

论文创新性说明:

本论文在动理学求解方法方面进行了系统性的创新和优化,提出了一种结合 CODE 程序谱方法与 NORSE 程序面向对象编程思想的全新数值求解框架,实现了空间维度为 0D2P (即零个位置空间、两个动量空间)的电子分布函数演化计算方法。该方法能够完整描述放电过程中电子的速度分布演化,涵盖了电场驱动项、试探粒子碰撞项、回旋辐射阻尼项以及目前最为完备的逃逸电子雪崩源项等关键物理过程,从而可以在时变背景参数 (如等离子体密度、环电压等)的作用下,自洽地研究动理学方程的动态演化行为。与以往主要针对稳态背景的动理学求解程序相比,本论文提出的算法在保证较高计算精度的同时,大幅提高了计算效率,尤其适合研究变化背景下非热化电子分布函数的演化。通过引入面向对象编程的思想,程序结构更加清晰、扩展性更强,便于后续耦合更多物理过程或移植到更复杂的放电场景中。

在物理结果方面,本论文首次利用该计算框架展示了电子回旋辐射 (ECE) 信号前端峰的形成与逃逸电子雪崩效应之间的直接关联,揭示了其背后的物理机制。针对托卡马克放电平台期通过调控密度使其下降到某一阈值后出现 ECE 信号突然增强的实验现象,已有研究通常将其解释为逃逸电子雪崩的双阈值特性。然而,本论文提出了一个全新的物理图像,认为该现象与等离子体中磁扰动的增强密切相关,而非仅仅由雪崩源项的非线性增长引起。通过数值模拟与实验数据的对比,本论文验证了这一观点的合理性,并指出磁扰动在触发或增强逃逸电子生成方面可能起到关键作用,为理解逃逸电子动力学提供了新的研究思路。

此外,本论文对电子与电磁波的相互作用进行了深入的模拟研究,并结合色散关系分析发现了一类能够有效约束逃逸电子的电磁波能量阈值。在此基础上,提出了一种利用非寻常波抑制逃逸电子的新方法。研究表明,非寻常波在等离子体中具有较小的朗道阻尼,更容易通过反常多普勒效应作用于高能电子,实现对其能量的削减;而低杂波则由于朗道阻尼较大,更适合用于加热背景电子。论文进一步提出了一种“双模协同”的优化方案,即利用较高能量的低杂波加热背景电子,提高等离子体整体温度和电阻率,同时利用较低能量的非寻常波专门抑制逃逸电子,从而在理论上实现了背景电子加热效率和逃逸电子能量约束的双赢局面。这一方法不仅有助于改善托卡马克装置的放电品质,降低逃逸电子对第一壁和真空室的损伤风险,而且为未来装置 (如 ITER) 提供了一种具有应用前景的主动控制策略,具有重要的工程价值和学术意义。