

# Aerodynamic Characteristics Study on Wind Turbine Airfoil Based on Weibull Distribution Function

Fengyan Yi, Liwei Zhang, Xiaofei Ai, Yonghui Liu

Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong  
Email: liu@mail.sdu.edu.cn

Received: Feb. 19<sup>th</sup>, 2016; accepted: Mar. 3<sup>rd</sup>, 2016; published: Mar. 9<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The aerodynamic characteristics of wind turbine airfoil directly influence its efficiency. In this paper, the CFD method was used to study the aerodynamic characteristics of NACA4415 airfoil. The Weibull function method of two-parameter was used to obtain the wind speed probability distribution; the numerical simulation method was established based on Weibull distribution parameters of the airfoil dynamic characteristic; and the airfoil aerodynamic drag, lift and the lift coefficient and drag coefficient were obtained on the 12 degree of attack angle. Then, a method for aerodynamic characteristics of airfoil on the actual wind speed was established based on the Weibull distribution function.

## Keywords

Wind Turbine, Airfoil, Weibull Distribution, Spalart-Allmaras Model

---

# 基于Weibull分布参数的风机翼型气动特性研究

衣丰艳, 张立伟, 艾晓飞, 刘永辉

山东交通学院, 山东 济南  
Email: liu@mail.sdu.edu.cn

收稿日期: 2016年2月19日; 录用日期: 2016年3月3日; 发布日期: 2016年3月9日

## 摘要

风力发电机翼型的气动特性直接影响其效率。本文采用CFD方法对NACA4415翼型的气动特性进行了研究。针对某地区的风速分布特性,采用双参数Weibull函数的方法获得其风速分布概率,采用CFD技术建立了基于Weibull分布参数下翼型的气动特性的数值模拟计算方法,在来流攻角为 $12^\circ$ 的情况下,获得了翼型的气动阻力、升力及阻力升力系数随Weibull分布参数的变化情况,建立了一种基于Weibull参数分布的实际风速情况下翼型气动特性的方法。

## 关键词

风力发电机, 翼型, Weibull分布, Spalart-Allmaras模型

## 1. 引言

风电已成为发展最快的新能源产业。随着我国新增风电项目建设,风力发电装机规模持续扩张,风电产业迎来历史性发展机遇。风机叶片的气动性能是大型风力发电机最关键的技术之一。目前,采用CFD方法对风机叶片周围的流体建立相应的守恒方程,求解得到流体微元的流动特性,是研究风力发电机气动特性的主要手段。

国内学者关于风机翼型的研究主要集中在翼型绕流、边界层的非定常分离特性、翼型的尾迹流动以及尾迹涡系的结构等方面。如范忠瑶[1]等采用商用软件FINETM/Turbo对DF90风轮进行三维定常数值研究,讨论了叶尖速比和来流风速对叶片载荷的影响;赵伟国[2]等人选用 $\kappa$ - $\epsilon$ 、 $\kappa$ - $\omega$ 、RSM和LES四种湍流模型对风力机专用S827翼型进行了数值模拟;杨从新等[3]利用Fluent软件对风力发电机专用翼型S816的模型进行了数值模拟;曲立群[4]等利用CFD软件对NACA4415翼型的失速特性进行了二维数值研究,掌握了NACA4415翼型的失速特性。上述研究多集中在稳态风速下的研究,对于在实际风速分布下风机翼型的气动特性研究较少。对于实际风速分布,目前采用较多的模型为Weibull分布模型[5],该模型形式简单并且能够较好的拟合实际情况的概率模型,精确度很高。因此,本文研究拟建立基于Weibull风速分布的水平轴风机叶轮翼型的计算模型,从而获得基于Weibull分布参数的风机翼型的气动特性。

## 2. 模型的建立

### 2.1. 计算域及网格划分

本文研究所采用的风机翼型为NACA4415翼型,该翼型具有较好的升力特性。翼型的弦长为1m。整个计算域采用C型网格进行处理。为了更好的获得翼型的捕风特性,近壁面采用加密网格处理方法。为了减少数值耗散,整个计算区域的网格均采用结构化网格处理,网格总数为50,000,网格模型如图1所示。

### 2.2. 数学模型

数值模拟计算采用Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型[6][7]。该方程为一方程模型,特别适用于空气流动。Spalart-Allmaras模型的求解变量是 $\tilde{\nu}$ ,表征出了近壁(粘性影响)区域以外的湍流运动粘性系数。 $\tilde{\nu}$ 的输运方程为:

$$\rho \frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = G_{\tilde{\nu}} + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2}\rho \left( \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right) \right] - Y_{\tilde{\nu}} \quad (1)$$

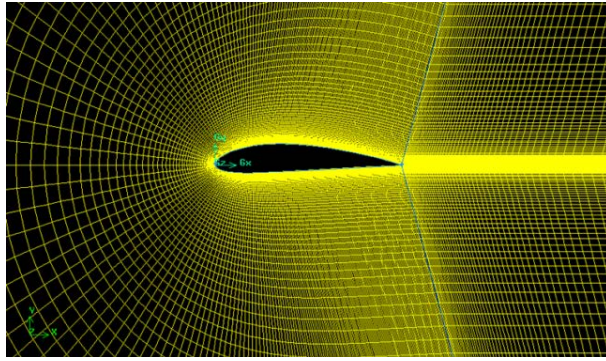


Figure 1. Computational region mesh

图 1. 计算域网格

其中,  $G_v$  是湍流粘性产生项;  $Y_v$  是由于壁面阻挡与粘性阻尼引起的湍流粘性的减少;  $\sigma_v$  和  $C_{b2}$  是常数;  $\nu$  是分子运动粘性系数。

模型假设: 根据经典理论, 在来流  $Ma < 0.3$  的情况下, 可以不考虑空气的压缩性。因此, 本文计算假设空气为不可以压缩流体, 密度保持不变; 忽略模型长度尺寸的变化; 假设流动为各向同性湍流。

数值方法: 采用二维稳态分离隐式解法, 空间离散格式为二阶迎风格式, 压力 - 速度耦合采用 SIMPLE 算法。

### 2.3. 边界条件

翼型表面边界采用无滑移壁面条件, 边界条件采用压力远场条件(pressure-far-field), 来流马赫数根据 Weibull 风速分布来确定。根据文献资料[4], 翼型 NACA4415 的失速大约在攻角为  $14^\circ$ , 为获得较好的升力系数及避免失速现象, 本文计算选取来流速度攻角为  $12^\circ$ 。

## 3. Weibull 风速分布参数

双参数 Weibull 分布风速概率函数为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2)$$

式中,  $f(v)$  为用百分比表示的风速平率分布特点;  $v$  代表某个时段的平均风速;  $c$  和  $k$  分别代表韦伯分布的倍数参数和形状参数。

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (4)$$

本文研究选取某地区一年中每小时一次风速测量数据[8], 获得不同风速的分布情况, 根据公式(2)~(4), 获得该地区的 Weibull 风速分布如表 1 所示。

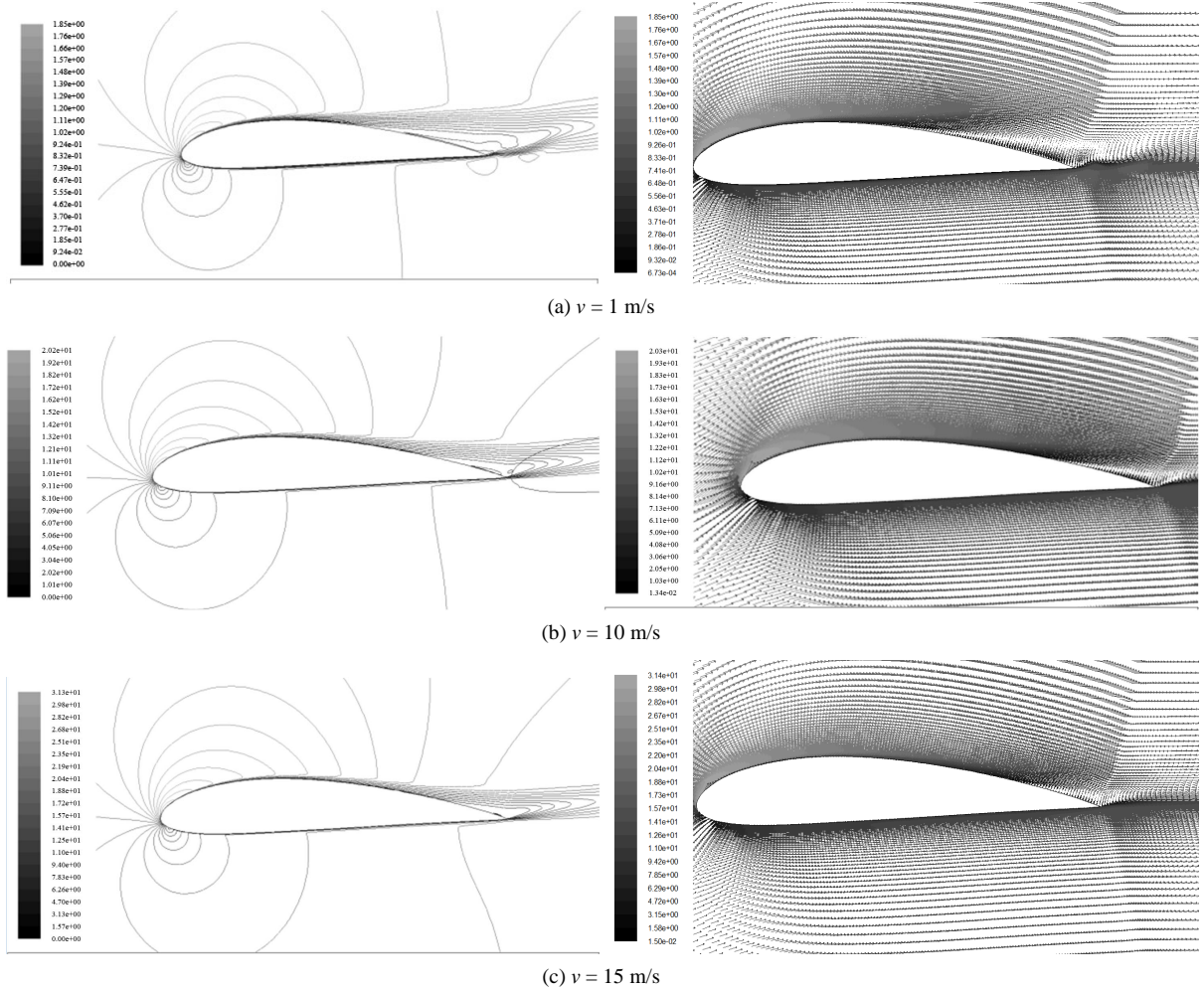
## 4. 计算结果分析

### 4.1. 流场分析

图 2 表示了翼型在采用  $12^\circ$  的攻角, 不同来流速度下的速度等值线和矢量分布图, 从图中速度等值线

**Table 1.** Wind speed distribution of a certain area  
**表 1.** 某地区的风速概率分布

$v/m\cdot s^{-1}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
小时数/h	842	1031	1488	1328	1153	876	723	515	383	171	85	72	38	28	15	12
$f(v)/\%$	0.0	16.9	18.02	16.07	13.06	9.95	7.22	5.03	3.39	2.21	1.40	0.87	0.52	0.31	0.18	0.10



**Figure 2.** Velocity contour and vector with different wind speed  
**图 2.** 不同来流速度下的速度等值线和矢量分布图

分布可以看出，随着来流速度的增大，翼型前缘附近的等速线环基本没有发生变化，翼型尾部的等速线环区域逐渐减少。从速度矢量图可以看出，随着速度的增大，翼型尾部区域流场气流分离逐渐靠前，但没有发展到叶背，叶背的边界层未受到破坏，没有出现涡流区，即上表面的气流基本没有脱离表面形成分离涡，根据空气动力学的失速理论分析，翼型在  $12^\circ$  攻角的来流情况下没有产生失速现象。

#### 4.2. 压力场分析

图 3 给出了在来流速度为  $15\text{ m/s}$  的情况下，翼型上下表面的静压分布图。横坐标代表翼型的前缘到后缘的位置。由图中可以看出，翼型的上表面静压值随着翼型的位置逐渐增大，下表面的静压值缓慢变低。上表面静压值没有产生突变，说明没有失速现象产生。由于气流在翼型上下不同曲率表面的绕流

动，使上表面气流速度大于下表面速度，因而使翼型的下表面静压值要大于上表面的静压值，翼型受到指向上表面的合力，产生升力。

### 4.3. 基于 Weibull 风速分布的气动特性分析

针对表 1 中某地区的风速分布，对区间中的每一种风速进行数值模拟计算，获得各种风速分布下的翼型总的阻力  $FD$  和阻力系数  $cd$ ，总升力  $FL$  和升力系数  $cl$ 。计算结果如表 2 所示。

由表 2 中的数据可以看出，翼型的阻力和升力值随着来流速度的增大而逐渐增大，升力的范围为 0~196.05 n，阻力范围为 0~37.27 n，升力要大于阻力，根据空气动力学理论，升力与阻力与速度的二次方程成正比。图 4 是翼型的阻力和升力系数曲线，在来流攻角为  $12^\circ$  的情况下，阻力系数和升力系数基本保

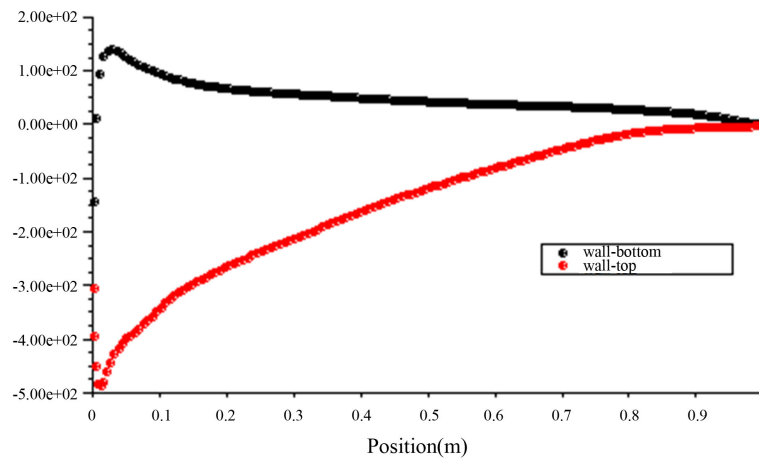


Figure 3. Pressure distribution of airfoil surface

图 3. 翼型表面静压分布图

Table 2. Aerodynamic characteristics of NACA4415 airfoil based on Weibull distribution

表 2. 基于 Weibull 分布的 NACA4415 翼型气动特性

$v/m\cdot s^{-1}$	0	1	2	3	4	5	6	7
时数/h	842	1031	1488	1328	1153	876	723	515
$f(v)$	0.00%	16.94%	18.02%	16.07%	13.06%	9.95%	7.22%	5.03%
$Ma$	0.000	0.003	0.006	0.009	0.012	0.015	0.018	0.021
$FD/n$	0.000	0.112	0.524	1.228	2.233	3.583	5.280	7.302
$cd$	0.000	0.191	0.223	0.232	0.237	0.244	0.249	0.253
$FL/n$	0.000	0.703	2.980	6.860	12.358	19.638	28.628	39.300
$cl$	0.000	1.195	1.266	1.296	1.313	1.335	1.352	1.363
$v/m\cdot s^{-1}$	8	9	10	11	12	13	14	15
时数/h	383	171	85	72	38	28	15	12
$f(v)$	3.39%	2.21%	1.40%	0.87%	0.52%	0.31%	0.18%	0.10%
$Ma$	0.024	0.026	0.029	0.032	0.035	0.038	0.041	0.044
$FD/n$	9.663	12.334	15.278	18.490	23.611	27.540	32.470	37.270
$cd$	0.257	0.259	0.260	0.260	0.279	0.269	0.273	0.272
$FL/n$	51.718	65.811	81.510	98.697	123.373	145.080	170.450	196.050
$cl$	1.374	1.381	1.385	1.386	1.406	1.418	1.430	1.430

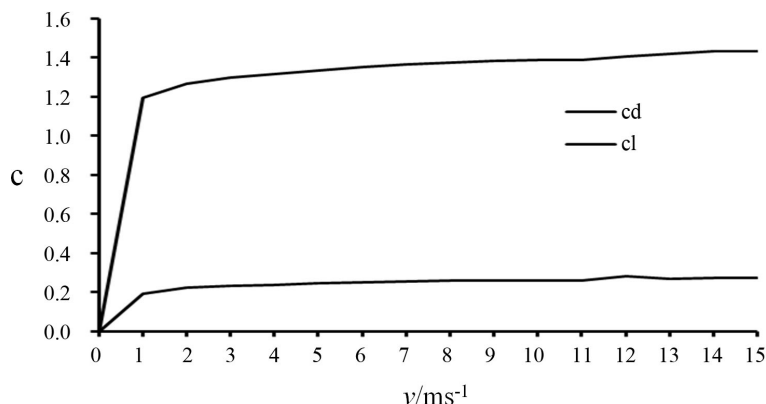


Figure 4. Drag and lift coefficient of NACA4415 airfoil

图 4. NACA4415 翼型的阻力和升力系数

持不变，这与翼型的气动特性理论是相符合的，即阻力和升力系数主要与来流的攻角有关，在攻角不变的情况下，保持不变。

表 2 给出了 NACA4415 翼型的升力、阻力、升力系数和阻力系数在 Weibull 风速参数情况下的分布情况。考虑升力  $FL$  随着来流速度的变化及满足 Weibull 分布规律，该地区实际风速情况下，翼型 NACA4415 的平均升力和阻力为：

$$\overline{FL} = \sum_{i=0}^{15} f(i) * FLi = 16.17n \quad (5)$$

$$\overline{FD} = \sum_{i=0}^{15} f(i) * FDi = 2.99n \quad (6)$$

## 5. 结论

本文采用数值模拟计算的方法对 NACA4415 翼型的气动特性进行的分析。根据某地区的平均风速分布，获得了两参数的 Weibull 分布概率函数。采用 CFD 方法对基于 Weibull 风速分布的翼型的气动特性进行了研究，获得的主要结论如下：

- 1) 建立了基于 Weibull 分布参数的风机翼型气动特性的数值模拟计算方法；
- 2) 通过 CFD 数值模拟计算给出了 NACA4415 翼型在 12° 攻角下，基于 Weibull 分布参数的气动特性，获得了翼型的升力、阻力、升力系数和阻力系数的随韦伯概率分布情况；
- 3) 根据 Weibull 分布参数及翼型的气动特性，建立了一种分析实际风速分布情况下翼型气动特性的方法。

## 基金项目

济南市科技计划资助项目(201303084)。

## 参考文献 (References)

- [1] 范忠瑶, 康顺, 赵萍. 2.5 兆瓦风力机气动性能数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(2): 287-291.
- [2] 赵伟国, 李仁年, 李德顺, 杨从新, 张玉良, 李晓鹏. 风力机专用翼型数值模拟中湍流模型的选择[J]. 西华大学学报, 2007, 26(6): 61-65.
- [3] 杨从新, 李春辉, 巫发明. 水平轴风力机专用翼型的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 17(8): 4994-4997.
- [4] 曲立群, 汪建文, 朱德臣, 吴克启, 高志鹰. NACA4415 翼型失速特性的二维数值模拟[J]. 内蒙古大学学报, 2009, 28(1): 48-51.
- [5] 李军, 胡非等. 风速的 Weibull 分布参数[J]. 太阳能学报, 2012, 33(10): 1667-1671.

- [6] 王林, 刘雄伟. 风力发电机叶片翼型气动性能分析与数值模拟[J]. 太阳能学报, 2012, 33(5): 711-716.
- [7] 铁庚. 水平轴风力机叶片的气动特性研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.
- [8] 杨刚, 杜永贤, 陈鸣. 基于风频 Weibull 分布和风机功率特性求解风机发电量[J]. 电力学报, 2008, 23(4): 276-278.