

人工势场法在无人艇避障中的实验教学设计与实践

刘星, 李建益*, 刘标, 霍清华, 杨冰, 冯卡力

海军士官学校, 安徽 蚌埠 233000

DOI:10.61369/EST.2026080032

摘 要 : 针对船舶与海洋工程专业“无人艇运动控制技术”课程教学中, 学生普遍面临的“能仿真、畏实操”, 难以建立算法参与真实船舶操纵性能间内在关联的教学痛点, 本研究以成果导向教育理念为指导, 设计并实践了一套以人工势场法局部避障为核心的“理论奠基—仿真探究—实物验证”三阶递进式实验教学体系。该体系依托 Matlab 仿真平台, 引导学生系统探究“参数—行为—性能”的因果映射, 并在狭窄通道、局部极小值等典型航行场景中, 前置性引入对流体动力、传感器噪声等工程约束影响的批判性讨论。随后, 基于教学无人艇平台, 完成从仿真到实物的能力迁移。两轮共4个教学班的实践数据表明, 该体系显著加深了学生对复杂算法的理解深度, 核心机理分析题得分率由65%提升至87.5%; 有效培养了学生的系统调试能力, 超过95%的学生独立完成了全流程任务。本研究为船舶智能控制类课程的“虚实结合、工学一体”教学改革提供了可复制的实施方案。

关 键 词 : 人工势场法; 实验教学改革; 无人艇; 路径规划; 虚实结合

Experimental Teaching Design and Practice of Artificial Potential Field Method in Unmanned Surface Vehicle Obstacle Avoidance

Liu Xing, Li Jianyi*, Liu Biao, Huo Qinghua, Yang Bing, Feng Kali

Naval Petty Officer Academy, Bengbu, Anhui 233000

Abstract : To address the persistent teaching challenge in the "USV Motion Control Technology" course for naval architecture and ocean engineering majors—where students are proficient in simulation but hesitant in practical operation and struggle to connect algorithm parameters with real ship maneuverability—this study, guided by the Outcome-Based Education (OBE) philosophy, designs and implements a three-stage progressive experimental teaching system: "theoretical foundation, simulation exploration, and physical verification," centered on the Artificial Potential Field (APF) method for local obstacle avoidance. The system uses a MATLAB simulation platform to guide students in systematically exploring the causal mapping of "parameters-behavior-performance" and proactively introduces critical discussions on the impact of engineering constraints such as hydrodynamic effects and sensor noise in representative scenarios including narrow channels and local minima traps. Subsequently, a teaching USV platform is used to achieve competency transfer from simulation to reality. Data from two rounds of teaching practice involving four classes show that the system significantly deepens students' understanding of complex algorithms, with the scoring rate on core mechanism analysis questions increasing from 65% to 87.5%, and effectively cultivates their system debugging skills, with over 95% of students independently completing the full-process task. This study offers a replicable implementation plan for the "virtual-real integration and work-study combination" teaching reform of intelligent ship control courses.

Keywords : artificial potential field method; experimental teaching reform; unmanned surface vehicle (usv); path planning; virtual-real integration

引言

随着智能航运系统的快速发展, 无人艇 (Unmanned Surface Vehicle, USV) 的自主避障能力成为关键技术热点^[1]。人工势场法 (Artificial Potential Field, APF) 因其计算效率高、物理概念直观等优势, 在 USV 局部路径规划中应用前景广阔^[2-3]。然而, 在《无人艇运动控制技术》等船舶与海洋工程类专业核心课程中, APF 算法的教学长期面临一个具体而深刻的痛点: 学生普遍“能仿真、畏实

基金项目: 国防军事教育规划课题: 水域无人专业体系培养构建。

作者简介: 刘星 (1988—), 男, 湖北黄梅人, 博士, 副教授, 现主要从事无人艇运动控制、智能算法教学研究。E-mail: liuxing.3n8b@163.com

通讯作者: 李建益 (1976—), 男, 安徽合肥, 硕士, 副教授, 现主要从事船舶智能控制研究。E-mail: 1463920466@qq.com

操”。在理想仿真环境中，学生通过试错能获得“完美”轨迹，但一旦面对教学无人艇，却无法解释为何调试好的参数在水面却引发剧烈振荡；也难以将“增大 k_{rep} ”这一操作，与真实船舶回转性、风浪流干扰等物理效应建立联系。这种理论与实践的严重脱节，导致学生缺乏在真实工程约束（如传感器噪声、执行机构延迟、流体动力耦合）下进行系统调试与性能评估的核心工程能力。对于职业院校学生而言，这一能力短板将直接影响其未来在一线装备操控岗位上的胜任力。

近年来，已有部分高校探索将虚拟仿真引入船舶控制教学。王晓娜等设计了控制算法虚拟仿真实验，但缺少实物验证环节，学生难以认知模型与现实的差距^[4]。陈永强等构建了机器人学仿真平台，但主要面向机械臂，其动态特性与水面无人艇差异显著^[5]。周海洋等探讨了无人艇路径规划中的环境建模与仿真验证，但未涉及教学转化问题^[6]。总体而言，现有研究在构建“从仿真到实船”的完整认知闭环、系统培养学生工程调试方法论方面，仍存在空白。为破解这一困境，本研究以成果导向教育（OBE）理念为指导，对 APF 教学环节进行系统性重构，构建了“理论奠基—仿真探究—实物验证”三阶段递进教学模式，旨在实现学生从“算法认知”到“系统集成能力”的跃升。

一、实验教学体系总体设计

（一）理论基础与设计理念

本教学体系的设计严格遵循建构主义学习理论，强调学生在与环境的主动交互中构建知识^[7]。具体而言，利用最近发展区理论，将复杂的工程实践能力分解为三个连续阶梯：理论认知（锚定概念）、仿真探索（安全试错）、实物验证（挑战现实）。整个设计贯彻“以学生为中心、以产出为导向”的 OBE 原则，将最终的教学产出明确指向学生的参数整定能力、系统集成能力与批判性工程思维。

（二）三阶段递进体系架构

为克服以往教学中模块割裂、认知脱节的弊端，本体系统构建了如图1所示的闭环教学架构。

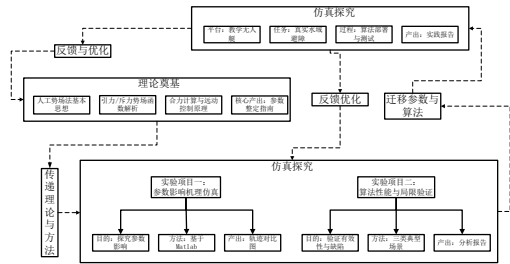


图1 实验教学体系总体架构

该架构实现了三个层面的教学转变：从“知识传授”向“能力建构”转变；从“单一验证”向“探究发现”转变；从“虚拟仿真”向“虚实融合”转变。其核心要义在于，将仿真阶段的“理想发现”与实物阶段的“现实约束”进行预先设计与强制对比，从而弥合认知差异^[8]。

二、核心实验项目的分层设计与实施

（一）理论奠基与仿真探究一：参数影响机理及整定策略构建

1. 实验目的与平台

本环节旨在超越感性认知，引导学生建立定量的“参数—性能”映射关系，并形成一套可迁移的系统性参数整定策略。平台为 Matlab 仿真环境，允许学生进行无风险的反复试错。

2. 结构化参数整定指南的构建

为避免学生陷入盲目试错，提供了一套启发式调试方法论

（见表1）。这一设计直接源于建构主义的“脚手架”理念——通过提供概念框架，引导学生从“散点式操作”走向“策略性思考”。

表1 人工势场法关键参数整定指南

参数	作用	调整原则	典型值范围
k_{att}	控制吸引力大小	增大→路径直接但易碰撞；减小→平稳但耗时	1-10
k_{rep}	控制排斥力强度	增大→避障积极但易振荡；减小→平滑但危险	5000-20000
d_0	障碍物影响范围	增大→提前避障但路径绕远；减小→反之	10-30 米
k_m	动量项权重	增大→运动连贯但超调；减小→反之	10-20
k_θ	航向控制增益	增大→响应迅速但超调；减小→平稳但迟钝	0.5-2.0

教学引导学生遵循“单因素分析→耦合关系探究→全局优化”的路径：首先固定他项参数，独立调节 k_{att} 或 k_{rep} ，观察轨迹剧变；进而同时调节二者，发现“冒险”与“保守”策略的转化阈值（ k_{rep}/k_{att} 比值）；最后遵循“先主导、后辅助、再精细”的流程进行系统优化。

3. 典型场景下的验证与可视化分析

学生在“稀疏”与“密集”障碍物场景下进行实验，直观感受参数整定的效果。实验结果如图2、图3所示。

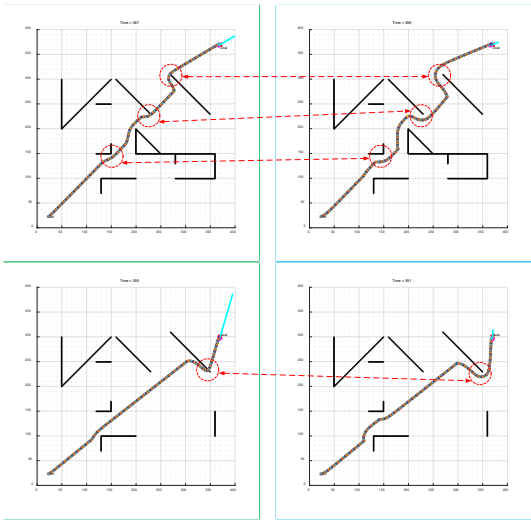


图2 参数未优化的轨迹 图3 参数优化后的轨迹

从图2可以看出，在未优化参数条件下，无人艇路径呈明显锯齿

齿状，在障碍物附近出现“紧邻”甚至“穿越”的趋势。该现象表明，斥力与引力配比（ k_{rep}/k_{att} ）严重失衡，导致控制超调。而从图3优化后的轨迹可见，路径曲率连续平滑，无人艇以自然弧线穿过障碍物间隙，有效抑制了势场震荡。这组对比数据清晰地将抽象的“算法机理”转化为可视的“行为表现”，帮助学生建立了对调参逻辑的具象化认知。

（二）仿真探究二：算法性能边界与局限性剖析

1. 实验目的

本实验重在培养批判性工程思维，超越对算法的简单验证，引导学生客观评估其适用边界与结构性缺陷。

2. 梯度化验证场景与深度教学引导

针对 APF 算法的优缺点，设计了三个难度递进的场景。

场景一：稀疏环境下的有效性验证。在开阔场景设置4个静态障碍物，无人艇从起点（20, 20）至终点（370, 370）。轨迹如图4所示。

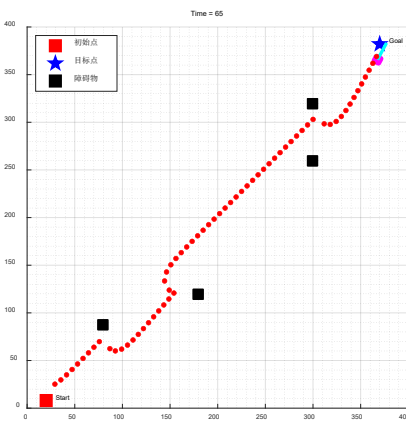


图4 传统人工势场法避障规划图

从图4可见，无人艇在合力的连续作用下，平滑规避了所有障碍物，全程曲率变化平缓。这一数据验证了 APF 在静态稀疏环境下的实时性与有效性，为学生建立了算法应用的信心基线。

场景二：狭窄通道下的振荡现象。设置由3个长方形障碍物构成的狭窄通道。轨迹如图5所示。

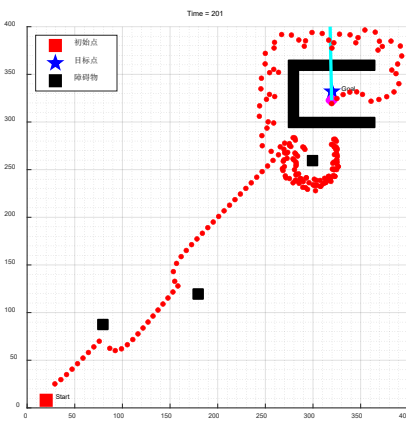


图5 引入阻尼控制的避障轨迹对比

图5呈现了一种典型的非理想航行状态。从图中的轨迹震荡特征可以看出，无人艇在进入由长方形障碍物构成的狭窄通道后，航向出现了高频次、大幅度的往复摆动。这一现象的数据规律表明，在狭窄空间内，目标引力与障碍物斥力的动态平衡极易被打破，导致合力方向剧烈跳变。对此现象进行深度剖析，能够引导学生认识到：APF 算法在狭水道中的应用需要引入额外的阻尼项或滤波算法以抑制振荡，从而初步培养其算法优化与创新意识。

场景三：封闭环境下的局部极小值问题。设置半封闭的长方形障碍物，目标点位于封闭区域内。轨迹如图6所示。

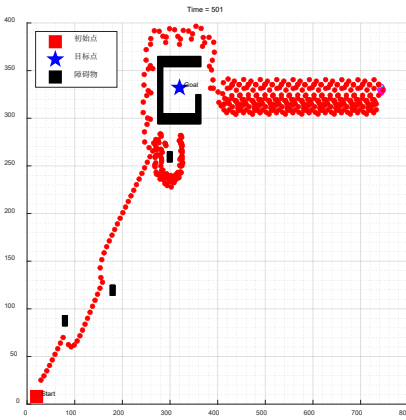


图6 传统人工势场法规划图——路径不可达

图6的数据揭示了经典 APF 的结构性缺陷。无人艇在接近入口时，引力与斥力达到局部平衡，陷入“吸引与排斥”的震荡，迭代500次后仍未收敛至目标点。教学中，引导学生分析该现象的数学本质——梯度场中的局部极小点，并组织小组研讨可能的解决方案，如添加虚拟逃逸力、引入随机扰动或切换至全局规划器。这一设计深刻培养了学生“任何工程算法均有适用边界”的批判性思维。

（三）实物验证：从仿真到实船的能力迁移

1. 实验系统与任务设计

本模块是实现能力内化的最终环节。实验系统由教学无人艇（配备 GPS、IMU、控制单元与推进机构）、岸基控制站（集成 APF 算法的模块化软件平台）及无线通信链路组成。与仿真最大的不同在于，学生需将先前验证的算法，部署到一个充满物理约束的真实系统中。控制软件采用层次化架构设计，突出算法模块与船舶执行系统之间的接口关系，便于学生理解算法在真实船舶控制系统中的集成方式（见图7）。

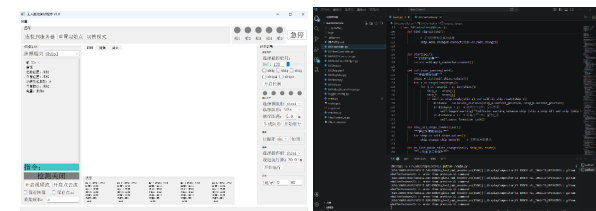


图7 教学无人艇控制界面与算法源码示例

核心任务是在真实静水水域复现仿真避障任务，但教学重点并非“成功避障”这一结果，而是“仿真与实物的差异”这一过

程。要求学生带着预设参数开始实验，并全程记录轨迹数据。

2. 差异分析与工程反思

实物实验成功复现了避障行为。现场情况如图8所示。



图8 教学无人艇湖面避障实验实录

对比图8实物轨迹与图4仿真轨迹，组织了教学的核心环节——“仿真－实物差异分析工作坊”。学生被要求从船舶控制系统工程角度撰写分析报告。一组高质量报告指出，实物轨迹存在约0.5秒的偏航修正延迟和局部超调，其差异根源在于三个层面：（1）感知层：GPS定位噪声导致势场计算出现抖动；（2）传输与控制层：无线通信延迟与推进机构响应滞后，使控制指令跟踪精度下降；（3）环境层：微风与表面流场对低干舷无人艇的位姿产生不可忽略的干扰。这一过程，有效推动了学生从“算法实现者”向“具备整船系统思维的工程实践者”的角色转变，成功培养了其严谨、求真、务实的工程素养。

三、教学成效与持续改进

（一）多维度量化成效分析

经过两轮（4个教学班，120名学生）的教学实践，通过试卷分析、实验验收记录与匿名问卷调查，数据证明了改革成效，详见表2。

表2 两轮教学改革前后核心指标对比

评价维度	具体观测点	改革前数据	改革后数据	提升幅度	数据来源
知识理解	APF机理分析题得分率	约65%	87.5%	↑ 22.5%	期末试卷分析
实践能力	全流程任务独立完成率	约40%（仅仿真）	95%（含实物）	↑ 55%	实验验收记录
系统思维	系统调试能力自评认可度	未专项统计	93.2%	—	匿名问卷（N=120）
批判思维	算法局限评估能力认可度	未专项统计	90.1%	—	匿名问卷（N=120）
团队协作	团队协作与沟通认可度	未专项统计	94.5%	—	匿名问卷（N=120）

参考文献

- [1] 高霄鹏, 刘冬雨, 霍聪. 水面无人艇运动规划研究综述 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45(16): 1-6.
- [2] 李家林, 张建强, 李春来. 基于优化人工势场法的无人艇局部路径规划 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(16): 69-73.
- [3] 刘忠, 伊戈, 张建强. 基于改进人工势场法的无人艇避障算法 [J]. 海军工程大学学报, 2021, 33(5): 28-32.
- [4] 王晓娜, 李志强. 基于虚拟仿真技术的控制算法实验教学研究 [J]. 实验技术与管理, 2023, 40(5): 130-134.
- [5] 陈永强, 刘金琨. 机器人学课程虚拟仿真实验教学平台设计 [J]. 实验技术与管理, 2023, 40(4): 123-128.
- [6] 周海洋, 刘建国, 赵静. 无人艇路径规划中的环境建模与仿真验证 [J]. 船舶工程, 2023, 45(3): 56-61.
- [7] 李志刚, 王萌, 刘全. 面向工程能力培养的无人系统实验教学体系构建 [J]. 实验技术与管理, 2022, 39(8): 23-28.
- [8] 赵东风, 胡晓锋, 严帅. 虚实结合的测控专业实践教学改革与探索 [J]. 实验技术与管理, 2021, 38(10): 194-198.
- [9] 郑康. 基于安全强化学习的无人艇路径跟踪和避障研究 [D]. 江苏科技大学, 2025.
- [10] 徐国庆. 职业教育项目课程开发的理论与实务 [J]. 教育与职业, 2018(6):5-10.

从表2可见，改革在多维度取得了实质性突破。知识理解得分率由约65%提升至87.5%，印证了引言所述“能仿真、畏实操”痛点得到了有效缓解——学生不再只是“跑通仿真”，而是真正理解了算法在物理系统中的行为机理。95%的学生完成了含实物调试的全流程任务，全部12个小组均成功实现了无人艇在真实水面环境下的静态障碍物避碰。尤为关键的是，通过《仿真－实物差异分析报告》的撰写，超过90%的学生形成了将物理约束、系统延迟等非理想因素纳入工程设计的意识，这标志着批判性系统思维能力培养目标的初步达成。

（二）反思与未来迭代方向

本体系在实施中也暴露了不足，将其作为新一轮改革的起点。其一，实物实验受天气、场地限制大，部分小组等待时间长，实验可重复性有待提高。对此，课程组正开发高保真度水上机器人仿真平台，作为实物实验前的强制性预演环节，以提高外场实验的一次成功率。其二，当前场景以静态障碍物为主，无法训练学生在动态不确定性环境下的决策能力。为此，计划引入动态障碍物及多艇协同避障实验项目，提升任务复杂度和决策挑战性。其三，计划针对学有余力的学生，开设“APF改进算法对比实验”选修模块，鼓励其从“方法应用”迈向“算法创新”，进一步深化课程的高阶性与挑战度^[9]。

四、结语

本文聚焦船舶智能控制教学中“重理论、轻实践”的具体痛点，特别是学生难以跨越“仿真”到“实船”鸿沟的教学难题，构建并实践了“理论奠基—仿真探究—实物验证”三阶递进式实验教学体系^[10]。该体系通过前置性的工程约束讨论、结构化的参数整定方法论和强制的虚实对比分析，有效提升了学生的算法理解深度与工程实践能力。两轮教学实践的量化数据表明，核心机理分析题得分率由65%提升至87.5%，超过95%的学生独立完成了含实物调试的全流程任务，验证了本体系的有效性。未来，本研究将进一步在动态场景与多机协同的复杂性维度上进行拓展，为智能船舶领域培养更多具备坚实工程系统思维的高素质人才。