SPIDER 实验活动期间遇到的电气问题概述

A. Maistrello[a], M. Agostini[a,b], M. Bigi[a], M. Brombin[a,b], M. Dan[a], R. Casagrande[a], M. De Nardi[a,d], A. Ferro[a], E. Gaio[a,b], P. Jain[a], F. Lunardon[a,c], N. Marconato[a,e], D. Marcuzzi[a], M. Recchia[a,b], T. Patton[a], M. Pavei[a], F. Santoro[a,d], V. Toigo[a,b], L. Zanotto[a], M. Barbisan[a], L. Baseggio[a], M. Bernardi[a], G. Berton[a], M. Boldrin[a], S. Dal Bello[a], D. Fasolo[a,e], L. Franchin[a], R. Ghiraldelli[a], L. Grando[a], R. Milazzo[a], A. Pimazzoni[a], A. Rigoni[a], E. Sartori[a,e], G. Serianni[a,b], A. Shepherd[a], M. Ugoletti[a], B. Zaniol[a], D. Zella[a,e], E. Zerbetto[a], H. Decamps[f], C. Rotti[f], P. Veltri[f]

[a]RFX联合体（CNR、ENEA、INFN、帕多瓦大学、威尼托钢铁股份公司），美国大道4号，35127帕多瓦，意大利[b]CNR- ISTP，帕多瓦，意大利[c]根特大学应用物理系，9000根特，比利时[d]CRF – 帕多瓦大学，意大利[e]帕多瓦大学电气工程系，帕多瓦，意大利[f]ITER组织，维农叙韦尔东路，CS 90 046，13067圣保罗莱迪朗斯Cedex，法国

摘要

SPIDER 是ITER 加热中性束注入器离子源的全尺寸原型，其通过射频产生的等离子体生成氢或氘负离子，并利用一组栅极将其加速至 ~100 keV。SPIDER束源的设计符合ITER 的特定要求，整个装置完全安装在真空容器内，且其电路在残余背景压力下运行。电源系统由能够承受频繁栅极击穿的高压直流电源、用于磁过滤器磁场的高电流直流发生器，以及用于产生等离子体的射频发生器组成。

在 SPIDER 运行的头三年中，通过对实验结果进行深入分析，并结合建模工作，发现、弄清并解决了各种电气问题。

所遇到的主要问题之一是束源背面的射频电路上出现射频放电，从而限制了源内的工作气压。

自激式射频振荡器表现出频率不稳定性，研究发现这是该技术应用于中性束注入器谐振负载时所固有的局限；对这些不稳定性的理解，为评估最终决定在 SPIDER 和MITICA 中替换射频发生器，并将当前 ITER 基线方案改为固态放大器技术提供了技术依据。

其他问题包括：源上射频电路之间的互耦效应、各种电磁兼容性问题、通过改进 SPIDER 的运行策略来缓解运行空间受限的问题，以及修订磁过滤场的布局配置以避免等离子体猝熄。

本文概述了观测到的现象及为理解这些现象而开展的相关分析，介绍了为解决所遇问题而对 SPIDER 进行的短期改造的效果，并阐述了目前正在进行的长时间停机期间将引入的长期解决方案的设计原则。

关键词：NBI；SPIDER；射频驱动离子源；

1. 引言

SPIDER 于 2018 年 6 月开始运行，并于 2021 年底开始长期停机以进行改进 [1].

在 SPIDER 中，束源完整安装在真空容器内，并在残余气体压力下运行，其中包括 8 个射频（RF）感应耦合等离子体驱动器、其匹配网络，以及用于提取和加速负离子的栅极组，能量为~100 keV。

With reference to Figure 1, the power supply system is composed of the Acceleration Grid Power Supply (AGPS) [2] which biases up to -96 kV the Extraction Grid (EG) and the Ion Source and Extraction Power Supplies (ISEPS) with respect to the Grounded Grid (GG). ISEPS, installed within a Faraday cage called “High Voltage Deck” (HVD) [3], is in turn composed of [4]:

- 离子源抽取栅极（ISEG）电源为等离子体栅极（PG）相对于 EG 施加最高 -12 kV 的偏压；
- 离子源等离子体栅极（ISPG）电源向等离子体栅极（PG）馈送最高 5 kA 的电流；
- 离子源偏置（ISBI）电源为离子源本体相对于 PG 施加最高 -30 V 的偏压；
- 离子源偏置板（ISBP）电源为偏置板（BP）相对于离子源本体施加最高 30 V 的偏压。
- 4 额定功率为 200 kW 的自由运行射频发生器，工作50 Ω 于 900 kHz-1100 kHz 的频率范围内，为等离子体产生提供 4 对驱动器。

电源通过一条长达 40 米[5]的多导体传输线连接到束源。

SPIDER power supply system and the beam source were designed taking into account normal and anomalous

作者电子邮箱：alberto.maistrello@igi.cnr.it（A. Maistrello）

operation, with the support of simulation tools and benefiting from the experimental results obtained with the most significant devices. Nevertheless, the need to satisfy the specific ITER requirements and the relevant complexity of the circuits led to explore novel conditions and encounter electrical issues during the SPIDER experimental campaigns, not easily predictable.

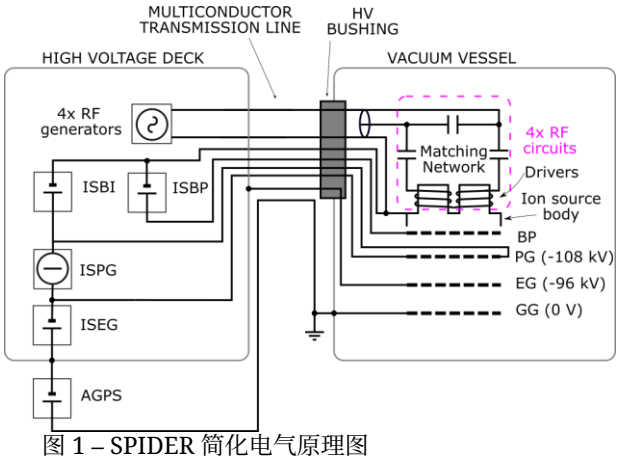


图 1 – SPIDER 简化电气原理图

2. 射频系统

SPIDER 射频系统由 4 台额定功率为 200 kW 的射频振荡器组成，接入 50 Ω 负载，由一台额定电压为 12 kV、电流为 140 A 的共用高压电源供电。

射频发生器是一种自激振荡器，由两只推挽配置的四极管、一个由输出变压器实现的槽路以及两个可变电容器（C_V）组成，可将频率调节至 900 kHz – 1100 kHz 范围内。

图 2 展示了振荡器的简化原理图，供参考。

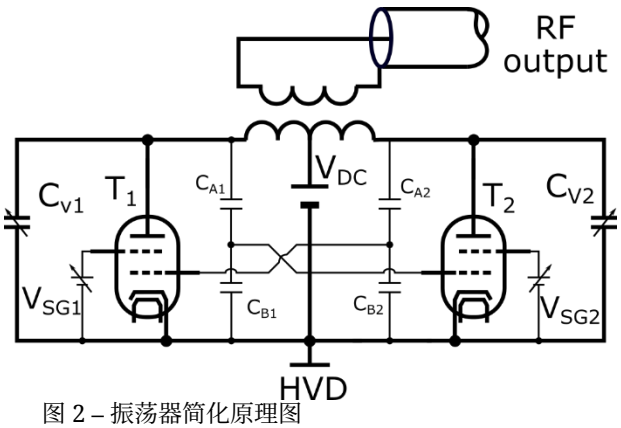


图 2 – 振荡器简化原理图

在SPIDER中，每个射频振荡器为安装在束源上的一对驱动器供电。该驱动器是一种经过高度工程化设计的感应耦合等离子体源，其等效阻抗会在等离子体点火后发生变化，并随等离子体参数而变化。SPIDER运行期间估算得到的驱动器对参数列于表 1 中：真空情况下（无等离子体）的参数既来自阻抗仪测量，也来自发生器输出探头；而有等离子体时的参数则仅通过发生器探头获得。等效电感 Ld 包括由连接部分引入的杂散电感。

表 1 – 真空条件下及有等离子体时驱动对的等效电气参数

等效值 参数	真空	等离子体
Rd	2 Ω	3 - 5 Ω
Ld	20 μH	19.5 μH

每对线路均通过一个常规 L 型匹配网络与发生器特性阻抗匹配。该网络由两个并联的 5 nF 电容组成，总并联电容为 10 nF；另有两个各为 3 nF 的串联电容[6], , 如图 3 所示。

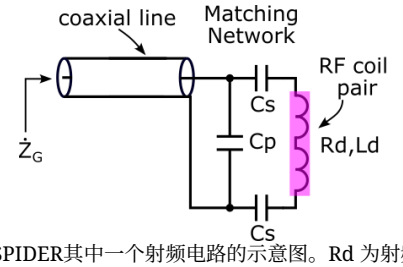


图3 – SPIDER其中一个射频电路的示意图。Rd 为射频线圈对的杂散电阻。

图4展示了输出发生器所见阻抗（Z_G）及相应电压驻波比（VSWR）随频率的变化：上图为阻抗模值，中图为阻抗相位偏移，下图为相应的 VSWR（竖线表示 VSWR 最小值对应的频率，横线为供读者参考的基准，对应于 VSWR = 2）。等离子体启动后及脉冲期间，Ld 和 Rd 的变化会改变发生器所见的阻抗和 VSWR 最小值。当发生器所见阻抗为~50+j0 Ω时，电路达到匹配状态，对应的 VSWR 为 ~1。这仅在某些等效驱动器参数和狭窄带宽范围内发生，利用的是驱动器阻抗与固定匹配电容之间的谐振。

It is highlighted that the presence of a resonance means that the circuit is subjected to RF high voltage and currents, that for SPIDER are expected up to 17 kV rms and 260 A rms at full power.

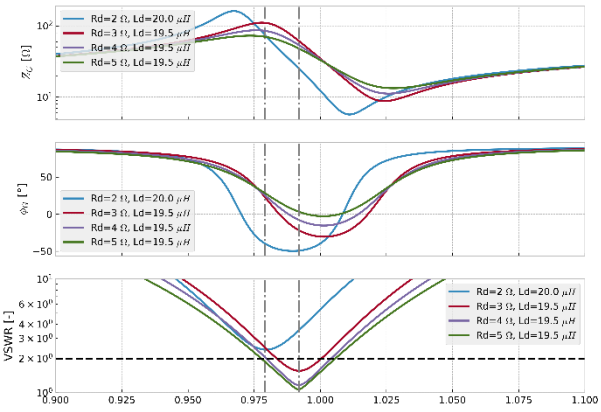


图4 – 不同驱动器等效模型下射频发生器所见阻抗的数值模拟

parameters. Top plot: impedance modulus, central plot: impedance phase displacement, bottom plot: VSWR.

2.1. 射频振荡器频率不稳定性

由于自激振荡器被认为能够适应负载变化，因此一直优先采用这类振荡器；然而，其运行暴露了SPIDER 首轮实验中遇到的主要问题之一：所谓的“频率突变”频率不稳定现象，即在调节内部可变电容以寻找匹配条件时，频率会突然变化。其他采用振荡器供电的 RF 离子源中也观察到了这一现象 [7]。频率突变会形成一个受抑制的频率范围，其中包含 VSWR 最小值。其主要后果是无法达到匹配条件（VSWR 最小值），因此振荡器无法向负载提供额定功率。

所开发的模型加深了对所观测现象的理解，该现象可由两个借助阻抗解耦的谐振电路来解释：一个是发生器的槽路，另一个是负载，而解耦阻抗则为传输线 [8]。

如图 5 下方的图所示，频率翻转在 C_V-频率平面中表现出迟滞行为：从较低的 C_V 开始并逐渐增大时，频率相应降低；但当 C_V 达到频率翻转的低阈值时，频率会跃降至低几十 kHz 的值。继续增大 C_V 会使频率进一步降低。将 C_V 调回较低值时，频率翻转阈值则有所不同。正如预期，最佳匹配频率处于抑制范围内，如图 5 上方的图所示。

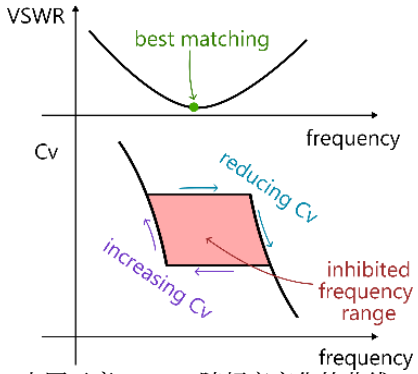


图 5 – 上图示意 VSWR 随频率变化的曲线，下图示意 C_V 平面中的受抑制频率范围，频率

受抑制频率范围的幅度与驱动器对的等效电感成正比，与其等效电阻成反比。

由于等离子体起始后以及等离子体参数变化时发电机所见阻抗发生变化，因此必须改变工作频率，以达到可实现的最佳匹配。最初制定的策略是以低功率启动振荡器，并将C_V 设置为使频率接近频率翻转低阈值；随后，在等离子体起始后，降低 C_V 以达到新的阈值（该阈值会随负载变化而相应改变），之后再将功率提高到可达到的最大值。然而，这种方式下振荡器之间的串扰较为显著，因此需要制定另一种策略，详见第 2.2 节

2.2. 射频振荡器串扰

RF发生器所看到的阻抗在四个RF电路中略有不同，因此相应的受抑制频率范围也各不相同。这意味着每个发生器都有一个最佳工作频率，在该频率下不会发生频率跳变；这些频率已按照第2.1节所述的策略分别通过实验确定。

两个或更多发生器同时运行并不简单，因为串扰导致输出功率和 Hα 出现强烈调制。调制频率等于各发生器频率之差；研究发现，顶部两组驱动器和底部两组驱动器之间的调制较强，而中间两组驱动器之间的调制较弱。这提示我们应寻找各组驱动器之间的差异；我们发现，RF 电路的布局存在差异，如图 6 所示（为简洁起见，图中未显示匹配电容）。

具体而言，为第 1 组供电的 RF 电路路径形成了一个较大的回路，甚至穿过第 2 组；第 3 组和第 4 组的情况相同，而第 2 组和第 3 组之间则不存在这种情况。由于这些大回路与相邻驱动器组之间存在磁通链，因此第 1、2 组以及第 3、4 组之间会产生互耦；这与受到较大 RF 功率和 Hα 调制影响的驱动器组相对应。

在一次短暂的 SPIDER停机期间，对布局进行了相对简单的修改，如图6中的红色箭头所示。部分导体被替换，使其路径位于所供电驱动线圈绕组所在的平面上，从而避免跨越另一对驱动器形成大回路。

根据通过网络分析仪测得的散射参数外推得出，驱动器对 1-2 和 3-4 之间的互感降至原值的 25%。此外，耦合发生器处的感应电压降至原值的 40%；研究详情见 [9]。

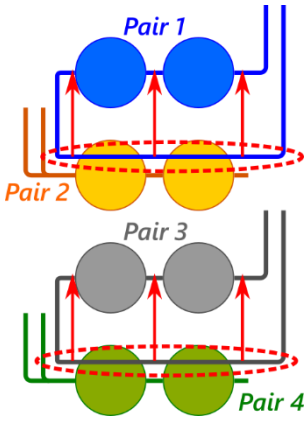


图 6 – 射频电路在束源背面的布局示意图（圆圈表示驱动器）

The output power and Hα modulation is still present in some operating conditions (magnetic filter field, gas

pressure, RF power and frequency, …) suggesting that the coupling due to the layout was not the only root cause.

为尽量避免串扰效应，在很宽的SPIDER参数范围内进行了特定测试：测试结果表明，当振荡器锁定在同一频率，或频率差足够大时，等离子体光调制会显著减弱。对于不同的等离子体参数（受气体压力、磁滤场和射频功率的强烈影响），第一种条件并不容易实现和维持；而后一种条件则更容易获得，尽管其缺点是输送至负载的功率会进一步降低[10]。随后，射频发生器 C_V 控制策略也进行了相应改进。

2.3. 四极管的高压需求

射频振荡器中采用的四极管技术要求在运行过程中使用高直流电压，该电压也施加于其他部件，例如槽路和反馈电路。必须定期安排维护，对部件进行清洁以避免闪络，并使用外部电源进行调理，以恢复可变电容器的耐压能力。

对于 MITICA，这些工作并非易事，因为振荡器位于一个高压平台内，该平台坐落在 6 米高的绝缘子上，只能通过移动平台或借助桥式起重机架设的临时楼梯进入。尽管如此，SPIDER 的经验表明，预防性维护并不足够：在实验活动期间，可变电容器需要额外的老炼程序才能从电弧中恢复。可变电容器可靠性差对可用实验时间产生了负面影响，而鉴于可达性有限，这对 MITICA 将更为重要。

2.4. 射频杂散电流

运行射频发生器时，观察到两种不希望出现的现象：部分原本不用于承载射频电流的设备部件上有较大的射频电流流过；部分诊断设备出现噪声，淹没了有用信号。

确定了射频电路中两个与 HVD 的连接点：第一个连接点是同轴电缆外导体与束流源主体的连接，并通过 ISBI、ISPG 和 ISEG 接至 HVD；第二个连接点是安装在射频发生器内部的分压器。出于功能方面的原因，无法移除第一个连接点（以避免栅极击穿时出现过压、同轴线电磁场辐射等）。第二个与 HVD 的连接点是差分电容分压器（CVD）的中心点。该分压器由振荡器供应商提供，并连接在输出变压器的下游。

为了降低杂散电流幅值，需要确保输出变压器下游的电路只有一个点连接到 HVD；最佳方案是将 CVD 移至输出变压器的原边，以确保所需的为保持预期电压信号的幅值和相位而进行适配。图7示意性地绘出了概念方案。这样，存在于绕组之间、数值约为~10 pF的输出变压器杂散电容，便串联在RF杂散电流通路中。

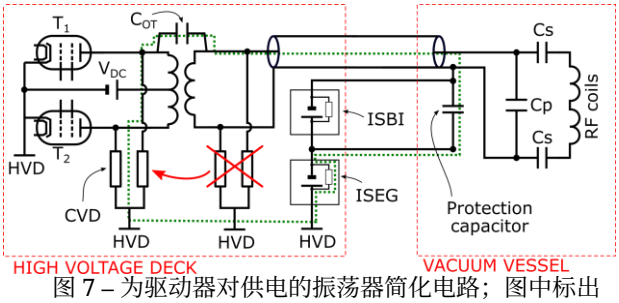


图 7 – 为驱动器对供电的振荡器简化电路；图中标出了 CVD 连接点的偏移。绿色虚线表示改进后 RF 杂散电流的路径

修改后，在单台发生器向等离子体源提供100 kW功率时，杂散电流降至约0.2A；根据射频发生器的不同，该数值为原始值的 12% 至25% [9]，。受射频发生器运行影响的部分诊断系统，其噪声水平已降至正常背景噪声水平。对于仍在影响其他一些诊断系统的噪声，其余根本原因仍需进一步调查。

2.5. 射频发生器的替代技术：固态开关放大器

用于为 SPIDER 射频源供电的射频自激振荡器固有的频率不稳定性限制了向负载输送的最大输出功率，而第 2.2 节所述的运行策略和改进措施无法彻底解决这一问题。因此，人们认为有必要进行更彻底的升级，即改用放大器技术。放大器不利用内部谐振电路，而是直接从外部设定频率，因此能够达到最佳匹配频率。

所有放大器均可在同一频率下驱动，从而限制各发生器之间串扰的影响。

采用固态技术可带来额外益处，因为相关元件不使用高电压：无需进行老炼处理或频繁清洁，可避免四极管淘汰的风险，也不需要额外的大型高压电源。此外，要获得较大的射频额定功率，必须采用模块化方案，这意味着原则上单个模块故障不会使发生器停机；因此实验活动可以在有限的输出功率下继续进行，从而提高装置的可用性。

开关技术相对于线性放大器可以提高效率，尽管输出端得到的方波必须滤除，才能获得总谐波失真（THD）受限的正弦波。

These expected advantages pushed for the replacement of RF oscillator technology with RF solid-state switching amplifiers (RFSSA) for SPIDER and MITICA and to change the baseline for ITER HNBI;

more details can be found in [11]. In SPIDER, RF amplifiers will be installed during the long shutdown, ongoing at the time of writing.

RF 振荡器的实际运行经验让我们意识到，在 SPIDER 装置中集成 RFSSA 时必须格外谨慎，因为杂散参数和次要细节（例如传感器的连接）都可能对 SPIDER 的运行表现产生负面影响。此外，尽管已有积极的反馈[12] [13]，但 NBI 领域在使用大功率 RF 放大器为 RF 驱动离子源供电方面的经验仍然有限。

开展了集成研究，以评估配备 RFSSA 的新电路中的杂散电流幅值、射频电路之间的相互耦合对发生器输出调制的影响，以及谐波失真对传输线和射频负载的影响；详情见 [14]。

RFSSA 的技术规格满足了在工厂中对其进行测试的需求，测试所用负载应与应用相关，并在正常和异常条件下尽可能接近最终负载；为此，对合适的假负载以及旨在验证RFSSA首台设备设计和运行情况的专门测试所开展的设计研究，详见 [15]。

3。 束源背面的射频放电 ide

观察到束源背面在容器压力高于40mPa 时发生了射频诱发放电[16]。通过观察可见光摄像机拍摄的画面，可以将在 [17] 中研究的放电归纳为两种宏观类型：“辉光”型，即背景气体被电离，并在驱动器附近观察到弥散光（图8 a）；以及“电弧”型，即在特定区域可见闪络（图 8 b）。还观察到了从辉光型向电弧型的转变。

光探测器在束源背面的信号，以及从 ISBI 测得的输出电流和电压，证实了不同类型的现象。对这些事件的基本理解使得人们能够通过观察电气测量趋势，建立一种实时识别这些现象的方法，旨在通过快速停止脉冲来防止束源部件受损。

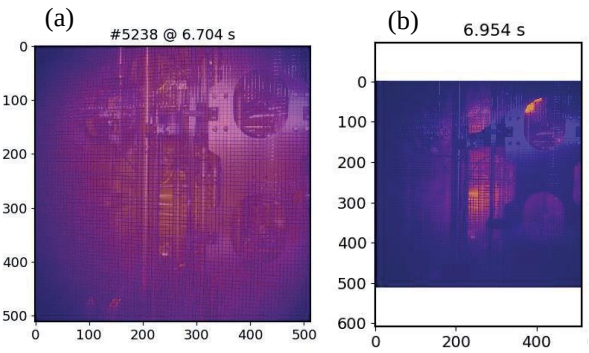


图 8 – 辉光放电 (a) 和电弧放电 (b) 的图片 **[17]**

为了在不引发放电的情况下继续实验活动，有必要降低离子源与容器之间的气体电导。目标电导使离子源能够在标称压力下运行，同时将背景压力保持在低于 40 mPa的水平。所采用的临时措施是安装 PG 掩膜，以封闭大部分孔径；其缺点是限制了束流电流。长期解决方案是提高抽气速率 [1]。

在短期停机期间开展的检查，以及对射频电路几何结构（包括处于束源电位的无源元件）进行的深入分析，确定了若干电场较强的位置（驱动器、匹配网络电容器、陶瓷断口）。改进这些位置有助于减少电子发射，从而降低放电发生的概率。

实际上，根据 IPP 加兴 ELISE 的经验，驱动器已被认为是电压耐受能力方面的关键部件；两者采用了相同的驱动器设计理念 [18] [19], , 并且 ELISE 受到了驱动器区域放电的影响 [20]。

图9 展示了一个驱动器的剖面：RF线圈紧密缠绕在氧化铝驱动器外壳（RF窗）周围，匝间采用介电梳状结构保持间距。处于束源本体电位的法拉第屏蔽层可保护氧化铝免受等离子体刻蚀。该配置使三相交界处（顶部线圈匝、驱动器外壳和真空，如图 9a 所示）的电场特别高，从而导致电子发射并降低电压耐受能力。

驱动器配置的改进方案设想从外侧对线圈进行径向支撑，采用4个彼此相隔90°的梳状支架，并在线圈与驱动器外壳之间留出间隙，详见[21]：这样，三重点便移至梳状支架处，如图9 b所示，此处的电场强度低一个数量级。

A further improvement is obtained with the adoption of holes on the comb to allow electric field to relax close to the high voltage turn. For the matching capacitors and ceramic breaks additional shields were designed with the aim to reduce the electric field at their triple junction; the analyses and implementation of these upgrades on RF circuits on board the source are reported in [22].

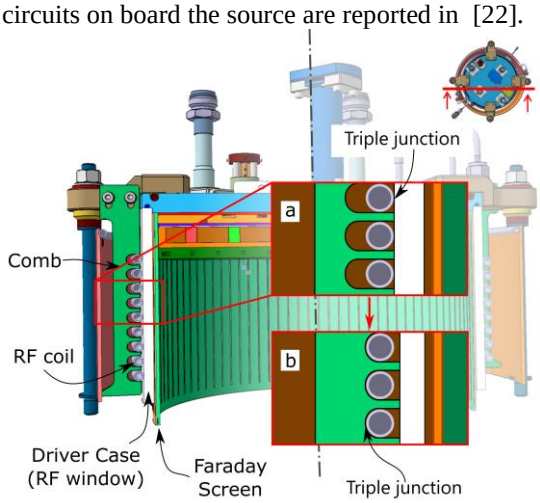


图 9 – 原始配置下驱动器横截面的 CAD 视图，放大图显示原始配置中 RF 线圈接触 RF 窗口并形成三重点 (a)，以及改进后的配置。

where the triple junction is at the contact point between the comb and the RF coil (b)

4. 磁过滤场配置优化

在SPIDER中，磁滤场用于降低引出区域的电子温度和密度，并滤除不可避免的共引出电子。该滤场通过ISPG 向 PG 供给最高达 5 kA 的电流，并使电流流经一组母排形成。

滤波场的原始设计侧重于优化膨胀区和加速区中的B场线，同时将其在驱动器[23]中降至最低。图10a）示意性地展示了束源部件的横截面，其中红色矩形表示：一对射频驱动器、等离子体膨胀区、PG、EG 和GG；此外，还描绘了为 PG 供电的 5 根原始汇流排，分别标注为“LEFT FWD”、“RIGHT FWD”、“LEFT RETURN”、“MID RETURN”和“RIGHT RETURN”。

在SPIDER运行期间，当PG电流（磁场强度）增加超过某一阈值时，Hα 线性降低，直至等离子体完全猝熄。通过分析B场分布图，确定了一种会导致电子在靠近中部回流母线的驱动器壁面上损失的配置。

研究了一种新的回流母线布局设计 [24]，该设计能够在射频驱动器内形成优化的磁场拓扑，同时使其他区域的磁场几乎保持不变。具体而言，额外的母线被放置在源的背面，在图10 b）中分别标示为“NEW LEFT RETURN”、“NEW MID RETURN”和“NEW RIGHT RETURN”。从同一图中可以看出，所得的沿射频驱动器轴向的磁场分量（Bz）相对于原始构型相对较低，这意味着与驱动器壁相交的磁力线被减至最少。

这项改动是在 SPIDER 短暂停机期间引入的，事实证明效果显著，因为此后随着滤波器场电流的增加，Hα 也随之增大。

5. 电网击穿导致的快速瞬态 ևրև

中性束注入器运行期间，栅网上可能经常发生击穿。PS 系统在设计时已考虑这一点，并采取措施限制电弧能量。

当加速电压高于 50 kV 时，发现栅极击穿会导致 PS 系统组件中出现快速瞬态电压峰值。

参见图 11，发生击穿时，来自 AGPS 的电流 I_A（以及来自电缆和 HVD 相对于地的杂散电容的电流，为简明起见未在图中示出）分流为两部分：I_P 流经 ISEG 输出滤波器流向 PG，I_E流向 EG。I_P 会在 ISEG 输出滤波器处产生一个超出额定值的反向电压峰值。AGPS 输出电缆屏蔽层的杂散电感会因 I_A产生电压降，该电压降超过了绝缘能力】【。

AGPS 回流路径连接至其接地支架的高度。

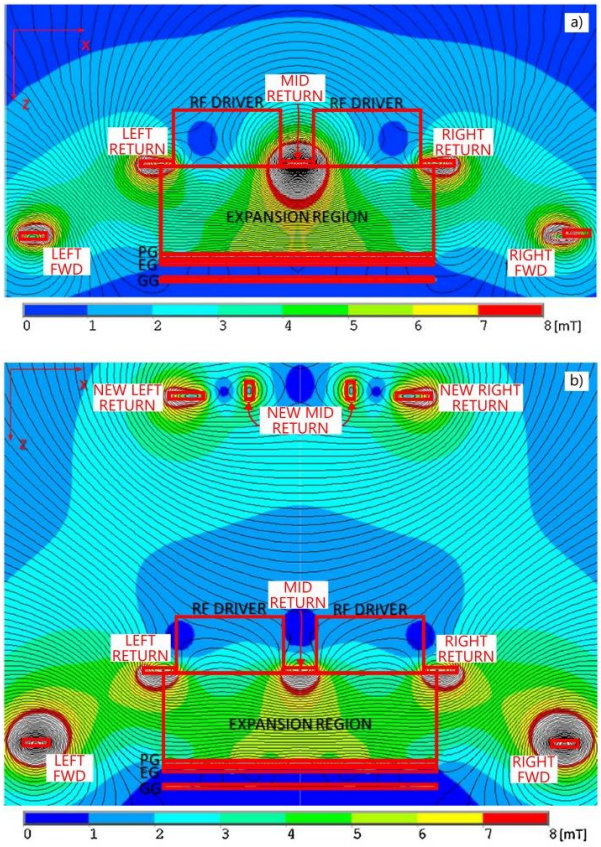


图 10 – 磁场绝对值等高线图：a) 改造前，b) 改造后，回流母排 **[24]**

电路按图 12 所示进行了修改：ISEG 输出滤波电阻针对 I_P 进行了分段处理，而 AGPS 冷极则通过无源 RC 网络接地。如 [25]，中所述，第一项修改经验证在最高 80 kV 时有效，但之所以能够实施，是因为 ISEG 输出电流受到限制（原因是 PG 遮罩，见第 3 节）。因此，这不能作为长期解决方案：由于电压降和功率耗散，ISEG 的满电流无法流经分段处理后的滤波电阻。作为长期解决方案，应考虑重新设计输出滤波器并采用合适的电压钳位器。

连接至 AGPS 冷极的 RC 同样被证明有效，既降低了电缆屏蔽层所承载的电流，又使电流得以通过接地系统流通。

作为长期解决方案，应提高回流路径相对于地的绝缘强度，并可尝试通过更好地接地电缆桥架来降低电缆屏蔽层的杂散电感 [26]。

除了上述所述的过电压问题外，在电网故障期间，安装在部分 PS 上的电子卡还遭遇了电磁兼容性问题，导致 SPIDER 脉冲中断。

These electronic cards are custom boards used for the acquisition of the PS output voltage and current (analogue signals) and for the transmission through optic fibers. The EMC issue was due to fast voltage transients applied to

the electronic boards between the ac voltage supply and the measuring point (physically connected or by means of the current probe stray capacitance). The voltage transient at the breakdown is due to the stray inductance of the cable connecting the reference potential to the ac supply, the issues on the boards are caused because the transient voltage is applied to the internal transformers and electronics. The solution, proved being effective up to the nominal SPIDER acceleration and extraction voltage values, was to reduce the stray inductance of the cable and to add suitable high-pass filters between the analogue inputs and the supply voltage reference [25].

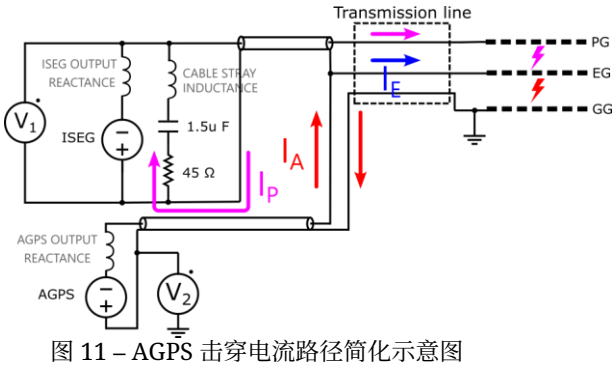


图 11 – AGPS 击穿电流路径简化示意图

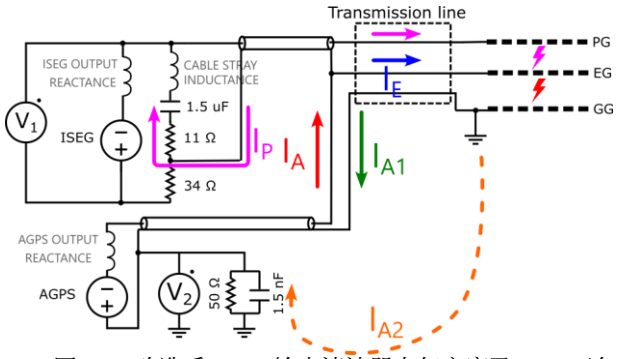


图 12 – 改造后 ISEG 输出滤波器电气方案及 AGPS 冷极接地连接的简化示意图

6. 结论

在 SPIDER 运行的 3 年间，我们发现了许多与高度互联的电源系统和复杂的束源相关的问题。

并行开展建模工作和实验活动，使我们能够深入理解所观察到的现象。

在短期停机期间安装的临时应对措施，使我们能够验证对问题的理解并评估措施的有效性。目前正在详细设计已确定的长期解决方案，以便在正在进行的长期停机期间实施。

在考虑 MITICA 运行时，SPIDER 积累的经验至关重要。预计其高出 10 倍的加速电压和长出 3 倍的多导体传输线，不仅会对束源构成严峻考验，也会对 PS 系统造成影响。

致谢

本工作是在ITER-RFX中性束测试设施（NBTF）协议框架内开展的，并获得了ITER组织的资助。本文所表达的观点和意见不一定代表ITER的立场。

本研究是在 EUROfusion 联盟框架内开展的，由欧盟通过 Euratom 研究与培训计划（资助协议编号 101052200——EUROfusion）提供资助。然而，文中表达的观点和意见仅代表作者本人，并不一定反映欧盟或欧盟委员会的立场。欧盟和欧盟委员会均不对这些观点和意见承担责任。

参考文献

[1] V. Toigo, D. Marcuzzi, G. Serianni, M. Boldrin, G. Chitarin, S. Dal Bello, L. Grando, A. Luchetta, R. Pasqualotto and P. Zaccaria, "On the road to ITER NBIs: SPIDER improvement after first operation and MITICA construction progress," *Fusion Engineering and Design*, vol. 168, p. 112622, 2021.

[2] N. Singh, H. Dhola, A. Patel, S. Gajjar, B. Raval, A. Thakar, D. Upadhyay, N. Goswami, K. Mehta, V. Gupta and others, "Installation and initial run of 96 kV 7.2 MW acceleration grid power supplies," *Proc. 27th IAEA Fusion Energy*, 2018.

[3] M. Boldrin, L. Grando, A. Pesce, M. Recchia, V. Toigo, D. Gutierrez, M. Simon, G. Faoro, A. Guion and E. Maggiora, "The 100 kV Faraday cage (High Voltage Deck) for the SPIDER experiment," *Fusion engineering and design*, vol. 96, pp. 411-415, 2015.

[4] M. Bigi, L. Rinaldi, M. Simon, L. Sita, G. Taddia, S. Carrozza, H. Decamps, A. Luchetta, A. Meddour and M. Moressa, "Design, manufacture and factory testing of the Ion Source and Extraction Power Supplies for the SPIDER experiment," *Fusion Engineering and Design*, vol. 96, pp. 405-410, 2015.

[5] M. Boldrin, A. De Lorenzi, M. Recchia, V. Toigo, T. Bonicelli and M. Simon, "The Transmission Line for the SPIDER experiment," *Fusion engineering and design*, vol. 86, no. 6-8, pp. 754-758, 2011.

[6] A. Zamengo, M. Recchia, W. Kraus, M. Bigi, C. Martens and V. Toigo, "Electrical and thermal analyses for the radio-frequency circuit," *Fusion Engineering and Design*, vol. 84, p. 2025–2030, 2009.

[7] M. J. Singh, M. Bandyopadhyay, G. Bansal, A. Gahlaut, J. Soni, S. Kumar, K. Pandya, K. G. Parmar, J. Sonara, R. Yadava, A. K. Chakraborty, W. Kraus, B. Heinemann, R. Riedl, S. Obermayer, C. Martens, P. Franzen and U. Fantz, "RF-Plasma Source Commissioning in Indian Negative Ion Facility," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1390, no. 1, pp. 604-613, 2011.

[8] F. Gasparini, M. Recchia, M. Bigi, T. Patton, A. Zamengo and E. Gaio, "Investigation on stable operational regions for SPIDER RF oscillators," *Fusion Engineering and Design,* vol. 146, pp. 2172-2175, 2019.

[9] A. Maistrello, M. Dan, R. Casagrande, P. Jain, M. Recchia, M. Bigi, L. Zanotto and M. Pavei, " On the effectiveness of SPIDER RF system improvements," *IEEE Transactions on Plasma Science* , accepted for publication.

[10] R. Casagrande, M. Dan and A. Maistrello, "Techniques to widen the operational space of SPIDER Radio Frequency driven plasma source," *Journal of Physics: Conference Series,* pp. doi:10.1088/1742-6596/2244/1/012054, 2021.

[11] L. Zanotto, A. Maistrello, M. Boldrin, M. Bigi, R. Casagrande, M. De Nardi, E. Gaio, D. Marcuzzi, M. Recchia, V. Toigo, C. Rotti, H. Decamps, P. Veltri, J. Zacks, D. Gutierrez and M. Simon, "Radio Frequency Generators Based on Solid State Amplifiers for the NBTF and ITER Projects," *IEEE Transactions on Plasma Science,* no. 10.1109/TPS.2022.3176030, pp. 1-7, 2022.

[12] W. Kraus, U. Fantz, H. B. and P. Franzen, "Solid state generator for powerful radio frequency ion sources in neutral beam injection systems," *Fusion Engineering and Design,* vol. 91, pp. 16-20, 2015.

[13] S. Gajjar, D. Upadhyay, N. Singh, M. Singh, A. Gahlaut, K. Pandya, M. Bhuyan, R. Yadav, H. Tyagi, M. Vuppugalla, A. Thakar, A. Patel, B. Raval, R. Dave, H. Dhola, K. Mehta, N. Goswami, V. Gupta, M. Bandyopadhya, A. Chakraborty and Baruah, "Experimental results of 40 kW, 1 MHz solid state high frequency power supply with inductively coupled plasma," *AIP Conference Proceedings,* vol. 2373, no. 1, p. 100002, 2021.

[14] R. Casagrande, A. Maistrello, M. Recchia, M. De Nardi, M. Bigi, L. Zanotto, M. Boldrin and H. Decamps, "Integration studies of RF solid-state generators in the electrical system of NBTF experiments and ITER HNB," *presented at 32nd SOFT* , 2022.

[15] M. De Nardi, A. Maistrello, R. Casagrande, M. Recchia, M. Bigi, L. Zanotto and H. Decamps, "Special tests of the solid-state RF amplifiers prototype for the ITER HNB and the NBTF experiments," *presented at 32nd SOFT,* 2022.

[16] G. Serianni, V. Toigo, M. Bigi, M. Boldrin, G. Chitarin, S. Dal Bello, L. Grando, A. Luchetta, D. Marcuzzi and R. Pasqualotto, "First operation in SPIDER and the path to complete MITICA," *Review of Scientific Instruments,* vol. 91, no. 2, p. 023510, 2022.

[17] M. Dan, A. Zamengo and M. Agostini, "RF induced discharges in vacuum in the SPIDER experiment," *2020 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV),* no. 10.1109/ISDEIV46977.2021.9587204, pp. 442-445, 2021.

[18] B. Heinemann、H. Falter、U. Fantz、P.Franzen、M. Fröschle、R. Gutser、W. Kraus、R. Nocentini、R. Riedl、E.Speth、A. Stäbler、D. Wünderlich、P. Agostinetti和 T. Jiang, 《为测试设施 ELISE 设计的“半尺寸”ITER 中性束源》, 《聚变工程与设计》, 第84卷, 第 2 期, 第 915-922 页, 2009 年。[19] D. Marcuzzi、P. Agostinetti、M.DallaPalma、F. Degli Agostini、M. Pavei、A. Rizzolo、M.Tollin 和L. Trevisan, 《SPIDER 实验束源的详细设计》, 《聚变工程与设计》, 第 85卷, 第 10 期, 第 1792-1797 页, 2010 年。[20] B. Heinemann、U. Fantz、W.Kraus、D. Wünderlich、F. Bonomo、M.Froeschle、I.Mario、R. Nocentini、R. Riedl 和 C.Wimmer, 《负离子束测试设施 ELISE 的最新成果》, 《聚变工程与设计》, 第 136 卷, 第 569-574 页, 2018 年。[21] M.Recchia 、A. Maistrello、M.Bigi、D. Marcuzzi 和E. Gaio, 《高射频功率下 SPIDER 驱动线圈耐压性能的研究》, 《AIP 会议论文集》, 第 2050 卷, 第 10.1063/1.5083744 期, 第040010 页, 2018年。[22] M. Recchia、A. Maistrello、M. Dan、T. Patton、M. Bernardi、R. Casagrande、N.Marconato、L.Franchin 和M. Pavei, 《SPIDER 束源电气设计的改进》, 发表于第 32届 SOFT, 2022年。[23] N. Marconato、G. Chitarin、P. Agostinetti、N.Pilan和G. Serianni, 《负离子加速器磁场配置的仿真、代码基准测试与优化》, 《聚变工程与设计》, 第86卷, 第 6 期, 第 925-928 页, 2011年。[24] N.Marconato、M. Brombin、M. Pavei、M.Tollin、L.Baseggio、M. Fincato、L. Franchin、A. Maistrello 和G. Serianni, 《SPIDER 实验中磁滤波器的优化灵活配置》, 《聚变工程与设计》, 第 166 卷, 第 https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112281期, 第 112281 页, 2021 年。[25] M. Bigi、M.Agostini、M. Brombin、Casagr、R. e、M. Dan、M. De Nardi、P.Jain、F. Lunardon、A. Maistrello、M. Recchia、F.Santoro 和 L. Zanotto, 《SPIDER离子源电源在超过30keV束能下的早期运行经验与改进》, 《IEEE 等离子体科学汇刊》, 第 https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3173820 页, 2022 年。[26] A.Ferro 等, 《SPIDER实验加速栅电源的全电压运行》, 《IEEE 等离子体科学汇刊》, 第doi: 10.1109/TPS.2022.3170999 期, 2022 年。