

擦时的动力学问题, 常常会有如本文中所讨论的非线性和多解性等比较复杂的性质. 教师在命题时, 需要特别注意, 应从多个方面仔细考虑和分析.

**致谢** 本文成稿后与南京航空航天大学王怀磊博士进行过讨论, 王老师给出了很好的建议和鼓励, 对此作者表示衷心感谢.

## 参 考 文 献

- 1 苏振超, 薛艳霞. 论理论力学中摩擦力和摩擦角概念的引入. 力学与实践, 2012, 32(1): 96-99
- 2 苏振超, 薛艳霞, 王怀磊. 理论力学多面摩擦问题的程式化解法. 力学与实践, 2014, 36(1): 87-90
- 3 王铎, 程靳主编, 六院校理论力学教研室合编. 理论力学解题指导及习题集 (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2005

(责任编辑: 周冬冬)

# 融入创新性试验的流体力学研究性课程<sup>1)</sup>

白 莉<sup>2)</sup> 刘玉泉 倪玲英 刘成文 赵欣欣

(中国石油大学 (华东) 石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要** 本科生的创新人才培养模式既应注重专业基础理论的学习, 也要重视对学生创造性思维和实践能力的培养. 结合工科类专业的“流体力学”课程教学, 将由大学生创新创业项目、实验室的开放试验以及教师科研项目组成的创新性试验模块融入其中, 进行了研究性课程的探索和实践. 通过精心设计的开放性问题将基本流体力学理论引入到创新性试验中. 在加强传授基础理论的同时, 也注重培养学生的创造性思维和探索精神.

**关键词** 流体力学, 创新性试验, 研究性课程

**中图分类号:** O35 **文献标识码:** A

**doi:** 10.6052/1000-0879-17-281

流体力学是工科专业的重要技术基础课程之一. 流体力学对推动许多工程技术的发展, 特别是高新技术的发展有重要而深远的影响<sup>[1]</sup>, 国际上著名高校在流体力学教学改革的实践中得出的结论认为: 培养大学生提出问题、然后解决问题的探索精神尤为重要<sup>[2]</sup>. 清华大学等在力学基础课如材料力学、理论力学的教学实践中提出了“教师在教学中研究, 在研究中教学; 学生在学习中研究, 在研究中学习”的研究型教学理念<sup>[3]</sup>, 使学生从知识接受者转变为知识的探究者<sup>[4]</sup>. 为了响应教育部倡导高校进行创

新人才模式的培养, 国内各高校的流体力学教师们也在进行流体力学研究性课程的探索和实践<sup>[5-6]</sup>.

研究性课程区别于一般课程的主要特征是: 教师坚持研究型教学理念, 强调素质教育和创新教育以激发学生的创新精神, 强调理论和实践教学相结合, 坚持课内课外相结合, 以提高学生分析和解决问题的综合能力<sup>[7]</sup>. 以强化培养学生创造性思维和动手实践为基本目标, 我们进行了将创新性试验寓于流体力学研究性课程的一系列探索和实践. 依据流体力学基本理论去指导学生设计和完成一些创新创业训练项目, 比如海洋石油开发发生井喷溢油事故的模型试验观测与仿真<sup>[8]</sup>. 本次的流体力学研究性课程探索实践, 将课程教学的基本思路确定为: 按照学生的不同专业背景, 因材施教, 分层次、模块化地完成理论知识的传授; 同时在课堂上引入一些与流体力学有关的自然或工程现象, 引导学生提出问题, 然后探究这些现象背后的流体力学原理. 学生利用课内的理论知识, 结合课外的试验探索和实践, 将创新性试验模块与流体力学研究性课程教学进行有机结合, 以达到培养学生创新意识和探索精神的目的.

2017-08-09 收到第 1 稿, 2017-11-02 收到修改稿.

1) 中国石油大学 (华东) 研究性课程改革项目 (YK201503) 和国家自然科学基金 (11502305) 资助项目.

2) 白莉, 副教授, 主要研究方向为环境流体力学、海洋油气流动保障. E-mail: baili@upc.edu.cn

**引用格式:** 白莉, 刘玉泉, 倪玲英等. 融入创新性试验的流体力学研究性课程. 力学与实践, 2018, 40(1): 89-92

Bai Li, Liu Yuquan, Ni Lingying, et al. Integrating innovative experiments into fluid mechanics research-based course. *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(1): 89-92

## 1 实施流体力学研究性课程教学的基本流程

围绕教学大纲的基本要求将流体力学课堂教学目标分为三个层次:基本层次,即专业基础课是联接基础理论如高数、理论力学等课程与专业课程的桥梁;中等层次,引导学生认识到基本流体力学理论在专业应用中的强大渗透力;高层次,即让学生喜欢并主动钻研结合专业特色的流体力学课题.具体实施过程分为两个步骤:从自然流动现象或者工程流动现象入手,引导学生提出与流体力学相关的开放性问题.然后建议学生结合自己的专业背景,提出自己设想的解决思路和试验方案,完成探索性试验过程.

## 2 课堂教学模块和创新性试验模块

### 2.1 课堂教学模块

流体力学理论知识的课堂教学环节:首先针对流体力学教材各章的重点,依据与本章理论知识相关的自然现象和工程现象,提炼出其中需要解决的问题,引入数学和力学方法去分析其中的流体力学原理,建立简化的力学模型去推导基本方程,将流体力学方程用于经典问题的求解.再辅以例题和习题分析,让学生总结基本分析方法.在引导学生选

择感兴趣的创新性试验模块时,引入工程案例是常用的方法.在课堂上完成基本理论推导和例题精讲后,介绍该理论知识在各学科中的工程应用和研究热点.比如,对石油工程专业的学生,在学习动量方程时,介绍高压水射流在钻井中的应用,以及磨料水射流切割金属的优点;对过程装备与控制专业的学生,在学习流体静力学和压力管路的水力计算时引入的工程案例则偏重于化工流体压力容器的设计、运行安全.对工程力学专业的学生,在边界层基本理论部分则引入卡门涡街与桥梁的风振、海底管道的涡激振动等动力学案例.

### 2.2 创新性试验模块

创新性试验模块的基本流程则是:依据教师推荐的与课程教学进度相符,难度适宜的自然现象或者工程现象,学生从中提炼出一两个问题作为创新性试验要解决的核心问题,创新性试验项目本身,可以是大学生创新创业实践项目,或者是试验室开放性试验以及教师的科研项目等多种类型(图1),学生按研究小组分工合作,以解决提出的问题为目标,完成创新试验方案设计和试验的过程.

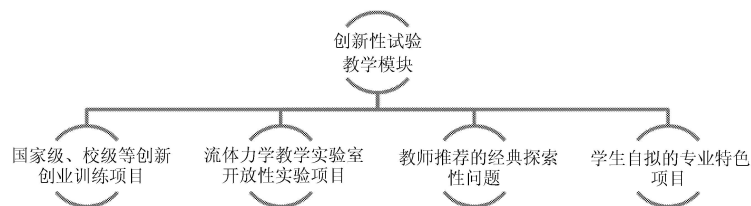


图1 创新性试验教学模块的问题分类

## 3 创新性试验寓于研究性课程的案例

### 3.1 课堂开展的创新性小试验

课堂创新性试验的设计包括问题和时间安排.问题来源于教师提出或者学生自拟的一些与流体力学知识相关的题目.在课程初期,教师提出开放性专题的建议,学生自选专题,要求学生去解释现象背后的理论或者完成验证性试验及其拓展应用.学生组成3~5人研究小组,自选专题,利用课外时间设计并完成整个探索过程.在课程教学后期,用2~4个课堂教学学时,请各组按10分钟左右时间在课堂演示试验,给出理论解释及其拓展应用的思考.这些实验与各章的基本理论有一定联系,比如观察流体黏性的库仑实验、基于流动流体吸力的喷泉试验以及基于虹吸现象的公道杯.各小组围绕基本理论,

展开讨论、制定设计方案,自选实验材料并制作简单的验证性实验装置.最终各小组在课堂上分享自己的问题解决过程、实验原理以及拓展和思考.例如某研究小组针对伯努利方程的应用,利用三个矿泉水瓶和吸管制作了一个自动喷水装置.另一个小组则用下落的球体在液体中的位移和时间测量,验证了不同材质小球在同一种液体中受到同样的黏性阻力作用.而针对虹吸现象这一原理,多个研究小组用了不同材料和实验方案做了验证性试验.针对这些科普类问题,他们主动思考,提出了各有特色的解决方案,有利于培养创新意识.

过程检测与装备控制专业的同学们分组积极完成了创新性小试验全部环节.工程力学和船舶与海洋工程专业的同学们进行了流体力学特色专题的调

研和汇报。各研究小组在课堂上分享自己的问题解决过程、试验原理以及自己的探索体会，并面对其他同学的质疑和讨论。表 1 展示了不同专业学生自主选择的开放性专题。图 2 为流体力学现象所选题目的分布情况。学生在思考如何实现任务的过程中，感受到探索未知和自主设计的乐趣，也激发了一些灵感。从执行实验方案到实现目标的实践中，既巩固了基本理论的学习，又锻炼了自己的动手实践能力。有的专题能引起同学们的讨论和质疑，甚至引出了更有深度的问题，例如有同学在分析足球旋转运动产生大弧线是由于空气流动的“马格努斯效应”，联想到理论力学中由于地球旋转运动产生的科氏加速度，提出这两种效应之间是否有内在联系。经过学生、老师的课堂讨论及课后的调研，明确了这两个效应的

原理和区别，加深了对理论知识的理解。认为当一个旋转物体的旋转角速度与物体飞行速度不重合时，在与旋转角速度和平动速度组成的平面相垂直的方向上将产生一个横向力。在这个横向力的作用下物体飞行轨迹发生偏转的现象称作“马格努斯效应”。此横向力是由于旋转物体周围的流体被带动而旋转，使得物体一侧的流体速度增加，另一侧流体速度减小，从而在物体两侧产生的压力差，压力差驱动旋转物体产生了横向加速度和弧线型轨迹。其理论依据是理想不可压缩流体运动的伯努利方程。而当我们以自转中的地球为参照系时，地球上一切运动的物体都具有科氏惯性力。科氏力总是垂直于运动方向，改变运动方向，而不改变物体速度的大小。

表 1 装控、力学和海工专业学生的开放性专题

装控专业选题	类型	力学专业选题	类型	海工专业选题	类型
虹吸现象 — 公道杯	科普	捞面条的学问	科普	汽车动力学	科普
血压计的原理	科普	台风和飓风的特点及区别	科普	趣味流体力学	科普
小球在液体中的相对平衡	特色	火灾时的逃生方式	科普	香蕉球	科普
流动流体的吸力	特色	帆船运动时的风帆	科普	卡门涡街	特色
流沙的特点	特色	三峡大坝利弊分析	特色	风洞	特色
超音速飞机的基本原理	特色	鹰击长空，鱼翔海底	特色	高尔夫表面光滑还是粗糙	经典
文丘里管的流动	经典	输液的流体力学知识	特色	飞机升空的原理	经典
流体的黏性	经典	弧线球的原理	经典	球体运动与流体力学	经典
音爆现象	经典	乒乓球在水中的运动	经典	高尔夫球的表面凹洞	经典
鲨鱼皮泳衣与流体力学	前沿	雨滴和液滴的形状	前沿	超空泡减阻技术简介	前沿

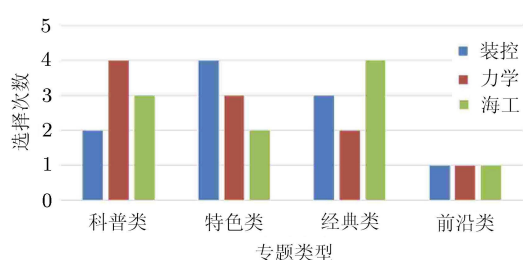


图 2 装控、力学和海工学生选择的开放性专题分布

### 3.2 结合大学生创新创业实践活动的创新性试验

研究性课程强调课内课外的结合。为了帮助学生加强课外思考和动手能力的锻炼，笔者针对大学生创新创业实践项目提出一个“含砂流冲蚀模型试验研究”的课题推荐。该任务由海洋油气工程专业的 5 名二年级本科生领取并执行。由于该研究小组工作出色，该项目被成功升级为国家级大创实践项目，最终结题也获得优秀的评价。

问题的背景是海洋油气开发过程中遇到油气产

出液含一定量的固相砂粒，这一问题威胁到海底管道的安全运行。海底管段到立管段的弯道段、闸阀等处常常面临含砂流动的冲蚀而导致管壁磨损、腐蚀甚至泄漏。为研究弯管段冲蚀磨损的基本规律，冲蚀试验小组进行了加入 5% 石英砂的固液两相管流循环模型试验。试验按砂粒粒径分 4 组，主要观测布置在弯管段一组碳钢贴片在 2~3 小时后的壁面冲蚀特征，然后分析不同粒径砂粒对弯管段冲蚀作用的影响。小组采用两种方法进行试验数据的分析，即用失重法测量试验贴片在冲蚀前后的重量变化，估算各贴片冲蚀速率；再用扫描电镜观测贴片表面的损伤形貌（图 3 和图 4）。对四组含砂流冲蚀的试验数据进行了统计分析，发现弯管受冲刷壁面减薄的效果在不同位置有明显差别。冲蚀研究小组为了解释这一现象与老师开展了讨论，并提出了试验过程中存在的问题，如循环管道中掺入较多的空气，以及试验贴片上冲刷与腐蚀效应的相互影响，对试验结果存在一定的影响。

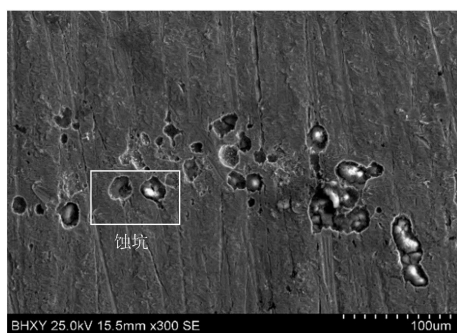


图 3 扫描电镜观察外拱壁 5 号窄片表面损伤特征  
(放大倍数: 300 倍, 自来水)

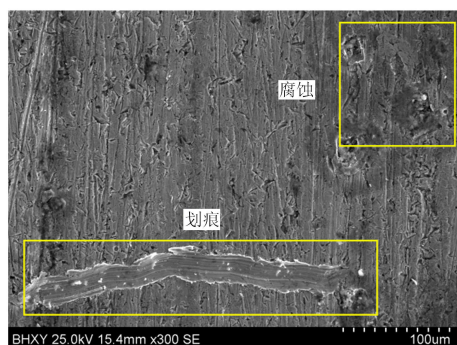


图 4 扫描电镜观察内拱壁 4 号窄片表面损伤特征  
(放大倍数: 300 倍, 粒径: 178~250  $\mu\text{m}$ )

这次的创新性试验基于流体力学基本理论, 又超出了流体力学的课内学习范围, 紧密结合了研究小组的海洋油气工程专业背景, 研究小组为了解决试验中出现的各种问题, 主动查阅相关文献, 改进试验步骤, 学习使用扫描电镜, 尝试根据试验数据提炼出有用的试验结论. 实现了课内与课外的有机融合, 增强了学生对创造性思维的训练, 也提高了实践能力.

#### 4 结论

立足于增强大学生创新意识和实践能力的基本理念, 本文进行了基于创新性试验的流体力学研究性课程实践, 旨在培养学生的创新意识和科研实践精神. 通过发现问题、寻找解决方法以及课堂展示这一系列环节, 同学们实现了对理论知识的消化吸收, 进行了课堂内外的思考和探索. 所设计的创新性试验模块体现了一定的专业特色和多样性, 增强了不同专业背景学生动手实践的能力, 激发了学生的学习兴趣. 将创新性试验与流体力学课程有机结合, 促进学生认识到扎实学习基本理论的重要性, 又提高了学生的创造性思维和实践能力, 有利于使其成为适应于工程和科研需求的高素质创新型工科人才.

#### 参 考 文 献

- 1 郑哲敏, 周恒, 张涵信等. 21 世纪初的力学发展趋势. 力学进展, 1995, 25(4): 433-441
- 2 朱克勤, 任仲泉. 关于美国几所著名高校的流体力学新生研讨课. 力学与实践, 2005, 27(1): 78-80
- 3 范钦珊, 殷雅俊, 陈建平. 实施研究型教学的创新之路. 中国高等教育, 2013, (5): 23-25
- 4 孔祥清, 曲艳东, 李韧等. 材料力学课程教学改革与实践探讨. 试验技术与管理, 2017, 34(2): 174-178
- 5 赵存有, 刘训涛, 曹贺. 工程流体力学课程创新实践平台的构建. 试验技术与管理, 2012, 29(9): 135-137, 141
- 6 刘宏升, 朱泓, 张博. 卓越计划背景下的流体力学课程教学改革与实践. 试验技术与管理, 2014, 31(1): 194-200
- 7 范钦珊, 陈建平, 唐静静等. 研究型大学需要研究型教学——力学课程研究型教学的几点体会. 中国大学教学, 2009, (11): 8-10
- 8 白莉, 刘志慧, 李晓东. 流体力学研究性教学实践: 以创新性试验为例. 力学与实践, 2014, 36(5): 657-659

(责任编辑: 周冬冬)