



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103217282 B

(45) 授权公告日 2015.04.22

(21) 申请号 201310100562.9

(22) 申请日 2013.03.26

(73) 专利权人 中国科学院工程热物理研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路 11 号 A202

(72) 发明人 石可重 赵晓路

(51) Int. Cl.

G01M 13/00(2006.01)

(56) 对比文件

CN 102798509 A, 2012.11.28, 全文.

CN 101261155 A, 2008.09.10, 全文.

US 2007/0005310 A1, 2007.01.04, 全文.

US 2011/0106503 A1, 2011.05.05, 全文.

吴培德等. 带式舟桥的试验. 《带式舟桥》. 2005, 第 232-235 页.

马静等. 基于数值计算的高速列车气动阻

力风洞试验缩比模型选取方法. 《计算机辅助工程》. 2007, 第 16 卷 (第 3 期), 第 110-113、118 页.

金玉龙等. 集装箱码头岸桥结构的动力相似分析与试验验证. 《上海交通大学学报》. 2012, 第 46 卷 (第 10 期), 第 1609-1615 页.

审查员 郑睿

权利要求书2页 说明书4页

(54) 发明名称

一种基于等寿命原则的水平轴风力机叶片缩比模型疲劳测试方法

(57) 摘要

本发明公开了一种水平轴风力机叶片缩比模型的疲劳测试方法,其目的在于通过采用低成本、高效率的缩比模型试验检测与计算分析手段,替代全尺寸叶片疲劳测试试验。该方法特点在于,采用尺寸等比例缩小的叶片模型疲劳试验替代传统的全尺寸叶片疲劳测试,并依据缩比模型与原型叶片满足结构等寿命这一要求,用以确定缩比模型的试验载荷。该测试方法既可采用行业现有使用的叶片疲劳测试设备,也可采用低成本的小型试验装置和设备,进行疲劳测试。通过准确的设计与分析,可保证缩比模型与全尺寸叶片有着比较准确的结构尺寸对应关系与载荷对应关系,因此可保证测试结果的准确性。

1. 一种水平轴风力机叶片的疲劳测试方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

1) 依据所要测试评估的原型全尺寸叶片结构特征,设计并制作一个材料相同而结构尺寸等比例缩小的缩尺寸模型叶片,并以该缩尺寸模型叶片作为试验叶片;

2) 依据等寿命原则,即缩尺寸模型叶片与原型全尺寸叶片在各自的试验载荷作用下应保持相同的结构疲劳损伤与寿命分布情况,将原型全尺寸叶片的试验载荷转化为缩尺寸模型叶片的试验载荷,具体步骤如下:

(a) 采用有限元数值模拟方法,分别建立原型全尺寸叶片与缩尺寸模型叶片的有限元模型;

(b) 对上述两个有限元模型分别定义一致的边界条件;

(c) 根据设计部门所提供的原型全尺寸叶片疲劳载荷,取两次计算,分别将疲劳载荷幅值范围的上限值与下限值作为计算载荷施加到原型全尺寸叶片有限元模型上,分别计算在该疲劳载荷上限值与下限值作用下原型全尺寸叶片结构的应力分布情况;

(d) 将步骤(c)中原型全尺寸叶片各加载点处的疲劳载荷上限值,按照一个相同的比例缩小,并将缩小后的载荷施加到缩尺寸模型叶片的有限元模型上,采取与步骤(c)中一致的计算方法,计算在该载荷作用下缩尺寸模型叶片的结构应力分布情况;

(e) 分别在原型全尺寸叶片和缩尺寸模型叶片的对应位置选取若干位置点,作为应力对比点;

(f) 比较原型全尺寸叶片和缩尺寸模型叶片在上述应力对比点处的应力分布情况,如应力分布不一致,则调整施加到缩尺寸模型叶片有限元模型上的载荷;

(g) 经过若干次调整计算,找到实现原型全尺寸叶片和缩尺寸模型叶片在应力对比点处应力分布一致或近似一致的缩尺寸模型叶片施加载荷,以该载荷作为缩尺寸模型叶片疲劳试验的试验疲劳载荷上限值;

(h) 将步骤(c)中原型全尺寸叶片各加载点处的疲劳载荷下限值,按照上述(d)-(g)步骤相同的方式处理,得到缩尺寸模型叶片疲劳试验的试验疲劳载荷下限值;

3) 按照步骤2)所确定的施加到缩尺寸模型叶片的试验疲劳载荷,对缩尺寸模型叶片进行疲劳试验;

4) 根据步骤3)缩尺寸模型叶片疲劳测试的结果,实现对原型全尺寸叶片的结构性能进行评估。

2. 根据权利要求1所述的水平轴风力机叶片的疲劳测试方法,其特征在于,所述步骤2)的子步骤(c)中,施加到原型全尺寸叶片有限元模型上的试验载荷,为沿叶片展向布置的几处集中载荷,包括疲劳载荷幅值范围的上限值与下限值。

3. 根据权利要求1或2所述的水平轴风力机叶片的疲劳测试方法,其特征在于,所述步骤2)的步骤(d)中,按照原型全尺寸叶片与缩尺寸模型叶片的尺寸缩小比例值,缩小步骤(c)中原型全尺寸叶片各加载点处的载荷,得到施加到缩尺寸模型叶片有限元模型上的载荷。

4. 根据权利要求1所述的水平轴风力机叶片的疲劳测试方法,其特征在于,所述步骤2)的步骤(f)中,调整施加到缩尺寸模型叶片上的载荷时,须保证施加到各位置点处的载荷按照相同比例同步增减。

5. 根据权利要求1所述的水平轴风力机叶片的疲劳测试方法,其特征在于,所述步骤

2) 中,对原型全尺寸叶片与缩尺寸模型叶片的有限元模型采用一致或相似的计算网格以及相同的边界条件进行数值计算,以使二者具备一致或相似的计算误差。

6. 根据权利要求 1 所述的水平轴风力机叶片的疲劳测试方法,其特征在于,采用该方法进行叶片疲劳性能评估,试验步骤利用现有通用的叶片疲劳测试步骤。

一种基于等寿命原则的水平轴风力机叶片缩比模型疲劳测试方法

技术领域

[0001] 本发明涉及机械行业风力发电技术领域,尤其涉及一种水平轴风力机叶片在疲劳载荷作用下结构性能的测试评估方法。

背景技术

[0002] 风电叶片在疲劳载荷作用下发生损伤破坏问题是风电叶片设计、制造、运行中所关注的一项重要内容。在风电叶片设计中,一般都要求风电叶片能满足 20 年的使用寿命。在如此长的服役期间和恶劣的工作环境下,风电机组经常要在多种疲劳载荷作用下运行,严重影响了风电机组安全运行的可靠性和使用寿命。而恶劣的工作环境,特殊的材料性质,以及结构与工艺所带来的种种问题,给叶片疲劳载荷下性能评估带来相当大的难度。

[0003] 由于风电叶片结构及运行情况特殊性,其它行业已建立的工程实践经验和知识不能有效的应用到风电机组叶片的疲劳性能评估中来。进行叶片在疲劳载荷作用下的损伤与寿命测试可以提供对设计的可靠确认。对于新设计、新工艺、新材料的风电叶片,疲劳测试是保证叶片质量关键的一环。通过测试,可以将测量数据与设计的数据进行比较,以掌握叶片的结构性能。并且可以利用测试的结果改进与优化结构设计。

[0004] 然而,目前所开展的叶片疲劳测试方法大都为全尺寸叶片测试,试验叶片的制作与试验周期很长,而且大都采用大型试验设备进行,成本很高。降低叶片测试成本,缩短测试周期,对于叶片行业具有重要的现实意义。

发明内容

[0005] 针对现有叶片疲劳测试的以上问题,本专利提出一种新的叶片疲劳性能测试评估方法,即利用叶片缩比模型的疲劳测试,来代替全尺寸叶片疲劳测试。该方法具有周期短、成本低等优点。此外,本方法中缩比模型试验所需的设备与实验步骤,与现有全尺寸叶片疲劳测试方法相似。该方法即可利用现有国内外已有的叶片疲劳检测设施开展测试,也可采用规模形式较小的试验设备开展,因此在设备投资上也是比较经济的。

[0006] (一) 要解决的技术问题

[0007] 针对目前风力机叶片疲劳测试测试周期长、成本高等缺点,本发明提出了一种缩比模型疲劳测试方法,通过对缩比模型结构与试验载荷准确的设计与分析,可保证缩比模型测试具有比较准确的测试结果。采用该方法进行疲劳测试,可实现周期短、成本低、能够获得比较准确的叶片疲劳加载情况下结构性能数据等优点。

[0008] (二) 技术方案

[0009] 根据本发明的一个方面,提供了一种利用缩比模型试验替代全尺寸风力机叶片疲劳测试的方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

[0010] 1) 依据所要测试评估的原型叶片结构特征,设计并制作一个结构尺寸等比例缩小的叶片,并以该叶片作为试验叶片;

[0011] 2) 依据等寿命原则, (即缩尺寸模型叶片与原型叶片在各自的试验载荷作用下, 应保持相同的结构疲劳损伤与寿命分布情况), 将原型叶片的试验载荷转化为缩尺寸模型叶片的试验载荷。其机理与方法如下:

[0012] 为了实现用缩比模型试验替代全尺寸叶片疲劳测试, 首先要确定两个试验的相似准则。由于疲劳试验的核心目标是研究叶片在一定时间周期内疲劳载荷作用下, 叶片疲劳损坏情况。因此, 疲劳试验的要求是要能够实现对一定周期内的疲劳载荷作用下, 叶片结构的疲劳损伤分布情况进行准确描述。根据这一要求, 在本发明中, 缩比模型试验载荷确定的原则为, 缩比模型与原型叶片在相同的疲劳周期内, 在各自试验载荷作用下, 应保持相同的疲劳损伤分布, 由于结构疲劳损伤与结构寿命具有确定的关系, 即缩比模型与原型叶片在各自试验载荷作用下具有相同的寿命分布。

[0013] 由于结构的寿命与疲劳损伤取决于结构的疲劳应力情况与材料的疲劳性能指标, 缩比模型与原型叶片具有相同的材料分布, 即具有相同的材料疲劳性能指标, 因此二者结构寿命的差别, 取决于结构的疲劳应力情况。当二者具有相同的疲劳应力分布时, 即具有相同的寿命。因此, 上述缩比模型试验载荷确定所依据的等寿命原则即可转换为等疲劳应力原则。

[0014] 然而, 要实现这一目标, 首要解决的是外部疲劳载荷与叶片疲劳应力分布关系的建立问题。由于风电叶片是由外部壳体与内部大梁组成的复合材料结构体, 沿叶片展向, 外部壳体的形状、尺寸与铺层结构都在发生变化, 而内部大梁的结构形状、尺寸与铺层结构也都随之发生变化。这种复杂的结构形式, 难以采用解析方法建立载荷与叶片应力分布的数学关系。这也成为实现缩比模型试验替代全尺寸叶片测试的难点。

[0015] 本发明则提出利用数值分析的方法, 确定缩比模型试验的疲劳载荷。其方法如下:

[0016] (a) 采用有限元方法, 分别建立全尺寸叶片与缩比模型的有限元模型;

[0017] (b) 对两个模型分别定义一致的边界条件。例如, 由于开展台架疲劳试验时, 叶片的结构边界条件只包括叶根处的约束, 因此有限元模型也只需定义叶根约束即可。

[0018] (c) 考虑到叶片疲劳载荷的频率较低, 因此可采用准静态计算方法进行结构疲劳应力的计算分析。即根据设计部门所提供的全尺寸叶片测试载荷 (一般为沿叶片展向布置的几处集中疲劳载荷, 包括疲劳载荷幅值范围的上限值与下限值), 取两次计算, 分别将疲劳载荷幅值范围的上限值与下限值作为计算载荷施加到相应位置, 计算在该疲劳载荷上限值与下限值作用下叶片结构的应力分布情况。

[0019] (d) 将 (c) 中全尺寸叶片各加载点处的疲劳载荷上限值, 按照一个相同的比例缩小, (例如按照缩比模型与原型叶片的尺寸缩小比例值), 并将缩小后的载荷施加到缩比模型的有限元模型上, 采取与 (c) 中一致的计算方法, 计算在该载荷作用下叶片结构应力分布情况。

[0020] (e) 分别在全尺寸叶片和缩比模型的对应位置选取若干位置点, 作为应力对比点, 选取的原则为, 利用这些点处的强度计算结果, 可以较好反映或识别叶片的损伤情况。

[0021] (f) 比较全尺寸叶片和缩比模型对比点处的应力情况, 如应力不一致, 可调整缩比模型的载荷, (调整时须保证缩比模型上各点处的载荷按照相同比例, 同步地增减)。

[0022] (g) 经过若干次调整计算, 可以找到实现对比点处应力一致 (或近似) 的缩比模型

施加载荷,以该载荷作为缩比模型疲劳试验的试验疲劳载荷上限值。

[0023] (h) 将 (c) 中全尺寸叶片各加载点处的疲劳载荷下限值,按照上述 (d)-(g) 步骤处理,得到缩比模型疲劳试验的试验疲劳载荷下限值。

[0024] 3) 完成以上步骤后,即可进行缩尺寸模型叶片的疲劳测试。包括将叶片固定在试验台架上,进行疲劳加载,测量等步骤。所采用的加载装置与试验过程可与现有通用的叶片疲劳测试方法相同或类似,这里不再表述;

[0025] 4) 根据缩比模型疲劳测试的结果,可实现对原型叶片的结构性能进行评估。根据 2) 中所述,由于缩比模型试验所获得损伤与寿命测量结果,可以用来描述全尺寸叶片的损伤与寿命分布情况,因此根据该模型试验的损伤测量结果对原型叶片损伤的具体情况可进行判断。该评估过程与现有通用的叶片疲劳试验结果评估方法相同或类似,这里不再表述。

[0026] 优选的,采用该方法进行叶片疲劳测试,其前提在于依据原型叶片设计并制作等比例缩小的试验叶片。

[0027] 优选的,采用该方法进行叶片疲劳性能评估,应依据等寿命原则,采用有限元数值模拟方法,对原型叶片与缩比模型进行准确的疲劳应力计算,用以确定缩比模型的试验载荷。

[0028] 优选的,所述步骤 2) 的子步骤 (c) 中,施加到原型全尺寸叶片有限元模型上的试验载荷,为沿叶片展向布置的几处集中载荷,包括疲劳载荷幅值范围的上限值与下限值。

[0029] 优选的,所述步骤 2) 的步骤 (d) 中,按照原型全尺寸叶片与缩尺寸模型叶片的尺寸缩小比例值,缩小步骤 (c) 中原型全尺寸叶片各加载点处的载荷,得到施加到缩尺寸模型叶片有限元模型上的载荷。

[0030] 优选的,所述步骤 2) 的步骤 (f) 中,调整施加到缩尺寸模型叶片上的载荷时,须保证施加到各位置点处的载荷按照相同比例同步增减。

[0031] 优选的,所述步骤 2) 中,对原型全尺寸叶片与缩尺寸模型叶片的有限元模型采用一致或相似的计算网格以及相同的边界条件进行数值计算,以使二者具备一致或相似的计算误差。

[0032] 优选的,采用该方法进行叶片疲劳性能评估,试验步骤及试验装置可利用现有通用的叶片疲劳测试步骤。

[0033] (三) 有益效果

[0034] 本发明与现有技术相比,具有如下明显的实质特点和显著优点:

[0035] 1) 与现有采用全尺寸叶片进行载荷作用下结构性能测试评估相比,该方法采用缩比模型进行疲劳载荷作用下性能测试评估,可实现周期短、成本低、能够比较准确获得叶片疲劳结构性能等优点。

[0036] 2) 该方法可利用现有国内外叶片疲劳检测设施,或更小型的试验设备,因此在设备投资上也是比较经济的。

具体实施方式

[0037] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,以下结合具体实施例,对本发明进一步详细说明。

[0038] 本实施例中,以当前主流的 MW 级风力机叶片为例,采用以下步骤进行检测:

[0039] 1) 依据所要测试评估的原型叶片结构特征,设计并制作一个结构尺寸等比例缩小的叶片,并以该叶片作为试验叶片,本例中缩小比例取为 10;

[0040] 2) 依据等寿命原则,(即缩尺寸模型叶片与原型叶片在各自的试验载荷作用下,应保持相同的结构损伤与寿命分布),将原型叶片的试验载荷转化为缩尺寸模型叶片的试验载荷。其步骤如下:

[0041] (a) 采用有限元方法,分别建立全尺寸叶片与缩比模型的有限元模型;

[0042] (b) 对两个模型分别定义一致的边界条件;

[0043] (c) 考虑到叶片疲劳载荷的频率较低,因此可采用准静态计算方法进行结构疲劳应力的计算分析。即根据设计部门所提供的全尺寸叶片测试载荷(一般为沿叶片展向布置的几处集中疲劳载荷,包括疲劳载荷幅值范围的上限值与下限值),取两次计算,分别将疲劳载荷幅值范围的上限值与下限值作为计算载荷施加到相应位置,计算在该疲劳载荷上限值与下限值作用下叶片结构的应力分布情况。

[0044] (d) 将(c)中全尺寸叶片各加载点处的疲劳载荷上限值,按照一个相同的比例缩小,本例中缩小比例取为 10,并将缩小后的载荷施加到缩比模型的有限元模型上,采取与(c)中一致的计算方法,计算在该载荷作用下叶片结构应力分布情况。

[0045] (e) 分别在全尺寸叶片和缩比模型的对应位置选取若干位置点,作为应力对比点,选取的原则为,利用这些点处的强度计算结果,可以较好反映或识别叶片的损伤情况。

[0046] (f) 比较全尺寸叶片和缩比模型对比点处的应力情况,如应力不一致,可调整缩比模型的载荷,(调整时须保证缩比模型上各点处的载荷按照相同比例,同步地增减)。

[0047] (g) 经过若干次调整计算,可以找到实现对比点处应力一致(或近似)的缩比模型施加载荷,以该载荷作为缩比模型疲劳试验的试验疲劳载荷上限值。

[0048] (h) 将(c)中全尺寸叶片各加载点处的疲劳载荷下限值,按照上述(d)-(g)步骤处理,得到缩比模型疲劳试验的试验疲劳载荷下限值。

[0049] 3) 将该缩比模型叶片固定在叶片实验台架上,在叶片表面及内部设置应变片,本实例中传感器的数量为 10 片,布置位置尽可能地覆盖叶片在疲劳载荷下的危险发生位置(危险发生位置根据叶片设计得到);

[0050] 4) 依据 2) 中所确定的试验载荷,对叶片进行疲劳加载测试,测试过程与现有通用的全尺寸疲劳测试过程相似,这里不介绍;

[0051] 5) 对实验所采集的应变等结果进行分析,可获得原型叶片的相关疲劳结构力学性能数据。

[0052] 通过以上步骤的实施,完成了对该叶片疲劳加载性能的测试与评估。

[0053] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明。所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。