课程建设与改革

基于 CCL 模式的综合能力教学方案设计与实践*

周一卉,高英皓,武锦涛

(大连理工大学 化工学院,辽宁 大连 116023)

[摘要]大连理工大学化工机械与安全系采用 CCL(Cross-Course Learning)模式,设计了贯穿核心课程的综合能力学习方案。文章以圆柱绕流和曲面叶片流场为例,介绍了空间实体建模、计算流体力学、激光测量实验方法相结合的 CCL 方案。该方案在原有工程流体力学、微积分、工程制图核心课程的基础上进行了深度拓展,针对制定实施研究方案、利用先进仪器设备开展研究工作、进行数据分析并得出有效结论等多项综合能力的培养,设置了相应的训练与考核环节,以期全面提升学生解决复杂工程问题的能力。

[关键词]跨课程学习;目标导向;教学实践

Design and Practice of Comprehensive Ability Teaching Programme Based on Cross-Course Learning Method

Zhou Yihui, Gao Yinghao, Wu Jintao

(*School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023*)

Abstract: The cross-course learning method are adopted by Department of Chemical Machinery and Safety Engineering. The Kaman vortex street of cylinder and flow after curved blade are selected as project which combined PMP, CFD and PIV measurement technologies, which expands the knowledge of fundamental courses such as engineering fluid mechanics, calculus and engineering drawings. The integrated capabilities including making and implementing effective conclusion, doing research using advanced instruments and equipment to carry out experiments independently, data processing will be trained and evaluated in the procedure based on the deep expansion from class. It is hoped to improve students' abilities of solving complex engineering problems.

Key words: Cross-course learning; Outcome-based education; Teaching practice

[作者简介]周一卉(1974-),女,副教授,博士,化工机械与安全系系主任;高英皓(1997-),男,本科生;武锦涛(1975-),男,副教授,博士,教学系主任。

[通信作者]周一卉,E-mail:zflower@dlut.edu.cn。

* 基金项目:2018—2019 年度国家质量工程过程装备与控制工程专业综合改革项目。

大连理工大学过程装备与控制工程专业创建于1951年，是全国唯一连续两次参加工程教育专业认证(2010年和2016年)并取得六年有效期的过程装备与控制工程专业。该专业以工程教育专业认证为契机，进行了以OBE理念为引领的教学体系设计，有效提升了毕业生解决复杂工程问题的能力。

CCL(Cross-Course Learning)，即跨课程学习，国内外多所超一流大学已对这种课程学习模式进行了探索。如MIT在2017年8月启动实施了“新工程教育转型(NEET)计划”，明确本科教育改革的重心向以项目为中心的课程转移，全面构建“项目中心课程”的新工程教育人才培养模式[1]。荷兰代尔夫特理工大学进行了一场较彻底的改革，不仅更新了课程内容，而且构建了以设计流为核心、以项目为基础的系统化课程体系，为开展项目式教学提供了强大的基础支撑[2]。

传统分散独立的教学方式和关联不紧密的培养模式很难使学生通过一个个相对独立的知识点明确学习目的，单个知识点的学习和技能训练也很难使学生在整体上实现由知识向能力的有效转变，无法达到能力叠加的效果[3]。为此，大连理工大学过程装备与控制工程专业自2018年以来，持续开展深度教学改革与探索，措施之一就是设计并实施了CCL模式，制定了跨课程的综合能力学习方案。我们在核心课程的基础上，设计典型的复杂工程问题，以能力达成为目标，通过多个环节的连续交叉式学习，不断拓展关键知识点的内涵，并将跨课程的知识点有效融合起来，共同支撑学生学习目标的达成，同时实现能力的达成与输出。

一、CCL核心课程与设计思想

在过程装备与控制工程专业的培养方案中，微积分、工程制图、工程流体力学属于核心课程。微积分作为数学类基础课，主要讲授数值模拟的基本数学原理；工程制图课程主要讲授空间建模工具Autodesk Inventor软件的使用，并通过课程大作业让学生明确复杂结构与零部件设计之间的联系；工程流体力学课程主要讲授定常不可压缩流体的运动行为与特征。

虽然这几门课程的教学中都对关键知识点进行了重点讲授，但是学生在尝试解决实际流体流动的问题时，无论是在理论解析方式的选择上，还是在数值计算或实验研究方式的确定方面都存在不足，他们在建立多门相关课程知识点的融合体系、提取并应用相关知识、设计可行研究方案的能力也比较欠缺，亟待提高。为此，我们设计了跨课程的综合学习实践内容，这与传统以课程设计为代表的训练项目的不同之处在于：1.CCL不是简单的知识点的叠加，而是对核心课程相关部分的拓展与深化，目的是在更深层面上增强学生对课程内容的理解与掌握；2.CCL过程一定是核心知识点的有机交叉和再融合的过程，应为学生预留更多自主确定研究思路、自由发挥创造性的空间。

二、CCL模式的改革与实践

以经典圆柱绕流和曲面叶片诱导流场内容教学为例，CCL模式下的相关课程、教学目标和能力要求如表1所示。

(一)圆柱绕流问题的CCL设计

圆柱绕流是工程流体力学课程中的经典问题，具有一定的复杂性。在流体中放置一个阻流体，在一定雷诺数条件(对于圆柱是$47<Re<10^5$)下，阻流体表面会产生不稳定的边界层分离，在下游会产生两列旋转方向相反且成交错排列的漩涡。这种周期性非定常流动一般用斯特劳哈尔数(Strouhal number)来描述：

$$St=\frac{f\cdot L}{U} \tag{1}$$

式中St为斯特劳哈尔数，f为漩涡脱落频率，L为特征长度(单位为m)，U为来流速度(单位为m/s)。圆柱绕流尾流场形态由雷诺数决定，但是流场也会受来流条件、阻流比等因素的影响。我们以圆柱绕流为对象，进行了教学与训练环节的设计。

1.利用相移轮廓测量系统(Phase Measuring Profilometry，PMP)创建实体模型并进行表面修正。PMP系统是主动式测量方法中的一种结构光测量法，因计算简单且效率较高而得到广泛应用。测量时，结构光投射器向被测物体表面投

表 1 CCL 模式下的相关课程、教学目标与能力要求

学习案例	圆柱绕流、曲面叶片诱导流动		
贯穿课程	学习内容	学习目标	能力达成
微积分（上、下）	有限差分方法的基本原理和数值求解方法	利用 FLUENT 工具求解圆柱绕流	1.具备对复杂装备零部件进行空间建模的能力；2.具备根据工程特点提出假设、建立物理模型的能力；3.具备利用数学工具进行模型求解的能力；4.具备制定和实施实验方案、进行数据整理和分析的能力；5.具备利用先进仪器开展复杂工程问题实验研究的能力
画法几何与工程制图	Autodesk Inventor 空间实体建模方法	利用立体扫描实现复杂曲面空间建模	
工程流体力学	不可压缩流体定常流动	完成 CFD 数值计算与流场测量实验，流场测试与表征	

射带有光栅条纹的结构光，条纹随物体表面发生变化（被物体表面调制）[4-6]。相机获取图像后，对被测物体表面的结构光进行分析可以获得被测物体表面的深度信息。图 1 为 PMP 测量系统，图 2 为实体扫描建模与表面修正过程。

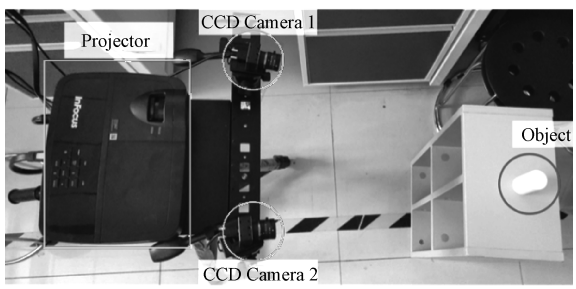


图 1 PMP 测量系统

2.利用工程软件进行不可压缩流体绕流问题的 CFD 求解。根据真实气体来流速度，本项目设置速度边界条件为 2.5m/s，来流雷诺数约为 1800，

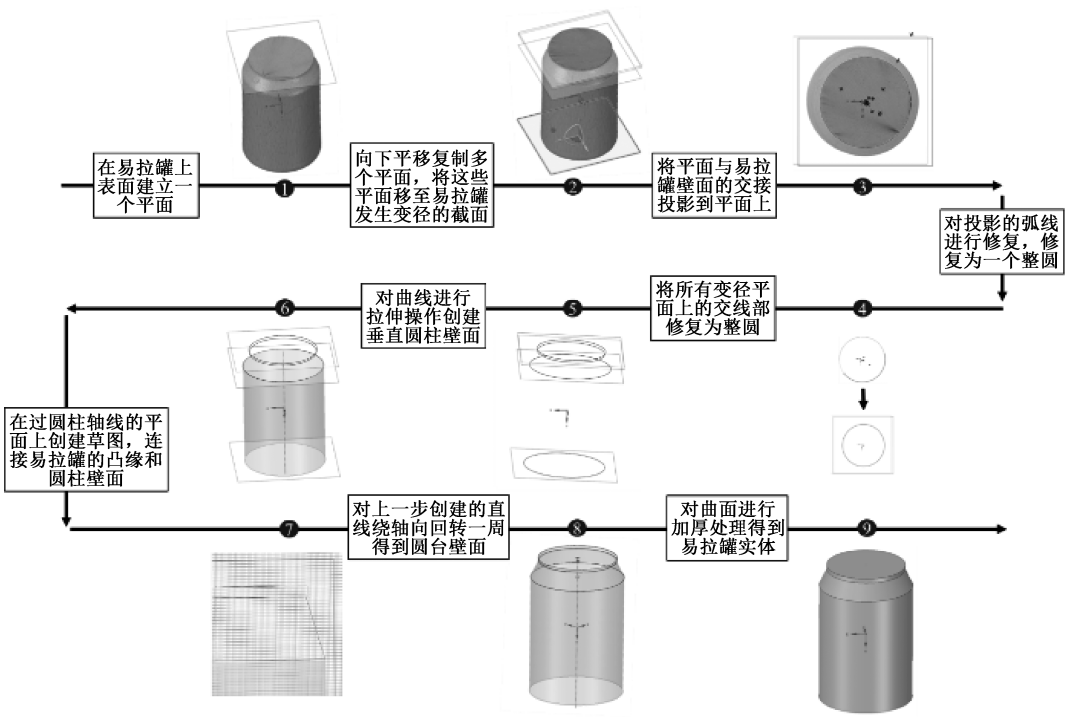


图 2 实体扫描建模与表面修正过程

采用层流 laminar 模型。在 ANSYS Meshing 中进行分区域网格划分，并在柱体近壁面区进行网格加密，运行软件可得到涡量分布图（见图 3）与速度矢量分布图（见图 4）。图 3 清晰地展示出圆

柱两侧的剪切层出现了涡量极值区域，该区域不断向还未脱落的尾涡输送涡量促进漩涡的生长。当涡量输送被切断后，漩涡便停止生长，向下游运动。圆柱后方形成了长达 2D 的尾涡，并在 3D 位置发生脱落。漩涡脱落之后，剪切层不再向漩涡中输送涡量，尾涡长度变短，涡量逐渐减小，这是由于黏性作用导致的涡量耗散。图 4 中呈现了涡街导致的尾流摆动现象。

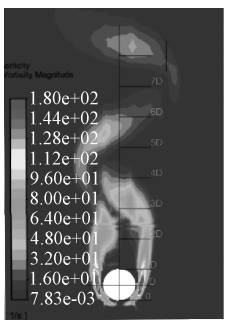


图 3　圆柱绕流后涡量分布图

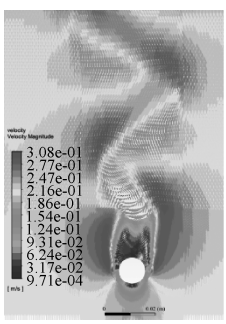


图 4　速度矢量图

3.流场的激光诊断与测量。依托辽宁省石油化工装备重点实验室的反应流场大型测试平台，本项目开展了绕流流场的 PIV 测试实验。图 5 为 PIV 测量系统示意图，图 6 是涡系的连续运动形态。从图 6 中可以看出，圆柱后出现了连续的涡生成与脱落行为。

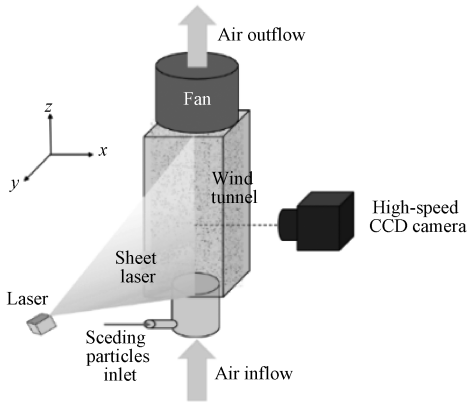


图 5　PIV 测量示意图

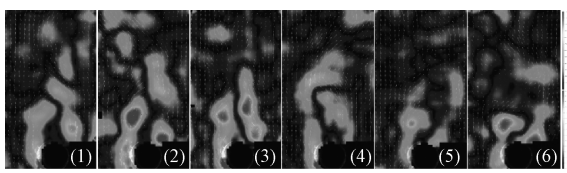
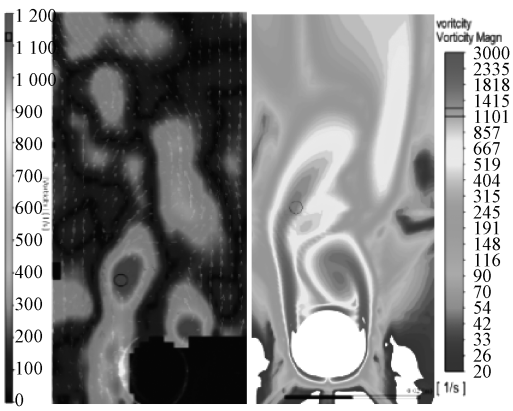
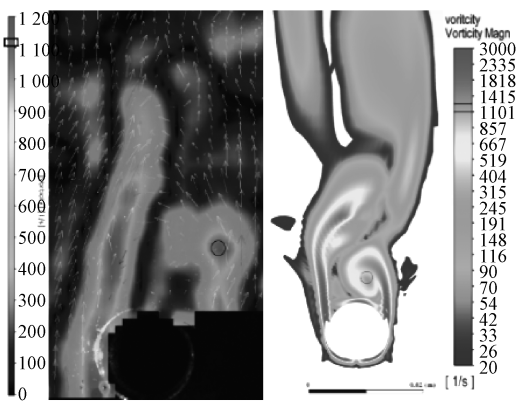


图 6　圆柱后连续涡生成与脱落过程

图 7 是 PIV 测量结果与 CFD 计算结果的对比。由图 7 可见，数值计算与实验结果吻合良好，这说明对于经典圆柱绕流问题，无论是数值解法还是 PIV 实验测量，都能够很好地反映流场形态和涡量的分布特征。



(a) 涡量分布
（左：PIV实验；右：CFD计算）



(b) 涡量分布
（左：PIV实验；右：CFD计算）

图 7　不同时刻下实验与数值计算结果对比

（二）曲面叶片过流问题的 CCL 设计

在以圆柱为代表的简单曲面 CCL 训练完成后，学生已经具备了在教师指导下进行曲面建模、初步 CFD 计算、设计实验装置、制定并实施实验

计划的能力。在此基础上，我们又设计了曲面叶片过流过程的 CCL 项目。

曲面叶片是大型能源动力和过程装备的典型核心零部件之一，具有加工难度高、流动形态复杂等特点。本项目选取轴流风扇叶片为对象，以充分拓展并提升项目训练的深度与广度。

1.叶片曲面建模。图 8 是利用 PMP 系统实现的曲面扫描和表面修正过程。

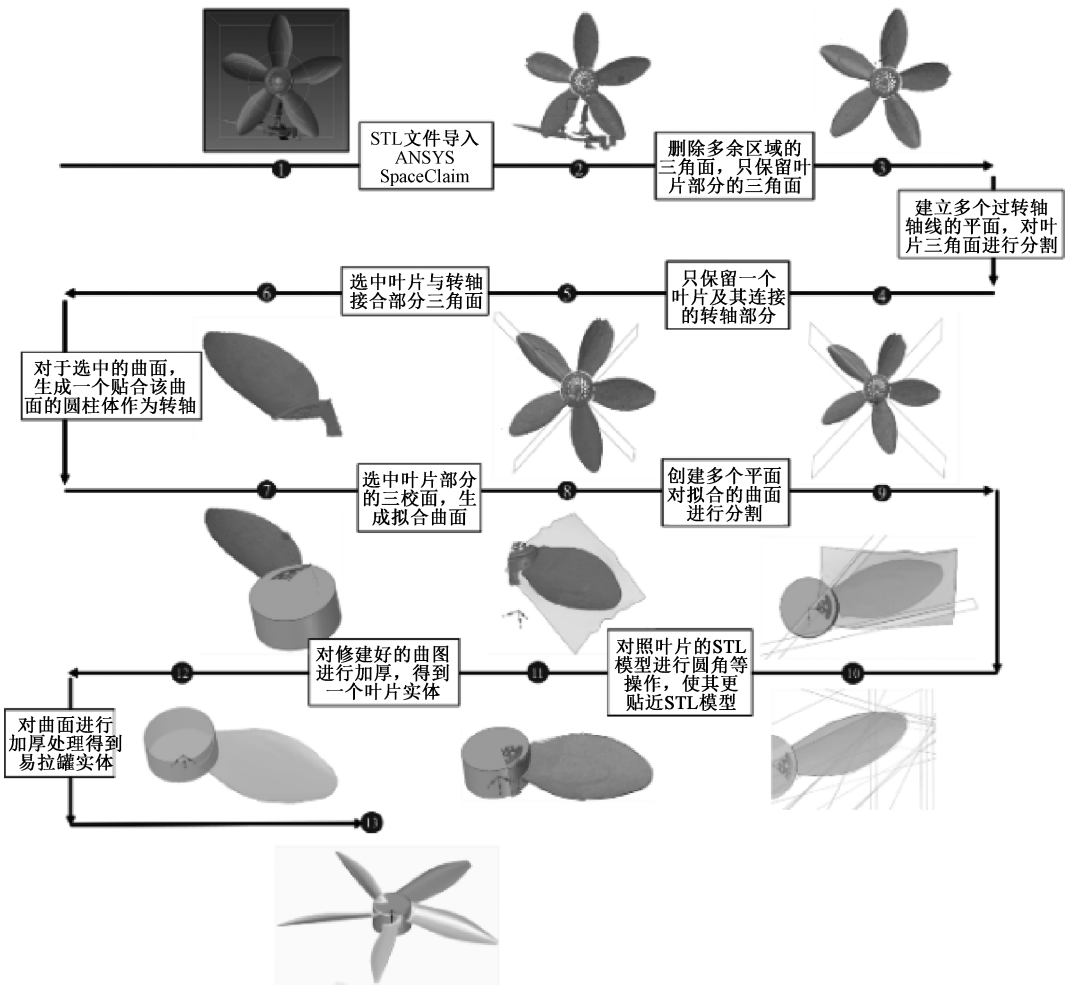


图 8　曲面扫描和表面修正过程

2.叶片过流形态与叶片表面压力分布计算。图 9 为叶片流场模型，将叶片转速设为 600rpm，使用 k-ε 湍流模型，计算结果如图 10—12 所示。由图 10 可以看出，叶片的尖端产生了低压区，叶

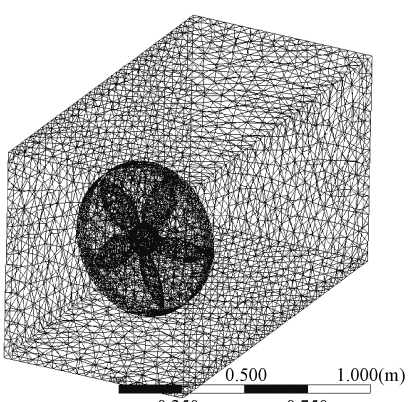


图 9　曲面叶片流场模型

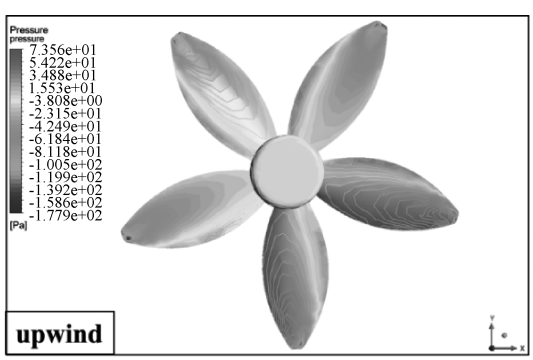


图 10　曲面叶片迎风面压力分布(表压)

(逆时针旋转)

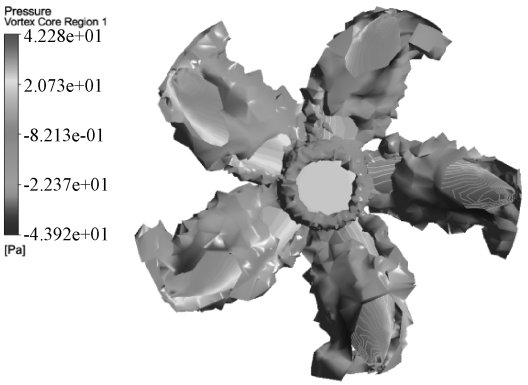


图 11　转动时叶片周围的涡核心区的压力分布

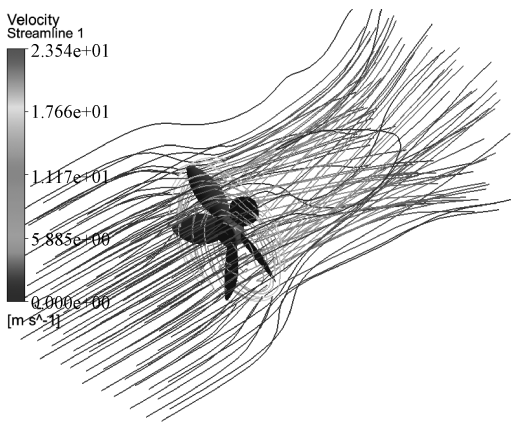


图 12　叶片迎风面涡核心区压力分布

片的前缘为高压区。图 11 为转动时叶片周围的涡核心区的压力分布，与图 10 相互印证，也显示叶片迎风面产生了低压区。图 12 为叶片转动时的流线图。叶片附近为低压区，周围空气在气压作用下穿过叶片旋转区域，被旋转的扇叶带动加速后向下游流动。从图 12 中可以看出，下游中心区域产生了旋流。

三、结语

我们选取了两种复杂工程问题，在化工机械与安全系 2015 级本科生中进行了 CCL 教学实践，通过交叉式和问题引导式训练，将多门核心课程的关键知识点进行了有机融合，这在一定程度上解决了单点式的知识与能力传授无法有效培养学生综合应用能力的问题。学生对 CCL 模式给予了积极的反馈。如作为本文作者之一的 2015 级高英皓同学认为，与传统教学方式相比，CCL 模式使学生可以根据目标有针对性地学习，体会到不同学习阶段都是为最终培养目标服务的。同时，解决复杂工程问题带来的成就感也激发了学生学习的热情。

本文涉及的复杂工程问题跨接多门核心课程，必须有机地将知识点融合起来才有可能进行求解。除了引入 CCL 模式，我们还大幅度拓展了课程内容与深度，并结合前沿计算与实验平台，实现了“做中学”，从而有效保障了学生能力的达成。

（文字编辑：李丽妍）

参考文献：

[1] 朱伟文，李亚东.MIT“项目中心课程”人才培养模式解析及启示[J].高等工程教育研究，2019(1)：164-170.

[2] 朱佳斌，张国洋，刘群群，等.代尔夫特理工大学项目式教学的实践与启示[J].高等工程教育研究，2019(3)：81-86.

[3] 孙康宁，于化东，梁延德.基于新工科的知识、能力、实践、创新一体化培养教学模式探讨[J].中国大学教学，2019(3)：93-96.

[4] 陆红红，殷鸣，谢罗峰，等. 基于面结构光的叶片三维重构技术研究[J].中国测试，2019，45(2)：134-138.

[5] 李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究[D].武汉：华中科技大学，2009.

[6] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35(5): 263-284.