

文章编号: 2095-4980(2020)01-0160-05

准点 X 光源成像实验台架的研制

邹 俭, 王 川, 郑 侠, 曾乃工, 张天爵

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 为了研究医学系统中乳腺癌早期诊断的关键技术, 研制了一台用于准点 X 光源成像实验台架。该实验台架由脉冲触发器电源和脉冲 X 射线管组成, 其中脉冲触发器电源由 Marx 发生器、火花隙开关、电容分压器及输出段构成, 采用紧凑可移动化的设计; 脉冲 X 射线管利用冷阴极反射轰击阳极靶致辐射出 X 射线的机理, 该方法可有效提高辐射出 X 射线点源位置的重复率, 并且根据不同的驱动电压可调节阴阳极的材料及距离, 保证在脉冲 X 射线管输出 X 射线光子能量 ≥ 15 keV 的情况下, X 射线点源尺寸可以达到 ≤ 100 μm 的设计指标。Simplorer 模拟结果表明: 在脉冲 X 射线管阻抗为 $57\ \Omega$ 时, 脉冲触发器输出指标为电压 169 kV, 上升时间 ≤ 10 ns, 脉宽 ≤ 100 ns。

关键词: 脉冲触发器; 脉冲 X 射线管; 光子能量; 点源尺寸

中图分类号: TN78; TL515

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018169

Development of X light source imaging experimental platform with punctuality

ZOU Jian, WANG Chuan, ZHENG Xia, ZENG Naigong, ZHANG Tianjue

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: In order to study the key technology of early diagnosis of breast cancer in medical system, an X-ray imaging test bench for punctual X-ray source is developed. The test bench consists of a pulsed power trigger and a pulsed X-ray tube. The pulsed flip-flop power supply consists of a Marx generator, a spark gap switch, a capacitive voltage divider and an output section. Pulsed X-ray tube utilizes the mechanism of cold cathode reflection bombarding anode target to emit X-ray. This method can effectively improve the repetition rate of radiated X-ray point source position, and adjust the material and distance of cathode and anode according to different driving voltage to ensure the output of X-ray photon energy in the pulse X-ray tube. In the case of more than 15 keV of X-ray photon energy, the size of the X-ray point source can reach the design index of less than 100 μm . Simplorer simulation results show that when the impedance of the pulsed X-ray tube is $57\ \Omega$, the output voltage of the pulse trigger is 169 kV, the rise time is less than 10 ns, and the pulse width is less than 100 ns.

Keywords: pulsed power trigger; pulsed X-ray tube; photon energy; point source

随着全球患乳腺癌的比例逐年增高的发展趋势, 国际卫生组织已把乳腺癌早期诊断技术作为关键而又刻不容缓的工作开展下去。目前临床上对乳腺癌的诊断设备医用 CT 分辨力为 $300\sim 500\ \mu\text{m}$ ^[1], 但乳腺癌早期病变的矿化颗粒的分辨力范围是 $180\sim 500\ \mu\text{m}$, 并且对 X 射线的吸收性极差, 所以诊断出来的时机都偏向于中晚期。在光的波动性方面, X 射线相位衬度成像技术目前是国内外关注和研究的热点之一, 这是因为软组织的 X 射线相位衬度的分辨力约为常规 X 射线 CT 吸收衬度分辨力的 1 000 倍, 所以相位衬度成像技术特别适用于对乳腺癌的早期诊断。日本光子工厂建立的 X 射线相位衬度成像系统获得了老鼠肝血管干涉图像; 北京同步辐射装置 4W1A 束线形貌站上成功获得了大鼠肺部相位衬度图像。研究表明, 老鼠的内脏器官的组织密度分布与人类乳腺极为相近, 通过一定的驱动能量的提升和合适的光源尺寸与距离, 相位衬度成像在乳腺癌的早期诊断上将具有可行性^[2]。近年来, 随着脉冲功率技术的发展, 利用脉冲功率装置开展医学诊断研究成为一大热点, 优势是单次诊断剂量微乎其微, 通过结合 X 射线相衬成像可有效提高诊断图像的分辨力与对比度。该实验台架包括脉冲触发器、脉冲

收稿日期: 2018-08-20; 修回日期: 2018-11-20

基金项目: 中国核工业集团公司龙腾 2020 项目资助(HXLT201601)

作者简介: 邹 俭(1983-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为脉冲功率技术。email: jou981@126.com

X 射线管、X 射线透镜及成像系统, 进行基于准点 X 光相位差照相的乳腺癌早期诊断关键技术研究工作^[3-5]。

本文重点介绍准点 X 光源成像实验台架系统中的脉冲触发器和脉冲 X 射线管的研制, 脉冲 X 射线管利用冷阴极反射轰击阳极靶致辐射出 X 射线的机理, 该方法可有效提高辐射出 X 射线点源位置的重复率, 并且根据不同的驱动电压可调节阴阳极的材料及距离, 保证在脉冲 X 射线管输出 X 射线光子能量 $\geq 15 \text{ keV}$ 的情况下, X 射线点源尺寸可以达到 $\leq 100 \mu\text{m}$ (根据相称成像原理倒推可分辨矿化颗粒范围的尺寸) 的设计指标。脉冲触发器不仅要满足脉冲 X 射线管的驱动指标, 同时其时间分散性和整体结构要尽量小。设计指标: 输出电压峰值 150~180 kV, 上升时间 $\leq 10 \text{ ns}$, 脉宽 $\leq 100 \text{ ns}$ 。

1 结构设计

该实验台架采用同轴侧立式的结构(见图 1), 可直接接入负载, 减少能量损耗, 同时采用模块化设计, 分为 Marx 发生器模块、测量模块、开关模块和充电整流模块。充电整流模块安置在装置内侧入口处, 为了提高触发器稳定度及紧凑度, Marx 发生器模块、开关模块和充电整流模块均封装在直径为 480 mm, 高度为 1 000 mm 的钢筒内, 由 3 个聚甲醛绝缘支柱进行固定, 筒内绝缘气体为 0.2 Mpa 合成空气, 脉冲 X 射线管与触发器直接连接, 其中阳极靶材料及距离均可调节, 所用的电气连接均采用较短的薄铜片以获得较小的回路电感, 有效利用钢筒与各模块部件的耦合电容来锐化触发器的输出脉冲^[6-8]。

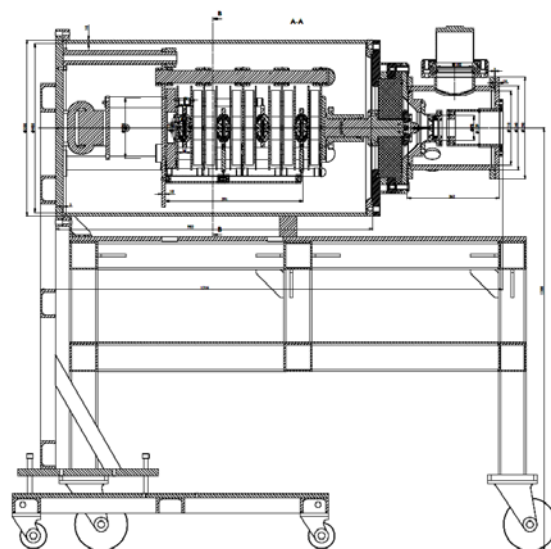


Fig.1 Mechanical drawing of experimental bench
图 1 实验台架机械图

1.1 触发器电源

图 2 为触发器等效电路图, C 为电容器模块储能部件; G 为开关模块部件; 充电整流模块包括: 充电电阻 R_c , 开关触发电阻 R_t , 开关耦合电阻 R_{td} , 接地电阻 R_d , 变压器 T 。电容器由 8 组同轴模块构成, 每组模块由 6 个低电感高压陶瓷电容(40 kV, 3 800 pF)并联呈圆环形状, 工作方式采用正负极同时充电。电容器模块间由 4 个开关模块进行隔离, 开关采用三电极火花隙的设计, 触发极与高低压极的距离为 5 mm, 击穿为电阻耦合式触发, 为了获得较大的电位差, 开关触发电阻采用跨级链接的方式, 这样可有效提升开关击穿的稳定度。

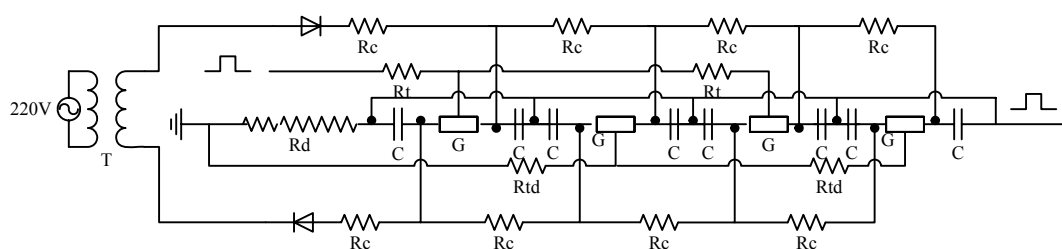


Fig.2 Circuit diagram of Marx generator
图 2 Marx 发生器等效电路图

1.2 电容分压器

电容分压器为测量输出电压部件^[9-11], 其结构见图 3, 电容分压器的高压臂电容 C_{HV} 为触发器输出内导体杆与低压电极之间的电容: $C_{HV} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(r_b/r_a)} = 1.427 \text{ pF}$, $\epsilon = 2.04 \times 10^{-13} \text{ F/cm}$ 为聚酰亚胺薄膜介电常数; $l = 2 \text{ cm}$ 为低压臂电极环的厚度; $r_a = 15 \text{ cm}$ 和 $r_b = 15 \text{ cm}$ 分别为高压绝缘环的半径和高压电极半径。

电容分压器的低压臂电容 C_{LV} 为环形低压电极与金属法兰之间的电容, $C_{LV} = \frac{\epsilon S_l}{d_i} = 16.4 \text{ nF}$, S_l 为低压电极横截面积, d_i 为低压电极与金属法兰之间的距离。为了获得较大的电容分压比, 低压电极与金属法兰之间的绝缘薄膜选择厚度 50 μm 的聚酰亚胺作为介质。

故电容分压比为: $k_c = \frac{C_{LV} + C_{HV}}{C_{HV}} = 11\ 468.26$ 。

1.3 脉冲 X 射线管

图 4 为脉冲 X 射线管结构图, 该方案为冷阴极真空 X 射线管, 采用锥形钨针作阳极, 圆环钢片作阴极, 安装在真空室中构成反射靶真空 X 射线二极管, 冷阴极有锐利的边角或尖端, 以促进场发射电流的产生; 阳极的设计使 X 射线的强度最大, 而发射面积尽可能地小(小焦斑)。反射靶 X 射线二极管原理是: 高压正脉冲作用在二极管阳极时, 阴极场强非常高, 因场致发射在阴极环会产生环状电子束, 经阴阳极间电场加速后轰击阳极靶, 产生韧致辐射 X 射线, 这种结构在 0° 角具有最大的 X 射线传输效率, 同时点源位置重复率较高, 通过对阳极靶锥尖的精细加工, 可达到直径 $50\ \mu\text{m}$ 的量级, 在脉冲触发器输出电压为 $150\sim 180\ \text{kV}$ 、上升时间 $\leq 10\ \text{ns}$, 脉宽 $\leq 100\ \text{ns}$ 的驱动下, 脉冲 X 射线管输出 X 射线光子能量在 $50\ \text{keV}$ 左右, 点源的尺寸在 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 的量级^[12-15]。

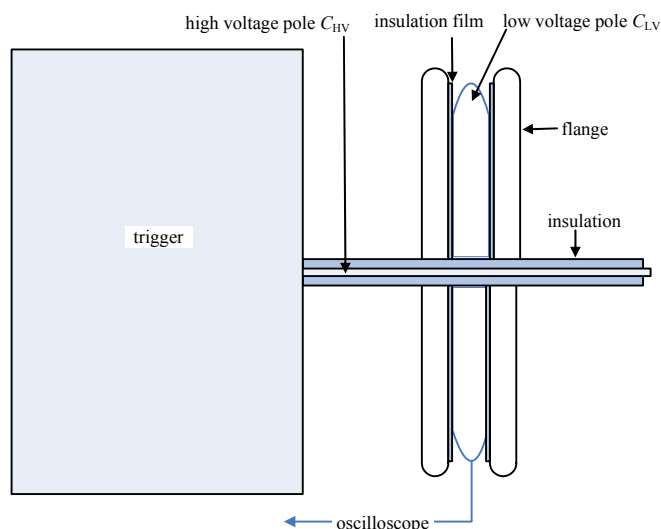


Fig.3 Structure diagram of capacitance divider
图 3 电容分压器结构图

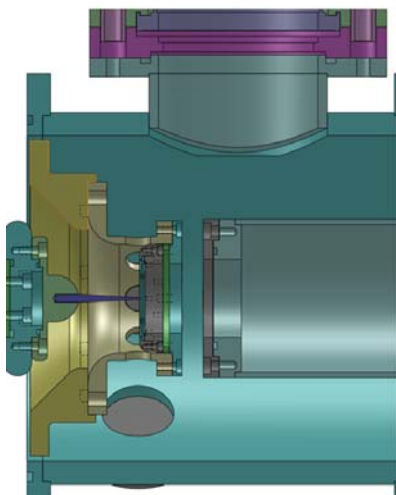


Fig.4 Structure of pulse X ray tube
图 4 脉冲 X 射线管结构图

图 5 为脉冲 X 射线管充电电压为 $170\ \text{kV}$ 下的电磁场模拟结果, 结果显示三相点工作场强为 $10\ \text{kV/cm}$, 小于 $30\ \text{kV/cm}$ 的安全界定, 工作场强为 $80\ \text{kV/cm}$, 满足二极管的工作场强设计应在 $80\sim 120\ \text{kV/cm}$ 范围内的要求。

2 电路模拟

根据触发器的结构、各部件的参数和它的放电回路, 得到触发器的放电回路等效电路见图 6: C_m 为 Marx 发生器的串联电容; L_m 为发生器的回路电感, 主要包括火花隙开关的通道电感、电极电感和电容器电感, 由于采用低电感陶瓷电容器, 回路电感主要由开关通道电感和电极电感决定; R_m 为串联电阻, 主要由开关通道电阻决定; R_p 为二极管特性阻抗; C_f 为高压极输出端对地的杂散电容。

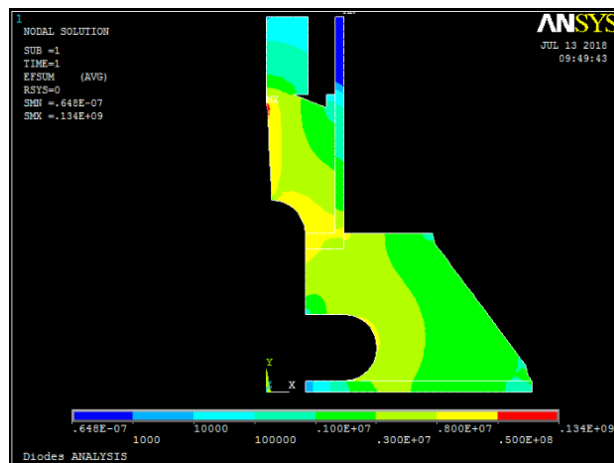
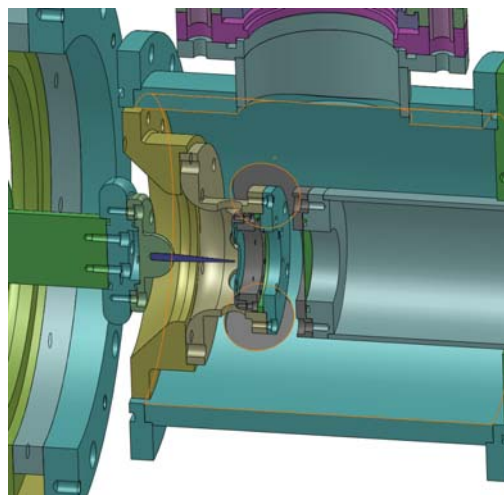


Fig.5 Electromagnetic field simulation of pulsed X ray tube
图 5 脉冲 X 射线管电磁场模拟

发生器回路电感 L_m 为：

$$L_m = L_{sp} + L_e, \quad L_{sp} = 2l_{sp} \ln(R/r_g), \quad L_e = 2l_e \ln(R/r_e) \quad (1)$$

式中： L_{sp} 为火花通道电感； l_{sp} 为火花隙开关电弧长度； R 为开关外筒半径； r_g 为电弧半径； L_e 为电极电感； l_e 为电极长度； r_e 为电极半径； $L_m=200$ nH。

火花隙开关串联电阻 R_m 为：

$$R_m = \frac{2}{U_m} \sqrt{\frac{Pd_1^2}{\pi a}} \sqrt{\frac{L_m}{C^3}}, \quad C = \frac{C_m C_f}{C_m + C_f} \quad (2)$$

式中： U_m 为充电电压； P 为开关内充气气压； d_1 为开关间隙距离； $a = 0.1 (\text{MPa} \cdot \text{cm}^2) / (\text{s} \cdot \text{V}^2)$ ； $R_m=2.5 \Omega$ 。

二极管阻抗 Z_d 为：

$$Z_d = 136(d/r)^2 U_d^{-1/2} \quad (3)$$

式中： d 为阴阳极间距离； r 为阴极环半径； U_d 为触发器输出电压； $Z_d=57 \Omega$ 。

每个低电感陶瓷电容器容量为 40 kV, 3 800 pF，所以理论计算出 $C_m=2.85$ nF，杂散电容 $C_f=20$ pF。

根据对触发器各项参数的计算，采用 Simplerer 软件对触发器输出电压进行模拟，当电容器充电电压为 22.5 kV 时，仿真结果见图 7。由仿真结果可知，当充电电压为 22.5 kV 时，触发器输出电压幅值 169 kV，脉宽为 100 ns，脉冲上升时间小于 10 ns，满足设计指标要求。

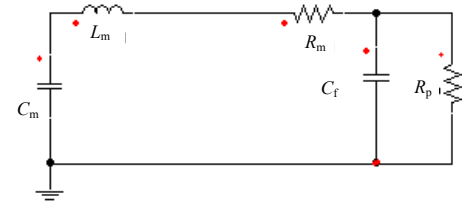


Fig.6 Equivalent circuit diagram of trigger
图 6 触发器等效电路图

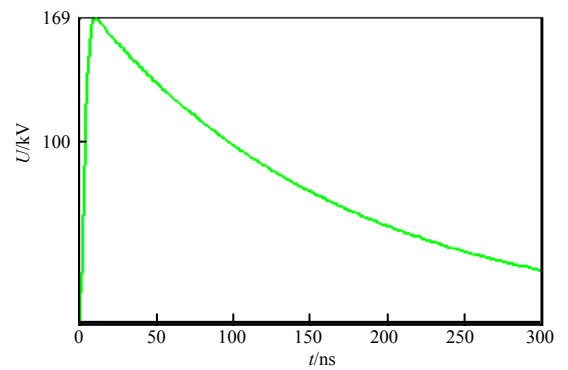


Fig.7 Simulation waveform of trigger output voltage
图 7 触发器输出电压仿真波形

3 结论

本文研制了一台用于准点 X 光源成像的实验台架，该台架由脉冲触发器和脉冲 X 射线管构成，脉冲 X 射线管采用冷阴极反射轰击阳极靶致辐射出 X 射线的机理，该方法可有效提高辐射出 X 射线点源位置的重复率，并且根据不同的驱动电压可调节阴阳极的材料及距离，X 射线管电磁场模拟结果显示，在阳极充电电压 170 kV 时，X 射线管三相点工作场强为 10 kV/cm，管内最大工作场强为 80 kV/cm，满足二极管安全场强界定。其中 Marx 发生器采用同轴正负极充电的双边结构，同时紧凑回路低电感的设计；4 个火花隙开关采用跨级触发放电；在输出段末端设计了环形电容分压器作为触发器的高电压测量探头。仿真结果显示输出脉冲峰值 169 kV，脉宽为 100 ns，脉冲上升时间小于 10 ns，满足准点 X 光源成像实验台架的指标要求。

参考文献：

- [1] 叶芳,曾蒙苏,严福华,等. MRI 结合数字化钼靶诊断乳腺癌的临床研究[J]. 放射学实践, 2007,22(11):1139-1143. (YE Fang,ZENG Mengsu,YAN Fuhua,et al. Clinical study of digital mammography, contrast enhanced MRI as well as their combination in the diagnosis of breast cancer[J]. Department of Radiology, 2007,22(11):1139-1143.)
- [2] 谭辉,张宏伟,顾宇叁,等. SPECT/CT 和乳腺专用伽玛显像对乳腺癌诊断价值的对比研究[J]. 复旦学报(医学版), 2015,42(6):716-721. (TAN Hui,ZHANG Hongwei,GU Yusan,et al. Comparative study of SPECT/CT and breast specific gamma imaging in the diagnosis of breast cancer[J]. Fudan University Journal of Medical Sciences, 2015,42(6):716-721.)
- [3] 邹晓兵,朱宏林,曾乃工,等. 纳秒级高压快脉冲发生器的研制[J]. 高电压技术, 2011,37(3):787-792. (ZOU Xiaobing,ZHU Honglin,ZENG Naigong,et al. Development of a nanosecond fast pulse generator[J]. High Voltage Engineering, 2011,37(3):787-792.)
- [4] 邹俭,王川,曾乃工,等. 紧凑型 X 箍缩脉冲功率发生器[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(3):663-667. (ZOU Jian,WANG Chuan,ZENG Naigong,et al. A compact pulsed power generator for X-pinch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(3):663-667.)

- [5] 杨大为,曾乃工,王晓军,等. 变阻抗线及预脉冲开关的设计与调整[J]. 强激光与粒子束, 1991,3(3):398-404. (YANG Dawei,ZENG Naigong,WANG Xiaojun,et al. Design and adjustment of an impedance tapering line and prepulse switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1991,3(3):398-404.)
- [6] 邹俭,曾乃工,王川,等. 天光 II -B 光源的初步实验[J]. 原子能科学技术, 2013,47(7):1268-1271. (ZOU Jian,ZENG Naigong,WANG Chuan,et al. Preliminary experiments on light II -B[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(7):1268-1271.)
- [7] 邹俭,曾乃工,王川,等. 天光 II -B 强流脉冲电子加速器的设计[J]. 原子能科学技术, 2013,47(5):875-879. (ZOU Jian, ZENG Naigong,WANG Chuan,et al. Design of Light II -B pulsed power electron accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013,47(5):875-879.)
- [8] 杨大为,王乃彦,张奎方,等. 强流脉冲电子加速器充电调整[J]. 原子能科学技术, 1988,22(2):134-147. (YANG Dawei, WANG Naiyan,ZHANG Kuifang,et al. Adjustment for charging process of pulsed intense-electron-beam accelerators[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1988,22(2):134-147.)
- [9] 邹俭,王川,郑侠,等. 紧凑型 X-pinch 装置探头标定[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(6):1687-1691. (ZOU Jian,WANG Chuan,ZHENG Xia,et al. Measure probes on X-pinch compact pulsed power generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(6):1687-1691.)
- [10] 邹俭,曾乃工,王川,等. 天光 II -B 装置的诊断刻度[J]. 原子能科学技术, 2011,45(12):1502-1505. (ZOU Jian,ZENG Naigong,WANG Chuan,et al. Current and voltage measurement of light II -B pulsed power generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011,45(12):1502-1505.)
- [11] 曾乃工,杨大为,姜兴东,等. 天光 II 号强流脉冲电子加速器[C]// 第五届全国高功率会议论文集. 合肥:高电压新技术分委会, 1993:207-211. (ZENG Naigong,YANG Dawei,JIANG Xingdong,et al. Light II intense particle pulse electron accelerator[C]// The fifth high power meeting. Hefei,China:High voltage new technology sub committee, 1993:207-211.)
- [12] 邹俭,王川,曾乃工,等. 混合电极结构下的 X-pinch 研究[J]. 原子能科学技术, 2015,49(12):2251-2254. (ZOU Jian, WANG Chuan,ZENG Naigong,et al. The experiments of hybrid X-pinch[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015,49(12):2251-2254.)
- [13] 邹俭,曾乃工,王川,等. 基于 X-pinch 丝负载的背光照相研究[J]. 原子能科学技术, 2017,51(8):1484-1487. (ZOU Jian, ZENG Naigong,WANG Chuan,et al. Study on X-ray backlighting of wire load X-pinch[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017,51(8):1484-1487.)
- [14] SHELKOVENKO T A,PIKUZ S A,CAHILL A D,et al. Hybrid X-pinch with conical electrodes[J]. Physics of Plasmas, 2010,17(11):112707.
- [15] 曾正中. 脉冲功率技术引论[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2003. (ZENG Zhengzhong. The pulsed power technology[M]. Xi'an,China:Shaanxi Science Technology Press, 2003.)