



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105604810 B

(45)授权公告日 2020.06.16

(21)申请号 201510773796.9

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2015.11.13

F03D 80/30(2016.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

F03D 1/06(2006.01)

申请公布号 CN 105604810 A

审查员 赵银凤

(43)申请公布日 2016.05.25

(30)优先权数据

14193039.6 2014.11.13 EP

(73)专利权人 西门子歌美飒可再生能源公司

地址 丹麦布兰德

(72)发明人 P.B.埃内沃尔德森 K.奥尔森

K.希布斯拜

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

代理人 余鹏 李婷

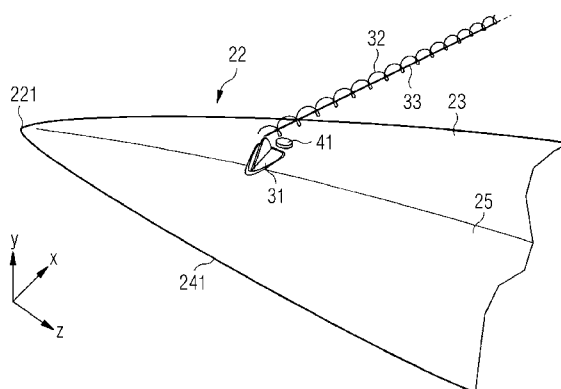
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

引导雷电至雷电接收器

(57)摘要

本发明涉及引导雷电至雷电接收器。本发明涉及一种将雷电引导至用于风力涡轮机的转子叶片的雷电接收器的方法,其中,所述方法包括以下步骤:借助于旋涡发生器产生气流的旋涡,所述旋涡发生器位于转子叶片的表面处;通过旋涡吸引雷电;将雷电引导到雷电接收器。此外,本发明还涉及一种用于风力涡轮机的转子叶片,其中,所述转子叶片包括:用于产生气流的旋涡的旋涡发生器,所述旋涡发生器位于转子叶片的表面处;以及用于从雷电接收电流的雷电接收器。旋涡发生器和雷电接收器相对于彼此被布置成使得雷电被通过旋涡发生器产生的旋涡引导到雷电接收器。最后,本发明涉及旋涡的吸引雷电的用途。



1. 一种将雷电引导到用于风力涡轮机(10)的转子叶片(20)的雷电接收器(41)的方法, 其中, 所述方法包括以下步骤:

借助于旋涡发生器(31)产生气流的旋涡(32), 所述旋涡发生器(31)位于所述转子叶片(20)的表面处, 所产生的旋涡(32)位于所述转子叶片(20)的末端部段(22)处, 通过所述旋涡发生器(31)产生的所述旋涡(32)具有第一旋转方向(34);

通过所述转子叶片(20)的末端部段(22)的形状产生末端旋涡(51), 通过所述转子叶片(20)的末端部段(22)的形状产生的所述末端旋涡(51)具有第二旋转方向(52), 所述第一旋转方向(34)和所述第二旋转方向(52)是等同的;

将通过所述旋涡发生器(31)产生的所述旋涡(32)和通过所述转子叶片(20)的末端部段(22)的形状产生的所述末端旋涡(51)合并在一起, 以形成合并的旋涡;

通过所述合并的旋涡吸引所述雷电; 以及

将所述雷电经由所述合并的旋涡引导到所述雷电接收器(41)。

2. 根据权利要求1所述的方法,

其特征在于, 所述旋涡发生器(31)被改装到所述转子叶片(20)。

3. 根据权利要求1或2所述的方法,

其特征在于,

所述雷电接收器(41)被改装到所述转子叶片(20),

所述雷电接收器(41)被布置和准备成用于从所述雷电接收电流, 以及

所述雷电接收器(41)被连接到避雷针, 以便将所述电流传送到地面。

4. 根据权利要求1或2所述的方法,

其特征在于, 所述旋涡发生器(31)通过提高所述转子叶片(20)的升阻比而附加地提高了所述转子叶片(20)的效率。

5. 根据权利要求1所述的方法,

其特征在于, 所述雷电接收器(41)被布置和准备成用于从所述雷电接收电流, 以及

所述雷电接收器(41)被连接到避雷针, 以便将所述电流传送到地面。

6. 根据权利要求1或5所述的方法,

其特征在于, 所述雷电接收器(41)位于所述旋涡发生器(31)的下游。

7. 根据权利要求1或5所述方法,

其特征在于, 所述旋涡发生器(31)位于所述转子叶片(20)的吸力侧(251)处。

8. 根据权利要求1或5所述的方法,

其特征在于, 所述旋涡发生器(31)和所述雷电接收器(41)彼此接近地隔开。

9. 根据权利要求1或5所述的方法,

其特征在于, 所述旋涡发生器(31)和所述雷电接收器(41)之间的距离小于50厘米。

10. 根据权利要求1或5所述的方法,

其特征在于, 所述旋涡发生器(31)和所述雷电接收器(41)之间的距离小于5厘米。

11. 根据权利要求1或5所述的方法,

其特征在于, 所述旋涡发生器(31)包括导电材料。

12. 根据权利要求1或5所述的方法,

其特征在于, 所述旋涡发生器(31)包括钢。

13. 根据权利要求1或5所述的方法，
其特征在于，所述旋涡发生器(31)和所述雷电接收器(41)通过导电材料连接。
14. 根据权利要求1或5所述的方法，
其特征在于，所述旋涡发生器(31)被布置在所述雷电接收器(41)的顶部上。

引导雷电至雷电接收器

技术领域

[0001] 本发明涉及一种将雷电引导至用于风力涡轮机的转子叶片的雷电接收器的方法。此外,本发明涉及一种具有改进的雷电保护装置的用于风力涡轮机的转子叶片。而且,本发明还涉及将旋涡用于吸引雷电。

背景技术

[0002] 风力涡轮机通常易于受雷电攻击。一方面,这可能是因风力涡轮机被安装在本身易于受雷电攻击的暴露场所处而引起。另一方面,风力涡轮机就其本身而言包括沿风力涡轮机的竖直方向、即沿风力涡轮机的重力方向的相当大的延伸部。这种沿竖直方向的延伸部可能显著地比周围建筑物和/或树木要大,使得与周围的建筑物和/或树木相比,雷电更可能攻击风力涡轮机。

[0003] 如果雷电攻击风力涡轮机,则经常会击中风力涡轮机的转子叶片。这是由于如下事实,即:对于具有至少三个转子叶片的水平轴线的风力涡轮机而言,相应的转子叶片的末端通常代表风力涡轮机在地面上方的最高的点或部段。因此,转子叶片、特别是转子叶片的末端部段易受雷击的影响和侵害。

[0004] 在现有技术水平下,雷电保护装置通常包括雷电接收器,其被集成在转子叶片的壳体中,并且通过导电材料与避雷针连接。避雷针被布置和准备成用于将来自雷击的电流传送至地面。这样的常规雷电接收器通常由具有高导电率的材料制成,并且具有几厘米的大小。它可相对于转子叶片的壳体的表面略微暴露,但是从空气动力学的观点来看,雷电接收器完全集成到叶片壳体中是优选的。

[0005] 常规的雷电保护装置的缺点在于,尽管在转子叶片上的突出和易受影响的位置处存在雷电接收器,但大量的雷击在离开雷电接收器一定距离处击中转子叶片。这可对转子叶片、特别是对可能由纤维复合材料制成的转子叶片的壳体造成相当大的损伤。由于雷击引起的对转子叶片的损伤从不需要立即维修的轻微损伤达到超过需要及时维修以避免水或灰尘进入转子叶片的内部结构的转子叶片的壳体的更严重的损伤,并且直至达到需要风力涡轮机停机的转子叶片的重大损伤。

[0006] 例如,国际专利申请W0 2012/055418 A1中公开了一种常规的风力涡轮机雷电保护系统。其中,附接在旋涡发生器条带上的多个旋涡发生器通过导电带连接到雷电保护系统的接收器。与只具有结合到转子叶片的壳体中的雷电接收器的常规基本系统相比,这是一种改进,只要雷电能够攻击沿导电的旋涡发生器条带的任何点并且随后被传导到雷电接收器。然而,这种雷电保护装置需要在雷电接收器的附近设置旋涡发生器条带或至少设置导电带。此外,仍有相当大的可能雷电在离开导电带或旋涡发生器条带一定距离处攻击或击中转子叶片。

[0007] 因此,将需要提供一种雷电保护装置以及与现有技术水平相比得到了改进的避免雷电击中并损坏用于风力涡轮机的转子叶片的方法。因此,能够实现降低雷击在离开雷电接收器一定距离处击中转子叶片的比率。

发明内容

[0008] 此目标通过独立权利要求来解决。从属权利要求表示有利的发展和修改。

[0009] 根据本发明,提供了一种将雷电引导到用于风力涡轮机的转子叶片的雷电接收器的方法,其中,所述方法包括以下步骤:

[0010] - 借助于旋涡发生器产生气流的旋涡,其中,所述旋涡发生器位于转子叶片的表面处;

[0011] - 通过旋涡吸引雷电;以及

[0012] - 将雷电引导到雷电接收器。

[0013] 换言之,本发明公开了如何将雷电引导到转子叶片上的适当位置、即雷电接收器所处的位置的概念。这通过简单且廉价的方式来实现。

[0014] 所述方法得益于如下技术效果,即:由于旋涡中心处的较低压力,雷电优选地被旋涡吸引。旋涡中心处增加的湿度是通过旋涡更有可能吸引雷电的另一个原因。换言之,雷电优选地在存在真空的区域中攻击转子叶片。在转子叶片附近不存在技术真空(technical vacuum)。然而,由于转子叶片在空气中的移动和转子叶片的空气动力学形状,在空气压力上存在差异。因此,同样在不存在技术真空的情况下,雷电优先攻击处于低压的区域中的转子叶片。

[0015] 因此,本发明的一个关键方面是,到目前为止仅从空气动力学视角评估的旋涡发生器也可被用于雷电保护。在现有技术水平下,旋涡发生器已被用作例如失速还原装置,或者如果前缘被污染,用作用于增加转子叶片的效率的装置。在本发明中,在雷电保护的背景下,通过旋涡发生器产生的旋涡是有益的。因此,在存在旋涡的情况下,通过此旋涡并且通过小心地布置旋涡发生器和雷电接收器来吸引雷电,并且雷电被直接引导到雷电接收器并防止在别处击中转子叶片。

[0016] 在本发明的实施例中,所产生的旋涡位于转子叶片的末端部段处。通过旋涡发生器产生的旋涡具有第一旋转方向。转子叶片的末端部段的形状所产生的末端旋涡具有第二旋转方向。所述第一旋转方向和所述第二旋转方向是基本上等同的。

[0017] 换言之,如果通过旋涡发生器产生的旋涡的旋转方向和转子叶片的末端所产生的末端旋涡的旋转方向彼此相对应,则是有利的。这些旋转方向也被称为旋动方向(spinning direction)。如果两个旋转方向彼此匹配,则通过旋涡发生器产生的通常较小的旋涡合并到转子叶片的末端部段所产生的通常较大的末端旋涡中。因此,降低了噪声并且提高了效率。

[0018] 与旋涡发生器和转子叶片的末端部段的旋涡反方向旋转的相反情况相比,这是有利的实施例。注意,转子叶片的末端部段所产生的末端旋涡是常规的转子叶片的众所周知的现象。在常规的工业型风力涡轮机中,末端旋涡在末端部段的下游可延伸数米。

[0019] 在本发明的另一个实施例中,旋涡发生器被改装到转子叶片。

[0020] 由于雷电保护装置的廉价和简单的设置,所以旋涡发生器能够容易地被改装在现有的转子叶片上。此转子叶片还可以被安装在风力涡轮机上,并且例如可以持续运转几年。因此,本发明是具有成本效益和吸引力的。

[0021] 可替代地,当然,本发明也可以被建立在新制造的转子叶片上。

[0022] 在本发明的另一个实施例中,雷电接收器被改装到转子叶片,并且雷电接收器被

布置和准备成用于从雷电接收电流。雷电接收器被连接到避雷针,以便将电流传送到地面。

[0023] 因此,即使迄今为止在转子叶片上不存在任何雷电接收器,或者如果有意将另一雷电接收器添加到转子叶片,通过将雷电接收器添加和改装到现有的转子叶片,这能够容易地执行。显然,雷电接收器必须被连接到避雷针以便将电流传送到地面。因此,为了更高效地将雷电引导到雷电接收器和/或进一步将像这样的另一雷电接收器添加和集成到转子叶片,在通过旋涡发生器改装现有的转子叶片方面存在灵活性。

[0024] 在本发明的另一个实施例中,旋涡发生器特别是通过提高转子叶片的升阻比来附加地提高转子叶片的效率。

[0025] 应当注意的是,如到目前为止所述的旋涡发生器主要服务于为吸引雷电并且将雷电引导到雷电接收器而产生旋涡的目的。为了服务于这个目的,不一定需要顾及到空气动力学方面的考虑。因此,旋涡发生器例如可以被设计得相对较大。为了给出具体的示例:对于具有75米的总长度的风力涡轮机的常见的转子叶片而言,用于控制流动分离和/或与前缘污染有关的典型的旋涡发生器具有几毫米最多达一厘米或两厘米的竖直延伸部。此相对较小的尺寸的一个原因在于使旋涡发生器的阻力(drag)最小化,这些旋涡发生器通常数十个旋涡发生器成组地安装在转子叶片上。

[0026] 与这些常规的空气动力学旋涡发生器相比,用于吸引雷电的单旋涡发生器也能具有比上述给定数字大的尺寸。例如,具有几厘米的大小的旋涡发生器可能是最佳的。这是由于如下事实,即:在雷电保护装置的背景下,旋涡发生器主要具有在所述旋涡发生器所处位置的下游产生表现出足够的大小和延伸的旋涡的任务。

[0027] 综上所述,应当强调的是,用于将雷电引导到雷电接收器的旋涡发生器可以附加地具有空气动力学的目的,但这不是必要的要求。

[0028] 本发明还涉及一种用于风力涡轮机的转子叶片,其中,所述转子叶片包括:用于产生气流的旋涡的旋涡发生器,其中,所述旋涡发生器位于转子叶片的表面处;以及用于从雷电接收电流的雷电接收器。所述旋涡发生器和所述雷电接收器相对于彼此被布置成使得雷电被所述旋涡发生器所产生的旋涡引导到所述雷电接收器。

[0029] 换言之,本发明涉及一种用于风力涡轮机的转子叶片,其中,所述转子叶片包括用于产生气流的旋涡的旋涡发生器和雷电接收器,其中,所述旋涡发生器和所述雷电接收器相对于彼此被布置成使得雷电被所述旋涡发生器所产生的旋涡引导到所述雷电接收器。

[0030] 特别地,本发明涉及一种风力涡轮机的转子叶片。

[0031] 注意,关于将雷电引导到用于风力涡轮机的雷电接收器的方法所述的特征和修改也同样地适用于用于风力涡轮机的转子叶片,并且反之亦然。

[0032] 在本发明的一个实施例中,转子叶片被配置成使得雷电接收器被连接到避雷针以便将电流传送到地面。

[0033] 存在实现将在雷电接收器处接收的雷电传导到其上安装有风力涡轮机的地面的不同的方式和方法。本领域技术人员将知道或将至少能够告知他自己例如雷电如何从转子叶片传送到轮毂,从旋转的轮毂传送到固定的机舱以及从机舱经由偏航轴承和塔架传送到地面。

[0034] 在另一个有利的实施例中,雷电接收器位于旋涡发生器的下游。

[0035] 因为旋涡主要或仅仅建立在旋涡发生器所处位置的下游,所以有益的是如果雷电

接收器被放置在旋涡发生器的下游。通过此措施,确保了通过旋涡吸引的雷电经过雷电接收器,并且不需要沿转子叶片的表面上的特定距离行进。

[0036] 在另一个有利的实施例中,旋涡发生器位于转子叶片的吸力侧处。

[0037] 注意,原则上旋涡发生器和雷电接收器的放置在转子叶片的两侧上、即压力侧和吸力侧上都是可能的。在一些情况下,在两侧上都具有这样的雷电保护装置甚至可能是有利的。然而,通常,大多数的攻击是在转子叶片的吸力侧处攻击转子叶片。因此,旋涡发生器和雷电接收器在吸力侧上的定位是有利的。注意,在转子叶片在末端部段处装备有小翼的情况下,其中,所述小翼以超过60度或70度的大角度弯曲,优选的是,包括雷电接收器和旋涡发生器的雷电保护系统被放置在所述小翼的两侧上、即压力侧和吸力侧上。在转子叶片的每一侧上具有旋涡发生器的优点在于,通过旋涡发生器产生的旋涡可有利地合并到后缘之后的一个较大的旋涡中,并且随后,能够合并到转子叶片的末端部段所产生的甚至更大的末端旋涡中。

[0038] 在另一个有利的实施例中,旋涡发生器和雷电接收器彼此接近地隔开。

[0039] 特别地,旋涡发生器和雷电接收器之间的距离小于50厘米,甚至小于5厘米。

[0040] 换言之,有利的是如果旋涡发生器紧挨着雷电接收器。因为本发明的一个主要目的在于减少雷击在离开雷电接收器一定距离处击中转子叶片的比率,所以关键的是引导雷电接近地通过雷电接收器;因此在雷电接收器和旋涡发生器之间的小距离是优选的。

[0041] 应当强调的是,优选为小于50厘米、特别是小于5厘米的给定值与达到具有50米至80米之间的长度的风力涡轮机的标准转子叶片相关。对于其长度偏离这些标准范围的转子叶片而言,更长或更短的距离可能是优选的。还能说明的是,旋涡发生器和雷电接收器之间的距离优选地小于在雷电接收器的翼展向位置处的弦长度的百分之五,特别是小于在给定翼展位置处的弦长度的百分之二。

[0042] 在另一个有利的实施例中,旋涡发生器和雷电接收器通过导电材料来连接。这种附加的连接可提高通过旋涡吸引的雷电最终被雷电接收器接收的概率。

[0043] 然而,注意此实施例脱离了现有技术水平,这是因为雷电被旋涡发生器的旋涡吸引和引导,在现有技术中不是这种情况并且这在现有技术中也未公开。

[0044] 又在本发明的另一个实施例中,旋涡发生器被布置在雷电接收器的顶部上。

[0045] 旋涡发生器能够被直接放置在雷电接收器的顶部上。可替代地,还可以有一些中间层,例如当多个旋涡发生器对被安装在风力涡轮机的转子叶片上时很常见的旋涡发生器的条带或基部。在旋涡发生器被放置在雷电接收器的顶部上的情况下,特别有利的是如果旋涡发生器本身由例如不锈钢之类的导电材料制成。

[0046] 旋涡发生器可以通过焊接(例如,点焊)附接到雷电接收器。例如,除不锈钢之外的替代性导电材料是铝、铜、碳或例如黄铜之类的合金。

[0047] 注意,在雷电接收器被结合到转子叶片的壳体之后,旋涡发生器可以被紧固到雷电接收器。这能够在新制造的转子叶片上完成,或者它能够被改装在风力涡轮机的已安装的转子叶片上。

[0048] 显然,如果雷电保护装置被放置在新制造的转子叶片上,则例如通过机器人的自动化是有利的。

[0049] 最后,本发明还涉及用于吸引雷电的旋涡的用途。所述旋涡通过位于用于风力涡

轮机的转子叶片的表面处的旋涡发生器来产生,并且雷电随后通过所述旋涡被引导到雷电接收器。

[0050] 如已描述的,在现有技术水平下,旋涡发生器仅被称为空气动力学装置。在此背景下,通过旋涡发生器产生的旋涡服务于如下目的,即:例如,重新激励转子叶片的边界层,以便使失速延迟到较高的攻角。此外,在前缘例如受到污垢、灰尘或昆虫污染的背景下,旋涡发生器对转子叶片的效率具有积极的影响。

[0051] 本发明的关键概念是使用旋涡来吸引雷电。通过详细地解释将雷电引导到雷电接收器的方法,以及通过公开设有雷电保护系统的转子叶片,已示出并且公开了旋涡如何能够被用于吸引雷电。

附图说明

[0052] 现在参考附图,仅借助于示例来描述本发明的实施例,在附图中:

[0053] 图1示出了风力涡轮机;

[0054] 图2示出了风力涡轮机的转子叶片;

[0055] 图3示出了设有旋涡发生器和雷电接收器的转子叶片的末端部段;

[0056] 图4以另一个视角示出了与图3相同的转子叶片的末端部段;以及

[0057] 图5示出了通过旋涡发生器产生的旋涡和通过转子叶片的末端部段产生的末端旋涡。

[0058] 附图中的图示是采用示意性形式。应当注意的是,在不同的附图中,相似或相同的元件可设有相同的附图标记。

具体实施方式

[0059] 在图1中,示出了风力涡轮机10。风力涡轮机10包括机舱12和塔架11。机舱12被安装在塔架11的顶部处。机舱12借助于偏航轴线(yaw bearing)承相对于塔架11可旋转地安装。机舱12相对于塔架11的旋转轴线被称为偏航轴线。

[0060] 风力涡轮机10还包括具有三个转子叶片20(图1中描绘了其中的两个转子叶片20)的轮毂13。轮毂13借助于主轴承相对于机舱12可旋转地安装。轮毂13围绕转子旋转轴线14可旋转地安装。

[0061] 此外,风力涡轮机10还包括主轴,其将轮毂13与发电机15的转子连接。轮毂13被直接连接到所述转子,因而风力涡轮机10被称为无齿轮传动(gearless)的直驱式风力涡轮机。作为替代方案,轮毂13也可以经由齿轮箱连接到转子。这种类型的风力涡轮机被称为齿轮传动式风力涡轮机。

[0062] 发电机15被容纳在机舱12内。它包括转子和定子。发电机15被布置和准备成用于将来自转子的转动能转化成电能。

[0063] 图2示出了风力涡轮机的转子叶片20。转子叶片20包括具有根部211的根部部段21和具有末端221的末端部段22。根部211和末端221通过跨度(span)26虚拟地连接,所述跨度26依循转子叶片20的形状。如果所述转子叶片是矩形形状的物体,则跨度26将是直线。然而,因为转子叶片20以不同的厚度为特征,所以跨度26也是略微成曲形或弯曲的。注意,如果转子叶片20本身是弯曲的,则跨度26也将是弯曲的。

[0064] 此外,转子叶片20还包括具有前缘241的前缘部段24和具有后缘231的后缘部段23。

[0065] 后缘部段23围绕后缘231。同样,前缘部段24围绕前缘241。

[0066] 在每个翼展向位置处,能够限定将前缘241与后缘231连接的弦线27。注意,弦线27垂直于跨度26。在所述弦线包括最大弦长度的区域中限定肩部28。

[0067] 此外,转子叶片20能够被分成包括转子叶片20与根部部段21相邻的一半的内侧部段和包括转子叶片20与末端部段22相邻的一半的外侧部段。

[0068] 图3示出了转子叶片的末端部段22。末端部段22包括吸力侧251和压力侧252(后者在图3上非直接可见)。此外,所述转子叶片包括前缘241以及与前缘241相对的后缘231。在吸力侧251上安装了旋涡发生器31和雷电接收器41。旋涡发生器31紧挨着雷电接收器41以一定间隔隔开。如果气流从前缘241流动到后缘231,则旋涡发生器31产生旋涡32。旋涡32也被称为螺旋。在任何情况下,旋转方向和旋转轴线33能够归因于旋涡32。

[0069] 图4示出了与图3相同的实施例,但是从不同的视角来看。虽然图3在从前缘241的透视图示出了转子叶片的末端部段22,但图4在到转子叶片的吸力侧251上的顶视图示出了转子叶片的末端部段22。在此顶视图中,能够辨别出旋涡发生器31和雷电接收器41之间的距离。

[0070] 在图3和图4的具体示例中,转子叶片在旋涡发生器31的翼展向位置处的弦长为大约70厘米。在此背景下,应当注意的是,雷电接收器41和旋涡发生器31之间的距离42仅为2厘米。这确保了从旋涡的衰减端(fading end)被引导直至旋涡的源、即旋涡发生器31本身的雷电被引导到旋涡发生器31,并且直接经过雷电接收器41。在那里,它被传导至避雷针,并且随后传导至地面。

[0071] 图5给出了转子叶片的末端部段22的另一个实施例。在此图中,从后缘231观察末端部段22。换言之,因为转子叶片被布置和准备成使得气流从前缘部段流动到后缘部段,所以从下游的视角来观察图5的转子叶片。此外,在图5中能够辨别出旋涡发生器31。甚至比旋涡发生器31本身更加突出的是旋涡发生器31所产生的旋涡32。还能看到的是,所述旋涡具有沿顺时针方向的第一旋转方向31。

[0072] 所述转子叶片包括末端221。如果气流在所述转子叶片上流动,则在末端221处产生末端旋涡51。末端旋涡51对转子叶片下游的空气压力具有影响。在典型的操作条件下,这种影响在转子叶片下游的几米可测量。第二旋转方向52能够归因于末端旋涡51。在图5的示例中,末端旋涡51的第二旋转方向52为顺时针方向。这是有利的,因为通过这一措施,较小的旋涡32和较大的末端旋涡51合并在一起,并且不会引起可能产生另外的旋涡的任何附加的噪声。

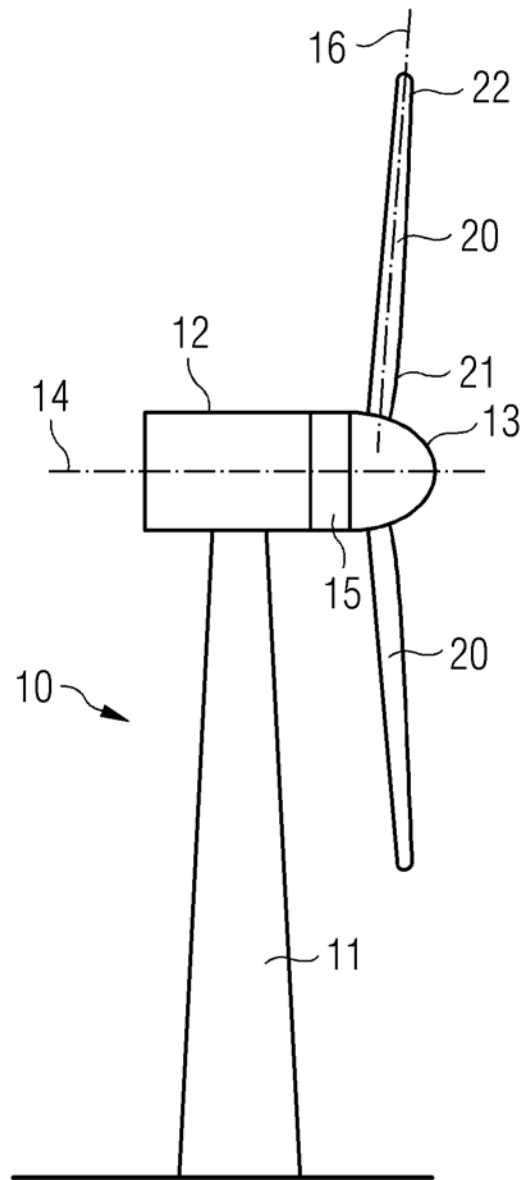


图 1

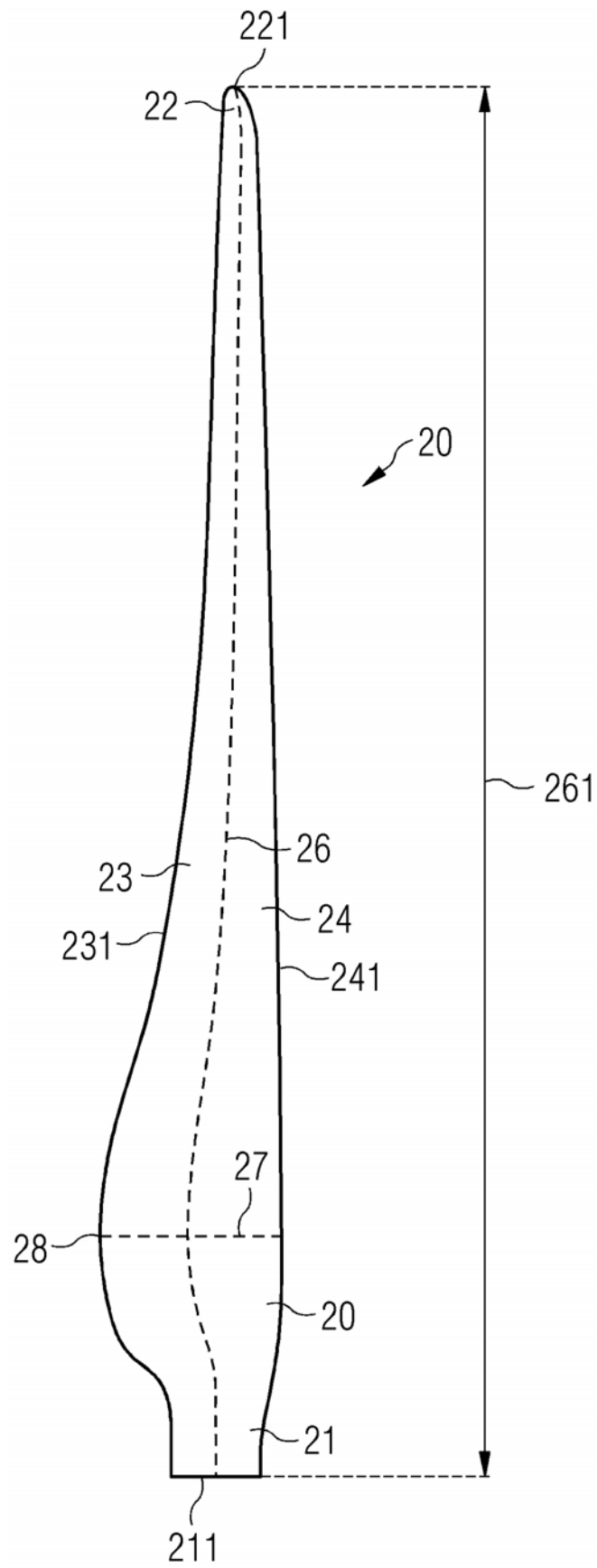


图 2

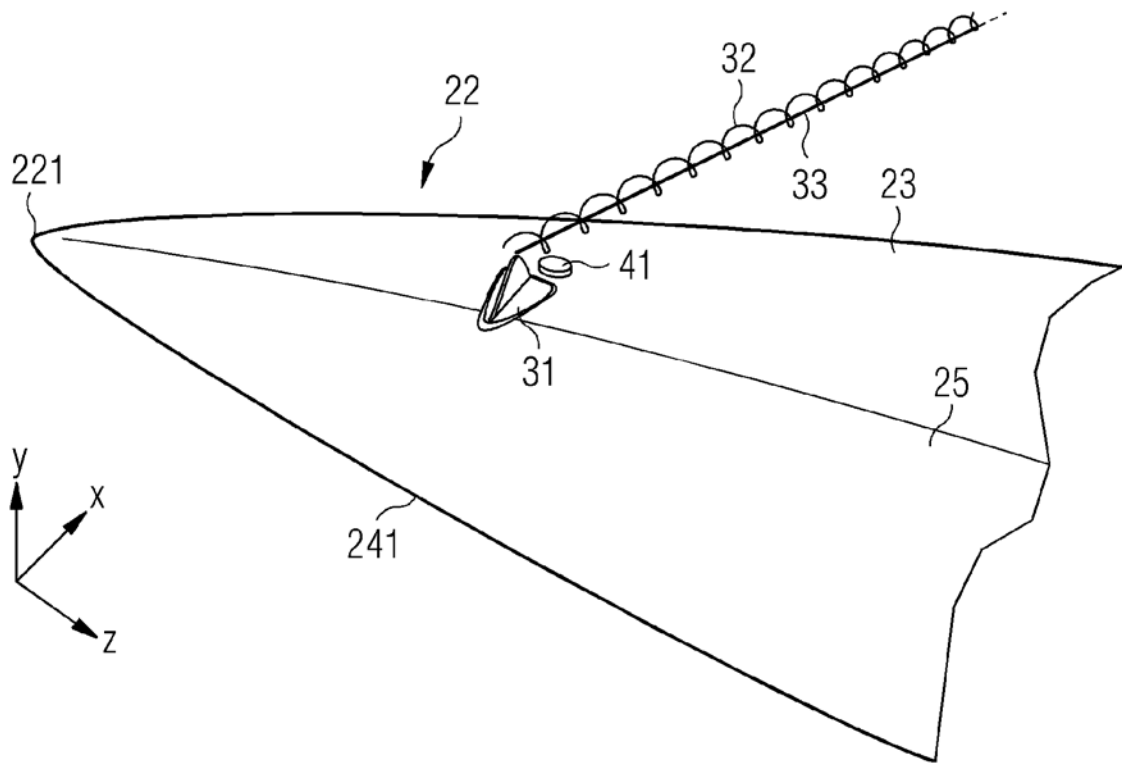


图 3

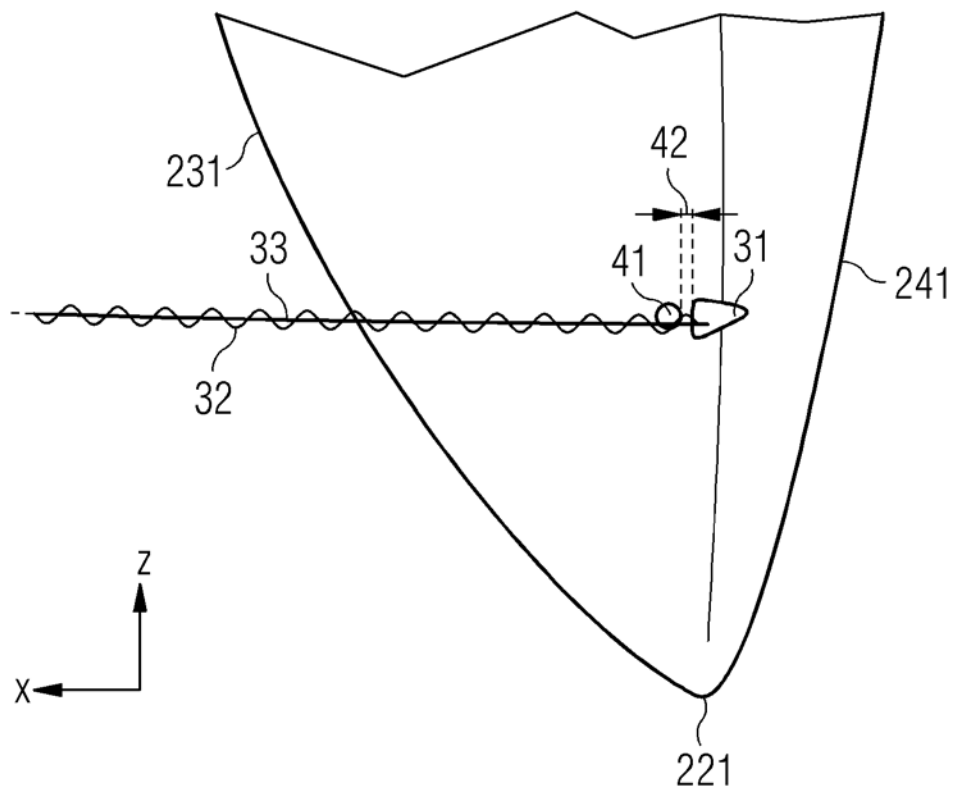


图 4

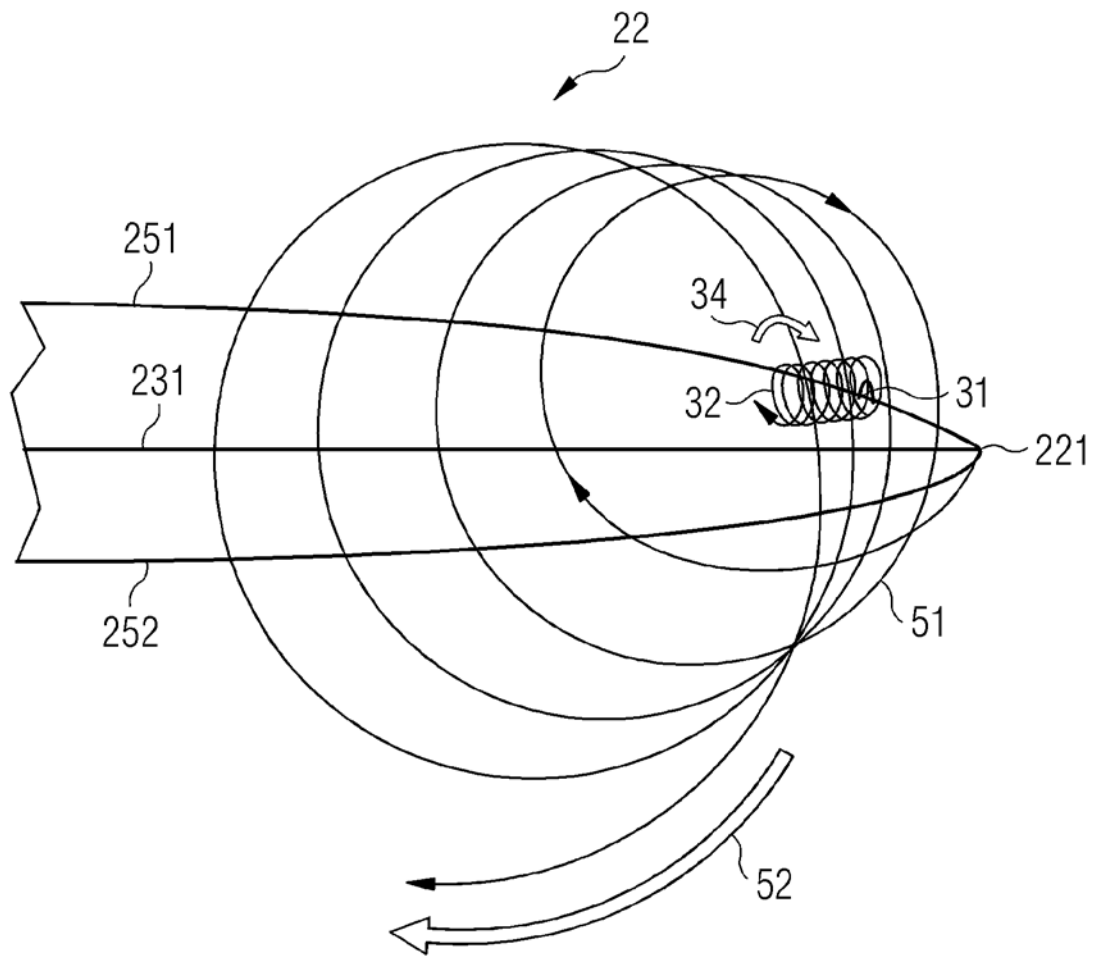


图 5