

小型高频X射线机的控制策略及样机研制

曾莹莹¹, 肖化武², 刘朝晖¹, 陈海辉^{3*}

¹井冈山大学机电工程学院, 江西 吉安

²重庆三峡学院电子与信息工程学院, 重庆

³井冈山大学化学化工学院, 江西 吉安

收稿日期: 2024年4月7日; 录用日期: 2024年4月24日; 发布日期: 2024年6月28日

摘要

阴极空间电荷效应、灯丝电流漂移是X射线发射管的固有特性, 是X射线机管电压、管电流精确控制的瓶颈问题。传统控制方案有缺陷, 难以满足X射线机小型轻量、高效率、快速响应、高性能等要求。该文提出了新的控制策略, 解决了这个难题: 基于X射线机管电流的闭环控制策略, 用占空比作为非线性实时动态补偿X射线管阴极空间电荷效应的影响, 构建前馈控制环节, 对管电压大范围变动实现快速预调; 构建X射线管灯丝电流作副控变量的串级控制, 应对管电流的滞后, 减少整个X射线发射过程的时间常数。自主研发了4套小型高频X射线机样机, 构建MC34067管电压控制电路、TL494管电流控制电路, 单片机根据管电压范围段进行阴极空间电荷效应的非线性补偿, 并对新研制样机的控制效果进行测试。试验结果表明, 该X射线机的控制新策略有效, 电路装置可靠, 拍摄效果良好。

关键词

高频X射线机, 管电压, 管电流, 阴极空间电荷效应, 控制策略

Control Strategy and Prototype Development of small High Frequency X-Ray Machine

Yingying Zeng¹, Huawu Xiao², Zhaohui Liu¹, Haihui Chen^{3*}

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Jinggangshan University, Ji'an Jiangxi

²College of Electronic & Information Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing

³College of Chemistry & Chemical Engineering, Jinggangshan University, Ji'an Jiangxi

Received: Apr. 7th, 2024; accepted: Apr. 24th, 2024; published: Jun. 28th, 2024

Abstract

Cathode Space Charge Effect (CSCE) and Filament Current Drift (FCD) are inherent characteristics

*通讯作者。

文章引用: 曾莹莹, 肖化武, 刘朝晖, 陈海辉. 小型高频 X 射线机的控制策略及样机研制[J]. 电力与能源进展, 2024, 12(3): 85-92. DOI: 10.12677/aepe.2024.123010

of X-ray emitting tube, which is the key problem for the precise control of tube voltage and tube current in X-ray machines. The traditional control scheme is defective and difficult to meet the requirements of small and lightweight, high efficiency, fast response and high performance of X-ray machines. A new control strategy is proposed in this paper to solve this challenge. Based on the closed-loop control strategy of X-ray tube current, the duty cycle is used as a nonlinear real-time dynamic compensation for X-ray tube Cathode Space Charge Effect (CSCE), and the feed-forward control is constructed to achieve rapid pre-adjustment for a wide range of variations of the tube voltage; The serial control of X-ray tube filament current as a subcontrol variable is constructed to cope with the hysteresis of the tube current and to reduce the time constant of the whole X-ray emission process. Four sets of small high-frequency X-ray machine prototypes are developed independently, MC34067 tube voltage control circuit and TL494 tube current control circuit are constructed, and the microcontroller compensates the Cathode Space Charge Effect nonlinearly according to the tube voltage range section, and the control effect of the newly developed prototype is tested. The test results show that the new strategy for controlling the X-ray machine is effective, the circuit device is reliable, and the X-ray photos are clearly.

Keywords

High Frequency X-Ray Machine, Tube Voltage, Tube Current, Cathode Space Charge Effect, Control Strategy

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 前言

根据球管处于人体的不同方位而适时调节管电流输出称为 CT 管电流调制技术,可降低图像噪声、提高信噪比和空间分辨率,因此近年来得到广泛认同[1] [2]。在此基础上,X射线机的管电压也能跟着人体的解剖结构和尺寸变化而调整,那就实现了以最小辐射剂量为代价来保证图像质量,即实现 X 射线实时动态输出[3] [4] [5]。这就要求管电压、管电流短时间内达到稳态输出,要求管电压、管电流动态响应尽可能快[5] [6] [7]。X 射线机高动态响应难度较大的主要原因[6] [7]:管电压、管电流的输出范围越来越大,如现在某些 X 线机管电压要求在 20~150 KV 之间变化,管电流要求在 0.5 mA~1 A 之间变化;动态响应性要求越来越高,如某些管电压、管电流要求在 1 ms,甚至更短时间以内达到稳定状态;X 线管固有的发射特性:阴极空间电荷效应,灯丝电流漂移;高频电路出现电压尖峰和电流浪涌;现有的控制技术还有得提高。这些问题给医用 X 线机小型轻量化、高效率化、快速响应、高性能化带来很大的负面影响[8] [9]。高频 X 线机管电压控制、管电流控制采用简单 PID 控制方案,管电压的上升响应变慢,越是轻负荷,上升时间越长[8] [9]。采用模糊 PID 控制方法虽然能够得到最佳的电压波形,但因模糊推理计算需要时间[8]。国内外研究文献[6] [7] [8] [9]对高频医用 X 线机的控制方式有所报道,研究主要集中在中大型高频射线机、管电压、静态精度方面,对微型高频 X 射线机(管电流 10 mA 以内)的精确控制研究却非常少。

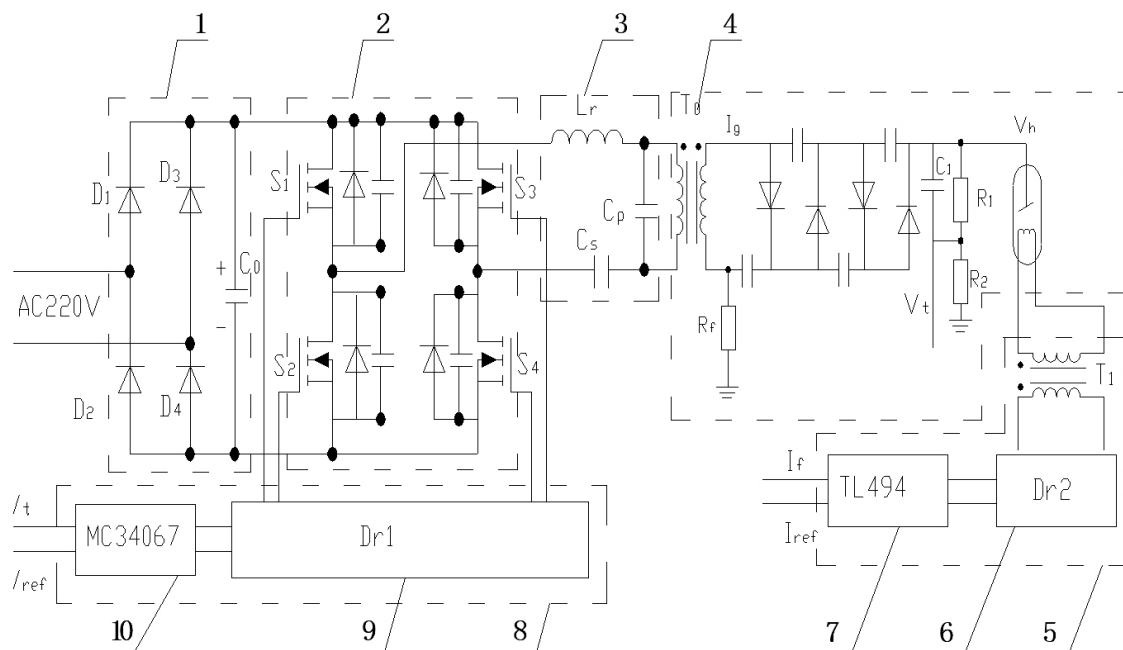
中国专利 02215351.9 提出了小容量组合式 X 线发生器电路构成,它包括一个控制箱和主机,主机包括逆变电路、高频整流电路、灯丝电路。该类电路不足之处在于将逆变电路放置在主机内,难于保证其绝缘、抗干扰能力。西门子公司中国专利 200310085526.0 提出使用单个内存储信息位置图控制 X 射线管电流调制的方法。滨松光子学株式会社的中国专利 03807709.4 提出:在控制装置存储与管电压值对应

的动作程序。利用了存储单位的预存数值、数值计算结合而输出控制信号，但无法消除元器件、X 发射管的电参数差异影响。通用电气公司的中国专利 90101239.4 提出：管电流反馈信号用来控制 X 射线管灯丝电流，通过插入一个与管电流命令倒数成比例的信号，在管电流的宽范围内使反馈环路的增益保持基本不变。但该专利的管电流进行了固定比率补偿，即只进行了一段补偿，难以精确补偿 X 射线发射管阴极空间电荷效应。中国专利 200620025175.9 提供一种高频直流 X 射线高压发生器，但该类电路不足之处没有管电流、管电压的反馈检测电路，不能精确控制管电流、管电压。中国专利 03133411.3、200620012531.3、200710143656.9、200710139049.5 均涉及到组合机头机芯的固定问题。这些专利均没有设计机头机芯引线经过外壳与外接引脚之间如何密封，发射窗口如何密封。

本课题组提出发明专利 201110189158.4 [5]，提出了一种准谐振型高频 X 线机的控制新方法及其控制电路；发明了一种高频直流 X 射线源组合式机头的 200920060095.0，解决了如何密封的问题[10]；提出了发明专利 201510131916.2，提出了一种高频 X 射线机的锂电池供电方法及其电路，制作出锂电池供电型便携式小容量高频 X 射线机[11]。在研制了多款小容量组合式 X 线发生器电路的基础上[5] [10] [11] [12] [13]，本文设计出微型高频 X 射线机的主电路，提出控制新策略及实施电路，研制出新样机，并对新研制样机的控制效果进行测试。

2. X 射线机主电路设计

微型高频 X 射线机主电路由全整流桥、MOSFET 高频开关、高频变压器、倍压整流回路构成。主电路如图 1，管电压控制如图 2。如图 1 所示，主电路拓扑结构采用零电压开关准谐振全桥变换器进行功率变换，采用高频变压器次级绕组在初级侧的等效分布电容作为并联谐振电容，MOSFET 管输出电容及外加电容作为串联谐振电容，包括高频变压器的漏感在内的谐振电感，实质上是一种串并联混合谐振变换电路。这种直流高压 DC-DC 变换拓扑电路，可适用动态范围较大的负载，如高频 X 射线球管。



1.全桥整流电路；2.高频开关逆变电路；3.高频电容电感；4.X 射线机球管；5.管电流控制部件；6. X 射线发射管灯丝加热电路；7. T494L 控制器；8.管电压控制部件；9.高频开关驱动电路；10. MC34067 控制器

Figure 1. Main circuit of micro high frequency X-ray machine

图 1. 微型高频 X 射线机主电路

3. 电压控制策略及实施电路

管电压控制电路如图 2，MC34067 为其核心芯片，它采用恒关断时间，通过频率改变来实现占空比改变的模式，稳定输出的管电压。电路谐振频率由 R1 和 C1 决定，管电压的反馈值为 V_{ref} ，管电压的设定值为 V_t 。MC34067 芯片 12、14 引脚接图 1 的高频开关驱动电路 9。高频开关驱动电路 9 接图 1 中 MOSFET 管的开/关控制引脚，从而控制 MOSFET 管的开与关。

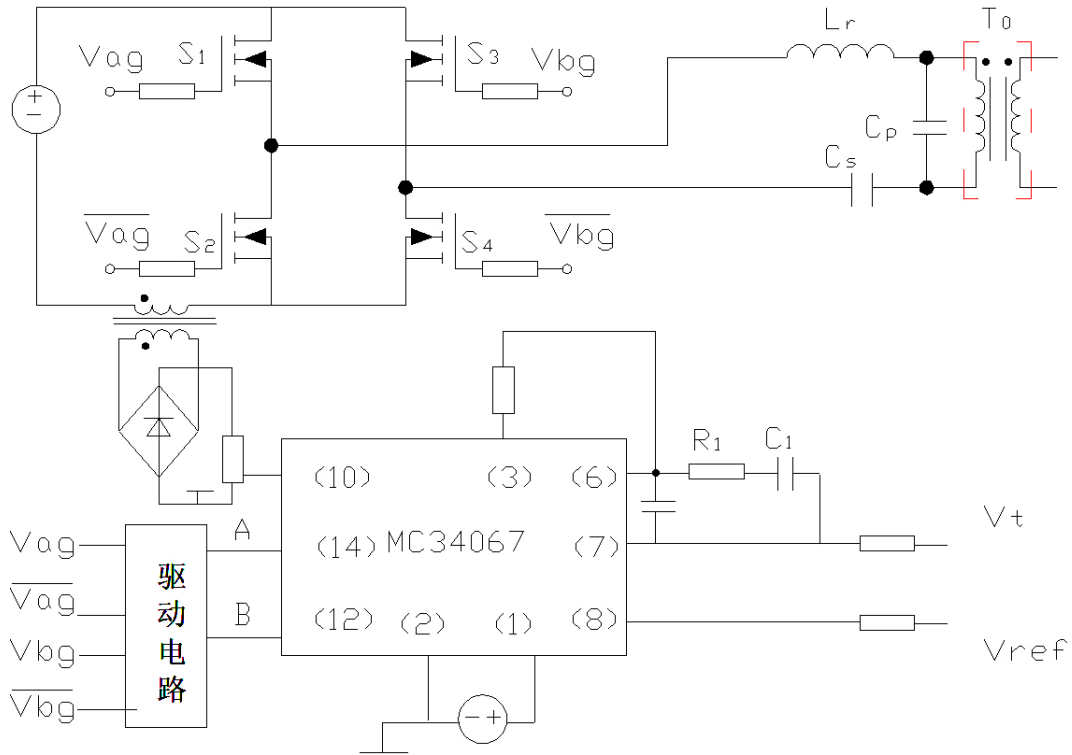


Figure 2. Control circuit of tube voltage
图 2. 管电压控制电路

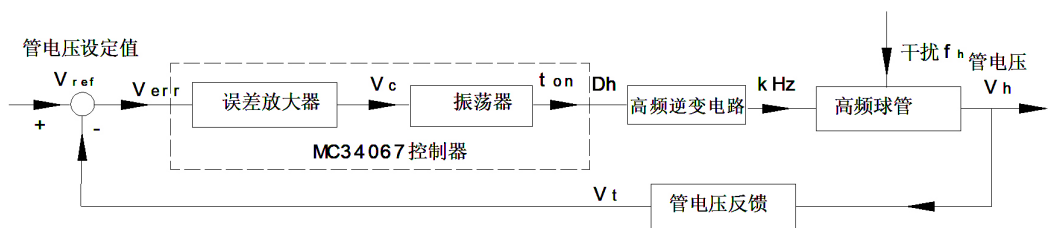


Figure 3. Voltage control strategy
图 3. 管电压控制策略

管电压控制原理如图 3 所示，是一个典型的负反馈闭环控制策略。在该高频逆变电源中，MOSFET 管的开关驱动信号必须可靠，不能出现上下管共通现象，还要避免逆变器负载进入容性状态，防止 MOSFET 管损耗剧增而烧坏。

4. 管电流快速控制及实施电路

构建两种控制策略：管电流的前馈—反馈控制方法如图 4 所示，管电流前馈—串级控制方法如图 5

所示。如图 4 所示，基于 X 线机管电流的闭环控制策略，前馈部分引入占空比(代表管电压)信号，作为实时动态补 X 射线管的阴极空间电荷效应，对管电压的大范围变动实现快速预调。如图 5 所示的管电流前馈—串级控制方法，是未了考虑灯丝加热电流的微小变化会引起管电流的大幅变化，将 X 射线发射管的灯丝加热电流作为副控变量，减少 X 射线发射过程的时间常数，提高管电流的动态精度。

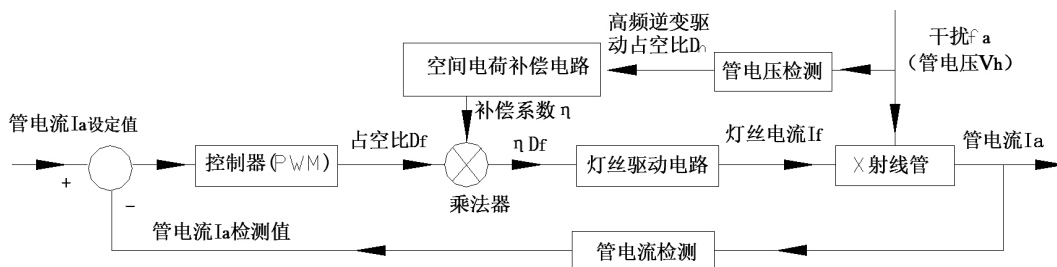


Figure 4. Control strategy of feedforward-feedback for the X-ray tube current
图 4. 管电流前馈 - 反馈控制方法

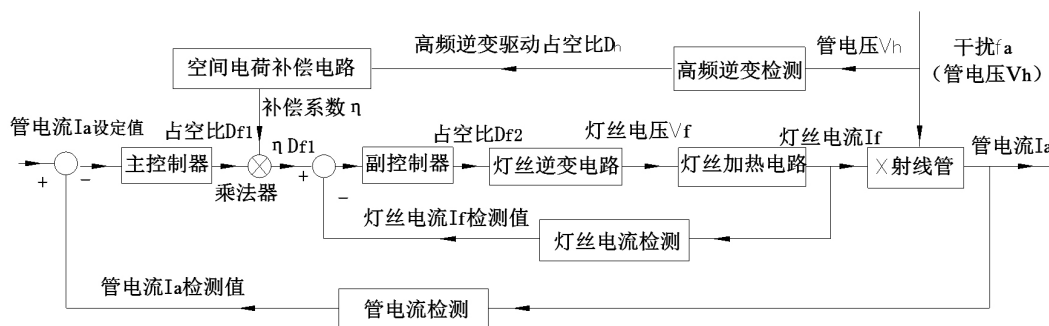


Figure 5. Control strategy of feedforward-cascade for the X-ray tube current
图 5. 管电流前馈 - 串级控制方法

5. 空间电荷效应的补偿电路

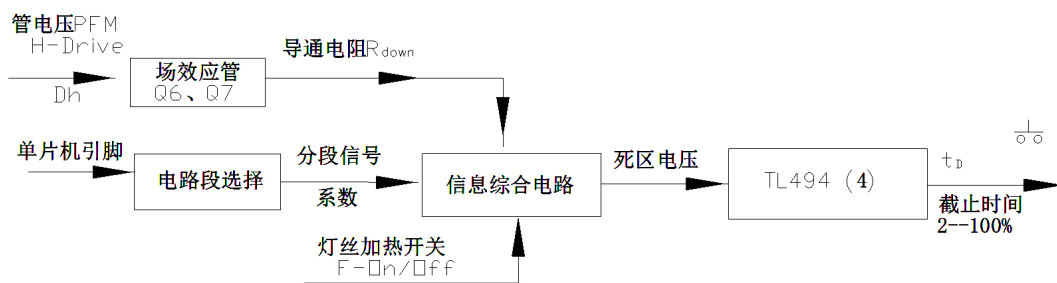


Figure 6. Compensation circuit
图 6. 分段补偿电路

管电压非线性分段补偿 X 射线管阴极空间电荷效应的电路如图 6 所示。管电压检测反馈值 D_h 实时反映了 X 射线的管电压， D_h 决定了场效应管开通时间，从而决定了导通电阻 R_{down} 。单片机根据管电压反馈值 D_h ，选择不同的电路段，可给出相应的补偿系数。结合导通电阻 R_{down} 、补偿系数，综合信息电路计算出最终补偿量(死区电压)，实现在整个 X 射线管的管电压范围内进行非线性补偿。该补偿量可引入管电流控制的前馈部分，输送给 TL494 第 4 引脚作死区电压，从而控制了 TL494 芯片 PWM 输出的截止时间百分比(2%~100%)。

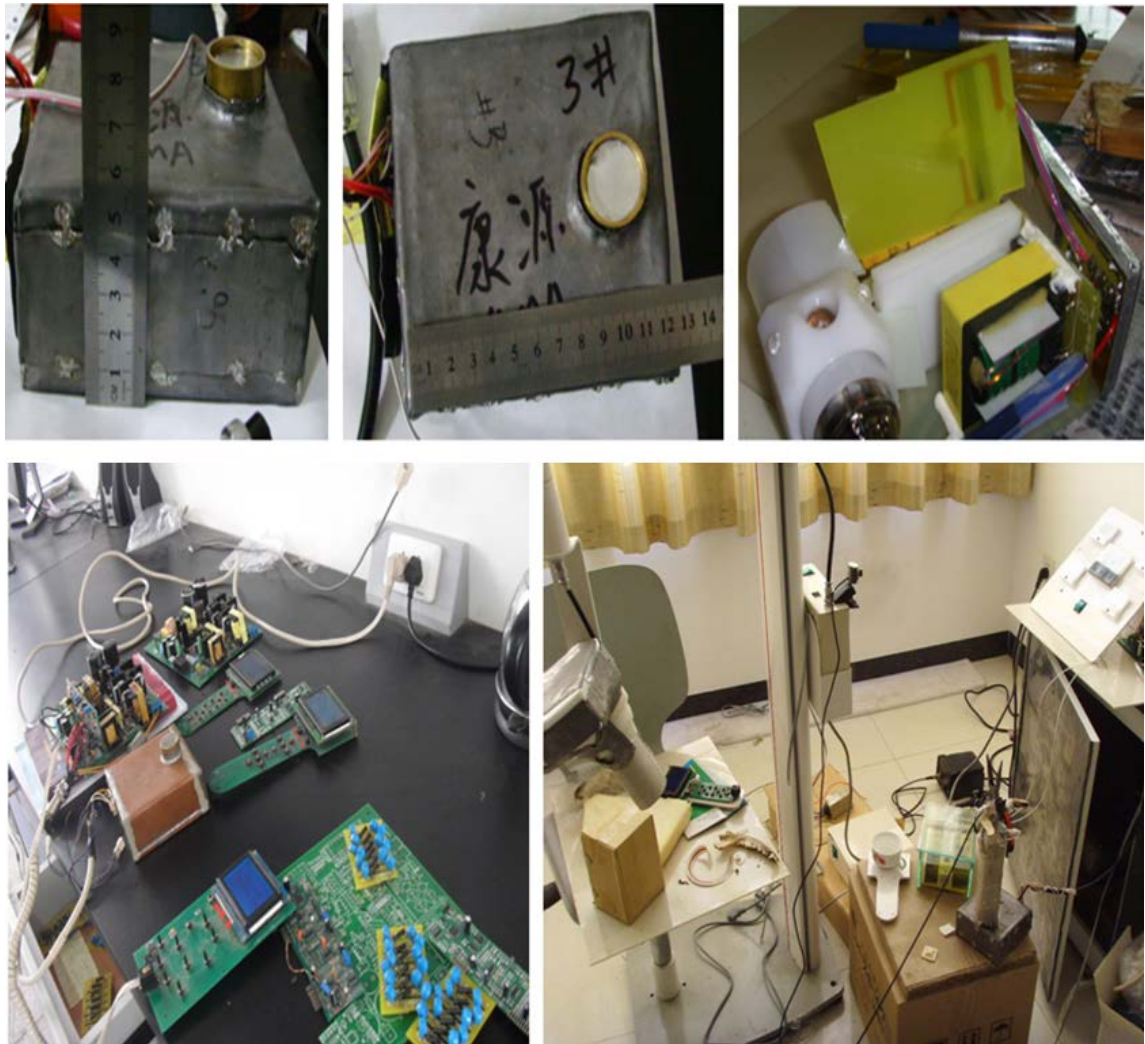


Figure 7. Prototype of small high-frequency X-ray machine
图 7. 小型高频 X 射线机样机实物

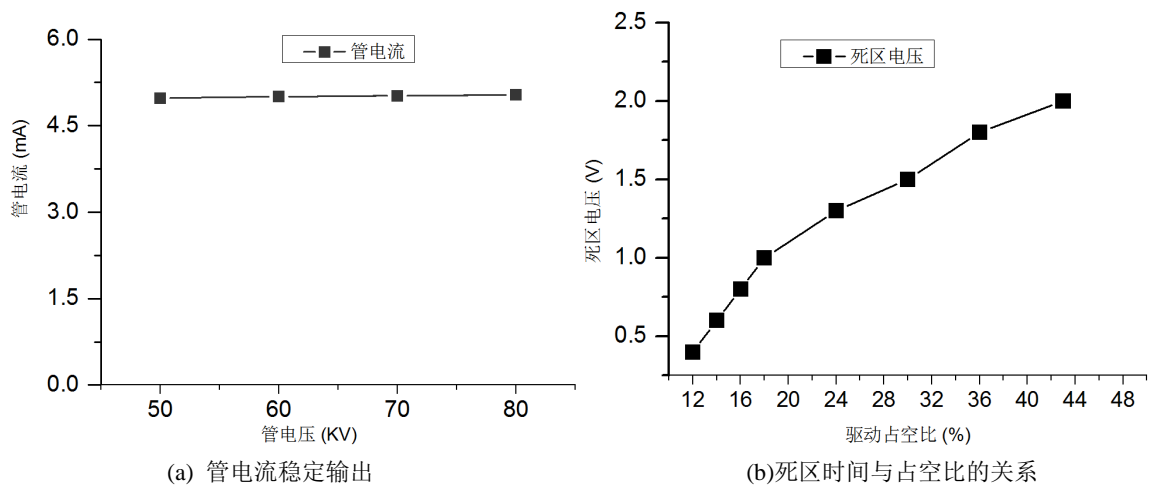


Figure 8. Experimental results of Prototype control strategy
图 8. 样机的控制策略实验效果

6. 试验结果

基于上面的想法, 研制作了小型高频 X 射线机 4 台, 实物如图 7 所示, 主要技术参数: 固定阳极 X 射线管, 高频开关频率 20 kHz, 灯丝加热电源(DC5V, 3A), 高频高压变压器 30 倍升压, 8 级倍压整流, 电压反馈检测在第 2 级倍压整流处; 球管外壳采用紫铜便于散热, 130 mm 长, 120 mm 宽, 55 mm 高。样机测试结果表明: 在 2~5 mA 范围内管电流误差波动在 5% 以内, 在 50~80 kVA 范围内管电压误差波动在 3% 以内, 曝光时间误差在 3% 以内。500 W 手电钻突然开、断作为模拟干扰源, 测试其抗干扰能力, 实验结果表明样机没有受到干扰。

通过测试不同管电压下的管电流情况, 绘制了管电压大范围变化下的管电流稳定输出曲线, 如图 8(a) 所示, 可以看出管电压在 50~80 KV 之间变化, 管电流在设定值附近上下波动 3% 左右。非线性补偿电路效果如图 8(b) 所示, 死区时间电压随着驱动信号占空比(管电压)增加而增加, 但它们之间的关系为非线性, 死区时间电压增加率在占空比较小时(小于 20%)时明显高于占空比较大时(20%~44%)。

样机 X 射线拍摄效果如图 9 所示。临床实验结果如图 9(a) 所示, 标本实验结果如图 9(b) 所示, 可以非常清晰地看到牙釉质、牙本质、牙髓腔、牙槽骨、牙周膜、骨硬板。

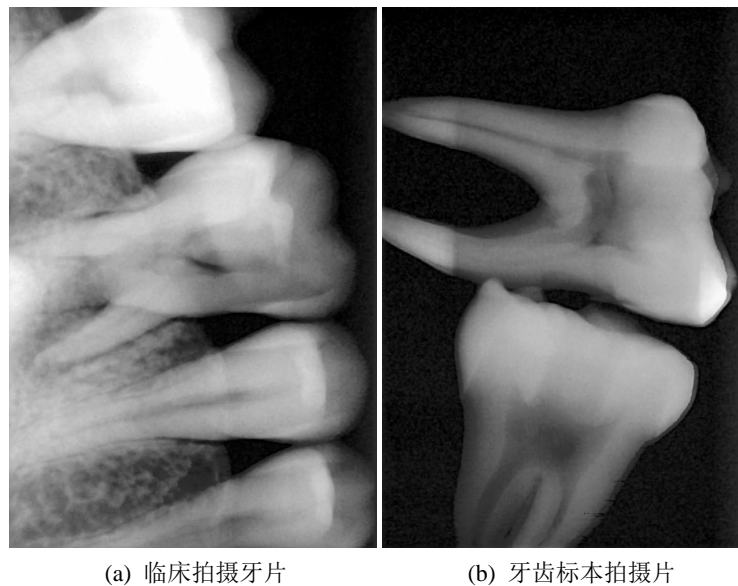


Figure 9. X-ray photos of these prototypes
图 9. 样机 X 射线拍摄片

7. 结论

该文提出了微型高频 X 射线机的控制新策略, 解决了 X 射线机精确控制的瓶颈问题: 1) 将占空比(管电压反馈值)实时引入前馈部分, 根据管电压大小, 进行分段非线性补偿 X 射线管阴极空间电荷效应; 2) 在通用的“脉宽调制灯丝电流以实现管电流闭环控制”的基础上, 引入灯丝加热电流作为副控变量, 做管电流的串级控制, 以减少整个过程的时间常数, 缩短过渡时间的管电流精确控制策略。采用集成芯片 MC340367、TL494, 研制出实现这种控制方法的微型高频 X 射线样机。样机试验结果表明该电路装置可靠有效, 控制新策略有效可行, X 射线拍摄效果良好。本文研究的 X 射线机管电压的闭环控制策略, 及其高频球管、高频逆变、管电压和管电流的优化控制电路, 可以实现 X 射线机管电流的闭环控制策略, 提高其精度和减少整个过程的时间常数, 实现了 X 射线机的高性能化。

基金项目

江西省科技支撑计划 20161BBG70033; 吉安市科技计划 20222-181740。

参考文献

- [1] 张见, 刘鹏, 张晓军. 基于管电流自动调制模式的儿童头颅 CT 体型特异性剂量的快速估算[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(10): 73-78.
- [2] 张振华, 肖雁冲, 龚鑫鑫, 刘继遥, 朱杏莉. 基于体质量调节管电压联合自动管电流技术降低儿童胸部 CT 辐射剂量的价值[J]. 分子影像学杂志, 2023, 46(4): 688-691.
- [3] 杜凡宇, 蒋曦贤, 邓岚之, 冯小洁. 基于最小二乘法的 X 线球管管电流校准优化方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2023, 40(4): 456-462.
- [4] 王静, 梁保辉, 王梦廷, 王浩祥, 张梦雨. 定位像参数对智能管电压辅助技术联合自动管电流调制技术性能的影响[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(3): 21-25.
- [5] 陈海辉, 曾莹莹, 王强, 黄小民. 准谐振型高频 X 线机的控制方法和控制电路[P]. 中国专利, CN 201110189158.4. 2013-07-10.
- [6] Goo, H.W. and Suh, D.S. (2006) The Influences of Tube Voltage and Scan Direction on Combined Tube Current Modulation: A Phantom Study. *Pediatric Radiology*, **36**, 833-840.
- [7] Liang, S.-S. and Tzou, Y.-Y. (2001) DSP Control of a Resonant Switching High-Voltage Power Supply for X-Ray Generators. *4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, **2**, 522-526.
- [8] 余炎雄, 林伟鹏, 赵少武. 基于 STM32F429xxx 微处理器的 X 射线机控制系统设计[J]. 中国医疗器械信息, 2022(11): 32-36.
- [9] 褚恩辉, 张化龙, 刘秀罡. X 线管驱动用高频串联谐振形直流高压发生装置及其性能评价[J]. 石化电气, 2009, 28(6): 76-82
- [10] 陈海辉, 曾莹莹, 肖化武. 高频 X 射线机的锂电池供电方法和电路[P]. 中国专利, CN201510131916.2. 2015-05-09.
- [11] 陈海辉, 张阳德, 曾莹莹, 周立新. 一种高频直流 X 射线源组合式机头[P]. 中国专利, CN 200920060095.0. 2010-05-05.
- [12] 粟俊杰, 陈海辉, 张阳德. 高频直流牙科 X 线机的研制[J]. 中国医疗器械杂志, 2008, 32(6): 443-448.
- [13] 陈文光, 饶益花, 陈海辉. X 射线机管电流控制方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(4): 770-773.