

中 华 人 民 共 和 国 能 源 行 业 标 准

NB/T 10211—2019

---

风力发电机组叶片电加热防/除冰控制系统  
技术规范

Technical specification for blade electro-thermal anti-icing/deicing control system of  
windturbine generator system

行业标准信息服务平台

2019 - 06 - 04 发布

2019 - 10 - 01 实施

---

发 布



目 次

前言 ..... III

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 技术要求 ..... 2

5 试验方法 ..... 6

6 检验规则 ..... 8

7 标志、标签、使用说明书 ..... 9

8 包装、运输、储存 ..... 10

附录 A（规范性附录） 基于手册方法电热防除冰功率计算 ..... 11

行业标准信息平台

行业标准信息服务平台

## 前 言

本标准按GB/T 1.1—2009给定的规则起草。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由能源行业风电标准化技术委员会风电电器设备分技术委员会（NEA/TC1/SC6）归口。

本标准主要起草单位：成都阜特科技股份有限公司、机械工业北京电工技术经济研究所、中广核新能源投资（深圳）有限公司、上海电气风电集团有限公司、明阳智慧能源集团股份公司、北京金风科技电气设备有限公司、中国船级社质量认证公司。

本标准参加起草单位：国电联合动力技术有限公司、北京天诚同创电气有限公司、江苏金风科技有限公司、远景能源（江苏）有限公司、浙江运达风电股份有限公司、许昌许继风电科技有限公司、中国质量认证中心。

本标准起草人：苗强、侯垚、付小林、成和祥、孙二平、俞庆、贾石、房海涛、马晓岩、褚景春、周胜兵、杨建军、王艳华、巩世昌、陈凯、岳红轩、侯洪强。

行业标准信息平台



# 风力发电机组叶片电加热防/除冰控制系统技术规范

## 1 范围

本标准规定了风力发电机组叶片电加热防冰除冰控制系统（以下简称“防除冰控制系统”）的技术要求、试验方法、检验规则等。

本标准适用于并网型陆（地）上水平轴风力发电机组的叶片电加热防除冰控制系统。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB/T 191 包装储运图示标志

GB/T 2422 电工电子产品环境试验术语

GB/T 2423.10 电工电子产品环境试验. 第2部分：试验方法. 实验Fc：振动（正弦）GB/T 2423.15 电工电子产品环境试验. 第2部分：试验方法. 试验Ga和导则：稳态加速度

GB/T 2900.1 电工术语基本术语

GB/T 2900.53 电工术语风力发电机组

GB/T 2900.57 电工术语发电、输电及配电运行

GB/T 11287-2000 电气继电器 第21部分：量度继电器和保护装置的振动、冲击、碰撞和地震试验 第1篇：振动试验（正弦）

GB/T 14537-1993 量度继电器和保护装置的冲击与碰撞试验

GB/T 15543-2008 电能质量三相电压不平衡

GB/T 18802.1-2011 低压电涌保护器（SPD）第1部分低压配电系统的保护器性能要求和试验方法

GB/T 19608.1 特殊环境条件分级第1部分：干热

GB/T 19608.2 特殊环境条件分级第2部分：干热沙漠

GB/T 19608.3 特殊环境条件分级第3部分：高原

GB/T 19963 风电场接入电力系统技术规范

GB/T 20626.1-2006 特殊环境条件 高原电工电子产品 第1部分：通用技术要求

GB/T 33629-2017 风力发电机组雷电保护

NB/T 31017 风力发电机组主控制系统技术规范

NB/T 31018 风力发电机组电动变桨控制系统技术规范

## 3 术语和定义

GB/T 2422、GB/T 2900.1、GB/T 2900.53、GB/T 2900.57、GB/T 4365界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1 叶片电加热防冰除冰控制系统 blade electro-thermal anti-icing/deicing control system

通过加热去除桨叶表面覆冰的电气控制的装置，主要包括叶片电加热防冰除冰控制器、传感器、保护装置、配电装置等部件。

### 3.2 雷电电磁脉冲防护系统 light electromagnetic impulse measure system (LPMS)

针对自然界雷电所引起的高能电磁脉冲的防护系统，是通过拦截、疏导、泄放入地的一体化系统方式，防止由直击雷或雷电电磁脉冲对建筑物本身或其内部设备造成损害的防护技术。

### 3.3 电涌保护器 surge protective device (SPD)

用于限制瞬时过电压和泄放浪涌电流的电器，它至少包含一非线性的元件。

## 4 技术要求

### 4.1 使用条件

#### 4.1.1 正常使用环境条件

适用于下述条件并能正常工作。

- a) 环境温度：-40℃～+45℃。
- b) 相对湿度：≤50%，空气清洁无凝露
- c) 海拔高度：≤2000m。

当应用环境海拔高度>2000m，参考GB/T 20626.1-2006标准第5节，对相关部件进行降容后选型。

#### 4.1.2 正常试验环境条件

主要包括使用气候条件，应在如下大气环境下进行试验：

- a) 环境温度：+15℃～+35℃。
- b) 相对湿度：45%～75%。
- c) 大气压力：86kPa～106kPa。

#### 4.1.3 电源条件

##### 4.1.3.1 交流电源

- a) 电源频率变化范围：47.5Hz～51.5Hz。
- b) 电源电压允许波动范围：电压额定值的-10%～+10%。
- c) 电源的不平衡度应满足GB/T 15543-2008第4章的规定，并在其范围内正常工作。
- d) 电源波形为正弦波，总谐波含量小于5%

##### 4.1.3.2 直流电源

- a) 电源电压允许偏差-15%～+10%。
- b) 电源电压纹波系数小于5%。

#### 4.1.4 使用场所的要求

a) 环境中不应有腐蚀破坏绝缘的气体或导电介质，不应有引起火灾或爆炸的介质，不应有明显的及较严重的霉菌。

b) 使用场所应避免雨、雪、沙的进入。



- c) 使用场所的接地电阻应小于等于  $4\Omega$ 。
- d) 特殊使用场所的要求参见 GB/T 19608 的规定。

#### 4.1.5 其他使用条件

当超出4.1.1~4.1.4规定的环境条件时，应由制造商与用户签订专门的协议。

### 4.2 功能要求

#### 4.2.1 基本功能

- a) 提供叶片电加热器用标准配电，包括过流、人身保护等电气保护功能。
- b) 提供叶片电加热器供电浪涌保护功能，使之符合整机安全要求。
- c) 防除冰控制系统能够控制叶片电加热器，清除叶片表面覆冰或降低叶片表面覆冰概率。

##### 4.2.1.1 加热功率

每只叶片额定加热功率参考附录 A  $q_{PS} \approx 1211 \times \rho_{LWC} \Delta y^3 \sqrt{t}$  公式 10  $q_{PS} \approx 1211 \times \rho_{LWC} \Delta y^3 \sqrt{t}$  计算。

$$q_{PS} \approx 1211 \times \rho_{LWC} \Delta y^3 \sqrt{t}$$

##### 4.2.1.2 精度要求

- a) 加热温度控制精度（闭环）： $\leq 5^\circ\text{C}$ 。
- b) 防除冰同步控制精度： $\leq 1\text{h}$ 。
- c) 覆冰测量精度： $\leq$ 叶片质量\*5%。
- d) 指令/反馈周期： $\leq 1\text{s}$ 。

#### 4.2.2 系统运行模式

##### 4.2.2.1 系统维护模式

- a) 模式进入时，系统停止向叶片电加热器的功率输出，模式进入后不接受上位机指令
- b) 系统按照按键或维护终端直接指令投入或切出叶片电加热器回路
- c) 系统维护模式下，系统投退不受自身故障诊断系统的安全保护功能限制

##### 4.2.2.2 受控运行模式

- a) 模式进入时，系统应首先判断处于系统维护模式解除状态下
- b) 防除冰控制系统优先处于安全保护功能控制，能按照设定及时退出
- c) 防除冰控制系统按照接受的上位机指令正常工作，满足NB/T 31017的有关要求

##### 4.2.2.3 自主运行模式

通过传感器采集机组运行参数，防除冰控制系统应能自动计算生成防除冰指令并控制叶片加热器完成防除冰过程，其性能满足4.2.1.2控制精度的要求

#### 4.2.3 故障诊断功能

防除冰控制系统应具备自诊断功能,能实时检测设备的故障或异常情况,信息能及时上送控制系统。诊断及保护可包括以下方面:

- a) 防雷保护动作
- b) 熔断器或保护开关动作
- c) 柜体异常,一般应包括以下内容:
  - 1) 柜内温湿度超范围
  - 2) 柜内加热器/散热器故障
  - 3) 自启动超时/温湿度控制失效
  - 4) 柜体绝缘或接地状态监测故障。
- d) 通信超时或中断
- e) 控制器故障(如果系统包括)
- f) 传感器故障,一般应包括以下内容:
  - 1) 温度传感器故障
  - 2) 测冰传感器故障(如果系统包括)
  - 3) 信号变送器故障(如果系统包括)
- g) 加热器故障,一般可包括以下内容:
  - 1) 加热回路故障(开路/短路)
  - 2) 加热功率异常
  - 3) 温度异常
  - 4) 反馈信号异常。

#### 4.2.4 安全上电功能

防除冰控制系统初始化上电时,当环境温度、湿度等超出内部元器件的工作范围时,应有预加热功能,只有条件达到要求时,才允许系统工作。

#### 4.2.5 安全保护功能

当防除冰控制系统处于运行工况时出现故障,应能自行进入断电保护状态。

##### 4.2.5.1 保护范围

- a) 电源故障:即供电超出额定范围。
- b) 自检故障:即系统启动时,系统自诊断结果不具备控制系统运行条件。
- c) 通讯故障:即与上位系统之间出现通信故障。
- d) 控制故障:即控制系统失效或输出故障。

##### 4.2.5.2 状态反馈

防除冰控制系统应具备自身保护状态输出功能,即采用可靠的方式,确保在出现4.2.5.1各类问题时反馈系统整体状态。

#### 4.2.6 人机交互功能

- a) 信息交互:叶片电加热防除冰控制系统参数的查询、设置,系统状态查看及故障诊断信息查看。
- b) 参数设置:叶片电加热防除冰控制系统处于手动控制模式或系统维护模式时,通过人机界面或维护上位机可以对每个桨叶的叶片电加热防除冰控制参数进行校准或更改,同时对设定的参数有安全范围限定。

#### 4.2.7 通信功能

##### 4.2.7.1 接口一般要求

- a) 叶片电加热防除冰控制系统的通信接口，主要用于实现与主控系统的通信。接口可采用 CAN、工业以太网、RS485 串行通讯等现场总线方式
- b) 通信信号线应采用屏蔽双绞铜缆，插接头应带屏蔽外壳，通信线两端屏蔽层应连接到外壳并正确接地
- c) 在总线的末端应符合总线终端阻抗匹配的要求，防止信号失真
- d) 通信系统可以通过变桨系统转发或直接经由滑环与风机主控相连

##### 4.2.7.2 控制系统交互信息要求

- a) 防除冰控制系统应能接受主控系统到防除冰控制系统的以下信息：
  - 1) 叶片加热装置启停状态。
  - 2) 叶片加热温度设定值。
  - 3) 防除冰控制系统工作模态。
  - 4) 外部测冰装置测量值
- b) 主控制系统应能接收防除冰控制系统的以下信息：
  - 1) 叶片加热装置当前温度反馈。
  - 2) 叶片加热装置当前启停状态。
  - 3) 保护装置状态值。
  - 4) 柜体温度及环境温度。
  - 5) 系统状态信息。
  - 6) 测冰装置测量值。
  - 7) 当前输出功率。

##### 4.2.7.3 通信规约

产品的通信规约应支持以下一种或多种，ModbusTCP、CANopen、OPC 、Profibus等。

#### 4.3 性能要求

##### 4.3.1 机械性能

###### 4.3.1.1 振动性能（正弦）

- a) 振动：系统应能承受 GB/T 11287-2000 中 3.2.1 规定的严酷等级为 II 级的振动响应试验。
- b) 振动耐久：系统应能承受 GB/T 11287-2000 中 3.2.1 规定的严酷等级为 II 级的振动耐久试验。

###### 4.3.1.2 冲击性能

- a) 冲击：系统应能承受 GB/T 14537-1993 中 4.2.1 规定的严酷等级为 I 级的冲击响应试验。
- b) 冲击耐久：系统应能承受 GB/T 14537-1993 中 4.2.2 规定的严酷等级为 I 级的冲击耐久试验。
- c) 碰撞：系统应能承受 GB/T 14537-1993 中 4.3 规定的严酷等级为 I 级的碰撞试验。

###### 4.3.1.3 旋转性能

系统应能承受GB/T 2423.15-2008 第4章规定的严酷等级为50m/s<sup>2</sup>稳态加速度试验。

4.3.2 防雷性能

系统应提供GB/T 33629-2017 中8.5规定的雷电电磁脉冲防护系统（LPMS），相关SPD选项应符合下表要求。

表 1 SPD 等级

序号	类型	SPD 等级
1	叶片加热器电源	I 级
2	叶片电信号	I 级
3	交流电源	II 级
4	直流电源	II 级
5	通讯信号	II 级

4.3.3 其他性能指标

叶片电加热防除冰控制系统的其他性能指标参考并满足NB/T 31018 性能参数要求，实际使用中超过该标准的与客户协商确定。

5 试验方法

5.1 试验仪器

除另有规定外，试验中所使用的仪器仪表精度应满足下列要求：

- a) 一般使用的仪表精度应根据被测量的误差等级按表 2 进行选择。
- b) 测量温度用仪表误差不超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。
- c) 测量时间用仪表：当测量时间大于 1s 时，相对误差不大于 0.5%，测量时间小于 1s 时，相对误差不大于 0.1%。
- d) 其他测试仪器、仪表的精度应符合有关标准的要求，并在计量认证的有效期内。

表 2 测试仪表精度的选择

误差	$\leq 0.5\%$	0.5%~1.5%	1.5%~5%	7.5%
仪表精度	0.1 级	0.2 级	0.5 级	1.0 级
数字仪表精度	6 位半	5 位半	4 位半	4 位半

5.2 检查和试验

5.2.1 功能检查

试验方法按照 4.3.1 要求进行。

5.2.2 故障诊断试验

在系统上电状态下，手动模拟器件执行下列动作，观察系统断电过程和故障报警状态。

5.2.2.1 防雷保护动作

模拟防雷保护动作，检查系统是否能够报警及通信上传。

#### 5.2.2.2 熔断器或保护开关动作

模拟熔断器或保护开关动作，检查系统是否能够报警及通信上传。

#### 5.2.2.3 柜体温度异常

模拟柜体内温度降为正常设定的加热温度以下，检查系统是否能够报警及通信上传。

#### 5.2.2.4 通信超时或中断

模拟关断上位机通讯程序，检查系统是否按要求完成过程和故障报警状态。

#### 5.2.2.5 控制器故障

模拟控制器故障输出，观察系统断电过程和故障报警状态。

#### 5.2.2.6 传感器故障

传感器故障以模拟叶片温度传感器失效为例，其他参照执行。即在系统正常投入状态，切断叶片温度传感器，观察系统断电过程和故障报警状态。

#### 5.2.2.7 加热器故障

加热器故障以模拟外部加热器回路开路，其他参照执行。即在系统正常投入状态，切断加热器输出回路，观察系统断电过程和故障报警状态。

#### 5.2.2.8 通信故障

在系统上电状态下，将通信线路断开，观察系统断电过程和故障报警状态。

#### 5.2.3 上电安全试验

先断开系统电源，分别调整上电温湿度检测开关的设定值使其优于当前环境，然后闭合系统主电源开关，此时系统应不得电；状态稳定 1 分钟以后，再分别调整温湿度检测开关设定值使之劣于当前环境，此时系统应上电工作。

#### 5.2.4 通信功能

系统的通信规约测试按相关产品标准规定的试验方法进行试验。

#### 5.2.5 机械性能

##### 5.2.5.1 振动试验

振动响应试验和振动耐久试验方法按 GB/T 11287-2000 的规定进行。

##### 5.2.5.2 冲击与碰撞试验

冲击响应试验和冲击耐久试验方法按 GB/T 14537-1993 的规定进行。碰撞试验方法按 GB/T 14537-1993 规定的方法进行。

##### 5.2.5.3 旋转试验

旋转试验方法按 GB/T 2423.15-2008 规定的严酷等级为  $50\text{m/s}^2$  稳态加速度的规定进行。

### 5.2.6 防雷试验

防雷试验针对系统各个外部电气连接点,参考4.3.2表1规定的SPD等级,依据GB/T 18802.1-2011第7.5章节对应的电压电流等级进行。

## 6 检验规则

### 6.1 产品检验分为两种类型

产品检验分为出厂检验和型式检验。

### 6.2 出厂检验

- a) 每台产品均应进行出厂检验。
- b) 出厂检验项目为企业产品标准规定及本标准表3出厂检验栏勾选的相关规定。
- c) 出厂检验的合格判定为全部检验项目合格。

### 6.3 型式检验

#### 6.3.1 型式检验条件

下列情况之一时,产品应进行型式检验:

- a) 新产品定型前。
- b) 正常生产后,如结构、材料、元器件、工艺等有较大改变,可能影响产品性能时。
- c) 正常生产后的定期检验,其周期为5年。
- d) 产品停产超过上述规定周期后再恢复生产时。
- e) 国家质量监督检验机构要求时。

#### 6.3.2 型式检验项目

除6.3.1 e规定项目外,型式检验项目详见表3。

表3检验项目

试验名称	技术要求条款	试验方法	型式检验	出厂检验
基本功能	错误! 未找到引用	错误! 未找到引用	√	√
故障诊断	错误! 未找到引用	错误! 未找到引用	√	√
上电安全	错误! 未找到引用	错误! 未找到引用	√	√
通信功能	错误! 未找到引用	错误! 未找到引用	√	√
机械性能	错误! 未找到引用	错误! 未找到引用	√	—
防雷性能	错误! 未找到引用	错误! 未找到引用	√	—
a.仅进行绝缘电阻测量和介质强度检验。				

#### 6.3.3 检验项目

#### 6.3.4 抽样方案及合格判定

##### 6.3.4.1 产品的抽样

抽样数量为1套，检验时不分组。

#### 6.3.4.2 合格判定

样品应符合第4章规定的全部项目的要求。检验中允许对可调整的部分进行调整，不允许更换元器件。进行一次调整后，样品符合各项指标要求时，判定为合格；若进行一次调整后性能仍不合格的样品，判定为不合格。

### 7 标志、标签、使用说明书

#### 7.1 标志和标签

7.1.1 标志和标识应符合 GB/T 191 的规定。

##### 7.1.2 产品标志

- a) 制造厂名称和商标。
- b) 产品型号和名称。
- c) 规格号（需要时）。
- d) 额定值。
- e) 产品制造年、月。
- f) 产品的编号。

##### 7.1.3 包装标志

产品的外包装上有收发标志、包装储运标志和安全警告标志。

#### 7.2 使用说明书

7.2.1 产品使用说明书的基本要求应符合 GB/T9969 的规定。

7.2.2 使用说明书一般应提供以下信息：

- a) 产品型号及名称。
- b) 产品执行的标准代号及名称。
- c) 主要用途及适用范围。
- d) 使用条件。
- e) 产品主要特点。
- f) 产品原理、结构及工作特性。
- g) 产品额定值。
- h) 主要性能及技术参数。
- i) 安装、接线、调试方法。
- j) 运行前的准备及操作方法。
- k) 软件的安装、操作及维护。
- l) 故障分析及排除方法。
- m) 有关安全事项的说明。
- n) 产品接口、附件及配套情况。
- o) 维护与保养。



- p) 运输及储存。
- q) 开箱及检查。
- r) 质量保证及服务。
- s) 附图：包括外形图、安装图、原理接线图等。
- t) 其他必要的说明。

## 8 包装、运输、储存

### 8.1 包装

- a) 产品在包装前，应将其可动部分固定。
- b) 每台产品应用防水材料包好，再装有具有一定防振能力的包装盒内。
- c) 产品随机文件、附件及易损件应按企业产品标准和说明书的规定一并包装和供应。
- d) 其他有企业标准规定。

### 8.2 运输

包装好的产品在运输过程中的温度为 $-40^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于 95%，不应有剧烈震动、冲击、曝晒、雨淋。

### 8.3 储存

包装好的产品应储存在 $-30^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不大于 80%、周围空气中不含有腐蚀性、火灾及爆炸性物质的室内。

行业标准信息平台



## 附 录 A

### （规范性附录）

### 基于手册方法电热防除冰功率计算

#### A.1 计算方法

##### A.1.1 手册方法

翼型上结冰的详细模拟已经在工业中使用。对于各种大气和风况，有多种的数值方法来计算冰的形状，但计算方法及结论参考过于复杂且不统一。本标准参考SAE出版的《冰、雨、雾和霜冻防护文献》（AIR 1168/4）进行风力发电机组电热防除冰的快速的手册方法。

##### A.1.2 融冰和防冰概念。

根据AIR 1168/4术语定义：

- 除冰是通过破坏冰和受保护表面之间的结合，以机械或热方式周期性地融化小冰块。
- 防冰是防止冰在受保护表面上积聚，或者通过蒸发撞击的水，或者通过允许水回流并在非关键区域结冰。

##### A.1.3 结冰基本原理

低于0° C的液态水称为过冷水。过冷水之所以存在，因为水在冷却过程中完全不受干扰——没有任何东西使它变成冰。然而，当叶片撞击液滴时，液滴接收到所需的相变输入，从而变成冰。从水到冰的相变需要一些潜热的提取，但是当液滴是过冷水时，已经发生了热量提取。冰水混合物比稍冷的水稍早一秒钟。因此，由于与叶片的相互作用，过冷水立即变成冰。

##### A.1.4 简化假设

作为手册方法不可避免地需要做出简化的假设：

- a) 仅考虑静态气流的二维效应。
- b) 翼型的前缘只有一个点被评估。雷诺数、静压、温度、积水量等在翼面各点的大小和方向都不同。简化手册法使用平均值。
- c) 除冰的功率要求取决于大气条件（例如环境温度、液体水含量、液滴直径）及机组状态（例如空气流速  $v$  和翼型厚度  $t$ ）。简化手册法只考虑一个关键的设计点，即最严冰期的额定风况。

#### A.2 计算步骤

##### A.2.1 捕水计算

为了计算机翼的总捕水量，我们将叶片分解成具有不同横展  $y$  和厚度  $t$  的分段。每个分段以不同速度  $v$  通过具有一定质量过冷水的空气。每体积空气的过冷水质量称为液态水含量(LWC)，用密度参数  $\rho_{LWC}$  或  $\rho_{LWC}$  表示。我们将  $t \cdot y$  作为垂直于其叶片扫掠路径的虚筛。过冷水通过筛网的质量流量为

$$m = vt\Delta y\rho_{LWC} \rho$$

公式 1

然而，水对叶片前缘的撞击不同于通过筛子的流动，较小的液滴会被空气围绕叶片通过，只有较大的液滴撞击表面，这种现象是通过水捕获效率 $E_m$ 来表示，AIR 1168/4给出了计算 $E_m$ 的详细方法，经简化后是一个关于空气流速 $v$ 和叶片厚度 $t$ 的函数。 $E_m$ 的简化公式以相对厚度为6%~16%的 $\alpha=4^\circ$ 攻角翼型，液滴直径 $d_{med}=20\text{ }\mu\text{m}$ ，海拔高度 $h=10000$ 英尺计算，海拔高度提升到 $H=20000$ 英尺其误差小于10%。本方法不考虑条件误差，统一表示为无量纲数：

$$E_m = 0.00324 \cdot (v/t)^{0.613} \quad \text{公式 2}$$

$v$ ——空气流速，单位：米/秒

$t$ ——叶片厚度，单位：米

因此，考虑电加热防除冰系统仅考虑敷设加热带/热风腔的分段（其他分段的覆冰采取联动剥离），则单套叶片捕水量为

$$m = \rho_{LWC} \sum (E_m v t \Delta y) = 3.24 \times 10^{-3} \times \rho_{LWC} v^{1.613} \sum (t^{0.387} \Delta y) \quad m = \quad \text{公式 3}$$

$\Delta y$ ——单加热带长度或加热风腔长度，单位：米

在风力发电系统中按单一加热段考虑，捕水空气流速参考  $v = \lambda_{optima} V_{nominal} / 2 = 6 \times 12 / 2 = 36 \text{ m/s}$ ，带入上式则可以简化为

$$m \approx 1.05 \times \rho_{LWC} \Delta y \sqrt[3]{t} \quad \text{公式 4}$$

## A. 2.2 功率需求计算

在最简单的形式中，防冰系统所需的能量由必须供应以平衡来自加热表面的热损失的速率确定。详细地说，有显热  $q_{sens}$ 、对流冷却  $q_{conv}$ 、蒸发冷却  $q_{evap}$ 、冲撞加热  $q_{kin}$  和气动加热  $q_{areo}$ 。

$$Q_{A/I} = Q_{PS} = q_{sens} + q_{conv} + q_{evap} + q_{kin} + q_{areo} \quad \text{公式 5}$$

其中：

$$q_{sens} = m [\Delta T ((1-n)c_{liq} + nc_{ice}) + nL_f] \quad \text{公式 6}$$

$m$ ——捕水量

$n$ ——固态降水比例

$c$ ——比热容，冰  $c_{liq}=2.1\text{ kJ/kgK}$ ，水  $c_{ice}=4.2\text{ kJ/kgK}$

$L_f$ ——冰熔化热， $334\text{ kJ/kg}$

$\Delta T$ ——相变加热温差，叶片加热平衡温度  $T_{skin}$  取  $4^\circ\text{C}$ ，高寒气候环境温度  $T_\infty$  取  $-20^\circ\text{C}$ ，则

$$\Delta T = 24\text{ K}$$

$$q_{conv} = h_0 \Delta T \quad \text{公式 7}$$

$h_0$ ——空气对流导热系数 ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )

$\Delta T$ ——冰面与环境温差  $T_{skin}-T_\infty$

$$q_{evap} = \frac{0.7 h_0 L_e (R_h E_\infty - e_{surf})}{p_\infty c_{p,air}} \quad \text{公式 8}$$

对于 3 叶片的水平轴风力发电系统简单模型中，防除冰系统表面已经存在覆冰的情况下，考虑超冷水全部在叶片表面凝结为与环境温度相同的明冰（不存在液态水）；仅考虑极端冰冻条件下，冰面温度低于环境温度，不存在对流冷却  $q_{\text{evap}}$ ，同时蒸发冷却  $q_{\text{evap}}$  也可以忽略不计；水滴冲撞加热冲撞加热  $q_{\text{kin}}$  和叶片气动加热气动加热  $q_{\text{aero}}$  在低速叶片中所占比例较小，保证除冰可靠性，不予考虑。则上式则简化为

$$q_{\text{PS}} = q_{\text{sens}} = 1211 \times m_{\text{ice}} (\Delta T_{\text{ice}} + L_f) \quad \text{公式 9}$$

带入  $q_{\text{sens}} = m[\Delta T((1-n)c_{\text{liq}} + nc_{\text{ice}}) + nL_f]$  公式 6 参数后，进一步简化为

$$q_{\text{PS}} \approx 1211 \times \rho_{\text{LWC}} \Delta y^3 \sqrt{t} \quad \text{公式 10}$$

$\rho_{\text{LWC}}$  公式 —— 液态水密度

$\Delta y$  —— 单加热带长度或加热风腔长度，单位：米

$t$  —— 叶片厚度，单位：米

单位 kJ

例：叶片平均厚度 0.5m 及加热效率 75%，加热段每叶片 15 米，每只叶片加热功率约为 18kW

行业标准信息服务平台