

陆上风力发电机组  
钢混塔架预应力技术规程

编制说明

(征求意见稿)

标准编制组

2024年8月

## 目 录

一、工作简况 .....	1
(一) 任务来源 .....	1
(二) 编制目的 .....	1
(三) 参加单位 .....	2
(四) 单位分工和主要起草人 .....	2
(五) 工作过程 .....	3
二、标准编制原则和主要内容 .....	3
(一) 标准编制的原则 .....	3
(二) 标准的主要内容 .....	4
三、主要试验（或验证）情况分析 .....	7
四、标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明 .....	7
五、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效益等情况 .....	7
六、采用国际标准和国外先进标准情况 .....	10
七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准 .....	10
八、重大分歧意见的处理经过和依据 .....	10
九、标准性质的建议说明 .....	10
十、贯彻标准的要求和措施建议 .....	10
十一、废止现行相关标准的建议 .....	11
十二、其他应予说明的事项 .....	11

# 一、工作简况

## （一）任务来源

根据中国混凝土与水泥制品协会《关于下达 2024 年中国混凝土与水泥制品协会标准制修订计划（第一批）的通知》（中制协字[2024]06 号）的要求，《陆上风力发电机组钢混塔架预应力技术规程》为协会标准制定项目，计划号 2024-04-cbjh。

本规程由中国混凝土与水泥制品协会负责管理，由中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会牵头制定并组织编制工作，由威胜利工程有限公司负责起草并组织相关单位共同完成。

## （二）编制目的

随着风电清洁能源的大规模应用，混塔的应用于风电项目越来越广泛，而混凝土塔架主要采用钢筋混凝土+预应力的配置方式。由于混凝土抗拉，抗弯性能较弱，在水平荷载作用下仅依靠混凝土自身性能无法抵抗，需增加预应力体系才能够加强混凝土的整体抗弯性能，塔筒横向接缝处仅通过结构胶连接，抗拉也主要靠预应力实现，因此预应力技术是混合塔架最为关键的技术之一。

混合塔架预应力体系与桥梁及普通民建预应力体系有很大的不同之处，预应力体系在材料选型、设计原则及设计方法、布置方式、防腐体系、预应力损失计算等方面存在很多需要完善和确定的要求。而在进行钢混塔架预应力设计及施工时，无相对应的系统性规范依据。同时，预应力施工作为一种专业施工，相关的安装、张拉、灌浆及封闭等施工工艺需要有适合的规范进行约束，以确保预应力体系的施工质量。

陆上风力发电机组混凝土塔架预应力技术规程的缺失，使得各方主体在使用混塔时缺乏足够的理论参考，在遇到预应力及其他相关问题时无法做出及时、准确的判断，并在不断推诿和延误中浪费不必要的资源，给混塔的进一步发展造成阻碍。不利于风电混塔的健康良性发展，因此，编制《陆上风力发电机组钢混塔架预应力技术规程》对风力发电机组混合塔架的安全运行，为各方单位提供准确可靠技术理论依据等方面具有重要的意义。

### (三) 参加单位

本规程由中国混凝土与水泥制品协会负责管理,由中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会牵头制定。主编单位有中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会、威胜利工程有限公司、柳州欧维姆机械股份有限公司、天津市新天钢中兴盛达有限公司、北京市建筑工程研究院有限责任公司、天津银龙预应力材料股份有限公司,参编单位有北京天杉高科风电科技有限责任公司、上海电气研砵(木垒)建筑科技有限公司、内蒙古金海新能源科技股份有限公司、上海风领新能源有限公司、浙江华东新能科技有限公司、一重(黑龙江)风电混塔有限公司、辽宁昌和风电设备有限公司、协合新能源集团有限公司、中国船级社质量认证有限公司、柳州市建桥预应力智能设备有限公司、江苏陆海工程科技有限公司、浙锚科技股份有限公司、柳州市邱姆预应力机械有限公司。

### (四) 单位分工和主要起草人

本规程共分8章,主要起草人及分工如表1所示。

表1 主要起草人及分工

章节名称	单位分工	主要起草人
标准编制进度统筹	中国混凝土与水泥制品协会风电混塔分会	孙莉丽
1 总则	柳州欧维姆机械股份有限公司牵头	刘进、李建军
2 术语和符号	威胜利工程有限公司牵头	杨明、张健
3 基本规定	天津银龙预应力材料股份有限公司牵头	金庆波
4 预应力材料	威胜利工程有限公司牵头	杨明、刘进、刘鲁、金庆波、张健、陈彬毅、唐茂、李长乐、李论、周瑞权
5 预应力设计计算	威胜利工程有限公司牵头	杨明、刘进、刘鲁、陈彬毅、张后禅、彭子腾、黄张裕、李帅、周瑞权
6 构造规定	柳州欧维姆机械股份有限公司牵头	刘进、杨明、刘鲁、金庆波、张健、陈彬毅、张后禅、彭子腾、黄张裕、李帅、周瑞权、周云、颜廷俊
7 安装及验收规定	威胜利工程有限公司牵头	杨明、刘进、金庆波、刘鲁、陈彬毅、唐茂、李长乐、周云、颜廷俊

8 检测及运维	柳州欧维姆机械股份有限公司牵头	刘进、刘鲁、彭子腾、李论、张后禅、苏均
规范性引用文件	天津市新天钢中兴盛达有限公司牵头	张健
统稿	威胜利工程有限公司牵头	杨明

## （五）工作过程

2024年4月12日，召开编制组成立暨第一次工作会议。会上听取了由威胜利工程有限公司编制单位就标准编制的背景，编制组成员单位组成，标准的主要架构以及分工进行介绍。原则上通过标准的主体构架，明确了参编单位的分工以及编制进度计划安排。中国混凝土与水泥制品协会主管标准工作领导介绍了标准工作要求、流程和注意事项。

2024年5月7日，标准编制组以线上会议形式召开了第二次会议。会上听取了各家单位对规程各章节进度的统计汇报，对各章节范围具体内容及存在的问题进行初步协商确定，就进度及内容等相关内容等进行了讨论和交流，就规程草稿的修改反馈意见进行了通报和讨论，对第六章主要涉及风塔设计、需要由各风塔厂家（天杉，风领，电气研砣，华东院，金海，一重）提供内容，由北京建筑工程研究院整理汇总，然后进行讨论，定稿。明确了下一次会议讨论的主要技术要求内容和会议时间。

2024年7月5日，标准编制组以线上会议形式召开了本规程的草稿修改稿讨论会，对本规程的每章条文具体内容、章节标题、术语、统一表述等进行了讨论和修改，进行了充分讨论，并确定了编制意见，会议上各位代表对标准初稿进行了细致的审议和充分讨论。对于初稿结构及条款取得了广泛共识。为后续编制指引了方向

2024年8月，本规程征求意见稿送交中国混凝土与水泥制品协会标准质量部以通过社会公开征求意见。

## 二、标准编制原则和主要内容

### （一）标准编制的原则

本规程按照《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》

GB/T 1.1-2020 及《工程建设标准编写规定》(建标[2008]182号)给出的规则进行编写。本规程的编制遵从以下规则:贯彻执行国家的政策、法规,与现行其他国家标准协调一致的原则;技术指标制定先进可行、规范合理的原则;标准制定突出产品特性,适用于陆上风力发电机组钢混合塔架预应力体系,促进陆上风力发电机组钢混合塔架预应力体系行业健康发展和产品推广的原则。

## (二) 标准的主要内容

本规程共分8章,分别为:1 总则;2 术语和符号;3 基本规定;4 预应力材料;5 预应力设计计算;6 构造规定;7 安装及验收规定;8 检测及运维。

### 1 总则

为规范陆上风力发电机组钢混塔架混凝土塔筒在预应力设计,施工及后期运维全过程的工作,明确和规范预应力体系设计依据及参考,混凝土塔筒预应力施工在项目现场全过程需达到的技术要求,从而制定本规范规定了本标准适用范围。

### 2 术语和符号

本章节中的术语均为在混凝土塔筒预应力设计和施工时用到的重要定义内容,为了明确其定义,编制专门的解释说明内容。符号为本规程所引用采用涉及符号,在此归纳总结可方便读者在不知其含义时迅速查询了解。

### 3 基本规定

本章规定包括预应力体系的总体概括,设计寿命,基本使用环境,温度要求及其他要求等基本总体情况。

### 4 预应力材料

包括预应力筋、锚具、孔道与灌浆料,以及预应力组件及性能要求等预应力体系基本材料及其性能要求。分别从材料本身性能,整体技术指标

4.1.1 本节主要规定目前混凝土塔筒所使用的集中预应力筋的类型,最低抗拉强度标准值等内容、

4.1.2~4.1.4 详细地规定了预应力钢绞线的基本要求,限制其最低要求,对预应力钢绞线的外观形状,成品瑕疵,几何外观尺寸偏差,横截面积等进行详细规定。4.1.3节在其疲劳试验性能上进行基本规定,4.1.4节则规定了钢绞线的

基本力学性能要求，包括屈服力，最大力总延伸率等性能，通过这些基本要求保证其选用预应力筋的质量。

4.1.6节针对目前应用于风塔混凝土塔筒广泛的无粘结预应力体系，体外预应力筋的护套HDPE材料、厚度、表观质量、性能技术指标进行要求，油脂和蜡的含量及进行规定。保证无粘结预应力筋体外束后期使用过程中的防腐满足要求。

4.1.11节对无粘结预应力筋钢绞线油脂包裹密实性，防腐润滑脂的生产厂应提供质量证明文件及检测报告，并符合相应规定。蜡的技术性能指标进行规定，满足表格的要求，保证钢绞线防腐质量。

4.2节对混凝土塔筒预应力体系的重要组成部分锚具进行规定，锚具组成由锚板，锚垫板，夹片，螺旋筋等部分组成，分别对组成部分制造材料，性能，基本试验要求，使用环境温度等进行规定。

4.3本节是针对当风塔采用体内预应力体系时，对预应力管道与灌浆料进行规定，包括预应力管道的类型种类，基本尺寸，性能要求。预应力灌浆料为引用参考规范，以此保证该章节预应力材料体系的完整性。

4.4节总结预应力所有组件材料的基本试验性能，受力，外观等要求规定。

## 5 预应力设计计算

5.1 本节为一般规定，通过总体性概括预应力设计计算参数，包括作用分项系数，张拉控制力的范围的规定等，其中对于预应力分项系数按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T50010 及《工程结构通用规范》GB 55001 执行。

5.2 节为塔筒预应力设计计算过程中预应力损失计算，5.2.1 节表格列举所有影响预应力损失的因素，共计 7 种。5.2.2~5.2.7 分别对不同类型因素引起的预应力损失给出具体计算方法。5.2.8 节按分类列出短期预应力损失，长期预应力损失两阶段分别对应预应力损失规定。5.2.9 节为最终承载能力极限状态的有效预应力计算方法。

5.3 节为预应力筋伸长量计算方法，参考现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650。

5.4 节为疲劳验算，采取 SN 曲线描述规定，进行预应力疲劳验算，规定等，该章节根据最终评估取舍，因其 SN 曲线难以说明来源。

5.5 节为锚固区设计规定，保证预应力体系张拉端与锚固端其设计与相应张

拉力相配套。该章节主要引用现行国家标准《混凝土结构设计标准》第 6.6 条，5.5.1 节通过该公式，对局部受压区最小截面面积进行限制，保证截面不过小。5.5.2 节对局部受压区面积取值进行规定。5.5.3 节通过构造措施与配筋率计算公式，对锚固区螺旋筋参数，型号等进行明确规定要求。

## 6 构造规定

本章主要介绍针对预应力混凝土塔架的普遍构造，预应力系统的设计选用及使用要求。基本规定内容参考现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85-2010

6.0 节主要就预应力体系的基本构造进行规定，6.0.3 节对预应力束曲线偏转起始点与张拉锚固点之间的直线段最小长度进行要求，6.0.5~6.0.7 分别对锚固区需进行锚固区性能传递试验规定，锚固区螺旋筋材料最低要求，配筋率以及是否需要增加劈裂钢筋参照现行行业《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定。

6.1 节为预应力系统设计选用，主要为预应力辅件用途，应用场景，技术说明列表归纳。

6.2~6.4 节从局部区构造要求，约束装置，转向装置对局部锚固区，约束装置，转向参数规定要求。不同张拉控制力，其最小弯曲半径不同，通过 6.4.1 节表格列出。

6.5 节为预应力体系防腐，防腐在体系设计寿命周期中尤其重要，是保证预应力体系正常运行的前提条件，该节对体内预应力筋的压浆密实度，体外预应力筋 PE 层，油脂包裹。组件的镀锌层，环氧涂层进行规定，保证预应力体系无部位与空气直接接触。

## 7 安装及验收规定

7.1 节总体概括性规定安装前的必要工作。因预应力施工属于专项施工，需编制专项施工方案编制，故在此安装章节对其进行规定要求。安装时环境温度要求，预应力材料安装前堆放要求规定，保证材料质量在施工前完整可靠。

7.2 预应力材料制作与安装，从安装前制造质量检验，材料成品保护，预应力筋切割方式方法以及 PE 层细微损害的修补方法，保证现场安装的切实可行性，提供依据性的解决方案。预应力安装从体内和体外预应力两个方面进行规定，体

内对管道固定，浇筑时抽芯转动，安装预应力筋后灌浆时间限制，主要为防止预应力筋生锈。体外对 PE 层剥除长度限制规定。

7.3 节从预应力筋张拉施工规定，7.3.1 节在张拉施工前对预应力张拉设备校验，设备校验期限以及证书规定。保证施工设备可靠安全。7.3.5 节为张拉时具体操作方法规定，张拉后误差范围控制。7.3.6 节对施工时张拉顺序原则规定，当设计图纸有规定时按图纸进行，无要求时按此规定进行，保证张拉时受力合理性及安全性。7.3.7 节规定了张拉后预应力束内缩限制。7.3.8~7.3.12 节分别从张拉后预留长度切割方式，长度；张拉后出现异常情况需要卸锚，以及其他情况的处理进行要求。

7.4~7.5 节分别为体内预应力灌浆规定，为体内预应力塔筒提供参考依据；封锚与防腐则是在预应力张拉完成后最后工作。

## 8 检测及运维

风力机组塔架预应力系统监测应分为初始检查、日常巡查、定期检查和特殊检查。本章节主要从这四个方面进行规定。同时保持与《陆上风力发电机组混凝土-钢混合塔架维护技术规程》的统一性。

## 三、主要试验（或验证）情况分析

本规程为规范陆上风力发电机组钢混塔架预应力技术的设计、施工、维护等，相关技术数据和要求引用现行国家及行业标准规范。

## 四、标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明

本规程不涉及专利和相关知识产权。

## 五、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况

2023 年 12 月 20 日，国家能源局发布 1-11 月份全国电力工业统计数据。截至 11 月底，全国累计发电装机容量约 28.5 亿千瓦，同比增长 13.6%。其中，太阳能发电装机容量约 5.6 亿千瓦，同比增长 49.9%；风电装机容量约 4.1 亿千瓦，

同比增长 17.6%。1-11 月份，全国主要发电企业电源工程完成投资 7713 亿元，同比增长 39.6%。其中，太阳能发电 3209 亿元，同比增长 60.5%；核电 774 亿元，同比增长 45.3%；风电 2020 亿元，同比增长 33.7%。电网工程完成投资 4458 亿元，同比增长 5.9%。

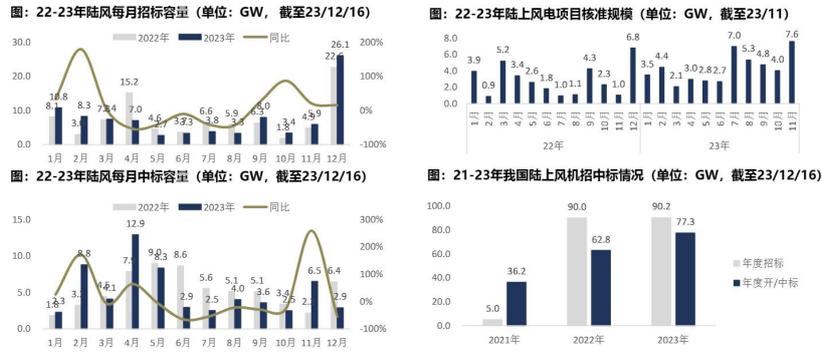


图 1 中国风电陆风招标/中标量

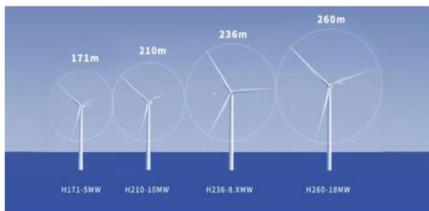
国家“双碳”政策提出后行业规划的多批陆上风光大基地资源的批量释放。陆风大基地项目、老旧机组改造、分散式核准制改备案制，共同推动“十四五”末期中国陆风进入装机高峰期。23年1-11月我国陆上风电核准项目规模达 47.2GW，同比增长 71.4%。进入 23 年下半年，风电项目核准规模较 23 年上半年显著增长。

风电平价时代的到来，使风机单机容量明显提升。据中国风能专业委员会发布的数据，2022 年，中国新增装机的风电机组平均单机容量为 4.49MW，同比增长 27.8%，其中陆上风电机组平均单机容量为 4.3MW，同比增长 37.9%，海上风电机组平均单机容量为 7.4MW，同比增长 33.4%。

### 风电机组：大型化趋势明显

- 风机大型化是降本的重要抓手，近年风机大型化的速度加快，2022 年新增装机的单机容量同比明显增长。
- 展望未来，风机大型化还将更进一步，目前风机企业已经推出 10MW 左右的陆上机组，并即将批量应用，头部风机企业已经开始着手研发 12-15MW 单机容量的陆上机组；海上方面，头部的海上风机企业已经推出 16-18MW 的海上机组，后续推出单机容量 20MW 以上的机组可期。

中国海装海上风机往大型化方向迭代的示意图



资料来源: CWEA, 中国海装, BNEF, 平安证券研究所

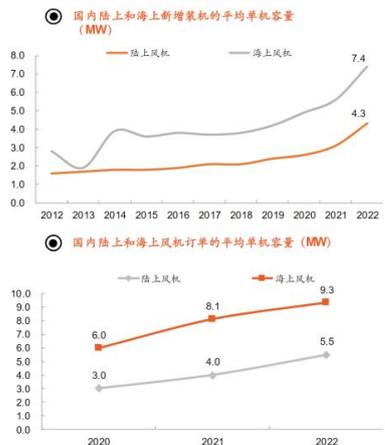


图 2 风机大型化趋势

风机大型化发展趋势下，混凝土-钢混合塔筒方案技术的经济性优势随塔筒高度的增加不断体现：

(1) 高风速地区风能开发殆尽，中、低风速地区资源亟待开发，需提升轮毂高度获得更高风速，增加风机输出功率；

(2) 混塔整机结构刚度大，抗疲劳和避震性能更强，结构更加安全；

(3) 混塔频率高，振动频率可避开共振点，安全稳定性高；

(4) 混凝土与预应力体系协同作用，安全稳定性高；

(5) 据测算，塔筒高度 $>140\text{m}$ 时，混塔更具经济性；

(6) 分片式解决大直径塔筒运输难题。高塔筒通过增加直径既可以提升塔筒的承载能力又能兼顾经济性，但受制于运输限制，传统钢塔的直径很难突破 $5\text{m}$ 。分片式塔筒可采用堆叠式或单片式运输，能够很好地解决大直径塔筒的运输难题。

高塔架方案可显著提升低风速高切变风资源区发电量。风切变越大，增加塔高时风机输出功率的提升效果越显著，发电量越多，如安徽、河南、湖北、湖南、江西等低风速地区，塔高由 $100\text{m}$ 增至 $150\text{m}$ 时，安徽/陕西/湖北风机功率增幅约 $50\%$ ，由 $150\text{m}$ 增至 $200\text{m}$ 时，陕西/广西/安徽/湖北/江西风机功率增幅约 $30\%$ 。

图：低风速省市近地面高度风速(m/s)及输出功率随高度增长率(%)

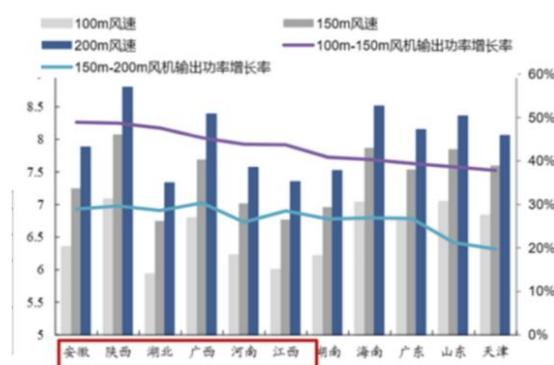


图3 混塔经济性优势

但是，混凝土-钢混合塔筒没有专门的维护技术标准规范，用于指导维护，也是制约产业进一步发展、工程使用安全性保障的一个重要因素。

本标准结合钢混塔架的结构特点，从影响钢混塔架正常运行和极限承载的要素出发，对钢混塔架的维护内容、标准、方法、周期做了规定，在风电机组整个服役期内，通过定期维护，及时掌握钢混塔架的运行状态，及时了解钢混塔架缺陷和损伤的性质、部位、严重程度、发展趋势，评估对钢混塔架的影响，为钢混

塔架的维护提供可靠的技术依据。

本标准的编制规范了钢混塔架运维,可有效预防风机运行过程中由于钢混塔架问题导致的质量缺陷、问题或事故,保障了服役期内钢混塔架及搭载主机的安全、可靠运行,对于风电行业健康、高质量发展具有重要意义。

## 六、采用国际标准和国外先进标准情况

1. 本规程 4.1.2 条中,其表中横截面积允许偏差 $\pm 2\%$ 参考欧洲规范 FprEN10138-3 第 7.1 条中表 4, Permitted deviation on nominal mass per metre 的相关要求。

2. 本规程 4.1.7 条中, HDPE 护套在钢绞线上初始摩擦阻力,参照法国标准 NFA35-037-3 的相关要求。

3. 本规程 5.4 节疲劳验算部分的 N, K1, K2 系数取值参考 EN1992-1-1 6.8.4 条 Verification procedure for reinforcing and prestressing steel 中表格相关要求。

## 七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准

经广泛调研和多方面征求意见,本规程符合现行的相关法律、法规、规章及相关标准的要求。

## 八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

## 九、标准性质的建议说明

建议《陆上风力发电机组钢混塔架预应力技术规程》作为推荐性工程建设类协会标准发布实施。

## 十、贯彻标准的要求和措施建议

尽快做好标准发布实施工作,标准颁布实施后,相关部门和企业应做好标准

宣贯培训工作，制定相应的实施方法，使本规程得以认真执行，在混凝土塔筒构件生产技术和质量管理方面起到重要的指导作用。

## 十一、废止现行相关标准的建议

无。

## 十二、其他应予说明的事项

无。