

分离流动大涡模拟壁模型的特征嵌入式学习 1)

周志登^{*,+}, 张鑫磊^{*,+}, 何国威^{*,+}, 杨晓雷^{*,+,2)}

*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: 机器学习方法已经在多种不同的流动设置中用于建立大涡模拟壁模型。但对于分离流动而言, 后验准确的数据驱动壁模型仍然是一个悬而未决的难题。针对这一问题, 本论文提出了大涡模拟壁模型的特征嵌入式学习 (features-embedded-learning, FEL) 方法, 旨在提升分离流动的后验精度与泛化能力。FEL 壁模型包括两个子模型, 其一用于预测壁面切应力条件, 其二用于修正近壁第一层网格的涡粘系数。对于前者, 结合周期山状流的高可信度数据与壁面律进行训练, 同时实现了平衡流动与分离流动的先验准确预测; 对于后者, 提出了修正的混合长度模型, 并采用集合卡尔曼方法进行嵌入式学习, 解决了数据驱动壁模型训练和应用环境不一致的问题。对 FEL 壁模型进行了详细评估, 结果显示: (1) 对于关键流动统计量, 包括分离泡、壁面摩擦系数、平均速度和二阶湍流统计量等, 模型具备良好的后验预测能力; (2) 模型在不同网格分辨率、不同坡度和雷诺数的周期山状流算例中表现出良好的泛化能力; (3) 模型对平均流向速度和湍动能的预测误差分别小于 10% 和 20%, 明显低于经典的 Werner-Wengle 模型; (4) 模型对于湍动能的部分低估是由于粗网格解析能力较低, 已通过模型预测与滤波的 WRLES 流场计算的湍动能之间的一致性进行证明; (5) 模型提升了近壁第一层网格的亚格子应力和能量传递速率预测, 这是后验预测性能改善的原因之一。

关键词: 分离流动; 大涡模拟; 壁模型; 神经网络; 集合卡尔曼方法

1) 受国家自然科学基金委基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(NO. 11988102)、青年基金项目(NO. 12002345)与面上项目资助(NO. 12172360)。