

计算流体力学技术在流体力学教学改革中的应用

尤一*, 刘绪, 韩豪

海军潜艇学院基础部, 山东 青岛

收稿日期: 2023年6月26日; 录用日期: 2023年7月24日; 发布日期: 2023年7月31日

摘要

目前流体力学教学中普遍存在一些问题, 如理论性过强、理解困难、学生畏难情绪较重, 因此急需一些改革措施提升教学效果。计算流体力学技术是近些年迅速发展起来的一种流体力学研究方法, 得到了广泛的应用, 本文提出将这种技术引入到流体力学基础教学中, 一方面提升课程的趣味性, 帮助学生接触流体力学的前沿成果, 另一方面可以替代演示实验的作用, 帮助学生理解抽象的概念, 从而起到改善教学效果, 提升教学质量的目的。

关键词

计算流体力学, 教学改革, 欧拉法, 拉格朗日法

Application of Computational Fluid Dynamics Technology in Teaching Reform of Fluid Mechanics

Yi You*, Xu Liu, Hao Han

Undergraduate Education Foundation Department, Naval Submarine Academy, Qingdao Shandong

Received: Jun. 26th, 2023; accepted: Jul. 24th, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

At present, there are some common problems in the teaching of fluid mechanics. Such as too theoretical, difficult to understand, and students are afraid of difficulties. Therefore, some reforms are needed to improve the teaching effectiveness. Computational fluid dynamics technology is a re-

*通讯作者。

search method for fluid mechanics which has developed rapidly and been widely used in recent years. This paper proposes to introduce this technology into the basic teaching of fluid mechanics. On the one hand, it can improve the interest of the course, and help students get in touch with the forefront achievements of fluid mechanics. On the other hand, it can replace the effect of demonstration experiments and help students understand abstract concepts, so as to improve the teaching effectiveness and quality.

Keywords

Computational Fluid Dynamics, Teaching Reform, Euler Method, Lagrange Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

流体力学课程是高等教育院校中很多工科类专业必修的专业基础课程，其工程应用背景明确，在航空航天、船舶、水利、机械、土木等专业中都发挥着重要的作用。课程一般是在大学前半段开设，主要为后续的专业课程学习奠定理论和技术基础。

流体力学这门课程的特点是理论性强、概念抽象难懂、需要比较扎实的数学和物理基础。但这几个特点对于大部分学生来说都是最具有挑战性的，通过历年的学生调查问卷显示学生对于这类理论性强、公式推导多、概念抽象的课程普遍学习兴趣不浓，课堂中更多的是被动接受知识的灌输，而不是主动参与到授课过程中去，因此讲授效果并不好，这也使得流体力学这门课程急需通过一些改革手段提升学生的学习兴趣，改善教学效果。近些年中很多高校的流体力学课程组也对这门课程的教学改革提出了一些探索性的方案[1] [2] [3] [4]，我们认为要探索流体力学课程的改革手段还是需要回归到流体力学这门学科的研究方法中寻找思路。

2. 流体力学研究方法

从流体力学这门学科的发展历程来看，流体力学的研究方法主要有三种：实验方法、理论方法、数值方法。流体力学是一门实践的学科，产生于人们与大自然的斗争过程，在实践活动中逐渐积累和总结经验，因此实验方法是最早出现的研究方法。进入 17 世纪后，牛顿、莱布尼兹、欧拉、伯努利等一批伟大数学家的出现使得数学得到了空前的发展，流体力学家们利用数学原理来推导流体力学理论，使得流体力学的理论体系得到建立和完善，理论研究方法得到发展。20 世纪 50 年代后，随着计算机水平的迅速发展，流体力学逐渐与计算机科学、数值数学结合，产生了一种新的研究方法：数值方法，也叫做计算流体力学方法(Computational Fluid Dynamics, CFD)，这种方法是把工程中的实际问题通过数学描述转换为离散方程，借助计算机对问题重新构造和求解。数值法可以解决很多理论法无法解决的复杂流动问题，与实验法相比所花费的费用和时间都更少，因此近些年得到了广泛的发展和应用。

3. 计算流体力学技术融入流体力学教学

目前我们高校中开设的流体力学课程的教学内容主要是以理论研究方法为基础的经典流体力学理论教学，有时会辅助以流体力学实验教学。但是通过流体力学的教学实践来看，学生从理论教学到理解流

动现象的本质需要一个过程，仅仅只是靠任课教师的语言描述和课本上简单的图片来进行讲解很难将复杂的流动现象形象、直观、动态地传递给学生，使理论知识讲解与流动现象产生脱节，因此学生常常会感到讲授内容抽象、难理解。这就是目前流体力学教学中所面临的问题，华罗庚先生曾经说过：“数无形时少直觉，形少数时难入微，数形结合百般好”，因此理论知识与流动的演示教学结合在一起才能更好地帮助学生接受流体现象和理解流动的本质，提升学生的学习兴趣，起到提升教学效果的目的。

目前流动的演示教学一般是通过实验教学的手段开展的，但是受限于实验条件的约束，一些复杂的实验很难在教学中开展，一方面实验设备价格昂贵，牵扯到的物力、人力、场地等各方面的成本很高，另一方面实验设备的操作要求高，一些特殊的设备还会涉及高温高压，有较大的实验风险。因此常规教学中的实验时间、内容都存在各方面的限制，大部分实验教学都还是以一些非常简单的流体实验为主，让学生对这些流体现象有一些简单的了解即可，这样是很难达到演示教学的预期效果。近些年来另一个新兴的流体力学研究方法——计算流体力学在流体力学研究领域发挥着越来越重要的作用。钱学森先生曾经说过：今日力学是一门用计算机计算去回答一切宏观的实际科学技术问题。因此将计算流体力学的研究方法和研究内容引入到基础流体力学的教学改革中，可以很好地起到演示教学的作用，通过 CFD 技术与传统理论讲授相结合，能更好地将抽象的概念与理论转为可视化的流动状态，直观地揭示流动特性，经过后处理渲染后的 CFD 结果更能够吸引学生的学习兴趣。另一方面由于近些年 CFD 技术的迅速发展，目前很多学术科研的研究内容都是通过 CFD 技术开展的，因此利用 CFD 技术还可以将流体力学的前沿知识和成果融入到教学内容中，开阔学生的视野，培养他们的创新思维和意识。

4. 教学实施案例——流体运动的描述方法

流体运动的描述方法是流体力学研究的前提，也是后续进行流体力学理论分析的基础。因为对于不同的流体力学问题来说，所选择的运动描述方法直接决定了后续研究分析的难度和结果的精确度。因此让学生深刻理解不同描述方法的特点在流体力学教学内容中是至关重要的。

描述流体运动的方法主要有两种：拉格朗日法和欧拉法，欧拉和拉格朗日师徒两人分别采取了两种不同角度去描述流体。拉格朗日法是着眼于流体本身，所研究的是流体受到力的作用后自身运动状态的改变，欧拉法是着眼于特定空间，所研究的是流体流经这一空间时所发生的变化。但是只是这样描述其实非常抽象，没有任何流体基础的本科生在接触到这一知识点的时候通常是很难理解的，再加上不同描述方法下的物理量的表示公式会让他们更加眼花缭乱，因此往往并不能取得很好的教学效果，有可能在一开始就让学生动摇了学好流体力学的信心，失去了学习的兴趣。如果能将计算流体力学技术引入到教学内容中，就可以通过借助典型算例来介绍计算流体力学的不同方法和计算结果，向学生们展示拉格朗日法和欧拉法之间的区别。传统的计算流体力学方法是以欧拉法为基础开展的，比如 FEM (有限元法)、FDM (有限差分法)、FVM (有限体积法)等，经过几十年的发展这些方法无论是理论还是应用都已经比较成熟，被广泛应用于流体力学研究中。图 1 中给出了一个流体力学的典型算例[5]，图中的蓝色块状体所表示的是一块水体，被隔板挡住保持静止状态，四周都是壁面，距离水体右侧 0.6 米处安置着一个弹性板。当把隔板抽走，水体由于缺少了阻挡就会像溃坝一样冲向弹性板，弹性板由于受到水流的冲击就会发生变形，同时反作用于水流，阻挡水流的继续前进，这个过程充分展示了流体运动的各种特性。

图 2 中就是 FEM-FDM 方法中所应用到的欧拉网格[5]，通过借助这个例子向学生介绍：欧拉法就是将流体域划分为网格体，流体域内的每一空间点的位置信息都由网格点所标记，这些网格点的位置是固定不动的，因此通过研究流经每一固定网格点处的流体的物理信息就能汇总得到整个流场的物理信息，这就是讲授内容中所说的“欧拉法着眼于特定的空间”。如图 3 中所示为廖康平等人[5]通过欧拉法计算得到的 $t=0.35$ 秒时流体的运动状态，通过与实验结果的对比可以看出欧拉法很好地再现了这个流动过程。

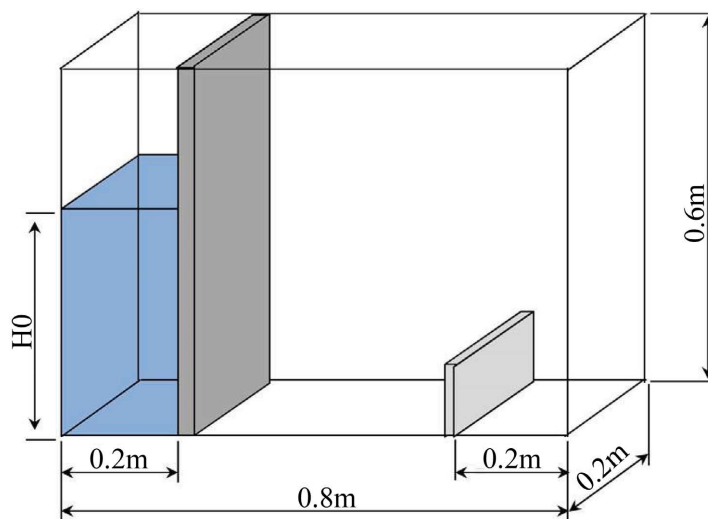


Figure 1. Diagram of dam-breaking case with an elastic plate [5]

图 1. 溃坝与弹性板算例示意图[5]

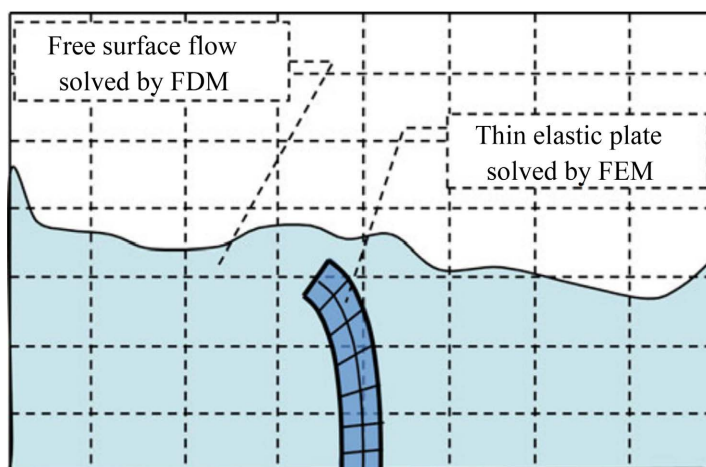


Figure 2. The mesh used in Euler method [5]

图 2. 欧拉法中的网格[5]

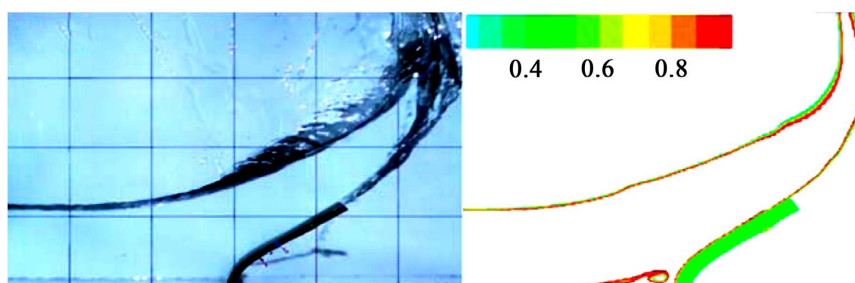


Figure 3. Fluid motion described by Euler method [5]

图 3. 欧拉法描述的流体运动状态[5]

流体运动除了通过欧拉法还可以通过拉格朗日法来进行描述，近些年由于欧拉法在自由液面大变形、非连续问题(如破碎波、水下爆炸、大幅度液舱晃荡等问题)中遇到了很多瓶颈，因此一些以拉格朗日法为基础的无网格粒子法(如 SPH 方法、MPS 方法等)逐渐发展起来。拉格朗日法是初始时刻在整个流体域上

布置粒子，并赋予每一个粒子相应的流体信息和边界条件，每一个流体粒子都在控制方程的作用下进行运动，这些流体粒子每个时刻的物理信息(位置、速度、压力等)都在改变，因此需要通过追踪每一个流体粒子的物理信息才能汇总得到整个流场的物理信息，这就是讲授内容中所说的“拉格朗日法着眼于流体本身”。如图4中所示为 Khayer 等人[6]通过拉格朗日法计算得到的 $t = 0.35$ 秒时流体的运动状态，通过与实验结果的对比可以看出拉格朗日法也很好地把这个流动过程模拟了出来。

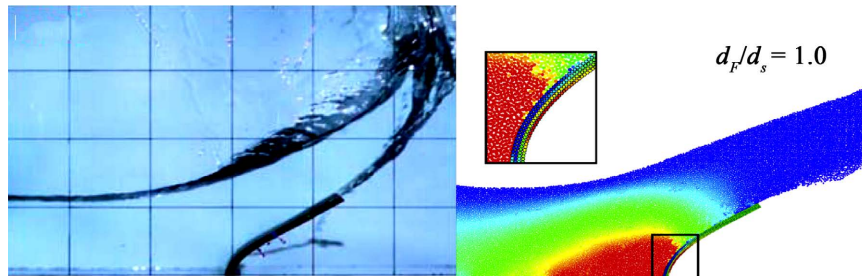


Figure 4. Fluid motion described by Lagrange method [6]
图 4. 拉格朗日法描述的流体运动状态[6]

无论是欧拉法还是拉格朗日法，利用计算流体力学技术都可以很方便的把整个流动过程描述出来，如图5所示为通过计算流体力学技术模拟得到的流动视频。通过这种动态视频也可以向学生完整地展示整个流动过程，很好地替代演示实验的作用，一些比较复杂的流动现象也可以通过计算流体力学技术模拟展示出来，同时还可以将整个流场的自由表面形状、压强分布、温度分布、速度矢量方向等信息显示出来，如图4中不同颜色代表的就是流体压强场的分布，让学生更加直观地看到流动过程中更多细节的信息，五颜六色的视觉效果也可以吸引学生的注意力，激发出学生想要深入了解的兴趣。

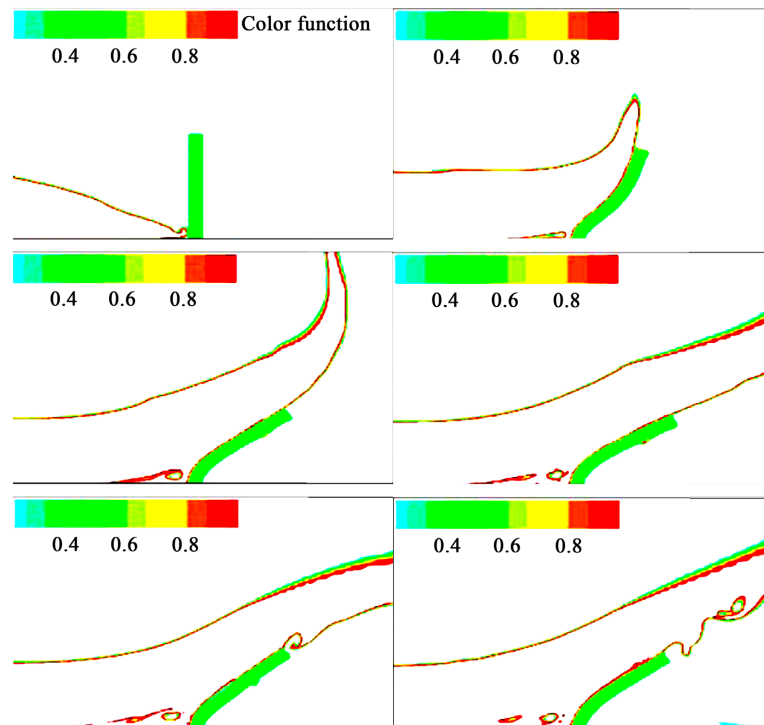


Figure 5. Flow process simulated by computational fluid dynamics [5]
图 5. 计算流体力学技术模拟的流动过程[5]

5. 结束语

本文提出通过传统流体力学教学中融入计算流体力学技术来提升学生的兴趣和学习的主动性，并以“流体运动的描述方法”为例介绍了如何通过计算流体力学技术帮助学生理解理论知识，旨在通过计算流体力学技术拓宽学生的视野，接触前沿成果，激发学习兴趣，帮助学生更好地理解抽象的理论知识，为以后的学习和工作夯实好基础。

参考文献

- [1] 许栋, 及春宁, 白玉川. 基于生活实践的工程流体力学启发性教学初探[J]. 力学与实践, 2016, 38(2): 195-198.
- [2] 陶海升. 流体力学课程教学与课程考核改革的实践[J]. 教育教学论坛, 2015(17): 91-93.
- [3] 吴琼, 王文欢, 刘海龙. 流体力学实验教学改革与探索[J]. 教育教学论坛, 2016(42): 124-125.
- [4] 杨扬, 张勤星, 王利霞. 工科流体力学教学方法与改革[J]. 大学教育, 2015(5): 129-130.
- [5] Liao, K., Hu, C., Sueyoshi, M. (2015) Free Surface Flow Impacting on An Elastic Structure: Experiment versus Numerical Simulation. *Applied Ocean Research*, **50**, 192-208. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.02.002>
- [6] Khayyer, A., Tsurutab, N., Shimizua, Y. and Gotoh, H. (2019) Multi-Resolution MPS for Incompressible Fluid-Elastic Structure Interactions in Ocean Engineering. *Applied Ocean Research*, **82**, 397-414. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.10.020>