



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118715365 A

(43) 申请公布日 2024.09.27

(21) 申请号 202280092047.8

(22) 申请日 2022.12.09

(30) 优先权数据

PA202170673 2021.12.28 DK

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2024.08.19

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/DK2022/050274 2022.12.09

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2023/126041 EN 2023.07.06

(71) 申请人 维斯塔斯风力系统集团公司

地址 丹麦奥胡斯

(72) 发明人 T·S·B·尼尔森 R·T·鲁道夫

T·J·拉森 M·K·奥斯特兰德

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

专利代理师 王永建

(51) Int.Cl.

F03D 1/06 (2006.01)

B64C 3/14 (2006.01)

权利要求书2页 说明书9页 附图7页

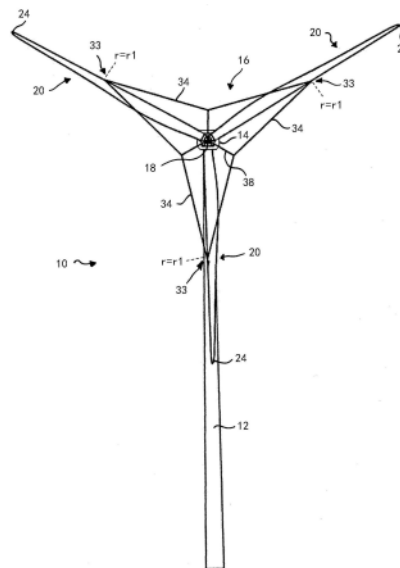
(54) 发明名称

风力涡轮机

(57) 摘要

在本发明的第一方面,提供了一种风力涡轮机,其包括塔架、安装在塔架上的机舱和安装在机舱上的转子。该转子包括轮毂和通过相应的变桨机构连接到轮毂上的至少三个可调桨距的风力涡轮机叶片。每个叶片从定义径向位置 $r=0$ 的叶片根部延伸至定义径向位置 $r=R$ 的叶片顶端。每个叶片包括迎风侧和背风侧,迎风侧和背风侧在前缘和后缘处相接,以限定翼型轮廓。弦长是前缘和后缘之间的距离,相对厚度是厚度与弦长的比值。翼型轮廓的厚度是迎风侧和背风侧之间的与弦长正交的最大距离。每个叶片包括位于叶片根部和叶片顶端之间的第一径向位置(r_1)处的连接点。风力涡轮机还包括连接在该连接点和相邻叶片上的对应连接点之间的一个或多个叶片连接构件。在叶片根部和连接点之间的叶片内侧部分内,每个叶片的厚度和/或相对厚度基本恒定或具有局部最小值。

CN 118715365 A



1. 一种风力涡轮机,所述风力涡轮机包括塔架、安装在所述塔架上的机舱和安装在所述机舱上的转子,

所述转子包括轮毂和通过相应的变桨机构连接到所述轮毂的至少三个可调桨距的风力涡轮机叶片,

每个叶片从定义径向位置 $r=0$ 的叶片根部延伸至定义径向位置 $r=R$ 的叶片顶端;

每个叶片包括迎风侧和背风侧,所述迎风侧和所述背风侧在前缘和后缘处相接以限定翼型轮廓,弦长是所述前缘和所述后缘之间的距离,相对厚度是厚度与弦长的比值,所述翼型轮廓的厚度是所述迎风侧和所述背风侧之间的与所述弦长正交的最大距离;

每个叶片包括位于所述叶片根部和所述叶片顶端之间的第一径向位置(r_1)处的连接点,所述风力涡轮机还包括连接在所述连接点和相邻叶片上的对应连接点之间的一个或多个叶片连接构件,

其中,每个叶片的厚度和/或相对厚度在所述叶片位于所述叶片根部和所述连接点之间的内侧部分内基本恒定或具有局部最小值。

2. 根据权利要求1所述的风力涡轮机,其中,所述内侧部分在 $r=0.2R$ 和 $r=0.55R$ 之间,优选地在 $r=0.3R$ 和 $r=0.50R$ 之间,更优选地在 $r=0.35R$ 和 $r=0.45R$ 之间的径向区间中延伸。

3. 根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,其中,在每个叶片的整个内侧部分上,所述相对厚度在0.15和0.50之间,优选地在0.18和0.4之间,更优选地在0.20和0.36之间。

4. 根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,其中,每个叶片的厚度和/或相对厚度从所述叶片根部向所述内侧部分减小。

5. 根据权利要求4所述的风力涡轮机,其中,每个叶片的厚度和/或相对厚度从所述叶片根部向所述内侧部分严格单调减小。

6. 根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,其中,每个叶片的厚度和/或相对厚度从所述内侧部分向所述连接点增大。

7. 根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,其中,所述局部最小值位于从所述连接点向内侧0.02R和0.25R之间,优选地0.05R和0.15R之间,更优选地0.05R和0.1R之间的径向区间中。

8. 根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,其中,每个叶片的连接点位于 $r=0.20R$ 和 $r=0.6R$ 之间,优选地 $r=0.3R$ 和 $r=0.55R$ 之间,更优选地 $r=0.35R$ 和 $r=0.50R$ 之间的径向区间中。

9. 根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,其中,每个叶片在所述连接点处的相对厚度在0.15和0.5之间,优选地在0.20和0.40之间,更优选地在0.24和0.36之间。

10. 根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机叶片,其中,所述叶片的厚度和/或相对厚度在所述连接点附近具有局部最大值。

11. 根据权利要求1至10中任一项所述的风力涡轮机,其中,所述叶片的厚度和/或弦长和/或扭曲度在所述连接点(r_1)处或附近基本恒定。

12. 根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,其中,每个叶片的厚度和/或相对厚度从所述连接点向所述叶片顶端严格单调减小。

13. 根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,其中,每个叶片的相对厚度在所述叶

片根部和所述连接点之间至少 $0.05R$ 的长度上,优选地在所述叶片根部和所述连接点之间至少 $0.1R$ 的长度上,更优选地在所述叶片根部和所述连接点之间的至少 $0.2R$ 的长度上小于 0.5 ,优选地小于 0.4 ,更优选地小于 0.36 。

14.根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,所述风力涡轮机还包括布置在所述叶片根部和所述内侧部分之间和/或所述连接点附近的一个或多个气动装置,诸如涡流发生器和/或格尼襟翼和/或失速屏障。

15.根据任一项前述权利要求所述的风力涡轮机,其中,每个叶片的总叶片长度 R 至少为 70m ,优选地至少为 80m ,更优选地至少为 85m 。

风力涡轮机

技术领域

[0001] 本发明大体上涉及风力涡轮机,更具体地说,涉及一种具有转子的风力涡轮机,该转子包括至少三个可调桨距的转子叶片和连接相邻叶片的一个或多个叶片连接构件。

背景技术

[0002] 人们一直希望从陆上和海上风电场生成增加水平的电力。实现这一目标的一种方法是为现代风力涡轮机提供更大的风力涡轮机叶片。提供更大的叶片会增大转子的扫掠面积,使风力涡轮机从风中捕获更多能量。然而,风力涡轮机叶片在使用中会承受各种负载和压力,增大风力涡轮机叶片的长度会增大叶片必须承受的负载幅值。例如,对于较大的叶片,风压对叶片造成的挥舞方向负载和叶片重量造成的边缘方向(沿边)负载都会更大。

[0003] 风力涡轮机叶片的内侧端部包括叶片根部,叶片在该处附接到风力涡轮机的轮毂上。为了在使用中承受增大的负载,大型叶片通常靠近内侧端部使用更多材料制造,和/或通过增大叶片根部的直径,和/或通过增大叶片靠近内侧端部的厚度。这些解决方案中的每一个都能提高叶片内侧端部的刚度和强度,使其能够支撑更大的负载。然而,在实践中,这些解决方案中的每一个也都具有缺点和局限性。

[0004] 例如,增大根部直径会使制造和运输叶片变得更加困难,靠近内侧端部使用更多材料会增大叶片的重量和成本,增大叶片靠近内侧端部的厚度不利于叶片的空气动力性能。举例来说,厚度和相对厚度(即厚度与弦长比值)增大的翼型轮廓通常具有较差的升阻比,并且在工作攻角下具有相对较低的滑翔比,这使得叶片的这些部分对表面粗糙度更加敏感。因此,为增加结构性能而具有较高厚度的叶片部分从风中捕获的能量通常较少,并导致阻力增加,从而对风力涡轮机能够生产的总功率产生不利影响。

[0005] 本发明正是在这一背景下设计出来的。

发明内容

[0006] 在本发明的第一方面,提供了一种风力涡轮机,其包括塔架、安装在塔架上的机舱和安装在机舱上的转子。该转子包括轮毂和通过相应的变桨机构连接到轮毂上的至少三个可调桨距的风力涡轮机叶片。每个叶片从定义径向位置 $r=0$ 的叶片根部延伸至定义径向位置 $r=R$ 的叶片顶端。每个叶片包括迎风侧和背风侧,迎风侧和背风侧在前缘和后缘处相接,以限定翼型轮廓。弦长是前缘和后缘之间的距离,相对厚度是厚度与弦长的比值。翼型轮廓的厚度是迎风侧和背风侧之间的与弦长正交的最大距离。每个叶片包括位于叶片根部和叶片顶端之间的第一径向位置(r_1)处的连接点。风力涡轮机还包括连接在该连接点和相邻叶片上的对应连接点之间的一个或多个叶片连接构件。在叶片根部和连接点之间的叶片的内侧部分内,每个叶片的厚度和/或相对厚度基本恒定或具有局部最小值。

[0007] 基本恒定的厚度和/或相对厚度意味着叶片的厚度和/或相对厚度在长度至少为 $0.05R$ 的叶片部分上的变化不超过1%。

[0008] 每个叶片的内侧部分优选地延伸至少 $0.05R$ 的长度。更优选地,内侧部分可以延伸

至少 $0.1R$ 的长度。更优选地,内侧部分可以延伸至少 $0.15R$ 的长度。内侧部分优选地延伸至多 $0.35R$ 的长度。更优选地,内侧部分可以延伸至多 $0.2R$ 的长度。长度在这些优选范围内的内侧部分在不对叶片的结构性能产生不利影响的情况下提供空气动力优势。

[0009] 在某些示例中,风力涡轮机可以包括连接在连接点和相邻叶片上的对应连接点之间的多个叶片连接构件。因此,叶片在使用中承受的部分负载可以传递到多个叶片连接构件上,从而减小每个构件上的负载。

[0010] 在本上下文中,术语“叶片连接构件”应作广义解释,以覆盖任何合适种类的拉伸构件,包括柔性和刚性构件。因此,在某些示例中,叶片连接构件可以包括缆索。因此,优选地,叶片连接构件可以是叶片连接缆索,而转子可以是缆索式转子。例如,在本上下文中,“缆索”可以是由金属丝(例如钢丝)、聚合物纤维(例如聚乙烯、聚丙烯、尼龙、聚酯、芳纶纤维)、无机纤维(例如碳纤维)或此类材料的混合绳索编织或铺设而成的绳索。在其他一些示例中,叶片连接构件可以包括复合构件,仅举几个可能的示例,诸如是拉挤成型件或金属棒。

[0011] 内侧部分可以在 $r=0.2R$ 和 $r=0.55R$ 之间的径向区间(径向间隔)中延伸。优选地,内侧部分可以在 $r=0.3R$ 和 $r=0.50R$ 之间的径向区间中延伸。更优选地,内侧部分可以在 $r=0.35R$ 和 $r=0.45R$ 之间的径向区间中延伸。与典型叶片相比,将叶片内侧部分配置成位于这些径向区间中提供了这些径向区间的改进空气动力性能。

[0012] 在某些示例中,在每个叶片的整个内侧部分上,相对厚度可以在 0.15 和 0.50 之间。优选地,在每个叶片的整个内侧部分上,相对厚度可以在 0.18 和 0.4 之间。更优选地,在每个叶片的整个内侧部分上,相对厚度可以在 0.20 和 0.36 之间。在这些优选范围内的相对厚度提供了叶片强度和空气动力性能之间的有利折衷。

[0013] 每个叶片的厚度优选地从叶片根部向内侧部分减小。每个叶片的厚度可以从叶片根部向内侧部分单调减小。优选地,每个叶片的厚度可以从叶片根部向内侧部分严格单调减小。严格单调减小是指叶片的厚度从叶片根部向内侧部分不断减小。因此,叶片的厚度可以在叶片根部处最大。因此,叶片根部可以为结构性能而配置,从叶片根部向外侧移动,叶片可以在空气动力学方面变得更加优化。

[0014] 每个叶片的相对厚度可以从叶片根部向内侧部分减小。每个叶片的相对厚度可以从叶片根部向内侧部分单调减小。优选地,每个叶片的相对厚度可以从叶片根部向内侧部分严格单调减小。严格单调减小是指叶片的相对厚度从叶片根部向内侧部分不断减小。因此,叶片的相对厚度可以在叶片根部处最大。因此,叶片根部可以为结构性能而配置,从叶片根部向外侧移动到内侧部分,叶片可以在空气动力学方面变得更加优化。

[0015] 在某些示例中,每个叶片的厚度可以从内侧部分向连接点增大。替代地或附加地,每个叶片的相对厚度可以从内侧部分向连接点增大。例如,叶片的厚度可以增大,以提供用于连接叶片连接构件的坚固叶片部分。厚度的这种增大同样会导致从内侧部分向连接点的相对厚度增大。

[0016] 在某些示例中,局部最小值可以位于从连接点向内侧 $0.02R$ 和 $0.25R$ 之间的径向区间中。优选地,局部最小值可以位于从连接点向内侧 $0.05R$ 和 $0.15R$ 之间的径向区间中。更优选地,局部最小值可以位于从连接点向内侧 $0.05R$ 和 $0.1R$ 之间的径向区间中。因此,局部最小值优选地位于尽可能远的外侧,以提供最大的空气动力益处(因为扫掠面积随着从 $r=0$

开始的径向距离的增大而增大),但仍与连接点间隔开一定的距离,使叶片在连接点处或附近足够坚固。

[0017] 每个叶片的连接点可以位于 $r=0.20R$ 和 $r=0.6R$ 之间的径向区间中。优选地,每个叶片的连接点可以位于 $r=0.3R$ 和 $r=0.55R$ 之间的径向区间中。更优选地,每个叶片的连接点可以位于 $r=0.35R$ 和 $r=0.50R$ 之间的径向区间中。使连接点位于这些范围内有助于通过叶片连接构件将叶片上的负载以有利的比例传递到轮毂上。

[0018] 每个叶片在连接点处的相对厚度可以在 0.15 和 0.5 之间。优选地,每个叶片在连接点处的相对厚度可以在 0.20 和 0.40 之间。更优选地,每个叶片在连接点处的相对厚度可以在 0.24 和 0.36 之间。在这些优选范围内的相对厚度可以提供用于连接叶片连接构件的坚固叶片部分,而不会对叶片的空气动力性能造成实质性损害。

[0019] 叶片的厚度和/或相对厚度可以在连接点附近具有局部最大值。因此,叶片可以在连接点附近更厚/具有更大的相对厚度,以增大叶片在连接点附近的强度。例如,局部最大值可以在距离连接点 $0.2R$ 的范围内。优选地,局部最大值可以在距离连接点 $0.1R$ 的范围内。更优选地,局部最大值可以在距离连接点 $0.05R$ 的范围内,在某些示例中包括位于连接点处。

[0020] 在某些示例中,叶片的厚度和/或弦长和/或扭曲度在连接点处或附近可以基本恒定。例如,连接点可以位于长度在 $0.01R$ 和 $0.2R$ 之间,优选地长度在 $0.01R$ 和 $0.1R$ 之间,更优选地长度在 $0.01R$ 和 $0.05R$ 之间,例如长度在 $0.03R$ 和 $0.05R$ 之间的径向区间中,在该区间中,叶片的厚度和/或弦长和/或扭曲度可以基本恒定。例如,连接点可以位于或靠近模块化叶片的两个叶片模块之间的连接部处。通常情况下,叶片会沿其长度连续改变扭曲度。但在某些示例中,在靠近连接点的位置保持恒定的扭曲度可能是有利的。叶片模块在连接部处可以具有基本相同的轮廓,即相同的外部几何形状,以便于以更有利的方式将叶片模块连接在一起。因此,在连接点处或附近,叶片的厚度和/或弦长可以基本恒定。

[0021] 每个叶片的厚度可以从连接点向叶片顶端单调减小。优选地,每个叶片的厚度可以从连接点向叶片顶端严格单调减小。附加地或替代地,每个叶片的相对厚度可以从连接点向叶片顶端单调减小。优选地,每个叶片的相对厚度可以从连接点向叶片顶端严格单调减小。因此,连接点外侧的叶片优选地主要为空气动力性能而非结构要求进行配置。特别是,连接点外侧较薄的翼型轮廓对表面粗糙度的敏感度较低,从风中捕获更多能量,从而生成更多的升力,以增大风力涡轮机产生的功率。

[0022] 每个叶片的相对厚度可以在总叶片长度的至少 60% 上,优选地在总叶片长度的至少 65% 上,更优选地在总叶片长度的至少 75% 上小于 0.5 ,优选地小于 0.4 ,更优选地小于 0.36 。

[0023] 每个叶片的相对厚度可以在叶片根部和连接点之间的至少 $0.05R$ 的长度上,优选地在叶片根部和连接点之间的至少 $0.1R$ 的长度上,更优选地在叶片根部和连接点之间的至少 $0.2R$ 的长度上小于 0.5 ,优选地小于 0.4 ,更优选地小于 0.36 。

[0024] 风力涡轮机还可以包括布置在叶片根部和内侧部分之间的一个或多个气动装置,诸如涡流发生器和/或格尼襟翼(gurney flap)和/或失速屏障。在某些示例中,风力涡轮机可以附加地或替代地包括布置在连接点附近的一个或多个气动装置,诸如涡流发生器和/或格尼襟翼和/或失速屏障。该气动装置或每种气动装置可以有助于改进风力涡轮机叶片

较厚部分(诸如在内侧部分的内侧和/或在连接点附近)的空气动力性能和升力生成。

[0025] 在一些示例中,每个叶片的总叶片长度 R 可以至少为70m。优选地,每个叶片的总叶片长度 R 可以至少为80m。更优选地,每个叶片的总叶片长度 R 可以至少为85m。提供连接到叶片上的连接点的叶片连接构件有助于使用更长的叶片,这些叶片可以从风中捕获更多的能量,而不会产生与叶片根部处或附近的结构要求相关的缺点。实际上,在许多情况下,这允许在与现有技术叶片重量相近的情况下使用更长的叶片,和/或在与现有技术叶片叶片长度相近的情况下使用更轻的叶片。

附图说明

[0026] 现在将仅以非限制性示例的方式,参照附图描述本发明的示例,其中:

[0027] 图1是风力涡轮机的示意图,该风力涡轮机包括具有多个风力涡轮机叶片和叶片连接构件的转子;

[0028] 图2是风力涡轮机叶片的平面图,该风力涡轮机叶片包括用于将叶片连接构件连接到叶片上的连接点;

[0029] 图3是风力涡轮机叶片的翼型部分的截面图;

[0030] 图4显示了本发明叶片与典型现有技术叶片相比的示意性负载分布;

[0031] 图5是叶片厚度变化的示意图,其包括内侧部分内的局部最小厚度;

[0032] 图6是叶片厚度变化的示意图,其包括内侧部分内的基本恒定的厚度;

[0033] 图7是叶片相对厚度变化的示意图,其包括内侧部分内的局部最小相对厚度;

[0034] 图8是叶片相对厚度变化的示意图,其包括内侧部分内的基本恒定的相对厚度;以及

[0035] 图9是风力涡轮机的示意图,该风力涡轮机包括转子,该转子具有连接在叶片连接构件和轮毂部件之间的预张紧构件。

具体实施方式

[0036] 图1显示了风力涡轮机10,其包括塔架12和安装在塔架12上的机舱14。转子16安装在机舱14上,转子16包括轮毂18和多个可调桨距的风力涡轮机叶片20。在该示例中,风力涡轮机10包括三个可调桨距的叶片20。风力涡轮机叶片20通过相应的变桨机构(未显示)连接到轮毂18上,借助于这些机构,叶片20可相对于轮毂18旋转。因此,风力涡轮机叶片20的桨距可依据入射风的相对速度进行控制,以确保叶片20以有利的攻角定向,从而从风中捕获能量。

[0037] 另请参考图2,每个叶片20沿翼展方向(S)从叶片根部22延伸至叶片顶端24。叶片20在此被无量纲地定义为具有总叶片长度 R 。因此,叶片根部22定义了径向位置 $r=0$,叶片顶端24定义了径向位置 $r=R$ 。在某些示例中,总叶片长度 R 可以至少为70m。

[0038] 现在参照图3,图3显示了叶片20的示意性截面图,每个叶片20包括迎风侧26和背风侧28,它们在叶片20的前缘30和后缘32处相接,以限定翼型轮廓。当风入射到叶片20上时,翼型轮廓产生升力,升力推动转子16旋转并驱动发电机(未显示)产生电力。叶片20包括弦长(Ch),即前缘30和后缘32之间的距离。此外,叶片20还包括厚度(Th),即迎风侧26和背风侧28之间的与弦长(Ch)正交的最大距离。叶片20的相对厚度是沿叶片20的长度 R 在给定

径向位置 r 处的厚度(Th)与弦长(Ch)的比值。

[0039] 如前通过背景技术所述,叶片20的较厚部分或相对厚度较高的部分在风入射到叶片20上时的工作攻角下通常具有相对较低的滑翔比(其是升力系数与阻力系数的比值)。因此,在现有的风力涡轮机叶片上,叶片根部附近需要支撑叶片在使用中承受的负载的较厚翼型轮廓对表面粗糙度更加敏感,通常不会增大太多风力涡轮机产生的功率。事实上,这些较厚部分可能会造成阻力,该阻力不利于叶片的空气动力性能。

[0040] 然而,本发明的风力涡轮机10有利于促进使用空气动力学改进型风力涡轮机叶片20,该叶片可以从风中捕获更多能量,从而提高风力涡轮机10的能量生产能力。

[0041] 再参照图1和图2,风力涡轮机10的叶片20包括位于叶片根部22和叶片顶端24之间的第一径向位置(r_1)处的连接点33。风力涡轮机10还包括连接在该连接点33和相邻叶片20上的对应连接点之间的一个或多个叶片连接构件34。叶片连接构件34可以是叶片连接缆索34。因此,安装在机舱14上的转子16可以称为缆索式转子16。叶片连接构件34可以在径向位置 r_1 处的连接点33处通过可旋转联轴器(未显示)与叶片20连接,这样叶片20在与叶片连接构件34连接的同时可相对于轮毂18变桨,即旋转。风力涡轮机叶片20的叶片连接构件34可以彼此相邻布置,例如彼此靠近布置,甚至是共享连接点33的某些结构元件。例如,两个叶片连接构件34(在它们相对的两端上连接到不同的叶片20)可以连接到一个叶片20的同一个连接点33上。这样做的好处是,当在叶片连接构件34上施加拉力时,叶片20会受到一个合力的影响,因此叶片20不会暴露于叶片连接构件34在两个不同方向上的拉力。此外,当连接点33彼此相邻或两个叶片连接构件34使用相同的连接点33时,可以将两个叶片连接构件34的连接点33布置在更靠近叶片变桨轴线、甚至是位于叶片变桨轴线上的位置。

[0042] 每个叶片连接构件34承担了叶片20在使用中承受的部分负载,并提供了额外的负载路径,通过该路径可以将负载传递到轮毂18和/或叶片20之间。连接在相邻叶片20之间的叶片连接构件34意味着叶片20部分地“承载”彼此,因此一些负载可以通过连接构件34在叶片20之间传递。此外,叶片连接构件34还有助于将一些负载传递或卸载到轮毂18上。叶片连接构件34提供了一条负载路径,它绕过了叶片根部22和叶片根部22与位于 r_1 处的连接点33之间的叶片20部分。

[0043] 在优选示例中,连接点33可以位于叶片20在 $r=0.35R$ 和 $r=0.50R$ 之间的径向区间中。将连接点33设置在该径向区间中,可以有利地使叶片连接构件34承担叶片20在使用中承受的负载的大部分。在某些示例中,风力涡轮机10可以附加地包括预张紧构件38,诸如预张紧缆索38,该预张紧构件38可进行调节,以增大或减小叶片连接构件34中的张力,从而控制从叶片20传递到叶片连接构件34中的负载的多少。预张紧构件38的一端可以连接到一个或多个叶片连接构件34,另一端可以连接到轮毂18(如图1所示)或轮毂部件36(如图9所示)上。

[0044] 简要地参考图4,图4中示意性显示的负载分布表明,与不带叶片连接构件34的叶片20相比,由于一部分负载传递到了叶片连接构件34上,叶片20上的负载(如挥舞方向的负载和边缘方向的负载)在 r_1 处的连接点33的内侧如何减小。因此,提供在连接点33处与叶片20连接的叶片连接构件34减小了叶片20在连接点33内侧承受的负载。因此,与现有技术叶片相比,叶片20在连接点33内侧的结构要求更低,叶片20的空气动力性能也因此得到改进,因为可以允许在结构性能与空气动力性能之间进行安全平衡的叶片设计更多地转向空气

动力性能。

[0045] 特别是,再次参照图2,风力涡轮机叶片20包括位于叶片根部22和连接点33之间的内侧部分40,叶片20在该内侧部分40中被配置用于改进空气动力性能。例如,内侧部分40可以在 $r=0.2R$ 和 $r=0.55R$ 之间的径向区间中延伸。在某些示例中,内侧部分40可以在至少 $0.05R$ 的长度上延伸,但优选地在不超过 $0.3R$ 的长度上延伸。

[0046] 现在将参照图5至图8描述风力涡轮机叶片20的内侧部分40。首先参考图5,但也要继续参照前面的图,叶片20的厚度(Th)在内侧部分40内可以具有局部最小值42。也就是说,叶片20的厚度(Th)可以在内侧部分40内减小到局部最小值42处的拐点,然后厚度(Th)增大。例如,叶片20的厚度(Th)可以从叶片根部22向外侧减小至局部最小值42,并从局部最小值42向外侧朝向连接点33增大。在内侧部分40内将叶片20的厚度(Th)减小到局部最小值42,与在叶片的相当部分中具有较厚翼型的典型叶片相比,提供了改进的空气动力性能。

[0047] 优选地,局部最小值42位于从 r_1 处的连接点33向内侧 $0.05R$ 和 $0.1R$ 之间的径向区间中。因此,局部最小值42优选地与连接点33间隔开,叶片20的厚度(Th)在连接点33附近不会受到影响,以确保叶片20在连接点33处足够坚固。内侧部分40优选地尽可能靠近连接点33,即尽可能在外侧,以增加空气动力学内侧部分40的优势,从而提高风力涡轮机10的电力生产,同时仍与连接点33向内侧间隔开至少 $0.02R$,优选地至少 $0.05R$ 的距离,使得叶片20在连接点33处和附近足够坚固。

[0048] 如图6所示,在某些示例中,叶片20的厚度(Th)可以在内侧部分40中基本恒定。这样的配置可以使风力涡轮机叶片20的制造更简单和/或更具成本效益。此外,与不包括具有基本恒定厚度(Th)的内侧部分40的典型风力涡轮机叶片相比,风力涡轮机叶片20有利地在制造时使用更少的材料,并且可以在更靠近径向位置 $r=0$ 的叶片根部22处包括更薄的翼型轮廓。这样,内侧部分40中的恒定厚度(Th)导致叶片20具有改进的空气动力性能。

[0049] 如图5和图6所示,叶片20的厚度(Th)优选地从叶片根部22向内侧部分40减小。因此,位于径向位置 $r=0$ 的叶片根部22优选地具有最高的厚度(Th)。在优选示例中,叶片20的厚度(Th)从叶片根部22向内侧部分40严格单调减小。在这种配置中,叶片轮廓从叶片根部22处或附近的结构轮廓迅速过渡到内侧部分40附近和内侧部分40中的更有益于空气动力的轮廓。

[0050] 从内侧部分40向外侧移动至 r_1 处的连接点33,在某些示例中,叶片20的厚度(Th)可以增大。例如,图5显示了风力涡轮机叶片20的厚度(Th)可以如何在连接点33附近具有局部最大值44。因此,风力涡轮机叶片20的厚度(Th)可以在连接点33处或附近增大,以便在连接叶片连接构件34的位置处提供更厚、更坚固的叶片20部分。虽然图6中没有显示,但可以理解的是,在内侧部分40中具有基本恒定的厚度(Th)的风力涡轮机叶片20也可以包括如上所述的局部厚度最大值(Th)。

[0051] 还是参考图5和图6,在某些示例中,叶片20的厚度(Th)可以从连接点33向叶片顶端24严格单调减小。因此,叶片20的翼型轮廓,从 r_1 处的连接点33到顶端24,可以被配置用于改进空气动力性能,以从入射风中捕获能量。特别地,在连接点33向外侧,叶片20可以具有降低的结构/承载要求,因此在连接点33的外侧可以使用具有有利空气动力特性的相对较薄的翼型轮廓。

[0052] 现在参照图7,在某些示例中,叶片20的相对厚度,即厚度(Th)与弦长(Ch)的比值,

可以在内侧部分40内具有局部最小值46。如前所述,减小相对厚度提供了更有利的翼型轮廓,其能够从风中捕获更多的能量,以帮助提高风力涡轮机10产生的总功率。与典型的叶片(其需要这样的内侧区域中的较厚且空气动力学上有害的轮廓来抵抗弯曲负载)相比,局部最小相对厚度46在内侧部分40中提供了空气动力学上有利的叶片轮廓。

[0053] 如图8所示,在某些示例中,叶片20的相对厚度在内侧部分40中可以基本恒定。基本恒定的相对厚度可以源于内侧部分40中基本恒定的厚度(T_h)和基本恒定的弦长(Ch)。替代地,基本恒定的相对厚度也可以源于叶片20的厚度(T_h)和弦长(Ch)以基本相同的速率增大或减小。

[0054] 与制造典型的风力涡轮机叶片相比,在内侧部分40中包括基本恒定的相对厚度的叶片20的制造可以被简化。此外,与不包括具有基本恒定的相对厚度的内侧部分40的典型风力涡轮机叶片相比,风力涡轮机叶片20可以包括在更靠近叶片根部22处(即,在叶片20总长度 R 的更多部分上)具有空气动力学上有利的相对厚度的翼型轮廓。因此,内侧部分40的恒定相对厚度将导致叶片20具有改进的空气动力学性能。

[0055] 如图7和图8所示,在最优选的示例中,在整个内侧部分40上,叶片20的相对厚度可以在0.2和0.36之间。与现有叶片相比,如图7和图8所示,整个内侧部分40上的相对厚度减小的叶片20可以从入射风中产生更多的升力,从而产生更多的功率。

[0056] 此外,如图7和图8所示,叶片20的相对厚度优选地从叶片根部22向内侧部分40减小。因此,位于径向位置 $r=0$ 的叶片根部22优选地具有最高的相对厚度。例如,在叶片根部22包括圆形轮廓的情况下,叶片20在叶片根部22的相对厚度可以为1。在优选示例中,叶片20的相对厚度可以从叶片根部22向内侧部分40严格单调减小。因此,从叶片根部22到内侧部分40,叶片20可以在空气动力学方面变得更加优化。

[0057] 在内侧部分40的外侧,即从内侧部分40移动到连接点33,叶片20的相对厚度可以增大,如图7所示。例如,叶片20的相对厚度可以在连接点33附近具有局部最大值48。在某些示例中,相对厚度可以因连接点33处或附近的厚度(T_h)增大而增大,以在附接叶片连接构件34的位置处提供更坚固的叶片20部分,如前所述。在某些示例中,叶片20在连接点33处的相对厚度可以在0.15和0.5之间。在此范围内的相对厚度可以在连接点33处提供叶片强度和空气动力学性能之间的有利折衷。虽然图8中没有显示,但可以理解的是,在内侧部分40中具有基本恒定的相对厚度的风力涡轮机叶片20也可以包括如上所述的局部最大相对厚度48。

[0058] 如图7和图8中的相对厚度变化所示,在某些示例中,叶片20的相对厚度可以从 r_1 处的连接点33向叶片顶端24严格单调减小。因此,在连接点33的外侧,叶片20可以配置有通过产生更大升力来改进空气动力学性能的翼型轮廓。

[0059] 在叶片根部22和连接点33之间至少 $0.05R$ 的长度上,叶片20的相对厚度优选地小于0.36。因此,以叶片连接构件34的形式提供附加负载路径,有利地促进了使用为改进空气动力学性能而配置的相当薄的风力涡轮机叶片20。特别是,包括叶片连接构件34的转子16使得能够使用如下风力涡轮机叶片20:在叶片20的更大长度或部分上,叶片20的翼型轮廓被主要设计用于空气动力学性能而非结构性能。

[0060] 可以理解的是,在某些示例中,图5中以示例方式显示的厚度变化可以与图6或图7中的相对厚度变化描述相同的叶片20。类似地,在某些示例中,图6中以示例方式显示的厚

度变化可以与图7或图8中的相对厚度变化描述相同的叶片20。为简洁起见,不对每种不同的配置提供详细描述,但可以理解的是,上文提供的与每种厚度和相对厚度变化有关的相应描述同样适用于包括上述组合的示例。

[0061] 为了进一步改进叶片20的空气动力性能,在某些示例中,叶片20可以包括布置在叶片根部22和内侧部分40之间的一个或多个气动装置50,如图2示意性所示。气动装置50可以帮助补偿叶片20在靠近叶片根部22处的厚度(Th)和/或相对厚度较高的部分中的降低的空气动力性能。举例来说,这种气动装置50可以包括涡流发生器、格尼襟翼或失速屏障中的一种或多种。在某些示例中,叶片20可以附加地或替代地在连接点33附近包括气动装置50,以操纵连接点33附近叶片20上的气流,从而将连接点33造成的阻力效应或湍流最小化。

[0062] 可以理解的是,上述描述和附图仅作为本发明的一个示例提供。因此,在不脱离所附权利要求书中定义的本发明范围的情况下,上述具体示例的许多替代方案都是可能的。

[0063] 例如,图1中以示例显示的风力涡轮机10包括连接在叶片20的连接点33和相邻叶片20上的对应连接点33之间的叶片连接构件34,并且可以包括连接在叶片连接构件34和轮毂18之间的预张紧构件38。然而,如图9所示,在某些示例中,风力涡轮机10可以附加地或替代地包括连接在一个或多个叶片连接构件34与连接到轮毂18的轮毂部件36上的连接点52之间的预张紧构件38。例如,轮毂部件36可以从轮毂18沿逆风向方向延伸。因此,如图9所示的那样将预张紧构件38连接到轮毂部件36上可以使叶片连接构件34和预张紧构件38中的张力将叶片20拉向逆风向方向并远离塔架12,从而增加与塔架12的间隙并降低长叶片20在大风条件下撞击塔架12的风险。

[0064] 此外,虽然附图中没有显示,但叶片20的厚度(Th)和/或弦长(Ch)在连接点33处或附近可以基本恒定。这样的配置可以促进简化叶片20的制造工艺。附加地,这样的配置还可以有利于将叶片20作为模块化叶片提供,该模块化叶片包括两个或更多叶片模块(未显示)。这样的配置可以使得能够仅通过更换小叶片模块来制造长度可调的叶片。叶片模块可以在厚度(Th)和/或弦长(Ch)基本恒定的叶片20部分的连接部处连接,这有利于叶片模块的制造和组装叶片20时模块的对齐。在某些优选示例中,用于将叶片连接构件34与叶片20连接的连接点33可以设置在连接部处。有利的是,模块化叶片20可以在叶片模块之间的连接部处进行加固,因此在连接部处连接叶片连接构件34可以确保叶片连接构件34与叶片20的坚固部分相连。

[0065] 可以理解的是,在本文描述的所有示例中,叶片连接构件34为部分叶片负载绕过内侧部分40和叶片根部22提供了一个辅助负载路径。因此,本文所述的所有配置都有利于提供厚度(Th)和/或相对厚度在内侧部分40中基本恒定或具有局部最小42、46的风力涡轮机叶片20,因为叶片20的内侧部分40需要承受和传递的负载较小。因此,使用包括叶片连接构件34的可调桨距的转子16有利于使用空气动力学上更加优化的风力涡轮机叶片20,这有助于提高风力涡轮机10的年发电量(AEP)。

[0066] 此外,诸如本文所述的包括叶片连接构件34的可调桨距的转子16可以包括的叶片20与尺寸相当的典型叶片相比重量最多可减轻20%。因此,与标准转子重量相同并且包括叶片连接构件34的转子16可以包括更长的叶片20。因此,在某些示例中,本文所述的转子16可以安装到现有的涡轮机10上,以升级涡轮机10的潜在发电量,而不会增大主轴承上的负载和/或增大叶片根部和轮毂尺寸。

[0067] 本文提供的描述旨在展示本发明的多个可能示例。在不偏离所附权利要求书中定义的本发明范围的前提下,上面关于任何示例描述的特征都可以很容易地与参照不同示例描述的任何其他特征相结合。

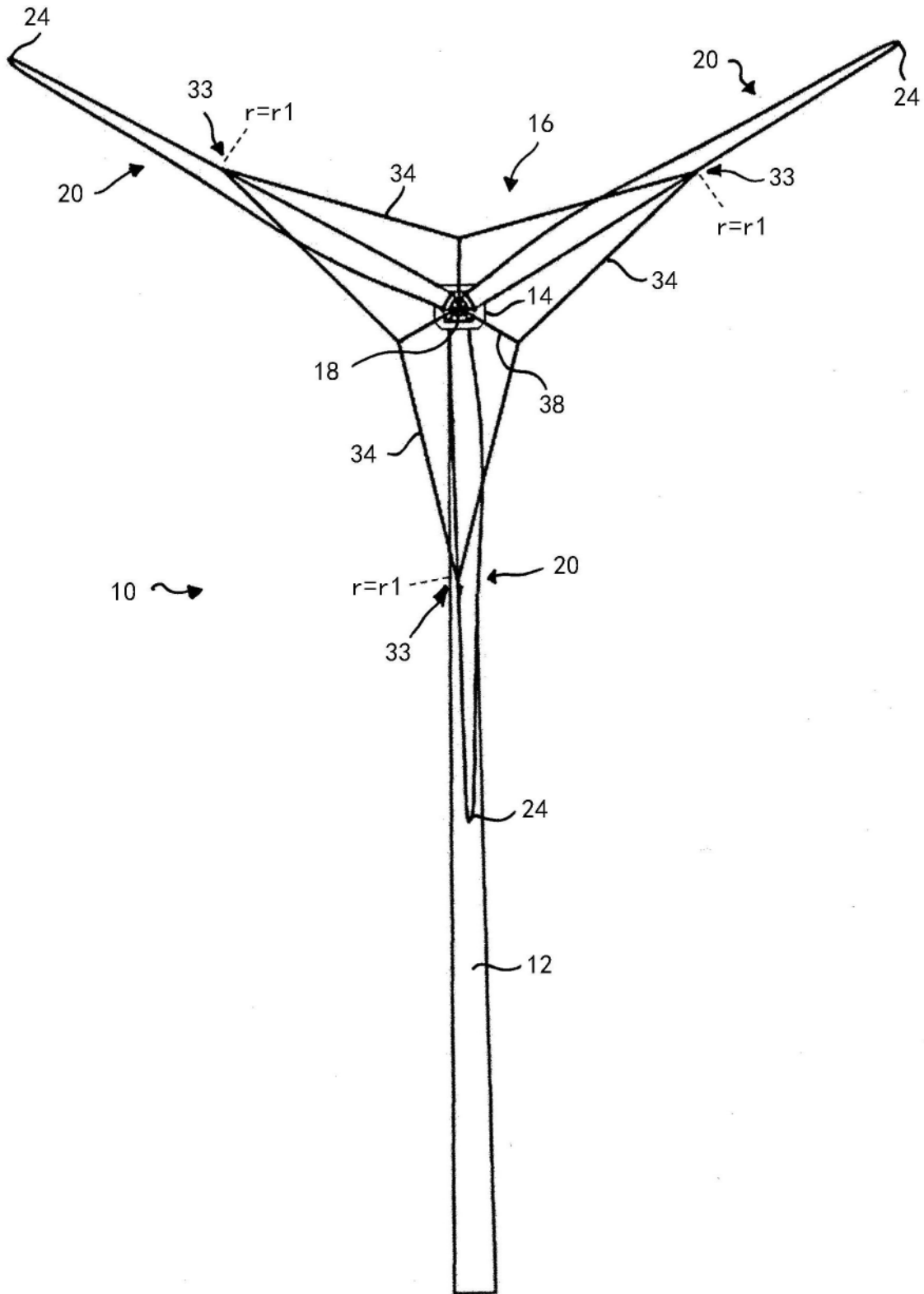


图1

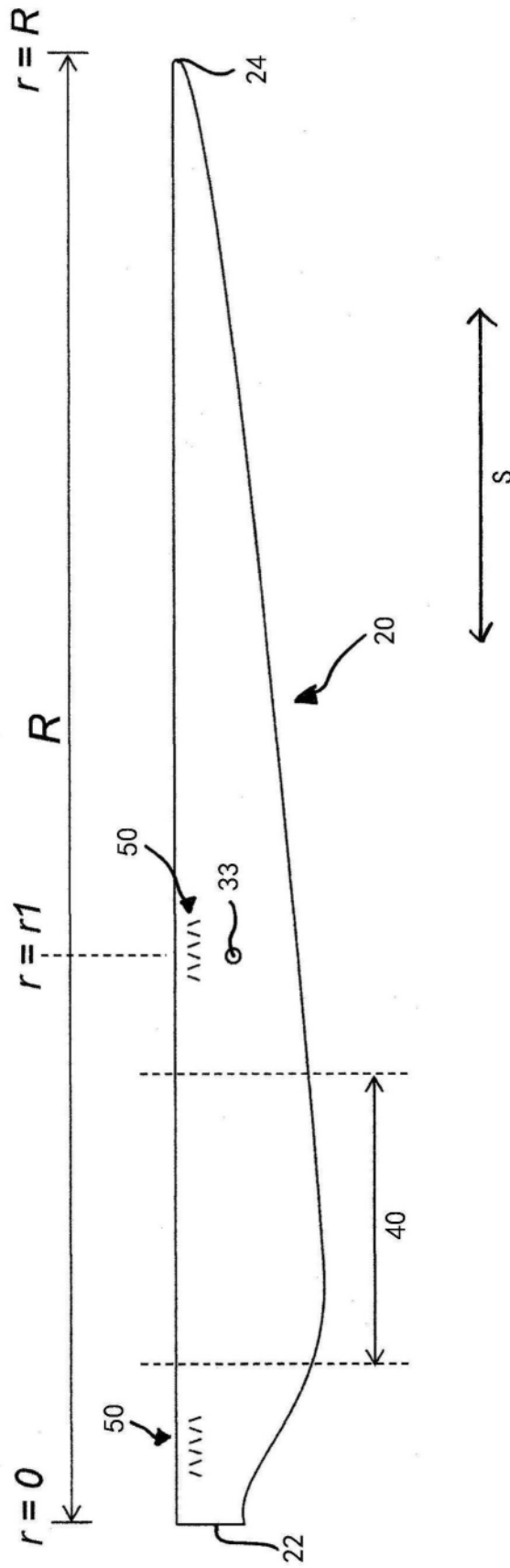


图2

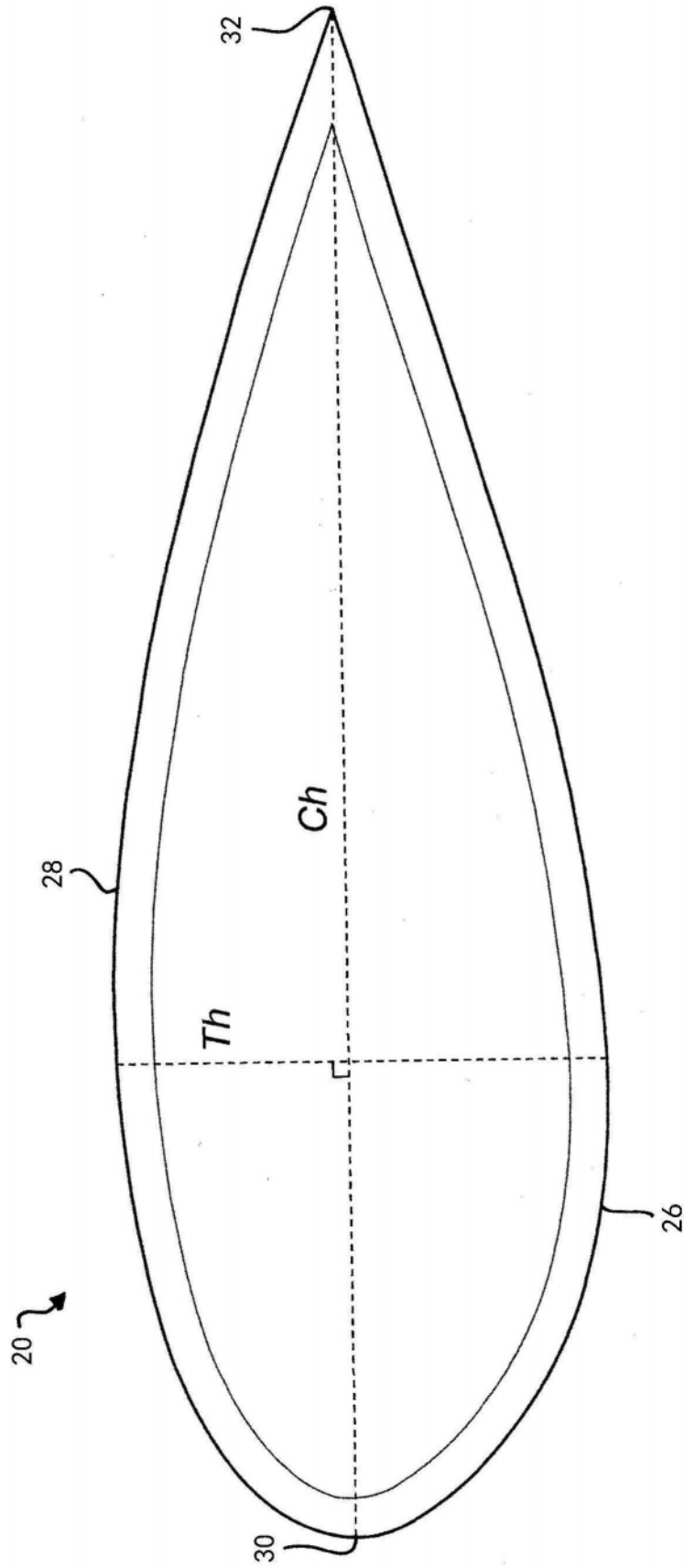


图3

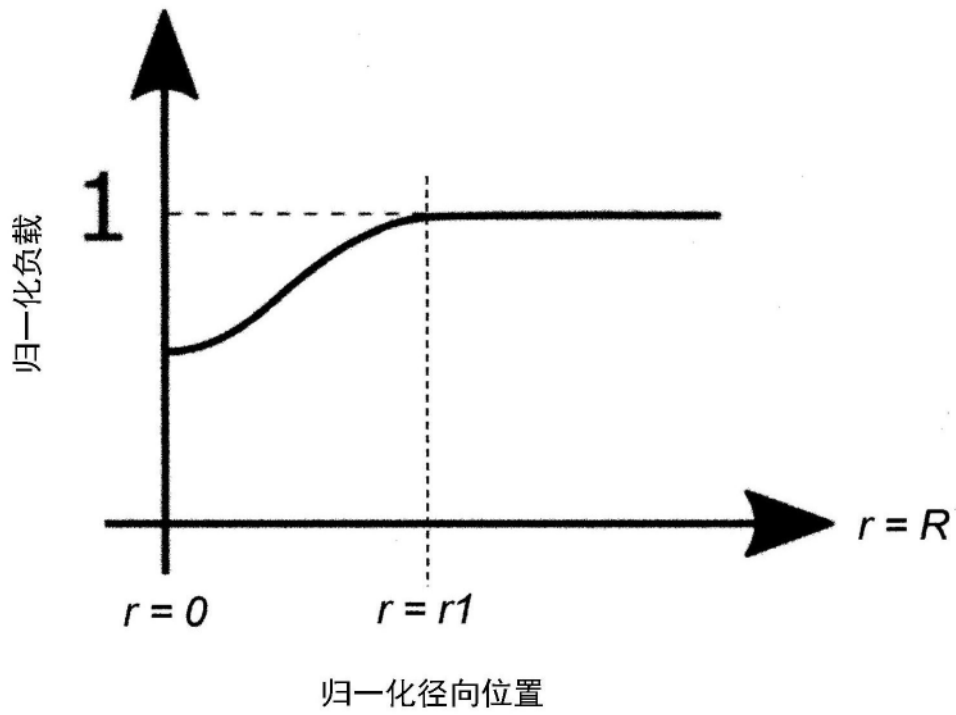


图4

缆索式风力涡轮机叶片20的厚度变化
(未按比例)

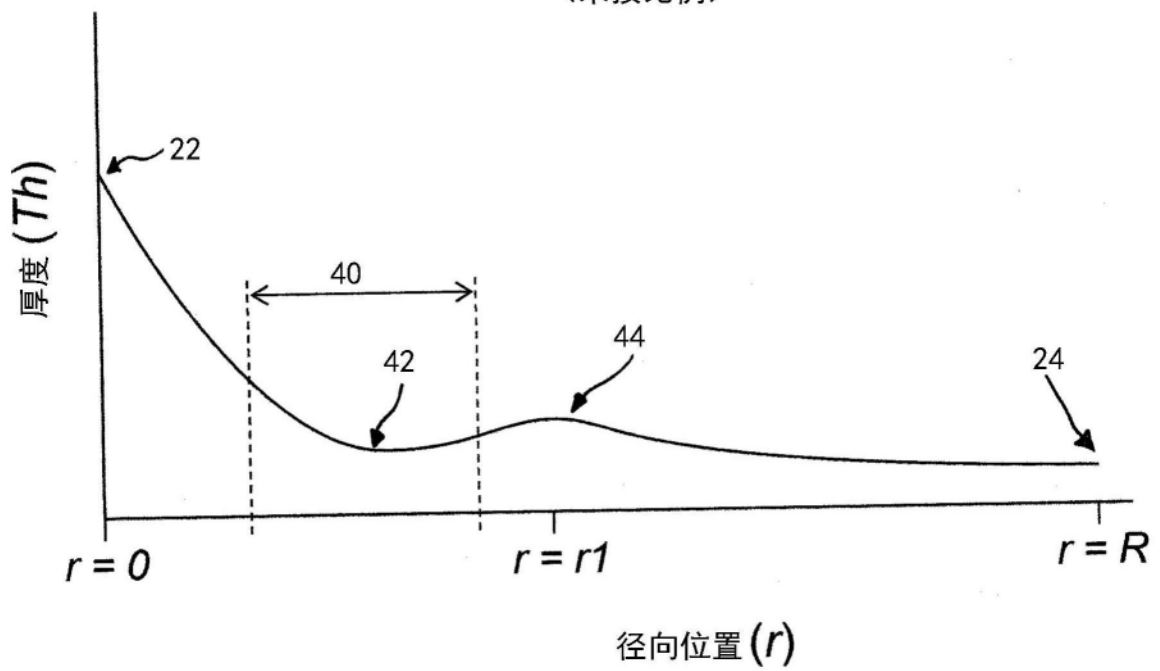


图5

缆索式风力涡轮机叶片20的厚度变化
(未按比例)

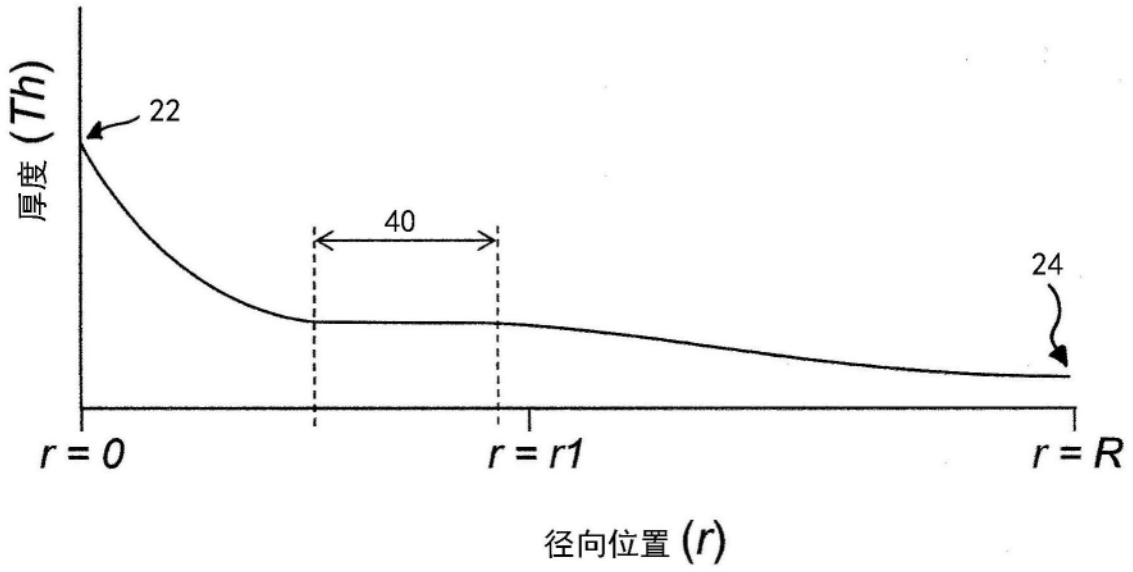


图6

缆索式风力涡轮机叶片20的相对厚度变化
(未按比例)

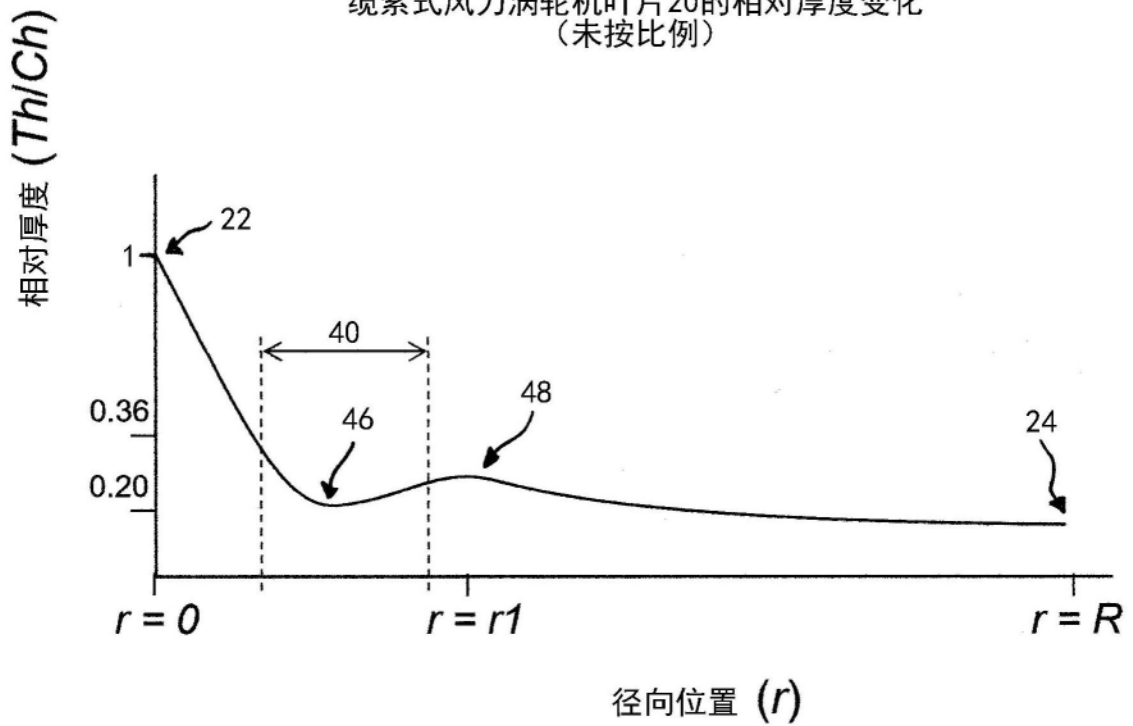


图7

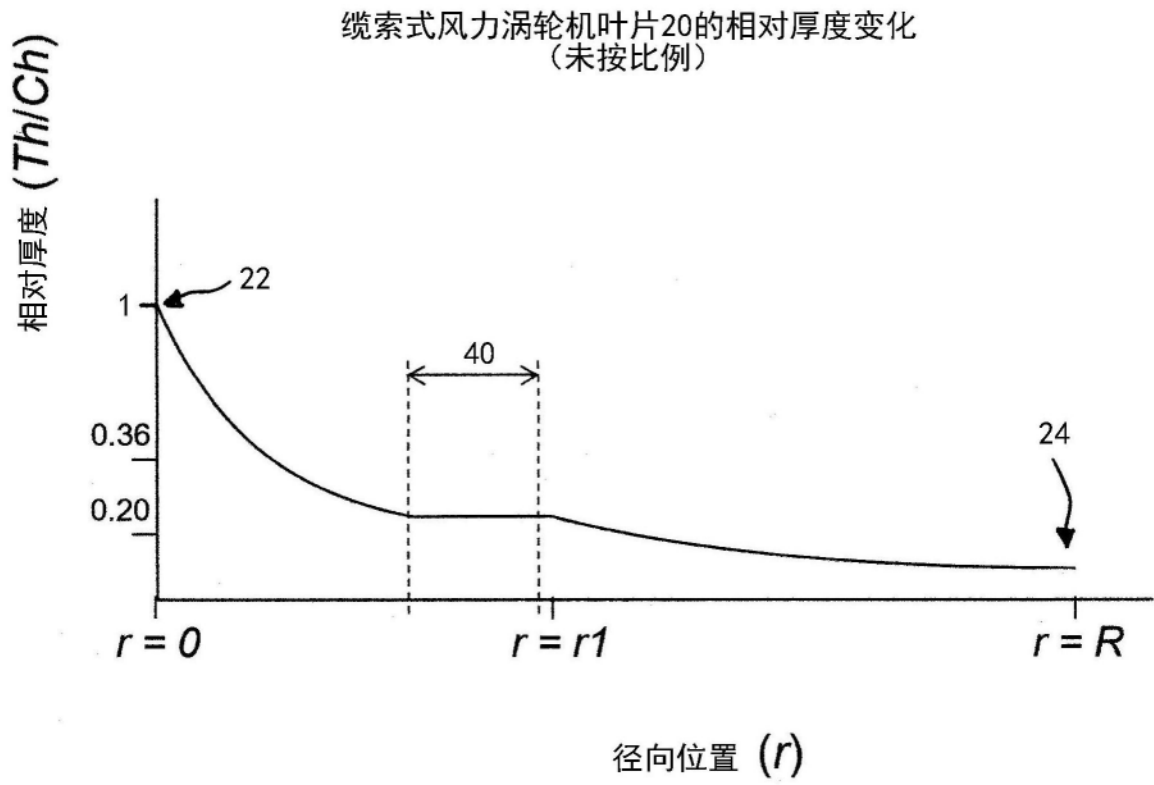


图8

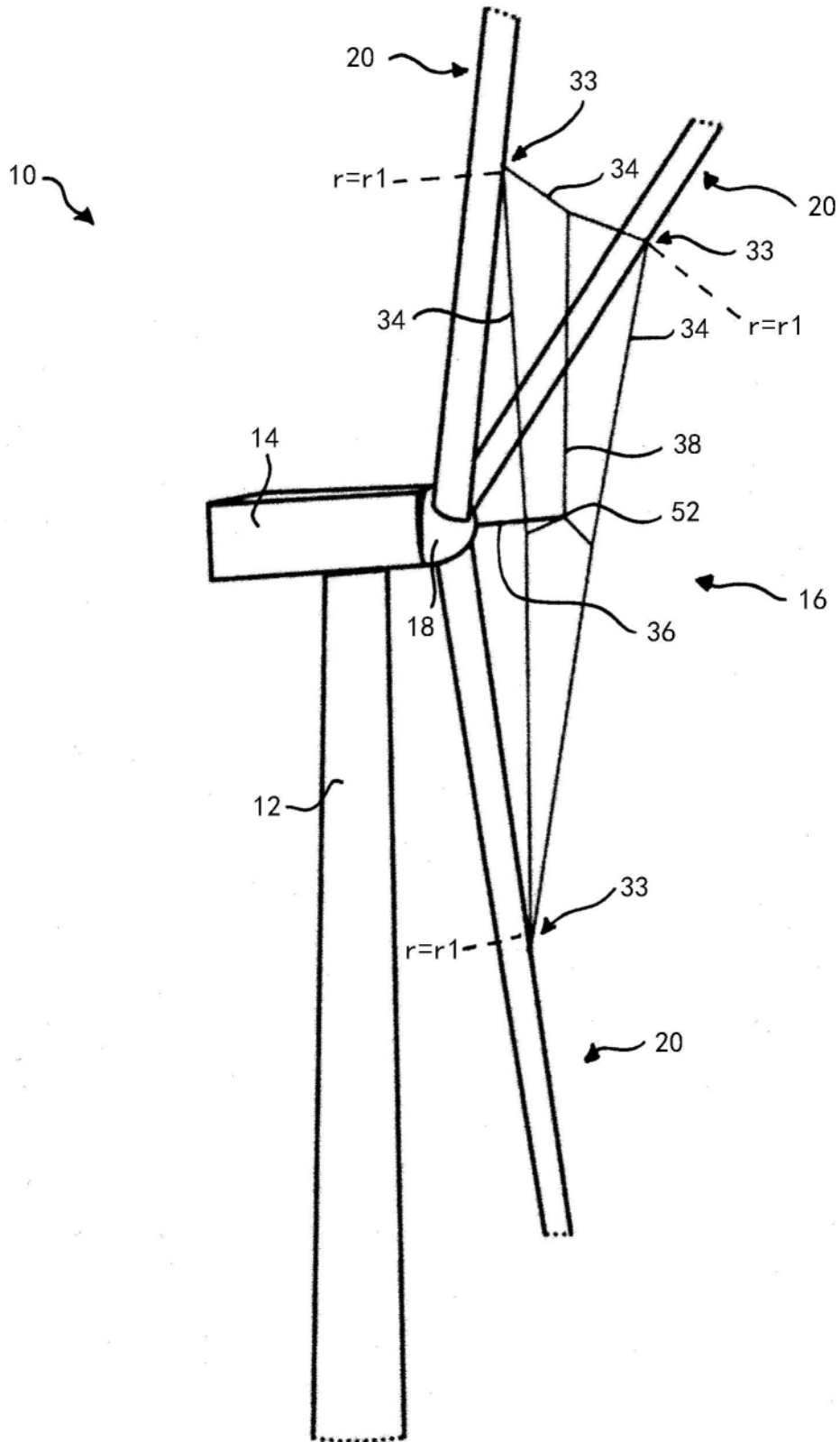


图9