

文章编号: 1007-4627(2010)01-0048-04

高电压锯齿波聚束器的设计研制*

孙列鹏^{1,2}, 许哲^{1, #}, 石爱民¹, 冯勇¹, 金鹏¹, 兰涛¹, 高宜海¹, 赵红卫¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 近些年来, 使用锯齿波直接形成的方法建造非谐振型聚束器在国内及国际均得到了广泛的应用。由于电子技术及机械加工工艺的飞速发展和更高功率电子管的出现, 可以设计出更高指标的聚束器, 进而可以有效提高束线的匹配效率及运行稳定度。对兰州重离子加速器源束线新的高电压锯齿波聚束器的研制进行了详细阐述, 由于该聚束器具有目前国际同类型设备中最高电压、频率以及相对苛刻的现场条件限制, 故还对设计中所涉及的工程实施方案进行了有效补充和完善。

关键词: 锯齿波; 非谐振腔; 聚束器

中图分类号: TL503.2 **文献标识码:** A

1 引言

兰州重离子研究装置(HIRFL)的注入器 SFC 的前端束运线(源束线)上有一台非谐振型聚束器 B02, 它的作用主要是利用锯齿波电压对离子源出来的束流进行纵向聚束、降低能量分散, 以此来提高注入器 SFC 的注入效率。由于早期的电子管功率限制及电子技术的制约, 原有的 B02 无法适应如今 HIRFL 新的超导离子源和静电偏转板改造等因素的要求, 故需要研制一台聚束电压 2 kV 的锯齿波聚束器。本文基于直接形成锯齿波的方法进行设计, 首先详细介绍了计算方法, 得出设计指标及各个参数之间的相互关系。然后再利用计算方法得出结果, 比对荷兰 AGOR 同类聚束器的测试参数以分析其可行性。最后针对本设计的技术难点逐一提出相应的解决方案。

2 电子学指标及其实施

根据动力学计算结果, 要求的聚束器电压在频率低端达到 2 kV, 在频率高端达到 1.1 kV(频率 5.4—18 MHz), 有效聚束段为 80%。

直接形成锯齿波的方法具有突出的优势——直

接形成高电压、高线性度的锯齿波, 而且造价低廉、工作可靠, 其工作原理如图 1 所示。

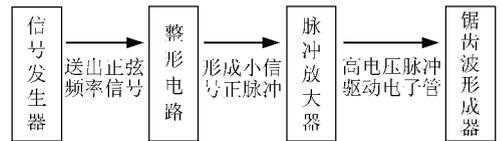


图 1 锯齿波直接形成的原理

即通过对正弦信号整形, 形成一个满足有效聚束段比例的窄脉冲, 再将该窄脉冲送入陶瓷四极电子管, 触发由四极管、负载电极网和高频磁芯电感组成的充、放电回路^[2], 即直接在电极上形成锯齿波形^[3]。通过计算充、放电电流的方法可以得到它的管耗受限公式为

$$V_{p-p} = \frac{P_a \eta}{E c f} \quad (1)$$

该公式显示了各个参数之间的相互关系: 即直流高压 E 、负载电容 c 以及聚束段比例 η 选定后, 锯齿波的峰值电压 V_{p-p} 直接受电子管功耗 P_a 和工作频率 f 限制。

* 收稿日期: 2009-04-02; 修改日期: 2009-05-06

* 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10635090)

作者简介: 孙列鹏(1979-), 男(汉族), 甘肃兰州人, 博士研究生, 工程师, 从事加速器高频系统及其谐振腔研究; E-mail: sunlp@impcas.ac.cn

通讯联系人: 许哲, E-mail: zxu@impcas.ac.cn

3 可行性分析

根据公式(1), 选择合适的电子管就可满足电压要求。随着电子管加工技术的飞速发展, 更高管耗的电子管得以普及, 以选用管耗 12.5 kW 四极电子管 FC-307F 为例计算, 直流电压 E 设为 3 kV, 负载电容取为 80 pF, 电子管耗取为 9 kW, 标示为 CALCULATION。比对分析 AGOR 及 HIRFL 的聚束器情况, 见图 2。图中依次为 CALCULATION、HIRFL 上 B02 及 AGOR 聚束器的运行数据。

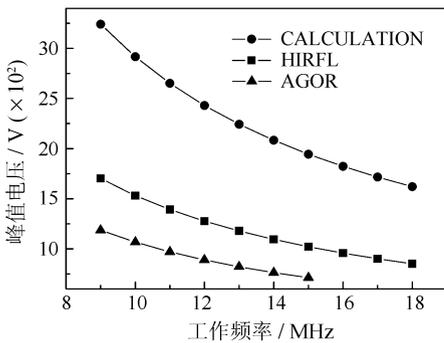


图 2 计算值与两台同类聚束器装置的比较

图 2 表明, 随着更高管耗电子管的出现, 可以设计更高电压的聚束器。选择电子管 FC-307F 的聚束电压明显高于 AGOR 上的聚束器及 HIRFL 上 B02 的, 即满足高电压指标的首要工作是选择高功耗的电子管, 然后依此进行工程设计。

4 工程设计及试验研制

4.1 脉冲放大器的设计

要满足设计指标, 还需要一台高性能的脉冲放大器, 以提供电子管所需的激励电压和较理想的聚束效率, 它的脉冲幅度 80 V, 且满足占空比指标 20% (即有效聚束段 80%)。日本 AGOR 上的聚束器用脉冲放大器均具有很高的技术指标 (最高频率约 15 MHz, 占空比达到 20%, 幅度为 70 V)。

脉冲放大器的原理是对小信号脉冲波形进行傅里叶分解后, 再对其进行宽带放大。脉冲信号经傅里叶分析后得:

$$f(t) = \frac{\tau A}{T} + \sum_0^{\infty} \frac{2A}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) \cos\left(\frac{2n\pi}{T}\right) \left(t + \frac{\tau}{2}\right) \quad (2)$$

取基波振幅极限值 $2\tau A/T$ 的 $1/10^{[3]}$, 振幅低于此值的高次谐波可以忽略不计, 达到此振幅值的最高谐波频率为 $f = n/T = 3.15/\tau$ 。取整后 $f = 4/\tau$, 再根据脉冲放大器 5.4—18 MHz 的重复频率, 计算占空比在 10%—30% 时的带宽 (单位: MHz) 为

$$f_{\text{高}} = \frac{4}{0.1 \times 1) / 18 \times 10^6} = 720 \quad (3)$$

从(3)式可以看到放大器的带宽达到百兆赫兹量级^[4], 据此估计其脉冲的前后沿将达到千兆赫兹! 因此可以采用脉冲功率合成^[5]结合匹配网络进行阻抗变换的办法, 避免直接在容性负载上形成脉冲所涉及的问题, 如图 3 所示。

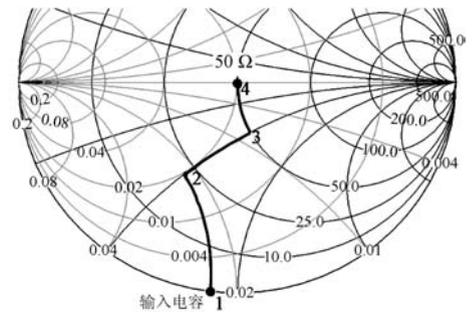


图 3 对 50 Ω 阻抗和输入电容进行匹配

利用 SMITH 图设计匹配网络, 将 50 Ω 阻抗和四极电子管 FC-307F 输入电容进行阻抗变化, 使功率合成器输出端与电容负载相互匹配。目前正在测试其匹配网络参数指标。

4.2 管座设计及其电气考虑

由公式(1)可知, 总输出电容将影响锯齿波的幅度^[4], 如图 4 所示 (以四极管 FC-307F 在 18 MHz

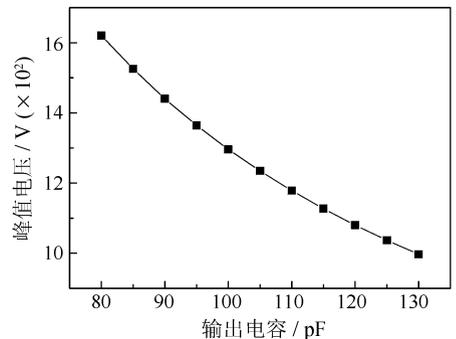


图 4 峰值电压与电容的关系的比较

为例)。可以看到, 随着输出电容的增加峰值电压

下降很快, 电容变化 50 pF 时, 峰值电压相差达 600 V, 这也是直接形成锯齿波方法的缺点, 即频率限制性。故应首要考虑尽量降低管座的分布电容。根据机械试验及设计经验采用了多种措施互相结合的方法尽量降低管座电容: 栅极采用内屏蔽小导电体结构, 可以减小各极对地电容, 防止交互耦合, 避免高频自激; 利用 120° 三角式支架, 改善管座的各个极间电容并有利于极间散热; 采用高介电常数材料, 增加帘栅极电容等。

4.3 电极连接结构设计

根据传输线理论^[6], 一段微分长度为 dz 的均匀传输线(其中 R 、 L 、 G 和 C 分别为单位长度的电阻、电感、电导和电容), 可以等效为图 5 中的电路。

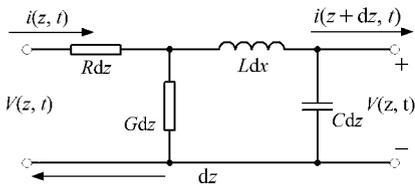


图 5 传输线的等效电路

显然, 锯齿波形成电路连接负载电极, 采取长线传输即使不考虑信号失真的问题, 也会产生较大的功率损耗。因此只能采用形成电路直接与负载相接的连接方式, 但对电路的现场抗干扰能力及工作稳定性提出了很高的要求。

4.4 上升沿线性度的考虑

由于锯齿波聚束器的上升沿的线性度对聚束效率影响很大, 所以还需要考虑如何保证其波形的高线性度。经过计算, 阳极高压、电容、电感环、电流、频率及有效聚束段均对其有影响, 在综合考虑时需要首先保证 $\omega T \leq 2.2$, 即角频率与周期的限制, 其余参数需要参考恒流曲线反复选择, 以期提高波形的线性度。由于公式计算比较繁杂, 在此不再赘述。

5 总结

通过前面计算和工程设计要点的综合考虑, 完成设计: 重复频率 5.4—18 MHz 的锯齿波形(频率稳定度与 SFC 高频稳定度一致); 聚束段比例为

80%; 电压幅度在频率低端(≤ 9.5 MHz)满足 2 kV, 在频率高端(9.5—18 MHz)满足 1.1 kV; 利用电感、电阻组成匹配网络, 带宽覆盖重复频率; 管座设计满足电气要求, 总电容小于 90 pF; 采用陶瓷元件绝缘高压和衔接真空件; 高压电极直接连接锯齿波形成电路, 避免长线传输的损耗和失真问题等。

需要说明的是, 利用直接形成锯齿波的方法设计非谐振型聚束器已经得到了广泛的应用, 在国内及国际上, 拥有同类聚束器的装置有: 上海光源(SSRF)、荷兰 AGOR 回旋加速器及日本 RIKEN 的 AVF 回旋加速器装置。除 RIKEN 外均使用了此方法设计建造聚束器, 并在加速器的实际运行中证明其工作稳定可靠。但是由于该方法的局限性——峰值电压的幅度极大的受限于其工作频率, AGOR 锯齿波聚束器最高电压只有 600 V 左右, 频率也不超过 15 MHz。因此研制本聚束器具有其特殊性和困难点, 可采取上面的多种方案结合机械设计来进一步改善其电气特性, 以提高其工程可实现性。相信, 通过对本课题的设计研究会对未来建造更高指标的同类型非谐振型聚束器积累宝贵的经验。

参考文献(References):

- [1] Jiang Weimo, Zhou Xuehou, Sun Qingyu, *et al.* Proceedings of Heavy Ion Research Facility In Lanzhou, 1993, **10**: 28 (in Chinese).
(蒋维模, 周学厚, 孙庆余等. 兰州重离子研究装置进展报告, 1993, **10**: 28.)
- [2] Pardo R C, Bogaty J M, Clift B E. Proc 1998 Linear Accelerator Conf, 1999, **2**(28): 998.
- [3] Tang Jingyu, Jiang Junzhang, Shi Aimin, *et al.* Nuclear Techniques, 2000, **30**(7): 475 (in Chinese).
(唐靖宇, 蒋君章, 石爱民等. 核技术, 2000, **30**(7): 475.)
- [4] Tang Jingyu, Jiang Junzhang, Li Zhibui, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2000, **24**(12): 1173 (in Chinese).
(唐靖宇, 蒋君章, 李智慧等. 高等物理与核物理, 2000, **24**(12): 1173.)
- [5] Yang Honglin. Information and Electronic Engineering, 1995, **3**: 34 (in Chinese).
(杨洪林. 信息与电子工程, 1995, **3**: 34.)
- [6] Li Zongqian, She Jingzhao, Gao Baoxin. Foundations for Microwave Engineering. Beijing: Tsinghua University Press,

2004, 28—31(in Chinese).

版社, 2004, 28—31.)

(李宗谦, 余京兆, 高葆新. 微波工程基础. 北京: 清华大学出

Theoretical Calculation of Sawtooth Wave Buncher with High Voltage^{*}

SUN Lie-peng^{1, 2}, XU Zhe^{1, #}, SHI Ai-min¹, FENG Yong¹, JIN Peng¹,
LAN Tao¹, GAO Yi-hai¹, ZHAO Hong-wei¹

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The method which builds a buncher with non-resonant cavity through the direct production of sawtooth wave has already been applied commonly to accelerator technologies all over the world. Recently, with the rapid development of electronic and mechanical manufacture technology during the last few decades, it leads to develop a sawtooth buncher easily, furthermore, it can improve match efficiency and operation stability in HIRFL at IMP. It has been concluded that the design can be applied to more sophisticated specification according to this method and the measurement of building higher voltage buncher is feasible. At last, we complement critical points involved implementation of this project and makes it work efficiently because of the highest demand and more rigorous installation limitation of this new buncher throughout the world.

Key words: sawtooth wave; non-resonant cavity; buncher

* **Received date:** 2 Apr. 2009; **Revised date:** 6 May 2009

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10635090)

Corresponding author: Xu Zhe, E-mail: zxu@impcas.ac.cn