

# 脉冲 X 射线模拟源技术的发展

邱爱慈

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**[摘要]** 文章简要介绍了利用强流脉冲电子束加速器模拟脉冲 X 射线的发展概况及国内脉冲 X 射线模拟源的发展现状, 指出作为主要技术途径, 高功率 Z 箍缩技术在实现超强脉冲 X 射线源和 ICF 驱动源上都有很重要的发展应用前景, 并提出了今后工作设想。

**[关键词]** 脉冲 X 射线; 高功率脉冲技术; 脉冲电子束加速器; Z 箍缩; ICF

## 1 引言

脉冲 X 射线模拟源技术随着高功率脉冲技术的发展而发展。用于脉冲 X 射线模拟的强流脉冲电子束加速器就是一种高功率脉冲装置。这种装置一般由初级能源、脉冲功率系统和负载构成, 它以慢的方式储存能量, 然后通过开关瞬间释放能量给负载, 产生粒子束或辐射, 见图 1。

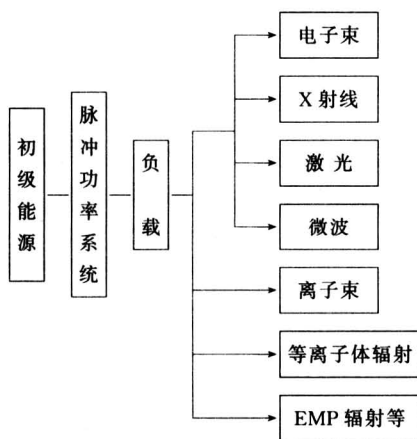


图 1 高功率脉冲装置构成方框图

Fig.1 Block diagram of high pulsed power facility

脉冲功率系统包括初级储能、脉冲储能和传输几部分。初级储能常采用 Marx 发生器或脉冲电容器组, 脉冲变压器 (包括直线型和特斯拉型) 等。脉冲储能主要有传输线型的电容储能 (包括同轴型和平板型) 和电感储能 (同轴型和螺旋线型) 方式, 它们分别通过高功率闭合开关和断路开关, 实现电脉冲压缩和功率放大。脉冲储能可以由一级或几级组成, 末级也有采用磁感应方式, 实现脉冲电压倍加 (又叫感应电压加法器 IVA)、能量会聚, 最后通过真空磁绝缘传输线把能量传输给负载。脉冲功率系统的复杂程度决定于负载对它的要求、系统的开关性能和初级储能向脉冲储能放电的快慢程度。

负载通常采用爆炸发射等离子体阴极二极管, 直接产生强流电子束, 也可通过抑制越过二极管间隙的电子流, 产生强流离子束。还可利用金属丝阵或园柱状气流等作为负载, 通过 Z-pinch (箍缩) 产生等离子体辐射, 其工作过程是当脉冲大电流流过负载时, 将后者加热并形成等离子体, 同时由于大电流产生的强磁场作用, 等离子体向轴线快速聚缩 (称为内爆), 最终在对称轴附近滞止, 同时辐射 X 射线, 等离子体的终态形状为沿轴线的线状流体。

大功率脉冲装置不仅成为脉冲辐射模拟的最有效的实验手段, 而且在惯性约束聚变 (ICF)、新概念武器 (激光武器、微波武器、电磁脉冲弹、粒子束武器、电磁炮、电热炮等) 等国防和能源领域研究中得到重要应用, 在其他民用领域中也有广阔的发展前景, 如脉冲 X 射线源用于消毒灭菌, 脉冲离子束源用于材料表面改性, 以及利用脉冲功率装置进行脱硫、脱硝、污水净化等环保应用和作为石油助采、勘探的供能系统等。

## 2 强流脉冲电子束加速器模拟脉冲 $\gamma$ 、X 辐射的发展概况

早在 60 年代初, 英国原子武器研究中心 J. C. 马丁领导的研究组将传输线技术应用于高电压脉冲形成中, 研制成功高阻抗强流脉冲电子束加速器, 从而为脉冲辐射模拟提供了一种有效的手段。从那时候起, 这类加速器首先在核武器及效应模拟需求背景的推动下, 得到了很大的发展。作为辐射模拟源, 要求其辐射的能谱、脉冲宽度和上升时间、剂量率以及辐照均匀性等方面都尽可能地接近它的实际情况。目前利用高能 (3~22 MeV)、强流 (几十~几百 kA) 的脉冲电子束轰击高原子序数材料, 所产生的韧致辐射已能较真实地模拟瞬发脉冲  $\gamma$  射线, 辐照剂量率达  $10^{10}$  Gy/s, 均匀照射面积最大可达  $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ 。由于半导体器件和集成电路应对辐射脉冲上升时间和宽度非常敏感, 因此发展了不同脉冲宽度的辐射产生技术, 从 80 年代中期以来, 随着大功率开关技术和二极管技术的发展, 获得了窄脉宽 (小于 20 ns) 和长脉宽 (几百 ns 乃至  $\mu\text{s}$ ) 的高剂量率辐射脉冲。因此, 总的说来, 目前脉冲  $\gamma$  射线模拟源技术已经比较成熟。然而对于脉冲 X 射线模拟, 多年来一直在努力探索有效的模拟途径, 由于它不仅依赖脉冲形状和能量沉积率, 而且对 X 射线能谱也非常敏感, 至今还没有完全解决, 这是今后努力要争取实现的目标。

脉冲 X 射线模拟曾经历了几个发展阶段。70 年代初以来, 由于水介质同轴线技术的发展, 研制成功低阻抗强流脉冲电子束加速器, 阻抗可以降低到几欧姆, 输出的电子束流达到几百 kA, 使低能强流脉冲电子束成为当时模拟脉冲 X 射线在材料中产生的热力学效应的唯一有效手段。80 年代以来, 脉冲电子束加速器技术又取得重大进步, 单台

加速器达到阻抗 1 欧姆以下, 输出电子束流达到 MA 以上, 并发展了多台并联技术, 使输出功率大大提高, 利用这些低阻抗大功率加速器产生能量 300 keV 以下的 X 射线技术有了较大进展<sup>[1]</sup>。一种方法是采用强箍缩二极管, 利用强箍缩电子束在阳极靶后产生虚阴极和角向自磁场, 使电子束多次穿过阳极薄靶, 这可以提高硬 X 射线的总输出产额, 但同时伴随产生高能韧致辐射; 另一种方法是在低阻抗加速器中采用几级二极管串接, 每一级端电压为 200~400 kV, 利用发射的低能电子束产生韧致辐射。这两种方法产生的 X 射线可以模拟 20~300 keV 能段的脉冲 X 射线。由于更低能量的电子转换韧致辐射的效率很低, 要产生足够强的 20 keV 以下的 X 射线, 电子束流要达到  $10^{10}$  A 以上, 实际上这是难以做到的。然而这个能段 (尤其是 < 10 keV) 的 X 射线与材料的相互作用研究, 不论从实用价值上, 还是科学意义上都很重要, 因此需要寻求新的技术途径解决。与此同时, 研究利用短脉冲电流驱动的 Z-pinch 技术取得了大的进展, 产生了较强的 keV 能段的 X 射线, 但总的辐射能量和功率都还不够高, 可提供给辐照样品的面积和能注量都还不够大, 能谱逼真度差。1995 年以来美国 Sandia 实验室在 Saturn 和 Z 装置上, 采取增加金属丝阵列丝数目和多层结构, 使丝间距离减少到足够小, 有效地控制了瑞利-泰勒 (R-T) 不稳定性, 使 Z-pinch 技术研究取得了突破性的进展, 在短短几年内辐射输出功率增长 7 倍以上 (见图 2), 获得了总能量为 1.9 MJ、功率 290 TW 的 X 射线输出<sup>[2,3]</sup>。Z 装置已成为目前世界上最强的脉冲 X 射线源。从 1992 年起投资建造的超大型 X 射线模拟器 (DECADE) 前不久也投入试验, 辐照空间比已有的模拟器大 10 倍<sup>[4,5]</sup>。据称, 美国今后还拟建更高功率的装置, 包括 ZX 装置 (拟产生总能量为 7 MJ 的 X 射线) 和 Jupiter 装置 (拟产生 20 MJ 的 X 射线辐射)。

大功率 Z-pinch 具有总的 X 射线能量转换效率高 (可达 15%), 脉冲功率源技术相对比较成熟, 费用相对较低等突出优点。根据 Z 装置上系列实验结果和理论模拟计算对利用 Z-pinch 驱动 ICF 的概念进行了初步评估, 结果表明这个概念是有前途的<sup>[6]</sup>。因此, 在 ICF 方面它也有很好的应用前景, 已成为激光驱动 ICF 强有力的竞争对手, 经过巨大的不懈努力, 也许在不远的将来, 在实验室里实

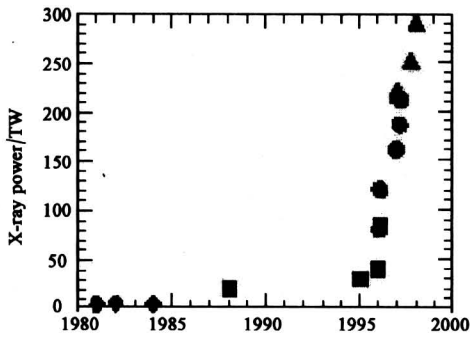


图 2 近几年 Z-pinch 辐射功率的增长  
Fig.2 Scheme of Z-pinch radiation power increase in recent years

现这种 ICF。正是由于高功率 Z-pinch 研究具有重要的应用前景，除美国外，俄罗斯、英国、法国、日本等国家也都在开展这方面的研究。

### 3 国内脉冲 X 射线模拟源技术发展现状

从 80 年代初提出利用低能强流电子束模拟材

料的脉冲 X 射线热力学效应，到 1990 年研制成功闪光二号加速器以来，我们一直在跟踪研究国外 X 射线模拟源技术的发展。近些年，我们根据国内发展的需要，提出技术要求，由俄罗斯大电流所负责，合作研制成功了一台多功能组合式高功率脉冲装置。它由直线型脉冲变压器、水介质同轴形成线、电感器、导体爆炸开关、等离子体断路器、水介质和气体高功率闭合开关等组成，如图 3 所示。该装置再配上 3 种结构的二极管负载，通过改变设备组合及运行状态，可以分别得到不同的能量、脉冲宽度和辐照面积的 6 种辐射脉冲，它所采用的技术和达到的输出指标具有当今国际先进水平，它能在 100 cm<sup>2</sup> 辐照面积上，提供脉宽 15~20 ns、剂量率 10<sup>10</sup>~10<sup>11</sup> Gy/s、平均光子能量 1.5 MeV，以及脉宽 150~200 ns、剂量率 10<sup>9</sup> Gy/s、平均光子能量 1.0 MeV 的 X 射线，可满足对脉冲 γ 射线的模拟要求。该装置已于 2000 年 1 月投入运行，命名为“强光一号”，见图 3。然而在脉冲 X 射线模拟方面，目前达到的指标离实际模拟要求还存在很大差距。下面重点介绍这方面情况。

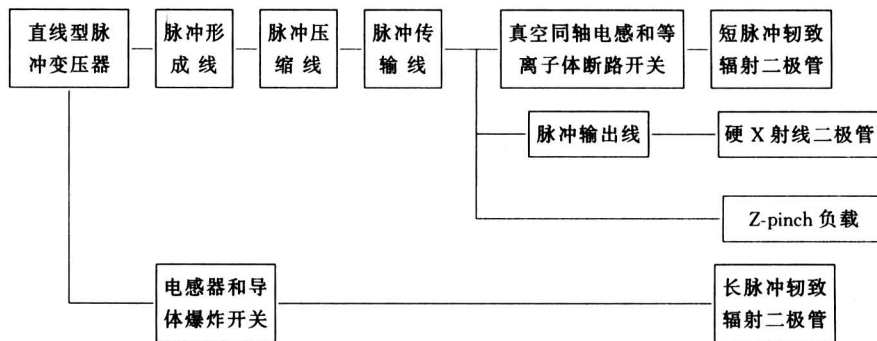


图 3 “强光一号”装置结构方框图  
Fig.3 Block diagram of "Qiang Guang 1" facility construction

#### 3.1 闪光二号强流脉冲电子束加速器——强脉冲 X 射线模拟源

闪光二号加速器是国内唯一能模拟强脉冲 X 射线热力学效应的设备，它产生的电子能量为 0.9~1.47 MeV，电子束流达 720~1 000 kA，束斑直径达 100~180 mm 和束能注量达 300~500 J/cm<sup>2</sup>，束均匀度达 85%。从 1990 年投入运行以来，在束能注量 100~420 J/cm<sup>2</sup> 和束斑直径 100~180 mm 条件下，试验研究了大量不同类型和性能的材料热击波效应和结构件的变形和应变，其结果得到了实际应用。目前正在开展提高电子束能注量达到

1 000 J/cm<sup>2</sup>和产生离子束二项研究工作，前者已经达到预期指标，并开展了材料辐照试验，观察到显著不同的效应。在第二项工作中，已完成在 200 kV 脉冲功率装置上自箍缩反射二极管产生脉冲离子束的原理性实验，获得了 2.1 kA、20ns、160 A/cm<sup>2</sup> 的质子束流。下一步拟在闪光二号加速器上实验，以期获得更强的离子束流，并开展利用模拟 1 keV 以下 X 射线研究等。

#### 3.2 脉冲硬 X 射线模拟源

##### 3.2.1 DPF-200 脉冲 X 射线源装置

DPF-200 脉冲 X 射线源装置是一台等离子体

焦点 (DPF) 装置, 70 年代末由清华大学负责研制, 1991 年搬到西安, 由我所重新安装调试, 经过几次改造, 作为脉冲 X 射线源, 目前已能稳定提供光子能量小于 60 keV 以下的脉宽 100 ns、剂量率为  $6.1 \times 10^9$  Gy/s 的脉冲 X 射线辐照环境, 单个脉冲总辐射能量可达 100 J, 进行了半导体器件和集成电路及专用电路的 X 射线瞬态剂量率效应和总剂量效应实验研究, 获得了重要结果。

### 3.2.2 “强光一号”装置产生的硬 X 射线

在“强光一号”装置阻抗为  $0.75 \Omega$  的水介质输出线端接上强箍缩二极管, 可产生脉冲硬 X 射线, 对小面积二极管, 输出硬 (20~100 keV) X 射线的能注量为  $5 \sim 6 \text{ J/cm}^2$ 、辐照面积为  $50 \text{ cm}^2$ , 脉冲宽度 35 ns; 对大面积二极管, 在电子束能量为 80 kJ 条件下, 所产生的硬 X 射线在辐照面积为  $500 \text{ cm}^2$  时, 能注量达  $1 \text{ J/cm}^2$ 。前不久, 我们通过调节二极管和预脉冲开关工作状态及阳极靶厚度, 在  $50 \text{ cm}^2$  辐照面积上, 获得硬 X 射线能注量  $8 \sim 10 \text{ J/cm}^2$ , 比装置原来达到的指标提高近一倍, 并进行了电子线路的辐照效应实验。

### 3.3 “强光一号”装置 Z-pinch 产生的脉冲软 X 射线

“强光一号”装置有一种喷气式 Z-pinch 辐射输出状态, 它产生小于 keV 的脉冲软 X 射线。当装置总储能为 259 kJ 时, 在二极管的电压 1.0~1.1 MV、电流 1.5~1.6 MA、阴阳极间距 4 cm, 喷氮气园柱外径 18 mm 和 liner 线质量约  $150 \mu\text{g/cm}$  条件下, 取得了输出总辐射能量 60 kJ 的结果。此时, 装置的总储能转换成 X 射线能的效率约为 23%, 而负载电能转换成 X 射线能量的效率约为 67.4%。用 X 射线二极管探测器测得 50~700 eV X 射线的平均功率大于 2 TW。通过针孔照相法测得产生 X 射线的等离子体线长度约为 3.8 cm, 直径约为 1.5 mm, 由此估算等离子体径向压缩比约为 10, 等离子体压缩速度为  $2.1 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。上述结果虽然还不能满足实用要求, 却为下一步开展 Z-pinch 研究打下了基础。

## 4 今后发展的设想

通过对强脉冲 X 射线模拟源技术多年的探索和 Z-pinch 技术最近取得的重大突破, 证实了高功率 Z-pinch 不但可以产生超强脉冲 X 射线, 而且也是 ICF 驱动源的一种具有发展前景的技术途径。

近期我们准备利用已有的设备和条件, 开展合作研究, 努力探索适合我国国情的技术发展路线。

### 4.1 开展高功率 Z-pinch 内爆动力学和等离子体辐射特性研究

Z-pinch 技术取得两次重大进展都是由于等离子体的不稳定性得到了明显的控制和改善。尤其是 1995 年在 Saturn 装置上进行的金属丝阵的负载实验表明, 当丝的数目从 10 根增加到 100 根, 丝间距小于毫米时, Z-pinch 产生的 X 射线脉冲宽度减小一个量级, 辐射功率显著提高。初步分析表明, 由于等离子体融合形成的“准薄壳”明显改善了等离子体向轴心压缩时的不对称性, 抑制了它的不稳定性的增长, 从而使 Z-pinch 的品质大大提高。因此开展高功率 Z-pinch 研究, 作为基本问题, 最关键的是如何控制等离子体不稳定性, 提高辐射输出的能量、功率和效率。如果能更有效地控制或利用 R-T 不稳定性, 增大内爆时间 (驱动电流上升时间), 将可降低对脉冲驱动源的要求, 简化脉冲功率系统, 从而降低装置造价。

高功率 Z-pinch 的物理过程很复杂, 其输出辐射性能与负载的初始状态、Z-pinch 内爆阶段的流体动力学和滞止阶段的辐射运输紧密有关, 还与脉冲驱动源的电流参数直接有关, 如何达到箍缩的最佳状态, 需要深入研究不同条件下 Z-pinch 内爆动力学和辐射特性, 以及它们的关系, 提出辐射功率和转换效率提高的途径, 为进一步发展 Z-pinch 脉冲功率源提供参考。

### 4.2 开展高功率 Z-pinch 脉冲驱动源的关键技术研究

国外不同驱动电流的系列实验表明, 脉冲 X 射线总能量与驱动电流的平方成比例关系, 而金属丝 k 层辐射产额与电流的 4 次方成比例关系, 因而作为超强脉冲 X 射线源的高功率 Z-pinch 装置, 其输出电流应在几十 MA, 功率应在几十 TW 以上, 同时它还应技术风险小, 具有高的运行重复性和可靠性, 并结构紧凑、造价较低。而现有的脉冲功率技术水平尚存在差距, 因此还要发展新的技术。

研究表明, 迄今单路脉冲功率源达到的输出水平大多在 MA、TW 级, 因此更高功率的脉冲源需要采用多路模块并联结构, 而各模块间的同步技术是必须解决的基本关键技术, 减少开关抖动则是这一技术的基础。同时还要解决多路模块的输出能量会聚和高功率密度的脉冲电流馈送到中心负载等关

键技术问题。为了减小脉冲功率源的复杂程度、体积和成本,提高性能价格比,需要研究在单路模块中快放电储能技术和新的组合结构。直线型脉冲变压器是多年来发展起来的一种新的初级脉冲能源,与传统的 Marx 发生器相比,它不需要庞大的绝缘油系统,能量利用率高,工作可靠,关键是要解决它的低电感、低抖动的技术难题。电感储能方式具有结构紧凑、重量轻、成本低等突出优点,关键是它的断路开关技术能否取得突破。它们的组合可使装置结构大大简化。

在我们已有的低阻抗、短脉冲电容储能的高功率脉冲装置研制经验和等离子体断路开关研究的基础上,今后准备先从单路模块技术研究着手,选择低电感直线型脉冲变压器模块化结构和低抖动气体开关技术研究为突破口,重点研究上述关键技术,对大型 Z-pinch 脉冲功率源的几种储能技术进行研究和评估。

#### 参考文献

[1] Bloomquist D D, Stinnet R W, et al. Saturn, A large

area X-ray simulation accelerator [A]. 7th IEEE International Pulsed Power Conference [C]. 1989. 310~317

[2] Summa W J, et al. Advances in x-ray simulator technology [A]. 10th IEEE International Pulsed Power Conference [C]. 1995. 1~2

[3] Quintenz J. Pulsed power fusion program [A]. Task Force on Fusion Energy Third Meeting [C]. Lawrence Livermore National Laboratory. 1999. 26~27

[4] Cook D. New developments and applications of intense pulsed radiation sources at Sandia National Laboratories [A]. 11th IEEE International Pulsed Power Conference [C]. 1997. 23~36

[5] Covault Craig. Powerful X-ray facility readied for BMD tests [J]. Aviation Week & Space Technology. April, 2000: 65

[6] Hammer J H, Tabak M, Wilke S C, et al. Z-箍缩驱动腔的高产额惯性约束聚变靶设计 [J]. (译自 Phys. Plasmas. 1999.6 (5): 2129~2136). 强激光技术进展. 1999 (6): 1~9

## The Development of Technology for Pulsed X-ray Simulators

Qiu Aici

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

[Abstract] In this paper is given briefly a survey of situation of simulating pulsed x-ray with high current pulsed electron beam accelerator. It's indicated that technology of high pulsed power Z-pinch has vast application prospects in the realization of ultraintensive pulsed x-ray simulator and ICF driver as a chief technological way. Also are described the progress and the current status of simulators for pulsed x-ray in China, and proposals for the future development of Z-pinch technology.

[Key words] pulsed x-ray; high pulsed power technology; pulsed electron beam accelerator; Z-pinch; ICF

(Cont. from p.11) respectively. Acid deposition in south China is typical "sulfuric acid type". According to the view of sustainable development, some control strategies are brought forward: 1. Strengthening environmental management, specifying acid deposition control area, and controlling and abating the total emission amount of SO<sub>2</sub>. 2. Employing practical techniques of clean coal, such as techniques of washing pyrite off from raw coal, industrial sulfur-fixed briquette, and abating sulfur from waste gas, etc. 3. Developing alternative energy sources to replace coal, including hydroenergy, nuclear, solar and wind energy, etc. 4. In acid deposition region of South China, selecting acid-resistant crop and tree species to reduce agriculture and forestry losses, planting more green fertilizer crops, using organic fertilizers and liming to raise buffer capacities of soils.

[Key words] acid deposition; terrestrial ecosystems; economic loss; control strategy