

## 中子输运设计与安全评价软件系统 SuperMC “超级蒙卡” 研发进展

宋婧, 胡丽琴, 龙鹏程, 何桃, 王芳, 郝丽娟, 吴斌, 俞盛朋, 孙光耀, 何鹏, 甘佳,  
王磊, 杨琪, 蒋洁琼, 吴宜灿, 凤麟团队

中国科学院核能安全技术研究所, 安徽 合肥 230031

Email: [jing.song@fds.org.cn](mailto:jing.song@fds.org.cn)

**摘要:** 聚变核能系统的设计与安全评价中, 涉及到复杂的材料核素组成、形状复杂的空间结构以及极端耦合的多物理场, 导致中子输运各向异性强烈, 给传统的中子输运理论及其求解方法都提出了较大的挑战。为了解决上述难题, 凤麟团队自主研发了中子输运设计与安全评价软件系统 SuperMC “超级蒙卡”。

SuperMC “超级蒙卡” 历经 20 余年持续投入、十余次版本升级, 现已发展成为代码量超过 120 万行的大型核设计软件。它以辐射输运计算为核心, 支持包含核素燃耗、辐射源项/剂量/生物危害、材料活化与嬗变等的全过程中子学计算, 支持中子学、热工水力学、结构力学、化学、生物学等多物理耦合计算, 以高效高保真多物理计算、精准系统建模、可视化智能分析与虚拟仿真、网络协同云计算为系统特色, 可应用于核能系统设计与安全评价以及辐射医学、核探测等核技术交叉应用领域。

“超级蒙卡” 研发了支持全过程中子学模拟的云计算平台, 并在核心计算引擎方面发展了多种先进方法与技术。研发了粒子密度不均匀性偏倚的高效蒙特卡罗中子输运计算方法, 构建基于粒子密度不均匀性的重要性函数, 并累积历史贡献进行重要性迭代优化, 解决了强各向异性复杂核能系统的高效精准中子输运计算难题; 发展了连续-离散混合变量差分进化方法, 并基于 NSGA-II 的改进非劣排序方式进行种群个体前沿的快速分配, 同时采用新的排序策略、种群动态调整策略与改进的拥挤度算子实现更好的多样性与收敛性, 可实现聚变核能系统的设计方案智能设计。最新版本中, 发展了基于先进一步法的停堆剂量率计算和基于伴随通量的反应堆控制棒位置临界搜索, 支持移动终端的云计算服务, 并实现了源建模可视化、蒙卡计算结果的收敛性判断、高斯能量展宽等实用化功能。

“超级蒙卡” 已经通过了 2000 多道国际基准例题的验证和确认, 包括屏蔽积分实验基准库 SINBAD 的正确性验证, 以及聚变堆 (ITER、FDS 系列等) 等反应堆综合应用验证。同时, 基于源强在运国际第一的强流氘氚中子源科学装置 HINEG 等开展了系列验证实验。目前, “超级蒙卡” 已在全球 60 多个国家获得国际规模化应用, 并成功应用于 30 多个大型核工程项目。

**关键词:** SuperMC; 超级蒙卡; 核设计; 安全评价; 验证与确认