



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101351640 B

(45) 授权公告日 2012.07.04

(21) 申请号 200580052323.4

审查员 池建军

(22) 申请日 2005.10.17

(85) PCT申请进入国家阶段日

2008.06.16

(86) PCT申请的申请数据

PCT/IB2005/053397 2005.10.17

(87) PCT申请的公布数据

W02007/045940 EN 2007.04.26

(73) 专利权人 维斯塔斯风力系统有限公司

地址 丹麦兰纳斯

(72) 发明人 K·B·戈德斯克 T·S·B·尼尔森

(74) 专利代理机构 北京市中咨律师事务所

11247

代理人 马江立 吴鹏

(51) Int. Cl.

F03D 1/06 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

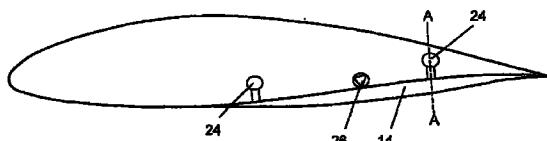
权利要求书 4 页 说明书 16 页 附图 9 页

(54) 发明名称

具有可变空气动力学轮廓的风轮机叶片

(57) 摘要

本发明提供了一种风轮机叶片，该风轮机叶片包括主动弹性件，该主动弹性件布置成提供到风轮机叶片的表面的通路。主动弹性件可从第一形状变形到第二形状，并且在主动弹性件处于第一形状时翼型的升力系数大于在主动弹性件处于第二形状时翼型的升力系数。此外，还提供了包括这种风轮机叶片的风轮机以及操作包括这种风轮机叶片的风轮机的方法。



1. 一种风轮机叶片，具有吸力侧和压力侧，所述吸力侧和压力侧在前缘和后缘处连接，该叶片还具有主动弹性件，所述主动弹性件布置成能接近风轮机叶片的表面，其中，主动弹性件能从第一形状变形到第二形状，在主动弹性件处于第一形状时的翼型的最大升力系数 $C_{L, \max 1}$ 大于在主动弹性件处于第二形状时的翼型的最大升力系数 $C_{L, \max 2}$ ，其中所述主动弹性件布置成使叶片的厚度在主动弹性件变形时改变，以使室线相对于弦线移位，其特征在于，所述主动弹性件布置成能接近叶片翼型的压力侧。

2. 按照权利要求 1 的风轮机叶片，其特征在于，主动弹性件布置在后缘和距前缘 40% 弦长之间的区域中。

3. 按照权利要求 2 的风轮机叶片，其特征在于，用于翼型的主动弹性件布置如下：从弦长的 50-70% 到弦长的 80-90%。

4. 按照权利要求 1 的风轮机叶片，其特征在于，所述主动弹性件布置在叶片的最外面的 50 半径% 中。

5. 按照权利要求 1 的风轮机叶片，其特征在于，所述主动弹性件布置在叶片的翼型最大厚度处与后缘之间的区域中。

6. 按照权利要求 1 的风轮机叶片，其特征在于，还包括布置在叶片的末端附近的风速计，所述风速计功能性地连接到一控制单元上，所述控制单元能控制主动弹性件的形状。

7. 按照权利要求 1 的风轮机叶片，其特征在于，还包括布置在叶片中以建立叶片的张紧的叶片张紧装置，上述叶片张紧装置功能性地连接到一控制单元上，所述控制单元能控制主动弹性件的形状。

8. 按照权利要求 1 的风轮机叶片，其特征在于，包括多个布置在叶片压力侧的主动弹性件。

9. 按照权利要求 8 的风轮机叶片，其特征在于，还包括多个沿叶片在纵向上分布的风速计，其中所述多个风速计中的每个都布置在所述多个主动弹性件中不同的一个附近，所述多个风速计功能性地连接到控制单元上，所述控制单元能单个地控制所述多个主动弹性件的形状。

10. 按照权利要求 8 的风轮机叶片，其特征在于，所述多个主动弹性件中的至少一个在叶片的长度上延伸 2-30 米。

11. 按照权利要求 8 的风轮机叶片，其特征在于，所述多个主动弹性件中的至少一个延伸风轮机叶片的长度的 3-50%。

12. 按照权利要求 8 的风轮机叶片，其特征在于，所述多个主动弹性件中的至少两个基本上首尾相连地布置，以使第一主动弹性件在叶片的长度上从第二主动弹性件延伸。

13. 按照权利要求 8 的风轮机叶片，其特征在于，所述多个主动弹性件中的至少两个并排布置，以使第一主动弹性件基本上垂直于叶片的长度从第二主动弹性件延伸。

14. 按照权利要求 8 的风轮机叶片，其特征在于，所述多个主动弹性件中的至少两个至少部分地在叶片的长度上和 / 或基本垂直于叶片的长度重叠。

15. 按照权利要求 8 的风轮机叶片，其特征在于，还包括单个地控制主动弹性件的形状的装置。

16. 按照权利要求 1 的风轮机叶片，其特征在于，主动弹性件的第二形状是主动弹性件的松弛状态。

17. 按照权利要求 1 的风轮机叶片, 其特征在于, 在主动弹性件处于第一形状时翼型的最大升力系数 $C_{L,\max 1}$ 至少比在主动弹性件处于第二形状时翼型的最大升力系数 $C_{L,\max 1}$ 大 10%。

18. 按照权利要求 1 的风轮机叶片, 其特征在于, 主动弹性件处于第一形状和第二形状时翼型的升力系数的差 ΔC_L 应大于在 $\alpha_{\max} - 5^\circ$ 至 α_{\max} 之间的所有迎角下的升力系数中最大值的 10%, 此处 α_{\max} 是对应于最大升力系数的迎角。

19. 按照权利要求 1 的风轮机叶片, 其特征在于, 在主动弹性件处于第一形状时翼型的最大升力系数 $C_{L,\max 1}$ 大于 1.2, 以及 / 或者在主动弹性件处于第二形状时翼型的最大升力系数 $C_{L,\max 2}$ 低于 1.0, 此处最大升力系数对应于 Re 在 1 百万至 1 千万的范围内以及流过光滑轮廓表面的二维流。

20. 按照权利要求 1 的风轮机叶片, 其特征在于, 在主动弹性件处于第一形状时的室中翼型与在主动弹性件处于第二形状时的室中翼型不同, 并且室中的差别是至少 0.25% 弦的距离, 该距离与弦线相垂直并且针对与弦线的至少 10% 相对应的一部分翼型。

21. 按照权利要求 1 的风轮机叶片, 其特征在于, 在主动弹性件处于第一形状时翼型的室线与主动弹性件处于第一形状时翼型的弦线垂直地偏离弦长度的至少 1.5%, 这是在前缘和后缘之间范围的至少 10% 中。

22. 按照权利要求 1 的风轮机叶片, 其特征在于, 主动弹性件包括用于接收流体的隔间。

23. 按照权利要求 1 的风轮机叶片, 其特征在于, 主动弹性件与风轮机的刚性部分结合形成用于接收流体的隔间。

24. 按照权利要求 22 或 23 的风轮机叶片, 其特征在于, 还包括用于控制流体到所述隔间中的输送的接收阀, 所述接收阀布置在待控制的隔间附近, 并且所述接收阀功能性地连接到所述隔间。

25. 按照权利要求 24 的风轮机叶片, 其特征在于, 接收阀布置在隔间的朝向叶片根部的端部附近。

26. 按照权利要求 22 或 23 的风轮机叶片, 其特征在于, 还包括用于控制流体从所述隔间的输送的放泄阀, 所述放泄阀布置在待控制的隔间附近, 并且所述放泄阀功能性地连接到所述隔间。

27. 按照权利要求 26 的风轮机叶片, 其特征在于, 放泄阀布置在隔间的朝向叶片末端的端部附近。

28. 按照权利要求 26 的风轮机叶片, 其特征在于, 放泄阀布置成将流体放泄到风轮机叶片的表面。

29. 按照权利要求 22 或 23 的风轮机叶片, 其特征在于, 还包括检测装置, 该检测装置功能性地连接到隔间, 并且所述检测装置能建立隔间中流体的体积。

30. 按照权利要求 22 或 23 的风轮机叶片, 特征在于, 还包括与隔间连通的流体分配系统, 所述流体分配系统与隔间连通。

31. 按照权利要求 30 的风轮机叶片, 特征在于, 还包括用于输送流体的装置, 所述装置与流体分配系统连通。

32. 按照权利要求 22 或 23 的风轮机叶片, 其特征在于, 所述流体是气体。

33. 按照权利要求 1 的风轮机叶片, 其特征在于, 还包括布置在翼型后缘附近的折翼, 所述折翼在下述意义上活动, 即它能被第一位置和第二位置之间的致动器装置致动; 在折翼处于第一位置时翼型的最大升力系数大于在折翼处于第二位置时翼型的最大升力系数。

34. 按照权利要求 33 的风轮机叶片, 其特征在于, 折翼从弦长度的 80–90% 之间从前缘延伸到后缘。

35. 按照权利要求 33 或 34 的风轮机叶片, 其特征在于, 折翼的第二位置与折翼的第一位置相比朝向翼型的吸力侧, 折翼的第二位置是折翼的松弛状态。

36. 按照权利要求 33 或 34 的风轮机叶片, 特征在于, 所述布置在翼型后缘附近的折翼包括多个折翼。

37. 按照权利要求 36 的风轮机叶片, 其特征在于, 所述多个折翼中的至少一个在叶片的长度上延伸 2–20 米。

38. 按照权利要求 36 的风轮机叶片, 其特征在于, 所述多个折翼中的一个延伸风轮机叶片的长度的 3% –50%。

39. 按照权利要求 36 的风轮机叶片, 其特征在于, 所述多个折翼布置成在叶片的长度方向上一个接一个延伸, 在相邻折翼之间布置有弹性连接器, 以使折翼在叶片的纵向方向上形成没有阶梯的连续表面。

40. 按照权利要求 33 的风轮机叶片, 其特征在于, 致动器装置能通过流体致动。

41. 按照权利要求 40 的风轮机叶片, 其特征在于, 致动器装置功能性地连接到流体分配系统, 该流体分配系统与主动弹性件连通。

42. 操作风轮机的方法, 该风轮机具有按照权利要求 1–41 之一的风轮机叶片, 该方法包括以下步骤: 建立来风速度, 如果来风速度低于第一极限值, 则使主动弹性件从第二形状变形到第一形状, 从而翼型在主动弹性件处的升力增加。

43. 按照权利要求 42 的方法, 所述风轮机叶片为按照权利要求 33 的风轮机叶片, 其特征在于, 还包括下述步骤: 如果来风速度低于第二极限值, 则将折翼从第二位置致动到第一位置, 以使翼型在折翼处的升力增加。

44. 按照权利要求 42 或 43 的方法, 其特征在于, 风轮机是俯仰调节式, 且还包括根据所建立的风速调节叶片的总俯仰角的步骤。

45. 操作风轮机的方法, 该风轮机具有按照权利要求 1–41 之一的风轮机叶片, 该方法包括以下步骤: 建立风轮机叶片的张力, 如果张力低于第一极限值, 则使主动弹性件从第二形状变形到第一形状, 以使翼型在主动弹性件处的升力增加。

46. 按照权利要求 45 的方法, 所述风轮机叶片为按照权利要求 33 的风轮机叶片, 其特征在于, 还包括下述步骤: 如果张紧风速低于第二极限值, 则将折翼从第二位置致动到第一位置, 以使翼型在折翼处的升力增加。

47. 按照权利要求 45 或 46 的方法, 其特征在于, 风轮机是俯仰调节式, 且还包括根据所建立的张力调节叶片的总俯仰角的步骤。

48. 操作风轮机的方法, 该风轮机具有按照权利要求 1–41 之一的风轮机叶片, 该方法包括以下步骤: 建立风轮机叶片的张力改变速率, 如果张力增加比第一极限值更快, 则主动弹性件从第一形状变形到第二形状, 以使翼型在主动弹性件处的升力减小。

49. 按照权利要求 42、45 或 48 的方法, 其特征在于, 风轮机叶片包括至少两个布置在距

叶片根部不同距离处的主动弹性件,所述主动弹性件中的至少两个可独立地变形,所述方法包括以下步骤:对每个主动弹性件建立在所述主动弹性件处的来风速度,如果来风速度低于那个主动弹性件的局部极限值,则使所述主动弹性件从第二形状变形到第一形状,以使翼型在所述主动弹性件处的升力增加。

50. 按照权利要求 49 的方法,其特征在于,将用于调节风轮机的运行的参数进行优化,以便在运行期间,风轮机将在风轮机的可以容许的磨损范围内产生最大的能量输出。

51. 按照权利要求 49 的方法,其特征在于,将用于调节风轮机的运行的参数进行优化,以便在运行期间,风轮机将在风轮机的可以容许的声排放的范围内产生最大的能量输出。

52. 按照权利要求 49 的方法,其特征在于,以小于 0.1HZ 的频率重复地调节各单个主动弹性件的形状。

53. 按照权利要求 49 的方法,其特征在于,对各单个主动弹性件的形状的调节以大于 10HZ 的频率重复。

54. 按照权利要求 49 的方法,其特征在于,对各单个主动弹性件的形状的调节以与叶片绕旋转轴旋转小于 1/8 转相对应的频率重复。

55. 按照权利要求 53 的方法,其特征在于,调节是周期性的,以便调节的持续时间与风轮机转子旋转一周相对应。

56. 按照权利要求 55 的方法,其特征在于,还包括调节叶片周期的各个俯仰的步骤。

57. 按照权利要求 43 或 46 的方法,其特征在于,逐步调节至少一个主动弹性件或折翼的形状,以使主动弹性件处于第一形状或第二形状。

58. 按照权利要求 43 或 46 的方法,其特征在于,基本连续地调节至少一个主动弹性件或折翼的形状,以使主动弹性件可以多步骤变形,或者在提供最小的最大升力系数的形状和提供最大的最大升力系数的形状之间无任何步骤地连续变形。

59. 操作风轮机的方法,该风轮机具有按照权利要求 33 的风轮机叶片,所述风轮机叶片包括多个主动弹性件和 / 或多个折翼,该方法包括以下步骤:建立来风速度、噪音排放、叶片的应变的至少其中之一;根据人工智能建立叶片的多个主动弹性件和 / 或折翼的期望的构型;并相应调节主动弹性件和折翼。

60. 一种风轮机,包括至少一个按照权利要求 1-41 之一的风轮机叶片。

61. 按照权利要求 60 的风轮机,其特征在于,还包括布置在风轮机的轮毂上的风速计,所述风速计功能性地接到一控制单元,该控制单元能控制所述至少一个风轮机叶片的主动弹性件的形状。

具有可变空气动力学轮廓的风轮机叶片

技术领域

[0001] 本发明涉及风轮机叶片。特别地，本发明涉及具有空气动力学轮廓的风轮机叶片，该轮廓可通过主动弹性件的变形调节，该主动弹性件布置成能在该轮廓处接近风轮机叶片的表面。

背景技术

[0002] 已经提出使用其外部形状可能在使用期间改变的风轮机叶片。尤其是，在 WO 02/051730 中公开了为风轮机叶片提供朝向根部的可活动或变形的部分，此处的弦长度最大。因此叶片最宽部分的弦长度在疾风中可以减小，以减少应变。

[0003] 还提出通过将轮廓向上或向下弯曲来使前缘和 / 或后缘变形。例如，在 WO 2004/088130 中提议利用智能材料或液力活塞组件来使前缘区或后缘折翼弯曲。叶片壁部分由被动柔性橡胶制成，在使用期间，该被动柔性橡胶伸展以适应智能材料或者液力活塞组件。在一个实施例中，橡胶包括隔离的空隙。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种具有可调空气动力学轮廓（翼型、叶型）的改进的风轮机叶片。

[0005] 本发明的另一目的是提供一种用于操作具有可调空气动力学轮廓的风轮机的改进的方法。

[0006] 本发明的一个或多个上述和其它目的通过一种风轮机叶片实现，所述风轮机叶片具有吸力侧和压力侧，所述吸力侧和压力侧在前缘和后缘处连接，该叶片还包括弹性件，所述弹性件布置成能接近风轮机叶片的表面（与风轮机叶片的表面相通地布置）。主动弹性件可从第一形状变形到第二形状，并且在主动弹性件处于第一形状情况下翼型（翼面，airfoil）的最大升力系数 $C_{L,max1}$ 大于在主动弹性件处于第二形状情况下翼型的最大升力系数 $C_{L,max2}$ 。

[0007] 所谓主动弹性件 (active elastic member) 在本文中是指叶片的厚度在弹性件变形时改变。为了在最大升力系数下实现所希望的变化，主动弹性件的至少一个位置处厚度通常应增加至少 10%。优选的是，至少 10% 是除了通过任意地弯曲末端区域和 / 或后缘区域所实现的厚度的可能增加之外的增加量，因为这可用于主动弹性件处最大升力系数的很精细的调谐。

[0008] 主动弹性件可以例如部分或全部用橡胶基材料或其它聚合物基材料制造。

[0009] 所谓将主动弹性件布置成能接近表面（利用表面布置，arranged with access to the surface）在本文中是指当主动弹性件变形时表面也变形。换句话说，布置成能接近表面包括下述情况：主动弹性件部分或完全被诸如油漆、热塑性涂层的表面层、诸如智能材料的致动器装置、接闪器或避雷针等覆盖。

[0010] 主动弹性件可以作为整体薄板或松散构件设置在刚性的全部或基本全部的叶片

壁部分上,例如当传统的叶片通过布置主动弹性件于其上而升级时。致动器装置和 / 或用于接收流体的隔间在这种情况下可以布置在原始的叶片壁和主动弹性件之间。主动弹性件也可以作为连接以在其中形成一个或多个隔间或凹部的两个或多个薄板或整体薄板或松散构件提供。这种主动弹性件同样可以布置在刚性的全部或基本全部的叶片壁部分上,或者布置在更开放的结构如一个或多个刚性肋或其它刚性支承结构上。

[0011] 风轮机叶片的空气动力学形状通常通过插在多个翼型,即垂直于叶片长度的叶片横断面之间形成,此处每个翼型都对一特定厚度优化到弦长比,所述弦长比再通过叶片的结构要求控制。本发明涉及包括至少一个翼型的风轮机叶片,所述叶片可以在使用期间通过增加翼型的厚度改变形状和空气动力学性能。

[0012] 当来风的速度高于一较低的水平例如 11m/s-13m/s 时,则风轮机达到标称功率输出,并且风轮机的运行是防止或限制风轮机的损坏比优化能量输出更重要。这在传统上是通过俯仰叶片定而降低效率实现的,那样减少来风的迎角并因而减少叶片上的升力。当来风的速度很高如超过 22-25m/s 时,使风轮机停止。然而,如果当来风速度高于低水平时叶片的升力减小,则可以扩展运行的窗口。当升力的减少集中在远离根部的叶片部分中时,升力的减少与转子半径的实际减小相对应,这在传统的俯仰或主动失速上十分有利,因为在叶片上的荷载更有利得多,并且叶片的应变显著减小。而且,如果叶片的升力调节足够快,则各叶片或甚至单个叶片可以按照叶片受到的瞬时来风例如在阵风期间优化,或者—如果在风轮机的前面测量来风速度—叶片可以甚至在例如阵风到达之前优化,因此大大减少了叶片的疲劳恶化。

[0013] 在优选实施例中,按照本发明所述的风轮机叶片还包括叶片张紧装置,所述叶片张紧装置布置在叶片中以建立(确定)叶片的张力。叶片张紧装置可有利地是布置在叶片壁或者叶片的叶梁中的应变仪,因为这可在叶片内对张力进行很精确和很局部的测量。在另一实施例中,叶片张紧装置包括光纤或传导纤维。叶片张紧装置例如经由机械装置、经由电连接或经由无线连接功能性地连接到一控制单元。该控制单元能控制主动弹性件的形状,并可以是比如处理器或计算机。控制单元可以连接到一个以上风轮机叶片上,并优选与风轮机的主控制单元成为整体。在替代性但仍然优选的实施例中,控制单元布置在叶片中,以便各个叶片自主地起作用。

[0014] 在另一优选实施例中,风轮机叶片还包括布置在叶片的末端附近的风速计。该风速计可以是用于测量来风速度、在叶片的一个或多个表面上的有效风和 / 或风在叶片上的入流角的一定范围的装置。有利的例子是用于测量叶片前面风速的激光风速计或者用于测量在叶片表面处的入流角或风速的空速管(皮托管)。风速计在功能上连接到控制单元上。控制单元和连接如上所述。

[0015] 弦线是前缘和后缘之间的直线。室是通过连接压力侧壁和吸力侧壁之间中部各点所形成的曲线。因此,对于不对称的翼型来说,室将偏离弦线。

[0016] 现有技术的风轮机叶片通常具有其中室偏离弦线的翼型,因为这可允许较大的升力系数,并因此需要较短的弦用于恒定能量输出。实验表明,相对于弦线改变室线的翼型形状的变化十分理想,因为这往往导致升力较大的变化。

[0017] 在优选实施例中,主动弹性件从第一形状变形到第二形状造成在室中翼型与主动弹性件一起变动,室中的变动是对于相当于至少 10% 弦线的一部分翼型与弦线垂直的至少

0.25%弦的距离。这比如可以是如果室线从在70%弦处的约0.030%弦和在80%弦处的0.025%弦变动到在70%弦处的约0.027%和在80%弦处的0.021%弦来实现,但至少10%弦线的范围也可以分成多个间隔。

[0018] 在优选实施例中,主动弹性件从第一形状变形到第二形状造成在室中翼型与主动弹性件一起变化,室中的变动对于相当于至少15%弦线的一部分翼型来说,是垂直于弦线的至少0.25%的弦,优选至少0.30%弦,的距离。在另一优选实施例中,主动弹性件从第一形状变形到第二形状造成在室中翼面与主动弹性件一起变动,室中的变动对于相当于至少10%弦线的一部分翼面来说,是垂直于弦线的至少0.30%弦的距离。

[0019] 实验工作表明,最大升力系数对翼面厚度的最高灵敏度以及因此布置主动弹性件的最有效区域是与叶片翼面的压力侧相通的(利用叶片翼面的压力侧)。当主动弹性件布置在现有叶片上时,这意味着有利的位置是在叶片翼面的压力侧上。更具体地说,发现将主动弹性件设置在压力侧上后缘与距前缘约40%弦长之间的区域中十分有利。在最优先的实施例中,主动弹性件是布置在后缘与距前缘约50%弦长之间的区域中。因此,主动弹性件通常是布置在叶片翼面的最大厚度与后缘之间的区域中,因此叶片的最大厚度不受主动弹性件的影响,而最大厚度与后缘之间的形状在使用期间进行调节并可以进一步修改。

[0020] 主动弹性件不必一直延伸到后缘,但已发现,这种安排在结构上有利,增加后缘的厚度也显著影响最大升力系数的大小。应理解,例如表述“在后缘与距前缘约50%弦长之间”不仅包括从正好50弦-%到100弦-%的主动弹性件,而且包括完全或基本布置在翼面该部分内的主动弹性件。

[0021] 而且,现已发现,在距前缘约50–90%弦长之间的主动弹性件是有利的,尤其是在距前缘约60–95%之间的主动弹性件十分有利。

[0022] 在特别有利的实施例中,主动弹性件布置成对于特定的翼面来说,主动弹性件设置在翼面的压力侧上,且主动弹性件在弦的约50–70%处开始,优选主动弹性件在弦的约55–65%如弦的约60%处开始,并且主动弹性件在弦的约80–90%处终止,优选主动弹性件在弦的约90–98%如弦的约95%处终止。主动弹性件的这些安排尤其有利,因为室可以在使翼面的升力改变很多的区域中改变。

[0023] 可以理论化的是,这些安排的优点是基于下述事实,即叶片的这部分通常具有朝吸力侧相对于弦线显著变动的室,及主动弹性件的伸展将在朝翼面的压力侧变动室时很有效,并因此通常减小了翼面的不对称性。然而,在极个别情况下,室甚至可以变动到弦线的压力侧。

[0024] 在风轮机中转换的能量随着叶片的半径增加而增加,因此大部分能量源自叶片的外面部分。因此,叶片远离叶根的部分的升力改变将得到对能量生产更大的影响。在优选实施例中,主动弹性件是布置在叶片最外面的50半径-%中,如至少一部分是在叶片的50–90半径-%之间,或者至少一部分是在叶片的60–95半径-%之间,而主动弹性件布置在叶片的最外面25半径-%中甚至更有利。叶片的外面部分中最大升力系数的改变将在减小疲劳荷载和能量生产方面有与实际减小转子的半径相同的效果。因此,本发明的具有主动弹性件的风轮机叶片的风轮机可以认为具有可变的有效空气动力转子半径,并因此可认为是更多结构上复杂的叶片的代用品。当翼面具有很低的最大升力系数如对称的翼面或基本上是零升力轮廓时,当主动弹性件处于具有很低最大升力轮廓的形状时,当主动弹性件处于其

在低最大升力系数的形状时,情况尤其是这样。

[0025] 在十分优选的实施例中,按照本发明所述的风轮机叶片包括多个主动弹性件。例如,叶片可以包括 2、3、4、5、6、7、8、9、10 或者更多的主动弹性件。具有多个主动弹性件改善了对叶片的轮廓优化作用的灵活性。当各个叶片相对于来风或叶片的张力连续优化时,这是尤其重要的。优选将多个弹性件中的一个以上布置成与叶片的压力侧相通。优选的是,将大多数主动弹性件布置在叶片轮廓的厚度与后缘之间的区域中,因为这是实现主动弹性件的最大作用的区域,如别的地方所述。

[0026] 多个风速计可有利地沿叶片在纵向上分布,从而每个风速计都布置在多个主动弹性件中不同的弹性件附近。风速计功能性地连接到控制单元,所述控制单元能单独控制多个主动弹性件的形状。控制单元、连接部分和相关类型的风速计已在上面说明。

[0027] 多个主动弹性件中至少两个优选基本首尾相连地布置,以使第一主动弹性件在叶片的长度上从第二主动弹性件延伸。这允许相邻主动弹性件更好地配合并且有利于控制各构件,并形成从一个主动弹性件到另一个主动弹性件的平稳过渡。

[0028] 在另一实施例中,多个主动弹性中的至少两个并排布置,以便第一主动弹性件基本上垂直于叶片的长度从第二主动弹性件延伸。这尤其与很大的风轮机叶片有关,在这些风轮机叶片中单个主动弹性或者首尾相连布置的多个主动弹性太慢以致不能致动。

[0029] 在有利的实施例中,多个主动弹性件中的至少两个布置成在叶片的长度上和 / 或基本上垂直于叶片的长度部分地重叠。叠加的主动弹性件可供一特别方便的控制装置用于风轮机叶片的多步控制,因为多个步骤可以通过开 / 关控制各个主动弹性件的步骤的组合实现。尤其优选的是,叠加主动弹性件是尺寸上不同。例如,尺寸的 1/2-2/3 可用于 4 级,而 1/2-1/2 只可用于 3 级。

[0030] 主动弹性件的尺寸应选择为综合考虑在风轮机叶片的尺寸、单个主动弹性件的尺寸和主动弹性件的数目。数目应不是太小,因为这导致大量的主动弹性件或者对最大升力系数仅有有限的影响。在一优选实施例中,多个主动弹性件的至少其中之一在叶片的长度上延伸 2-30 米,优选主动弹性件延伸 5-20 米。优选的是,多个主动弹性件中的至少两个在叶片的长度上延伸 8-15 米。

[0031] 对很大的风轮机叶片来说,旋转速度通常较慢,因此具有较慢旋转模式的较大主动弹性件是可接受的。可以看出,多个主动弹性件的至少其中之一有利的是可以延伸风轮机长度的 3% -50%。优选的是,多个主动弹性件的至少其中之一延伸风轮机叶片长度的 5% -40%。最后,另外优选的是多个主动弹性件中有至少两个延伸风轮机叶片长度的 10% -25%。这通常是合理地保持主动弹性件的数目。

[0032] 在一优选实施例中,按照本发明所述的风轮机叶片还包括单独控制主动弹性的形状的装置。这允许高自由度优化主动弹性件的构型,即,可使主动弹性件不变形,可使主动弹性件部分变形以及使主动弹性件完全变形。而且,单独控制可用于与最大升力系数变化有关的半径,以便升力系数可以相对于来风比如阵风的局部变化和 / 或由于地面上方高度变化所产生的变化进行优化。用于单独控制主动弹性件的形状的装置可以比如包括多个流体分配系统中的一个或多个、单个流体分配系统与单独可控制的用于控制流体流入和 / 或流出主动弹性件的阀的组合、用于每个主动弹性件的压力表、用于确定流体输送进 / 出主动弹性件的流量测量装置。

[0033] 在另一优选实施例中，按照本发明所述的风轮机叶片还包括控制至少两个主动弹性件组合的形状的装置。这允许具较少传感器和 / 或分配系统的更简单的设计。

[0034] 在按照本发明的风轮机叶片的另一有利构型中，主动弹性件的第二形状是主动弹性件的松弛状态。松弛状态与平衡状态相对应，其中比如控制流体的压力与外部压力相对应。换句话说，主动弹性件的平衡状态在该实施例中是轮廓的最大升力系数小于最大可能值的情况。因此，如果用于控制一个或多个主动弹性件的装置比如由于闪电冲击未完全被闪电保护系统转移、由于系统的机械故障或者由于传感器故障而不超支，则系统转变到升力较低的状态，并因此减少了系统将过速或脱离控制的可能。实际上这起到进一步安全预防措施的作用并且得到更可靠的风轮机。这可通过将附加的偏压装置连接入或功能性地连接到主动弹性件，通过利用真空作为控制流体，或者通过充填作用来排空或充满主动弹性件的隔间来实现。

[0035] 翼型在主动弹性件处于第一形状情况下的最大升力系数 $C_{L,max1}$ 和翼型在主动弹性件处于第二形状情况下的最大升力系数 $C_{L,max2}$ 之间的差值将是实现来风的很宽的工作范围的重要部分。在优选实施例中，最大升力系数 $C_{L,max1}$ 至少比轮廓在主动弹性件处于第二形状情况下的最大升力系数 $C_{L,max2}$ 大 10%。在另一优选实施例中，翼型在主动弹性件处于第一形状情况下的最大升力系数 $C_{L,max1}$ 至少比翼型在主动弹性件处于第二形状情况下的最大升力系数 $C_{L,max2}$ 大 15%。然而，甚至更优选的是翼型在主动弹性件处于第一形状情况下的最大升力系数 $C_{L,max1}$ 至少比翼型在主动弹性件处于第二形状下的最大升力系数 $C_{L,max2}$ 大 20%。令人惊奇的是，仅是这些较小的差值就足以调谐叶片性能，但可以看出，这可用于叶片的空气动力性能的很精细的调谐—尤其是当多个主动弹性件存在时。

[0036] 风轮机通常在迎角 α 小于 α_{max} 的范围内运行，此处 α_{max} 是与最大升力系数相对应的迎角。因此，对 α_{max} 周围的迎角范围的升力差也是重要的。已经发现，主动弹性件处于第一形状和第二形状情况下翼型的升力系数的差值 ΔC_L 将比迎角在 $\alpha_{max}-5^\circ$ 至 α_{max} 之间的所有值下的升力系数的最大值大 10%。优选的是，对于 $\alpha_{max}-5^\circ$ 至 α_{max} 之间的所有迎角来说， ΔC_L 比其中最大的升力系数大 20%，如 $\Delta C_L > 25\%$ 或甚至 $\Delta C_L > 50\%$ 。在尤其有利的实施例中，要使 ΔC_L 高于所限定的值， α 的范围应当是 0° 至 $\alpha_{max}+2^\circ$ ，更优选的是其中 ΔC_L 应当高于限定值的 α 的范围是 -2° 至 $\alpha_{max}+3^\circ$ 。低的 α 值对应于猛烈的来风，而高的 α 值对应于在接近 α_{max} 的低风下运行。

[0037] 翼型的最大升力系数可以在本发明的发明思想范围内显著改变。然而，在优选实施例中，在主动弹性件处于第一形状情况下的最大升力系数 $C_{L,max1}$ 为大于 1.2 和 / 或翼型在主动弹性件处于第二形状情况下的最大升力系数 $C_{L,max2}$ 为低于 1.0，此处最大升力系数对应于 Re 在 1-10 百万的范围内以及流过光滑轮廓表面的二维流。特别地，已经发现， $C_{L,max1}$ 大于 1.25 和 / 或 $C_{L,max2}$ 低于 0.9 是有利的，此处最大升力系数对应于 Re 在 1-10 百万的范围内以及流光滑轮廓表面的二维流。可以看到，在使用条件下的实际值通常偏离这些值，且这些值只理解为在风洞试验或建立模型时有益。

[0038] 由轮廓在使用期间所经历的雷诺 (Reynolds) 数可以根据叶片上的径向位置和叶片的长度显著改变。典型的雷诺数的值在 1-10 百万之间改变。

[0039] 在按照本发明所述的十分优选的实施例中，主动弹性件包括用于接收流体的隔间，或者主动弹性件与风轮机叶片的刚性部分如叶片壁部分结合形成用于接收流体的隔

间。隔间如此布置,以使隔间的充满或排空导致主动弹性件形状的改变;尤其是,隔间如此布置,以便在充满或排空隔间时叶片在主动弹性件处的厚度改变。利用这个隔间来致动主动弹性件的变形十分有利,因为它能很精密、快速而可重现的控制主动弹性件的形状。

[0040] 可以看出,这种隔间可以用来逐步变形,比如完全充满或全部排空,和 / 或连续变形,比如将隔间充装到最大含量的连续百分率。优选的是,风轮机叶片还包括接收阀,以便控制流体输送到隔间。接收阀有利的是布置在待控制的隔间附近,因为这样减少阀和隔间之间的死体积。而且,接收阀在功能上连接到待控制的隔间上。阀可以比如是磁力阀或者其它可通过控制装置的自动化以开 / 关方式或连续操纵的阀。流体可以从流体分配系统接收,或者—如果流体是空气—则任选地但不一定从叶片的表面接收。接收阀有利的是可以布置在隔间朝向叶片根部的端部附近,因为由于在风轮机运行期间作用在流体上的离心力,这使流体能更快地移动到隔间中。而且,用于使流体移动通过流体分配系统的装置如泵通常占据一部分空间,而更多的空间可在叶片的叶根部分中使用。

[0041] 优选的是,风轮机叶片还包括一放泄阀,以便控制从隔间输送流体。放泄阀有利的是布置在待控制的隔间附近,因为这减少了阀和隔间之间的死体积。而且,放泄阀在功能上连接到待控制的隔间上。阀可以比如是磁力阀或者另外可通过控制装置的自动化以开 / 关方式或者连续地操纵的阀。流体可以放泄到流体分配系统,或者—如果流体是空气—任选地但不一定放泄到叶片的表面。放泄阀有利的是可以布置在隔间朝向叶片叶尖的端部附近,因为能使流体由于在风轮机运行期间作用在流体上的离心力而更快地从隔间移出。

[0042] 在优选实施例中,叶片还包括检测装置,以便通过确定隔间中是否存在流体和 / 或中存在的流体量比如流体的体积或压力进一步控制充满或排空隔间。优选的检测装置是压力表和流量计,但其它检测装置可能也适用。检测装置在功能上连接到隔间上,并且上述检测装置能比如通过隔间中的流体的压力或者流体流到隔间和 / 或从隔间流出的流量确定隔间中流体的体积。

[0043] 可以看出,待进入隔间的流体有利的是通过流体分配系统分配在叶片内部。流体分配系统优选的是通过接收阀和 / 或放泄阀与隔间连通,以用于控制输送流体到隔间和 / 或从隔间输出流体。流体分配系统可以是单管道 (one-string) 系统或者双管道 (two-string) 系统,这与隔间的数目和操作有关。

[0044] 十分优选的是,流体分配系统与用于输送流体的装置连通。用于输送流体的装置也被风轮机叶片包括在内,并且通常布置在叶片的根部附近。用于输送流体的装置的优选例子是真空泵 (用于是气体的流体) 和高压泵 (用于是气体或液体的流体)。

[0045] 流体可以是气体或液体。气体是优选的,因为气体的可压缩性通常高于液体,并因此可以通过简单的装置如压力容器达到短的响应时间。而且,气体比较轻,因此增加叶片的重量不像液体那样多。气体可以具有任何组成,比如氮气、氩气或空气。空气是优选的,因为容易获得并且成本低。当利用周围空气时,优选在使用前使空气脱水,以防止水在系统内部冷凝。而且,空气是有利的,因为它可以在没有任何环境排放的情况下从叶片的表面放泄。优选的液体是含有合适添加剂的水和其它合适的液压流体。

[0046] 或者,布置在翼型的最大厚度与后缘之间的轮廓和后缘之间压力侧上的主动弹性件的形状可以通过隔间中流体之外的其它致动器装置致动。这类其它致动器装置可以比如包括智能材料、线性致动器、机械装置、可通过气体或流体伸展的活塞、压电材料等。可供选

择的致动器装置通常连接到翼型的刚性部分和主动弹性装置二者上。几种可供选择的致动器装置（比如智能材料和压电材料及某些机械装置）在只需要电输入致动和不转移比如流体时是有利的。这从布置观点来看可能是有利的。

[0047] 在另一方面，本发明涉及具有主动弹性件和折翼（flap）的组合的风轮机叶片，上述折翼布置在翼型的后缘附近。折翼在下述意义上是活动的，即它可通过致动器装置在第一位置和第二位置之间致动，并且在折翼处于第一位置情况下翼型的最大升力系数大于在折翼处于第二位置情况下翼型的最大升力系数。可以看出，主动弹性件与折翼的组合十分有利，因为折翼可以在由一个或多个主动弹性所实现的更精密的减小不足的情况下增加最大升力系数的减小。这可以比如是在极端风中或者用于很长风轮机叶片的情况，此处来风中的差异基本上是在叶片的最高位置和最低位置之间变动。致动折翼可以与致动主动弹性件同步，但致动折翼至少应与致动主动弹性件协调。

[0048] 折翼可以用一个或多个步骤致动，其中一个步骤是使最大升力系数最大化，或者折翼可以在一最大升力系数最大化的位置和折翼朝吸力侧方向弯曲以产生较低最大升力系数的位置之间连续地致动。

[0049] 在优选实施例中，折翼从距前缘的弦长的 80–90% 延伸到后缘，因为这可用来使叶片的主要部分在结构上坚硬。已经发现，当折翼从距前缘的弦长的约 85% 延伸到后缘时，最大升力系数足够通过致动调节。

[0050] 致动折翼可以包括叶片的刚性部分绕一枢轴点的部分旋转或者后缘结构的多个分布的弯曲。

[0051] 在本发明的实施例中，作为安全防护措施优选的是折翼的松弛状态是第二位置，在上述松弛状态中，折翼处于最不可能发生的情况—即控制系统失效的状态，而在上述第二位置处，与折翼的第一位置相比，折叠是朝向轮廓的吸力侧方向。在这种布置下，叶片不太可能超速或甚至脱离控制。

[0052] 在十分优选的实施例中，按照本发明所述的风轮机叶片包括多个布置在后缘附近的折翼。例如，叶片可以包括 2、3、4、5、6、7、8、9、10 个或更多的折翼。具有多个折翼改善了在使用期间优化叶片翼型的灵活性。当单个叶片对来风或者叶片的张力连续进行优化时，这点尤其重要。

[0053] 折翼的尺寸，亦即在叶片的纵向方向上的长度应选择作为风轮机的尺寸、单个折翼的尺寸和合理的折翼数目之间的综合考虑。折翼不应太小，因为这导致大量的折翼，同时每个折翼只对最大升力系数产生很有限的影响。在优选实施例中，多个折翼的至少其中之一在叶片的长度上伸展 2–20 米，优选在叶片的长度上伸展 5–15 米。优选多个折翼中的至少两个在叶片的长度上伸展 5–15 米。折翼可以或者不可以遵循主动弹性件的尺寸，但优选折翼的端部基本布置在对应主动弹性件的端部处，因为这是在结构上更有益，且防止主动弹性件的扭绞。

[0054] 对很大的风轮机叶片来说，旋转速度通常较慢，因此具有较慢反作用模式的大折翼是容许的。可以看出，多个折翼的至少其中之一有利的是可以伸展风轮机叶片长度的 3% –50%。优选的是多个折翼构件的至少其中之一伸展风轮机叶片长度的 5% –40%。最后，更进一步优选的是多个折翼中有至少两个折翼伸展风轮机叶片长度的 10% –25%。通常这将合理地保持折翼的数目。

[0055] 在本发明的十分优选的实施例中,将多个折翼布置成在叶片的长度方向上一个向另一个伸展,且在相邻折翼之间布置一弹性连接器,以便折翼在叶片的纵向方向上形成没有阶梯的连续表面。如果伸展的折翼分开一短距离如 10–50cm 以便提供用于弹性连接器的空间,并且弹性连接器连接到两个折翼的端面上和叶片的刚性部分上,则可以实现这点。

[0056] 即使折翼的致动器装置可以用别的方法致动,但十分优选的是折翼的致动器装置可通过流体,尤其是通过与主动弹性件相同的流体(如果主动弹性件可通过流体致动的话)致动,因为这可形成更简单的控制系统。而且,折翼的致动器装置有利的是可以在功能上连接到流体分配系统上,所述流体分配系统与主动弹性件连通。这可使流体分配系统的设计更简单,它减少了对整个流体分配系统的空间要求,并且减少了系统的总重量。

[0057] 其它类型致动折翼的致动器装置包括智能材料—即在材料上的电位改变时改变形状的材料、线性致动器、机械装置、可通过气体或流体伸展的活塞、压电材料。优选的是,只需要电信号致动的致动器装置是有利的,因为这种致动器装置较容易布置在叶片中。

[0058] 可以看出,当翼型在表面中没有显著的阶梯并具有弄圆(倒圆)的形状,以便在使用期间翼型上(除了后缘之外)没有分开气流时,得到最有益的结果。为了减小朝向小阶梯的灵敏度,上述小阶梯在叶片的刚性部分和主动弹性件之间不可避免的,优选的是翼型具有一钝的前缘。优选的形状在申请人的专利申请 WO2005IB052355 中公开,所述专利申请结合在本文中以作参考。

[0059] 另一方面,本发明涉及用于安装在风轮机叶片上的子单元。该风轮机叶片具有吸力侧和压力侧,所述吸力侧和压力侧在前缘和后缘处连接,以形成刚性叶片表面。该子单元包括主动弹性件,其具有如本发明的其它方面的一个或多个实施例所述的性能和形状。主动弹性件在形状和尺寸方面适于连接到风轮机叶片的刚性表面部分上,以便在风轮机—该风轮机包括其上安装有该子单元的风轮机叶片—的运行期间,主动弹性件可从第一形状变形到第二形状。这可以通过比如致动器装置实现,所述致动器装置如本发明的其它方向中的一个或多个的实施例所述,如线性致动器装置或至少部分由主动弹性件形成的流体进和/或出的隔间。与本发明的第一方面类似,该子单元和风轮机叶片的组合结构在处于第一形状时的最大升力系数 $C_{L,max1}$ 大于该子单元和带有主动弹性件的风轮机叶片的组合结构在处于第二形状时的最大升力系数 $C_{L,max2}$ 。

[0060] 子单元在升级现有风轮机叶片或者在减少叶片的磨损时尤其有利,上述升级现有风轮机叶片可使叶片在例如更大的来风范围内工作,而上述减少叶片的磨损通过减少由于阵风或极端风所产生的疲劳荷载实现。因为子单元和尤其是主动弹性件可以简单地粘附到表面上和任选地比如用软管将流体分配系统布置在叶片的内部,所以安装简单和不涉及叶片结构的变化(除了在主动弹性件和流体分配系统之间穿过叶片壁的连接孔的很有限的影响之外)并因此通常不需要添加另外的增强件。

[0061] 再一方面,本发明涉及随着叶片的有效空气动力学轮廓的变化操作风轮机的方法。该方法包括建立来风速度的步骤,并且如果来风速度低于第一极限值,则使主动弹性件从第二形状变形到第一形状,以使在主动弹性件处翼型的升力增加。风速计可以是任何类型,而优选的是与本发明的第一方面有关所述的类型。风速计优选布置在风轮机叶片上,但风速计也可以布置在风轮机附近,如布置在相邻的风轮机或结构上,或者风速计可布置在风轮机的另外部分上,如布置在塔架(塔筒)或引擎舱(吊舱)上。在特别优选的实施例

中,风速计是激光风速计,并布置在轮毂上与水平线成一角度,因此,风速计将扫掠风轮机前面的区域,因此能根据离地高度的不同测量瞬时来风速度。这允许针对其它地方所述的叶片的周期俯仰或周期半径可变的空气动力学轮廓进行很精密的优化。除了或者代替测量来风速度,风速计有利的是可以测量风在风轮机叶片处的入流角。这可以比如是有利的,因为这为叶片进一步优化提供数据,其中包括俯仰角。

[0062] 与上述方法类似,在测量来风速度并确定极限值处,用于控制风轮机的其它可能的输入参数,如通过应变仪测得的叶片的荷载、风的入流角、转子速度或者功率输出,也可以确定单独的或耦合的极限值。

[0063] 第一极限值的水平取决于风轮机叶片的实际设计、叶片的主动弹性件和折翼以及工作位置。典型的第一极限值约为 10–16m/s,但在某些情况下其它值也是合适的。

[0064] 操作通常进行优化,以便在允许的疲劳荷载水平和 / 或噪音排放水平内提供最大的功率输出。而且,操作可以根据平均来风、根据在规定时间范围内的最大或平均来风、根据当前来风或根据如通过风速计所测得的风的入流角、根据例如由应变仪测量的叶片荷载、或根据工作参数如转子速度或功率输出进行控制。相关的极限值水平取决于优化参数,并可以随时间改变,比如由于允许的噪声排放随一天中的时间变化。

[0065] 在按照本发明所述方法的另一实施例中,方法还包括下述步骤,即如果输入值的其中之一如来风速度低于第二极限值,则将折翼从第二位置致动到第一位置,以使翼型在折翼处的升力增加。第二极限值可以与第一极限值相同,但优选第二极限值比第一极限值公差更大,例如对于来风来说,比如 15m/s,因为这允许更多的调节步骤,因此可用于叶片的空气动力性能的更精细的调谐。

[0066] 操作带有按照本发明第一方面的任何实施例所述的风轮机叶片的风轮机的方法的另一实施例包括建立风轮机叶片的张力的步骤,以及—如果张力低第一极限值—使主动弹性件从第二形状变形到第一形状,以使翼型在主动弹性件处的升力增加。风轮机叶片的张力优选通过布置在风轮机叶片中的叶片张紧装置确定,该叶片张紧装置例如布置在叶片壁中或布置在增强结构例如叶梁中。叶片张紧装置优选是应变仪。利用应变测量作为控制参数是有利的,因为它直接根据风对叶片的实际影响,并因此将重点放在叶片上而不是通过设计与叶片的性能间接有关的间接特征如风速上。

[0067] 在操作带有按照本发明第一方面的任何实施例所述的风轮机叶片的风轮机的方法的另一实施例中,按照风轮机叶片的张力的变化速率调节主动弹性件的形状。因此,当叶片由于阵风而开始偏转且不等偏转变大时,主动弹性件的形状就可以改变到具有低升力的形状。这允许针对极端阵风进行更精确的控制。

[0068] 在按照本发明所述方法的另一实施例中,方法还包括下述步骤,即如果风速低于第二极限值,则将折翼从第二位置致动到第一位置,以使翼型在折翼处的升力进一步增加。第二极限值可以与第一极限值相同,但优选第二极限值高于第一极限值,因为这可允许更多的调节步骤,因此可允许更精细地调谐叶片的空气动力性能。

[0069] 如果风轮机是俯仰调节式,则按照本发明所述的方法有利的是可以包括按照所确定的风速和 / 或张力调节叶片的总俯仰角的步骤,以便可以进一步优化风轮机的运行。

[0070] 按照本发明所述的另一方法涉及风轮机叶片,所述风轮机叶片包括至少两个布置在距叶片根部不同距离处的主动弹性件和至少两个可单独变形的主动弹性件。该方法包括

下述步骤，即对每个主动弹性件确定在上述主动弹性件处的来风速度，如果来风速度低于那个主动弹性件的局部极限值比如 10m/s，则主动弹性件从第二形状变形到第一形状。这增加了翼型在所述主动弹性件处的最大升力。

[0071] 建立在每个主动弹性件处的来风速度可以用间接方法。例如，在本发明的发明思想内，在叶片上、风轮机上或者相邻的结构处仅一个位置中测量来风速度，或者可以根据例如能量输出、叶片的张力等决定来风速度，并用来根据沿风轮机叶片的相对位置，确定各主动弹性件的期望的构型。

[0072] 在按照本发明所述的优选实施例中，优化用于调节风轮机运行的参数例如极限值，以便在运行期间使风轮机在容许的磨损水平内产生最大能量输出。在具有经常性强风的位置中，尤其是当比如通过激光风速计在风轮机的前面测量来风速度时，这种方法尤其有利。在这个实施例的十分有利的不同方案中，调节足够快，以便考虑阵风，所述阵风通常是造成风轮机叶片全部疲劳磨损中大部分的原因。高调节频率可以比如通过用气态流体进/出隔间来实现，所述隔间至少部分地由主动弹性件形成，因为这种调节装置很快和可靠。

[0073] 在按照本发明所述的另一优选实施例，优化用于调节风轮机运行的参数例如极限值，以便在操作期间，使风轮机在容许的声音排放水平内产生最大能量输出。在建筑物附近的位置或者其它经常有人到达的区域中，这种方法尤其有利。关于声音排放的要求通常随一天的不同时间而变，因此各参数应当进行调节。

[0074] 主动弹性件可以用任何通过控制装置和致动器装置可以实现的频率调节。然而，如果主动弹性件是单独对仅是缓慢改变的平均来风或另一输出参数进行调节，则形状改变的频率和形状改变的速度可能低，如低于 0.1Hz-0.01Hz 或甚至更低。这种形状变化的频率只能在有限的程度上可用于调节来风中的短期变化，且不能考虑在风的湍流中形状的变动。另一方面，形状的低频率变动能考虑在大多数情况下大部分风的变动。

[0075] 十分优选的是，以大于 10HZ 的频率重复进行对单个主动弹性件的形状的调节。比如，如果阵风到达风轮机，则来风和湍流可以十分快速地改变。因此，甚至更优选的是，调节以大于 20HZ 的频率例如以大于 40HZ 的频率重复进行。很快速调节的能力使风轮机能很接近最佳构型运行，如来流阵风可以用动力学方法说明，而不必用平均构型考虑。快速调节频率要求主动弹性件的形状可以很快地调节。可以看出，尤其是通过气体进/出隔间调节的主动弹性件可用于很快速调节，上述隔间至少部分地由主动弹性件形成。而且，通过可用电快速调节的致动器装置如压电元件调节的主动弹性件同样可以适用于主动弹性形状的这种快速调节。

[0076] 或者，调节各个主动弹性件的形状的频率可涉及叶片的旋转速度。在优选实施例中，调节用与叶片绕旋转轴线旋转的 1/8 转相对应的频率重复进行。然而，更优选的是，调节用一与叶片绕旋转轴线旋转的 1/16 转相对应的频率进行，而甚至更优选的用一与叶片绕旋转轴线旋转的 1/40 转相对应的频率进行。

[0077] 在十分优选的实施例中，调节用与风轮机转子的一转相对应的调节的周期循环。在这个周期内，一个或多个主动弹性件或者折翼可以调节几次，但总的构型模式基本上是循环式重复。可以看出，这种周期性变动在考虑来自比如风轮机放置场中相邻风轮机的尾流和遮蔽影响，和/或来自复杂的周围地形的影响时尤其有利。这些影响通常是周期性的，但不一定具有与转子一转相对应的周期。具有转子一转的周期性变化尤其有利的例

子是当风轮机是根据时间平均来风工作时,因此调节主要是考虑来风速度的垂直变化,并且只对较长时间范围内整个来风速度的变化进行调节。另一个例子来自塔架的遮蔽,所述塔架的遮蔽通常也是具有转子一转的周期的周期性影响。这提供一种较简单的运行,所述较简单的运行尤其适合于具有很长风轮机叶片如长于40米、50米、60米或更长的很大风轮机,此处来风速度的垂直变化相当大。

[0078] 对于通过周变俯仰操作的风轮机来说,尤其有利的是将周变俯仰与翼型剖面的各个与半径有关的变化叠加,因为这允许更精细地调谐叶片的空气动力性能,并因此允许较高的功率输出和 / 或较低的叶片的疲劳磨损。

[0079] 在优选实施例中,调节至少一个主动弹性件或折翼是逐步进行的,以使主动弹性件或处于第一形状,或处于第二形状。对形成用于接收流体的隔间的至少一部分的主动弹性件来说,这优选对应于隔间完全充满或全部排空。这种类型的逐步调节相当于开 / 关调节,并且是有利的,因为形状很清楚并因此限制了校准。

[0080] 在另一优选实施例中,主动弹性件的形状基本上是连续地调节,因此将主动弹性件变形成多个阶段,也许变形到在提供最小升力系数的形状和提供最大升力系数的形状之间的若干阶段,如3、4、5、6、7、8个阶段或者连续地没有任何阶段。对于形成用于接收流体的隔间的至少一部分的主动弹性件来说,这相当于隔间在较小的阶梯部分充装。基本上连续的调节尤其有利,因为翼型在主动弹性件处的最大升力系数可以很精细地调节,因而可实现更接近最佳情况的运行。

[0081] 操作具有按照本发明的风轮机叶片的风轮机的方法的另一实施例包括自适应控制算法或人工智能。当风轮机叶片包括若干布置在距叶片根部不同距离处的可单独调节的轮廓时,这是有利的。例如,可以看出,操作方法的这个实施例对于包括多个主动弹性和 / 或多个折翼的风轮机和尤其是但不限于风轮机叶片尤其有利,此处一个或多个主动弹性件和折翼的至少其中之一可调节到两个以上形状如连续可调,因为这留下一个或多个主动弹性件和折翼的大量可能的构型。

[0082] 在十分优选的实施例中,弹性件和 / 或折翼与一控制系统结合,所述控制系统具有快速反应时间及监测器和反馈设计二者,所述反馈设计能使弹性件和折翼定位用于最大的载荷减少。

[0083] 当继续不断地监测力时,自适应控制系统将能在对最大载荷减少或功率减少迭代优化循环期间将折叠和弹性件重新定位。多个主动弹性件与自适应控制装置的组合通过阻尼叶片摆动的幅度使风轮机能有效地减小来自叶片的固有本征频率的载荷。而且,风速在展向方向上的变化用主动弹性件与自适应控制装置的组合有效地减小。

[0084] 该方法包括下述步骤,即确定来风速度、噪音排放和叶片的应变的至少其中之一;和根据人工智能来建立叶片的多个主动弹性件和折翼的构型。建立构型优选涉及叶片的所有主动弹性件和折翼,但在某些情况下,建立构型只涉及叶片的某些主动弹性件和折翼可能是有利的。所建立的构型应在风轮机叶片中允许的应变水平内和 / 或允许的噪音排放水平内优化风轮机的功率输出。最后,该方法因此包括调节主动弹性件和折翼的步骤。多个主动弹性件和 / 或折翼的构型优选在包括叶片的转子的一转期间优化多次,如8、10、20或更多次,因为这能通过翼型剖面的单独与半径有关的变化操纵叶片。

[0085] 所谓人工智能在本文中是指自学习或自调节系统,如可通过模糊逻辑操作的系

统。

[0086] 本发明还涉及将按照本发明第一方面所述的风轮机叶片用于一可通过翼型部分的单独与半径有关的变化操作的风轮机。翼型部分的单独与半径有关的变化用于很大的风轮机,如具有直径为约80米、100米、120米或更大的转子的风轮机尤其有利,因为来风速度用于这种大叶片的周期性变化变动相当大。这种差别不能用规则的俯仰充分调节,因为对这些大叶片来说来风速度的变化非常与半径有关。换句话说,叶片朝向叶片根部的部分来风速度的变化比叶片朝向叶片尖头的部分来风速度小得多。

[0087] 本发明的另一方面涉及风轮机,所述风轮机包括至少一个按照本发明的第一方面所述的风轮机叶片。这种风轮机尤其有利,因为它在使用期间提供很精细的用于优化空气动力学轮廓的方案,因此在许多情况下可供用比传统风轮机低的疲劳载荷和 / 或低的噪音排放生产更多的能量。

[0088] 按照本发明所述的风轮机的优选实施例还包括风速计,所述风速计布置在风轮机的轮毂上。该风速计功能性地连接到一控制单元,所述控制单元能控制上述至少一个风轮机叶片的主动弹性件的形状。尤其有利的是利用激光风速计并以非水平角度布置激光风速计,并且激光风速计是能从激光风速计朝不同方向测量来风速度的类型。这样,风速度可以在风轮机叶片的前面多个垂直水平中进行测量,以便可以在使用期间按照瞬间来风速度调节叶片的空气动力学轮廓。这样,风轮机叶片可以比如在阵风实际上到达叶片之前考虑到阵风进行调节,因此大大减少了对叶片的疲劳损害。

附图说明

- [0089] 下面将参照示例性实施例和附图更充分地说明本发明,在附图中:
- [0090] 图1示出其主动弹性件处于第一和第二形状下的轮廓及相应的升力曲线,
- [0091] 图2示出具有叠加的主动弹性件的轮廓及相应的升力曲线,
- [0092] 图3示出具有主动弹性件和折翼的轮廓和相应的升力曲线,
- [0093] 图4示出按照本发明的风轮机叶片与线性致动器装置的剖视图,
- [0094] 图5示出按照本发明的风轮机叶片与流体分配系统的剖视图,
- [0095] 图6示出按照本发明的风轮机叶片与流体分配系统的剖视图,
- [0096] 图7示出具有首尾相连地布置的主动弹性件的风轮机叶片的一部分,
- [0097] 图8示出操纵按照本发明的风轮机叶片的原理的实施例,
- [0098] 图9示出风轮机叶片及例如在周期性变化下操纵风轮机叶片的原理。
- [0099] 所有附图都是高度示意性的并且不一定按比例示出,它们仅示出为了阐明本发明所必需的部分,其它部分省略或者仅仅提及。

具体实施方式

[0100] 按照本发明所述的风轮机叶片通常用真空助力树脂浸渍法制造。主增强件通常布置在叶片壁中或者在叶片壁内的叶梁中。图1A示出风轮机叶片2的轮廓的实施例,该叶片具有与弦线(对应于X轴线)不同的室。叶片具有吸力侧4和压力侧6,二者在前缘8和后缘10中连接。叶片还包括一设置在压力侧的主动弹性件12。该主动弹性件用虚线示出(标示为NACA 626151),并对应于处于伸展状态的主动弹性件。主动弹性件形成用于接收

流体如空气的隔间 14 的一部分。

[0101] 在图 1B 中,示出图 1A 的相当于弦的 0.6–0.9 的部分。尤其可以看出,弹性件处的厚度在主动弹性件伸展时增大。这里,厚度的增加在箭头处约为 30–40%,该处相应于距前缘约 0.77 弦长度。实验结果表明,在与前缘相距 0.65–0.9 弦长度的范围的至少一部分内,厚度增加约 10–15% 通常得到合适的叶片性能。

[0102] 图 1C 中提供了对于图 1A 中的轮廓的升力系数 C_L 随迎角变化的曲线图。可以看出,与主动弹性件处于变形状态下的轮廓相对应的曲线在全部所示范围内显示出显著较低的升力系数,特别地,对于具有变形的主动弹性件的轮廓来说,每个曲线形成为最大升力系数的最大升力也较低。这在图 1D 中可更清楚地看出,此处升力系数 C_L 的减小,与未作修改的 NACA63615 轮廓相比,表示为随迎角 α 而变。可以看出,在约为 $\alpha = 14^\circ$ 的临界迎角(对应于最大升力系数)以内的范围内,升力系数减少至少 10%。

[0103] 示例性的轮廓是 NACA63615 轮廓,但同样的原理可适用于其它风轮机叶片。尤其是,优选轮廓具有高的最大升力系数。

[0104] 图 2 还涉及按照本发明的风轮机叶片的翼型。图 2A 示出具有两种另外的轮廓 NACA636151 和 NACA63615H1 的轮廓。这两种另外的轮廓可以通过下述方法形成:在两个步骤中使主动弹性件变形;将一帶有两个隔间的主动弹性件或者将两个单独的主动弹性件一个在另一个之上地布置在图 2 所示的剖面上。这三种轮廓的升力曲线在图 2B 中示出。可以看出,升力系数随着翼型偏离由 NACA63615 所示的原始未变形的翼型的大小下降。同样的趋势可在图 2C 中观察到,图 2C 示出两个经过调节的翼型的升力系数相对于原始的未变形翼型的升力系数下降。

[0105] 图 3 也涉及用于按照本发明的风轮机叶片的翼型。图 3 一起示出原始轮廓、具有变形的主动弹性件的轮廓(NACA636151)以及具有变形的主动弹性件和向上弯曲的折翼 16 的轮廓。在图 3 中,更详细示出叶片的后区。可以看出,为模型化起见,利用了尖锐的后缘,但实际应用的后缘具有一约为弦长度的约 0.1–1% 的有限后缘。折翼的弯曲可以与主动弹性件的变形同时进行,或者如此处所示的作为独立的步骤进行。图 3A 中所示的三种轮廓的升力曲线在图 3C 中示出。可以看出,折翼朝向吸力侧的弯曲大大加快了升力系数的下降。这在图 3D 中甚至更明显,图 3D 示出各轮廓相对于原始的未变形的轮廓的升力系数的下降。这里,可以看出,带有朝吸力侧弯曲的折翼的翼型的升力下降在临界迎角之下约为 30% 或更多。

[0106] 图 4 中所示的叶片剖面示出可以如何利用线性致动器装置 22 来致动主动弹性件 12 的变形。在图 4A 中,示出主动弹性件 12 处于变形的形状。图 4A 中的原理图在横断面的平面中有四个线性致动器,但根据实际叶片的尺寸可采用更多或更少的致动器,从而,通常是叶片越大,致动器越多。另外,所需的致动器数量也取决于主动弹性件的挠性。在图 4B 中,示出同一叶片的横断面,其中主动弹性件处于未变形状态,而致动器处于压缩状态。所述致动器示出为位于刚性叶片壁 20 的顶部,但在许多情况下,致动器优选与叶片壁成为整体或者没入到叶片壁中。

[0107] 图 5 示出带主动弹性件的风轮机叶片的横断面,所述主动弹性件适合于通过使流体进入/回到隔间 14 中而变形。在图 5A 中,叶片还包括流体分配系统 24。该系统主要由两个管子 24 形成,所述管子 24 基本上垂直于该横断面的平面布置。各管子通过连接配件

(未标号)与隔间 14 连通。所述管子可例如为一个管子用于将流体分配到隔间中(优选朝向前缘的管子),而一个管子用于使从隔间出来的流体返回到用于分配流体的装置如泵(未示出)。所述管子可连接到更多设置在叶片其它横断面中的隔间上。传感器 26—例如压力计—布置成与隔间连通,以便在使用期间使流体和/或流体压力存在或消失。图 5A 所描述的系统可以例如用于循环的气体如空气或氮气,或者用于循环的流体如水或其他液压流体。

[0108] 图 5B 示出按照本发明的风轮机的另一实施例的剖视图。这里,只有一个分配系统或管子 24。该实施例可能特别适用于两种明显不同的情况。

[0109] 在第一种情况下,它可以在主动弹性件通过压力操作时使用,以便在使用期间使隔间通过经由接收阀 24 从分配系统 24 进入并进入隔间 14 中的空气或其它气体伸展。该室可通过关闭接收阀和打开放泄阀 28 收缩,上述接收阀将分配系统 24 连接到隔间上,而上述放泄阀 28 打开可使主动弹性件返回松弛状态,此处隔间通过放泄隔间中的压缩空气而收缩。这要求主动弹性件的平衡状态与隔间伸展相对应。

[0110] 在另一种情况下,在图 5B 中用剖视图示出的叶片可以通过真空操作,从而,在使用期间,隔间通过经由接收阀 28 从叶片壁 20 的表面进入的空气伸展。应该注意,阀 28 的用途已经从上一情况的放泄模式改变到目前情况下的接收模式。隔间 14 的松弛状态用于待伸展的隔间(如图 5B 所示)。从安全的观点来看,这是特别有利的,因为松弛状态提供具有较低最大升力系数的翼型,并因此在未必有的失效情况下往往降低对风的响应。为了使隔间收缩,接收阀 28 应当关闭,并且连接隔间 14 与分配系统的阀应当打开。该分配系统应连接到真空系统如真空泵,以抽出隔间中的空气。

[0111] 图 6 是沿图 5 的叶片长度在用虚线 A-A 表示的平面中的剖面。分配系统 24 的管子因此优选是返回管(溢流管)。这在图 6 中也可看到,因为与主动弹性件 12 的隔间 14 的连接设置在该隔间 14 的朝向叶片末端的端部附近。阀 28 设置成连接在隔间 14 和分配系统之间。该阀可以比如是磁力阀或其它可通过控制单元(未示出)操纵的阀。在隔间和分配系统之间设置连接的优点主要是基于在使用期间通过离心力强制流体朝向隔间的末端流动。这在使用期间将有助于排空隔间。

[0112] 图 7 中示出一部分风轮机叶片 2。在图 7 中看到的该叶片部分包括两个主动弹性件 12。所述主动弹性件沿叶片的纵向方向连接。相邻主动弹性件之间的连接部 30 优选制备成使得对于主动弹性件的任何构型叶片的形状都没有突然变化。所谓没有突然变化在此也包括叶片纵向方向上的变化,而不仅是指横向于叶片长度方向的变化。这降低了气流在叶片表面上过早分开的可能性,亦即离开后缘的可能性。

[0113] 一般地说,优选的是将主动弹性件和/或折翼布置在叶片的最外部分上,如叶片长度的最外面的 2/3 或者更优选地叶片长度的最外面的 1/2,因为叶片的外面部分涉及大部分的功率输出。而且,由于距叶片根部距离的动量,所以叶片的最外面部分也往往引起大部分疲劳磨损,所述疲劳磨损可通过按照本发明所述的风轮机和方法显著减少。

[0114] 图 8 涉及操纵按照本发明所述的风轮机叶片的优选总体原理。图 8 示出对来风速度的变化的期望响应。这可以是在运行瞬间很活动的弹性件处的局部来风,或者是沿叶片的长度在一段时间内或者一些位置处取平均值的全部来风。X 轴示出来风的速度。1 和 2 示出两个极限风速水平。从左手侧开始,曲线图的左半部示出对于来风的速度减少的反应。在

最左侧,主动弹性件应当成形为第二形状,即具有较低的升力系数 $C_{L, max2}$ 。当来风达到上限值 1(用 A 表示)时,主动弹性件的构型不应发生改变,但当来风达到下限值 2(用 B 表示)时,主动弹性件的构型应转换到第一形状,即具有较高的最大升力系数 $C_{L, max1}$ 。当来风速度与曲线图的右边相对应逐渐增加时情况相似。当来风速度达到下限值 2(用 C 表示)时,则不发生变化,而当来风速度达到上限值 1 时,主动弹性件变换到第一形状,即具有较高的最大升力系数 $C_{L, max2}$ 。

[0115] 所述延迟的转换可增加安全限度(裕度)。所述安全限度可以按照构型变化的速度和形成来风速度的速率限定,因此,构型的转换越快和形成来风速度的速率越快,应当使用的安全限度就越窄。此外,该安全限度保证主动弹性件在不需要时不前后拍打。这种操作的方法尤其适合于根据平均来风形成最佳构型。它可以用于仅具有一个主动弹性件的风轮机叶片,但通过叠加多个类似的控制模式—通常是每个主动弹性件或者是每组主动弹性件一个控制模式,则可以很容易实现精细控制。

[0116] 图 9A 示出具有三个主动弹性件 E_a 、 E_b 、 E_y 及三个折翼 F_I 、 F_{II} 和 F_{III} 的风轮机叶片的示意图。折翼对应于主动弹性件布置。折翼和主动弹性件可以例如通过人工智能如模糊逻辑,或者其它自学习专家系统操纵。或者,可提供一组规则以用于调节每个折翼和主动弹性件。图 9B 中示出一组规则的例子。在图 9B 的上部,示出每个主动弹性件处的来风速度。可以看出,来风速度的变化在叶片的末端部分比在叶片的较朝向根部的部分大很多。这说明风轮机变得越大,在提供优化的功率输出时的常规周期性俯仰越差,因为整个叶片的俯仰不能考虑到来风速度的变化中的径向差别。然而,已经发现,通过利用具有用于在沿叶片长度的不同纵向位置处调节翼型的装置的风轮机,可以通过在周期性俯仰上叠加根据沿叶片长度的纵向位置的变化而变化的翼型变动来大大优化周期性俯仰。这可以例如用按照本发明的风轮机叶片实现。

[0117] 在图 9B 的下面部分中,示出图 8 所描述的调节方案用于主动弹性件的实施例。每个主动弹性件 E_a 、 E_b 和 E_y 的第一和第二极限值 $T1$ 和 $T2$ 都用纵向线表示。对于风轮机的这种特定旋转,可以看出,主动弹性件 E_y 根本不从第一形状改变,而在叶片朝上面位置运动期间,末端主动弹性件 E_a 在中间主动弹性件 E_b 之前从第一形状改变到第二形状。因此有效空气动力学转子直径实际上减小。在叶片朝向下面位置转动时,第一和中间主动弹性件 E_b 以及末端主动弹性件 E_a 改变到具有更高升力的形状。图 9B 中来风的变化仅考虑来风的垂直变化,但另一些作用如来自相邻风轮机、地形或风轮机塔架的尾流或遮蔽效应可以以类似的方式考虑。而且,其它输入参数如输出功率、声发射、载荷等同样可以用来调节主动弹性件和 / 或折翼的形状。与一个或两个极限值不同的其它调节类型如优选与适合的调节结合的连续形状调节也可以用来调节主动弹性件的形状。

[0118] 弹性和仅是叶片长度的变化导致当叶片俯仰时叶片末端稍微形状走样。这是例如当叶片以周期性俯仰工作时存在的问题。如果叶片的空气动力性能主要通过按照本发明的主动弹性件和 / 或折翼调节,或者主动弹性件的工作与俯仰相结合,则可能绕过由于叶片的弹性而引起的延迟,并因此可以实现更多的优化操作。

[0119] 而且,当风轮机变得更大时,由叶片所实现的来风速度的变化增加。这部分地通过俯仰补偿,然而,俯仰不能一次在叶片的整个长度上实现翼形的最佳取向。因此,与俯仰相结合的翼型形状的调节是对传统的仅通过俯仰来优化操作的重要改进。

[0120] 除非本领域技术人员直接意识到最后的实施例实际上不合理,否则本文所述的本发明的一个实施例的单个特征或特征的组合及其各种变化,都可以与本文所述的另一实施例的特征相结合或者交换。

- [0121] 附图标记列表
- [0122] 2、风轮机叶片
- [0123] 4、吸力侧
- [0124] 6、压力侧
- [0125] 8、前缘
- [0126] 10、后缘
- [0127] 12、主动弹性件
- [0128] 14、隔间
- [0129] 16、折翼
- [0130] 20、风轮机叶片壁
- [0131] 22、致动器装置
- [0132] 24、流体分配系统
- [0133] 26、压力计
- [0134] 28、阀
- [0135] 30、相邻主动弹性件间的连接部

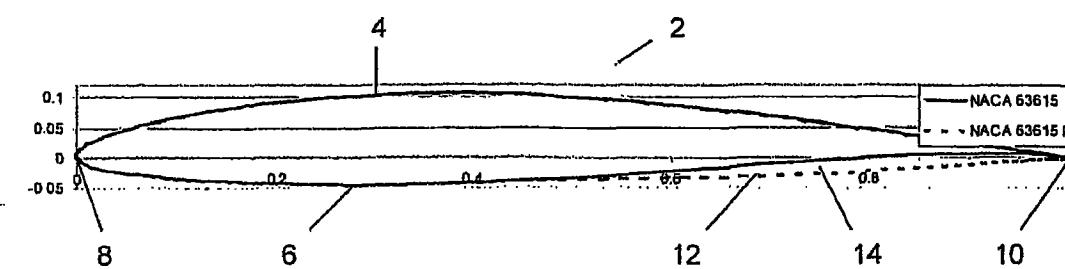


图 1A

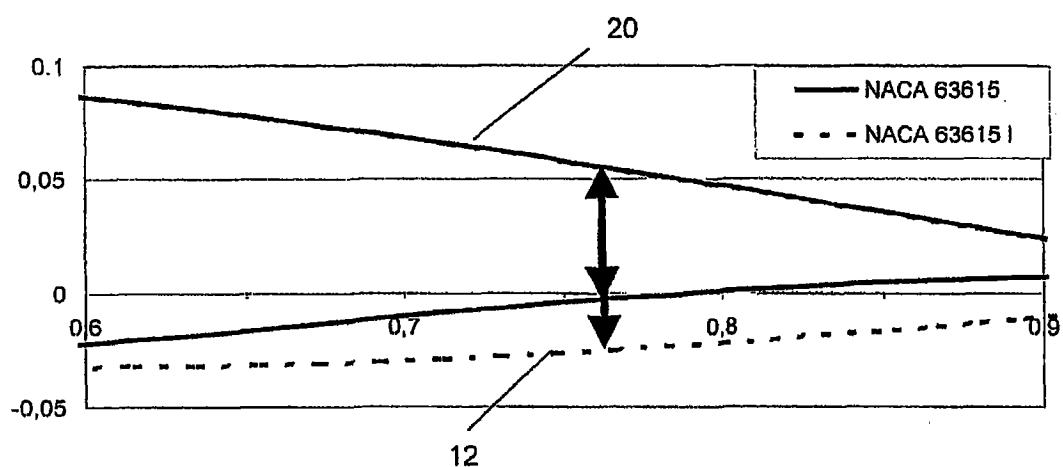


图 1B

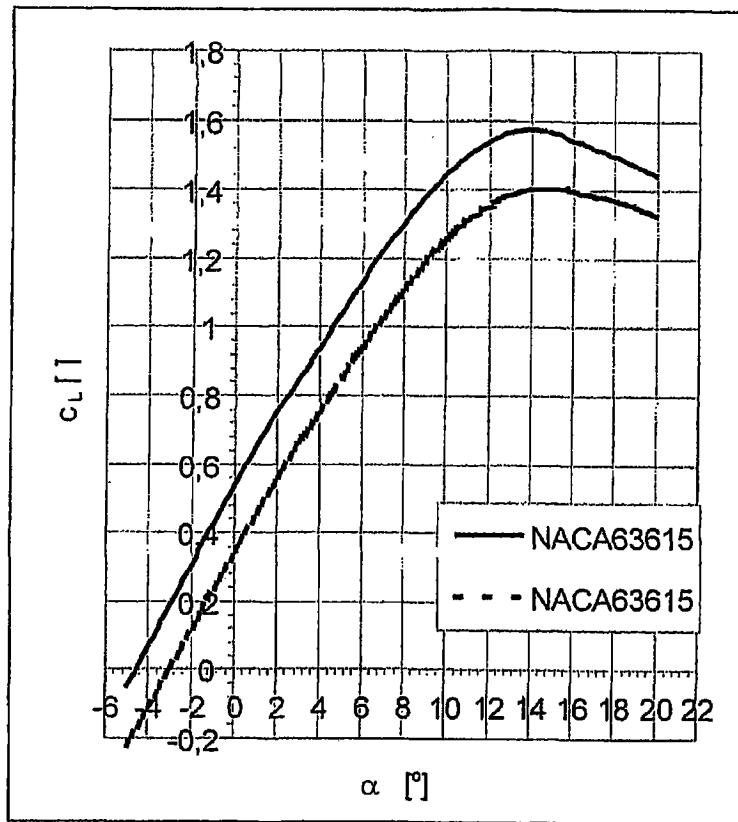


图 1C

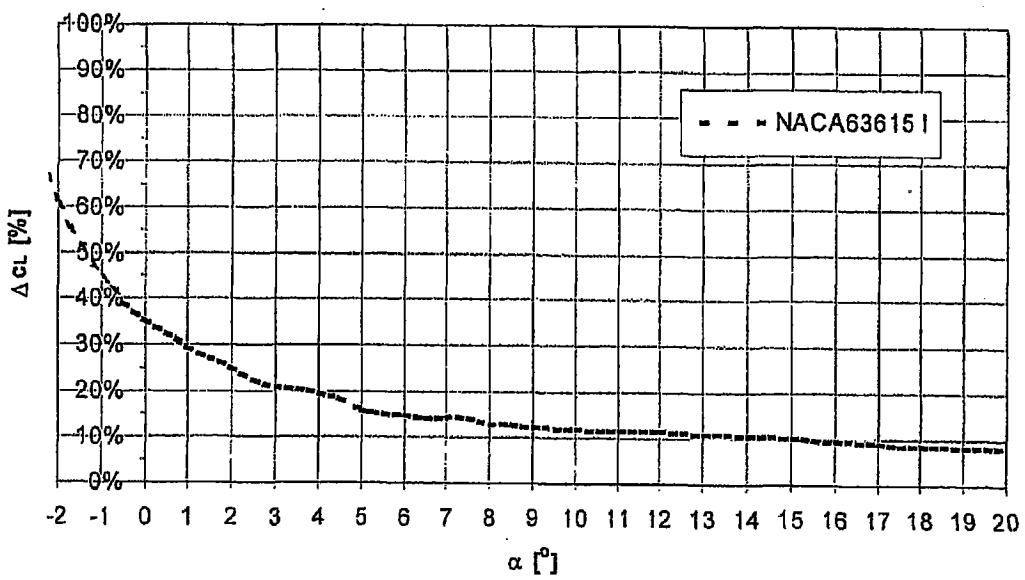


图 1D

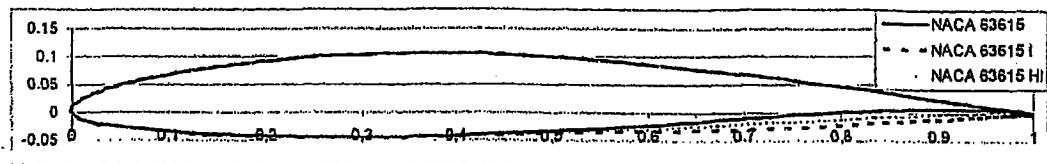


图 2A

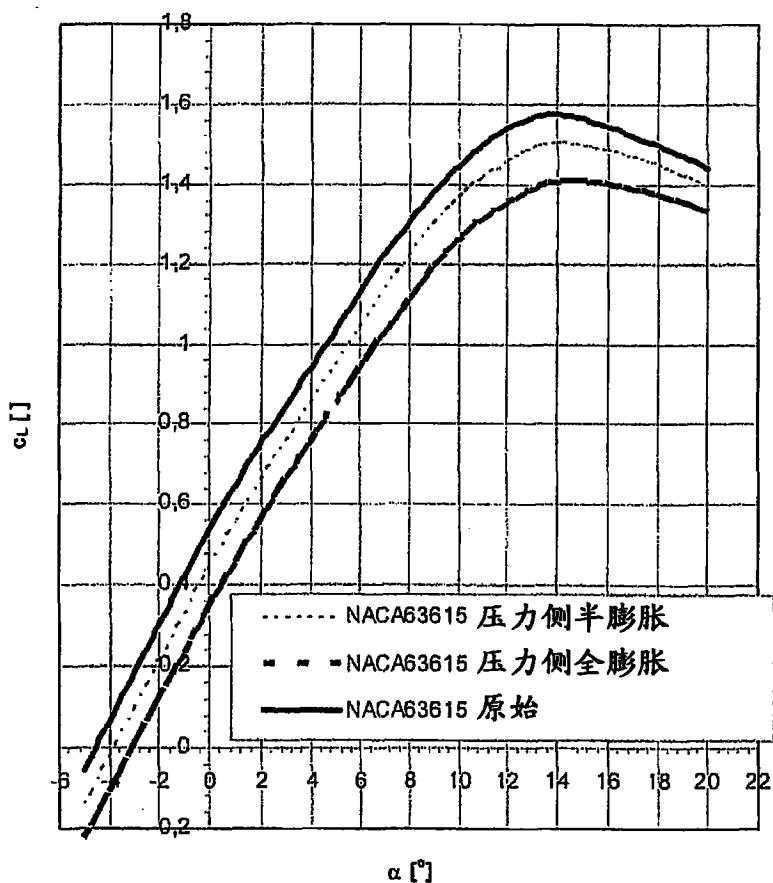


图 2B

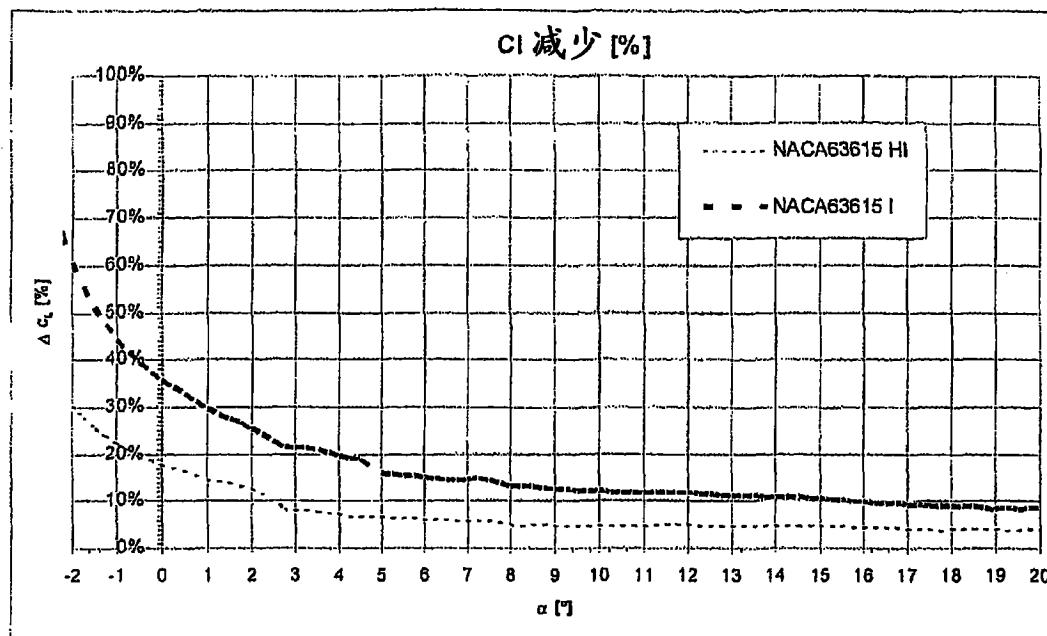


图 2C

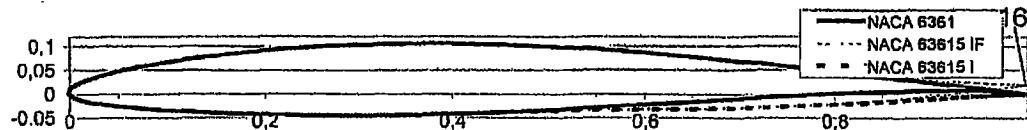


图 3A

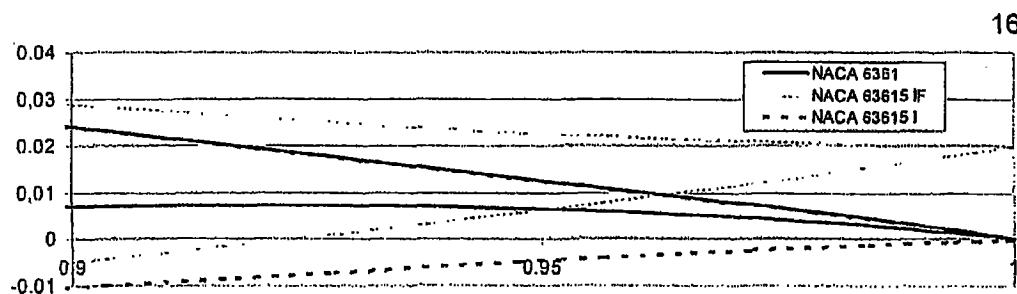


图 3B

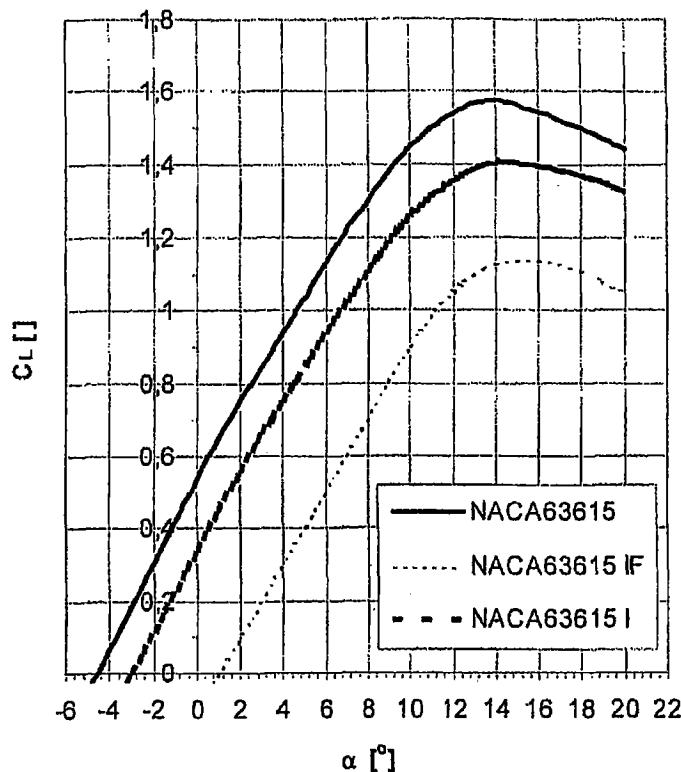


图 3C

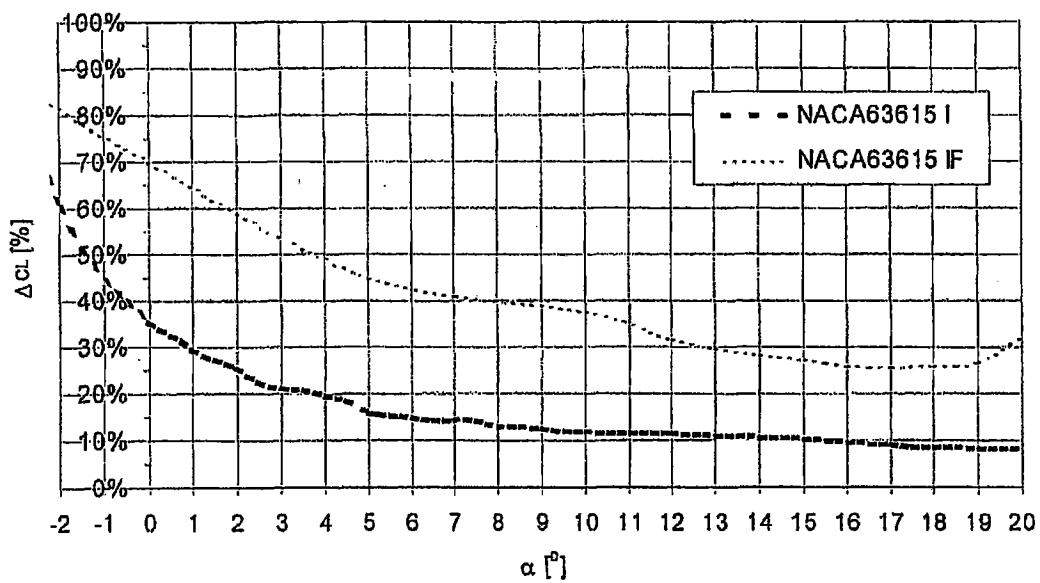


图 3D

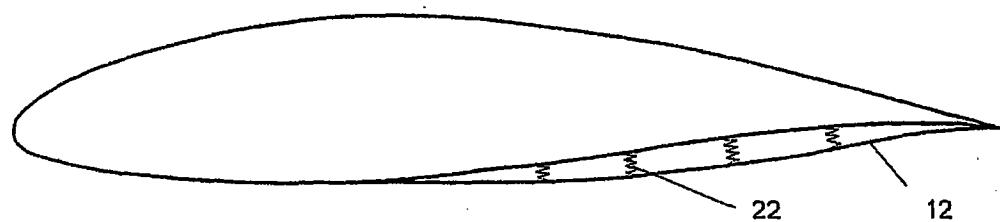


图 4A

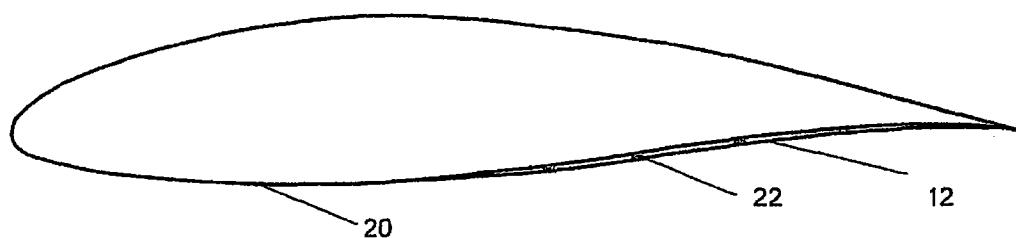


图 4B

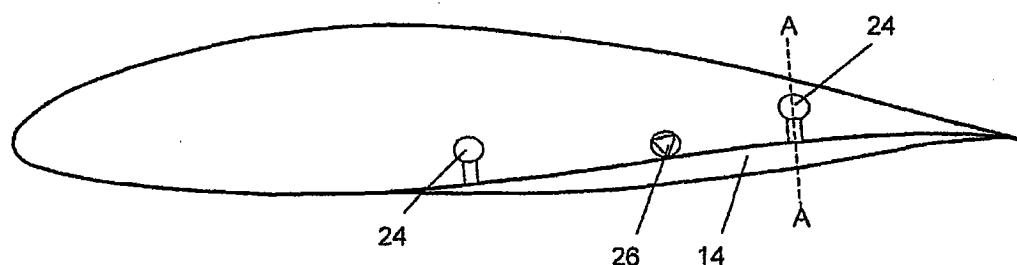


图 5A

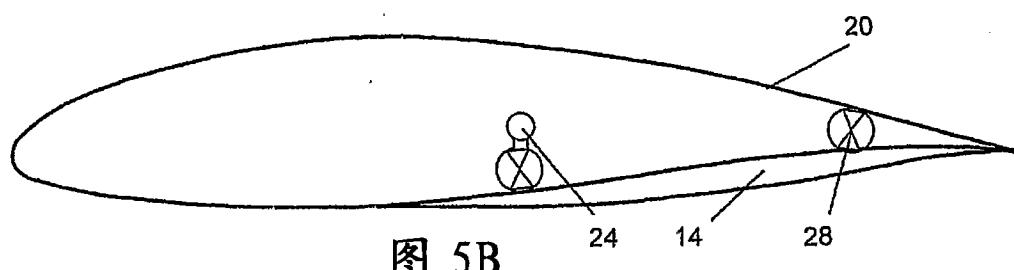


图 5B

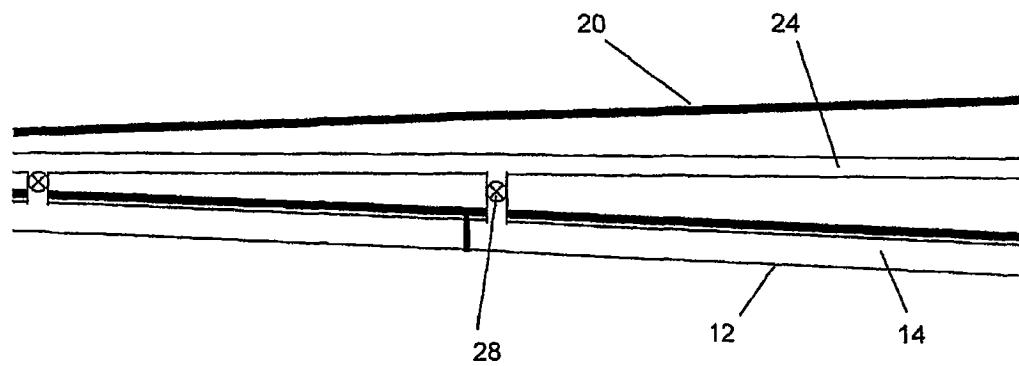


图 6

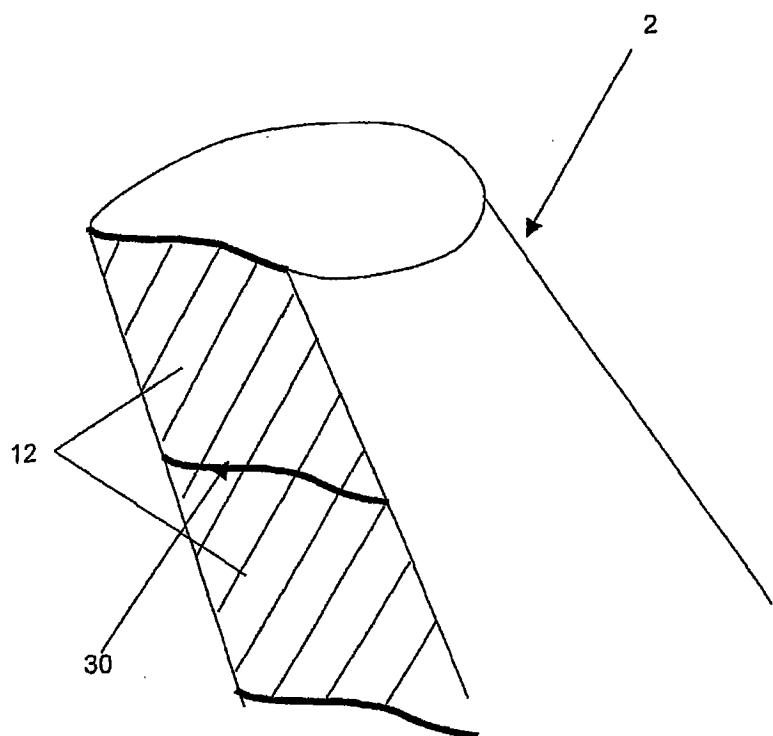


图 7

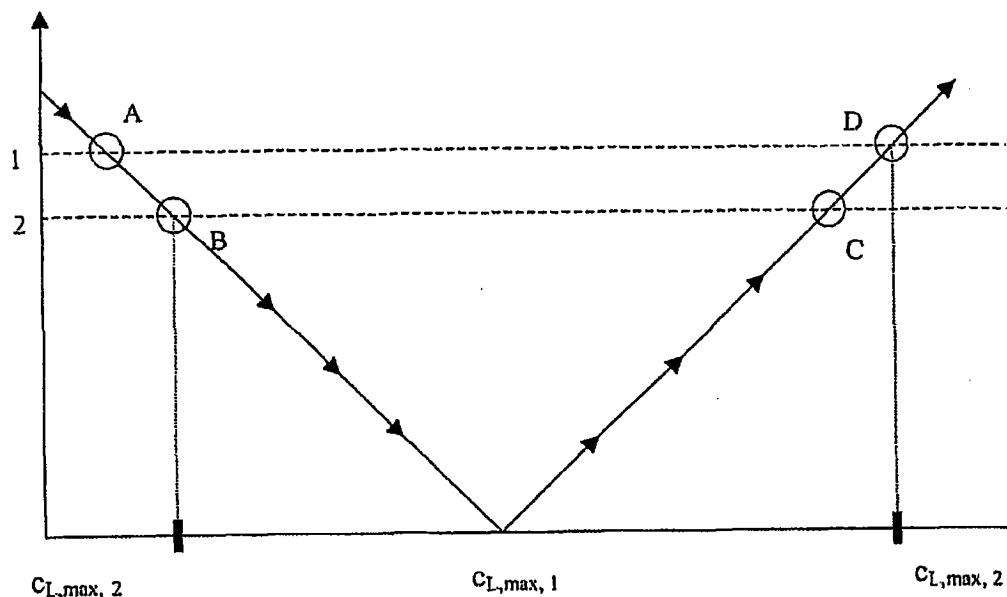
$W \text{ [m/s]}$ 

图 8

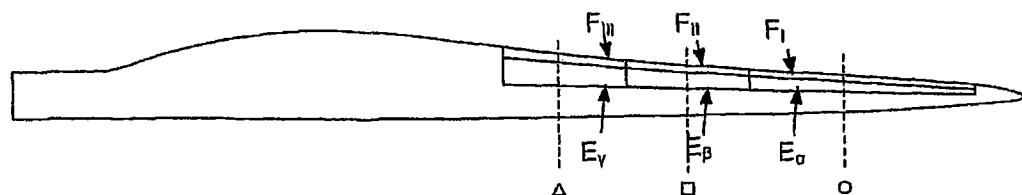


图 9A

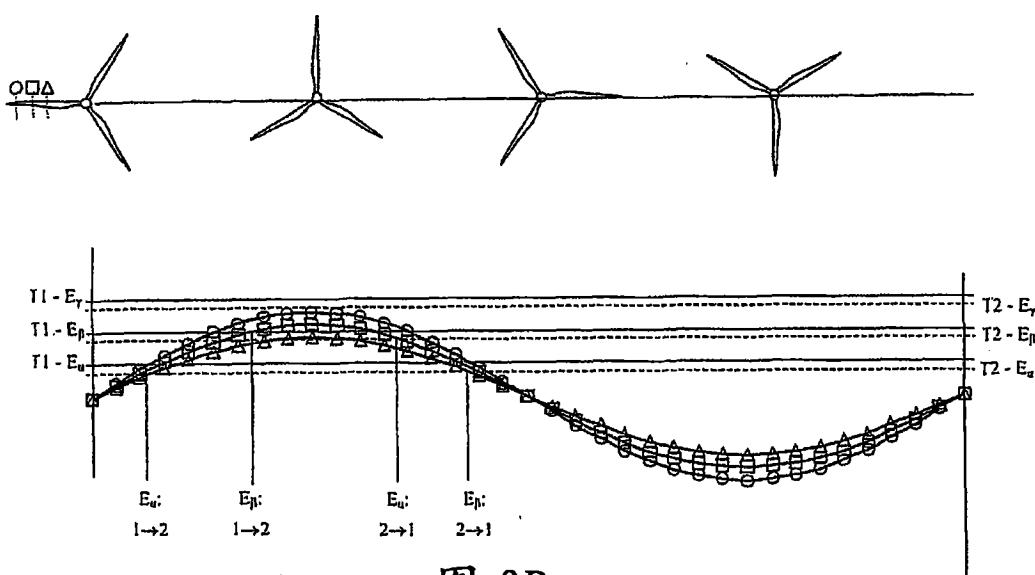


图 9B