



面向热流国际班的流体热物性测试技术 课程实验

张可, 毕胜山, 胡书瑞, 孟婧, 孟现阳, 吴江涛

(西安交通大学能源与动力工程专业国家级实验教学示范中心, 西安 710049)

摘要: 针对培养一流人才的目标, 制定了面向热流国际班本科生开设的流体热物性测试技术课程实验体系。课程包括温度与压力测量、饱和蒸气压测量及临界现象观测、流液相密度测量和液体运动黏度测量 4 项实验。课程实验均源于热物性科研实验, 实验设备均为自主研发。实验预习、操作和数据处理内容较为丰富, 实验过程中学生全程动手操作, 实验参与度高。该课程实验在开设的 5 年内获得了学生的一致好评, 起到了培养拔尖人才的作用。

关键词: 流体热物性; 热流国际班; 课程实验; 测试技术

中图分类号: G642.3

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230515

Course Experiment of Measurement of Thermophysical Properties of the Fluids for the Thermal Fluid International Class

ZHANG Ke, BI Shengshan, HU Shurui, MENG Jing, MENG Xianyang, WU Jiangtao

(National Experimental Teaching Demonstration Center of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to cultivate top-notch talents, a experimental system for the course of Fluid Thermophysical Testing Techniques has been developed targeting undergraduate students in the Thermal Fluid International Class. The course includes four experiments: temperature and pressure measurement experiment, saturated vapor pressure measurement and critical phenomenon observation experiment, liquid density measurement experiment, and liquid motion viscosity measurement experiment. These experiments are derived from research experiments on thermophysical properties, with all experimental equipment independently developed. The course provides comprehensive pre-lab preparation, hands-on operation during the experiments, and post-lab analysis, offering a rich learning experience. The high level of student engagement is reflected in their active participation throughout the experimental process. Over the course of five years since its introduction, this experimental course has received consistent praise from students, demonstrating its effectiveness in cultivating outstanding talents.

Key words: thermophysical properties of the fluids; thermal fluid international class; course experiment; testing technology

流体热物性测试技术是西安交通大学热流科学与工程系的专业课程之一, 面向热流国际班本科生开设。热流国际班于 2016 年底开班, 每届从能源与动力工程学院本科生中招收成绩最好的 20 余名学生进行培养^[1-2]。本课程在国内为本校率先开设的一门课程, 于 2017—2018 学年第二学期首次向能源与动力工程学院 C51 班 24 名本科生开出, 理论授课 40 学时, 实验授课 16 学时。流体热物性测试技术课程实验是配合理论教学而开设的系列实

验, 课程实验的目标是通过实验帮助学生深刻理解各种热物性参数的基本概念和测试方法, 提高学生实际动手操作能力, 培养学生的科研创新能力。

1 课程实验模式和建设思路

流体热物性测试技术是一门专业讲授实验测量技术的课程, 若没有良好的实验操作环节, 本课程将非常枯燥且难以理解。然而, 热物性相关实验众多, 在有限的实验学时中无法向学生开设

收稿日期: 2023-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(51776171); 西安交通大学本科实验实践与创新创业教育教学改革研究专项(22SJZX17)。

作者简介: 张可, 博士, 研究员, 主要从事流体热物性与可燃性方面的研究。E-mail: k.zhang@xjtu.edu.cn

所有的实验项目。因此,为学生及时配套与理论课紧密结合且具有测量共性的实验,是本课程实验的首要建设思路。

与能源与动力专业其他课程不同,热物性测试技术所涉及的实验基本技能非常多,实验的开放性非常强,学生在实验中必须通过充分的参与和动手操作,才能真正获得专业的实验能力。因此,为学生提供全程动手、测量知识点丰富的实验,是本课程的另一条建设原则。

流体的热物性主要包括热力学性质和迁移性质^[3],其中热力学性质包括饱和蒸气压、比热容、PVT 性质、音速、相平衡性质等;迁移性质包括黏度、导热系数、扩散系数等。基于上述课程建设思路的综合评定,选定将热力学性质中的“饱和蒸气压测量及临界现象观测”“流体的液相密度测量”和迁移性质中的“液体运动黏度测量”作为课程实验的项目。此外,由于所有的热物性实验均需要基于准确的温度和压力测量,因此“温度与压力测量”也作为实验的项目之一。本课程的实验包括以上 4 项,每项实验均为 4 学时。

2 课程实验内容设计

2.1 温度与压力测量实验

在本院所开设的热能与动力机械测试技术和工程热力学课程实验中均包含温度与压力测量的相关内容。在工程热力学实验中,温度与压力的测量作为演示实验向学生讲授^[4],主要讲解温度和压力传感器的原理,讲授时间有限,且学生仅能从直观上认识多种传感器,缺乏动手测量的环节;在热能与动力机械测试技术实验中,温度和压力的实验均为传感器的标定实验^[5],传感器和测量仪表在实验前已经连接好,学生在实验中仅进行读数操作。经过两门实验课程的学习,学生并未真正掌握温度与压力实际测量的方法。

鉴于温度与压力测量的重要性,在本课程实验中,向学生开设的第一项实验即为温度与压力的测量实验。在实验中,为学生准备了各式各样的传感器,首先用约 40 min 对照实物向学生讲解温度和压力传感器的测量原理,然后让学生自己动手测量,实验包括以下 4 部分的内容。

1) 使用数字万用表测量温度

为学生提供两线制和四线制 Pt-100 铂电阻温度计、K 分度和 E 分度热电偶,将 4 支传感器放

置于干体炉内,将温度设置为 70 °C 进行恒温,让学生使用 Fluke 8808A 数字万用表分别对 4 支传感器的输出信号进行测量。使用铂电阻温度计,让学生学会两线制和四线制传感器的接线和数字万用表测量设置方法,通过实际的测量结果认识到四线制传感器的测量精度更高;使用热电偶温度计,通过测量得到的电压值分辨出 K 分度和 E 分度热电偶,并计算测量得到的温度值,让学生掌握热电偶测量端温度补偿的方法,以及热电偶分度表正函数和反函数多项式的计算方法。

2) 使用温度控制器测量温度

为学生提供温度控制器,同样使用上述 4 支传感器进行温度的测量。在实验过程中,让学生掌握热电偶和三线制铂电阻的接线方法,学会温度控制器参数的设置方法,了解其测量端温度自动补偿的原理。此外,将一支带补偿导线和一支不带补偿导线的 S 分度热电偶同时置于温度设置为 700 °C 的高温干体炉中,让学生将其连接至温度控制器,通过测量值了解补偿导线的作用。

3) 使用数字万用表测量压力

为每组学生提供不同量程的压阻式、电流型压力变送器,其中部分为绝压型,部分为表压型,实验中使用压力变送器测量常压和制冷剂 R125 在室温下的饱和蒸气压。通过实验让学生掌握使用 Fluke 8808A 数字万用表测量压力的接线和铂电阻分度表的使用方法,通过测量值判断出所用的变送器是表压型或绝压型。

4) 使用智能数显测控仪测量压力

为学生提供智能数显测控仪,使用同样的变送器进行常压和制冷剂 R125 在实验温度下的饱和蒸气压的测量。在实验过程中,让学生掌握智能数显测控仪与压力变送器的接线方法,学会智能数显测控仪参数的设置方法。

2.2 饱和蒸气压测量及临界现象观测实验

饱和蒸气压是流体工质最重要的热力学性质之一,也是工程热力学、热工基础、化工原理等课程中最基本的概念。饱和蒸气压测量实验,让学生准确形象地认识饱和蒸气压的概念,加深对饱和状态、凝结、气化、气液相平衡和精馏等热力学知识的认识,对学习热力循环及化工过程等都具有重要作用^[6-7]。

该实验使用西安交通大学能源与动力工程专业国家级实验教学示范中心自主研发的实验装

置^[8-9],如图1所示。实验装置使用的工质为制冷剂 R125,测量时首先要求学生按预习内容连接控制电路,使用温度控制器控制半导体制冷片对测量装置进行降温,然后连接真空泵将测量装置抽真空,利用温差使 R125 在测量装置内冷凝,实现工质的充灌。通过工质的充灌过程,加深学生对饱和蒸气压的概念和实际应用的理解,并可观测气体的降温冷凝现象;充灌工质后,将实验装置设置为不同的温度,当温度稳定后记录该温度下

的饱和压力值,实验过程中可测量得到 10 组以上的数据,根据实验数据通过非线性拟合得到 Antoine 和 Riedel 形式的饱和蒸气压方程;当温度升至 65 °C 时,每隔 0.1 °C 开始缓慢升高温度,此时观测气-液两相界面越来越模糊的现象,在临界点附近,分别在升温和降温过程中观测临界乳光现象。本实验中饱和蒸气压的测量结果与 REFPROP 软件的偏差不得超过±2%,临界温度的测量偏差不得超过±0.5 °C。

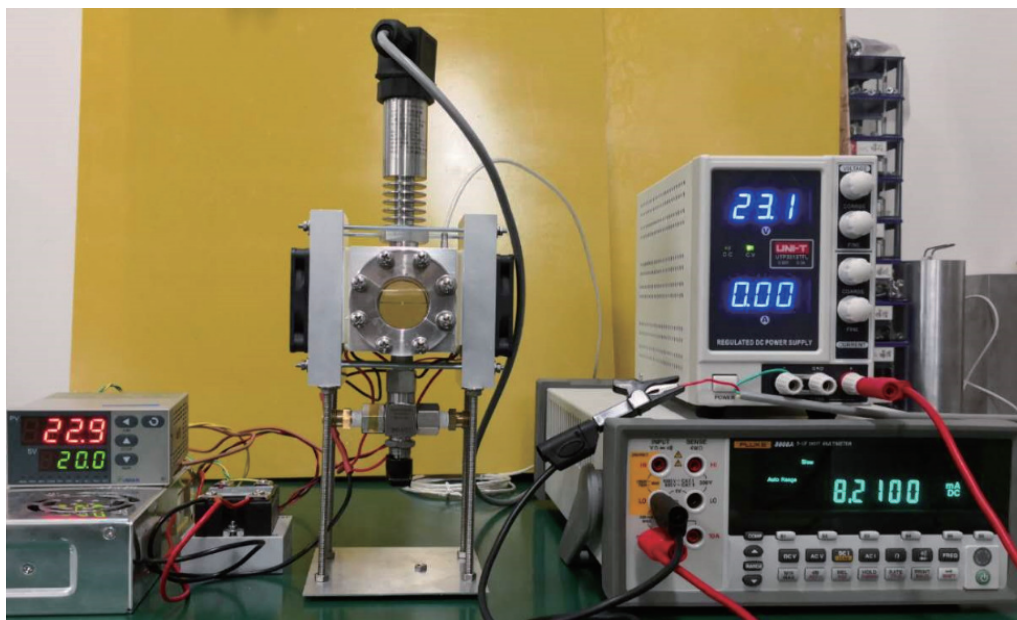


图1 饱和蒸气压测量及临界现象观测实验装置图

2.3 流体液相密度测量实验

流体液相密度同样属于最基本的热物理性质之一,通常液相密度值相对容易精确测量。液相密度的测量方法众多,包括密度瓶法、浮子法、振动管法、振动弦法和磁悬浮法等^[10-11]。其中密度瓶和浮子法过于简单;振动管法操作步骤更为简单且价格昂贵;振动弦法和磁悬浮法为原理非常复杂的科研方法,不适合用于实验教学。作者在完成科研项目的过程中,曾经采用过一种通过测量液面高度差的方法测量流体的密度,该方法测量精度可达±0.5%,非常适合用于本科生的实验教学。

课程实验所用的测量装置如图2所示。测量容器为一根底端封闭的带刻度尺的石英玻璃管,由玻璃管顶端注入质量为 m 的液体,使用密封件将顶端密封,将玻璃管放入恒温浴中,待温度达到平衡时,根据刻度算出流体液相的体积,即可

计算得到该温度 T 下流体的液相密度为:

$$\rho_T = f(h_T) = \frac{4m}{\pi D^2(h_T - h_0)} \quad (1)$$

式中: D 为石英玻璃管内径; Δh 为液柱的长度, $\Delta h = h_T - h_0$, 其中 h_T 为液面位置处的读数, h_0 为石英玻璃管底部液柱的起始高度(标尺的 0 刻度并非完全与液柱起始高度重合,且石英玻璃管底部可能并非平面)。

D 和 h_0 为仪器常数,其值不随温度的变化而发生变化,本实验所用的石英玻璃管内径约为 6 mm,管长约为 240 mm。在实验时,首先向石英玻璃管中灌入已知液相密度的质量为 m 的标准物质,标准物质的标准密度数据来源于 REFPROP 软件,测量得到一系列不同温度下液面的高度 h ,即可根据最小二乘方法拟合得到 D 和 h_0 。标定得到 D 和 h_0 后,重新充入其他待测流体,根据式(1)测量得到待测流体在不同温度下的液相密度值。

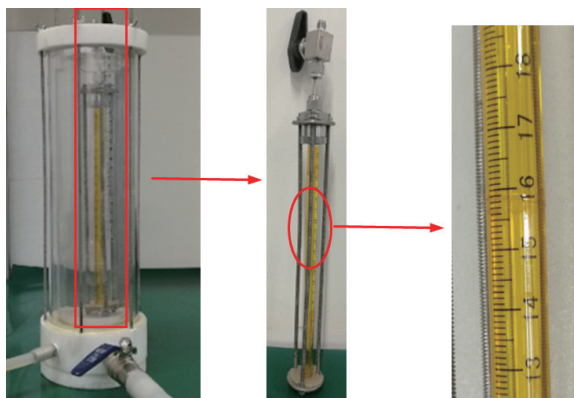


图 2 流体液相密度测量装置图

本实验相对于密度瓶和浮子密度计，可测量的温度和压力范围较宽，可测量高压最高至 5 MPa 时的液相密度；相对于振动管密度计等商业仪器，在锻炼学生动手能力方面也有良好的效果。

2.4 液体运动黏度测量实验

由于流体的迁移性质相对较少，因此本课程仅安排了一项迁移性质测量实验。导热系数和黏度是最重要的两种迁移性质，其中导热系数在测量时其各种测量方法中的动手机会均较少，因此本课程选择开设黏度测量的实验。毛细管黏度计是黏度测量中应用最为广泛的一种方法，其测量结果可靠，测量精度相对较高，测量条件容易实现，且测量成本较低^[11]。因此，本课程开设了毛细管黏度计测量液体运动黏度的实验。

实验中使用的黏度计为应用较为广泛的乌氏毛细管黏度计，配备 3 台透视型恒温槽，每台恒温槽可供多支毛细管黏度计共同使用。与流体液相密度测量实验相同，液体运动黏度的测量过程同样包括标定过程，但仅标定时间常数一项参数，因此标定的实验和计算过程均相对简单。首先使用毛细管黏度计测量纯水在 40、50、60、70、80 °C 时的流动时间，根据纯水的标准运动黏度数据计算出毛细管黏度计在每个温度下的时间常数，比较时间常数随温度的变化关系。标定过程完成后，使用乙醇清洗毛细管黏度计，然后测量乙醇在 50 °C 温度点下的运动黏度，比较测量值与 REFPROP 软件标准值的偏差。

3 实验教学成效

3.1 教学模式的创新

本课程将预习、实践和数据处理环节进行有机结合，不仅提高了学生的学习兴趣和参与度，

而且有效地培养了学生的创新思维和科研能力。

在预习阶段，为学生提供仪器说明书等资料，鼓励学生自主学习，并且在预习报告中为学生设置了与实验关键过程相关的问题，引导学生聚焦实验的关键环节。尽管学生普遍反映预习阶段存在挑战，尤其是面对晦涩的说明书，然而当其完成实验后，发现自己已经初步掌握了自学仪器设备操作过程的基本技能。如 C51 班学生在“温度和压力测量”实验报告中写到：“这可能是我上大学以来觉得最棒的一次实验体验了，因为这个实验是我们可以通过充分的预习去理解的，且通过自己阅读仪器说明书去完成接线工作，增强动手能力，而不像以前的很多实验只是照着老师的操作模仿一遍，或者单纯在面板上读几个数”。

在实验过程中，学生全程动手参与。通过“做中学”的方式，深化了对理论知识的理解和应用。如在饱和蒸气压测量及临界现象观测实验中，从半导体控温系统的搭建到饱和蒸气压的测量，学生真正动手完成一个实验系统从 0 到 1 的过程，通过这种实验操作不仅增强了学生的实验技能，而且培养了解决实际问题的能力。

数据处理也是本课程的特色。数据分析是科学研究中不可或缺的一环，通过本课程的实践，使学生学会如何从实验数据中提取有价值的信息，如何运用统计方法验证科学假设，以及如何通过数据解释现象背后的原理。如在液体密度测量实验的数据处理过程中，需要用到流体热物性测试技术中非常重要的一种手段——使用标准物质标定仪器常数的方法^[12-15]，通过非线性、最小二乘拟合的方法对实验结果进行分析和处理，以培养学生运用科学方法解决问题的能力。

3.2 教学实验的创新

本课程的实验内容和实验设备均为自主研发，不仅为学生提供了接触先进测量仪表和设备的机会，还体现了本校在教学实验设备研发方面的能力。其中温度和压力测量实验台于 2021 年推广至青岛科技大学，2022 年推广至深圳技术大学，2023 年推广至中山大学；饱和蒸气压测量及临界现象观测实验台于 2021 年和 2022 年分别获得“第六届全国高等学校教师自制实验教学仪器设备创新大赛自由设计类一等奖”和“第十一届全国高等学校物理实验教学研讨会教学仪器评比

一等奖”。2019年与四川世纪中科光电技术有限公司进行了专利成果转化,目前已经推广至中山大学、哈尔滨工程大学、青岛科技大学等20余所高校,充分体现了所研制的教学实验设备的先进性。

除本课程外,所研制的教学实验还应用于其他课程和专业的实验教学中。如温度和压力测量实验2020年应用于青岛科技大学的工程热力学课程实验中,2024年应用于本校的大面积专业基础课程热流体课程实验中;饱和蒸气压测量及临界现象观测实验自2022年起应用于本校的热流体课程实验中,此外还推广应用于大学物理课程实验中。

4 结束语

流体热物性测试技术课程是一门偏重于实验测量的课程,本课程的开设不仅加深了学生对测试技术的理解和掌握,也提高了学生对所学的工程热力学、流体力学等课程的理解程度。本课程仅面向本院很小一部分拔尖人才,其课程实验不应再偏向于常规的验证性实验。本文所规划的课程实验全部为综合性实验,实验过程中学生几乎全程动手操作,实验参与度高。通过本课程实验的开设,学生不仅掌握了多种热物性参数的测量方法,而且提升了自己操作仪器设备、动手搭建测试系统、标定仪器常数及实验数据处理的相关实验能力。本课程实验目前已面向5届学生开设,参加实验的人数为119人,课程实验开设后得到学生的一致好评,起到了培养拔尖人才的作用。

参考文献

[1] 杨富鑫,何坤,任秦龙,等.培养具有国际视野的热流创新人才:西安交通大学“热流国际班”的探索与实践[J].高等工程教育研究,2019(S1):246-250.

[2] 付雷,杨富鑫,唐桂华,等.具有人文数理信息基础、培养国际化一流热流人才:西安交通大学“新工科”人才培养模式实践与探索[J].高等工程教育研究,2019(S1):1-5.

[3] 吴江涛.高精度流体热物性测试实验系统的研制及二

甲醚热物理性质的研究[D].西安:西安交通大学,2003.

- [4] 王小丹.热与流体实验教程[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2017.
- [5] 厉彦忠,吴筱敏.热能与动力机械测试技术[M].西安:西安交通大学出版社,2007.
- [6] 张可,何健钊,孟婧,等.饱和蒸气压测量与临界现象观测实验教学装置的研制[J].中国现代教育装备,2022(9):59-62.
- [7] 邓昌宇,张可,刘翱铭,等.饱和蒸气压实验教学装置的研制[J].实验室研究与探索,2018,37(7):69-71.
- [8] 张可,邓昌宇,刘翱铭,等.一种饱和蒸气压测量装置及方法[P].中国专利:ZL201710452894.1.2019-07-23.
- [9] 张可,毕胜山,王小丹,等.一种饱和蒸气压测量和临界现象观测装置[P].中国专利:CN209858128U.2019-12-27.
- [10] YANG J, FANG D, MENG X Y, et al. Experimental measurements and correlations of the vapor phase pvTx behavior of binary mixtures of 1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane (R134a) + 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf)[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 132: 263-275.
- [11] 孟现阳.振动弦黏度/密度计的研制及部分替代燃料黏度和密度实验研究[D].西安:西安交通大学,2009.
- [12] ZHANG Z Y, MENG X Y, ZHANG K, et al. Viscosity measurements of dialkyl adipates in the temperature range of (283 to 363) K and up to 40 MPa[J]. International Journal of Thermophysics, 2019, 40(12): 109.
- [13] WANG X Q, QIU S, WU J T, et al. Measurements of the thermal conductivity of *n*-pentane, isopentane, 1-pentene, and 1-pentanol in the temperature range from 253 to 373 K at pressures up to 30 MPa[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2020, 65(4): 1993-2001.
- [14] LIANG X M, SUN Q Y, MENG X Y, et al. Liquid viscosity measurements for the binary and ternary refrigerant mixtures of R134a, R1234ze(E), and R1234yf[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2022, 67(8): 1872-1881.
- [15] DENG C Y, ZHANG K. Thermal conductivity of 1, 2-ethanediol and 1, 2-propanediol binary aqueous solutions at temperature from 253 K to 373 K[J]. International Journal of Thermophysics, 2021, 42(6): 81.

编辑 葛晋