

气密装饰窗研究性实验的开发

刘 婷^{1,2} 黄映洲^{1,2} 蒲贤洁^{1,2} 陈 果^{1,2} 徐玮婧^{1,2} 潘 量^{1,2}

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

摘 要 声学超表面是声学功能材料方面的科学前沿研究。该文从现实需求出发引出声学超表面——气密装饰窗, 并将气密装饰窗的研究开发设计成研究性实验。实验基于理论推导、有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 理论分析设计出气密装饰窗及其金属保持装置, 开发了 COMSOL 建模及分析、保持装置的设计、气密装饰窗透射效果的测量等丰富的实验内容。在大学物理实验教学中引入气密装饰窗研究性实验, 有效增强了实验的高阶性、创新性和挑战度, 有利于培养新材料方面的拔尖创新人才, 为提升学生的创新能力打下坚实基础。

关键词 创新能力; 声学超表面; 大学物理实验; 科教融合

DEVELOPMENT OF AN INVESTIGATIVE EXPERIMENT ON DECORATED AIR-PROOF WINDOWS

LIU Ting^{1,2} HUANG Yingzhou^{1,2} PU Xianjie^{1,2} CHEN Guo^{1,2} XU Weijing^{1,2} PAN Liang^{1,2}

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

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

Abstract Acoustic metasurfaces represent a cutting-edge research area in functional acoustic materials. This paper introduces the acoustic metasurface—Decorated Air-proof Window (DAW)—based on practical needs, and designs the research and development of DAW as an investigative experiment. The experiment employs theoretical derivation and finite element simulation software COMSOL Multiphysics for theoretical analysis and design of the DAW and its metal retention device. It encompasses a wide range of experimental components, including COMSOL modeling and analysis, design of the retention device, and measurement of the DAW's transmission performance. Introducing the investigative experiment on DAW into university physics lab teaching enhances the advanced nature, innovation, and challenge level of the experiment. This approach is conducive to nurturing top innovative talents in new materials and lays a solid foundation for improving students' innovative abilities.

Key words innovative capability; acoustic meta-surface; university physics experiment; science research and education combination

收稿日期: 2025-06-15

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)。

通信作者: 刘婷, tingliu@cqu.edu.cn。

引文格式: 刘婷, 黄映洲, 蒲贤洁, 等. 气密装饰窗研究性实验的开发[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 258-263.

Cite this article: LIU T, HUANG Y Z, PU X J, et al. Development of an investigative experiment on decorated air-proof windows[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 258-263. (in Chinese)

教育部于 2019 年印发《关于一流本科课程建设的实施意见》，提出提高课程“高阶性、创新性和挑战度”的指导性意见，以全面提升课程的教学质量为目标，提高学生创新能力^[1-2]。传统大学物理实验课程教学模式单一，以讲授为主，学生教条式学习实验原理及实验操作，无法灵活地将实验原理与实验实际操作结合，对实验原理的理解不深刻，对实验操作实践不到位。经过多年的教学改革，大学物理实验主要以基础实验、提升实验、研究性实验展开教学。研究性实验作为大学物理实验的高阶模式，极大地增加了学生的自主学习空间，不仅能锻炼学生调研文献、解决实验操作问题、测量数据等的能力，更能有效的促进学生主动分析理论、结合实际等问题，积极探索未知知识，进而提升学生的创新能力^[3-8]。但当下验证性实验在我校大学物理实验中占绝大多数，实验内容缺乏物理前沿科学研究内容，无法为培养拔尖创新人才、推动社会科技进步的人才打下坚实基础^[9-11]。为解决这些问题，使大学物理实验能为培养创新人才提供支持，该文将介绍一种气密装饰窗(Decorated Air-proof Window, DAW)，它既属于物理前沿科学研究，又属于一种新材料。将气密装饰窗的研究内容引入大学物理实验教学中，开发出有关新材料的研究性实验，增加大学物理实验的高阶性、创新性和挑战度，不仅可以拓宽理工科大学生的物理知识边界，提升学生解决现实问题的能力，为培养新材料领域的拔尖创新人才打下基础，也可以体现出学校大学物理实验教学体系的本土科研特色，其结合新材料战略性新兴产业方向，鼓励学生将来成为推动科技进步的人才。

1 实验背景

声学超材料^[12-13]是一种人工复合的周期性结构材料，其结构参数是影响其声学性质的重要因素，人为设计的声学超材料的声学性质可与天然材料的大相径庭，声学超材料可具有负等效参数，且能具备天然材料所不具备的非常规声学性能。声学超表面^[14-15]是声学超材料的一种，它是人工合成的二维声学超材料。声学超表面的厚度可达

亚波长，相比传统的三维声学超材料来说，具有体积小、损耗小、成本不高、构造相对简单、易于制造等优点，且在反射、透射等领域的应用也更广泛。

2 实验现实意义

生活中在不需要任何通风，需要可见光透视效果佳，声波能实现最大程度传输的场合，对气密性好、透明度高、透声强的材料的潜在应用需求是比较大的，例如消防员在执行任务抢救火灾时，火灾所产生的浓烟严重威胁身体健康，普通材料制作的消防面罩会影响消防员的视线，会降低外部呼救声传输到消防员耳朵里，降低消防员救灾的效率，但用气密性好、透明度高、透声强的材料制作消防面罩，将有效提高消防员救灾效率。

该文是将一种气密性好、透明度高、透声强的声学超表面——DAW 引入大学物理实验教学，并围绕 DAW 开发设计大学物理研究性实验。

3 实验设计

3.1 实验目的

(1) 理解单层、双层 DAW 透声强的实验原理。根据 DAW 透声强的实验原理，掌握设计、制作 DAW 的方法。学会用 COMSOL Multiphysics 仿真软件完成 DAW 建模及分析，测量单层、双层 DAW 的透射效果，掌握本次实验实验仪器的注意事项和使用方法。

(2) 掌握用关键词查询文献的方法，了解声学超材料及声学超表面的发展历程、影响声学超材料及声学超表面性能的关键性因素、声学超表面的广泛应用领域。

(3) 拓宽理工科大学生的物理知识边界，提升学生分析、解决现实问题的能力。

3.2 实验原理

对于单层 DAW，假设 DAW 的边界完全固定，且考虑 DAW 存在能量损耗的情况，DAW 的共振振幅可表达为

$$a(t) = a_0 \exp(j\omega_0 t - \gamma t) \quad (1)$$

其中， a 为振幅， a_0 为初始状态的谐振振幅， ω_0 为单层 DAW 的固有频率(由材料决定)， j 是单位虚

数, γ 是衰减系数(由材料决定)。对式(1)变形有

$$\frac{da}{dt} = (j\omega_0 - \gamma)a \quad (2)$$

在一般一维条件下,考虑设计的综合性实验只有一个声源且传输的声波可能并不是同一种模式(频率)的情况,用狄拉克右矢来表示传输声波的态(这里的 a 也是狄拉克右矢的表示形式),并设从声源发出的声波在左边传输至单层 DAW,设其为 $|s_{1+}\rangle$,则对应的反射波就是 $|s_{1-}\rangle$,如图 1 所示。他们与单层 DAW 之间满足这样的耦合关系

$$\frac{da}{dt} = (j\omega_0 - \gamma)a + k_{11}|s_{1+}\rangle \quad (3)$$

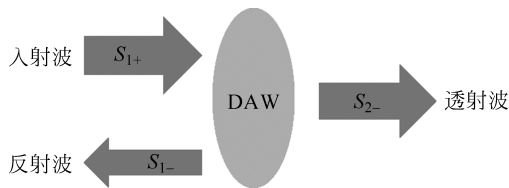


图 1 声波从左边传输到单层 DAW 的示意图

对于该系统中向左传播的波(反射波)有

$$|s_{1-}\rangle = a \cdot d_{11} \quad (4)$$

对于该系统中向右传播的波(入射波和透射波)有

$$|s_{2-}\rangle = C|s_{1+}\rangle + a \cdot d_{22} \quad (5)$$

其中, C 为描述背景场的散射矩阵, k_{11}, d_{11}, d_{22} 为待定系数,由于实验中单层 DAW 的样品在几何上是对称结构,且待定的系数只与材料本身有关,所以令

$$k_{11} = k, \quad d_{11} = d_{22} = d \quad (6)$$

这时, k 和 d 为待定的系数。通过能量守恒,和简化初始值可计算得到 d 。令开始时没有声波传入,即

$$|s_{1+}\rangle = 0 \quad (7)$$

将式(7)、式(6)代入式(3)、式(4)、式(5)有

$$\frac{da}{dt} = (j\omega_0 - \gamma)a \quad (8)$$

$$|s_{1-}\rangle = a \cdot d, \quad |s_{2-}\rangle = a \cdot d \quad (9)$$

能量守恒有时间反演对称性,这里表现为输出的能量和衰减的能量总和为 0(因为没有入射声波),所以有

$$\frac{d(a + a)}{dt} + \langle s_{1-} | s_{1-} \rangle + \langle s_{2-} | s_{2-} \rangle = 0 \quad (10)$$

这里的 $\langle s_{1-} |$ 为与狄拉克右矢 $|s_{1-}\rangle$ 对应的狄拉克左矢。得到 d 的关系

$$\langle d | d \rangle = \gamma \quad (11)$$

假设左边传输的是频率为 ω 的声波,根据 DAW 振动的性质,振动复频率为 ω 的 DAW,有

$$\frac{da}{dt} = j\omega a \quad (12)$$

代入式(3)有

$$(j\omega - j\omega_0 + \gamma)a = k|s_{1+}\rangle \quad (13)$$

令复频率 $\omega = \omega_0 - j\gamma$ 代入式(13)有

$$2\gamma a = k|s_{1+}\rangle \quad (14)$$

根据时间反演对称性有

$$2\gamma a^* = k|s_{1-}\rangle + k|s_{2-}\rangle \quad (15)$$

其中, a^* 是 a 的复共轭。

将式(4)、式(5)代入式(15)并与式(14)、式(3)、式(11)联立得到

$$k = d = j\sqrt{\gamma} \quad (16)$$

$$a = \frac{j\sqrt{\gamma}}{j(\omega - \omega_0) + \gamma}|s_{1+}\rangle \quad (17)$$

将式(17)代入式(4)和式(5)有

$$|s_{1-}\rangle = -\frac{\gamma}{j(\omega - \omega_0) + \gamma}|s_{1+}\rangle \quad (18)$$

$$\begin{aligned} |s_{2-}\rangle &= |s_{1+}\rangle - \frac{\gamma}{j(\omega - \omega_0) + \gamma}|s_{1+}\rangle \\ &= \frac{j(\omega - \omega_0)}{j(\omega - \omega_0) + \gamma}|s_{1+}\rangle \end{aligned} \quad (19)$$

解得,透射率

$$S_{11} = \frac{j(\omega - \omega_0)}{j(\omega - \omega_0) + \gamma} \quad (20)$$

反射率

$$S_{21} = -\frac{\gamma}{j(\omega - \omega_0) + \gamma} \quad (21)$$

由于实验中的 DAW 的边界并不能完全固定,也就是说在边界上会存在固有的损耗,假设固有损耗因子为 γ_0 ,它与衰减因子之间的关系为 $\gamma = \frac{\gamma_0}{2}$,

所以修正后的透射率和反射率的公式为

$$S_{11} = \left| \frac{j(\omega - \omega_0) - \frac{\gamma_0}{2}}{j(\omega - \omega_0) + \gamma + \gamma_0} \right| \quad (22)$$

$$S_{21} = \left| -\frac{\gamma + \frac{\gamma_0}{2}}{j(\omega - \omega_0) + \gamma + \gamma_0} \right| \quad (23)$$

可以看到当入射声波的频率与单层 DAW 的固有频率相等时,入射波与 DAW 形成共振,此时透射系数达到最大,而反射系数最小,即此时实现声波

的最大传输。

通过类似的推导,可以得到双层 DAW 在边界不完全固定的情况下的透射系数

$$T = \left| \frac{\gamma - \frac{\gamma_0}{2}}{j(\omega - \omega_a) + \gamma + \gamma_0} - \frac{\gamma - \frac{\gamma_0}{2}}{j(\omega - \omega_b) + \gamma + \gamma_0} \right| \quad (24)$$

可以看出,当入射波的频率等于双层 DAW 的固有频率 ω_a 或者 ω_b 时,透射系数达到极大值,实现声波的最大传输,值得注意的是透射谱会出现两个峰值。

3.3 DAW 及其金属保持装置的设计

根据 DAW 透射强的实验原理知,当入射声波的频率与 DAW 的固有频率相等时,入射波与 DAW 形成共振,透射系数即达到最大,因此在实验过程中应该高度关注能量损失,所以在制作 DAW 时所选用的材料非常关键,应该尽量选择损耗较小的材料,以避免实验达不到理论效果。

由于玻璃具有损耗低、价格实惠等特点,DAW 结构选用纯玻璃构成,同时也保证了 DAW 结构的透明度,如图 2(a)所示,较厚的玻璃板作为主体,较薄的玻璃板阵列作为谐振单元。厚玻璃板的厚度用 t_w 来标记,谐振单元薄玻璃板的厚度用 t_p 标记,谐振薄玻璃板的半径用 r 标记,谐振单元薄玻璃板阵列在 x 方向和 y 方向的周期均为 P 。图 2(b)为 DAW 样品的透视图。

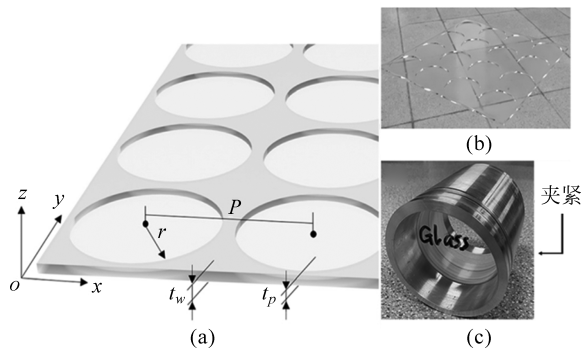


图 2 气密装饰窗及金属保持装置图

为了减小实验测量误差,实验中应尽量使 DAW 的谐振单元部分的边界固定,该文介绍一种金属保持装置,这种金属保持装置可以较好地固定谐振单元薄玻璃片,固定薄玻璃片后的金属保持装置如图 2(c)所示,它可以看作 DAW 的一个单元。经过实际实验的测量与优化,本实验中的

金属保持装置的材料最终用的是铝合金,其外径选用 100mm,内径选用 94mm。为了让金属保持装置能切实有效固定谐振单元薄玻璃板,装置内部设计了多个聚四氟乙烯垫片,垫片外径定制为 94mm,内径定制为 88mm,单个垫片厚度定为 2.72mm。实验过程中旋转金属保持装置的盖子即可调节聚四氟乙烯和谐振单元薄玻璃片之间的应力,增大应力最终可使聚四氟乙烯垫片夹紧玻璃片。对于双层 DAW,实验者可通过间隔不同数量的垫片来调节谐振单元薄玻璃片间的间距。

3.4 理论建模及其分析

该实验使用商业有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 基于三维空间模拟 DAW 模型。因玻璃的气密性好,透明度又高,DAW 结构的材料选用玻璃,模型的其余部分用空气填充。如图 3 所示,模拟平面波从 z 轴正方向入射,经 DAW 作用,在出口处设置完美匹配层来模拟声波耗散在无穷大空间的情形,防止声波反射带来的影响。在双层 DAW 模型上使用固体力学物理场,在其余的空气通道部分则是使用压力声学物理场,在交界处使用声-结构边界多物理场进行耦合。

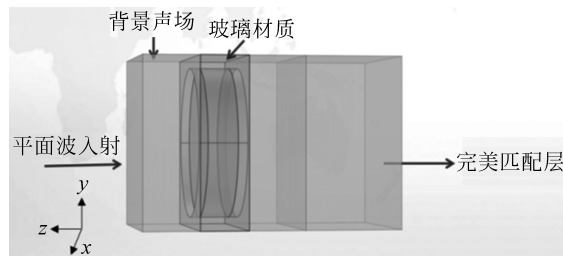


图 3 气密装饰窗模型图

设主要针对亚波长频率范围(200~1000Hz)的声波来设计 DAW,经模拟优化 DAW 的结构后,取 $r = 38.2\text{mm}$, $t_w = 6\text{mm}$, $t_p = 0.3\text{mm}$, $P = 100\text{mm}$ 。实验中使用金属保持装置夹紧 DAW 通常并不能完全固定 DAW 的边界,也就是说在边界上会存在固有损耗,在考虑固有损耗的情况下,得到的单层 DAW 的模拟吸收谱、透射谱以及反射谱,如图 4 所示,从图可以看出,当声波频率为 405Hz 时,DAW 发生共振,此时反射达到最低,透射率达到 80%,与 DAW 的耦合模理论结论相符,当声波频率为 DAW 的共振频率时,DAW 对声波的透射率达到最大,存在一个峰值。

对于双层 DAW,两片谐振单元薄玻璃片可用

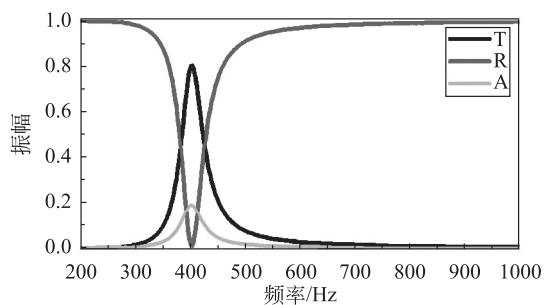


图4 单层 DAW 的模拟吸收谱、透射谱以及反射谱

垫片隔开,空气层设为 18mm,优化结构参数后取 $r = 38.2\text{mm}$, $t_w = 30\text{mm}$, $t_p = 0.3\text{mm}$, $P = 100\text{mm}$ 。同样在考虑固有损耗的情况下,可得到双层 DAW 的模拟吸收、透射以及反射谱,如图 5 所示,从图可以看出,当声波频率分别为 400Hz、642Hz 时,DAW 发生共振,此时反射达到最低及次低,而透射率分别达到 78%、70% 左右,与 DAW 的双层耦合模理论的结论相符,当声波频率为双层 DAW 的共振频率时,DAW 对声波的透射效果增强,且透射谱存在两个峰值。

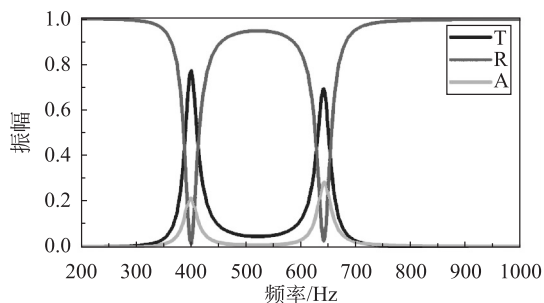


图5 双层 DAW 的模拟吸收谱、透射谱以及反射谱

3.5 实验仪器

模拟仿真软件 COMSOL 软件、SW422 声阻抗管、全频扬声器、麦克风、功率放大器、数据采集分析仪、单层 DAW、双层 DAW。

3.6 实验内容

1) COMSOL 建模及结果分析

使用模拟仿真软件 COMSOL 搭建、计算单层 DAW ($r = 38.2\text{mm}$, $t_w = 6\text{mm}$, $t_p = 0.3\text{mm}$, $P = 100\text{mm}$) 及双层 DAW ($r = 38.2\text{mm}$, $t_w = 30\text{mm}$, $t_p = 0.3\text{mm}$, $P = 100\text{mm}$) 模型,并分析其模拟结果。

2) DAW 的设计与制作

设计区别与铝合金材质的保持装置,并找加

工厂进行加工。

3) DAW 透射效果的测量

使用声阻抗管等仪器测量不同材质保持装置的单层、双层 DAW 的透射谱,对比实验与模拟结果,对比不同材质保持装置的单层、双层 DAW 的透射效果,并分析误差来源及不同材质保持装置对单层、双层 DAW 透射效果的影响。

3.7 思考题

(1) DAW 中谐振单元较薄玻璃板的厚度影响 DAW 的透射效果吗?

(2) DAW 的边界如果固定程度不够,会不会影响 DAW 的透射效果,思考其原因。

(3) 双层 DAW 玻璃片间的空气层厚度影响 DAW 的透射效果吗?

(4) 金属保持装置相当于 DAW 的一个单元,实际的 DAW 的透射效果会高于金属保持装置的透射效果吗?

(5) SW422 声阻抗管价格高,能不能设计较简易的实验装置代替声阻抗管,并保证实验测量结果趋势与 COMSOL 结果相符。

4 结语

该文介绍了一种新材料(DAW),并围绕这种新材料 DAW 开发设计了大学物理研究性实验,探索将新材料的科学研究引入教学,培养学生分析、解决问题的能力,提高学生设计新材料的创新意识,同时,该实验项目可以作为项目案例吸引更多学有余力的学生加入到校级、市级的大学生科研训练项目、各级大学生物理实验竞赛当中去,并鼓励学生在此项目基础上继续深入探究、持续改进,为培养拔尖创新人才增加培养渠道、拓宽新材料方面的物理知识边界,助力科技型人才的培养。当前成果已在 *Applied Physics Letters* 上发表科研论文一篇^[16]。

参 考 文 献

- [1] 袁小平,陈烨,蔡丽.基于产出导向的国家级线下一流本科课程建设研究[J].中国大学教学,2022(9):67-73.
YUAN X P, CHEN Y, CAI L. Research on the construction of national-level offline first-class undergraduate courses based on outcome-oriented approach[J]. China University Teaching, 2022(9): 67-73. (in Chinese)
- [2] 杨捷,闫羽.当前我国一流本科课程建设研究的计量分析与

- 展望[J]. 中国大学教学, 2022(5): 4-12+22+2.
- YANG J, YAN Y. A bibliometric analysis and prospects of research on the construction of first-class undergraduate courses in China[J]. China University Teaching, 2022(5): 4-12+22+2. (in Chinese)
- [3] 唐艳妮, 杨卫军, 周战荣, 等. 大学物理设计性、研究性实验在线教学实践[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 57-63, 70.
- TANG Y N, YANG W J, ZHOU Z R, et al. On-line teaching practice of designing and researching experiments for college physics course[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 57-63, 70. (in Chinese)
- [4] 荣新, 刘国超, 董泽昊, 等. 低波数拉曼光谱在专题研究性实验教学中的应用[J]. 物理实验, 2022, 42(5): 41-47.
- RONG X, LIU G C, DONG Z H, et al. Low-wavenumber Raman spectroscopy in the teaching of thematic research-oriented experiments[J]. Physics Experimentation, 2022, 42(5): 41-47. (in Chinese)
- [5] 张志友, 张红. 光自旋霍尔效应的研究性实验教学[J]. 物理实验, 2023, 43(4): 53-63.
- ZHANG Z Y, ZHANG H. Research-oriented teaching in experiment of spin Hall effect of light[J]. Physics Experimentation, 2023, 43(4): 53-63. (in Chinese)
- [6] 余卿, 范昕玥, 陈寅, 等. 原位 X 射线衍射探究结构相变的研究性实验——以钴酸锂的脱嵌锂相变行为为例[J]. 物理与工程, 2020, 30(6): 133-138.
- YU Q, FAN X Y, CHEN Y, et al. Research experiment on studying the structural phase transition by using In-Situ X-ray diffraction—In de-intercalation induced phase transition of LiCoO_2 cathode material, for example[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(6): 133-138. (in Chinese)
- [7] 陈杰, 黄鑫. 研究性实验教学中学生分组的实践探索[J]. 大学物理实验, 2019, 32(1): 119-122.
- CHEN J, HUANG X. Research on grouping mode in experiment teaching [J]. Physical Experiment of College, 2019, 32(1): 119-122. (in Chinese)
- [8] 宋红杰, 张立春, 吕弋. 研究型综合化学教学实验的探索[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(2): 173-176.
- SONG H J, ZHANG L C, LYU Y. Exploration on research-type comprehensive chemistry teaching experiment [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2017, 36(2): 173-176. (in Chinese)
- [9] 陈淑妍, 孟霆, 张晓峻, 等. 新工科大学物理实验多维度教学模式探索[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(3): 169-172, 183.
- CHEN S Y, MENG T, ZHANG X J, et al. Exploration of multi-dimensional teaching model of college physics experiment in the background of new engineering[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(3): 169-172, 183. (in Chinese)
- [10] 周国泉, 徐一清, 樊艳, 等. 面向工程教育专业认证的“三性四度”大学物理实验教学探索与实践[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(11): 225-231.
- ZHOU G Q, XU Y Q, FAN Y, et al. Exploration and practice on “Three natures four degrees” experiment teaching of college physics oriented by engineering education professional accreditation [J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(11): 225-231. (in Chinese)
- [11] 王鹤, 姜建刚, 张锐, 等. 基于朗伯比尔定律/等厚干涉现象探究溶液吸光度与折射率的关系[J]. 大学物理实验, 2024, 37(2): 35-38.
- WANG H, JIANG J G, ZHANG R, et al. A study on the relationship between absorbance and refractive index based on Lambert-Beer law and interference of isopach[J]. Physical Experiment of College, 2024, 37(2): 35-38. (in Chinese)
- [12] 马珂婧, 陈虎越, 张文明. 声学超材料和亥姆霍兹共振结构的自供能传感器[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(1): 110-116.
- MA K J, CHEN H Y, ZHANG W M. A self-powered sensor of acoustic metamaterial and Helmholtz resonator structure[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(1): 110-116. (in Chinese)
- [13] 林乐荣, 王志刚, 马炳杰. 减振降噪声学超材料的研究与应用进展[J]. 船舶工程, 2024, 46(3): 1-10.
- LIN L S, WANG Z G, MA B J. Researches and applications of acoustic metamaterials related to vibration and noise control[J]. Ship Engineering, 2024, 46(3): 1-10. (in Chinese)
- [14] 隋玉梅, 何兆剑, 毕仁贵, 等. 基于亥姆霍兹共振的超薄弧形声学超表面地毯斗篷[J]. 物理学报, 2024, 73(6): 222-228.
- SUI Y M, HE Z J, BI R G, et al. Ultrathin acoustic metasurface carpet cloaking based on Helmholtz resonances[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(6): 222-228. (in Chinese)
- [15] 王蔚彰, 孔维萱, 严昊, 等. 声学超表面抑制高速边界层内宽频不稳定模态研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(2): 388-396.
- WANG W Z, KONG W X, YAN H, et al. Acoustic metasurfaces for stabilization of broadband unstable modes in high speed boundary layer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(2): 388-396. (in Chinese)
- [16] TAN X H, XIANG X, HU C D, et al. Extraordinary acoustic transmission of a decorated window without ventilation[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(9).