

ICS 27. 180
P 61

团体标准 CSCS

T/CSCS 061-2024

陆上风电机组基础加固技术及施工验收标准

陆上风电机组基础加固技术及施工 验收标准

Standard for reinforcement technology and construction
acceptance of onshore wind turbine foundation

2024-10-25 发布

2024-12-10 实施

中国
建筑
工业
出版社



中国钢结构协会 发布



1 5 1 1 2 4 4 1 9 8

统一书号：15112·44198
定 价： 32.00 元

团 体 标 准

陆上风电机组基础加固技术及施工 验收标准

Standard for reinforcement technology and construction
acceptance of onshore wind turbine foundation

T/CSCS 061 - 2024

主编单位：湖 南 科 技 大 学

瑞风能源（武汉）信息技术有限公司

批准单位：中 国 钢 结 构 协 会

施行日期：2 0 2 4 年 1 2 月 1 0 日

中国建筑工业出版社

2024 北 京

团体标准
陆上风电机组基础加固技术及施工
验收标准

Standard for reinforcement technology and construction
acceptance of onshore wind turbine foundation

T/CSCS 061 - 2024

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路9号）

各地新华书店、建筑书店经销

北京鸿文瀚海文化传媒有限公司制版

印刷厂印刷

*

开本：850毫米×1168毫米 1/32 印张：3 $\frac{3}{4}$ 字数：91千字

2025年3月第一版 2025年3月第一次印刷

定价：**32.00元**

统一书号：15112·44198

版权所有 翻印必究

如有质量问题，可与本社读者服务中心联系

电话：(010) 58337283 （邮政编码 100037）

本社网址：<http://www.cabp.com.cn>

网上书店：<http://www.china-building.com.cn>

中国钢结构协会

中钢构协〔2024〕37号

中国钢结构协会关于发布团体标准 《陆上风电机组基础加固技术及施工 验收标准》的通知

现批准《陆上风电机组基础加固技术及施工验收标准》为中国钢结构协会团体标准，编号为 T/CSCS 061-2024，自 2024 年 12 月 10 日起实施。本团体标准由中国钢结构协会委托中国建筑出版传媒有限公司出版发行。

中国钢结构协会
2024 年 10 月 25 日

前 言

根据《关于发布中国钢结构协会 2020 年第三批团体标准编制计划的通知》，标准编制组经广泛调查研究，认真总结工程实践经验，参考有关国家标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准的主要内容是：1. 总则；2. 术语和符号；3. 基本规定；4. 基础检测与评估；5. 地基、基础及结构复核；6. 纠倾；7. 基础加固方法；8. 裂缝与防水修复；9. 事故预防与补救；10. 检验与验收；11. 监测及有关附录。

本标准由中国钢结构协会负责管理，由湖南科技大学和瑞风能源（武汉）工程技术有限公司负责具体技术内容的解释。请各使用单位在执行本标准过程中，结合工程实践，注意总结经验，随时将有关意见和建议寄交《陆上风电机组基础加固技术及施工验收标准》管理组（地址 1：湖南省湘潭市湖南科技大学土木工程学院，邮编：411201；或地址 2：湖北省武汉市东湖高新区高新大道 999 号未来科技城 B4 栋，邮编：430206）。

本标准主编单位：湖南科技大学

瑞风能源（武汉）工程技术有限公司

本标准参编单位：同济大学建筑设计研究院（集团）

有限公司

河海大学

重庆大学

金风科技股份有限公司

北京天杉高科风电装备有限责任公司

湖南兴蓝风电有限公司

龙源（北京）新能源工程设计研究院
有限公司

中国能源建设集团广西电力设计研究
院有限公司

中国电建集团江西省电力设计院有限
公司

国家电投集团江西电力有限公司
卡本科技集团股份有限公司

北京安泰得建筑技术有限公司

诺泰集团有限公司（NAUTEC
GROUP PTE. LTD.）

福漫（上海）贸易有限公司

湖南纳业工程技术有限公司

本标准主要起草人员： 吕伟荣 张艳江 王宇航 周继凯
黄冬平 张紫平 丛 欧 李光辉
胡玉贵 吕祥云 程良超 张家志
卢倍嵘 邓 然 李红有 华锡江
刘忠德 刘金虎 戚菁菁 曹恩志
刘帅栋 常现杰 刘言初 谢国胜
税鸿宇 黄海林 林成欢 李琦琦
姚 帅 陈彬毅 薛雪雪 卜岸辉
王 猛

本标准主要审查人员： 舒兴平 王振宇 胡永柱 邢占清
宁华晚 吴剑剑 何 杰

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	8
4	基础检测与评估	10
4.1	一般规定	10
4.2	检测与评估	11
4.3	其他检测	13
5	地基、基础及结构复核	14
5.1	一般规定	14
5.2	地基及基础复核	14
5.3	基础与塔架连接复核	14
5.4	其他复核	20
6	纠倾	21
6.1	一般规定	21
6.2	塔架顶升纠倾	22
7	基础加固方法	26
7.1	一般规定	26
7.2	灌浆加固法	27
7.3	栓钉加固法	29
7.4	增大截面加固法	31
7.5	预应力加固法	32
7.6	粘贴钢板加固法	34
7.7	置换加固法	36

8	裂缝与防水修复	38
8.1	一般规定	38
8.2	基础裂缝修复技术	38
8.3	基础及部件密封防水修复技术	40
9	事故预防与补救	43
9.1	一般规定	43
9.2	塔架倾斜引起事故的预防与补救	43
9.3	基坑开挖引起事故的预防与补救	44
9.4	地下水及地表水引起事故的预防与补救	45
9.5	其他因素引起事故的预防与补救	46
10	检验与验收	47
10.1	一般规定	47
10.2	混凝土工程	49
10.3	钢筋及栓钉工程	50
10.4	预应力混凝土工程	54
11	监测	55
附录 A	风电机组基础锚栓连接计算—Petersen 算法	58
附录 B	风电机组基础防水材料试验方法	61
附录 C	基础加固施工质量验收记录	62
附录 D	钢绞线工程质量现场检验方法与评定	65
附录 E	风电机组基础监测记录	68
	本标准用词说明	71
	引用标准名录	72
	附：条文说明	73

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Requirements	8
4	Foundation Testing and Evaluation	10
4.1	General Requirements	10
4.2	Testing and Evaluation	11
4.3	Other Testings	13
5	Safety Check for Soil, Foundation and Structure	14
5.1	General Requirements	14
5.2	Soil and Foundation Safety Check	14
5.3	Check of Connection Between Foundation and Tower	14
5.4	Other Safety Checks	20
6	Tilt Rectifying	21
6.1	General Requirements	21
6.2	Tower Jacking and Tilt Correction	22
7	Foundation Strengthening Method	26
7.1	General Requirements	26
7.2	Structure Member Strengthening with Grouting	27
7.3	Structure Member Strengthening with Stud Connector	29
7.4	Structure Member Strengthening with Increasing Section Area	31
7.5	Structure Member Strengthening with Applied Prestressing	32
7.6	Structure Member Strengthening with Bonded Steel Plate	34

7.7	Structure Member Strengthening with Displacement	36
8	Crack and Waterproofing Repair	38
8.1	General Requirements	38
8.2	Foundation Crack Repair Technology	38
8.3	Foundation and Component with Sealing Waterproof Repair Technology	40
9	Accident Prevention and Remediation	43
9.1	General Requirements	43
9.2	Prevention and Remediation of Accidents Caused by Tower Tilt Rectifying	43
9.3	Prevention and Remediation of Accidents Caused by Foundation Pit Excavation	44
9.4	Prevention and Remediation of Accidents Caused by Groundwater and Surface Water	45
9.5	Prevention and Remediation of Accidents Caused by Other Factors	46
10	Inspection and Acceptance	47
10.1	General Requirements	47
10.2	Concrete	49
10.3	Rebar and Stud	50
10.4	Prestressed Concrete	54
11	Monitoring	55
Appendix A	Strength Analysis of Wind Turbine Foundation Anchor Bolts-Petersen Algorithm	58
Appendix B	Test Method for Waterproof Materials of Wind Turbine Foundation	61
Appendix C	Quality Acceptance Record of Foundation Reinforcement Construction	62
Appendix D	In-Situ Quality Test Methods and Acceptance for Steel Strand Engineering	65

Appendix E Monitoring Record of Wind Turbine	
Foundation	68
Explanation of Wording in This Standard	71
List of Quoted Standards	72
Addition: Explanation of Provisions	73

国家标准

1 总 则

1.0.1 为了在陆上风电机组基础加固的设计、施工和质量检验中贯彻执行国家的技术经济政策，做到安全适用、技术先进、经济合理，确保质量，环境友好，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于陆上风电机组基础的加固设计、施工和质量检验。

1.0.3 陆上风电机组基础加固设计、施工和质量检验除应执行本标准外，尚应符合国家及行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 基础环基础 embedded ring-foundation

塔架与基础采用基础环进行连接的风电机组基础。

2.1.2 锚栓基础 anchor cage foundation

塔架与基础采用锚笼环进行连接的风电机组基础。

2.1.3 塔架连接结构 tower connecting structure

风电机组基础与上部塔架之间的连接结构，常见连接结构形式有基础环及锚笼环。

2.1.4 基础加固 foundation reinforcement

为满足风电机组基础使用功能和耐久性要求，对风电机组基础采取加固技术措施的总称。

2.1.5 基础环水平度 embedded ring levelness

基础环上法兰或上锚板平面在机组停机状态下的水平度偏差值。

2.1.6 动态竖向位移峰峰差 peak-to-peak value of dynamic vertical displacement

对风力发电机组基础环上法兰或上锚板某测点在启机、运行、偏航及停机等工况下一段时间内监测得到的动态竖向位移信号中最大值与最小值的差值。

2.1.7 基频 fundamental frequency

风力发电机组塔架的第一阶固有频率。

2.1.8 纠倾 tilt rectifying

为纠正风电机组塔架倾斜，使之满足使用要求而采取的纠倾技术措施的总称。

2.1.9 灌浆加固 grouting reinforcement

为修复基础混凝土内的空腔、裂缝等缺陷，使之满足使用要求而采取灌注浆液，达到渗透粘结、充填、固结等目的的技术措施总称。

2.1.10 预应力加固 strengthening with applied prestressing

通过施加预应力，使原结构、构件的受力得到改善或调整的一种加固法。

2.1.11 栓钉加固 strengthening with applied stud connector

通过在基础环上焊接栓钉连接件，使原结构、构件的受力得到改善或调整的一种加固法。

2.1.12 粘贴钢板加固 strengthening with bonded steel plate

通过在基础上粘贴钢板，使原结构、构件的受力得到改善或调整的一种加固法。

2.1.13 增大截面加固 strengthening with sectional area

增大原构件截面面积并增配钢筋，以提高其承载力和刚度的一种加固法。

2.1.14 置换加固 strengthening with concrete replacement

通过清除存在严重破损或质量问题的混凝土结构层，用满足设计要求的新材料重新填充的一种加固法。

2.2 符 号

2.2.1 作用和作用效应

$F_{z,k}$ ——正常运行工况标准组合下，上部结构传至基础顶面竖向力；

$M_{xy,k}$ ——正常运行工况标准组合下，上部结构传至基础顶面力矩；

N ——锚栓受拉承载力设计值；

N_d ——锚栓预拉力设计值；

N_k ——锚栓预拉力标准值；

M_s ——上锚板单位长度悬臂最大弯矩；

W_s ——上锚板计算单元截面模量；

- f_{zs} ——上锚板弯曲应力；
 F_{vs} ——上锚板计算单元最大剪力；
 τ_{ss} ——上锚板计算单元最大剪应力；
 f_x ——下锚板迎风侧最大压应力；
 p_x ——下锚板均布线荷载；
 M_x ——下锚板最大弯矩；
 W_x ——下锚板跨中截面抵抗矩；
 f_{zx} ——下锚板弯曲应力；
 F_{vx} ——下锚板计算单元最大剪力；
 τ_{sx} ——下锚板计算单元最大剪应力；
 F_z ——极端荷载效应基本组合下，上部结构传至基础顶面竖向力；
 M_{xy} ——极端荷载效应基本组合下，上部结构传至基础顶面力矩；
 G_k ——荷载标准组合下基础自重及土重标准值；
 F_{lxc} ——单个计算单元受到的最大冲切力；
 N_a ——顶升支承点千斤顶的工作荷载设计值；
 P_{max} ——基底边缘最大反力；
 σ ——正应力设计值；
 σ_v ——折算应力设计值；
 σ_{tk} ——等效截面边缘最大拉应力；
 σ_p ——预应力对混凝土产生的压应力；
 τ ——剪应力设计值；
 Q ——相应于作用的标准组合时，塔架总荷载；
 N_v^c ——单个栓钉连接件的受剪承载力设计值；
 p_z ——迎风侧基础悬挑板中心位置自重压力；
 M_R ——截面弯矩；
 P_0 ——预应力钢绞线的预拉力。

2.2.2 材料性能

- f ——钢材的强度设计值；

- f_v ——钢材的抗剪强度设计值；
 f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值；
 $R_{p0.2}$ ——锚栓规定非比例延伸 0.2% 的应力；
 R_m ——锚栓抗拉强度；
 f_{cd} ——高强灌浆料的抗压强度设计值；
 σ_m ——灌浆料所受平均压应力；
 f_{ck} ——高强灌浆料的轴心抗压强度标准值；
 f_{eck} ——高强灌浆料的标准抗压强度值；
 $f_{cu,k}$ ——立方体抗压强度标准值；
 f_{yv} ——间接钢筋的抗拉强度设计值；
 E_c ——混凝土的弹性模量；
 f_u ——圆柱头焊钉极限抗拉强度设计值。

2.2.3 几何参数

- t ——塔架钢板厚度；
 d_w ——内外圈锚栓分度圆直径平均值；
 A_f ——与高强灌浆层上表面接触的法兰或上锚板净截面面积；
 n ——锚栓总根数；
 A_{sp} ——锚栓应力截面积；
 A_{sch} ——根据锚栓公称直径计算出的截面积；
 t_s ——上锚板厚度；
 l_0 ——上锚板每个区格简化为两端悬臂， l_0 为悬臂长度；
 A_{fx} ——下锚板底部净截面积；
 d_x ——下锚板宽度；
 l_x ——下锚板外圈环向螺栓间距；
 t_x ——下锚板厚度；
 A_{ln} ——混凝土局部受压净面积；对后张法构件，应在混凝土局部受压面积中扣除孔道、凹槽部分的面积；
 ρ_v ——间接钢筋的体积配筋率；
 A_x ——单个计算单元的平均冲切面积；

- a ——单个计算单元的平均冲切宽度；
 h_0 ——截面的有效高度；
 D_0 ——锚板中心直径；
 N_i 、 L_i ——各顶升点所需的顶升力及其力臂；
 G_j 、 x_j ——塔架各段自重的标准组合荷载及质心的偏移量；
 n_d ——顶升点数；
 A_s ——圆柱头焊钉杆截面面积；
 A ——风电机组基础底面面积；
 r_1 ——风电机组基础底面半径；
 r_2 ——风电机组基础台柱半径；
 a_c ——基底受压面宽度；
 I ——台柱横截面惯性矩；
 y_{\max} ——中心轴到截面形心的距离；
 Δd ——预应力钢绞线布置间距；
 D_2 ——风电机组基础台柱直径；
 S_A 、 S_B ——基础或构件倾斜方向上 A、B 两点的沉降量；
 L ——A、B 两点间的距离。

2.2.4 计算系数

- S_{cf} ——结构的应力集中系数，根据构件尺寸、外形等因素综合确定；
 D_d ——累积损伤；
 N_i ——荷载循环次数；
 $\Delta\sigma$ ——循环荷载的应力范围；
 $\Delta\sigma_D$ ——部件 S-N 曲线对应的疲劳极限；
 $\Delta\sigma'_D$ ——板厚大于 25mm 对接焊缝的疲劳极限；
 N_D ——部件 S-N 曲线对应的荷载循环次数；
 γ_N ——疲劳计算采用的材料分项系数；
 m ——S-N 曲线斜率的倒数；
 γ_s ——锚栓的材料系数；
 γ_0 ——结构重要性系数；

- γ_p ——预应力分项系数；
- γ_m ——高强灌浆料的材料系数；
- p ——螺栓分布系数；
- β_c ——混凝土强度影响系数；
- β_l ——混凝土局部受压时的强度提高系数；
- α ——间接钢筋对混凝土约束的折减系数；
- β_{cor} ——配置间接钢筋的局部受压承载力提高系数；
- β_{hp} ——受冲切承载力截面高度影响系数；
- K ——安全系数。

3 基本规定

3.0.1 风电机组基础加固，应根据加固目的和要求取得相关资料后，确定加固方案，并进行专业设计与施工。

3.0.2 风电机组基础加固前，应对风电机组基础现状进行检测，并根据需要对塔架结构现状进行检测。

3.0.3 风电机组基础加固设计与施工前，应收集下列资料：

1 场地岩土工程勘察资料。若资料缺失或不完整，无法满足加固设计要求时，应重新勘察或补充勘察；

2 风电机组基础设计资料和图纸、风电机组塔架图纸及相关主机技术资料、隐蔽工程施工记录、竣工图等。当搜集的资料不完整，不能满足加固设计要求时，应进行补充检验；

3 风电机组基础运行现状的检测资料，包括基础混凝土强度、裂缝、沉降、基础环水平度及动态竖向位移峰峰差、基础环穿孔钢筋位置及损伤情况、基础环下法兰周边混凝土损伤情况、基础混凝土压溃、基础密封防水、高强灌浆料性能及施工质量、基础连接件资料等；

4 风电机组基础施工质量检测资料，包括混凝土密实度、钢筋保护层厚度、表层钢筋直径及间距等；

5 风电机组自运行起，相关机组历史运行数据等资料；

6 其他相关资料。

3.0.4 风电机组基础加固设计，应符合下列要求：

1 对新增荷载，应对地基承载力及变形进行验算；

2 根据风电机组基础检测结果，进行基础抗弯、抗剪、抗滑稳定、抗倾覆稳定验算及抗冲切承载力验算；

3 对基础环、锚笼环等连接进行加固设计时，进行连接强度验算。

3.0.5 风电机组基础的加固设计，应按下列步骤进行：

1 根据加固目的，结合基础和上部结构现状，考虑上部结构、基础的共同作用，选择并制定加固基础或加强上部结构刚度或两者相结合的方案；

2 应从预期加固效果，施工难易程度，可行性和安全性，施工材料来源和运输条件等方面进行技术经济分析和比较，选择合理加固方案；

3 风电机组基础加固设计应与施工方法紧密结合，并采取有效措施，保证新旧材料连接可靠、协同工作。

3.0.6 风电机组基础加固使用的材料，其性能应符合国家现行有关标准对安全、可靠及耐久性设计的要求。

3.0.7 加固后的风电机组基础运行状态应进行定期检测或监测。

3.0.8 风电机组基础的检测、加固设计和施工，应由具有相应资质和业绩的单位承担。

4 基础检测与评估

4.1 一般规定

4.1.1 陆上风电机组基础检测应按下列步骤进行：

- 1 搜集检测所需的基本资料；
- 2 对搜集到的资料进行初步分析，确定现场检测的工作内容，制定现场检测方案；
- 3 结合风电机组现场情况，依据检测方案进行现场检测；
- 4 分析检测结果，提交检测报告和加固处理建议。

4.1.2 现场调查应包括下列内容：

- 1 风电机组基础使用历史和现状，包括与荷载相关的机组运行数据，基础的变形、裂缝等情况，以及历史检测和加固等情况；
- 2 风电机组基础周围地形、地质及排水等情况。

4.1.3 具有下列情况时，应适当增加风电机组基础的沉降观测次数：

- 1 风电机组基础中存在明显的地基沉降和基础开裂现象；
- 2 风电机组基础周围的地形、地质或围护结构因环境影响，以至于对现有风电机组基础结构产生较大影响的情况。

4.1.4 风电机组基础检测，应对下列内容进行分析评估：

- 1 风电机组基础地基承载力、稳定性及结构耐久性；
- 2 风电机组基础开裂、不均匀沉降及倾斜的原因；
- 3 风电机组因所处环境的变化、自然灾害等，对地基基础已造成的影响或仍然存在的影响；
- 4 风电机组地基基础加固的必要性，以及建议采用的加固方法；
- 5 风电机组塔架垂直度检测和加固的必要性。

4.1.5 检测报告应包含下列内容：

- 1 工程名称，地点，建设、勘察、设计、监理和施工单位，基础结构形式，塔架结构形式及高度，风电机组机型，改造加固的设计要求，检测目的、检测日期等；
- 2 现场的调查情况；
- 3 现场检测的方法、参考规范及标准、仪器设备、过程及结果；
- 4 计算分析与评估结果；
- 5 检测结论及建议。

4.2 检测与评估

4.2.1 基础的现场调查，应包括下列内容：

- 1 基础与风电机组塔架的连接形式；
- 2 基础的外观质量；
- 3 基础的类型、尺寸及埋置深度；
- 4 基础的开裂、腐蚀、压溃或损坏程度；
- 5 基础沉降及底部塔架倾斜情况；
- 6 塔架连接结构周边防水措施完好情况；
- 7 高强预应力锚栓的预拉力及张拉记录。

4.2.2 基础的检测可采用下列方法：

- 1 基础混凝土强度检测，宜采用无损检测法（回弹法或超声回弹综合法）或钻芯法；
- 2 基础表层钢筋直径、保护层厚度及间距检测，宜采用无损检测法检测，可通过局部凿开法予以验证；
- 3 基础环上法兰或基础上锚板水平度，宜采用水准仪进行静态水准测量；
- 4 基础沉降观测，宜采用水准仪进行持续观测，并与历史数据进行比对分析；
- 5 基础表面裂缝，宜采用裂缝综合测试仪检测或钻孔测深等方法检测；

6 桩身完整性宜采用低应变法或钻芯法检验，桩的长度宜采用钻孔取芯法或旁孔透射法检测；

7 基础混凝土浇筑密实性检测，宜采用地质雷达法或钻芯法；

8 下法兰磨损空腔大小的检测，宜采用钻芯法或测量动态竖向位移峰差予以确定。

表 4.2.2 基础检测项目与方法

序号	检测项目	建议检测方法或仪器
1	混凝土强度检测	回弹法、超声回弹综合法或钻芯法
2	表层钢筋直径、保护层厚度及间距检测	铁磁法或超声法，凿开验证
3	基础环上法兰或基础上锚板的水平度	水准测量
4	基础沉降观测	水准测量,历史数据对比分析
5	表面裂缝	裂缝综合测试仪检测或者钻孔测深
6	桩身完整性	低应变法或钻芯法
7	下法兰磨损空腔大小	钻芯法或测量动态竖向位移极值

4.2.3 基础的分析评估应包括下列内容：

1 结合基础环周边的脱开裂隙、混凝土压溃、冒浆以及基础环水平度等情况，对基础结构的风致疲劳损伤程度进行分析评估；

2 结合锚笼环周边的压溃、裂缝及锚栓预拉力下降等情况，对基础结构的损伤程度进行分析评估；

3 结合基础混凝土强度检测、面层钢筋保护层厚度及间距、混凝土浇筑密实度等检测结果，对基础结构混凝土施工质量进行评估；

4 对于桩基础，应结合桩身质量检验、场地岩土的工程性质、桩的施工工艺、沉降观测记录、载荷试验资料等，结合地区经验对桩的承载力进行分析和评估；

5 对基础结构进行承载力验算、基础局压承载力验算、基

础与塔架连接等验算，分析基础加固的必要性，提出基础加固的建议方法。

4.3 其他检测

4.3.1 其他检测应包括下列内容：

- 1 风电机组塔架的基频；
- 2 风电机组塔架垂直度。

4.3.2 其他检测可采用下列方法：

- 1 风电机组塔架的基频，可采用测振仪进行检测，并经主机厂家确认；
- 2 风电机组塔架垂直度，宜采用全站仪或倾角仪进行检测。

5 地基、基础及结构复核

5.1 一般规定

5.1.1 风电机组基础复核应符合下列规定：

1 根据检测结果对陆上风电机组的地基及基础应按荷载效应组合的要求进行复核，并应符合国家现行标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 及《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 等有关规定；

2 应进行基础与风电机组塔架连接的强度复核；

3 抗震验算应符合国家现行标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 及《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 等有关规定。

5.2 地基及基础复核

5.2.1 地基承载力复核、变形验算应满足《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 的有关规定。

5.2.2 风电机组基础抗弯、抗剪、抗冲切承载力、裂缝宽度等验算应满足《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 的有关规定。

5.3 基础与塔架连接复核

5.3.1 风电机组基础环应进行强度验算。

5.3.2 风电机组基础环应进行环焊缝疲劳强度验算，累积疲劳损伤 $D_d \leq 1$ 。

5.3.3 风电机组基础环法兰连接螺栓应进行强度验算。

5.3.4 风电机组基础法兰连接螺栓应进行疲劳强度验算，连接螺栓的累积疲劳损伤满足 $D_d \leq 1$ 。

5.3.5 风电机组基础环上法兰强度验算应满足强度验算要求。

5.3.6 针对加焊栓钉的基础环宜采用整体建模方式对栓钉的受力情况进行分析。

5.3.7 由于基础环下法兰附近存在应力集中，风电机组基础环周围混凝土局压验算宜结合有限元模型分析结果综合考虑。

5.3.8 风电机组基础锚栓复核应保证塔架底法兰与锚笼环上锚板结合面或塔架底法兰与混凝土结合面紧密接触，不允许结合面脱开。锚栓的预拉力应满足下列公式要求：

$$N_k \geq \frac{4 \times M_{xy,k}}{nd_w} - \frac{F_{z,k}}{n} \quad (5.3.8-1)$$

式中： $M_{xy,k}$ ——正常运行工况标准组合下，上部结构传至基础顶面力矩；

$F_{z,k}$ ——正常运行工况标准组合下，上部结构传至基础顶面竖向力，以向下为正；

n ——锚栓总根数；

d_w ——内外圈锚栓分度圆直径平均值；

N_k ——锚栓预拉力标准值。

5.3.9 风电机组基础预应力锚栓承受的拉力应符合下列公式要求：

$$\frac{4M_{xy}}{nd_w} - \frac{F_z}{n} \leq N \quad (5.3.9-1)$$

$$N = \min\left(\frac{R_{p0.2}A_{sch}}{1.1\gamma_s}, \frac{R_m A_{sp}}{1.25\gamma_s}\right) \quad (5.3.9-2)$$

式中： N ——锚栓受拉承载力设计值；

$R_{p0.2}$ ——锚栓规定非比例延伸 0.2% 的应力；

R_m ——锚栓抗拉强度；

A_{sp} ——锚栓应力截面面积；

A_{sch} ——根据锚栓公称直径计算出的截面面积；

γ_s ——锚栓的材料系数，可取 1.1；

F_z ——极端荷载效应基本组合下，上部结构传至基础顶面

竖向力；

M_{xy} ——极端荷载效应基本组合下，上部结构传至基础顶面力矩。

5.3.10 风电机组基础上锚板及计算单元如图 5.3.10 所示。上锚板应进行灌浆料强度局压验算、上锚板的抗弯、抗剪验算，上锚板尺寸应满足下列要求：

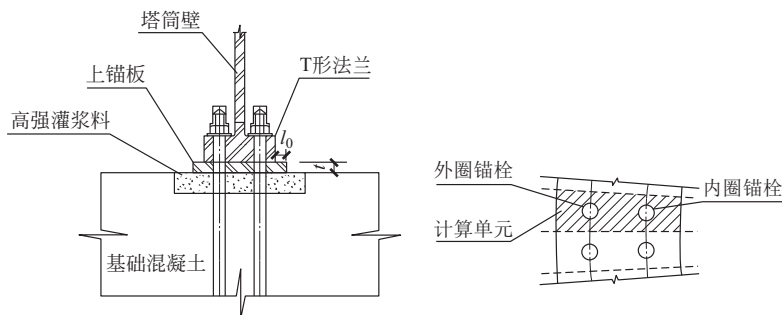


图 5.3.10 上锚板及计算单元

1 高强灌浆层的局压验算应符合下列公式要求：

$$\gamma_0 \left(\frac{4M_{xy}}{nd_w} + \frac{F_z}{n} + \gamma_p(1-p)N_k \right) \leq f_{cd}A_f/n \quad (5.3.10-1)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数，安全等级为一级， γ_0 取 1.1，安全等级为二级， γ_0 取 1.0；

p ——螺栓分布系数，按 Peterson 方法计算，一般介于 0.05~0.1，取值应按本标准附录 A 执行；

γ_p ——预应力分项系数，可取 1.2；

f_{cd} ——高强灌浆料的抗压强度设计值；

A_f ——与高强灌浆层上表面接触的法兰或上锚板净截面面积。

2 高强灌浆料的抗压强度设计值 f_{cd} 应按下列公式确定：

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_m \quad (5.3.10-2)$$

式中： f_{ck} ——高强灌浆料的轴心抗压强度标准值；

γ_m ——高强灌浆料的材料系数。

5.3.11 风电机组基础上锚板应进行抗弯、抗剪强度验算，上锚板尺寸应满足下列要求：

1 上锚板单位长度悬臂最大弯矩应按下列公式计算：

$$M_s = \frac{1}{2} \sigma_m l_0^2 \quad (5.3.11-1)$$

式中： l_0 ——上锚板每个区格简化为两端悬臂， l_0 为悬臂长度；

σ_m ——灌浆料所受平均压应力。

2 上锚板计算单元截面模量应按下列公式计算：

$$W_s = \frac{1}{6} t_s^2 \quad (5.3.11-2)$$

式中： t_s ——上锚板厚度。

3 上锚板弯曲应力应按下列公式计算：

$$f_{zs} = \frac{M_s}{W_s} \quad (5.3.11-3)$$

4 上锚板弯曲应力应满足下列公式要求：

$$f_{zs} \leq f \quad (5.3.11-4)$$

5 上锚板计算单元最大剪力应按下列公式计算：

$$F_{vs} = \sigma_m l_0 \quad (5.3.11-5)$$

6 上锚板计算单元最大剪应力应按下列公式计算：

$$\tau_{ss} = \frac{1.5 \times F_{vs}}{t_s} \quad (5.3.11-6)$$

7 上锚板计算单元最大剪应力应满足下列公式要求：

$$\tau_{ss} \leq f_v \quad (5.3.11-7)$$

8 钢材的设计用强度指标，应根据钢材牌号、厚度或直径按现行标准采用。

5.3.12 风电机组基础下锚板应进行抗弯、抗剪强度验算，下锚板尺寸应满足下列要求：

1 下锚板迎风侧最大压应力应按下列公式计算：

$$f_x = \frac{\gamma_p \times n \times (1+p) \times N_d}{A_{fx}} \quad (5.3.12-1)$$

式中： N_d ——锚栓预拉力设计值；

A_{fx} ——下锚板底部净截面面积。

2 下锚板均布线荷载应按下列公式计算：

$$p_x = f_x \times d_x \quad (5.3.12-2)$$

式中： f_x ——按照本标准公式 (5.3.12-1) 计算；

d_x ——下锚板宽度。

3 下锚板最大弯矩应按下列公式计算：

$$M_x = \frac{1}{12} p_x l_x^2 \quad (5.3.12-3)$$

式中： p_x ——按照本标准公式 (5.3.12-2) 计算；

l_x ——下锚板外圈环向螺栓间距。

4 下锚板跨中截面抵抗矩应按下列公式计算：

$$W_x = \frac{1}{6} d_x t_x^2 \quad (5.3.12-4)$$

式中： t_x ——下锚板厚度。

5 下锚板弯曲应力应按下列公式计算：

$$f_{zx} = \frac{M_x}{W_x} \quad (5.3.12-5)$$

6 下锚板弯曲应力应满足下列公式要求：

$$f_{zx} \leq f \quad (5.3.12-6)$$

7 下锚板计算单元最大剪力应按下列公式计算：

$$F_{vx} = p_x l_x / 2 \quad (5.3.12-7)$$

8 下锚板计算单元最大剪应力应按下列公式计算：

$$\tau_{sx} = \frac{1.5 \times F_{vx}}{d_x \times t_x} \quad (5.3.12-8)$$

式中： F_{vx} ——按照本标准公式 (5.3.12-7) 计算。

9 下锚板计算单元最大剪应力应满足下列公式要求：

$$\tau_{sx} \leq f_v \quad (5.3.12-9)$$

5.3.13 风电机组基础下锚板的局压验算应满足下列要求：

1 局部受压区的截面尺寸应符合下列公式要求：

$$f_x \leq 1.35\beta_c\beta_1f_cA_{ln} \quad (5.3.13-1)$$

式中： β_c ——混凝土强度影响系数：当混凝土强度等级不超过 C50 时， β_c 取 1.0；当混凝土强度等级为 C80 时， β_c 取 0.8；其间按线性内插法确定；

β_1 ——混凝土局部受压时的强度提高系数；

A_{ln} ——混凝土局部受压净面积；对后张法构件，应在混凝土局部受压面积中扣除孔道、凹槽部分的面积。

2 局部受压承载力应符合下列规定：

$$f_x \leq 0.9(\beta_c\beta_1f_c + 2\alpha\rho_v\beta_{cor}f_{yv})A_{ln} \quad (5.3.13-2)$$

式中： α ——间接钢筋对混凝土约束的折减系数；

ρ_v ——间接钢筋的体积配筋率；

β_{cor} ——配置间接钢筋的局部受压承载力提高系数；

f_{yv} ——间接钢筋的抗拉强度设计值。

5.3.14 下锚板周围混凝土的抗冲切验算应满足下列公式要求：

$$\gamma_0 F_{1xc} \leq 0.7\beta_{hp}f_t A_x \quad (5.3.14-1)$$

$$A_x = 2\sqrt{2}ah_0 = 2\sqrt{2} \frac{\pi D_0 h_0}{n} \quad (5.3.14-2)$$

$$\beta_{hp} = \sqrt[4]{\frac{800}{h_0}} \quad (5.3.14-3)$$

式中： β_{hp} ——受冲切承载力截面高度影响系数：当 h 不大于 800mm 时，取 β_{hp} 为 1.0；当 h 不小于 2000mm 时，取 β_{hp} 为 0.9，其间按线性内插法取用；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

A_x ——单个计算单元的平均冲切面积；

a ——单个计算单元的平均冲切宽度；

h_0 ——截面的有效高度；

F_{1xc} ——单个计算单元受到的最大冲切力；

D_0 ——锚板中心直径。

5.3.15 风电机组基础施工中下锚板处螺母漏装等缺陷问题，锚栓整体稳定性复核宜采用有限元法进行分析。

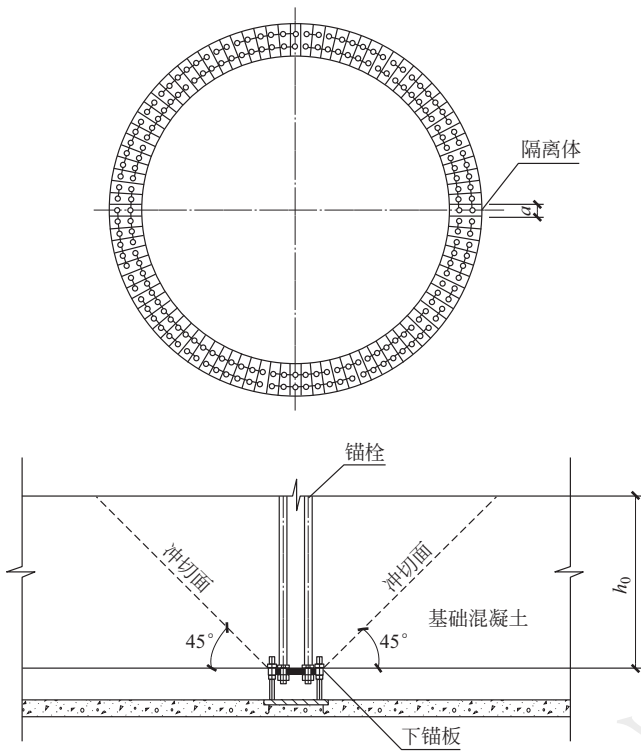


图 5.3.14 锚板冲切受力简图

5.4 其他复核

5.4.1 风电机组频率计算、机组及基础振动特性频谱分析、风电机组运行状态评估分析宜由主机厂家完成。

6 纠 倾

6.1 一般规定

6.1.1 风电机组塔架及基础倾斜的纠倾主要包括风电机组塔架倾斜纠倾和地基不均匀沉降引起的基础整体纠倾。

6.1.2 风电机组倾斜值应按照现行规范、标准进行控制。倾斜值超过现行规范、标准规定的允许值，且影响正常使用或安全的风电机组，应进行纠倾。

6.1.3 风电机组塔架倾斜纠倾主要采用塔架顶升法；风电机组基础整体纠倾可采用迫降法、阻沉法等；多种形式倾斜的纠倾可采用多种纠倾方法联合进行。

6.1.4 纠倾设计前，应进行现场踏勘、了解风电机组基础及地基现用情况、收集相关资料等前期准备工作，掌握下列相关资料和信息：

1 原设计和施工文件，原岩土工程勘察资料和补充勘察报告，气象资料，地震危险性评价资料；

2 检测报告；

3 使用情况；

4 电缆线、排水管等地下设施的分布状况、周围环境资料；

5 与纠倾工程有关的技术标准。

6.1.5 纠倾设计应包括下列内容：

倾斜风电机组概况、检测与检测结论、工程地质与水文地质条件、倾斜原因分析、纠倾目标控制值、纠倾方案比选、纠倾设计、结构加固设计、防复倾措施、纠倾施工要求、监测点布置及监测要求等。

6.1.6 纠倾设计应遵循下列原则：

1 防止结构和构件局部破坏、过量附加沉降和整体失稳；

- 2 确定抬升量和回倾速率的预警值；
 - 3 考虑纠倾施工对电缆线、泄水管等地下设施的影响；
 - 4 根据监测数据，及时调整相关的设计参数。
- 6.1.7 纠倾设计应按倾斜原因分析、纠倾方案比选、纠倾方法选定、结构加固设计、纠倾施工图设计、纠倾方案动态优化等步骤进行。
- 6.1.8 纠倾实施前的设计和施工方案应进行专项审查和危险性评估。
- 6.1.9 风电机组塔架倾斜纠倾工程在施工过程中和竣工后应进行塔架顶升安全和倾斜量监测。
- 6.1.10 迫降法、阻沉法等风电机组基础整体纠倾方法按现行行业标准《既有建筑地基基础加固技术规范》JGJ 123 的相关规定执行。

6.2 塔架顶升纠倾

- 6.2.1 对于因混凝土风致疲劳损伤导致的风电机组塔架倾斜问题，宜采用顶升纠倾。
- 6.2.2 顶升纠倾应在水平测量最低点处进行。顶升千斤顶宜布置在塔架内部基础环上法兰的下方。
- 6.2.3 现场通过基础水准测量结果确定风电机组倾斜方向，沿基础环水平度测量最低点及附近均匀布置顶升装置。

- 1 各项升装置的顶升力可按下式计算：

$$\sum N_i L_i = \sum G_j x_j \quad (6.2.3-1)$$

$$\frac{N_1}{L_1} = \frac{N_2}{L_2} = \frac{N_3}{L_3} = \dots = \frac{N_i}{L_i} \quad (6.2.3-2)$$

式中： N_i 、 L_i ——各项升点所需的顶升力及其力臂；

G_j 、 x_j ——塔架各段自重的标准组合荷载及质心的偏移量。

- 2 各项升点处千斤顶吨位及数量，可按下式估算：

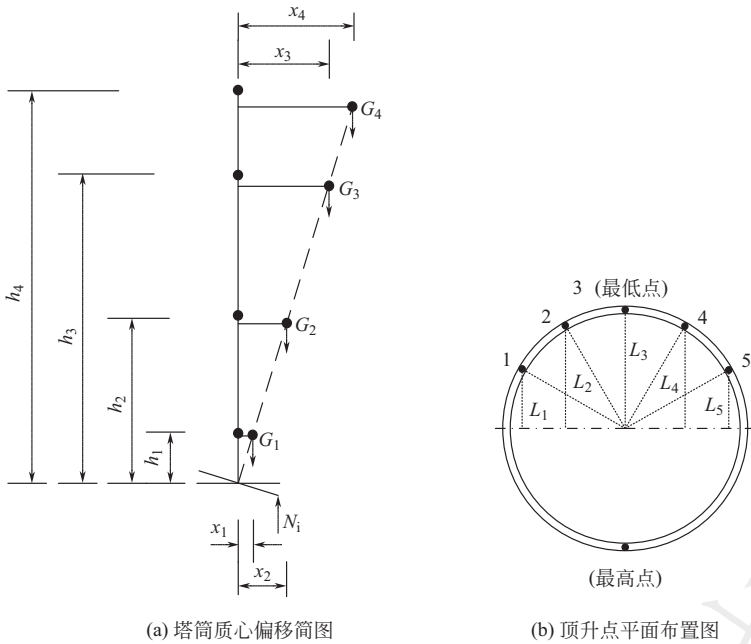


图 6.2.3 顶升力计算示意图

$$n_d \geq K \frac{Q}{N_a} \quad (6.2.3-3)$$

式中： n_d ——顶升点数（个）；

N_a ——顶升支承点千斤顶的工作荷载设计值（kN），可取千斤顶额定工作荷载的 0.8；

Q ——相应于作用的标准组合时，塔架总荷载（kN）；

K ——安全系数，可取 2.0。

6.2.4 顶升过程中，应通过百分表等位移测量设备精准控制顶升量，同时对顶升力最大处的基础环应变进行实时动态应变监控，以免造成法兰塑性变形。顶升点和测点可参考图 6.2.4 进行布置。

6.2.5 顶升纠倾的施工，应按下列步骤进行：

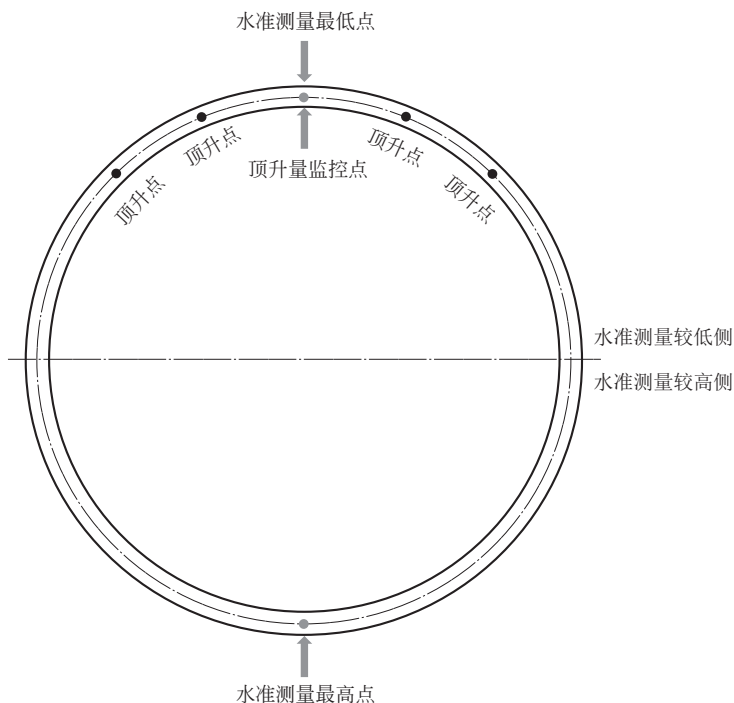


图 6.2.4 顶升纠倾示意图

1 利用高精度水准仪对基础环上法兰进行水平度测量，确定水准测量最高点和最低点，以此判断基础环倾斜方向；

2 根据测量结果，在最低处均匀布置顶升点，在最高处布置固定点，并在相应位置布置监控百分表以及应变片；

3 在水准测量最低点安装手动液压千斤顶、垫块及百分表；在高处安装固定装置以便对纠倾完成后的塔架进行固定；

4 手动液压千斤顶分 3 级~5 级加载，加载过程中密切关注百分表读数，每次加载顶升位移不宜超过 1mm；每级加载后，对基础环水平度进行测量，以观测纠倾效果，同时密切监控最大顶升力处法兰监控应变片的应变值是否超限；

5 当基础环水平度达到纠倾目标时，用多层钢垫板将各项

升点和固定点塞紧；同时用钢楔板将基础环周边出现的缝隙塞紧以防风电机组塔架再次倾斜；

6 再次复核基础环水平度和百分表读数，确认达到纠倾目标后，进行灌浆，待注浆强度达到设计要求后即可拆除顶升和固定装置。

6.2.6 顶升纠倾的施工，应符合下列规定：

1 在进行纠倾工作前，应尽量保持风电机组塔架原始状态，切勿对风电机组塔架周边进行破拆、堆载及钻孔等不必要的扰动，造成纠倾困难；纠倾前宜将塔架机头偏航至纠倾方向，依靠机头进行协助纠倾，同时应将风电机组停机。

2 纠倾过程中，当水准测量最低处千斤顶达到最大顶升力时，风电机组塔架会产生松动并复位，千斤顶油压随之下降明显，顶升力降低，此时可继续加载直至达到纠倾目标值。

3 纠倾过程中应进行实时水平度测量，并监控百分表读数及应变片监控结果，以保证纠倾过程平稳安全。

4 纠倾全过程中，千斤顶不拆除，以备再次顶升。

5 加载过程中，注意千斤顶油压变化情况。

6 千斤顶的选用应遵循吨位小且多的原则，不宜选用 200t 及以上的大吨位千斤顶，以避免对法兰造成破坏。

7 顶升纠倾过程中，可通过机头偏置或转动等上部机组操作，以达到纠倾设计目标。

6.2.7 顶升千斤顶的拆除应在基础环周边灌浆完成并达到设计强度后，且最近三天基础环水平度测量结果稳定，满足纠倾目标值后，方能拆除离场。

6.2.8 顶升纠倾完成后，针对实际的纠倾情况，是否达到加固设计要求，应做好相应记录；若达不到设计要求，应协同设计单位进行设计论证。

7 基础加固方法

7.1 一般规定

7.1.1 风电机组基础加固设计，应遵循新增截面与既有基础、新增桩基和原有桩基变形协调原则，进行地基与基础复核。新增截面与既有基础的连接应采取可靠的技术措施。

7.1.2 风电机组基础加固方法主要有灌浆加固法、增大截面加固法、预应力加固法、栓钉加固法、粘贴钢板加固法以及多种方法组合运用的综合加固法等。

1 灌浆加固法适用于填充基础环式风电机组基础中基础环与混凝土间磨损性空腔及缝隙；下锚板周边混凝土浇筑不密实缺陷等；

2 预应力加固法和增大截面加固法适用于基础混凝土强度较低，不满足承载能力及正常使用极限状态的情况；

3 预应力加固法和栓钉加固法适用于提高基础环与混凝土间抗剪能力的加固；

4 综合加固法适用于风电机组基础环与混凝土间磨损性空腔较大，塔筒倾斜严重，且基础混凝土强度较低，严重不满足承载能力及正常使用极限状态的情况。

7.1.3 既有风电机组基础加固设计，可按下列步骤进行：

1 根据加固的目的，结合基础和上部结构现状，考虑上部结构、基础和地基的共同作用，选择并制定加固基础、加强上部结构刚度和两者相结合的方案。

2 对选定的加固方案，应分别从预期加固效果，施工难易程度，施工可行性和安全性，施工材料来源和运输条件，以及对邻近风电机组和周围环境影响等多方面进行技术经济分析和比较，优化加固方案。

3 对选定的加固方案，应根据现场实际情况确定具体施工工艺参数和施工可行性。

7.1.4 既有风电机组基础加固使用的材料，应符合国家现行有关标准对耐久性设计的要求。

7.1.5 纠倾加固施工过程中应设置现场监测系统，监测基础环水平度，基础环竖向变形和顶升点处应变等。

7.1.6 既有风电机组基础的检测、加固设计和施工，应由具有相应资质的单位和有经验的专业人员承担。承担既有风电机组基础加固施工的工程管理和技术人员，应掌握所承担工程的基础加固技术与质量要求，严格进行质量控制和工程监测。当发现异常情况时，应及时分析原因并采取有效处理措施。

7.1.7 既有风电机组基础加固工程，应对风电机组基础在施工期间及使用期间进行沉降观测，直至沉降达到稳定为止。

7.1.8 对风电机组基础进行加固施工，宜选择在淡风季进行。

7.1.9 采用增大截面加固法时，混凝土强度等级应比原基础混凝土提高一级，且不应低于 C30；采用预应力加固法时，新增混凝土强度不应低于 C40。

7.2 灌浆加固法

7.2.1 本方法适用于风电机组基础中混凝土中存在不密实空腔或与基础环间存在明显脱开的加固。

7.2.2 风电机组基础加固选用的灌浆材料性能应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728 的相关规定。

7.2.3 针对基础内部磨损较大，存在较大不密实空腔分布的风电机组基础，可先采用水泥基灌浆料填充空腔，再采用水泥基或环氧基灌浆料压力灌浆至基础环壁冒浆，不同基体的灌浆材料选用比例依据现场实际情况确定。

7.2.4 钻孔应根据风电机组基础现场检测结果，在基础环周边均匀分布钻孔，其中环内部数量不少于 4 个，基础环外不少于 8

个，严重破损处可加钻 1 孔~2 孔。孔径不大于 50mm，钻孔深度应至下法兰顶面，且不宜超过下法兰底面。成孔设备可选用风动凿岩机或循环回转式钻机，当选择循环回转式钻机时，应配合钢筋定位仪进行表层钢筋定位，以尽可能避免钻到钢筋。

7.2.5 灌浆孔在灌浆前宜采用压力水进行裂隙冲洗，冲洗压力不大于 1MPa；冲洗至回水清时止，或不大于 20min。当选用环氧基灌浆时，宜对灌浆孔及裂隙进行风干。灌浆孔经冲洗风干后，应放入视频探头进行灌浆孔内部视频探测，掌握下法兰周边空腔的分布情况。

7.2.6 灌浆加固应满足下列要求：

- 1 风电机组基础灌浆应采用压力灌浆法；
- 2 灌浆孔宜单孔进行灌注；对相互串浆的灌浆孔，可并联灌注，并联孔数不应多于 3 个；
- 3 灌浆压力应根据要求和施工条件确定，但应严格控制灌浆压力和注入率，防止混凝土结构破坏；
- 4 灌浆孔封孔可采用导管注浆法；
- 5 灌浆施工应在基础水平度满足相关要求后进行。

7.2.7 灌注浆液达到凝固强度后，宜进行相应的灌注质量检测，检测方式包括钻芯法和有关的试验检测、物探检测等。

7.2.8 锚栓基础中因施工质量导致混凝土不密实的灌浆加固处理，可参考现行国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550 的相关要求执行。

7.2.9 锚板周边混凝土缺陷灌浆处理应满足下列要求：

- 1 用小孔径钻孔取芯机或凿岩机在锚栓基础台柱适当位置倾斜钻孔至锚板周边，钻孔数量根据锚栓松动情况确定，一般不宜少于 3 个；
- 2 用高压水将内部的粉尘及泥浆从钻孔和缝隙中洗出，冲洗压力不大于 1MPa，并将内部空腔及缝隙进行风干；
- 3 空腔采用水泥基或改性环氧树脂类材料进行灌浆处理，树脂应添加改性剂和填料，以增加树脂固化后的韧性、耐磨性等

性能，配比根据设计要求由现场实验确定；

4 灌浆材料的强度、流动度、最大骨料粒径等参数应符合现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB 50448 的相关规定。

7.3 栓钉加固法

7.3.1 本方法适用于风电机组基础混凝土强度偏低或有严重缺陷的局部加固。采用本方法加固时，基础混凝土现场检测强度等级不宜低于 C20。

7.3.2 基础环环壁栓钉连接件宜采用圆柱头焊钉，单个栓钉连接件的受剪承载力设计值应由下列公式确定：

$$N_v^c = 0.43A_s \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7A_s f_u \quad (7.3.2)$$

式中： E_c ——混凝土的弹性模量（N/mm²）；

A_s ——圆柱头焊钉钉杆截面面积（mm²）；

f_u ——圆柱头焊钉极限抗拉强度设计值（N/mm²），需满足现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的要求。

7.3.3 塔架连接结构栓钉连接件的布置应根据现场情况予以确定，宜错列布置，基础环内外可根据实际破拆高度予以区别，其中基础环外最上排栓钉不宜高于基础环上法兰连接焊缝以下 150mm，基础环内若布置栓钉时，最上排栓钉不宜高于基础环上法兰连接螺栓表面以下 350mm，且满足螺栓拆卸要求。

7.3.4 对经局部加高后的风电机组宜进行整机动力特性验算，以保证经加固后的整机频率满足整机动力参数设计要求。

7.3.5 塔架连接结构栓钉连接件的布置规格和数量，应以满足极限荷载及疲劳工况的验算要求来确定。

7.3.6 塔架连接结构栓钉连接件的构造要求：

1 栓钉连接件钉头下表面宜高出基础环内侧钢筋顶面 30mm；

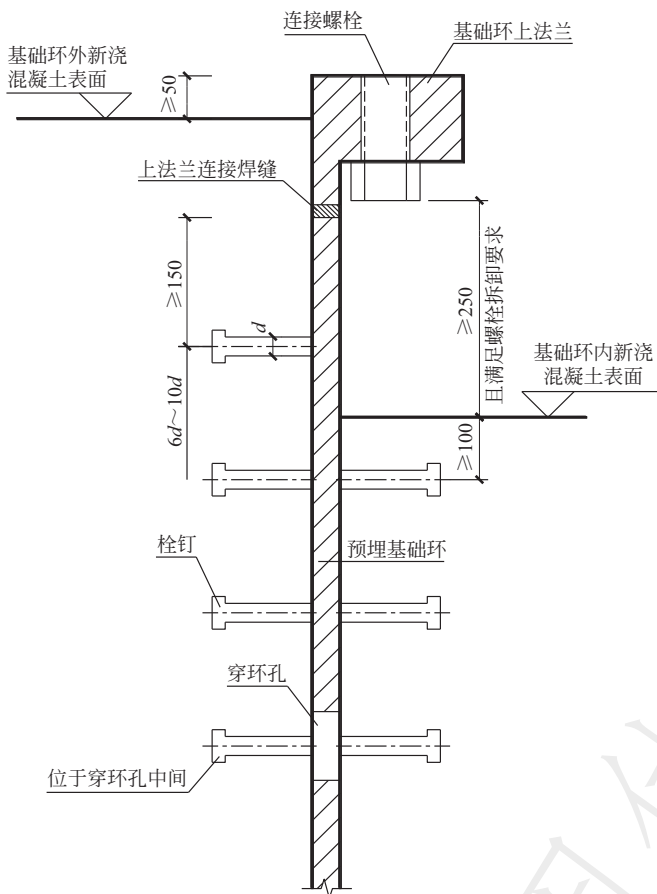


图 7.3.3 基础环栓钉布置示意图

- 2 连接件顶面的混凝土保护层厚度不应小于 100mm；
- 3 栓钉杆直径不应大于基础环板厚度的 1.5 倍，且不宜小于 22mm；
- 4 栓钉长度不应小于其杆径的 4 倍；
- 5 连接件沿基础环高度方向和环向间距不应小于杆径的 4 倍，最大间距不应大于 400mm。

7.3.7 塔架连接结构栓钉连接件加固用混凝土的相关要求：

1 加固用混凝土强度应高于原混凝土强度一个等级，且不宜低于 C40；

2 基础环外混凝土浇筑高度不宜高于基础环顶面，环内浇筑高度应距离基础环内连接螺栓底面 150mm 以上，且确保留出螺栓拆卸空间；

3 加固混凝土浇筑前应对原混凝土表面进行凿毛和植筋，浇筑前应对原混凝土表面进行清扫和湿水。

7.4 增大截面加固法

7.4.1 本方法适用于风电机组基础混凝土强度偏低或有严重缺陷的局部加固。

7.4.2 新增混凝土截面宽度及高度应根据基础承载力验算及现场检测情况予以综合确定，且新增高度应满足基础环或上锚板与上部塔架进行拆卸作业要求。

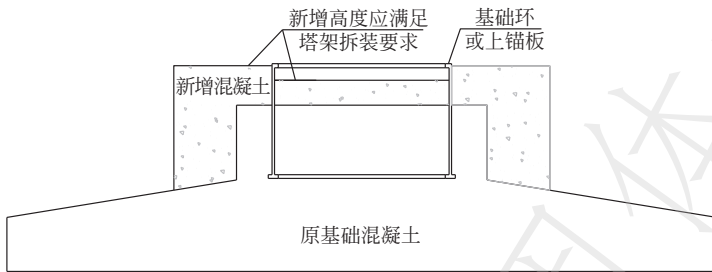


图 7.4.2 增大截面加固法示意

7.4.3 采用增大截面加固法时，原构件混凝土表面应经处理。设计文件应对所采用的界面处理方法和处理质量提出要求。一般情况下，除混凝土表面应予打毛外，尚应采取涂刷结构界面胶种植剪切销钉或增设剪力键等措施，以保证新旧混凝土共同工作。

7.4.4 采用增大截面加固法时，应根据现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 中扩展基础的有关规定进行新增截

面的抗弯、抗剪及冲切等承载力验算。

7.4.5 采用增大截面加固法时，应进行新增截面配筋的抗裂度、钢筋应力、裂缝宽度的验算，可按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 关于叠合式受弯构件的规定进行。

7.4.6 采用增大截面加固法时，可选用现浇细石混凝土、自密实混凝土或纤维混凝土浇筑。

7.4.7 加固用的钢筋，应采用热轧钢筋。受力钢筋直径不应小于 20mm；分布钢筋直径不应小于 16mm。

7.5 预应力加固法

7.5.1 本方法适用于风电机组基础混凝土强度偏低或有严重缺陷的局部加固。采用本方法加固时，基础混凝土现场检测强度等级不应低于 C20。

7.5.2 预应力钢绞线及锚具的选择应按现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 及《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的相关规定执行。

7.5.3 预应力钢绞线的预拉力计算应符合下列规定：

1 基底边缘最大反力 P_{\max} 计算按照《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 的相关规定执行；

2 迎风侧基础悬挑板中心位置自重压力可按式 (7.5.3-1) 计算：

$$p_z = \frac{G_k}{A} - \left(1 - \frac{3r_1 + r_2}{2a_c}\right) P_{\max} \quad (7.5.3-1)$$

式中： G_k ——荷载标准组合下基础自重及土重标准值；

A ——风电机组基础底面面积；

r_1 ——风电机组基础底面半径；

r_2 ——风电机组基础台柱半径；

a_c ——基底受压面宽度， $a_c = \tau r_1$ ， τ 的取值按照《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 的相关规定执行；

P_{\max} ——基底边缘最大反力。

3 截面弯矩可按式 (7.5.3-2) 计算:

$$M_R = \frac{p_z}{3(r_1 + r_2)} (2r_1^3 - 3r_1^2 r_2 + r_2^3) \quad (7.5.3-2)$$

4 等效截面边缘最大拉应力可按式 (7.5.3-3) 计算:

$$\sigma_{tk} = \frac{M_R}{I/y_{\max}} \quad (7.5.3-3)$$

式中: I ——台柱横截面惯性矩;

σ_{tk} ——等效截面边缘最大拉应力;

y_{\max} ——中心轴到截面形心的距离。

5 预应力损失应按《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 相关规定计算, 且有效预应力应大于等效截面边缘最大拉应力:

$$\sigma_p > \sigma_{tk} \quad (7.5.3-4)$$

6 每道预应力钢绞线的预拉力可按式 (7.5.3-5) 计算:

$$P_0 \geq \frac{\sigma_p \Delta d D_2}{2} \quad (7.5.3-5)$$

式中: Δd ——预应力钢绞线布置间距;

σ_p ——预应力对混凝土产生的压应力;

D_2 ——风电机组基础台柱直径。

7.5.4 预应力钢绞线受力面应平整, 如有凹凸不平的地方, 应进行修补、打磨。

7.5.5 混凝土强度较低时, 应定期对钢绞线预应力进行检测、补张拉, 检测频次不低于一年一次, 直到稳定为止。

7.5.6 张拉设备的选用、标定和维护应符合下列规定:

1 环向预应力钢绞线的张拉应选用专用张拉设备, 以满足钢绞线张拉和锚具的锚固要求;

2 纵向预应力锚栓或锚杆的张拉应选用配套张拉设备, 以满足锚栓或锚杆张拉和锚具的锚固要求;

3 张拉设备及仪表, 应定期维护和校验;

4 张拉设备应配套标定、配套使用;

5 张拉设备的标定期限不应超过半年，当在使用过程中张拉设备出现反常现象时或检修后，应重新标定；

6 张拉所用压力表的精度不宜低于 1.6 级，标定千斤顶用试验机或测力计的精度不应低于 $\pm 1\%$ ；标定时千斤顶活塞的运行方向，应与实际张拉工作状态一致。

7.5.7 预应力钢绞线、锚栓或锚杆的张拉控制应力应符合设计要求，超张拉系数按设计要求执行。

7.5.8 预应力钢绞线、锚栓或锚杆用应力控制法张拉时，应以伸长值进行校核。实际伸长值与计算伸长值之差应控制在 $\pm 6\%$ 以内，否则应暂停张拉，待查明原因并采取措施予以调整后再继续张拉。

7.5.9 预应力钢绞线、锚栓或锚杆张拉锚固后实际建立的预应力值与设计规定检验值的相对偏差不应超过 $\pm 6\%$ 。

7.5.10 预应力钢绞线、锚栓或锚杆的张力宜采用分步逐级加载的方式，当张拉力值达到设计要求时，停止加载，观测 0.5h~1.0h，若载荷无异常变化即可锁定。

7.6 粘贴钢板加固法

7.6.1 本方法适用于风电机组基础混凝土强度偏低或有严重缺陷的局部加固。采用本方法加固时，基础混凝土现场检测强度等级不应低于 C20，且混凝土表面的正拉粘结强度不应低于 1.5MPa。

7.6.2 粘贴钢板加固适用于出现蜂窝麻面、分层冷缝、径向裂缝等结构缺陷的风电机组基础。

7.6.3 粘贴钢板加固设计，应符合下列规定：

1 本方法不适用于素混凝土构件，包括纵向受力钢筋一侧配筋率小于 0.15% 的构件加固；

2 被加固的混凝土结构构件，其现场实测混凝土强度等级不应低于 C15，且混凝土表面的正拉粘结强度不得低于 1.5MPa；

3 粘贴钢板加固风电机组基础时，应将钢板受力方式设计

成仅承受轴向应力作用；

4 粘贴在混凝土构件表面上的钢板，其外表面应进行防锈蚀处理，表面防锈蚀材料对钢板及胶粘剂应无害；

5 采用本标准规定的胶粘剂粘贴钢板加固混凝土结构时，其长期使用的环境温度不应高于 60℃；处于特殊环境（如高湿、介质侵蚀等）的混凝土结构采用本方法加固时，除应按国家现行有关标准的规定采取相应的防护措施外，尚应采用耐环境因素作用的胶粘剂，并按专门的工艺要求进行粘贴。

7.6.4 粘贴钢板加固施工，应符合下列规定：

1 采用手工涂胶粘贴的钢板厚度不应大于 5mm；采用压力注胶粘结的钢板厚度不应大于 10mm，且应按外粘型钢加固法的焊接节点构造进行设计；

2 对基础进行加固时，应在延伸长度范围内设置垂直于钢板方向的钢压条进行锚固。钢压条一般不宜少于 3 条；钢压条应在延伸长度范围内均匀布置，且应在延伸长度的端部设置一道。钢压条的宽度不应小于加固钢板宽度的 3/5，钢压条的厚度不应小于加固钢板厚度的 1/2；

3 当粘贴不止一层钢板时，相邻两层钢板的截断位置应错开不小于 300mm，并应在截断处加设横向压条进行锚固；

4 粘贴钢板加固时，钢板的净间距 s 不应大于现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 规定的最大箍筋间距的 0.70 倍，不应大于梁高的 0.25 倍，即 $0.25h$ （图 7.6.4）。

7.6.5 加固用的钢板，其品种、质量和性能应符合下列规定：

1 应采用 Q235 级或 Q355 级钢材；

2 钢材质量应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定；

3 钢材的性能设计值应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定执行；

4 不得使用无出厂合格证、无中文标志或未经进场检验的钢材。

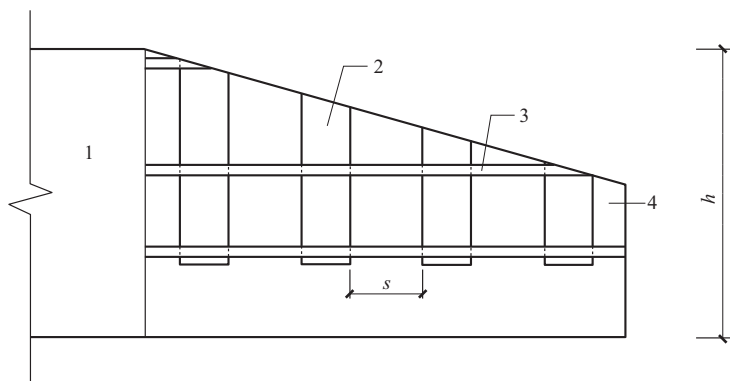


图 7.6.4 钢板净间距

1—台柱；2—加固钢板；3—钢压条；4—主梁

7.6.6 钢混凝土组合加固基础的质量检验，应符合下列规定：

- 1 钢板的品种、规格、质量、性能，必须符合设计要求；
- 2 粘钢用胶粘剂必须符合设计要求；
- 3 钢板粘贴外观质量应符合设计要求；
- 4 钢板粘贴允许偏差应符合设计要求。

7.7 置换加固法

7.7.1 本方法适用于基础混凝土、锚栓及灌浆层等有严重缺陷的局部加固。

7.7.2 有严重缺陷混凝土的置换加固应符合下列规定：

1 置换用混凝土的强度等级应比原构件混凝土提高一级，且不应低于 C40；

2 混凝土的置换深度应满足完全去除缺陷混凝土的厚度，且不应小于 100mm；

3 置换范围内的混凝土表面处理，应符合现行国家标准《建筑结构加固工程施工质量验收规范》GB 50550 的规定；对既有结构，旧混凝土表面尚应涂刷界面胶，以保证新旧混凝土的协同工作。

7.7.3 锚栓断裂的置换处理应符合下列规定：

1 根据断裂数量分析其余锚栓是否在受力允许范围之内，若其余锚栓仍满足受力要求，则无需置换处理；若其余锚栓有不满足受力要求的，则需根据机位地质条件考虑掏挖置换或其他处理方案。

2 掏挖置换时，不得损伤基础主要受力部位及主要受力钢筋，对非主要受力部位的损伤，应采取适当的修复措施。

3 基础底部巷道回填时，巷道顶部应采用微膨胀注浆料注浆，确保基础与地基土的传力。

7.7.4 锚栓基础高强灌浆层的置换处理应符合下列规定：

1 应根据现场破拆工作量的大小，划分成若干施工段，每个施工段宜由 180°对称的两个扇区组成；

2 施工前，应采用张拉设备对锚栓进行预紧力的放松，放松程度应根据计算及上锚板变形情况综合确定；锚栓放松顺序应均匀对称，依次进行；

3 破拆作业前，将作业扇区内锚栓预紧力全部放松；

4 应使用小锤、小铲及小型冲击钻等小型工具；破拆作业时，应注意对锚栓套管的保护，并制定套管破损处理方案；

5 灌浆前应进行作业扇区清理，施工缝处应凿毛；

6 扇区灌浆必须连续进行，应从一侧进行灌注，直到另一侧溢出为止，严禁从两侧同时灌浆；

7 整个施工过程中，应加强对上锚板变形的监控，每完成预定扇区的破拆和灌浆等工序后，应进行上锚板水平度的测量；

8 灌浆结束并养护达到设计强度后，将锚栓预紧力张拉至破拆作业前水平；待全部置换施工结束后，且灌浆层达到设计强度后，可将预紧力张拉至锚栓设计预拉力。

8 裂缝与防水修复

8.1 一般规定

8.1.1 风电机组基础混凝土裂缝的修复应依据裂缝成因及现场检测结果，综合评估后制定针对性的修复处理方案。

8.1.2 风电机组基础的密封防水失效修复可采取拆除置换的方式予以修复，施工过程中应注意对基础环的保护，防止对基础环漆膜造成破损。

8.2 基础裂缝修复技术

8.2.1 基础裂缝修复应符合下列规定：

1 基础裂缝修复方法应根据裂缝成因，可按照表 8.2.1 选用。结构性裂缝还应经过计算分析确定结构加固方案后选用；

表 8.2.1 裂缝修复方法及适用范围

裂缝修复方法	适用范围
表面封闭法	适用于宽度小于 0.15mm 的裂缝处理
自动低压渗注法	适用于数量较多、宽度在 0.1mm~1.5mm 间的裂缝处理
压力灌注法(适合深、细缝隙)	适用于较深、宽度 $\geq 0.15\text{mm}$ 的裂缝处理

2 当裂缝区存在钢筋锈蚀时，应先对钢筋进行除锈，再进行裂缝修复；

3 基础裂缝修复后，可进行表观处理；

4 裂缝胶和改性环氧基裂缝注浆料中不得含有挥发性溶剂和非反应性稀释剂；改性水泥基裂缝注浆料中氯离子含量不得大于胶凝材料质量的 0.05%。任何胶粘剂和注浆料不得对钢筋及金属锚固件和预埋件产生腐蚀作用；

5 裂缝修复材料的性能及要求应满足现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728 的相关规定。

8.2.2 基础裂缝修复应按下列规定进行操作：

1 对裂缝进行全面调查和编号，测量裂缝的走向、长度、宽度及深度，绘制裂缝分布图；

2 裂缝处理应根据不同部位、不同形态选择适当的修补方法、材料和顺序；

3 基础裂缝缝口表面处理，沿裂缝两侧各 100mm 范围内的原构件表面，用角磨机打磨平整，直至露出坚实的骨料新面，经检查工作表面平顺、干燥、无油污；

4 采用表面封闭法处理裂缝时，待胶粘剂完全固化后，再抹水泥砂浆或设计指定材料，作为防护层；

5 采用自动低压灌注法，宜采用定压注射器注胶法施工，压力应不小于 0.2MPa；注胶嘴间距为 100mm~300mm，应设在裂缝交叉点、裂缝较宽处和端部；裂缝采用封缝胶密封，封缝胶固化后，应进行压气实验，检查密封效果，观察注胶嘴之间的通气情况，若有不通气的注胶嘴，则应重新埋设注胶嘴，缩短间距；

6 采用压力灌注法，宜选用机控压力注浆法，注胶（浆）嘴间距为 300mm~500mm，应设在裂缝交叉点、裂缝较宽处和端部；裂缝采用封缝胶密封，封缝胶固化后，应进行压气实验，检查密封效果，观察注胶（浆）嘴之间的通气情况，若有不通气的注胶（浆）嘴，则应重新埋设注胶（浆）嘴，缩短间距；

7 采用自动低压灌注法和压力灌注法时，当上部注胶（浆）嘴或排气嘴有胶（浆）液流出时，应及时关闭上部注胶（浆）嘴，并维持压力 1min~2min。待缝内的胶（浆）液初凝时，应立即拆除注胶（浆）嘴和排气嘴，并用封缝胶将嘴口部位抹平、封闭。

8.2.3 裂缝修复的施工质量检验应符合下列规定：

1 结构性裂缝修复后，应进行检测以确定修补质量满足设

计要求；

2 裂缝表面封闭修补后，封缝胶和纤维布处理后的表面应平整，不出现空鼓和脱落，粘贴纤维布的宽度允许偏差为 $-3\text{mm}\sim+5\text{mm}$ ，长度允许偏差为 $-5\text{mm}\sim+10\text{mm}$ ，中心线允许偏差为 $-5\text{mm}\sim+5\text{mm}$ ；

3 裂缝胶注入裂缝，在 5°C 以上环境中固化期达到7d，可采用取芯法检验修补质量，芯样检验采用劈裂抗拉强度测定方法。检查数量：每100m裂缝抽测一组，每组芯样3个；检验结果符合下列条件之一时为符合设计要求：

(1) 沿裂缝方向施加劈力，其破坏应发生在混凝土部分（即内聚破坏）；

(2) 破坏虽有部分发生在界面上，但其破坏面积不大于破坏总面积的15%。

4 裂缝注胶（浆）后，在 5°C 以上环境中固化期达到7d，可采用超声波法进行检测，检查数量：抽测10%且不少于5条裂缝；检查方法：按现行团体标准《超声法检测混凝土缺陷规程》CECS 21的规定执行。

8.3 基础及部件密封防水修复技术

8.3.1 基础及部件密封防水方案设计应符合下列规定：

1 密封防水材料应能适应潮湿、水泡、室外暴露、冷热交替等使用环境的要求；

2 密封防水材料应具有良好的施工可操作性；

3 密封防水方案应能适应风电机组运行的要求。

8.3.2 基础及部件密封防水施工，应符合下列规定：

1 基础密封防水施工前，应对施工区域进行详细检查，并应采取措施消除基础结构破损对密封防水施工的影响；

2 应编制详细的施工技术方案；

3 在施工过程中，应根据现场温度严格按照密封防水材料的配合比进行材料配制。

8.3.3 风电机组基础应进行严格的密封防水处理，宜采用聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）材质的高性能防水材料或同等防水效果的材料进行防水处理，防水材料试验应按附录 B 的要求执行。

8.3.4 基础密封防水施工应符合下列规定：

1 防水施工环境要求：温度 $-5^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ ；湿度小于等于 95%；混凝土基层含水率小于等于 6%（按重量计算）；

2 防水施工前，应保证防水施工区域表面干净平整、无油污；施工过程中表面温度应高于 3°C 。

8.3.5 风电机组基础混凝土基层处理应符合下列规定：

1 混凝土基层有局部缺陷，应采用专用的基层修补砂浆进行修补；待修补材料干燥且达到施工要求的强度后，再进行后续的施工作业；

2 混凝土基层表面松散物应用铁刷刷除；基层凸出部分应用角磨机打磨平整，清理干净后，再进行后续的施工作业。

8.3.6 风电机组塔架钢构件表面基层处理应符合下列规定：

1 宜采用棉织物清理钢构件表面基层的浮浆、浮灰、油污等，做到基层干净、干燥；

2 钢构件表面基层有难于清洗的污物，宜采用不破坏漆面的砂纸进行打磨处理，并清洗干净。

8.3.7 风电机组基础防水施工应符合下列规定：

1 在防水区域钢构件表面应采用金属底漆进行涂刷，混凝土表面应采用混凝土专用底漆进行涂刷；

2 在基础环与混凝土表面交接处，应采用弹性密封胶带进行粘贴密封；

3 在防水区域表面滚涂一道防水涂料，铺设聚酯无纺布等防水加强层后，再滚涂第二道防水涂料。

8.3.8 风电机组基础防水施工应注意以下事项：

1 密封防水施工用所有原材料，应妥善保管，避免尘土、油污等污染；

- 2 防水施工应根据天气合理安排；
- 3 施工时应佩戴防护措施，避免涂刷材料飞溅到眼睛及皮肤。

9 事故预防与补救

9.1 一般规定

9.1.1 当风电机组基础因外部条件改变，可能引起地基基础变形，影响其正常使用或危及安全时，应遵循预防为主的原则，采取必要措施，确保风电机组的安全。

9.1.2 风电机组地基基础出现工程事故时的补救，应符合下列原则：

- 1 分析判断造成工程事故的原因；
- 2 分析判断事故对风电机组整体结构安全及正常使用的影响；
- 3 分析判断事故对周围构筑物、道路、管线的影响；
- 4 采取安全、快速、施工方便、经济的补救方案。

9.1.3 当风电机组地基存在液化土或软土地基时，风电机组基础因地震可能产生震陷时，应按现行国家标准《建筑抗震设计标准》GB/T 50011 的规定进行地基加固或重新选址。

9.1.4 对下列风电机组基础加固施工中可能存在的风险点，应进行预防与补救：

- 1 塔架纠倾施工中可能存在顶升力过大，造成基础环塑性变形、塔架抬升过大以致塔架反向倾斜等；
- 2 基坑开挖施工中可能存在边坡失稳、垮塌、坑内积水等；
- 3 地下水及地表水可能引起地基不均匀沉降、周边边坡失稳、垮塌等；
- 4 大风、冰雪、触电等其他因素可能引起塔架倾斜、倾覆、叶片落冰及触电伤人等。

9.2 塔架纠倾引起事故的预防与补救

9.2.1 应制定详细的塔架纠倾方案，明确纠倾目标位移量；现

场在抬升位移最大处设置百分表，根据纠倾方案监控竖向变形量，确保在安全范围内。

9.2.2 在基础环顶升最大变形处安装应变片或应变计，设置监控应变允许值，监控顶升过程中基础环抬升应变。

9.2.3 如遇监控位移及应变大于允许值时，应立即停止纠倾作业，并卸载，重新复测基础环水平度，分析问题原因，修订纠倾方案。

9.3 基坑开挖引起事故的预防与补救

9.3.1 基坑周边施工材料、设施或车辆荷载严禁超过设计要求的地面荷载限值。

9.3.2 当基坑开挖面上方的锚杆、土钉、支撑未达到设计要求时，严禁向下超挖土方。

9.3.3 采用锚杆或支撑的支护结构，在未达到设计规定的拆除条件时，严禁拆除锚杆或支撑。

9.3.4 基坑开挖和支护结构使用期内，应按下列要求对基坑进行维护：

1 雨期施工时，应在坑顶、坑底采取有效的减排水措施；对地势低洼的基坑，应考虑周边汇水区域地面径流向基坑汇水的影响；排水沟、集水井应采取防渗措施；

2 基坑周边地面宜作硬化或防渗处理；

3 基坑周边的施工用水应有排放措施，不得渗入土体内；

4 当坑体渗水、积水或有渗流时，应及时进行疏导、排泄和截断水源；

5 开挖至坑底后，应及时进行混凝土垫层和基础施工；

6 基础施工时，基础与基坑侧壁之间应及时回填。

9.3.5 支护结构或基坑周边环境出现规定的报警情况或其他险情时，应立即停止开挖，并根据危险产生的原因和可能进一步发展的破坏形式，采取控制或加固措施。危险消除后，方可继续开挖。必要时，应对危险部位采取基坑回填、地面卸土、临时支撑等应急措施。当危险由地下水管道渗漏、坑体渗水造成时，应

及时采取截断渗漏水源、疏排渗水等措施。

9.3.6 在基坑开挖过程与支护结构使用期内，可根据实际情况进行支护结构的水平位移监测和地面的沉降监测。

9.3.7 在支护结构施工、基坑开挖期间以及支护结构使用期内，应对支护结构和周边环境的状况随时进行巡查，现场巡查时应检查有无下列现象及其发展情况：

- 1 基坑外地面和道路开裂、沉陷；
- 2 基坑周边构筑物、围墙开裂、倾斜；
- 3 基坑周边水管漏水、破裂；
- 4 挡土构件表面开裂；
- 5 锚杆锚头松动，锚具夹片滑动，腰梁及支座变形，连接破损等；
- 6 支撑构件变形、开裂；
- 7 土钉墙土钉滑脱，土钉墙面层开裂和错动；
- 8 基坑侧壁和截水帷幕渗水、漏水、流砂等；
- 9 降水井抽水异常，基坑排水不畅通。

9.3.8 基坑监测数据、现场巡查结果应及时整理和反馈。当出现下列危险征兆时应立即报警：

- 1 支护结构位移达到设计规定的位移限值；
- 2 支护结构位移速率增长且不收敛；
- 3 支护结构构件的内力超过其设计值；
- 4 基坑周边构筑物、道路、地面的沉降达到设计规定的沉降、倾斜限值；基坑周边构筑物、道路、地面开裂；
- 5 支护结构构件出现影响整体结构安全性的损坏；
- 6 基坑出现局部坍塌；
- 7 开挖面出现隆起现象；
- 8 基坑出现流土、管涌现象。

9.4 地下水及地表水引起事故的预防与补救

9.4.1 雨季施工，应在基坑顶部和坑内沿基坑四角设置排水沟、

集水井，并及时将集水井内积水排出。

9.4.2 施工期间，应在基坑四角设置水位观察井。

9.4.3 施工期间，应对风电机组周边山体边坡和水沟进行勘查，对可能存在的危险点制定应急方案。

9.5 其他因素引起事故的预防与补救

9.5.1 施工作业尽量选择风力等级小、气温适宜和天气晴朗的季节。

9.5.2 加固施工方案中应明确施工作业允许的风力等级，超过该等级时，现场应立即停止作业。

9.5.3 施工人员进入现场前，应由建设单位组织用电安全教育及考核，并明确危险点，经考核合格后方可进入现场。

9.5.4 叶片下方应竖立警示标识，严禁站人和施工作业；如必须作业时，可向建设单位提交申请，将叶片移动至其他方位。

9.5.5 施工方案应制订安全应急预案。

10 检验与验收

10.1 一般规定

10.1.1 陆上风电机组基础加固工程，应按设计要求及现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202 的规定进行质量检验。

10.1.2 对于有特殊要求或国家标准没有具体要求的，可按设计要求或专门制定针对加固项目的检验标准及方法进行检验。

10.1.3 风电机组基础加固工程可根据加固设计要求划分为模板、钢筋、锚栓张拉、栓钉焊接、预应力、混凝土、注浆、浇筑混凝土结构等分项工程。各分项工程可根据与生产和施工方式相一致且便于控制施工质量的原则，按进场批次、工作班和施工段划分为若干检验批。加固施工质量验收记录应按附录 C 的要求执行。

10.1.4 风电机组基础加固工程的质量验收，应在钢筋、锚栓张拉、栓钉焊接、预应力、混凝土、注浆、浇筑混凝土结构等相关分项工程验收合格的基础上，进行质量控制资料检查、观感质量验收及新浇混凝土结构实体验收。

10.1.5 检验批抽样样本应随机抽取，并应满足分布均匀、具有代表性的要求。检验批的质量验收应包括实物检查和资料检查，应符合现行相关标准规定。

10.1.6 不合格检验批的处理应符合下列规定：

- 1 材料、构配件、器具及半成品检验批不合格时不得使用；
- 2 隐蔽工程施工前施工质量不合格的检验批，应返工、返修，并应重新验收；
- 3 隐蔽工程施工后施工质量不合格的检验批，应按相关标准的规定进行处理。

10.1.7 水泥、钢筋、锚栓、钢板、栓钉、焊条、预应力钢筋及灌浆料等加固材料进场需提供厂家出具的原材料质量合格证，产品出厂合格证，加固材料的进场复验应按现行相关标准的要求执行。

10.1.8 基础加固工程用的材料或产品，应按其工程用量一次进场到位。若加固用材料或产品的量较大，可分次进场，经设计单位和监理单位许可后，应逐次进行抽样复验。

10.1.9 对一次进场到位的材料或产品，应按下列规定进行见证抽样：

1 当本标准条文中对检查数量有具体规定时，应按本标准的规定执行，不得以任何产品标准的规定替代；

2 当本标准条文中未对检查数量作出规定，而国家现行有关标准已有具体规定时，可按该标准执行，但若是计数检验，应选用符合现行国家标准《计数抽样检验程序 第2部分：按极限质量 LQ 检索的孤立批检验抽样方案》GB/T 2828.2 规定的方案。

10.1.10 若所引用的标准仅对材料或产品出厂的检验数量作出规定，而未对进场复验的抽样数量作出规定时，应按下列情况确定复验抽样方案：

1 当一次进场到位的材料或产品数量大于该材料或产品出厂检验划分的批量时，应将进场的材料或产品数量按出厂检验批量划分为若干检验批，然后按出厂检验抽样方案或本标准有关的抽样规定执行；

2 当一次进场到位的材料或产品数量不大于该材料或产品出厂检验划分的批量时，应将进场的材料或产品视为一个检验批量，然后按出厂检验抽样方案或本标准有关的抽样规定执行；

3 对分次进场的材料或产品，除应逐次按上述规定进行抽样复验外，尚应由监理单位以事前不告知的方式进行复查或复验，且至少应进行一次；其抽样部位及数量应由监理总工程师决定；

4 对强制要求复验的项目，其每一检验批取得的试样，应分成两等份。其中一份供进场复验使用；另一份应封存保管至工程验收通过后（或保管至该产品失效期），以备有关各方对工程质量有异议时供仲裁检验使用。

10.1.11 在施工过程中，若发现某种材料或产品性能异常，监理单位应立即下通知停止使用，并及时进行见证抽样专项检验。专项检验每一项目的试件数量不应少于 15 个。

10.2 混凝土工程

10.2.1 混凝土强度应按现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107 的规定分批检验评定。划入同一检验批的混凝土，其施工持续时间不宜超过 3 个月。

1 检验评定混凝土强度时，应采用 28d 或设计规定龄期的标准养护试件；

2 试件成型方法及标准养护条件应符合现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 的规定。

10.2.2 当混凝土试件强度评定不合格时，应委托具有资质的检测机构按国家现行有关标准的规定对结构构件中的混凝土强度进行推定，并按《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 相关规定进行处理。

10.2.3 混凝土有耐久性指标要求时，应按现行行业标准《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193 的规定检验评定。

10.2.4 当结构加固工程选用聚合物混凝土、减缩混凝土、微膨胀混凝土、钢纤维混凝土、合成纤维混凝土或喷射混凝土时，应在施工前进行试配，经检验其性能符合设计要求后方可使用。

10.2.5 新浇混凝土结构的外观质量缺陷应由监理单位、施工单位等各方根据其对结构性能和使用功能影响的严重程度按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 相关规定确定。

10.2.6 新浇混凝土结构的外观质量不应有严重和一般缺陷。

10.2.7 应对新、旧基础结构连接构件进行检验，并提供隐蔽工程检验报告。

10.2.8 基础补强灌浆加固基础，宜在基础补强后，对加固后混凝土进行钻芯取样检验。

10.2.9 对涉及新浇筑混凝土结构安全的有代表性的部位应进行结构实体验收。结构实体验收应包括混凝土强度、钢筋保护层厚度、结构位置与尺寸偏差以及合同约定的项目，必要时可检验其他项目。

10.2.10 加固效果复验应符合下列规定：

1 灌浆效果的复验：取 3 处代表性位置钻孔，钻孔位置选择在灌浆孔旁 200mm 以内，芯样取出后目测观察浆液的填充程度，并拍照存档；

2 新旧混凝土交界面结合度复验：取 3 处代表性位置钻孔，芯样取出后以目测观察交界面的结合程度，并拍照存档；

3 新浇混凝土强度复验：预留标准试块进行压力试验，或采用回弹法对混凝土强度进行检验；

4 钢绞线张拉力复验：按照钢绞线张拉验收要求，采用配套的张拉设备对钢绞线张拉力进行抽检，钢绞线抽检根数不宜少于 3 根，且不少于钢绞线总数量的 1%。

10.3 钢筋及栓钉工程

10.3.1 钢筋进场时，应按国家现行标准的规定抽取试件作屈服强度、抗拉强度、伸长率、弯曲性能和重量偏差检验，检验结果应符合相应标准的规定。

10.3.2 钢筋应平直、无损伤，表面不得有裂纹、油污、颗粒状或片状老锈。

10.3.3 加固用钢筋，其品种、质量和性能应符合下列规定：

1 钢筋和钢绞线的质量应分别符合国家现行标准《钢筋混凝土用钢 第 1 部分：热轧光圆钢筋》GB 1499.1、《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2 和《无粘结预应力

钢绞线》JG 161 的规定；

2 钢筋性能的标准值和设计值应按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的规定采用；

3 不得使用无出厂合格证、无中文标志或未经进场检验的钢筋及再生钢筋。

10.3.4 当混凝土结构的后锚固件为植筋时，应使用热轧带肋钢筋，不得使用光圆钢筋。植筋用钢筋，其质量应符合本标准第 10.3.3 条的规定。

10.3.5 承重结构加固用的胶粘剂，包括粘贴钢板和纤维复合材料，以及种植钢筋和锚栓的用胶，其性能均应符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728 的规定。

10.3.6 承重结构加固工程中严禁使用不饱和聚酯树脂和醇酸树脂作为胶粘剂。

10.3.7 焊接材料的品种、规格、性能应符合国家现行标准的规定并满足设计要求。焊接材料进场时，应按国家现行标准的规定进行抽样，进行化学成分和力学性能检验，检验结果应符合国家现行标准的规定。

10.3.8 栓钉焊接施工，除应符合本标准第 7.3 节和现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的要求外，尚应符合下列要求：

1 焊接前栓钉不得带有油污，两端不得有锈蚀，如有油污或锈蚀应在施工前采用化学或机械方法进行清除；

2 瓷环应保持干燥状态，如受潮应在使用前经 $120^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 烘干 2h；

3 母材表面如存在水、氧化皮、锈蚀、非可焊涂层、油污、水泥灰渣等杂质，应清除干净。

10.3.9 栓钉焊接外观检查应符合下列要求：

1 栓钉焊接接头冷却到环境温度后可进行外观检查。外观检查应逐一进行，并应符合表 10.3.9-1 的要求。当采用电弧焊

方法焊接的栓钉焊接接头时，最小焊脚尺寸应符合表 10.3.9-2 的要求；

2 外观检查可采用目测，或借助放大镜进行。尺寸的测量应使用焊缝量规、卡具、钢尺等工具。

表 10.3.9-1 栓钉焊接接头外观检验合格标准

外观检验项目	合格标准	检验方法
焊缝外形尺寸	360°范围内焊缝饱满 拉弧式栓钉焊:焊缝高 $\geq 1\text{mm}$;焊缝宽 $\geq 0.5\text{mm}$ 电弧焊:最小焊脚尺寸应符合表 10.3.9-2 的规定	目测、钢尺、 焊缝量规
焊缝缺陷	无气孔、夹渣、裂纹等缺陷	目测、放大镜(5倍)
焊缝咬边	咬边深度 $\leq 0.5\text{mm}$,且最大长度不得大于1倍的栓钉直径	钢尺、焊缝量规
栓钉焊后高度	高度偏差 $\leq \pm 2\text{mm}$	钢尺
栓钉焊后倾斜角度	倾斜角度偏差 $\theta \leq 5^\circ$	钢尺、量角器

表 10.3.9-2 采用电弧焊方法的栓钉焊接接头最小焊脚尺寸

栓钉直径(mm)	角焊缝最小焊脚尺寸(mm)
10,13	6
16,19,22	8
25	10

10.3.10 栓钉焊接接头外观检验应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的规定。检查数量为检查批栓钉数量的 1%，且不应少于 10 个。

10.3.11 栓钉焊接接头外观质量检验合格后进行现场弯曲试验，焊缝和热影响区不得有肉眼可见的裂纹。现场弯曲试验应按下列规定进行：

1 现场弯曲试验应采用锤击打弯或套管弯曲在焊缝不完整

或焊缝尺寸较小的方向，沿原轴线弯曲 30° ，当焊接部位无裂纹时为合格；

2 每个检验批应由同一规格、同一焊接位置、同一焊接工艺（穿透焊或非穿透焊）的栓钉焊接接头组成。每个检验批栓钉接头数量不宜超过 5000 个；

3 抽样比例不小于已焊栓钉总数的 1%，且每检验批抽检数量应不少于 10 根；

4 抽样检查的结果当不合格率小于 2% 时，该批验收应定为合格；不合格率大于 5% 时，该批验收应定为不合格；不合格率为 2%~5% 时，应加倍检查。当所有抽检栓钉中不合格率不大于 3% 时，该批验收应定为合格；大于 3% 时，该批验收定为不合格。当批量验收不合格时，应对该批余下的栓钉全数进行检查。

10.3.12 检验出的不合格焊接部位应进行焊缝修补，焊缝修补应符合下列要求：

1 当栓钉焊缝的挤出焊脚不足 360° ，且缺损长度不超过栓钉直径的 $1/2$ 时，可采用电弧焊方法进行修补，修补焊缝应超过缺损两端 10mm，且焊脚尺寸不得小于 6mm；

2 当焊缝中存在明显的裂纹缺陷时，应在距母材表面 5mm 以上处铲除不合格栓钉，并将其表面打磨光洁、平整，当母材出现凹坑时，可用电弧焊方法填满修平，然后在原位置重新植焊，且焊接质量应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的有关规定；

3 对上述之外的其他不合格缺陷，可铲除不合格栓钉并按本条第 2 款的规定重新植焊；或直接采用电弧焊方法进行补焊，且焊接质量应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的有关规定。

10.3.13 施工前应由焊接技术负责人员根据焊接工艺评定结果编制焊接工艺文件，并向有关操作人员进行技术交底。

10.4 预应力混凝土工程

10.4.1 预应力钢绞线进场时，应按国家现行标准的规定抽取试件作抗拉强度、伸长率检验，其检验结果应符合相应标准的规定。

10.4.2 浇筑混凝土之前，应进行预应力隐蔽工程验收。隐蔽工程验收应包括下列主要内容：

- 1 预应力钢绞线的品种、规格、级别、数量和位置；
- 2 成孔管道的规格、数量、位置、形状、连接以及灌浆孔、排气兼泌水孔；
- 3 局部加强钢筋的牌号、规格、数量和位置；
- 4 预应力钢绞线锚具和连接器及锚垫板的品种、规格、数量和位置。

10.4.3 预应力钢绞线张拉机具及压力表应定期维护。张拉设备和压力表应配套标定和使用，标定期限不应超过半年。张拉工程质量现场检验应按照附录 D 的要求执行。

10.4.4 预应力钢绞线用锚具应和锚垫板、局部加强钢筋配套使用，锚具、夹具和连接器进场时，应按现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的相关规定对其性能进行检验，检验结果应符合该标准的规定。

10.4.5 预应力钢绞线张拉或放张前，应对构件混凝土强度进行检验。同条件养护的混凝土立方体试件抗压强度应符合设计要求，当设计无要求时应符合下列规定：

- 1 应达到配套锚固产品技术要求的混凝土最低强度且不应低于设计混凝土强度等级值的 75%；
- 2 对采用消除应力钢丝或钢绞线作为预应力钢绞线的先张法构件，不应低于 30MPa。

11 监 测

11.1 陆上风电机组地基基础加固施工时，对开挖深度超过 3m 的基坑，应制定专项方案对影响范围内的周边附属设施、地下光缆及电缆、开挖场地周边边坡的沉降和位移进行监测。

11.2 陆上风电机组地基基础加固施工时，当降水对周边环境存在影响时，应对有影响的边坡及陡崖等进行沉降和位移监测，对地下水位的变化进行监测。

11.3 采用增大截面法加固陆上风电机组基础时，应对结构新增荷载引起的基础沉降进行观测。

11.4 对采用增大截面法等加固的风电机组，现场宜对塔身结构自振频率进行监测，并与风电机组设计值进行对比。监测方案应满足下列规定：

- 1 测点布置应位于结构第一阶频率振动幅值较大处，至少布置 2 个成正交的水平向加速度传感器；

- 2 现场应采集自由振动衰减信号或不少于 30min 的自然白噪声信号；

- 3 传感器安装应与塔身结构保持良好接触，无相对振动；

- 4 监测周期可在加固工程开展前后一周内完成 2 次比对测试，其后可按每 6 个月测试一次，数据稳定 1 年后可结束监测，监测记录按附录 E 执行。

11.5 顶升纠倾施工前应制定详细的基础环位移分级顶升方案；施工过程中应对风电机组基础环竖向位移、水平度、基础混凝土裂缝以及千斤顶的油压或顶力进行实时监测。必要时，宜对直接作用点处基础环应变进行实时监测。监测方案应满足下列规定：

- 1 监测点的布置应选择可能的最大受力或变形处；

- 2 位移监控宜选用百分表或电子位移计；

3 顶升前，应对千斤顶油压表进行标定或设置压力传感器。

11.6 基础环顶升纠倾施工中，应对基础环一周至少 6 个均匀分布测点进行水准测量，并依据测量值计算基础环水平度，观测周期和时间应符合下列规定：

1 加固施工前后，应分别对基础环全部测点各进行 1 次水准测量；

2 加固施工过程中，应依据顶升方案的关键节点，增加全部测点的水准测量次数；

3 加固施工过程中，若基础环水平度出现较大变化，加固过程中应及时暂停纠倾作业，实施安全预案；

4 加固后运营阶段的水准测量次数，除有特殊要求外，可在第一年每 3 个月测量 1 次，第二年起每 6 个月观测 1 次，第三年后每年测量 1 次，至连续两次及以上测量的基础环水平度达到稳定状态为止。稳定状态标准为连续两次及以上基础环水平度小于 1.0mm，监测记录按本标准附录 E 执行；

5 加固后运营阶段的观测中，若发现基础环水平度出现较大变化，应及时进行现场调查，找出变化原因，采取相应措施。

11.7 加固施工前后及运营阶段的风电机组基础沉降应进行监测，监测的周期和时间应符合下列规定：

1 加固施工前后，应对风电机组原沉降观测点各进行 1 次沉降观测；

2 加固后运营阶段的观测次数，应视地基土类型和沉降速率大小确定。除有特殊要求外，可在第一年观测 3 次，第二年观测 2 次，第三年后每年观测 1 次，至沉降达到稳定状态或满足观测要求为止；

3 观测过程中，若发现大规模沉降、严重不均匀沉降或严重裂缝等，或出现基础附近地面荷载突然增减、基础四周大量积水、长时间连续降雨等情况，应提高观测频率，并制定和实施安全预案；

4 风电机组基础沉降达到稳定状态可由沉降量与时间关系

曲线判定。当最后 100d 的最大沉降速率小于 0.01mm/d ~ 0.04mm/d 时，可认为已达到稳定状态。对具体沉降观测项目，最大沉降速率的取值宜结合当地地基土的压缩性能来确定。

11.8 按下式验算基础的倾斜率：

$$\tan\theta = (s_A - s_B)/L \leq [\tan\theta] \quad (11.8)$$

式中： s_A 、 s_B ——基础倾斜方向上 A、B 两点的沉降量 (mm)；

L ——A、B 两点间的距离 (mm)；

$[\tan\theta]$ ——基础倾斜率允许值，按《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 的相关规定取值。

附录 A 风电机组基础锚栓连接计算— Petersen 算法

A.0.1 本方法适用于风电机组基础锚栓连接计算，Petersen 算法应按下列基本假定进行计算：

- 1 将 T 形法兰与垫圈、上锚板、灌浆层、锚栓影响区混凝土、下锚板均视为弹性体；
- 2 各弹性体之间变形协调。

A.0.2 Petersen 算法的示意图如图 A.0.2 所示：

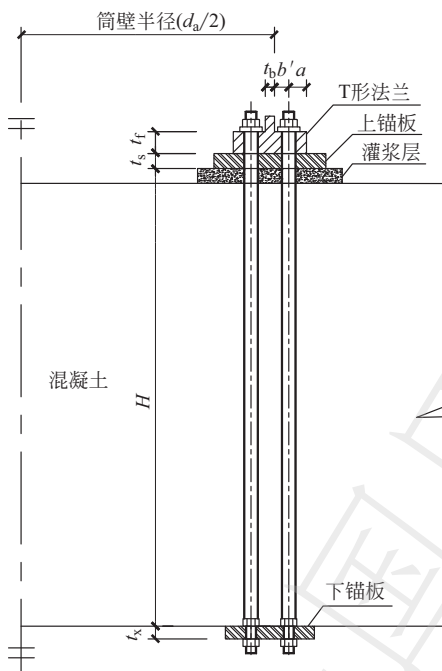


图 A.0.2 Petersen 算法计算示意图

A. 0. 3 Petersen 算法应符合下列计算公式要求：

塔筒截面模量：

$$W = \frac{\pi}{32} d_a^3 \left[1 - \left(\frac{d_a - 2t_b}{d_a} \right)^4 \right] \quad (\text{A. 0. 3-1})$$

区格宽度：

$$c = 2\pi \frac{d_a - t_b}{n} \quad (\text{A. 0. 3-2})$$

塔筒半拉力：

$$Z = \frac{M}{2W} t_b c \quad (\text{A. 0. 3-3})$$

法兰抗弯刚度：

$$EI = \frac{1}{12} E c t_f^3 \quad (\text{A. 0. 3-4})$$

锚栓总长度：

$$L_s = t_s + t_x + H + t_f + 2t_d \quad (\text{A. 0. 3-5})$$

锚栓抗拉刚度：

$$C_s = \frac{EA_{sch}}{L_s} \quad (\text{A. 0. 3-6})$$

法兰、锚栓影响区混凝土、垫圈、上锚板及下锚板连接总刚度：

$$C_d = 1 / \left(\frac{1}{C_{d1}} + \frac{2}{C_{d2}} + \frac{1}{C_{d3}} + \frac{1}{C_{d4}} + \frac{1}{C_{d5}} \right) \quad (\text{A. 0. 3-7})$$

总刚度：

$$C = C_d + C_s \quad (\text{A. 0. 3-8})$$

分布系数：

$$p = \frac{C_s}{C} \quad (\text{A. 0. 3-9})$$

$$q = \frac{C_d}{C} \quad (\text{A. 0. 3-10})$$

不考虑预拉时的锚栓拉力：

$$F = \alpha Z \quad (\text{A. 0. 3-11})$$

其中：

$$b = b' + \frac{t_b}{2} \quad (\text{A. 0. 3-12})$$

$$\gamma = \frac{a}{b} \quad (\text{A. 0. 3-13})$$

$$\delta = 2 \frac{Cab^2}{EI} \quad (\text{A. 0. 3-14})$$

$$\alpha = \frac{1/2 + (1 + \gamma/3)\gamma\delta}{1 + (1 + \gamma/3)\gamma\delta} \quad (\text{A. 0. 3-15})$$

式中： d_a ——外径；

t_b ——壁厚；

M ——法兰处弯矩标准值；

t_f ——法兰厚度；

t_s ——上锚板厚度；

t_x ——下锚板厚度；

H ——锚板净距；

t_d ——垫圈厚度；

A_{sch} ——根据锚栓公称直径计算出的截面积；

C_{d1} ——法兰刚度；

C_{d2} ——垫圈刚度；

C_{d3} ——上锚板刚度；

C_{d4} ——锚栓影响区混凝土刚度；

C_{d5} ——下锚板刚度；

b' ——锚栓壁距；

a ——锚栓中心到法兰内边缘的距离；

b ——锚栓中心到塔壁中心的距离。

附录 B 风电机组基础防水材料试验方法

B.0.1 聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）防水材料性能的相关试验方法参考《聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）防水涂料》JC/T 2251 的相关规定执行。

B.0.2 聚氨酯防水材料性能的相关试验方法参考《聚氨酯防水涂料》GB/T 19250 的相关规定执行。

B.0.3 丙烯酸类防水材料性能的相关试验方法参考《金属屋面丙烯酸高弹防水涂料》JG/T 375 的相关规定执行。

B.0.4 运用于风电机组基础防水的其他防水材料试验方法需结合现行相关标准的规定执行。

附录 C 基础加固施工质量验收记录

C.0.1 基础加固检验批质量验收可按表 C.0.1 记录。

表 C.0.1 检验批质量验收记录

工程名称		分项工程名称		验收部位	
施工单位		专业工长		项目经理	
分包单位		分包项目经理		施工班组长	
批号及批量				见证取样人员	
执行标准名称及编号					
检查项目	质量验收标准的规定 (条文号)	施工单位自查评定记录	监理(建设)单位验收记录		
主控项目	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
一般项目	1				
	2				
	3				
	4				
施工单位检查 评定结果	项目专业质量检查员				年 月 日
监理(建设) 单位验收结论	监理工程师(建设单位项目专业技术负责人)				年 月 日

C.0.2 基础加固分项工程质量验收可按表 C.0.2 记录。

表 C.0.2 分项工程质量验收记录

工程名称		基础类型		检验批数	
施工单位		项目经理		项目技术负责人	
分包单位		分包单位负责人		分包项目经理	
序号	检验批部位、区段	施工单位检查 评定结果	监理(建设) 单位验收结论		
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
检查 结论	项目专业技术负责人 年 月 日		验收 结论	监理工程师 (建设单位项目专业技术负责人) 年 月 日	

C.0.3 基础加固分部（子分部）工程质量验收可按表 C.0.3 记录。

表 C.0.3 分部（子分部）工程质量验收记录

工程名称		基础类型		验收部位	
施工单位		技术部门负责人		质量部门负责人	
分包单位		分包单位负责人		分包技术负责人	
序号	分项工程名称	检验批数	施工单位检查 评定结果		验收意见
1					
2					
3					
4					
5					
6					
质量控制资料					
安全或功能检测报告					
观感质量验收					
验收 单 位	分包单位	项目经理		年 月 日	
	施工单位	项目经理		年 月 日	
	勘察单位	项目负责人		年 月 日	
	设计单位	项目负责人		年 月 日	
	监理(建设) 单位	总监理工程师 (建设单位项目专业负责人)		年 月 日	

附录 D 钢绞线工程质量现场检验方法与评定

D.1 适用范围及应用条件

- D.1.1** 本方法适用于钢绞线锚固工程质量的现场检验。
- D.1.2** 钢绞线工程质量应按张拉力的现场抽样检验结果进行评定。
- D.1.3** 钢绞线张拉后应进行现场的张拉力抽检，满足设计要求方可予以验收。

D.2 抽检规则

- D.2.1** 钢绞线张拉力现场抽样检验时，应以同品种、同规格、同强度等级的钢绞线安装于同一风电机组基础为一检验批，并应从每一检验批中进行抽样检验。
- D.2.2** 钢绞线张拉力的抽检应按表 D.2.2 规定的抽样数量对该检验批的钢绞线进行检验。

表 D.2.2 钢绞线张拉力抽检表

项目	单台风电机组基础
按检验批钢绞线总数计算的最小抽样量	50%，且不少于 3 件

- D.2.3** 钢绞线张拉力的抽样检验，应符合下列规定：
- 1 钢绞线张拉力的抽样检验应在张拉完毕，封锚前进行；
 - 2 抽样检验过程中，针对不满足检验要求的钢绞线，应按照施工要求重新进行张拉操作，经检验合格后方可予以验收。

D.3 仪器设备要求

D.3.1 钢绞线张拉力现场检验用的加荷设备，宜采用专门的钢绞线张拉设备，应符合下列规定：

1 设备的加荷能力应比预计的检验荷载值至少大 20%，且不大于检验荷载的 2.5 倍，应能连续、平稳、速度可控地运行；

2 加载设备应能按照规定的速度加载，设备的液压加荷系统持荷时间不超过 5min 时，其降荷值不应大于 5%；

3 加载设备应能够保证所施加的拉伸荷载始终与钢绞线的轴线一致。

D.3.2 现场检验用的仪器设备应定期由法定计量检定机构进行检定。遇到下列情况之一时，还应重新检定：

1 读数出现异常；

2 拆卸检查或更换零部件后。

D.4 加载方式

D.4.1 钢绞线张拉力的加载方式可为连续加载或分级加载，可根据实际条件选用。

D.4.2 钢绞线张拉力检验时，荷载的施加应符合下列规定：

1 连续加载时，宜以均匀速率在 2min~3min 时间内加载至设定的检验荷载；

2 分级加载时，宜将设定的检验荷载均分为 3 级，逐级加载直至设定的检验荷载；

3 荷载检验值应取锚栓及钢绞线的设计张拉力。

D.5 检验结果评定

D.5.1 钢绞线张拉力检验的评定，应按下列规定进行：

1 一个检验批所抽取的钢绞线张拉力检验全部合格时，该检验批应评定为合格检验批；

2 一个检验批所抽取的钢绞线张拉力检验若有不合格项，

重新张拉操作后经抽检全部合格时，该检验批应评定为合格检验批。

D.5.2 钢绞线张拉力检验结果不满足第 D.5.1 条的规定时，应判定该检验批的钢绞线张拉力不合格，并应同加固设计单位、建设单位等根据检验结果，研究采取专项措施进行处理。

附录 E 风电机组基础监测记录

E.0.1 风电机组频率监测可按表 E.0.1 记录。

表 E.0.1 风电机组频率监测记录

监测单位名称：

监测人员：

工程名称		工程地点		
委托单位		监测机位		
监测单位		设计基频(Hz)		
采样波形	停机工况()；白噪声()	采样频率		
采样时长		分析方法		
采样仪器		传感器型号		
传感器编号	传感器安装位置	采样时间	频率值(Hz)	阻尼比
监测结论				

监测： 记录： 审核： 日期： 年 月 日

E.0.3 风电机组基础沉降监测可按表 E.0.3 记录。

表 E.0.3 风电机组基础沉降监测记录

监测单位名称：

监测人员：

工程名称				工程地点		
委托单位				监测机位		
监测单位				测量仪器		
试验数据						
测点 编号	第 次			第 次		
	年 月 日			年 月 日		
	相对高程 (m)	沉降量(mm)		相对高程 (m)	沉降量(mm)	
		本次	累计		本次	累计
测点布置示意图：						

监测： 记录： 审核： 日期： 年 月 日

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 标准中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《工程结构通用规范》 GB 55001
- 2 《钢结构通用规范》 GB 55006
- 3 《混凝土结构通用规范》 GB 55008
- 4 《既有建筑鉴定与加固通用规范》 GB 55021
- 5 《建筑地基基础设计规范》 GB 50007
- 6 《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》 NB/T 10311
- 7 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
- 8 《风电机组钢塔筒设计制造安装规范》 NB/T 10216
- 9 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 10 《风力发电机组 验收规范》 GB/T 20319
- 11 《高耸结构设计标准》 GB 50135
- 12 《既有建筑地基基础加固技术规范》 JGJ 123
- 13 《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》 GB 50728
- 14 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》 GB/T 10433
- 15 《混凝土结构加固设计规范》 GB 50367
- 16 《混凝土结构设计标准》 GB/T 50010
- 17 《预应力混凝土用钢绞线》 GB/T 5224
- 18 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》 GB/T 14370
- 19 《建筑结构加固工程施工质量验收规范》 GB 50550
- 20 《建筑抗震设计标准》 GB/T 50011
- 21 《建筑地基基础工程施工质量验收标准》 GB 50202
- 22 《混凝土耐久性检验评定标准》 JGJ/T 193
- 23 《钢结构工程施工质量验收标准》 GB 50205
- 24 《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》 JGJ 85
- 25 《Eurocode 2: Design of concrete structures》 BS EN 1992-1-1

团体标准

陆上风电机组基础加固技术及施工
验收标准

T/CSCS 061—2024

条文说明

中国团体标准

制定说明

《陆上风电机组基础加固技术及施工验收标准》T/CSCS 061—2024 经中国钢结构协会 2024 年 10 月 25 日以中钢构协〔2024〕37 号公告批准发布。

本标准制定过程中，编制组进行了广泛、深入的调查研究，总结了我国风电机组基础加固的实践经验，同时参考了国内先进技术标准，并征求了有关设计单位和科研单位的意见。

为便于广大管理、设计、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《陆上风电机组基础加固技术及施工验收标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	77
2	术语与符号	78
2.1	术语	78
3	基本规定	79
4	基础检测与评估	80
4.1	一般规定	80
4.2	检测与评估	81
5	地基、基础及结构复核	84
5.1	一般规定	84
5.3	基础与塔架连接复核	84
6	纠倾	87
6.1	一般规定	87
7	基础加固方法	88
7.1	一般规定	88
7.2	灌浆加固法	88
7.3	栓钉加固法	89
7.4	增大截面加固法	90
7.5	预应力加固法	91
7.6	粘贴钢板加固法	91
7.7	置换加固法	92
8	裂缝与防水修复	93
8.1	一般规定	93
8.3	基础及部件密封防水修复技术	93
9	事故预防与补救	94
9.1	一般规定	94

9.3	基坑开挖引起事故的预防与补救	94
9.5	其他因素引起事故的预防与补救	95
10	检验与验收	96
10.1	一般规定	96
10.2	混凝土工程	96
10.3	钢筋及栓钉工程	97
11	监测	98

1 总 则

1.0.1 根据现有成功加固案例的总结，本标准规定了陆上风电机组基础的加固设计原则及方法，但不涉及海上风电机组基础的相关内容，其加固设计、施工及质量检验可参照现行的其他标准要求。

1.0.2 本标准是针对陆上风电机组基础因勘察、设计、施工或使用不当，导致风电机组基础运行过程中出现损伤，影响机组发电量而需要对基础进行加固的情形。风致结构损伤可能导致基础出现混凝土的开裂、压溃及翻浆等现象，甚至导致基础塔架出现倾斜过大的情形。风电机组的技改或自然灾害的影响也会导致基础出现不同程度的损伤，影响风电机组基础的安全可靠运行，本标准针对风电机组基础出现的各种损伤，结合相关成功案例的实施，给出了主要的加固设计、施工和质量检验的相关要求。

1.0.3 陆上风电机组基础的设计复核可参照《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 等相关现行规范的要求执行，基础加固施工及质量检验可参照《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的相关要求执行。

1.0.4 本标准针对的主要是目前存量较大的基础环基础，其次是锚笼环基础。针对其他形式的风电机组基础的加固设计、施工和质量检验，可参考本标准的相关方法。

2 术语与符号

2.1 术 语

2.1.3 陆上风电机组基础的灌浆加固材料主要采用改性环氧基及水泥基材料，在实际使用过程中，灌浆是具有一定的压力的，参照《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》DL/T 5148 及《水电水利工程化学灌浆技术规范》DL/T 5406 里针对灌浆的说法，本标准针对灌浆或注浆等说法统一按照灌浆进行说明。

注浆和灌浆有区别，注浆需要的压力较大，往往适用于修补混凝土裂缝；灌浆需要的压力较小，压力一般控制在 0.5MPa 左右，往往适用于填补较大的空腔。陆上风电机组基础加固过程中，通常两者都需要。

3 基本规定

3.0.3 大量研究成果表明，目前内陆风电机组普遍采用的基础环式基础在风荷载作用下常出现基础环周边混凝土的脱开裂隙、压溃、基础环水平度超差过大、基础环上排穿环钢筋疲劳断裂及基础环下法兰空腔等病害。其中，程度大的病害将引起风电机组塔架晃动，严重影响风电机组运行。因此，需对上述风电机组基础病害参数予以检测，评估其风致疲劳程度。

风电机组基础混凝土施工质量不满足设计要求，是目前引起上述风电机组基础病害的主要原因。因此，有必要增加混凝土强度、混凝土保护层厚度、表层钢筋间距及台柱区混凝土浇筑密实度等参数的检测。这些检测结果可用于评价基础混凝土施工质量。

风电机组基础可能存在因场地周边边坡垮塌、堆载及地下水变化等导致的整体不均匀沉降等。

4 基础检测与评估

4.1 一般规定

4.1.1 陆上风电机组基础检测工作的开展应注意如下事项：

1 检测前搜集的基本资料，应包括地勘报告、设计图纸、施工及监理记录、风电机组历史运行情况等资料。

3 风电机组基础的现场检测，还应根据基础的现状，合理开展检测工作，以尽可能全面收集基础的相关数据。

4 根据检测结果，可依据第 5 章开展基础复检验算，综合计算结果，给出检测结论和加固方法的建议。

4.1.2 现场调查的注意事项：

1 风电机组的实际荷载可通过对 SCADA 历史数据进行收集分析，重点关注风速过大期间的机组振动报警等数据，对基础的实际荷载数据进行收集评估，基础的现状调查应包括基础沉降、基础混凝土的开裂、压溃、冒浆等典型的基础损伤现象，还应应对基础的历史加固情况进行调查；

2 风电机组基础的周边环境应进行现场调查：一是针对基础周边地形、边坡进行现场查勘，检查是否存在不利于基础运行的安全隐患；二是针对基础周边的排水情况进行查勘，检查排水通道是否顺畅。

4.1.3 风电机组基础的沉降观测注意事项：

1 风电机组基础建成后观测 1 次，在风电机组安装前后各观测 1 次，在风电机组运行后观测 1 次。在运行期内，如出现特殊情况（如台风、地震等）时，应增加沉降观测次数。

2 风电机组基础运行期内，因周边环境影响，可能导致基础出现不均匀沉降的情况，宜增加沉降观测次数。

4.1.4 风电机组基础检测后的分析评估注意事项：

1 风电机组基础的稳定性及耐久性分析以基础现场检测数据为依据进行评估；

2 风电机组基础开裂的原因分析主要从基础所受载荷的大小、基础混凝土强度、混凝土保护层厚度等因素进行评估，基础的不均匀沉降原因，主要从基础持力层受外界影响进行评估，倾斜可分为地基沉降倾斜及塔架倾斜，分别进行分析评估，地基沉降倾斜主要考虑不均匀沉降，塔架倾斜主要考虑为基础环与基础连接部位的混凝土损伤造成。

4.2 检测与评估

4.2.1 风电机组基础现场调查注意事项：

1 高强预应力锚栓的预紧力、锚栓及基础环表面锈蚀、保护帽完好程度。

2 基础表面混凝土的风蚀，北方寒冷地区，基础混凝土表面因冻融导致表面破损等外观质量。

5 基础不均匀沉降应重点关注底部塔架的倾斜，该倾斜与基础混凝土损伤及施工质量有关，现场检测应重点分析问题出现的原因。

7 高强预应力锚栓的规格型号、设计预拉力及锚栓张拉安装记录等。

4.2.2 基础检测的注意事项：

1 当选用钻孔取芯法进行强度检测时，钻孔深度可根据检测目的予以确定，实际工程中一般为 500mm 和基础环下法兰位置处。

4 基础沉降观测的评估结论，需结合基础的沉降历史数据进行综合评估。

5 基础表面裂缝检测需对结构性裂缝和非结构性裂缝予以区别，实际工程表明，风电机组基础因风致疲劳引起的结构性裂缝往往为环形裂缝，且紧贴基础环或其周边分布；非结构性裂缝往往为温度或水化等收缩裂缝，呈径向分布。

7 基础混凝土浇筑密实度检测，可结合深孔钻芯强度检测一并考虑，即先采用地质雷达法进行基础台柱区混凝土密实度检测，对雷达云图异常区进行钻深孔检测验证。

4.2.3 基础的分析评估内容的相关说明：

1 结合基础环周边的脱开裂隙、混凝土压溃、冒浆以及基础环静态水平度等情况，对基础结构的风致疲劳损伤程度进行分析评估。当机组晃动过大，直观表现为塔架的动态竖向位移大，可推测风电机组基础环底法兰区域存在一定程度的压溃、破损等损伤，若继续运行将致使基础的损伤进一步加剧，直接影响风电机组结构的安全。依据风电场安全运维要求，结合风电机组静态水平度、动态竖向位移峰峰差等情况，针对风电机组运行建议如表 1 所示。

表 1 风电机组基础的评估标准及建议

判断标准	运行建议	备注
静态水平度 $\leq 4\text{mm}$	正常运行	重点检查风电机组基础密封防水情况,若防水失效应及时处理
动态竖向位移峰峰差 $\leq 2\text{mm}$		
$4\text{mm} < \text{静态水平度} \leq 6\text{mm}$	建议风电机组 限功率运行	结合水平度发展是否稳定, 经论证后采取相应处理措施
$2\text{mm} < \text{动态竖向位移峰峰差} \leq 4\text{mm}$		
$6\text{mm} < \text{静态水平度}$	建议风电机组 采取停机措施	
$4\text{mm} < \text{动态竖向位移峰峰差}$		

(1) 静态水平度：对新建风电机组而言，静态水平度主要为基础环的初始安装偏差，其偏差方位是随机的，数值上是稳定的，基础环下法兰周边混凝土的风致磨损空腔尚未形成；但对于运行了一段时间的风电机组，基础环下法兰周边混凝土往往因风致磨损形成空腔，导致水平度在主风向产生倾斜，且随着空腔的加大而不断加大，水平度的实测值能较准确的反映下法兰周边混凝土的磨损情况。两类水平度的区分可根据现场实测水平度偏差方位与所测机位的主风向及表层混凝土的破损情况予以判断。

其次，目前国内大多数主机厂家将基础环水平度的安装误差定为 2mm~3mm，为此本标准将正常运行的标准确定为 2mm 是可行的。至于停机加固的 6mm，主要是基于目前编制组成员单位近年来在国内开展的 800 多台基础环基础的检测和加固项目中总结出来的，即超过 6mm 的水平度偏差，基础环下法兰周边混凝土风致磨损空腔已经形成且较大，必须予以加固处理。

(2) 动态竖向位移峰峰差是对风力发电机组基础环上法兰某测点在启机、运行、偏航及停机等工况下一段时间内监测得到的动态竖向位移信号中最大值与最小值的差值。该数值可准确的反映出测点位置处下法兰周边混凝土的磨损空腔大小。

与静态水平度相比，该参数反映的是测点位置基础环下法兰周边的混凝土磨损情况，而整体磨损情况，理论上更为准确。但是考虑到实际检测过程中，由于时间短，检测结果常受到检测时风向、发电功率大小等诸多因素影响，很难通过短时间监测得到准确的结果，故该参数仅作为辅助参数，而非主要控制参数。测试方案建议以启机、偏航 360°及停机等工况执行完成后，监测到的最大水平度值即为动态竖向位移峰峰差。建议实际工程中监控测点不少于 4 个，其中主风方向是重点布置方位。

2 结合基础混凝土强度检测、面层钢筋保护层厚度及间距、混凝土浇筑密实度等检测结果，对基础结构混凝土施工质量进行评估。

5 地基、基础及结构复核

5.1 一般规定

5.1.1 风电机组基础加固设计及复核的相关说明：

1 针对由于结构强度不足、基础开裂、基础变形超标等不适合风电机组正常运行的基础，应对基础进行相应的复核，对复核不满足要求的类目采取有针对性地加固处理。

2 风电机组基础与塔架常用的连接形式为基础环和预应力锚栓，针对技改项目涉及基础连接件复用的项目应进行基础与塔架间连接件的强度复核，连接件的强度复核主要包括极限强度、疲劳复核。

5.1.2 新增截面的基础加固设计中，应考虑新旧界面的栓钉连接件，原基础表面应凿毛，吹扫干净后涂抹界面剂，以增强新增截面与既有基础的整体工作性能。

5.3 基础与塔架连接复核

5.3.1 风电机组基础环强度分析应包括筒壁、穿筋孔静强度计算，计算应符合《风电机组钢塔架设计制造安装规范》NB/T 10216 的规定，筒壁和穿筋孔钢板折算应力应按下列式计算：

$$\sigma_v = S_{cf} \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq f \quad (1)$$

式中： σ_v ——折算应力设计值；

S_{cf} ——结构的应力集中系数，根据构件尺寸、外形等因素综合确定；

σ ——正应力设计值；

τ ——剪应力设计值；

f ——钢材的强度设计值。

基础环开孔主要有圆形、椭圆形两种开孔型式，不同开孔对

应的 S_{cf} 宜根据开孔外形、尺寸等因素通过有限元分析确定。

5.3.2 风电机组基础环焊缝疲劳强度验算宜采用 Palmgren - Miner 线性损伤累计理论。疲劳损伤应根据所分析结构对应的焊缝疲劳细节选取相应的 $S-N$ 曲线，累积损伤应按下列公式计算：

$$D_d = \sum \frac{N_i \left(\frac{\Delta\sigma \gamma_N S_{cf}}{\Delta\sigma_D} \right)^m}{N_D} \leq 1 \quad (2)$$

$$\Delta\sigma'_D = \Delta\sigma_D \left(\frac{25}{t} \right)^{0.2} \quad (3)$$

式中： D_d ——累积损伤；

N_i ——荷载循环次数；

$\Delta\sigma$ ——循环荷载的应力范围；

$\Delta\sigma_D$ ——部件 $S-N$ 曲线对应的疲劳极限，具体取值应符合《Eurocode 2: Design of concrete structures》BS EN 1992-1-1 的规定；

$\Delta\sigma'_D$ ——板厚大于 25mm 对接焊缝的疲劳极限；

N_D ——部件 $S-N$ 曲线对应的荷载循环次数；

γ_N ——疲劳计算采用的材料分项系数， $\gamma_N = 1.25$ ；

m —— $S-N$ 曲线斜率的倒数；

t ——塔架钢板厚度。

5.3.3 螺栓复核宜符合《风电机组钢塔筒设计制造安装规范》NB/T 10216 附录 D 的规定。

5.3.4 螺栓的疲劳计算宜符合《风电机组钢塔筒设计制造安装规范》NB/T 10216 附录 D 的相关规定，疲劳损伤应根据螺栓疲劳细节选取相应的 $S-N$ 曲线，并根据螺栓直径考虑相应的缩减。

5.3.5 风电机组基础环上法兰验算应符合《风电机组钢塔筒设计制造安装规范》NB/T 10216 附录 B 的相关规定。

5.3.6 加焊栓钉的环壁疲劳可按照《钢结构设计标准》GB 50017 要求进行验算，其构件和连接类别取 Z7。加焊栓钉后基础环受力比较复杂，要综合考虑栓钉与周边混凝土、基础环下法兰

与周边混凝土间的整体的力-变形的协调,采用整体建模的方式可以较好的反映栓钉及基础环环壁、下法兰间的力的分配情况。

5.3.7 基础环下法兰(T形法兰)附近混凝土存在应力集中现象,宜采用有限元方法考虑法兰的刚度对应力的影响进行基础混凝土的受力分析。基础环与混凝土间采用接触假定可以较好的模拟基础环周边混凝土的受力情况,摩擦系数可采用经验取值或者取标准推荐值,有条件可以通过试验获取相关参数。根据局部应力集中系数及风电机组的载荷情况选择抗疲劳性能好的、强度满足要求的灌浆材料,保证加固效果。

5.3.8 锚栓的预拉力值应保证锚栓在疲劳荷载作用下其疲劳损伤不大于1.0。

5.3.10 在风力发电行业,高强灌浆料在锚栓环风机基础中应用较普遍,但是针对高强灌浆料的性能研究尚不够,针对高强灌浆料的轴心抗压强度标准值的确定尚缺乏相关试验数据的支撑,建议参照现行混凝土材料的相关试验标准通过试验结果取值。若无相关试验数据时,建议按国外DNV-GL相关标准予以确定。

高强灌浆料的抗压强度设计值 f_{cd} 可按下式确定:

$$f_{cd} = f_{ck} \left(1 - \frac{f_{ck}}{600} \right) / \gamma_m \quad (4)$$

式中: f_{ck} ——高强灌浆料的标准抗压强度值,灌浆材料试件应采用 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的圆柱体,在28d或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有95%保证率的抗压强度值;

γ_m ——高强灌浆料的材料系数,可取1.5。

5.3.11 计算基于上锚板下方应力为均布假定,实际应力分布为中间大边缘小,可采用有限元方法考虑应力不均匀分布对锚板进行设计校核。

5.3.12 计算基于下锚板上方应力为均布假定,实际应力分布为中间大边缘小,可采用有限元方法考虑应力不均匀分布对锚板进行设计校核。

6 纠 倾

6.1 一 般 规 定

6.1.1 风电机组倾斜的原因主要有 2 类，一为基础环式风电机组基础中基础环周边混凝土损伤严重导致的底段塔架松动而倾斜，具有风致疲劳动态变形特点；二为地基不均匀沉降导致的塔架倾斜，为静态变形。

6.1.2 风电机组塔架倾斜值应满足《风力发电机组 验收规范》GB/T 20319、《高耸结构设计标准》GB 50135、《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》NB/T 10311 规定的允许值。

6.1.4 地基不均匀沉降引起的基础整体纠倾应符合《既有建筑地基基础加固技术规范》JGJ 123 的相关规定。

7 基础加固方法

7.1 一般规定

7.1.1 既有风电机组地基加固设计的相关规定，加固方法的选择，针对风电机组基础及地基类型，加固设计及方法应符合《既有建筑地基基础加固技术规范》JGJ 123 的规定。

7.1.9 因地基不均匀沉降导致基础及上部结构倾斜过大，宜对地基进行化学灌浆处理，先处理地基沉降量大的一侧，另一侧根据地质情况确定。

7.2 灌浆加固法

7.2.1 风电机组基础风致疲劳损伤中可分为下法兰磨损空腔和环壁裂隙两类，针对较大的下法兰磨损空腔，建议采用水泥基灌浆料进行填充加固；小空腔或环壁裂隙建议采用环氧基灌浆料或水泥基注浆料进行加固。

7.2.2 考虑到环氧基灌浆料费用高且大量聚集发热量大的缺点，针对基础内部磨损较大，或存在较大的不密实空腔分布的风电机组基础，可适当考虑用水泥基灌浆料或纤维增强型高强水泥基灌浆料进行填充后，再采用环氧基灌浆料进行压力灌浆的方式进行加固。

7.2.3 钻孔深度不宜超过下法兰底面，主要是出于基础环下法兰距离预埋电缆管较近，避免钻孔过深可能会对电缆造成破坏。

7.2.5 对于大空腔，以填充为主的水泥基灌浆施工时，灌浆压力可控制在 0.5MPa 左右；但对于小空腔和裂缝为主的环氧基或水泥基材料注浆施工时，注浆压力可适当加大。

7.2.6 浆料注入裂缝，在 5℃ 以上环境中固化期达到 7d，可采用取芯法检验修补质量，芯样检验采用劈裂抗拉强度测定方法。

检查数量：按现场情况取芯应不少于 3 个；检验结果符合下列条件之一时为符合设计要求：（1）沿裂缝方向施加劈力，其破坏应发生在混凝土部分（即内聚破坏）；（2）破坏虽有部分发生在界面上，但其破坏面积不大于破坏总面积的 15%。

7.2.7 目前，锚栓基础常出现以下 2 类需采用灌浆加固的工程问题：（1）锚板周边混凝土因浇筑不密实导致的锚栓张拉力不满足设计要求；（2）上锚板下方高强灌浆料层强度不达标，需置换，置换方法详见正文第 7.7.2 条“锚栓基础高强灌浆层置换处理”。

7.2.8 锚栓基础在锚栓张拉后，抽检验收中遇到锚栓张拉力不足，多次张拉仍无法满足张拉要求的情况，且同区域内数根锚栓出现同样的现象，根据实际的工程经验，考虑是锚板周边混凝土振捣不密实或空腔的原因导致，针对该现象需采取空腔填充及置换的措施进行处理，灌浆料强度应高于基础本体混凝土强度。

7.3 栓钉加固法

7.3.1 栓钉加固法的应用，应对原塔架结构表面的施焊影响进行评估，评估通过后方可采用栓钉加固方案。

7.3.2 针对目前风电机组基础混凝土强度普遍为 C30 及以上，故单个栓钉连接件的受剪承载力设计值按 $0.7 A_s f_u$ 计算。

7.3.3 栓钉布置要求：

1 实际工程中，塔架底段内设备及管线往往较多，破拆和栓钉施工困难，栓钉群的布置应根据现场情况进行布置。出于对栓钉的保护和塔架结构拆卸的需要，应对最上排栓钉位置加以限制。

2 基础环上法兰因维修要求，需要预留出法兰连接螺栓的操作空间，故基础环内若布置栓钉，需向下破拆混凝土，且栓钉布置数量明显较基础环外偏少。

3 新增基础混凝土面不宜超过基础环上法兰接缝。

4 （1）基础环外最上排栓钉不宜高于基础环上法兰连接焊

缝以下 150mm 主要为避开基础环连接焊缝的热影响区, 借鉴钢结构构件焊接局部预热宽度一般应为焊缝区周围各三倍壁厚, 且不得少于 150mm~200mm, 为此确定不少于 150mm。(2) 栓钉间距 $6d \sim 10d$ 主要是基于周绪红院士提出的 $6.5d$ 为群钉连接件的最优层间距。

7.3.6 为避免顶层栓钉受拔引起的表层混凝土的冲切破坏, 需对顶层栓钉保护层最小厚度加以限制。

7.3.7 塔架连接结构栓钉连接件加固用混凝土的相关要求:

2 为保证风电机组底段塔架可拆卸, 需对基础环加固用混凝土浇筑高度加以限制。针对基础环外混凝土浇筑高度高于基础环顶面的项目, 应加强对塔架内部连接螺栓的监测频次。

3 植筋的基本锚固深度、构造要求等应符合《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 第 15 章的规定。

7.4 增大截面加固法

7.4.1 现场检测的原风电机组基础混凝土强度等级过低, 不利于新旧混凝土界面的有效粘结。若采用植入剪切-摩擦筋来改善结合面的粘结抗剪和抗拉能力, 也会因基材强度过低而无法提供足够的锚固力。

7.4.2 新旧混凝土的连接界面处理是保证新增部分与原结构连接可靠的关键, 考虑到新增部分混凝土尺寸较大, 且往往配置有受力及构造钢筋, 故不适合采用刷涂界面胶的方式增加界面间的粘结性能。已有的工程经验表明, 当采用 $\phi 6\text{mm}$ 的 T 形销钉种植, 且植入深度为 50mm、销钉间距为 200mm~300mm 时, 可以满足混凝土表面已凿毛的界面传力需求。

7.4.8 这主要是根据结构加固工程的实践经验和有关研究资料作出的规定, 其目的是保证原构件与新增混凝土的可靠连接, 使之能够协同工作, 以保证力的可靠传递, 从而获得良好的加固效果。

7.5 预应力加固法

7.5.1 现场检测的既有风电机组基础混凝土强度等级过低，不利于新旧混凝土界面的有效粘结。若采用植入剪切-摩擦筋来改善结合面的粘结抗剪和抗拉能力，也会因基材强度过低而无法提供足够的锚固力，且较低强度的混凝土徐变较大，造成预应力损失较大。

7.5.2 预应力钢绞线的选用，应按照风电机组基础加固设计要求的性能指标进行选择。

7.5.4 预应力钢绞线安装时，应针对安装面进行清理，钢绞线安装可选用适当的限位装置以保证钢绞线的安装精度。

7.6 粘贴钢板加固法

7.6.2 本方法不适用于素混凝土构件（包括纵向受力钢筋配筋率不符合现行《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 最小配筋率构造要求的构件）的加固。

在实际工程中，有时会遇到原结构的混凝土强度低于现行设计标准规定的最低强度等级的情况。如果原结构混凝土强度过低，它与钢板的粘结强度也必然很低。此时，极易发生呈脆性的剥离破坏。故本条规定了被加固结构、构件的混凝土强度最低等级，以及钢板与混凝土表面粘结应达到的最低正拉粘结强度。

粘钢的承重构件最忌在复杂的应力状态下工作，故本条强调了应将钢板受力方式设计成仅承受轴向应力作用。

对粘贴在混凝土表面的钢板之所以要进行防护处理，主要是考虑加固的钢板一般较薄，容易因锈蚀而显著削弱截面，或引起粘界面剥离破坏，其后果必然影响使用安全。

本条规定了长期使用的环境温度不应高于 60℃，是按常温条件下使用的普通型树脂的性能确定的。当采用与钢板匹配的耐高温树脂为胶粘剂时，可不受此规定限制，但应受现行钢结构设计标准有关规定的限制。在特殊环境下（如高湿、介质侵蚀等）

采用粘贴钢板加固法时，除应符合相应的国家现行有关标准的规定采取专门的粘贴工艺和相应的防护措施外，尚应采用耐环境因素作用的胶粘剂。

7.6.3 虽然允许使用较厚（包括总厚度较厚）的钢板，但为了防止钢板与混凝土粘结的劈裂破坏，应要求其端部与梁柱节点的连接构造必须符合外粘型钢焊接及注胶方法的规定。

本条采取的锚固措施，是根据国内科研单位和高等院校的试验结果和标准编制组总结的工程经验，经讨论、验证后确定的。因此，可供当前的加固设计参考使用。另外，应指出的是，图中钢板布置是示意性的；其尺寸、数量和位置应由设计人员按实际需要确定。

7.6.4 对结构加固用钢材的选择，主要基于以下两点的考虑：

1 在二次受力条件下，具有较高的强度利用率和较好的延性，能较充分地发挥被加固构件新增部分的材料潜力，钢材也可采用 Q355 级。

2 具有良好的可焊性，在钢板之间焊接的可靠性能得到保证。

7.7 置换加固法

7.7.2 锚栓基础高强灌浆层置换处理的说明：

1 实际工程中，锚栓基础上锚板高强灌浆层因施工质量问题，导致出现强度不达标或不密实等严重质量问题时，需进行局部或整体置换。

2 置换施工中对锚栓预紧力的放松主要是出于破拆需要。

8 裂缝与防水修复

8.1 一般规定

8.1.2 实际工程中，温度收缩裂缝宽度较大，深度较深，对混凝土的耐久性影响较大。

8.3 基础及部件密封防水修复技术

8.3.1 现有风电机组基础密封防水方案用的材料中，聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）材质的应用案例较多，该材料可直接暴露在室外，防水层施工完成后无需额外的抗紫外线面层。聚氨酯及丙烯酸材质的防水材料用于风电机组基础的密封防水时，因材料抗紫外线性能的原因，应在防水涂层施工完毕后，增加抗长期紫外线的保护层。防水材料的试验方案应按附录 B 的要求执行。

9 事故预防与补救

9.1 一般规定

9.1.1 对于风电机组基础，地基等出现工程事故，轻则需加固处理，且加固处理一般比较困难；重则造成风电机组的破坏，出现人员伤亡和重大经济损失。因此，对于风电机组地基基础工程事故应采取预防为主的原则，避免事故发生。

9.1.2 本条为地基基础事故补救的一般原则。对于地基基础工程事故处理应遵循的原则首先应保证相关人员的安全，其次应分析事故原因，避免事故进一步扩大。采取的加固措施应具备安全、施工速度快、经济的特点。

9.1.3 工程经验表明，地基存在液化土或软土时，地震可能导致液化和震陷，造成风电机组的倾斜或整体倾覆。因此，对于风电机组地基，可能存在液化或震陷问题时，应按现行国家标准《建筑抗震设计标准》GB/T 50011 进行检测和加固。

9.3 基坑开挖引起事故的预防与补救

9.3.1、9.3.2 风电机组基坑往往超过 3m，其支护工程属住房和城乡建设部《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》建办质〔2018〕31 号文中的危险性较大的分部分项工程范围，施工与基坑开挖不当会对基坑周边环境和人的生命安全和财产安全酿成严重后果。基坑开挖面上方的锚杆、支撑、土钉未达到设计要求时向下超挖土方、临时性锚杆或支撑在未达到设计拆除条件时进行拆除、基坑周边施工材料、设施或车辆荷载超过设计地面荷载限值，致使支护结构受力超越设计状态，均属严重违反设计要求进行施工的行为。锚杆、支撑、土钉未按设计要求设置，锚杆和土钉注浆体、混凝土支撑和混凝土腰梁的养护时间不足而未达到开

挖时的设计承载力，锚杆、支撑、腰梁、挡土构件之间的连接强度未达到设计强度，预应力锚杆、预加轴力的支撑未按设计要求施加预加力等情况均为未达到设计要求。当风电机组基础施工过程需要拆除局部锚杆或支撑时，拆除锚杆或支撑后支护结构的状态是应考虑的设计工况之一。

9.3.6 针对软土地基或软弱下卧层等较差的地质条件时，建议对支护结构的水平位移和地面的沉降进行监测。

9.3.7、9.3.8 大量工程实践表明，多数基坑工程事故是有征兆的。基坑工程施工和使用期间及时发现异常现象和事故征兆并采取有效措施是防止事故发生的重要手段。不同的土质条件、支护结构形式、施工工艺和环境条件，基坑的异常现象和事故征兆会不一样，应能加以判别。当支护结构变形过大、变形不收敛、地面下沉、基坑出现失稳征兆等情况时，及时停止开挖并立即回填是防止事故发生和扩大的有效措施。

9.5 其他因素引起事故的预防与补救

9.5.2 允许的风力等级应根据当地风资源情况、施工作业类型等综合确定。雷电、雨雪等极端天气不应进行加固施工作业，施工作业风速不宜超过 10m/s。

9.5.5 人员安全应急预案应包括施工现场可能的触电、砸伤、摔伤及交通事故等事故的应对措施。

10 检验与验收

10.1 一般规定

10.1.3 检验批是工程质量验收的基本单元。检验批通常按下列原则划分：

1 检验批内质量均匀一致，抽样应符合随机性和真实性的原则；

2 贯彻过程控制的原则，按施工次序、便于质量验收和控制关键工序质量的需要划分检验批。

10.1.6 隐蔽工程施工验收包括钢筋施工、混凝土浇筑、注浆及栓钉焊接等。

10.2 混凝土工程

10.2.6 对已经出现的严重和一般缺陷，应由施工单位提出技术处理方案，并经监理单位认可后进行处理；对裂缝或连接部位的严重缺陷及其他影响结构安全的严重缺陷，技术处理方案尚应经设计单位认可。对经处理的部位应重新验收。对严重和一般缺陷的界定，详见《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204-2015 表 8.1.2 确定。

10.2.8 对基础钻芯取样，可采用目测方法检验浆液的扩散半径、浆液对基础裂缝的填充效果。

10.2.10 实际工程中，若同时需要注浆效果复验和新旧混凝土交界面结合度复验时，两类检查孔可合并。新浇筑混凝土的强度现场检验有疑问的情况下，也可采用回弹超声法或钻芯取样检测等手段进行强度的确认。

10.3 钢筋及栓钉工程

10.3.2 钢筋的选用应符合《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 第 4.2 条的相关规定。

10.3.3、10.3.4 本标准对结构加固用钢材的选择，主要基于以下三点的考虑：

1 在二次受力条件下，具有较高的强度利用率和较好的延性，能较充分地发挥被加固构件新增部分的材料潜力；

2 具有良好的可焊性，在钢筋、钢板和型钢之间焊接的可靠性能得到保证；

3 高强钢材仅推荐用于预应力加固及锚栓连接。

10.3.11 锤击打弯或套管弯曲是目前现场栓钉弯曲试验较常采用的两种方法，相对锤击打弯试验，套管弯曲较易实现，且弯曲角度宜控制。

10.3.13 焊接工艺文件应包括下列内容：

- 1 母材的材质、规格及其他相关信息；
- 2 栓钉材质的牌号、栓钉规格；
- 3 焊接瓷环的牌号、规格；
- 4 非穿透焊或穿透焊。若穿透焊，还应注明母材的材质规格和镀层含量；
- 5 焊接位置；
- 6 焊接工艺参数：焊接电流、提升高度、伸出长度、焊接时间、电源极性；
- 7 预热温度与预热方式；
- 8 检验方法及合格标准；
- 9 其他必要的规定。

11 监 测

11.1、11.2 基槽开挖和施工降水等可能对周边环境造成影响，为保证周边环境的安全和正常使用，应对附属设施、地下光缆及电缆、场地周边边坡、陡崖及地下水位的变化等进行监测。

11.3 增大截面及注浆加固施工可能会引起附加沉降，应在施工期间进行风电机组基础沉降监测。视沉降发展速率，施工后的一段时间也应进行沉降监测。

11.4 考虑到增大截面法等加固方法可能会使得风电机组塔身结构自振频率及模态阻尼等动力参数产生影响，故应对塔身结构基频及阻尼进行检测，以保证机组经加固后能正常运行。

11.5、11.6 纠倾加固施工，当各点的顶升量和迫降量不一致时，可能造成结构产生新的裂损，应对结构的变形和裂缝进行监测，根据监测结果进行施工控制。

11.7 本条关于沉降观测周期与观测时间的规定，是在综合有关标准规定和工程实践经验基础上给出的。由于观测目的不同，荷载和地基类型各异，执行中还应结合实际情况灵活运用。对于从施工开始直至沉降达到稳定状态为止的长期观测项目，应统一考虑施工期间及竣工后的观测周期、次数与观测时间。

对沉降是否达到稳定状态，本标准采用最后 100d 的最大沉降速率是否小于 $0.01\text{mm/d}\sim 0.04\text{mm/d}$ 作为判断标准。该取值来源于对几个城市有关设计、勘测单位的调查。实际生产中，最大沉降速率的具体取值尚需结合不同地区地基土的压缩性能来综合确定，并在项目技术设计中予以规定。监测记录应按附录 E 的要求执行。