

风力机叶片力学分析

一、概述

作用在叶轮上的空气动力是风力机最主要的动力来源,也是造成各个零部件的主要的载荷来源。要计算风力发电机组的载荷就必须先计算出空气作用在叶片上的作用力。除了气动载荷,风力机叶片在风机工作中受到的作用力主要还受到惯性力,特别应该考虑重力、离心力和陀螺力等。

风力机的叶片设计分气动设计和结构设计两大部分,气动性能计算为气动设计结果提供评价和反馈,并为叶片的结构设计提供气动载荷等原始数据。气动性能计算的准确性,直接影响叶片的气动性能和结构安全,从而影响风力机的运行效率和运行安全。

二、风力机叶片空气动力基础

2.1 风力机叶片翼型几何参数和气流角^[1]

翼型是组成风力机叶片的基本元素,因此,翼型的气动特性对风力机的性能起着决定性的作用。

以一个静止的翼型为例,其受到气流作用,风速为 \vec{v} ,方向与翼型截面平行。

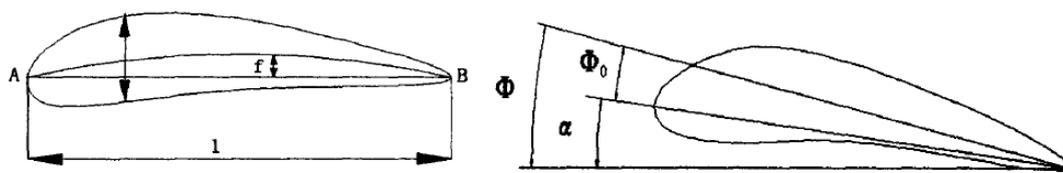


图 2.1 翼型的几何参数和气流角

翼型的尖尾(点 B)称为后缘。

圆头上的 A 点称为前缘,距离后缘最远。

l ——翼型的弦长,是两端点 A、B 连线方向上翼型的最大长度;

C ——翼型最大厚度,即弦长法线方向之翼型最大厚度;

\bar{C} ——翼型相对厚度, $\bar{C} = \frac{C}{l}$,通常为 10%~15%;

翼型中线—从前缘点开始,与上、下表面相切诸圆之圆心的连线,一般为曲线;

f ——翼型中线最大弯度;

\bar{f} ——翼型相对弯度, $\bar{f} = \frac{f}{l}$;

α ——攻角,是来流速度方向与弦线间的夹角;

ϕ_0 ——零升力角,它是弦线与零升力线间的夹角;

ϕ ——升力角,来流速度方向与零升力线间的夹角。

$$\alpha = \phi + \phi_0 \quad (2-1)$$

此处 ϕ_0 是负值, α 和 ϕ 是正值。

2.2 风力机叶片空气动力[1,2]

物体在空气中运动或者空气流过物体时，物体将受到空气的作用力，称为空气动力。通常空气动力由两部分组成：一部分是由于气流绕物体流动时，在物体表面处的流动速度发生变化，引起气流压力的变化，即物体表面各处气流的速度和压力不同，从而对物体产生合成的压力；另一部分是由于气流绕物体流动时，在物体附面层内由于气流粘性作用产生的摩擦力。

假定叶片处于静止状态，令空气以相同的相对速度从相反方向吹向叶片时，作用在叶片上的空气动力将不改变其大小。空气动力只取决于相对速度和攻角的大小，为便于研究，先研究静止的叶片置于流动空气中，其无穷远来流速度为 v 时的情况。

由于受叶片外型干扰，作用在叶片表面上的空气压力是不均匀的，叶片的上表面气压减少而在下表面则增加。为了表示压力沿表面的变化，可作翼型表面的垂线，用垂线的长度 K_p 表示各部分压力的大小。

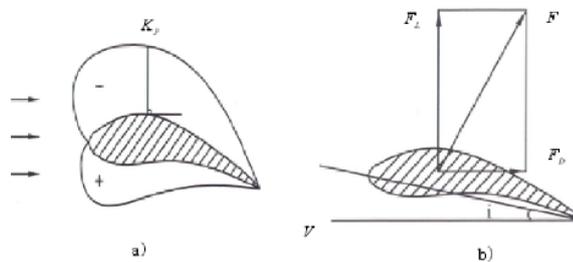


图 2.2 叶片翼型上受力情况

$$K_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (2-2)$$

式中 P ——翼型表面的静压；

ρ 、 P_0 、 v ——无限远处的来流条件。

所有作用在叶片上的各个力的合力 F ，通常与气流方向斜交，可以用下式表示

$$F = \frac{1}{2} \rho C_r S v^2 \quad (2-3)$$

式中 S ——翼展面积，等于弦长 \times 翼展长度；

C_r ——总的气动系数。

该作用力可以分为两部分：一个是平行于气流速度 \bar{v} 的分力——阻力 D ；一个是垂直于气流速度 \bar{v} 的分力——升力 L 。

D 与 L 可分别表示为

$$D = \frac{1}{2} \rho C_d S v^2 \quad (2-4)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho C_l S v^2 \quad (2-5)$$

式中， C_d 和 C_l 分别为阻力系数和升力系数。这两个分力相互垂直，可写为：

$$D^2 + L^2 = F^2 \quad (2-6)$$

因此

$$C_d^2 + C_l^2 = C_r^2 \quad (2-7)$$

设 M 为 F 相对于前缘的力矩，力矩系数 C_M 有下式定义：

$$M = \frac{1}{2} \rho C_M S l v^2 \quad (2-8)$$

式中 l ——翼型的弦长。

因此作用在翼型上的气动力可以表示为升力、阻力和气动力矩三部分。对于各个攻角值都有一特殊点 C ，该点的气动力矩为零，称为压力中心。空气动力在翼型截面上的影响可由单独作用于该点的升力和阻力来表示。压力中心点与前缘的相对距离与弦长比值大约为 25%—30%。

有限长度的叶片，必须对结果加以修正。一个叶片的下表面压力比周围空气要大，而上表面压力则小。因此在叶尖，空气企图从高压侧向低压侧流动，从下表面流回上表面，结果在叶尖形成涡流。实际上，由于叶尖的影响，沿整个叶片产生许多小涡旋，这些小涡旋在叶尖内侧形成两个大涡旋。

这些涡旋引起的后果是使阻力增加，由此产生的阻力称为诱导阻力 F_{di}

$$F_{di} = \frac{1}{2} \rho C_{di} S v^2 \quad (2-9)$$

因此，上述阻力系数变为

$$C_d = C_{d0} + C_{di} \quad (2-10)$$

其中 C_{d0} 为无限长叶片的阻力系数。

要想得到同样的升力，攻角必须加上一个增量 θ ，所以，新攻角为

$$\alpha = \alpha_0 + \theta \quad (2-11)$$

当环量的分布呈椭圆分布时， C_{di} 和 θ 可由以下关系给出

$$C_{di} = \frac{S}{L^2} \cdot \frac{C_l^2}{\pi} = \frac{C_l^2}{\pi a} \quad (2-12)$$

$$\theta = \frac{S}{L^2} \cdot \frac{C_l}{\pi} = \frac{C_l}{\pi a} \quad (2-13)$$

式中 S ——翼型面积；

L ——翼型长度；

a ——展弦比 ($a = L^2/S$)。

三、风力机叶片气动模型^[3-7]

3.1 动量理论 (Momentum Theory)

动量理论 (Momentum Theory) 主要考虑风力机轴向动量变化，主要用于描述作用在风轮上的力与来流速度之间的关系，主要用于估算风力机的理想出功效率和流速。

3.1.1 经典的动量理论

经典的动量理论定义了一个通过风轮平面的理想流管，并假设：

- (1) 气流是不可压缩的均匀定常流；
- (2) 风轮简化为一个轮盘；
- (3) 轮盘上没有摩擦力；
- (4) 风轮流动模型简化为一个单元流管；
- (5) 风轮前后远方的气流静压相等；
- (6) 轴向力沿轮盘均匀分布。

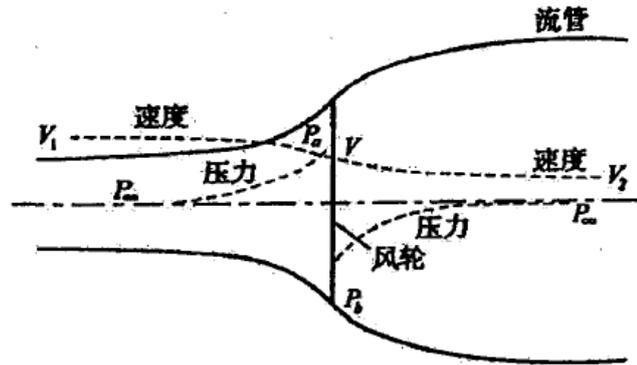


图 3.1 风轮流动的单元流管模型

考虑风力机轴向的动量变化，可得到作用在风轮上的轴向力(推力) T 为：

$$T = \dot{m}(V_1 - V_2) \quad (3-1)$$

式中， V_1 ——风轮前来流速度 ($V_1 = V_\infty$)；

V_2 ——风轮后尾流速度；

\dot{m} ——单位时间流经风轮的空气质量流量，可表示为

$$\dot{m} = \rho V_t A \quad (3-2)$$

其中， ρ ——空气密度；

A ——风轮扫掠面积；

V_t ——流过风轮的速度。

代入式 (3-1) 中

$$T = \rho V_t A (V_1 - V_2) \quad (3-3)$$

根据动量理论，作用在风轮上的轴向力 T 可表示为

$$T = A(P_a - P_b) \quad (3-4)$$

式中， P_a ——风轮前的静压；

P_b ——风轮后的静压。

由伯努利方程可得

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + P_1 = \frac{1}{2}\rho V_t^2 + P_a \quad (3-5)$$

$$\frac{1}{2}\rho V_2^2 + P_2 = \frac{1}{2}\rho V_t^2 + P_b \quad (3-6)$$

根据风轮前后远方的气流静压相等的假设

$$P_1 = P_2 \quad (3-7)$$

由式 (3-5)、式 (3-6) 和式 (3-7) 可得:

$$P_a - P_b = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2) \quad (3-8)$$

代入式 (3-4) 可得:

$$T = \frac{1}{2}\rho A(V_1^2 - V_2^2) \quad (3-9)$$

由式 (3-3) 和式 (3-9) 可得

$$V_t = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3-10)$$

上式表示: 流经风轮的速度是风轮前来流速度和风轮后尾流速度的平均值。

定义轴向诱导因子 $a = v_a/V_1$, v_a 为风轮处轴向诱导速度, 则

$$V_t = V_1(1-a) \quad (3-11)$$

和

$$V_2 = V_1(1-2a) \quad (3-12)$$

由式 (3-11) 和式 (3-12) 可知, 在风轮尾流处的轴向诱导速度是在风轮处的轴向诱导速度的两倍。轴向诱导因子 a 又可以表示为

$$a = \frac{1}{2} - \frac{V_2}{2V_1} \quad (3-13)$$

上式表明: 如果风轮吸收风的全部能量, 即 $V_2 = 0$, 则 a 有一个最大值, $a = \frac{1}{2}$ 。但是实际情况下, 风轮只能吸收风能的一部分, 所以 $a < \frac{1}{2}$ 。

由式 (3-9) 和 (3-12) 可得:

$$T = \frac{1}{2}\rho A V_1^2 \cdot 4a(1-a) \quad (3-14)$$

引入风轮轴向力系数 C_T

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A V_1^2} \quad (3-15)$$

将式 (3-14) 代入式 (3-15) 可得

$$C_T = 4a(1-a) \quad (3-16)$$

根据能量方程，风轮吸收的能量（风轮轴功率 P ）等于风轮前后气流动能之差：

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}(V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} \rho V_r A (V_1^2 - V_2^2) \quad (3-17)$$

将式 (3-11) 和式 (3-12) 代入式 (3-17) 可得：

$$P = 2\rho AV_1^3 a(1-a)^2 \quad (2-18)$$

当

$$\frac{dP}{da} = 2\rho AV_1^3 (1-4a+3a^2) \quad (3-19)$$

时，则 P 出现极值，求解后 $a=1$ 和 $a=1/3$ ，因为 $a < \frac{1}{2}$ ，所以只取 $a=1/3$ 。

因为 $\frac{dP^2}{da^2} < 0$ ， P 取极大值，由于 P 的连续性，极大值就是最大值，即

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho AV_1^3 \quad (3-20)$$

定义风轮功率系数 C_p 为

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho AV_1^3} \quad (3-21)$$

将 (3-18) 代入 (2-21) 可得

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (3-22)$$

因此，当 $a=1/3$ 时，风轮功率系数最大， $C_{p_{\max}} \approx 0.593$ ，此值称为 Betz 极限。它表示在理想情况下，风轮最多吸收 59.3% 风的动能。

3.1.2 风轮尾流旋转时的动量理论

上面研究的是一种理想情况，实际上当气流在风轮上产生转矩时，也受到了风轮的反作用力，因此，在风轮后的尾流是向相反的方向旋转的。这时，如果风轮处气流的角速度和风轮的角速度相比是一个小量的话，那么一维动量方程仍可以应用，而且风轮前后的气流静压仍假设相等。

由动量方程得出 dr 圆环上的轴向力可表示为

$$dT = d\dot{m}(V_1 - V_2) \quad (3-23)$$

式中 $d\dot{m}$ - 单位时间内流经风轮叶片平面 dr 圆环上的空气流量，可表示为

$$d\dot{m} = \rho V_r dA = 2\pi\rho V_r r dr \quad (3-24)$$

其中 dA - 风轮平面 dr 圆环的面积。

假设式 (3-11) 和式 (3-12) 仍然成立，则将式 (3-11)、式 (3-12) 和式 (3-24) 代入式 (3-23)，可得

$$dT = 4\pi\rho V_1^2 \cdot a(1-a)rdr \quad (3-25)$$

作用在风轮上的轴向力可表示为

$$T = \int dT = 4\pi\rho V_1^2 \int_0^R a(1-a)rdr \quad (3-26)$$

式中 R - 风轮半径。

应用动量矩方程，则作用在风轮平面 dr 圆环上的转矩可表示为

$$dM = dm(v_t r) = 2\pi\rho V_1 \varpi r^3 dr \quad (3-27)$$

式中 v_t - 风轮叶片 r 处的周向诱导速度， $v_t = \varpi r$ ；

ϖ - 风轮叶片 r 处的周向诱导角速度。

定义轴向诱导因子

$$b = \frac{\varpi}{2\Omega} \quad (3-28)$$

式中 Ω - 风轮转动角速度。

将式 (3-11) 和式 (3-28 代入式) 代入式 (3-27)，可得

$$dM = 4\pi\rho\Omega V_1 b(1-a)r^3 dr \quad (3-29)$$

作用在整个风轮上的转矩可表示为

$$M = \int dM = 4\pi\rho\Omega V_1 \int_0^R b(1-a)r^3 dr \quad (3-30)$$

风轮轴功率是风轮转矩与风轮角速度的乘积，因此

$$P = \int dP = 4\pi\rho\Omega^2 V_1 \int_0^R b(1-a)r^3 dr \quad (3-31)$$

定义风轮叶尖速比 $\lambda = \frac{\Omega R}{V_1}$ ，风轮扫掠面积 $A = \pi R^2$ ，则式 (3-31) 可表示为

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \frac{8\lambda^2}{R^4} \int_0^R b(1-a)r^3 dr \quad (3-32)$$

这时，风轮功率系数克表示为

$$C_p = \frac{8\lambda^2}{R^4} \int_0^R b(1-a)r^3 dr \quad (3-33)$$

因此，当考虑风轮后尾流旋转式，风轮轴功率有损失，功率系数要减少。

3.2 叶素理论

叶素理论 (Blade Element Theory) 的基本出发点是将风轮叶片沿展向分成许多微段，称这些微段为叶素。叶素理论应用在风力机气动设计和性能预告中有如下基本假设：

- (1) 不考虑沿叶片展向方向相邻叶素间的干扰；
- (2) 作用于每个叶素上的力仅由叶素的翼型气动性能决定。

假设在每个叶素上的流动相互之间没有干扰，即将叶素看成二维翼型，这时将作用在每个叶素上的力和力矩沿展向积分，就可以求得作用在风轮上的力和力矩。

对于每个叶素来说，其速度都可以分解为垂直于风轮旋转面的分速度 V_{x0} 和平行于风轮旋转面的分量 V_{y0} ，速度三角形和空气动力分量如图 3.2 所示。图中 ϕ 角为入流角， α 为攻角， θ 为叶片在叶素处的几何扭角， a 为轴向诱导速度， b 为周向诱导速度。由动量理论可知，当考虑风轮后尾流旋转时，

$$\left. \begin{aligned} V_{x0} &= V_1(1-a) \\ V_{y0} &= \Omega r(1+b) \end{aligned} \right\} \quad (3-24)$$

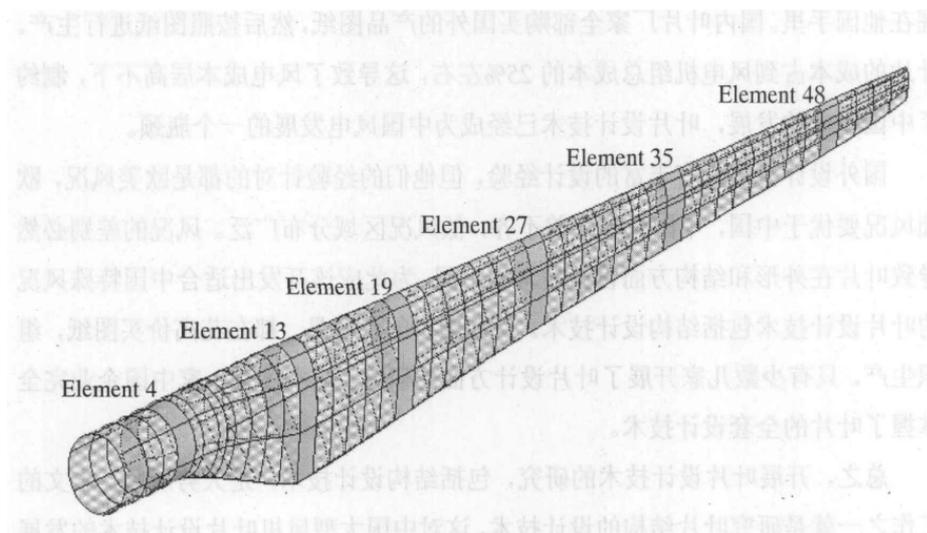


图 3.2 叶片叶素示意图

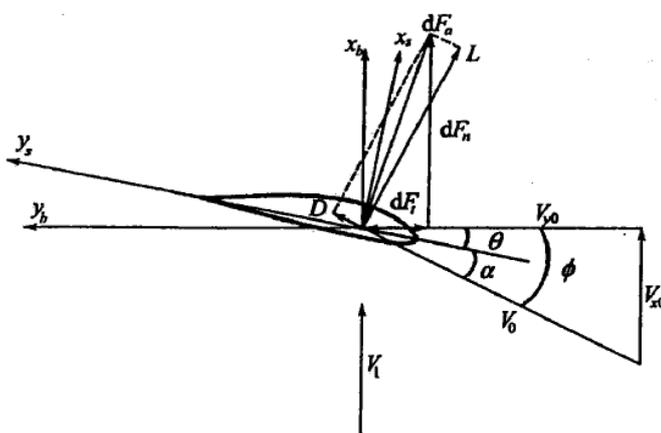


图 3.2 叶素上的气流速度三角形和空气动力分量

因此，叶素处得合成气流速度 V_0 可表示为

$$V_0 = \sqrt{V_{x0}^2 + V_{y0}^2} = \sqrt{(1-a)^2 V_1^2 + (1+b)(\Omega r)^2} \quad (3-35)$$

叶素处的升力角 ϕ 和攻角 α 可表示为

$$\phi = \arctan \frac{(1-a)V_1}{(1+b)\Omega r} \quad (3-36)$$

$$\alpha = \phi + \phi_0 \quad (2-1)$$

这样，得出 α 后，就可以根据翼型气动数据表得到叶素的升力系数 C_l 和阻力系数 C_d 。

合成气流速度 V_0 引起的在长度为 dr 叶素上的空气动力合力 dF_a 可以分解成法向力 dF_n

和切向力 dF_t ：

$$\left. \begin{aligned} dF_n &= \frac{1}{2} \rho l V_0^2 C_n dr \\ dF_t &= \frac{1}{2} \rho l V_0^2 C_t dr \end{aligned} \right\} \quad (3-37)$$

式中 ρ ——空气密度；

l ——叶素翼型弦长；

C_n, C_t ——分别代表叶轮平面法向力系数和切向力系数，

$$\left. \begin{aligned} C_n &= C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \\ C_t &= C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (3-38)$$

其中 C_l, C_d 分别为叶素翼型的升力系数和阻力系数。

这时作用在风轮平面 dr 圆环上的轴向力可表示为：

$$dT = \frac{1}{2} B \rho l V_0^2 C_n dr \quad (3-39)$$

式中 B ——叶片数。

作用在风轮平面 dr 圆环上的转矩为

$$dM = \frac{1}{2} B \rho l V_0^2 C_t r dr \quad (3-40)$$

叶素理论把气流流经风力机的三维流动简化为各个互不干扰的二维翼型上的二维流动，忽略了叶素间的气流的相互作用。

3.3 动量—叶素理论 (BEM Theory)

动量—叶素理论结合动量理论和叶素理论，计算风轮旋转面中的轴向诱导因子 a 和周向诱导因子 b 。

由动量理论可得作用在 dr 圆环上的推力和转矩为：

$$dT = 4\pi\rho V_1^2 \bullet a(1-a)rdr$$

$$dM = 4\pi\rho\Omega V_1 b(1-a)r^3 dr$$

由叶素理论可得作用在 dr 圆环上的推力和转矩为：

$$dT = \frac{1}{2} B \rho l V_0^2 C_n dr$$

$$dM = \frac{1}{2} B \rho V_0^2 C_n r dr$$

利用 $dT_{\text{动量}} = dT_{\text{叶素}}$ ， $dM_{\text{动量}} = dM_{\text{叶素}}$ ，并根据速度三角形，整理得到：

$$\frac{a}{1-a} = \frac{B l C_n}{8 \pi r \sin^2 \phi} \quad (3-41)$$

$$\frac{b}{1+b} = \frac{B l C_t}{8 \pi r \sin 2\phi} \quad (3-42)$$

3.4 Prandtl叶尖、轮毂损失修正^[3,7]

叶素理论假设叶展方向的叶素互不干扰，叶素可以作为二维翼型来进行计算。实际上，当叶片旋转时沿着叶展方向会产生二次流动。叶尖部分的叶素由于空气在叶尖部分脱落使三维作用更加明显由于叶尖处的叶素受力对整个风力机的性能有很大的影响，所以叶尖损失不容忽视。基于二维流动，考虑叶尖流动损失，Prandtl 对叶尖的流动做了研究，定义叶尖损失修正系数为

$$F_{ip} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-f} \right) \quad (3-43)$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi} \quad (3-44)$$

其中 ϕ 为升力角。

轮毂部分由于周线速度低，二次流作用更加的明显，使气动力大大增加，同时轮毂处一般应用弦长较大的厚翼型，扫风面积不可忽略，为此，需要考虑轮毂损失的修正。与叶尖损失类似，Prandtl 提出定义轮毂损失系数为：

$$F_{hub} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-f} \right) \quad (3-45)$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{r - R_{hub}}{r \sin \phi} \quad (3-46)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{ip} &= \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \phi}} \right) \\ F_{hub} &= \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{r-R_{hub}}{r \sin \phi}} \right) \end{aligned} \right\} F = F_{ip} \bullet F_{hub} \quad (3-47)$$

则式 (3-41) 和式 (3-42) 变为

$$\frac{a}{1-a} = \frac{B l C_n}{8 \pi r F \sin^2 \phi} \quad (3-48)$$

$$\frac{b}{1+b} = \frac{B l C_t}{8 \pi r F \sin 2\phi} \quad (3-49)$$

则可得出诱导因子 a 和 b 的计算公式为

$$a = \frac{BLC_n}{8\pi rF \sin^2 \phi + BLC_n} \quad (3-50)$$

$$b = \frac{BLC_t}{8\pi rF \cos \phi \sin \phi + BLC_t} \quad (3-51)$$

3.5 风力机叶片气动模型计算方法^[3]

1. 首先给出 a 和 b 的初值

2. 计算升力角 ϕ 。

3. 计算叶素翼型攻角 α

$$\alpha = \phi + \phi_0 \quad (2-1)$$

其中 ϕ_0 为零升力角，为负值。

4. 根据攻角选择相应叶素翼型的气动数据，叶素翼型的升力系数 C_l 和阻力系数

C_d 。

5. 计算叶素翼型法向力系数 C_n 和切向力系数 C_t

$$\left. \begin{aligned} C_n &= C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \\ C_t &= C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (3-38)$$

6. 根据式 (3-50) 和式 (3-51) 计算诱导因子 a 和 b

$$a = \frac{BLC_n}{8\pi rF \sin^2 \phi + BLC_n} \quad (3-50)$$

$$b = \frac{BLC_t}{8\pi rF \cos \phi \sin \phi + BLC_t} \quad (3-51)$$

7. 返回步骤 2，进行迭代，直到精度满足要求。

8. 诱导因子 a 和 b 精度满足要求后，根据求得的叶素翼型法向力系数 C_n 和切向力

系数 C_t 求的截面叶素的法向力和切向力

$$dT = 4\pi rV^2(1-a)aFdr \quad (3-52)$$

$$dM = 4\pi r^3V(1-a)bFdr \quad (3-53)$$

此处 V 是转轮坐标系的自然来流风速。

9. 最后积分求出叶片轴向推力和转矩

$$\left. \begin{aligned} T &= \int_0^R dT \\ M &= \int_0^R dM \end{aligned} \right\} \quad (3-54)$$

四、风机叶片惯性力

4.1 离心力作用

离心力是叶片旋转时产生的一种质量力，它的方向是从旋转轴向外，而同时又垂直于旋转轴。离心力可以分解成纵向分力和横向分力。纵向分力沿着叶展轴线方向，使叶片产生拉伸力；离心力的横向分力绕叶展轴线作用，使叶片产生了离心扭矩，它顺着叶片的自然扭转方向作用，有将叶弦扭向旋转平面的趋势，使叶片的攻角 α 减小，而与气动扭矩的方向正好相反。

离心力的计算公式为：

$$p_r = \rho_b \omega^2 \int_0^R r F(r) dr (N) \quad 0 \leq r \leq R \quad (4-1)$$

式中： ω ——叶片旋转角速度，rad/s；

ρ_b ——风机叶片的密度，kg/m³；

R ——叶尖半径，m。

离心扭矩计算公式为：

$$M_{kP} = -\rho_b \omega^2 \int_0^R I_{xy} dr (N \cdot m) \quad (4-2)$$

式中 I_{xy} ——惯性矩，m⁴。

4.2 重力作用

重力方向垂直指向地面，其大小与叶片材料的密度属性有关系。计算公式

$$G = \rho_b g V \quad (4-3)$$

五、风机叶片的有限元计算分析简介^[8-10]

5.1.1 叶片有限元模型建立

风力机翼型叶片属于扭曲变截面叶片，通常由翼型系列组成，因此不同半径处的截面形状不同，扭角不同，导致叶片外形曲面相当复杂。现存的一些分析很多都是基于简化的实体外形结构，使得结果存在一定误差，风力机叶片的 3D 计算机建模分析在某种程度上成为了影响风力机叶片分析精度的瓶颈。

(1) 建立几何模型

一般构造叶片几何模型的方法有两种，一是在 ANSYS 有限元程序中直接创建几何模型，可以采用自底向上自顶向下或者混合的建模方法，二是将 CAD/CAM 软件中 Pro/E、UG 等创建好的几何模型通过数据接口转换过滤器引入到有限元分析程序中去进行分析的一种方式。

由于风力机叶片外形和截面形状复杂，在翼展方向还存在扭转角和渐缩的弦长，使得对叶片的几何建模存在较大的困难。一般采用国际流行三维建模软件 Pro/E 对叶片进行几何建模，所建立的叶片实体文件生成 IGES 格式，通过这两个软件的数据接口进行

数据传输，从而完成 ANSYS 中叶片几何模型的建立。但是利用这些接口直接传输 Pro/E 模型数据，会导致模型数据部分丢失。同样可以采用两种软件几何建模相结合的方法，在 Pro/E 中，严格根据叶片气动外形优化设计结果，绘出叶片不同半径处的翼型线框(图 5.1)，并保存成*.iges 文件格式；输入 ANSYS 中，再利用 ANSYS 自身的建模功能，两者相结合，建立叶片三维有限元几何模型。

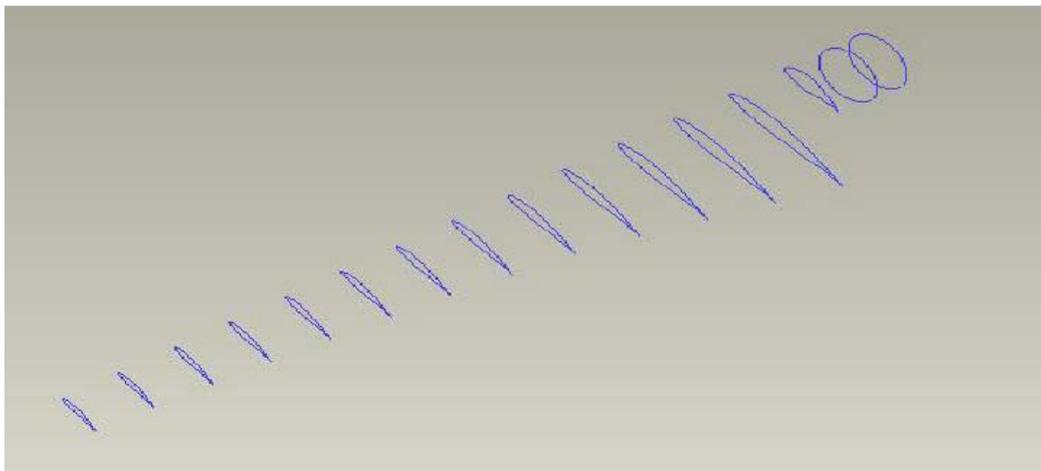


图 5.1Pro/E 中叶片模型

该方法一般要经过从 CAD→IGES→ANSYS 的转换过程，但很多情况无法实现 100% 转换，特别是复杂大型结构更易出现信息丢失现象。ANSYS 程序提供了几何模型修复工具对读入的实体模型进行修复，以保证能够成功的进行网格划分。通常的修复包括是否忽略细小的几何特征，消除模型的不连续特征，如微小间隙、重叠以及穿透等，自动进行图元合并和创建几何体。导入模型之后，还可以进行简化模型，如去除某些孔和凸台、消除小图元、合并临近单元的图元、通过分割和折叠移去小碎片等，进一步提高网格划分的质量，减少划分的单元规模。但是，由于风力机叶片外形和截面形状复杂，在导入风力机叶片模型之后还会出现翼型线框某些线与线之间的交点分离、交错过大和重复等现象，仅凭 ANSYS 自身的修复不能恢复翼型的几何特征，因此还需要进行手工修复。手工修复采用布尔运算处理，主要用到减运算、搭接和粘接命令，恢复原有的几何模型，以便于以后形成面，建立体。为后续的 ANSYS 有限元分析打好基础。图 5.2 为 ANSYS 中修复好的有限元几何模型。

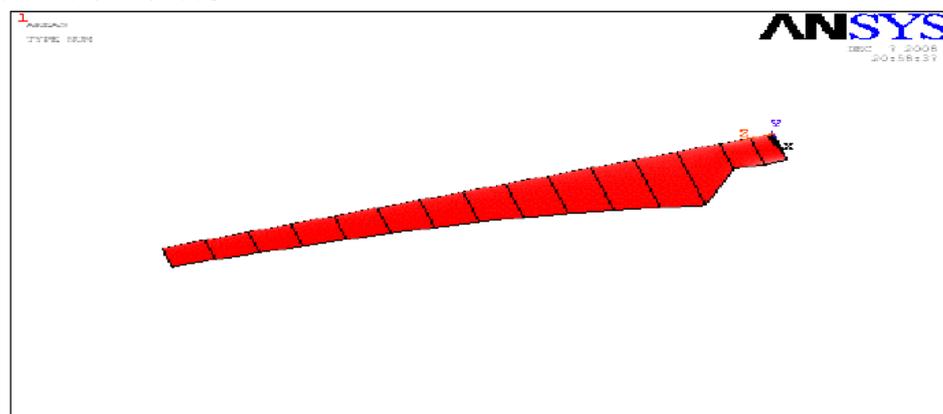


图 5.2ANSYS 中叶片几何模型

(2) 建立实体模型

在风力机叶片几何模型的建立基础上，运用 ANSYS 软件的建立实体模型功能，用线创建面，依次组成连续的面。之后，在原有坐标系的基础上建立一个局部坐标系，将

已经建立好的所有的面复制到局部坐标系中，并将复制后的所有的面创建为一个体。这样在同一位置既有一个由面组成的叶片模型还有一个体叶片模型。

5.1.2 叶片有限元分析

有限元分析的过程包括单元类型选择、坐标系设置、实常数设置、材料属性设置、网格划分、自由度耦合与约束方程、边界条件和载荷施加等。

划分网格是建立有限元模型的一个重要环节，所划分的网格形式和大小直接影响计算精度和计算规模。但过密的网格不仅导致网格划分和计算过程占用大量 CPU、计算时间过长、求解不易收敛，而且过密的网格计算精度反而下降。为了建立正确、合理的有限元模型，必须考虑网格数量、网格密度、单元属性、网格质量、网格的分界面分界点以及网格布局等众多因素。

ANSYS 程序具有便捷、高质量的对实体模型进行网格划分的功能。网格可分为自由网格和映射网格。自由网格对实体模型无特殊要求，对任何几何模型（规则的或不规则的），都可以进行网格化分，没有特定的规则，可以由四边形单元组成也可以只由三角形单元组成，或由两者混合组成，或者是四面体单元。映射网格化分要求面或体是有规则的形状，而且必须遵循一定的准则，只包含四边形、三角形或六面体单元。叶片作为一个不规则的体，故选择自由网格划分。图 5.3 即为一种进行了网格划分的叶片模型。



图 5.3 叶片有限元网格模型

网格划分完成之后，有时模型的各部分之间并不都是连续的，它们之间必须建立某种形式的连接关系，如重合/不重合节点间的铰链接/刚性连接等，另外还有对称边界条件、刚性区域等。此时，可以用自由度耦合与约束方程来描述节点之间的连接关系。约束方程是描述多个不同的或相同自由度之间的线性协调关系，与约束方程相比耦合仅描述两个节点或节点集与节点集之间位移的相等关系，即一比一的关系，可以将耦合当做约束方程的特殊情况。

六、风机叶片有限元分析讨论

靳交通，梁鹏程，曾竟成等^[11]采用 ANSYS 的壳单元 shell99 对风电叶片进行了两种受力模式（见图 6.1）下的模态分析和静力分析，计算出叶片总质量、挠度变形与实测结果相对误差小于 10%（分别见表 6.1—表 6.3），证明了该方法在工程应用上的可行性和

可靠性。

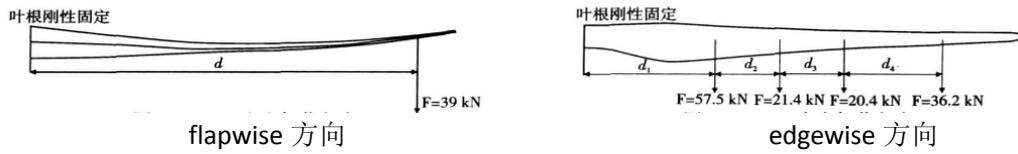


图 6.2 叶片两种受力模式

表 6.1 风电叶片质量计算结果

	质量/kg	重心（距叶根）/m
实际值	5950	12.1
有限元计算值	5571	11.9
误差/%	6.4	1.65

表 6.2 风电叶片一阶固有频率计算结果

	频率值/Hz	
	一阶 flapwise 方向	一阶 edgewise 方向
试验值	0.8	1.46
计算值	0.89	1.61
误差/%	11.25	10.27

表 6.3 风电叶片的最大挠度

	叶片最大挠度/Hz	
	flapwise 方向	edgewise 方向
试验值	5.36	1.11
计算值	4.83	1.02
误差/%	9.9	8.1

Us S等对一个 2.5m长的复合材料叶片进行有限元分析后,发现叶片中的应力分布存在不连续现象,采用夹芯结构可以使叶片在增加刚度的同时减轻重量^[12]。

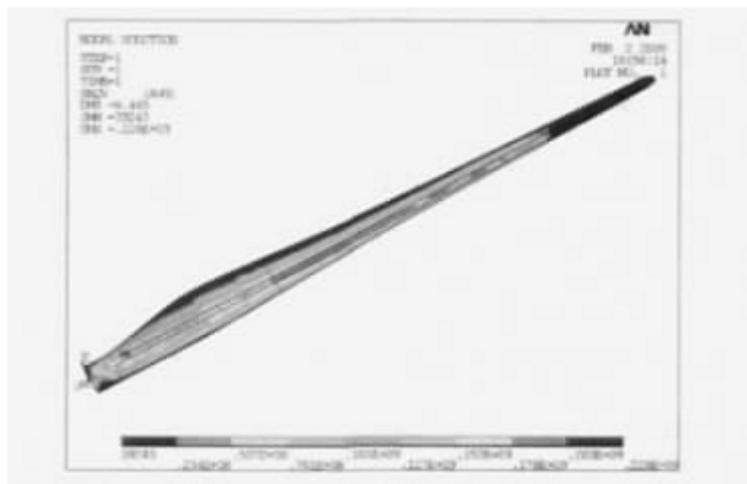


图 6.2 叶片整体应力云图

周鹏展, 曾竟成, 肖加余等^[12]基于ANSYS软件, 对某款 1500kW大型水平轴风力机叶片的应力特征进行了分析, 数据显示风力机叶片在极限挥舞载荷的作用下, 叶片大梁和叶根的整体应力水平比较高, 而剪切腹板和翼板上的整体应力水平比较低(见图 6.2),

说明叶片大梁和叶根是叶片的主要承力部件，而剪切腹板和翼板主要作用是维持叶片结构的稳定性。另外，在叶根与剪切腹板相接的角点上存在应力集中现象，但是，剔除应力集中点后，叶片大梁上的平均应力比叶根部分的高。将叶片大梁有限元应力分析结果提取出来研究发现，叶片大梁中部约 $1/3$ 区域的应力都比较高。

韦丽珍^[10]在其研究生论文中，将叶片从叶根到叶尖，第一个翼型开始每间隔 150mm 分为五段、六个断面，分别将集中载荷施加在叶片各段上,如图 6.3 为在耦合体叶片上施加五个集中载荷分布图，运用有限元软件ANSYS进行仿真模拟。

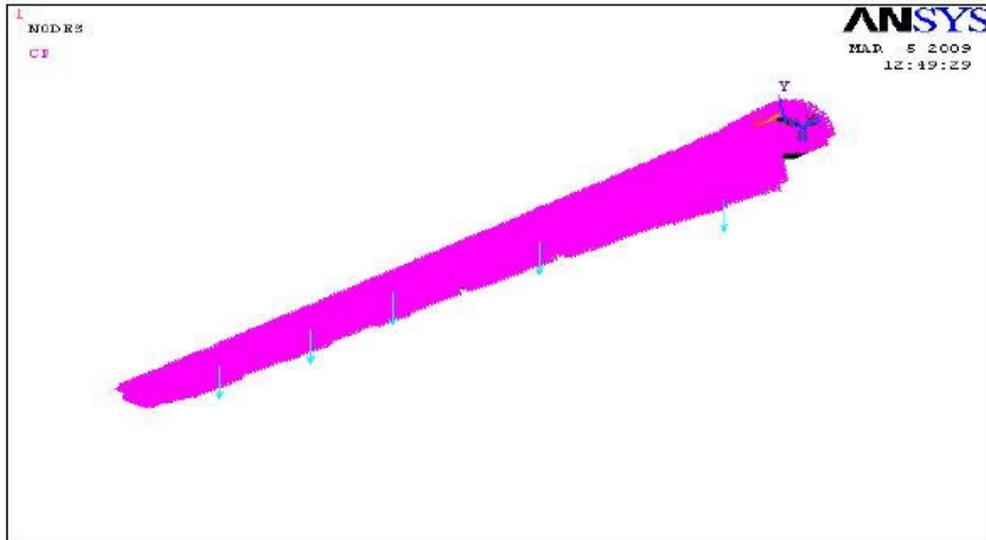
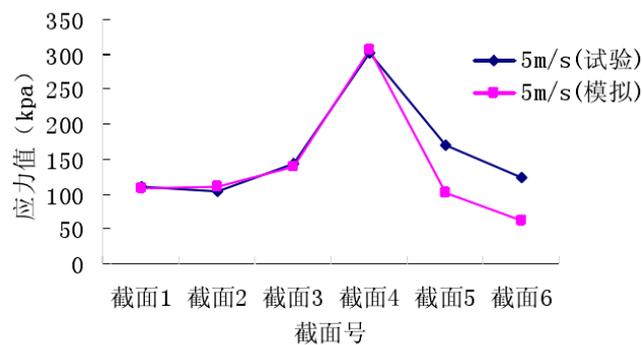
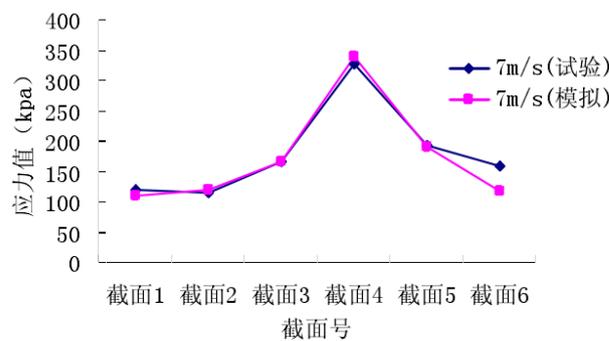


图 6.3 耦合体受力图

与叶片动载荷试验结果相比较，在额定风速下，有限元分析模拟叶片应力变化值与动载荷试验数据基本符合，各截面的应力变化趋势也基本相同（见图 6.4）



(1)



(2)

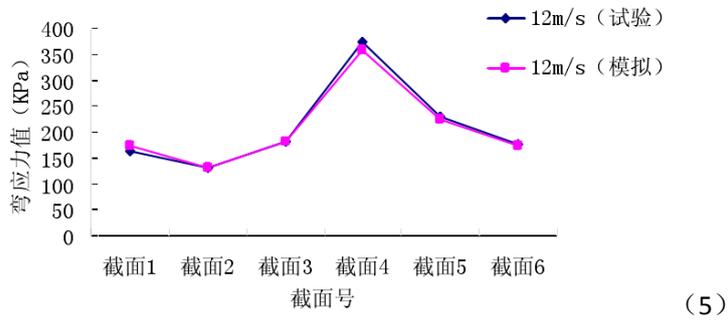
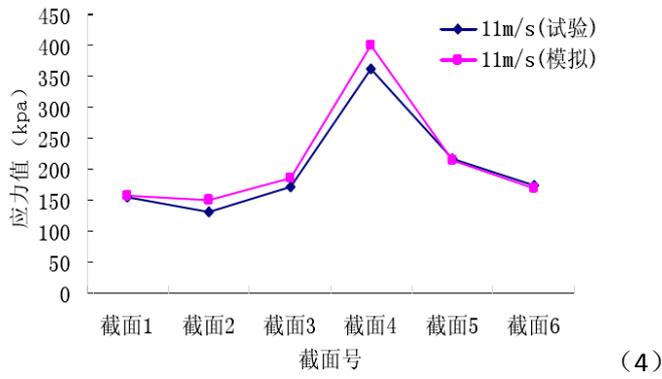
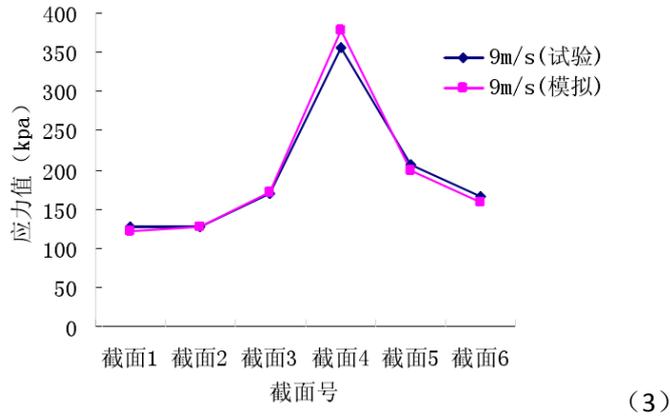


图 6.4 不同风速下

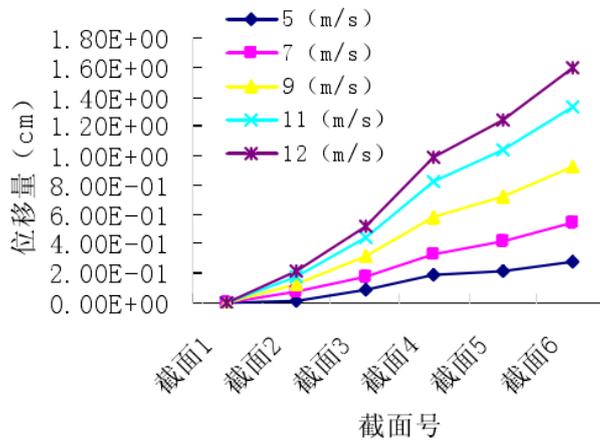


图 6.5 在不同风速下各截面叶片位移量分布图

通过不同风速不同截面的应力和形变（见图 6.5）可以发现，截面 4 的弯应力值比其他截面的弯应力值偏大，说明在截面 4 处叶片外形收缩过快，应力变化比较大，相比其他截面出现应力集中现象。

【参考文献】:

- [1] 王凡. 风力发电机的叶片设计方法研究.南京理工大学硕士学位论文, 2007.
- [2] 倪受元. 风力发电讲座第二讲风力机的工作原理和气动力特性.
- [3] 张仲柱. 水平轴风力机叶片气动性能计算模型研究.中国科学院研究生院硕士学位论文, 2007.
- [4] 李向军. 大型风机叶片气动性能计算与结构设计研究.武汉理工大学博士学位论文, 2008.
- [5] 张义华. 水平轴风力机空气动力学数值模拟.重庆大学硕士学位论文, 2007.
- [6] 包飞. 风力机叶片几何设计与空气动力学仿真.大连理工大学硕士学位论文, 2008.
- [7] 朱蕾. 复合材料风力发电机叶片结构优化设计.哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2007.
- [8] 张春丽. 复合材料风力机叶片结构设计.同济大学硕士学位论文, 2007.
- [9] 费金凡. 复合材料风力叶片结构的有限元分析.武汉理工大学硕士学位论文, 2009
- [10] 韦丽珍. 基于 ANSYS 风力机叶片的载荷研究.内蒙古工业大学硕士学位论文, 2009.
- [11] 靳交通, 梁鹏程, 曾竟成等. 复合材料风电叶片有限元刚度分析[J].武汉理工大学学报, 2009, 31 (21): 133-136.
- [12] 周鹏展, 曾竟成, 肖加余等. 大型水平轴风力机叶片应力特征分析[J].可再生能源, 2009, 27 (5): 6-9.