

大连理工大学提名 2021 年辽宁省自然科学奖项目公示

项目名称：核聚变中磁流体不稳定性非线性演化机理及控制研究

提名者：大连理工大学

一、提名意见：

我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目符合填写要求。按照要求，我单位和完成人所在单位都已对该项目进行了公示，目前无异议。

该项目围绕国家战略性、前瞻性重大科学问题，针对核聚变装置中严重威胁上亿度高温等离子体稳态运行的磁流体不稳定性，自主开发了我国首个模拟新经典撕裂模的大规模三维磁流体程序 MDC。该程序已替代了欧美程序，成为我国 HL-2A 核聚变装置预测新经典撕裂模的唯一大型国产程序。该项目通过大规模计算机模拟，揭示了先进磁场位型下新经典撕裂模非线性演化特性，建立了核聚变等离子体不稳定性多尺度相互作用的新物理模型，为我国 EAST 全超导聚变装置创造长脉冲运行的世界纪录提供了电流剖面优化设计。同时该项目在新经典撕裂模方面的研究成果也为我国下一代聚变工程实验堆 CFETR 的不稳定性控制和位形优化提供了预测与设计。上述成果标志着我国在磁约束聚变磁流体不稳定性物理机理及控制研究领域已进入世界第一梯队。

项目执行期间，第一完成人担任国家重大专项首席科学家；五篇代表性论文发表在物理学顶级期刊 Phys. Rev. Lett. 和核聚变领域顶级期刊 Nuclear Fusion；第一完成人获得国家杰出青年基金，被亚太等离子体物理学会授予“杰出青年科学家奖”，获评“中国青年五四奖章”（2017 年全国共 20 人）。

对照省自然科学奖授奖条件，提名该项目为 2021 年度辽宁省自然科学奖一等奖。

提名该项目为辽宁省自然科学奖 一 等奖

二、项目简介：

该项目属于热核聚变等离子体物理学领域。磁约束核聚变能源作为一种清洁能源，在“十三五”时期被国家列为战略性、前瞻性重大科学问题。对于核聚变中上亿度的高温等离子体，实验诊断研究相应物理机理极具挑战性；而复杂的磁场几何以及高度非线性的物理过程，使得理论解析研究几乎不可能。所以大规模计算机模拟是磁约束聚变物理研究不可或缺的强大工具。近些年，随着美国在关键科技领域的收紧政策，开发具有自主知识产权的大规模计算机模拟程序对保持我国磁约束核聚变研究的领先地位具有重要的战略意义。

该项目在国家科技部重大专项和国家基金委项目的资助下，围绕磁约束核聚变装置中极具危害的磁流体不稳定性等关键科学问题，自主开发了大规模计算机模拟程序，提出新的物理模型并开展了核聚变中新经典撕裂模的物理机理及其主动控制研究。该项目取得的一系列创新性成果标志着我国在磁约束核聚变磁流体不稳定性物理机理及控制研究领域已进入世界前列。项目主要发现点如下：

(1) 开发我国首个可以模拟新经典撕裂模的大型三维磁流体程序。针对磁约束核聚变装置中导致放电破裂的最危险磁流体不稳定性---新经典撕裂模 (NTM)，建立了自洽的物理模型，揭示了 NTM 在先进放电位型下的非线性演化特性；自主开发的程序替代了欧美程序，成为我国 HL-2A 核聚变装置预测 NTM 的唯一大型国产程序；为我国 EAST 全超导聚变装置创造长脉冲运行的世界纪录提供了电流剖面优化设计。

(2) 揭示了先进磁场位型下双撕裂模现象的物理机理。针对先进磁场位型下极具破坏性的双撕裂模 (DTM)，通过研究不同非线性阶段的电阻定标关系，阐明了 DTM 磁场重联各阶段对应的物理机理，修正了早年美国和日本学者对 DTM 快速磁场重联过程的物理认识，成功解释了美国 DIII-D、欧洲 ASDEX Upgrade、日本 JT-60U 以及我国 EAST 等中大型聚变装置上观测到的 DTM 非线性快速磁场重联现象。

(3) 建立了核聚变中不稳定性多尺度相互作用的新物理模型。通过在磁流体模型中考虑多种动理学效应，使基于磁流体理论框架下研究多尺度相互作用变得可行，极大降低了不同时空尺度过程带来的巨大运算量。发现磁岛内部流场结构转换现象，成功解释了世界第二大仿星器 LHD 核聚变装置上极向流分布的物理机理；提出涡旋流诱发输运垒的理论模型，被欧洲 RFX-mod 装置的实验所验证，在国际上引领了该领域的实验与模拟研究。

该项目 5 篇代表性论文发表在物理学顶级期刊 *Phys. Rev. Lett.* 和核聚变领域顶级期刊 *Nuclear Fusion*，包括 2 篇 *Nuclear Fusion* 封面文章，且其中 1 篇论文入选 2016 年度亮点文章(当年全球共 12 篇)，SCI 他引共计 70 次；研究成果在 *Rev. Mod. Phys.*、*Phys. Rev. Lett.* 等权威期刊中正面引用评述（附件 2）；获得授权发明专利 2 项。项目第一完成人获国家杰出青年基金，被亚太等离子体物理学会授予“杰出青年科学家奖”，获评“中国青年五四奖章”（2017 年全国共 20 人）。

三、代表性论文专著目录(不超过 5 篇)

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	年卷页 码	发表 时间 年月 日	通讯 作者 (含共 同)	第一 作者 (含共 同)	国内 作者	他引 总次 数	检索 数据 库	论文署名 单位是否 包含国外 单位
1	Nonlinear evolution of neo-classical tearing modes in reversed magnetic shear tokamak plasmas/Nuclear Fusion/Z.X. Wang, L. Wei, F. Yu	2015 年 55 卷 043005 页	2015 年 3 月 18 日	王正 涵	王正 涵	王正 涵, 魏 来, 禹 芳	6	SCI-E	否
2	Control of neo-classical double tearing modes by differential poloidal rotation in reversed magnetic shear tokamak plasmas/Nuclear Fusion/J. Wang, Z.X. Wang, L. Wei, Y. Liu	2017 年 57 卷 046007 页	2017 年 2 月 14 日	王正 涵	王佳 磊	王佳 磊, 王 正涵, 魏来, 刘悦	6	SCI-E	否
3	Fast resistive reconnection regime in the nonlinear evolution of double tearing modes/Physical Review Letters/Z.X. Wang, X.G. Wang, J.Q. Dong, Y.A. Lei, Y.X. Long, Z.Z. Mou, W.X. Qu	2007 年 99 卷 185004 页	2007 年 11 月 2 日	王晓 钢	王正 涵	王正 涵, 王 晓钢, 董家 齐, 雷 奕安, 龙永 兴, 牟 宗泽, 曲文 孝	38	SCI-E	否

4	Nonlinear mutual destabilization of the tearing mode and ion temperature gradient mode/Nuclear Fusion/Z.Q. Hu, Z.X. Wang, L. Wei, J.Q. Li, Y. Kishimoto	2014年54卷123018页	2014年11月20日	王正涵	胡朝清	胡朝清, 王正涵, 魏来	12	SCI-E	是
5	Dual roles of shear flow in nonlinear multi-scale interactions/Nuclear Fusion/Z. Q. Hu, Z. X. Wang, L. Wei, J.Q. Li, Y. Kishimoto	2016年56卷016012页	2015年12月2日	王正涵	胡朝清	胡朝清, 王正涵, 魏来	8	SCI-E	是
合 计							70		

四、主要完成人(完成单位)

序号	完成人姓名	完成单位	工作单位
1	王正涵	大连理工大学	大连理工大学
2	魏来	大连理工大学	大连理工大学
3	王佳磊	大连理工大学	日本国立核聚变科学研究所
4	胡朝清	大连理工大学	核工业西南物理研究院
5	王晓钢	北京大学	哈尔滨工业大学