

导流型垂直轴风力机 内部流场计算方法的比较与研究

王 鑫, 童正明, 王企鲲

(上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 基于 CFD 模拟计算, 分别用多参考坐标系法 (Multiple Reference Frame MRF) 和滑移网格法 (Sliding Mesh SM) 对导流型垂直轴风力机进行数值模拟, 给出每种方法在工程应用中所适用的范围与场合。在对该种风力机整体外特性的计算上, 两种方法对其总扭矩等性能有着相似的结论, 周期较短的 MRF 法更为适合; 在局部流动内特性上, SM 法作为一种非常数的计算方法, 能相对准确的表达出风轮的内特性参数随时间及空间的变化, 对于此方面的计算, 物理意义较合理的 SM 法更为适合。

关 键 词: 风轮; 导风轮; 数值模拟; 多参考坐标系; 滑移网格

中图分类号: TK83 O357.4 文献标识码: A

引 言

风力发电是一种清洁能源的利用方式, 风力机性能对风能利用起到了至关重要的作用。

风力机按结构形式大体上分为水平轴和垂直轴两种。水平轴风力机发展较完善, 然而水平轴风力机有安装难度高、投资成本大且不便移动等缺点。对于一些小型离网型发电系统中, 目前使用最为广泛的仍是垂直轴风力机, 其具有投资成本低、安装方便、便于移动、运行噪音小等特点。其缺点是效率较低。这些在阻力型垂直轴风力机上表现地尤为突出^[1~2], 而具有导风轮的导流型垂直轴风力机有望改善这一缺点^[3]。

由于风力发电装置周围风力场的复杂性, 难以用局部流场的实验结果来直接验证数值计算的正确性。数值计算方法发展到现在, 对流场特性的计算应该说是比较可信的, 关键是方法的适用性和适应范围。目前, 对于旋转式叶轮机内部流场的 CFD 计算, 要处理动、静两部分区域交界面上计算信息的传递, 这主要有两种计算方法: 多参考坐标系法

(Multiple Reference Frame 以下简称“MRF法”)和滑移网格法 (Sliding Mesh 以下简称“SM法”)^[4]。

MRF法作为一种定常的近似求解方法, 以简便适用的特点在工程中被广泛应用。相比较而言, SM法是一种非定常方法, 通过旋转区域与静止区域的相对滑动, 在每个时间步内不断产生新的网格, 从而给出随时间变化的数值解^[5~6]。

导流型垂直轴风力机绕流流场的数值模拟是对多尺度、大分离、复杂流场的数值模拟。这对 CFD 计算提出了新的挑战。对于这种多尺度的旋涡场是否仍能采用简单的 MRF法来代替物理意义较合理的 SM法来进行 CFD 计算目前尚未可知, 也未见相关研究的报导^[7]。

基于此, 对同一种导流型垂直轴风力机的绕流场, 分别运用 MRF和 SM两种方法对其进行模拟计算。通过对整体外特性以及局部流场内特性的比较, 得出两种方法的异同点, 并分析原因。

1 CFD数值模型及算法

1.1 物理模型与流场区域

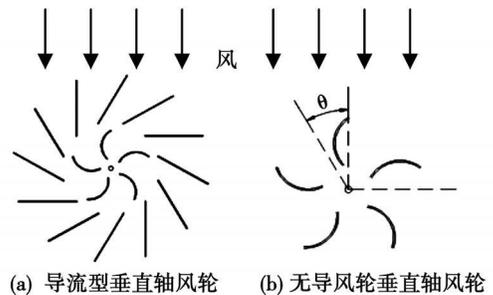


图 1 垂直轴风轮示意图

图 1 (a) 为该种导流型垂直轴风力机的平面示意图。风轮叶片为 5 片, 采用圆弧形式; 导流叶片为 12 片, 采用直板形式。该种垂直轴风轮是在如图 1

(b)所示的外围添加一个由导流叶片沿圆周方向均匀排列而构成的导风轮。导风轮是静止部件,主要起导流作用。在其导流作用下,使来流导向左侧风叶的压力面,同时对右侧风叶而言,导流叶片能起到挡流作用,使来流不直接冲击风叶的吸力面,这样就有希望通过简单的二元叶轮而实现对整个垂直轴风力机做功效率的提高。

此导流型垂直轴风力机的计算区域是以该风力机为中心,上延其导风轮外径的4倍、下延12倍,左右方向各延伸5倍的二维矩形范围。

1.2 CFD计算网格与计算模型

计算网格采用结构与非结构型相结合的混合网格,其中在导流型垂直轴风力机内部采用非结构型网格,在外部绕流场采用结构型网格。网格总数大约60万,其具体形式如图2所示。

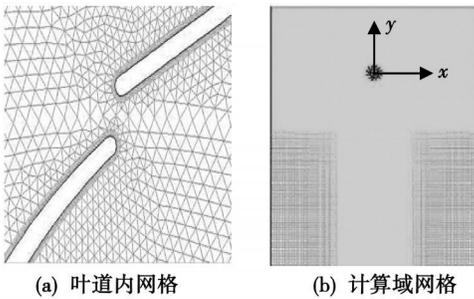


图2 计算网格示意图

所采用的计算模型是二维不可压缩的雷诺时均N-S方程;采用k-ε湍流模型和Simple系列的有限体积法进行离散;动量方程,湍动能,湍流耗散率均采用具有三阶精度的Quick格式离散^[8]。对于风力机旋转区域与静止区域分界面上信息交换的处理,分别采用MRF方法与SM方法。

边界条件为:

- (1)入口速度: 10 m/s,沿y轴负方向,如图2(b)所示;
- (2)出口压力: 标准大气压 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$
- (3)风轮转速: 200 r/min;
- (3)叶片表面为固壁面;
- (4)流场两侧远场边界为Euler面。

在MRF法中,风轮旋转1/5周为一个计算周期。取一个计算周期内θ角度为0°、12°、24°、36°、48°和60°分别计算。其中θ角为风叶外半径方向与y轴正向的夹角,以逆时针方向为正,如图1(b)所示。

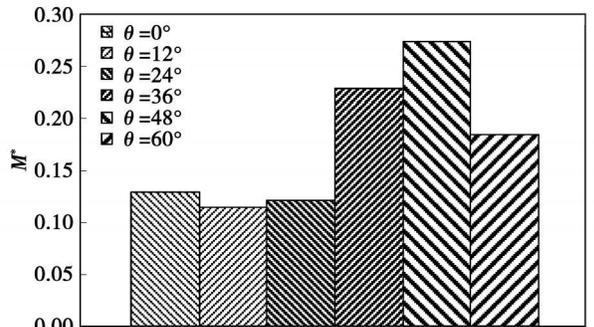
在SM法中,风轮叶片转过一周需要0.3s,每个叶片转过1/5周期所需的时间为0.06s,即为非

定常计算的计算周期。为了与MRF法在相同位置作对比,选择计算步长为0.01s,为计算周期的1/6。

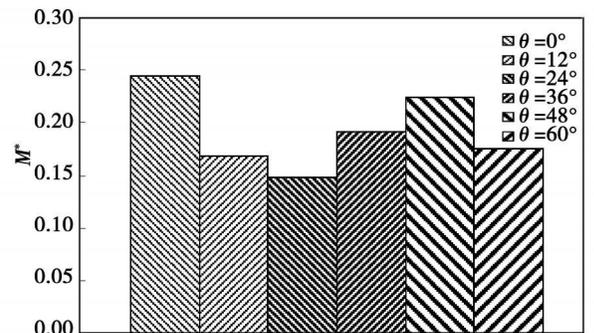
2 计算结果的比较分析

2.1 整体外特性的比较分析

图3为该种风力机在一个计算周期内的总扭矩系数分布图,两种方法所得结果的平均值较为接近。这就说明了两种方法在此种风力机的整体外特性计算上差别并不大,这样MRF方法比SM法计算时间短、利用资源少的特点就显现了出来。但运用SM法在这6个角度所得到的结果比MRF法更为连续平均。这就说明了SM法对风轮每一个角度的计算在时间和空间运动上都存在着相互的关联性,可以更好地描述风力机连续工作的情况。



(a) MRF法



(b) SM法

图3 各角度的转矩系数比较

M为无量纲扭矩系数,定义为:

$$M = M / (\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S R)$$

式中: M—风力机的风轮总扭矩; V_{∞} —来流速度; ρ —空气密度; S—风轮迎风面积; R—风轮半径。

2.2 局部流场内特性的比较

2.2.1 单一风叶在旋转周期内的扭矩系数比较分析

图4为不同旋转角度时,单一风轮叶片的扭矩

系数分布图, 图中 M_L 为单一风叶的扭矩系数。此图表明两种方法的计算结果存在较大差别, 且主要做功区域有所不同。MRF 法中风轮的有效扭矩 (即正扭矩) 出现了双峰现象: $30^\circ \sim 170^\circ$ 区域与 $240^\circ \sim 300^\circ$ 区域上均出现正扭矩, 其中前者为主要有效做功区; SM 法中其主要做功区域出现在 0° 左右, 在 280° 附近时, 也就是流体流出风轮区域时存在较大的负扭矩。由于两者均有主要做功区域和负扭矩较大区域, 只是存在位置不同, 故在图 3 中两者总扭矩的平均值较为接近。

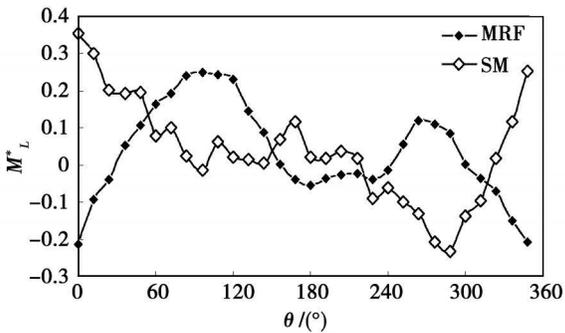


图 4 单一动叶片在不同角度所受扭矩

2.2.2 主要做功区域内流动特性的比较分析

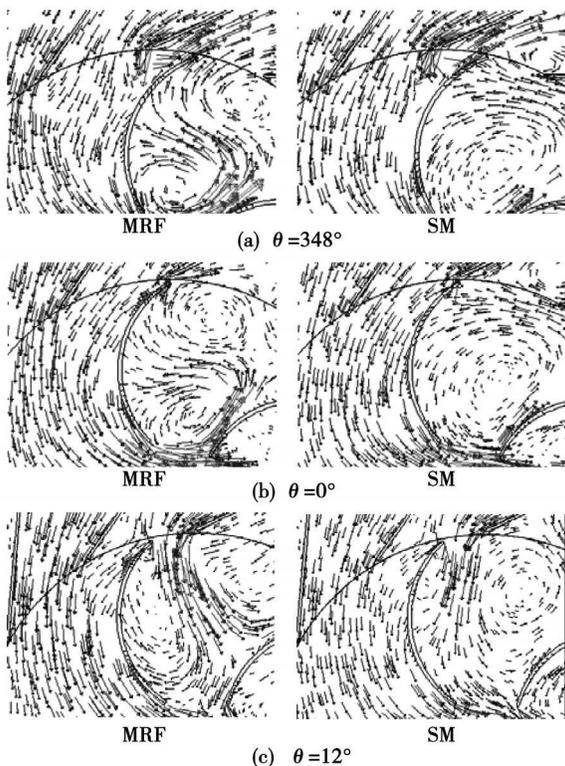


图 5 两种方法在 $\theta=0^\circ$ 左右时的速度矢量图

图 5 (a)、(b) MRF 法的计算所得速度矢量图中, 风叶的压力面附近流场存在较多的分离漩涡, 流体动能耗散较大。而在 SM 法的计算结果中, 风叶的压力面附近流场较规则, 对于风叶的压力面有较强的冲击效果, 存在明显做功。图 5 (c) MRF 法所示图中, 流体从风叶与导流叶片中间流入, 直接冲击另一风叶的吸力面, 与风叶之间形成了一定的负压, 所以使得此时流体对风轮的转动产生阻力作用。在 SM 法的结果中, 风叶与导流叶片之间的流体能够达到风叶的压力面, 而且有一定的冲击作用, 此时风叶所受扭矩较大。由于此区域为风轮的主要做功区, 这也说明了图 4 中, 在 $\theta=0^\circ$ 左右时两种方法存在差别的原因。

2.2.3 风轮出口流动特性的比较分析

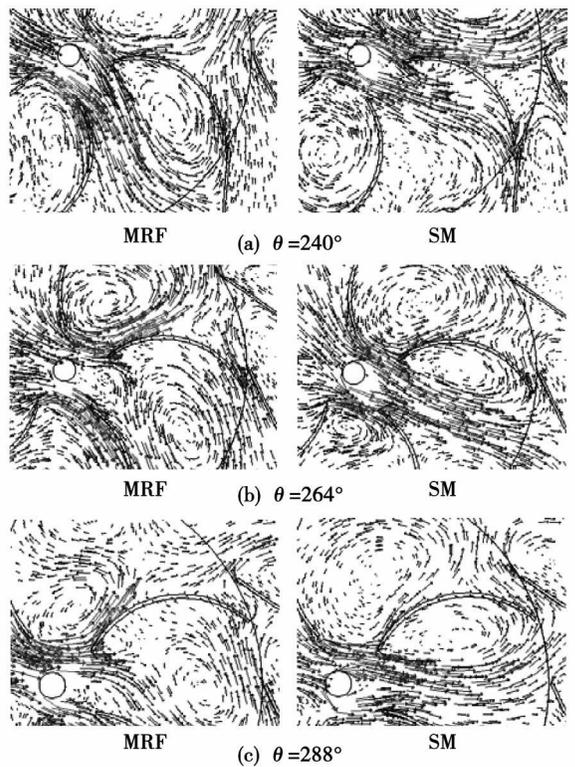


图 6 两种方法在流体流出风轮区域时的速度矢量图

如图 6 (a) 所示, 当 θ 为 240° 时, SM 法中, 流体在流出风轮区域时对风叶的外缘压力面有一定的冲击。但在此风叶的内端部压力面有负压区域的存在, 而且吸力面受到上面流道流出流体的冲击, 所以在流体流出风轮区域时此风叶整体扭矩为负。MRF 法所得速度矢量图中, 在风叶压力面出现了尺度较大的漩涡, 而 SM 法中这一情况并不明显。

图 6 (b) 中, SM 法所示流体径直地通过风叶间

的流道流出风轮区域,使得流体与风叶压力面形成较大的负压空间,所以此风叶所受扭矩为负。与图 6(a)相同,在 MRF法中风叶压力面附近亦出现了明显的漩涡。

在 $\theta=288^\circ$ 时,图 6(c)所示与图 6(b)相仿,SM法中流体流出风轮区域时与风叶压力面形成负压,所以风叶受负扭矩作用。

对该种风力机局部流场的内特性而言,MRF法计算所得的结果在流动分离较大的区域内,其产生的涡结构要比 SM法计算结果更为明显。这是因为两者在数值计算中初始条件对计算的敏感性不同。

MRF法为定常的计算方法,始终于 $t=0$ 时刻的 v_0 为初始条件,其仅起到启动迭代计算的作用。故无论给定何初始值,迭代计算总会趋于同一结果,并且其计算的初始条件并非为实际物理条件,故产生较为明显的“数值涡”。

SM法中 $t+\Delta$ 时刻计算的初始条件是 t 时刻的计算结果,能表达出风轮的性能参数随时间和相对位置的变化,“数值涡”在 SM法所得的流场中并不明显。由于该方法对初始条件的依赖性与实际是一致的,其描述的局部流场与实际风轮的工作过程较为接近,所以非定常的 SM法较定常的 MRF法所得计算结果更能精确的分析风轮内局部流场的内特性。

3 结 论

在对导流型垂直轴风力机的整体性能分析上,两种计算方法的结果比较接近,但流场细节存在较大差异。这两种方法的适用场合牵涉到研究对象是整体性能还是局部流场的内特性。

在风轮的总扭矩等整体外特性参数计算方面,两者所得结果的平均值较为接近,MRF法可以满足总体计算所需精度。考虑到节省计算的时间和资源,在通常对风力机的整体工作性能的计算中,建议使用 MRF法。

在风轮的局部流场内特性参数的计算方面,SM法由于是一种非定常的计算方法物理意义较合理。其每一步计算的初始条件是上一步计算的所得结果,即 $t+\Delta$ 时刻计算的初始条件是 t 时刻的计算结果。该方法能相对准确的表达出风轮的内特性参数随时间及空间的变化,所以 SM法更适用于计算局部流场、流动复杂的流体机械内部特性。

参考文献:

- [1] 田海娇,王铁龙,王 颖.垂直轴风力发电机发展概述[J].应用能源技术,2006 11(11): 22-27
- [2] MANABU TAKAO, HIDEKIKUMA. A straight bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row: effect of guide vane geometry on the performance[J]. Journal of Thermal Science, 2009, 18(1): 54-57
- [3] 蒋本华.导流式全风向垂直轴风力机[P].中国:200620006299.2 2007-2-21.
- [4] 何 炜,马 静,王 东,等.多参考坐标系法和滑移网格法在汽车前端进气数值模拟中的比较[J].计算机辅助工程,2007 16(3): 96-100.
- [5] SIEBER R, SCHÄFER M. Dynamic mesh schemes for fluid-structure interaction[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [6] MOUREAU V, LARTIGUE G, SOMMERER Y et al. Numerical methods for unsteady compressible multi-component reacting flows on fixed and moving grids[J]. Journal of Computational Physics, 2005 202(2): 710-736
- [7] DEGLON DA, MEYER C J. CFD modeling of stirred tanks: numerical considerations[J]. Minerals Eng, 2006 19(10): 59-68
- [8] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.

新技术、新工艺

用于西气东输管线的 RB211燃气轮机已达到 19台

据《Gas Turbine World》2009年7~8月号报道,Rolls-Royce公司被授予两个补充的合同,提供输气管线压缩机成套设备,用于中国石油公司的西气东输管线项目。

该订货的总价值超过 1.2亿美元。

中石油最新的订货包括 3套由 RB211驱动的天然气管压缩机成套设备和单一的由电动机驱动的压缩机用于西气东输一线的输气管线,以及 6台 RB211成套装置用于西气东输二线 2 450 km的西段管线。

新的合同使用于西气东输管线的 Rolls-Royce RB211燃气轮机成套装置的总数达到 19台,并且使由电动机驱动的压缩机组的总数达到 6台。

用于第一条西气东输管线的设备预定在 2010年第一季度交付,用于第二条西气东输管线的 6台 RB211成套装置计划在 2010年第二季度交付使用。

(吉桂明 摘译)

the initial concentration of methylene blue was within a range from 50 to 250 mg/L and the temperature was 30 °C. The adsorption isotherm and kinetic curves of the com core active carbon when adsorbing the methylene blue were obtained. The test results show that the Freundlich adsorption isotherm model can relatively accurately describe the adsorption phase equilibrium of methylene blue on the com core active carbon. A quasi second stage reaction model can more accurately describe the adsorption process of the com core active carbon. When a balance is established, the adsorption capacity of the active carbon ranges from 48.5 to 225 mg/g. It can be known from the foregoing that the com core active carbon can achieve a best effectiveness for removing the methylene blue pigment in the water solution and is a kind of adsorption agent with a development potential. Key words: biomass active carbon; methylene blue; adsorption; balance; kinetics

导流型垂直轴风力机内部流场计算方法的比较与研究 = Comparison and Study of the Methods for Calculating the Flow Fields inside a Flow-guided Type Vertical Shaft Wind Turbine [J]. 汉 / WANG Xin, TONG Zhengming, WANG Qikun (College of Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 455 ~ 458

On the basis of CFD (computational fluid dynamics) simulation calculations, a multiple reference coordinate system method and a sliding mesh method were used respectively to conduct the numerical simulation of a flow-guided type vertical shaft wind turbine. The scope and occasions of each method suitable for engineering applications were also given. In terms of calculation of the overall external characteristics of this type wind turbine, both calculation methods can arrive at similar conclusions regarding such performances as total torque and others. The multiple reference coordinate system method with a relatively short period is regarded as more suitable. As regards the inner characteristics of local flows, the sliding mesh method, as a nonstationary flow calculation method, can relatively accurately express the change of inner characteristics parameters depending on time and space. For the calculations in this regard, the sliding mesh method, which is comparatively reasonable in physical meaning, is more applicable. Key words: wind wheel; guide wind wheel; numerical simulation; multiple reference coordinate system; sliding mesh

核电汽轮机的特点及选型 = Features and Type Selection of Steam Turbines in Nuclear Power Plants [J]. 汉 / CHEN Juan (Guangdong Provincial Electric Power Design and Research Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510663), XU Damao (Guangdong Nuclear Power Group Co., Ltd., Shenzhen, China, Post Code: 518124) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 459 ~ 462

First described were such features of nuclear power plant turbines as low parameters, adoption of throttling regulation, high steam wetness and additional installation of MSRs (moisture separator and reheater) etc. and analyzed were the main generation causes of these features. Subsequently, the capacity matching and concepts of various capacities were expounded. The features of nuclear power plants themselves include a high manufacturing cost, a low operation cost and absence of greenhouse gas emissions. To allow full play to the merits of nuclear power plants, the reactor and steam turbines adopt a zero allowance matching. The concepts of various capacities are different from those of conventional coal-fired power plants. Finally, the type selection of steam turbines for use in nuclear power plants and comparison of full speed turbines and semi speed ones in terms of cost effectiveness and reliability were discussed in detail. Key words: nuclear power plant unit; steam turbine; type selection; full speed turbine; semi speed turbine