



双驱动射频负氢离子源匹配网络设计与实验研究

阳璞琼¹, 李宇乾¹, 蒋才超², 潘军军², 刘波², 陈世勇², 谢远来²

(1. 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国科学院 合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 随着磁约束聚变实验装置对中性束注入器的输出束流强度与脉冲时间的要求越来越高, 开展高功率大面积射频离子源的研究迫在眉睫。为了实现大面积、高密度均匀等离子体放电, 基于多驱动射频离子源的设计是当前的发展趋势, 而阻抗匹配网络是射频功率源将最大功率输送至线圈并耦合至等离子体的关键, 故对其结构设计和调谐特性的研究是不可或缺的。基于前期在单驱动射频离子源的研究基础上, 结合双驱动射频离子源的放电需求, 开展了双驱动阻抗匹配网络优化结构的设计与分析, 通过实验中对匹配网络的调谐, 成功实现了140 kW高功率和25 kW/1000 s长脉冲的稳定运行。随后在等离子体稳定放电的基础上研究了两个驱动器之间的功率分配均匀性问题, 实验结果表明了该匹配网络的优化设计合理可行, 上下驱动器的射频功率分配基本均匀。

关键词: 中性束注入系统; 双驱动射频离子源; 阻抗匹配; 射频功率传输系统; 等离子体

中图分类号: TL62

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230313

Design and experimental study of matching network for dual drive RF negative hydrogen ion source

Yang Puqiong¹, Li Yuqian¹, Jiang Caichao², Pan Junjun², Liu Bo², Chen Shiyong², Xie Yuanlai²

(1. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: With the increasing demand for the output beam intensity and pulse time of the neutral beam injector in the magnetic confinement fusion experimental device, it is urgent to carry out research on high-power large-area RF ion sources. It is the key to designing an impedance matching network that can deliver the maximum power of the RF power source to the coil and couple it to the plasma, thus to achieve large-area, high-density and uniform plasma discharge. Based on the previous research on single driver RF ion sources, the impedance matching network of dual driver RF ion sources was optimized and analyzed. The key parameters of the matching network were calculated, and the topology of the matching circuit was optimized. In the experiment, frequency tuning was used to tune the matching network. Stable and repeatable plasma discharge with 140 kW high power and 1000 s long pulse at 25 kW was achieved under dual drive. Subsequently, based on stable plasma discharge, the issue of power distribution uniformity between the two drivers was studied. The experimental results indicate that the optimized design of the matching network is reasonable and feasible, and the RF power distribution of the upper and lower drivers is basically uniform, laying the foundation for the upcoming negative ion beam extraction in the CRAFT (Comprehensive Research fAcility for Fusion Technology) NNBI (neutral beam injection system) project.

Key words: neutral beam injection system, dual drive RF ion source, impedance matching, RF power transmission system, plasma

中性束注入是聚变等离子体加热和电流驱动的有效方法, 是聚变界公认的实现聚变堆点火和燃烧等离子体控制的必备工具^[1]。随着聚变装置的升级以及对等离子体参数的需求不断增长, 采用基于射频负离子源的中性束注

* 收稿日期: 2023-09-14; 修订日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(11975263, 12275121); 聚变堆主机关键系统综合研究设施项目(2018-000052-73-01-001228); 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2019YFE03070000)

联系方式: 阳璞琼, yangpuqiong@usc.edu.cn。

通信作者: 潘军军, pj@ipp.ac.cn。

入器(NNBI)成为当前的发展趋势^[2]。NNBI是中国科学院等离子体物理研究所聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)的子系统之一,其验收指标是实现功率大于2 MW、束流能量为400 keV、脉冲长度为100 s的中性束引出^[3]。对于负离子源,由于受负离子浓度的制约,要实现高流强的束引出,需要设计大面积的加速器,因此对应需要产生大面积的等离子体。在射频离子源中,通常采用的方法是在一个扩展室上安装多个驱动器同时放电来产生大面积的等离子体^[4]。在射频离子源放电中,阻抗匹配是实现射频功率从功率源有效馈入至等离子体的重要环节^[5],相对于单驱动射频离子源,多驱动射频离子源在放电时会存在驱动器相互干扰等相关问题,对于其阻抗匹配的设计和调谐会相对复杂和困难。因此,本文在单驱动射频离子源的研究基础上^[6],开展了对双驱动射频离子源阻抗匹配网络的优化设计与实验研究。

1 匹配网络的设计及结构优化

1.1 匹配网络的设计

阻抗匹配网络是射频功率传输系统的重要组成部分,也是射频离子源顺利运行的保障,图1给出了CRAFT NNBI束源测试平台射频离子源功率传输系统示意图,其由一台最大输出功率为200 kW的射频功率源为两个驱动器(图2)提供功率,射频功率通过射频传输线及阻抗匹配网络后经由串联的两个射频线圈馈入等离子体,实现等离子体的激发并维持。

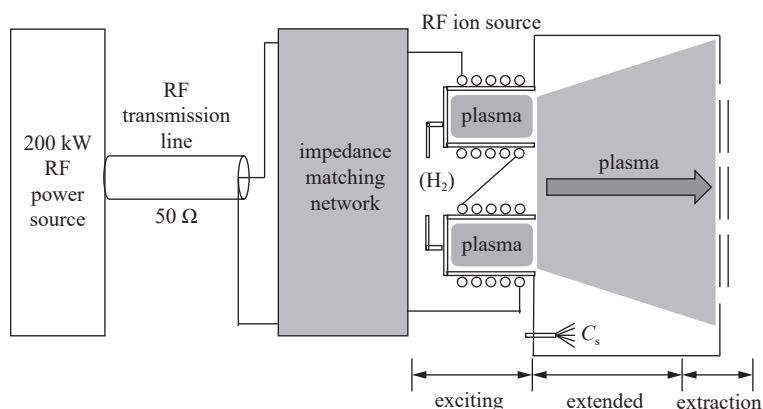


Fig. 1 Schematic of CRAFT NNBI RF power transmission system

图1 CRAFT NNBI 射频功率传输系统示意图

要设计满足 NNBI 运行需求的阻抗匹配网络,通常从电路的连接方式以及电气参数的计算出发。匹配网络的设计将采用大功率 LC 分立元件,因为大功率下纯电阻元件发热较为严重,会增加射频功率在输送过程产生的损耗。图3给出基于带隔离变压器的 L 型匹配网络下双驱动射频离子源的阻抗匹配网络设计图。其中射频隔离变压器的变比 $n = 3$,它主要起到隔离直流高压的作用,还可降低加载在线圈两端的电压,减小线圈打火的概率^[7]。假设双驱动射频离子源的两个驱动器始终对称运行,即两个驱动器中的等效电阻 $R_{S1} = R_{S2}$, 等效电感 $L_{S1} = L_{S2}$ 。

由最大功率传输理论可知,实现阻抗匹配的前提是射频离子源负载阻抗 Z_L 与源端阻抗 Z_g 互为共轭关系,据图3所示, Z_L 与 Z_g 可表示为

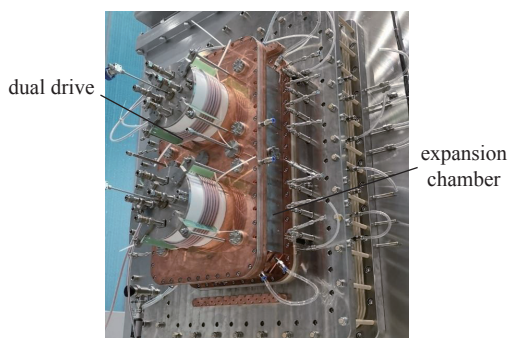


Fig. 2 Real image of CRAFT NNBI dual driver

图2 CRAFT NNBI 双驱动器实物图

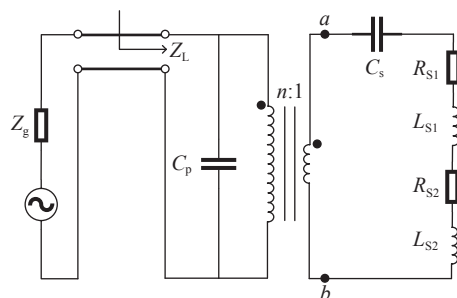


Fig. 3 Initial structure of dual driver matching circuit

图3 双驱动器的匹配电路初始结构

$$\begin{cases} Z_g = 50 + j0 \\ Z_L = \frac{jn^2 X_{C_p} [(R_{S1} + R_{S2}) + jX_{C_s} + j(X_{L_{S1}} + X_{L_{S2}})]}{jX_{C_p} + n^2 [(R_{S1} + R_{S2}) + jX_{C_s} + j(X_{L_{S1}} + X_{L_{S2}})]} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X_{C_p} = -1/(\omega C_p)$; $X_{C_s} = -1/(\omega C_s)$; $X_{L_{S1}} = X_{L_{S2}} = \omega L_{S1}$; $\omega = 2\pi f$; f 是工作频率, C_p 与 C_s 分别是并联电容与串联电容的电容值。为了选取适合匹配网络的电容型号以及保证整个系统的安全稳定运行, 电容值是必须要参考的数值^[8], 因此, 当 $Z_g = Z_L$ 时, 推导出匹配电路中电容器 C_p 和 C_s 的计算公式为

$$\begin{cases} C_p = \frac{1}{100\pi f n \sqrt{\frac{R_{S1} + R_{S2}}{Z_g - n^2(R_{S1} + R_{S2})}}} \\ C_s = -\frac{1}{2\pi f \left[\frac{(R_{S1} + R_{S2})(Z_g - n^2)}{n} - 2\pi f(L_{S1} + L_{S2}) \right]} \end{cases} \quad (2)$$

阻抗完全匹配时, 射频功率在理想情况下没有损耗, 电容 C_s 和 C_p 的电压和电流可表示为

$$\begin{cases} U_{C_s} = I_{C_s} \left(-j \frac{1}{\omega C_s} \right) \\ I_{C_s} = \sqrt{\frac{P}{R_{S1} + R_{S2}}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_{C_p} = 2I_{C_s} n^2 (R_{S1} + j\omega L_{S1}) + U_{C_s} \\ I_{C_p} = j\omega C_p U_{C_p} \end{cases} \quad (4)$$

由上述分析可知射频离子源等效阻抗值是设计匹配网络时最根本的参考依据, CRAFT 离子源射频负载等效阻抗的计算取决于系统的整体几何形状、射频驱动等离子体的物理参数等^[9]。由于研究的驱动器结构与德国马克斯-普朗克等离子物理研究所 RADI 双驱动实验台相似, 本双驱动实验台的等效电阻取值取文献 [10] 中的 $R_s = 2 \Omega$ ^[10], 等效电感 L_s 取电桥测量下的驱动器线圈电感值 $18.0 \mu\text{H}$, 据此可以初步设定阻抗匹配网络的主要参数^[11]。当射频功率源工作频率为 1 MHz , 输出功率为 200 kW 时, 由公式 (2)、(3)、(4) 可计算出电容元件的电气参数如表 1 所示, 电容器两端的电压和流经电容器的电流代表着器件的理论耐压值与耐流值, 器件型号依据电气参数选取。

表 1 双驱动射频离子源阻抗匹配网络的两个电容的电气参数

Table 1 Electrical parameters of two capacitors in the impedance matching network of a dual drive RF ion source

| C_s/nF | $ I_{C_s} /\text{A}$ | $ U_{C_s} /\text{kV}$ | C_p/nF | $ I_{C_p} /\text{A}$ | $ U_{C_p} /\text{kV}$ |
|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| 1.4 | 316.2 | 34.8 | 4.2 | 91.6 | 3.4 |

1.2 匹配网络的优化结构

在对阻抗匹配网络进行了初步的设计后, 进一步发现串联运行的双驱动器为匹配网络的结构设计提供了更多选择。为了更好的满足双驱动射频离子源运行要求, 可通过对不同的匹配电路连接方式进行优化, 图 4 是两种不同的匹配优化结构电路连接方式。

优化结构 (a) 将电容 C_s 移至两个射频线圈之间, 通过计算发现对应各个部件上的射频电压电流值并未产生变

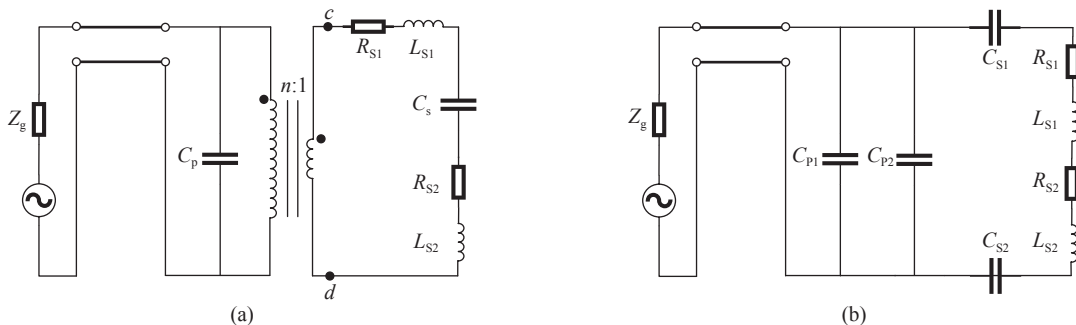


Fig. 4 Optimization structures of dual drive matching circuit

图 4 双驱动匹配电路优化结构

化,但是射频线圈两端的电压即 c 、 d 两点之间的电压值变小^[12],图 4(a)与图 3 中射频驱动器两端的电压模值可分别表示为

$$|U_{cd}| = I_{S1} \sqrt{4R_{S1} + \left(2\omega L_{S1} - \frac{1}{\omega C_S}\right)^2} \quad (5)$$

$$|U_{ab}| = 2I_{S1} \sqrt{R_{S1}^2 + \omega^2 L_{S1}^2} \quad (6)$$

其中驱动器电流 $I_{S1} = I_C$,将式(5)与式(6)进行数学变化后发现 $|U_{ab}|$ 始终大于 $|U_{cd}|$,结果表明将串联电容 C_S 放置于两个射频线圈中间可以降低驱动器整体两端的电压值,极大程度降低射频线圈之间出现打火击穿的概率和驱动器的绝缘要求。

除了射频线圈打火的风险外,射频离子源运行过程中,电容器两端也一样需承受高电压,针对电容器承受电压电流问题的优化,给出优化结构图 4(b)。为降低电容器承受电压电流过大而导致击穿和烧毁风险,将串联电容 C_S 和并联电容 C_p 都一分为二,以对称的方式插入电路中,可使得电容器承受的峰值工作电压电流降低^[13]。另外,一般匹配电路所需并联电容 C_p 电容值都比较大,此结构也降低了单个 C_p 所需选用的电容值,增加了匹配网络在高射频频率下的适用性,同时为采购增加了便利性。

对比以上两种结构,在进行多次实验测试后发现电容器过热不严重但射频线圈出现过多次打火击穿,目前实验状况表明射频线圈打火击穿的风险较电容器更大,因此在本测试平台上采用了图 4(a)结构的匹配网络来开展相关的实验。

2 匹配网络的实验研究

2.1 匹配网络的搭建及等离子体放电实验

在 CRAFT NNBI 功率传输系统的设备支撑条件下,进行阻抗匹配电路的实验调试,进而验证本文设计的阻抗匹配优化结构的可行性。图 5 给出了匹配箱和双驱动器的现场安装图,其中,阻抗匹配网络安装在由铝皮包裹的箱体内部,主要目的是降低射频波对其他设备的干扰。

根据表 1 中两个电容值的电气参数计算结果,串联电容选择范围为 $0 \sim 2.3$ nF 的可调电容,并联电容设计为可在 $0 \sim 12$ nF 内自由拆卸的电容组合,此设计参数能够在较大范围内满足调谐需求,匹配箱内结构组成如图 6 所示,各元器件之间用无氧铜板连接,支撑电容的材料为聚四氟乙烯,绝缘性能更好。

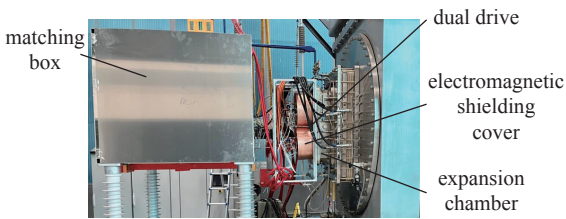


Fig. 5 On-site diagram of CRAFT NNBI power transmission system
图 5 CRAFT NNBI 功率传输系统现场图

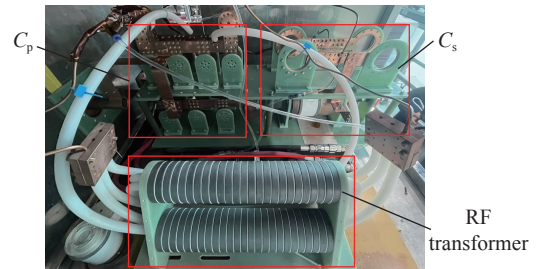


Fig. 6 Impedance matching network
图 6 阻抗匹配网络

由于等离子体在激发过程中,等效阻抗会随着等离子体密度等各参数的变化而变化^[14],需要通过调节阻抗匹配网络的参数进行匹配,否则射频功率无法馈入至射频线圈。在阻抗调谐中,通常采用驻波比(R_{SW})表示匹配状态的好坏^[15],驻波比越小则反射越小,匹配状态越好,工程上一般控制在 $1 \leq R_{SW} \leq 1.5$ 。

$$R_{SW} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (7)$$

其中 Γ_L 为电压终端反射系数,可表示为

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_g}{Z_L + Z_g} \quad (8)$$

据式(1)、(7)、(8)可知匹配状态主要受到驱动器等效阻抗 R_S 、 L_S ,匹配电容值 C_S 、 C_p 以及工作频率 f 的影响,接下来的实验将主要围绕着调节电容值与工作频率来适应等效阻抗的变化。

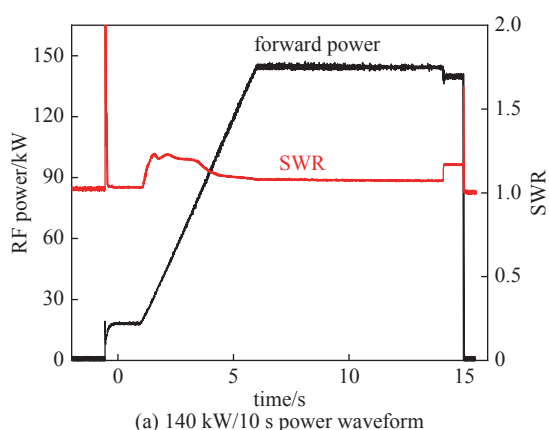
等离子体放电前先进行静态匹配状态下的优化, 调节两个电容值, 通过矢量网络分析仪测量到的传输线终端驻波比 R_{SW} , 如图 7 所示, 曲线最低点为最佳静态匹配点, R_{SW} 最小值为 1.4, 测量到此时的并联电容 C_p 为 2 nF, 串联电容 C_s 为 1.1 nF, 与电容范围设计值基本吻合。

在等离子体激发实验中, 由于驱动器的静态和动态阻抗存在一定的差异, 同时阻抗值随着放电功率的增加和进气量的变化等原因也会发生改变^[16], 因此, 需要在等离子体激发实验中开展阻抗匹配的调谐。由于调节电容来实现阻抗匹配相对复杂且精度难以控制, 因此在本测试平台中主要通过频率调谐^[17]来改善匹配状态, 此调谐方法可有效降低 R_{SW} , 使射频功率有效耦合至等离子体。图 8 给出了双驱动射频离子源在 140 kW 高功率和 25 kW/1000 s 长脉冲等离子体放电的波形。实验结果表明本文针对双驱动射频离子源的阻抗匹配网络是合理可行的。

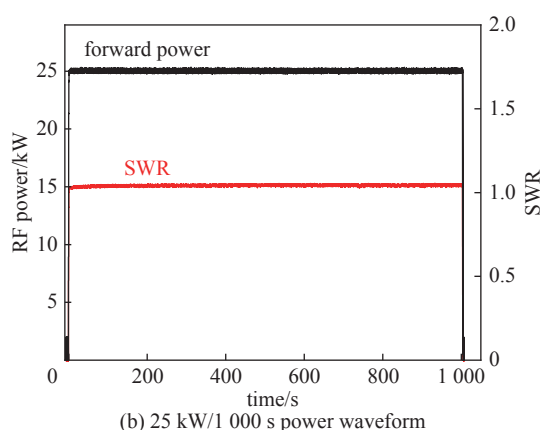


Fig. 7 Measured value of vector network analyzer

图 7 矢量网络分析仪测量值



(a) 140 kW/10 s power waveform



(b) 25 kW/1000 s power waveform

Fig. 8 High power and long pulse plasma discharge waveforms of dual drive RF ion source

图 8 双驱动射频离子源高功率和长脉冲等离子体放电波形

2.2 双驱动射频功率分配均匀性实验研究

在双驱动器的结构中, 每个驱动的工作原理与单驱动一样, 分别由通入的交变电流形成的感应磁场及感应电场激发产生等离子体。但由于此结构是在同一个离子源腔室平面上的间隔一定距离的两个驱动器, 会存在两个驱动器相对侧电磁场相互之间的干扰, 导致驱动器内电磁场大小及分布受到一定影响, 这可能会影响到射频功率在等离子体中的沉积, 从而产生等离子体分布不均匀。

研究发现两个驱动器的间距与扩展室的深度能够影响到射频功率分布均匀性^[18], 当双驱动射频离子源机械参数设计为驱动器间距 90 mm、扩展室深度 220 mm 时, 双驱动器中馈入的射频功率均匀性最佳。通过在相邻驱动器之间插入铜板或用铜屏蔽包围每个驱动器, 可以减少电磁场互相干扰造成的射频功率馈入不均匀问题^[19], 将一对由铜制成的圆柱形电磁屏蔽罩对称地放置在两个驱动器周围如图 5 所示, 使射频功率以最大程度的均匀性馈入至各个驱动器中。

在经过阻抗匹配调谐后等离子体稳定放电的实验基础上, 进行了 30~90 kW 的功率扫描实验, 通过 WFC 诊断系统得到上下驱动器线圈上能量沉积的对比关系如图 9 所示, 由于 $P = I^2R$, 线圈电阻的欧姆发热表示为能量沉积, 与射频功率呈正相关, 可以表征上下驱动器线圈射频功率分配的关系。

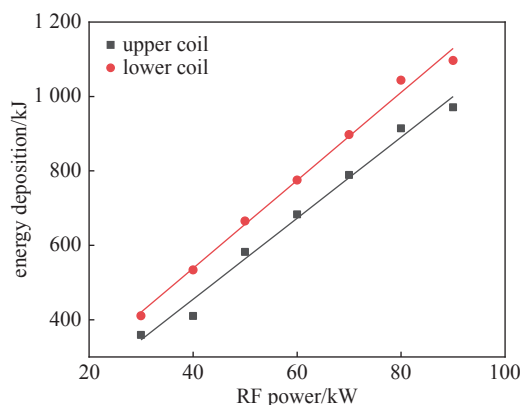


Fig. 9 Comparison of energy deposition between upper and lower drive coils

图 9 上下驱动器线圈能量沉积对比

系。实验结果表明在不同功率的等离子体放电实验中两个驱动器之间的射频功率分配基本均匀。

3 结 论

为了填补国内在高功率多驱动射频离子源相关研究的空白,同时推动 CRAFT NNBI 项目的进展,本文对双驱动射频离子源的阻抗匹配网络进行了设计,并推导出阻抗匹配时核心部件串联电容与并联电容的电气参数要求。在此基础上,分析了两种更为优化的匹配电路结构,并根据相关测试结果选取了最为有效的结构。最后,在等离子体激发实验过程中,通过调节电容与频率的调谐方法,实现了双驱动下 140 kW 高功率和 25 kW 下 1000 s 的长脉冲稳定可重复的等离子体放电,并通过实验验证了使两个驱动器之间的功率分配尽可能均匀的技术方法。本研究为 CRAFT NNBI 项目即将开展的负离子束引出奠定了基础,同时,为我国发展大面积高功率射频离子源关键技术积累了工程设计和实验运行经验。

参考文献:

- [1] 胡纯栋, 梁立振, 谢远来, 等. CFETR 中性束注入系统概念设计[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2022, 42(4): 388-392. (Hu Chundong, Liang Lizhen, Xie Yuanlai, et al. Conceptual design of neutral beam injection system for CFETR[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2022, 42(4): 388-392)
- [2] 谢亚红, 胡纯栋, 韦江龙, 等. CFETR 中性束注入系统负离子束源概念设计[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2021, 41(4): 628-634. (Xie Yahong, Hu Chundong, Wei Jianglong, et al. Conceptual design of negative ion based beam source for CFETR neutral beam injector[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2021, 41(4): 628-634)
- [3] Yang Puqiong, Liu Bo, Jiang Caichao, et al. Impedance characteristic analysis and preliminary experimental results of a high-power RF plasma source[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022, 50(4): 775-781.
- [4] Fantz U, Franzen P, Wunderlich D. Development of negative hydrogen ion sources for fusion: Experiments and modelling[J]. *Chemical Physics*, 2012, 398: 7-16.
- [5] 蒋才超. 大功率 RF 离子源功率馈入关键技术及实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019. (Jiang Caichao. Study on key technology and experiment of power feed-in for high power RF ion source[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019)
- [6] Jiang Caichao, Hu Chundong, Xie Yahong, et al. Design and preliminary results of matching network for MW scale high current RF ion source[J]. *Fusion Science and Technology*, 2017, 72(3): 496-499.
- [7] Jiang Caichao, Hu Chundong, Wei Jianglong, et al. Design of power supply system for the prototype RF-driven negative ion source for neutral beam injection application[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2017, 117: 100-106.
- [8] Marcuzzi D, Palma M D, Pavei M, et al. Detailed design of the RF source for the 1 MV neutral beam test facility[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2009, 84(7/11): 1253-1258.
- [9] Sudhir D, Bandyopadhyay M, Kraus W, et al. Online tuning of impedance matching circuit for long pulse inductively coupled plasma source operation—An alternate approach[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 013510.
- [10] Kraus W, Fantz U, Heinemann B, et al. Solid state generator for powerful radio frequency ion sources in neutral beam injection systems[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 91: 16-20.
- [11] 岳海昆, 李冬, 刘开锋, 等. 大功率 RF 离子源阻抗匹配电路的设计与实现[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2015, 35(4): 346-349. (Yue Haikun, Li Dong, Liu Kaifeng, et al. Design and implementation of the matching unit for a high-power RF based ion source[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2015, 35(4): 346-349)
- [12] Franzen P, Falter H, Heinemann B, et al. RADI—A RF source size-scaling experiment towards the ITER neutral beam negative ion source[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, 82(4): 407-423.
- [13] Zamengo A, Recchia M, Kraus W, et al. Electrical and thermal analyses for the radio-frequency circuit of ITER NBI ion source[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2009, 84(7/11): 2025-2030.
- [14] 阳璞琼, 刘波, 蒋才超, 等. 大功率射频离子源驱动器等效阻抗特性分析[J]. *核技术*, 2021, 44: 080603. (Yang Puqiong, Liu Bo, Jiang Caichao, et al. Analysis of equivalent impedance characteristics of a high power RF ion source driver[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, 44: 080603)
- [15] Jiang Caichao, Hu Chundong, Xie Yahong, et al. Analysis and experimental study of impedance matching characteristic of RF ion source on neutral beam injector[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(7): 2677-2679.
- [16] Huh S R, Park M, Jung B K, et al. Preliminary design of an impedance matching circuit for a high power rectangular RF driven ion source[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2017, 121: 337-341.
- [17] Yue Haikun, Li Dong, Zhao Peng, et al. The matching unit for the RF ion source at HUST[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2015, 34(6): 1229-1233.
- [18] 陈俞钱, 苏国建, 谢亚红, 等. 大面积射频离子源等离子体激励模拟研究[J]. *核科学与工程*, 2023, 43(5): 1174-1181. (Chen Yuqian, Su Guojian, Xie Yahong, et al. Simulation study of plasma generation of radio frequency ion source with large area[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2023, 43(5): 1174-1181)
- [19] Wang Na, Liu Zhimin, Xie Yahong, et al. An analysis and preliminary experiment of the discharge characteristics of RF ion source with electromagnetic shielding[J]. *Plasma Science and Technology*, 2023, 25: 045601.