

2025 年度拟提名陕西省技术发明奖项目公示内容

一、项目名称

水下电磁信息跨介质无线传输技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：该成果创建了水下电磁信息跨介质无线传输技术。提出了复杂海洋环境中电磁波传播建模与求解技术，揭示了复杂海洋环境中水下电磁波跨介质传播规律和环境影响机制；提出了水下电磁波跨介质传输技术，实现了水下信息跨海面隐蔽无线传输，突破了小发射功率下公里级的水下信息跨介质无线传输能力；提出了水下目标电/磁场信号高性能检测技术，大幅提升了水下目标电磁探测概率。研究成果选题准确，研究起点高，技术上有创新，已授权发明专利 34 项，发表论文 26 篇（SCI 收录 12 篇）。研究成果已应用到中船集团第七一〇研究所、第七一五研究所、第七二二研究所、中国科学院上海硅酸盐研究所等多家单位的关键系统和重要项目中，解决了海洋电磁场计算、水下目标探测、航空磁异常探测、跨介质通信等领域的多项技术难题，取得了显著的社会效益。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议。符合陕西省技术发明奖提名条件。特提名为陕西省技术发明奖二等奖。

三、项目简介

该项目属于电子信息、水下目标探测、海洋信息传输等领域的前沿研究内容，可应用于水下信息跨介质传输和水下目标电/磁探测等多个技术领域。

水下探测是保障“水下国门”安全的重要手段。为应对水下目标声隐身技术发展对水声探测带来的挑战，亟需发展非声探测技术。水下目标磁场和电场探测是非声探测发展的重点和热点。目前，单一介质中单节点电/磁探测作用距离近，难以满足远程探测需求。因此，在发展单节点电/磁探测技术的同时，亟需创新探测模式，充分利用水下电磁波跨越海空界面传播的特性和优势，突破水下探测信息跨介质隐蔽无线传输技术，进而将水下电/磁探测节点与海面上方探测节点有效联通，**形成跨域协同电磁探测网络，大幅提升电/磁探测识别能力。**

该成果在国家自然科学基金、陕西省自然科学基金计划项目等支持下，历经近十年潜心研究，在水下目标电磁探测和水下信息跨介质无线传输两方面的基础理论、关键技术和实际应用方面取得了突破，发明了复杂海洋环境中电磁波传播建模与求解技术，解决了任意空间电磁场幅度和相位快速精确求解的难题，发明了水下电磁波跨介质传输技术，实现了水下信息跨海面隐蔽无线传输，发明了水下目标电/磁场信号高性能检测技术，大幅提升了水下目标电磁探测概率。主要发明点如下：

1. 发明了复杂海洋环境中电磁波传播建模与求解技术，解决了任意空间电磁场幅度和相位快速精确求解的难题

针对传统方法在计算海洋分层介质中辐射源层电磁场时效率低下的问题，提出了一种“辐射源层初始场+界面反射二次场”的高效建模求解方法，在保证计算精度的同时模型求解的计算效能提高 10 倍以上。进一步，根据海水电导率与介电常数垂向变化显著的特性，建立了海底-多层海水-空气构成的 N 层介质中电磁波传播模型，提出了局部坐标系下的直接全局矩阵法，该模型在非均匀海水条件下的计算偏差相较理想模型的 9 dB 降低至 0.26 dB，显著提升了电磁场求解精度。最后，基于 TMA 谱和蒙特卡洛方法构建了随机海面起伏模型，并在此基础建立了海浪条件下水下电磁波跨介质传播模型，具备了任意风速和海况等级下电磁场精确求解的能力。利用所构建的电磁波传播模型，融合世界海洋数据库 (WOD) 和团队海试观测数据，获得了复杂海洋环境中水下电磁波跨介质传播的时空频分布规律和环境影响机制：海水电导率的垂向变化对跨介质电磁场幅度影响超过 3 dB，且大部分区域中电磁场强度和相位随深度增加呈负梯度变化；不同海况下海浪的有效波高和接收位置处的瞬时波高对跨介质电磁场影响较大，超过 95% 的区域电磁场强度与相位偏离量呈现零均值正态分布特性。在中科院上海硅酸盐研究所承担的国家重点研发专项中应用，支撑了项目的顺利开展。

2. 发明了水下电磁波跨介质传输技术，实现了水下信息跨海面隐蔽无线传输

信道特性决定了跨介质通信系统的性能指标、数据传输的可靠性和高效性。构建了基于电磁波的水下信息跨介质无线传输链路损耗模型和信道模型，实现了信道与环境 and 通信系统参数的显式表征，揭示了跨介质信道特性与频率和海水电磁参数的非线性耦合特性；提出了基于递归最小二乘理论的自适应信道估计方法，计算复杂度降低 1 个数量级，同时提升了数据传输质量。提出与水下电磁波跨介质信道适配的 EBPSK+LDPC-RS 调制编码技术，提升了通信性能；研制成功水下小型化低频电磁发射天线和高性能通信系统。在水下信息跨介质无线传输的海上实验中，在有效发射功率低于 50 W、收发节点深度大于 7 m 时，水平传输距离突破了 1.3 km（数据传输速率高于 300 bps）；利用所提信道估计算法，误码率降低 21%。在中船七二二研究所水下信息跨介质通信系统中应用，大大提高了信号传输特性评估的准确性。

3. 发明了水下目标电/磁场信号高性能检测技术，提升了水下目标电磁探测概率

构建了包括水下目标磁异常场、轴频电磁场和尾流电磁场在内的目标综合电磁场模型，获得了综合电磁场的时空频分布特性，揭示了海洋环境和目标运动参数对电磁场分布的影响机制，为后续信号检测算法性能提升和平台探测模式优化提供了技术支撑。水下目标微弱电/磁信号检测方法是电/磁探测技术的核心，提出了基于递推最小二乘法的改进磁干扰系数求解技术，在中船七一五

研究所海上测量系统应用表明磁干扰补偿改善比达到 30；提出了预处理和正交基函数匹配相结合的高性能磁信号检测方法，在中船七一〇研究所某作战系统应用表明检测率平均提升 9%；提出了一种基于“优先检测与选择性增强”原则的电场信号检测方法，在-16dB 信噪比条件下，与常规方法相比，所提方法的检测率提升 42%。

该项目提出了水下电磁信息跨介质无线传输技术，解决了跨域协同电磁探测网络中的关键技术问题，为未来水下目标电磁探测中“探的远”和“易协同”奠定了坚实的理论和技術基础。该项目共授权发明专利 34 项 实用新型专利 7 项，登记软件著作权 8 项，发表高水平学术论文 26 篇，包括国际电磁领域顶尖期刊 IEEE Transactions on Antennas and Propagation，中国工程院院刊 ENGINEERING（2020，SCI IF=12.8）等 SCI 检索论文 12 篇。

研究成果应用到中国船舶集团有限公司第七一〇、第七一五和第七二二研究所、中国科学院上海硅酸盐研究所等多家单位的关键系统和重要项目中，解决了海洋电磁场计算、水下目标探测、航空磁异常探测、跨介质通信等领域的多项技术难题；成果分别应用到中国船舶集团有限公司第七〇二和第七二二研究所两家单位合作项目中，解决了项目中的核心技术难题，两家应用单位对相关工作的评价均为“优”；成果应用于海军“金海豚”杯水声目标智能识别算法挑战赛并获一等奖（磁探测科目）。

主要成果获得了 2025 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等。

四、客观评价

1. 学术评价

该项目发表高水平学术论文 26 篇，包括国际电磁领域顶尖期刊 IEEE Transactions on Antennas and Propagation，中国工程院院刊 ENGINEERING（2020，SCI IF=12.8）等 SCI 检索论文 12 篇。该项目成果受到了国内外多位知名专家学者的引用和正面评价。其中典型评价如下：

（1）电磁场与天线领域知名专家、上海交通大学金荣洪教授（IEEE Fellow、中国电子学会会士）团队在国际电磁领域顶级期刊 IEEE Trans. Antennas Propag. 上发表的学术论文中对本成果中所提出的电磁波跨介质传播模型及求解方法进行了引用，并将其拓展到水下机械天线辐射特性的研究中。（IEEE Trans. Antennas Propag., 2023, 71(3): 2082-2095）

（2）山东科技大学罗汉江教授联合深圳大学伍楷舜教授（IEEE Fellow、IET Fellow）等人在撰写的利用跨介质通信手段实现水下传感器网络的综述文章中，大篇幅引用了本成果中的多项研究内容，并将其作为电磁波跨海水-空气界面通信领域的最新研究进展之一。（IEEE Sens. J., 2022, 22(9): 8360-8382）

（3）英国南威尔士大学 Jonathan Rodriguez 教授（IET Fellow）等人针对本成果中提出的电磁波跨介质传播应用场景，开展了海水等各向异性介质中

印刷偶极子天线的阻抗特性与互耦效应的精确建模与系统分析，对水下偶极子天线辐射性能的评估具有重要意义。（IEEE Access, 2021(9): 84910-84921）

（4）海军工程大学谢慧教授（低频电磁波传播和水下电磁场研究领域知名专家）团队引用了本成果中构建的水下电磁波跨介质传播模型，并将其应用于评估海水-空气界面处极低频电偶极子天线辐射性能的研究中。（Electronics, 2023, 12(19): 4165）

（5）浙江大学金晓峰教授团队在国际电磁领域顶级期刊 IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 上发表的论文中引用了本成果中提出的电磁波跨介质传播模型，并将其应用于近海面水下磁偶极子辐射低频侧面波的近似公式求解中。（IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., 2023, 23(2): 708-712）

（6）西班牙马德里理工大学的知名教授 Santiago Zazo 等人在研究水下电磁传感器网络（Underwater Electromagnetic Sensor Networks）时，将本成果中水下磁偶极子天线辐射电磁波跨介质传播的结果和结论作为基准，与其实验结果进行比较，两者具有良好的一致性。（Sensors, 2017, 17(1): 189）

（7）西班牙萨拉戈萨大学的知名教授 José Luis Villarroel 团队提出了一种求解三层介质模型中电磁场的新算法，并在算法验证阶段使用本成果中的模型示例和计算结果作为评估算法准确性的重要参考依据。（Radio Sci., 2019, 54(9): 822-838）

2. 用户评价

用户群主要分布在行业相关的科研院所，他们对该项目提出的技术均有很好的评价。典型评价如下：

中国船舶集团有限公司第七一〇研究所评价：“我单位将西北工业大学发明的磁信号检测技术应用于水下目标磁探测系统中，在典型场景下，可支持低信噪比下磁异常信号的检测和分析，相比传统方法，检测率平均提高了 9%。该技术提高了水下目标磁探测应用中低信噪比下的检测率，为水下作战系统的实际应用提供了技术支撑。”

中国船舶集团有限公司第七一五研究所评价：“我单位将西北工业大学发明的磁干扰补偿技术应用于海上测量系统中，在典型航空磁异常探测场景下，通过该技术实现了对测量数据的有效处理，补偿改善比达到 30，大大提高了航空平台磁干扰补偿效果，有力支撑了航空磁异常数据的分析和目标信号的检测。西北工业大学发明的磁干扰补偿技术，提高了水下目标磁探测应用中平台磁干扰补偿效果，为提升水下目标航空磁异常探测性能提供了重要技术支撑。”

中国船舶集团有限公司第七二二研究所评价：“我单位将该技术应用于水下信息跨介质通信系统中，在跨介质电磁信号传输场景下，可支持跨介质电磁信号传播特性分析，计算范围可达上千公里，同时跨介质电磁场的计算结果精确，大大提高了信号传输特性评估的准确性，有力支撑了关键技术的突破和指标的可达性分析。”

中国科学院上海硅酸盐研究所评价：“该技术应用于本单位执行的国家重点

研发专项《磁电型弱磁探测传感器研制》(编号 2021YFB3203002)中,为本单位高性能磁电耦合型弱磁传感器对海洋矿产资源探测的磁性目标的定位、识别、反演等信号处理方式,提供了有力支持,支撑了项目的顺利开展。”

五、应用情况和效益

1. 应用情况

该项目研究形成的关键技术已应用于中国船舶集团有限公司第七一〇研究所水下目标磁探测系统中,提高了水下目标磁探测应用中低信噪比下的检测率,为水下作战系统的实际应用提供了技术支撑;已应用于中国船舶集团有限公司第七一五研究所海上测量系统中,大大提高了航空平台磁干扰补偿效果,有力支撑了航空磁探测数据的分析和目标信号的检测;已应用于中国船舶集团有限公司第七二二研究所水下信息跨介质通信系统中,大大提高了信号传输特性评估的准确性,有力支撑了关键技术的突破和指标的可达性分析;已应用于中国科学院上海硅酸盐研究所重点研发项目研究中磁性目标的定位、识别、反演等信号处理,有力支撑了项目的顺利开展。

主要应用单位情况如下:

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	中国船舶集团有限公司第七一〇研究所	磁信号检测技术	应用于水下目标磁探测系统	2022 年 08 月 01 日-2024 年 09 月 30 日	宋新昌
2	中国船舶集团有限公司第七一五研究所	磁干扰补偿技术	应用于海上测量系统	2023 年 03 月 01 日-至今	丁立超
3	中国船舶集团有限公司第七二二研究所	水下电磁信息跨介质无线传输技术	应用于水下信息跨介质通信系统	2019 年 12 月 01 日-2023 年 03 月 31 日	赵锦波
4	中国科学院上海硅酸盐研究所	水下电磁波跨介质传播建模与求解技术	应用于国家重点研发项目《磁电型弱磁探测传感器研制》	2021 年 12 月 -2024 年 11 月	狄文宁

2. 应用效益

(1) 应用于磁探装备研制主要工业部门,提升水下目标磁探测能力

中国船舶集团有限公司第七一五研究所将该项目发明的磁干扰补偿技术成

功应用于海上测量系统中，在典型航空磁异常探测场景下，通过该技术实现了对测量数据的有效处理，补偿改善比达到 30，大大提高了航空平台磁干扰补偿效果，有力支撑了航空磁异常数据的分析和目标信号的检测。西北工业大学发明的磁干扰补偿技术，提高了水下目标磁探测应用中平台磁干扰补偿效果，为提升水下目标航空磁异常探测性能提供了重要技术支撑。

中国船舶集团有限公司第七一〇研究所将该项目发明的磁信号检测技术成功应用于水下目标磁探测系统中，典型场景下，可支持低信噪比下磁异常信号的检测和分析，相比传统方法，检测率平均提高了 9%。该技术提高了水下目标磁探测应用中低信噪比下的检测率，为水下作战系统的实际应用提供了技术支撑。

该项目提出的磁干扰补偿技术和磁信号检测技术应用于海军第二届“金海豚”杯水声目标智能识别算法挑战赛并获一等奖（磁探测科目）。

（2）应用于海洋通信装备研制主要工业部门，推动水下通信技术的发展

中国船舶集团有限公司第七二二研究所将该项目发明的水下电磁信息跨介质无线传输技术应用于水下信息跨介质通信系统中，在跨介质电磁信号传输场景下，可支持跨介质电磁信号传播特性分析，计算范围可达上千公里，同时跨介质电磁场的计算结果精确，大大提高了信号传输特性评估的准确性，有力支撑了关键技术的突破和指标的可达性分析。

（3）应用于先进电磁传感器材料研制部门和其他相关工业部门，支撑水下高性能电磁传感器研制技术的突破以及相关项目的实施

中国科学院上海硅酸盐研究所将该项目发明的水下电磁波跨介质传播建模与求解技术应用于国家重点研发专项《磁电型弱磁探测传感器研制》（编号 2021YFB3203002）中，为该单位高性能磁电耦合型弱磁传感器对海洋矿产资源探测的磁性目标的定位、识别、反演等信号处理方式，提供了有力支持，支撑了项目的顺利开展。

该项目发明的复杂海洋环境中水下电磁波跨介质传播建模与求解技术，应用于中国船舶集团有限公司第七〇二所委托项目“复杂水文条件下电磁波跨空气-海水界面传播特性研究”，解决了复杂海洋环境（1~7 级海况）中低频电磁波跨介质传播幅度和相位的计算与分析，项目验收组综合评价等级为“A 优”；还应用于中国船舶集团有限公司第七二二所委托项目“海底地壳大深度电磁波传播技术”，解决了复杂海底分层结构下低频电磁波传播特性的分析和性能评估，项目验收组综合评价等级为“优”。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

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	一种海洋多层介质中电磁波传播时电磁场的建模方法	中国	ZL202210016683.4	2024 年 03 月 01 日	6754789	西北工业大学	王宏磊, 杨益新
2	发明专利	一种跨海水-空气界面的电磁波传输系统及方法	中国	ZL201510010473.4	2017 年 08 月 01 日	2572798	西北工业大学	杨坤德, 王宏磊, 郑琨, 马远良
3	发明专利	一种空中移动平台与水下平台之间的数据传输方法	中国	ZL201910471839.6	2021 年 11 月 19 日	4800377	西北工业大学	王宏磊, 杨坤德, 任英达
4	发明专利	一种基于电磁波的海底预置无人系统远程激活方法	中国	ZL202210551707.6	2023 年 12 月 22 日	6577849	西北工业大学	王宏磊, 杨益新
5	发明专利	一种用于水声信道估计的自适应滤波方法	中国	ZL202411249109.9	2024 年 12 月 03 日	7574436	西北工业大学	王宏磊, 杨惠中, 杨益新
6	发明专利	一种跨冰层数据无线传输的方法	中国	ZL201910470496.1	2021 年 11 月 23 日	4809885	西北工业大学	王宏磊, 杨益新
7	发明专利	一种电磁波跨越海与空界面电磁场的获得方法	中国	ZL201510096415.8	2017 年 10 月 27 日	2670243	西北工业大学	杨坤德, 王宏磊, 郑琨, 马远良
8	发明专利	一种低频天线	中国	ZL201711428149.X	2020 年 04	3762425	中国船舶集团有	赵锦波、郑欢、刘

					月 21 日		限公司第七二二 研究所	庆、邓方顺、向 冰、罗成、杨淼、 王衡、程磊、赵小 波、宋超、邓珊
9	发明专利	基于旋转式机械天 线的发信系统及信 息加载方法	中国	ZL201911025042.X	2022 年 10 月 11 日	5503226	中国船舶集团有 限公司第七二二 研究所	赵锦波；郑欢；张 杨勇；查明；王琦 思；何杰；邓珊； 程磊；舒欣；杨洋
10	发明专利	一种自沉浮剖面浮 标控制电路及控制 方法	中国	ZL201910388709.6	2021 年 04 月 23 日	4375993	中国船舶集团有 限公司第七一五 研究所	熊育信,丁立超,颜 世龙,张君健,唐照 建

七、主要完成人情况（不超过 6 人）

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
王宏磊	1	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	<p>负责项目总体实施和关键技术攻关，设计整体技术路线并组织了多次外场实验，对项目第 1、2、3 发明点做出了实质性贡献。</p> <p>1. 创建了复杂海洋环境中水下电磁波跨介质传播模型（发明点 1）；</p> <p>2. 发明了水下电磁波跨介质传输技术，实现了水下信息跨海面隐蔽无线传输（发明点 2）；</p> <p>3. 提出了水下目标综合磁场模型，提出了磁干扰补偿改进方法、电磁信号检测方法（发明点 3）。</p>
任英达	2	无	无	汉江国家实验室	西北工业大学	<p>参加了项目理论模型的构建和关键技术攻关，并参与了多次外场实验，对项目第 1、2 发明点做出了实质性贡献。</p> <p>1. 参与创建了复杂海洋环境中水下电磁波跨介质传播模型，建立了海底-多层海水-空气构成的 N 层介质中电磁波传播模型，提出了局部坐标系下的直接全局矩阵法来求解该模型（发明点 1）；</p> <p>2. 构建了电磁波信号跨介质通信信道模型，获得了信道响应和路径损耗（发明点 2）。</p>

赵锦波	3	无	高级工程师	中国船舶集团有限公司第七二二研究所	中国船舶集团有限公司第七二二研究所	<p>参加了项目技术的应用研究,对项目第2发明点做出了实质性贡献。</p> <p>1. 参与设计了水下电磁波跨介质传输实验系统,参与了水下信息跨海面无线传输的应用和外场实验(发明点2)。</p>
丁立超	4	主任	研究员	中国船舶集团有限公司第七一五研究所	中国船舶集团有限公司第七一五研究所	<p>参加了项目技术的应用研究,对项目第3发明点做出了实质性贡献。</p> <p>1. 参与设计了水下目标磁探测实验系统,参与了磁异常探测的应用和外场实验(发明点3)。</p>

八、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	<p>制定项目总体规划和总体方案，领导关键技术攻关，设计组织了多次外场实验，对该成果第 1、2、3 发明点做出了实质性贡献。</p> <p>1. 发明了复杂海洋环境中电磁波传播建模与求解技术（发明点 1）；</p> <p>2. 发明了水下电磁波跨介质传输技术，实现了水下信息跨海面隐蔽无线传输（发明点 2）；</p> <p>3. 发明了水下目标电/磁场信号高性能检测技术，大幅提升了水下目标电磁探测概率（发明点 3）。</p> <p>西北工业大学作为该项目的完成单位，从各方面保障该成果所需的人力、物力，并与有关单位充分协调、密切合作，按时监督检查。学校科研院和财务部门相互配合，严格执行上级部门有关经费与科研管理规定，确保了成果的顺利完成。</p>
中国船舶集团有限公司第七二二研究所	2	<p>参与项目技术的应用研究，参与制定项目实验方案，实施了多次外场实验，对该成果第 2 发明点做出了实质性贡献。</p> <p>1. 参与设计了水下电磁波跨介质传输实验系统，参与了水下信息跨海面无线传输的应用和外场实验（发明点 2）。</p>
中国船舶集团有限公司第七一五研究所	3	<p>参与项目技术的应用研究，参与制定项目实验方案，实施了多次外场实验，对该成果第 3 发明点做出了实质性贡献。</p> <p>1. 参与设计了水下目标磁探测实验系统，参与了磁异常探测的应用和外场实验（发明点 3）。</p>

九、完成人合作关系说明

项目完成人通力合作，历经 10 余年合作研究，突破了水下电磁信息跨介质无线传输技术。

项目第 2 完成人任英达主要完成了复杂海洋环境中水下电磁波跨介质传播模型，参与本人主持的自然基金青年项目“近海底界面水下电磁波跨介质传播特性研究”、陕西省自然科学基金基础研究计划项目“极地海域水下电磁波信号跨界无线传输技术研究”、中国船舶集团有限公司第七〇二研究所委托项目“复杂水文条件下电磁波跨空气-海水界面传播特性研究”和中国船舶集团有限公司第七二

二研究所委托项目“海底地壳大深度电磁波传播技术研究”。与本人共同发表学术论文 7 篇，授权专利 3 项，登记软著 2 项。

项目第 3 完成人赵锦波主要完成了水下电磁波跨介质传输实验系统，完成了水下信息跨海面无线传输的应用和外场实验，本人发明的水下电磁信息跨介质无线传输技术应用于其承担的水下信息跨介质通信系统项目中。与本人共同完成中国船舶集团有限公司第七二二研究所委托项目“海底地壳大深度电磁波传播技术研究”。

项目第 4 完成人丁立超主要完成了水下目标磁探测实验系统，完成了磁异常探测的应用和外场实验，本人发明的磁干扰补偿技术应用于其承担的海上测量系统项目中。

承诺：本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。