

## 基于扩展流体模型的外源驱动型托卡马克湍流和全域运输的数值模拟

李继全

中核集团核工业西南物理研究院，成都 610225

Email: [lijq@swip.ac.cn](mailto:lijq@swip.ac.cn)

**摘要：**磁约束聚变等离子体湍流运输问题是实现聚变能源的最大障碍之一。探索托卡马克高约束运行模式的途径就是在充分理解湍流运输机理的基础上，通过外部控制（如加热、加料、特别是电流驱动等）和利用湍流非线性自组织过程激发大尺度结构（如带状流、环向旋转等）来规整湍流并抑制运输，从而触发 L-H 模式转换和形成内部输运垒 (ITB)。一方面，高温聚变等离子体湍流富含多种扰动模式（起源于不同驱动机制）和多时空尺度（从宏观、介观到微观尺度），高度非线性相互作用和磁位形复杂性是研究托卡马克湍流运输的挑战之一。另一方面，等离子体加热、加料以及电流驱动等外源不仅改变等离子体局域参数，而且引起等离子体输运结构 ITB 以及台基区域的形成，展现了运输的全域特征。此外，外源还可能驱动等离子体扰动从小振幅稳定状态到临界不稳定状态，饱和后达到大振幅准稳态。这一动力学过程不同于梯度驱动湍流从高度不稳定状态发展到饱和后的准稳态。面向即将建成的国际热核聚变实验堆 (ITER) 的运行和未来聚变工程试验堆或 DEMO，如中国聚变工程试验堆 (CFETR) 的设计，高能量阿尔法粒子慢化过程中与本底等离子体的能量交换成为主要的加热源，阿尔法粒子本身也成为粒子（可看成杂质）源。燃烧等离子体中多模多尺度相互作用问题成为更加突出的物理问题，并且芯部-边缘区域间的运输耦合展现出显著的全域性特征。

研究这些高度非线性、具有全域性的外源驱动型湍流运输问题的数值模拟要求求解物理量的整体（平衡+扰动部分）随时间演化过程。从动理学模拟的算法来讲这就是所谓的 full-f 模拟方法。长时间的 full-f 数值模拟在计算方法和经济性两个层面都具有很大的挑战性，基于改进的流体模型数值模拟（如回旋-朗道流体模型）可能是一个可替代和可利用的选择。基于以上考量，近年来我们自主开发了一个研究托卡马克外源驱动型湍流和全域输运特性的扩展流体程序 ExFC (Extended Fluid Code)。该程序采用 3D 全差分和先进的计算流体动力学 (CFD) 算法，建立一个求解多变量（物理量）的对流-扩散型流体模型方程组的平台。

本报告首先介绍托卡马克外源驱动型湍流和全域运输的特征，重点分析加热和动量注入情况下湍流结构与等离子体全域运输的相关性、以及剪切流的作用；数值模拟 ITB 形成的动力学过程及解析其物理机制。然后，介绍自主开发的扩展流体程序 ExFC 的进展和现状及功能。重点聚焦于托卡马克等离子体多模式多时空尺度湍流物理的扩展流体模型及其数值验证。这里的“多模式”物理模型主要包括 MHD 撕裂模（电阻性单、双撕裂模及扭曲撕裂模）、电磁 ITG（即 AITG）、捕获电子模 (TEM)、动理学气球模 (KBM) 等。最后，简要展示 ExFC 程序的具体应用。

**关键词：**等离子体湍流、输运、扩展流体模型、数值模拟、托卡马克

**基金项目：**国家重点研发计划磁约束聚变专项“面向聚变堆高约束运行模式的实验研究”项目 (2017YFE0301200)、国家自然科学基金项目 (11775069)。