



热工基础虚拟仿真实验平台的开发与应用

李江涛¹, 张香玉¹, 赵群喜¹, 李 昆¹, 李 丹², 马保建^{1*}

(1. 新疆理工学院 机电工程学院, 阿克苏 843100; 2. 温州职业技术学院 数字经贸学院, 温州 325000)

摘要: 热工基础是研究热能与其他形式能量转换规律及应用的一门学科, 其课程内容晦涩抽象, 理论性较强, 学生学习难度较大。为提高学生的学习效率, 基于有限元法和 COMSOL 仿真 APP, 开发了热工基础虚拟仿真实验平台, 并实现自主运行 APP 的封装。学生可以通过 APP 界面对热工基础中三类边界条件的传热问题进行数值模拟, 并实现仿真结果的可视化展示。将虚拟仿真技术引入热工基础的课堂教学, 有利于提高学生的学习兴趣, 降低学生的学习难度, 同时加深学生对热工基础基本概念的理解。

关键词: 热工基础; 虚拟仿真; 实验教学; 教学方法

中图分类号: TK122

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240103

Development and Application of the Virtual Simulation Experimental Platform for Thermal Engineering

LI Jiangtao¹, ZHANG Xiangyu¹, ZHAO Qunxi¹, LI Kun¹, LI Dan², MA Baojian^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843000, China;

2. School of Digital Economy and Trade, Wenzhou Polytechnic, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Fundamentals of thermal engineering is a subject that studies the law and application of the conversion of heat energy and other forms of energy. This course is highly theoretical, abstruse and difficult to learn. In order to improve students' learning efficiency, based on finite element method and COMSOL simulation APP, thermal engineering basic virtual simulation experiment platform is developed, and the packaging of APP is realized. Students can numerically simulate heat transfer problems of three types of boundary conditions in thermal engineering foundation through the APP interface, and realize visual display of simulation results. The work reported in this paper is a beneficial attempt to enhance students' interest in learning, reduce their learning difficulty, and deepen students' understanding of basic concepts of basic thermal engineering.

Key words: thermal engineering; virtual simulation; experimental teaching; teaching method

随着“新工科”建设的需要及交叉学科的发展, 热科学知识早已成为 21 世纪工科各类专业人才知识体系的重要组成部分^[1-2], 其相关理论早已融合应用在智能制造、航空航天、新能源等高新技术的高速发展过程^[3-5]。热工基础是研究热能和其他形式的转换及传递方式的学科, 也是新世纪

工科各类专业人才培养的重要课程。传统的热工基础内容理论性较强且相对独立, 老师授课过程偏重理论知识的讲解, 脱离工程实际, 使得课程枯燥无味, 导致学生的学习积极性不高; 另外实验教学学时较短, 教学内容多为单一的实验演示或验证, 忽视了学生创新与实践能力的培

收稿日期: 2024-03-04

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(220906492212028); 新疆维吾尔自治区教改项目(XJGXPTJG-202397); 新疆维吾尔自治区高校本科教育教学研究与改革项目(XJGXJGZH-2024004)。

作者简介: 李江涛, 硕士, 助教, 主要从事微纳流体力学传热学数值模拟及优化方面的研究。E-mail: 1738144236@qq.com

*通信作者: 马保建, 博士, 副教授, 主要从事智能农业装备研发及实验室管理工作方面的研究。E-mail: 1009384790@qq.com

养^[6-7]。为提高学生实践动手能力及对理论知识的掌握程度，激发学生的学习兴趣，虚拟仿真技术逐渐在热工基础及其他热工学科的教学过程中广泛应用。

1 虚拟仿真技术在导热实验教学中的应用

文献 [8] 利用有限差分法及 MATLAB 界面，开发了求解一维、二维传热问题的虚拟实验教学平台，提高了教学效果。文献 [9] 基于 Energy2D 开展传热虚拟仿真教学，实现了用户的实时交互。文献 [10] 利用 Tina-II 电路虚拟仿真软件进行传热学热电比拟实验教学，丰富了实验教学的内容及构架。文献 [11] 基于 Java 语言，利用有限差分法及网络交互式数据可视化技术，开发了平壁、圆筒壁等导热虚拟仿真实验模块。虚拟仿真教学平台的构建对平台建设者的数理基础要求较高，不仅需要对热力学、传热学等知识有充分的理解与认识，还需要熟练的编程技术。这使得虚拟仿真技术在热工基础的教学过程应用门槛较高，仅在专业的仿真工程师和科学研究者之间得以应用，在高校虚拟平台的构建及使用过程具有一定局限性。

2 COMSOL 虚拟仿真平台

2.1 虚拟仿真平台的构建

为解决虚拟仿真技术在热工基础教学应用过程中遇到的问题，本文基于 COMSOL 虚拟仿真软件建立热工基础仿真平台，以提升教学效果为目标，将虚拟仿真技术引入热工基础的教学过程。利用 COMSOL APP 开发工具，建立关于热工基础的虚拟仿真 APP。COMSOL 虚拟仿真 APP 通过交互界面可供不同的人群使用，同时也能在多种操作系统上运行，实现数值仿真信息的横纵向传递^[12-13]。虚拟仿真 APP 功能的开发可通过表单编辑器及方法编辑器实现。表单编辑器以集成化的方式将文本框、输入框等图形化界面融为一体^[14-16]。方法编辑器主要基于 Java 语言实现 APP 内部数据结构及 GUI(graphical user interface)界面的修改与调整。另外 COMSOL 友好的操作界面及方便快捷的后处理工具可直观展现虚拟仿真的结果，不仅有利于提高学生对理论知识的掌握与理解程度，也锻炼了学生理论结合实际的工程实践能力。

2.2 虚拟仿真 APP 开发流程及验证

热工基础虚拟仿真 APP 的实现主要由热工仿真模型和仿真 GUI 界面的开发两部分构成。仿真模型开发流程如图 1(a)所示。针对实际传热问题，在 COMSOL Multiphysics 软件里选择合适的传热模块，利用三维建模软件或 COMSOL 选定模块完成几何模型的导入与构建，然后根据实际物理工况，完成边界条件及网格划分，最后对研究及求解器进行设置，完成传热虚拟仿真模型的构建。

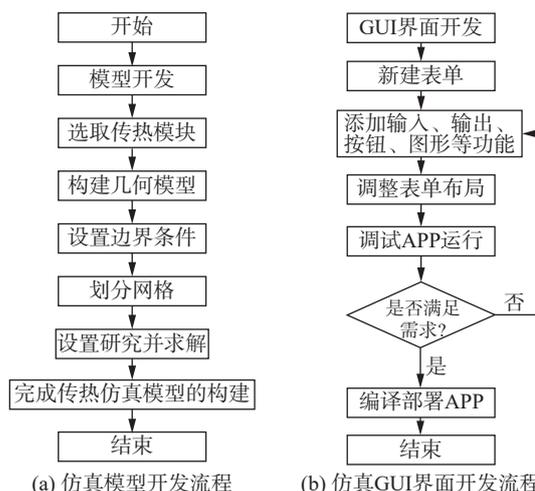


图 1 虚拟 APP 开发流程图

在传热仿真模型的基础上，需要对仿真 APP 的 GUI 界面进行开发，本文主要采用表单编辑器实现软件 GUI 界面的开发，其基本流程如图 1(b)所示。首先选中 APP 模型开发器，进入 GUI 开发界面，完成单一表单的构建，然后根据虚拟仿真 APP 的功能，添加所需的输入、输出框以及按钮、图形框等图形化界面并进行集成，同时调整整个表单的布局并进行 APP 的调试运行，直至满足所有功能进行 APP 的编译部署。

为验证 COMSOL 建立虚拟仿真实验平台的可行性及准确性，参考文献 [9] 的物性参数，建立内热源为 400 000 W/m 的二维瞬态虚拟仿真 APP，其仿真界面如图 2 所示。计算区域为边长为 0.1 m 的正方形，内热源均匀分布，计算区域表面与外界进行对流换热。该虚拟仿真实验平台可以实现计算区域的集合绘制，内热源的添加，网格划分及最后的结果展示。当利用文献 [11] 物性参数构建 COMSOL 虚拟仿真实验平台，其计算区域温度随着时间的变化如图 3 所示。在内热源的作用下，该虚拟仿真平台方形计算区域温度随着时间在不

断增加, 在 $t=1800\text{ s}$ 之前, 两种虚拟仿真平台在热值计算结果还存在一定的差异, 这是由于二者求解传热方程的方法存在差异。但随着时间的增加, 计算域最终到稳定状态时, 两种虚拟平台仿真温度都趋于 $55.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此基于 COMSOL 虚拟仿真平台的构建具备较好的可行性, 且该方法在工科领域具有较好的推广性。

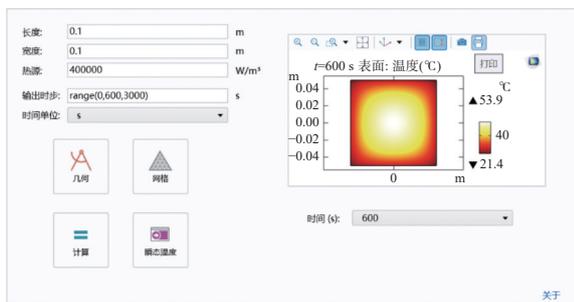


图2 二维虚拟仿真界面

计算域进行瞬态热仿真。首先对物理模型的几何参数、材料参数、第一类边界温度进行设置, 确定仿真所需要的瞬态时间步长以及进行网格划分, 然后点击计算按钮进行求解。计算区域的仿真结果会在右侧的绘图框中显示, 点击绘图框底部的时间选择框, 可以实现不同时刻求解区域温度的展现。

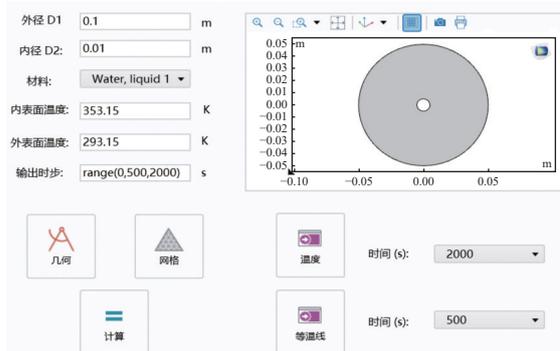


图4 第一类边界条件虚拟仿真 APP 用户界面

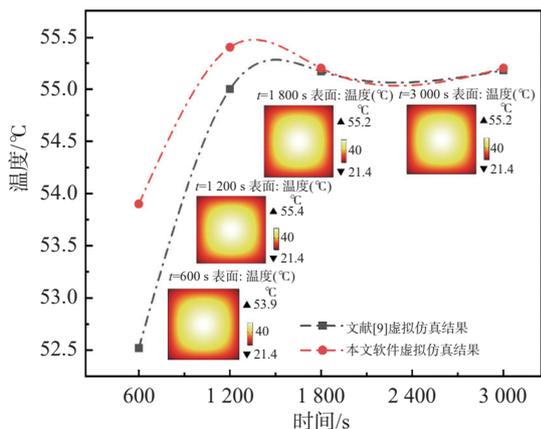


图3 有内热源的瞬态仿真计算结果

当环形外径为 0.10 m , 内径为 0.01 m , 计算区域的材料选为 Water, 计算区域设置第一类边界条件, 环形内表面温度为 353.15 K , 外表面温度为 293.15 K 时, 在 GUI 界面上分别设置时间 t 为 $500、1000、1500、2000\text{ s}$, 其瞬态仿真结果如图 5 所示。

3 以热工基础三类边界条件为例的仿真应用教学

热工基础虚拟仿真实验平台以环形为计算区域, 可实现恒定边界温度, 恒定热流密度, 以及对流换热三类边界条件下独立瞬态传热仿真。该实验平台可实现模型构建、网格划分、仿真结果展示等功能, 同时还可以调用 COMSOL 材料库, 实现不同材料的快速切换。该虚拟仿真实验平台使学生易于理解热工基础中常见三类传热边界条件的施加与应用。

3.1 第一类边界条件

为探究不同材料恒定边界温度热量传递的基本过程, 基于第一类边界条件的虚拟仿真 APP 用户界面如图 4 所示, 该虚拟仿真平台主要对环形

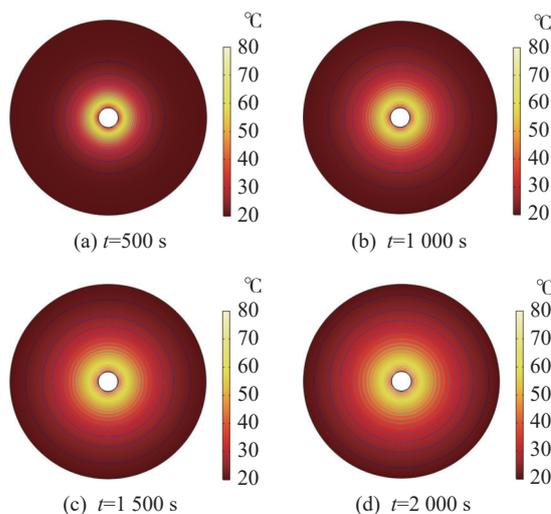


图5 二维瞬态温度变化示意图

在施加第一类边界条件后, 由于环形内径处温度较高, 外径处温度较低, 温度自发地从高处向低处传递, 随着时间的推移, 瞬态热传导过程继续进行, 计算域整体温度也在慢慢升高。本模块的案例演示, 可以让学生深刻理解到当计算区

域施加第一类边界条件后热量传递的基本现象，掌握边界条件对热传导的影响。

3.2 第二类边界条件

为探究恒定热流密度差热量传递的基本过程，基于第二类边界条件的虚拟仿真 APP 用户界面如图 6 所示。其计算步骤与计算域施加第一类边界条件相同，在完成物理模型几何、材料参数设置后，分别在环形内外径添加第二类边界条件热流密度，同时确定瞬态时间步长及划分网格，最后点击计算按钮进行求解。

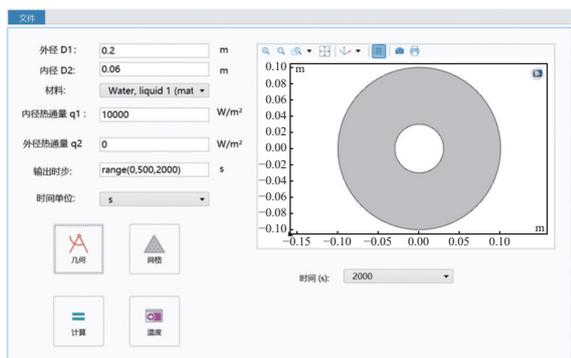


图 6 第二类边界条件虚拟仿真 APP 用户界面

当环形外径为 0.20 m，内径为 0.06 m，计算区域的材料选为 Water，计算区域设置第二类边界条件，环形内热流密度为 100 00 W/m²，外表面设置为绝热条件，热流密度为零时，在 GUI 界面上分别设置时间 t 为 500、1 000、1 500、2 000 s，其瞬态仿真结果如图 7 所示。随着时间的推移，热量逐渐从环形内部向外部传递，同时计算域整体温度不断升高。通过本案例的学习，学生可直观了解到温度随时间的变化过程，同时也对热流密度这一概念有了深刻的理解。

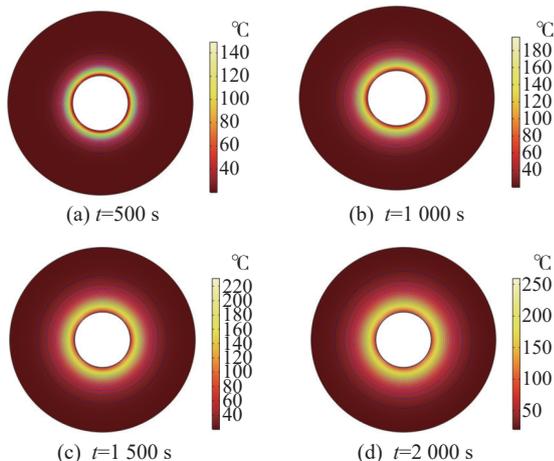


图 7 第二类边界条件下二维瞬态温度变化示意图

3.3 第三类边界条件

当材料边界与周围流体热量传递方式为对流换热，虚拟仿真 APP 用户界面设置如图 8 所示，其计算步骤与上述两类边界条件相同。物理模型热量来自计算域内部热源，环形外径施加第三类边界条件对流换热，在仿真建模过程中需要给定对流换热系数及环境温度，然后点击计算按钮进行计算。

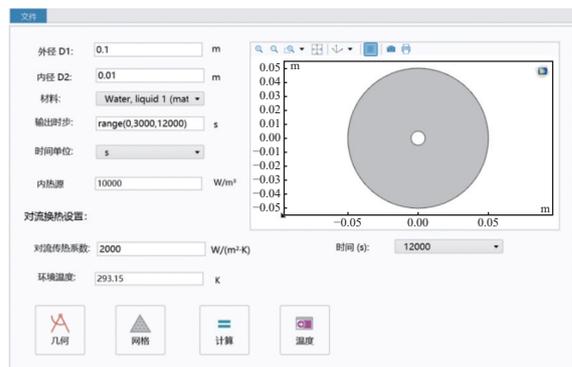


图 8 第三类边界条件虚拟仿真 APP 用户界面

当环形外径为 0.10 m，内径为 0.01 m，计算区域的材料选为 Water，内热源为 100 00 W/m²，环形外径处设置对流换热边界条件，对流换热系数为 2000 W/(m²·K)，环境温度为 293.15 K 时，在 GUI 界面上分别设置时间 t 为 3 000、6 000、9 000、12 000 s，其温度随时间的变化如图 9 所示。在内热源的影响下，整体温度不断升高，但是环形外径温度相比模型内部较低，这是由外表面与外界发生强烈的对流换热效应。当 $t=9 000$ s 时，计算区域整体温度不随着时间的变化而变化，最高温度稳定在 302 K 左右。

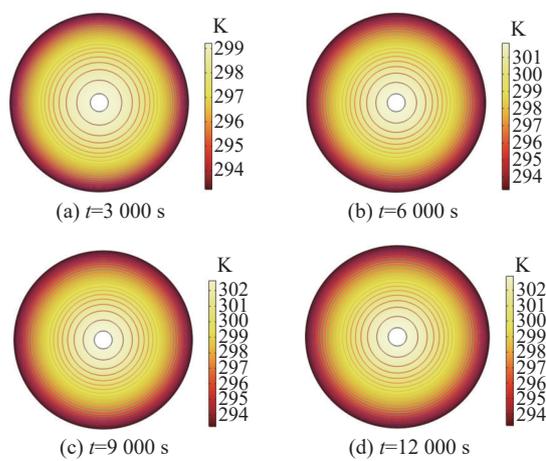


图 9 第三类边界条件下二维瞬态温度变化示意图

4 结束语

本文基于 COMSOL 的热工基础虚拟仿真实验平台实现了三类边界条件下瞬态导热数值模拟及仿真结果的可视化展示。利用虚拟仿真 APP 进行热工基础的课程实验,弥补了多媒体教学模式的单一性,提升了课堂的教学效率,加强了学生对热工基础课程的认识及基本原理的掌握,激发了学生的学习兴趣。将虚拟仿真技术应用在热工基础课堂上,为学生理解导热问题的数值求解提供了一种思路,具有较好的教学实用性。本文提出的实验平台在丰富多媒体教育的同时,对促进机械专业高等教育改革、提高教学质量具有重要意义。

参考文献

- [1] 何雅玲,陶文铨.对我国热工基础课程发展的一些思考[J].*中国大学教学*,2007(3):12-15.
- [2] 张凤宝.新工科建设的路径与方法刍论:天津大学的探索与实践[J].*中国大学教学*,2017(7):8-12.
- [3] 汪维,李科斌,霍庆,等.基于 OBE 理念的工程热力学与传热学教学改革[J].*高教学刊*,2023,9(28):136-140.
- [4] 张学民,李银然,王英梅,等.工程教育认证背景下“热工基础”课程教学改革初探[J].*教育教学论坛*,2021(28):72-75.
- [5] 杨丽敏.完善教学管理制度 促进大学生创新能力培养[J].*中国高教研究*,2007(8):56-57.
- [6] 聂少武,李天兴,苏建新,等.基于专业认证的“热工基础”教学改革探索[J].*教育教学论坛*,2022(12):71-74.
- [7] 王艳,周向葵,李莹.热工基础课程内容交叉渗透研究及其教学改革探索[J].*河南教育(高教版)(中)*,2020(12):85-87.
- [8] 张程宾,韩群,陈永平.基于 MATLAB 的传热学课程虚拟仿真实验平台设计[J].*实验技术与管理*,2020,37(1):132-136.
- [9] 李大鹏,杨蹈宇,黄丹.Energy2D 在传热学虚拟仿真教学中的应用研究[J].*教育现代化*,2020,7(49):12-15.
- [10] 孟婧,张可,魏昀,等.Tina-II 在“传热学”热电比拟实验中的应用[J].*实验室研究与探索*,2021,40(9):114-118.
- [11] 梁秀俊,刘璐,刘彦丰,等.基于 Java 语言的在线导热实验虚拟仿真软件开发[J].*实验室研究与探索*,2022,41(2):106-110.
- [12] 崔小斌,季文杰.COMSOL Multiphysics 软件在矩形波导课堂教学中的应用[J].*实验室研究与探索*,2021,40(11):130-135.
- [13] 刘海龙,沈学峰,郑诺,等.虚拟仿真平台及 APP 在流体力学教学中的探索与应用[J].*高等工程教育研究*,2019(S1):215-217.
- [14] 吕科锋,李铮,胡超,等.基于虚拟仿真技术的流体力学案例库建设与实践[J].*信息与电脑(理论版)*,2022,34(8):242-245.
- [15] 蔡沛辰,阙云,李显.虚拟仿真 APP 开发在土体孔隙细观两相渗流研究中的应用[J].*水资源与水工程学报*,2021,32(6):207-214.
- [16] 李正文.油茶籽榨油过程的试验与仿真研究[D].武汉:武汉轻工大学,2020.

编辑 王燕