

文章编号: 1672-3031(2017)06-0425-05

## 流动空气与风力发电叶片作用特性研究

Muhammad Aqeel<sup>1</sup>, 高延伟<sup>2</sup>, 李永强<sup>3</sup>, 刘青<sup>1</sup>, 张照煌<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 2. 中国建筑出版社, 北京 100037;

3. 山西省忻州市滹沱河水利管理局, 山西 忻州 034000)

**摘要:** 流动空气与风力发电叶片作用特性是风力发电叶片设计的基础, 是风力发电领域研究的难题。长期以来以动量-叶素理论为基础, 以流过风力发电叶片空气流场为对象, 相继建立了叶片优化设计的 Schmitz 方法、Glauert 方法、Wilson 方法和 CFD 方法等。但流经叶片过程中的空气对叶片作用的特性仍有许多问题需要亟待解决和深入研究。为此, 论文应用伯努利方程推导了环状流动空气流过风力发电风轮时传递给风轮的能量计算解析式; 应用动量矩原理推导了环状流动空气流过风力发电风轮时作用在风轮上的力矩解析式; 提出了流过风轮的环状空气向风轮释放功率的解析式, 从而发现风轮正常工作时, 流过风轮的环状空气向风轮释放的功率等于环状空气流量、空气密度、环缘处风轮的牵连运动速度及环缘处流出空气的绝对运动速度在此点牵连运动速度方向上投影的连乘积。为叶片截面轮廓曲线后边缘特征参数设置提供了参考。

**关键词:** 风力发电叶片; 伯努利方程; 动量矩原理

**中图分类号:** TK83

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.06.003

### 1 研究背景

风力发电叶片是捕获风能并将之转化为机械能的核心部件, 其气动外形对实现这一功能具有至关重要的作用, 因此, 一直以来, 国内外学者对其气动外形设计理论的研究都非常重视。文献[1]根据风力发电叶片优化设计目标的不同将风力发电叶片优化设计分为以风能利用系数( $C_p$ )最大或者年能量输出(Annual Energy Production, AEP)最大为目标的优化设计; 以能量成本(Cost of Energy, COE, 风力机总成本  $C$  与年能量输出 AEP 的比值)最小为目标及多学科、多目标的优化设计。风力发电叶片优化目标确定后, 一般采用动量-叶素理论<sup>[2]</sup>、Schmitz 方法<sup>[3]</sup>、Glauert 方法<sup>[4]</sup>或 Wilson 方法<sup>[5]</sup>等对之实施优化设计, 而后辅之以叶片外形修正以实现设计要求<sup>[6]</sup>。随着计算机技术的发展, 以 Navier-Stokes(N-S)方程为基础的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD)法等应用于风力发电叶片优化已逐渐受到人们的重视<sup>[7-8]</sup>。研究发现, 对风力发电叶片进行优化设计, 无论建立什么模型、采用哪种优化方法, 一般步骤是: 首先选定叶片总体参数(如: 额定功率  $P$ , 叶片数  $B$ , 风能利用系数  $C_p$ , 叶尖速比  $\lambda$ , 设计风速  $v_0$ , 机电效率  $\eta$ , 空气密度  $\rho$ , 风轮直径  $D$ , 风轮转速  $n$  等); 然后将叶片分段, 设定叶素, 选择对应翼型, 即确定翼型沿叶片展向的布置; 最后, 根据优化目标, 选定的优化方法进行优化设计<sup>[9]</sup>。优化设计变量一般是①弦长、扭角(或桨矩角<sup>[10]</sup>); ②弦长、扭角、桨矩角<sup>[11]</sup>; ③弦长、扭角、叶尖线速度和叶尖速比<sup>[12]</sup>; ④外形参数、翼型特征、风轮转速和叶尖桨矩角<sup>[13]</sup>; ⑤更多<sup>[14]</sup>等。从中可看出对风力发电叶片进行优化设计, 一般不包括叶片截面轮廓曲线特征参数的优化, 因为叶片截面轮廓曲线是通过选择翼型确定的, 国外常用风力发电叶片专用翼型有<sup>[15-16]</sup>: NREL 的 S 系列翼型、DU 系列翼型、RisØ 系列翼型和 FFA 系列翼型等。因商业保密等原因, 国内叶片厂商很难得到这些翼型的相关数据, 一般靠测绘仿制。因此, 对流动空气与风力发电

收稿日期: 2016-05-26

作者简介: Muhammad Aqeel(1985-), 男, 巴基斯坦, 博士生, 主要从事可再生能源高效利用理论与技术等方面的研究。

E-mail: maqeel1@qq.com

叶片作用理论进行研究就显得非常重要。文中通过对流经风力发电风轮空气建模,应用伯努利方程推导出环状流动空气流过风力发电风轮时传递给风轮的能量计算解析式;应用动量矩原理推导出环状流动空气流过风力发电风轮时作用于风轮上的力矩解析式;通过对导出的解析式的分析,提出了流过风轮的环状空气向风轮释放的功率的解析式,从而发现风轮正常工作时,流过风轮的环状空气向风轮释放的功率等于环状空气流量、空气密度、环缘处风轮的牵连运动速度及环缘处流出空气的绝对运动速度在此点牵连运动速度方向上的投影的连乘积。从而为叶片截面轮廓曲线后缘特征参数设置提供了依据。

## 2 风轮的能量表达式

以叶片半径为 $r$ 、在半径方向长为 $dr$ 的圆环状流体为研究对象(见图1所示)。设空气流入叶片的初始绝对运动速度、初始相对运动速度、初始牵连运动速度、初始压力能头和空气相对于零位能面的高度分别为 $\vec{v}_1$ 、 $\vec{w}_1$ 、 $\vec{u}_1$ 、 $p_1$ 和 $z_1$ ,相应的,空气流出叶片的初始绝对运动速度、初始相对运动速度、初始牵连运动速度初始压力能头、和空气相对于零位能面的高度分别为 $\vec{v}_2$ 、 $\vec{w}_2$ 、 $\vec{u}_2$ 、 $p_2$ 和 $z_2$ ,此过程中的能量损失为 $\Sigma h$ 。空气刚流入叶片间的能量 $E_1$ 为,

$$E_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \quad (1)$$

空气刚从叶片间流出的能量 $E_2$ 为,

$$E_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2)$$

考虑此过程中的能量损失 $\Sigma h$ ,则圆环状流体输送给风轮的能量 $E$ 为:

$$E = E_1 - E_2 - \Sigma h \quad (3)$$

将式(1)和(2)代入式(3)并整理,得:

$$E = (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} - \Sigma h \quad (4)$$

在叶片间流动的空气,遵循伯努力方程,即:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h \quad (5)$$

现在假设给风轮一个大小与其转速相等、旋转方向与其相反的转速,则相当于在刚流入叶片间的单位重量的流体上加了一负能量 $\frac{u_1^2}{2g}$ ,在刚要流出叶片间的单位重量的流体上加了一负能量 $\frac{u_2^2}{2g}$ ,则式(5)的能量转换还可写为:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} + \Sigma h \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)并整理,得

$$E = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} \quad (7)$$

考虑环域内有: $u_1 = u_2$ ,所以式(7)可表示为:

$$E = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} \quad (8)$$

由图中 $\Delta ABC$ 得, $w_1^2 = u_1^2 + v_1^2 = u_2^2 + v_1^2$ 代入式(8)并整理,得:

$$E = \frac{w_2^2 - u_2^2 - v_2^2}{2g} \quad (9)$$

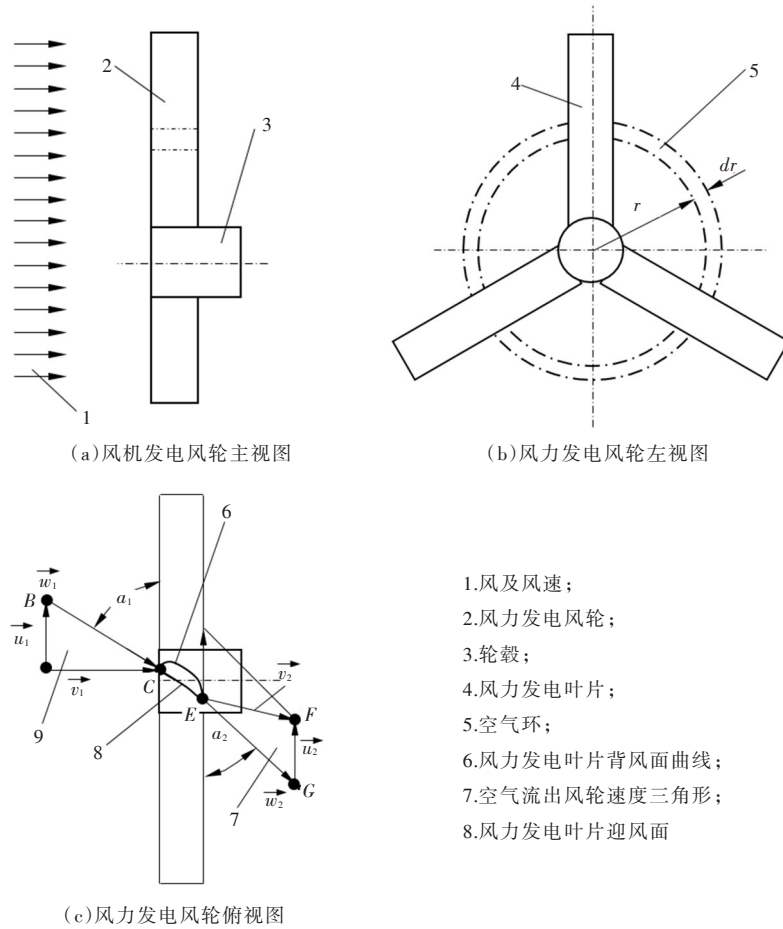


图1 流动空气与风力发电叶片相互作用分析示意图

此即所考察的环状流动空气流过风力发电风轮时传递给风轮的能量。由此可看出，环状流动空气流过风力发电风轮时传递给风轮的能量只与此环状流动空气刚流出风轮的状态有关，即，只与此环状流动空气刚流出风轮的绝对运动速度、牵连运动速度和相对运动速度有关，且随空气相对于风力发电叶片运动的运动速度的平方的增加而增加，随该点的牵连运动速度平方和相对运动速度平方的增加而减小。

### 3 风轮的力矩表达式

流动空气流过风轮过程中，其与风力发电叶片的相互作用满足动量矩定理。设考察环域内空气刚流入风轮时对风轮产生的动量矩 $\vec{M}_1$ 为：

$$\vec{M}_1 = \vec{r} \times (\rho 2\pi r dl \vec{v}_1) = 0 \quad (10)$$

式中： $\rho$ 为空气密度； $l$ 为 $r$ 处叶片宽度。

环域内空气刚流出风轮时对风轮产生的动量矩 $\vec{M}_2$ 为：

$$\vec{M}_2 = \vec{r} \times (\rho 2\pi r dl \vec{v}_2) = 0 \quad (11)$$

由图1可得， $\vec{M}_2$ 的大小 $M_2$ 为：

$$M_2 = \rho 2\pi r dl v_2 r \cos(\vec{v}_2, \vec{u}_2) = \rho 2\pi r dl v_2 r \frac{w_2^2 - u_2^2 - v_2^2}{2u_2 v_2} \quad (12)$$

式中各符号意义同前。

假设环域空气流过叶片宽度 $l$ 的时间为 $t$ ，根据动量矩原理，环域内空气对风轮产生的力矩 $M$ 为：

$$M = \frac{M_2 - M_1}{t} = \rho \frac{2\pi r dr l}{t} v_2 r \frac{w_2^2 - u_2^2 - v_2^2}{2u_2 v_2} = \rho q r \frac{w_2^2 - u_2^2 - v_2^2}{2u_2} \quad (13)$$

式中： $q$ 为环内空气流量；其它符号意义同前。

此即所考察的环状流动空气流过风力发电风轮时作用于风轮上的力矩。由此可看出，环状流动空气流过风力发电风轮时作用于风轮上的力矩除与空气自身的密度、空气流量和考察点半径有关外，就只与此环状流动空气刚流出风轮的状态有关，即，只与此环状流动空气刚流出风轮的绝对运动速度、牵连运动速度和相对运动速度有关。

#### 4 风轮的功率表达式

式(9)给出的能量是以水头表示的，所以其对应的功率 $N_E$ 为：

$$N_E = E \rho g q = \frac{w_2^2 - u_2^2 - v_2^2}{2} \rho q \quad (14)$$

式(13)给出的功率 $N_M$ 可表示为：

$$N_M = M \omega = \rho q v_2 r \frac{w_2^2 - u_2^2 - v_2^2}{2u_2 v_2} \omega = \rho q \frac{w_2^2 - u_2^2 - v_2^2}{2} \quad (15)$$

式中 $\omega$ 为风轮旋转角速度；其它符号意义同前。

比较式(14)、(15)发现，流过风力发电风轮的空气，无论从能量的角度进行分析，还是从动量矩定理进行分析，流动空气传递给风轮的功率的表达式都完全一致。即，只与此环状流动空气刚流出风轮的状态有关，具体来说，也就是只与此环状流动空气刚流出风轮的绝对运动速度、牵连运动速度和相对运动速度有关。

根据图1中 $\Delta EFG$ ，由余弦定理，得

$$w_2^2 = u_2^2 + v_2^2 - 2u_2 v_2 \cos(\overline{u_2, v_2}) \quad (16)$$

将式(16)代入式(14)或式(15)，得

$$N = N_E = N_M = -\rho q u_2 v_2 \cos(\overline{u_2, v_2}) \quad (17)$$

式(17)表示，风轮正常工作，流动空气流出风轮叶片的绝对运动速度与该点牵连运动速度的夹角必为钝角；流过风轮的环状空气向风轮释放的功率等于环状空气流量、空气密度、环缘处风轮的牵连运动速度及环缘处流出空气的绝对运动速度在此点牵连运动速度方向上投影的连乘积。

#### 5 结论

通过分析流经风电叶片间的能量流和动量矩的传递发现，流动空气与风力发电叶片间的相互作用如下：(1)环状流动空气流过风轮过程中，若向风轮传递功率，其流出风轮叶片的绝对运动速度与该点牵连运动速度的夹角必为钝角；(2)流过风轮的环状空气向风轮释放的功率等于环状空气流量、空气密度、环状空气从叶片后缘流出的牵连运动速度及其绝对运动速度在此点牵连运动速度方向上投影的连乘积；(3)改变风力发电叶片迎风面后缘曲线切线角(相当于改变空气从风力发电叶片后缘流出角)，可改变流过风轮的环状空气传递给风轮的功率。

#### 参 考 文 献：

- [ 1 ] DANIIL Perfiliev . Methodology for wind turbine blade geome-tryoptimization[D] . Finland: Lappeenranta University of Tech-nology, 2013 .
- [ 2 ] 段宏, 赵明, 梁俊宇, 等 . 基于动量叶素理论的风力机叶轮建模[J] . 云南电力技术, 2016, 44(2) :

- 130-133 .
- [ 3 ] 李连波, 陈涛, 王凡, 等. 基于 Schmitz 理论的风叶气动设计研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(2): 225-229 .
- [ 4 ] 方程. 基于涡流理论的立轴风力机气动特性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2012 .
- [ 5 ] 钟友富. 基于 Wilson 理论的大型风力机叶片三维实体建模[J]. 科技创新, 2015(10): 39-40 .
- [ 6 ] 李强, 金哲岩, 杨志刚. 风力机叶片气动外形优化设计综述[J]. 机械设计, 2016, 33(7): 1-7 .
- [ 7 ] 姚世刚, 戴丽萍, 康顺. 风力机叶片气动性能及流固耦合分析[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5): 988-992 .
- [ 8 ] 徐宇, 廖猜猜, 张淑丽, 等. 大型风电叶片设计制造技术发展趋势[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(12): 124702-1-10 .
- [ 9 ] GUO Tingting, WU Dianwen, XU Jihui, et al. The method of large-scale wind turbine blades design based on MATLAB programming[C]//Nanjing: Sustainable Power Generation and Supply, 2009: 1-5 .
- [ 10 ] WOOD D H. Dual purpose design of small wind turbine blades[J]. Wind Engineering, 2004, 28(5): 511-528 .
- [ 11 ] 吕小静. 大型水平轴风力机风轮气动性能计算与优化设计[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011 .
- [ 12 ] ERNESTO Benini, ANDREA Toffolo. Optimal design of horizontal-axis wind turbines using blade-element theory and evolutionary computation[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002(124): 357-363 .
- [ 13 ] FUGLSANG P, MADSEN H A. Optimization method for wind turbine rotors[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999(80): 191-206 .
- [ 14 ] WANG Tongguang, WANG Long, ZHANG Wei, et al. Large-scale wind turbine blade design and aerodynamic analysis[J]. Fluid Mechanics, 2012, 57(5): 466-472 .
- [ 15 ] NAMBU T, HASHIMOTO A, UENO M, et al. Evaluation of wall-interference correction method using numerical analysis and porous wall model[J]. Aircraft, 2015, 52: 226-234 .
- [ 16 ] KANG S H, SHIN E S, RYU K W, et al. Separation blockage-correction method for the airfoil of a wind turbine blade[J]. Mech. Sci. Tech., 2013, 27: 1321-1327 .

### Study on characteristics of the interaction between flowing air and wind turbine blade

Muhammad Aqeel<sup>1</sup>, GAO Yanwei<sup>2</sup>, LI Yongqiang<sup>3</sup>, LIU Qing<sup>1</sup>, ZHANG Zhaohuang<sup>1</sup>

(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Chinese architectural press, Beijing 100037, China;

3. Hutuohe River Basin Water Resources Management Bureau of Shanxi Province, Xinzhou 034000, China)

**Abstract:** The characteristic of interaction between flowing air and wind turbine blade is the foundation in the wind turbine blade design and has been a difficult problem in the wind power generation. For a long time, taking the air flow field of wind turbine blades as the objective and on the basis of momentum-blade element theory, the Schmitz method, Glauert method, Wilson method and CFD method have been established to optimize the blade design. However, still a lot of problems need further improvement and study in view of the characteristics of the effect of air on blades during the air flowing through blades. Therefore, the analytical formula of energy transferred from annular flowing air to rotor was proposed based on Bernoulli equation, the analytical formula of torque on the rotor under the annular flow situation was put forward with the principle of momentum, and the analytical formula of transmission power from annular flowing air to rotor was presented. It is obtained that the transmission power is equal to the continuous product of annular air flow, air density, convected velocity of rotor at rim and the projection of the absolute velocity of the air outflowing around the rim. It provides guide for setting trailing edge feature parameters of blade profile curve.

**Keywords:** wind turbine blade; bernoulli equation; momentum moment principle

(责任编辑: 李 琳)