

## 风力发电场发电功率预测与优化

风力发电作为一种清洁可再生的能源，在全球能源结构中占有越来越重要的地位。随着技术的进步，风力发电的成本已经大幅下降，成为许多国家能源政策的重点。通过精准预测和最大化风力发电功率，我们不仅能更有效地应对持续增长的电力需求，还能增强电网的稳定性并优化能源配置。因此，开发先进的预测和控制策略以提升风电场的发电效率显得尤为重要，这对保障能源供应的安全性和推动环境的可持续性发展具有重大意义。

涡轮机主要由塔架(tower)、叶片(blade)、机箱(nacelle)、齿轮箱(gearbox)和发电机(generator)组成。当风吹过叶片时，叶片捕捉风能并开始旋转，这种旋转力通过轮毂传递给齿轮箱。齿轮箱再将低速旋转转换为高速旋转，以驱动发电机产生电力。涡轮机的控制系统调整桨距角 ( $\theta$ ，每个叶片都有一个桨距角) 和偏航角 ( $\gamma$ )，如图 1(a)所示，以优化能量捕获并保护涡轮机免受过大风力的损害。

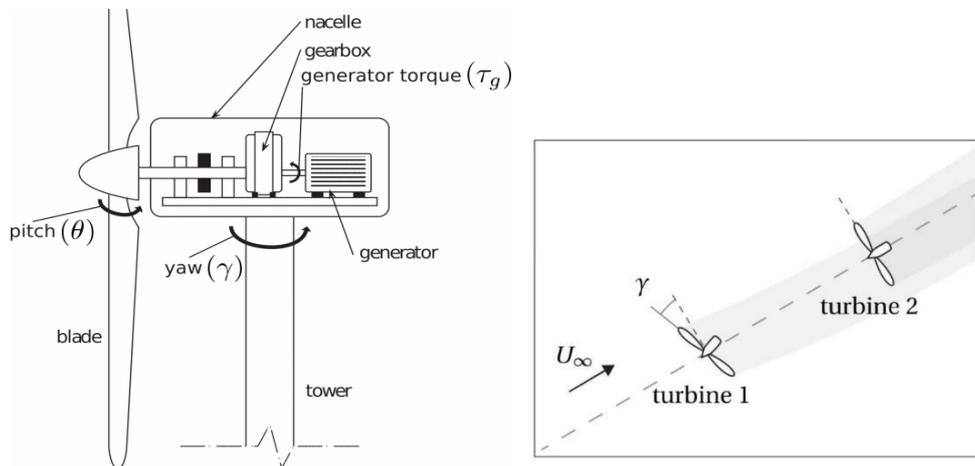


图 1 (a) 涡轮机示意图<sup>[1]</sup>

(b) 风电场涡轮机配置与尾流影响示意图<sup>[2]</sup>

**桨距角 (pitch)：** 涡轮机的叶片与旋转平面（所有叶片在旋转时形成的平面）的夹角

**偏航角 (yaw)：** 偏航轴承相对于地理北方的旋转角度（等效于轮毂与发电机连线与地理正北方向所形成的夹角（正北顺时针方向的夹角）。）

**轮毂：** 处于涡轮机叶片旋转形成圆盘的中心处。

一个风电场通常由多个这样的涡轮机组组成，它们分布在同一地区，每台涡轮机都独立捕捉风能并转化为电能。然而，涡轮机之间的尾流作用对风场发电量有重大影响。如图 1(b)所示，两台涡轮机（标记为 turbine 1 和 turbine 2）被布置在一定的角度 ( $\gamma$ ) 和距离上，以便在风速（标记为  $U_\infty$ ）下操作。turbine 1 首先接触到来风，捕捉风能并将其转换为电能。在此过程中，涡轮机的叶片旋转产生了湍流和减速的尾流，这影响了后面涡轮机的风流条件。turbine 2 位于 turbine 1 的尾流中，因此它接收到的风速可能比未受扰动的风速  $U_\infty$  低，并且更加湍动。这种现象称为“尾流效应”，它导致 turbine 2 的发电功率下降。

现有来自某风电场 6 个涡轮机的数据（见附件），附件一给出了 6 个涡轮

机的静态数据，包括涡轮机的额定功率、转子直径、轮毂高度。附件二提供了2022年1月1日至12月31日间，六台涡轮机每10分钟发电功率、风速和每个叶片的桨距角（每台涡轮机配备三个叶片）等变量的统计数据，包括平均值、标准差、最大值和最小值。请注意，所示数据是在指定时间点前连续10分钟内收集的。例如，如果数据是标记在10:00，那么它代表的是从9:50到10:00这段时间内的数据平均值、标准差、最大值和最小值。由于设备检修、故障等原因，部分数据缺失，缺失的数据用"NaN"表示，详细的变量解释请参考随附的“变量解释表.xlsx”。

请建模解决以下问题：

**问题 1:** 风速、风向和桨距角等因素与涡轮机功率之间可能存在一定的联系，请在附件二的 Turbine\_Data\_Turbine 1. xlsx 所给的变量中选择一些适用的变量，建立数学模型，实现涡轮机 1 发电功率的预测，并评估预测方法的精确度。

**问题 2:** 建立数学模型实现整个风场的发电功率的预测，并评估预测方法的精确度。

**问题 3:** 风力发电场需要提前半小时向电网公司汇报下半小时的发电量，例如 13:00 需要汇报 13:30-14:00 的发电量，这里称为汇报发电量。如果实际发电量低于汇报发电量的 95%，则电网公司会审核风力发电场。现假设电价为  $a$  元每千瓦时；每审核一次，罚钱数为  $b$  元（ $a$  和  $b$  均为常数）。建立数学模型实现发电场的收益最大化。

**问题 4:** 风力涡轮机的桨距角和偏航角若频繁调整，将导致维修成本上升，并缩短涡轮机的使用寿命。为此，现规定：每 10 分钟内桨距角和偏航角保持不变。例如 13:10-13:20 涡轮机将维持一组特定的桨距角和偏航角，而 13:20-13:30 可切换到另一组固定的桨距角和偏航角。

请参考附件二中的数据，在确保每个涡轮机均符合桨距角和偏航角规定的前提下，建立数学模型通过调控桨距和偏航实现风力发电场功率最大化，并验证该方法的有效性。

- [1] Boersma, Sjoerd, et al. "A tutorial on control-oriented modeling and control of wind farms." *2017 American control conference (ACC)*. IEEE, 2017.
- [2] Doekemeijer, B. M. Enhanced Kalman filtering for a 2D CFD Navier-Stokes wind farm model.2016.