

# 基于时间推进自由尾迹法的 水平轴风力机气动特性分析

周文平, 唐胜利, 吕红

(重庆大学动力工程学院, 重庆市 沙坪坝区 400030)

## Computation on Aerodynamic Performance of Horizontal Axis Wind Turbine Based on Time-marching Free Vortex Method

ZHOU Wenping, TANG Shengli, LÜ Hong

(College of Power Engineering, Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400030, China)

**ABSTRACT:** A computational method based on rotor free-wake model was developed for horizontal axis wind turbine's aerodynamic performance prediction. The analytical method combined a Weissinger-L lifting surface model with a time-marching free vortex method to simulate the rotor flow field. Adams-Moulton predictor-corrector scheme was used to improve computational order of accuracy. The comparison between the calculated results of model wind turbine under axis flow condition, including tip vortex geometry and aerodynamic performance, and available experimental data shows that this method is suitable for wind turbine aerodynamic performance analysis. Finally, a series of numerical calculations were made to investigate the evolving of tip vortex geometry and aerodynamic performance of the wind turbine when yawing  $30^\circ$  out of the wind and pitch angle increasing from  $2^\circ$  to  $4^\circ$ , some significant conclusions were obtained.

**KEY WORDS:** horizontal axis wind turbine; time-marching; free vortex method; unsteady aerodynamic performance

**摘要:** 建立适合于水平轴风力机气动特性分析的自由尾迹计算方法。该方法中, 桨叶模型采用 Weissinger-L 升力面模型, 转子自由尾迹的求解采用时间推进方法, 数值求解方法采用 4 阶 Adams-Moulton 预估-校正算法以提高计算精度。应用所建立的方法对模型风力机处于轴向来流工况时的尾迹形状和气动特性进行计算, 并与文献实验数据进行比较, 验证了该方法的有效性。最后计算了来流风偏转和桨叶桨距角增加时尾迹形状的非定常畸变及气动载荷特性, 得出一些有意

义的结论。

**关键词:** 水平轴风力机; 时间推进; 自由尾迹; 气动特性

## 0 引言

风力机在旋转过程中会从桨叶后缘拖出尾迹, 形成强烈的卷起涡和内部涡面。涡的强度由桨叶叶素的几何参数、运动参数及桨叶气动力决定; 反过来涡的诱导效应又改变转子的速度场, 从而影响涡的强度<sup>[1]</sup>。因此桨叶和尾迹之间存在相互干扰, 尾迹形状及涡强的计算是桨叶气动特性分析的关键。

目前工程上广泛应用的气动特性分析方法是动量-叶素理论(blade element momentum, BEM)方法, 它是基于静态平衡尾迹假设, 认为翼型周围的气流场始终处于平衡状态。然而实际运行的风力机受变风速风向的自由流、旋转流和诱导流的影响, 尾迹会呈现滞后的非定常特性, 因此 BEM 方法不再适用<sup>[2-3]</sup>。自由尾迹方法<sup>[4-6]</sup>则直接从尾迹涡线出发, 充分考虑了桨叶与尾迹之间的相互干扰, 非常适合于风力机气动特性分析。根据对尾迹涡线离散求解方式不同, 自由尾迹方法可分为松弛迭代类和时间推进类<sup>[7]</sup>。前者通过加强周期性边界条件, 对尾迹形状在伪时间域中进行空间迭代求解, 能较好地计算定常工况下的尾迹形状和气动特性。后者则在时间域内以推进方式对涡线位置求解, 能得到转子的瞬时气动特性, 尤其适合于偏航、变桨等工况时的气动特性分析。

本文基于 Weissinger-L 升力面模型和时间推进

基金项目: 重庆市科委自然科学基金资助项目(2006BA3023)。

Natural Science Foundation of Chongqing Science Technology Commission(2006BA3023).

自由尾迹模型，建立了适用于风力机气动特性分析的计算模型。为了提高计算精度，采用具有 4 阶精度的 Adams-Moulton 预估-校正算法对尾迹涡线进行离散求解。利用所建立的方法对模型风力机处于轴流时的尾迹形状和气动特性进行计算，并与文献实验数据进行比较，验证了方法的有效性。然后对来流风偏转 30°和桨叶桨距角从 2°增加到 4°时的尾迹形状和气动特性进行分析。

### 1 坐标系

建立如图 1 所示的坐标系。在风力机塔架中心确定总体坐标系  $S$ ： $Z$  轴垂直地平面， $X$  轴与风轮转轴对齐， $X$ 、 $Y$  轴形成水平面。设风轮转轴倾角为  $\tau$ ，将总体坐标系  $S$  绕  $Y$  轴旋转角度  $\tau$  得到坐标系  $S_n$ 。以方位角  $\psi$  表征风轮在旋转过程中所处位置，将坐标系  $S_n$  绕  $X_n$  轴旋转  $\psi$  角，得到风轮坐标系  $S_r$ 。桨叶通常与扫掠面成一定锥度，将风轮坐标系  $S_r$  绕  $Y_r$  轴旋转角度  $\beta$ ，得到桨叶坐标系  $S_p$ 。

总体坐标系用来描述尾迹位置，桨叶坐标系用来描述桨叶当地的气动环境。

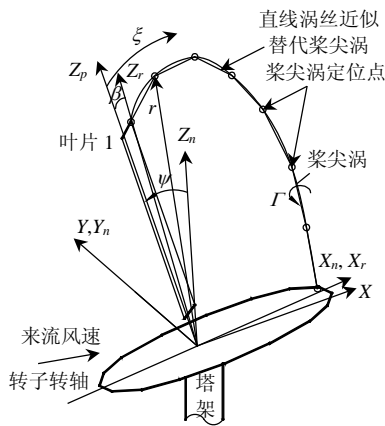


图 1 风力机运行时的坐标系  
Fig. 1 Coordinate system used for modeling the wind turbines

### 2 计算模型

#### 2.1 基本假设

自由尾迹方法基于不可压无黏无旋势流假设，将桨叶和转子后拖出的尾迹用离散涡元表示。假定涡量集中于涡元内，涡元外的区域为无旋流动，采用拉格朗日描述法追踪涡元的运动。自由尾迹方法主要包括 2 个问题：建立桨叶模型对转子桨叶涡系的分析和建立尾迹模型对转子尾迹的分析。

### 2.2 桨叶气动模型

#### 2.2.1 Weissinger-L 升力面模型

假设风力机桨叶为刚性桨叶，桨叶数为  $N_b$ 。

最简单的桨叶模型，即升力线模型将叶片简化为 1 根涡线，不能很好地计入三维影响和叶尖效应，而升力面模型虽能模拟叶片上的三维效应，但计算量较大<sup>[8]</sup>，因此本文采用 Weissinger-L 模型<sup>[9]</sup>模拟风力机桨叶。Weissinger-L 模型是简化的升力面模型，如图 2 所示，沿展向将桨叶分成若干段，每 1 小段中附着涡位于 1/4 弦线，环量  $\Gamma$  为常数。相同数目的控制点布置在 3/4 弦线的中点处。展向载荷的变化使得不同强度的涡从后缘拖出，构成转子的尾迹。

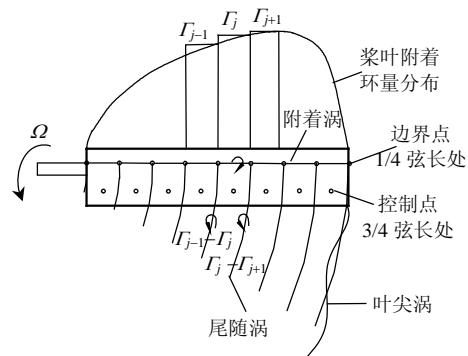


图 2 自由尾迹模型分析图

Fig. 2 Modeling of blades and near wake in free vortex method

转子尾迹由近尾迹和远尾迹组成。近尾迹包括模拟桨叶附着环量展向变化的尾随涡和周向变化的脱体涡 2 部分。一般认为，近尾迹在经过大约 30°~60°寿命角后，聚合并卷起为单根叶尖涡线，即远尾迹<sup>[10]</sup>。这种假设会导致叶尖涡的起始位置变化较大，影响计算的收敛性。为此，本文假设叶尖涡是由靠近叶尖最大环量外端的所有涡聚集而成的，因此可简单地认为其径向释放点固定在叶尖处，且涡强度等于沿桨叶展向的最大附着环量值。

翼型气动特性数据是桨叶气动特性分析的基础。工作中的风力机，叶片翼型会经历非定常攻角变化，产生动态失速现象<sup>[11-12]</sup>，此时翼型气动力变化为复杂的动态过程，采用静态气动特性数据进行计算会极大地低估桨叶载荷。为了计入动态失速的影响，本文引入 Beddoes-Leishman 半经验模型<sup>[13]</sup>计算翼型气动特性数据和非定常气动载荷。

#### 2.2.2 桨叶附着环量计算

桨叶附着环量值由控制点处满足物面不穿透

条件得到。桨叶坐标系  $S_p$  中, 假设第  $i$  段叶素的附着涡及近尾迹与该叶素位于同一平面内, 则其在控制点处的诱导速度垂直于叶素平面。由物面不穿透条件可得:

$$V_{bi} + V_{NW_i} = W_{\infty i}(\alpha_i - \Phi_{FW_i}) \quad (1)$$

式中:  $W_{\infty i}$  为桨叶坐标系  $S_p$  中来流风速  $V_{\infty}$  与叶素旋转速度的合速度;  $\alpha_i$  为  $W_{\infty i}$  与弦长的夹角;  $\Phi_{FW_i}$  为远尾迹的诱导迎角, 其值由自由尾迹计算得到。

附着涡和近尾迹的诱导速度可写为:

$$V_{bi} = \sum_j I_{bi,j} \Gamma_j \quad (2)$$

$$V_{NW_i} = \sum_j I_{NW_i,j} \Gamma_j \quad (3)$$

式中:  $j$  为桨叶径向的分段数;  $I_b$  和  $I_{NW}$  分别为附着涡和近尾迹对控制点的诱导速度影响系数矩阵。

则桨叶环量控制方程可写为

$$\sum_j (I_{bi,j} + I_{NW_i,j}) \Gamma_j = W_{\infty i}(\alpha_i - \Phi_{FW_i}) \quad (4)$$

求解上述线性方程组即得到桨叶附着环量值。

## 2.3 自由尾迹模型

### 2.3.1 涡线控制方程

自由尾迹方法将桨叶后拖出的涡线视为物质线, 用拉格朗日节点将其离散为有限数量的直线涡段, 如图 1 所示。节点在流场中以当地速度自由运动, 因此总体坐标系下涡线控制方程<sup>[14]</sup>可描述为

$$\frac{d\mathbf{r}(\psi, \xi)}{dt} = \mathbf{V}[\mathbf{r}(\psi, \xi), t], \quad \mathbf{r}(t_0) = \mathbf{r}_0 \quad (5)$$

式中:  $\psi$  为桨叶方位角;  $\xi$  为尾迹寿命角;  $\mathbf{V}$  为当地速度;  $\mathbf{r}$  为尾迹流场中涡线定位节点的位置矢量。

将式(5)左端沿方位角和寿命角做全微分展开, 并考虑到  $d\psi/dt = d\xi/dt = \Omega$  可得:

$$\frac{\partial \mathbf{r}(\psi, \xi)}{\partial \psi} + \frac{\partial \mathbf{r}(\psi, \xi)}{\partial \xi} = \frac{1}{\Omega} \mathbf{V}[\mathbf{r}(\psi, \xi)] \quad (6)$$

### 2.3.2 数值求解方法

尾迹涡线控制方程(6)为双曲型偏微分方程, 沿特征线可将其转化为常微分方程, 即沿特征线直接求解方程(5)。

将桨叶方位角和寿命角以步长  $\Delta\psi$  和  $\Delta\xi$  离散, 所有尾迹节点组成 1 个二维求解域  $(j, k)$ , 如图 3 所示。若给出初始条件, 对式(5)沿时间  $\psi$  积分, 即可以得到到尾迹形状的时间历程。

方程的求解采用 3 步 4 阶的 Adams-Moulton 差

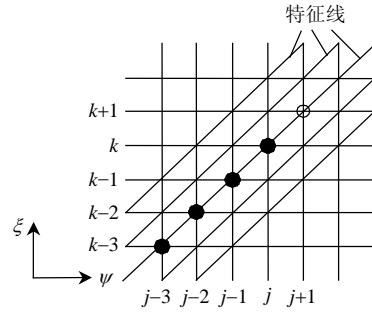


图3 离散网格示意图

Fig. 3 Difference scheme for solution of free wake equations

分格式。但该格式是隐式格式, 不能直接求解, 因此首先用 4 阶 Adams-Bashforth 公式算出一个预估值, 再用 4 阶的 Adams-Moulton 隐式公式校正<sup>[15]</sup>。

预估步:

$$\mathbf{r}_{j+1,k+1}^{(0)} = \mathbf{r}_{j,k} + \frac{\Delta\psi}{24\Omega} [55\mathbf{V}(\mathbf{r}_{j,k}) - 59\mathbf{V}(\mathbf{r}_{j-1,k-1}) + 37\mathbf{V}(\mathbf{r}_{j-2,k-2}) - 9\mathbf{V}(\mathbf{r}_{j-3,k-3})] \quad (7)$$

校正步:

$$\mathbf{r}_{j+1,k+1} = \mathbf{r}_{j,k} + \frac{\Delta\psi}{24\Omega} [9\mathbf{V}(\mathbf{r}_{j+1,k+1}^{(0)}) + 19\mathbf{V}(\mathbf{r}_{j,k}) - 5\mathbf{V}(\mathbf{r}_{j-1,k-1}) + \mathbf{V}(\mathbf{r}_{j-2,k-2})] \quad (8)$$

其中速度项为自由来流风速减去诱导速度:

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}) = \mathbf{V}_{\infty} - \mathbf{V}_{ind}(\mathbf{r}) \quad (9)$$

Adams-Moulton 差分格式的绝对稳定区域是有界的, 需要在小步长时才能满足稳定性条件。且涉及多步计算, 不能自行启动, 对初始时段的尾迹形状采用同阶的显式 Runge-Kutta 方法计算。

### 2.3.3 诱导速度及涡核模型

尾迹涡线对空间点的诱导速度不能解析求解获得。一般是先将尾迹涡线离散成直线涡元, 再由 Biot-Savart 定律计算直线涡元对空间点的诱导速度, 最后通过积分得到涡线对该点的诱导速度。

强度为  $\Gamma$  的直线涡元  $d\mathbf{l}$  对点  $\mathbf{r}$  的诱导速度为

$$d\mathbf{V} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} \quad (10)$$

式(10)是基于不可压势流假设, 当计算点到涡元距离为 0 时会发生诱导速度无穷大的情况, 需要采用相应的涡核模型解决这一数值计算奇点问题。Leishman<sup>[16]</sup>在式(10)中乘以参数  $K_V$  计入涡核影响, 即

$$K_V = \frac{h^2}{(r_c^{2z} + h^{2z})^{1/z}} \quad (11)$$

式中： $h$  为计算点到涡线的垂直距离； $r_c$  为涡核半径。受黏性及紊流的影响，涡核会发生耗散，即

$$r_c(t) = \sqrt{r_{c0}^2 + 5.025 \ 72 \delta_v \nu t} \quad (12)$$

式中： $r_{c0}$  为涡刚从桨叶拖出时的半径，一般为弦长的 10% 左右； $\delta_v$  为湍流黏性系数，用以表征湍流黏性引起的涡核增长率，实验研究表明，小型风力机的  $\delta_v$  一般取值 10，大尺寸风力机则在 100 到 1 000 之间取值比较合理。

式(11)中  $z$  取值为 1 时，涡核模型为 Scully 模型， $z$  取 2 时为 Lamb-Oseen 模型。文献[17]表明，Lamb-Oseen 模型得到的值与实测值最接近，因此本文  $z$  取为 2。

### 2.3.4 初始条件和边界条件

本文采用时间推进方法。初始条件为直接给出的刚性尾迹或者由松弛迭代方法得到的收敛尾迹。边界条件则假设尾迹涡线从每片桨叶的后缘拖出，因此各个  $\psi$  时刻叶尖涡释放点位置已知。由 2.2.1 节可知，在桨叶坐标系中叶尖涡释放点位置为  $(0, 0, R)$ ，经过坐标变换可得总体坐标系下释放点坐标：

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(\psi, 0) = & (R \sin \beta \cos \tau - R \cos \beta \cos \psi \sin \tau) \mathbf{i} + \\ & (R \cos \beta \sin \psi) \mathbf{j} + (R \sin \beta \sin \tau + \\ & R \cos \beta \cos \psi \cos \tau) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (13)$$

## 3 数值计算流程

时间推进方法的计算过程如下：

- 1) 给定初始入流和桨叶参数，由 Weissinger-L 模型生成桨叶附着涡和尾随涡系；
- 2) 生成叶尖涡初始尾迹。既可以是直接给出的刚性尾迹，又可是松弛迭代法得到的收敛尾迹；
- 3) 计算各尾迹节点的诱导速度；
- 4) 沿方位角推进，根据离散尾迹的预估算法(式(7))估算新的尾迹形状；
- 5) 利用估算的新的尾迹形状，计算该时刻各尾迹节点的诱导速度；
- 6) 采用离散校正算法(式(8))更新尾迹形状；
- 7) 计算该时间步的桨叶环量、叶素处诱导速度和攻角，结合 Beddoes-Leishman 模型计算风力机气动特性；
- 8) 重复步骤 3) 继续进行尾迹计算。

对于定常分析，可以利用收敛条件判断计算是否继续进行。对于偏航、变桨等工况的非定常计算，只需在得到周期性的尾迹后将偏航角或桨距角输入，对尾迹进行时间推进计算即可。

## 4 算例

### 4.1 风力机参数

为了验证模型的有效性，对 Delft 模型风力机的尾迹形状和气动特性进行计算。风力机桨叶数为 2，直径为 1.2 m，轮毂直径为 0.36 m，翼型 NACA0012。具体参数和用于与计算结果进行比较的实验数据参考文献[18-19]。

### 4.2 轴流

首先将尖速比  $\lambda$  为 8(对应来流风速为 5.5 m/s)，叶尖桨距角  $\theta$  为  $2^\circ$  时的轴向诱导速度与实验值比较，如图 4 所示。由图可见，在叶根和叶中处，计算值与实验数据吻合较好，但在叶尖处误差偏大。

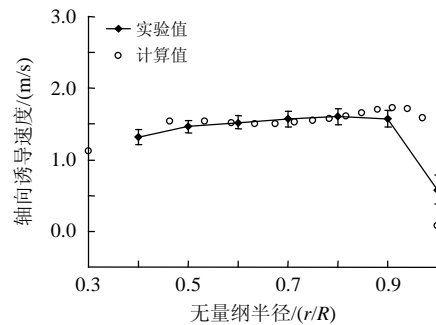


图 4 轴向诱导速度与实验值比较

Fig. 4 Comparison of local axial induced velocity

图 5 给出了尖速比  $\lambda$  为 8，不同叶尖桨距角  $\theta$  时的尾迹形状，图 6 为预测的推力系数  $C_T$  与实验值比较。结合图 5—6 可以看出，随着桨距角增加，尾迹径向膨胀的幅度减小，桨盘处诱导速度减小，螺旋线尾迹的螺距增大，因此桨盘所受的推力减小。

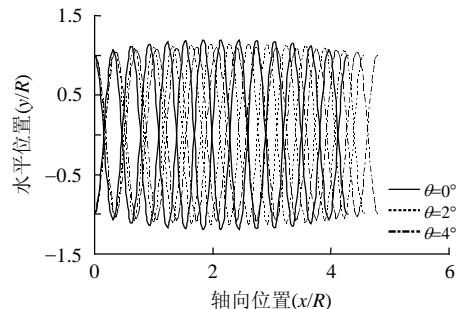


图 5 不同桨距角时的叶尖涡位置

Fig. 5 Predicted tip vortex geometry at different pitch angle

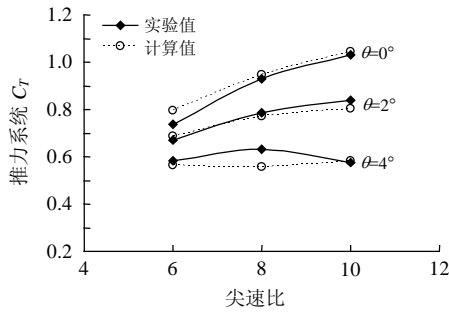


图6 推力系数预测值与实验值的比较  
Fig. 6 Comparison of thrust coefficient and experiment value

上述计算表明本文建立的时间推进自由尾迹方法是有效的。

4.3 非稳态偏航

时间推进方法可以用于风力机转子非定常气动特性分析。假设来流风在风力机旋转半转的时间内偏转 30°并保持 10 转时间，然后又恢复为轴向来流，对尖速比  $\lambda$  为 8，桨距角  $\theta$  为 2°时的转子尾迹形状和载荷特性进行计算。

图 7 为来流风偏转后各时刻的尾迹形状。从图 7 可以看出，来流风偏转后，离转子较近的尾迹迅速完成偏转，引起较大的桨叶载荷波动，而远处的尾迹并未受到影响。在转子旋转 6 转后，除最后 2 圈尾迹外，其余的基本完成重组。在 8 转后，尾迹全部完成重组，此后的尾迹呈现周期性变化。为了节省篇幅，此处没有给出来流风恢复为轴流状态的尾迹形状变化。

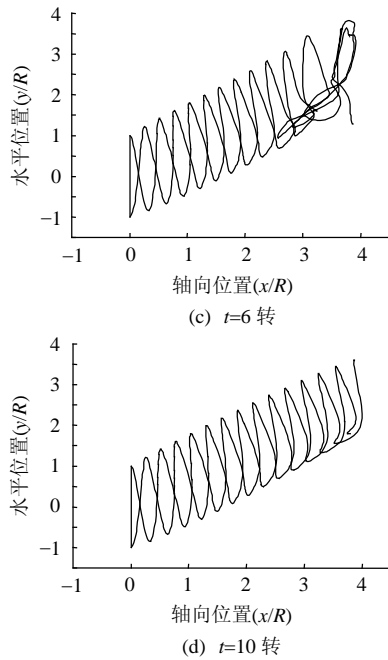
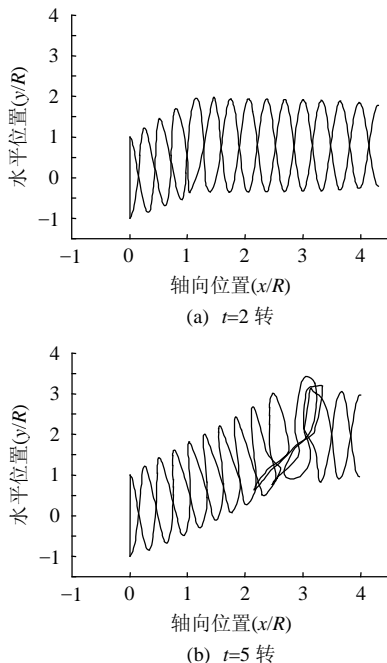


图7 来流风偏转 30°后尾迹形状随时间变化  
Fig. 7 Evolving of wake when turbine yawing 30° out of wind

图 8 为相应的功率系数  $C_p$  和推力系数  $C_T$  随时间的变化曲线。从图 8 可以看出，来流风偏转后，功率系数和推力系数迅速下降，形成较大的超调量，然后随着尾迹开始重组，功率系数和推力系数均有所恢复。转子旋转 8 转后，呈现明显的周期性。10 转后，来流风恢复为轴向来流，功率系数和推力系数迅速上升，此后随着尾迹的重组，恢复为轴流工况值。

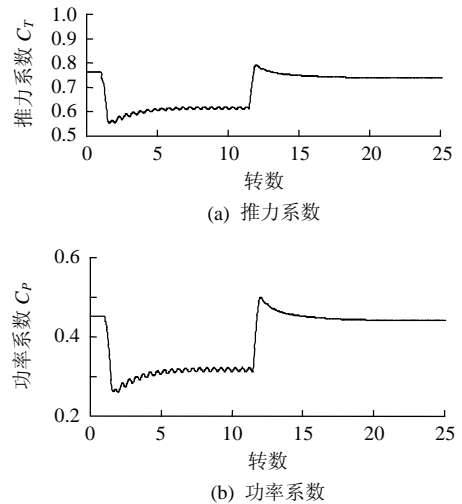


图8 来流风偏转 30°后功率、推力系数随时间变化  
Fig. 8 Power coefficient as function of time when turbine yawing 30° out of wind

#### 4.4 变桨

为了更好地验证模型, 图 9 还给出了风力机桨距角  $\theta$  从  $2^\circ$  增加到  $4^\circ$  时的功率系数随时间的变化。从图 9 可以看出, 随着桨距角增加, 叶素攻角减小, 功率系数迅速下降, 此后尾迹重组, 功率系数有所恢复, 经过大约 10 转后达到新的平衡。尽管缺乏相应的实验数据进行比较, 但与文献[20]的 Tjærborg 风力机实验结果在定性上是一致的。

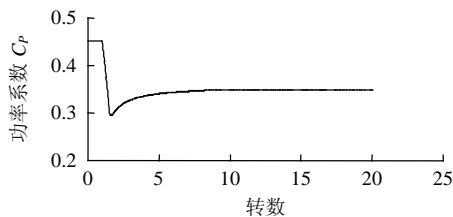


图 9 桨距角突增后功率系数随时间变化

Fig. 9 Power coefficient as function of time during pitch changes

由上述分析可知, 风力机偏航或变桨动作时, 桨叶上的涡在脱落并向下游传输的过程中, 需要一定的时间才能使尾迹从一个流态变成另一个流态, 导致诱导速度的时间滞后响应, 这种滞后响应对风力机气动特性的影响很大。而目前广泛应用的 BEM 理论得到的诱导速度是一个静态平衡结果, 不能体现这种时间滞后, 因此本文的自由尾迹模型具有明显的优势。

## 5 结论

本文结合 Weissinger-L 升力面模型和时间推进自由尾迹方法建立了适合于水平轴风力机气动特性分析的计算模型。模型采用 4 阶 Adams-Moulton 预估-校正算法对尾迹进行离散求解, 并考虑黏性涡核、动态失速的影响。应用所建立的模型对风力机尾迹形状和气动特性进行计算, 得出如下结论。

1) 模型在轴流工况时能较好地预测尾迹形状和桨叶处诱导速度。对不同桨距角时风力机气动力计算表明, 随着桨距角增加, 尾迹径向膨胀的幅度减小, 桨叶处诱导速度减小, 螺旋线尾涡的螺距增大, 因此桨盘所受的推力减小。

2) 对来流风偏转和桨距角增加时的尾迹形状和气动特性计算表明: 来流风偏转后, 尾迹呈现明显的时间滞后响应, 需要经过一定的时间才能完成重组, 相应的功率系数和推力系数会先下降, 然后逐渐稳定且呈周期性振荡变化; 桨距角突增时, 同

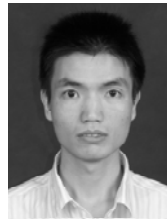
样出现滞后响应, 功率系数和推力系数先明显降低, 经过一定的时间后达到稳定值。

3) 本文基于时间推进自由尾迹方法建立的风力机气动特性计算模型能够用于风力机定常及偏航、变桨等非定常工况时的气动特性分析。

## 参考文献

- [1] Leishman J G. Principles of helicopter aerodynamics [M]. New York: Cambridge University Press, 2006: 598-626.
- [2] 祝贺, 徐建源, 腾云, 等. 风力机风轮气动性能三维流场数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 85-90. Zhu He, Xu Jianyuan, Teng Yun, et al. 3D flow field numerical aerodynamic performance test of wind turbine rotor[J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(17): 85-90(in Chinese).
- [3] 徐建源, 祝贺. 风波联合作用海上风力机动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(5): 120-124. Xu Jianyuan, Zhu He. Dynamic characteristic analysis of offshore wind turbine under combined wind and wave action[J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(5): 120-124(in Chinese).
- [4] Sandeep Gupta. Development of a time-accurate viscous Lagrangian vortex wake model for wind turbine applications[D]. Maryland: University of Maryland, College Park, 2006.
- [5] 沈昕, 竺晓程, 杜朝辉. 两种自由尾迹模型在风力机气动性能预测中的应用[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 923-927. Shen Xin, Zhu Xiaocheng, Du Zhaohui. Using two free wake methods to predict the aerodynamics performance of HAWT[J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2010, 31(7): 923-927 (in Chinese).
- [6] Leishman J G. Challenges in modelling the unsteady aerodynamics of wind turbines[J]. Wind Energy, 2002, 5(11): 85-132.
- [7] 李春华. 时间准确自由尾迹方法建模及(倾转)旋翼气动特性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007. Li Chunhua. Modeling on time-accurate free wake method and investigation on aerodynamic characteristics of rotor and tiltrotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese).
- [8] 李春华, 徐国华. 倾转旋翼过渡状态的尾迹及其气动力特性计算与分析[J]. 应用力学学报, 2008, 25(3): 466-470. Li Chunhua, Xu Guohua. Computation and analysis for wake and aerodynamic characteristics of tiltrotors in

- transitional flight[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(3): 466-470(in Chinese).
- [9] National Advisory Committee for Aeronautics. The lift distribution of swept-blade wings [R]. Weissinger J, Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1947.
- [10] 黄水林, 李春华, 徐国华. 基于自由尾迹和升力面方法的双旋翼悬停气动干扰计算[J]. 空气动力学学报, 2007, 25(3): 390-395.  
Huang Shuilin, Li Chunhua, Xu Guohua. An analytical method for aerodynamic interactions of twin rotors based upon free-vortex and lifting-surface models[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(3): 390-395(in Chinese).
- [11] Carr L W. Progress in the analysis and prediction of dynamic stall[J]. Journal of Aircraft, 1988, 25(1): 6-17.
- [12] 胡丹梅, 李佳, 闫海津. 水平轴风力机翼型动态失速的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(20): 106-111.  
Hu Danmei, Li Jia, Yan Haijin. Numerical simulation of airfoil dynamic stall of horizontal axis wind turbine [J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(20): 106-111(in Chinese).
- [13] Leishman J G, Beddoes T S. A semi-empirical model for dynamic stall[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1989, 34(3): 3-17.
- [14] Bagai A, Leishman J G. Rotor free-wake modeling using a pseudo-implicit algorithm[J]. Journal of Aircraft, 1995, 32(6): 1276-1285.
- [15] 李清杨, 关治, 白峰杉. 数值计算原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 356-407.  
Li Qingyang, Guang Zhi, Bai Fengshan. Principles of numerical calculation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 356-407(in Chinese).
- [16] Bhagwat M J, Leishman J G. Generalized viscous vortex model for application to free-wake and aeroacoustic calculations[C]//58th Annual Forum and Technology Display of the American Helicopter Society International, Montreal, Canada, 2002.
- [17] Bagai A, Leishman J G. Flow visualization of compressible vortex structures using density gradient techniques[J]. Experiments in Fluids, 1993, 15(6): 431-442.
- [18] Wouter Haans, Tonio Saint. HAWT Near-Wake aerodynamics, part I: axial flow conditions[J]. Wind Energy, 2008, 11: 245-264.
- [19] Tonio Saint. Improving BEM-based aerodynamic models in wind turbine design codes[D]. Malta: University of Malta, 2007.
- [20] Suzuki A. Application of dynamic inflow theory to wind turbine rotors[D]. Salt Lake City: Department of Mechanical Engineering, University of Utah, 2000.



周文平

收稿日期: 2011-05-26。

作者简介:

周文平(1982), 男, 博士研究生, 研究方向为风力机气动性能研究, wenzp@sina.com;

唐胜利(1962), 男, 博士生导师, 主要研究先进能源动力系统建模与仿真, tytsl@cqu.edu.cn;

吕红(1983), 女, 博士研究生, 主要从事多相流直接数值模拟方向研究, lvhonglx@126.com。

(责任编辑 张媛媛)