

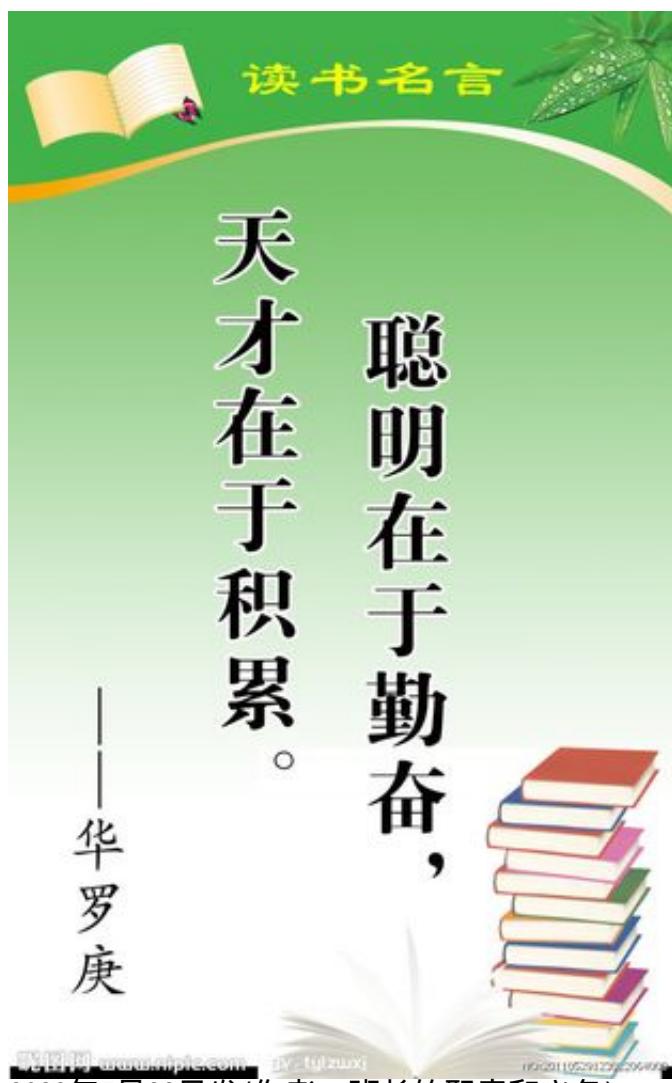
# 风力机最佳攻角与最大升阻比攻角非等同性研究

作者：有故事的人 来源：范文网 www.wtabcd.cn/fanwen/

本文原地址：<https://www.wtabcd.cn/zhishi/a/168469569916119.html>

范文网，为你加油喝彩！

班组建设总结-决胜高考



2023年5月22日发(作者：班长的职责和义务)

风力机最佳攻角与最大升阻比攻角非等同性研究

赵骞;厉伟;姚兴佳;范释艺;邵一川;张靖;李鑫

【摘要】为提高风力机风能利用率,追求最大风能利用系数,对水平轴风力机最佳攻

角与最大升阻比攻角的非等同性进行了理论分析,并采用叶素动量理论对其进行实

例论证,以及通过计算流体力学(CFD)对结论进行仿真验证.研究结果表明,二者具有

非等同性,最佳攻角略大于最大升阻比攻角,处于最佳工作点的风力机具有更高的风

能利用系数,同时具有最大的速度比阈值区间.研究进一步发现,对于目前工作于最大

升阻比攻角状态的风力机,通过减小叶尖速比的方式可以使其过渡到最佳攻角状

态.%In order to further improve the utilization rate of wind energy and

track the maximum wind energy utilization coefficient,optimum angle of

horizontal axis wind turbine and the non-equivalence of maximum lift-to-

drag ratio angle is demonstrated theoretically, and the example is

expounded by element momentum theory, and the conclusion is further

verified by computational fluid dynamics (CFD). The results show that the

two are not equal, and the optimal angle of attack is slightly larger than the

maximum lift-to-drag ratio, the wind turbine has there are the maximum

wind energy utilization factor and the maximum velocity ratio threshold

region in wind turbine which is at the optimum angle of attack. And

through the study found that for the current work in maximum lift-to-drag

ratio, the attack angle of the wind turbine can be transit to the optimum

angle of attack by reducing the tip speed ratio. The wind turbine has there

are the maximum wind energy utilization factor and the maximum velocity

ratio threshold region in wind turbine which is at the optimum angle of attack.

【期刊名称】《可再生能源》

【年(卷),期】2017(035)011

【总页数】6页(P1693-1698)

【关键词】风力机;最佳攻角;最大升阻比攻角;风能利用系数

【作 者】赵骞;厉伟;姚兴佳;范释艺;邵一川;张靖;李鑫

【作者单位】沈阳工业大学 风能技术研究所, 辽宁 沈阳 110023; 沈阳工业大学 风能技术研究所, 辽宁 沈阳 110023; 沈阳工业大学 风能技术研究所, 辽宁 沈阳 110023; 国网辽阳供电公司 信息通信分公司, 辽宁 辽阳 111000; 沈阳大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110044; 沈阳工业大学 风能技术研究所, 辽宁 沈阳 110023; 沈阳大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110044

【正文语种】中 文

【中图分类】TK83

人类所面临的能源危机及环境污染问题使人们不得不大力发展可再生能源，风能作为可再生能源中储量最丰富的能量形式得到人们的关注，关于风力发电的各方面的研究层出不穷[1] ~ [4]。风轮是实现风力机风-机能量转换的关键环节。风轮的性能除取决于翼型之外，攻角、转速等因素同样对其产生重要影响。由于风力机在安装完毕以后，无法实现对翼型形状的灵活调节，因此，对处于运行状态风力机的风轮攻角、转速等参数进行优化调节，对提高风力机风能利用系数具有重要意义。

风力机翼型起源于航空翼型。风电发展早期，水平轴风力机叶片翼型一直选用航空翼型，直到20世纪80年代，虽然一些风电大国相继开发了一系列风力机专用翼型，但仍然采用航空翼型的设计理念以及攻角调节理论。对攻角的研究一直是风力机及航空器的研究重点之一。白鹏[5]对对称翼型低雷诺数小攻角升力系数非线性现象进行了研究。姜海波[6]对大攻角绕流升力和阻力系数进行了计算。研究结果表明，对于航空器而言，翼型的最佳攻角与翼型的最大升阻比攻角具有等同性。受航空器设计理念的影响，对风力机翼型而言，以往人们也倾向于认为其最佳攻角与最大升阻比攻角具有等同性，因此，倾向于将风力机攻角设计成最大升阻比攻角[7] ~ [10]。目前，针对风力机的攻角调节优化研究逐渐展开。Chalothorn[11]对风力机非扭曲叶片攻角进行了优化。杨志强[12]对风力机变速运行的叶素运行攻角分布的影响因素进行了分析。这些研究针对离散数据点进行，虽能得到风能捕获能力随攻角变化的趋势，但无法论证风力机的最佳攻角是否与最大升阻比攻角等同。叶航治[7]虽然对风力机的最佳攻角与最大升阻比攻角的等同性进行了理论研究，但该研究基于风能转换效率，非基于最大风能利用系数。

风能利用系数被公认为是衡量风力机发电性能的重要标准，其大小直接关系到风力机输出功率大小，从而影响整个风力发电机组的发电功率。以追求最大风能利用系数为目标，论证风力机最佳攻角与最大升阻比攻角是否具有等同性，有利于进一步

认识风力机攻角对风能利用系数的影响方式，从而能够进一步提高风能利用系数。

本文通过理论分析，基于叶素动量（BEM）理论的实例论证，以及CFD仿真验证，对风力机最佳攻角与最大升阻比攻角的非等同行进行论证。并针对目前运行于最大升阻比状态的风力机提出了将其过渡到最佳攻角的调节方案。

本文采用叶素动量理论作为对风力机最佳攻角与最大升阻比攻角非等同性论证的实例证明方法。叶素理论是将风轮叶片沿展向分成若干微段，这些微段称为叶素。应用动量和角动量守恒方程，可计算出作用在风轮上的力、转矩以及输出功率。图1为叶素动量理论分析截面图，图中显示某叶素（距风轮中心 $r$ ）的翼型截面及该处气流与翼型之间的相对速度关系。

由图1可知，轴向诱导因子 $a$ 、切向诱导因子 $a$  对作用于翼型上的风速起重要影响。

将动量及角动量守恒方程应用于该叶素，可计算出轴向力 $dF_n$ 、切向力 $dF_t$  以及风能利用系数 $C_p$ ，见式（1）~（3）：

式中： $\rho$  为空气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $v_0$  为风轮上游远端风速， $\text{m}/\text{s}$ ； $\alpha$  为入流角， $\text{rad}$ ，表示风轮处相对风速与风轮旋转平面的夹角； $N_b$  为叶片数； $c$  为该处叶片弦长， $\text{m}$ ； $CL$ ， $CD$  为风力机翼型升力、阻力系数，对于一个确定的翼型， $CL$ ， $CD$  主要由攻角  $\beta$  决定； $\lambda$  为当地速度比，表示叶素切向速度与来流远端风速之比。

式中： $\omega$  为风轮角速度。

诱导因子 $a_x$ ， $a_t$  对式（1）~（3） 均起到重要作用。 $a_x$ ， $a_t$  可以通过建立动量及角动量守恒方程来求解。

式中： $F$  为普朗特叶尖损失因子； $\sigma$  为风轮实度； $\beta$  为功角， $\beta$  处于 $(0, 1)$  区间内。

由风速与叶素相对速度的几何关系可得到入流角  $\alpha$  及攻角  $\beta$  的表达式为

式中： $\gamma$  为节距角，表示叶素弦长方向与风轮旋转平面之间的夹角。

给定当地速度比  $\lambda$  及节距角  $\alpha$ ，便可以通过迭代式 (5) ~ (8) 计算出  $a_n$ ， $a_t$  的收敛值，并进一步由式 (1)、(2) 计算出  $dF_n$ ， $dF_t$  及风能利用系数  $C_p$ 。

在转速恒定的情况下，式 (2) 决定了输出功率的大小，当攻角发生变化时，会对式 (2) 中的升阻系数产生直接影响，若不考虑攻角的微小变化对式 (2) 中其他参数带来的间接影响，则式 (2) 关于攻角  $\alpha$  的变化率为

式中：，其值不受  $\alpha$  直接影响，这里视为常数，值为正。

运行在最大升阻比攻角工作点的风力机，处于升阻比曲线的最高点，此时：

同时产生正向切向力，由式 (2) 可知：

由翼型的升阻系数曲线 (图2) 可知，最大升阻比状态时，处于阻力系数的上升阶段，此时：

联立式 (9) ~ (12) 可得：

式 (13) 说明，处于最大升阻比攻角状态的风力机，切向力  $(dF_t)$  随攻角  $\alpha$  的增大而继续增大，进而使风能利用系数  $C_p$  继续增大。将实际能够达到最大  $C_p$  时的攻角称为最佳攻角，则式 (13) 表明，最佳攻角大于最大升阻比攻角。因此，二者具有非等同性。

低风速时，该翼型升阻系数  $CL$ ， $CD$  主要由攻角  $\alpha$  决定，图2显示了  $CL$ ， $CD$  随在  $0 \sim 180^\circ$  内的变化关系。由图2可知，在小攻角段， $CL$  与  $\alpha$  几乎成正比关系，在  $12^\circ$  时翼型发生失速，之后  $CL$  发生短暂的降落，通常情况下，翼型工作在失速点之前。

为了进一步论证风力机最佳攻角与最大升阻比攻角的非等同性，采用叶素动量理论对拥有NACA0012翼型的1.5 MW风力机的攻角特性进行实例分析。该翼型为NACA经典翼型，很多研究针对该翼型展开。翼型截面如图3所示，这里已将弦长做归一化处理。

本文选取翼型中部叶素作为计算区域，不涉及叶尖损失，因此叶尖损失因子 $F$ 取1。

对于每一组 $\alpha$ ， $Cl$ ，通过式(5)~(8)迭代确定各相关参数，并通过式(3)计算出风能利用系数 $CP$ ，进而得到 $CP$ 随 $\alpha$ ， $Cl$ 变化的曲面图，实现在全局范围内搜索 $CP$ 最大值。

使用C++语言编制该迭代程序，选取6万组 $\alpha$ ， $Cl$ 点，分别对每个点的 $CP$ 进行计算，能够很好地反映出 $CP$ 与 $\alpha$ ， $Cl$ 之间的连续变化关系。图4以4个不同视角显示了该变化关系。图4中 $\alpha$ 取值为 $0\sim 8^\circ$ ， $Cl$ 取值为 $0\sim 15^\circ$ ，可见在该变化区间内， $CP$ 可取得最大值 $CP_{-max}$ 。

图4(a)，(b)分别以3D视角和 $\alpha$ 轴视角显示了 $CP$ ， $\alpha$ ， $Cl$ 三者之间变化关系，图中可知，风能利用系数的一个微小波动 $VCP$ ，从 $\alpha$ ， $Cl$ 都有相应的阈值区间与之对应，该阈值区间的大小可以反映出风力机输出功率能够抵御环境变化，特别是风速变化所带来的干扰的能力。风力机往往运行在瞬变风速环境中，由于其转子的惯性，无法实现风轮转速与风速的同步变化，导致风轮速度比 $Cl$ 存在一定波动。若风力机在实际工作点具有较大的速度比阈值区间，表明即使 $Cl$ 存在一个较大波动，其所引起的 $CP$ 波动也会被限制在较小的范围，从而使风力机更好的实现最大风能捕获。 $CP$ 达到最大值处，速度比阈值区间亦达到最大，将该工作点称为最佳工作点，所对应的攻角即为最佳攻角。

图4(c)，(d)分别为以 $\alpha$ 轴视角及 $Cl$ 轴视角的显示结果。从图中可以得到最佳工作点处参数值： $\alpha_{opt}=4.0^\circ$ ， $Cl_{opt}=3.9^\circ$ ，最大风能利用系数 $CP_{opt}=0.48$ ，由此计算出最佳攻角 $\alpha_{opt}=5.9^\circ$ 。

为了论证最佳攻角 $\alpha_{opt}$ 与最大升阻比攻角的非等同性，这里引入该实例翼型的升阻比曲线，如图5所示，该曲线由升阻系数曲线(图2)计算得到。从图5中可知，最大升阻比攻角 $Cl_{max}=4.2^\circ$ ，可见 $\alpha_{opt} > Cl_{max}$ 。这再次表明最佳攻角大

于最大升阻比攻角，即二者具有非等同性。

为了将最大升阻比攻角与最佳攻角时CP值做更加直观的对比，在图4 (a) 中，

提取出攻角分别为  $\alpha_{mldr}$  和  $\alpha_{opt}$  的两条二维曲线，如图6所示。

由图6可知，处于最佳攻角状态的风力机，其风能利用系数高于处于最大升阻比攻角状态的风力机，两者均在节距角  $\beta = 4^\circ$  时达到各自风能利用系数极大值，即分别为最佳工作点和最大升阻比工作点。处于最大升阻比工作点时  $CP=0.46$ ，处于最佳工作点时  $CP=0.48$ ，提升幅度为4.3%。相应的计算同时表明，此时两者的速度比由4.7降为4.0，减小15%。前面的分析表明，在不改变风轮其它运行参数的条件下，将风轮转速降低15%，即可使风力机从最大升阻比工作点过渡到最佳工作点。

针对分别处于最大升阻比工作点和最佳工作点的风力机，采用计算流体力学CFD的FLUENT软件包对其周向力系数进行仿真，进而计算出两者风能利用系数差值百分比。本文设定来流风速为15 m/s，初始的网格剖分如图7所示。

图8为在最大升阻比工作点处通过CFD对周向力系数  $C_t$  的迭代结果，该工作点处  $\alpha$  为4.7。由图8可知， $C_t$  收敛于0.75。

图9为在最佳工作点处通过CFD对周向力系数  $C_t$  的迭代结果，该工作点处  $\alpha$  为4.0。从图中可见， $C_t$  收敛于0.91。

考虑到来流风速及风轮半径一定的情况下，风能利用系数与周向力系数及速度比乘积成正比。

因此，最佳工作点与最大升阻比工作点时风能利用系数之比为1.033，风能利用系数提高3.3%。这进一步验证了风力机处于最佳工作点状态时CP值高于处于最大升阻比工作点状态。

该提升率略低于通过叶素动量理论计算出的提升率，主要是由于尾流因素所引起。

CFD具有更强的尾流计算能力，能够更好的反映出尾流对气动性能的影响，致使通过CFD计算出的CP值略低于通过叶素动量理论计算出的CP值。

本文以追求最大风能利用系数为目标，对水平轴风力机最佳攻角与最大升阻比攻角的非等同性进行了研究。分别采用理论分析、实例论证及CFD仿真验证3种方法对该问题进行研究，结论如下。

风力机最佳攻角大于最大升阻比攻角，两者具有非等同性。

处于最大升阻比工作点的风力机，通过减小速度比的方式可以使其过渡到最佳工作点。

最佳工作点状态与最大升阻比工作点状态相比，风能利用系数有所提高（不小于3%）。

最佳工作点状态时，具有最大的速度比阈值区间，此时风力机输出功率抗风速波动干扰的能力较强。

## 【相关文献】

[1] 尹俊，毕天姝，薛安成，等.计及低电压穿越控制的双馈风力发电机组短路电流特性与故障分析

方法研究[J].电工技术学报，2015，30（23）：116-125.

[1] Yin Jun , Bi Tianshu , Xue Ancheng , et on short circuit current and fault analysis method of double fed induction generator with low voltage ride-through control strategy [J].Transactions of China Electrotechnical Society , 2015 , 30 ( 23 ) : 116-125.

[2] 胡维昊，王跃，李明，等.基于MRAS的多相永磁直驱型风力发电系统无速度传感器控制策略研

究[J].电力系统保护与控制，2014，42（23）：118-124.

[2]Hu Weihao , Wang Yue , Li Ming , et al on sensorless control strategy of direct drive multi-phase PMSG wind power generation system based on MRAS[J].Power System Protection and Control , 2014 , 42 ( 23 ) : 118-124.

[3]林莹莹 , 汤宁平 , 戴志远.  
直驱风力发电机无位置传感器控制的研究[J].电气技术 , 2014 ( 1 ) : 7-10.

[3]Lin Yingying , Tang Ningping , Dai Zhiyuan.  
Control of the sensorless direct drive wind generator[J].Electrical Engineering , 2014 ( 1 ) : 7-10.

[4]郝艳捧 , 刘国特 , 阳林 , 等.  
风力机组叶片覆冰数值模拟及其启动载荷特性研究[J].电工技术学报 , 2015 , 30 ( 10 ) : 292-300.

[4]Hao Yanpeng , Liu Guote , Yang Lin , et al on ice numerical simulation and its power loss characteristics for the blades of wind turbine[J].Transactions of China Electrotechnical Society , 2015 , 30 ( 10 ) : 292-300.

[5]白鹏 , 崔尔杰 , 李峰 , 等.对称翼型低雷诺数小攻角升力系数非线性现象研究 [J]. 力学学报 , 2006 , 38 ( 1 ) : 1-8.

[5]Bai Peng , Cui Erjie , Li Feng , et al on the nonlinear phenomenon of the lift coefficient at low Reynolds number[J].Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics , 2006 , 38 ( 1 ) : 1-8.

[6]姜海波 , 曹树良 , 程忠庆.平板大攻角绕流升力和阻力系数的计算[J].应用力学学报 , 2011 , 28 ( 5 ) : 518-520.

[6]Jiang Haibo , Cao Shuliang , Cheng Zhiqiang.  
Lift coefficient and drag coefficient of flow around flat plate with large angles of attack[J].Chinese Journal of Applied Mechanics , 2011 , 28 ( 5 ) : 518-520.

[7]叶杭治.风力发电机组的控制技术[M].北京：机械工业出版社，2002.14-27.

[7]Ye | Technology of Wind Turbine[M].Beijing : China Machine Press ,

2002.14-27.

[8]程江涛，陈进，沈文忠，等.

基于最大风能利用系数的风力机翼型设计 [J].机械工程学报，2010，

46 ( 24 ) : 111-117.

[8]Cheng Jiangtao , Chen Jin , Shen Wenzhong , et of wind turbine airfoils

bad on maximum power coefficient[J].Journal of Mechanical Engineering , 2010 , 46

( 24 ) : 111-117.

[9]吴江海.大型风力机叶片及翼型优化设计 [D]. 南京：南京航空航天大学，2011.

[9]Wu -scale wind turbine blade and airfoil optimization design[D].Nanjing :

Nanjing University of Aeronautics , 2011.

[10]Rajakumar S , Ravindran iver approach for optimising coefficient of power ,

coefficient of lift and drag of wind turbine rotor[J].Renewable Energy , 2012 , 38 : 83-93.

[11]Chalothorn Thumthae , Tawit l angle of attack for untwisted

blade wind turbine[J].Renewable Energy , 2009 , 34 : 1279-1284.

[12]杨志强，殷明辉，谢云云，等.

面向风力机变速运行的叶素运行攻角分布的影响因素分析[J].中

国电机工程学报 , 2015 , 35 : 162-169.

[12]Yang Zhiqiang , Yin Minghui , Xie Yunyun , et is on factors affecting the

distribution of operational angle of attack of blade element for variable-speed operation

of wind turbines[J].Proceeding of the CSEE , 2015 , 35 : 162-169.

凛冽什么意思-28h



## 高尔基

(1868-1936)

社会主义现实主义文学的奠基人，列宁称他为  
“无产阶级艺术最杰出的代表”，代表作品：《童年》、  
《在人间》、《我的大学》等。

时间是最公开合理的，它从不多给谁一份，勤劳者能叫时间留给串串的果实，懒惰者时间给予他们一头白发，两手空空。

名 人 名 言

更多 在线阅览 请访问 [https://www.wtabcd.cn/zhishi/list/91\\_0.html](https://www.wtabcd.cn/zhishi/list/91_0.html)

文章生成doc功能，由[范文网](http://www.wtabcd.cn/fanwen/)开发