2021年度自治区科技奖励提名公示内容

# 一、项目名称

项目名称：地震波动方程数值模拟的吸收边界条件和有限差分新方法

# 二、提名单位意见

提名等级：自然科学奖一等奖

该项目围绕地震波动方程数值模拟中的吸收边界条件和有限差分方法开展研究，主要原创性科学发现点为：

1.通过在模拟区域与边界之间引入过渡带及相应策略，提出一种混合吸收边界条件，有效压制人工边界反射；通过将边界点拓宽、过渡区域波场加权策略进行改进，进一步提高压制效果。

2.通过逼近声波方程有限差分数值模拟的时间-空间域差分频散关系，提高多个传播方向的模拟精度；采用菱形空间差分算子，提出任意方向具有相同阶模拟精度方法；发展了仅涉及求解三对角矩阵方程组的高精度隐式空间差分方法。

3.提出考虑地下介质非均质性的自适应变空间差分算子长度方法、平衡不同频率成分模拟精度的最小二乘优化有限差分方法，有效提高模拟效率。

8篇代表性论文被SCI他引340次，被44种国际SCI期刊论文他引。论文成果被SEG主办的国际期刊报道为地球物理亮点；两篇论文入选SEG出版的经典文献书籍；论文成果获国际出版的两本专著和一本百科词典介绍推荐；德国WIT项目组年报长文研究该项目论文成果；日本京都大学、苏黎世联邦理工学院、德国、墨西哥学者在国际SCI期刊上发表论文，积极评价、应用或发展该项目论文成果。

该项目提出的混合吸收边界条件适用于不同类型波动方程及模拟方法，提高有限差分数值模拟精度效率方法可用于类似波动方程数值模拟，有广阔应用前景。

提名单位同意本提名书所填写全部内容及附件，提名该项目为自治区自然科学奖一等奖。

# 三、项目简介

1.主要研究内容

速度反演和成像是地震勘探的核心问题，全波形反演和逆时偏移因其精度高而备受关注，地震波动方程数值模拟是其基础科学问题，也是地震勘探的基础问题。本项目针对地震波动方程数值模拟中的压制人工边界反射、提高有限差分模拟精度和效率开展研究。

2.科学发现点和科学价值

（1）提出混合吸收边界条件。由于波动方程数值模拟区域有限，若不采取边界处理措施，则会在边界处产生所不期望的边界反射波，从而影响模拟质量。本项目提出一种混合吸收边界条件，它在内部模拟区域和边界之间引入过渡带，联合单程和双程波方程，使得内部区波场经过渡区后平滑变化到边界，从而有效压制人工边界反射（论文1）；通过采取将边界点拓宽、将过渡区域单程波方程和双程波波场的加权系数进行改进等措施，发展了改进的混合吸收边界条件来进一步提高压制效果（论文2）。

（2）提出提高有限差分模拟精度新方法。有限差分模拟关键之一在于确定空间差分系数，通常利用逼近空间波场方法确定这个系数。由于时间导数采用二阶差分求解，所以常规声波方程数值模拟精度通常为二阶。本项目从声波方程的时间-空间域差分频散方程出发，利用泰勒级数展开推导空间差分系数，将常规模拟精度沿多个方向提高到高阶（论文3）。通过引入菱形差分算子，将模拟精度沿所有方向提高到高阶精度（论文4）。提出一种高精度的空间隐式差分方法（论文5），它仅涉及求解三对角矩阵方程组，效率较高。

（3）提出提高有限差分模拟效率新方法。求解效率主要取决于空间差分算子长度。国际上已有方法为固定算子长度。考虑到地下介质的非均质性，提出变差分算子长度方法，即空间差分算子长度随地下介质参数的变化而变化，速度小则采用长的差分算子，速度大则采用短的差分算子，来提高模拟效率（论文6）。对空间有限差分算子进行研究发现：频率低时精度很高，频率高时精度变低。因此，提出优化方法来平衡不同频率成分模拟精度，进一步减小算子长度和提高模拟效率（论文7-8）。

3.同行引用及评价

本项目发表的12篇论文被SCI他引449次，其中8篇代表性论文（1-8）被SCI他引340次，44种地学、数学、物理学、计算机等学科的国际SCI期刊论文他引代表性论文。SEG（国际勘探地球物理家学会）主办的《The Leading Edge》杂志将论文1报道为“地球物理亮点”；论文1、5入选由SEG出版的经典文献书籍；SEG出版的两本专著《3D Seismic Survey Design》、《Seismic Inversion》以及Springer出版的百科词典《Encyclopedia of Solid Earth Geophysics》介绍和推荐论文1、2；德国WIT项目组年报14页长文研究论文6；日本京都大学、苏黎世联邦理工学院、德国、墨西哥学者在国际SCI期刊上发表论文，积极评价、应用或发展论文1、3、4、7、8。

# 四、代表性论文专著目录

1. Yang Liu, Mrinal K. Sen, 2010, A hybrid scheme for absorbing edge reflections in numerical modeling of wave propagation, Geophysics, 75(2): A1–A6.
2. Yang Liu, Mrinal K. Sen, 2018, An improved hybrid absorbing boundary condition for wave equation modeling, Journal of Geophysics and Engineering, 15(6): 2602–2613.
3. Yang Liu, Mrinal K. Sen, 2009, A new time-space domain high-order finite-difference method for the acoustic wave equation, Journal of Computational Physics, 228(23): 8779–8806.
4. Yang Liu, Mrinal K. Sen, 2013, Time–space domain dispersion-relation-based finite-difference method with arbitrary even-order accuracy for the 2D acoustic wave equation, Journal of Computational Physics, 232(1): 327–345.
5. Yang Liu, Mrinal K. Sen, 2009, An implicit staggered-grid finite-difference method for seismic modeling, Geophysical Journal International, 179(1): 459–474.
6. Yang Liu, Mrinal K. Sen, 2011, Finite-difference modeling with adaptive variable length spatial operators, Geophysics, 76(4): T79–T89.
7. Yang Liu, 2013, Globally optimal finite-difference schemes based on least squares, Geophysics, 78(4): T113–T132.
8. Yang Liu, 2014, Optimal staggered-grid finite-difference schemes based on least squares for wave equation modeling, Geophysical Journal International, 197(2): 1033–1047.

# 五、主要完成人情况

刘洋，男，1972年10月生，现为中国石油大学（北京）克拉玛依校区石油学院教授，目前从事专业为地质资源与地质工程，研究方向地震勘探理论与方法。曾获省部级科技进步奖一等奖2项和二等奖3项、省部级优秀科技著作奖二等奖1项。本项目的12篇论文，刘洋均为第一作者和通讯作者，为本项目唯一完成人。

# 六、完成人合作关系说明

无。

# 七、知情同意证明

申报本奖项的所有论文，申报人刘洋均为第一作者、通讯作者，其中部分论文的第二作者为美国德州大学奥斯汀分校的Mrinal K. Sen教授。根据本奖项的申报要求，申报人必须为中国公民。Sen教授已经知悉，并以书面函方式同意刘洋申报此奖项（书面同意函见附件）。

附件：Mrinal K. Sen教授的书面同意函

