



中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 44048—2024/IEC TR 61400-12-4:2020

风能发电系统 风力发电机组功率性能 测试的数值场标定方法

Wind energy generation systems—Numerical site calibration for power
performance testing of wind turbines

(IEC TR 61400-12-4:2020, Wind energy generation system—Part 12-4: Numerical
site calibration for power performance testing of wind turbines, IDT)

2024-05-28发布

2024-12-01实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语、定义、缩略语和符号 1

 3.1 术语和定义 1

 3.2 缩略语 1

 3.3 符号和单位 2

4 数值模拟方法概述 4

 4.1 线性流动模型 4

 4.2 雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS)模型 4

 4.3 大涡模拟(LES)和 RANS /LES 混合模型..... 5

5 数值流动建模应用的现有准则 6

 5.1 概述 6

 5.2 AIAA(1998)计算流体仿真验证和确认指南 6

 5.3 计算流体力学和传热学的验证和确认标准-ASME V&V 20-2009 7

 5.4 COST 732 “微尺度气象模型的质量保证” 7

 5.5 日本建筑学会准则 8

 5.6 VDI 3783第9部分环境气象学—预测微尺度风场模式-建筑物和障碍物绕流评估 8

 5.7 国际能源署任务31尾流试验台-风场尾流基准的模型评估协议 8

 5.8 MEASNET —特定场址风况评估 9

6 基准验证测试总结 9

 6.1 概述 9

 6.2 DEWI 循环测试在风能数值模拟中的应用 9

 6.3 Bolund 试验 9

 6.4 欧洲风能协会资源比较与发电量评估程序I 和 II (2011, 2013)..... 10

 6.5 国际能源署任务31尾流试验台试验 10

 6.6 欧洲风能新图谱试验 11

 6.7 风预测改进项目2 11

 6.8 风洞测试验证数据 11

7 风能应用中基于地形进行流动模拟的重要技术 12

 7.1 概述 12

 7.2 输入地形数据的质量 12

7.3 计算域..... 12

7.4 计算域的边界条件..... 12

7.5 网格参数..... 12

7.6 收敛准则..... 12

7.7 大气稳定性..... 12

7.8 科里奥利效应..... 13

7.9 障碍物影响..... 13

7.10 关于数值场地标定模型适用范围的建议..... 13

8 开放性问题..... 13

8.1 概述..... 13

8.2 从数值模拟结果确定气流校正系数以进行功率曲线测试..... 13

8.3 不确定度量化..... 14

8.4 数值场地标定程序验证活动的提案..... 14

参考文献..... 16

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。

本文件等同采用IEC TR 61400-12-4:2020《风能发电系统 第12-4部分：风力发电机组功率特性测试的数值场标定方法》。文件类型由IEC的技术报告调整为我国的国家标准化指导性技术文件。

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。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国风力发电标准化技术委员会(SAC/TC 50)归口。

本文件起草单位：金风科技股份有限公司、北京金风科创风电设备有限公司、北京鉴衡认证中心有限公司、中国船舶重工集团海装风电股份有限公司、中国质量认证中心、西门子歌美飒可再生能源科技(中国)有限公司、中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、浙江运达风电股份有限公司、明阳智慧能源集团股份公司、上海电气风电集团股份有限公司、中国电力科学研究院有限公司、中车山东风电有限公司、中车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部、北京协合运维风电技术有限公司、兰州交通大学、上海能源科技发展有限公司、广东省风力发电有限公司、华润电力技术研究院有限公司、中国长江三峡集团有限公司、中国三峡新能源(集团)股份有限公司、江苏金风科技有限公司、东方电气风电股份有限公司、大唐可再生能源试验研究院有限公司、国电联合动力技术有限公司、深圳市禾望电气股份有限公司、上海海湾新能风力发电有限公司。

本文件主要起草人：孔婕、敖娟、蔡继峰、宫伟、康巍、俞黎萍、李跃、郭辰、姜婷婷、魏煜峰、石宇峰、许移庆、张黎明、薛扬、付德义、杨彦平、巫发明、陈振华、李卓群、邓屹、刘东海、卢仁宝、张学礼、袁恩来、姚加桂、陈飞、聂峰、李金缀、石浩、李媛、卢坤鹏、黄树根、梁瑞利、张家铭、姜德旭、李伟、杨天时、赵玉、张旭日、张智伟。

引 言

IEC 61400-12-11是用于风力发电机组功率特性测量的国际标准。规定在复杂地形中需要进行场地标定，以获得测量位置和测试风力发电机组之间的流动特性关系。该方法要求除用于测量风力发电机组功率曲线的参考测风塔外，还需要在被测风力发电机组安装之前，在机位处安装一个临时测风塔。IEC 61400-12-1方法经常在工业实践中使用，但是有如下缺点：

- 第二座测风塔的额外费用和场地标定结果的分析；
- 额外需要3个月以内的场地标定时间；
- 在安装风力发电机组之前，必须做出场地标定的决策。

这些缺点促使业界寻找替代方法进行场地标定。一种替代方法是利用数值模拟来推导气流校正系数，即风力发电机组位置的风速与参考测风塔位置的风速之间的关系。

在数值场地标定中，气流校正系数是通过对流动的数值模拟计算出来的。尽管消除了前面提到的一些缺点，但数值场地标定也带来了其他挑战：

- 仿真模型的依赖；
- 模型设置的依赖；
- 建模人员专业性的依赖；
- 模型不确定度的量化。

风能发电系统 风力发电机组功率性能 测试的数值场标定方法

1 范围

本文件总结了流动数值建模的现状、现有的准则和过去在数值模型验证和确认方面的基准经验。在所做工作的基础上，本文件鉴别出在风能应用中基于复杂地形进行流动模拟的重要技术，以及现有的未解决问题，包括通过基准测试进一步验证的建议。

本文件适用于风电场中风力发电机组功率特性测试场地的标定。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语、定义、缩略语和符号

3.1 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AIAA: 美国航空航天学会(American Institute of Aeronautics and Astronautics)

ABL: 大气边界层(Atmospheric Boundary Layer)

AEP: 年发电量(Annual Energy Production)

AIJ: 日本建筑学会(Architectural Institute of Japan)

ALEX17: 2017 Alaiz 试验(Alaiz Experiment 2017)

ASME: 美国机械工程学会(American Society of Mechanical Engineers)

CEDVAL: 验证微尺度扩散模型的实验数据汇编(Compilation and Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models)

CFD: 计算流体力学(Computational Fluid Dynamics)

CHT: 计算传热学(Computational Heat Transfer)

COST: 欧洲科学技术合作(European Cooperation in Science and Technology)

CREYAP: 资源比较和发电量评估程序(Comparative Resource and Energy Yield Assessment Procedures)

DES: 分离涡模拟(Detached Eddy Simulation)

DDES: 延迟分离涡模拟(Delayed Detached Eddy Simulation)

DEWI: 德国风能研究所(Deutsches Windenergie-Institut)

DTU: 丹麦技术大学(Danish Technical University)

EWEA: 欧洲风能协会(European Wind Energy Association)

- EWTL: 环境风洞实验室(Environmental Wind Tunnel Laboratory)
- FCF: 气流校正系数(Flow Correction Factor)
- GWh: 百万千瓦时(Gigawatt-hour)
- IEA: 国际能源署(International Energy Agency)
- IEC: 国际电工委员会(International Electrotechnical Commission)
- LES: 大涡模拟(Large Eddy Simulation)
- LIDAR: 激光雷达(Light Detection and Ranging)
- MEASNET: 国际风电检测组织(Measuring Network of Wind Energy Institutes)
- MEP: 模型评估协议(Model Evaluation Protocol)
- NEWA: 新欧洲风能图谱(New European Wind Atlas)
- NSC: 数值场地标定(Numerical site calibration)
- RANS: 雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds-averaged Navier-Stokes)
- RNG: 重整化群(Renormalization Group)
- SC: 场地标定(Site Calibration)
- SODAR: 声雷达(Sound Detection and Ranging)
- TC: 技术委员会(Technical Committee)
- TR: 技术报告(Technical Report)
- UQ: 不确定度量化(Uncertainty Quantification)
- URANS: 非稳态雷诺平均纳维-斯托克斯(Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes)
- V&V: 验证和确认(Verification and Validation)
- VDI: 德国工程师协会(Verein Deutscher Ingenieure)
- WAsP: 风资源分析及应用程序(Wind Atlas Analysis and Application Program)
- WFIP: 风预测改进项目(Wind Forecast Improvement Project)
- WTG: 风力发电机组(Wind Turbine Generator)

3.3 符号和单位

表1给出了本文件中文本和公式中使用的符号。

表 1 本文件中使用的符号

符号	定义	单位
	滤波后风速的第 <i>i</i> 个分量	m/s
<i>p</i>	滤波后的压力	Pa
<i>p</i>	分子动力黏度	Pa · s
<i>μ</i>	湍流动力黏度	Pa · s
<i>C_s</i>	Smagorinsky常数	
<i>K</i>	冯卡门常数	
<i>d</i>	到最近壁面的距离	m
<i>Δ</i>	局部滤波器大小	m
<i>l</i>	湍流长度尺度	m
<i>l_{RANS}</i>	RANS模型中的湍流长度尺度	m

表 1 本文件中使用的符号 (续)

符号	定义	单位
l_{les}	LES模型中的湍流长度尺度	m
f_a	DDES模型常数	m
U_i	i方向速度的平均分量	m/s
	i方向速度的脉动分量	m/s
x_i	i方向的空间变量	m
P	平均压力	Pa
ρ	密度	kg/m ³
ν	分子运动黏度	m ² /s
F	i方向的体积力	kg · m/s
τ_{ij}	雷诺应力	m ² /s ²
ω	克罗内克符号	
ν_t	湍流运动黏度	m ² /s
k	湍动能	m ² /s ²
L_j	湍流长度尺度	m
P	湍动能产生项	m ² /s ²
E	湍动能耗散率	m ² /s ³
C	RANS湍流模型常数	
C_i	RANS湍流模型常数	
C_a	RANS湍流模型常数	
σ	RANS湍流模型常数	
E	验证对比误差	
	模型假设导致的误差	
δ_{num}	方程数值解导致的误差	
δ_{input}	输入参数导致的误差	
δ_p	实验值误差	
u_{val}	验证标准不确定度	
u_{ng}	数值解不确定度	
u_{input}	输入参数不确定度	
u_{lp}	实验值不确定度	
r	相关系数	
Y_a	DDES参数	
A	修正的DDES常数/分布函数	
A_2	DDES常数	
K	有效水平运动黏度	m ² /s

表 1 本文件中使用的符号(续)

符号	定义	单位
K、	有效垂向运动黏度	m ² /s
u	i方向的速度扰动分量	m/s
p	压力扰动	Pa
U _j	无扰动流动的水平速度j方向分量	m/s
D	叶轮直径	m

4 数值模拟方法概述

4.1 线性流动模型

20世纪80年代后期以来，由于受计算资源限制，线性流动模型成为了风资源评估的标准。这些模型基于 Navier-Stokes 方程的线性化，该方程最初由参考文献[2]引入。它们在中性大气条件下，坡度足够平缓的地形上可以可靠使用，这种条件可以确保完全附着的流动状态。线性流动模型如公式(1)和公式(2)所示：

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0, \text{ for } i = 1, \dots, 3 \dots\dots\dots (1)$$

$$U_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{P}}{\partial x_i \rho} + K_h \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) + K_v \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_3^2} \text{ for } i = 1, \dots, 3 \text{ and } j = \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- U_j(j=1,2) ——未受扰动气流的水平速度分量；
- u_i(i=1,...,3)—— 速度扰动分量；
- p ——压力扰动；
- Kh ——水平方向上的有效运动黏度；
- Kv ——垂直方向上的有效运动黏度。

在风不会显著地受到陡坡，流动分离，热驱动流，低空急流以及其他动态和非线性大气边界层现象影响的情况下，线性模型表现得相对较好。

风资源分析和应用程序(Wind Atlas Analysis and Application Program,WAsP)³在线性模型的使用中最广泛。WAsP 程序是将参考处风速与预测位置处风速联系起来的传递函数模型。误差的重要来源可能与地形复杂度，大量流动分离，风向变化以及大气条件变化有关，包括狭管效应，阻塞效应和热驱动流(例如，昼间的海风，下坡风)。

由于其快速而稳定的性能，线性模型仍在风电行业中使用。

4.2 雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS) 模型

如4.1所述，由于线性模型的局限性，计算流体力学(CFD) 模型在风电行业中得到了越来越广泛的应用。CFD 在大气边界层(ABL) 中的应用已受到机械工程领域的CFD 和中尺度气象模式的影响。CFD 考虑具有4个未知变量的动量和质量守恒方程：压力和3个速度分量。通常不考虑描述大气状态的其他变量，例如温度，湿度和气溶胶浓度。

典型的CFD 大气流动模拟应用遵循单一风向方法来代表离散风向玫瑰图的一个扇区。考虑到地

形和粗糙度的影响，每个风向的流动模拟都会得出加速因子。

在雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS) 方法4中，由于流动的湍流特性，变量用统计函数描述，分为平均和波动(湍流)分量(例如， $U_i=U_i+\overline{u_i}$)，从而得到RANS 方程，如公式(3)所示：

$$\frac{\partial(\rho\overline{U_i})}{\partial x_i}=0 \text{ 和 } U_j \frac{\partial(\rho\overline{U_i})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\overline{v} \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right] + \overline{F_i} \text{ for } i, j = 1, \dots, 3 \quad \dots\dots (3)$$

在RANS 方程中，湍流相关性 $\overline{u_i u_j}$ ，(也称为湍流通量或应力)须被参数化以闭合方程组。采用 Boussinesq 假设，通过引入涡流黏度(一阶闭合)来定义湍流通量和平均值梯度之间的关系，如公式(4)所示：

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_T \left[\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \text{ for } i, j = 1, \dots, 3 \quad \dots\dots\dots (4)$$

引入两个基本量来描述湍流：运动湍流黏度 ν_T 和湍动能 k 。运动湍流黏度取决于湍动能 k 和湍流涡的大小 L_T ，即 $\nu_T = k^{1/2} L_T$ 。

模型有不同的闭合类型，例如单方程和双方程模型。在单方程模型中，湍动能 k 的方程如公式(5)所示：

$$\overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - C_\mu \frac{k^2}{\nu_T} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \text{ for } j = 1, \dots, 3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

P_k —— 由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项；

L_T —— 湍流长度尺度。

湍流长度尺度 L_T ，是根据解析模型得出的，例如垂向高度的函数，有时也与热稳定性相关5。

在双方程模型(k-ε, RNG k-ε, k-ω, ...)中，方程闭合是通过两个传输方程来实现的，一个用于求解 k ，一个用于求解湍流耗散 ϵ ：

$$\overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \text{ for } j = 1, \dots, 3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\overline{U_j} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\epsilon}{k} (C_{1k} P_k - C_{2k} \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \text{ for } j = 1, \dots, 3 \quad \dots\dots\dots (7)$$

运动湍流黏度 ν_T 由闭合方程 $\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 给定。

如果没有在RANS 模型中使用稳态假设，则可以用非稳态RANS(URANS) 描述运动方程。

与线性模型相比，RANS 稳态模型在大多数情况下能够预测分离区域中的流动分离和再附着，但是在该区域中结果的准确性值得怀疑。该限制是模型的统计本质所固有的。RANS 模型多采用中性分层假设，这在很多情况下限制了它的适用性。现有应对中性分层限制假设的解决方案，例如，基于莫宁-奥布霍夫相似性理论通过修改湍流闭合项 或求解能量方程并将浮力项添加到RANS 方程7；但是，还需要其他验证。

与线性模型相比，RANS 模型需要更多的计算资源。目前，它们主要用于复杂场地的资源评估和场地适应性评估，例如非平坦的地形，粗糙度突变区域或森林区域。

4.3 大涡模拟(LES) 和 RANS/LES 混合模型

大涡模拟(LES) 通过低通滤波器忽略小尺度湍流的影响，只求解可由网格解析的湍流。公式(8)～公式(13)给出了不可压缩流动的控制方程(使用亚格子模型[8])：

$$\frac{\partial \rho \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\mu_t = \rho L^2 \nu_t \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$L_t = C_t \Delta \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$|\mathbf{S}| = \sqrt{2} S_{ij} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中：

- u——滤波后风速的*i* 分量；
- C_t——常数；
- Δ ——局部滤波器的大小，*ij*=1...3。

其他亚格子尺度模型的更多信息可参见参考文献[9]。

与 RANS 不同，LES 不能求解亚格子尺度参数的传输方程，即不是所有表征流动的涡都能够被求解。因此，LES 高度依赖于网格分辨率，并且网格的选择至关重要。另一方面，当网格足够精细时，LES 通常可以解决出现在小山后或悬崖边缘的非稳态流动分离问题，这种分离区的模拟流场比 RANS 更接近真实[10]。

然而，LES 的一个主要问题是关于表面粗糙度的建模。例如，对于低粗糙度的表面，LES 需要非常精细的网格来解析它，这对于工程应用而言计算成本太高。

混合 RANS/LES 方法用来克服这个问题。分离涡模拟(DES)[11] 就是这样一种方法。在 DES 中，传输方程中的*k* 和 *ε* 被求解，并且长度尺度*l* 可以通过公式(14)~公式(16)来计算：

$$l = \min(l_{RANS}, l_{es}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$l_{RANS} = \frac{k^{3/4}}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$l_{es} = C_t \Delta \quad \dots\dots\dots (16)$$

通过使用这种方法，在边界附近选择RANS 模型，在远离边界的区域选择LES 。但是，Spalart 等[12]提到DES 模型在厚边界层情形下表现不佳，并提出了一种改进方案，称为延迟分离涡模拟(DDES)。在 DDES 中，可以通过公式(17)和公式(18)计算长度尺度*l*[14]：

$$l = l_{RANS} - f_{dmax}(0, l_{RANS} - l_s) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$f_d = 1 - \tanh[(A_1 - Y_a)A^2] \quad \dots\dots\dots (18)$$

在参考文献[14]中，用*A*₁ 分段函数代替常数来模拟大气边界层中的流场。

5 数值流动建模应用的现有准则

5.1 概述

科研机构、认证组织和国家工程协会已经针对数值流动模型的验证和确认、质量保证以及评估制定了准则。这里对与数值场地标定最相关的准则进行综述。

5.2 AIAA(1998)计算流体仿真验证和确认指南

美国航空航天学会(AIAA) 指南5提供了CFD 模型性能基准测试的准则。尽可能多地进行验证和确认(V&V) 测试，以获得模型结果的可信度和可靠性，从而达到模型的特定预期用途。模型的高度复杂性使得很难验证全范围的运行条件。因此，验证过程的主要目标是在数值模型中建立和量化足够的可信度，以便在可接受的范围内用于预测研究变量。

V&V 流程宜考虑以下要素：

- 模型的一般说明，包括其预期的用途或应用；

- 该模型求解的预测方程的描述;
- 假设和近似的描述;
- 模型参数化的描述;
- 大气尺度和空间/时间分辨率;
- 计算网格的描述;
- 边界条件和初始条件;
- 输入数据和来源;
- 根据预测和诊断(从预测)变量输出数据;
- 参考已发表的材料处理该模型与其他类似模型的评估结果。

5.3 计算流体力学和传热学的验证和确认标准-ASME V&V 20-2009

美国机械工程师学会(American Society of Mechanical Engineers,ASME)标准[16]描述了在计算流体力学和计算传热学(CHT) 中进行验证和确认的方法。该标准认为测量值和仿真值之间的对比误差 E 可以使用模型假设误差 δ_{mad} ,数值解误差 δ_{m} , 仿真输入参数误差 δ_{mu} 和实验数值误差 δ_{p} 来表示, 如公式(19)所示:

$$E = \delta_{\text{mad}} + \delta_{\text{m}} + \delta_{\text{mpu}} - \delta_{\text{p}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

假设 δ_{mad} , δ_{mpu} 和 δ_{p} 彼此独立, 由这些项引起的不确定度 u 可以写成公式(20)的形式:

$$u = \sqrt{\delta_{\text{mad}}^2 + \delta_{\text{m}}^2 + \delta_{\text{mpu}}^2 + \delta_{\text{p}}^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

其中 u_{mm} 是由数值解引起的不确定度(即 δ_{num} 的标准偏差)。

该标准的目的是提出量化建模假设不确定度的方法, 并对该不确定度值作出解释。因此, 该标准的内容如下。

- 数值求解引起的不确定度可以通过使用代码验证和求解验证来量化。代码验证可以通过将数值解与解析解进行比较来进行。求解验证可以通过系统化的网格优化来进行。
- 由于仿真输入而导致的不确定度可以通过使用输入参数的系统敏感度分析来估算。
- 确定实验值不确定度的基本概念。
- 针对不同情况, 介绍了由建模假设导致的不确定度量化方法。
- 对由建模假设产生的不确定度的解释。
- 一个验证和确认的案例。

5.4 COST 732 “微尺度气象模型的质量保证”

欧洲科学技术合作(COST)732 项目“微尺度气象模型的质量保证” [17]已立项, 目的是改善和确保用于预测城市风环境的微尺度气象模型的质量。这些实践经验是基于以前关于中性分层流场稳态RANS 方程的准则。

为降低物理建模和数值方法中的误差和不确定度, 制定了通用指南。建模的不确定度可能与以下方面有关:

- 目标变量;
 - 描述流动物理性质的近似方程, 例如湍流模型;
 - 障碍物的几何描述;
 - 计算域的定义, 包括边界和初始条件。
- 数值方法的不确定度可能与以下方面有关:
- 计算网格;
 - 时间步长;
 - 数值近似(离散格式);

——迭代收敛准则。

COST 732准则对于大多数标准仍然是通用的，并建议工程师使用实践经验来降低误差。大多数参数在很大程度上取决于应用问题的细节，并且在通用准则中并不总是精确的。例如，没有给出选择湍流模型的最佳方案。但是，对于某些参数，例如计算域的选择，该准则给出了精确的建议：域大小宜定义为城市规模模型的函数，特别是城市冠层的高度。该准则还为空间和时间离散化以及收敛准则提供了明确的建议，以降低数值误差。

该指南鼓励在文献中可用的测试案例上应用数值敏感性测试和模型性能验证。

5.5 日本建筑学会准则

5.5.1 概述

日本建筑学会(AIJ)提出了两种CFD应用准则。一个是CFD在建筑物周围行人风环境的实际应用指导手册[18]，另一个是建筑物荷载推荐指导手册[19]。这两个准则均包含设置计算条件和基准程序的实践经验。计算条件如下：

- 计算域扩展；
- 网格生成和分辨率；
- 边界条件；
- 数值格式；
- 湍流模型；
- 解的收敛性。

5.5.2 CFD在建筑物周围行人风环境的实际应用指导手册[18]

本准则总结了使用CFD技术合理预测行人风环境的要点。研究变量为平均风速比和湍动能。该指南基于基准测试的结果，例如单个建筑物、建筑群，以及实际市区建筑物和林冠周围的气流。验证数据库可从AIJ网站上获得[21]。

5.5.3 建筑物荷载推荐指导手册2[19]

该文档为预测建筑物上的设计风载提供了实用指南，包括参考文献[20]中使用CFD时地形影响。根据该准则，CFD可以用作风洞测试的替代方法。研究变量为压力系数峰值、平均风速以及湍动能。在该准则中，由于建筑物周围湍流边界层和分离流的可重复性，推荐LES技术用于预测强风事件期间的风载峰值。该指南说明了模型设置，准确性验证和确认以及风载设计的要求。

5.6 VDI3783 第9部分环境气象学—预测微尺度风场模式—建筑物和障碍物绕流评估

德国工程师协会(Verein Deutscher Ingenieure, VDI)准则描述了德国科学技术目前的发展水平，并在立法的准备阶段以及法律法规的应用中提供了决策支持。

VDI 3783准则第9部分²的目的是评估地形上的微尺度CFD风场模型，该模型明确地求解近地面大气边界层中障碍物周围的流场。VDI准则中给出的评估程序的目的是确保模型的高质量。该准则包含有关收敛标准和网格分辨率独立性的建议。它还提供了测试案例(包括分析和实验参考数据)以验证模型的一致性。实验参考数据来自汉堡大学气象研究所环境风洞实验室(EWTL)的CEDVAL数据库[23]。这些数据经过设计，适用于RANS模型的评估。由于缺乏详细的入流条件，因此不适用于LES模型验证。VDI准则中提供了验证指标和通过标准。

5.7 国际能源署任务31尾流试验台—风场尾流基准的模型评估协议

在国际能源署(IEA)风能分项目(Wind Task 31)“Wakebench”[24]的框架下，开发了一份风电场流

动模型的模型评估协议(MEP)。该协议为风电场流动模型在微观尺度层面的使用提供了验证和确认框架(V&V), 通常用于风资源/场地评估和风电场设计应用。

MEP开发成一种与风场流动模型验证和确认(V&V)相关活动的框架底层。MEP 包括。

——通过科学审查获得模型资格。

——代码和解决方案验证。

——验证, 包括:

- 构建模块验证方法;
- 验证数据的要求和来源;
- 研究变量;
- 建立并运行模型;
- 指标;
- 质量验收标准。

——模型校准。

5.8 MEASNET—特定场址风况评估

国际风电检测组织(MEASNET) 是一个合作组织, 其成员从事风能领域并希望确保高质量的标准测量, 标准和建议的统一解释以及结果的可互换性。MEASNET 文件《特定场地风况评估》25]概括了MEASNET 成员之间达成的场地评估流程。该文档以从所需输入数据到输出结果报告为主题。与数值场地标定最相关的部分是需要对风场进行数值建模的空间外推指导。MEASNET 在模型验证, 模型假设, 模型确认和敏感性分析方面提供了相关建议。MEASNET 还认识到, 数值模拟的不确定性将取决于地形和场地气象的复杂性(测量位置与外推位置之间的垂直和水平距离, 地表粗糙度, 稳定性条件以及模型精确度)。

6 基准验证测试总结

6.1 概述

第6章总结了风能数值模拟验证活动的对比测试。

6.2 DEWI循环测试在风能数值模拟中的应用

这项盲测于2004年开始, 2008年完成[26]。当时数值模型已经广泛应用于风能分析中, 用于将风况从测量点外推到风电场中的其他未知点。循环测试的目的是系统地评估模型对于风测量数据的水平和垂直外推能力。因此, 地形数据以及一个参考点的风测量值会被提供给测试参与者作为输入, 他们需要做的是通过数值模拟来计算得到其他两个点的风况, 而这些目标点的风测量值是可用的, 但测量结果并未提供给参与者。

有8名参与者使用各种不同的数值模型(如中尺度模拟、RANS 和 LES), 且参与者不能使用相同的模型。预测的结果与这两个地点的实测数据进行了比较。输入高度为43 m, 输出高度要求达到80 m。

平均风速误差的绝对值在各扇区内的平均值介于5%~18%。但是, 单个扇区的偏差大于此值。绝对平均发电量误差在1%~36%。

6.3 Bolund试验

Bolund Hill盲测是由丹麦技术大学(DTU) 于2009年组织的, 针对于流动模型的验证[27][28]。测

试在丹麦罗斯基勒附近的一个小岛(高12 m, 长130 m, 宽75 m)上, 离地2 m, 5 m和9 m 的高度进行了广泛的测风活动。这为参与者们提供了现场流动模拟所需的所有输入数据, 并且应提供反映测量点的特定点的结果。需要注意的是, 该试验中山体的坡度以及剧烈变化的粗糙度违反了线性模型的假设。

试验定义了4个风向, 使用了从数值到物理的57个模型, 包括 LES 模型、RANS 模型和线性模型, 以及风洞和水槽实验。所有的参与者有义务在600个位置返回他们的结果。

在此特定测试中, 双方程湍流闭合的RANS 方法给出了最一致的结果。最佳性能模型的风加速因子平均误差为10.2%(测试案例1~4分别为9.6%, 10.6%, 13.8%和7.0%)。对于具有最平稳坡度的风向(测试案例4), 发生的误差最小。在该项目的最终报告中, 强调了让有经验的工程师使用可靠数值方法的重要性。

6.4 欧洲风能协会资源比较与发电量评估程序I 和 II (2011, 2013)

DTU 进行了资源比较和发电量评估程序(CREYAP) 第一部分29]的测试, 其结果展示在2011年欧洲风能协会(EWEA) 风资源评估技术研讨会上, 来自16个国家的36个组织共提交了37组结果。该项测试是在一个拥有单测风塔的28MW 风电场(14台风力发电机组)中进行的。它包含了一个风电场案例研究, 其中包括:

- 风电场与风力发电机组数据;
- 风数据输入;
- 地形数据输入。

在以下方面对模型结果进行了比较:

- 50 m与60 m 高度处的长期校正风速;
- 垂直外推(风切变);
- 总发电量;
- 潜在能量产出;
- 上网电量P50 与 P90。

报告的风切变结果范围为0.015~0.237(标准偏差为0.037—变异系数为22%), 37组数据中, 风电场的总发电量在113 GWh~27 GWh之间(标准偏差为3.5 GWh—变异系数为3.5%)。

CREYAP 第二部分[30测试由DTU 完成, 结果于2013年在EWEA 研讨会上展示。进行测试的60个团队来自17个国家, 包括咨询公司、风电场开发商和科学团体。该测试是在一个拥有7个测风塔的28.6MW风电场(22台风力发电机组)中进行的。

循环测试说明了在年发电量预测过程中数值结果的可用性。在年发电量估算过程的各个步骤进行了比较, 包括:

- 长期校正;
- 垂直外推(风切变);
- 流动与尾流模型;
- 技术损失估计;
- 不确定度量化。

报告的风切变结果范围为0.105~0.179(标准偏差为0.013—变异系数为10%), 60组数据中, 风电场的总发电量在79.3 GWh~106 GWh(标准偏差为5.7 GWh—变异系数为5.8%)。

6.5 国际能源署任务31尾流试验台试验

尾流试验台试验[31测试案例的选择是基于大气边界层和风力发电机组尾流的相似性理论、风洞和现场研究试验以及来自风力行业的运营测量活动。这些案例包括典型基准(例如大型风电场), 无论是在陆上还是海上, 从平坦到非常复杂的地形以及从中性至分层大气边界。结果可从参考文献[31]中在

线找到。

6.6 欧洲风能新图谱试验[32]

6.6.1 Perdigão(双脊地形)

欧洲风能新图谱(NEWA) 试验之一正在葡萄牙Perdigão 附近的两个陡峭平行山脊附近进行。该试验始于2016年秋季, 主要项目于2017年春季启动。在这片区域共使用了50多个高度从10 m~100 m的测风塔以及19台激光雷达(LIDAR) 来测量风场。除此之外, 使用的仪器还包括声学风速仪、多普勒激光雷达、湿度廓线光雷达、雷达多普勒廓线仪、无线电探空仪、压力传感器和系绳气球。

6.6.2 Alaiz(具有很强中尺度效应的复杂地形)

ALEX17 开放获取试验已于2018年7月开始。该试验包括5台远程风扫描仪, 6座80 m 测风塔, 1台激光雷达, 1台声雷达(SODAR) 以及10个位于西班牙纳瓦拉的气象站。试验目的是描述在Alaiz山脉和上游山脊之间延伸约6 km 的山谷中的气流, 地形会影响测试地点以及下风向运营风电场的风况。

6.6.3 Østerild(非均匀粗糙度上的气流)

该试验研究了在原本几乎完全平坦的地形上, 变化的地表粗糙度(交替的田野和森林)对轮毂高度处的风资源的影响。试验测量在丹麦Østerild 的试验场进行, 试验设备为两台安装在测风塔上的水平扫描多普勒激光测风雷达, 测量距离为5 km。

6.6.4 Kassel(森林覆盖山体上的气流)

自2016年8月起, 该项目使用12个远程扫描多普勒激光测风雷达测量了德国Kassel附近森林茂密的山体上的风场。结合200 m 和140 m 的测风塔, 他们绘制了此处的风图谱, 在这类地形中, 对风资源的低估并不罕见。

有关NEWA 所有试验的初步结果都可从项目网站上找到[33]。

6.7 风预测改进项目2³⁴

风预测改进项目2(WFIP 2)将改进复杂地形下的风速预测模型作为首要目标。为了支持WFIP2 的目标, 参与者已在华盛顿州东部和俄勒冈州哥伦比亚盆地进行了现场试验, 用以评估发生在各种空间尺度上的物理过程如何改变整个叶轮直径上的风速。WFIP 2的总体设计着眼于一系列天气现象, 这对哥伦比亚峡谷复杂地形中的风和风能预测构成了特殊挑战。WFIP 2部署了一套多种多样的大型气象观测仪器, 包括风廓线雷达, 声雷达, 廓线与扫描激光雷达, 微波辐射计, 微气压计, 声波风速计和表面能量平衡系统。WFIP 2代表了风电行业, 科学团体和联邦试验室之间的合作伙伴关系。

6.8 风洞测试验证数据

6.8.1 验证微尺度扩散模型的试验数据汇编[23]

用于验证微尺度扩散模型的试验数据汇编(CEDVAL), 包括可用于数值流动模型验证的风洞数据集。CEDVAL 中的所有数据集在完整的边界条件记录和测量过程中的质量保证方面, 遵循高标准。这些数据用于5.7中所述的V&V 程序。

6.8.2 AIJ风洞

对表面边界层内的单个高层建筑物边界层内流动, 现实建筑群内的流动以及树木绕流等场景的风

洞数据、现场测量以及各种k-e 模型和LES[35]的CFD 结果进行交叉对比。这些数据参考5.5使用。

6.8.3 山体绕流的风洞测试

在比例为1/1000的边界层风洞中评估了在简单的二维山脊和三维山体上的气流。测试中使用了两种不同的表面粗糙度 z_0 :0.3 mm的粗糙情形与0.01 mm 的光滑情形。测试记录了地形上各点入流的平均与波动分量[36]。风洞测试数据被用于 RANS、URANS、LES、DES 和修正 DDES 模型的验证¹⁴。对于粗糙表面情形，结果表明在山体背风面，所有模型均与测量值显示出良好的一致性。对于光滑情形，RANS和 URANS 高估了加速因子；在LES、DES和修正 DDES 模型中，后者在背风面的表现最佳。

7 风能应用中基于地形进行流动模拟的重要技术

7.1 概述

第7章描述了基于地形进行流动模拟中设置、运行和提取数据的重要技术。在数值场地标定中，重要的是根据IEC 61400-12-11 的建议确定测风塔的位置。

7.2 输入地形数据的质量

使用高质量的地形(山岳形态和粗糙度)数据建立数值模型是使模型能够计算出最准确的风况并获得高模型性能的关键因素。强烈建议在目标点周围使用水平分辨率为10 m 或更精细的地形数据。在距离较远的区域，较低分辨率的地形海拔信息也是可以的(但水平分辨率不超过30 m)。

此外，宜创建并验证详细的粗糙度图，尤其是在具有高粗糙度表面值的敏感区域中(例如森林区域)。

7.3 计算域

计算域在水平和垂直方向上的扩展宜确保目标区域中的流场不受影响。因此，建议对每个特定场地的域扩展大小进行敏感性研究。建议在地形外围使用平滑的缓冲区，以提高模拟收敛性。

7.4 计算域的边界条件

宜检查地表边界条件，以正确表示地形的粗糙度。可以通过场地图像或现场踏勘进行检查。所有其他边界条件的设置宜使目标区域内的流场不会受到明显影响。

7.5 网格参数

宜对网格水平和垂直分辨率、第一层网格尺寸和垂直扩展比率进行敏感性研究，以确保目标区域中的流场不会因更改网格而受到显著影响。

7.6 收敛准则

收敛准则宜确保目标区域的流场不受影响。

7.7 大气稳定性

由于假定在强风事件中大气处于中性条件，因此通常忽略了大气稳定性，但是对于数值场地标定，较低的风速条件很重要，因此宜考虑大气稳定性。大气边界层稳定性的正确建模在科研领域正处于研究阶段，并且存在几种方法。一种方法是通过修改RANS 湍流闭合来求解不同稳定性条件下湍流的

变化6;另一种已知的方法是通过向Navier-Stokes方程添加浮力项并求解能量方程(Boussinesq近似)[37]。

7.8 科里奥利效应

随着现代风力发电机组的轮毂高度远远超过100 m,可以观察到科氏力效应在轮毂高度上引起风向变化(埃克曼螺旋),尤其是在稳定大气条件下。建议在模型中包含科氏力效应。

7.9 障碍物影响

本文件考虑障碍物对气流的阻塞作用以及相应的气流变形。可以通过网格划分并在障碍物表面上施加适当的边界条件来求解障碍物周围的气流。对障碍物周围的气流进行建模的另一种方法是对障碍物影响进行参数化。在后者中,冠层模型被广泛用于表示障碍物对气流的影响。经过充分的验证,冠层模型可用于对森林影响进行建模[7], [38], [39]和[40]。

7.10 关于数值场地标定模型适用范围的建议

从本质上讲,当地形坡度高于10%时,线性模型比非线性模型有更多的限制。在这种情况下使用线性模型可能会在数值场地标定结果中引入额外的不确定度[4]。

RANS模型比线性模型具有更高的潜力,可以预测坡度高于10%的地形上的加速因子。但是,风洞验证表明,RANS模型也可能会错误地计算丘陵和障碍物下游的气流。在这种情况下使用RANS模型可能会在数值场地标定结果中引入额外的不确定度[42]。

LES和混合RANS/LES模型在解决复杂地形流场方面具有最高的潜力。与RANS相比,这些模型对输入参数(例如,基准测试[4]指出的网格分辨率)明显表现出更高的敏感性。更高的模型保真度需要更高的专业知识和更高的计算能力。

以稳定状态为主的场地上的数值场地标定需要能够考虑大气边界层分层的流动模型[37]。

8 开放性问题

8.1 概述

根据IEC61400-12-1的描述,场地标定建议使用两个测风塔:参考测风塔和在风力发电机组位置的临时气象测风塔。场地标定完成时,将确定风速传递函数和相关的不确定性,移除临时测风塔,并且安装风力发电机组以开始功率特性的验证测量。

在复杂地形进行功率特性验证时,使用数值场地标定替代使用临时测风塔生成风速传递函数,参考测风塔结合数值模拟结果以确定风力发电机组位置的风速。在第8章中,介绍了使用现有方法进行数值流动建模的潜在缺点及其在数值场地标定中的应用。后续可增加更多基准测试验证试验,以改善将来应用时现有方法的不足。

8.2 从数值模拟结果确定气流校正系数以进行功率曲线测试

8.2.1 概述

场地标定(SC)程序是IEC 61400-12-1的规范部分。该文件介绍了如何计算场地标定结果以及何时将这些结果视为有效从而进行功率特性测试。建议数值场地标定考虑IEC 61400-12-1中规定的数据质量检查。

场地标定测试结果列出了测量扇区中所有风向的气流校正系数(flow correction factors, FCFs)。对于每个10°风向区间,将以风力发电机组位置风速作为因变量,参考风速作为自变量进行普通的最小

二乘线性回归。如果风切变的影响很大，将采用风向和风切变的直方图法。该测试可以为改变允许的测量扇区提供证明信息。GB/T 18451.2—2021的附录C 引入了质量检查程序，这些程序可能会将扇区，测量数据或不确定度增加的情况排除在外。主要质量检查如下所述。

8.2.2 线性回归的相关性检查

对于每个风向区间，宜根据回归的相关系数，即通常所说的 r 值来评估相关程度。通过K-fold 分析 IEC 61400-12-1,可以根据质量检查结果调整不确定度值。

8.2.3 相邻风向区间的相关性变化

当相邻扇区之间的 r 相关性变化超过2%时，建议从测量扇区中删除该扇区。

8.2.4 不同季节的场地标定和功率特性测量

风速的季节性变化以及由于植被，降水(雪和冰)以及水体冻结引起的地表粗糙度变化可能会导致场地标定气流校正产生季节性依赖。因此，建议在同一季节(例如，均发生在夏季)进行场地标定和功率特性测量。

为了验证功率曲线，将进一步研究类似程序用于定义数值场地标定的有效扇区。根据8.4中提出的数值场地标定基准验证案例的结果，可以建立数值场地标定的详细程序。与不确定度量化有关的程序在8.3中讨论。

8.3 不确定度量化

GB/T 18451.2—2021的 C.6 定义了场地标定的不确定度量化。为了计算数值场地标定的不确定度量化，宜开发另一种方法来确定与每个有效扇区的气流校正系数相关的不确定度数值。这种新方法宜考虑测量带来的不确定度以及以下其他不确定度来源：

- 与初始和边界条件，环境条件，强制函数和所用数值模型的本构方程有关的参数；
- 缺少线性或非线性方程求解器的收敛性，也缺少网格收敛性。

在参考文献[15]、[44]和[45]中提供了用于估计由于参数和网格收敛的不确定性而引起的模型不确定性的方法。

8.4 数值场地标定程序验证活动的提案

8.4.1 概述

8.4的目的是解决与数值场地标定程序验证相关的缺失测量活动。使用数值场地标定代替测量结果尚未得到验证。因此，建议进行验证测试，其中将数值场地标定结果与使用IEC 61400-12-1中定义的两个测风塔的场地标定结果进行比较。

下面介绍了此类测试的建议场地和试验排布方案。

8.4.2 评估测试场地的地形

GB/T 18451.2—2021的表B.1描述了场地标定时的标准(以地形坡度和与平面相比的最大地形变化建立风力发电机组与测风设备之间距离的函数)。不同场地，如果复杂程度超过GB/T 18451.2—2021的表B.1, 宜研究。

8.4.3 试验布置

现有的试验场地标定数据可用于验证数值场地标定程序，但建议使用更详细的试验设置来验证数

值模型所有方面，并且包括以下内容。

- 在复杂地形两个测风塔宜保持 $2.5D$ 的距离(例如，如果用 D 代表叶轮直径，假定为130 m, 那么 $2.5D$ 为325 m)。
- 顶部风速仪的高度宜等于风力发电机组的预期轮毂高度(例如，轮毂高度为100 m)。
- 测量设备的安装应符合IEC 61400-12-1。
- 测风塔宜沿着主风向建立。
- 所有测量均宜在同一时间段内进行。
- 每个测风塔的传感器宜至少包括以下内容：
 - 1) 按照IEC 61400-12-1要求，顶部风速仪和参考风速仪应具有相同的品牌和型号；
 - 2) 宜根据IEC 61400-12-1安装风向标；
 - 3) 宜在另外两个位置—下叶尖高度以及下叶尖高度和轮毂高度的中间位置—安装风速计(相同的品牌和类型)以评估风切变；
 - 4) 声波风速计宜安装在距轮毂高度5m~10 m,以及下叶尖高度，以评估三维流动效应和大气稳定性；
 - 5) 另一个三维风速仪宜放置在离地面3 m处，以获得至少10 Hz 的热通量；
 - 6) 差分温度传感器宜放置在参考风速仪的高度和下叶尖高度，以便能够验证大气稳定性；
 - 7) 湿度传感器宜放置在离地面3 m 的位置；
 - 8) 测试周期宜与IEC 61400-12-1要求采集的最小数据量所需要的时间保持一致。如果考虑昼夜差异、季节变化、稳定性变化等因素而进行详细分析，建议采集的数据量要显著增加，测试周期宜达到IEC 61400-12-1所要求测试时间的2倍；
 - 9) 宜按照与IEC 61400-12-1功率特性测量相同的条件进行数据筛选；
 - 10) 建议连续测量扇区最小为 60° ；
 - 11) 建议使用雨量传感器，以便能够过滤并分别分析降水期间的数据；
 - 12) 时序数据的采样频率需满足 IEC 61400-12-1 推荐的最低采样要求，按照原始数据的采样频率进行采集和存储数据。

参 考 文 献

- [1] IEC 61400-12-1:2017 Wind energy generation systems—Part 12-1:Power performance measurementsof electricity producing wind turbines.
- [2] JACKSON,P.S.and HUNT,J.C.R.,Turbulent Wind Flow over a Low Hill, Quart.J.R.Met.Soc.,101,929-955,1975.
- [3]TROEN,I,A High Resolution Spectral Model for Flow in Complex Terrain,Proc.9th Symposium on Turbulence and Diffusion,Roskilde,Denmark,1990.
- [4]WILCOX,D.C.,Turbulence modelling for CFD,DCW Industries Inc.,1993.
- [5]HURLEY,S.P.J.,An evaluation of several turbulence schemes for the prediction of mean and turbulent fields in complex terrain,Boundary Layer Meteorology,83(1)43-73,1997.
- [6] LI,R.and DELAUNAY,D.,A new Turbulence Model for the Stable Boundary Layer with application to CFD in Wind Resource Assessment,Proc.EWEA 2015,2015.
- [7]SOGACHEV,A.,KELLY,M,and LECLERC,M.Y.,Consistent Two-Equation Closure Modelling for Atmospheric Research:Buoyancy and Vegetation Implementations,Boundary-Layer Meteorology.145(2)307-327,2012.
- [8] SMAGORINSKY,J.,General Circulation Experiments with the Primitive Equations, Monthly Weather Review,91(3),99-164,1963.
- [9] SAGAUT,P.,Large Eddy Simulation for Incompressible Flows,ISBN 978-3-540-264033,Springer,2006.
- [10]BECHMANN,A.,SørenSEN,N.N.and Johansen,J.,Atmospheric flow over terrain using hybrid RANS/LES.,Proc.EWEA2007,Milan,2007.
- [11] SPALART,P.R.,Comments on the feasibility of LES for wing and on a hybrid RANS/LES approach.1st ASOSR CONFERENCE on DNS/LES.Arlington,1997.
- [12] SPALART,P.R.,DECK,S.and SHUR,M.L.,SQUIRES,K.D.,STRELETS, M.Kh.and TRAVIN,A.,A new version of detached-eddy simulation,resistant to ambiguous grid densities,Theoretical and computational fluid dynamics 20(3)181-195,2006.
- [13] GRITSKEVICH,M.S.,GARBARUK,A.V.,SCHÜTZE,J.and MENTER,F. R.,Development of DDES and IDDES formulations for the k- ω shear stress transport model, Flow,Turbulence and Combustion 88(3),431-449,2012.
- [14]ISHIHARA,T.and QI,Y.H.,Numerical study of turbulent flow fields over steep terrains by using a modified delayed detached eddy simulations,Boundary-Layer Meteorology pp.1-24,<https://doi.org/10.1007/s10546-018-0389-8>,2018.
- [15]AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations.American Institute of Aeronautics and Astronautics,AIAA-G-077-1998,1998.
- [16]ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer,The American Society of Mechanical Engineers,2009.
- [17] FRANKE,J.,HELLSTEN,A.,SCHLÜNZEN,H.and CARISSIMO,B.ed.,Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment—Quality Assurance of Microscale Meteorological Models,COST Action 732,2007.
- [18]The guidebook for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings(in Japanese),ISBN 978-4818926653,Architectural Institute of Japan,2007.

[19] Guidebook of recommendations for loads on buildings 2—Wind-induced response and load estimation/Practical guide of CFD for wind resistant design(in Japanese),ISBN 9784818906389,Architectural Institute of Japan,2017.

[20] AIJ recommendations for loads on buildings(in Japanese),ISBN 978-4-8189-0626-6,2015.

[21] AIJ Benchmarks for Validation of CFD Simulations Applied to Pedestrian Wind Environment around Buildings,http://www.aij.or.jp/eng/publish/index_ddonly.htm,Accessed on 13 September 2018.

[22] VDI 3783 Blatt 9:2017-05,Environmental meteorology—Prognostic microscale wind field models—Evaluation for flow around buildings and obstacles,Verein Deutscher Ingenieure,2017.

[23] Data sets,CEDVAL at Hamburg University,<http://mi-pub.cen.uni-hamburg.de/index.php?id=432>,Accessed 13 September 2018.

[24] JAVIER,S.R.and MORIARTY,P.ed.,WAKEBENCH Model Evaluation Protocol for Wind Farm Flow Models,First Edition,IEA-Wind Task31,2015.

[25] Evaluation of site-specific wind conditions version 2,MEASNET,2016.

[26] DURANTE,F.,RIEDEL,V.,BUNSE,U.,BUSCHE,P.,MELLINGHOFF,H.,MONNICH,K.and SCHORER,T.ed.,Round Robin Numerical Flow Simulation in Wind Energy,Final Report,DEWI GmbH-Deutsches Windenergie-institut,2008.

[27] BERG,J.,COURTNEY,M.S.,JØRGENSEN,H.E.,MANN,J.and SØRENSEN,N.N.,The Bolund Experiment:Overview and Background,Riso-R-1658(EN),2009.

[28] BECHMANN,A.,SØRENSEN,N.N.,BERG,J.,MANN,J.and RETHORÉ,P.E.,The Bolund Experiment,Part II:Blind Comparison of Microscale Flow Models,Boundary Layer Meteorol.,141,245-271,2011.

[29] MORTENSEN,N.G.and JØRGENSEN,H.E.,Comparison of Resource and Energy Yield Assessment Procedures,EWEA Wind Resource Assessment Technology Workshop,2011.

[30] MORTENSEN,N.G.and JØRGENSEN,H.E.,Comparative Resource and Energy Yield Assessment Procedures (CREYAP)Pt.I II,EWEA Technology Workshop:Resource Assessment,Dublin,2013.

[31] IEA-Wind Task 31 WAKEBENCH,<http://windbench.net/wakebench>,Accessed on 13 September 2018.

[32] MANN,J.,ANGELOU,N.,ARNQVIST,J.,CALLIES,D.,CANTERO,E.,CHAVEZ ARROYO,R.,COURTNEY,M.,CUXART,J.,DELLWIK,E.,GOTTSCHALL,J.,IVANELL,S.,KÜHN,P.,LEA,G.,MATOS,J.C.,VEIGA RODRIGUES,C.,PALMA,J.M.L.M.,PAUSCHER,L.,PENA,A.,SANZ RODRIGO,J.,SODERBERG,S.,VASILJEVIC,N.,Complex terrain experiments in the New European Wind Atlas.Phil. Trans.R.Soc.A,20160101,doi:10.1098/rsta.2016.0101,2017.

[33] New European Wind Atlas,<http://www.neweuropeanwindatlas.eu/>,Accessed on 13 September 2018.

[34] WFIP2 Wind Forecast Improvement Project 2,Atmosphere to Electrons,US Department of Energy,<https://a2e.energy.gov/projects/wfip2>,Accessed on 13 September 2018.

[35] Architectural Institute of Japan,Guidebook for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings,http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm,Accessed on 13 September 2018.

[36]ISHIHARA,T.,FUJINO,Y.and HIBI,K.,A wind tunnel study of separated flow over a two-dimensional ridge and a circular hill,Journal of Wind Engineering,89:573-576,2001.

[37]ALINOT,C.and MASSON,C.,Aerodynamic simulations of wind turbines operating in atmospheric boundary layer with various thermal stratifications,ASME Wind Energy Symposium,Reno,U.S.A.,2002.

[38]QI,Y.H.and ISHIHARA,T.,Numerical study of turbulent flow fields around of a row of trees and an isolated building by using modified k-e model and LES model,J.of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,177:293-305,2018.

[39]SOGACHEV,A.and PANFEROV,O.,Modification of two-equation models to account for plant drag,Boundary-Layer Meteorology,121,229-266,2006.

[40]CHAVEZ ARROYO,R.,SANZ RODRIGO,J.and GANKARSKI,P.,Modelling of atmospheric boundary-layer flow in complex terrain with different forest parametrizations,Journal of Physics:Conference Series 524,2014.

[41]YAMAGUCHI,A.,ISHIHARA,T.and FUJINO,Y.,Applicability of linear and non-linear wind prediction models to wind flow in complex terrain,Proc.World Wind Energy Conference and Exhibition,Berlin,Germany,2002.

[42]BECHMANN,A.,SØRENSEN,N.and JOHANSEN,J.,Atmospheric Flow over Terrain using Hybrid RANS/LES,Proc.European Wind Energy Conference and Exhibition,2007.

[43]HEFNY,M.M.and OOKA,R.,Influence of cell geometry and mesh resolution on large eddy simulation predictions of flow around a single building,Building Simulation,1(3),251-260,2008.

[44]OBERKAMPF,W.L.and ROY,C.J.,Verification and Validation in Scientific Computing,Cambridge University Press,2010.

[45]ROACHE,P.J.,Fundamentals of Verification and Validation,Hermosa Publishers,2010.

[46]GB/T 18451.2—2021 风力发电机组功率特性测试(IEC 61400-12-1:2017,IDT)