

## 目录

前 言.....	3
引 言.....	4
1. 主题与范围.....	5
2. 引用标准.....	5
3. 定义.....	5
4. 符号.....	8
4.1 符号.....	8
4.2 希腊符号.....	8
4.3 下标符号.....	8
4.4 缩写词.....	9
5 通用原则.....	9
5.1 试验目的.....	9
5.2 临界状态.....	9
5.3 实际约束.....	10
5.4 试验结果.....	10
6 叶片数据.....	11
6.1 概要.....	11
6.2 外部尺寸与接触面.....	11
6.3 叶片特性.....	11
6.4 材料数据.....	12
6.5 设计负荷及条件.....	12
6.6 试验区域.....	13
6.7 特殊的叶片修改.....	13
6.8 根部固定.....	13
6.9 机械装置.....	13
7. 设计和试验负荷条件的不同.....	13
7.1 总述.....	13
8. 试验负荷.....	15
8.1 总述.....	15
8.2 以负荷为基础的试验.....	15
8.3 以强度为基础的试验.....	16
8.4 负荷静态试验各方面.....	17
8.5 负荷疲劳试验各方面.....	17
8.6 静态和疲劳试验顺序.....	18
8.7 机械装置.....	18
9 试验负荷因素.....	18
9.1 概要.....	18
9.2 设计中使用的准安全因子.....	18
9.3 试验负荷因素.....	19
9.4 负荷系数的应用以获得目标负荷.....	20
10 试验负荷分布之于设计负荷的评估.....	20
10.1 概要.....	20
10.2 引入负荷的影响.....	20
10.3 静态试验.....	20

10.4 疲劳试验.....	22
11 故障状态.....	24
11.1 概要.....	24
11.2 灾难性故障.....	24
11.3 功能故障.....	24
11.4 表面故障.....	24
12 试验过程和方法.....	25
12.1 概要.....	25
12.2 试验台和根部固定装置要求.....	25
12.3 引入负荷的固定装置 第 38 页图 6.....	25
12.4 静态强度试验.....	25
12.5 疲劳试验.....	26
12.6 选择各种试验方法的优缺点.....	28
12.7 决定性修正.....	28
12.8 数据收集.....	29
13 决定叶片性质的其他试验.....	30
13.1 概要.....	30
13.2 试验台偏移.....	30
13.3 偏移.....	30
13.4 刚度分布.....	30
13.5 变形分布测量.....	31
13.6 固有频率.....	31
13.7 阻尼.....	31
13.8 形态.....	31
13.9 (物理) 质量分布.....	32
13.10 蠕变.....	32
13.11 其他非破坏性试验.....	32
13.12 叶片分段.....	32
14 报告.....	32
14.1 概要.....	32
14.2 内容.....	32
14.2.1 通用---所有试验.....	32
14.2.2 静态试验和疲劳试验.....	32
14.2.3 其他试验.....	33
附录 A (常规性) 准安全系数的考虑.....	34
附录 B (常规性) 疲劳公式敏感性评估.....	35
附录 C (常规性) 加载角度变化的考虑.....	36
附录 D (资料性) 试验安装实例.....	37
Bibliography .....	39

## 前 言

1) IEC(国际电工技术委员会)是由各国家电工技术委员会(IEC国家委员会)组成的世界性标准化组织。IEC的宗旨是促进电气及电子领域标准化工作的全面的国际间合作。为此目的和为其他业务IEC发布国际标准。他们的准备工作委托给技术委员会;任何对涉及题目感性趣的国家委员会,都可参与它的工作。根据IEC与国际标准化组织(ISO)达成的协议,两个组织之间将紧密协作。

2) IEC技术内容的正式决议尽可能地表达了相关问题上的一致意见,因为各技术委员会代表了所有这些国家委员会。

3)产生的文件以推荐的形式提供给国际间使用,并以标准、技术报告或指导性文件发布,它们在某种意义上被各国家标准委员会认可。

4)为促进国际间的统一,各IEC国家委员会同意在它们的国家和地区明显地、最大限度的使用IEC国际标准。IEC标准与相关国家和地区标准间的任何差异,都应在后者明确说明。

5) IEC不提供有关标准批文,也不对任何设备与某IEC标准相一致的申报行使责任

6)应注意本国际标准的某部分是专利内容的可能性。IEC不负区分它们的责任。

国际标准IEC61400-21是由IEC技术委员会88: 风力发电机组

本标准版本根据下列文件产生:

FDIS	投票报告
88/144/FDIS	88/150/RVD

对本标准的投票情况,可在上面指定的投票报告中查询。

本标准是依照ISO/IEC方针第3部分起草的。

委员会决定本标准的内容将保持不变到2003。届时,将对本标准进行:

- 再次确认;
- 撤销;
- 用修订版取代;
- 修改,

## 引 言

通常风力机转子叶片被当作风力发电机组最关键的组件，许多国家标准将叶片的设计单独提出，但很少将叶片的试验作为认证的必须要求，然而，全世界范围许多国家现在均进行叶片实验室试验。每个实验室都各自开发出独一无二的一套试验设备，程序以及专业术语用来试验叶片。虽然每个实验室的技术可能都是合乎规定的，但在不同单位做出的叶片试验结果可能难于比较和评估。

IECTC88第八工作组主要工作重点是验证众多实验室普遍接受的实践方法，同时，给出建立叶片试验标准的指导，由于各个实验室使用的方法范围很大（由试验系统硬件决定），所以编写出一个限制性的标准，仅支持一种方法而排斥其他全部的，这样是很不公平的。因此，目前这个技术规范仅提供推荐指导试验的方针，包括许多不同的方法。

本技术规范提及的所有试验并不视作每个叶片设计的必须要求。试验是否需要决定于：由于使用新材料，新设计理念，新生产程序等导致的设计评定上的不确定程度，或可能发生在整体结构上的碰撞。在有些例子中，普遍使用其他方法进行试验（见附录D）。本技术规范中讨论的各种选择均列出了其相应的优缺点。

## 风力发电机组

### 第23部分：转子叶片的全尺寸比例结构试验

#### 1. 主题与范围

本技术规范为风力机叶片全尺寸比例结构试验和相关结果的说明及评估提供了指导方针，作为叶片整体设计验证的一部分。

在该技术规范中，应考虑下列试验：

- 静态强度试验；
- 疲劳试验
- 其它叶片特性试验

假设决定试验参数的数据是可用的。在本技术规范中，设计负荷和叶片的原料数据作为确定和评估试验负荷的起始点，与实际负荷相关的设计负荷的评估则不在本技术规范的范围之内。

本技术规范不包括：

- 试验设备采购的详细规范；
- 覆盖进行强度试验所有方面的详细工作指导；
- 作为确定叶片及其组件基本原料强度和疲劳强度设计依据；
- 替代精确的设计流程；
- 用来试验机械功能。

本技术规范编制中，进行的是水平轴风力机叶片的实物测试，多数是纤维加固塑料和环氧树脂/木材叶片。然而，其它结构，尺寸和原材料的风力机发电机组同样适用其中大的原则。

#### 2. 引用标准

下述标准文件中所含条款，通过在本技术规范中引用而构成本技术规范的条文。凡是注明日期的引用文件，其随后所有的增补版或修订版和其它版本均不适用于本部分，然而鼓励根据本部分达成协议的各方研究可使用这些文件的最新版本。凡是不注明日期的引用文件，使用其最新版。IEC和ISO的成员国内进行最新有效的国际标准的登记。

IEC 60050—415：1999 国际电工词汇——第415部分：风力发电机组。

IEC 61400—1：1999 风力发电机组 第一部：安全要求；

ISO2394：1998 结构可靠性通用原则

ISO/IEC17025：1999 标定计量单位标准和实验室试验通用设备。

#### 3. 定义

通常风力机或风力能源相关的定义对该更确切，IEC 60050—415提到的以及下述定义的，该技术规范的目标是

##### 3.1 执行机构

用恒定或变化的力或位移操纵的设备。

### 3.2 叶片

转子的旋转及气动设备

### 3.3 叶根

转子叶片与转子衬套相连接的部分

### 3.4 翘曲

压力荷载下非线性偏差引起的非正常形态

### 3.5 叶弦

叶片翼型横截面上前沿和后沿相连的参考直线长度（叶弦片）按一定的惯例定义。

### 3.6 恒定幅值负荷

在疲劳试验中，应用恒定幅值和平均值的循环负荷

### 3.7 蠕变

在长时间持续负荷下引起应力的不断增加

### 3.8 设计负荷

叶片设计承受负荷，包括相关部分安全系数

### 3.9 沿边向

与局部叶弦平行的方向

### 3.10 疲劳公式

评估疲劳寿命的方法

### 3.11 疲劳强度

重复负荷下材料或结构元件的承受能力的测量值

### 3.12 疲劳试验

一种使用恒定或变化幅值的循环负荷作用于试验本体的试验

### 3.13 固定件

引入负荷或支撑试验样本的组件和设备

### 3.14 沿翼向

与未变形的动叶轴伸展表面方向垂直的方向

### 3.15 沿展向

与局部叶弦和叶轴高方向垂直的方向

### 3.16 全尺寸试验

在实际结构或组件上进行的试验

### 3.17 内侧

朝向叶片根部

### 3.18 前后沿

平行与伸展表面的几何平面，垂直于不变形动叶的纵轴的方向

### 3.19 静态负荷

在所有方向和叶高位置上最大设计负荷的集合

### 3.20 形态试验

决定整体固有频率、阻尼和结构形态外形的试验

### 3.21 固有频率

( **eigen** 频率) 在这一点频率当受到干扰时整体允许的自由振动

### 3.22 非破坏性试验

不改变整体性质的检查方法

### 3.23 外侧

指向叶尖

### 3.24 准安全系数

用于修正负荷和原材料强度典型值的不确定性的系数

### 3.25 点负荷

一个负荷或一组负荷作用在离散叶展位置

### 3.26 径向位置

在几何平面上从转子中心到转子轴的垂直距离

### 3.27 R—比率

循环负荷中最小与最大值的比值

### 3.28 服务负荷

负荷频谱, 包括实际操作环境的典型连续场量

### 3.29 S—N公式

用来表述应力 (S) 和材料循环 (N) 特性、组件和结构整体的方法

### 3.30 沿叶高

平行与动叶纵轴的方向

### 3.31 静态试验

定值、定向的特定负荷作用于试验样本的试验

### 3.32 刚度

力的变化 (或扭矩) 与弹性体、非固定体位移变化的比值

### 3.33 应变

在应力作用下材料拉长值 (或切位移) 与最初材料长度的比值

### 3.34 皮重负荷

由重力引起的力或力矩

### 3.35 试验区域

承受设计负荷试验体的部位

### 3.36 试验负荷

试验中应用的力和力矩

### 3.37 厚度

垂直于叶弦，叶片翼型上部与下部表面之间的最大距离

### 3.38 扭转

叶片截面的叶弦直线在角度上沿叶高方向发生变化

### 3.39 最大强度

材料或结构元件最大（静态）承载能力的测量值

### 3.40 变化振幅的负载

应用的非恒定的平均值和循环幅度的循环负载

### 3.41 威尔福树

将单一负载源分散放置在试验样本的多个点上的设备

## 4. 符号

### 4.1 符号

$F_x$  沿翼形方向切应力

$F_y$  前后沿切应力（转子协调系统）

$F_z$  沿叶高方向拉力（转子协调系统）

$M_x$  前后沿弯矩（转子协调系统）

$M_y$  沿翼形方向弯矩（转子协调系统）

$M_z$  叶片扭距（转子协调系统）

$F_a$  沿展向切应力（叶弦方向协调系统）

$F_b$  沿边向切应力（叶弦方向协调系统）

$F_c$  沿叶高方向（拉）应力（叶弦方向协调系统）

$M_a$  沿边向弯矩（叶弦方向协调系统）

$M_b$  沿展向弯矩（叶弦方向协调系统）

$M_c$  叶片扭距（叶弦方向协调系统）

$D$  理论损失

$C$  材料强度转换系数

$f$  强度

$F$  负荷

$g$  强度系数

### 4.2 希腊符号

$\gamma$  部分因子（偏因子）

$\sigma$  应用应力和拉力

### 4.3 下标符号

design 设计负荷条件

df	设计负荷：疲劳
du	设计负荷：静态
ef	试验负荷疲劳公式的不确定系数
f	负荷
ff	疲劳负荷
f <sub>u</sub>	静态负荷
k	特性值
m	材料
n	故障影响
nf	疲劳故障影响
nu	静态故障影响
sf	叶片间振动：疲劳试验负荷

Su: 叶片间振动：静态试验负荷

Target: 目标负荷条件

Test: 试验负荷条件

#### 4.4 缩写词

SSF: 静态强度系数

RSSF: 相对SSF

MSS: 最小静态强度

FSF: 疲劳应力系数

RFSF: 相对FSF

MFS: 最小疲劳强度

RMFS: 相对MFS

WGTS: 风力发电机组

## 5 通用原则

### 5.1 试验目的

风力机叶片试验的基本目的是为了证明叶片型号，在制造过程中相对确定的系列规格。

必须说明：叶片可以承受在它的设计服务寿命中可能经受的最大负荷帮疲劳负荷。

通常，技术规范中的全尺寸试验主要进行有限数目的样本试验，只试验设计提供的一到两个叶片，所以不能得到生产中片强度的静态分布规律。虽然试验提供了叶片型式的确凿信息，但这此既不能替代精确的设计程序，也不能替代一系列的叶片生产质量保证体系。

### 5.2 临界状态

考虑到其它影响，有代表性的试验负荷能高于设计负荷，例如，环境影响、试验的不确定

性以及生产中的变数（见第9章）

对临界状态实际余量的确定非常有必要，因为，这个余量能提供试验叶片抵抗力实际安全性的一个评估，然而，这种价值的体现并不直接，也并不要求作为一个可能的方法必须应用。

### 5.3 实际约束

实际的试验操作受到技术和经济条件的限制。最主要的一些受约束条件如下所列：

- 模拟的叶片上的负荷分布只能近似精确；
- 试验的时间通常仅有一年或更短；
- 仅测试一个或少量叶片；
- 某些失败很难被预见

因为以上约束条件会做出一些处理，以便最终的试验结果能用来对定义的临界状态进行评估，试验会是一折衷产物。

考虑到结果的体现，用来试验的叶片通常是系列产品的第一代叶片，而且是经过发展改良的，这些应该心中了解，即使是最小的修改也可能影响试验的有效性。

### 5.4 试验结果

设计负荷是试验负荷及随后严格的试验负荷评估的基础，如果在试验期间没有发生叶片损伤，同时叶片结构和试验负荷都经过准确评估，那么预示着叶片满足设计要求，虽然如此，我们必须知道测试内容和不测试的内容。

#### 5.4.1 测试内容

按设计计算，叶片必须能承受设计负荷。在这些设计计算中隐含了一些假设：

- 精确计算应力和应变或保守的估算；
- 精确或保守估算所有有关材料和细节的强度及疲劳公式是精确的或保守的；
- 产品是以设计为依据的；

当一个全尺寸结构比例试验作业最终设计验证时，上述的假设合理性同时得到检验，当试验中叶片损坏，那么至少上述假设中一项被违背了，虽然没有更深的分析清楚说明是什么导致这非预料性的失败。

当叶片经过试验没有出现非预计性或严重的损伤，那么就有把握说叶片的设计和和生产没有可导致不安全情况的重大错误，然而，这还不是绝对的保证，因为，可能有些设计假设中的错误。在全尺寸试验环境条件下相互抵销了，但他们在实际操作环境中不会抵销。

#### 5.4.2 非测试内容

全尺寸试验中，下列内容不被测试（和验证）

- 设计负荷的正确性；
- 由于环境条件与试验时条件不同产生的影响；
- 结果的分散；

——生产或设计中可能的变化；

## 6 叶片数据

### 6.1 概要

通常用一些图、技术规范和部件列表来说明叶片。同时还配有操作、运输和储存相应的指导。

试验叶片的设计和建造都应有可查找的文件根据，例如图纸，要附注分层草图和签名的检查报告。叶片应有自身唯一的特性说明书。特别是如果试验叶片与系列生产叶片有不同，那么不同点要清楚地文件中标出。

要安全确切说明叶片性质需要大范围的数据，这些数据被各个方面使用。例如，实验室必须有基本体积数据以便决定叶片是否合适试验床，而更细节的原料信息则用来评估和测试。这些基本分类如下所述。

### 6.2 外部尺寸与接触面

在图纸上应确切说明叶片的尺寸，至少提供下列数据（举一个例子，见图1）

- 叶片从根部到顶部的长度；
- 螺栓式样和叶片根部接触面尺寸；
- 叶弦与扭转的分布位置

为了确定整体尺寸的表面，需要进行设备试验，叶片的最大偏差和负荷均应提供。

#### 第15页图

图1——表示外部尺寸和接触面的图例

### 6.3 叶片特性

为了试验和评估的目的，特别说明下列内容：

- 叶片包括外加负荷部件至少5面良好分布位置的几何轮廓
- 主要内部组件的位置与特性
- 使用材料（见6.4）
- 原料分布
- 基本制造过程性质
- 锻压及层状结构组成部分
- 不锈钢及金属组件
- 固定装置
- 连接件
- 叶片至少5个良好分布位置截面性质
  - 弹性区
  - 主要弯曲刚性

- 主轴刚性区
- 扭转刚性区
- 剪力中心区
- 总质量及质量分布
- 重心位置
- 固有频率（第一、二级沿平展方向和沿边向，第一级扭转）
- 主要特性公差

以强度为基础的试验应提供选择下每个横截面有关的强度

#### 6.4 材料数据

一些试验区域使用的材料相应的强度/或疲劳公式及弹性特性均应提供。对于疲劳强度，这包括恰当的S-N公式，循环计算步骤，合适的损坏累积模型，R-比率影响其它

#### 6.5 设计负荷及条件

##### 6.5.1 总述

通常试验负荷就是指将空气动力和叶片扭矩简化分布位于叶片跨度方向为分散的力，用这些力来表示一个特定的负荷情况。

以负荷为基础的试验（见8.2）应确切说明设计负荷，而对于以强度为基础的试验（见8.3），就不需要。应使用的标准和设计负荷包括的准安全系数均应标明。

##### 6.5.2 负荷情况

每种负荷情况均应以6个负荷分量来定义（ $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ ），沿叶片跨度方向选取多点在试验的重要位置，使试验负荷得到精确评定。提供的6个负荷分量还包括用来产生复合负荷1)的相位和频率信息。然而，并不是所有负荷都是同等重要，也不是所有负荷在试验中都可以外加的（见第7章）。协调系统有关负荷分量应清楚说明。正常情况下，使用沿叶弦方向协调系统（见图2）或转子协调系统（见图3）。用于试验目的，建议采用图3的转子协调系统。

#### 第17页图

图2——转子（沿翼形，沿边方向）协调系统

图3——转子（沿翼形，沿前后沿）协调系统（选择的）

##### 6.5.3 环境条件

除了负荷之外，关于设计操作条件及试验条件都应明确规定，这些会影响材料性质（例如湿度、温度）

##### 6.5.4 机械装置

在像顶部制动器这样的重要部件上外加负荷通常与在叶片上外加负荷性质不同，需要特别的技术规范和详述试验说明。

## 6.6 试验区域

没有一个试验能同时加负荷到整个叶片，外加有代表性的负荷到重要的区域。请考虑下列可能的重点区域：

- 在跨度之外叶片内侧部分，这部分性质缓慢变化
- 叶片的一些部位，那里计算中采用最小余量系数来抗扭曲，计算强度或疲劳寿命
- 叶片上与空气动力制动装置连为一体的部分，此部分结构特性受空气动力制动装置影响

这些区域试验情况应详述

## 6.7 特殊的叶片修改

为了试验的目的能存在一些特殊的叶片修改。在疲劳试验中，在一个可接受的时间框架内负荷必须放大来做试验。在某些情况下，疲劳负荷要求的放大量可能导致某些不用考虑做试验的部分损坏，在这种情况下，可以考虑特殊的叶片修改，以可能由于外加负荷加强而修改。所有特殊的叶片修改都应详述。

## 6.8 根部固定

在某种条件下应考虑做根部区域试验，根部安装细节应详述：包括螺栓的技术规范和装紧程序，固定长度，轮毂刚性等等

## 6.9 机械装置

如果一个机械装置的结构接触面要试验，那么最好机械装置和适当的固定装置引入由叶片提供的负载。任何机械装置和固定装置承载物，位置及配置的附加数据都应详述。

## 7. 设计和试验负荷条件的不同

### 7.1 总述

设计负荷包括下列负荷要素

- 沿平展方向弯矩
- 沿边向弯矩
- 在平展方向加负荷剪应力
- 在边方向加负荷剪应力
- 扭矩
- 径向负荷

然而，实验室试验必须有限制。在试验中，负荷并没有实际加到所有构件上，也没有建立与设计环境相同的条件，更有甚者，做疲劳试验必须加速，增加试验负荷使之大于设计负荷以至在某个试验阶段里叶片承受明显的疲劳损伤。还有，它不同于加负荷理想状态下的情况，也应考虑例如，外加集中负荷，增强的剪力负荷及扭负荷。同样，通常情况下，也不可能平等试验叶片所有部分，即使是简化的负荷也应按排在规定的有效区域试验。

在很多情况下，为了解释试验条件和假设负荷或强度数据角度的环境条件不同（例如实验室环境通常与设计 and 操作环境不同），必须修改试验负荷。用来判断评估的有关因素是个问题，

在第9和第10节讨论。

在下列章节中，将讨论一些可能存在的设计与试验负荷条件不同之处。

## 7.2 外加负荷

在一个试验中，外加负荷往往集中在叶片沿跨度部分（见12.3），由于负荷的集中及可能横截面的加厚，那么，通常横截面的变形可能不发生，这将改变叶片就地应力。那些外加负荷点因而远离了试验详细规定的那些区域。

### 第19页图4

#### 图4——理想和试验负荷不同的力矩分布

## 7.3 弯矩和剪力

在一个试验装置上，通常负荷仅加在一些数量的部件上，而理想的所加试验负荷应是连续的，这会导致部件沿跨度方向力矩（见图4）及剪应力不同。

通过增加动作机构外加负荷的横截面数量，这种情况可改善。然而，增加动作机构数目也便增加了并不准备试验的一些叶片区域（见7.2和10.2）

虽然如此，试验中的沿跨度方向力矩与剪应力分布必须尽可能的与设计负荷接近。通常，这对力矩分布很重要。

## 7.4 沿平展方向和沿叶片边方向的合并

在静态和疲劳试验中，外加的沿平展方向和沿叶片方向的负荷合并后其结果最有代表性。仅外加沿平展方向弯矩或仅外加沿叶边方向弯矩，产生的应力和变形/或损伤率在某些区域可能低于设计值，特别是，如果应力和变形是随负荷非线性变化，而且这并不计入评估，那么原则上评估不如当同时外加沿平展方向和沿叶边方向负荷时那么精确。

## 7.5 径向负荷

由于重力和离心力在运行中的风力机叶片上产生了径向负荷，通常，在没有显著结构改变的试验装置上，在叶片外加分布良好的离心负荷是不现实的。由径向负荷产生的应力相对比较小。

径向力与弯曲合成后可能非常显著（例如：对叶根固定装置来说，这可以通过适当调整弯曲构件来补偿。

## 7.6 扭转负荷、

对大多数叶片来说，扭矩经常很小或忽略不计。如果认为这是有关系的，那么需外加扭矩。通常，试验负荷设备偶尔产生一些意想不到的扭转负荷（见12.7.3），这种影响应评估。

## 7.7 机械装置

位于叶片外部的机械装置的动力环境非常复杂。在这些外侧区域里，径向负荷能产生重要影响，不应被忽视。由于试验装置径向负荷的缺少，可能不能适当试验机械装置结构接触面。

因此，为了试验结构接触面应考虑包括径向负荷在内的特殊试验安装。然而，为了防止过分复杂化，仅试验机械构件结构接触面最重要的设计负荷要素。

## 7.8 环境条件

试验过程中，环境和时间条件都与设计条件不同，这些条件包括：

- 湿度
- 温度影响
- 紫外线辐射
- 时效性（疲劳强度与时间相互作用）
- 灰尘
- 盐分
- 化学污染

通过使用适当的强度和疲劳公式来设计和试验，在评估中相关影响均应考虑。然而，对不同条件的不同设计公式的有效性不进行试验。

## 7.9 负荷频谱和顺序

设计所加负荷通常是一组负荷，有一定负荷循环周期，以实际随机负荷情况为基础。由于一些现实的原因，基于设计负荷的试验负荷更为简单化。它可能是一个有限变化的循环周期，数目远远少于设计负荷。因为循环周期的减少和其它影响，对试验负荷负荷幅值及平均值都较高。结果导致试验负荷频谱与设计负荷大大不同。

不考虑这个不同，试验负荷和设计负荷可能均等，然而，关于此项结论还要仰赖于疲劳公式的精确度（见9.3.2和附录B），此外，设计负荷的负荷循环顺序也是不同的。

通常，负荷循环顺序产生的影响不考虑在疲劳公式之内，这是因为通常不能完全知道影响程序而且即使知道，计算也很复杂。

# 8. 试验负荷

## 8.1 总述

设计负荷或设计强度应明确规定，以便决定试验负荷。试验负荷可以以负荷为准或以强度为准，以负荷为准的试验使用完全的设计静态负荷或选择负荷情况。

进行静态负荷试验的目的是为了说明叶片能承受计划负荷而不产生损伤，通常作为验证过程的一部分。静态负荷试验必须包括一个试验前试验负荷评估，这在第10章列出。

进行选择性负荷试验使用一些选择的负荷分布作为基础。以强度为准试验使用制造叶片强度数据作为基础。设计者/制造者使用上述两种试验类型，通过加负荷使叶片破坏来决定强度余量。2)

## 8.2 以负荷为基础的试验

### 8.2.1 设计静态负荷试验

### 8.2.1.1 总述

这种类型的试验用来证明，试验叶片在一定可行等级中，在运行或极限负荷条件下能达到结构设计要求。破坏试验既无法达到也不要求，试验目的只为了表明叶片能承受要求负荷而不损坏。不同的负荷条件使负荷方向变化很大，所以对于一给定叶片，在单个试验中不可能试验所有的负荷条件和叶片位置。试验负荷的基础是整体静态叶片设计负荷，来源于被广泛接受的如IEC 61400—1这样的标准或其它同样的资料，这种类型的试验对设计验证来说推理最小。

为了得到合适的试验负荷，负荷通过系数调整，这在第9章讨论，这些在静态负荷试验条件下系数的评估应在试验前进行。这个过程细节在第10章讨论。

### 8.2.1.2 静态试验

静态试验中，考虑到制造叶片数量的变化和实验室设计环境条件的不同，叶片应加载每种最严重设计负荷条件。

因为并不希望叶片在进行设计静态负荷试验时损坏，所以使用严格的、有效的试验来完整地测试叶片。例如，如果不同的认识环境或负荷分布代表不同的极限负荷情况，那么要按顺序试验每种情况。做这些加负荷试验时，负荷引入固定装置，要改变位置或方向，也要变化负荷值，保证叶片所有有关区域均经过试验。

### 8.2.1.3 疲劳试验

在选择的关键区域试验负荷加载试验产生的疲劳损伤必须与设计负荷带来的相同。基于实际原因，通常疲劳负荷选择缩短试验时间，围绕整个叶片截面的试验区域，各种沿展向和沿边向的负荷合并共同产生作用。更详细的加载方法的讨论和最终加载试验负荷时的负荷因子将在第9、10章给出。

因为并不希望叶片在进行设计静态负荷试验时损坏，于是在做完疲劳试验后，出现了两种选择，一是进行非破坏性静态负荷保证试验，或是残余强度负荷至疲劳破坏试验。

### 8.2.2 选择性负荷试验

叶片的试验负荷可以来源时挑选的单个设计负荷情况。通常，叶片在一种负荷分布情况下进行静态或疲劳破坏试验，该负荷分布具有符合规定的设计负荷的情况。这就产生了加载负荷与叶片相对这些负荷最脆弱位置的疲劳强度之间的余量，当叶片强度分布还未确切知道或全面的试验负荷评估还未在试验之前完成时，可以用此方法进行试验。这种试验应在那些不会导致破坏的试验之前进行。例如，它可以用来测定负荷静态试验后的残余强度，或者极限负荷加载后的疲劳强度。连续或高强度负荷增加用来验证时间损伤。

如果叶片适合多种使用标准，试验后评估用来确定相对那些标准的余量，然而一旦做了设计负荷评估，可能发现试验外加负荷对通过负荷要求的试验负荷来说，在所有叶片等级上都是不相称的，如果故障最终余量大小可能导致产生非结论性结果。而且，这种方法仅允许试验一种负荷条件，因为试验过程中叶片会损坏（故障）。如果，试验的主要目的是为了证明叶片符合设计标准，负荷静态试验的整个方法应在最初考虑中给出。

## 8.3 以强度为基础的试验

### 8.3.1 概要

以强度为基础的试验允许用来直接验证叶片强度，评定设计计算方法，设计结果本身可能得到改善，这种方法可用来在一个大区域中寻找相对要求强度来说强度最弱位置。在感兴趣的部位对于叶片的可能最大长度，负荷的选择与强度成比例。强度分布自然规律和试验组织结构限制，将最终决定强度分布试验区域的尺寸。随着叶片大范围均能符合相对期望强度的理想条件，就可能进行静态破坏加载或感兴趣的疲劳负荷级加载。如果试验负荷类型想要与决定设计的负荷类型不同，例如，一种叶片它的设计是通过疲劳操作负荷决定的，使它经受极端加载试验或缺陷试验，那么以强度为基础的试验特别有用。对这类情况来说，叶片强度分布通常与

设计负荷情况不同，这个设计负荷情况不能确定它的设计。

以强度为基础的试验的另一个目的可能是用来评定在叶片出现的大块材料与用来试验原料强度的小试样之间的强度减弱。由于试样和最终的叶片在同样控制的实验条件下均能试验，就能获得受外界影响最小的评定。如果使用威尔福树或其它多点加载，就选择能使加载曲线与强度曲线外形匹配的外加负荷点，如果使用单点加载，就选择使试验感兴趣部位负荷对理想强度比率最高的负荷点加载。

选择试验区域以外的强度也应接受检验，以减少由于意想不到区域故障而损坏试验试样的危险。如果意想不到的故障模式被视为可能，就可以调整负荷的分布。相反，在同一试验中多个部分用来试验故障强度的负荷是有意施加的，这样相对于预告的最低强度将被发现。

按自身的特点，以强度为基础的负荷将产生沿叶高区域相对恒定的高应力。这样，变形的测量值在广泛位置上将接近定值。如果正好在或接近结构缺陷，例如，内部材料层就可以监测到叶片最大变形，在无特性变化的位置，能测定典型的大变形，另一种情况，产生大面积相对恒定变形的能力用来帮助调查感兴趣区域的性质。

### 8.3.2 静态试验

对一个以强度为基础的静态试验，相对给定方向的加载沿叶高方向强度分布应给出。需注意保证加载方法不会引起非理想的局部翘曲或过度剪力。如果检验翘曲稳定性是试验的目的，那么以强度为基础的加载伴有合适的方向会产生很大的高应力区，这会使叶片达到它的稳定极限的可能性最大化。

### 8.3.3 疲劳试验

对疲劳试验来说，作显沿叶高位置的一个函数，强度分布曲线应以叶片的计算疲劳公式为基础，多层脱落改变的原材料成分和其它结构细节，这些对静态加载试验都有较小影响，这些都应考虑。这些细节可能会有一个不同的疲劳特性。因此，使用循环调整系数的单个强度曲线可能并不适用于做所有可能试验的基础。

负荷方面的变化可以改变试验疲劳状态和强度曲线。如果不同原料类型或结构特件有不同的疲劳反应，那么应产生限制因素，必须关注：保证强度曲线适合试验条件和认识环境。

## 8.4 负荷静态试验各方面

### 8.4.1 负荷合并

如果叶片试验采用的是沿展向和沿边向要素结合的负荷，那么一个方向的最大负荷应与另一个方向的适当的负荷合并（并不必须是最大的负荷）。在一个静态试验中，每个方向轮流施加最大负荷，与另外方向上的适当的负荷合并。必须注明：当一个必然发生的负荷合并恰好施加到特殊方向负荷值并不必须是最大的，但叶片可能在那种特定疲劳状态下最易损坏，对于每种负荷组合叶片应在规定的负荷持续时间随负值最大值。

### 8.4.2 静态加载期间

由于通常大多数叶片随负荷持续时间材料发生强度缩减，因此试验负荷持续应尽可能地保持尖峰设计负荷。如果设计负荷相关信息提供了一个定义好的，在叶片上施加尖峰负荷的持续时间，那么试验负荷和持续时间均应直接以此为基准。如果难以确定常规恒定试验负荷多大的持续时间对设计负荷的时间历史来说是个好的匹配，那么建议10S作为最小值，建议避免采用比设计负荷持续时间短的值，那样会要求引入使用一个强度换算系数，因引在试验结果的说明中，引入不理想的不确定性。

## 8.5 负荷疲劳试验各方面

### 8.5.1 试验时间的缩减

由于实际原因试验时间必须被缩减，这可以通过对设计负荷的下列修改来实施。

- 提高频率；
- 忽略非破坏性循环；
- 增大负荷；

可能的试验频率（0.5Hz-5Hz）通常不高于设计负荷主频，个假设设计负荷的循环数大约为20米叶片5亿次试验1Hz需要15年，除了提高频率外，其它设计负荷的修改也是必需的。

忽略非破坏性循环的影响取决于材料（例如S-N曲线斜率、疲劳极限等等）。需要分析整个循环中哪部分能看作是非破坏性的部分。

通常对大叶片来说，必须增大负荷获得大约1千万循环数或略少的实际试验。这是试验尽可能接近实际，与获得更多试验时间两者之间的一个折衷。

#### 8.5.2对负荷放大率和频率的限制

由于上面提到的相关考虑设计负荷必须放大到一个适当的试验负荷。当负荷被放大时，应力和变形增加，这种放大理论会导致相应的疲劳损伤积累，然而，对这是有限制的。应力和变形的最大值可能大于材料的静态强度，最终导致静态损伤或静态破坏。

更有甚者，应力和变形可能非常高以至于通常外力与应变之间线性关系的假设不再适用。例如，翘曲这种情况。结果导致在非放在负荷试验中不会出现的内部力或结构力矩由于放大试验而产生，这样试验就不十分地切合实际或难于说明了。

所以，由于叶片的静态强度和非线性因素，在加载疲劳负荷时，就对应力和变形的最大值做了实际的限制，特别是在变幅值加载情况时，这些限制使负荷放大系数相对比较低。在这种情况下时，只有中级负荷循环能不断增加，结果试验负荷变得越来越是一个定幅负荷。（见图5）

随着增大疲劳负荷和频率，另一个问题是对某些材料来说，高应力区域的内部发热。这也能加速疲劳损伤。

实际上，当显著发热无法避免时，发热应最小化到一定程度，温度升高应受监控和纪录，这样就能分析发热的影响了。

#### 第25页图5

#### 图5——负荷放大的实际限制

#### 8.5.3负荷类型

疲劳试验有很多类型的负荷，他们可能是：

- 定幅负荷
- 巨大负荷
- 变幅负荷
- 单轴负荷
- 多轴负荷
- 多点负荷

这此负荷类型在12.5.1中解释。

### 8.6 静态和疲劳试验顺序

在动中经过象静态试验这样的非破坏性静态试验后，就能进行疲劳试验。这对象钢这样的材料也许不适合。因为这此材料在高度加载后，疲劳特性会增强，建议剩余强度试验在疲劳试验完成之后进行。

### 8.7 机械装置

机械装置和它的机械接触面的负荷情况与整体叶片加载情况或特殊设备操作条件有关。举例说明，一个回转叶尖在它的运行位置能沿平展方向进行负荷试验或在特别试验中，外加负荷在调整的叶尖位置（见6.5.4和7.7），在这一个例子中，机械装置和机械接触面是作为构成叶片结构负荷路径整体的部分。通常考虑外加负荷试验应在任何可能感兴趣的区域进行，机械装置是其它情况的结构试验，例如，叶尖在停止位置，则应考虑适当的调整或对此条件相应的试验。

## 9 试验负荷因素

### 9.1 概要

试验中，应考虑各种负荷因素，那些来自设计的将在9.2中讨论。除了这些，另外还有由于引入的试验方法而用来计算影响程度的试验负荷因素，这些试验负荷因素在9.3中讨论。

### 9.2 设计中使用的准安全因子

#### 9.2.1概要

在设计计算中必须包括准安全因子（或系数），根据ISO2394这些包括： $r_m$ ：准材料因子； $r_n$ 准故

障因子； $r_f$ 准负荷因子

在设计计算中所有三个准安全因子（ $r_m$ 、 $r_n$ 和 $r_f$ ）必须使用。这些准因子的结果在整个设计的安全等级上是一个重要数字。对于试验负荷来说，仅 $r_n$ 和 $r_f$ 就有下述理由影响试验负荷。

显示准安全因子的结果（ $r_m$ 、 $r_n$ 和 $r_f$ ）与很多设计标准同样重要。然而，一些标准主要将整体安全性分配到这三个中的一个或其它因子。对于设计来说这没有区别，因为所有这些都必须应用。然而，对于试验来说有区别因为仅有 $r_n$ 和 $r_f$ 会影响试验负荷。这在附录A中说明，还包括一个处理该问题的实例。

### 9.2.2材料准因子

常用材料准因子 $r_m$ 通常用来解释说明介于材料结构特性和试验控制样本测量值之间的不确定性，例如，换算系数的不确定性。换句话说，生产叶片的实际材料的强度和疲劳特性可能比试验中那些强度和疲劳公式的基础材料要差，由于试验叶片的材料是真实材料，那就不应通过系数来增加分析。

材料换算系数要考虑结构上材料的条件和使用强度和疲劳公式条件之间的特殊差异，如尺寸影响湿度、时效、温度等等系数都是换算系数。这些都会在评估时通过使用适当的强度和疲劳公式而间接使用（见9.3.3和10.4.4）

### 9.2.3故障影响准因子

故障影响准因子 $r_n$ 考虑结构的重要性，还考虑（包括事故的典型类型）了事故影响重要性。因为对于一个非失效安全部件（如叶片）应要求比一个失效安全部件更高的安全等级。这种情况下，实物疲劳试验能反应这额外的安全要求。结果，试验负荷中应包括这些因子。

### 9.2.4负荷准因子

在设计过程中，负荷准因子 $r_f$ 考虑的是负荷的不确定性。因此，试验叶片必须承受设计负荷，包括给负荷加适当准安全因子。

## 9.3 试验负荷因素

### 9.3.1叶片与叶片间变动

通常在实物叶片试验中仅试验一个样本并作为最终设计验证。没有集合关于实际叶片强度可能散布的信息。这就出现了问题，因为没有一个好的方法能知道试验叶片代表的是生产叶片分配的哪个部分。如果确信试验样本的强度接近于平均水平，那么从一大堆强度低于设计强度的叶片中选出了一个强度高于平均水平的，这就使试验结果产生了误导。然而，在全尺寸试验中，叶片的大部分区域被视作试验负荷等于设计负荷，许多细节和大片区域同时试验。这与在相同条件下试验大量小样本，取最先损坏的样本数据作为试验结果，这样的实验有某些可比性。统计表明这意味着对叶片来说，一个低于平均值少分散的样本比小尺寸样本更合适。另一方面叶片的损伤累积可能由于受损区域变得易变，应力重新分布，而变得缓慢。

虽然如此，仍可少量认为叶片面积区域平等严格试验，在试验中需要更加意识到多方面加负荷比单轴试验要好。如果没有特殊叶片类型的损坏可能分布数据，可参考下列试验负荷因子。

对于静态试验： $r_{su}=1.9$

对于疲劳试验： $r_{sf}=1.1$

### 9.3.2疲劳公式中可能的错误

由于最初的设计疲劳负荷到试验负荷的换算，必须评估试验负荷关于设计负荷的严格可比性（见第10章），这种相同程度的评定通过使用适当的疲劳公式。当试验负荷偏听偏信离原始设计负荷（如定幅负荷）过大时，这种可比性就越发依赖于疲劳公式的合理。（见附录B），本不确定的补偿系数如下：（应使用）

对于疲劳试验来说， $r_{cf}=1.05$

如果能表明试验负荷与设计负荷相比的评估很少受疲劳公式中的特性值变化影响，那么可减少上述系数（例如，S-N曲线斜率、R比率模型、顺序影响）。

### 9.3.3环境条件

通常，试验装置条件比实际操作和设计条件要安全的多。在许多强度和疲劳公式中，这

些条件表现为一些系数，然而，不同的条件导致不同的强度或疲劳公式。

试验条件比设计条件无危险的多，就需要对要求试验负荷进行放大。通过评估试验负荷的分布来检验适当的系数。但对两种条件来说适当的强度或疲劳公式必须应用。(10.4.4) 无论何时系数产生影响，都可以作为放大负荷以达到一个平等的试验负荷的第一个必要系数的猜想。

#### 9.4 负荷系数的应用以获得目标负荷

设计负荷包括准安全因子有负荷因子 $r_f$ 、故障影响因子 $r_n$ 及试验负荷因子 $r_s$ 和 $r_e$ ，这些作为试验负荷的起始点，该负荷被看作目标负荷 ( $F_{\text{target}}$ )。对于静态和疲劳试验来说，这就相对变为：

对静态试验来说： $F_{\text{target-u}} = F_{\text{du}} \times r_{\text{nu}} \times r_{\text{su}}$

$F_{\text{target-u}}$  是目标负荷  
 $F_{\text{du}}$  是设计负荷（负荷准因子 $r_f$ ）  
 $r_{\text{nu}}$  是故障影响准因子  
 $r_{\text{su}}$  是叶片间振动准因子

对疲劳试验来说： $F_{\text{target-f}} = F_{\text{df}} \times r_{\text{nf}} \times r_{\text{sf}} \times r_{\text{ef}}$

$F_{\text{target-f}}$  是目标负荷  
 $F_{\text{df}}$  是设计负荷（负荷准因子 $r_f$ ）  
 $r_{\text{nf}}$  是故障影响准因子  
 $r_{\text{sf}}$  是叶片间振动准因子  
 $r_{\text{ef}}$  是疲劳公式误差准因子

## 10 试验负荷分布之于设计负荷的评估

### 10.1 概要

为了获得实际试验负荷而必须的修改，以及实验室条件与外界条件的不同，由于这些原因，试验负荷会与目标负荷不同（见8.4）。

试验负荷的负荷要素之间的分配和/或比率与目标负荷不同，既然试验必须证明叶片能随目标负荷，那么必须评估试验负荷。应该检验在叶片的哪些区域试验负荷的确与目标负荷等同或超过目标负荷，因为试验负荷与目标负荷的比较在叶片各区域是变化的，原则上，叶片需试验的所有位置均应评估，在进行评估中，需要注意第7章所述不同仍然存在。

### 10.2 引入负荷的影响

在一些情况中，引入试验负荷有作为集中为施加在有限数目的位置上（例如在执行机构位置上），那些外加负荷的部分被扰乱，某个区域因为这些附件可能强度加强，因此在这些区域，叶片不能被很好试验，就不应考虑在分析或评估中，干扰区域的长度（在纵向方向）可以从计算或测量来估算。

如果没有更多分析，就假设该影响区域会在附件任一边延伸至一个叶弦长度。

### 10.3 静态试验

#### 10.3.1 概要

在下面章节中，给了静态试验中评估试验负荷分布的两种可能的方法，每种方法都能用来评估试验负荷是否严格与目标负荷相同，然而，一种可能更针对一个特殊设计计算方法，可能易于使用。其它方法也可能适用。

#### 10.3.2 基于负荷要素分布的评估

通过试验负荷对目标负荷的6个负荷要素的比较，就能评估试验负荷与目标负荷之间的相等程度。在每个横截面，由试验负荷产生了一组力与力矩大于由目标负荷产生的，试验负荷比目标负荷要求高，这就意味着经受了充分的静态强度试验。然而，由于实际原因，并不是所有设计负荷产生的负荷要素都能在试验过程应用（见第7章），更有甚才，不同的负荷情况在叶片上能产生不同的重点应力区。这就使以负荷要素分布为基准的评估通常不太令人信服。

### 10.3.3以静态强度系数为基准的评估

通过比较来自设计负荷和条件的目标负荷的静态强度系数（SSF）和试验负荷与试验条件的SSF，实施评估。

静态强度系数表示在应力或变形水平基础上的储备量，这个SSF可以按下面这样定义：

SSF是这样一个系数，通过它负荷或应力增强达到材料或结构细节的设计强度。

对于SSF给出下列表达式：

$$SSF = (f_k / r_m) / (\sigma = f_k / (r_m \times \sigma))$$

这里 $f_k$ 是特性强度；

$\sigma$ 是外加应力或变形水平

$r_m$ 是准材料系数

对于设计试验负荷和条件相对就力：

$$SSF_{target} = (4)$$

$$SSF_{test} = (5)$$

这里 $\sigma_{target}$ 是目标负荷引起的外加应力或变形水平；

$\sigma_{test}$ 是实际试验负荷引起的外加应力或变形水平；

$f_{k-design}$ 是针对设计条件的特性强度；

$f_{k-test}$ 是针对试验条件的特性强度

通过比较以实际试验负荷为基础和以目标负荷为基础的SSF，可以获得以负荷或应力或变形为基础的试验负荷，在一个特定位置，试验负荷至少要严格的与目标负荷一致，下面必须为真： $SSF_{test} \leq SSF_{target}$  (6)

SSF<sub>s</sub>之间的比率可作为相对SSF（RSSF）

$$R_{SSF} = SSF_{target} / SSF_{test} \quad (7)$$

(4) 和 (5) 的替换可导出：

$$R_{SSF} = (\sigma_{test} \times f_{k-design}) / (\sigma_{target} \times f_{k-test}) \quad (8)$$

在此系数等于或大于1的所有位置，至少试验负荷严格与目标负荷一致。

RSSF大于1，要求应力或变形水平要达到的标准，能以下面方法推断出来，由(8)式，一个试验负荷严格与目标负荷一致，给出要求的最小应力或变形水平： $\sigma_{test} = \sigma_{target} \times (f_{k-test} / f_{k-design})$  (9)

假设负荷与应力或变形之间的为线性关系，由(1)式导出 $\sigma_{target}$

$$\sigma_{target} = \sigma_{design} \times r_{un} \times r_{sn} \quad (10)$$

这里 $\sigma_{target}$ 基于设计负荷的应力或变形

以(9)代入(10)得到下列试验期间要不是应力或变形水平的表达式： $\sigma_{test} = \sigma_{design} \times r_{un} \times r_{sn} \times (f_{k-test} / f_{k-design})$  (11)

### 10.3.4以要求的最小强度为基础的评估

原则上要计算SSF，有关次要部分的特性强度 $f_k$ 和/或材料和可能的应力集中区都应作为前提获知。而以承受负荷的最小静态强度（MSS）为基础的评估，这些数值不必要求。

最小静态强度能按以下定义：

最小静态强度（MSS）是在定义参考条件下承受外加负荷（应力或变形）要求的最小特性强度值。

$$MSS = \sigma \times r_{un} \quad (12)$$

对于目标负荷和试验负荷，它相对变力：

$$MSS_{target} = (13)$$

$$MSS_{test} = (14)$$

这里 $C_{design}$ 是定义参考条件到设计条件的转换；

$C_{test}$ 是定义参考条件到试验条件的转换；

$$给出这些转换系数：C_{test} = f_{k-test} / f_{k-ret} \quad (15)$$

$$C_{\text{design}} = (16)$$

通过比较来自实际试验负荷和来自目标负荷的MSS值，可以得到以应力或变形为基准的严格的试验负荷，对一个试验负荷至少在一特定位置严格与目标负荷一致，下列必须真： $MSS_{\text{test}} \geq MSS_{\text{target}}$  (17)

MSS值的比率可作为相对MSS (RMSS)

$$R_{\text{MSS}} = (18)$$

(13) 和 (14) 的变换可导出：

$$R_{\text{MSS}} = (19)$$

在所有该系数等于或大于1，至少试验负荷严格与目标负荷一致。如果对所有负荷要素来说，可能的应力集中系数相等，那么 $R_{\text{MSS}}$ 与实际值无关。

RMSS大于1，应力和变形水平要求达到的标准，能以下面的方法推出，从(19)式，试验负荷与目标负荷严格一致，给出最小要求应力或变形水平：

$$(20)$$

将(10)代入(20)式导出下面试验期间要求的应力或变形的表达式：

$$(21)$$

用(16)、(15)式代入(21)式可得出(11)的结果。

## 10.4 疲劳试验

### 10.4.1 概要

在试验区域中，试验负荷与目标负荷的比较是变化的，对疲劳试验来说，这就意味在一个不同数目的疲劳循环中，能达到试验负荷和目标负荷的严格一致，由于大多数材料疲劳特性随时间不同是非常可观的。而以负荷水平为基础的不同是适度的。

当叶片的一个确定区域承受相当于目标负荷的试验负荷后发生故障，这个区域就通过了试验。原则上在其它区域叶片试验能达到同样的效果，这对有些区域是有效的，这些区域没有被应力重新分配而引起的操作影响。

在试验结束段，考虑这些因素，可以证明，哪些位置在达到要求操作前可承受一个平衡的或更严格的疲劳负荷而没有故障。原则上，已经证明这些位置能充分抗疲劳。

需要注明：用于设计负荷和试验负荷的疲劳公式和/或原材料系数不必相同。试验和设计条对应适当的系数，这将在10.4.4中解释。

### 10.4.2 以理论损伤为基础的评估

在疲劳试验中叶片的一些位置理论损伤（如Miner总结）等于或高于以目标负荷为基础的理论损伤，试验负荷等于或大于目标负荷，

$$\text{这表示为 } D_{\text{test}} \geq D_{\text{target}} \quad (22)$$

式中：

$D_{\text{test}}$  是实际试验负荷引起的理论损伤；

$D_{\text{target}}$  是目标负荷引起的理论损伤。

### 10.4.3 以负荷或应力水平为基础的评估

#### 10.4.3.1 概要

在一些区域，试验负荷引起的计算疲劳损伤比目标负荷引起的计算疲劳负荷大，但它没有故障这就证明这些区域足够抗疲劳，然而，这两种损伤间的系数难于说明，没有一个清楚的指标说明哪个系数的试验负荷更严密。这是因为损伤本身的数值没有给出清楚的关于以应力和变形为基础的负荷的严密性的指标，因而，各种系数都用来比较以负荷或应力/变形水平为基础产生的不同负荷谱或疲劳公式。这些也用来评估相对于目标负荷的试验负荷，这里给出两种可能，选择取决于特别的设计计算方法。

#### 10.4.3.2 以疲劳应力系数为基础的评估

疲劳应力系数 (FSF) 能用来评估目标负荷相比实际应力严密性<sup>4)</sup>，这个FSF按以下定义：

FSF是一个系数，通过使用这个系数增强负荷或应力以达到允许的损伤率D（通常为1）

FSF表示以应力或变形水平为基础的保留量，通过比较实际试验负荷产生的FSF与目标负荷5)产生的FSF就能获得基于负荷或应力的严密的试验负荷，对一个试验负荷至少在一个特定位置要与目标负荷严格一致，下列必须为真 $FSF_{test}^D \leq FSF_{target}^D$  (23)

式中：

$FSF_{test}^D$ 是用于实际试验负荷计算的FSF值。

$FSF_{target}^D$ 是用于目标负荷计算的FSF值

FSF间的比率能作为相对FSF（RFSF）

(24)

在该系数等于或大于1的所有位置至少试验负荷必须与目标负荷一致。

P34页下有注释未译

#### 10.4.3.3以最小要求疲劳强度为基础的评估

原则上为了计算FSF，有关微小部分的疲劳强度和材料各可能应力集中处均应作为先决条件了解，通过评估，以最小要求疲劳强度（MFS）为基础承受负荷，疲劳强度本身不必须完全了解。

通常材料或细节处抗疲劳度通过在定义条件下在特定数目循环下允许的应务水平来定性，这个参考应力水平可作为一个参数（），疲劳强度用它来定性。

最小要求疲劳强度（MFS）可按以下定义：

MFS是疲劳强度参数值，通过它疲劳损伤率等于允许的D值（通常为1）。

通过比较实际试验负荷产生的MFS与设计负荷产生的MFS可以获得基于负荷或应力的严密的试验负荷，对一个试验负荷至少在一个特定位置要求与设计负荷严格一致。下列必须为真 $MFS_{test}^D \geq MFS_{target}^D$  (25)

式中：

$MFS_{test}^D$ 是用于实际试验负荷计算的FSF值。

$MFS_{target}^D$ 是用于目标负荷计算的FSF值

FSF间的比率能作为相对FSF（RFSF）

必须注明特性疲劳强度参数 $qf$ 在两疲劳公式中必须相同，与不同的条件无关。

$MFS^D$ 值的比率能作为相对 $MFS^D$ （ $RMFS^D$ ）

$RMFS^D = (26)$

该系数等于或大于所有位置，试验负荷与目标负荷完全一致，对所有负荷要素如果可能的应力集中系数相等，那 $RMFS^D$ 与实际值无关。

这种方法用来评估木头/环氧树脂叶片、玻璃纤维加强塑料的试验实例在参考书目（5）和（1）中给出。

#### 10.4.4疲劳公式因素

原则上，用于实物疲劳试验的叶片与取决于实际操作设计负荷的叶片是相同的，然而，这并不包括由目标负荷引起的在计算损伤中使用的疲劳公式也与由试验负荷引起的一样。这是因为实验室比汽轮机实际叶片更受不同的环境控制。

例如，材料的疲劳性能在潮湿条件下与干燥条件下不同，（不同的定值，或不同斜率的曲线），如果在干燥条件下进行实验室试验，试验过程的累积损伤计算应使用干燥条件的疲劳公式，在设计寿命期间损伤计算应使用操作条件下有效公式。

原则上，对于试验负荷来说，应使用在试验条件下有效或适用的疲劳公式，而对目标负荷来说，应使用在操作条件下有效或适用的疲劳公式。

由于试验条件通常不如实际操作条件严格，所以疲劳性能会更好，结果必须用比目标负荷试验负荷来获得相等的损伤累积，这就要求在试验中负荷增加一个系数（峰值负荷系数用来补偿负荷循环损失）（见9.3.3）

#### 10.4.5试验后评估

试验结束后，使用适当的损坏模型可计算出累积的损伤。进行相同的循环数后，在最终

负荷水平或其它一些选择的负荷水平，试验结果被重述，就象这代表一个相同的操作寿命，另外，损坏模型可用于随一定循环数的最大负荷。所有这些由材料性质影响的故障决定，不考虑显著的试验引入影响，例如局部发热，低连接、翘曲、过度剪应力或其它影响，这些用损伤模型不能适当计量，然而，当判定有些影响不显著时，相同的损伤累积计算会精确一点，这些计算能在其它条件下对叶片疲劳性能给出估计，因此，有根据说，设计是合理的。

当进行试验评估时为了增加洞察力，建议在叶片关键区域测量叶片变形，以便提供一个更精确的材料变形的了解和一个附加的用来解释结论的材料损伤模型的理解。

## 11 故障状态

### 11.1 概要

在试验中可能的损伤或故障的检测可能很难，因为叶片结构复杂，这就意味着重要的结构组件被隐藏着，难于检测和监控，更有甚者叶片材料承受局部损伤但没有表现出来。在这一章提出了将叶片性质不可逆的变化作为故障状态，叶片故障是否符合一定的设计规定或标准不是本章的课程，只描述了可能必须被监控的故障状态。

下列故障状态的定性差别在下面章节11.2-11.4中使用和定义

- 严重损伤，灾难性故障
- 功能故障
- 表面故障

组件的翘曲自身并不作为一个故障状态。但因为它对内部变形的影响和对叶片横截面刚性的影响，翘曲也成为一种故障状态。

试验区域以外的损伤，它并不影响试验区域的变形分布，那么应记录但不视作故障。

### 11.2 灾难性故障

IEC60050-415灾难性故障的定义是：

一个组件或结构的解体或断裂，导致重要功能的丧失，这会损害安全性。下列事例可视为灾难性故障：

- 主要叶片的断裂或倒塌；
- 结构元件的完全故障，如内部或外部连接线，表皮剪力网，叶根加固件等等；
- 主要部件开始与主要结构分离

### 11.3 功能故障

当特殊的组件或部件不在允许限制内工作可判断出现功能故障。

下列事例可视为可能的功能故障：

- 叶片刚度显著下降并不可逆（从5%到10%**6**）**7**）
- 卸载后，叶片出现可观的永久变形；
- 横截面形状可观的永久改变；
- 叶片卸载后，机械装置不再能执行设计功能**8**）

上述条件中任一项是否是功能故障取决于特殊的设计标准，还应在经过无数试验基础上评估，在任何情况下，这些条款均应被注明并记录评估。

### 11.4 表面故障

表面故障不会立即有结构影响

下列事例可视为表面故障：

- 小裂纹，没有引起显著强度退化或连接线变弱；
- 凝胶外层裂纹；
- 油漆剥落；
- 表面起泡；
- 少量的弹性板翘曲；
- 小的脱层；

在外部环境条件下，表面故障可能随着时间发展成功能或灾难性故障，在任何情况下，

这些条款均需注明或记录评估。

## 12 试验过程和方法

### 12.1 概要

本章讲述进行静态和疲劳强度试验的多种方法和程序。用实验决定叶片性质的试验方法在第13章讲述，在本章中测量叶片性能的试验一般或者与静态试验同时进行，或者按需要单独进行。

控制、校准、维护和检测测量及试验设备的程序应保持和坚持。（例如，如ISO/IEC17025或其它中所述），如果可能，应进行系统校准结点到结点的检查以检查整个系统组件。如果必要，由试验组织机构或试验几何因素引起的系统误差的测量数据应正确。

### 12.2 试验台和根部固定装置要求

所有强度试验要求适当的固定表面来附着叶片，回应试验负荷和外加试验负荷平均值。由于实际原因，叶片根部通常固定在试验台，正常负荷在叶片的轴上，外加试验负荷沿叶片跨度方向。使用固定装置调螺栓模型将叶片附着在试验台上。

如果要求试验根部设计的有效性，根部固定件会在叶片根部产生典型的应力分布。叶片/轮毂附件与根部固定件同样刚度，最好包括直接固定叶片根部的实际轮毂/叶片表面部分。如果装紧过程和/或螺栓或双头螺栓的夹紧长度与风力机使用的固定件不同，应需要记录和计算。

### 12.3 引入负荷的固定装置 第 38 页图 6

#### 图6——使用外部木衬套的叶片连接固定件

在施加负荷点应保护好叶片以防在接触表面由负荷传递引起的集中压力和高的剪应力负荷造成局部损伤。通过在叶片周围建造一个外部衬套，在负荷源和叶片表面之间分开负荷，防止横截面变形（见图6）。这种连接方法通常是可拆卸的，不会永久改变叶片的结构。因此，可以在后面的时间里试验叶片该区域。

对于力点负荷来说，当负荷点不移动时，叶片结构本向加固以防局部各零件的挤压。需注意避免改变接近试验区域的叶片刚性。

叶片自身的加固通常是不可逆的，会永久改变叶片结构和固有的频率，不可能再试验改善区域。

### 12.4 静态强度试验

#### 12.4.1 负荷类型

##### 12.4.1.1 概要

叶片能负载表面负荷或集中点负荷（单/多点负荷），每种方法都有优、缺点，这总结在表1中，下面讨论的实际因素决定使用何种方法。

##### 12.4.1.2 分散的表面负荷

用一个重物（如沙袋）沿叶片长度施加连续分散的表面负荷。在试验指定向重力连续分散在叶片跨度方向压力侧，沿跨度没有大的变化一律的分散负荷就能得到。这种方法能得到沿叶片跨度上最典型的剪应力分布，提供负荷分布的精确典型。

这种方法难于使用因为需处理质量物件有关的问题，因为外加的大质量物件，系统在极限负荷时固有频率很小，这就使叶片/大质量物件系统易于动力激励，故障时因为最初断裂后连续施加负荷，负重表面负荷产生一个高能释放，这种方法限于单轴静态加载试验。

##### 12.4.1.3 单点方法

在沿叶高位置外加单个集中力点，将产生线性弯矩分布。这种线性分布接近目标负荷在整个叶片跨度部分的分布，通常要求不断加大叶片负载，在叶片沿叶高方向各不同位置多次加力，来获得在所有必要位置的目标试验负荷。这能减少所需设备数量。通用过程包括最初在叶片外侧部分加载到相应试验负荷。然后负荷点移向内侧，接着下部分向根部加载。

这种方法在叶片内侧负荷点会产生剪应力负荷，这比多点加载或分散表面负荷产生的要高。

对负荷到故障的试验这个方法不实际，但是可能的。按顺序多次外加负荷，每次小百分

比增加负荷水平直到故障出现，如果负荷步骤足够小，那结果会大致与多点负荷试验相同。

#### 12.4.1.4 多点方法

使用多点加载，可以在同一时间给叶片外加想要的试验负荷分布（力矩和剪力）这个方法提供了比单点加载更现实的剪力负荷匹配，在多个沿叶高方向的位置同时外加的全跨度分布负荷可以用于操作负荷故障试验，以确定最大强度，设计余量或翘曲限制，因为大多数叶片能同时试验。

当负荷增加时，每点负荷增加要保持负荷分布形状不变，这一点很重要。通过连接每个负荷引入点到威尔福树或独立加载装置就能做到这一点。这增加了所需硬件数量。需注意避免将连接点放在感兴趣的重要区域，因为负荷附着连接区域受影响，在10.2中有讲述，移走负荷固定装置后，同一时间试验负荷引入各重要区域，再次试验附着区域。

#### 12.4.2 试验控制方法

静态加载试验通常需要简单地按序增加负荷，对于给定的负荷顺序，通常均匀地施加或以一定控制速度稳定增加。如果需要随最大标准一部分试验负荷规定为加载速度。通常加速必须很慢避免会引起负荷波动的动力影响，这种负荷波动会改变试验。因为当负荷增加时试验几何形状发生变化就带来了试验负荷误差，而且试验系统设备的质量也会引起试验负荷误差。这些影响的更正在12—7中。

#### 12.4.3 加载设备

用来做静态叶片试验的加载设备是

- 离地起重机或起吊器械
- 液压或气动的执行机构
- 全重（如沙包）
- 卷扬机

有时需要其它设备改善或分配最初的负荷 叶片上的不同点，这些设备是：

- 威尔福树和传力工具
- 摇臂和杠杆
- 滑轮和缆绳系统

在附录D中给出这些设备的实例。

## 12.5 疲劳试验

### 12.5.1 负荷类型

#### 12.5.1.1 概要

在疲劳试验中有许多加载方法。负荷可以加在单个点上或多个点上。弯矩负荷能加到单轴上或更多的轴上。负荷可以是恒定幅值的恒定频率的或变化的。每种类型各有优缺点。使用的加载类型取决于使用的试验设备。

#### 12.5.1.2 定幅加载

在恒定幅值试验时，试验负荷的特性由单个负荷循环决定，该循环重复很多次，最大和最小负荷值是固定的。因为他们使用同样的方法确定所以定幅叶片试验数据易于与原材料试样数据做比较，使用定幅试验，当放大负荷加快试验速度时非常容易避免非线性故障状态。定幅试验忽略了负荷顺序影响的可能性，由于疲劳公式易受影响，这将带来额外的不确定性。

#### 12.5.1.3 组块负荷

组块负荷加载是一个定幅试验的变异，规定的定幅循环一段时间后，它的负荷变了一次或多次。目的是想通过外加快增加幅值的一组循环产生疲劳故障。如果叶片承受了一组循环，那么负荷按规定值增加，又可以外加新的一组负荷。这个过程一直重复直到故障使试验停止。这种加载类型允许试验在一个适度的负荷水平进行以检验叶片设计（例如设计验证试验）。然而增加负荷允许加速试验更深入地影响了故障寿命，预期故障状态和设计余量或储备量。

每组负荷对损伤的贡献可以使用Miner的条例计算出来。组负荷加载通常以定幅加载。负荷不应增加到某个水平，在正常操作时这种水平的负荷会把预想的故障水平给改变了。

组负荷加载的另一个变异是变化的组负荷，外加了交替多种幅值的组负荷，变化组负荷

加载的目的是为了当连续变幅加载不可能时引入一些对定幅试验而言的顺序特性值。

#### 12.5.1.4 变幅加载

在变幅加载试验中，负荷由一系列不同放大率和平均值的负荷循环来定性。典型地负荷系列重复很多次，但负荷频谱可以包含一定范围的负荷幅值比率和放大率。这些谱很难与取自定幅的试样数据作比较，因为有负荷放大率的限制(见8.5.1)所以对变幅加载来说负荷放大可能更难。

在与设计负荷频谱匹配方面变幅值加载具备最高精度，因为疲劳计算不像疲劳公式中的不确定性那么易受影响（见附录3）。

#### 12.5.1.5 单轴加载

这种类型的加载使用单个执行机构或负荷源简化了加载，但不允许变化负荷方向。在单轴简化了加载，但不允许变化负荷方向。在单轴加载时，批拉负荷组成部分分开施加湖合并（如轻拍和超前滞后）提供一个必然产生的负荷，分开外加疲劳负荷组成部分要求做两个试验，然而与多轴加载比两个单独分开的试验都不能导致与同时外加负荷相同的疲劳损伤。

同时外加扁平面和lead-lag前沿中组件要求这些组件阶段出现，因为只有一根弯曲轴，单轴加载操作的试验将严重加强离弯曲轴最远的纤维结构，但降低靠近中性轴地区的负荷。

单轴加载能用定幅或变幅试验。

#### 12.5.1.6 多轴加载

在多轴加载试验中，疲劳加载组成部分，如扁平面和前后沿弯曲都用分离的加载装置独立外加。试验过程应了解和控间，负荷组件间的相互关系，这种方法更能代表操作过程中叶片横断面周围的实际应力分布。两轴弯曲，靠近一个负荷组件中性轴位置的纤维结构能从另一个弯曲方向得到加强。多轴加载也能用定幅或变幅试验。

#### 12.5.1.7 多负荷点

为了简化，在疲劳试验中经常使用沿叶高方向单个负荷引入点。单个点能试验叶片跨度大部分，但不能整个长度，为了增加叶片试验部分长度或力矩分布的精确性，就使用沿叶片多点引入负荷，这大大增加了试验复杂性但对单个负荷合并来说要包括全部叶片的全部重要区域这也许是必须的。

#### 12.5.1.8 共振负载

以接近叶片固有频率的频率激励叶片就会产生共振负载，当沿叶片高方向负荷分布遵循叶片的形态时，通过在选择区域加质量就能得到想要的负荷，这样就能在一个试验中测试叶片的大部分了。共振加载一般用于单轴定幅加载，通过改变激励频率它也可以用于变幅加载，但有一定的限制。

### 12.5.2 试验控制方法

#### 12.5.2.1 概要

现在广泛使用的有三种基本试验控制方法。原则上，使用的控制方法并不取决于使用的加载类型。下面章节并不介绍特别的硬件或试验组织机构结构，这些在附录D中介绍。

#### 12.5.2.2 位移控制法

在位移控制下，叶片偏移不受外加负荷控制。当试验频率接近（大约在20%）叶片固有频率时，必须进行位移控制，这些情况中，叶片动作用将改变外加力的静态水平。在一个线形弹性结构上，当准静态负荷和行程比例时这不是一个问题，由动力位移数值决定负荷大小。应监测叶片刚度，如果显著的变化出现必须调整位移范围。蠕变也要求调整位移平均值。

可以从加载准静态负荷速度到超过第一级固有频率，这个范围内变化试验频率。大多数试验都在第一级固有频率下运行以保持动力稳定性使热效应最小化。

#### 12.5.2.3 力控制法

力控制法使用外加负荷来决定叶片的移动，外加力与叶片位移或固有频率无关。如果叶片强度变弱或故障，外加力仍是定值，这会导致更大的位移，额外需要监测和控制这些位移。当试验频率比试验系统固有频率低很多以保证动力影响最小化时，使用力控制法。当位移很小或位移与负荷之间非线性关系时，使用力控制法是最佳。

12.5.2.4共振试验法

共振试验法原理是刚刚低于固有频率以一狭小范围频率激励试验叶片。给叶片附加另外的食粮块以获得想要的平均负荷。保持频率略低于固有频率，通过变化激励频率调整位移的频值。通过给叶片附加一个励磁机或以叶片的基础频率移动基座都能产生叶片共振。周围温度巨大变化会引起叶片刚度变化和叶片平均偏移值变化，这就要求调整。通过直接保持偏移量或变形在规定的容忍范围之内或间接使用加速度计可以控制叶片负荷。

12.5.3加载设备

下列设备类型用来进行风力机叶片疲劳试验

- 偏心转动质量块
- 液压执行机构
- 凸轮轴

在附录D给出更完全的加载设备描述

12.6 选择各种试验方法的优缺点

表1中总结了上述各种试验方法的优缺点

表1——选择各种试验方法的优缺点

选择试验	优点	缺点
表面分散加载(使用固定重量,如沙包等)	精确的负荷分布 精确的剪力分布	仅单轴 静态 故障能量释放会引起更大的灾难性故障 很低的固有频率
单点加载	简单的硬件	一个时间只能试验1到2各部分 剪负荷高
多点加载	一个试验能试验叶片大部分区域 剪应力更实际	更复杂的硬件和负荷控制
单轴加载	简单的硬件	在整个截面上获得正确的变形 损伤分布有限
多轴加载	使沿翼形方向和沿边向合并更实际	更复杂的硬件和负荷控制
共振试验	简单硬件 低能耗	在整个截面上获得正确的变形 损伤分布有限
定幅加载	简单、快速, 低峰负荷	对故障公式准确性敏感
定幅 递增组负荷加载	有限的循环数	对故障公式准确性和顺序影响敏感
定幅变组加载	方法简单便于加载变幅负荷	对故障公式准确性和顺序影响敏感, 但没定幅递增组负荷加载敏感
变幅加载	加载更实际 对故障公式准确性低敏感	负荷峰值高 复杂的软、硬件设备

12.7 决定性修正

12.7.1皮重负荷

试验可能受非试验负荷部分的重力负荷影响，再负荷由测力传感器测量。在试验和试验数据处理过程中应考虑这些负荷。

皮重负荷可能由下列质量块引起

- 叶片本身

- 连接执行机构的夹紧结构件
- 叶片上的铰链
- 威尔福树设备
- 绳索、吊索、转换器械

任何上述设备的质量和它们相对叶片协调系统的位置都应文件记录，由于考虑这些额外质量负荷相关试验负荷均应修正。应关注在一个已知的未确定水平范围里建立测力传感器的零水平线。

在一些情况下，皮重负荷垂直加在敏感的测力传感器轴上，例如，水平定向的执行机构一端连着试验装置。另一端连着叶片处就会传递它部分固定的重量到叶片上。这种负荷测力传感器就测量不到但应考虑。一些设备（如威尔福树组件）可以引起对叶片的不能完全排除的局部力矩。

#### 12.7.2 负荷角度变化

当叶片转向时，相对叶片定向的负荷方向的改变。在评估中应考虑这些负荷方向的变化。详细情况在附录D中说明。

#### 12.7.3 产生的扭负荷

在加载过程中作用在叶片上的扭矩，能沿叶高方向叶片饶度引起。

当叶片在一个方向偏移时，开始垂直作用的负荷或负荷分量会在根部产生扭矩，它等于最初偏移乘以垂直负荷，这些力矩很明显，在详细说明试验负荷时应考虑在内。

当外加力的沿叶弦位置不同于叶片的弹性轴时，能外加扭矩，外加负荷可以被弹性轴有意抵消，得到规定的扭矩。

### 12.8 数据收集

#### 12.8.1 概要

本章所述数据收集与试验规定的监测和记录工作有关，这些工作范围从肉眼检查到产生校准数据的记录，因顾客要求或由标准权威机构设定规定数据可以变化。

#### 12.8.2 负荷测量

对强度试验来说，在整个试验过程中外加负荷的大小、位置和方向都应受监测记录。对13章所述决定叶片性质的试验，也应记录外加负荷，而且如果可行，数据抽样检查频率也要充分用来监测动力负荷变化在可接受的容许偏差内。

外力负荷可用多种方法监测。监测负荷的最佳方法通常取决于使用的试验方法，下面说到不同的原理

- 偏差法
- 力/负荷法
- 加速法
- 变形计量法
- 所有这些合并

一般叶片位移能决定负荷，特别在疲劳试验过程中，外加力与它在静态符合情况下状态不同。加速计和变形计量计，在一些环境下用来决定负荷。这些探测装置也可能用于控制负荷登记，使它在整个试验过程中保持在规定的容忍偏差之内。

在静态试验中测力传感器应放于叶片与施加负荷设备之间。对威尔福树来说，必须测量树顶的外加单个负荷。威尔福树的何外形用来决定连接点的负荷。

#### 12.8.3 损伤探察

在试验中不时地应看看叶片表面损伤情况，如裂纹、脱层、和粘连脱落。明显的表面损伤应拍照记录。偏移、变形情况、刚度、阻尼、声音发散、蠕变和外形的变化也可以包括在检查程序中。建议试验时对关键事件的发生进行录象。

#### 12.8.4 刚度变化

对静态或疲劳试验来说，刚度变化可作为故障标准（见11章）。刚度变化提供了一个可靠的方法来监测使用任何方法的疲劳试验中不断增加的损伤。

在共振疲劳试验过程中，刚度是用来监测的基本参数，因为负荷的分布取决于叶片的刚度分布。基于控制原理，刚度可通过偏移变形测量、定时校准负荷或这些方法的组合来监测。对于偏移控制来说，通常，在慢速或准静态负荷条件下测量刚度。负荷与偏移应是可测量的。如果使用偏移控制，当刚度发生变化时，需不时调整偏移范围保持定负荷。

周围温度条件变化也能引起叶片刚度变化，这不是由于加载引起的损伤。由于材料的非弹性弯曲产生了结构发热，通常，在一般试验频率下这不算问题。在高频试验时，应监测和控制叶片发热。正常情况下，很容易通过触摸探测叶片大的温度梯度，这就表明叶片内部或表面以下正逐渐故障。小的温度梯度是正常的，不会对试验有大的影响。

#### 12.8.5 变形监测

通过肉眼检查不能探测到叶片条件变化，就需要使用变形计量仪。置于格栅模型内的变形计量仪放在试验区域上，它能探测到内部故障。内部故障总是在叶片表面不引人注意地表现为变形模型上相应的重新分布。另外，由叶片的结构设计分析可知，临界区域和高应力区能用变形计量仪测量。变形大小变化可用来推断局部内部故障，也可用来疲劳试验后选择是否做另外的试验。变形计量仪还可用来测量叶片特性，但，该主题在13章讲述。

#### 12.8.6 环境条件的监测

试验中，实验室温度、湿度都应定时记录，以用来监测周围波动。这样还不足以建立叶片任何给定时间中的真实的潮湿条件。需花费数周使叶片在恒定的温度中达到一种平衡状态。因此，试验结束后必须将叶片分段，测量湿度容量。同样地，需花费数小时使叶片达到平衡的温度。应致力于消除热通风和局部发热源使温度波动最小化。在试验前，试验叶片应放入实验室环境中。如果一段时间里周围温度不稳定，就需进行更多的测量。如果在叶片表面出现不同的周边条件应使用试验叶片多点测量法。

应进行环境记录以用来表示试验叶片上的热效应量。例如，刚度变化，变形计量漂移（特别在单元件平台上）或其他探测装置漂移。

要求特定的试验环境。在某些情况下，也要求另外的设备。

#### 12.8.7 故障说明

故障状态应以11章提到的故障标准说明和记录。试验结束时，在故障位置将叶片分段，检测故障状态。这是很合理的。

### 13 决定叶片性质的其他试验

#### 13.1 概要

前面的章节里，只涉及相关强度的试验。然而，提供另外关于其他结构或动力特性信息的试验也很重要，通常，也要求做这些试验。这些试验与强度试验无关。但，正常情况下，基于实际原因，大多数试验操作与强度试验一起做——特别是静态强度试验。如果需要，也可做其他附加试验，如非破坏性试验。这些试验仅仅大致提一下。对这些试验也适用决定性修正（见12.7）。

#### 13.2 试验台偏移

根据叶片根部固定件和试验台的变形来校正测量的叶片偏移和刚度。测量固有频率、阻尼和状态外形也应考虑试验台的影响。对相对刚性（顶部偏移小于1%）的试验台来说，试验台影响可忽略不计。

#### 13.3 偏移

通常，由于风力机塔座的设计余隙，沿平展方向偏移最为显著。试验中，应记录叶片和试验装置的偏移。该试验一般与静态试验联合做。

#### 13.4 刚度分布

对于给定负荷方向的叶片来说，由负荷/变形测量或偏移测量可得出弯曲刚度。

如果需要详细的刚度分布——特别是在根部和内截面上的，那么负荷/变形法很适用。要仔细选择变形测量点，沿叶片分布一组变形计量仪——在叶片两边沿叶高同样位置各放一个。通过在叶尖加载，测量叶片每边的变形，知道计量仪之间的距离，就能算出局部弯曲形状。由弯曲形状和弯矩就能得到刚度。必须注意：计量仪应放在表面不受干扰的区域。

对详述的负荷来说，应在沿叶高位置顺叶片长度测量叶片的位移。测量位移的位置要多，便于确定整个叶片的位移曲线和刚度。位移法是一个简单快捷的试验方法，但由于根部固定件的变形必须校正偏移值。另外，使用此方法要求表面光滑程度高，而且叶片内部分辨率差，这些都给结果带来了很大的不确定性。

叶片的扭转刚度可以用一个扭转力函数的旋转角度来表示。

### 13.5 变形分布测量

如有要求，将变形计量仪放在感兴趣的区域旧能测量变形分布，得到叶片的变形水平分布情况。计量仪的位置和定向应文档记录。测量设备数量取决于试验叶片本身（如尺寸、复杂性、感兴趣区域）。如果要求从零应力水平找到非线性因素，计量仪**必须以未加载并皮重抵消的叶片为准**。

在叶片表面临界区域应测量叶片变形，叶片在典型位置几何形状发生转变，出现重要设计细节或变形很大。建议测量位置有：

- 叶根与轮毂的连接处
- 叶根
- 叶根到叶片过渡处
- 大截面变化处
- 材料和厚度变化处
- 气力制动机械装置过渡处
- 设计细节和连接处
- 内部连接、加强板和梁处

每个测量点都包括3个变形测量位置。如果不知道主要变形方向，那么变形计量仪的应变花能用来确定测量点主要变形值的大小和方向。

变形计量仪的使用和校准不再表述。实验人员应了解。

如果仅对应力集中区域特定变形感兴趣，那就使用应力涂层法。这是一种易变形的脆性漆，带有明显的裂纹限制。每步加载后，检查涂层裂纹。应力涂层手控操作。

应力也能用相片——弹性测量法得出。

### 13.6 固有频率

正常情况下，主频限制在一、二级沿平展方向频率和一级沿边方向频率以内（有些情况是第一级扭转频率）。对大多数叶片来说，这些频率很好分离而且**或多或少是分开的**。结果，将叶片一个接一个放入理想振动状态，监测来自变形计量仪、位移传感器或加速计量器的代表振动状态的信号。这样就可以直接测出频率。**激励第二级沿平展方向的模型会引起一些问题——特别是刚度强的叶片。**

如果不能单独激励模型，可通过激励叶片谐波之外的自由振动产生信号来做频率分析。

### 13.7 阻尼

对于沿平展方向和沿边方向来说，通过测量未受干扰的振荡的对数衰减量就能记录结构阻尼。振荡的幅值必须很小以防受气动阻尼的影响。众所周知，阻尼大小通常取决于温度。

### 13.8 形态

可标明的涉及分离自振频率的轻阻尼流线型结构的标准形态值，可以通过转换函数（共振）的虚数部分联系确定形态值的各点上产生加速反应的作用力来估计；

平面朝前和刀口朝前的测量，可以在叶片（被安置在固定测试台）适当的点上（通常在叶尖）运用励磁（在相关频率上）来完成。必须监控来自以适当清晰度沿叶片被隔开的位置的合成加速反应。激振力可使用力传感器被测定及用加速计测定加速度。然后将测量结果反馈给分析员以得到求出（象在振动频率上合成转移函数的那样）模数的可能性。在[7]中提供详细的描述。

以加强频率的范围，沿叶片分布的许多加速计通过操纵叶片来得到形态，以替代移动单台加速计。

### 13.9 (物理) 质量分布

了解叶片总质量和重心位置就可以得出大致的质量分布情况。更精确的方法在参考书目(8)中有说明。如果必要,可以将叶片割成小块,称每块的重量,这样就可以测出质量分布情况。

### 13.10 蠕变

对易产生蠕变的材料来说,必须作个试验来设定蠕变和叶片的复原特性。这试验在静态加载下要做很长的时间(要很多小时或几天)。试验中,要经常测量偏移而且还要记录偏移随时间变化情况。一段时间后,拿走负荷,等叶片松弛,记录复原随时间变化情况。

### 13.11 其他非破坏性试验

在某些情况下,非破坏性试验(NDT)能用来检验叶片的建造是否基于设计假设,还能用来找出制造缺陷。NDT能与其他试验一起进行。使用的方法有:

- 检查叶片几何外形测量法(如面积、轮廓等)
- 硬币-标签法
- 原声传递法
- 超声波试验法
- 原声发散法
- 热成像法

### 13.12 叶片分段

叶片分段能用来检验叶片的建造是否基于设计假设,还能用来找出制造缺陷。

能检查下列特性:

- 叶片质量分布
- 几何外形(如翼形)
- 层压材料、梁、胶合连接等的建造特性(如玻璃含量、纤维定向、纤维玻璃叶片的气隙度)

叶片分段也能用来检测故障状态。

## 14 报告

### 14.1 概要

本试验应以文件形式记录,包含足够的信息,以便对任何感兴趣的团体来说,试验方法和实验结果都是很全面的。

### 14.2 内容

本试验报告应包括以下条款,这取决于试验类型。

#### 14.2.1 通用---所有试验

需给出下列信息:

- 内容表
- 试验负责人
- 试验日期和位置
- 目的
- 叶片数据
- 叶片特性证明
- 试验总结和试验结果
- 附录:图纸、测量数据、日志、照片等

#### 14.2.2 静态试验和疲劳试验

需给出下列信息:

- 试验负荷的说明和起源
- 故障标准说明
- 试验的组织结构和过程
- 使用的试验设备

- 测量设备的校准
- 变形计量仪位置和测量偏移的点的位置（图）
- 测量的偏移、负荷及负荷方向
- 试验结果精确性
- 试验负荷包括试验负荷分布的评估<sup>9)</sup>
- 故障说明<sup>10)</sup>
- 测量变形、负荷的水平和范围
- 负荷方向
- 整个试验的负荷和偏移总结

#### 14.2.3 其他试验

关于叶片其他试验的报告格式和内容要求遵循以上说明。

##### 注：

- 1) 当6个分量以时间序列提供时，这自动满足。
- 2) 方括号中所指图涉及参考数目。
- 3) 在一些规章中，通过使用不同负荷因子来考虑。
- 4) 术语应力备用系数（SRF）在参考数目中使用，用来比较多种设计计算结果。后来，由于一个备用系数不能找到，此系数重命名为疲劳应力系数。
- 5) 在多数情况下，FSF和MFS可能有明确的数字表述。可以通过相互计算获得，此处，RKF变化直到损伤速度等于允许的损伤D。由于在疲劳公式中的不连续性，这一点不可能达到（如疲劳界限）。通过有限的变化给出较低和较高的损伤，这种情况下能用RKF值。
- 6) 相对百分比取决于设计限制。
- 7) 在一段时间内，粘-弹性材料能全部或部分存储偏差，这点应给予考虑。
- 8) 机械功能试验不在本技术规范中。
- 9) 仅用于设计静态负荷试验。
- 10) 即使它们与结果无关，同样要求所有叶片故障报告并文件记录。

### 附录 A (常规性) 准安全系数的考虑

在设计计算中必须使用准安全系数 ( $\gamma_m, \gamma_n$  和  $\gamma_f$ )。这些准系数的产物在设计整体安全水平中充当重要角色。对于试验负荷来说, 仅有  $\gamma_f$  和  $\gamma_n$  对它产生效应。(见 9. 2)

事实显示许多设计标准中准安全系数的产物大小相同。然而, 一些标准将整体安全性更多地分配给了其中一个或另一个系数。甚至达到了这样的程度: 在一些标准中, 准安全系数仅有负荷系数一项, 其他的标准中, 准安全系数仅有材料系数一项。似乎, 有些时候 (因为某些原因) 在一些规章中所有的不确定因素都集中在上述的一或二个系数上。对于设计来说, 这是没有区别的, 因为所有系数都要使用。然而, 在试验中, 有区别, 因为只有  $\gamma_f$  和  $\gamma_n$  会影响试验负荷。(见 9. 2)

结果, 使用不同设计规章形成同样的设计但得出不同的, 可能低估了的试验负荷。基于以往的经验, 及提出的可能性, 下面合理考虑了产物的最小值:

对于静态试验来说:  $\gamma_u \times \gamma_{nu} \geq 1.25$

对于疲劳试验来说:  $\gamma_{ff} \times \gamma_{nf} \geq 1.15$

如果设计过程或设计使用的标准提供了较高的整体准安全系数, 那么上面的最小值对试验负荷就不会产生影响。但, 如果一个设计标准将全部或大部分的准安全系数放在负荷系数或故障影响系数或材料系数上, 那么这些最小值有助于确定试验负荷的合理最小值, 它并不取决于系数的分配。

实例, 当最小值没有使用时, 考虑一下 IEC 61400-1 疲劳计算第一和第二版的比较。

	61400-1 第一版	第二版
准系数		
$\gamma_{mf}$	1.25	1.10
$\gamma_{nf}$	1.0	1.15
$\gamma_{ff}$	1.0	1.0
影响设计的准系数产物 ( $\gamma_m \times \gamma_n \times \gamma_f$ )	1.25	1.26
影响试验负荷的准系数产物 ( $\gamma_{nf} \times \gamma_{ff}$ )	1	1.15

如上所见, 设计使用了基本相同的系数, 而试验所用系数很不同, 取决于 和 之间安全性的分配。理想情况下, 遵循不同规章的试验其试验负荷和结果应是相同的。引用最小值就能限制上面图示表明影响。

### 附录 B（常规性）疲劳公式敏感性评估

因为设计负荷不同于试验负荷，所以设计负荷产生的和试验负荷产生的损伤累积比较取决于使用的疲劳公式。由疲劳公式给出的疲劳特性的准确理解会得出准确的比较。然而，正常情况下，正确的疲劳公式并不知道。准确性取决于对特殊资料的了解。

通常，疲劳公式由一条 S-N 曲线，GOODMAN RELATION，MINER 总结，计数程序，及其他影响系数得出。疲劳损伤预告的不确定性与下面的不确定性有关：

- S-N 曲线的斜率
- GOODMAN 图
- MINER 总结的有效性
- 循环计数程序的适用性
- 其他影响系数的结果

对于设计负荷和试验负荷来说，由于这些不确定性引起的疲劳损伤预告的误差是不同的。结果，这些不确定性和误差影响了设计负荷与试验负荷的较的严密性。

#### 图 B.1—

例如，S-N 公式的变化可以导致关于试验负荷与设计负荷比较的不同结果。试验负荷频谱与设计负荷越是不同，疲劳公式的敏感性越强。由于这个原因，在定幅加载试验情况下比同样频谱和顺序的变幅加载试验情况，试验负荷与设计负荷比较的结果更易受疲劳公式影响。

图 B.1 显示了设计负荷和两种可能的试验负荷的疲劳损伤。用不同的 S-N 曲线斜率表示疲劳损伤值。假设 S-N 曲线斜率为 10，那么作为设计负荷，变幅加载和定幅加载产生同样的损伤。在这种情况下，两种试验负荷与设计负荷的比较也是同样的。如果实际材料的斜率是 8 而不是 10，所有负荷产生的损伤都会变化。然而，VA 试验负荷仍与设计负荷紧密一致（都接近 7.3）而 CA 试验负荷乘以系数 1.4（10.47 除以 7.3）更接近设计负荷。如果实际斜率是 12 而不是 10，那么 CA 试验负荷乘以 1.4（0.138 除以 0.097）与设计负荷不一致而 VA 试验负荷与设计负荷产生同样的损伤。寿命系数 1.4 等同于以应力或负荷为准的 4%。

其他关于试验负荷严密性结果的可能误差是由这个事实引起的：对 GRP 材料来说，用疲劳公式不能精确预计变幅加载损伤。最近，在 GRP 试样上做高循环变幅（WHISPER）试验，上述事实得到证明。这表明，在变幅情况下，使用疲劳公式，使用精确的基于定幅试验的 S-N 曲线低估了预告疲劳寿命。这种低估取决于应力水平但能以系数 100 调整。以负荷应力为准，不同处大约为系数 1.5。

两个例子都说明试验负荷的严密结果取决于使用疲劳公式的准确度。还能得出这样的结论：公式敏感性越增加，试验负荷越不同于设计负荷。由于这个原因，当试验负荷接近 CA 负荷，敏感性增加，同样，加载时外加循环数减少，敏感性也增加。

### 附录 C（常规性）加载角度变化的考虑

对于静态和疲劳试验来说，叶片挠度会引起显著的负荷角度变化。这会改变预期加载情况。当外加负荷于叶片时，应考虑很多影响，相应的挠度使叶片变形改变它的几何形状，改变了负荷的定向。在很多环境下均会出现这个问题。

在疲劳或静态试验时，叶片相对水平面的计划弯曲长度变的更短。对于负荷方向小的偏移来说，这种影响可以忽略，但对大的位移或垂直于负荷方向的位移来说，可能引起叶片外加力矩的显著减弱。如果负荷点固定在叶片和相应的反应点上（如液压执行机构），那么负荷方向上的力不会保持正常。结果，叶片的力矩减弱了。如果负荷点一端可以调整（如静态加载时的起重机），那么外加力可以保持一正常方向，但力矩臂变短了，这同样减弱了力矩。在其他情况下，应增加力以便达到同样的力矩分布。

在多轴加载时，垂直于负荷方向出现位移，就必须进行大的修正。例如，在疲劳试验中，沿展向偏移使垂直于超前滞后负荷的外加负荷点移动。即使相对很小的偏移也会对计划的加载产生很大影响。因为超前滞后负荷力的分量会传递到平展方向，这些沿展向偏移会减弱超前滞后负荷增加沿展向负荷，这种效应是非预计的。该效应是可逆的，沿展向执行机构会引入较高的超前滞后负荷。使用相对比垂直位移较长的执行机构或连接件可以使这些引入的负荷误差最小化。由于沿展向位移很大，这就意味着超前滞后执行机构要比之前仅用来获得必须偏移更长。考虑到几何外形的变化，通过适当改变试验负荷可以抵消剩余误差。还有更好的控制方案可行。将叶片偏移精密编程以清除不想要的影响。

在高叶片偏移期间，使用刚性符合支座会引入另外的误差。通常，负荷支座是一块木头，它在理想负荷点围住叶片横截面。在支座边缘外加负荷，负荷通过支座传递给叶片。当偏移很大，负荷支座与负荷方向形成一个角度时，叶片反应力形成一对力，根据符合如何施加，它会试图增加或减少计划力矩。这种效应如图 C.1 所示。这种效应影响很大，支座设计保持负荷作用线通过理想叶片叶弦，就可以自身抵消，使该效应最小化。

明显的负荷角度变化会改变力矩分布，这就不能获得计划分布。在这些情况下，可以很好的预见到偏移，并使用试验硬件设备来抵消它。通常，针对负荷角度在最大负荷情况下的偏移进行力的修正，这是最重要的。因此，计划负载应随叶片的偏移而变化。如果未偏移叶片轴从水平方向朝与负荷方向相反的方向倾斜，那么叶片偏移会减弱。这会增大偏移范围，这样就不必调整了。倾斜能力能做入试验台或附加作为试验固定件一部分。对高偏移的叶片试验来说，比刚性叶片更加需要测量更多的参数。叶片角度偏移，负荷角，负荷径向位置以及叶片线形位移都很重要。

在垂直面上，叶片大偏移提高了惠思特试验出现问题的可能性。通过水平加载可以消除这些问题。在三个平面内叶片大偏移能用地面检测装置远程测量。外加负荷的角度变化，如叶片的偏移，能用试验组织结构中的位移变送器监测。

## 附录 D (资料性) 试验安装实例

### D.1 液压执行机构

液压执行机构通常用来外加疲劳负荷。该执行机构架在一个刚性支撑物或地板和叶片连接固定装置之间。通过监控负荷或位移能控制该执行机构。

液压执行机构允许各种试验条件和控制选择项。试验频率、负荷幅值和顺序，负荷分布和分荷轴的数目均能改变。执行机构能用于单个点或多种组合。多点执行机构用于施加多轴负荷。沿叶高位置两个不同点处的两个执行机构能用于对叶片施加分散的疲劳负荷。单个执行机构可用于施加沿平展方向和沿边方向合并的负荷，如 12.5.1.5 所述，对叶片必然产生一定的角度，根据所用液压控制系统可以外加定幅或变幅负荷。

液压执行机构主要缺点是花费大，当然大多数载类型都能用，大位移高频率或沿叶高多负荷点都要用昂贵的特殊设备和大量液压泵。

液压执行机构的组织结构随试验要求和叶片特性变化。大多数液压执行机构试验系统使用伺服阀反馈系统来控制外加负荷。命令指令发给伺服阀，计划反应由控制器监测。通过位移或负荷标准就能控制执行机构。做一些调整保持负荷或位移指令在预先设定的限制内，很多因素都能影响试验精确性和稳定性。

在重建或维修期间液压执行机构需承受数百万次负荷循环来进行额定疲劳试验。作为整体组件执行机构需配有持久负荷对外加反向负荷或长位移来说更为稳定。双端执行机构能持续更长时间，但能产生相同的位移和负荷，双端的比单端更长更重。为了迎合多种加载要求，要有很多不同负荷和行程容量的执行机构。在执行机构末端要有抗间断装置，以防有反向负荷时保护组件。

压力和回流管路中心须装有蓄能器和逆止阀用来抚平压力波动。必须要有一个大液压泵供高压液体流向执行机构。建议使用一个精密的伺服阀来控制到执行机构的油流。液压油必须冷却，如果位移探测装置浸没在液压油中，油温变化会引起探测装置漂移，必须监测油温。

流体和试验物件的相互影响会导致液压共振或不想要的动力系统相互作用。伺服阀承载力、执行机构负荷和位移能力，蓄能器容量，压力和回流管的压力以及流体速率的综合作用必须达到最佳动力稳定性。每个试验组织结构都要有硬件调整装置。影响试验稳定性的外部参数有：叶片固有频率、叶片质量和刚度，以及试验负荷和速度要求。试验频率受可传递的最大液压油速率限制。随执行机构量程、负荷承载力和执行机构数目的增加要用的油量也增加。

为了最好的精确度，要求来自执行机构上位移或负荷探测装置的反馈控制。在某些情况下要有辅助反馈探测装置（如加速度计，线压探测器）用来控制液压共振或高级别的叶片固有频率。

### D.2 偏心转动质量团

偏心转动质量团试验方法的原理是：以接近转子固有频率的频率激励转子叶片。调整一个带有偏心转动质量团的变速励磁机单元到振荡频率，就会产生想要的反应。励磁机单元的作用就是在振荡中保持能量。产生稳定定幅负荷循环。

在偏心质量试验时，沿叶高方向负荷分布遵循第一级试验系统模型外形（叶片包括预负载和励磁机的固定质量）。试验负荷的 R-比率通过在励磁机位置外加置一个预负载到叶片来调整。

这种试验方法的优点是：试验组织结构简单，稳定，试验费用便宜。缺点是：只能是定幅或成块加载，试验频率限制为试验系统的固有频率（叶片包括预负荷）。

#### D2.2 试验组织结构

对一个沿平展方向试验来说典型的组织结构是：固定在试验设备上的叶片根部，叶片在水平位置顶弦，叶片下风侧面向地面。励磁机和固定的重要放在叶片试验区域以得到理想的负荷分布。例如，如果根据截面和叶片内截面设为试验区域，那么就可通过固定预负载和励磁机在叶片外部（如在外片 75% 长度处）来建立负荷。在根部区预负载的重量包括励磁机在内，通常小于计划试验负荷重要的一半。这可能会改善负荷分布情况，以便通过放置预负载在叶片沿叶高不同位置来获得理想的加载。

开始试验后，在感兴趣的区域，叶片加载的负荷要计划加载负荷比较一下。必须保证试验区以外的地方没有严重超载。

沿边向试验的方法与上述沿平展方向试验方法类似，但通常需要在叶片顶部叶弦垂直位置上将叶片固定。可能在进行上述沿边向试验时在沿平展方向用定件对叶片进行预负载，这样就完成了沿边向和沿展向的联合试验。另一种可能是：把两个励磁机相互垂直固定开始试验。

### D2.3 加载

由于预负载和励磁机的固定重要，当试验进行时，相比静态试验产生的负荷分布，模型外形的变化会引起叶片上负荷分布变化。因此，在选择试验区域和试验循环数时应考虑这个问题。对于叶片的激励，可使用带有偏心转动质量速度控制马达。为了获得理想的 R-比率，必须外加固定重量以提供负荷范围的平均值。调整偏心转动质量和它的频率，提供叶片理想的位移，这些都可在校准试验中进行。

对控制和数据采集设备的要求很大程度上由选择的控制和监测的原理决定。

### D2.4 试验控制项目

#### D2.4.1 幅值调整

调整励磁机频率范围低于叶片的固有频率（包括固定重要），就能调整位移幅值到理想水平。

#### D2.4.2 刚度变化

基于控制原理，可用偏移或变形计量装置，定时负荷校准装置或综合使用这些方法来监测刚度。

#### D2.4.3 位移控制/行程限制

整个试验过程中，负荷水平必须保持规定的偏差之内。叶片性质通常是线性弹性的，能从位移得出负荷水平。位移能直接用位移传感器或间接由加速度器测量值得到（或特殊环境下，用变形计量设备）

如果超过特定的负荷极限，建议按应急开关停止试验。

#### D2.4.4 温度

周围温度的大变化会引起叶片刚度和叶片平均偏移的变化，这就需要调整。

### D.3 其它加载设备

当位移很大的，而且试验条件要求在顶部外加负荷时，起重机或卷扬机工作很顺利。如果起重机不具备慢速控制时，对刚性结构来说就很难控制加载速率。绞盘以同样方式工作，但能固定在任何刚性支座上。

静态加载时，威尔福树用来外加分数的点负荷。如图 D.7 所示，就是一个典型的威尔福树框架。所有的绞链和连接件都用来防止负荷固定件改变叶片刚性。威尔福树的几何形状设计成便于给叶片外加负荷，它的形状接近于目标试验负荷的分布。对大型叶片来说，叶片分段试验可能很实际。例如，一棵威尔福树用来试验叶尖，而另一棵用来试验内部区域。当使用一棵威尔福树时，在叶片上用起重吊钩比较容易，但也能用液压执行机构。通常，威尔福树应用轻型材料建造。

对一些特殊的加载装置来说，摇臂和摇杆以及滑轮组、绳索都能用来改变机械优点通过增加负荷或位移。

将叶片附在推力杆上，连接到旋转凸轮轴上就能给风力汽轮机外加循环负荷。调整推力杆的线性移动，得到理想的偏移。这种方法通常限于位移控制和单一方向定幅加载。用一个刚性连接能用硬件将位移固定。或者较弹性的连接用来提供系统阻尼。连接是刚性的，因为位移受系统几何形状控制，所以不需要另外的位移信号。

### Bibliography

- [1] D.R.V. van Delft, J. L. van Leeuwen, Full-scale testing of wind turbine rotor blades, EWEC'94 conf. 1994, Thessaloniki
- [2] W.D. Musial et al. A Comparison of Strength and Load-based Methods for Testing Wind Turbine Blades, AIAA 97-0957; 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1997 RENO
- [3] W.D. Musial et al, A Photo-elastic stress analysis on a Phoenix 7.9 meter blade, Windpower '91 conference and Exposition, Palm Springs, 1991
- [4] H.J. van Grol. B.H. Bulder, Reference procedure to establish fatigue stresses for large size wind turbines
- [5] D.R.V. van Delft, D.C. Corbet, J.L. van Leeuw.n, Full-scale fatigue tests of wood.-epoxy blades., Proc. EW EC'91, Amsterdam 1991
- [6] Perry, C.C., and Lissner, H.R. The Strain Gage Primer, Chapter 5, McGraw-Hill, 1962
- [7] G.C. Lars.n and A. Kretz, Experimental Determination of Stiffness Distributions and Mode Shapes of Wind Turbine Blades. Riso report R-773(EN), March 1995.
- [8] G.C. Larsen and A. Kretz, Experimental determination of structural properties by non-destructive methods
- [9] H.J. Sutherland et al. The application of non-destructive techniques to the testing of a wind turbine blade, Sandia report: SAND93-1380.UC-261, June 1994
- [10] A.G. Dutton et al., Damage detection and stress measurement In composite wind turbine blades EW EC'94 conf. 1994, Thessaloniki
- [11] D.J. Ewins, Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd, UK
- [12] D.R.V. van Delft et al, Fatigue behaviour of fibreglass wind turbine blade material under variable amplitude loading Proc. EUWEC'96, GBtenburg
- [13] K. Mctemon N. Gibson and P. Graets. Development of Blade Test Facility to Accommodate Flexible Blade Assembly for New MS4 Wind Turbine, BW EA 19 Edinburgh 1997
- [14] T.P. Philippidis, P.S. Vionis, D.J. Lekou, A.N. Fragoulls, Rotor Blade Design Verification by means of Full-Scale Testing, EWEC=97