

CFD技术在“航空发动机传热学”课程教学中的应用

胡希卓, 刘智刚, 赵自庆

中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300

DOI: 10.61369/SDME.2025220015

摘 要 : 为克服传统“航空发动机传热学”课程教学中理论抽象、学生难以建立工程直观认识的瓶颈, 本文探讨了计算流体力学(CFD)技术在该课程教学中的应用研究。通过引入CFD数值仿真, 构建“理论-仿真-实践”一体化教学模式, 以达到深化理论理解、激发学习兴趣、培养工程实践与创新能力的目的。基于系统教学使学生掌握数值模拟的全流程, 精选发动机典型传热部件作为教学案例, 配套开发算例教程, 采用“课堂演示-课后拓展”相结合的实践方式, 引导学生进行自主探究。CFD技术的融入能够有效增强教学的直观性与趣味性, 显著提升学生解决复杂工程问题的能力, 为培养创新型航空专业人才提供有力支撑。

关 键 词 : 航空发动机; 传热学; CFD技术; 教学改革; 工程实践

Application of CFD Technology in the Teaching of "Heat Transfer of Aero-engine" Course

Hu Xizhuo, Liu Zhigang, Zhao Ziqing

Department of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300

Abstract : To overcome the bottleneck in the traditional teaching of the "Heat Transfer of Aero-engine" course, where theories are abstract and students find it difficult to establish an intuitive understanding of engineering, this paper explores the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) technology in the teaching of this course. By introducing CFD numerical simulation, an integrated teaching model of "Theory-Simulation-Practice" is constructed to deepen the understanding of theories, stimulate learning interest, and cultivate engineering practice and innovation capabilities. Based on systematic teaching, students master the whole process of numerical simulation; typical heat transfer components of aero-engines are selected as teaching cases, supporting example tutorials are developed, and a practical method combining "in-class demonstration and after-class expansion" is adopted to guide students in independent exploration. The integration of CFD technology can effectively enhance the intuitiveness and interest of teaching, significantly improve students' ability to solve complex engineering problems, and provide strong support for cultivating innovative aviation professionals.

Keywords : aero-engine; heat transfer; CFD technology; teaching reform; engineering practice

引言

随着现代高性能航空发动机涡轮前温度的不断升高, 航空燃气涡轮发动机的传热与冷却成为发动机设计研发和使用维护中的一项核心技术。作为飞行器动力工程专业的一门重要的专业课程, “航空发动机传热学”可以使学生在理解基本传热规律的基础上, 掌握先进的航空发动机热防护技术的基本原理, 了解发动机热端部件的换热特点和冷却结构的设计^[1]。该课程内容主要基于传热学的基础理论, 特别是航空发动机热端部件的冷却涉及多种复杂对流换热问题, 大量的理论推导和经验关系式深奥难懂, 增加了学生的学习难度。教师在课堂上如不能具体动态的将传热现象讲授给学生, 容易造成传热学理论知识学习无法与工程实践相结合。仅使用传统的教学方法讲授该课程, 其教学效果无法得到保障。

CFD (Computational Fluid Dynamics) 是一门运用数值方法求解流体流动与传热问题的学科。随着计算机软件水平突飞猛进, CFD技术给科学发展和工程应用设计带来了革命性的变化, 成为解决各种传热和流体流动问题强有力的工具, 现已广泛应用于航空发动机高温结构流固热耦合三维仿真^[2]。对一些复杂流动传热现象和过程, 尤其是在实验室环境难以实现的实验, 可以通过计算传热学软件对相关问题进行模拟仿真, 将结果以彩色画面直观的展示出来。因此, 将计算传热学技术与航空发动机热防护课程相结合是解决该课程教学中存在问题的有效途径。

一、“航空发动机传热学”课程教学面临的问题

（一）理论抽象性强，学生理解难度大

“航空发动机传热学”的核心内容建立在数学推导与物理模型之上，既包括传热学通用的傅里叶定律、牛顿冷却公式、斯忒藩-玻尔兹曼定律等基础理论，又包含针对航空发动机的特殊传热模型，如涡轮叶片气膜冷却效率计算、燃烧室辐射换热系数修正等。这些内容往往以复杂的偏微分方程、无量纲准则数形式呈现，学生仅通过板书推导或多媒体演示，难以建立系统认知，导致理论学习与工程应用脱节^[9]。

（二）工程场景复杂，传统教学手段难以复现

航空发动机的传热过程具有“高温、高压、高流速”的特点，且涉及多物理场耦合，如流场与温度场耦合、辐射与对流耦合，传统教学手段无法直观呈现这些复杂场景^[10]。例如，燃烧室内部的传热过程同时包含燃气对流换热、火焰辐射换热及壁面导热，学生仅通过静态图片或动画，无法观察火焰形态变化对温度分布的影响，也难以理解“热流密度不均匀性”对燃烧室壁面寿命的影响。

（三）实践环节薄弱，学生工程应用能力不足

“航空发动机传热学”是一门实践性极强的课程，但其实践教学常受限于实验条件与安全要求^[9]。一方面，航空发动机核心部件如涡轮叶片、燃烧室的传热实验需专业实验室与高精度测量设备，多数高校难以提供充足的实验资源，学生只能参与“管内对流换热”“平板导热”等基础验证性实验，无法接触航空发动机真实传热场景；另一方面，学生在课后作业与课程设计中，多以“给定参数计算热流密度”“验证公式正确性”等理论题为主，缺乏一些工程设计训练。

（四）教学学时有限，理论与实践难以平衡

在应用型高校“压缩理论学时、强化实践能力”的教学改革背景下，“航空发动机传热学”的课程内容涵盖基础传热理论、航空发动机特殊传热问题、传热优化设计等多个模块，一些教师在有限学时内完成大纲要求，不得不压缩理论推导与案例分析时间^[9]；同时，由于学时紧张，实践环节多以“课堂演示”代替“学生实操”，学生缺乏自主设计、仿真分析、结果验证的完整训练。

二、引入 CFD 教学的目的

在“航空发动机传热学”课程中引入 CFD 教学，并非简单的增加一项软件操作技能，其核心目的在于构建一个多维度、深层次的教学目标体系，以突破传统教学模式的局限，全面提升人才培养质量。具体而言，引入 CFD 教学旨在实现从理论知识内化、学习动力激发到未来职业发展三方面目的。

（一）加深对理论知识的理解

引入 CFD 教学的首要目的在于加深学生对理论知识的理解。传统传热学教学偏重公式推导与理论分析，学生往往难以建立直观的物理图像^[7]。CFD 技术通过可视化手段，将抽象的流动传热

现象（如边界层发展、分离流动、涡系结构等）转化为具象的温度云图、流线和动态视频，使学生能够直观观察温度场、压力场和速度场的分布与演化，从而更好地理解对流换热基本原理及其在发动机复杂环境中的耦合作用，弥补从理论到认知的鸿沟。

（二）提高学习兴趣，激发学生的主动性和创造性

引入 CFD 教学的另一重要目标是提高学生的学习兴趣，激发其主动性与创造性。相较于被动接受理论知识，学生通过亲手操作 CFD 软件、设置参数并分析计算结果，成为探索知识的主体^[9]。这一过程富有挑战性和成就感，能够有效调动学习热情。学生可自主设计不同工况，探究参数变化对传热效果的影响，在发现、分析和解决问题的过程中培养创新思维和科研兴趣，使学习从“被动灌输”转变为“主动建构”。

（三）为学生参与科研和工程实践提供知识和技能储备

引入 CFD 教学旨在为学生未来参与科研和工程实践提供关键的知识与技能储备。现代航空发动机研发高度依赖数值仿真技术。通过在课程中提前接触主流 CFD 软件（如 ANSYS Fluent、CFX），学生不仅掌握了先进的工程分析工具，更初步培养了解决实际工程问题的能力，包括几何建模、网格划分、模型选取、结果分析等^[9]。这为他们日后进入研究生课题或航空发动机制造企业从事设计、优化和故障分析工作奠定了坚实的实践基础。

三、CFD 教学方法和教学内容

为有效达成教学目标，应在“航空发动机传热学”课程中构建一套系统化的 CFD 教学方法与教学内容体系。该体系并非简单的软件操作培训，而是以深化工程认知、掌握核心流程、联系工程实际、培养创新能力为核心，旨在引导学生从“理论学习者”转变为“实践探索者”。下面将从教学过程、案例选择、资源建设与教学模式四个方面进行阐述。

（一）CFD 数值模拟的基本概念和主要过程

在教学方法与内容上，CFD 教学应聚焦于帮助学生理解和掌握数值模拟的全过程。教学重点不应局限于软件操作，而需系统讲解从物理问题到数学建模（控制方程）、空间离散（网格技术）、方程求解（迭代算法）、到结果后处理与可信度分析（网格无关性、模型验证）的完整链条^[10]。通过分解并实践这一流程，学生能够建立起对 CFD 仿真工作本质的深刻认识，知其然更知其所以然，避免沦为简单的“软件操作员”。

（二）教学案例的选择

教学案例的选择至关重要，应直接服务于课程核心内容并与工程实际紧密结合。选择航空发动机中的典型传热问题作为案例，例如，涡轮叶片的外部气膜冷却效率分析、内部冲击冷却与扰流柱强化换热、压气机叶片表面的换热系数分布、燃烧室壁面的冷却结构仿真等。这些案例既蕴含了丰富的传热学基本原理，又具有鲜明的行业背景，能够让学生在解决专业问题的过程中巩固知识，强化工程意识。

（三）教程制作

为保障教学效果，需精心制作详细的算例教程。教程编写应

循序渐进，从简单二维模型入手，逐步过渡到复杂三维问题。内容需涵盖软件操作的每一个关键步骤（几何导入、网格生成、物理模型设置、边界条件定义、求解监控及后处理），并辅以必要的理论解释和操作原理说明（如为何要设置特定边界类型、湍流模型的选择依据等）。一份优秀的教程不仅是操作指南，更是一本融合了理论与实践的自学手册，便于学生课后复习与拓展。

（四）课堂教学与课后实践相结合

在教学组织实施上，应采用“课堂教学与课后实践相结合”的模式。课堂教师进行核心案例的演示与讲解，课后则布置开放性的选做作业或小课题，鼓励学生自主探索。例如，可要求学生在完成基础涡轮叶片冷却仿真后，自行更改气膜孔的吹风比，观察并分析冷却效率的变化规律；或改变来流攻角，研究其对叶片表面努塞尔数（Nu）分布的影响。这种“基础任务+探索拓展”

的模式，既能巩固基本技能，又能最大限度地培养学生的举一反三和独立研究能力。

四、结束语

将CFD技术引入“航空发动机传热学”课程教学，是对传统教学模式的深刻革新与有效补充。不仅能深化学生对抽象传热理论的理解，通过可视化手段构建起直观的物理图像，更能极大地激发学生的学习兴趣、主动性与创造性，实现从被动接受到主动探索的转变。通过系统化的教学方法，能够有效弥合课堂理论与工程应用之间的鸿沟，显著提升课程的高阶性、创新性与挑战度，从而使学生获得宝贵的工程实践技能，为其未来投身航空发动机科研与设计领域奠定了坚实的能力基础。

参考文献

[1] 汪勇, 郑前钢, 张海波, 等. 虚实结合的“航空发动机控制系统设计技术”课程教学改革探索 [J]. 工业和信息化教育, 2024, (12): 90-94.

[2] 刘君, 谢旅荣, 杨荣菲, 等. 基于卓越工程师培养目标的“航空发动机总体设计”课程教学探索与实践 [J]. 工业和信息化教育, 2024, (12): 60-64.

[3] 高怡宁, 冯军, 艾俊强. 仿生技术在航空工程中的应用进展 [J]. 航空工程进展, 2024, 15(06): 27-38.

[4] 周宇. CFD方法在普通本科“传热学”教学中应用浅析 [J]. 教育教学论坛, 2024, (24): 145-149.

[5] 刘金枝. 基于培养目标的传热学课程建设探索 [J]. 科教导刊, 2024, (01): 52-54.

[6] 耿直, 张贺磊, 常绪成, 等. 航空类“计算传热学”研究性教学改革思考——以郑州航院为例 [C]//教育部高等学校航空航天类专业教学指导委员会. 第五届全国高等学校航空航天类专业教育教学研讨会论文集. 郑州航空工业管理学院航空发动机学院; , 2023: 40-44.

[7] 谭展. CFD技术在航空工程领域的应用挑战与发展 [J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(04): 189-191.

[8] 张喜东, 王红艳, 姚爱林. CFD技术在应用型高校传热学教学改革中的应用及思考 [J]. 中国现代教育装备, 2023, (05): 130-131+138.

[9] 姚玉, 吴逸飞. 体现航空特色的“传热学”教学改革探讨——以飞行器动力工程专业为例 [J]. 教育教学论坛, 2022, (36): 86-89.

[10] 张恒铭. CFD技术在航空燃气涡轮发动机原理教学中的应用探讨 [J]. 中国教育技术装备, 2019, (23): 38-39.