

引用格式: 夏冬辉, 卢婧, 陈曦璇, 等. 磁约束等离子体电子回旋加热技术发展现状 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 1-9. XIA Donghui, LU Jing, CHEN Xixuan, et al. Development status and trends of the ECH technology for the magnetic confinement fusion [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-061.

磁约束等离子体电子回旋加热技术发展现状

夏冬辉[✉], 卢婧, 陈曦璇, 方新宇

(华中科技大学电气与电子工程学院, 强电磁技术全国重点实验室, 磁约束聚变与等离子体国际合作联合实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: [目的] 磁约束聚变研究中, 电子回旋加热 (ECH) 和电流驱动手段应用广泛, 包括但不限于等离子体的启动、加热、无感电流驱动和磁流体不稳定性控制等。近年来, 针对未来聚变堆发展需求, 电子回旋加热相关技术得到了长足发展, ECH 已成为磁约束聚变装置中主要的辅助加热手段之一。[方法] 首先对 ECH 系统进行简介, 阐述了其组成部分、特点和应用现状; 然后重点从 4 个方面论述了目前 ECH 系统相关技术的发展现状与趋势。[结果] 结合 ECH 相关技术的研究现状及应用需求, 得出各相关技术发展的重难点。[结论] 文章立足于 ECH 相关技术的发展现状与趋势, 从高频以及多频回旋管 (微波源)、ECH 系统智能控制技术、高效电流驱动技术以及基于回旋管的相干汤姆逊散射技术等多个方面, 对 ECH 系统相关技术的未来研究方向及应用进行了展望。

关键词: 电子回旋加热; 回旋管; 智能控制; 电流驱动; 相干汤姆逊散射

中图分类号: TL4; TN015

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0001-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-061

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Development Status and Trends of the ECH Technology for the Magnetic Confinement Fusion

XIA Donghui[✉], LU Jing, CHEN Xixuan, FANG Xinyu

(International Joint Research Laboratory of Magnetic Confinement Fusion and Plasma Physics, State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: [Introduction] In magnetic confinement fusion research, electron cyclotron heating (ECH) and current drive means are widely implemented for applications including, but not limited to, plasma initiation, heating, non-inductive current drive, and magnetohydrodynamic instability control. In recent years, ECH-related technologies have experienced significant development in response to the development needs of future fusion reactors, and ECH has become one of the main auxiliary heating means in magnetic confinement fusion devices. [Method] Firstly, the ECH system was introduced, and its components, characteristics and application status were described; then the development status and trends of ECH system-related technologies were discussed with emphasis on four aspects. [Result] Combined with the research status and application requirements of ECH-related technologies, the important and difficult points in developing each related technology are identified. [Conclusion] Based on the development status and trends of ECH-related technologies, the article forecasts future research directions and applications of ECH system-related technologies in diverse aspects, including high-frequency and multi-frequency gyrotrons (microwave sources), the intelligent control technology of ECH system, the high-efficiency current drive technology, and the gyrotron-based collective Thomson scattering technology.

收稿日期: 2024-03-05 修回日期: 2024-04-03

基金项目: 国家自然科学基金青年项目“基于对称分布宽带定向耦合器的电子回旋波模式实时分析技术研究”(11605066); 湖北省重点研发计划资助“回旋管大功率太赫兹连续波源技术研究”(2021BAA167)

Key words: ECH; gyrotron; intelligent control; current drive; collective Thomson scattering

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

聚变能是人类未来理想的清洁能源。为实现聚变反应并进行相关研究,需要将等离子体加热到数亿摄氏度高温,并稳态运行。磁约束聚变反应中,传统的欧姆加热受限于加热效率随着等离子体温度提升而下降,一般仅能将等离子体加热到数千万摄氏度的量级,无法满足聚变反应的要求,因此需要采用辅助加热手段进一步提高等离子体的温度^[1]。

电子回旋加热(Electron Cyclotron Heating, ECH)是磁约束聚变领域一种重要的辅助加热手段,其基本原理是利用高功率毫米波与等离子体共振,将波的能量传递给等离子体,从而进行等离子体加热和调控等^[2]。常见的 ECH 系统组成如图 1 所示,主要由波源系统、电源系统、传输与天线系统、控制系统及冷却系统等组成^[3]。

在聚变实验装置中, ECH 波源系统产生的特定频率的高功率毫米波,通过传输线传输到装置附近,然后通过天线系统将微波以特定角度注入到等离子体中,最终沉积到等离子体中期望位置。图 2 展示了 J-TEXT 装置 105 GHz ECH 系统示意图,包括系统基本组成、发射器原理图以及 350 kW 注入情况下的等离子体加热效果。相对于其他加热手段, ECH 具有以下特点: (1)波与等离子体的耦合机制较

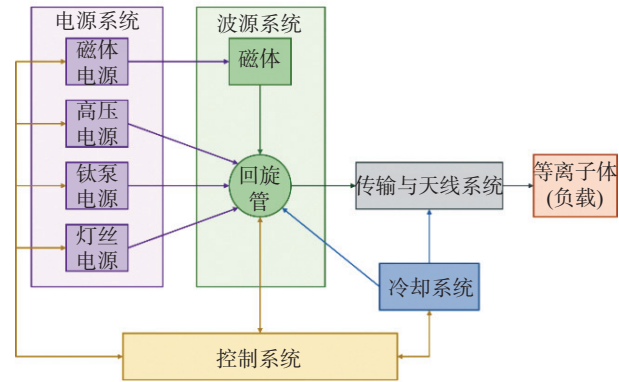


图 1 ECH 系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ECH system

为简单; (2)可以从远离等离子体处以准光学方式注入; (3)能够选择加热区域,从而进行局部加热来改变电流剖面和控制不稳定性等^[2]。因此, ECH 既是一种重要的辅助加热手段,也是理想的调控手段。除了用于常规的等离子体加热和电流驱动外, ECH 还可用于等离子体启动、磁流体不稳定性控制、电流剖面控制、粒子输运以及高能粒子等研究^[2, 5-6]。

近年来,随着高功率回旋管的发展, ECH 已成为磁约束聚变装置中主要的辅助加热手段之一。目前,国内外各主要磁约束核聚变装置均配备了兆瓦量级电子回旋加热系统,如德国 ASDEX-U^[7]、美国 D III-

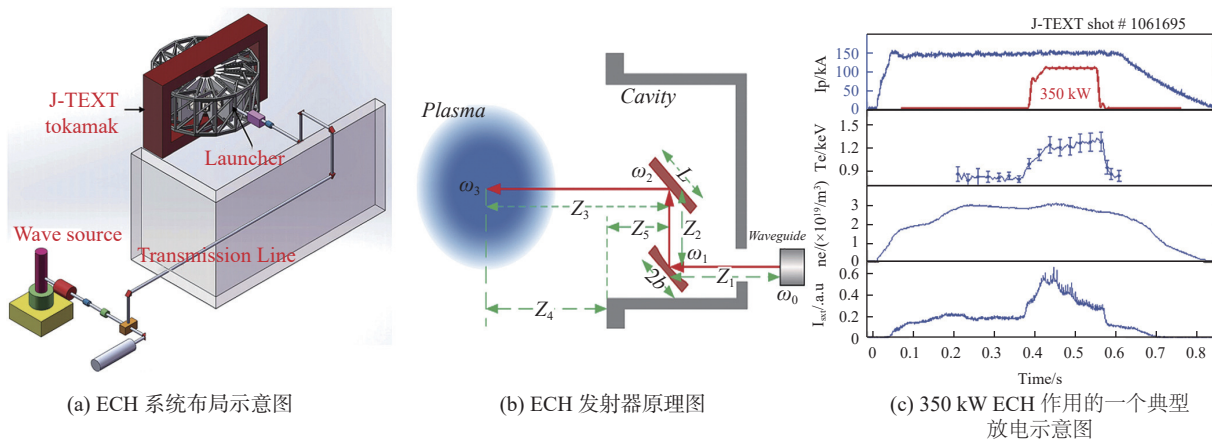


图 2 J-TEXT 装置 105 GHz ECH 系统示意图^[4]

Fig. 2 Schematic of the 105 GHz ECH system on J-TEXT

D^[8]、中国 EAST^[9]、HL-3^[10] 和 J-TEXT^[3] 等托卡马克装置和德国 W7-X^[11]、日本 LHD^[12] 等仿星器装置。同时, ECH 也是新一代聚变装置如国际热核聚变实验堆(ITER^[13])及未来聚变堆级装置重要的等离子体加热和调控手段。

随着磁约束聚变技术的不断发展, ECH 相关的技术发展具有以下特点, 包括但不限于: (1) 回旋管呈现出高频与多频点的发展趋势; (2) 智能控制技术逐步发展并应用于 ECH 系统以提高系统在运行过程的可靠性与稳定性; (3) 高效电流驱动技术成为实现未来聚变堆先进运行模式下高聚变增益稳态运行所面临的主要挑战。此外, ECH 系统的微波源回旋管也可以用于相干汤姆逊散射(Collective Thomson Scattering, CTS)诊断。文章将主要从以上 4 个方面进行简要介绍, 需要说明的是 ECH 相关技术的发展远不止上述内容。

1 高频及多频回旋管

各个装置上的 ECH 系统组成结构虽然不尽相同, 但其核心器件都是产生高功率毫米波的波源回旋管。回旋管一般分为二极管型和三极管型, 典型的二极管型回旋管如图 3 所示, 其主要由电子枪、谐

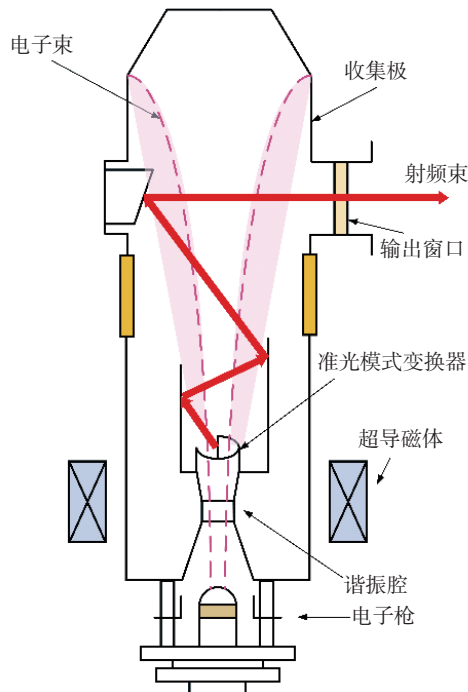


图 3 回旋管组成结构示意图^[14]

Fig. 3 Schematic diagram of the composition of the gyrotron^[14]

振腔、准光模式变换器、输出窗口、收集极等组成^[15]。其基本原理如下: 阴极发射的空心电子束经电场加速和特定的磁场位形压缩后进入谐振腔, 与电磁波相互作用后通过能量传递激发高功率微波, 最后通过准光模式变化以准高斯模式从输出窗口辐射出去, 同时相互作用之后的电子束在磁场的引导下进入收集极^[15]。

对于未来聚变堆, 为提高聚变增量, 通常希望装置能够工作在较强的磁场条件下。而回旋管的工作频率与装置的磁场为近似正比关系。因此, 近年来, 研究人员已逐步将注意力转移到 200 GHz 以上高频回旋管的研制^[16,17]。在托卡马克装置中, 由于其环形磁场的大小取决于等离子体中的径向位置, 因此 ECH 系统的频率将取决于期望的加热或电流驱动区域在等离子体中的位置。对于给定的等离子体位形(密度剖面、温度剖面)和装置参数(磁场、可能的发射位置), 为选择出特定的最佳频率, 需要进行充分的优化计算^[15]。由于空间和成本的限制, 导致在 ECH 系统每个功能的最佳频率之间, 需要进行权衡与折中。同时, 在高频条件下, 回旋管内焦耳损耗和介电损耗导致的局部发热不可忽视。为了将热负荷限制在一定范围内, 需要选择更高阶的振荡模式, 导致模式竞争更为激烈。因此, 限制高频回旋管腔体热负荷和抑制其中的竞争模式振荡是高频回旋管的研究重点^[18]。

此外, 近年来 ECH 系统中多频系统的比例也在逐步提升。回旋管所产生的毫米波在等离子体中的沉积位置是 ECH 相关研究中需要重点关注的。一般来说, 决定波沉积位置的主要参数是装置磁场、毫米波的频率和入射角度, 与 ECH 系统直接相关的参数即毫米波的频率和入射角度^[2]。目前, 对于大多数磁约束核聚变装置上的单频 ECH 系统而言, 主要通过调节天线改变毫米波入射的极向角度和环向角度来改变毫米波的沉积位置。

相对于单频 ECH 系统, 多频系统可以通过调整频率来改变波的沉积位置, 从而减少对天线角度和窗口大小的要求^[19]。此外, 多频系统还能够满足不同运行阶段和方案的需求, 以进行各种物理实验研究。因此, 多频方案更加适用和灵活, 在新建聚变装置 ECH 系统中较为有竞争力的方案。

目前德国 ASDEX-U^[20]、瑞士 TCV^[21]、韩国

KSTAR^[22] 以及日本 JT-60SA^[23] 等装置均发展了或者正在发展多频 ECH 系统, 相关参数如表 1 所示。日本国立量子科学与技术研究院针对 ITER 研制的多频回旋管实现了连续波工作模式下单个回旋管在 104 GHz、137 GHz 和 170 GHz 都达到了 1 MW 量级的输出功率, 并计划进一步改进该多频回旋管, 以满足 ITER 装置在不同阶段的运行要求^[13]。此外, 设计中的欧盟 DEMO 装置 ECH 系统除考虑 240 GHz 左右的单频方案外, 亦考虑了多频方案, 在多频方案中 ECH 系统将运行在 4 个不同的频率点, 这将有效地提升系统的灵活性, 满足不同运行方案需求^[24-25]。

表 1 国内外部分装置多频 ECH 系统相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of multi-frequency ECH systems for some domestic and foreign installations

装置	频点数	频率/GHz	功率/MW
ASDEX-U	2	140	0.91
		105	0.62
TCV	2	84	1.00
		126	1.00
KSTAR	2	105	0.80
		140	0.95
JT60-SA	2	110	1.00
		138	1.00

未来, 多频点下的准光模式变换、高功率毫米波的低损耗传输以及波与等离子体的高效耦合等, 对多频 ECH 系统的应用提出了更高的挑战。由于波的传播特性等会随着波的频率发生变化, 现有单频 ECH 系统中的准光、极化等关键技术难以直接应用至多频 ECH 系统。当频率变化导致波与等离子体参数失配时, 波在等离子体中吸收效率将会较低, 未被吸收的微波能量将会影响装置部件的安全运行, 甚至导致系统损坏。因此, 在多频点下如何实现同样的高功率毫米波高效传输、波与等离子体的高效耦合等亦是未来 ECH 系统的研究重点。

2 ECH 系统智能控制

为使 ECH 系统实现良好的加热或调控效果, 必须保证其运行过程的可靠性与稳定性, 因此智能控制技术正逐步发展并应用于 ECH 系统以满足这一条件。

回旋管是 ECH 系统中的核心器件, 用于产生特

定频率的高功率微波, 同时回旋管也是一种较为脆弱的真空电子器件。回旋管的工作状态主要由阴阳极电压、灯丝功率、磁场强度、真空状态等因素决定。回旋管运行过程中, 任一参数偏离正常运行区间都可能导致回旋管及其辅助设备发生故障。运行过程中常见的故障主要有阴阳极过压过流、弧光打火、无微波输出等。一旦运行出现故障, 需要在规定时间内进行保护动作以避免回旋管受到损害。

传统的控制保护策略将通过快速关断高压电源并闭锁当前所有时序的方式响应故障, 这种策略虽然能够在很大程度上保护回旋管和系统中的其他器件, 但由于中止了回旋管运行, 会导致相关实验或测试的效率降低。因此, 近年来, 研究人员逐步考虑将智能控制技术引入并应用于 ECH 系统。智能控制技术的调控作用包括但不限于: (1) 根据运行过程中产生的特定信号进行故障预测, 并实现故障避免; (2) 系统一旦出现故障相关保护及时动作, 保证回旋管的安全; (3) 一旦出现故障系统能够进行快速恢复, 以避免实验过程的中断或 ECH 功率下降影响实验。不少装置基于此对其 ECH 控制系统进行优化设计, 以提高运行过程的可靠性与稳定性, 同时有利于等离子体相关实验的高效开展^[17,26], 如 EAST 装置针对回旋管中央控制器发生故障时调试工作繁琐、难以查找异常发生的原因等问题, 设计了一套实时在线的异常检测和诊断逻辑, 通过对 ECH 系统进行异常诊断设计与仿真, 实现了实时在线故障检测和诊断的功能^[27-28]。

应用于运行过程的智能化调控, 还包括故障预测、故障避免、快速恢复控制等内容, 其示意图如图 4 所示。故障预测是回旋管故障避免的前提, 故障预测单元将预测结果传递给故障避免单元, 当故障预测单元判断即将出现回旋管故障时, 故障避免单元执行相应策略。美国 DIII-D 装置通过识别故障前兆, 调节阴极参考电压, 实现了管体电流故障避免的良好效果^[29]。故障避免的概率虽然可以通过不断优化模型等方式尽可能提高, 但还是不能完全保证不发生任何故障, 在故障发生后, 通过快速恢复控制使回旋管尽快恢复正常运行状态, 二者可以互为补充。

目前, 不少磁约束聚变装置针对快速恢复控制展开研究并取得了一定成果。德国 W7-X 装置相关研究人员提出了一种利用回旋管迟滞特性的自动模

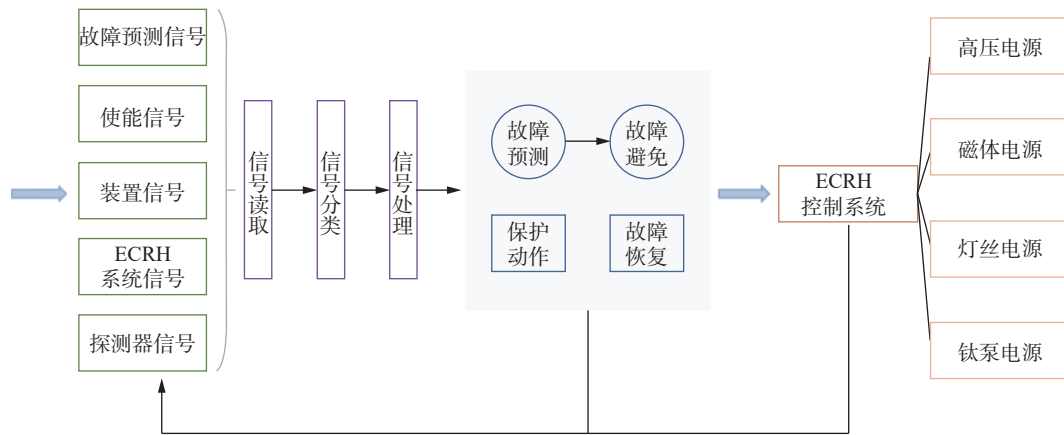


图4 智能化调控示意图

Fig. 4 Schematic diagram of intelligent regulation

式恢复算法^[30], 反馈控制系统结合该算法应用于ECH系统, 确保回旋管以尽可能高的输出功率稳定运行, 并在模式丢失后能够实现快速恢复^[31]。ITER装置通过引入“暂停”和“恢复”功能实现对模式跳变的智能化调控, 可以在不关断主电源的情况下, 实现回旋管振荡的自动恢复, 具体实现方式如下: 当发生不期望的模式跳变时, 通过闭合半导体开关将阳极电极短接到阴极电极上, 从而阻止电子束发射, 即“暂停”功能; 经过特定的时间间隔后, 不期望的模式消失, 开关自动关断, 主模重新产生并“恢复”振荡^[17]。

基于ECH系统高频与多频的发展趋势, 未来的控制系统将会更复杂, 在故障预测、故障避免、快速恢复控制等方面需要更具备即时性与智能性, 能够通过杂散辐射频谱等方式识别出实际故障前兆实现故障预测并进行故障避免, 实时调控回旋管以指定功率输出并稳定工作在安全工作范围内, 以及在故障发生后通过快速恢复控制使回旋管尽快恢复正常运行状态。一方面利用故障预测单元的信号和测量得到的微波信号进行故障避免, 另一方面在有故障发生后相关保护动作并进行快速恢复, 从而降低回旋管运行过程中受到损害的概率, 由此, 通过智能化实时调控, ECH系统运行的可靠性与稳定性将得到显著提高。

3 高效电流驱动

利用磁约束实现受控核聚变的托卡马克已成为当今世界上用于研究聚变的主要途径, 而其实现商

用的关键之一在于高性能的稳态运行。先进托卡马克运行模式通过电流分布优化获得更高的比压, 从而提升自举电流份额, 有利于未来聚变装置实现高聚变增益稳态运行, 是近年来各大聚变装置重点研究方向之一^[32]。

已有研究表明, 在先进托卡马克运行模式中, 通过离轴电流驱动调控等离子体电流分布, 有利于提高等离子体稳定性和约束性能^[33]。然而, 传统电子回旋电流驱动(Electron Cyclotron Current Drive, ECCD)的效率会随着沉积位置远离磁轴而降低, 通常需要较大的电子回旋波功率以维持稳态运行所需的电流分布^[34]。过高的电子回旋波功率会增加装置建设难度和降低聚变增益, 无法满足聚变装置的经济性要求。因此, 如何提高ECCD的离轴驱动效率是实现未来聚变堆先进运行模式下高聚变增益稳态运行所面临的难点问题和主要挑战。

近年来, 研究人员提出了通过高场侧顶部注入ECCD提高离轴驱动效率的方案, 欧盟 DEMO^[35]、韩国 KSTAR^[36]、美国 FNSF^[37] 和 DIII-D^[33], 以及中国 CFETR^[38] 等多个装置的模拟结果表明基于高场侧顶部天线的电子回旋波注入方案可以有效提高其离轴电流驱动效率。但目前仅 DIII-D 开展了相关实验研究, 其初步实验结果虽然表明该方案具有良好的潜力^[33], 但亟需通过更多实验验证高场侧顶部注入ECCD提高离轴驱动效率的有效性和适用范围。此外, 在提高ECCD驱动效率的同时, 还需考量电子回旋波的吸收效率, 综合二者以实现较优的高性能等离子体电流驱动效果。未来, 随着磁约束聚变装置

的发展,需要探究更多途径以提高 ECCD 的离轴驱动效率,为未来聚变堆先进运行模式下高聚变增益稳态运行高效电流驱动提供参考。

4 基于回旋管的相干汤姆逊散射

磁约束聚变装置中,CTS 诊断主要用于测量体离子温度、快离子速度分布等。CTS 诊断是一种主动测量方法,其向等离子体中注入探测波束,从接收端散射信号的频谱中获得等离子体参数信息,其示意图如图 5 所示。

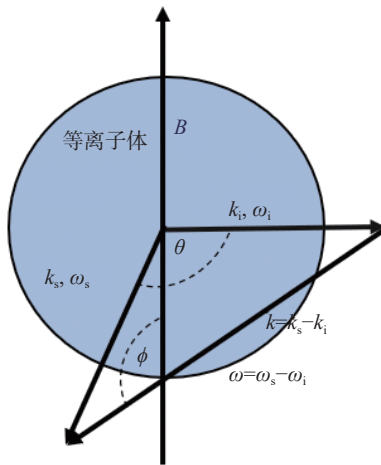


图 5 相干汤姆逊散射示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the CTS

在磁约束聚变相干汤姆逊散射诊断技术研究中,由于毫米波在选择散射几何方面具有很大的灵活性,其通常被用作探测波束。CTS 诊断系统的一个关键部分是毫米波探测波束的波源,其需要兼顾高功率和窄带宽的特性。而回旋管正是一种能够产生兆瓦级毫米波的电子真空管,其不仅可用于 ECH 系统以加热等离子体,也可以用作 CTS 诊断系统的探测波源。目前,很多装置上都发展了或计划发展基于回旋管的 CTS 系统,如欧洲的 JET^[39]、美国的 TFTR^[40]、德国的 W7-X^[41] 和 ASDEX-U^[42]、中国的 HL-2A^[43] 等。

在 CTS 诊断应用过程中,为防止对接收器造成损害,需要用陷波滤波器滤除进入接收器的大功率探测光束的杂散辐射。陷波滤波器的频宽是获得良好 CTS 频谱的关键参数。如果宽度过大,将无法观察到体等离子体的 CTS 信号,且数据处理将变得困难。如果宽度过小,陷波滤波器将无法削弱微波功率,接收器可能会受损或被进入饱和状态。此外,等

离子体中的电子也会在毫米波区域发射回旋辐射。这意味着在系统设计时必须考虑等离子体对探测波束可能的吸收,同时在数据分析中必须考虑到由毫米波电子回旋辐射产生的背景辐射^[44]。

ASDEX Upgrade 装置进行了 CTS 测量快离子的实验,通过降低 ECE 背景辐射以获得可接受的信噪比,使得回旋管的入射波束可以有效地在基频和二次谐波的 ECE 共振之间的区间运行^[44]。该实验中体等离子体的 CTS 散射频谱通常具有 500 ~ 1000 MHz 的典型宽度,因此这些实验中使用了 200 ~ 300 MHz 的陷波滤波器。值得注意的是,在 ASDEX Upgrade 的实验中,最成功的 CTS 诊断运行模式是使用来自回旋管的短 2 ms 脉冲,而较长的回旋管脉冲在某些情况下会导致检测系统中出现高功率信号。

此外,CTS 系统的接收器需要具有高灵敏度,以捕获散射波信号。在 CTS 频谱中,由于快离子密度相对较低,快离子成分通常较小,仅在相对较大的频率偏移处占主导地位;而体等离子体信号较大。同时,相比于百万瓦的探测功率,沿接收方向的 CTS 散射功率通常在纳瓦数量级;等离子体背景辐射的强度可轻易达到散射信号的两个数量级以上。因此,为成功实现 CTS 测量,需要保证接收系统的线性度与检测系统的高灵敏度,同时避免增益压缩并过滤不需要的信号。

近年来,为稳定 CTS 诊断系统中回旋管的输出频率和相位,研究人员提出了利用锁相环调制三极管式磁控注入枪阳极电压的方法,研究表明该方法具有良好的潜力^[45-46]。未来的磁约束聚变装置将会工作于强磁场条件下,故相应地需要发展高频探测系统。为实现这一需求,回旋管亦需要往高频方向发展,这也是文章第二部分回旋管高频发展趋势的依据之一。

目前,ITER 装置的快离子 CTS 诊断已完成初步结构设计^[47],该系统探测波将由一套 1 MW/60 GHz 的回旋管提供,可以测量聚变反应产生能量在 300 eV ~ 3.5 MeV 之间的 α 粒子。此外,CTS 有望成为测量等离子体离子比例的新诊断。燃料离子比的测量对于 ITER 以及未来聚变堆中等离子体的控制和设备保护至关重要。在 CTS 频谱中可能会出现离子回旋结构以及离子伯恩斯坦波结构,这是 CTS 诊断可以成为新的燃料离子比诊断的理论基础^[48]。敏感性分析

表明这种诊断适用于聚变堆环境,且能够在等离子体芯部提供空间分辨率的测量,其测量的有效性也在最近的 TEXTOR 装置实验中得到了证明^[49]。

5 结 论

作为一种重要的辅助加热手段,ECH 已被广泛应用于国内外各主要装置。近年来,随着相关技术的发展,ECH 系统中多频系统的比例在不断提升,且为提高系统运行的稳定性和可靠性,智能控制技术已逐步应用于 ECH 系统。与此同时,研究人员正在逐步探索高效 ECCD 技术,以满足先进运行模式下高聚变增益稳态运行要求。此外,ECH 系统的毫米波回旋管已在 CTS 诊断中得到了广泛应用。上述进展为 ECH 相关技术的发展提供了新的牵引,也为未来聚变堆 ECH 应用提供了有力支撑。

展望未来,需要发展更高频率(200 GHz 以上)且运行频率点更多的高功率回旋管,以满足更高运行磁场和更加灵活的 ECH 应用场景。同时,未来 ECH 系统也将朝着更加智能化的方向发展,在故障预测、故障避免、快速恢复控制等方面发挥重要作用,以进一步提升系统运行的可靠性。同时,磁约束聚变堆先进运行模式以及高聚变增益运行等要求发展更高效的离轴 ECCD 方案,非常值得探索。此外,聚变堆应用场景下 CTS 系统的适用性、波源的选择、探测性能以及误差等有待进一步研究。

参考文献:

- [1] WESSON J. Tokamaks [M]. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [2] PRATER R. Heating and current drive by electron cyclotron waves [J]. *Physics of plasmas*, 2004, 11(5): 2349-2376. DOI: 10.1063/1.1690762.
- [3] XIA D H, CHEN X X, XU D F, et al. Recent progress of the ECRH system and initial experimental results on the J-TEXT tokamak [J]. *Plasma science and technology*, 2022, 24(12): 124010. DOI: 10.1088/2058-6272/aca4b5.
- [4] ZHANG J L, XIA D H, LIU C H, et al. Design of a Launcher for the 105-GHz ECRH System on J-TEXT [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 48(6): 1560-1565. DOI: 10.1109/TPS.2019.2951816.
- [5] LLOYD B. Overview of ECRH experimental results [J]. *Plasma physics and controlled fusion*, 1998, 40(8A): A119-A138. DOI: 10.1088/0741-3335/40/8A/010.
- [6] ERCKMANN V, GASPARINO U. Electron cyclotron resonance heating and current drive in toroidal fusion plasmas [J]. *Plasma physics and controlled fusion*, 1994, 36(12): 1869-1962. DOI: 10.1088/0741-3335/36/12/001.
- [7] WAGNER D, STOBER J, LEUTERER F, et al. Status, operation, and extension of the ECRH system at ASDEX upgrade [J]. *Journal of infrared, millimeter, and terahertz waves*, 2016, 37(1): 45-54. DOI: 10.1007/s10762-015-0187-z.
- [8] CENGHER M, CHEN X, ELLIS R, et al. Advances in technology and high power performance of the ECH system on DIII-D [J]. *Fusion engineering and design*, 2017, 123: 295-298. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.05.022.
- [9] WANG X J, LIU F K, SHAN J F, et al. Progress of high power and long pulse ECRH system in EAST [J]. *Fusion engineering and design*, 2015, 96-97: 181-186. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.03.042.
- [10] HUANG M, RAO J, SONG S D, et al. Design and research of electron cyclotron resonance heating and current drive system on HL-2M tokamak [J]. *EPJ web of conferences*, 2017, 147: 04006. DOI: 10.1051/epjconf/201714704006.
- [11] WOLF R C, ALI A, ALONSO A, et al. Major results from the first plasma campaign of the Wendelstein 7-X stellarator [J]. *Nuclear fusion*, 2017, 57(10): 102020. DOI: 10.1088/1741-4326/aa770d.
- [12] SHIMOZUMA T, IGAMI H, KUBO S, et al. Optimization of the high harmonic ECRH scenario to extend a heating plasma parameter range in LHD [J]. *Nuclear fusion*, 2015, 55(6): 063035. DOI: 10.1088/0029-5515/55/6/063035.
- [13] IKEDA R, SHINYA T, YAJIMA S, et al. Multi-frequency, megawatt-power gyrotron to facilitate a wide range of operations at ITER [J]. *Nuclear fusion*, 2023, 63(6): 066028. DOI: 10.1088/1741-4326/accdeb.
- [14] LITVAK A, SAKAMOTO K, THUMM M. Innovation on high-power long-pulse gyrotrons [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2011, 53(12): 124002. DOI: 10.1088/0741-3335/53/12/124002.
- [15] THUMM M K A, DENISOV G G, SAKAMOTO K, et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive [J]. *Nuclear fusion*, 2019, 59(7): 073001. DOI: 10.1088/1741-4326/ab2005.
- [16] TANG Y Y, WANG X J, ZHANG L Y, et al. Design status of the ECRH system for CFETR [J]. *Fusion engineering and design*, 2022, 182: 113225. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113225.
- [17] IKEDA R, KAJIWARA K, NAKAI T, et al. Progress on performance tests of ITER gyrotrons and design of dual-frequency gyrotrons for ITER staged operation plan [J]. *Nuclear fusion*, 2021, 61(10): 106031. DOI: 10.1088/1741-4326/ac21f7.
- [18] THUMM M. Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development [J]. *IEEE transactions on plasma science*, 2014, 42(3): 590-599. DOI: 10.1109/TPS.2013.2284026.
- [19] ZOHN H, THUMM M. On the use of step-tuneable gyrotrons in

- ITER [J]. *Journal of physics:conference series*, 2005, 25: 274-282. DOI: [10.1088/1742-6596/25/1/033](https://doi.org/10.1088/1742-6596/25/1/033).
- [20] WAGNER D, STOBBER J, KIRCHER M, et al. Extension of the multi-frequency ECRH system at ASDEX upgrade [C]//Proceedings of the 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Copenhagen, Denmark, September 25-30, 2016. Copenhagen: IEEE, 2016: 1-2. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2016.7758412](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2016.7758412).
- [21] SIRAVO U, ALBERTI S, DUBRAY J, et al. Electrical integration of two 1MW/2s dual-frequency gyrotrons into the EC-system of the TCV tokamak [J]. *Fusion engineering and design*, 2019, 146: 1510-1514. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2019.02.117](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.117).
- [22] PARK H K, CHOI M J, HONG S H, et al. Overview of KSTAR research progress and future plans toward ITER and K-DEMO [J]. *Nuclear fusion*, 2019, 59(11): 112020. DOI: [10.1088/1741-4326/ab20e2](https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab20e2).
- [23] HORIE N, OMORI K, OMORI A, et al. High power test of wideband polarizer for electron cyclotron current driving system in JT-60SA [J]. *Fusion engineering and design*, 2017, 122: 218-222. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2017.08.013](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.08.013).
- [24] KALARIA P C, AVRAMIDIS K A, FRANCK J, et al. Systematic cavity design approach for a multi-frequency gyrotron for DEMO and study of its RF behavior [J]. *Physics of plasmas*, 2016, 23(9): 092503. DOI: [10.1063/1.4962238](https://doi.org/10.1063/1.4962238).
- [25] JELONNEK J, AIELLO G, ALBERTI S, et al. Design considerations for future DEMO gyrotrons: a review on related gyrotron activities within EURO fusion [J]. *Fusion engineering and design*, 2017, 123: 241-246. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2017.01.047](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.047).
- [26] 赵磊, 李立, 卜英南, 等. 基于 PLC 的 HL-2A 装置电子回旋共振加热系统控制与保护 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2010, 30(3): 230-235. DOI: [10.16568/j.0254-6086.2010.03.009](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.2010.03.009).
ZHAO L, LI L, BU Y N, et al. Control and protection system based PLC for the ECRH system on the HL-2A tokamak [J]. *Nuclear fusion and plasma physics*, 2010, 30(3): 230-235. DOI: [10.16568/j.0254-6086.2010.03.009](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.2010.03.009).
- [27] 杨永. EAST 装置电子回旋共振加热系统中央控制器设计 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2021, 41(3): 234-239. DOI: [10.16568/j.0254-6086.202103007](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.202103007).
YANG Y. Central controller design of electronic cyclotron resonance heating system for EAST [J]. *Nuclear fusion and plasma physics*, 2021, 41(3): 234-239. DOI: [10.16568/j.0254-6086.202103007](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.202103007).
- [28] 杨永. 电子回旋共振加热系统中央控制器异常诊断设计与仿真 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28(5): 46-50. DOI: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2020.05.011](https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2020.05.011).
YANG Y. Design and simulation of abnormal diagnosis of central controller of ECRH system [J]. *Computer measurement & control*, 2020, 28(5): 46-50. DOI: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2020.05.011](https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2020.05.011).
- [29] TORREZAN A C, PONCE D, GORELOV Y, et al. New features of the ECH control system on DIII-D and impact of power modulation on collector loading [J]. *Fusion engineering and design*, 2019, 146: 486-490. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2018.12.098](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.098).
- [30] WILDE F, MARSEN S, STANGE T, et al. Automated mode recovery for gyrotrons demonstrated at Wendelstein 7-X [J]. *Fusion engineering and design*, 2019, 148: 111258. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2019.11.1258](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.11.1258).
- [31] WILDE F, LAQUA H P, MARSEN S, et al. Measurements of satellite modes in 140 GHz Wendelstein 7-X gyrotrons: an approach to an electronic stability control [C]//Proceedings of the 2017 18th International Vacuum Electronics Conference, London, UK, April 24-26, 2017. London: IEEE, 2017: 1-2. DOI: [10.1109/IVEC.2017.8289661](https://doi.org/10.1109/IVEC.2017.8289661).
- [32] GORMEZANO C, SIPS A C C, LUCE T C, et al. Steady state operation [J]. *Nuclear fusion*, 2007, 47(6): S285-S336. DOI: [10.1088/0029-5515/47/6/S06](https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/6/S06).
- [33] CHEN X, PETTY C C, LOHR J, et al. Doubling off-axis electron cyclotron current drive efficiency via velocity space engineering [J]. *Nuclear fusion*, 2022, 62(5): 054001. DOI: [10.1088/1741-4326/ac544a](https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac544a).
- [34] PETTY C C, PRATER R, LOHR J, et al. Detailed measurements of the electron cyclotron current drive efficiency on DIII-D [J]. *Nuclear fusion*, 2002, 42(12): 1366-1375. DOI: [10.1088/0029-5515/42/12/303](https://doi.org/10.1088/0029-5515/42/12/303).
- [35] POLI E, TARDINI G, ZOHH M, et al. Electron-cyclotron-current-drive efficiency in DEMO plasmas [J]. *Nuclear fusion*, 2013, 53(1): 013011. DOI: [10.1088/0029-5515/53/1/013011](https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/1/013011).
- [36] BAE Y S, NAMKUNG W, CHO M H. Ray tracing study on top ECCD launch in KSTAR [J]. *EPJ web of conferences*, 2017, 157: 03003. DOI: [10.1051/epjconf/201715703003](https://doi.org/10.1051/epjconf/201715703003).
- [37] GAROFALO A M, CHAN V S, CANIK J M, et al. Progress in the physics basis of a fusion nuclear science facility based on the advanced tokamak concept [J]. *Nuclear fusion*, 2014, 54(7): 073015. DOI: [10.1088/0029-5515/54/7/073015](https://doi.org/10.1088/0029-5515/54/7/073015).
- [38] CHEN X, PRATER R, PETTY C, et al. Top launch for higher off-axis electron cyclotron current drive efficiency [J]. *EPJ web of conferences*, 2019, 203: 01004. DOI: [10.1051/epjconf/201920301004](https://doi.org/10.1051/epjconf/201920301004).
- [39] BINDSLEV H, HOEKZEMA J A, EGEDAL J, et al. Fast-ion velocity distributions in JET measured by collective Thomson scattering [J]. *Physical review letters*, 1999, 83(16): 3206. DOI: [10.1103/PhysRevLett.83.3206](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.3206).
- [40] MACHUZAK J S, WOSKOV P P, GILMORE J, et al. TFTR 60 GHz alpha particle collective Thomson scattering diagnostic [J]. *Review of scientific instruments*, 1995, 66(1): 484-486. DOI: [10.1063/1.1146323](https://doi.org/10.1063/1.1146323).
- [41] KRIER L, AVRAMIDIS K A, BRAUNE H, et al. Short-pulse frequency stabilization of a MW-class ECRH gyrotron at W7-X

- for CTS diagnostic [J]. *Fusion engineering and design*, 2023, 192: 113828. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2023.113828](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113828).
- [42] MEO F, BINDSLEV H, KORSHOLM S B, et al. Commissioning activities and first results from the collective Thomson scattering diagnostic on ASDEX Upgrade (invited) [J]. *Review of scientific instruments*, 2008, 79(10): 10E501. DOI: [10.1063/1.2989140](https://doi.org/10.1063/1.2989140).
- [43] DENG W C, SHI Z B, SHI P W, et al. Development of a 105 GHz fast ion collective Thomson scattering diagnostic on HL-2A tokamak [J]. *Journal of instrumentation*, 2022, 17: C02006. DOI: [10.1088/1748-0221/17/02/C02006](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/C02006).
- [44] NIELSEN S K, STEJNER M, RASMUSSEN J, et al. Measurements of the fast-ion distribution function at ASDEX upgrade by collective Thomson scattering (CTS) using active and passive views [J]. *Plasma physics and controlled fusion*, 2015, 57(3): 035009. DOI: [10.1088/0741-3335/57/3/035009](https://doi.org/10.1088/0741-3335/57/3/035009).
- [45] FOKIN A, GLYAVIN M, GOLUBIATNIKOV G, et al. High-power sub-terahertz source with a record frequency stability at up to 1 Hz [J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 4317. DOI: [10.1038/s41598-018-22772-1](https://doi.org/10.1038/s41598-018-22772-1).
- [46] DENISOV G G, KUFTIN A N, GLYAVIN M Y, et al. Experimental tests of a high-stable 170 GHz/25 kW gyrotron as a master oscillator for frequency locking of megawatt level microwave sources [C]//Proceedings of the 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference, Rotterdam, Netherlands, April 27-30, 2021. Rotterdam: IEEE, 2021: 1-2. DOI: [10.1109/IVEC51707.2021.9722456](https://doi.org/10.1109/IVEC51707.2021.9722456).
- [47] KORSHOLM S B, CHAMBON A, GONÇALVES B, et al. ITER collective Thomson scattering—preparing to diagnose fusion-born alpha particles (invited) [J]. *Review of scientific instruments*, 2022, 93(10): 103539. DOI: [10.1063/5.0101867](https://doi.org/10.1063/5.0101867).
- [48] STEJNER M, NIELSEN S K, BINDSLEV H, et al. Principles of fuel ion ratio measurements in fusion plasmas by collective Thomson scattering [J]. *Plasma physics and controlled fusion*, 2011, 53(6): 065020. DOI: [10.1088/0741-3335/53/6/065020](https://doi.org/10.1088/0741-3335/53/6/065020).
- [49] KORSHOLM S B, STEJNER M, BINDSLEV H, et al. Measurements of intrinsic ion Bernstein waves in a tokamak by collective Thomson scattering [J]. *Physical review letters*, 2011, 106(16): 165004. DOI: [10.1103/PhysRevLett.106.165004](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.165004).

作者简介:



夏东辉

夏冬辉 (第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 副教授, 博士, 主要从事磁约束聚变高功率微波加热技术研究工作 (e-mail)xiahd@hust.edu.cn。

项目简介:

项目名称 回旋管大功率太赫兹连续波源技术研究(2021BAA167)

承担单位 华中科技大学

项目概述 本项目针对太赫兹回旋管中高品质电子注的稳定产生、高频相互作用结构的精确模拟、协同优化与系统性工艺等关键技术问题开展研究, 主要研究内容有: 分析磁场位形、磁场与电场的匹配状态等对电子注参数的影响规律, 研究不均匀发射条件下电子注参数离散计算方法和宽带磁调谐低速度离散电子枪设计方法; 建立回旋管多物理场动态耦合注波相互作用模型, 研究电大尺寸下激烈模式竞争过程中回旋管工作稳定性问题; 建立回旋管的协同优化和工艺误差分析模型, 搭建测试平台进行回旋管测试。

主要创新点 (1)建立回旋管阴极发射不均匀性的电流-电压曲线评估模型, 分析不均匀阴极发射条件下的电子注速度、能量等参数的离散特性, 揭示回旋管阴极不均匀发射对电子注品质的影响机制; (2)建立回旋管多物理场动态耦合注波相互作用模型, 揭示时变扰动对电子回旋脉塞起振和多模相互作用的影响机制, 解决电大尺寸下激烈模式竞争动态演化过程中工作模式的稳定性问题。

(编辑 徐嘉铖)