

2026 年度拟提名陕西省技术发明奖项目公示内容

一、项目名称

致密气储层探测的地震信号智能稀疏表征算法体系与应用

二、提名者及提名意见

提名者：陈晓非，南方科技大学，教授，固体地球物理学

提名意见：苏里格气田是我国第一大气田，以致密气为主，但非平稳弱地震信号直接定量表征致密储层难度大。该项目围绕“如何实现致密气储层探测的地震信号高分辨智能稀疏表征”这一核心问题，创新性提出了非平稳地震信号的多维度、多机制的稀疏时频相空间系列变换及其智能化定量表征油气储层展布和物性的算法体系。该项目形成了由 15 项发明专利、3 项软件著作权和 66 篇原理性论文支撑的数学基础理论、地球物理机制与人工智能方法深度交叉的自主技术体系，具有系统性、独创性和领先性。原理性论文入选 ESI 前 1% 高被引论文、被国际著名科技机构 AIE 评为 1% 关键科学论文、被中信所评为 F5000 论文等。2015 年以来合作完成井位部署、水平井轨迹导向及开发决策等，揭示了致密气储层分布与产量间的幂指数关系，为苏里格气田勘探开发提供核心技术，经济效益巨大。

提名该项目为陕西省技术发明奖一等奖。

提名者：周军，中国石油集团测井有限公司，教授级高工，地球探测与信息技术

提名意见：致密气是全球重要的非常规天然气资源类型。中国致密气资源丰富，以鄂尔多斯盆地、四川盆地和准噶尔盆地为主，已成为中国天然气增储上产的重要组成部分。尤其是鄂尔多斯盆地苏里格致密气田，是我国第一大气田。但是中国致密气整体采收率与北美成熟区的差距显著，亟需持续提升 3000 米以深的致密气储层勘探开发能力。地震勘探是致密气储层探测的首要工具。然而，非平稳弱地震信号直接定量表征致密储层的难度大、直接服务于生产开发的精度不足。2015 年以来，西安交通大学与中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司等单位开展联合攻关，围绕“如何实现致密气储层探测的地震信号高分辨智能稀疏表征”这一核心问题，创新提出了非平稳弱地震信号多维度、多机制稀疏相空间系列变换及其智能化定量表征储层含气区展布和物性的算法体系。整体技术为苏里格致密气田井位部署、水平井轨迹导向及开发决策提供了系统性支撑，取得了巨大社会 and 经济效益。

提名该项目为陕西省技术发明奖一等奖。

三、项目简介

致密气是全球重要的非常规天然气资源类型。中国致密气资源丰富，以鄂尔多斯盆地、四川盆地和准噶尔盆地为主，已成为中国天然气增储上产的重要

组成部分。尤其是鄂尔多斯盆地苏里格致密气田，是我国第一大气田。但是中国致密气整体采收率与北美成熟区的差距显著，亟需持续提升 3000 米以深的致密气储层勘探开发能力。

地震勘探是致密气储层探测的首要工具。但对于致密气储层，地震信号直接定量表征难度大：一是由于地表被巨厚黄土塬、沙漠覆盖，中深层地震波传播过程中吸收衰减严重，造成单一地震信号非平稳、反射特征弱，所蕴含的多频率、多尺度、衰减信息等难于挖掘；二是由于地下中深部致密储层相变快、厚度薄、孔隙度小、渗透率低、丰度低，导致地震数据非均质性强，单一地震数据特征与厚度、孔隙度等致密储层参数间非线性和多解性显著，定量预测精度不足于服务开发。

针对上述两个致密气勘探开发行业技术难题，该项目围绕“如何实现致密气储层探测的地震信号高分辨智能稀疏表征”这一核心问题，创新提出非平稳弱地震信号多维度、多机制稀疏相空间系列变换及其智能化定量表征储层含气区展布和物性的算法体系，形成数学方法、地球物理机制和人工智能深度交叉的技术体系。

该项目提出的“稀疏相空间”是针对非平稳弱地震信号，以振幅、频率、相位、波形、能量、衰减及多尺度响应等为状态变量，通过稀疏分解、时频展开、能量挤压、特征抽取与重排、非线性嵌入、流形映射及深度潜空间学习，将高维地震观测转换为低冗余、高信息密度、具有潜在低维非线性结构的多维地震响应空间。该项目通过系列数学变换改变地震信息的组织方式，实现由“单一地震波形”向“具有潜在低维流形结构的多维智能稀疏状态空间”的转变。

围绕上述核心思想，形成三项主要技术发明。

第一，发明非平稳弱地震信号多维度、多机制智能稀疏相空间系列变换技术。针对弱地震信号信息混叠、特征冗余和非平稳性强等问题，建立由基函数表示、时频展开、谱能量挤压、特征抽取与重排、稀疏重构、潜在流形映射和深度潜空间变换组成的系列数学变换；同时融合地震传播衰减、频率变化、薄层调谐和子波畸变等地球物理响应机制，以及稀疏表示、自监督学习、自编码器和深度特征学习等智能计算机制，实现单一叠后地震数据的多维、高分辨率和高信息密度表征。该技术可直接应用于已有叠后地震资料，实现不增加采集成本的信息增维与储层弱信号深度挖掘。

更重要的是，多维智能稀疏相空间中的高维数据特征并非均匀随机分布，而是受沉积微相、含气区类型以及物性规律共同约束，形成具有聚集、分异和连续变化特征的潜在低维非线性结构。由此，复杂地震响应不再只是传统地震属性集合，而转化为具有内在地质结构含义的统一数学空间，为后续储层含气区识别、物性参数与工程参数定量映射提供了统一数理基础。

第二，发明多维稀疏相空间驱动的储层含气区类型层次化智能表征技术。以发明点 1 形成的多维稀疏相空间为统一信息载体，融合多频率、多尺度、相位、波形及空间结构特征，利用自注意力机制、编码-解码-超列网络、非线性

特征嵌入和多频率属性融合等方法，识别稀疏相空间中的地震响应模式，建立地震相、沉积微相和含气区类型的层次化定性智能映射，实现复杂致密储层由连续地震信号向离散储层含气区类型的智能转换。该技术突破传统单一属性和人工经验驱动的地震相解释模式，为储层含气区空间展布预测提供新的高维信息维度。

第三，发明地震相约束的多维稀疏相空间中储层物性稳定映射与工程决策技术。针对不同沉积类型下地震特征—物性关系差异显著、传统统一映射多解性强的问题，以地震相、沉积微相和含气区类型作为地质条件约束，对多维稀疏相空间进行条件分区，在不同地震相对应的特征子空间内建立地震特征与储层厚度、孔隙度、渗透率等物性参数之间的稳定非线性映射，并通过跨井、跨储层类型和跨区域验证，识别具有地质一致性、稳定性和可迁移性的地震特征—物性关系，进一步形成储层含气区与物性预测、井位部署、水平井轨迹导向以及产能核实等的工程决策链。

该项目形成了由 15 项发明专利、3 项软件著作权和 66 篇原理性论文支撑的数学方法、地球物理机制与人工智能深度交叉的自主技术体系，实现了由“单一属性空间中储层静态地震解释”向“多维智能稀疏相空间中含气区表征、物性映射、参数决策”的转变，形成了弱先验、低成本、可扩展、可泛化的致密气储层探测的地震信号智能稀疏表征新范式。该项目为苏里格等致密气区块的井位部署、水平井轨迹导向及开发决策提供了系统性技术支撑，已经取得上亿元经济效益，具有良好的推广应用价值和产业化前景。

四、客观评价

（1）对项目自主知识产权和创新性的评价：

- 吉林大学林君教授（中国工程院院士）与李月教授团队在其发表的研究论文中评价指出：“提出了一种极具针对性的多尺度方案”
- 中国工程院外籍院士、英国皇家工程院院士 Yanghua Wang 教授团队在其论文中多次引用该项目原成果的原理论文并评价认为：“可以有效计算地震数据时频谱”、“提出了基于物理小波的同步挤压变换，其是地震数据解释的代表性工作”。
- 中国矿业大学彭苏萍院士团队在其衰减估计论文中引用该项目原成果的原理论文并评价认为：“提出的叠前地震波衰减估计方法是衰减估计成功用于储层预测的代表性工作”。
- 欧洲科学院通讯院士 Ru-shan Wu 教授团队在其论文中多次引用该项目原成果的原理论文并评价认为：“提出的时频双聚集短时傅里叶变换是时频分析方法在地震数据处理和解释中成功应用的代表性工作”、“提出的地震波衰减估计方法有助于改善逆时偏移算法效果及提高其计算效率”。
- 国际著名小波分析专家 Charles K. Chui 教授（IEEE Life Fellow）团队在其多分量信号分离论文中引用该项目原理论文并评价认为：“提出的 chirplet 变换再分配算法为瞬时频率估计的代表性算法”。

- 香港浸会大学 Charles K. Chui 教授（斯坦福大学客座教授、IEEE Life Fellow）团队撰文并评价指出：“……，广义 chirplet 变换在近期的文献中被广泛应用于多分量信号的瞬时频率估计和模态提取，如项目提出的基于 chirplet 变换的瞬时频率和 chirp 率联合估计代表性方法”。
- 纽约大学 Ivan W. Selesnick 教授（IEEE Fellow）团队在其发表的研究论文中，引用该项目原成果的原理论文并评价认为：“同步挤压变换已经被成功应用于多个领域，项目论文是油气地球物理勘探领域的典型成功应用”。
- 圣地亚哥-德孔波斯特拉大学 Juan J. Nieto 教授（加利西亚皇家科学院院士）团队在其论文中对申请人提出的结构总广义变分去噪方法进行了深入剖析，评价认为：“本文将所提算法与地震去噪领域常用成功算法进行对比与分析，包括项目所提出的结构导向全广义变分方法，并在其后续研究中深度参考并全面借鉴了其提出的参数选取策略”。
- 俄克拉荷马大学 Kurt J. Marfurt 教授（AASPI 创始人、SEG Maurice Ewing Medal 等获得者）团队在其论文中，引用该项目原成果的原理论文并评价指出：“谱分解技术可以把一维全频带地震数据转变为多频率数据体，项目所提方法已经被成功应用于油气勘探”。

（2）项目应用效果评价：

- 中国石油勘探开发研究院专家组验收意见指出：“测试了松辽盆地龙 45、四川盆地川中地区等多个工区实际数据”，“实际数据测试结果表明，模块稳定、效果明显”。

五、应用情况和效益

1. 应用情况

该项目围绕致密气储层弱地震信号难识别、直接定量表征难度大，提出了非平稳弱地震信号多维度、多机制稀疏相空间系列变换及其智能化定量表征储层甜点展布和物性的算法体系。成果已在中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第三采气厂、第一采气厂等单位推广应用。

项目整体技术推广应用于苏里格气田，预测井位 3235 口，预测成功率提高 15%；指导实施水平井井位部署优化和导向 357 口，水平段气层钻遇率平均提高 7 个百分点。在苏里格气田资源勘探落实 2126 亿 m³ 探明储量及天然气有效开发中发挥了重要支撑作用。

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/电话
1	中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第三采气厂	整体技术	苏里格致密气田主要区块推广应用。	2015.07-2026.07	杨森

2	中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第一采气厂	整体技术	苏里格致密气田苏东南等区块推广应用。	2015.07-2026.07	陈兴官
---	---------------------------	------	--------------------	-----------------	-----

2. 应用效益

（1）直接经济效益显著

该项目成果在中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第一采气厂和第三采气厂的井位部署、水平井导向、产能建设及经营管理中实现了规模应用，近三年产生的经济效益共计 1.24 亿元。

（2）潜在经济效益

项目技术已推广应用于苏里格气田支撑落实 2126 亿 m^3 探明储量，保障 $120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 产能建设，并为 110 亿 m^3 增储上产提供技术支撑。随着成果在苏里格气田及其他同类型致密气藏进一步推广，其在减少无效井投资、提高储层钻遇率、优化压裂设计、提升单井产能和延长气井稳产期等方面具有持续的经济效益潜力。

（3）社会效益

该项目形成了具有自主知识产权、自主可控的致密气储层地震信号智能稀疏表征算法体系和软件系统，提升了复杂致密砂体的精细刻画与定量预测能力，推动地震技术由勘探阶段向井位部署、水平井导向、压裂设计、产能核实和气井全生命周期管理等延伸。

该项目成果显著提高了致密气井位部署和水平井轨迹优化的科学性，降低了钻井投资风险，为苏里格气田增储上产和长期稳产提供了关键技术支撑。成果的推广有助于提高我国致密气资源规模高效开发水平，增强天然气稳定供应能力，对保障国家能源安全、优化能源结构和促进油气行业技术进步具有重要意义。同时，该技术体系可复制推广至鄂尔多斯盆地其他区块及国内外同类型致密气藏，具有良好的行业示范和推广价值。

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	一种基于混合范数和小波变换的稀疏时频谱分解方法、装置、设备及存储介质	中国	ZL202110926763.9	2022.10.25	5535664	西安交通大学	王治国;杨阳; 高静怀;刘乃豪;张兵
2	发明专利	一种基于可解释深度网络的地震信号瞬时频率估计方法	中国	ZL202210520298.3	2025.02.28	7767297	西安交通大学	王治国;姜悦 樱;杨阳;刘乃豪;高静怀
3	发明专利	一种基于自监督生成对抗学习和重构物理约束的稀疏时频分析方法、设备及可读存储介质	中国	ZL202211307564.0	2025.09.23	8290912	西安交通大学	刘乃豪;雷友波;杨阳;王家 乐;王静宇;王治国;高静怀
4	发明专利	基于自编码器的稀疏时频谱分析方法、模型、设备及介质	中国	ZL202211212676.8	2025.09.26	8301560	西安交通大学	杨阳;雷友波; 刘乃豪;张宇新;魏圣焘;王 家乐;王治国; 高静怀
5	发明专利	AUTOMATIC SEISMIC FACIES IDENTIFICATION METHOD BASED ON COMBINATION OF SELF-ATTENTION MECHANISM AND U-SHAPE NETWORK	美国	US11922679B2	2024.03.05	US011922679B2	Xi'an Jiaotong University	Zhiguo Wang;Yumin Chen;Yang Yang;Zhaoqi Gao;Zhen Li;Qiannan

		ARCHITECTURE						Wang;Jinghuai Gao
6	发明专利	一种地震相分类方法、 装置、电子设备及介质	中国	ZL202311188166.6	2025.09.26	8303764	西安交通大学	杨阳;潘乐乐; 龙秋怡;王治 国;刘乃豪;高 静怀
7	发明专利	一种基于稀疏 S 变换和 自适应对数谱比法的地 震衰减估计方法、系 统、设备及存储介质	中国	ZL202110858324.9	2022.08.09	5367324	西安交通大学	刘乃豪;魏圣 焘;杨阳;高静 怀;王治国;张 浩然;张宇新; 雷友波
8	发明专利	一种基于深度学习的地 震波衰减估计方法与估 计系统	中国	ZL202211208146.6	2025.05.16	7944441	西安交通大学	刘乃豪;张宇 新;杨阳;魏圣 焘;雷友波;王 家乐;王治国; 高静怀
9	发明专利	一种基于 t 分布随机近 邻嵌入的多频率属性融 合砂体解释方法、设备 及可读存储介质	中国	ZL202211580496.5	2025.06.17	8010467	西安交通大学	刘乃豪;张浩 然;魏圣焘;张 泽洲;王家乐; 王治国;杨阳; 张懿洁;高静怀
10	发明专利	一种储层预测方法	中国	ZL202211586533.3	2025.07.22	8094016	西安交通大学	王治国;王倩 楠;杨阳;贾骏 雄;高静怀

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
王治国	1	副主任	教授	西安交通大学	西安交通大学	项目的总体组织者与设计者，是项目发明点 1、发明点 2 和发明点 3 的核心贡献者。构建了多维度、多机制智能稀疏相空间系列变换、多维稀疏相空间特征与储层参数间的深度映射方法等，发明了一种基于可解释深度网络的地震信号瞬时频率估计方法等 7 项核心技术。
刘乃豪	2	院长助理	副教授	西安交通大学	西安交通大学	项目第二负责人，是项目发明点 1、发明点 2 和发明点 3 的核心贡献者。构建了无监督稀疏智能相空间变换方法、基于稀疏相空间变换的地震衰减估计方法等，发明了一种基于 t 分布随机近邻嵌入的多频率属性融合砂体解释方法等 6 项核心技术。
杨阳	3	/	副教授	西安交通大学	西安交通大学	项目第三完成人，是项目发明点 1 和发明点 2 的核心贡献者。构建了数据-物理约束的稀疏相空间变换方法、基于稀疏相空间变换的储层参数预测方法等，发明了一种基于自编码器的稀疏时频谱分析方法等 2 项核心技术。

高照奇	4	院长助理	教授	西安交通大学	西安交通大学	项目主要完成人，是项目发明点 2 的贡献者。参与构建了基于编码-解码-超列深度网络的地震相表征方法等，参与发明了一种基于自注意力机制与 U 型结构结合的地震相自动化识别方法等 2 项核心技术。
李柏鹏	5	厂长、党委副书记	高级工程师	中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司	中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司	项目主要完成人，是项目发明点 3 的贡献者。组织了项目在苏里格气田的应用实施，参与发明了基于稀疏相空间的水平井智能分析与导向方法等 1 项核心技术。
李桢禄	6	副所长	高级工程师	中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司	中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司	项目主要完成人，是项目发明点 1 和发明点 3 的贡献者。参与组织了项目在苏里格气田的应用实施，参与发明了多维稀疏相空间驱动的储层含气区类型层次化智能表征技术等。

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）
西安交通大学	1	该项目技术创新工作主要由西安交通大学负责完成，在项目实施过程中，单位主要贡献如下：联合中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司开展了产学研联合研究。在我校大数据算法与分析技术国家工程实验室、国家天元数学西北中心、陕西国家应用数学中心、西安数学与数学技术研究院等科研平台的支持下，十余年来相继配置了 GPU 服务器 1 套、高端工作站 10 余台、GEOEAST 等地震处理解释平台以及大量应用软件，构成了地震资料常规处理能力和地震资料处理模块科研开发的基础环境。上述基础设施和资源为该项目的开展提供了良好的平台。为充分保证项目研究人员的研究时间，提供良好的工作环境，学校在教学工作考核上给予一定的倾斜，同时在工作环境上尽量将项目完成人员的办公地点集中，促进交流和探讨。西安交通大学购买了 AIAA、ASME、IEEE、Springer Link、Elsevier、PQDT、SPIE、Science Online 等许多优质的电子学术文献数据库，为项目研究人员查阅资料提供了方便。
中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司	2	本单位是该项目的主要完成单位之一，是理论与技术研究应用于生产的承担方，在该项目实施过程中，组织了强有力的科研团队，自筹经费联合西安交通大学团队承担多项企业横向项目。组织该项目理论、方法和技术在苏里格致密气田勘探开发生产中的大规模推广应用，并发挥了重要的支撑作用。为该项目理论方法的生产力转换创造了有利条件。投入人员 10 余人，提供工作站等设备 10 余台、软件 10 余套。

九、完成人合作关系说明

该项目第一完成人王治国与刘乃豪（第二完成人）、杨阳（第三完成人）、高照奇（第四完成人）属于西安交通大学团队，共同开展致密气储层探测的地震信号智能稀疏表征算法体系与应用。联合承担国家自然科学基金面上项目、国家重点研发计划项目、企业委托项目等，合作发表论文 62 篇，共获授权发明专利 15 项和软件著作权 3 项。

王治国（第一完成人）与李柏鹏（第五完成人）、李桢禄（第六完成人）多年来合作，从事致密气勘探开发产学研相结合的多学科深度融合研究。西安交通大学王治国团队，受长庆油田分公司委托，联合承担了多项横向项目。在项目合作中，西安交通大学王治国团队负责地震信号智能稀疏表征算法体系研究及软件研制，长庆油田分公司李柏鹏和李桢禄团队负责该项目方法的地质解释、效果验

证以及生产推广应用。两个团队合作将所研制整体技术应用于苏里格气田致密气勘探开发，成效显著。相关项目均已顺利通过验收。