

# 叶片气动不平衡对风机载荷和发电量的影响分析

文/陈珍 马文博  
广东粤电风电有限公司

为深入研究气动不平衡现象对风力发电机组载荷和发电量的影响，对风机叶片气动不平衡现象进行详细分析。结合风机叶片在气动平衡与不平衡状态下的实际监测数据，结果表明气动不平衡导致风机发电效率下降，发电量减少，叶片载荷增加；容易造成风电机组的损伤。研究成果对优化风机设计、改善智能监测技术方法，提高运维效率以及推动风电行业的可持续发展具有重要的参考价值。

在当今全球能源格局中，可再生能源的地位日益凸显，风力发电作为可再生能源的重要组成部分，在全球范围内得到了广泛应用。随着技术的不断进步，风机的规模持续扩大，叶片长度和塔筒高度不断刷新纪录，额定功率也逐步攀升。然而，叶片不平衡逐渐成为制约风机性能和寿命的关键因素之一。气动不平衡作为叶片不平衡的主要表现形式，相较于质量不平衡，对风电机组的振动影响更为显著。其不仅引发风机振动加剧，噪声增大，还在发电量降低和载荷增加方面带来严重后果，进而对风机的运行稳定性和整体寿命构成较大威胁。因此，深入研究气动不平衡对风机发电量和载荷的影响机制，对于优化风机设计，提高运维效率以及推动风电行业的可持续发展具有重要意义。

## 气动不平衡现象

气动不平衡是指风机叶片在旋转过程中，由于形状、质量分布或安装角度等因素的差异，导致叶片零度角偏差而产生的气动力不平衡。这种不平衡会产生额外的振动和载荷，对风机的各个部件造成冲击和损伤。

产生气动不平衡的主要原因有：①叶片在工厂的生产过程中，将0刻度标尺安装错位而造成叶片出厂时本身的产品误差；②在吊装过程中，由于施工环境较为复杂，施工人员的经验、水平限制，在安装叶片时0度位置的安装偏差所引起；③变桨控制过程中产生的故障致使运行过程中出现的变桨减速器输出值误差，叶片0度角发生偏差，引起叶片的不平衡。此外，叶片长期运维过程中会出现的磨损和变形等，都是气动不平衡现象产生的缘由。

## 气动不平衡对风机载荷的影响

当叶片存在气动不平衡时，风机会受到额外的力和扭矩作用，导致其受力不均匀，气动不平衡时会额外产生俯仰力矩和偏航力矩，这些额外力矩和不均匀受力会导致风机各个部件的载荷增加，进而加速其磨损和疲劳损伤。

下面分别在风力发电机的叶根和轮毂处建立坐标说明风机的载荷情况，分析气动不平衡对风机各部分的影响，如图1所示。图1中XB和XN为轴向，YB和YN为径向。

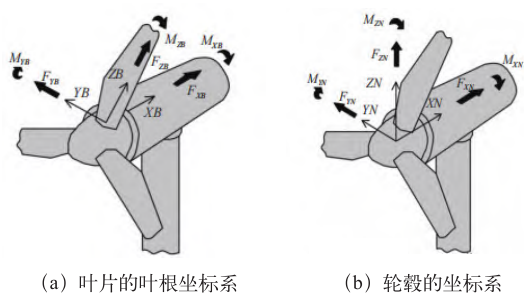


图1 坐标系示意图

风机的叶片载荷可以通过以下公式计算

$$F_{XB} = \int_r^R \frac{1}{2} \rho W^2 C C_x dr \quad (1)$$

$$F_{X-rp} = \int_r^R m_i(r) \Omega^2 r dr \cos \Omega_i \cos \delta \quad (2)$$

$$M_{X-rp} = \Omega^2 \int_r^R e_r m_i(r) r dr \sin \Omega_i \cos \delta \quad (3)$$

式中,  $F_{XB}$  为单位长度翼型截面的气动力;  $\rho$  为空气密度;  $W$  为相对速率;  $C$  为叶片弦长;  $C_x$  为惯性坐标下的升力系数;  $F_{X-rp}$  为离心力;  $M_{X-rp}$  为气动不平衡作为叶片不平衡的主要表现形式;  $r$  为叶根距叶轮中心的距离;  $\delta$  为轴倾角;  $\Omega_i$  为旋转方位角;  $e_r$  为叶根坐标系和轮毂坐标系原点之间的距离;  $m_i(r)$  为在  $r$  处的叶素集中质量。

相较于质量不平衡, 气动不平衡对风电机组的振动影响更为显著。其不仅引发风机振动加剧、噪声增大, 还在发电量降低和载荷增加方面带来严重后果, 进而对风机的运行稳定性和整体寿命构成较大威胁。

### 气动不平衡对风机载荷的影响

具体来说, 气动不平衡对风机载荷的影响主要体现在以下几个方面。

1) 叶片载荷增加。气动不平衡会导致叶片在旋转过程中受到更大的气动力作用, 从而增加叶片的载荷。这种载荷增加会加速叶片的磨损和变形, 进而影响其性能和使用寿命。为了提高叶片对抗疲劳性能的影响, 可以采用抗拉伸强度和疲劳强度优越的合金钢、纤维增强复合材料等作为叶片的制造材料。

2) 轴承和齿轮载荷增加。由于气动不平衡导致的振动和载荷增加, 风机的轴承和齿轮等机械部件会受到更大的应力和磨损, 这种应力和磨损的累积会导致部件的疲劳损伤和失效。主要是由于0度角

偏差增大后, 气动不平衡增大, 轮毂中心载荷不断增加, 影响传动链和机舱底架等主要部件, 对齿轮箱、轴承的寿命有较大影响。

3) 塔架和基础载荷增加。气动不平衡还会对风机的塔架和基础产生额外的载荷作用。当偏航中心载荷增加, 那么偏航系统和塔筒也相应增加偏航制动和驱动负担, 降低部件疲劳寿命和带来不利影响。这种载荷增加会导致塔架和基础的变形和损伤, 进而影响风机的整体稳定性和安全性。

### 气动不平衡对风机发电量的影响

当风电机组中有一叶片出现0度角偏差时, 攻角发生改变, 导致叶片力矩变化, 产生一个新的倾覆力矩, 造成三叶片力矩不平衡, 则影响功率吸收, 从而影响风机发电量。主要体现在以下几个方面。

1) 功率损失。气动不平衡时产生的倾覆力矩, 是风机叶片在旋转过程中受到的额外阻力障碍, 从而降低风机的功率输出。随着气动不平衡程度的增加, 功率损失也会逐渐增大。

2) 发电效率下降。由于气动不平衡导致的振动和载荷增加, 风机的发电效率会受到影响。振动会加剧叶片和轴承的磨损, 导致能量转换效率降低; 而载荷增加则会使风机的机械部件承受更大的应力, 进而影响其长期运行稳定性。

3) 年发电量减少。当叶片出现0度角偏差增大时, 也就是说气动不平衡不断增加, 风能的利用率减少, 功率损失增大, 风机的单次发电量明显下降, 甚至会因频繁停机维修和更换受损部件而导致年发电量的收益损失扩大。

### 载荷监测结果分析

本文应用光纤载荷传感器作为监测重要元件, 以某风电场的3.5 MW风电机组作为研究对象, 记录10 min时间段内的载荷和功率输出数据。使用上海拜安公司的载荷数据分析软件对某风电场的风机进行载荷监测, 采集三叶片气动不平衡量数据, 分析其对风机发电量和载荷的影响。具体如图2和图3所示。

从图2的监测数据显示, 三叶片的载荷趋势虽然一致, 但是三叶片的载荷是明显不同的。绿色波形的叶片承受的载荷最高, 红色波形的叶片承受的

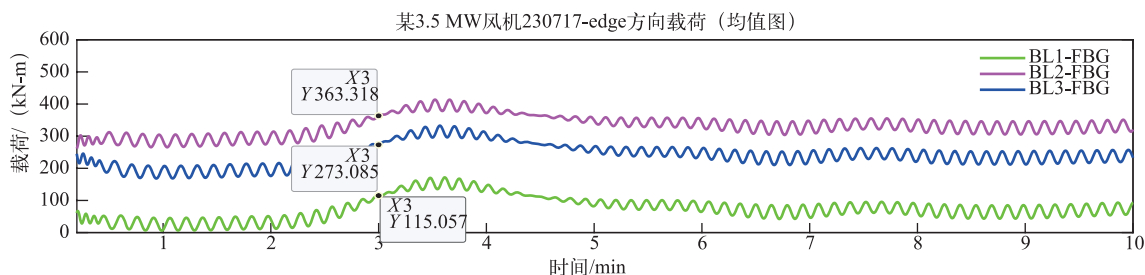


图2 某3.5 MW风机在气动不平衡时挥舞弯矩和摆振弯矩10 min的时域均值图

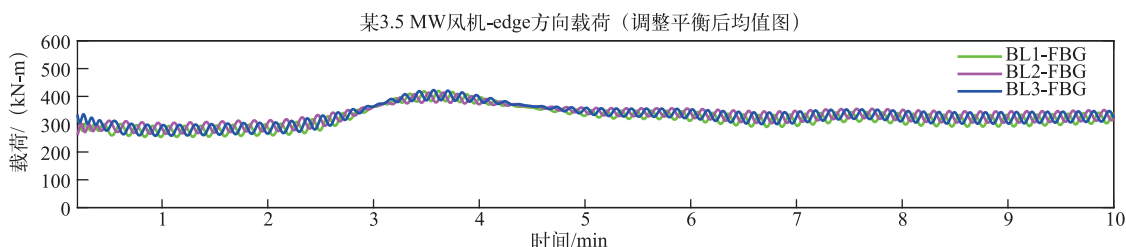


图3 某3.5 MW风机在气动平衡时挥舞弯矩和摆振弯矩10 min的时域均值图

载荷次之，蓝色波形的叶片承受的载荷最低。由此表明在三叶片处于气动不平衡时，其载荷是不均衡的。额外的力矩作用在塔筒上，不但会引起机舱的振动和塔筒本身的晃动，而且严重影响机组的寿命和运行的稳定。

如果能够在风电机组运行过程中，通过实时监测叶片旋的数据，当产生气动不平衡预警时，通过自动调整三叶片的桨矩角后，则可大大改善三叶片的气动不平衡状态。从图4可知，通过对监测数据的分析，一旦发现叶片不平衡，自动调整三叶片的桨矩角，避免额外力矩的产生，三叶片气动不平衡显著改善。同时也表明：风电机组的三叶片挥舞弯矩和摆振变矩在测试过程中是一致的，并未发生异常。课题小组人员根据测试数据分析，然后实地对该机组的主轴、齿轮箱和偏航装置进行检查，发现风电机组不受损。

当风电机组中有一叶片出现0度角偏差时，攻角发生改变，产生新的倾覆力矩，则影响功率吸收，发电效率低下，从而影响风机发电量。在图4中，红色波形的是在气动不平衡状态下，风机叶轮输出的机械功率-风轮旋转周数变化曲线；而蓝色波形的则是在气动平衡状态下，风机叶轮输出的机械功率-风轮旋转周数变化曲线图。也就是说，在气动不平衡时，风机的机械功率低下；经调整叶片的桨矩角使叶片处于气动平衡后，其功率大为提升，从而提升发电量，增加企业效益。

某3.5 MW风机-风机叶轮机械功率-风轮旋转周数变化图，调整平衡前后对比

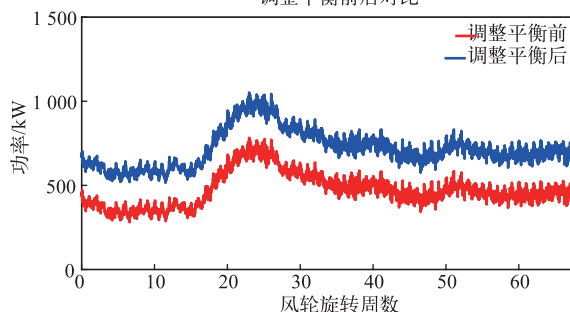


图4 某3.5 MW风机在气动调平前后的功率输出图

## 结束语

本文通过对叶片气动不平衡现象的深入剖析，详细阐述了其产生的根源，以及对风机载荷和发电量造成的多方面严重影响。通过实际监测数据的有力支撑，充分证明了调整叶片桨矩角实现气动平衡的重要性和有效性。这一举措不仅能够有效降低风机的载荷与振动，减轻齿轮箱、偏航系统等关键部件的损伤，延长风机各部件的使用寿命，降低运维成本，还能显著提高发电量，为企业带来可观的经济效益。随着风电智能监测技术的飞速发展，对气动不平衡问题的持续深入研究，必将提高风机整体性能和寿命，推动风电行业在可持续发展的轨道上稳步前行，为全球能源转型和环境保护贡献力量。EA

（收稿日期：2024-12-15）