arXiv:2302.01071v1 [physics.flu-dyn] 2 Feb 2023

基于高保真代理模型的风电场布局贝叶斯优化

Nikolaos Bempedelis[1] 和 Luca Magri[1,2]

[1] 帝国理工学院航空系，英国伦敦 SW7 2AZ[2] 艾伦·图灵研究所，英国伦敦 NW1 2DB

摘要。 我们提出了一种无梯度数据驱动框架，结合贝叶斯方法和大涡模拟，对风电场的功率输出进行优化。与采用简单尾流模型的传统风电场布局优化策略不同，所提出的框架能够考虑复杂流动现象，例如尾流摆动、局部加速，以及风力涡轮机与大气流动之间的相互作用。我们以由五台风力涡轮机组成的小型风电场为例，展示了该框架的能力。结果表明，该框架只需少数几次迭代便能找到最优设计，同时利用上述现象提升风电场的性能。

关键词： 风电场布局优化 · 大涡模拟 · 贝叶斯优化。

1 引言

如今，对可再生能源的需求比以往任何时候都更加迫切。在英国，风能是可再生电力的最大来源，英国政府已承诺到 2030 年进一步大幅扩大装机容量。然而，目前已建成的风电场发电量并未达到预期，因为大多数风力涡轮机都在风电场内其他风力涡轮机的尾流区中运行。在尾流区中运行的风力涡轮机会面临两个问题：首先，风速降低会导致其功率输出减少；其次，风速波动加剧会增加疲劳载荷。

通过在可用土地上优化安排风力涡轮机，可以最大限度地减少尾流效应。通常，风电场布局优化（WFLO）采用低保真流动求解器（尾流模型）作为目标函数（风电场功率输出）评估器 [10,9]。尾流模型基于对多孔圆盘尾流的简化假设，未考虑多种机制，例如非定常性、非线性相互作用或阻塞效应等。因此，基于尾流模型进行优化，会错失通过操控并可能利用这些现象来提升性能的诸多机会。此外，尾流模型通常会产生不连续解，因此难以将其用于基于梯度的优化算法。尽管如此，由于计算成本低廉，布局优化研究几乎总是采用尾流模型

（单次评估通常在一秒以内完成）。

只有少数研究考虑了对风电场流动进行更准确的近似 [6,1]。在这些研究中，研究人员采用伴随方法和稳态雷诺平均纳维-斯托克斯（RANS）仿真对风电场布局进行了优化。稳态 RANS 仿真能够捕捉上述若干现象。然而，稳态流动这一假设意味着，尾流动力学以及尾流之间和大气与尾流之间的相互作用——这些对于风电场布局优化问题至关重要——未能得到恰当考虑。

本文提出一种无梯度框架，基于贝叶斯方法和对风电场周围流动进行的高保真大涡模拟，优化风电场的输出。由于风电场布局优化问题具有多模态特性（这使得基于梯度的方法容易陷入局部极值），且目标函数的评估成本很高（至少在像本研究这样需要准确流场模型的情况下），贝叶斯优化是一种合适的优化策略。本文结构如下：第 2 节介绍数据驱动优化框架；第 3 节讨论其在风电场布局优化问题中的应用；最后，第 4 节总结本研究。

2 方法

2.1 优化问题

我们的目标是通过控制风力涡轮机的位置 $\boldsymbol{c} = [\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}]^T$，使 N 台不同风力涡轮机在 K 种不同风况下的总功率输出 P 最大化，其中 $\boldsymbol{x} =$(${x_1}$、.....、 ${x_N}$) 和 $\boldsymbol{y} =$(${y_1}$、.....、 ${y_N}$) 位于给定空间 $\boldsymbol{X}$内。空间$\boldsymbol{X}$ 对应于可安装风力涡轮机的可用土地。为避免不同风力涡轮机之间相互重叠，我们施加一项约束，确保它们的中心（即其位置）之间至少相隔一个涡轮机直径 D 。优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \arg\max_{\boldsymbol{c}} \quad & \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} a_k P_{n,k} \\ \text{s.t.} \quad & \boldsymbol{c} \in \boldsymbol{X}, \\ & ||\boldsymbol{c}_i - \boldsymbol{c}_j|| > D, \text{ for } i,j = 1,\ldots,N \text{ and } i \neq j \end{aligned} \tag{1}$$

其中 a_k 是每种风况的权重（即概率），这些权重根据当地气象数据（通过测量塔获取）得出。

2.2 流动求解器

风力涡轮机的功率输出通过开源有限差分框架 Xcompact3D [2], 计算，该框架用于求解不可压缩滤波后的

纳维–斯托克斯方程，采用笛卡尔网格上的六阶紧致格式，并使用三阶亚当斯–巴什福思法进行时间推进 [7]。并行化通过 2Decomp & FFT 库实现，该库对计算域进行二维铅笔分解 [8]。风力涡轮机采用致动盘方法建模。斯马戈林斯基模型用于模拟未解析流体运动的影响。最后，为了真实地模拟风电场与大气流动的相互作用，我们对充分发展中性大气边界层进行先导模拟，以生成入口条件。有关数值求解器和相关验证研究的更多详情，请参阅 [3]。

2.3 贝叶斯优化算法

贝叶斯优化是一种无梯度优化技术，包含两个主要步骤。首先，根据已知的一组参数对应的目标函数值，计算目标函数的代理模型（此处为高斯过程）。这也能量化近似结果的不确定性。其次，在搜索空间中提出一些点，在这些点进行采样可能会带来改进。这通过最小化采集函数来实现。在本研究中，我们使用 GPyOpt 库 [11]。具体而言，我们使用 Mat´ern 5/2 核函数和 ExpectedImprovement 采集函数，并通过 L-BFGS 算法对其进行最小化。贝叶斯优化需要一定数量的初始样本才能启动。在本研究中，这些样本通过拉丁超立方抽样技术以及一个自定义函数获得；该函数旨在使风力涡轮机在可用土地 $\boldsymbol{X}$ 上均匀分布，同时倾向于将其布置在区域边界上（本研究采用的初始布局见图 4）。关于贝叶斯优化的更详尽介绍，以及将其用于优化混沌流体力学系统的示例，请参阅 [5]。

3 结果

数据驱动优化框架应用于以下问题。可用土地为边长 $6D \times 6D$的正方形，其中 $D = 100$ m为风力涡轮机直径。风从单一方向（东风）吹来，且风速恒定。大气边界层的摩擦速度为 u^* =0.442 m/s，高度为 $\delta = 501$ m，粗糙度长度为 $z_0 = 0.05$ m，对应于北海的条件 [12]。风力涡轮机轮毂高度$h = 100$ m处的风速为 $U_h = 8.2$ m/s，同一高度处的湍流强度为$TI_h = 7.4\%$（见图1）。风力涡轮机的运行推力系数为$C_T = 0.75$。计算域在流向、展向和垂直方向上的尺寸均为 $2004 \times 1336 \times 501$ m。计算域分别离散为 $193 \times 128 \times 49$ 个网格点（每个时间步包含 $\approx 5 \times 10^6$ 个自由度）。可布置风力涡轮机的土地起始于距上游边界 $x = 3.68D$处。横向边界采用周期性条件

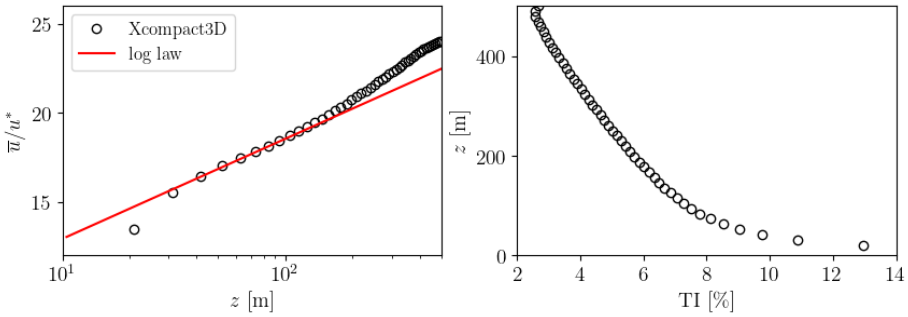


图 1：模拟大气边界层的平均速度（左）和湍流强度（右）。

域边界。时间步长为 $\Delta t = 0.15$ s，最大CFL数保持在0.18以下。统计数据在一小时的时间段内取平均，且该时间段始于一小时的初始化之后（每个时间段相当于基于轮毂高度处风速的 ≈ 15 个流经时间）。

我们考虑由五台风力涡轮机构成的风电场。我们使用五种布局来初始化贝叶斯优化。其中四种通过拉丁超立方抽样技术生成，另一种则通过自定义函数生成（见第 2 节）。图 2 展示了后一种情况下流向速度的一个快照，显示出流场的湍流特性。

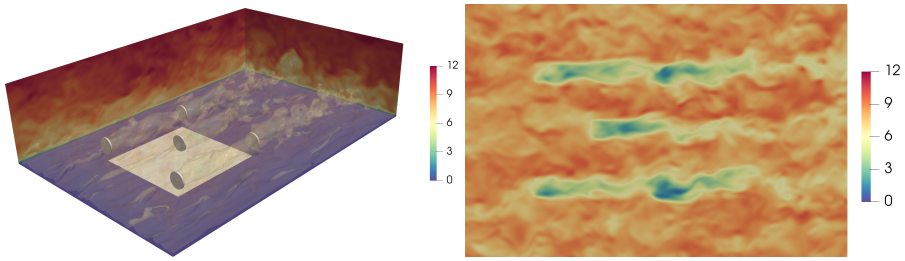


图 2：布局 #5 的瞬时流向速度。三维视图中，正方形表示可用土地，五个圆盘表示涡轮机转子（左）。涡轮机轮毂高度处的水平剖面（右）。

优化以批处理模式运行 [4], ，每一步都会提出三组待探索的参数值。这意味着收敛结果可能并非最优；不过，这种方式可以并行运行三次数值实验。优化在迭代 50 次后停止。每次仿真在 ARCHER2 上需要 ≈ 70 CPU 小时。图 3 展示了优化历史。平均风电场输出功率以一台放置在可用土地中心的涡轮机所产生的功率为基准进行归一化（该功率由单独的仿真估算）。

（记作 P_0 ）。优化框架成功提升了风电场的功率输出：与初始布局相比，提升后的功率输出超过五台独立风力涡轮机所能产生的功率 4.5%。这一点尤为重要，因为传统尾流模型估算的最大输出功率正是这一水平。

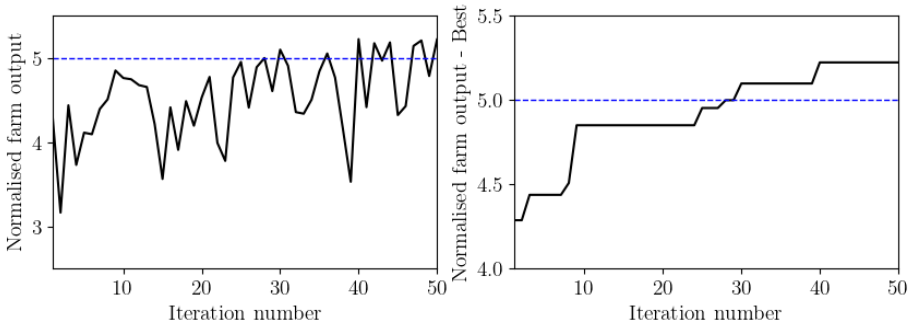


图 3：风电场平均功率输出的归一化值（左）及最佳性能历史（右）。

图 4 展示了初始布局、优化过程中探索的两个布局，以及性能最佳的布局。对于每种布局，图中还显示了涡轮机轮毂高度处的平均流向速度。在性能最佳的布局（#40）中，风力涡轮机并排布置，以最大限度地减少尾流与风机间干扰；同时沿流向略微错开，使其能够受益于邻近风机周围流动的局部加速效应。表 1 列出了各风力涡轮机产生的归一化功率（按流向距离递增排列）以及归一化风电场总输出功率。这里，布局 #5 中的第三台风力涡轮机尤其值得关注：它位于参考风机的确切位置，但由于加速效应，其功率输出提高了 5%。与前文所述相同，我们注意到，传统尾流模型无法解释这种功率增幅。

4 结论

本研究提出了一种无梯度数据驱动框架，采用贝叶斯方法和风电场周围流动的大涡模拟来优化风电场的功率输出。与采用简单尾流模型的传统风电场优化策略不同，该框架考虑了湍流动力学，包括尾流摆动、尾流间相互作用以及大气与尾流间的相互作用。通过一个由五台风力涡轮机构成的小型风电场案例研究，展示了该框架的有效性。结果表明，该优化方法能够快速找到最优设计，同时提升风电场性能。

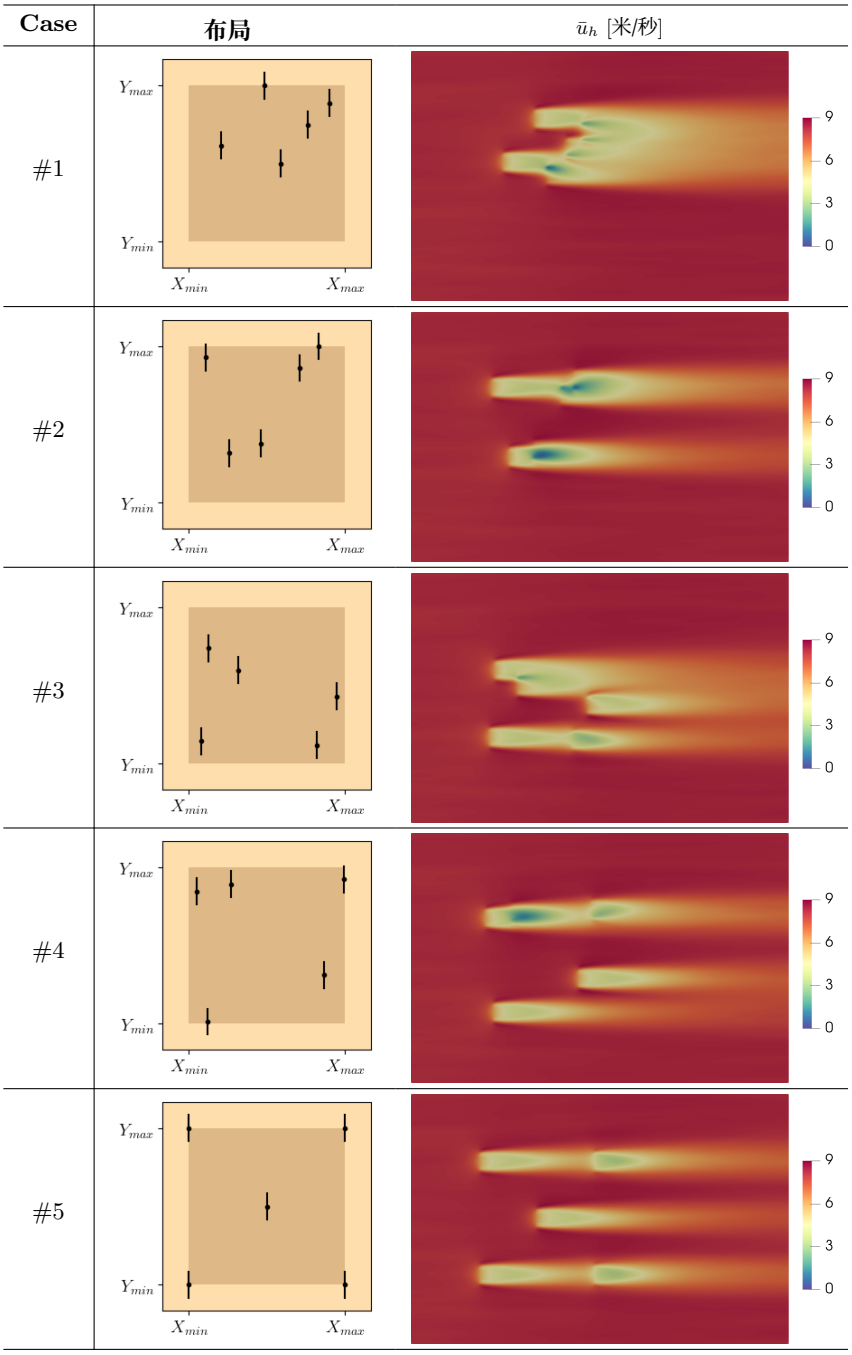


图4：示例布局及轮毂高度处的平均流向速度（续见下页）。

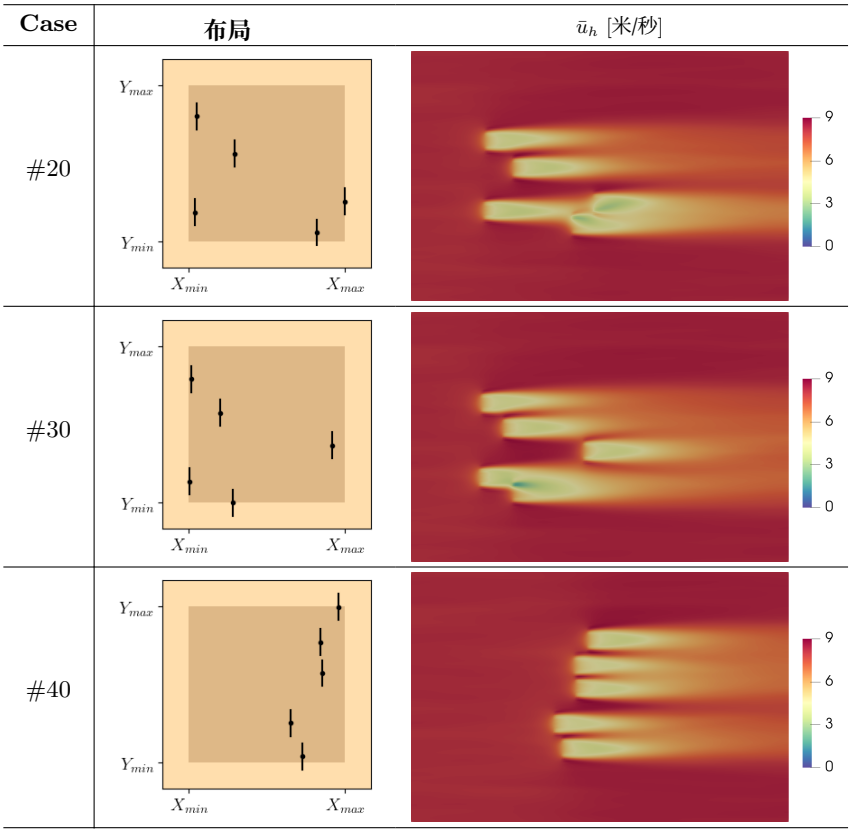


图4：布局示例及轮毂高度处对应的平均流向速度（接续上一页）。

布局	P_1/P_0	P_2/P_0	P_3/P_0	P_4/P_0	P_5/P_0	总计
#1	0.975	1.000	0.654	0.857	0.803	4.287
#2	0.986	0.979	0.329	0.444	0.427	3.165
#3	1.005	0.987	0.989	0.398	1.059	4.438
#4	0.951	1.003	0.237	1.071	0.469	3.731
#5	1.001	1.016	1.050	0.513	0.532	4.113
#20	1.006	1.003	1.083	0.806	0.634	4.531
#30	0.984	1.007	1.092	0.916	1.099	5.099
#40	1.001	1.054	1.033	1.068	1.067	5.224

表 1：不同风电场布局下归一化的涡轮机和风电场功率输出。

通过考虑这些复杂的流动现象。未来，将对该框架进行测试，并将其应用于具有复杂风玫瑰图（多个风向和速度）以及包含更多风力涡轮机的大型风电场等现实配置。

致谢

NB 和 LM 获得英国工程与自然科学研究委员会资助，资助编号 EP/W026686/1。LM 还感谢欧洲研究委员会启动基金（编号 PhyCo 949388）提供的资金支持。作者感谢英国湍流联盟（EP/R029326/1）提供 ARCHER2 的访问权限。

参考文献

1. Antonini, E.G.A., Romero, D.A., Amon, C.H.: 风电场布局优化的连续伴随公式：二维实现。《应用能源》**228**, 2333– 2345 (2018) 2. Bartholomew, P., Deskos, G., Frantz, R.A.S., Schuch, F.N., Lamballais, E., Laizet, S.: Xcompact3D：一种用于在笛卡尔网格上求解湍流问题的开源框架。《SoftwareX》**12**, 100550 (2020) 3. Bempedelis, N., Laizet, S., Deskos, G.: 有限长度风电场中的湍流卷吸。《流体力学杂志》**955**, A12 (2023) 4. Gonz´alez, J., Dai, Z., Hennig, P., Lawrence, N.: 通过局部惩罚实现批量贝叶斯优化。载于：人工智能与统计。第 648–657 页。PMLR (2016) 5. Huhn, F., Magri, L.: 利用储备池计算对混沌声学进行无梯度优化。《物理评论：流体》**7**(1), 014402 (2022) 6. King, R.N., Dykes, K., Graf, P., Hamlington, P.E.: 使用伴随方法优化风电场布局。《风能科学》**2**(1), 115–131 (2017) 7. Laizet, S., Lamballais, E.: 不可压缩流动的高阶紧致格式：一种具有准谱精度的简单高效方法。《计算物理学杂志》**228**(16), 5989 – 6015 (2009) 8. Laizet, S., Li, N.: Incompact3d：一种可调用多达 $\mathcal{O}(10^5)$ 个计算核心、用于处理湍流问题的强大工具。《国际流体数值方法杂志》**67**(11), 1735–1757 (2011) 9. Port´e-Agel, F., Bastankhah, M., Shamsoddin, S.: 风力涡轮机及风电场流动：综述。《边界层气象学》**174**(1), 1–59 (2020) 10. Shakoor, R., Hassan, M.Y., Raheem, A., Wu, Y.K.: 尾流效应建模：使用 Jensen模型进行风电场布局优化的综述。《可再生与可持续能源评论》**58**, 1048–1059 (2016) 11. GPyOpt作者：GPyOpt：Python中的贝叶斯优化框架。http://github.com/SheffieldML/GPyOpt (2016) 12. Wu, Y.T., Port´e-Agel, F.: 使用大涡模拟对风电场内的涡轮机尾流和功率损失进行建模：应用于 Horns Rev海上风电场。《可再生能源》**75**, 945–955 (2015)