

Research on the Development and Application of Wind Turbine Tower Technology

Huan Liu¹ Geng Chen²

1. Huadian Hubei New Energy Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430073, China

2. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract

As a critical support structure for wind turbines, the technological development of wind power tower towers directly impacts the advancement of the wind energy industry. This paper systematically reviews the evolution of wind power tower towers from early simple structures to modern diversified technical solutions, comprehensively analyzing the technical characteristics and application scenarios of different structural forms such as steel towers, concrete towers, hybrid towers, and lattice-frame towers. Finally, it explores the future development directions of wind power tower towers in areas such as material innovation, intelligent operation and maintenance, and deep-sea applications, providing references for the technological upgrading of the wind energy industry.

Keywords

wind turbine tower; hybrid tower structure; high tower technology; large-scale wind turbine; wind power development

风电塔筒技术发展与应用前景研究

刘欢¹ 陈庚²

1. 华电湖北新能源有限公司, 中国·湖北 武汉 430073

2. 华电电力科学研究院有限公司, 中国·浙江 杭州 310030

摘 要

风电塔筒作为风力发电机组的关键支撑结构, 其技术发展直接影响着风电产业的进步。本文系统梳理了风电塔筒从早期简单结构到现代多样化技术解决方案的演变历程, 全面分析了钢制塔筒、混凝土塔筒、混合塔筒及格构式塔架等不同结构形式的技术特点与应用场景。最后探讨了风电塔筒在材料创新、智能化运维及深远海应用等领域的未来发展方向, 为风电产业技术升级提供参考。

关键词

风电塔筒; 混塔结构; 高塔技术; 风机大型化; 风电发展

1 引言

全球能源转型背景下, 风电作为清洁可再生能源的核心组成, 技术革新与产业升级广受关注。塔筒作为风电机组的支撑结构, 承载机组全部重量并抵御复杂风况动态载荷, 其性能直接决定风电系统的安全性、稳定性与发电效率。

当前风电技术持续发展, 风机呈现明显大型化与高塔筒化趋势: 陆上单机容量突破 8MW, 海上达 14MW 及以上, 轮毂高度从几十米攀升至 160 米以上。这一趋势对塔筒技术提出更高要求, 推动其结构形式从传统单一钢筒向多元化发展。

2 风电塔筒的发展历程

风电塔筒发展历经三阶段: 20 世纪 70-80 年代为初始探索期, 以桁架结构、小型钢筒为主, 荷兰曾用纯木质塔架, 因强度和耐久性不足被金属结构取代, 彼时风机容量仅几十至几百千瓦。20 世纪 90 年代 -21 世纪初进入标准化钢塔阶段, 锥形钢制塔筒成为主流, 其分段卷制焊接的结构契合受力需求, 制造工艺标准化推动风电规模化发展。21 世纪初至今迈向多元化, 为破解钢塔高塔局限, 混凝土、钢混混合塔筒(1990 年德国 Enercon 首推) 广泛应用, 花瓣式组合、格构式等结构也在特定场景探索应用。

3 风电塔筒的主要结构形式与技术特点

3.1 钢制塔筒

钢制塔筒是风电发展史上应用最广泛的结构形式, 主要包括传统刚性钢塔和柔性钢塔两类。

【作者简介】刘欢(1989-), 男, 中国湖北鄂州人, 本科, 工程师, 从事电力生产管理研究。

传统刚性钢塔由多段锥形筒体组焊而成，整体性好，结构简单，制造工艺成熟。其自振频率通常高于风轮的激振频率，避免了共振风险，稳定性较高。但随着风机大型化发展，传统钢塔在达到一定高度后，壁厚和重量大幅增加，导致制造成本攀升，运输和吊装难度加大。

柔性钢塔（柔塔）是为适应高塔趋势而发展起来的技术路线，其基本特征是通过结构优化降低塔筒重量，使塔筒自振频率降低，因而被称为“柔塔”。柔塔的主要优势在于：塔筒重量明显降低，经济性优势突出 1；生产过程与传统刚性塔架相似，供应链完整，制造周期短；退役后便于拆解。柔塔的劣势在于：控制技术难度较高，可能与风轮产生共振，从而降低风塔寿命、增加事故风险。国内外的应用实践表明，Vestas 和国内个别厂家都曾因塔架二次共振导致塔架刚性受力太大而发生事故。

3.2 混凝土塔筒与混合塔筒

混凝土塔筒（混塔）是由钢材和混凝土共同构成的塔架，通常采用预制装配式结构。混合塔筒则是混凝土塔筒与钢制塔筒的组合，一般下部为混凝土段，上部为钢制段。

混塔结构的主要优势包括：①具有更高的发电效率，大型化趋势下成本优势明显；②对于高度超过 160 米的风机，整体结构刚度大，可靠性更强；③适用于复杂风况地区，并具备良好的防水性能；④在钢材等原材料成本上升的情况下，成为提升风机高度与保障机组可靠性运行的另一种选择。

从技术特点看，混塔的稳定性好，可通过优化设计使结构一阶频率落在允许范围内，减少无频率穿越造成的发电量损失。混凝土材质可更好满足大风机对塔筒稳定性需求，

承载更大叶片电机的安装重量。与基础连接方便可靠，整体性好，无刚度突变，降低了发生基础倾覆事故的风险。

混塔的不足之处在于：建设周期相对较长，安装费用较高。此外，混凝土部分在风机运行寿命终结后，回收难度相对钢制塔筒要大一些。

为提升混凝土塔筒的安全性能，预应力技术和高性能混凝土材料得到了广泛应用。例如，上海风领新能源有限公司采用有粘接体内预应力系统，在塔筒内部预留孔洞固定钢缆，然后进行水泥灌浆填充缝隙，通过灌浆料将钢绞线和塔筒融为一体，保证预应力损失可控，大大提升塔筒的耐久性。在材料方面，UHPC（超高性能混凝土）材料在传统混凝土中增加了钢纤维等金属材料，大幅提升了混凝土的密度和抗拉强度，防止掉块和开裂，具备出色的抗腐蚀性、不透水性和抗冻融性，在极端自然条件下依旧保持其安全性。

3.3 格构式塔架与其他结构形式

格构式塔架是另一种具有应用潜力的塔筒结构，其基础类似于输电塔架的点式分布。这种结构的主要优势在于：大大节省用钢量，经济性和稳定性较好，且可在多种场景下应用。然而，相比传统塔架，格构式塔需要使用大量螺栓，安装紧固和运维工作量较大，存在一定风险。

分瓣式组合塔筒则是为解决山地风电场运输难题而开发的创新结构。这种塔筒由多边等边型钢板焊接，通过螺栓组装，其优势在于：①钢制，回收简单；②基础直径大一点没有制造难度，无需大直径法兰；③运输无限制，运输成本低。欧洲 ENERCON 公司推广的这种分瓣式塔筒，在山地风电场等运输条件受限的场景中展现出独特价值。

表 1 主要风电塔筒结构形式比较

结构形式	适用高度	主要优势	主要局限	典型应用场景
传统钢塔	120m	技术成熟、制造简单、回收方便	高度受限、运输困难	常规风电场
柔性钢塔	100-140m	重量轻、经济性好、制造周期短	控制复杂、共振风险	高塔需求场景
混凝土塔筒	120-180+m	刚度大、稳定性好、成本优势	建设周期长、回收难	低风速高塔场景
格构式塔架	100-160m	用钢量少、经济性好	安装工作量大、运维复杂	多种地形条件
分瓣式塔筒	100-150m	运输方便、无需大法兰	现场组装需时	山地风电场景

3.4 不同地域的塔筒选择策略

风电塔筒的选择还需考虑具体地域特点，不同地区因风资源条件、地形特征与运输条件差异，适合的塔筒结构形式也有所不同。3

三北地区（东北、华北、西北）风资源丰富，地形平坦开阔，交通条件相对较好，传统钢制塔筒仍是经济性较好的选择。这些地区一般无运输难、征地难和制造难的问题，传统的钢筒方案可能是最好的选择，成本可能是最低，回收没有问题。

中东南部低风速地区已成为中国风电开发的重点区域，这些地区风资源呈现典型的低风速、高切变特征，高塔筒技术尤为重要。在此类地区，混塔凭借其高度优势、良好的经

济性和稳定的支撑性，成为开发低风速风场的主流选择。

山地与高原风电项目面临运输难、施工难、征地难等挑战。机型容量越大，重量就越大，塔架塔筒就会越大越重，在山地和高原吊装难度极大，现场施工面积小。在此情况下，分瓣式塔筒和格构式塔架等结构形式具有较好应用前景，能够有效解决运输瓶颈。

特别值得关注的是，“沙戈荒”（沙漠、戈壁、荒漠）风电基地的塔筒需要应对极端环境挑战。这些地区往往温差极大，同时面临风沙侵蚀、沙丘移动等特殊问题。针对这些特殊环境，塔筒需要从材料选择、防腐设计、密封结构等方面进行针对性优化。

4 风电塔筒面临的挑战与未来发展方向

4.1 当前面临的主要技术挑战

运输与安装瓶颈始终是制约大型塔筒发展的重要因素。随着风机容量增加，塔筒尺寸和重量不断攀升，给传统运输方式带来极大挑战。尤其是对于山地风电场，如何突破运输限制是一大难题。针对这一问题，分瓣式塔筒和现场装配式混塔是可能的解决方案，但也带来了成本增加和质量控制难度加大等新问题。

结构动力学问题随着塔筒高度增加而日益凸显⁴。大叶轮风力发电机组塔筒容易产生二阶涡激振动，需要结合叶片柔性、叶轮直径、叶片结构阻尼、塔筒结构阻尼等多种因素进行精细分析。这类振动问题如果处理不当，可能导致塔筒结构损伤甚至破坏，对风机安全运行构成威胁。

运维便利性与成本也是塔筒技术需考虑的重要因素。特别是对于格构式塔架，相比传统塔架，需要使用大量螺栓，安装紧固和运维工作量较大，存在一定风险。在沙戈荒等偏远地区，风电场地域辽阔，人烟稀少，运维挑战更为突出，需要提高风机的可靠性，降低故障率，以确保风电场的稳定运行。

4.2 风电塔筒未来发展方向

高塔筒与混塔技术将成为低风速地区的主流选择。数据显示，2023 年国内使用钢混塔筒的装机量达到 7.3GW，同比增长 209%，未来混塔有望逐步成为陆塔的主流技术路

线。混凝土塔筒风机的结构形式也在不断创新，从传统的现浇式向体外后张预应力装配式发展，这种结构形式能够有效增加塔筒高度以及刚度，稳定性好且施工便捷。

深远海适应型基础结构是海上风电的重要发展方向。随着海上风电朝着深水区趋势发展，未来风机支撑基础将由桩基、向导管架、再向漂浮式基础方向发展。根据国家能源局数据，截至 2024 年年底，中国海上风电累计装机约 41.3GW，占全球总容量 50%，已成为全球最大海上风电市场。随着近海风能资源的开发利用逐步饱和，海上风电新建项目向深远海开拓布局的趋势明确。

材料创新与结构优化将持续提升塔筒性能与经济性。UHPC（超高性能混凝土）等新材料的应用显著提升了混凝土塔筒的性能。例如，上海风领使用的 UHPC 材料在传统混凝土中增加了钢纤维等金属材料，大幅提升了混凝土的密度和抗拉强度，防止掉块和开裂。同时，基于数字技术的塔筒设计优化也将进一步发展，通过有限元分析、模态分析等技术手段，实现塔筒结构的精细设计与轻量化。

智能运维与全生命周期管理将成为塔筒技术的重要特征。面对风电场运维的挑战，特别是沙戈荒等偏远地区，智能化运维的重要性日益凸显。需要从风机的设计、制造到安装、运维等各个环节进行全面的优化和改进。同时，风电场的运维区域需要进行科学规划，以确保覆盖所有风机并提高运维效率。随着物联网、大数据、人工智能等技术的发展，塔筒状态的实时监测、智能诊断与预测性维护将成为可能。

表 2 风电塔筒技术创新方向与潜力

创新方向	技术内容	潜在效益	发展阶段
混塔技术优化	UHPC 材料、预应力装配式结构	提升高度、增强稳定性、降低成本	规模化应用
漂浮式基础	适用于深水远岸的浮动式塔筒基础	拓展海上风电开发范围	示范推广
分瓣式塔筒	多边形钢板螺栓组装结构	解决运输难题、适应复杂地形	特定场景应用
智能塔筒	集成传感器、实时监测结构健康	实现预测性维护、提高安全性	技术开发中
复合材料应用	纤维增强复合材料在塔筒中的应用	减轻重量、提高耐腐蚀性	前期研究

5 结语

风电塔筒技术发展经历了从简单到复杂、从单一到多元的演进过程⁵。塔筒选择需综合考虑风资源条件、地形特征、运输条件与经济性等因素。面对运输安装、环境适应性、结构动力学等方面的挑战，风电塔筒技术正朝着高端化、智能化、多元化方向快速发展。混塔技术、深远海基础结构、新材料应用以及智能化运维等将成为未来技术竞争的重点领域。

展望未来，随着风电产业持续发展和技术不断进步，风电塔筒将在材料科学、结构设计、制造工艺和智能运维等方面继续创新，为全球能源转型提供更加强有力的支撑。特别是在全球碳中和背景下，风电塔筒技术的进步将直接关

系到风能利用效率的提升与度电成本的降低，其战略重要性将日益凸显。

参考文献

[1] 王经亚.陆上风电塔筒产品发展趋势探析[J].中国设备工程,2022(10):223-226.

[2] 王丹,徐军,贺广零,等.风电机组混凝土-钢混合塔筒技术现状与发展趋势[J].重庆大学学报,2023.

[3] 张羽,蔡新,高强,等.风力机塔架结构研究概述[J].工程设计学报,2016,23(2).

[4] 樊扬,李鹏,肖博文,等.大型风电机组塔筒动力学特性与寿命损耗研究进展[J].发电技术,2022,43(3):421-430.

[5] 乔亚兰,风电网格式塔架技术研究综述[J].风能,2023(11):94-103.