

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.103



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 风电机组混凝土-钢混合塔筒技术现状 与发展趋势

王丹<sup>1</sup>, 徐军<sup>1</sup>, 贺广零<sup>2</sup>, 吴强<sup>2</sup>, 李宇翔<sup>2</sup>

(1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南三一智慧新能源设计有限公司, 长沙 410082)

**摘要:**为开发利用低风速、高切变地区的风资源,需增加风电机组的轮毂高度。目前工程应用的高塔架方案主要有3种,分别是全钢塔筒、全混凝土塔筒(全混塔筒)以及混凝土-钢混合塔筒(钢混塔筒)。首先,对比3种塔筒的技术特点发现,钢混塔筒兼具全钢塔筒与全混塔筒的优点,且能克服二者缺点,是应对高塔架挑战的优选方案。其次,围绕塔筒形式(倒角正方形、圆锥形、倒角三角形、腰形、正多边形及“自升式”),综述钢混塔筒技术的发展历程和研究现状,并将中国钢混塔筒技术发展归纳为3个发展阶段与3个技术流派。再次,介绍钢混塔筒的行业标准,概述现有提升其性能、优化成本、缩短施工周期及开展健康监测的关键技术研究。最后,总结钢混塔筒技术研究中存在的问题与挑战,包括结构选型、子模型分析技术、可靠性研究、老旧钢混塔筒的升级改造及超高钢混塔筒研究,为新产品开发提供借鉴与参考。钢混塔筒具有稳定性高、使用寿命长、建造成本低等特点,可满足大型风电机组的发展要求。

**关键词:**风电机组;混凝土-钢混合塔筒;预制混凝土;生产工艺;技术现状;发展趋势

**中图分类号:**TU347      **文献标志码:**A      **文章编号:**2096-6717(2025)06-0151-17

## Technology status and development trends of concrete-steel hybrid towers for wind turbines

WANG Dan<sup>1</sup>, XU Jun<sup>1</sup>, HE Guangling<sup>2</sup>, WU Qiang<sup>2</sup>, LI Yuxiang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China; 2. Hunan Sany Intelligent New Energy Design Co., Ltd., Changsha 410082, P. R. China)

**Abstract:** To exploit wind energy resources in areas with low wind speeds and high shear, the hub height of a wind turbine must be increased. There are three main engineering solutions for high towers, namely all-steel towers, all-concrete towers, and concrete-steel hybrid towers (hybrid towers). Firstly, this paper compares the technical characteristics of the three types of towers. The results show that the hybrid towers combine the advantages of both all-steel and all-concrete towers, overcome their disadvantages, and are the preferred solution to address the challenges of high towers. Secondly, this paper reviews the development history and

**收稿日期:**2023-05-05

**基金项目:**国家自然科学基金(52278178);湖南省科技创新计划项目(2022RC1176)

**作者简介:**王丹(1992-),男,博士生,主要从事风力发电机研究,E-mail:wangdan1@hnu.edu.cn。

徐军(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:xujun86@hnu.edu.cn。

**Received:** 2023-05-05

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52278178); Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (No. 2022RC1176)

**Author brief:** WANG Dan (1992-), PhD candidate, main research interest: wind turbines, E-mail: wangdan1@hnu.edu.cn.

XU Jun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xujun86@hnu.edu.cn.

research status of hybrid tower technology focusing on tower types (chamfered square, cone, chamfered triangle, kidney shape, regular polygon, and “self-elevating”), and summarizes the domestic technological development of hybrid towers into three development stages and three technical schools. Thirdly, this paper introduces the domestic and international industry standards for hybrid towers, and outlines the existing key technology research on improving their performance, optimizing costs, shortening the construction cycle, and conducting health monitoring of hybrid towers. Finally, this paper summarizes the problems and challenges in the research of hybrid tower technology, including structural unification, application of sub-model analysis techniques, reliability research, upgrading of old hybrid towers, and research on ultra-high hybrid towers, which provides references for new product development. With high stability, a long service life and low construction costs, hybrid towers can meet the development needs of large wind turbines.

**Keywords:** wind turbines; concrete-steel hybrid towers; precast concrete; production process; technology status; development trends

风能是一种清洁的可再生能源,风力发电是风能利用的主要形式,亦是目前可再生能源中除水能以外技术最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的发电方式之一<sup>[1]</sup>。大容量、高可靠性的风电机组始终是风电设备整机制造商的重要研发方向<sup>[2]</sup>。目前,提高发电量的技术手段主要有3种:增大机组容量、增大叶轮直径、增加轮毂高度<sup>[3]</sup>,且行业通常会组合使用这3种技术手段,以最大化提升发电量。中国140 m级塔架已进入商业应用阶段,未来将进一步向更高高度发展。为获得最佳风电投资收益率,陆上风电机组单机容量已进入6 MW级别,对应的风电机组塔筒需求高度为140~180 m。此外,随着中国近20年的风电产业发展,陆上风电逐渐呈现出由传统风资源丰富地区向低风速区拓展的趋势,江苏、安徽、河南、山东、湖北、河北等低风速区域均拥有丰富的低风速资源。如何高效开发利用这类低风速、高切变风资源,是行业当前面临的一大挑战,而高塔架技术正是应对这一挑战的关键<sup>[4]</sup>。目前行业内已有实际工程应用的高塔架方案主要有3种:全钢塔筒、全混凝土塔筒(以下简称“全混塔筒”)及混凝土-钢混合塔筒(以下简称“钢混塔筒”)<sup>[5]</sup>。

全钢塔筒的市场占比仍居首位,其应用主要集中在“三北”(西北、华北及东北地区)等风资源条件较好的区域<sup>[6]</sup>。随着塔架高度不断增加,全钢塔筒通过降低塔架刚度解决塔底大直径用钢成本过高和运输受限的问题,代价是各阶固有频率更低<sup>[7]</sup>。如图1所示,全钢塔筒的固有频率小于风轮旋转频率1P(叶轮转速的1倍)<sup>[8]</sup>,不仅在机组启停过程中存在与叶轮的共振风险<sup>[9]</sup>,在自然条件下也容易达到触发塔架涡激振动的临界风速;为避免全钢塔筒受涡振破坏,需要采取一系列控制措施<sup>[10-12]</sup>。由于全钢塔筒存在易共振、易疲劳、运维工作量较

大及底部钢塔筒运输直径受限<sup>[13]</sup>等问题,很难进一步向高空化发展。相较于全钢塔筒,全混塔筒具有塔架刚度大、不易发生共振、不易疲劳、建造成本低且运维工作量小的特点。2005年美国新能源实验室对圆锥形全钢塔筒、圆锥形全混塔筒及钢混塔筒进行经济性对比分析,结果表明:对于大型风电机组,现浇圆锥形全混塔筒的经济性最佳<sup>[14]</sup>。但全混塔筒施工环节较多、吊装时间长,导致施工速度较慢;且随着高度的提升,钢绞线需采用分级张拉工艺,成本较高且施工工艺复杂。

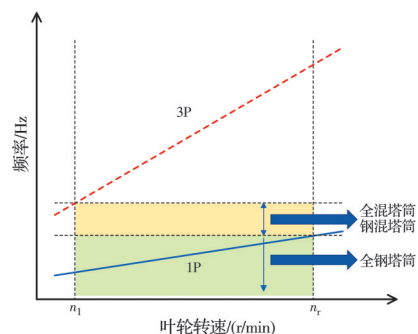


图1 塔架振动频率与叶轮转速的关系

Fig. 1 The relationship between tower vibration frequency and impeller rotational speed

钢混塔筒利用混凝土结构替代高塔架底段,钢塔段与全钢塔筒结构一致,钢塔段与混凝土塔段间通过过渡段(或称“法兰”)连接,混凝土塔段固定于混凝土基础(如图2所示)。混凝土塔段由多个单节塔节连接而成,具体塔节数量可根据钢塔段与混凝土塔段的高度组合确定,使塔架频率保持在风轮旋转频率1P(叶轮转速的1倍)与叶片通过频率3P(叶轮转速的3倍)之间,避免与叶轮产生共振。正因如此,钢混塔筒无须额外增加复杂的控制策略和内部减振装置,便可应对各种复杂工况,且无须增加额外的运维负担。对于全钢塔筒无法适应的复杂风资源项目,钢混塔筒同样能够保障机组安全可靠运

行。钢混塔筒预制装配的生产方式解决了随着机组的扩大塔底直径增加带来的运输问题<sup>[15]</sup>。混凝土塔节生产可灵活采用在项目现场附近设置移动预制工厂的方案,为复杂地形风场的建设提供更多选择。钢混塔筒采用模块化设计,根据市场行情与设计需要,混凝土塔段和钢塔段可灵活组合,其施工速度较全混塔筒更快,运维工作量也较小。钢混塔筒使用寿命长,目前风电机组运行寿命按照20 a设计,而混凝土结构的使用寿命可达到50 a以上<sup>[16-17]</sup>。此外,由于混凝土具有耐腐蚀特征,比全钢塔筒更适合盐水环境,因此,钢混塔筒技术也有助于沿海地区海上风电机组的开发与应用<sup>[18]</sup>。简而言之,钢混塔筒兼具全钢塔筒与全混塔筒的优点,并克服了二者的缺点<sup>[19]</sup>。随着钢混塔筒施工工艺日益成熟,其项目整体施工周期基本可接近全钢塔筒。面对塔架高度在120 m及以上的风电机组,钢混塔筒凭借自身优势,可大幅缓解全钢塔筒高度增加与造价成本上升之间的矛盾,对于低风速、高切变风电场,将具备良好的发电收益。因此,以目前的研究技术水平,钢混塔筒可作为高塔架的优选解决方案<sup>[20]</sup>。

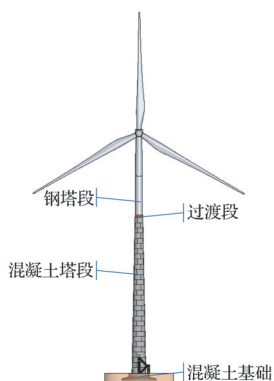


图2 钢混塔筒结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hybrid tower structure

## 1 发展历程与现状

钢混塔筒是风力发电机组的重要组成部分,能够支撑叶轮、轮毂的重量并承受巨大的风荷载。过去几十年,钢混塔筒的设计和制造经历了多次革新和发展。早期钢混塔筒主要采用圆锥形结构,随着风电机组规模的不断扩大,为应对不同工程实际需求,新的塔筒形式被相继提出,如逐级变径式、倒角三角形、倒角正方形等。目前,全球钢混塔筒应用数量超10 000台,其中以圆锥形与倒角正方形应用最广泛。

欧洲最早开始钢混塔筒研究,如德国 Enercon 公司开发的 E-126 型风电机组<sup>[21]</sup>,其样机于2007年投入运行。该机组塔筒高135 m,由35节预制式混凝土塔筒组成,各节塔筒预先在工厂浇筑成型,再

运至现场装配。其中,底部8节塔筒每节等分为3段圆环,中部22节塔筒每节分为两段半圆环,顶部5节塔筒为整体圆环,最顶节塔筒由钢板制成。西班牙 Gamesa 公司的 G128 型风电机组同样采用钢混塔筒,其样机于2008年完成安装<sup>[22]</sup>。目前全球最高的钢混塔筒安装于德国斯图加特的 Max Bögl 风电场(如图3所示),该塔筒轮毂高度为178 m,建造于2017年<sup>[23]</sup>。中国已吊装的最高钢混塔筒高度为170 m,于2021年建成。



图3 目前最高的钢混塔筒

Fig. 3 The tallest hybrid tower in existence

### 1.1 欧美国家研究与应用现状

欧美国家钢混塔筒的技术研究和应用相对较早,120~160 m的钢混高塔已有批量商业运行业绩。Brughuis<sup>[24-25]</sup>首次提出混凝土-钢组合塔筒的概念,并从经济性和可行性两方面对其开展研究。研究人员详细研究了钢混塔筒设计标准的制定、混凝土塔筒的厚度、塔节的尺寸、连接方式、塔筒整体的动力性能、混凝土塔段的比例、预应力的确定等内容,结果表明钢混塔筒建设具有技术可行性<sup>[26-27]</sup>。此后,大量厂家及机构参与到钢混塔筒的研究与应用中,如荷兰 MECAL 公司,德国 Enercon 公司、Max Bögl 公司,西班牙 Acciona 公司、Inneo Torres 公司、Esteyco Energia 公司、HWS 公司,墨西哥 Postensa Wind Structures 公司,美国 Venture 公司、WTT 公司、Tindall 公司及爱荷华州立大学等。

1) MECAL 公司方案。荷兰 MECAL 公司在国际上率先倡导并实践混合塔架技术路线,其在德国风电机组试验场部署的混合塔架样机已安全运行超10 a,轮毂高度达160 m<sup>[28]</sup>。2009年,该公司拥有专利的钢混塔筒概念样机在德国北莱茵威斯特伐利亚州的风电机组试验场揭幕,样机轮毂高度超过100 m。

为解决圆锥形截面模具制造费用高、占地面积广等问题,MECAL 公司推出倒角正方形塔筒,并将其命名为 Advanced Tower Systems (ATS)<sup>[29]</sup>。如图4所示,该公司拥有专利技术的钢混塔筒采用长10~15 m、宽3~4 m、厚25~35 cm的预制混凝土构件拼接而成<sup>[24]</sup>,每个塔节包括4个相同的90°圆弧转角以及4个连接圆弧转角的梯形平板。混凝土塔段

的圆弧转角半径均一致,通过一套模具即可完成所有转角构件的浇筑,不仅生产更简便,质量把控也更有保障。梯形平板的尺寸随塔架高度的上升而逐层减小,以此实现塔架的锥度设计。由于只需调整平板边模宽度即可完成不同规格梯形平板的生产,ATS塔架仅需3套模具(即平板模具、转角模具与过渡段塔节模具)就能完成全部混凝土构件的生产,实现模具的充分利用。MECAL公司采用低压模具制作混凝土单元,这种低压成型工艺不仅能提高模具使用寿命,减少制造误差,还能大幅提高产品的尺寸精度<sup>[30]</sup>。



图 4 倒角正方形塔筒

Fig. 4 Chamfered square tower

2)Max Bögl公司方案。德国Max Bögl公司采用的塔筒形式主要为圆锥形,根据塔筒直径差异,塔节由2~4个混凝土弯曲管片组成(如图5所示)。圆锥形塔筒具有结构受力合理、占地面积小等优点,但由于每层塔节直径不同,不同部分的管片需用单独模具生产,导致模具数量较多。Max Bögl公司于2011年开始批量生产钢混塔筒,凭借其技术,可建造高度达190 m的塔筒<sup>[31]</sup>。该公司的特点是采用移动工厂预制混凝土管片(如图6所示),通过本地采购原材料并在现场直接制造,提高了项目实施的灵活性。此外,为实现混凝土管片间的精密配合,Max Bögl公司通过混凝土精密预制工艺以及在预制完成后用研磨数控机床(CNC)打磨管片顶部和底部的技术手段,提高了构件制造精度。得益于这一高精度生产工艺,现场装配时混凝土构件间采



图 5 圆锥形塔筒

Fig. 5 Conical tower



图 6 Max Bögl移动工厂

Fig. 6 Max Bögl's mobile factory

用干连接形式,可大幅缩短塔架施工周期。

除Max Bögl公司外,亦有多家钢混塔筒厂家采用圆锥形塔筒形式,如西班牙的Acciona公司、Inneo Torres公司等,且这些公司的混凝土管片连接方式大多为湿连接。

3)Postensa Wind Structures公司方案。为解决圆锥形塔筒模具数量多、投资成本大的问题,墨西哥的Postensa Wind Structures公司采用的塔筒形式分为两种,分别为倒角三角形(如图7所示)与腰形(如图8所示)。其中,倒角三角形塔筒同样可实现模具标准化、塔节预制快速化,但由于其横截面积相对较小,仅适合亚兆瓦级风电机组,不适用于大容量风电机组<sup>[29]</sup>。Postensa Wind Structures公司的腰形塔筒样机于2012年在美国伊利诺伊州建造完成。与MECAL公司的方案不同,其塔节由两个呈180°弯曲的圆弧转角与两个平板组成;随着塔架高度的增加、直径逐渐减小,在较高高度,塔节会过渡到圆形部分,不再需要平板构件。



图 7 倒角三角形塔筒

Fig. 7 Chamfered triangular tower



图 8 腰形塔筒

Fig. 8 Kidney-shaped tower

4)爱荷华州立大学方案。为推动美国高塔架的设计、制造与建造,爱荷华州立大学于2010年开始研究 Hexcrete 塔概念。研究的第1阶段调查了预制超高性能混凝土在风电机组塔架设计中的应用,完成了100 m 塔架的设计。第2阶段于2013年开展,目的是进一步研究塔架负荷大小、降低塔架成本、开发满足使用要求的预制件连接方式并进行试验验证。2014年底开展第3阶段研究,主要目标是进一步发展 Hexcrete 塔架140 m 高度的商业技术,建造塔架样机<sup>[32]</sup>。如图9所示,塔节由6根混凝土柱与6个混凝土平板组成,横截面呈六边形。柱与平板可用超高性能混凝土(UHPC)、高性能混凝土(HPC)或高强度混凝土(HSC)预制成型,连接方式可为螺栓连接、UHPC 湿连接或后张法连接。由于 Hexcrete 塔架构件无弯曲结构,仅需两套模具即可完成所有柱与平板的制造,既降低了模具成本,又极大方便了预制件的运输。

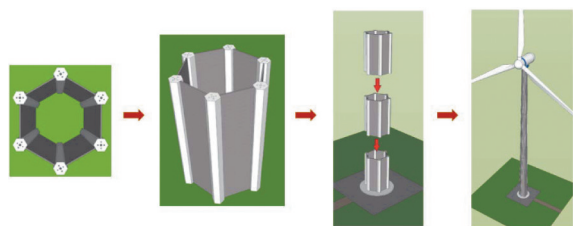
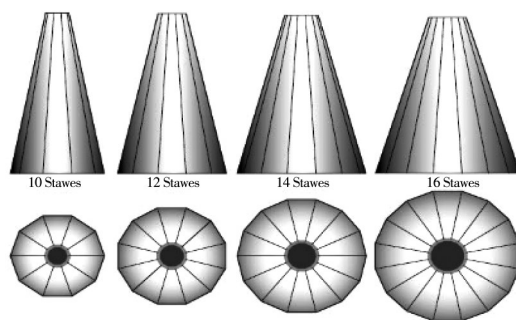


图9 正六边形塔筒

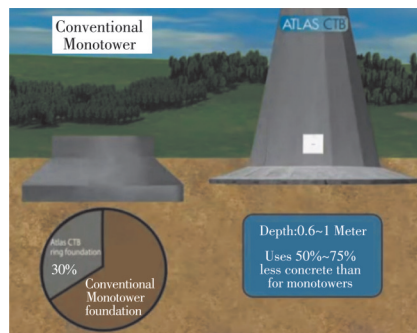
Fig. 9 Regular hexagonal tower

5)Tindall公司方案。2012年,Tindall公司设计出一种由40 m 混凝土塔段与100 m 传统钢制塔段组合而成的钢混塔筒,以实现140 m 轮毂高度,适用于1.5~3 MW 及以上风电机组。该钢混塔筒的预制构件为梯形混凝土平板,所有平板尺寸相同,可根据实际需要组合成不同大小的塔筒(如图10所示),用于不同高度的风电机组。塔架地基采用简单的环形基础,最大厚度仅1 m,与传统塔架基础相比,混凝土用量显著减少。该方案的样机在美国佐治亚州建成,但尚未批量使用。

6)Esteyco Energia公司方案。Esteyco Energia公司采用“自升式”钢混塔筒设计,该塔架样机于2014年建造。“自升式”塔筒由两部分组成:下部为混凝土结构,顶部为常规钢塔筒。下部混凝土结构由3个高度为40~50 m 的混凝土塔筒组成,设计为层层嵌套的同心结构,类似“伸缩式长筒望远镜”(如图11所示)。塔架未提升时,吊装高度较低,便于叶轮安装,降低了作业难度和风险。塔架与基础固定后,以最外层塔筒为支撑塔筒设置提升装置,通过钢绞线千斤顶依次带动内层逐级提升到位(如



(a) 塔筒组合



(b) 地基

图10 正多边形塔筒

Fig. 10 Regular polygonal tower

图12所示)并锚固<sup>[32]</sup>。2021年,Esteyco Energia公司研发的“自升式”钢混塔筒在中国河南完成建造,塔架高度达170 m。

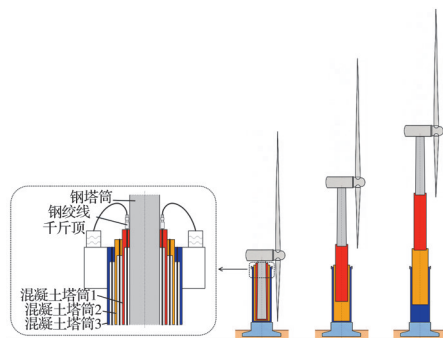


图11 “自升式”钢混塔筒

Fig. 11 Self-elevating hybrid tower

## 1.2 中国研究与应用现状

相较于欧洲,中国的钢混塔筒技术研究起步较晚,研究成果主要涉及塔筒管片拼装方法、预制工艺及模具等。中国的钢混塔筒发展大致经历了几个关键时间节点:2011年,水电水利规划设计总院牵头,金风科技股份有限公司(简称“金风科技”)与中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司合作,成立钢混塔筒攻关项目组;2012年,金风科技旗下北京天杉高科风电科技有限责任公司(简称“天杉高科”)的德国研发中心与德国塔架设计咨询机构确定中国钢混塔筒样机方案,该方案同时被纳入国

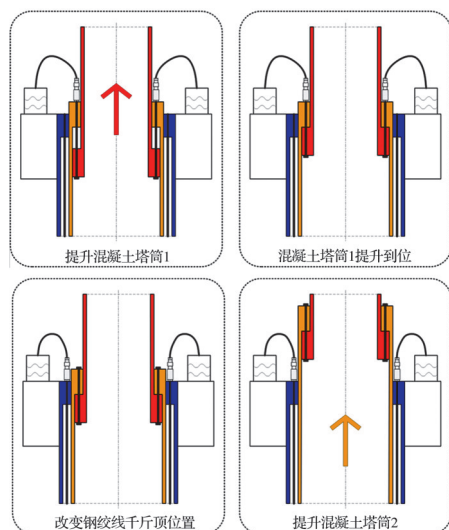


图 12 钢绞线千斤顶提升过程

Fig. 12 Strand jack lifting process of tower sections

家高技术研究发展计划(863计划);2013年,天杉高科现浇式钢混塔筒样机投入使用;2015年,天杉高科预制装配式钢混塔筒样机投入使用;2016年,天杉高科的批量化钢混塔筒项目落地应用。此后,越来越多中国厂家参与钢混塔筒的研究与应用,中国钢混塔筒市场可概括为3个发展阶段与3个技术流派。

### 1.2.1 3个发展阶段

1)初代及一代钢混塔筒技术。出于成本与技术条件限制,2013年初代钢混塔筒采用现浇式技术和滑模施工(如图13所示)。滑模施工的优点是可分段施工、模具简单。模具由内壳和外壳组成,可根据所需直径调节自身尺寸<sup>[33]</sup>。但受天气影响,现浇式塔筒易出现裂缝,且较长的浇筑周期导致初期客户体验不佳。为解决现场施工问题,天杉高科于2015年研制出分片预制式钢混塔筒,开启了中国一代钢混塔筒技术路线市场应用的元年。



图 13 滑模施工

Fig. 13 Climbing formwork construction

一代钢混塔筒技术采用“临时工厂+短距离配送+现场湿连接”的模式,钢混塔筒截面形式主要为圆锥形。在预制式钢混塔筒建设初期,预制混凝土管片暂未形成标准化施工规范,需根据项目需要,在临时搭建的混凝土预制厂生产,配送方式亦以短距离配送为主。因预制混凝土管片的加工工

艺水平与模具精度水平不高,现场拼接工艺采用湿连接。该技术的施工周期虽较现浇式钢混塔筒技术有所缩短,但仍需较长施工时间。

2)二代钢混塔筒技术。二代钢混塔筒技术采用“分片式设计+工厂化生产+中长距离运输+现场干湿连接结合”的模式。塔节分片式设计可实现模具标准化,不仅模具精度高、利于质量控制,也便于中长距离运输、降低运输成本;此外,该设计可根据塔架高度灵活调整塔节数量,方便资源快速调配。工业化生产可降低综合成本,更具经济性。传统钢混塔筒为截面正圆形的混凝土塔筒,为实现塔筒锥度,其截面圆直径自下而上不断减小。受精度控制和运输限高制约,每节预制单元高度一般为3 m左右,即每间隔3 m就需一套不同尺寸的模具。随着机组容量的快速迭代,预制单元及模具尺寸也需更新换代,由此带来巨大成本压力。

为解决此问题,重庆海装率先引入MECAL公司的技术,将钢混塔筒设计为竖向8分片形式:先将截面圆等分为4个圆弧单元并沿圆周向外扩展,再在相邻圆弧单元间增加梯形平板单元。通过此设计,整个塔筒的圆弧单元尺寸完全一致,平板单元也只需调整边模宽度即可实现塔筒锥度。预制混凝土管片实现模块化设计与制作,模具简单,同时管片加工精度得到提升。

3)三代钢混塔筒技术。在二代钢混塔筒技术的基础上,三代钢混塔筒技术采用“工厂自动化流水线生产+中长距离运输+现场干连接”的模式。由于钢混塔筒需长期承受动态载荷,对混凝土预制构件的质量要求极高。参照地铁管片的生产方式,其生产过程需为质量完全可控、稳定且可重复的工业化流程。预制混凝土管片设计方案灵活性更高,模具具备通用性,生产成本得以降低。得益于混凝土预制件工厂化生产流程的完善及高精度数控加工设备的应用,预制混凝土管片的加工精度可满足现场全装配化建造需求。这些技术的应用不仅提高了钢混塔筒的质量和安全性,还大幅降低生产成本、缩短建造周期。

### 1.2.2 3个技术流派

1)圆锥形、逐级变径式结构。圆锥形与逐级变径式技术方案源于西班牙、美国及中国二次自主开发。其结构特点为采用“下大上小”的变直径塔节,可充分发挥结构强度优势;圆锥形塔筒直径均匀变化,能最大程度利用圆环的拱效应,结构整体受力合理,无显著应力集中问题,安全可靠。混凝土塔段由多个单节塔节连接而成,每个单节塔节通常又由2个或4个预制管片拼合而成。但每节塔筒直径

不同,导致每段模具不同,模具种类多、制造费用高。

如图14所示,逐级变径式塔筒采用3段式等直径设计,塔架主体由3种混凝土直筒节和3种混凝土过渡筒节组成,其中过渡筒节布置于钢塔筒与3种直筒节之间,模具需求数量少。

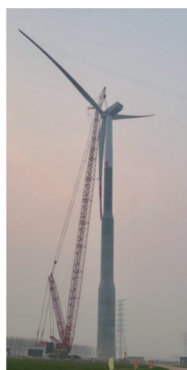


图14 逐级变径式塔筒

Fig. 14 Tower with stepped diameter

目前,采用圆锥形技术方案的代表性厂家有金风科技(旗下天杉高科)、内蒙古金海新能源科技股份有限公司(以下简称“金海股份”)、明阳智慧能源集团股份公司及华东勘测设计研究院有限公司(以下简称“华东院”,旗下浙江华勘新源科技有限公司);采用逐级变径式技术方案的代表性厂家有金海股份、华东院及浙江运达风电股份有限公司。

2)薄壁圆锥形+高强度混凝土结构。薄壁圆锥形+高强度混凝土结构与圆锥形结构基本一致。为减少混凝土用量、降低生产成本,金科新能源有限公司(现为上海风领新能源有限公司,以下简称“金科新能源”)与上海电气集团股份有限公司(以下简称“上海电气”,旗下上海电气研砭建筑科技集团有限公司)采用高强度C80混凝土预制管片。在预应力形式上,金科新能源采用体内预应力索+灌浆,而上海电气则采用体外预应力索。

3)倒角正方形、正多边形结构。为解决圆锥形塔筒模具数量多、制造费用高、占地面积广等问题,中国钢混塔筒厂家采用了多种替代解决方案,如倒角正方形和正多边形结构。采用倒角正方形方案的代表性厂家为中船海装风电有限公司,其技术源于荷兰MECAL公司。该方案将塔筒塔节设计为竖向8分片形式(4转角构件+4平板构件),从塔筒底部到顶部的转角构件外形相同,使用一种模具即可生产所有转角构件,平板构件也只需通过调整边模实现宽度变化。该方案不仅能充分利用模具,也能减小构件尺寸,方便运输。

采用正多边形方案的代表厂家为湘电风能有限公司(现为哈电风能有限公司),多边形塔筒结构

也能以最少数量的模具实现所有塔节的预制生产。如图15所示,混凝土塔筒的模具分为角模、标准模与调整模<sup>[34]</sup>,其中角模与标准模尺寸固定。

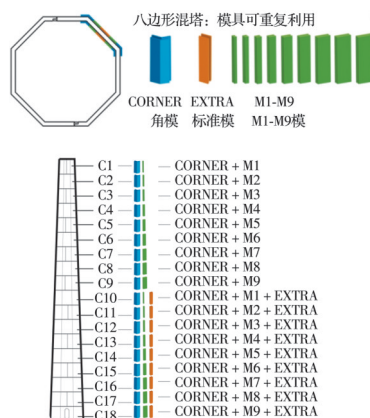


图15 正多边形方案

Fig. 15 Regular polygonal tower scheme

### 1.2.3 小结

钢混塔筒的技术路线经历了从发展初期的现浇混凝土塔段、体内预应力索,到预制混凝土塔段、体外预应力索;从低强度混凝土塔段、灌浆连接管片,到高强度混凝土塔段、螺栓连接管片的演变。如今,钢混塔筒技术日趋成熟,分片预制装配式钢混塔筒+后张拉体外预应力索的技术路线成为主流。该技术路线的优点显而易见,可提高施工便利性、加快吊装速度,且能保证钢混塔筒质量。未来或将诞生更为先进的技术,但大的发展方向具有共通性,即:

1)更高的高度,以适应大功率风电机组的发展;

2)采用标准化结构,提高混凝土管片的生产效率和模具的利用率,降低生产制造成本;

3)发展装配式混凝土塔筒,通过CNC铣削提高构件的尺寸精度<sup>[35]</sup>,优化吊装工艺,进一步提高钢混塔筒的现场施工效率。

## 2 关键技术研究

由于钢混塔筒的结构体系具有独特性,其设计方案、生产与施工工艺、动力响应等方面较全钢塔筒有明显不同。针对钢混塔筒技术研究中的关键问题,学者们提出了多种技术路线和解决途径。

### 2.1 新材料研究

材料发展的特点一方面是绿色生态混凝土研究,2021年10月26日国务院发布的《2030年前碳达峰行动方案》明确提出,加强低碳混凝土等低碳建材产品研发应用,循环再生利用矿渣、粉煤灰和建筑垃圾;另一方面是材料性能的提升,如 HPC、

UHPC 及纤维增强混凝土<sup>[36]</sup>, HPC 的应用意味着可实现更高钢混塔筒的建造。Sritharan 等<sup>[37]</sup>、Wu 等<sup>[38]</sup>学者提出采用 UHPC 建造全混塔筒, 也为钢混塔筒提供了一种新型技术路线选择。

## 2.2 结构设计

### 2.2.1 现行设计规范

目前中国专门针对钢混塔筒设计的规范为《风电机组混凝土-钢混合塔筒设计规范》(NB/T 10907), 该规范对钢混塔筒的材料、荷载与荷载效应组合、承载能力极限状态计算、正常使用极限状态验算、构造规定及安全检测进行了规定<sup>[39]</sup>。从结构类型上看, 钢混塔筒的混凝土塔段属于中国技术最成熟的混凝土工程领域, 各类成熟的设计规范可作为钢混塔筒设计的依据和保障, 例如《风力发电机组塔架》(GB/T 19072)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011)、《烟囱设计规范》(GB 50051)、《高耸结构设计标准》(GB 50135)、《风力发电机组预应力装配式混凝土塔筒技术规范》(T/CEC 5008)、《无粘结预应力混凝土结构技术规程》(JGJ 92)、《预应力混凝土结构抗震设计标准》(JGJ/T 140)、《预应力混凝土结构设计规范》(JGJ 369)、《Wind Energy Generation Systems - Part 6: Tower and Foundation Design Requirements》(IEC 61400-6)、《Support Structures for Wind Turbines》(DNVGL-ST-0126)、《Offshore Concrete Structures》(DNV-OS-C502)、《Eurocode 2: Design of Concrete Structures》(EN 1992)、《fib Model Code for Concrete Structures 2010》、《Performance and Assessment Requirements for Design Standards on Structural Concrete》(ISO 19338)等, 这些标准可为钢混塔筒设计提供依据和保障。钢塔段设计基本可与全钢塔筒保持一致, 设计成熟度较高, 可参考的规范包括《风力发电机组塔架》(GB/T 19072)、《钢结构设计标准》(GB 50017)、《风电机组钢塔筒设计制造安装规范》(NB/T 10216)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99)、《Wind Energy Generation Systems - Part 6: Tower and Foundation Design Requirements》(IEC 61400-6)、《Support Structures for Wind Turbines》(DNVGL-ST-0126)、《Eurocode 3: Design of Steel Structures》(EN 1993)等。

此外, 钢混塔筒的结构设计同样需满足行业既有风力发电机组设计要求, 例如《风力发电机组设计要求》(GB/T 18451.1)、《Wind Energy Generation Systems-Part 1: Design Requirements》(IEC 61400-1)、《Guideline for the Certification of Wind

Turbines》(GL 2010)等。

### 2.2.2 设计分析方法

钢混塔筒作为一种新型混合结构形式, 在设计时需结合全钢塔筒设计与装配式建筑理论。钢混塔筒的结构体系具有复杂性, 往往需要多次迭代设计, 正如 Huang 等<sup>[40]</sup>的研究结果所示, 钢混塔筒的结构设计是一个不断试错、优化迭代的过程, 设计过程大致经历如下几个环节: 1) 总体方案设计, 根据风电机组、荷载工况与成本控制要求, 初步确定总体尺寸、塔段比例分配、材料型号、塔筒壁厚、配筋率及预应力大小, 并参照规范<sup>[39, 41-43]</sup>进行校核; 2) 有限元分析计算, 对完成初始结构设计的塔筒进行有限元分析, 包括静力学分析与动力学分析; 3) 结构优化再计算, 根据分析结果对结构薄弱部位及设计冗余部位进行优化, 并再次提交有限元计算直至评审通过; 4) 其他细节设计, 如内饰件设计、构件设计、工艺设计等。

钢混塔筒设计时常采用的方法包括规范工程计算、有限元数值仿真计算、基于多体动力学的一体化(基础、混凝土塔段、过渡段与钢塔段)建模分析。钢混塔筒虽无需像全钢塔筒那样进行复杂的振动控制方案设计, 但仍需对其自振频率进行严格控制。此外, 较全钢塔筒, 钢混塔筒还面临诸多设计难点<sup>[44]</sup>, 如: 混凝土强度离散性较大, 有限元分析与实际观测结果偏差较大; 材料非线性特性明显, 无法使用简单的荷载谱进行疲劳评估; 过渡段结构设计避免混凝土因应力集中造成破坏等。

周瑞权<sup>[45]</sup>从现有行业标准出发, 详细介绍了结构设计的主要内容, 可很好地指导结构的前期设计及验证。顾富斌<sup>[46]</sup>、刘延翔<sup>[47]</sup>、Zhang 等<sup>[48]</sup>、Lee 等<sup>[49]</sup>、Özdemir 等<sup>[50]</sup>、Kenna<sup>[51]</sup>等学者借助 ABAQUS、ANSYS 等有限元分析软件, 系统分析了不同高度、不同截面钢混塔筒的力学性能(如承载能力、变形能力、疲劳性能与动态响应等), 为钢混塔筒在风电机组塔架这类高耸结构中的应用提供了理论依据。研究表明, 采用钢混塔筒能有效降低塔架的水平位移。周扬等<sup>[52]</sup>指出, 塔门位置为应力薄弱部位, 需加强设计。

在进行塔筒结构设计时, 自振频率是主要控制因素之一。通过计算塔筒的固有频率, 并将其与风轮旋转频率 1P 比较, 可评估钢混塔筒的动力学性能<sup>[53]</sup>。Peggar<sup>[32]</sup>、宋双贺<sup>[54]</sup>等利用有限元软件建立钢混塔筒的有限元模型, 对结构的强度、稳定性及模态进行综合分析。张晓钊<sup>[55]</sup>等基于 Hamilton 原理, 推导钢混塔筒一阶自振频率的解析计算公式, 并通过参数分析探讨塔架固有频率与几何形状之

间的相关性,结果表明,混凝土塔段比例增加、塔筒壁增厚,对高塔架的一阶自振频率产生了显著影响。Huang等<sup>[40]</sup>结合灵敏度分析与遗传算法,确定了满足模态频率与极限状态限制条件的塔筒相对最优几何尺寸。

钢混塔筒的质量及刚度分布较全钢塔筒有明显不同,且具有显著的非线性特征,需专门开展风荷载与地震荷载下的减振、隔震研究,以保障风电机组安全稳定运行。时文浩<sup>[56]</sup>、余智等<sup>[57]</sup>研究了钢混塔筒在风荷载作用下的动态响应,并基于S-N曲线和Miner线性累积损伤理论评估钢混塔筒的疲劳性能,结果表明过渡段连接法兰是疲劳薄弱部位,在设计及运维过程中应重点关注。地震荷载的频谱与风荷载不同,在高频下会出现相对较高的地震振幅<sup>[58]</sup>。Chen等<sup>[59]</sup>、Huang等<sup>[60]</sup>采用反应谱法、非线性时程法对钢混塔筒的地震动响应进行分析,指出非线性时程法更适用于计算钢混塔筒的地震作用效应,且分析结果显示,较全钢塔筒,钢混塔筒的高阶模态参与度较高。张栋梁等<sup>[61]</sup>研究了钢混塔筒在风荷载与地震荷载联合作用下的动态响应,优选出合适的控制策略,为工程建设提供指导。

有限元分析能帮助工程师预测结构的响应和性能,为钢混塔筒的结构稳定性分析、疲劳寿命分析、结构优化设计等提供重要指导。在实际工程中,需开展深入研究和实践,以充分发挥有限元分析的优势,具体体现在以下方面:

1)针对风电机组基础、混凝土塔段、钢混过渡段、钢塔段等部位进行一体化建模分析。目前关于混凝土塔段高度占比、塔筒壁厚设计、塔筒锥度设计等已有初步研究,但钢混塔筒的最优设计仍需进一步通过理论与实践论证<sup>[62]</sup>。

2)已有研究表明,钢混塔筒采用线性分析时,有限元分析结果误差往往较大<sup>[63]</sup>;采用非线性有限元法能提高分析精度,获取各种应变、应力张量及其增量以及材料本构关系,并通过理论与实测数据的对比修正,检验其适用性<sup>[64]</sup>。

3)钢混塔筒的组成构件数量繁多,三维建模工作量极大。此外,有限元分析过程中需考虑设计材料非线性、几何非线性、接触非线性、预应力施加等复杂项,易造成计算时间冗长甚至不收敛。目前已有部分学者对钢混塔筒的计算模型进行优化研究<sup>[65-66]</sup>,如何更加合理地优化模型、提高计算效率是后续研究的重点。

### 2.2.3 混凝土-钢过渡段

过渡段作为混凝土塔段与钢塔段的连接部件,受力情况复杂,其结构设计是钢混塔筒设计中的关

键点与难点。目前,主流连接方式有两种:第1种为锚栓+预应力索形式,即预应力索不直接和钢段下法兰连接,下法兰通过螺栓固定于混凝土塔筒上(如图16(a)所示);第2种为无锚栓形式,预应力索直接连接并固定钢段下法兰(如图16(b)所示)。相较于锚栓+预应力索连接,无锚栓连接可实现混凝土塔筒和钢塔筒的快速组装,以完成钢混塔筒的安装固定。此外,锚栓+预应力索连接在使用过程中预应力锚栓将拉力传递给锚板,锚板再将拉力传递给上部的混凝土,导致锚板下部混凝土承受拉力;风电机组在工作过程中可能使混凝土局部区域产生裂缝、脱空等现象。鉴于锚栓+预应力索连接的诸多劣势,无锚栓连接已成为钢混塔筒过渡段研究的主要方向。

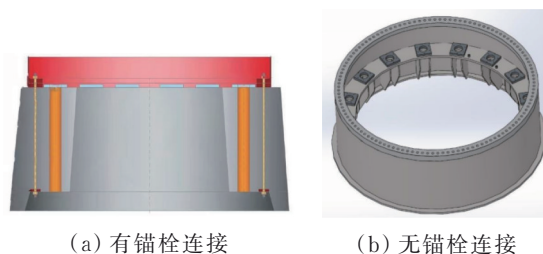


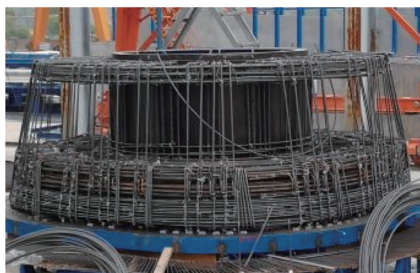
图16 过渡段连接方式

Fig. 16 Connection modes for transition section

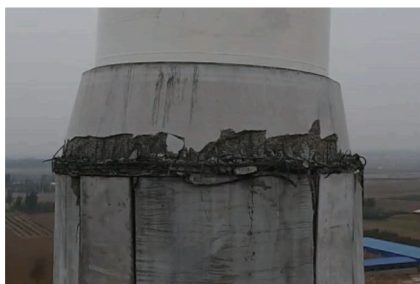
根据材料及结构的不同,常见过渡段类型可分为钢筋混凝土过渡段、钢管混凝土过渡段与钢过渡段。钢筋混凝土过渡段作为传统过渡段形式,技术成熟度较高,应用范围广泛。但该过渡段存在一些不足,如钢筋网结构复杂、绑扎困难(如图17(a)所示),承载能力有限(如图17(b)所示)。鉴于上述缺点,学者及相关厂家提出了多种改进方案。王宇航等<sup>[67]</sup>、谭继可等<sup>[68]</sup>、Ren等<sup>[69]</sup>提出,将钢管混凝土用于过渡段连接,可显著提高过渡段的承载能力。许斌等<sup>[70-71]</sup>、张栋梁等<sup>[72]</sup>提出多种钢过渡段方案,旨在改善过渡段混凝土的受力状态,为钢混塔筒的连接设计提供了重要参考。Kim等<sup>[73]</sup>结合设计规范,提出过渡段的疲劳设计方法,并通过实验验证了所提方法的有效性,填补了过渡段疲劳试验领域的空白。如图18所示,各钢混塔筒生产厂家及研究机构针对过渡段装置,提出诸多解决方案,所解决的主要问题包括:提高过渡段整体刚度、改善混凝土应力分布;实现预应力混凝土塔筒与钢塔筒的合理紧固连接,且安装简便、耗时少;优化结构以降低成本。

### 2.2.4 成本优化

塔筒成本通常占风电机组总成本的20%~30%<sup>[74-75]</sup>,且占比随塔筒高度的增加而提高;在当前“风火同价”背景下,其建设成本已成为结构设计的



(a) 钢筋网结构复杂



(b) 压缩破坏

图 17 钢筋混凝土过渡段缺点

Fig. 17 Shortcomings of reinforced concrete transition sections

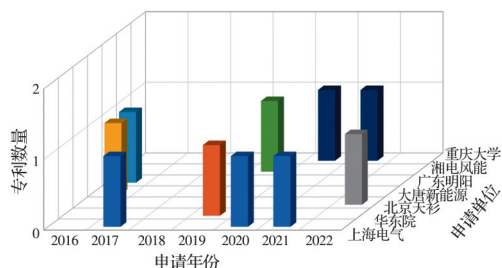


图 18 过渡段方案专利布局

Fig. 18 Patent layout for transition sections

重要考量因素之一<sup>[76]</sup>。在最优化问题的求解中,粒子群优化算法<sup>[77]</sup>和遗传算法<sup>[78]</sup>被证实是行之有效的方法。许斌等<sup>[70]</sup>、Li等<sup>[79-81]</sup>、陈逸杰等<sup>[62]</sup>将粒子群优化算法引入钢混塔筒结构设计优化,结合有限元分析寻求塔筒建设成本的最小值。研究中,通常将钢混塔筒的物理尺寸作为优化变量,将成本作为最优目标函数,将塔架强度、最大位移、稳定性、疲劳性能与自振频率等因素作为优化约束条件,通过多次迭代得到塔架几何最优解。研究表明,混凝土塔段高度、塔筒壁厚及直径对建设成本影响显著,混凝土塔段高度占比建议为70%~75%。Chen等<sup>[82]</sup>通过遗传算法优化塔身结构,实现了更优的结构强度和更低的建设成本。

## 2.3 生产及施工工艺

### 2.3.1 整体流程

目前,行业主流技术采用分片预制装配式钢混塔筒,施工流程如图19所示。其中,预制混凝土管片制作、现场拼接与预应力索安装是钢混塔筒施工

的关键工序<sup>[83]</sup>,对保障施工质量意义重大。中国针对钢混塔筒施工的专门规范为《风电机组混凝土-钢混合塔筒施工规范》(NB/T 10908),该规范对钢混塔筒的模板工程、钢筋工程、现浇混凝土塔筒施工、装配式混凝土塔筒施工、预应力工程及环境保护作出了明确规定<sup>[84]</sup>。

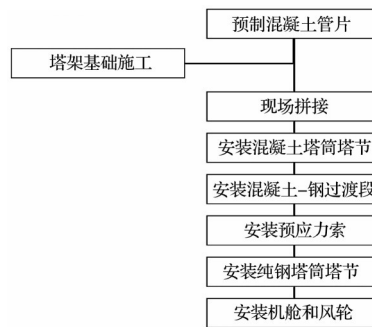


图 19 施工流程图

Fig. 19 Construction flow chart

与全钢塔筒不同,钢混塔筒的塔节数量较多,往往需耗费更长的吊装时间。此外,钢混塔筒额外包含预应力索张拉、过渡段安装等环节,故其施工周期长于全钢塔筒。以高度140 m的塔架为例,全钢塔筒的施工周期为4~6 d,钢混塔筒的施工周期则为8~10 d。但随着钢混塔筒生产及施工工艺的成熟与标准化,其施工周期将进一步缩短。

### 2.3.2 混凝土塔段预制

近年来,随着建筑产业现代化的推进,预制混凝土技术也得到迅速发展,其生产方式向自动化、标准化、模块化、通用化方向不断迈进。采用集中式工厂化生产与模块化运输,可提高装配效率与扩大辐射范围。风电机组规模越大,塔筒的运输和组装过程越复杂。钢混塔筒的塔节采用分片设计,工厂化集中预制,精度高、质量可控。蒋璞等<sup>[85]</sup>详细论述了预制混凝土塔筒的施工流程与工艺要点。赵靓<sup>[86]</sup>提出分散式项目钢混塔筒的革新技术为管片塔技术,该技术参照地铁管片形式,无需打磨即可实现钢混塔干连接,可避免传统混凝土塔筒灌浆连接、养护施工周期长的弊端,大幅缩减施工周期。

由于混凝土为可塑性材料,成型完全依靠模具,因此预制构件的尺寸和外观质量取决于模具的质量,模具质量直接影响预制构件的尺寸精度<sup>[87]</sup>。混凝土管片模具按浇筑类型分为立式浇筑模具(如图20(a)所示)与卧式浇筑模具(如图20(b)所示)。通过设计优化混凝土塔段新型模具、加强混凝土塔筒外观工艺控制,并采用流水作业施工,能有效提高塔筒预制施工效率。通过优化混凝土配比以确定预制管片高强混凝土的关键参数,研制新型专用

振捣器,使风电机组混凝土塔段的工厂化预制达到安装技术标准要求;配合高精度磨床,可完全实现管片间、塔节间的干连接。



(a) 立式浇筑模具



(b) 卧式浇筑模具

图20 混凝土预制管片

Fig. 20 Precast concrete pipe segments

### 2.3.3 混凝土塔筒段拼装及连接

依据不同的塔筒形式,混凝土塔节通常由2~8个预制管片拼接而成,该拼接工作需在施工现场进行,难以实现自动化作业。如图21所示,为提高拼装效率,可根据塔节结构形式及尺寸设计专用拼装平台,通过流水作业提高组装效率,有效缩短施工周期<sup>[88]</sup>。



图21 混凝土管片拼装

Fig. 21 Concrete pipe segment assembly

依据是否灌浆,塔筒管片的连接方式可分为湿连接与干连接。如图22所示,长管片一般采用湿连接;除个别厂家外,短管片通常采用螺栓组装(即干连接)。湿连接因需一定时间养护,对塔筒施工周期有一定影响。干连接虽能提高施工效率,但需管片安装孔对接良好,且对管片的尺寸精度及表面平

整度要求较高。随着预制管片生产技术与工艺水平的日益成熟,干连接也得到了越来越广泛的应用。



(a) 湿连接



(b) 干连接

图22 管片连接方式

Fig. 22 Connection modes of pipe segments

### 2.3.4 预应力形式

在未施加预应力的情况下,当混凝土塔筒受到水平外力作用时,受力一侧会出现较大拉应力,混凝土构件很容易出现裂缝。为提高钢混塔筒结构的抗侧刚度,确保在正常工况下混凝土塔筒不出现明显拉应力,目前工艺通常采用后张法安装预应力索,对筒节施加竖向预应力,预应力索顶部、底部分别连接过渡段和基础。按照预应力索的安装位置不同,分为体内预应力索(如图23(a)所示)与体外预应力索(如图23(b)所示)。由于体内预应力索的孔道位于筒壁内部,该孔道会削弱混凝土管片的截面强度<sup>[89]</sup>,且在塔节安装过程中孔道容易堵塞,对施工质量把控要求较高,故体外预应力的形式被大多数厂家所采用。另外,该预应力索施工及维护也较方便<sup>[52]</sup>。为减少预应力索与混凝土之间摩擦导致的预应力损失,保证预应力的有效施加,体外预应力索应在保证其不接触内侧筒壁的前提下,尽量贴近筒壁布置。按照预应力索的施工方法不同,预应力形式又可分为有黏结与无黏结预应力,有黏结预应力通常应用于体内预应力索;在进行压力灌浆时,若塔节之间贴合不好,灌浆液将从接缝处渗出,这个问题也成为体内预应力索的施工难点。

### 2.3.5 信息化管理

质量控制和施工过程的效率优化是塔筒现场施工的重要问题,将信息技术作为预制技术的补充,是钢混塔筒技术研究的进阶目标。建筑信息模型(BIM)技术被认为是最合适的方法,可补充场外技术,并通过改进设计、制造、运输与组装过程,实现更高的效率<sup>[90-91]</sup>。BIM技术在装配式结构中具有天然优势,已得到大量应用,但在风电领域应用极少。可通过创建参数化BIM模型,开展预制构件场



(a) 体内预应力 (b) 体外预应力

图 23 预应力形式

Fig. 23 Prestressing modes

地布置、预制塔筒生产仿真模拟以及预制塔筒模具虚拟拼装等工作。借助BIM技术提前模拟生产与施工环节,可提前发现潜在问题,避免时间与成本的浪费<sup>[92]</sup>。

## 2.4 健康监测

钢混塔筒的健康监测是保障其安全运行的重要环节。由于钢混塔筒的应用时间相对较短,目前尚无长期监测经验,因此对可能发生的病害预估不足。从目前的研究结果可知,塔筒的第一节(塔门节)以及混凝土塔段至钢塔段的过渡段受力情况最为复杂且不利,可作为重点监测部位(如图24所示)。Botz等<sup>[93]</sup>、郑健<sup>[94]</sup>已对钢混塔筒的健康监测开展初步研究;随着对钢混塔筒健康监测研究的深入,发展智能化、自动化的在线监测系统,可大幅缩短塔筒的维护时间、降低维护成本,并延长风电机组的使用寿命<sup>[95]</sup>。

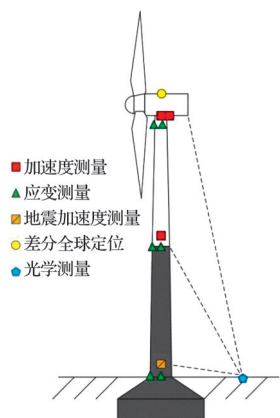


图 24 监测点选取

Fig. 24 Selection of monitoring points

## 3 总结与展望

随着风电行业对更高轮毂高度的需求不断增加,全钢塔筒在增高的同时亦面临着塔壁厚度、运输高度及重量、制作成本的限制,已接近设计极限,可能无法满足更高轮毂高度的需求。因此,亟须新型塔架的开发与应用。在此背景下,钢混塔筒技术

方案不失为一种兼具安全性和经济性的选择。本文以风电机组钢混塔筒技术研究为主题,概述了3种高塔架方案,并简要分析了各自优缺点;介绍了钢混塔筒技术的发展历程和研究现状,从钢混塔筒形式、施工工艺、现行行业标准等角度阐述了钢混塔筒研究进展,梳理了提升钢混塔筒性能、优化成本及缩短施工周期的关键技术;总结了钢混塔筒技术研究中存在的问题与挑战,为新产品的开发提供借鉴与参考。

钢混塔筒研发涵盖整体方案、模具、预制、运输、拼接、吊装、内部附件等各环节的工艺及结构优化设计。需要指出的是,作为一种新兴技术,钢混塔筒的力学机理具有其复杂性和独特性,加之发展时间较短,相关方法与技术尚不成熟。通过对现有钢混塔筒的技术难点、制约因素等进行分析总结,发现钢混塔筒仍面临一系列亟待解决的基础问题和关键技术,建议从以下几方面开展深入研究:

1)在结构选型、生产及施工工艺标准化方面进一步完善行业规范,可参照地铁管片的运作模式,实现标准化、自动化流水线生产及装配,降低生产成本,减少环境污染,缩短风电场建设周期,推动风电产业高质量发展。

2)由于钢混塔筒结构的复杂性,在进行有限元分析计算(尤其是非线性有限元分析计算)时,往往需耗费较长时间;而采用模态分析法,又无法得到结构的应力和应变数据。为兼顾分析效率与精度,可采用子模型分析技术,既能保证关键部位研究的准确性,又能大幅度减少计算量。

3)钢混塔筒类型繁多、应用时间短、可靠性基础数据不完善,其可靠性研究尚处于起步阶段。关于荷载分项系数的取值也未形成共识:一种观点是参照建筑结构荷载规范,取永久荷载与可变荷载的分项系数;另一种观点则是参照传统塔架设计规范,取正常与非正常荷载分项系数。随着钢混塔筒的长期应用,可积累大量可靠性数据,在此基础上开展理论与可靠性建模、评估工作,为全面保障风电机组的安全性提供支撑。

4)混凝土塔段的使用寿命远高于钢塔段及风电机组的使用寿命,可利用此优势,开展对老旧钢混塔筒升级改造研究,使原有混凝土塔段能长期服役,实现资源充分利用。

5)超高钢混塔筒研究。未来全球风电装机功率将向更大功率方向发展,2023年已开启6 MW平台元年,并将以较快速度向8 MW级别平台发展。相应地,全球风电机组的叶轮直径也将向更大尺寸发展,突破了150 m,180 m及以上的超高塔架也将

应运而生。超高特性意味着钢混塔筒将面临更为恶劣的荷载工况,这对塔架材料的强度及耐久性提出了更高要求。此外,随着塔架高度升高,塔筒柔性增大,塔筒结构振动特征更为复杂。目前已有研究表明,超高钢混塔筒将面临高阶振动问题,需同步开发配套的振动控制策略。

传统钢制塔架主要集中在我国北方风资源条件较好的地区,钢混塔架则以低风速市场为切入点,逐步扩展至“三北”区域及超高塔项目区域。当前市场上3 MW以上风电机组已成为主流,平均叶轮直径突破140 m,高塔架市场份额猛增。目前,风电钢混塔筒的发展仍处于较早期阶段,仍有很多技术上的挑战和问题需要解决。但随着“碳达峰、碳中和”目标的确立,能源消费结构向清洁低碳加快转变,风力发电行业快速发展,钢混塔筒技术也将不断创新和进步,以适应更大功率的风电机组和更严格的安全要求,更高规格的钢混塔筒亦将成为未来风电塔架的主流产品。

## 参考文献

- [1] HANSEN M O L. Aerodynamics of wind turbines [M]. 3rd ed. New York: Routledge, 2015.
- [2] 赵萍,高首聪,卜继玲.大型风力发电机组动力学[M].北京:科学出版社,2017.  
ZHAO P, GAO S C, BU J L. Dynamics of large wind turbines [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [3] LIU Y Q, QIAO Y H, HAN S A, et al. Rotor equivalent wind speed calculation method based on equivalent power considering wind shear and tower shadow [J]. Renewable Energy, 2021, 172: 882-896.
- [4] 朱少辉.风力发电机组钢混结构塔架研究[J].重型机械, 2022(5): 74-78.  
ZHU S H. Research on steel-concrete structure tower of wind turbine generator set [J]. Heavy Machinery, 2022 (5): 74-78. (in Chinese)
- [5] AGBAYANI N A, VEGA R E. The rapid evolution of wind turbine tower structural systems: A historical and technical overview [C]//Structures Congress 2012. Chicago, Illinois, USA. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2012: 1201-1212.
- [6] 梁峰,陶铎.140m高四边形构架式预应力抗疲劳风力发电塔过渡段结构设计[J].建筑结构, 2019, 49(14): 23-28.  
LIANG F, TAO D. Structural design of transition piece of 140m-high quadrilateral lattice prestressed anti-fatigue wind turbine tower [J]. Building Structure, 2019, 49 (14): 23-28. (in Chinese)
- [7] 陶涛,龙凯,白欣鉴,等.风电机组高柔塔二阶涡激振动特性研究[J].太阳能学报, 2022, 43(2): 498-503.  
TAO T, LONG K, BAI X J, et al. Study on second-order vortex-induced vibration characteristics of high-flexible towers of wind turbines [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(2): 498-503. (in Chinese)
- [8] 王佼佼,施刚,石永久,等.考虑不同边界约束条件下的风电机塔架固有频率分析[J].特种结构, 2011, 28(5): 5-8, 108.  
WANG J J, SHI G, SHI Y J, et al. Finite element analysis of the natural frequency for a wind turbine tower under different boundary constraints [J]. Special Structures, 2011, 28(5): 5-8, 108. (in Chinese)
- [9] XU Z Q. Research on structural dynamics of safe operation of the large wind turbine [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Mechatronics, Materials, Biotechnology and Environment (ICMMBE 2016). August 13-14, 2016. Yinchuan, China. Paris, France: Atlantis Press, 2016.
- [10] 葛文澎,苗得胜,吴迪,等.风力发电机组液态阻尼器减振设计研究[J].可再生能源, 2022, 40(4): 499-505.  
GE W P, MIAO D S, WU D, et al. Study on the liquid damping reducing vibration for wind turbine [J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(4): 499-505. (in Chinese)
- [11] MALLIOTAKIS G, ALEVRAS P, BANIOPOULOS C. Recent advances in vibration control methods for wind turbine towers [J]. Energies, 2021, 14(22): 7536.
- [12] 李杨,兰涌森,李强,等.风力机塔架结构振动控制研究及方法综述[J].船舶工程, 2020, 42(Sup 2): 248-253.  
LI Y, LAN Y S, LI Q, et al. Research and method summary on vibration control of wind turbine tower structure [J]. Ship Engineering, 2020, 42(Sup 2): 248-253. (in Chinese)
- [13] MALCOLM D J. WindPACT rotor design study: Hybrid tower design: NREL/SR-500-35546 [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2004.
- [14] LANIER M. LWST phase I project conceptual design study: Evaluation of design and construction approaches for economical hybrid steel/concrete wind turbine towers [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [15] PONS O, DE LA FUENTE A, ARMENGOU J, et al. Towards the sustainability in the design of wind towers[J]. Energy Procedia, 2017, 115: 41-49.
- [16] 贺广零.钢筋混凝土风力发电塔风致动力响应分析[J].风能, 2011(5): 48-52.  
HE G L. Wind-induced dynamic response analysis of reinforced concrete wind power tower [J]. Wind Energy, 2011(5): 48-52. (in Chinese)
- [17] 赵瑞平,白鹤.混凝土混合塔筒在低风速地区的应用[C]//中国电机工程学会电力建设专委会2016年年会

- 论文集. 南京, 2016.
- ZHAO R P, BAI H. The application of concrete mixing tower in low wind speed areas [C]//Proceedings of the 2016 Annual Conference of the Electric Power Construction Committee of the Chinese Society of Electrical Engineering. Nanjing, 2016. (in Chinese)
- [18] MATHERN A, VON DER HAAR C, MARX S. Concrete support structures for offshore wind turbines: Current status, challenges, and future trends [J]. *Energies*, 2021, 14(7): 1995.
- [19] HERNANDEZ-ESTRADA E, LASTRES-DANGUILLECOURT O, ROBLES-OCAMPO J B, et al. Considerations for the structural analysis and design of wind turbine towers: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110447.
- [20] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国风电发展路线图 2050[R]. 2011.
- Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. China wind energy development roadmap 2050 [R]. 2011. (in Chinese)
- [21] QUILLIGAN A, O'CONNOR A, PAKRASHI V. Fragility analysis of steel and concrete wind turbine towers [J]. *Engineering Structures*, 2012, 36: 270-282.
- [22] 施跃文, 高辉, 陈钟. 特大型风力发电机组技术现状与发展趋势[J]. *神华科技*, 2009, 7(2): 34-38.
- SHI Y W, GAO H, CHEN Z. Technological development trends of super-large wind generating set [J]. *Shenhua Science and Technology*, 2009, 7(2): 34-38. (in Chinese)
- [23] PAUL D. Max Bögl wind puts turbine on the tallest tower, 178m. Blade tip to 246.5m [EB/OL]. <https://www.windpowerengineering.com/max-bogl-wind-puts-turbine-tallest-tower-178m-blade-tip-246-5m/>.
- [24] BRUGHUIS F J. Advanced tower solutions for large wind turbines and extreme tower heights [C]//Proceedings of the 2003 European Wind Energy Conference and Exhibition. Madrid, 2003: 16-19.
- [25] BRUGHUIS F J. Improved return on investment due to larger wind turbines [C]//Proceedings of the 2004 European Wind Energy Conference and Exhibition. London, 2004: 22-25.
- [26] BROMAGE A, TRICKLEBANK A, TRICKLEBANK A, et al. Concrete towers for onshore and offshore wind farms [R]. London: MPA The Concrete Centre, 2012.
- [27] 严科飞, 万家军, 任伟华, 等. 大型风电机组塔架材料的现状和发展[J]. *风能*, 2013(3): 102-105.
- YAN K F, WAN J J, REN W H, et al. The status and development of materials of large scale wind turbine tower [J]. *Wind Energy*, 2013(3): 102-105. (in Chinese)
- [28] ATS. ATS offers the technology to reach high hub heights (90-160 m), allowing more energy to be produced! [EB/OL]. <https://advancedtowersystems.com/services/>.
- [29] DE VRIES E. Concrete-steel hybrid tower from ATS [R]. *Renewable Energy World*, 2009: 109-111.
- [30] 张子瑞. 混合塔架技术可提升发电量 30%: 访 MECAL (北京) 工程技术有限公司总经理奥云 [N]. *中国能源报*, 2016-07-11(18).
- ZHANG Z R. Hybrid tower technology boosts power production by 30%: An interview with Ao Yun, General Manager of MECAL (Beijing) Engineering Technology Co., Ltd. [N]. *China Energy News*, 2016-07-11 (18). (in Chinese)
- [31] BÖGLMAX. Hybrid tower concept [EB/OL]. <https://www.mbrenewables.com/en/hybrid-tower-concept/>.
- [32] PEGGAR R. Design and structural testing of tall Hexcrete wind turbine towers [D]. Iowa State University, 2017.
- [33] VON DER HAAR C, MARX S. Design aspects of concrete towers for wind turbines [J]. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 2015, 57 (4): 30-37.
- [34] 哈电风能有限公司. XEMC 模块化多边形超高混塔应用技术亮相 2020 北京国际风展 [EB/OL]. [http://www.xemc-wind.cn/html/mtsd/view\\_209.html](http://www.xemc-wind.cn/html/mtsd/view_209.html).
- Harbin Electric Corporation Wind Power Co., LTD.. XEMC modular polygonal ultra-high hybrid tower application technology appearing at the 2020 Beijing International Wind Exhibition [EB/OL]. [http://www.xemc-wind.cn/html/mtsd/view\\_209.html](http://www.xemc-wind.cn/html/mtsd/view_209.html). (in Chinese)
- [35] ENGSTROEM S, LYRNER T, HASSANZADEH M, et al. Tall towers for large wind turbines. Report from Vindforsk project V-342 [R]. 2010.
- [36] GRÜNBERG J, GÖHLMANN J. Concrete structures for wind turbines [M]. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- [37] SRITHARAN S, SCHMITZ G. Design of tall wind turbine towers utilizing UHPC [C]//RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. Marseille, 2013.
- [38] WU X G, ZHANG X S, BHATTARAI H B, et al. Structural behavior analysis of UHPC hybrid tower for 3-MW super tall wind turbine under rated wind load [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2022, 16(1): 1-13.
- [39] 风电机组混凝土-钢混合塔筒设计规范: NB/T 10907—2021 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.
- Code for design of concrete-steel hybrid tower of wind turbine: NB/T 10907—2021 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2022. (in Chinese)
- [40] HUANG X G, LI B K, ZHOU X H, et al. Geometric optimisation analysis of Steel-Concrete hybrid wind

- turbine towers [J]. Structures, 2022, 35: 1125-1137.
- [41] GL. Guideline for the certification of wind turbines: GL 2010 [S]. Hamburg: Germanischer Lloyd, 2010.
- [42] DNV GL. Support structures for wind turbines: DNVGL-ST-0126 [S]. 2016.
- [43] IEC. Wind energy generation systems-Part 6: Tower and foundation design requirements: IEC 61400-6 [S]. 2020.
- [44] SEIDEL M. Experiences with two of the world's largest wind turbine towers [C]//2003 EWEC European Wind Energy Conference and Exhibition. Madrid, 2003: 16-19.
- [45] 周瑞权. 风电机组钢-混凝土混合塔筒结构设计[J]. 风能, 2022(1): 62-67.
- ZHOU R Q. Structural design of steel-concrete hybrid tower of wind turbine [J]. Wind Energy, 2022(1): 62-67. (in Chinese)
- [46] 顾富斌. 风电机组用钢-混凝土组合塔架研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009.
- GU F B. Research on steel-concrete composite tower for wind turbine [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [47] 刘延翔. 钢-混凝土组合结构风电塔架设计关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- LIU Y X. Research on key technologies of design of steel-concrete composite structure wind turbine tower [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [48] ZHANG P, CHENG S K, GUO B. Simulation and optimization design of tower structure of wind generating set [C]//2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE). August 20-22, 2010, Chengdu. IEEE, 2010: V4-309.
- [49] LEE S M, KWON D Y, KIM Y C, et al. Analysis of load on the hybrid tower and cost effectiveness of the wind turbine [J]. Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy, 2010, 6(4): 50-60.
- [50] ÖZDEMİR A, SERMET F, YİĞİT M, et al. Static analysis of different type of wind turbine towers [C]//The International Conference on Wind Energy Harvesting 2017. Coimbra, 2017.
- [51] KENNA A P. The response and optimisation of hybrid wind turbine towers [D]. Trinity College Dublin, 2019.
- [52] 周扬, 兰涌森, 李杨, 等. 风电机组钢混塔筒设计方法研究[J]. 船舶工程, 2020, 42(增刊2): 254-259, 272.
- ZHOU Y, LAN Y S, LI Y, et al. Research on design method of steel-concrete hybrid tower for wind turbines [J]. Ship Engineering, 2020, 42(Sup 2): 254-259, 272. (in Chinese)
- [53] TRICKLEBANK A H, HALBERSTADT P H, MARGEE B J. Concrete towers for onshore and offshore wind farms technical report [R]. Camberley: The Concrete Center, 2007.
- [54] 宋双贺. 基于有限元分析的风力发电机混合式塔筒强度及稳定性分析[D]. 山东 青岛: 青岛大学, 2017.
- SONG S H. Strength and stability analysis of hybrid tower of wind turbine based on finite element analysis [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao University, 2017. (in Chinese)
- [55] 张晓钊, 周绪红, 王宇航, 等. 风电机组钢-混凝土混合结构塔筒自振频率实用计算方法研究[J]. 特种结构, 2022, 39(3): 1-7.
- ZHANG X Z, ZHOU X H, WANG Y H, et al. A natural frequency calculation method of steel-concrete hybrid wind turbine tower [J]. Special Structures, 2022, 39(3): 1-7. (in Chinese)
- [56] 时文浩. 钢-混凝土组合风机塔风致疲劳可靠度研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- SHI W H. Study on wind-induced fatigue reliability of steel-concrete combined fan tower [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022. (in Chinese)
- [57] 余智, 张凤亮, 熊海贝. 基于线性累计损伤理论的预应力混凝土风电塔架疲劳可靠性及剩余寿命研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(5): 756-762.
- YU Z, ZHANG F L, XIONG H B. Fatigue reliability and remaining life analysis of prestressed concrete wind turbine towers based on linear cumulative damage rule [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(5): 756-762. (in Chinese)
- [58] XIE F, ALY A M. Structural control and vibration issues in wind turbines: A review [J]. Engineering Structures, 2020, 210: 110087.
- [59] CHEN J L, LI J W, WANG D W, et al. Seismic response analysis of steel-concrete hybrid wind turbine tower [J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(17/18): 2240-2253.
- [60] HUANG X G, LI B K, ZHOU X H, et al. Computational study of steel-concrete hybrid wind turbine tower seismic performance [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2023, 27(10): 2796-2817.
- [61] 张栋梁, 汤群益, 李天昊, 等. 风载和地震波联合作用下风电机组钢混组合式塔架响应控制研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(23): 190-200.
- ZHANG D L, TANG Q Y, LI T H, et al. Study on response control of steel-concrete composite tower of wind turbine under combined action of wind load and seismic wave [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(23): 190-200. (in Chinese)
- [62] 陈逸杰, 张艳江, 林成欢, 等. 风电预应力混凝土-钢混合塔架设计优化研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 121-127.
- CHEN Y J, ZHANG Y J, LIN C H, et al. Optimization and analysis on prestressed concrete-steel hybrid

- wind turbine tower [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2021, 42(3): 121-127. (in Chinese)
- [63] 杜静, 杨瑞伟, 李东坡, 等. MW 级风电机组钢筋混凝土塔筒稳定性分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(3): 9-14.  
DU J, YANG R W, LI D P, et al. Stability analysis of reinforced concrete tower of MW grade wind turbine [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2021, 42(3): 9-14. (in Chinese)
- [64] 游潇, 苏小卒. 简析非线性有限元法[J]. *江西科学*, 2012, 30(1): 75-78.  
YOU X, SU X Z. Studies on non-linear finite element analysis [J]. *Jiangxi Science*, 2012, 30(1): 75-78. (in Chinese)
- [65] 王磊, 宋龙代, 颜海燕, 等. 钢筋连续性对钢-混凝土混合式塔架结构性能的影响[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2020, 33(1): 1-6.  
WANG L, SONG L D, YAN H Y, et al. Influence of reinforcement continuity on structural performance of steel-concrete hybrid tower [J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition)*, 2020, 33(1): 1-6. (in Chinese)
- [66] 边杰, 余洁, 孔维博. 体外后张预应力装配式风电钢混塔筒结构设计[C]//2021 年工业建筑学术交流会论文集. 2021: 410-411, 424.  
BIAN J, YU J, KONG W B. Structural design of external post-tensioned prefabricated wind power steel concrete tower [C]// *Proceedings of the 2021 Industrial Architecture Academic Exchange Conference*. 2021: 410-411, 424. (in Chinese)
- [67] 王宇航, 余洁, 周绪红, 等. 一种用于风电机组钢混塔筒的组合结构转接构造: CN112112767A [P]. 2020-12-22.  
WANG Y H, YU J, ZHOU X H, et al. Combined structure transfer structure for steel-concrete tower drum of wind turbine generator: CN112112767A [P]. 2020-12-22. (in Chinese)
- [68] 谭继可, 李守振, 周绪红, 等. 一种风力发电机组的钢-混凝土组合结构转接段: CN216111116U [P]. 2022-03-22.  
TAN J K, LI S Z, ZHOU X H, et al. Steel-concrete composite structure switching section of wind generating set: CN216111116U [P]. 2022-03-22. (in Chinese)
- [69] REN W, DENG R, ZHOU X H, et al. Compressive behavior of the steel-concrete composite adapter for wind turbine hybrid towers [J]. *Engineering Structures*, 2023, 280: 115703.
- [70] 许斌, 李泽宇, 陈洪兵. 预应力混凝土-钢组合风电塔架塔段优化研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(7): 25-31.  
XU B, LI Z Y, CHEN H B. Geometry optimization on prestressed concrete and steel segments of wind turbine towers [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(7): 25-31. (in Chinese)
- [71] 许斌, 谢咏剑, 李正超. 预应力砼-钢组合风电塔架穿筋连接段弹塑性分析[J]. *可再生能源*, 2015, 33(7): 1033-1041.  
XU B, XIE Y J, LI Z C. Elasto-plastic analysis on a perfbond strip connection of prestressed concrete-steel hybrid wind turbine tower [J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(7): 1033-1041. (in Chinese)
- [72] 张栋梁, 李天昊, 孙杏建, 等. 一种新型预应力钢混塔架过渡段转换装置: CN110259643A [P]. 2019-09-20.  
ZHANG D L, LI T H, SUN X J, et al. Novel prestressed reinforced concrete tower transition section conversion device: CN110259643A [P]. 2019-09-20. (in Chinese)
- [73] KIM M O, KIM T M, LEE D Y, et al. Experimental investigation of the steel-concrete joint in a hybrid tower for a wind turbine under fatigue loading [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(7): 2971-2982.
- [74] BERTOLLUCCI COLHERINHAS G, SHZU M, AVILA S, et al. Genetic optimization analysis of wind tower vibrations controlled by a pendulum TMD [C]// *Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*. Brasilia, 2016.
- [75] DE LANA J A, ALMEIDA MAGALHÃES JÚNIOR P A, ALMEIDA MAGALHÃES C, et al. Behavior study of prestressed concrete wind-turbine tower in circular cross-section [J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111403.
- [76] 高国庆, 胡彬. 影响大型风电机组塔筒高度的因素探讨[J]. *风能*, 2012(8): 66-70.  
GAO G Q, HU B. A discussion on the factors that influence the tower height of large-scale wind turbines [J]. *Wind Energy*, 2012(8): 66-70. (in Chinese)
- [77] SAHIB N M, HUSSEIN A. Particle swarm optimization in managing construction problems [J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 154: 260-266.
- [78] PETROVIĆ A, ĐURIŠIĆ. Genetic algorithm based optimized model for the selection of wind turbine for any site-specific wind conditions [J]. *Energy*, 2021, 236: 121476.
- [79] LI Z Y, XU B, CHEN H. Segments geometry optimization for prestressed concrete-steel hybrid wind turbine towers [C]// *The 14th International Symposium on Structural Engineering (ISSE-14)*. Beijing, 2016.
- [80] LI Z Y, CHEN H, XU B. Dimension optimization for a prestressed concrete-steel hybrid wind turbine tower with particle swarm approach [C]// *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*. Guangzhou: Destech Publications, 2018.

- [81] LI Z Y, CHEN H B, XU B, et al. Hybrid wind turbine towers optimization with a parallel updated particle swarm algorithm [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(18): 8683.
- [82] CHEN J L, LI J W, HE X H. Design optimization of steel-concrete hybrid wind turbine tower based on improved genetic algorithm[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2020, 29(10): e1741.
- [83] 张纪升, 李涛, 陈昊. 陆上超高风电机组混合塔架施工技术研究: 以大唐滑县枣村风电工程项目为例[J]. *工程技术研究*, 2022, 7(23): 29-31.
- ZHANG J S, LI T, CHEN H. Study on construction technology of hybrid tower of ultra-high wind turbine on land: Taking Zaocun wind power project in Datang Hua County as an example [J]. *Engineering and Technological Research*, 2022, 7(23): 29-31. (in Chinese)
- [84] 风电机组混凝土-钢混合塔筒施工规范: NB/T 10908—2021 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.
- Code for construction of concrete-steel hybrid tower of wind turbine: NB/T 10908—2021 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2022. (in Chinese)
- [85] 蒋璞, 丁环宇. 风力发电机组预制混凝土塔筒施工方法[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(增刊1): 188-190.
- JIANG P, DING H Y. Construction method of precast concrete tower of wind turbine [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(Sup 1): 188-190. (in Chinese)
- [86] 赵靛. 高塔架, 激发资源潜能[J]. *风能*, 2022(1): 18-19.
- ZHAO L. High tower frame, stimulate the potential of resources [J]. *Wind Energy*, 2022(1): 18-19. (in Chinese)
- [87] 刘备, 郭鲲鹏. 预制混凝土构件模具的重要性及设计与制作理念[J]. *安徽建筑*, 2018, 24(1): 306-308.
- LIU B, GUO K P. Importance, design and manufacturing concept of precast concrete component mold [J]. *Anhui Architecture*, 2018, 24(1): 306-308. (in Chinese)
- [88] 孟欣, 许川川. 风电机组混合塔筒施工关键技术[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(增刊1): 170-173.
- MENG X, XU C C. Key technologies of the construction of the mixing tower of wind turbine [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(Sup 1): 170-173. (in Chinese)
- [89] 边杰, 余洁, 陈庆. 装配式风电钢混塔筒中预应力系统的工艺要求[J]. *山西建筑*, 2021, 47(9): 91-93.
- BIAN J, YU J, CHEN Q. Technological requirements of prestressed system in assembled wind power steel concrete tower [J]. *Shanxi Architecture*, 2021, 47(9): 91-93. (in Chinese)
- [90] ABANDA F H, TAH J H M, CHEUNG F K T. BIM in off-site manufacturing for buildings [J]. *Journal of Building Engineering*, 2017, 14: 89-102.
- [91] ALVAREZ-ANTON L, KOOB M, DIAZ J, et al. Optimization of a hybrid tower for onshore wind turbines by building information modeling and prefabrication techniques [J]. *Visualization in Engineering*, 2016, 4(1): 1-9.
- [92] 董龙锋, 孙岩波, 阎明伟, 等. BIM技术在装配式风电混合塔筒构件生产中的应用[J]. *建筑技术*, 2021, 52(6): 714-717.
- DONG L F, SUN Y B, YAN M W, et al. Application of BIM technology in the production of assembled wind power hybrid tower components [J]. *Architecture Technology*, 2021, 52(6): 714-717. (in Chinese)
- [93] BOTZ M, OBERLÄNDER S, RAITH M, et al. Monitoring of wind turbine structures with concrete-steel hybrid-tower design [C]//8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2016). Bilbao, 2016
- [94] 郑健. 风电钢混塔筒健康监测系统设计[J]. *安装*, 2023(4): 83-85.
- ZHENG J. Design of health monitoring and testing system for wind power steel concrete tower [J]. *Installation*, 2023(4): 83-85. (in Chinese)
- [95] KALKANIS K, KAMINARIS S D, PSOMOPOULOS C, et al. Structural health monitoring for the advanced maintenance of wind turbines: A review [J]. *International Journal of Energy and Environment*, 2018, 12: 69-79.

(编辑 朱备)