

Teaching Reform and Practice Exploration of Fluid Mechanics Based on Data Driven

Yuxia Han Jianmin Guo Xiaoying Liu Yajun Xiang

School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia, 010051, China

Abstract

This thesis addresses the prominent issues existing in traditional fluid mechanics teaching, such as the disconnection between theory and practice, and the separation of numerical simulation and experimental analysis. It systematically introduces data assimilation technology and modal decomposition methods into the teaching reform system of fluid mechanics. By constructing a three-level course structure of “basic theory + special topic modules + challenge projects”, it innovates a teaching model that combines case-driven and project-oriented approaches, and strengthens the practical links through the fluid mechanics simulation platform and PIV experimental system, effectively enhancing students’ depth of understanding and comprehensive analysis ability for complex flow problems. In the specific implementation, students integrate numerical simulation and experimental data through data assimilation technology, analyze complex turbulent structures with the help of proper orthogonal decomposition and dynamic mode decomposition methods, and identify the quasi-ordered structures in chaotic random turbulence, significantly improving their theoretical application ability and innovative thinking. Teaching practice shows that this reform not only stimulates students’ exploration interest but also effectively cultivates their interdisciplinary integration and engineering problem-solving abilities, providing a beneficial reference and implementation path for fluid mechanics teaching to adapt to the practical needs of engineering in the new era.

Keywords

fluid mechanics; data assimilation; modal decomposition; teaching reform; engineering education

基于数据驱动的流体力学教学改革与实践探索

韩玉霞 郭建民 刘晓英 相亚军

内蒙古工业大学能动学院, 中国·内蒙古 呼和浩特 010051

摘要

本文针对传统流体力学教学中存在的理论与实践脱节、数值模拟与实验分析分离等突出问题, 将数据同化技术和模态分解方法系统引入流体力学课程教学改革体系。通过构建“基础理论+专题模块+挑战项目”的三层次课程结构, 创新案例驱动与项目导向相结合的教学模式, 并依托流体力学仿真平台和PIV实验系统强化实践环节, 有效增强了学生对复杂流动问题的理解深度与综合分析能力。在具体实施中, 学生通过数据同化技术整合数值模拟与实验数据, 借助本征正交模态及动态模态分解方法解析复杂湍流结构, 识别杂乱随机湍流中的拟序结构, 显著提升了理论应用能力和创新思维。教学实践表明, 此项改革不仅激发了学生的探索兴趣, 还有效培养了其跨学科融合与工程解决问题的能力, 为流体力学教学适应新时代工程实际需求提供了有益借鉴与实现路径。

关键词

流体力学; 数据同化; 模态分解; 教学改革; 工程教育

1 引言

流体力学作为能源与动力工程、机械工程、航空航天等专业的核心基础课程, 以其理论性强、抽象概念多、数

学难度大而著称。传统的教学模式偏重理论推导和理想假设, 理论与实践脱节, 导致学生难以将抽象原理应用于实际工程问题分析。此外, 计算流体力学 (Computational Fluid mechanics, CFD)^[1-3] 模拟与实验流体力学 (Experimental Fluid mechanics, EFD)^[4-5] 在教学中往往被割裂对待, 学生缺乏将二者有机结合解决复杂流动问题的能力。

数据同化^[6] 技术作为一种融合数值模拟与实验测量的方法, 通过引入观测数据来优化模型参数和状态变量, 已成为流体力学研究前沿的重要工具。同时, 模态分解方法如本征正交分解 (Proper Orthogonal Decomposition, POD)^[7] 和动态模态分解 (Dynamic mode decomposition, DMD)^[8-9] 等, 能

【课题项目】内蒙古工业大学教改项目“AI 赋能的《工程流体力学》课程体系优化与教学创新实践研究”; 项目编号: 2025225。

【作者简介】韩玉霞 (1979-), 女, 中国内蒙古巴彦淖尔人, 博士, 副教授, 从事风能高效利用研究。

够从复杂流动数据中提取主导结构和动态演化规律。这些先进方法不仅推动了流体力学研究范式的变革，也为教学改革提供了新思路。

本文提出一种融合数据同化与模态分解的流体力学教学改革方案，通过系列化“挑战型”案例项目和分层式教学设计，引导学生从数据视角理解流动物理本质，培养其跨学科思维和解决复杂工程问题的能力。

2 教改目标

本次教学改革旨在通过引入数据同化和模态分解等现代流体力学研究方法，改变传统教学中“重理论、轻实践”、“重结果、轻过程”的弊端，实现从“教为中心”到“学为中心”的转变^[10-11]，具体设定了清晰的三维教学目标，并依托数据驱动技术实现教学模式的重塑，构建新型课程教学模式：

知识目标：通过数据驱动技术增强流体力学原理（如湍流结构、边界层分离等）的可视化与动态交互，变抽象为具体，深化学生对核心概念的理解。

能力目标：培养学生运用数据驱动工具（如模态分解、数据同化等）解决复杂流体问题的实践能力，使其掌握面向未来的先进分析手段。

创新目标：打破理论、仿真、创新实践相互脱节的现状，构建“理论-仿真-创新实践”三位一体的新型教学模式，引导学生进行探究式、创新性学习。

3 教改方法及成效

3.1 课程体系重构与教学内容更新

针对能源与动力工程专业《流体力学》课程，我们系统重构了课程体系，在保持经典流体力学理论核心内容的基础上，有机融入数据同化与模态分解等数据驱动方法，形成了“基础理论+专题模块+挑战项目”的三层次课程结构。

在基础理论部分，除了常规的流体力学基本概念和方程外，拓展了湍流模型分类、数据同化基本原理和模态分解方法介绍。这部分内容通过对比传统模拟与数据同化方法的

差异，帮助学生理解如何通过融合实验数据来改进数值模拟的准确性。

在专题模块部分，设计了 2 个核心模块：(1) 数据驱动的湍流建模，包括数据融合后改进的 RANS 湍流模型；(2) 基于模态分解的尾流湍流结构识别和提取，认识到湍流的杂乱无章中还存在有规律的拟序结构。

在挑战项目部分，设计了系列化的“挑战型”实验任务，如基于高精度 PIV 风力机尾流数据驱动校正 RANS 湍流模型以及基于 POD 分解识别尾流中拟序结构特征等。这些项目由浅入深，从简单流动现象到复杂工程问题，引导学生逐步应用所学方法解决实际问题。

以“湍流流动”模块为例，展示了数据驱动如何赋能教学内容升级。原课程模块：边界层与湍流理论，侧重于经典理论讲解。引入数据驱动后，教学效果明显提升：

(1) 数据同化提升 CFD 计算精度

引入“基于 PIV 实验数据校正湍流模型常数”的前沿方法，让学生体验从实验测量到模型优化的完整科研流程，弥合理论与高保真仿真之间的鸿沟。在《工程流体力学》的传统教学中，学生对湍流、分离流等复杂流动现象的理解往往停留在抽象概念和简化模型的层面。RANS 模型 CFD 模拟虽能提供全流场信息，但其结果的准确性严重依赖于湍流模型的选取与经验常数，导致演示结果有时与物理真实存在偏差，削弱了教学可信度。而 PIV 实验虽能提供真实、精确的瞬时流场数据，但受限于测量视窗和成本，难以获得全域、连续的数据。

将 PIV 实验数据与 RANS 模型 CFD 结果相融合，正是破解这一教学困境的有效途径。以特定工况下获取的高精度 PIV 实验数据（如风力机尾流某个截面的平均速度与雷诺应力分布）为“基准真值”，通过迭代算法反向校正 RANS 模型中关键的湍流模型常数。校正后的 CFD 模型再进行全域计算，其生成流场云图、流线动画和涡结构等可视化结果，其物理真实性和可靠性均得到质的提升。见图 1 和图 2。

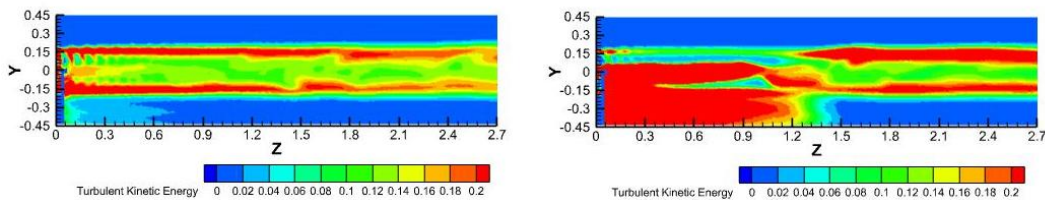


图 1 同化后和原始参数湍动能云图

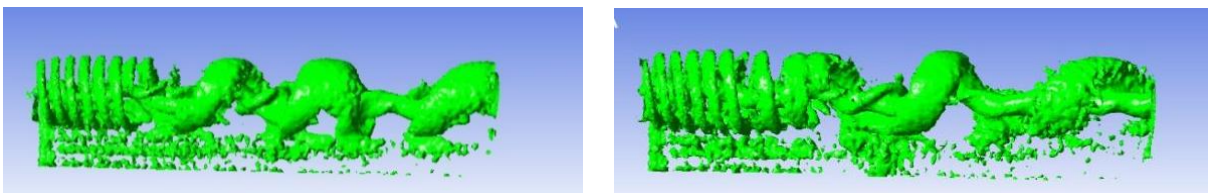


图 2 同化后和原始参数 $Q=0.0001$ 涡量云图

(2) 基于 POD 分解识别并量化风力机尾流湍流相干结构含能占比

将现代降维方法引入教学, 让学生直观理解湍流中的拟序结构。在《工程流体力学》教学中, 湍流的随机性、非定常性与多尺度特性是其最为晦涩难懂的核心难点。传统教学通常展示瞬时流场或时均化结果, 学生难以从中剥离并认知主导流动结构的演化规律。为此, 我们创新性地引入了本征正交分解 (POD) 现代流场诊断方法, 设计了针对“风力机尾流多涡系复杂干涉过程”的可视化教学案例, 成功将抽象的湍流理论具象化。

该案例设计的具体路径如下: 首先, 获取通过高分辨率 PIV 实验得到的风力机尾流非定常流场数据序列。随后, 应用 POD 方法对数据进行分解, 提取出一系列按能量降序排列的 POD 模态。其中, 前几阶低阶模态即清晰地揭示了尾流中蕴含的大尺度相干结构 (如发卡涡、涡环等) 及其空间组织形式, 使学生直观地认识到: 看似混沌的湍流实则由少数占主导地位的结构所掌控。动态演示这些模态的演化动画, 能够生动地再现特定频率下流场结构的周期性振荡、增长或衰减行为, 如叶尖涡的失稳、破碎过程。见图 3 和图 4。

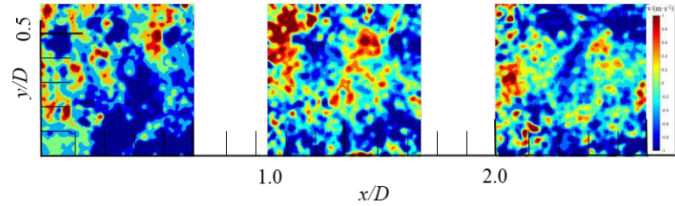


图 3 风力机尾迹流场的湍流瞬时速度特征

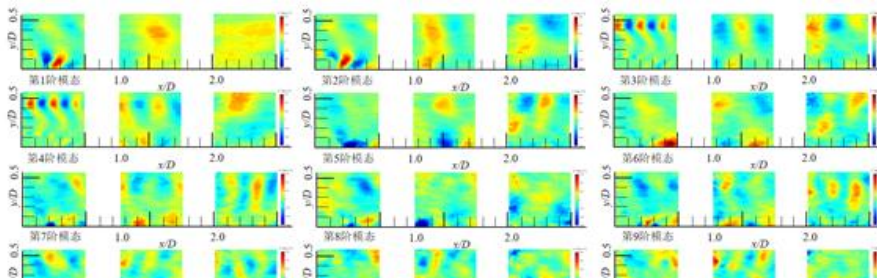


图 4 POD 分解 1-12 阶模态结构

3.2 教学方法创新与实施过程

在教学方法上, 我们摒弃了传统的“教师讲授 - 学生接受”的单向模式, 采用了多元化的教学策略, 包括案例教学和团队研究等, 充分体现“以学生为中心”的教学理念。

3.2.1 团队研究与协作学习

在数据同化等难度较高的内容教学中, 采用团队研究模式^[12], 将学生分为 3-4 人的小组。课前, 学生通过教学平台观看上交大刘应征老师关于数据同化的专题讲座, 了解数据同化的基本概念和方法; 课中, 教师则重点引导学生开展讨论、答疑和实例分析, 深化对难点知识的理解。

3.2.2 数字化资源与开放实验

收集了包括绕流等多个典型流动案例的数据集, 学生可以利用这些数据进行数据同化和模态分解的练习与实践。此外, 实验室实行开放式管理, 学生可以根据研究需要预约使用 PIV 系统、热线风速仪等先进测量设备, 为自主探究提供条件支持。

3.3 教学改革反馈

通过两轮教学实践, 改革成效显著。学生对融合数据同化与模态分解的教学改革反响积极。匿名问卷显示, 95%

的学生认为“增强了解决实际流动问题的能力”, 90% 的学生认为“数据驱动方法提供了研究流动现象的新视角”, 88% 的学生表示“挑战型实验激发了进一步探索的兴趣”。许多学生在课程反馈中提到, 数据同化方法帮助他们理解了如何将“点”的测量数据转化为“场”的完整信息, 而模态分解技术则使他们能够从复杂流动数据中提取主导结构, 这两种方法极大地提升了对流动现象的分析能力。

4 结论

本教学改革研究针对传统流体力学课程中存在的理论与实践脱节、数值模拟与实验分析分离等问题, 系统引入了数据同化和模态分解等现代流体力学研究方法, 构建了以“基础理论 - 专题模块 - 挑战项目”为框架的新型课程体系。通过两年的教学实践, 取得以下主要成果:

首先, 创建了融合数据同化与模态分解的流体力学教学新范式。通过设计多层次的教学内容和系列化“挑战型”实验项目, 实现了经典理论与前沿方法的有机衔接, 为学生提供了理解复杂流动现象的新视角和新工具。

其次, 形成了以学生为中心的教学模式。通过案例分析和团队研究等多种教学方法, 激发了学生的学习主动性和

探索精神,培养了其批判性思维和创新能力。

最后,引入数据同化与模态分解的教学改革显著提升了教学质量,学生不仅加深了对流体力学基本原理的理解,更培养了跨学科思维和解决复杂工程问题的能力。这一改革经验可为工科类专业流体力学课程的教学改革提供有益参考。

参考文献

- [1] Matsfelt J, Davidson L. Large eddy simulation: A study of clearings in forest and their effect on wind turbines[J]. *Wind Energy*, 2021, 24(12): 1388-1406.
- [2] Arabgolarcheh A, Jannesarahmadi S, Benini E. Modeling of near wake characteristics in floating offshore wind turbines using an actuator line method[J]. *Renewable Energy*, 2022,185: 871-887.
- [3] De Cillis G, Cherubini S, Semeraro O, et al. The influence of incoming turbulence on the dynamic modes of an NREL-5MW wind turbine wake[J]. *Renewable Energy*, 2022, 183:601-616.
- [4] 高晓霞,王腾渊,赵飞,等. 基于激光雷达扫描数据的湍流强度影响下风力机尾流特性研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 040(012): 3645-3650.
- [5] Zhan L, Letizia S, Valerio I G. LiDAR measurements for an onshore wind farm: Wake variability for different incoming wind speeds and atmospheric stability regimes[J]. *Wind Energy*, 2020, 23(3): 501-527.
- [7] Samadiani E, Joshi Y. Reduced order thermal modeling of data centers via proper orthogonal decomposition: a review[J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2010,20(5): 529-550.
- [8] Schmid P J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 656: 5-28.
- [9] 侯晓真,马栋,屈曼等.基于二维经验模态分解的河北省及邻区流动重力场时空动态变化分析[J].*中国地震*, 2023, 39(02): 356-366.
- [10] 张伟伟,王旭,寇家庆.面向流体力学的多范式融合研究展望[J].*力学进展*,2023,53(2):433-467.
- [11] 赵洪洋,胡鹏,杨志国,黄煜,潘军廷,以能力培养为核心的流体力学实验教学改革, *实验室科学*第 2021,24(6): 100-107
- [12] 邓辉,张志宏,王冲. 流体力学研讨课模式实验教学的研究[J]. *实验室科学*, 2018, 21(1):118—120.