紧凑型Orbitron聚变装置的5 MV高压系统概念设计

莫因 博尔盖[a], *, 罗宾 兰特里[a], 尼古拉·范穆恩[a], 马修阿福尔特[a] 和埃里克 麦基[a]

[a]*Avalanche Energy Designs*，美国华盛顿州 *Tukwila*，*E Marginal Way S 9100*号，邮编*98108*

arXiv:2611.28658v1 [physics.app-ph] 21 Nov 2026

文章信息

关键词：Orbitron 离心镜 高压工程 真空套管 并联馈电串级整流器 聚变电力系统

摘要

高压（HV）系统是紧凑型Orbitron装置实现净正聚变功率的关键环节。本文提出了一种面向下一代Orbitron的5兆伏、20 mA、100 kW高压系统概念工程设计，并将其作为高压系统的上限设计点。利用MC-TRANS++ 0-D离心镜代码确定负载要求：中心室长1米、第一壁半径0.45米，轴向磁场为2.5 T、镜喉磁场为10 T，以及维持超声速旋转的5 MV径向电势降（$M \approx 4.8$）。该系统实现的三重积为 5.8×10^{21} keV s m^{-3} and $Q_{\mathrm{sci}} \approx 8.5$。高压电源集成交直流变换器、碳化硅全桥逆变器、带空心升压变压器的CLLC谐振网络，并为工作频率250 kHz的120级并联馈电串级整流器（PFSCR）供电。在满载条件下，该架构的端到端效率达到85%，显著高于三极管驱动的兆伏级电源通常所具有的 ~60%效率。5 MV电压输送至径向嵌套的50间隙套管系统，该系统通过钎焊氧化铝间隔件和波纹轮廓结构，使加压的全氟酮/CO2/O2绝缘气体与高真空相接。该设计直接借鉴了此前已验证的300 千伏原型机（Hammerhead套管）的实测特性，并从中提炼出六条定量经验，将其映射到5 MV设计中。对额定电压下完整组件进行静电模拟显示，电晕环上的最大表面电场为30.3兆伏/米，阴极三相结处为7.7兆伏/米，平均真空间隙电场范围为5.5至40兆伏/米。由于采用三相结屏蔽、绝缘波纹结构以及2.5-10 T下的轴向磁绝缘，这些电场强度均低于击穿阈值。该概念系统的外形尺寸约为直径2.7米、长度6.5米。根据预期的等离子体性能，该系统可实现86–171 kW$_e$的净功率输出。

1. 引言

过去两年，全球电力需求的增长速度超过了自2010 年代初以来任何一个可比时期，这主要由交通电气化、数据中心扩张和工业活动复苏所推动。国际能源署报告称，2024 年需求增长了 2.2%，几乎是2013—2023 年平均水平的 ~1.3% [26], 两倍，而麦肯锡预计，到 2050 [33], 全球电力需求将增长至目前的两倍以上。为此，私营和公共领域对聚变能源的投资均有所加速，目前已有 50 多家公司获得近 100 亿美元的已披露融资 [17]。

高压（HV）子系统对多种聚变概念至关重要。典型实例包括用于中性束注入的高压加速器 [48], 用于惯性静电约束的高压阴极 [14, 24],用于惯性约束聚变激光器的高压电源调节 [3],以及用于 Z 箍缩聚变的脉冲功率驱动器 [38]。Orbitron 是一种混合磁电约束装置 [2],，依靠处于高负直流电势的中心阴极产生深静电势阱，使离子加速至与聚变相关的能量，发射初级电子，并协助等离子体形成。在经典 Orbitron 中，电子受轴向场磁化，而离子基本不受磁化。

增强轴向场会使 Orbitron 进入离心镜式状态：离子也开始受到 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 旋转的影响，其轨道缩小，而由此产生的超声速旋转可减少轴向镜损失，并通过剪切稳定低频互换模 [5, 13]。代价是，轨道缩小后所经过的阴极电势范围也随之减小，从而降低静电加热效率。要弥补这一损失，并提供旋转功率以抵消黏滞损失和平行损失，净能量装置的高压电源端电压要求必然达到数兆伏范围。数十年来，人们一直在探索离心约束的可行性：布德克尔研究所的交叉场等离子体（PSP）[1] 实验在镜区使用分段环形电极，电压最高达 ~450 kV，产生了稳定的旋转等离子体，离子能量为 ~20 keV，密度约为 10^{18} m^{-3} [1, 47]；马里兰离心实验

（MCX）已证明，在 $n_e \gtrsim 10^{20}$ m^{-3} [13, 31]处，完全电离等离子体可实现马赫数2–2.5的常规超声速旋转；马里兰大学的离心镜聚变实验（CMFX）目前采用超导磁体和绝缘端板，并施加最高达~100 kV的直流阴极偏压（目前受端部绝缘体放电限制为 ~60 kV），以驱动氘等离子体中的 $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ 旋转 [4, 36]。这些实验确立了物理可行性；而从这些实验到实现净正能量装置之间剩下的障碍，是工程问题——如何产生、调节并在真空中

*通讯作者mborghei@avalanche.energy (M. Borghei) ORCID：0000-0002-4188-432X (M. Borghei)

[1]PSP 是俄语首字母缩略词的英语音译，字面意思是“交叉场中的等离子体”。

输送高出一个数量级以上的直流电势。

现有的兆伏级直流电源体现了这一差距的本质。Van de Graaff 和 Pelletron 等静电发生器的电压可达 25 MV，但由于依赖机械电荷传输，其输出电流远低于 1 mA [21–23]。传统的单电源 Cockcroft–Walton（Greinacher）整流器存在电压降和纹波，二者分别随级数的立方和平方增长 [27], ，因此在数兆伏电压下实现数十毫安电流并不实际。绝缘芯变压器（ICT） [15, 46], 级联变压器 [27], 以及并联供电的电容耦合整流器（Dynamitron 类 [10]）通过将倍压过程分散到多个交流电源或磁耦合中，克服了这些限制。其中，Dynamitron 已在商业应用中得到验证，其电流水平适用于 Orbitron 负载；但其经典实现采用真空三极管并以 C类工作模式运行 [19, 32, 42, 44], ，使系统效率最高约为 60% [18], ，并产生 120 Hz 的端子纹波 [43], ，同时将电子管寿命限制在 20,000–25,000 小时 [19]。已有研究提出以固态振荡器替代，并报道了一种 1.3 MV 的实现方案 [20],，但目前尚无数百千瓦级、经验证的 5 MV 固态Dynamitron。

1.1. 范围与贡献

本文介绍了面向下一代 Orbitron 的一体化 5兆伏高压系统的概念工程设计。本研究借鉴了此前已验证的 300千伏真空套管原型的经验 [6]，并为实验实现奠定了基础。主要贡献总结如下：

(1) 设计并确定了一种 100 千瓦高压发生器的参数，该发生器将碳化硅MOSFET CLLC谐振腔与 120 级并联供电、串联级联整流器相结合，达到 >93% 直流-直流效率和 ~85% 端到端效率（第 4节）。
(2) 一种紧凑型真空套管拓扑，通过 50 个钎焊氧化铝间隔件，将 5兆伏电压从加压的 $C_5F_{10}O$ /CO_2 / O_2 气体介质传输至高真空环境，并采用源自 Hammerhead 原型的三相结屏蔽（第 5节）。
(3) 一套端部电极系统，可在旋转等离子体上施加定制的径向电势分布，并在电气和机械方面集成到套管中（第 5节）。

本文其余部分的组织如下。第2 节概述 Orbitron、其负载要求，并讨论磁绝缘和稳定性。第 3 节总结 300 千伏原型机测试的定量结果及其对 5 MV设计的影响。第 4 节详细介绍高压生成链，包括对高频介电效应的新分析以及对无源器件商用可用性的评估。第 5 节描述高压输送架构——气体容器、真空套管和 Orbitron 主腔体。第 6节总结全文并概述未来工作的范围。

2. Orbitron装置、要求与等离子体负载

2.1. Orbitron装置的概念视图

图 1 展示了 Orbitron装置的概念视图，其中标出了中心阴极、接地阳极（真空容器壁）、端电极、磁力线的相对位置以及 **E**×**B** 旋转方向。以下各节所述的高压系统连接至机器左端，套管将来自加压气体容器的 5兆伏直流电压引入真空室，并为中心阴极和另外 49 个分级电压电极供电。

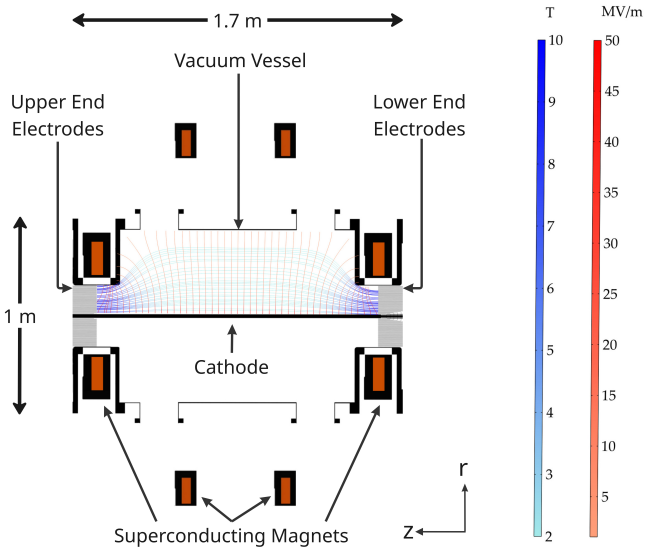


图 1：所述 Orbitron装置的概念示意图，突出显示磁通密度（蓝色）和电场分布（红色）。

图 1展示了装置内部交叉磁场线和电场线。电场由同轴电极构型建立，其中中心阴极和真空容器充当阳极。还可利用设置在端部磁体孔内的两组端电极进一步调节该电场。对于磁场而言，轴线上达到 2.5 T、镜喉处达到 10 T 的稳态运行是主要工程驱动因素；因此，该设计采用由强制流动氦冷却的高温超导（HTS）线圈组。虽然这些线圈的详细热设计超出了本文范围，但其概念性布置如图 1所示。交叉场的相互作用会诱导等离子体围绕中心电极快速旋转，从而产生有效约束等离子体所需的离心力，尤其是在超声速运行期间。

2.2. 基于零维等离子体建模的负载规格

本研究所考虑的等离子体负载由使用MC-TRANS++获得的稳态氘氚（D-T）解确定。MC-TRANS 是由马里兰大学开发的零维离心镜等离子体模型 [36]。对于给定的装置几何结构、磁场构型、燃料组成和运行条件，该模型求解粒子平衡方程和能量平衡方程，以估算稳态等离子体性质和聚变性能。因此，下文报告的温度、约束时间、聚变三乘积、聚变功率和科学能量增益均为模型预测值，而非经实验验证的拟议 5 MV Orbitron 的性能。表1 和2 总结了给定的装置参数及相应计算得到的等离子体性能量。

模拟单元长度为1 m，第一壁半径为0.45 m。磁约束和整体稳定性要求装置中心轴线上磁场强度为2.5 T、镜喉处为10 T。在这些条件下，稳态解得出离子温度和电子温度分别为45 keV和55 keV，每种粒子的密度均接近 $4\times10^{19}\,\mathrm{m^{-3}}$，聚变三乘积为 $nT\tau \approx 5.8\times10^{21}$ keV s $\mathrm{m^{-3}}$，科学增益为 $Q_{\mathrm{sci}} \approx 8.5$，等离子体体积为0.282$\mathrm{m^3}$时热功率输出为0.434 MW。

离心约束要求超声速旋转，以降低轴向损失；解预测马赫数为4.76，对应的方位速度为 6.9×10^{6} m/s。要抵抗黏性损失和~35 kW的平行损失维持这种旋转，需要强径向电场，因此稳态下需要5 MV的径向电势降。从电气特性看，等离子体表现为一个与89.9 pF并联的623 MΩ高阻抗负载。考虑泄漏余量后，高压电源规格设定为在5 MV下提供20 mA（向等离子体输送100 kW）。这些负载特性构成了后续章节所述高压系统的主要要求。

2.3. 真空间隙磁绝缘

由于 Orbitron 在极高电压下运行，若要在装置中心的中心导体与接地腔体之间实现真空绝缘，所需的间隙距离将达到数米，以便进行电极调 conditioning。为避免这种情况并保持 Orbitron 的紧凑性，必须使用轴向磁场提供磁绝缘，防止真空击穿。所施加的磁场必须等于或超过临界磁场（通常称为 Hull 截止磁场），以确保从阴极发射的电子被偏转回阴极，而不是穿过间隙到达阳极。因此，电子沿横向穿越磁力线的输运会受到强烈抑制，并适用 $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ 绝缘状态 [29, 30]。

对于电子速度接近光速的情况（本研究即属于此类），使同心圆柱绝缘所需的临界轴向磁场 B_c 由相对论性 Hull 截止方程 [12]给出：

$$B_c = \frac{2R_2 m_e c}{e(R_2^2 - R_1^2)}\left[\left(\frac{eV_0}{m_e c^2}\right)^2 + 2\frac{eV_0}{m_e c^2}\right]^{1/2} \qquad (1)$$

表 1紧凑型Orbitron装置及其等离子体参数，来自 MC-TRANS++ 稳态D–T解。

参数	符号	数值
几何形状与构型		
燃料种类	—	D–T
中心室长度	L	1.0 m
第一壁半径	R_{wall}	0.45 m
等离子体内半径	R_{min}	0.01 m
等离子体外半径	R_{max}	0.30 m
喉部外半径	—	0.15 m
排气半径	R_{exh}	0.04 m
等离子体体积	V	0.282 $\mathrm{m^3}$
磁场构型		
中心区磁场	B_0	2.5 T
磁镜喉部磁场	B_{m}	10 T
磁镜比	R_{m}	4
等离子体参数		
电子密度	n_e	4×10^{19} 米$^{-3}$
离子密度	n_i	4×10^{19} $\mathrm{m^{-3}}$
电子温度	T_e	54.8 keV
离子温度	T_i	45.3 keV
有效电荷	Z_{eff}	1.0
等离子体β	β	25.8%
离子拉莫尔半径	ρ_i	0.0137 m
归一化回旋半径	ρ^*	0.0947
离子碰撞性	ν^*	2.24×10^{-6}
运行马赫数	M	4.76
阿尔芬马赫数	M_A	1.26
旋转速度	v	6.9×10^{6} 米/秒
角速度	ω	4.45×10^{7} $\mathrm{s^{-1}}$

其中，R_2 为外电极（阳极）的半径，R_1 为内电极（阴极）的半径，V_0 为施加电势，c 为光速，m_e 和 e 分别为电子静止质量和电荷。

请注意，中心电极半径还受到等离子体接触材料寿命的限制。高能等离子体粒子的轰击，加上局部场致发射或放电事件，可能导致电极发生溅射和表面退蚀。因此，R_1 数值应视为概念设计输入，而非经寿命验证的尺寸。确定实际可行的最小阴极半径，需要综合评估入射粒子通量及其能量、溅射产额、热负荷，以及在目标运行寿命内允许的退蚀量。该评估留待未来的设计和实验鉴定阶段进行。

为确保足够的磁绝缘裕度，实际设计通常采用显著高于理论极限的磁场，运行磁场一般至少达到 Hull 截止磁场临界值的 1.5 至 3.0 倍。

对于所提出装置的几何结构和工作电压，$B_c = 0.25\ T$。因此，轴向磁场必须大得多。这一条件得以满足，因为真空室中心处的最低磁场为 2.5 T。

表 2MC-TRANS++稳态D–T解的紧凑型Orbitron性能指标和品质因数。

指标	符号	数值
电负载和功率平衡		
总电势降	V_0	5 MV
径向电流	I	8.03 mA
维持旋转的功率	P_{rot}	40.1 kW
黏性加热	—	25.3 kW
总热损失	P_{loss}	84.2 kW
等离子体电阻	R_p	623 MΩ
等离子体电容	C_p	89.9 皮法
能量约束		
总储存能量	W	1.39 兆焦耳
转动动能	—	1.12 兆焦耳
热能	—	0.271 MJ
能量约束时间	τ_E	3.22 s
粒子约束时间	τ_p	14.5 s
离子-电子平衡	τ_{eq}	8.76 秒
聚变输出和品质因数		
聚变三乘积	$nT\tau_E$	5.83×10^{21} 千电子伏·秒·米$^{-3}$
阿尔法加热功率	P_α	59.1 kW
聚变功率（阿尔法粒子）	—	68.2 kW
聚变功率（中子）	—	273 kW
中子壁负荷	—	66.4 kW/m^2
总热功率	P_{th}	433 kW
科学增益	Q_{sci}	8.5

2.4. 磁流体力学和高速不稳定性方面的考量

众所周知，旋转镜等离子体容易发生两类低频不稳定性：由方位速度的径向剪切驱动的类开尔文–亥姆霍兹模，以及由磁场曲率中的离心有效重力驱动的交换模 [5, 13, 25]。阴极和端塞电极所施加的**E × B** 构型通过两种方式减轻了这些不稳定性。首先，一旦马赫数超过 1，剪切 **E × B** 流本身便可通过速度剪切稳定作用抑制交换模，这一点已在 PSP-2 [1, 47]和 MCX [13, 31]中得到实验验证。其次，端塞电极（第5节）使得所施加的径向电势分布 $\phi(r)$ 可以进行调节，进而设定局部剪切 $d\omega/dr$，其中 $\omega = -(1/rB)\,d\phi/dr$ 为旋转频率。调节这一分布既能塑造马赫数分布，也能抑制共振开尔文–亥姆霍兹频带。第++2.2 节报告的 MC-TRANS 解假定采用满足上述标准的磁流体力学稳定分布；详细的瞬态磁流体力学分析超出了本工程研究的范围，将另行报告。

3. 来自300千伏 Hammerhead套管的输入

目前的 5 MV设计借鉴了 300 kV紧凑型真空套管 *Hammerhead* 在设计、仿真和实验方面的多项成果。作者最近报告了该装置，并通过实验对其进行了表征，其在 300千伏下稳定运行了 144小时，暗电流低于 10 μA [6]。表 3总结了此次原型机测试的六项定量结果，以及每项结果对 5 MV设计的具体启示。

这些经验为后续子系统描述奠定了基础。300千伏实验依靠单个间隙承受全部电势，而我们的5 MV设计则将负载分配到50个彼此独立的100千伏间隙上。因此，Hammerhead原型所确立的设计要求可作为5 MV系统中每个电压级的保守基准。

4. 高压产生

4.1. 总体架构

用于向Orbitron产生并输送最高达5兆伏电压的总体架构如图 2所示。整个链路始于480 V_{rms}、60 Hz的三相电网输入；商用AC–DC前端产生受调节的1 kV直流母线；碳化硅全桥逆变器将其转换为0.5–1 kV_{pk}、250 kHz的方波；CLLC谐振腔与空心升压变压器提供150 kV_{pk} 正弦驱动；120级并联馈电串级整流器（PFSCR）将其倍增至5 MV直流端。调节回路将测得的端电压与设定值进行比较，并通过AC–DC级形成闭环。第4.2–4.7节将分别介绍各个模块。

4.2. 并联馈电串级整流器

此处采用的并联馈电串级整流器（PFSCR）拓扑结构，最著名的应用是其商用 Dynamitron 实现 [10]。射频振荡器向两个半圆柱形驱动电极（射频电极）馈电，这两个电极包围着高压整流器组件 [8, 18]。连接到每个整流级的半圆形电晕环（历史上采用真空二极管，如今采用固态堆栈）沿加速柱形成一列电极。射频电极之间的振荡电势通过特意设计得很小的电极—环电容，在每个电晕环上感应出相应的射频电压 C_{se}；每个整流级都耦合到同一个射频场，因此交流驱动实际上并联施加于所有整流级，而整流直流分量则沿柱体串联叠加 [9, 19]。为实现绝缘，PFSCR 发生器几乎都安装在充满高介电强度气体的接地压力容器中。此处采用的电路拓扑结构如图 3所示。

与传统串联馈电倍压器相比，PFSCR 拓扑具有多项实际优势。首先，分布式射频驱动降低了高压端子的有效源阻抗，并改善了束流负载下的电压调节。其次，由于刻意尽量减小射频电极与各整流级之间的耦合，高压系统在满端电压 [18] 下的总储存能量仍相对较低（$\lesssim$ 100 焦耳）。这一数值低于在 300 千伏原型机上经实验证实的 ~195 焦耳储能界限

表3300 kV Hammerhead原型的经验及其在5 MV设计中的应用。

300千伏下的观测结果	定量结果	对5 MV设计的启示
等电位阱屏蔽阴极三相结	模拟的三结合点电场降低从数十兆伏/米降至 1.04 兆伏/米；未发生闪络起始，持续 144小时 [6]	Each 5 个装置的 50 个电极间隙中 MV 套管采用相同的屏蔽式三结合点几何结构；5兆伏阴极处的模拟电场三结合点为 7.7 兆伏/米，仍低于 the 钨上开通的40兆伏/米设计上限 sten [16]
波纹状 （锯齿状） MA-COR 绝缘体几何结构	闪络路径延长至 >400 毫米沿着一条 10 厘米长的轴向绝缘体；电子在表面上被迫逆着外加电场	每个 100 千伏级均采用波纹状 Al_2O_3 绝缘-子，其闪络路径为 210 mm。沉孔特征保留在第一鳍片上
难熔金属 阴极（钼）	表面电场保持在40兆伏/米以下，比报告的开关场低0.6倍，开关场 [16]	5兆伏阴极和电极改用钨以提高与氧化铝的可钎焊性，并获得相当的工作功能；5兆伏环上的峰值电场限制在 30.3 兆伏/米
介电常数 匹配 固体／气体／真空界面 跨越	使用 ε选择的材料 $_r \in [2.8, 6]$ 以限制三结合点处的电场不连续处	5兆伏接口与97%的Al_2O相匹配 $_3$ （$\varepsilon_r \approx 9.4$）以 气体侧的 $C_5F_{10}O$混合物和真空 ($\varepsilon_r = 1$) 位于等离子体侧， 采用电晕环几何结构，将局部场增强因子降至 < 2
颗粒 （铜/银） 污染 as the main 去调理原因	密封件中的铜和紧固件镀层中的银，在扫描电子显微镜/能谱中观察到再沉积 团块，需要 多天恢复	在 5 MV 组装中， 所有铜密封件均已从真空包壳上拆除；紧固件有源电极附近使用未涂层的 不锈钢；洁净室等级从 10,000 级提升至 1 级 ,000
安全调理的储能预算调理	在完整试验台中，300千伏时的 ~195 焦耳足以进行向上调理且未造成电极损伤	5 MV PFSCR 梯级在全电压下储存 [18]J。 The 射频扼流圈 L_i 和电晕环电容网络的尺寸经过设计，确保单一故障通路放电量不超过 ~30 J，远低于 Hammerhead 验证的上限

，因此可大幅限制内部放电或真空火花可能造成的损害。3

大功率传统 PFSCR 发生器通常采用工业真空电子管（三极管），一般以 C 类模式运行，以驱动谐振腔 [19, 32, 42, 44]。使用真空电子管会使整个系统效率降至约 60% [18]。此外，这些电子管还会引起 120 Hz 的端电压纹波 [43]，且使用寿命有限，通常为 20,000 至 25,000 小时 [19]。尽管人们已经设计出基于固态振荡器、效率更高的发生器，但在数百千瓦功率等级下，它们尚未成功应用于高达 5兆伏的电压。电压高达 5兆伏、功率达数百千瓦。

电路定尺寸

并馈电路在负载下的直流输出电压由空载电压和负载相关的电压降 [44] 构成：

$$V_0 = \frac{NV_{rf}}{K} - \frac{I(N-1)}{fC_{se}K}, \tag{2}$$

其中，V_{rf} 为振荡器射频电压的幅值，N 为倍压级的数量，I 为负载电流，f 为工作频率，C_{se} 为每级的耦合电容

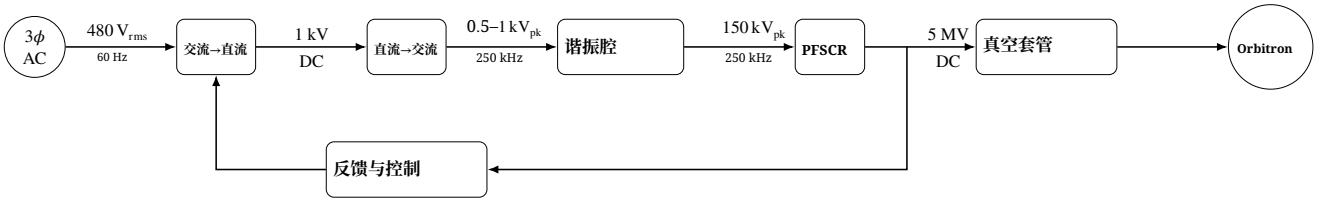


图2：采用闭环调节的5兆伏直流电生成与输送链高级框图。

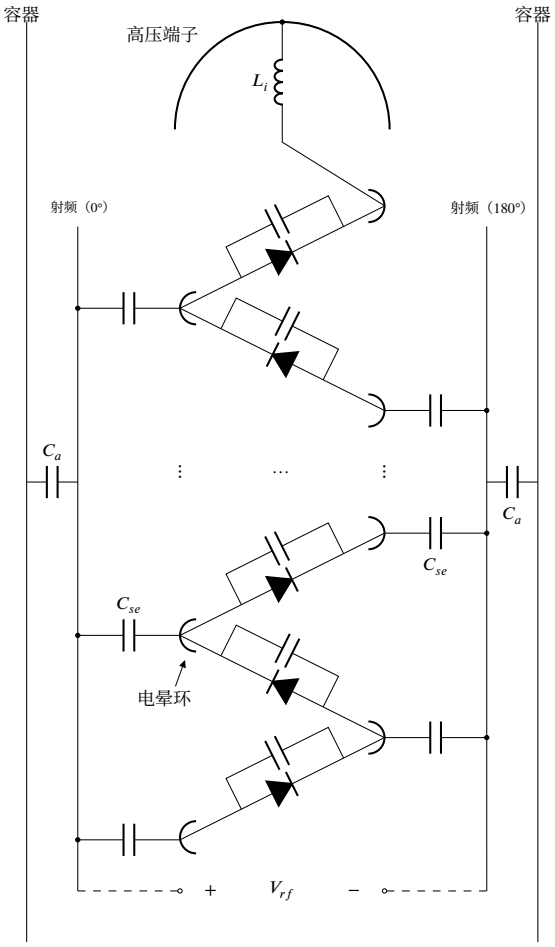


图3：对称并联馈电串级整流器柱体。

，K 为电容耦合系数，

$$K = 1 + 4\,\frac{C_{ac}}{C_{se}}. \tag{3}$$

这里 C_{ac} 是每级的并联电容。输出端的峰峰值电压纹波为 [44]

$$V_{ripple} = \frac{I}{2fC_{se}}. \tag{4}$$

设计目标为 $V_0 = 5$ MV、$I = 20$mA，纹波因数低于0.5%。固定振荡器的两个自由度（$V_{rf} = 150$ kV 和 $f = 250$kHz）后，问题就简化为求解 N、C_{se} 和 K。使用 COMSOL Multiphysics 建立电极柱的参数化几何结构，并据此计算三个电容分量：每个射频电极与容器之间的电容（C_a）、每组电晕环与相邻射频电极之间的电容（C_b），以及每组电晕环与射频中性平面之间的电容（C_c）。

选择 250 kHz 可大幅降低电压降和纹波因数（与当前先进水平相比，降低了 > 2 倍），但会增加开关动作和二极管的

表4高压发生器柱中的电容分量。

参数	数值
C_a	147.6 皮法
C_b	86.9 皮法
C_c	61.2 皮法
C_d	21.3 皮法

耗散，并提高对漏感的敏感度——下文的热能和振荡器设计将解决这些问题。

满足静电耐压要求（第5节）的电极柱配置在 $N = 120$处获得。表 4汇总了此配置的电容值；C_d 表示单个倍压级中所用二极管的总结电容。

由表 4 可知，级间耦合电容为 $C_{se} = 2C_b/N = 1.45$皮法，每级的并联耦合电容为 $C_{ac} = (C_c + C_d)/(2N) = 0.39$ 皮法，因此 $K = 2.07$。根据式（2）–（4），最大端子直流电压约为 5.5兆伏，峰峰值电压纹波为 ~27.6 kV（约为端电压的 0.55%）。纹波可通过射频扼流圈 L_i 与端子（C_D）及等离子体负载（C_L）的总电容结合来衰减：

$$V_{ripple,residual} \approx \frac{V_{ripple}}{\omega_s^2 L_i (C_D + C_L)}. \tag{5}$$

当 $C_D = 26.0$ 皮法和 $C_L = 89.9$ 皮法时，需要 $L_i > 3.8$ 毫亨的电感才能将纹波因数降至 0.5% 以下。

4.3. 射频振荡器：CLLC谐振腔

此处采用的射频振荡器是一种CLLC谐振变换器，属于具有宽电压增益范围的全软开关拓扑 [50]；它广泛用于可再生能源发电、电动汽车和直流微电网中的直流母线接口 [35, 51]。单向CLLC变体已被证明可用作 1.3 MV Dynamitron中的射频振荡器 [20]。所提出的振荡器如图4 所示，由四个阶段组成：(1) 商用快速响应交直流变换器，提供输入直流母线；(2) 碳化硅 MOSFET全桥（Q_1–Q_4），产生高频方波；(3) 串联 LC支路（L_s，C_s），用于滤除高次谐波；(4) 谐振腔本体，由空心升压变压器和并联谐振电容组成（原边为分立电容 C_r，副边为PFSCR电容网络）。

*CLLC*谐振网络

图 5 展示了 LC滤波器之后的简化谐振网络。次级谐振电容 C_T主要由 PFSCR 梯级的等效电容决定，$0.5(C_a + C_b(C_c + C_d)/(C_b + C_c + C_d))$，并加上次级绕组的寄生电容。该

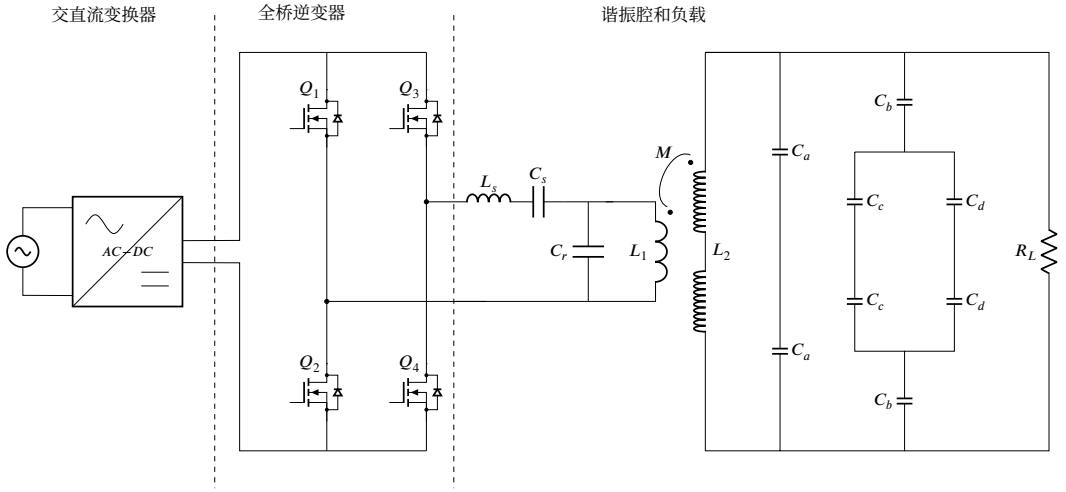


图4：带有PFSCR小信号等效网络的射频振荡器总体架构。

变压器的设计使次级漏感满足 $\omega_s^2 = 1/L_{\sigma 2}C_T$。在此条件下，CLLC网络的增益为

$$\frac{V_{rf}}{V_s} = \omega R_L C_T \frac{M}{L_1}. \tag{6}$$

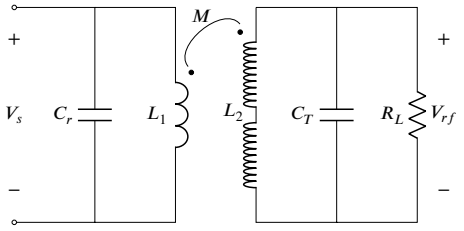


图5：CLLC谐振腔的等效电路。

对于固定频率（$\omega = \omega_s$）、负载 R_L和 PFSCR 架构，必须设计变压器，使变比 M/L_1 提供所需的电压升压。要实现从 1千伏pk 到 150 kVpk 的增益，需要 $M/L_1 > 10.6$。一次侧电流为

$$i_s = V_s \frac{L_2\left(1 + \dfrac{j\omega C_T M^2}{L_1 L_2} R_L - \omega^2 L_{\sigma 1} C_r\right)}{j\omega L_1 L_{\sigma 2}}. \tag{7}$$

给定 $L_{\sigma 1}$，一次侧谐振电容的尺寸应满足$\omega_s^2 = 1/L_{\sigma 1}C_r$，从而使谐振回路对逆变器呈现纯电阻负载，最大限度地减少无功功率循环。此时，公式（7）可简化为

$$i_s = V_s \frac{C_T M^2 R_L}{L_1^2 L_{\sigma 2}}. \tag{8}$$

4.4. 变压器设计

在 250 kHz 附近运行时，空心变压器是 CLLC 谐振腔的自然选择。两项约束决定了设计：$L_{\sigma 2} = 1/(\omega_s^2 C_T) = 4.2$ mH，以及 $M/L_1 \geq 10.8$。

表5所选利兹线绕组束的参数。

绕组	载流量 (A)	数量：42 美国线规股线	外径（毫米）	直流电阻 (Ω/千米)	R_{AC}/R_{DC}
初级	500	60,750	110.2	0.11	1.50
副边	30	4,200	7.3	1.53	1.55

绕组绝缘必须能够承受初级侧 1千伏、次级侧 150 kV 的峰值电压。为降低趋肤效应导致的交流电阻损耗，两个绕组均采用 42 美国线规（AWG）利兹线束，单股线直径为 73。7 μm。表 5列出了每个绕组的参数。次级导线可商购；初级导线则需要将九股标准 6750× 42 美国线规利兹线捆扎在一起。

变压器如图 6所示；外径为 50 cm，高度为 150 cm。结构支撑材料为氮化硅（Si_3N_4），选用该材料是因为其兼具热导率（28 W/m.K）、介电强度（19 兆伏/米）和机械强度。次级绕组的平均半径为 15 cm，长度为 140 cm，分为两半并采用中心接地（中心抽头）。其 320 匝绕组配置为两个区段，每个区段包含两个径向层和 80 个轴向层。匝间聚酰亚胺绝缘厚度为 ∼1.5 mm，可提供充足的匝间耐压。初级绕组由 4 匝组成，平均半径为 25 cm。鉴于采用空心磁芯且初级匝数极少，约 49% 的耦合系数是可以接受的。表 6 列出了三维仿真变压器参数。

初级至次级绝缘必须承受 150 kV 的峰值电压。两个绕组之间 6 cm 的径向间隙，加上加压绝缘气体的介电强度，可以轻松满足这一要求。

仿真得到的次级漏感与目标值 $L_{\sigma 2} = 4.2$ mH 的偏差在 0.1% 以内。当 $L_{\sigma 1} = 2.93$ μH 时，一次侧谐振电容为 $C_r = 1/(\omega_s^2 L_{\sigma 1})$ =138.55 nF。

表6三维仿真得出的变压器参数。

参数	数值
初级电感	3.84 μH
次级电感	5.51 mH
互感	71.04 μH
初级交流电阻	20.37 $\mu\Omega$
次级交流电阻	128.66 mΩ

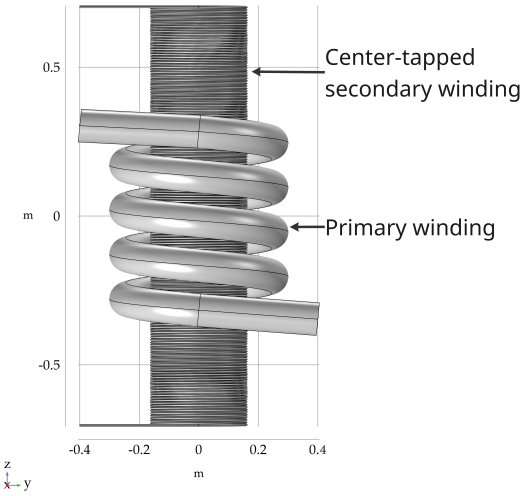


图6：射频变压器的有限元模型 .

4.5. 效率估算

主要损耗来源的功率损耗汇总于表 7。变压器欧姆损耗根据谐振状态下的绕组电流计算：

$$i_1 = V_s \frac{j\omega L_1 L_2 L_{\sigma 2} - M^2 R_L}{(j\omega L_1 L_{\sigma 2})^2} \tag{9a}$$

$$i_2 = V_s \frac{M L_1 R_L - j\omega M L_1 L_{\sigma 2}}{(j\omega L_1 L_{\sigma 2})^2} \tag{9b}$$

在 $V_s = 875$ V 时（满载输出为 5兆伏），初级绕组和次级绕组分别耗散 5.1 W 和 115.8W。

开关、二极管和谐振回路的损耗来自 LTSpice 在满载（5兆伏，20 mA）下进行的电路仿真。逆变器采用 Wolfspeed CAB500M17HM3 半桥模块，该模块使用碳化硅 MOSFET。串联滤波电感 L_s 由与变压器初级绕组相同的导线绕制 10 匝，线圈直径为 15 cm，长度为 125 cm，电感为 1.03 μH，电阻为 0.54 mΩ。串联谐振电容 $C_s = 390$ nF 是一款 CalRamic CR09 超低损耗脉冲电容（损耗因数为 0.2%）。每个整流级使用 15 个 Voltage Multipliers Inc. X100UFG 二极管串联。

总损耗低于输出功率的 7%，因此 1千伏直流至 5兆伏直流转换级在满载时理论上可达到 >93% 的效率。假设商用交流–直流前端（例如 Magna-Power MT-150kW）的效率为 92%，则

表 7满载时的主要功率耗散元件。

元件	功率损耗（W）
射频变压器	121
二极管	3,000
逆变器 MOSFET	2,980
串联 LC 滤波器	182
总计	**6,283**

系统总效率为 ~85%，显著高于三极管驱动的 Dynamitron 通常达到的 ~60%。

4.6. 无源元件的绝缘与采购

表 8 总结了高压产生链中每个主要无源和有源部件所需的电压、电流和额定能量，以及其商业可获得性状态。每个部件均已确定为现成产品，或可通过捆绑、堆叠或重新灌封商用基础部件制成的定制变体，无需开发新技术。

4.7. 传感与调节

端电压测量是系统中的关键信号，既用于 Orbitron 运行，也是稳定输出电压的闭环调节器的主要输入。概念设计如图7所示。

在数百万伏级，传统的电阻分压器或电容分压器会变得体积庞大，并且越来越容易受到表面漏电、电晕放电和沿面闪络等限制因素的影响。此处采用发电式电压表（GVMs）测量端子直流电压。带有扇区切口的接地转子在分段定子前方旋转，周期性调制端子与定子之间的电容，并产生与 $V_0\, dC_{GVM}(t)/dt$ 成正比的电流。经过跨阻转换和载波滤波后，低电压输出与端电压成正比。GVM 通道的有效带宽受转子转速和载波滤波的限制，仅为几 Hz；载波滤波会引入相位滞后，从而限制控制环路交越频率。

为捕捉 GVM 无法跟随的快速扰动，采用电容拾取（CPO）板。每块 CPO 板都是一块安装在罐体壁上、与罐体壁绝缘并朝向高压端子的金属电极，从而形成一个小电容 C_{plate}。板上的电流为 $C_{plate}\, dV_0/dt$，而带有反馈电容器 C_f 和泄放电阻 R_f 的电荷放大器（跨阻级）会产生一个近似正比于 V_0 以上$f_c = 1/(2\pi R_f C_f)$交流分量的输出，同时在直流方向滚降，以避免漂移和饱和。附加的高频低通级（通常为数百千赫兹）可抑制来自 250 kHz 振荡器场的直接射频拾取。

安装在端子相对两侧的两个 GVM 探头的信号取平均，以降低对横向运动和场不对称性的敏感度。将平均后的 GVM 信号与设定值 V_{ref} 进行比较，并通过差分（仪表）放大器

表 8主要组件、绝缘要求及商业可获得性。

组件	峰值额定值	来源	备注
AC–DC前端	150千瓦，1千伏直流	商用（Magna-Power MT-150kW）	92%效率
逆变器半桥模块	1.7 kV，每个 500 A	商用（Wolfspeed CAB500M17HM3）	软开关碳化硅
串联 LC 滤波器 L_s	~1 千伏pk亨 1 μ	定制（利兹线绕制）	与变压器初级绕组使用相同的导线-mary
串联谐振 C_s	2 千伏，390 纳法	商用（CalRamic CR09）	0.2% 损耗因数
空心变压器	150 kVpk 副边，500 A pri-mary	定制	定制 60,750 股利兹线初级绕组
整流二极管（每只 120×15）	100 kV，50 mA	商用（VMI X100UFG）	每个倍压器中串联堆叠
并联馈电耦合 C_{se}	150 kVpk，1.45 皮法	集成于电晕放电-环形结构	No 所需的分立元-件
射频扼流圈 L_i	5兆伏支撑绝缘子，3.8 mH，20 mA	定制	位于加压容器内
套管绝缘子	100 千伏/间隔件，50 个间隔件	商用毛坯，定制加工	97% Al_2O_3，可钎焊 to 钨
绝缘气体	1 兆帕，~50兆伏/米强度	商用混合气体	$C_5F_{10}O$ / CO_2 / O_2 at 2.75/91.75/5.5%

生成缓慢但准确的误差信号，再经过低通滤波（直流至 f_c）。与此同时，使用电荷放大器处理两个 CPO 板的信号，取平均后进行高通滤波，截止频率高于 f_c，并额外施加高频低通滤波，以限制快速通道的带宽。随后，使用匹配交越滤波器将低通滤波后的 GVM 误差与带宽受限的 CPO校正结合，使控制权限在 f_c 附近于两个通道之间平滑交接，同时避免增益峰化。合并后的误差驱动 PI控制器（可选用经过强滤波的超前项来提高相位裕度）。控制器输出限制为 0–10 V 的指令，该指令与 PFSCRRF驱动器/变流器控制输入相连，对应于端子处的 0–5兆伏。

5. 高压配电与输送

PFSCR 产生端电压，并将其传输至 Orbitron 的中心阴极，再通过电阻分压将电压分配至端部电极系统中的另外 49 个电极，如图所示 8。电压生成和电阻分压发生在加压气体介质内部；真空套管是该介质与发生聚变反应的真空室之间的关键接口。

5.1. 加压气体容器和绝缘介质

加压气体既用于在紧凑空间内实现电绝缘，也用于热管理：振荡器中的射频损耗所产生的热量，通过使绝缘气体循环流经储罐外的热交换器而被带走（图8中未显示）。中压范围内高压系统主要选用的绝缘气体一直是 SF_6，因为它具有出色的绝缘性能和化学惰性 [7]。出于环境方面的考虑，本设计采用全氟酮 $C_5F_{10}O$，其全球变暖潜能值（GWP）低于 1，而 SF_6 [49] 的全球变暖潜能值为 23,500。虽然 $C_5F_{10}O$ 的临界介电强度是 SF_6，的两倍，但其沸腾温度为 ~26.9°C，且在 25°C 时蒸气压仅为 93.8 kPa [37]，，因此必须与载气混合。比例为 2.75 / 91.75 / 5.5% 的 $C_5F_{10}O$ / 一氧化碳 2 / O_2 混合气体在 1 MPa 下的介电强度与 0.6 MPa 下的 SF_6 大致相同 [40],；在均匀电场中，其介电强度为 50–60 兆伏/米 [27]。

在标称5 MV端电压下，采用各电极的稳态数值，对包括上述所述电极在内的加压容器进行 COMSOL Multiphysics 仿真。图9绘出了由侧视图和俯视图得到的电场分布结果。电晕环承受两种主要的电应力来源：(1) 85 kV 的环间电势差；(2) 与射频电极的邻近效应，后者相对于顶部电晕环具有最大的电势差。为减弱第二种影响，射频电极采用弯曲且倾斜的结构，以最大限度地降低电场的不均匀性。在这些条件下，相邻电晕环之间的平均场为 11.9 兆伏/米，而最大表面电场在顶部电晕环面向射频电极的各点处达到 30.3 兆伏/米。顶部电晕环与射频电极之间的平均场为 8.7 兆伏/米。

柱顶场集中 图中电场分布9 显示出靠近高压

紧凑型Orbitron的5 MV高压系统概念设计

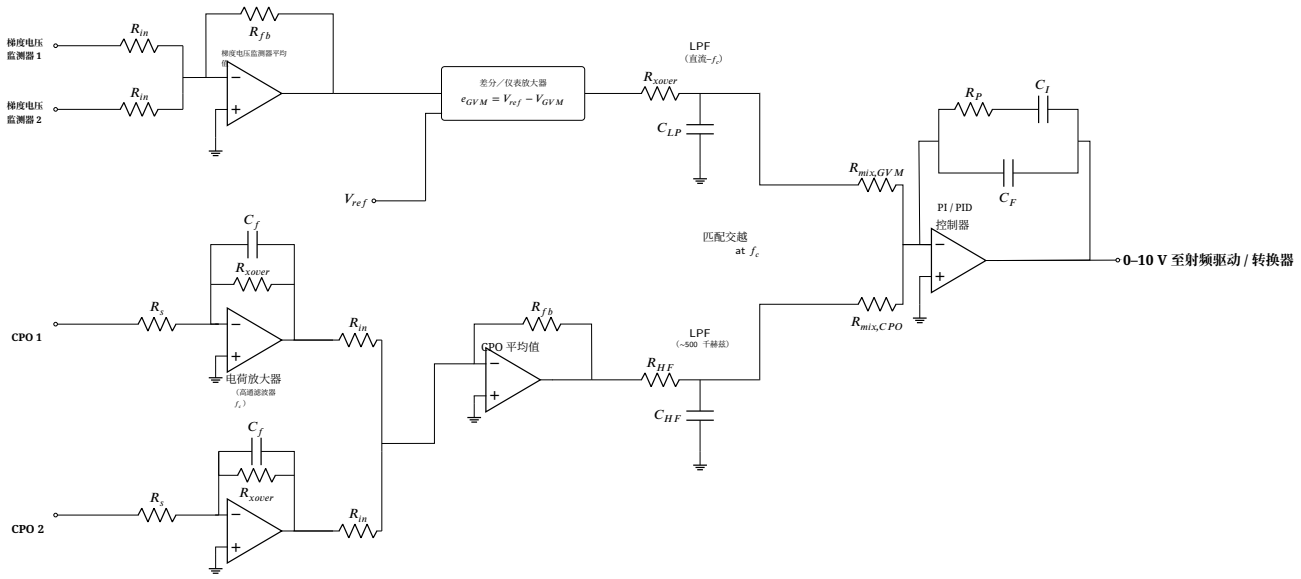


图7：结合慢速绝对值梯度电压监测器（GVM）测量与快速电容式取样（CPO）通路的低压调节回路。

柱体上部 1.8-2 米处的发生器端子处存在电场集中，这是由射频电极与接地容器壁之间不断增大的电势差驱动的。三项设计措施用于控制这种集中。首先，对电晕环的次半径进行设计，以防止最顶部电晕环发生电晕起始，使其表面的峰值电场达到 30.3 兆伏/米。其次，柱体顶部附近射频电极的曲率采用准 Rogowski 轮廓，使电晕环与射频电极之间的峰值电场至少低于混合气体流注起始电场的 1/2。第三，终端穹顶本身向上延伸，并配备尺寸加大的环形屏蔽罩，从而将最高电场位置远离任何三结合点或密封结构。三种选择均直接继承了 Hammerhead 的设计理念，即将易发生场致发射的点限制在等电位阱内（第3节）。

除直接连接至 PFSCR 端子的 Orbitron 阴极外，阴极与阳极（真空容器）之间还设有 49 个电极。电压由电阻串（每对相邻电极之间连接一个大电阻）均匀分配。这些电极有两个作用：(1) 对套管上的电压进行分级，降低各绝缘级两端的电势差，并减轻梯度电极结构中的总电压效应；

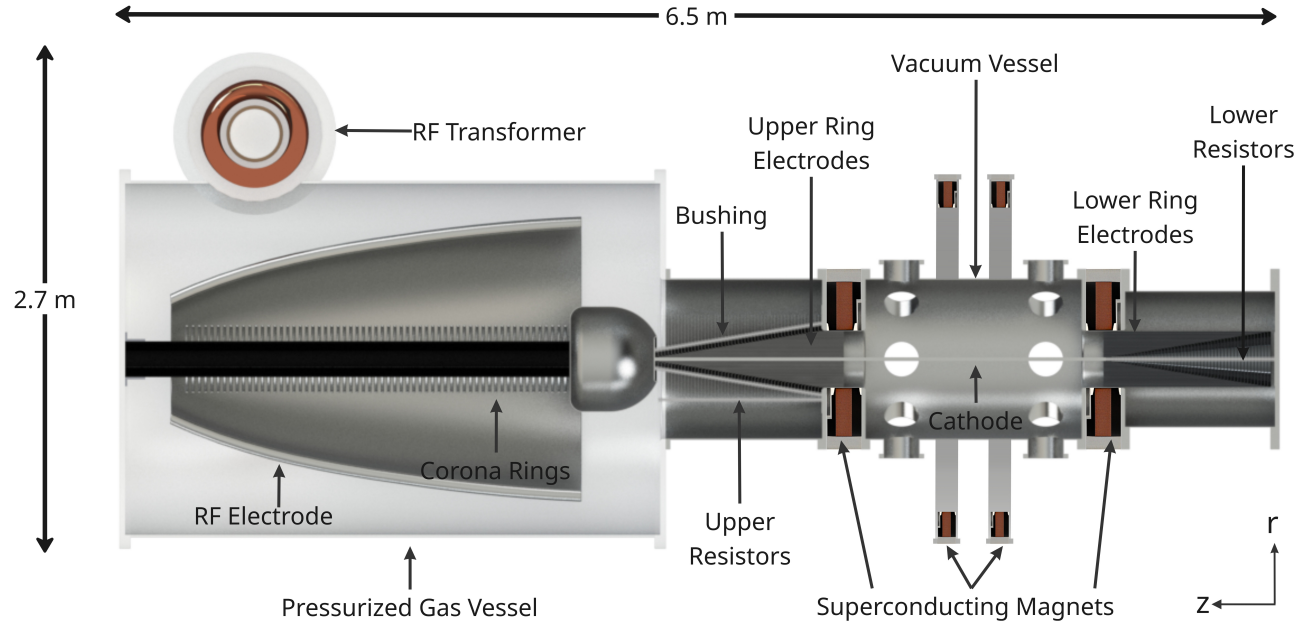


图8：5 MV Orbitron 系统的 CAD 模型，包括高压发生器、套管和电压分配网络。

(2) 充当端塞系统，在等离子体上施加定制的电势分布。在加压气体区域，这些电极的水平段厚 0.75 毫米，间距为 18 毫米，电极间电场为 5.5 兆伏/米。它们向真空中的延伸部分经由真空套管引出，下面将对此进行介绍。

5.2. 真空套管

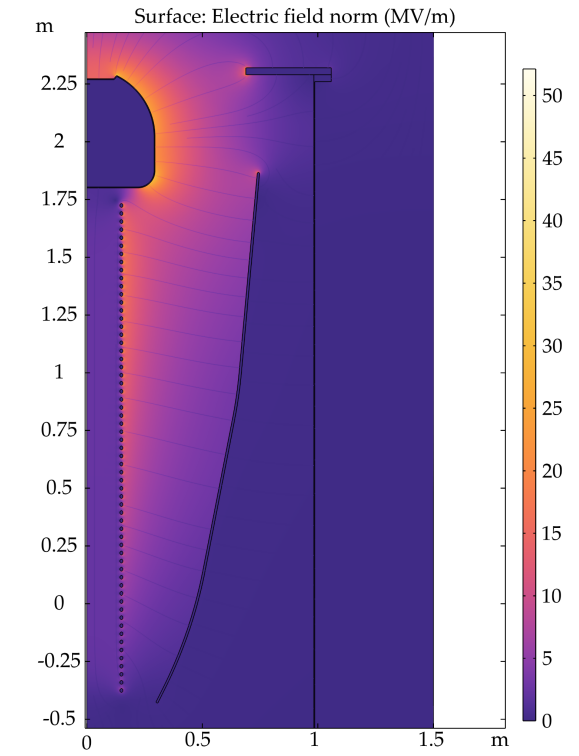
真空套管将高压从加压气体容器传输至真空容器，其中压力范围为10^{-6} 至 10^{-1} Pa。如图 10所示，置于电极（包括中心阴极与腔室）之间的绝缘隔块，既作为加压区与真空区之间的界面，又可维持每个隔块两端 100 kV 的电压。一个主要问题是沿绝缘体表面发生的沿面闪络，其击穿电压通常低于两侧块状固体电介质以及气体或真空电介质的击穿电压。尽管真空中的沿面闪络发展过程不同于加压气体中的情况，但普遍认为，两者均由三结合点处的电子发射引发 [28, 41], ; 三结合点是阴极、绝缘体与真空（或气体）交汇之处，由于固体绝缘体与气体或真空绝缘体之间相对介电常数和电导率不匹配，该处会承受强烈的电应力。

这正是 Hammerhead原型针对的故障模式，其在 300 千伏下测得的三结合点电场为 1.04 兆伏 / 米（第 3 节），为此处 50个间隙中每个间隙所采用的几何结构提供了依据。图 11显示了当前设计中的阴极三结合点区域。模拟得到的三结合点电场为 ~7.7 兆伏/米，远低于钨或钼等难熔金属所报道的起始场 [16]。此外，波纹绝缘体在每个 100 千伏间隙上具有 210 毫米的闪络路径，这种几何结构能够有效抑制紧凑型支撑绝缘子中的表面闪络 [6, 34]。

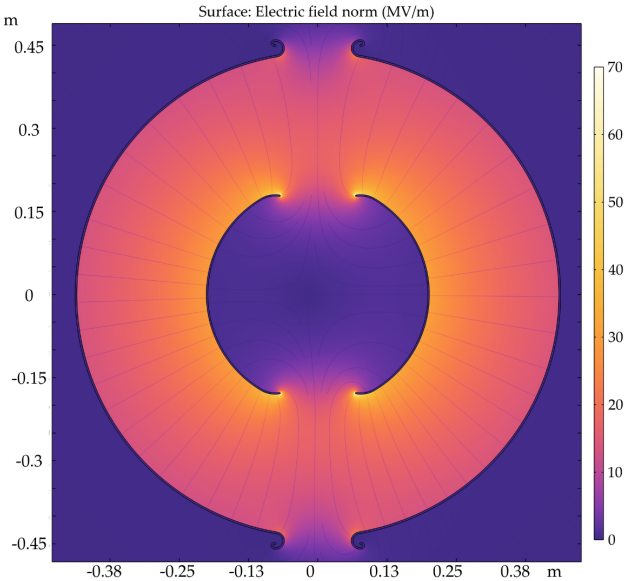
在可用于间隔件的真空兼容陶瓷中，我们选用了 97 % 纯度的氧化铝（Al_2O_3），因为它应用广泛，并且可以直接钎焊到钨电极上。该 18 毫米厚的绝缘体能够为 100 千伏间隙提供足够的固体介质耐压，其介电强度为 ~15.5 兆伏/米。

与其他绝缘介质不同，真空的介电强度强烈依赖于间隙总电压：随着间隙距离和电压增加，击穿对应的阴极梯度会逐渐降低，这一现象称为“总电压”效应 [45]。若要在 5兆伏下避免真空击穿，单个间隙的距离需超过 ~3 m [11]。为使装置保持紧凑，将 5兆伏总电势分为五十个 100 kV 间隙。在均匀电场下，每个间隙可小至 2 mm（对应高于 50兆伏/米的击穿场强）[39]。

真空侧（绝缘体之后）电极的水平段间距为 18 mm，平均场为 5.5兆伏/米。这些 L形电极随后过渡为磁体孔内的垂直段，



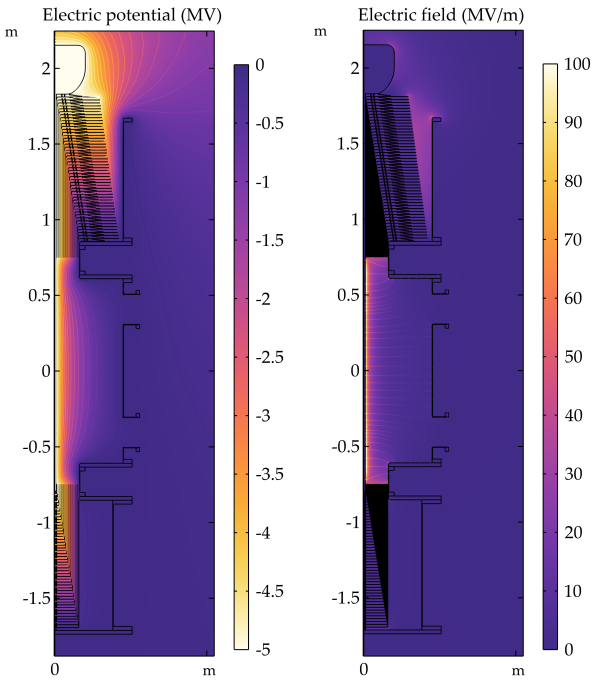
（a）侧视图。



（b）俯视图。

图 9：标称端电压为 5兆伏时 PFSCR柱中的电场分布。

轴向场最强，且电极直接面向等离子体。在垂直段，电极间间隙缩小至 ~2.5 毫米，平均场为 40 兆伏/米。虽然在纯真空间隙中，40 兆伏/米已接近可承受的上限，但强轴向磁场会抑制径向电子运动，并提供磁绝缘，使这一场强可以接受（参见第 2.3 节和参考文献 [30]）。



（a）电势分布。 （b）电场分布。

图10：套管与Orbitron的静电模拟。

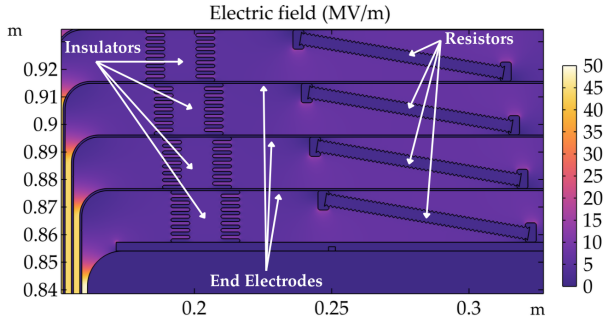


图11：磁体孔和第一个端电极附近的电场分布，显示了波纹绝缘体和电阻式均压元件。

尽管中间电极将电势差分摊到各个绝缘级上，主 Orbitron 单元仍需在中心阴极与周围阳极之间的单个间隙中承受完整的 5 兆伏电势差。由于存在上述总电压效应，单个间隙中的现有间隙距离不足。系统中存在的强轴向磁场会抑制横向电子输运并提供磁绝缘，详情见第 5.4节。

5.3. 电阻式均压

为维持沿5 MV套管的受控电势分布，49个中间电极通过由50个高压电阻元件组成的串联网络连接，如图11所示。所提出的电阻器由掺杂氧化钌（RuO_2）的 Al_2O_3 陶瓷制成，这是一种商用开发的电阻材料，其电阻值可通过RuO_2浓度进行调节。每个电阻器均采用波纹表面，以增加爬电距离，并设计为具有150 kV的标称耐压值，从而为相邻电极之间100 kV的工作电势差提供裕量。

所选电阻值旨在维持预期电压分布，同时尽量减小均压网络产生的寄生电流。将 50 个相同的电阻串联，跨接在完整的 5兆伏电势差两端，每级选用 $R = 5\,\mathrm{G\Omega}$ 的电阻，可得到总电阻 $250\,\mathrm{G\Omega}$ 和均压电流 $I_{\mathrm{div}} = 20\,\mu\mathrm{A}$。由此产生的功耗约为每个电阻 2 W，整个分压器约为 100 W，相当于标称 100 kW 直流输出功率的 0.1%。

5.4. Orbitron 腔室与等离子体负载相互作用

主真空腔室容纳 Orbitron 组件，该组件由一根中央棒电极（阴极）、腔室壁（阳极）以及分别位于纵向两端、用于提供轴向约束的端电极组成。尽管从面向等离子体的一侧看，这些端电极组件外观相同，但其结构和电气集成方式各不相同。在左侧（高压侧），电极组通过上述钎焊陶瓷套管引入真空。右侧则通过沿 z 轴布置的分压电阻串来维持电极间隔；由于这些电极完全位于真空容器内部，因此无需采用左侧高压接口所需的钎焊陶瓷绝缘体。

在这些电极组之间的主要等离子体区域内，电学行为与传统静电间隙存在显著差异。在冷的、无磁真空中，系统可能会在达到5兆伏之前就发生击穿。然而，交叉电磁场中的聚变等离子体（$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$）从根本上改变了传导动力学。轴向场从装置中心的2.5 T延伸至磁体孔中的10 T，电子受到强烈磁化；其沿磁力线方向的迁移率比横向方向高出几个数量级。这种高平行电导率使等离子体电势沿每条磁力线几乎保持不变，实际上使这些磁力线成为等势面 [29]。相反，电子跨磁力线输运受到严重抑制，从而抑制了传统的真空击穿机制，并维持极高的电势梯度。当在位于离散磁力线上的电极之间施加偏置电压时，所产生的电势差会贯穿整个等离子体体积而保持存在，从而建立稳定的静态 $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ 场。有关这些等离子体—高压相互作用及其瞬态动力学的详细表征将在后续论文中 प्रस्तुत。

5.5. 中子屏蔽与辐射防护

Orbitron中的氘氚聚变反应会产生高能中子，对周围结构和高压电源提出额外要求。对于本研究所考虑的运行点，MC-TRANS++ 模型预测中子功率约为273 kW，中子壁负荷为66.4 kW m^{-2}。因此，需要设置中子包层和屏蔽系统，以管理聚变中子的能量沉积，并限制对周围设备的辐射照射。该系统的详细设计，包括其材料组成、几何结构和屏蔽厚度，不属于当前高压概念设计的研究范围，并且需要开展专门的中子输运和热分析。

辐射防护对 PF-SCR 的半导体元件尤为重要，因为中子诱发位移损伤、总电离剂量和单粒子效应都可能影响其性能与可靠性。拟采用的集成策略是：在可行的情况下，将辐射敏感元件置于主屏蔽后方，并在必要时增设局部屏蔽。因此，屏蔽设计必须考虑中子和次级伽马射线输运，包括辐射可能经由结构开口和高压引入端贯穿的通道。作为详细系统设计的一部分，将评估元件的耐辐射能力，以及预期运行寿命内的累积辐射剂量。

气体绝缘高压容器还需考虑辐射诱导的绝缘介质退化。中子和次级伽马射线照射可能使 $C_5F_{10}O/CO_2/O_2$ 混合气体发生辐解，进而影响其介电强度、化学稳定性和长期绝缘性能。因此，最终的屏蔽配置必须将气体绝缘电源所受的辐射照射限制在与其所需运行寿命相适应的水平。需要开展耦合中子学计算和辐射鉴定测量，以确定相关剂量水平，并验证绝缘气体及相关材料在具有代表性的辐射条件下的介电性能。

6. 结论与未来工作

本文介绍了一种面向下一代净正功率紧凑型Orbitron聚变装置的5兆伏高压系统概念工程设计。在紧凑型300千伏原型机（*Hammer*-头）定量经验的基础上，所提出的架构结合了碳化硅MOSFET CLLC谐振腔与120级并联馈电串级整流器，可在20 mA下输出5兆伏。与当前技术水平相比，其主要进展包括：端到端效率为 ~85%，而三极管驱动的 Dynamitron为 ~60 %；采用$C_5F_{10}O$ / CO_2 / O_2 混合气体的环境可持续气体绝缘方案，其GWP比SF_6低四个数量级以上；紧凑型真空输送架构，配备三结合点屏蔽以及波纹绝缘支撑件，为阴极供电并在端电极组件之间均匀分配电压；此外，还采用一体化 $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ 绝缘方案，利用2.5–10 T磁场，使等离子体区域内部的间隙电场保持在40兆伏/米。

根据 0-D MC-TRANS++ 代码，在拟议的集成高压系统驱动下，一台第一壁半径为 45 cm、长度为 1 m，中心磁场为 2.5 T、端线圈磁场为 10 T 的紧凑型 Orbitron，可实现等离子体 $Q \approx 8.5$。这相当于 433 kW 的热功率输出，其主要由输送至高压端子的 40 kW 功率驱动。根据所达到的热效率，此类装置可产生 86–171 kW 的净电功率输出$_e$，其物理外形尺寸约为直径 2.7 m、长度 6.5 m。

未来工作将重点开展以下方面：(1) 进行子系统测试和瞬态分析，以表征高压电源与动态等离子体负载之间的相互作用，尤其是在启动和故障模式期间；(2) 开展实验鉴定，从单个 100 kV 套管级逐步推进至具有代表性真空和磁场条件下的中压多级组件；(3) 开展耦合中子学和辐射输运分析，以确定屏蔽要求和部件辐射暴露；以及 (4) 进一步优化高压产生链的效率。

致谢

作者感谢 Steve Battel、Craig Miller、Brian Riordan 和 Corentin Lazarus 提供富有见地的讨论，并仔细审阅了本文。

经费

本研究由 Avalanche Energy Designs Inc. 内部资助。

数据可用性

支持本研究结论的数据包含在本文中。如有需要，可应要求提供其他数据。

CRediT 作者贡献声明

Moein Borghei:概念构思、调查、方法学、项目管理、可视化、初稿撰写、审阅与编辑。**RobinLangtry:**调查、方法学、审阅与编辑。**Nicola Van Moon:** 方法学、审阅与编辑。**Matthew Affolter:**审阅与编辑。**Erik McKee:** 审阅与编辑。

参考文献

[1] Abdrashitov, G., Beloborodov, A. 等，1991年。PSP-2实验中的热旋转等离子体。《核聚变》31，1275–1290。doi：10.1088/ 0029-5515/31/7/004。

[2] Affolter, M.、Thompson, R. 等，2024年。Orbitron：一种用于高能离子和电子共约束的交叉场装置。AIP Advances 14, 085025。doi:10.1063/5.0201470。[3] Arnold, P.A.、Le Galloudec, B.J. 等，2015年。国家点火装置中的功率调理，载于：2015年IEEE脉冲功率会议（PPC），IEEE，美国德克萨斯州奥斯汀。第1–6页。doi:10.1109/PPC.2015. 7296966。[4] Ball, J.L.、Mackie, S. 等，2025年。离心镜聚变实验中的聚变产额测量。doi:10.48550/arXiv.2505。23047。arXiv:2505.23047 [physics]。[5] Bekhtenev, A.、Volosov, V. 等，1980年。旋转等离子体热核反应堆的问题。《核聚变》20，579–598。doi:10. 1088/0029-5515/20/5/007。[6] Borghei, M.、Vorenkamp, M. 等，2025年。Hammerhead：一种紧凑型300千伏真空套管。《自然·通讯》16，11391。doi:10.1038/ s41467-025-66194-w。[7] Christophorou, L.、Van Brunt, R.，1995年。SF_6/N_2 混合物：基本特性和高压绝缘特性。IEEE《介电与电气绝缘学报》2，952–1003。doi:10.1109/94.469988。[8] Cleland, M.、Thompson, C. 等，1993年。用于电子束加工的新型大电流Dynamitron加速器。《核仪器与方法：物理研究B辑：束流与材料及原子相互作用》79，861–864。doi:10.1016/0168-583X(93) 95486-O。[9] Cleland, M.R.，2006年。电子加速器的工业应用。doi:10.5170/CERN-2006-012.383。[10] Cleland, M.R.、Farrell, P.，1965年。未来的Dynamitron。《IEEE核科学学报》12，227–234。doi:10.1109/TNS.1965.4323626。[11] Cranberg, L.，1952年。真空中电击穿的起始。《应用物理学杂志》23，518–522。doi:10.1063/1.1702243。[12] Creedon, J.M.，1977年。大电流二极管中的磁截止。《应用物理学杂志》48，1070–1077。doi:10.1063/1.323782。[13] Ellis, R.、Case, A. 等，2005年。马里兰离心实验中的稳定超声速旋转等离子体。《等离子体物理学》12。[14] Fancher, A.N.，2018年。在10至200千伏下利用氘燃料在惯性静电约束装置中产生聚变中子。博士学位论文。威斯康星大学麦迪逊分校。[15] Frost, R.E.P.、Lewin, P.L.、Spong, M.，2019年。绝缘铁心变压器技术用于特高压电源的适用性研究。IEEE《介电与电气绝缘学报》26，501–507。doi:10.1109/TDEI.2019.007751。[16] Furuta, F.、Nakanishi, T. 等，2005年。采用钼阴极和钛阳极降低高场梯度电子枪的场致发射暗电流。《核仪器与方法：物理研究A辑：加速器、光谱仪、探测器及相关设备》538，33–44。doi:https://doi.org/10.1016/ j.nima.2004.08.131。[17] 聚变工业协会，2025年。《2025年全球聚变产业报告》。技术报告。聚变工业协会。华盛顿特区。[18] Galloway, R.、DeNeuter, S. 等，2004a年。用于工业应用的新型IBA自屏蔽Dynamitron加速器。《辐射物理与化学》71，283–285。doi:10.1016/j.radphyschem.2004.03.060。[19] Galloway, R.、Lisanti, T.、Cleland, M.，2004b年。用于辐射加工的新型5兆电子伏–300千瓦Dynamitron加速器。《辐射物理与化学》71，551–553。doi:10.1016/j.radphyschem.2004.03.059。[20] Gong, W.、Pang, L. 等，2024年。采用CLLC型谐振拓扑的固态高压射频振荡器及其参数优化。IEEE《电力电子学报》39，13285–13299。doi:10. 1109/TPEL.2024.3431450。[21] Herb, R.G.，1959年。范德格拉夫发生器，载于：Flügge, S.、Creutz, E.（编），《核仪器I / 核物理仪器辅助设备I》。施普林格·柏林·海德堡，柏林、海德堡。第8/44卷，第64–104页。doi:10.1007/978-3-642-45926-9_2。丛书名称：《物理学百科全书 / 核物理学手册》。[22] Herb, R.G.，1971年。Pelletron加速器。《IEEE核科学学报》18，71–75。doi:10.1109/TNS.1971.4325962。[23] Hinterberger, F.，2006. 静电加速器。doi:10.5170/CERN-2006-012.95.[24] Hirsch, R.L.，1967. 电离聚变气体的惯性静电约束。《应用物理学杂志》38, 4522–4534. doi:10.1063/1.1709162. [25] Huang, Y.M., Hassam, A.B., 2001. 旋转等离子体中交换模的剪切流稳定。《物理评论快报》87, 235002 10 1103 87 235002 . doi: . /PhysRevLett. . .[26] 国际能源署，2025。《电力 2025》。技术报告。国际能源署（IEA）。巴黎。[27] Kuffel, E., Zaengl, W., Kuffel, J., 2000. 高电压工程基础。Newnes.[28] Li, Z., Liu, J. 等，2023. 50年来的表面闪络：理论模型与竞争机制。《高电压》8, 853–877. doi:10.1049/hve2.12340.[29] Liziakin, G.D., Gavrikov, A.V. 等，2024. 在具有轴向磁场的圆柱形等离子体柱中产生径向电场。《物理学进展》67, 464–486. doi:10.3367/UFNe.2023.12.039622. [30] Lovelace, R.V., Ott, E., 1974. 磁绝缘理论。《流体物理学》17, 1263–1268. doi:10.1063/1.1694876. [31] Lunsford, R., 2007. 马里兰离心实验中放电性能的参数限制。博士论文。[32] Matsuyama, S., Fujisawa, M. 等，2013. 改进东北大学 Dynamitron 加速器的能量稳定性，以用于微束和纳米束应用。《国际 PIXE 杂志》23, 69–75. doi:10.1142/ S0129083513400081.[33] 麦肯锡公司，2025。《全球能源展望 2025》。技术报告。麦肯锡公司。[34] Miller, H., 1993. 真空中绝缘体的闪络：现象综述及提高耐压的技术。《IEEE 电气绝缘汇刊》28, 512–527. doi:10.1109/14.231534.[35] Nhat Trung Tran, T., Wang, J.M., 2025. 一种用于提高轻载至中载效率的双向全桥 CLLC谐振变换器，具有双谐振频率。《IEEE新兴与精选电力电子主题杂志》13, 119–135. doi:10.1109/JESTPE.2024. 3480329.[36] Schwartz, N.R., Abel, I.G. 等，2024. MCTrans++：离心镜的零维模型。《等离子体物理学杂志》90, 905900217. doi:10.1017/ S0022377824000424. arXiv:2304.01496 [物理学]。[37] Simka, P., Nitesh, R., 2015. C_5 全氟酮的介电强度，捷克共和国 Pilzen。第338页。[38] Sinars, D.B., Sweeney, M.A. 等，2020. 桑迪亚国家实验室 Z 装置上脉冲功率驱动的高能量密度物理研究综述。《等离子体物理学》27, 070501. doi:10.1063/5.0007476.[39] Spolaore, P., Bisoffi, G. 等，1997. 真空高压绝缘的大间隙情形。《IEEE电介质与电气绝缘汇刊》4, 389–393. doi:10.1109/94.625353.[40] Stoller, P.C., Doiron, C.B. 等，2017. 用于高压应用的一氧化碳2 与 $C_5F_{10}O$ 全氟酮混合物。《IEEE电介质与电气绝缘汇刊》24, 2712–2721. doi:10.1109/TDEI.2017.006383.[41] Sudarshan, T.S., Dougal, R.A., 1986. 压缩气体中沿固体电介质的表面闪络机制：综述。《IEEE电气绝缘汇刊》EI-21, 727–746. doi:10.1109/TEI.1986. 348922.[42] Thompson, C., Cleland, M., 1989. 用于 X 射线处理的大功率 Dynamitron 加速器。《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料及原子相互作用》40-41, 1137–1141. doi:10.1016/0168-583X(89)90557-0.[43] Thompson, C.C., 1967. Dynamitron 电压调节多环反馈系统。《IEEE核科学汇刊》14, 169–173. doi:10.1109/ TNS.1967.4324546.[44] Thompson, C.C., Cleland, M.R., 1969. 兆伏范围 Dynamitron 型电源的设计方程。《IEEE核科学汇刊》16, 124–129. doi:10.1109/TNS.1969.4325195.[45] Trump, J.G., Van De Graaff, R.J., 1947. 真空中的高电压绝缘。《应用物理学杂志》18, 327–332. doi:10.1063/1. 1697654.[46] Van De Graaff, R.J., 1965. 具有绝缘磁芯的高压电磁设备。

[47] Volosov, V., 2009. 高温旋转等离子体的磁流体动力学稳定性：PSP-2实验简述。《等离子体物理学报告》35, 719–733. [48] Watanabe, K., Fujiwara, Y. 等，1998. 用于氢负离子束的多孔径、多级静电加速器的开发。《科学仪器评论》69, 986–988. doi:10.1063/1.1148619.[49] Zhang, B., Xiong, J. 等，2020. SF_6 替代气体的基本物理化学性质：近期进展综述。《物理学杂志D：应用物理》53, 173001. doi:10.1088/1361-6463/ab6ea1. [50] Zhang, X., Lin, F. 等，2023. 引言，载于：恒压变换、级联稳定性与高效率谐振直流变压器的整体设计。Springer Nature Singapore，第1–10页。doi:10.1007/978-981-19-9115-8_1.[51] Zhao, B., Zhang, X., Huang, J., 2018. 面向交直流混合微电网应用的 CLLC谐振变换器设计，载于：2018年 IEEE国际电力电子与应用会议暨展览会（PEAC），IEEE，深圳。第1–5页。doi:10.1109/PEAC.2018.8590451.