

1 MV X 光机系统可靠性实验研究

马成刚, 李洪涛, 邓明海, 曹宁翔, 莫腾富, 王 晓, 张志强

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

摘 要: 参考“天蝎-I”原型机, 重新设计了 1 MV X 光机系统, 根据技术指标可靠性要求, 对 Marx 发生器、场畸变开关、脉冲传输线、脉冲形成线及二极管等进行了可靠性设计。针对新设计的 1 MV X 光机系统, 对其可靠性进行了实验研究, 包含 1 MV X 光机系统的时间抖动和出光剂量稳定性等, 根据调试实验结果制定 1 MV X 光机系统操作规程, 按照规程对 1 MV X 光机系统进行了可靠性考核, 连续工作 81 发次, 最大时间抖动为 146 ns, 剂量为 0.75~1.40 R @1 m, 满足总体技术指标要求, 可靠度达到 98%。

关键词: Marx 发生器; 场畸变开关; 可靠性; 1 MV X 光机; 闪光照相

中图分类号: TL65; TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190378

Experimental research on reliability of 1 MV X-ray system for radiography

Ma Chenggang, Li Hongtao, Deng Minghai, Cao Ningxiang, Mo Tengfu, Wang Xiao, Zhang Zhiqiang

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Referring to the Scorpio-1 prototype, the 1 MV X-ray system for radiography was redesigned. According to the reliability requirements, it has a reliability design of the system elements, including Marx generator, field distortion switch, pulse forming line, pulse transmission line and rod-pinch diode. Moreover, the experimental tests on the reliability of the system, including time jitter and stability of X-ray, were performed. According to the experimental results, the system operates stable and continuous outputs more than 81 shots. The following technical parameters of the system were achieved: time jitter less than 146 ns, X-ray dose 0.75–1.40 R at 1 m right in front of the system and reliability up to 98%.

Key words: Marx generator; field distortion switch; reliability; 1 MV X-ray system; radiography

自从 1895 年德国科学家伦琴发现 X 射线以来, X 射线照相诊断技术就得到了蓬勃的发展。为满足流体动力学实验对闪光 X 射线照相的需求, 中国工程物理研究院流体物理研究所相继研制了 150 kV, 300 kV, 450 kV, 1 MV 等中低能闪光照相系统^[1-3], 其中 2013 年研制成功的“天蝎-I”1 MV X 光机系统包含三套互成一定角度布置的 X 射线照相系统, 能够拍摄同一客体不同时刻的三幅图像, 形成了准动态闪光照相能力。国内其他单位如西北核技术研究所也研制了输出电压 2 MV 的 RPD 型 X 射线源^[4]。但随着流体动力学实验对闪光照相需求的提高, 对装置可靠性方面提出了更高的要求。美国双轴闪光照相装置 Cygnus 可靠性达到 98%, 达到了较高水平^[5-6]。目前“天蝎-I”1 MV X 射线照相系统的可靠性还存在一定的问题, 因此研究人员在“天蝎-I”原型机的基础上重新设计了一套 1 MV X 光机系统, 对其工作可靠性进行了实验研究。本文简要介绍了相关可靠性设计工作, 通过实验考核了 1 MV X 光机系统的工作可靠性。

1 系统组成及工作原理

1 MV X 光机系统主要包括充电控制系统、主机系统和触发控制系统(延时同步机、高压脉冲发生器)、时间间隔测量系统(PIN 探头、示波器)以及辅助系统等组成。其中 1 MV X 光机主机系统如图 1 所示, 主要由 Marx 发生器、油介质连接线、水介质脉冲形成线、自击穿油开关、水介质脉冲传输线、rod-pinch 二极管及参数诊断系统等组成。

1 MV X 光机系统的基本工作原理为: 首先由 Marx 发生器通过油介质连接线将水介质脉冲形成线充电至 1 MV 左右, 然后油开关击穿, 输出电压脉冲经水介质脉冲传输线到真空二极管上, 二极管中阴极场致发射产生的电子

收稿日期: 2019-09-23; 修订日期: 2019-10-30

作者简介: 马成刚(1977—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为脉冲功率技术及应用研究; macg2@21cn.com。

通信作者: 邓明海(1984—), 男, 助研, 主要研究方向为脉冲功率技术及应用研究; dmh@caep.cn。

束流在阴阳极间加速后轰击阳极靶,通过韧致辐射产生 X 射线。

1 MV X 光机系统主机实物图如图 2 所示。

1 MV X 光机的脉冲形成线和脉冲传输线都为单同轴线,这种设计结构简单、可靠,采用最佳阻抗变换原则^[7-8],合理设计两段形成线阻抗,可以在二极管负载上得到超过 1 MV 的高压脉冲信号。

1 MV X 光机中 Marx 发生器、水介质脉冲形成线、水介质脉冲传输线、油介质连接线、主开关和 rod-pinch 二极管的主要设计参数如表 1 所示。

2 可靠性分析及相关措施

2.1 可靠性分析

从图 1 和表 1 中可以看出,1 MV X 光机的油介质连接线、脉冲形成线和传输线通过合理设计保证其可靠性,一般不会出现绝缘问题,影响整体可靠性的主要为 Marx 发生器、主开关和二极管。一是 Marx 发生器能否正常工作,不存在触发不动作、自击穿、误触发及绝缘问题;二是主开关工作可靠,不存在提前导通或滞后导通,且不存在绝缘击穿;三是二极管正常出光,剂量达到要求,并且真空区隔板不出现沿面闪络或绝缘击穿问题。

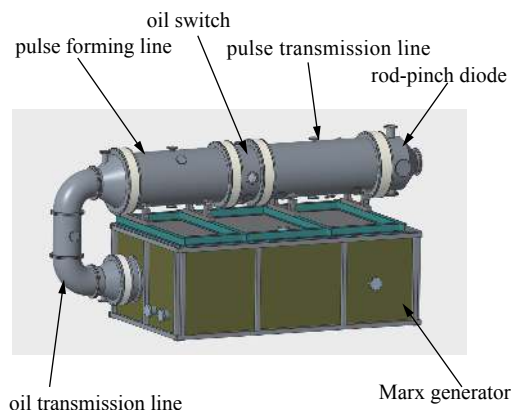


Fig. 1 Schematic illustration of the 1 MV X-ray system
图 1 1 MV X 光机主机系统示意图



Fig. 2 Photo of the 1 MV X-ray system
图 2 1 MV X 光机主机系统实物图

表 1 设计参数表

Table 1 Design parameters

	geometrical parameters	electrical parameters
Marx generator	dimensions: ~2 970 mm × 1 690 mm × 1 000 mm; switch gap: 23 mm ± 0.2 mm	9 stage; capacitor: 100 kV/0.4 μF; charge voltage: ± 58 kV; number of capacitor: 18; $k \approx 0.6$
pulse forming line	inner diameter of the outer conductor: 614 mm; outer diameter of the inner conductor: 292 mm; $L \approx 1$ m	equivalent capacitor: 6 nF; impedance: 5 Ω; $k \approx 0.6$
oil switch	switch gap ≈ 26 mm	/
pulse transmission line	inner diameter of the outer conductor: 614 mm; outer diameter of the inner conductor: 76 mm; $L \approx 1.34$ m	equivalent capacitor: 2.9 nF; impedance: 14 Ω; $k \approx 0.6$
rod-pinch diode	diameter of the graphite cathode hole: 12 mm; thickness: 3 mm; diameter of the tungsten anode rod: 1.5 mm; outer dimension ≈ 11 mm	design impedance: 40 Ω
oil transmission line	inner diameter of the outer conductor: 320 mm; outer diameter of the inner conductor: 102 mm; $L \approx 2$ m	impedance: 45 Ω; $k \approx 0.6$

Cygnus 装置的可靠性分为两个方面:可靠性和重复性^[6],总体可靠度达 98%。可靠性指系统能够可靠地将电脉冲产生并传输到二极管,重复性指在可靠工作的前提下,产生的 X 射线能够对客体进行闪光照相,可由输出剂量稳定性反映。

根据可靠性实验的成败型实验模型^[9],当采用 80% 的置信度时,要达到 98% 的可靠度置信下限,至少要进行 80 发次的实验无失误。当采用 90% 的置信度时,要达到 98% 的可靠度置信下限,至少要进行 114 发次的实验无失误。

参考 Cygnus 装置并根据 80%~90% 置信度下实验最小发次, 提出了 1 MV X 光机系统的可靠性综合指标, 并给出了 1 MV X 光机可靠性指标: 系统能够在规定时间范围内可靠工作, 出光抖动极值不超过 200 ns, 输出剂量不小于 0.60 rad@1 m, 最大输出剂量不小于 1.00 rad@1 m, 焦斑直径不超过 1.5 mm, 总体可靠度不小于 98%。

2.2 可靠性措施

根据前文的可靠性分析, 在 1 MV X 光机系统的硬件设计、操作规程上都采取了措施, 以保证系统的可靠稳定运行, 具体可靠性措施如表 2 所示。

表 2 可靠性措施表

Table 2 Measurements of the reliability

\	failure mode	action
hardware design	oil transmission line,pulse transforming line and pulse transmission line electric breakdown	conservative electrical stress design, $k \approx 0.6$
	Marx generation electrical breakdown	conservative Marx generation electrical stress design
	Marx generation trigger reliability	pulse transformer trigger mode,output voltage up to double capacitor charge voltage,rise time less than 70 ns
	diode insulator and structure coherence	robust electrode design and vacuum system design,assistant system
procedural design	inspector before test	specific parameters of oil,water,vacuum and diode;special check table
	operation in test	special operation order and time
	operation after test	specific test recorder and analysis,find hidden failure

3 可靠性考核

3.1 关键部件的可靠性考核

根据前面制定的可靠性措施, 在设计和操作上都采取措施保证系统的可靠性。对“天蝎-I”1 MV X 射线照相系统进行改进时, 对 Marx 发生器开关和二极管真空室绝缘隔板进行了改进, 因此把这两部分作为整个系统的关键部件进行可靠性考核。

Marx 发生器开关的可靠性直接影响了整个系统的工作可靠性, 另外由于把原有开关的绝缘气体由 N_2 和 SF_6 混合气体改为干燥空气并适当加大开关间隙^[10], 降低开关的工作电压系数, 因此专门制定了考核办法对其工作稳定性进行了考核。

Marx 发生器开关经过老炼后, 在 1 MV X 光机上对其进行了性能测试, 共放电测试了 1 050 次, 开关导通时延数据以 10 次放电测试为一组, 每组分别选取最大值和最小值进行了统计, 共统计了 210 个数据, 如图 3 所示。开关导通时延的最大值为 268.2 ns, 最小值为 242.6 ns, 算术平均值为 252.9 ns, 抖动(绝对值)为 25.6 ns, 与 1 MV X 光机中原使用的开关性能基本相同, 1 050 次放电测试中 Marx 开关的导通时延分散性没有明显的变化, 说明 Marx 发生器开关经过 1 000 多次放电后导通时延性能未出现明显的下降。

实验次数累计达到 50 次, 在同样条件下进行一次开关自击穿实验, 共进行了 21 次开关自击穿实验, 统计结果见图 4, 最大值为 91.4 kV, 最小值为 86.6 kV, 平均值约为 88.9 kV, 最大偏差不超过 3%, 可见 1 050 次放电测试中 Marx 发生器开关的自击穿电压没有明显的变化, 说明 Marx 发生器开关经过 1 000 多次放电后绝缘性能未出现明

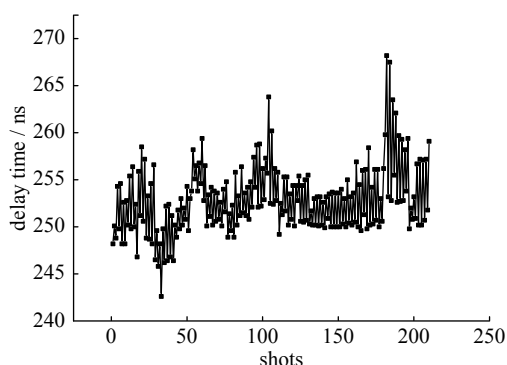


Fig. 3 Experimental results of switch jitter

图 3 开关导通时延统计图

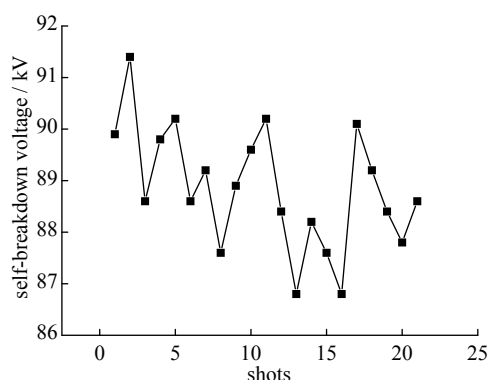


Fig. 4 Experimental results of switch self-breakdown voltage

图 4 开关自击穿电压统计图

显的下降。

实际使用中, Marx 发生器开关的工作次数远达不到 1 000 次(目前工作约 400 次, 年度出光约 200 次, 短期内出光次数不超过 1 000 次), Marx 发生器开关仍在其稳定工作范围内, 可保证其稳定可靠工作。

“天蝎-I”1 MV X 射线照相系统的真空室绝缘隔板曾发生绝缘击穿及沿面闪络, 为避免类似问题再次发生, 对真空室绝缘隔板进行了改进, 增大沿面绝缘距离和隔板厚度, 因此对真空室绝缘隔板的可靠性进行了考核。通过实验, 每隔 10 发对绝缘隔板表面进行清洁处理, 经过 400 多发次的实验未出现绝缘隔板沿面击穿现象, 但是在改进之前绝缘隔板常出现绝缘隔板沿面闪络, 位于绝缘隔板的中下部, 如图 5 所示。

根据图 5 分析, 沿面闪络主要是在工作多次后二极管粉尘污染绝缘隔板表面导致沿面绝缘强度降低所致。虽然设计了屏蔽罩阻挡爆炸粉尘或颗粒直接轰击绝缘隔板, 但仍然无法阻挡爆炸粉尘在二极管区域的沉积, 这也是沿面闪络多发生在绝缘隔板中下部的原因。实验发现, 工作 13 次后拆开二极管区域, 大多发现绝缘隔板有沿面闪络痕迹, 但是输出剂量并没有明显降低, 通过清洁绝缘隔板表面, 按照 13 发次间隔进行, 每块绝缘隔板工作 39 发次后输出剂量才稍有降低, 因此为保证绝缘隔板的工作可靠性, 制定真空室绝缘隔板的操作规程: 新绝缘隔板工作 10 次进行表面清洁, 工作 20 次更换新的绝缘隔板。

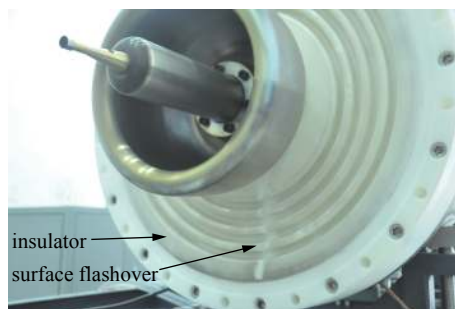


Fig. 5 Photo of the flashover on insulator
图 5 真空室绝缘隔板沿面闪络图片

3.2 系统整体考核

按照操作规程对 1 MV X 光机系统工作可靠性进行了整体考核, 总计进行 81 发次实验, 不同发次的出光延时时间分布如图 6 所示。可以看出, 总计 81 发次, 最大出光延时时间为 2.470 μs , 最小出光延时时间为 2.324 μs , 出光延时最大抖动为 146 ns。

1 MV X 光机出光点正前方 1 m 处的输出剂量分布情况如图 7 所示。可以看出, 出光点正前方 1 m 处的剂量一般不小于 1.00 R, 最低输出剂量为 0.75 R@1 m, 最高输出剂量为 1.40 R@1 m。

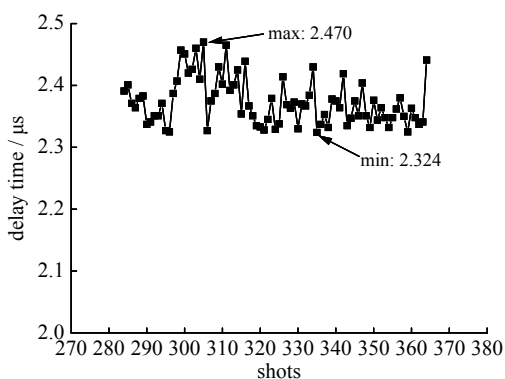


Fig. 6 Time jitter of the 1 MV X-ray system
图 6 系统出光延时时间分布图

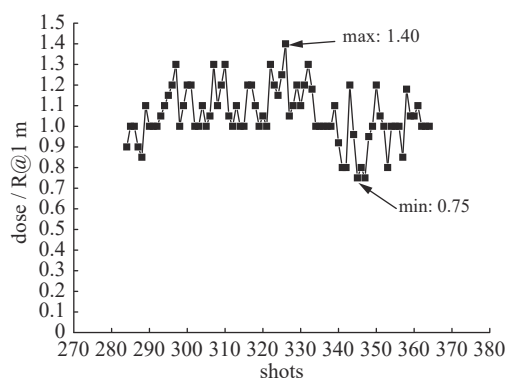


Fig. 7 Dose at 1 m right in front of the 1 MV X-ray system
图 7 系统输出剂量分布图

在这 81 发次的可靠性考核中, 1 MV X 光机无自激、不动作和误触发现象, 系统工作稳定可靠。在本次可靠性实验考核之前, 研究人员对 1 MV X 光机系统的可靠性进行了内部考核, 总计工作 125 发次, 最大时间抖动为 161 ns, 满足前文的可靠性指标要求, 125 发次全部工作正常。另外又进行了 35 发次的照相实验, 全部工作正常。这样 1 MV X 光机目前已稳定工作 241 发次, 表 3 所示为 1 MV X 光机系统与 Cygnus 装置 2007 年工作可靠性数据对比^[6]。

表 3 1 MV X 光机系统与 Cygnus 工作情况对比表

Table 3 Performance contrast of the 1 MV X-ray system and Cygnus systems

	working shots	failure shots
Cygnus1	164	2
Cygnus2	171	4
1 MV X-ray system	241	0

4 结 论

通过从硬件设计和操作规程上加强 1 MV X 光机系统的可靠性,对关键部件进行可靠性考核,1 MV X 光机系统按照规程考核 81 发次,最大时间抖动 146 ns,全部可靠工作。目前 1 MV X 光机已稳定工作 241 发次,最大时间抖动为 161 ns,剂量为 0.75~1.40 rad@1 m,全部发次都稳定可靠,可靠度达到 98%。目前 1 MV X 光机输出剂量还不是很稳定,最大偏差超过 40%,另外真空室绝缘隔板工作次数较少,建议在下一步工作中提高系统输出剂量稳定性并提高真空室绝缘隔板工作寿命。

参考文献:

- [1] 吴红光,曹科峰,梁川,等. 150 kV脉冲X光机[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 941-944. (Wu Hongguang, Cao Kefeng, Liang Chuan, et al. 150 kV pulsed X-ray system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 941-944)
- [2] 吴红光,王晓,李玺钦,等. 300 kV高压脉冲发生器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 715-718. (Wu Hongguang, Wang Xiao, Li Xiqin, et al. 300 kV high-voltage pulse generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 715-718)
- [3] 吴红光,马成刚,冯元伟,等. 450 kV数字化X光照相诊断系统[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 014003. (Wu Hongguang, Ma Chenggang, Feng Yuanwei, et al. 450 kV digital X-ray diagnostic system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 014003)
- [4] 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 Hailiang, 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)
- [5] Smith J, Carlson R, Fulton R, et al. Cygnus dual beam radiography source[C]//Proc of the 15th Pulsed Power Conference. 2005: 334-337.
- [6] Smith J, Nelson D, Ormond E, et al. Cygnus performance in subcritical experiments[C]//Proc of the 16th Pulsed Power Conference. 2007: 1089-1094.
- [7] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003. (Zeng Zhengzhong. Introduction of pulsed power technology. Xi'an: Shaanxi Technology Press, 2003)
- [8] 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. Application of pulsed power technology. Xi'an: Shaanxi Technology Press, 2016)
- [9] Elsayed A. Reliability engineering[M]. Beijing: Electric Industry Press, 2013.
- [10] 李洪涛,丁伯南,谢卫平,等. 200 kV/100 kA低抖动环轨式场畸变开关[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 33-35. (Li Hontao, Ding Bonan, Xie Weiping, et al. A study on the 200 kV/100 kA low jitter ring rail electrode field distortion switch[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 33-35)