



REETG/TN017: 2024

# 边坡地形风电场风资源评估方法

Wind resource assessment method of wind farm for slope topography

2024-01-27 发布

2024-01-27 实施

可再生能源专家技术委员会 发布

## 版权声明

本文为技术说明，不属于标准及规范性文件，可用于应对行业实际问题实施时提供执行依据，及行业制修订相关标准或规范性文件时提供参考。本文的著作权属于可再生能源专家技术委员会成员单位共有，任何成员单位或个人未经其他成员单位同意不得直接或变相将本文全部或部分用于商业用途及市场宣传。对于违反此声明或者其他违法使用本文内容者，可再生能源专家技术委员会将依法追究其法律责任。

本文件起草召集人：冒洪生（联合召集人）、曹旭（联合召集人）、盛科（总执行人兼风参组召集人）、蔡继峰（载荷组召集人）、许昌（CFD组召集人）、王建林（地形组召集人）、徐昕彤（案例组召集人）

本文件主要起草人员：冒洪生、曹旭、盛科、蔡继峰、许昌、王建林、徐昕彤、王璇、黄智、李新华、陈强波、牛猛、韩星星、刘超、石浩、程哲、薛飞飞、焦在强、朱良山、张立英、宁洪涛、逢增强、房杰、王聚博、陈静、王朝、王滋宇、赵琳、朱金阳、梁会森、陈振华、朱向东、杨顺、杨国亮、杨杰、周毅、王先阳、吴轩、王海斌、朱雨露、张祟、李光远

# 目 录

1. 目的及范围 .....	5
2. 规范性引用文件 .....	5
3. 术语和定义 .....	5
4. 符号和缩略语 .....	7
4.1 符号 .....	7
4.2 缩略语 .....	9
5. 项目基本资料 .....	10
5.1 风资源数据 .....	10
5.1.1 测风数据 .....	10
5.1.2 周边气象站数据 .....	10
5.1.3 长期气象数据 .....	11
5.2 地形图信息 .....	11
5.3 风电场及风电机组资料 .....	11
6. 边坡地形流场仿真计算方法 .....	12
6.1 数据前处理 .....	12
6.1.1 测风塔数据处理要求 .....	12
6.1.2 流场仿真计算输入数据处理 .....	12
6.2 仿真计算 .....	13
6.2.1 仿真入流参数处理要求 .....	15
6.2.2 网格划分原则 .....	15
6.2.3 边界条件处理原则 .....	15
6.2.4 机组模型的设置 .....	15
6.2.5 计算时长及步长设置 .....	15
6.3 数据后处理 .....	16
6.3.1 流体仿真结果分析 .....	16
6.3.2 风特征参数统计与计算 .....	16
7. 载荷分析 .....	18
7.1 载荷仿真流程 .....	18

7.2	地形复杂度评估 .....	18
7.3	精细化三维风模型 .....	19
7.4	载荷后处理 .....	19
7.4.1	极限载荷 .....	19
7.4.2	疲劳载荷 .....	19
8	发电量计算 .....	20
附录 A	边坡示意图 .....	21
附录 B	边坡扰流区介绍 .....	22
附录 C	大气热稳定度计算方法 .....	24
C.1	辐射法 .....	24
C.2	风向标准差法 .....	25
C.3	风速比 $U_r$ 法 .....	26
附录 D	仿真计算域各区域 .....	28
附录 E	入流边界条件和边界层高度计算 .....	29
E.1	中性大气条件下入流边界条件计算 .....	29
E.2	非中性大气条件下入流边界条件计算 .....	29
E.3	边界层高度计算 .....	30
附录 F	地形复杂度对湍流结构的影响 .....	31
附录 G	边坡应对方案 .....	32
G.1	风电机组吊装平台设计原则 .....	32
G.2	边坡应对方案 .....	32
G.2.1	边坡效应适用范围 .....	32
G.2.2	物理应对方案 .....	33

# 边坡地形风电场风资源评估方法

## 1. 目的及范围

本文件规定了边坡地形风电场及风电机组机位风资源的评估方法。

本文件规定的方法可适用于有边坡影响的风电场及风电机组机位的发电量计算及载荷分析。

## 2. 规范性引用文件

下列引用文件对于本说明的应用是必不可少的。凡是注有日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本规范。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修订版）适用于本说明。

GB/T 50330-2013 建筑边坡工程技术规范

GB/T 18451.2-2021 风力发电机组功率特性测试

IEC61400-1-2019 Wind energy generation systems-Part 1: Design requirements

DB52T 1031-2015 贵州山地风电场风能资源观测及评估技术规范

REETC/TN010-2022 在役风电场风资源评估方法指导文件

NB/T 31147-2018 风电场工程风能资源测量与评估技术规范

NB/T 10103-2018 风电场工程微观选址技术规范

GB/T 37523-2019 风电场气象观测资料审核、插补与订正技术规范

NB/T 31147-2018 风电场工程风能资源测量和评估技术规范

NB/T 10909-2021 微观选址中风能资源分析及发电量计算方法

## 3. 术语和定义

### 3.1

**边坡<sup>注1</sup> slope**

在建筑物场地及周边，由于建筑工程、市政开挖或者填筑施工所形成的人工斜坡，以及对建（构）筑物安全或稳定有不利影响的自然斜坡。

### 3.2

**吊装平台 hoisting platform**

为满足吊车以及风电机组等设备安装要求，通过人工或机械挖填平整改造而形成的场地。

注1 边坡的范围可根据区域场地评估结果确定，参考 GB/T 18451.2-2021《风力发电机组功率特性测试》测试场地要求，坡度小于3%的区域为边坡外区域。

3.3

**坡顶** The highest point of the slope

边坡的最高点。

3.4

**基准面** base

吊装平台开挖成型后的相对标高面。

3.5

**坡高** slope height

坡顶与基准面的垂直距离。

3.6

**坡脚** slope base

边坡坡面与吊装平台的交线部位。

3.7

**坡脚点** slope base point

风电机组机位中心点和坡顶连线的水平投影线与坡脚的交点。

3.8

**坡角** slope angle

挖方边坡坡面与基准面所形成的角度。

3.9

**坡比（坡度）** slope ratio

坡角的正切值。

3.10

**坡宽** slope width

边坡坡面与基准面的交点的最大距离。

3.11

**坡距** Slope distance

坡顶与风电机组机位中心点的水平距离。

3.12

**扇区角** Sector angle

基准面内，过风电机组机位中心点与边坡最外围等高线的两切线之间的最大夹角；如附录 A 所示。



3.13

边坡影响扇区<sup>注2</sup> sectors affected by slope morphology

对风电机组有边坡影响的风向所在区域。

3.14

边坡扰流区<sup>注3</sup> disturbance sectors affected by slope morphology

受到边坡地形影响的区域。

3.15

大气热稳定度<sup>注4</sup> atmospheric stability

受温度分布状况影响大气垂直方向运动受到抑制或加强的程度。

## 4. 符号和缩略语

### 4.1 符号

$\alpha$ ——边坡坡角, °。

$b$ ——边坡坡宽, m。

$C_{CT}$ ——湍流结构修正系数。

$C_T$ ——风电机组推力系数。

$C_\mu$ ——大气边界层常数。

$d_n$ ——一年中的日期序数。

$D$ ——风轮直径, m。

$f$ ——科里奥利参数, rad/s。

$g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

$h$ ——边坡坡高, m。

$\Delta h$ ——高度差, m。

$H$ ——地形复杂度中的高复杂等级。

$k$ ——湍动能。

$L$ ——莫宁-奥布霍夫长度, m。

$m$ ——SN 曲线幂指数, 即 wholer 指数。

$P$ ——气压, kPa。

注 2、注 3 详见附录 B 所示。

注 4 根据大气热力分层和大气边界层湍流的产生机制, 将大气分为稳定大气、中性大气和 unstable (对流) 大气三种状态。具体计算方法如附录 C 所示。

$P_1$ ——边坡影响扇区内的扇区角区域风向汇总概率。

$P_2$ ——边坡影响扇区内的  $W$  扇区风向汇总概率。

$P_3$ ——非边坡影响扇区内风速汇总概率。

$Ri$ ——理查森数。

$S$ ——坡距, m。

$t$ ——时间, s。

$T_0$ ——地面位温, K。

$T'$ ——温度脉动量, K。

$TI$ ——湍流强度。

$u'$ ——流向速度脉动量, m/s。

$U$ ——来流方向年平均风速, m/s。

$v'$ ——展向速度脉动量, m/s。

$V_{ave}$ ——轮毂高度年平均风速, m/s。

$V_{in}$ ——风电机组切入风速, m/s。

$V_r$ ——风电机组额定风速, m/s。

$V_{ref}$ ——用于确定风力发电机组等级的 50 年一遇 10 分钟平均风速最大值, m/s。

$V_{out}$ ——风电机组切出风速, m/s。

$w'$ ——垂向速度脉动量, m/s。

$z$ ——离地高度, m。

$z_0$ ——地表粗糙度, m。

$Z$ ——计算域竖直方向高度, m。

$\sigma$ ——风速标准差, m/s。

$\sigma_\theta$ ——风向标准差,  $^\circ$ 。

$\sigma_1$ ——风速  $x$  轴分量标准差, m/s。

$\sigma_2$ ——风速  $y$  轴分量标准差, m/s。

$\sigma_3$ ——风速  $z$  轴分量标准差, m/s。

$\sigma_{\theta 1}$ ——风向  $x$  轴分量标准差,  $^\circ/s$ 。

$\sigma_{\theta 2}$ ——风向  $z$  轴分量标准差,  $^\circ/s$ 。

$\theta$ ——扇区角,  $^\circ$ 。



$\theta_0$ ——日角，表示太阳每日角度变化， $^{\circ}$ 。

$\theta_1$ ——入流角， $^{\circ}$ 。

$\theta_{max}$ ——1 小时内风向最大方位角， $^{\circ}$ 。

$\theta_{min}$ ——1 小时内风向最小方位角， $^{\circ}$ 。

$\theta_*$ ——特征位温，K。

$\Theta$ ——平均位温，K。

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$ ——风切变指数。

$\rho$ ——空气密度， $\text{kg/m}^3$ 。

$\kappa$ ——冯·卡门常数。

$\Omega$ ——地球自转速度， $7.292115 \times 10^{-5}$ ， $\text{rad/s}$ 。

$\lambda$ ——当地纬度， $^{\circ}$ 。

$u_*$ ——摩擦风速， $\text{m/s}$ 。

$\Delta u$ ——两个海拔平均风速差值， $\text{m/s}$ 。

$\Delta z$ ——两个海拔高度差值， $\text{m}$ 。

$\Psi$ ——太阳高度角， $^{\circ}$ 。

$\Psi_{\sigma}$ ——太阳倾角， $^{\circ}$ 。

$\varphi$ ——当地经度， $^{\circ}$ 。

$\varepsilon$ ——湍流耗散率。

$\phi_m$ ——风速无量纲垂直梯度。

$\phi_t$ ——位温无量纲垂直梯度。

$\phi_k$ ——湍动能无量纲垂直梯度。

$\phi_{\varepsilon}$ ——耗散率无量纲垂直梯度。

## 4.2 缩略语

CFD (Computational Fluid Dynamics) ——计算流体动力学

DEL (damage equivalent load) ——20 年累积等效疲劳载荷

ECD (Extreme coherent gust with direction change) ——极端相干阵风伴随方向变化

EWS (Extreme wind shear) ——极端风切变

EOG (Extreme operating gust) ——极端运行阵风

ETM (Extreme turbulence model) ——极端湍流模型

LDD (Load During distribution) ——载荷持续分布

LES (Large Eddy Simulation) ——大涡模型仿真

LRD (Load Revolution distribution) ——载荷转数分布

$k-\varepsilon$ ——一种湍流双方程模型

N-S (Navier-Stokes equation) ——纳维-斯托克斯方程, 描述粘性不可压缩流体动量守恒的运动方程, 包含连续性方程、动量方程和能量方程

NTM (Normal turbulence model) ——正常湍流模型

## 5 项目基本资料

### 5.1 风资源数据

#### 5.1.1 测风数据

##### (1) 测风代表性要求

1) 风电场测风应符合 GB/T 37523《风电场气象观测资料审核、插补与订正技术规范》和 NB/T 31147-2018《风电场工程风能资源测量与评估技术规范》的规定。

2) 在风电场前期开发时, 宜根据限制性因素进行风电机组初步排布, 并根据风电机组的水平空间分布、垂直空间分布、以及地形特征综合确定测风设备数量及位置, 所选测量位置的风况应代表边坡机位的风资源特征, 能够反应地形地貌带来的影响。

3) 至少有 1 座测风设备对边坡位置具有代表性, 距离边坡机位不宜大于 2.0km, 与风电机组实际运行海拔高差不宜大于 50m。

4) 为进行精确分析, 宜在附录 B 边坡绕流区范围内, 于相似地形环境设立测风设备。

##### (2) 测量数据要求

1) 风速及风向传感器布置高度应涵盖预装轮毂中心高度, 并在近地面应加密测风, 边坡扰流区高度内宜包含 3 层及以上风速测量设备以及 1 层风向测量设备。

2) 应在测风设备近地面高度及初拟风电机组轮毂高度处附近各安装 1 套气温气压观测设备。

3) 至少一个完整年 10min 的各高层时间序列数据, 应涵盖风速及其标准差、风向及其标准差、温度、气压和相对湿度。

4) 参数采样时间间隔应不大于 3 s, 并自动计算和记录 10 分钟平均值与标准偏差。

#### 5.1.2 周边气象站数据

宜收集风电场场址周边长期气象站近 20 年资料, 资料应符合 GB/T 37523-2019《风电场气象观测资料审核、插补与订正技术规范》的相关规定。

### 5.1.3 长期气象数据

应收集风电场区域气象再分析资料或中尺度资料（如 MERRA2、ERA5 等），数据应包括位置坐标、风速、风向、温度、气压等时间序列（逐十分钟或逐小时）数据。

## 5.2 地形图信息

地形数据和地貌粗糙度数据应符合 NB/T 10103-2018《风电场工程微观选址技术规范》的要求，地形数据处理时宜考虑施工后地形变化造成的影响。

目标区域及目标风电场 1:2000 或更高精度的实测等高线地形图文件，等高线地形图中涵盖附着物、障碍物及区域范围限制性因素等信息。

涵盖风场区域和计算域的中尺度数字高程地形图（背景地图），精度为 30m 分辨率或更高；范围应包含实测等高线地形图，且至少外扩 10km 以上。

涵盖风场区域和计算域的地貌粗糙度信息。

拟开发机位吊装平台的设计方案资料，涵盖风电机组吊装平台开挖施工图（宜采用 1:500 等高线地形图绘制，包含平台基准面海拔高度、平台位置、坡高、坡宽、坡比、平台设计尺寸、粗糙度等信息）和施工总布置图（CAD 格式）。

## 5.3 风电场及风电机组资料

### （1）风电场基本情况

风电场所处位置、机型、台数、总容量。

风电场各机位点、测风塔的坐标与编号，其坐标系宜与等高线地形图一致；并提供测风塔高程、测风时段、测风塔安装报告、测风仪器设置及检测报告等资料。

### （2）项目机组参数

机组额定功率、轮毂高度、风轮直径、塔筒外部直径、机舱尺寸（长宽高）、风场空气密度下的功率曲线及推力系数曲线。

如需高精度模拟，应提供叶片详细的几何信息，包括：叶片长度；叶片最大厚度；翼型详细数据：弦长、半径、安装角、桨距角、上下弦线坐标；叶片叶素的升力系数、阻力系数；叶片、轮毂的几何外形。结合致动线或实体风电机组进行数值模拟。

### （3）周边风电场风电机组信息

如若周边有其它风电场，且距离目标风电场中最外围风电机组在 3km 以内，需提供该临近风电场的风电机组数量、机位点坐标、机组型号、轮毂高度、风轮直径、风场空气密度下的功率曲线及推力系数曲线。

#### (4) 风电场地理环境变化资料

记录风电场建成前后植被的季节或年度变化情况、边坡环境情况及环境参数。

### 6 边坡地形流场仿真计算方法

边坡地形流场仿真计算应符合 CFD 基本理论，包括数据前处理、仿真计算及数据后处理。

#### 6.1 数据前处理

##### 6.1.1 测风塔数据处理要求

测风数据处理应符合现行标准 GB/T 37523-201《风电场气象观测资料审核、插补与订正技术规范》和 NB/T 31147《风电场工程风能资源测量和评估技术规范》的规定。

具体处理流程如图 6-1-1-1 所示：

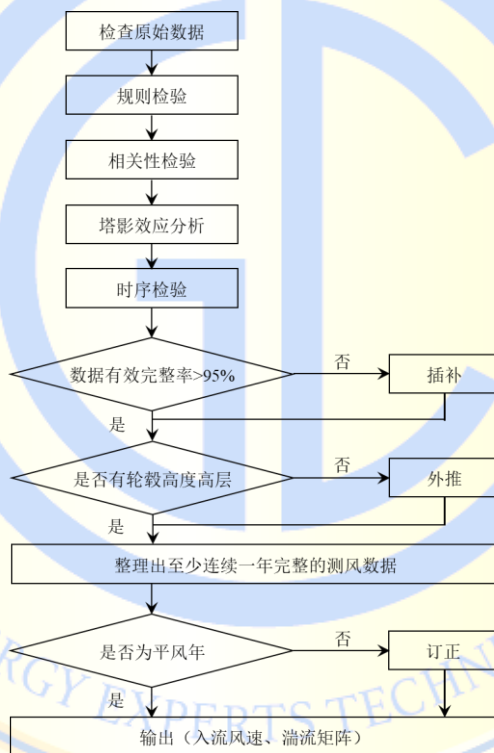


图 6-1-1-1 测风数据处理流程

##### 6.1.2 流场仿真计算输入数据处理

根据获取的地形数据（实测等高线地形图、平台开挖施工图和中尺度数字高程地形图等地形文件）进行地形建模；建模过程中，地形融合应考虑容差设置和偏移量，平台搭建时应考虑坡角、坡高、基准面海拔高度、平台位置信息；最终获取考虑边坡影响的计算域地形文件。

根据测风数据及建模后地形，通过读取计算域地形文件边界坐标，获取沿流向和展向方向最大最小值，

在此基础上缩减 100m 获取计算域沿流向和展向方向的边界，垂直方向边界层高度和入流参数情况参照附录 E 进行计算，具体流程见图 6-1-2-1：

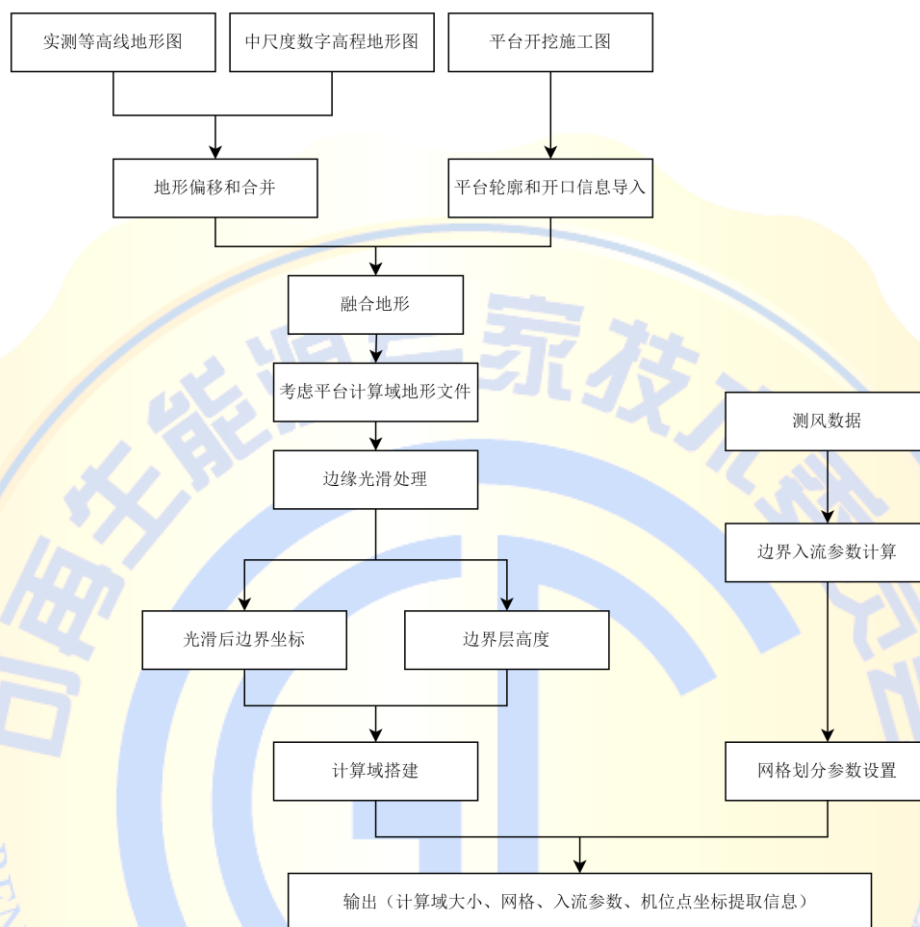


图 6-1-2-1 数值模拟前期处理流程

地形建模过程中，融合地形图容差应符合具体工程项目需求；提取地形图高程误差应在 2m 以内；整个计算区域可划分两个区域高精度计算区域和常规分辨率外扩区域，具体见附录 D。

## 6.2 仿真计算

将 6.1 节数据前处理输出结果作为输入进行仿真计算，计算须符合质量守恒、动量守恒和能量守恒等基本方程；实际边界条件应考虑大气热稳定度、及地形起伏带来的高程变化。基于上述原则仿真计算后，获取机位点处风参数结果（风速和湍流强度），输出参数详见 6.3.1 节。具体仿真计算流程见图 6-2-1：



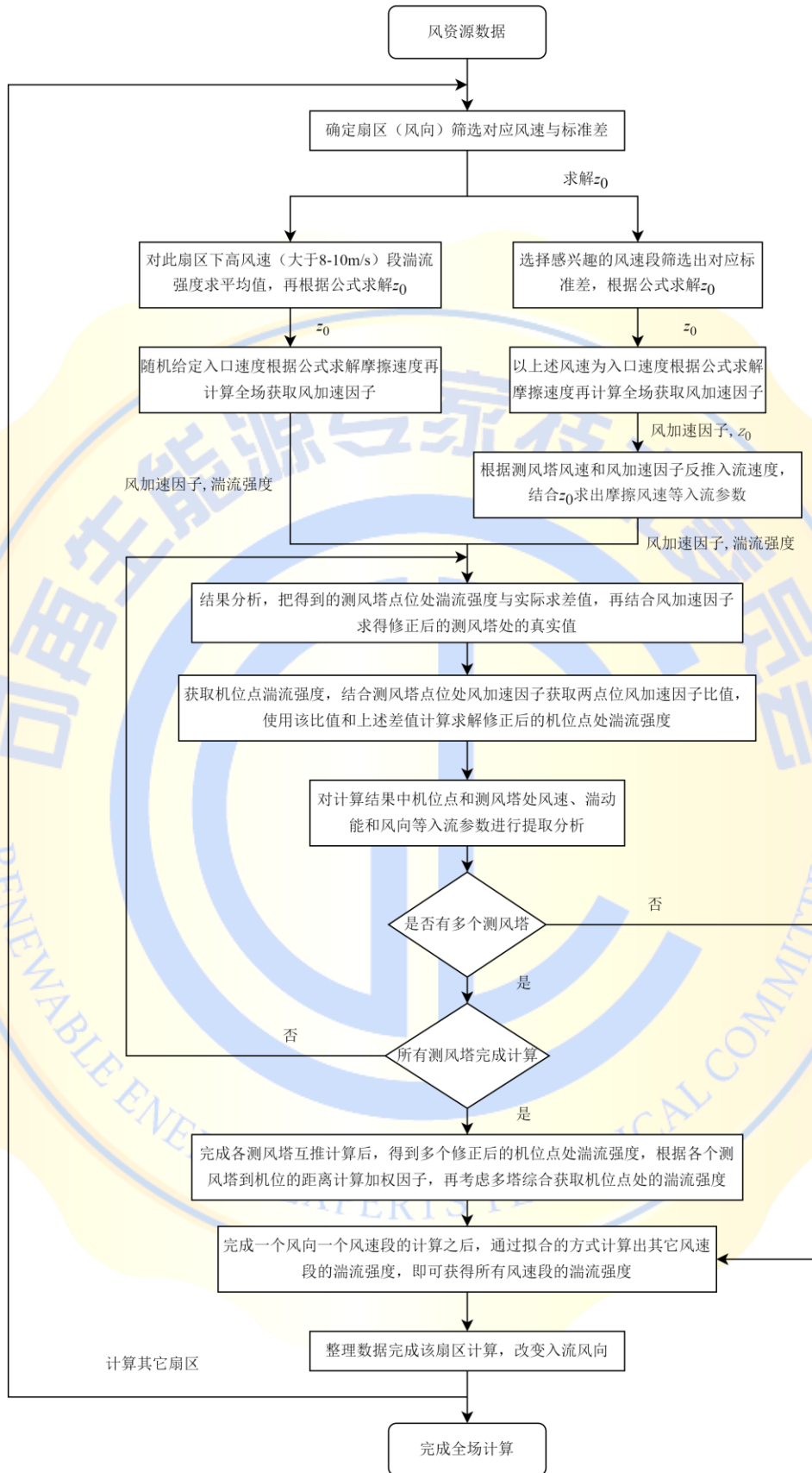


图 6-2-1 风资源仿真计算流程



### 6.2.1 仿真入流参数处理要求

以实测测风数据作为输入，计算各扇区（宜划分为 16 扇区）入流参数，包含年平均风速、湍动能、耗散能、湍流强度等。公式见附录 E。

### 6.2.2 网格划分原则

网格划分宜分区域加密，区域分为背景网格区域和边坡网格区域，背景网格区域网格分辨率宜为 150m 及以下，边坡网格区域处网格分辨率应达到米级。具体原则如下：

(1) 背景网格区域为除去边坡扰流区外的其它区域。

(2) 边坡网格区域应包含整个吊装平台且各方向外扩 200m 以上，边坡网格区域网格需在背景网格区域网格基础上进行加密，加密层数根据工程实际情况拟定。

(3) 如需获取边坡尾流变化情况，应沿流动方向进行网格扩展及加密，此区域应要大于边坡扰流区长度和高度，详见附录 B，区域细化等级根据工程实际情况拟定。

### 6.2.3 边界条件处理原则

(1) 进出口边界条件中，风廓线模型在中性大气条件下遵循 IEC61400-1-2019《Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements》3.67 节中边界设置方法，参照附录 E.1 进行计算；非中性大气条件下参照附录 E.2 进行计算。

(2) 顶部边界切应力及梯度变化应均为零。

(3) 底部边界宜为考虑大气热稳定度的壁面函数。

### 6.2.4 机组模型的设置

宜采用致动盘模型；如需进行机理性非稳态研究，宜采用致动线模型。

### 6.2.5 计算时长及步长设置

宜采用定常计算，具体执行标准见下表

表 6-2-6-1 CFD 仿真计算时长及步长设置推荐

状态	计算时间	步长	收敛名称	收敛标准	模型方法	湍流模型
稳态	2000s 及以上	计算域长度/计算时间	每步长结束收敛标准	1e-0 及以下(P) 1e-05 及以下(U/T/k/ε)	致动盘	k-ε
			计算结束收敛标准	0.01 及以下(P) 0.1 及以下(U/T/k/ε)		

### 6.3 数据后处理

#### 6.3.1 流体仿真结果分析

根据流场计算结果，提取机位点处风资源数据后，经多塔综合及发电量计算，获取机位点处风速矩阵、湍流矩阵、机位点风资源信息、风廓线信息、发电量表格结果，具体流程如下图 6-3-1-1 所示：

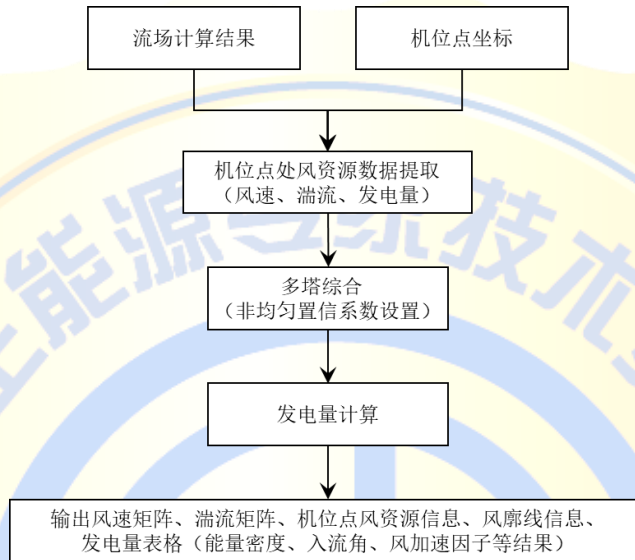


图 6-3-1-1 数值模拟后处理流程

#### 6.3.2 风特征参数统计与计算

按照附录 B 判断边坡扰流区，并将全风向扇区划分为边坡影响扇区和非边坡影响扇区后，将 CFD 仿真后机位点处风资源参数结果分别统计计算，按照表 6-3-2-1 至表 6-3-2-5 的格式作为输入进行载荷仿真及年发电量计算。

表 6-3-2-3 中，各区域内的年平均风速计算时应使用表 6-3-2-2 的风频归一化之后的风频值。各区域内的湍流强度计算时应采用区域内各扇区归一化的风向频率占比。区域内风速频率或者扇区风向频率的归一化处理均采用区域的累计风向频率进行。

其它风参数据处理方法依据 IEC61400-1-2019 《Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements》第 11 章节。

表 6-3-2-1 边坡扰流区内各高度年平均风速

离地高度 (m)	扇区角范围年平均风速 (m/s)	W 扇区范围年平均风速 (m/s)
下叶尖		
下叶尖+ $\Delta h$		
.....		
2 倍坡高		

$$\Delta h \leq 5m$$

表 6-3-2-2 边坡地形机位点轮毂高度处风频分布

风速 (m/s)	边坡影响扇区		非边坡影响扇区
	扇区角范围	W 扇区范围	
$V_{in}$			
$V_{in+1}$			
.....			
$V_{out}$			

表 6-3-2-3 边坡地形机位点轮毂高度处风资源参数表

风资源参数	单位	边坡影响扇区				非边坡影响扇区
		扇区角范围		W 扇区范围		
年平均风速 ( $V_{ave}$ )	m/s					
参考风速 ( $V_{ref}$ )	m/s					
入流角 ( $\theta_1$ )	°					
风切变指数	-	边坡扰流区	常规区	边坡扰流区	常规区	$\alpha_5$
		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	
空气密度 ( $\rho$ )	kg/m <sup>3</sup>					
累计风向频率	-					

a: 风速沿高度分布表, 见表 6-3-2-1;  
b: 使用区域内不同高度年平均风速拟合的风切变指数

表 6-3-2-4 边坡地形机位点轮毂高度处湍流强度

风速 (m/s)	边坡影响扇区				非边坡影响扇区	
	扇区角范围		W 扇区范围			
	$\sigma_1$ -NTM		$\sigma_1$ -ETM		$\sigma_1$ -NTM	
	$m=1$	$m=10$	$m=1$	$m=10$	$m=1$	$m=10$
$V_{in}$						
$V_{in+1}$						
.....						
$V_{out}$						

表 6-3-2-5 边坡扰流区内(边坡影响扇区扇区角范围、边坡影响扇区 W 扇区范围)各高度湍流强度分布

高度	湍流强度 (NTM)			
	3m/s	5m/s	.....	25m/s
下叶尖				
下叶尖+ $\Delta h$				
.....				
2 倍坡高				

## 7 载荷分析

### 7.1 载荷仿真流程

边坡地形机位机组载荷宜进行精细化处理，具体分析如下图 7-1-1 所示：

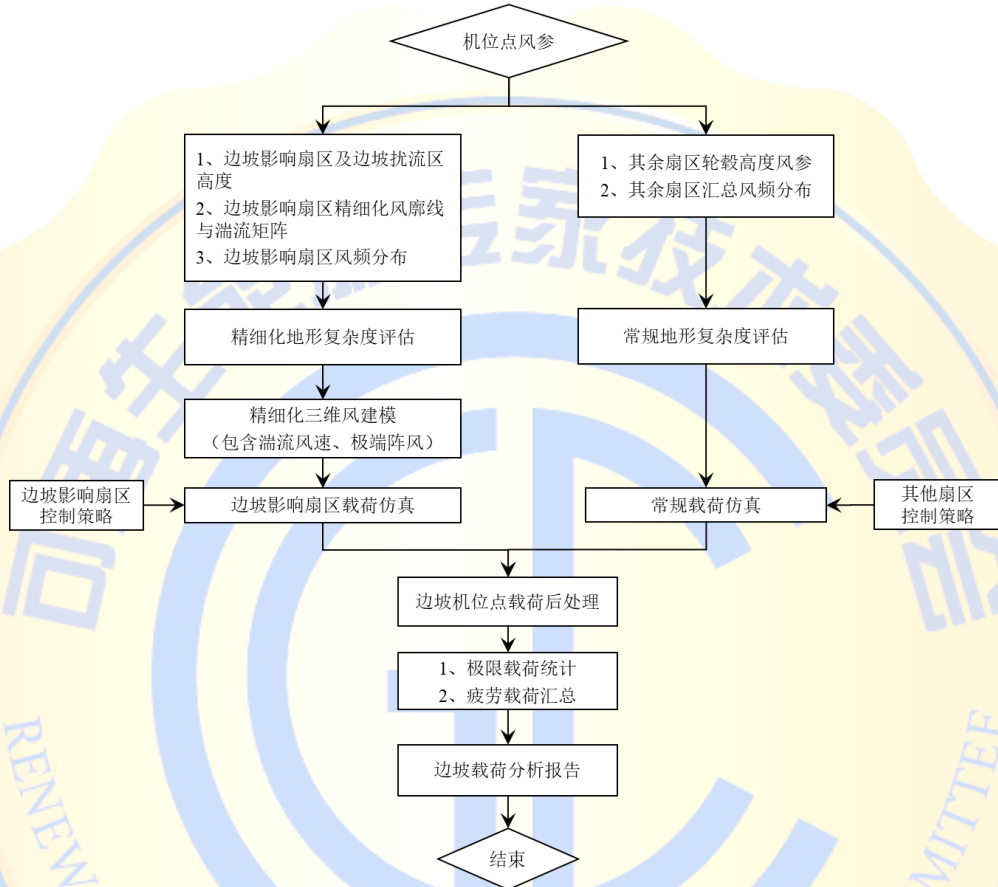


图 7-1-1 边坡机位点载荷分析流程

### 7.2 地形复杂度评估

边坡地形的机位点载荷仿真的三维湍流风场建模，应按照地形复杂度进行湍流强度修正，评估方法与修正方法如下：

- (1) 机位点处应对边坡影响扇区及之外区域分别进行地形复杂度评估。
- (2) 边坡影响扇区之外区域可按 IEC61400-1-2019《Wind energy generation systems-Part 1: Design requirements》第 11.2.1 章节进行地形复杂度评估。
- (3) 边坡影响扇区内区域应进行精细化地形复杂度评估，即最小半径应缩小至边坡远离风电机组侧的外边界至风电机组的距离。
- (4) 湍流强度修正按 IEC61400-1-2019《Wind energy generation systems-Part 1: Design requirements》第

11.2.1 章节 Table 6 及 Table 7 进行，见附录 F。

### 7.3 精细化三维风模型

边坡影响扇区载荷仿真需进行精细化三维风建模，包括：

- (1) 风廓线需采用自定义方式，按照 6.3.2 中的要求，建立精细化的风廓线模型。
- (2) 三维湍流风场仿真建模需按照 6.3.2 中的要求，按照高度输入湍流强度。
- (3) 极端阵风模型阵风幅值与风向应按照 IEC61400-1:2019 标准第 6 章节以及前述 6.3.2 中的要求，按每个高度的湍流强度计算各高度的风速幅值与风向幅值，并同时引入精细化的风廓线。

### 7.4 载荷后处理

#### 7.4.1 极限载荷

分区域对边坡影响扇区及其余扇区进行载荷仿真后，按照全扇区汇总统计部件极限载荷结果。

#### 7.4.2 疲劳载荷

##### (1) 20 年等效疲劳载荷

单独计算边坡影响扇区中扇区角（如果在边坡影响扇区内）与 W 扇区（如果在边坡影响扇区内）及非边坡影响扇区的 20 年累积等效疲劳载荷  $DEL_1$ 、 $DEL_2$ 、 $DEL_3$ ，注意需使用归一化风速概率分布，然后按照各区域风向概率占比汇总全扇区等效疲劳载荷。

$$DEL = \sqrt[m]{DEL_1^m P_1 + DEL_2^m P_2 + DEL_3^m P_3}$$

$P_1$ ：边坡影响扇区内的扇区角区域风向汇总概率。

$P_2$ ：边坡影响扇区内的 W 扇区风向汇总概率。

$P_3$ ：非边坡影响扇区风向汇总概率。

$m$ ：SN 曲线幂指数。

##### (2) LDD 与 LRD

按照归一化风速概率分布，分别统计边坡影响扇区中扇区角（如果在边坡影响扇区内）与 W 扇区（如果在边坡影响扇区内）及非边坡影响扇区的部件 LDD 与 LRD 载荷，然后累积风向概率占比计算全扇区 LDD 与 LRD 结果，方法如下：

$$LDD = LDD_1 P_1 + LDD_2 P_2 + LDD_3 P_3$$

$$LRD = LRD_1 P_1 + LRD_2 P_2 + LRD_3 P_3$$

##### (3) 载荷报告编制



边坡地形机位点载荷报告名称中应含有边坡字样，报告内容需含有边坡影响扇区的机组控制策略描述或者文件名称，相应的边坡应对方案如附件 G 所示。

## 8 发电量计算

边坡机位发电量计算，针对边坡影响扇区应采用等效风速法单独计算，等效风速法计算参考 GB/T 18451.2-2021《风力发电机组功率特性测试》，当边坡影响扇区范围超过一个统计扇区单位（一般为  $22.5^\circ$ ）时，应使统计扇区范围大于边坡影响扇区范围；其它区域正常计算。具体计算流程如下图 8-1 所示：

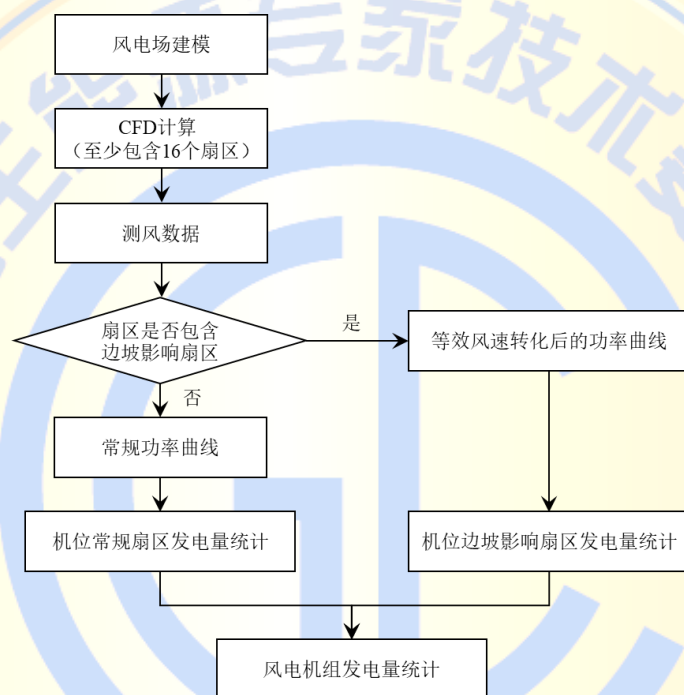


图 8-1 边坡机位点风电机组发电量计算流程



## 附录 A 边坡示意图

(资料性附录)

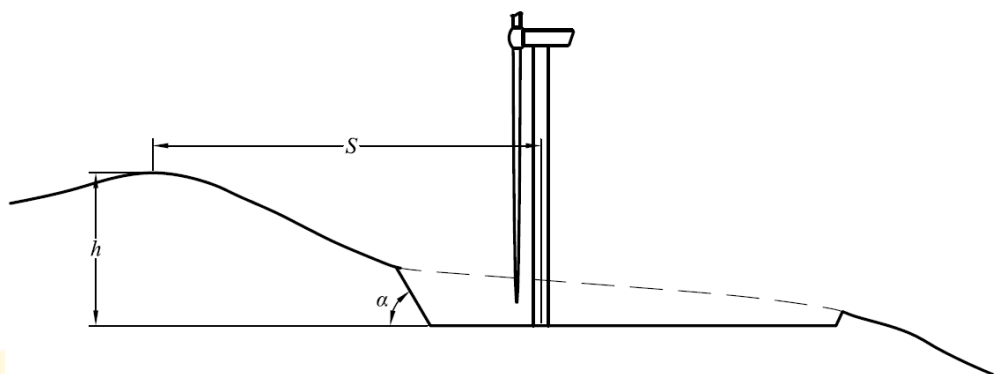


图 A.1 边坡示意图

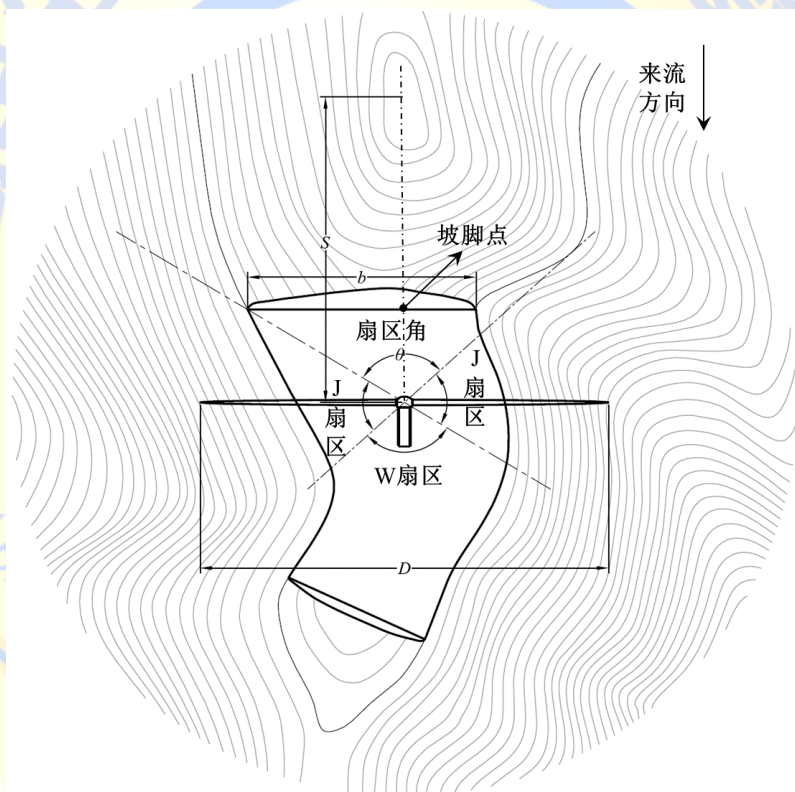


图 A.2 边坡机位点基准面内区域划分（俯视图）

W 扇区范围：当扇区角  $\theta$  小于等于  $180^\circ$  时，W 扇区范围等于  $\theta \pm 180^\circ$ ；当扇区角  $\theta$  大于  $180^\circ$  时，W 扇区范围等于  $360^\circ - \theta$ 。

J 扇区范围：除扇区角和 W 扇区外的其余区域。

## 附录 B 边坡扰流区介绍

### (资料性附录)

在进行尾流区域影响范围计算时，需获取边坡尾流分界线曲线。

当来流风向位于扇区角范围时，对称山脉不同大气热稳定度下最大尾流分界线为坡高的 2 倍，边坡引起的流向方向尾流最大距离约为 10 倍坡高；非对称山脉不同大气热稳定度下的最大尾流分界线为坡高的 1.1 倍，边坡引起的流向方向尾流影响最大距离约为 15 倍坡高。因此，当来流风向位于扇区角范围，坡距在 15 倍坡高以内，且风电机组下叶尖处于 2 倍坡高范围时，应考虑边坡影响；其它为常规区域，可不考虑边坡影响。

当来流风向位于 W 扇区范围时，需考虑地形阻塞产生的阻碍作用，对称山脉不同大气热稳定度下引起的速度亏损高度最大为坡高的 1 倍，在流向方向引起的阻塞最大距离至坡脚约为 1.5 倍坡高；非对称山脉不同大气热稳定度下引起的速度亏损高度最大可到 1.2 倍坡高，在流向方向引起的阻塞最大距离至坡脚约为 1.5 倍坡高。因此，沿流向方向当风电机组机位中心点距坡脚在 1.5 倍坡高范围内，且风电机组下叶尖在 1.2 倍坡高范围时，应考虑边坡影响；其它为常规区域，可不考虑边坡影响。

为充分考虑仿真计算过程中的边坡效应及垂直方向网格的一致性，宜采用更大范围作为边坡扰流区；因此，来流风向位于扇区角范围时，边坡后流向 15 倍坡高距离、垂直方向上 2 倍坡高高度以内的区域为边坡扰流区；来流风向位于 W 扇区范围时，流向方向风电机组机位中心点距坡脚 1.5 倍坡高、垂直方向上 2 倍坡高以内的区域为边坡扰流区。

风轮影响范围计算时，输入机位点坐标获取下叶尖高程、及尾流分界线边界与叶片交汇点高程，由此获取高程差和尾流影响占比区域。

表 B.1 边坡影响扇区范围判定

来流风方向	流向距离	下叶尖离基准面的垂直距离	边坡影响扇区范围
W 扇区范围	机位点距坡脚点 $\leq 1.5h$	$\leq 2h$	等于 W 扇区
W 扇区范围	机位点距坡脚点 $> 1.5h$	/	不存在
W 扇区范围	/	$> 2h$	不存在
扇区角范围	机位点距坡顶水平距离 $\leq 15h$	$\leq 2h$	等于扇区角范围
扇区角范围	机位点距坡顶水平距离 $> 15h$	/	不存在
扇区角范围	/	$> 2h$	不存在

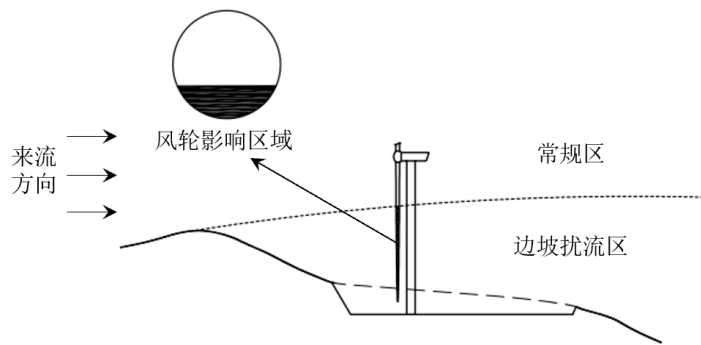


图 B.1 尾流影响示意图

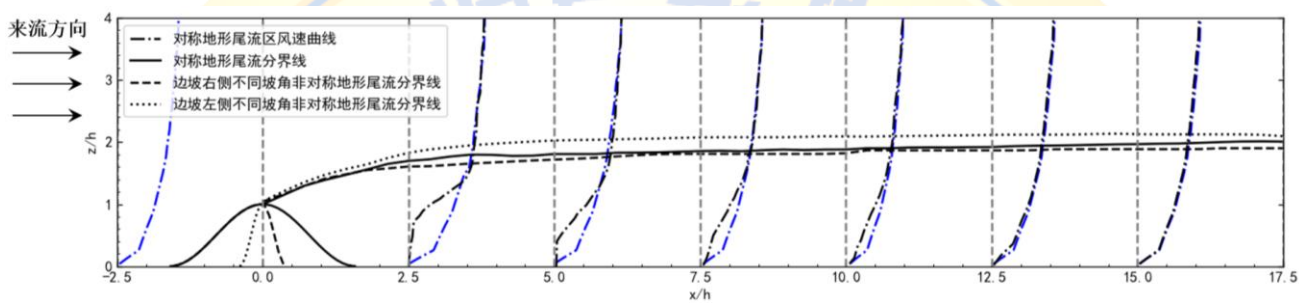


图 B.2 尾流分界线及风速曲线示意图

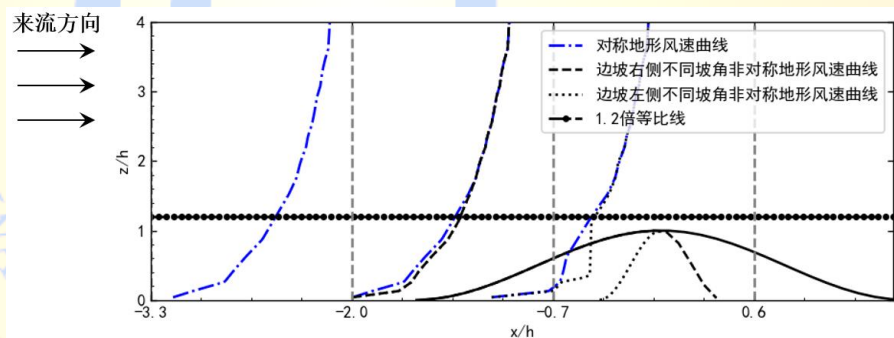


图 B.3 W 扇区风速曲线示意图

## 附录 C 大气热稳定度计算方法

### (资料性附录)

大气热稳定度计算方法有多种，针对风电场数值模拟，宜采用 NB/T 10909-2021《微观选址中风能资源分析及发电量计算方法》中的莫宁-奥布霍夫（Monin-Obukhov）长度进行大气热稳定度计算。

当测风塔没有两层温度数据，大气热稳定度可采用常规气象分类法的辐射法、风向标准差（ $\sigma_\theta$ ）法和风速比  $U_R$  法等其他方法进行分类和计算。现在国内推荐 P·S 分类法(修订帕斯奎尔)，分为 6 个级别，分别用字母来表示：A-强不稳定，B-不稳定，C-弱不稳定，D-中性，E-较稳定以及 F-稳定。

#### C.1 辐射法

##### (1) 计算太阳高度角

太阳高度角  $\psi$  计算公式如下：

$$\psi = \arcsin \left[ \sin \lambda \sin \sigma + \cos \lambda \cos \psi_\sigma \cos(15t + \varphi - 300) \right] \quad (\text{C-1})$$

式中  $\psi$ ——太阳高度角，°。

$\lambda$ ——当地纬度，°。

$\varphi$ ——当地经度，°。

$t$ ——观测时的北京时间，s。

$\psi_\sigma$ ——太阳倾角，°。计算式如下：

$$\psi_\sigma = (0.006918 - 0.39912 \cos \theta_0 + 0.070257 \sin \theta_0 - 0.006758 \cos 2\theta_0 + 0.000907 \sin 2\theta_0 - 0.002697 \cos 3\theta_0 + 0.00148 \sin 3\theta_0) 180/\pi \quad (\text{C-2})$$

式中  $\theta_0$ —— $360d_n/365$ ，°。

$d_n$ ——一年中的日期序数，0，1，2，3……，364。

##### (2) 求取太阳辐射等级数

根据太阳高度角，通过太阳辐射等级表 C.1 获取太阳辐射等级数。

表 C.1 太阳辐射等级数

云量，1/10	太阳辐射等级数				
	夜间	$\psi \leq 15^\circ$	$15^\circ < \psi \leq 35^\circ$	$35^\circ < \psi \leq 65^\circ$	$\psi > 65^\circ$
$\leq 4/\leq 4$	-2	-1	1	2	3
5-7/ $\leq 4$	-1	0	1	2	3
$\geq 8/\leq 4$	-1	0	0	1	1
$\geq 5/5-7$	0	0	0	0	1
$\geq 8/\geq 8$	0	0	0	0	0

注：云量（全天空十分制）观测准则与国家气象局制定的《地面气象观测规范》一致。

### (3) 大气热稳定度分类

根据大气热稳定度表 C.2，通过太阳辐射等级数与地表风速查找稳定等级。

表 C.2 大气热稳定度等级

地面风速 m/s	大气热稳定度等级					
	3	2	1	0	-1	-2
≤1.9	A	A-B	B	D	E	F
2~2.9	A-B	B	C	D	E	F
3~4.9	B	B-C	C	D	D	E
5~5.9	C	C-D	D	D	D	D
≥6	D	D	D	D	D	D

注：地面风速（m/s）指地表高度 10m 处 10 分钟段内的平均风速。如果是气象站测量数据，其观测规则采用《地面气象观测规范》。

### C.2 风向标准差法

风向标准（ $\sigma_\theta$ ）法可以根据测风塔任一高度的水平风向资料计算标准差来判定大气稳定性，风向标准差为  $\sigma_\theta$ 。

$$\sigma_\theta = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{6} \quad (C-3)$$

$\theta_{max}$  和  $\theta_{min}$  为 1 小时内风向最大与最小方位角。 $\sigma_\theta$  与大气热稳定度关系见表 C.3。

表 C.3  $\sigma_\theta$  与大气热稳定度关系

$\sigma_\theta$	大气热稳定度类别		$\sigma_\theta$	大气热稳定度类别	
	白天	夜晚		白天	夜晚
0	F	F	15°	C	D
3.75°	E	E	18.75°	B	G
7.50°	D	D	≥22.5°	A	G
11.25°	C-D	D			

表 C.3 适用于农村或远郊平原地区，表中增加了 G 类。处于 G 类稳定性的天气平均风速常常比较小，因此风向变化较大。

类似宏观气象条件下，湍流的性质也可能差异很大，因此仅根据宏观气象条件来划分稳定性级别不够精确。风向脉动标准差可分为  $\sigma_{\theta 1}$  (水平) 和  $\sigma_{\theta 2}$  (垂直) 两种，这是直接表征湍流强度的参量，与扩散参数的直接相关，可以用于大气稳定性的判定。 $\sigma_{\theta 1}$  和  $\sigma_{\theta 2}$  风向标准差法分类标准采用美国环保局推荐值（1980），并用  $(z_0/0.15)^{0.2}$  对实际地区粗糙度进行分类修正（与下表 C.4 中值相乘可得到修正值）。



表 C.4 大气热稳定度分类方法的标准

参数	大气热稳定度类别					
	A	B	C	D	E	F
$\sigma_{\theta 1}$	$\sigma_{\theta 1} \geq 22.5$	$22.5 > \sigma_{\theta 1} \geq 17.5$	$17.5 > \sigma_{\theta 1} \geq 12.5$	$12.5 > \sigma_{\theta 1} \geq 9.5$	$9.5 > \sigma_{\theta 1} \geq 3.8$	$3.8 > \sigma_{\theta 1}$
$\sigma_{\theta 2}$	$\sigma_{\theta 2} > 12.0$	$10.0 < \sigma_{\theta 2} \leq 12.0$	$7.8 < \sigma_{\theta 2} \leq 10.0$	$5.0 < \sigma_{\theta 2} \leq 7.8$	$2.4 < \sigma_{\theta 2} \leq 5.0$	$\sigma_{\theta 2} \leq 2.4$

风向标准差法  $\sigma_{\theta}$  能够准确划分稳定性级别，因为它是直接表现湍流强度的参数，但是它的其限制条件应该是用于平坦地形，在复杂地形以及不同下垫面的过渡地带（如海陆过度带），这些区域粗糙度变化较大，用风向标准差法判断热稳定性误差可能较大。

### C.3 风速比 $U_R$ 法

风速比  $U_R$  法是指上层与下层风速之比，即：

$$\begin{cases} U_R = \frac{u(z_1)}{u(z_2)} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^p \\ p = \phi_m / \left[ \ln(\sqrt{z_1 z_2} / z_0) - \psi \right] \end{cases} \quad (C-4)$$

其中  $\psi$  为与  $\phi_m$  有关的无因次函数，

$\psi$  太阳高度角，其计算式为：

$$\begin{cases} \psi = 2 \ln \left( \frac{1 + \phi_m^{-1}}{2} \right) + \ln \left( \frac{1 + \phi_m^{-2}}{2} \right) - 2 \arctg(\phi_m^{-1}) + \frac{\pi}{2}, & (z/L) < 0 \\ \psi = -4.7 z/L, & (z/L) \geq 0 \end{cases} \quad (C-5)$$

式中  $\phi_m$  是平均风速无量纲垂直梯度，其计算式为：

$$\begin{cases} \phi_m = (1 - 15 z/L)^{-0.25}, & (z/L) < 0 \\ \phi_m = 1 + 4.7 z/L, & (z/L) \geq 0 \end{cases} \quad (C-6)$$

令  $z_0 = 0.5\text{m}$  可以计算出风速比选法对应于 Pasquill 大气热稳定度分类中各级别范围，见表 C.5。

表 C.5 风速比法  $U_R$  与大气热稳定度关系

大气热稳定度	A	B	C
范围	$U_R < 1.0032$	$1.0032 \leq U_R < 1.0052$	$1.0052 \leq U_R < 1.0101$
大气热稳定度	D	E	F
范围	$1.0101 \leq U_R < 1.5717$	$1.5717 \leq U_R < 2.1963$	$U_R \geq 2.1963$

注：此表中标准按照  $\sqrt{z_1 \times z_2} = 62\text{m}$ ，按照 Businger 公式计算。

风速比法  $U_R$  与热稳定性关系见表 C.5。  $U_R$  值是经验数据，可以根据 Businger 表达式计算得到，参考



Pasquill 分类可分为 6 个等级。 $U_R$  法在低风速条件下误差较大，适合用于高风速、高级别稳定性的大气状态的判定，在平坦地形可用，不适用于复杂地形。



## 附录 D 仿真计算域各区域

### (资料性附录)

区域划分可遵循一般划分原则和精细划分原则，一般划分原则可直接采用本规范拟定方法，针对精细划分原则本规范只给定推荐方式，具体使用方法可自行拟定。

一般划分原则中，地形区域可划分为两种，高精度计算区域和常规分辨率外扩区域：

- (1) 高精度计算区域：网格核心加密区域，本区域需包含测风塔、机位点和其它所有感兴趣点位坐标。
- (2) 常规分辨率外扩区域：网格次级加密区域，本区域为高精度计算区域外扩后的其它区域。

精细化划分原则中，整个计算域划分成 5 个区域：核心区、控制区、保留区、过渡区和平滑底图，各区域介绍：

- (1) 核心区：网格核心加密区域，须包含测风塔与机位点等兴趣点坐标。
- (2) 控制区：控制区为核心区外扩后的区域，该区域地形须保留原始地形特征，保障测风塔或机位点到向边界延伸的地形有一段为真实地形。
- (3) 保留区：保留区是控制区的外接椭圆或圆，用于确定过渡区边界。如果过渡区是椭圆则需提供椭圆区域长短轴范围，本区域用于确定过渡区域的起始边界。
- (4) 过渡区：对保留区的非均匀高程边界进行光滑（均匀）处理，实现平滑底图到保留区的光滑过渡，该区域通过设置扩张系数来控制。
- (5) 平滑底图：平滑底图为过渡区再外扩一定范围后的区域，本区域用于确定整个计算域的大小。

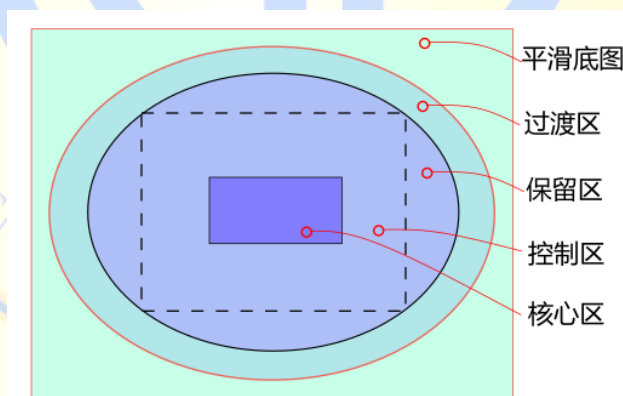


图 D.1 计算域区域划分

## 附录 E 入流边界条件和边界层高度计算

(资料性附录)

### E.1 中性大气条件下入流边界条件计算

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{E-1})$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} = \frac{3}{2} (TI * U)^2 \quad (\text{E-2})$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z+z_0)} \quad (\text{E-3})$$

$$TI = \frac{\sigma}{U} = \kappa \sqrt{\frac{2}{3C_\mu}} \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (\text{E-4})$$

式中  $u_*$ ——摩擦速度，m/s。

$U$ ——来流方向年平均风速，m/s。

$\sigma$ ——风速标准差， $\sqrt{(u'^2 + v'^2 + w'^2)}/3$ ， $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$ 分别表示沿流向、展向、垂向速度脉动量，m/s。

$z_0$ ——地表粗糙度，m。

$\kappa$ ——冯卡门常速，取 0.4。

$z$ ——离地高度，m。

$C_\mu$ ——大气边界层常数，一般取值 0.033。

$TI$ ——湍流强度。

### E.2 非中性大气条件下入流边界条件计算

本标准提供基于 Monin-Obukhov 相似性理论的非中性大气条件入流边界条件示例，其中近地面中无量纲湍流特性主要包括风速无量纲垂直梯度  $\phi_m$ 、位温无量纲垂直梯度  $\phi_h$ 、湍动能无量纲梯度  $\phi_k$  及耗散率无量纲梯度  $\phi_\varepsilon$ 。

非中性条件下 Monin-Obukhov 相似性理论：

$$\phi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (\text{E-5})$$

$$\phi_h\left(\frac{z}{L}\right) = \frac{\kappa z}{\theta_*} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \quad (\text{E-6})$$

$$\phi_k\left(\frac{z}{L}\right) = k \frac{\sqrt{C_\mu}}{u_*^2} \quad (\text{E-7})$$

$$\phi_\varepsilon\left(\frac{z}{L}\right) = \frac{\kappa z}{u_*^3} \varepsilon \quad (\text{E-8})$$

入口，无量纲风速垂直梯度—风轮廓预测：

$$U(z) = \int_{z_0}^z \frac{u_*}{\kappa z} \phi_m\left(\frac{z}{L}\right) dz \quad (\text{E-9})$$

入口，湍流强度及其耗散率：

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \phi_\varepsilon\left(\frac{z}{L}\right) \quad (\text{E-10})$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \phi_k\left(\frac{z}{L}\right) \quad (\text{E-11})$$

式中  $U$ ——来流方向年平均风速，m/s。

$\Theta$ ——平均位温，K。

$\theta_*$ ——表示特征位温， $\theta_* = -\overline{u'w'}/u_*$ ，K。

$C_\mu$ ——大气边界层常数，0.033。

$k$ ——湍动能。

$\varepsilon$ ——湍流耗散率。

$z$ ——离地高度，m。

$L$ ——Monin-Obukhov 长度，m。

### E.3 边界层高度计算

计算域整体大小由地形图边界坐标确定，流向和展向方向边界由计算域地形文件边界确定，竖直方向高度由风电场所在经纬度确定，具体公式如下：

$$Z = \frac{u_*}{6f} + 500 \quad (\text{E-12})$$

$$f = 2\Omega \sin(|\lambda|) \quad (\text{E-13})$$

式中  $Z$ ——计算域竖直方向高度，m。

$u_*$ ——摩擦速度，m/s。

$\lambda$ ——当地纬度，°。

$f$ ——科里奥利参数，rad/s。

$\Omega$ ——地球自转速度， $7.292115 \times 10^{-5}$  rad/s。

## 附录 F 地形复杂度对湍流结构的影响

(资料性附录)

IEC 61400-1-2019 标准中, 对于机位点的地形复杂度评估方法进行了说明, 并将地形复杂度对机位点处湍流结构的影响进行了分类要求, 见下表:

表 F.1 地形复杂度等级低, 中, 高对应的横向及竖向湍流标准偏差与轴向分量比值

	类别		
	低	中	高
$\sigma_2/\sigma_1$	0.85	0.93	1.0
$\sigma_3/\sigma_1$	0.6	0.65	0.7

表 F.2 地形复杂度等级低, 中, 高对应的湍流结构修正系数

	类别		
	低	中	高
$C_{cr}$	1.05	1.10	1.15

## 附录 G 边坡应对方案

### (资料性附录)

#### G.1 风电机组吊装平台设计原则

遵循因地制宜、节约用地的原则，保证工程设计质量，优化设计，控制工程造价，并考虑由于平台开挖形成的边坡带来的影响风资源评估计算以及机组运行安全等问题。

风电机组吊装平台是在设置在风电机组基础周边的吊装作业场地。与平原风电场的风电机组吊装平台相比，山地风电场的风电机组吊装平台具有开挖工程量大、形状不规则等特点，在设置时应根据具体地形条件合理设计。风电机组吊装平台的具体设计原则如下：

(1) 制约因素：吊装平台布置除考虑风向因素外，还应考虑以下因素：①风电机组基础主要为挖方基础；②为使风轮摆放稳定，风轮组装时  $1/3\sim 1/2$  叶片长度应在平台上；③主吊与辅吊有合适的停放位置及作业空间。

(2) 设计原则：相对于风电机组基础占地面积，吊装平台的面积较大，本着节约用地的原则，吊装场地的布置，经设计院、业主、风电机组生产厂商共同讨论研究后确定吊装平台的基本尺寸，在满足风电机组安装要求的前提下，根据吊装平台所处具体位置，对其大小及形状作优化调整，尽可能减小占地面积，减少开挖，尽量避免形成高边坡。对于存在边坡的机位，合理设计开挖坡比，以自然稳定为主，减少边坡支护工程量。

(3) 开挖设计：吊装平台的开挖设计，根据地质勘测资料结果，结合实际地形条件及风电机组安装要求，尽可能考虑“挖填平衡”，尽量减少工程开挖量及浆砌石用量，以减小工程投资。吊装平台的开挖边坡，以自然稳定为主，以减少边坡支护工程量。同时，考虑吊装设备等工作安全，吊装平台回填区域，在施工过程中进行分层碾压夯实。

#### G.2 边坡应对方案

##### G.2.1 边坡效应适用范围

从风资源利用率和机组安全性考虑，边坡效应主要存在于边坡扰流区，通过风轮扫轮面积受影响区域的大小改变风能转化效率，进而影响风电机组发电性能。

边坡影响扇区区域，当自然边坡坡面与基准面的夹角小于  $22^\circ$  时，如若风轮圆盘小于 5% 区域处在边坡扰流区中可不考虑边坡效应，当风轮圆盘大于 60% 区域处在边坡扰流区中需移动机位。

边坡影响扇区区域，当自然边坡坡面与基准面的夹角大于  $22^\circ$  时，需进一步考虑回流区带来的影响，认为风轮圆盘大于 40% 区域处在边坡引起的尾流影响中需移动机位。



风轮圆盘在边坡扰流区的面积占比在中间范围时，需根据具体情况进行分析，结合开挖工程量及敏感性因素分布范围对边坡坡比进行放缓调整，降低坡高或改变吊装平台空间展布从而改变边坡空间分布，以减小或消除边坡的尾流影响。

### G.2.2 物理应对方案

(1) 从风资源角度分析不同地形开挖条件下的边坡特性，并结合主风向确定影响结构荷载的临界坡高，对于临界值以下的坡高可不进行考虑。

(2) 应充分考虑地形特征及机位初步布置情况，以减少边坡机位的产生，尽量避免在主风向形成边坡。

(3) 结合湍流以及边坡粗糙度等综合因素调整边坡开挖坡比，并结合开挖工程量调整平台的空间展布，从而改变边坡的空间分布。

(4) 对于坡高超过影响风电机组正常运行的情况，对边坡进行削坡处理，削坡范围根据轮毂高度及叶轮尺寸进行综合分析，使用坡率法维持边坡稳定。

(5) 在削坡工程量较大时，可同步考虑增高轮毂高度、适当提高平台标高，较少开挖、微调机位、机型变更等诸多方式。