



·脉冲功率技术·

中能 X 光机触发系统*

何 安^{1,2}, 郭 帆^{1,2}, 康军军^{1,2}, 夏明鹤^{1,2}, 丁 瑜¹, 周良骥^{1,2},
耿力东^{1,2}, 卫 兵^{1,2}, 袁建强^{1,2}, 谢卫平^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 中物院脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了中能 X 光机装置触发系统研制和相关实验结果, 触发系统包括主机 6 个支路激光开关的触发和主机放电的触发。其中 6 个支路的触发由 6 台 YAG 四倍频激光器完成, 主机放电电触发系统由 1 台 YAG 四倍频激光器来触发。实验结果表明: 每台激光器出光时间抖动 σ 小于等于 0.3 ns, 激光开关导通延迟时间约 25 ns, 抖动 σ 小于等于 1.2 ns, 电触发系统中激光与触发器输出电压之间的时间抖动 σ 为 0.5 ns, 匹配负载上电压大于 120 kV, 前沿约 28 ns, 脉宽 150 ns。中能 X 光机在杆箍缩二极管负载上获得最大输出为 4.2 MV/100 kA 的电脉冲, 电压脉冲半高宽约 55 ns, 输出的 X 射线时间抖动 σ 为 3.4 ns。实验结果表明触发系统具备对 6 个支路精确调节和控制的能力, 确保了中能 X 光机装置的高可靠性。

关键词: 激光触发开关; 触发; 时间抖动; YAG 激光器

中图分类号: O56; TL503

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220170

Trigger system of the middle energy X-ray device

He An^{1,2}, Guo Fan^{1,2}, Kang Junjun^{1,2}, Xia Minghe^{1,2}, Ding Yu¹, Zhou Liangji^{1,2},
Geng Lidong^{1,2}, Wei Bing^{1,2}, Yuan Jianqiang^{1,2}, Xie Weiping^{1,2}

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of Pulsed Power, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper introduces the trigger system of the middle energy X-ray device and experimental results. The trigger system controls triggering of laser-switches in six modules and the electric trigger part. Each switch is triggered by one laser. Seven lasers could be adjusted stand-alone. The test results show that the time jitter of laser was less than 0.3 ns and the time jitter of the laser-switch was less than 1.2 ns. For electric trigger system, the voltage of the matching load was 120 kV, the rising time was about 28 ns, the pulse width (FWHM) was 150 ns, and the time jitter was less than 0.5 ns. The middle energy X-ray device could produce a maximum output voltage and current of about 4.2 MV /100 kA and the pulse width (FWHM) was 150 ns. The time jitter of X-ray was less than 3.4 ns in the middle energy X-ray device. The experimental results show that the trigger system was able to adjust the six modules accurately, which improves reliability of the middle energy X-ray device.

Key words: laser trigger switch, trigger, time jitter, YAG laser

在流体动力学实验研究中, 为了获取材料被爆炸驱动压缩后的内表面位置和密度分布情况, 闪光 X 射线辐射照相技术已经发展成为一种重要的诊断技术被广泛应用^[1-3]。采用脉冲功率装置来驱动电子束二极管是一种获得闪光 X 射线的最佳方法, 具有成本低和结构紧凑等优点, 由于单路脉冲功率装置难以获得更高的脉冲功率输出, 通常采用多路汇聚的方式来建立高功率脉冲装置。目前国内外大型脉冲功率装置分为采用多路初级功率源并联汇聚获得大电流输出和采用多路初级功率源串联叠加获得高电压输出两种技术方案。典型的多路并联型脉冲功率驱动器为美国圣地亚国家实验室 (SNL) 研制成功的 ZR 装置^[4] 和中国工程物理研究院流体物理研究所研制成功的 10 MA 装置^[5], 多路串联型装置的代表为 SNL 研制成功的 RITS^[6] 和 Cygnus^[7-8]、英国原子武器实验室正在研制的

* 收稿日期: 2022-05-24; 修订日期: 2022-08-30
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51907181)
联系方式: 何 安, hean66@tom.com。

Merlin 加速器^[9]、法国的 Asterix^[10], 以及西北核技术研究院研制成功的剑光二号装置^[11-12]。

采用多路并联或串联方式能够有效降低初级功率源的工作电流、电压等级, 有利于装置结构紧凑和高可靠性运行, 但为了实现电流汇聚或电压叠加, 均要求多路初级功率源的工作时序能够被精确控制。国内外在进行上述大型脉冲功率装置研制时, 在高电压绝缘气体开关选取中由于激光触发比电触发方式具有很多优势, 最大的优点是高压的光隔离, 此外, 还具有抖动时间低、开关自触发可能性减少、开关寿命长和能量损失少等优点, 大多采用激光触发气体开关实现时序可控要求。例如, ZR 装置采用 36 台 YAG 四倍频激光器输出 36 路激光^[13], 每路激光触发 1 路初级功率源对应的激光触发气体开关, 通过调节每路激光开关的导通时间, 实现了对 36 路大功率脉冲放电时序的精确调制, 获得了 26 MA 的负载电流并实现了对电流脉冲波形的精确调节。中国工程物理研究院流体物理研究所在研制 10 MA 装置时, 采用 1 台 YAG 激光器分光成 2 路激光后触发 2 路初级功率源对应的激光触发气体开关, 成功实现了用 12 台 YAG 激光器对 24 路激光开关的放电时间精确触发控制^[14-16], 激光触发系统使 24 路大功率模块既能实现精确同步放电又能实现多路模块的分时放电, 能够实现对负载电流脉冲波形的调节^[17]。中国工程物理研究院流体物理研究所在 40 路可扩展高压脉冲触发器研制^[18]中采用 1 台 YAG 激光器分光成 4 路激光后触发 4 路激光开关, 激光触发技术已成功应用到基于 LTD 的 Z 箍缩驱动器单路验证装置^[19-20]。

近几年, 中国工程物理研究院流体物理研究所成功研制了一台多路串联型脉冲功率驱动器——中能 X 光机^[21-23], 已成功应用于 X 射线辐射照相。基于中能 X 光机可开展流体动力学、微喷、混合等爆轰实验研究, 中能 X 光机采用了 7 台激光器实现 X 射线出光时刻的精准控制。第一台激光器输出激光控制前级触发系统的工作, 其余 6 台激光器输出的激光则分别控制 6 个激光触发气体开关的工作。本文介绍了中能 X 光机设计采用的技术路线和激光触发系统的各项关键技术, 包括光路设计、激光器控制与触发技术, 同时给出了激光触发系统和中能 X 光机的实验结果。

1 中能 X 光机技术路线

中能 X 光机采用“脉冲功率源+IVA+RPD 二极管”的技术方案, 装置主机总体结构为 6 个完全相同的支路并行, 组成结构如图 1 所示。每个支路包括初级储能器、脉冲变压器、中间储能器、激光触发气体开关、脉冲形成线、油介质自击穿开关和脉冲传输线。其中初级储能器由 2 个 $4 \mu\text{F}$ 电容器和 1 个三电极气体开关组成, 为脉冲变压器提供初始能源。整个驱动器包含 6 路初级功率源, 每路初级功率源由 Tesla 变压器提供初始储能, Tesla 变压器被前级触发系统输出脉冲触发后向中储电容器充电。激光开关采用 1 级触发隙+7 级过压隙的多级结构, 激光触发气体开关在合适的时间导通后中储电容器向脉冲形成线充电, 然后通过自击穿油开关, 能量被传递到水介质传输线, 水介质传输线与感应腔相连接, 6 路初级功率源产生的快前沿高压脉冲被感应腔叠加后驱动杆箍缩二极管负载并产生 X 射线。

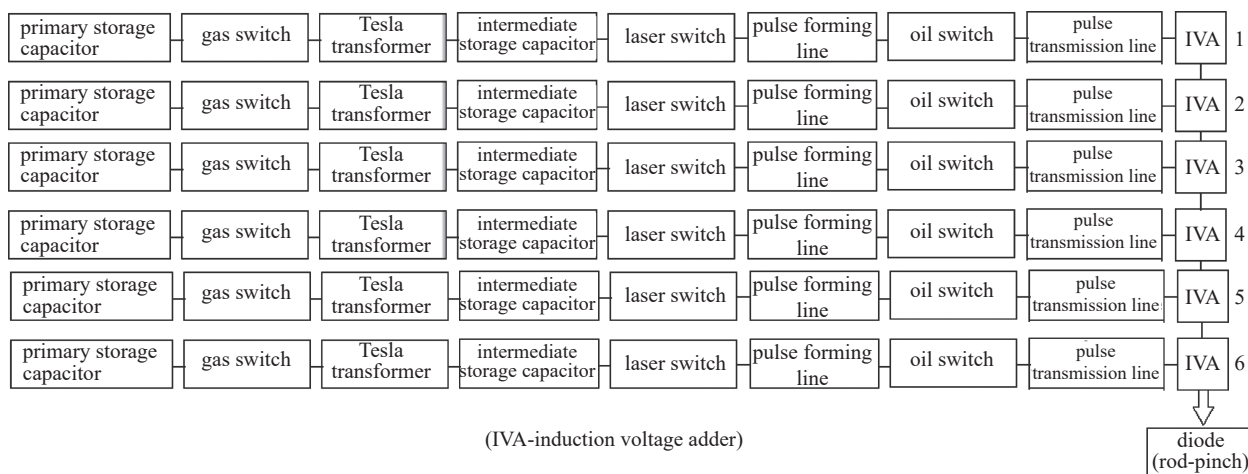


Fig. 1 Schematic diagram of the middle energy X-ray machine

图 1 中能 X 光机装置技术路线示意图

在中能 X 光机中激光触发开关是装置中唯一活性可控元件, 通过触发系统完成对 6 个支路中的 6 个激光触发开关的精确触发, 能够实现对 6 个支路的独立控制, 确保 6 个支路的电压按照设计要求的时间精确馈入到 6 级感应腔中, 6 个支路的电压馈入到感应腔的时间将直接影响到最终电压的大小, 二极管负载上电压的设计指标为 4.0 MV,

为了达到这一技术指标中能 X 光机的触发系统必须具备高精度和高可靠性。

目前,我们对多路大功率模块精确同步控制技术研究中主要关键技术(高性能工程化 YAG 四倍频激光器、高精度延时同步机、强电磁场环境中 YAG 激光器电磁兼容性、光路系统的绝缘性和抗震性等)的掌握为中能 X 光机中 6 路模块的精确触发和控制提供了技术支持。

2 光路设计

光路设计包括激光触发系统和电触发系统两个部分,其中激光触发系统为了实现对每路激光开关导通时间的独立调节和控制,采用 1 台 YAG 四倍频脉冲激光器触发 1 个激光开关的触发方式,6 路激光开关的触发由 6 台 YAG 四倍频激光器完成,6 台激光器的出光时间通过 3 台多路精密延时同步机来控制,6 路激光开关的导通时间能够实现独立控制和精确调节。

电触发系统的核心要求是高可靠性,要求在满足输出技术指标的前提下系统构成简单和开关器件可靠性高。基于以上要求,采用电容器直接放电电路,通过优化回路结构,使得回路电感最小化,获得快前沿脉冲输出。采用激光触发气体开关,由 1 台 YAG 四倍频脉冲激光器来触发,通过优化设计,可以使其工作在极低的欠压比下,以获得极高的工作可靠性。

为了便于感应腔的维护和维修,根据总体需要,设计加工特殊的安装平台将 6 台激光器分 3 层进行安装。光路设计中通过缩短激光光程和减少光学元件数量等措施来提高光路的稳定性,将激光器安装在入射窗口附近,1 台激光器触发 1 个激光开关的光路图如图 2 所示,激光传输总光程不超过 2 m,激光器输出的 266 nm 激光通过紫外全反射镜进入光窗,然后被一块直角棱镜进行全反射 90° 转向后由透镜聚焦到激光开关主间隙中,激光束将开关中的 SF₆ 气体电离形成电离通道使开关快速导通。为了避免开关中 SF₆ 气体放电后对光学元件表面膜层的污染,内部光学元件(包括:入射窗、直角棱镜和聚焦透镜)全部采用无膜 CaF₂ 材料制作。由于 266 nm 工作激光为紫外不可见光,在光路调节时,采用与工作激光同轴的 532 nm 半导体连续激光来进行准直。由于实验大厅粉尘较大以及主机油系统和水系统经常换水换油,使激光器处于恶劣的工作环境中,为了保护激光器和光学元器件,激光器和外部光路管道采用全密封设计,能够起到良好的防尘、防水和防油作用。

内部光路管道和激光开关安装俯视图如图 3 所示,内部光路管道需要跨越开关的内外筒,通过绝缘设计和模拟计算,采用聚乙烯绝缘管道从开关外筒穿越到开关内筒。内部光路连接采用双层结构设计,里面的一层通过刚性连接将聚焦透镜和反射棱镜固定在开关背面上,外面的一层起密封和固定作用,通过金属波纹管与径向的光路管道进行连接。为了减小电感尽量缩短开关外筒的轴向长度,采用短焦距透镜对激光束进行聚焦。

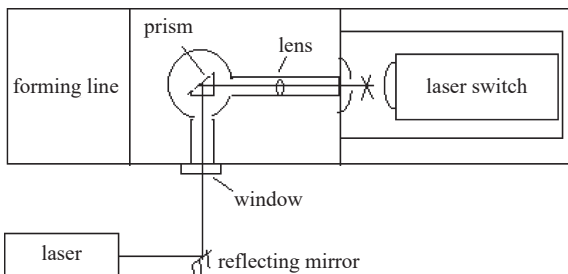


Fig. 2 Path of the laser trigger switch

图 2 激光触发开关光路图

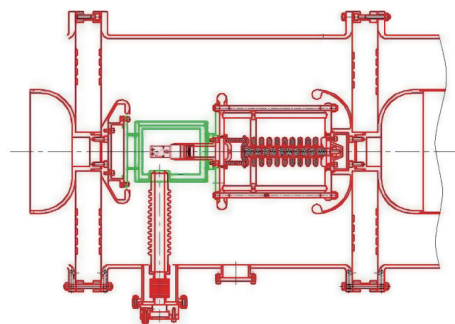


Fig. 3 Installation graph of laser tube and laser-switch

图 3 光路管道和激光开关安装俯视图

电触发单元结构示意图如图 4 所示,由 2 个 20 nF/100 kV 电容器、一个激光触发气体开关和 6 根 75 Ω/250 kV 电缆组成,电容器和开关被安装在变压器油箱中。6 根电缆输出 6 路高压电脉冲通过匹配电阻负载触发 6 路初级储能器中的 6 个三电极气体开关,实现对 6 路初级储能器放电控制。电触发单元和 0 号激光器实物图如图 5 所示。

激光触发开关被一台 YAG 四倍频激光器触发,采用充足的激光能量来触发,可以让开关工作在较低的欠压比下,大大降低开关自击穿概率,提高开关可靠性。激光束经过一块 45° 全反射镜通过入射窗在聚乙烯绝缘管道中传输,然后由透镜聚焦到开关的电极中将绝缘气体电离形成电离通道使气体开关快速导通。

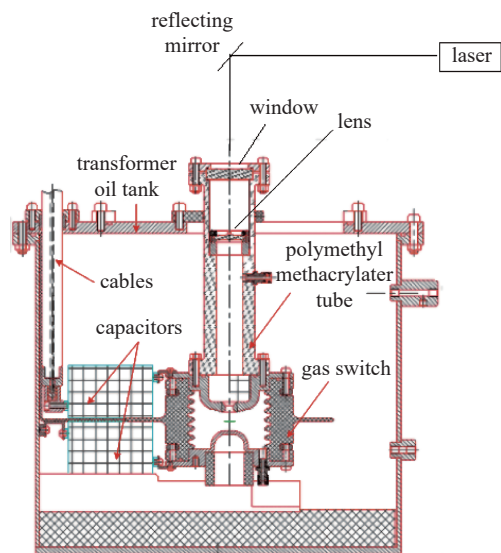


Fig. 4 Layout of the electricity-trigger unit

图4 电触发单元结构示意图



Fig. 5 Picture of the trigger unit and No.0-laser

图5 电触发单元和0号激光器实物图

3 激光器的控制和触发

为了实现自主可控,激光器立足于国内研制,中国科学院福建物质结构研究所与中国工程物理研究院流体物理研究所共同研制了用于工程需要的YAG四倍频纳秒脉冲激光器。前期单路样机研制的实验结果表明激光触发气体开关稳定触发时要求进入开关中的激光能量不低于35 mJ。在本系统中内部光路传输过程中总共采用3块无膜光学元件,每块光学元件对266 nm激光的能量损失约10%,内部光路系统共计对266 nm激光能量损失约30%,加上外部光学元件和激光在绝缘气体中传输损耗,整个光路系统的激光传输能量损失约40%,因此,要求YAG激光器266 nm激光输出能量应不低于60 mJ。考虑到激光器使用一段时间后由于倍频效率的下降,激光能量通常会下降,为了尽量减少激光器的调节时间和维修周期,采用充裕能量的激光器很有必要。YAG激光器主要技术指标:266 nm输出能量约100 mJ,脉冲半高宽6~8 ns,出光时间抖动 $\sigma \leq 0.5$ ns,发散角 ≤ 0.5 mrad。

由于6台激光器分别被安装在主机的3层不同位置中,操作人员需要爬上爬下才能完成激光器操作,并且主机与控制室相距较远,为了减少实验前激光器的开机时间和实验后的关机时间,设计了一套远程控制系统来控制7台激光器的操作(包括图5中的0号激光器)。该远程控制系统不仅大大提高了工作效率,还能够对激光器和冷却水箱的工作参数和运行状态进行实时监控(主要包括:冷却水箱温度、Q开关晶体温度、二倍频晶体温度、四倍频晶体温度、氙灯电压和Q开关电压等)。由于实验前激光器需要长时间处于待机状态,激光器工作参数一旦出现异常就能够及时发现并进行故障排除,确保激光器在实验前处于正常工作状态,进一步提高触发系统的可靠性。远程控制系统分两部分:数据接收端在大厅主机旁边,另一部分数据发送端在远程控制室。为了避免主机放电时产生的电磁干扰,采用光纤进行数据传输,数据的接收模块被放置在屏蔽机柜中。

4 触发控制时序

YAG激光器为单次外触发工作模式:首先触发氙灯使其放电,当氙灯放电390 μ s后达到峰值附近时给出一个触发信号将Q开关打开,约50 ns后激光器输出激光脉冲。中能X光机触发控制时序如图6所示,总控信号触发0号延时同步机,其输出的2路信号分别触发1号和2号延时同步机。1号延时同步机输出7路信号用于触发7台激光器的氙灯,2号延时同步机输出7路信号用于触发7台激光器的Q开关。考虑到脉冲变压器对中间储能器充电时间约4 μ s,激光触发系统需要比电触发系统延后约4 μ s才能在中间储能器电压达到峰值时让激光开关导通,6路激光开关的导通时间需要通过精确调节6台激光器出光时间来进行匹配。

自主研制的3台精密延时同步机外触发时抖动小于0.2 ns,通道之间的抖动小于0.2 ns,3台延时同步机工作情况如下:

1)总控系统触发0号延时同步机,其0延时输出触发1号延时同步机,1号延时同步机输出7路信号用于触发7台激光器的氙灯;

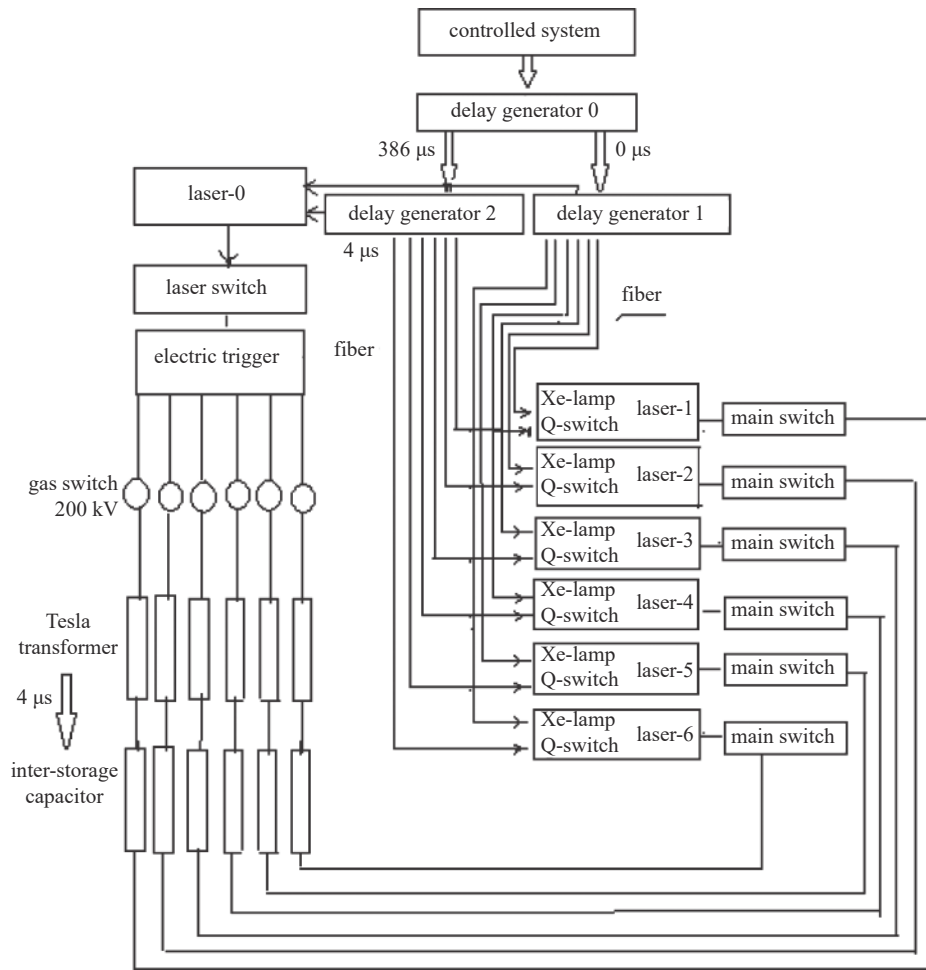


Fig. 6 Block diagram of triggering sequence for the middle energy X-ray device

图 6 中能 X 光机触发控制时序图

2) 0 号延时同步机经过 $386 \mu\text{s}$ 延时后的输出信号用于触发 2 号延时同步机;

3) 2 号延时同步机的 0 延时输出信号触发 0 号激光器的 Q 开关, 0 号激光器输出的激光脉冲用于触发电触发系统中的激光开关, 电触发系统经过 t (子系统固有时延) 时间后输出 6 路高压电脉冲触发初级储能器中的 6 只 200 kV 三电极气体开关, 使脉冲变压器放电, 然后对中间储能器充电, 充电时间约 $4 \mu\text{s}$;

4) 2 号延时同步机的 6 路延时约 $4 \mu\text{s}$ 输出信号分别触发 6 台激光器的 Q 开关, 每一路输出信号在 $50 \sim 10000.0 \text{ ns}$ 内精确可调, 调节精度 1.0 ns 。6 台激光器输出的 6 束激光脉冲分别用于触发 6 个支路中的激光开关。

在采用外触发方式时 Q 开关 YAG 激光器出光时间的抖动(激光脉冲相对于外触发信号)主要取决于外触发信号前沿的陡度, 为了减小激光器的抖动, 用于 Q 开关的触发信号上升前沿要求小于 3.0 ns 。由于激光器的工作环境是 MV 级脉冲高电压, 激光器的触发信号容易被电磁干扰, 为了提高激光器在复杂电磁环境中的电磁兼容性, 自主研制了用于触发激光器氙灯和 Q 开关的光电转换盒。其中氙灯光电转换盒输出: 电压 10 V , 上升前沿小于 10 ns , 宽度 $100 \mu\text{s}$ 。Q 开关光电转换盒输出: 电压 22 V , 上升前沿小于 3.0 ns , 宽度 $10 \mu\text{s}$ 。氙灯和 Q 开关光电转换盒的触发采用光信号触发, 由多模光纤进行传输。

5 实验结果

激光器主要技术指标静态测试: 对 7 台 YAG 四倍频 100 mJ 激光器进行的 50 次测试结果表明每台激光器的时间抖动 $\sigma \leq 0.3 \text{ ns}$, 主要技术指标全部达到设计要求。

激光器时间抖动实验运行测试: 激光器同步输出的 532 nm 激光用光纤传输到多路光电转换器后通过示波器来记录激光脉冲信号, 对每一台激光器的出光时间进行实时监测。通过设置 2 号延时同步机 6 个延时通道的时间, 可以对 6 台激光器的出光时间进行精确控制, 精密延时同步机的调节精度为 1.0 ns 。对 50 发次主机放电时激光器出光时间进行统计, 获得 2 号延时同步机设置时间与激光器出光时间的抖动 $\sigma \leq 0.7 \text{ ns}$ 。

激光触发气体开关延迟时间和抖动测试: 主机充电电压 ± 55 kV, 激光开关工作欠压比 75%, 266 nm 激光能量为 70 mJ, 在需要的工作气体(SF_6+N_2)混合比例下, 激光开关的延迟时间约 25 ns, 抖动 $\sigma \leq 1.2$ ns。

电触发系统实验测试: 根据开关自击穿数据进行激光触发实验, 266 nm 激光能量 60 mJ, 开关气体为零级干燥空气, 气压为 0.38 MPa, 充电 ± 75 kV, 工作欠压比 50%, 获得触发器输出电压波形如图 7 所示, 匹配负载上电压大于 120 kV, 前沿约 28 ns(10%~90%), 脉宽(FWHM)150 ns。激光与触发器输出电压之间的时间抖动 $\sigma=0.5$ ns, 400 余发次实验无自击穿现象。

在杆箍缩二极管负载上获得最大输出为 4.2 MV/100 kA 的高压电脉冲, 电压脉冲宽度(FWHM)为 55 ns。50 发次连续实验 X 射线出光时间(相对于 2 号延时同步机 0 延时输出)统计结果如图 8 所示, X 射线出光时间平均值为 4352 ns, 抖动 $\sigma=3.4$ ns。

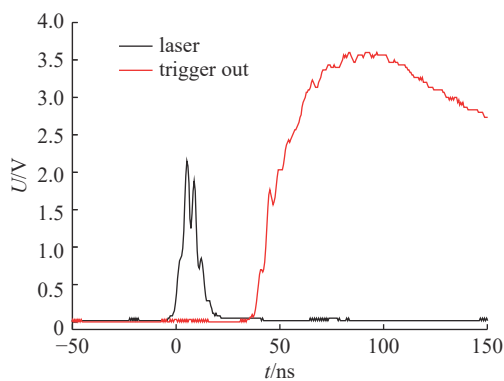


Fig. 7 Laser pulse and voltage waveform of trigger output

图 7 激光脉冲和触发器电压波形

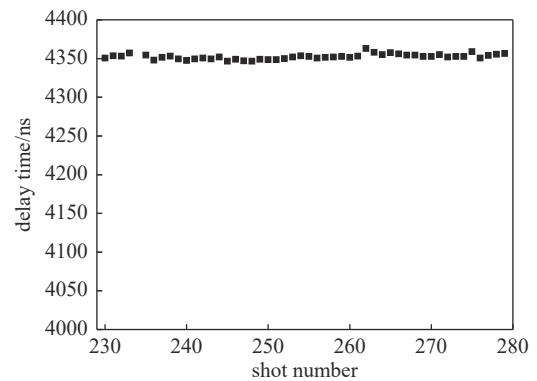


Fig. 8 Statistical delay time of the middle energy X-ray device for 50 consecutive shots

图 8 中能 X 光机连续 50 发次实验输出 X 射线时间统计

6 结论

激光触发技术能够很好地控制整个驱动器中 6 路高电压脉冲的产生和形成过程, 最终使中能 X 光机在杆箍缩二极管负载上获得最大输出为 4.2 MV/100 kA 的高压电脉冲, 电压脉冲半高宽(FWHM)为 55 ns。通过采用精密延时同步机、低抖动激光器和激光触发开关, 使主机输出 X 射线时间抖动很小, 整机 X 射线输出时刻的抖动仅 3.4 ns, 确保了中能 X 光机按照预定的时刻产生 X 射线, 完全满足流体动力学、微喷、混合等爆轰实验对 X 光机出光时刻精确控制的要求。同时实验结果表明采用激光触发的气体开关由于采用较低工作欠压比, 使其自击穿概率大幅降低, 开关抖动依然较小, 气体开关能够稳定可靠工作, 十分有利于提升脉冲功率驱动器整机的可靠性。中能 X 光机整机 400 余发次的实验已经验证了激光触发系统具有良好的电磁兼容性和可靠性, 在中能 X 光机放电产生的强电磁干扰环境中, 激光触发系统能够稳定工作, 触发系统实现了零故障。稳定可靠的触发系统为中能 X 光机高可靠运行发挥了重要作用, 很好地满足了相关物理实验的要求。

致谢 光电转换盒和精密延时同步机由流体物理研究所张志强、康龙飞、代刚和欧阳艳晶等人研制, 作者在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Cunningham G S, Morris C. The development of flash radiography[J]. Los Alamos Science, 2003, 28: 76-91.
- [3] 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 (Cat. No. 01CH37251). Las Vegas: IEEE, 2001.
- [4] Weinbrecht, E. A. Bloomquist, D. D. McDaniel, D. H, et al. Update of the Z refurbishment project (ZR) at Sandia National Laboratories [C]//16th IEEE International Pulsed Power Conference. 2007: 975-978.
- [5] Deng Jianjun, Xie Weiping, Feng Shuping, et al. From concept to reality—A review to the primary test stand and its preliminary application in high energy density physics[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2016, 1(1): 48-58.
- [6] Smith I D, Bailey V L, Fockler J 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.
- [7] Weidenheimer D, Corcoran P, Altes R, et al. Design of a driver for the Cygnus X-ray source[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 (Cat. No. 01CH37251). Las Vegas: IEEE, 2001.
- [8] Ormond E C, Parrales M F, Garcia M R, et al. Cygnus system timing[C]//2019 IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS). 2019.
- [9] 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). Brighton: IEEE, 2017.
- [10] Raboisson G, Eyl P, Roche M, et al. Asterix, a high intensity X-ray generator[C]//7th Pulsed Power Conference. Monterey: IEEE, 1989.
- [11] Wei Hao, Yin Jiahui, Zhang Pengfei, et al. Development of a 4-MV, 80-kA-induction voltage adder for flash X-ray radiography[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(11): 5030-5036.
- [12] 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.
- [13] Bliss D E, Clark W T, LeChien K R, et al. A laser trigger system for ZR[C]//2007 IEEE 34th International Conference on Plasma Science (ICOPS). 2007: 638.
- [14] He An, Li Fengping, Deng Jianjun, et al. Primary investigation into the laser triggering multi-gap multi-channel gas switch in a single test module facility[J]. *Plasma Science and Technology*, 2006, 8(5): 602-606.
- [15] 何安, 任济, 丰树平, 等. Z箍缩初级实验平台的激光触发系统[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(4): 839-842. (He An, Ren Ji, Feng Shuping, et al. Laser triggering system for Z-pinch primary test stand[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 839-842)
- [16] 何安, 丁瑜, 康军军, 等. 聚龙一号装置24路模块精确控制技术[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 035003. (He An, Ding Yu, Kang Junjun, et al. Accurate control technology of 24 modules in PTS[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 035003)
- [17] 夏明鹤, 计策, 王玉娟, 等. PTS装置工作模式及波形调节[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2768-2772. (Xia Minghe, Ji Ce, Wang Yujuan, et al. Operation models and waveform shaping of primary test stand[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2768-2772)
- [18] 周良骥, 何安, 丁瑜, 等. 40路可扩展高压脉冲触发器[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 095006. (Zhou Liangji, He An, Ding Yu, et al. Extendable high voltage trigger unit with 40 output cables[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 095006)
- [19] Chen Lin, Zou Wenkang, Jiang Jihao, et al. First results from a 760-GW linear transformer driver module for Z-pinch research[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2021, 6: 045901.
- [20] 陈林, 田青, 周良骥, 等. 基于LTD的Z箍缩驱动器单路验证装置研制进展[C]//第七届全国脉冲功率会议暨第八届全国特种电源学术交流会议论文集. 重庆, 2021. (Chen Lin, Tian Qing, Zhou Liangji, et al. The study advance of single module device base on LTD Z-Pinch[C]//7th National Pulsed Power Conference and 8th National Special Type Power Supply Conference. Chongqing, 2021)
- [21] 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.
- [22] Zhao Yue, Xie Weiping, Jiang Jihao, et al. Replacement of Marx generator by Tesla transformer for pulsed power system reliability improvement[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(1): 574-580.
- [23] Geng Lidong, He Yang, Yuan Jianqiang, et al. Study on eccentricity effects of the rod-pinch diode radiography source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 023304.