

# 风力机翼型气动力特性模拟精度的影响因素

余江 楼文娟

(浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058)

**【摘要】**本文以风力机翼型的气动力特性为研究对象,分别建立了多面体和六面体两种体网格模型,并分别在  $S-A$  和  $SST k-\omega$  湍流模型下进行 CFD 模拟,还与风洞试验结果进行对比。计算结果表明  $SST k-\omega$  湍流模型的计算结果相对于  $S-A$  模型与风洞试验值更为接近,六面体网格模型的计算结果相对于多面体网格模型与风洞试验值更为接近,并且所划分的网格质量越好 CFD 模拟得越准确。将等截面模型的风洞实验结果或 CFD 模拟结果应用于真实叶片的气动力特性计算是比较合理的。

**【关键词】**CFD 模拟;翼型;气动力;湍流模型;网格

**【中图分类号】**TP391.9:TK83 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1674-7461(2013)06-0039-04

随着世界能源危机的日益严重,风能作为一种清洁的可再生能源越来越受到各国政府的重视<sup>[1]</sup>。风电技术的快速发展也使得未来风力发电机风轮直径有着变大的发展趋势,这就要求能更加准确地预测风力机翼型的气动力系数。Christopher 等人<sup>[2]</sup>认为在用 CFD 模拟翼型气动性能时,二维与三维得到的结果不相同,三维模拟结果比二维的精度要高。潘小涛等人<sup>[3]</sup>认为风力机三维等截面模型比二维模型的 CFD 计算结果略精确,特别是失速后的升力系数,且三维模型模拟得到的最大升力系数比二维翼型的要大。但是不管是三维还是二维模型,其计算结果均与风洞试验值存在一定的偏差。因此本文以某风力机专用翼型为研究对象,采用不同的计算网格与湍流模型,研究不同 CFD 模型的计算差异,以确定能最准确获得翼型气动力特性的 CFD 模拟方法。

## 1 计算模型

### 1.1 网格划分

为了研究不同体网格和湍流模型对风力机翼型三维气动力特性的影响,本文针对某风力机专用翼型划分了非结构化和结构化两种体网格,并用其

进行运算和后处理分析。首先对展长为 10m 的等截面翼型三维模型添加外流域,外流域采用半径为 30m、高为 10.4m 的圆柱形空间几何体来表示。需要说明的是翼型位于外流域的正中位置(如图 1.1 所示),上下端各有 0.2m 余量以方便体网格的划分,圆柱形的流场可以在不改变体网格的前提下就不同攻角进行计算分析。然后对三维模型进行体网格的划分工作,并且分别建立了非结构化多面体网格和结构化六面体网格两种模型用以比较(如图 1.2 所示),划分网格的具体参数设定已列于表 1.1 中。最终多面体总网格数约 273 万,六面体总网格数约 257 万。模型采用的翼型弦长设定为 1,且弦长方向平行于 0 度攻角方向。

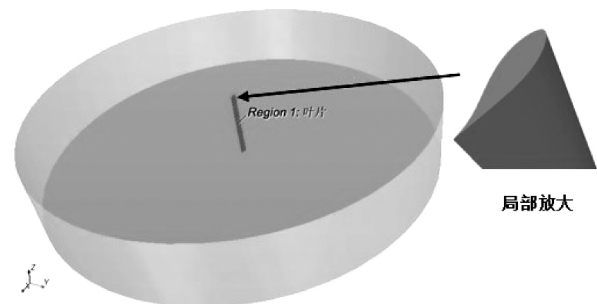


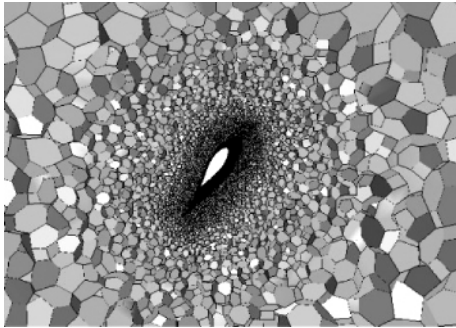
图 1.1 三维模型示意图

**【基金项目】**高等学校博士点学科专项科研基金(20110101110046)

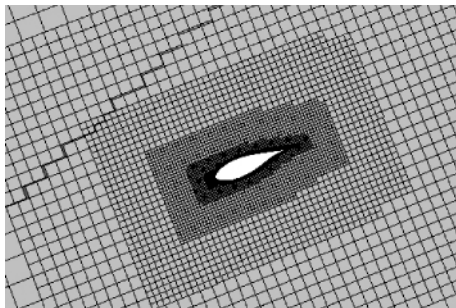
**【作者简介】**余江(1991-),男,博士研究生。主要从事结构风工程研究。

表 1.1 网格划分的参数设置

参数 类型	基本尺寸	边界层	叶片		外流域	
			目标尺寸	最小尺寸	目标尺寸	最小尺寸
多面体	0.5m	总厚 0.0065m	0.015m	0.005m	0.5m	1.25m
六面体		共 6 层 递增比例 1:1.6	0.015m	0.005m	0.25m	1.0m



(a) 非结构化多面体网格



(b) 结构化六面体网格

图 1.2 体网格划分示意图

## 1.2 湍流模型

目前,工程计算中常用的基于 RANS 的湍流模型有基于 Boussinesq 涡粘性假设的零方程模式、一方程模式、两方程模式。由于一方程模型中的 S-A 模型相对于其它湍流模型而言,不仅计算量小、稳定性好,而且不要求设置壁面函数,所以其计算误差对于网格的划分质量不太敏感,对于翼型问题的计算精度较高<sup>[4]</sup>,参照文献<sup>[3]</sup>中采用的 S-A 模型进行分析。但是据资料<sup>[5]</sup>显示,现在多数航空航天与机械汽车产业中也常用 k- $\omega$  湍流模型对飞机机翼或是赛车零部件进行 CFD 分析。于是在保证其他条件相同的情况下,本文也同时采用两方程的 SST k- $\omega$  湍流模型与 S-A 模型进行对比。

## 1.3 边界条件

本文选用的翼型为某公司风力机专用翼型,并已完成  $310^6$  雷诺数条件下的全攻角风洞试验,对应马赫数为 0.126 1。风速由马赫数确定,攻角定义如图 1.3 所示。本文 CFD 模拟选用理想可压缩气体,叶片边界条件为 wall,流场周边边界条件为 free stream,外流域的上下圆形表面边界条件为 symmetry plane,攻角范围为  $0^\circ$  至  $30^\circ$ ,间隔  $2.5^\circ$ ,且均采用分离求解器求解。

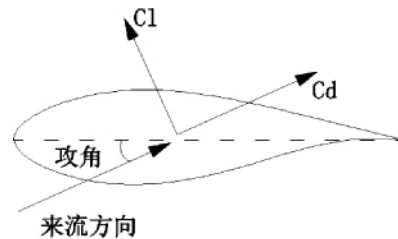


图 1.3 叶片攻角示意图

## 2 结果分析

### 2.1 湍流模型不同的影响

与风洞试验采用的三维等截面模型相似,为了方便得到升阻力系数且与风洞试验结果进行对比,本节针对 1.1 节中所提到的以非结构化多面体网格来划分的三维模型,分别就 S-A 湍流模型和 SST k- $\omega$  湍流模型做 CFD 模拟。收敛标准为所有的残差曲线达到水平,由于 S-A 模型计算结果中的残差值在大于  $15^\circ$  的攻角下无法平稳,故只对  $0^\circ$  至  $20^\circ$  攻角下的 CFD 计算结果进行比较。对于本文采用的等截面三维 CFD 模型,升阻力系数可通过在 reports 中设置参考面积为  $10\text{m}^2$  并定义升、阻力系数 Cl、Cd 相关参数后直接获得,结果如图 2.1 所示。可以看出在  $0^\circ$  至  $10^\circ$  攻角下两种湍流模型的升力系数模拟结果非常接近,且与风洞试验结果相差不多。但是在大于  $10^\circ$  的攻角下 S-A 模型的模拟结

果明显偏离了试验值,相反的  $k-\omega$  模型的模拟结果则相对较好。因此可以认为针对此类风力机翼型,更适合采用 SST  $k-\omega$  湍流模型对其进行 CFD 模拟。

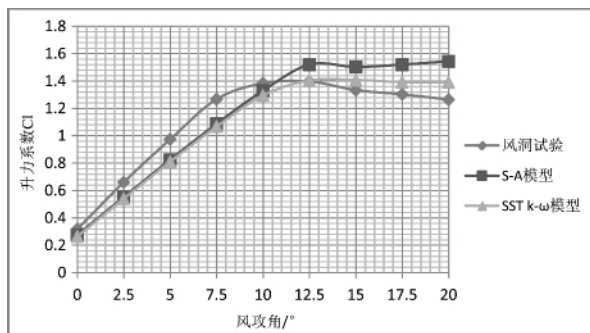


图 2.1 不同湍流模型下的叶片升力系数

## 2.2 体网格划分形式的影响

体网格划分得合理与否往往决定了 CFD 模拟结果的准确性,本节将着重考虑体网格的划分方式对风力机翼型气动力特性 CFD 模拟的影响。

### 2.2.1 多面体网格与六面体网格的比较

为了研究不同的体网格形式对 CFD 模拟结果的影响,本节分别针对 1.1 节中所提及的用非结构化多面体网格和结构化六面体网格划分出来的两种体网格模型进行模拟分析,湍流模型的选取上采用 2.1 节中效果较好的  $k-\omega$  模型。计算结果如图 2.2 所示,可以看出在  $0^\circ$  至  $12.5^\circ$  攻角下,两种划分网格方式的计算结果十分接近且与试验结果比较吻合。但是在  $15^\circ$  至  $30^\circ$  攻角下,以多面体网格划分的模型计算结果(升力系数  $C_l$ )呈现出先平稳后急剧下降的曲线,不论是数值还是曲线变化趋势都与实验结果差异较大;而以六面体网格划分的模型计算结果来看,则与试验相似的有升力系数在超过某临界攻角后随其增加而递减的趋势。不过在  $15^\circ$  攻角下升力系数突然下降,即明显的失速状态,这是在风洞试验结果中没有体现出来的。为此对  $12.5^\circ$  至  $17.5^\circ$  之间的攻角做加密处理,以更好的反映出翼型气动攻角增加到一定程度时,翼型所产生的升力突然减小的失速状态,图 2.2 中的局部放大就体现了这种状态。而升力系数骤降后能较快回升,并且随攻角增加只有小幅度下降的趋势,这说明此翼型具有良好的失速性能<sup>[6]</sup>。

### 2.2.2 网格质量好坏的影响

参照文献<sup>[3]</sup>对同一种风力机翼型做 CFD 模拟,

且物理模型的参数设定均相同。但是发现由于所生成体网格质量的好坏存在差异,同样采用六面体网格对等截面三维叶片模型进行划分的情况下,模拟结果却有着较大的区别(如图 2.3 所示)。文献<sup>[3]</sup>中的图 2 显示划分的六面体网格在叶尖等位置较狭长,而本文通过合理设置边界层网格和局部位置加密的方式将体网格划分得比较均匀(接近正方体)。因此在网格总数偏少的情况下,本文的模拟结果相较于文献<sup>[3]</sup>仍更为准确。具体来看在  $0^\circ$  至  $15^\circ$  攻角下,本文的升力系数模拟结果更接近试验值,且在攻角大于  $12.5^\circ$  之后与风洞试验结果一致有明显的下降趋势。而就阻力系数而言,本文的模拟结果已经与风洞试验结果基本吻合。这就说明划分的六面体网格若可以尽可能避免狭长的长方体形式,而多采用正方体或者近正方体的网格形式,就能在一定程度上提高 CFD 模拟计算结果的准确性。

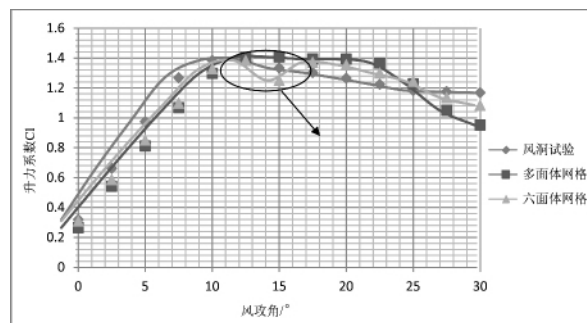


图 2.2 不同网格划分方式下的叶片升力系数

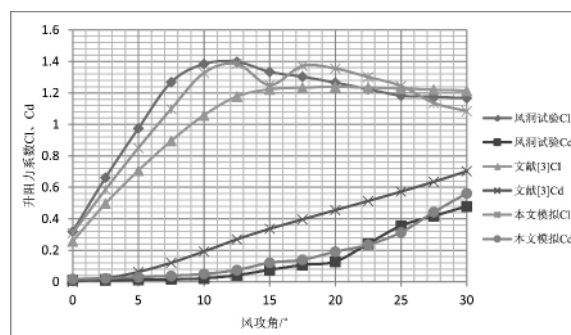
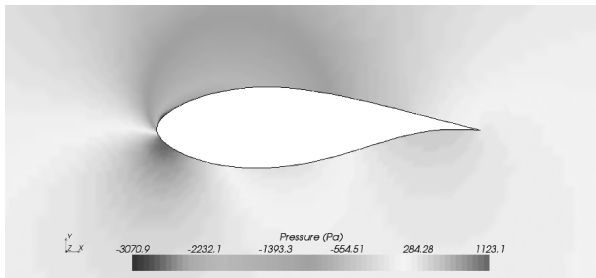


图 2.3 叶片的气动力特性

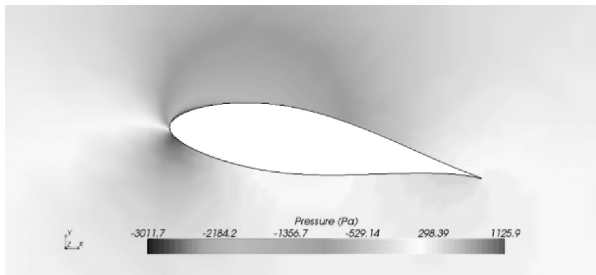
## 2.3 叶片整体模型与等截面模型比较

随着计算机技术的发展,CFD 数值风洞技术在翼型空气动力特性预测中起着越来越重要的作用。但是目前风力机气动特性的预测,多还是通过对真实叶片各特征段的等截面模型进行风洞试

验,进而叠加合成来完成。不过真实风力机的叶片不仅仅是变截面的,还存在扭角。风洞试验又或者是等截面模型 CFD 模拟得到的气动力参数能否应用于真实三维叶片,以及对实际工程的影响还有待进一步研究。本节对某公司提供的风力机专用真实整体翼型做 CFD 模拟,使用六面体网格进行划分,物理模型设定与 1.1 节一致。方便起见,就真实叶片根部位置按图 1.3 规定将攻角定义为  $0^\circ$ ,取与 1.1 节中等截面翼型一致的截断面(距叶片根部 30.5m 处)进行对比。此时需要将等截面模型风向角调整为  $9.347^\circ$ ,比较两者的风压分布(如图 2.4 所示)可以看出叶片整体模型与等截面模型的 CFD 模拟结果十分相近,所以将等截面模型的风洞实验结果应用于真实叶片的空气动力特性计算是比较合理的。



(a) 等截面模型

(b) 真实整体叶片模型  
图 2.4 风压分布图

### 3 结论

由于风力机翼型的几何外形复杂,所以目前工程实践中一般通过等截面三维模型进行风洞试验,或者通过 CFD 模型计算模拟来得到其气动力系数。然而风洞试验结果与 CFD 模拟结果往往存在着一定的差异,并且以上述方法获得的气动力系数是否

能适用于真实叶片也有待研究。本文分别建立了非结构化多面体和结构化六面体两种体网格模型,并分别在 S-A 和 SST  $k-\omega$  湍流模型下对风力机翼型的气动力特性进行 CFD 模拟,还与风洞试验结果进行对比,得到的主要结论如下:

(1) SST  $k-\omega$  湍流模型的计算结果相对于 S-A 模型与风洞试验值更为接近。虽然在  $0^\circ$  至  $10^\circ$  攻角下两种湍流模型的计算结果基本一致,但是在失速后 S-A 模型的模拟结果明显偏离了风洞实验值;

(2) 结构化六面体网格模型的计算结果相对于非结构化多面体网格模型与风洞试验值更为接近。同样的在  $0^\circ$  至  $12.5^\circ$  攻角下两者的计算结果也基本一致,但是采用结构化六面体网格能更好地模拟失速之后翼型升力系数的变化趋势,且数值也与风洞试验值更为相近;

(3) 所划分的结构化六面体网格若可以尽可能避免狭长的长方体形式,而多采用正方体形式,就能在一定程度上提高 CFD 模拟计算结果的准确性;

(4) 对比相同翼型截面的压力分布图,可以看出等截面三维模型与真实整体叶片模型的 CFD 模拟结果十分接近。所以综合上述结论,将等截面模型的风洞实验结果或等截面三维模型的 CFD 模拟结果应用于真实叶片的空气动力特性计算是比较合理的。

### 参考文献

- [1] 潘艺,周鹏展,王进. 风力发电机叶片技术发展概述[J]. 湖南工业大学学报,2007,21(3):48-51.
- [2] Stone C P, Tebo S M, Duque E P N. Computational fluid dynamics of flat-back airfoils for wind turbine applications [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, (Reno, NV), AIAA-2006-0194. 2006.
- [3] 潘小涛,黄铭枫,楼文娟. 风力机翼型三维气动力特性 CFD 模拟[OL]. [2013-09-11]. 中国科技论文在线.
- [4] 韩占忠,王敬,韩小平. FLUENT 流体工程仿真设计实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:98-121.
- [5] 尹耀安. 大型风力机叶片设计与 CFD 分析[D]. 华中科技大学,2008.
- [6] 叶枝全,黄继雄,陈严,等. 风力机新系列翼型气动性能研究[J]. 太阳能学报,2002,23(2):211-216.

(下转第 47 页)

[14] 夏海兵 熊城. Tekla BIM 技术在上海城建 PC 建筑深化设计

中的应用[J]. 土木工程信息技术. 2012(4):96-103.

## How to Achieve Efficient Architecture Cooperative Design in the BIM Environment

Zhang Dehai<sup>1</sup>, Han Jinyu<sup>1</sup>, Zhao Hainan<sup>2</sup>, Yao Yunfeng<sup>2</sup>

- (1. BIM Engineering Center of Shenyang Construction University, Shen Yang 110168, China;
2. Architectural design and Research Institute of Shenyang Construction University, Shen Yang 110168, China;
3. Shenyang Three Three Brand Valve Manufacturing Co., Ltd., Shen Yang 110168, China)

**Abstract:** Realization high efficiency method of collaborative design research under the environment of BIM building can improve the efficiency and quality of architectural design. It can avoid the information inconsistency and conflict between different professional and different design view which often appear in the two-dimensional design environment of building. Using REVIT and Navisworks software research on a collaborative technology under the BIM design environment which include architecture. The BIM execution plan book binding, structure and mechanical and other professional in, taking Shenyang Construction University Sino German energy-saving demonstration project as an example. Through taking the standard format RVT file of the Revit model into the NavisWorks software for collision detection, to realize the collaborative design in BIM environment majors. Compared with the two dimensional cooperative design mode, collaborative design in BIM environment enhances information transmission and sharing, realize the different profession and the upstream and downstream of enterprises can work in the same mode. It can reduce or even avoid the design change and engineering rework what because of the design and construction personnel lack of synergy in work. All this can achieve high efficiency and high quality of architectural design, effectively reduce the construction cost.

**Key Words:** BIM; Cooperative Design; Using REVIT; BIM Execution Plan

(上接第 42 页)

## Factors of Simulation Accuracy for Wind Turbine Airfoil Aerodynamic Characteristics

Yu Jiang, Lou Wenjuan

(College of Civil Engineering & Architecture Zhejiang University Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** In this paper, we respectively established the polyhedral and hexahedral volume mesh models and used CFD method to calculate the aerodynamic characteristics of a wind turbine airfoil under the S-A and SST k- $\omega$  turbulence model. The calculated result was compared with wind tunnel test data. It was discovered that the calculation results under SST k- $\omega$  turbulence model were more close to the wind tunnel test than S-A turbulence model. And the results showed that choosing better quality hexahedral mesh could get more accurate simulated result than polyhedral mesh. Wind tunnel test or CFD method could reasonably be applied to the aerodynamic characteristics calculation for a real wind turbine airfoil.

**Key Words:** CFD Simulation; Airfoil; Aerodynamic Force; Turbulence Model; Mesh