

# 直接驱动 Z 箍缩的 FLTD 型脉冲功率源的发展

孙凤举, 邱爱慈, 曾正中, 曾江涛, 丛培天

(西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 介绍了快直线型变压器(FLTD)脉冲源的技术特点;概述了美国圣地亚国家实验室与俄罗斯强流电子学研究所合作研制的 FLTD-Z 模块的新进展,基于 FLTD 拟重复频率运行的针对聚变能源(IFE)应用的原理性样机 Z-POP 装置,以及下一代惯性约束核聚变(ICF)和 IFE 用的指标为 6 MV,60 MA/90 MA 和 100 ns FLTD 型直接驱动脉冲源的概念设想;初步分析了 FLTD 直接驱动源需要研究的关键技术。

[关键词] 快 Z 箍缩;直接驱动;FLTD 型脉冲加速器;高功率脉冲加速器;概念设计

[中图分类号] TL53 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)11-0056-08

## 1 前言

快 Z 箍缩在核武器物理、高能密度物理、核辐射效应模拟等国防领域及聚变能源(inertial fusion energy, IFE)领域具有极为重要的应用<sup>[1]</sup>,美国圣地亚国家实验室(SNL)近年报道了在 Z 装置上取得的突破性实验结果<sup>[2]</sup>:产生了 1.8 MJ 的 X 射线, DH 压缩比为 10,靶丸吸收了 24 kJ 的 X 射线,产生了  $(2.6 \pm 1.3) \times 10^{10}$  个聚变中子。Z 装置从初级储能到 X 射线的能量转换效率高达 15%,经过优化总能量效率可以进一步提高,而造价较低。因此,国际上除了升级现有脉冲功率装置外,如 SNL 将 Z 装置升级为 ZR<sup>[3]</sup>;俄罗斯也在改造超级“Bakail”装置<sup>[4]</sup>。国际上认为脉冲功率源应当给(10~15 nH)的丝阵负载提供前沿为 100 ns 或更短的 60 MA 以上的驱动电流,并具有重复频率工作潜力,以满足建立快 Z 箍缩 IFE 发电站的要求<sup>[5]</sup>。采用类似 SATURN 和 ZR 装置等常规的水介质传输线几级脉冲压缩传输的技术途径进一步提高电流,从装置造价、结构、复杂性和可靠性等方面都具有相当大的难度。因此,国际上积极发展直接驱动 Z 箍缩负载的驱动源新技术<sup>[6]</sup>。

俄罗斯强流电子学研究所(HCEI)在国际上率先开展了模块化快直线型变压器(FLTD)技术研究<sup>[7]</sup>,并与许多国家开展合作,如与法国合作建立了电流上升时间 800~900 ns,峰值达 10 MA 的 Sphinx 装置,直接驱动长脉冲高功率 Z 箍缩负载<sup>[8]</sup>。2007 年 4 月,SNL 报道了与 HCEI 合作研制的快放电模块化 FLTD 技术的新进展<sup>[9]</sup>,连接匹配负载时输出电压 100 kV,电流 500 kA,电流前沿 100 ns,以重复频率方式无故障运行 13 000 多次,显示了 FLTD 技术在快 Z-ICF 和 IFE 上的巨大应用前景<sup>[10]</sup>。

## 2 FLTD 型脉冲功率源的等效电路<sup>[11]</sup>

FLTD 脉冲源原理简单,如图 1 所示,包含电容器 C,开关 S,总电感 L 和电阻 R。开关 S 代表 FLTD 感应腔所有并联开关,电容 C 为感应腔所有电容器等效电容,电感 L 代表开关、电容器和连线电感之和,电阻 R 为负载和感应腔内阻之和,电路二阶微分方程为:

$$L \cdot (d^2i/dt^2) + R \cdot (di/dt) + i/C = 0 \quad (1)$$

可以解析求解,在  $R = \sqrt{L/C}$  匹配负载时,达到峰值电流的时间为:

[收稿日期] 2008-12-17

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50477019, 50637010)

[作者简介] 孙凤举(1967-),男,山东济阳县人,博士,西北核技术研究所副研究员,研究方向为高功率脉冲技术;

E-mail: sun-feng-ju@126.com

$$t_{\text{peak}} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \sqrt{LC} \approx 1.21 \sqrt{LC} \quad (2)$$

峰值电流为:

$$i_{\text{peak}} = \frac{2V_0}{\sqrt{3}R} \exp\left[-\frac{\pi}{3\sqrt{3}}\right] \sin(\pi/3) \approx 0.546 293 \frac{V_0}{R} \quad (3)$$

峰值电压为:

$$V_{\text{peak}} = Ri_{\text{peak}} = 0.546 293 V_0 \quad (4)$$

传输到负载的能量效率为:

$$\eta_{E(t_{\text{peak}})} \approx 0.403 128 \quad (5)$$

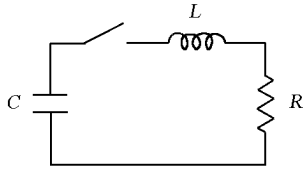


图1 FLTD的简化等效电路

Fig. 1 The equivalent circuit of FLTD

在  $R = 2 \sqrt{L/C}$  临界阻尼时,峰值电流比匹配负载时小 33%,传输到负载的能量小 20%,但电压上升时间短和峰值电压高,分别为:  $t_{\text{peak}} = \sqrt{LC}$ ;  $V_{\text{peak}} \approx 0.735 76 V_0$ 。

用于闪光照相的 FLTD 型脉冲功率源, X 射线输出剂量正比于电子束电压的二次方以上,而电流适当,因此常采用临界阻尼或更高负载电阻。对于快 Z 箍缩,要求获得大电流和高能量传输效率,负载一般为匹配方式。然而 Z 装置最近的电流定标实验表明内爆时间缩短,虽然峰值电流降低,但产生了更高 X 射线辐射功率。

FLTD 作为一种获得高电压大电流的脉冲功率源新技术,其突出特征是通过低电感回路、磁芯隔离和电磁感应使脉冲电压电流叠加,初级绝缘仅承受电容器的充电电压,感应腔通过多个径向布置的快放电支路并联获得大电流,通过多级串联获得高电压。由于 FLTD 感应腔具有模块化结构,很容易将多级串联获得高电压,再多路并联获得大电流。

目前,低电感电容器和开关技术水平已经使建造不含有大量去离子水和变压器油而直接驱动负载的快 Z 箍缩 FLTD 脉冲驱动源成为可能,与 Marx 和水线组成的加速器相比的优点:它不需要承受高电压的绝缘子堆,多个感应腔叠加,次级为同轴传输线,初次级紧密耦合;其所有开关采用压缩干燥空气而不用 SF<sub>6</sub>,有利于环保;所有元件包含在接地的金

属感应腔外壳内,电气干扰和破坏小,单个气体开关导通电流小,增加了装置可靠性和寿命。FLTD 更为重要的特征是提供了重复频率工作能力,可脉冲串或重频方式提供多脉冲,原则上寿命只受电容器限制,有能力达到 10 Hz (IFE 的 FLTD 型驱动源的重复频率要求达 0.1 Hz)。

### 3 FLTD - Z 感应腔的新进展

#### 3.1 500 kA/100 ns 重复频率 FLTD 模块<sup>[12]</sup>

SNL 专门建立了 FLTD 技术研究实验室, 500 kA 的 FLTD 由 HCEI 研制,安装在 SNL。包括电容器充电、开关充气、开关抽真空、磁芯复位和触发等辅助系统为重复频率运行,500 kA FLTD 感应腔见图 2,实验布局如图 3 所示。



图2 500 kA FLTD 除去上盖后的照片

Fig. 2 Photo of the 500 kA FLTD module without the top plate

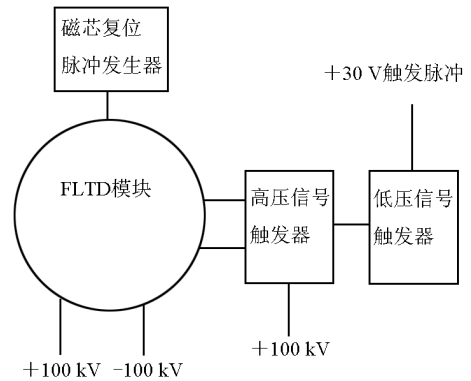


图3 SNL 重复频率 FLTD 实验布局示意图

Fig. 3 The experimental layout of FLTD module operating in rep - rate in SNL

实验时,FLTD 气体开关被抽空后填充干燥空气,磁芯复位脉冲电流源,充电电压 3 kV,电流 2 kA,电流脉宽 75 μs,在完成磁芯复位和电容器充电至设定电压后,一个 30 V 电压脉冲送至低电压触发器,触发高压触发器的气体开关,再触发模块内

20 个气体开关,开关气压根据输出结果自动调整。所有子系统,包括油、干燥空气、真空系统、供电电源和开关气压等通过一个笔记本电脑的 Labview 程序控制自动完成。目前该模块运行频率每分钟 5 次,运行超过 13 000 次,没有观测到开关、电容器和辅助系统等任何部件出现问题,连续运行 200 次的电流波形如图 4<sup>[17]</sup>。

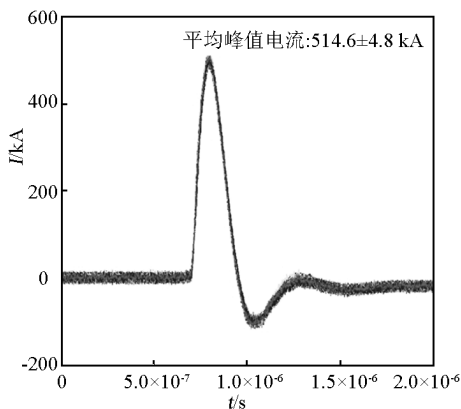


图 4 充电 85 kV 时连续运行 200 次的电流波形

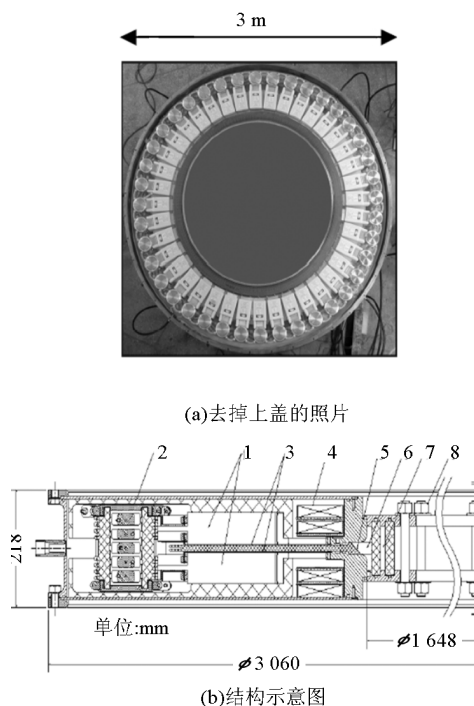
Fig. 4 200 shots current wave overlay with charge voltage 85 kV

电流的变化主要是由 KBr 液体负载电阻受温度的影响阻值变化引起。在充电电压 85 kV,开关气压 0.28 MPa 和负载 0.170  $\Omega$  时,平均电流(514.6  $\pm$  4.8) kA,电流前沿(60.6  $\pm$  1.7) ns。LTD 感应腔一个放电支路(两个电容器和一个开关)每分钟运行 5 次,连续运行 37 000 次,没有发现电容器或开关损坏。感应腔输出电流均方差抖动约 2 ns,幅值变化约 1%。运行频率为 0.097 Hz,通过改进磁芯复位及辅助充电电源等,工作频率可达 0.12 Hz,接近 IFE 要求的重复频率。SNL 聚变能源计划的高级科学家和项目管理者 Craig Olson 称之为革命性的进步。

### 3.2 1 MA LTD 感应腔及 5 级串联的测试

HCEI 研制的 1 MA - LTDZ 模块采用 80 只 GA 31165 型号塑壳电容器(100 kV, 40 nF, 25 nH, 270 m $\Omega$ ),组成 40 路并联放电支路,其结构和照片见图 5<sup>[13,18]</sup>。最高充电电压  $\pm$  100 kV,40 只多级多通道气体开关由 4 根电缆触发,触发电压峰值 -100 kV,前沿 25 ns。开关气体为干燥空气,绝对压强为 0.4 MPa,初级充变压器油。磁芯直径约 2 m,由厚 80  $\mu$ m,宽 18 mm ET3425 硅钢薄带绕 995 匝制成,每级包含 4 只磁芯,截面积 57.3 cm<sup>2</sup>。单极

性磁芯复位脉冲电流(1.5 kA, 40  $\mu$ s)在工作前 3 min 施加,磁芯  $\Delta B = 3.2$  T,总伏秒积分  $18.2 \times 10^{-3}$  (V $\cdot$ s)。磁芯采用环氧树脂浇注。该模块等效电容 800 nF,等效电感 7 nH,连接 0.1  $\Omega$  匹配负载时,电流前沿约 100 ns,峰值约 970 kA,功率 100 GW,能量效率 72%。模块直径约 3 m,输出线直径 1.6 m,高度 22 cm,是目前世界上功率最大的 FLTD 模块。



注:1—GA 31165 储能电容器;2—多间隙串联触发气体开关;3—初级绕组输出板;4—磁芯;5—聚乙烯绝缘子;6—真空或充油腔室;7—负载腔,内装 NaCl 溶液;8—拉杆

图 5 具有 80 只电容器和 40 只开关的 1 MA/100 ns FLTD 模块

Fig. 5 The photo of 1 MA/100 ns FLTD module consisted of 80 capacitors and 40 gas switches

HCEI 将 5 个 1 MA 的 FLTD 模块按电压叠加器结构装配(见图 6),连接 0.5  $\Omega$  的真空电子束二极管。阴极杆直径为 15.2 cm,左边安装在电压叠加器接地法兰上,右边伸入二极管的环形阴极电极。驱动二极管真空传输线电感为 18 nH,叠加器阴阳极间隙为 6.35 cm,在电压为 500 kV 时阴极表面电场为 80 kV/cm,低于真空中电极表面电子发射电场阈值 200 kV/cm。运行在真空绝缘状态,中心阴极到叠加器阳极电流由位于接地盘槽内的 B - Dot 测量,二极管电压通过 1  $\mu$ H 电感的电流脉冲微分得

到,1  $\mu\text{H}$  电感与负载二极管并联。

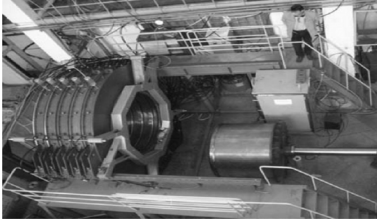


图6 5级FLTD模块按电压叠加器结构装配的照片

Fig. 6 The photograph of 5 FLTD modules according to inductive voltage adder structure

实验结果:在负载电感为 18 nH 和负载电阻 0.43  $\Omega$  时获得负载电压 360 kV, 电流 833 kA, 前沿 97 ns, 峰值功率 300 GW, 电容器反峰电压 14 %, 电压过零时传到二极管能量 40 kJ, 支撑电感中的电流 77 kA, 脉宽 263 ns。对电压低于 500 kV 的平板二极管非相对论空间电荷限制流电子发射方程为:

$$I = P(U_d)^{3/2}, P = 2.335 \cdot 10^{-6} \frac{S}{d^2} \quad (6)$$

式(6)中, $S$ 为阴极发射面积; $d$ 为阴阳极间隙。当  $U_d = 360 \text{ kV}$ ,  $I = 833 \text{ kA}$ , 导流系数  $P$  为  $3.8 \times 10^{-3} (\text{A}/\text{V}^{3/2})$ ,  $S$  为  $2900 \text{ cm}^2$ , 间隙  $d$  约为  $1.325 \text{ cm}$ 。充电电压从 80 kV 到 90 kV, 调整二极管间隙获得最佳二极管性能, 间隙为 1.4 cm, 每 10 炮需更换二极管天鹅绒阴极, 充电 90 kV 时的波形如图 7, 充电 80, 85 kV 和 90 kV X-ray PIN 二极管波形如图 8, X 射线产额与充电电压关系如图 9。5 级 FLTD 和 1 MA 模块串联实验成功展示了 FLTD 可以运行于感应电压叠加器结构。

为了建造更大电流的 FLTD 型脉冲功率源, HCEI, TITAN-PSD 与 SNL 等还设计了由 60 个放电支路组成的 FLTD-Z 模块, 预计连接匹配负载时电流达 1.5 MA, 前沿 100 ns, 负载电压 110 kV, 模块直径约 4 m, 高度 20 cm。

## 4 FLTD 型 Z 箍缩驱动源的概念设计

### 4.1 FLTD 型 Saturn 及 Z-POP 样机设想

HCEI 在 2000 年曾提出了 FLTD 感应腔 64 级串联再 64 路并联, 电流 50 MA、内爆时间 100 ns 的快 Z 箍缩 LTDD 驱动源的概念设想<sup>[14]</sup>, SNL 也在 2000 年提出了 LTD 型 Saturn 装置的概念设想<sup>[15]</sup>, 以进一步证明和发现该技术途径的优缺点(见图 10)。设计输出电流 10 ~ 14 MA, 功率

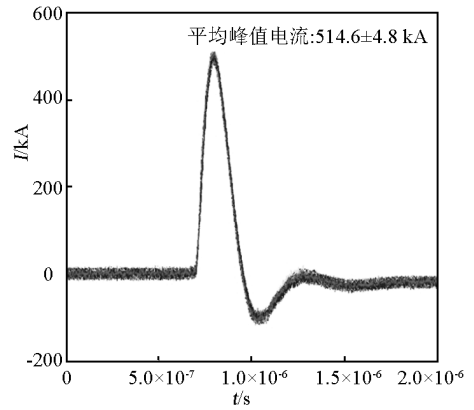


图7 电容充电电压 90 kV 时 5 次二极管电压与电流波形的叠加

Fig. 7 Overlay of the voltage and current of diode for the 5 shots with capacitor charging voltage of 90 kV

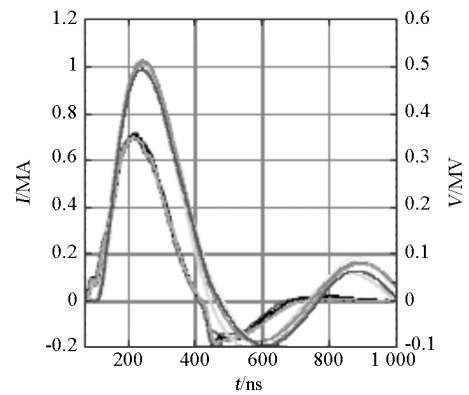


图8 充电 80, 85, 90 kV X-ray PIN 二极管波形

Fig. 8 X-ray PIN diode traces with three charging voltages 80, 85, 90 kV

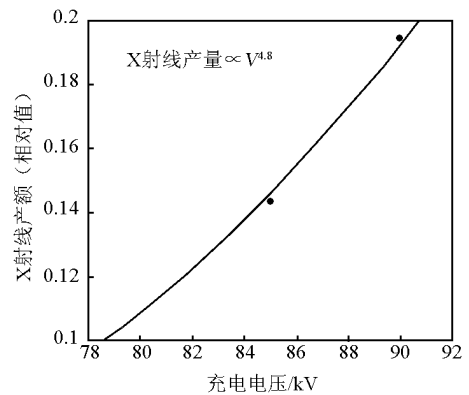


图9 充电 80, 85, 90 kV X-ray 产额  
Fig. 9 X-ray yield at charging voltage 80, 85, 90 kV

31 TW, 能量0.96 MJ, 峰值电压 2 MV, FWHM 约 50 ns, 其指标与 Saturn 装置相当, 即可用于韧致辐射环形电子束二极管, 也可用于快 Z 箍缩, 通过感应腔反向还可提供正负极性的电脉冲。装置直径从 30 m 减小到 15 m, 高度从 5 m 变为约 7.5 m, 采用 12 路并联, 每路 20 个感应腔串联, 感应腔电压梯度达 0.5 MV/m。整个设计没有油箱、水箱和水真空分界绝缘堆以及 MV 级同步触发气体开关, 仅感应腔初级腔体内充少量变压器油, 避免感应腔内固体绝缘子和开关绝缘体表面发生滑闪放电, 次级一般为真空磁绝缘传输线 (MITL)。

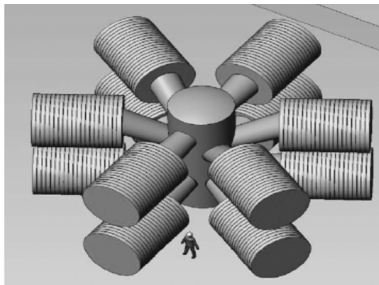


图 10 基于 FLTD 技术的新 Saturn 脉冲源三维结构

Fig. 10 3-D drawing of the new Saturn pulsed power driver based on FLTD technology

感应腔与 HCEI 研制的 1 MA FLTD 模块基本相同, 为使电流脉冲前沿从 100 ns 变为 50 ns, 电容器拟采用 10 nF, 放电支路电感从 232 nH 减小为 80 nH, 特征放电时间常数降低到  $\sqrt{LC} = 20$  ns, 不需要进一步压缩脉冲, 可直接驱动二极管。单个感应腔 40 个支路的总电容为 200 nF, 电感 2 nH, 而 HCEI 研制的 1 MA FLTD 模块感应腔总电感和电容分别为 6 nH 和 800 nF。目前, 放电最快的电容器为美国通用原子公司研制的双端出线 3540 型塑壳电容器, 尺寸 58 mm × 150 mm × 274 mm, 电感 25 nH, 电容 20 nF, 经过优化改进, 电感可降为 10 nH, 电容为 10 nF。目前的概念设计仍采用 GA3540 电容器尺寸。

每一路 20 级感应腔串联, 直径 3 m, 长度约 4 m, 次级 MITL 阴极圆柱体起始直径约 1.62 m, 终端直径约 1.52 m, MITL 阳极由 20 个串联的金属感应腔圆柱体内表面形成, 直径 1.6 m, 到中心区直径缩小到 1.2 m, 2 m 长同轴真空 MITL 将每一路连接到各自的三板传输线 MITL, 过渡到圆锥状的 MITL。为了保持与原 Saturn 装置类似的功率 3:2:1 的比例

到负载, 拟两路连接到上端圆锥状 MITL, 4 路连接到中间, 6 路连接到底端的圆锥状 MITL, 分别驱动 3 个环形二极管, 从感应电压叠加器到二极管的功率传输, 严格保持磁绝缘和阻抗匹配。该概念设计的优点是没有水与真空界面之间的绝缘子堆, 设计中唯一的绝缘子为 FLTD 感应腔内高度 2 cm, 支撑 200 kV 加速器间隙的绝缘子环, 在脉冲功率传输中最小阴阳极间隙为 1 cm。与原 Saturn 装置输出指标的比较见表 1, 模拟得到的电压、电流和功率波形如图 11。作为第一步, SNL 计划在未来 5 年投资 3 500 万美元, 建造 100 个 1 MA 的 FLTD 感应腔, 10 路并联, 每路 10 级串联, 重复频率 0.1 Hz, 作为 LTD 型 Z-ICF 的原理性样机, 称为 Z-POP, 如图 12 所示。

表 1 LTD 设计指标与 Saturn 装置比较  
Table 1 Comparison of LTD design indexes and Saturn device

位置	LTD Saturn 装置			
	驱动源 阻抗 /Ω	Z 负载 阻抗 /Ω	负载 电压 /MV	负载 电流 /MA
上层	0.91	0.99	2.40	2.4
中间层	0.45	0.38	2.02	5.3
底层	0.30	0.33	2.2	6.7
目前 Saturn 装置的性能				
上层	0.66	0.99	2.1	1.8
中间层	0.33	0.38	2.1	3.9
底层	0.22	0.33	2.1	6.2

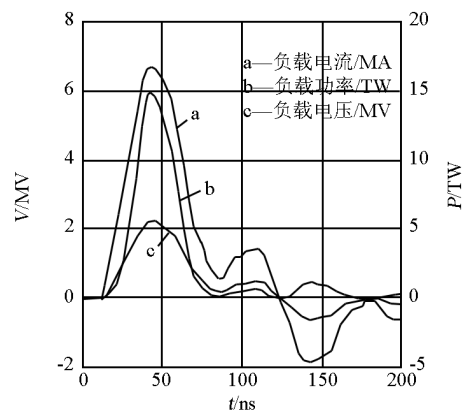


图 11 新 Saturn 底层环形二极管的模拟电压、电流和功率波形

Fig. 11 The voltage, current and power simulated waveforms of the bottom ring diode for new Saturn

FLTD 型直接驱动 Z 箍缩脉冲源的关键技术包括多路并联 (从同轴 MITL 到中心区板状 MITL) 的

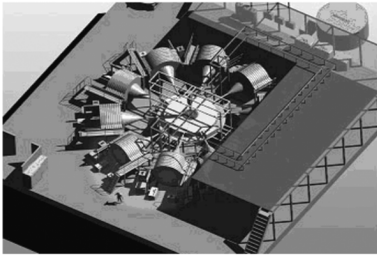


图 12 FLTD 型 Z-POP 加速器设想结构  
Fig. 12 The configuration of Z-POP accelerator based on FLTD

穿孔过渡段的电流损失;长 MITL 对传输脉冲的影响、特别需要计算和实验证实大量并联感应腔多个传输线并联时的能量和电流损失;输出极性选择和不同负载二极管的行为,以及与感应腔支路设计、触发、脉冲成型等有关的电气与机械方面难题,如感应腔连接结构、气体开关抽空排气、中间导体支撑绝缘、锥状 MITL 支撑、损坏感应腔和气体开关的更换、输出反极性脉冲等。

FLTD Saturn 共需 240 个感应腔,每个感应腔 40 个开关,共有 9 600 个开关需要同步触发。单个感应腔造价约 10 万美元,所有感应腔总造价约 2 400 万美元,加上其他相关的设计费用,新 Saturn 装置总造价为 3 000 万到 4 000 万美元。降低总造价的方法是减小感应腔的数量,由于真空传输线直接到锥状 MITL,无真空和水之间的绝缘子,将极大减小负载区电感,降低对驱动源输出电压要求,如驱动负载的电压降低,则可减小串联感应腔的数目和造价,因此,优化负载工作电压具有重要意义。

#### 4.2 60 MA/6 MV/100 ns 快 Z-IFE 直接驱动源的概念设计

SNL 提出了一种电功率达 1 000 TW,210 路并联、每路 60 级串联、次级采用水线、三层布置的脉冲功率源概念设想<sup>[16]</sup>。基于 1 MA FLTD 模块,SNL 与 HCEI 还提出了 60 MA,6 MV,100 ns LTD 型直接驱动负载源的概念设想,如图 13 所示<sup>[12]</sup>。60 路并联,每路 60 个感应腔串联,到双板或三板传输线,再馈入到后端 RTL (MITL) 的中心快 Z 箍缩负载和 ICF/IFE 的靶丸,如图 14 所示。

对 IFE 应用,驱动源优先选择单层结构,将使循环使用传输线(RTL)的更换和从 FLTD 到平板传输线和 RTL 功率传输简单,此结构没有多层孔后连接,缺点是驱动源占用空间大;对快 Z 箍缩 ICF,拟

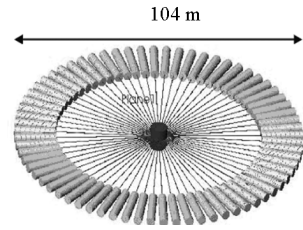


图 13 IFE 用 60 MA FLTD 脉冲驱动源俯视图  
Fig. 13 Top view of FLTD pulsed power driver with the output current of 60 MA for IFE application

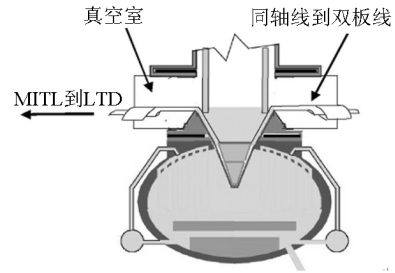


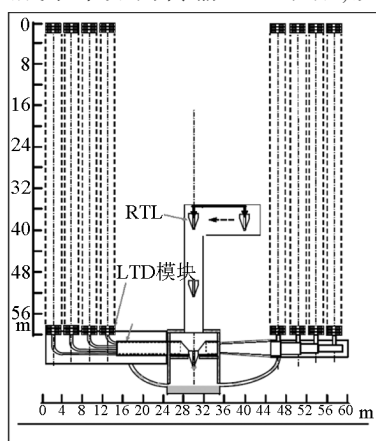
图 14 Z-IFE 发电站中心区的结构设想  
Fig. 14 Configuration of IFE z-pinch reaction chamber in centric area

采用多层和孔后连接的布局。系统中每一路 FLTD 的感应腔串联数和并联 FLTD 路数相同,60 MA 驱动源等效电路与一个 FLTD 腔相同。感应腔直径 3 m,60 路并联最小半径约 31 m,MITL 长度与感应腔接近,MITL 会使脉冲前沿损失电流,但也有两个好处,陡化脉冲前沿,可增加快 Z 箍缩的功率输出;使感应腔与负载隔离,在等离子体内爆滞止阶段使感应腔不受负载电感增加的影响。60 个感应腔串联加上真空泵的长度约 13 m,所以驱动源总半径约 44 m,包括支撑总高度约 5 m,总共有 3 600 个感应腔,144 000 个压缩空气闭合开关,288 000 个电容器,数量巨大。然而在整个驱动源中只有 4 个主要元件,电容器、开关、磁芯和感应腔室。上述设计忽略了长 MITL 和同轴 MITL 到平板传输线的损失,在之前关于 Jupiter 和 LMF 研究中,由于脉冲前沿缩短导致在长 MITL 中的电流损失和磁场为零传输区域的电流损失约占总电流的 10%~15%,考虑到上述损失,设计调整为 70 级串联 70 路并联。

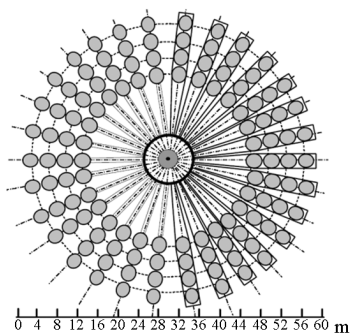
#### 4.3 用于高产额和 IFE 的 ZP-3R 多层 FLTD 型驱动源(90 MA)设计<sup>[12]</sup>

ZP-3R FLTD 型驱动源在阻抗 0.1 Ω 负载上可形成电流 90 MA,前沿 100 ns,重复频率 0.1 Hz

的强大电脉冲,Z 箍缩辐射 X 射线使动态空腔内的热核靶丸聚变,其总储能为 250 MJ,MITL 传输电磁波能量 170 MJ,辐射 X 射线动能达 35 MJ,单脉冲热核微爆炸的产额大于 3 GJ。ZP-3R 由 4 层环形 LTD 并联,每层由 30 路相同的 LTD 组成,汇聚电流到 MITL,驱动负载,如图 15 所示。构成 4 层 FLTD 的每一个 LTD 位于负载中心不同半径(17, 20.5, 24, 27.5 m),高度 60 m,每一路 FLTD 产生电压脉冲 10~20 MV,来自 FLTD 电脉冲沿同轴 MITL 传输,弯曲 90°改成水平方向传输至汇聚器,从同轴转为



(a)侧视图



(b)俯视图

图 15 FLTD 型 ZP-3R 聚变能发电站的概念结构图

Fig. 15 Conceptual scheme of ZP-3R installation based on the FLTD driver

平板。Z-IFE 长远发展目标是建立技术和经济有吸引力,能够以 0.1 Hz 重复频率工作,可产生 1 000 MW 电功率演示型发电厂。12 路并联,每路可产生 3 GJ 能量和 1 000 MW 电功率。

## 5 60 MA FLTD 型直接驱动源关键技术分析

FLTD 型 Z-IFE 尽管显示了技术上的美好前

景,但要克服的难题和面临的挑战非常巨大。无论采用常规的 Marx 水线技术还是 FLTD 技术,在工程上都存在巨大的难题和挑战。目前提出的 60 MA FLTD 型直接驱动快 Z 箍缩脉冲源概念设计的主要问题有:a. 需要同步触发的开关数量太多,高达百万只,要保证如此多的开关按要求的时序触发,对开关性能和数万路输出快前沿触发器提出了非常高的要求;b. 电容器数量达数百万只,一旦某只电容器损坏,查找和检修困难;c. 单模块直径达 3 m,外电极直径 2 m,内筒电极直径始端 1.96 m,末端 1.33 m,即在直径 1.33 m,长度 12.8 m 的 70 个锥形圆筒内不储存能量,使空间储能密度大大降低;d. 采用 2605 Co 非晶磁芯或硅钢磁芯,磁芯直径 2 m,截面积 15 cm<sup>2</sup>,共需数万只磁芯,价格昂贵;e. 需要直径达 3 m,厚度 10 cm 的高密度绝缘子数万只;f. 工程实施难度巨大,维修和维护困难。功率传输过程的电流损失和长 MITL 对电流脉冲的影响目前还不清楚。因此,上述方案尽管原理上可行,但在工程实现上难度巨大。

要减少触发开关和电容器的数量,降低装置的复杂性,提高可靠性,须设法提高单级放电单元的电流,目标是放电支路电流达约 1 MA,同时提高对 Z 箍缩等离子体不稳定性控制水平,内爆时间 150~300 ns 也能实现 Z 箍缩等离子体内爆的对称压缩,需要发展电流可达约 1 MA,电压约 200 kV,连接匹配负载时电流上升时间约 300 ns 的单级放电单元。以此为基础,通过 60 支路并联放电获得 60 MA 电流,通过 60 级串联,获得 6 MV 输出电压,显著减少直接驱动源所需要的电容器和开关的数量。

以目前技术条件建造 6 MV/60 MA/100 ns 的 FLTD 型直接驱动 Z 箍缩的脉冲功率源对国内外脉冲功率界都是个巨大的挑战,需要国内外相关单位的通力合作,一旦脉冲功率驱动源技术取得突破,利用 Z 箍缩实现 ICF 和 IFE 就会取得重大进展。

## 参考文献

- [1] Arsdall A V. Pulsed power at Sandia National Laboratory the first forty years[R]. SAND2007-2984P, 2007
- [2] Olson C L, Slutz S A, Morrow C W, et al. Z-pinch IFE program [A]. Fusion summer study[C]. Snowmass, 2002, July 8-19
- [3] Neal Singer, Paul Silver, Charlie Robinson, et al. Refurbished Z continues its march into the future [N]. Sandia Lab news, 2008-03-14
- [4] Grabovsky E V, Azizov E A, Alikhaniv S G, et al. Development of X-ray facility "Baikal" based on 900 MJ inductive store and re-

- lated problem[A]. The 13<sup>th</sup> IEEE PPC[C]. Las Vegas; 2001, 06: 773 - 776
- [5] SNL. Rapid-fire pulse brings Sandia Z method closer to goal of high-yield fusion reactor [EB/OL]. [2007 - 04]. <http://www.sandia.gov.com>
- [6] Sun Fengju, Qiu Aici, Zeng Zhenzhong, et al. The development of short pulsed power driver for fast Z pinch [J]. High Laser and Particles, 2006, 18(3): 513 - 520
- [7] Bastrikov A N, Kim A A, Kovalchuk B M. Fast primary energy storage based on linear transformer scheme [A]. The 11<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Baltimore: 1997, 02: 489 - 497
- [8] Francis Lassalle, Arnaud Loyer, Alain Georges, et al. Status on the Sphinx machine based on the 1- $\mu$ s LTD technology[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(2): 370 - 377
- [9] Mazarakis M G, Fowler W E, McDaniel D H, et al. A 1-MA LTD cavities building blocks for next generation ICF/IFE [A]. 2006 IEEE International Conference on Magagauss Magnetic Field Generation and Related Topics[C]. 2006, 11: 523 - 528
- [10] Smirnov V. Review of pulsed power development at Kurchatov and Trinita [A]. 07 - PI - 01, The 17<sup>th</sup> International Conference on High-power Particle Beams[C]. Xi'an: 2008, July 6 - 11
- [11] Mazarakis M G, Fowler W E, Kim A A, et al. High current fast 100-ns LTD driver development in Sandia laboratory [A]. The 15<sup>th</sup> IEEE PPC[C]. 2005, 06: 390 - 393
- [12] Olson C L, Mazarakis M G, Fowler W E, et al. Recyclable transmission line (RTL) and linear transformer driver (FLTD) development for Z-Pinch inertial fusion energy (Z-IFE) and high yield[R]. SAND2007 - 0059, 2007, January
- [13] Kim A A, Bastrikov A N, Kovalchuk B M, et al. 100 GW fast LTD stages[A]. The 13<sup>th</sup> International Symposium on High Current Electronics[C]. Tomsk: 2004, June 24 - 29. 141 - 144
- [14] Kim A A, Kovalchuk B M. High power direct driver for Z pinch loads[A]. Proceeding of 1<sup>st</sup> International Conference on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials[C]. Tomsk: 2000. 363 - 368
- [15] Mazarakis M G, Struve K W. Conceptual Design for a linear-transformer driver (LTD) based refurbishment and upgrade of the Saturn accelerator pulse-power system[R]. SAND2006 - 5811, 2006, September 1 - 24
- [16] Stygar W A, Cuneo M E, Headley D I, et al. Architecture of petawatt-class Z-pinch accelerators [J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams (10:030401), 2007. 1 - 24
- [17] M G Mazarakis, W E Fowler, A A Kim, et al. High current, 0.5-MA, fast, 100-ns, linear transformer driver experiments [J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams (12:040501), 2009, (05): 1 - 17
- [18] A A Kim, M G Mazarakis, V A Sinebryukhov, et al. Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages[J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams (12:040502), 2009, (05): 1 - 17

## Development of high pulsed-power source based on linear transformer driver for direct-driven Z pinch load

Sun Fengju, Qiu Aici, Zeng Zhengzhong,  
Zeng Jiangtao, Cong Peitian

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[ **Abstract** ] The paper introduced the properties of pulsed power source based on fast linear transformer driver (FLTD), and summarized the latest developments of FLTD-Z module and the conception design of pulsed power source based on FLTD such as Z-POP for verifying the availability of IFE, and the next generation direct-driven pulsed power source of the current of 60 MA, and the voltage of 6 MV or the current of 90 MA and the rise time of the current of 100 ns for ICF (inertial confinement fusion) and IFE (inertial fusion energy). The paper also analyzed the crucial core technology for further investigation.

[ **Key words** ] fast Z pinch; direct driven; FLTD pulsed-power source; high power pulsed accelerator; conception design