

文章编号: 2095-4980(2016)02-0311-07

一种新型 X 射线发生器电源设计

雷 宇, 冉汉政, 曾 清

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 设计了一种新型X射线发生器电源, 应用高频开关电源技术、高压倍压整流技术与单片机控制技术, 成功研制出一台额定电压160 kV, 管电流0.4 mA~1.2 mA的用于安检设备的X射线发生器。介绍了X射线发生器的应用场合、工作原理、主要设计思想及国内外研究现状; 详细介绍了设计的X射线发生器电源的功能构成, 阐述了高压与灯丝高频逆变电路、高压倍压整流电路以及控制系统的拓扑结构、设计过程和仿真结果; 最后给出了试验结果以及与安检系统进行联试的扫描图像, 测试结果表明, 其技术指标达到安检设备用X射线发生器的要求。

关键词: X射线发生器; 高压发生器; 高频逆变谐振电路; 安检系统

中图分类号: TN86

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0311

Design of a novel X-ray generator power system

LEI Yu, RAN Hanzheng, ZENG Qing

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A novel X-ray generator power system in security inspection system is proposed and designed, which has rated voltage of 160 kV and tube current of 0.4 mA–1.2 mA. The technology of high frequency switching power supply is applied to the design, as well as high voltage doubling rectifying and single chip microcomputer control. The application and working principles of X-ray generator are introduced as well as the design methods. Then the functional configuration of the proposed X-ray generator is listed, including the high voltage and filament high frequency inverter, high voltage doubling rectifying circuit and the controlling system. The topological structure, design process and simulating result of the functional component are also discussed. At last, the experiment results and scanned images of the security inspection system are presented, indicating the technical parameters of the proposed X-ray generator fully meet the requirement of the security inspection equipment.

Key words: X-ray generator; high voltage generator; high frequency resonance oscillation inverter; security check system

自“911”事件以后, 在一些国家和地区恐怖主义活动开始猖獗, 并显示出潜滋暗长、不断蔓延的态势, 严重威胁着各国的安全与稳定, 这也在世界范围内极大地刺激了对安防产品的需求。基于 X 射线探测技术的安检设备是现今应用最为广泛的一类安检设备^[1-4]。X 射线的产生需要借助 X 射线电源建立高压电场以及灯丝电流, 随着电力电子技术和控制技术的发展, 功率晶体管(Power Transistor, GTR), 功率场效应管(Power Field Effect Transistor, MOSFET)、门极可关断晶闸管(Gate Turn Off Thyristor, GTO)及绝缘栅晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)等全控型电力电子器件相继研制成功, 适合于高频化应用的功率变换新技术也相继出现, 使得 X 射线电源的研制朝着高频化、大功率、小体积和高效率的方向发展^[5]。

1 X 射线发生器简介

X 射线发生器的工作原理如图 1 所示, 位于阴极的灯丝电源为 X 射线管灯丝提供加热电流, 当灯丝加热到

收稿日期: 2014-10-22; 修回日期: 2015-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271330); 973 计划资助项目(2013CB328902); 新世纪人才基金资助项目(NCET-12-0383)

一定温度时,灯丝中的自由电子溢出并发射出来,该过程称为“热发射”。高压发生器为 X 射线管阳极和阴极之间提供高压,该高压建立的电场使阴极释放的灯丝自由电子加速向阳极运动,加速后的高能电子流轰击阳极的金属靶,产生 X 射线^[6]。故 X 射线发生器电源从功能上分为 2 部分:高压电源部分和灯丝电源部分。

通常 X 射线管阴阳两极间高压为几万伏至几十万伏, X 射线管功率从几十瓦至上千瓦。在工程运用中, X 射线管极间电压需要在一个较大的范围内调整,以满足产生不同强度 X 射线的要求。同时 X 射线管的管电流(由加速后的电子定向移动产生的电流)也需要在一个范围内进行调节,而管电流的大小由极间高压和灯丝电流共同决定,极间高压决定了自由电子的运动速度,灯丝电流决定了单位时间内产生的自由电子数量。因此 X 射线管在不同的高压和灯丝电流条件下工作时,呈现出来的特性类似于一个阻抗可变的负载,如图 2 所示,这种特殊的伏安特性使得在对 X 射线管工作点进行调整时, X 射线发生器电源输出的极间高压与灯丝电流会相互影响彼此的反馈调整与控制^[7]。

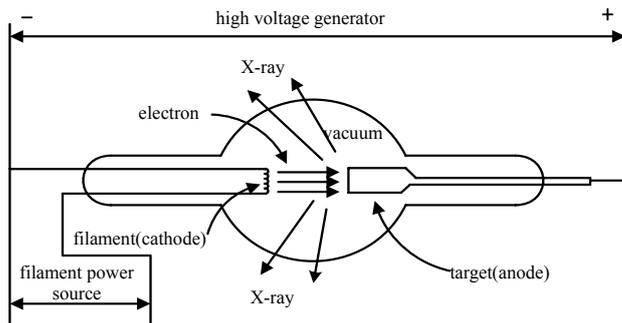


Fig.1 Working principle of X-ray generator
图 1 X 射线发生器工作原理

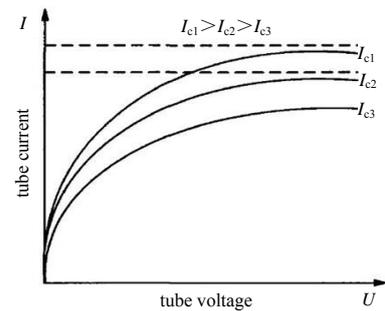


Fig.2 U - I characteristic of X-ray tube
图 2 X 射线管的伏安特性

高压加到 X 射线管上有 2 种方式:一种是 X 射线管阴极接地,阳极接高压;另一种是阴极接负高压,阳极接正高压。本设计采取第 2 种阴极浮地设计,采取双极性电压为 X 射线管供电,使得高压输出的绝对值降低了一半,有利于小体积空间内的绝缘设计。

2 国内外研究现状

随着安检设备性能指标的不断提高,对 X 射线源的要求也进一步提高。X 射线电源输出的高压稳定性、控制方式的智能化、设备的小型化等成为安检用 X 射线发生器电源的发展方向。

开关电源技术广泛应用于 X 射线发生器电源的设计,且有逐步高频化的趋势。目前国内外常用的高频开关器件为 IGBT 和大功率 MOSFET^[8]。IGBT 为绝缘栅双极晶体管,是一种集成功率开关,工作频率为 15 kHz~40 kHz。IPM 为智能 IGBT,是自关断器件,具有过热、欠压、过流、短路保护功能,使用方便,性价比很高,是目前高频 X 射线发生器电源的主流开关器件。但 IGBT 也有缺点:电流密度小,耐冲击能力差。MOSFET 的频率最高可达 1 MHz,一般工作在 100 kHz 左右,由于其工作电流较小,约为 12 A 左右,只适用于小功率 X 射线发生器。

X 射线发生器电源普遍采用直流逆变方式^[9],目前国内外主流工作频率在 25 kHz~40 kHz 之间。由于频率极高,已超过声频范围,进入无声时代。高频逆变使得高压变压器的工作效率得到很大提高,也使得脉冲透视及摆影很容易实现。高压的上升沿可以变得很陡,脉冲密度最小可到 1 ms,脉冲的重复性很好,这为数字图像技术提供了极大的便利条件。高频逆变的效率极高,功率因数可达到 80%,对电源的依赖性大大降低,几乎不受电源电压波动的影响。

高频高压发生器的输出精确度要求较高,其控制系统一般由单片机或 ARM 芯片为核心搭建,国外技术领先的 SPELLMAN, VJ 等 X 射线发生器厂商更是采用数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)单元完成数据采集、处理,实现控制系统的数字化^[10]。

3 X 射线发生器电源主电路设计

3.1 总体方案

X 射线发生器电源从结构上划分为低压控制部分和高压发生器部分,如图 3 所示。

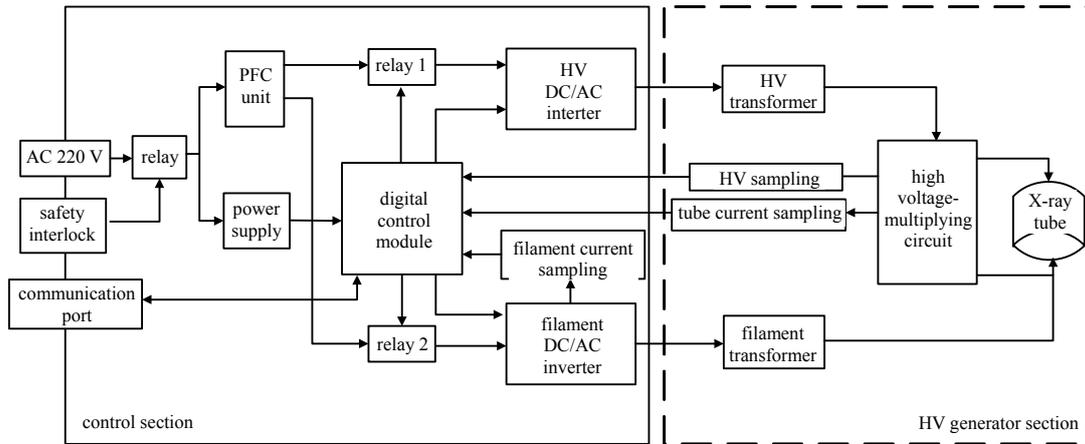


Fig.3 Block diagram of X-ray generator power system
图 3 X 射线发生器电源系统原理框图

其工作原理为：AC 220 V 输入电压由安全连锁信号控制，当收到指令后，系统通电，经功率因数校正单元(集成了整流、滤波、稳压、功率因数校正功能)后，变换成直流电压给储能电容充电，作为高压与灯丝高频变换的能量输入，同时辅助供电单元为整个低压控制部分供电。储能电容通过高压与灯丝高频 DC/AC 逆变电路形成高频正负调制脉冲电压输入给高压发生器部分。而后灯丝调制脉冲通过灯丝变压器降压，加至 X 射线管阴极灯丝两端；同时高压调制脉冲通过高压变压器升压，再经正负高压倍压电路分别形成正、负直流高压，加在 X 射线管阳极与阴极形成高压电场。

整个电源部分的核心为数字控制单元，主要负责与上位机通信，接收并传输上位机加电、断电、参数设置指令，对采样回来的 X 射线发生器的高压值、管电流值、灯丝电流值等进行处理，与设置值进行比较与逻辑运算，实时调节低压电路的输出状态，形成闭环反馈控制。X 射线发生器电源的总体电路拓扑结构如图 4 所示。

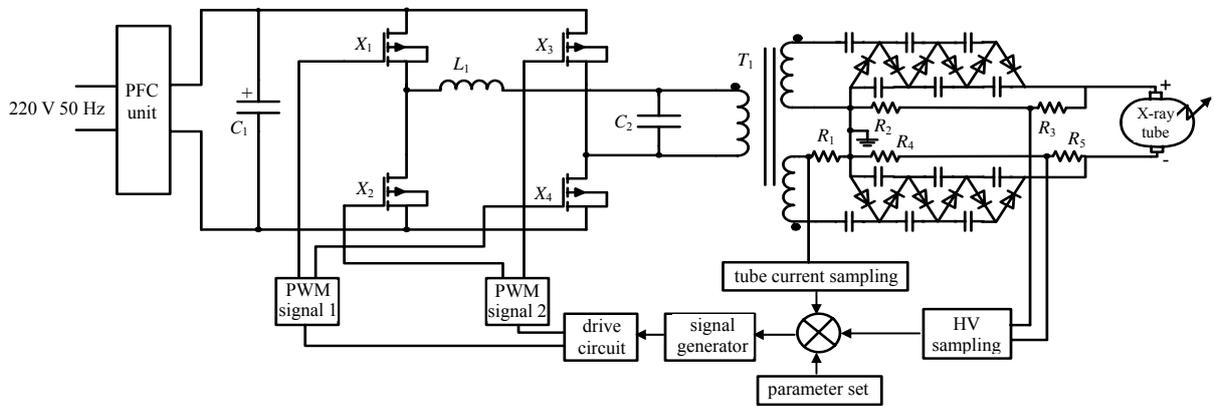


Fig.4 Circuit topology of X-ray generator power system
图 4 X 射线发生器电源拓扑电路图

3.2 低压控制电路设计

电源输入电压为单向交流 220 V，经整流滤波后输出最大电压 $U_v=311\text{ V}$ ，在全桥逆变电路中每个 IGBT 管承受的电压为输入直流电压 U_v 的一半，考虑到电路安全，即使有一只 IGBT 管损坏短路而不导致整个逆变电路完全崩溃，每只 IGBT 管所能承受的电压应在 U_v 之上。同时考虑到高频变压器漏感的存在及主回路中电感的影响，在 IGBT 关断时会引起较大的尖峰电压，所以 IGBT 所承受的电压应该留有裕量，取电压裕度 $U_\delta=1.5$ ，则 IGBT 耐压为： $U_d=1.5U_v=467\text{ V}$ 。

文献资料表明：电路开关频率 f 和谐振频率 f_p 的比值在 $0.7 < f/f_p < 0.9$ 之间变化时，输出正弦波形畸变最小。选择开关频率 $f=20\text{ kHz}$ ，取 $f/f_p=0.8$ ，则 $f_p=25\text{ kHz}$ 。取 $R_L/\sqrt{L/C}=5$ ， R_L 是等效负载电阻，由设计要求，取逆变器输出的最大电压为 400 V，平均电压约为 $U_0=400/\sqrt{2}=283\text{ V}$ ， $R_L=U^2/P=160\ \Omega$ ，则可计算出：

$$C = 1 / 2\pi f_p \sqrt{L/C} \approx 0.2 \mu\text{F} \quad (1)$$

$$L = \sqrt{L/C} / 2\pi f_p \approx 200 \mu\text{H} \quad (2)$$

根据上述设计方案和指标，采用了 PSPICE 仿真软件进行仿真^[11-12]，输入电压设为 300 V，PWM 信号幅值取 15 V，从图 5 的仿真结果可以看出，谐振电容上的电流基本为正弦波，畸变较小，满足设计需求。

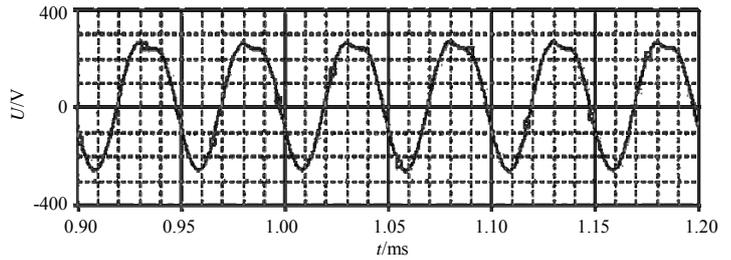


Fig.5 Simulation result of resonant capacitor current
图 5 谐振电容电流仿真波形

3.3 高压发生器电路设计

如图 4 所示，高压发生器部分包括高压倍压电路、高压升压变压器、高压与管电流采样电路以及 X 射线管。由于安检系统中对高压发生器部分的体积限制，本文的设计采用升压变压器和倍压整流电路结合的升压方式，倍压电路的基本原理如图 6 所示。

这种倍压整流电路中其能量是由前向后逐步传递的，通过调整倍压级数可以达到所需的最大输出电压。本设计中阴阳两极最大额定输出电压 $U = \pm 80 \text{ kV}$ ，额定输出电流 $I = 1.2 \text{ mA}$ 。

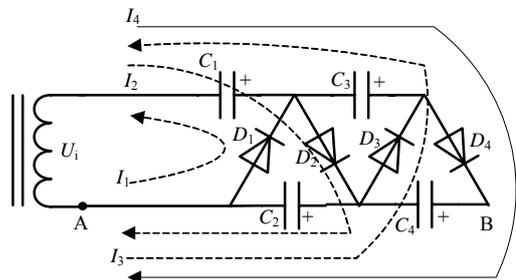


Fig.6 High voltage doubling and rectifying circuit
图 6 高压倍压整流电路原理图

由前面分析可知，变压器的输出峰值电压为 $U_{pk} = 15 \text{ kV}$ ，设计时应给倍压整流电路输出电压留有一定的裕量，取倍压整流电路空载时的输出电压 $U_{out} = 80 \text{ kV}$ ， $n = U_{out} / 2U_{pk} = 80 / 30 \approx 2.7$ ，倍压级数取为 3，倍压整流电路的供电频率 $f = 20 \text{ kHz}$ ，负载电流小于 2 mA ，则倍压整流电路的平均降压为：

$$U_{drop} = (I_{load} / 6fC)(4n^3 + 3n^2 - n) \leq 1 \text{ kV} \quad (3)$$

倍压整流电路的输出纹波电位为：

$$U_{Ripple} = (I_{load} / 2fC)n(n+1) \leq 300 \text{ V} \quad (4)$$

式中： C 为电容； f 为交流电源频率。

通过图 7 所示的 PSPICE 仿真结果可以看出，不论正倍压电路还是负倍压电路，其三级倍压后的输出电压大约为输入的 6 倍，分别接近 $\pm 90 \text{ kV}$ ，不但满足了高压输出，还有一定的裕量设计，能满足系统对输出高电压以及高压纹波电压的技术要求。

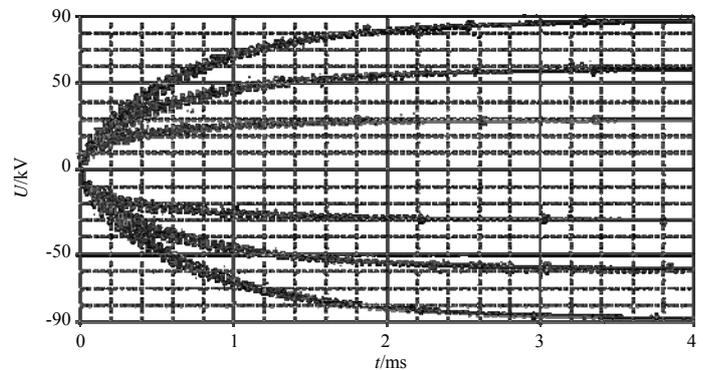


Fig.7 Simulation results of high voltage doubling and rectifying circuit
图 7 高压倍压整流电路输出电压仿真波形

3.4 灯丝电源设计

X 射线发生器电源对 X 射线管管电流的控制，是借助于改变灯丝电流的方法来实现的。X 线管的灯丝电流一般不超过 $4 \text{ A} \sim 8 \text{ A}$ ，灯丝电压不超过 $15 \text{ V} \sim 30 \text{ V}$ ，由于灯丝加热温度与管电流的稳定有密切关系，因此要求灯丝两端的电压变化很小，以保持 X 线输出剂量的稳定。

本文的灯丝电源采用半桥逆变电路的方案，基本原理如图 8 所示， $C_1 = C_2$ ， $R_1 = R_2$ ，电容器中心点电压为直流母线电压的一半，即 $U_A = U_0 / 2$ ，当上管 X_1 的栅极驱动脉冲变为高电平时，则 X_1 导通。此时加在 X_1 漏极的高压电源 U_0 经 C_3 到变压器 T_1 的原边绕组，再经 C_2 到地，形成正向充电回路。而电容器 C_1 则经 T_1, C_3, X_1 回路放电，使中点电压 U_A 在前半周期结束时升高了 ΔU_{e1} 。当 X_1 变为截止、 X_2 尚未导通时，两管中点电压 U_A 又恢复到接近 $U_0 / 2$ 。

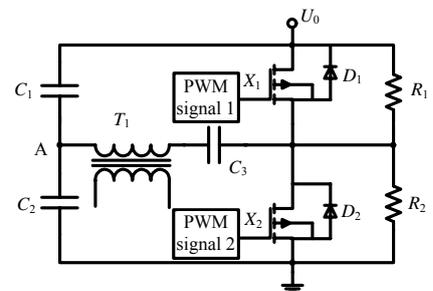


Fig.8 Half-bridge resonant inverter circuit
图 8 半桥逆变谐振电路原理图

当桥臂下管 X_2 的栅极驱动脉冲变为高电平时, X_2 导通, 电源电流又由 U_0 经 C_1, T_1, C_3 到地, 形成反向充电回路。此时 X_1 截止, C_2 则经 T_1, C_3, X_2 放电。因此中点电压 U_A 在后半周期结束时又下降了 ΔU_{e2} 。如果电路参数对称, 则 $\Delta U_{e1} = \Delta U_{e2}$, 中点电位 U_A 在开关过程中将以 $U_0/2$ 为中心, 按正负 ΔU_e 幅度周期性波动^[13]。变压器 T_1 在次级感应出正负脉冲电压, 直接加在 X 射线管阴极灯丝的两端。

4 X 射线发生器电源控制系统设计

控制系统完成与上位机的数据交换, 执行上位机的动作指令, 实现高压与管电流输出设置; 完成高压采样及管电流、灯丝电流采样; 将设置值与采样值进行比较与逻辑运算, 实时调节电源的输出状态; 实现过压、过流保护、报警等功能。控制系统的原理框图如图 9 所示。

数字控制单元由 CVR 单片机、AD 芯片、DA 芯片、达林顿管及模拟输入插件组成。AD 芯片完成灯丝电流反馈电压、管电流反馈电压采样, 高压反馈电压采样; DA 芯片完成灯丝电流设置值、管电流设置值、高压设置值模拟电压输出。达林顿管驱动高压继电器和管电流/灯丝电流继电器。单片机通过 RS232 接口实现与上位机的数据交换、AD 芯片时序控制及数据采集、达林顿管控制、DA 芯片模拟信号输出等功能。硬件组成框图如图 10 所示。

5 试验结果

本文设计的电源可以为 X 射线发生器提供的额定工作条件为高压 160 kV(X 射线管两极电压分别为 +80 kV 和 -80 kV), 管电流 0.4 mA~1.2 mA 可调。图 11 所示为 X 射线发生器电源工作在 160 kV/1.0 mA 时分别测量的 X 射线管阳极和阴极直流电压, 可以看出, 两极正负高压的一致性较好。图 12 为高压高频全桥逆变电路中, 上下桥臂功率 MOSFET 栅极驱动电压及死区时间。

使用线阵列辐射探测器在距 X 射线发生器出光口 1 m 处测量得到的满度图像如图 13 所示。将搭载该新型电源的 X 射线发生器安装在同方威视技术股份有限公司的 CX7555BI 型安检系统中进行扫描出图试验, 图 14 所示为系统扫描图像, 可以看出安检扫描图像清晰可见, 细腻无条纹, 充分体现本文所设计的 X 射线发生器电源具有较高的性能水平。

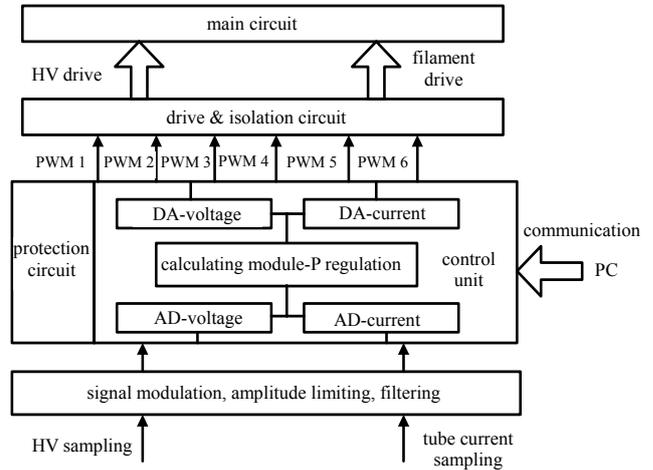


Fig.9 Block diagram of controlling system
图 9 控制系统原理框图

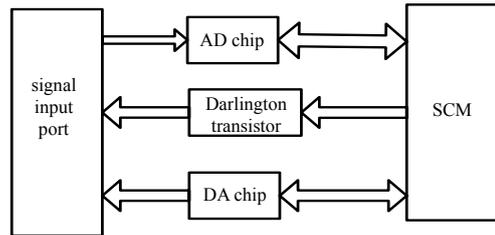


Fig.10 Block diagram of controlling system hardware
图 10 控制系统硬件组成框图

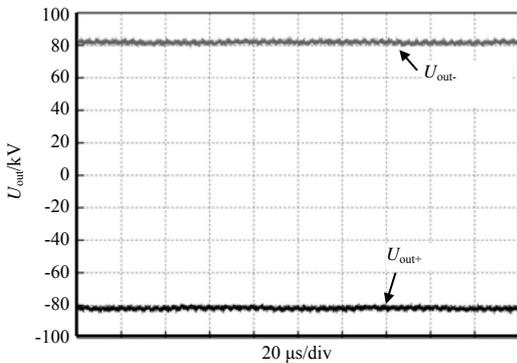


Fig.11 Output voltage of X-ray generator power system
图 11 X 射线发生器电源高压输出波形

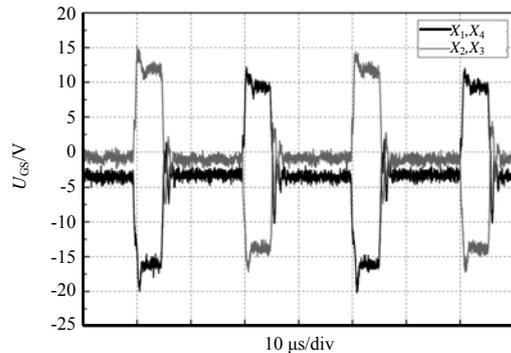


Fig.12 Drive waveform of MOSFET in resonant inverter circuit
图 12 逆变谐振电路中 MOSFET 驱动波形

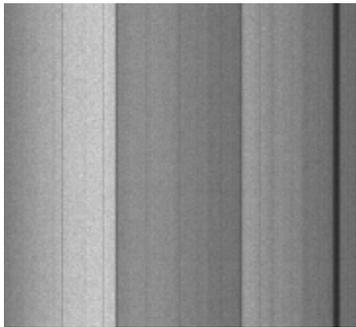


Fig.13 Original image of X-ray generator
图 13 X 射线发生器满度图像

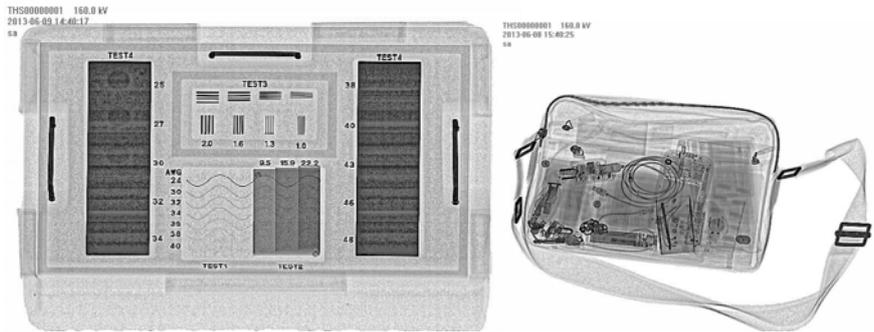


Fig.14 Scanned image of X-ray generator in security inspection system
图 14 X 射线发生器与安检系统联试的扫描图像

6 结论

本文设计了一种新型 X 射线发生器电源, 采用高频开关电源技术、高压倍压整流技术与单片机控制技术进行研制, 并成功应用于额定电压 160 kV、管电流 0.4 mA~1.2 mA 的用于安检设备的 X 射线发生器中。

参考文献:

- [1] EVANS J P O,WANG X,CHAN J W,et al. Colour 3D X-ray imaging for security screening[C]// IET Conference on Crime and Security. London:IET, 2006:372-377.
- [2] KOLKOORI S,WROBEL N,OSTERLOH K,et al. Novel X-ray backscatter technique for detection of dangerous materials: application to aviation and port security[J]. Journal of Instrumentation, 2013,8(9):1-18.
- [3] ZHANG Ran,ZHANG Li,CHEN Zhiqiang,et al. Sensitivity of a non-interferometric grating-based x-ray imaging system[J]. Physics in Medicine and Biology, 2013,59(7):1573-1588.
- [4] TAKAYA T,TOMONORI Y,AKIHIKO N. Development of laser cladding system with process monitoring by x-ray imaging[C]// High-Power Laser Materials Processing:Lasers,Beam Delivery,Diagnostics,and Applications III. San Francisc:SPIE, 2014: 4177-4180.
- [5] JUHA K,TIMO K,JAN W,et al. Assessment of effective radiation dose of an extremity CBCT,MSCT and conventional X ray for knee area using MOSFET dosimeters[J]. Radiat Protection Dosimetry, 2013,157(4):515-524.
- [6] AZAROV A V,PETERS P J M,BOLLER K J. Soft x-ray generation in gases by means of a pulsed electron beam produced in a high-voltage barrier discharge[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2007,16(1):110-115.
- [7] 王昌. X 射线电源系统[D]. 北京:北京交通大学, 2006. (WANG Chang. Study of power supply for x-ray[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2006.)
- [8] SUN J,DING X,NAKAOKA M. Series resonant high-voltage PFM DC-DC circuit with voltage multiplier based a two-step frequency switching contro for medical-use X-ray power generator[C]// The third International Conference on Power Electronics and Motion Control. Beijing:IEEE, 2000:596-601.
- [9] OGURA K,CHU E H, ISHITOB I M, et al. Inductor snubber-assisted series resonant ZCS-PFM high frequency inverter link DC-DC circuit with voltage multiplier[C]// Proceedings of the Power Conversion Conference. Osaka:[s.n.], 2002:110-114.
- [10] LIANG S S,TZOU Y Y. DSP control of a resonant switching high voltage power supply for X-ray generators[C]// 2001 4th International Conference on Power Electron and Drive Systems Conference. [S.l.]:IEEE, 2001:522-526.
- [11] 邵学飞,李威强. 浅析高频变压器分布参数的变化趋势[J]. 电力电子技术, 1995(2):44-46. (DENG Xuefei,LI Weiqiang. Brief analysis for the variation tendency of HF transformer distribution parameters[J]. Power Electronics, 1995(2):44-46.)
- [12] PEASGOOD W,DISSADO L A,LAM C K,et al. A novel electrical model of nerve and muscle using Pspice[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2003,36(4):311-329.
- [13] KONG M F,CHEN X B. A new high-voltage level-shifting circuit for half-bridge power ICs[J]. Journal of Semiconductors, 2013,34(10):105012-1-105012-6.

作者简介:



雷 宇(1987-),男,四川省绵阳市人,硕士,研究实习员,主要从事高压组件设计、脉冲功率技术方面的研究工作 .email:diylanny@hotmail.com.

冉汉政(1972-),男,四川省达州市人,硕士,高级工程师,主要从事高压脉冲功率技术方面的研究工作.

曾 清(1973-),女,福建省莆田市人,硕士,高级工程师,主要从事脉冲功率技术方面的研究工作.

2016 全国电子战学术交流会征文通知

未来战争将是信息化条件下的局部战争,电子战作为未来夺取制信息权的主要手段,受到了各国的高度重视,成为当前军事科技最为活跃的领域之一。特别是随着先进信息技术应用于军事,对电子战新技术的需求越来越迫切。基于这种形势,在吕跃广院士提议下,中国电子学会拟于 2016 年 6 月 25~26 日在北京举办“2016 全国电子战学术交流会”。有关会议事宜及征文内容如下:

一、大会主席:吕跃广院士

二、大会共同主席:杨小牛院士、陈志杰院士、包为民院士、何友院士、于全院士等

三、征文内容:

专题一 电子战系统技术:(1)电子战系统技术发展趋势;(2)电子战系统设备综合集成;(3)电子战系统设备组织运用;(4)电子侦察;(5)电子攻击及自卫对抗;(6)指挥控制及组网协同;(7)效能评估等

专题二 雷达对抗技术:(1)复杂信号环境下雷达对抗侦察和干扰新理论、新技术、新方法;(2)认知雷达对抗关键技术;(3)压缩感知技术在电子侦察接收中应用;(4)微波光子技术在雷达对抗中的应用;(5)自适应雷达对抗技术;(6)大数据分析在电子侦察中应用

专题三 通信对抗技术:(1)世界军事通信、通信对抗的装备与技术发展;(2)陆海空天平台通信对抗装备的设计、测试与验证;(3)复杂电磁环境下通信对抗装备的应用及效能评估;(4)电台网、卫星网、基础设施网等网络的对抗;(5)新型导航对抗;(6)无人作战平台、隐身目标等的对抗;(7)数据链、测控链路等链路的对抗;(8)新体制、低截获概率通信信号的对抗;(9)通信信号接收处理、高精度测向定位、最佳干扰等侦察与干扰技术;(10)通信对抗情报分析、个体识别等技术;(11)大数据、认知、一体化、综合化等技术在通信对抗中的应用;(12)通信对抗新技术、新概念、新理论。

专题四 光电对抗技术:(1)光电侦察新技术;(2)光电干扰新技术;(3)激光辐照效应与机理;(4)激光光限幅技术;(5)空天电磁环境监视、信息获取与目标识别;(6)复杂电磁环境下光电对抗新技术;(7)光电对抗仿真、虚拟现实与效能评估技术;(8)新型光源技术

专题五 侦/干/探/通一体化等技术

专题六 复杂电磁环境效应:(1)电磁及频谱认知;(2)复杂电磁环境效应研究;(3)复杂电磁环境逼真度构建;(4)复杂电磁环境仿真实验技术;(5)复杂电磁环境适应性评估技术

四、征文要求、论文格式及要求:可参看《太赫兹科学与电子信息学报》(www.iaeej.com)网站相关通知。会议优秀论文将推荐到《电子学报》、《雷达学报》、《现代雷达》、《电子对抗》、《电子信息对抗技术》、《舰船电子对抗》、《航天电子对抗》、《无线电工程》、《太赫兹科学与电子信息学报》、《安全与电磁兼容》等科技期刊。

联系人:张杰

E-mail:cie_ew2016@163.com

联系电话:010-68246068、13811330009