



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104155092 A

(43) 申请公布日 2014. 11. 19

(21) 申请号 201410404931. 8

(22) 申请日 2014. 08. 16

(71) 申请人 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 徐建中

(51) Int. Cl.  
G01M 13/00 (2006. 01)

权利要求书2页 说明书5页

(54) 发明名称

一种风力机叶片静态分析方法

(57) 摘要

本发明涉及一种风力机叶片静态分析的方法,该方法特点在于,采用尺寸等比例缩小的叶片模型开展静力试验与静力计算,通过二者的相关性分析,修正叶片材料性能,并将所修正的材料数据,应用到所要分析或评估的实际叶片上,对实际叶片进行计算,获得该叶片在所关心载荷作用下的静态参数。对所研发设计的风电叶片,使用本发明的方法可以比较准确地预测出叶片在极限载荷或其它静态载荷作用下的各项结构响应数据,以及对现有叶片在静态载荷作用下的响应情况进行评估。通过该方法可以在叶片设计之初,比较准确地把握叶片在极限载荷或其它静态载荷作用下的各项结构响应数据,便于在设计时开展结构优化。同时,也可应用于对已经生产制造出来或在运行中的大型叶片的静态评估。

1. 一种风力机叶片静态分析方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

SS1. 依据所要测试评估的全尺寸风力机叶片的几何结构特征,设计并制作一个结构尺寸等比例缩小的缩尺寸风力机叶片;

SS2. 对所述缩尺寸风力机叶片进行静态测试试验,获得缩尺寸风力机叶片在测试载荷数据下的各项结构静态参数;

SS3. 对所述缩尺寸风力机叶片建立结构有限元数值模型,使用步骤2中的测试载荷数据对所述结构有限元数值模型施加载荷,依据给定的叶片材料性能参数,对所述缩尺寸风力机叶片开展静态计算,获得所述结构有限元数值模型在测试载荷下的各项结构静态参数;

SS4. 对比分析所述缩尺寸风力机叶片的静态测试试验与静态计算的结果,比较各对应静态参数的差异;

SS5. 通过所述缩尺寸风力机叶片的静态测试试验与静态计算结果的相关性分析,对所述结构有限元数值模型中叶片各部位材料性能参数进行优化修正,获得修正后的材料性能参数;

SS6. 建立所述全尺寸风力机叶片的结构有限元数值模型,以步骤5中经过优化分析获得的修正后的材料性能参数作为该全尺寸风力机叶片的结构有限元数值模型的材料性能参数;

SS7. 根据实际所要分析的工况,对步骤6中全尺寸风力机叶片的结构有限元数值模型施加相应的静态载荷进行静态计算,获得相应的各项结构静态参数,以准确反映风力机叶片的真实静态响应信息。

2. 根据权利要求1所述的风力机叶片静态分析方法,其特征在于,步骤5中,对缩尺寸风力机叶片的静态测试试验与静态计算结果进行相关性分析,对缩尺寸风力机叶片的结构有限元数值模型中的材料性能参数进行优化分析,获得修正后的材料性能参数,具体包括如下子步骤:

A. 根据各部位材料性能的不同,将风力机叶片的整体结构划分为若干个部分,将叶片各部分的材料性能参数作为分析变量;

B. 将所述缩尺寸风力机叶片的静态测试试验与静态计算得到的各项静态结构参数的差值作为目标变量;

C. 以子步骤A设定的分析变量和子步骤B设定的目标变量进行优化计算,通过调整叶片各部位的材料数据(即分析变量),可以使目标变量值趋近于最小,以目标变量取最小值时对应的叶片各部分的材料性能参数的取值作为修正后的材料性能参数。

3. 根据权利要求2所述的风力机叶片静态分析方法,其特征在于,子步骤C中,以设计单位预先提供的叶片材料性能参数计算得到的所述各对应结构静态参数的差异值为初始目标变量值。

4. 根据权利要求1至3所述的风力机叶片静态分析方法,其特征在于,确定步骤1中的缩小比例时,应保证缩尺寸风力机叶片各部位具有足够的复合材料铺层厚度,使其各部位的材料性能与全尺寸风力机叶片相当。

5. 根据权利要求1至4所述的风力机叶片静态分析方法,其特征在于,步骤2中采用常规的静态测试设备与手段获得叶片的各项结构静态参数。

6. 根据权利要求1至5所述的风力机叶片静态分析方法,其特征在于,所述结构静态参数包括应变、应力、变形量等。

7. 根据权利要求1至6所述的风力机叶片静态分析方法,其特征在于,步骤2中在叶片距叶根每间隔1米处的各截面表面,分别在叶片前缘、尾缘、压力面、吸力面设置若干个应变片,用来进行结构应变测量。

8. 根据权利要求1所述的风力机叶片静态分析方法,其特征在于,采用该方法进行叶片静态性能评估,其前提在于依据原型全尺寸叶片设计并制作等比例缩小的试验缩尺寸叶片,并分别建立该缩尺寸叶片与全尺寸叶片的结构有限元数值模型,优选地,采用有限元软件如Nastran对结构有限元数值模型进行分析计算,采用目前成熟的各种优化软件来实现步骤5中的材料性能参数优化。

9. 根据权利要求1所述的风力机叶片静态分析方法,其特征在于,采用该方法进行叶片静态性能评估,应根据缩尺寸叶片的试验结果与计算结果,建立以材料性能参数为优化变量,以试验与计算的模态结果数据之差最小化为优化目标的优化分析,以获得准确的材料性能,并将之应用到全尺寸叶片的计算中。

10. 根据权利要求1所述的风力机叶片静态分析方法,其特征在于,采用该方法进行叶片静态分析,所建立的缩尺寸叶片与全尺寸叶片的结构有限元数值模型,除结构尺寸不同外,其它模型数据以及计算方法应保持一致。

## 一种风力机叶片静态分析方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及机械行业风力发电技术领域,尤其涉及一种风力机叶片的静态分析方法。

### 背景技术

[0002] 风力机叶片在野外环境下工作,承受复杂随机的外界环境与工况,叶片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载荷作用下运行,其中极限载荷是对叶片性能造成损坏的一个非常严重的因素。研究叶片在极限载荷作用下,结构的响应问题,是叶片设计、制造、运行等过程中十分关心的问题。此外,叶片在一些典型工况下,承受其它的一些静态载荷作用下的结构响应问题,有时也是需要关注的。

[0003] 在叶片的设计过程中,如果能准确地把握叶片在极限载荷或其它静态载荷作用下的静态响应参数,并据此对叶片结构进行优化,将在很大程度上对叶片未来的安全运行提供保障。

[0004] 现有的风电叶片静态分析评估方法主要有计算分析与静态试验。静态试验是要求对已经制作出来的叶片进行测试,这不利于在叶片设计阶段进行设计改进。且由于大型叶片的制造周期与成本方面的原因,也会给产品的研发带来时间与成本的大幅增加。而静态计算由于周期短,成本低,因此在叶片设计阶段,是非常适宜的,尤其在产品优化设计方面。

[0005] 因此,开展准确的叶片静态计算具有非常重要的作用。目前在结构静态计算方面的技术大都比较成熟,尤其是结构有限元计算技术在结构静态计算方面的精度已经很高。然而在风电叶片结构的有限元静态计算中却仍然存在一定的问题。其原因在于,影响静态计算准确性的主要因素在于结构刚度的准确判定。而影响结构刚度的一个重要因素是结构的材料性能。由于风电叶片大都是由复合材料制成,其产品的材料性能,取决于具体的复合材料构成模式,也就是说,即便对于同一个叶片,其不同部位的材料性能,也会由于复合材料铺层方式与构成的不同而不同,如果要准确获知各部位的材料性能,需要对各部位的结构材料分别进行材料性能试验,这对于目前大型的风电叶片结构是难以实现的,尤其在叶片设计之初。而即便能开展这样的材料试验,常规的材料试样性能试验往往也难以反应叶片中实际材料结构的性能。

[0006] 因此,在叶片静态计算中,准确地确定材料性能,是影响到叶片静态参数能否被准确评估的重要前提。建立准确的材料性能确定方法,并应用到叶片静态计算中,对于新型叶片的设计研发具有重要的作用。

### 发明内容

[0007] 针对现有叶片静态计算中诸如不能准确确定材料性能等问题,本发明旨在提供一种风力机叶片静态分析方法,通过缩尺寸叶片的静态试验与静态计算相关性分析的方法,

可以获得比较准确的叶片材料性能,并应用到新型叶片的设计中。该方法相对于现有的静态计算方法,具有更高的准确性;相对于大型叶片静态试验的方法,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测试设备,相对于大型全尺寸叶片的静态试验所需的设备,在设备投资上也是比较经济的。

[0008] (一) 要解决的技术问题

[0009] 针对目前风力机叶片静态分析中所存在的诸如不能准确确定材料性能等问题,本发明提出了一种风力机叶片静态计算方法,通过利用缩比模型的静态试验与静态计算的相关性分析,获得比较准确的材料性能参数,并应用到原型叶片的静态计算中,获得比较准确的分析结果,该方法可应用于新型叶片的研发。

[0010] (二) 技术方案

[0011] 本发明为解决其技术问题所采用的技术方案如下,一种风力机叶片静态分析方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

[0012] SS1. 依据所要测试评估的全尺寸风力机叶片的几何结构特征,设计并制作一个结构尺寸等比例缩小的缩尺寸风力机叶片,所述全尺寸风力机叶片和缩尺寸风力机叶片均由复合材料铺层工艺制备而成,在确定缩尺寸风力机叶片相对于全尺寸风力机叶片的缩小比例时,应考虑叶片尺寸缩小对复合材料铺层厚度的影响,需保证复合材料铺层厚度减少后,所述缩尺寸风力机叶片应有足够的复合材料铺层厚度,以用于对材料性能的识别。即在确定缩小比例时,应保证缩尺寸风力机叶片各部位具有足够的复合材料铺层厚度,使其各部位的材料性能与全尺寸风力机叶片相当。

[0013] SS2. 对所述缩尺寸风力机叶片进行静态测试试验,获得缩尺寸风力机叶片在测试载荷数据下的各项结构静态参数。由于采用的是缩小比例的叶片,因此,可以比较方便的采用常规的静态测试设备与手段获得叶片的各项结构静态参数,测试载荷可以任意确定,优选地,根据试验条件确定对缩尺寸风力机叶片静态测试时加载的测试载荷。所述各项结构静态参数包括应变、应力、变形量等。

[0014] SS3. 对所述缩尺寸风力机叶片建立结构有限元数值模型,使用步骤2中的测试载荷数据对所述结构有限元数值模型施加载荷,依据给定的叶片材料数据,对缩尺寸风力机叶片开展静态计算,获得缩尺寸风力机叶片的有限元数值模型在测试载荷下的各项结构静态参数。在首次计算中,可依据设计单位所提供的材料数据进行,计算得到相应的各项结构静态参数(结构强度、刚度等数据)。

[0015] SS4. 对比分析所述缩尺寸风力机叶片的静态测试试验与静态计算结果,比较二者所得各项结构静态参数的差异。

[0016] SS5. 对所述缩尺寸风力机叶片的静态测试试验与静态计算结果进行相关性分析,开展对所述有限元数值模型中的材料性能进行修正。依据静态参数主要是受叶片刚度分布影响这一原则,而对于风力机叶片这种复合材料的有限元模型分析中,当所建立的有限元数值模型与选用的数值计算方法都比较合理的情况下,影响叶片刚度的主要因素就是叶片材料性能,因此,要提高叶片静态计算的精度,就必须准确地确定叶片各部分的材料性能参数。下面将通过所述缩尺寸风力机叶片的静态试验与静态计算结果进行相关性分析,开展对有限元数值模型中材料性能的修正工作,具体包括如下子步骤:

[0017] (A) 根据各部位材料的不同,将风力机叶片的整体结构划分为几个部分,将叶片各

部分的材料性能作为分析变量。

[0018] (B) 将所述缩尺寸风力机叶片的静态测试试验与静态计算的各项静态结构参数的差值（如叶尖最大变形量的试验数据与计算数值的差值等）作为目标变量。

[0019] (C) 以子步骤A设定的分析变量和子步骤B设定的目标变量进行优化计算，优化计算中，通过调整叶片各部位的材料数据（即分析变量），可以使目标变量值趋近于最小，以目标变量取最小值时对应的叶片各部分的材料性能参数的取值作为修正后的材料性能参数。当子步骤A中的所述分析变量发生改变时，子步骤B中的目标变量也随之发生改变，当所述目标变量取最小时，即表示此时静态试验与静态计算的结果很接近，此时的分析变量值，即材料参数值，也最接近真实值。于是，我们便可以采用多目标变量与多分析变量的优化方法，来获得所希望的分析变量值。其优化原理与方法如下：

[0020] 首先根据步骤3中设计单位给定的初始材料参数赋值给子步骤A中的分析变量，计算出相应的结构静态参数（如变形、应变等），与步骤2的静态测试试验中获得的相应静态结构参数相减，得到初始的目标变量值。调整叶片各部位的材料数据（即分析变量），即可获得相应调整后的目标变量值。对比不同分析变量对目标变量的影响，可寻找到目标变量取最小值时的分析变量值。此过程也可利用目前成熟的各种优化软件来实现。

[0021] SS6. 建立全尺寸风力机叶片的结构有限元数值模型，以步骤5中经过优化分析获得的叶片各部位的修正后的材料性能参数作为该全尺寸风力机叶片有限元数值模型的材料性能参数，由于步骤3中所建立的数值模型是严格按照等比例缩减的，两个模型的差别只是尺寸方面，在各部位的材料方面是一致的，因此步骤5中获得的修正后的材料性能参数，也是可以比较地准确描述全尺寸叶片的真实材料性能。

[0022] SS7. 根据实际所要分析的工况，对步骤6中的有限元数值模型施加相应的静态载荷进行静态计算，获得相应的各项静态结构参数，这些数据就可以比较准确地反应叶片的真实静态响应信息。

[0023] 优选的，采用该方法进行叶片静态参数性能评估，其前提在于依据全尺寸风力机叶片设计并制作等比例缩小的缩尺寸试验风力机叶片，并分别建立该缩尺寸试验风力机叶片与全尺寸风力机叶片的有限元数值分析模型。

[0024] 优选的，采用该方法进行叶片静态参数性能评估，应根据缩尺寸试验风力机叶片的试验结果与计算结果，建立以材料性能参数为优化变量，以试验与计算的静态结果数据之差最小化为优化目标的优化分析，以获得准确的材料性能，并将之应用到全尺寸风力机叶片的计算中。

[0025] 优选的，采用该方法进行叶片静态分析，所建立的缩尺寸试验风力机叶片与全尺寸风力机叶片的有限元数值分析模型，除结构尺寸不同外，其它模型数据以及计算方法应保持一致。

[0026] (三) 有益效果

[0027] 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：

[0028] 1) 与现有风力机叶片静态计算相比，由于材料性能得到修正，因此计算结果更为精确。

[0029] 2) 与现有采用全尺寸风力机叶片进行静态试验方法相比，该方法具有周期短、成本低、并能够获得大型叶片静态试验中不易获得的一些静态数据的优点。

[0030] 3) 该方法可利用现有国内外叶片静态检测设施,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

[0031] 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。

[0032] 本实施例中,以当前主流的 MW 级风力机叶片为例,采用以下步骤进行风力机叶片静态分析:

[0033] 1) 依据所要测试评估的某 MW 级风力机原型叶片结构特征,设计并制作一个结构尺寸等比例缩小的叶片,本例中缩小比例取为 5。原型全尺寸叶片全长 50 米,缩比后的叶片长度为 10 米。此缩小比例的确定,保证了测试模型较小,同时叶片各部位的材料性能不会由于铺层厚度过小而与原型全尺寸叶片发生大的改变。

[0034] 2) 对该缩尺寸叶片进行静态测试试验:将该缩尺寸叶片的叶根部位进行固定,并水平悬空放置。在叶片距叶根每间隔 1 米处的各截面表面,分别在叶片前缘、尾缘,压力面、吸力面,设置若干个应变片,用来进行结构应变测量。对该缩尺寸叶片进行静态测试,为综合考虑载荷方向的影响,在叶片端部挥舞方向与摆振方向各施加 100 牛顿的载荷分量。测出在这两个载荷的共同作用下,叶片各测量点的应变值,同时用皮尺测出距叶根每间隔 1 米的各截面处的变形值。

[0035] 3) 对该缩尺寸叶片,建立结构有限元数值模型,采用与 2) 中一致的载荷,进行静态数值计算,本例中采用 Nastran 有限元软件进行分析计算,在本次计算中,可依据设计单位所提供的材料数据进行,计算得到与 2) 中测点位置相同点处的应变值与变形值。

[0036] 4) 对比分析试验与计算的结果,比较试验与计算各位置处的应变与变形差异。

[0037] 5) 通过试验与计算的相关性分析,开展对叶片计算模型中材料性能的修正工作,具体如下:

[0038] (A) 将风电叶片的整体结构,根据各部位材料的不同,划分为几个部分,将各部分的材料性能作为分析变量。此时,由于相对原型全尺寸叶片尺寸缩小,会导致缩比叶片铺层厚度相对原型叶片有所减少,因此,在选择分析变量时,应有所注意。比如原型叶片某部位原有 20 层单向玻璃布和 30 层双向玻璃布铺层构成,缩小后的叶片可能由 4 层单向玻璃布和 6 层双向玻璃布铺层构成,此时在选择分析变量时,应将此处的单向玻璃布与双向玻璃布的材料性能均分别作为分析变量,并以此构成该部位的复合材料性能参数;

[0039] (B) 将叶片的静态试验与静态计算中各观测点的结构响应值的差值(实测变形量与计算变形量的差值,实测应变变量与计算应变变量的差值)作为目标变量;

[0040] (C) 根据 (A) (B) 中所设定的分析变量与目标变量,开展一个多目标变量的优化。本例中采用 Nastran 有限元软件的优化模块进行优化分析。计算得到符合目标的最优分析变量值;所获得的分析变量值,可以比较地准确描述叶片的真实材料性能。

[0041] 6) 建立原型全尺寸叶片的有限元结构模型,以 5) 中经过优化分析获得的各部位修正后的材料性能参数作为该原型叶片有限元结构模型的材料参数。

[0042] 7) 采用 Nastran 有限元软件对 6) 中的有限元模型进行静态计算,根据实际所要分析的工况,对 6) 中的有限元模型施加相应的静态载荷,通过计算,获得相应的各项结构相

应数据,这些数据就可以比较准确地反应叶片在该种工况下的结构响应信息。

[0043] 通过以上步骤的实施,完成了对该叶片静态参数性能的分析与评估。

[0044] 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。