

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.013



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 陆上风电装配式基础结构研究综述

白久林, 王瑞毅, 王宇航, 杨庆山

(重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 陆上风电结构的基础通常采用现场浇筑混凝土的施工方式, 效率低, 污染大, 质量难以保障, 不利于风电产业的高质量发展。装配式风电基础结构采用了标准化设计、工厂化生产的建造方式, 能大幅缩短风电场建设周期, 有效保障基础质量, 并减少对环境的污染, 是风电转型升级和降本增效的重要举措之一。搜集、整理和归纳陆上风电装配式基础结构及研究现状, 针对风电装配式基础结构的特点, 总结了梁板基础、多足基础等6类主要的风电装配式基础结构形式, 并对每种形式的特点、研究现状做了详细的分析, 列举了部分国内外应用装配式基础的陆上风电场项目。结果表明: 陆上风电装配式基础结构需要进一步完善设计依据, 优化结构形式, 形成全寿命设计理论与性能控制方法, 以支撑风电结构高质量发展。

**关键词:** 风力发电; 陆上风电结构; 装配式基础; 基础类型

**中图分类号:** TU476 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)03-0080-14

## A review of onshore wind turbine prefabricated foundation structures

BAI Jiulin, WANG Ruiyi, WANG Yuhang, YANG Qingshan

(School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The foundation of onshore wind turbine (OWT) structure is usually constructed by cast-in-situ concrete, which is inefficient, polluting, and difficult to guarantee quality, either not conducive to the high-quality development of the wind power industry. The prefabricated wind turbine foundation adopts the construction method of standardized design and factory production, which can significantly shorten the construction period of wind farms, effectively guarantee the quality of the foundation, and reduce the pollution to the environment. It is one of the important measures for the transformation and upgrading of wind power and reducing costs and increasing efficiency. This paper collects, sorts out and summarizes the research of prefabricated OWT foundation and its state-of-the-art research. According to the characteristics of the wind power prefabricated infrastructure, it lists six main types of wind power prefabricated infrastructure, such as raft foundation and multi-footing foundation, and makes a detailed analysis of the characteristics and research status of each type, and lists some onshore wind farm projects that apply prefabricated wind turbine foundation worldwide. The results show that the design basis of OWT prefabricated foundation structures needs to be

**收稿日期:** 2022-12-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(52278144)

**作者简介:** 白久林(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事装配式结构研究, E-mail: baijiulin@cqu.edu.cn.

**Received:** 2022-12-08

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 52278144)

**Author brief:** BAI Jiulin (1985-), PhD, associate professor, main research interest: precast structure system, E-mail: baijiulin@cqu.edu.cn.

further improved, the existing structure forms should be optimized, and further research on design methods and performance control should be promoted.

**Keywords:** wind power; onshore wind turbine; prefabricated foundation; foundation type

风能作为一种清洁、储量大的可再生能源,具备成熟的技术支撑和规模化、商业化的发展前景,逐步受到各国青睐。中国在“十四五”现代能源体系规划<sup>[1]</sup>中指出:要全面推进风电的大规模开发和高质量发展,科学有序推进实现碳达峰、碳中和目标。根据全球风能理事会(GWEC)发布的报告<sup>[2]</sup>,2021年全球新增风电装机容量93.6 GW,其中陆上风电新增72.5 GW,达到了历史第二高水平。中国风电产业发展势头同样迅猛,陆上风电2021年新增容量和截至年底的总装机容量均位居世界第一。

陆上风电结构包括基础以及上部的塔筒、机舱、轮毂及叶片。风电基础结构是风电结构的重要组成部分,具有承受360°方向重复荷载的特殊性,其稳定性对保障风力发电机组的正常运行至关重要。陆上风电基础结构经过几十年的发展,目前应用较多的是扩展式基础和梁板式基础,此外还有桩基础、锚杆基础和预应力筒型基础等<sup>[3]</sup>,各基础的结构形式如图1所示。在风电支撑结构建设时,基础通常采用现浇的方式来完成,然而,现浇基础存在一些不足。

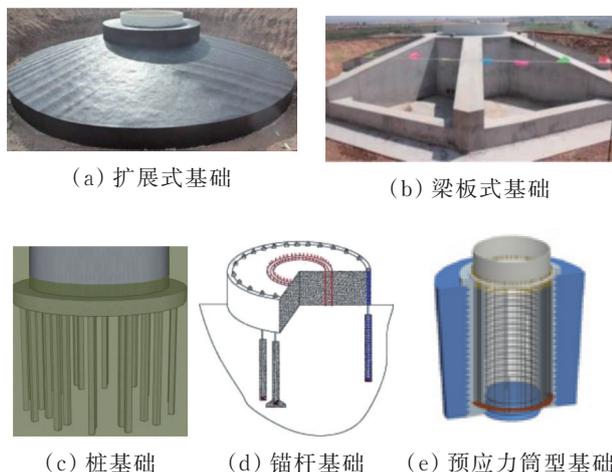


图1 陆上风电常见基础结构形式

Fig. 1 Common foundation structures forms of onshore wind power

1) 风电基础体积大,钢筋间距小,需要一次性浇筑大量混凝土,因受到天气、场地偏远、现场施工技术限制等影响,常会出现混凝土施工冷缝和蜂窝空洞等缺陷,难以保障基础质量<sup>[4]</sup>。由基础施工质量引起的风机停机检修时有发生<sup>[5-8]</sup>,给风电场造成了巨大经济损失。

2) 现场浇筑和养护风电基础周期较长,通常超

过30 d,生产效率低下,特别是大型风电场项目,基础建造数量大,由于基础施工中不可预见的问题(如恶劣的天气条件,混凝土供应不足等),工程进度延误,会影响项目的完成时间,修建风电基础的成本也随着工期的延长而增加,给风电的“平价上网”<sup>[9]</sup>带来挑战。

3) 现场浇筑基础,资源消耗多,工作量大,而且会产生大量的建筑垃圾、噪声和烟尘污染,对周围环境产生不良影响<sup>[10]</sup>。同时,上部风电机组寿命到期拆除后,现浇基础仍留在原位,难以移动、拆除或改造再利用,未实现资源的最大化。

这些因素都将阻碍风力发电的规模化、商业化和高质量发展,风电基础的现浇施工方式亟待改进。采用具有质量可靠、高效建造、绿色环保,便于拆除、回收和重复利用等特点<sup>[11]</sup>的风电装配式基础结构是解决上述问题的有效途径之一。

目前,装配式结构在其他结构领域已有较广泛的研究,但在风电基础领域的研究相对较少。同时,风电基础在结构形式、受力特性等方面与其他结构有较大区别,难以直接采用其他结构的设计方法和经验。因此,有必要专门对陆上风电装配式基础进行深入分析研究。笔者总结陆上风电装配式基础的研究现状,分析目前陆上风电装配式基础发展面临的主要问题,为今后陆上风电装配式基础的深入研究和应用提供参考。

## 1 陆上风电装配式基础结构研究现状

陆上风电装配式基础结构主要基于现浇基础结构研发而来。目前,陆上风电装配式基础结构的主要形式有装配式梁板基础、装配式多足基础、装配式筒型基础、装配式扩展基础、装配式箱型基础、装配式支撑基础等。笔者将对上述6类风电装配式基础结构的研究现状进行分类阐述。

### 1.1 装配式梁板基础

风电梁板基础结构由台柱、底板、从台柱悬挑的多根肋梁组成,部分也设置封边次梁<sup>[12]</sup>。风电梁板基础结构具有承载能力强、场地适应广、材料用量少、传力路径明确、抗倾覆能力强等优点。但是,现浇梁板基础由于形状较复杂、模板制作时间长,并且肋梁内部钢筋间距密,混凝土现场浇筑、振捣难度大,难以保障基础施工质量<sup>[13]</sup>。风电装配式梁板基础结构能充分发挥现浇梁板基础的优点,同时

能有效解决上述问题。装配式梁板基础结构具有传力路径明确、预制构件易于划分、连接区域结合面积小等优势,是目前陆上风电装配式基础结构采用的主流形式。根据现场施工是否包含湿作业,可将装配式梁板基础分为装配整体式梁板基础和全装配式梁板基础。

### 1.1.1 装配整体式梁板基础

风电装配整体式梁板基础根据现浇梁板基础的受力特性及施工工艺,把配筋和模板安装相对复杂的部分在工厂进行预制,相对简单的部分采用现场浇筑的方式。施工时,现场吊装预制构件,与现浇部分的钢筋绑扎后浇筑混凝土,并形成整体。此方式施工较简便,节点连接结构可靠,同时避免了全预制拼装节点复杂和精度要求高的问题<sup>[14]</sup>,在风电装配式基础结构领域有良好的应用前景。

Phuly<sup>[15]</sup>提出了一种仅肋梁预制的装配整体式梁板基础结构,具体构造如图2所示。施工时,在基础中心定位放置锚笼环,吊装预制肋梁,先将预制肋梁下端和内端预埋的钢筋与底板、台柱等构件现场绑扎的钢筋搭接,再整体浇筑。此外,预制肋梁的内端还布置了型钢抗剪键,可以增大预制肋梁与后浇台柱结合面的抗剪承载力,提高装配式基础的整体性。

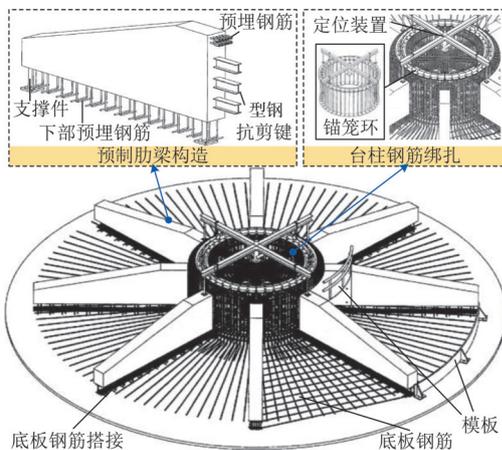


图2 带抗剪键的装配整体式梁板基础<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Assembled monolithic raft foundation with shear key<sup>[15]</sup>

瑞典企业 SKANSKA 在瑞典北部 Sjisjka 山区风电项目中,采用了一种与现浇基础相似的装配整体式梁板基础<sup>[16]</sup>,如图3所示。该项目在考虑到建造地区偏远,并且由于相关政策的限制,需要减小对山区环境的破坏,故采用装配式基础结构,以期减少现浇混凝土用量和施工对周边环境的污染。同时,综合考虑设计、运输、施工等环节的难易程度,基础的台柱及预制构件间的拼缝段仍采用后浇的方式,只将较复杂的肋梁预制。此方式在现场需要浇筑部分混凝土<sup>[17]</sup>,在该项目施工期间,瑞典北部

气候寒冷,混凝土的浇筑和养护质量成为整个工程的焦点。



图3 瑞典 Sjisjka 陆上风电场现场施工<sup>[16]</sup>

Fig. 3 Site construction of Sjisjka onshore wind farm in Sweden<sup>[16]</sup>

宋次等<sup>[18]</sup>采用数值模型的方法对仅肋梁预制的风电装配整体式梁板基础结构的受力情况进行了研究。结果表明,基础现浇部分混凝土收缩变形小,对节点的连接影响可忽略;部分区域混凝土出现拉压破坏,预制梁与现浇台柱新旧混凝土交接区域混凝土拉压应力较大,需着重考虑这些破坏区域的配筋设计,以及新旧混凝土结合面的连接构造。

许云龙<sup>[19]</sup>制作了仅肋梁预制的装配整体式梁板基础的1:5缩尺模型,对该模型进行了室内模型试验及有限元分析。试验结果表明,基础在极端荷载工况下的抗倾覆稳定性满足设计规定;预制梁和底板的钢筋应力远小于屈服强度,底板钢筋应力分布均匀,此连接方式整体性较好;在试验加载过程中,预制梁与底板交接面部分区域的混凝土出现受拉破坏,混凝土开裂较为严重,需要优化加强预制构件和现浇构件交接区域的设计。有限元分析结果表明,预制混凝土梁的主要破坏形式仍然是混凝土受拉破坏,基础各处的钢筋应力大小与模型试验基本相符。在初始模型的基础上,提出了可以通过在肋梁中加入预应力筋的方式来解决混凝土的受拉破坏问题,并通过理论分析验证了优化方案的可行性。

陈俊岭<sup>[20]</sup>提出了一种采用型钢桁架代替混凝土梁的装配整体式梁板基础。该方案的台柱部分使用基础环与塔筒连接,基础环周围无须浇筑混凝土,整个基础结构仅底板采用现浇的形式,如图4所示。装配整体式钢梁板基础优势在于可以有效减少混凝土的用量,即使钢材用量增加,整个基础的

造价也相对于常规现浇梁板基础低。此外,考虑到上部的风机结构的设计寿命一般为20 a,基础的设计寿命为50 a,在风机达到使用期限后,可以方便地将下部基础进行拆除、加固或改造。张佑臣<sup>[21]</sup>对该类基础在结构设计、疲劳分析、有限元模拟等方面开展了详细研究。通过理论分析,得出了基础的最优桁架斜腹杆倾角、节间布置数量、上弦杆倾角与合理的桁架布置数量;给出了适用于这类基础的地基刚度范围,并按照经验给出了相应的土体类型;提出了适用于这类基础的疲劳验算方法。同时,针对某2 MW的风机进行了详细的基础设计与有限元模拟分析。结果表明,装配整体式钢梁板基础基本能满足风机运行的要求。

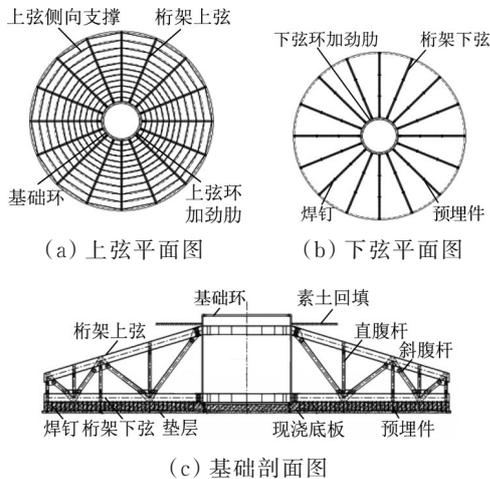


图4 装配整体式钢梁板基础<sup>[21]</sup>

Fig. 4 Assembled monolithic steel raft foundation<sup>[21]</sup>

张广杰等<sup>[22]</sup>提出了一种梁板预制、仅台柱现浇的装配整体式梁板基础。该基础结构的预制梁板分为凸型和凹型两类,两类预制梁板间预设的凸凹模块可以相互嵌合,预制梁板内预留有可以环向贯通的孔洞。装配施工时,将预制梁板定位放置,通过凸凹模块嵌合后初步连接,然后将钢索穿过预留环向孔洞,张拉钢索并灌浆,完成预制构件间的环向连接;最后,将基础环和预制梁板通过螺栓连接,并绑扎台柱处的钢筋以及基础环的穿孔钢筋,在中心区域浇筑混凝土,将预制构件和现浇台柱连接成整体。该方案与塔筒的连接采用的是基础环形式,由于台柱是现场后浇,基础环式塔筒连接方案的疲劳破坏仍有可能发生<sup>[23]</sup>。

德国企业 NORDEX<sup>[24]</sup>提出了一种将台柱和梁一体化分块预制,基础底板现浇的装配整体式梁板基础结构。该类基础的环向连接是将两类可相互配合的预制构件预埋的U形钢筋交错放置,在内外翼板的孔洞中穿过插销钢筋形成钢筋框架后,往夹

板拼缝浇筑灌浆料。底板的钢筋现场绑扎,并与预制构件下部预埋的钢筋相互搭接,最后现浇底板完成基础的装配施工。该基础与塔筒通过台柱区域预留的孔洞,后张拉预应力锚栓进行连接。

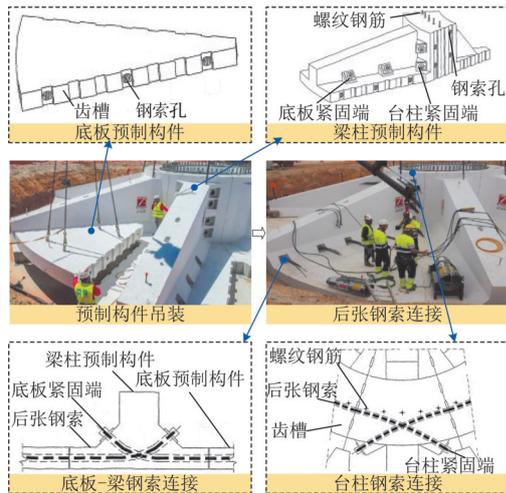
德国企业 RWE<sup>[25]</sup>提出了一种梁、底板采用预制,台柱现浇的方形装配整体式梁板基础,共划分成4类预制模块。此方案将常规的圆形底板改为方形,可以方便构件的预制、运输及装配。施工时,预制构件之间通过预设的齿槽进行拼接,预制构件拼装完成后浇筑基础的台柱部分,再在预设的孔洞中后张拉预应力筋,提高基础的整体性。该基础结构的预制底板按照设计需要可以环向布置多段,来适应不同的荷载及场地条件,布置形式较为灵活。

#### 1.1.2 全装配式梁板基础

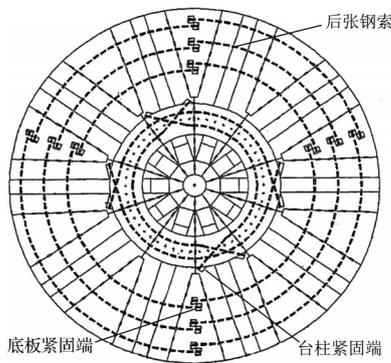
对于部分构件预制的装配整体式梁板基础,施工现场需浇筑较多混凝土,连接区域的构造与现浇基础基本相同<sup>[26]</sup>,结构性能基本可等同于现浇梁板式基础,在工程应用方面的前景比较好,但这类装配式基础的湿作业工作量仍较大,建造周期较长,不能充分发挥装配式结构的优势。因此,为减少现浇工作量、施工时间和环境污染,预制化程度更高的梁板基础的方案研究有待深入。中国暂时缺乏对于全装配式基础的研究,但在此趋势下,其他国家一些企业研发出了现场几乎没有湿作业的全装配式梁板基础。

西班牙企业 ARTEPREF 研发出一种采用环向后张预应力钢索连接的全装配式梁板基础结构<sup>[27-28]</sup>。该体系将完整的梁板基础划分成两类预制构件,两类构件间预设的拼缝齿槽可相互嵌合,并在两类构件内部设置预留通孔,具体如图5(a)所示。施工时,在基坑开挖后,将预制构件吊装到相应位置,齿槽拼接对位完成,预制构件贴合后(拼缝无明显间隙)再在预先设置的孔洞中穿入钢索,对钢索张拉预应力后,将钢索首尾固定在预制构件的紧固端,使所有预制构件环向紧紧贴合,钢索连接方式如图5(b)所示。需注意的是,该基础方案在台柱区域预埋了用于连接塔筒的锚杆,对预制构件的制作精度要求会相应提高。

德国陆上风电装配式基础企业 ANKER 研发了多种全装配式梁板基础结构<sup>[29]</sup>。第1种基础结构将预制构件按照梁板和台柱两类进行划分,结构组成和装配施工流程如图6所示。在预制梁板内侧,预制台柱相对应区域沿环向设置了4排环向布置的预留竖向孔洞,其中最外侧和最内侧的孔洞用于几类预制构件在中心重叠区域垂直方向的连接,中间两排孔洞用于基础和上部塔筒法兰连接。此外,底板



(a) 构件及施工流程示意图



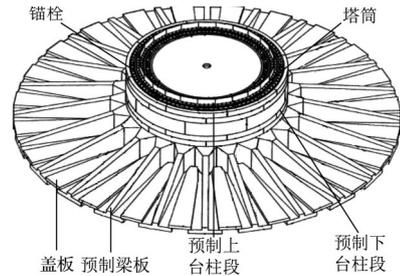
(b) 环向钢索连接示意图

图 5 ARTEPREF 后张环向预应力筋全装配式梁板基础<sup>[27-28]</sup>Fig. 5 ARTEPREF fully assembled raft foundation with post tensioned circumferential prestressed reinforcement<sup>[27-28]</sup>

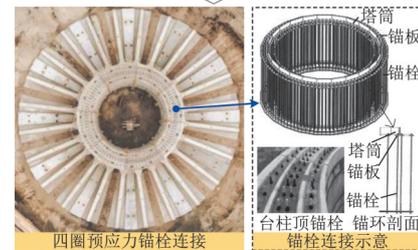
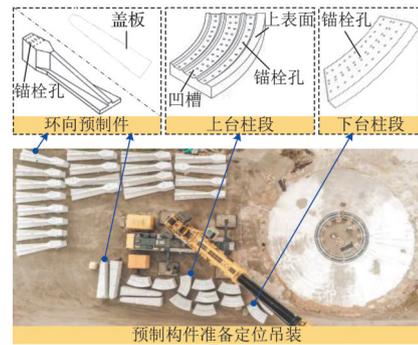
拼缝之间设置预制盖板,待预制梁板放置完成后将预制盖板搭接于预制肋梁间的拼缝上。

Monnier<sup>[31]</sup>在爱尔兰某风电场的设计方案中详细比较了ANKER的全装配式梁板基础与常规的现浇风电基础的材料用量、施工时间、建造成本等指标。结果表明,采用ANKER的全装配式梁板基础可以减少约70%的混凝土用量,施工受天气影响小,仅需5 d即可完成,并且构件组装简单,装配精度要求不高,基础后期的拆除工作也十分容易,可以有效地减少基础建造的各项成本及施工造成的环境污染。

ANKER也提出了其他两类全装配式梁板基础方案。第2类基础结构如图7(a)所示<sup>[32]</sup>,在预制台柱构件之间外伸型钢连接件,通过螺栓进行台柱预制构件间的环向连接。基础的预制肋梁的内端设置了凹槽空间,将预制台柱放置后,有足够的下部空间对连接塔筒的预应力锚栓的张拉固定。第3类基础结构如图7(b)所示<sup>[33]</sup>,将常见的混凝土台柱改为型钢构件,基础与塔筒的连接方案也由预应力锚



(a) 全装配式梁板基础结构示意图

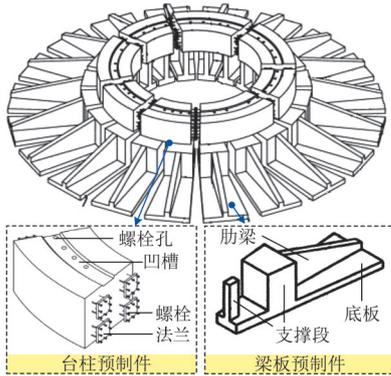


(b) 预制构件及施工流程示意图

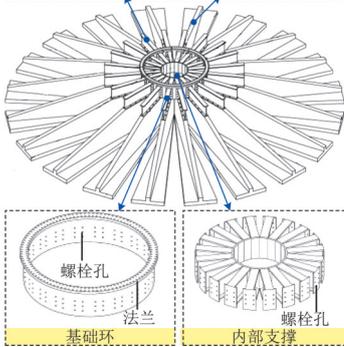
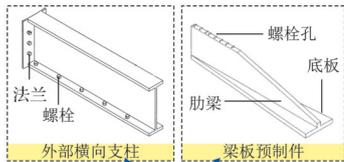
图 6 ANKER 第一类全装配式梁板基础<sup>[30]</sup>Fig. 6 ANKER type I fully assembled raft foundation<sup>[30]</sup>

栓换成了基础环,通过这两方面改动进一步减少了预制构件的质量和体积,同时也方便构件的运输、装配、拆除或更换。

美国陆上风电装配式基础企业RUTE<sup>[34]</sup>研发出了一种全装配式箱梁梁板基础,该方案将梁划分成3段或多段不同的箱型预制构件,基础台柱也划分成同箱梁个数一致的构件,结构及装配施工如图8所示。为方便基础构件间的装配连接,在单根预制梁各段箱型构件和预制台柱对应的区域设置用于穿过预应力筋的孔洞,预应力筋的一端锚固在预制梁最外侧,一端锚固在预制台柱内侧;台柱处的环向连接采用环向后张预应力的方式。基础的预制梁两侧也设置了可选板段,可以根据实际需要调整,可选板段之间不用设置连接。在基础的装配施工完成后,把预应力锚栓穿过预制台柱预留的孔洞将基础和上部塔筒连接。RUTE的全装配式箱梁梁板基础,构件预制化程度高,经济性、环保性强,仅需1 d就可将所有预制段运输至施工现场,3 d完成基础施工,混凝土用量相比于常规现浇梁板基础减少一半,二氧化碳的排放量可降低约75%<sup>[35]</sup>。



(a) 第2类全装配式梁板基础<sup>[32]</sup>



(b) 第3类全装配式梁板基础<sup>[33]</sup>

图7 ANKER第2、3类全装配式梁板基础

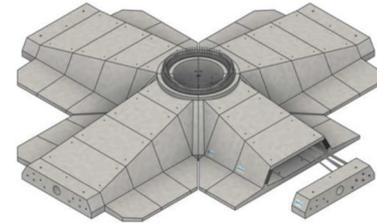
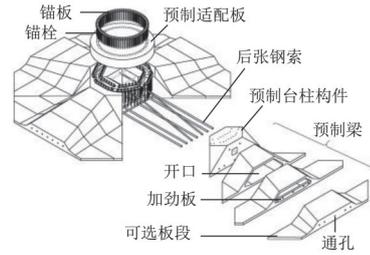
Fig. 7 ANKER type II & III fully assembled raft foundation

### 1.2 装配式多足基础

风电装配式多足基础结构主要由台柱以及绕台柱放射状布置的梁组成,梁的外端可以根据实际场地条件来选择和布置独立承台、锚杆或桩。

新西兰企业MERIDIAN在南极罗斯岛的风电场项目中,鉴于南极洲的气候特殊,施工设备、条件差,并且项目需要保证在仅有两个月夏季、光线充足的短暂时间段内完成<sup>[36]</sup>,故采用一种钢梁装配式多足锚杆基础<sup>[37]</sup>,结构如图9所示。该基础在施工时首先将地基开挖后按常规方式将锚杆锚入下部岩层,将预制承台放置在锚杆顶部,锚杆锚固在承台上表面,待承台上部钢梁放置完成后,将钢梁外端与预埋在承台内部的螺杆进行连接。基础装配施工完成后,将上部风机塔筒与基础中心处的基础环通过螺栓连接。

美国陆上风电装配式基础企业RUTE<sup>[38]</sup>研发出一种采用后张预应力连接的装配式多足基础,共有3种不同的梁端支撑方式,其下沉承台支撑的结构形式如图10(a)所示。该方案中的基础肋梁采用工字形截面,可以减少梁预制时的材料用量。预制承



(a) 箱梁装配式梁板基础结构示意图



(b) 预制构件运输



(c) 基础施工完成

图8 RUTE预制箱梁装配式梁板基础<sup>[35]</sup>

Fig. 8 RUTE prefabricated box girder raft foundation<sup>[35]</sup>



(a) 预制独立承台



(b) 型钢连梁



(c) 塔筒安装

图9 MERIDIAN钢梁装配式多足锚杆基础<sup>[37]</sup>

Fig. 9 MERIDIAN prefabricated multi-footing anchor bolts foundation with steel beam<sup>[37]</sup>

台和预制梁之间通过在梁端部设置的支撑结构连接,承台的位置及埋深可以根据场地条件灵活调整。台柱外侧延伸出和梁相同的截面,将结合面对应后,在台柱内侧张拉预应力筋进行连接,预应力

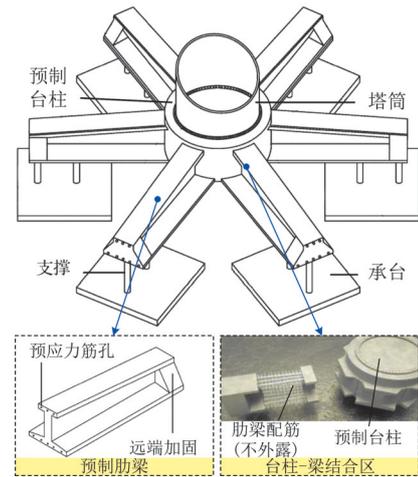
筋的另一端固定在梁最外端。基础建成后,将预应力锚栓穿过台柱预留的锚栓孔和上部塔筒连接,现场不存在任何湿作业。该基础结构也提供了锚杆和微型桩的端承形式<sup>[39]</sup>,锚杆形式结构如图 10(b)所示,根据实际场地条件需要可以把端部承台换成锚杆或微型桩,3种支撑形式的构件连接方式基本相似。

Norvell<sup>[40]</sup>对 RUTE 的后张预应力装配式多足基础进行了参数化设计研究,详细比较了锚杆、微型桩两种端承方式的受力特性,指出该基础结构可以大幅缩减材料和时间成本,易于装配施工和后期拆除,具有良好的应用前景。Velasquez 等<sup>[39]</sup>对采用锚杆形式的 RUTE 装配式多足基础进行了有限元数值分析。结果表明,该基础结构在抗拔、抗倾覆、整体稳定性和基础旋转刚度等方面性能较好,但少数工况下台柱和肋梁结合面的抗剪强度不能达到风机制造商的最低要求,但可以通过增加预制梁的宽度的方式,来优化结合面设计进行改善。

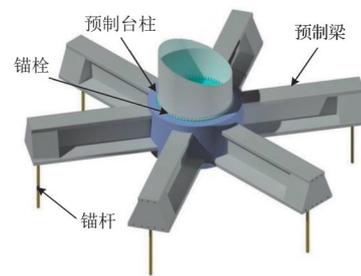
西班牙企业 HWS 提出的装配式多足基础方案中,仅梁采用预制的形式,并提供多种肋梁截面选择,承台、桩和中心台柱仍是现浇<sup>[41]</sup>,该基础结构如图 10(c)所示。承台施工时,将现浇承台顶部的外伸钢筋穿过预制梁的预留孔洞后灌浆连接;台柱施工时,先在中心区域放置锚笼环,再将梁端部外伸钢筋和台柱钢筋现场绑扎形成框架后,浇筑混凝土形成整体<sup>[42]</sup>。该方案根据场地条件可将桩和混凝土承台互换,两种方式施工流程类似。虽然这类方案的现浇工作量仍然较大,也不能缩短工期,但经济效益明显,相较于传统现浇扩展基础,可以减少约 35% 混凝土用量以及 30% 的总成本<sup>[43]</sup>,并且可以现场灵活调整承台的高度以及埋置深度,能够较好地适应各类地形条件。

王宇航等<sup>[44]</sup>提出一种采用组合结构的装配式多足桩基础。该形式的装配式多足桩基础用钢-混组合结构梁、台柱替代常规的混凝土构件,充分发挥了组合结构优势,除了台柱以外的其余构件均采用预制的形式,构件预制化程度较高。装配施工时,主梁和钢管混凝土台柱、主梁和钢连梁均通过螺栓连接;预制桩和预制的钢管混凝土梁通过后浇混凝土进行连接。基础与塔筒的连接没有采用常规的基础环和锚笼环,而是在基础台柱内侧布置多排抗剪栓钉,上部塔筒的底部同样设置有栓钉,将上部塔筒埋入一定深度后,现浇混凝土使其在中心台柱处形成钢管混凝土式的结构。

德国企业 NORDEX<sup>[45]</sup>提出的装配式多足基础方案中,取消了梁外端与预制承台的连接,只需要



(a) RUTE 装配式多足基础-下沉承台形式



(b) RUTE 装配式多足基础-锚杆形式<sup>[39]</sup>



(c) HWS 装配式多足基础<sup>[42]</sup>

图 10 不同形式的装配式多足基础

Fig. 10 Different forms of prefabricated multi-footing foundation

将梁放置在墩台上部,依靠自重和上覆土使两者贴合。基础的环向通过在预制构件间环向拼接形成的凹槽内灌浆进行连接,台柱和预制梁通过预留在构件的内锚栓孔竖向连接。基础装配完成后,塔筒和基础通过预留在外侧的环向孔洞,穿过预应力锚栓进行连接。该基础形式的承台下部还可以根据需要设置桩,现场施工时在桩顶与预制承台进行连接。此外,这类基础在不同的施工场地只需调整承台的设计,预制的梁柱构件不用更改,可以方便地实现不同场地条件下的基础设计。

### 1.3 装配式筒型基础

筒型基础常在软土地区上的护岸、码头等港口结构中采用,但尺寸和受力模式与风电结构中的筒型基础有所差异。筒型基础适用于沿岸、湿陷性土

层的特点,使其在风电基础领域也有很好的应用前景。常规的风电筒型基础<sup>[46]</sup>是由美国地球系统公司提出的 Patrick & Henderson tensionless pier foundation (P&H 无张力墩基础),中国引进后常被称为预应力筒型基础或预应力墩基础,该基础结构通过内外波纹钢筒和周围的摩擦传递荷载,对贯穿筒体高度方向的锚栓施加预应力使基础在运行过程中保持“无张力”状态。筒型基础在沿海软土地场的适应性强,将其改造成装配式结构综合效益好。

马人乐等<sup>[47]</sup>提出了一种装配式筒型基础,结构如图 11 所示。该装配式筒型基础结构取消了内外波纹钢筒,将基础沿着筒身不同高度的水平方向,均匀划分成若干个相同的环状预制筒体。装配施工时,将预制筒体吊装堆叠成筒型,再通过筒身内部通长的预应力锚杆将其构件及上部塔筒进行连接,不需要额外的湿作业。这种装配式基础具有结构简单,施工速度快,造价低的优点。唐甜甜<sup>[48]</sup>对其进行了较为详细的理论分析和有限元分析。结果表明,装配式筒型基础结构具有良好的抗弯性能,施工方便,可以较好地缩短工期,降低造价。

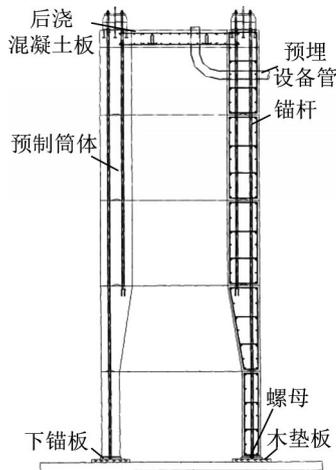


图 11 装配式筒型基础<sup>[48]</sup>

Fig. 11 Prefabricated tubular foundation<sup>[48]</sup>

汤友生等<sup>[49-50]</sup>对装配式筒型基础进行了详细的受力特性研究。结果表明,在水平荷载作用下装配式筒型基础的变形特征类似于现浇筒型基础,并且与现浇基础的受力性能相当,采用预应力锚杆的连接方式可使基础各水平接触面具有足够的抗剪承载力,并提出了水平接触面承载力的分析方法。

李振作等<sup>[51]</sup>对装配式筒型基础结构进行了改进,优化后的基础结构如图 12 所示。该方案在预制构件吊装完成后,对筒体内外周侧后浇低强混凝土,并将预制筒体的外边缘设置成波纹状以提高新旧混凝土结合面的黏结力。

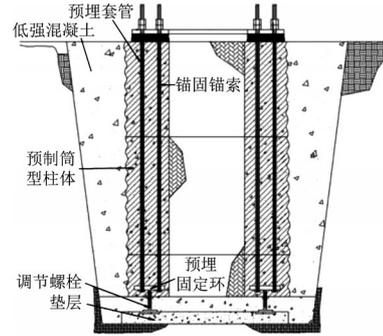


图 12 改进后的装配式筒型基础<sup>[51]</sup>

Fig. 12 Improved prefabricated prestressed tubular foundation<sup>[51]</sup>

### 1.4 装配式扩展基础

风电扩展基础具有应用广泛、技术成熟、整体性好、刚度大、埋深小、土方开挖量小等优势。随着风机容量逐渐增大,外荷载逐渐增加,其混凝土的用量以及占地面积也随之增加,导致经济性逐渐降低<sup>[52]</sup>。扩展基础有着和梁板基础相似的受力特点,预制构件可参照梁板基础的拆分方式,其制作方面相对简单。不过,扩展基础通常可以被梁板基础替代,且材料用量多于梁板基础,接触区域面积也相应增加,构件连接设计的精度要求更高,故在装配式基础结构领域的方案不多。

吴香国等<sup>[53]</sup>提出将扩展基础模块化的方式,把完整的扩展基础主体划分成两类预制混凝土构件,在预制构件之间设置凸凹齿槽以及预留孔洞,结构如图 13 所示。装配式扩展基础施工时,将所有的预制构件先按照齿槽相互匹配拼接成完整圆形扩展基础,然后再在预留孔洞内后张环向预应力筋使各构件连接为整体。可以看到,装配式扩展基础的预制构件划分方式和装配式梁板基础基本相同,但相对于装配式梁板基础而言,材料用量多,构件体积大,构件间的较大面积的齿槽设计也会给预制构件的制作带来更大的难度。

### 1.5 装配式箱型基础

风电箱型基础结构是在台柱周侧设置若干的箱型凹槽,往凹槽内部回填土或其他填充物,以满足基础抗倾覆性能,可以有效地回填利用开挖土方,节约材料。风电箱型基础由于各构件易于划分,基础材料用量少,经济性较好,因而也有不少装配式结构方案被提出。

丹麦风机制造商 VESTAS<sup>[54]</sup>研发出一种装配式箱型基础,结构如图 14 所示。装配施工时,将预制箱体沿着开挖好的基坑中心环向均布,预制箱体环向之间不做连接,每个箱体内部设置用于连接拉索的固定装置,再将开挖出的土回填至基坑并填平,然后在中心台柱上立起塔筒,塔筒中部设置拉

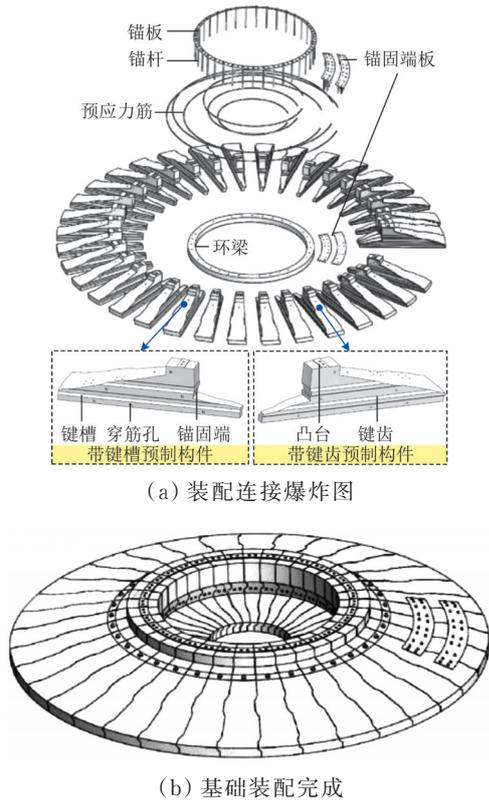


图 13 装配式扩展基础结构示意图<sup>[53]</sup>

Fig. 13 Details of a prefabricated spread foundation<sup>[53]</sup>

索固定端,并通过拉索与基础上的固定端连接,有效地提高了塔筒的稳定性。已有研究表明,带塔架拉索的基础形式<sup>[55]</sup>,可以减少塔筒成本约 20%,并且百分比随着轮毂高度的增加而增加。

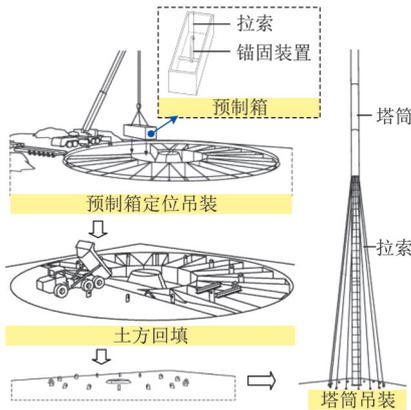


图 14 VESTAS 装配式箱型基础<sup>[54]</sup>

Fig. 14 VESTAS prefabricated box foundation

德国企业 RWE<sup>[56]</sup>提出的装配式箱型基础方案中,各单元预制箱被划分成 3 个不同的预制构件,各预制构件表面设置用于相互连接贴合的齿槽,内部预留孔洞。施工时,将各预制构件按齿槽拼装贴合后,在孔洞内后张预应力筋将各预制构件连接形成整体。

郝华庚等<sup>[57]</sup>提出的蜂窝型装配式箱型基础结构

方案中,整体预制各个箱体,各预制箱内部预设孔洞,施工时将各个箱体之间通过螺栓相互连接。基础台柱也采用预制的方式,实现了所有构件均采用预制的效果。此外,根据实际需要可以调整箱型构件的个数及布置位置,在基础的设计及施工方面具有较强的灵活性。

### 1.6 装配式支撑基础

陆上风电装配式支撑基础源于西班牙企业 ESTEYCO<sup>[58]</sup>,基础结构由底部、支撑、中心筒、顶板组成,其中仅支撑采用的是预制的形式,结构如图 15 所示。该方案可以节省混凝土和钢筋用量,减少锚栓的数量并方便更换锚栓,还可以将塔筒的开洞布置在基础台柱,避免常规塔筒开洞引起的塔筒应力集中现象<sup>[59]</sup>。支撑式基础已在包括中国、德国等在内的许多国家都有实际项目,中国在新疆的某风电项目中采用了此基础<sup>[60]</sup>,施工流程如图 16(a)所示。可以看到,由于基础预制构件占比不高,现场绑扎钢筋的工程量仍然较大,且工艺复杂,相对于传统的现浇基础,节省工期的程度有限。

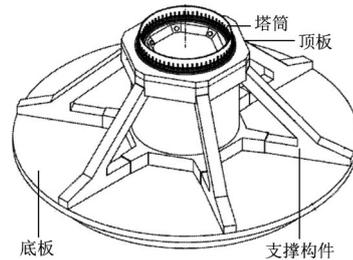


图 15 支撑基础<sup>[58]</sup>

Fig. 15 Braced foundation<sup>[58]</sup>

田春雨等<sup>[61]</sup>对装配式支撑基础进行了优化,发展了支撑、台柱均预制的结构形式。孙阳等<sup>[62]</sup>在田春雨的基础上进一步优化,提出了构件全部预制的装配式支撑基础,除部分保留了前者<sup>[61]</sup>提出的连接方案外,将底板也改为预制形式,各构件间的连接及基础结构示意如图 17 所示。

胡晨<sup>[63]</sup>考虑到风电基础中部分后浇节点的构造无明确的规范和图集可参考,对装配式支撑基础预制底板间 U 形筋搭接后浇节点和台柱的螺栓连接节点进行了模型试验和有限元模拟分析,结果表明,后浇带节点的受弯破坏模式与现浇相同,开裂荷载减小了 40% 以上,裂缝宽度也明显更大,但仍可采用相应规范计算受弯承载力,并提出了节点的裂缝宽度计算方法;分析了后浇带和螺栓连接区域的受剪破坏机理,提出了后浇带和螺栓连接节点受剪承载力的计算公式。



(a) 新疆昌吉风电项目施工



(b) 国外采用支撑基础的风电场

图 16 支撑基础国内外实际项目<sup>[60]</sup>

Fig. 16 Domestic and foreign actual projects of braced foundation<sup>[60]</sup>

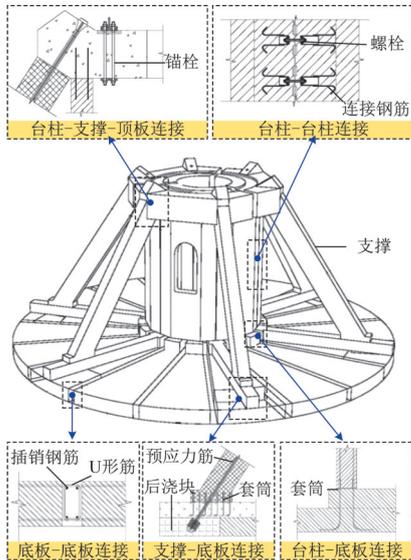


图 17 装配式支撑基础<sup>[62]</sup>

Fig. 17 Prefabricated braced foundation

## 2 研究现状总结及面临的问题

通过总结上述研究现状可知,目前已有较多的装配式风电基础结构方案,行业企业、科研人员等对装配式基础也做了大量相关研究。从当前装配式结构与可再生能源发展的国家战略可知,陆上风电装配式基础结构具有良好的研发和推广应用前景。区别于现浇基础通常仅需考虑基础结构设计

和施工,装配式基础结构则需要对方案进行全过程、全流程设计,如图 18 所示。然而,现有研究仍然面临以下问题亟待解决:

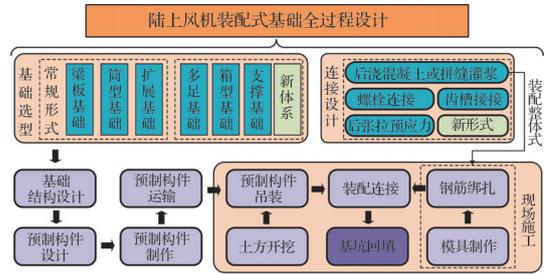


图 18 陆上风电装配式基础全过程设计

Fig. 18 Whole process design of onshore wind turbine prefabricated foundation

1) 结构设计规范化与标准化程度不高。已有的风电装配式基础拼缝常采用钢筋搭接后浇、螺栓连接、后张预应力等方式,但都缺乏专门的规范要求和标准。虽然大多数连接方式在建筑、桥梁等结构中已有成熟运用,但风机基础由于结构形式和受力状态与其他结构差异较大(如疲劳问题突出),难以直接沿用这些连接方式的构造、设计要求,相关的理论研究亟待补足。同时,不同国家和地区的企业、高校、科研人员提出的装配式基础在结构设计、预制构件拆分、连接方式等方面差异较大,各类方案参照的设计标准多数是依据所在地区的规范,不同地区的装配式基础方案相互借鉴比较困难。此外,目前还未形成较成熟、可统一推广的装配式基础结构方案,这也阻碍了风电装配式基础结构的规模化应用。

2) 装配式基础结构预制化水平较低。中国风电装配式基础结构处于起步阶段,大多工程项目存在着大量现浇构件,构件预制化程度低,施工效率并未有明显提升,装配难度高于已提出的全装配式风电基础。其他国家虽有少数项目方案采用全装配式的结构形式,但对预制构件制作、装配施工的精度要求较高,预埋钢筋的位置、预留锚栓孔的同心度与连接构造设计等都需要重点考虑,需要在施工难度和预制构件的制作难度之间找到平衡点,实现经济、社会效益的最大化。

3) 装配式基础结构理论研究不足。目前相关科研人员已对现浇陆上风电基础开展了详细的研究,如基础的受力状态及优化设计、风荷载与地震作用下基础的动力响应、土-结构相互作用、基础的疲劳分析、基础-塔架一体化设计等。但在装配式基础结构理论论述研究方面还存在大量空白,难以保障装配式基础在风机运行过程中正常工作,现有研究在基础选型、结构设计、构件拆分、连接设计、运输

施工都还有进一步优化的空间,对装配式基础在运行阶段中可能出现的破坏模式的认识还不充分,缺乏足够的研究确保装配式基础的全寿命周期性能。

### 3 结论及展望

陆上风电装配式基础结构具有质量可靠、施工快速、绿色环保等优势,已开展相应的研究和工程应用,具有较好的应用前景。风电装配式基础研究起步较晚,虽有多种方案提出,但相关的研究不深入、不充分,未能实现装配式基础的设计及生产标准化、产业化。笔者在已有的研究基础上,通过系统归纳和广泛调研,建议在以下几个方面开展深入、全面的研究,以期风电结构的高质量发展提供技术支撑:

1)在结构选型、连接设计等方面进一步研发、优化现有的装配式基础形式,提出与之配套的设计理论与分析方法,并形成规范、图集等设计依据。

2)充分考虑风电基础结构的地域、环境适用性,提高装配式基础的构件预制化程度与现场施工效率,提出与风电设计容量相匹配的最优装配式基础结构形式。

3)着力风电基础结构的荷载特性与装配式基础的结构属性,开展基础理论与应用基础协同攻关研究,探究装配式基础在风、地震及土-结构相互作用下的响应与关键节点的疲劳分析,发展装配式基础的全寿命设计方法与性能控制理论。

4)随着风电技术的发展,老旧风电场设备可更换为更大容量的风机,将装配式基础的技术拓展应用于老旧风电场基础的加固、扩容,使原有基础能够承受扩容后的更大荷载,实现资源的重复利用。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.“十四五”现代能源体系规划[R/OL]. (2022-03-22) [2022-11-02]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220322\\_1320017.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220322_1320017.html). National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Modern energy system planning in the 14th five year plan [R/OL]. (2022-03-22) [2022-11-02]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220322\\_1320017.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220322_1320017.html).
- [2] 夏云峰. 2021年全球新增风电装机93.6 GW [J]. 风能, 2022(6): 38-43. XIA Y F. In 2021, the installed capacity of new wind power in the world was 93.6 GW [J]. Wind Energy, 2022(6): 38-43. (in Chinese)
- [3] 陆上风电场工程风电机组基础设计规范: NB/T 10311—2019 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. Code for design of wind turbine foundations for onshore wind power projects: NB/T 10311—2019 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese)
- [4] 李才华, 赵志. 风电机组混凝土基础强度及施工冷缝检测评估技术[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(Sup1): 364-368. LI C H, ZHAO Z. Detection and evaluation technology of concrete foundation strength and construction cold joint of wind turbine [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(Sup1): 364-368. (in Chinese)
- [5] 汪宏伟. 风机基础环松动原因分析和注浆加固[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(3): 104-107. WANG H W. Cause analysis and grouting reinforcement on loose foundation ring of wind turbine [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(3): 104-107. (in Chinese)
- [6] 谢冰冰, 袁凌, 王小虎, 等. 风电机组基础环周边混凝土受力机理分析及基础加固[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8592-8599. XIE B B, YUAN L, WANG X H, et al. Force analysis and foundation reinforcement of concrete around fan foundation ring [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8592-8599. (in Chinese)
- [7] 康明虎. 某风电场风机基础故障分析及处理[J]. 可再生能源, 2014, 32(6): 809-813. KANG M H. Analysis and treatment of wind turbine foundation fault in a wind farm [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(6): 809-813. (in Chinese)
- [8] 赵炜, 何芳, 谢云春. 风机基础预应力锚栓张拉失效原因分析及处理方案[J]. 云南水力发电, 2020, 36(5): 74-78. ZHAO W, HE F, XIE Y C. Failure analysis and treatment scheme of prestressed anchor bolt tension of fan foundation [J]. Yunnan Water Power, 2020, 36(5): 74-78. (in Chinese)
- [9] 国家能源局. 关于公布2020年风电、光伏发电平价上网项目的通知[R/OL]. (2022-07-31) [2022-11-02]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202008/t20200805\\_1235592.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202008/t20200805_1235592.html). National Energy Administration. Notice on Announcing the Projects of Wind Power and Photovoltaic Power Generation in 2020 [R/OL]. (2022-07-31) [2022-11-02]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202008/t20200805\\_1235592.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202008/t20200805_1235592.html).
- [10] 李滨. 我国预制装配式建筑的现状与发展[J]. 中国科技信息, 2014(7): 114-115. LI B. Present situation and development of prefabricated buildings in China [J]. China Science and Technology Information, 2014(7): 114-115. (in Chinese)
- [11] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技

- 术, 2010, 41(12): 1074-1077.  
JIANG Q J. Summary on development of assembled concrete building both home and abroad [J]. Architecture Technology, 2010, 41(12): 1074-1077. (in Chinese)
- [12] 李早, 李大均, 陈利德, 等. 陆上风电场风机基础形式分析[J]. 神华科技, 2013, 11(3): 61-64.  
LI Z, LI D J, CHEN L D, et al. Analysis of fans base form in lushangfeng power plant [J]. Shenhua Science and Technology, 2013, 11(3): 61-64. (in Chinese)
- [13] 迟洪明, 李向辉, 陈丙杰. 我国陆上风电场风机基础形式研究[J]. 山西建筑, 2014, 40(29): 88-90.  
CHI H M, LI X H, CHEN B J. Research of wind turbine foundation types of onshore wind power station in China [J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(29): 88-90. (in Chinese)
- [14] 王利楠, 郝华庚, 丛欧, 等. 半预制半现浇混凝土风机基础的受力分析[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1719-1726.  
WANG L N, HAO H G, CONG O, et al. Force analysis of a semi prefabricated fan base [J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(11): 1719-1726. (in Chinese)
- [15] PHULY A. Fatigue reistant foundation system: US20110061321 [P]. 2011-03-17.
- [16] Skanska. The Sjisjka wind farm [EB/OL]. [2022-11-02]. <https://group.skanska.com/projects/57331/The-Sjisjka-wind-farm>.
- [17] ENELANDENELAND L M. Prefabricated foundation for wind power plants-A conceptual design study [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2013.
- [18] 宋欢, 丛欧, 郝华庚, 等. 预制装配式风机基础受力特性研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(13): 96-100.  
SONG H, CONG O, HAO H G, et al. Research on mechanical properties of prefabricated foundation of wind turbine generators [J]. Building Structure, 2018, 48(13): 96-100. (in Chinese)
- [19] 许云龙. 陆上装配式风机基础受力特性及结构优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.  
XU Y L. Research on mechanical characteristics and structure optimization of assembled foundation for onshore wind turbines [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [20] 陈俊岭. 预制装配式钢结构风机基础: CN205188991U [P]. 2016-04-27.  
CHEN J L. Prefabricated steel structure fan base: CN205188991U [P]. 2016-04-27. (in Chinese)
- [21] 张佑臣. 预制装配式钢基础在风力发电塔中的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2018.  
ZHANG Y C. Study on application of prefabricated steel foundation in wind power tower [D]. Shanghai: Tongji University, 2018. (in Chinese)
- [22] 张广杰, 王康世, 康高英. 肋板式风机基础: CN111411642A [P]. 2020-07-14.  
ZHANG G J, WANG K S, KANG G Y. Ribbed-plate fan foundation: CN111411642A [P]. 2020-07-14. (in Chinese)
- [23] 吕伟荣, 何潇锟, 卢倍嵘, 等. 插环式风机基础疲劳损伤机理研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 140-148.  
LÜ W R, HE X K, LU B R, et al. Fatigue damage mechanism of wind turbine foundation with foundation pipe [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 140-148. (in Chinese)
- [24] AITOR G E, IVÁN G M, TERESA A G, et al. System, manufacturing method and precast foundation structure for wind turbine: WO2022129555A1 [P]. 2022-12-17.
- [25] MARTA C D, RÜDIGER M, ALI M M. Mold part set for wind turbine ground foundation and wind turbine ground foundation: WO2022174912A1 [P]. 2022-08-25.
- [26] 景赵丰, 刘波, 李翔宇, 等. 装配整体式混凝土结构钢筋连接技术综述[J]. 施工技术, 2018, 47(10): 24-26, 31.  
JING Z F, LIU B, LI X Y, et al. Review for connection technology of prefabricated monolithic concrete structure steel bar [J]. Construction Technology, 2018, 47(10): 24-26, 31. (in Chinese)
- [27] KNISEL S. Foundation for a wind turbine tower: US8695297 [P]. 2014-04-15.
- [28] Artepref. Precast concrete for wind turbines [EB/OL]. [2022-11-02]. <https://www.artepref.com/empresa/innovacion/precast-concrete-for-wind-turbines/>.
- [29] GREGOR P, CHRISTOPH S. Ankerkorb für ein fundament für eine windkraftanlage: DE102021125328A 1 [P]. 2022-03-31.
- [30] FOUNDATIONS A. Wind turbine foundations [EB/OL]. [2022-11-02] <https://www.anker-foundations.com/en/wind-turbine-foundation/>.
- [31] SERRALE MONNIER B. Diseñoy estudio de la viabilidad de un parque eólico en el condado irlandés de Galway [D]. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2022.
- [32] GREGOR P, CHRISTOPH S. Fundament für eine windkraftanlage: DE102019126587A1 [P]. 2021-04-08.
- [33] GREGOR P, CHRISTOPH S. Fundament für eine windkraftanlage: DE102019126629A1 [P]. 2021-04-08.
- [34] CORELLA A, KRAUSE D, GODSELL Z. Tower foundation with concrete box girder beams: US10982406 [P]. 2021-04-20.
- [35] FoundationsRute. Delivered right to your wind power site [EB/OL]. [2022-11-02]. <https://www.rutefoundations.com/bxgproducts>.
- [36] CONTI J P. In search of the zero-emission continent

- [Power Antarctic] [J]. *Engineering & Technology*, 2009, 4(21): 46-49.
- [37] South Pole Station. The Ross Island Wind Farm [EB/OL]. [2022-11-02]. <https://www.southpolestation.com/trivia/00s/windfarm.html>.
- [38] KRAUSE D E. Beam and pile anchor foundation for towers: US20180187389 [P]. 2018-07-05.
- [39] VELASQUEZ R A, MORGAN K B, KRAUSE D J, et al. Challenges evaluating performance of innovative wind turbine foundation via 3D numerical modeling [C]// *Geo-Congress 2020*. February 25-28, 2020, Minneapolis, Minnesota. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2020: 325-333.
- [40] NORVELL C. Structural design issues of "Hexapod" foundations for wind turbine towers [D]. Portland State University, 2016.
- [41] JESÚS M F, JOSÉ MANUEL S E, MARIANO P A. Foundation for wind turbine towers: WO2022115341A1 [P]. 2020-06-11.
- [42] TowersHWS. A Precast Foundation for wind turbines [EB/OL]. [2022-11-02]. <https://www.hwstowers.com/airbase/>.
- [43] BHASKAR P, STEHLY T. Technology innovation pathways for distributed wind balance-of-system cost reduction [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2021.
- [44] 王宇航, 邓然, 周绪红, 等. 一种全装配式组合结构风电塔筒基础: CN109295994A [P]. 2019-02-01.  
WANG Y H, DENG R, ZHOU X H, et al. Fully fabricated wind power tower barrel foundation of combined structure: CN109295994A [P]. 2019-02-01. (in Chinese).
- [45] AITOR G E, IVÁN G M, JOSE LUIS A L, et al. Precast foundation structure for a wind turbine, wind turbine and assembly method of a wind turbine: EP3845712A1 [P]. 2021-07-07.
- [46] HENDERSON A P, PATRICK M B. Tensionless pier foundation: US5586417 [P]. 1996-12-24.
- [47] 马人乐, 何敏娟. 预应力锚栓预制拼装筒式风机基础: CN201411706Y [P]. 2010-02-24.  
MA R L, HE M J. Prestress anchor bolt prefabricated assembled cylinder blower base: CN201411706Y [P]. 2010-02-24. (in Chinese).
- [48] 唐甜甜. 风力发电机预制预应力筒状基础研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.  
TANG T T. Study on precast prestressed tubular foundation of wind turbine [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [49] 汤友生, 姚海林, 卢正, 等. 水平荷载作用下装配式风机基础受力性状研究[J]. *工程勘察*, 2019, 47(3): 1-8.  
TANG Y S, YAO H L, LU Z, et al. Study on the behavior of prefabricated wind turbine foundation under lateral load [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2019, 47(3): 1-8. (in Chinese)
- [50] 汤友生. 新型装配式风机基础开发及力学特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.  
TANG Y S. Development and mechanical characteristics of new assembled fan foundation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [51] 李振作, 胡永柱, 申宽育, 等. 一种装配式预应力混凝土圆筒型柱体基础: CN203145034U [P]. 2013-08-21.  
LI Z Z, HU Y Z, SHEN K Y, et al. Assembled prestress concrete cylindrical column body foundation: CN203145034U [P]. 2013-08-21. (in Chinese).
- [52] 张浦阳, 曾斌, 丁红岩, 等. 陆上风机圆形扩展基础底板内力及脱开规律研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(3): 129-136.  
ZHANG P Y, ZENG B, DING H Y, et al. Analysis of internal force and disengagement law for circular expansion foundation plate of onshore wind turbine [J]. *Building Structure*, 2020, 50(3): 129-136. (in Chinese)
- [53] 吴香国, 李伟涛, 刘万通, 等. 承台单元和具有其的模块化装配式风电扩展基础: CN217630065U [P]. 2022-10-21.  
WU X G, LI W T, LIU W T, et al. Bearing platform unit and modular assembly type wind power extended foundation with same: CN217630065U [P]. 2022-10-21. (in Chinese).
- [54] GERNER L, GUNNAR K, STORGAARD P, et al. Wind turbine foundation: WO2020048573A1 [P]. 2020-03-12.
- [55] JESPERSEN M, STØTTRUP-ANDERSEN U. Guyed wind turbine towers: Developments and outlook [J]. *Papers*, 2019, 3(3/4): 779-784.
- [56] MARTA C D, RÜDIGE M, MOHAMMADI M. Molded part set for wind turbine foundation and wind turbine foundation: WO2022174913A1 [P]. 2022-08-25.
- [57] 郝华庚, 曹亮, 冶学斌, 等. 一种预制装配式风电基础: CN114855863A [P]. 2022-08-05.  
HAO H G, CAO L, YE X B, et al. Prefabricated assembled case becomes basis: CN217460658U [P]. 2022-09-20. (in Chinese).
- [58] JOSÉ SALUSTIANO SERNA GARCÍA-CONDE. Foundations system for towers and method for installing the foundations system for towers: US20170152641 [P]. 2017-06-01.
- [59] 北极星风力发电网. 金科新能源邓飞: 风力发电机组装配式抬高基础 [EB/OL]. (2019-10-24) [2022-11-02]. <https://news.bjx.com.cn/html/20191024/1015626.shtml>.
- [60] ESTEYCO. Beitashan Wind Farm [EB/OL]. [2022-11-

- 02]. <https://www.esteyco.com/proyectos/beitashan-wind-farm/>.
- [61] 田春雨,周剑.一种装配式风电塔筒基础及其施工方法:CN109518712A[P].2019-03-26.  
TIAN C Y, ZHOU J. Offshore wind power fabricated type bearing table foundation and construction method thereof:CN109518712A [P]. 2019-03-26. (in Chinese)
- [62] 孙阳,李沐,邓飞,等.塔筒基础及其施工方法:CN113136890A[P].2021-07-20.  
SUN Y, LI M, DENG F, et al. Tower drum foundation and construction method thereof:CN113136890A [P]. 2021-07-20. (in Chinese)
- [63] 胡晨.风电塔筒装配式混凝土基础节点受力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.  
HU C. Study on mechanical behavior of precast concrete foundation joint of wind turbine tower [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)