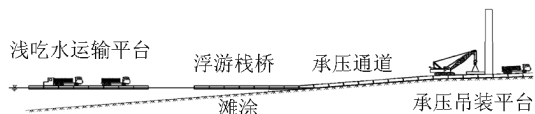


图2 承压浮箱通道及浮游栈桥方案

Fig. 2 The grounded pontoon passageway and the pontoon trestle support scheme

2)承压浮箱通道与高架浮箱栈桥混合方案。高架浮箱栈桥是利用能够坐滩承压、浮游工作和架空工作的浮箱器材构筑,在高潮水深小于浮箱静载吃水的区域采用能够坐滩承压的浮箱器材构筑通道,在高潮水深大于浮箱静载吃水的区域利用桩腿使浮箱通道架空脱离海面,形成高架浮箱栈桥,选用高架栈桥方案可使位于深水的通道架空脱离水面,车辆在高架浮箱栈桥上通行时不受潮汐及波浪的影响(见图3)。

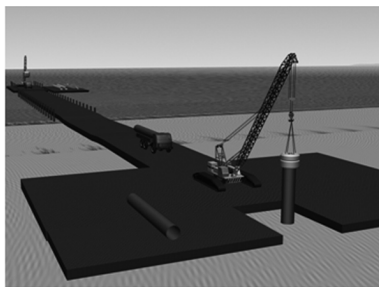


图3 承压浮箱通道与高架浮箱栈桥混合方案

Fig. 3 The combination scheme of the grounded pontoon passageway and the overhead pontoon landing stage

3)固定栈桥方案。固定栈桥方案是在潮间带滩涂风电场建设区域内建造永久性固定栈桥,为风电场提供高架的永久通道。这种通道脱离海面,车辆通行不受潮汐和波浪的影响,但工程造价高,且建造过程对潮间带生态环境有较大的影响。

4)临时栈桥方案。临时栈桥方案利用拼装式可撤收的通用器材构筑,如我国交通部门大量贮备的321型公路钢桥及ZB200型公路钢桥器材。这类器材专门为快速架设桥梁而设计,结构变化灵活,

使用简便,承载能力大,而且可以采用租赁的方式使用,特别适合在施工荷载大、转场多、工期较短的情况下使用。

5)风机基础施工及风电设备吊装平台方案。潮间带滩涂风机基础施工及风电设备吊装平台采用承压浮箱平台方案或与潮下带风电工程平台相同的方案,有两种情况需要考虑。第一种情况:对于高潮位时浮箱平台不能从海上到达的情况,可采取在通道构筑完成后,再在作业点构筑坐滩承压式工程平台的工程措施;第二种情况:对于高潮位时浅吃水浮箱平台能够从海上到达的情况,可使用与潮下带风电工程平台方案相同的保障方案。

6)潮间带滩涂风电场运行维护工程保障方案。潮间带滩涂风电场运行维护工作除固定栈桥方案以外,都是在无维护通道情况下进行的,一般的维护工作可在潮水允许的情况下用浅吃水的船只到达,也可使用直升机到达。对比较大的部件的换件修理工作,则可考虑使用具有良好滩涂通过能力的水陆两用运输工具。比较理想的进入方案是采用有较大运载能力的气垫船,现有气垫船技术已经能够满足风机一般配件的运输,且气垫船不受地形、潮汐及一般波浪的影响。直升机和气垫船是最理想的进入工具,但费用高,可考虑采取租赁的方式使用。

以上各工程保障方案在实际工程应用中可根据工程情况综合考虑应用,比如对于盐城市的辐射沙洲风电场,根据不同的滩涂条件,采用浅吃水海上运输工具从海上接近与构筑通道接近相结合的技术方案。对有的建设区域,从陆上构筑通道接近太远,可采用从水深允许的海上接近这一区域,再在区域内的潮上带滩涂内使用承压浮箱方案构筑通道或以栈桥方案向可抵达的风机建设点辐射。

### 3.3 潮下带至5 m水深海域风电场建设工程保障方案

目前近海风电场设备运输大都采用大型船舶运输,安装主要采用海上起重平台和起重船方案。国内现役的适应于海上风电场建设的大型起重船吃水深度基本都在5 m左右。所以,对水深大于5 m的近岸潮下带滩涂风电场,可采用现有的运输船舶、工程平台或起重船进行运输及安装的工程保障。

对于潮下带水深小于5 m的海域,可考虑参照移动式海上石油钻井平台的技术方案,从近海到深海,根据不同水深采取不同的保障策略,如图4所示。在近岸海域,从浅海到深海,石油钻井平台分别采用了

坐底式平台和自升式平台两种形式,坐底式平台又分

别采用了沉箱式坐底平台和半潜式坐底式平台<sup>[9]</sup>。

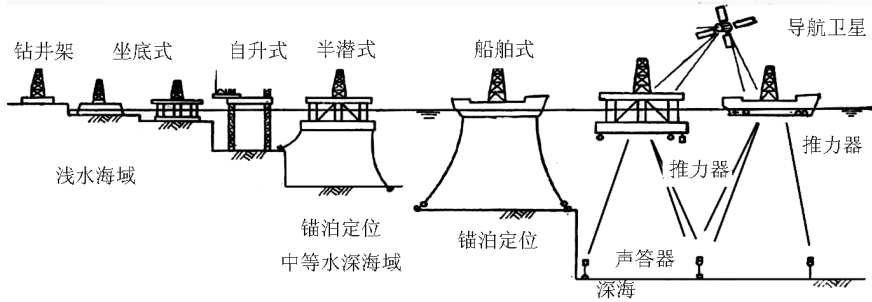


图4 移动式海上石油钻井平台的形式及作业海域的水深

Fig. 4 Forms of the movable offshore oil platform and water depth of the working area

### 3.3.1 近岸海域风电场建设的自升式工程平台工程保障方案

从已建成的海上风电场看,将自升式海洋工程平台运用于海上风电场的运输和安装,是海上风电场建设最常用的工程保障手段之一。自升式海洋工程平台由于桩腿可以自由升降,转场和设置十分的便捷。而且工作时,平台升离海面,能够为安装工作提供一个稳定的平台,使风电安装工作不受海况影响,符合海上风电场安装工作要求。由于自升式海洋工程平台桩腿可以迅速升降,而且和运输船舶相比吃水较小,所以,自升式海洋工程平台也可以作为近岸浅海水域海上风电场建设的运输工具,直接运输海上风电设备至现场并进行安装。

用于浅海上风电场建设的自升式海洋工程平台由模块化箱体拼装而成,可根据不同的风电场建设要求拼装成形状不同的大面积的海上作业平台。平台工作时能够自升脱离海面,通过合理地组配浮箱模块,可使自升式海上风电场建设工程平台的满载吃水控制在1 m以内,从而满足滩涂风电场建设的要求(见图5)。自升式海上风电场平台的基本技术原理源自海上自升式石油平台技术,但由于海上风电场建设的特殊需求,所以,用于海上风电场建设的自升式海洋工程平台和海上自升式石油平台又有较大区别。首先,海上风电场建设工程平台一般多为大面积、浅吃水平台,由于海上风电场建设平台工作时桩腿支起,不需要以自身的浮力支承工作荷载,自身浮力只提供转场及移位航行时的自重荷载,所以吃水浅,特别适应于在浅水区工作。其次,由于风电场建设海域的水文及地质条件、风电场的建设条件、设备荷载的不同,对工程平台的尺度要求不同。同时,像运输平台、基础施工平台、设备吊装安装平台等工作性质不同,荷载不同,对平台的尺度和形状

要求也不同。所以,文章提出的海上风电场建设工程平台一般由浮箱之类的模块化结构拼装而成。最后,海上风电场建设工期相对较短,工程平台需要频繁转场和移位,频繁地升降。同时海上风电场安装过程对吊装要求高,还有各种不同的工程保障平台,像基础施工平台、设备吊装安装平台等,对桩腿及其控制的需求也不尽相同,所以,用于海上风电场建设的自升式海洋工程平台对桩腿升降系统及控制系统的要求较高<sup>[10]</sup>。

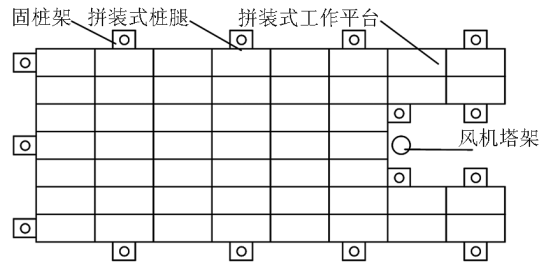


图5 用于浅海上风电场建设自升式海洋工程平台

Fig. 5 The jack-up offshore wind farm construction platform

1) 风机整体安装平台。风机整体安装是指风机在陆上全部吊装拼组完毕,然后利用船舶整体运输到安装点,整体吊装安装。东海大桥风电场已经安装的风机均采用了这一技术。文章提出的风机整体安装平台是一种吃水较小,能够工作在近岸浅海水域的海上风机运输及安装平台,平台根据要求可配置成一次运输安装一台风机(见图6)或一次运输安装两台风机,在平台的风机安装端设置有安装缺口,以利于与基础对正和安装。作业时,风机在岸上安装完毕后,整体吊装安装在浅吃水安装平台的安装控制系统及固定架上,由安装平台运输到安装点,平台锚泊定位,调整与风机基础上的整体吊装软着陆系统对正。在海况条件好的情况下,可直接浮游

安装,否则,平台自升起安装。松动锁定系统,风机在固定架及安装控制系统的控制下通过整体吊装软着陆系统与基础平台相对接完成安装。该方案的部分关键技术环节已经在海上风电示范项目——东海大桥风电场建设中成功应用过<sup>[1]</sup>。方案的创新之处在于取消了海上整体吊装过程,增加了平台自身下落安装控制机构,实现了风机海上无吊机安装。

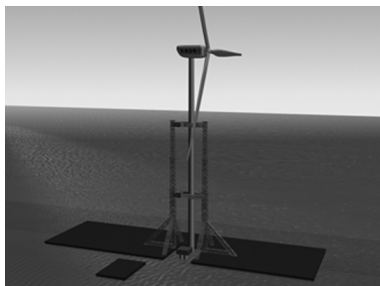


图6 风机整体吊装平台方案  
Fig. 6 The integral aerogenerator erection platform scheme

2) 风机散装吊装平台。风机散装吊装平台由自升式工程平台和陆上起重设备组成,应用在由于风机运输手段所限,风机设备只能散件运输,且风机只能散件安装的情况下。平台浮运至作业点,定位升起后,能够提供一个稳定的吊装作业平台,所以能够使用平台上的陆上起重设备,在海上完成风机塔架、机舱、轮毂、桨叶的吊装工作<sup>[1]</sup>。

3) 爬升式风机吊装平台方案。爬升式风机吊装利用陆上建筑吊机自爬升高的原理进行工作,在陆上风电场建设中已经有成功应用的范例。爬升式风机吊装平台方案可应用在由于风机运输手段所限,风机设备只能散件运输,且风机只能散件安装的情况下。利用爬升式风机吊装平台可省去庞大的起重设置,减小了平台荷载,从而减小了吃水。爬升式风机吊装技术可应用在浅海平台,也可应用在潮间带滩涂的承压或高架平台。在潮间带滩涂上构筑时,平台围绕风机基础构筑,浅海构筑时,平台留有安装缺口,浮运进入时,设置在风机基础周围。可根据海况条件选择平台以浮游状态安装或平台以顶起状态安装,跨风机基础构筑爬升式起重塔架,首先吊起吨位较大的机舱,然后在吨位较小的起重设置的协助下,吊装塔筒,并随着塔筒的接长,起重塔架自爬升高,直至风机设备吊装完毕(见图7)。

4) 风机设备运输平台。风机设备运输平台是一种浅吃水海上运输平台,平台的满载吃水控制在1 m以内,平台自带动力,可实现风机设备在浅海的

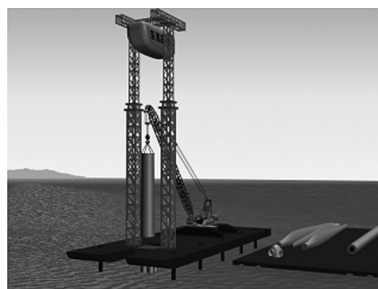


图7 爬升式风机吊装平台方案  
Fig. 7 The jack-up erection of offshore aerogenerator scheme

输送。平台也可从临海一侧接近滩涂通道的临海一端,实现滩涂通道临海平台的靠泊和卸载<sup>[11]</sup>。

5) 风机基础施工平台。风机基础施工平台是一种自升式浅吃水工程平台,平台上可配置导桩架及陆上型置桩机,能够在平台升起稳固后进行风机基础的置桩作业。平台同时可配置混凝土施工设备,以进行混凝土桩及承台的施工<sup>[12]</sup>(见图8)。

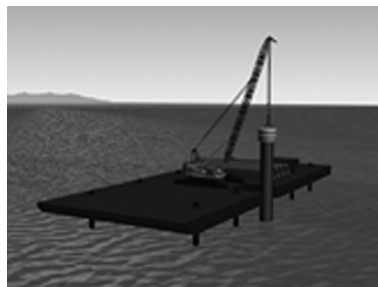


图8 自升式风机基础施工平台  
Fig. 8 The jack-up aerogenerator foundation construction platform

### 3.3.2 坐底式近岸海域风电场建设工程平台工程保障方案

坐底式近岸海域风电场建设工程平台在技术原理上与坐底式近海石油钻井平台基本相同,平台在结构上有两种形式。一种是由单体沉箱构成的沉箱式作业平台(见图9),另一种是由沉箱加作业平台构成的半潜式作业平台(见图10)。

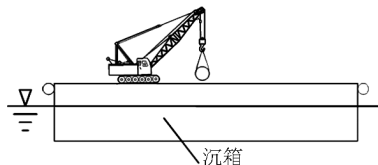


图9 沉箱式近岸海域风电场建设工程平台  
Fig. 9 The construction platform of caisson style offshore wind farm

作业时,将平台浮运至施工地点,锚泊定位后向沉箱内注水,使平台下沉坐滩,变成稳固的施工平

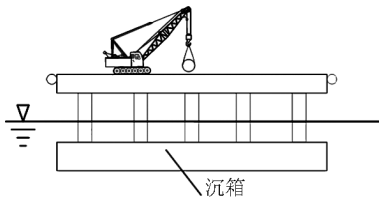


图 10 半潜式近岸海域风电场建设工程平台

Fig. 10 The construction platform of semisubmersible offshore wind farm

台。转场移位时,将沉箱内的水抽出,平台整体浮起。为了适应大型风电设备的安装,坐底式风电建设工程平台的面积更大,这也符合近岸海域风电场建设中平台在浅水中的转场移位作业时小吃水的需求。坐底式近岸海域风电场建设工程平台与自升式海上风电场建设工程平台相比,只是在海滩上的支撑方式不同,前者是坐滩承压,后者靠桩腿升起,在平台的作业设备配置及使用场合上基本相同<sup>[9]</sup>。

#### 4 结语

文章根据海岸滩涂及浅水海域风电场建设及运行维护工程保障的需求,提出了适应于海岸滩涂及浅水海域风电场建设施工及运行维护的一系列工程保障方案,从潮上带、潮间带和潮下带不同滩涂区域对施工工程技术的要求出发,以系列技术保障

措施分段保障,较好地解决了海岸滩涂及浅水海域风电场建设的工程保障问题。

#### 参考文献

- [1] 江 波. 海上风电场施工方法初探[J]. 太阳能, 2007(4):34-36.
- [2] 陈 丽. 盐城市沿海滩涂利用模式分析[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(36):11926-11928,11955.
- [3] 池钊伟. 平原滩涂海岸风电场建设几个问题的初步探讨[J]. 华东电力, 2009, 37(1):169-171.
- [4] 凌 申. 沿海地区风能资源开发与新能源产业带的构建—以江苏盐城市为例[J]. 商场现代化, 2008(24):197-198.
- [5] 陶西贵, 李少红, 梁龙喜. 土体固结剂(HEC)在军事工程中的应用探讨[J]. 国防交通工程与技术, 2007(4):71-73.
- [6] 范华林, 刘福君. 箱式路面体系车辆通过性机理分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2):26-29.
- [7] 王春辉, 陈云鹤. 新型快速克服松软岸滩路面器材的设计[J]. 解放军理工大学学报自然科学版, 2004, 5(6):49-54.
- [8] 史宣琳, 张新强. 我国浮箱发展概况及应用[J]. 黑龙江交通科技, 2008, 178(12):172-173.
- [9] 李润培, 王志农. 海洋平台强度分析[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1992.
- [10] 张太佶, 汪张棠. 海上风电设备安装船的崛起和发展[J]. 中国海洋平台, 2009, 24(5):1-5.
- [11] 张太佶, 汪张棠. 一种新船型—海上风电设备安装船的开发[J]. 船舶, 2009(5):38-43.
- [12] 丁金鸿, 谭家华. 近海风电专用安装船概述[J]. 中国海洋平台, 2009, 24(5):6-16.

## Engineering support strategy research of the tideland wind farm construction

Li Zhigang, Zheng Feng, Xiao Bin

(Department of Field Engineering EIEC, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

[Abstract] Based on the engineering support requirements of the offshore wind farm construction and operation maintenance, a series of engineering support projects were proposed, including: the series road building project for the zone above the high tide line, the grounded pontoons and the pontoon trestle support projects for the zone between high tide level and the low tide level, the shallow draft jack-up wind power platform and amphibious project during the maintenance period for the zone above 5 m depth of water below low tide level. The adaptability, feasibility and the key techniques of the projects were researched. The projects with series of technique support means can meet the needs of the different requirements of the construction on different tideland zones, and solve the problems effectively of construction engineering support of tideland and the shallow water wind farm.

[Key words] wind power; sea wind farm; tideland; engineering support