

# 新工科背景下大学物理实验的创新教学设计与实践

## ——以多普勒效应综合实验为例

邹卓君<sup>1</sup>, 吴迪<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>沈阳航空航天大学民用航空学院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>沈阳航空航天大学理学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年6月30日

### 摘要

新工科建设对理工科基础实验教学提出“知识传授、能力培养、价值引领”三位一体的人才培养要求。针对传统大学物理实验教学模式固化、内容层次单一、价值引领缺位等痛点, 本文以成果导向教育(OBE)理念为核心, 构建线上线下载混合、三阶递进、理实一体、思政融入的创新教学设计体系, 并以多普勒效应综合实验为载体完成教学实施。该方案经第十一届全国大学生物理实验竞赛(创新)讲课赛道国家级评审, 荣获全国二等奖, 实践效果良好。为大学物理实验教学改革提供了可复制范式, 也为理工科基础课程落实创新人才培养目标提供了参考。

### 关键词

新工科, 大学物理实验, 多普勒效应, 创新教学设计, 混合式教学, 课程思政

# Innovative Teaching Design and Practice of College Physics Experiments in the Context of New Engineering Disciplines

## —A Case Study on the Doppler Effect-Based Comprehensive Experiment

Zhuojun Zou<sup>1</sup>, Di Wu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Civil Aviation College, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>College of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

\*通讯作者。

## Abstract

The development of new engineering disciplines puts forward the three-in-one talent training requirement of “knowledge imparting, ability cultivation and value guidance” for basic experimental teaching of science and engineering disciplines. Targeting the problems of rigid traditional college physics experiments teaching mode, single hierarchical content and lack of value guidance, this paper takes the Outcome-Based Education (OBE) concept as the core, constructs an innovative teaching design system integrating online and offline teaching, three-stage progression, theory and practice, as well as ideological and political education. It also carries out teaching practice with the comprehensive Doppler effect experiment as the carrier. This scheme has passed the national review of the lecture track in the 11th National University Physics Experiment Competition (Innovation), won the national second prize, and achieved favorable practical effects. It not only provides a replicable model for the reform of college physics experiments teaching, but also offers a reference for the implementation of innovative talent training objectives of basic science and engineering courses.

## Keywords

New Engineering Disciplines, College Physics Experiments, Doppler Effect, Innovative Teaching Design, Blended Teaching, Course Ideological Education

Copyright © 2026 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

依据教育部《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》[1], 大学物理实验是高等理工科院校本科生必修基础课程, 是学生接受系统科学实验方法与技能训练的开端, 是衔接物理基础理论与工程技术应用的核心纽带, 在理工科人才科学素养与创新能力培养中具有不可替代的基础性地位。随着新工科建设的持续推进, 传统以验证性实验为核心、单向灌输式的大学物理实验教学, 已无法适配新时代创新型工程人才的培养需求, 还有部分教学模式思想太过超前, 措施太过激进, 全然不顾大学物理实验课程的基础地位, 忽视人才培养过程的循序渐进性和课程安排的系统性, 试图一蹴而就[2]。因此, 课程亟需从“知识本位”向“学生本位、能力本位、素养本位”转型。

多普勒效应是波动过程的核心特征, 理论覆盖多物理分支, 在科学研究、工程技术和医疗诊断等各方面有着广泛的应用[3], 是大学物理实验的核心教学内容之一。当前国内该实验教学虽已有诸多改革探索, 但在教学模式、内容设计等维度仍有可改进的问题。基于此, 本文研究以多普勒效应综合实验为载体, 针对传统教学痛点开展系统性创新教学设计与实践, 探索新工科背景下大学物理实验教学改革的有效路径。

## 2. 研究背景与教学现状

钟登华院士在新工科建设的核心内涵中明确提出, 我国工程教育改革需以培养创新型卓越工程人才为目标, 强化学生工程实践、创新创业与跨学科解决复杂问题的能力, 落实“以学生为中心、成果为导

向”的教育理念[4]。大学物理实验是理工科专业的公共基础课,是让学生从感性的物理理论走向探索物理并应用物理规律的一条桥梁,也是为将来继续深入研究物理规律之前必须要走的路[5]。大学物理实验教学改革需要突破传统验证性实验的局限,从单一技能训练转向综合科学素养与工程能力的系统培养。授课不仅要帮助学生验证物理规律、掌握实验技能,更需要搭建理论与应用的桥梁,建立从物理规律到工程实践的转化思维;同时,科学探索的历史与前沿应用的背景,为课程思政的深度融入提供了天然载体,教学设计需要遵循学生主体、自主优先原则,强化学生的情感体验与行为锻炼,保障思政教育的自然融入[6]。

## 2.1. 国内外研究现状

从国内外研究进展来看,国外和国内一些大学物理实验教学改革的起步比较早的教学机构在多年的研究和发展中,逐步形成了比较成熟的探究式教学体系。美国麻省理工学院(MIT)推行的“技术增强型物理实验”(TEAL)模式通过多媒体技术、交互式仿真与小组协作,将传统验证性实验转变为探究性实验,显著提升了学生的概念理解能力,欧洲高校则更注重跨学科融合,如德国亚琛工业大学将物理实验与机械、电子等专业课程结合,开发了系列跨学科实验项目。国内物理实验教学改革的近年来呈现数字技术赋能、多模态协同、课程思政深度融合三大趋势,在教学模式创新方面,杜娟等[7]提出通过构建分层问题链整合动态动画仿真、手机实验等多模态工具,有效解决了抽象物理概念教学中的认知负荷问题;王玉良等[8]运用 BOPPPS 模型,将科学探索精神、家国情怀自然融入多普勒效应教学全过程,为理工科基础课程思政建设提供了案例参考。在数字技术应用方面,冯宝刚[9]指出,数字技术能够打破传统实验的时空限制,推动实验教学从“验证型”向“探究型”和“创新型”转变。但总体而言,现有研究多聚焦于单一维度的优化,缺乏系统性、整体性的教学设计,且多数研究未建立配套的可量化评价体系。

以 Phyphox 为代表的手机 App 辅助物理实验(PPL)因便携性强、成本低、场景不受限等优势,成为近年来物理实验教学创新的热点,国内学者惠宇洁[10]利用 Phyphox 完成了声速测量、向心加速度验证、单摆周期探究等实验;卢惠利[11]指出,智能手机可有效辅助实验数据处理、过程记录与课后交流,弥补了传统实验的不足;沈祖荣[12]利用智能手机的同屏技术、慢动作摄影功能,显著增强了物理演示实验的教学效果。但现有研究多停留在演示性、验证性实验层面,未将 PPL 深度融入教学全流程,与传统实验室实验形成互补,同时,缺乏针对 PPL 实验的教学评价体系,难以衡量其对学生能力培养的实际效果。

## 2.2. 传统教学存在的具体问题深度剖析

从国内高校教学实践来看,大学物理实验教学仍存在诸多共性问题,难以适配新工科人才培养要求,核心问题可归纳为五点:

1. 教学模式固化,学生主体地位弱化。传统教学以单向灌输为主,课前预习缺乏过程性引导与有效反馈,效果难以保障;课中以标准化被动操作为主,探究空间不足;课后缺乏拓展延伸,学生学习主体性难以充分发挥。

2. 教学内容单薄,层次化设计欠缺。有些实验内容局限于基础验证环节,未构建基础-进阶-应用的分层体系,无法满足学生差异化学习需求,也难以衔接工程应用与前沿成果,创新能力培养不足。

3. 理实衔接不畅,工程转化能力薄弱。理论推导、实验操作与工程应用相互割裂,学生仅能完成基础测量计算,难以理解应用原理、解决实际问题,存在“知其然不知其所以然”的问题。

4. 价值引领不足,思政融入形式化。教学偏重知识与技能传授,缺乏科学精神、家国情怀的系统培育;思政元素多为口号式添加,未与教学内容深度融合,难以达成“三位一体”的教学目标。

5. 实验场景受限,低成本创新探究不足。实验完全依赖实验室专用仪器,受场地、设备数量与开放时间限制,无法开展大规模自主探究。学生只能在规定的时间内、地点完成规定的实验内容,无法根据自

己的兴趣进行拓展实验。

### 3. 创新教学设计的核心理念与整体框架

本研究以成果导向教育理念(OBE)为核心指导[13], 紧扣新工科创新型工程人才的培养目标, 始终坚持“以学生为中心”的教学原则, 针对传统多普勒效应实验教学的核心关键点, 构建了覆盖教学全流程、融合知识传授与能力培养、兼顾基础夯实与创新拓展的一体化创新教学设计体系, 整体设计思路如图 1 所示。



Figure 1. Innovative teaching design technology roadmap  
图 1. 创新教学设计技术路线图

本文研究从教学模式、教学内容、教学方法、育人维度四个核心层面进行了系统性改革与重构, 各维度的改革内容、核心目标与解决的关键问题如表 1 所示。

Table 1. Innovative teaching design dimension framework table  
表 1. 创新性教学设计维度框架表

设计维度	具体改革内容	核心教学目标	解决的关键问题
教学模式	构建“课前-课中-课后”线上线下混合式闭环教学	落实学生主体地位, 实现教学过程的全流程管控	教学模式固化, 学生主体性缺失
教学内容	构建“基础验证-进阶拓展-创新探究”递进式内容体系	适配差异化学习需求, 实现能力阶梯式提升	内容单一, 层次化设计不足
教学方法	采用“问题导向-原理剖析-实践验证-应用拓展”一体化教学方法	打通理论与实践的壁垒, 培养工程转化能力	理论与实践脱节, 工程能力培养不足
育人维度	构建全程融入式四维课程思政体系	实现知识传授与价值引领的有机统一	价值引领缺位, 思政融入生硬

在教学模式上, 本文研究突破传统线下教学的单一形式, 借助线上平台完成预习、反馈与难点梳理, 课堂围绕关键问题开展互动探究, 课后以分层任务促进能力提升, 有效改变了传统教学中单向灌输的局面。在教学内容上, 本文研究跳出单一验证性实验的框架, 从基础验证、进阶拓展到创新应用逐层推进, 将实验场景从实验室延伸至生活与工程中的实际应用, 兼顾不同层次学生的学习需要, 稳步提升学生的

创新与实践能力。在教学方法上,采用理论与实践相结合的探究式教学,以现实问题激发学习兴趣,以递进式讲解夯实理论基础,以协同操作完成实验验证,以工程应用实现能力迁移,让理论学习与实践操作深度融合。在育人层面,将科学精神、工程素养、家国情怀与创新意识自然融入教学全过程,使价值引领与知识传授同步推进,避免形式化的思政植入。

## 4. 教学设计的具体实施与实践

本教学设计的教学总时长为2课时(90分钟),配合课前1周的线上预习与课后分层化拓展任务,形成完整的教学周期,充分落实以学生为中心的教学原则。

### 4.1. 课前线上预习与学情诊断

课前1周,教师通过学习通和超星平台等线上教学平台搭建完整预习资源体系,包括实验讲义、教学课件、多普勒效应科普视频、科学家事迹材料、工程应用案例短视频,并设置核心预习思考题,引导学生带着问题开展预习。学生需完成线上资源学习、提交预习报告,并梳理实验原理中的难点与疑问。教师借助平台实时监控预习进度,收集学生反馈的核心问题,针对性调整课堂教学侧重点,确保课堂教学精准对接学生需求,为高效开展课堂教学奠定基础。

### 4.2. 课堂探究式教学实施

课中教学围绕教学目标,按“背景引入-原理剖析-仪器讲解-操作演示-数据处理-拓展探究”的逻辑有序推进,全程采用互动探究式教学。课堂以多普勒雷达测速实景视频导入,提出“雷达如何实现测速”的核心问题,由实际应用需求引出多普勒效应探究主题,激发学生思考,自然进入实验原理的学习环节。引导学生从学科发展的历史过程中提炼出思考问题、解决问题的科学方法,从而深入地领会和掌握这些定律和原理是非常重要的[14],因此,教学中引入AI交互手段,通过模拟与多普勒先生对话的形式还原1842年多普勒发现该效应的经典过程,以沉浸式体验梳理关键科学史节点,使学生直观理解物理规律的发现与验证路径,在趣味互动中初步渗透科学精神,并明确本节课的分层教学目标(如图2)。

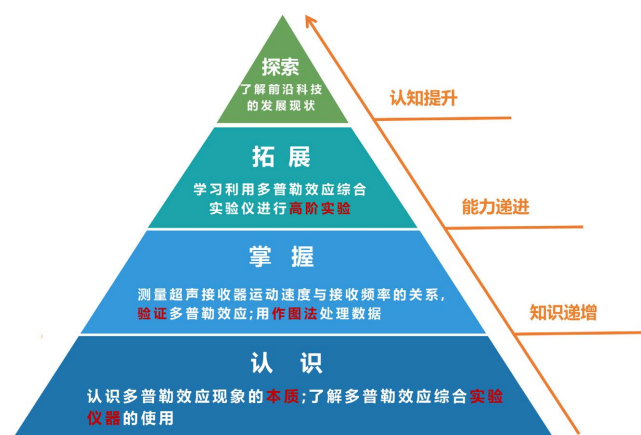


Figure 2. This class features a tiered teaching pyramid approach  
图2. 本节课分层教学金字塔

实验原理的剖析以火车汽笛声调变化为切入点,借助动态示意图(如图3)呈现波源与接收者相对运动时的波长变化规律,帮助学生理解“相对运动引起接收频率改变”的核心本质。在明确基本物理量定义的基础上层层递进推导:先分析“波源静止、接收者运动”时的接收频率,总结分子符号规律即接收者

靠近波源分子运算为+, 接收者远离波源分子运算为-; 再分析接收者静止、波源运动时的波长与频率变化, 总结分母符号规律即波源靠近接收者分母运算为-, 波源远离接收者分母运算为+; 最后结合两种情形, 推导出普适公式, 形成完整理论体系。

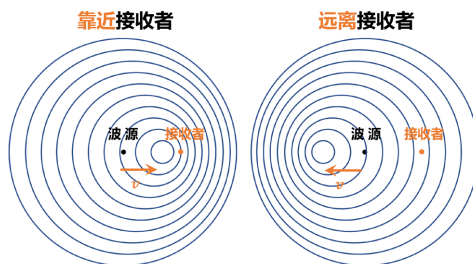


Figure 3. Dynamic presentation diagram  
图 3. 动态课件示意图

在实验原理的推导结束后, 提炼多普勒效应的本质特征, 纠正认知误区, 明确其适用于机械波、电磁波与光波。结合本实验“波源发射器静止、接收器沿连线运动”的条件, 对普适公式进行简化, 得到本实验内容的核心计算公式; 同时运用本节课讲授的多普勒普适公式, 反向解析课前播放的多普勒测速雷达工作原理, 完成“从应用需求提出问题→开展理论研究→用理论解决实际应用”的闭环教育(如图 4), 从而实现了从物理理论研究向工程应用的科研成果转化。

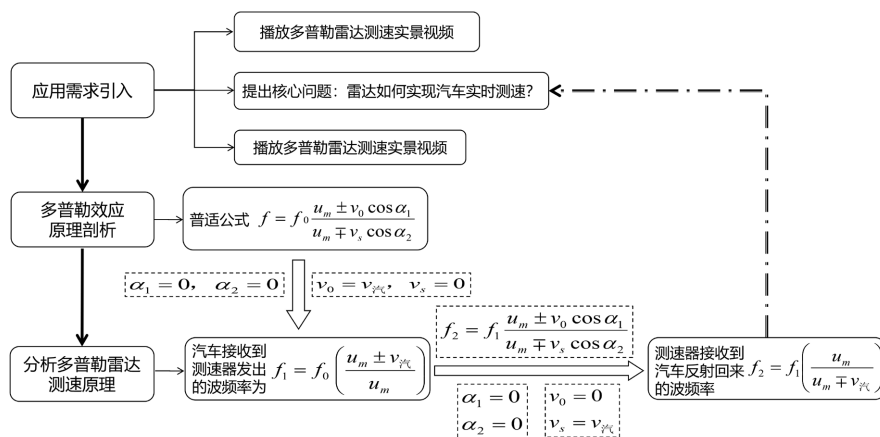


Figure 4. Closed-loop education schematic diagram  
图 4. 闭环教育示意图

实验仪器的讲解与操作演示采用师生协同方式进行。结合实验装置(如图 5), 逐一介绍测试架、主测试仪、智能运动控制系统、数字示波器、温度计等核心设备, 重点说明波源发射与接收换能器的谐振原理、光电门的测速与保护功能, 以及主测试仪与运动控制系统的操作逻辑, 使学生掌握使用规范与安全要点。在学生配合下完成全流程操作演示, 同步说明要点、易错点与注意事项。操作依次完成源频率测量与谐振调节; 装置复位与导轨清理; 参数设置与调谐验证; 以及不同速度、靠近和分离两个运动方向下的瞬时测量与数据采集, 记录多组速度与接收频率数据。

实验数据处理环节着重培养学生规范的数据处理能力与严谨的科学态度。依据实验数据定义多普勒频移, 绘制“频移 - 速度”关系曲线, 采用两点法计算斜率并得到声速测量值; 结合实验环境温度计算

声速理论值, 完成相对误差计算并分析误差来源; 基于误差传递理论推导不确定度公式, 完成相对不确定度与标准不确定度计算, 给出规范的声速测量结果, 使学生掌握物理实验数据处理的完整流程。

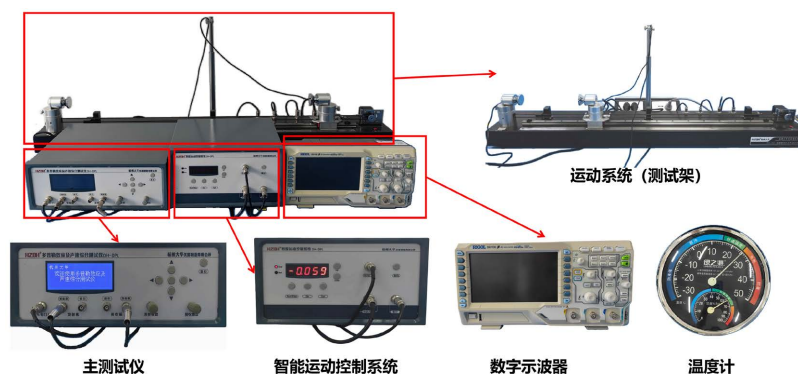


Figure 5. Dynamic display diagram of the experimental setup  
图 5. 实验装置动态展示图

在拓展探究环节, 突破实验室场景限制, 从多方面拓宽学生视野与创新思维。在高阶实验部分, 介绍了驻波法、相位法、时差法测声速的原理, 对比不同方法的特点与适用场景; 在创新实验部分, 根据多普勒效应原理, 自主设计居家物理实验, 依托 Phyphox 手机软件实现水流速度及流量的测量[15] (如图 6), 将实验延伸至日常生活场景, 大幅降低自主探究门槛, 形成独具特色的原创教学内容; 前沿应用部分系统介绍多普勒效应在脉冲多普勒雷达、医用彩超、北斗卫星导航等领域的工程应用, 并简介 AF-RDV 首款收发一体全光纤旋转多普勒测速技术[16]的最新成果, 展现经典物理规律的现代价值与发展前沿, 完成课堂教学的总结与提升。



Figure 6. Doppler current measurement principle  
图 6. 多普勒水流测速原理

### 4.3. 课程思政融合与课后分层拓展

课程思政元素的融入贯穿教学全流程[17][18]。通过还原多普勒效应的科学发现与验证历程, 让学生直观感受科学研究的严谨性与持续性, 培养勇于探索、严谨求实的科学精神; 通过交通测速、流量测量、雷达探测等工程应用案例, 培养学生的工程思维与运用物理规律解决实际工程问题的能力; 通过北斗导航卫星的技术突破与发展历程, 讲解我国打破国外技术垄断、实现自主可控的实践, 厚植学生的民族自

豪感与家国情怀；通过国内科研团队的前沿成果，激发学生的创新意识与科技报国的理想信念，实现了知识传授、能力培养与价值引领的深度融合。

#### 4.3.1. 分环节思政融入实施路径

课前预习阶段以隐性渗透为主，在学习通预习资源包中嵌入多普勒生平事迹纪录片片段，重点呈现其在理论不被学界认可的情况下，历时多年完成实验验证的科学探索历程；同时加入北斗三号全球组网发展短视频，展现我国突破国外技术封锁、实现导航系统自主可控的艰辛过程。配套设置核心思考题，引导学生在预习中同步思考科学研究的本质与科技自立自强的意义，为课堂思政融入做好铺垫。

课堂教学阶段将思政元素与教学内容深度融合，在还原多普勒效应发现史时，通过 AI 模拟对话呈现理论从提出到完善的完整过程，可以提出“多普勒最初提出的理论存在哪些缺陷？后来的科学家是如何逐步完善的？”“如果在实验中得到了与理论不符的数据，你会怎么做？”等问题，引导学生讨论科学研究中严谨求实、持之以恒的重要性，以及面对异常数据时应有的科学态度。讲解多普勒雷达测速原理时，结合高速公路测速、机场跑道飞机测速等真实工程场景，分析实际应用中影响测量精度的关键因素与误差修正方法，让学生在理解原理的同时，建立工程思维与问题解决意识。在前沿应用拓展部分，重点介绍我国北斗导航系统、国产医用彩超设备的技术突破，对比过去核心技术受制于人的困境与如今自主可控的成就，引导学生思考“作为新时代的大学生，你认为我们应该如何为国家的科技发展贡献力量？”，厚植学生的民族自豪感与家国情怀。介绍 Phyphox 水流测速居家实验时，鼓励学生结合生活场景拓展实验设计，提出问题：“除了测量水流速度，你还能利用多普勒效应和手机传感器设计哪些有趣的实验？”探索多普勒效应在更多领域的应用，激发自主创新意识。

课后阶段基于学生的不同学习水平与学习需求，设计分层化的拓展任务，实现学生认知的深化与能力的阶梯式提升，具体任务设置如下：

1. 基础巩固任务：指导学生完成完整的实验报告，深入分析实验误差来源，提出实验方案的改进措施，巩固课堂所学的基础内容，并撰写实验反思日志，梳理本次实验在科学精神、工程应用与家国情怀方面的收获。
2. 进阶探究任务：指导学生完成 Phyphox 多普勒效应居家实验，提交完整的实验报告，对比不同测量方法的误差，分析影响测量精度的核心因素，培养学生的自主探究能力。
3. 创新拓展任务：鼓励学生基于多普勒效应自主设计创新实验项目或者科创项目，引导学生参与大学生物理实验竞赛、创新创业训练计划等科创活动，实现课堂教学与科创竞赛的双向赋能。

#### 4.3.2. 可观测的课程思政评价指标体系

本研究从知识掌握、能力提升、价值认同三个维度设计课程思政评价指标体系(如表 2)，采用过程性评价与终结性评价相结合的方式，全面评价思政教育效果。

**Table 2.** Observable evaluation index system for curriculum ideological and political education

**表 2.** 可观测的课程思政评价指标表

评价维度	具体评价指标	评价方式	权重
知识掌握	能准确阐述多普勒效应的科学发现历程，能说出至少 3 个我国应用多普勒效应的重大工程成果	预习报告、课堂提问、课后作业	30%
能力提升	能独立分析实验误差并提出改进措施，能自主设计简单的拓展实验方案	实验报告、居家实验报告、科创项目	40%
价值认同	能结合科学史阐述科学精神的内涵，能表达对国家科技发展的自豪感与责任感	反思日志、课程论文、小组讨论	30%

## 5. 教学实践效果与验证

本文的教学设计方案经第十一届全国大学生物理实验竞赛(创新)讲课赛道国家级评审, 荣获全国二等奖。该方案紧扣新工科人才培养目标, 逻辑完整、层次清晰, 兼具教学创新性与推广价值。实践表明, 线上线下混合式教学有效提升了学生的学习参与度, “三阶递进式”教学内容为学生提供了分层能力提升路径, 理实一体化教学实现了从理论到工程实践的转化, 全程融入的课程思政达成了知识传授、能力培养、价值引领三位一体的育人效果。

## 6. 讨论

### 6.1. 研究局限性分析

本研究虽取得了良好的实践效果, 但仍存在以下局限性:

1. 样本量有限: 本研究的教学实践主要在特定的本科班级开展, 样本量较小, 且学生均为理工科背景, 研究结果的普适性有待进一步验证。
2. 评价体系有待完善: 本研究设计的课程思政评价指标体系主要基于文本分析与主观评价, 缺乏客观的量化评价工具, 如问卷调查、访谈等, 评价结果的准确性有待进一步提高。
3. 长期效果未跟踪: 本研究仅评价了单次实验的教学效果, 未对学生的长期学习效果与能力发展进行跟踪研究, 无法全面反映该教学模式的育人价值。

### 6.2. 教学模式的普适性与推广条件

本研究构建的“线上线下混合、三阶递进、理实一体、思政全程融入”的教学模式, 不仅适用于多普勒效应实验, 也可推广至其他大学物理实验项目, 如声速测量、牛顿第二定律验证、电磁感应实验等。该模式的推广需满足以下条件:

1. 师资条件: 教师需具备扎实的物理专业知识与工程实践经验, 掌握线上教学平台与手机 App 的使用方法, 具备课程思政融入的意识与能力。
2. 资源条件: 学校需提供完善的线上教学平台与实验仪器设备, 支持教师开发线上预习资源与拓展实验项目。
3. 制度条件: 学校需出台相关政策, 鼓励教师开展教学改革研究, 将教学改革成果纳入教师考核评价体系, 为教学模式的推广提供制度保障。

### 6.3. 研究改进方向

针对上述局限性, 未来研究应着重扩大研究样本并开展长期跟踪, 将该教学模式逐步推广至不同层次、不同类型的高校及文理工科专业, 同时建立学生成长跟踪档案, 系统评估该模式对学生科学素养、创新能力及价值观念的长期影响。完善多元评价体系, 引入标准化问卷调查、半结构化访谈、课堂行为观察等多种评价方法, 结合大数据技术对学生的线上学习行为、实验操作过程及成果产出进行多维度分析, 构建更加客观、全面的教学效果评价体系。同时, 拓展课程建设范围, 开发系列化的创新实验课程资源, 同时加强与航空航天、机械、电子等专业课程的衔接, 构建跨学科的实验教学体系, 更好地服务于新工科创新型工程人才培养目标。

## 7. 结论与展望

本研究以 OBE 理念为指导, 以构建多普勒效应实验项目的创新教学设计为例, 解决了传统教学模式固化、理实脱节等问题, 在夯实学生理论与实验技能的同时, 培养其工程实践与创新能力, 实现知识传

授与价值引领的统一, 为新工科背景下大学物理实验教学改革提供了可推广的范式。未来将持续优化教学设计、引入新型教学手段, 并将该模式推广至更多实验项目, 完善创新教学资源, 更好地服务于创新型工程人才培养。

## 基金项目

2025 年沈阳航空航天大学校级本科教学改革研究项目: 在创新性物理实验中开展课赛结合的研究与实践(项目编号: JG252002E2)。

## 参考文献

- [1] 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会. 理工科类大学物理实验课程教学基本要求[M]. 北京: 高等教育出版社, 2023: 17-22.
- [2] 梁席民, 陈叶叶. 大学物理实验教学方法探索与研究[J]. 教育进展, 2023, 13(9): 6661-6666.
- [3] 刘战存. 多普勒和多普勒效应的起源[J]. 物理, 2003, 32(7): 488-491.
- [4] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. 高等工程教育研究, 2017(3): 1-6.
- [5] 肖立娟. 大学物理实验教学的现状与教学改革的探究[J]. 大学物理实验, 2015, 28(6): 114-116.
- [6] 刘毅. 大学物理实验课程思政元素契入路径和教学设计[J]. 创新教育研究, 2022, 10(4): 670-675.
- [7] 杜娟, 杨红卫, 杨倩倩. 问题驱动与多模态教学法在抽象物理概念教学中的应用研究——以“多普勒效应”为例[J]. 教育进展, 2025, 15(8): 248-255.
- [8] 王玉良, 顾殿雨, 郭云超, 孙江. 大学物理课程思政案例研究与实践——以《多普勒效应》为例[J]. 教育进展, 2025, 15(1): 348-351.
- [9] 冯宝刚. 基于数字技术赋能探究中学物理实验教学变革的路径与策略[J]. 新课程, 2026(11): 17-20.
- [10] 惠宇洁. 智能手机在物理实验教学中的应用探讨——以 Phyphox 软件为例[J]. 物理教学探讨, 2018, 36(7): 70-72.
- [11] 卢惠利. 巧用智能手机, 做好物理课外实验[J]. 新课程, 2020(42): 170.
- [12] 沈祖荣. 智能手机增强物理演示实验教学功效案例举隅[J]. 中学物理(高中版), 2019, 37(6): 40-42.
- [13] 李志义. 解析工程教育专业认证的成果导向理念[J]. 中国高等教育, 2014(17): 7-10.
- [14] 王军. 对大学物理化学课程教学的思考[J]. 教育进展, 2013, 3(1): 13-16.
- [15] 姚章民. 声学多普勒水流剖面仪在河流流量测量中的应用[J]. 人民珠江, 2002(6): 23-24.
- [16] Wan, Z., Tang, Z., Zhang, X., Padgett, M.J. and Wang, J. (2025) Compact and Reciprocal Probe-Signal-Integrated Rotational Doppler Velocimetry with Fiber-Sculpted Light. *Light: Science & Applications*, **14**, Article No. 88. <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01747-8>
- [17] 吴迪, 段丽娜, 孙景超, 王珩, 徐世峰. 线上和线下混合式实验教学的探索和建设[J]. 创新教育研究, 2022, 10(6): 1455-1460.
- [18] 吴迪, 段丽娜, 杨迪, 王珩, 徐世峰, 孙景超, 高峰, 董雪, 赵诗禹. 在混合式实验教学中开展线上和线下跨校修读的探索与实践[J]. 教育进展, 2025, 15(12): 1236-1245.