

2025 年度安徽省自然科学奖提名项目公示内容

项目名称	面向未来磁约束聚变堆的先进运行模式（I-mode）的实验研究
提名者	中国科学技术大学
提名意见	该项目围绕磁约束核聚变先进运行模式 I-mode 的微观输运机制，在 EAST 全超导托卡马克上开展了系统实验研究，取得了系列原创性科学发现。项目首次在国家大科学装置 EAST 托卡马克上实现稳态 I-mode，建立了功率阈值与约束定标律；发现新型边缘宏观模式 —— 边缘温度环振荡（ETRO），并首次揭示其驱动电子 / 离子逆磁方向湍流交替转变、维持稳态 I-mode 的微观机制，解释了 I-mode 能量 / 粒子输运解耦的物理根源；同时明确了 I-H 转变前驱信号并实现边缘湍流主动控制。系列成果发表于 Nuclear Fusion 论文 5 篇，获得欧洲物理年会国际邀请报告 1 次，被国际同行广泛引用，推动了托卡马克边缘湍流与输运解耦的基础认知，为 ITER/CFETR 无 ELM 长脉冲运行提供了实验依据与控制手段，具有重要科学价值与应用前景。
项目简介	本项目围绕磁约束核聚变先进运行模式 I 模（I-mode），在实验先进超导托卡马克（EAST）上开展了系统的实验研究。I 模兼具高约束模（H-mode）级能量约束与低约束模（L-mode）级粒子约束、天然无边缘局域模（ELM），可从根本上规避大边缘局域模对偏滤器的瞬态热负荷并避免杂质聚积，是未来聚变堆极具前景的运行方案，但其稳态维持的微观机制长期未获澄清。 本项目取得以下重要发现：（1）首次在全超导托卡马克上实现可持续数秒的稳态 I 模，建立了功率阈值与能量约束定标律，发现储能随密度线性增长、约束时间随加热功率衰减慢于高约束模等对燃烧等离子体有利的特性；（2）发现新型边缘宏观模式 —— 边缘温度环振荡（ETRO），方位角对称、局域于台基顶部，以温度扰动为主，系统论证其为 I 模特有、区别于测地声模（GAM）和极限环振荡（LCO）的有限频率带状流；（3）首次揭示稳态 I 模的微观维持机制：边缘温度环振荡驱动捕获电子模（TEM）与离子温度梯度模（ITG）交替转变，形成捕食者 — 猎物（predator-prey）自组织循环，从微观层面解释了 I 模能量 / 粒子输运解耦的物理根源；（4）明确 I 模向高约束模转变的前驱信号 —— 台基爆发不稳定性（PBI）及归一化密度梯度阈值，并实现超声分子束注入（SMBI）对边缘温度环振荡的主动控制。系列成果发表于《核聚变》（Nuclear Fusion）论文 5 篇，并获得了第 47 届欧洲物理学会等离子体物理会议（EPS2021）邀请报告。研究深化了对托卡马克边缘湍流自组织与输运解耦的基础认知，为国际热核聚变实验堆（ITER）/ 中国聚变工程实验堆（CFETR）无边缘局域模长脉冲稳态运行提供了直接实验依据与控制手段，具有重要的科学价值与工程应用前景。
主要完成人	刘阿娣 仲小明 周楚 刘子奚 张斌
主要完成单位	中国科学技术大学、中国科学院合肥物质科学研究院

5 名论证专家		1. 丁卫星、中国科学技术大学、教授、等离子体物理 2. 徐国盛、中国科学院合肥物质科学研究院、研究员、等离子体物理 3. 陈伟、西南物理研究院、研究员、等离子体物理 4. 许宇鸿、西南交通大学、教授、等离子体物理 5. 郑坚、中国科学技术大学、教授、等离子体物理						
代表性论文（专著）目录								
序号	论文（专著）名称/刊名/作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	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	论文署名单位是否包 含国外单位	是否国内期刊
1	I-mode investigation on the Experimental Advanced Superconducting Tokamak/Nuclear Fusion/X. Feng, A.D. Liu, C. Zhou, Z.X. Liu, M.Y. Wang, G. Zhuang, X.L. Zou, T.B. Wang, Y.Z. Zhang, J.L. Xie, H.Q. Liu, T. Zhang, Y. Liu, Y.M. Duan, L.Q. Hu, G.H. Hu, D.F. Kong , S.X. Wang, H.L. Zhao, Y.Y. Li, L.M. Shao, T.Y. Xia, W.X. Ding, T. Lan, H. Li, W.Z. Mao, W.D. Liu, X. Gao , J.G. Li, S.B. Zhang, X.H. Zhang, Z.Y. Liu, C.M. Qu, S. Zhang, J. Zhang, J.X. Ji, H.R. Fan and X.M. Zhong	59 (2019) 096025	2019.07.29	C. Zhou, Z.X. Liu	X. Feng	冯喜, 刘阿娣, 周楚, 刘子奚, 王明远, 庄革, 谢锦林, 刘海庆, 张涛, 刘永, 段艳敏, 胡立群, 胡广海, 孔德峰, 王守信, 赵海林, 李颖颖, 邵林明, 夏天阳, 丁卫星, 兰涛, 李弘, 毛文哲, 刘万东, 高祥, 李建刚, 张寿彪, 张小辉, 刘朝阳, 渠臣明, 张津, 季佳旭, 范泓锐, 仲小明	是	否
2	Power threshold and confinement of the I-mode in the EAST tokamak/Nuclear Fusion/Y.J. Liu, Z.X. Liu, A.D. Liu, C. Zhou, X. Feng, Y. Yang, T. Zhang, T.Y. Xia, H.Q. Liu, M.Q. Wu, X.L. Zou, D.F. Kong, H. Li, J.L. Xie, T. Lan, W.Z. Mao, S.B. Zhang, W.X. Ding, G. Zhuang, W.D. Liu and EAST team	60 (2020), 082003	2020.7.21	Z.X. Liu	Y.J. Liu	刘彦君, 刘子奚, 刘阿娣, 周楚, 冯喜, 杨曜, 张涛, 夏天阳, 刘海庆, 吴木泉, 孔德峰, 李弘, 谢锦林, 兰涛, 毛文哲, 张寿彪, 丁卫星, 庄革, 刘万东, EAST 团队	是	否
3	Experimental identification of edge temperature ring oscillation and alternating turbulence transitions near the pedestal top for sustaining stationary I-mode/Nuclear Fusion/A.D. Liu, X.L. Zou, M.K. Han, T.B. Wang, C. Zhou, M.Y. Wang, Y.M. Duan, G.	60 (2020), 126016	2020.9.30	A.D. Liu, M.Y. Wang	A.D. Liu	刘阿娣, 韩明昆, 周楚, 王明远, 段艳敏, 董家齐, 王正涵, 冯喜, 谢锦林, 庄革, 丁卫星, 张寿彪, 刘永, 刘海庆, 王亮, 李颖颖, 王嵎	是	否

	Verdoolaege, J.Q. Dong, Z.X. Wang, F. Xi, J.L. Xie, G. Zhuang, W.X. Ding, S.B. Zhang, Y. Liu, H.Q. Liu, L. Wang, Y.Y. Li, Y.M. Wang, B. Lv, G.H. Hu, Q. Zhang, S.X. Wang, H.L. Zhao, C.M. Qu, Z.X. Liu, Z.Y. Liu, J. Zhang, J.X. Ji, X.M. Zhong, T. Lan, H. Li, W.Z. Mao and W.D. Liu					民, 吕波, 胡广海, 臧庆, 赵海林, 渠臣明, 刘子奚, 刘朝阳, 张津, 季佳旭, 仲小明, 兰涛, 李弘, 毛文哲, 刘万东		
4	Characterization of pedestal burst instabilities during I-mode to H-mode transition in the EAST tokamak/Nuclear Fusion/X.M. Zhong, X.L. Zou, A.D. Liu, Y.T. Song, G. Zhuang, E.Z. Li, B. Zhang, J. Zhang, C. Zhou, X. Feng, Y.M. Duan, R. Ding, H.Q. Liu, B. Lv, L. Wang, L.Q. Xu, L. Zhang, H.L. Zhao, Q. Zang, T. Zhang, B.J. Ding, M.H. Li, C.M. Qin, X.J. Wang, X.J. Zhang and EAST Team	62 (2022), 066046	2022.4.20	A.D. Liu, Y.T. Song	X.M. Zhong	仲小明, 刘阿娣, 宋云涛, 庄革, 李二众, 张斌, 张津, 周楚, 冯喜, 段艳敏, 丁锐, 刘海庆, 吕波, 王亮, 徐立清, 张凌, 赵海林, 臧庆, 张涛, 丁伯江, 李妙辉, 秦成明, 王晓洁, 张新军, EAST 团队	是	否
5	Characteristics of edge temperature ring oscillation during the stationary improved confinement mode in EAST/Nuclear Fusion/A.D. Liu, X.L. Zou, X.M. Zhong, Y.T. Song, M.K. Han, Y.M. Duan, H.Q. Liu, T.B. Wang, E.Z. Li, L. Zhang, X. Feng, G. Zhuang and EAST I-mode Working Group	64 (2024), 016013	2023.11.21	X.M. Zhong, Y.T. Song	A.D. Liu	刘阿娣, 仲小明, 宋云涛, 韩明昆, 段艳敏, 刘海庆, 李二众, 张凌, 冯喜, 庄革, EAST I-mode 团队	是	否