



中华人民共和国国家标准

GB/Z XXXXX-XXXX/IEC TR 61400-12-4:2020

风能发电系统 风力发电机组功率特性测试 的数值场地标定方法

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)

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前 言 3

引 言 4

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 符号及单位 2

4 数值模拟方法概述 3

 4.1 线性流动模型 3

 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 6

 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 7

 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 国际能源署分项目 Task 31 Wakebench - 风场流动模型的模型评估协议 8

 5.8 MEASNET - 特定场地风况评估 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 实验 9

 6.4 欧洲风能协会资源比较与产能评估程序 I 和 II（2011，2013） 9

 6.5 IEA Task 31 Wakebench 实验 10

 6.6 新欧洲风能图谱实验[32] 10

 6.7 风预测改进项目 2[34] 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..... 12

7.9 障碍物影响..... 12

7.10 关于数值场地标定模型适用范围的建议..... 13

8 开放式问题..... 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

表 1 本文件中使用的符号..... 2

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。

本文件使用翻译法等同采用IEC 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地标定方法。

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/TC50）归口。

本文件起草单位：新疆金风科技股份有限公司、xxxxxxx。

本文件主要起草人：

引 言

IEC 61400-12-1[1]是用于风力发电机组功率特性测量的国际标准。它规定在复杂地形中，需要进行场地标定，以获得测量位置和测试风机之间的流动特性关系。该方法要求除用于测量风机功率曲线的参考测风塔外，还需要在被测风机安装之前，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，它有如下缺点：

- 第二座测风塔的额外费用和场地标定结果的分析，
- 场地标定所需的 3 个月以内的额外时间，
- 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，即风机位置的风速与参考测风塔位置的风速之间的关系。

IEC TC 88 委员会 "风能发电系统"发起了本文件的工作，以评估数值流动模拟在场地标定中的潜在应用，即数值场地标定。

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：

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

项目组(PT 61400-12-4)概述了流动数值建模的现状并总结了现有的准则和对过去数值模型验证和确认的基准测试经验。根据所开展的工作，项目组鉴别出在风能应用中基于地形进行流动模拟的重要技术方面，以及现有的未决问题，包括通过基准测试进一步验证的建议。项目组的结论是，在发布数值场地标定标准之前，还需要进一步的工作。

风能发电系统 风力发电机组功率特性测试的数值场地标定方法

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，该文件鉴别出在风能应用中基于地形进行流动模拟的重要技术方面，以及现有的未决问题，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

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）适用于本文件。

GB/T 18451.2-2021 风力发电机组 功率特性测试（IEC 61400-12-1:2017）

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

本文件中使用的缩略语如下：

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）

AII 日本建筑研究所（Architectural Institute of Japan）

ALEX17 2017 Alaiz 试验（Alaiz Experiment 2017）

ASME 美国机械工程协会（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 资源比较和产能评估程序（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 吉瓦时 (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& 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 风力预测改进项目 (Wind Forecast Improvement Project)
WTG 风力发电机组 (Wind Turbine Generator)

3.3 符号及单位

表1显示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
$\bar{u}_i$	滤波后风速的第 <i>i</i> 个分量	<i>m/s</i>
$\bar{p}$	滤波后的压力	<i>Pa</i>
μ	分子动力粘度	<i>Pa·s</i>
μ_t	湍流动力粘度	<i>Pa·s</i>
C_s	Smagorinsky 常数	-
κ	冯卡门常数	-
d	到最近壁面的距离	<i>m</i>
Δ	局部滤波器大小	<i>m</i>
l	湍流长度尺度	<i>m</i>
l_{RANS}	RANS 模型中的湍流长度尺度	<i>m</i>
l_{LES}	LES 模型中的湍流长度尺度	<i>m</i>
f_d	DDES 模型常数	<i>m</i>
$\overline{U_i}$	<i>i</i> 方向速度的平均分量	<i>m/s</i>
u_i	<i>i</i> 方向速度的脉动分量	<i>m/s</i>

x_i	i 方向的空间变量	m
$\bar{P}$	平均压力	Pa
ρ	密度	kg/m^3
ν	分子运动粘度	m^2/s
$\bar{F}_i$	i 方向的体积力	$kg \cdot m/s$
$\overline{u_i u_j}$	雷诺应力	m^2/s^2
δ_{ij}	克罗内克符号	-
ν_T	湍流运动粘度	m^2/s
k	湍动能	m^2/s^2
L_T	湍流长度尺度	m
P_k	湍动能产生项	m^2/s^3
ε	湍动能耗散率	m^2/s^3
C_μ	RANS 湍流模型常数	-
$C_{1\varepsilon}$	RANS 湍流模型常数	-
$C_{2\varepsilon}$	RANS 湍流模型常数	-
σ_ε	RANS 湍流模型常数	-
E	验证对比误差	
δ_{model}	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_D	实验值误差	
u_{val}	验证标准不确定度	
u_{num}	数值解不确定度	
u_{input}	输入参数不确定度	
u_D	实验值不确定度	
r	相关系数	-
γ_d	DDES 参数	-
A_1	修正的 DDES 常数/分步函数	-
A_2	DDES 常数	-
K_h	有效水平运动粘度	m^2/s
K_v	有效垂向运行粘度	m^2/s
$\tilde{u}_i$	i 方向的速度扰动分量	m/s
$\tilde{p}$	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, 计算资源受到限制, 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（2）所示：

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

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

式中：

$U_j (j=1, 2)$ ——未受扰动流动的水平速度分量；

$\tilde{u}_i (i=1, \dots, 3)$ ——速度扰动分量；

$\tilde{P}$ ——压力扰动；

K_h ——水平方向上的有效运动粘度；

K_v ——垂直方向上的有效运动粘度。

在风不会显著地受到陡坡，气流分离，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]在线性模型中的使用最广泛。WAsP 程序可以被视为将参考处的风速与预测位置处的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，大量气流分离，风向变化以及大气条件变化有关，后者包括狭管效应，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 考虑具有四个未知变量的动量和质量守恒方程：压力和三个速度分量。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， $U_i = \overline{U_i} + u_i$ ），从而得到 RANS 方程，如公式（3）所示：

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

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）必须参数化以闭合方程组。采用 Boussinesq 假设，通过引入涡流粘度（一阶闭合）来定义湍流通量和平均值梯度之间的关系，描述为公式（4）：

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

引入两个基本量来描述湍流：运动湍流粘度 ν_T 和湍动能 k 。运动湍流粘度取决于湍动能 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：

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

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（ $k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$, $k - \omega$, ...）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 ：

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

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

运动湍流粘度 ν_T 由闭合方程 $\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 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[6]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宜性评估，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 (large eddy simulation, LES) [8] 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) - (13) 给出了不可压缩流动的控制方程（使用 Smagorinsky 亚格子模型[8]）：

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$L_s = C_s \Delta \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

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

式中：

$\bar{u}_i$ ——滤波后风速的 i 分量；

C_s ——Smagorinsky 常数；

Δ ——局部滤波器的大小。

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，即所有表征流动的涡必须被求解。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 更接近现实[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 (Detached eddy simulation, 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) - (16) 来计算：

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

$$l_{\text{RANS}} = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$l_{\text{LES}} = C_s \Delta \quad \dots\dots\dots (16)$$

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 (delayed detached eddy simulation, DDES)。在 DDES 中，可以使用以下公式计算长度尺度 l [13] [14]：

$$l = l_{\text{RANS}} - f_d \max(0, l_{\text{RANS}} - l_{\text{LES}}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$f_d = 1 - \tanh\left[(A_1 \gamma_d)^{A_2}\right] \quad \dots\dots\dots (18)$$

在参考文献[14]中，作者提出用 A1 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

科学团体、认证组织和相关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 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA) 指南[15]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将他们用于预测研究变量。

V&V 流程应考虑以下要素：

- a) 模型的一般说明，包括其预期的用途或应用，
- b) 该模型求解的预测方程的描述，
- c) 假设和近似的描述，
- d) 模型参数化的描述，
- e) 大气尺度和空间/时间分辨率，
- f) 计算网格的描述，
- g) 边界条件和初始条件，
- h) 输入数据和来源，
- i) 根据预测和诊断（从预测）变量输出数据，
- j) 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

美国机械工程师协会 (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 (computational heat transfer, CHT) 中进行 V&V 的方法。本文档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_{model} ，数值解误差 δ_{num} ，仿真输入参数误差 δ_{input} 和实验数值误差 δ_{D} 来表示，如公式 (19) 所示：

$$E = \delta_{\text{model}} + \delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D \quad \dots\dots\dots (19)$$

假设 δ_{num} 、 δ_{input} 和 δ_D 彼此独立，由这些项引起的不确定度 u_{val} 可以写成公式（20）的形式：

$$u_{\text{val}} = \sqrt{u_{\text{num}}^2 + u_{\text{input}}^2 + u_D^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

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

本文的目的是提出量化建模假设不确定度的方法和对该不确定度值作出解释。因此，文档的内容如下：

- a) 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。
- b) 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。
- c) 确定实验值不确定度的基本概念。
- d) 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。
- e) 对由建模假设产生的不确定度的解释。
- f) V&V 的一个例子。

5.4 COST 732 “微尺度气象模型的质量保证”

欧洲科学技术合作（European Cooperation in Science and Technology, 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。这些最佳实践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：

- a) 目标变量，
- b) 描述流动物理性质的近似方程，例如湍流模型，
- c) 障碍物的几何描述，
- d) 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：

- a) 计算网格，
- b) 时间步长，
- c) 数值近似（离散格式），
- d) 迭代收敛准则。

COST 732 准则对于大多数标准仍然是通用的，并鼓励工程师使用最佳实践来降低误差。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实践。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：域大小应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。

该准则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（Architectural Institute of Japan, 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最佳实践。计算条件如下：

- a) 计算域扩展，

- b) 网格生成和分辨率,
- c) 边界条件,
- d) 数值格式,
- e) 湍流模型,
- f) 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流动。验证数据库可从 AIJ 网站上获得[21]。

5.5.3 建筑物载荷推荐指导手册 [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。在本准则中,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。本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 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

Verein Deutscher Ingenieure (VDI, 德国工程师协会) 准则描述了德意志联邦共和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援助。

VDI 3783 准则第 9 部分[22]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(Environmental Wind Tunnel Laboratory, 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 国际能源署分项目 Task 31 Wakebench - 风场流动模型的模型评估协议

在国际能源署(International Energy Agency, 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(A model evaluation protocol, 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:

- a) 通过科学审查获得模型资格,
- b) 代码和解决方案验证,
- c) 验证,包括:
 - 1) 构建模块验证方法,
 - 2) 验证数据的要求和来源,
 - 3) 研究变量,
 - 4) 建立并运行模型,
 - 5) 指标,
 - 6) 质量验收标准,
- d) 模型校准。

5.8 MEASNET – 特定场地风况评估

国际风电检测组织（Measuring Network of Wind Energy Institutes, 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，地面粗糙度，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。在撰写本文时，其中有些项目已经完成，而有些正在进行中。

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米，输出高度要求达到80米。

平均风速误差的绝对值在各扇区内的平均值介于5%和18%之间。但是，单个扇区的偏差大于此值。绝对平均产能误差在1%至36%之间。

6.3 Bolund 实验

Bolund Hill盲测是由丹麦技术大学(Danish Technical University, DTU)于2009年组织的，专注于流动模型[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2m，5m和9m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，他们则必须提供反映测量点的特定点的结果。需要注意的是，该实验中山体的陡度以及剧烈变化的粗糙度违反了线性模型的假设。

实验定义了四个风向，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。所有的参与者都必须提交600个位置上的结果。

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产能评估程序 I 和 II（2011，2013）

DTU 进行了资源比较和产能评估程序(Comparative Resource and Energy Yield Assessment Procedures, CREYAP)第一部分[29]的测试，其结果展示在 2011 年欧洲风能协会(European Wind Energy Association, 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：

- a) 风电场与风机数据，
- b) 风数据输入，
- c) 地形数据输入。

在以下方面对模型结果进行了比较：

- a) 50m与60m高度处的长期校正风速，
- b) 垂直外推（风切变），
- c) 总产能，
- d) 潜在能量产出，
- e) 净产能P50与P90。

报告的风切变结果范围为0.015至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和127 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：

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

报告的风切变结果范围为0.105至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和106 GWh之间（标准偏差为5.7 GWh - 变异系数为5.8%）。

6.5 IEA Task 31 Wakebench 实验

Wakebench [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、风洞和现场研究实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 新欧洲风能图谱实验[32]

6.6.1 Perdigão（双脊地形）

新欧洲风能图谱(NEWA)实验之一正在葡萄牙Perdigão附近的两个陡峭平行山脊附近进行。该实验始于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至100 m的测风塔以及19台激光雷达（light detection and ranging, 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）

一项名为ALEX17的开放获取实验计划于2018年7月开始。该实验包括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（sound detection and ranging, SODAR）以及10个位于西班牙纳瓦拉的气象站。实验目的是描述在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

地点以及下游运营风电场的风况。

6.6.3 Østerild（非均匀粗糙度上的气流）

该实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。实验测量在位于丹麦Østerild的实验场进行，实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，该项目使用十二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所有实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 2[34]

风预测改进项目2（Wind Forecast Improvement Project 2, WFIP2）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实验，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。WFIP2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。WFIP2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。WFIP2代表了风电行业，科学团体和联邦实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实验数据汇编[23]

用于验证微尺度扩散模型的实验数据汇编（Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models, 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5.6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，真实城市中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 $k-\epsilon$ 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值： $z_0 = 0.3 \text{ mm}$ 的粗糙情形与 $z_0 = 0.01 \text{ mm}$ 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GB/T 18451.2-2021 [1]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。强烈建议在兴趣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，应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应确保兴趣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

应检查地表边界条件，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应使兴趣区域内的流场不会受到明显影响。

7.5 网格参数

应该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，以确保兴趣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

收敛准则应确保兴趣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，因此应考虑大气稳定性。大气边界层稳定性的正确建模仍在科研领域发展，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

随着现代风机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

本文档考虑障碍物对气流的阻塞作用以及相应的流动变形。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流动。对障碍物周围的流动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流动的影响。经过充分的验证，林冠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[41]。

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[43]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 开放式问题

8.1 概述

根据GB/T 18451.2—2021的描述,场地标定建议使用两个测风塔:参考测风塔和在风机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。

在复杂地形的特性验证时,设想使用数值场地标定来避免使用临时测风塔来生成风速的传递函数。永久测风塔与数值模拟结果的结合将产生风机位置的风速。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。建议进行基准测试验证活动,以支持在将来应用之前突破现有的差距。

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(site calibration, SC)程序是GB/T 18451.2-2021的规范部分。该文档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GB/T 18451.2-2021中规定的检查数据质量。

场地标定测试的关键结果是一个表,它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,将以风机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附件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,应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折分析(GB/T 18451.2-2021),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

当相邻扇区之间的流动相关性变化超过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表面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第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，应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。这种新方法应考虑测量带来的不确定度以及以下其他不确定度来源：

- a) 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，
- b) 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GB/T 18451.2-2021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实验排布方案。

8.4.2 评估测试场地的地形

GB/T 18451.2—2021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机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表B.1，应当研究。

8.4.3 实验布置

现有的实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实验设置来验证数值模型所有方面，并且应包括以下内容：

- a) 在复杂地形两个测风塔应该保持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）。
- b) 顶部风速仪的高度应等于风机的预期轮毂高度（例如，轮毂高度为100 m）。
- c) 测量设备的安装应符合GB/T 18451.2—2021建议的标准。
- d) 测风塔应该沿着主风向建立。
- e) 所有测量均应在同一时间段内进行。
- f) 每个测风塔的传感器至少应包括以下内容：
 - 1) 按照GB/T 18451.2-2021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) 应根据GB/T 18451.2-2021安装风向标。
 - 3) 应在另外两个位置-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) 声波风速计应安装在距轮毂高度5 m至10 m之间，以及下叶尖高度，以评估三维流动效应和大气稳定性。
 - 5) 另一个三维风速仪应放置在离地面3 m处，以获得至少10 Hz的热通量。

- 6) 差分温度传感器应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) 湿度传感器应放置在离地面3 m的位置。
- 8) 测试周期应与GB/T 18451.2-2021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，测试周期应该达到GB/T 18451.2-2021 所要求测试时间的2倍。
- 9) 应按照与GB/T 18451.2-2021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GB/T 18451.2-2021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 measurements of 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 $k-\omega$ 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), ISBN9784818906389, Architectural Institute of Japan, 2017

- [20] AIJ recommendations for loads on buildings (in Japanese), ISBN978-4-8189-0626-6, 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 Task 31, 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, Risø-R-1658(EN), 2009
- [28] BECHMANN, A., SØRENSEN, N. N., BERG, J., MANN, J. and RÉTHORÉ, 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. 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., CHÁVEZ 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., PEÑA, A., SANZ RODRIGO, J., SÖDERBERG, 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] ISHIIHARA, 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 ISHIIHARA, T., Numerical study of turbulent flow fields around of a row of trees and an isolated building by using modified k- ϵ 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] CHÁVEZ 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 FUZINO, Y., Applicability of linear and nonlinear 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
