



·强流加速器与粒子束技术·综述·

国际高能脉冲 X 射线闪光照相加速器的发展综述

魏 浩, 孙凤举, 邱爱慈, 杨海亮, 尹佳辉, 张鹏飞, 姜晓峰, 王志国

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 高能脉冲 X 射线闪光照相加速器在高性能爆轰流体动力学实验研究中具有重要应用, 是牵引高功率脉冲技术发展的重大需求之一。综述了射频直线加速器、电子感应加速器、基于高压脉冲源和高功率二极管的强流脉冲功率加速器 3 大类、5 种闪光照相加速器技术路线的主要特点、代表性装置, 对比了几种技术路线的特点, 展望了未来发展趋势: 一是大力发展共轴多脉冲 X 射线分幅照相技术; 二是采用全固态脉冲功率组件实现加速器紧凑化、小型化和可移动。

关键词: 射频直线加速器; 回旋式电子感应加速器; 直线感应加速器; Marx 发生器; 感应电压叠加器; 快脉冲直线变压器

中图分类号: TM836

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210444

Review of development of high energy pulsed X-ray accelerators for flash radiography

Wei Hao, Sun Fengju, Qiu Aici, Yang Hailiang, Yin Jiahui, Zhang Pengfei, Jiang Xiaofeng, Wang Zhiguo

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Flash radiographic accelerators with high energy pulsed X-ray have important applications in hydrodynamic experiments, which is recognized as an important motivation to drive the development of the pulsed power technology. This paper reviews the advantages, typical facilities, and technical weaknesses of three kinds of flash X-ray radiographic accelerators, including the radio frequency linac, electron induction accelerator, and high-current accelerators driven by the high-voltage pulsed-power source and diodes. The technology trends for the future are summarized, as follows: (1) to develop accelerators capable of producing co-axial multi-pulse X-ray; (2) to develop compact, small and mobile accelerators by employing all-solid-state pulse power components.

Key words: radio frequency linac, betatron, linear induction accelerator, Marx generators, induction voltage adder, fast linear transformer driver

脉冲 X 射线闪光照相可以透视高速运动物质的结构、状态及演化过程, 是流体动力学实验等快速瞬变过程不可缺少的重要诊断工具, 广泛用于研究冲击加载下物质内部结构的瞬态演化过程, 在爆轰物理、高速侵彻等方面有广泛应用^[1-3]。与工业 CT 辐射成像不同, 闪光相对脉冲 X 射线源提出了特殊要求, 包括射线能量(决定穿透深度)、脉冲宽度(影响成像时间分辨率)、焦斑尺寸(影响成像空间分辨率)、辐射剂量(影响图像清晰度)和时间抖动(决定拍摄时刻精准度)等^[4-5]。高性能爆轰流体动力学实验对闪光照相加速器的要求是: 高能量(0.5~20 MeV)、短脉冲(脉宽 20~100 ns)、小焦斑(直径 1~5 mm)、高剂量(每个脉冲靶前 1 m 处剂量 1~1000 rad)、低抖动(通常小于 20 ns)^[1,5]。此外, 为了实现图像的三维重构, 获得被照物体动态变化过程不同时刻的多幅图像, 还需要多轴、多脉冲 X 射线输出。

自 20 世纪 50 年代至今, 高能脉冲 X 射线闪光照相加速器历经 60 余年发展, 形成了射频直线加速器、电子感应加速器和基于高电压脉冲源和高功率二极管的强流脉冲功率加速器 3 大类技术路线, 其中电子感应加速器包括电子回旋式感应加速器(Betatron)和直线感应加速器(LIA)两种代表性技术路线, 强流脉冲功率加速器主要包

* 收稿日期: 2021-10-20; 修订日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(11975186, 51790524)

联系方式: 魏 浩, weihao@nint.ac.cn。

括 Marx 发生器+脉冲形成线技术、感应电压叠加器(IVA)和快脉冲直线变压器(LTD)3种代表性技术路线。本文综述了以上3大类、5种代表技术路线的主要特点、代表性装置,对比分析了各路线的技术特点,展望了未来发展方向。

1 典型的高能脉冲 X 射线闪光照相加速器

1.1 射频直线加速器

射频直线加速器属于共振型时变电磁场加速器,利用交变电磁场沿直线轨道加速带电粒子,它的快速发展得益于高频、微波技术的发展及自动稳相原理的发现^[6]。射频直线加速器通常采用驻波与行波两种加速结构。1963年,美国 Los Alamos 国家实验室研制了 Phermex 闪光照相加速器^[7-8],如图1所示。Phermex 是一台三腔驻波射频加速器,工作频率 50 MHz,射频源提供给每个谐振腔的功率达到 2~3 MW。热阴极注入器产生束流强度约 1 kA、脉宽约 200 ns 脉冲电子束注入谐振腔,大部分电子束损失掉,加速器输出 10 个电子束串,能量 20~30 MeV,脉冲宽度约 3.3 ns,间隔时间 20 ns(取决于谐振频率),平均束流强度约 175 A,电子束串轰击靶产生脉冲 X 射线,靶前 1 m 处 X 射线剂量约 400 rad, X 射线焦斑(50%, MTF)直径约 3 mm,是当时世界上最强的闪光 X 射线照相装置^[1,7-8]。1997 年前后,Phermex 装置注入器的脉冲功率系统进行升级,首创了脉冲形成线串联技术,采用两台 Marx 发生器分别对两个气体开关串联的脉冲形成线充电,国际上首次获得了重复性和一致性优良的双脉冲(600 kV/39 kA/90 ns)^[9],Phermex 双脉冲输出时,每个 X 射线脉宽约 60 ns,间隔时间约 1 ms,靶前 1 m 处剂量约 100 rad,焦斑直径约 3 mm^[11]。

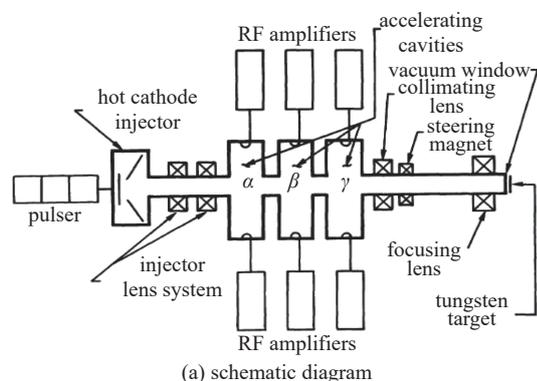


Fig. 1 Radio frequency linac Phermex^[7]

图1 射频直线加速器 Phermex^[7]

1.2 电子感应加速器

1.2.1 回旋式电子感应加速器

回旋式电子感应加速器(Betatron)是依据电磁感应原理,通过随时间变化的磁通量所产生的涡旋电场来连续加速电子束^[6]。回旋式电子感应加速器使用环形真空加速室,电子可在恒定不变的圆形平衡轨道上循环连续地获得加速(一般每转一圈可获得几十 eV 能量),经过多次积累得到较高能量^[6]。俄罗斯基于 Betatron 技术研制了 BIM 系列闪光照相加速器,代表性装置是 BIM-M,电子能量 70 MeV,电子束流 280 A, X 射线焦斑 2 mm×4 mm,脉宽小于 100 ns,靶前 1 m 处剂量为 150 rad, BIM-M 可输出 1~3 个脉冲 X 射线,且三脉冲 X 射线的强度、间隔时间可以调节^[10-11]。BIM 系列加速器电子能量高(30~70 MeV)、电子束流小(数百 A),束-靶相互作用沉积能量低(通常小于 1 kJ),辐射转换靶可多次重复使用,加速器产生多个脉冲 X 射线相对容易。这类闪光照相加速器的主要特点是 X 射线光子能量过高,与被照物体匹配差,同时 X 射线焦斑尺寸较大。

1.2.2 直线感应加速器

20 世纪 80 年代开始,国际上相继采用电子直线感应加速器(LIA)来产生高能脉冲 X 射线。LIA 主要由前级脉冲功率系统、注入器、加速腔、束流传输与聚焦、辐射转换靶等系统组成。脉冲功率系统为注入器和加速腔提供电脉冲(电压 200~300 kV、功率<1 GW),建立强流电子束发射和加速所需的高电场。注入器产生束流强度 1~5 kA、能量 1~4 MeV 强流脉冲电子束。在每个加速腔的加速间隙,强流电子束被脉冲电场加速,在加速间隙外的束流管道区域,电场被金属管道屏蔽,束流不会被减速,如图2所示。与 Betatron 加速器采用环形加速室不同, LIA 多个加速腔连接在一起,实现带电粒子多级累积加速,电子束经数十级加速腔被加速至数十 MeV(10~20 MeV),

电子束轰击高原子序数材料靶,产生高能脉冲 X 射线^[12]。LIA 对注入器和加速腔的脉冲馈入时序提出了很高的时间同步要求。国际上典型 LIA 型闪光照相加速器技术指标如表 1 所示,其代表性装置为美国 Los Alamos 国家实验室 DARHT-II 和中国工程物理研究院 XX 二号加速器。

LIA 闪光照相加速器电子束能量相对较低(10~20 MeV),电子束强度约数 kA,每个脉冲沉积在转换靶的能量约数 kJ,转换靶可实现数次重复使用,从而产生多个脉冲 X 射线,实现多分幅闪光照相。美国 Los Alamos 国家实验室 DARHT-II 加速器产生四脉冲 X 射线原理如图 3 所示。注入器首先产生和加速一个长脉冲电子束(束流~2 kA、脉宽~1.6 μs),在电子束打靶前采用踢束器(kicker)从长脉冲中选择 4 个间隔时间 400~500 ns、脉宽约 50 ns 电子束(其余电子束偏转掉),4 个短脉冲电子束依次打靶产生四脉冲 X 射线^[13-15]。中国工程物理研究院 XX 二号加速器,国际首创高压硅堆网络隔离脉冲功率系统的三路 200~300 kV 电脉冲,依次产生和加速 3 个短脉冲电子束(脉宽 60~80 ns),获得三脉冲 X 射线^[16-17]。美国正基于 LIA 技术研制闪光照相加速器 Sorpius,如图 4 所示,整机长度约 80 m,包括 12 级感应腔组成的 2.4 MeV 注入器和 90 级加速腔组成。Sorpius 显著特色是感应腔和加速腔的前级脉冲功率系统全部采用全固态器件,每个固态脉冲功率组件给 3 个感应腔(加速腔)提供 200 kV 脉冲,整机需要 34 套全固态组件, Sorpius 预计 2025 年建成^[18-19]。

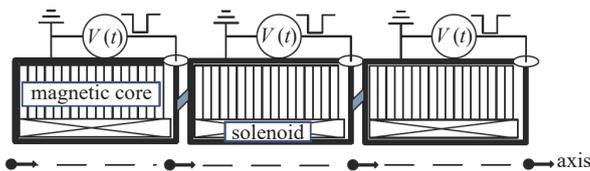


Fig. 2 Working principle diagram of LIA^[6]

图 2 LIA 工作原理图^[6]

表 1 国际上典型 LIA 型闪光照相加速器的技术指标

Table 1 Technical specifications of typical LIA typed flash X-ray radiographic accelerators in the world

accelerator	organization	energy/ MeV	current/ kA	FWHM time/ ns	dose@1 m/ rad	spot size 50% MTF/mm
FXR ^[1]	Lawrence Livermore National Laboratory, USA	18	2.3~3.4	65	325~400	3.2~3.5
AIRIX ^[1]	Commissariat à l’Energie Atomique, CEA, France	19	1.9~3.1	60	350	1.6~2.0
DARHT-I ^[1]	Los Alamos National Laboratory, USA	20	3.0	60	550~650	1.9~2.1
XX-I ^[16-17]	Institute of Fluid Physics, CAEP, China	20	3.5	70	>300	<2.0
DARHT-II ^[13-15]	Los Alamos National Laboratory, USA	18	2.0	4×50	100/100/100/300	<2.3
XX-II ^[16-17]	Institute of Fluid Physics, CAEP, China	20	3.5	3×70	>3×300	<2.0

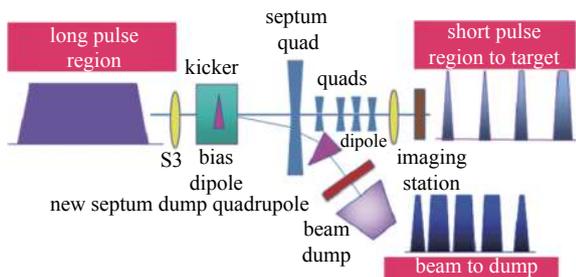


Fig. 3 Schematic diagram of DARHT-II accelerator to generate four X-ray pulses^[14]

图 3 DARHT-II 加速器产生四脉冲示意图^[14]

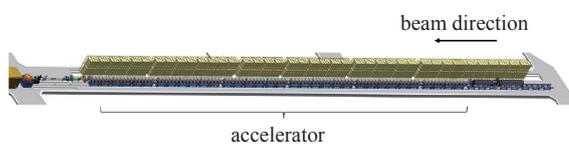


Fig. 4 Sorpius, a 20 MeV flash radiographic accelerator under construction in U. S. whose total length is 80 m^[19]

图 4 美国正在研制的 20 MeV 闪光照相加速器 Sorpius(长度 80 m)^[19]

1.3 强流脉冲功率加速器

1.3.1 Marx 发生器和脉冲形成线技术

1964 年,英国原子能武器研究中心(AWE)为满足闪光照相需要,首次将 Marx 发生器和 Blumlein 脉冲形成线技术相结合,研制了世界上第一台强流相对论电子束加速器 SMOG(3 MV/50 kA/30 ns),由此开创了高功率脉冲技术发展的新纪元^[12]。该技术路线的主要特点为:采用 Marx 发生器产生 μs 级高压电脉冲,并通过单脉冲形成线或者 Blumlein 线(通常采用变压器油作为介质)脉冲整形,之后经真空绝缘堆加载到高功率 X 射线二极管上,韧致辐射产生脉冲 X 射线。AWE 基于该技术研制了 Mevex, SuperSwarf, Mogul-E 等闪光照相加速器, X 射线能量涵盖 0.8~10 MeV^[1,3],其主要技术指标如表 2 所示,其中低能量 Mevex, Mini B 装置采用低阻抗(≤50 Ω)自磁箍缩二极管产生 X 射线,高能量 SuperSwarf, Mogul-D, Mogul-E 装置采用高阻抗(>100 Ω)傍轴二极管,这些装置 X 射线焦斑尺寸通常较大(>2.5 mm)^[1]。法国原子能委员会在此期间也研制了闪光照相加速器 Euphrosyne(3 MV/50 kA/30 ns),

表 2 基于 Marx 发生器和脉冲形成线技术的典型闪光照相加速器的技术指标^[1,3]Table 2 Technical specifications of typical flash radiographic accelerators based on Marx generator and pulse forming line^[1,3]

accelerator	organization	energy/MeV	current/kA	FWHM time /ns	dose@1 m/rad	spot size 50% MTF/mm
Mevex	Atomic Weapons Establishment, UK	0.8	35	50	1.2	~2.7
Mini B	Atomic Weapons Establishment, UK	2.2	30	50	12	~3.3
SuperSwarf	Atomic Weapons Establishment, UK	5.5	30	60	80	~4.9
Mogul-D	Atomic Weapons Establishment, UK	7.0	30	80	220	~4.9
Mogul-E	Atomic Weapons Establishment, UK	10.0	35	80	600	~5.5

Thalie(8.5 MV/110 kA/75 ns)和 Asterix 装置^[20]。2000 年后,法国对 Asterix 装置进行升级改造,与美国海军实验室联合开展了 4~6 MV 电压下正极性杆箍缩二极管实验,为基于感应电压叠加器和阳极杆箍缩二极管技术的新型闪光照相加速器研制与性能优化提供了大量实验数据^[21-22]。

基于 Marx 发生器和脉冲形成线技术的闪光照相加速器结构相对简单,在 20 世纪 60—90 年代脉冲功率装置中广泛采用,我国也研制了闪光照相和辐射模拟两用装置“闪光一号”(8 MV/100 kA/80 ns)^[12]。近年来中国工程物理研究院流体物理研究所研制了“天蝎”闪光照相 X 光机,输出电压约 1 MV,靶前 1 m 处 X 射线剂量 0.75~1.4 rad^[23]。该技术路线的主要缺点:(1)X 射线输出时间抖动大,X 射线源与被照客体、图像诊断系统时间关联同步难度大,导致拍摄时刻不够精准。(2)X 射线能量受限,一般小于 10 MeV。X 射线能量取决于加载在二极管上脉冲电压幅值,随着装置输出电压提高,输出线与真空二极管之间的绝缘堆电感急剧增大,导致脉冲前沿急剧变缓,若采用真空沿面闪络开关陡化脉冲前沿,导致输出时间抖动进一步增大。

1.3.2 感应电压叠加器(IVA)

2000 年以来,中、美、英等大国均大力发展 IVA 型闪光照相加速器^[24-27]。IVA 主要由前级脉冲功率源、感应腔、磁绝缘传输线、高功率二极管负载等组成,如图 5 所示。前级脉冲功率源通常采用 Marx 发生器+脉冲形成线技术,通过 2~3 级脉冲压缩,产生多路兆伏级电脉冲(电压~1 MV、电流 100~200 kA、脉宽 40~80 ns、峰值功率 100~200 GW),按照特定时序馈入各级感应腔。基于电磁感应原理,馈入电脉冲在 IVA 次级中心导体上实现电压叠加,产生的高功率电脉冲(电压数 MV~数十 MV、电流数百 kA,峰值功率 TW 级)直接加载到高功率 X 射线二极管上,韧致辐射产生高能脉冲 X 射线^[28-29]。

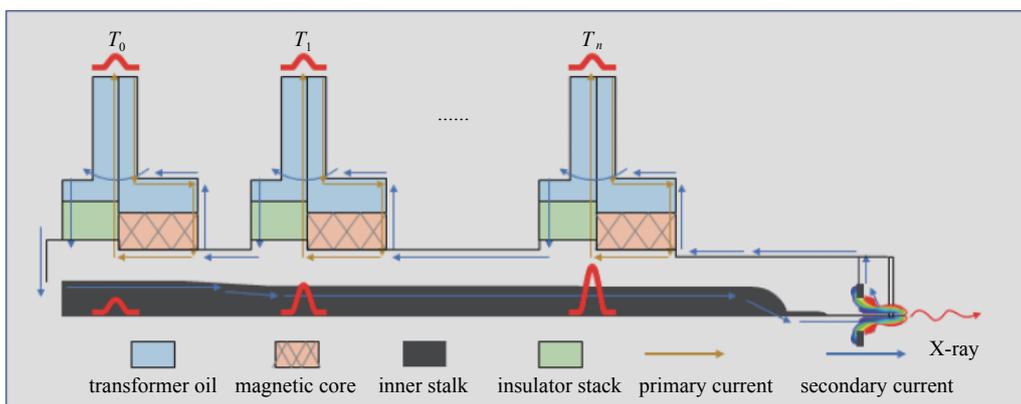


Fig. 5 Schematic diagram of working principle of IVA

图 5 感应电压叠加器(IVA)工作原理示意图

IVA 加速器结构紧凑、效费比高。与 LIA 加速器相比,IVA 加速器高功率脉冲电子束产生、聚焦和打靶都在加速器输出端的高功率二极管内完成,规避了 LIA 强流电子束加速、远距离传输由尾场效应导致的束流崩溃不稳定性。国际上典型 IVA 型闪光照相加速器如表 3 所示,其代表性装置为美国双轴闪光照相装置 Cygnus^[30]、闪光照相集成验证平台 RITS-6^[31]和英国原子能武器研究中心在建的五轴闪光照相试验设施 HRF^[32]。

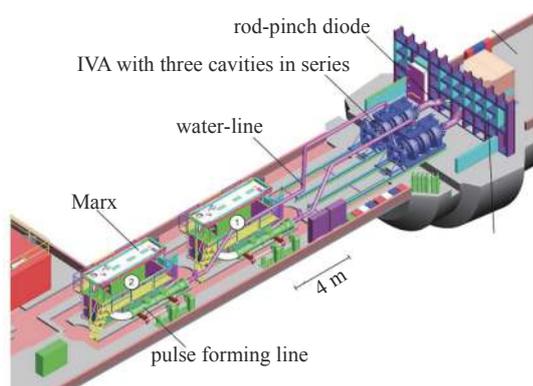
Cygnus 是国际上首台基于 IVA 和阳极杆箍缩二极管技术的紧凑型闪光照相加速器(图 6(a)),由两套完全独立的 X 射线源呈 60°夹角双轴布放,可获得被照物体两个不同时刻两幅图像。Cygnus 是目前唯一在美国内华达国家综合试验靶场应用的高能脉冲 X 射线加速器,然而由于 X 射线能量偏低(2.2 MeV),对爆轰压缩中晚期高密度阶段的穿透能力不足,因此美国近年来一直在大力发展更高电压的 IVA 驱动源和高功率强聚焦 X 射线二极管,并

表3 国际上典型IVA型闪光照相加速器的技术指标

Table 3 Technical specifications of typical IVA flash radiographic accelerators in the world

accelerator	organization	energy/ MeV	current/ kA	FWHM time/ ns	dose@1 m/ rad	spot size 50% MTF/mm
Cygnus	Sandia National Laboratory, USA	2.2	62	50	4.0	~1.0
RITS-6	Sandia National Laboratory, USA	10	120	45	350	<1.8
HRF (under construction)	Atomic Weapons Establishment, UK	14	140	60	600~1000	~5
Jianguang-I	Northwest Institute of Nuclear Technology, China	2.4	45	50	3.7	~1.0
Jianguang-II	Northwest Institute of Nuclear Technology, China	4.3	80	50	16	<2
Hawkeye-I	Institute of Fluid Physics, CAEP, China	4.3	100	~60	18	<2

建成了闪光照相集成验证平台 RITS-6(图 6(b))。英国原子能武器研究中心规划建设五轴闪光照相试验设施 HRF, 其中三轴为 14 MeV IVA 型闪光照相加速器 Merlin(图 6(c)), 每一套 Merlin 加速器由 10 级感应腔串联组成, 输出电压 10~14 MV, 输出指标将超过目前英国最强的闪光照相加速器 Mogul-E^[32]。国内西北核技术研究所分别在 2008 年和 2018 年分别研制出 2.4 MeV 和 4.3 MeV 闪光加速器“剑光一号”和“剑光二号”(图 6(d))^[33-34]。中国工程物理研究院在 2018 年前后成功研制 4.3 MeV 脉冲 X 光机“鹰眼一号”^[35]。



(a) dual beam radiography source Cygnus



(b) radiographic integrated test stand RITS-6



(c) Merlin accelerator (under construction)



(d) Jianguang-II accelerator

Fig. 6 Typical IVA typed flash X-ray radiographic accelerator

图6 典型IVA型闪光照相加速器

IVA 闪光照相加速器电子束流通常为数十 kA, 每个脉冲在转换靶上沉积能量通常为数十 kJ, 如此高能量作用下, 高功率 X 射线二极管通常仅能单次运行。国内外正积极开展 IVA 加速器产生多脉冲 X 射线新原理、新方法探索研究, 包括 TW 级 MHz 猝发重复率多脉冲产生、高功率强聚焦 X 射线二极管重复使用等^[36-37], 然而距离工程实用化仍面临不少技术挑战。

1.3.3 快脉冲直线变压器(LTD)

2000 年后 LTD 技术发展迅速, 在 高能脉冲 X 射线闪光照相领域展现出很好的应用前景^[38-40]。LTD 的基本原理如图 7 所示, 单路 LTD 脉冲源通常由数十级模块串联组成, 每级模块由多个低电感、小电容放电支路(通常称为 brick)并联组成。LTD 和 IVA 加速器均基于电磁感应原理, IVA 加速器需要初级脉冲功率源提供多路 MV 级电脉

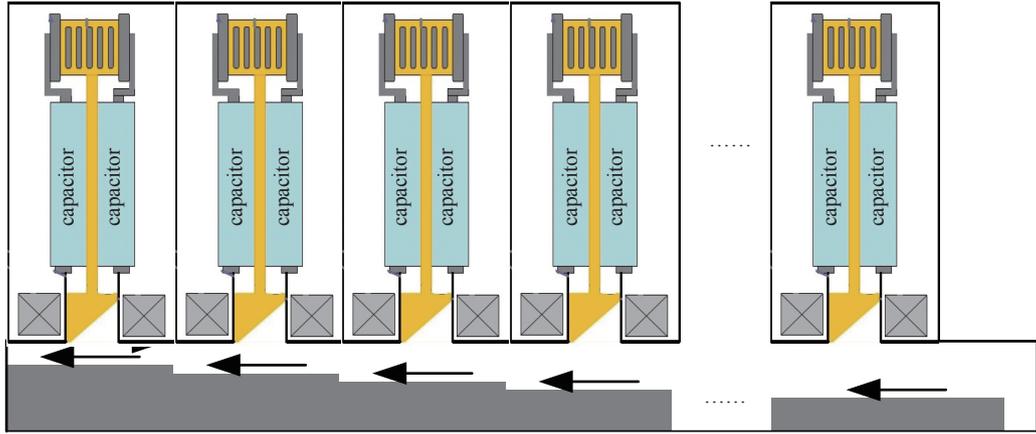


Fig. 7 Schematic diagram of working principle of LTD

图7 LTD工作原理示意图

冲并按照特定时序依次馈入,而LTD将初级储能(brick)集成在模块内部,可直接产生驱动负载的前沿数十ns~百ns电脉冲,无需额外脉冲压缩环节,相对于Marx发生器和脉冲形成线技术等传统多级脉冲压缩技术路线,具有结构非常紧凑、能量利用效率高等优势。

国际上典型LTD型闪光照相加速器的设计指标见表4。目前国际上典型LTD型闪光照相加速器大多处于概念设计阶段,如图8所示。美国Sandia国家实验室2008年给出了双轴7 MeV闪光照相加速器概念设计,脉冲驱动源采用72级LTD模块(每个模块电压100 kV)串联组成,次级采用真空磁绝缘传输线,X射线负载采用自磁箍缩二极管,预计二极管电压约7 MV,X射线脉宽约53 ns,靶前1 m处X射线剂量约350 rad^[41-42],该加速器输出指标与闪光照相集成测试平台RITS-6相近,但加速器体积非常紧凑。为了验证双轴7 MeV加速器关键技术,美国2011年研制成功21级模块串联的小型闪光照相加速器URSA,输出电压2.5 MV,用于开展LTD组部件测试^[40]。法国原子能委员会在2007年前后提出移动式8 MeV闪光照相加速器IDERIX概念设计^[43],脉冲功率驱动源采用84级LTD模块串联组成,次级真空磁绝缘传输线运行阻抗与负载阻抗近似匹配(约50 Ω),预计负载电压为8 MV,半高宽约75 ns,靶前1 m处X射线剂量大于100 rad,X射线焦斑尺寸小于2 mm,并在2010年建立了输出电压1 MV的10级串联实验平台LTDR,目前LTDR已完成2700余次可靠性测试^[44-45]。

表4 国际上典型LTD型闪光照相加速器的设计指标

Table 4 Design indexes of typical LTD typed flash radiographic accelerators in the world

accelerator	organization	energy/ MeV	current/ kA	FWHM time/ ns	dose@1 m/ rad	spot size 50% MTF/mm
dual-axis 7 MeV conceptual design	Sandia National Laboratory, USA	7.0	160	53	350	~2
URSA	Sandia National Laboratory, USA	2.5	58	53	2~3	~2
IDERIX conceptual design	Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA, France	8.0	120	—	>100	<2
LTDR platform 10-stage	Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA, France	1.0	~170	—	3.4	~4
LTD in series	Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA, France	1.0	~170	—	3.4	~4
3MV LTD conceptual design	Institute of Fluid Physics, CAEP, China	3.0	~75	—	—	—
ten-stage LTD in series	Institute of Fluid Physics, CAEP, China	1.0	~100	—	—	—

国内中国工程物理研究院流体物理研究所2017年提出3 MeV LTD型闪光照相驱动器概念设计^[46],整个装置长8 m,由30级LTD模块串联组成,X射线负载采用阻抗约40 Ω杆箍缩二极管,二极管电压约3 MV,上升沿约17 ns,脉宽约98 ns。与英法两国LTD型闪光照相加速器的主要区别在于:(1)利用LTD模块磁芯饱和特性来压缩脉冲宽度;(2)次级采用变压器油作为绝缘介质。在此之前,中国工程物理研究院流体物理研究所研制了10级LTD模块串联实验平台,输出电压约1 MV、电流约100 kA^[47-48]。西北核技术研究所建立了7级LTD串联实验研究平台,开展了多级模块串联触发时序、大规模开关触发方式等关键技术研究。

相对于IVA型闪光照相加速器,LTD闪光照相加速器结构更加紧凑,特别适合狭小空间闪光X射线照相需求。另外通过每级LTD模块内多支路延时触发、分时放电,有望实现多脉冲输出。LTD型闪光照相加速器面临的主要问题:(1)受次级真空功率长距离传输限制,LTD串联级数不宜过多(一般不超过100级),X射线光子能量

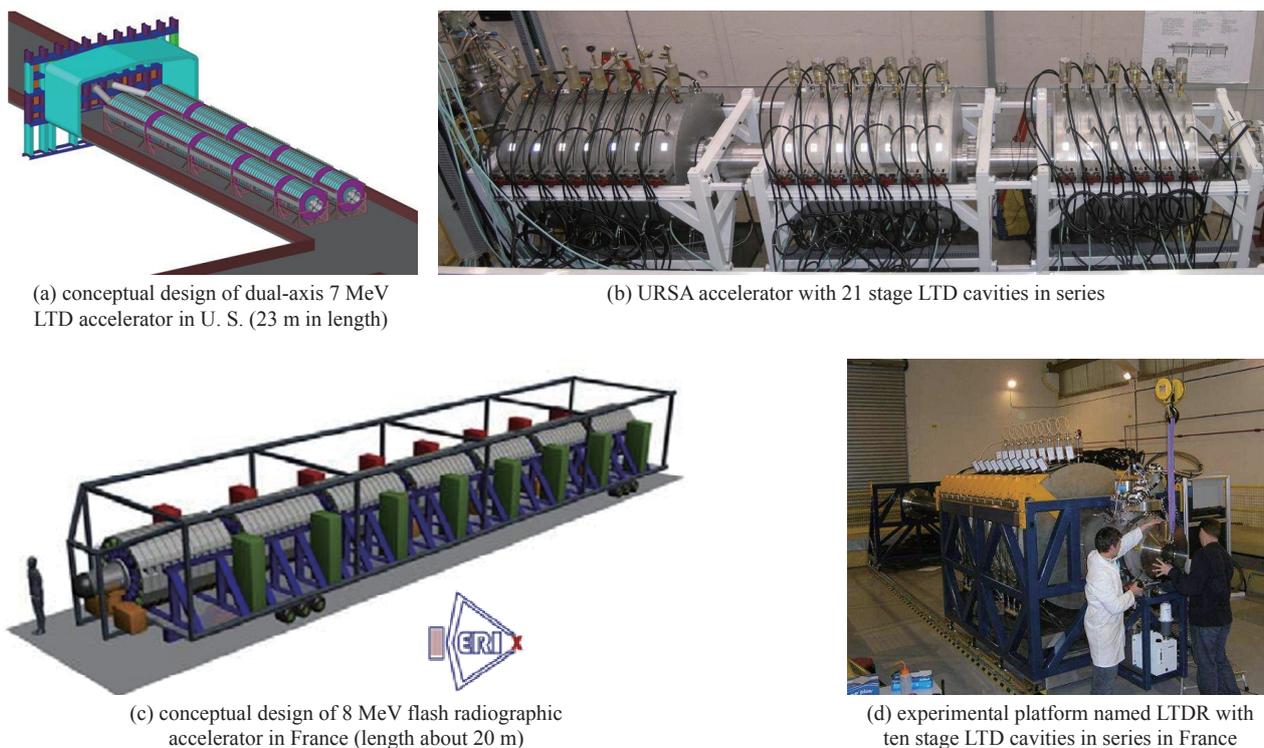


Fig. 8 Typical LTD typed flash X-ray radiographic accelerators

图 8 典型 LTD 型闪光照相加速器

一般不超过 8 MeV; (2) LTD 脉冲源与负载耦合效率低。受串联级数和输出电压幅值的限制, 目前设计的 LTD 型闪光照相加速器脉冲源与负载近似匹配, 而实际中为了提高加速器电流利用效率, 通常要求驱动源输出阻抗大于 X 射线负载阻抗(即负载欠匹配)^[49], LTD 加速器难以实现 7~8 MV 电压下负载欠匹配运行; (3) 输出脉冲波形品质稍差, LTD 输出波形由电容器直接放电产生, 没有经过额外的脉冲压缩环节, 脉冲前沿较缓、平顶度差, 加载到大功率二极管上电脉冲不是准方波, 若引入高次谐波支路实现准方波输出时, 器件可靠性降低。

2 几种技术路线的比较

几种闪光照相加速器技术路线的对比如表 5 所示。射频直线加速器和电子回旋感应加速器结构紧凑, 产生电子束能量高(30~100 MeV), 平均束流强度 100~200 A, X 射线剂量可达到数百 rad。这两类闪光照相加速器的主要问题在于 X 射线焦斑偏大、能谱过硬, 不但降低了闪光 X 射线照相的空间分辨率, 还导致 X 射线源与被照客体匹配难度大, 难以满足特殊领域高性能爆轰流体动力学实验精细化诊断需求, 但在工业检测等对成像空间分辨率要求不太高的领域仍有很大优势。

表 5 几种典型闪光照相加速器技术路线比较

Table 5 Comparison of several typical flash radiographic accelerators

classifications	accelerators	advantages	disadvantages
RF linac	RF linac	compact, capable of producing multi X-ray pulses	X-ray energy spectrum is very hard and focal spot size is large
induction accelerator	Betatron	compact, capable of producing multi X-ray pulses	X-ray energy spectrum is very hard and focal spot size is large
	LIA	high irradiation dose, small focal spot, capability of producing multi X-ray pulses	complexity, large volume, high cost
high-voltage, high-current pulse power accelerator	Marx+PFL	high irradiation dose, small focal spot	large time jitter of X-ray output, difficulty to produce multi X-ray pulses
	IVA	high irradiation dose, small focal spot, compact volume	difficult to produce multi X-ray pulses
	LTD	small focal spot, very compact volume	difficult to produce multi X-ray pulses

LIA 型闪光照相加速器电子束能量 10~20 MeV, 束流强度 1~2 kA, X 射线剂量可达到数百 rad, 能够同时实现大剂量、小焦斑、多脉冲, 已经成为实验室高性能流体动力学物理过程研究最重要的诊断工具之一。主要问题是

系统复杂, 造价昂贵, 体积庞大, 难以满足空间受限场景应用需求。

Marx 发生器+脉冲形成线型闪光照相加速器电子束能量 <10 MeV, 束流强度数十 kA, 辐射剂量大。主要问题是随着 X 射线能量提高, 加速器输出时间抖动较大, 导致拍摄时刻不够精准, 也很难实现多脉冲 X 射线输出。在 1 MeV 以下中低能闪光 X 射线照相领域, 该技术路线仍具有较大优势。

IVA 型闪光照相加速器电子束能量 2~20 MeV, 束流强度数十 kA~百 kA, 具有结构紧凑、辐射剂量大等优势, 被视作是闪光照相领域的革命性进步, Cygnus 是目前唯一在美国内华达国家综合试验靶场应用的高能脉冲 X 射线加速器。主要问题是很难实现多脉冲 X 射线输出。

LTD 型闪光照相加速器电子束能量 <8 MeV, 结构非常紧凑, 能量传输效率高, 在加速器可移动化、空间受限等应用领域, 展现出很好的应用前景, 目前正处于概念设计和组部件实验考核阶段。受 LTD 模块串联级数的限制, X 射线最高光子能量一般小于 8 MeV。

从发展历程上讲, 在 20 世纪 60—80 年代, 美、俄两国重点发展射频直线加速器和回旋式电子感应加速器, 英、法两国重点发展 Marx 发生器和脉冲形成线技术。20 世纪 90 年代后, 美国在 LIA, IVA 和 LTD 三种技术路线方面全面体系布局, 在加速器技术指标、数量、新技术研究方面长期引领发展, 英国则与美国联合发展 IVA 技术, 法国与美国联合发展 LIA 和 LTD 技术。我国在 20 世纪 90 年代后在 LIA, IVA 和 LTD 技术上发展迅速, 并研制成功“神龙”“剑光”系列等代表性加速器。

3 未来技术发展趋势

3.1 多脉冲 X 射线分幅照相

单脉冲 X 射线闪光照相每次只能获得被照物体一个时刻的图像。在爆炸流体力学实验中, 为了获得爆轰过程的时间演化信息, 迫切需要在同一光轴上产生间隔时间亚 μs ~亚 ms 的多个脉冲 X 射线, 对高速运动过程进行“超高速连拍”, 以在一次实验中拍摄获得不同时刻的多幅图像。当 X 射线能量较低(≤ 1 MeV)时, 可以将多个独立 X 射线源集成在一个真空腔体, 空间上压缩多个 X 射线源之间的焦点距离实现多焦点闪光照相, 从而获得与单焦点、多脉冲分幅照相相当的效果^[50]。然而相邻 X 射线源之间的焦点距离随 X 射线能量提高急剧变大, 对于高能 X 射线必须发展单光轴、单焦点、多脉冲产生技术。多脉冲 X 射线分幅照相的瓶颈是高功率(百 GW~TW 级)、高重复率(猝发频率 MHz)电脉冲产生, 核心科学问题是多脉冲下强聚焦 X 射线产生器件的重复发射特性, 难点是多个脉冲 X 射线一致性调控。

3.2 脉冲功率系统全固态化

目前闪光照相加速器脉冲功率系统通常采用变压器油、去离子水等作为储能或者绝缘介质, 采用大量高功率气体火花开关作为电脉冲产生、传输、调制与整形的控制器件, 这给加速器运维带来诸多不便。随着电力电子器件电压等级和功率容量的快速进步, 特别是高电压、低电感、快响应整流硅堆、高电压大功率电真空器件(伪火花开关、氢闸流管)和快速闭合开关(IGBT, MOSFET)的发展, 高能脉冲 X 射线闪光照相加速器脉冲功率系统全固态化成为可能^[51-52]。美国在建 20 MeV 闪光照相加速器 Sorpius 脉冲功率系统将采用全固态脉冲功率组件。

3.3 加速器紧凑化、小型化和可移动

目前高能脉冲 X 射线闪光照相加速器体积庞大, 移动不便。随着应用需求拓展, 要求加速器结构轻巧、体积紧凑、实验准备周期短, 具备快速部署、快速试验能力。加速器紧凑化、小型化和可移动对脉冲功率系统提出了很高要求, 采用全固态化脉冲功率组件是重要的技术举措。

4 结 语

梳理了高能脉冲 X 射线闪光照相加速器 60 余年的发展历程, 综述了射频直线加速器、回旋式电子感应加速器、直线感应加速器、Marx 发生器和脉冲形成线技术、感应电压叠加器、快脉冲直线变压器 5 种技术路线的主要特点、代表性装置和技术指标。目前国际上重点发展直线感应加速器、感应电压叠加器和快脉冲直线变压器 3 种类型强流脉冲功率闪光照相加速器。直线感应加速器能够同时实现小焦斑、大剂量、多脉冲, 成为实验室高性能流体动力学物理过程研究最重要的诊断工具之一, 制约问题是系统复杂、体积庞大。感应电压叠加器结构紧凑、辐射剂量大, 制约问题是多脉冲 X 射线输出难度大。快脉冲直线变压器型闪光照相加速器结构非常紧凑, 具有重要发展前景。展望了高能脉冲 X 射线闪光照相加速器技术未来发展趋势: 一是大力发展多脉冲 X 射线分幅照相技术; 二是采用全固态脉冲功率组件实现加速器小型化、紧凑化和可移动, 提升快速部署和快速试验能力。

参考文献：

- [1] Ekdahl C. Modern electron accelerators for radiography[C]//PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers. 2001: 29-34.
- [2] Mehlhorn T A. National security research in plasma physics and pulsed power: past, present, and future[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(5): 1088-1117.
- [3] Goldsack T J, Bryant T F, Beech P F, et al. Multimegavolt multi-axis high-resolution flash X-ray source development for a new hydrodynamics research facility at AWE Aldermaston[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(1): 239-253.
- [4] 康克军, 陈志强, 肖永顺, 等. 适于大型装备缺陷检测的工业CT辐射成像技术[J]. *中国体视学与图像分析*, 2016, 21(1): 14-21. (Kang Kejun, Chen Zhiqiang, Xiao Yongshun, et al. Industrial CT imaging for detecting defects in large scale equipments[J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2016, 21(1): 14-21)
- [5] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. (Qiu Aici. Pulsed power technology application[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016)
- [6] 陈思富, 黄子平, 石金水. 带电粒子加速器的基本类型及其技术实现[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 045101. (Chen Sifu, Huang Ziping, Shi Jinshui. Basic types and technological implementation of charged particle accelerators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 045101)
- [7] Boyd T J Jr, Rogers B T, Tesche F R, et al. PHERMEX—A high-current electron accelerator for use in dynamic radiography[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1965, 36(10): 1401-1408.
- [8] Starke T P. PHERMEX standing-wave linear electron accelerator[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1983, 30(2): 1402-1404.
- [9] Carlson R L, Kang M, Melton J G, et al. A 600-kV double-pulsed for the PHERMEX electron gun[C]//Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. 1997: 1698-1703.
- [10] Kuropatkin Y P, Mironenko V D, Suvorov V N, et al. Characteristics of the installation for flash radiography based on the uncored betatron BIM-M[C]//Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. 1997: 1663-1668.
- [11] Kuropatkin Y P, Mironenko V D, Suvorov V N, et al. Uncored betatron BIM-M a source of bremsstrahlung for flash radiography[C]//Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. 1997: 1669-1673.
- [12] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High power pulse technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [13] Scarpetti R D, Nath S, Davis H A, et al. Status of the DARHT 2nd axis at Los Alamos National Laboratory[C]//Proceedings of 2005 IEEE Pulsed Power Conference. 2005: 37-42.
- [14] Schulze M E, Ekdahl C A, Hughes T P, et al. Ion production and RF generation in the DARHT-II beam dump[C]//Proceedings of 2013 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science. San Francisco, CA, USA, 2013: 395-402.
- [15] Nielsen K, Barraza J, Kang M, et al. Upgrades to the DARHT second axis induction cells[C]//Proceedings of 2005 IEEE Pulsed Power Conference. 2005: 43-46.
- [16] 石金水, 邓建军, 章林文, 等. 神龙二号加速器及其关键技术[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 010201. (Shi Jinshui, Deng Jianjun, Zhang Linwen, et al. Dragon-II accelerator and its key technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 010201)
- [17] Xie Weiping. The introduction of flash X-ray sources for radiography in Institute of Fluid Physics[C]//Proceedings of the 7th Europe-Asia Pulsed Power Conference and High Power Particle Beams Conference. 2018.
- [18] Crawford M, Barraza J. Scorpius: the development of a new multi-pulse radiographic system[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Pulsed Power. 2017: 1-6.
- [19] Burris-Mog T J. Scorpius and the integrated test stand[R]. Los Alamos Report, LA-UR-20-22398, 2020.
- [20] Raboisson G, Eyl P, Roche M, et al. Asterix, a high intensity X-ray generator[C]//Proceedings of the 7th Pulsed Power Conference. 1989: 567-570.
- [21] Commisso R J, Young F C, Allen R J, et al. Overview of the 6-MV, rod-pinch experiment on Asterix[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Pulsed Power Conference. 2003: 479-482.
- [22] Young F C, Commisso R J, Allen R J, et al. Radiographic results for the rod-pinch diode scaled up to 6 MV[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Pulsed Power Conference. 2003: 979-982.
- [23] 马成刚, 李洪涛, 邓明海, 等. 1 MV X光机系统可靠性实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 025018. (Ma Chenggang, Li Hongtao, Deng Minghai, et al. Experimental research on reliability of 1 MV X-ray system for radiography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 025018)
- [24] Maenchen J, Cordova S, Gustwiller J, et al. Inductive voltage adder driven X-ray sources for hydrodynamic radiography[C]//Proceedings of the 12th IEEE International Pulsed Power Conference. 1999: 279-282.
- [25] Maenchen J, Cooperstein G, O'Malley J, et al. Advances in pulsed power-driven radiography systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(7): 1021-1042.
- [26] Oliver B V, Hahn K, Johnston M D, et al. Recent advances in radiographic X-ray source development at Sandia[C]//Proceedings of the 17th International Conference on High Power Particle Beams. 2008: 1-5.
- [27] 邱爱慈, 孙凤举, 杨海亮, 等. 紧凑型闪光照相强流脉冲电子束加速器的发展[R]. 2009年中国核学会学术年会, 2009. (Qiu Aici, Sun Fengju, Yang Hailing. Developments of compact pulsed-power high current accelerator for radiography[R]. 2009 Annual Academic Meeting of China Nuclear Society, 2009.)
- [28] Smith I, Corcoran P, Carboni V, et al. Induction voltage adder architectures and electrical characteristics[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Pulsed Power Conference. 2003: 371-378.

- [29] Smith I D. Induction voltage adders and the induction accelerator family[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2004, 7: 064801.
- [30] Smith J, Carlson R, Fulton R, et al. Cygnus dual beam radiography source[C]//Proceedings of 2005 IEEE Pulsed Power Conference. Monterey, California, USA, 2005: 334-337.
- [31] Smith I D, Bailey V L, Fockler J, et al. Design of a radiographic integrated test stand (RITS) based on a voltage adder, to drive a diode immersed in a high magnetic field[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(5): 1653-1659.
- [32] Thomas K, Beech P, Brown S, et al. Status of the AWE hydrus IVA fabrication[C]//Proceedings of 2011 IEEE Pulsed Power Conference. 2011: 1042-1047.
- [33] 孙凤举, 邱爱慈, 杨海亮, 等. 感应电压叠加器驱动阳极杆箍缩二极管型脉冲X射线源[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 936-940. (Sun Fengju, Qiu Aici, Yang Hailing, et al. Pulsed X-ray source based on inductive voltage adder and rod pinch diode for radiography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 936-940)
- [34] Wei Hao, Yin Jiahui, Zhang Pengfei, et al. Simulation, experiment, and performance of a 4 MV induction voltage adder machine for flash x-ray radiography[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 020402.
- [35] Xie Weiping, Xia Minghe, Guo Fan, et al. Design and performance of a pulsed power-driven X-ray source for flash radiography[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 110401.
- [36] Smith D L, Johnson D L, Boyes J D, et al. Proposed inductive voltage adder based accelerator concepts for the second axis of DARHT[C]//Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, 1997: 1647-1652.
- [37] Mazarakis M, Cuneo M, Hess M, et al. Multi-pulse electron diode development for flash radiography[C]//Proceedings of 2015 IEEE Pulsed Power Conference. 2015: 1-5.
- [38] 孙凤举, 邱爱慈, 魏浩, 等. 闪光灯相快放电直线型变压器脉冲源新进展[J]. *现代应用物理*, 2015, 6(4): 233-243. (Sun Fengju, Qiu Aici, Wei Hao, et al. Development of fast linear transformer drivers for radiography[J]. *Modern Applied Physics*, 2015, 6(4): 233-243)
- [39] Rose D V, Welch D R, Oliver B V, et al. Numerical analysis of a pulsed compact LTD system for electron beam-driven radiography[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(5): 1879-1887.
- [40] Leckbee J, Cordova S, Oliver B, et al. Linear transformer driver (LTD) research for radiographic applications[C]//Proceedings of 2011 IEEE Pulsed Power Conference. 2011: 614-618.
- [41] Leckbee J J, Maenchen J E, Johnson D L, et al. Design, simulation, and fault analysis of a 6.5-MV LTD for flash X-ray radiography[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(5): 1888-1899.
- [42] Leckbee J J, Oliver B V, Bruner N, et al. Design of a 7-MV linear transformer driver (LTD) for down-hole flash X-ray radiography[R]. Sandia Report, SAND2008-6142, 2008.
- [43] Toury M, Vermare C, Etchessahar B, et al. IDERIX: an 8 MV flash X-rays machine using a LTD design[C]//Proceedings of the 16th IEEE International Pulsed Power Conference. 2007: 599-602.
- [44] Toury M, Cartier F, Caron M, et al. Transfer and test of a 1 MV LTD generator at CEA[C]//Proceedings of 2013 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science. 2013: 599-602.
- [45] Maisonnay R, Ribière M, Toury M, et al. Investigating the performances of a 1 MV high pulsed power linear transformer driver: from beam dynamics to X radiation[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2016, 19: 120401.
- [46] 陈林, 周良骥, 蒋吉昊, 等. 基于方波LTD的3 MV闪光灯相驱动器设计[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 115001. (Chen Lin, Zhou Liangji, Jiang Jihao, et al. Design of 3 MV flash radiographic driver based on square pulse LTD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 115001)
- [47] Zou Wenkang, Chen Lin, Liu Dagang, et al. Investigation on high inductive helical supported magnetically insulated transmission line on a 10-stage linear transformer driver system[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2012, 15: 110401.
- [48] 陈林, 谢卫平, 邹文康, 等. 100 GW快脉冲直线型变压器功率源[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(3): 651-654. (Chen Lin, Xie Weiping, Zou Wenkang, et al. 100 GW fast linear transformer driver generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 651-654)
- [49] 魏浩, 孙凤举, 呼义翔, 等. 欠匹配型磁绝缘感应电压叠加器次级阻抗优化方法[J]. *物理学报*, 2017, 66: 208401. (Wei Hao, Sun Fengju, Hu Yixiang, et al. Method of optimizing secondary impedances for magnetically-insulated induction voltage adders with impedance under-matched loads[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66: 208401)
- [50] 马勋, 邓建军, 姜莘, 等. 流体动力学实验用闪光X光机研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 010201. (Ma Xun, Deng Jianjun, Jiang Ping, et al. Review of flash X-ray generator applied to hydrokinetical experiments[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 010201)
- [51] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用: (7)主要技术问题和未来发展趋势[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 010201. (Jiang Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (VII) Major challenges and future trends[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 010201)
- [52] 丛培天. 中国脉冲功率科技进展简述[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 025002. (Cong Peitian. Review of Chinese pulsed power science and technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 025002)