

文章编号: 1007-4627(2001)03-0160-04

# HIRFL-CSR 主环加速腔系统设计\*

张文志, 张殿胜, 宋明涛, 杨晓东, 夏佳文, 原有进

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:**正在建设中的兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的主环加速腔系统用于将累积的重离子束流进行加速, 其频率范围为 0.25—1.7 MHz, 峰值电压为 8.0 kV. 重点介绍了主环加速腔系统的设计及主要高频参数, 包括高频腔体的设计及低电平控制部分的设计.

**关键词:**高频腔; 同步加速; 高频控制

**中图分类号:** TL503.2      **文献标识码:** A

## 1 引言

兰州重离子加速器冷却储存环主环(CSRm)<sup>[1]</sup>将采用多圈注入或射频堆积加电子冷却将重离子束在横向相空间与纵向相空间进行累积, 使环内束流流强达到  $10^{12}$ — $10^{14}$  ions/s. 然后加速并引出打靶, 产生放射性次级束或剥离成高电荷态重离子束注入实验环进行内靶实验.

能量为 10—50 MeV/u 的离子束流注入到主环中由射频堆积腔捕获后, 将束流在纵向相空间进行射频堆积或通过多圈注入在横向空间进行累积. 累积以后的束流由加速腔加速至设计能量 ( $^{12}\text{C}^{4+}$  900 MeV/u,  $^{238}\text{U}^{72+}$  400 MeV/u). 加速腔的频率范围设计为 0.25—1.7 MHz, 腔体峰值电压设计为 8.0 kV. 腔体采用铁氧体加载的同轴线型调谐腔, 通过改变绕在其上的偏磁线圈的偏磁电流来改变其谐振频率. 加速腔高频系统信号源将采用高精度的信号发生器 DDS.

## 2 主要高频参数

CSR 主环的目标是利用电子冷却系统储备高流强、高品质的重离子束. 同时它也是一个同步加速器, 为了使粒子能够谐振地加速到所设计的能量, 加速电压的频率在一个加速周期内随主导二极磁场的变化而变化. 这种加速器的加速设备多采用铁氧体加载的同轴型谐振腔<sup>[2]</sup>, 通过改变铁氧体磁

性材料的磁导率来改变高频腔体的谐振频率.

注入到主环的束流能量为 10—50 MeV/u, 动量散度为  $\Delta P/P = \pm 0.15\%$ , 通过多圈注入或射频堆积后, 在主环内形成具有一定动量散度的连续束, 由加速腔绝热捕获后加速至设计能量, 所需的捕获电压由下式决定:

$$V_c = \frac{\pi^3 h k^2 \eta \beta_i^2 \gamma_i E_0}{8\epsilon} \left( \frac{\Delta P}{P} \right)_i^2, \quad (1)$$

式中,  $i$  表示加速前的束流参数,  $\beta$  为粒子的相对论速度,  $h$  为高频谐波数,  $E_0$  为离子的静止单核能,  $\gamma = 1/\gamma_0^2 - 1/\gamma_c^2$ ,  $\gamma_c$  为机器的临界能量(转变能),  $\epsilon$  为离子的荷质比,  $k$  为相空间稀释因子, 即高频相稳区与束流纵向发射度之比,  $\gamma$  为相对论因子.

在加速过程中, 高频电压由以下条件决定: (1) 高频电压每圈提供给粒子的能量(即粒子能量的增长)应与主导磁场的增长同步, 即  $V \cdot \Gamma = 2\pi\rho RB$ , 其中  $\Gamma = \sin\phi_s$ ,  $\rho$  为主导二极磁场的曲率半径,  $R$  为主环的平均半径,  $B$ (T/s) 为主导磁场随时间的变化率,  $\phi_s$  为同步相角; (2) 高频相稳区的面积要大于或等于束流的纵向发射度. 而高频频率要满足关系式  $df_{RF}/dt = (\eta/\beta^2)(f_{RF}^2/hE) \cdot e e V_{RF} \sin\phi_s$ , 根据对束流加速过程的数值模拟, 可以得到加速过程中高频电压的变化曲线, 同时可得到加速腔系统的主要物理参数<sup>[2]</sup>. 表 1 给出主环加速腔系统的主要参数.

收稿日期: 2001-02-20; 修改日期: 2000-04-24

\* 基金项目: 国家重大科学工程 HIRFL-CSR

作者简介: 张文志(1966—), 男(汉族), 宁夏盐池人, 博士, 副研究员, 从事加速器物理及技术研究.

表1 主环加速腔系统参数

参数名称	参数指标
频率范围 (MHz)	0.25—1.7
峰值电压 (kV)	8.0
中心高度 (mm)	1 500
腔体调谐精度 (°)	<±5
铁氧体材料种类	HH 600
铁氧体环数目	80
电压稳定度 (ΔV/V)	短期 ≤ 5 · 10 <sup>-3</sup> 长期 ≤ 1 × 10 <sup>-3</sup>
高频谐波数	1
加速周期 (ms)	3 000
腔体长度 (m)	<2. 600
束流孔径 (mm)	200
铁氧体环尺寸 (mm)	480 × 300 × 20
初始磁导率 (H/m)	600
电压精度 (ΔV/V)	≤ 1 × 10 <sup>-3</sup>

### 3 高频腔体设计

高频腔体将采用单间隙铁体材料加载的同轴型谐振腔, 腔体由两个四分之一波长线组成, 铁氧体材料的选择主要考虑其磁导率的变化范围以及尽可能小的高频损耗. 腔体谐振频率是通过改变绕在铁氧体环上的偏磁电流线圈的电流来实现. 我们选择 HH600 作为腔体的加载材料, 其初始磁导率是 600 H/m. 采用推挽式将功率馈入腔体内.

高频腔体由外径为 480 mm、内径为 300 mm、厚度为 20 mm 的铁氧体环加载, 每两块铁氧体环之间插一冷却用的铜板. 腔体内的平均磁导率  $\bar{\mu}$  及平均介电常数  $\bar{\epsilon}$  分别用下列关系式表示:

$$\bar{\mu} = \mu_e \mu_0, \quad (2)$$

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_r \epsilon_0, \quad (3)$$

这里, 
$$\mu_e = \frac{[1 + \Phi(\mu_r - 1)]d_1}{d_1 + d_2}, \quad (4)$$

$$\epsilon_e = \frac{1}{1 - \Phi}, \quad (5)$$

$$\Phi = \frac{\ln(\rho_2/\rho_1)}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (6)$$

其中  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为铁氧体环的内径和外径,  $r_1$  和  $r_2$  为腔体的内外径,  $d_1$ ,  $d_2$  分别表示铁氧体环及冷却

板的厚度,  $\mu_r$ ,  $\mu_0$  和  $\epsilon_0$  分别为铁氧体材料的相对磁导率、空气的磁导率和介电常数. CSR 主环加速腔的设计中,  $\rho_1 = 300$  mm,  $\rho_2 = 480$  mm,  $r_1 = 200$  mm,  $r_2 = 642$  mm,  $d_1 = 20$  mm,  $d_2 = 2$  mm. 腔体作为同轴线谐振腔, 单位长度电感及电容分别为

$$L_0 = \frac{\bar{\mu} \ln(r_2/r_1)}{2\pi}, \quad (7)$$

$$C_0 = 2\pi \bar{\epsilon} \ln\left\{\frac{r_2}{r_1}\right\}, \quad (8)$$

特性阻抗  $Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}$ , 铁氧体材料中最大的高频磁场为

$$B_H(\max) = \mu_r \mu_0 \sqrt{\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\mu}}} \frac{V_g}{\rho_1 \sin\theta \ln(r_2/r_1)}, \quad (9)$$

其中,  $V_g$  为间隙电压,  $\theta$  为腔体的特性角, 定义为  $\theta = \omega l/c \cdot \sqrt{\mu_r/\epsilon_r}$ ,  $\omega$  为高频角频率,  $l$  为腔体长度,  $c$  为光速. 在  $\theta$  角较小的情况下(一般情况下所设计的  $\theta$  角不大于 20°)腔体的分路阻抗可表示为

$$R_s = 4\pi \times 10^{-7} (\mu_r Q f) \left(\frac{\mu_r}{\mu_0}\right)^2 G, \quad (10)$$

$G$  为腔体的形状因子,  $G \equiv \ln^2(r_2/r_1) l (d_2 + d_1) \cdot (r_1 + r_2) / [2d_1(\rho_2 - \rho_1)]$ . 铁氧体材料中的高频功

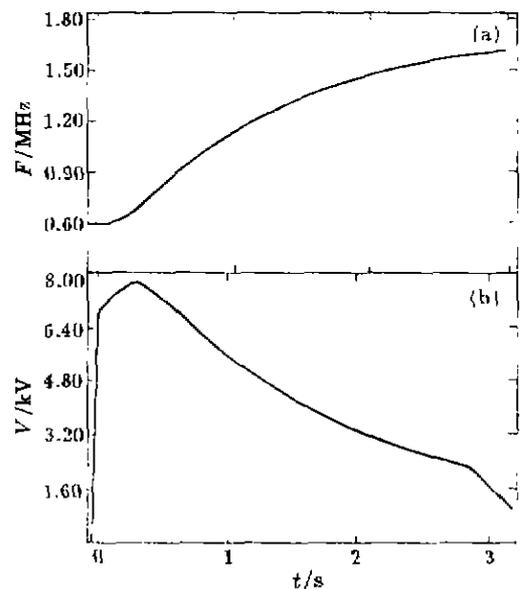


图1 主环加速典型离子<sup>12</sup>C<sup>6+</sup>时高频频率(a)及高频电压(b)在一个周期内随时间的变化关系

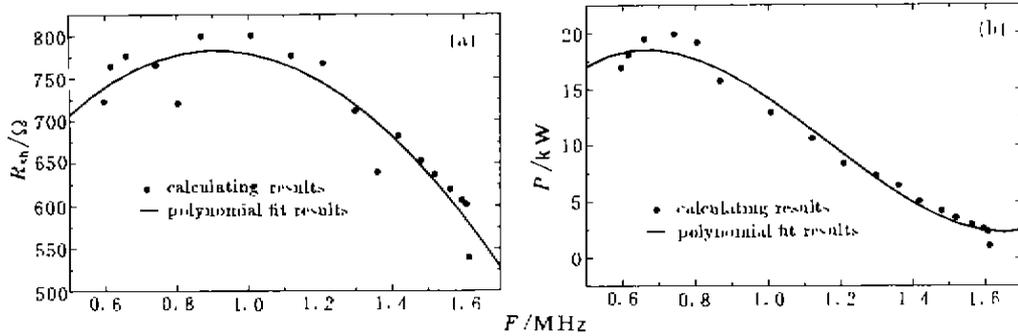


图2 主环加速腔分路阻抗(a)及功率损耗(b)随频率的变化系统

率损耗为

$$P = \frac{V_g^2}{2R_s} \quad (11)$$

根据对主环加速过程进行数值模拟得到的高频频率及高频电压在一个加速周期内的变化情况<sup>[3]</sup>如图1所示, 计算得到高频腔分路阻抗( $R_{sb}$ )及功率损耗如图2所示. 由计算结果可知, 所设计腔体的最大

功率损耗为20 kW. 这样, 高频腔体的建造及运行都不会存在太大的困难, 同时可以选择国产的高频功率管, 大大降低了建造及运行维护的费用.

### 4 高频控制

CSR 高频控制线路将采用基于 DDS 的高频信号处理线路, 作为同步加速器, 束流的加速是靠主

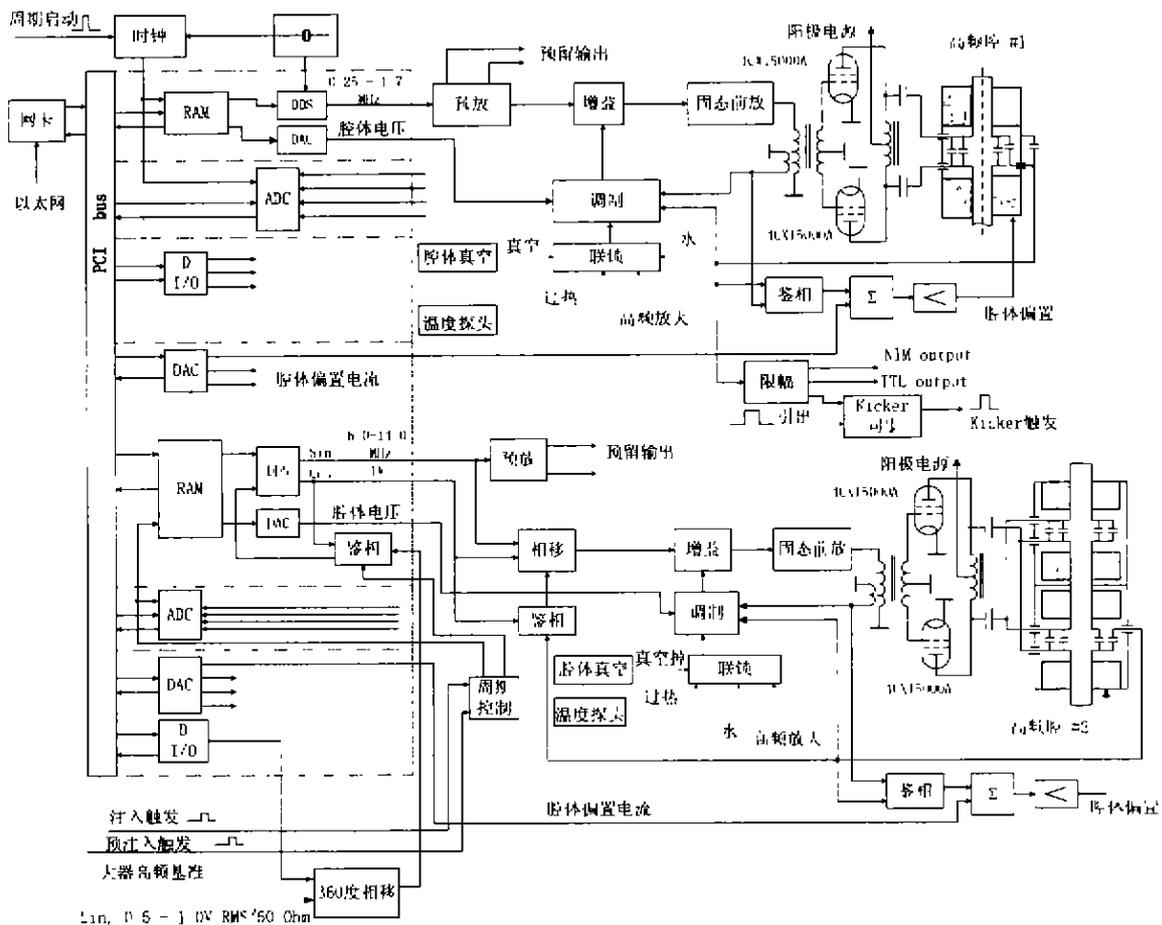


图3 CSR 主环高频系统控制框图

导偏转场磁感应强度与高频电压之间的精确依赖关系来实现的。在加速过程中, 高频频率分辨率要小于 10 Hz, 频率稳定小于  $10^{-5}$ , 所需要的数字控制量为 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。在高频率分辨下, 数字分频比  $1/N$  很大时, 环路增益会降到  $1/N$ , 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 主环高频系统(高频腔 $1^{\#}$ )的控制框图。图中还包括了 CSR 主环另一高频系统——射频累积腔系统(高频

腔 $2^{\#}$ )的控制部分。

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。

由于使用频段较低, 高频功率放大大部分将采用功率增益较高的末级功放管, 末前级采用功率较小的固态宽放(6 kW)作为推动末级, 这样可取得简洁的设计方案, 末级暂用国产的 8281/4CX15000A 束射功率四极管。整个电路采用宽带不调谐, 只有腔体调谐, 这种工作方式较级间调谐式稳定。

#### 参 考 文 献:

- [1] Xia J W, Rao Y N, Yuan Y J, *et al.* HIRFL Status and HIRFL-CSR Project in Lanzhou [C]. Proceedings of the First Asian Particle Accelerator Conference (APAC), KEK, Tsukuba, Japan, 1995. 343-348.
- [2] Cradner I S K. Ferrite Dominated Cavities [R]. CERN Accelerator School, April 1992. 349-369.
- [3] 张文志, 陆晓文, 徐向阳, 等. HIRFL-CSR 束流加速过程模拟 [J]. 原子能科学技术, 2000, 34(2): 142-145.

## Design of HIRFL-CSRm Accelerating System\*

ZHANG Wen-zhi, ZHANG Dian-sheng, SONG Ming-tao, YANG Xiao-dong  
XIA Jia-wen, YUAN You-jin

(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** An ion cooler-storage ring HIRFL-CSR is constructing at Institute of Modern Physics (IMP). It consists of two rings——main ring (CSRm) and experimental ring (CSR<sub>e</sub>). For the CSRm, two RF systems will be employed. One is for RF stacking, and another is for beam accelerating. The designed parameters of CSRm accelerating system and the control block diagram of RF system are described. The RF accelerating system has a specification of lower and wider frequency range from 0.25 to 1.7 MHz. The peak RF voltage of the cavity is 8.0 kV.

**Key words:** radio frequency cavity; synchronise accelerating; radio frequency system control

\* Foundation item: National Scientific Project HIRFL-CSR