

ICS 65.060.99

F11

JB

中华人民共和国机械行业标准

JB/T 10194—2000

风力发电机组风轮叶片

Rotor blades of wind turbine

2000-04-24 发布

2000-10-01 实施

国家机械工业局 发布

目 次

前 言	ii
1 范围	1
2 引用标准	1
3 定义	1
4 缩略语	4
5 载荷情况定义	5
6 设计要求	5
7 环境适应性	7
8 安全和环保	7
9 叶片材料要求	7
10 工艺要求	10
11 质量保证	12
12 试验方法	12
13 检验规则及验收	18
14 叶片的标志和使用维护说明书	19
15 叶片包装、贮存、运输	19
附录 A (标准的附录) 载荷情况定义	21
附录 B (标准的附录) 强度计算	39

前 言

本标准的制订参考了 IEC 61400-1、IEC 61400-23、丹麦标准 DS472 以及德国劳埃德风力发电机组认证规范等标准，对风力发电机组风轮叶片的设计、制造、材料、技术条件、试验方法、检验规则以及叶片的包装、运输和贮存等有关内容给出了通用性技术要求。供国内开发研制风力发电机组风轮叶片参照执行。

本标准的附录 A 和附录 B 都是标准的附录。

本标准由全国风力机械标准化技术委员会提出并归口。

本标准起草单位：中国航空工业总公司保定螺旋桨制造厂、上海玻璃钢研究所。

本标准主要起草人：田野、石海增、鲁金华、田卫国、陈余岳。

1 范围

本标准规定了风力发电机组风轮叶片的通用技术条件。

本标准适用于风轮扫掠面积等于或大于 40m^2 的水平轴风力发电机组风轮叶片。

2 引用标准

下列标准所包含的条文，通过在本标准中引用而构成本标准的条文。本标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T 1447—1983	玻璃纤维增强塑料拉伸性能试验方法
GB/T 1449—1983	玻璃纤维增强塑料弯曲性能试验方法
GB/T 1463—1988	纤维增强塑料密度和相对密度 试验方法
GB/T 2576—1989	纤维增强塑料树脂不可溶分含量试验方法
GB/T 2577—1989	玻璃纤维增强塑料树脂含量试验方法
GB/T 3356—1999	单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法
GB 9969.1—1998	工业产品使用说明书 总则
GB/T 13981—1992	风力机设计通用要求
GB/T 19001—1994	质量体系 设计、开发、生产、安装和服务的质量保证模式
GB/T 19002—1994	质量体系 生产、安装和服务的质量保证模式
ISO 12944.3—1998	涂料和油漆——用保护涂料进行钢结构防腐 第3部分：设计依据
ISO 12944.5—1998	涂料和油漆——用保护涂料进行钢结构防腐 第5部分：涂料保护系统
IEC 61400-24—1999	结构防雷击保护 第1部分：总则

3 定义

本标准采用下列定义。

3.1 制动

能有效地降低风轮转速或使其停止转动的手段。

3.2 切入风速

风力发电机组开始输出有用功率时，在轮毂高度处的最小风速。

3.3 切出风速

设计时规定的风力发电机组输出有用功率时，在轮毂高度处的最大风速。

3.4 短期切出风速

使安全系统立即触发的风速。

3.5 设计极限

设计中使用的最大或最小值。

3.6 设计工况

机组可能发生的运行模式（如发电、停机等）。

3.7 外界条件

影响风力发电机组运行的因素，包括风况和其它气象因素（如温度、盐雾、沙尘等）。

3.8 阵风

风速的瞬间变化。可以通过它的形成时间、强弱和持续时间来表示其特性。

3.9 水平轴风力发电机组

风轮轴与风向基本平行的风力发电机组。

3.10 轮毂

能将叶片或叶片组件安装在风轮轴上的装置。

3.11 轮毂高度

风轮中心距地面的高度。

3.12 待机

风力发电机组慢速运转无功率输出的状态。

3.13 极限状态

载荷作用于结构上的一种状态，若超出此范围，则结构不再满足设计要求（见 ISO 2394）。

3.14 载荷情况

结合考虑设计工况和外界条件所产生的结构载荷。

3.15 平均风速

在一给定的时间段内，瞬时风速的平均统计值，时间段可以从几秒钟到许多年。

3.16 停机

风力发电机组正常关机以后的状态。

3.17 输出功率

以特定的方式，为达到特定的目的通过一种装置输出的功率。

3.18 安全系统

使机组保持在设计极限范围内的安全保护装置。

3.19 额定功率

部件、装置或设备在规定的运行条件下能达到的功率，通常由制造商给出。

3.20 额定风速

风力发电机组达到额定功率时的特定风速。

3.21 风轮转速

风力发电机组风轮绕其轴的旋转速度。

3.22 扫掠面积

风轮叶尖旋转运动所作的圆在垂直于风速矢量平面的投影面积。

3.23 风切变

在垂直于风向的平面内，风速随高度的变化。

3.24 风速

空气通过空间特定点上的瞬时运动速度。

3.25 风力发电机组

将风能转变为电能的装置。

3.26 瑞利风速分布

在给出的风速频率里用瑞利公式对风速进行的数学描述。

3.27 风速频率

一年时间的间隔内，相同风速小时数的总和，对于总间距总时数的百分比。

3.28 叶尖速度比

同一时刻，叶尖线速度与轮毂高度处风速的比值。

3.29 风能利用系数

风轮转换的风的动能与通过风轮扫描面积的全部风的动能的比值。用 C_p 表示。

3.30 推力系数

风轮产生的推力与通过风轮扫描面积的全部风产生的推力的比值。用 C_t 表示。

3.31 扭矩系数

风轮的输出扭矩与风能对风轮产生的扭矩的比值。

3.32 气动性能

表面风轮推力系数、扭矩系数、风能利用系数和叶尖速度比之间关系的属性。

3.33 设计使用寿命

风力发电机组在安全风速以下正常工作的设计使用年限。

3.34 风轮

由叶片等部件组成的将风能转化为机械能的转动件。

3.35 叶片

具有空气动力形状，使风轮绕其轴转动的主要构件。

3.36 叶片安装角

叶根确定位置处翼型几何弦与叶片旋转平面所夹的角度。

3.37 扭角大小

叶片尖部几何弦与根部几何弦夹角的绝对值。

3.38 颤振

风力发电机组风轮叶片在气流中出现自激振动的不稳定状态。

3.39 雷诺数

表征流体惯性力和粘性力相对大小的一个无因次相似参数。

3.40 相似准则

流动现象的各参数所组成的描述流动特性的无因次量，即判定两个流动现象相似必须遵守的原则。

3.41 风洞

在一个按一定要求设计的管道内，产生可控制流动参数的人工气流，供气动实验使用的设备。

3.42 风洞试验

利用在风洞试验段中的气流绕模型流动,获得模型气动力特性的试验。

3.43 失速

翼型升力系数随迎角增加开始下降,或叶片出现不可承受的抖动或结构振动的异常现象。其机理在于大迎角翼型边界层分离。

3.44 中弧线

翼型上下表面内切圆圆心光滑连接起来的曲线。在前部,最小内切圆与翼型周线的切点是中弧线的起点;在后部,最小内切圆与翼型周线的切点是中弧线的终点。

3.45 前缘

翼型中弧线的最前点。

3.46 后缘

翼型中弧线的最后点。

3.47 弦线

连接前缘与后缘的直线。

3.48 弦长

弦线的长度。

3.49 上弧线

从前缘到后缘,翼型的上部轮廓曲线。

3.50 下弧线

从前缘到后缘,翼型的下部轮廓曲线。

3.51 厚度

垂直于翼型弦线测得的上下弧线间的距离。一般指最大厚度。

3.52 重心

在重力场中,物体处于任何方位时,所有各组成质点重力的合力通过的那一点。

3.53 不平衡量

转子某平面上不平衡的量值大小,不涉及不平衡的相角位置。它等于不平衡质量与其质心至轴线距离的乘积。

3.54 静平衡

通过调整叶片的质量分布,使每套叶片组成的风轮的不平衡量到达规定的要求。

3.55 计数法

把载荷-时间历程简化成一系列全循环或半循环,从而编制载荷谱的过程。

3.56 雨流计数法

考虑了应力-应变迟滞回线的一种计数法。

4 缩略语

叶片:风力发电机组风轮叶片

复合材料(FRP):纤维增强塑料

5 载荷情况定义

叶片载荷情况定义参考附录 A（标准的附录）。

6 设计要求

6.1 气动设计

6.1.1 总则

叶片气动设计是整个机组设计的基础，为了使风力发电机组获得最大的气动效率，建议所设计的叶片在弦长和扭角分布上采用曲线变化；设计方法可采用 GB/T 13981 中给定的方法。

可采用专门为风力发电机组设计的低速翼型。

6.1.2 额定设计风速

叶片的额定设计风速按附录 A 中表 A1 规定的等级进行选取。

6.1.3 风能利用系数 C_p

为了提高机组的输出能力，降低机组的成本，风能利用系数 C_p 应大于或等于 0.44。

6.1.4 外形尺寸

叶片气动设计应提供叶片的弦长、扭角和厚度沿叶片径向的分布以及所用翼型的外形数据。

6.1.5 气动载荷

根据气动设计结果，考虑第 5 章中给定的载荷情况，计算作用在叶片上的气动载荷。

6.1.6 使用范围

叶片的气动设计应明确规定叶片的适用功率范围。无论是定桨距叶片还是变桨距叶片，都要求其运行风速范围尽可能宽。对于变桨距叶片，要给出叶片的变距范围。

6.2 结构设计

6.2.1 总则

叶片结构设计应根据 6.1.5 中的载荷，并考虑机组实际运行环境因素的影响，使叶片具有足够的强度和刚度。保证叶片在规定的使用环境条件下，在其使用寿命期内不发生损坏。另外，要求叶片的重量尽可能轻，并考虑叶片间相互平衡措施。

叶片强度通常由静强度分析和疲劳分析来验证。受压部件应校验稳定性。

强度分析应在足够多的截面上进行，被验证的横截面的数目取决于叶片类型和尺寸，至少应分析四个截面。在几何形状和/或材料不连续的位置应研究附加的横截面。

强度分析既可用应变验证又可用应力验证，对于后者，应额外校验最大载荷点处的应变，以证实没有超过破坏极限。

应通过可靠的分析方法和试验验证，证明叶片能满足各种设计使用情况下的静强度和疲劳强度及气动弹性稳定性要求。强度计算见附录 B（标准的附录）。

6.2.2 安全系数

叶片的设计安全系数应大于或等于 1.15。

6.2.3 刚度

对于复合材料结构叶片，设计时应满足机组振动、气动弹性不稳定性、机械功能等设计目标的要求，还应保证其在承受 50 年一遇阵风载荷情况下不损坏及对机组造成灾难性的后果。

6.2.4 固有频率

叶片的固有频率应与风轮的激振频率错开，避免产生共振。固有频率既可以通过计算也可以通过实测确定。

6.2.5 气动弹性稳定性

应考虑叶片所有设计状态下的颤振及其它不稳定性，使叶片不产生有害的振动，并分析叶片的动态特性。

6.2.6 设计使用寿命

叶片的设计使用寿命大于或等于 20 年，结构设计应满足这一要求。叶片的设计使用寿命既可以通过计算，也可以通过疲劳试验确定。用于疲劳分析验证的载荷谱既可以通过计算也可以通过实测的方法确定；载荷循环数可用雨流计数法确定。

6.2.7 可靠性

对于叶片中的机械机构，如变桨距叶片的变桨距系统和定桨距叶片的叶尖气动刹车机构（如果有的话），其可靠性应满足用户的要求。

6.2.8 物理特性

叶片的设计还应给出下列内容：

- a) 叶片的质量及质量分布；
- b) 叶片重心位置；
- c) 叶片转动惯量；
- d) 叶片刚度及刚度分布；
- e) 叶片的固有频率（挥舞、摆振和扭转方向）。

6.2.9 接口尺寸

结构设计应给出同轮毂连接的详细接口尺寸。

6.3 技术要求

6.3.1 叶片应符合由制造商制定的技术文件要求，叶片图样是叶片的主要技术文件。

6.3.2 制造叶片所用的材料应有供应商的合格证明，并符合零件图样规定的牌号。化学成分、力学性能、热处理和表面处理应符合相应标准。

6.3.3 叶片的零件、组件及外购件应符合生产的技术文件。

6.3.4 为了满足叶片的气动性能，并考虑叶片加工的工艺性及相应的制造成本，下列公差要求是叶片批量生产时应达到的最低值：

- a) 叶片长度公差： $\pm (0.13\% \times L)$ mm，其中 L 为叶片长度；
- b) 叶片型面弦长公差： $\pm (1.5\% \times c)$ mm，其中 c 为翼型型面弦长；
- c) 叶片型面厚度公差： $\pm (1\% \times t)$ mm，其中 t 为翼型型面最大厚度；
- d) 叶片型面扭角公差： $\pm 0.4^\circ$ ；
- e) 叶片成套重量互差： $\pm 1\%$ ；
- f) 叶片轴向重心互差： ± 10 mm。

7 环境适应性

7.1 总则

设计和制造叶片时要考虑环境因素的影响,应进行耐环境设计,采取相应措施,使其具有较高的环境适应性。

叶片在一定程度上暴露在腐蚀性环境条件下并且不容易接近。由于运行条件的原因,在许多情况下,不可能重做防腐层,因此重视设计、材料选择和防腐保护措施特别重要。

防腐和减轻腐蚀的结构设计对防腐的实施、效果和可修理性具有重大影响。防腐的基本规则见 ISO 12944-3 和 ISO 12944-5 的规定。

对于不能通过涂层或镀层来防腐的部位,可以选用适当的材料。

复合材料叶片应采用胶衣保护层。

7.2 环境条件

7.2.1 温度

叶片设计使用温度范围为 -30°C ~ $+50^{\circ}\text{C}$ 。

7.2.2 湿度

叶片设计使用湿度小于或等于 95%。

7.2.3 盐雾

对于在沿海地区运行的风力发电机组,叶片设计时应考虑盐雾对其各部件的腐蚀影响,并采取相应的防腐措施。

7.2.4 雷电

叶片设计时应充分考虑遭雷击的可能性,并采取相应的雷击保护措施,雷击保护系统的设计按 IEC 61400-24:1999 要求进行。

7.2.5 沙尘

叶片设计应考虑沙尘的影响,如沙尘对叶片表面的长期冲蚀,对机械转动部位润滑的影响以及对叶片平衡造成的影响等。

7.2.6 辐射

对于复合材料叶片应考虑太阳辐射强度以及紫外线对材料的老化影响。

8 安全和环保

8.1 总则

叶片的使用和制造不应当地居民的安全和环境产生不利影响。

8.2 噪声

叶片产生的噪声是机组噪声的一个组成部分,叶片设计时必须考虑这一因素。

8.3 环保

制造叶片材料,尤其是复合材料,在制造过程中可能会产生一些有害的物质,因此,应尽量选择适当的材料,使其在制造和使用过程中不会产生大量有害的粉尘和挥发物,对环境产生不利影响。

9 叶片材料要求

9.1 总则

9.1.1 叶片材料选择应遵守下列准则:

- a) 疲劳强度高;
- b) 静强度适当;
- c) 在所有环境下的可靠性;
- d) 重量轻;
- e) 成本低。

9.1.2 所选择的材料必须满足设计使用要求,并适合加工制造。

9.1.3 所选择材料的性能指标及化学成分应符合现行有效标准或其它有关技术条件要求。

9.1.4 材料制造商应具备 GB/T 19002 的质量认证体系,应提供材料的合格证和检验单。

9.1.5 材料应有使用说明书,并按其规定使用。

9.1.6 主要材料和用于重要零部件的材料,进厂后应进行性能复验,试验类型和范围按设计要求或有关规定进行。

9.1.7 不允许使用超期材料,除非经试验证明性能符合要求,并办理有关手续方可使用。

9.1.8 代用材料其性能指标及质量等级应与原使用材料相当。

9.2 复合材料

9.2.1 增强材料

9.2.1.1 叶片的增强材料通常选择玻璃纤维及其制品,如粗纱、毡、各类织物。必要时可适当选用碳纤维制品。

9.2.1.2 纤维表面必须进行保护或附着增强型涂层,并且要适合于使用的层压树脂。

9.2.1.3 玻璃纤维应使用 E—玻璃纤维、R 或 S—玻璃纤维,不得使用其它类型的纤维。

9.2.1.4 纤维及其制品的牌号、性能、规格应符合现行国家标准或行业标准。

9.2.1.5 性能试验按国家相关标准进行。

9.2.2 树脂

9.2.2.1 根据用途和要求,可区分为层压树脂和胶衣树脂,如两种树脂混合在一起,或配套使用,必须证明两种树脂相容,除非两种树脂结构相同。

9.2.2.2 胶衣树脂在固化条件下,应具有较好的防潮性和防紫外线辐射及其它有害环境影响的性能,并且应具有良好的耐磨性、低吸水性和高弹性,胶衣树脂中只允许添加触变剂、颜料和固化剂。

9.2.2.3 层压树脂在铺层时应有良好的浸渍性能,在固化状态有良好的防潮性和高的防老化性能。

9.2.2.4 树脂的所有添加物如固化剂、促进剂、催化剂、填料和颜料,要与树脂相协调,并且彼此之间要兼容,保证树脂完全固化。

9.2.2.5 填料不得影响树脂的主要性能,填料的类型和填加总量可通过试验确定,在树脂中填料的比例不超过重量的 12% (包括最多 1.5% 的触变剂),触变剂的比例在胶衣树脂中不超过重量的 3%。

9.2.2.6 颜料应不受气候影响,可由无机或不褪色的有机染料物质组成,颜色由用户决定,填加比例按制造商规定,否则按重量的 5%。

9.2.2.7 树脂、固化剂、催化剂、促进剂应根据制造商的工艺说明书使用,通常应选择冷固化系统,即在 16℃~25℃ 温度范围内达到良好固化。

9.2.2.8 树脂及所有添加物的牌号、规格、性能应符合现行国家标准或有关行业标准。

9.2.2.9 性能试验按国家相关标准进行。

9.2.3 芯材

9.2.3.1 芯材要满足使用要求，并不影响树脂的固化。

9.2.3.2 金属材料局部加强件要仔细清洗、去油脂、喷砂或用其他方法得到合适的表面状态，以便达到最佳连接。

9.2.3.3 硬质泡沫塑料可以作为芯材，使用的泡沫塑料应为闭孔结构。

9.2.3.4 轻质木材可作为芯材，在使用前必须进行灭菌和杀虫处理，并进行热处理及烘干处理，平均水分含量应小于或等于 12%。

9.2.4 预浸料

预浸料须满足组件的要求和适当的保存、使用时间，而且树脂含量不低于 30%，在工作温度下有适当的粘性。

9.2.5 胶粘剂

9.2.5.1 胶粘剂只允许使用无溶剂胶粘剂，最好使用双组分反应型胶粘剂。如果可能，使用与叶片相同的层压树脂。

9.2.5.2 胶粘剂不得降解被粘材料，并能保证叶片的结构性能。

9.2.6 玻璃纤维增强塑料层板性能要求

9.2.6.1 玻璃纤维增强塑料层板的性能应满足下列要求：

- a) 树脂含量（重量）：40%~50%（胶衣、富树脂层除外）；
- b) 固化程度：环氧>90%，聚酯>85%；
- c) 密度：1.7~1.9g/cm³。

9.2.6.2 单向纤维层压板力学性能应符合下列要求：

- a) 拉伸强度： $\geq 500\text{N/mm}^2$ ；
- b) 拉伸模量： $\geq 29000\text{N/mm}^2$ ；
- c) 弯曲强度： $\geq 600\text{N/mm}^2$ ；
- d) 弯曲模量： $\geq 29000\text{N/mm}^2$ 。

9.2.6.3 $\pm 90^\circ$ 玻璃纤维增强塑料层板性能应满足下列要求：

- a) 拉伸强度： $\geq 200\text{N/mm}^2$ ；
- b) 拉伸模量： $\geq 16000\text{N/mm}^2$ ；
- c) 弯曲强度： $\geq 200\text{N/mm}^2$ ；
- d) 弯曲模量： $\geq 16000\text{N/mm}^2$ 。

9.2.6.4 试验方法

玻璃纤维增强塑料树脂含量按 GB/T 2577 的规定。

玻璃纤维增强塑料固化度按 GB/T 2576 的规定。

玻璃纤维增强塑料密度按 GB/T 1463 的规定。

单向纤维增强层板弯曲性能及模量按 GB/T 3356 的规定。

玻璃纤维增强塑料弯曲性能按 GB/T 1449 的规定。

玻璃纤维增强塑料拉伸性能按 GB/T 1447 的规定。

9.3 金属材料

9.3.1 金属材料在满足使用要求的前提下,可选择普通结构钢、锻钢、铸钢、铸铁、铝合金或不锈钢。

9.3.2 对金属材料要考虑其对疲劳强度和缺口的敏感性,也要考虑低温性能、防腐性能和加工性能。

9.3.3 普通结构钢

普通结构钢的屈服强度范围应在 235~355N/mm² 之间。

9.3.4 铸钢、铸铁

9.3.4.1 如选用铸钢可选择一般工程用铸造碳钢或不锈钢。

9.3.4.2 如选用铸铁只允许选择质量等级高于 4 级的球墨铸铁或其它更高级材料。

9.3.4.3 铸件不允许有疏松、热裂、缩孔、气孔、裂纹、氧化皮、砂眼等缺陷。铸件表面应用喷砂、喷丸、化学清理或其它方法清理。

9.3.4.4 根据铸造形式,提供的铸件应进行适当热处理。

9.3.5 不锈钢

按照耐腐蚀能力和加工性能选择合适的不锈钢,通常选用的奥氏体不锈钢应保持 0.2% 的弹性应变极限和 0.03% 的最大含碳量,并且有较好的防止晶间腐蚀能力。

9.3.6 所有金属材料性能、化学成分应符合国家标准或其它有关技术条件。

9.3.7 对锻、铸件,应按有关标准进行磁粉探伤、液体渗透探伤、X 射线照相探伤或超声波探伤等无损检验。

10 工艺要求

10.1 总则

10.1.1 下列要求仅适用于手糊湿法成型工艺。

10.1.2 层压车间应为全封闭空间,并能加热、通风,一般要求环境温度为 16~25℃,最大湿度 70%,并通过自动记录式温度计和湿度计进行监测记录。

10.1.3 通风设备应保证在工作场地内有害气体浓度不超标。

10.1.4 工作场地应采用适当方法照明,采取措施防止阳光和灯光温度达到引起树脂固化的程度。

10.1.5 进行叶片铺层及胶合工作时,车间内不允许进行产生粉尘的机械加工、油漆或喷涂等作业。

10.1.6 所有材料应按制造商说明书存放,如无说明应存放在 10~18℃ 室内,储存间应干燥、通风,避免强光,并应配置自动记录式温度计、湿度计。

10.1.7 叶片制造人员、检验人员必须通过专门职业培训。

10.1.8 叶片制造必须根据叶片图样、技术条件、工艺规程进行制造、检验。

10.1.9 试生产结束后,应冻结关键工序和重要工艺参数。

10.2 图样

10.2.1 使用的图样、资料必须完整、正确、有效。

10.2.2 叶片生产必须遵守图样规定的技术要求、尺寸公差、外观质量和材料技术要求。

10.2.3 必须保证增强材料的铺层方向、层数、位置和铺放规则以及含胶量、固化程度等。

10.2.4 必须按图样要求对金属零件进行热处理和表面防护。

10.3 模具

10.3.1 模具的材料、结构由制造商决定，但必须保证足够强度、刚度、表面硬度以及尺寸精度，保证叶片的外形尺寸公差及稳定性和重复性。

10.3.2 必须考虑加热及加压对模具造成的影响。

10.3.3 如果成型时使用真空袋，要确保模具密封良好。

10.3.4 模具表面应光滑，不许有尖棱，成型面要去除斑点。

10.3.5 模具经检验认定合格，并经试模后方可使用。在铺层工作开始之前，模具表面涂适量脱模剂，如需要可预热到铺层要求的温度，模具表面须干燥、无尘。

10.4 工装

10.4.1 叶片制造所需工装、设备、工具等均应满足工艺要求及其它有关规定。

10.4.2 所用量具、衡器、仪表需经检定，并在检定周期内。

10.4.3 调胶机、喷涂机等必须准确无误，并按有关规定进行标定。

10.4.4 直接影响叶片质量的工装，如下料样板、型面样板等，必须保证设计公差要求，并定期校检，切面样板间隔应按设计要求确定。

10.5 叶片制造

10.5.1 金属零件加工制造按图样及工艺指令进行。

10.5.2 按合适的工艺方法把胶衣树脂均匀涂在准备好的模具表面，厚度在 0.4~0.6mm 之间。

10.5.3 涂完胶衣后应按时铺第一层材料，该层含胶量较高且使用的增强材料单位面积较轻，如使用最大为 300g/m² 玻璃纤维织物时，树脂含量一般为 70%。

10.5.4 必须按制造商的说明书和有关部门的规定配制和准备胶液。

10.5.5 树脂及固化剂必须严格按照比例混合，并尽量不混入空气，必要时可进行真空排气，填料及颜料必须按规定加入。

10.5.6 铺层应符合有关技术文件及工艺规程的要求，必须严格控制铺层位置、纤维方向，单向纤维束、带保证平直，严格控制各节点位置。

10.5.7 层间要压实，含胶量一般控制在 40%~50% 之间，胶衣及富树脂层除外。

10.5.8 胶液的操作时间不超过制造商规定的范围，必要时须经初步试验以确定操作时间及固化时间。

10.5.9 一次能铺层的最大厚度，取决于固化时最大允许放热量；如果使用真空袋，其决定因素还应包括最多使多少层材料的空气完全排尽。

10.5.10 如果铺层过程被中断，再次铺层时，固化层表面须打毛，去除尖点，并清除干净，以获得合适的粘接表面。

10.5.11 铺层过程中应尽量避免剪断加强层，无法避免或对接时应适当增用加强带，加强带及搭接宽度最少 25mm。

10.5.12 预埋件、局部加强件、叶根法兰盘、衬套等零件须干燥，并清理干净，表面做适当处理。

10.5.13 固化

10.5.13.1 树脂系统固化应按制造商说明书或预试验得到的工艺参数进行。

10.5.13.2 叶片及其部件固化达到脱模强度后，即可从模具中取出。对于冷固化系统（16~25℃），固化时间至少需要 12h。

10.5.13.3 部件加温固化后应立即在相关温度下进行时效处理，冷固化系统不须时效处理，但叶片出

厂前必须在室温下至少存放 7 天, 或 40℃/16h, 或 50℃/9h。

10.5.1.4 叶片表面抛光后, 对没有表面保护的部位要进行密封。特别是切断面、胶接处, 以防外部介质浸入, 使用的密封材料应不影响层板胶接处的性能, 也不影响叶片的特性。

10.5.1.5 在专用设备上对叶片进行静平衡。

10.6 制造监控

10.6.1 对叶片的制造监控, 应包括原材料质量控制、制造过程监控和成品质量检验。

10.6.2 叶片制造工作程序单、检验单和工艺规程等文件必须跟随生产过程, 并由负责每一阶段的工作人员签字。

10.6.3 叶片及各部件层压时, 应对制造过程进行现场检验, 特别是纤维方向、用胶量等。

10.6.4 用随件试件或从部件上直接切取试样, 进行固化程度检验。

10.6.5 在加工过程期间, 应抽样检查层板的性能参数, 如树脂含量、密度、拉伸强度及拉伸模量、弯曲强度及弯曲模量、剪切强度及剪切模量等。如果不能从部件上切取足够大的层板试件, 可随件制造 500mm × 500mm 的平行层板。

10.6.6 对部件的加工过程及完成的叶片成品进行目视检验, 应特别注意气泡、夹杂起层、变形、变白、变污、损伤、积胶等, 对表面涂层也要进行外观目视检验。

10.6.7 对叶片及部件内部缺陷可采用 X 射线或超声波等无损检验方法来检验, 检验标准可由设计、工艺、检验部门共同制定或确定一标准样件作为判据。

10.7 缺陷修补

10.7.1 允许修补叶片外表面气泡和缺损等缺陷, 但应保持色调一致, 修补后表面上直径小于 5mm 的气泡在 1m² 内不允许超过 3 个。

10.7.2 对于内部开胶、胶接处缺胶、分层等缺陷可通过注胶修补。

10.7.3 对于叶片表面的凹坑和皱折可用环氧树脂或聚酯腻子填充进行修补, 并喷涂表面涂层, 打磨抛光。

10.7.4 对于运输过程中造成的叶片损伤, 可根据损伤的具体情况, 由制造商制定修补计划, 在现场进行修补, 并由制造商提供质量保证。

11 质量保证

11.1 推荐制造商的质量保证体系应通过 GB/T 19001 的认证; 最低应通过 GB/T 19002 的认证。

11.2 制造商必须保证质量保证体系的有效性。

12 试验方法

12.1 总则

所有试验的目的是为了验证设计的正确性、可靠性和制造工艺的合理性, 并为设计和制造工艺的完善和改进提供可靠的依据。试验结果作为产品定型的审查文件。

试验仪器、仪表及量具应满足测量精度要求。

12.2 试验报告格式

试验报告应包括以下内容:

a) 试验目的;

- b) 试验件或试验模型描述;
- c) 试验仪器、仪表及量具的精度和灵敏度;
- d) 试验原理及简明处理方法;
- e) 试验情况记录 (附以相应的照片和简图);
- f) 试验数据;
- g) 试验处理结果 (包括各种曲线);
- h) 试验结论;
- i) 试验地点和日期。

试验报告应有完整的会签和盖章证明。

12.3 气动性能试验

12.3.1 总则

对于新研制的叶片,要求进行风洞模型试验和风场实测,目的是验证风轮在各种工况下的气动性能,对于变距叶片还要试验各个变距角度下的气动性能。

对于购买专利或许可证生产的叶片,一般只要求进行风场实测。

12.3.2 风洞试验

12.3.2.1 试验条件

- a) 试验风洞要求能够模拟风场实际工况条件。
- b) 风洞直径 D 和风轮模型直径 d 的关系;
 - 对于开口风洞: $D \geq 1.5d$;
 - 对于闭口风洞: $D \geq 2d$ 。

12.3.2.2 相似准则

叶片模型相似准则:

- a) 几何相似;
- b) 动力相似。

雷诺数相似不做要求,但要有可靠的试验数据和理论进行雷诺数修正。

12.3.2.3 测试内容

测试项目包括:

- a) 风能利用系数 C_p 与叶尖速度比 λ 的关系曲线;
- b) 风轮扭矩系数 C_q 与叶尖速度比 λ 的关系曲线。

12.3.3 风场实测

12.3.3.1 试验条件

试验地点应考虑下列因素:

- a) 自然物 (建筑物、树木等);
- b) 地形变化;
- c) 其它风扰动。

对以上因素要根据设计条件进行修正。

12.3.3.2 测试项目

测试项目包括风速和功率曲线,并由此得出:

- 风能利用系数 C_p 与叶尖速度比 λ 的关系曲线;
- 风轮扭矩系数 C_q 与叶尖速度比 λ 的关系曲线。

12.4 定桨距叶片的叶尖气动刹车机构功能试验

12.4.1 总则

在定桨距风力发电机组中,有的叶片设计有叶尖气动刹车机构。在叶片研制过程中,这一机构的功能要分析和验证。

12.4.2 试验条件

试验件是具有完整尺寸的首件实物叶片。

12.4.3 试验内容及方法

在试验台架上,通过人工控制施加作用力,迫使叶片叶尖气动刹车机构打开和复位。检查整个机构在打开和复位过程中是否顺利,如有干涉现象,则要采取适当措施,分析和解除这种故障直到整个机构满足设计要求,并记录下试验过程中进行的所有调整内容。在满足设计要求时,整个试验过程应重复三次。

12.5 固有特性试验

12.5.1 总则

对于新研制的叶片,都要求进行叶片固有特性试验,其目的是测量叶片的固有频率,为叶片动力分析、振动控制提供原始依据,并验证动力分析方法的正确性。

12.5.2 试验条件

12.5.2.1 试验件要求

试验件应从试制批中抽取。

12.5.2.2 试验件支持

试验夹具要保证叶片叶根固支,夹具刚度要大于叶片刚度的 10 倍以上。

12.5.3 试验项目

- a) 叶片挥舞弯曲振动至少一、二阶固有频率;
- b) 叶片摆振弯曲振动至少一阶固有频率;
- c) 叶片扭转振动的一阶固有频率(必要时)。

12.5.4 试验测量方法

根据试验任务书的要求和试验设备等具体条件,可以采用:

- 时域法;
- 频域法。

对叶片固有特性进行测量。

注:时域法对二阶固有特性测量不适用。

在用频域法测量时,压电式加速度传感器的安装固定要特别注意,以免影响其额定频响曲线。

12.6 静力试验

12.6.1 总则

对于新研制的叶片,要求做叶片静力试验;对于批生产叶片,在工艺做重大技术更改后,也要求

做静力试验；其目的是为了验证叶片的静强度储备，并为校验强度、刚度计算方法以及结构合理性提供必要的数据库。试验测定的有关数据还可供强度设计、振动分析使用。

12.6.2 试验条件

12.6.2.1 试验件要求

试验件应是具有静强度试验要求的全尺寸叶片，一般可从试制批中抽取，可作不影响静强度试验的再加工，以便与试验工装连接和加载，件数一般为一件。

12.6.2.2 试验件支持

试验夹具要尽量模拟叶片的力学边界条件，并尽可能小地影响叶片的内力分布。

12.6.3 试验项目

a) 刚度测量：包括挥舞、摆振刚度；必要时，也应测量扭转刚度；

b) 静强度试验。

12.6.4 试验载荷及试验方法

试验应先进行刚度测量，再进行静强度试验。

12.6.4.1 进行刚度测量时，试验载荷不超过设计载荷。在试验载荷作用下，加载部位不得有残余变形和局部损坏。在试验过程中，按任务书规定的试验载荷，采取逐级加载逐级测量的试验方法，对同一试验内容一般不少于三次试验，或用不同的试验方法验证数据的重复性和准确性。

为了消除加载时因结构间隙带来的非线性，提高数据测量的精度，可采用预加载或其它适宜的试验方法。

试验结果处理可采用最小二乘法。

12.6.4.2 进行静强度试验时，试验载荷应尽量与叶片设计载荷一致，既要满足叶片的总体受力要求，也要满足叶片的局部受力要求。静强度试验顺序：

a) 预试；

b) 使用载荷试验；

c) 设计载荷试验；

d) 破坏试验（如果要求确定剩余强度，需进行破坏试验，可在疲劳试验完成后进行）。

其中：

——预试是为了检查试验、测量系统是否符合试验技术要求和拉紧试验件，消除其间隙。预试载荷为设计载荷的40%。

——使用载荷试验是为了确定叶片承受使用载荷的能力，加载梯度不大于设计载荷的10%，在各级载荷情况下进行应变、位移测量和变形观察，加载到使用载荷后，停留时间不少于30s，卸载后，叶片不应出现永久变形，也不允许出现折皱等局部失稳。

——设计载荷试验是为了确定叶片承受设计载荷的能力，在超过使用载荷后，加载梯度不大于设计载荷的5%，在各级载荷情况下进行应变、位移测量和变形观察，加载到设计载荷后，停留时间不少于3s，叶片不出现破坏。

——破坏试验是为了确定叶片的实际承载能力，为强度计算提供数据，加载梯度不大于设计载荷的5%，直至破坏。

12.7 疲劳试验

12.7.1 总则

对于新研制的叶片,要求进行叶片疲劳试验;对于批生产叶片,在工艺做重大技术改进后,也要要求做疲劳试验。其目的是为了暴露叶片的疲劳薄弱部位,验证设计的可靠性、工艺的符合性,为改进设计、工艺、编制使用维护说明书、确定叶片使用寿命提供依据。

12.7.2 试验条件

12.7.2.1 试验件要求

试验件应是具有静强度要求的全尺寸叶片,一般可从试制批中抽取,并做不影响静强度要求的再加工,以便与试验工装连接和加载,试验件数根据实际情况取一至二片。

12.7.2.2 试验件支持

试验夹具要尽量模拟叶片的力学边界条件,并尽可能少地影响叶片的内力分布,还要保证载荷谱多点协调加载的实现。

12.7.3 试验载荷

12.7.3.1 疲劳试验载荷既可以采用程序谱加载也可以采用等幅谱加载,等幅谱载荷应力幅按设计载荷包线最大值选取,循环特征依据实际载荷环境确定;对于程序谱加载,载荷谱应根据载荷环境分析及运用应变(或载荷)测量统计结果得到的使用载荷谱编制,编制载荷谱时要保证损伤等效,并能实现随机加载。

12.7.3.2 加载误差在最大峰值时一般小于5%。

12.7.3.3 能导致蠕变或结构疲劳强度明显降低和引起任何热应力的严重影响、腐蚀影响等都应予以模拟,如果试验设备不能实现环境模拟要求,可考虑其它方法弥补。

12.7.3.4 对于复合材料叶片,若要加速试验时,试验频率不应导致试验件发热而使疲劳特性受影响。

12.7.4 试验方法

试验前应对测量系统进行标定,标定载荷至少应达到试验载荷的80%,试验加载系统和测量系统要按有关规定进行评定。

按试验任务书要求进行加载,进行应变、变形、载荷测量。对疲劳裂纹的出现要监测及时、记录准确。当试验结束后,应对试件进行认真的分解检查(尤其是不可检部分)和断口分析,检查分析结果纳入试验报告。

12.8 解剖试验

12.8.1 总则

解剖试验仅适用于复合材料叶片。

解剖试验属于预生产试验范畴,应在工艺试模取得全面检查合格以后进行,目的是确定复合材料叶片各验证位置的材料性能,检查工艺与设计的符合性等,以便为设计调整、工艺参数修正提供依据。

12.8.2 试验要求

12.8.2.1 试验件要求

试验件应是工艺试模件,对于材性试验,可根据设计要求铺设局部切面,其它项目试验可选用疲劳试验后的试件。

12.8.2.2 试验件切割位置要求

试验件切割位置由设计按需要在试验任务书中规定。

12.8.3 试验项目

- a) 成型工艺质量（型腔节点位置、前后缘粘结质量、内填件的粘结质量等）；
- b) 主要承力部分材性试验（密度、拉伸强度、拉伸模量、剪切模量等）；
- c) 质量分布特性。

12.8.4 试验方法

12.8.4.1 按任务书要求对检验件进行切割，首先检查成型工艺质量，仔细记录检查项目。

12.8.4.2 对主要承力部分按相应国家标准进行材性试验，如果从主要承力部分截取下来的试件不符合标准要求，设计、工艺要协商一致，也可采用随件试件的办法来解决。

12.8.4.3 对试验切割下来的每段叶片，分别称重，测量重心，绘制沿展向的叶片质量分布曲线。

12.9 雷击试验

12.9.1 总则

雷击试验的目的是为了考核叶片防雷击保护系统的性能，确定叶片抗雷击的能力。

12.9.2 试验条件

12.9.2.1 试验件为全尺寸叶片或模拟样件。

12.9.2.2 雷击试验可在高压实验室内进行。

12.9.3 试验项目

进行高雷击脉冲电流试验和雷击飞弧试验。

由高雷击脉冲电流试验验证雷电电流传导系统承载电流的能力；雷击飞弧试验验证电极的引雷效果。

12.10 叶片随件试件试验

12.10.1 总则

叶片随件试件试验仅适用于复合材料叶片。

叶片随件试件试验是每件叶片生产时都要进行的常规试验，目的是保证工艺、材料稳定性，对于叶片来说，由于实际原因，不可能对产品进行破坏，需要对每一片叶片安排一个随模试件，对其主要性能进行测试，该测试结果按常规检验填写在叶片履历本或合格证上。

12.10.2 试验要求

该随模试件要求和叶片一起成型，最好共用一个模具，否则，该试件的工艺参数要求和叶片成型一致，试件尺寸按设计要求，切割成符合材性测量的标准试件。

12.10.3 试验项目

- a) 拉伸强度；
- b) 拉伸模量；
- c) 弯曲强度；
- d) 弯曲模量；
- e) 剪切强度；
- f) 剪切模量。

12.10.4 试验方法按国家相关标准进行。

13 检验规则及验收

13.1 检验分类

叶片的检验分出厂检验、型式检验和鉴定检验。

每片叶片均做出厂检验；新产品试制完成时应进行鉴定检验；凡属下列情况之一者应进行型式检验：

- a) 新产品经鉴定定型后，叶片制造商第一次试制或小批量生产时；
- b) 停产一年以上，产品再次生产时；
- c) 正常生产的叶片自上次试验算起已满三年；
- d) 叶片的设计、生产工艺、主要原材料的变更影响叶片性能时，进行有关项目的试验；
- e) 质量监督机构、叶片制造商和用户三方对产品质量、性能发生异议时，可进行有关项目的试验。

13.1.1 出厂检验

13.1.1.1 每片叶片均要求检验型面翼型的弦长、扭角、厚度等几何数据。

13.1.1.2 每片叶片均要求检验重量及重心位置。

13.1.1.3 每片叶片均要求检验叶片连接尺寸。

13.1.1.4 对于具有叶尖制动机构的定桨距叶片应进行功能试验。

13.1.1.5 每片叶片应进行外观质量检查。

13.1.1.6 每片叶片应进行随件试件玻璃纤维增强塑料固化度和树脂含量检验。

13.1.1.7 对叶片内部缺陷应进行敲击或无损检验。

13.1.1.8 对于成套供应的叶片应检验其配套情况。

13.1.1.9 制造商与用户商定的其它检验项目。

13.1.2 鉴定检验

叶片在定型鉴定时，应进行气动性能试验、静力试验、解剖试验、固有特性试验、雷击试验、定桨距叶片叶尖制动机构功能试验、疲劳试验。

13.1.3 型式检验

13.1.3.1 型式检验项目包括：随件试件性能试验、静力试验、固有特性试验、定桨距叶片叶尖制动机构功能试验。

13.1.3.2 质量监督机构以及制造商和用户商定的其它试验项目。

13.1.4 检验中使用的设备、仪器、工具、标准样品、计量器具均应符合规定的精度等级，并经质量监督机构认可。

13.2 判定规则和复验规则

13.2.1 检验结果与产品技术条件及要求不符时，则叶片判定为不合格品。

13.2.2 型式检验每批检验一至二片叶片，试验中只要有一项指标不合格，就应在同一批中另抽取加倍数量的叶片，对该项目进行复验；若仍不合格，应对该批叶片的该项目逐片检验。

13.3 不合格品处理

13.3.1 不合格叶片应做明显标记，并应单独存放或处理，禁止与合格叶片混放。

13.3.2 对存在轻微缺陷但不影响安全使用和性能要求的叶片，经必要处理，由用户认可后可视为合格品。

13.4 最终验收

所有叶片经过严格检验，并完成规定试验后，填好产品履历本、合格证、检验单及所需的其它文件交付验收。

14 叶片的标志和使用维护说明书

14.1 叶片的标志

14.1.1 总则

叶片的标志提供了叶片的简要描述，应用耐环境的材料在叶片根部位置固定一个永久性的标志。

14.1.2 叶片的标志应包括下列内容：

- a) 叶片名称、商标；
- b) 制造商名称、详细地址；
- c) 叶片规格、型号；
- d) 叶片的长度、质量和重心位置等参数；
- e) 叶片系列编号和制造日期；
- f) 叶片配套号；
- g) 其它项目。

14.2 叶片使用维护说明书

14.2.1 叶片使用维护说明书目的是提供正确使用和维护叶片的必要说明。

14.2.2 叶片使用维护说明书的格式应符合 GB 9969.1 的规定。

14.2.3 叶片使用维护说明书的内容：

- a) 制造商；
- b) 名称、型号；
- c) 叶片描述；
- d) 风轮直径；
- e) 额定输出功率、风轮转速；
- f) 风轮的功率输出曲线；
- g) 叶片安装角；
- h) 切入风速、额定风速、切出风速；
- i) 叶片技术数据；
- j) 叶片各部件的安装原理图；
- k) 叶片安装、运输过程中的吊装位置及吊装要求；
- l) 叶片使用维护要求。

15 叶片包装、贮存、运输

15.1 包装

叶片存放要按技术要求对金属部件进行油封包装，油封期至少为1年；复合材料部分不需要包装，但要进行适当的保护，避免磕碰损伤。

15.2 叶片随机文件

叶片的随机文件应包括下列内容：

- a) 装箱单；
- b) 随机备件、附件清单；
- c) 安装原理图；
- d) 叶片履历本或合格证；
- e) 叶片使用维护说明书；
- f) 其它有关的技术资料。

15.3 备件、安装工具和随机文件应装到一个包装箱内，以确保在保管和运输中的完整性。

15.4 贮存

叶片可以露天存放，但要对叶片进行适当保护，避免损坏叶片表面。

15.5 运输

15.5.1 在叶片运输时，要对叶片启封并对金属部件重新油封包装，并用支架支撑和固定牢固，保证叶片在运输过程中不损坏。

15.5.2 对于叶片的薄弱部位，在运输过程中应安装适当的保护罩。

15.5.3 在装、卸叶片及运输过程中，避免叶片受力过于集中，内、外螺纹和配合处应当防止碰伤、堵塞等。

附录 A

(标准的附录)

载荷情况定义

A1 总则

A1.1 确定载荷情况是为了进行静强度和疲劳强度分析。如有必要,应考虑系统的动态特性(例如共振、动态的不稳定性)。疲劳分析应采用适当的方法考虑风速在风轮扫描面上的不均匀分布造成的影响,这种不均匀分布是确定因素(垂直风速梯度、塔影)和随机因素(局部阵风、湍流)影响的结果。

A1.2 按照 A2 尤其是湍流度(A2.2.5)考虑所有的外界条件来建立用于疲劳分析的实际载荷谱,可能包括很多理论上的和计算上的工作。为此,在 A4.7 中给出了一个确定风轮直径最大 46m、具有三片或三片以上叶片水平轴风力发电机组替代载荷谱的简化方法。

A1.3 为了确定载荷,把外界条件和运行状态按照它们发生的概率来细分。外界条件和运行状态在统计上是相互独立的,所以罕见外界条件和罕见运行状态的组合通常不予考虑。需考虑的最小载荷情况组合列于 A4 及 A5 的表 A5 中。

A1.4 A6 里给出了水平轴、三叶片或三叶片以上风力发电机组的简化设计载荷谱。

A2 外界条件

A2.1 总则

A2.1.1 本标准中,外界条件意味着在风力发电机组上所有的外在影响,这些影响既来自于山岳和地形条件又来自于气象条件和其它外部原因(例如电网连接、机械驱动机构)。

A2.1.2 为了和运行状态相结合,外界条件分为正常外界条件和极端外界条件两种。正常外界条件通常是指那些具有每年一次或更多次概率的情况,而极端外界条件是指具有 50 年一遇概率的情况。

A2.1.3 载荷的确定是以安装风力发电机组地点的气候条件和地形数据为基础的,尤其应注意一些特殊地区,例如极地、高山地区、沙漠和有热带风暴的地区。如果不能充分了解实际环境条件,风力发电机组可以按照 A2.2 提到某种等级及下面描述的数据进行设计。吊装风力发电机组之前,应确保设计状态包含了该地区比较普遍的外界条件;对于风场中安装好的风力发电机组,应考虑机组之间的相互影响,和其它情况一样,它明显地增加了来流风的湍流和不均匀性。

A2.1.4 根据相关的外界条件划分的五个等级为 I 至 IV 级和 S 级,风力发电机组相应地分为五个等级,下面给出 I 至 IV 级相关的外界条件, S 级和这里给出状态不同,单独加以定义。

A2.1.5 安装在沿海地区的风力发电机组,要考虑选择适当的材料、涂层和保护膜及定期检查等措施进行防腐保护,机械和电气元件的确定不仅应考虑整体性能还应注意腐蚀对功能的影响。例如:传感器失效或组件锈死的故障。由于在进行疲劳强度计算时,未考虑腐蚀的影响,因此,对于叶片更应考虑防腐措施。

A2.1.6 风力发电机组是暴露在外的设备,应考虑遭雷击的危险。

A2.1.7 设计叶片时,要考虑冰雹和可能的鸟撞影响。

A2.2 气象数据

A2.2.1 风力发电机组的等级

A2.2.1.1 风力发电机组的等级是根据具有 50 年一遇平均概率的极限风速的 10min 平均值 \bar{v}_E 和多年来年平均风速 \bar{v}_M （在轮毂高度处）来划分的，见表 A1。

表 A1 风力发电机组的等级

级 别	I	II	III	IV
\bar{v}_E m/s	50	42.5	37.5	30
\bar{v}_M m/s	10	8.5	7.5	6

A2.2.1.2 为了与国际标准（IEC 61400-1）的极限载荷情况的安全水准保持兼容，在为极限载荷情况计算设计载荷时，表 A1 中的极限风速 \bar{v}_E 及由此导出的所有风速应减少 7%。

A2.2.2 50 年一遇的阵风

A2.2.2.1 在轮毂高度处，具有 50 年一遇平均概率的 5s 内最大风速平均值 v_E ，由表 A1 里 50 年一遇的极限风速 \bar{v}_E 乘以系数 1.4 得到，即 $v_E = 1.4 \bar{v}_E$ 。

对于其它高度，这一系数可以根据 A2.2.8 利用风速梯度进行转换，阵风可能偏离平均风向达 $\pm 15^\circ$ 角。

A2.2.2.2 有时，在另外一段时间内求平均值的，或者具有其它出现概率的极限风速是有效的。在缺少其它确定数据的情况下，具有百年一遇概率的风速减少 4% 可以转化为 50 年一遇的风速。同样地，对于 3s 的阵风转换为 5s 的阵风，风速可减少 3%。把 60 min 内平均风速值提高 10% 可以转换为 10min 平均风速。

A2.2.3 年平均风速

10min 的年平均风速 \bar{v}_j 和具有 50 年一遇概率的年阵风 v_j 在 5s 内最大风速的平均值，分别相当于 A1、A2 中提到的 50 年一遇的风速和阵风的 80%：

$$v_j = 0.8 v_E$$

$$\bar{v}_j = 0.8 \bar{v}_E$$

阵风可能偏离平均风向达 $\pm 15^\circ$ 角。

A2.2.4 平均风速分布

10m 高度处，10min 平均风速 \bar{v} 的分布函数可以假定为瑞利分布：

$$F(\bar{v}) = 1 - \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left(\frac{\bar{v}}{\bar{v}_M} \right)^2 \right\}$$

A2.2.5 风湍流度

A2.2.5.1 对于（主动或被动地）跟踪风向的风力发电机组，除非由于控制系统和偏航系统而产生了更大的误差值，否则认为有 $\pm 15^\circ$ 的恒定偏航误差。在考虑湍流时，如果注意到了垂直于平均风向的速度分量以及偏航系统的滞后，则该误差可以忽略。

A2.2.5.2 风的湍流度由湍流涡带走的能量来体现，功率谱及相关函数表示的超过大约 10min 带走的能量沿频率的分布通常被认为足够表达湍流规则的本质。在一个较短的时期内，由统计参数表征的风的自然湍流特征可以得到下列参数；其中包括：

- 平均风速；
- 湍流度；

——整体长度尺寸。

A2.2.5.3 外部参数（例如风程、粗糙长度、平均风速等）与风速的功率谱及相关函数的标准组合被基本认可为描述湍流的起始点。

A2.2.5.4 在轮毂高度处，湍流强度假定为：

$$I_T = \frac{\sigma}{\bar{v}} = 0.2$$

式中： \bar{v} ——相关的 10min 平均风速值，m/s；

σ ——瞬间风速相对于 \bar{v} 的标准偏差。

对于其它高度，可以假设 σ 保持不变，而 \bar{v} 将按 A2.2.8 变化，因此， I_T 也变化，尤其应考虑叶片扫掠面内风速的变化。这些，加上决定性的风速变化和风轮的旋转就产生了“旋转脉冲”效应（即部分阵风反复通过）。这一效应将对疲劳强度产生很大的影响。

A2.2.6 运行过程中的阵风

A2.2.6.1 运行过程中的阵风，将导致风速的增加（正的阵风）或减少（负的阵风），用阵风系数 k_b 进行计算：

$$k_b = 1 + \frac{v_B}{\bar{v}}$$

对于正的阵风： $v = k_b \times \bar{v}$

对于负的阵风： $v = 1/k_b \times \bar{v}$

式中： \bar{v} ——相关的平均风速，m/s；

v_B ——阵风的幅值（见 A2.2.6.2），m/s。

A2.2.6.2 阵风幅值 v_B 取值如下：

——对于具有每年发生一次平均概率的阵风（正常运行阵风）， $v_B = 9$ m/s；

——对于具有 50 年一遇的平均概率的阵风（极限运行阵风）， $v_B = 13$ m/s。

A2.2.6.3 如果在载荷情况中未明确指出，则阵风可与平均风向偏离 $\pm 15^\circ$ 。对于水平轴风力发电机来说，可假设阵风前的平均风向平行于风轮旋转轴。

A2.2.6.4 在仿真过程中，如果考虑阵风的发生次数，可以假定风的最大加速度为 5 m/s^2 ，应采用正弦阵风形式，且风速和风向同时变化。如果仿真阵风的时间序列，当考虑运行阵风时，应对完整周期（阵风增加和衰减）和半个周期（在风速增加时）均加以分析。

A2.2.7 风向变化

A2.2.7.1 在风力发电机组运行期间，需考虑相对于 10min 平均风向在 $\pm 30^\circ$ 范围内自发变化（风向的正常变化），另外风向的极端变化和 A2.2.6.2 中所述阵风同时发生的情况也应考虑。

A2.2.7.2 在平均风速为 5 m/s 内，风向的极端变化范围可达 $\pm 180^\circ$ ；平均风速为 15 m/s 时，风向的变化范围是 $\pm 35^\circ$ ；50 年一遇风速 v_E 时，风向的变化范围为 $\pm 15^\circ$ ；对于平均风速的中间值，角度变化值可以用线性内插法插值。

A2.2.8 正常风速梯度

在 h 高度上，10min 风速平均值的风速梯度可假定由幂函数给出：

$$\bar{v}(h) = v^* \left\{ \frac{h}{h^*} \right\}^a$$

式中: \bar{v}^* ——参考高度 h^* 的风速, m/s;

α ——幂指数: $\alpha=0.16$ (当 $\bar{v}^* \leq \bar{v}_E$);

$\alpha=0.11$ (当 $\bar{v}^* = v_j, v_E$)。

A2.2.9 极限风速梯度

风轮扫掠面上的极限风速梯度为:

$$w = \frac{1.5}{D - 15} + 0.15, \text{ms}^{-1}\text{m}^{-1}$$

式中: D ——风轮直径, m。

对于风轮直径小于 30m 的风力发电机组来说, 应使用的极限风速梯度为: $w=0.25\text{ms}^{-1}\text{m}^{-1}$ 。假定这一风速梯度在水平和垂直方向上是相互独立的。

A2.2.10 温度范围

A2.2.10.1 风力发电机组的极限设计温度为 $-30^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$, 运行温度为 $-20^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ 。

A2.2.10.2 应力分析的基础温度相对于 15°C 的吊装温度有 $\pm 35^\circ\text{C}$ 的变化。

A2.2.10.3 如果安装风力发电机组的地区, 多年来低于 -20°C 的日期平均多于 9 天, 应该制定更低的温度极限。如果是由于选择的运行地区或部件表面的原因, 部件的温度可能高于 $+50^\circ\text{C}$, 这些情况也应加以考虑。

A2.2.11 空气密度

用于气动计算的海平面上的空气密度假设为: $\rho=1.25\text{kg/m}^3$ 。

如果在 A2.2.10 中限制的温度低于 -20°C , 空气密度将相应地增大。在高海拔地区, 空气密度将相应地减小。

A2.2.12 太阳辐射强度

太阳辐射强度为: $I=1000\text{W/m}^2$ 。

A2.2.13 结冰

A2.2.13.1 对于不转动部件, 假设所有暴露表面结冰厚度为 30mm, 冰的密度假设为 700kg/m^3 。对于处在停机状态的风力发电机组, 叶片也必须进行这种表面结冰分析。

A2.2.13.2 对于运行的风力发电机组, “全部叶片结冰”和“一片叶片结冰”的状态必须加以分析, 假设冰层的质量分布 (每单位长度上冰层的质量) 在叶片的前缘上。冰层质量分布从旋转轴线的零开始, 线性增加到一半半径处为 μ_E , 然后直至叶尖一直保持为常数。 μ_E 的值为:

$$\mu_E = \rho_E k c_{\min} (c_{\max} + c_{\min})$$

式中: ρ_E ——冰的密度, 700kg/m^3 ;

$k=0.00675+0.3\exp(-0.32R/R_1)$;

R ——风轮半径, m;

R_1 ——1, m;

c_{\max} ——最大弦长, m;

c_{\min} ——叶尖弦长, m。

A2.3 地形影响

A2.3.1 特殊地形, 尤其是坡形地带可能产生不同于 A2.2.8 中提到的速度分布, 应该相应地加以考虑。

A2.3.2 如果 $\tan \varphi \leq 0.3$ 且 $h_{\text{hub}}/H \geq 6$, 则坡形地带引起的风速增加可以不予考虑, 这里 φ 是坡地的倾斜角, h_{hub} 是风力发电机组轮毂处的高度 (从塔底到轮毂处), H 是坡地高于平坦地带的高度。对于 $\tan \varphi \leq 0.3$ 且 $6 > h_{\text{hub}}/H \geq 2$ 的地区来说, 风速的增加可通过将表 A1 的风速及由此导出的所有风速增加 10% 来考虑。

A2.3.3 对于在斜坡上的风力发电机组来说, 实际上风速矢量可能偏离水平方向, 因此, 在整个工作寿命期间, 假定风速从下向上的攻角偏离水平线 10° 。

A2.4 电网负载变化的影响

如有必要, 应考虑连接在电网上负载对电网的特殊影响 (例如在弱电网中的频率、电压和载荷波动、电动机驱动的机械、电网故障)。

1h 电网故障和/或失载应视为正常的外界条件, 例如对风力发电机组的最大影响为:

- a) 在一弧立电网中的主频、电压和载荷波动;
- b) 干扰电压;
- c) 短路;
- d) 机械设备突加的负载。

A2.5 地震

有地震危险的地区应考虑由地震产生的载荷。

A3 运行状态

A3.1 总则

在正常状态、经常发生的工作状态、很少发生的故障情况、故障发生后的情况以及运输和安装状态之间制定了区别。

注: 对水平轴风力发电机组的所有工作状态应考虑 A2.2.5.1 中的恒定偏航误差。

在研究制动机构的制动性能时, 对 A3.2.4 和 A3.3.1 的停机状态应考虑其最小制动力矩。最大制动力矩将用来确定极限载荷。

A3.2 正常运行

A3.2.1 待机

当风力发电机组没有故障或其它停机的条件且风速在规定的功率输出范围之外时, 风力发电机组处于待机状态, 机组停机或空转, 这取决于它的设计和工作原理。

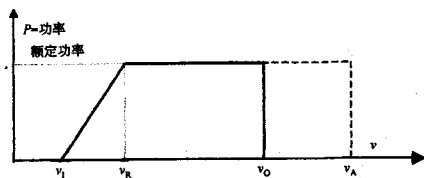
A3.2.2 启动

启动状态为介于待机状态及功率输出状态之间的过程, 或者处于功率输出的不同状态之间, 例如: 从低转速到高转速的一个过程。

A3.2.3 功率输出

在功率输出状态期间, 风力发电机组产生的功率取决于风速。图 A1 中定义了主要数据。

对于没有切出风速的风力发电机组, 在计算中可以用 50 年一遇风速 (A2.2.1.1) 来代替。



v_1 —切入风速;

v_R —额定风速;

v_O —切出风速;

v_A —短期切出风速

图 A1 功率曲线简图

A3.2.4 正常关机

正常刹车状态是介于功率输出状态和待机状态之间的一个过程,或处在功率输出过程中的状态,例如:从高转速到低转速的一个过渡过程。

A3.3 故障

如果风力发电机组出现故障就会出现这种情况,在这里假定相互独立的故障不会同时发生。

A3.3.1 应急停机

应急停机可能由下列原因引起,例如:

——人工触发;

——超过安全和控制系统中规定的极限值引起的触发(超速、超功率、振动等)。

A3.3.2 控制系统故障

控制系统故障包括偏航系统故障、输出控制系统故障、叶片调节系统故障。

A3.3.3 安全系统部件的故障

在安全系统中,几个独立部件同时发生故障的情况可以不必考虑。下面的情况需要特别注意:

——主刹车系统故障;

——叶片变距系统故障(如果应用此系统)。

A3.3.4 电力系统故障

A3.3.4.1 在此,要特别研究发电机短路的情况,因为它可产生一个极大的瞬间载荷。两相短路产生的扭矩通常会比三相短路的更大,因此两相短路是起决定性的,在没有更精确的经过验证值的情况下,应用下面所给的方程。

A3.3.4.2 在同步发电机两相短路的情况下,应分析下列电磁扭矩(M):

$$M = \frac{1.3M_n}{X_d''}$$

式中: M_n ——额定扭矩;

X_d'' ——由发电机制造商给定的同步发电机的次瞬态电抗。

如果 X_d'' 未知,则应考虑10.5倍额定扭矩的值。

A3.3.4.3 在感应发电机两相短路的情况下,应分析下面的电磁扭矩(M):

$$M = \frac{M_k}{1-\sigma} \cos \alpha + \frac{M_k}{1-\sigma} \cos(2\omega_s t - \alpha) - 2 \frac{M_k}{1-\sigma} \sin(\omega_s t) \exp\left(\frac{-t}{T_1}\right)$$

式中: M_k ——感应发电机倾复力矩;

σ ——漏磁系数;

α ——两相短路的相角, $\alpha = \arctan(\omega_s T_1)$

ω_s ——电网的角频率;

t ——时间;

T_1 ——定子的时间常数。

M_k 、 σ 和 T_1 的值按发电机制造商提供的资料使用。如果需要的值未知, 则应考虑 8 倍额定扭矩的值。

A3.3.4.4 对感应发电机来说, 也应研究三相短路的情况, 在此应分析下面的电磁扭矩:

$$M = 2M_k \sin(\omega_s t) \exp(-2s_k \omega_s t)$$

式中: ω_s ——电网角频率;

M_k ——倾复力矩;

s_k ——发电机制造商给定的感应发电机的倾斜转差率。

由下式就可获得最大扭矩:

$$\omega_s t = \arctan\left(\frac{1}{2s_k}\right)$$

A3.4 发生故障后的状态

A3.4.1 具有缺陷或损坏元件 (例如 A3.3 中的情况) 的风力发电机组属于这个范畴。

A3.4.2 风力发电机组未与电网连接的状态, 即电网故障超过 1h, 若这种情况持续 5 天应认为是故障状态。

A3.5 运输、吊装、维护和交付

A3.5.1 制造商应说明在什么天气, 特别是最大平均风速 (10min 平均) 条件下, 机组可以进行吊装和维护。在运输和吊装过程中增加的载荷应加以考虑。

A3.5.2 工作次序应用适当的文件说明。

A3.5.3 在维护情况下, 应特别注意各种锁定装置的作用 (例如: 风轮叶片、偏航驱动) 以及可能采用的维护位置。

A4 载荷

A4.1 总则

A4.1.1 载荷是由特定的外界条件和运行状态的组合来确定。用于静强度计算的载荷一般由下列组合给出:

- 正常的外界条件和正常运行;
- 正常的外界条件和 A3.3 和 A3.4 提到的故障;
- 极端外界条件和正常运行。

A4.1.2 外界条件和运行状态假定在统计规律上是相互独立的, 则极端外界条件和故障的组合是不可能发生的, 所以可以不必考虑。确定需要考虑的组合集中在表 A2 中。

表 A2 外界条件和运行状态的组合

运行状态	外界条件	
	正 常	极 端
正常	N	E
故障	S	—
吊装	M	—

A4.1.3 在这些组合中, 在 A4.3 至 A4.6 部分定义的载荷组是用于估算的, 这些载荷的特点在于具有可选择的附加补充影响的基本状态。

A4.1.4 用于疲劳分析的载荷一般只来源于正常外界条件和运行状态的组合。本标准假定由于其它组合很少发生, 因此不会对疲劳强度产生任何明显的影响。除非采用 A4.7 的替代载荷谱, 否则在疲劳分析时应考虑正常外界条件的湍流影响 (A2.2.5)。

A4.1.5 需要研究的一般载荷组合集中列在表 A4 中, 对于某些结构的机组, 一些载荷情况可以取消, 或增加新的载荷情况。

A4.1.6 对所有的载荷情况, 需要考虑以下影响:

- 叶片和暴露在风中的风力发电机组的所有表面上的气动力;
- 惯性力, 特别是重力、离心力和陀螺力;
- 由电子或液压元件的动作产生的操作力;
- 从能量吸收产生的力, 例如由驱动电动机产生的扭矩。

A4.1.7 对于所有载荷情况, 应画一个包括相关点 (通常在叶根、轮毂和塔顶) 截面力的图表。

A4.1.8 疲劳分析是以载荷谱为基础的, 可用不同的方法确定疲劳分析的载荷谱, 例如通过测量或计算机仿真。在 A4.7 中给出了一个在疲劳分析中使用的简化替代载荷谱。

A4.2 载荷局部安全系数

A4.2.1 对于可维修性极限状态的分析, 载荷局部安全系数 $\gamma_F = 1.0$ 可以用于所有的承载部件。

A4.2.2 当验证极限状态 (即静态应力分析) 时, 表 A3 给出的载荷局部安全系数适用于相应载荷组的各种承载部件。

表 A3 载荷局部安全系数 γ_F

载荷组	N	E	S	M
重 力 / 惯 性 力				
不利的情况	1.35/1.1 ¹⁾	1.35/1.1 ¹⁾	1.0	1.35
有利的情况	1.0	1.0	1.0	1.0
由 预 应 力 产 生 的 初 始 应 力				
不利的情况	1.2	1.2	1.0	1.0
有利的情况	0.8	0.8	1.0	1.0
气动力	1.2	1.5	1.0	1.5
操作力	1.35	1.2	1.0	1.35
温度影响	1.5	—	—	—
地震	—	—	1.0	—
1) 如果质量能准确测定。				

A4.2.3 对于疲劳分析, 载荷局部安全系数 $\gamma_F = 1.0$ 适用于所有的承载部件。

A4.3 正常载荷情况

正常载荷情况是由正常外界条件和正常运行组成的, 至少应研究下面的情况。

A4.3.1 载荷组 N1

载荷情况 N1.0: 基本功率输出状态 (A3.2.3) 和风速为 v_R 、 v_0 以及在结构上产生最大载荷的 v_1 和 v_0 之间的正常外界条件 (A2.2)。

载荷情况 N1.1: 正常运行阵风 (A2.2.6)。

载荷情况 N1.2: 侧风 (A2.2.7.1)。

载荷情况 N1.3: 电网故障或失载 (A2.4)。

载荷情况 N1.4: 温度变化引起的影响 (A2.2.10)。

A4.3.2 载荷组 N2

载荷情况 N2.0: 在风速 v_1 、 v_R 和 v_0 点的正常外界条件下启动的基本状态 (A3.2.2)。

载荷情况 N2.1: 正常工作阵风 (A2.2.6)。

A4.3.3 载荷组 N3

载荷情况 N3.0: 在风速为 v_1 、 v_R 和 v_0 点的正常外界条件下, 刹车过程的基本状态 (A3.2.4)。

载荷情况 N3.1: 正常运行阵风 (A2.2.6)。

A4.3.4 载荷组 N4

载荷情况 N4.0: 在风速直至 v_1 下的正常外界条件下的待机基本状态 (A3.2.1)。

载荷情况 N4.1: 年阵风的发生 (A2.2.3)。

载荷情况 N4.2: 侧风 (A2.2.7.1)。

载荷情况 N4.3: 温度变化的影响 (A2.2.10)。

A4.4 极限载荷情况:

极限载荷情况是由正常运行状态和极限外界条件组合构成, 至少应研究下列情况。

A4.4.1 载荷组 E1

载荷情况 E1.0: 基本功率输出状态 (A3.2.3) 和风速为 v_R 和 v_0 以及在结构上产生最大载荷的 v_1 和 v_0 之间的正常外界条件的正常外界条件 (A2.2)。

载荷情况 E1.1: 考虑风向极端变化和可能的偏航 (A2.2.7) 情况下的极端运行阵风 (A2.2.6)。

载荷情况 E1.2: 在风轮扫掠面上的极限风速梯度 (A2.2.9)。

载荷情况 E1.3: 负载的极端影响 (A2.4)。

载荷情况 E1.4: 在功率输出过程中的结冰载荷 (A2.2.13)。

A4.4.2 载荷组 E2

载荷情况 E2.0: 具有 50 年一遇风速 (A2.2.1) 下的基本待机状态 (A3.2.1)。

载荷情况 E2.1: 50 年一遇阵风 (A2.2.2) 和风向极端变化 (A2.2.7.2) 的发生, 如果电网发生故障 (A2.4), 将导致更不利的状态, 可以应用这一状态。对于水平轴风力发电机组, 可以假定平均风向 (在阵风前) 和风力发电机组轴向往一致。

载荷情况 E2.2: 结冰载荷 (A2.2.13) 和风向的极端变化 (A2.2.7.2)。

A4.5 特殊载荷情况

特殊载荷情况通常是由故障运行状态和正常外界条件组成，至少应研究下列情况：

A4.5.1 载荷组 S1

载荷情况 S1.0：由基本功率输出状态（A3.2.3）和在风速 v_R 和 v_A 时的正常外界条件（A2.2），以及对结构产生最大载荷的介于 v_1 和 v_A 之间的风速一起构成。

载荷情况 S1.1：根据 A3.3.1 的应急刹车状态。

载荷情况 S1.2：根据 A3.3.4 的内部电气系统故障。

载荷情况 S1.3：根据 A3.3.2 的控制系统的故障。

载荷情况 S1.4：根据 A3.3.3 的安全系统或制动系统中的故障。

载荷情况 S1.5：根据 A2.5 的地震。

注：当分析载荷组 S1 中的特殊载荷情况时，应注意制动系统的要求。

A4.5.2 载荷组 S2

载荷情况 S2.0：基本状态：在年平均风速（A2.2.3）下发生故障（A3.4.1）的状态。

载荷情况 S2.1：一年一遇的阵风（A2.2.3）。

A4.6 运输和吊装载荷情况

这些载荷情况来源于制造商规定的运输和安装时的吊装条件（也可见 A3.5），由制造商规定的外部条件，在吊装和维护期间的短暂状态以及在竖立期间多于 1 天的盛行状态。

A4.6.1 载荷组 M1

载荷情况 M1.0：基本状态：如果没有规定风速，在制造商规定的最大允许平均风速或年平均风速下吊装、安装和维护状态（A3.5）。

载荷情况 M1.1：如假定年平均风速为基本状态，正常工作阵风或年阵风的发生。

载荷情况 M1.2：在校验塔架时，应考虑由涡流脱落引起的横向振动。

A4.6.2 载荷组 M2

在运输和吊装过程中的载荷情况（A3.5.1）。

A4.7 疲劳分析载荷谱

A4.3 下所列的正常载荷情况是进行疲劳分析的最低要求。在确定载荷谱时，需注意 A4.1.8 下的实测值。载荷循环用雨流计数法进行确定。假定最少寿命为 20 年。除交变载荷外，还应指明平均值。这些值可从雨流矩阵中或从简化载荷谱中获得，在额定输出时的平均载荷可以作为疲劳分析的平均值。

A4.7.1 需考虑的影响

对于通过计算得出的载荷谱，还须考虑以下影响：

a) 重力；

b) 偏心度：对于风轮，要考虑实际质量的偏心度。如果不知道，可用下面公式：

对于平衡过的风轮： $e_M = 0.005R$

对于未平衡的风轮： $e_M = 0.05R$

R 为风轮半径，m。

c) 风力发电机组的结构动力学：应考虑叶片的弹性，传动系统和发电机的扭转振动以及塔架的弯曲。在不能忽略其影响的前提下，也应考虑机器的弹性安装、塔架的扭转应力和地基的影响；

d) 应根据塔的几何形状考虑塔的堵塞效应和塔影效应对风速图形的扰动；

e) 由叶片制造或装配公差引起的气动力的不对称,应考虑其实际公差,如果不太清楚,可假定叶片的安装角公差范围为 $\pm 0.3^\circ$;

f) 所用翼型的动态失速;

g) 根据 A2.2.8 的正常风速梯度;

h) 根据 A2.2.5 的风湍流度,其仿真时间一般不应少于 10min;

i) 平均风速变化;

j) 如果只考虑风湍流度的纵向分量,除应考虑按 A2.2.5.1 的侧面的恒定倾斜气流外,还应考虑按 A2.2.7.1 变化的侧风;

k) 根据 A2.3.3 的风向在水平方向的偏移;

l) 对于具有主动偏航的水平轴风力发电机组,如果偏航速度超过 $15/R [^\circ/\text{s}]$ 或偏航加速度超过 $450/R^2 [^\circ/\text{s}^2]$ 时,应考虑偏航系统在 10% 的使用寿命内的工作(其中 R 为风轮的半径,单位为 m);

m) 当启动和停机过程经过塔的共振点时要考虑动态放大率(通常包括在结构动力学中);

——在速度 v_1 每年有 1000 次启动和 1000 次停机过程;

——在速度 v_0 每年有 50 次启动和 50 次停机。

n) 对变桨距风力发电机组、变速风力发电机组和其它相关的情况来说,应以实际方式来考虑控制系统(控制性能)。

A4.7.2 水平轴风力发电机组气动载荷部件的简化载荷谱

A4.7.2.1 对于三叶片、风轮直径为 46m 以下的水平轴风力发电机组来说,图 A2 所示的载荷谱适用于气动载荷部件,在此,最大范围 ΔS_{\max} 相当于 A4.3.1 (载荷情况 N1.0) 在 v_R 处的平均气动载荷的 1.5 倍,最大载荷循环次数是在风力发电机组整个使用寿命期内假定是连续工作的条件下由其风轮的额定转速和叶片频率来导出(风轮的额定转速乘以风轮的叶片数)。这也适用于变速运行的风力发电机组。

注:由惯性力和重力得出的载荷循环次数可按由风力发电机组的工作特性求得的其出现频率加以考虑。气动载荷部件的简化载荷谱应叠加在这一载荷谱上。

A4.7.2.2 假设作用在轮毂上的气动推力有一个作用力的偏心距:

$$e_w = \frac{wR^2}{2v_R}$$

式中: w ——按 A2.2.9 在任何方向上极限风速梯度, $\text{ms}^{-1}\text{m}^{-1}$;

R ——风轮半径, m;

v_R ——额定风速, m/s。

对风轮的俯仰力矩来说,应这样来假定:作用力使得由风轮重量产生的力矩增加。对其它载荷分量来说,每种情况的作用力应假定在最不利的位置上。用这种方式确定的俯仰力矩和偏航力矩的载荷谱应假定同时起作用,其相位差为 90° 。

A4.7.2.3 对于叶片和叶片的附件来说,旋转速度是载荷循环次数的决定性因素,对于风力发电机组的其它部件来说,叶片经过的频率(旋转速度乘叶片数)是一个决定性因素。在计算载荷循环总数时,假定在整个使用寿命期内,风力发电机组都在 v_R 风速下运行。

A4.7.2.4 对于叶片来说,由重力引起的载荷波动应叠加到气动载荷引起的波动上。在每一种情况下应用气动力与重力之间的相同相位关系来求摆振力和力矩的载荷分量。对其余载荷分量,可以假设气

动力的相位关系对应于由垂直风速梯度引起的相位关系（即在顶部或底部最大）。

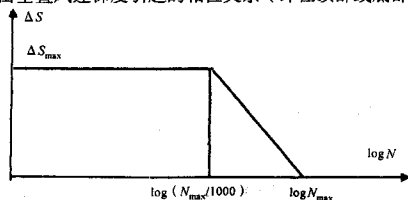


图 A2 气动载荷部件简化载荷谱（简图）

A4.7.2.5 作为平均值，应假设按 A4.7.2.1（气动载荷和重力载荷）在额定输出功率时的载荷用于确定载荷谱（A3.1 在 v_R 时的载荷情况 N1.0）。

A5 载荷情况表

为了防止在土壤和基础之间出现裂纹，应分析正常载荷情况（载荷情况 Nx.0）的基本状态。在载荷情况 M1.0/M1.1 下，如果制造商未对安装和维修规定最大允许平均风速，则应假定年平均阵风风速。符号说明： v_0 = 切出风速（10min 平均值）， v_A = 短期切出风速。

表 A4 载荷情况表

运行状态 外界条件	待机	启动	功率 输出	停机	应急 停机	控制 系统 故障	安全/ 制动 系统 故障	电力 系统 故障	发生 故障 后的 状态	运输 安装 维护
v_0 以下的正常外界条件		N2.0	N1.0 E1.0	N3.0						
v_A 以下的正常外界条件			S1.0		S1.1	S1.3	S1.4	S1.2		
正常运行阵风		N2.1	N1.1	N3.1						M1.1 (M2)
侧风	N4.2		N1.2							
电网故障/卸载	E2.1		N1.3							
温度变化的影响	N4.3		N1.4							
极限运行阵风			E1.1							
风向的极限变化	E2.1 E2.2		E1.1							
极限风梯度			E1.2					S2.1		
极限负载影响			E1.3							
年平均风速	N4.0 N4.2 N4.3								S2.0	(M1.0)
年阵风风速	N4.1								S2.1	(M1.1)
50 年一遇风速	E2.0 E2.2									
50 年一遇阵风风速	E2.1									
冰载	E2.2		E1.4							
地震			S1.5							

A6 简化设计载荷

A6.1 总则

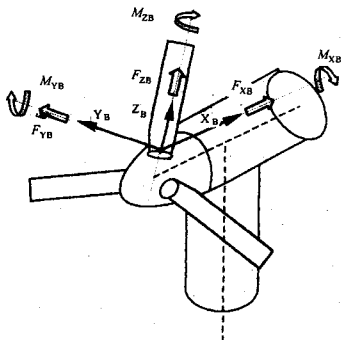
A6.1.1 本部分的目的是为具有三片或三片以上叶片刚性连接在轮毂上，且风轮有小的锥角和仰角的简单水平轴风力发电机组提供近似、保守的计算。复杂机组通常更需要更详细的分析。

A6.1.2 上面所需的综合计算，可用以下简化公式来近似。

A6.1.3 验证的基础是载荷情况的组合（A4，加上 A5 载荷情况表）。简化和减少了载荷情况的数目。通过局部较高载荷减少了计算所需的时间和工作量。

A6.2 坐标系

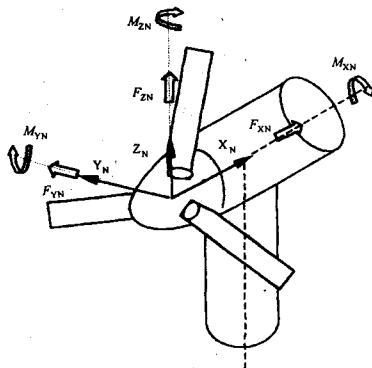
A6.2.1 叶片坐标系的原点在叶根上且和风轮一起旋转。它对于轮毂的位置是固定的。



X_B —沿风轮旋转轴方向； Z_B —径向； Y_B — X_B 、 Y_B 、 Z_B 组成右手系

图 A3 叶片坐标系

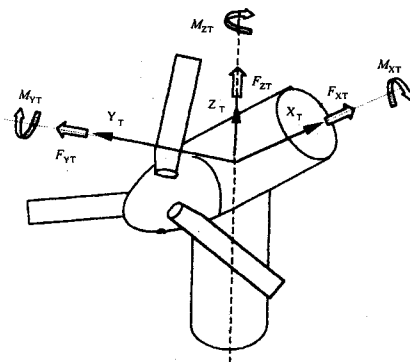
A6.2.2 轮毂坐标系的原点在风轮旋转中心且不随风轮转动。



X_N —在风轮旋转轴方向； Z_N —与 X_N 垂直向上； Y_N —水平方向，且 X_N 、 Y_N 、 Z_N 组成右手系

图 A4 轮毂坐标系

A6.2.3 塔架坐标系的原点在风轮旋转轴线和塔架的中心线的交点上，且不随风轮转动。



X_T —风轮旋转轴水平方向； Z_T —垂直向上； Y_T —水平方向，且 X_T 、 Y_T 、 Z_T 组成右手系

图 A5 塔架坐标系

A6.3 正常运行载荷（载荷情况 N1.0 基本状态）

A6.3.1 风轮上的气动载荷

A6.3.1.1 作用在风轮扫掠面积 A 上的平均压力 p_N 取决于额定风速 v_R ：

$$p_N = \frac{C_{FB} \rho v_R^2}{2}$$

式中： C_{FB} —8/9，按 Betz 公式；

ρ —空气密度， kg/m^3 。

注： $p_N = v_R^4 / 1800 \text{ kN/m}^2$ ，式中 v_R 为额定风速， m/s 。

A6.3.1.2 作用在塔顶的力为：

$$F_{XN} = p_N A$$

A6.3.1.3 湍流、侧风和塔影的影响用气动力至风轮旋转中心的偏心距 e_w 来处理：

$$e_w = \frac{w R^2}{2 v_R}$$

式中： R —风轮半径， m ；

w —按 A2.2.9 在任意方向的极限风速梯度， $\text{ms}^{-1}\text{m}^{-1}$ 。

这个作用力的偏心距产生附加的力矩。

A6.3.1.4 力矩 M_{XN} ，是由最大的输出电功率 P_{el} 确定的：

$$M_{XN} = \frac{P_{el}}{\omega \eta}$$

式中： ω —风轮角速度；

η —发电机和齿轮箱的总效率。

对于电功率或总效率值来说，如果没有实际值可利用，则可以假设风轮扫掠面上具体的输出功率

为 500W/m^2 且发电机和齿轮箱的总效率 $\eta=0.7$ 。

注：对于 $\eta=0.7$ 且 P_{el} 用 kW 表示，则

$$M_{XN} = \frac{14 \times P_{el}}{n} \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$$

式中： n ——为风轮的旋转速度，rpm。

A6.3.2 单片叶片上的气动载荷

A6.3.2.1 作用在单片叶片上的气动力假设为三角形线性载荷。这种三角形分布的力产生下列线性载荷：

$$\begin{aligned} f_{XB}(r) &= \frac{2F_{XN}r}{ZR^2} \\ f_{YB}(r) &= \frac{3M_{XN}r}{ZR^3} \end{aligned}$$

式中： r ——距风轮旋转轴线距离，m；

Z ——叶片数。

A6.3.2.2 对于悬臂叶片，叶根处（在 $r=0$ 位置）气动力为：

$$\begin{aligned} F_{XB} &= \frac{F_{XN}}{Z} \\ F_{YB} &= -\frac{3M_{XN}}{2ZR} \\ M_{XB} &= \frac{M_{XN}}{Z} \\ M_{YB} &= \frac{2F_{XB}R}{3} \end{aligned}$$

A6.4 阵风对载荷的影响（载荷情况 N1.1 和 E1.1）

A6.4.1 阵风对载荷影响的处理与 A6.3 中正常载荷相似，但阵风系数 k_b 增加了风速：

阵风系数： $k_b = 5/3$

阵风风速： $v_B = k_b v_R$

由此，在风轮扫描面积 A 上增加的平均压力 p_B 为：

$$\begin{aligned} p_B &= \frac{C_{FB} \rho v_B^2}{2} \\ &= \frac{C_{FB} \rho k_b^2 v_R^2}{2} \end{aligned}$$

注：对应于 A6.3.1.1 的简化形式，导出为： $p_B = v_R^2 / 650 \text{kN/m}^2$ ， v_R 为额定风速，m/s。

A6.4.2 作用在风轮上的气动载荷及作用在单个叶片上的气动载荷按 A6.3.1 和 A6.3.2 计算，用 p_B 代替 p_N 。对于力矩 M_{XN} ，是 A6.3.1.4 中值的两倍。

A6.4.3 气动力的偏心距这里可以忽略。

A6.5 由侧风或风梯度引起的载荷（载荷情况 N1.2 和 E1.2）

A6.5.1 当风向相对于风力发电机组旋转轴线倾斜时，假设有下列载荷作用在风轮上。

$$F_{XN} = \frac{p_N A}{\sqrt{2}} \quad (\text{对于 N1.2})$$

$$F_{YN} = \pm \frac{P_N A}{\sqrt{2}} \text{ (对于 N1.2)}$$

$$F_{XN} = P_N A \text{ (对于 E1.2)}$$

$$F_{YN} = \pm P_N A \text{ (对于 E1.2)}$$

力的 Y 向分量导致风轮旋转轴上的弯矩和机舱偏航齿轮上的阻尼力矩。

A6.5.2 扭矩 M_{XN} 和叶片上的气动载荷按 A6.3 计算。

A6.5.3 这里气动力的偏心距可以忽略。

A6.6 陀螺力产生的载荷 (载荷情况 E1.1)

A6.6.1 总则

A6.6.1.1 风轮载荷为:

$$F_{XN} = \pm p_B A$$

$$F_{YN} = \pm p_B A$$

A6.6.1.2 快速偏航和偏航过程中的变化对塔架和单独的风轮叶片均能产生很大载荷, 偏航运动角加速度 $\dot{\Omega} = d\Omega/dt$ 和角速度 Ω 是产生这种力的决定性因素。通常考虑“开始偏航”和“以恒定角速度偏航”两种情况。

A6.6.2 开始偏航

A6.6.2.1 角加速度取决于有效力矩 M_{ZT} , 本标准对三种情况进行分析。

A6.6.2.1.1 被动偏航的下风向风轮:

$$M_{ZT} = \pm p_N A e_w$$

A6.6.2.1.2 具有对风尾舵的、被动偏航的上风向风轮:

$$M_{ZT} = \pm c p_A A_F e_F$$

式中: c ——尾舵的阻力系数 ($c=2$);

p_A ——风速 v_R 的驻点压力, kN/m^2 ;

A_F ——尾舵表面积, m^2 ;

e_F ——从塔架中心线至尾舵压力中心的距离, m 。

注: $p_A = v_R^2 / 1600 \text{ kN/m}^2$, v_R 为额定风速, m/s 。

A6.6.2.1.3 主动偏航的风力发电机组

如果塔架的扭转固有频率 ω_T 为已知, 则可假定为:

$$M_{ZT} = I_M \omega_T \Omega$$

式中: I_M ——机舱和风轮相对塔架轴线的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

Ω ——偏航运动的角速度, s^{-1} 。

另一方面, 如果假定塔架为刚性扭转, M_{ZT} 是偏航系统能适用的最大力矩。

A6.6.2.2 在偏航运动开始, $\Omega=0$, $\dot{\Omega} = \pm M_{ZT}/I_M$, 除 M_{ZT} 外, 还有作用力 F_{YT} :

$$F_{YT} = m_M e_M \dot{\Omega}$$

式中: m_M ——机舱和风轮的质量, kg ;

e_M ——从塔架轴线到 m_M 的重心的距离, m 。

A6.6.2.3 由于偏航运动, 单个叶片上的最大线性载荷:

$$f_{xB}(r) = -\mu(r)r \dot{\Omega}$$

$$f_{zB}(r) = -\mu(r)e_0 \dot{\Omega}$$

式中: $\mu(r)$ ——单位长度的质量, kg/m;

e_0 ——从塔架轴线到风轮重心的距离, m。

A6.6.2.4 对于悬臂叶片, 由于偏航运动, 作用在叶根截面上的力为:

$$F_{xB} = -m_B r_s \dot{\Omega}$$

$$F_{zB} = -m_B e_0 \dot{\Omega}$$

$$M_{yB} = -I_B \dot{\Omega}$$

式中: m_B ——叶片质量, kg;

I_B ——叶片相对于风轮旋转轴线的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

r_s ——叶片重心到风轮旋转轴线的距离, m。

A6.6.3 恒定角速度的偏航运动

A6.6.3.1 具有被动偏航系统的风力发电机组, 如果没有经过验证, 可假定有一秒钟的加速时间, 否则可使用偏航系统的角速度。

A6.6.3.2 对于具有主动偏航系统的机组, 其角速度通常都很小, 因此这种载荷情况可以不考虑。

A6.6.3.3 在这些情况下, 将作用有下列载荷:

$$F_{xT} = -m_M e_M \Omega^2$$

$$M_{yT} = Z I_B \omega \Omega$$

A6.6.3.4 由偏航系统作用于单个叶片上的最大线性载荷为:

$$f_{xB}(r) = -\mu(r) \times (e_0 \Omega^2 + 2 r \omega \Omega)$$

$$f_{yB}(r) = -\mu(r) \Omega^2 r/2$$

$$f_{zB}(r) = \mu(r) \Omega^2 r/2$$

A6.6.3.5 对于悬臂的风轮叶片, 由偏航运动在叶片根部截面上产生的力为:

$$F_{xB} = -m_B (e_0 \Omega^2 + 2 r_s \omega \Omega)$$

$$F_{yB} = -m_B \Omega^2 r_s/2$$

$$F_{zB} = m_B \Omega^2 r_s/2$$

$$M_{xTB} = I_B \Omega^2/2$$

$$M_{yTB} = -m_B r_s e_0 \Omega^2 - 2 I_B \omega \Omega$$

A6.7 由刹车力引起的载荷 (载荷情况 N3, S1.1)

A6.7.1 从最大的刹车力矩 M_B , 可以得到风轮轴线的角加速度:

$$\dot{\omega} = \frac{M_B}{Z I_B + I_0}$$

式中: I_0 ——由轮毂、风轮轴、齿轮箱和发电机构成的系统有效转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

A6.7.2 单个叶片上的线性载荷为:

$$f_{yB}(r) = \mu(r) r \dot{\omega}$$

A6.7.3 由此引起的悬臂叶片叶根截面上的力为:

$$F_{yB} = m_B r_s \dot{\omega}$$

$$M_{xB} = -I_B \dot{\omega}$$

A6.8 短路载荷（载荷情况 S1.2）

A6.8.1 在发电机或连接电缆短路的情况下，会产生扭矩峰值。如果不知道发电机的短路力矩，则对于同步发电机假设为 10.5 倍的额定扭矩；对于感应发电机假设为 8 倍的额定扭矩。

A6.8.2 风轮叶片上的载荷可以按 A6.7 计算。

A6.9 损伤-等效等变程载荷谱的疲劳分析

对于具有斜率 $k=3$ 到 9 的 S/N 曲线的疲劳分析，作为对 A4.7.2 规定的载荷谱的进一步简化，可以假定具有应力变程等于根据 A4.3.1 的平均气动载荷的损伤-等效等变程载荷谱，载荷循环次数可以认为等于 A4.7 中所确定的总循环数的 75%。

附录 B
(标准的附录)
强度计算

B1 总则

B1.1 叶片强度通常由静强度分析和疲劳分析(设计极限状态校核)来验证。受压部件应校验失稳(膨胀、折皱、翘曲)。

B1.2 强度分析应在足够多的截面上进行,被检验的横截面的数目取决于叶片类型和尺寸,但至少应研究四个截面。在几何形状和/或材料不连续的位置处应研究附加的横截面。

B1.3 用螺纹、粘接或其它连接技术在不同部位间构成的连接强度,应用尺寸确定,由载荷来验证。

B1.4 为了确保叶片和其它部件间的最小间隙,应使用可维修性极限状态进行变形分析。如果进行静态或准静态分析,则对风轮运行时的所有载荷情况,其最小间隙应保持为未变形结构间隙的 50%;对风轮静止时的载荷情况,其最小间隙应为未变形结构间隙的 5%。如经动态或气动弹性变形分析,则其最小间隙在风轮运行时总是保持为未变形结构间隙的 30%。

B1.5 应以设计载荷值为依据在权威试验机构监督下进行叶片静态试验。在进行试验过程中,应特别验证分析确定的最大载荷区域。如果不进一步分析,则不允许有局部损伤或屈曲。在叶片试验中作为最低要求,应求出风轮叶片在 50%和 100%的载荷条件下的变形并与计算值比较,而且至少应确定叶片挥舞方向的一阶固有频率以及叶片的质量和重心。

B1.6 在应变、应力和稳定性分析中,应采用各向异性材料破坏假设证明其实际安全。

B1.7 应确定叶片在运行和静止时的一阶、二阶挥舞和摆振方向的固有频率。如有必要,轮毂和叶片轴承的影响也应加以考虑。若风轮激振频率在风轮固有频率 80%至 120%及叶片固有频率的 90%至 110%这一范围内时,则应提供适当的验证。

B2 玻璃纤维增强塑料(FRP)**B2.1 总则**

B2.1.1 强度分析既可用应变验证又可用应力验证,对于后者,应额外建立最大载荷点处的应变来证实没有超过破坏极限。

B2.1.2 验证是用 B2.2 中叙述的试验数据确定的特征值来进行的,需要证明应力 S (由设计载荷导出的应力)不超过材料的设计强度 R_d (特征值 R_k 除以该材料局部安全系数 γ_{Mk}):

$$S \leq R_k / \gamma_{Mk} = R_d$$

B2.1.3 如果没有供验证的试验结果,可以使用下面给出的最小特征值。在开始生产前,应能证明材料至少达到了用于验证的特征值。

B2.2 特征值

B2.2.1 对于特征应力/应变 R_k ,使用 $P=95\%$ 置信度, $\alpha=5\%$ 破坏概率的正态分布。如果不进一步验证,可以使用离差系数 $\nu=15\%$,给出 n 次试验:

$$R_k(\alpha, P, \nu, n) = \bar{x} \left[1 - \nu \left[U_\alpha + \frac{U_P}{\sqrt{n}} \right] \right]$$

利用假定的离差系数, 得到:

$$R_N(5\%, 95\%, 0.15, n) = \bar{x} \left[1 - 0.15 \left[1.645 + \frac{1.645}{\sqrt{n}} \right] \right]$$

式中: U_i ——相应于 $i\%$ 概率的标准正态分布偏量;

\bar{x} ——试验结果的平均值。

B2.3 材料的局部安全系数

B2.3.1 对于静强度分析和疲劳强度分析, 应分别确定材料的局部安全系数 γ_{Mx} 。这些系数通过安全系数 γ_{M0} 与几个系数 C_{ix} 相乘得到:

$$\gamma_{Mx} = \gamma_{M0} \times \prod C_{ix}$$

对所有分析, 安全系数 $\gamma_{M0} = 1.35$ 。如果不进一步验证, 可以采用下列系数 C_{ix} 。经试验验证的系数可以替换下列系数。

B2.3.2 在静强度分析中, γ_{Mx} 由系数 γ_{M0} 与系数 C_{ix} 相乘确定, 考虑到对材料特性的影响, 应使用下列系数:

$C_{2x} = 1.5$ 老化影响;

$C_{3x} = 1.1$ 温度影响;

$C_{4x} = 1.1$ 预浸料成型以及半自动制造成型;

$C_{4x} = 1.2$ 手工铺敷成型;

$C_{5x} = 1.0$ 后固化成型;

$C_{5x} = 1.1$ 非后固化成型。

B2.3.3 对于疲劳强度分析, γ_{M0} 由系数 γ_{M0} 与下列系数 C_{ix} 相乘确定:

$C_{2x} = N^{1/k}$ 载荷循环次数 N 和斜率 k 的高周疲劳强度曲线;

$k=9$ 聚酯树脂基体层板;

$k=10$ 环氧树脂基体层板;

$C_{3x} = 1.1$ 温度影响;

$C_{4x} = 1.0$ 对于单向增强制品;

$C_{4x} = 1.1$ 对于无纤维和单向纺织纤维束

$C_{4x} = 1.2$ 对于其它增强制品;

$C_{5x} = 1.0$ 后固化成型;

$C_{5x} = 1.1$ 非后固化成型。

B2.3.4 如果不进一步验证, 按 B2.3.3 的斜率 k 适用于纤维体积含量至少为 30% 的层板。如果使用更大的值, 则要求进行适当的验证 ($S-N$ 曲线)。

B2.3.5 如果 50℃ 时层板的剪切模量或弯曲模量与 23℃ 的值比较, 其下降不超过 20%, 则系数 C_{ix} 适用于环境温度为 -30℃ ~ +50℃。

B2.4 其它材料制成的部件

B2.4.1 对于用其它材料制成的叶片部件 (例如在叶尖机构中或在叶片连接部位的钢部件, 叶片的铝材连接件等) 与 FRP 之间的连接强度, 应在确定载荷情况下加以验证。

B2.5 应变验证

B2.5.1 应变的设计值是由在所有载荷情况下避免发生破坏的要求确定的。对于层板不连续部位,应考虑作用力的作用点和大的载荷循环数。

B2.5.2 如果不进一步验证,在纤维方向的破坏极限为: $\varepsilon_R = 0.55\% / (C_{4s} \times C_{4b})$, 由设计载荷计算的应变不能超过破坏极限 ε_R 。

B2.5.3 疲劳强度的验证是以上述层板建立的特征 S/N 曲线和用这一曲线建立的戈德曼图为基础的。如果对于层板没有合适的 S/N 曲线,可以按 B2.3.3 系数 C_{2b} 的假设值。

B2.5.4 戈德曼图显示了平均应变和交变应变部件间的关系且可以按图 B1 所示给出。

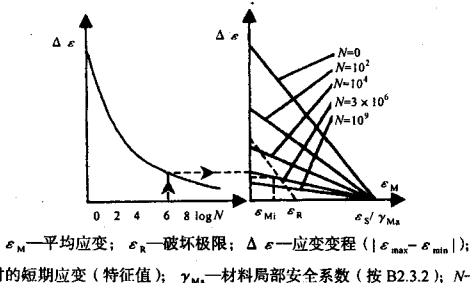


图 B1 S/N 曲线图和戈德曼图

B2.5.5 戈德曼图可以用于确定给定应变下的许用载荷循环数,它能用于损伤累积计算。损伤定义为施加的载荷循环数与许用载荷循环数商的总和,它必须小于或等于 1。

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

式中: D ——损伤;

n_i ——某级应变变程作用的载荷循环数;

N_i ——某级应变变程许用的载荷循环数。

B2.5.6 承载层板是由单向玻璃纤维增强铺层制成的叶片可以用简化的应变验证方法来检验。在设计载荷点沿纤维方向的应变设计值为:

——拉伸应变 $\varepsilon_{2d} = 0.35\%$;

——压缩应变 $\varepsilon_{0d} = 0.25\%$ 。

B2.5.7 如果由于设计,使高应变发生在纤维方向的横向上,则必须进行试验证明,在设计载荷下没有破坏。

B2.6 应力验证

B2.6.1 应力验证和应变验证方式一样 (见 B2.5)。设计应力值 (见 B2.1.2) 应与载荷进行比较。

B2.6.2 如果不进一步验证,沿纤维方向在力的作用区内表面压力不能超过 100N/mm^2 。

B2.6.3 疲劳强度的验证是以上述层板建立的特征 S/N 曲线和用这一曲线建立的戈德曼图为基础的。如果对于层板没有合适的 S/N 曲线,可以按 B2.3.3 系数 C_{2b} 的假设值。

B2.6.4 戈德曼图显示了平均应力和交变应力元件间的关系且可以按图 B2 所示给出。

B2.6.5 戈德曼图可用来确定给定应力下的许用载荷循环数。它可用于损伤累积计算。损伤定义为施

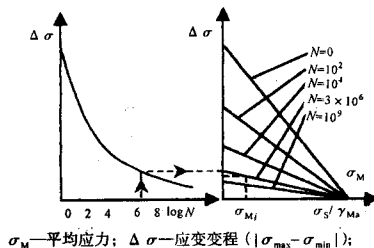
加的载荷循环数与许用载荷循环数商的总和，它必须小于或等于 1。

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

式中：D——损伤；

n_i ——某级应力变程作用的载荷循环数；

N_i ——某级应力变程许用的载荷循环数。



σ_M —平均应力； $\Delta\sigma$ —应变变程 ($|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|$)；

σ_s —破坏时的短期应力（特征值）； γ_{Ms} —材料局部安全系数（按 B2.3.2）； N —载荷循环次数

图 B2 S/N 和戈德曼图

B2.7 稳定性分析

B2.7.1 受压或受剪零件的稳定性（抗褶皱、弯曲、翘曲等）应根据设计载荷进行验证。

B2.7.2 对于稳定性分析，应将材料局部安全系数 γ_{Mc} 应用到材料的刚度平均值上， γ_{Mc} 通过安全系数 γ_{M0} 与下列系数相乘得到：

$C_{2c}=1.1$ 考虑了模量分散性的大层板和夹芯结构的表面层；

$C_{2c}=1.3$ 考虑了模量分散性的芯材；

$C_{2c}=1.0$ 适用于验证过最小特征值的芯材；

$C_{3c}=1.1$ 温度影响。

B2.7.3 如果用线性有限元计算进行稳定性分析，则应考虑 1.25 的附加安全系数。

B2.7.4 对通过计算进行验证的实际结构不能详细分析的地方，所做的假定和估算应偏保守。

B2.7.5 试验验证可以作为稳定性分析的一种替代方法。在这种情况下，应考虑载荷的平均值和 B2.7.2 中的系数。其中的 $C_{2c}=1.0$ 。

B3 碳纤维增强塑料 (CRP)

B3.1 总则

B3.1.1 用 CRP 制造的叶片的强度和稳定性分析，不论是整体还是它的承载部件，均和 FRP 叶片方法相似。

B3.1.2 本标准指的是高强度增强纤维。

B3.1.3 在碳纤维复合材料和金属部件直接接触的情况下，由接触腐蚀产生的可能的损坏应用适当的方法排除。

B3.1.4 对 CRP 来说，按 B2.3.3 的高周疲劳强度系数 C_{2s} 中的斜率 $k=14$ 。如果不进一步证明，它可适用于纤维体积含量最小为 50% 的环氧树脂基体的 CRP 层板。如果使用更大的值，则要求进行适当的

验证 ($S-N$ 曲线)。

B3.2 应变验证

B3.2.1 如果不进一步验证, 纤维拉伸方向上的破坏极限 $\epsilon_R = 0.35\% / (C_{4a} \times C_{4b})$, 由设计载荷计算的应变不应超过破坏极限 ϵ_R 。

B3.2.2 对承受压缩载荷的地方, 如果不进一步验证, 使用 B3.2.1 中计算值的 75% 作为许用压缩应变。

B3.2.3 承载层板是用单向碳纤维增强层制造的叶片用应变分析来验证更简单。在设计载荷下, 沿纤维方向的许用应变为:

——拉伸应变 $\epsilon_{Zzul} \leq 0.24\%$;

——压缩应变 $\epsilon_{Dzul} \leq 0.18\%$ 。

B3.3 应力验证

如果不进一步验证, 在力的作用区内沿纤维方向的表面压力不能超过 150N/mm^2 。