



大型风力机的空气动力学问题

王同光

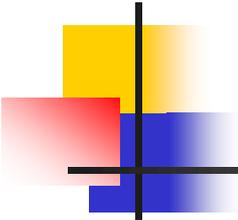
南京航空航天大学

Tel: 025-84896138

Email: tgwang@nuaa.edu.cn



提纲



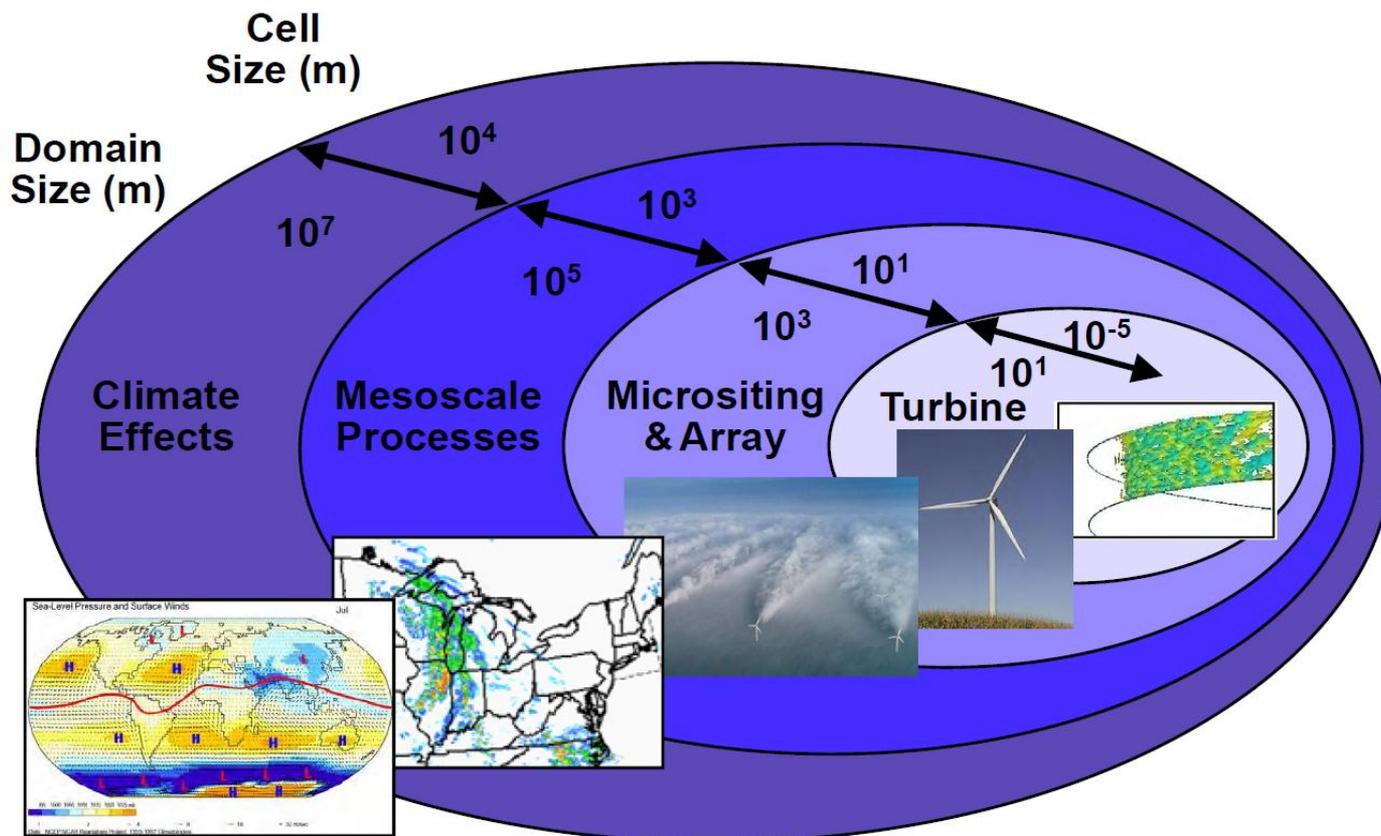
风力机空气动力学的复杂性

风力机的气动计算

风力机设计中的气动问题

小结

风力机空气动力学的复杂性

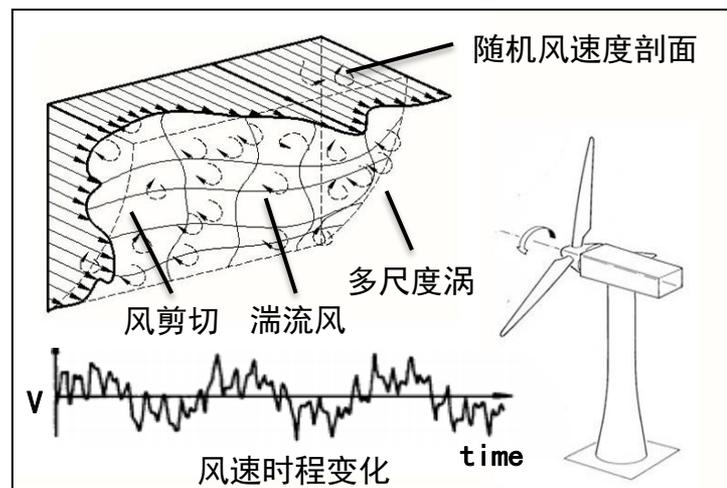


大尺度上风资源与气候相关联，
小尺度上风力机气动性能与边界层流动有关

风力机空气动力学的复杂性

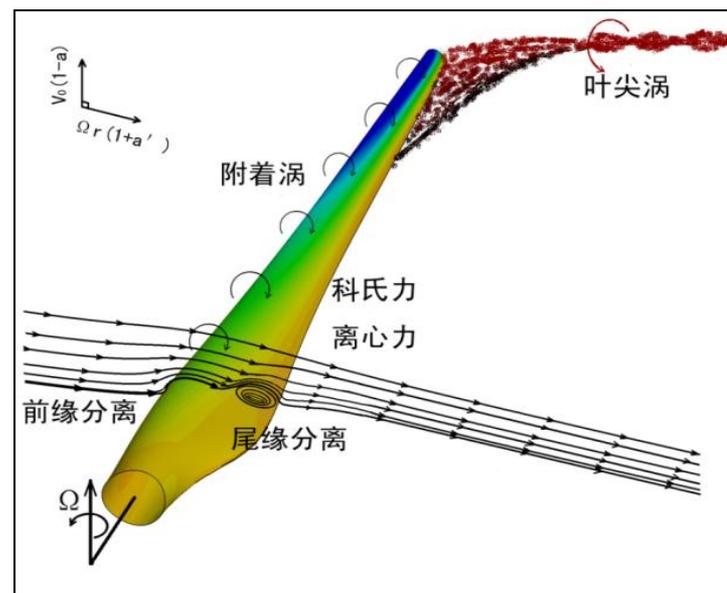
◆ 复杂风况

- 大气边界层、高湍流、多尺度涡、随机风、极端风

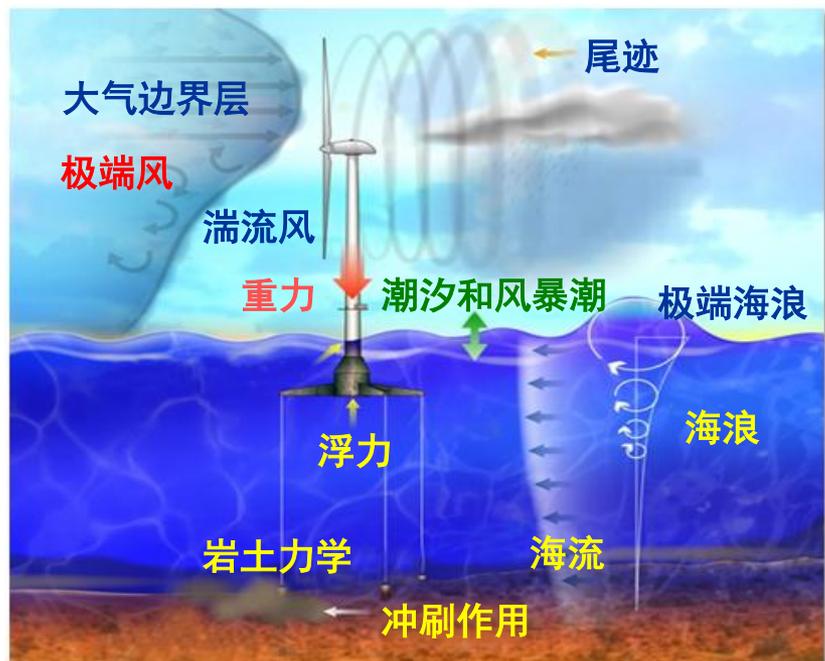


◆ 复杂绕流

- 大分离、深失速、动态失速、三维旋转、尾涡、气动干扰



风力机空气动力学的复杂性



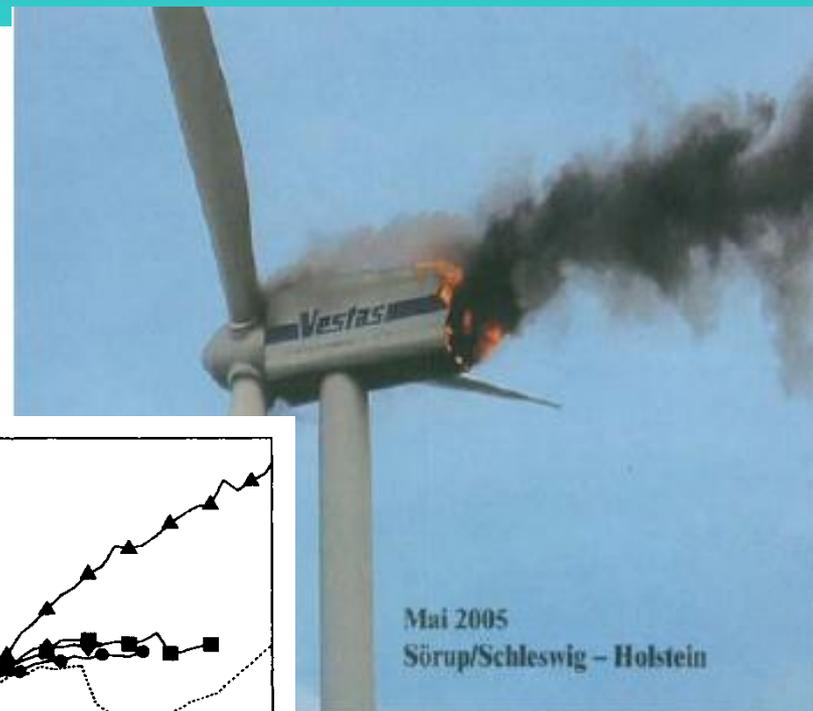
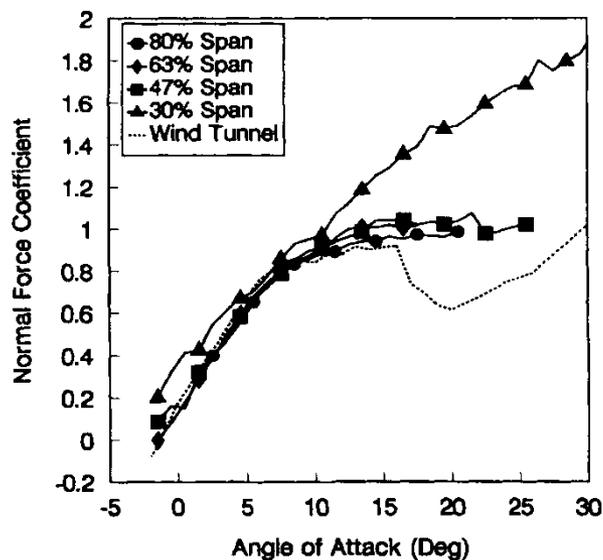
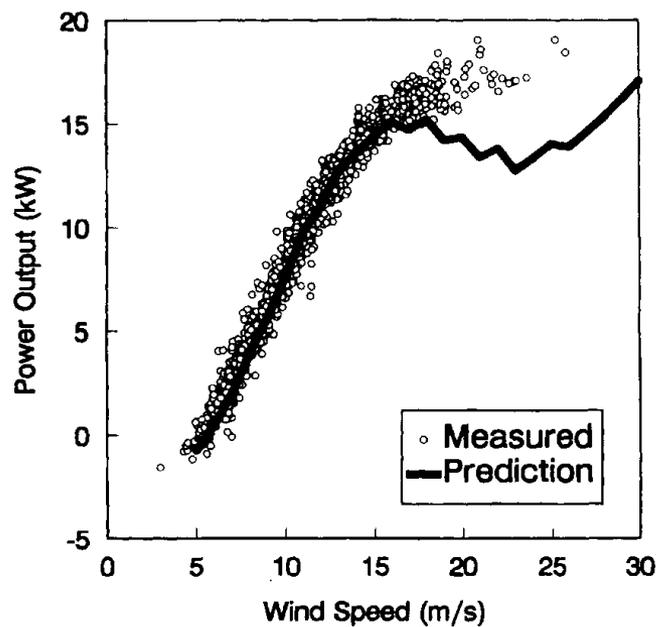
复杂环境和极端风况给大型风力机设计和安全运转带来极大挑战。



桑美台风对浙江苍南风场的破坏
(28台机组中, 22台损坏)

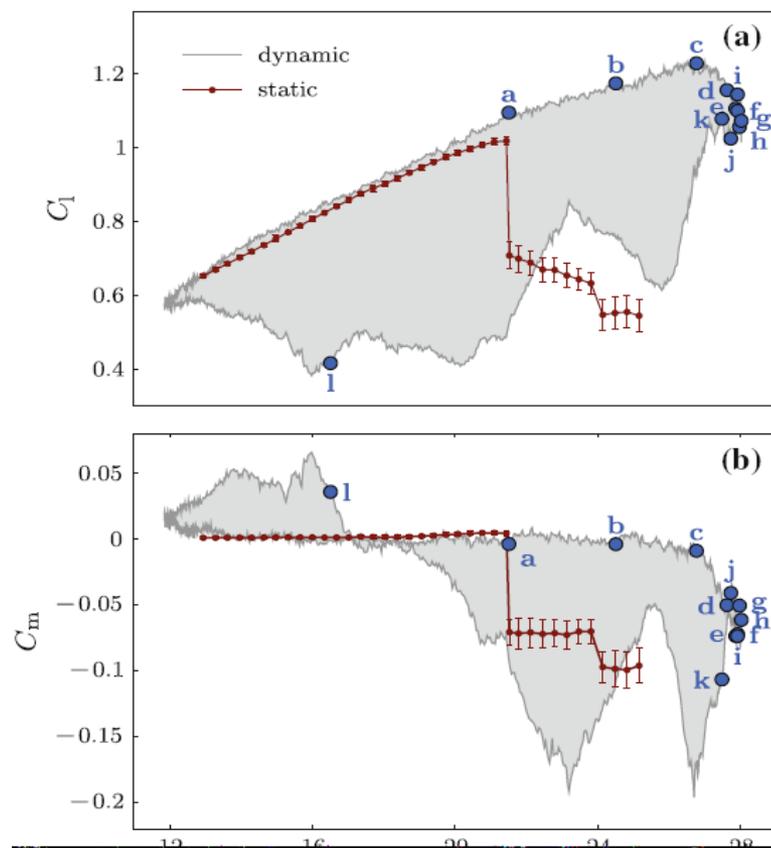
风力机空气动力学的复杂性

三维旋转效应



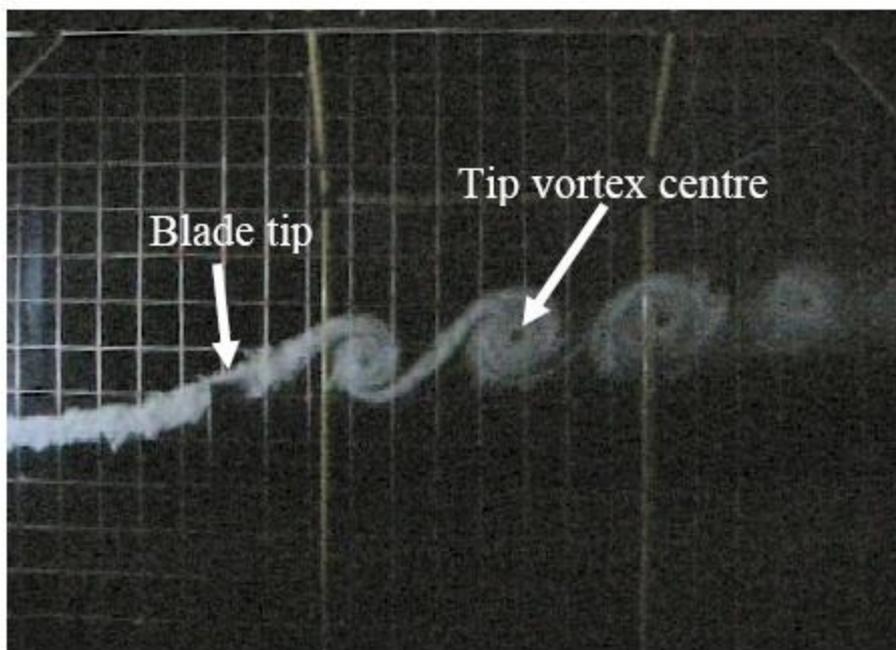
风力机空气动力学的复杂性

深失速和动态失速

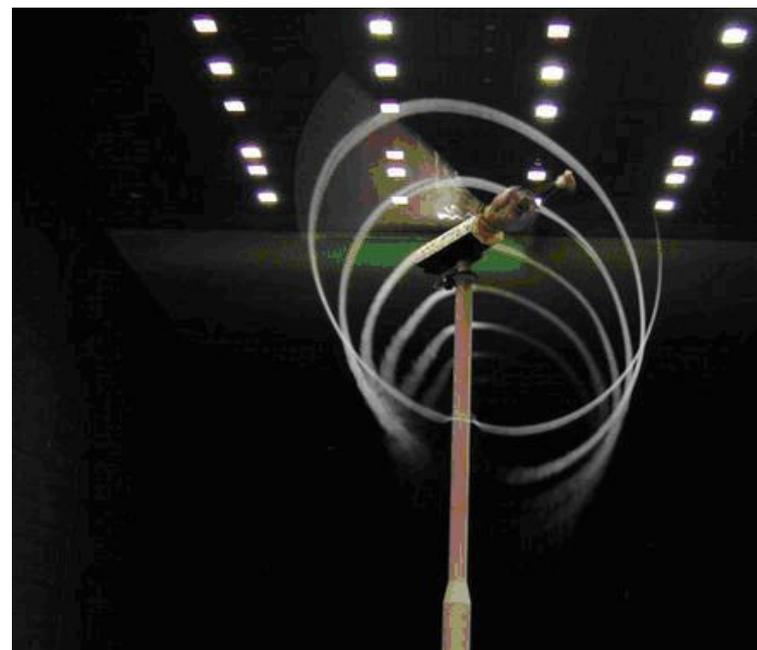


风力机空气动力学的复杂性

叶尖涡及塔影效应



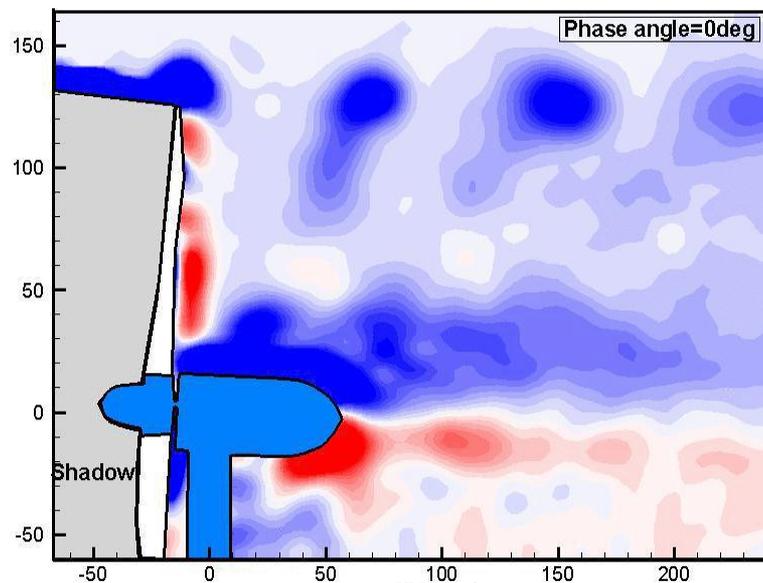
叶尖涡的烟流实验



塔影效应

风力机空气动力学的复杂性

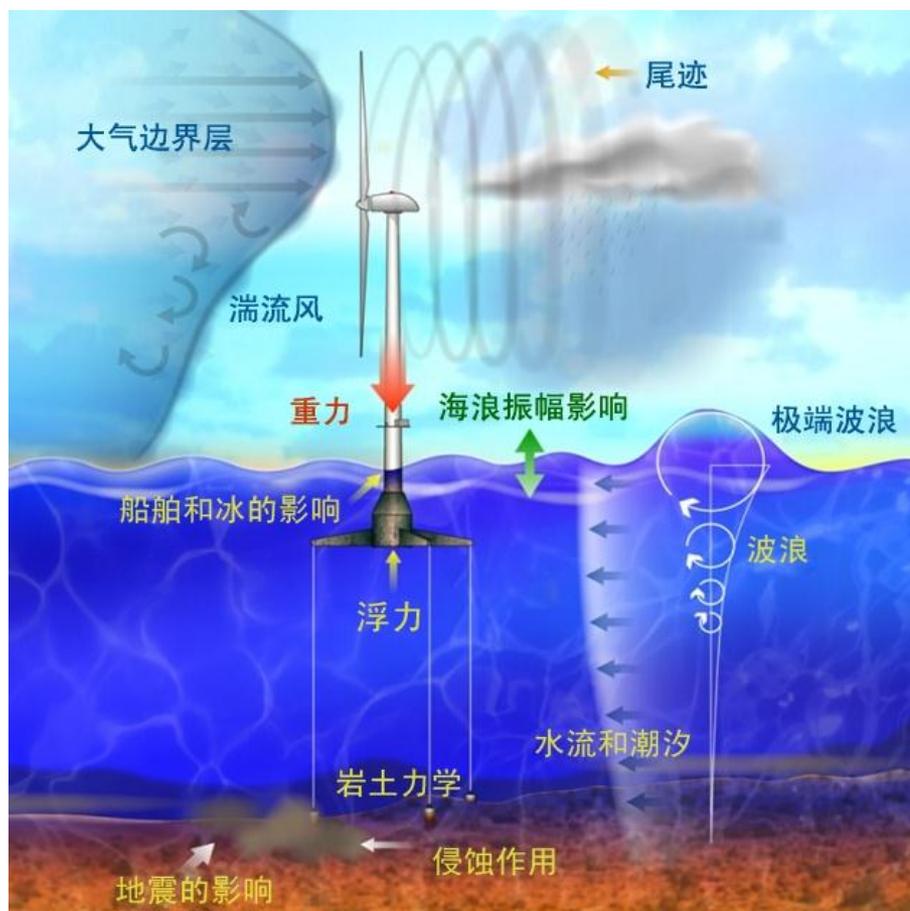
风力机的尾流干扰



风力机空气动力学的复杂性

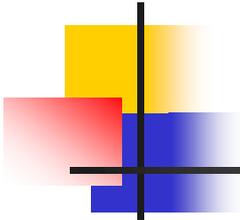
海上风力机问题更加复杂

- 超大型化
- 气动弹性与非线性特性更明显
- 极端天气和海况
- 风-波浪-海流-结构的耦合
- 高耸结构稳定性
- 基础承载力和抗拔力
- 强腐蚀





提纲



风力机空气动力学的复杂性

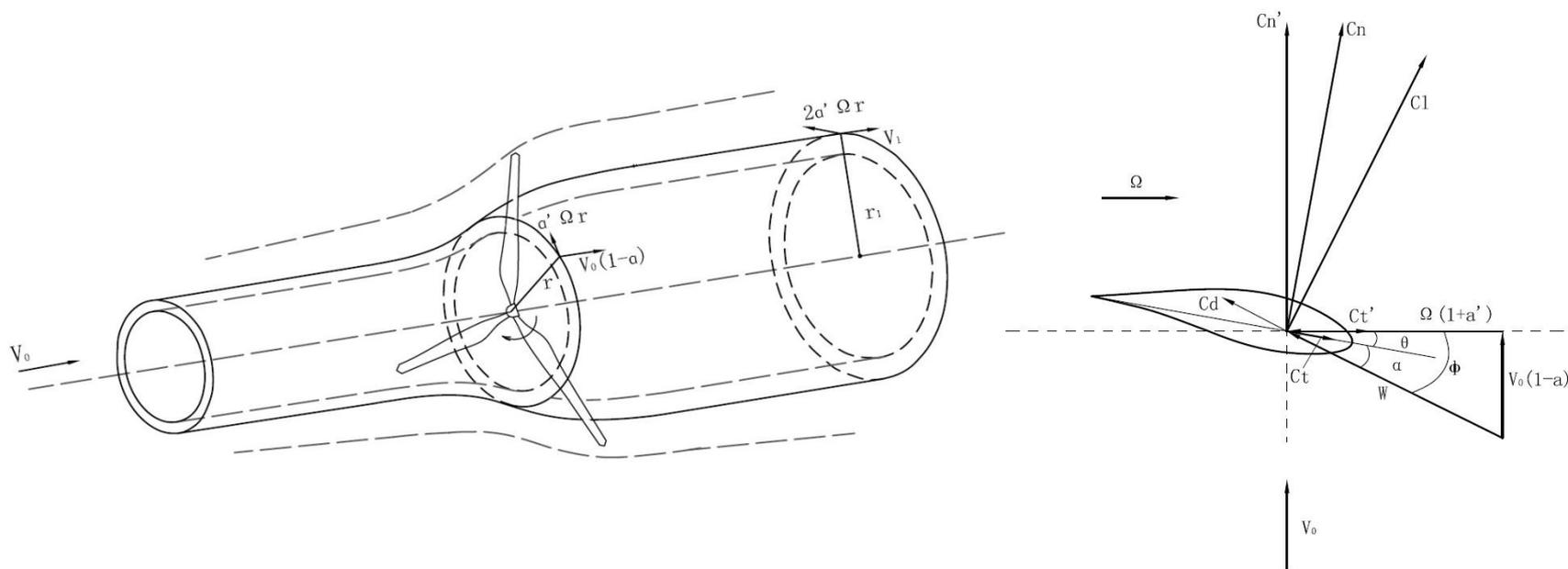
风力机的气动计算

风力机设计中的气动问题

小结

风力机空气动力学的计算

叶素动量方法 (BEM)

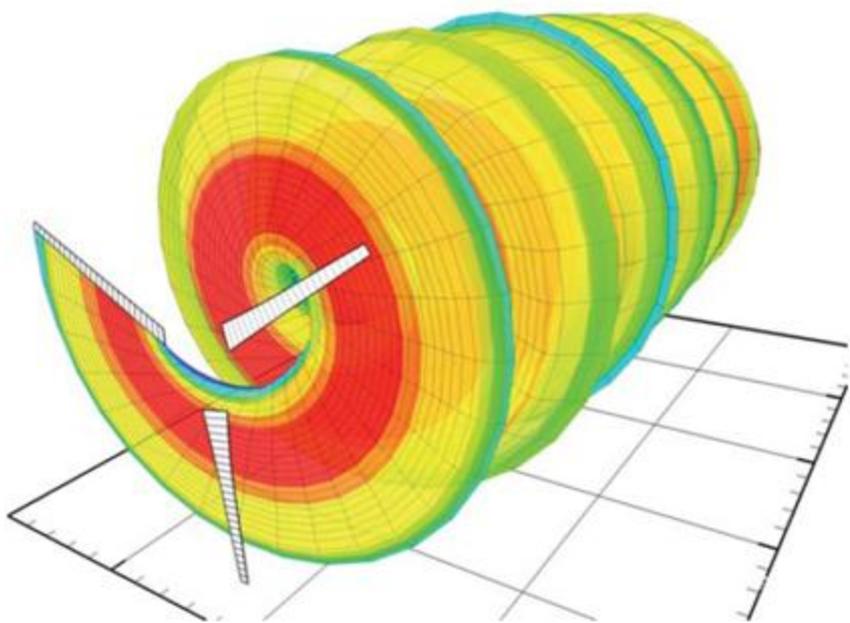


$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 \pi R^2} = 4a(1-a)^2$$

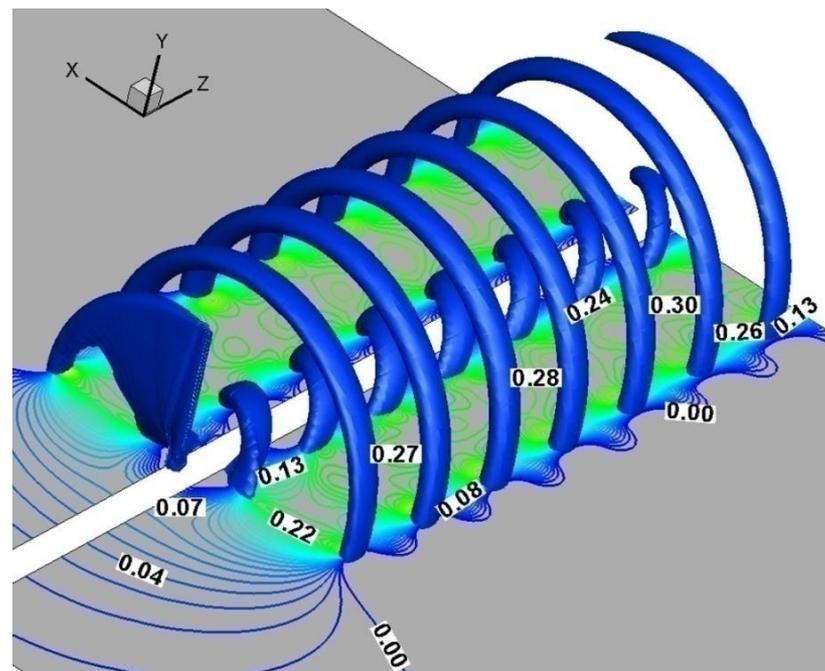
$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593$$

风力机空气动力学的计算

涡尾迹方法 (VWM) 和计算流体力学 (CFD)



涡尾迹



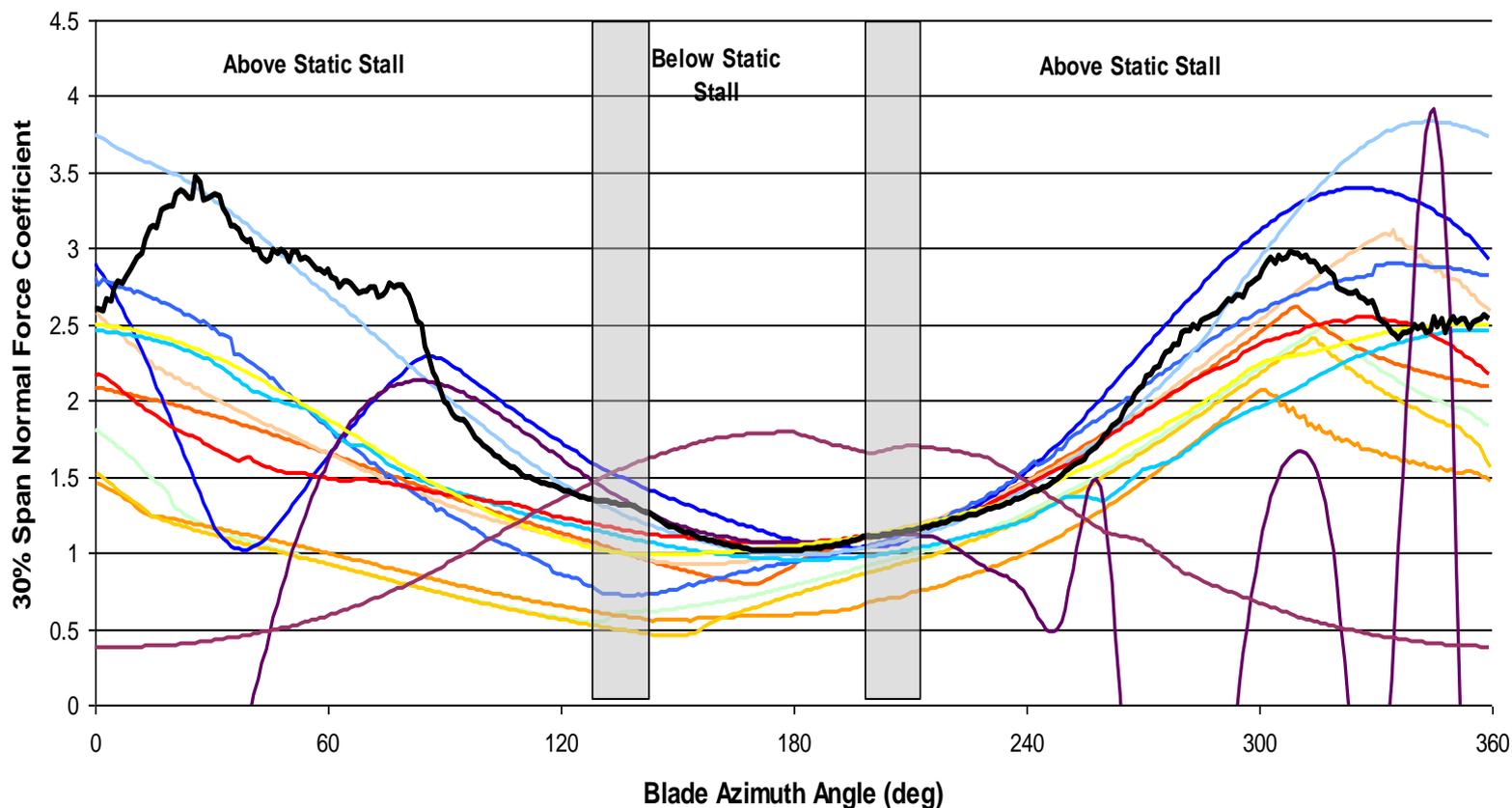
CFD



风力机空气动力学的计算

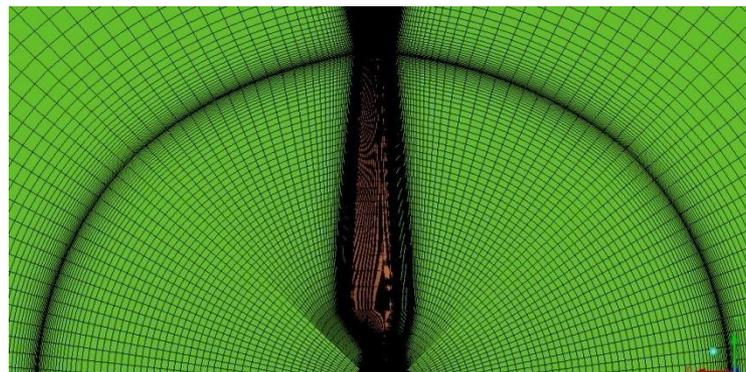
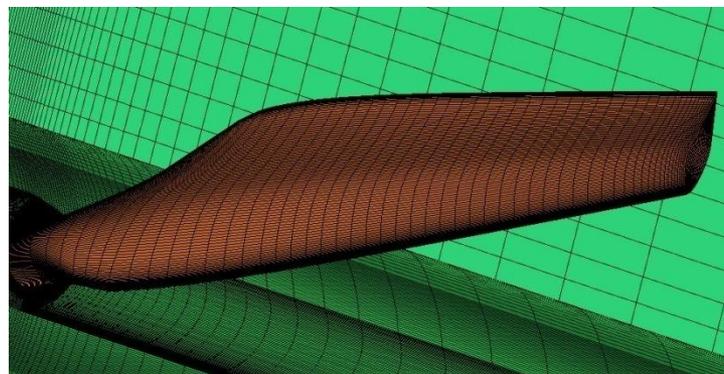
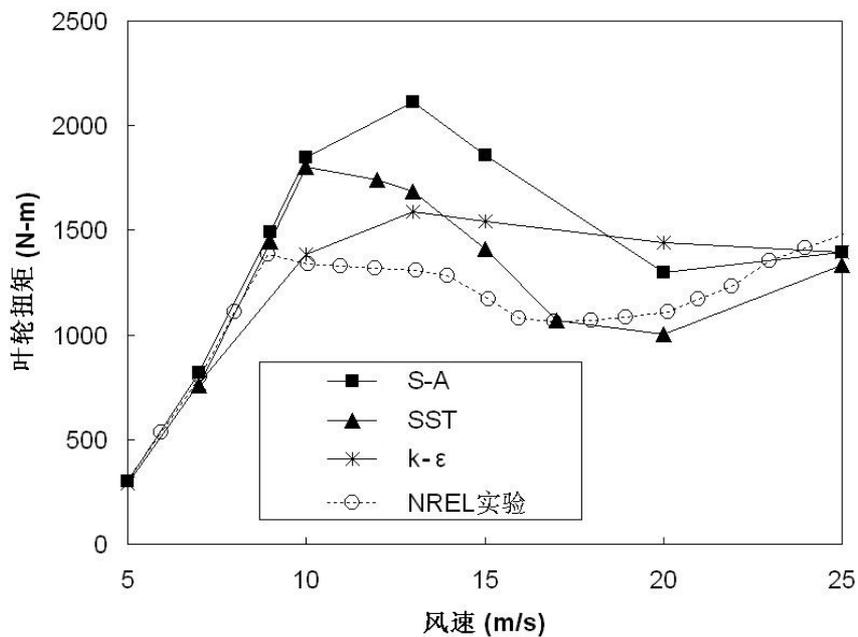
NREL Unsteady Aerodynamics Experiments Phase VI – Blind Comparison

Upwind Configuration, 30 Degrees Yaw, 15 m/s



风力机空气动力学的计算

RANS的缺陷：流动分离预测不准确，失速后计算误差大





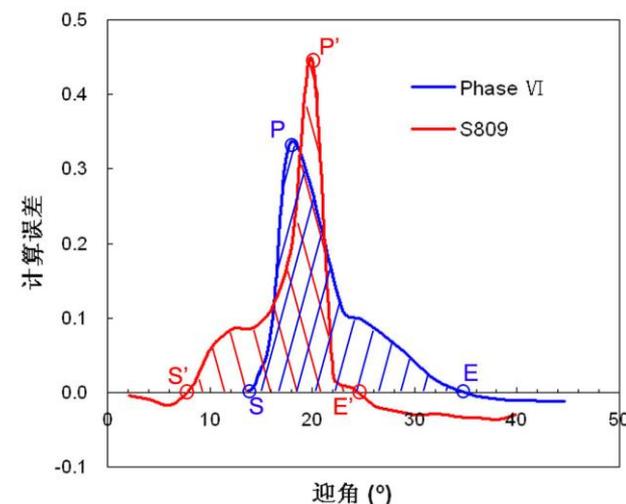
风力机空气动力学的计算

➤ SST湍流模型的经验常数:

$$\sigma_{k,1}=1.176, \sigma_{\omega,1}=2.0, \sigma_{k,2}=1.0, \sigma_{\omega,2}=1.168, a_1=0.31,$$

$$\beta_{i,1}=0.075, \beta_{i,2}=0.0828, \alpha_{\infty}^*=1.0, \alpha_{\infty}=0.52, \alpha_0=\frac{1}{9},$$

$$\underline{\beta_{\infty}^*=0.09}, R_{\beta}=8.0, R_k=6, R_{\omega}=2.95, \xi^*=1.5$$



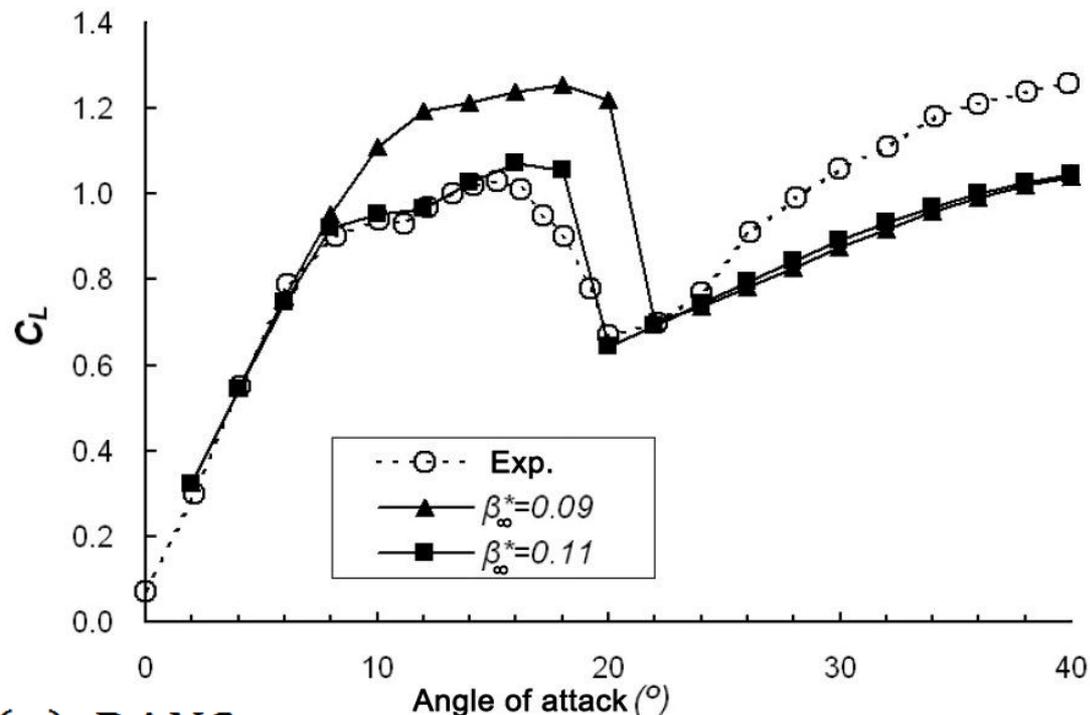
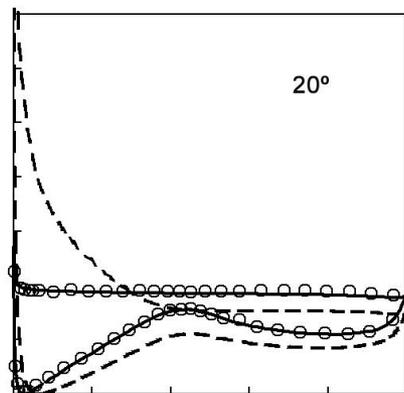
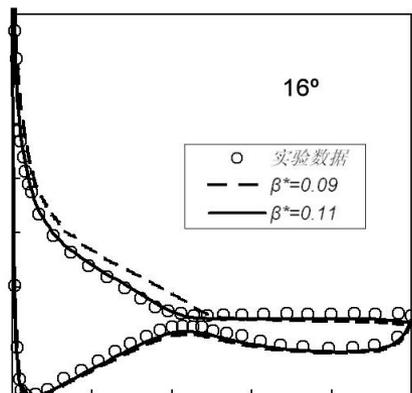
➤ 对 β_{∞}^* 的数值进行调整, 该经验常数与湍动能的生成项直接相关:

$$\mu_T = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2)$$
$$\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\mu_L}{\rho \omega y^2}\right)$$

风力机空气动力学的计算

- 翼型升力系数计算结果的准确性在参数调整后获得了极大改善；
- 只需以个别迎角下的实验数据作为参照，即可校正出适用于整个迎角范围的最优 β_{∞}^* 数值。

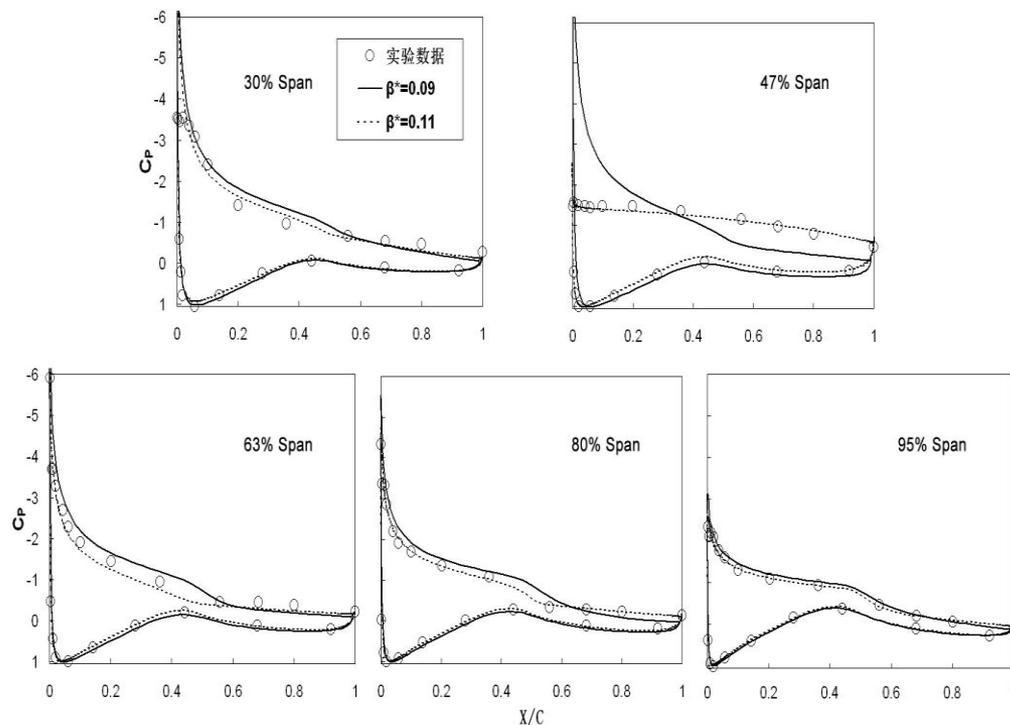
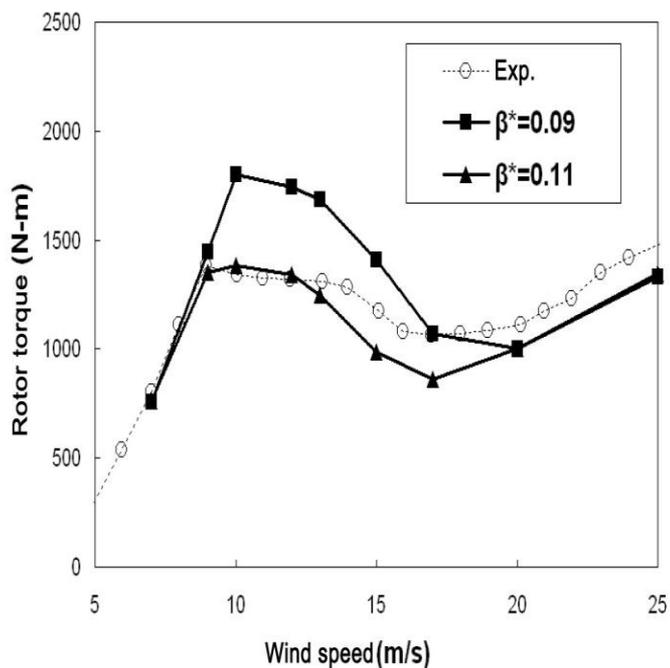


$$\frac{\mu_T(\alpha), \text{RANS}}{\mu_T(\alpha), \text{Real}} = \text{const?}$$

Reynolds number of 1×10^6

风力机空气动力学的计算

➤采用在翼型上校正获得的最优封闭常数，改善了叶轮失速状态的计算准确程度。



$V=10\text{m/s}$



风力机空气动力学的计算

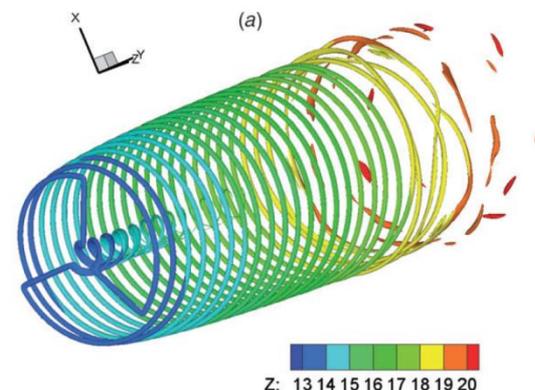
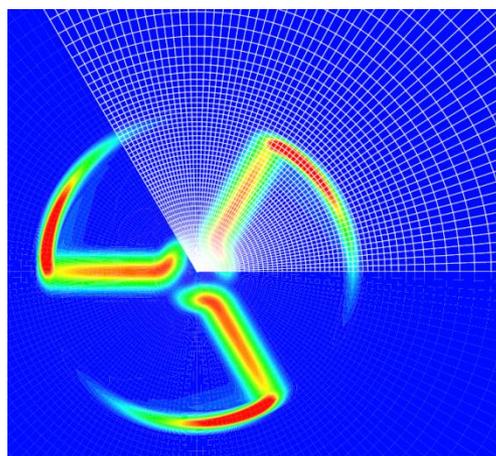
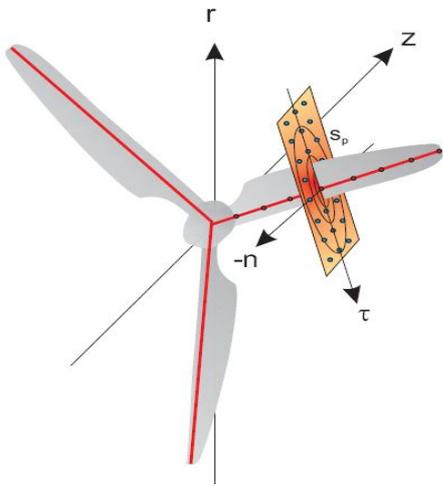
致动线+LES

- 风力机的尾流场内存在大尺度和高强度的湍流，湍流的发展情况很大程度上决定了尾流的发展情况，但湍流模拟也正是CFD数值模拟的根本难点之一。
- 雷诺平均方法（RANS）在尾流模拟中准确性很差，于是采用能够更精确模拟湍流的大涡模拟方法（LES）成为相关研究的选择之一。
- 庞大的计算量是LES的一个显而易见的障碍。大型风力机的尺度大，运行雷诺数较高，难以用常规的LES方法开展数值模拟。

风力机空气动力学的计算

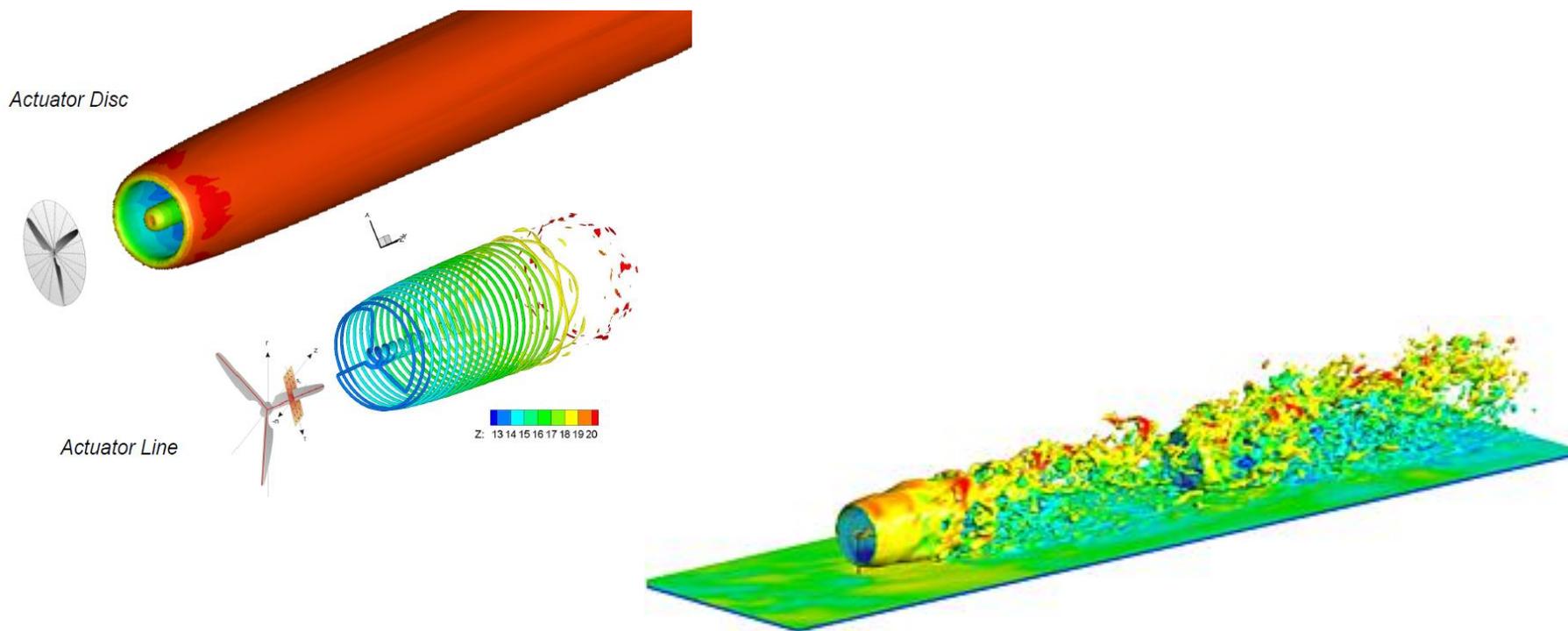
致动线+LES

- 将升力线理论和CFD方法结合，忽略叶片的真实几何外形，将叶片对周围空气的扰动通过作用在升力线上的力来体现，计算域内没有任何壁面边界存在，可以显著减小计算量；
- 升力线上的作用力由叶片剖面当地扭转角、速度矢量和翼型的气动力系数确定，通过体积力的方式添加进CFD动量方程的源项，从而在没有叶片存在的计算域内产生虚拟叶片的效果。



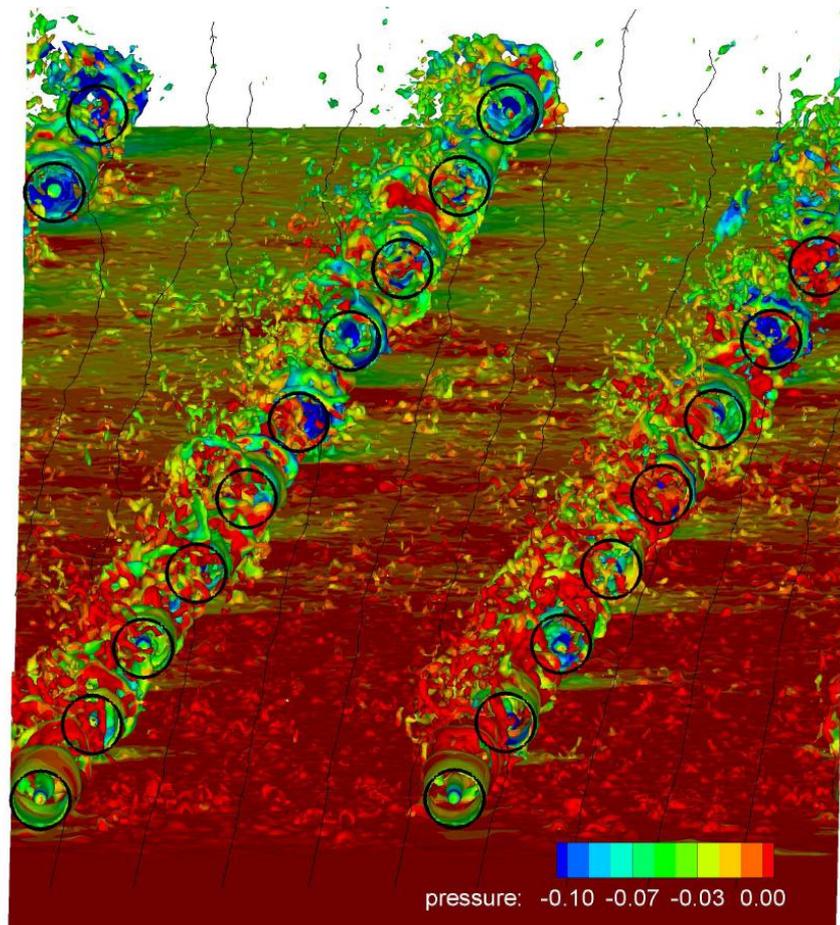
风力机空气动力学的计算

➤如果进一步简化，将叶片作用效果在整个扫略面积内平均，则致动线简化为致动盘。



致动盘+LES：前后两台风机之间的干扰

风力机空气动力学的计算



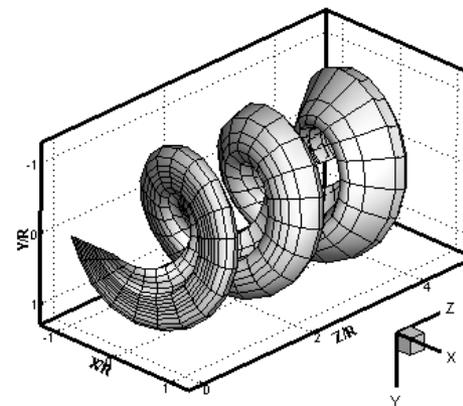
致动盘+LES：风力机阵列的尾流干扰

风力机空气动力学的计算

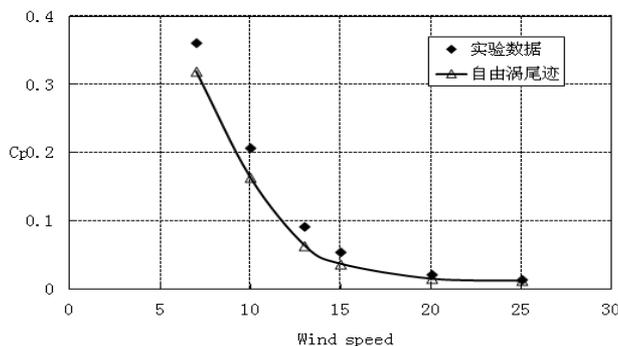
涡尾迹方法

自由涡尾迹模型

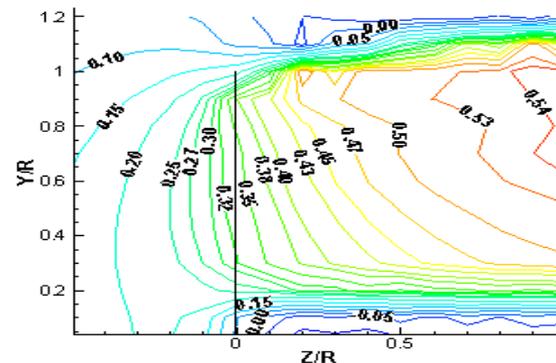
- ✓ 引入涡尾迹的扩张与畸变影响
- ✓ 引入涡核及其粘性耗散效应
- ✓ 松弛迭代
- ✓ 成功捕捉叶尖涡和叶根涡的卷起的特征
- ✓ 提高风力机叶片气动载荷计算的精度



自由涡尾迹最后收敛结果



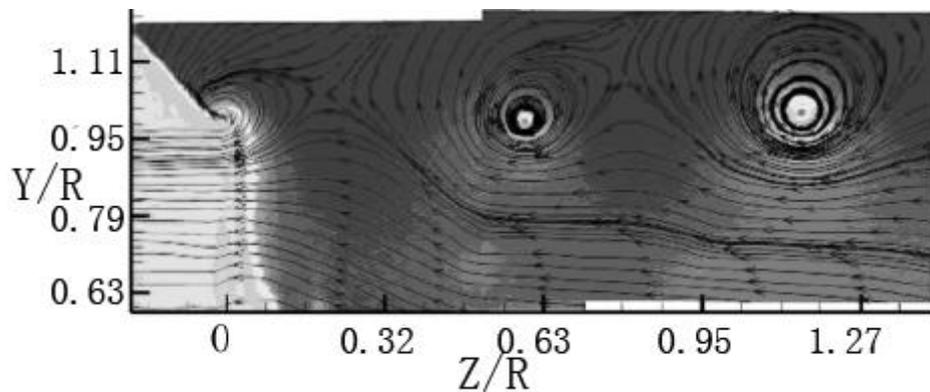
NREL PHASE VI 功率系数曲线计算与实验比较



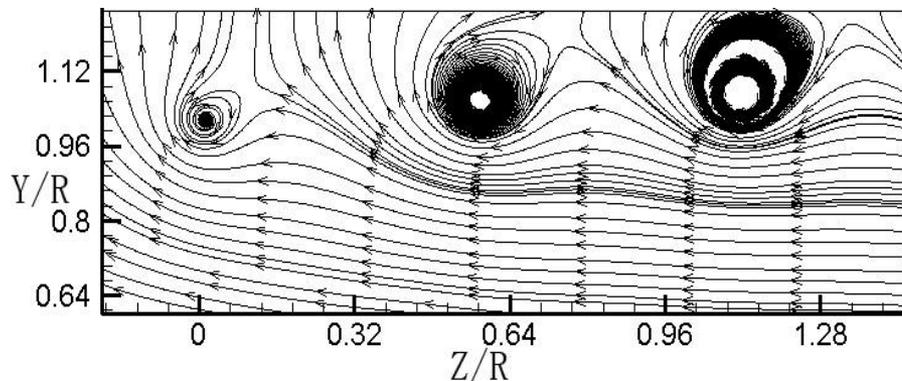
NH1500叶片轴向诱导速度因子分布

风力机空气动力学的计算

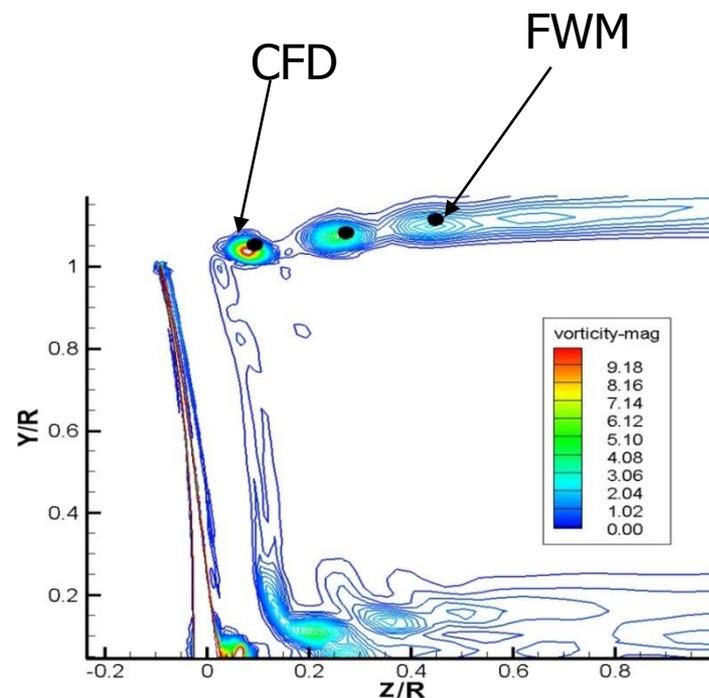
➤ 尾流的空间流场结构计算结果。



(a) 实验结果



(b) 计算结果

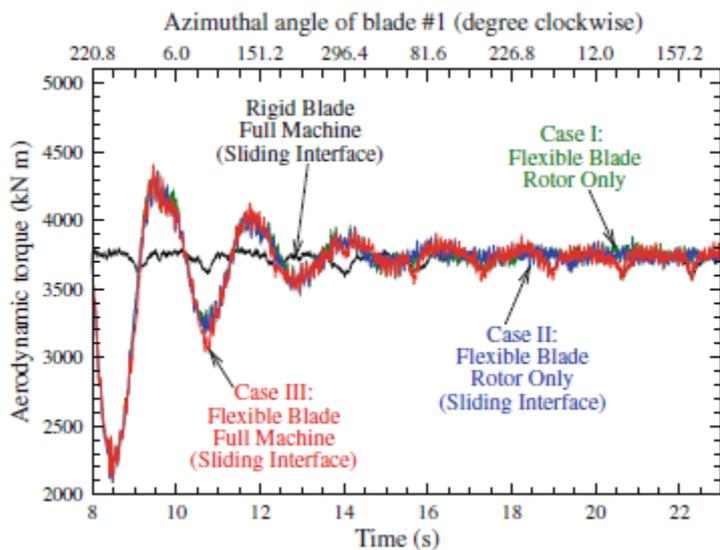




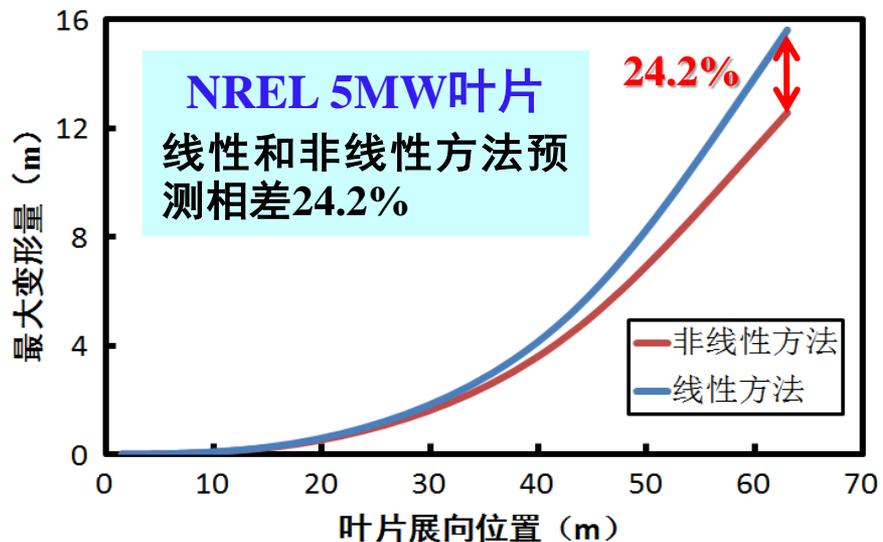
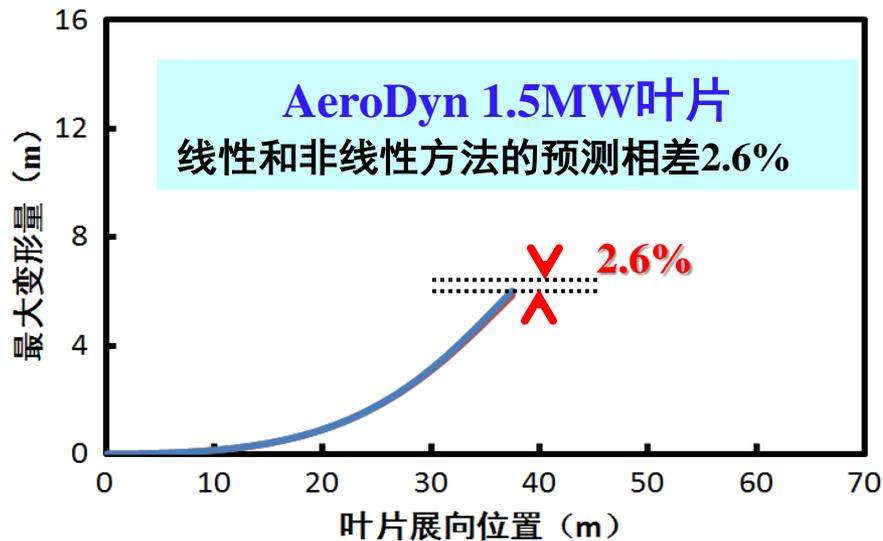
风力机空气动力学的计算

气动弹性计算

Comput Mech (2012) 50:821–833

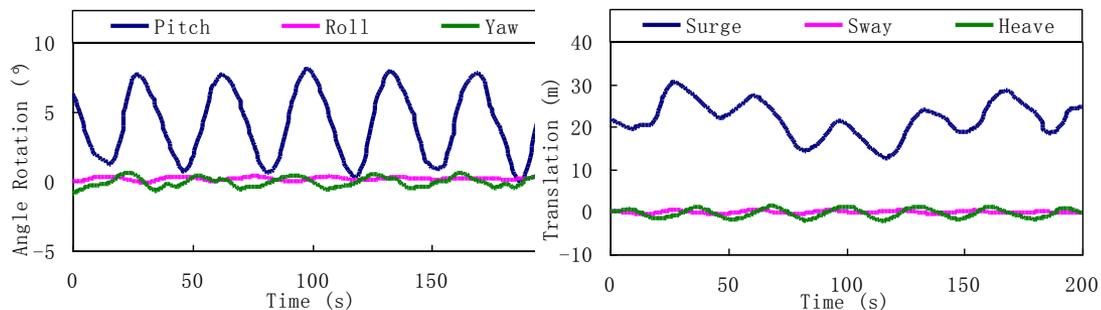
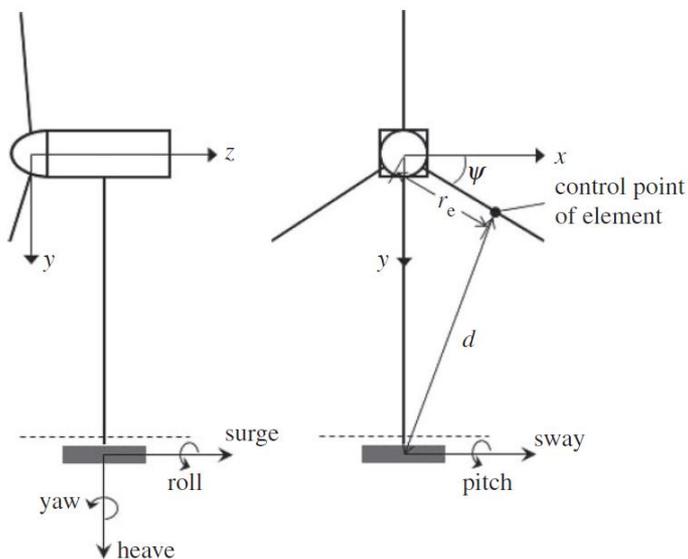


功率变化幅度最大70%

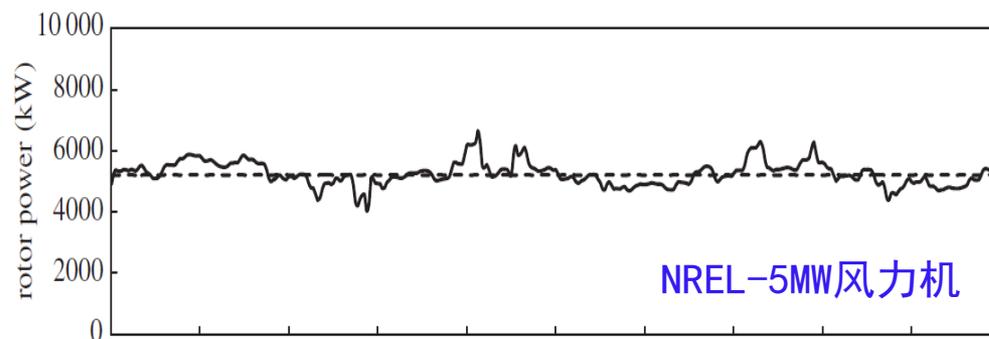


风力机空气动力学的计算

海上漂浮式风力机多自由度运动下的气动力计算



Sebastian T, Lackner MA. WIND ENERGY, 19 MAR, 2012



Xu BF, Wang TG, Philosophical Transactions A, 2014



提纲

风力机空气动力学的复杂性

风力机的气动计算

风力机设计中的气动问题

小结



风力机设计

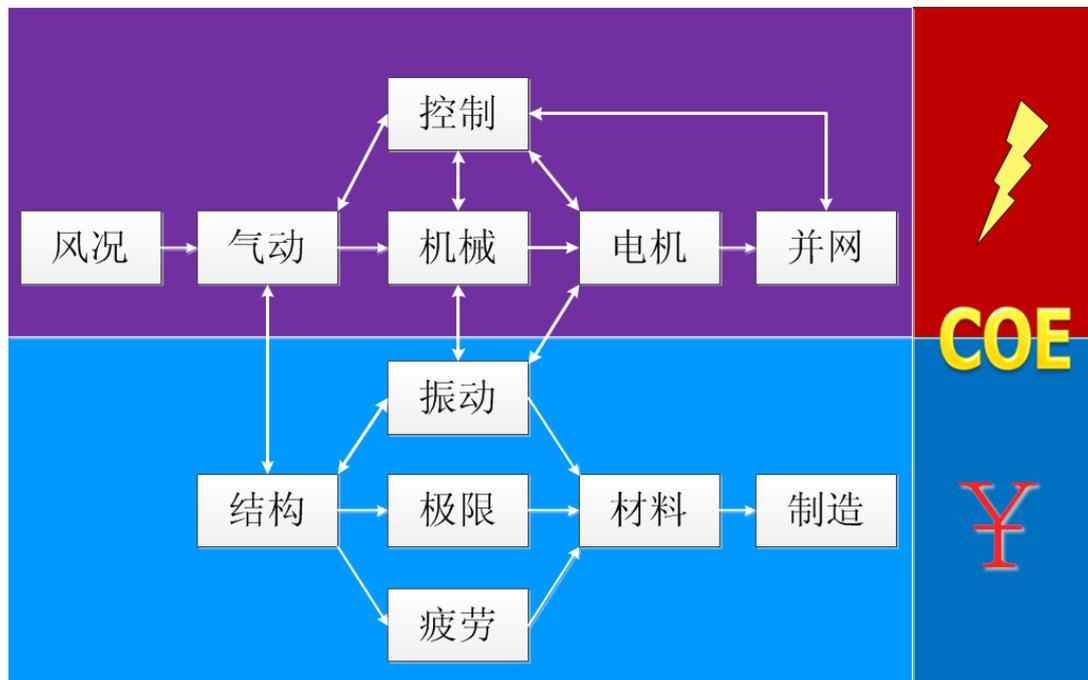
风力机设计的特点

- 部件多，涉及到众多部件的设计、选型和匹配；
- 涉及的设计目标众多，目标之间还时常存在冲突；
 - ✓ 功率系数 C_P/AEP 最大
 - ✓ 度电成本 COE 最小
 - ✓ 叶片总量最轻
 - ✓ 噪声最小
 - ✓ 叶片根部推力最小等



风力机设计

风力机设计的特点



➤ 约束条件众多；

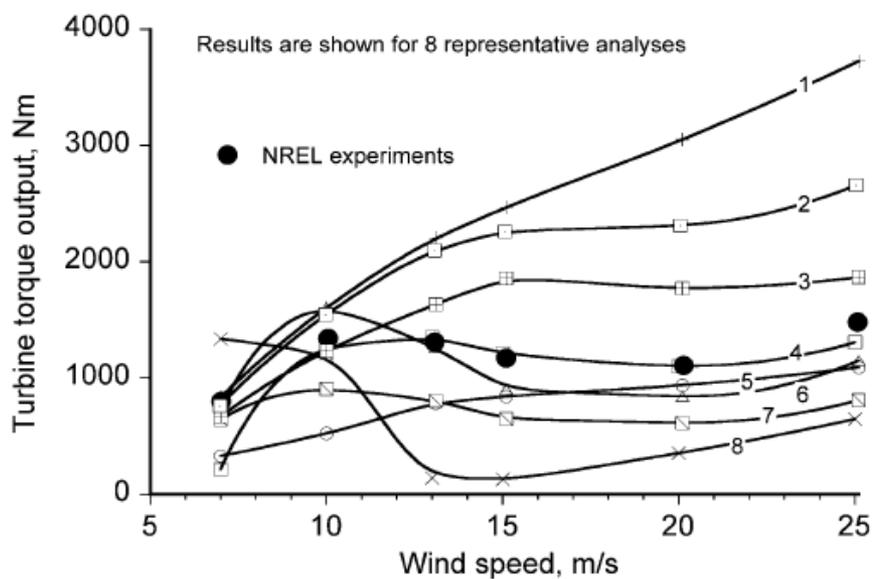
- ✓ 功率约束
- ✓ 载荷约束
- ✓ 重量约束
- ✓ 成本约束
- ✓ 几何约束
- ✓ 风资源约束
- ✓ 气弹约束等

➤ 涉及的学科众多，计算量大；

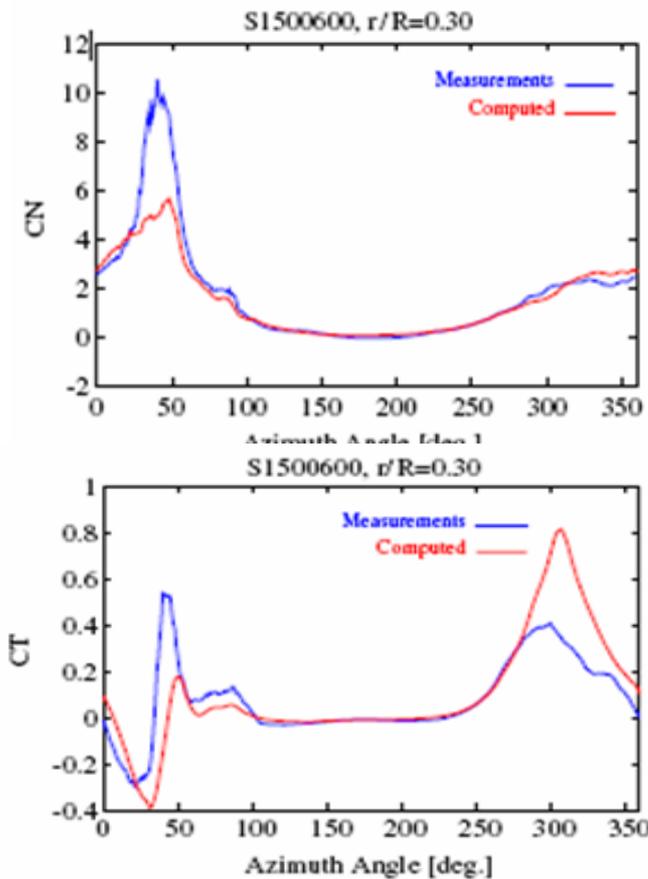
风力机优化设计中的大部分因素都直接或间接与气动相关。

风力机设计

NREL 盲比结果和最新进展



NREL 盲比实验结果 (2002)



最新结果



风力机设计

为什么**BEM**在风力机设计中是成功的？

气动性能的准确计算并不一定是**气动**最优设计的必须

- 目的是在设计工况下具有好的气动性能
- 变桨距风力机工作迎角小
- 不需考虑非定常效应
- 无需考虑三维旋转效应
- 用最简单的方法计算优化目标函数也能保证气动设计逐步达到最优



风力机设计

为什么存在大量结构损坏？

气动载荷的准确计算是风力机设计的必须

- 叶片的结构设计
- 其他零部件（如主轴、底盘、塔架、变桨机构、偏航机构、基础等）的设计

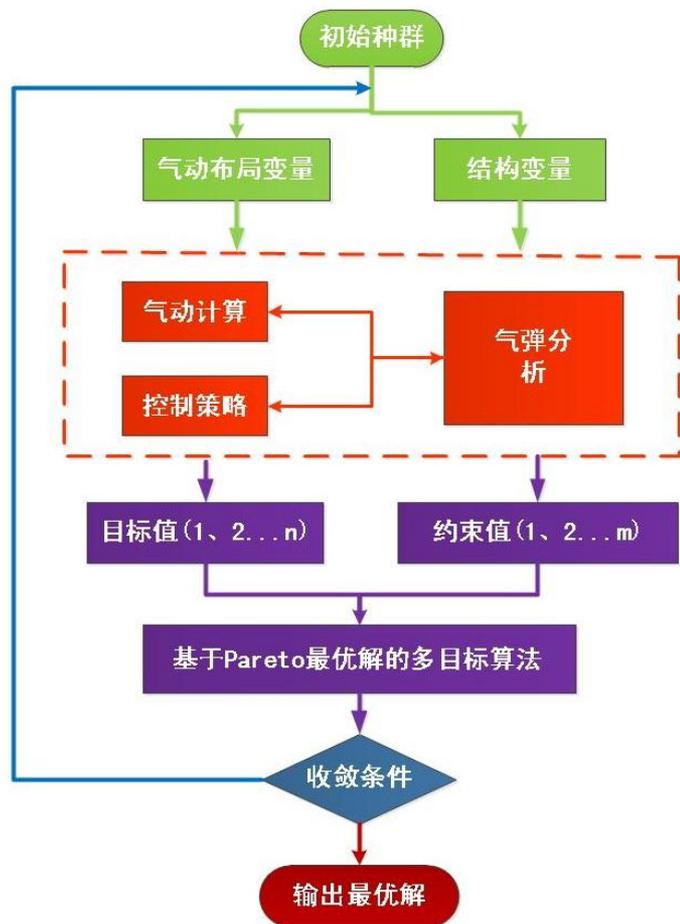
载荷的准确计算是结构选型、优化的根本，也是整机成本优化的关键，必须考虑非定常效应、动态失速、三维旋转效应、气弹、结构动态响应等。





风力机设计

基于进化算法和Pareto最优解理论的风力机叶片设计



特点:

- 不追求唯一的最优解，而是获得Pareto最优解集；
- 能处理任意目标数的优化问题；
- 能处理任意数目的约束条件；
- 鲁棒性好，收敛速度快；
- 易于并行性；

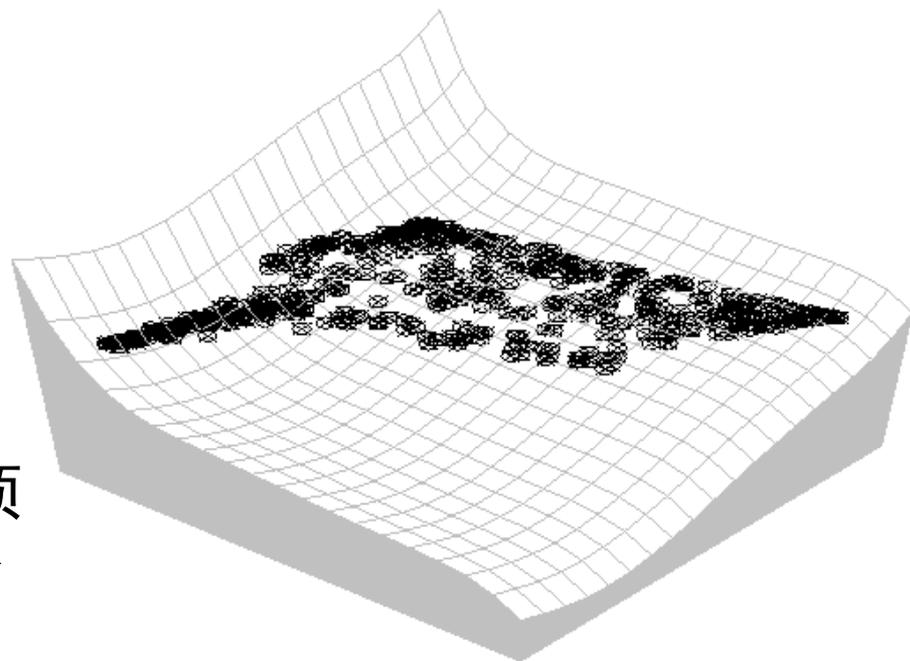


风力机设计

1.5MW风力机叶片设计

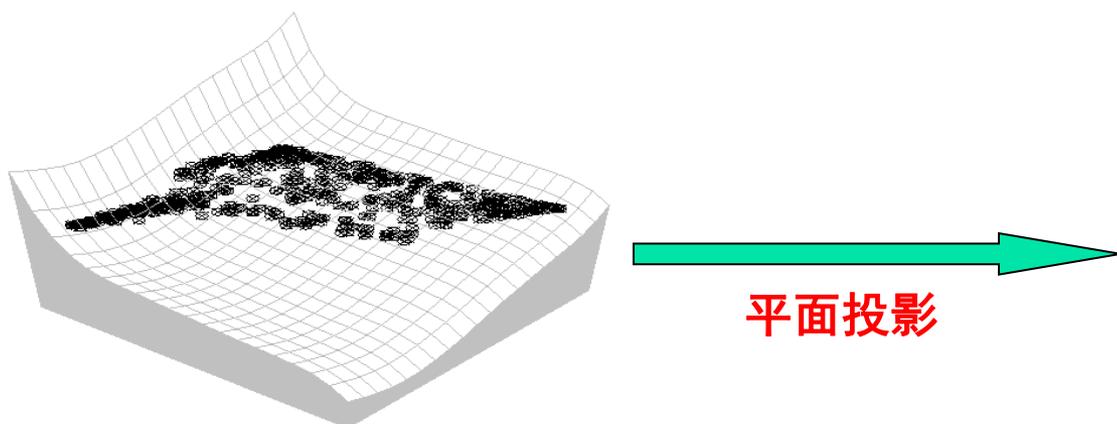
优化目标：

- 年发电量最大
 - 叶片重量最轻
 - 叶根载荷最小
-
- 综合最优解集分布在曲面上；
 - 作为实际叶片设计方案，必须进行气动效率、结构承载等综合分析

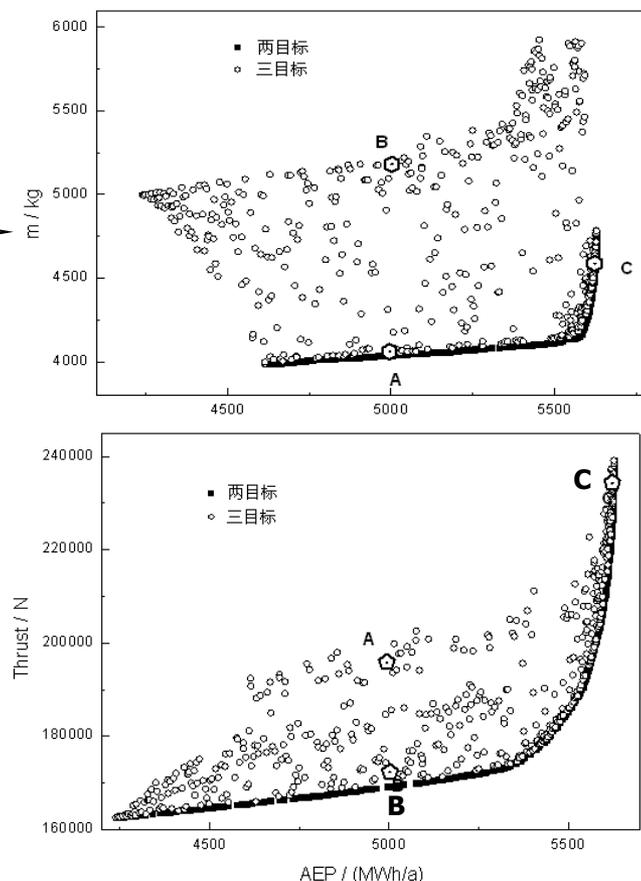


风力机设计

1.5MW风力机叶片设计



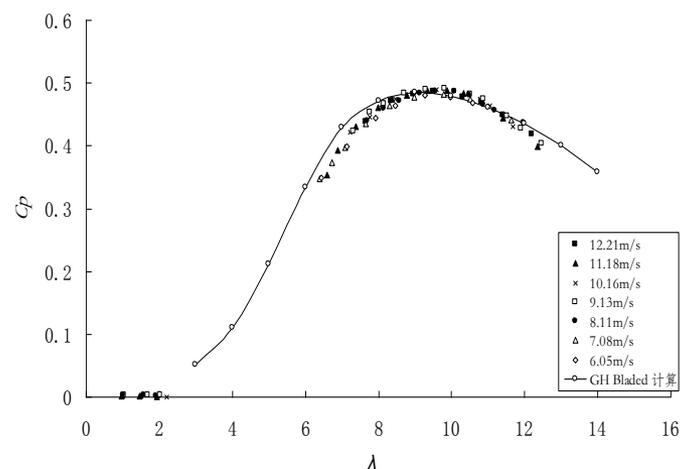
- ✓ 叶片 C: 年发电量最大
- ✓ 叶片 C: 比 A 重, 比 B 轻
- ✓ 叶片 C: 载荷最大
- ✓ 叶片 B: 年发电量与 A 相同
- ✓ 叶片 B: 比 A 重
- ✓ 叶片 B: 载荷最小



风力机设计

1.5MW风力机叶片气动实验验证

1: 16的缩尺模型在 $12\text{m} \times 16\text{m}$ 大型风洞中进行了气动性能试验验证，其缩尺模型风洞试验得到的最大功率系数达到0.492，再次表明了NH1500叶片气动性能的优越性。考虑到尺寸效应（雷诺数效应），显然全尺寸的NH1500叶片的最大功率系数应该高于0.492



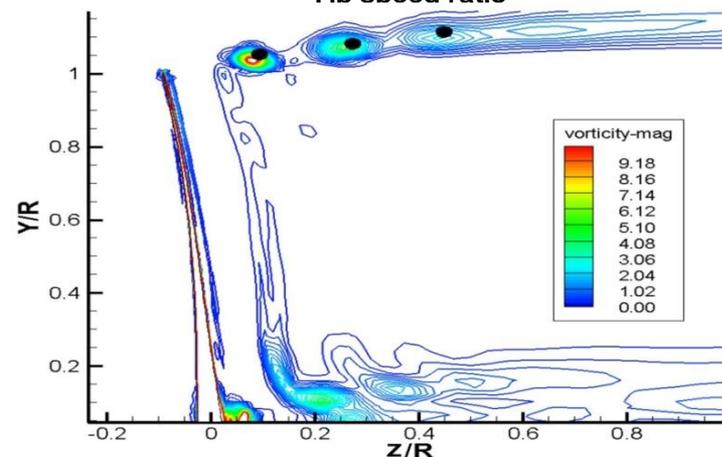
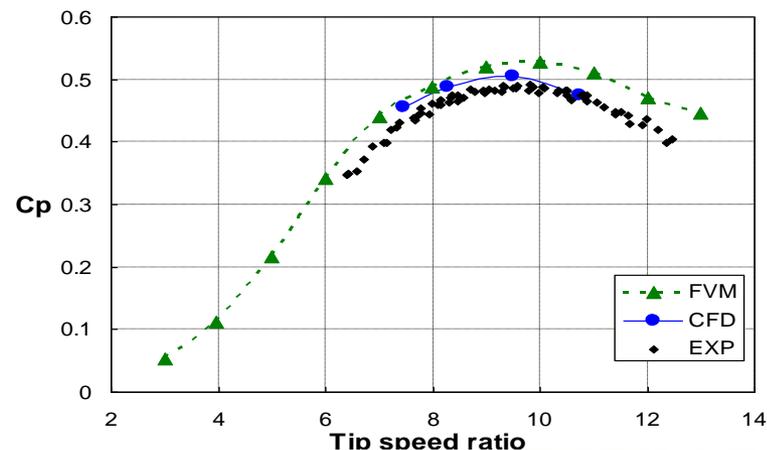
NH1500叶片风洞实验结果

风力机设计

1.5MW风力机叶片计算校核

自由涡尾迹方法和CFD方法计算的气动结果也表明NH1500叶片的最终设计方案气动性能优异，其最大功率系数分别为0.528和0.505

方法	最大Cp
自由涡尾迹（全尺寸叶片）	0.528
C F D （全尺寸叶片）	0.505
风洞实验（缩尺模型）	0.492



FVM和CFD计算的叶尖涡核位置对比



小结

- 风力机空气动力学的一些基本问题远未解决；
- 必须进一步发展适合风力机模拟的高精度的CFD计算模型，并建立可靠的气动工程模型；
- 运转环境的高度复杂性、风电设备的高度复杂性及其设计和制造所涉及的多学科性使得风电产业的发展还远远落后于传统产业。风力发电产业作为一个新兴的产业，兆瓦级以上的大型风力机是从上世纪末和本世纪初开始安装的，存在的问题正在逐步暴露出来，还没有完全暴露出来，这既给我们带来巨大的挑战，又为我们带来巨大的机遇。



请批评指正！

