

# 风力机尾流流场的数值分析和尾流边界建模

朱 翀 王同光 钟 伟

(南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室,南京,210016)

**摘要:**采用计算流体力学(Computational fluid dynamics,CFD)的方法模拟致动盘,研究了尾流边界的发展过程。为了准确捕捉尾流边界细节,根据尾流边界的速度梯度远远大于流场中的其他区域的速度梯度的特性,使用自适应弹簧网格技术,使网格的最密区域始终跟随尾流边界运动。基于该数值模拟结果建立了一个尾流边界模型。该模型将尾流的发展分为与粘性无关的膨胀过程和与粘性相关的扩散过程,建模结果与实验结果吻合。在此基础上,还利用该模型对高斯分布预测(Gaussian distribution prediction,GDP)尾流模型进行了修正,使其更加准确。

**关键词:**风力机;致动盘;数值模拟;尾流边界

**中图分类号:**O355;TK89 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)05-0688-05

## Numerical Analysis and Wake Boundary Modeling of Wind Turbine Flow Fields

Zhu Chong, Wang Tongguang, Zhong Wei

(Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design,  
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The development of the wake boundary after an actuator disc is simulated using the computational fluid dynamics (CFD) method. To capture the details of wake boundary, the adaptive spring-mesh technique is used to make the finest meshes always follow the wake boundary movement, according to the fact that the velocity gradient in the wake boundary is much larger than in other regions. A wake boundary model has been developed based on the CFD results. This model divides the wake development into the expanding process due to inviscid flow and the diffusing process due to viscous influence. The reliability of the model is validated by comparing with experimental data. As a demonstration of application, a newly developed wake velocity model called Gaussian distribution prediction (GDP) model is improved by the present wake boundary model.

**Key words:** wind turbine; actuator disc; numerical simulation; wake boundary

风力机是将自然界的风能转化为机械能并获得电能的装置。在风力机运行的风电场中,空气经过旋转的风轮后会发生速度大小和方向的变化,这种对来流空气的影响称之为风力机的尾流效应。风电场中许多风力机排布在一起,其中的一些风力机

必然将处于另一些风力机的尾流中,使受影响的风力机发电量减少,降低整个风场的总输出功率。尾流所附加的风剪切和强湍流也会导致下游风力机的疲劳载荷增加、使用寿命缩短和结构性能变差。因此,开展尾流效应的研究,对风电场中的风力机

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714600);江苏省创新学者攀登(BK2008044)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

**收稿日期:**2011-04-29;**修订日期:**2011-07-18

**通讯作者:**王同光,男,教授,博士生导师,1962年3月生,E-mail:tgwang@nuaa.edu.cn。

位置的合理布置、减小尾流对风力机性能的影响、减小风电场的占地面积、提高风能资源的利用效率,最终使风电场的经济性达到最佳有着重要意义。

国内外目前对尾流的研究大致分为两类:(1)尾流模型研究,有无粘近场尾流模型、简化尾流模型和AV尾流模型等<sup>[1]</sup>;(2)对尾流流动机理的研究,旨在揭示尾流流动的基本特征。计算流体力学(Computational fluid dynamics,CFD)方法可以获得整个流场的所有流动信息,可以用于尾流机理的研究,为尾流建模提供参考,正在成为尾流研究的有力工具。

本文结合致动盘理论<sup>[2-3]</sup>和CFD方法<sup>[4]</sup>对尾流边界进行研究和建模。根据支配因素的不同,将尾流区域的发展分为膨胀过程和扩散过程。膨胀过程是在不考虑气体粘性作用的情况下,气流受质量守恒和机械能守恒支配的运动结果;扩散过程是在气体粘性的作用下,尾流边界向外扩散的现象。在对膨胀过程和扩散过程进行分析的基础上,建立了一种新的尾流边界模型。

## 1 计算方法

### 1.1 致动盘理论

空气经过风轮时,由于风力机风轮的阻塞作用,使得流管内的风速降低,风轮后的流管会膨胀以满足质量守恒。本文在数值计算中,将风力机风轮简化为致动盘<sup>[5]</sup>处理。

由经典的Rankine-Froude原理可知,风经过制动盘时,会在制动盘前后产生压差,压差的表达式为

$$\Delta p = 2\rho U^2 a(1-a) \quad (1)$$

式中: $\Delta p$ 为空气经过制动盘时产生的压力降; $\rho$ 为空气密度; $U$ 为来流速度; $a$ 为轴流诱导因子,与推力系数 $C_T$ 的关系为

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{2} \quad (2)$$

推力系数

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho U^3 \pi R^2} \quad (3)$$

式中: $T$ 为风轮所受到的推力; $R$ 为风轮半径。

### 1.2 流场计算方法

1989年Garrad Hassan在Marchwood工程实验室(MEL)开展了一系列的风力机尾流的实验研究<sup>[6]</sup>,所选用的实验对象为模型缩比尺度为1/160的水平轴风力机。对于风力机来说,能反映其性能

的重要的参数就是推力系数,所以在风洞试验中,观察了风力机在3个不同尖速比下的气动性能。3个不同尖速比 $\lambda$ 为2.9,4.0,5.1对应的轴向推力系数 $C_T$ 分别为0.61,0.79,0.85。

为了使计算模型更接近真实风力机,本文选用的计算模型为Hassan实验模型所对应的真实模型,即风轮直径为43.2 m。

本文使用计算流体力学软件FLUENT作为求解器,解算模型为二维轴对称,湍流模型为 $k-\omega$ SST,采用FAN边界模拟致动盘。计算区域边界条件包括速度入口、压力出口和轴对称边界。计算中分别使用了网格单元数为6 000和60 000的四边形网格,其中网格单元数为6 000的网格作为自适应弹簧网格进行计算,网格单元数为60 000的网格作为计算参考标准。

### 1.3 自适应弹簧网格方法

尾流区域的网格密度足够大是精确模拟尾流的基础。由于尾流的位置不确定性,只有通过加密整个流场达到理想效果。因此,使用自适应网格技术根据流场信息实时调整网格成为一种更好的选择。

弹簧网格<sup>[7]</sup>是将任意两个网格节点之间的连线看作一条弹簧,整个计算区域看成一个由多个弹簧交错组成的网格结构。

本文根据尾流边界的速度梯度远远大于流场中的其他区域的速度梯度的特性,使用自适应弹簧网格技术使网格的最密区域始终跟随尾流边界运动。图1为初始网格,图2为自适应弹簧网格效果图。

图3为初始稀疏网格、自适应弹簧网格和标准网格的数值计算结果比较。其中自适应弹簧网格以初始稀疏网格为初始网格;标准网格的网格密度足够大,其计算结果作为参考标准。图3中选取了5倍

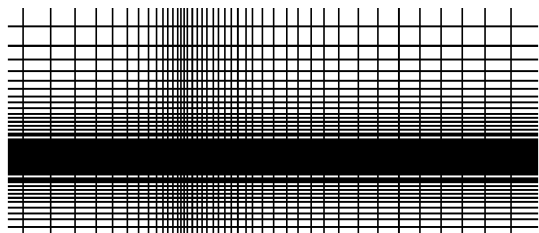


图1 初始网格

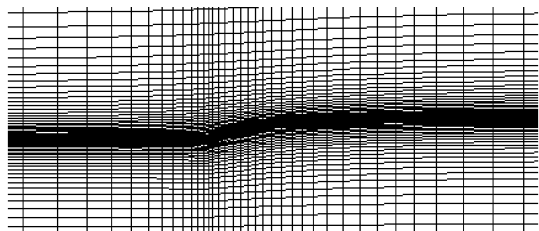
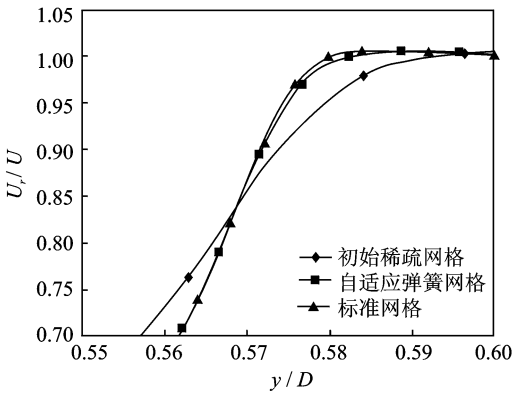


图2  $C_T=0.79$ 时的自适应弹簧网格

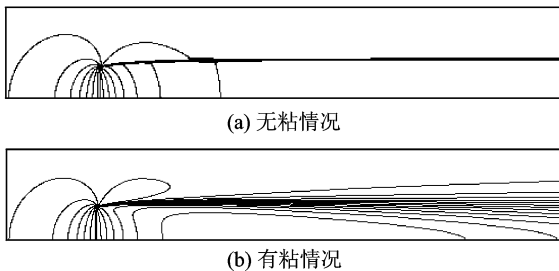
图3  $C_T=0.61$  时截面处的速度分布

风轮直径截面处的速度分布,在同样网格单元数的基础上,自适应弹簧网格捕捉尾流区域边界的效果明显优于初始稀疏网格。其中: $U_r$  为当地速度; $U$  为来流速度; $y$  为截面径向位置; $D$  为风轮直径。

## 2 计算结果与尾流边界建模

### 2.1 尾流边界的特点

图4为不考虑粘性与考虑粘性情况下CFD计算所得的流场区域的速度等值线图。从图4(a)中可以看出,不考虑粘性影响的情况下来流空气会因为风轮的存在产生一个膨胀的尾流区域,但在远离风轮一定距离以后尾流不再膨胀。从图4(b)可以看出,风轮后面的尾流区域是边膨胀边向周围流场中扩散,这是由于在粘性作用下尾流区域与周围流场有了动量交换。因此,可以将尾流的发展分为膨胀过程和扩散过程。

图4  $C_T=0.79$  时CFD计算所得速度等值线

### 2.2 膨胀过程的边界模型建立

根据无粘尾流边界的膨胀特点,建立如下表达式来描述尾流边界的膨胀

$$y_p = m + ne^{-qx} \quad (4)$$

式中: $y_p$  为膨胀过程的尾流边界位置; $x$  为径向位置。

首先,尾流区域边界必过致动盘边缘,即式(4)必过 $(0, D/2)$ ,于是有 $m+n=D/2$ 。

其次,尾流区域在距离风轮一定距离以后将不

再膨胀,即式(4)必过 $(\infty, D_1/2)$ ,其中 $D_1$  为距离风轮足够远的位置的尾流区域边界直径,于是有 $m=D_1/2$ 。

根据连续性方程

$$u_0(\pi(D/2)^2) = u_1(\pi(D_1/2)^2) \quad (5)$$

式中 $u_0, u_1$  分别为风轮处的空气速度和风轮之后尾流稳定后的空气速度。又有

$$u_1 = u_0 \frac{1-2a}{1-a} \quad (6)$$

式中 $a$  为轴流诱导因子。

由式(2,5,6),可得

$$m = \frac{D_1}{2} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1-C_T}}{2\sqrt{1-C_T}}} \quad (7)$$

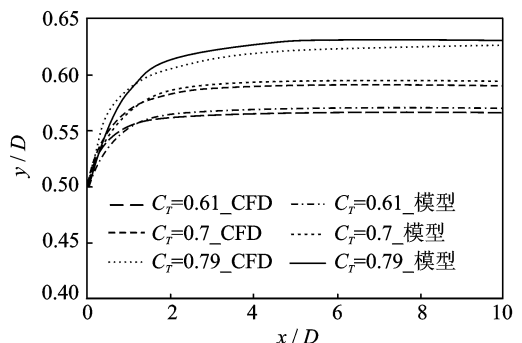
$$n = \frac{D}{2} - m = \frac{D}{2} \left[ 1 - \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1-C_T}}{2\sqrt{1-C_T}}} \right] \quad (8)$$

最后,对于式(4)中的参数 $q$ ,其主要控制尾流的膨胀曲率,根据不考虑粘性影响时,各种不同 $C_T$  情况下CFD计算所得的结果可知 $C_T$  越大,尾流区域膨胀越剧烈,则参数 $q$  应与 $C_T$  成反比。根据数值计算结果,参数 $q$  的取值可表示为

$$q = 1.3 - C_T \quad (9)$$

将式(7~9)代入到式(4)中,即可得所需建立的膨胀过程的边界模型。

为了验证所建立的膨胀过程的尾流边界模型的准确性,选择了推力系数 $C_T$  分别为0.61, 0.7, 0.79三种情况下的CFD计算结果与所建立的膨胀过程的尾流边界模型相比较。从图5中可以看出,所建立的膨胀过程的尾流边界模型与CFD计算所得尾流边界基本吻合。但是CFD计算中,把风力机风轮简化为致动盘进行二维计算;而在建立膨胀过程的尾流边界模型中,使用的是一维理想风力机模型。故所建立的尾流边界模型比CFD计算所得的

图5 不同 $C_T$  下CFD计算尾流边界与尾流边界模型比较

尾流边界要大一些,但误差在3%之内,应该是可以接受的范围。

### 2.3 扩散过程的边界模型建立

尾流区域膨胀过程的边界模型是基于无粘假设下,是一种理想状态。但是现实流动中,由于粘性的作用,尾流区域会与周围流场区域有动量、能量的交换,从而尾流区域会不断扩张。图6中列出了 $C_T$ 为0.61,0.79,0.85三种情况下,无粘条件与有粘条件下数值模拟得到的尾流边界,清晰地显示了无粘条件下尾流区域的膨胀过程与有粘条件下尾流区域的扩散过程。

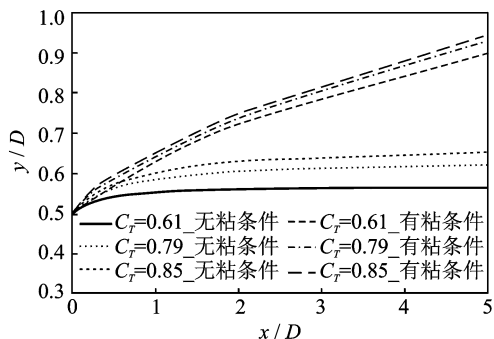


图6 不同 $C_T$ 下无粘条件与有粘条件下的尾迹边界

为了体现尾流区域扩散过程对尾流边界的影响,去除尾流边界中膨胀过程的影响,使有粘条件下尾流边界减去无粘条件下的尾流边界,结果如图7所示,即只体现了尾流区域的扩散过程对尾流边界的影响。从图7中可以看出,风轮后两倍直径位置以后由于扩散过程所造成的尾流边界基本是线性增长,而在风轮两倍直径以内,属于近风轮区域,流场复杂,较难简单描述。

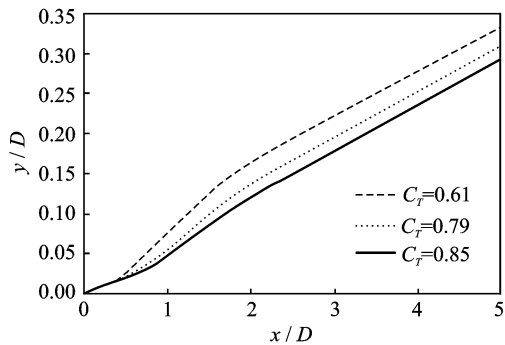


图7 不同 $C_T$ 下只考虑扩散过程的尾流边界

由于建立尾流区域扩散过程的尾流边界模型涉及有粘情况下湍流的信息等问题,故较难直接建立模型。由图7可以基本认为扩散过程的尾流边界是线性增长的。所以假定扩散过程的尾流边界是线

性增长的,且由图7中可以看出不同 $C_T$ 下,尾流区域扩散过程的尾流边界的线性增长斜率基本相同,但随着 $C_T$ 的变大而略有减小。故扩散过程的尾流边界可以表示为

$$y_k = (-0.02C_T + 0.1)x \quad (10)$$

式中 $y_k$ 为扩散过程的尾流边界位置。

### 2.4 尾流边界模型

结合尾流区域膨胀过程与扩散过程分别建立的尾流边界模型,即可得到完整的尾流边界模型

$$y_b = y_p + y_k \quad (11)$$

式中 $y_b$ 即为所求的尾流边界位置。

为了验证该尾流边界模型的正确性,与1989年 Garrad Hassan 在 Marchwood 工程实验室开展的风力机尾流的实验结果相比较。同时还引进了目前工程应用中最广泛的尾流模型——Park 模型<sup>[8]</sup>。Park 模型的边界模型基于两个假设:(1)尾流初始直径为风轮直径;(2)尾流增长速率呈线性关系。Park 模型中尾流的增长速率主要由尾流衰减系数确定。

图8为本文所建立的尾流边界模型、Park 模型尾流边界模型与实验数据的比较。Park 模型中的尾流衰减系数是一个与风力机本身参数和周围环境有关的参数,故对于MEL开展的实验而言,尾流衰减系数为一常值,这样Park模型尾流边界与 $C_T$ 无关,这明显是不够准确的。从图8中可以看出,本文所建立的尾流边界模型与Park模型中的尾流边界模型相比,与实验更符合。

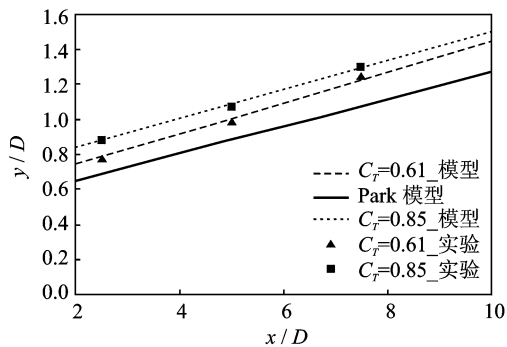


图8 建立的尾流边界模型、Park模型的尾流边界模型与实验数据的比较

## 3 尾流区域的径向速度分布

尾流边界模型能够引入到尾流区域径向速度分布模型中。本科研团队对尾流区域的径向速度分布建立了高斯分布预测(Gaussian distribution prediction, GDP)模型。其径向位置速度分布为

$$U_r = -A \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} + B \quad (12)$$

式中:  $\sigma = 0.55r_1$ ,  $A = \sqrt{2\pi\sigma}(U - U_{\text{centre}})$ ,  $B = U$ ,  $U_{\text{centre}} =$

$$U \left[ 1 - \frac{1}{(0.85 - 0.41C_T)x + (1.5 - 1.64C_T)} \right] \quad (13)$$

式中  $U$  为空气来流速度。

但 GDP 模型仍是基于 Park 模型的尾流边界, 其中的尾流区域半径  $r_1 = kx + D/2$ ,  $k$  为尾流衰减系数, 其值不随  $C_T$  变化, 这是不准确的。故利用本文所建立的尾流边界模型对 GDP 模型进行修正, 即使  $r_1 = y_b$ 。

图 9 为  $C_T = 0.61$  时风轮之后 2.5 倍风轮直径截面处的径向速度分布, 主要显示了尾流边界附近区域使用 Park 模型尾流边界的原始 GDP 模型和使用本文所建立的尾流边界模型修正后的 GDP 模型比较, 可以看出修正后的 GDP 模型在尾流边界附近区域的速度分布与实验值更为接近。

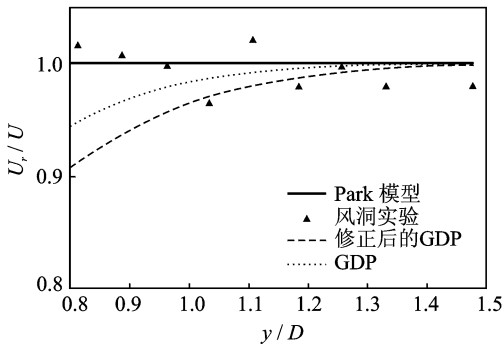


图 9  $C_T = 0.61$  时风轮之后 2.5 倍风轮直径截面处的径向速度分布

## 4 结束语

本文结合致动盘理论和 CFD 方法对尾流边界进行研究和建模。为了更好地捕捉尾流边界, 采用自适应弹簧网格, 在不增加网格数量的条件下更精

确地捕捉了尾流边界的细节。根据支配因素的不同, 将尾流区域的发展分为膨胀过程和扩散过程。膨胀过程是在不考虑气体粘性作用的情况下, 气流受质量守恒和机械能守恒支配的运动结果; 扩散过程是在气体粘性的作用下, 尾流边界向外扩散的现象。在对膨胀过程和扩散过程进行分析的基础上, 建立了一种新的尾流边界模型。新的尾流边界模型与 MEL 开展的尾流实验数据吻合。还利用新的尾流边界模型对表达径向速度分布的 GDP 模型进行了修正, 使 GDP 模型更加准确。

## 参考文献:

- [1] 陈坤, 贺德馨. 风力机尾流数学模型及尾流对风力机性能的影响研究[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(1): 84-87.
- [2] Sørensen, Shen W Z, Munduate X. Analysis of wake states by a full-field actuator disc model[J]. Wind Energy, 1988, 1(2): 73-88.
- [3] Sørensen J N, Shen W Z. Numerical modeling of wind turbine wakes[J]. Journal of Fluid Engineering, 2002, 124(2): 393-399.
- [4] Lin S Y, Shieh T H. Study of aerodynamical interference for a wind turbine[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(8): 1044-1047.
- [5] Helmis C G, Papadopoulos K H, Asimakopoulos D N, et al. An experimental study of the near wake structure of a wind turbine operating over complex terrain[J]. Solar Energy, 1995, 54(6): 413-428.
- [6] Schlez W, Tindal A, Quarton D. GH wind farmer validation report [M]. [S. l.]: Garrad Hassan and Partners Ltd, 2003.
- [7] 孙旭, 张家忠, 黄科峰. 基于弹簧近似的非结构化网格自适应处理方法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(9): 104-108.
- [8] Sanderhoff P. PARK-user's guide [M]. Denmark: Risø National Laboratory, 1993.