

风力发电机组 塔架涡激振动计算与减振  
技术规范

Vortex-induced vibration analysis and suppression for wind turbine tower

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施



## 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 设计要求 .....	3
4.1 总则 .....	3
4.2 机组吊装完成前设计要求 .....	4
4.3 机组吊装完成后设计要求 .....	4
4.4 特殊工况设计要求 .....	4
5 涡激振动计算方法 .....	4
5.1 结构建模计算 .....	4
5.2 幅值激励法 .....	5
5.3 模态谱方法 .....	5
5.4 能量法 .....	5
5.5 数值仿真计算方法 .....	5
6 减振方案 .....	6
6.1 加阻方法 .....	6
6.2 扰流方法 .....	7
6.3 刚度增加法 .....	8
6.4 减振方案测试验证 .....	8
7 阻尼测试验证方法 .....	8
7.1 测试目的 .....	8
7.2 测试方法 .....	8
7.3 测试设备及要求 .....	8
7.4 数据处理 .....	9
8 验收要求 .....	9
附录 A (资料性) EN 1991-1-4 中推荐的涡激振动计算方法 .....	11
附录 B (资料性) 涡激振动基本理论 .....	16
附录 C (规范性) 塔架涡激振动分析结构阻尼值 .....	18
附录 D (资料性) 数值仿真计算方法 .....	19
附录 E (资料性) 减振方案测试验证 .....	22

## 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。

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（NEA/TC 1/SC 5）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# 风力发电机组 塔架涡激振动计算与减振技术规范

## 1 范围

本文件规定了风力发电机组在吊装过程及整机状态下，塔架涡激振动的设计要求、计算方法、验证方法和验收要求。

本文件适用于风力发电机组锥管式塔架的涡激振动分析，其它形式塔架可参照使用。

## 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 18451.1-2022 风力发电机组 设计要求

IEC 61400-6 风能发电系统 第6部分：塔架和基础设计要求（Wind energy generation systems - Part 6: Tower and foundation design requirements）

EN 1991-1-4:2010 对结构的作用 第1-4部分：总体作用 风载作用（Actions on structures. Part 1-4: General actions - Wind actions）

## 3 术语和定义

### 3.1

**刚性塔架** **stiff tower**

风力发电机组运行过程中，塔架一阶固有频率大于风轮运行转频又小于运行转频下叶片扫塔频率的塔架，简称刚塔。

### 3.2

**柔性塔架** **soft tower**

风力发电机组运行过程中，塔架一阶固有频率小于风轮额定转频。并且在运行过程中塔架的一阶固有频率与风轮运行转频存在相交，简称柔塔。

### 3.3

**涡激振动** **vortex-induced vibration**

流体（如，风）流经钝体（如，塔架）表面时，由于边界层的不稳定，会在下游脱离出成对的反对称漩涡。漩涡的生成与释放直接关系到结构体表面的激励的周期性变化，当激励的频率与结构体固有频率接近时，振动放大，而振动同时反向影响流场、加剧激励，形成大幅值的振动。简称涡振或VIV。

### 3.4

**锁定现象 Locking phenomenon**

当漩涡的激励力频率与结构体固有频率相近时，漩涡频率固定在结构体的固有频率上，即涡脱频率锁定在结构体固有频率上。

3.5

**塔架一阶涡激振动 1<sup>st</sup> mode vortex-induced vibration**

涡脱落频率与塔架一阶频率共振，简称一阶涡振，见图1。

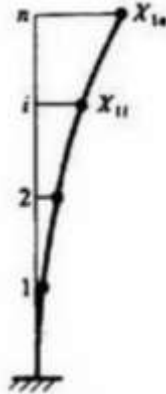


图1 一阶涡振示意图

3.6

**塔架二阶涡激振动 2<sup>nd</sup> mode vortex-induced vibration**

涡脱落频率与塔架二阶频率共振，简称二阶涡振，见图2。



图2 二阶涡振示意图

3.7

**起始风速 start wind speed of VIV**

涡激振动发生的最小风速。

3.8

**脱离风速 end wind speed of VIV**

涡激振动发生的最大风速。

### 3.9

**临界风速 critical wind speed of VIV**

起始风速与脱离风速居中的风速，用于表征涡激振动大致发生风速。

### 3.10

**最大振幅风速 maximum amplitude windspeed of VIV**

涡激振动幅值最大发生时的风速。

### 3.11

**调谐质量阻尼器 tuned mass damper**

通过质量系统的运动产生的惯性力来抑制振动的装置，简称质量阻尼器或TMD。

注：由质量系统、刚度系统、阻尼系统组成。

### 3.12

**调谐液体阻尼器 tuned liquid damper**

通过液体的流动、晃动产生的惯性力来抑制振动的装置，简称液体阻尼器或TLD。

### 3.13

**塔架扰流器 spoiler**

安装于塔架外表面，使塔架截面形状改变为非规则的附加装置。其中主要起改变形状作用的部件称为扰流块。

### 3.14

**塔筒涡流发生器 tower vortex generator**

不改变塔架截面形状，通过在边界层中的机构产生涡旋增加或延缓边界层分离的装置简称塔筒VG。

## 4 设计要求

### 4.1 总则

为了防止重大人员财产损失，并有效提高风力发电机组吊装效率，以下吊装要求需要在风力发电机组设计时进行考虑并充分证明。涡振评估应满足下列要求：

- a) 涡振仅发生在叶轮对塔架无扰动的状态下，机组正常运行状态下，通常不具备塔架涡振的条件，可以不考虑。
- b) 对于轮毂中心高度为120 m及以上刚塔与柔塔，通常需考虑一阶涡振和二阶涡振。若轮毂中心高度小于120 m时，通常只需考虑一阶涡振。
- c) 塔架涡振为自限性振动，由涡振引发的塔架载荷远小于机组设计工况中的极限载荷，可不考虑涡振对于极限的影响。

- d) 涡振评估需包含吊装阶段及整机阶段，需要考虑吊装工艺及对塔架疲劳的影响。
- e) 根据IEC 61400-6的规定，机组生命周期内，因为涡激振动产生的疲劳损伤不应超过0.1时可以忽略不计，如果超过0.1，需将涡激振动引发的疲劳增加到机组全生命周期载荷工况疲劳结果中。

#### 4.2 机组吊装完成前设计要求

吊装时，需综合考虑人员、设备、吊装对接要求，对于振动的还应满足下列要求：

- a) 通过第5章涡激振动计算方法理论计算吊装工况，若顶部晃动位移最大幅值（峰值）不应超过0.5 m，需采用抑振措施。安装过程中，晃动加速度最大幅值不应超过0.5 g；
- b) 机组设计计算疲劳时，单台机组吊装周期为7天。计算保守工况，即吊装至该部件松钩后的放置时间。各主机厂家可根据各家风力发电机组特点分配吊装时间。

#### 4.3 机组吊装完成后设计要求

机组吊装完成后，存在涡振风险的主要工况为：并网前、运维、正常停机。评估涡振风险时，需将上述工况在全生命周期中的时间占比进行规范，具体要求如下表1：

表 1 涡振时间分配

机组状态	暴露在可能发生涡激的总时间	关注涡激振动种类
并网前	0.5 年	一阶、二阶
运行后停机、运维（全生命周期占比）	1/20	一阶、二阶
运行过程中大风切出	根据机组切出风速及风速分布进行计算	二阶
注：表中时间适用于没有任何抑振措施，若在相应阶段采用了有效的抑振措施，此阶段的疲劳损伤可不进行计算		

需计算上述表格中所包含阶段，涡振造成的塔架疲劳损伤。保证全生命周期涡振疲劳损伤并满足总4.1 e)的规定。

#### 4.4 特殊工况设计要求

如风力发电机组安装后或长期处于无电状态，存在长时间无电停机。则需考虑在这种特殊工况条件下的涡激振动。必要时采用涡激振动监测系统。根据监测到的振幅及机组模型，计算无电停机阶段累积疲劳损伤，若达到0.08，需采用减振措施。

### 5 涡激振动计算方法

#### 5.1 结构建模计算

采用以下方法的商用软件、开源软件、自编软件均可以进行涡振的结构建模：

- a) 有限元方法；
- b) 有限差分方法；



### c) 有限体积法。

作为简化,风力发电机组塔架可以简化成欧拉梁或铁木辛柯梁建模,基础通过平动刚度、转动刚度、基础质量建立。对于非大叶轮机组,机头可以采用塔顶质量点等效,大叶轮机组(叶轮直径大于130 m),需要考虑叶片的非线性对于模态的影响。模型频率与载荷计算频率差异需在许可误差内。

结构建模计算得到各阶模态振型、模态频率和模态质量。风力发电机组的涡激振动遵循机组的固有模态进行振动。

## 5.2 幅值激励法

此方法认为塔筒截面的位移幅值直接与激励载荷大小相关,因此采用塔筒截面的位移来计算激励载荷并迭代计算位移直至计算出稳态振幅。

EN 1991-1-4:2010中的方法1为该方法的简化计算,具体计算过程见附录A,该方法可用于计算塔架的二阶涡激振动。但通过EN 1991-1-4:2010方法1计算出的结果与实际测量有时候可以相差较大,并且其中风区等选择与实际中国风区选择差异较大,因此不建议选择。

## 5.3 模态谱方法

该方法主要依据来源于Vickery and Basu的方法。通过假设负阻尼然后通过激励谱的方式计算其最大位移。

EN 1991-1-4:2010中的方法2为该方法的简化计算,具体计算过程见附录A,该方法可用于计算塔架的一阶涡激振动。同时,此方法可以考虑叶轮阻尼对塔架涡激振动的影响。

## 5.4 能量法

Vandiver, J. K.给出了通过能量法计算圆柱结构的基本算法,基本原理为外界流体对固体的做功,等于固体的变形能,利用功能原理可求解变形固体的位移、变形和内力等。

该算法被众多商用软件采用。用于计算流体,尤其是海洋工程的涡振。

## 5.5 数值仿真计算方法

通过建立计算固体力学与计算流体力学的双向耦合计算每个风速下的最大幅值。流固耦合(Fluid-solid interaction, FSI)方法计算固体在流体作用下产生的应力应变或位移及流体在固体变形、位移或旋转影响下的流场改变,需计算流体力学及计算固体力学(CSM)进行交互,具体的计算思路如图3。详细推荐仿真方案,参考附录D。

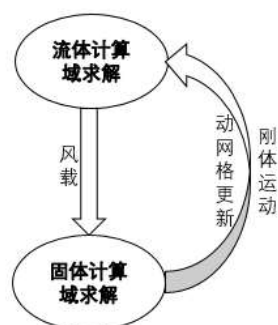


图3 流固耦合仿真思路

## 6 减振方案

### 6.1 加阻方法

#### 6.1.1 总则

通过调节阻尼器的参数，如质量、刚度、液体直径或液面高度等，使阻尼器的固有频率（使用公式计算）等于结构体的固有频率，这样当主结构受激励而振动时，阻尼器就会产生一个与主结构振动方向相反的惯性力作用在主结构上，使主结构的反应衰减并受到控制。阻尼器的质量可以是固体质量也可以是液体质量。

#### 6.1.2 调谐质量阻尼器

##### 6.1.2.1 摆式阻尼器

为调谐质量阻尼器的一种，通过单摆方式由重力提供回复力的阻尼器结构。

摆长设计：根据需要抑振的结构的固有频率（或周期）进行设计。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

摆角范围—— $\pm 8^\circ$ ；

质量设计——阻尼器有效质量/结构模态质量=2%；

阻尼设计——M峰，最优阻尼比；

出厂测试——频率、阻尼相差不大于10%。

##### 6.1.2.2 滑轨式阻尼器

为调谐质量阻尼器的一种，通过弹簧提供有效刚度，滑轨限制运动方向的阻尼器结构。

质量m设计：阻尼器有效质量/结构模态质量=2%。

弹簧刚度k设计：

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

XXX

#### 6.1.3 调谐液体阻尼器

通过液体周期性晃动来提供回复力的阻尼器结构。选用液体阻尼器时，需考虑并明确有效质量设计、频率范围计算、使用温度要求。

液体阻尼器包括圆形阻尼器和方形阻尼器。

## 6.2 扰流方法

### 6.2.1 塔架扰流器

扰流器示意图如4:

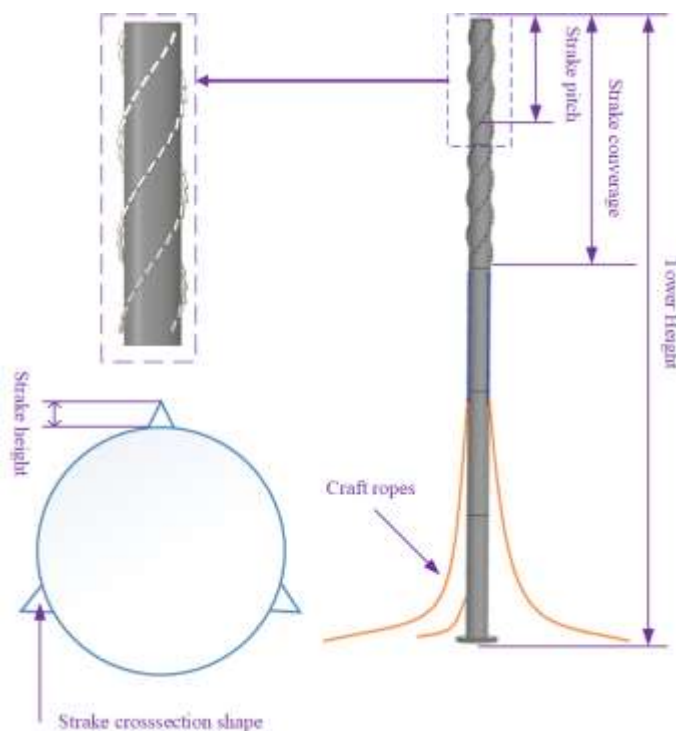


图4 扰流器示意图

设计要求应满足下列要求:

- 形状: 圆柱、棱柱;
- 高度要求: 不小于5% 等效直径 (最大位移处的直径);
- 螺距要求: 为4-5倍的塔架直径;
- 扰流器覆盖范围: 至少顶部30%;
- 使用寿命要求: 单次使用不少于30天。

### 6.2.2 塔筒涡流发生器

涡流发生器设计方法待补充。

形状:

尺寸:

安装方式

材料要求:

若使用此种方法, 需经过计算或仿真方法验证, 如果焊接, 评估塔架强度。

## 6.3 刚度增加法

### 6.3.1 缆风绳

揽风绳载荷要求地面固定方法等待补充

## 6.4 减振方案测试验证

减振方案测试验证见附录 E。

## 7 阻尼测试验证方法

### 7.1 测试目的

机组或塔架的阻尼值，是涡激振动计算或仿真的输入，且可以对机组的振动响应产生较大的影响。为了更准确仿真计算评估，需输入准确的阻尼值，现场测试为一种可靠的确定阻尼值的方法。

使用减振方案之后，可以通过阻尼测试，确认方案的有效性。

注：也可以使用位移幅值测试或加速度幅值测试确认方案的有效性。

### 7.2 测试方法

根据外界激励不同，推荐以下三种测试方法：

- a) 风振激励法：利用风压使风力发电机组产生随机振动，测试结构的基本参数。测试时机组所处的风速环境应能够获得机组的一阶和二阶模态信息；测试过程中桨距角保持在顺桨状态，减少气动阻尼的影响；
- b) 急停测试：通过急停的方法，使得机组快速变桨停机的，机组完成停机动作后，对其自由衰减振动过程进行记录测试。测试时机组处于切入切出风速之内，宜在低风速下测试；测试完成后，取桨距角保持在顺桨状态后的振动衰减曲线进行数据处理；
- c) 激振器法：通过控制激振器，将一定频率带宽的激励施加到风力发电机组上，从而激发机组一阶/二阶共振，然后停止激振器，机组做一阶/二阶自由衰减振动。测试一阶时，激振器的频率应在塔架一阶频率附近，测试二阶时，激振器的频率应在塔架二阶频率附近，高阶频率依次类推。该方案应在低风速下进行，减小外界环境因素的影响；测试时机组处于停机状态，桨距角保持在顺桨状态，减少气动阻尼的影响。

### 7.3 测试设备及要求

传感器宜采用加速度传感器或速度传感器，传感器应具备机械性能高，安装调节方便，体积重量小且便于携带、防水、防电磁干扰等性能。传感器宜采用磁性底座的安装方式。传感器采样频率应大于等于10倍的测试频率。

对于风振激励法、急停测试及激振器测试三种测试方法的测试位置、采集参数及采集数据量应满足如下要求：

测试位置：测量塔架关键截面的沿着机舱轴线和垂直机舱轴线的速度或加速度，传感器的位置如图5所示。

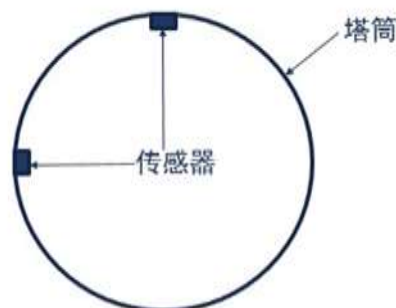


图5 传感器安装位置示意图

塔架的关键截面应在测试前进行确定，通常为一阶及二阶振型位移最大的截面。一阶振型位移最大处为塔顶位置；二阶涡激振动位移最大位置处的高度应在测试前通过有限元分析确定，约在塔高3/5高度处。考虑现场安装方便性，传感器可安装在距离关键截面最近的平台附近。每次应至少在三个截面位置处布置传感器，其中应包括一阶及二阶振型位移最大的截面。

采集参数：采集传感器的速度或加速度信息；同时通过SCADA进行机组状态信息采集，主要包括：偏航角度、风轮转速、桨距角、机舱加速度，以及风速、风向数据，建议采样频率1Hz；同步记录两个采集系统的时间偏差。

采集的数据量：应采集200个采样周期；

测试工况触发前，应先查看测试系统运行状况，测试时应避免或减小环境对系统的干扰。

#### 7.4 数据处理

塔架固有频率可通过对测试过程中的数据进行FFT或者PSD处理，参考仿真结果，拾取处理后的频谱峰值，确定实际的固有频率。

塔架阻尼比可采用时域衰减法、半功率带宽法或模态分析法得到。阻尼比应取3次测试所得结果的均值，单次试验的测试结果与均值的偏差不应超过±20%，还应满足下列要求：

- a) 时域衰减法，只适合单一频率的自振信号；
- b) 半功率带宽法，适用于在自振频谱上采用半功率带宽法求结构阻尼参数，频率分辨率不应大于1%的自振频率值，以确保插值计算的精度；
- c) 模态分析法，例如最小二乘法、随机子空间法。

### 8 验收要求

风力发电机组塔架验收时，需提供塔架涡激振动相关设计参数，必要时，需提供吊装过程和机组运行阶段涡激振动抑制方案。

塔架涡激振动相关设计参数如下：

机组安装、机组运行时各个阶段的频率、阻尼、振型等。

塔架一阶涡激振动临界风速、二阶涡激振动临界风速、起始风速、脱离风速、最大振幅风速。

振动最大位移幅值，加速度幅值。

计算塔架吊装与运行疲劳损伤，疲劳损伤按照Palmgren-Miner's法则进行评估。

判断机组是否满足设计要求。

以上设计参数可参考附录B和附录C。

吊装过程涡激振动抑制技术方案（必要时）主要信息如下：

扰流块高度、螺距等；vg方案：

或阻尼器有效质量、阻尼值；

或缆风绳载荷计算。

附录 A  
(资料性)

EN 1991-1-4 中推荐的涡激振动计算方法

A.1 涡激振动计算

目前通常采用风电行业公认的 EN 1991-1-4 进行塔架涡激振动的计算，其计算流程如图 A.1 所示。

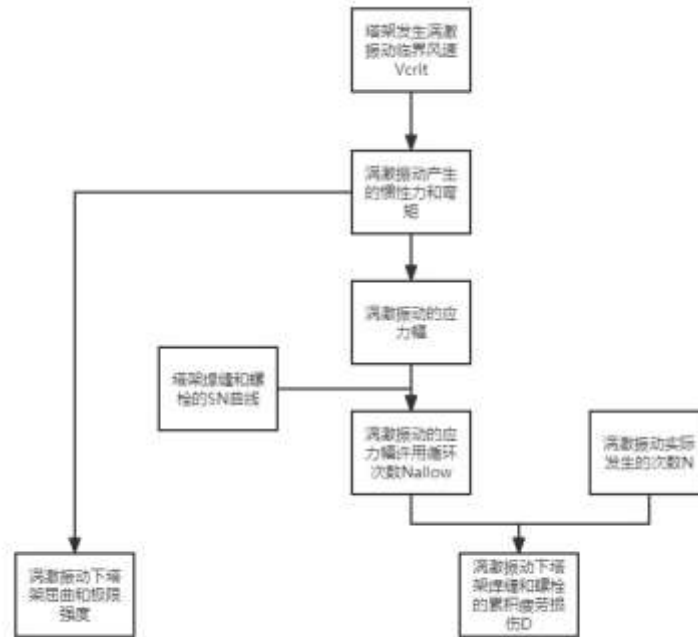


图 A.1 涡激振动计算流程

如图 A.1 所示，涡激振动分析中最重要的是计算塔架的惯性力，标准中直接给出了惯性力的表达式 A.1:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$F_w(s)$ ——作用在单位长度塔架上的与风向垂直的惯性力幅值;

$m(s)$ ——单位长度塔架的振动质量;

$n_{i,y}$ ——塔架第  $i$  阶的固有频率，可通过有限元方法计算得到;

$\phi_{i,y}(s)$ ——第  $i$  阶塔架频率对应的归一化振型值，可通过有限元方法计算得到;

$y_{F,max}$ ——塔架最大振动位置处的位移值，A.1 和 A.2 章节给予方法 1 和方法 2 中  $y_{F,max}$  的计算公式。

风电机组设计时，假设风速呈威布尔分布，得出塔架在相应工况下的应力循环次数  $N$ :

$$N = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \epsilon_0 \cdot \left(\frac{v_{crit}}{v_0}\right)^2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{v_{crit}}{v_0}\right)^2\right) \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

$n_y$ ——塔筒的固有频率；

$T$ ——以秒为单位的设计寿命，风电机组设计寿命一般为 20 年，因此  $T$  一般取  $6.4 \times 10^8 s$ ；

$\varepsilon_0$ ——涡激振动的带宽系数，一般设定为 0.3； $V_0$  为涡激振动位置的参考风速，由风电机组的设计参数决定； $V_{crit}$  是临界风速，计算公式见 (A.3)。

$$V_{crit,i} = \frac{b \times n_{i,y}}{St} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

$V_{crit,i}$ ——塔架发生第  $i$  阶涡激振动的临界风速；

$n_{i,y}$ ——塔架第  $i$  阶固有频率；

$St$ ——斯特劳哈尔数，对于塔架圆柱形结构一般取 0.18。

对于塔架强度分析最关键的两个位置——环焊缝和法兰连接螺栓，涡激振动分析时应该予以分析。其中，Miner 疲劳损伤累积法则认为每次应力循环都对构件造成一定量的损伤，且损伤可以线性叠加，于是得出塔架由于涡激振动而造成的疲劳损伤为公式 A.4：

$$D = N/N_{allow} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

$D$ ——损伤值；

$N_{allow}$ ——结构的许用循环次数，该值由相应结构的 S-N 曲线决定。

EN 1991-1-4:2010 中规定了方法 1 和方法 2 两种方法来计算一阶涡激振动的最大位移。主要区别为方法 1 未考虑湍流强度的影响且适用于各阶涡激振动的计算，而方法 2 考虑了不同湍流强度的影响且仅适用于一阶涡激振动计算。

C.2 方法 1：

该方法规定最大位移值的计算公式如下：

$$y_{F,max} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat} \cdot b \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

$St$ ——斯托克尔数，对于圆形结构一般取 0.18；

$Sc$ ——Scruton 数（质量阻尼参数）；

$K$ ——振型参数； $K_w$  为工作长度系数；

$c_{lat}$ ——气动激振力系数；

$b$ ——发生涡激振动位置塔架的外径，一阶涡激振动一般选取塔架 5/6 高度处的外径。

$Sc$  由下式得出：

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2} \dots\dots\dots (A.6)$$

式中：



$\rho$ ——空气密度；

$\delta_s$ ——塔架的阻尼比对数衰减率；

$m_{i,e}$ ——第  $i$  阶模态塔架的单位等效质量，其值由公式 (A.7) 计算得出：

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) ds} \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

$\Phi_1(s)$ ——塔架的一阶振型值；

$K_w$ ——由下式 (A.8) 计算得出。

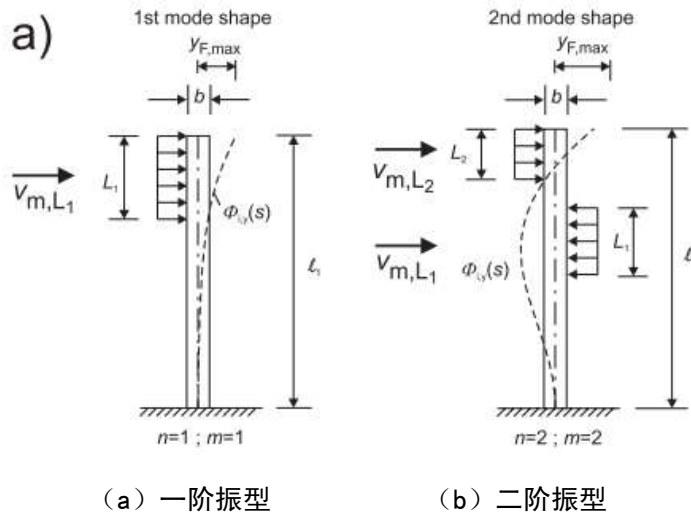
$$K_w = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{L_j} |\Phi_{i,y}(s)| ds}{\sum_{j=1}^m \int_{l_j} |\Phi_{i,y}(s)| ds} \leq 0.6 \dots\dots\dots (A.8)$$

式中：

$L_j$ ——有效长度，如图 D.2 所示；

$l_j$ ——塔架的总高度；

$n$ ——同时发生涡激振动的区域数，对于塔架一阶和二阶涡激振动，其值都取 1； $m$  为振动的波腹数，对于塔架一阶涡激振动，其值取 1，对于二阶涡激振动，其值取 2。



(a) 一阶振型 (b) 二阶振型

图 A.2 涡激振动相关长度参数  $L_j$  的示意

$K$  由公式 (A.9) 计算得出：

$$K = \frac{\sum_{j=1}^m \int |\Phi_{i,y}(s)| ds}{4\pi \times \sum_{j=1}^m \int \Phi^2_{i,y}(s) ds} \dots\dots\dots (A.9)$$

气动激振力系数基本值  $c_{lat,0}$  与雷诺数  $Re$  相关，具体可表示为：

$$c_{lat,0} = \begin{cases} 0.7 & 1 \times 10^4 \leq Re < 3 \times 10^5 \\ -2.5 \times 10^{-6} \times Re + 1.45 & 3 \times 10^5 \leq Re < 5 \times 10^5 \\ 0.2 & 5 \times 10^5 \leq Re < 5 \times 10^6 \\ 0.2 \times 10^{-7} \times Re + 0.1 & 5 \times 10^6 \leq Re < 1 \times 10^7 \\ 0.3 & 1 \times 10^7 \leq Re < 3 \times 10^7 \end{cases} \dots\dots\dots (A.10)$$

其中，雷诺数  $Re$  的计算公式见 (A.11)。

$$Re = \frac{b \cdot v_{crit,i}}{v} \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：

A.11:  $v$ ——空气粘度，取值为  $1.5e-6m^2/s$ 。

A.5: 气动激振力系数  $c_{lat}$  与公式 (A.10) 中  $c_{lat,0}$  的关系见表 C.1；

$V_{m,Lj}$ ——涡激振动相应位置的参考风速值。

表 C.1 气动激振力系数  $c_{lat}$

$\frac{V_{crit,i}}{V_{m,Lj}} \leq 0.83$	$c_{lat} = c_{lat,0}$
$0.83 \leq \frac{V_{crit,i}}{V_{m,Lj}} < 1.25$	$c_{lat} = \left( 3 - 2.4 \times \frac{V_{crit,i}}{V_{m,Lj}} \right) \times c_{lat,0}$
$1.25 \leq \frac{V_{crit,i}}{V_{m,Lj}}$	0

C.3 方法 2:

该方法规定最大位移值的计算公式如下：

$$y_{max} = \sigma_y \cdot K_p \dots\dots\dots (A.12)$$

式中：

$\sigma_y$ ——位移的标准差；

$K_p$ ——峰值系数。

$\sigma_y$ ——由下式得出。

$$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2} \dots\dots\dots (A.13)$$

c<sub>1</sub> 和 c<sub>2</sub> 的计算公式为:

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right); c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h} \dots\dots\dots (A.14)$$

式中:

C<sub>c</sub>——空气动力学常数, 其取决于横截面形状, 对于塔架这种圆柱体结构也取决于雷诺数 Re;

K<sub>a</sub>——气动阻尼参数;

a<sub>L</sub>——归一化的极限振幅。

表 C.2 不同雷诺数 Re 下 C<sub>c</sub>、K<sub>a</sub> 和 a<sub>L</sub> 的推荐值

参数	Re ≤ 10 <sup>5</sup>	Re = 5 × 10 <sup>5</sup>	Re ≥ 10 <sup>6</sup>
C <sub>c</sub>	0.02	0.005	0.01
K <sub>a,max</sub>	2	0.5	1
a <sub>L</sub>	0.4	0.4	0.4

注: 对于 10<sup>5</sup> < Re < 5 × 10<sup>5</sup> 以及 5 × 10<sup>5</sup> < Re < 10<sup>6</sup>, C<sub>c</sub> 和 K<sub>a,max</sub> 可以采用线性插值获得。

表 C.2 给出不同雷诺数 Re 下 C<sub>c</sub>、K<sub>a,max</sub> 和 a<sub>L</sub> 的推荐值。其中, K<sub>a,max</sub> 为湍流强度为 0 时的最大气动阻尼参数, 其可由下式求得:

$$K_a = K_{a,max} \cdot (1 - 3 \cdot I) \dots\dots\dots (A.15)$$

式中:

I——湍流强度;

K<sub>p</sub>——计算见式(A.16)。

$$K_p = \sqrt{2} \cdot \left\{ 1 + 1.2 \cdot \arctan\left(0.75 \cdot \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot a}\right)^4 \right\} \dots\dots\dots (A.16)$$

同时需要注意的是, 方法2对应的循环次数计算公式 (A.2) 中带宽系数ε<sub>0</sub>一般取值为0.15。

附录 B  
(资料性)  
涡激振动基本理论

B.1 无量纲数

为了确定流场中的脱涡频率，定义了无量纲数St见公式 (B.1)

$$St = \frac{f_s d}{U} \dots\dots\dots(B.1)$$

式中：

$f_s$  ——脱涡频率，单位为赫兹 (Hz)；

$d$  ——圆柱直径，单位为米 (m)；

$U$  ——自由流风速，单位为米每秒 (m/s)。

根据实验经验涡脱频率与雷诺数有如下关系，关系内容见图B.1，该图像的取值对应关系见附录C。

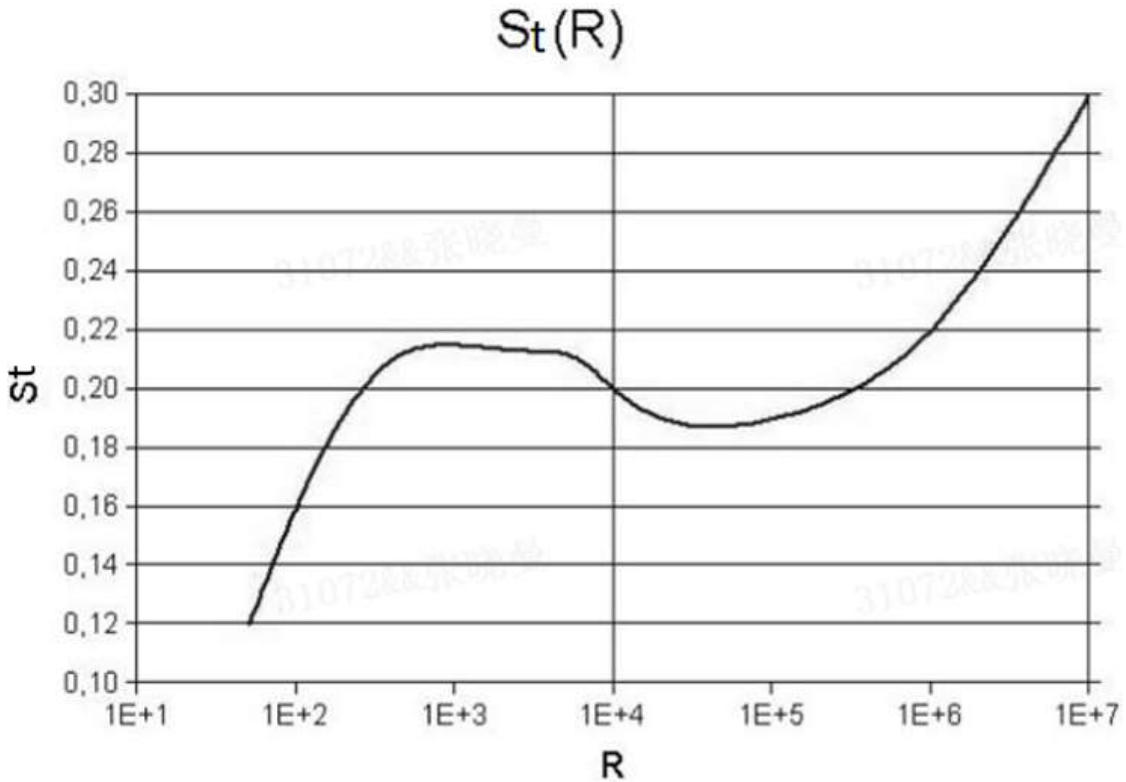


图 B.1 不同雷诺数 R 下 St 值

塔架一阶涡振的推荐St数：0.18

塔架二阶涡振的推荐St数：0.26

当脱涡频率与塔架某阶频率相等时的风速为某阶涡激振动的临界风速。

涡激振动的激励来源于风激励，应按照GB/T 18451.1-2022推荐的风随高度分布关系为指数风廓线见公式 (B.2)

$$U(z) = U_{hub} \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \dots\dots\dots(B.2)$$

式中：

$U(z)$ ——高度 $z$ 的风速，单位为米每秒（m/s）；

$U_{hub}$ ——轮毂高度风速，单位为米每秒（m/s）；

$Z$  ——轮毂高度风速，单位为米每秒（m/s）；

$z_{hub}$ ——轮毂高度，单位为米（m）；

$\alpha$  ——风剪切。

涡振的激励表现为两个方向的力，平行来流方向的力与垂直来流方向的或者称为阻力方向的力与升力方向的力。阻尼方向的力频率是升力方向的两倍，但在风力发电机组主要的振动形式为垂直来流方向的升力方向振动，阻力方向无需评估。

塔架的锁定是涡激振动的特征之一，如图 B.1 所示，在此特征下发生强烈的流固耦合现象，此时流体的激励频率不随公式（B.1）改变，而是会被强行限制在共振频率上。锁定现象通过迭代的方法计算得到。

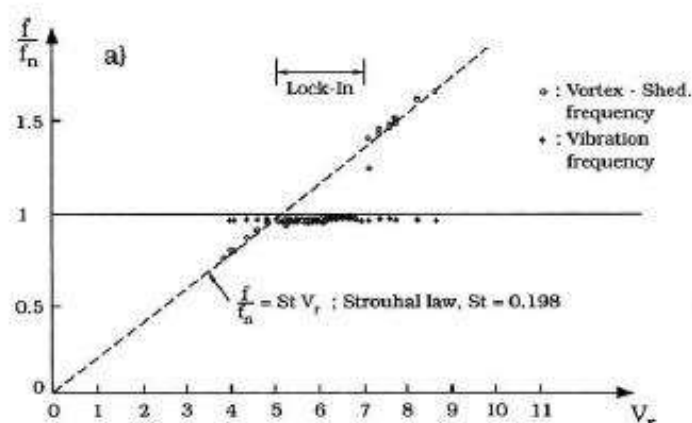


图 B.2 涡激振动的锁定现象

整机的塔架涡激振动，需考虑叶轮阻尼的影响。

刚性塔架易在吊装完成后停机时发生塔架涡激振动。柔性塔架，易在吊装过程中、吊装完成后停机时发生塔架涡激振动。

附录 C  
(规范性)

塔架涡激振动分析结构阻尼值

C.1 陆上风力发电机组

根据IEC 61400-6中塔架设计要求，二阶阻尼比等于塔架一阶阻尼比。高阶阻尼比采用瑞利阻尼进行估算。不同材质塔架的阻尼比不同。

$$\zeta_2 = \zeta_1 \dots \dots \dots (C.1)$$

式中：

$\zeta_1$ ——结构一阶模态结构阻尼比；

$\zeta_2$ ——结构二阶模态结构阻尼比。

钢制塔架一阶与塔架一阶与二阶均取0.0025。

表 C.1 钢制塔筒一阶与二阶结构阻尼

Material	Damping ratio	Log decrement
Steel tubular towers	0.0025	0.015

或根据以下公式进行确定。如有实际测量，根据实际测量结果给定。

$$\zeta_1 = \frac{2e^{-\frac{1.3}{f_1} + 0.15}}{100} \dots \dots \dots (C.1)$$

式中：

$f_1$ ——结构一阶模态固有频率；

混凝土塔架一阶、二阶阻尼比按照标准定义为 0.0065；

钢制、混凝土塔架，按照钢制塔架给出保守的阻尼比。

C.2 海上风力发电机组

塔架一阶、二阶阻尼比：待补充。

C.3 叶轮气动阻尼影响

在停机时，计算塔架涡激振动时，需考虑叶轮气动阻尼的影响。必要时，长时间停机需要使用变桨方案，如将一支叶片开桨到较低桨距角，建议桨距角不应大于 50°，且通过载荷校核评估。

## 附录 D (资料性) 数值仿真计算方法

### D.1 方法说明

风力机塔架高达100多米，若塔架外壁面使用边界层网格，使用Morphing（变形）方法实现流固耦合，会消耗较多的计算资源速度过慢。不适用工程应用。

塔架直径在竖直方向上变化率小，可使用截面的二维流动来代替三维流动，同时将塔架一阶涡激振动简化为只做x、y方向平动的弹簧-质量振子运动，且固体控制方程通过脚本加载到CFD软件中。流体域中计算塔架所受风载并传递给固体域。固体域在风载、阻尼、弹性力的作用下发生位移，并将位移反馈给流体域。以此来进行耦合迭代。

### D.2 流体域计算方法

流体部分计算域为5D（上游）\*10D（下游）\*5D（单侧），x方向为来流方向。使用嵌套网格及边界层网格，首层网格为0.005m。

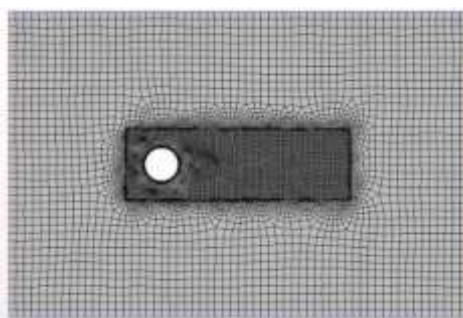


图 D.1 计算域及网格

流体域部分，应用嵌套网格，边界条件设置如图D.1所示。塔架外壁使用粗糙壁面，粗糙度为0.01 m。嵌套网格部分的流体域设置为运动区域，运动速度根据固体域的运动反馈进行设置。

流体域部分使用 Realizable K-ε，采用壁面函数，使用隐式非定常方法。时间步长 0.01 s。

### D.2 流体域计算方法

对塔架结构及动力学参数进行提取，如下：

1) 第*i*阶模态等效质量：

$$m_{i,e} = \int_0^l m(s)\phi_i^2(s)ds \dots \dots \dots (D.1)$$

2) 一阶振动等效长度（上1/4长度）：

$$l_{1,e} = \frac{l}{4} \dots \dots \dots (D.2)$$

3) 圆频率：

$$\omega_n = 2\pi f \dots\dots\dots(D.3)$$

4) 阻尼系数:

$$C = 2m_{i,e}\omega_n\xi \dots\dots\dots(D.4)$$

5) 刚度:

$$k = m_{i,e}\omega_n^2 \dots\dots\dots(D.5)$$

式中:

$l$ ——结构的高度;

$m$ ——单位长度的质量;

$\phi_i$ ——第*i*阶结构阵型;  $f$ 为结构频率;

$\xi$ ——结构的阻尼比, 塔架材料为钢, 根据IEC61400-6,  $\xi$ 取值为0.0025;

$\phi_i$ 、 $f$ ——通过可以通过动力学仿真软件得到。

固体域受力计算

固体域运动为x、y方向平动。作用于固体域上的力, 包括风载、阻尼、弹性力, 每种载荷均有x、y两个方向, 分别如下:

风载:

$$F_{wx} = F_d * l_{1,e}; F_{wy} = F_l * l_{1,e} \dots\dots\dots(D.6)$$

阻尼力:

$$F_{damx} = -C * V_x; F_{damy} = -C * V_y \dots\dots\dots(D.7)$$

式中:

$C$ ——阻尼系数;

$V_x$ 为塔架x向运动速度;

$V_y$ ——塔架y向运动速度;

弹性力:

$$F_{sx} = -k * R_x; F_{sy} = -k * R_y \dots\dots\dots(D.8)$$

式中:

$R_x$ ——塔架x向运动位移;

$R_y$ ——塔架y向运动位移。

综上, 固体域上所受合力为:

$$F = F_w + F_{dam} + F_s \dots\dots\dots(D.9)$$

固体域的运动方程为:

$$m_{i,e} \frac{dv}{dt} = F \dots\dots\dots(D.10)$$



在CFD软件中，通过脚本二次开发，加载固体一阶等效质量 $m_{i,e}$ 、一阶等效长度 $l_{1,e}$ 、圆频率 $\omega_n$ 、阻尼系数 $C$ 、刚度 $k$ 、受力及运动方程。

附录 E  
(资料性)  
减振方案测试验证

### E.1 位移幅值测试

通过高速摄像成像技术来定位塔筒位置，并通过图像处理来进行幅值和频率分析。或通过卫星罗经等直接进行位移的测量，测试仿真结果结果如图E.1所示。

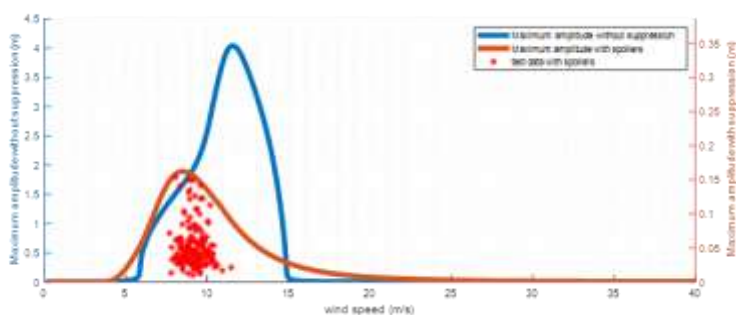


图 E.1 测试仿真结果对比

### E.2 加速度幅值测试

通过加速度传感器进行加速度测试。在所需部位安装加速度传感器，一阶振动加速度传感器安装在塔顶，二阶振动加速度传感器通常根据振型安装在塔架中部振动最大位置，加速度采集频率不应低于10Hz，进行加速度幅值及频率分析。