



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103547898 B

(45)授权公告日 2017.03.08

(21)申请号 201180068782.7
 (22)申请日 2011.12.19
 (65)同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 103547898 A
 (43)申请公布日 2014.01.29
 (30)优先权数据
 10197350.1 2010.12.30 EP
 (85)PCT国际申请进入国家阶段日
 2013.08.30
 (86)PCT国际申请的申请数据
 PCT/EP2011/073248 2011.12.19
 (87)PCT国际申请的公布数据
 W02012/089545 EN 2012.07.05
 (73)专利权人 LM WP 专利控股有限公司
 地址 丹麦科灵
 (72)发明人 C. 斯科维拜
 (74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
 72001
 代理人 谭佐晞 谭祐祥

(51)Int.Cl.
 G01M 5/00(2006.01)
 (56)对比文件
 CA 2714852 A1,2010.10.24,
 CN 101321949 A,2008.12.10,
 CN 101672247 A,2010.03.17,
 CN 101460901 A,2009.06.17,
 WO 2010/040832 A1,2010.04.15,
 CN 201408112 Y,2010.02.17,
 US 7520176 B1,2009.04.21,
 US 2007/0098551 A1,2007.05.03,
 单晓亮.复速级涡轮机叶片强度分析.《中国制造业信息化》.2008,第37卷(第1期),第58-60、64页.
 贾玉梅.风力发电机叶轮叶片新技术的发展.《新技术新工艺》.2008,(第10期),第43-45页.

审查员 朱海业

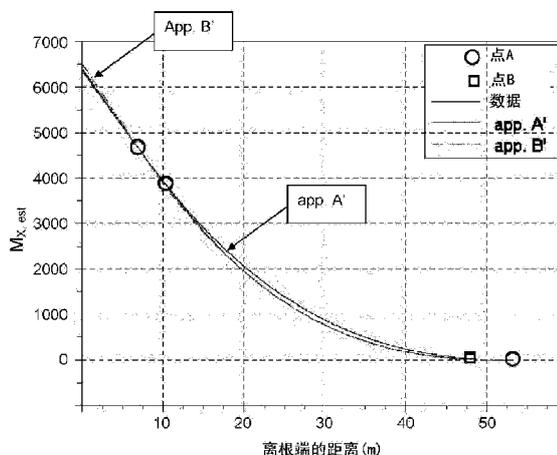
权利要求书2页 说明书20页 附图6页

(54)发明名称

用于确定风力涡轮机叶片的载荷的方法和装置

(57)摘要

用于监控风力涡轮机叶片(10)的弯曲力矩的方法和叶片监控系统。该方法包括获得第一传感器组信号,该第一传感器组信号表示沿着风力涡轮机叶片的纵向轴线在不同于末梢(14)端的第一传感器位置处的第一弯曲力矩,并且基于第一传感器组信号来估算沿着纵向轴线在第一估算位置处的弯曲力矩,其中沿着纵向轴线第一传感器位置不同于第一估算位置。该叶片监控系统包括处理单元和连接到处理单元的接口,该处理单元配置成执行该方法。



1. 一种用于估算风力涡轮机叶片的弯曲力矩的方法,所述风力涡轮机叶片沿着纵向轴线从根端延伸到末梢端,并且具有根部区域、过渡区域和翼面区域,所述方法包括下述步骤:

a1) 获得第一传感器组信号,所述第一传感器组信号表示沿着所述风力涡轮机叶片的所述纵向轴线在不同于所述末梢端的第一传感器位置处的第一弯曲力矩,以及

a2) 获得第二传感器组信号,所述第二传感器组信号表示沿着所述纵向轴线在第二传感器位置处的第二弯曲力矩,或假定所述末梢端处的弯曲力矩是零,

b) 基于所述第一传感器组信号来估算沿着所述纵向轴线在第一估算位置处的弯曲力矩,其中沿着所述纵向轴线所述第一传感器位置不同于所述第一估算位置,其特征在于

针对位于所述风力涡轮机叶片的所述根端处的所述第一估算位置,且通过将所述第一弯曲力矩及从步骤a2)获得的弯曲值和表示沿着叶片的所述纵向轴线的力矩分布的逼近函数进行比较,实施步骤b)中的估算。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,假定所述末梢端处的弯曲力矩为零,进一步实施步骤b)。

3. 根据权利要求1至2中任一项所述的方法,其中,在所述第一传感器位置和所述第一估算位置之间沿着所述纵向轴线的距离为至少1m。

4. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述第一传感器位置位于所述叶片的所述根部区域的外侧。

5. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述第一弯曲力矩具有关于垂直于所述纵向轴线的第二轴线的次要分量。

6. 根据权利要求1所述的方法,所述方法包括获得第二传感器组信号,所述第二传感器组信号表示沿着所述纵向轴线在第二传感器位置处的第二弯曲力矩,并且其中步骤b)进一步地基于所述第二传感器组信号。

7. 根据权利要求6所述的方法,其中,所述第二弯曲力矩具有关于垂直于所述纵向轴线的第二轴线的次要分量。

8. 根据权利要求1所述的方法,其中,估算弯曲力矩包括沿着所述纵向轴线在第一估算位置处,估算关于垂直于所述纵向轴线的第二轴线的次要分量。

9. 根据权利要求1所述的方法,其中,从所述末梢端到所述第一传感器位置通过使用第一逼近函数并且从所述第一传感器位置到所述第一估算位置通过使用第二逼近函数,来估算在所述第一估算位置处的弯曲力矩,并且其中所述第二逼近函数是基于所述第一逼近函数的。

10. 根据权利要求9所述的方法,其中,所述第一逼近函数从三次样条函数和多项式函数中选择,并且所述第二逼近函数为线性内插。

11. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述第一传感器位置位于所述风力涡轮机叶片的所述过渡区域或所述翼面区域中。

12. 根据权利要求1所述的方法,其中,步骤b)包括曲线拟合。

13. 根据权利要求1所述的方法,包括将估算出的弯曲力矩传输至控制系统。

14. 一种用于监控包括传感器系统的风力涡轮机叶片的叶片监控系统,所述叶片监控

系统包括处理单元和连接到所述处理单元的接口,所述处理单元配置成

- 接收第一传感器组信号以及可选地第二传感器组信号,所述第一传感器组信号表示沿着纵向轴线从根端延伸到末梢端的在风力涡轮机叶片的第一传感器位置处的第一弯曲力矩,所述第二传感器组信号表示沿着所述纵向轴线在第二传感器位置处的第二弯曲力矩,

- 基于所述第一传感器组信号并进一步基于第二弯曲力矩或假定在风力涡轮机叶片的末梢端处的弯曲力矩是零通过比较这些力矩和表示沿着叶片的所述纵向轴线的力矩分布的逼近函数来估算沿着所述纵向轴线在第一估算位置处的弯曲力矩,其中沿着所述纵向轴线所述第一传感器位置不同于所述第一估算位置。

15. 根据权利要求14所述的叶片监控系统,包括连接到所述处理单元的记忆单元,所述记忆单元配置成存储所述传感器系统的传感器系统参数,并且其中所述处理单元配置成基于存储在所述记忆单元中的传感器系统参数来估算弯曲力矩。

用于确定风力涡轮机叶片的载荷的方法和装置

技术领域

[0001] 本发明涉及一种风力涡轮机叶片,以及用于确定或估算诸如风力涡轮机叶片的弯曲力矩、尤其是位于风力涡轮机叶片的根端处或附近的根部力矩的载荷的方法和装置。

背景技术

[0002] 为了使年发电量最大化,风力涡轮机制造商一直致力于提高他们的风力涡轮机的效率。进一步地,因为研发新的风力涡轮机机型需要花费很长时间和很多资源,所以风力涡轮机制造商对于延长他们的风力涡轮机机型的寿命感兴趣。用于监控风力涡轮机和其部件(诸如风力涡轮叶片等)的运行参数的系统已成为日益受到关注的领域,以便优化性能和延长不同部件的寿命。

[0003] 因此,需要一种风力涡轮机叶片、能够精确和有效地监控风力涡轮机或风力涡轮机叶片的一个或多个运行参数的方法及装置。受到特别关注的领域可以是在风力涡轮机运行期间对施加在风力涡轮机叶片上的载荷和压力进行监控。

发明内容

[0004] 根据第一方面,本发明提供了一种用于估算风力涡轮机叶片的弯曲力矩的方法,风力涡轮机叶片沿着纵向轴线从根端延伸到末梢端,并且具有根部区域、过渡区域和翼面区域,该方法包括下述步骤:a)获得第一传感器组信号,第一传感器组信号表示沿着风力涡轮机叶片的纵向轴线在不同于末梢端的第一传感器位置处的第一弯曲力矩;以及b)基于第一传感器组信号来估算沿着纵向轴线在第一估算位置处的弯曲力矩,其中沿着纵向轴线第一传感器位置不同于第一估算位置,并且其中针对位于风力涡轮机叶片的根端处的第一估算位置,且通过比较第一弯曲力矩和表示沿着叶片的纵向轴线的力矩分布的逼近函数,实施步骤b)中的估算。

[0005] 通过将传感器布置在过渡区域或翼面区域中,传感器读取(reading)不会受到非线性的妨碍,该非线性是将传感器布置在叶片的根部区域中时由于叶片的根部区域与风力涡轮机叶片的轮毂相连接所固有的。相反,在根部处的力矩可以经由从离根部一定距离的传感器位置获得的逼近函数和/或曲线拟合(curve fitting)而计算出,这相比于在根部处实际实施的测量反而提供了对根部力矩的更好的估算。因此,第一传感器位置优选地还位于叶片的根部区域的外侧。

[0006] 然而,原则上,在沿着叶片的任何位置处的弯曲力矩都可以通过比较测量结果和逼近函数来实现。

[0007] 因此,根据第二和更广的方面,本发明提供一种用于估算风力涡轮机叶片(例如,如本文中公开的风力涡轮机叶片)的弯曲力矩的方法。该风力涡轮机叶片沿着纵向轴线从根端延伸到末梢端,并且具有根部区域、过渡区域和翼面区域,该方法包括下述步骤:获得第一传感器组信号,该第一传感器组信号表示沿着风力涡轮机叶片的纵向轴线在不同于末梢端的第一传感器位置处的第一弯曲力矩;并且基于第一传感器组信号来估算沿着纵向轴

线在第一估算位置处的弯曲力矩,其中沿着纵向轴线第一传感器位置不同于第一估算位置,并且其中通过比较第一弯曲力矩和逼近函数的估算,表示沿着叶片的纵向轴线的力矩分布。

[0008] 接下来讨论涉及第一方面和第二方面二者的有利的实施例。

[0009] 因此,本发明提供了一种风力涡轮机叶片,该风力涡轮机叶片沿着纵向轴线从根端到末梢端并且在垂直于纵向轴线的横平面(transverse plane)中延伸,该横平面具有延伸穿过弹性中心点的主轴线,风力涡轮机叶片包括形成成型轮廓的叶片壳体(shell),成型轮廓包含压力侧和吸力侧、以及具有翼弦的前缘和后缘,翼弦具有在前缘和后缘之间延伸的翼弦长度,主轴线平行于翼弦。风力涡轮机叶片可以包含传感器系统,该传感器系统包括例如用来测量第一弯曲力矩的在离根端第一距离处的第一传感器位置中的第一传感器组,第一传感器组包括用来测量主要分量的第一主要传感器和用来测量次要分量的第一次要传感器,其中在横平面中的第一主要传感器轴线沿由第一主要传感器和弹性中心点限定的方向定向,并且在横平面中的第一次要传感器轴线沿由第一次要传感器和弹性中心点限定的方向定向。第一主要传感器轴线和第一次要传感器轴线之间的角度可以介于从 50° 到 130° 的范围内。

[0010] 因此,根据本发明的风力涡轮机叶片允许在截面中仅以两个传感器来确定弯曲力矩,从而节约制造成本。

[0011] 还公开了一种风力涡轮机叶片,其沿着纵向轴线从根端到末梢端并且在垂直于纵向轴线的横平面中延伸,该横平面具有延伸穿过弹性中心点的主轴线,风力涡轮机叶片包括形成成型轮廓的叶片壳体,成型轮廓包含压力侧和吸力侧、以及具有翼弦的前缘和后缘,翼弦具有在前缘和后缘之间延伸的翼弦长度,设置有平行于翼弦的主轴线。该风力涡轮机叶片可以包括传感器系统,传感器系统包含多个传感器组,每个传感器组包括多个传感器,多个传感器包含分别用于测量主要分量和次要分量的主要传感器和次要传感器。多个传感器组包含:第一传感器组,用于测量离根端第一距离处的第一传感器位置中的第一弯曲力矩;以及第二传感器组,用于测量离根端第二距离处的在不同于第一传感器位置的第二传感器位置中的第二弯曲力矩。该第一距离可以是至少1m。该第二距离可以是至少3m。

[0012] 进一步地,公开了一种用于监控包括传感器系统的风力涡轮机叶片的叶片监控系统,叶片监控系统包括处理单元和连接到处理单元的接口。处理单元配置成接收第一传感器组信号,第一传感器组信号表示沿着纵向轴线从根端延伸到末梢端在风力涡轮机叶片的第一传感器位置处的第一弯曲力矩。处理单元配置成基于第一传感器组信号来估算沿着纵向轴线在第一估算位置处的弯曲力矩,其中沿着纵向轴线第一传感器位置不同于第一估算位置。

[0013] 还需要一种具有低损耗的光学传感器系统的风力涡轮机叶片。

[0014] 因此,提供一种风力涡轮机叶片,风力涡轮机叶片沿着纵向轴线从根端到末梢端并且在垂直于纵向轴线的横平面中延伸,该横平面具有延伸穿过弹性中心点的主轴线,风力涡轮机叶片包括形成成型轮廓的叶片壳体,成型轮廓包含压力侧和吸力侧、以及具有翼弦的前缘和后缘,翼弦具有在前缘和后缘之间延伸的翼弦长度,主轴线平行于翼弦。风力涡轮机叶片包括具有光径(optical path)的传感器系统,光径包括第一光学纤维、第二光学纤维,并且可选地包括跳接光学纤维(patch optical fiber),第一光学纤维包含具有第一

纤芯直径的第一纤芯,其中第一光学纤维从第一端延伸到第二端,并且包括至少一个传感器,第二光学纤维包含具有第二纤芯直径的第二纤芯,其中第二光学纤维从第一端延伸到第二端,并且包括至少一个传感器。跳接光学纤维包含具有跳接纤芯直径的跳接纤芯,其中跳接光学纤维从第一端延伸到第二端。跳接光学纤维可以连接第一光学纤维和第二光学纤维,并且第一纤芯直径可以和跳接纤芯直径相同。

[0015] 具有跳接光学纤维的传感器系统在设计风力涡轮机叶片时提供了高度的设计自由,并且提供了可易于适配的光学传感器系统,该光学传感器系统可在不同的可易于构造的配置和风力涡轮机叶片机型中使用。

[0016] 进一步地,因为传感器系统的组装不需要专业知识或工具,可促进风力涡轮机叶片的制造。

[0017] 进一步地,根据本发明的风力涡轮机叶片,允许在叶片壳体部件模制和组装后,对传感器系统进行简单的重新配置。

[0018] 风力涡轮机包括多个风力涡轮机叶片,多个风力涡轮机叶片包含如本文中描述的第一风力涡轮机叶片,其中风力涡轮机包括叶片监控系统,叶片监控系统配置为基于来自第一风力涡轮机叶片的传感器系统的传感器组信号来估算第一风力涡轮机叶片的弯曲力矩。

[0019] 本发明涉及一种例如用于具有基本上水平的转子轴的风力涡轮机的转子的风力涡轮机叶片,该转子包括轮毂,叶片在安装到轮毂上时,从轮毂基本上沿径向方向延伸,叶片沿着纵向轴线从根端到末梢端并且在垂直于纵向轴线的横平面中延伸,该横平面具有延伸穿过弹性中心点的主轴线。风力涡轮机叶片包括形成成型轮廓的叶片壳体,成型轮廓包含压力侧和吸力侧、以及具有翼弦的前缘和后缘,翼弦具有在前缘和后缘之间延伸的翼弦长度。该成型轮廓受到入射气流冲击时,产生升力。该成型轮廓分成:根部区域,其具有最接近根端的基本上圆形或椭圆形轮廓,其中根部直径为根端处的翼弦长度;翼面区域,其具有离根端最远的产生升力的轮廓;以及在根部区域和翼面区域之间的过渡区域,过渡区域具有从根部区域的圆形或椭圆形轮廓到翼面区域的产生升力的轮廓沿径向方向逐渐改变的轮廓,并且拥有肩部,肩部具有肩部宽度和肩部距离,并且位于过渡区域和翼面区域之间的边界处,其中叶片具有叶片长度。肩部指的是在风力涡轮机叶片具有其最大翼弦长度的位置,而肩部距离是从根端到肩部的距离。该长度区间被限定为从根端至末梢端,因此沿着纵向轴线,根端定位在 $r=0$ 处并且末梢端位于 $r=L$ 处。

[0020] 叶片可以包括具有壳体主体的叶片壳体。例如,该壳体主体可由压力侧壳体和吸力侧壳体组装在一起,压力侧壳体和吸力侧壳体在前缘附近和后缘附近互相粘附或结合。在另一个实施例中,该壳体经由一次成型处理(one-shot process)制成,例如经由封闭式中空模制方法(closed hollow molding method)。

[0021] 壳体主体可以包括纵向延伸的承载结构,例如主层压件(main laminate)。这样的承载结构或主层压件通常形成为纤维插入件,该纤维插入件包括多个纤维增强层,例如在20与50层之间。在承载结构的每一侧上,叶片通常包括夹层结构,该夹层结构具有诸如轻木或泡沫聚合物等芯部材料,并且具有由纤维增强聚合物制成的内壳板和外壳板。

[0022] 一个或多个传感器可以布置在主层压件中或者主层压件的边缘中,例如一个或多个传感器组的第一传感器轴线可以横穿主层压件或主层压件边缘。

[0023] 叶片壳体通常由纤维增强聚合物材料制成。该增强纤维可以例如是玻璃纤维、碳纤维、芳族聚酸胺纤维、诸如钢纤维的金属纤维、或者植物纤维；而该聚合物例如可以是环氧树脂、聚酯或乙烯基酯。

[0024] 风力涡轮机叶片包括传感器组，传感器组包括例如用来测量或确定弯曲力矩的至少一个传感器。传感器组可以替代地或结合地配置成测量其它参数。至少一个传感器组包含沿着纵向轴线定位在第一传感器位置处的第一传感器组。该第一传感器组可以定位在离根端第一距离 d_1 处。

[0025] 该风力涡轮机叶片可以包括多个传感器，多个传感器包含第一传感器组和沿着纵向轴线定位在第二传感器位置处的第二传感器组。第二传感器组可以定位在离根端第二距离 d_2 处。

[0026] 多个传感器组可以包含用于测量在离根端第三距离 d_3 处的第三传感器位置中的第三弯曲力矩的第三传感器组。

[0027] 多个传感器组可以包含用于测量在离根端第四距离 d_4 处的第四传感器位置中的第四弯曲力矩的第四传感器组。

[0028] 多个传感器组可以包含用于测量在离根端第五距离 d_5 处的第五传感器位置中的第五弯曲力矩的第五传感器组。

[0029] 第一距离 d_1 可以介于从大约1m到大约20m的范围内，并且第二距离 d_2 可以介于从大约3m到大约50m的范围内。

[0030] 可选地，离根端的传感器位置距离可以取决于风力涡轮机叶片的长度 L 和/或肩部距离或位置 d_s 。

[0031] 第一距离 d_1 可以在从 $d_{1,\min}$ 到 $d_{1,\max}$ 的范围内选择。第一距离 d_1 可以介于从大约4m到大约15m的范围内，诸如从大约6m到大约10m的范围内，优选地为大约8m。

[0032] 第一距离 d_1 可以取决于肩部距离 d_s ，即， d_1 可以是肩部距离 d_s 的函数。例如， d_1 可以通过以下给出：

$$[0033] \quad d_1 = \alpha_1 d_s,$$

[0034] 其中 α_1 介于从0.2到1.0的范围内。

[0035] 第一距离 d_1 可以取决于风力涡轮机叶片的长度，即， d_1 可以是叶片长度 L 的函数。例如， d_1 可以通过以下给出：

$$[0036] \quad d_1 = \beta_1 L,$$

[0037] 其中 β_1 介于从大约0.05到大约0.95的范围内。

[0038] 第一距离 d_1 可以取决于根部直径 d_{root} ，即， d_1 可以是根部直径 d_{root} 的函数。第一距离 d_1 可以至少是根部的直径。

[0039] 例如， d_1 可以通过以下给出：

$$[0040] \quad d_1 = \gamma_1 d_{\text{root}},$$

[0041] 其中 γ_1 为至少0.8。

[0042] 最小第一距离 $d_{1,\min}$ 可以取决于根部直径 d_{root} ，例如通过以下给出：

$$[0043] \quad d_{1,\min} = \gamma_1 d_{\text{root}},$$

[0044] 其中 γ_1 为至少0.8，诸如为大约1。

[0045] 最大第一距离 $d_{1,\max}$ 可以取决于肩部距离 d_s ，例如通过以下给出：

[0046] $d_{1,max}=\alpha_1d_s$,

[0047] 其中 α_1 介于从0.5到1.0的范围内。

[0048] 肩部距离 d_s 可以介于从11m到15m的范围内,例如,对于具有大约61.5m长度的风力涡轮机叶片,肩部距离 d_s 为大约13m。

[0049] 根部直径 d_{root} 可以介于从2m到5m的范围内,例如,对于具有从40m到50m长度的风力涡轮机叶片,根部直径 d_{root} 为大约2.5m;或者对于具有从60m到75m长度的风力涡轮机叶片,根部直径 d_{root} 为大约3.5m。

[0050] 第二距离 d_2 可以在从 $d_{2,min}$ 到 $d_{2,max}$ 的范围内选择。第二距离 d_2 可以介于从大约5m到大约40m的范围内,诸如从大约10m到大约30m的范围内,譬如大约12m或大约23m。

[0051] 第二距离 d_2 可以取决于肩部距离 d_s ,即, d_2 可以是肩部距离 d_s 的函数。例如, d_2 可以通过以下给出:

[0052] $d_2=\alpha_2d_s$,

[0053] 其中 α_2 介于从0.5到10.0的范围内。

[0054] 第二距离(d_2)可以取决于风力涡轮机叶片的长度,即, d_2 可以是叶片长度 L 的函数。例如, d_2 可以通过以下给出:

[0055] $d_2=\beta_2L$,

[0056] 其中 β_2 介于从0.1到0.8的范围内。

[0057] 第二距离 d_2 可以取决于根部直径 d_{root} ,即, d_2 可以是根部直径 d_{root} 的函数。例如, d_2 可以通过以下给出:

[0058] $d_2=\gamma_2d_{root}$,

[0059] 其中 γ_2 为至少0.8。

[0060] 最小第二距离 $d_{2,min}$ 可以取决于根部直径 d_{root} ,例如通过以下给出:

[0061] $d_{2,min}=\gamma_2d_{root}$,

[0062] 其中 γ_2 为至少0.8,诸如为大约2。

[0063] 最大第二距离 $d_{2,max}$ 可以取决于肩部距离 d_s ,例如通过以下给出:

[0064] $d_{2,max}=\alpha_2d_s$,

[0065] 其中 α_2 介于从0.5到3.0的范围内。

[0066] 传感器组离根端的距离 d_1 、 d_2 、 d_3 ……可以为至少6m,从而在传感器的测量中最小化或避免来自变桨轴承(pitch bearing)的不期望的非线性。

[0067] 在一个或多个实施例中,传感器组离根端的距离 d_1 、 d_2 、 d_3 ……可以小于25m,例如小于20m,以减小或避免在传感器的测量中过多的重叠误差。

[0068] 为了促进期望的测量,例如为了估算沿着风力涡轮机叶片的诸如在一个或多个估算位置中的弯曲力矩,对于沿着纵向轴线的传感器组之间的距离进行选择。传感器位置之间的距离以 d_{ij} 表示,其中 i 和 j 是针对传感器组及其传感器的标志数字。

[0069] 第一传感器组和可选的第二传感器组之间沿着纵向轴线的距离 d_{12} 可以介于从大约1m到大约30m的范围内,诸如从大约3m到大约20m,例如大约4m、大约10m、大约15m。

[0070] 第一传感器组和可选的第三传感器组之间沿着纵向轴线的距离 d_{13} 可以介于从大约1m到大约50m的范围内,诸如从大约10m到大约40m,例如大约15m、大约25m、大约35m。

[0071] 第一传感器组和可选的第四传感器组之间沿着纵向轴线的距离 d_{14} 可以介于从大

约1m到大约60m的范围内,诸如从大约15m到大约50m,例如大约20m、大约30m、大约40m。

[0072] 第一传感器组和可选的第五传感器组之间沿着纵向轴线的距离 d_{15} 可以介于从大约20m到大约 $L-d_1$ 的范围内,诸如从大约20m到大约60m,例如大约30m、大约40m、大约50m。

[0073] 传感器组可以包括一个或多个传感器。传感器组的一个或多个传感器可以包含主要传感器和可选的次要传感器。传感器组的(多个)传感器可适于测量弯曲力矩分量,即,传感器组可以包括用于测量关于垂直于纵向轴线的第二轴线的主要弯曲力矩分量 M_x 的主要传感器、和/或用于测量关于垂直于纵向轴线的第二轴线的次要弯曲力矩分量 M_y 的次要传感器。在一个或多个实施例中,传感器组由用于测量弯曲力矩分量的两个传感器组成,从而允许仅用两个传感器对风力涡轮机叶片进行弯曲力矩测量。

[0074] 风力涡轮机叶片包括在离根端第一距离处的第一传感器位置中的例如用于测量第一弯曲力矩的第一传感器组。

[0075] 第一传感器组可以包括:第一主要传感器,用于测量关于垂直于纵向轴线的第二轴线(第一主要传感器)的第一弯曲力矩的主要分量($M_{x,1}$);以及第一次要传感器,用于测量关于垂直于纵向轴线的第二轴线(第一次要传感器)的第一弯曲力矩的次要分量($M_{y,1}$)。

[0076] 第二传感器组可以包括:第二主要传感器,用于测量关于垂直于纵向轴线的第二轴线(第二主要传感器)的第二弯曲力矩的主要分量($M_{x,2}$);以及第二次要传感器,用于测量关于垂直于纵向轴线的第二轴线(第二次要传感器)的第二弯曲力矩的次要分量($M_{y,2}$)。

[0077] 传感器组的传感器定位在离根端相同的距离处,即,在相同的横平面内。在一个或多个实施例中,传感器组的传感器(例如主要传感器和次要传感器)可以沿着纵向轴线移动。传感器组的传感器之间沿着纵向轴线的距离应该尽可能得小。传感器组的传感器之间的最大距离可以小于1m,诸如小于0.5m。可以使用更大的距离。在传感器组的传感器被移动的情况下,该传感器组离根部的距离是传感器组中的传感器的平均距离。

[0078] 风力涡轮机叶片的长度 L 可为至少40m。

[0079] 从风力涡轮机的控制观点来看,风力涡轮机叶片的根部力矩是期望的,例如为了控制俯仰度(pitch)和其它运行参数以优化风力涡轮机的运行和功率输出。然而,用定位在叶片根端处的传感器测量根部力矩会受到来自变桨轴承的非线性力矩作用的很大影响。

[0080] 为了获得精确的测量及为了减小或消除诸如非线性影响等不期望的影响,在风力涡轮机叶片中适当(correct)定位传感器是重要的。从成本和制造的观点来看,期望使用数量较少的传感器。

[0081] 主要传感器定位在延伸穿过具有主要传感器的横平面中的弹性中心的主要传感器轴线上。次要传感器定位在延伸穿过具有次要传感器的横平面中的弹性中心的次要传感器轴线上。

[0082] 第一主要传感器轴线和第一次要传感器轴线之间的角度可介于从大约 85° 到大约 95° 的范围内。第一主要传感器轴线和第一次要传感器轴线之间的角度可以是大约 90° 。

[0083] 在垂直的第一和第二传感器轴线的情况下,第一弯曲力矩 M_1 可以作为以下给出:

[0084]
$$M_1 = \sqrt{M_{x,1}^2 + M_{y,1}^2}。$$

[0085] 例如在根端处的第一估算位置处的弯曲力矩的估算出的主要分量 $M_{x,est,1}$,可以作

为一个或多个传感器信号 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 、 S_{22} ……的函数而给出,其中 S_{11} 是第一主要传感器信号, S_{12} 是第一次要传感器信号, S_{21} 是第二主要传感器信号, S_{22} 是第二次要传感器信号等等。

[0086] 例如在根端处的第一估算位置处的弯曲力矩的估算出的次要分量 $M_{Y,est,1}$,可以作为一个或多个传感器信号 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 、 S_{22} ……的函数而给出,其中 S_{11} 是第一主要传感器信号, S_{12} 是第一次要传感器信号, S_{21} 是第二主要传感器信号, S_{22} 是第二次要传感器信号等等。

[0087] 传感器信号可以以时间和/或以频率/波长的方式多路传输。为了减少读取单元中的部件数量和减小传感系统的成本,时间多路传输可为优选的。

[0088] 在第一估算位置处的弯曲力矩的估算出的主要分量 $M_{x,est,1}$ 可以仅基于来自一个或多个传感器组中的主要传感器的主要传感器信号来估算。在第一估算位置处的弯曲力矩的估算出的次要分量 $M_{y,est,1}$ 可以仅基于来自一个或多个传感器组中的次要传感器的次要传感器信号来估算。附加地或替代地, $M_{x,est,1}$ 可以基于来自一个或多个传感器组中的次要传感器的次要传感器信号来估算,并且/或者 $M_{y,est,1}$ 可以基于来自一个或多个传感器组中的主要传感器的主要传感器信号来估算。

[0089] 在第一估算位置处的弯曲力矩 $M_{est,1}$ 可以作为以下估算出或给出:

$$[0090] \quad M_{est,1} = \sqrt{M_{x,est,1}^2 + M_{y,est,1}^2}.$$

[0091] 在第一估算位置处的弯曲力矩 $M_{est,1}$ 可以作为以下估算出或给出:

$$[0092] \quad M_{est,1} = \sqrt{\alpha_x M_{x,est,1}^2 + \beta_y M_{y,est,1}^2}$$

[0093] 其中 α_x 和 β_y 是用于对不垂直的第一轴线和第二轴线进行补偿的补偿系数。

[0094] 风力涡轮机叶片可以包括在离根端第二距离处的第二传感器位置中的例如用于测量第二弯曲力矩的第二传感器组。该传感器组可以包括用于测量主要分量的第二主要传感器和用于测量次要分量的第二次要传感器,其中在横平面中的第二主要传感器轴线沿由第二主要传感器和弹性中心点限定的方向定向,并且在横平面中的第二次要传感器轴线沿由第二次要传感器和弹性中心点限定的方向定向。第二主要传感器轴线和第二次要传感器轴线之间的角度可以介于从 50° 到 130° 的范围内,诸如从 85° 到 95° 的范围内。第一主要传感器轴线和第一次要传感器轴线之间的角度可以是大约 90° 。

[0095] (多个)主要传感器(例如第一主要传感器和/或第二主要传感器)可以例如布置在叶片的压力侧或吸力侧处,有利地在承载结构处或嵌入承载结构中,承载结构诸如为叶片壳体结构的主层压件。

[0096] (多个)次要传感器(例如第一次要传感器和/或第二次要传感器)可以例如布置在风力涡轮机叶片的前缘或后缘处。

[0097] 将主要传感器和次要传感器分别定位在压力侧上和前缘处,可以促进应变式传感器(strain gauge sensor)的使用。一个或多个传感器(诸如主要传感器和/或次要传感器)可以是应变式传感器。

[0098] 一个或多个传感器(诸如主要传感器和/或次要传感器)可以是光学传感器,诸如光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating)。

[0099] 传感器中的至少一个可以嵌入叶片壳体中。一个或多个传感器可以附接到或安装在叶片壳体的内表面上。风力涡轮机叶片可以包括附接到壳体的梁,并且在这种情况下,传感器中的至少一个可安装在梁上。一个或多个传感器可以安装在壳体主体的主层压件上或嵌入壳体主体的主层压件中。

[0100] 风力涡轮机叶片可以包括附接到壳体的腹板(web),并且传感器中的至少一个可以安装在腹板上。

[0101] 一个或多个传感器组(例如,第一传感器组,和/或第二传感器组)可以布置在风力涡轮机叶片的根部区域、过渡区域或翼面区域中。

[0102] 风力涡轮机叶片的传感器提供表示弯曲力矩的传感器信号,例如呈表示施加在传感器上的应变/压力的应变/压力信号的形式。传感器的应变/压力信号可以通过使用例如在风力涡轮机叶片校准和/或设计期间确定的传感器系统参数而转换为弯曲力矩或其分量。

[0103] 表示弯曲力矩的传感器信号可以是来自光学纤维中的例如光纤布拉格光栅的光学传感器的光学信号,其中传感器信号是具有取决于施加在传感器上的应变的波长的反射光。传感器信号可以被反馈至读取单元,该读取单元例如定位在风力涡轮机叶片中或风力涡轮机的轮毂中。读取单元可以配置为确定或得出一个或多个传感器信号的波长,并且将(多个)传感器信号的(多个)波长提供给叶片监控系统中的处理单元。读取单元可以是可连接到传感器系统和叶片监控系统的独立装置,用于接收传感器信号并且将经过处理的传感器信号发送到叶片监控系统。在一个或多个实施例中,读取单元可以嵌入叶片监控系统中,即,叶片监控系统包括读取单元,并且经由接口的一个或多个传感器端口是可连接到传感器系统的。

[0104] 在其中传感器在光学纤维中实施为光纤布拉格光栅的一个或多个实施例中,传感器信号是具有波长 λ_{11} (第一主要传感器)、 λ_{12} (第一次要传感器)、 λ_{21} (第二主要传感器)、 λ_{22} (第二次要传感器)…… λ_{ij} 的光学信号,其中i和j是用于传感器组及其传感器的标志数字。传感器信号可以以时间和/或频率/波长的形式多路输出。施加在传感器上的应变和/或压力可以从传感器信号的波长得到。处理单元可以配置为例如基于存储在记忆单元中的传感器系统参数,从传感器信号得到弯曲力矩和/或弯曲力矩分量。

[0105] 对于具有包含第二光学纤维和跳接光学纤维的光学传感器系统的风力涡轮机,第二纤芯直径可以是相同的。传感器系统中的光径可以具有相同的直径,即该系统中的不同光学纤维可以具有相同的纤芯直径或模场直径。

[0106] 第一光学纤维可以包括分别用于表示在离风力涡轮机叶片的根端第一距离处的应变和可选地在离风力涡轮机叶片的根端第二距离处的应变的第一主要传感器和可选的第二主要传感器。

[0107] 第二光学纤维可以包括分别用于表示在离风力涡轮机叶片的根端第一距离处的应变和可选地在离风力涡轮机叶片的根端第二距离处的应变的第一次要传感器和可选的第二次要传感器。

[0108] 标准跳接光学纤维具有9 μm 的纤芯直径。传感纤维通常具有小于7 μm 的纤芯直径。在第一光学纤维和跳接光学纤维中具有相同的纤芯直径提供了具有低衰减(low damping)的光径,并且因此提供了具有低损耗的传感器系统。为了满足来自读取单元对传感器系统

的要求、或为了减小对读取单元的要求,可以提供具有低损耗的例如小于3.5dB的光学传感器系统。

[0109] 传感器系统可以包括多个具有相同跳接纤芯直径的跳接光学纤维。

[0110] 传感器系统可以包括很多光学纤维,每一个光学纤维包括一个或多个传感器,其包含第三光学纤维和/或第四光学纤维。第三光学纤维可定位成平行于和邻近风力涡轮机叶片中的第一光学纤维,并且/或者第四光学纤维可定位成平行于和邻近风力涡轮机叶片中的第二光学纤维。超过两个的具有传感器的光学纤维可以允许对传感器系统进行简单修复。例如,如果第一光学纤维断裂,将跳接光学纤维简单连接到第三光学纤维,并且叶片监控系统配置为基于来自第二和第三光学纤维中的传感器的传感器信号来估算弯曲力矩,而不是基于来自第一和第二光学纤维中的传感器的传感器信号来估算弯曲力矩。

[0111] 将一个或多个具有相同纤芯直径的跳接线缆设置为具有(多个)传感器的光学纤维,促使叶片设计者具有高度自由。

[0112] 具有例如小于 $7\mu\text{m}$ 的相对较小的纤芯直径的光学纤维,可以优选用于在其中低弯曲诱发损耗(bend-induced loss)可为重要的风力涡轮机叶片中进行传感。因为为了促进某些类型的光纤布拉格光栅(FBG)的制作,高光敏性是可期望的,可以使用 $4.2\mu\text{m}$ 的纤芯直径。

[0113] 因此,第一纤芯直径、第二纤芯直径和/或跳接纤芯直径可以小于 $7\mu\text{m}$,诸如 $6.4\mu\text{m}$ 、 $5.3\mu\text{m}$ 或 $4.2\mu\text{m}$ 。

[0114] 第一和/或第二光学纤维可以是具有1550nm的设计波长的(多个)单模纤维。

[0115] (多个)跳接光学纤维可以是具有1550nm的设计波长的(多个)单模纤维。

[0116] 在一个或多个实施例中,第一和第二光学纤维以及跳接光学纤维是具有 $6.4\mu\text{m}$ 的MFD和 $80\mu\text{m}$ 外径的光学纤维。

[0117] 在一个或多个实施例中,第一和第二光学纤维以及跳接光学纤维是具有 $4.2\mu\text{m}$ 的MFD和 $125\mu\text{m}$ 外径的光学纤维。

[0118] 光学纤维可以具有介于从1350到1500nm范围内的截止波长。

[0119] 光学纤维可以是SM1500(4.2/125)光学纤维。

[0120] 传感器系统的传感器之间的距离沿着传感器系统的光径可以是至少3m。具体地,为了能够在沿着风力涡轮机的纵向轴线的距离处实现传感,第一主要传感器和第二主要传感器之间沿着第一光学纤维的距离可以是至少3m,例如,至少5m、至少8m。第一次要传感器和第二次要传感器之间的距离沿着第二光学纤维可以是至少3m,例如至少5m、至少8m。

[0121] 至少3m的传感器之间的距离促进了传感器信号的时间多路传输。对光学纤维中传感器之间的距离进行选择,以将传感器布置在风力涡轮机叶片中的期望位置中。

[0122] 第一光学纤维和第二光学纤维可以主要地或至少部分地嵌入叶片壳体中。优选地,第一光学纤维和/或第二光学纤维的一端或多端设置有用于耦合或连接到跳接光学纤维、读取单元或其它具有传感器的光学纤维的连接部。(多个)连接部可以嵌入或容纳在安装在叶片壳体上或模制进叶片壳体中的一个或多个连接器盒中,从而允许对一个或多个跳接光学纤维进行简单安装。在光学纤维端部处的连接部提供了光学纤维的纤维纤芯的光学耦合。

[0123] 第一光学纤维和第二光学纤维可以至少部分地粘附或安装到叶片壳体上。

[0124] 该风力涡轮机叶片可以包括读取单元,读取单元包括至少一个传感器端口,该至少一个传感器端口包含用于将例如第一光学纤维的传感器系统光学地(optically)耦合到读取单元的第一传感器端口。该读取单元可以配置成读取如以上描述的传感器系统中的光学传感器的传感器信号。该读取单元可以配置为得到表示在风力涡轮机叶片中的传感器系统的传感器上的应变的多个传感器信号。

[0125] 该读取单元可以包括第二传感器端口,例如使得第二光学纤维的第二端可以光学地耦合到第二传感器端口,用于读取传感器系统中的光学传感器的传感器信号。这种配置与第一光学纤维的第二端和第二光学纤维的第一端的光学耦合相结合,能够实现对传感器的监控,即使在由第一光学纤维和第二光学纤维形成的光径中的单个点处有损坏的情况下也是如此。

[0126] 温度可以影响传感器的运行和特性,即,来自光学传感器的传感器信号可取决于温度。可期望对温度不敏感的弯曲力矩的确定方式。

[0127] 因此,传感器系统可以包括在第一光学纤维中的第一温度传感器和/或在第二光学纤维中的第二温度传感器。光学纤维的光纤布拉格光栅(FBG)可以布置在风力涡轮机叶片中,使得应变或压力方面的变化未施加在FBG上。由此,FBG可以作用为温度传感器。

[0128] 第一光学纤维的第一纤芯直径可以等于第二光学纤维的第二纤芯直径。

[0129] 传感器系统可以包括具有第一、第二和第三端口的光束分离/结合单元,其中第一端口光学地耦合到第一光学纤维的第一端,并且第二端口光学地耦合到第二光学纤维的第二端,使得来自第一光学纤维的传感器信号与来自第二光学纤维的传感器信号在连接到读取单元的第三端口上结合。

[0130] 处理单元可以配置为对温度变化进行补偿,即,弯曲力矩的估算可以包括将补偿系数应用于传感器信号,补偿系数是基于来自第一温度传感器和/或第二温度传感器的一个或多个温度信号。

[0131] 为了减少或消除雷击的破坏,光学传感器是优选的。

[0132] 第一光学纤维可以包括第一端连接器部和/或第二端连接器部,用于分别将第一端和第二端连接到读取单元、叶片监控系统和其它光学纤维。

[0133] 第二光学纤维可以包括第一端连接器部和/或第二端连接器部,用于分别将第一端和第二端连接到读取单元、叶片监控系统和其它光学纤维。

[0134] 连接器部可以是E2000连接器。

[0135] 在用于估算风力涡轮机叶片的弯曲力矩的方法中,假定在风力涡轮机叶片的末梢端处的弯曲力矩是零,可以实施对第一估算位置处的弯曲力矩的估算。

[0136] 在第一传感器位置和第一估算位置之间沿着纵向轴线的距离可以是至少1m,诸如至少3m,优选地介于从3m到大约12m的范围内。

[0137] 在风力涡轮机的运行期间,从涡轮机控制角度来看,关于风力涡轮机叶片上的载荷的信息可能是受到关注的。因此,关于风力涡轮机叶片的根部力矩的信息可能是期望的参数。第一估算位置可以是沿着纵向轴线的任何位置,诸如在风力涡轮机叶片的根端处。

[0138] 第一弯曲力矩可以具有关于垂直于纵向轴线的第二轴线的次要分量。

[0139] 该方法可以包括获得表示沿着纵向轴线在第二传感器位置处的第二弯曲力矩的

第二传感器组信号,并且可以基于第二传感器组信号来估算在第一估算位置处的弯曲力矩。

[0140] 在该方法中,第一传感器位置和第二传感器位置之间沿着纵向轴线的距离可以是至少1m。

[0141] 第二弯曲力矩可以具有关于垂直于纵向轴线的第二轴线的次要分量和关于垂直于纵向轴线的第二轴线的次要分量。

[0142] 第一轴线和第二轴线可以是垂直的或形成角度,例如最小的角度可以介于从75°到大约90°的范围内。

[0143] 第一轴线可以垂直于主要传感器轴线。第二轴线可以垂直于次要传感器轴线。

[0144] 在该方法及叶片监控系统中,估算弯曲力矩可包括沿着纵向轴线在第一估算位置和/或第二估算位置处,估算关于垂直于纵向轴线的第二轴线的次要分量 $M_{x,est}$ 和/或关于垂直于纵向轴线的第二轴线的次要分量 $M_{y,est}$ 。估算弯曲力矩可以包括曲线拟合。

[0145] 在该方法中并且在该叶片监控系统中,从末梢端到第一传感器位置通过使用第一逼近函数并且从第一传感器位置到第一估算位置通过使用第二逼近函数,可以对第一估算位置处的弯曲力矩 $M_{est,1}$ 或其分量 $M_{x,est,1}$ 和/或 $M_{y,est,1}$ 进行估算。第二逼近函数可以基于第一逼近函数。不同的逼近函数可以被应用于主要和次要分量,即,第一和第二主要逼近函数可以被应用于主要分量,并且第一和第二次要逼近函数可以被应用于次要分量。

[0146] 第一逼近函数可以从三次样条函数和多项式函数中选择。多项式函数可以是第一阶、第二阶、第三阶、第四阶或更高阶多项式函数。第二逼近函数可以是线性内插(Linear interpolation)。

[0147] 第一传感器位置可以位于风力涡轮机叶片的过渡区域或翼面区域中。

[0148] 该方法可以包括将估算出的弯曲力矩或其分量传输至风力涡轮机的控制系统,例如叶片监控系统、俯仰度控制系统、风力涡轮机控制器、风场控制器(wind park controller)、报警系统等。

[0149] 该叶片监控系统可以配置成执行在本文中所描述的方法的一个或多个部分或步骤。该叶片监控系统能够确定和估算施加在例如在风力涡轮机运行期间的风力涡轮机的一个或多个风力涡轮机叶片上的弯曲力矩或其分量。因此,该发明允许风力涡轮机的控制系统调整诸如俯仰角(pitch angle)等运行参数,以优化风力涡轮机和风力涡轮机叶片的功率输出及寿命。

[0150] 该叶片监控系统可以包括连接到处理单元的记忆单元,该记忆单元配置成存储传感器系统的传感器系统参数。该处理单元可以配置成基于存储于记忆单元中的传感器系统参数(例如,在风力涡轮机叶片的校准或制造期间得到的传感器系统参数)来估算弯曲力矩。

附图说明

[0151] 参照附图通过以下对本发明示例性实施例的详细描述,本发明的上述和其它特征及优点对于本领域技术人员来说将变得显而易见,其中:

[0152] 图1 图示了风力涡轮机,

[0153] 图2 图示了风力涡轮机叶片,

- [0154] 图3 是风力涡轮机叶片的截面图，
[0155] 图4 图示了风力涡轮机叶片的不同视图，
[0156] 图5 是根据本发明的示例性方法的流程图，
[0157] 图6 图示了风力涡轮机叶片的截面，
[0158] 图7 图示了风力涡轮机叶片的截面，
[0159] 图8 图示了风力涡轮机叶片的截面，
[0160] 图9 图示了风力涡轮机叶片的截面，
[0161] 图10 图示了风力涡轮机叶片的截面，
[0162] 图11 图示了根据本发明的具有传感器系统的风力涡轮机叶片，
[0163] 图12 示意性地图示了第一光学纤维和跳接光学纤维，
[0164] 图13 图示了叶片监控系统，
[0165] 图14 图示了叶片监控系统，以及
[0166] 图15 图示了用曲线拟合估算出的弯曲力矩。

具体实施方式

[0167] 为了清楚起见，图是示意性的和经简化的，而且这些图仅示出了对于理解本发明必不可少的细节，同时将其它细节省去。自始至终，相同的参考标号用于同样或对应的部件。

[0168] 图1 图示了根据所谓“丹麦概念(Danish concept)”的常规的现代逆风风力涡轮机，其具有塔架4、机舱6 以及具有基本上水平的转子轴的转子。转子包含轮毂8 和从轮毂8 径向延伸的三个叶片10，每个叶片具有离轮毂最近的叶片根部16 和离轮毂8 最远的叶片末梢14。转子具有以R标注的半径。

[0169] 图2 示出了根据本发明的风力涡轮机叶片10 的第一实施例的示意图。风力涡轮机叶片10 具有常规的风力涡轮机叶片的形状，并且包括离轮毂最近的根部区域30、离轮毂最远的成型或翼面区域34、以及在根部区域30与翼面区域34之间的过渡区域32。叶片10包括当叶片安装在轮毂上时面向叶片10 的旋转方向的前缘18、以及面向前缘18的相反方向的后缘20。

[0170] 翼面区域34(也称为成型区域)具有就产生升力而言理想的或几乎理想的叶片形状，而根部区域30 由于结构上得考虑而具有基本上圆形或椭圆形的截面，例如，这使得将叶片10 安装到轮毂更容易且更安全。根部区域30的直径(或翼弦)沿整个根部区域30可以是恒定的。过渡区域32具有过渡轮廓，过渡轮廓逐渐从根部区域30的圆形或椭圆形形状变成翼面区域34的翼面轮廓。过渡区域32 的翼弦长度通常随着离轮毂的距离 r 的增大而增大。翼面区域34 具有翼面轮廓，翼面轮廓具有在叶片10 的前缘18 与后缘20 之间延伸的翼弦。翼面区域中的翼弦的宽度随着离轮毂的距离 r 的增大而减小。

[0171] 叶片10的肩部40被限定为其中叶片10具有其最大翼弦长度的位置。肩部40通常设置在过渡区域32和翼面区域34之间的边界处。

[0172] 叶片10沿着叶片的纵向轴线具有不同的翼面轮廓41、42、43、44、45、46。

[0173] 如图4中所图示，风力涡轮机叶片10包括至少一个传感器组，该至少一个传感器组包含沿着纵向轴线定位在第一位置处的第一传感器组。第一传感器组包括第一主要传感器

47A并且可选地包括第一次要传感器47B,其定位在离根端第一距离 d_1 处。传感器47A和传感器47B可以沿着纵向方向移动距离 $d_{1,12}$ 。距离 $d_{1,12}$ 可以是小于1m。

[0174] 可选地,风力涡轮机叶片10包括沿着纵向轴线定位在第二位置处的第二传感器组。第二传感器组包括第二主要传感器48A并且可选地包括第二次要传感器48B,其定位在离根端第二距离 d_2 处。传感器48A和传感器48B可以沿着纵向方向移动距离 $d_{2,12}$ 。距离 $d_{2,12}$ 可以是小于1m。

[0175] 在风力涡轮机叶片10中,传感器为嵌入风力涡轮机叶片的壳体中的、呈具有光纤布拉格光栅的光学纤维的形式的光学传感器。风力涡轮机叶片的传感器可以是相同光学纤维的一部分,和/或由一个或多个光学连接器耦合的不同光学纤维区段中的一部分。

[0176] 应当注意的是,叶片的不同区段的翼弦通常不在共同的平面内,这是由于叶片可以扭曲和/或弄弯(即预弯曲),从而为翼弦平面提供了相应的被扭曲和/或弄弯的路径,这是最通常的情况以便补偿叶片的局部速度,该叶片的局部速度取决于离轮毂的半径。

[0177] 以下表1图示了传感器位置(离根端的距离)的不同的合适的组合,可选地取决于风力涡轮机叶片的长度。

[0178]

d_1/m	d_2/m	d_3/m	d_4/m	d_5/m	L/m
2-L	3-L	10-L	20-L	30-L	≥ 40
2-20	3-40	10-45			
4-15	5-30				
4-10	10-30				
6-10	10-15	15-20			
5	10				
8	12	23	40	50	≥ 60
$1.5 \cdot d_{root}$	$0.9 \cdot d_c$				
8	$d_1 + d_{12}$				
8	12				
8	23	40			

表 1. 传感器位置。*如果存在

[0179] 传感器位置的配置可以取决于可用的传感器组的数量和(多个)估算位置。接近根端的传感器位置可以是期望的,然而因为受到来自变桨轴承的影响或噪音,过于接近根端的传感器位置是不期望的。

[0180] 图3和图4描绘了可以用来解释根据本发明的风力涡轮机叶片的几何结构的参数。

[0181] 图3 示出了用许多不同参数描绘的风力涡轮机的典型叶片的翼面轮廓50 的示意图,这些参数通常用于限定翼面的几何形状。翼面轮廓50 具有压力侧52 和吸力侧54,它们在使用期间——即在转子旋转期间——通常分别面朝向迎风(或逆风)侧和背风(或顺风)侧。翼面50具有翼弦60,翼弦60具有在叶片的前缘56 与后缘58 之间延伸的翼弦长度c。翼面50 具有厚度t,其被限定为压力侧52 与吸力侧54 之间的距离。翼面的厚度t 沿翼弦60 变化。由弧线(camber line)62 给出了对称轮廓的偏离,弧线62 为穿过翼面轮廓50 的中线。通过从前缘56 到后缘58 画出的内切圆可找到该中线。该中线依循这些内切圆的中心,并且与翼弦60 的偏离或距离被称为弧高f。通过使用称为上弧(或吸力侧弧)和下弧(或压

力侧弧)的参数也能限定不对称,这些参数被分别地限定为从翼弦60 到压力侧54 及吸力侧52 的距离。

[0182] 通常翼面轮廓的特点在于下列参数:翼弦长度 c ;最大弧高 f ;最大弧高 f 的位置 d_f ;最大翼面厚度 t ,该翼面厚度为沿着中弧线62的内切圆的最大直径;最大厚度 t 的位置 d_t ;以及翼尖(nose)半径(未示出)。这些参数通常限定为与翼弦长度 c 的比率。因此,局部相对叶片厚度 t/c 作为局部最大厚度 t 与局部翼弦长度 c 之间的比率给出。进一步地,最大压力侧弧高的位置 d_p 可以作为设计参数使用,而且最大吸力侧弧高的位置当然也可以作为设计参数使用。

[0183] 图4示出了叶片的其它几何参数。叶片具有叶片总长 L 。如图3中所示出的,根端位于 $r=0$ 的位置处,并且末梢端位于 $r=L$ 的位置处。叶片的肩部40位于 $r=d_s$ 的位置处,并具有等于在肩部40处的翼弦长度的肩部宽度 W 。根部的直径被限定为 d_{root} 。叶片在过渡区域中的后缘的曲率可以通过两个参数来限定,即最小外曲率半径 r_o 和最小内曲率半径 r_i ,它们分别被限定为从外侧(或从后缘后方)看时后缘的最小曲率半径,以及从内侧(或从后缘前方)看时的最小曲率半径。进一步地,叶片设置有限定为 Δy 的预弯曲,其对应于与从叶片的俯仰轴(pitch axis)22超出的平面偏转度(plane deflection)。

[0184] 图5图示了根据本发明的示例性方法。该方法100包括:102获得第一传感器组信号,该第一传感器组信号表示沿着风力涡轮机叶片的纵向轴线在第一传感器位置处的第一弯曲力矩。进一步地,方法100包括:104基于第一传感器组信号估算沿着纵向轴线在第一估算位置处的弯曲力矩,其中沿着纵向轴线第一传感器位置不同于第一估算位置。该方法可在如本文中所描述的风力涡轮机叶片中使用。可选地,方法100包括:106获得第二传感器组信号,该第二传感器组信号表示沿着纵向轴线在第二传感器位置处的第二弯曲力矩;以及104基于第二传感器组信号估算弯曲力矩。传感器信号可以以串联和/或并联的方式获得。

[0185] 第一传感器组信号包括来自第一主要传感器(47A)的第一主要传感器信号和来自第一次要传感器(47B)的第一次要传感器信号。第一主要传感器信号表示第一弯曲力矩的主要分量 $M_{x,1}$,并且第一次要传感器信号表示第一弯曲力矩的次要分量 $M_{y,1}$ 。

[0186] 图6和图7为图示了定位在风力涡轮机叶片上的传感器组的示例的截面图。

[0187] 在图6中,风力涡轮机叶片10'包括具有在离根部第一距离 d_1 处的第一主要传感器47A和第二主要传感器47B的第一传感器组。第一主要传感器47A位于延伸穿过叶片截面(在第一距离 d_1 处的横平面)的弹性中心70的第一主要传感器轴线74上。第一次要传感器47B位于延伸穿过叶片截面的弹性中心70的第一次要传感器轴线76上。在图6中,弹性中心位于翼弦60上,并且因此主轴线72与翼弦60重合。两个传感器轴线74和76之间的角度 α_1 为 90° 。主轴线72和第一主要传感器轴线74之间的角度 β_1 为 90° 。

[0188] 在图7中,风力涡轮机叶片10''包括具有在离根部第一距离 d_1 处的第一主要传感器47A和第二主要传感器47B的第一传感器组。第一主要传感器47A位于延伸穿过叶片截面(在第一距离 d_1 处的横平面)的弹性中心70的第一主要传感器轴线74上。第一次要传感器47B位于延伸穿过叶片截面的弹性中心70的第一次要传感器轴线76上。在图7中,弹性中心位于翼弦60上,并且因此主轴线72与翼弦60重合。两个传感器轴线74和76之间的角度 α_1 为 90° 。主轴线72和第一主要传感器轴线74之间的角度 β_1 为 75° 。

[0189] 在图6和图7中,传感器嵌入风力涡轮机叶片的壳体主体78中。

[0190] 图8为图示了定位在风力涡轮机叶片上的传感器组的示例的截面图。风力涡轮机叶片10'''包括附接到壳体主体78的梁80,并且第二主要传感器47B在最接近前缘56处附接到梁80。

[0191] 图9为图示了定位在风力涡轮机叶片上在第一距离 d_1 处的第一传感器组的示例的截面图。风力涡轮机叶片包括壳体主体78,并且传感器47A、47B安装在壳体主体78的内表面上。传感器轴线74和76之间的角度 α_1 为 90° 。

[0192] 图10为图示了定位在风力涡轮机叶片上在第二距离 d_2 处的第二传感器组的示例的截面图。风力涡轮机叶片包括壳体主体78,并且传感器48A、48B安装在壳体主体78的内表面上。传感器轴线74和76之间的角度 α_2 为 90° 。

[0193] 图11图示了风力涡轮机的一部分。风力涡轮机包括轮毂8,叶片(示出了关于叶片的第一风力涡轮机叶片10)在安装到轮毂8后,从轮毂8基本上沿径向方向延伸。风力涡轮机叶片10包括具有光径的传感器系统82,光径包括第一光学纤维84、第二光学纤维86以及跳接光学纤维88。光学连接器90使第一光学纤维84和跳接光学纤维88耦合,并且光学连接器90'使第二光学纤维86耦合到跳接光学纤维88。光学纤维84、86、88为SM1500(4.2/125)纤维。第一光学纤维包括呈光纤布拉格光栅形式的第一主要传感器47A和第二主要传感器48A,并且可选地包括第一温度传感器98A。第二光学纤维包括呈光纤布拉格光栅形式的第一次要传感器47B和第二次要传感器48B,并且可选地包括第二温度传感器98B。第一光学纤维84的第一端85耦合到读取单元92,用于从传感器系统82读取传感器信号。读取单元92经由数据线缆96将传感器信号的波长值提供给叶片监控系统94。叶片监控系统配置成基于传感器信号而估算在风力涡轮机叶片根端处的弯曲力矩的分量,并且配置成将估算出的弯曲力矩传输至涡轮机控制器(未示出)。第一光学连接器84的第二端85'光学地耦合到连接器或连接器组件90中的跳接光学纤维88的第一端89。跳接光学纤维88的第二端89'光学地耦合到连接器或连接器组件90'中的第二光学纤维86的第一端87。

[0194] 图12示意性地图示了在第一光学纤维84和跳接纤维88之间的光学连接器或连接器组件90。第一光学纤维84包括具有第一纤芯直径 $d_{core,1}$ 的第一纤芯130。跳接光学纤维88包括具有跳接纤芯直径 $d_{core,p} = d_{core,1} = 4.2\mu\text{m}$ 的跳接纤芯132。纤维包层材料和板134、136保护纤芯130、131、132。第一光学纤维84包括在第一端(未示出)处的第一端连接器部和在第二端85'处的第二端连接器部138(例如阴型E2000 连接器),并且跳接光学纤维包括用来连接第一光学纤维84和跳接光学纤维88的第一端连接器部140(例如阳型E2000 连接器)。连接器组件90'以与由参考标号表示的连接器组件90相同的方式形成。

[0195] 第二光学纤维86包含具有第二纤芯直径 $d_{core,2} = d_{core,p}$ 的第二纤芯131,其中第二光学纤维从第一端延伸到第二端并且包括至少一个传感器。第二光学纤维86包括在第一端87处的第一端连接器部138'(例如阴型E2000 连接器)和在第二端处的第二端连接器部(未示出),并且跳接光学纤维包括用来连接第二光学纤维86和跳接光学纤维88的第二端连接器部140'(例如阳型 E2000 连接器)。

[0196] 图13示意性地图示了叶片监控系统94。叶片监控系统94包括容纳了分别经由连接装置155、155'连接到接口152和记忆单元154的处理单元150的外壳95。接口152包括第一连接器端口156和第二连接器端口158。第一连接器端口156配置成连接到读取单元,用以接收来自风力涡轮机叶片的传感器系统的传感器信号的数据。第二连接器端口158配置成连接

到涡轮机控制器,用以向涡轮机控制器传输和/或发送数据和/或控制/报警信号。

[0197] 处理单元150配置成经由第一连接器端口156接收第一传感器组信号,第一传感器组信号表示沿着纵向轴线从根端延伸到末梢端的在风力涡轮机叶片的第一传感器位置处的第一弯曲力矩。进一步地,处理单元150配置成基于第一传感器组信号估算沿着纵向轴线在第一估算位置处的弯曲力矩或其分量,其中沿着纵向轴线第一传感器位置不同于的第一估算位置。

[0198] 图14示意性地图示了叶片监控系统94',其中读取单元92集成于叶片监控系统中,并且经由连接装置155'''连接到处理单元150。接口152包括呈第一传感器端口160的形式的第一连接器端口156,用于将例如第一光学纤维84的传感器系统耦合(可选地经由跳接光学纤维)到叶片监控系统94'的读取单元92。

[0199] 图15示意性地图示了在具有 $L=53.2$ m的风力涡轮机叶片的根端处(第一估算位置)的弯曲力矩的主要分量 $M_{x,est,1}$ 的估算。第一距离 d_1 是7 m,而第二距离 d_2 是10.5 m。主要分量 $M_{x,est,1}$ 是基于来自 d_1 处的第一主要传感器的第一主要传感器信号 S_{11} 和来自 d_2 处的第二主要传感器的第二主要传感器信号 S_{21} 来估算的。

[0200] 已示出了从第一主要传感器到风力涡轮机叶片的末梢端使用三次样条函数,然后使用在第一距离处的弯曲力矩的斜率或导数从 d_1 到根端来实行线性外插(linear extrapolation)可以是优选的。在末梢端处的弯曲力矩的斜率为零。进一步地,可以基于 d_1 和 d_2 处的弯曲力矩例如使用后向欧拉法(backward Euler method)来估算 d_1 处的弯曲力矩斜率。第一和第二传感器组之间的较大距离可能不是期望的。

[0201] 如图15中图示的估算包括使用了在 d_1 和 d_2 处测量的弯曲力矩分量的下述步骤:

[0202] 一使用两个测量点以及其中弯曲力矩为零的末梢端点的“适当的”边界条件,第一三次样条函数被拟合用来执行风力涡轮机叶片端部附近处的点的内插。此处的“适当的”是指该区间两端处的一阶导数是适当的;

[0203] 一通过对 d_1 处的弯曲力矩($M_{x,1}$)和 d_2 处的弯曲力矩($M_{x,2}$)使用后向欧拉法来估算 d_1 处的弯曲力矩斜率, d_1 处的弯曲力矩($M_{x,1}$)和 d_2 处的弯曲力矩($M_{x,2}$)通过对测得的传感器数据转换得到,并且末梢端处的导数为零。三点(即 d_1 , d_2 和末梢端点)在图15中被标注为点A。风力涡轮机叶片的端部附近的内插点被标注为点B;

[0204] 一然后,通过使用其中使用了点A和B的“非扭结”(not-a-knot)方法,构建覆盖了从 d_1 到末梢端的区间的第二样条函数;

[0205] 一然后,通过线性外插将第二样条函数延伸至根端,第二样条函数在 d_1 到根端之间被标注为 $app. A'$ 。

[0206] 该“非扭结”方法是指当从点的每一侧看时,用于内插的定义域(domain)的第二点及倒数第二点处的三阶导数是相同的。

[0207] 图15图示了弯曲力矩的估算。在图表中, $app. A'$ 代表在 $d_1=7$ m和 $d_2=10.5$ m处的传感器位置,而 $app. B'$ 代表在 $d_1=7$ m和 $d_2=20$ m处的传感器位置。正如在图15上可见的那样, $app. A'$ 提供了在根端附近的主要分量的更好估算,而 $app. B'$ 提供了离根端在10m和50m之间的更好估算。

[0208] 应当注意的是,除了附图中所示出的本发明的示例性实施例之外,本发明可以以不同的形式实施,而不应该理解为局限于本文中所提出的实施例。更确切地,提供这些实施

例是为了使得该公开内容充分和完整,并且将本发明的构思完全传达给本领域技术人员。

[0209] 参考标号列表

[0210]	2	风力涡轮机
[0211]	4	塔架
[0212]	6	机舱
[0213]	8	轮毂
[0214]	10、10'、	
[0215]	10''、10'''	风力涡轮机叶片
[0216]	14	叶片末梢
[0217]	16	叶片根部
[0218]	18	前缘
[0219]	20	后缘
[0220]	22	俯仰轴
[0221]	30	根部区域
[0222]	32	过渡区域
[0223]	34	翼面区域
[0224]	40	肩部
[0225]	41、42、43、	
[0226]	44、45、46	翼面轮廓
[0227]	47A	第一主要传感器
[0228]	47B	第一次要传感器
[0229]	48A	第二主要传感器
[0230]	48B	第二次要传感器
[0231]	50	翼面轮廓
[0232]	52	压力侧
[0233]	54	吸力侧
[0234]	56	前缘
[0235]	58	后缘
[0236]	60	翼弦
[0237]	62	弧线/中线
[0238]	70	弹性中心
[0239]	72	主轴线
[0240]	74	主要传感器轴线
[0241]	76	次要传感器轴线
[0242]	78	壳体主体
[0243]	80	梁
[0244]	82	传感器系统
[0245]	84	第一光学纤维
[0246]	85	第一光学纤维的第一端

[0247]	85'	第一光学纤维的第二端
[0248]	86	第二光学纤维
[0249]	87	第二光学纤维的第一端
[0250]	87'	第二光学纤维的第二端
[0251]	88	跳接光学纤维
[0252]	89	跳接光学纤维的第一端
[0253]	89'	跳接光学纤维的第二端
[0254]	90,90'	光学连接器
[0255]	92	读取单元
[0256]	94	叶片监控系统
[0257]	94'	叶片监控系统
[0258]	95	外壳
[0259]	96	数据线缆
[0260]	98A	第一温度传感器
[0261]	98B	第二温度传感器
[0262]	99	光束分离/结合单元
[0263]	130	第一纤芯
[0264]	131	第二纤芯
[0265]	132	跳接纤芯
[0266]	134	纤维包层材料和板
[0267]	136	纤维包层材料和板
[0268]	138	第一光学纤维的第二端连接器部
[0269]	138'	第二光学纤维的第一端连接器部
[0270]	140	跳接光学纤维的第一端连接器部
[0271]	140'	跳接光学纤维的第二端连接器部
[0272]	150	处理单元
[0273]	152	接口
[0274]	154	记忆单元
[0275]	155、155'、155''、	
[0276]	155'''、155''''	连接装置
[0277]	156	第一连接器端口
[0278]	158	第二连接器端口
[0279]	160	传感器端口
[0280]	c	翼弦长度
[0281]	d _t	最大厚度的位置
[0282]	d _f	最大弧高的位置
[0283]	d _p	最大压力侧弧高的位置
[0284]	d _s	肩部距离
[0285]	d _{root}	根部直径

[0286]	f	弧高
[0287]	L	叶片长度
[0288]	P	功率输出
[0289]	r	局部半径,离叶片根部的径向距离
[0290]	t	厚度
[0291]	v_w	风速
[0292]	θ	扭曲度,俯仰度
[0293]	Δy	预弯曲
[0294]	α_1	第一主要传感器轴线和第一次要传感器轴线之间的角度
[0295]	α_2	第二主要传感器轴线和第二次要传感器轴线之间的角度
[0296]	β_1	第一主要传感器轴线和主轴线之间的角度
[0297]	β_2	第二主要传感器轴线和主轴线之间的角度
[0298]	$d_{\text{core},1}$	第一纤芯直径
[0299]	$d_{\text{core},2}$	第二纤芯直径
[0300]	$d_{\text{core},p}$	跳接纤芯直径

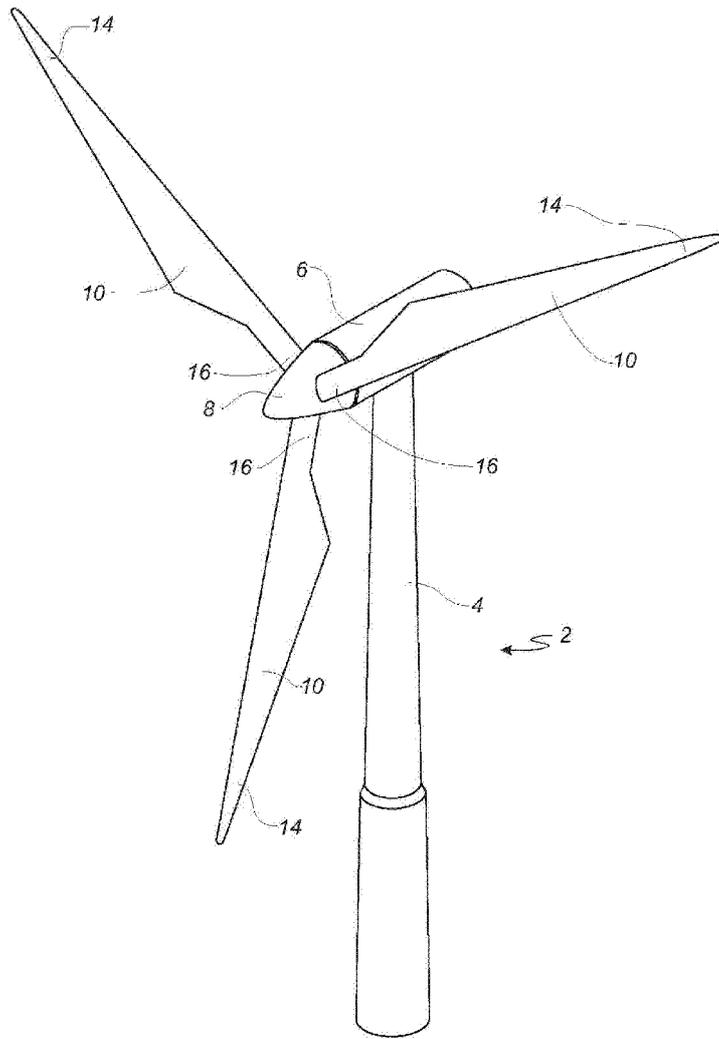


图 1

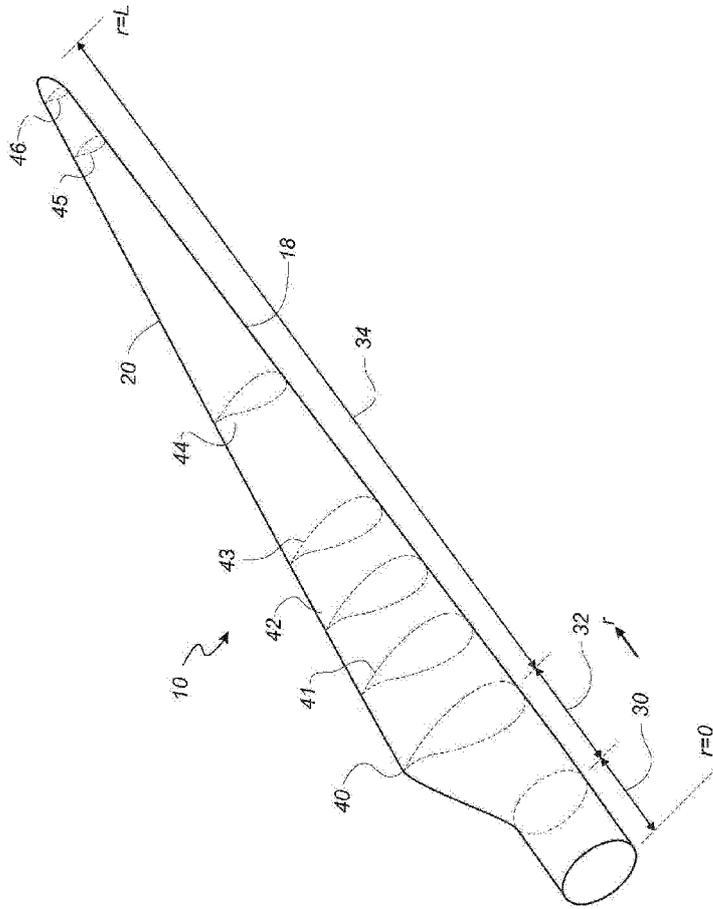


图 2

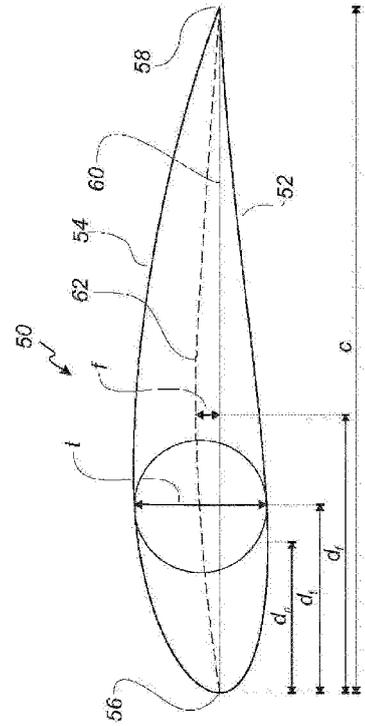


图 3

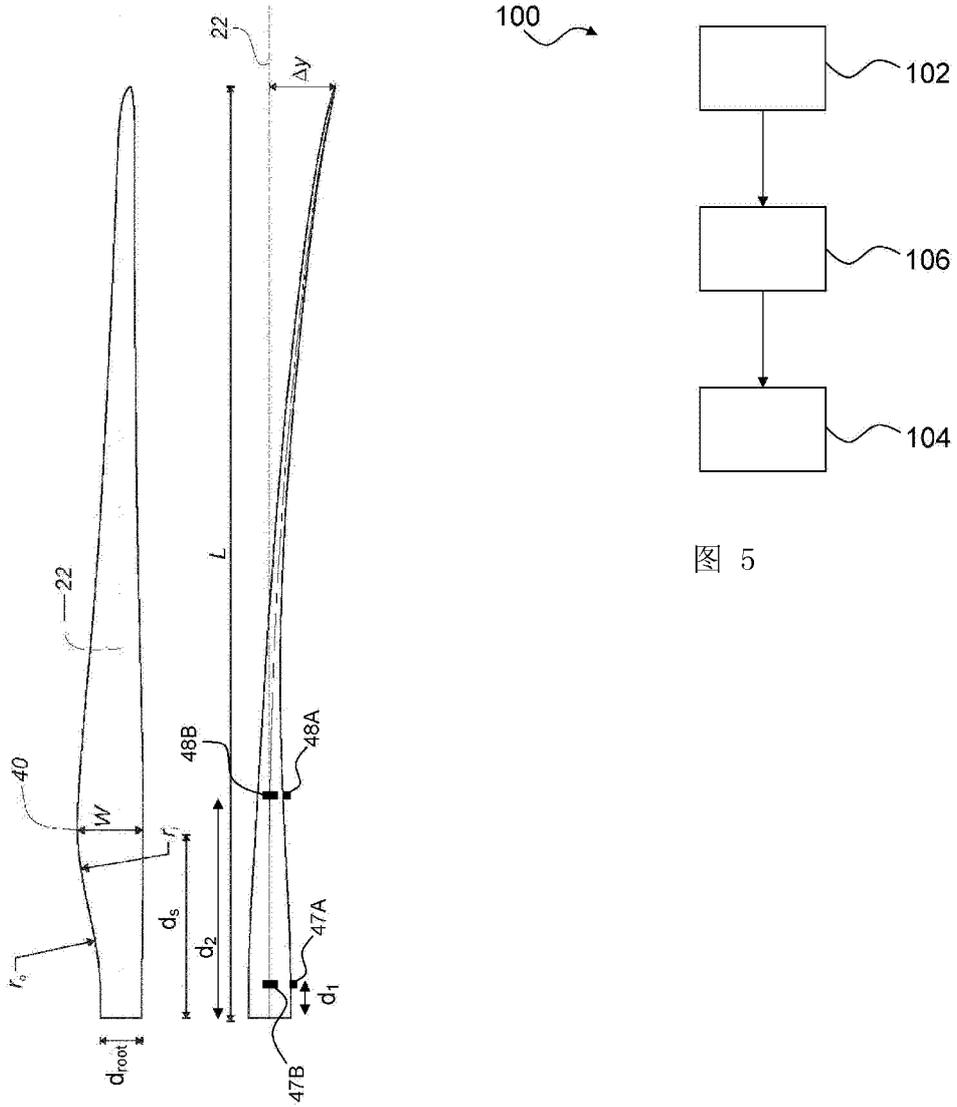


图 4

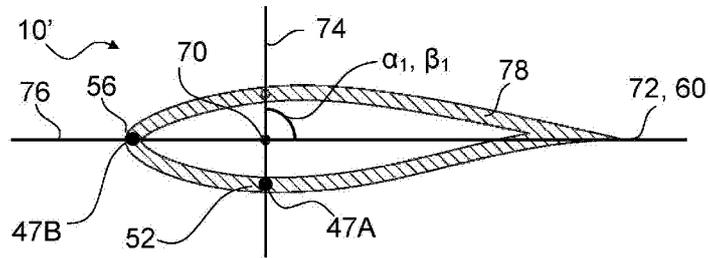


图 6

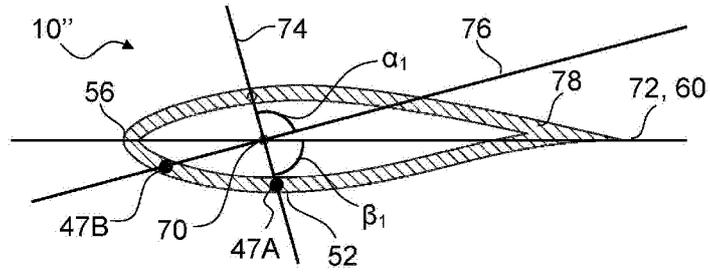


图 7

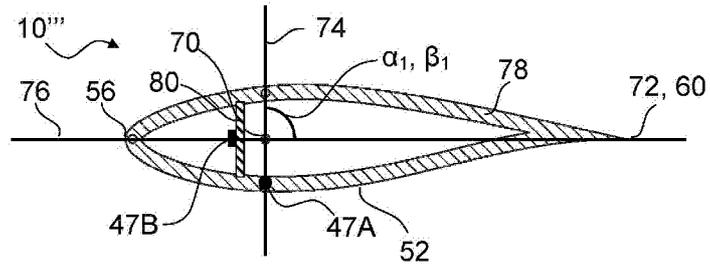


图 8

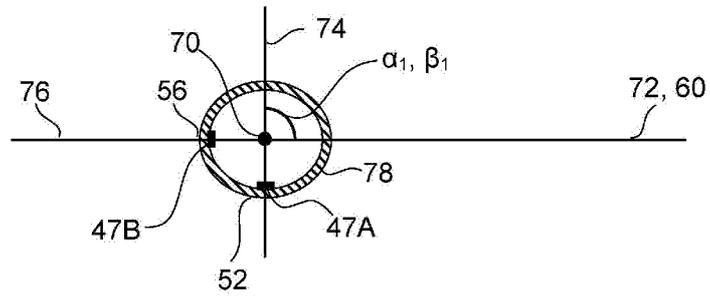


图 9

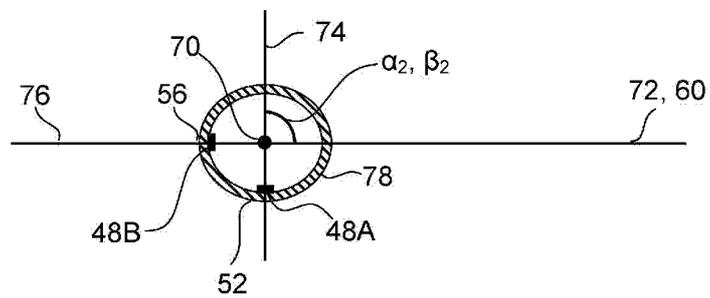


图 10

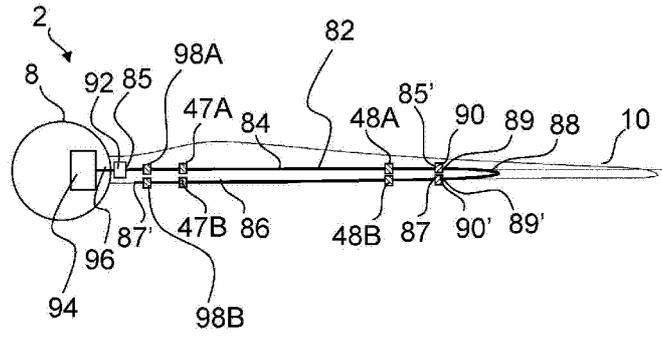


图 11

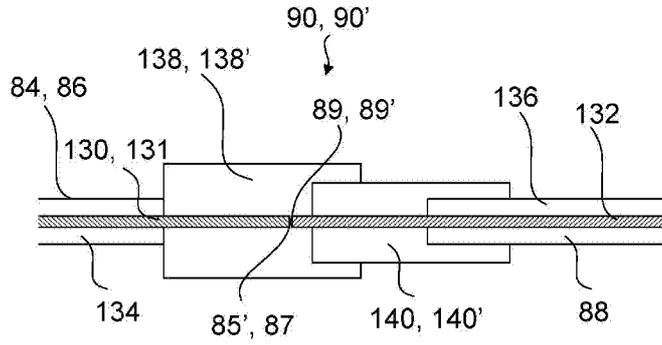


图 12

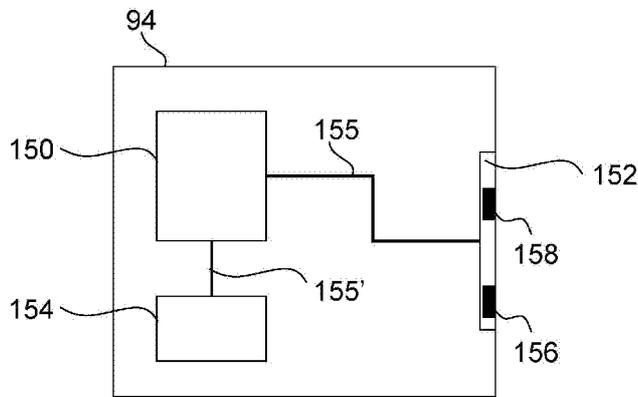


图 13

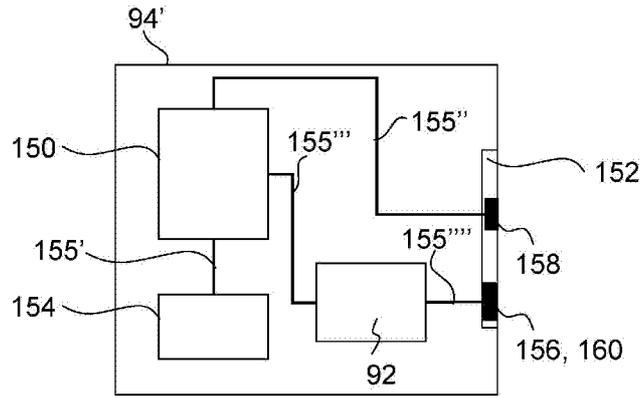


图 14

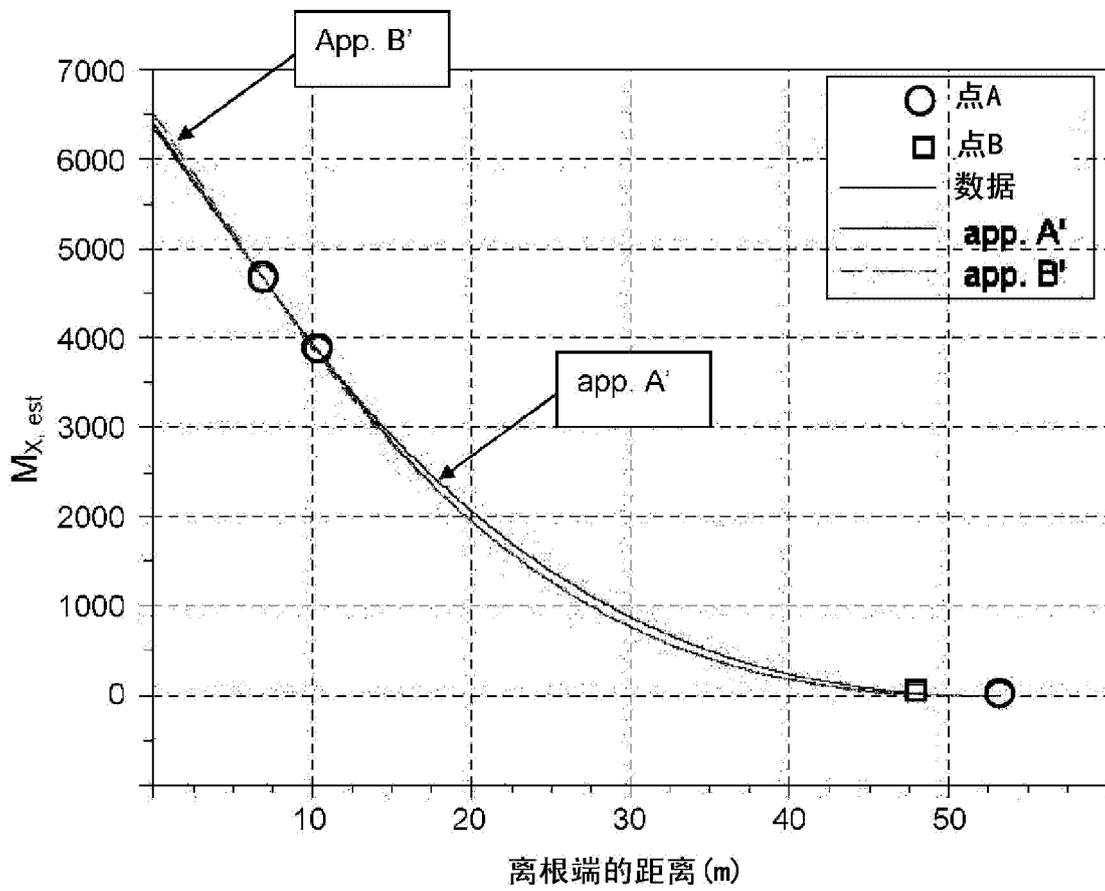


图 15