

托卡马克磁流体平衡及 MHD 不稳定性程序介绍

作者：马骏，联系方式：junma@ipp.ac.cn

本研究小组致力于托卡马克磁流体平衡及 MHD 不稳定性相关的数值模拟，包括程序开发和数值模拟研究。程序发展的目标为在统一的 MHD 模型框架下，为 MHD 不稳定性方面的研究者提供自洽的、全面的数值模拟研究工具。

目前计划以及开发完成的数值模拟程序主要分为三个方面：1. 托卡马克磁流体平衡计算程序，2. 磁流体线性不稳定性专用模拟程序，3. 磁流体时间演化大型非线性模拟程序。借助这一系列模拟程序，研究者能够从指定的压强及安全因子剖面出发构建平衡位形，在得到平衡参数的基础上，一方面利用线性专用模拟程序高效快速的开展多参数下 MHD 不稳定性线性模的研究，另一方面可针对感兴趣的具体的物理过程，利用时间演化程序模拟从线性阶段到非线性阶段的完整动力学过程，且其线性阶段的结果可以与本征值模拟程序的结果互相验证，增强了研究结论的可信度。

目前已开发和正在开发的模拟程序情况如下：

1. 托卡马克磁流体平衡计算程序：

目前完成了固定边界等离子体的平衡求解程序。该程序以压强剖面和安全因子剖面为输入，用户可指定边界形状的拉长比及

三角化参数，计算得到磁通函数以及对应的磁面网格。该程序采用四阶差分格式和傅里叶谱方法相结合的数值格式，能有效得到较高精度的结果。计算得到的平衡以及网格数据将作为我们其他不稳定性模拟程序的必要输入数据。

2. 磁流体线性不稳定性专用模拟程序：

已开发了固定边界等离子体的磁流体线性不稳定性本征值模拟程序 SCELT(Symbolic Computation aided Eigenvalue and Linear code for Tokamkas)。该程序中自主开发了独立的符号计算模块和衍生的自动数值离散模块，其特点和优势在于采用符号计算功能自动推导各种坐标系下复杂冗长的磁流体线性模型，并完成自动数值离散，把原先依赖于人力的大量的模型推导、数值离散工作由程序自动完成，极大降低了程序编写的工作量和出错几率。此外，在 SCELT 框架下修改模型，增加新模型，改用数值离散格式都非常方便，从而使得程序具有良好的可扩展性。目前实现了柱位形和环位形下的功能，并在扭曲模、撕裂模、双撕裂模等物理问题研究中开展了大量的验证和研究工作。利用线性模拟程序，可对大量参数展开高效而快速的模拟分析，也便于研究者更有针对性地规划参数范围，开展非线性的时间演化动力学数值模拟研究。

3. 磁流体时间演化大型非线性模拟程序：

模拟程序 HCM (High accuracy Conservative MHD code) 基于守恒形式的扰动磁流体模型，并结合了现代计算流体力学中的

高精度守恒数值方法例如加权本质无震荡 (WENO)、间断有限元 (DG) 等数值格式开发。目前已实现柱位形下的模拟功能, 环位形下三维程序的开发工作接近尾声。开发完成的程序具有高精度 (不低于 3 阶精度)、守恒律、适合长时间计算的特点。得益于高精度和良好的数值稳定性, 程序已成功应用于模拟高磁雷诺数双撕裂模的时间演化动力学过程。研究发现双撕裂模的非线性演化中能够激发二级磁岛, 其产生和演化显著的加速了磁重联过程。