

Development of Pulsed Trigger in 160 kV and 10 ns Raise Time

Jian Zou, Chuan Wang, Xia Zheng, Naigong Zeng, Tianjue Zhang

China Institute of Atomic Energy, Beijing
Email: jou981@126.com

Received: Aug. 18th, 2018; accepted: Aug. 31st, 2018; published: Sep. 7th, 2018

Abstract

In order to study the key technology of early diagnosis of breast cancer in medical system, a trigger for the X-ray phase-contrast imaging system is developed. The output pulse of the trigger is required: the peak voltage = 160 kV, the rise time ≤ 10 ns, and the pulse width ≤ 100 ns. The flip-flop consists of Marx generator, spark gap switch, capacitive voltage divider and output section. The Marx generator is composed of 8 stages of coaxial positive and negative electrode charge, each level is composed of 6 40 kV 3800 pF ceramic capacitors in parallel, and the design of compact loop low inductance is adopted; and the 4 spark gap switches use the cross stage trigger discharge. At the end of the output section, a ring capacitance divider is designed as a high voltage probe for triggers. The Simplorer simulation results show that when the actual load is blocked, the output voltage is 169 kV, the rise time is less than 10 ns, and the pulse width is less than 100 ns, which meets the design requirements.

Keywords

Marx Generator, Spark Gap Switches, Capacitance Divider

160 kV, 10 ns 上升沿脉冲触发器的研制

邹 俭, 王 川, 郑 侠, 曾乃工, 张天爵

中国原子能科学研究院, 北京
Email: jou981@126.com

收稿日期: 2018年8月18日; 录用日期: 2018年8月31日; 发布日期: 2018年9月7日

摘 要

为了研究医学系统中乳腺癌早期诊断的关键技术, 本文研制了一台用于准点X光相位差照相系统的触发

器,对触发器的输出脉冲要求:峰值电压160 kV,上升时间 ≤ 10 ns,脉宽 ≤ 100 ns。该触发器由Marx发生器、火花隙开关、电容分压器及输出段构成,其中Marx发生器采用8级同轴正负极充电的双边结构,每级由6个40 kV 3800 pF的陶瓷电容器并联组成,采用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。Simplorer模拟结果表明:在实际负载阻值时,输出电压169 kV,上升时间 ≤ 10 ns,脉宽 ≤ 100 ns,满足设计指标要求。

关键词

Marx发生器,火花隙开关,电容分压器

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

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分辨率为300~500 μm ,但乳腺癌早期病变的矿化颗粒的分辨率范围是180~300 μm ,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。那么在光的波动性方面,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率约为常规X射线CT吸收衬度分辨率的1000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[1][2]。日本光子工厂(PF)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SD大鼠肺部相位衬度图像。虽然同步辐射具备完全空间相干性光源,但对于实际光源,只要其点源尺寸足够小,同样也具备一定的空间相干性,本项目拟搭建脉冲触发器、脉冲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][4][5]。

本论文重点介绍基于准点X光相位差照相系统中的脉冲触发器的研制,近年来,随着脉冲功率技术的发展,大功率脉冲装置不仅要具有稳定的输出,同时其时间分散性也尽量的小。所以电压幅值为150~200 kV、上升时间 ≤ 10 ns,脉宽 ≤ 60 ns的脉冲触发器具有极大的需求空间。该脉冲触发器的技术指标为:峰值电压160 kV,上升时间 ≤ 10 ns,脉宽 ≤ 100 ns,由小型同轴型Marx发生器、火花隙开关、电容分压器及输出段构成,电容器充电电源与Marx发生器、火花隙开关及其硅堆电阻等均集成在一个充气钢筒内,钢筒采用侧立式,直接输出至负载,具有结构紧凑,移动方便的特点,满足基于准点X光相位差照相系统的触发器要求。目前触发器已完成初步设计阶段,下一步将进行实验论证。

2. 结构设计

该触发器采用同轴侧立式的结构(图1),可以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出,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480 mm高度1000 mm的钢筒内,由三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,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][7][8]。

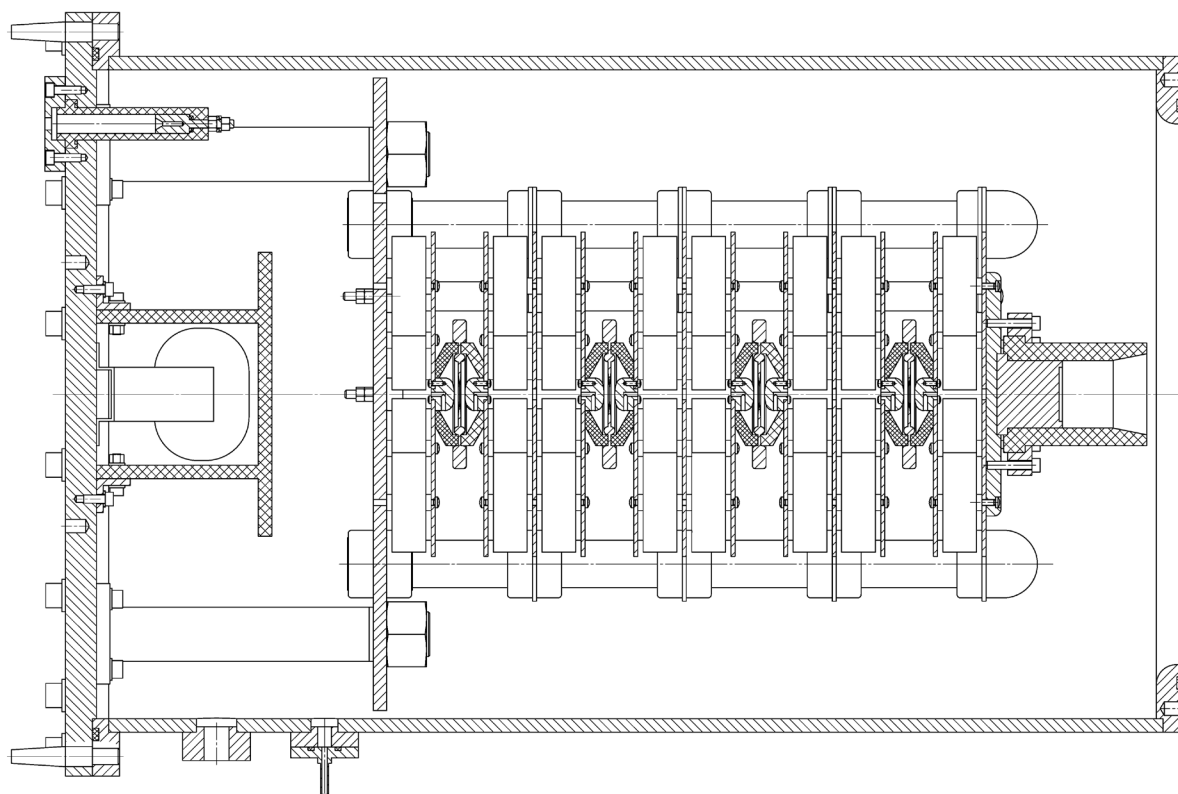


Figure 1. Machine drawing of Marx generator
图 1. Marx 发生器机械图

2.1. Marx 发生器

图 2 为其中 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: Rc 充电电阻, Rt 开关触发电阻, Rtd 开关耦合电阻, Rd 接地电阻, T 变压器。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 3800 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。

2.2. 电容分压器

在对高压脉冲信号进行示波器测量时, 需要用到分压器把脉冲的幅度降低, 以满足示波器的量程。为了得到准确真实的波形数据, 分压器的分压比必须精确计算。电容分压器在脉冲功率技术当中是一种有效的测量工具, 因为它的结构可以根据不同的电极而改变, 同时频率响应可以达到很宽, 并且不直接接触高压电极, 可有效避免电场扰动影响, 根据该触发器的结构特点, 制作聚酰亚胺薄膜介质电容分压器作为电压测量部件[9][10][11]。

电容分压器结构图如图 3 所示, 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, 电容分压器高压臂电容由以下公式计算: $C_{HV} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_b}{r_a}} = 1.42767 \text{ pF}$, 式中 $\epsilon = 2.04 \times 10^{-13} \text{ F/cm}$

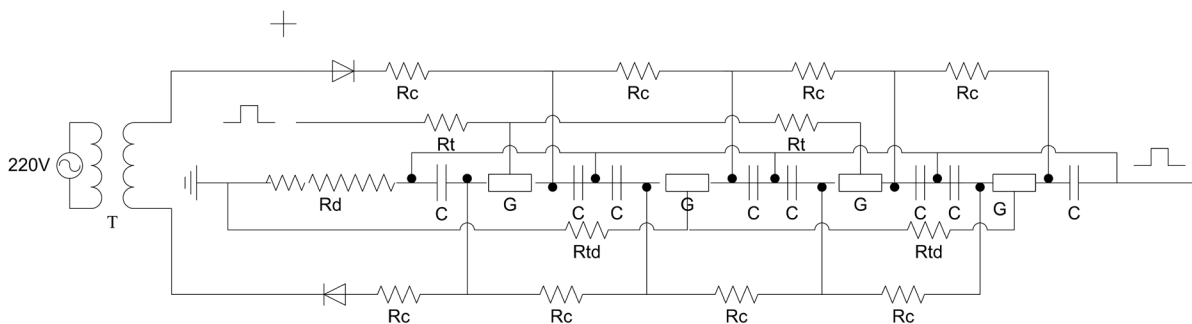


Figure 2. Circuit diagram of Marx generator
图 2. Marx 发生器等效电路图

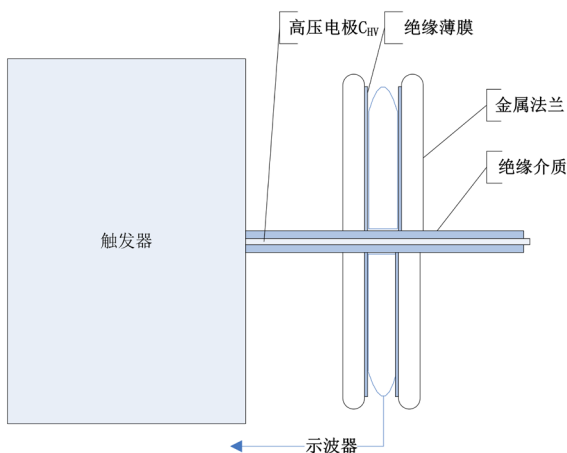


Figure 3. Circuit diagram of Marx generator
图 3. 电容分压器结构图

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 $r_b = 2.5 \text{ cm}$ 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，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 $50 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺作为介质。

电容分压器内导体杆与电容分压器外筒之间的电容，大小为： $C_{LV} = \frac{\epsilon S_l}{d_i} = 16.4 \text{ nF}$ ， 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， ϵ 为聚酰亚胺薄膜的介电常数。

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

3. 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如图 4 所示。其中： 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的选择，所以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 Z_d ； C_f 为高压极输出端对地的杂散电容[12] [13] [14] [15]。

发生器回路电感 L_m 为：

$$L_m = L_{sp} + L_e$$

$$L_{sp} = 2l_{sp} \ln(R/r_g)$$

$$L_e = 2l_e \ln(R/r_e)$$

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:

$$R_m = \frac{2}{V_m} \sqrt{\frac{Pd^2}{\pi a}} \sqrt{\frac{L_m}{C^3}}$$

$$C = \frac{C_m C_f}{C_m + C_f}$$

式中 V_m 为充电电压, P 为开关内充气气压, d 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:

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

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, 最后的 $Z_d = 57 \Omega$ 。

每个低电感陶瓷电容器容量为 40 kV 3800 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, 仿真结果如图 5 所示。

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(FWHM)为 100 ns, 脉冲上升时间小于 10 ns, 满足设计指标要求。

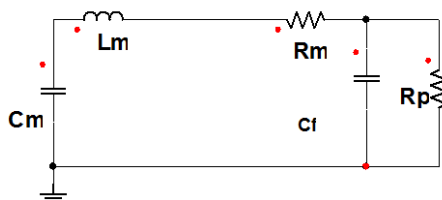


Figure 4. Circuit diagram of Marx generator

图 4. 触发器等效电路图

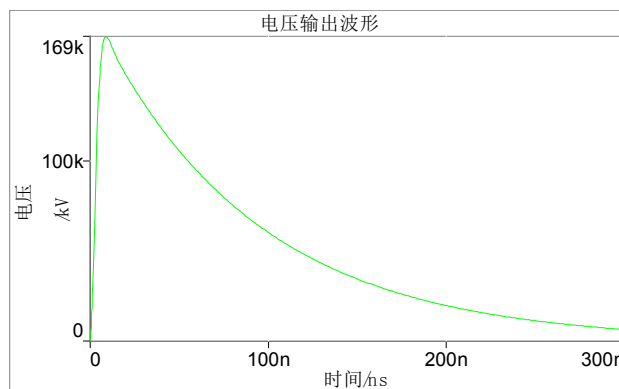


Figure 5. Circuit diagram of Marx generator

图 5. 触发器输出电压仿真波形

4. 总结

本文研制了一台用于准点 X 光相位差照相系统的触发器, 该触发器由 Marx 发生器、火花隙开关、电容分压器及输出段构成, 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(FWHM)为 100 ns, 脉冲上升时间小于 10 ns, 满足准点 X 光相位差照相系统的驱动指标要求。

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.
- [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, 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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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, 6(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.
- [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]//高电压新技术分委会. 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.
- [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.
- [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.
- [14] Shelkovenko, T.A., Pikuz, S.A., Cahill, A.D., et al. (2010) Hybrid X-Pinch with Conical Electrodes. *Physics of Plasmas*, 17, Article ID: 112707. <https://doi.org/10.1063/1.3504226>
- [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: 147-180.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org