

# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—202X/IEC 61400-5:2020

---

## 风能发电系统 风力发电机组风轮叶片

Wind energy generation systems—Wind turbine blades

(IEC TR 61400-21-3:2019, (IEC 61400-5:2020, Wind energy generation systems—Part 5: Wind turbine blades, IDT), IDT)

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 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 .....	II
引言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语与定义 .....	2
4 标识 .....	4
4.1 符号 .....	4
4.2 希腊符号 .....	4
4.3 下标 .....	4
4.4 坐标系 .....	5
5 设计环境条件 .....	6
6 设计 .....	6
6.1 结构设计流程 .....	6
6.2 叶片特征 .....	10
6.3 气动设计 .....	11
6.4 材料要求 .....	12
6.5 设计制造 .....	15
6.6 结构设计 .....	16
7 制造要求 .....	30
7.1 制造工艺 .....	31
7.2 车间要求 .....	31
7.3 质量管理体系要求 .....	33
7.4 制造工艺要求 .....	33
7.5 天然纤维增强风轮叶片的制造 .....	37
7.6 其它制造工艺 .....	37
7.7 质量控制过程 .....	37
7.8 制造评估要求 .....	40
8 叶片安装，运行及维护 .....	40
8.1 概述 .....	40
8.2 运输吊装 .....	41
8.3 维护 .....	41

## 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 61400-5:2020《风能发电系统 第5部分：风力发电机组风轮叶片》。

本文件代替 GB/T 25383-2010《风力发电机组 风轮叶片》，与 GB/T 25383-2010 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 更改了.....
- b) 增加了.....
- c) 删除了.....

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：中材科技风电叶片股份有限公司、金风科技股份有限公司、中船海装风电有限公司.....

本文件主要起草人：

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——2010年首次发布为 GB/T 25383-2010；

——本次为第一次修订。

## 引 言

风轮叶片通常被视为风力发电机组中最关键部件之一。本标准定义了风轮叶片设计和制造的最低要求。

在叶片特性、气动设计、材料要求和结构设计的一般领域，本标准提出了一种结构化的过程方法。此外，为了有效地促进叶片设计更贴近生产环境，本标准提出了为制造而设计的要求。

风轮叶片的结构设计要求以一种得益于创新、验证、质量和测试的方式开展。具体来说，在原有校核的基础上，设计人员可以通过额外的模型验证和测试关联来选择更低的局部安全系数。

为确保叶片能够在与设计要求一致的环境中生产，本标准中的制造要求部分提出了对质量管理体系和车间的最低限度要求。此外，在本标准的结尾处定义了叶片安装、运行和维护的要求。



# 风能发电系统 风力发电机组风轮叶片

## 1 范围

IEC 61400 的本部分，规定了确保风轮叶片工程完整性要求和全设计生命周期中适当的运行安全级别。包括对以下部分的要求：

- 气动和结构设计；
- 材料选择、评估和测试；
- 制造（包括相关质量管理）；
- 叶片的运输、安装、运行和维护。

本文件的目的是为叶片设计方、制造商、采购商、运营方、第三方机构以及材料供应商提供技术参考，并定义认证要求。

关于认证，本标准提供了详细依据以满足 IECRE 以及与风轮叶片相关的其他 IEC 标准。用于认证时，标准各部分的适用性应根据认证的范围以及 IECRE 系统的相关认证模块来确定。

风轮叶片定义为在叶片设计中所有部件的集成，但不包括叶片根部连接的可拆卸螺栓和安装支撑结构。

本文件适用于所有风力发电机组叶片。对用于小型风机的风轮叶片可参照 IEC61400-2 标准要求。

在本文件编制时，大多数叶片是为水平轴风力发电机生产的，这些叶片主要材料体系为纤维增强塑料（FRP）。然而，本标准给出的大多数原则适用于任何叶片的配置、尺寸和材料。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）适用于本文件。

IEC 60050-415 国际电工词汇（IEV）第 415 部分：风力发电机组（International Electrotechnical Vocabulary（IEV）- Part 415: Wind turbine generator systems）

注：GB/T 2900.53-2001 电工术语风力发电机组（IEC 60050-415：1999，IDT）

IEC 61400-1 风能发电系统 第 1 部分：设计要求（Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements）

注：GB/T 18451.1-2022 风力发电机组 设计要求（IEC 61400-1：2019，IDT）

IEC 61400-2 风力发电机组 第 2 部分：小型风力发电机组（Wind turbines - Part 2: Small wind turbines）

注：GB/T 17646-2017 小型风力发电机组（IEC 61400-2：2013，IDT）

IEC 61400-3-1 风能发电系统 第 3-1 部分：固定式海上风力发电机组设计要求（Wind energy generation systems - Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines）

注：GB/T 31517.1-2022 固定式海上风力发电机组 设计要求（IEC 61400-3-1：2019，IDT）

IEC 61400-3-2 风能发电系统 第 3-2 部分：漂浮式海上风力发电机组设计要求（Wind energy generation systems - Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines）

注：GB/Z 44047-2024 漂浮式海上风力发电机组 设计要求（IEC TS 61400-3-2：2019，IDT）

IEC 61400-23 风力发电机组 第 23 部分：风轮叶片全尺寸结构试验（Wind turbines - Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades）

注：GB/T 25384-2018 风力发电机组 风轮叶片全尺寸结构试验（IEC 61400-23：2014，IDT）

IEC 61400-24 风能发电系统 第 24 部分：雷电保护（Wind energy generation systems - Part 24: Lightning protection）

注：GB/T 33629-2017 风力发电机组 雷电保护（IEC 61400-24: 2010, IDT）

ISO/IEC 17021-1 合格评定 管理体系审核认证机构要求 第 1 部分：要求（ISO/IEC 17021-Conformity assessment — Requirements for bodies providing audit and certification of management systems- Part 1: Requirements）

注：GB/T 27021.1-2017 合格评定 管理体系审核认证机构要求 第 1 部分：要求（ISO/IEC 17021-1: 2015, IDT）

ISO 10474 钢和钢成品 检验文件（Steel and steel products - Inspection documents）

注：GB/T 18253-2018 钢及钢产品 检验文件的类型（ISO 10474: 2013, IDT）

ISO 2394 结构可靠性的一般原则（General principles on reliability for structures）

ISO 9000 质量管理体系 基础和术语（Quality management systems - Fundamentals and vocabulary）

注：GB/T 19000-2016 质量管理体系 基础和术语（ISO 9000: 2015, IDT）

ISO 9001 质量管理体系 要求

注：GB/T 19001-2016 质量管理体系 要求（ISO 9001: 2015, IDT）

EN 10204 金属产品 检查文件种类（Metallic products - Types of inspection documents）

ISO 16269-6 数据的统计说明 第 6 部分：统计容许区间的测定（Statistical interpretation of data — Part 6: Determination of statistical tolerance）

注：GB/T 3359-2009 数据的统计处理和解释 统计容忍区间的确定（ISO 16269-6: 2005, IDT）

### 3 术语与定义

IEC 60050-415 界定的以及下列术语与定义适用于本文件。

ISO 和 IEC 维护术语数据库以用于标准化，地址如下：

- IEC 电工百科：<http://www.electropedia.org/>
- ISO 在线浏览平台：<http://www.iso.org/obp>

#### 3.1

**叶根 blade root**

叶片上与轮毂相连的部分。

#### 3.2

**叶片子系统 blade subsystem**

能够完成定义于叶片上的目标或功能的项目集合（例如雷电防护子系统、气动刹车子系统、监控子系统、气动控制子系统等）。

#### 3.3

**屈曲 buckling**

一种失稳失效模式，其特征是随压缩载荷的变化面外挠度呈非线性增加。

#### 3.4

**特征值 characteristic value**

无法按既定概率达到的数值（即小于或等于既定概率可以达到的数值）。

#### 3.5

**弦长 chord**

连接叶片翼型剖面前缘点和后缘点的参考直线长度。

#### 3.6

**蠕变 creep**

在持续载荷作用下，应变随时间增加而增加的现象。

- 3.7  
设计极限 design limit  
在设计中使用的最大值或最小值。
- 3.8  
设计载荷 design loads  
在设计时确定的叶片应承受的载荷，包括适当的局部安全系数。
- 3.9  
设计属性 design properties  
材料和几何属性（包括设计极限）。
- 3.10  
（弦长坐标系）摆振方向 edgewise  
与局部弦长平行的方向。
- 3.11  
环境条件 environmental conditions  
可能影响叶片的环境特征（风、海拔、温度、湿度等）。
- 3.12  
（叶片坐标系）挥舞方向 flapwise  
与未变形叶片轴线旋转扫掠平面垂直的方向。
- 3.13  
（弦长坐标系）挥舞方向 flatwise  
沿叶片轴线分布并垂直于局部弦线的方向。
- 3.14  
内侧 inboard  
朝向叶根的一侧。
- 3.15  
（叶片坐标系）摆振方向 lead-lag  
与风轮扫掠面平行且与未变形叶片的纵轴垂直的方向。
- 3.16  
极限状态 limit state  
结构承受负载的极限，负载再增加，结构就不再满足设计要求的状态。
- 3.17  
载荷包络 load envelope  
在所有截面方向和展向位置的最大设计载荷的集合。
- 3.18  
固有频率 natural frequency, eigen frequency  
当结构受扰动后自由振动时表现出的频率。
- 3.19  
局部安全系数 partial safety factors  
考虑特征值的不确定度时用于载荷和材料强度的系数。
- 3.20  
预弯曲 prebend  
无加载时，叶片在（叶片坐标系）挥舞平面内的弯曲。
- 3.21  
展向 spanwise

与叶片纵轴平行的方向。

### 3.22

**刚度** *stiffness*

弹性物体上载荷的变化与对应的位移变化之比

### 3.23

**应变** *strain*

用以描述材料变形程度的力学量，线应变等于材料伸长量与原长之比，切应变等于材料直角单元变化角度（弧度）。

### 3.24

**扫掠** *sweep*

无加载时，叶片在（叶片坐标系）摆振方向平面内的弯曲。

### 3.25

**扭角** *twist*

叶片截面弦线的角度在展向的变化。

### 3.26

**关键质量特性** *CTQ*

可测量的过程或设计值，以及特定的关键验收标准。

## 4 标识

### 4.1 符号

F	载荷
F <sub>d</sub>	载荷设计值
F <sub>k</sub>	载荷特征值
R	材料或结构对相应极限状态的阻抗
R <sub>k</sub>	材料特征阻抗
PSF	局部安全系数
S ( )	结构对载荷的响应函数
T <sub>g</sub>	玻璃化转变温度
p <sub>⊥</sub> ( - )	Puck 负倾角参数
p <sub>⊥</sub> ( + )	Puck 正倾角参数

### 4.2 希腊符号

γ	局部安全系数
---	--------

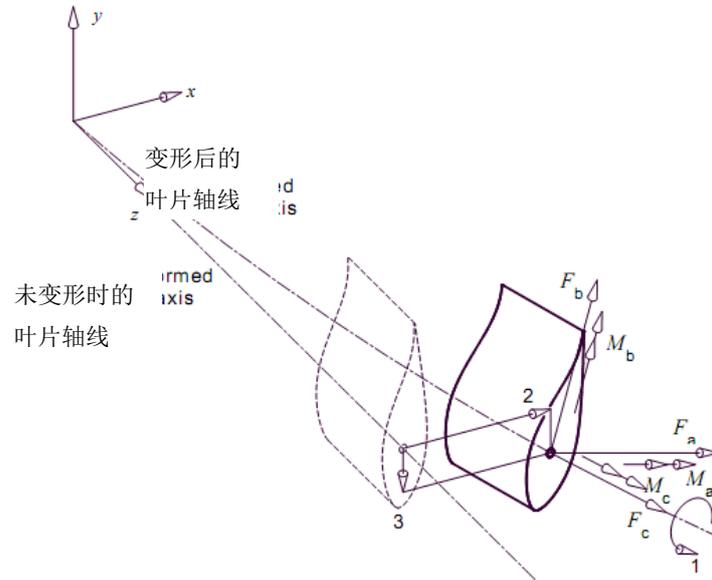
### 4.3 下标

m	材料
m0	基础材料因子（所有分析中均应包含）
m1	考虑环境对材料的影响（不可逆）
m2	考虑温度对材料的影响（可逆）
m3	考虑制造对材料的影响
m4	考虑计算精度和验证方法对材料的影响。
m5	考虑受载特性对材料的影响
n	失效后果因子

f 载荷系数

#### 4.4 坐标系

图 1 和图 2 展示了载荷与设计参考的坐标系。



说明:

沿着/垂直于叶片局部弦长的载荷

$M_a$ ——弦长坐标系摆振弯矩

$M_b$ ——弦长坐标系挥舞弯矩

$M_c$ ——扭转弯矩

$F_a$ ——弦长坐标系挥舞剪力

$F_b$ ——弦长坐标系摆振剪力

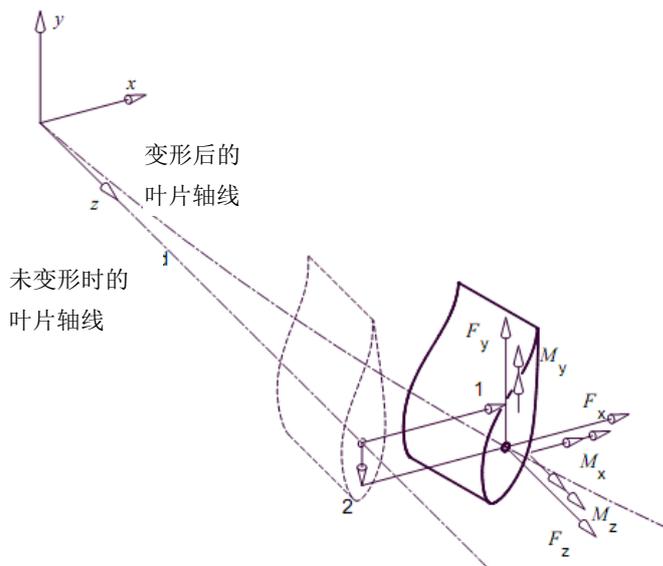
$F_c$ ——轴向力

1——扭角

2——叶片坐标系挥舞转化

3——叶片坐标系摆振转化

图 1 弦长坐标系



说明:

沿着/垂直于风轮平面参考方向的载荷

$M_x$ ——叶片坐标系摆振弯矩

$M_y$ ——叶片坐标系挥舞弯矩

$M_z$ ——扭转变矩

$F_x$ ——叶片坐标系挥舞剪力

$F_y$ ——叶片坐标系摆振剪力

$F_z$ ——轴向力

1——叶片坐标系挥舞转化

2——叶片坐标系摆振转化

图 2 叶片坐标系

## 5 设计环境条件

环境条件可能影响风轮叶片的受载、耐久性和运行。为确保合适程度的安全性与可靠性，应在设计文件中考虑并在设计文件中明确说明设计环境条件，包括但不限于在 IEC 61400-1，IEC 61400-3-1 或 IEC 61400-3-2，以及 IEC 61400-24（雷电防护）中所规定的环境条件。

环境条件分为正常运行环境和极端环境。正常运行环境通常是指复现性高的结构受载条件，而极端的环境条件则代表少见的外部设计条件。IEC61400-1 和 IEC 61400-3-1 或 IEC 61400-3-2 中定义的设计载荷工况包括这些环境条件下风机运行模式及其他设计情况的组合。

当设计人员定义了上述标准中未列出的额外环境条件时，应在设计文件中明确环境条件的变量及数值。

应注意这些环境条件在产品生命周期的不同阶段（制造、运输/储存、安装、操作或拆除）可能有所不同。

## 6 设计

### 6.1 结构设计流程

#### 6.1.1 一般要求

结构设计流程应确保满足叶片设计寿命内承载所需的运行安全等级。

为确保设计流程中的假设条件在制造过程中得到满足并遵守，应对设计进行充分的描述和规定。允许制造公差和验收标准应由设计者制定并在设计文档中指明。

如果可以合理证明风力发电机系统安全性不受损害，本规范中的要求均可修改。

### 6.1.2 复合材料结构设计的构建块方法

纤维增强材料结构的传统的详细设计方法，即解析和数值计算结合通过验证的材料性能和全尺寸叶片测试，可以通过构建块方法强化：从材料试样测试开始、分析和测试更复杂的结构，直到最终的全尺寸叶片测试。构建块法如图3所示，可用更复杂的测试来评估更复杂的载荷条件和失效模式。

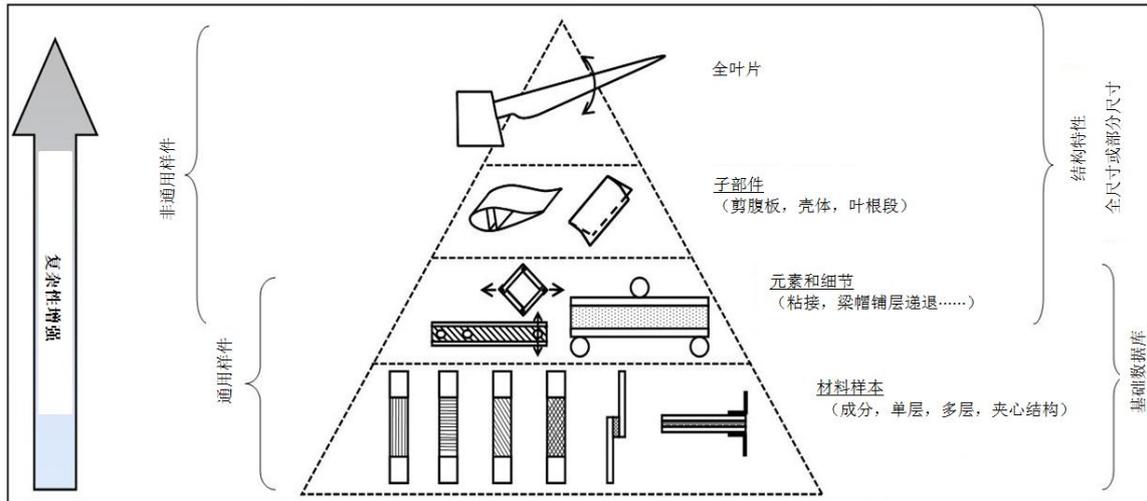


图3 构建块方法

方法总结如下：

**材料试样：**对材料试样进行大量测试，以得到重复可信的物理特性，对组分材料制定采购规范，并对层合板/层合板制品制定设计变量的许用值。

**元素和细节：**对设计分析确定的危险区域，制备等效样件，在设计条件下做进一步测试和分析，例如梁帽-剪腹板粘接区或梁帽铺层错层区。

**子部件：**对代表叶片设计的部件或截面进行测试以评估其载荷工况及失效模式，例如主梁、蒙皮或叶根段；测试部件可以是整体或局部缩放，只需保证测试部件的代表性。

**全叶片：**对代表设计的全尺寸叶片或叶片主要部分进行测试以评估其载荷工况和失效模式；叶片可以是整体或局部缩放，只需保证其代表性。

每级所需的测试数量应按照设计要求单独定制，叶片设计方应负责为每个阶段制定合理数量的测试。

元件、细节和子部件级别的测试将增强结构设计的可信度。

对于任何级别（材料试样、子部件等）测试中获取的设计值（强度、刚度等），其有效性应被最终设计中的接收准则<sup>1</sup>和许用公差描述与限定。

### 6.1.3 叶片设计流程概述

<sup>1</sup> 接收准则说明（举例）：对于测试疲劳强度的样件，验收标准包括原材料（与样件相关的材料）的定义，纤维体积分数、纤维排列角度、生产和加工过程等。

图 4 展示了一个典型的叶片设计与分析校核流程，仅作为示意；除图中所示步骤之外，设计流程还可能包括关键输入项的开发，例如翼型气动性能的建立和材料特征属性的描述。

图中所示迭代过程仅为示意，并不能代表所有设计过程。例如，如果对气动设计性能评估不满意，设计者可能会重新考虑使用的翼型（如图中所示），或在气动设计流程中的另一个步骤迭代。

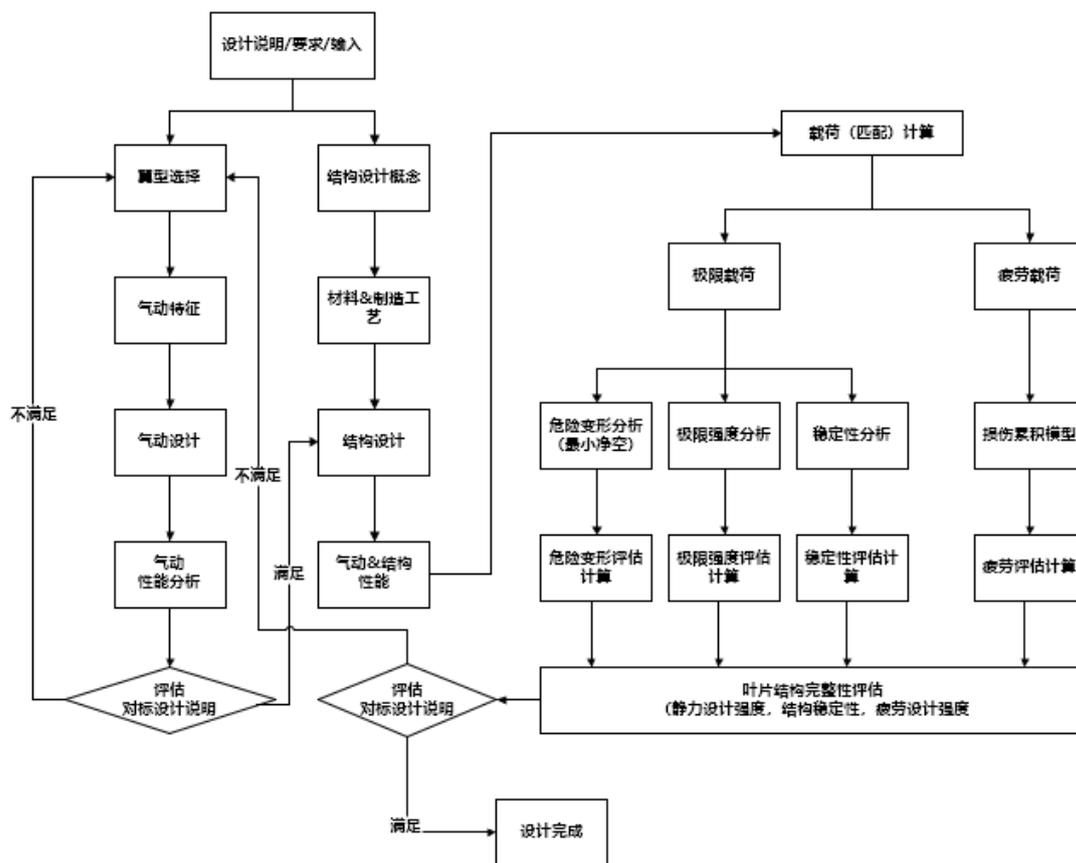


图 4 典型叶片设计与分析评估过程

如图 4 所示，为避免特定失效模式的发生，需对叶片结构完整性进行评估；该评估可基于分析、测试或分析与测试的结合（参见构建块方法，第 6.1.2 章）。这也符合 IEC 标准（如，IEC61400-1，IEC61400-3-1，IEC61400-3-2）中要求使用的极限状态设计法。

一般来讲，极限状态设计法包含施加载荷后的特征结构响应（如应力、应变或挠度）和这些响应的阻抗（如强度、刚度）。分项安全系数（PSFs） $\gamma$ ，用于考虑计算得到的响应和阻抗的不确定性，使得超过极限状态的概率降低至可以接受的水平。

特征载荷考虑了发生几率的预期。设计载荷定义为与载荷分项安全系数 $\gamma$ 的乘积。阻抗通常是关于材料属性的方程。特征阻抗是由测试结果计算得到，根据 ISO 16269-6，默认为 95%超越率和 95%置信度。若使用已知或未知的总体标准偏差的统计公差限制因素，应予以说明。

完整叶片结构中材料所体现的结构材料阻抗可能与在材料样本级中的测量值不同。在某些情况下，这可能是由于比例、形状和加载情况的影响。其他影响可能包括材料特性的变化（例如成分、力学性能和纤维方向）。材料分项安全系数 $\gamma_m$ 旨在弥补基于材料样本的阻抗和基于完整叶片的阻抗间的差异。6.6.4 章给出了 $\gamma_m$ 的详细定义。

根据 IEC61400-1，表现失效后果的分项安全系数 $\gamma_n$ 必须考虑。一般来说， $\gamma_n$ 用来表征响应的增长或阻尼的下降，如图 5 所示。

所有的校核中，响应的设计值不得超过阻抗的设计值。图 3 中这两者之间间隔了储备裕度。校

核要求安全裕度大于等于零。

对于某些极限状态，材料属性和抵御极限状态下失效的阻抗之间关系并非线性（例如，断裂力学和屈曲分析）。对于这些情况，PSFs 只在他们与承载能力呈如下方程所示线性关系时适用：

$$S(\gamma_f \cdot F_k) \leq \frac{R_k}{\gamma_m \gamma_n} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

S——结构对荷载响应的函数；

Rk——材料的特征阻抗。

这个普遍性方程如图 5 所示，其中，分项安全系数应用于荷载的结构响应与极限状态下的阻抗的关系中。

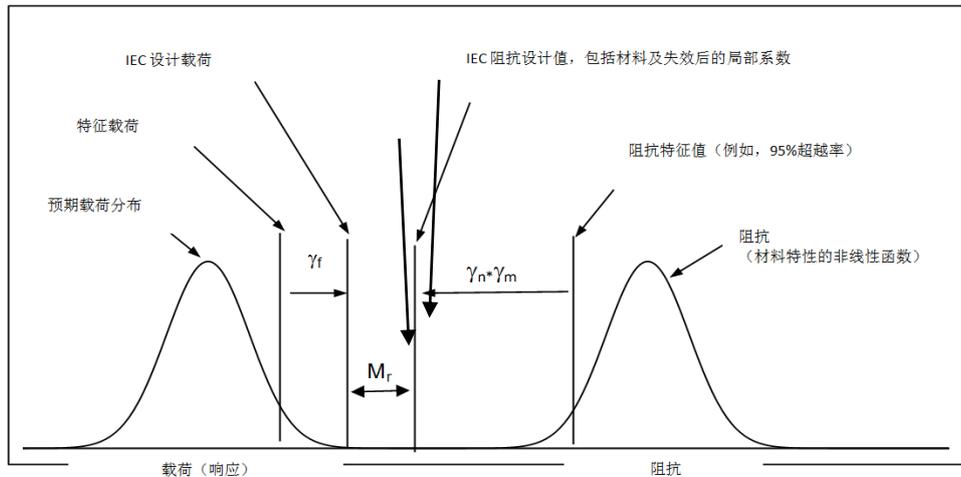


图 5 叶片验证的极限状态设计方法

材料阻抗可以用应力或应变表示。

如章节 6.6 中所述， $\gamma_m$  体现了总体阻抗的不确定性的影响。本标准编制时，图 3 中所示内容与典型的行业实践一致，即由材料样本级测试测定材料属性得到的材料阻抗在通过 $\gamma_m$  转化到叶片级别后能够覆盖广泛范围内的不确定性。由多种可能的策略可以降低由原材料级别的属性转化到产品叶片阻抗过程的不确定性。

例如，积木法将失效模式和极限状态结合考虑，通过对更大对象和更高复杂度进行测试来降低不确定性。测试得到的强度和稳定性结果将确定材料样本和子部件的失效模式，并与解析法的校核结果相比较。

### 6.1.4 设计荷载

#### 6.1.4.1 设计包络

叶片的设计荷载可以指定用于单一风力发电机的设计，也可以用更广泛的包络荷载的形式覆盖一系列风力发电机组的设计。

定义的荷载/荷载包络应基于 IEC61400-1 第 7 章的设计荷载工况，包含非操作工况（如运输、装卸、安装、维修、附件点荷载等）。对于海上机组，应满足 IEC 61400-3 的要求。

#### 6.1.4.2 荷载相互作用

叶片的结构特性与其气动荷载及机组控制器相关。为了叶片在旋转和静止状态下的安全运行，荷载计算中应确保考虑由气动荷载、结构与机组控制（转速，变桨角度等）间相互作用引起的任

何失稳（如颤振）或共振。

叶片的结构设计应反映叶片定义的载荷包络，结构校核应当证明叶片能够承受指定的极限和疲劳设计载荷。

### 6.1.4.3 载荷包络

由于风轮叶片结构的不对称性，分析中假定的载荷可能不能反映任一失效模式中的最危险的加载方向。如下两种方法可考虑最危险加载方向。

- 基础方法：使用四组与叶片挥舞及摆振方向相对应的极限载荷（矩和力），载荷的角度需要考虑。对于特定的校核，这种方法可能不足以覆盖组合载荷的最危险方向，这点应在设计中予以考虑；
- 高级方法：在每个截面内考虑所有可能的潜在危险载荷方向。如果不对载荷危险程度做进一步分析，一组至少十二个方向平均分布的载荷是满足该方法要求的。

极限载荷包络的组成通常不是同时发生的（同时发生），因此载荷包络代表一个保守的条件。该保守性可以通过对构成极限载荷的每一同时期载荷分别进行结构评估来降低。

一般而言，对合弯矩进行设计就足够了。但合弯矩在所有失效模式下可能不是最危险的载荷类型。例如，粘接强度校核中最大剪切力为最危险载荷。设计中也应考虑扭转载荷。

为确保载荷涵盖足够的沿翼型展向方向的截面，应提供至少 12 个沿叶片长度方向（展向）截面的载荷。

对于叶根至 85% 叶片长度范围内的截面，载荷的截面的展向距离应不大于截面最小弦长的 2.0 倍。

截面的选择应考虑几何或刚度的变化。

## 6.2 叶片特征

### 6.2.1 叶片属性

叶片的结构和气动属性对叶片和涡轮的气动弹性载荷至关重要。

叶片特征需要被定义并作为载荷计算的输入，这些特征应包括叶片展向各离散截面的力学和物理属性，并应包括相关设计状态下的相关自由度。

- 气动翼型、弦长、气动扭角和厚度的分布；
- 与气动翼型相关的气动特性（随攻角变化的升力、阻力和力矩系数的函数）；
- 弹性刚度属性（如挥舞和摆振刚度，若对设计有影响，扭转和拉伸刚度也应考虑）及参考轴；
- 质量和质量惯性矩的分布和参考轴；
- 弹性耦合（如挥舞vs摆振，挥舞vs扭转或类似对设计重要的耦合）；
- 结构阻尼。

定义结构属性要用足够数量沿叶片方向的截面，该数量应不少于章节 6.6.3.1 中规定的用于结构校核的截面数。

### 6.2.2 功能性设计公差

应按如下参数定义公差：

- 气动翼型的形状，包括但不限于：
  - 翼型前缘半径；
  - 翼型的相对厚度；
  - 局部弦长。
- 翼型表面粗糙度；

- 气动扭角分布；
- 叶片长度；
- 叶片气动外形相对于叶根的几何位置；
- 任何固定的或动态的气动附件的外形及位置（涡流发生器，襟翼等）；
- 0°刻度线；
- 叶片质量；
- 叶片静力矩（每支叶片的和相对于叶片组的）；
- 叶片固有频率；
- 叶片端面法兰的角度和平度公差。

在载荷、性能和结构完整性的设计评估中，应考虑上述参数的容差范围，这些变化对于叶片的安全运行是不可忽视的。

设计者应考虑并制定公差的实际值。

如果设计者没有指定代替值，通常可以接受下列数值并无需进一步技术说明：

- 翼型<sup>2</sup>：
  - 翼型的外形： $\pm 2\% \times \text{弦长}$
  - 翼型表面的粗糙度<sup>3</sup>： $Rz \leq 15\mu\text{m}$
  - 局部弦长（对于内侧 80%的跨度：）： $\pm 1.0\% \times \text{弦长}$
- 扭角分布： $\pm 0.2^\circ$
- 叶片长度： $\pm 1.0\% \times \text{长度 [mm]}$
- 0° 刻度线的设置： $\pm 0.2^\circ$
- 叶片质量： $\pm 3.0\%$
- 叶片静力矩： $\pm 4.5\%$
- 同组叶片静力矩的差别： $\pm 0.2\%$
- 叶片固有频率： $\pm 5.0\%$

## 6.3 气动设计

### 6.3.1 概述

转轮叶片气动性能的评估将为载荷计算和功率性能计算评估提供输入数据。气动评估是基于试验和计算结果得到的。

### 6.3.2 气动特性

叶片具有空气动力学特征。应考虑 360° 的攻角和所有的流动规律。

可组合选择以下方法来评估叶片的气动特性（在适当情况下，应验证所用模型和工具）：

- 3D 模拟（计算流体力学分析，边界元法，涡格法等）；
- 翼型空气动力学特性的 2D 模拟；
- 对流动分离攻角范围内空气动力学特性的合理假设；
- 至少涵盖最小至最大升力系数对应攻角范围内的风洞试验。

计算应考虑实际的雷诺数和马赫数。

任何计算代码都必须是有用的。

<sup>2</sup> 该公差的影响取决于翼型的特定特性和其在叶片表面的位置，叶片前缘及其周围区域对外形偏差与粗糙度最为敏感

<sup>3</sup> 该公差应用于凝胶涂层和涂漆面，不适用于因运行导致的污渍叶片表面，污渍叶片表面应通过适当的设计假设予以考虑

为了确保真实的载荷和性能分析，应该考虑实际运行中叶片腐蚀的影响。

为了表征整支叶片的空气动力学特性，采用上述评估方法时需考虑足够数量的气动翼型。

气动翼型中至少包括一个相对厚度在 50%-75%的基础翼型，一个相对厚度在 30%-50%的基础翼型和两个相对厚度小于 30%的基础翼型

应考虑 3D 影响。

任何计划要应用于叶片上的气动附件（襟翼，涡流和格林襟翼等）都应经过上述方法的评估。

### 6.3.3 功率特性（参考）

评估叶片的效率需考虑叶片的功率特性。为了获得转轮真实的功率特性，以下方面应予以考虑：

- 真实的叶片空气动力学模型，参照 6.3.2 章节评估；
- 适当的风场湍流度；
- 适当的风场垂直梯度；
- 适当的风场空气密度和温度；
- 适当的涡轮控制单元仿真模型（速度（single and / or collective）和变桨控制）；
- 翼型表面粗糙度的影响，可以表征预期的表面条件；

为保证真实的功率特性，应考虑叶片在运行过程中的变形（扭角和外形变化）。

### 6.3.4 翼型噪声（参考）

应考虑叶片噪声的产生。应使用适当的分析或计算方法并考虑特殊的气动附件。

## 6.4 材料要求

### 6.4.1 概述

对于纤维增强复合材料，其强度和刚度值取决于原材料和制造工艺的性能。

以下步骤对于确保材料满足设计要求至关重要：

- 应指定结构复合材料构件所用材料的强度和刚度的设计值；
- 材料需要一个符合规定值的资格证明。该资格证明应记录在案，并且应描述需要进行必要测试的过程；
- 对于复合材料制造的原材料，设计者应定义在来料检验过程中验证和/或测试的关键参数或值。

### 6.4.2 叶片设计的材料性能

#### 6.4.2.1 特性描述

用于叶片设计的材料性能，包括组合材料（例如，纤维复合材料）、粘结层（例如，包括胶粘剂和完整的粘结层组合的强度）、夹层设计（例如，包括夹心芯材料及其与面板的相互作用）的设计值。

材料的性能和设计值决定了材料是否符合特定的叶片功能要求，这是材料选择的基础。叶片设计的材料要求是材料、产品或子系统的特性。

设计人员应选择适当的测试试样，将具代表性的制造工艺用于叶片连续生产中。建议按照第 6.1.2 条中所描述的建模方法。为了认证，建立结构验证设计值的试验，应按有关认证计划规定的要求进行。例如：

- 一家认可的测试机构；
- 由合适的认证机构认可的公司；
- 由认证机构见证的未经认证的公司。

由于复合材料的性质，一些材料的设计性能最好由元件和/或部件样品水平配置决定。

材料力学性能的特征应以统计评估为基础，如均值法、标准差法等。如果不是陈述不同，则 95% 的生存概率与 95% 的置信水平一起被使用。小规模测试的结果可以用来估计大规模测试的离散性。

在没有有效的测试方法情况下，材料力学性能可以通过验证过的计算方法来演示，例如合成的经典层板理论（CLT）或失效模型，提供的模型的准确性可以通过测试验证。由此产生的任何不确定性将在相应的 PSF（有效负荷）中表示。

来自公认准则的设计值的使用是可以接受的。应说明资料来源，但应注意所使用的值通常是保守的。

#### 试样调节/老化：

对于名义设计属性，试样没有经过调节和老化进行测试。如果需要如 6.6.5.3 中所述的有关特定材料的部分安全系数  $\gamma_{m1}$ ，则应根据部分安全系数的特定选择，对已经调节/老化的试样进行附加测试。

#### 试验温度：

对于名义设计属性，试样应在室温下进行测试。如果需要如 6.6.5.4 中所述的有关特定材料的部分安全系数  $\gamma_{m2}$ ，则应根据部分安全系数的特定选择，在要求的温度下进行附加测试。

#### 制造工艺：

对名义设计属性，测试试样不考虑叶片制造容差。

#### 弹性性能：

根据 IEC 61400-1，对于标准风力发电机组的极端温度范围以外的应用，应考虑叶片材料弹性性能的变化。

### 6.4.2.2 纤维增强层板

FRP（纤维增强塑料）材料由纤维增强材料组成。纤维提供了主要的强度和刚度特性，并与聚合物基体成分（树脂）相结合；树脂为纤维提供支撑、应力传递和保护。

每个单层的层板类型（单向、双轴向和多轴向）应分别进行测试。当相同成分用于不同的层板（例如，由同种纤维制成的单向、双轴和多轴层板，采用相似的层板厚度和相同的树脂基体）时，或当为了叶片设计用材料组合和典型的铺层制作测试试样时，需要测试的范围可能会减少（使用更高  $\gamma_{m3}$  和/或  $\gamma_{m4}$ ，见 6.6.4）。

必须对以下材料性能进行测试，并获得强度特性的统计特征值。

每个测试平板的物理特性：

- 纤维体积分数和孔隙率；
- 固化程度（例如，环氧树脂的 Tg）；
- 固化层厚度。

静态测试：

- 纵向[0°]拉伸：强度、模量、应变、泊松比；
- 横向[90°]拉伸：强度、模量、应变；
- 纵向[0°]压缩：强度、模量、应变；
- 横向[90°]压缩：强度、模量、应变；
- 面内剪切：强度、模量；
- 层间剪切：强度（例如短梁）。

疲劳测试：

- 纵向[0°]：强度。

应论证合理的循环次数范围，例如连续四个十年，每十年有 3 个试样。其中一个十年应超过 106 个循环周期。

如果只在一个  $R$  比值下进行测试，则应该是  $R = -1$ 。

为了符合部分安全系数选择中的“完全疲劳表征”的定义，应进行以下测试：具有多个代表性  $R$  比值的循环疲劳测试（一般为  $R = -1$ 、 $R = 10$  和  $R = 0.1$ ）。

或者如果没有进一步确认（纤维方向的静态强度和假定的 Wohler 斜率），以下的 S-N 曲线反斜率可与适当的部分安全系数（ $\gamma_{m4}$ ）结合使用于疲劳强度验证，所提供的纤维体积含量不超过 55%（玻璃纤维）或 60%（碳纤维；仅丝束 $\leq 50K$ ）：

- 玻纤/环氧层压板 = 10；
- 玻纤/聚酯层压板 = 9；
- 碳纤/环氧层压板 = 14。

#### 6.4.2.3 结构胶和胶接接头

根据 6.6.5.8 和 6.6.5.9，采用符合部分安全系数的具有代表性的试验来评估粘结强度（极限和疲劳）。疲劳应以循环次数的合理分布来评估（例如连续四个十年，每十年有 3 个试样。其中一个十年应超过 106 个循环周期）。结合较低的安全系数，可以用更复杂和更真实的细节以来评估粘结强度。

有可能采用断裂的基本方法，在这种情况下，应测试断裂韧性，并根据统计得到的特征值确定。应为胶粘剂材料确定下列性能：

- 静态拉伸和剪切模量；
- 固化程度（例如，环氧树脂的最小玻璃化温度  $T_g$ ）。

对胶粘剂材料的以下性能进行测试，并根据叶片设计和材料选择的要求确定最低标准。

- 蠕变；
- 收缩率。

#### 6.4.2.4 夹层结构

为了符合较低的  $\gamma_{m3}$  和  $\gamma_{m4}$ ，应测试以下芯材性能，并获得其强度特性的统计推导特征值：

- 面外压缩（强度、模量）；
- 最大加工温度；

为了得到较低的  $\gamma_{m3}$  和  $\gamma_{m4}$ ，应测试以下夹层的性能，并获得其强度特性的统计推导特征值：

- 面外剪切（强度、模量、应变）；
- 剥离或表面粘结强度；
- 表面皱褶。

夹层材料应代表叶片设计中所用的芯材、面板和界面特性。如果使用带有开槽、孔或布基的芯材，也应包括在内。

#### 6.4.2.5 结构金属材料

对每种材料应进行以下材料性能的测试（或通过公认标准来保证）：

- 拉伸强度；
- 弯曲强度；
- 断裂伸长率；
- 冲击吸收能量。

#### 6.4.2.6 表面处理

应测试下列材料性能，并确定作为材料选择要求的最低标准：

- 基材的附着力（例如拉拔试验）；
- 柔韧性或断裂伸长率；

- 对雨水和颗粒撞击的耐蚀性，用于前缘和叶尖区域的材料。  
确保材料对环境的影响有足够的抵抗力，如湿度和紫外线辐射。  
对抗冲击性能（冰雹）应进行测试，并确定了作为叶片设计和材料选择要求的最低标准。

#### 6.4.2.7 非结构材料

所有非结构性材料（例如密封胶、填料、配平重量、防雷系统部件或其他设备）均应记录在案。应确保它们的性能适合于预期的用途，使其能够承受在整个预期的运行时间内由于整体叶片变形而产生的应变，而且它们对叶片结构没有不利的影响。

#### 6.4.3 制造材料的资格

应确保所使用的材料类型符合关于所指定的材料特性的设计假设（以及作为设计依据的任何附加测试）。

制造商应为新供应商提供的微小变化和材料确定一个资格方案。该方案应确定用于记录材料的要求和测试方法，以满足设计中定义的值和公差范围内的设计和加工性能。

这些特性包括强度和刚度，以及在制造过程中控制材料行为的加工性能或特性。应建立这些材料性能与工艺参数（时间、温度、压力等）之间的关系。

如果发生微小的变化，如以下所述，可允许减少一组测试：

- 原材料的微小调整作为材料供应商持续开发的一部分，或转移到一个新的相同材料供应商；
- 生产过程中的微小变化（例如：对固化周期的调整）；
- 叶片制造商应有适用于层板或原材料（例如，树脂、胶粘剂、纤维）的规范，以在授权期间确定试验的关键参数。规范应包括但不限于：
- 材料的可追溯性；
- 材料制造过程的重复性；
- 来料性能的验证系统（例如：测试方法）；
- 合适的材料储存条件。

### 6.5 设计制造

#### 6.5.1 概论

设计文档需详细说明制造所有要求，必须满足技术性和功能性规范，实现叶片假定结构完整性，包括强度、刚度、质量、质量矩、固有频率和稳定性。

这些要求包括具体的制造工艺、材料、尺寸、公差和验收标准（针对材料、几何形状和装配）。

测试材料试件样品、单元部件或其他细节，作为特征设计值（强度、刚度和稳定性）定义的基础。对应制造中应用需在叶片制造中说明。

确认基准工艺偏离是叶片制造商的职责。制造商生产过程必须保证不能统计上显著偏离使用基准工艺建立的设计许用值。

关键公差和验收要求可被设计人员或制造商定义为质量关键点；同时也要参考 6.5.2。确保设计或生产过程中，关键公差和验收要求在每一步生产制造过程可以测量和记录，以确保设计或过程遵循该要求。

应考虑其他公差、工艺或产品特性和验收要求，并且设计或工艺的符合性应通过持续记录、监控或证明过程能力来展示。

安全性分析的有效性应一直延伸到产品，该产品可以在合理的统计确定范围内保持计算的安全水平。这可以包括制造公差的定义，而不直接影响结构计算。为了解释这样的效果，下面定义了所需公差的最小列表。

叶片设计规范需确定制造质量关键点，要求对每项生产进行测量和记录，除非已证明具有合格制造工艺能力。

对于可被制造且维持在合理统计确定的计算安全水平内的产品，安全分析的有效性需一直延伸到产品完成。有效性可能包含制造公差定义，但并未直接影响结构计算。为了考虑类似情况，定义的要求公差至少包含下列项。

### 6.5.2 制造公差要求

在适用情况下，设计中定义的公差和/或制造验收标准包含所列项目，但并非局限于此：

- 织物/铺层在展向和弦向定位，包含长度、宽度、搭界长度和错层长度；
- 织物/纤维（局部和全局）方向；
- 纤维错位（包含褶皱）一面内和面外；
- 纤维毡面积重量；
- 纤维体积含量；
- 错层距离—包含楔形连接；
- 树脂处理包含混合比例和空隙含量；
- 树脂固化水平和过程包含温度、时间、真空度（如果适用）；
- 夹芯材料定位（间隙、错位）；
- 夹芯材料尺寸（厚度、切口/开槽、倒角角度）；
- 预制件的定位和方向；
- 结构胶填充（几何和空隙）；
- 结构胶混合比例；
- 结构胶自由边形状；
- 结构胶固化水平和过程包含温度、时间、真空度（如果适用）；
- 粘结线尺寸：厚度和宽度，容许偏差的最大尺寸和范围（尺寸、空隙、裂纹、填充率/覆盖率）；
- 粘结表面处理和保护；
- 胶衣质量——附着力和厚度；
- 表面处理后、粘结前的临时贮存；
- 螺栓孔位置（偏离标称位置）；
- 除主结构粘接（例如配重）外的装配部件的几何定位。螺栓连接需详细说明安装扭矩值；
- 排水孔几何定位和直径；
- 雷电保护系统电阻。

## 6.6 结构设计

### 6.6.1 通用设计方法

本章节为风力发电机组风轮叶片结构解析和数值设计提出要求。叶片结构完整性需加以检验，证明其具有可接受的安全水平。通过计算和/或试验，检验叶片极限、疲劳强度。

依据 ISO2394，本标准使用极限状态设计方法，描述一个确定性方法需满足的要求。

作为一种选择，使用概率方法、基于可靠性的设计是可接受的，但可能会导致局部安全因子与本标准中的规定存在差异。如果采用基于可靠性的方法，可使用 ISO2394 作为指南，定义和记录失效风险。如果使用可靠性预测替代本标准中的设计局部安全因子，则可靠性模型通过局部安全因子成为本标准中描述的变化性和不确定性的最基本体现。

下面章节依据极限状态设计方法进行校核。

对于 IEC 61400-1 中定义的所有极限强度状态分析，载荷按下列方式定义：

$$F_d = \gamma_f \cdot F_k \dots \dots \dots (2)$$

式中：

$F_d$ ——表示载荷设计值；

$\gamma_f$ ——表示载荷局部安全因子；

$F_k$ ——表示载荷特征值。

依据 IEC 61400-1，与极限极限状态相关的分析需进行下列四种类型：

- 极限强度分析；
- 疲劳失效分析；
- 稳定性分析。

临界挠度分析（包含叶片与塔筒等部件间的机械干扰）。

此外，纤维间失效需在铺层校核中加以评估。评估使用的载荷特征值 $F_k$ 可取载荷局部安全因子 $\gamma_f = 1.0$ 。

每种类型分析要求用不同的极限状态公式，通过局部安全因子的使用，处理不同来源的不确定性。在以下条款中，描述了风力发电机组风轮叶片相关分析的四种类型。

建模、校核的水平需满足所考虑失效模式、材料和结构细节的要求。

在所有的校核分析中，结构模型需使用材料刚度（模量）的平均值。模量的不确定性应针对分析类型，通过适当的材料局部安全因子加以考虑。

## 6.6.2 结构分析

### 6.6.2.1 极限强度分析

对于极限强度分析，应使用设计载荷对所有相关失效模式进行验证。这包括但不限于纤维和纤维间失效模式。

由于面外剪应力和面外正应力作用，层间失效、分层或粘结剥离失效可能在相邻铺层、芯材、粘结胶之间发生。这些失效模式通常出现在诸如厚度变化、螺栓连接、粘结结点等设计细节处，需予以考虑。

夹芯材料失效可能由拉伸、压缩和剪切加载引起，这些失效模式应当予以考虑。

### 6.6.2.2 疲劳失效分析

所有的疲劳失效分析校核需使用载荷设计值完成。

疲劳失效模式表现为依据适当疲劳损伤累计模型得到的局部损伤累计超过许用值，该许用值由小于结构设计寿命的时间段内局部材料疲劳强度确定。

依据 Palmgren-Miner 公式，纤维方向线性损伤累计可被用于获得总损伤结果。由此，根据有效的特征 S-N 曲线，需构建基于应力或应变的等寿命图。对于每个施加的应变条件（幅值和均值水平），利用等寿命图，提取失效特征循环次数。即由施加应变/应力获得失效预计循环次数。

可以使用断裂力学方法替代基于应力或应变的校核。

疲劳计算可以基于损伤等效载荷、Markov 矩阵或载荷时序。

疲劳强度分析可以基于损伤容限方法：

- 如果可以证明某种失效机理引起的疲劳失效，在设计寿命期间不会违背叶片结构完整性（例如静力失效、挠度过大等），则该种叶片特定疲劳失效机理可以被接受；
- 当一种失效模式被评估对于某种结构可以接受，需证明该失效不会导致不可接受的失效模式萌生：
  - 如果某种特定失效模式在失效序列中不会发生，则结构需遵循前述失效模式不发生的方式进行设计；
  - 通过渐进损伤分析、子部件或全叶片静力和疲劳试验，验证一系列失效模式的损伤容

限是必须的。

### 6.6.2.3 稳定性分析

稳定性分析需包含全局稳定性和局部稳定性。

全局屈曲是指完整结构件或单元件出现的稳定性损失（例如板屈曲）。表现为载荷值小量增加导致变形出现大量、不稳定增长，因而限制任何进一步地载荷承受能力。

验证应基于分析或数值方法、全尺寸测试或其组合。

屈曲通用设计标准基于 IEC 61400-1。需证明主要承受载荷结构（例如主梁、抗剪腹板、尾缘梁）不会发生屈曲，即结构承受设计载荷时载荷系数小于或等于 1.00。

局部失稳是指结构件的部分区域出现的稳定性损失（例如夹芯结构面板起皱或卷曲），需进行评估。

### 6.6.2.4 临界挠度分析

挠度分析、相关设计载荷工况和局部安全因子的定义均需依据 IEC 61400-1 进行。

为预测整体刚度和叶片对叶片变化的不确定度，通常 IEC 61400-1 中定义的临界挠度分析局部安全因子  $\gamma_m$  值需取 1.1。

当弹性参数通过全尺寸叶片试验验证，满足 6.6.3.2 章要求后，局部安全因子  $\gamma_m$  值可以降低到 1.05。

当叶片弹性参数由同一或相似叶型挠度测试的统计结果确认后，可以将  $\gamma_m$  取值低于 1.05 但高于 1.0。

在所有的工况下，局部安全因子  $\gamma_m$  值取 1.0。

## 6.6.3 验证要求

### 6.6.3.1 模型分辨率

叶片结构分析用模型需满足展向和弦向分辨率的最低要求，如下所示：

- 展向分辨率；
- 需考虑足够数量的展向截面；
- 沿叶片展向，校核至少需引入 12 个截面；
- 从叶根到最大弦长，校核截面间的展向距离需不大于 1 倍给定截面最小弦长；
- 从最大弦长到 85% 叶片长度，校核截面间的展向距离需不大于 2 倍给定截面最小弦长；
- 弦向分辨率；
- 建模时每个截面应考虑足够详细的弦向分辨率，分辨率可应用于进一步验证。

### 6.6.3.2 全局模型的试验验证

对认证而言，设计的通用验证采用与获得的全尺寸叶片试验结果比较实现，至少包含：

- 计算值和测量值的比较；
- 测量结果的评估。

依据 IEC 61400-23，在各试验载荷水平情况下，最外侧加载位置全局弯曲挠度偏差不超过  $\pm 7\%$ ，两主方向一阶固有频率偏差不超过  $\pm 5\%$ ，轴向应变偏差不超过  $\pm 10\%$ ，相关结果可接受，无需进一步解释。

### 6.6.3.3 分析模型和方法的验证

分析设计过程中使用的模型和进行的假定，会影响计算结果的不确定性。

对独立计算而言，使用局部安全因子体现类似不确定性。对于一个特定的设计，数值/解析模型

的验证可能基于对类似设计概念进行数值/解析建模和试验结果的比较。局部安全因子的选择依赖于模型验证的程度。使用纵向测试仪器的试验仅允许降低该测试仪器位置由纵向加载主要影响的铺层局部安全因子。由横向加载主要影响或由多轴载荷主要影响的结构的局部安全因子，依然应保持在较高水平。具体分析和局部安全因子选取应针对相应模型验证进行。对于有限元或类似数值模型，6.6.2.1 章节中的要求可以被作为遵循标准。

对于设计和/或认证的叶片，为验证模型，用于试验和比较的样件应与设计相似、制造和加载具有充分代表性。

#### 6.6.3.4 中级水平试验

中级水平（例如图 1 中单元件和细节部分的水平或子部件的水平）或全叶片试验可以被用于证明局部安全因子的降低。类似特征包括但不限于：褶皱、粘接线、预埋螺栓套、T 型螺栓和铺层退层。

除了比材料试件试验能更准确地表达叶片细节，中级水平试验还比全叶片在完成大量试验方面更具有可行性，从而允许：

- 带有额外联系的离散结果的统计相关数据组；
- 各种环境条件下的试验；
- 各种结构方案的对比试验。

为达到最低局部安全因子，试验应在基于实际边界条件的理性情况下进行。然而，简单边界条件可用于验证建模结果，对建模获得所需要的信心。

### 6.6.4 材料局部安全因子

#### 6.6.4.1 定义

材料局部安全因子值体现了纤维增强塑料材料、复材夹芯结构，粘接连接，方法和载荷处理的固有变化性和不确定性。基于此点，材料局部安全因子必须针对每种材料类型和材料组合形式进行专门开发。既可以通过基于可靠性的专用试验程序，也可以通过经验方法，加以确定。当使用经验方法时，需依据如下方式选择适当的局部安全因子：

$$\gamma_m = \gamma_{m0} \cdot \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} \cdot \gamma_{m3} \cdot \gamma_{m4} \cdot \gamma_{m5} \dots \dots \dots (3)$$

式中：

$\gamma_{m0}$ ——基础材料局部安全因子（所有分析中引入）；

$\gamma_{m1}$ ——环境退化（非可逆效应）局部安全因子；

$\gamma_{m2}$ ——温度效应（可逆效应）局部安全因子；

$\gamma_{m3}$ ——制造影响局部安全因子；

$\gamma_{m4}$ ——计算精度和方法验证局部安全因子；

$\gamma_{m5}$ ——载荷局部表征因子。

设计者可以定义一个替代的经验方法（包含相关局部安全因子），通过满足与本文概述方法等效水平的安全性和可靠性的适当校验，确认提供方法的合理性。

基于可靠性的专用试验程序需至少涵盖本文采用经验方法列出的变量，这些变量基于 IEC 61400-1 定义。

以下章节给出每项材料局部安全因子值。作为一项通常原则，局部安全因子在选取时必须考虑材料特性在转移到制造叶片过程中的所有失效模式和相关不确定性。局部安全因子 $\gamma_{m1}$ 到 $\gamma_{m5}$ 的任何调整需被设计者记录，并确保设计的全面安全性和可靠性。该设计应与下面给出局部安全因子值使用时的结果可以进行比较。

#### 6.6.4.2 基础材料局部安全因子 $\gamma_{m0}$

对于所有强度和稳定性分析，最小局部安全因子 $\gamma_{m0}$ 取 1.20。

该因子包括其他安全因子不包括的不确定性。

$\gamma_{m0}$ 可缩减至如补偿 $\gamma_n > 1.0$ 的取值，像 $\gamma_{m0}$ 和 $\gamma_n$ 同时应用时因子不大于 1.20。

#### 6.6.4.3 环境退化（非可逆效应）局部安全因子 $\gamma_{m1}$

环境效应局部安全因子考虑材料特性与初值相比的不可逆性和长期退化性。该效应可以包括但不局限于：

- 温度变化引起的长期退化；
- 化学老化和退化；
- 紫外线辐射（如果适用）；
- 湿度和盐度；
- 外部化学影响；
- 依赖于疲劳寿命的刚度；
- 依赖于蠕变或应变松弛的刚度。

设计需规定叶片与环境相关的局部安全因子。如果进行试验，材料试验应设计涵盖这些因素的影响，例如涵盖极限温度和湿度的耦合退化效应或温度变化的长期效应的典型试验。

#### 6.6.4.4 温度效应（可逆效应）局部安全因子 $\gamma_{m2}$

温度局部安全因子考虑材料强度和刚度特性的可逆性和短期变化，该现象伴随变化运行温度和基于铺层特性的可变性和不确定性而出现。

#### 6.6.4.5 制造影响局部安全因子 $\gamma_{m3}$

对于所有校验，制造影响局部安全因子考虑各方面给强度带来的影响，包括制造公差、制造叶片相对理想结构的不确定性或者基于子部件、材料试件试验的设计值的不确定性。

证明制造控制有三点要素：

- 制造公差的确定。可来自于最好工厂的实践经验，或针对具体结构在基于过程验证和测量的问题中确定。具有代表性的试验结果可用于降低不确定性，被反映在最终局部安全因子中；
- 制造质量关键点的控制。每件产品制造均应测量和记录制造质量关键点，制造质量关键点设计过程中的说明可用于降低不确定性，包括材料合格证和入场检查报告；
- 公差极限情况的材料性能。指定公差极限情况下，材料和具有代表性子结构性能的特征描述可用于极大地降低不确定性，被反映在局部安全因子中。

公差交叠的影响需被解读为所有公差极限情况下材料性能的改变，而非独立作用的产物。

制造影响分析需考虑以下相关项的置信水平：

- 检验方法；
- 制造控制；
- 由可测量过程中表现出的能力（持续时间、环境、防护）记录下的制造经验。

方差影响分析指南：

该准则规定叶片设计评估中确定关键制造工艺鲁棒性和可重复性的评估。

对于 $\gamma_{m3}$ 水平的确定，设计者需量化特定部件或装配关键制造工艺中的方差（许用公差）。

要求考虑一个或一个以上占主导地位的公差的组合。

对于某项特定制造工艺，确定占主导地位的公差，设计者应评估：

- 制造工艺可能的方差（及其量级）；
- 方差的可检验性；

- 方差引起结构性能的下降。

如果设计者希望采用最低水平的 $\gamma_{m3}$ ，则必须使用试验程序确定材料许用值，从而检验材料性能。

试验程序必须使用工艺评估中确认表现出最大方差的试件，必须使用代表关键设计条件的加载方法。如果有足够证据表明其中一些公差影响不重要，则无须强制试验证明每一项公差的影响或可以通过分析来评估。

基于解析的方法必须考虑工艺评估中确认的最大方差，必须使用代表关键设计条件的加载方法。如果有足够证据表明其中一些公差影响不重要，则无须强制量化每一项公差的影响。

可以使用下表 1 作为识别典型制造的影响 ( $\gamma_{m3}$ ) 与特定的结构设计验证

表 1 典型制造影响

对 $\gamma_{m3}$ 起作用的典型制造影响										
验证	制造公差类型									
	纤维方向偏差/褶皱	纤维体积含量偏差	空隙率	固化程度 (T <sub>g</sub> ) /树脂混合比	定位 (间隙、搭接)	粘接表面处理和保护	胶层厚度	粘接自由边形状	胶粘剂开放时间	
铺层校核										
铺层极限强度	X		X	X	X					
铺层疲劳失效	X	X								
纤维间失效										
夹芯结构极限强度					X					
稳定性校核										
全局屈曲										
局部屈曲										
粘接极限强度				X		X	X		X	
粘接疲劳失效			X	X		X	X	X		
机械紧固极限强度和疲劳失效										
非结构特征										

指南结束

6.6.4.6 计算精度和方法验证局部安全因子 $\gamma_{m4}$

计算方法局部安全因子需考虑与使用分析方法相关的不确定性，需考虑分析精确性和校验完整性。

铺层疲劳评估情况下，计算和验证的局部安全因子 $\gamma_{m4}$ 被认为由两部分构成：

$$\gamma_{m4} = \gamma_{m4a} \cdot \gamma_{m4b} \dots \dots \dots (4)$$

式中：

- $\gamma_{m4a}$ —模型验证因子：使用预测模型的相关性，降低设计不确定性；

- $\gamma_{m4b}$ —疲劳模型因子：由疲劳试验支撑的材料疲劳性能和更复杂损伤累计模型的使用，降低不确定性。

#### 6.6.4.7 载荷表征因子 $\gamma_{m5}$

该局部安全因子考虑与施加载荷分量分辨率、施加载荷分量耦合相关的不确定性。

最简单情况，载荷分解为2个相互垂直方向（例如最大和最小挥舞及最大和最小摆振），分别施加4组载荷。

结合中间载荷方向、耦合加载进行叶片模拟，可以更好表达真实情况，因此降低局部安全因子是合理的。

铺层疲劳评估情况下，载荷分量分辨率的局部安全因子 $\gamma_{m5}$ 被认为由两部分构成：

$$\gamma_{m5} = \gamma_{m5a} \cdot \gamma_{m5b} \dots \dots \dots (5)$$

式中：

- $\gamma_{m5a}$ —表示载荷方向分辨率；
- $\gamma_{m5b}$ —表示载荷谱分辨率。

#### 6.6.5 结构设计校核

##### 6.6.5.1 验证要求

需进行下列结构校核：

铺层校核：

- 铺层极限强度；
- 铺层疲劳失效；
- 纤维间失效；
- 夹芯结构极限强度。

稳定性校核：

- 全局屈曲；
- 局部屈曲。

粘接校核：

- 粘接极限强度；
- 粘接疲劳失效。

部件：

- 机械紧固极限强度和疲劳失效；
- 非结构特征。

这些校核的详细描述可以在下面章节 6.6.5.2 和 6.6.5.11 中找到。

##### 6.6.5.2 铺层极限强度校核

局部安全因子	数值
$\gamma_{m1}$	环境退化（非可逆效应）局部安全因子 1.20 - 基于室温的材料性能、干燥的机械性能 1.00 - 考虑环境退化相关效应的材料性能
$\gamma_{m2}$	温度效应（可逆效应）局部安全因子 1.10 - 基于室温的材料性能 1.00 - 材料性能试验涵盖运行温度范围极限
$\gamma_{m3}$	制造影响局部安全因子

局部安全因子	数值
	<p>1.30 - 使用标称设计性能进行叶片分析 占主导地位的制造公差对于标称材料性能的影响已被考虑，适当体现在使用的局部安全因子中。</p> <p>1.10 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入占主导地位的制造公差的假设影响 这些公差对于标称材料性能的影响，已通过基于解析方法和/或适用参考文献的非试验手段加以验证。</p> <p>1.00 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入基于工艺验证和测量的占主导地位的制造公差的验证影响 这些公差（包括公差叠加）对于标称材料性能的影响，已通过试验手段加以验证。至于褶皱和退层的情况，需使用中级水平或全叶片试验手段加以验证。</p>
$\gamma_{m4}$	<p>计算精度和方法验证局部安全因子</p> <p>1.20 - 应变计算未被验证</p> <p>1.00 - 应变计算由全叶片试验验证</p>
$\gamma_{m5}$	<p>载荷特性描述局部安全因子</p> <p>1.20 - 四个主方向载荷</p> <p>1.00 - 最少十二个均匀分布的载荷方向的载荷</p>

### 6.6.5.3 铺层疲劳失效校核

局部安全因子	数值
$\gamma_{m1}$	<p>环境退化（非可逆效应）局部安全因子</p> <p>1.10 - 基于室温的材料性能、干燥的机械性能</p> <p>1.00 - 考虑环境退化相关效应的材料性能</p>
$\gamma_{m2}$	<p>温度效应（可逆效应）局部安全因子</p> <p>1.00 - 无影响须考虑</p>
$\gamma_{m3}$	<p>制造影响局部安全因子</p> <p>1.30 - 使用标称设计性能进行叶片分析 占主导地位的制造公差对于标称材料性能的影响已被考虑，适当体现在使用的局部安全因子中。</p> <p>1.10 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入占主导地位的制造公差的假设影响 这些公差对于标称材料性能的影响，已通过基于解析方法和/或适用参考文献的非试验手段加以验证。</p> <p>1.00 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入基于工艺验证和测量的占主导地位的制造公差的验证影响 这些公差（包括公差叠加）对于标称材料性能的影响，已通过试验手段加以验证。至于褶皱和退层的情况，需使用中级水平或全叶片试验手段加以验证。</p>
$\gamma_{m4}$	<p>计算精度和方法验证局部安全因子</p> <p><math>\gamma_{m4a}</math> 模型（载荷响应应变）验证</p> <p>1.20 - 应变计算未被验证</p> <p>1.00 - 应变计算由全叶片试验验证</p> <p><math>\gamma_{m4b}</math> 疲劳（Goodman 或等效）模型</p>

局部安全因子	数值
	1.20 - 静强度和假设 wöhler 斜率 1.10 - 静强度和假最小 wöhler 斜率 1.00 - 全疲劳特性 (6.4.2.2 节) $Y_{m4} = Y_{m4a} \cdot Y_{m4b}$
$Y_{m5}$	载荷特性描述局部安全因子 $Y_{m5a}$ 载荷方向分辨率 1.20 - 两主方向弯矩谱和简单叠加组合 1.05 - 最少六个方向弯矩谱和简单叠加组合 1.00 - 由时序得到精确应变历程的应变谱 <hr/> $Y_{m5b}$ 疲劳载荷计算因子 1.20 - 使用等效载荷 1.00 - 使用全疲劳载荷描述, 例如 Markov 矩阵、时序 $Y_{m5} = Y_{m5a} \cdot Y_{m5b}$

#### 6.6.5.4 纤维间失效校核

纤维间失效模式需基于特征载荷 $F_k$ 来考虑铺层和夹芯结构。

纤维间失效可以导致随后的过早纤维失效（静力和疲劳），以及过早屈曲失效。

考虑的失效模式应包含纤维间失效，其由面内横向拉伸或压缩应力 $\sigma_2$ 、面内剪切应力 $\tau_{12}$ 或二者组合引起，也会被面内纵向拉伸或压缩应力 $\sigma_1$ 影响。

需使用适合的验证手段证明对于纤维间失效存在影响足够安全。

一项适合的验证可以由以下三者之一或三者组合组成：

- 1) 分析证明基体裂纹不会发生到每个独立铺层。

实际安全需记录在极限强度和疲劳强度分析中，校核需使用文献认可的各项异性材料失效假定，例如依据VDI 2014的Puck或Larc03。除非另有记录，如果使用上述提及的失效假定，需引入以下系数：

$$p_{\perp|}^{(-)} = 0.25 \dots \dots \dots (6)$$

$$p_{\perp|}^{(+)} = 0.30$$

式中，

$p_{\perp|}^{(-)}$ 和 $p_{\perp|}^{(+)}$ ——Puck理论中的倾角参数。

解析验证强度和应变设计极限需基于材料试验平均值。

局部安全因子	数值
$Y_{m1}$	环境退化（非可逆效应）局部安全因子 1.00 - 无影响须考虑
$Y_{m2}$	温度效应（可逆效应）局部安全因子 1.10 - 使用室温有效平均材料模量值建立的模型进行计算 1.00 - 使用最低运行温度有效平均材料模量值建立的模型进行计算
$Y_{m3}$	制造影响局部安全因子 1.10 - 用于所有的分析
$Y_{m4}$	计算精度和方法验证局部安全因子

局部安全因子	数值
	1.10 - 有限元计算 1.20 - 其它解析模型
$\gamma_{m5}$	载荷特性描述局部安全因子 1.10 - 四个主方向载荷 1.00 - 最少十二个均匀分布的载荷方向的载荷

## 2) 分析证明基体裂纹对于结构完整性不重要

使用考虑基体裂纹预损伤的设计性能，进行铺层极限强度（6.6.5节）、铺层疲劳失效（6.6.5.3节）和全局稳定性（6.6.5.6节）校核。要求所有相关材料设计极限，通过试件试验确定。在极限或疲劳失效试验前，试件已通过载荷引入基体裂纹。

材料试验程序需至少包括但不局限于以下内容：

- 通过面内横向拉伸和/或面内剪切引入预损伤的单轴和多轴织物，极限拉伸和压缩试验；
- 通过面内横向拉伸和/或面内剪切引入预损伤的单轴和多轴织物，疲劳试验。

预加载需至少等于相关材料和方向的设计极限应变或应力。

## 3) 成功的全叶片试验

根据IEC 61400-23要求，该试验至少应包括预疲劳静态试验、疲劳试验和疲劳后静载试验试验。通过分析或其它技术论证，需合理说明带有基体裂纹且成为潜在失效模式的区域可以承受充分加载。

如果这些失效模式已知且不会导致超过其它极限状态，则纤维间失效可以被接受。

### 6.6.5.5 夹芯结构极限强度校核

夹芯结构极限强度校核，局部安全因子 $\gamma_{m0}$ 和下列 $\gamma_{m1}$ 到 $\gamma_{m5}$ 的乘积需用于芯材平均强度值。芯材强度需至少但不局限于证明面外剪切和压溃（即面法线方向的压缩）。如果适用，在强度评估中需考虑面屈曲引起的局部非线性变形。

局部安全因子	数值
$\gamma_{m1}$	环境退化（非可逆效应）局部安全因子 1.30 - 基于室温的开孔泡沫、木材和蜂窝材料性能（由于温度变化，允许进入芯材铺层界面） 1.10 - 基于室温的封闭泡沫、木材和注树脂开孔泡沫材料性能 1.00 - 考虑环境退化相关效应的材料性能
$\gamma_{m2}$	温度效应（可逆效应）局部安全因子 1.20 - 仅基于存在文献或数据表单的材料性能 1.10 - 室温下进行材料试验 1.00 - 材料性能试验涵盖运行温度范围极限
$\gamma_{m3}$	制造影响局部安全因子 1.30 - 使用标称设计性能进行叶片分析 占主导地位的制造公差对于标称材料性能的影响已被考虑，适当体现在使用的局部安全因子中。 1.10 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入占主导地位的制造公差的假设影响 这些公差对于标称材料性能的影响，已通过基于解析方法和/或适用参考文献的非试验手段加以验证。 1.00 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入基于工艺验证和测量的占主导地

局部安全因子	数值
	位的制造公差的影响 这些公差（包括公差叠加）对于标称材料性能的影响，已通过试验手段加以验证。至于褶皱和退层的情况，需使用中级水平或全叶片试验手段加以验证。
$\gamma_{m4}$	计算精度和方法验证局部安全因子 1.35 - 基于假定或制造商未经证实数据的解析方法，该解析方法未经中级水平或全叶片试验验证 1.20 - 基于特定算法的有限元分析，特定算法指使用壳单元模拟面并结合芯材强度、面褶皱失效模式的解析表达式进行的分析，该有限元分析未经中级水平或全叶片试验验证 1.20 - 基于特定算法的有限元分析，特定算法指使用三维单元模拟芯材并模拟几何非线性进行的分析，该有限元分析未经中级水平或全叶片试验验证 1.00 - 基于特定算法的有限元分析，特定算法指使用壳单元模拟面并结合芯材强度、面褶皱失效模式的解析表达式进行的分析，该有限元分析已经中级水平或全叶片试验验证 1.00 - 基于特定算法的有限元分析，特定算法指使用三维单元模拟芯材并模拟几何非线性进行的分析，该有限元分析已经中级水平或全叶片试验验证
$\gamma_{m5}$	载荷特征描述局部安全因子 1.20 - 四个主方向载荷 1.00 - 最少十二个均匀分布的载荷方向的载荷

#### 6.6.5.6 全局静力稳定性（整体失稳）校核

需使用材料刚度均值进行分析。

夹芯结构厚度需保守估计，包含对于与制造选择方法有关的潜在压缩的考虑。

有限元网格密度的适用性需通过收敛性研究加以证明。如果对问题涉及屈曲模态相关的模型区域的网格密度进行加倍，（线性）屈曲特征值改变不超过 5%，则可假定网格具有足够精度。

对于几何非线性有限元分析，应考虑载荷矢量方向，并与结构的变形有关，并且与外部载荷方向一致。仿照相关线性屈曲特征振型，以一个成比例的高度，将无应力预变形赋予结构。如无进一步根据（例如与制造公差相关的几何缺陷），缺陷高度需取 0.25% 的相关特征振型波长。

在下列条件下允许稳定后屈曲行为：

- 屈曲不会导致设计载荷下任何结构件失效。按照本文剩余要求，所有相关失效模式需在屈曲条件下被检查；
- 按照本文其它要求，屈曲不会发生在只能导致局部疲劳损伤的低载荷情况；
- 按照本文其它定义，屈曲不会导致叶片的过度挠曲。

局部安全因子	数值
$\gamma_{m1}$	环境退化（非可逆效应）局部安全因子 1.00 - 无影响须考虑
$\gamma_{m2}$	温度效应（可逆效应）局部安全因子 1.10 - 使用室温的芯材模量值 1.00 - 使用考虑最高运行温度的芯材模量值
$\gamma_{m3}$	制造影响局部安全因子 1.00 - 无影响须考虑
$\gamma_{m4}$	计算精度和方法验证局部安全因子 分析方法局部安全因子 1.40 - 二维解析方法（非有限元方法） 1.20 - 线性有限元分析方法

局部安全因子	数值
	1.00 - 模拟几何非线性的有限元分析方法 验证局部安全因子 1.25- 没有任何验证 1.00 -用于经中间水平或全尺寸叶片试验验证的非线性屈曲检测或失效的方法 m4 由 m4a 和 m4b 组合而成
$\gamma_{m5}$	载荷特征描述局部安全因子 1.20 - 四个主方向载荷 1.00 - 最少十二个均匀分布的载荷方向的载荷

#### 6.6.5.7 局部稳定性（面板屈曲）校核

需使用材料刚度均值进行分析。

对于静力稳定性分析，下列局部安全因子 $\gamma_{m2}$ 可以用于材料刚度或载荷。

稳定的非线性变形是允许的，只要变形不导致：

- 面或芯材的局部静力失效；
- 面从芯材上分层；
- 疲劳损伤。

局部安全因子	数值
$\gamma_{m1}$	环境退化（非可逆效应）局部安全因子 1.00 - 无影响须考虑
$\gamma_{m2}$	温度效应（可逆效应）局部安全因子 1.10 - 使用室温的芯材模量值 1.00 - 使用考虑最高运行温度的芯材模量值
$\gamma_{m3}$	制造影响局部安全因子 1.00 - 无影响须考虑
$\gamma_{m4}$	计算精度和方法验证局部安全因子 1.35 - 基于假定或制造商未经证实数据的解析方法，该解析方法未经中级水平或全叶片试验验证 1.20 - 基于特定算法的有限元分析，特定算法指使用壳单元模拟面并结合芯材强度、面褶皱失效模式的解析表达式进行的分析，该有限元分析未经中级水平或全叶片试验验证 1.20 - 基于特定算法的有限元分析，特定算法指使用三维单元模拟芯材并模拟几何非线性进行的分析，该有限元分析未经中级水平或全叶片试验验证 1.00 - 基于特定算法的有限元分析，特定算法指使用壳单元模拟面并结合芯材强度、面褶皱失效模式的解析表达式进行的分析，该有限元分析已经中级水平或全叶片试验验证 1.00 - 基于特定算法的有限元分析，特定算法指使用三维单元模拟芯材并模拟几何非线性进行的分析，该有限元分析已经中级水平或全叶片试验验证
$\gamma_{m5}$	载荷特征描述局部安全因子 1.20 - 四个主方向载荷 1.00 - 最少十二个均匀分布的载荷方向的载荷

#### 6.6.5.8 粘结极限强度校核

本段描述极限强度状态粘结校核。

粘结极限强度设计评估需考虑粘结的主要特点，例如胶粘剂、胶层界面、相邻基底材料和几何的层间载荷。本节还包括考虑与粘结无关的层间载荷的特征。本节还包括考虑粘结包含不同基底材

料的情况，例如复合材料与金属界面。

局部安全因子	数值
$\gamma_{m1}$	环境退化（非可逆效应）局部安全因子 1.20 - 基于室温的材料性能、干燥的机械性能 1.00 - 考虑环境退化相关效应的材料性能
$\gamma_{m2}$	温度效应（可逆效应）局部安全因子 1.10 - 使用室温的材料性能试验 1.00 - 材料性能试验涵盖运行温度范围极限
$\gamma_{m3}$	制造影响局部安全因子 1.30 - 使用标称设计性能进行叶片分析 占主导地位的制造公差对于标称材料性能的影响已被考虑，适当体现在使用的局部安全因子中。 1.10 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入占主导地位的制造公差的假设影响 这些公差对于标称材料性能的影响，已通过基于解析方法和/或适用参考文献的非试验手段加以验证。 1.00 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入基于工艺验证和测量的占主导地位的制造公差的验证影响 这些公差（包括公差叠加）对于标称材料性能的影响，已通过试验手段加以验证。至于褶皱和退层的情况，需使用中级水平或全叶片试验手段加以验证。
$\gamma_{m4}$	计算精度和方法验证局部安全因子 2.00 - 使用基于失效准则平均应力的解析方法预测结构承载能力。使用的失效准则需基于具有代表性试验的平均粘结应力。具有代表性试验意味着具有相似界面材料、基底和加载的试验。 1.30 - 使用基于应力的失效准则的有限元模型来预测结构承载能力。使用的模型和失效准则需通过具有代表性的试验验证。具有代表性试验意味着具有相似界面材料、几何、优化的模型网格、剥离和剪切比的试验。 1.10 - 使用基于失效准则（例如界面单元或其它解析方法）的断裂力学有限元模型预测结构承载能力。预测能力需通过具有代表性的中级水平或全叶片试验验证。具有代表性试验意味着具有相似界面材料、剥离和剪切比的试验。材料性能需通过适当的材料试验确定。 1.00 - 通过中等水平或全叶片试验，使结构和载荷能承载所设计部件的特征强度。通过有限元分析或类似方法表明，在采用 PSF 时，叶片局部细节的荷载小于或等于试验结构的特性强度。
$\gamma_{m5}$	载荷特征描述局部安全因子 1.00 - 无影响须考虑

#### 6.6.5.9 粘结疲劳失效校核

本段描述疲劳失效状态粘结校核。

粘结疲劳失效设计评估需考虑粘结的主要特点，例如胶粘剂、胶层界面、相邻基底材料和几何的层间载荷。本节还包括考虑与粘结无关的层间载荷的特征。本节还包括考虑粘结包含不同基底材料的情况，例如复合材料与金属界面。

局部安全因子	数值
$\gamma_{m1}$	环境退化（非可逆效应）局部安全因子 1.10 - 基于室温的材料性能、干燥的机械性能 1.00 - 考虑环境退化相关效应的材料性能

局部安全因子	数值
$\gamma_{m2}$	温度效应（可逆效应）局部安全因子 1.00 - 无影响须考虑
$\gamma_{m3}$	制造影响局部安全因子 1.30 - 使用标称设计性能进行叶片分析 占主导地位的制造公差对于标称材料性能的影响已被考虑，适当体现在使用的局部安全因子中。 1.10 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入占主导地位的制造公差的假设影响 这些公差对于标称材料性能的影响，已通过基于解析方法和/或适用参考文献的非试验手段加以验证。 1.00 - 使用设计性能进行叶片分析，该设计性能已引入基于工艺验证和测量的占主导地位的制造公差的验证影响 这些公差（包括公差叠加）对于标称材料性能的影响，已通过试验手段加以验证。
$\gamma_{m4}$	计算精度和方法验证局部安全因子 2.00 - 使用基于失效准则平均应力的解析方法预测结构承载能力。使用的失效准则需基于具有代表性试验的平均粘结应力。具有代表性试验意味着具有相似界面材料、基底和加载的试验。 1.50 - 使用基于失效准则峰值应力的有限元模型预测结构承载能力。使用的模型和失效准则需通过具有代表性的试验验证。具有代表性试验意味着具有相似界面材料、几何、优化的模型网格、剥离和剪切比的试验。 1.10 - 使用基于失效准则（例如界面单元或其它解析方法）的断裂力学有限元模型预测结构承载能力。预测能力需通过具有代表性的中级水平或全叶片试验验证。具有代表性试验意味着具有相似界面材料、剥离和剪切比的试验。材料性能需通过适当的材料试验确定。 1.00 - 所制造的结合或细节的特征强度通过中间水平或全叶片试验来建立，使得结构和载荷代表所设计的部件。使用有限元分析或类似的方法，用 PSF 施加叶片细节上的载荷低于或等于被测结构的特征强度。
$\gamma_{m5}$	载荷特征描述局部安全因子 1.05 - 使用损伤等效载荷 1.00 - 使用全疲劳载荷的描述，如 Markov 矩阵，时序载荷等

#### 6.6.5.10 机械紧固结构接触面校核

结构界面包括风力发电机组风轮叶片与不同结构部件（例如风轮轮毂结构、叶尖刹车机械装置）间的连接面，控制表面或多部分结构叶片内连接面。这些界面通常由两种不同材料组成（例如复合材料叶片结构和金属机械系统），使用机械紧固件（例如螺栓或铆钉）连接。

对于依赖机械紧固和粘结的联合效应的接头，每种紧固方法均需单独进行验证，除非联合系统的承载能力得到证明。这些界面计算模型可以通过中级水平或全叶片试验加以验证。

结构界面强度校核可以考虑至少以下内容：

- 静力设计极限状态；
- 疲劳设计极限状态。

界面校核需考虑整个接头的灵活性，包括紧固件和附加相关结构部件。预紧接头的评估需考虑连接部件间间隙张开的可能性。在铺层厚度达到平面应变/应力假定不适用程度的情况下，需考虑应变/应力的全三维状态。

机械紧固界面强度校核需考虑周围材料孔边应力集中。此外，机械紧固界面校核需考虑制造和装配指定公差的影响（例如孔径、界面匹配、紧固件拉伸和扭转等）。预装接头的校核需考虑应力

松弛和蠕变的长期影响。

#### 叶根结构

叶根结构，特指其与风轮轮毂结构的界面，需使用所有之前章节定义的不同方法进行分析，包括静强度、纤维间失效、疲劳、粘结。然而，厚铺层的影响以及对于经典（薄）铺层分析不在适用的三维效应，应给予特殊考虑。此外，需特别注意由于开裂、扩展引起的层间剪切，以及其它三维效应。叶片根端复杂性要求使用全叶片和/或子结构试验定义关键失效模式。

试验需被设计，用于捕捉极限强度和疲劳失效状态相关的失效模式。周围铺层的几何形状需对叶片根部连接具有代表性。试验载荷水平需对叶片设计具有代表性。

疲劳失效试验需描述载荷引入以及与叶片设计相关的载荷水平。几何和载荷循环的缩放需加以验证，并记录在设计文档中。对于预埋部分不同几何形状（例如直径、长度）的试验结果进行插值，需提供合理证明。

### 6.6.5.11 非结构特性

非结构特性被定义为非直接作用或影响叶片承载部分的项目，例如雷电保护系统的元件、锚点（用于防坠落系统）、空气动力学装置（涡流发生器等）、非结构舱壁和测量系统。

非结构特性不包括叶根界面、叶片壳体/抗剪腹板/主梁结构等。

如果非结构特征的失效会导致人员或财产的安全风险，则应进行强度分析。

可根据个人评估选择验证方法和部分安全系数，包括对人和财产安全的考虑。

对于所有强度分析，最小局部安全因子 $\gamma_m = 1.20$ 。

### 6.6.6 其它失效模式

#### 6.6.6.1 防雷

风力发电机组风轮叶片需通过雷电防护系统的设计安装避免雷击。雷电防护系统需满足 IEC 61400-24 标准要求。

#### 6.6.6.2 侵蚀

风力发电机组风轮叶片很容易受到侵蚀，特别是在前缘和叶尖。该侵蚀可以在雨、尘、沙等环境中暴露造成。

相关表面漆应针对预期的侵蚀加以评估，侵蚀保护的基础应在叶片技术说明书中明确规定。

如果叶片使用防冰冻功能，表面漆应针对最大期望表面温度情况下的侵蚀进行评估。

#### 6.6.6.3 其它环境影响

纤维增强复合材料对于直接暴露于外部环境中的影响（例如水分、外来化学品和紫外线辐射）通常比较敏感。叶片设计需确保结构具有足够的环境密封系统以保护其不受到影响。

材料选择应保证其在设计寿命的预期环境里不发生化学分解。如果无法避免，这些影响应被量化，并在材料特征强度发展中加以考虑。

维护活动中，材料对于化学品（例如液压流体）的疏忽性暴露也应被考虑。如果暴露被认为重要，其影响应在特征强度发展中加以考虑。

一些芯材随着时间的推移可以释放气体，特别是在高温情况下。这些气体产生的压力可以造成芯材和表面分层，应被考虑。

构成材料的腐蚀也需被考虑。碳纤维材料与金属接触，可以导致电偶腐蚀，其影响需被考虑。

叶片中积水的预防需进行规定。

## 7 制造要求

## 7.1 制造工艺

制造工艺应适合于满足结构设计规定的要求。

应准备每个生产步骤的风险评估（例如，PFMEA 过程失效模式和效果分析），包括公差和验收标准的影响以及它们是否符合结构设计假设。

应确定关键和重要的工艺参数，并将这些参数记录在控制计划或等效的文件中。

应制定工艺规范，至少包括以下内容：

- 连续生产步骤的描述；
- 连续质量控制步骤的描述。

对于每个生产步骤，应编制作业指导书，至少包括以下内容：

- 详细描述要执行的每个操作，如有必要，增加示意图或照片；
- 对于所有单个元素（如纤维材料层或粘接层）都需要有制造图纸，并明确表明尺寸、位置及公差；
- 使用的材料（BOM 清单）；
- 使用的设备和工具。

应建立变更管理制度，以控制、记录和保证对设计、工艺和工装规范中实施的变更进行适当的工程评估。

在以下小节中，规定了关键质量参数（CTQs）、工艺测量和记录要求，这些定义可以查看6.5.1章节。

## 7.2 车间要求

### 7.2.1 概述

制造商应有适合实现制造的车间设施、制造工艺、工具和设备，以及人员的培训和能力。

这些可以通过提供质量管理体系文件来证明。

制造商有责任了解和遵守本标准中定义的制造要求和国家的法律法规，包括健康和安全法规、其他适用的技术标准、对于材料的仓储和工艺要求，对于工具及设备的操作要求。

如果本标准中的要求不能确保产品可重复性和与设计相符性要求，则在质量管理体系中应规定必须的要求。

### 7.2.2 车间设施

车间设施应适合执行生产制造。

所有车间及其操作设备均应符合国家法律、法规和标准的要求。

对于所有的材料的加工和存储区，应该规定环境要求。这些要求应该通过现场测试数值来监控和记录。

对于铺层车间，当材料暴露在大气中时，如果在制造工艺中没有规定和要求可接受的温度和湿度，应保持车间内温度在16~30°C之间，相对湿度在20~80%之间。如果树脂或胶粘剂制造商指定了其它的工艺温度和湿度，应按其要求执行。

通风口和排气设备排除对材料的损伤，例如，在层压板中没有不可接受的大量溶剂可提取。

通过分开生产区域和其它车间以及储藏室，应尽量减少层压材料污染的危险。

工作场所应以适当的方式照明。应采取预防措施，防止因光照而无法控制的树脂固化。

对于特定的工作流程，可能适用附加的要求，并应说明。

至少应指定并记录以下关键质量参数（CTQs）：

按照质量管理体系（QM）规范，应连续记录车间温度和湿度。

### 7.2.3 材料处理和存储设施

反应材料。如层压树脂化合物、预浸料、胶衣、油漆和胶粘剂应根据制造商的指示运输和存储。应连续记录贮存和加工区域的温度和湿度。

增强材料、芯材、填料和添加剂应储存在密闭包装中，以防止污染和环境退化（例如，由粉尘、温度、湿度等引起）。暴露在空气湿度下的湿气敏感材料应存储在具有连续湿气记录的空间中，除非此类超越的影响微不足道，否则湿度不得超过此类材料规定的限制。

存储应以材料指定的方式排列，以确保制造商规定的存储条件和最大存储期限（到期日期）很容易看到。超过保质期的材料应标记为不合规，禁止使用；除非经检定并证明该材料适合特定用途。

所有对要加工的湿度敏感材料，在带到加工车间时应保持密封，直到其温度会防止冷凝（达到露点）。

密封包装的反应性和湿气敏感材料移出存储仓库并打开包装后可能在指定情况下（例如，热固化预浸料）返回存储仓库。在这种情况下，这些包裹必须做好清晰的标记。

#### 7.2.4 工具和设备

模具和工装设备应适用于所采用的制造工艺。

提供最终叶片外形的模具和工装应验证是否符合功能要求。

这包括但不限于：

- 过程中的温度分布（如果适用）；
- 表面粗糙度；
- 表面平面度；
- 外形公差。

##### 7.2.4.1 维护

应为所有工具、模具和设备（不包括通用的手工工具等）制订维护计划。

为了检查和验收准则，维护计划应指定时间间隔、过程周期或等价有效的规定。

为了跟踪检查/维护，工具和设备应标明具有唯一的标识，包括但不限于：（如果适用）

- 用于铺层工作的所有模具；
- 液体原材料自动混合设备；
- 叶片连接的钻孔机器；
- 装配夹具和定位装置。

维护过程必须在质量管理体系（QM）中描述

##### 7.2.4.2 校准

生产过程中使用的测量设备，包括液体原料的混合设备（如流量测量设备），应按预定计划进行校准。

按预定计划校准的测量设备清单，应包括但不限于：

- 温度和湿度传感器；
- 尺寸和角度测量设备（例如，卡尺、卷尺、激光测量设备）；
- 压力传感器（如果是关键过程）；
- 质量测量设备（例如，磅秤/称重传感器）；
- 配比设备/流量传感器；

设备应标有可追溯的标签，包括下一个所需的校准日期。

校准过程必须在质量管理体系（QM）中进行描述。

#### 7.2.5 人员

### 7.2.5.1 培训与认证

从事叶片制造的人员应具备足够的资质。

执行或控制直接或间接影响结构完整性（包括材料性能）的关键工作流程的人员应具备此类工作的资格。

必须确定关键工序的培训和能力要求。

关键工序定义为，但不限于：

- 纤维增强材料的铺设，包括预浸料；
- 夹层芯材的铺设；
- 轻木的铺设；
- 辅助部件的安装；
- 树脂和胶的应用；
- 手工混合两种或多种组分材料；
- 胶衣或油漆的应用；
- 切割、钻孔或打磨结构材料；
- 焊接；
- 无损检测过程；
- 质量控制（QC）包括目视检查。

每个员工执行或控制关键工作流程的培训级别和能力应登记，并根据制造商的质量管理体系定期进行审查。

### 7.2.5.2 环境、健康和安

本标准不包括对环境、健康和安全的要

求。应遵守国家和地方法律和要

求。层板的制造可能涉及某些健康风险，应制定健康和安

- 危险材料；
- 危险工序；
- 人员培训；
- 使用个人防护装备。

全计划，描述如何处理；个人防护设备和材料安全数据表（MSDS）应是有效的并可随时使用，以满足国家和当地的健康和安全要求。

## 7.3 质量管理体系要求

制造商至少应执行符合 ISO 9000 系列标准要求的

质量管理体系（QM）。制造商有义务满足本标准规定的制造要求，并将其纳入质量管理体系（QM）。

根据ISO9001标准，质量管理体系至少应满足质量管理模型的要求，质量管理体系（QM）应以书面形式做出详细规定。

其他标准可用作质量管理体系（QM）的参考。关于详细级别和文件的要求应与 ISO 9001 中规定的要求相媲美。

建议通过符合 ISO/IEC 17021 或同等标准的认证机构对质量管理体系（QM）进行单独认证，但不是必需的。

如果制造商没有质量管理体系（QM）认证，那么质量管理体系必须包括在生产评估中，并参照 IEC 认证方案。

## 7.4 制造工艺要求

### 7.4.1 通用制造要求

在以下小节中，给出了用于叶片制造的代表性制造工艺的基本要求。

在标准工序中，应避免在标准工序之外的任何制造工序（如维护、维修）。如果一个工序需要中断（即周末）操作，那么应确保最终产品由于中断而不会产生不良影响。

应考虑到可能影响工艺的外部因素（例如，在铺层/胶结区域中的粉尘、油漆和喷雾）的污染。

如果制造商能够确保此类活动不会对铺层质量产生负面影响，则仅允许在铺层车间内运行有粉尘产生的机械、油漆或喷涂工作。

对于材料的制备和加工，除本标准外，还应遵守材料制造商的说明以及其他任何适用的法规，如相关安全部门的规定。

#### 7.4.2 模内胶衣的应用

如果表面处理是通过胶衣实现的，应根据工艺规范并通过合适的工艺将胶衣进行混合后用于模具上。

应规定固化水平和/或允许第一层铺层铺设在胶衣上的时间范围。

至少应规定并记录以下关键质量参数（CTQ）：

- 胶衣的厚度（湿膜或干膜）。

#### 7.4.3 制作层压板

##### 7.4.3.1 概述

应根据工艺说明书制作层压板。

对于夹层芯材，应确保加工过程中材料的条件得到规定和控制。这可能包括，但不限于，脱泡、温度和湿度控制。

只有在工作说明书中描述的情况下，才能进行铺层的延长（在纤维长度/布卷不足时创建一个接头）。

预成型部件，如木材或泡沫套件、纤维套件等，应以确保重复性的方式做出规定和加工。

控制装置应到位，将预制部件并入铺层中时不会对整体结构产生不利影响。

至少应规定、控制和/或监视以下工艺参数：

- 相邻芯材之间的间隙和台阶；
- 铺层的位置，包括铺层搭接；
- 纤维排列。

##### 7.3.4.2 铺层的整合

这些层应得到充分的整合和压缩，以便满足后续的工艺要求。

##### 7.4.3.3 树脂的应用与固化

应有文件明确该工艺能够在验收准则内按规定的设计生产，包括干纤维或气泡含量以及根据材料要求规定的纤维体积或质量分数百分比，以满足设计强度要求。

应用的工艺应适用于所用的树脂系统。

树脂和固化剂应均匀混合，无任何空气侵入。如果使用混胶设备，则应规定一个验证和控制每个制造周期的正确混合比的工序。

手糊工艺（如树脂混合、机械制备（辊筒）以释放被困的空气或层压板中的其他气体、以及固化）应加以控制，以确保指定的最终层层压板的质量得到保证。

在生产期间，不得超过制造商规定的混合树脂组份的操作时间。在没有此类信息的情况下，应在初步试验和制造规范中描述的操作时间限制内建立操作时间。

控制装置应到位，将预制部件并入铺层中时不会对整体结构产生不利影响。

如果需要真空辅助加压，则应规定允许的工艺温度和真空水平，两者都是时间的函数。

对于真空灌注，应指定相关的工艺参数，至少包括树脂使用温度和时间，真空设置以及灌注和固化所设的不同的真空度。

应规定层压板缺陷的检查方法（如，空隙率、干斑、杂物、高或者低树脂含量）

至少应规定、控制和/或监视以下工艺参数：

- 在固化和/或灌注期间的固化周期、树脂温度和真空度。

从混合树脂到完成应用的时间

#### 7.4.4 胶粘剂粘结工艺

##### 7.4.4.1 表面处理

应规定粘结前的表面处理工序。粘结表面的处理工艺应适用于所用的基材和粘结材料。

典型的表面处理程序可能包括机械打磨（如粗磨、研磨或者喷砂、剥离脱模布）和化学腐蚀。

应考虑表面处理的退化（如湿气和灰尘的积累、表面处理和粘合之间的时间间隔以及环境条件）。

在粉尘和表面污染方面，应规定粘接前表面条件的验收标准，并满足所用的特定胶粘剂的要求。

如果胶粘剂型号要求，粘结在一起的材料表面不含污染物（如湿气、脱模剂、蜡、油脂、油、粉尘、铁锈或溶剂）。使用溶剂清洗时，应确保溶剂与材料的相容性。

如果FRP组件要粘合，在粘结前应规定最低和最高固化度。

##### 7.4.4.2 胶粘剂的应用

胶粘剂的混合和应用工艺应适用于所使用的基材和胶粘剂材料。应规定控制和验证正确混合比例的程序。应控制工艺，使其达到规定的最终粘合性能。

应规定粘结层宽度和厚度的标称值和公差，以及允许的最大尺寸和范围（如空隙、圆角半径）。

胶粘剂应按照制造商的说明进行处理。填料的比例不得超过允许的限制。胶粘剂应以达到均匀混合的方式混合。

考虑到环境条件，应规定并记录从胶粘剂混合到应用结束的时间和在正确的位置零件的最终粘结情况。

##### 7.4.4.3 质量保证

应确保粘结线几何形状符合设计规范。这可以通过使用具有显示稳定性的受控过程或通过检查每个部件来实现。例如，模具空合试验（未永久粘结的连接部件以验证粘结厚度或间隙）、目视检查和/或无损检测测量可用于显示符合制造要求的情况。

至少应规定、控制和/或监视以下工艺参数：

- 粘结宽度；
- 粘结厚度；
- 已固化的胶粘剂硬度；
- 已混合的胶粘剂粘度；
- 空隙率；
- 粘结前表面的开放时间；
- 从开始混合胶粘剂到完成零件粘结的时间。

##### 7.4.5 固化

树脂和胶粘剂系统应进行固化，以达到设计规范中规定的最终性能要求。这可能包括根据树脂或胶粘剂制造商的说明或适当的先前调研的结果进行固化。这个要求包括固化后的操作。

应控制和记录固化时间-温度曲线，以达到胶粘剂和树脂的设计性能要求。应规定这些曲线的公

差。

树脂和胶粘剂的固化应不会对叶片部件产生负面影响。例如，在在固化过程中发生的最高温度应该不超过 PVC 或者模具等材料最高允许温度。

在进行可能对结构造成损坏的操作（如脱模或叶片/预制构件移动）之前，应达到足够的固化程度。

应验证和记录固化度。

至少应规定、控制和/或监视以下工艺参数：

- 固化度（如适用）。

#### 7.4.6 脱模

应规定和描述叶片或叶片部件的脱模过程。

#### 7.4.7 修边、切割和打磨

修边、切割和打磨过程包括机械去除材料的全部操作。这包括但不限于：

- 在结构中的钻孔；
- 研磨根部端面；
- 修边和切割层合工艺产生的多余材料；
- 砂磨操作。

修边、切割和打磨工艺应定义为叶片结构不会因工艺而退化，关键尺寸符合设计标准。

#### 7.4.8 表面涂层

表面涂层可能包括油漆（包括底漆/面漆系统）、胶衣和前缘保护。

对于表面涂层（除胶衣外）的应用，应规定应用工艺和表面条件。

底漆或油漆混合和使用工艺应按照工艺规范进行控制，并应适合所用材料。应规定、控制和记录工艺参数和公差，以满足设计要求，包括但不限于混合比。

涂层工艺应提供涂层与结构层压板之间所需的附着力。应规定将涂层应用到层压板表面的固化度和/或时间允许范围。

应规定带有公差的固化前或固化后的涂层厚度。厚度测量应均匀地在叶片表面上采样，并做好记录。

如适用，应指定前缘保护系统（LEP）及其应用工艺。应规定、控制和记录LEP的工艺参数和公差，以确保最终的LEP符合规定的要求。

至少应规定、控制和/或监视以下工艺参数：

- 表面涂层：光泽、颜色、粗糙度；
- 固化水平；
- 表面涂层厚度。

#### 7.4.9 密封

除非证明没有必要，否则没有表面保护的层压板表面应使用合适的介质进行密封。特别要注意的是，切割和胶合接缝的切割边缘应小心保护，以免受到环境影响（例如，潮湿或紫外线辐射）。

所用的密封材料不得损害层压板的性能。它们还应符合该组件的预期用途。

#### 7.4.10 其他部件装配工艺

如果在车间进行装配、安装子部件或附加装置，这些应在作业指导书中描述，包括几何位置和工艺或者带有公差的扭矩值。这包括但不限于：

- 根部连接件；
- 叶片轴承；
- 叶片根部螺栓；
- 防雷系统部件；
- 排水系统；
- 机械叶尖刹车系统；
- 叶片分段连接；
- 气动装置（如涡流发生器）。

#### 7.4.11 质量和平衡

平衡过程包括设备的使用、装卸和安装平衡材料应在作业指导书中明确规定。

在平衡工序后无需加入或应添加的功能或设备，应量化并纳入叶片文档中。

至少，在平衡后，每个叶片应规定并记录以下关键质量参数（CTQ）：

- 叶片总质量；
- 叶片重心位置或叶片质量矩（包括参照位置）；
- 添加的平衡重量（适用于每个平衡位置）。

#### 7.4.12 外部控制环境下的制造和装配工序

任何在受控环境之外进行的制造或装配工序，都应考虑到对外部气候条件的敏感性。这适用于在户外进行的工作等。

如果在控制环境之外的这些操作被视为标准制造过程的一部分（例如，叶片运输后的刮痕修复、叶片安装前的清洁表面），则应记录它们并证明它们将不影响叶片的任何设计要求或性能。

应规定材料与新环境条件兼容，也应与车间使用的标准材料兼容。

对于层压或粘结过程，应至少规定以下参数的环境限制：

- 温度；
- 湿度；
- 风速；
- 表面处理及污染；

应考虑温度和露点引起的材料表面凝结。

#### 7.5 天然纤维增强风轮叶片的制造

天然纤维（包括木材、竹子和其他天然生长纤维）的机械性能可能对加工更敏感。工艺参数和限制应考虑到这一点。

对于天然纤维材料，应明确规定原料的种类、产地和使用年限等要求。如果与材料有关，预先对应使用的材料进行分类，以确保材料符合要求的质量标准（如锯材的DIN 4074-1）。应规定和控制含水率，以确保层压材料在加工前和加工过程中满足文件要求。

制造材料的认证应考虑到天然纤维的强度、刚度和密度的机械性能的额外变化。

对于本文件未涉及天然纤维的特性，可以采用其他工业认可的标准。

#### 7.6 其它制造工艺

对于上述章节未涉及的其他制造工艺（“纤维增强叶片的制造”或“天然纤维增强叶片的制造”），应确保具有与纤维增强材料工艺或天然纤维工艺相同的文件和质量水平。

#### 7.7 质量控制过程

### 7.7.1 制造质量计划

制造质量计划应定义为每个制造步骤的检查清单和文件。

### 7.7.2 来料检验

制造商应建立来料检验程序，包括适用的方法，以确保制造过程中使用的材料和部件符合设计或材料规范中规定的性能和公差。

来料检验应包括但不限于：

- 结构纤维增强材料；
- 结构树脂；
- 结构胶粘剂；
- 预浸料；
- 胶衣和涂层；
- 结构芯材；
- 结构螺栓和紧固件，包括根部螺栓套。

来料检验方法包括：

- 来料检验证书；
- 由供应商提供文件验证的质量控制程序；
- 内部检查是否有任何损坏；
- 规定抽样率或频率的内部测试；

这些方法的验收标准应在文件中规定。

来料检验证书可基于与 ISO 10474 (EN 10204) 相关的 ISO 10474-2.2 (EN 10204-2.2) 和 ISO 10474-3.1 (EN 10204-3.1)，或等效的其它标准。

### 7.7.3 制造和质量控制记录

生产过程的详细内容应按说明书和作业指导书规定，其中还包含记录所选生产工艺参数的文件，例如 关键质量参数 (CTQ) 值、部件的测试。

明确生产和质量控制部门的任务和职责，包括签署过程和质量文件的权限。

在过程的特定阶段，质量计划中规定的有能力的人员对这个步骤的完成进行确认和检查。

为叶片的设计寿命，每个叶片生产和存储在安全位置时，应记录以下数据：

- 叶片序列号或类似的唯一标识；
- 在过程检查、审批和检查列表以及相应的限制中的所有关键质量参数 (CTQ) 和设计项目

应测量或记录：

- 不合格报告 (NCRs) 和处理/修复不合格项 (NCR)；
- 可追溯性要求的物料批号；
- 影响关键质量参数 (CTQs) 的所用的叶片工具标识 (序列号或等效标识)。

在部件中使用的原材料的可追溯性 (如供应商、批次和批次编号) 应确保至少有以下项目：

- 结构纤维增强材料
- 结构树脂
- 结构胶粘剂
- 预浸料
- 胶衣和油漆
- 结构芯材
- 结构螺栓和紧固件

对于使用上述描述未涵盖的材料的其他制造工艺，应确保有类似的文件和质量记录。

#### 7.7.4 不合格流程

##### 7.7.4.1 不合格标识和记录

应建立记录和评估在生产过程中发现的任何不合格的系统（例如，作为符合ISO 9001的质量管理体系的一部分）。

应确保检测和记录制造中的不合格（例如，超过公差或验收标准）。

##### 7.7.4.2 不合格评定和纠正

应建立纠正措施评估程序。不合格应按严重程度和需要采取纠正措施进行分级。

严重程度应按照第6条的结构要求进行评估。

包括结构修复在内的纠正措施应根据结构的严重程度进行分类，这应包括设计人员。

如果纠正措施包括不合格品的验收或标准维修，则应在设计文件中加以考虑。

#### 7.7.5 在制造过程中的纠正措施

对于制造中的纠正措施，应确保所产生的结构和几何形状符合第6节的要求。

对于包括结构维修在内的纠正措施，此符合性应通过以下方式证明：

- 维修的完整描述/规范（准备、材料、铺层、加工等）。

根据第6.6节的要求进行设计分析。这种分析应包括对用于修复结构的部分安全系数的明确说明。允许使用与未修复结构分析不同的部分安全系数，但前提是应满足第6.6.5节中所规定的适用这些系数的条件。

- 完成维修的完整文档（制造协议）。

结构维修包括但不限于：

- 任何连续纤维的切割、打磨和/或更换；
- 任何结构胶粘剂的去除和/或更换；
- 任何夹层芯材的去除和/或更换。

非结构性维修可能包括：

- 涂层或者胶衣维修；
- 表面的轻微填充以满足外形需要；
- 防雷部件的更换。

#### 7.7.6 最终制造检验和符合性审查

最终检验应由制造商进行。

检验程序应明确规定，包括但不限于以下项目：

- 检查几何形状，包括剖面数据和尾缘厚度的精度；
- 质量和重心的测量；
- 检查每套叶片的平衡质量；
- 表面质量和外观；
- 排水系统（如适用）。
- 安装系统的功能检查（包括但不限于）：
  - 刹车系统；
  - 挥舞或者移动装置；
  - 传感器和监控系统；
  - 防雷系统；
- 伴随风轮叶片生产流程的工作进度表和检查表；

- 控制表和检查表中数据和条目的完整性检查。符合验收标准的验证数据（CTQ）。最终检验的数据和结论应记录并存储在叶片制造的文件中。

### 7.7.7 文件

#### 7.7.7.1 叶片的标识

每个风轮叶片应永久地用唯一的标识作标记。

唯一标识可以是序列号，并应允许识别生产地点和叶片制造文件。

此外，应将永久性标识（例如，非腐蚀性材料制成的板）固定在易于接近的位置，并至少提供以下信息：

- 制造商；
- 型号命名；
- 系列号。

除非在设计上另有定义，否则在桨叶根部应标上变桨安装角的基准。

#### 7.7.7.2 叶片文件

最终检验/检查应形成文件。

对于每个风轮叶片，文档至少应包含以下数据：

- 制造商；
- 风轮叶片型号命名（例如，型号/名称）；
- 系列号和制造日期；
- 质量和重心；
- 质量矩（包括几何参考）；
- 气动刹车的类型（如适用）。

### 7.8 制造评估要求

为了符合认证要求，在执行制造评估时参照 IEC 认证方案，对风轮叶片制造评估提出具体要求。制造评估应包括对材料结构性能至关重要的制造过程的抽查，包括：

- 主要结构纤维、芯材和/或部件的铺设；
- 树脂应用工艺（如适用）；
- 主要粘结工艺（如适用），包括表面处理、部件定位和施胶。

应该特别注意与关键工序有关的质量程序，包括：

- 固化过程。

至少，应审查下列文件是否符合设计要求，并可用于制造评估审查工作。

- 材料合格证；
- 作业指导书和图纸，包括带有公差的工艺说明书；
- 质量控制表，包括为了关键质量参数（CTQ's）而制定的验收标准/公差。

质量管理体系的要求应符合第 7.3 条中有关制造评估的要求。

## 8 叶片安装，运行及维护

### 8.1 概述

本章节定义了叶片安全运输吊装、运行及维护所应需的信息与要求。

应定义叶片运行范围与限制。

为满足叶片设计中考虑的情况或假设，必须以信息材料（如手册或同类资料）的形式说明特定的要求，并提供给在全生命周期内对其进行运输、运行和/或维护的人员。

设计应考虑特定维护工作相关的个人防护设备的需求，但不能取代任何法律或国家的要求。

为保证风力发电机型式认证一致性，可以采用其他相关标准；包括与 IEC 61400-1 标准一致。

## 8.2 运输吊装

维护手册应包括但不限于对叶片吊装、运输以及贮存的说明。

应提供叶片搬运相关所有工作的指南，包括但不限于吊装、贮存、运输以及安装。

如果设计指定了叶片的吊装运输点，手册中应包含具体的位置与尺寸说明。

应提供以下位置与参考信息（通过在叶片上附加标签、草图或说明等方式）：

- 重心位置（CG）；
- 吊装运输点。

许用吊运流程应定义如下内容：

- 在吊装运输过程中叶片的姿态（例如挥舞或摆振）；
- 吊点组合使用的说明；
- 叶片旋转方法；
- 如何保护叶片整体，尤其是前后缘；
- 如何在叶片存放期间对其支撑和保护，以及存放时间限制。

应规定叶片在运输过程中允许的最大加速度和载荷。

应明确标识在运输与贮存中支撑点的位置与尺寸。

如果运输工装是通过叶片安装孔固定于叶根，应说明最少连接螺栓数以及紧固措施。

## 8.3 维护

### 8.3.1 概述

叶片防雷系统的检查及维护需按照 IEC 61400-24 标准要求。

如果叶片设计要求例行维护与检查，应予以说明。

如果对叶片清洁有所规定，应说明允许的清洁方法，以及任何对化学品使用的限制。

叶片维护手册应说明安全运行许可的缺陷。对可能引起结构强度退化的缺陷，应在设计和/或测试中予以考虑。

### 8.3.2 定期检查

如果要求对叶片进行定期检查，则以下部分应进行说明：

- 检查的形式，以及周期与时间；
- 要检查的叶片区域；
- 适用的接受标准。

典型的检测位置一般应包含但不限于以下：

- 后缘；
- 前缘；
- 主梁；
- 根部连接/根部密封；
- 叶尖/排水孔；
- 防雷系统及雷电记录卡；
- 叶片表面；
- 叶片内部，例如抗剪腹板；

- 叶片机械部件,例如叶尖刹车。
-