

机组提升功率后的样机测试验证方案

工作组成员名单（按姓名拼音排序）

蔡继峰

魏煜锋

蔡志崧

文茂诗

陈思敏

巫发明

高中华

徐可

胡代群

易权

黄剑锋

余清清

李强松

曾兴国

唐建平

张兆智

王丹丹（召集人）

周民强

王伟

朱志权

柔塔阻尼比的测试方法和要求

工作组成员名单（按姓名拼音排序）

蔡继峰

巫发明

曹广启

邢赢

陈思敏

徐斌

胡代群

杨柳

蒋祥增

杨微

靖峰

易权

李鹏

曾兴国

李强松

张维庆

李正农

张兆智

罗勇水

赵盼盼（召集人）

吕杏梅

祝磊

王诚辉

卓沛骏

魏煜锋

宗川翔

系列化叶片通过对比分析验证疲劳安全性的方法

工作组成员名单（按姓名拼音排序）

曹艳彬

闻笔荣

邓航

吴胜军

韩波

徐可

黄辉秀

杨海江

靳交通

张敬德

李聪颖

张石强

刘伟超

张万军

鲁晓峰

钟贤和

王国军

周晓亮

王宇

邹文尧（召集人）

魏煜锋

测试功率曲线分级和应用规则 工作组成员名单（按姓名拼音排序）

傅新鸿

王少波

蔡继峰

魏煜锋

高中华

巫发明

管海芳

肖富华

黄宇同（召集人）

张黎明

姜圣

张兆智

刘东海

周民强



WEEC/TN001: 2020

升功率机组样机测试验证方案

Prototype test verification plan for power-increased wind turbine

2020-10-15 发布

鉴衡风能专家委员会 发布



鉴衡风能专家委员会

CGC WIND ENERGY EXPERTS COMMITTEE

版权声明

本文的著作权属于鉴衡风能专家委员会成员单位共有，任何成员单位不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或市场宣传。对于违反此声明或者其他违法使用本文内容者，鉴衡风能专家委员会将依法追究其法律责任。





鉴衡风能专家委员会

CGC WIND ENERGY EXPERTS COMMITTEE

目 次

1	范围	7
2	规范性引用文件	7
3	术语和定义	7
4	通用要求	8
5	载荷计算模型影响分析	8
5.1	气动模型	8
5.2	结构动力学模型	9
6	补充测试验证方案	10
6.1	载荷测量	10
6.2	齿轮箱现场挂机实验	10





升功率机组样机测试验证方案

1 范围

IECRE OD-501 规定了已完成型式认证机组进行设计变更后的样机型式测试要求，变更内容包括额定功率、额定转速、叶片翼型以及其它对载荷有显著影响的变化等，其中额定功率增加超过 5% 时需要进行新的型式测试。

本说明规定额定功率增加超过 5%，增加方式限于增加额定扭矩或同时改变额定转速的样机型式测试方案，其他设计变更后机组的型式测试方案也可参考。

升功率后机组的设计评估和部件型式试验按照 GB/T 35792-2018 和 GB/T 18451.1-2012 要求进行。

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。

IECRE OD-501 Edition 2.0 2018-05-24 Type and Component Certification Scheme

GB/T 35792-2018 风力发电机组 合格测试及认证

GB/T 18451.1-2012 风力发电机组设计要求

GB/T 37257-2018 风力发电机组 机械载荷测量

GB/T 19073-2018 风力发电机组齿轮箱设计要求

3 术语和定义

3.1

基础机型 basic wind turbine generator

指用于比较的风力发电机组，一般已完成或正在进行型式认证。

3.2

攻角 attack angle

来流合速度方向和翼型弦线的方向（前缘指向后缘）的夹角，也称迎角。

3.3

失速攻角 attack angle of stall

在零度攻角附近，升力系数随着攻角的增加而增加，但攻角增大到某一个角度时，攻角的继续增加反而

会使升力系数降低，该角度称为失速攻角，也称临界攻角。

4 通用要求

依据 GB/T 35792-2018，风电机组型式试验和样机相关的测试包含：安全及功能测试、功率特性测试、载荷测量和齿轮箱现场挂机试验。其中齿轮箱和发电机等关键部件的型式试验和适应性评估在设计评估和部件认证中完成，不属于本说明样机测试验证范畴。

安全及功能测试的目的是验证机组整体的控制保护系统功能是否能按照设计预期实现，功率增加对机组的各种功能无影响，无需进行额外的测试。

功率特性测量的目的是获得机组的实测功率曲线，若机组的额定功率发生变化，可根据实际项目情况或业主需求进行选择。

载荷测量的目的是验证载荷计算模型和方法的有效性，功率增加后机组的运行范围增大，需要分析新的运行范围对载荷模型的影响，根据分析结果确认补充测试验证方案。

齿轮箱现场挂机实验的目的是验证齿轮箱的振动特性是否满足标准要求，以及润滑及冷却系统的功能是否能按照设计预期实现。在完成升功率后的传动链动力学分析和齿轮箱的部件试验的基础上，提升功率小于等于 15%，可不进行额外测试；大于 15%时需进行补充测试。

综上，机组提升功率后的样机测试验证要求见表 4-1。

表 4-1 升功率后的样机测试验证要求

测试项	测试验证要求
安全及功能测试	无需进行额外测试
功率特性测试	根据实际需求选择
载荷测量	根据分析结果确认补充测试验证方案
齿轮箱现场挂机试验	提升功率小于等于 15%，无需额外测试；提升功率大于 15%需进行补充测试

5 载荷计算模型影响分析

风电机组载荷计算模型包括气动模型和结构动力学模型。

5.1 气动模型

常规的气动模型是参考叶素动量理论，并使用二维翼型的升阻力系数和三维修正方法建立。当风电机组叶片运行的攻角接近或者超过失速攻角时，翼型升力随着攻角的增加反而降低，可能会使风电机组在某个模态下处于负阻尼状态，加大机组的载荷和振动从而诱发叶片的颤振等问题，也使得现有理论对这种情况

下的气动分析结果存在较大局限性。

提升功率后可能会使机组的运行攻角范围增加,从而导致机组运行攻角接近甚至大于失速攻角,带来额外的失速风险。因此需要进行失速风险分析。

在基础机型得到有效验证的前提下,提升功率后新的攻角范围若无失速风险或相对基础机型并未显著增加失速风险,则无需额外的样机测试验证,反之则需要补充测试验证。失速风险分析方法如下:

1: 分别对基础机型和提升功率后的机型在设计条件下的正常运行工况进行时序仿真,工况设置按照设计等级参考 GB/T 18451.1-2012 的正常运行工况 DLC1.2,选取额定风速-2m/s、额定风速-1m/s 和额定风速三个风速 bin 区间,每个风速区间种子数不少于 6 个。

2: 计算每个风速 bin 区间内十分钟样本的各翼型运行攻角的平均值和标准差,并在风速 bin 区间内对多个样本取平均值和平均标准差,得到该风速 bin 区间下各翼型运行攻角平均值和平均标准差。

3: 根据翼型所处叶片截面的不同位置选取相应的判断指标,当翼型的平均值和标准差满足一定的条件下,可以无需进行额外的样机测试验证,判断详见表 5-1。

表 5-1 失速风险分析方法

运行攻角分析区域	判断指标	无需额外测试验证的条件
距离叶根 2/3 处到叶尖区域	指标 1: 所有 bin 区间满足提升功率后机组运行攻角的平均值 +2.33 倍的标准差小于失速攻角。 指标 2: 平均值最大的 bin 区间满足下式 提升功率后运行攻角平均值-基础机型运行攻角平均值 $\leq 0.5^\circ$	满足指标 1 或者满足指标 2
距离叶根 1/2 处到叶根 2/3 处	指标 1: 所有 bin 区间满足提升功率后机组运行攻角的平均值 +1.28 倍的标准差小于失速攻角。 指标 2: 平均值最大的 bin 区间满足下式 提升功率后运行攻角平均值-基础机型运行攻角平均值 $\leq 0.5^\circ$	满足指标 1 或者满足指标 2

5.2 结构动力学模型

转速的倍频是系统激振力的主要来源,功率提升后机组正常运行的转速范围可能会增大,增加新的共振点从而带来额外的共振风险。因此结构动力学分析主要进行共振风险分析,具体分析方法如下:

对于新增转速区间内,分析 1P、3P、6P 激振力与系统固有频率的最小差异。

- 最小差异若大于等于 10%, 无须额外的样机测试验证。
- 最小差异若小于 10%, 需要结合模态阻尼和激振力能量来源分析是否存在共振可能(风险), 无法明确时则需要通过补充样机测试验证。

6 补充测试验证方案

6.1 载荷测量

对于第 5 章分析结果需要进行补充测试的情况，补充测试工况要求见表 6-1，其它采集系统要求同 GB/T 37257-2018。

表 6-1 补充测试工况

测试工况	测试变量	样本数	
额定风速-2m/s	塔底两个方向弯矩	不小于 6 个 10 分钟	或测试结果中有不少于 6 个 10 分钟内持续达到额定功率
额定风速		不小于 12 个 10 分钟	
额定风速+2m/s		不小于 6 个 10 分钟	

允许使用经过检定且处于有效期内的机舱风速计的采集获得测风数据。

测试结果与仿真结果的比对要求参考 IEC61400-13 附录 E。

6.2 齿轮箱现场挂机实验

升功率超过 15%时需要进行齿轮箱现场挂机实验，测试要求详见 GB/T19073-2018。



WEEC/TN002: 2020

柔塔阻尼比的测试方法和要求

Test methods and requirements for damping ratio
of soft tower

2021-07-27 发布

鉴衡风能专家委员会发布



版权声明

本文的著作权属于鉴衡风能专家委员会成员单位共有，任何成员单位不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或市场宣传。对于违反此声明或者其他违法使用本文内容者，鉴衡风能专家委员会将依法追究其法律责任。





目录

1	范围.....	7
2	规范性引用文件.....	7
3	术语和定义.....	7
4	测试方法.....	7
5	测试技术.....	8
5.1	设备要求.....	8
5.2	测试要求.....	8
6	数据处理.....	9
7	测试报告.....	9
8	测试结果的应用.....	10
附录 1	半功率法求阻尼比流程.....	1





柔塔阻尼比的测试方法和要求

1 范围

本提案适用于陆上柔塔风力发电机组（定义见第三节）塔筒一阶、二阶阻尼比的测试方案和数据处理方法，测试结果可应用于制造商的设计校核、认证机构对机组设计的复核，以及开发商对风电机组的验收。

柔塔的阻尼比符合瑞利阻尼，瑞利阻尼不仅和频率相关，同时也与质量和刚度相关，因此相同塔架高度下，塔架频率或质量偏差 5%以上应进行阻尼测试。

其他类型塔架可参考本提案。

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 18451.1-2012 风力发电机组 设计要求

GB/T 19072—2010 风力发电机组 塔架

JGJ/T101-2015 《建筑抗震试验方法规程》

JTG/TJ21-01-2015 《公路桥梁荷载试验规程》

Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, BS EN 1991-1-4:2005

3 术语和定义

柔塔¹

塔架一阶固有频率与机组的风轮转速频率（1P）存在交点。

临界风速

涡旋脱落频率与塔架固有频率相等时的风速。

4 测试方法

根据外界激励不同，本提案推荐的柔塔阻尼比测试方案可分为以下三种：

¹ 通常风电行业柔塔机组的塔架高度大于等于 120 米，机组一阶固有频率小于 0.2Hz。

(1) 风振激励法²：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及二阶模态信息；测试过程中桨距角保持在顺桨状态，减少气动阻尼的影响。

(2) 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。

(3) 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。

测试一阶阻尼比时，激振器的频率应在塔架一阶频率附近，测试二阶阻尼比时，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。

5 测试技术

5.1 设备要求

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。传感器采样频率宜大于等于 10 倍的测试频率。

5.2 测试要求

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宜满足如下要求：

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 5.1 所示。

² 来源于 JGJ/T101-2015 《建筑抗震试验规程》

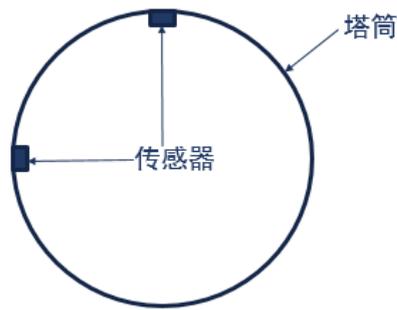


图 5.1 传感器安装位置示意图

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。每次宜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：宜采集 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。

6 数据处理

柔塔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。阻尼比宜取 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宜超过 $\pm 20\%$ 。

- (1) 时域衰减法，只适合单一频率的自振信号。
- (2) 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，频率分辨率应不大于 1% 的自振频率值，以确保插值计算的精度，具体流程见附录 1。
- (3) 模态分析法，例如最小二乘法、随机子空间法。

7 测试报告

通过以上方法将测试过程及数据后处理过程形成报告，报告内容应包括以下信息：

- 1) .测试介绍
- 2) .被测机组的描述和辨识参数，包括：

-
- a). 机组的制造商，型号，序列号，生产年份；
 - b). 风轮直径；
 - c). 风轮转速或转速范围；
 - d). 叶片信息：制造商，型号，序列号，叶片数量，变桨方式，叶片附属物；
 - e). 轮毂高度和塔架类型；
 - f). 控制系统描述；
 - g). 被测机组照片
- 3). 测试变量
 - 4). 坐标系说明
 - 5). 测试设备
 - a). 数据采集系统说明（例如采样频率，滤波方式，同步性等）
 - b). 每个测试变量对应的传感器参数（制造商，型号，序列号），传感器安装位置，标定关系（或标定证书）
 - 6). 数据处理过程，包括阻尼比计算的方法
 - 7). 测试结果：对于每个测试工况，每个方向的加速度（位移）包括以下结果：
 - a). 时序图
 - b). 频谱图，至少列出塔架一阶和二阶频率
 - c). 风速信息
 - d). 阻尼比

8 测试结果的应用

制造商、认证机构可应用测试结果对机组设计的进行校核：

- (1) 若测试结果大于机组设计阶段的阻尼比，则认为机组安全性满足标准要求；
- (2) 若测试结果小于机组设计阶段的阻尼比，应对机组安全性进行复核，如有安全性风险，则制造商需重新制定应对方案，例如采取对风或加阻措施等，并需通过认证机构验证其应对方案是否可以满足机组安全性要求；

开发商可应用测试结果对机组进行验收：

- (1) 若测试结果大于机组设计阶段的阻尼比，则认为机组安全性满足标准要求；

-
- (2) 若测试结果小于机组设计阶段的阻尼比，应对机组安全性进行复核，如有安全性风险，则需要制造商提供相应的应对方案以达到设计要求，或通过相关计算证明测试结果下机组涡激振动造成的损伤满足标准要求。



附录 1 半功率带宽法求阻尼比流程

(资料性附录)

以下为采用半功率带宽法对测试数据处理的流程：

- 1) 提取测试结果，包括测试时间及振动加速度或速度信息；
- 2) 采用快速傅里叶变换，将数据采集得到的时域信号数据变换到频域，进行参数识别；
- 3) 根据机组频率和采样频率，对数据进行滤波，滤波带宽为塔架频率 $\pm 10\%$ ；
- 4) 为了减少频谱能量泄漏，对滤波后的结果进行加窗处理，以保证滤波后数据准确性。加窗处理的窗口类型可选择汉宁窗、矩形窗等，窗口长度根据机组频率及采样点数量确定；
- 5) 对滤波和加窗处理后的数据使用半功率法计算得到机组阻尼比。





WEEC/TN003: 2020

系列化叶片通过对比分析验证
疲劳强度的方法

Method for serialized blade to verify fatigue
safety through comparative analysis

2020-10-15 发布

鉴衡风能专家委员会 发布



鉴衡风能专家委员会

CGC WIND ENERGY EXPERTS COMMITTEE

版权声明

本文的著作权属于鉴衡风能专家委员会成员单位共有，任何成员单位不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或市场宣传。对于违反此声明或者其他违法使用本文内容者，鉴衡风能专家委员会将依法追究其法律责任。





目 次

1	范围.....	1
2	规范性引用文件.....	1
3	术语和定义.....	1
4	通用要求.....	1
5	对比分析方法.....	2
5.1	原始叶片试验要求.....	3
5.2	外形设计、铺层设计的对比分析.....	3
5.3	生产工艺、生产厂体系的对比分析.....	3
5.4	载荷、刚度、安全余量的对比分析.....	4
6	叶片的典型改型.....	5
	附录 A.....	6





鉴衡风能专家委员会

CGC WIND ENERGY EXPERTS COMMITTEE

1 范围

本规范适用于一款在已通过疲劳试验评估的叶片的基础上进行一部分设计变更的改型叶片的疲劳强度对比分析及验证。

其他差异较小的两款叶片的疲劳强度对比验证也可参考本规范，对比分析的结果可用于制造商的设计校核，也可用于认证机构的评估参考。

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

IECRE OD-501 Type and Component Certification Scheme

GB/T 35792-2018 风力发电机组 合格测试及认证

IEC 61400-5: 2020 Wind energy generation systems –Part 5: Wind turbine blades

IEC 61400 -23: 2014 Full-scale structural testing of rotor blades

GB/T 25384-2018 风力发电机组风轮叶片全尺寸结构试验

3 术语和定义

原始叶片：指用于对比设计差异的基础型号叶片，一般已完成或正在进行疲劳试验验证。

改型叶片：指参考原始叶片，更改了一部分结构设计、材料设计、工艺设计等的新叶片。

系列化叶片：指外形设计、工艺方式基本相同，铺层设计、材料设计等差异较小的两款或多款叶片的合称。

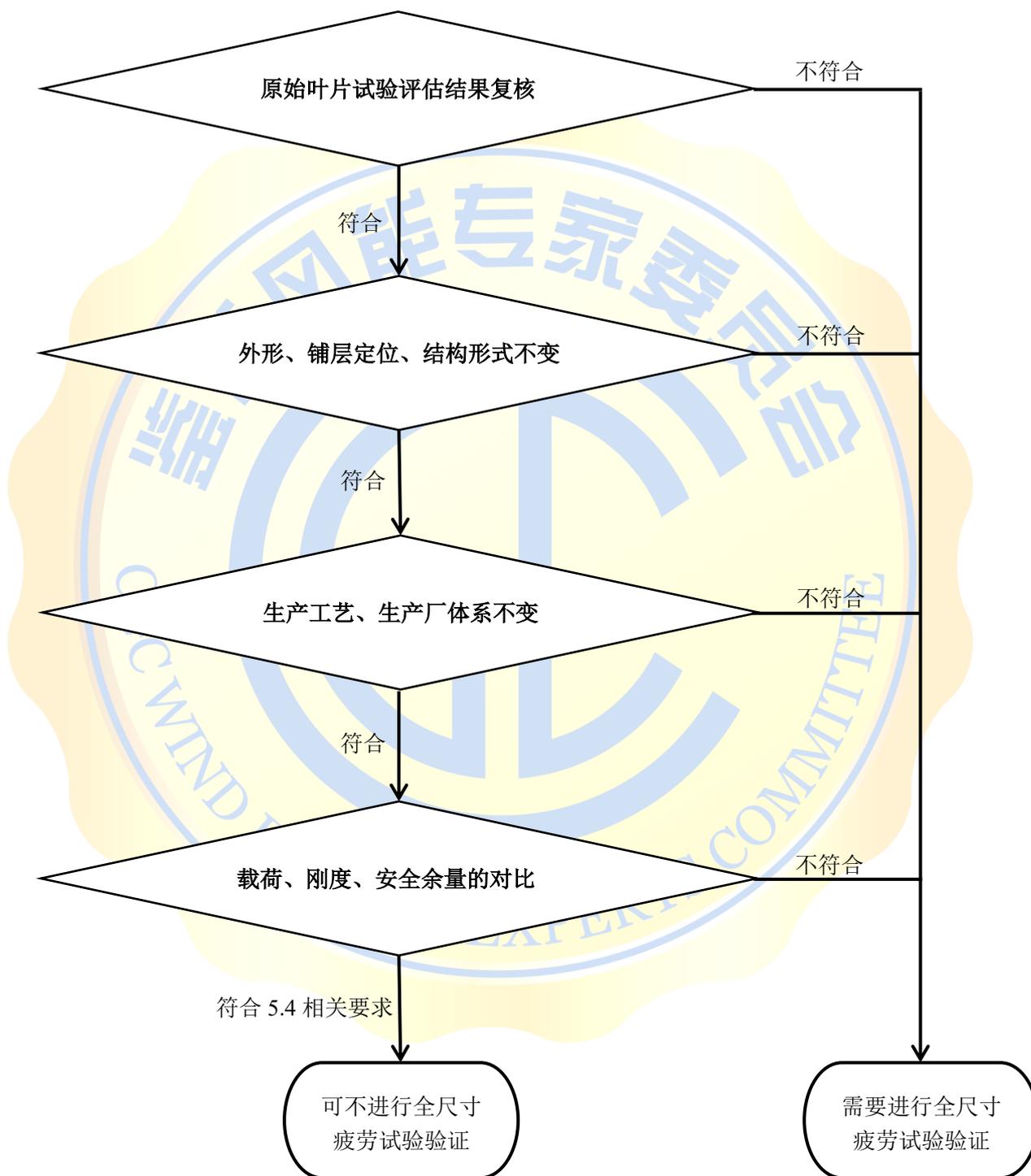
截面载荷超载系数：指疲劳试验实际载荷与设计等效疲劳的比值。

4 通用要求

对改型叶片进行疲劳强度对比分析时，首先对原始叶片的疲劳试验评估结果进行评估结果复核(如原始叶片的疲劳试验仍在进行中，改型叶片的评估结果取决于疲劳试验的验证进度)，然后在外形、铺层、工艺、疲劳载荷、刚度、安全余量等方面对改型叶片与原始叶片的差异进行对比分析。符合第 5 章节对比分析要求

的，改型叶片可不进行全尺寸疲劳试验验证，不符合的，应当进行全尺寸疲劳试验验证。

5 对比分析方法



5.1 原始叶片试验要求

- ◆ 完成全尺寸试验验证并符合第 2 部分的标准要求；
- ◆ 如因制造缺陷在试验中出现区域损伤，损伤区域的工艺应进行优化；
- ◆ 试验的偏差应不影响对比分析内容；
- ◆ 疲劳试验的相关建议：
 - 在试验中记录足够多的应变片采集数据；
 - 使用双轴疲劳试验获得应变数据；
 - 在材料级试验中测试 S-N 曲线；
 - 完成设计要求的载荷后继续试验以确认真实的疲劳极限。

5.2 外形设计、铺层设计的对比分析

对比范围应能覆盖两支或多支叶片全部的疲劳试验验证区域：

- ◆ 外形完全一致；
 - ◆ 或：叶片长度 40% 区域以及疲劳试验考察区域的外形一致
- ◆ 主要铺层定位（主梁、后缘梁、腹板）不变；如有少量定位优化，则：
 - ◆ 对比应力应变水平、损伤因子等，以确认定位优化方案比原设计更合理、更安全。
- ◆ 主要结构形式不变；
- ◆ 制造公差要求基本相同，包含：
 - ◆ 纤维角度
 - ◆ 褶皱控制要求
 - ◆ 纤维体积含量
 - ◆ 孔隙率
 - ◆ 固化温度
 - ◆ 主梁、腹板等定位公差
 - ◆ 粘接面光滑度
 - ◆ 粘接厚度
 - ◆ 粘接胶自由边形状
 - ◆ 粘接前表面的开放时间

5.3 生产工艺、生产厂体系的对比分析

- ◆ 主要工艺方式不变；
- ◆ 生产管理体系基本不变。

5.4 载荷、刚度、安全余量的对比分析

- ◆ 截面等效疲劳目标验证载荷差异对比：
 - 摆振方向不大于+5%
 - 挥舞方向不大于+10%
- ◆ 截面刚度对比变化差异：
 - 降低幅度不大于 10%，或：
 - 降低幅度大于 10%，不大于 30%时，截面刚度与疲劳载荷同步变化或刚度变化率大于载荷，根据铺层设计细节确定是否需要补充局部疲劳试验或全尺寸疲劳验证。且安全余量要求：
 - ◆ 考虑疲劳试验过程中最终每个截面的载荷超载系数，确定安全裕量的降低比例。原叶片的疲劳试验载荷能包络改型叶片的试验目标载荷（包络时需考虑载荷、刚度等多方面影响因素）
- ◆ 安全余量评估：

- 安全余量对比要求：

a) 疲劳试验设计原理

目前叶片疲劳试验的目标载荷来源于叶片设计等效疲劳载荷，在选定的区域内：

$$M_{test} \geq M_{target} = M_{eqv-design} \cdot f \cdot (N_1 / N_2)^{1/m} \quad (1)$$

例如： $f = 1.32825$ ， $N_1 = 1 \times 10^7$ ， $N_2 = 2 \times 10^6$ ， $M_{eqv-design}$ 为 N_1 次下的设计等效疲劳载荷。

疲劳试验验证的设计等效载荷为：

$$M_{verify} = \left[\frac{\sum (M_{test}^i / f)^m}{N_1} \right]^{1/m} \geq M_{eqv-design} \quad (2)$$

其中： M_{test}^i 为疲劳试验第 i 次振动载荷幅值（峰峰值）。

b) 对比要求

叶片纤维疲劳失效分析采用 Markov 矩阵作为载荷输入，计算各种截面最小破坏系数 D_{markov} ，分析中考虑均值载荷的影响。而在实际疲劳试验目标载荷确定时没有考虑均值的影响，因此在叶片疲劳试验覆盖性分析不用此分析结果。设 A 为原始叶片，B 为改型叶片。

以 N_1 次等效疲劳载荷（均值为 0）作为载荷输入，计算各截面最大破坏系数 $D_{eqv-design}$ 。

无法确定一般性转化关系，但存在一一对应关系

$$\begin{array}{l} D_{markov}^A \quad D_{eqv-design}^A \leq D_{eqv-verify}^A \\ D_{markov}^B \quad D_{eqv-design}^B \leq D_{eqv-verify}^B \end{array}$$

用 A 叶片（原始叶片）的试验验证 B 叶片（改型叶片）的设计疲劳载荷安全性（即 $D_{eqv-verify}^B$ 不存在），要求 A 叶片的验证损伤大于 B 叶片的设计损伤：

$$D_{eqv-verify}^A \geq D_{eqv-design}^B \quad (3)$$

疲劳破坏系数的计算是基于单位载荷下叶片响应进行的，引入 A 叶片（原始叶片）的试验载荷相对设计载荷的超载系数，即上面的不等式转化为：

$$M_{eqv-verify}^A \geq \frac{M_{eqv-design}^A}{D_{eqv-design}^A} \cdot D_{eqv-design}^B \quad (4)$$

表达式(3)~(4)应至少在 B 叶片（改型叶片）的关键区域（由展向位置界定）内得到满足。

- 对于使用断裂力学方法或经试验修正的疲劳公式进行计算的疲劳结果，改型叶片的安全余量或计算损伤分布应与基础型号相似或更合理。
- 按 IEC61400-5 考虑制造公差影响的疲劳损伤分析结果，改型叶片的安全余量或计算损伤分布应与基础型号相似或更合理。
- 使用应力应变水平对比疲劳性能：
 - ◆ 改型叶片大部分截面的应力应变水平应与基础型号相近，相似或更合理，考虑试验安全系数之上的试验超载，考虑实际测试的应变值；
 - ◆ 应控制使用线性 Miner 方法计算的最高损伤因子，考虑局部形状和变形等差异的影响；
- 疲劳试验方案中均值对试验造成的影响可以采用设计损伤进行对比，但改型叶片的疲劳结果仍需满足安全裕量的要求；

6 叶片的典型改型

附录 A 列举了改型叶片的几种典型变更情况，用于快速判断是否应进行新的疲劳试验验证。列举的情况均以原始叶片已完成疲劳试验并符合 5.1 的要求为前提。

附录 A

附表 A-1 改型叶片疲劳验证方式的几种典型情况

	可以不重新进行疲劳试验的典型情况	必须重新进行疲劳试验的典型情况
材料变更类	材料类型不变更，材料品牌变更，检测结果符合设计要求；	主要材料（如主梁 UD、后缘梁 UD、叶根增强三轴布材料）变更为强度、模量更小的材料，不符合材料设计要求
	防雷系统（导线、中部接闪器、叶尖接闪器等）的金属材质变更，变更后符合相关标准要求；	叶片上大量使用了行业内未广泛应用的全新品种芯材材料
	常规芯材替换或挖槽打孔方式的调整	
结构变更类	局部补强布层在原基础上增加 1-2 层，面积与原补强设计相似	疲劳验证区域内的叶片外形变更
	-	主梁和后缘梁宽度超过 10%的变更
	-	腹板数量和位置变更
工艺变更类	改型叶片的倒角要求更为平滑	使用未在行业内广泛应用的全新工艺方式
	非预制叶根变更为预制叶根，且生产厂家的预制叶根工艺已经完成过叶根疲劳试验验证。	-

注：

- 1.广泛应用的芯材指“多个企业已进行过全尺寸试验的芯材”；
- 2.若仅为局部芯材替换，建议从设计、子部件试验进行验证说明；若全叶片更换行业内未广泛使用的芯材，则建议做全尺寸疲劳试验。



CGC/TN004: 2021

风力发电机组测试功率曲线分级和应用规 则

Requirements on Classification and Application of Tested Power
Curves for Wind Turbines

2021-01-12 发布

鉴衡风能专家委员会发布



版权声明

本文的著作权属于鉴衡风能专家委员会成员单位共有，任何成员单位不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或市场宣传。对于违反此声明或者其他违法使用本文内容者，鉴衡风能专家委员会将依法追究其法律责任。





目次

1	范围.....	1
2	规范性引用文件.....	1
3	通用要求.....	1
3.1	偏离项.....	1
3.2	地形的影响.....	2
3.3	安装记录.....	3
4	分级规则.....	3
5	场景应用.....	4
5.1	评级分数为 0 的功率曲线.....	4
5.2	评级分数为 1 和 2 的功率曲线.....	4
5.3	评级分数为 3 的功率曲线.....	5
5.4	环境匹配度的影响.....	5
	附录.....	6
	附录 A 偏离项的评估.....	6
	参考文献.....	8





测试功率曲线分级和应用规则

1 范围

本规则针对风力发电机组的测试功率曲线给出对应的分级。分级基于测试功率曲线的代表性和有效性给出，使用者可以根据不同的需求在招投标、机组选型、发电量评估等不同的应用场景中选择对应等级的功率曲线。本规则适用于以 IEC61400-12 系列标准为基础进行测试的功率曲线。

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

IEC 61400-12-1:2005 风力发电机组第12-1部分：功率特性测试（Wind turbines-Part 12-1:Power performance measurements of electricity producing wind turbines）

GB/T 18451.2-2012 风力发电机组功率特性测试

IEC 61400-12-1:2017 风力发电机组第12-1部分：功率特性测试（Wind turbines-Part 12-1:Power performance measurements of electricity producing wind turbines）

IEC 61400-12-2:2013 风力发电机组第12-2部分：基于机舱风速计的功率特性测试（Wind turbines-Part 12-2:Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry）

3 通用要求

目前功率曲线测试，尤其是在运行的风电场进行测试时，往往面临一些困难，例如复杂地形的风电场，由于机组已经吊装，因此无法按照标准进行场地标定，或者其它客观原因导致的标准偏离；即使测试满足标准要求，但是如果测试场地过于复杂，场地标定可能无法完全解决气流畸变修正的问题。基于这些考虑，本规则对测试的影响因素进行评分，最终给出总评分作为分级的依据。

3.1 偏离项

当测试不满足标准要求时，测试机构应对偏离项进行评估，并给出偏离项对测试结果的影响，例如可以通过测量不确定度给出。并非所有的偏离项都会对测试结果产生影响，但是测试机构应给出令人信服的证据；类似的，并非所有的标准偏离项都可以给出量化的影响程度，当测试机构无法对偏离项所导致的影响进行评估时，使用者应限制此类功率曲线的使用范围。

实验室在处理偏离项时应遵循 CNAS-CL01:2018《检测和校准实验室能力认可准则》中 7.2“方法的选

择、验证和确认”中的原则，关于功率曲线测试中偏离项的评估建议在附录 A 中给出。

3.2 地形的影响

地形的影响体现在测量风速的代表性上。IEC61400-12-1 标准中要求在复杂地形下测试必须先进行场地标定建立气流修正关系，但是场地标定并不能完美解决气流畸变的问题。IEC61400-12-1,2005 版标准中场地标定修正系数的计算方式是每个 10° 扇区求出一个机组处风速和参考风速的比值： $\alpha = V_{turbine} / V_{ref}$ 。但是这种方法忽略了机组处和测试塔处的风廓线相关性对气流修正关系的影响，因此 IEC61400-12-1,2017 版标准中重写了场地标定的方法，考虑了风剪切在场地标定中的作用，使得气流修正关系的计算更加精确，但是代价是更多的数据量以及更长的测试周期。

相比与 IEC61400-12-1 的 2005 版本，IEC61400-12-1 的 2017 版标准在场地标定中加入了风廓线相关性的考虑，理论上确保了测量风速的代表性问题，因此复杂地形下场地标定推荐使用该版本标准。

对于极端复杂的地形，场地标定对气流修正的效果可能有限，IEC61400-12-1,2017 版标准中指出了这样的问题，并在 C.3.1 中给出了 3 类复杂程度不同的地形划分，即 Type A，Type B 和 Type C，其中 Type C 属于极度复杂地形，标准指出在该地形下测风塔和机组处的风速相关性可能非常糟糕，因此测试结果可能会很发散并具有一定的不确定度。

IEC61400-12-1 中仅对这 3 类地形给出了文字描述，并无量化的参数，因此本规则参考 IEC61400-12-2 中 6.3.4 章节对于地形等级的划分，给出这 3 类地形等级的定义。IEC61400-12-2 使用了 2 个指标得到最终的地形等级划分：第一个是坡度，见表 3-1，第二个是 RIX（粗糙度等级），见表 3-2。

表 3-1 坡度地形分级 (IEC61400-12-2: 2013)

绝对坡度 (%)	坡度地形分级
符合 IEC61400-12-1:2005 附录 B (L=2.5D)	1
$0^\circ \leq \text{坡度} < 10^\circ$ ，但不是 1 等级	2
$10^\circ \leq \text{坡度} < 15^\circ$	3
$15^\circ \leq \text{坡度} < 20^\circ$	4
$20^\circ \leq \text{坡度}$	5

表 3-2 RIX 地形分级 (IEC61400-12-2: 2013)

RIX (%)	RIX 地形分级
符合 IEC61400-12-1:2005 附录 B (L=2.5D)	0
$RIX_{0.04} < 16$ 并且 $RIX_{0.06} < 8$ 并且 $RIX_{0.08} < 4$ ，但不是 0 等级	1
$RIX_{0.04} < 32$ 并且 $RIX_{0.06} < 16$ 并且 $RIX_{0.08} < 8$ ，但不是 1 等级	2
$RIX_{0.04} < 48$ 并且 $RIX_{0.06} < 32$ 并且 $RIX_{0.08} < 16$ ，但不是 2 等级	3
$RIX_{0.04} \geq 48$ 或者 $RIX_{0.06} \geq 32$ 或者 $RIX_{0.08} \geq 16$	4

综合坡度地形等级和 RIX 地形等级，最终地形分级见表 3-3。

表 3-3 最终地形分级 (IEC61400-12-2: 2013)

坡度地形等级	RIX 地形等级				
	0	1	2	3	4
1	1	2	3	4	5
2	2	3	4	5	5
3	3	4	5	5	5
4	4	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5

本规则利用表 3-3 (IEC61400-12-2 标准 Table3) 中的最终分级, 给出不同地形的定义:

- Type A: 按表 3-3 (IEC61400-12-2 标准 Table3) 最终地形分级为 1 的地形
- Type B: 按表 3-3 (IEC61400-12-2 标准 Table3) 最终地形分级为 2 或 3 的地形
- Type C: 按表 3-3 (IEC61400-12-2 标准 Table3) 最终地形分级为 4 或 5 的地形

Type B 和 Type C 类型的地形均为复杂地形, 其中 Type C 地形属于极度复杂地形, 在这些地形下测试的功率曲线, 使用者应考虑风速代表性对测试结果的影响。

3.3 安装记录

当测试与预期不一致时, 通过对安装记录的追溯可以确认测试过程中可能存在的问题, 并确保测试是按照标准执行的。不完整的安装记录将导致测试结果的有效性受到质疑, 因此当受到质疑时, 如果测试机构无法提供完整的安装记录, 使用者应限制测试结果的使用范围。

4 分级规则

本规则考虑按照标准要求 and 偏离标准要求执行测试的 2 种情况, 并在此基础上根据各自的影响因素进行测试功率曲线的分级, 分级规则在表 4-1 中列出。

表 4-1 分级规则

测试条件	影响因素	等级划分	评级分数
I 与标准偏离	偏离项	影响可忽略	0
		有影响, 可量化	1
		有影响, 不可量化	3
II 满足标准要求	地形	Type A 及平坦地形	0
		Type B, 按照 IEC61400-12-1, 2017 版进行	0

测试条件	影响因素	等级划分	评级分数
		场地标定	
		Type C, 按照 IEC61400-12-1,2017 版进行场地标定	1
		Type B 或 Type C, 按照 IEC61400-12-1,2005 版进行场地标定	2
测试过程控制: 安装记录		<ul style="list-style-type: none"> 能够进行与标准一致性的核查 缺少必要的信息, 无法完成核查 	0 3
测试功率曲线根据评级分数总和进行分级 <ul style="list-style-type: none"> 0: 理想的功率曲线 1~2: 使用中需要考虑修正 3: 仅可作为非定量分析的场景使用 			评级分数总和: 每一个影响因素对应的评级分数求和, 总和大于 3 时按 3 计算

测试功率曲线的分级按照每个影响因素的评级分数总和给出, 评级分数总和为表 4-1 中最后一列的分数求和, 但是上限为 3, 即如果求和之后总分大于 3, 仍然按 3 计算。根据评级分数总和, 测试功率曲线划分为如下等级:

- 0: 理想的功率曲线, 可评为 A 级
- 1~2: 使用中需要考虑修正, 可评为 B 级
- 3: 仅可作为非定量分析的场景使用, 可评为 C 级

5 场景应用

5.1 评级分数为 0 的功率曲线

按表 4-1 评级为 0 的功率曲线是最理想的情况: 功率曲线测试与标准没有偏离, 测试场地平坦, 环境条件与应用场景匹配, 测试过程的记录完整。通常而言, 此类功率曲线具有相对较小的测量不确定度, 测量风速的代表性较好, 因此能够应用于对发电量估算的准确性的要求较高的应用场景, 以及其他需要定量分析的场景。

以下应用场景中, 本规则建议只使用评级为 0 的功率曲线:

- 涉及到以发电量评估为基础的机组选型, 例如招投标项目
- 以发电量评估作为核算依据的商业行为, 例如功率曲线考核项目

5.2 评级分数为 1 和 2 的功率曲线

按表 4-1 评级为 1 和 2 的功率曲线同样可以应用到 5.1 所描述的应用场景, 但需要考虑标准偏离, 地形等级以及环境条件适应性对发电量评估造成的影响。

5.3 评级分数为 3 的功率曲线

当偏离项造成的影响无法量化，实验室无法提供可用于核查的安装记录，或者是地形，偏离项和环境匹配性的综合影响过大时，功率曲线的评级为 3。该类型的功率曲线不应用于对发电量估算的准确性的要求较高的应用场景，以及其他需要定量分析的场景。以下场景可以应用评级为 3 的功率曲线：

- 企业内部的研发项目，不需要对发电量有准确的估算
- 双方事先约定好的，认可无法对发电量准确估算的项目

5.4 环境匹配度的影响

同一台（型号）机组的测试功率曲线在不同季节（地点）的测试结果可能有显著差异，其中环境条件的差异是无法忽略的，因此将测试功率曲线应用于另外一个环境条件差异较大的场地会对发电量估算产生影响。本规则建议在功率曲线评价中（例如在功率曲线验证的合同中明确）考虑环境参数的筛选条件，其中包括：

- 湍流强度的定义及选取范围
- 风剪切的定义及选取范围

当环境条件不匹配时，使用者应根据实际情况对发电量估算进行修正。该要求可能会对测试数据进行筛选，若无足够的测试数据可能无法满足环境条件匹配性的要求。



附录

附录 A 偏离项的评估

当测试不满足标准要求时，实验室应按照 CNAS-CL01:2018《检测和校准实验室能力认可准则》：7.2“方法的选择、验证和确认”中的原则进行处理。在具体的项目中偏离项应结合实际情况进行相应的分析，一般来说偏离项可以分为如下情况：

1 偏离项对测试结果产生的影响可以评估，且该评估方法是经过验证并在被行业广泛认可的，此时偏离项的评级应为 1 或 0

2 偏离项对测试结果产生的影响无法评估，或者评估方法未被行业认可，此时偏离项的评级为 3

对于第 1 种情况的偏离项，以下给出了几个案例：

- 风速计支撑杆直径

IEC61400-12-1,2017 标准中规定，测风塔上安装的风速计的支撑杆外径应与其在风洞标定中使用的支撑杆外径一致，误差不得超过 $\pm 0.1\text{mm}$ 。事实上，由于制造的公差，不同国家钢材标准尺寸不同等原因，测试中几乎无法满足此要求。为此 Deusch Windguard 利用风洞试验对该要求进行了测试，结果证明即使是更大的杆件外径偏差也不会对测试结果造成影响[1]。该结论在 IECRE 风电实验室工作组中进行了讨论并获得了一致的同意。

- 温湿度和气压修正

当气压传感器安装在靠近地面的平台时，可以通过 ISO2533 中的大气模型将其修正至轮毂高度处，由此带来的不确定度可以估计，例如 IEC61400-12-1,2017 版的 E.10.9 中给出的不确定度估计方法是修正值的 10%。对温湿度和气压的高度修正已经成为行业内普遍认可的做法。

- 切入风速以下 BIN 区间的样本数不足 3 个

一些大兆瓦机组的切入风速往往较低（例如 2.5m/s），在某些风场的测试中切入风速以下 1m/s 的 BIN 区间的测试样本可能很难捕获，但是机组在该 BIN 区间几乎不会处于发电状态，对测试结果的影响可能微乎其微，因此在评估过不确定度后该偏离项是可接受的。

- 额定功率之后的 BIN 区间数据量

相比对于 IEC61400-12-1,2005 版本，IEC61400-12-1,2017 版本对于数据完整性的判定增加了一条：对于变速变桨机组，当测试数据达到满发之后，连续 3 个 BIN 区间的平均功率变化不超过 0.5%或者 5kW，并且这 3 个 BIN 区间功率没有呈现上升趋势，此时可以认为数据量满足要求。对于使用 2005 版标准进行测试的项目而言，本规则认为使用 2017 版本标准的数据库判定条件也是可以接受的。

对于第 2 种情况的偏离项，以下是一些常见的案例：

- 复杂地形未按标准要求进行场地标定（虽然 CFD 方法可以建立气流畸变的修正关系，但是目前尚无系统性的结论）

-
- 未按 IEC61400-12-2 的要求使用机舱风速计进行风速测量



参考文献

- [1]. Roß, M. Sc., Influence of mounting tube diameter on anemometer output, VT180177_01_Rev0, 2018-04-06

