

CNIC-01650
CAEP-0112

PBFA Z 装置的主体设计及性能综述
AN OVERVIEW ON THE MAIN DESIGN AND
PERFORMANCE OF PBFA Z MACHINE
(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01650
CAEP-0112

PBFA Z 装置的主体设计及性能综述

宋盛义

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳, 621900)

摘 要

PBFA Z 是圣地亚国家实验室一台用于驱动 Z 箍缩的电流驱动器, 其脉冲功率设计是基于早期 Saturn 及 PBFA II 加速器的单脉冲 Marx 发生器, 水线形成线技术。PBFA Z 用 36 台 Marx 发生器储存 11.4 MJ 的能量, 将 5 MJ 的能量以 60 TW/105 ns 的脉冲耦合到水传输线中去, 将 50 TW, 3.0 MJ 的电能量传递到 Z 箍缩负载上去。在一定的负载条件下, 得到了上升时间为 105 ns, 峰值为 20 MA 的电流脉冲。电流通过自磁绝缘传输线传递到负载上去, 绝缘传输线上的峰值场强超过 2 MV/cm。来自四个独立锥形圆盘绝缘传输线上的电流在一个双层柱-孔真空盘旋面上汇聚, 效率超过 90%。在钨丝阵列箍缩负载上得到了功率为 200 TW, 能量 1.9 MJ X 射线。

关键词: PBFA Z Z 箍缩 Saturn 加速器 PBFA II 加速器 Marx 发生器 水传输线
磁绝缘传输线 双层柱-孔真空盘旋面

An Overview of the Main Design and Performance of PBFA Z Machine

(In Chinese)

SONG Shengyi
(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

PBFA Z is a new 60 TW/5 MJ electrical driver located at Sandia National Laboratories (SNL). It has been used to drive Z-pinches. The pulsed power design of PBFA Z is based on conventional single-pulse Marx generator with water-line pulse-forming technology used on the earlier Saturn and PBFA II accelerators. PBFA Z stores 11.4 MJ in its 36 Marx generators, couples 5 MJ in a 60 TW/105 ns pulse to the output water transmission lines, and delivers 3.0 MJ and 50 TW of electrical energy to the Z-pinch load. Depending on the initial load inductance and the implosion time, PBFA Z has attained peak currents of 16~20 MA with a rise time of 105 ns. Current is fed to the Z-pinch load through self-magnetically insulated transmission lines (MITLs). Peak electrical fields in the MITLs exceed 2 MV/cm. The current from the four independent conical-disk MITLs is combined together in a double post-hole vacuum convolute with an efficiency greater than 95%. SNL has achieved X-ray powers of 200TW and X-ray energies of 1.9 MJ from tungsten wire-array Z-pinch loads.

Key words: PBFA Z, Z-pinch, Saturn accelerator, PBFA II accelerator, Marx generator, Water transmission line, Magnetically insulated transmission line, Double post-hole vacuum convolute

引言

1996 年美国 Sandia 国家实验室将用于轻离子束 ICF 计划的 PBFA II^[1]加速器改造成具有双重运行功效的装置。改造后的装置(称作 PBFA Z, 简称 Z 装置在保持原有的粒子束能力的同时, 开发了一个长脉冲、大电流的用于磁内爆驱动的运行模式。其核心任务是对电设计进行重大改造, 以优化发生器对磁内爆负载、尤其是 Z-pinch 负载的匹配, 为此设计了新的水传输线、绝缘支架以及磁绝缘传输线。

本文叙述了 PBFA Z 的电性能, 总结了当今世界上最大的 Z-pinch 驱动器成功运行的脉冲功率设计。自 1996 年 9 月到 1997 年以来, 在 PBFA II-Z^[2]上已进行了近 100 次试验。PBFA Z 在它的常值阻抗水线中以 2.5 MV, 宽度 105 ns 的脉冲电压产生 5 MJ, 功率 60 TW 的电。电能在水线、绝缘器、真空界面中传输, 并通过真空自磁绝缘传输线传送到 Z-pinch 负载上。PBFA Z 将峰值为 18~20 MA 的电流传递给低阻抗 Z-pinch 负载, 使钨丝阵列负载产生了能量为 1.9 MJ, 功率 200 TW 的 X 射线。

1 脉冲功率特性

1.1 基本过程综述

PBFA Z 的脉冲功率设计基于 Marx 发生器和水脉冲成形线技术。

PBFA Z 包括 36 个几乎相同的模块, 每个模块中有 1.3 μF , 充电 90 kV 的 Marx 发生器, 在 1 μs 时间内将能量传送到一个水介质同轴电容器中, 使之达到峰值为 5 MV 的电压。低抖动的激光触发气体开关在 200 ns 时将能量传送到第二段低电感的同轴水线电容器上去。通过自断水开关能量进入 4.32 Ω 常值阻抗水传输线, 在此处脉冲电压为 2.5 MV, 脉宽 105 ns, 功率 60 TW, 能量进入与加速器真空部分连接的绝缘器, 通过四个真空磁绝缘传输线(MITLS)和一个真空盘旋面, 能量被送入 Z-pinch 负载。图 1 是 PBFA Z 装置的图示; 图 2 表示了功率脉冲的形成框图; 图 3 简要描述装置对功率脉冲的压缩过程。

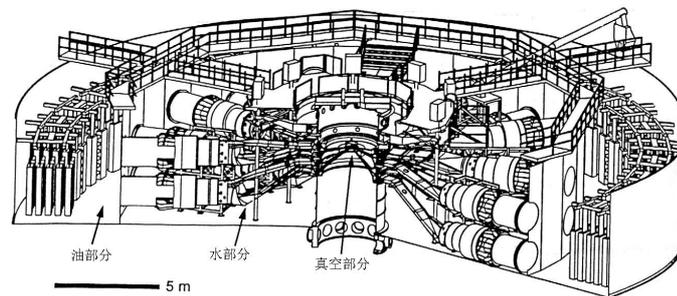


图 1 PBFA Z 装置

包括 MAX 发生器模块、水脉冲形成线及传输线、绝缘堆、负载

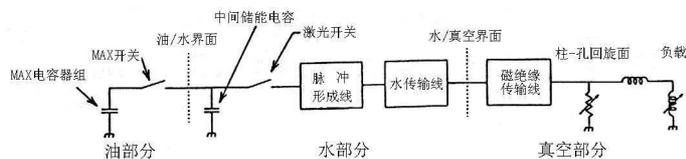


图2 PBFA Z 脉冲功率形成回路框图

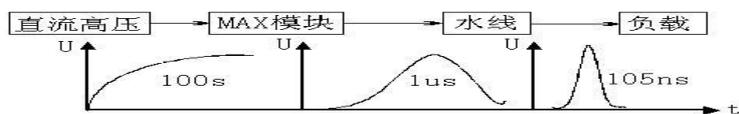


图3 PBFA Z 对功率脉冲的逐级压缩

1.2 电性能

图4表示了PBFA Z单模块典型的测试电压波形，图中峰值电压为2.5 MV，脉宽105 ns。图中的功率是单线功率的36倍。最高场强可达180 kV/cm，没有发现水传输均匀电场部分的电击穿或损耗。

绝缘支架承受的电压峰值超过3 MV，峰值电场~100 kV/cm，绝缘支架未出现过打火。这个电压值非常接近文献1和4中经典绝缘器击穿极限。事实上，即使电压达到-1 mV的反向电压(峰值电流之后)绝缘器承受负电压可达200 ns的时间，图5表示在第51发试验中PBFA Z四个绝缘支架的电流、电压波形。

图6是通过绝缘支架的总电流及电功率($I \times V$)，测得的峰值电功率是50 TW，电能是3.1 MJ。第51次试验中从MITLS电流监测器得到电流向内部MITLS电流的转换达100%。

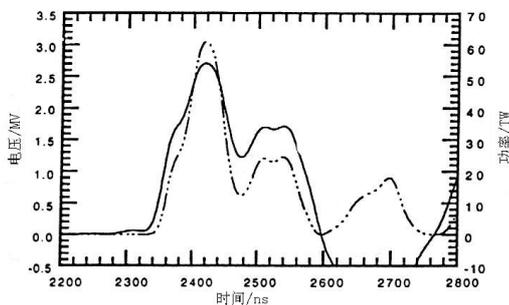


图4 PBFA Z 单模块典型的测试电压波形

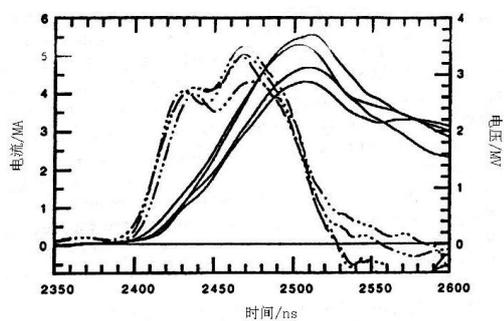


图5 PBFA Z 四个绝缘支架的电流、电压波形

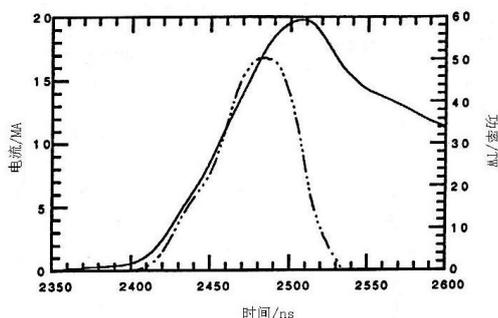


图 6 通过绝缘支架的总电流及电功率

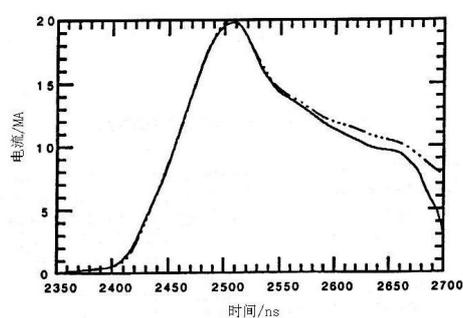


图 7 MITLS 上的总电流与绝缘支架上的总电流比较

MITLS 上的总电流与绝缘支架上的总电流比较见于图 7。可以看到：除了在后由于绝缘支架上出现漏电外，在几乎所有的时间内两者上的电流一直具有相同的形状。几乎所有的磁流陷入 MITLS 中并逐渐以 L/R 率衰减，从其它试验中，用紧靠真空盘旋面(距负载 30 cm)外面的 MITL 电流监控器得到 MITL 电流数据表明，在径向位置上 MITL 没有电流损失。

试验数据和计算表明能量在真空盘旋面上有损耗。依赖于负载的电感，这种损失为传送到绝缘支架上的总电流的 5%~10%，该损失是由于负载与驱动器不完全匹配、降低了驱动 Z-pinch 负载的峰值电流所致。

1.3 基本结构简述

水线是一个双层板、常值阻抗、常值阴阳极间隙结构，是为优化传输线的能量效率和最大程度地将传输线中的能量耦合到电感型负载中去而设计的。36 条水线中的每一条具有 4.32Ω 的阻抗，传输线间隙固定为 14 cm，每条水线均有电流、电压监控器。

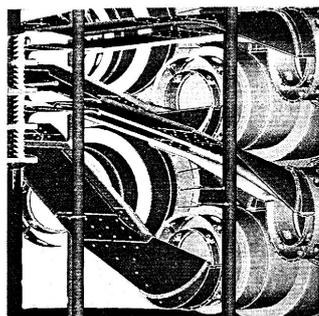


图 8 水线设计图

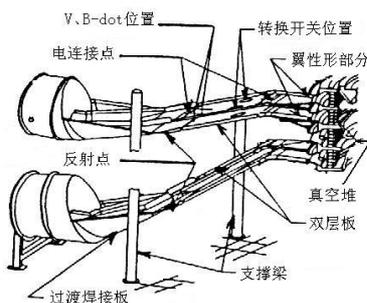


图 9 水线系统构造

绝缘堆位于水介质和驱动 Z-pinch 负载所必需的真空盘旋面之间，绝缘器直径 4 m，采用 REXOLITE(高密度交叉结合的聚苯乙烯)材料，经验表明与 PMMA 或复合碳酸盐相比，REXOLITE 在机械性能和电性能方面有优势。为使每个绝缘器元件上的电场强度

均衡将其电场进行“分级”。

PBFA Z 最大的成就之一就是 MITLS 的成功设计。MITLS 由四个分离的、在真空盘旋面上耦合在一起的同锥圆盘式供给器组成。上面两组 MITLS 阻抗是 2Ω ，下面两组 MITLS 阻抗为 2.75Ω ，阴阳极真空间隙小于 1 cm ，峰值电场强度 2 mV/cm 。

在真空功率流中一个关键点是用于将四个同锥圆盘式 MITLS 耦合在一起的双层柱孔式盘旋面。用于将每层电流汇合后传送到 Z-pinch 负载上去。真空盘旋面是一个三维结构，具有大量的磁场零位点。盘旋面的设计是为了使电子损耗通过零磁位来实现。

2 水线设计

2.1 水线原理

水线的内外层分别为 87.4 cm 和 119.4 cm ，堆置于沿 18 个角向位置成对分布的四层上(图 8)。内外层水线开始是一对间隙为 16.5 cm ，水平方向的同心通道，然后变成一种间隙为 14 cm 的双板式平行板传输线，头三层必须往上倾斜以适应逐级到达绝缘堆圆环，而第四层(顶层)几乎在水平位置上。水线的斜向设计有一个自然的优点，即可以降低在真空电压设计中必须予以重视的磁旋载留。最后水线回到一个翼形部分上的水平方位，径向会聚于整流圆环堆，水线的几何构形有四个可变化的量，每个唯一对应于每层，每条线的斜向角度变化范围是为 $39^\circ \sim -1^\circ$ 。

2.2 水线系统构造^[3]

水线是 4.8 mm 厚的镀 5052-H32 铝合金，分为三个径向部分，见图 9。第一部分是内外传输焊接件，第二部分是双层板，第三部分是翼形部分。外层水线部分是一个用螺栓固定于同轴圆柱外部的焊接整件，是所有部件中最大、最复杂的，其起始端是一个轧制的法兰盘，末端是一个成形变换止口。复式外形是从同轴通道向平板形平稳传输的要求，同时采用渐缩式间隙以保证有一个边缘卷曲。鉴于其复杂的几何形状，此件最好是采用模压成形，但是费用和工艺要求认为，用一种更为普通的制造技术能得到可以接受的设计近似。内向卷曲只是针对外层水线的。

内层水线焊接件被置于外层水线之内，用螺栓固定于更小的同轴圆管上，它是由四个单独成型并边缘卷曲的焊接部件组成。内层线与外层线的总长相同，以减少平板连接处发生电弧。

双层板是最简单的水线元件，是最后安装的部分。每层的双层板长度不一样，并用铆钉与自电边卷曲加固，每个双层板还有一对电阻式转向开关，以耗散绝缘堆反射过来的电能。绝缘堆能降低电弧对水线的损坏，双层板的下面还有电流、电压监测器。

最后是翼形部分，安装双层板之前将其用螺栓固定在绝缘堆的电极圆环上。铝合金翼形对应于每层的双层板角度。这些翼表面镀镍，并且从双层板到堆上的扩口圆环使其边缘卷曲。

为了维持要求的电特性和 4.32 的常阻抗，在机械连接点上必须要求良好的电接触，同时要求 14 cm 的常值板间隙，其误差要维持在 5% 以内。水线设计中要求要重叠连接并夹紧到位。将铝板接触镀镍才能使大电流顺利通过接触点。匹配连接点有一个 6 mm 厚的不锈钢板，铆固板的重叠式安装是考虑到了每个双层板要安装在翼形和传输部分上去的

要求。因此双层板设计可以互换，一半可用不锈钢企口铆接，另一半可不用。

所有自由边的边缘弯曲是为了降低电场增强效应。边缘有一个 5 cm 半径的固定卷曲，是为了确保低场强以使板间电弧降到最小。这种弯曲也增加了装置的稳定性。

设计初衷强调了尽量缩短 Z 装置与 PBFA-II 装置互换时间的要求，设计了专门用于缩短要安装时间的专用设备。插栓门锁用于保证电接触，单功能滑动门锁被设计成在结合点上分得支撑结构，所有设计为平板间隙区。

2.3 水线的力学承载

水线组件是为静态和脉冲负载所设计。分析中考虑了水线的自重，也考虑了负载 180 kg 的实用重，电脉冲以几种方式产生有重要影响的脉冲力。第一种力点来自于自断水开关，此开关位于每根水线的管道部分，其中电能穿过电极间的水间隙，当电弧出现时水被瞬时汽化，从每个间隙中的各个方向辐射出一个 6 kJ 的冲击波。第二种是来自于电脉冲的 $J \times B$ ，有使双层板相互分离的趋势。最后一种力是由于爬电和极间电弧产生的一个类似于前面描述的附加冲击波。

除了能具有力学承载传力外，组件还必须兼顾水线长度的变化，使板间间隙在临界范围内可调。水线搁置于现成支柱上并用吊挂系统支撑，用成对的尼龙棒(Lexan rods)相互连接。水线中的电脉冲对棒的一端充电而中一端保持接地。虽然这种情形在反射脉冲到达时并不总是出现，但当尼龙棒发生爬电时，其毁坏性后果是必然的。

2.4 吊挂支撑系统

为使水线适合于承载要求，必须要有一个结构式的支撑系统，这种办法使带电水线与地面隔离的同时，还可调整板间隙、与现成支撑结构的接触面。脉冲负载类型要求这种吊挂器应为悬挂设计。根据元件的电场增强效应和物理外形，设计可以降低由于过电流而引起的电压击穿现象。首次设计采用了一段长的、直径为 2.5 cm 的尼龙棒，两端夹入一个长 12 cm，直径 5 cm 的表面镀镍的黄铜盖帽中。

尼龙棒的长度 38~53 cm，设计中要采用特殊的结构以消除空气气泡陷阱，不用螺纹消除任何应力增强点。棒用两颗内置的螺钉固定到位，便使其长度在棒端没有螺纹的条件下可调节。考虑到线间隙精细的调节能力，用左旋和右旋螺纹将不锈钢球端接点旋结于黄铜端。这种局部装配件就像一个松紧螺旋扣可轻易而精确地对双层板的间隙进行最后调节。因要消除尼龙棒上所有的弯曲应力，球端连接点要经过选择。不管是打开或闭合板间隙，在棒中都要出现拉紧或压缩应力，因此棒需要进行预加载。为在水中方便地移动尼龙棒，在吊挂装置上要有快速释放栓。

另外，为保证水线长度的精确性，设计并制造了四个焊接金属设备，每层一个。像在装置里一样水线用螺栓成对地栓在一起，以便水线长度能被精确测量。线长有 6.3 mm 的偏差是可以接受的。

2.5 设计总结

新的成功的 Z 装置水线系统来源于广泛深入的工程化设计及分析努力。如以前的水线设计一样，重要的后继工作对确保运行中的长期可靠性和有效性是必要的。改进措施采取后，对未来低阻抗系统的不断需求无疑会使设计更靠近电学和力学可靠性的极限。虽然系统的优化大体上来源于可靠的阻抗平衡，但消除脉冲加速器中水开关冲击波和后滞高压击穿现象，今后还应需作出艰苦的努力。

3 绝缘支架的设计^[3~5]

3.1 设计思想

PBFA Z 上现有的真空绝缘堆是为轻离子实验而设计的，由 8 个隔离的堆组成。利用这样的堆不可能设计一个低感的 MITL 和真空盘旋面，因此必须重新设计一个全新的绝缘堆。

重新设计一个新的绝缘堆的想法最早是出自于电感方面的考虑。为满足 20 MA 这样一个台阶及得到所希望的 Z-Pinch 动能，设计一个具有最小电感的绝缘堆是至关重要的。最初的设计是以 Saturn^[6]的绝缘堆设计为基础，选择包括四个隔层绝缘堆的设计。这是基于双重后孔式盘旋面的 MITL 系统的最优方案。36 条水线被安排在四层上，每层 9 条，这样四个绝缘堆中的每一堆就接收 9 条水线。

3.2 具体结构

绝缘堆的设计，包括每个堆的角度都被重新设计了好几次。初始的设计来源于电感的计算，Screamer^[7]的自稳电压、绝缘堆的承力计算。根据绝缘堆的跳水标准，堆的高度调节被重复几次。设计结果如图 10 所示。最优结果是：5 个绝缘器被置于 A, B 两层(靠负载最近的两层)。6 个绝缘器被置于 C, D 两层(电压最高的绝缘器)。事实上，所用的绝缘器串除了是用 REXOLITE、一种横向纤维的聚苯乙烯制造外，几乎与 PBFA II 所用的完全一致。PEXOLITE 可以抑制电子诱导枝晶现象，具有比 PMMA 大 14% 的电压修正特性。顶部模块由 5 个厚 5.72 cm，直径 169 cm 的 PEXOLITE 绝缘器组成。底部两个模块有 6 个类似的 PEXOLITE 绝缘器。它们与真空塑料侧面成 45° 的角度。

绝缘堆设计确立后，必须进行仔细的电场分级，每个绝缘器之间电场级数有 ±5% 的设计标准。利用紧靠 C、D 两层上绝缘器外水中的通量排除器，和调节绝缘器附近的导体形状来完成。

绝缘堆设计利用了屏蔽环作为总体分级构想的一部分。屏蔽环有一个电子发射的潜在问题。在 MITL 设计中采用了再入式阳极构造。在位于绝缘堆里的阴、阳极间的大的真空间隙之间，采用阴极迅速靠拢的办法加以缩小。结果导致在屏蔽环上相对于附近阳极的负电位，这样当表面电场强度超过 250~300 kV/cm 时有发生电子发射的可能。

3.3 绝缘器的击穿机制

在 PBFA Z 的绝缘堆设计中一个主要的问题就是绝缘器的击穿。在 J.Chorlie Martia 及合作者汇编的数据库中^[8]，对在 PBFA Z 中涉及到的多个绝缘器堆栈中的大绝缘器面积和堆直径，其适用性进行了限制。标准绝缘器击穿公式(即所指的 JCM 限制)

$$Ft^{1/6} A^{1/10} = 175 \quad (1)$$

限制了运用于绝缘堆的有效面积与时间的定标关系。对 J.C.Martia 数据库的进一步分析表

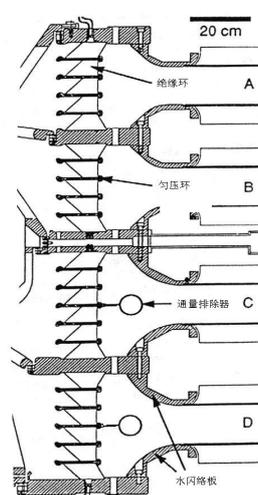


图 10 真空/水界面：绝缘支架

明，关联于时间 $t^{1/4}$ 不是没有道理的。希望在大多数情况下，大面积的绝缘堆的表面积对击穿的影响变弱。另外，JCM 限制没有考虑到多个绝缘管的影响，I.Swith 对 J.C.Martia 的公式进行了改造。在每一堆具有多个绝缘器时公式将更强地依赖于时间和统计概率。也利用现有的 Saturn 和 PBFA II 的数据去检验绝缘器击穿的实验运行限制。对现有数据和定标关于的分析结果预计，计划设计的 PBFA II-Z 的堆将能在击穿极限附近运行，但 90% 的情况不会发生击穿。

在每层上绝缘堆里都安有电流、电压监测器。还有助于确保对堆 MITL 负载电性能有一个准确的测量。能够仔细地将所测得的前行电压波与绝缘堆测得的电压进行比较。这些数据将能确保堆性能与 Screamer 和 TLCODE^[9] 计算结果的比较。

4 磁绝缘传输线(MITLS)及盘旋面设计

4.1 基本构造

PBFA II-Z 的真空部分的设计轮廓如图 11 所示，图中四条对称的 MITL 被双层后孔式盘旋面平行地并接于半径为 7.5 cm 的圆盘上，盘旋面下面是一单条 5 cm 长给负载供能的 MITL。主要设计是基于 PROTO-II 和 Saturn 的真空部分的成功设计。四层 MITL 盘旋面设计在 PROTO-II 和 Saturn 上分别进行了 5 MA 和 10 MA 的检验实验。预计在 PBFA-II 上可达 20 MA^[10]。

设计有五个用于限定 4 个真空传输线的电极组件，每个组件由四个环形组成一个外层圆锥及三个外层圆锥，其直径依次减小。这种环状区系统有助于在发生严重的功率流意外事件中减缓损伤，只有受影响的内层部分而不是整个 MITL 需要替换或修复。另外，

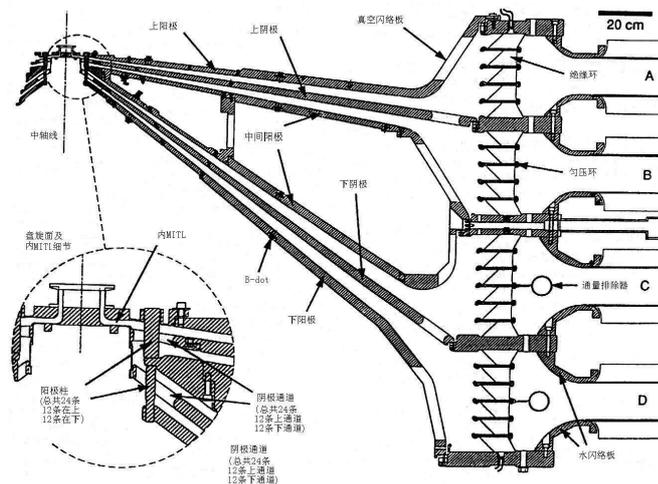


图 11 Z 的真空部分，包括：绝缘支架、外磁绝缘传输线、真空盘旋面、内磁绝缘传输线

为适应将来的实验需要可能将对内锥部分作重大变更，实际费用将比对整个结构进行改造所花费的要少得多。获得均匀的阴极电子发射和出于损伤修复的考虑，所有的 MITL(外层阳极除外)都选用不锈钢材料，外层阳极选用铝合金材料以保证五条 MITL 电极的总重量在起重机承载极限之内。圆锥间用内螺纹连接，功率流表面用内铜垫圈进行电连接，以便于替换及保护配合表面不受电弧损伤。各种铜合金的螺旋式垫圈被试用，而目前正使用固体线铜线。圆锥组件置于圆周上的薄垫片上，这些薄垫片附在支架电极串的内边缘上，允许~22 mm 的阴-阳电极间隙的调节量，用弹性铜合金螺旋式垫圈形成电连接。

4.2 磁绝缘传输线特性及数值模拟

MITL 间隙的外形呈半径的三线性函数，其阻抗外形将电子鞘所通过的电流降到最低，以确保至少 20 MA 的电流被传递到长 2 cm，初始半径 2.5 cm，质量 15 mg 的负载上去。间隙外形将到达阴极的电子剂量限制到 ≤ 150 J/g，远低于此不锈钢或铝阳极形成等离子体的阈值 150 J/g 或 300 J/g，设计中考虑到了阴极等离子体 2.5 cm/ μ s 的折散速度。对于起码的负载，绝缘堆与真空接触面内部的初始电感是 10 nH。

MITL 的设计是电 TLCODE, SCREAMER, TRIFL^[11], TWO QUICK^[12], IVORY^[13] 和 LDLASNEX 模型^[14]的反复修改而得到的，设计的不同方面是用不同的计算方法进行的，TRIFL 是一个一维 MITL 模型编码，Two Quick 和 IROVY 是二维电磁单体离子编码；而 LASNEX 是一个辐射运输磁流体学编码。图 12 显示一个用 Two Quick 模型得到的结果。计算表明在早期，阴-阳极间隙充满了真空电子流，而在电流峰值附近却得到了很好的抑制，并在阴极附近形成了一个薄的电子鞘。编码计算的电流符合程度在 4% 以内。

另外，还用 NISA 和 AGOR^[15]有限之模型证实了 MITL 设计的有效性。

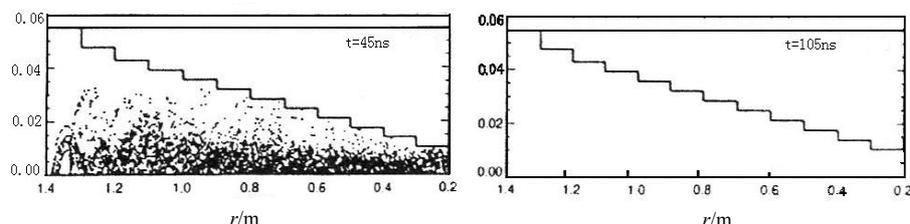


图 12 TWO-QUICK 计算表明在 FBFA Z 的 MITLS 中建立起了磁绝缘

计算中考虑的是动态负载

4.3 真空盘旋面及电流诊断

双层后孔式盘旋面，实质上是一个电流歧点，具有零磁位的三维装置。采用 Quicksilver 一个电磁单粒子编码进行模拟(见图 11)。结果表明：在盘旋面上的 MITL 上游发射的所有电子鞘电流，可以很好地近似为将在磁零位上的损耗，并且在峰值电流时盘旋面固有的效率实质为 100%。这些结果只对低阻抗负载有效。

MITL 的 B-dot 电流监控器设计位于三个径向位置：一个在半径为 80 cm 的所有四个外盘 MITL 上，一个在紧接盘旋面上游的四个外盘 MITL 上，一个在内盘 MITL 上。利

用位于半径为 3 cm 位置上的压电式探针测传输线负载的总电流。

MITL 诊断组建的运用有助于提高对 MITL 性能\真空盘旋面损耗、及高电流密度区功率流的理解。MITL 和维接触面的间隙设计中允许在 1.0~1.2 cm 间变动, 以支持功率流实验。

MITL 的电极是用不锈钢和铝制作的, 这些材料方便适用, 有低除点率、低的物理表面积。不锈钢用于制作 MITL 的阴极以提供均匀的电子发射。由于高质量度将提供一个更长元件寿命, 所以不锈钢作 MITL 的阴极时半径要求不大于 70 cm, 保证间隙最小。MITL 的阳极用铝制作时半径较大总重量不大于 9 吨以确保 PBFA II 起重机的单次装载。

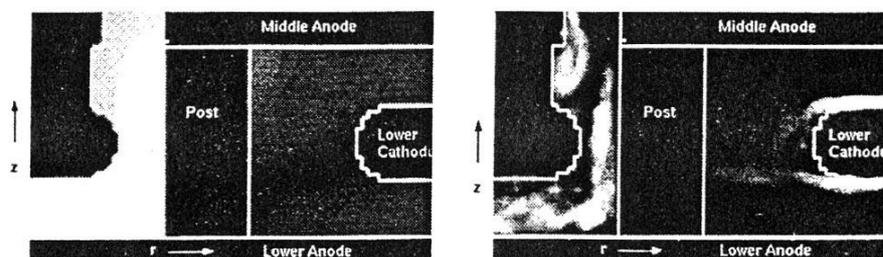


图 13 Quicksilver 编码计算结果

5 结束语

PBFA Z 是一个用于传输 20 MA 电流到负载上去的 Z-Pinch 内爆加速器。虽然许多工作已着手于为功率流研究作准备, 但确立传统的设计思想主要集中于脉冲功率的可靠性上。在确立总的设计标准中采用了最新的功率脉冲数据。PBFA Z 的设计增长了功率水线, 绝缘体电压, MITL 性能和电子流、真空盘旋面方面的基本知识。

对提供相关资料的所有同志表示衷心感谢!

参考文献

- 1 Turman B N, et al. Proc. of the Fifth IEEE Pulsed Power Conf., Arlington, VA: 1985. 155
- 2 Spielman R B, et al. Proc. of the Tenth IEEE Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM: 1995. 396
- 3 Weseloh V N. Proc. Of the Seventh IEEE Pulsed Power Conf. Monterey, CA: 1989. 989
- 4 Milcon O. IEEE Transactions on Electrical Insulation Ei-7, #1 March 1972. 9
- 5 Martin J C. Fast Pulse Vacuum Flashover. SSWA/JCM/713/157 and AFWL High Voltage Notes, Note 2, 16. March 1971
- 6 Spielman R B, Corcoran P, Fockler J, Kishi H, and Spence P W. In Proceedings of the 7th IEEE International Pulsed Power Conference 1989. 445

- 7 Martin T H, VanDevender J P, Johnson D L, McDaniel D H, and Aker M. In Proceedings of the International Topical Conference on Electron Beam Research and Technology. Albuquerque, NM: 1976, (1): 450
- 8 Bloomquisc D D, et al. Proc. of the Sixth IEEE Pulsed Power Conf. Arlington, VA: edited by P. J. Turchi and B. H. Bemscein. IEEE, New York: 1987. 310
- 9 Sanford T V L, et al. Sandia Laboraioly Report, SAND88-1297 1988
- 10 Spence P, Triebes K, Genuario R, Pellinen D. In Proceedings of the International Topical Conference on Electron Beam Research and Technology. Albuquerque, NM, 1976 (1): 346
- 11 Blaugrund A E, Cooperstein G, Goldstein S A. Phys. Fluids, 1997 (20): 1185
- 12 Cuneo M E, Gilgenbach R M, and Brake M L. IEEE Tram. on Plasma Science, PS-15, 1987. 4
- 13 Mesyacs G A, Proskurovsky D1. Pulsed Electrical Discharge in Vacuum. (Springer-Verlag, New York,) 1988. 118~120
- 14 Parker R K, Richard E. Anderson, and Charles V. Duncan, J. Appl. Phys. 1974, (45): 2463
- 15 Sunnett R, Palmer M A, Spielman R B, and Bengston R. IEEE Trans. on Plasma Science, PS-I 1983 (1): 216