

兰州重离子加速器冷却储存环高频加速系统

张文志^{1,2}, 王凤文¹, 许哲², G. Y. Kurkin³, 杨晓东², 夏佳文², 魏宝文²

(1. 东北大学 秦皇岛分校, 河北 秦皇岛 066004;

2. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

3. 俄罗斯科学院 核物理研究所, 俄罗斯 新西伯利亚 630090)

摘要: 文章介绍兰州重离子加速器冷却储存环主环用于加速粒子的高频加速系统。加速系统的频率范围为 0.25~1.7 MHz, 最高峰值电压为 8.0 kV。高频腔体的固有谐振频率通过调节绕在腔体加载的铁氧体材料上的偏磁电流来改变, 所加载的铁氧体材料为 600HH。高频腔体内的真空度达到 3×10^{-9} Pa, 高频发射机的最大输出功率为 30 kW, 高频系统的控制采用基于 PCI 总线技术, 它提供所有高频系统控制及监测功能。

关键词: 铁氧体; 高频腔; 束流加速

中图分类号: TL503.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2006)04-0490-04

RF Accelerating Station for Heavy Ion Research Facility at Lanzhou-Cooling Storage Ring

ZHANG Wen-zhi^{1,2}, WANG Feng-wen¹, XU Zhe², G. Y. Kurkin³,
YANG Xiao-dong², XIA Jia-wen², WEI Bao-wen²

(1. *Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;*

2. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

3. *Budker Institute of Nuclear Physics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russia*)

Abstract: The RF accelerating station for the multipurpose cooling storage ring (CSR) system, constructed at Institute of Modern Physics (IMP) is described. The RF station was tested at IMP and now is installed into the main ring of the facilities. The RF station is operated in the frequency range of 0.25-1.7 MHz, and maximum accelerating voltage is 8 kV. The resonance frequency of the RF cavity is tuned in the whole frequency range by biasing of ferrites, which are used in the cavity. Ferrites of 600HH type were used in the cavity. The pressure in the cavity vacuum chamber is lower than 3×10^{-9} Pa. RF cavity, RF generator, and power supplies are made in one module. Maximum output power of the RF generator is 30 kW. Low level control electronics are placed separately in a rack. The RF station control is based on the compact PCI bus and provides

收稿日期: 2004-11-01; 修回日期: 2005-07-19

基金项目: 国家“九五”重大科学工程“兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)”资助项目

作者简介: 张文志(1966—), 男, 宁夏盐池人, 教授, 博士, 加速器物理专业

all functions of RF station control and monitoring.

Key words: ferrite; RF cavity; beam acceleration

正在建造中的国家“九五”重大科学工程兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)^[1]是一个多用途的加速器组合,它由注入器SFC、SSC,主环(CSR_m)及实验环(CSR_e)组成。主环和实验环的周长分别为161 m和128 m。从注入器(SSC或SFC)引出的能量为10~50 MeV/u的束流,注入到主环中,采用多次多圈注入或射频堆积加电子冷却的方法,将束流在横向或纵向相空间进行累积,使环内束流流强达到 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ s}^{-1}$,且在主环内形成连续束,用加速腔对所形成的连续束流进行捕获并加速到最终能量。文章介绍HIRFL-CSR高频加速系统。

1 系统主要参数

HIRFL-CSR高频加速系统主要参数列于表1。

2 高频腔

高频系统包括高频腔、高频发射机和高频控制系统。高频腔采用铁氧体加载的单间隙同轴线型谐振腔,它由两个四分之一波长线谐振腔组成,在中间形成隙地,即高频加速间隙。图1所示为高频腔结构示意图。铁氧体环的尺寸为外径480 mm、内径340 mm、厚度20 mm,每两个铁氧体环中间夹有金属冷却片,其厚度为1 mm。铁氧体材料的初始相对磁导率 $\mu_r=600$ 。整个腔体共加载68块铁氧体环。铁氧体中最大磁通量密度为 $1.3 \times 10^{-2} \text{ T}$ 。

腔体内铁氧体环共分4组,每2组绕有相

互独立的偏磁绕组,通过调节偏磁绕组线圈上的电流来改变铁氧体材料的磁导率,从而改变高频腔的谐振频率。偏磁绕组绕成“8”字型,使高频磁通量密度变化而在偏磁线圈中产生的感应电动势相互抵消,使偏磁电流源能够正常工作。共使用了96匝偏磁绕组,互相串联(图1中仅画出2匝),在频率0.25~1.7 MHz范围内,偏磁电流的调节范围为0~35 A。腔体及铁氧体材料的冷却采用水冷方式,损失在铁氧体材料中的高频功率通过夹在其间的金属冷却板传给与其外端具有良好热接触的冷却水管,从而达到冷却的目的。同时,为增强铁氧体环与冷却板的热接触、机械稳定度以及电绝缘强度,在高频腔体的自由空间填充了绝缘硅胶介质。所设计的高频系统工作于脉冲模式,腔体内的平均功率损耗为2.2 kW,铁氧体内平均功率损耗为 15 mW/cm^3 。经测量,铁氧体环与冷却水间的最大温差不超过 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为使高频腔的谐振频率能够达到所设计频率的下端0.25 MHz,在腔体的高频加速间隙间接有间隙电容,其值为6 200 pF,由28个相同的陶瓷电容并联组成,每个电容为220 pF,耐压值为15 kV。从开路端,即加速间隙到短路端,其电长度为 11° 。腔体真空室经烘烤后所达到的真空度好于 $3.5 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ 。

3 高频发射机

高频发射机末级功率放大器的最大输出功率为30 kW,采用共阴极推挽放大方式(单管输出最大功率为15 kW)。因使用频段较低,高频

表1 高频加速系统主要参数

Table 1 Main parameters of RF accelerating system

参数名称	量值	参数名称	量值
频率范围	0.25~1.7 MHz	腔体真空度	$<3.5 \times 10^{-11} \text{ Pa}$
最高加速电压	8.2 kV	加载铁氧体材料类型	600HH
高频谐波数	1	高频腔轴线高度	1 500 mm
发射机最大输出功率	30.0 kW	高频腔安装长度	2 600 mm
运行周期	3.0 s	高频腔真空室孔径	200 mm

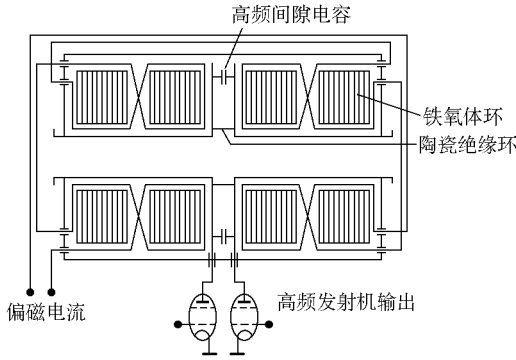


图 1 高频腔体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of RF cavity

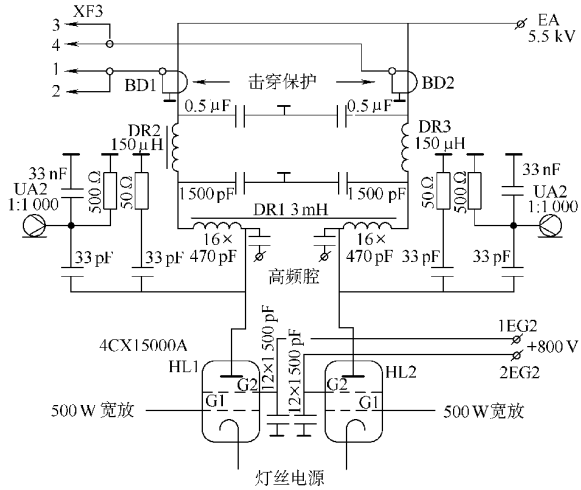


图 2 高频发射机末级线路图

Fig. 2 Circuits of final stage of the RF amplifier

功率放大部分采用功率增益较高的末级功放管,其型号为 8281/4CX15000A 束射功率四极管。功率管的冷却方式为风冷。功率管的板极与高频腔体的加速间隙直接相接,即高频腔体直接作为末级功率放大器的槽路,末前级为 500 W 固态宽带放大器,采用水冷却方式。在连续波输出模式下,最大输出功率为 0.5 kW。固态宽带放大器所需的最小输入功率为 0.5 W,整个电路采用宽带不调谐,仅有腔体调谐,这种工作方式较级间调谐式稳定。图 2 示出高频发射机末级线路图。

靠主导偏转场磁感应强度与高频电压间的精确依赖关系实现。在加速过程中,高频频率分辨率小于 10 Hz,频率稳定度小于 10^{-3} ,所需的数字控制量为 18 bit。传统采用的信号源 VCO 的长期稳定度为 10^{-2} ,数字分频 PLL 合成方式的频率发生速度决定于其频率分辨率,即频率分辨率越高,频率发生速度越慢,这是由 PLL 环路的低通滤波器决定的。在高频率分辨率下,当数字分频比 $1/N$ 很大时,环路增益将降至 $1/N$,环路稳定性变差。采用较新的 DDS 技术能满足 CSR 高频信号处理的要求。图 3 为 CSR 主环高频加速系统的控制框图。

4 高频控制系统

CSR 高频控制系统采用基于 DDS 的高频信号处理线路。作为同步加速器,束流的加速

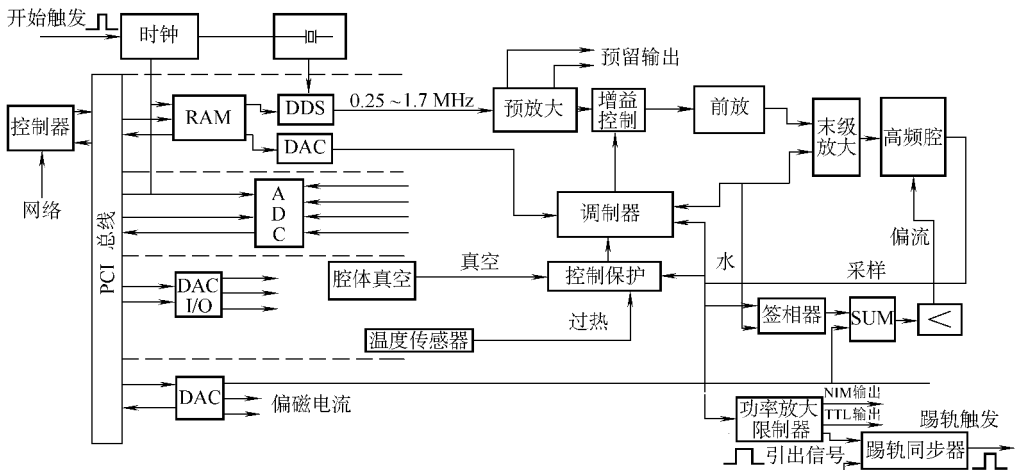


图 3 CSR 主环高频加速系统控制框图

Fig. 3 Control diagram of CSR RF accelerating system

所有高频信号控制单元将采用基于 Compact PCI 总线的工控机插件,所有插件是带有 MCU 的独立系统,以缓冲工控机较慢的通信速度。它提供高频加速过程中所需要的所有高频参量(加速电压、高频相位等),这些参量由预先编制好的程序提供。同时,控制系统能够进行高频参量的微调。

安装于 Compact PCI 机柜的主控插件包括高频主振荡器 DDS, DAC 提供腔体高频电压幅度的直流参考信号及腔体调谐参数, ADC 提供整个运行周期中对高频参量的监控, RAM 部分存储着决定运行周期过程中最关键参量的信息,即 DDS 的输出频率、高频腔的电压幅值以及偏磁电流的预值。高频系统可在本地进行控制,也可通过网络在远程(中央控制室)进行控制。

5 机械结构

高频腔固定在 1 个钢体架上,整个框架由 4 个脚固定在地面上。高频腔长度 2 600 mm,束流轴线高度为 1 500 mm、宽度为 878 mm。腔体下安装 3 个机柜,从左到右分别为 1 号柜、2 号柜和 3 号柜,1 号机柜里安装有四极管的阳极电源、廉栅极电源,2 号机柜安装有高频四极管、灯丝电源,3 号机柜安装偏磁电流源 DC 放大器、高频发射机的控制电路以及发射机的控制保护电路部分。

6 测试结果

腔体安装后,首先进行真空测试。经烘烤

后,腔体真空度达到设计要求。高频参数的测试通过 72 h 不间断的运行而得到。在整个运行过程中,高频腔体电压稳定度达到 0.2%,腔体的频率调谐精度为 10° 。图 4 为从电压幅度探测器上获取的模拟加速注入能量为 25 MeV/u、引出能量为 900 MeV/u 的 $^{12}\text{C}^{6+}$ 离子的高频电压波形。同时,测试模拟加速注入能量为 10 MeV/u、引出能量为 450 MeV/u 的 $^{238}\text{U}^{72+}$ 离子过程,所得到的电压波形与设计波形符合。其它各项高频参数均达到设计指标。

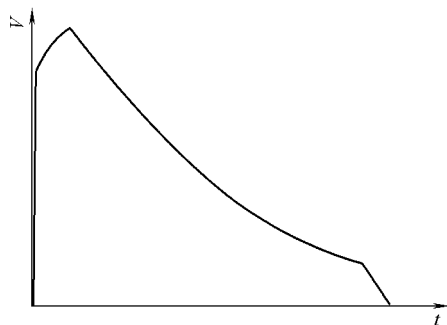


图 4 高频腔电压测试结果

Fig. 4 Oscilloscope testing result of RF cavity voltage

参考文献:

- [1] XIA J W, ZHAN W L, WEI B W, et al. The Heavy Ion Cooler-Storage-Ring Project (HIRFL-CSR) at Lanzhou [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2002, 488(1-2):11-25.