

风电叶片空气动力学

风电叶片的形状设计均出自于对以最低成本获取最高效能的考虑。基本上，设计必须满足空气动力学要求，但经济性要求意味着叶片形状同样要保证成本架构的合理性。特别需要提到的是，越接近根部，叶片弯曲程度越大，结构应力也达到最大，叶片实际厚度比理想的空气动力学设计更厚。

叶片设计往往开始于一个“理想的猜测”，这个“猜测”将空气动力学与结构效率有机地结合起来；同时，材料和制造工艺的选择对能否把叶片做“薄”（理想的空气动力学设计）也有很大影响。例如，对比碳纤维预浸料和灌注的玻璃纤维，前者强度高刚性好，优势十分明显。当在既定的动力学形状上施加更高载荷时，许多设计问题将会显现出来，此时，设计者需要重新计算空气动力学性能，这些问题则可以帮助设计者优化翼形。

风能

很显然，对风的了解是风电叶片设计的基础。风所蕴含的能源与风速成立方关系，即双倍的风速会使风能增加八倍，这就是风场谨慎选址的原因：风速低于5米/秒（10英里/小时）的风场无法获得足够的有用的能量；相反地，将风机安装在大风较多的地方，虽然风速很高时风机可以捕获较多风能，但其余时间效率很低，这也是对风机设备的浪费。因此，理想的风场应该选在常年有风的地区，而且在这里风机既可以利用大部分低速风发电，又可以经受最强风的考验。

由于地表特征、热蒸汽和天气变化，地表气流变幻莫测，因此，风不仅是每天在变化，而是每时每刻都在变化；而且，越是远离地表，风力越强。所有这些都将引起加载在叶片上的载荷发生波动，叶片设计及结构都需要经受无法预测的考验，这远比理想状态复杂得多。

风机除了捕获风能外，对附近的气流会产生一定的影响：气流经过叶片进入背风带后运动速率减小。因为叶尖形成的圆盘扫风区，风速甚至在靠近叶片时已经开始下降，也减少了可利用的风能。部分风吹向圆盘扫风区时，围绕着缓慢移动的气流发生转向，最终完全无法被风机获取。因此，不同的扫风圆盘直径均有最佳捕风量：捕风量过大会导致风速减少过多，相应地，可利用的风能也会减少。理想的状态是经过风机后，风速下降背风区风速的三分之二，这样才有可能捕获最大可达59%（理论值）的风能，即所谓的Betz极限。实际应用中，目前的设计仅能达到40-50%。

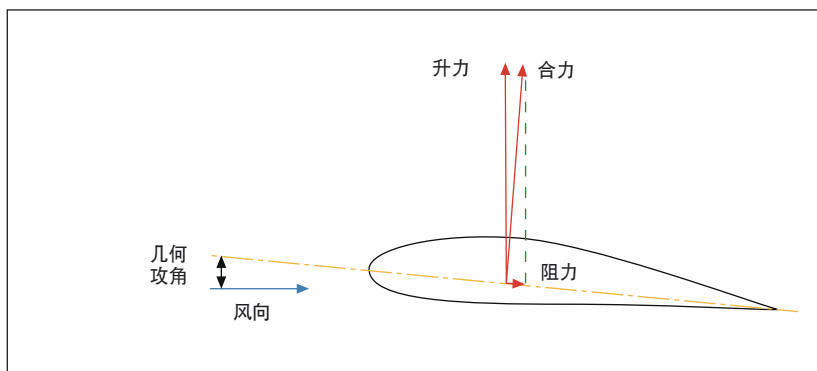
叶片数量

对每个风机而言，捕获风能的能力固定且有限，这意味着：首先，叶片数量越多，每支叶片捕获的风能越少；此外，叶片也必须足够窄，以保证其空气动力学效率。这里需要介绍一个概念，就是“实度”，即叶片的面积占总扫风面积的比例。在给定的叶尖速度下，叶片存在理论最佳实度，叶片数量越多，叶片宽度就必须越窄。实际风机中，实度的值非常低，因此，即使只有三支叶片，每支也必须非常窄；同时，这也导致叶片被设计得非常薄，当然薄叶片也是为了减小叶片运行中的空气阻力。进一步需要考虑的是，薄叶片所带来的制造技术的挑战和制造成本的压力。鉴于以上原因，大型风电设备中叶片数量都不会多于三。

另一个影响叶片数量的因素是审美学，三支叶片的风机比两支叶片或一支叶片在视觉上更容易被接受。

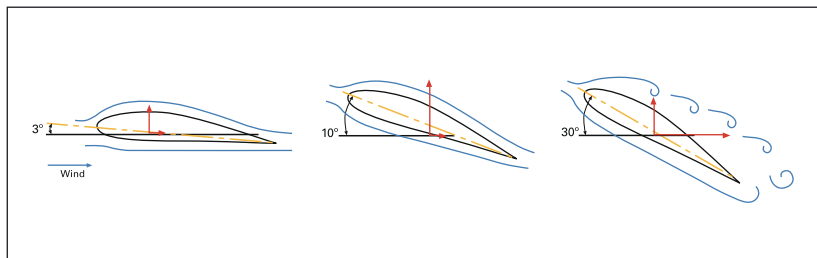
叶片如何捕获风能

如飞机机翼一样，风电叶片因其翼型设计产生的升力而持续运转。空气在翼型的曲面产生的压力较小，在另一面产生较大压力，两个力合成后即为垂直于空气流动方向的升力。



升力和阻力向量

叶片轴向与风向夹角越大，其受到的升力也越大，这个夹角被称为几何攻角。当几何攻角增大到一定程度，叶片会停止转动，升力也会降低，故存在产生最大升力的最佳几何攻角。

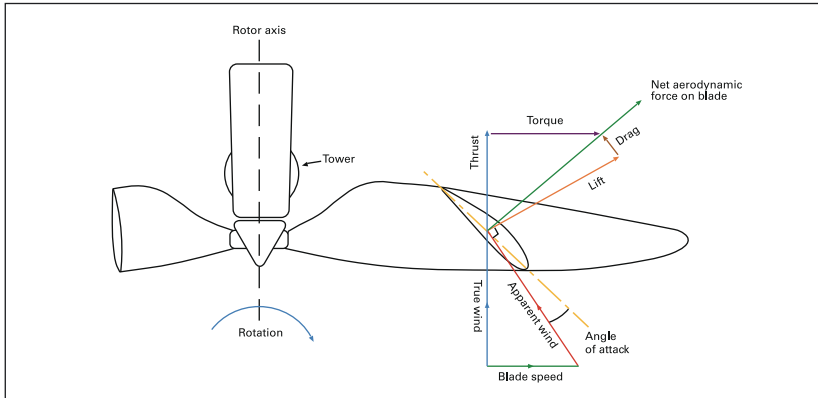


叶片在高、中、低几何攻角下的升力和阻力

在受到升力作用的同时，叶片还受到阻碍其运动的阻力。阻力平行于风向，也随着几何攻角的增加而增大。如果翼型设计较好，升力降远大于阻力，但是几何攻角过大，特别是叶片停转时，阻力会急剧增大。因此，在几何攻角略小于获得最大升力的攻角时，叶片达到最大的升力/阻力比。最佳工作点即介于两个角度之间。

从图示可以看出，阻力是处于背风方向而且与叶片轴向平行，它仅产生“推力”，既然

如此，阻力似乎并不会使叶片转速增大或减小。当叶片处于静止状态时，事实的确如此。但叶片自身的不断运动意味着，风对叶片而言将从另一个方向吹来，这里的风被称为可视风。可视风要大于真实的风，角度则不利于叶片转动，也就是说，它使升力和阻力的角度发生旋转，从而降低了升力增加了阻力对叶片的作用。这也意味着升力对叶片受到的推力也有贡献。

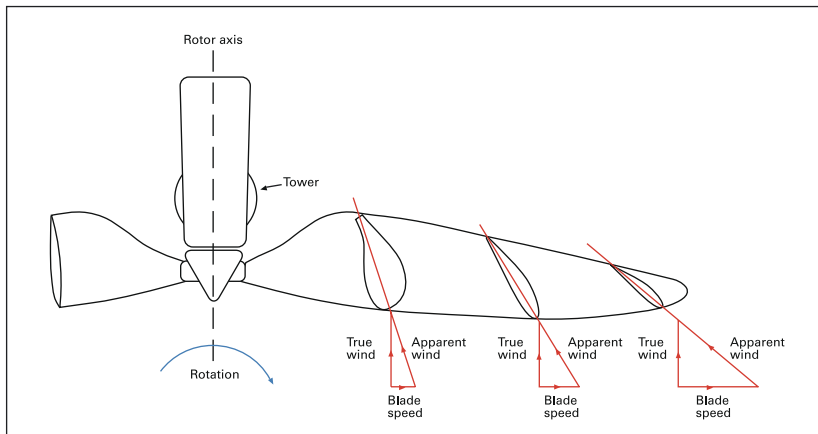


升力和阻力向量

从以上的描述中可以得出：可视风的存在导致叶片必须旋转更大的角度，以保持最佳几何攻角。

叶片扭角

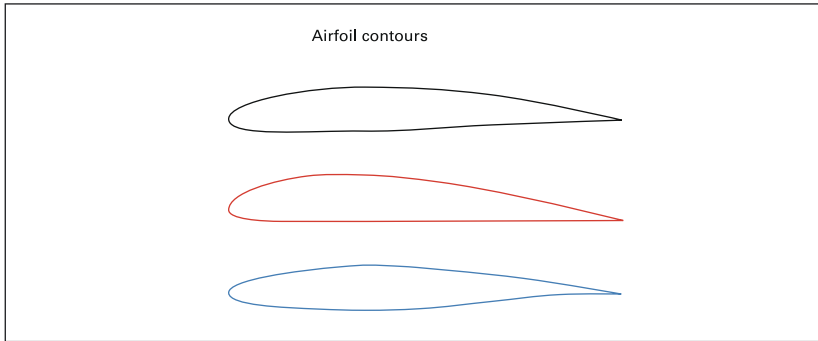
越接近叶片尖部，叶片转速越快，可视风角度也越大，因此，叶片尖部旋转角度比根部更大。换言之，叶片延长度方向出现了扭曲。通常，从根部到尖部，扭角为 $10\text{--}20^\circ$ 。扭角的存在使叶片的制作更加困难。



叶片扭角

叶片截面形状

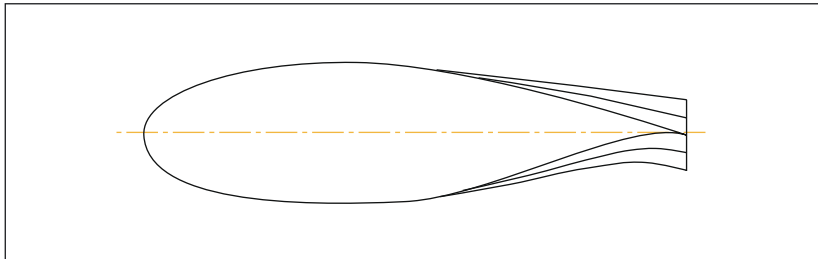
除了扭角，风电叶片和飞机机翼有着相似的要求，故它们的截面形状也是基于相似翼型设计。这种设计提供了最大升力/阻力比，翼型本身又很薄：厚度仅为弦长10-15%（弦长指横跨叶片宽度方向的长度）。



具有良好升力/阻力比的常见翼型

以上只是无结构要求情况下风机叶片的比例图，当然，叶片需要承受升力、阻力和重力等作用力，这些结构要求意味着叶片翼型需要比理想动力学设计厚很多，特别是在靠近根部的位置，此处叶片受到的弯曲作用最大。幸运的是，根部可视风速度很小，叶片作用在轮毂上的杠杆作用也最小，因此，某些空气动力学无效性在此位置相对较弱。此前提到过，叶片厚度相对于它的弦长不能太大，其原因是气流将在叶片后面产生分流，导致阻力的急剧增大，结果类似于停转。

为了增加根部厚度，又不形成一个短粗的翼型截面，某些设计采用了“方脊”翼型，该翼型可以是标准翼型后缘加厚至方形，也可以是更长的翼型被截去后缘。这种设计相对于圆形后缘减少了阻力，却增大了噪音，其适用性取决于风场位置。



典型的“方脊”翼型

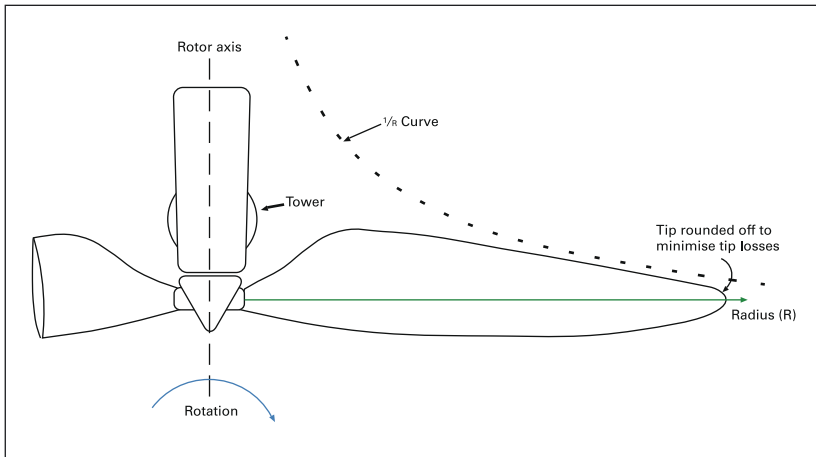
在空气动力学效率和结构效率间取得平衡很重要：即是使用大量的增强材料可以制造出高强度高刚度的薄叶片，把叶片做厚一些是有好处的，尽管损失了一些动力学优势，却因为节省了大量的原材料成本，使叶片总体收益增加。风场最大的投入就是风电机，因此为了持续优化叶片厚度，人们在翼型设计上不断改进。

叶片平面形状

设计叶片时对平面形状的考虑是为了让叶片整体对风的削弱效应保持基本恒定，即减小叶片尖部的可视风，使其与中部和根部接近。进而确保：既没有气流离开叶片时速度过慢形成“扰流”，也没有气流运动速度过快减少风能的捕获。再次提一下上文讨论的 Betz 极限，这是风机捕获风能的最大极限值。

由于叶尖比根部转动速度快，尖部穿过的气流量要大很多，也必须产生更大的升力减缓叶尖气流运动。因为升力恰好是转速的平方，所以不难满足此要求；现实中，叶片在尖部即使很窄也可以产生足够的升力。靠近翼尖处的最佳平面锥度可以通过计算得到。简单来说，弦长与半径成反比，若10米半径处弦长为2米，则1米半径处弦长为20米。这种反比关系在叶根和叶尖处不成立，它们的最佳形状与叶尖损失的计算有关。

实际应用中，线性锥形的平面形状适宜于大多数设计，且与理想形状相比，其结构更优化、制作更容易。

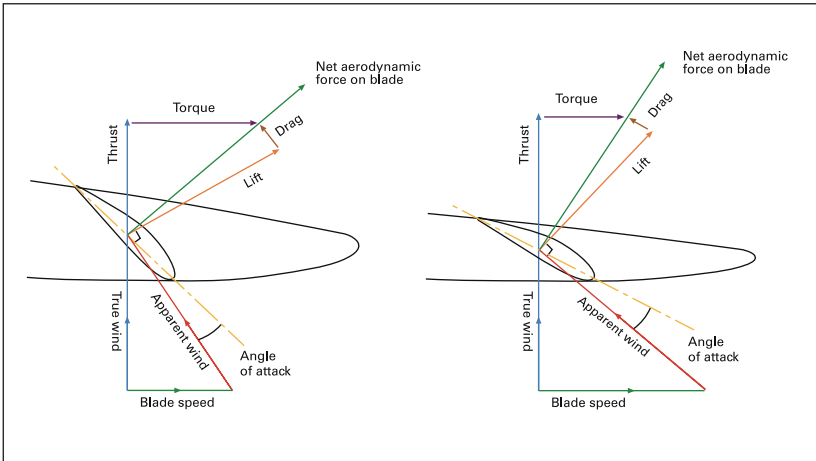


最佳叶片弦长(宽度)与半径的关系

转速

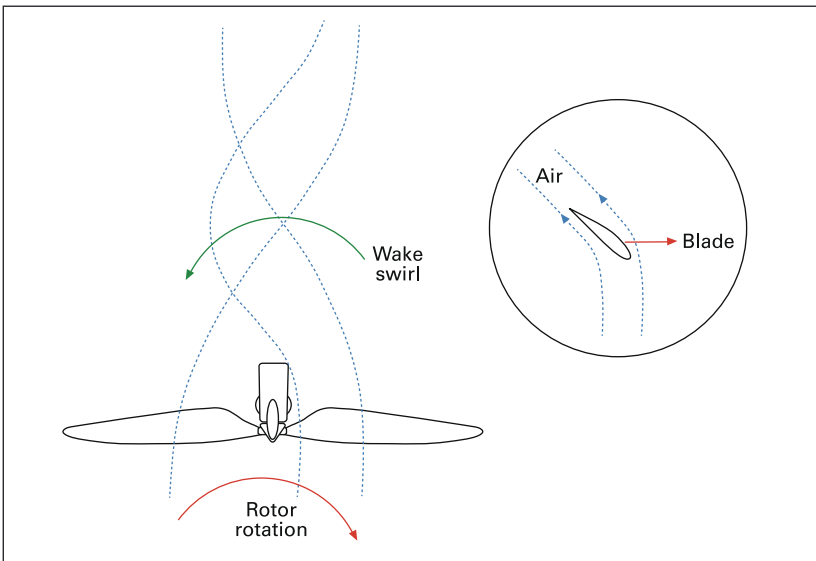
风机转速是设计叶片时考虑的基本因素，转速的定义是相对于自由风速（未被风机削弱的风速）的叶尖转动速度，也被称为叶尖速率。

高叶尖速率意味着施加在叶片上的力（升力和阻力之和）几乎与叶片轴向平行，这个合力依赖于升力/阻力比，而升力/阻力比受到沙尘或叶片表面粗糙度的严重影响



叶尖速率对阻力的影响

低叶尖速率似乎是更好的选择，但会导致动力学效率低下，具体原因为两个效应。首先，因为升力更接近切线方向，它使叶片发生转动而不是拉动叶片沿轴向向后运动，同时升力对风有着相反的反作用力，使风沿着相反的切线方向运动，从而导致了背风区域的气流形成“漩涡”，漩涡代表着风能的损失和动力学效率的下降。



尾迹漩涡

另一个导致动力学下降的原因为“叶尖损失”，即来自于迎风区域的高压气流沿着叶尖溜到低压区域造成的能量损失。因为能量 = 力 × 速度，在低转速下，叶片需要更大的

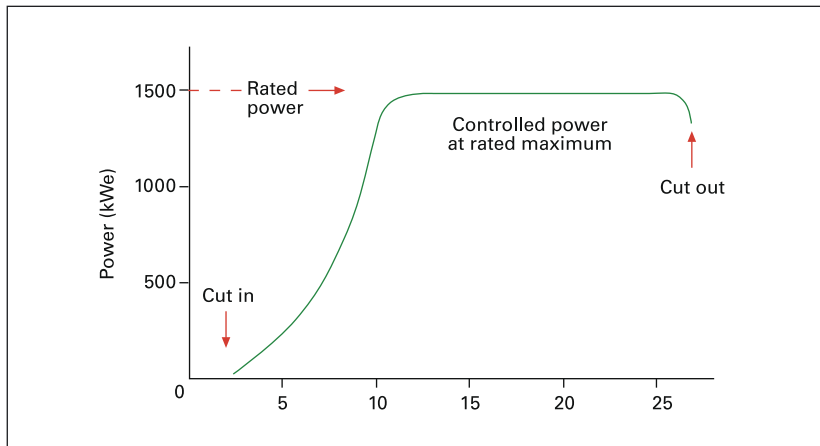
升力以产生相同的风能，为了获得更大升力，叶片宽度要增加，从几何角度来讲，叶片接近叶尖所占的比例也相应增大，然而，这只会导致更多的叶尖损失和效率下降。各种技术都可以用于降低叶尖损失，譬如增加小翼，但由于成本增加，这些技术很少被实际应用。

宽叶片产生的较大升力也被转化为作用在其他结构（如轮毂和轴承）的高载荷，因此低叶尖速率将增加这些结构的成本。从另一个角度讲，宽叶片能够更好地承受升力，叶片本身成本可能会下降。

综上，叶片设计者通常将叶尖速率定义在7-10，因此在设计风速（12-15米/秒）下，叶尖运动速度大约为120米/秒（大约270英里/小时）。需要注意的是，绝对叶尖速度受到许多因素限制：在这样的速度下，鸟类、雨水侵蚀都会影响叶片寿命；叶尖速度增加噪音也会显著增大。

功率和变桨距控制

经济的叶片设计，应该把发电机和齿轮箱的最大效能控制在一个合理的水平。理想状态是风机能够尽可能地捕获风能以达到发电机的额定功率，然后，即使风速增大，风机依然被限制在额定功率。



如果叶片迎风角度保持不变，叶片就无法在风速改变时获得最大功率，即定桨距控制。强风条件下，让定桨距风机安全停机的唯一方法就是使叶片具有良好的失速性能，但是这种控制获得的功率曲线不如上图所示的那么平滑，因此，对于最大功率的限制问题，失速控制仅适用于额定功率低于潜在最大功率的状况。

如果叶片与轮毂的连接通过轴承实现，叶片攻角可以在一定范围内变化，即变桨距控制。变桨距叶片可以改变角度以保证风机在设计风速下很快达到额定功率，超过设计风速后，整个叶片绕叶片中心轴旋转，减小攻角并降低升力，使输出功率仍保持相对

稳定。服役过程中，先使叶片顺桨，减少机组结构受力，即可使风机安全停机。

另一种减小几何攻角的方法是故意增加攻角至叶片停止运动，即失速控制。故意增加攻角会减小升力、增加阻力，进而达到降低风机转速的效果。失速控制比变桨距控制对强风的敏感性更小，因为它通过减小可视风角度增加几何攻角，实现风机停转的。两种方式目前被应用于不同的设计。

小结

- **叶片长度：**叶片长度不同，扫风圆盘面积不同，决定了风机捕获风能的能力。风机存在Betz极限，即风机仅能捕获大约50%的风能。
- **空气动力学截面：**叶片被赋予了空气动力学截面形状，以产生升力带动叶片转动。
- **平面形状：**叶片平面在接近叶尖处变窄，这样可以使叶片在扫风区域内保持固定的减速效应，既没有气流离开叶片时速度过慢形成“扰流”，也没有气流运动速度过快减少风能的捕获。
- **翼型厚度：**越靠近根部，叶片厚度越大，以承受结构载荷，特别是弯矩。叶片中部截面的厚度/弦长比率约为10~15%。“方脊”截面设计可以应用于根部，增加空气动力学效率。
- **叶片扭角：**可视风角度沿着叶片长度变化，原因在于转速随着翼尖距离增加而增大。因此，要保持截面有适宜的几何攻角，叶片必须沿长度方向发生扭曲。
- **叶片数量和转速：**通常叶片转速是经过设计的，确保叶尖的转速是风速的7到10倍。叶片数量一般不大与三。
- **高转速和多支叶片意味着叶片必须更窄，也更薄，**如此设计的叶片很难满足强度要求。在高速转动的情况下，叶片开始变得动力学低效，噪音增加，且易于受到腐蚀和鸟类的影响。
- **低转速下，尾迹涡旋和叶尖损失都会导致空气动力学效率低下，作用在其他部件的推力增加。**
- **变桨距控制：**因为风能是风速的三次方，虽风速变化剧烈，风机必须既可以在微风时发电，也可以耐受强风施加的载荷。因此，在高于设计风速时，叶片通常采用变桨距控制或失速控制以减少输出功率并控制所受载荷。