

# 2025 年度拟提名陕西省科技进步奖项目公示内容

## 一、项目名称

水下航行体内波水动力效应抑制关键技术及应用

## 二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

潜艇、深潜器等高端海洋装备是探测和开发深海的关键，海洋内波具有作用强烈、能量巨大、隐蔽性强等特点，对水下航行器的威胁不容忽视，已成为水下安全航行的灾害性环境因素。项目全面系统地研究了水下航行体的内波水动力效应，建立了连续多层海洋内波模型、水下智能流场探测方法、波体耦合作用预报方法和航行体优化控制策略，解决了水下航行体内波危害的行业难题。项目研究难度大，创新性强，具有完全自主知识产权，成果达到了国际先进水平，推动了海洋内波水动力效应抑制技术的发展。累计授权发明专利 18 项、受理发明专利 9 项，登记软件著作权 12 项。在国内外期刊上发表学术论文 46 篇（其中 ESI 高被引论文 3 篇），受到国内外学术界的好评和认可，对相关研究有引领和示范作用。培养国家级领军人才 1 人次，陕西省青年科技新星 2 人次，陕西省高校科协青托 2 人次，陕西高校优秀青年人才 1 人次等。获中国国际大学生创新大赛全国金奖、中国造船工程学会优秀学术论文、中船集团逐梦深蓝科创大赛三等奖等奖项。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科技进步奖提名条件。特提名为陕西省科技进步奖二等奖及以上。

### 三、项目简介

潜艇、深潜器等高端海洋装备是探测和开发深海的关键，对于我国发展海洋经济、维护海疆安全至关重要。然而，海洋内波具有作用强烈、能量巨大、隐蔽性强等特点，对水下航行器的威胁不容忽视，全球迄今为止 30% 以上的潜艇事故与内波有关，包括美国海军“长尾鲨”号、以色列海军“达卡尔”号、印度尼西亚海军“南迦拉号”潜艇均是遭遇内波后艇毁人亡，因此，海洋内波已成为水下安全航行的灾害性环境因素。考虑到内孤立波对水下航行体安全航行构成的严重威胁，从建模、感知、预报、控制四个层面逐级递进，建立了连续多层海洋内波模型、水下智能流场探测方法、波体耦合作用预报方法和航行体优化控制策略，解决了水下航行体内波危害的行业难题。主要贡献如下：

**(1) 提出了计及复杂海洋层化结构的 HLGN/CFD 混合方法，实现了多层、多模态内孤立波的精确计算，建立了复杂海洋内波的统一分析框架，揭示了密度跃层对内波特性的水动力机制。**

基于海洋密度温度分层特性，建立了适用于复杂层化环境的内孤立波海洋模型，突破了传统内波理论分层、色散、非线性等方面的局限性，实现了任意连续分层、多模态、非定常海洋内波的精准建模。建立了内波理论与高保真数值水槽耦合方法，进一步提高了内孤立波的模拟精度，证明了势粘流混合方法的精度优势。基于线性长波速度、上下层流体密度与厚度比等特征参数，建立了复杂海洋内波的统一分析框架，揭示了密度分布对内波的水动力影响机制，突破了内波与其他流动的耦合分析方法，为内孤立波及波-流、波-体耦合等相关研究奠定了理论基础与计算框架。该项目为内孤立波撞击、追逐、波流耦合、波体耦合等复杂问题的进一步提供了重要理论支撑，并为潜航器、海洋结构物设计与安全作业提供了重要技术支持。

**(2) 建立了基于波致流场信息的内波智能探测方法，开发了由压力、壁面剪应力等多种流动传感器组成的流场探测装置，实现了内波探测平台传感器降维与布局优化。**

基于仿生流场探测原理，开发了由压力、壁面剪应力等多种流动传感器组成的流场探测装置，实现了微弱流动的高精度测量。构建了基于 CNN 的深度学习模型，引入了注意力机制来挖掘高维流场信息，实现了内孤立波特征参数的精准预测。基于动态模态分解与 k-均值聚类方法减少了传感器的数量并有效避免了噪声干扰，创造性地将贝叶斯优化方法嵌入到深度学习算法中，极大提高了关键区域的识别精度，有效增强了对流场信息的提取效果，首次实现了极少量传感器下水下航行体与海洋立管对内波环境动态、实时、准确的感知。该项克服了传统内波探测手段在准确度、实时性上的缺陷，为水下航行器在复杂内波环境中的安全航行提供了安全保障。

**(3) 提出了内波波浪力的数学模型，建立了海洋内波-水下航行体相互作用的实尺度、全过程、高精度的快速预报方法，首次揭示出航行体“掉深”是由于内波的“拖拽”作用。**

基于势粘流耦合算法和强流固耦合算法，模拟了真实海洋环境下内孤立波与航行体相互作用全过程，利用敏感性分析确定了描述水下航行体内波作用的关键参数，创建了基于潜航器的内波波浪力的数学模型，实现了水下航行体动力学模型与波浪力模型的耦合，填补了内波环境下航行体运动快速预报的空白，有效解决了传统预报方法存在的“效率低”的问题。给出了强分层和连续分层内孤立波对航行体运动及受载变化之间的特性差异，阐明了水下航行体运动响应与受载特性规律，首次揭示出航行体“掉深”是由于内波的“拖拽”作用，颠覆了传统观念中航行体穿越流体层引起浮力突变的“密度猜想”。该项目有效解决了传统预报方法存在的“效率低”的问题，对工程实际具有重要参考价值。

**(4) 构建了数值仿真与控制算法深度耦合的运动响应反馈系统，实现了关键受力信息的实时采集、控制器输出的动态修正，提出了适用于海洋内波影响的综合控制策略，给出了危险状态下航行体的安全操纵策略。**

基于高精度的数值仿真和先进的控制算法，形成了一个基于仿真数据的运动响应反馈控制系统，为动态环境下的精确控制提供了强有力的技术支持。基于构建的“CFD+控制”耦合算法，实现了复杂流动场景下水下航行体姿态、航向和速度的快速动态调整，系统开展了航行体在典型内孤立波参数下的姿态操控研究，提出了适用于海洋内波影响的综合控制策略，提高了航行体的操纵性和稳定性，有效解决了在海洋内波动态变化中航行体掉深控制的快速实时响应难题。该项目提出的综合控制策略显著提升了航行体在内波作用下的操纵性与稳定性，为航行体在海洋内波作用下的安全操控提供了科学依据和技术支持。

项目累计授权发明专利 18 项、受理发明专利 9 项，登记软件著作权 12 项。在国内外刊物上发表学术论文 46 篇（ESI 高被引论文 3 篇），出版英文专著 1 部、中文专著 1 部、国家级规划教材 1 部。培养国家级领军人才 1 人次，陕西省青年科技新星 2 人次，陕西省高校科协青托 2 人次，陕西高校优秀青年人才 1 人次等。获中国国际大学生创新大赛全国金奖、中国造船工程学会优秀学术论文、中船集团逐梦深蓝科创大赛三等奖等奖项。

## 四、客观评价

围绕海洋内波水动力效应方向,本项目面向水下航行器在内波环境中面临的挑战,通过理论创新与技术突破的有机结合,本项目有效解决了水下航行器在内波环境中的重大技术难题,为内波环境中的航行安全、性能优化及应用推广奠定了坚实基础,同时为相关领域提供了全新的研究思路与技术路径。项目研究成果得到国内外同行的广泛关注和高度评价。

(1)中国科学院院士、国家杰出青年科学基金获得者、何梁何利科技进步奖获得者哈尔滨工业大学李惠教授发表在 *Physics of Fluids* (2023)的论文中积极评价了该项目建立的近壁面速度场的预测方法:“Zhang 等创新的提出了一个 CNN 模型利用壁面受限湍流的缺失信息重建速度场”。

(2) *Ocean Engineering* 荣誉主编、英国皇家造船师协会(RINA)会员、前纽卡斯尔大学海洋科学与技术学院创始院长、思克莱德大学副校长 Atilla Incecik 教授对本项目提出的数值模型高度认可,在其发表在 *Applied Ocean Research* (2022)的论文中采用了该项目提出的验证方法对数值模型进行验证,并重点给出了论述:“为确保航行体水动力特性不会使结果偏离不可接受的裕度,进行了确认和验证研究。验证了数值模型的正确性,保证了计算误差是可以容忍的(Du et al., 2020)”。

(3)上海东方学者(跟踪计划)特聘教授、国家重点研发计划首席科学家、国际海洋与极地工程学会(ISOPE)水动力学委员会主席上海交通大学万德成教授发表在 *Physics of Fluids* (2024)的文章中引用了该项目关于波体耦合作用的研究成果,并积极评价了该项目工作:“Cheng 等(2024)研究了大规模连续分层的内部孤立波和运动航行器之间的相互作用,可为航行器的安全操控提供理论指导”。

(4) *Ocean Engineering* 主编、国际海洋技术专家、瑞典查尔姆斯理工大学机械与海事科学系海洋技术研究所 Jonas Ringsberg 教授发表在 *Ocean Engineering* (2023)的论文中,8次引用了该项目关于波-体相互作用的实尺度、全过程数值模拟研究的成果:“Mucha 等(2018)和 Du 等(2020)同样观察到,当距离航行器与波之间的相对距离  $d$  从大约  $2.5 B$  减小到  $1.0 B$  时,会发生明显的阻力变化”,并积极评价了该项目工作:“Du 等(2021)分析了航行器通过波谷时的非定常水动力行为,通过 CFD 计算的阻力和航行器的运动响应与实验结果吻合较好”。同时,2次直接引用了该项目的测量结果作为标准进行对比验证:“来自 Linde 等(2017)、Mucha 等(2018)和 Du 等(2020)关于波体相互作用的研究结果总结于图 4 中”。

(5) *Ship Technology Research* 编辑、德国杜伊斯堡-埃森大学船海工程研究所所长 Ould el Moctar 教授发表在在 *Applied Ocean Research* (2022)的论文中,引用了该项目关于波浪演化预测的研究成果,并积极评价了项目工作:“Du 等(2020)利用 CFD 方法预测了不同波体相互作用在受限水域产生的波浪,研究了水波之间的相干效应,并利用该方法对波浪演化进行了精准预测”。

(6) 国际工程软件专家、安徽省大型工程软件研究中心主任、中国科学技

术大学石油与天然气研究中心主任以及工程科学软件研究所所长卢德唐教授发表在 *Physics of Fluids* (2022) 的文章中，引用了该项目提出的基于机器学习的内波流场智能探测方法，积极评价了项目的工作：“Zhang 等（2022）提出了一种水动力人工智能检测方法来确定水下航行器与内部孤立波之间的相对位置，结果表明，内部孤立波的位置预测精度在 95% 以上”。

（7）Applied Ocean Research 编辑、华中科技大学船海工程学院副院长向先波教授发表在 *Ocean Engineering* (2023) 的文章中高度肯定了本项目提出的流场智能探测方法：“人工智能和机器学习技术已被应用于海洋工程领域。例如，利用机器学习建立了基于流场的水下感知与目标探测方法(Du et al., 2023)”。

（8）意大利顶尖的工程学家之一、意大利国家物理学研究中心(CNR-INM)首席研究员 Andrea Colagrossi 发表在 *Physics of Fluids* (2023) 的论中，引用了该项目关于高精度波体相互作用数值模型的研究成果，并积极评价了我们的工作：“他们开发的强流固耦合算法能够有效处理波体相互作用问题<sup>28-30</sup>”。

（9）玛丽·居里奖学金获得者、德国不伦瑞克工业大学海岸研究中心主任 Nils Goseberg 教授发表在 *Ocean Engineering* (2022) 的文章中，引用了该项目提出的高保真数值模拟方法的研究成果，并积极评价了申请人的工作：“基于 Reynolds-Average Navier-Stokes 方程(RANS)预测航行体-水波相互作用参数的高保真计算流体动力学(CFD)方法在行业内已经被广泛采用(Du et al., 2021)”。

（10）中国人民解放军总装备部水动力学专家组专家，海军预研专家组专家、中国人民解放军海军研究院研究员马骋认为申请人建立的海洋内波中水下航行器运动性能的数值计算方法达到了较高的技术指标，该方法有望在水下航行器水动力和运动预报方面得到应用，提出的操纵控制策略可谓内波条件下航行器的安全操纵提供参考。

（11）肯尼斯·戴维森奖获得者、韩国首尔国立大学(SNU)海洋工程系的主任 Yonghwan Kim 教授发表在 *Applied Ocean Research* (2022) 的文章中积极评价了该项目所建立的航行器多自由度操纵模型的研究成果：“Du 等（2022）建立了计及舵、桨等附体的航行器多自由度操纵运动模型，并成功地基于模型试验精准预测了航行器的操纵运动”。

## 五、应用情况

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人
1	中国船舶重工集团第七〇五研究所	水下运动平台智能流场感知方法	水下运动平台智能流场感知	2020. 8-至今	陈少强
2	中国船舶重工集团第七一三研究所	复杂流动环境下流固耦合作用高保真预报方法	水下航行体运动全过程预报、全场景水下航行器精细流场数值模拟软件	2019. 3-至今	李广华
3	西安天和海防智能科技有限公司	水下运动平台智能流场感知方法	水下航行器和水下采集系统	2020. 9-至今	陈建峰
4	西安流固动力科技有限公司	复杂流动环境下流固耦合作用高保真预报方法	CFD 分析软件中流固耦合高精度高效数值模拟	2020. 9-至今	董素艳
5	陕西欧卡电子智能科技有限公司	复杂流动环境下流固耦合作用高保真预报方法	Titan 无人驾驶清洁船系列产品的性能评估和优化设计	2021. 3-至今	虞梦苓
6	广东贝达海洋科学有限公司	基于波致流场信息的内波智能探测方法	内孤立波浮标监测系统、深海采矿内孤立波预警、海洋水文环境调查	2021. 3-至今	刘丁
7	广州海洋地质调查	水流场阵列式感知与流场目	多模态内孤立波的高精度模拟、海洋	2020. 6-至今	许安迪

	局	标信息还原等 系列关键技术、水动力快速预报方法	内孤立波预警、水下平台及潜体实时监测分析		
8	磐索地勘科技(广州)有限公司	海洋内波高精度建模与超前感知技术	南海北部某海域井场调查项目	2021. 10-至今	梁宝莹
9	青岛圣蓝科技有限公司	基于势粘流耦合的 HLGN/CFD 方法	海洋内波智能监测装备的研制	2020. 4-至今	李有桢
10	中国地质大学	海洋内波高精度建模与超前感知技术	构建海洋内波智能识别预警模型、监测南海某重点海域的内波行为	2022. 3-至今	陈伟涛

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

（应填写直接支持本项目主要技术发明成立且已批准或授权的知识产权（包括发明专利、实用新型专利、植物新品种权、计算机软件著作权、集成电路布图设计权、论文等）和标准规范等，应按与项目主要科技创新的密切程度排序。

对于发明专利，知识产权类别写发明专利，然后依次填写发明名称，国家（地区），专利号，授权公告日，专利证书上的证书号，发明人，专利权人。对于其他类型，根据实际情况填写相应栏目，发明人一栏可不填。

所列知识产权应为本项目独有，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖推荐项目中作为支撑材料出现。用于推荐陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的权利人（专利指发明人）的同意。

所列专利证书颁发日期、标准规范发布日期、论文发表日期应在 2024 年 12 月 31 日之前。发明人均不是项目主要完成人的发明专利，不得列入本表。）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家 (地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种基于机器学习的水下传感器输出信号降噪方法及系统	中国	ZL20241039199 1.4	2024-06-07	7080158	西北工业大学	杜鹏;魏洪壮;胡海豹;陈效鹏;闫海震;谢络;文俊;黄潇;程路;杨洋
2	发明专利	一种基于航行体水动力计算内波传播速度的方法、系统、设备及介质	中国	ZL20241045475 1.4	2024-07-02	7161983	西北工业大学	杜鹏;鲁浩辰;胡海豹;陈效鹏;文俊;谢络;黄潇;包艺;杨洋



3	发明专利	一种基于主动控制振动翼板的海洋内波消波方法	中国	ZL20211151457 0.9	2023-06-30	6103066	西北工业大学	杜鹏;刘苏阳;胡海豹;李卓越;汪超;张淼;程路;赵森
4	发明专利	介电弹性体的零质量射流驱动器及水下航行器控制方法	中国	ZL20211151755 8.3	2023-10-27	6437249	西北工业大学	杜鹏;刘苏阳;胡海豹;陈效鹏;李卓越;邢丞铭;宋健;汪超;张淼
5	发明专利	一种内波影响下航行体姿态的修正方法	中国	ZL20221110871 0.7	2024-10-29	7481265	西北工业大学	杜鹏;程路;胡海豹;汪超;张淼;李卓越;唐子建;赵森;陈效鹏
6	发明专利	一种基于卷积神经网络的PIV流场数据补缺方法	中国	ZL20221052211 5.1	2024-09-06	7346584	西北工业大学	胡海豹;张帆;任峰;陈效鹏;杜鹏;黄潇;文俊;谢络;郑美云
7	发明专利	一种内波中水下固定平台的受力预报方法及系统	中国	ZL20241077871 9.1	2024-08-20	7299333	西北工业大学	胡海豹; 张淼;杜鹏;陈效鹏;黄潇;谢络;文俊

8	发明专利	一种海洋孤立内波预警强度校正方法	中国	ZL20201164537 3.6	2021-11-30	4821222	海洋地质调查局，广东贝达海洋科学有限公司，南京信息工程大学	郭斌斌; 梁前勇; 葡飞龙; 崔子健; 刘丁; 梁楚进; 董一飞; 苏丹仪; 晏力争
9	软件著作权	基于真实数据驱动的内波模拟软件 V1.0	中国	2022SR0971563	2022-04-02	11212425	西北工业大学	杜鹏;曾谭;胡海豹;陈效鹏;李卓越;汪超;张淼;程路;唐子建
10	软件著作权	水下航行器自主航行系统 V1.0	中国	2022SR0692397	2022-03-21	10845395	西北工业大学	杜鹏;刘苏阳;文俊;黄潇;谢络;胡海豹;陈效鹏

## 七、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
杜鹏	1	校科协副秘书长	副教授	西北工业大学	西北工业大学	建立了基于势粘流耦合计算思想的HLGN/CFD (High Level Green-Naghdi / Computational Fluid Dynamics) 混合方法, 实现了任意连续分层、多模态、非定常海洋内波的精准建模, 建立了任意密度分布内孤立波分析框架, 揭示了密度分布对内波的水动力影响机制, 突破了内波与其他流动的耦合分析方法; 发展了基于波致流场信息的内波智能探测方法, 实现了内波探测平台传感器降维与布局优化; 建立了海洋内波-水下航行体相互作用的实尺度、全过程、高精度预报方法。
胡海豹	2	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	研究了真实海洋环境下内孤立波与航行体相互作用过程, 给出了潜深、波幅两个关键参数对航行体运动响应及其载荷特性的影响规律, 建立了内波波浪力模型, 实现了水下航行体动力学模型与波浪力模型的耦合, 形成了海洋内波-水下航行体相互作用的实尺度、全过程、高精度的快速预报方法。给出了强分层和连续分层内孤立波对

						航行体运动及受载变化之间的特性差异，阐明了水下航行体运动响应与受载特性规律。
梁前勇	3	主任（正处级）	正高级工程师	广州海洋地质调查局	广州海洋地质调查局	建立了水下航行器与内波相互作用的数值模拟方法，实现了航行器在内波流场中的自由运动。基于仿生流场探测原理，构建了由压力、壁面剪应力等多种流动传感器组成的流场探测装置，实现了微弱流动的精确测量。
郭斌斌	4	无	高级工程师	广州海洋地质调查局	广州海洋地质调查局	建立了海洋内波探测平台，设计了由水下航行体搭载的流场探测装置，提出了一种基于深度学习网络预测结果的传感器优化算法，实现了水下航行器与内波之间的相对位置与内波波幅的精准预测。
文俊	5	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	基于势粘流耦合算法和强流固耦合算法对真实海洋环境下内孤立波与航行体相互作用全过程进行了数值模拟，提高了波体耦合作用的精度，阐明了波体耦合作用的机理；通过对实尺度、多工况下内孤立波与航行体的非线性波体耦合过程进行了研究，获得了潜深、波幅对航行体多自由度运动及载荷特性的影响规律。
黄潇	6	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	基于传统的 PID 控制策略及 S 面控制策略，采用理论调参的方式选取较优

						控制参数，通过在 CFD 仿真过程中引入先进的控制算法，实现了 CFD 仿真与控制算法的深度耦合，形成了一个基于仿真数据的运动响应反馈控制系统。
谢络	7	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	构建了基于 CNN 的深度学习模型，实现理想条件下内孤立波特征参数的预测，并建立性能评估参数对预测精度进行定量化评价；提出了海洋内波-水下航行体相互作用的实尺度、全过程、高精度预报方法。
陈效鹏	8	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	研究了密度强分层、连续分层内孤立波环境下的波体相互作用，揭示了潜深、波幅和航速三个关键参数对航行体运动响应及其载荷特性的影响机理，比较了强分层和连续分层内孤立波对航行体运动及受载变化的不同之处。参与了基于机器学习的内波流场智能探测方法研究。
李卓越	9	无	无	西北工业大学	西北工业大学	建立了适用于多层流体系统的 HLGN 计算方法。基于势流理论，忽略流体的压缩性、粘性和表面张力，建立了适用于复杂层化环境的内孤立波海洋模型，克服了典型内孤立波在色散、非线性方面的限制，实现了多层、多模态内孤立波的精确计算；基于线性长波速

						度、上下层流体密度与厚度比等特征参数，建立了复杂海洋内波的统一分析方法。
程路	10	无	无	西北工业大学	西北工业大学	基于不同分层模型的内孤立波理论进行了波体相互作用的数值模拟研究，分析航行体的纵荡、垂荡，结合所受的水平力、垂向力和俯仰力矩变化，阐明了内孤立波对航行体的影响规律；参与了“CFD+控制”耦合算法的构建，系统开展了水下航行体在不同潜深、不同波幅的典型内孤立波海洋环境下的姿态操控研究，阐明了控制前后航行体水动力及运动响应的差异，提出了适用于海洋内波影响的综合控制策略。

八、主要完成单位情况及创新推广贡献

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献 (限 600 字)
西北工业大学	1	作为第一完成单位，负责本项目的研究内容制定、研究路线规划和项目实施，为本项目的成功开展提供了必要的人力资源和仿真计算平台，主要发现和创新体现在：提出了计及海洋层化结构和流体粘性效应的 HLGN/CFD (High Level Green-Naghdi / Computational Fluid Dynamics) 混合方法，实现了任意连续分层、多模态、非定常海洋内波的精准建模，揭示了密度分布对海洋内波的作用机制。建立了一种基于流场信息的内波智能探测方法，开发了基于极少量传感器的动态、实时、准确的内波环境感知技术。建立了海洋内波-水下航行体相互作用的实尺度、全过程、高精度预报方法，揭示出航行体“掉深”是由于内波的“拖拽”作用。形成了海洋内波影响下的航行体优化控制策略，提高了航行体的操纵性和稳定性。通过项目的实施，打造了一支优秀的科研队伍，培养了一批卓越的科研人才，有力推进了水下航行体内波危害的行业难题的解决。
广州海洋地质调查局	2	作为第二完成单位，负责本项目实验系统的设计、搭建、测试与应用，为本项目的成功开展提供了必要的人力资源和实验平台，主要发现和创新点体现在：设计搭建了基于机器学习的海洋内波探测系统，通过系统测试，为装置优化提供了重要支撑。协调有关职能部门和相关人员，顺利完成了海洋内波探测系统的多项工业化试验和技术推广。

九、完成人合作关系说明

西北工业大学杜鹏、胡海豹、文俊、黄潇、谢络、陈效鹏、李卓越、程路与广州海洋地质调查局郭斌斌、梁前勇长期围绕水下航行体的海洋内波水动力效应方向，进行内孤立波理论建模、环境探测感知、波体耦合作用预报、航行体扰动控制等方面的合作研究，具体如下：

- (1) 与胡海豹共同指导博士生李卓越，开展海洋内波高精度建模以及水下流场智能探测感知相关方面的研究工作；
- (2) 与郭斌斌、梁前勇开展复杂海洋流场智能探测以及波体耦合作用预报的研究工作；
- (3) 与文俊、黄潇、谢络、陈效鹏合作开展内波理论建模验证、内波环境动态、实时感知、传感器降维及布局优化、波体耦合作用机理、水动力快速预报、

航行体运动姿态修正控制相关方面的研究工作。

(4) 直接指导博士生程路，开展波体耦合作用分析、波致掉深机理揭示、波体耦合作用快速预报方法、航行体掉深控制的快速实时响应相关方面的研究工作。