合肥研究院在Grassy ELM高约束等离子体与辐射偏滤器反馈控制兼容运行方面取得进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/10425.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

近日，中国科学院合肥物质科学研究院等离子体研究所科研人员在杂草型边界局域模（Grassy ELM）高约束等离子体与辐射偏滤器反馈控制兼容运行研究方面取得进展，发展了一种新的辐射偏滤器反馈控制方法。通过监测上外偏滤器靶板打击点附近等离子体的电子温度及反馈控制偏滤器X点附近辐射水平，在EAST装置上实现了Grassy ELM高约束等离子体放电期间稳定偏滤器部分脱靶与良好等离子体芯部约束性能的兼容，研究成果以*Divertor impurity seeding with a new feedback control scheme for maintaining good core confinement in grassy-ELM H-mode regime with tungsten monoblock divertor in EAST*为题发表于*Nuclear Fusion*期刊上。 在托卡马克磁约束核聚变装置中，偏滤器和第一壁将承受从芯部等离子体输运出来的大量稳态和瞬态热流粒子流，其中偏滤器靶板是等离子体与壁相互作用最剧烈的部件。对于ITER、CFETR等未来聚变装置而言，过高的热流粒子流将严重腐蚀偏滤器靶板和第一壁材料、产生杂质和增加粒子再循环，这些边界杂质和再循环粒子会返流进入主等离子体，严重破坏等离子体的约束性能甚至引起放电破裂。因此，如何在维持高约束性能等离子体稳态运行的同时对到达偏滤器靶板表面的稳态和瞬态热流粒子流进行有效控制，以避免强烈的等离子体与壁相互作用的发生，是未来ITER和CFETR实现其运行目标的基础，甚至还关系到装置的运行安全和核心部件的使用寿命。

一方面，利用辐射偏滤器技术实现偏滤器脱靶运行是当前靶板稳态热负荷的最佳控制方案。近二十年来，包括EAST在内的国际主流磁约束聚变装置均开展了大量相关实验，充分验证了该技术在有效缓解偏滤器稳态热负荷问题上的可行性。而在EAST等装置前期研究中，由于其控制算法局限性、诊断测量限制等因素，导致利用总辐射功率或偏滤器靶板离子饱和流作为控制信号的辐射偏滤器反馈控制方法并不能很好地解决长脉冲放电条件下稳定偏滤器脱靶状态的维持问题。另一方面，实现小幅度或者无ELM高约束性能运行是有效控制ELM所引起的强烈靶板瞬态热负荷问题的核心和出发点。在EAST装置中观察到的Grassy ELM放电就是一种拥有高频小幅度ELM的高约束运行模式，其瞬态热负荷一般仅为大幅度Type-I ELM的1/20左右，具有强杂质排放能力；并且Grassy ELM不会给边界及偏滤器区等离子体带来大幅度扰动，不易引起较大的偏滤器状态跳变现象，有利于维持稳定的偏滤器脱靶状态。这使得Grassy ELM放电模式成为实现辐射偏滤器与稳态H-mode放电兼容运行的一种理想候选方案。

对于当前国内外磁约束聚变装置乃至未来聚变堆而言，探索并发展在维持芯部高约束性能等离子体稳态运行条件下兼顾边界稳态与瞬态热流粒子流有效控制的集成化方案将是其亟需研究并解决的问题。然而，当前国际磁约束聚变界针对该问题的研究工作尚未系统性地开展。尤其是受制于装置实际条件和硬件能力，大多数托卡马克装置无法在契合未来聚变堆环境的大功率加热、低动量注入和金属壁的条件下开展长脉冲实验，从而导致其研究结果难以拓展到未来聚变反应堆装置

环境。针对这一当前磁约束聚变的关键物理问题，等离子体所科研人员于近年来开展了大量研究工作，也取得了一定进展。

近日，研究团队在EAST物理实验中发现，当在偏滤器区注入过量的杂质或累积杂质过多时，偏滤器区X点附近辐射水平会显著增加，且台基性能出现退化。针对这一实验现象，并结合由绝对极紫外诊断系统 (AXUV)
测量的X点附近辐射水平与偏滤器打击
点附近电子温度(T_{et}
)以及芯部约束性能之间良好的对应关系，研究团队在EAST装置上提出了一种新的辐射偏滤器反馈控制策略。其流程图如图1所示，在Grassy
ELM高约束等离子体放电条件下，首先注入混合杂质气体(50% N_e和50%
D_2
)提高偏
滤器辐射水平，
利用外靶板打击点附近偏滤器朗
缪尔探针测量的电子温度信号(T_{et}
)确定偏滤器脱靶的开始，即当打击点附近的T_{et}
下降至5-8eV，然后等离子体控制系统以当前X点附近AXUV通道（AXUV59）测量的辐射量加上一个可调增量为目标，通过调节充气压电阀供电电压的脉宽调制占空比，即上钨偏滤器外靶板打击点附近混合杂质气体注入量，实现对偏滤器辐射的反馈控制。实验结果表明，采用该控制策略实现了稳定的外靶板部分脱靶，即打击点附近
的T_{et}
维持在5-8eV范围内，红外相机测量
的外靶板表面峰值温度($_{TIR,peak}$
)
下
降并
维持在~18
0 ° C，并且等离子
体储能在整个反馈控制期间几乎保持恒
定，稳定维持在$H_{98,y2>1}$的良好整体能量约束水平，如图2所示。

在EAST装置上发展的这一新辐射偏滤器反馈控制方案，实现了在Grassy ELM高约束等离子体条件下，稳定辐射偏滤器部分脱靶与良好等离子体芯部约束性能的兼容运行，有效控制了瞬态和稳态偏滤器靶板热负荷，为EAST高参数长脉冲稳态运行放电提供了一个具有应用前景的等离子体控制方案，并为未来的稳态聚变反应堆控制提供了有益参考。

基于以上研究成果，等离子体所研究人员将依托升级后的EAST下钨偏滤器，进一步开展相关物理实验，优化放电参数，继续改进辐射偏滤器反馈控制策略，为在EAST装置上实现大于粒子平衡时间尺度的长脉冲高参数放电，以及未来聚变堆就与高约束性能芯部相兼容的偏滤器热负荷问题可靠解决方案提供关键物理和技术支持。

以上工作得益于EAST团队的通力协作以及国内外合作，相关工作受到国家自然科学基金安徽省区域创新发展联合基金U19A20113、国家磁约束核聚变能发展研究专项、中科院等科研项目的支持。

论文链接

PCS based radiative divertor control flow

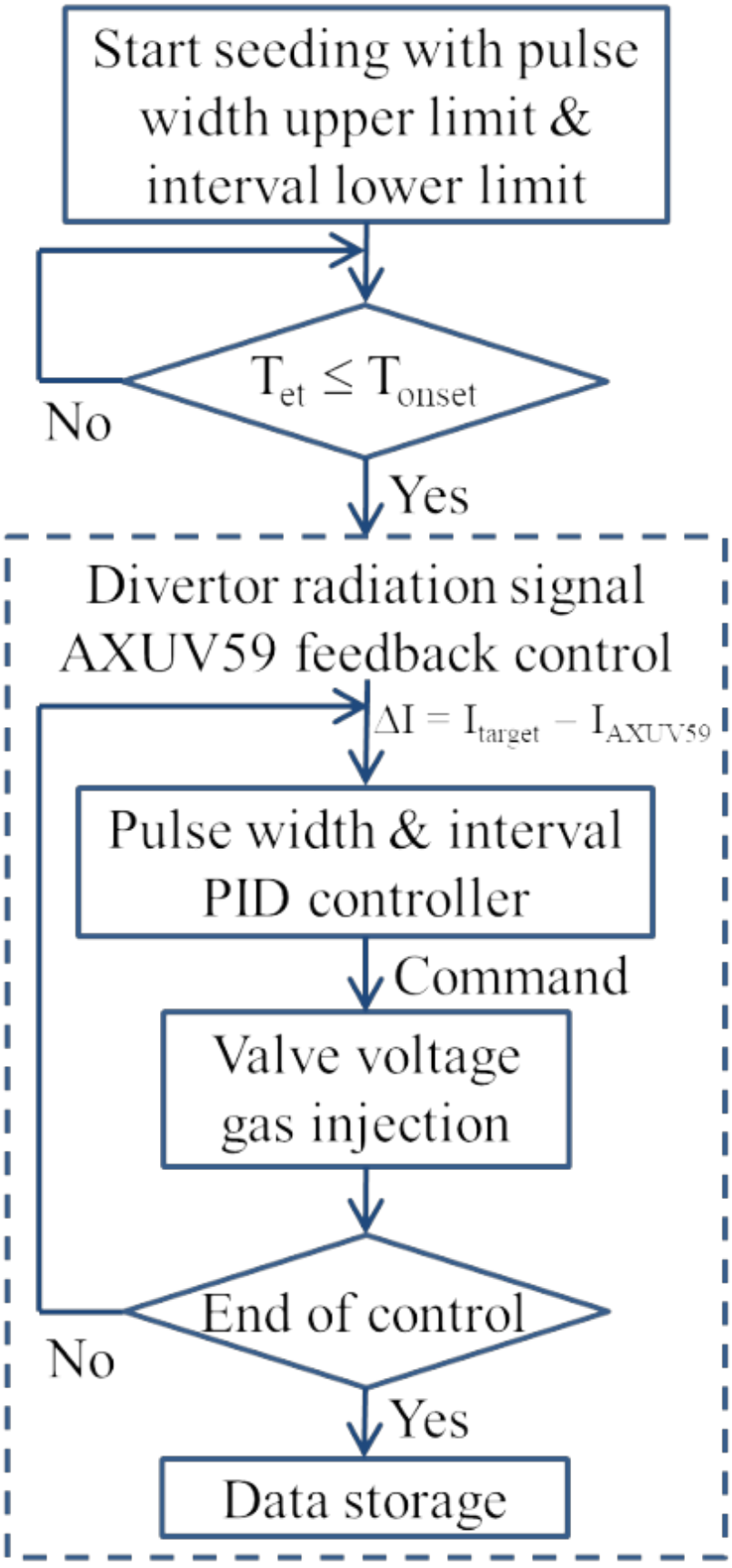


图1 EAST辐射偏滤器反馈控制策略流程图

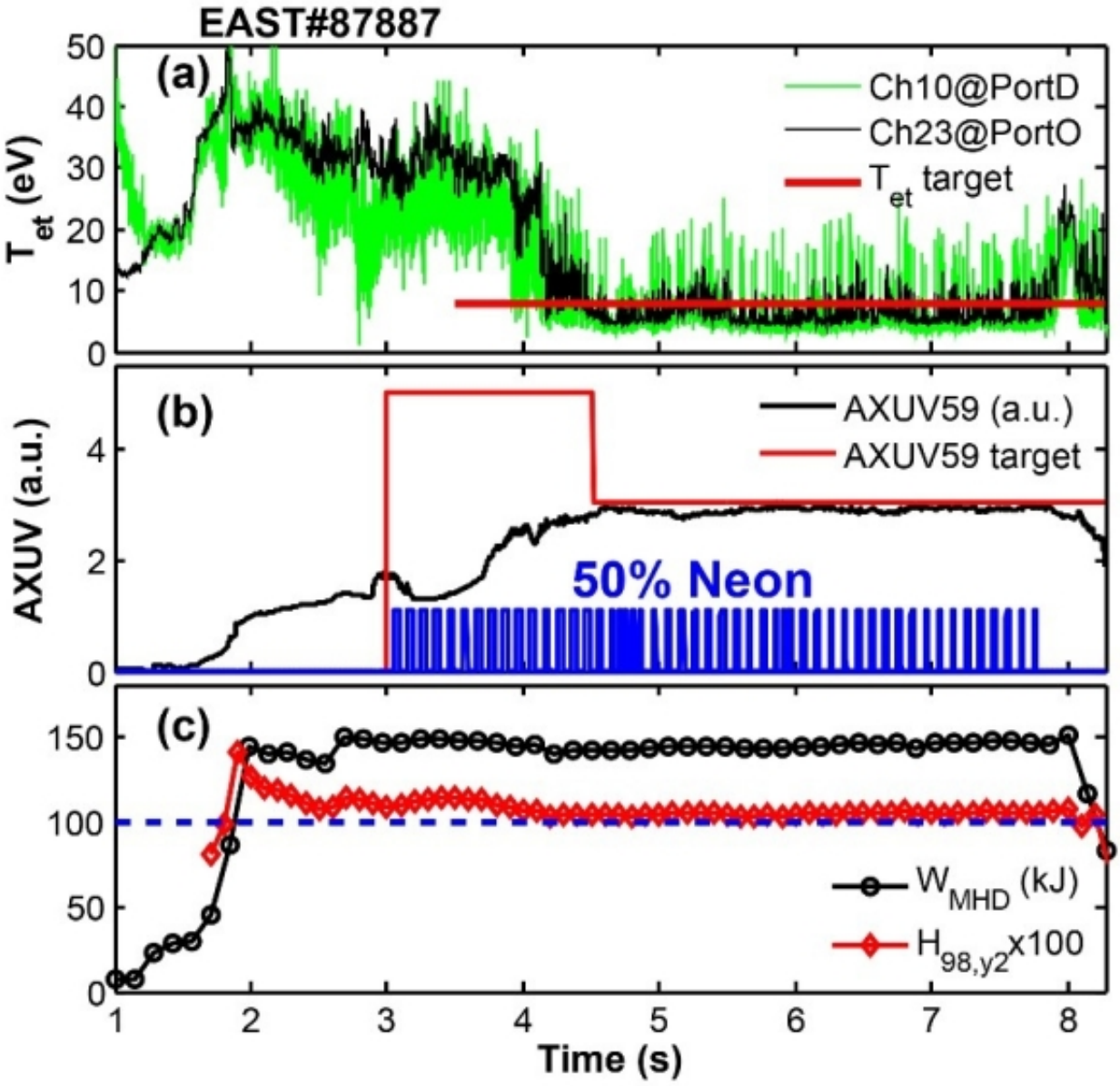


图2 EAST稳态高性能grassy-ELM H-mode放电与辐射偏滤器兼容运行控制典型炮放电参数（#87887）

研究团队单位：合肥物质科学研究院

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发