

周浩明, 刘鸾旸, 江晟. 射线管高压发生器主电路的设计与 PSpice 仿真[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(3): 114–119.
DOI:10. 20169/j. issn. 2095–2163. 250316

射线管高压发生器主电路的设计与 PSpice 仿真

周浩明, 刘鸾旸, 江 晟

(长春理工大学 物理学院, 长春 130022)

摘 要: 本文概述了 X 射线源系统中高压电源的作用及其对射线管工作状态的影响, 阐述了高压电源主电路的多级升压设计思路与高压电源整体设计方案。使用 OrCAD 绘图工具设计并搭建了高压电源主电路中各关键模块的电路结构, 基于 PSpice 插件实现了对主电路各模块的调试与瞬态仿真, 最终获得了能够稳定输出 40 kV 高压信号的主电路方案。

关键词: X 射线源; 高压电源; Cadence; PSpice; 瞬态仿真

中图分类号: TM832

文献标志码: A

文章编号: 2095–2163(2025)03–0114–06

Design and PSpice simulation of the main circuit of the high-voltage generator of the ray tube

ZHOU Haoming, LIU Luanyang, JIANG Sheng

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: This paper outlines the role of the high-voltage power supply in the X-ray source system and its impact on the working status of the ray tube, and explains the multi-level boost design ideas of the main circuit of the high-voltage power supply main circuit and the overall design scheme of the high-voltage power supply. After that, the paper uses the OrCAD drawing tool to design and set up the circuit structure of key modules in the main circuit of a high-voltage power supply. Based on the PSpice plug-in, the debugging and transient simulation of each module of the main circuit is achieved. Finally, the main circuit scheme that can stably output 40 kV high-voltage signal is obtained.

Key words: X-ray source; high-voltage power supply; Cadence; PSpice; transient simulation

0 引言

X 射线源是用于产生并发出 X 射线的产品, 由 X 射线管和高压电源电路以及控制电路构成。传统的 X 光机存在效率低、稳定性差、纹波系数大等较为明显的缺点^[1], 高压电源与工作环境对 X 射线管的工作状态有着较大影响。在电力电子中, 常用多级升压的方案获取 KV 级高压, 通过采用 Boost、Buck、Buck/Boost、全桥等拓扑结构实现对电信号的调制。在电路设计上, 高压电源的研发需要考虑电子电路设计、器件选择、pcb 版图绘制等多方面因素, 为了设计出一款具有稳定输出的 X 射线管专用供电电源, 可以使用仿真软件对高压发生器中的主

电路进行设计与仿真验证, 从而达到节约成本、减少硬件调试工作量、提升系统稳定性等目的。在本论文中, 主电路采用 AC-DC-AC-DC 升压方案, 通过逐级调制与升压能够得到稳定的 40 kV 直流电压输出, 在 Cadence 软件中使用 PSpice 插件瞬态分析主电路中的各个模块的工作状态, 并进行参数调整, 从而验证该电路输出 40 kV 电压信号的稳定性。

1 主电路设计原理

直流高压电源的设计通常是采取低压交流电信号经过整流、逆变以及升压后得到高压信号的调制方案, 即 AC-DC-AC-DC 的信号调制过程; 或者直接从低压直流电经过逆变、升压后得到, 即 DC-AC-

作者简介: 周浩明(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统, 模拟电路设计; 刘鸾旸(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 光电探测与传感技术。

通信作者: 江 晟(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 红外高光谱图像处理, 多源融合的嵌入式处理系统, 光电检测设备。Email: js1985_cust@163.com。

收稿日期: 2023–08–29

DC 变换模式^[2]。本电源系统采取 AC-DC-AC-DC 模式,如图 1 所示。



图 1 升压电路调制过程

Fig. 1 The process of boost circuit modulation process

主电路采用逐级升压方案,系统的设计思路为:

(1) 使用全桥整流电路对 220 V 市电半波整流, 获得峰值 $V_n = 220$ V, 频率翻倍的脉冲波形。

(2) 脉冲波形经过 Boost 电路的升压整流, 获得 400 V 左右的稳定直流电。

(3) 400 V 直流电作为 Buck 变换电路的输入信号进行调压, 得到 $V_p = 400$ V 的方波交流信号, 此电压作为逆变电路的母线电压。

(4)使用变比为 1/10 的高频变压器获取 kV 级高压,初级线圈输入 DC400 V 的方波交流信号,次级线圈为倍压整流电路提供 4 kV 的高压。

(5)设计正负双相倍压整流电路把4 kV 高压AC 电信号升压整流至DC40 kV 并输出。

高压电源整体设计方案如图 2 所示。

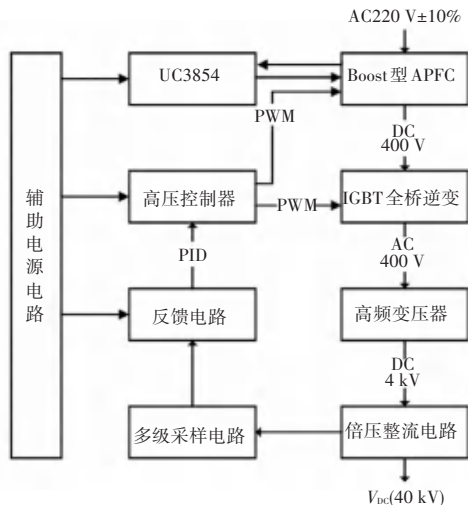


图2 40 kV 高压电源设计方案

Fig. 2 40 kV high -voltage power design scheme

2 电路模块分析

2.1 AC-DC 变换电路

AC-DC 电路能够通过桥式整流电路、滤波电路把输入端的交流信号 V_{in} 处理为稳定的直流输出 U_o 。典型的整流电路如图 3 所示。

电路工作时,在交流电的驱动下整流桥中的二极管 D_1 & D_4 、 D_2 & D_3 会交替导通,把正弦交流信号调制为单相的脉冲波形;LC 滤波电路利用电感 L 的

续流特性和电容 C 的储能作用,使输出端 U_o 的节点电压与电流不能突变,从而把前级脉冲信号转化为稳定的直流输出。

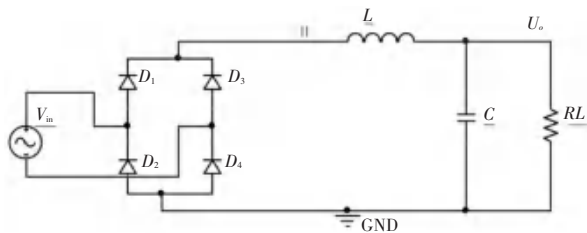


图3 典型整流电路

Fig. 3 Typical rectification circuit

但在电路实际使用的过程中,由整流二极管、滤波电容等非线性元器件组成的整流滤波电路工作时,输入的正弦电信号流经非线性负载会产生周期性变化的尖峰电流。这种畸变的输入电流含有大量的高次谐波分量,这些高次谐波将会在电网中引起严重的谐波污染。谐波会影响电路中各种电路元件的正常工作,使电能的传输和利用效率降低,高次谐波产生时会瞬间减小电容器的阻抗,大量电流涌入电容器,进而导致过热,严重时会导致设备烧毁等问题。电流和电压谐波输入后级逆变电路后则会导致开关管带载压力增大、变压器容量裕度减小、电路共振级噪声增加等问题。

为了提高电源电路的功率因数,常用的方法主要从抑制谐波、减小电压与电流的相位差等方面考虑,常用方法有:

(1)无源功率因数校正(PPFC)。使用只含有被动电子器件(如电感、电容等)的滤波器,将输入的电流进行相移、整流。这种方法的功率因数可以达到0.9以上,电路简单,但电路体积较大,并且可能在某些频率点产生谐振损坏系统。

(2)有源功率因数校正(APFC)。APFC 电路主要是在整流器与输出电容器之间串联有源功率控制器,通过调整负载的输入端电流提升电路系统的功率因数,主要的特点是调制后的输入电流信号接近纯电阻式负载电流,视在功率接近有功功率。理想状况下 APFC 电路的输入电流和输入电压为同频同相的正弦波^[3];其视在功率等于有功功率,无功功率为 0。

与无源功率因数校正相比较,有源功率因数校正是一种更为灵活的方法。

本仿真主电路的输入级 AC-DC 变换电路使用 Boost 型 APFC 电路, APFC 电路由功率变换电路和控制电路两部分组成。控制电路使用电流环 (V_{in} 、 I_L) 与电压环 (V_{out}) 双环控制逻辑。电流环采样流

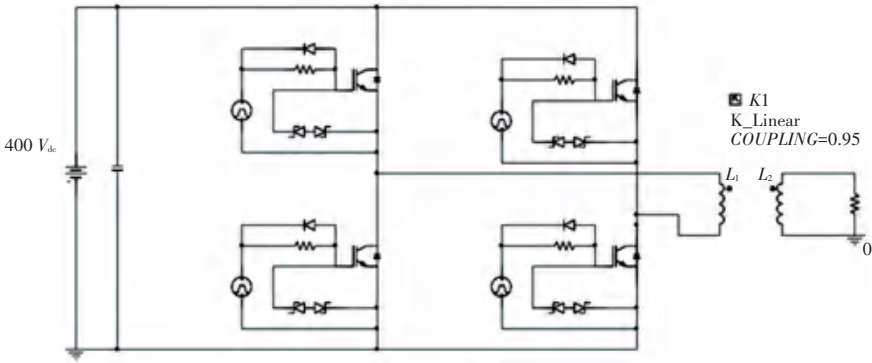


图 5 全桥逆变电路仿真电路图

Fig. 5 Simulation diagram of full bridge inverter circuit

高频变压器是功率变换器的核心器件,其设计好坏直接影响着电源系统的整体性能和效率。本仿真采用变比为 1 : 10 的理想变压器以减小计算机负载,提升仿真效率。实际电路搭建时应采用面积乘积 AP 法或几何系数 KG 法详细计算变压器参数。

2.3 倍压整流电路

高压源设计中,可以通过增大高频变压器的变比获得高压。但随着变压器绕组的增加,其分布电容、漏感等分布参数会大幅增加,影响信号质量。同时,由于工艺限制,性能优异的高变比变压器的制作仍有难度。因此,本电源采用两级升压的逻辑,把高频变压器输出的 kV 级高压接入倍压整流电路进行多倍压整流处理,从而得到所需的高压输出。图 6 为典型的倍压整流电路。

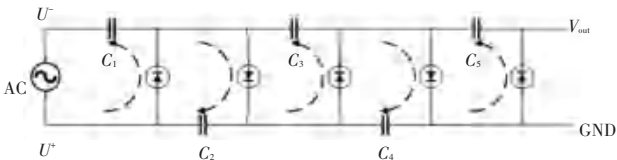


图 6 典型倍压整流电路

Fig. 6 Typical double-voltage rectifier circuit

由于二极管单向导通的特性,流过电容的电流方向如图 6 中的箭头所示。在变压器负半周期时(下正上负) C_2 不导通,变压器为 C_1 充电^[5], 此时电容两端

电压峰值约等于变压器次级线圈输出的电压峰值 U_M , 在下一个正半周期时(第二周期),电容 C_1 会在变压器负端和二极管负端保持一个大小为 U_M 的电势差,此时 C_2 两端的电压差为:

$$U_{C2} = U_{C1} + U_M \approx 2U_M \tag{1}$$

C_2 充满电后则会在 $U +$ 端与第二级二极管负相端保持 $2U_M$ 的电势差,使得在第三个周期时 C_3 两端的电压为:

$$U_{C3} = U_{C2} + U_M \approx 3U_M \tag{2}$$

采用这种方法,逐级递增二极管和电容器,即可组成多倍压电路,在第 N 级时能够对输入信号 U_M 实现 n 倍升压。输出电压则从最后一级二极管的负相端引出。

本文中采用了正负双相倍压整流的电路方案。在变压器次级线圈输出端并联 2 个相位相反的倍压电路,组成正负双向倍压整流的方式,并使正负两端一端接地,另一端输出高压^[6]。这样就可以获得 $2N$ 倍的倍压效果(N 为单个倍压电路的级数)。这样做的目的主要是为了减小倍压整流电路的内部压降,提高直流电源的稳定度和效率,增强了负载能力,可以大幅度地减小电源输出的纹波系数^[7]。基于 PSpice 搭建的双相倍压电路电路图如图 7 所示。

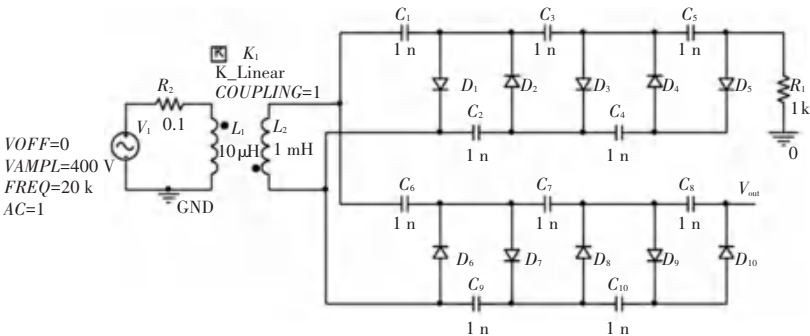


图 7 双相倍压电路图

Fig. 7 Double-phase multiplier circuit diagram

3 基于 PSpice 的电路仿真

电路仿真软件采用 Cadence 公司旗下的 PSpice 仿真软件,绘制原理图的工具是 Orcad。在使用包含 PSpice 模型的数据库绘制原理图时,可以在真实的原理图上做少量更改,如添加激励、添加参数等就能进行仿真,而不需要额外绘制专用于仿真的电路图,这一点带来了很大的方便。PSpice 的仿真精度

很高,仿真能很好地模拟真实情况;支持瞬态分析、AC 分析、参数扫描、蒙特卡洛分析等多种分析类型;支持模拟电路和数字电路仿真。

根据前文对 AC/DC 电路的设计,使用 PSpice 仿真工具搭建 APFC 电路并对其进行仿真。电源输入级使用幅值为 220 V、频率为 60 Hz 的交流电信号模拟市电作为整流电路的信号输入,整流电路与 Boost 型 APFC 电路的输出信号波形如图 8 所示。

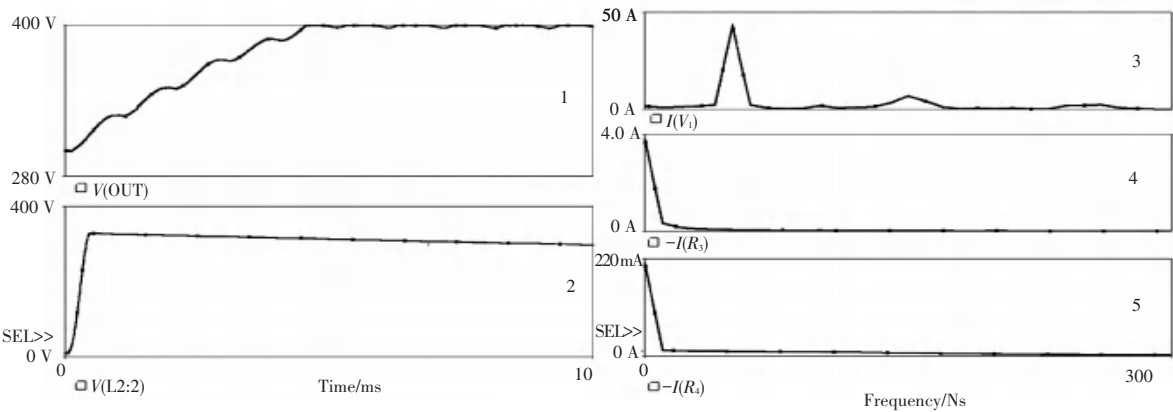


图 8 整流电路和 APFC 电路的 PSpice 仿真信号波形
Fig. 8 PSpice simulation signal waveforms of rectifier circuits and APFC circuits

图 8 左侧的波形 1、波形 2 分别为 APFC 电路输出电压信号与整流电路输出的电压信号;可以看出,与典型整流电路相比 APFC 电路引入电流环与电压环反馈后需要更长的启动时间(约为 50 ms)才能获得稳定的输出信号,输出电压稳定后能获得稳定在 400 V(±10 V)的直流电压信号。

任何连续测量的时序或信号,都可以表示为不同频率的正弦波信号在频域的无限叠加^[8]。为了更直观地反映电路中高频谐波的分布情况,对信号波形进行傅里叶变换即可看到信号的频域信息;图 8 右侧的波形 3、波形 4、波形 5 分别为 220 V 输入电流信号、APFC 输出电流信号和整流电路输出电流信号经傅里叶变换得到的频域波形。波形 3 中可以看出,输入电信号中分布着大量 60 Hz 倍数的高次谐波。波形 4 和波形 5 展示了 APFC 电路和典型整流电路的输出频域信号,可以看出这两者均可滤除大量高次谐波,提供较稳定的直流电信号。而 APFC 电路相较于典型整流电路输出的高次谐波更少,拥有更高的品质因数。输入电信号经过有源功率因数电路校正后,输入电流的谐波分量大幅减小,

功率因数接近 1。能为后级 Buck 变换电路提供稳定在 400 V 左右的输入电压,提高了电源的效率。

AC-DC 电路输出的 400 V 直流电信号作为逆变电路(DC-AC 电路)的输入信号。逆变电路的仿真模型中使用 4 颗英飞凌(Infineon)公司生产的 IGBT 管搭建全桥电路实现电信号的逆变,IGBT 管型号为 IRG4PC50UDPBF,使用移相 PWM 信号作为全桥驱动信号。电压经过逆变电路的逆变、升压处理以获得高压电信号如图 9 所示。

全桥逆变电路能够将 400 V 的直流输入信号调整为 $V_{p-p} = 800$ V 的交流方波信号,输出频率取决于开关管驱动信号频率。方波信号经过变压器升压后能够得到 $V_p = 4$ kV 高压信号。此高压信号作为升压电路的输入级二次升压,即可获得 X 光管工作所需的 40 kV 高压信号,其输出波形如图 10 所示。

经过倍压电路的逐级升压与整流,能够得到稳定在 40 kV 的高压输出,满足所选射线管的工作电压要求。

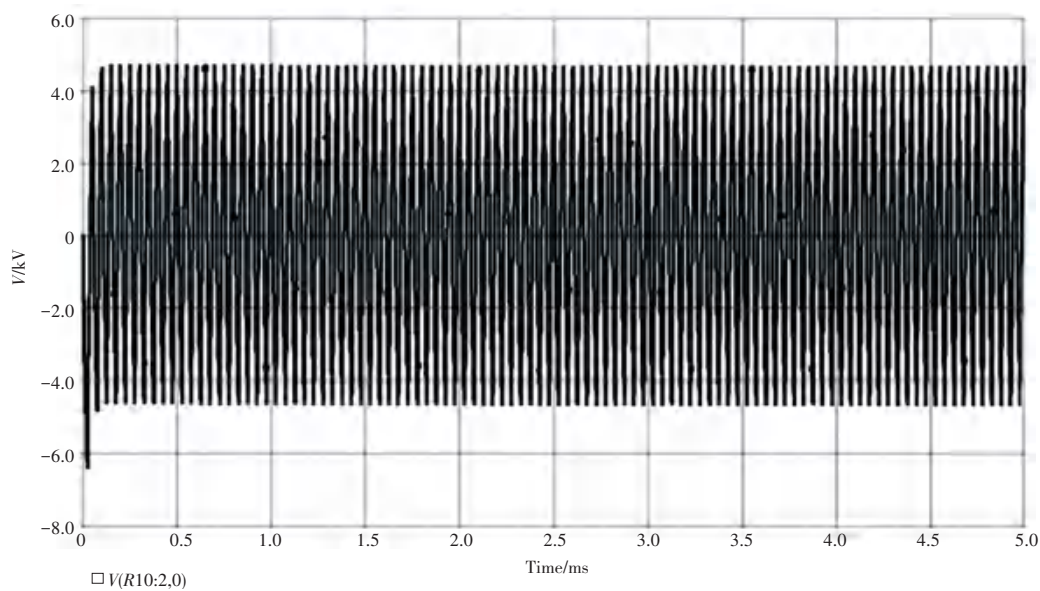


图 9 全桥逆变升压电路输出电压波形

Fig. 9 The output voltage waveform of the whole bridge inverter voltage

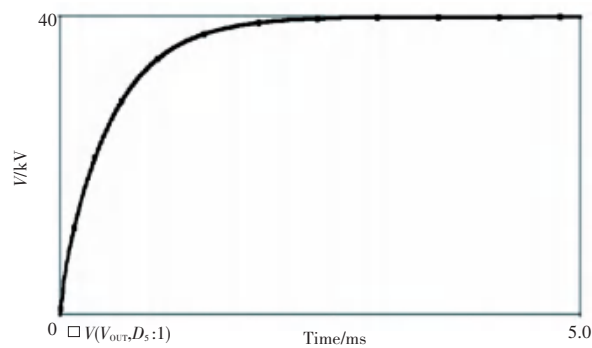


图 10 倍压电路输出电压波形

Fig. 10 Boosted circuit output voltage waveform

4 结束语

通过对高压电源设计的系统研究,本文深入剖析了其设计原理、技术挑战及优化策略,展现了高压电源在现代科技和工业中的不可或缺性。本次研究不仅为高压电源的设计提供了理论支撑和实践指导,也在一定程度上促进了相关领域的技术创新和

发展。尽管如此,但高压电源设计领域仍有待进一步探索和完善。未来将会在高压电源设计领域持续加大项目投入力度,助力该领域研究取得更多突破。

参考文献

[1] 赵颖异,井明忠,张博文,等. X 射线管的高压电源及灯丝电源电路的设计[J]. 电子设计工程,2021,29(21):79-83.

[2] 董文宇. X 射线管用直流高压电源的设计[D]. 大连:大连理工大学,2014.

[3] 梁文仪,万忠东,陈兵. ZVT-PWM 有源功率因数校正器的实现[J]. 电气应用,2005(9):69-71.

[4] 董秀芬. 一种有源功率因数校正电路及控制方法的设计[J]. 微型机与应用,2012,31(19):35-39.

[5] 孙亮亮,李利品,马桥斌,等. X 光管小型高压电源的研制[J]. 电子测试,2011(11):54-57.

[6] 吴占友. X 射线管用 140 kV 高压直流电源的设计[D]. 大连:大连理工大学,2008.

[7] 殷浩琳. 一种新型高压大功率脉冲电源的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.

[8] 陈垣毅. 风能及光伏发电功率短期预测方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.