

# 钢管混凝土格构式风电塔架研究综述

李栩森

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年6月25日; 录用日期: 2024年7月15日; 发布日期: 2024年7月29日

## 摘要

随着现在世界形势正日渐复杂化以及我国的经济正在高速健康发展, 现代社会对安全可靠地供电要求越来越高, 电力安全作为工业的主导地位显得尤为重要。本文通过系统地对国内外历年来的钢管混凝土格构式风能光伏发电工程塔吊论文数据进行系统检索整理和综合分析, 对钢管混凝土格构式风电塔架节点的结构抗震设计特性进行了总结, 对各结构类型节点结构受力设计特性变化规律的机理研究方法以及结构力学行为进行了归纳, 以便探究不同类型风力发电塔架的不同特性。同时总结了研究文献中的各种技术与管理的观点, 为工程实践提供理论依据。

## 关键词

风力电机, 塔架, 钢管混凝土, 格构式

# A Review of Research on Concrete-Filled Steel Tubular Lattice Wind Turbine Tower

Xusen Li

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 25<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 15<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

As the present world situation is increasingly complicated and our economy is developing in a high speed and healthy way, modern society has higher and higher requirements for safe and reliable power supply, electric power safety as the leading position of industry appears particularly important. This paper systematically retrieves, collates and synthetically analyzes the data of domestic and foreign papers on the tower crane of CST lattice wind photovoltaic power generation project. In order to explore the different characteristics of different types of wind power tower,

the structural seismic design characteristics of concrete-filled steel tube (CFST) lattice wind power tower nodes and the mechanism research method and the mechanical behavior of the structural joints are summarized in this paper. At the same time, various technical and management viewpoints in the research literature are summarized to provide theoretical basis for engineering practice.

## Keywords

Wind Turbine, Tower, Concrete Filled Steel Tube, Lattice

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

风能是当代的一种重要的清洁能源，是目前社会最重要的可再生能源之一[1]。风能蕴藏量巨大、可再生、无污染。据世界气象组织估计[2] [3]，世界上可供使用的风能总量约为  $2.74 \times 10^9$  兆瓦，尚未被人类利用的风能约  $2 \times 10^7$  兆瓦，接近地球上尚未被人类开发利用的水能总量的十倍。风力发电在能量转换过程中不需要额外添加其他燃料，不会产生任何对环境有害的气体或者废料。

世界排名前三的高风能资源蕴藏量国家中有我们国家的一席之地，并且我国海岸线长，能供利用的风力资源数不胜数。我国的风能开发正处在高速发展的黄金时期[4]。我国自上个世纪 90 年代以来就开始大量应用大型风力发电机，2019 年中国可再生能源发展报告指出，2019 年全国风电发电量 4057 亿 KW-h，约占全国总发电量的 1/20，新增风电机组平均单机总量 2.5 MW。陆上风电新增单机 2 MW~3 MW，海上新增的接近陆上的两倍。截止 2020 年上半年，全国风电新增并网装机 632 万 KW，其中陆上风电新增装机 526 万 KW、海上风电新增也达到了陆地的 1/5。2020 年我国首台 7 兆瓦海上半直驱风力发电机下线。年发电量可达 3000 万千瓦时，能满足 1 万户家庭全年的用电需求[5]。

塔架在风力发电机结构系统中举足轻重，塔架在支撑上部组织结构中起着极其重要的作用[6]。随着风力发电机组的容量和高度的增加，塔架的作用也越来越明显，风力发电机塔架的合理设计对于整个风力发电机组的安全可靠运行至关重要。本文针对风力发电机塔架的各力学问题进行了研究，对风力发电机塔架设计的发展方向进行了分析与展望。

## 2. 不同腹杆形式塔架抗震性能

在结合组合结构设计原理，现行规范以及钢结构设计的条件下，并在分析格构式钢管混凝土三肢柱风力发电机塔架受力特征的基础上，借鉴锥筒型风力发电机塔架对一个格构式钢管混凝土三肢柱交叉斜杆式风力发电机塔架进行了设计，并在此条件上拓展出了单斜杆式、交叉式、K 型腹杆式、再分式 4 种腹杆形式塔架，具体如图所示(见图 1) [7]。针对不同腹杆的使用范围，在选用时一般遵循以下规则：

(1) 单斜杆式腹杆：小型塔架使用较多，由于长细比的限制，所以无法完全发挥斜杆的材料强度。

(2) 交叉式腹杆：能够较好的承受变向荷载，且承受内力较小，此类腹杆常按柔性腹杆设计。

(3) K 式腹杆：可以有效的减小节间长度和斜杆、横杆长度，易于保证腹杆的稳定性，一般在塔架跨度较大，荷载较重时使用。

(4) 再分式腹杆：其优点在于能够减小塔柱、斜杆、横杆长细比，但同时节点增多、风荷载加大、

材料用量增加的缺点也不容忽视[8]。

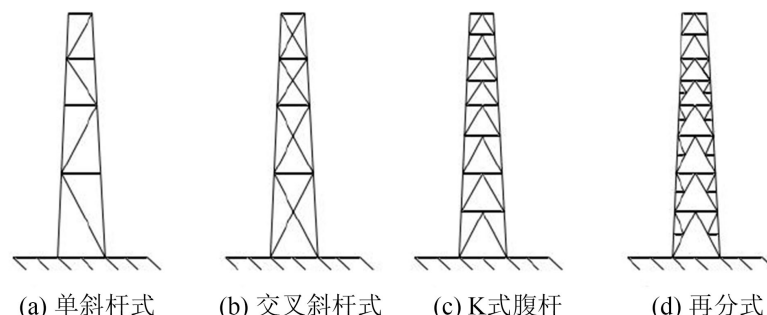


Figure 1. Commonly used tower belly rod form

图 1. 常用塔架腹杆形式

采用有限元分析方法对 4 种不同类型塔架进行了抗震性能研究, 得到如下结果:

滞回曲线又称恢复力曲线(restoring force curve), 是在力循环往复作用下, 得到结构的荷载—变形曲线。滞回曲线反映了结构的变形特征, 是分析的重要依据。

往复荷载作用下, 特别是水平地州条件下, 各类腹杆形式塔架腹杆相贯节点部位或柱肢-腹杆相贯节点位置容易发生集中破坏, 滞回曲线均呈典型的“弓”形, 出现了明显的捏缩现象。将不同腹杆形式塔架拟静力分析各项指标进行对比后, 得出以下结果: 交叉式腹杆塔架与钢管混凝土柱肢的协同效果最佳, 在对比 4 种不同腹杆布置形式塔架后发现交叉式腹杆塔架与钢管混凝土柱肢的抗震性能要优于其他形式, 单斜杆式腹杆塔架承载力及各项抗震性能均最差。在 4 类不同腹杆形式塔架中腹杆分布最为合理的是交叉式腹杆塔架, 运用在塔架上可以一定程度提升整体刚度, 该形式还可以减小地震作用对塔架的影响特别是地震作用下的位移响应幅度, 单斜杆式腹杆塔架位移幅值较顶部位移幅值增加约 9%, 但不会影响塔架响应地震作用下的加速度或产生较大差异。钢管混凝土格构式塔架腹杆形式变化对钢材用量的增加与塔架承载力、初始刚度及整体刚度的增加等的影响并不是正相关, 腹杆布置形式的合理性及其与柱肢的协调性需要同时考虑才能提升塔架力学性能。由局部塔架拟静力分析及塔架整体时程分析结果综合分析, 在 4 类不同腹杆形式塔架中, 腹杆布置形式最合理的是交叉式腹杆塔架, 其各方面力学性能最符合实际应用要求, 且最经济合理[7]。

### 3. 节点受力性能

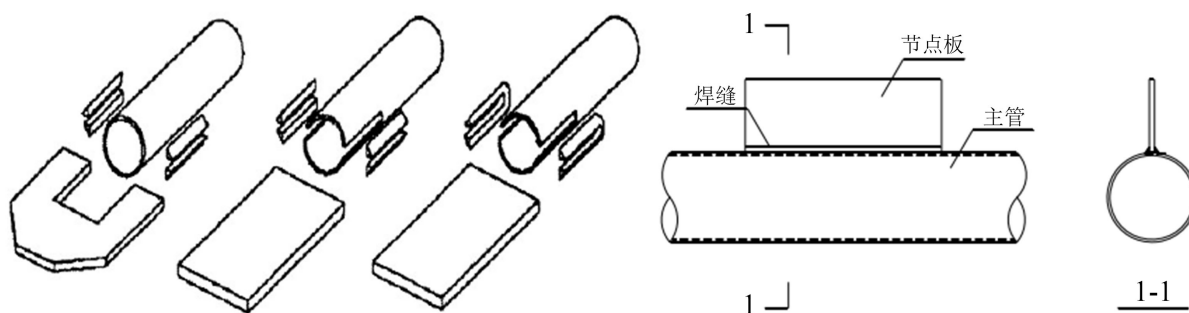
#### 3.1. 塔架的节点形式

##### (1) 管板节点

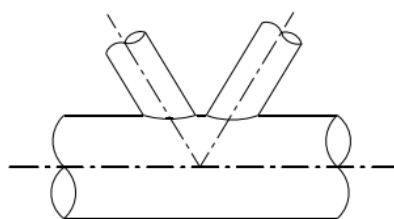
管板节点中主管外壁与节点板通过角焊缝直接焊接在一起, 支管与节点板的连接通常采用支管末端开槽后与节点板插接或在节点板开槽后与支管焊接(见图 2), 角缝焊接也可以说是一种间断角焊缝也或者是连续角焊缝, 管板节点中支管板上的轴力作用可以由节点板的平衡力转化而为一些局部平面作用力, 并且可以经过对主管板和节点板之间的焊接而把所有这些局部平面作用力都传送到主管。该板种的节点板可更有效快速地提高主管板和节点板之间的有效衔接和高度, 适合于壁厚相对比较薄的主管。

##### (2) 相贯节点

相贯节点通常是由贯通的主管与被切成相贯线形状的支管直接焊接而成(见图 3), 节点区主管除了承受轴向力外, 还提供空间以承受腹杆传递, 相贯节点形式构造比较简单, 不需要连接件, 建筑外形美观, 内力在杆件之间的传递路径简单明了, 并具有承载力高的优点。



**Figure 2.** Tubesheet joint  
**图 2.** 管板节点



**Figure 3.** Intersecting joint  
**图 3.** 相贯节点

### (3) 空心球节点

空心球节点是将闭合的球形壳体直接焊接杆件所形成的节点(见图 4)，球壳通常是由两块圆钢板经热压或冷压成半圆球壳后对接焊成整球，或是在球壳中间加设环形肋板后对焊成整球，对于个别受力较大的空心球节点，可设置相互垂直的环形加劲肋板。该类节点具有良好的各向同性，可与任意方向的杆件连接，杆件轴力均有球壳承担，球体上交汇的杆件越多，其优点越突出[8]。



**Figure 4.** Hollow sphere joint  
**图 4.** 空心球节点

## 3.2. 各类型节点受力性能

(1) 将混凝土灌注进塔柱中后，相贯节点的损坏形式由受压的塔柱管壁变为塑性构件导致失去承载能力转变为腹杆的局部屈曲导致失去承载能力，该节点的受压承载力提升至 44%；而混凝土对管板节点改善受力性能的作用不明显。

(2) 对钢管混凝土相贯节点承载力产生重要影响的参数包括腹杆与塔柱直径比和塔柱径厚比。塔柱直径比越大节点承载力越大, 柱径厚比的越大而节点承载力会随之下降; 节点的破坏模式与不同腹杆的塔柱直径比、塔柱径厚比有密切关系。通过分析得出参数取值范围为: 塔柱径厚比取值范围为 30~40, 腹杆与塔柱直径比取值范围为 0.3~0.4。

(3) 节点承载力与节点板厚度也有很大关联, 节点所用钢管混凝土管板厚度越大其承载力越大。当板厚超过 2 倍的腹杆壁厚后, 节点破坏模式变为腹杆的受压屈曲失效, 板厚再继续增大时, 承载力的变化不大[9]。

#### 4. 钢管混凝土格构式风力电塔可靠性分析

##### 纸型、页边距与版式

对钢管混凝土格构式风力发电机塔架进行静力可靠性分析, 主要内容有: 计算构件抗力和结构受荷载的概率统计函数、对塔柱——圆钢管混凝土柱进行可靠性分析、找出钢管混凝土格构式风力发电机塔架体系的主要失效路径, 使用 PNET 法与蒙特卡罗法计算其可靠度。通过研究分析, 得出如下结论:

(1) 构建出结构构件抗力的概率模型, 并计算得到每根构件的抗力统计参数, 取构件抗力服从对数正态分布。

(2) 塔架所受自重服从正态分布的概率分布函数; 塔身所受风荷载服从极值 I 型分布; 通过伯努利方程给出了风速与风压之间关系, 从而建立了气动推力与风压的关系式。利用风压的概率模型得到风轮中心气动推力的统计参数。

(3) 确定了影响钢管混凝土柱可靠性的各参数灵敏度。各变量参数按影响程度逐渐减弱来排列依次为钢管的壁厚、荷载、混凝土强度、钢材强度。研究表明在实际工程中应首先严格控制钢管的壁厚来保证结果可靠度; 在可靠度满足时进行优化, 可以通过改变钢材强度与混凝土强度来降低成本。

(4) 通过对 12 根轴心受压钢管混凝土短柱极限承载力进行数理统计分析, 得到极限承载力接近于对数正态分布。根据推荐公式推导出钢管混凝土柱极限承载力均值、标准差、变异系数的计算表达式。对比计算分析后可知钢管混凝土柱轴心受压时, 极限承载力可靠指标比屈服承载力可靠指标大 15.5% 左右, 因此钢管混凝土柱后期承载力可靠度具有较大的安全储备。

(5) 在建立了塔架结构体系混合模型后, 即塔柱采用梁单元, 腹杆为二力杆单元的模型。通过应用全局分支—约界法寻找失效路径, 研究表明塔架破坏主要集中在下三层。背风面的塔架构件与塔架每层横腹杆都没有发生破坏的现象。对称的杆件同时失效。塔架首先从受压的斜腹杆开始破坏, 最后失效主要集中在底层受拉塔柱。分析得知塔架底层塔柱与下部几层斜腹杆是塔架体系受力的关键部位。因此塔架应加强对底层塔柱和斜腹杆构件设计来保证结构体系的可靠性。

(6) 根据塔架的主要失效路径, 通过 PNET 法计算得到塔架体系可靠度为 0.9981。又利用 ANSYS 软件对塔架运用蒙特卡罗法进行可靠性分析, 其计算结果与 PNET 法求得的可靠度仅相差 0.0003, 说明 PNET 法计算得到的结果正确[10]。

#### 5. 总结

本文通过翻阅大量文献资料以及到各工程现场实验调查, 在已有的格构式风力发电机性能检测指标的基础上归纳总结。对钢管混凝土应用于格构式风力发电塔中的各种性能作了详细介绍, 总结了钢管混凝土格构式风力发电塔已有的各项研究成果, 分析了近些年来学界围绕钢管混凝土节点连接的力学性能等学术成果, 根据相关研究成果可以发现使用 PNET 法与蒙特卡罗法可以准确计算其可靠度, 通过工程实例发现, 学界的在研成果已很好地应用于现场实际, 符合理论模型。钢管混凝土格构式风电塔架节点



受力复杂且节点形式众多, 对众多节点统一对比研究的尚少, 建议后续研究者可以在以下方面继续开展工作: (1) 目前对钢管混凝土格构式风电塔架节点大多是静力性能的研究, 后期可以从疲劳、动力性能方面进行研究。(2) 空间节点等受力机理尚不明确, 可以在空间塔架结构中对节点进行受力性能分析。(3) 钢管混凝土风电塔架的节点还有其他形式, 可以在空间塔架结构中对众多节点进行对比分析, 找出合理的节点形式, 为钢管混凝土格构式风电塔架的建设提供建议和参考。

## 参考文献

- [1] Herbert, G.M.J., Iniyan, S., Sreevalsan, E., *et al.* (2007) A Review of Wind Energy Technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **11**, 1117-1145.
- [2] 刘万琨. 风能与风力发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 郭新生. 风能利用技术[M]. 北京: 北京化学工业出版社, 2007.
- [4] Zimny, M.J. (2011) Wind Energy Development in the World, Europe and Poland from 1995 to 2009; Current Status and Future Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 2330-2341.
- [5] Herbert, G., Iniyan, S. and Sreevalsan, E. (2007) A Review of Wind Energy Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, 1117-1145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.004>
- [6] 朱瑞兆, 薛桁. 我国风能资源[J]. 太阳能学报, 1981(2): 3-10.
- [7] 吴益阳. 不同腹杆形式钢管混凝土格构式风电塔架抗震性能对比研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
- [8] 李星荣, 魏才昂. 钢结构连接节点设计手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 162-167.
- [9] 乔明. 钢管混凝土格构式风电塔架节点受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.
- [10] 王博. 钢管混凝土格构式风力发电机塔架可靠性分析[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2013.