

应用型高校热工流体综合实验装置研制与应用

寇志海*, 李广超, 张 魏

沈阳航空航天大学航空发动机学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2024年11月6日; 录用日期: 2025年1月3日; 发布日期: 2025年1月13日

摘 要

为解决传统热工流体实验大多为演示性、验证性实验而不利于学生能力培养的问题, 结合航空发动机涡轮叶片的内外冷却结构, 创造性地自主研发了热工流体综合教学实验装置, 并申请了国家发明专利“一种多功能热工流体综合实验测量设备及使用方法”。该实验装置创新结合了传热学、流体力学、工程热力学、工程测试技术和发动机构造等专业知识, 开设多个综合性、设计性、开放性实验, 实现热工流体课程理论知识的交叉复合与系统性的整体应用, 有效提高学生工程实践能力与创新能力, 有力提升了应用型人才培养质量。

关键词

自主研发, 热工流体综合实验, 实验装置, 教学改革

Development and Application for the Thermal-Fluid Comprehensive Experiment Platform of Applied University

Zhihai Kou*, Guangchao Li, Wei Zhang

School of Aero-Engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

Received: Nov. 6th, 2024; accepted: Jan. 3rd, 2025; published: Jan. 13th, 2025

Abstract

In order to solve the problem that most of the traditional thermal fluid experiments are demonstration and verification experiments which is not conducive to the cultivation of students' ability, the thermal-fluid comprehensive experiment platform was developed independently based on the comprehensive use of the thermal-fluid courses and the turbine blade cooling structure of an aero-engine.

*通讯作者。

文章引用: 寇志海, 李广超, 张魏. 应用型高校热工流体综合实验装置研制与应用[J]. 创新教育研究, 2025, 13(1): 166-173. DOI: 10.12677/ces.2025.131023

The national invention patent “A multi-functional thermal fluid comprehensive experimental measurement equipment and use method” was applied. Heat transfer, fluid mechanics, engineering thermodynamics, engineering testing technology and engine structure are used together by this thermal-fluid comprehensive experiment platform. Thermal-fluid comprehensive experiment platform can meet the needs of comprehensive experiment, design experiment, and open experiment. The theoretical knowledge of thermal-fluid courses can be cross-combined and systematically applied, and the engineering practical ability and innovation ability of college students can be effectively improved through the teaching reform of the thermal-fluid experiment. The quality of application-oriented personnel training is effectively improved.

Keywords

Independent Development, Thermal-Fluid Comprehensive Experiment, Experimental Platform, Teaching Reform

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

实践教学环节是高等教育教学的重要组成部分，是高素质专业人才培养的重要环节，是提高大学生工程实践能力和创新能力的主要途径[1][2]。工程实践能力的培养和提高是卓越工程师培养的关键，要贯穿于高校卓越工程师培养的全过程[3]。在工程教育专业认证的通用标准中，明确要求实践教学环节的学分不低于人才培养方案总学分的 20% [4]。这突显了实践教学环节在培养学生的工程实践能力和创新实践能力方面的作用。另外，“新工科”建设也强调培养大学生具有较强的工程实践能力[5]-[7]。

然而，重理论、轻实践仍然是当前我国高校在工程教育上存在的一个较为普遍的问题[8]。实践教学环节学时不够导致学生工程实践创新能力培养难以达到培养目标的要求。高校开设的实验大多为演示性和验证性的，所使用的教学实验设备大多为购置的成熟实验设备，普遍缺乏灵活性和可修改性，很难开设综合性、设计性、开放性实验，不利于大学生工程实践能力与创新能力的培养[9]。

2. 热工流体实验教学现状分析

热工流体课程主要包含传热学、工程热力学以及流体力学，是能源动力、航空航天、化学工程、机械、核工程、油气储运工程、建筑环境与能源应用工程、环境科学与工程、安全工程、消防工程、冶金工程、轮机工程等专业主要的学科基础课。热工流体实验教学在热工流体课程知识的学习与理解以及专业人才的培养过程起到关键作用。

常规的热工流体课程基础教学实验多为演示性、验证性实验，重点聚焦在验证热工流体课程所学的基本定律、定理以及理论公式等，演示相关理论的基本物理现象。每门热工流体课程都是根据各自知识点和能力培养要求而单独设置各自的教学实验项目，从而导致各门热工流体课程相互之间缺乏有效的衔接、交叉与融合内容，也就更没法发挥其将公共基础课与专业课之间联系起来的作用。学生在热工流体基础实验过程中能够发挥的空间也非常有限，并且各个热工流体基础实验的工程应用背景也并不强。

国内一些高校相继从多个方面对热工流体实验教学进行了一定的改革与实践，如设置虚拟仿真实验项目、科研实验平台的使用、可视化实验、科研案例融入实验教学、实践教学体系改革、实验考评方式改革、师资队伍建设等方面[10]-[15]，取得了良好的教学效果。但以前的热工流体实验教学改革大多仅就

热工流体课程的单个课程实验进行改革，综合性、设计性和开放性实验改革相当匮乏。而在工程实际问题中往往需要综合使用热工流体课程知识。一些综合性实验台也仅是把原来的几个实验拼凑到一起，很难能够真正做到同时满足综合性、设计性和开放性实验的要求。

3. 热工流体实验教学改革

沈阳航空航天大学热工流体实验教学中心始建于 1980 年，由工程热力学实验室、传热学实验室、流体力学实验室、热工流体综合实验室和发动机数值仿真实验室组成，先后利用中央与地方共建资金、一流本科专业建设资金等不断加强热工流体实验教学硬件条件建设。实验室主要仪器设备有静水力学实验仪、流体力学综合实验台、沿程和局部压力损失实验台、综合传热性能实验台、热电偶校验装置、外掠平板对流换热特性实验台、换热器综合实验台、导热实验台、中温法辐射测定实验台、二氧化碳 P - V - T 关系测定仪、喷管实验台等。热工流体实验教学中心提供良好的实验教学条件，面向全校本科生的热流科学基础课程开展实践教学工作，同时还可面向社会开展技术服务。

为了突出热工流体实践教学环节在专业人才培养中的重要作用，在保留热工流体课程实验的基础上，提出了一个全新的、独立的实践教学环节：“热工流体综合实验周”，学时为 1 周，为我校能源与动力工程和飞行器动力工程专业本科生的必修实践教学环节。热工流体综合实验周安排在全部学完热工流体课程之后的大三春季学期进行。图 1 给出了构建的热工流体实践教学体系。热工流体基础实验侧重于演示实验现象以及验证物理定律和理论公式，而热工流体综合实验项目涉及到传热学、流体力学、工程热力学、工程测试技术、发动机构造等 5 门专业课程的相关知识，侧重于综合使用热工流体课程知识，具有鲜明的综合性、设计性和开放性实验的特点。

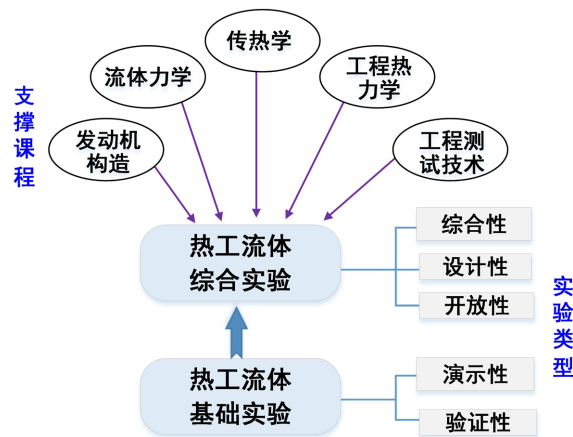


Figure 1. Thermal-fluid experimental teaching system
图 1. 热工流体实验教学体系

4. 热工流体综合教学实验台的研制

4.1. 热工流体综合教学实验台组成

为了开设综合性、设计性、开放性的热工流体教学实验，我校热工流体教学团队以航空发动机涡轮叶片内部冷却结构设计为参考，综合应用热工流体课程知识，创造性的自主研制了 11 套全新的热工流体综合教学实验台，并申请了国家发明专利“一种多功能热工流体综合实验测量设备及使用方法” (CN202010440361.3) [16]，组建了热工流体综合实验室。该热工流体综合教学实验台是由热工流体课程的主讲教师经过多次教学研讨、反复论证，联合研制并进行统一的实验指导，紧密结合了热工流体课堂教

学与实验教学内容,实现了各门热工流体课程间的有效衔接与交叉融合。热工流体综合实验教师团队都是我校航空发动机气动热力学科研团队骨干成员,承担国家自然科学基金、军委科技委项目、航空科学基金、中国航发产学研合作项目等科研项目,并主持高等学校能源动力类新工科研究与实践项目、辽宁省教学改革研究项目、辽宁省教学科学规划课题等教研项目,具有丰富的热工流体教学及工程实践经验。

自主研制的热工流体综合教学实验台,如图2所示。热工流体综合教学实验台包括两个有机玻璃制成的交叉气流通道,在通道内可布置不同形状的肋片结构,模拟航空发动机涡轮叶片内部柱肋强化对流换热结构。由两个离心式交流鼓风机(沈劲 CZR-68)分别提供两个通道内气流流动的驱动力。由直流稳压电源(固纬 SPS-1820)为通道内表面固定的钢带提供不同的直流电流和电压进行电加热,从而实现在钢带表面产生不同的表面热流,提供一个恒定热流密度加热的边界条件。

在实验过程中学生可测量气流的压力、流体和钢带表面的温度、气流的速度等物理参数。钢带表面的局部温度由等间距布置的20个热电阻进行测量,经自主设计开发的多点温度指示仪进行温度显示。气流的速度由安装在通道下游的皮托管测得。本实验使用的工作介质为空气,其粘度比较小,在气流通道内流动的压力损失比较低,因此气流的压力由倾斜式微压计(亿欧 YYT-2000B)测得。

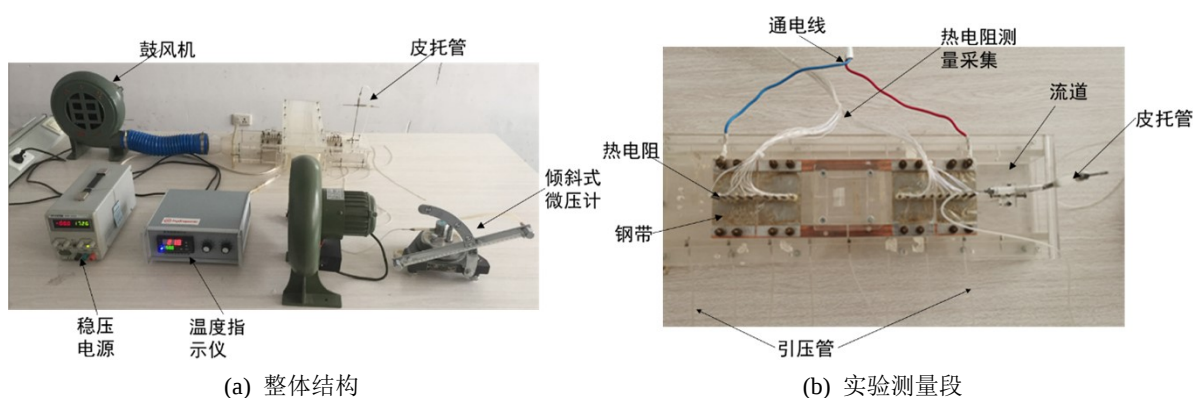


Figure 2. Thermal-fluid comprehensive experimental teaching platform by independent design and development
图 2. 自行设计、研制的热工流体综合教学实验台

4.2. 热工流体综合实验原理

热工流体综合实验教学的理念是注重学生对多门专业课程知识的综合理解和运用,注重学生对温度、压力、速度等物理参数的测试原理的理解和各种测试方法优劣的评估。

自主研制的热工流体综合教学实验台能够进行的实验项目有:双层壁夹层自然对流换热系数测量、光滑通道强迫对流换热系数测量、粗糙通道强迫对流换热系数测量、光滑通道压力系数测量、粗糙通道压力系数测量、气膜冷却流场显示。

求解对流换热系数是研究对流换热问题要解决的核心问题。在本实验中,利用钢带通电加热,产生恒定热流密度的边界条件。利用热电阻测量出钢带壁面局部温度和流体的温度。根据描述对流换热特性的牛顿冷却公式,可得到受热壁面与气流之间的对流换热系数为:

$$h_x = \frac{q_h}{T_{w,x} - T_f} \quad (1)$$

式中, q_h 为单位面积的对流换热量,由直流稳压电源的电压和电流读数乘积除以受热壁面的表面积获得,在实验过程中可通过调节电流大小而获得不同的热流密度下的实验结果。 $T_{w,x}$ 为受热壁面在 x 位置处的局部温度。 T_f 为气流的来流温度。

气流在通道内流动的流阻性能应用静压系数来衡量。静压系数可表示为：

$$C_{p_i} = \frac{p_i - p_\infty}{\rho_\infty V_\infty^2 / 2} \quad (2)$$

式中， p_∞ 为通道进口处的参考静压。 p_i 为第 i 点处静压测点处的静压。 $\rho_\infty V_\infty^2 / 2$ 为通道进口处的动压头， V_∞ 为气流的来流速度。在通道侧面沿着气流流动方向共布置了 10 个引压管如图 3(b)所示，第 i 点静压与进口静压的差值直接利用微压计测得。气流的来流速度利用皮托管测得。

注重培养学生使用各种热工仪器设备和实验操作规范。在实验进行前，提醒学生实验的注意事项以及进行安全教育。实验台的启动过程是先通气、后通电。电源启动前保证电流旋钮处于 0 位。实验结束过程是先断电、后断气，断电之前保证应保证电流旋钮处于 0 位。实验过程注意接触电阻对测量结果影响，保证采用螺栓对电线的连接接触良好。微压计内部不能有气泡，并且必须水平放置。在进行变工况的实验测量时，提醒学生需要等待该实验的流动传热过程达到新的稳态时才能进行测量。传热过程达到稳定状态所需的时间，要远高于流动过程达到稳态状态所需的时间。

4.3. 综合性、设计性、开放性实验

该热工流体综合教学实验台创新地结合了传热学、流体力学、工程热力学、工程测试技术和发动机构造等 5 门飞行器动力工程以及能源与动力工程专业的主干专业课程内容，可促进热工流体课程中理论知识的交叉复合及整体应用，能够使热工流体课程教学知识得到整体的、系统的和创新性的应用。重点培养学生对流动传热基本原理的理解以及冷却设计方法的工程实践能力，并深刻理解流动阻力增加与强化换热之间的关系。

为了便于学生设计和改造实验台，气流通道由多个螺栓紧密固定，增加了教学实验台使用的灵活性和便利性。学生在进行实验时可自动动手对实验台的测量段进行重新设计和改造，如图 3 所示。学生可拆开实验测量段，在气流通道内的不同位置和角度添加不同形状的肋片结构，改变受热表面附近流体流动的湍流度，从而增强受热表面的对流换热。借此模拟航空发动机涡轮叶片内部通过蛇形通道内布置柱肋强化换热结构，增强涡轮叶片与冷却空气之间的对流换热，从而实现更加高效、可靠的涡轮叶片冷却设计。在实验过程中，学生可通过设置不同间距和位置的肋片结构进行多次实验，从而检验不同肋片安装情况下的强化传热效果优劣，进而分析其原因。尽管人为在受热通道内布置肋片结构可以强化传热，但同时增加了气流在通道内的流动阻力，造成气流压力损失增加，因此造成维持气流流动所需要的能耗增加，这是流体力学与工程热力学在该实验过程中的应用。使综合性、设计性以及开放性实验内容成为热工流体综合实验教学的主要部分。

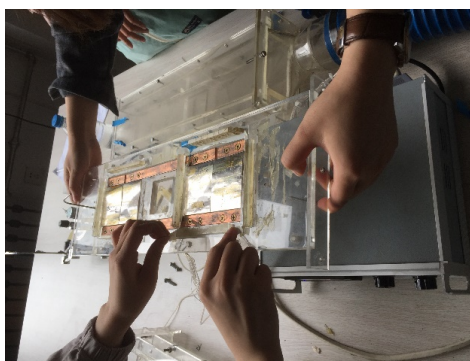


Figure 3. The thermal-fluid comprehensive experiment designed by students

图 3. 学生自行设计热工流体综合实验

另外,积极引导将热工流体综合实验结果与外掠平板强制对流换热过程的解析解进行对比验证,分析各个实验环节测量误差的产生原因,进而评估对流换热系数和静压系数测量结果的不确定度,并进行实验测量方法的改进。鼓励学生在实验后利用计算流体力学方法对该实验传热流动过程进行数值模拟,获得温度场、速度场、压力场云图分布。将理论分析、实验研究与数值模拟三种研究方法之间建立起联系,让学生了解理论分析、实验研究以及数值模拟的优缺点和研究思路。

5. 实验结果与分析

图4给出了有无扰流肋片对加热面的不同位置表面传热系数的影响。可见,加肋片时的加热面温度比光滑通道未加肋片时的温度更低,强制对流表面传热系数也更高,平均对流表面传热系数增加了10.4%。在入口处垂直气流方向加肋片,能够增强加热面表面附近的流体流动湍流度,因而可有效增加表面传热系数,强化流体与加热表面直接的对流换热速率。

图5给出了有无扰流肋片对气流通道不同位置静压系数的影响规律。可见,加肋片时的静压损失系

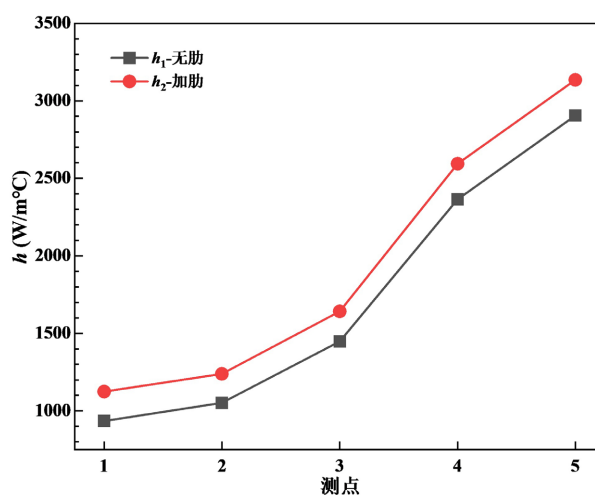


Figure 4. Comparison of convective surface heat transfer coefficients
图4. 对流表面传热系数对比

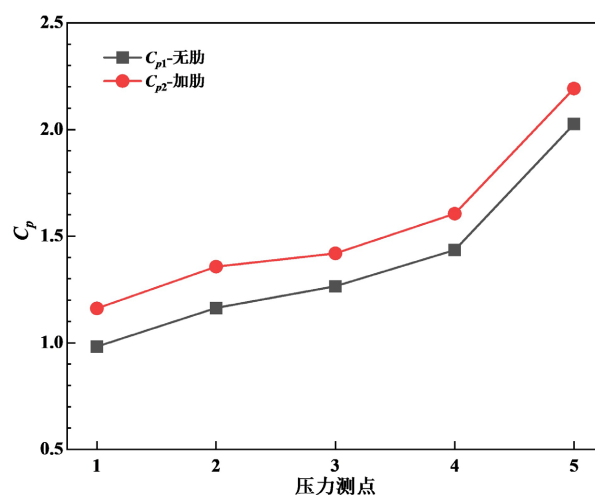


Figure 5. Comparison of static pressure loss coefficient
图5. 静压损失系数对比

数比光滑通道未加肋片时的静压损失系数更高, 平均压损失系数增加了约 11.9%。在添加扰流肋片强化对流换热的同时, 也会带来额外的流体流动损失, 即增加了维持流体流动所需的泵功率或者能耗, 这与强化传热进而节能减排的目的背道而驰。引导学生通过优化扰流肋片的布置方式、修改扰流肋片形状、高度以及间距, 从而实现在强化对流换热的同时尽可能降低流体的流动损失、达到节能减排的目的。让学生建立一定的工程优化设计的观念与思维。

实验过程中, 由于整体流道较短, 流体来流的压力和温度分布的均匀性有待提高。流体流过流道时, 沿流动方向整体压力变化较小, 微压计的测量误差和读数误差造成的影响有可能很大。接下来可提高流道长度、增加整流装置、更换高精度电子压差计, 进一步提高实验测量的稳定性和测试精度, 更好充分发挥热工流体综合实验在培养学生工程实践能力、解决复杂工程问题能力的作用。

6. 结语

依托航空工程国家级实验教学示范中心, 自主研制了热工流体综合教学试验台, 创新地结合了传热学、流体力学、工程热力学、工程测试技术和发动机构造 5 门专业课程内容, 使综合性、设计性和开放性实验内容成为热工流体综合实验教学的主要部分。使学生掌握热工仪器仪表的使用方法和热工参数测试的基本方法, 提高学生综合运用热工流体课程知识的能力, 培养学生设计和改造实验以及分析实验结果的能力, 锻炼学生的工程实践能力和解决工程实际问题的能力, 增强了团队协作意识, 真正让学生体会到学有所用、学以致用, 有效提高了学生的学习积极性和主动性。

通过热工流体综合实验教学改革, 有效提升了教师队伍的教学能力与水平, 有力提高了教学实验室建设水平, 在我校飞行器动力工程国家级一流本科专业、能源与动力工程省级一流本科专业的建设中都起到强有力的支撑作用。充分发挥热工流体实验教学支撑专业人才培养的作用。经过多年的教学实践应用进一步证明, 热工流体实验教学改革切合教学实际, 切实提高了学生的工程实践能力和创新能力, 具有很好的推广价值和积极的借鉴意义。

基金项目

辽宁省研究生教育教学改革研究项目(LNYJG2023063); 高等学校能源动力类教学研究与实践项目(NSJZW2021Y-41)。

参考文献

- [1] 于化东. 加强实践教学环节, 提高大学生创新实践能力[J]. 中国高等教育, 2010(21): 23-25.
- [2] 张其亮, 陈永生, 杜晓明. 基于混合思维能力培养的计算机类实践教学改革与实施[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(6): 203-207.
- [3] 林健. 构建工程实践教育体系培养造就卓越工程师[J]. 中国高等教育, 2012(Z2): 15-17.
- [4] 中国工程教育专业认证协会. 工程教育认证通用标准[EB/OL]. <https://www.cceaa.org.cn/gcjyzyrzh/rzcxjbz/gcjyrbz/tybz/630662/index.html>, 2022-07-15.
- [5] 徐骏, 王自强, 施毅. 引领未来产业变革的新兴工科建设和人才培养——微电子人才培养的探索与实践[J]. 高等工程教育研究, 2017(2): 13-18.
- [6] 张雪, 齐永正, 曾文杰, 等. 新工科视角下 BIM 工程实践能力培养框架及实证[J]. 高等工程教育研究, 2021(4): 47-53.
- [7] 戴亚虹, 李宏, 邬杨波, 等. 新工科背景下“学践研创”四位一体实践教学体系改革[J]. 实验技术与管理, 2017(12): 201-207.
- [8] 林健. 新工科专业课程体系改革和课程建设[J]. 高等工程教育研究, 2020(1): 1-13.
- [9] 彭大维, 王敏, 徐菁旌. 热工流体新实验改革探索[J]. 高等工程教育研究, 2019(Z1): 230-231.

-
- [10] 宋福元, 马修真, 张国磊, 等. 基于创新人才培养的热工实验教学模式研究[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(10): 162-164.
 - [11] 夏侯国伟, 张顺, 张晓烽, 等. 工程流体力学综合实验台的优化设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(5): 117-120.
 - [12] 徐长松, 路勇, 宋福元, 等. 改进“热工实验”教学加强自主实验能力培养[J]. 实验室科学, 2016, 19(2): 148-151.
 - [13] 曹玮, 许亚敏, 陆紫生. 能源动力类虚拟仿真综合实践平台建设[J]. 中国教育信息化, 2021(4): 71-74.
 - [14] 夏家群, 李沪萍, 罗康碧. 热工专业综合实验改革的实践[J]. 实验科学与技术, 2013, 11(2): 50-52.
 - [15] 刘向东, 戴含晖, 陈永平. 基于 LBM 与 Matlab GUI 的流体力学可视化教学与虚拟实验[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 102-107.
 - [16] 张魏, 曾睿, 李广超, 寇志海, 等. 一种多功能热工流体综合实验测量设备及使用方法[P]. 中国, 202010440361.3, 2020-05-22.