

开发基于亥姆霍兹谐振腔的通风吸声超材料创新性实验

刘 婷^{1,2} 熊泓媛¹ 黄映洲^{1,2} 潘 量^{1,2} 蒲贤洁^{1,2} 徐玮婧^{1,2} 肖 鹏^{1,2}

(¹ 重庆大学物理学院; ² 物理国家级实验教学示范中心(重庆大学), 重庆 401331)

摘 要 通风吸声超材料是目前解决通风降噪问题的热点研究,可围绕通风吸声超材料的研究方案开展大学物理实验教学。本研究方案采用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 理论建模并计算,优化设计基于不完美亥姆霍兹谐振腔的通风吸声超材料,该超材料在调整结构参数后能在低频噪音下实现宽频吸收;利用 3D 打印技术打印超材料结构,并采用突破黑匣子的实验装置定量测量声学超材料的吸声性能。本文将前沿、热点研究引入大学物理实验教学,模拟、还原科学研究的过程,增强实验的高阶性、创新性和挑战度,采用“小组式自主探究+答辩汇报”的教学模式,全面提升学生的“5C”核心能力。

关键词 低频吸声;声学超材料;大学物理实验;科教融合

INNOVATIVE EXPERIMENTS ON A VENTILATED SOUND-ABSORBING META-MATERIAL BASED ON HELMHOLTZ RESONATOR

LIU Ting^{1,2} XIONG Hongyuan¹ HUANG Yingzhou^{1,2} PAN Liang^{1,2} PU Xianjie^{1,2}
XU Weijing^{1,2} XIAO Peng^{1,2}

(¹ School of Physics, Chongqing University, Chongqing 401331;

² National Demonstration Center For Experimental Physics Education, Chongqing University, Chongqing 401331)

Abstract The college physics experiment educational campaigns can surround the research solutions on ventilated sound-absorbing meta-materials, which are in the spotlight of ventilation and noise-reduction issue recently. The research plan uses the finite element simulation software COMSOL Multiphysics for theoretical modeling and calculation, and optimizes the design of ventilating and sound-absorbing metamaterials based on imperfect Helmholtz resonators. By adjusting the structural parameters, the meta-material can achieve broadband absorption within low-frequency noise. The metamaterial structures are printed using 3D printing technology, and the acoustic performance of the metamaterials is quantitatively measured using an experimental setup that breaks through the “black box” approach. Integrating cutting-edge and hot topics into university physics experimental teaching, simulating and recreating the scientific research process, enhances the higher-order nature, innovation, and chal-

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 重庆市高等教育教学改革研究项目(No. 223022、No. 233024、No. 243011);重庆大学教师教学发展专项项目(No. 2023JF05);2023年重庆大学实验技术人员研修项目(No. 20231202、No. 20231110、No. 20231204);教育部产学合作协同育人项目(No. 231000532113527、No. 231000532115242、No. 231104090201308)

通信作者: 刘婷,重庆大学物理学院实验师,tingliu@cqu.edu.cn。

引文格式: 刘婷,熊泓媛,黄映洲,等. 开发基于亥姆霍兹谐振腔的通风吸声超材料创新性实验[J]. 物理与工程, 2024, 34(5): 153-159.

Cite this article: LIU T, XIONG H Y, HUANG Y Z, et al. Innovative experiments on a ventilated sound-absorbing meta-material based on Helmholtz resonator[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(5): 153-159. (in Chinese)

length of the experiments. The teaching model of “group independent exploration-defense report” is adopted to comprehensively enhance students’ “5C” core competencies.

Key words low-frequency sound absorption; acoustic meta-materials; college physics experiments; integration of science and education

当前我国正处于产业升级的关键时期,亟须大量理工科人才供给,要解决“卡脖子”难题,各高校需要培养学生解决复杂问题的综合能力和高级思维^[1]。大学物理实验是面向全校理工科本科学子(我校每年 4000 多名)开设的一门公共基础必修课,是培养学生创新实践能力的重要载体,在学生综合素质培养中有着其他课程不可比拟的优势^[2-4]。但目前授课黑匣子式的验证性实验项目居多^[5-6],远远脱离学生的生活实际,脱离科学前沿、热点研究,又主要依赖于“教师讲—学生听—教师演示—学生模仿”的教学模式^[7-8],对学生创新思维能力、创造力及自主探索精神的培养较为匮乏,也无法实现当下重庆大学的办学定位目标——培养具有创新(Creativity)、交流(Communication)、合作(Collaboration)、批判性思维(Critical thinking)和可持续学习(Continuous learning ability)——“5C”核心能力的人才。

为解决上述问题,本文围绕基于不完美亥姆霍兹谐振腔的通风吸声模型的研究方案开发突破黑匣子式的物理科研创新性实验,模拟、还原科学研究的过程,科教融合增强实验项目的高阶性、创新性和挑战度,在学生大一、大二阶段就引导学生进入科研实验室,激发学生的科研创新意识,激活学生的原始创新动力,并采用“小组式自主探究+答辩汇报”的教学模式开展大学物理实验教学,为培养具有“5C”核心能力的人才打下坚实的基础。

1 研究背景

近年来,低频噪声被证实会严重影响人的身心健康,低频噪声(频率为 20~800Hz)的波长较长,受质量定律约束,大体积(意味着较大重量)的吸声材料才能对其有良好的吸声效果,不利于现实中的实际应用。

早在 2000 年,Liu 等首次提出利用基于局域

共振的硅胶-铅球核壳结构构建声学超材料,并且证实该声学超材料具有负弹性常数^[9],这一设计思想为声学超材料提供了全新的研究手段。声学超材料^[10]是一种人工设计并制造的一种周期性结构,其结构参数对其声学性质有重要影响,可具有负等效参数和天然材料所不具备的超常声学特性(如异常的透射和反射、完美的吸收和声聚焦、声隐身等)。声学超材料的出现为控制低频噪声提供了新的解决方案。

2 研究意义

声屏障为了阻止空气中噪声的传播,通常被设计为隔音板,但同时也阻止了气流的传输。在声学工程中,特定场景需要在流体环境中控制噪声,生活中,在住房、汽车、航空等空间不仅需要吸收低频噪声营造安静的环境还需要有良好的通风性能,因此,如何在通风和吸声之间寻找到一个平衡成为亟待解决的问题。本文研究设计一款在空气流体中针对低频噪声的通风吸声超材料,且该声学超材料具有潜在的应用价值。

3 研究方案

3.1 理论机制

亥姆霍兹谐振腔是一种基础的声学系统,通常由一个体积 V_0 的腔体和一个横截面为 S_0 ,长为 L_0 的小开口短管组成,如图 1 所示。

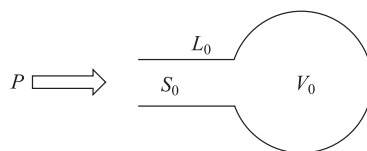


图1 亥姆霍兹谐振腔

如图 2 所示,可将亥姆霍兹谐振腔颈部处的空气等效于一个可以移动的质量块,谐振腔内的空气等效于一个弹簧。当空气流过谐振腔颈部

时,会与颈部的管壁发生摩擦,这个摩擦可以看作机械系统中的摩擦阻尼。因此,我们可以把亥姆霍兹谐振腔简化为一个含有阻尼项的弹簧-质量系统^[11-14]。当声波经过时,颈部的空气质量会在声压的作用下,像活塞一样在颈管内往复运动,并且由于摩擦阻尼的存在,声能会被转化为其他形式的能量。当声波的频率等于这个系统的固有频率时,颈部内的空气会产生共振,克服摩擦阻力做功,消耗大量的声能。

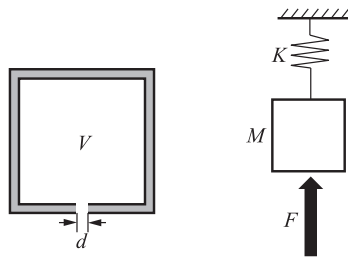


图2 共振吸声结构

根据等效弹簧振子系统可以推出亥姆霍兹谐振腔的共振频率公式

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{V_0 L_0}} \quad (1)$$

其中, c 表示声速, S_0 表示细颈截面积, V_0 表示腔体体积, L_0 为细颈长度。由公式可知,亥姆霍兹谐振腔的共振频率 f 主要受腔体、颈管的几何尺寸等多个因素的影响。

3.2 理论建模及其分析

本研究使用商业有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 的声学-热学相互耦合的物理场模块,分别采用耐维尔-斯托克斯方程、连续性方程和亥姆霍兹方程对结果、对模型的声学频域进行计算及分析。入射声波设置为垂直入射到结构表面的平面波,其压力幅值归一化为 1Pa。吸声效果为仿真模拟中测出的耗散声压比上测出的入射声压,吸声效果与声压场大小设定无关。在仿真模拟中,我们将通风吸声管道模型视为放在背景硬板前以 9cm 为周期的方格阵列中,并且我们将其边界设为了周期性边界条件。同时我们在声学域中设置了完美匹配层用来模拟真实的边界条件。由于空气和固体材料之间的阻抗不匹配,在模拟仿真中模型的壁全部被设置为刚性壁。模拟计算中空气密度、声速、动态黏度、导热系数、热膨胀系数分别设置为 1.2kg/m^3 、 343m/s 、 $18.5\mu\text{Pa}$ 、

24mW/(mK) 、 $3.41 \times 10^{-3}\text{K}^{-1}$,比热比设置为 1.4。根据能量守恒吸收系数 $A = 1 - |r|^2 - |t|^2$,其中 r 为反射系数, t 为透射系数。

本研究(实验)所设计的通风吸声超材料的基础组件由 4 个相同的简单亥姆霍兹谐振腔构成,如图 3(a)、3(b)。单个谐振腔的边长 L 固定设置为 146mm,厚度 w 固定设置为 2mm,所构成的单层基础组件显然具有良好的通风性能。固定宽度 l 为 24.5mm,小孔孔径 D 为 5.8mm,改变高度 H 时单层组件的吸收谱如图 3(c),在低频声波段内,吸收率不超过 50%,表现为不完美吸收,且随着 H 的增加,共振频率减小,通风性能降低,考虑到解决的是低频噪声及组件需良好的通风性能的问题,将单个谐振腔的高度 H 固定设置为 28.9mm。

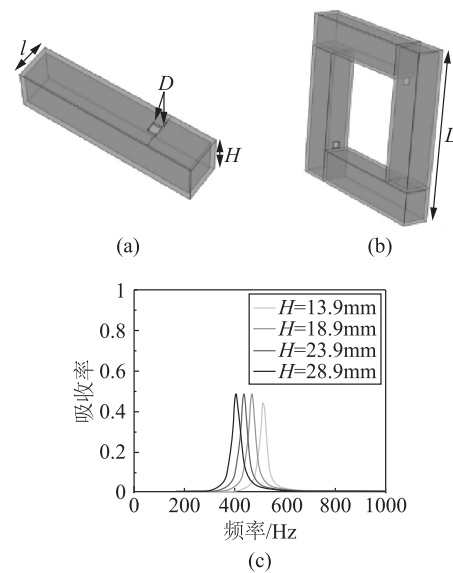


图3 基础组件模型图及其吸收谱

(a)、(b) 通风吸声超材料的基础组件模型；(c) 改变高度 H 时单层组件的吸收谱

由亥姆霍兹谐振腔的共振频率公式知改变单个谐振腔的宽度 l 和孔径 D 能改变基础组件的共振频率及吸收效果。但单层基础组件的吸收率不高,于是考虑通过弱耦合的方式将两层单层基础组件组建成两层通风吸声结构模型,如图 4(a)。设置第一层组件宽度 l 为 24.4mm,小孔孔径 D 为 6.0mm,第二层组件宽度 l 为 25.2mm,小孔孔径 D 为 5.7mm。单层组件的吸收谱如图 4(b),其吸收率不超过 50%,表现为不完美吸收。组建的两层通风吸声模型的吸收谱如图 4(c),吸收率超过 85%,效果较好。设置背景流体从相反方向

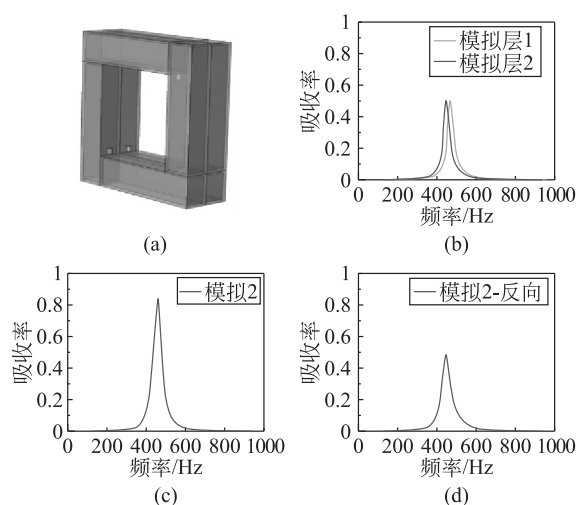


图4 两层通风吸声模型图及单层、两层通风吸声模型的吸收谱

(a) 基础组件参数不同的两层通风吸声的结构模型；(b) 单层组件的吸收谱；(c) 基础组件参数不同的两层通风吸声模型的吸收谱；(d) 设置背景流体从相反方向流动时，基础组件参数不同的两层通风吸声模型的吸收谱

流动作为对照组，其吸收谱如图4(d)，吸收效果降至50%，说明两层不同的基础组件构成的通风吸声模型的吸收效果极大地依赖于背景流体的传输方向。

单层基础组件通过弱耦合方式组建的三层(第一、二、三层组件宽度 l 分别为 23.8mm、25.2mm、27.6mm，小孔孔径 D 分别为 6.2mm、5.8mm、5.7mm)、四层(第一、二、三、四层组件宽度 l 分别为 23.8mm、24.8mm、25.8mm、26.8mm，小孔孔径 D 分别为 6.2mm、5.7mm、5.5mm、5.3mm)、五层(第一、二、三、四、五层组件宽度 l 分别为 23.8mm、24.7mm、25.6mm、26.5mm、27.4mm，小孔孔径 D 分别为 6.2mm、5.8mm、5.6mm、5.4mm、5.2mm)通风吸声模型的吸收谱如图5(a)，值得注意的是它们分别存在两个、三个、四个吸收峰，均实现了在吸收峰之间的宽低频声波段范围内的良好吸收，且其最高吸收率分别达到92%、95%、97%。对三、四、五层通风吸声模型设置流体反向传输对照组，如图5(b)，其吸收峰均变为一个，且吸收率均降至50%左右。图5(c)、5(d)分别为四层、五层通风吸声模型反射系数的振幅(实线)和相位(虚线)曲线，图中可以观察到在四层通风吸声模型的共振频率513Hz处存在相位突变，在五层通风吸声模型的共振频率

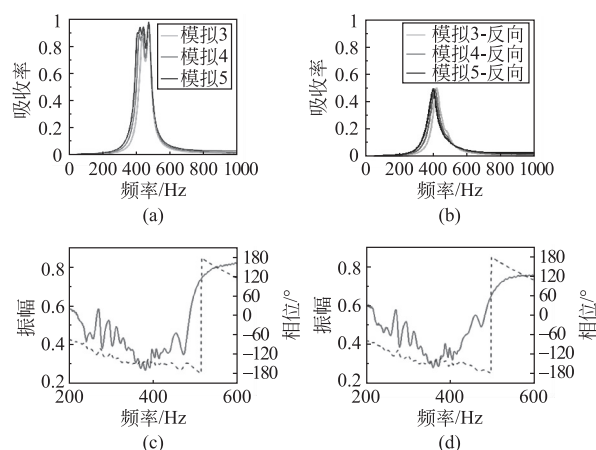


图5 三、四、五层通风吸声模型模拟吸收谱、反射系数的振幅和相位曲线

(a) 基础组件参数不同的三、四、五层通风吸声模型的吸收谱；(b) 三、四、五层模型设置流体反向传输时，其吸收谱；(c)、(d) 基础组件参数不同的四层、五层通风吸声模型反射系数的振幅(实线)和相位(虚线)曲线

495Hz处存在相位突变，说明其吸收峰与通风吸声模型内部的共振损失有关。

该研究设计的通风吸声模型的声压和速度分布图应该与亥姆霍兹谐振腔中的分布有相似之处，管道作为腔体，小孔作为端口。根据图6(a)、6(c)可以看出在共振频率455Hz处，声压振幅差为2.25Pa，在偏离共振频率300Hz处，声压振幅差减小到0.87Pa。在图6(b)、6(d)中，发现较大的声压振幅差激发了气流沿吸声器内通道以较大

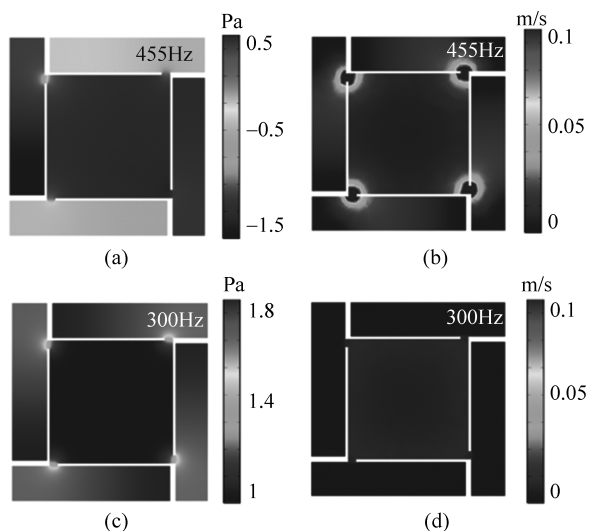


图6 一层通风吸声模型的声压和速度剖面图

(a)、(b) 一层通风吸声模型在其共振频率455Hz处的声压和速度剖面图；(c)、(d) 模型在偏离共振频率300Hz处的声压和速度剖面图

速度流动。这与亥姆霍兹谐振腔的工作原理是吻合的。

相同的单层基础组件(宽度 l 和小孔孔径 D 均取五层模型参数的中间值,分别为 25.6mm、5.6mm)通过弱耦合组建的五层通风吸声管道模型的吸收谱如图 7,吸收谱变为一个吸收峰,吸收率最高只达 83%,所以优化参数后的单层参数不同的五层管道模型的优势明显。

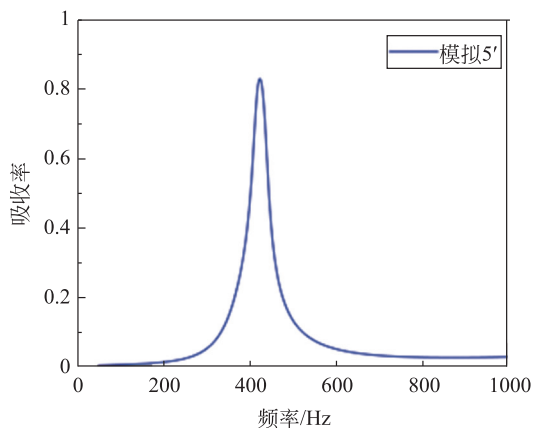


图 7 相同基础组件参数的五层管道模型的吸收谱

3.3 实验测量

实验在正方形(边长为 9.0cm)的阻抗管中用四麦克风双负载法进行测量,实验装置如图 8(a)所示,带有扬声器的阻抗管端有 2 个麦克风,带有泡沫的阻抗管端有 2 个麦克风。图 8(b)为 3D 打印机打印的一层和基础组件参数不同的二到五层

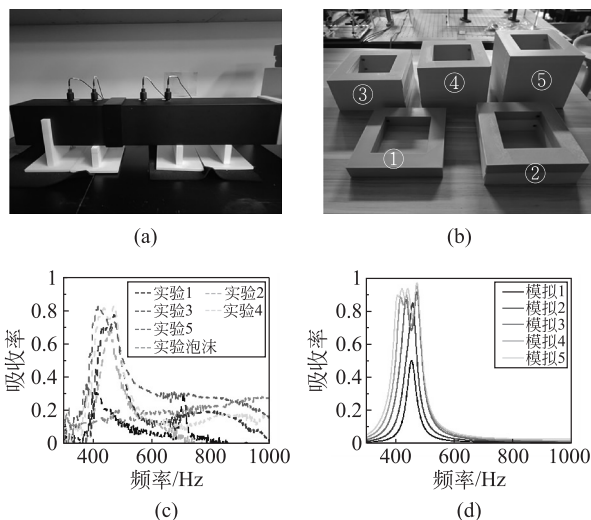


图 8 管道模型样品图及其实测、模拟吸收谱

(a) 实验装置图；(b) 3D 打印机打印的一层和基础组件参数不同的二到五层管道模型的样品图；(c) 管道模型的实测吸收谱；(d) 管道模型的模拟吸收谱

管道模型的样品图,样品分别用不同的颜色标记为 1、2、3、4、5。实验中在样品后面放置了厚度为 4mm 的夹紧铝板作为刚性背板,作为有声学硬边界的终端负载。拆下夹紧铝板后为开发边界,作为没有声学硬边界的终端负载,铝管的平面波截至频率约为 1000Hz。图 8(c)为管道模型的实测吸收谱,其颜色与其样品标记的颜色对应,黑色虚线为 3.5cm 厚的声学泡沫的吸收谱。图 8(d)为管道模型的模拟吸收图。从图中可以看出,实验结果与模拟结果相似,但对各管道模型的实测吸收率明显低于用仿真模拟计算的。差异可能是因为样品硬度不够,3D 打印机的精度相对对于共振频率、几何参数敏感的样品来说不够高。样品表面的制造也较粗糙,这对样品表面的摩擦损耗有影响。

4 开发科研创新性实验

4.1 教学目的

(1) 了解模拟仿真软件 COMSOL 的声学模块,学会构建通风吸声超材料结构模型,学会分析通风吸声超材料的模拟结果。

(2) 理解基于亥姆霍兹共振器的通风吸声超材料的基本工作原理,学会使用 3D 打印机。

(3) 掌握调研及分析总结文献的方法,了解基于亥姆霍兹共振的通风吸声超材料的研究进展、结构特点以及其在应用领域的潜在价值。

(4) 激发学生科研创新意识、激活学生原始创新动力,为培养学生“5C”核心能力打下坚实基础。

4.2 实验仪器

模拟仿真软件 COMSOL 软件、立体光刻(SLA)3D 打印机、铝制方管(外加一个放置模型的铝制方管)、全频扬声器、麦克风、功率放大器、数据采集分析仪。

4.3 实验内容

1) COMSOL 建模及结果分析

使用模拟仿真软件 COMSOL 搭建、计算一层和基础组件参数不同的二、三、四、五层管道模型,并分析其模拟结果

2) 模型打印

使用 3D 打印机((Isla660,ZRapid Tech,精度为 0.1mm)打印一层和基础组件参数不同的二到

五层通风吸声管道模型

3) 吸收性能的测试

结合正方形(边长为 9.0cm)阻抗管,用四麦克风双负载法测量一层和基础组件参数不同的二到五层通风吸声管道模型的吸收率,并与模拟结果作比较(一到五层通风吸声管道模型的参数分别为:一(l 为 24.5mm, D 为 5.8mm)、二(第一、二层组件宽度 l 分别为 24.4mm、25.2mm,小孔孔径 D 分别为 6.0mm、5.7mm)、三(第一、二、三层组件宽度 l 分别为 23.8mm、25.2mm、27.6mm,小孔孔径 D 分别为 6.2mm、5.8mm、5.7mm)、四(第一、二、三、四层组件宽度 l 分别为 23.8mm、24.8mm、25.8mm、26.8mm,小孔孔径 D 分别为 6.2mm、5.7mm、5.5mm、5.3mm)、五层(第一、二、三、四、五层组件宽度 l 分别为 23.8mm、24.7mm、25.6mm、26.5mm、27.4mm,小孔孔径 D 分别为 6.2mm、5.8mm、5.6mm、5.4mm、5.2mm),所有模型中单个谐振腔的边长 L 为 146mm,厚度 w 为 2mm,高度 H 为 28.9mm。

5 融入中国大学生物理学术竞赛(China Undergraduate Physics Tournament, 简称 CUPT)的“小组式自主探究+答辩汇报”教学模式设计

近年来 CUPT 模式在我校大学物理实验课程中被提出并逐步开展使用^[16],对学生的批判性思维能力、交流合作能力的提升有显著的积极作用。将解决科研问题的研究方案引入课堂教学中,并配以 CUPT 模式以小组合作的方式自主调阅文献、建模计算、分析仿真结果、设计实验、测量并分析数据、撰写报告、辩论汇报,有利于提高学生的创新能力和可持续学习能力,在大一、大二阶段为培养学生“5C”核心能力打下坚实基础。

5.1 课前准备

由于该实验受实验仪器数量的限制,课前上课教师需提前一个月发布实验原理讲解、实验仪器操作及其注意事项视频、作图软件等资源,同时向学生发布实验任务,班里学生按人数要求自行组队,以两个星期为一个周期开展该科研创新性实验。任课老师根据学生分组情况准备实验耗材、实验室,提前熟悉、掌握实验项目,进行数据测量、数据分析、数据处理,总结实验、完成实验报告。并能保障在进行该科研创新性实验的过程中

向学生提供开放实验室以保证实验顺利开展。

5.2 课中教学流程

将解决科研问题的研究方案引入课堂教学中,并借助我校初步形成的 CUPT 教学模式基本流程,本次开展的科研创新性实验项目的自主研究流程定为:调研文献→建模计算→分析仿真结果→设计实验方案→测量吸声率→分析所得数据→撰写报告→做 PPT 按照 CUPT 模式辩论汇报。

5.3 考核方案

本科研创新性实验项目的成绩考核采用研究报告和辩论评分加权总评的方案^[15-16]。研究报告参照科研论文的格式撰写,报告里须体现亥姆霍兹共振的通风吸声超材料的研究进展及其在应用领域的潜在价值,图文并茂,数据充分,能有效支撑结论。辩论评分参照 CUPT 的评分标准^[15],在准备及辩论过程中通过同学之间的合作、交流、提问、讨论以及辩论,逐步深入探索实验项目,可在一定程度上促进学生深度学习。

6 结语

本文围绕通风吸声超材料的研究方案设计科研创新性实验,期望通过展现科研真实研究路径激发学生的科研创新意识,激活学生的原始创新动力,同时吸引更多学有余力的学生创新通风声学超材料的结构,加入到市级、校级的大学生科研训练项目当中来,并尽早加入到科研小组当中去,为培养拔尖创新人才提供通道。CUPT 模式的“小组式自主探究+答辩汇报”教学模式更加强调小组之间的合作、交流、对抗以及自主探究模式,科研方案与新的教学模式相结合为培养学生的“5C”核心能力打下坚实基础。

参 考 文 献

- [1] 姚宇华,黄明东.建设新型高水平理工科大学:概念界定、战略需求与行动路径[J].现代大学教育,2024,40,(1):100-110.
YAO Y H, HUANG M D. Building high-level new polytechnics in China: Theoretical conception, strategic needs and action plans[J]. Modern University Education, 2024, 40, (1):100-110. (in Chinese)
- [2] 樊代和,贾欣燕,刘其军.基于知识图谱的大学物理实验课程教学策略研究:以“迈克耳孙干涉”实验项目为例[J].教育理论与实践,2023,43(36):57-60.

- FAN D H, JIA X Y, LIU Q J. Research on teaching strategies of college physics experimental courses based on knowledge graph: A case study of the "Michelson Interference" experimental project[J]. Theory and Practice of Education, 2023, 43(36): 57-60. (in Chinese)
- [3] 王新顺, 王本阳, 张立彬. 大学物理实验中大学生创新思维训练与提升[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(2): 244-247, 269. WANG X S, WANG B Y, ZHANG L B. Training and improvement of students' innovative thinking in college physics experiments[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(2): 244-247, 269. (in Chinese)
- [4] 郭袁俊, 于景侠, 霍中生, 等. 大学物理实验与理论融合教学的探索[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(7): 188-190. GUO Y J, YU J X, HUO Z S, et al. Training and improvement of students' innovative thinking in college physics experiments[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(7): 188-190. (in Chinese)
- [5] 袁霞. 验证性实验教学改革探讨[J]. 大学物理实验, 2012, 25(2): 94-96. YUAN X. Study on teaching reform of verification experiment[J]. Physical Experiment of College, 2012, 25(2): 94-96. (in Chinese)
- [6] 梁少军, 乐松. 创新型设计性近代物理实验教学实践探索[J]. 大学物理实验, 2023, 36(5): 128-132. LIANG S J, YUE S. Exploration of innovative and designing modern physics experiment teaching practice[J]. Physical Experiment of College, 2023, 36(5): 128-132. (in Chinese)
- [7] 赵国俭, 徐丽红, 王佳乐, 等. 大学物理实验“基础-进阶-高阶”教学模式的探索[J]. 物理与工程, 2022, 32, (6): 148-152, 158. ZHAO G J, XU L H, WANG J L, et al. Exploration of the teaching mode of "Basic-Intermediate-Advanced" in college physics experiment[J]. Physics and Engineering, 2022, 32, (6): 148-152, 158. (in Chinese)
- [8] 蔡青, 胡永金, 李星星, 等. 基于 MOOCs 的大学物理实验教学改革[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(9): 177-180, 199. CAI Q, HU Y J, LI X X, et al. Research on university physics experiment teaching reform based on MOOCs[J]. Research and Exploration In Laboratory, 2016, 35(9): 177-180, 199. (in Chinese)
- [9] LIU Z, ZHANG X, MAO Y, et al. Locally resonant sonic materials[J/OL]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [10] LI J, CHAN C T. Double-negative acoustic metamaterial[J/OL]. Physical Review E, 2004, 70(5): 55602.
- [11] INGARD U. On the theory and design of acoustic resonators[J]. The Journal of the acoustical society of America, 1953, 25(6): 1037-1061.
- [12] JOHN W S. The theory of sound[M]. Cambridge University Press, 2011.
- [13] ALSTER M. Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators[J]. Journal of Sound and Vibration, 1972, 24(1): 63-85.
- [14] MUNJAL M L. Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design[M]. John Wiley & Sons, 1987.
- [15] 蒲贤洁, 吴小志, 杨骏骏, 等. CUPT 模式下的居家物理实验线上教学实践[J]. 物理与工程, 2021, 31(2): 100-106. PU X J, WU X Z, YANG J J, et al. Online teaching practice of home-base physics experiment in CUPT mode[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(2): 100-106. (in Chinese)
- [16] 蒲贤洁, 吴小志, 张选梅, 等. CUPT 模式在大学物理实验教学中的应用及分析[J]. 物理与工程, 2019, 29(6): 25-30. PU X J, WU X Z, ZHANG X M, et al. Application of CUPT mode in college physics experiment teaching and the effect analysis[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(6): 25-30. (in Chinese)