

基于罗耶谐振的微型 X 射线管高压电源的设计

刘玺尧 曾国强 谭承君 罗 群 龚春慧 黄 锐
(成都理工大学核技术与自动化工程学院 成都 610059)

摘要 根据现有的微型 X 射线管高压电源的基本性能要求,设计了一种输出从 0 至-30 kV 可调的微型 X 射线管用高压直流电源。主电路采用直流电源供电,经过罗耶谐振逆变电路、高频变压器、正负双向倍压整流电路而达到产生直流高压的目的。在稳压电路中采用了反馈控制谐振三极管基极电流的方式,整个电路处于线性工作状态。实测数据表明,电路实现了低噪声、低纹波、低功耗的高压稳压电源设计。

关键词 高压电源, 罗耶谐振, 倍压整流电路

中图分类号 TL825

近年来, X 射线在各领域的应用日益广泛。安检系统中采用 X 射线照射携带的行李,通过 CT 成像技术检测违禁物品;无损检测中采用 X 射线确定被检物内部是否有裂纹或孔洞;X 荧光分析能够根据各元素的特征 X 射线的强度得到材料的元素组成以及各元素的含量信息,它具有原位、快速和多元素同时测量等优点,广泛应用于野外测量和实验室分析。如今,国民经济的迅速发展对高质量、高可靠性、高稳定性的微型 X 射线管需求迅猛增长。作为微型 X 射线管的重要核心组件,高压直流电源引起了广泛的关注^[1-5]。

现有的 X 射线管高压电源主要的实现方式有半桥逆变、全桥逆变和单管反激等。半桥式变压器开关电源的电源利用率比较低,不适宜用于工作电压较低的场合。全桥逆变电路则是功率损耗较大,四个开关器件会同时出现一个很短时间的半导通区域,产生很大的功率损耗。单管反激电路的缺点在于开关管截止时,变压器初级的反峰能量会被前级的电路消耗掉,而且在一般情况下,单管反激电路的开关管通过电流很大,导通压升高、损耗大,所以效率和可靠性不高^[6,7]。

针对与微型 X 射线管匹配的高压电源应具有体积小、轻便、移动性好等优点,本设计的逆变电路部分采用了罗耶谐振电路,电路自激振荡,不需要额外的振荡源,相对于半桥式或全桥式开关电源,它的驱动电路更加简单。并且它处于线性的工作状态,没有开关噪声。

1 系统总体设计

该电源系统的供电电压为 9 V,输出最高可达-30 kV,以保证 X 射线管能正常工作。电源整体结构由直流电源、罗耶谐振电路、高频变压器、倍压整流电路、取样反馈电路等几部分组成,系统总体原理如图 1 所示。电源的工作过程是:供电电源提供输入的直流电压 V_{cc} 到罗耶谐振电路,罗耶谐振电路将直流电转换为高频的类正弦波到变压器 T_1 的初级,然后通过高频变压器 T_1 进行第一级升压,变压器 T_1 次级输出再通过正负双向倍压整流电路进行第二级升压得到需要的直流负高压。通过反馈回路的放大器 U_1 的输出,控制三极管 Q_4 的基极电流,进一步控制罗耶谐振电路中三极管 Q_1 与 Q_2 的基极电流来控制变压器初级的电压,从而稳定高压的输出^[8]。

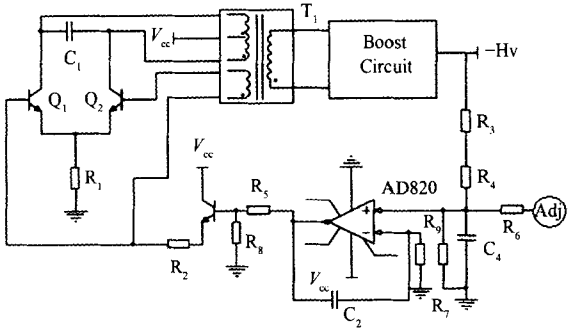


图 1 电源原理图
Fig.1 Function block diagram of power supply.

高技术的发展计划(863)项目(2012AA061803)与四川省科技厅科技支撑计划项目(2011FZ0064)资助
第一作者: 刘玺尧, 男, 1991 年出生, 2012 年毕业于成都理工大学, 现为成都理工大学在读硕士研究生, 研究方向为核仪器设计与开发
通讯作者: 曾国强, E-mail: zgq@cdut.edu.cn
收稿日期: 2013-03-11, 修回日期: 2013-06-05

2 电源主电路原理

2.1 罗耶谐振核心电路设计

罗耶变换电路通常用于 LCD 背光照明驱动电路, 它由两个三极管、一个基极电阻、一个谐振电容以及有三个绕组的变压器所组成。其电路如图 2 所示。

由于三极管 Q_1 、 Q_2 的性能不可能完全一样, 所以在接通电源的瞬间, V_{cc} 向三极管基极注入的电流也不可能绝对平衡。所以电路能通过初级线圈磁通量的变化来控制三极管的电流从而产生类正弦信号, 将直流电逆变为交流电, 再通过变压器实现升压。由于需要驱动电路产生比较标准的正弦波, 因此需要较大的谐振电流, 所以本电路中谐振三极管

选用峰值电流较大的型号为 ZTX853 的 NPN 型三极管。测试时变压器的初级形成的全波波形(a)与半波波形(b)如图 3 所示。

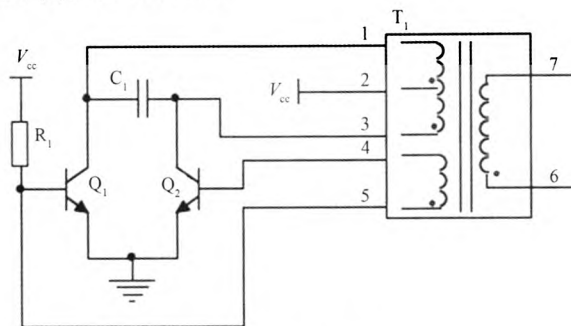


图 2 罗耶谐振电路
Fig.2 Resonant Royer circuit.

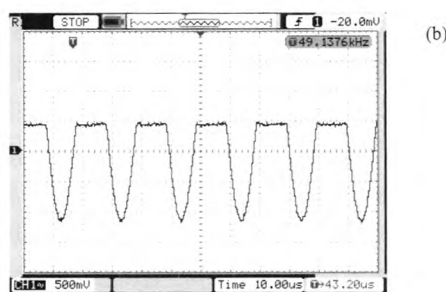
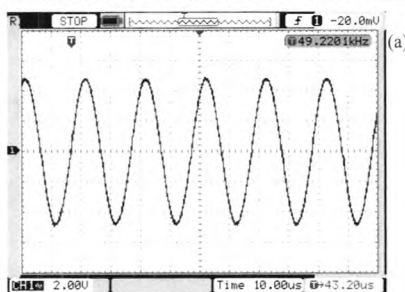


图 3 变压器初级全波(a)和半波波形(b)
Fig.3 Full (a) and half waveform (b) of transformer primary.

谐振电容 C_1 的存在使得振荡电路按照特定的频率进行简谐振荡。振荡的频率 f 与变压器线圈的初级电感值 L 、谐振电容 C 的关系如式(1):

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{4LC}} \quad (1)$$

罗耶结构的变压器由于结构的原因漏感一般在 20–100 mH 之间, 通常情况下漏感对频率的影响比较小。实际使用过程中需要工作频率比较高时, 往往减小电感 L , 然而工作频率升高有限, 这是因为此时谐振电感比较小, 漏感开始起比较大的作用。所以, 考虑到罗耶谐振电路本身的结构、变压器漏感的影响及后续倍压电路中电容的选取, 振荡的频率在 40–80 kHz 电路的效率最高, 谐振电容选用了 22 nF 损耗低的德国 WIMA 电容。所以根据式(1), 设计了谐振电感为 44 μ H 的变压器。

2.2 倍压整流电路

高频变压器要做成很高的变比时, 对工艺要求极高, 所以后续升压部分采用倍压电路。

与传统倍压电路不同, 正负双向倍压整流的方案是把高压变压器放在两个极性相反的倍压电路之

间, 如图 4 所示。如果使输出的某一段接地, 那么另一端输出的电压相当于两个倍压电路串联所得的高压, 正负脉动值能够相互抵消, 因此系统输出纹波变得非常小。同时, 双向倍压电路还可提高电源的稳定度和效率, 增强带负载能力。本设计中, 变压器次级输出的电压约为 2 kV, 所以在考虑压降的情况下, 要升至 -30 kV 高压至少需要用 12 阶的倍压电路^[9]。

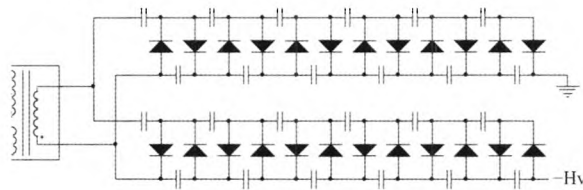


图 4 正负双向倍压整流电路
Fig.4 Signed bidirectional voltage doubling rectifier circuit.

如果不带负载, 电容与二极管所承受的最大电压都约为次级输出电压的 2.8 倍, 所以电容和二极管均要选择耐压值较高的器件。电容耐压选择是按输入交流电压的 50%选取, 原因是交流电的峰值是有效值的 1.4 倍左右, 一般电容的最高使用电压是耐压值的 70%左右。而对于电容值大小的选取要看倍压电路的负载电流大小, 输出电流越大, 电容量

就需要越大，否则不能提供足够的输出电流，但电容越大充电的时间也越长，电压上升的速度也越慢。本设计实际选用的电容是 1 nF/6 kV 的高压瓷片电容，二极管选用耐压值为 8 kV 的高压二极管 ESJA08-08，完全符合电路所需。

2.3 取样反馈电路

由于受高压变压器分布参数、倍压电路电容充电等因素的影响，输出直流高压并不是很稳定，因此采用取样反馈的方式进一步稳定输出高压。罗耶谐振电路的反馈控制可采用两种不同的方式：反馈控制输入电压与控制基极电流。

反馈控制输入电压一般采取的办法是直接从高压输出端对电压取样，将取样信号与基准电压比较，将比较的差值信号放大后送到电源输入端进行反馈控制，直至电压输出稳定。本设计采用的是控制基极电流的方式，电路如图 5 所示。放大器件选用单电源低功耗的 AD820AR 集成运放，电容 C₂ 起到了相位补偿的作用。R₃、R₄ 均是大小为 5 G、耐压值为 30 kV 的高阻值电阻，阻值远大于 R₇。根据虚短、虚断原理，在稳定的时候 A 点的电压应该保持为零，而从调整端 Adj 经 R₆ 流入的电流应与 A 点朝负高压(-HV)端所流入的电流相等。如果负高压值过高，则 A 点的电压将被拉低变负，此时 B 点输出的电压将降低，从而使三极管 Q₄ 的基极电流变小，反馈端 FB 所控制的罗耶谐振电路中三极管的基极电流也将变低，导致变压器输出电压降低，从而使负高压值下降；反之，如果高压值偏低，则 A 点的电压将升高，B 点的电压也将升高，三极管 Q₄ 的基极电流增加，罗耶谐振电路中三极管的基极电流也增加，变压器初级电压升高，负高压值也随之升高，直至稳定。

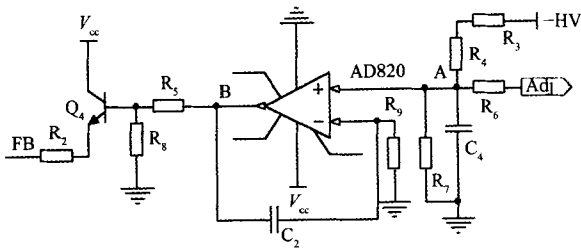


图 5 反馈控制电路
Fig.5 Feedback control circuit.

3 封装与测试方法

3.1 空气放电

一般的放电有三种形式，分别是电晕、电弧和电火花。

电晕放电是气体介质在不均匀电场中的局部自持放电，是最常见的一种气体放电形式。在曲率半径很小的尖端电极附近，由于局部电场强度超过气体的电离场强，使气体发生电离和激励，因而出现电晕放电引。在高压变压器内部通常都会产生电晕放电，在电晕放电的同时会产生大量的热量。

电弧是一种气体放电现象，电流通过某些绝缘介质（例如空气）所产生的瞬间火花。电弧放电是由于电极间消电离（电极表面的电离子的一个消散过程）不充分，放电点不分散，多次连续在同一处放电而形成。

电火花是一种自激放电，火花放电是非稳定的放电过程，具有明显的脉冲特性，放电时爆炸力大，蚀除量高。其特点如下：火花放电的两个电极间在放电前有较高的电压，当两电极接近时，其间介质被击穿后，随即发生火花放电。

一般情况下，当电压达到 5 kV 时，就会击穿空气而放电。除此之外，空气的湿度也会影响放电电压，无论电场是否均匀，只要空气湿度增加，固定距离之间的空气隙的击穿电压值就会下降。因为空气中的水微粒子中含有部分杂质，这些粒子在间隙间成了电弧桥的搭载体^[10]。

3.2 高压绝缘材料选择

由于本电源的最高输出可达-30 kV，处理不当很容易产生高压放电现象，所以需要将电路的高压部分（变压器、倍压电路与取样电阻）用高压绝缘物质灌封起来，以达到密封及绝缘的要求。高压绝缘材料有多种，如变压器绝缘油、高压硅油、高压硅脂等，选取时应该尽量选择流动性好，能完全排出空气以及能固化便于测试的材料。一般的变压器绝缘油均是矿物油，它的热稳定性不够好；高压硅油则具有较高的膨胀系数，粘度过高不利于导热；高压硅脂的稠度随温度变化极小且永不固化，需要外壳固定，不利于测试。所以，绝缘材料最终选择了流动性强可固化的透明高压绝缘硅胶——日本信越的室温硫化硅胶 KE-445-T。它是单组份、脱肟型、液体膏状、低粘度的电子硅胶，常用于电子电器零件或塑料的粘接、密封或披覆。

3.3 纹波的测量

从直流高压计量的角度而言，考虑纹波主要是为了控制其对直流高压测量准确度的影响，经过大量试验表明，在用示波器高压探头和示波器测量直流高压纹波时，适当提高示波器的触发电平至其峰值附近，可以获得稳定的纹波信号，该信号的峰-

峰值即为纹波的峰-峰值。而本设计中测量纹波的方法是用电容隔直通交的特性, 在高压的输出端串联多个高压电容与 $10\text{ M}\Omega$ 的电阻, 经过高压电容隔直后, 将交流量耦合在 $10\text{ M}\Omega$ 的电阻上, 再用示波器观察纹波电压的大小^[11]。

3.4 实际输出电压的测量

用数字高压表测量电压时, 表头会裸露在空气, 因为高压在空气中放电的缘故, 需要将高压通过电阻分压到 5 kV 以下测量。由于数字高压表的等效阻抗是 1 G , 所以电路中选择用两个 5 G 的电阻与高压表串联, 从而达到 $11:1$ 的分压, 将测量端的高压降至 5 kV 之下以防止高压放电。

4 性能指标

经过测试, 电源输出在 0 至 -30 kV 可调。除去高压表的 1 G 内阻, 当电源空载时, 输出 -30 kV 电压的静态功耗为 0.75 W 。输出电压为 -30 kV 时, 对电源进行稳定性测试, 通过每隔 20 min 对高压数字表读数, 测量结果见图 6, 由图 6 看出电压稳定度优于 $0.2\%/6\text{ h}$ 。

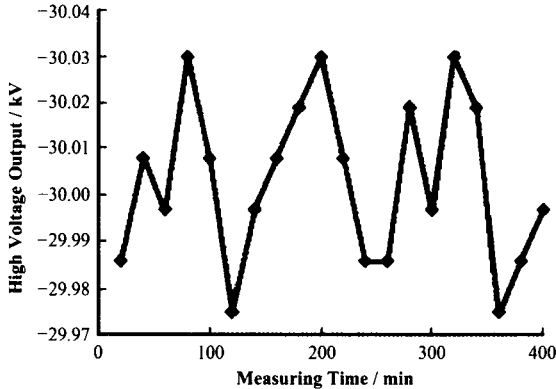


图 6 电源电压输出稳定度测量

Fig.6 Measurement of output voltage stability.

通过控制调整端的电压, 测试不同输出时的纹波大小, 数据见表 1。通过表 1 中的数据看出, 输出纹波电压百分比小于 0.3% 。

表 1 纹波电压测量

Table 1 Ripple voltage measurement.

输出电压 / kV Output voltage	纹波电压 / V Ripple voltage	百分比 / % Percentage
-0.275	0.77	0.282
-1.199	2.70	0.225
-5.874	10.40	0.177
-12.843	21.19	0.165
-17.832	27.64	0.155
-22.770	33.70	0.148
-27.005	38.35	0.142
-30.003	42.01	0.140

保持输入电压不变, 通过改变负载电阻的大小, 测试出当电源电压输出为 -30 kV 时带负载能力, 结果见表 2。

表 2 电源带负载能力

Table 2 Loading capability of power.

负载电阻 / G Load resistance	输出电流 / μA Output current	输出电压 / kV Output voltage
1.46	20.5	-30.019
1.14	26.3	-30.008
0.96	31.2	-30.030
0.82	36.7	-29.986
0.72	41.7	-29.997
0.63	47.4	-30.019
0.58	51.8	-29.975
0.53	57.0	-29.942

5 结语

本文设计的高压电源有输出电压范围宽、电压稳定度高、可靠性高、成本低优点, 达到了便携式 X 射线管的使用要求。但由于整个电路处于线性的工作模式, 效率不高, 效率的损耗主要在前级电路罗耶谐振中, 因此可通过对谐振电流的控制进一步提升电路的效率, 更大幅度地降低功耗。

参考文献

- 1 牟述佳, 姜学东. 基于 DSP 的 X 射线电源系统的设计[J]. 电源技术应用, 2007, 10(9): 5-8
MOU Shujia, JIANG Xuedong. The design of X-ray power system based on DSP[J]. Power Electronics, 2007, 10(9): 5-8
- 2 刘春茹, 黄静, 李建平, 等. X 射线荧光光谱法测定水系沉积物 ESR 测年样品 U、Th、K 含量[J]. 核技术, 2012, 35(11): 837-840
LIU Chunru, HUANG Jing, LI Jianping, et al. Sediment U, Th, K content analyzed using X-ray fluorescence spectrometry for ESR dating samples[J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(11): 837-840
- 3 Chu E, Ogura K, Moiseev S, et al. Duplex pulse frequency modulation mode controlled series resonant high voltage converter for X-ray power generator[C]. KPEE Proceedings of International Conference on Power Electronics, 2001: 295-300
- 4 王卓, 葛良全, 张庆贤, 等. 基于傅里叶变换的本底扣除法在 X 荧光分析中的应用[J]. 核技术, 2012, 35(7): 549-551
WANG Zhuo, GE Liangquan, ZHANG Qingxian, et al. Application of Fourier transform background subtraction

- in XRF analysis[J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(7): 549–551
- 5 Liang Shyh-Skin, Tzou Yiong-Yu. The DSP control of a resonant switching high-voltage power supply for X-ray generators[C]. IEEE Proceedings of the Power Electronics and Drive Systems, 2001: 522–526
- 6 沈锦飞. 电源变换应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 12–34
- SHEN Jinfei. Applications technology of power conversion[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007: 12–34
- 7 李爱文, 张承慧. 现代逆变技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 46–55
- LI Aiwen, ZHANG Chenghui. Modern inverter technology and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2000: 46–55
- 8 曾国强, 葛良全, 赖万昌. 手持式辐射仪高压直流电源的设计[J]. 电测与仪表, 2008, 45(6): 46–49
- ZENG Guoqiang, GE Liangquan, LAI Wanchang. Design of high voltage power supply used in handheld radiometer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(6): 46–49
- 9 戴晓明, 李振国. 新型高压开关电源的研制[J]. 原子能科学技术, 2000, 34(2): 125–127
- DAI Xiaoming, LI Zhenguo. The development of new high-voltage switching power supply[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2000, 34(2): 125–127
- 10 Lowke J J, Alessandro F D. Onset corona fields and electrical breakdown criterion[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(21): 2673–2682
- 11 石峰, 赵京伟, 舒乐, 等. 直流高压电源纹波的实验研究[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(1): 54–59
- SHI Feng, ZHAO Jingwei, SHU Le, *et al.* The experimental study of the DC high voltage power supply ripple[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(1): 54–59

Design of high voltage power supply of miniature X-ray tube based on resonant Royer

LIU Xiyao ZENG Guoqiang TAN Chengjun LUO Qun GONG Chunhui HUANG Rui

(College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract Background: In recent years, X rays are widely used in various fields. With the rapid development of national economy, the demand of high quality, high reliability, and high stability miniature X-ray tube has grown rapidly. As an important core component of miniature X-ray tube, high voltage power supply has attracted wide attention. **Purpose:** To match miniature, the high voltage power supply should be small, lightweight, good quality, etc. Based on the basic performance requirements of existing micro-X-ray tube high voltage power supply, this paper designs an output from 0 to –30 kV adjustable miniature X-ray tube voltage DC power supply. Compared to half-bridge and full-bridge switching-mode power supply, its driving circuit is simple. With working on the linear condition, it has no switching noise. **Methods:** The main circuit makes use of DC power supply to provide the energy. The resonant Royer circuit supplies sine wave which drives to the high frequency transformer’s primary winding with resultant sine-like high voltage appearing across the secondary winding. Then, the voltage doubling rectifying circuit would achieve further boost. In the regulator circuit, a feedback control resonant transistor base current is adopted. In order to insulate air, a silicone rubber is used for high pressure part packaging, and the output voltage is measured by the dividing voltage below –5 kV. **Results:** The stability of circuit is better than 0.2%/6 h and the percent of the output ripple voltage is less than 0.3%. Keeping the output voltage constant, the output current can reach 57 μ A by changing the size of load resistor. This high voltage power supply based on resonant Royer can meet the requirement of miniature X-ray tube. **Conclusions:** The circuit can satisfy low noise, low ripple, low power and high voltage regulator power supply design. However, its efficiency is not high enough because of the linear condition. In the next design, to further reduce power consumption, we could improve the efficiency by controlling the current of resonant circuit.

Key words High voltage DC power, Resonant Royer, Voltage doubling rectifying circuit

CLC TL825