

## 跨音速轴流压气机转子绕流的神经网络湍流建模及其可解释性析

吴楚旻<sup>\*,+</sup>, 王士召<sup>\*,+</sup>, 张鑫磊<sup>\*,+,2)</sup>, 何国威<sup>\*,+,3)</sup>

\* (中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

+ (中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 模型一致性训练是一种耦合神经网络和雷诺平均方程 (RANS) 的湍流建模方法, 能够显著提高模型的泛化性并降低数据需求, 已成为数据驱动湍流建模的趋势。神经网络凭借其强大的表示能力广泛用于表征雷诺应力, 但面临着模型输入和输出之间因果关系缺乏可解释性的挑战。一些神经网络解释性方法能够给出输入特征的重要性排序。然而, 对于模型一致性训练, 模型的可解释性还应涉及神经网络输出对 RANS 流场预测的影响。在这项工作中, 我们针对在峰值效率工况下的 NASA Rotor 37 转子, 采用基于集合卡尔曼的模型一致性方法训练神经网络模型, 明显改善了机匣附近的速度预测。进而, 我们从模型修正和输入特征重要性两方面进行了神经网络的可解释性分析。研究发现, 训练的模型增加了涡破坏区域的湍流产生, 从而捕捉到了机匣附近的阻塞效应。此外, SHAP 特征分析结果表明, 生成项与耗散项的比值以及螺旋度对于准确预测压气机转子的流动具有相对较高的重要性。

**关键词:** 集合卡尔曼方法; 湍流模型; 轴流压气机; 神经网络; 可解释性

1) 资金资助项目 (NSFC “基础科学中心项目” (No. 11988102))