

应用型大学的《计算流体力学》课程教学改革探索

韩翔希 齐国胜 符妃 任地
北部湾大学机械与船舶海洋工程学院

摘要: 计算流体力学是目前高等院校普遍开设的研究生课程,该门课程特点是基础理论学习难度大,对学生的数学基础要求较高,学生普遍感觉课程难度高。面对社会和用人单位对计算流体力学的应用要求越来越高和对掌握计算流体力学的人才需求日益增多的局面,传统的《计算流体力学》教学不能满足社会发展需求。本文从理论教学和实践教学等方面阐述应用型大学的《计算流体力学》课程教学模式。该教学模式可让学生具备应用计算流体力学知识解决工程实践的能力,并可为全国的机械类专业硕士《计算流体力学》课程教学提供参考。

关键词: 计算流体力学;教学改革;研究生课程;应用型大学

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6288.2022.01.022

一、《计算流体力学》课程教学背景

《计算流体力学》是一门研究生的专业基础课,兼有理论性和实践性的双重特点,仅仅依靠教师的语言描述、书本和黑板上的文字和公式推导来说明课程内容,常常使学生难以理解和掌握课程内容^[1]。应用型大学的机械类专业硕士计算流体力学课程的定位是工程应用,并非算法开发或软件开发,主要的课程内容应该是计算流体力学在工程中的应用。《计算流体力学》课程讲授内容主要是有限差分法、有限体积法等计算流体力学所涉及的数值方法理论,重点仍然是偏微分方程的求解算法、离散化方法、划分单元与插值方法的讨论。学生们难以将《计算流体力学》数值方法理论知识与工程实际问题联系起来,无法将所学知识应用到实际工程的需要当中。随着计算机技术的发展,大量优秀的计算流体力学软件涌现在市面上,已经拥有着很强的应用范围,并且在工业上已经得到了广泛应用,如船舶与海洋工程、机械、水利和建筑、航空航天等领域^[2]。技术和社会的发展对应用型大学的《计算流体力学》课程教学提出了新的要求。因此,我们迫切需要对现有计算流体力学课程进行改革,将计算流体力学的基础理论与实际工程问题紧密联系在一起,增强研究生对计算流体力学原理和方法的理解和掌握,在教学目的、教学方法、课程结构等方面体现现代工业对《计算流体力学》课程的要求及成熟的商用计算流体力学软件应有的优势。

二、《计算流体力学》课程教学研究现状

唐学林等^[3]采用通俗易懂的方法来讲解CFD理论和在应用过程中最基础的内容,使理论和应用方法与计算流体力学软件结合起来,使研究生较容易掌握计算流体力学解决工程科研问题的本质,以及CFD本身的高深

理论,并调动学生的学习兴趣。王文娥^[4]在教材体系构建、教学内容及方法上进行有益的改革和实践,提出了案例式、研讨式教学等多种方法,加强实践环节,采用多样化的教学手段建立“立体化”教学模式,全面提高学生学习兴趣与教学效果。李强^[5]在课程结构调整、教学方式及教学资源建设等方面进行了改革和实践,提出了“师、生双主体的两段制”课程结构和基于“项目式”的研讨式教学方法,加强实践环节,建立了基于网络的教学平台,着重培养学生的科研精神和创新思维能力,全面提高学生的学习兴趣和教学效果。王福军^[6]结合教改项目的实施,提出了用“两段制模式”改革课程结构,用“问题制模式”改革教学方法,用“先进教材观”构建新的教材体系,从而使计算流体力学课程的改革取得成功,课程成为深受学生喜爱、能产出原创性成果的现代“工具”。沈冬梅和余才锐^[7]针对地方院校师资、学生和流体力学课程的特点,提出将FLUENT软件引入课程教学中,并在课程的教学进行了试点。结果表明,学生学习流体力学的积极性有了明显的提高,学习由被动状态变为主动状态;试点班级的期末考试成绩有了较高提升。

总的来说,《计算流体力学》课程教学改革研究已取得部分研究成果,但仍未针对应用型人才培养形成一套行之有效的教学方法,特别是理论知识如何与实践相结合,如何能培养学生知识应用能力的具体教学方法仍旧没有被解决。许多大学课程的《计算流体力学》课程遵循类似顺序的主题,这门课程通常从插值开始,接着是常微分方程的数值积分,然后是关于偏微分方程的标准材料。学生们在学习过程中遇到了稳定性理论、收敛性理论和数值扩散理论,但他们往往没有获得太多

的编程经验。以往的教学计划中安排了16个实践课时，通过这些实践课时的学习，部分学生能够采用计算流体的软件解决一般性的工程问题，但是如面对新的工程问题，大部分学生仍感觉力不从心。由于实践课时短，学生按照计算流体力学实践教学讲义的内容进行对照性操作，而对于计算域的合理性、网格划分、湍流模型选择、边界条件、初始条件及数值方法选取等缺乏更多的思考。

因此，本项目拟在理论与实践教学体系构建、教学内容及方法上进行有益的改革和实践，拟采用编程方式让学生熟悉计算流体力学在数值离散过程中的基本理论和离散方法，同时结合计算流体力学软件开展任务化教学，加强实践环节，采用多样化的教学手段建立“立体化”教学模式，全面提高学生学习兴趣与教学效果，充分培养学生的知识应用能力，最终形成一套合理的应用型人才培养模式。

三、《计算流体力学》课程理论教学

《计算流体力学》课程的本质是利用计算机去求解数学方程，而这里的数学方程就是Navier-Stokes方程。在计算流体力学中，数学方程的离散化是一个重要的步骤，通过这个步骤，可以将空间上具有连续解的数学方程近似用空间上若干个数值近似解代替。因此，在《计算流体力学》理论部分的教学过程中，首先推导并介绍Navier-Stokes方程，然后将二维的Navier-Stokes方程的求解分解成12个任务。该12个任务是波士顿大学机械工程系Lorena Barba教授2009年至2013年期间所教授课程的一部分。通过编写12个任务的代码，学习有限差分法和Navier-Stokes方程各项的特点和离散方法。任务1到任务4为一维的算例代码编写：（1）具有阶跃函数初始条件（IC）和适当边界条件（BC）的线性对流项求解；具有相同的IC/BC的及具有锯齿IC和周期BC的：（2）非线性对流项求解，（3）仅扩散项求解；（4）Burgers方程求解。任务5到任务10为二维的算例代码编写：（5）具有平方函数IC和适当BC的线性对流项求解；相同的IC/BC的：（6）非线性对流项求解，（7）仅扩散项求解；（8）Burgers方程求解；（9）具有零IC和Neumann和Dirichlet BC的Laplace方程；（10）二维Poisson方程求解。任务11到任务12为二维的Navier-Stokes方程求解：（11）空腔流动问题；

（12）沟道流动问题。通过这12个任务指导学生，学生可以较为系统地学习如何求解二维的Navier-Stokes方程。任务的渐进性可以使学生在每次任务结束时都能获得成就感，而且学生觉得自己学习起来很轻松。随着他们的进步，他们自然地练习代码重用，并且逐渐地学习编程和绘图技术。当学生分析计算结果时，他们能够了解数值扩散、精度和收敛性。经过这十二个任务的学习后，学生们能够成为中等水平的程序员，并有动力开始讨论更深层次的理论问题。值得注意的是由于这十二个任务是采用代码编写进行教学，在进行具体的算法分析和演示之前，学生需要具备一定的编程基础，需要知道基本的程序语句、变量的定义等，同时还要具备一定的数据处理能力，因此课程教学中需要在任务教学前补充涉及的一些编程基础知识，这样可以避免因为程序本身的理解影响学生的计算流体力学理论的学习，而且还可以建立起学生使用开源代码的兴趣。在教学实践中我们发现，通过这12个任务的学习对于学生构建计算工具箱、建立对数值方法的理解以及完整的CFD算例的模拟都产生良好的作用，为他们进一步分析和使用现有的CFD工具奠定了良好的基础。

四、《计算流体力学》课程实践教学

随着FLUENT等CFD商业软件不断发展，一些常见的、成熟的流体力学问题的模拟都可以基于商业软件完成。在《计算流体力学》课程中融入CFD软件学习内容时，既要兼顾系统地学习《计算流体力学》课程的基本理论和相关算法，又要学会利用CFD软件解决实际船舶与海洋工程领域的水动力学问题。因此在Navier-Stokes方程的12个任务学习的基础上，增加CFD软件模拟技术的学习内容，通过几种不同经典的CFD算例，学习CFD软件的基本操作和相关技术。在CFD软件学习部分，主要讲解几何模型的建立、网格划分技术、各种湍流模型的差异、压力-速度项耦合的离散格式、动量方程的对流项离散格式、动量方程的瞬态项离散格式、湍流模型的离散格式、数值求解算法以及近壁面区处理方法。在教学过程中，需要根据具体的教学内容选择恰当的项目案例，结合传统教学方法与现代教学方法，使其发挥各自优势才能获得更好的教学效果。目前利用最多的CFD软件是ANSYS中的FLUENT，FLUENT等CFD商业软件的具体使用，可以帮助学生理解并掌握计算流体力学相

关算法知识如SIMPLE算法、亚松弛因子、迭代等。而且学生可以掌握ANSYS中Fluent的操作：几何建模、网格划分、物理性质设置、计算模型及边界条件的选择、计算参数选取以及计算数据的处理分析，从而让学生系统地了解计算流体力学完整流程，形成系统应用计算流体力学软件求解问题的能力。具体可通过层流圆管流动、NACA0012翼型风洞模拟计算、方块落水（滑移网格和重叠网格）、波浪模拟、柔性挡板的流致振动模拟等经典算例，让学生熟悉计算流体力学的模型建立、网格划分、计算设置、结果分析等内容，从而增强学生在工程中遇到的计算流体力学问题的解决能力。此外，还可以培养学生通过用户自定义函数（UDF）对FLUENT软件进行程序的二次开发，从而更充分和高效地使用CFD软件。这种理论和实践相结合的教学方法可以让学生在较短时间内掌握计算流体力学基本理论和CFD软件的模拟技术，并且能对常见的船舶与海洋工程水动力问题能进行数值模拟。

五、考核方式

为了适应新的教学模式，《计算流体力学》课程的考核方式不能再用一张试卷来定性和定量学生的学习情况。考核方式应由课程编程作业、CFD软件学习成果与期末试题三部分组成。通过十二个任务的学习，由学生自行编制二维Navier-Stokes方程求解程序，如空腔流动问题、沟道流动问题的求解程序。对于CFD软件的学习成果，教师可事先了解学生的专业背景及其研究方向，为学生选题提供建议性指导。为了CFD软件的学习成果质量同时培养学生的团队意识，教师可将学生分为3-5人为一组，自由组合共同完成CFD软件的学习成果。提交作业后，选择合适的时间地点，采取现场提问的方式，请学生对自己的论文内容进行讲解，保证小组内每个成员都有被提问的机会，教师对学生提交的作业及组内成员回答问题的情况进行评分。这样既能综合考察学生对计算流体力学课程学习的掌握情况，又能使学生结合自己的研究课题，动手解决一个CFD工程算例。

六、结论

本论文提出通过将二维的Navier-Stokes方程的求解分解成12个任务，并编写12个任务的代码实现流体流动的基本偏微分方程的解决方案，从而学习计算流体力学的理论基础，并通过工程上典型的计算流体力学应用

的案例，让学生具备应用计算流体力学知识解决工程实践的能力。该教学模式可为全国的机械类专业硕士《计算流体力学》课程教学提供参考。通过把《计算流体力学》课程的理论教学和实践教学有机结合起来，有助于提高学生理论知识的应用能力、专业技能水平，造就适应现代工程领域需要的高质量应用型人才。

参考文献

[1] 彭维红, 张海翔. CFD软件在流体力学教学中的应用[J]. 亚太教育, 2016(07): 69.

[2] 蒋光彪, 殷水平, 陈胜铭, 钟海, 阳杰. CFD软件及源程序辅助工程流体力学课程教学的探索与实践[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(05): 154-157.

[3] 唐学林, 王福军, 周凌九, 黎耀军. 流体流动仿真与应用的研究生教学实践探析[J]. 中国科教创新导刊, 2009(04): 86.

[4] 王文娥, 胡笑涛, 马孝义. “计算流体力学”课程教学改革方法探索[J]. 教育教学论坛, 2014(49): 191-192.

[5] 李强, 章大海, 许伟伟, 周昌静. 基于工程实践能力培养的计算流体力学课程教学改革实践与探索[J]. 化工高等教育, 2017, 34(01): 36-40.

[6] 王福军, 周凌九, 严海军. 计算流体力学课程教学改革与实践[J]. 高等农业教育, 2005(11): 65-66.

[7] 沈冬梅, 余才锐. FLUENT软件在地方本科院校流体力学课程教学中应用的探索与思考[J]. 中国现代教育装备, 2020(03): 71-73.

基金项目：项目名称：广西研究生教育创新计划项目（编号：JGY2021222, JGY2022298）

作者简介：韩翔希（1987-），男，汉族，山东潍坊市，研究生（博士），副教授，研究方向：船舶与海洋工程水动力学。

齐国胜（1998-），男，汉族，山东省淄博市，硕士研究生，研究方向：海洋结构物设计制造。

符妃（1988-），女，汉族，广西钦州市，研究生（硕士），助理研究员，研究方向：海洋结构物设计制造。

任地（1986-），男，汉族，吉林长春市，研究生（博士），讲师，研究方向：船舶与离岸结构极地环境载荷。