

T/GAL

团 体 标 准

T/GAL 007—2026

风力发电机组叶片气热防/除冰系统 验收规范

Acceptance Specification for Wind Turbine Blade Air-Heating Anti-Icing/De-Icing
System

2026 - 01 - 06 发布

2026 - 01 - 10 实施

江西省公共安全科技创新联合会
江西省水力和新能源发电工程学会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 验收总体要求	2
6 技术要求	3
7 叶片气热防/除冰系统保护配置	11
8 工厂验收 (FAT)	12
9 现场验收 (SAT)	16
10 验收结果判定与交付	19
附录 A (资料性) 风电叶片气热防/除冰系统工厂验收单	21
附录 B (资料性) 风电叶片气热防/除冰系统现场验收单	26
附录 C (规范性) 风电叶片气热防/除冰系统最终验收单	28
附录 D (资料性) 气热除冰冬季收益计算方法说明	31

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江西省水力和新能源发电工程学会、江西省公共安全科技创新联合会提出并归口。

本文件起草单位：国家电投集团江西电力有限公司、国家电投集团江西电力有限公司新能源发电分公司、长沙理工大学、电网防灾减灾全国重点实验室、国家电投集团江西省电力有限公司湖北分公司、江西省公共安全科技创新联合会、江西省水力和新能源发电工程学会、江西省质量和标准化研究院、东华理工大学、东北农业大学、湖南防灾科技有限公司、湖南拓天节能控制技术股份有限公司、江西硕博科技有限公司、三一重能股份有限公司、上海电气风电集团有限责任公司、湖南兴蓝风电有限公司、中国船级社质量认证有限公司、金风慧能技术有限公司、广东明阳新能源材料科技有限公司。

本文件主要起草人：刘忠德、范必双、陆佳政、邬伟骏、魏敏真、周强、吴江波、朱继涛、周俊杰、王虎、刘志龙、李国辉、秦挺鑫、何月顺、黄海潮、秦智军、罗金生、黄心悦、李依凡、谢克勇、华丹、李岩、何璘琳、张莹、罗晶、黄凌翔、杜玉杰、周海根、蒋辉、夏侯智聪。

引 言

风力发电机组叶片结冰是寒冷地区风电场安全稳定运行的关键制约因素，不同气候区域的结冰特性差异显著，直接影响气热防/除冰系统的适配性与应用效果。我国南方高湿寒冷地区（贵州、云南、江西、湖南等山区）作为风电除冰技术的核心应用场景。

为解决不同区域结冰问题的针对性治理需求，统一气热防/除冰系统设备验收的技术标准、测试方法与判定规则，破解行业内验收标准不统一、气热防/除冰效果参差不齐、运行能耗偏高的痛点，保障系统安全可靠运行，提升气热防/除冰效果并降低运行能耗，推动风电行业气热防/除冰技术标准化、规范化发展，特制定本规范。本规范既聚焦南方高湿结冰核心场景的技术需求，也充分考虑北方地区的适配性，为全行业气热防/除冰系统验收提供科学依据。

本规范编制以我国南方高湿寒冷地区风电场典型运行数据为核心依据，结合气热防/除冰系统技术特性与验收核心需求，通过多轮实证试验，验证该方法的科学性与可行性，广泛征求行业专家、设备制造商、发电企业及检测机构等多方意见，通过专家评审论证后定稿。

风力发电机组叶片气热防/除冰系统验收规范

1 范围

本规范规定了风力发电机组叶片气热防/除冰系统的验收内容、指标要求、验收方法及合格标准，核心聚焦验收安全与实际防除冰效果验证。主要适用于南方高湿寒冷地区（年均相对湿度>85%、冬季气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ）陆上风力发电机组配套气热防/除冰系统，北方地区风电场可参照执行；海上风力发电机组配套的同类系统可参照执行。

本规范适用气热防/除冰系统类型，包括热风循环式、电辅助加热式等基于热气发生与输送的气热防/除冰系统，涵盖工厂制造、现场安装、验收测试及交付验收全流程。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 25384 风力发电机组风轮叶片全尺寸结构试验
- GB/T 30121 工业铂热电阻及铂感温元件
- GB/T 33629 风能发电系统 雷电防护
- GB/T 36490 风力发电机组防雷装置检测技术规范
- GB 12476.1 可燃性粉尘环境用电气设备 第1部分：通用要求
- GB 50057 建筑物防雷设计规范
- GB 51096 风力发电场设计技术规范
- GB/T 18451.1 风力发电机组 第1部分：通用技术条件
- GB 5226.1 机械安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件
- NB/T 31017 风力发电机组主控制系统技术规范
- NB/T 31099 风力发电机组 安全要求
- NB/T 31122 风力发电机组在线状态监测系统技术规范
- IEC 60947-1 低压开关设备和控制设备 第1部分：总则
- IEC 60947-4-1 低压开关设备和控制设备 第4-1部分：接触器和电动机起动器
- IEC 61000-6-3 电磁兼容性（EMC）第6-3部分：通用标准——工业环境
- IEC 61400-1 风力发电机组 第1部分：设计要求
- IEC 61400-24 风力发电机组 第24部分：雷电防护

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

气热防/除冰系统 air-heating anti-icing/de-icing system (AHADS)

由控制、加热、送风、保护等子系统组成，通过鼓风机产生气流，经加热器加热后输送至叶片内腔或表面，实现风力发电机组叶片防冰/除冰的系统。

3.2

工厂验收测试 factory acceptance test (FAT)

气热防/除冰系统在供应商工厂完成装配后，由相关方（含业主、主机厂、叶片厂、系统供应商等）参与的验收测试，用于验证系统是否符合设计要求及技术规范。

3.3

现场验收测试 site acceptance test (SAT)

气热防/除冰系统在风电场现场完成安装调试后，由相关方参与的验收测试，用于验证系统在实际工况下的安装质量、功能性能及与机组的兼容性。

3.4

防冰模式 anti-icing mode

当环境条件满足覆冰风险阈值时，系统提前启动并维持叶片表面温度高于冰点，防止冰层形成的运行模式。

3.5

除冰模式 re-icing mode

叶片表面已形成冰层时，气热防/除冰系统启动，快速提升叶片表面温度以融化冰层的运行模式。

3.6

叶片覆冰期 period of blade icing

风力发电机组叶片表面形成冰层至冰层完全脱落所持续的时间段。

3.7

覆冰损失挽回率 icing loss recovery rate

气热防/除冰系统运行后，风力发电机组在相同工况下的发电功率恢复值与覆冰导致的功率损失值的比值，用于评价气热防/除冰效果对风力发电机组发电量的提升作用。

4 符号

表1 符号及含义

符号	含义	单位	符号	含义	单位
P	功率	kW	Q	风量	m ³ /h
I	额定电流	A	R	绝缘电阻	MΩ
U	额定电压	V	R _e	接地电阻	Ω
T	温度	℃	ΔT	温度偏差	℃
v	风速	m/s	t	时间	h/min/s
p	风压	Pa	η	功率效率	%
W ₀	覆冰期总理论发电量	kW·h	W ₁	覆冰期实际发电量	kW·h
W ₂	覆冰期除冰系统自耗电量	kW·h	W ₃	覆冰期净发电量	kW·h
W ₄	覆冰期参考机组平均实发电量	kW·h	W ₅	覆冰期主机原因未发电理论损失	kW·h
W ₆	覆冰期覆冰相关未发电理论损失	kW·h	ε	自耗电率	%
ρ	可利用率	%	ζ	覆冰损失挽回率	%

符号定义：

- W₀（覆冰期总理论发电量）：基于功率曲线与平均风速计算的理论最大可发电量，涵盖覆冰和非覆冰因素（如主机故障、风速仪结冰等）。
 - W₁（覆冰期实际发电量）：从监控系统调取的风机输出有功电量，已扣除除冰系统自耗电。
 - W₂（覆冰期除冰系统自耗电量）：气热防 / 除冰系统运行时自身消耗的电量，直接从风机输出中扣除。
 - W₃（覆冰期净发电量）：实际发电量扣除除冰系统自耗电后的净增发电量，计算公式为W₃= W₁ - W₂。
 - W₄（覆冰期参考机组平均实发电量）：同一风电场未安装除冰系统的参考机组在覆冰期的平均实际发电量，用于对比净效益。
 - W₅（覆冰期主机原因未发电理论损失）：因主机故障、风速仪结冰停机、人为未及时启机等非除冰因素导致未发电的理论损失，反映发电潜力浪费。
 - W₆（覆冰期覆冰相关未发电理论损失）：总理论发电量扣除主机原因损失后的覆冰直接影响损失。
 - 自耗电率(ε)：在覆冰期除冰系统自耗电量W₂除以覆冰期实际发电量W₁所得百分数。

$$\varepsilon = W_2 / W_1 \times 100\%$$
 - 可利用率(ρ)：在覆冰期，气热防/除冰系统正常运行时间与设备应启动时间之比的百分数。
 - 覆冰损失挽回率(ζ)：在覆冰期参考机组平均实发电量W₄ 减去覆冰期净发电量W₃所得差值再除以覆冰期覆冰相关未发电理论损失W₆与覆冰期参考机组平均实发电量W₄ 之差的百分数。

$$\zeta = W_4 / (W_6 - W_4) \times 100\%$$
- 实际理论发电量=W₀-W₅

5 验收总体要求

5.1 验收阶段划分

系统验收分为工厂验收（FAT）、现场验收（SAT）、最终验收三个阶段，各阶段依次进行，前一阶段验收合格后方可进入下一阶段。

5.1.1 工厂验收（FAT）：系统供应商完成气热防/除冰系统空载和负载运行，验收周期不超过 5 个工作日，验收地点为系统供应商工厂，主要针对设备自身的设计、制造、单体功能与性能进行验证。

5.1.2 现场验收（SAT）：现场完成风力发电机组叶片气热防/除冰系统安装、调试后 30 个工作日内启动，验收周期不超过 7 个工作日，验收地点为风电场现场，主要验证系统与风机集成的完整性、现场环境下的功能性能以及与风机主控系统的协同工作能力。

5.1.3 最终验收：现场验收合格后，气热防/除冰系统投入试运行，试运行期不少于 1 个月（含 1 个完整覆冰期），试运行期间无严重故障且核心指标满足要求后，启动最终验收。

5.2 参与方职责

表 2 参与方职责

参与方	主要职责
业主	<ol style="list-style-type: none"> 1. 明确验收标准和时间节点，组织成立验收小组； 2. 审查验收资料，参与 FAT、SAT 及最终验收测试； 3. 确认验收结果，签署验收报告； 4. 提出不合格项整改要求，跟踪整改进度； 5. 组织或委托第三方机构参与并监督各阶段验收； 6. 提供现场验收所需条件（如风机停机窗口、电网协调、气象条件支持）。
主机厂	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提供风力发电机组接口资料（如滑环参数、轮毂、叶片安装尺寸、控制信号协议、机舱安装空间尺寸）； 2. 协调叶片厂、系统供应商的技术对接； 3. 参与 SAT 中的联调测试； 4. 配合现场安装质量检查和试运行； 5. 确保风机设计（叶片、机舱、控制系统、叶片锁水平、双馈风机滑环通孔尺寸）与气热系统兼容； 6. 对气热防/除冰系统方案进行安全性校核； 7. 负责气热系统与风机主控系统的接口与联调。
叶片厂	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提供叶片内腔结构图样、安装工艺要求、防雷接地接口； 2. 验证气热防/除冰系统与叶片的适配性（如风管布置、加热元件安装不影响叶片气动性能）； 3. 参与 SAT 中叶片内部组件安装质量检查； 4. 提供叶片覆冰监测相关技术支持。
系统供应商	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提供完整的技术文件、测试报告、产品合格证等资料； 2. 准备 FAT 测试场地、设备和工具，配合完成各项测试； 3. 负责现场安装指导、调试及 SAT 测试配合； 4. 对验收中发现的不合格项进行整改，提供整改报告和复验资料； 5. 提供验收后的技术培训和质保期服务。
第三方检测机构（如需）	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依据本规范和相关标准，开展公正、专业的独立的检测工作； 2. 出具具有法律效力的检测报告，作为验收判定依据； 3. 参与验收过程中的技术争议协调。

6 技术要求

6.1 通用要求

6.1.1 适配性与气动兼容性

气热防/除冰系统设计需匹配风力发电机组核心额定参数（单机容量、叶片实际有效长度、额定风速及运行环境温度范围），确保与机组运行工况适配。系统结构布局、部件安装方式需与叶片气动设计兼容，不得改变叶片原有气动外形、破坏气流流场特性，保障无结冰工况下的运行效率。

6.1.2 安全与电磁兼容性

气热防/除冰系统安全与电磁兼容性需满足以下要求：防雷设计符合《建筑物防雷设计规范》（GB 50057-2010）及《风力发电机组 第24部分：雷电防护》（IEC 61400-24:2024），配备雷电分流、接地及绝缘保护措施；防护等级不低于IP54，漏电保护动作电流不大于30mA，响应时间不超过0.1s；电磁兼容性（EMC）符合IEC 61000-6-2及IEC 61000-6-4标准，传导干扰 ≤ 45 dB，辐射干扰 ≤ 65 dB，具备抗外部电磁干扰能力，通过全工况电磁兼容测试，避免与机组主控系统、传感器产生耦合干扰。

6.1.3 材料环境适应性

气热防/除冰系统所有材料需适配塔筒/机舱/轮毂/叶片内部环境（温度波动较小、紫外线照射弱、但存在振动/粉尘/局部高湿），具备耐腐蚀、耐低温循环等特性：运行环境温度（内部实际范围）： $-30^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ ，高湿/海洋环境：金属部件防腐等级不低于C4级，非金属材料盐雾试验不少于500小时无明显劣化。特殊环境条件下，提供材料适配性测试报告（无需强制第三方认证）。

6.1.4 系统可利用率

气热防/除冰系统在覆冰期连续运行期间正常运行时间与应启动运行时间的百分比需要达到90%以上，反映气热防/除冰系统在覆冰期内的可靠运行能力。

6.1.5 控制响应时效

气热防/除冰系统控制响应满足实际使用需求：从接收启动信号到加热器有效加热使叶片内腔温度达到稳定值的时间不超过30min；从防冰模式切换至除冰模式的响应时间不超过60s；系统具备短期结冰预测功能或具备接入第三方结冰预测结果接口，基于气象数据提前预判结冰风险，实现预热准备。

6.1.6 控制模式与运行稳定性

气热防/除冰系统具备自动、手动、远程三种独立控制模式，模式间切换平滑无冲击电流。自动模式：基于结冰传感器、环境参数，采用自适应算法完成启停与功率调节；手动模式：供现场运维人员应急操作，具备最高优先级；远程模式：支持后台监控系统远程控制，通信延迟不超过3s；控制系统具备自诊断功能。

6.1.7 模块化设计与运维便利性

气热防/除冰系统采用模块化设计，具备标准化接口与统一安装尺寸。故障诊断可通过模块级检测快速定位故障单元；模块防护等级不低于IP54，标注清晰的维护指引和安全警告标识。

6.1.8 寿命与维护周期

气热防/除冰系统设计寿命与风机主体设备协调，贴合产品实际耐用性。核心电子部件、鼓风机及加热元件设计寿命不低于5年，机械结构件及固定装置不低于20年；维护周期与风机常规维护周期（6个月）一致。

6.1.9 智能监控与数据管理

气热防/除冰系统具备基础数据采集与管理功能，实时监测并记录温度分布、能耗数据、运行状态、故障信息等关键参数；提供标准化数据接口（支持Modbus TCP协议），能与监控系统无缝对接，数据传输延迟不超过2s；数据存储本地缓存不少于180天，关键事件数据永久保存；支持数据可视化展示，提供基础分析报表。

6.1.10 气热防/除冰系统验证与测试

6.1.10.1 现场安装后完成24小时连续运行测试，记录关键参数；验证三种控制模式切换平稳性，无冲击电流。

6.1.10.2 关键性能指标应由甲乙双方共同验证。

6.1.11 环境保护与可持续性

系统设计考虑全生命周期环境影响，运行过程不得产生有害物质排放。

6.2 气热防/除冰系统组成

6.2.1 总体组成

气热防/除冰系统应按“探测-控制-执行-保护-连接”的功能闭环设计，组成应包括但不限于以下核心子系统，各子系统协同实现防冰、除冰及安全稳定运行。

6.2.2 探测单元

探测单元功能为实现结冰状态、运行参数及环境条件的精准采集，为系统控制逻辑提供数据支撑，其组成包括但不限于结冰探测装置、运行状态传感器及环境传感器。

6.2.3 控制系统

控制系统的功能为接收探测单元信号，实现运行模式切换、参数调节、指令下发、数据上传及人机交互，其组成包括控制柜、控制模块、人机界面及通信组件。

6.2.4 加热系统

加热系统核心功能为通过加热与送风协同作用保障防冰/除冰热源供给，其中加热部分可将气流加热至设定温度，由加热器（或其他适配热源）、温度控制器、功率调节模块组成，确保气流加热效率及温度稳定性；送风系统负责实现加热气流的产生、输送及均匀分布，由鼓风机、风管、出风口、风量调节阀构成，保障气流输送通畅且覆盖叶片目标区域。

6.2.5 保护系统

保护系统的功能为实现设备故障保护、安全极限保护及紧急状态处置，由过载保护器、电机保护器、温度熔断器、风压开关、烟雾探测器、紧急停机按钮组成，确保系统故障时及时切断回路，避免安全风险。

6.2.6 连接与固定部件

连接与固定部件的功能为保障系统机械连接可靠、电气传输稳定，适配风力发电机组的旋转及振动工况，其组成包括滑环（用于旋转部件供电/信号传输）、防扭支架、耐扭曲线缆、紧固件、减振装置、密封件，确保系统安装牢固、运行无松动。

6.3 核心设备要求

6.3.1 接触器应满足以下技术要求

- a) 抗振动性能：频率 5~55Hz，加速度峰值达到 5G；
- b) 防熔接设计：具备双断点结构；配备与接触器联动的过流保护装置（动作电流 ≤ 1.1 倍额定电流），避免短路时触点熔接。

6.3.2 控制器应满足以下技术要求

- a) 防冰/除冰模式控制：除冰启停指令统一由叶片气热防/除冰远程监控系统给出，支持防冰模式（温度维持）与除冰模式（快速除冰）切换，系统具备手动启动和自动启动功能，适配于叶片覆冰前后的工况；
- b) 时序逻辑控制：严格遵循“先启动鼓风机→后启动加热器”、“先停运加热器→后停运鼓风机”的安全时序，具备紧急停止功能，可立即切断所有执行机构输出；
- c) 采样信号类型：覆盖叶片内部温度、外部环境温/湿度、加热器和鼓风机的三相电流；运行状态信号（包括断路器、接触器、避雷器、开关电源等设备的运行状态）；
- d) 采样性能要求：采样频率 ≥ 10 Hz，模拟信号采样精度 $\leq \pm 1\%$ FS。
- e) 硬件保护：电源和通讯部分配备电源防雷模块及通讯防雷模块，温度及温湿度采集部分配备信号防雷模块；包括短路保护、过流保护、缺相保护；
- f) 软件保护：包括防干烧、过流保护、过压欠压保护、三相不平衡保护、缺相保护；
- g) 过载/过流保护：检测到加热器、鼓风机过载或过流时，立即切断对应设备电源并触发报警；
- h) 缺相保护：实时监测电机和三相加热器的各相电流，当检测到某一相电流为 0 或三相电流不平衡度超过 30%（可设定）时，判定为缺相故障，立即切断对应设备电源、触发报警，并记录缺相相序及故障发生时间；

- i) 过温保护：当叶片表面温度超过安全阈值（可设定）或加热器出风口温度 $\geq 100^{\circ}\text{C}$ 时，自动关闭加热器并维持鼓风机运行；
- j) 设备故障保护：鼓风机未启动、风机故障或传感器信号异常时，禁止加热器启动或立即切断加热器电源；
- k) 保护动作响应：各类故障触发后，保护动作响应时间 $\leq 100\text{ms}$ ，同时记录故障类型、发生时间、故障时运行参数等信息；
- l) 关键性能指标：温度控制精度： $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；通信能力：支持 CAN Open、Modbus/TCP、OPC UA 协议，与机组 SCADA 系统实时通信，数据更新周期 $\leq 1\text{s}$ ；数据存储：至少保存 1000 条故障记录，掉电后数据不丢失；环境适应性：工作温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim +60^{\circ}\text{C}$ ，防护等级 $\geq \text{IP54}$ ，抗振动性能符合 IEC 60068-2-6（ $10\sim 2000\text{Hz}$ ，加速度 5g ）。

6.3.3 鼓风机应满足以下技术要求

- a) 可靠性：适应风机叶片内长期连续旋转运行工况，具备抗恶劣环境（高温、高湿、沙尘）能力，关键部件（轴承、电机）寿命与风机本体匹配。
- b) 安全性：配备完善的监测与保护机制，防止因过载、超温、振动等引发安全事故，电机及电气部件符合相关安全标准。
- c) 可维护性：结构设计便于现场检修，关键部件通用性强，具备故障预警功能，降低维护难度和时间成本。
- d) 关键性能指标：结构特性要求应采用弹性减振底座；鼓风机的入口处应配备可更换式过滤网，防止异物掉入。

6.3.4 加热器应满足以下技术要求

- a) 可靠性：适应风机叶片内长期连续旋转运行工况。
- b) 温度性能：
 - 1) 外壳温度：额定工况运行时壳体温度 $\leq 60^{\circ}\text{C}$ ，避免周边部件老化；
 - 2) 环境适应温度： $-40^{\circ}\text{C}\sim +60^{\circ}\text{C}$ （覆盖极端寒冷/高温环境）；
 - 3) 温度控制精度： $\pm 5^{\circ}\text{C}$ （避免局部过热）。
- c) 绝缘要求：与自身发热匹配，在环境温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim +60^{\circ}\text{C}$ 范围内，设备绝缘电阻应大于 5 兆欧，保障用电安全。
- d) 防护等级：**IP54**
- e) 安全保护
 - 1) 过热保护：配置风温/元件温度传感器，超 100°C 自动断电；
 - 2) 三相不平衡保护：配置电流监测模块，当三相电流不平衡度超过 $\pm 7\%$ 时触发保护，避免设备损坏；
 - 3) 与鼓风机机械连锁：鼓风机未启动时停止加热。

6.3.5 风管应满足以下技术要求：

- a) 材质要求：宜采用与风力发电机组叶片相同或更优的材料，还需满足 IEC 60068-2-11 及 GB/T 2422 标准的要求，保证在高湿、高寒环境下的长期稳定性。
- b) 系统兼容性：风管系统应与叶片内腔结构相匹配，确保不影响叶片整体气动性能。

6.3.6 传感器应满足以下技术要求：

6.3.6.1 温度传感器

测量范围： $-40^{\circ}\text{C}\sim +150^{\circ}\text{C}$ ，精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，响应时间 $\leq 5\text{s}$ ；安装位置：加热器出口、风管出口、叶片内腔表面，每个点需要布置一用一备两个温度传感器；防雷要求：防雷指标达到防雷击电磁脉冲电压（ $\leq 4000\text{V}$ ）连续5次对传感器无损害。

6.3.6.2 温湿度传感器

- a) 测量范围： $-40^{\circ}\text{C}\sim +60^{\circ}\text{C}$ （机舱环境温度）， $0\sim 100\% \text{RH}$ （湿度）；
- b) 精度要求：温度精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，湿度精度 $\pm 2.5\% \text{RH}$ ；
- c) 安装位置：机舱顶部（避免阳光直射，远离排气口和热源）；
- d) 防护等级： $\geq \text{IP67}$ ，宜配备防辐射罩；

- e) 防雷要求: 电源端、信号端加装电涌保护器 (SPD), 防雷指标达到防雷击电磁脉冲电压 ($\leq \pm 4000\text{V}$) 连续 5 次对设备无损害;
 - f) 通信接口: 4-20mA 或 RS485, 支持 Modbus RTU 协议;
 - g) 安装要求: 传感器安装位置应远离机舱门、排气管道和热源; 确保传感器周围气流畅通; 安装于机舱顶部的专用支架上, 固定牢固, 避免振动影响; 传感器支架需采用不锈钢材质, 耐腐蚀性强; 传感器线缆应采用屏蔽线缆, 避免电磁干扰; 安装位置应便于定期维护和清洁。
- 6.3.7 气热防/除冰系统滑环应满足以下技术要求:
- a) 环道要求: 原有机组滑环各项功能和数据应不变; 动力环道应有电流过载保护: 额定电流 1.5 倍过载, 持续时间 1min; 额定电流 3 倍过载, 持续时间 10s; 动力环道和通信环道各室间均应屏蔽隔离; 各通道动态接触电阻变化值 $\leq 10 \text{ m}\Omega$; 各通道静态接触电阻 $\leq 10 \text{ m}\Omega$ (不含导线电阻) 环道宜镀金。
 - b) 绝缘要求: 绝缘介电强度工频耐压应符合 NB / T10213 《风力发电机组变桨滑环》的要求。
 - c) 滑环编码器要求: 除冰滑环编码器分辨率和原滑环应一致, 编码器输出信号数据应平稳无跳变波动现象。
 - d) 滑环电缆要求: 定转子两边连接线长度应经过勘测确认; 对于双馈风机, 电缆选型应确保电缆能安全通过穿线孔, 同时要有良好的散热功能; 气热防/除冰系统的电缆规格、长度、颜色等数据必须和原滑环保持一致。
 - e) 滑环结构设计要求: 230V 动力、400V 动力、690V 动力、CAN 通讯各室间应屏蔽隔离, 以确保电磁兼容的符合性, 编码器安装需要加装联轴器, 确保编码器转速与滑环转速一致, 同时应确保编码器更换与维护方便; 滑环机械安装接口尺寸须与现有的滑环接口相配套。
 - f) 安全防护要求: 外壳防护等级应为 IP65, 外壳材质为铝合金, 并进行原色阳极氧化; 应具有足够的抗振动设计, 确保在使用过程中滑环编码器正常使用。

6.4 气热防/除冰系统设备的机械特性

6.4.1 力学与环境适应性

- 6.4.1.1 机械强度: 系统各核心组件 (风管、加热器、传感器、连接件等) 应能承受叶片旋转产生的离心力 ($\geq 5G$), 经 1000 次循环测试后, 无松动、裂纹等结构性损伤, 机械连接保持可靠。
- 6.4.1.2 振动适应性: 符合 IEC 60068-2-6 《环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 F: 振动》要求, 在振动频率 $10 \sim 2000\text{Hz}$ 、加速度 $5G$ 的条件下测试后, 电气性能无衰减, 机械连接无松动、部件无脱落。

6.4.2 安装与连接要求

- 6.4.2.1 安装兼容性: 系统整体结构应与叶片内腔结构精准匹配, 风管、线缆及部件布置不得影响叶片配重平衡, 确保机组正常动平衡性能。
- 6.4.2.2 紧固件要求: 所有紧固件优先采用不锈钢材质 (304 或 316 级), 螺栓等级 ≥ 8.8 级, 螺母等级 ≥ 8 级; 必须配备弹簧垫圈+螺纹胶 (如 Loctite 243) 双重防松措施, 拧紧力矩应符合 GB/T 16823.3 《螺纹紧固件 拧紧试验方法》要求。
- 6.4.2.3 减振要求: 鼓风机等振动源设备安装时, 应配置邵氏 A 硬度 $50 \sim 60$ 的橡胶减振垫, 减振垫压缩量 $\leq 5\text{mm}$; 设备运行时, 振动加速度 $\leq 2.5\text{m/s}^2$, 避免振动传递至叶片或机组其他部件。

6.4.3 结构与材料特性

- 6.4.3.1 结构强度与密封性: 热空气输送管路及连接件应能承受风力发电机组运行 (含启停、湍流工况) 产生的振动、交变载荷及气压波动, 无泄漏、断裂; 叶片内空气通道的设计与布置不得破坏叶片原结构完整性。
- 6.4.3.2 材料兼容性: 所有与热空气直接接触的材料 (管路、密封件、胶粘剂等), 应能长期承受系统最高设计运行温度, 且不释放有毒有害物质; 与叶片复合材料接触的材料 (含线缆、密封件、紧固件等) 应无化学腐蚀性, 避免损伤叶片基材。
- 6.4.3.3 热膨胀管理: 系统设计应充分考虑不同材料的热膨胀系数差异, 设置热膨胀补偿结构 (如伸缩节、柔性连接段), 防止运行过程中因热应力导致连接松动、密封失效或结构损伤。

6.4.4 防雷与接地

系统所有金属部件（风管、控制柜外壳、加热器壳体等）应与风力发电机组雷电防护系统可靠连接。风力发电机组雷电防护系统应做好接地措施，接地电阻应符合GB/T 33629-2024《风能发电系统 雷电防护》及IEC 61400-24《风力发电机组 第24部分：雷电防护》相关要求，确保雷电冲击时电流有效泄放，避免设备损坏及人员安全风险。

6.5 气热防/除冰系统设备的电气特性

6.5.1 额定电源参数要求

系统设备额定电源参数需确保与风力发电机组供电系统兼容适配，需覆盖系统所有电气模块（加热单元、控制单元、检测单元等），确保各部件在额定电源条件下稳定运行，避免因电压、频率波动导致设备故障或性能衰减。

6.5.2 绝缘电阻要求

系统电气回路绝缘电阻需达到以下指标，防止漏电风险并保障电气安全：①动力回路（包括加热元件供电回路、主电源回路等）绝缘电阻 $\geq 5\text{M}\Omega$ ；②控制回路（包括信号传输回路、PLC控制回路等）绝缘电阻 $\geq 2\text{M}\Omega$ 。绝缘电阻测试需采用 500V 兆欧表，测试持续时间不少于 1min，测试过程中回路无击穿、闪络现象，且绝缘电阻数值稳定无大幅衰减。测试应在设备安装完成后、投运前及定期维护时进行，确保回路绝缘性能持续达标。

6.5.3 介电强度要求

系统电气回路需通过介电强度测试，验证绝缘系统承受过电压的能力，具体要求如下：动力回路：施加工频交流电压AC 2500V，测试持续时间1min，期间回路无击穿、无闪络现象，且泄漏电流峰值 $\leq 10\text{mA}$ ；控制回路：施加工频交流电压AC 1500V，测试持续时间1min，期间回路无击穿、无闪络现象，且泄漏电流峰值 $\leq 5\text{mA}$ 。测试时电压应平稳升至规定值，避免冲击电压影响测试结果，测试完成后需记录泄漏电流数据及回路状态，确保绝缘系统无隐性损坏。

6.5.4 接地性能要求

系统接地设计需满足安全与防雷接地双重需求，具体要求如下：气热防/除冰系统所有金属外壳、电气部件金属底座等保护接地部位，需通过专用接地导体与风机主接地网可靠连接，连接点采用螺栓紧固或焊接方式，过渡电阻 $\leq 0.1\Omega$ （采用等电位连接测试仪在连接点两端测量）；系统作为风机附属设备，其接地系统需与风机主接地网实现等电位连接，确保雷击或故障时各金属部件电位一致，避免电位差引发电击或设备损坏；系统接地需与主接地网设计协同适配。

6.5.5 电磁兼容性（EMC）要求

6.5.5.1 辐射骚扰：在 30~1000MHz 频率范围内，系统辐射骚扰场强 $\leq 40\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ，符合《电磁兼容 第6-3部分：通用标准 居住、商业和轻工业环境中的发射》（IEC 61000-6-3）要求；

6.5.5.2 静电抗扰度：接触放电测试等级为 $\pm 8\text{kV}$ ，空气放电测试等级为 $\pm 15\text{kV}$ ，测试后系统无功能性故障、性能无明显衰减，符合《电磁兼容 第4-2部分：试验和测量技术 静电放电抗扰度试验》（IEC 61000-4-2）要求；

6.5.5.3 浪涌抗扰度：线-线之间测试等级为 $\pm 2\text{kV}$ ，线-地之间测试等级为 $\pm 4\text{kV}$ ，测试波形采用 1.2/50 μs 电压浪涌，测试后系统无硬件损坏、控制功能正常，符合《电磁兼容 第4-5部分：试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验》（IEC 61000-4-5）要求。

6.5.6 电气安全要求

6.5.6.1 绝缘电阻、介电强度、接地连续性等核心安全指标，需同时满足《风力发电机组 第1部分：通用技术条件》（GB/T 18451.1）及《机械安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件》（GB 5226.1）的相关规定，确保电气系统无安全隐患。

6.5.6.2 加热器需配置双重温度保护机制：一级保护为自我具备防干烧或切断电源能力，当鼓风机停机或风量不足时，加热器干烧或内部自动切断电源，外部温度不得超过危险值；二级保护为外置温度传

感器联动控制模块，实时监测元件温度，超温时发出报警信号并触发断电，双重保护独立工作、互为备份，防止加热元件过热引发火灾或损坏。

6.5.6.3 系统需具备完善的过流保护、过压保护功能，保护装置动作灵敏可靠，动作阈值设置科学合理，确保在故障工况下快速切断危险电源，保障设备及人员安全。额定通断能力：在 AC-3 使用类别下额定通断能力 ≥ 8 倍额定电流。

6.5.7 通信系统要求

6.5.7.1 通信架构设计

表 3 通信架构设计

通信节点	通信介质性能要求	通信协议性能要求	通信速率要求	可靠性保障措施
叶根控制器↔ 机舱控制器	满足工业级总线介质性能（具备抗电磁干扰、稳定传输能力，需包含双层屏蔽等抗干扰结构）	满足工业总线协议规范（兼容 ISO 11898 类标准或等效性能的工业总线协议）如 canopen、ethercat、profinet 等	$\geq 250\text{kbps}$	<ul style="list-style-type: none"> 通信延迟$\leq 10\text{ms}$·自动故障切换（切换时间$\leq 50\text{ms}$） 通信介质需具备双层屏蔽等抗干扰性能
机舱控制柜↔ 塔基控制柜	满足长距离、抗电磁干扰的工业级传输介质性能（支持传输距离 $\leq 1000\text{m}$ ），如光纤等	满足高速工业网络协议规范（兼容 TCP/IP 或等效性能的高速网络协议）	$\geq 1\text{Gbps}$	<ul style="list-style-type: none"> 通信介质需具备抗电磁干扰性能 传输距离$\leq 1000\text{m}$ 故障自动切换（切换时间$\leq 100\text{ms}$）
塔基控制柜↔ 升压站服务器	满足工业级局域网介质性能（支持稳定数据传输）如以太网等	满足通用网络协议规范（兼容 TCP/IP 或等效性能的网络协议）	$\geq 100\text{Mbps}$	<ul style="list-style-type: none"> 双环网冗余设计 故障切换时间$\leq 50\text{ms}$ 数据加密·通信中断自动重连（重连时间$\leq 2\text{s}$）

6.5.7.2 关键通信参数要求

- a) 叶根控制器与机舱控制器通信参数要求（CAN 总线）
 - 1) 通信距离 $\leq 50\text{m}$ （适用于叶根控制柜在轮毂或叶根位置）；
 - 2) 通信延迟 $\leq 10\text{ms}$ （满足实时控制需求）；
 - 3) 冗余设计：双 CAN 总线（主/备），支持单线故障时自动切换。
- a) 机舱控制柜与塔基控制柜通信参数要求（光纤）：
 - 1) 通信距离 $\leq 100\text{m}$ （覆盖典型风机高度）；
 - 2) 光纤类型：铠装单模光纤（符合 IEC 60793-2-50 标准）；
 - 3) 抗干扰能力：满足 IEC 61000-4-3（30MHz~1GHz 电磁干扰）。
- a) 塔基控制柜与升压站服务器通信参数要求（以太网）：
 - 1) 通信距离 $\leq 10000\text{m}$ （塔基到升压站）；
 - 2) 网络架构：双环网冗余（符合 IEC 62439-3 标准）；
 - 3) 安全要求：数据传输加密，符合 GB/T 35273 个人信息安全规范。

6.5.7.3 通信可靠性验证要求

连续运行测试：系统连续运行48h，通信中断次数 ≤ 1 次；故障模拟测试：模拟CAN总线单线故障：系统自动切换至备用总线，无数据丢失；模拟光纤中断：系统切换至备用光纤，切换时间 $\leq 100\text{ms}$ ；模拟以太网故障：双环网自动切换，通信恢复时间 $\leq 50\text{ms}$ ；数据传输准确率： $\geq 99.99\%$ 。

6.6 环境适应性

6.6.1 温度适应性要求

工作温度：陆上机组适配严寒至高温环境，工作温度范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ ，覆盖北方严寒地区冬季低温及夏季暴晒高温工况；海上机组工作温度范围为 $-25^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ ，兼顾海洋环境冬季温和低温与夏季高湿高温特性，确保机组在海洋气候波动中稳定运行。

6.6.2 湿度适应性要求

- a) 工作湿度：正常运行时可耐受 $\leq 95\%$ RH 的高湿度环境（无凝露条件），通过密封设计与凝露抑制措施，防止电气回路短路、金属部件锈蚀。
- b) 恒定湿热测试：需依据《环境试验 第 2-78 部分：试验 Cab：恒定湿热》（IEC 60068-2-78）完成 48h 恒定湿热测试，测试条件为温度 40°C 、相对湿度 95% RH。测试后需满足：动力回路与控制回路绝缘电阻均 $\geq 5\text{M}\Omega$ ，无绝缘性能下降；金属部件、非金属外壳无腐蚀、鼓包、变形现象，电气连接部位无氧化松动，系统整体功能正常。

6.6.3 盐雾防护要求（适用于海上机组）

- a) 防护标准：符合《环境试验 第 2-11 部分：试验 Ka：盐雾》（IEC 60068-2-11）要求，采用防腐蚀材料及密封结构设计。
- b) 盐雾测试：需通过 96h 连续盐雾测试，测试条件为盐雾浓度 5% NaCl（质量分数）、喷雾压力 $0.07\sim 0.1\text{MPa}$ 、沉降量 $1\sim 2\text{mL}/(80\text{cm}^2\cdot\text{h})$ 。
- c) 测试后要求：所有暴露金属部件（包括紧固件、接地端子、外壳）无红锈、点蚀等腐蚀现象，非金属部件无老化、开裂；系统电气性能（绝缘电阻、介电强度、控制响应）无下降，加热单元、控制模块等核心部件功能正常。

6.6.4 沙尘防护要求（适用于陆上荒漠机组）

- a) 防护等级：设备整体防护等级 $\geq \text{IP65}$ （依据 GB/T 4208），其中“6 级防尘”确保无尘埃进入设备内部，“5 级防溅水”适配沙尘天气伴随的短时降水。
- b) 沙尘测试：需依据《环境试验 第 2-68 部分：试验 Fh：沙尘》（IEC 60068-2-68）完成 8h 沙尘测试，测试介质为滑石粉（粒径 $\leq 50\mu\text{m}$ ），测试浓度 $10\text{g}/\text{m}^3$ ，气流速度 $1\sim 2\text{m}/\text{s}$ 。
- c) 测试后要求：设备内部（电气腔室、加热单元腔体、控制模块接口）无沙尘沉积，密封件无损坏；系统机械传动部位（如阀门、风机）无卡滞，电气回路无短路、接触不良，加热、控制、检测等所有功能均正常运行。

6.6.5 海拔适应性要求

- a) 适用海拔：最高适配海拔 $\leq 4000\text{m}$ 。
- b) 性能修正：因高海拔空气稀薄导致散热效率与绝缘性能变化，需满足以下修正要求：以海平面（0m 海拔）为基准，海拔每升高 1000m，系统额定电流降低 5%，确保部件不会因散热不足过热损坏；海拔每升高 1000m，系统绝缘强度降低 10%，但降低后仍需符合本标准 6.4.2（绝缘电阻）、6.4.3（介电强度）的最低要求，避免绝缘失效。
- c) 特殊设计：高海拔地区使用时，电气部件需采用高海拔专用型号，加热单元需优化散热结构，确保性能稳定。

6.6.6 可维护性要求

6.6.6.1 模块化设计要求

系统核心功能部件需采用标准化模块化设计，具体要求如下：核心部件包括加热器、各类传感器（温度、结冰、压力传感器等）、鼓风机及控制模块，推荐采用独立成模设计，具备统一的安装接口、电气连接端子及固定尺寸；模块间采用快速插拔式或螺栓紧固式连接，无需复杂拆解即可实现单个组件的拆卸与更换，现场常规维护条件下，单个组件更换时间（含拆卸、安装、基础调试） $\leq 2\text{h}$ ；模块需具备防呆设计，避免安装错位导致的设备损坏，同时预留状态检测接口，便于快速判断模块是否正常工作。

6.6.6.2 标识规范要求

所有系统组件、线缆及接口需设置清晰、耐久的标识，具体要求如下：标识内容应包含设备名称、型号规格、额定参数（电压、电流、功率等）、安装位置编号、归属系统及线缆走向（线缆标识），确保运维人员快速识别；标识材质需满足耐温、耐磨损、抗紫外线、防油防水特性，粘帖牢固且不易脱落，长期使用无褪色、模糊现象；标识粘帖位置应醒目无遮挡，线缆标识间隔不超过 1m，接口标识需与对应部件标识一一对应，避免混淆。

6.6.6.3 维护周期要求

系统需明确各类部件的维护周期，确保运维工作有序开展，具体要求如下：易损件（含接触器触点、传感器探头、密封件、风管柔性接头）维护周期 ≤ 12 个月，维护内容包括外观检查、性能校准、老化评估，必要时进行更换；加热单元清洁周期 ≤ 12 个月，清洁内容包括表面积尘、油污及结冰残留清理，确保散热效率与加热均匀性；维护周期可根据实际运行环境（如高沙尘、高盐雾地区）适当缩短，但不得低于上述规定最低值，维护后需记录相关数据并存档。

6.6.6.4 备品备件要求

系统供应商需提供完善的备品备件保障，具体要求如下：需配套提供至少1套易损件备品备件，明细包括接触器（含触点组件）、温度传感器、结冰传感器（如有）、密封件等核心易损部件；备品备件需与原设备同型号、同规格，符合本标准技术要求，质量等级不低于原部件标准，且提供相应合格证明；配套提供详细的备品备件清单（含部件名称、型号、数量、用途、更换周期）及专用更换手册，手册需包含拆装步骤、工具清单、注意事项、故障排查要点及示意图，便于运维人员快速操作；备品备件需提供至少12个月的质保期。

6.6.7 气热防/除冰系统设备运行防火安全要求

6.6.7.1 电气防火要求

- a) 所有电气组件（接触器、加热器、控制器）的外壳应采用阻燃材料，符合 GB 8624 的 V0 级阻燃要求。
- b) 线缆选型：阻燃电缆
- c) 接线要求：接线端子宜采用阻燃型（PA66 材质），压线牢固，线鼻子与线缆匹配，无虚接、过热风险。
- d) 过载保护：动力回路配备塑壳断路器（MCCB），整定电流为额定电流的 $1.2 \sim 1.4$ 倍，控制回路配备微型断路器（MCB），整定电流为额定电流的 1.1 倍。
- e) 故障安全：当系统发生严重故障（如检测到火灾风险）时，应能自动安全停机并锁定，直至故障被人工复位。

6.6.8 消防配置要求

机舱内配置：机舱内、叶片维护入口处设置明显的消防警示标识；防火隔离：加热器与周围可燃物（如机舱保温材料、叶片内腔泡沫芯材）的距离 ≥ 300 mm，风管穿过可燃材料时需加装金属防火套管（厚度 ≥ 1 mm）。

7 叶片气热防/除冰系统保护配置

7.1 运行保护

7.1.1 设备故障保护

- 7.1.1.1 接触器故障保护：通过状态反馈信号监测接触器粘连、拒动故障，故障发生后 ≤ 1 s 切断对应动力回路电源，报警并上传气热防/除冰 SCADA 系统。
- 7.1.1.2 加热器故障保护：监测加热器开路、短路、过载故障，短路故障时立即切断电源，开路和过载故障时发出报警。
- 7.1.1.3 鼓风机故障保护：监测鼓风机电机过载、轴承超温故障，无备用鼓风机时切断加热电源并报警。
- 7.1.1.4 传感器故障保护：监测温度、冰层厚度、风速传感器的开路、短路、信号漂移故障（信号超出测量范围 $\pm 10\%$ ），故障时采用冗余算法（如历史数据均值）维持系统运行，同时发出报警。
- 7.1.1.5 电源故障保护：监测输入电压欠压（ ≤ 323 V）、过压（ ≥ 418 V）、缺相故障，故障持续时间超过 3s 时切断系统电源，电压恢复正常后自动重启。
- 7.1.1.6 其他严重故障保护：监测其他可能引起设备火灾、短路、过流、控制回路异常等严重后果的故障，故障发生时立即切断相关电源，报警并上传气热防/除冰 SCADA 系统。

7.1.2 安全极限保护

- 7.1.2.1 温度极限保护：叶片表面温度超过 70℃或叶片内腔温度超过 80℃时，立即切断加热器电源；加热器表面温度超过 150℃时，触发温度熔断器动作。
- 7.1.2.2 风压极限保护：风管内风压超过设定值或低于欠压设定值时，切断鼓风机电源并报警。
- 7.1.2.3 过载极限保护：动力回路电流超过额定电流 1.5 倍时，塑壳断路器瞬时跳闸，切断电源。
- 7.1.2.4 防雷保护：系统电源端、信号端安装电涌保护器（电源电涌保护器标称放电电流 $\geq 20\text{kA}$ ，信号电涌保护器标称放电电流 $\geq 5\text{kA}$ ），电涌保护器动作后发出报警，需手动复位，信号电涌保护器的使用应不影响信号的正常传输。
- 7.1.2.5 紧急停机保护：机舱内设置紧急停机按钮（红色蘑菇头式），按下后立即切断除冰系统所有电源，同时向机组主控发送紧急停机信号。

7.2 故障报警与应急处置

7.2.1 故障分类与报警机制

表 4 故障分类与报警机制

故障等级	故障类型	报警方式	处理方式
严重故障	接触器粘连、加热器短路、鼓风机全停、电涌保护器动作、紧急停机	气热防/除冰SCADA系统红灯及声音报警	立即切断系统电源，机组紧急停机，需人工排查整改后重启
一般故障	加热器开路、传感器故障、电源欠压/过压、风压过低	声光报警（黄色指示灯闪烁+蜂鸣器间歇鸣）、气热防/除冰SCADA系统黄色报警	系统自动切换至备用部件或冗余模式运行，运维人员24h内处理
轻微故障	接触器触点温升过高（50℃~65K）、传感器信号漂移、风管轻微漏风	气热防/除冰SCADA系统蓝色报警，无现场声光报警	记录故障信息，运维人员下次维护时处理

注：历史报警记录存储时间 ≥ 1 年。

7.2.2 紧急停机流程

- 7.2.2.1 紧急停机触发条件：叶片表面温度超温（ $\geq 80^\circ\text{C}$ ）、烟雾探测器报警、电涌保护器动作。
- 7.2.2.2 紧急停机停机步骤：
- 控制系统立即切断加热器、鼓风机电源，停止所有输出；
 - 启动报警，向气热防/除冰 SCADA 系统上报紧急停机信息。
- 7.2.2.3 紧急停机恢复流程：排查故障原因并整改后，手动复位紧急停机按钮，系统进行自检（ $\geq 30\text{s}$ ），自检合格后方可重新启动。

7.2.3 手动干预权限与操作要求

7.2.3.1 手动干预权限分级：

- 管理员权限：可进行所有操作（模式切换、参数修改、故障复位、紧急停机）；
- 运维权限：可进行启动 / 停止操作、故障查询、数据导出，不可修改关键参数；
- 访客权限：仅可查看运行参数和报警记录，无操作权限。

7.2.3.2 手动干预操作要求：

- 手动操作需通过密码验证（管理员密码长度 ≥ 8 位，含字母、数字、特殊字符）；
- 关键参数修改（如温度设定值、过载保护电流）需双重确认（两人输入密码）；
- 所有手动操作记录（操作人、操作时间、操作内容）自动存储，留存时间 ≥ 24 个月；
- 远程操作仅支持管理员权限，操作前需确认现场无人员作业，操作后需反馈执行结果。

8 工厂验收 (FAT)

8.1 文件资料审查

8.1.1 设计文件与图样

- 8.1.1.1 系统供应商应提供以下完整设计文件，文件需加盖设计单位公章和骑缝章：
- 系统总体技术方案（含设计依据、功能原理、技术参数表）；
 - 系统原理图（电气原理图、控制逻辑图）；

- c) 结构布置图（机舱内设备布置图、叶片内部风管/传感器布置图）；
- d) 部件明细表（含部件名称、型号、规格、制造商、数量、材质）；
- e) 接口协议文件（通信协议、信号定义、电源接口参数）；
- f) 测试报告（型式试验）、安装手册、操作维护手册、软件说明等。

8.1.1.2 审查要求：设计文件应符合本规范及相关引用标准，与风力发电机组接口匹配，计算数据准确，图样标注清晰。

8.1.2 产品合格证与型式试验报告

8.1.2.1 产品合格证：需包含产品名称、型号、规格、出厂编号、生产日期、检验员签字、制造商公章，确保产品经出厂检验合格。

8.1.2.2 型式试验报告宜由具备资质的第三方检测机构出具，包含以下测试项目及合格证明：

- a) 所有柜体、加热器、鼓风机电气性能测试（绝缘电阻、介电强度、EMC）；
- b) 所有安装于轮毂、叶片内的柜体、加热器、鼓风机机械性能测试（机械强度、振动适应性）；
- c) 所有柜体、加热器、鼓风机环境适应性测试（高低温、湿热、盐雾）；
- d) 电缆防火性能测试（阻燃等级、耐火时间）；
- e) 电涌保护器型式试验（电涌耐受能力测试、动作特性测试、环境与机械测试、安全性能测试等）；
- f) 接触器型式试验报告（通断能力、电寿命、灭弧性能、防熔接）。

8.1.2.3 审查要求：型式试验报告有效期 ≤ 3 年，测试项目覆盖本规范要求，测试数据符合规定阈值。

8.1.3 主要部件质检文件

8.1.3.1 滑环：绝缘电阻测试报告、机械寿命测试报告（ $\geq 10^6$ 转）、接触电阻测试报告（ $\leq 50\text{m}\Omega$ ）。

8.1.3.2 控制器：功能测试报告、EMC 测试报告、HMI 操作测试报告。

8.1.3.3 鼓风机：风量风压测试报告、噪声测试报告、电机绝缘测试报告、连续运行测试报告（单台 $\geq 3\text{h}$ ，同型号提供 $\geq 72\text{h}$ 运行报告）。

8.1.3.4 加热器：功率测试报告、绝缘电阻测试报告、阻燃测试报告。

8.1.3.5 接触器：制造商出厂检验报告、型式试验报告。

8.1.3.6 传感器：校准证书（由制造商出具，校准有效期 ≤ 1 年）、精度测试报告。

8.1.3.7 审查要求：质检文件应真实有效，测试数据符合本规范 6.2.2 条要求，无缺项、伪造现象。

8.2 外观与结构检查

8.2.1 气热防/除冰系统组件外观与标识

8.2.1.1 外观检查：

- a) 所有组件表面无划痕、变形、腐蚀、裂纹，涂层均匀无脱落；
- b) 加热器、鼓风机无油污、灰尘，接线端子无氧化、松动；
- c) 风管无破损、漏气；
- d) 传感器探头无损伤，导线屏蔽层无破损。

8.2.1.2 标识检查：

- a) 组件标识：设备名称、型号、额定参数（电压、电流、功率）、制造商、生产日期、防护等级清晰可辨；
- b) 线缆标识：每根线缆两端均有编号（与原理图一致），标识耐摩擦、不易脱落；
- c) 安全标识：紧急停机按钮、消防器材、危险区域（如加热器附近）应有明显安全警示标识。

8.2.1.3 验收标准：

- a) 紧固螺栓、螺母拧紧到位，有力矩标记（采用力矩扳手复核，误差 $\leq \pm 5\%$ ），防松措施齐全；
- b) 线缆排列整齐，绑扎间距 $\leq 300\text{mm}$ ，无交叉缠绕，接线端子压线牢固（用拉力计测试，拉力 $\geq 5\text{N}$ 无松动）；
- c) 控制线缆屏蔽层单端接地（连接点过渡电阻 $\leq 0.1\Omega$ ），无悬空、断裂；
- d) 线缆绝缘层无破损，与金属部件无摩擦接触（必要时加装绝缘护套）。

8.3 电气安全与性能测试

8.3.1 绝缘电阻测试

8.3.1.1 测试范围：系统所有电气回路，涵盖加热元件回路、控制系统回路、传感器信号回路、接地回路及电源回路等，重点检测各回路与地、不同回路之间的绝缘性能。

8.3.1.2 合格标准：电源回路、加热元件主回路绝缘电阻 $\geq 5\text{M}\Omega$ ；控制回路、传感器回路绝缘电阻 $\geq 2\text{M}\Omega$ ；所有回路与地之间无短路现象。

8.3.2 介电强度（耐压）测试

8.3.2.1 测试范围：系统各电气回路与地之间、不同电压等级回路之间，重点针对加热元件、控制柜内主回路、电源进线端等关键部位。

8.3.2.2 合格标准：测试过程中无击穿、闪络、绝缘击穿声等异常现象，耐压测试仪不跳闸，测试后回路绝缘电阻仍符合 8.3.1 条要求。

8.3.3 接地连续性测试

8.3.3.1 测试范围：系统所有金属外壳（控制柜、鼓风机、加热器外壳等）、接地端子、防雷测试点、线缆屏蔽层等接地部位，重点检测各接地部位与主接地网的电气连通性。

8.3.3.2 合格标准：所有接地部位与主接地网的连通电阻 $\leq 0.1\Omega$ ；接地导体无松动、断裂、腐蚀等缺陷，接线端子压接牢固、标识清晰。

8.4 功能与性能测试

8.4.1 控制系统基本功能测试

8.4.1.1 测试范围：系统控制柜内的控制器、人机交互界面（HMI）、电源模块、输入输出模块、模式选择开关等，测试上电初始化、工作模式切换及人机交互操作的可靠性。

8.4.1.2 合格标准：

- a) 上电初始化时间 $\leq 30\text{s}$ ，各组件供电电压符合要求，初始化后无异常报警，处于待机状态；
- b) 模式切换灵活可靠，切换时间 $\leq 2\text{s}$ ，模式显示准确，不同模式下执行机构动作符合设计逻辑；
- c) HMI 操作灵敏，参数输入准确，实时数据显示误差 $\leq \pm 2\%$ ，历史数据和报警记录完整可查，报警提示及时准确。

8.4.2 加热功能测试

8.4.2.1 测试范围：系统的加热器、功率调节模块等，启停控制及功率输出的稳定性、准确性。

8.4.2.2 合格标准：

- a) 加热器启动/停止响应及时，启动后 30s 内功率趋于稳定，停止后功率立即降至 0，紧急停止功能可靠；
- b) 不同功率等级下，实际输出功率与设定功率偏差 $\leq \pm 10\%$ ，温度随功率平稳变化，无异常波动。

8.4.3 报警与保护功能测试

8.4.3.1 测试范围：系统的过温保护、过流保护、过压保护、欠压保护、传感器故障保护、风机故障保护等所有报警与保护功能，覆盖控制器、加热元件、传感器、鼓风机等关键组件。

8.4.3.2 合格标准：所有模拟故障场景下，系统均能在规定时间内触发对应报警和保护动作，报警信息准确清晰，保护动作能有效避免设备损坏；故障排除后，系统需手动复位才能恢复正常运行，无自动恢复现象。

8.5 FAT 验收报告

8.5.1 报告编制与生效要求

工厂验收测试（FAT）完成后，由系统供应商牵头编制《风力发电机组叶片气热防/除冰系统工厂验收报告》（以下简称“报告”）。报告需全面、真实、详细记录所有测试项目的具体信息，包括测试项目名称、测试方法（含设备、步骤、环境条件）、验收标准（引用文件条款号）、实测数据、测试结果判定，以及验收过程中发现的各类问题（含轻微偏差、不合格项）。报告需经业主（甲方）、系统供应

商（乙方）共同审核，各方授权代表签字确认并加盖单位公章后生效。FAT验收合格（含整改后复验合格）是设备允许出厂发货的必要前提条件，未通过FAT验收的设备不得安排发货。

8.5.2 报告基本信息规范

- 8.5.2.1 报告首页需明确列明以下核心基本信息，确保溯源性与唯一性。
- 8.5.2.2 验收项目名称：风力发电机组叶片气热防/除冰系统工厂验收。
- 8.5.2.3 验收编号：采用“FAT-年份-序列号”格式编制（例：FAT-2024-001），年份为验收当年公历年份，序列号为三位阿拉伯数字（从001起依次递增）。
- 8.5.2.4 验收对象：设备型号（含版本号）、生产批次号、每台设备出厂编号（多台设备时需逐一列明）。
- 8.5.2.5 验收单位：甲方（业主）单位全称、乙方（系统供应商）单位全称（需与供货合同一致）。
- 8.5.2.6 验收时间：明确验收开始日期（年/月/日）与结束日期（年/月/日），若存在整改复验，需补充复验时间。
- 8.5.2.7 验收地点：乙方生产工厂具体地址。
- 8.5.2.8 参与人员：分别列出甲、乙双方参与验收的负责人（姓名、职务、联系方式）、测试工程师（姓名、资质证书编号），预留签字栏（含签字、日期），确保参与人员身份可追溯。

8.5.3 验收依据文件清单

报告需单独列明本次 FAT 验收的全部依据文件，按优先级排序，且文件需为有效版本，具体包括但不限于：甲乙双方签订的供货合同及补充协议、技术协议（需注明合同编号、签订日期）；风力发电机组叶片气热防/除冰系统相关国家标准、行业标准、团体标准、国际标准；系统设计规范、产品技术说明书、出厂检验规程（需加盖乙方技术部门公章）；本次验收所用计量器具的校准证书（需在有效期内，注明校准机构名称、校准日期、证书编号）；经双方确认的 FAT 测试方案（含测试大纲、合格判定准则）。

8.5.4 验收范围与内容概要

- 8.5.4.1 报告需清晰界定 FAT 验收的覆盖范围，并简要说明核心测试内容，确保各方对验收边界达成一致。
- 8.5.4.2 验收范围：本次验收涉及的风力发电机组叶片气热防/除冰系统设备（含加热单元、控制模块、鼓风机、传感器、管路组件、电气柜等）、系统软件（控制程序、监控软件）及配套附件。
- 8.5.4.3 测试内容概要：涵盖 8.3 工厂电气测试与 8.4 功能与性能测试的全部核心项目，具体包括：
 - a) 电气测试：绝缘电阻测试、介电强度测试、接地连续性测试；
 - b) 功能与性能测试：控制系统模式切换功能、加热启停响应功能、报警保护功能（超温、过载、故障报警）。

8.5.5 验收测试数据汇总要求

- 8.5.5.1 报告需以表格形式系统汇总所有测试数据，确保数据完整、清晰、可追溯。
- 8.5.5.2 关键测试数据表格：按“电气测试”、“功能与性能测试”分类编制表格，每表格需包含测试项目名称、测试时间、测试环境条件（温度、湿度）、所用计量器具编号、设计标准值、实测值、偏差值、数据单位等栏目；核心数据需重点标注，包括绝缘电阻测试值、耐压测试泄漏电流值、接地电阻值、加热功率偏差值等。
- 8.5.5.3 合格性判定汇总：单独编制判定表格，按测试项目逐一列明“合格”或“不合格”判定结果，判定依据需明确对应验收标准条款；对不合格项需详细标注具体位置（如设备编号、部件名称、测试点）、实测数据与标准值的差异，不得遗漏任何测试项目的判定结果。

8.5.6 验收结论分类要求

根据所有测试项目的合格性判定及不合格项整改情况，给出明确、唯一的验收结论，结论分为以下三类：

- a) 合格：所有测试项目实测结果均符合验收标准要求，无任何不合格项，系统核心性能、安全指标、功能完整性均满足合同与技术协议要求，同意通过工厂验收。

- b) 有条件合格：验收过程中发现轻微不合格项（不影响系统核心性能、安全运行，且可通过简单整改修复），乙方已按要求完成整改，复验结果全部合格，不遗留任何质量隐患，同意通过工厂验收；报告需附整改确认文件（整改方案、复验记录、对比照片）作为附件。
- c) 不合格：存在重大不合格项（如绝缘击穿、加热功率严重超标、控制功能失效等，影响系统安全运行或核心性能），或整改后复验仍未达到合格标准，不同意通过工厂验收；报告需明确后续整改要求（整改内容、完成时限）、复验时间及未达标项的处理预案（如更换部件、重新设计）。

8.5.7 附件清单及要求

报告需配套完整附件，附件需与报告正文内容对应，确保验收过程可追溯、可验证，附件清单包括但不限于：所有测试项目的原始记录表格（含测试人员签字、审核人员签字）；本次验收所用计量器具的校准证书复印件（需加盖校准机构公章及乙方质量部门公章）；不合格项整改报告及复验记录（含整改方案、整改过程照片、复验数据）；关键测试环节现场照片及视频资料（照片需标注拍摄时间、地点、测试项目；视频需配文字说明，时长不少于30秒/项）；系统软件版本说明（含控制程序版本号、监控软件版本号、发布日期、功能清单）；设备出厂合格证（需加盖乙方质量部门公章）；双方确认的 FAT 测试方案（含测试大纲、合格判定准则）。

8.5.8 签字确认栏要求

报告末尾需设置规范的签字确认栏，确保验收结论具备法律效力；甲方（业主）、乙方（系统供应商），均需预留“单位全称”“授权代表签字”“签字日期”“单位公章”栏目，授权代表需提供加盖甲方公章的授权委托书复印件作为报告附件。

9 现场验收（SAT）

9.1 叶片内部组件检查

9.1.1 叶片内部组件检查

9.1.1.1 检查范围：叶片内部所有气热防/除冰系统组件及安装工艺，包括加热器、鼓风机、温度/湿度传感器、送风风管、电气线缆、外壳接地、手糊固定部位及所有紧固件（螺栓、螺母、卡箍等）。

9.1.1.2 合格标准：所有组件安装位置符合设计图纸；加热器、鼓风机、传感器、风管、线缆固定牢固，无松动、破损；防雷接线可靠，材料合规，电阻达标；手糊工艺无缺陷，与基体结合紧密；紧固件型号正确、力矩合格、防松有效；传感器回路绝缘电阻达标。

9.1.2 机舱、轮毂内设备检查

9.1.2.1 检查范围：机舱内气热防/除冰系统相关设备，包括控制柜及所有电气接线（电源接线、控制接线、接地接线）。

9.1.2.2 合格标准：安装牢固，位置符合设计；接线正确、牢固，相序及标识清晰；设备外观完好，防护到位；点动测试无异常。

9.1.3 防雷与接地系统检查

9.1.3.1 检查范围：气热防/除冰系统全系统防雷与接地设施，包括控制柜接地、鼓风机接地、加热器接地及各接地连接点。

9.1.3.2 合格标准：接地系统连接完整，所有金属部件等电位连接；各接地端子与接地网连接点过渡电阻 $\leq 0.1\Omega$ 。

9.2 现场电气测试

9.2.1 回路绝缘电阻测试

9.2.1.1 测试范围：现场安装完成后的系统所有电气回路，包括加热元件回路、控制系统回路、传感器信号回路、电源回路及接地回路，重点检测现场接线后各回路的绝缘性能（区别于工厂测试，侧重接线后的整体绝缘）。

9.2.1.2 合格标准：电源回路、加热元件主回路绝缘电阻 $\geq 5\text{M}\Omega$ ；控制回路、传感器回路绝缘电阻 $\geq 2\text{M}\Omega$ 。

9.3 系统联调与功能测试

9.3.1 与监控系统通信与联动测试

9.3.1.1 测试范围：气热防/除冰系统与风力机叶片远程监控系统的通信链路、数据交互内容及联动控制逻辑，包括数据上传、指令接收、状态反馈及异常联动响应。

9.3.1.2 合格标准：物理通信链路连通性良好，丢包率 $\leq 1\%$ ；数据传输误差 $\leq \pm 2\%$ ，延迟 $\leq 1\text{s}$ ，24h传输成功率 $\geq 99.9\%$ ；远程指令执行准确率100%，响应时间 $\leq 2\text{s}$ ；报警信息与联动逻辑符合设计要求。

9.3.2 现场/远程控制功能测试

9.3.2.1 测试范围：气热防/除冰系统现场控制（控制柜按钮、HMI）与远程控制（监控系统）的所有操作功能，包括启停控制、模式切换、参数调节及权限管理。

9.3.2.2 合格标准：现场控制按钮与HMI操作响应及时，参数设置偏差 $\leq \pm 5\%$ ；远程控制指令执行准确率100%，数据显示误差 $\leq \pm 2\%$ ；权限管控有效，模式切换平稳无冲突，通信中断时控制权转移可靠。

9.3.3 全系统报警功能模拟测试

9.3.3.1 测试范围：系统所有报警类型，包括电气故障（过流、过压、绝缘不良）、设备故障（风机故障、传感器故障）、工艺故障（过温、欠温）及通信故障。

9.3.3.2 合格标准：报警触发准确率100%，报警响应时间 $\leq 2\text{s}$ ；报警信息在各终端一致且完整；声光报警有效，复位后系统恢复正常；报警优先级逻辑正确，历史日志可追溯。

9.4 本地运行测试

9.4.1 试验目的：检测叶片防除冰系统的自动运行、动作、保护功能

9.4.2 试验过程：

- 根据叶片防除冰系统的启动、停止条件，根据现场环境调整参数设置，直至防除冰系统自动触发并自动停止；
- 持续运行过程中记录加热功率的变化及对应时间的叶片内各温度传感器数据，观察加热功率换挡的动作，并记录稳定后T1（加热器出口温度）、T2（风管出口温度）、T3（叶片内腔温度）、T4（回风温度）的最高温度；
- 检查主电缆运行的情况；
- 人为屏蔽信号或制造通讯故障，观察系统保护动作；
- 修改防冰进入退出的温湿度参数，观察系统是否能按照参数顺利进入退出防冰程序。

表5 本地运行测试

测试环境： 开始时间：		叶片编号： 结束时间：	测试日期： 测试人：
记录事项	记录值		要求
机舱柜主页面状态	外界温度：	外界湿度：	数据显示正常
运行前数据记录	T1= T3= 机舱主电缆温度： 机舱主电缆端子温度：	T2= T4= T4= T4=	
2小时后数据记录	T1= T3= 机舱主电缆温度： 机舱主电缆端子温度： 机舱主电缆总电流：	T2= T4= T4= T4=	1. T1、T2、T3、T4是否有温度超限与换挡间隔约束 2. 主电缆温度温升不超过80℃ 3. 主电缆端子温升不超过80℃ 4. 主电缆总电流不超过设计值 $\pm 10\%$
故障模拟检查	1. 通讯故障模拟2. 超温故障模拟3. 过电流故障模拟		故障有响应，恢复后故障能复位
防除冰模拟检查	修改进入/退出防冰程序的温湿度参数		系统能按照参数进入/退出防冰程序

9.5 远程运行测试

9.5.1 试验目的：检测叶片气热抗冰系统在风机启机发电的工况下的稳定性能。

9.5.2 测试时间：连续运行 24 小时。

9.5.3 试验过程：

- a) 根据现场环境调整参数设置，让防除冰系统稳定运行在防冰模式下，加热器一直有输出，并且有最大功率输出（可以是短时）。
- b) 启动风机；
- c) 人员需要 24 小时持续保持观察系统运行的情况，发现异常应立即汇报。

表 6 远程运行测试

测试环境：	叶片编号：	测试日期：
开始时间：	结束时间：	测试人：
记录事项	主机记录值	除冰系统记录值
环境温湿度	外界温度： 外界湿度：	外界温度： 外界湿度：
自耗电统计	/	除冰系统自耗电（每小时平均值）：
总功率统计	/	除冰系统总功率（24小时平均值）：
数据观察	/	风机运行发电前后，整个测试过程要求电压、电流、温度、环境温湿度等数据无异常跳动，通讯无异常

9.6 气热防/除冰性能验证

9.6.1 自然覆冰条件下的启停与运行状态

9.6.1.1 测试范围：自然覆冰环境下，气热防/除冰系统的自动启停逻辑、运行状态参数及适应性，覆盖覆冰形成、发展至融化的全流程。

9.6.1.2 合格标准：系统能根据设定阈值自动启停，启动响应时间 $\leq 30s$ ；运行过程中无异常停机或报警，各参数稳定在设计范围内；覆冰形成至完全融化的全流程可有效监控，数据记录完整。

9.6.2 气热防/除冰系统效果评估

9.6.2.1 评估核心指标：气热防/除冰系统的核心性能指标，包括覆冰期风力发电机组实发电量、系统自耗电率、系统可利用率、覆冰损失挽回率。

9.6.2.2 评估合格标准：

- a) 环境气温在 $-2^{\circ}C \sim 0^{\circ}C$ 以内范围内，应能保证有效实现防冰功能；环境气温在 $-4^{\circ}C \sim 0^{\circ}C$ 以内范围内，应能保证有效实现除冰功能。
- b) 可利用率：气热防/除冰系统设备运行的可利用率(ρ) $\geq 90\%$ ；
- c) 自耗电率：在年度覆冰期叶片气热防/除冰系统自耗电率(ϵ) 不应超过安装气热防/除冰系统风力发电机组发电量的 10%。
- d) 覆冰损失挽回率：在年度覆冰期叶片气热防/除冰系统覆冰电量损失挽回率宜达到 40%以上。
- e) 功率曲线拟合度：安装气热防/除冰系统的风机功率曲线拟合度（覆冰期） $>90\%$ （标准功率曲线）。

9.7 SAT 验收报告

9.7.1 报告基本信息

包括验收项目名称、验收编号、验收对象、验收单位、主机厂、叶片厂、检测机构、验收时间、验收地点、参与人员。

9.7.2 验收依据

明确现场验收遵循的文件，包括但不限于：系统设计规范、产品技术说明书、甲乙双方技术协议、FAT验收报告及整改记录、现场安装施工方案及自检报告、计量器具校准证书。

9.7.3 验收范围与内容概要

简要说明SAT涵盖的核心测试项目，包括现场安装质量检查（叶片内部组件、机舱设备、防雷接地）、现场电气测试（绝缘电阻、接地电阻、接触器工况验证）、系统联调与功能测试（通信联动、控制功能、

报警功能)、空载运行测试(参数记录、温控逻辑、参数匹配)、气热防/除冰性能验证(效果评估、能耗记录),明确各项测试重点为现场安装适配性和实际工况稳定性。

9.7.4 验收测试数据汇总

9.7.4.1 关键数据表格按“安装质量-电气性能-功能测试-性能验证”分类整理核心数据,重点包含:安装尺寸偏差、绝缘电阻测试值、接地电阻值、接触器温升数据、通信传输延迟、报警响应时间、除冰见效时间、覆冰损失挽回率、各模式能耗值等,每个数据需标注测试时间、测试人员、所用仪器编号及环境条件。

9.7.4.2 FAT问题整改复验记录针对FAT验收中提出的不合格项,记录现场整改措施、整改完成时间、复验测试数据及判定结果,确保所有FAT遗留问题已闭环。

9.7.4.3 合格性判定汇总对每个测试项目对照合格标准给出“合格”“不合格”或“有条件合格”判定,对有条件合格项需注明附加条件(如“需每6个月复查接地电阻”)。

9.7.5 现场问题及处理记录

详细记录现场验收过程中发现的新问题,包括问题描述、发生位置、实测数据、原因分析、临时处理措施、长期整改方案、整改责任单位及完成时限,需附问题现场照片及整改前后对比数据,整改后由监理单位复核确认。

9.7.6 验收结论

根据测试数据及问题整改情况,给出明确结论,分为三类:

- a) 合格:所有测试项目符合合格标准,无未闭环问题,同意通过现场验收。
- b) 有条件合格:存在轻微非核心问题(如部分能耗指标略高于设计值但满足使用要求),已制定整改计划并经甲方确认,整改完成后提交复验报告即可通过验收。
- c) 不合格:存在重大问题(如气热防/除冰温度不达标、接地电阻超标),影响系统安全或核心性能,需全面整改后重新组织现场验收,明确重新验收的时间节点。

9.7.7 附件清单

包括现场测试原始记录、安装质量检查记录表、电气测试报告、通信联动测试日志、气热防/除冰性能评估报告、能耗记录报表、问题整改报告及复验记录、现场照片及视频资料、仪器校准证书、乙方提交的现场安装总结报告。

9.7.8 签字确认栏

设置甲方项目负责人、乙方项目负责人、监理工程师(如有)、检测机构负责人签字栏,注明签字日期,加盖各单位公章后报告生效。

10 验收结果判定与交付

10.1 合格判定标准

10.1.1 整体合格判定原则

系统需同时满足FAT和SAT验收合格要求,且所有不合格项已完成整改并复验合格,方可判定为整体验收合格。FAT与SAT验收相互关联,若SAT中发现FAT未覆盖的核心问题,需追溯FAT验收流程并补充测试。

10.1.2 核心指标合格要求

以下关键指标为“一票否决项”,任一指标不达标则直接判定为不合格,需彻底整改后重新验收:

- a) 电气安全指标:绝缘电阻(电源回路 $\geq 5\text{M}\Omega$ 、控制回路 $\geq 2\text{M}\Omega$)、与接地网连接点过渡电阻($\leq 0.1\Omega$)、介电强度测试无击穿现象。

- b) 气热防/除冰系统核心性能：系统设备运行的可利用率(ρ) $\geq 90\%$ 、最低防冰温度 $\leq -2^{\circ}\text{C}$ 、最低除冰温度 $\leq -4^{\circ}\text{C}$ 、除冰见效时间 $\leq 240\text{min}$ 、覆冰损失挽回率 $\geq 40\%$ 、气热防/除冰系统自耗电率 $<$ 安装气热防/除冰系统风力发电机组发电量的10%。
- c) 安全保护功能：过温、过流、风机故障等关键报警响应时间 $\leq 2\text{s}$ ，保护动作可靠无失效。
- d) 通信联动性能：数据传输延迟 $\leq 1\text{s}$ ，远程控制指令执行准确率100%。

10.1.3 一般指标合格要求

除核心指标外的其他指标（如能耗、安装尺寸偏差、HMI操作响应速度等），需满足“90%以上指标达标”或“不达标指标不影响系统安全运行及核心功能”，方可判定为合格。对不达标一般指标，需在验收报告中注明并提出改进建议。

10.2 验收文档清单与交付

10.2.1 文档交付要求

乙方需向甲方交付纸质文档及电子文档（U盘或光盘，含可编辑版本及PDF版本），文档需加盖乙方公章，内容完整、数据准确、装订规范。

10.2.2 必交付文档清单

10.2.3 技术文件类：系统设计说明书、产品合格证、安装手册、操作维护手册、电气原理图、接线图、零部件清单及供应商资质证明。

10.2.4 验收报告类：FAT 验收报告、SAT 验收报告、不合格项清单及整改报告、复验报告。

10.2.5 测试记录类：所有测试项目的原始记录表格、数据汇总表、仪器校准证书、现场照片及视频资料。

10.2.6 其他文件：培训记录（甲方操作人员培训签到表及考核结果）、售后服务承诺函（含质保期内服务计划）。

附录 A
(资料性)
风电叶片气热防/除冰系统工厂验收单

表 A.1 风电叶片气热防/除冰系统工厂验收文件资料审查表 (符合性+完整性验证)

验收类别	序号	验收项目	合格标准	验收方法	验收结果	备注(文件编号/测试数据/缺失项)
一、文件资料审查		(符合性+完整性验证)				
设计文件与图样	1	系统总体技术方案(含设计依据、功能原理、技术参数表)	内容完整,加盖设计单位公章及骑缝章,设计依据符合本规范及引用标准,技术参数明确无歧义	查阅文件原件,核对设计依据与本规范、引用标准的一致性,核查技术参数的完整性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	技术方案编号:
	2	系统原理图(电气、控制逻辑)	图样标注清晰(含部件编号、接口定义、线缆规格),逻辑严谨,与实际装配一致	图样与实物(控制柜、管路)比对,核查关键回路设计合理性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	原理图编号:
	3	结构布置图(机舱设备、叶片内部风管/传感器、安装固定图)	布置符合叶片内腔及机舱空间要求,安装尺寸、固定方式明确,满足机组接口匹配	结合机组接口参数,验证布置可行性;核对安装固定方式与机械特性要求一致性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	布置图编号:
	4	部件明细表(名称、型号、规格、制造商、数量、材质)	信息完整准确,无缺项、错项,材质标注符合机械特性及材料兼容性要求	逐一对明细项与实物部件(型号、数量、材质)进行一致性核对	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	明细表编号:
	5	接口协议文件(与机组主控通信协议、信号定义、电源接口参数)	协议格式规范,信号定义清晰,电源接口(电压、电流)匹配机组要求,通信链路明确	核查协议条款与机组主控接口的兼容性,验证信号定义、电源参数合规性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	协议文件编号:
产品合格证明	6	产品合格证	包含产品名称、型号、规格、出厂编号、生产日期、检验员签字、制造商公章	查阅文件完整性与规范性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	合格证编号:
主要部件质检文件	7	型式试验报告(第三方资质机构出具)	有效期 ≤ 3 年,覆盖电气性能(绝缘电阻、介电强度、EMC)、机械性能(机械强度、振动适应性)、环境适应性(高低温、湿热、盐雾)、防火性能(阻燃等级)、接触器专项测试	核查报告资质、覆盖范围,比对测试数据与本规范合格阈值一致性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	试验报告编号:
	8	滑环	提供绝缘电阻($\geq 100M\Omega$)、机械寿命($\geq 10^6$ 转)、接触电阻($\leq 50m\Omega$)测试报告	查阅测试报告,验证关键指标达标情况	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	测试报告编号:
	9	控制器	提供功能完整性、EMC(符合 IEC 61000-6-3)、HMI 操作响应测试报告	核查测试项目完整性,验证 EMC 测试数据合规性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	测试报告编号:
	10	鼓风机	提供风量风压(偏差 $\leq \pm 10\%$ 设计值)、噪声($\leq 110dB(A)$)、电机绝缘等级、连续运行($\geq 72h$)测试报告	核对测试数据与设计指标一致性,验证连续运行无故障记录	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	测试报告编号:

验收类别	序号	验收项目	合格标准	验收方法	验收结果	备注(文件编号/测试数据/缺失项)
	11	加热器	提供额定功率(偏差 $\leq\pm 10\%$ 设计值)、绝缘电阻($\geq 5M\Omega$)、阻燃测试报告	比对测试数据与设计指标,核查阻燃等级符合要求	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	测试报告编号:
	12	接触器	提供制造商出厂检验报告及型式试验报告	核查报告覆盖项目完整性与数据准确性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	检验报告编号:
	13	传感器(温度、压力、风速、覆冰等)	提供制造商出具的校准证书(有效期 ≤ 1 年)、精度测试报告(误差 $\leq\pm 2\%$ FS)	验证校准证书有效性,核对精度测试数据达标情况	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	校准证书编号:
二、实物外观与安装质量检查						
部件外观质量	14	核心部件(加热器、鼓风机、控制器、传感器)	表面无磕碰、锈蚀、变形,标识清晰(型号、规格、制造商),密封完好	目视检查 + 手检,逐一核查部件外观及标识	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
	15	风管、连接件及固定部件	风管无裂纹、破损,	目视检查	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
安装固定质量	16	紧固件安装	螺栓等级 ≥ 8.8 级、螺母 ≥ 8 级,配备弹簧垫圈 + 螺纹胶(如 Loctite 243)双重防松,拧紧力矩符合 GB/T 16823.3	目视检查防松措施,用扭矩扳手抽检拧紧力矩	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	抽检力矩值:
	17	减振装置安装(鼓风机、加热器)	配备邵氏 A 50~60 橡胶减振垫	目视检查减振垫规格	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	减振垫规格:
	18	电气接线	接线规范,标识清晰,绝缘层无破损	目视检查接线完整性及标识	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	接地电阻值:
三、功能性测试						
控制系统功能	19	模式切换功能(防冰 / 除冰)	接收指令后,模式切换响应时间 $\leq 3s$,HMI 实时显示当前模式	通过 HMI 下发模式切换指令,记录响应时间,核查显示一致性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	响应时间:
	20	参数调节功能(加热功率、风量)	调节范围符合设计要求,调节精度 $\leq\pm 10\%$,参数稳定无漂移	设定 3 组不同参数(最小 / 额定 / 最大),用仪器测量实际输出值	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	实测参数:
	21	数据采集与上传功能	传感器数据采集准确(误差 $\leq\pm 2\%$ FS),能实时上传至 HMI 及远程监控接口	模拟传感器信号,核查 HMI 及监控接口数据显示一致性	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
加热系统性能	22	加热功率与温度控制	额定功率偏差 $\leq\pm 10\%$ 设计值	用功率计测量加热功率	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	实测功率: 实测温度:
送风系统性能	23	风量	风量偏差 $\leq\pm 10\%$ 设计值	用风速仪 + 压力传感器测量管路出风口风量	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	实测风量: 实测风压:
保护功能验证	24	过载保护	模拟加热器 / 鼓风机过载(120%额定电流),系统在 $\leq 3s$ 内切断回路并报警	调节电源输出模拟过载,观察系统动作及报警情况	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	动作时间:
	25	超温保护	模拟气流温度超设定阈值($+10^{\circ}C$),系统切断加热回路并报警	用温度模拟器输入超温信号,核查系统保护动作	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
	26	紧急停机功能	按下紧急停机按钮,系统立即切断所有动力回路,HMI 显示报警信息	手动操作紧急停机按钮,观察系统停机状态及报警显示	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	

验收类别	序号	验收项目	合格标准	验收方法	验收结果	备注(文件编号/测试数据/缺失项)
通信兼容性	27	与机组主控通信	通信链路稳定,数据传输无丢包(丢包率 $\leq 0.1\%$) 信号响应时间 $\leq 2s$	搭建通信测试环境,连续测试 1h,记录丢包率及响应时间	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	丢包率: 响应时间:

表 A.2 风电叶片气热防/除冰系统工厂验收电气安全与性能测试表（量化+功能性验证）

测试类别	序号	测试项目	测试条件	测试设备	测试步骤	合格标准	测试结果	实测数据/备注（异常处理情况）
绝缘电阻测试	1	加热器、鼓风机、控制柜		500V/1000V 兆欧表（经校准在有效期内）、绝缘手套、绝缘鞋、螺丝刀、导线	<ol style="list-style-type: none"> 1. 兆欧表短路/开路试验，确认仪表正常； 2. 测试回路放电； 3. 兆欧表正接被测回路导体，负接系统接地端子/金属外壳； 4. 120r/min 摇动兆欧表，稳定后读数$\geq 1\text{min}$； 5. 完成所有回路测试，再次放电并记录 	电源回路、加热元件主回路 $\geq 5\text{M}\Omega$ ；控制回路、传感器回路 $\geq 2\text{M}\Omega$ ；无短路现象	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	各回路实测值：
介电强度测试	2	加热器、鼓风机、控制柜		交流耐压测试仪（0-5kV，精度 $\pm 5\%$ ，经校准）、绝缘手套、绝缘垫、警示标识、计时器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 检查测试仪接地，输出调至 0V； 2. 高压端接被测回路导体，低压端接接地端子 / 金属外壳； 3. 10s 内升至测试电压，保持 1min； 4. 观察是否击穿、闪络、跳闸，监听异响异味； 5. 降压至 0V，放电并记录； 6. 重复完成所有回路测试 	无击穿、闪络、绝缘击穿声等异常；测试后绝缘电阻符合 8.4.1 要求	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	测试电压：电源/加热回路 2.5kV，控制回路 1.5kV，传感器回路 500V

表 A.3 风电叶片气热防/除冰系统工厂验收功能与性能测试表（系统性+匹配性验证）

测试类别	序号	测试项目	测试条件	测试设备	测试步骤	合格标准	测试结果	实测数据/备注（异常处理情况）
控制系统基本功能	1	上电初始化	额定电压±10%	万用表、示波器、笔记本电脑	1. 闭合总电源，观察指示灯状态；2. 测量各组件供电电压；3. 记录初始化时间，检查待机状态与报警信息	初始化时间≤30s；供电电压符合额定要求（如 DC24V±5%）；无异常报警，处于待机状态	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	初始化时间： 供电电压：
	2	模式切换	同上	示波器、万用表、HMI 操作终端	1. 切换“手动 / 自动 / 远程 / 待机”模式，每种模式 3 次；2. 检测输出信号变化与 HMI 显示一致性；3. 记录切换时间	切换时间≤2s，无卡顿、误切换；模式显示准确，执行机构动作符合逻辑	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	切换时间：
	3	人机交互	同上	万用表、测试仪器	1. 操作 HMI 控件，检查响应灵敏度；2. 对比 HMI 实时数据与测试仪器测量值；3. 测试历史数据、报警记录查询功能；4. 模拟故障，验证报警提示	HMI 操作灵敏；实时数据误差≤±2%；数据记录完整可查；报警及时准确（含故障类型、时间、位置）	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	数据误差：报警响应时间：
	4	功率输出调节	同上	三相功率分析仪、HMI 操作终端	1. 设置一档、二档、三档额定功率，各稳定运行 5min；2. 测量实际输出功率，观察温度变化	实际功率与设定功率偏差≤±10%；温度平稳变化	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	各功率等级实测值：分区功率偏差：
报警与保护功能	5	过温保护	系统正常运行；HMI 与报警装置工作正常。	信号发生器、计时器	1. 设置温度阈值，模拟温度超阈值 5℃；2. 观察系统动作与报警信息，记录动作时间	立即降档或停止；报警信息准确；动作时间≤2s；需手动复位	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	动作时间：
	6	过流/过载保护	同上	负载电阻箱、计时器	1. 逐步增加负载电流至 1.2 倍（过流）、1.5 倍（过载）；2. 观察系统动作与报警信息，记录动作时间	过流报警并降功率，动作≤5s；过载切断电源并报警，动作≤1s；需手动复位	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	过流动作时间：过载动作时间：
	7	过压/欠压保护	同上	调压器、计时器	1. 调节供电电压至 1.1 倍（过压）、0.85 倍（欠压）；2. 观察系统动作与报警信息，记录动作时间	过压切断主电源并报警，欠压停止加热并报警；动作时间≤3s；需手动复位	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	过压动作时间：欠压动作时间：
	8	传感器故障保护	同上	信号发生器、计时器	1. 模拟传感器断线、信号漂移 ±20%；2. 观察系统动作与报警信息，记录动作时间	断线立即报警并停对应分区，动作≤2s；信号漂移报警提示，动作≤5s；需手动复位	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	断线动作时间：漂移动作时间：
	9	风机故障保护	同上	计时器	1. 模拟风机电源切断或电机故障；2. 观察系统动作与报警信息，记录动作时间	立即报警并停所有加热分区，动作≤3s；需手动复位	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	动作时间：
	10	柜门打开、接地故障、线缆过温等	同上	对应故障模拟装置	模拟设计要求的其他故障，观察保护动作与报警	保护动作可靠，报警信息准确；需手动复位	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	故障类型+动作情况：

附 录 B
(资料性)
风电叶片气热防/除冰系统现场验收单

序号	验收大类	验收项目	验收标准 (规范性要求)	检测方法 (可操作流程)	判定结果	备注
1	基础条件核查	验收资质与文件	1. 检测机构具备 CMA 资质 (若涉及第三方检测); 2. 设计图纸、BOM 清单、出厂自检报告等文件完整且签字盖章规范; 3. 仪器校准证书在有效期内。	1. 核查资质证书及范围; 2. 对照文件清单逐一核验完整性; 3. 核对校准证书有效期及参数	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
		安全保障措施	1. 绝缘工具 (绝缘手套、绝缘钳) 符合 GB/T 17622 标准且在检验有效期内; 2. 系统接地电阻 $\leq 4\Omega$	1. 核查工具检验证书; 2. 采用接地电阻测试仪在接地端子处实测	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
2	设备实体验收	组件完整性与外观	1. 加热器、风管、控制柜、传感器等组件型号/数量与 BOM 清单一致; 2. 外观无裂纹、变形、锈蚀; 3. 连接接口密封良好, 无漏气/渗油痕迹。	1. 逐件核对组件型号及数量; 2. 目视检查外观。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
		安装精度	1. 叶片内部加热器、鼓风机安装位置偏差 $\leq \pm 5\text{mm}$, 固定牢固无松动; 3. 接线端子扭矩符合 GB/T 3048.3: M6 螺栓 $\geq 2.5\text{N}\cdot\text{m}$ 、M8 螺栓 $\geq 6.0\text{N}\cdot\text{m}$ 。		<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
		材料符合性	1. 加热元件材质符合设计文件 (如镍铬合金需满足 GB/T 1234); 2. 风管耐温性能 $\geq 120^\circ\text{C}$ (符合 GB/T 13295); 3. 绝缘材料耐温等级 $\geq \text{H}$ 级。	1. 核查材料质保书及复检报告; 2. 抽样进行耐温性能测试 (若有争议)。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
		标识完整性	1. 各组件有清晰的产品标识 (型号、规格、出厂编号); 2. 控制柜有警示标识 (高压、高温) 及操作标识; 3. 接线端子有编号标识, 与接线图一致。	1. 目视核查各组件标识; 2. 对照接线图核对端子编号。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
3	系统功能测试	通电初始测试	1. 通电后系统无短路、冒烟等异常现象; 2. 控制柜 HMI 界面响应时间 $\leq 2\text{s}$, 显示正常无乱码; 3. 系统初始化完成后无	1. 闭合总电源后观察 30min; 2. 操作 HMI 各功能键测试响应速度;	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	

序号	验收大类	验收项目	验收标准（规范性要求）	检测方法 (可操作流程)	判定结果	备注
			ERROR 级告警，日志记录完整	3. 导出初始化日志进行核查。		
		气热防除冰性能测试	1. 在-2°C环境下，主机可以有效防冰，正常运行； 1. 在-4°C环境下，系统启动后240min内主机可以顺利启机运行。		<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
		保护功能测试	加热器温度超温（≥120°C）时系统10s内自动停机并告警；	模拟超温场景，记录停机及告警时间	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
		通信可靠性测试	1. 叶根 ↔ 机舱通信延迟 ≤10ms，在 CAN 总线端口施加 25kHz~100MHz 干扰下误码率 $\leq 10^{-7}$ ； 2. 机舱 ↔ 塔基光纤故障切换 ≤100ms； 3. 塔基 ↔ 升压站通信中断重连 ≤2s。	1. CAN 总线测试：用 CAN 分析仪实测叶根-机舱通信延迟（连续 10 次取平均值）； 2. 光纤故障模拟：人为断开主光纤，记录切换时间（重复 5 次）； 3. 以太网重连测试：模拟网络中断，记录恢复时间（重复 5 次）。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
	现场验收结论	<input type="checkbox"/> 符合预验收要求，同意进入最终验收 <input type="checkbox"/> 不符合预验收要求，需整改（整改项：_____； 整改期限：_____年___月___日；整改后需重新预验收）				
填写说明： 本验收单需随验收过程实时填写，数据需真实有效，不得涂改；若需修改，需相关方签字确认。 验收过程中需留存关键测试数据记录（如测温曲线、压力曲线）、现场照片及视频，作为附件归档。 判定结果为“不合格”时，需在备注栏详细说明不合格原因及初步整改建议。						

附 录 C
(规范性)
风电叶片气热防/除冰系统最终验收单

序号	核心验收指标	设计要求	实测数据	数据来源	验收结论
1	电源回路绝缘电阻	$\geq 5\text{M}\Omega$ (DC 500V)		SAT 绝缘测试记录 (编号: _____)	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
2	系统接地电阻	与风机主接地网可靠连接, 连接点过渡电阻 $\leq 0.1\Omega$ 。		SAT 接地测试记录 (编号: _____)	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
3	关键报警响应及时性 (过温/过压/接地故障)	响应时间 $\leq 2\text{s}$, 报警信息准确上传。		SAT 报警功能测试记录+主控系统日志。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
4	最低防冰温度 (定义: 稳定运行时阻止覆冰的最低环境温度)	$\leq -2^\circ\text{C}$			<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
5	除冰见效时间 (-4 $^\circ\text{C}$)	$\leq 240\text{min}$, 主机顺利启机			<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
6	防冰控制逻辑准确性	1. 结冰工况自动启动/非结冰工况自动停止; 2. 支持手动强制启停。		风机运行历史数据+控制逻辑测试记录。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
7	系统自身耗电量 (结冰期平均)	$< 10\%$ 安装系统风机发电量		覆冰期气热防/除冰系统耗电量统计表	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
8	覆冰电量损失挽回率	$\geq 80\%$		增发电量统计表+风速-理论发电量曲线。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
9	风机功率曲线拟合度 (覆冰期)	$\geq 90\%$		覆冰期运行数据统计报告 (拟合度=实测平均功率/理论平均功率 $\times 100\%$)。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
10	系统可利用率 (结冰期)	$\geq 90\%$		系统故障记录 (计算公式: 可利用率=1-故障时长/需启动时长 $\times 100\%$)。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格

序号	核心验收指标	设计要求	实测数据	数据来源	验收结论
11	连续运行稳定性测试（满负荷）	连续 24h 加热运行无故障，参数波动 $\leq\pm 10\%$ 。		24h 连续运行日志+参数趋势曲线。	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
13	与风机主控系统数据交互兼容性	1. 运行状态、故障信息上传准确率 100%；2. 接受主控指令响应延迟 $\leq 1s$		主控系统交互测试记录+数据传输日志	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
14	备件及技术资料完整性	1. 备件清单与合同一致（如备用密封件）；2. 操作手册、维护手册、图纸齐全并签章。		备件验收清单+技术资料交接记录	<input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
整体验收结论 <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格（不合格项：_____）； 整改要求：_____					

项目基础信息

供货单位		项目名称	
合同编号		验收周期	_____年__月__日 ~ _____年__月__日 (含结冰期数据采集)
风机编号		项目地域环境	<input type="checkbox"/> 陆地 <input type="checkbox"/> 海上 <input type="checkbox"/> 高海拔 ($\geq 1500m$) <input type="checkbox"/> 严寒地区 (最低温 $\leq -20^{\circ}C$)

签字确认栏

责任主体	签字	日期	备注（单位/资质信息）
甲方代表			需提供甲方授权委托书
乙方（供货方）代表			需加盖供货方公章
监理单位代表（若有）			需具备监理资质

填写说明：

- “实测数据”需填写具体数值及单位（如“65kW”、“60min”），涉及计算的需备注公式推导过

程（可附页）；

- “项目地域环境”需勾选实际场景，该信息将作为环境适应性验证的判定依据（如海上项目需重点核查盐雾测试结果）；
- 不合格项整改后需单独提交“整改验收确认单”，作为本验收单的补充文件归档；
- 附件清单：
 - ①防除冰性能评估报告；
 - ②72h 连续运行日志；
 - ③增发电量/耗电量统计表；
 - ④交互测试记录；

附录 D

(资料性)

气热除冰冬季收益计算方法说明

D.1 冬季冰期数据采集：收益计算的基础支撑

D.1.1 关键数据采集渠道与内容

D.1.1.1 从风场中控主机 SCADA 系统中采集：以小时为单位采集风机主机冰期运行数据，包括实际发电量（输出有功电量）、理论发电量（根据风功率曲线匹配得出）、平均风速、风机主机异常情况（如主机故障、气象站结冰、集电线路通讯异常等，用于分析未发电原因）。

D.1.1.2 防除冰系统上位机软件：采集除冰系统运行相关数据，主要有室外环境温度与湿度（判断是否满足结冰条件）、防除冰系统自耗电（计算除冰成本的关键指标）以及防除冰系统异常情况（评估除冰系统自身可靠性）。

D.1.2 对比风机的科学选择

对比风机的选取直接影响增发电量计算的准确性，需遵循“相似性”原则，确保对比基准一致。

- a) 若为部分改造风场（仅部分风机安装防除冰系统），优先选择同一风场未安装防除冰系统的相邻风机，或地理位置、风资源条件相近的风机，避免因环境差异导致数据偏差。
- b) 若为全场改造风场（所有风机均安装防除冰系统），则选取同等地理位置的相邻风场（需注意相邻风场装机容量换算，保证发电规模可比性），或本风场中除冰系统故障的风机作为对比风机，通过故障风机的运行数据，间接体现除冰系统的作用。也推荐不选对比风机，直接在风机机舱上安装结冰探测器，通过结冰探测器确定结冰期开始时间和结束时间。

D.1.3 冰期时长的精准确认

冰期时长是划分计算周期的核心，需结合对比风机情况与实际环境参数综合判断，同时扣除无关时间段，确保计算周期内的数据与除冰系统效益直接相关。

- a) 结冰期开始时间：以对比风机的结冰时间为主要依据。若因地理位置差异，对比风机未出现结冰，则综合风电场值班人员的现场天气观察、风机机舱温湿度传感器数据（温度低于 0℃、相对湿度大于 90%）来确定，此条件下空气中水汽易凝结成冰，符合冰期开始的判定标准。没有对比风机但安装了结冰探测器的，以结冰探测器结冰时间为依据。
- b) 结冰期结束时间：以对比风机的融冰时间为准。若对比风机未结冰，同样结合现场天气情况与机舱温湿度传感器数据（温度高于 0℃、相对湿度小于 90%）判断，此时环境条件已不满足结冰持续要求，覆冰可自然融化。没有对比风机但安装了结冰探测器的，以结冰探测器融冰时间为依据。
- c) 无效时间段扣除：在统计冰期实际发电量时，需扣除无关时间段的发电量；结冰期开始阶段除冰系统未开启的时间段，此阶段的发电成果未受除冰系统影响，需排除以确保数据准确性；扣除后，剩余时间段即覆冰期间防除冰风机实际增发电时间段。

D.1.4 采集表格

具体采集表格如下（该表格数据可以从风机SCADA系统与防除冰系统共同导出）

		xxx年x月x日xxx风场日报表																										
风机号	数据点	时间	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	累计	
		除冰/抗冰风机号	风机发电量 (kWh)																									
	风机运行时间 (h)																											
	风机实时风速 (m/s)																											
	风机理论发电量 (kWh)																											
	机舱外温度1 (℃)																											
	机舱外相对湿度 (%)																											
	除冰系统自耗电 (kWh)																											
	主机故障																											
	未及时开启除冰系统																											
	气象站结冰																											
	风速小未启机小时数																											
	叶片覆冰小时数																											
	除冰系统故障小时数																											
	除冰系统故障具体原因																											
	风机发电量 (kWh)																											
	风机运行时间 (h)																											
	风机实时风速 (m/s)																											
	风机理论发电量 (kWh)																											
	室外温度1 (℃/风机测)																											

D.2 冬季冰期数据统计与计算：收益量化的核心环节

D.2.1 每台风机风电叶片气热抗冰项目性能统计

根据采集的日报表，按每个冰期对单台风机的性能进行统计：

- 覆冰期风力发电机组理论发电量 (W_0)：根据主机 SCADA 系统记录的每小时平均风速，匹配对应风功率曲线得出每小时理论发电量，再累加得到冰期总理论发电量。注意：若某小时实际发电量大于理论发电量，认为该小时理论发电量等于实际发电量。
- 覆冰期输出有功电量 (W_1)：在覆冰期从风机监控系统调取得到的风机发电功率。
- 覆冰期气热防/除冰系统自耗电量 (W_2)：从除冰系统自带 SCADA 系统获取数据，根据除冰机舱柜输入的除冰电源实时电压、电流之乘积积分计算得出。
- 覆冰期参考风机平均实发电量 (W_3)：在同一风电场作为参考的若干台未安装气热防/除冰系统风机在覆冰期间防除冰风机实际增发时间段对应的发电量的平均值。
- 覆冰期风力发电机组增发发电量 (W_4)：作为衡量除冰系统直接收益的核心指标，计算公式为“ $W_4 = W_1 - W_2 - W_3$ ”。
- 覆冰期未发电理论发电量 (W_5)：统计因主机原因（如主机故障停机、风速仪风向标结冰停机、人为未及时启机等）导致的未发电时间段，根据这些时间段对应的平均风速与风功率曲线，计算得出的理论发电量（反映因非除冰因素损失的发电潜力）。
- 覆冰期实际理论发电量 (W_6)：计算公式为“ $W_6 = W_0 - W_5$ ”，该指标剔除了主机故障等非覆冰因素对理论发电的影响，更准确反映除冰系统在覆冰工况下的性能表现。
- 自耗电率 (ϵ)：计算公式为“ $\epsilon = W_2 / W_1 \times 100\%$ ”，反映除冰系统自身能耗占实际发电的比例，用于评估除冰系统的能源利用效率（自耗电率越低，除冰系统经济性越好）。
- 覆冰损失挽回率 (ζ)：计算公式为“覆冰损失挽回率 = 增发发电量 / (实际理论发电量 - 实际发电时间段对应的参考风机平均实发电量) 实际理论发电量 $\times 100\%$ ”，该指标体现除冰系统对覆冰导致的发电损失的挽回程度（挽回率越高，除冰系统对发电效率的提升效果越显著）。
- 可利用率 (ρ)：计算公式为“ $\rho = (1 - \text{结冰期除冰系统总故障小时数} / \text{结冰期总小时数}) \times 100\%$ ”，反映除冰系统在冰期内的可靠运行能力（可利用率越高，除冰系统持续发挥作用的时间越长，收益越稳定）。
- 具体表格如下图所示：

结冰期序号	起止时间	累计小时数 (h)	平均风速 (m/s)	W0 (kWh)	W5 (kWh)	W6 (kWh)	W1 (kWh)	W2 (kWh)	W3 (kWh)	W4 (kWh)	ϵ	ζ	备注
第一次结冰期													
第二次结冰期													
第三次结冰期													
第四次结冰期													
总计													

D.2.2 每台风机结冰期未发电时间统计

根据采集回来的日报表按照每个冰期对每台风机结冰期未发电时间统计，具体内容如下表所示：

结冰期序号	起止时间	结冰期总小时数	发电小时数	未发电小时数	主机故障小时数	气象站结冰小时数	未及时启机小时数	风速小未启机小时数	叶片覆冰小时数	结冰期除冰系统总故障小时数
第一次结冰期										
第二次结冰期										
第三次结冰期										
第四次结冰期										
合计										