关于　低杂波和电子回旋波对ADITYA升级装置托卡马克等离子体参数的影响 k

S. Aich[1, 2*], S. Dolui[1,2], K. Singh[1,2], J. Ghosh[1,2], K.A. Jadeja[1,3], R.L. Tanna[1,4], K.M. Patel[1], K. Galodiya[1],A. Patel[1], L.K. Pradhan[1], B.K. Shukla[1], H. Mistry[1], J. Patel[1], H. Patel[1], D. Purohit[1], K. G. Parmar[1], P. K. Sharma[1,2],J. Kumar[1,2], B. Hegde[1,2], Abhijeet Kumar[1], Vismay Raulji[1], Praveenlal E. V.[1], T. M. Macwan[1,2], R. Kumar[1], A. Kumar[1,2], A. Kumawat[1,2], H. Raj[1], I. Hauque[1,2], Komal[1,2], S. Banerjee[1,2], P. Verma[1] 和ADITYA-U团队

[1]等离子体研究所，巴特，甘地讷格尔 382 428[2]霍米·巴巴国家研究所，培训学校综合楼，阿努沙克蒂纳加尔，孟买 400 094[3]萨乌拉施特拉大学纳米科学与先进材料系，拉杰果德 360 005[4] 尼尔玛大学科学研究所，艾哈迈达巴德 382 481

摘要： ADITYA升级托卡马克中的等离子体放电是通过变压器作用产生的，其中欧姆产生的等离子体由次级环电压驱动。当等离子体温度达到一定水平后，等离子体电阻率降低，欧姆加热效果变差，要进一步提高温度就需要采用其他加热技术。ADITYA-U托卡马克配备了一套42 GHz、500 kW的电子回旋共振加热（ECRH）系统。此外，装置还安装了一套工作频率为3.7 GHz的低杂波电流驱动（LHCD）系统，在欧姆电流驱动之后用于驱动非感应等离子体电流。尽管ECRH和LHCD的应用分别会显著提高等离子体温度和等离子体电流，但它们与等离子体的能量耦合会使多项实验测得的等离子体参数呈现若干有趣的变化。本研究探讨了这些显著的观测结果；据报道，这些结果此前尚未在ADITYA-U托卡马克中发现。

关键词： 等离子体动能、等离子体β、安全因子、电子回旋共振加热、低杂波电流驱动

1 引言

托卡马克是聚变装置中有潜力的候选者之一 [1-2]。在托卡马克中，变压器作用借助一组变压器（TR）线圈产生环向电压（环电压），从而驱动等离子体中的欧姆电流 [2]。氢的同位素——氘和氚——被认为是最适合核聚变的燃料。要实现氘氚聚变，等离子体温度需达到约 10 keV，而欧姆加热等离子体不可能达到这一温度。此外，若要长时间以欧姆方式驱动等离子体电流，就需要经济高效的欧姆电源；若使用超导线圈，还需要适当的冷却机制。以氘氚聚变为目标的现有聚变装置（如 ITER）需要采用其他辅助等离子体加热和电流驱动机制 [1]。在这方面，电子回旋共振加热（ECRH）是一种非常有效的加热电子的方式，最终可将等离子体温度提升至所需值 [3-4]。另一方面，中性束注入（NBI）和低杂波电流驱动（LHCD）技术已在全球广泛应用于托卡马克电流驱动 [5-7]。电流驱动对于延长等离子体持续时间至关重要，进而有助于实现所需的等离子体参数。

ADITYA升级装置是一台中型托卡马克，其大半径和小半径分别为75 cm和25 cm。等离子体击穿通过初始环电压~20 伏实现，随后在平顶区由 ~1.8伏驱动等离子体。采用负变流器[8]时，典型放电持续时间可达300 ms。该托卡马克配备了42 GHz-500 kW的电子回旋共振加热系统和3.7 GHz-250kW的低杂波系统。本工作探讨了电子回旋共振加热和低杂波发射对多个等离子体参数的直接影响。本文安排如下：第2节简要概述ADITYA-U中的电子回旋共振加热和低杂波系统；第3节总结应用电子回旋共振加热和低杂波系统后获得的结果；最后，第4节进行深入讨论并给出相应结论，同时展望未来的工作方向。

2 ADITYA-U中的电子回旋共振加热和低杂波电流驱动系统

低杂波系统连接至 ADITYA-U托卡马克的 5 号端口，并根据实验要求投入运行 [9-10]。采用无源-有源多结（PAM）发射器，从低场侧（LFS）注入频率为 3.7 GHz 的低杂波 [9-10]。根据实验要求，注入时段选在等离子体平顶期或平顶阶段结束时。另一方面，电子回旋共振加热系统连接至 ADITYA-U托卡马克的 14 号端口，并以 O 模从低场侧向等离子体注入。频率为 42 GHz 的电子回旋共振加热波注入欧姆等离子体，用于辅助预电离或加热等离子体

，也可兼具这两种用途 [3-4]。这些技术的详情及相关结果将在未来的出版物中分别讨论。

3 结果：等离子体加热和电流驱动的影响

本文的分析仅限于相似类型的放电，其中等离子体通过欧姆方式产生，并由环电压驱动。作为变压器的次级侧，击穿和电流驱动所需的有效环电压通常分别为 ~ 18 V 和 2 V。额外的电子回旋共振加热功率和低杂波电流驱动功率分别注入同一等离子体放电或不同的等离子体放电，以分别提高等离子体的能量和持续时间。

a. 抗磁性、等离子体β和储能

带电粒子绕磁场旋转时，会通过抵抗源磁场而表现出抗磁性，因此抗磁性是托卡马克等离子体的固有属性 [2]。托卡马克中的抗磁电流强烈取决于压力梯度（Δp），进而取决于等离子体密度（n_e）和温度（T_e）[11-12]。在欧姆驱动的低 p 等离子体中，抗磁电流不足以降低等离子体内部的环向磁场 B_Φ。相反，在存在等离子体电流时，螺旋电流会使 B_Φ 增强，因此等离子体表现得像顺磁性元件，极向β（β_θ）小于 1.0 [12]。

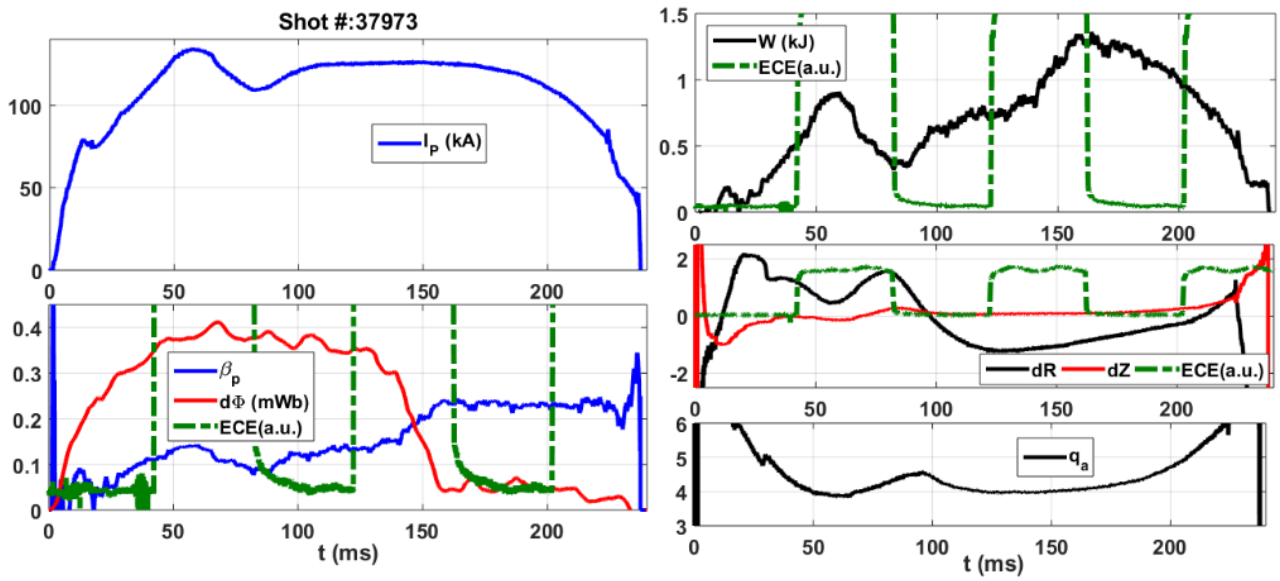

图1. 等离子体放电37973的不同等离子体参数随时间的变化曲线（如图例所示），以及发射的电子回旋共振加热功率（绿色）。

在 ADITYA-U托卡马克的等离子体放电过程中，使用抗磁环系统[13]测量有等离子体时的环向磁通与真空磁通之差，即抗磁通量 $\Phi_{dia} = (\Phi_{Pl} - \Phi_{Vac})$。测得该 Φ_{dia} 为 $\sim +0.3$ mWb。估算的 Φ_{dia} 为正，基本表明在此欧姆运行模式下，等离子体保持顺磁性。但是，电子回旋共振波成功耦合到等离子体后，会显著提高 Δp ，并增强抗磁电流。最终结果是，Φ_{dia}大幅降低；典型等离子体放电的情况如图1左下图中的红色曲线所示。图2展示了另一次典型放电，也观察到类似现象。图中，电子回旋共振波发射信号以绿色表示。因此，极向β β_θ 可按下式估算：

$$\beta_\theta = 1 - \frac{8\pi B_\Phi}{(\mu_0 I_p)^2}\Phi_{dia}$$

其中，I_p 表示等离子体电流，μ_0 为真空磁导率。β_θ 的时间变化曲线也以蓝色显示在图1和图2相应的子图中。显然，β_θ 的增强会改变Δp，使抗磁电流增强，欧姆等离子体的性质也因此由顺磁性转变为抗磁性。此外，随着$\beta_\theta(\infty n_e T_e)$增强，等离子体总动能也随之增加，如图1右上子图和图2右侧中间子图所示。在当前运行模式下，向等离子体放电中注入低杂波功率，并未对可检测范围内的抗磁性产生影响。

b. 安全因子

ADITYA-U欧姆等离子体通常在边缘安全因子为 $q_a \geq 4.0$ [8] 的条件下运行，且当达到最大值 $I_p \approx 210$ kA 时，q_a 降至 2.4。在发射低杂波功率的实验中，等离子体平顶期的驱动环电压保持较低，以便解析低杂波电流驱动产生的电流。根据低杂波功率与等离子体的耦合情况，q_a 没有明显变化。但有趣的是，电子回旋共振波与等离子体的耦合被发现强烈依赖于 q_a，而欧姆等离子体在 $q_a \approx 4.0$ 时更易实现成功耦合。例如，在图1所示的等离子体炮次37973中，等离子体电流从 100 ms 到 170 ms 保持稳定，其中一个电子回旋共振脉冲在此时间段（约 120 ms）发射；当 q_a 接近 4.0 时，发射功率与等离子体成功耦合。相比之下，第一个电子回旋共振脉冲则因 Φ_{dia} 突然下降而被清楚地捕捉到。图1和图2右下方的曲线显示了 q_a 随时间的变化。图2展示了另一个典型等离子体放电37976中类似的情况。

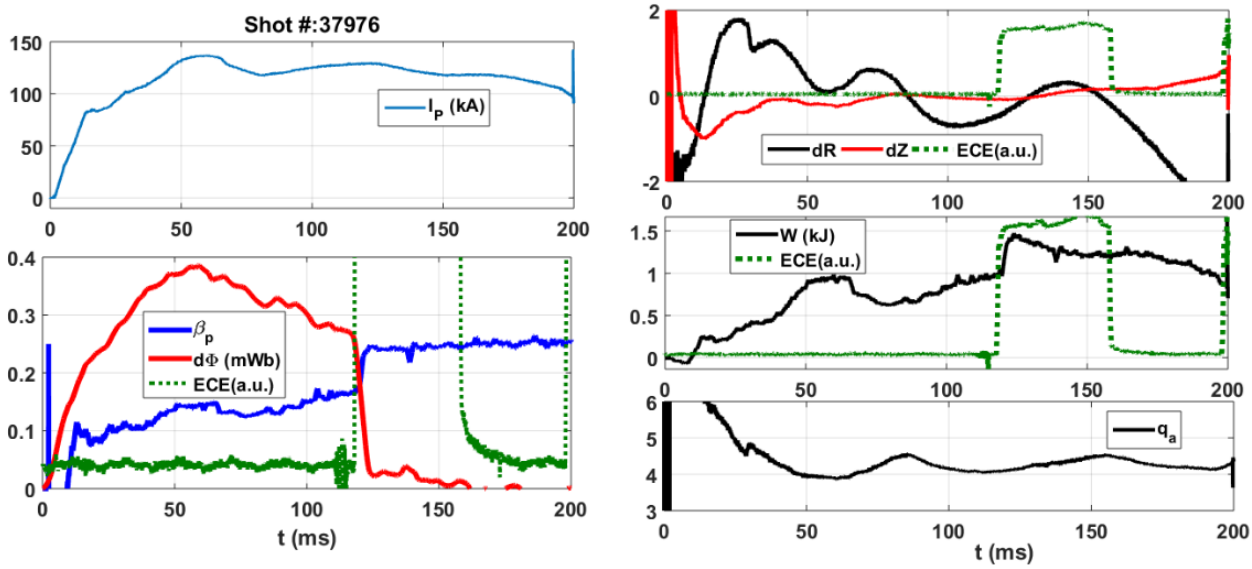

图2. 不同等离子体参数的时间变化曲线（如图例所示），以及等离子体放电37976中注入的电子回旋共振加热功率（绿色）。

c. 等离子体位置

ADITYA-U在限制器位形下的等离子体运行由实时水平位置控制系统 [8] 辅助实现，并利用磁信号和光学信号估算等离子体的水平及垂直运动。图1中右侧中部面板的红色和黑色曲线分别表示等离子体的垂直位置和水平位置。从图中可以明显看出，电子回旋波与等离子体的耦合会将等离子体推向低场侧（外侧）。这一现象已在多次等离子体放电中观察到，图2展示了另一典型放电的结果。

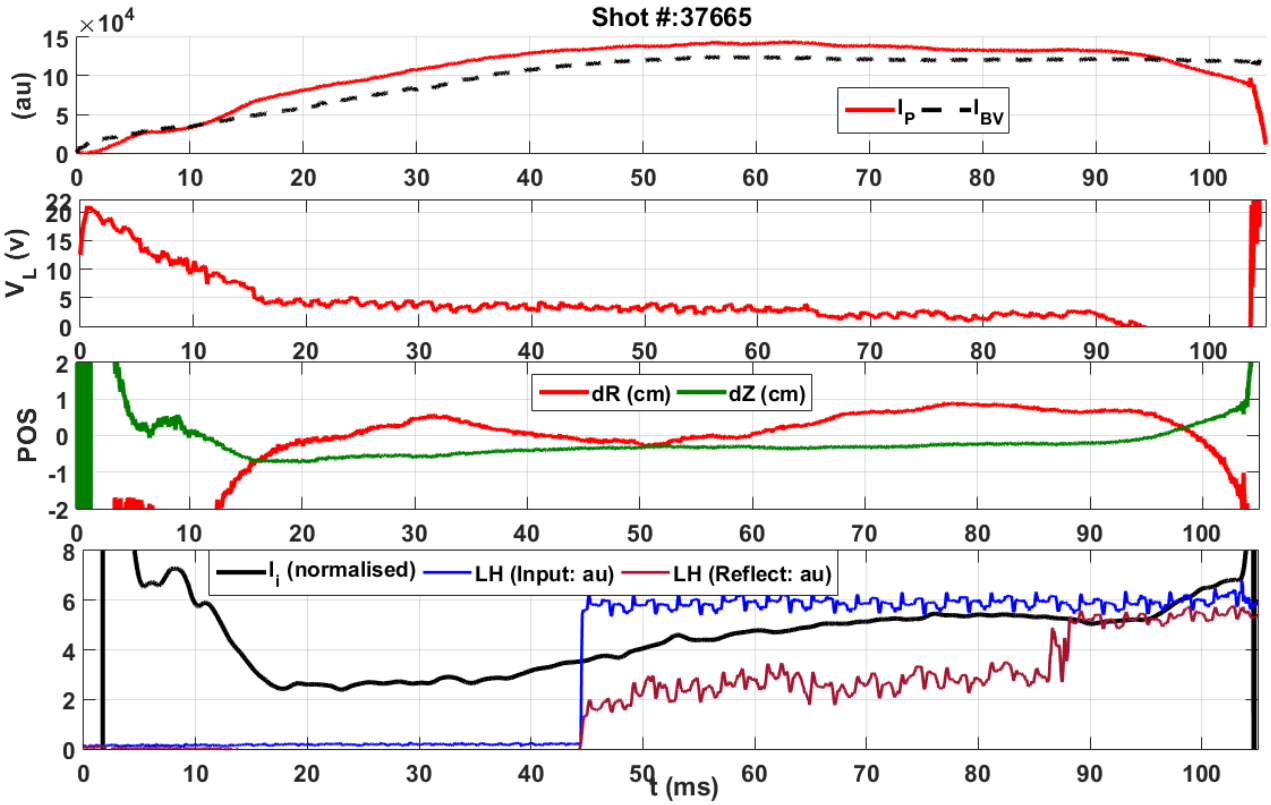

图3. 等离子体放电37665的不同等离子体参数（如图例所示）、环电压，以及发射的（蓝色）和反射的（灰色）低杂波功率的时间演化曲线。

与电子回旋波存在时等离子体的水平运动行为相反，低杂波耦合在很大程度上取决于等离子体向高场侧（内侧）的位置移动。研究发现，等离子体柱处于外侧位置时，更有利于发射的低杂波功率的耦合。例如，图3总结了低杂波电流驱动功率耦合对等离子体位置偏移和电感（归一化）的影响。最上方面板总结了等离子体电流和垂直磁场线圈中的电流；第二和第三面板分别给出了环电压和等离子体位置随时间的变化。第四面板总结了发射的低杂波功率（蓝色）和反射的低杂波功率（灰色）的时间变化，以及以黑色表示的等离子体柱电感；该电感根据测得的垂直磁场和极向β估算得到。另一典型等离子体放电37733的类似结果总结于图4。

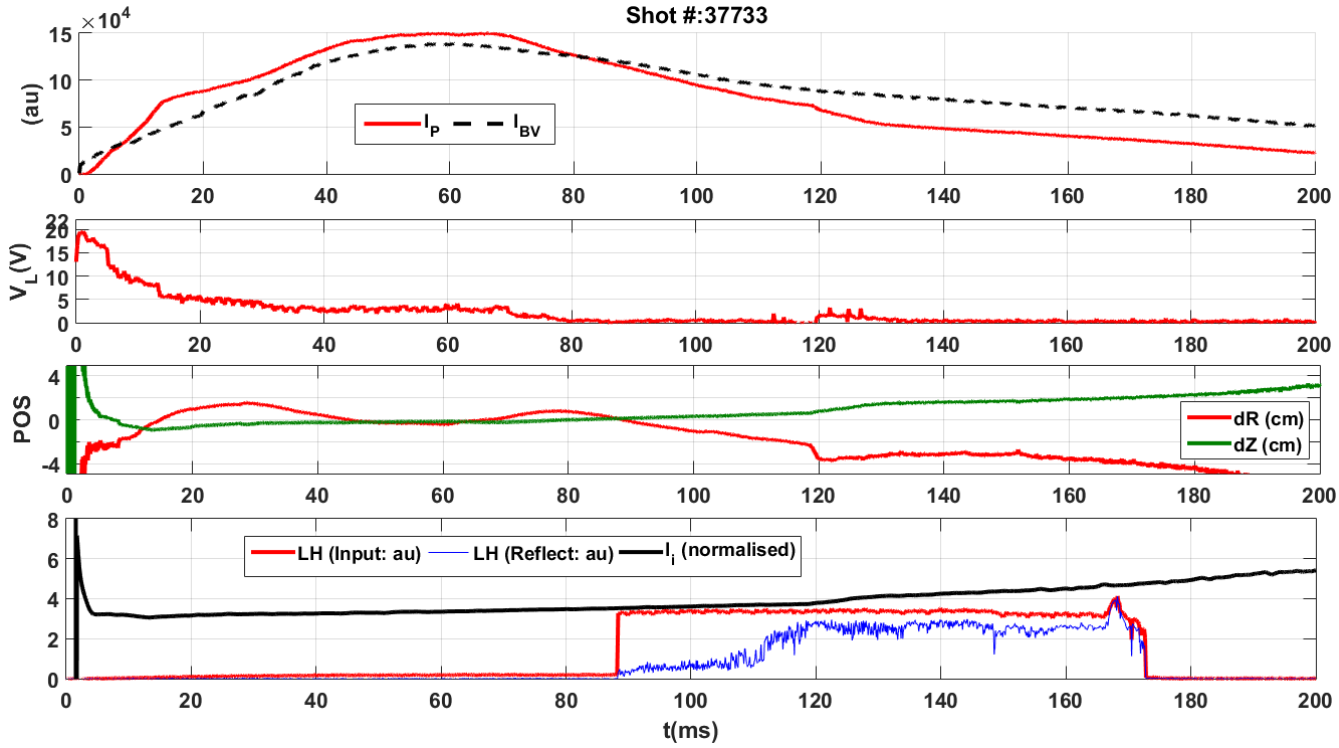

图4. 图例所示各等离子体参数及环电压的时间变化曲线，以及等离子体放电37733中发射（红色）和反射（蓝色）的低杂波功率。

4 讨论与结论

辅助机制驱动电流或加热等离子体对等离子体参数的影响，并不总是那么容易追踪，因此这一研究领域仍值得进一步探索。衡量这些机制对等离子体参数的直接影响不仅很有意义，也有助于了解在所运行的参数范围内，发射功率与等离子体之间的有效耦合情况。本研究总结了关于低杂波电流驱动和电子回旋共振加热对ADITYA-U托卡马克中若干实测等离子体参数即时影响的一些初步观察结果。

电子回旋共振加热功率与等离子体实现令人满意的耦合，可增强抗磁电流、β_p 以及等离子体动能。最终，维持水平位置平衡所需的垂直磁场对于当前等离子体电流而言将变得不足，因此整个等离子体柱有向外侧移动的趋势。此外，电子回旋共振功率只有在超过某个临界值 β_p 后才能与等离子体耦合；对于ADITYA-U欧姆等离子体，该值为0.16。研究还发现，当 q_a ~4.0时，电子回旋共振加热功率能够实现耦合，这表明电流密度分布对功率耦合有着至关重要的影响。

通过比较发射信号与相应的反射信号，可以观察到ADITYA-U托卡马克中的低杂波电流驱动功率耦合。研究发现，当等离子体位于外侧时，耦合效果较好；随着等离子体逐渐移向内侧，耦合效果也逐渐减弱。尽管目前仍在对此现象进行更深入的研究，尚无法对此作出完整解释，但相关内容将在未来的出版物中讨论。此外，低杂波功率与等离子体的耦合减弱，会使等离子体电流密度剖面从较平坦的状态恢复为峰化分布，这种分布通常见于欧姆驱动等离子体[14]。例如，放电37733中l_i在120 ms后上升（图4），随后低杂波耦合减弱，这清楚地表明了这一现象。低杂波电流驱动对l_i的影响从图3中看得更为明显。最初在约~ 45 ms时，低杂波电流驱动耦合效果很好，其功率支持离轴电流驱动，因此l_i的上升并不明显；接近88 ms时，l_i开始下降，随后进入平顶阶段。之后（90 ms以后），耦合效果变差，低杂波的电流驱动作用随之减弱，因此l_i趋于快速上升，表明电流分布出现峰化。

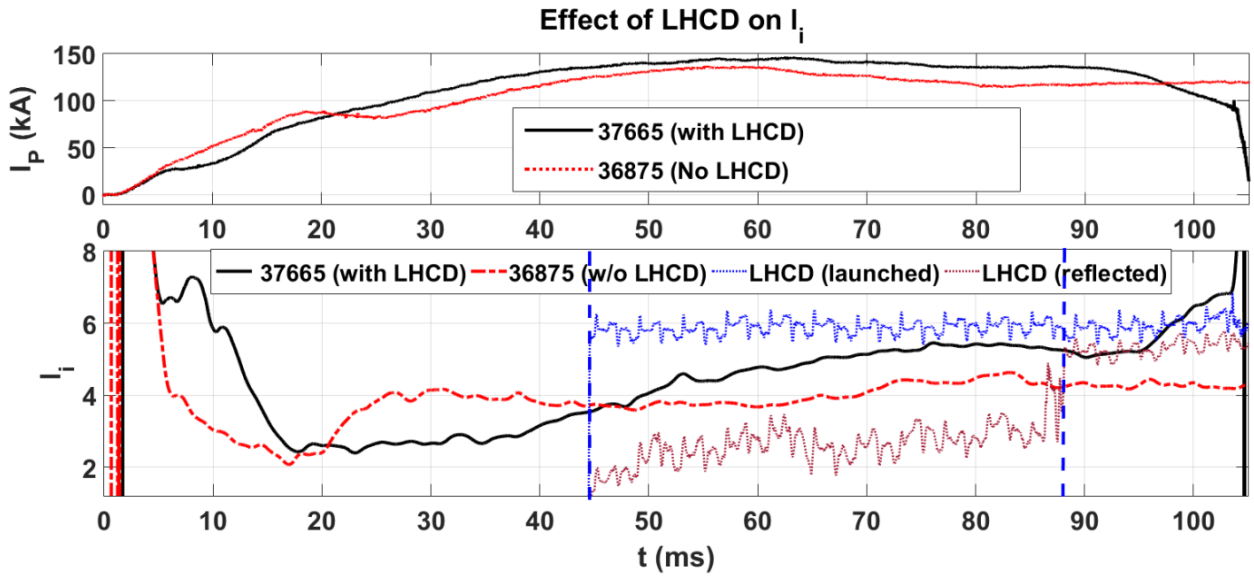

图5. 如图例所示的不同等离子体参数及环电压的时间曲线，以及等离子体放电37733中发射（红色）和反射（蓝色）的低杂波功率。

图5用于对两个参数几乎相同的等离子体放电进行公平比较，其中一个放电（37665）采用低杂波电流驱动，另一个（35875）未采用低杂波。l_i 强烈依赖于电流密度分布，而l_i 的值较低则表明分布较宽。在等离子体平衡期间，电流分布不会突然变化，因此 l_i 在等离子体平顶期几乎保持平台状态，如炮次 36875所示。从对 l_i 的比较中可以清楚看出，37665中低杂波功率与等离子体的耦合减弱后，电流分布峰化导致l_i 突然上升。

本文总结了电子回旋共振加热和低杂波电流驱动对一系列等离子体参数的初步影响；此外，其他等离子体参数所受的更多样化影响及其物理解释和重要性也正在研究中，并将于近期通过后续论文报告。

致谢

作者感谢电子与数据采集部门的全体团队成员，他们直接或间接地为本项工作做出了贡献。此外，作者也感谢低杂波电流驱动、电子回旋共振加热和AOD团队全体成员给予的支持。

参考文献

1. Campbell D J， 第27届国际原子能机构聚变能大会：EX/C、EX/S和PPC分会总结，《*Nuclear Fusion*》，60（2020）027001。2. WESSON J，《托卡马克》，牛津，*Clarendon*（1997）。3. Lloyd B 等，ITER中的电子回旋共振加热辅助启动，《等离子体物理与受控聚变》，38（1996）1627。4. Taguchi M，托卡马克等离子体中的电子回旋共振电流驱动，《等离子体物理与受控聚变》，31（1989）241。5. Yoshino R，JT-60中的高功率加热和电流驱动，《等离子体物理与受控聚变》29（1987）1377。6. Cardinali A 等， 高磁场、高密度托卡马克构型中的低杂波电流驱动建模，《物理学杂志：会议系列》，1125（2018）012004。7. Sharma P K 等， SST1托卡马克中的低杂波电流驱动实验，《*Nuclear Fusion*》，62（2022）056020。8. Tanna R L 等，ADITYA-U托卡马克物理结果概述及未来实验，《*Nuclear Fusion*》，64（2024）112011。9. Jain Y M 等，ADITYA-Upgrade 托卡马克低杂波电流驱动系统用被动-主动多结发射器（PAM）的射频设计，《*Fusion Engineering and Design*》，134（2018）109。

10. Jain Y M 等，《ADITYA-Upgrade 托卡马克低杂波电流驱动系统被动-主动多结发射器的多物理场分析》，《*Fusion Engineering and Design*》147（2019）111225。11. Hutchinson I H，《等离子体诊断原理》，剑桥大学出版社，剑桥（1987）。12. BAK J G 等，《韩国超导托卡马克高级研究装置中的抗磁环测量》，《*Review of Scientific Instruments*》，82（2011）063504。13. Aich S 等，《Aditya-U 托卡马克中抗磁环的设计与测量》，《Radiation Effects and Defects in Solids》（2024），DOI：10.1080/10420150.2024.2378424。14. M. Sakamoto 等，《在TRIAM-1M中通过联合低杂波实现电流剖面控制并提高电流驱动效率》，《*Nuclear Fusion*》，40（2000）453。

_____通讯作者电子邮箱：
suman.aich@ipr.res.in（Suman Aich）