# “多物理场耦合复杂热对流及其调控机制”项目公示材料

**一、项目名称**

多物理场耦合复杂热对流及其调控机制

**二、提名者**

重庆市教委

**三、提名等级**

自然科学奖三等奖

**四、项目简介**

该项目属于动力工程及工程热物理学科。在新型能源材料制备、电子元器件散热、航空航天以及能源高效利用与转化等复杂系统中广泛存在流动与热质输运问题，其具有多场、多参数、流动-传热-传质等相互耦合的特点。对多场耦合条件下流动与传热传质机理的认识深度在很大程度上决定了系统结构的设计优化及设备性能的提升。本项目在国家自然科学基金委等多个项目的持续支持下，针对上述领域中共性的多场耦合复杂热质流动及其调控机制这一前沿科学问题，重点研究了表面力和体积力耦合、热-流-质耦合以及外加力场耦合驱动热质输运机理和特性，明确了复杂热对流稳定性及其失稳机理，揭示了多场耦合驱动流动不稳定性及其调控机制，取得了系列原创性研究成果。

研究内容和科学发现点如下：

1. **阐明了非定常流-热-质耦合条件下复杂流动与热质传递特性**：建立了考虑流场、温度场、浓度场等多场耦合的多元流体热对流理论模型，创新发展了复杂热质耦合对流直接数值模拟方法，并开发了相应的计算程序，综合考虑了流体自由表面热和溶质毛细力、浮力及各种耦合作用的相互影响，探讨了多参数下的流动和热质传输特性，开辟了利用数值模拟研究复杂热对流过程中振荡流动发生条件、发展过程以及基本特性的新研究领域，为揭示各流场结构的物理本质提供了新的有效途径；利用数值和实验方法明确了热流体波、溶质波以及流动转变过程中的滞后和分叉现象，首次发现了浅液层热流体波的等角螺旋线特征，纠正了国际上对这一问题的不正确认识，发现了具有不同非线性动力学特征的多组热流体波共存现象、以及热流体波传播方向与液池旋转方向相反的现象，并解释了其中的内在原因。
2. **建立了复杂热对流稳定性理论，揭示了多场耦合驱动流动失稳本质**：首次利用渐近匹配展开法确定了耦合复杂热对流的理论近似解，提出了基于非平衡热力学理论的隐式重启动Arnoldi热对流线性稳定性分析方法，解决了传统的线性稳定性分析方法忽略热质毛细对流耦合作用的局限，拓展了线性稳定性理论应用范围；设计了一套基于光学法的温度测量系统，精确地测量了流体自由表面耗散结构；构建了复杂热对流理论分析—实验测量—数值模拟一体化综合研究体系，确定了流动失稳的临界条件，绘制了流动稳定性区域图谱，揭示了含斜压不稳定、离心力不稳定性、椭圆不稳定性、Taylor不稳定性等在内的多类流动失稳机理；明晰了流动失稳后不稳定流型结构演化规律，捕获了丰富的耗散结构及其转变过程，首次观察到了环形液池中溶质波振荡结构，发现了流动转变存在二维稳态流动—三维稳态流动—三维振荡流动—三维稳态流等多个历程，揭示了流动逆转现象的物理本质，构建了复杂热对流稳定性理论，合理解释了实验中经常观察到、但长期无法解释的热波形成的物理机制，进一步丰富了复杂热对流及耗散结构理论。
3. **发展了流动不稳定性的多场协同调控方法：**基于复杂热对流稳定性理论，确定了各表面力与体积力对流动不稳定性的贡献权重；以液封技术为背景，建立多层流体稳定性调控理论和数学模型，发展了一种全新的液封液桥内热对流三维直接数值模拟方法，掌握了液-液、气-液界面力和热的耦合特性，确定了流场失稳临界条件，预示了流动失稳后振荡行为特征；探索了磁场强度对表面温度波动的影响规律，确定了形成轴对称稳态流动的临界磁场强度；系统揭示了浮力、液封、磁场、旋转等多场耦合对复杂热对流的影响规律，得到了有效抑制流动不稳定性的最佳模式及参数匹配关系，明确了复杂热对流多场协同调控机制。

本项目成果极大地促进了工程热物理学科的发展，推动了复杂流动不稳定性调控技术的应用，具有重要的理论意义和广阔的应用前景。本项目成果在International Journal of Heat and Mass Transfer等国内外知名期刊上发表论文140余篇，总引用768次；其中，5篇代表性论文在Web of Science被他引近100次，1篇论文入选ESI高被引论文；研究成果得到国内外著名学者的广泛引用和高度评价，包括我国中科院、国际宇航院胡文瑞院士、英国皇家化学学会会士、传热协会副主席、爱丁堡大学Sefiane K教授、维也纳技术大学Kuhlmann H.C.教授等，其中胡文瑞院士及其团队在国际流体力学权威期刊Journal of Fluid Mechanics、Physics of Fluids等期刊上发表的论文，多次高度评价本项目研究成果；意大利热流体领域知名专家Lappa M.教授在其编著的两部专著中长篇幅引用报道了本项目研究工作；加拿大维多利亚大学能源转化领域著名学者Dost S.教授在Physics of Fluids期刊上发表论文，将本研究工作作为流动稳定性研究典型代表进行了正面评述，肯定了本成果提出的流动不稳定性调控机制，并指出该方法对能源材料制备系统的设计和优化有着重要指导意义。

**五、代表性论文专著目录**

1. Chen Jiechao, **Li Yourong**, **Yu Jiajia**, Zhang Li, **Wu Chunmei**, Flow pattern transition of thermal-solutal capillary convection with the capillary ratio of -1 in a shallow annular pool, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 95:1-6.
2. **Peng Lan**, **Li Yourong**, Shi Wanyuan, Imaishi Nobuyuki, Three-dimensional thermocapillary-buoyancy flow of silicone oil in a differentially heated annular pool, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50:872-880.
3. **Li Yourong**, Xiao Lan, Wu Shuangying, Imaishi Nobuyuki, Effect of pool rotation on flow pattern transition of silicon melt thermocapillary flow in a slowly rotating shallow annular pool, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51:1810-1817.
4. **Yu Jiajia**, Ruan Dengfang, **Li Yourong Li**, Chen Jiechao, Experimental study on thermocapillary convection of binary mixture in a shallow annular pool with radial temperature gradient, Exp. Therm. Fluid Sci., 2015, 61, 79-86.
5. **Mo Dongming**, **Li Yourong**, Shi Wanyuan, Linear-stability analysis of thermocapillary flow in an annular two-layer system with upper rigid wall, Microgravity Science and Technology, 2011, 23(S): 43-48.

**六、主要完成人**

李友荣、吴春梅、彭岚、莫东鸣、于佳佳

**七、主要完成单位**

重庆大学、重庆工业职业技术学院