



·脉冲功率技术·

# 100 kV/25 mA 低纹波高压直流电源研制\*

张葆青

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 百千伏高压直流电源广泛应用于电子束产生与应用领域。高压直流电源电压纹波是影响束流品质的重要因素之一。某型等效阻抗为 4 MΩ 的电子枪对加载电压提出峰峰值高压纹波不超过 0.06%, 同时实现较小高压储能以减小打火时电子枪损伤风险, 基于全桥逆变和双极性 Cockcroft-Walton 倍压电路设计了一种不对称电容布局的高压直流电源, 在分析储能与纹波、倍压效率关系基础上给出了倍压电路参数简化设计方法, 实验结果表明, 不额外采用滤波网络, 在 25 kHz 逆变频率、100 kV/25 mA 输出条件下纹波系数优于 0.06%, 相比于传统设计方法, 所需高压储能可降低 12% 以上。

**关键词:** 高压直流电源; 双极性倍压; 电压纹波; 电子束

中图分类号: TM836

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230034

## Development of 100 kV/25 mA high voltage DC power supply with lower ripple

Zhang Baoqing

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** High voltage DC power supply is widely used in research and application areas of electron beam. Recently the method of decreasing ripple is a research hotspot due to the ripple of high voltage is the very key factor to quality of beams. This paper studies a novel circuit topology, which is comprised of a high bridge converter and a double polarity Cockcroft-Walton circuit with unsymmetrical capacitors. The experimental results show that the ripple is lower than 0.06% when the output voltage and current are 100 kV and 25 mA, respectively. Meanwhile the storage energy of high voltage units is only 0.85 of traditional circuit.

**Key words:** high voltage DC power supply, double voltage rectifying circuit, voltage ripple, electron beam

数十至上百千伏电压输出的高压直流电源是电子束应用领域的重要设备。高压电源纹波系数是该类电源的重要技术指标, 通过纹波影响束流品质从而影响到实际应用效果。相比于单极性或倍压技术路线, 采用双极性 Cockcroft-Walton 电路通过对称补充电荷的方式可以进一步降低纹波。Cockcroft-Walton 电路一般由若干级倍压单元组成, 每级倍压单元由硅堆和三组高压电容组成, 根据与硅堆的相对位置不同, 其中两组高压电容称为侧柱电容, 另一组为中柱电容。大多数 Cockcroft-Walton 电路中各级倍压单元采用中柱和侧柱电容等电容设计及相应的经验公式, 但试验波形往往大于理论设计值<sup>[1-2]</sup>。为进一步降低高压输出纹波, 一般采用额外增加滤波电容的方式或移相纹波补偿电路, 但增加了电源系统储能或控制难度, 较大的储能在负载发生打火等情形时易对负载产生损伤。国内外基于高频逆变、倍压电路结合滤波网络方式在 200 kV/1 mA 输出下实现 0.01% 纹波<sup>[3]</sup>, 但随着电流变大纹波也相应变大, 在数十千伏电压到 200 kV 输出电压下, 不同技术路线在 10 mA 以上电流时纹波从 0.05% 到 2% 不等<sup>[4-7]</sup>。本文采用了中柱和侧柱电容非对称布局的倍压电路设计, 从能量角度给出了主电容与纹波关系表达式, 并从倍压效率方面开展了倍压电路优化和器件参数选择, 开展的初步试验表明 100 kV/25 mA 输出参数下电压峰峰值纹波系数优于 0.06%, 与基于纹波经验公式设计的高压直流电源其储能可下降 12% 以上。

### 1 电源拓扑设计

电源由滤波整流、稳压电路、全桥高频逆变、脉冲变压器、倍压整流、测试与控制单元组成, 如图 1 所示。

\* 收稿日期: 2023-02-20; 修订日期: 2023-06-08  
联系方式: 张葆青, 707680795@qq.com。

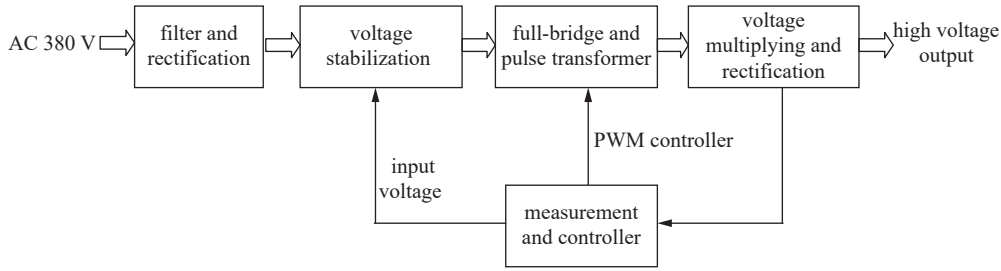


Fig. 1 Diagram of high voltage power

图 1 电源组成示意图

滤波与整流电路、第一级稳压电路将 380 V 输入交流信号变换成 200~600 V 可调直流电压,根据负载输出参数需要调整直流电压幅度,全桥高频逆变单元将直流电压变换成数十赫高频脉冲信号,并通过脉冲变压器实现数千伏至数十千伏高压脉冲信号输出,倍压整流进一步将高频脉冲信号升压并变换成直流输出,测试与控制系统实时测量输出电压并调控倍压整流单元输入波形幅度或占空比,从而实现高压电源稳定输出。相比 PWM(Pulse Width Modulation)控制模式,PFM(Pulse Frequency Modulation)控制模式可以在较大的输出电压范围下实现低纹波、高效率输出,由于本项目电源针对特殊负载设计了优化工作点,采用 PWM 模式可以实现更低的电压纹波。在特定输出工作参数下,通过优化高压逆变电路的占空比,以及调控第一级稳压电路的输出电压共同实现低纹波输出。脉冲变压器采用铁氧体具有相对较小的涡流损耗,适用于高频逆变,但较高的变比容易产生较大的级间耦合导致波形畸变,因此工程上大多采用 20~30 倍变比设计。其中倍压整流电路参数设计与高压直流电源电压纹波系数密切相关,相比于单极性倍压整流电路或倍压整流电路,双极性 Cockcroft-Walton 倍压电路由于具有对称馈入、电路各级部件容易实现均压等优点,可以实现较低的纹波系数及更高的输出电压,其电源拓扑如图 2 所示。

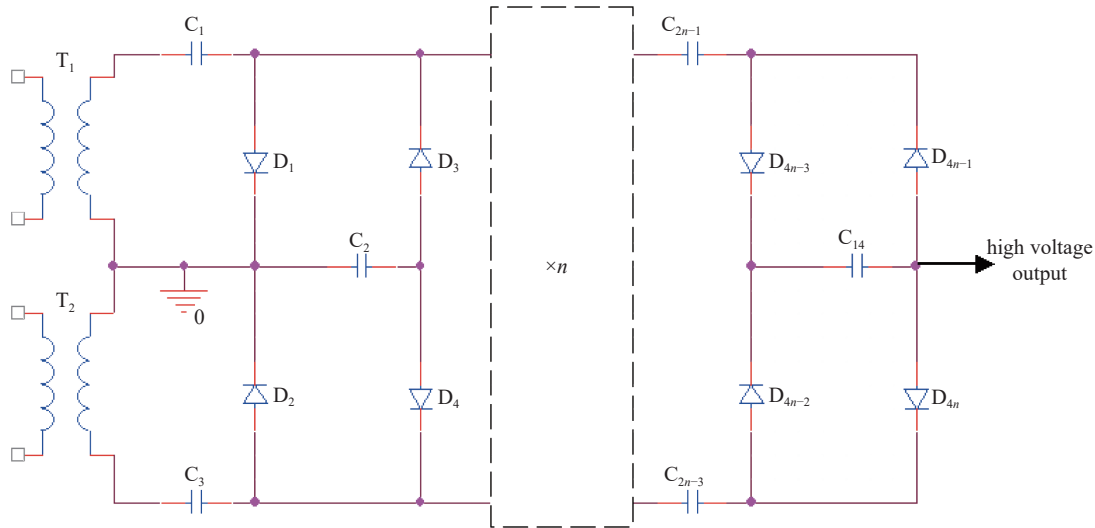


Fig. 2 Diagram of Cockcroft-Walton circuit

图 2 双极性倍压整流电路

图 2 中,  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_n$  为二极管,  $n$  为倍压单元的级数。根据结构布局,  $C_1$ 、 $C_3$ 、 $C_{2n-1}$  称为侧柱电容,每个侧柱电容容值相等。 $C_2$ 、 $C_4$ 、 $C_{2n}$  称为中柱电容,每个中柱电容容值相等。全桥逆变和脉冲变压器将整流稳压后的直流电压变换成高压高频输出,较高的变比往往导致变压器漏感和损耗较大,且容易产生波形畸变,因此本文设计变比不超过 25。为了在负载上实现 200 kV 电压输出,倍压整流单元设计为 9 级,将不高于 10 kV 的高频高压脉冲倍压至 200 kV 以上。

采用中柱电容与侧柱电容相等的经验公式时,纹波表达式为<sup>[8]</sup>

$$\Delta V = \frac{nI_e}{4fC_{2n}} \quad (1)$$

式中:  $\Delta V$  为纹波电压幅度;  $f$  为高频逆变频率;  $I_e$  为电源输出电流。在驱动等效阻抗 4 M $\Omega$  的某电子枪负载时,对高压直流电源提出了在 -(100~200) kV 电压范围内,电压纹波峰峰值系数小于 0.06% 的技术要求。由式(1)可知,为

为了满足纹波要求需要采用 37.5 nF 电容,相应储能不低于 250 J。为了进一步降低电源所需储能,本文开展了倍压电路优化设计,为清晰说明主要参数的定义,高压直流电源输出纹波如图 3 所示。

图 3 中,  $V_0$  为高压直流输出电压;  $\Delta t$  为纹波峰峰值的时间间隔。在一个纹波周期内,负载消耗的能量表述为负载平均电压、负载平均电流、纹波周期之积,在工程上简化起见,在  $\Delta t$  间隔内忽略全桥逆变单元通过侧柱电容对中柱电容的补电过程,则负载消耗能量来自中柱电容能量变化,当采用 9 级倍压电路设计时,有

$$\frac{C_{2n}}{2 \times 9} ((V_0 + \Delta V)^2 - (V_0 - \Delta V)^2) = V_0 I_c \Delta t \quad (2)$$

$$\Delta t = \frac{1}{2f} \quad (3)$$

$$\Delta V = 0.5 V_0 \eta \quad (4)$$

式中:  $C$  为所有中柱电容串联后的等效电容值;  $f$  为高频逆变频率,考虑到大功率 IGBT 器件频率水平,本文取 25 kHz;  $\eta$  为电压纹波系数,本文取 0.06%。则中柱电容电容值经计算取为 49.5 nF。

双极性倍压电路倍压效率定义为

$$\eta_v = \frac{V_0}{2N V_p} \quad (5)$$

式中:  $V_p$  为倍压整流单元输入高压的幅值。对于 9 级倍压整流电路,单只中柱电容设计为 50 nF,采用电路模拟方法侧柱电容与倍压效率的关系如图 4 所示。

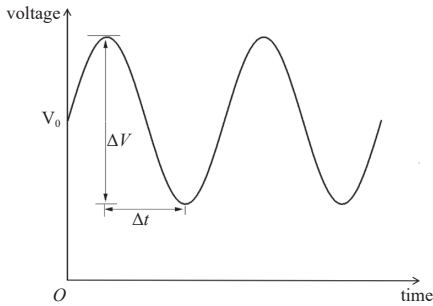


Fig. 3 Voltage ripple of Cockcroft-Walton circuit

图 3 双极性倍压电路电压纹波波形

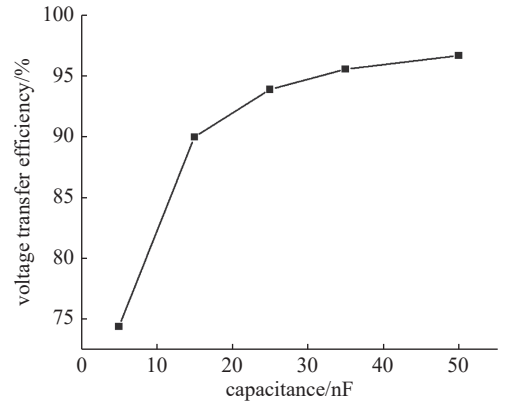


Fig. 4 Relation of flank capacitor and voltage transfer efficiency

图 4 倍压整流电路侧柱电容与倍压效率的关系

由图 4 可见,随着侧柱电容从 5 nF 增大至 25 nF,倍压效率可以显著提升,但随着侧柱电容进一步增大倍压效率增长逐渐变缓,同时电源纹波改善不明显,且随着侧柱电容增大,倍压整流单元总储能明显增大。当负载发生短路打火等情况时,较高的储能容易导致倍压整流电路器件和负载损伤,因此本文侧柱电容设计为 25 nF,中柱电容采用 2 只 25 nF 电容并联实现,当输出电压为 200 kV 时倍压整流单元总储能低于 220 J。由于电路模拟中引入了试验测量获得的某型标称耐压 40 kV,通流能力 2 A 二极管分布电容 1.2 pF、管压降 29.6 V 参数,模拟显示采用 25 nF 侧柱电容时所能达到的倍压效率接近 0.95。

## 2 试验与讨论

根据电源确定的设计参数,开展了倍压整流电路工程样机设计,共采用 36 只标称 30 kV 耐压 25 nF 金属化膜电容器,其中每级倍压单元的中柱电容由 2 只 25 nF 电容并联组成,2 个侧柱电容分别由 2 只 25 nF 电容组成,36 只标称耐压 40 kV,通流能力 2 A 的高压二极管,每级之间采用 50 MΩ 电阻串联均压。为减小电源高度,总体采用卧式方形布局,同时每级倍压电路采用铜环作为均压环调控倍压整流单元电场分布,倍压整流单元如图 5 所示。

倍压整流单元每级采用空芯铜管作为均压环,为防止金属化膜电容器在高电位下的击穿效应,后几级倍压电路电容器端子连接处设计匀场电极结构。

采用标称参数为 1.2 kV/50 A 的高频 IGBT 模块构成全桥逆变电路,以铁氧体为磁芯构建脉冲变压器,通过聚乙烯绝缘骨架实现初、次级同轴绕制以提高耦合效率。在低电压情况下,通过全桥逆变后在倍压整流单元的输入

电源波形如图6所示。

由图6可见,全桥逆变电路通过PWM调制和脉冲变压器输出峰值电压1.77 kV,频率25 kHz高压脉冲电压,通过倍压整流后在负载端输出30 kV高压,试验表明倍压效率为0.93,略低于图5理论设计结果,主要因素为工作电压较低时二极管管压降对倍压效率影响相对显著。为了开展高压实验,将倍压整流单元全部置入变压器油中,采用经高压探头标定过的隔直电容法测量其输出纹波,当输出电压为100 kV时,其高压输出电压和纹波波形如图7所示。

在4 M $\Omega$ 负载上输出电压为100 kV时,连续2000个逆变周期内高频纹波峰值幅度小于56 V,纹波频率为25 kHz,与逆变频率一致,纹波系数为0.056%,优于设计目标,高压纹波波形如图7所示。由于式(2)~(5)忽略了中柱电容对负载放电过程中高频逆变电路通过侧柱电容对中柱电容的补电过程,试验获得的纹波低于式(1)~(4)计算纹波。纹波波形中叠加了高频噪声,噪声出现时刻与逆变开关周期相同,后期还需要对开关缓冲电路及脉冲变压器输入端进行进一步滤波处理。

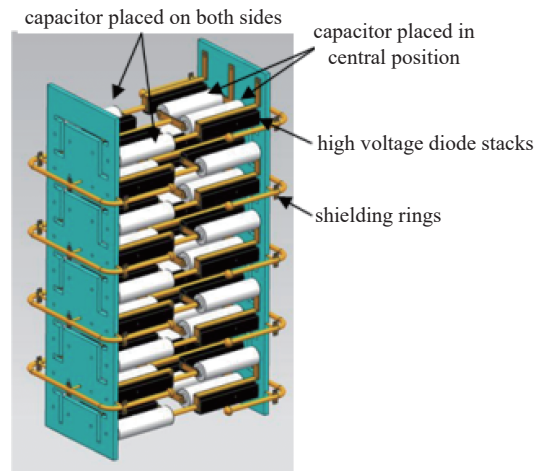


Fig. 5 Prototype of Cockcroft-Walton circuit

图5 倍压整流单元工程设计图

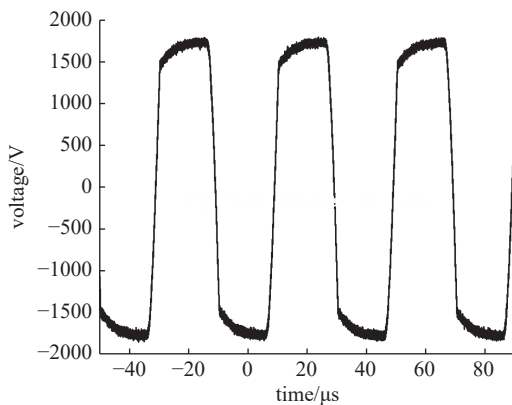


Fig. 6 Input voltage of double voltage rectifying circuit

图6 倍压整流单元输入电压波形

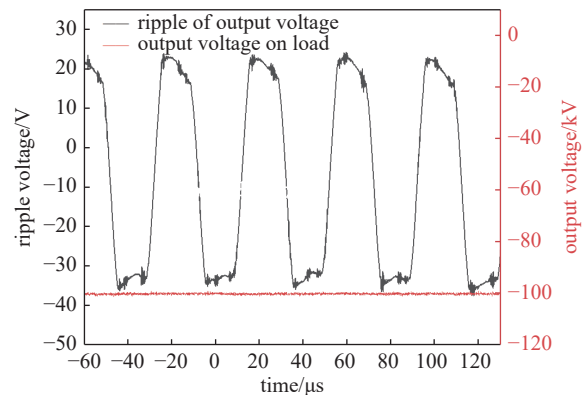


Fig. 7 Waveform of ripple and scope of output voltage

图7 输出电压幅度及纹波波形

### 3 结论

本项目开展了200 kV输出电压低纹波直流电源设计,在分析高频纹波产生原因基础上采用中柱电容和侧柱电容不等设计,给出了中柱电容和侧柱电容参数设计方法,相比各级倍压单元采用等电容设计方法,电源储能降低12%以上,实验结果表明在100 kV/25 mA输出条件下电压纹波系数优于0.06%,并正在通过电场优化后开展高压试验。为进一步降低电源纹波系数,正在从稳压电源电压调控、逆变占空比调控方面开展控制策略优化,以及基于SiC-IGBT的逆变频率提升方面开展研究。

#### 参考文献:

- [1] Shen Chao, Wan Lei. The performance optimization design of high frequency and high voltage transformer of electronic beam welder[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 383-390: 7175-7182.
- [2] Schilling F, Passon S, Meisner J, et al. High frequency high voltage power supplies[M]//Németh B. Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering. Cham: Springer, 2020: 1467-1476.
- [3] 李亚维, 谢敏, 蓝欣, 等. 200 kV低纹波高稳定度直流高压电源[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015016. (Li Yawei, Xie Min, Lan Xin, et al. A 200 kV high voltage DC power supply with high stability and low ripple[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015016)
- [4] 刘玺尧, 曾国强, 谭承君, 等. 基于罗耶谐振的微型X射线管高压电源的设计[J]. *核技术*, 2013, 36: 080403. (Liu Xiyao, Zeng Guoqiang, Tan Chengjun, et al. Design of high voltage power supply of miniature X-ray tube based on resonant Royer[J]. *Nuclear Techniques*, 2013, 36: 080403)
- [5] 陈尚文, 苏桐龄. 600kV、15mA直流高压稳压电源稳压系统[J]. *甘肃科学学报*, 1996, 8(3): 81-84. (Chen Shangwen, Su Tongling. The stabilized system of 600kV, 15mA DC high voltage stabilized power supply[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 1996, 8(3): 81-84)

- [6] 邹亚明. 电子束离子阱及高电荷态离子相关物理[J]. 物理, 2003, 32(2): 98-104. (Zou Yaming. Electron beam ion traps and highly charged ion relevant physics[J]. Physics, 2003, 32(2): 98-104)
- [7] 周长庚, 李彦, 娄本超, 等. 200 kV高压开关电源研制[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 761-764. (Zhou Changgeng, Li Yan, Lou Benchao, et al. Development of 200 kV high voltage switch power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 761-764)
- [8] 王亚君, 周岐. PWM型倍压电路压降的计算[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2008, 28(5): 299-301. (Wang Yajun, Zhou Qi. Calculation of output voltage from voltage multiplying circuit of PWM[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 28(5): 299-301)

· 简讯 ·

## 第五届复杂电磁环境技术及应用学术会议在伊宁召开

2023年7月25日至28日,由中国兵工学会复杂辐射场技术及应用专业委员会等单位主办,北京应用物理与计算数学研究所等单位具体承办,陕西威思曼高压电源股份有限公司等联合协办的第五届复杂电磁环境技术及应用学术会议在风景如画的新疆伊宁成功举行。来自全国科研院所、高等院校、企业单位、媒体等共计130余家单位的400余名代表出席本次会议,大会开幕式由大会主席北京应用物理与计算数学研究所周海京研究员主持。26日上午大会开幕,承办单位北京应用物理与计算数学研究所应阳君研究员致欢迎辞,大会主席中国兵工学会复杂辐射场技术及应用专业委员会主任委员、中物院应用电子学研究所马弘舸研究员致开幕辞。

开幕式结束后,中国航天科工集团戎建刚研究员以“复杂电磁环境的表征面理论及应用”为题的大会特邀报告拉开了本次学术盛宴的序幕。接下来,北京环境特性研究所的殷红成研究员(伍月千代做)做了“地海面大场景电磁散射工程化建模方法研究”的报告,解放军信息工程大学的周东方教授做了“电磁空间安全与控制”的报告,国防科技大学电子科学学院的刘培国教授做了“电磁战中的电磁攻防及其启示”的报告,陆军工程大学石家庄校区国防科技重点实验室的陈亚洲教授做了“无人机电磁环境效应与防护研究进展”的报告,中航工业合肥航太电物理技术有限公司的段泽民研究员做了“飞机雷电与HIRF试验研究”的报告,6个高水平的大会特邀报告精彩纷呈,从不角度分享了全国复杂电磁环境技术及应用的最新研究进展与未来行业趋势。

接下来以5个分会场、16个邀请报告、68个口头报告和123个张贴报告从不同研究方向、研究视角集中展示了我国科技工作者在复杂电磁环境特性建模与数值模拟、复杂电磁环境效应、电磁防护与应用、电磁频谱作战与电磁安全、电离辐射环境的效应与防护、复杂电磁环境中的等离子体过程等研究主题取得的新成果、新技术、新方法。参会代表们就相关话题开展了广泛深入的讨论,现场气氛热烈而融洽,使人收获颇丰。

闭幕式表彰本次会议评选出的11篇优秀学术成果,大会主席北京邮电大学刘元安教授对本次会议做了总结点评,复杂电磁环境技术及应用学术会议是中国兵工学会复杂辐射场技术及应用专业委员会2013年推出的重要学术会议,旨在加强我国复杂电磁环境研究领域学术交流,为相关领域的研究团队、科研人员和复杂电磁环境技术应用方面搭建高层次的学术交流平台的专业学术会议。本届会议在参会单位(130多家)、参会人数(400余人)、会议投稿(280多篇)等方面均创历史新高。本届会议还吸引了近20家企业及媒体参与学术交流,不仅为复杂电磁环境研究领域的科研人员分享了他们的最新研究成果,更是积极参与报告交流,达到了产学研融合的目的。



会议同期还召开了中国兵工学会复杂辐射场技术及应用专业委员会闭门会议,经过商议,2025年第五届复杂电磁环境技术及应用学术会议将由国防科技大学具体承办。(《强》刊编辑部 汪道友 王涛)