



·自由电子激光和新型光源·

闪光 X 射线照相光源的发展*

石金水

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 闪光 X 射线照相是利用加速器产生的短脉冲 X 射线对快速运动的致密客体进行透视照相的技术。概述了闪光 X 射线照相对 X 射线的性能要求;回顾了闪光 X 射线照相及其加速器的发展历程;分析了闪光 X 射线照相用加速器的发展方向。

关键词: 闪光 X 射线照相;脉冲功率;加速器;X 射线源

中图分类号: TL501; O572.21*1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220108

Development of flash X-ray radiography source

Shi Jinshui

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Flash X-ray radiography is a technique that uses short pulse X-rays generated by accelerators to perform fluoroscopic imaging of fast-moving dense objects. This paper summarizes the performance requirements for X-rays in flash X-ray radiography, then reviews the development of flash X-ray radiography and its accelerators, and finally analyzes the future research direction of accelerators for flash X-ray radiography.

Key words: flash X-ray radiography, pulse power, accelerator, X-ray source

闪光 X 射线照相是利用加速器产生的短脉冲 X 射线对快速运动的致密客体进行透视照相的技术。由于被透视客体处于快速运动状态,且等效厚度较厚,因此要求 X 射线具备短脉冲,且穿透能力强、照射量高,同时为获得好的图像分辨,期望光源的焦斑尺寸小,照相环境的散射背景低。自 1944 年美国原子武器研究 Manhattan(曼哈顿)工程使用一台电子感应加速器进行闪光照相起^[1],这一技术迄今已发展近八十年的历史。早期的闪光 X 射线照相用光源多使用当时面世的电子加速器进行改造,如曼哈顿工程使用的 15 MeV 电子感应加速器源自美国伊利诺斯大学,美国 LANL(洛斯阿拉莫斯)实验室 1960 年代开始使用的 PHERMEX 闪光照相装置^[2]是通过一台射频驻波直线电子加速器改进而来,这些加速器产生的 X 射线的穿透能力和成像的分辨能力均达不到期望的要求。1960 年代,英国 AWE(原子武器研究中心)的 J. C. Martin 及其研究小组发明了脉冲形成线后,直线感应电子加速器得到快速发展,使得闪光 X 射线照相的能力得到大幅提高,1982 年美国 LLNL(利弗莫尔)实验室研制的 FXR^[3]装置产生的脉冲 X 射线的穿透能力达到了在此之前三十多年从未达到的目标,同时分辨能力也得到大幅提升。受 FXR 装置研制成功的鼓舞,2000 年左右相继研制成功了 DARHT-I^[4], AIRIX^[5] 和 XX 一号^[6] 等大型闪光 X 射线照相装置,相较于 FXR,这些装置产生 X 射线的焦斑得到大幅缩小,使得精密照相成为可能;2010 年左右,美国 LANL 研制成功 DARHT-II^[7],中国也研制成功相对应的照相装置^[8],实现了同轴多幅照相能力;与此同时,基于 IVA 技术的一些紧凑型脉冲 X 光机也相继出现,如 Cygnus^[9], RITS^[10] 系列装置等。本文概述了闪光 X 射线照相对 X 射线的性能要求,回顾了闪光 X 射线照相及其加速器的发展历程,分析了闪光 X 射线照相用加速器的发展方向。

1 闪光 X 射线照相对 X 射线源的性能要求

1.1 闪光 X 射线照相系统的基本构成

如图 1 所示,闪光 X 射线照相系统主要由强流电子加速器、韧致辐射转换靶、防护容器和 X 光图像接收系统

* 收稿日期:2022-04-13; 修订日期:2022-05-19

基金项目:国家专项

联系方式:石金水, sjs8235@163.com。

等组成。其中,加速器产生合适电子能量的脉冲强流电子束,通过聚焦系统被聚焦成小焦斑打靶,从而得到具有强穿透、高照射量、小焦斑的脉冲 X 射线光源;因被诊断客体为快速运动的致密客体,其动力学过程将对加速器和图像接收系统产生破坏行为,需要防护容器对上下游系统进行隔离;具有高灵敏度、高分辨率、快响应的图像接收系统接收透过被诊断客体的 X 射线图像,并经后处理;加速器(光源)、被诊断客体、图像接收系统之间需要一个经优化的照相几何,如光源到被诊断客体之间的距离为 a ,光源到接收系统之间的距离为 b ,则 b 与 a 的比值 M 为照相系统放大比。

1.2 高 X 射线照射量

闪光 X 射线照相利用 X 射线的强穿透能力,采用吸收成像方法对所穿透客体进行成像。X 射线穿透客体时,其强度将遵从指数衰减规律,即

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

式中: I 为 X 射线穿过客体后的剩余照射量; I_0 为入射客体的照射量; μ 为材料的质能吸收系数; d 是被诊断客体的等效厚度。

从式(1)可知,对于一定厚度的被诊断客体,要获得有效的 X 射线图像,必须有足够高的初始 X 射线照射量和尽可能低的质能吸收系数。

加速器提供的电子束通过轫致辐射在正前方 1 m 处产生的 X 射线照射量可用 T. H. Martin 经验公式表示,即

$$I_0 = kZV^{2.8-3.0} \int I_b dt \quad (2)$$

式中: k 是系数; Z 是轫致辐射转换靶靶材的原子序数; V 是打靶电子的能量; I_b 是打靶电子束流强度,束流强度随时间 t 的积分为打靶束流的电荷量。

从式(2)可知,要获得高的 X 射线照射量,加速器提供的电子束必须具备高的电子能量和束流强度、宽的束流脉冲宽度,同时采用高 Z 材料制备的轫致辐射转换靶。

1.3 强穿透能力

从式(1)可知, X 射线能否穿透一定厚度的被诊断客体,起决于客体的质能吸收系数 μ ,材料不同 μ 值不同,对同一材料, X 射线能量不同, μ 值亦不相同。图 2 给出的是某一材料质能吸收系数随 X 射线能量的变化曲线,曲线存在一拐点(μ 的最小值),在拐点之前, X 射线的穿透能力随能量上升而快速上升,在拐点之后,穿透能力则随能量上升而缓慢下降。对重金属材料而言,这一拐点位于 4 MeV 左右。

如图 3 所示,加速器提供的电子束打靶产生的轫致辐射谱是一连续谱, X 射线最高能量即为电子能量,据经验,最可几光子能量约为电子能量的 1/5~1/3,特征谱光子份额占比很低。

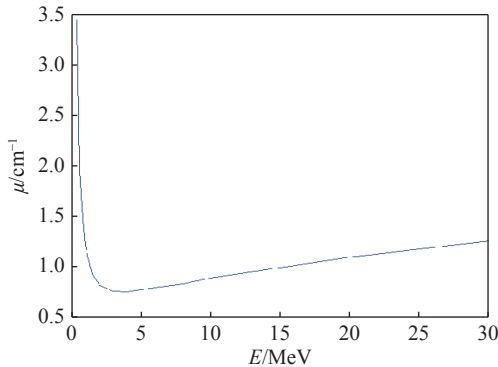


Fig. 2 Variation of mass energy absorption coefficient with X-ray energy
图 2 质能吸收系数随 X 射线能量的变化

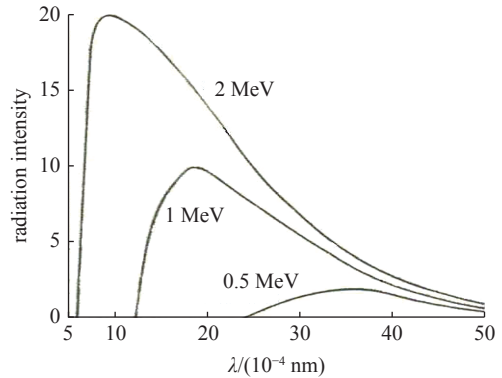


Fig. 3 Bremsstrahlung spectrum produced by electron beam shooting
图 3 电子束打靶产生的轫致辐射谱

根据式(2),提高打靶电子的能量,可以显著提高 X 射线的照射量。结合图 2 和图 3 不难看出,对 X 射线的穿透能力而言,打靶电子能量从低到高的变化则呈不同结果,一般地,当电子能量从低值到十几 MeV 的上升过程中,

打靶产生 X 射线的穿透能力将得到迅速提升,若进一步提高打靶电子能量, X 射线的穿透能力则缓慢下降。在具体的闪光照相光源设计中,有时为获得足够的照射量,提升打靶电子能量(当 X 射线的能量超过一定值后,穿透能力将下降),以弥补电子束流强度的不足。

1.4 短 X 射线脉冲

假定被诊断客体的运动速度为 v , 电子束脉冲的宽度为 t , 则运动引起的模糊量为

$$f = tvM \quad (3)$$

电子束脉冲的宽度越短, 客体运动引起的模糊量越小, 越有利于获得清晰的图像, 但由式(2)可知, 短的电子束脉冲不利于获得高的 X 射线照射量。因此, 如何选择电子束的脉冲宽度, 需要综合考虑。

1.5 X 射线光源斑点小

假定光源尺寸为 ϕ , 光源尺寸大小引起的图像模糊(几何模糊)可表示为

$$f = \phi(M - 1) \quad (4)$$

光源的尺寸与其引起的图像模糊量为线性关系, 光源的尺寸越小, 接收系统获得的图像越清晰。

1.6 光源引起的散射本底小

利用 X 射线的穿透能力对物体进行透视成像, X 射线在其行程上将与其周边物质相互作用, 产生光电效应(主要作用于原子内层紧束缚电子)、康普顿效应(主要作用于原子外层电子)和电子对效应(光子能量需大于 2 倍电子静止能量)。如图 4 所示, 这些效应发生的几率与光子能量和材料种类相关(σ_{ph} , σ_c 和 σ_p 分别为三种效应的作用截面), 当这些次生效应产生的光电子投射到接收系统上时, 将对正常图像带来严重干扰。当次生效应单一时, 对图像的后处理相对较为便利。

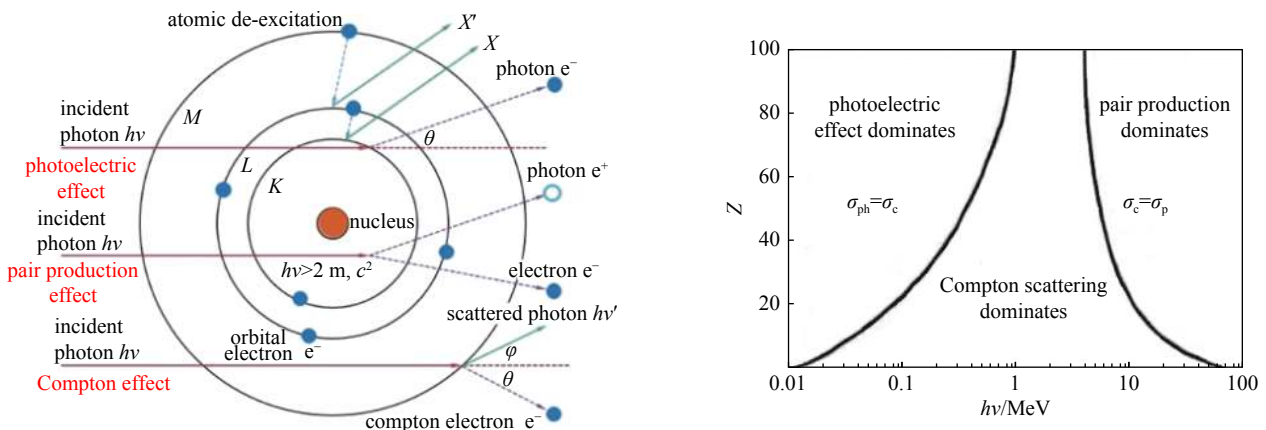


Fig. 4 Action mode and relative importance between X/ γ ray and matter

图 4 X/ γ 射线与物质的三种主要作用方式及相对重要性关系

2 闪光 X 射线照相的发展历程

闪光 X 射线照相始于 1944 年二战期间美国研制原子武器的曼哈顿工程。因原子武器研究过程中迫切需要了解高能炸药和裂变材料内爆压缩的动力学过程, 研究人员利用伊利诺斯大学原有的一台 15 MeV 电子感应加速器打靶产生短脉冲 X 射线进行透视照相, 尽管射线的穿透能力有限, 利用该加速器还是观察到了: 内爆压缩过程中弹芯的外部边缘状态; 高能炸药驱动下材料的动态响应; 高能炸药爆轰波传播的细节。

要提高射线的穿透能力, 需要提升加速器输出电子束的束流强度和电子能量。美国 LANL 于 1963 年研制成功 PHERMEX 闪光 X 射线机, 这是一台射频驻波直线电子加速器, 投入运行时, 输出电子束流强度 70 A, 电子能量 20~30 MeV, 束流脉冲宽度 200 ns, 经打靶, 1 m 处 X 射线照射量达到 9 R, 可开展一定缩比尺度的武器模型闪光照相实验, 该机投入闪光实验, 无论是射线的穿透能力, 还是成像的分辨能力, 均显著好于 15 MeV 的电子感应加速器。该加速器后经多次性能升级, 20 世纪 90 年代末期, 束流强度达到 kA 量级, 焦斑直径 3 mm, 1 m 处 X 射线照射量达到 400 R, 并且可以双脉冲运行。

20 世纪 60 年代初期, 英国原子武器研究中心的马丁及其研究小组发明了脉冲形成线, 极大地促进了脉冲功率技术的发展和运用, 一大批基于脉冲功率技术的闪光 X 射线照相装置应运而生, 如 AWE 的 SWARF^[1](3 MV, 50 kA,

30 ns)、法国 CEA(原子能委员会)的 GREC^[12](9 MV, 200 kA, 75 ns)、中国工程物理研究院(以下简称中物院)的 X-II 型闪光机和闪光-I^[13]等。这些大功率装置,使加速器输出的束流强度得到大幅度提高,但因无与之相匹配的加速结构,电子能量难以得到有效提升。

感应加速腔和 IVA(感应电压叠加技术)的发明,使加速器输出强束流的同时电子能量也得到进一步提升成为可能。前者通过感应加速腔和直线加速器的完美结合构成直线感应电子加速器,使二极管发射的电子束通过感应加速腔得以逐级加速;后者利用感应腔将脉冲压缩和电压倍增功能相对分离,每个感应腔的初级脉冲被控制在绝缘相对容易的电压下,通过次级中央导体 N 个感应腔串联输出近似 N 倍的电压并直接驱动二极管,使二极管的工作电压得以大幅提升。这两种电子能量提升方式形成了两种不同的产生闪光 X 射线光源的技术途径。

1982 年,美国 LLNL 实验室研制成功大型直线感应电子加速器 FXR, 电子束流强度 3 kA, 电子能量 17~20 MeV, 束流脉冲宽度 60 ns, 经打靶, 1 m 处 X 射线照射量达到 500 R, 焦斑直径 6 mm, 这是一标志性的研究成果。在此期间,中物院也确立了发展基于直线感应电子加速器闪光 X 射线光源的技术路线^[14],并于 1993 年研制成功 10 MeV LIA^[15](10 MeV, 2.3 kA, 60 ns, 4~6 mm 焦斑直径),该加速器 1995 年升级为 12 MeV LIA^[16]。

在 FXR 研制取得成功后,美国 LANL 实验室 1980 年代提出垂直照相概念 DARHT(双轴流体动力学实验设施),其主要目的:(1)减小闪光机的 X 射线焦斑,以提高闪光照相的分辨精度;(2)两台加速器的出光轴在同一平面内呈互成 90°布局,以实现准三维照相;(3)同一出光轴按一定时间序列输出多个(3 个及以上)X 光脉冲,以获取一次流体动力学实验过程(被诊断客体)的速度和加速度信息。DARHT 的第一轴 DARHT-I (17~20 MeV, 2.1 kA, 60 ns, 1.5 mm 焦斑直径)直线感应电子加速器于 1999 年 11 月研制成功,其第二轴 DARHT-II (17 MeV, 1.7 kA, 1.6 μ s, 2.0 mm 焦斑直径,采用踢束技术形成四脉冲 X 光输出,相邻两脉冲间隔 500 ns)直线感应电子加速器于 2009 年底研制成功。与此同时,中物院在 1990 年代掌握了直线感应加速器研制技术之后,研发了中国的双轴照相装置^[6,8]。

法国 CEA 在 LANL 实验室的技术支持下,于 1999 年底研制成功 AIRIX(17~20 MeV, 2.1 kA, 1.5 mm 焦斑直径)直线感应电子加速器,这是一台几乎与 DARHT-I 性能完全一样的闪光机。

受益于 DARHT 和中国双轴照相加速器研制成功的鼓舞,近几年来,一些多脉冲、多轴闪光 X 射线照相设施相继建设。如美国 NTS(内华达试验场)正在建设的 Scorpius 设施(图 5)^[17],以增强其次临界试验的诊断能力,拟建设的装置为双轴,计划分两个阶段建设完成,第一轴四脉冲,2025 年达到建设目标,性能与 DARHT-II 的唯一区别在于 Scorpius 的四脉冲相邻两脉冲的时间间隔是可调的(加速器直接产生四脉冲电子束),第二轴原计划采用基于 IVA 技术路线的 Merlin 装置(单幅照相)。2010 年,英法签署联合共建双轴照相 Epure 装置(图 6),第一轴采用法国 CEA 的 AIRIX 装置,并进行双脉冲改造^[18],第二轴采用英国 AWE 的 Merlin 装置^[19],于 2022 年建设完成。俄罗斯全俄技术物理研究院(VNIITF)计划发展 LIU-20 装置^[20],该加速器是一台多脉冲的直线感应电子加速器,第一步产生 3 个脉冲,脉冲宽度分别为 60, 60, 380 ns, 电子能量 20 MeV, 束流强度 2 kA, 焦斑直径 1 mm, 第二步拟将 380 ns 分成 7 个不同视角的射线束,这样整个装置可以提供 9 个不同视角的射线束对客体进行透视照相,整个项目计划 2027 年建设完成。

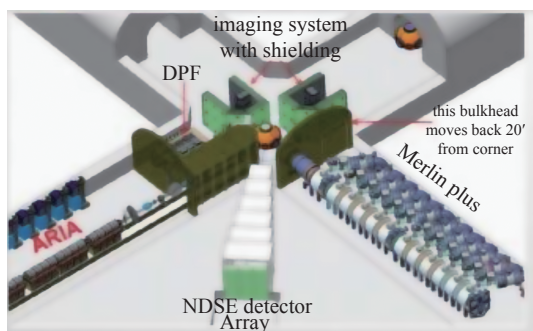


Fig. 5 Scorpius flash radiographic accelerator(NTS)

图 5 NTS 拟建的 Scorpius 设施布局

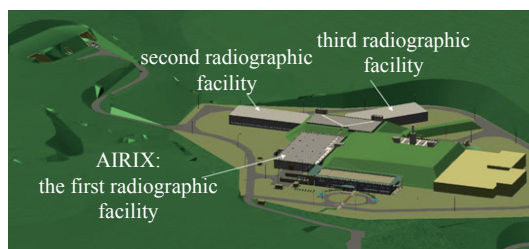


Fig. 6 Epure accelerator

图 6 英法联合建设的 Epure 设施布局

基于 IVA 技术路线的闪光机具有紧凑性,便于移动,但该技术发明后,约 100 kA 强流电子束的聚焦成为难题。1990 年代末到 2000 年代初期,基于 IVA 技术路线的闪光机发展了自磁聚焦、杆箍缩、场浸式、等离子体等强流电子束聚焦技术,使 X 射线焦斑直径缩小至约 1.0 mm。

2005 年, 美国 NTS 装备了基于 IVA 技术的 Cygnus 双轴 (60° 夹角布局)(每台性能参数: 2.2 MeV, 60 kA, 60 ns, 1.0 mm 焦斑直径) 照相装置^[9](图 7)。2005 年, 美国海军实验室 (NRL) 初步运行 Mercury(6 MeV, 360 kA, 50 ns) 装置^[21]。2006 年, 美国 SNL 研制成功基于 IVA 技术的 RITS-6^[22] 大型闪光 X 射线照相机, 该机电子能量 10 MeV, 束流强度 125 kA, 脉冲宽度 75 ns, 焦斑直径~2 mm。2014 年, 英国 AWE 初步运行 Merlin(7.5 MeV, 200 kA, 60 ns, 1~2 mm 焦斑直径) 装置^[19](图 8)。我国西北核技术研究所于 2008 年和 2019 年研制成功了 2 MV 的“剑光一号”(图 9) 和 4 MV 的“剑光二号”装置^[23]; 2020 年, 中物院研制成功“鹰眼一号”(图 10) 装置^[24]。受绝缘能力制约, 基于 IVA 技术的闪光机的穿透能力离理想要求还有一定距离。此外, 由于数十 kA 到数百 kA 强束流打靶和采用的聚焦方式局限, 基于 IVA 技术的闪光机难以实现同轴多幅照相。

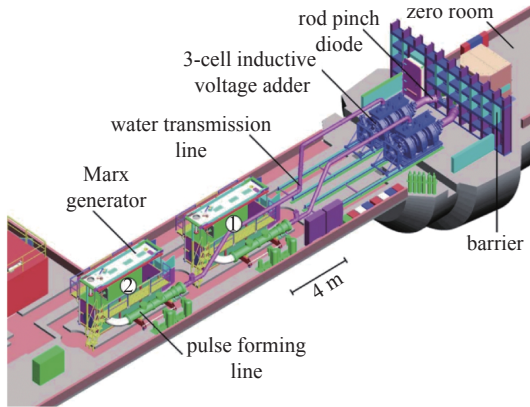


Fig. 7 Dual beam radiography source Cygnus
图 7 Cygnus 双轴照相装置



Fig. 8 Merlin accelerator (AWE)
图 8 英国 AWE 的 Merlin 装置

前苏联全俄实验物理研究院 (VNIIEF) 在闪光 X 射线照相技术路线的选择上走了一条完全不同的技术路线, 他们采用的是无铁芯的电子感应加速器 Betatron 产生脉冲 X 光源。通过不断提高加速器的束流强度来不断提高加速器的使用性能, 其标志性装置是 1980 年代研制成功的 BIM234.3000 装置^[25](70 MeV, 800 A, 100~500 ns), 可三脉冲运行, 焦斑为 2 mm×4 mm 的矩形。从投入使用的结果看, 采用电子感应加速器 X 射线光源形成照相系统的穿透能力和分辨能力远不及直线感应加速器 X 射线光源。



Fig. 9 Jianguang-I accelerator
图 9 剑光一号装置

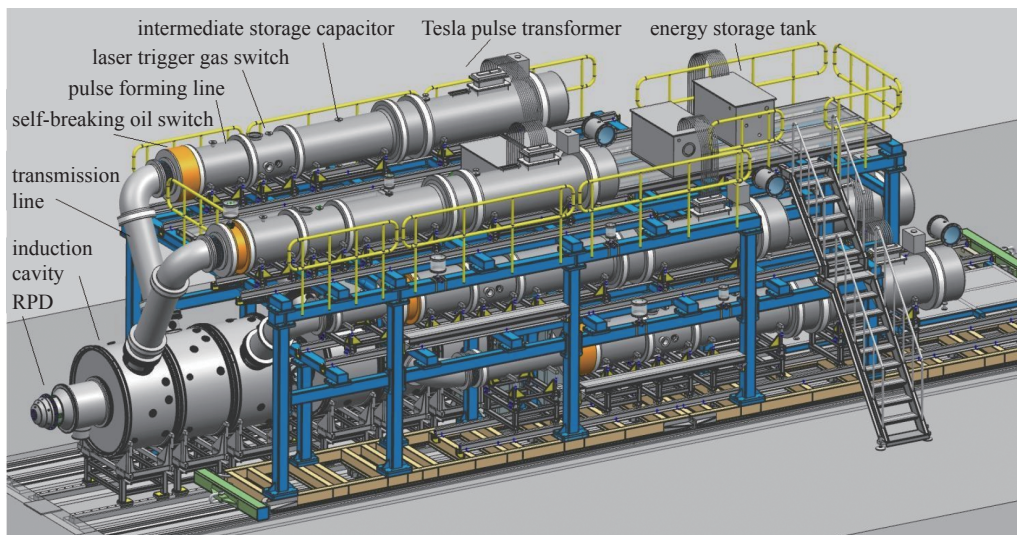


Fig. 10 Hawkeye-I accelerator
图 10 鹰眼一号装置

3 闪光 X 射线照相用光源的发展方向

闪光 X 射线照相光源的发展,大致经历了以下三个发展阶段:

(1) 1944 年到 1970 年代(发展初期阶段)。这一阶段发展的产生 X 射线的加速器为电子感应加速器或经性能改进的射频加速器,电子束的电子能量可以达到预期要求,但束流强度则相去甚远, X 射线的照射量远达不到预期要求; 1960 年代初期,脉冲形成线的发明极大地促进了脉冲功率技术的发展,但与之相匹配的强流加速结构尚未出现,基于脉冲功率技术的强流加速器都以二极管结构形式呈现,电子能量达到 MeV 量级都极为困难。此阶段发展的闪光 X 射线照相光源远不具备观察完整流体动力学试验的能力。

(2) 1970 年代末到 1990 年代初(能力提升阶段)。1960 年代脉冲形成线的发明和感应加速腔的技术验证在这一阶段得到完美结合, FXR 研制成功是其标志性成果,它既解决了早期强流加速器电子能量难以提升的问题,低 Q 值加速结构又解决了电子感应加速器和射频加速器加速电子束流强度不高的问题, FXR 具备了观察完整流体动力学试验的能力。IVA 技术的发明也使二极管型的电子加速器输出的电子能量得到大幅提高。

(3) 1990 年代末至今(精密照相、多幅照相和准三维照相阶段)。这一阶段大幅投入研发新一代的闪光机,主要目的是减小 X 射线的焦斑,同时实现同轴多幅精密照相和双轴准三维照相。

从上可知,大型闪光 X 射线光源将朝着精密照相和多幅照相的方向发展。精密照相需要发展小焦斑的 X 射线光源,小焦斑的获得将取决于品质好的强流发射阴极、精密的强流束束流传输线和尽可能方波输出的脉冲功率系统;能否实现多幅照相将取决于能否发展高猝发率(MHz 量级)的脉冲功率技术和相应的感应加速结构。

近十几年来,射流穿甲、航空航天发动机的叶片动力学过程诊断、电力系统输变电系统开关动态检测、轨道交通轨道动态检测等,对闪光 X 射线照相带来了新的需求,满足这一需求,需要发展车载、精密诊断的闪光机,这就需要发展紧凑型的固态重复频率脉冲功率技术、高梯度的强流加速技术等。

4 结束语

闪光 X 射线照相用光源是应核武器研究与发展而逐步发展起来的,对于这样一个特定的研究客体,要求光源具有强穿透、高照射量、短脉冲、小焦斑、低散射背景,而这些性能参数之间又是相互制约的,如提高加速器输出电子束的电子能量对提高照射量有利,但电子能量提高到一定程度后一方面会使质能吸收系数降低,同时会带来强的散射环境,又如提高电子束流强度对提高照射量有利,但又使小焦斑的获得带来更多困难。早期的闪光照相均是基于当时有的电子感应加速器和射频加速器作为闪光照相光源,通过提高电子能量和增加束流脉冲宽度来缓解照射量远远不够的问题。1960 年代发明了脉冲形成线和 IVA 技术,脉冲功率技术的发展与感应加速腔完美结合,使束流强度和电子能量同时提升成为可能。在解决了穿透和照射量问题之后,则致力于如何缩小光源的焦斑,期望实现精密照相,由于被诊断客体是高速运动的动态力学过程,本质上没有多幅照相能力,也难以实现精密照相。经过近八十年的发展,一台高性能的闪光机,焦斑已缩小至 1 mm 左右,照相过程中光源尺寸引起的几何模糊量已与运动模糊量相当,闪光照相技术发展这一阶段,本质上缩小焦斑尺寸对成像精度提升已无实质意义,过去不太关注的散射问题成为成像精度提升的主要障碍,要降低散射意味着要降低电子能量,这是突出的现实矛盾。

近二十年来,闪光 X 射线照相的作用已外溢到国防其他领域和国民经济领域,由于这些场合的使用,被诊断客体的等效厚度远不及前述的流体动力学过程等效厚度,运动速度也低得多,这就给闪光机相互制约的参数设计带来一定的调整空间,对于这样的诊断背景设计,可能更强调的是紧凑、可车载,以及运维便利。

参考文献:

- [1] Peach K, Ekdahl C. Particle beam radiography[J]. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2013, 6: 117-142.
- [2] Venable D, et al. Phermex Program. LA-3241, 1967.
- [3] Kulke B, Innes T G, Kihara R, et al. Initial performance parameters on FXR[C]//15th Power Modulator Symposium. Baltimore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1982.
- [4] Burns M J, Carlsten B E, Kwan T J T, et al. DAHRT accelerators update and plans for initial operation[C]//Proceedings of 1999 Particle Accelerator Conference. New York: IEEE, 1999: 617-621.
- [5] Merle E, Boivin M, Mouillet M, et al. Status of the AIRIX accelerator[C]//Proceedings of 1999 Particle Accelerator Conference. New York: IEEE, 1999: 3260-3262.
- [6] 丁伯南, 邓建军, 王华岑, 等. “神龙一号”直线感应电子加速器[J]. *高能物理与核物理*, 2005, 29(6): 604-610. (Ding Bonan, Deng Jianjun, Wang Huacen, et al. Dragon-I linear induction electron accelerator[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, 29(6): 604-610)

- [7] Scarpetti R D, Nath S, Barraza J, et al. Status of the DARHT 2nd axis accelerator at the Los Alamos National Laboratory[C]//Proceedings of 2007 IEEE Particle Accelerator Conference. 2007: 831-835.
- [8] 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)
- [9] Smith J, Carlson R, Fulton R, et al. Cygnus dual beam radiography source[C]//Proceedings of the 15th 2005 IEEE Pulsed Power Conference. 2005: 334-337.
- [10] Portillo S, Lutz S S, Mix L P, et al. Time-resolved spot size measurements from various radiographic diodes on the RITS-3 accelerator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(5): 1908-1913.
- [11] Gilbert J F. High energy flash radiography[J]. *Phys Bulletin*, 1997, 28(9): 425.
- [12] Champney D, Spence P. Pulsed electron accelerator for radiography and irradiation[C]//Proceedings of the Flash Radiography Symposium. Hoston, 1977.
- [13] 刘锡三. 强流粒子束及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. (Liu Xisan. Intense particle beams and its applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007)
- [14] 陶祖聪, 张寿云, 刘锡三. CAEP闪光X射线机的发展[J]. *强激光与粒子束*, 1991, 3(3): 269-285. (Tao Zucong, Zhang Shouyun, Liu Xisan. Development of flash X-Ray machines at CAEP[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1991, 3(3): 269-285)
- [15] 张寿云. 10 MeV感应直线加速器研制[C]//中国高功率粒子束十年文集. 1995. (Zhang Shouyun. Development of 10 MeV induction linac[C]//Ten Years of High Power Particle Beams in China. 1995)
- [16] 石金水, 丁伯南, 邓建军, 等. 12MeV直线感应电子加速器[J]. *强激光与粒子束*, 1997, 9(4): 599-604. (Shi Jinshui, Ding Bonan, Deng Jianjun, et al. 12 MeV linear induction electron accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(4): 599-604)
- [17] Crawford M, Barraza J. Scorpius: the development of a new multi-pulse radiographic system[C]//2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC). 2017: 1-6.
- [18] Vermare C. Investigations on dual-pulse technologies for future upgrade of CEA flash X-rays LIA[C]//IEEE Pulsed Power Conference. 2017.
- [19] Thomas K, Beech P, Clough S, et al. The MERLIN induction voltage adder radiographic accelerator[C]//2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC). 2017: 1-8.
- [20] Akimov A, Akhmetov A, Bak P, et al. Single-triple pulse power supply for 2kA, 20MeV linear induction accelerator[C]//IEEE 21st International Conference on Pulsed Power. 2017.
- [21] Allen R J, Berry J W, Comisso R J, et al. Initialization and operation of mercury, a 6-MV MIVA[C]//Proceedings of the 15th IEEE International Pulsed Power Conference. 2005: 318-321.
- [22] Oliver B V, Maenchen J E. Advanced X-ray radiography on the RITS-6 accelerator[C]//Proceedings of the 16th High Power Particle Beams Conference. 2006.
- [23] 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)
- [24] 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.
- [25] Kuropatkin Y P, Mironenko V D, Suvorov V N, et al. Uncored betatron BIM-M a source of bremsstrahlung for flash radiography[C]//Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference. 1997: 1669-1673.