

ICS 27.180  
CCS F 11

NB

# 中华人民共和国能源行业标准

NB/T 10656—2021

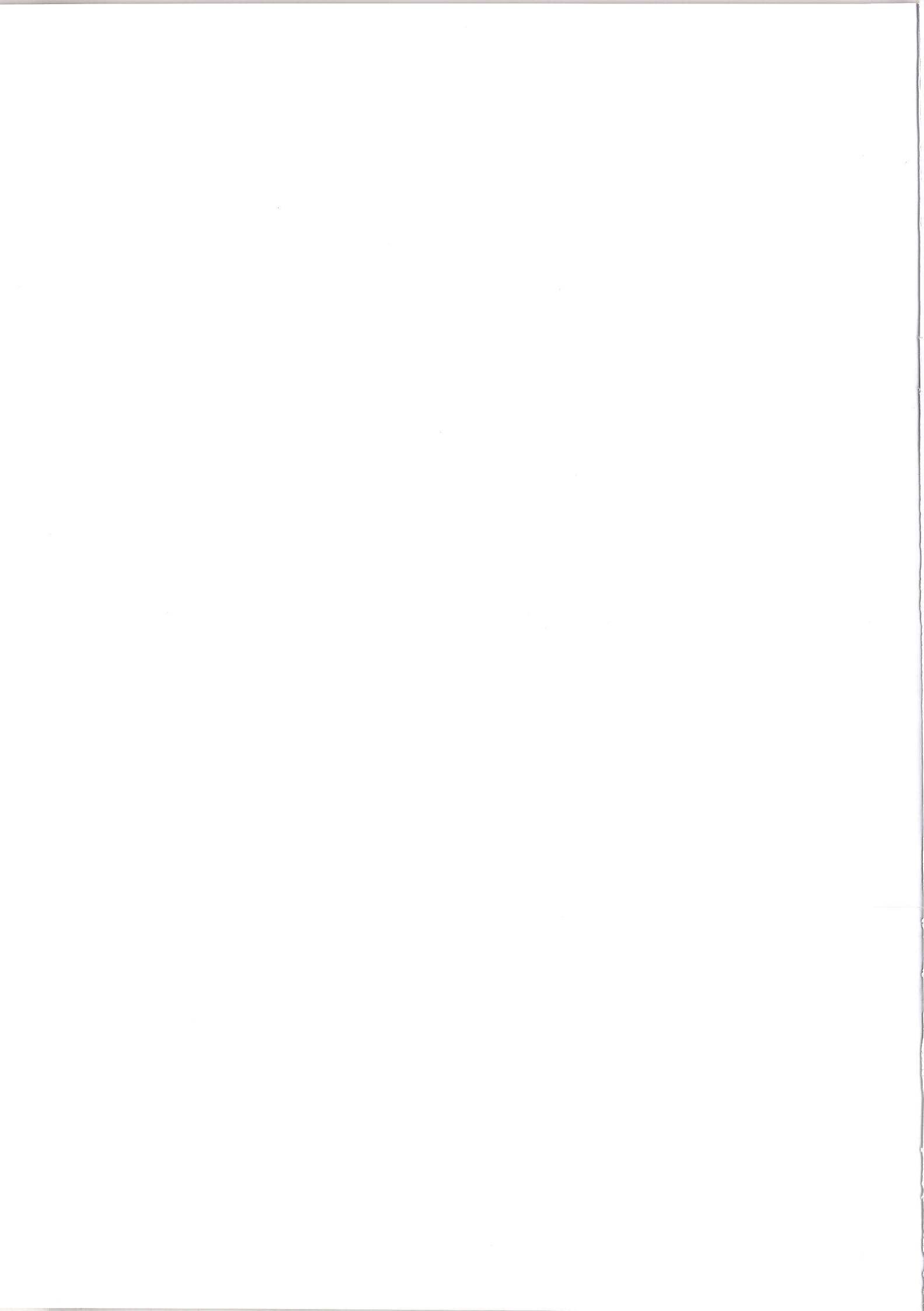
## 直驱永磁风力发电机组 振动稳定性仿真与验证

Direct drive permanent magnet generator system of wind turbine—  
Dynamic stability simulation and validation

2021-04-26发布

2021-10-26实施

国家能源局 发布



## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 基本要求 .....	2
5 仿真建模与分析 .....	3
5.1 总则 .....	3
5.2 建模要求 .....	3
5.3 评估方法 .....	5
5.4 性能指标 .....	6
6 试验验证 .....	6
6.1 基本原则 .....	6
6.2 模态试验 .....	7
6.3 振动试验 .....	9
6.4 仿真与试验偏差要求 .....	11
7 振动稳定性评估与试验报告 .....	11
7.1 概况 .....	11
7.2 仿真模型和结果 .....	11
7.3 试验结果 .....	12
7.4 结论和建议 .....	12
附录 A（规范性） 风力发电机组基本配置参数表 .....	13

## 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。

本文件由国家能源局提出。

本文件由能源行业风电标准化技术委员会风电机械设备分技术委员会（NEA/TC 1/SC 5）归口。

本文件起草单位：北京金风科创风电设备有限公司、江苏金风科技有限公司、上海电气风电集团股份有限公司、西北工业大学、天津大学、湘电风能有限公司、北京鉴衡认证中心有限公司、西安热工研究院有限公司、华润电力技术研究院有限公司、新疆金风科技股份有限公司、福建金风科技有限公司。

本文件主要起草人：徐志良、张志弘、彭超、靖峰、杨洋、马金宝、邢赢、李双虎、蔡小双、许移庆、廖明夫、徐可、李霞、姜少辉、李颖峰、何佳、周幼辉、蔡雅娜、颜益峰、高杨、吕品。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

# 直驱永磁风力发电机组 振动稳定性仿真与验证

## 1 范围

本文件规定了直驱永磁风力发电机组整机振动稳定性评估的建模要求、评价指标、试验内容、试验方法及仿真试验验证等技术要求。

本文件适用于评估直驱永磁风力发电机组整机振动稳定性。

## 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，仅该注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 10068—2020 轴中心高为 56 mm 及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值

GB/T 11349.2—2006 振动与冲击 机械导纳的试验确定 第 2 部分：用激振器作单点平动激励测量

GB/T 11349.3 振动与冲击 机械导纳的试验确定 第 3 部分：冲击激励法

GB/T 14412 机械振动与冲击 加速度计的机械安装

GB/T 35854—2018 风力发电机组及其组件机械振动测量与评估

JB/T 8990 大型汽轮发电机定子端部绕组模态试验分析和固有频率测量方法及评定

IEC 61400-1: 2019 风能发电系统 第 1 部分：设计要求 (Wind energy generation systems—Part 1: Design requirements)

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 气弹耦合 aeroelastic coupling

结构惯性力、弹性力与气动力之间的交互作用。在风力发电领域，主要指叶片、塔架结构与空气动力的耦合现象。

### 3.2 不平衡磁拉力 unbalanced magnetic pull

由发电机定子、转子之间的不均匀气隙导致的两者之间不平衡的磁拉力。

### 3.3 磁固耦合 magnetic-structural coupling

发电机定转子结构与气隙磁场之间的交互作用。

### 3.4 基波频率 fundamental frequency

$F_p$

发电机的电流频率，由发电机转速和磁极对数决定，见公式（1）。



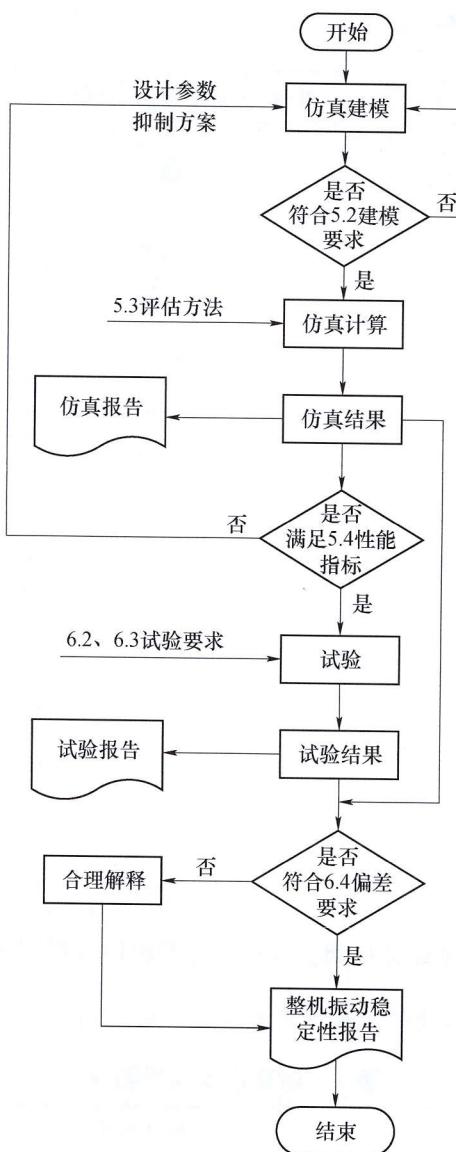


图1 振动稳定性评定步骤

## 5 仿真建模与分析

### 5.1 总则

本文件中的风力发电机组振动稳定性仿真模型应根据风力发电机组的实际结构和参数进行建模。

风力发电机组振动稳定性模型应能正确反映风力发电机组动力学特性，充分考虑在空气动力学、水动力、控制等多域作用下的整机耦合系统动力学特性，适用于整机振动稳定性评估。

### 5.2 建模要求

整机振动稳定性仿真模型应包含对整机振动稳定性有明显影响的部件、系统。典型的整机动力学仿真模型包括风轮系统、传动系统、塔架基础系统、整机控制系统。整机动力学仿真模型拓扑图见图2。

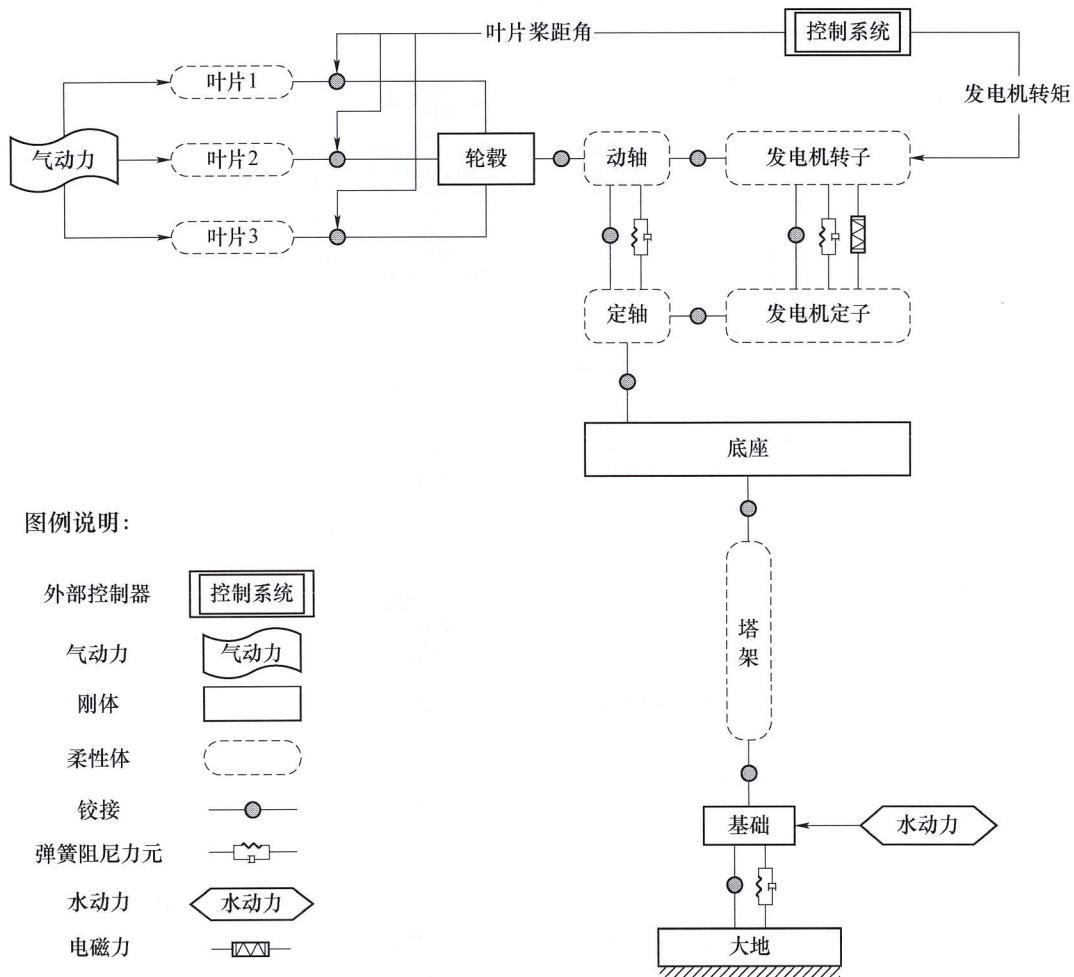


图 2 直驱永磁风力发电机组整机仿真模型拓扑图

计算机仿真模型的完整度、精细度以及相关参数要求见表 1。

表 1 仿真模型建模要求

建模元素	最低要求
叶片	a) 应至少包含前三阶挥舞、前三阶摆振、第一阶扭转模态; b) 对于长度大于 65 m 的叶片，宜考虑叶片大变形非线性效应; c) 各阶模态阻尼比根据模态试验结果给定，或者参考同等材料、工艺的叶片试验结果
轮毂	质量、质心位置及转动惯量等
气动力	应充分考虑叶片的气弹耦合，建议采用叶素动量理论模型或者其他气动理论模型
传动系统	a) 直驱永磁发电机：至少包含一阶弯曲、一阶轴向 <sup>a</sup> 、一阶扭转模态，须考虑不平衡磁拉力的影响; b) 定轴、动轴、机舱底座、轴承等部件：刚度、阻尼和质量参数
塔架	a) 应至少考虑前后、侧向各两阶弯曲模态和一阶扭转模态; b) 模态阻尼比根据模态试验结果或经验给定
基础	质量、刚度、阻尼参数等
水动力	莫里森方程或势流理论
控制系统	包含变桨控制、发电机扭矩控制

<sup>a</sup> 一阶轴向指定子支架或者转子支架发生的轴向运动模态。

## 5.3 评估方法

### 5.3.1 总则

评估方法包括但不限于特征值分析、时程扫频、涡激振动分析。

### 5.3.2 特征值分析

应考虑入流特性、载荷、结构变形、运动姿态、控制等因素对整机模态的影响。

针对不同风速下机组不同稳定状态，应至少对下述两种系统模式进行特征值分析：

——开环系统：针对无控制器介入的整机动力学系统，分析其特征值、特征向量，评估系统稳定性；

——闭环系统：针对控制器介入的整机动力学系统，分析其特征值、特征向量，评估系统稳定性。

特征值分析应定量给出各阶模态的频率、振型和阻尼比，并指出潜在的稳定性风险。

### 5.3.3 时程扫频

施加 NWP 风激励，采用两种扫频方式：风速渐进上升的斜坡风扫频和针对特定风速点的阶跃风扫频。斜坡风的风速变化见图 3，阶跃风的风速变化见图 4。

斜坡风扫频：关注叶片、发电机、塔架振动随风速、转速的变化特征。分析结构加速度响应时程曲线，针对包络线出现明显隆起区域，进行细致检查，确定激励源、模态频率、模态阻尼比及对应的风速。包络线出现局部隆起的区域即为潜在发散的工作区域，见图 5。

阶跃风扫频：针对潜在发散的工作区域及切入风速点、切出风速点、额定风速点等，采用阶跃风进行更加细致的校核分析。

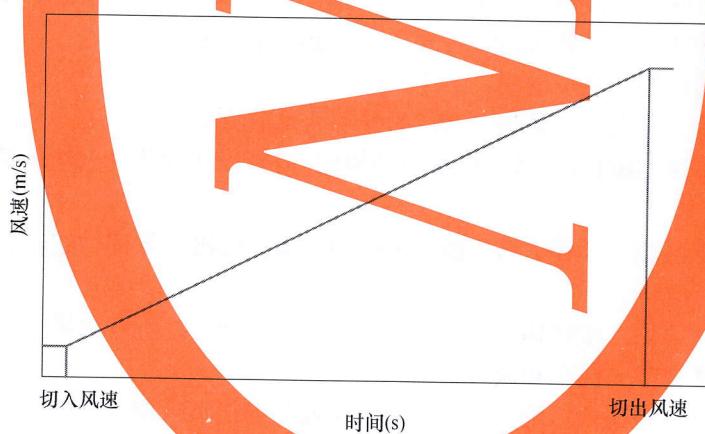


图 3 斜坡风风速变化示意图

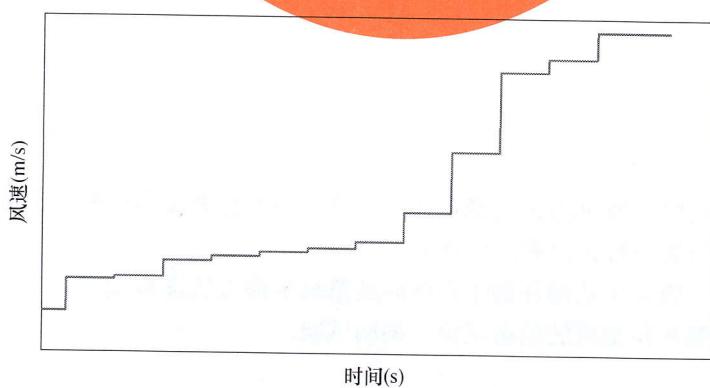


图 4 阶跃风风速变化示意图

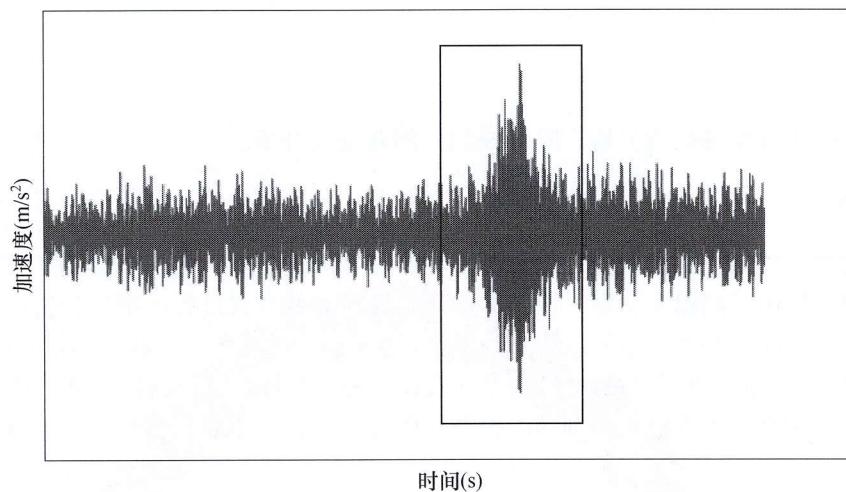


图 5 潜在发散的工作区域示意图

#### 5.3.4 涡激振动分析

涡激振动分析建议采用模态能量法、时域响应法、谱模型等方法。

#### 5.4 性能指标

对于激励频率，应考虑风轮转频及其倍频（1倍频~9倍频），以及发电机基波频率及其二倍频。叶片、发电机、塔架共振转速互不重叠（建议转速带宽为±0.5 r/min）。

风轮系统不宜存在面内的负阻尼情况。

整机时程扫频时叶片、发电机、塔架等部件的振动无发散特征。

振动加速度阈值应按照 GB/T 35854—2018 中的描述，或者以结构发生无法承受的疲劳损伤对应的振动阈值为参考。

针对潜在发散的工作区域，须评估对机组安全性的影响，给出定量评估结论和合理解释，或者从结构设计、控制策略上进行改进。

塔架涡激振动分析须给出定量评估结果，包括塔架一阶弯曲、二阶弯曲模态发生涡激振动的风速、振动频率、振动幅值、塔架截面载荷和疲劳损伤。

在风力发电机组全寿命周期内，塔架涡激振动累计疲劳损伤不应超过 0.1。

根据塔架振动风险大小，建议通过增加揽风绳、扰流块、硬件阻尼器或者其他方式对塔架进行加阻以满足要求。

### 6 试验验证

#### 6.1 基本原则

试验验证主要目的是验证整机的振动稳定性，同时也是对仿真模型的验证与确认，依据相关标准和要求对机组振动稳定性结果进行评定和改进优化。

为保证机组安全，一般采用从部件到子系统再到整机的递进验证步骤。

试验内容包括关键部件和整机的模态试验、振动试验。

## 6.2 模态试验

### 6.2.1 试验对象和内容

通过试验获取叶片、发电机的激励和响应数据，对数据进行处理、辨识，以获取叶片和发电机的模态参数。试验主要内容有：

- a) 预试验分析；
- b) 试验实施；
- c) 试验数据有效性检查；
- d) 模态参数辨识；
- e) 试验结果评定。

### 6.2.2 边界条件

模态试验需要在一定的边界条件下进行，叶片和发电机的边界条件要求如下：

- a) 叶片：通过叶根法兰安装于试验台，叶片预弯方向根据试验条件选择；
- b) 发电机：按照 JB/T 8990 的规定，通过机舱安装于台架上，进行约束模态试验。

### 6.2.3 试验系统

#### 6.2.3.1 激励系统

激励系统须满足以下要求：

- a) 激励主要由激振器或力锤产生。
- b) 力锤应符合 GB/T 11349.3 的规定。
- c) 激振器系统中的激振器应符合 GB/T 11349.2—2006 中 6.3 的规定；功率放大器应具备高输出阻抗，且要求在试验频率范围内频响特性为线性。

#### 6.2.3.2 测量系统

测量系统要求如下：

- a) 系统组成：测量系统一般由加速度传感器和数据采集系统组成。
- b) 加速度传感器要求：
  - 1) 量程及使用频率范围应满足试验要求，线性度偏差不大于 2%，频响偏差不大于 5%；
  - 2) 具有足够的灵敏度和较强的抗干扰能力，传感器质量和惯性特性应尽量小，以减小附件质量对被测对象的影响；
  - 3) 灵敏度应稳定，温度灵敏度偏差不大于 1%，横向灵敏度应在测量方向灵敏度占比不小于 5%；
  - 4) 对使用环境（如温度、湿度、磁场、电场等）的影响不敏感；
  - 5) 传感器安装可通过胶或双面胶纸等固定被试对象上，安装应牢固，在传感器的主轴方向应是刚性的，不应有松动或滑移；
  - 6) 传感器应与被测对象绝缘。
- c) 数据采集系统：
  - 1) 模拟信号采样前应加模拟式抗混滤波器，滤波器的截止频率应大于最高分析频率且应尽量接近分析频率，频带外的分频斜率应大于 12 dB/oct。
  - 2) 采样频率应根据所处理信号的类型、最高分析频率、硬件条件来选择。

- 3) 应具备模态数据采集功能, 要求具备存储频响函数, 甚至原始数据的功能; 并且具备满足模态数据采集及分析所要求的基本信号分析功能: 能对信号做时域、频谱、互谱、频响函数、相干函数、互功率谱分析等, 并且可对信号进行加窗处理(力信号 - 力窗, 响应信号 - 指数窗)。

#### 6.2.3.3 分析系统

分析系统应包括数据预处理、几何建模、模态参数辨识、振型显示及结果验证等功能。

#### 6.2.3.4 其他要求

试验系统应符合以下要求:

- 模数转换器和数模转换器字长至少 12 位;
- 激励系统、测量系统所用设备应由具有检定、校准资质的机构检定合格, 并在有效期内使用。

#### 6.2.4 测点、激励点布置

##### 6.2.4.1 一般要求

测点位置、数量及测量方向应能保证清晰辨识所关注的模态。

激励点的选择遵循如下原则:

- a) 可根据预试验结果来选定, 或根据同型号的结果选定;
- b) 避开振型节点或节线, 布置在各阶模态振型幅值相对较大的位置;
- c) 应布置在被试对象的主要受力构件上。

##### 6.2.4.2 叶片

叶片模态试验至少辨识前三阶挥舞模态、前三阶摆振模态、第一阶扭转模态的模态频率、模态阻尼比、模态振型。

激励点宜靠近叶尖位置, 推荐靠近叶尖的 1/3 长度内。

测点要求如下:

- a) 至少测量 3 个截面。
- b) 每个截面的前、后缘应分别布置传感器, 测量挥舞和摆振方向。
- c) 传感器布置时应考虑避开模态节点或节线, 可在两个节点或节线之间布置传感器。叶片各阶模态的节点位置见图 6。

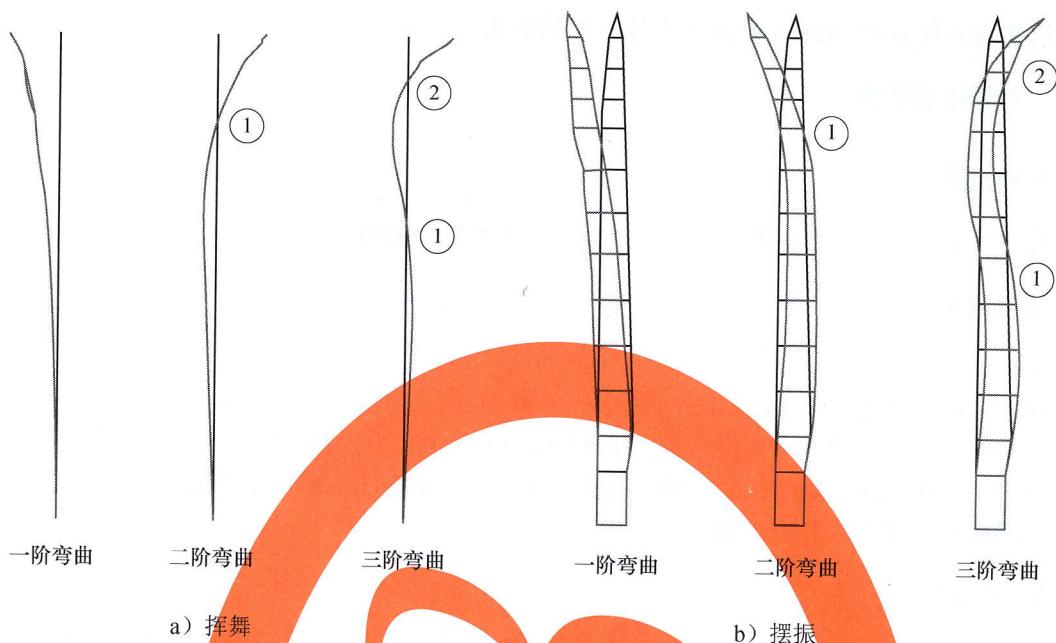
##### 6.2.4.3 发电机

发电机模态试验至少辨识一阶弯曲模态、二阶弯曲模态、一阶轴向模态的模态频率、模态阻尼比、模态振型。

发电机宜采用多参考点激励。

测点要求如下:

- a) 测点应布置在发电机的主体支撑结构上, 可均匀布置。
- b) 方向应包括轴向、径向和切向。
- c) 布置传感器时, 应考虑避开模态节点或节线, 可在两个节点或节线之间布置传感器。传感器数量可根据关心的振型的节点位置及节点数确定。发电机模态节点位置见图 7。



注：数字表示叶片的模态节点。

图 6 叶片模态振型示意图



注：数字表示发电机的模态节点，虚线表示发电机，实线表示振型。

图 7 发电机二阶弯曲模态振型示意图

模态试验结果要求如下：

- 输出要求的模态频率、阻尼比和振型；
- 对于同次试验，能够清晰辨识出不同振型；
- 对于重复性试验，模态频率一致性偏差不超过 3%。

### 6.3 振动试验

#### 6.3.1 概述

振动测量参数包括振动加速度和振动速度两类。振动加速度参数用来评估机械结构的振动冲击，振动速度参数用来评估机械结构的振动能量。

试验设备应满足 GB/T 35854—2018 中第 5 章的要求。

### 6.3.2 发电机试验台试验

#### 6.3.2.1 试验目的

获取发电机定子、转子及轴承在空载、负载工况下的振动特性。

#### 6.3.2.2 试验要求

试验要求如下：

- a) 轴承振动测量方法应按照 GB/T 10068—2020 的规定进行；
- b) 发电机定子振动测点应按照 GB/T 35854—2018 中 4.3 的规定进行；
- c) 宜进行发电机转子振动试验，测点布置在转子的主要振动面或主支撑结构上；
- d) 试验转速应至少涵盖工作转速区间。

#### 6.3.2.3 试验输出

应给出发电机振动的坎贝尔图、振动加速度趋势图和振动速度趋势图，以及频率分布特征。

#### 6.3.2.4 试验结果

试验结果判定要求如下：

- a) 轴承振动结果应按照 GB/T 10068—2020 第 8 章的规定判定；
- b) 定子振动结果应按照 GB/T 35854—2018 中 6.2.2 的规定判定；
- c) 应根据试验振动量级来评估结构安全。

### 6.3.3 整机试验

#### 6.3.3.1 试验目的

试验目的如下：

- a) 获取整机状态下关键部件的模态参数；
- b) 辨识整机状态下风轮、塔架和发电机的耦合振动特征，并评估振动风险。

#### 6.3.3.2 工况设置

工况分为两类，即稳态工况和瞬态工况。应按照 IEC 61400-1: 2019 相关工况进行测试。

- a) 稳态工况细分为 DLC1.2 正常发电工况和 DLC6.4 停机工况。

- 1) DLC1.2 正常发电工况：测试工况应包括切入风速到额定风速所有风速区间状态，数据分析时建议以 0.5 m/s 为分仓间隔，进行风速覆盖。转速应该包括切入转速到额定转速，建议以 0.5 r/min 为分仓间隔，进行转速覆盖，在额定转速附近应包括机组从最优增益比控制阶段到额定功率的过渡阶段（此阶段为发电机转矩比例积分控制，即 PI 控制）的参数。额定功率以上机组进入变桨阶段，桨距角建议从 0° ~ 10° 区间进行评估。
  - 2) DLC6.4 停机工况：测试工况应包括切入风速到切出风速区间状态（若条件受限，所经历的风速越大越有利于机组的振动评估）。停机工况机组可以自由偏航，风轮可以自由转动。
- b) 瞬态工况细分为启动工况、正常停机工况、紧急停机工况。
- 1) 启动工况：启动工况测试可以选择在各风速区间进行评估，若条件受限，一般选择在低风速区间和额定风速区间附近各选择一个工况进行启动测试。

- 2) 正常停机工况：正常停机工况测试可以选择在各风速区间进行状态评估，若条件所限，一般选择在低风速区间和额定风速区间附近各选择一个工况进行正常停机测试。
- 3) 紧急停机工况：紧急停机工况测试可以选择在各风速区间进行状态评估，若条件所限，一般选择在低风速区间和额定风速区间附近各选择一个工况进行紧急停机测试。

上述所有工况，具体执行情况取决于现场试验时的风况条件。

#### 6.3.3.3 振动测量

整机状态下典型的测量位置参数、测量位置和测量方向应按照 GB/T 35854—2018 中 4.3 的要求执行，测量示意图见 GB/T 35854—2018 附录 C。

振动传感器的安装方法和工艺规定应按照 GB/T 14412 的要求执行。塔顶安装加速度传感器，应标定传感器的安装方位与机舱偏航角的关系。柔塔应在二阶弯曲模态振型最大处安装加速度传感器，评估塔架振动。

#### 6.3.3.4 试验结果

振动结果判定要求如下：

- a) 采用振动加速度和振动速度两个参数来评估振动风险，评估方法应符合 GB/T 35854—2018 中第 5 章～第 8 章的要求；
- b) 评估塔架在各工况下的振动风险，当塔架振动不满足结构安全性要求时，应增加减振措施，建议增加阻尼装置或者通过控制策略加阻，并验证其效果；
- c) 应评估发电机振动对结构疲劳的影响。

### 6.4 仿真与试验偏差要求

#### 6.4.1 试验台试验

对试验台试验的结果要求如下：

- a) 叶片一阶挥舞、一阶摆振模态频率仿真与试验结果偏差应在 5% 以内，其余模态频率要求在 10% 以内；
- b) 叶片前两阶挥舞、前两阶摆振模态振型仿真与试验结果对比的模态值校验应在 0.9 以上；
- c) 发电机前两阶模态频率仿真与试验结果偏差应小于 5%。

#### 6.4.2 整机试验

对整机试验的结果要求如下：

- a) 塔架一阶、二阶弯曲频率仿真与试验结果偏差应在 5% 以内；
- b) 评估叶片、发电机、塔架振动风险，与仿真结果进行对比，并对差异较大的特征给出合理解释。

## 7 振动稳定性评估与试验报告

### 7.1 概况

报告内容应包括但不限于风力发电机组基本配置参数（具体格式应按照附录 A）、仿真模型和结果、试验结果、结论和建议。

### 7.2 仿真模型和结果

包括第 5 章中仿真建模、仿真方法及以下结果：

- a) 关键模态参数表;
- b) 坎贝尔图;
- c) 潜在发散工作区域统计结果及原因分析;
- d) 潜在发散工作区域风险评估;
- e) 塔架涡激振动关键风速及疲劳损伤结果;
- f) 塔架涡激振动抑制装置措施。

### 7.3 试验结果

包括第6章中试验系统描述，试验结果分析包括：

- a) 叶片、发电机关键模态参数表;
- b) 整机试验坎贝尔图;
- c) 振动趋势图;
- d) 异常振动特征分析。

### 7.4 结论和建议

主要包括风力发电机组仿真与试验对比及差异分析、振动稳定性风险评估和处理建议。

**附录 A**  
**(规范性)**  
**风力发电机组基本配置参数表**

风力发电机组基本配置参数表见表 A.1。

表 A.1 风力发电机组基本配置参数表

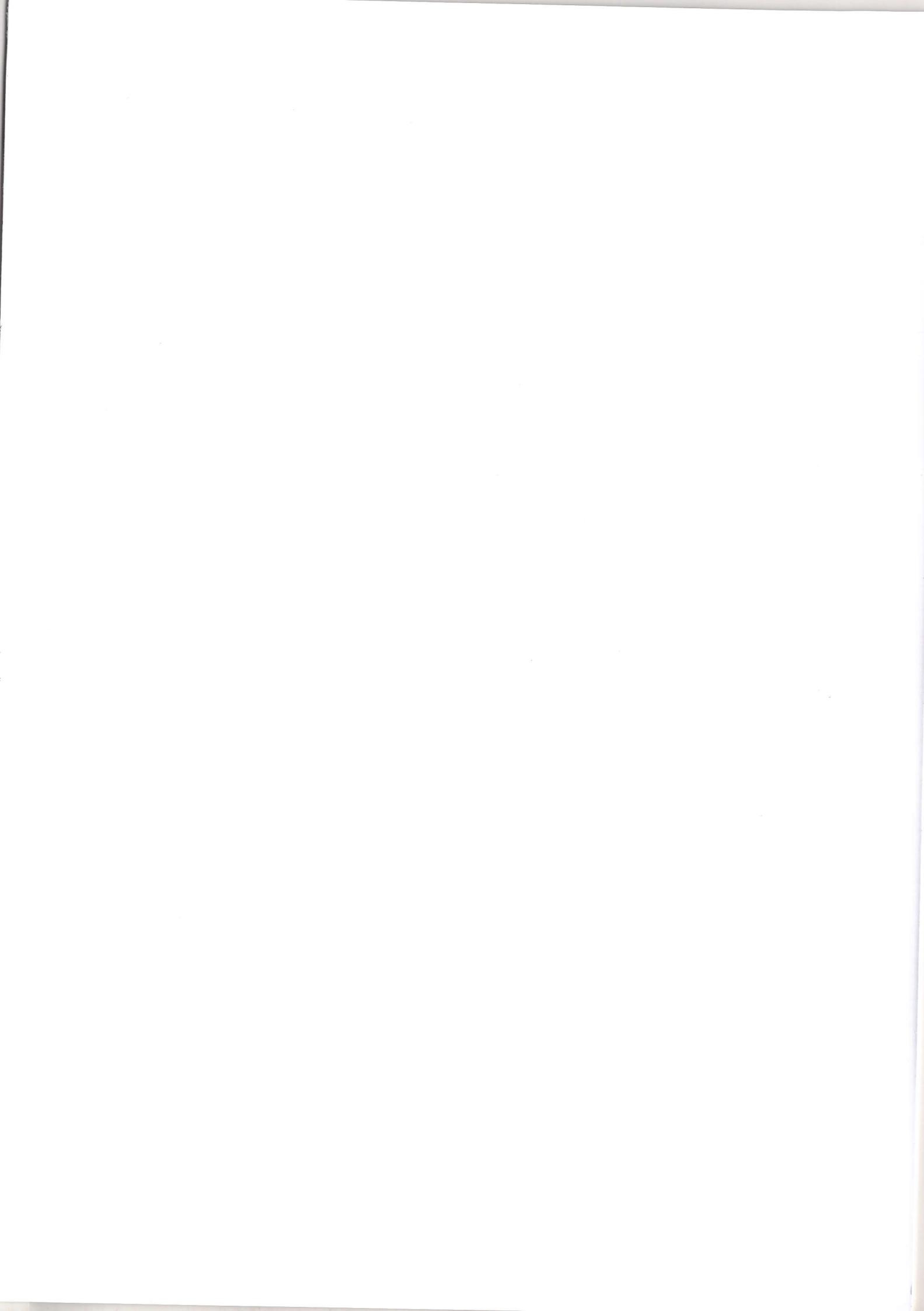
1 概要	
制造商	
型号	
类型 (水平轴/垂直轴)	
额定功率	kW
功率控制	
轮毂中心高度	m
额定电流	A
额定电压	V
额定风速	m/s
切入切出风速	m/s
设计寿命	年
短路电流	A
2 风轮	
风轮直径	m
扫掠面积	m <sup>2</sup>
叶片数量	
轮毂类型	
风轮位置 (上风向/下风向)	
额定转速/转速范围	r/min
叶尖速比	
叶片桨角设置	°
锥角	°
倾角	°
轮毂中心距离塔筒中心距离	m
3 叶片	
制造商	
型号	
叶片材料	

表 A.1 (续)

叶片长度		m
叶片弦长 (最大/最小)		m
附加组件 (失速条, 扰流器)		
延长节长度 (如果有)		m
<b>4 发电机</b>		
制造商		
类型		
发电机数量		
设计方		
发电机类型		
额定功率		kW
额定视在功率		kVA
额定转速/转速范围		r/min
输出电压		V
输出频率		Hz
额定转差率		%
<b>5 塔架</b>		
制造商		
类型		
设计 (方形/管形, 圆柱/圆锥)		
材料		
长度		m
<b>6 偏航控制</b>		
设计 (主动/被动)		
驱动 (电动/机械/液压)		
运行阻尼系统		
<b>7 控制系统</b>		
功率控制类型		
功率控制的驱动		
自动重启动		
控制系统制造商		
类型		
控制性能		

表 A.1 (续)

8 制动系统		
制动系统 (主要/次要)		
激励方式		
安装位置		
类型		
驱动		
9 认证测试		
测试机构		
参考标准		
10 相关信息		
测试风力发电机位置		
风力发电机编号		
叶片编号		
发电机编号		
变流器编号		



中 华 人 民 共 和 国  
能 源 行 业 标 准  
直 驱 永 磁 风 力 发 电 机 组 振 动 稳 定 性 仿 真 与 验 证

NB/T 10656—2021

\*

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天泽润科贸有限公司印刷

\*

2022 年 1 月第一版 2022 年 1 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 16 开本 1.25 印张 37 千字

\*

统一书号 155198 · 3594 定价 **25.00** 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换



中国电力出版社官方微信

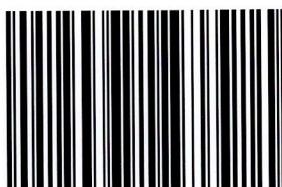


中国电力百科网网址



电力标准信息微信

为您提供最及时、最准确、最权威的电力标准信息



155198.3594