

# 以学生为中心的工程流体力学 课程体系改革和构建<sup>1)</sup>

王芳<sup>\*,†,2)</sup> 刘中秋<sup>†</sup> 谭建鹏<sup>†</sup> 荣文杰<sup>†</sup> 李宝宽<sup>†</sup> 齐凤升<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>(东北大学共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 沈阳 110819)

<sup>†</sup>(东北大学冶金学院, 沈阳 110819)

**摘要** 本文介绍了新工科背景下东北大学能源与动力工程专业工程流体力学课程体系改革的探索。结合笔者多年教学经验, 从教学模式、教学内容、教学手段和教学环节等多方面, 提出了以学生为中心、以问题为导向的工程流体力学课程体系改革方案及构件要素。

**关键词** 工程流体力学, 学生为中心, 问题为导向, 教学改革, 混合式教学

中图分类号: O35 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-21-475

## REVOLUTION AND CONSTRUCTION OF CURRICULUM SYSTEM WITH ENGINEERING FLUID MECHANICS BASED ON LEARNER-CENTERED TEACHING MODEL<sup>1)</sup>

WANG Fang<sup>\*,†,2)</sup> LIU Zhongqiu<sup>†</sup> TAN Jianpeng<sup>†</sup> RONG Wenjie<sup>†</sup> LI Baokuan<sup>†</sup> QI Fengsheng<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>(Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multi-Metallic Ores (Ministry of Education),  
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

<sup>†</sup>(School of Metallurgy Northeastern University, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract** The exploration and reform of the curriculum system of engineering fluid mechanics in Northeastern University in the context of the “new engineering” is presented in this paper. Since the authors have the learner-centered teaching practice of engineering fluid mechanics for many years, the scheme and components of the reform of the curriculum system of engineering fluid mechanics based on learner-centered teaching and project-based learning have been proposed from the aspects of teaching mode, teaching contents, teaching approach and teaching links.

**Keywords** engineering fluid mechanics, learner-centered teaching, project-based learning, teaching reform, mixed teaching

新工科建设以创新性、综合性、全生命周期的新工科教学理念为指引, 重点培育自然科学基础知识厚、工程技术实践能力强、综合素养高的技能型工程创新人才, 其中需要着力解决的问题是教学中的实用性与创新能力水平问题<sup>[1-2]</sup>。以学

习为中心是从“讲授模式”向“学习模式”的转变, 课堂教学应着力于学生的能力培养、知识掌握以及学习效果。工程流体力学是研究流体受力以及宏观运动规律性的一门学科, 是介于基础科学与工程之间的专业理论基础课, 是能源与动力工程

2021-11-03 收到第 1 稿, 2021-11-16 收到修改稿。

1) 东北大学 PBL 教学法研究与应用项目资助 (PBL—JX2021yb014)。

2) 王芳, 副教授, 主要从事流体力学与计算流体力学的教学与科学研究。E-mail: wangfang@smm.neu.edu.cn

**引用格式:** 王芳, 刘中秋, 谭建鹏等. 以学生为中心的工程流体力学课程体系改革和构建. 力学与实践, 2022, 44(3): 700-705

Wang Fang, Liu Zhongqiu, Tan Jianpeng, et al. Revolution and construction of curriculum system with engineering fluid mechanics based on learner-centered teaching model. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(3): 700-705

专业的学科基础与骨干课程。因为该课程包含了大量公式推导计算、模型的建立和分析，所以课程内容也相对枯燥难懂。该课程体系的特点是偏重于课堂教学。传统教学模式上课方法简单、知识点全面丰富，但知识点的吸收面临着从未知的客观认识转换为主观个人理解的过程。

“以学生为中心”教学模式的关键在于有效调动学生学习的主动性，高效合理引导学生自主学习，进而提高和强化学生的学习效果。根据本校办学定位，结合学生的教育基础、阶段、学科等特点，将“学生的学习”放在至关重要的位置，在工程流体力学课堂教学过程中，以项目式学习(project-based learning, PBL)为纽带，立足课堂教育目标，利用合理设计并使用多元化教学方法与教学手段，构建“以学生为中心”的教学模式，实现“以学生为中心”的学习和教学。

## 1 改革课程讲授模式

“以学生为中心”的教学过程，首先要确定的是老师的讲授方法和模式。老师应该摒弃面面俱到的满堂灌做法，将教师个人唱独角戏转变成由老师组织和引导、学生讨论的教学模式。为了适应新的课程讲授模式，教师需要从教学理念上进行改革；要摒弃过去单纯的课堂教育模式，教师一定要适应学生在教学框架、课堂讲授、学习评价，以及课程内容、大纲和教学模式等各方面所出现的变化。

采用“雨课堂”助力翻转课堂教学，真正做到了老师和学生之间在教和学、线上与线下的双向交流。如图 1 所示为工程流体力学课程混合式授课模式。(1) 在授课之前，教师应当重新总结所教授知识点与前后章节的关联、在该教学中的地位 and 重要性，及其所教学的步骤与前后顺序。对于那些比较简单的知识点，可在课前将网络上优质课程录像准备给学生进行自学，或者在老师上课的时候进行专题检测与交流以了解学生对知识点的掌握程度，从而更好地提高教学效果。

(2) 课中利用“雨课堂”对学生进行随堂测试，不仅能够随时检测和量化管理学生的上课表现，还可以使学生保持头脑清醒与敏捷度。利用“雨课堂”的投稿和弹幕功能开展课堂讨论，老师还

可选取典型的案例投影授课，以更好地教与学。色彩丰富的图片或者形象生动的动画演示能够瞬间抓住学生的眼球，使学生印象深刻。(3) 课后通过“雨课堂”上传知识点和思维导图，可提升和拓展学生的知识面，使学习有了延续性。根据学生学习效果和掌握情况，及时调整下节课授课内容。

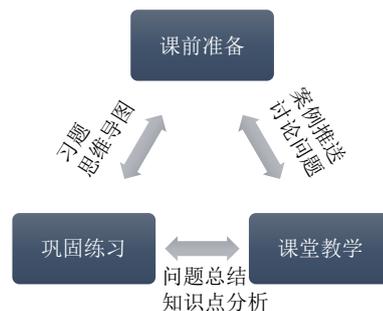


图 1 工程流体力学课程混合式授课模式

例如在讲解积分形式沿总流伯努力方程推导时，先用“雨课堂”推送介绍都江堰特色的视频，然后提出问题：为什么选定鱼嘴的适当位置就可以按照需要调节内外江分水比例？这是什么原理？学生可通过“雨课堂”的投稿和弹幕功能回答问题。这样，那些课上发言不积极的同学便都能加入到互动当中，有效提高了学生学习的主动性。接下来讲述都江堰水利工程中鱼嘴的作用，进而提出知识点：江水流动应满足积分形式连续性方程。随后，讲授该知识点的推导过程，并引导学生联系实际列举出基于连续性的相关案例，充分调动学生发现问题的积极性。在此过程中，学生提出了多个问题，例如如何计算水漏中连续流淌的水流时间，人体内血液静、动脉的循环原理，以及输送管道内流体流量变化规律等等。课后要求学生以小组为单位画出思维导图，并完成“雨课堂”发布的课后练习题，将其作为平时成绩计入总分。

## 2 以项目式学习为纽带

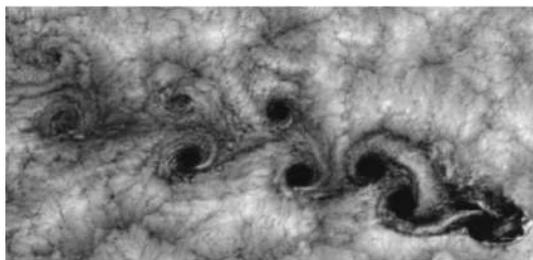
PBL 已被广大老师和学生所认可，它更重视学生在学习中的主角地位，并通过让每个学生围绕重大问题展开合作研究来发展学生的源动力<sup>[3]</sup>。PBL 一开始被广泛应用于医学教学中，后来又逐步延伸至整个教学领域，它对高校学生知识技能

培养、创新能力训练等方面产生了重大影响<sup>[4-5]</sup>。关注学生的个体差异,从而营造出能够充分调动每位学生主观积极性与学习兴趣的课堂教学氛围,让每个学习者在相对宽松的环境中学习与探索,增强了学生分析和解决问题的能力<sup>[6]</sup>。

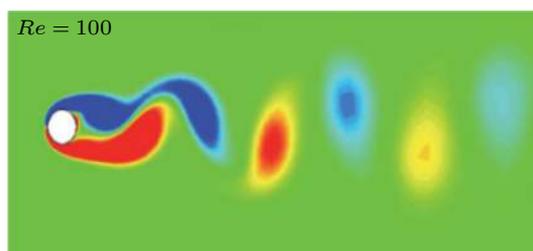
由于授课团队长期从事计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)理论研究及工程应用等相关工作,故在该课程教学中特别设计了以组为单位,针对工程实践或生活中的科学问题,以PBL为手段开展教学。在教学中,教师应该尽量将新知识点转化为学习者所感兴趣的新问题,使抽象的理论知识内容通过生动具体的生活实例和多媒体场景表象化。例如,在讲解圆柱绕流问题时,可以先提出如下问题:广东省境内一座连接广州市南沙区与东莞市虎门镇的跨海大桥——虎门大桥,它是我国第一座大型悬索桥,如图2所示,它的防台风极限风速限定为61 m/s。但在2020年5月5日自然风速仅为10~16 m/s情况下,桥体出现剧烈抖动,在去除桥体两侧水马后,振动情况得到缓解,但第二天又发生振动,这是什么原因?针对这一现象,可以用圆柱绕流中最典型的现象——卡门涡街来解释,即圆柱绕流后部出现一对不稳定摆动的涡旋,随着雷诺数不断增大,涡旋交替地从圆柱上脱落,两边的涡旋旋转方向相反,顺流而下,在圆柱后面形成一定规律、交叉排列的涡列,图3为云团流过岛屿和圆柱绕流(数值模拟)时出现的卡门涡街现象<sup>[7]</sup>。悬索桥的风振动有以下三种类型:涡振、抖振和颤振<sup>[8]</sup>。这次虎门大桥发生振动的主要原因之一是涡振。当风通过桥梁后产生的尾涡脱离频率接近桥体固有频率时,形成由机械频率控制旋涡脱离频率的风振现象。虎门大桥是大跨



图2 “会跳舞”的虎门大桥



(a) 云团流过岛屿(照片)



(b) 圆柱绕流(数值模拟)

图3 卡门涡街现象

度钢箱梁悬索桥,属于典型柔性结构,沿桥梁边护栏连续设置的水马改变了桥体气动特性,在特定风速条件下,诱发桥梁产生竖向涡激共振;持续较长时间、较大振幅的涡振使桥梁结构阻尼下降。当水马拆除后,特定风速下的悬索桥又发生了涡激共振。

### 3 建立合理课程资源更新模式

目前课程组教师队伍的学历、年龄结构较合理,未来教学组还将有计划地引进博士毕业生,并确保每年选派一或两名青年教师到国外研究考察,留学和深造。课题组会定时优化CFD程序操作教学<sup>[9]</sup>,使学生对抽象概念和方程理解更加深刻,了解工程流体力学学科发展前沿,从而提高学生对流体力学工程应用的认识。

科学研究方法既可训练教师业务能力,又可跟踪学科发展走向<sup>[10-11]</sup>。课题组要求所有教师都成为科研课题负责人,教学内容中必须有自己的科研成果。CFD模拟研究的一般步骤分为4部分。第一部分是要对研究对象进行问题解析,提炼该问题的物理属性,即是否包括流动、传热和凝固过程?流体流动是否为多相流?是否有其他外场调控措施等。第二部分是建立数学模型和描述。如果考虑流体流动,则需选择连续性方程和纳维-斯托克斯方程,并针对具体流动特征,选择有效黏度湍流模型。如果研究热量传递等问题,

还需要借用能量方程。研究对象如果包括两种以上流体流动过程，则需采用多相流模型，比如流体体积 (volume of fluid, VOF) 模型，离散相 (dispersed phase model, DPM) 模型或者欧拉模型等。第三部分是绘制物理模型并网格化，根据实际情况加载合适的边界条件和初始条件。第四部分是针对计算求得的流场、温度场、相场等结果展开讨论和总结。例如鼓泡塔反应器是重要的传热传质设备，塔内泡状流是气液两相流的一种基本流型，准确预测塔内泡状流的流动状况及各种流体力学参数对鼓泡塔的设计、放大与优化具有重要意义。由于主要研究对象为鼓泡塔内两

相流体流动过程，因此需要利用连续性和 N-S 方程。由于该过程从底部吹入大量气泡，用一般的湍流模型很难有效预测其内部流动特征，因此采用了能够精确捕捉大、小涡流运动的大涡模拟湍流模型。其两相流动过程采用欧拉-欧拉模型描述。采用欧拉-欧拉-大涡模拟耦合模型对鼓泡塔内的泡状流进行了三维数值模拟，结果如图 4 所示。最后针对计算模拟结果，各个小组展开讨论分析其流动特点。当气泡从容器底部吹入时，弥散的气泡从底端向上行进，上升过程中受到升力、浮力、曳力等各种力，因此气泡群以某一螺旋曲线上行，并且其所占容积逐渐扩大。

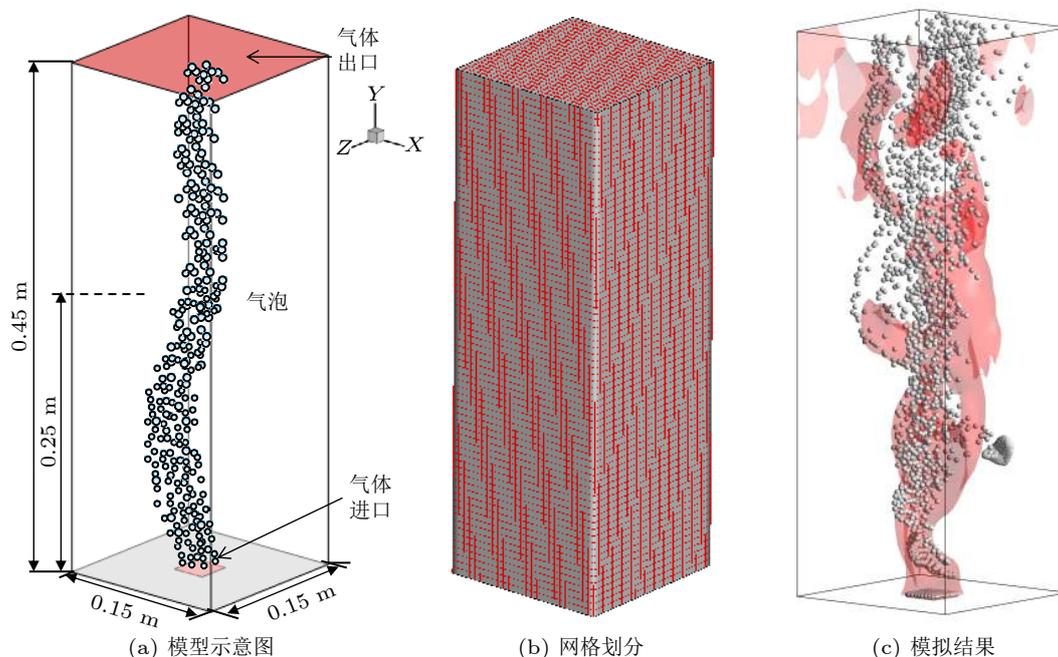


图 4 鼓泡塔反应器 CFD 建模、网格划分和模拟结果

#### 4 实施多元化考核机制

按照整个课程实施的过程，在课程开始前、课堂教学中、课后学习和教学内容结束后等几个阶段展开了完整的教学评价活动，具体包括以下几个方面：（1）对上课出勤率和学习态度等评价；（2）学生可以利用课余时间开展在线学习，并且回答课后习题；（3）课前用“雨课堂”发布随堂测试习题，时间为 8 min 左右，以便及时检测学习效果和调整教学内容；（4）用“雨课堂”进行课上提问，也可用投稿和弹幕功能参与课堂讨论，以考查学生知识的理解程度；（5）根据

学生完成作业的整体表现，包括正确性、规范性和解题灵活性，给出作业考核成绩；（6）通过闭卷考核，全面考查学生对所学知识的理解 and 应用情况。课题组在该课程的教学实践中采用了如表 1 所示的考核办法。

#### 5 融入课程思政教育

习近平总书记在全国高等学校思想政治制度建设教育工作大会上指出：“各门课都要守好一段渠、种好责任田，使各类课程与思想政治制度建设研究理论教学同向同行，协同效应。”授课

表1 流体力学课程考核办法

成绩构成/%	考核内容	所占比例/%
平时成绩(30)	出勤率和学习态度	5
	学堂在线学习成绩	10
	“雨课堂”问答和讨论表现	5
	随堂测试	5
	课后作业	5
期末成绩(70)	试卷(闭卷)	70

团队秉承着引导学生树立正确理想信念、厚植爱国情怀、加强道德修养和增强综合素质的课程思政理念,将教书育人与课堂教学有机结合,达到润物无声的教育目的。

唐诗宋词是中国文学史上的瑰宝,千百年来传诵至今。实际上,唐诗宋词中有一些佳句,正是古代诗人对流体力学现象的精确描述<sup>[12]</sup>。介绍古代诗人对流体力学现象的描写和认识,可以激发学生学习流体力学的兴趣。例如唐代著名诗人韦应物写了这首脍炙人口的七言绝句——《滁州西涧》,即“春潮带雨晚来急,野渡无人舟自横。”这是一首写景的小诗,描写带雨春潮之急和水急舟横的景象。这里形象又真实地描绘了在河中荡漾的小船,因为要处于一个稳定的平衡位置而需要横在河中。这个问题直到19世纪末、20世纪初,才用浮体稳定性理论进行了精确解释。唐代诗人韦应物仅仅用七个字就将船体稳定性活脱脱地勾画出来,使我们不仅能感受到美感,还能从中体味出自然规律。

在授课过程中介绍中国古代流体力学方面的成就和成果,也可以激发学生强烈的民族自豪感。例如,唐朝李冰父子于公元前256年修建的都江堰水利工程,是唯一以水利为主题的世界文化遗产,它是采用无坝引水的方法达到了疏通和灌溉的目的,使得川西平原变成了“天府之国”。当时人们还没有发明火药,李冰父子便采用烧山炸石的方法,在山中间开凿出宝瓶口,并提出了“深淘滩,低作堰”的治水方式。唐朝时的流体力学系统知识体系还未健全,人们主要通过经验分析不同部分的矛盾,以简单应对复杂,运用自然构建流体运动中的平衡和统一。后人为了纪念李冰父子修建了二王庙,虽然它在汶川大地震中严重

受损,但历经两千余年风霜雪雨的都江堰却安然无恙,一切如常。学生们都惊叹于中国古代人们改造自然的神奇力量,这里蕴含的中国智慧,值得我们传承并发扬光大。

流体力学课程中也会涉及很多伟大的科学家,如钱学森、周培源、郭永怀、陆士嘉等国内学者,伯努利、欧拉、托里拆利、阿基米德等国外学者。这些科学巨匠虽然取得了举世瞩目的成就,但背后的故事却鲜为人知。让学生了解这些背后的故事,体会先辈们拼搏和奋斗的精神,可以引导学生正确面对生活和学习中的各种困难,从而坦然面对挫折。例如在介绍边界层理论时,不得不提到“中国航天之父、导弹之父”钱学森先生。他是我国“两弹一星”功勋奖章获得者之一。1936年,他赴加州理工学院航空系读博,师从西奥多·冯·卡门研究空气动力学,与老师一起提出了“卡门-钱”公式,并创立了工程控制论。钱学森在麻省理工学院的学习如鱼得水,但是他瞧不惯美国人对中国人的傲慢态度,他说道:“你们谁敢和我比?到期末看谁的成绩好!”期末考试时,教授出了一些难题,大部分同学都不会做,觉得是老师故意刁难学生。但是当他们来到教授办公室门前,发现门上贴着一份考卷,试卷卷面整洁,字迹工整,每道题都完成得像标准答案一样,老师评阅分数为A+++ ,这显然是最高分。其他学生看着这份试卷目瞪口呆,没想到这位平时不声不响的中国学生竟然有这么大的能耐,对于这么难的题目都能从容应对,从此同学们对钱学森刮目相看。他这种敢于挑战、敢于攀登并且傲视群雄的精神,是值得同学们学习的。

## 6 结束语

将以学生为中心的学习方式引入工程流体力学课程教学活动中,以学生为教学主体,以问题为导向,重新构建了教师教学模式和学生学习模式。对比传统的教育模式,新的教学模式使学生更易入门和理解专业知识来运用于实践的整个过程,既提升了学生的积极主动性、自我思考能力、自主学习能力、小组合作和交流能力等,又使学生形成更完整的知识体系和属于自身的个性化知识体系,提高学生的实践能力。

## 参 考 文 献

- 1 钟登华. 新工科建设的内涵与行动. 高等工程教育研究, 2017, 3: 1-6  
Zhong Denghua. Connotations and actions for establishing the emerging engineering education. *Research in Higher Education of Engineering*, 2017, 3: 1-6 (in Chinese)
- 2 林健. 面向未来的中国新工科建设. 清华大学教育研究, 2017, 2: 6-35  
Lin Jian. The construction of China's new engineering disciplines for the future. *Tsinghua Journal of Education*, 2017, 2: 6-35 (in Chinese)
- 3 解光勇. 国外高等教育PBL教学法教师研修项目的学习与启示. 高等理科教育, 2020, 4: 101-106  
Xie Guangyong. Enlightenment of PBL teaching method research project in foreign higher education. *Higher Education of Sciences*, 2020, 4: 101-106 (in Chinese)
- 4 Barrows HS, Tamblyn RM. Problem-based Learning: An Approach to Medical Education. New York: Springer, 1980
- 5 冯喜兰, 胡林峰, 李英. PBL 与 LBL 结合的教学模式在工科有机化学教学中的应用. 化学教育, 2015(22): 55-58  
Feng Xilan, Hu Linfeng, Li Ying. Application of integration of PBL and LBL teaching modes in organic chemistry teaching for engineering. *Chinese Journal of Chemical Education*, 2015(22): 55-58 (in Chinese)
- 6 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. *力学与实践*, 2016, 38(2): 195-198  
Xu Dong, Ji Chunning, Bai Yuchuan. A first exploration on the heuristic teaching of engineering fluid mechanics based on living practices. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 195-198 (in Chinese)
- 7 张伟伟, 豆子皓, 李新涛等. 桥梁若干流致振动与卡门涡街. 空气动力学学报, 2020, 38(3): 405-412  
Zhang Weiwei, Dou Zihao, Li Xintao, et al. Various flow-induced vibrations of bridges and von Karman vortex street. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(3): 405-412 (in Chinese)
- 8 颜大椿. 湍流、风工程和虎门大桥的风振. 力学与实践, 2020, 42(4): 523-525  
Yan Dachun. Turbulence, wind engineering and wind vibration of Humen Bridge. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(4): 523-525 (in Chinese)
- 9 李宝宽, 荣文杰, 刘中秋等. 在工程流体力学教学中引入 CFD 工程案例的探讨. *力学与实践*, 2018, 40(1): 93-95  
Li Baokuan, Rong Wenjie, Liu Zhongqiu, et al. Discussion on introducing CFD engineering case into the teaching process of engineering fluid mechanics. *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(1): 93-95 (in Chinese)
- 10 倪玲英, 谢翠丽, 张洋洋. 工程流体力学考试、考察方式的改革. *力学与实践*, 2014, 36(1): 94-98
- 11 郑晓英, 马长明, 刘斌云. 流体力学课程教学方法的探讨. *教育教学论坛*, 2016(4): 173-174
- 12 王振东. 诗情画意谈力学. 北京: 高等教育出版社, 2008

(责任编辑: 王永会)