

对 HIRFL 几个主要参数的稳定性要求*

唐靖宇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 对 HIRFL(兰州重离子研究装置)的几个主要参数的稳定性对束流指标及运行效率的影响进行了分析,如高频的幅度稳定和相位稳定及主磁场的稳定等,并提出了合理的稳定度要求和需要采取的措施.

关键词 高频幅度稳定性 高频腔谐振频率稳定性 束流相位稳定性 主磁场的稳定性 束流闭环控制

分类号 TL501.5

HIRFL 系统自 1988 年建成出束以来,在为实验提供束流的同时或间隙,对其进行了一些改进,从而提高了束流指标和运行效率.为了满足在 HIRFL 上开展放射束物理工作以及作为后级加速器 CSR 冷却储存环对高束流流强的要求,应全面提高 HIRFL 各加速传输段的传输效率,其中包括两台回旋加速器(注入器 SFC 和主加速器 SSC)的引出效率.回旋加速器的引出效率一方面与注入加速器的束流品质有关,另一方面也与加速器的几个主要参数的稳定性有关,如高频频率稳定性、高频电压稳定性、高频相位稳定性、主磁场的稳定性等.提高这些参数的稳定性不仅可以通过实现单圈引出,从而提高回旋加速器的引出效率;从两台加速器的匹配出发,如 SFC 与 SSC、SSC 与冷却储存环 CSR,这些稳定性还可对下一级加速器有理想的注入效率发挥积极的作用.下面分析这些参数对引出效率的影响,并根据 HIRFL 的具体情况给出了对这些参数的稳定性要求以及可以采取的措施.

1 高频幅度稳定性

高频加速电压的幅度稳定性对加速器尤其是回旋加速器的传输效率有相当大的影响,主要反映在注入效率和引出效率上.由于加速电压幅度的变化,一方面使加速过程中

束流的进动轨道发生变化,另一方面使引出点同圈数的束流径向位置发生变化(能量变化).为简化论题,这里只估计由第二个性质决定的对高频幅度稳定性的要求.

1.1 注入器 SFC

SFC 的最大引出圈数为 $n \approx 150$,此时可估计引出区的加速圈距为

$$\Delta R = R_{\text{ext}} \frac{\Delta W}{W} \frac{\gamma}{1 + \gamma} \frac{1}{v_\gamma^2},$$

其中 $\Delta W/W = 1/n$, $\gamma \approx 1$, $v_\gamma \approx 0.9$, $R_{\text{ext}} = 0.75 \text{ m}$,所以 $\Delta R \approx 3.1 \text{ mm}$.高频电压的变化对引出能量的影响有

$$\frac{\delta W}{W} = \frac{\delta V}{V},$$

它和加速圈距一样,也产生径向位置的变化 δR .为了保证较高的引出效率,希望有

$$\frac{\delta R}{\Delta R} \leq 0.1,$$

即 $\frac{\delta V}{V} \leq \frac{1}{10n} = \pm 6.7 \times 10^{-4}$.

ΔR 中不能加入由进动共振产生的圈距,因为进动过程是与粒子的能量密切相关.由高频电压不稳定造成的能量弥散对进动过程也有影响.

1.2 主加速器 SSC

在主加速器 SSC 中,高频幅度稳定性的作用原理同 SFC 的情况一样,主要考虑加速

* 1997 - 09 - 16 收稿,1997 - 12 - 10 收到修改稿.

圈数的不同. SSC 也是在加速最高单核能量的粒子时加速圈数最多,此时采用 $H=2$ 加速模式, $n \approx 450$. 所以对高频电压的稳定性要求为

$$\frac{\delta V}{V} \leq \frac{1}{10n} = \pm 2.2 \times 10^{-4}.$$

对于 SSC, 注入过程与引出过程几乎完全相反, 都采用静电偏转板来进行注入轨道或引出轨道与加速轨道的过渡. 高频电压的稳定性不仅影响引出效率, 也影响注入效率, 但在注入阶段因加速圈距较大, 因而加速电压的稳定性对注入效率的影响相对引出效率要小得多.

造成腔体电压变化的原因主要有两个: 一是发射机的输入功率(激励)不稳定, 二是腔体的谐振频率和品质因数 Q 由于在热状态的各种扰动形成的腔体参数涨落引起的变化. 输入功率的不稳定性可以通过在发射机回路中加入闭环稳定回路来解决, 而腔体谐振频率的变化可以通过微调对腔体参数产生影响的电容或电感来解决. 只有两者都满足要求时, DEE 电极上的电压幅度稳定性才能达到较好的指标. 下面就腔体谐振频率失谐对加速电压的影响作一简单的分析.

因为谐振腔是高品质因数的腔体, 属于弱阻尼情况, 设 ω_0 为馈入电磁波频率, ω 为腔体谐振频率, Q 为腔体品质因数, E 为任意一点的电场强度的幅值(或加速电压幅值), 则由于 ω_0 与 ω 的不一致导致电场幅值的相对变化为

$$\left| \frac{E}{E_0} \right| = \frac{\frac{1}{2}\Gamma}{\left[(\omega_0 - \omega)^2 + \left(\frac{1}{2}\Gamma \right)^2 \right]^{1/2}},$$

其中, $\Gamma = \frac{\omega_0}{Q}$, 令 $\Delta\omega = \omega_0 - \omega$, 则

$$\left| \frac{\Delta E}{E_0} \right| = 1 - \left[(2Q \frac{\Delta\omega}{\omega})^2 + 1 \right]^{-1/2} \\ \approx 2(Q \frac{\Delta\omega}{\omega})^2.$$

若要求 $\Delta E/E = 2 \times 10^{-4}$, $Q = 10^4$, 则 $\Delta\omega/\omega = 1 \times 10^{-6}$. 目前, 注入器 SFC 和主加速器

SSC 的高频幅度稳定性都在 $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ 之内, 离要求还有一定的距离, 正在进行幅稳环和频调环的改进工作.

2 高频频率稳定性

加速腔中的高频电场的频率稳定性对束流也有较大的影响. 假定等时场垫补很好, 则由高频频率的变化引起的圈数变化为

$$\Delta n = \frac{1}{qV} \sum_{i=1}^n \cos \omega_{\text{RF}} t_i - n \\ = - \sum_{i=1}^n (1 - \cos \omega_{\text{RF}} t_i),$$

这里 $t = n \cdot 2\pi h / \omega_{\text{RF}}^0$. 定义 $\omega_{\text{RF}} = \omega_{\text{RF}}^0 + \Delta\omega_{\text{RF}}$, 或 $f_{\text{RF}} = f_{\text{RF}}^0 + \Delta f_{\text{RF}}$, 则

$$\Delta n = - \sum_{i=1}^n (1 - \cos 2\pi n h \frac{\Delta f_{\text{RF}}}{f_{\text{RF}}^0}) \\ \approx 2 \int_1^n \sin^2 \frac{\pi n h \Delta f_{\text{RF}}}{f_{\text{RF}}^0} dn \\ = \frac{2}{3} n^3 \pi^2 h^2 \left(\frac{\Delta f_{\text{RF}}}{f_{\text{RF}}^0} \right)^2 \\ \approx 2\pi n^3 h^2 \left(\frac{\Delta f_{\text{RF}}}{f_{\text{RF}}^0} \right)^2.$$

若 $\Delta n = 0.1$, $n = 450$, $h = 2$, 则 $\frac{\Delta f_{\text{RF}}}{f_{\text{RF}}^0} \leq \pm 6.6 \times 10^{-6}$.

不过, 一般加速器的频率源现在均采用晶体振荡器和分频技术, 其稳定性可达到 10^{-8} 量级, 所以在多数情况下它的影响可忽略.

3 高频相位稳定性

HIRFL 中有多个高频腔体, 分别用于束流的加速和聚束作用, 除了频率应严格地满足一定的关系外, 它们的高频相位之间也应满足一定的关系, 这要通过比较相位的闭环控制来达到. 对这些相对相位之间的稳定性要求同样也可以通过研究它们对束流引出效率的影响来得到. 假定 SFC 和 SSC 的等时场是理想优化的, 且加速相位也在高频峰值相

位上,现在所考虑的腔体相对前级腔体的高频相位漂移 $\Delta\Phi$,那么该相位漂移对束流能量的影响为

$$\frac{\Delta W}{W} = 1 - \cos\Delta\Phi \approx \frac{1}{2}(\Delta\Phi)^2.$$

同样,以 SFC 和 SSC 引出点位置的变化限制束流能量变化的方法来确定对各高频腔的相位稳定性要求. HIRFL 高频系统的实际情况是其它腔体的相位都是以注入器 SFC 的高频腔为参考系,所有腔体的相位都是以自身频率计算的. SFC 轴向注入线上的聚束器 B01 ($h=1$)或 B02($h=3$)相对 SFC 高频的相对相位决定了束流相位,而该聚束器通常采用半频聚束模式,因而其相位稳定性要求也比用上式计算出的要好一倍. SFC 与 SSC 之间的传输线上两台聚束器 B1 和 B2 都采用 SSC 的高倍频模式,因而其相位稳定性要求可以比 SSC 加速腔的低一些.

加速条件对于 SFC 为 $\Delta n = 0.1, n = 150, h = 1$;对于 SSC 为 $\Delta n = 0.1, n = 450, h = 2, h_{\text{BUN}}/h_{\text{SSC}} = 4$,则聚束器 B01 的相位稳定性要求为

$$\Delta\Phi \leq \pm 1^\circ, \quad (\text{SFC 引出要求})$$

$$\Delta\Phi \leq \pm 0.4^\circ. \quad (\text{SSC 引出要求})$$

SSC 两台加速腔的相位稳定性要求为 $\Delta\Phi \leq \pm 1.2^\circ$,聚束器 B1 和 B2 的相位稳定性要求为 $\Delta\Phi \leq \pm 4.8^\circ$.

目前,HIRFL 各高频腔的相位稳定性都达到 $\pm 0.7^\circ$,除 B01 腔体外都满足要求,B01 和 B02 相位稳定性的提高已在研究之中.

4 主磁场的稳定性

对主磁场的稳定性要求与对高频频率的稳定性要求类似,在有 ΔB 存在的情况下,引出半径处的中心粒子相位移动和加速圈数的变化为

$$\Delta\Phi = 2\pi n h \frac{\Delta B}{B}, \quad \Delta n \approx 2\pi n^3 h^2 \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2.$$

为了保证多级加速器的能量匹配,对 $\Delta E/E$ 有一定的要求,从上面的结果可以直接

得到

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta n}{n} \approx 2\pi n^2 h^2 \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2.$$

从满足引出效率出发,对 SFC 的磁场稳定性要求为: $\Delta n = 0.1, n = 150, h = 3$,则 $\Delta B/B \leq \pm 2.3 \times 10^{-5}$;对 SSC: $\Delta n = 0.1, n = 450, h = 2$,则 $\Delta B/B \leq \pm 6.6 \times 10^{-6}$.

在满足上面条件的情况下,引出能量的变化对 SFC 和 SSC 分别为 7×10^{-4} 和 2×10^{-4} ,可以满足后级加速器的要求.

从满足引出束流相位的稳定出发(这也是两台加速器进行匹配所必须的,因为 SSC 也有与后加速器 CSR 冷却储存环的匹配要求),对于 SFC 磁场稳定性的要求为: $\Delta\Phi = \pm 1^\circ, n = 150, h = 3$,则 $\Delta B/B \leq \pm 6 \times 10^{-6}$;对 SSC: $\Delta\Phi = \pm 1^\circ, n = 450, h = 2$,则 $\Delta B/B \leq \pm 3 \times 10^{-6}$.

由此可见,由相位稳定性给出的对主磁场稳定性的要求比单圈引出条件还要高,因此,对 SFC 和 SSC 分别提出 $\pm 6 \times 10^{-6}$ 和 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 的要求.

主磁场的稳定性与电源的稳定性、控制系统的稳定性和精度以及磁铁的磁性能的稳定性有关,下节将介绍通过闭环控制来解决磁场的稳定性问题.

5 束流闭环控制

从上节的分析可以看出,单圈引出条件和束流相位稳定性对主磁场的稳定性要求很高.由电源造成的主磁场不稳定性可以通过提高电源本身的稳定性及提高控制系统的稳定性和控制精度来解决.目前 SFC 的主线圈电源的稳定性为 $\sim 1 \times 10^{-5}/8 \text{ h}$,SSC 为 $\sim 5 \times 10^{-6}/8 \text{ h}$,不能满足前面提出的要求,控制系统也造成类似程度的漂移.另外,由于主磁铁的磁场响应还与磁铁的环境温度有关,而环境温度的变化在长期运行过程中是不可避免的.其它实验室研究显示磁铁温度变化 1° ,约对应于 $\sim 10^{-5}$ 的磁场变化^[1].若在加速器中放置核磁共振探头进行监测,一方面要达到 $1 \times$

10^{-6} 水平较为困难(正在使用的 NMR-751-27 型号核磁共振仪的测量精度为 $3 \times 10^{-6} \text{T}$),另一方面为跟踪操作增加了难度.比较可行的方法是在束运线上放置束流探针和中心相位探针来监测束流能量和相位,并反馈到主磁场电源的调节器上.由感应式束流位置探针可以得到束流能量偏离的信息,从而可以为

主磁场的控制提供反馈信号,但该反馈信号的灵敏度可能不够,因为能量的不稳定性偏差在 10^{-4} 量级,引起束流中心位置的变化较小,难以在束流位置探针上反应出来.采用测量束流中心相位的方法则有较高的精度,可以得到 $\pm 1^\circ$ 以内的分辨率.因而是提供闭环控制的较好信息源,如图 1 所示.

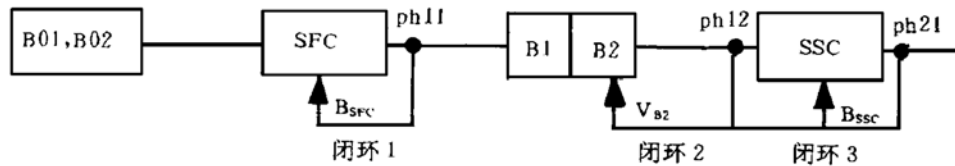


图 1 HIRFL 束流相位稳定闭环控制示意图

6 讨 论

根据以上的分析讨论,高频加速电压幅度的稳定性以及主磁场的稳定性对回旋加速器的引出效率和运行稳定性起到很重要的作用.高频加速电压的稳定性可以通过把腔体的感应探针引出的信号反馈到发射机的末前级功放上,以调节激励的大小和对腔体谐振频率的闭环补偿来达到. HIRFL 两台回旋加速器的高频幅度稳定性目前都没达到理想的指标,需进一步改进闭环补偿系统,从而将幅度稳定性从 $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ 提高到 5×10^{-4} (SFC) 和 2×10^{-4} (SSC). 主磁场的变化除与电源的稳定性和控制系统的稳定性直接有关

外,还与磁铁的环境温度有关.当在运行过程中发生变化时,可通过由束运线上的束流中心相位与主线圈电流构成的闭合环路控制得到解决,即由引出束流的相位变化来控制主磁场的变化,这样就可以将主磁场的稳定性控制在 2×10^{-6} 左右.

感谢王义芳研究员在百忙之中抽出时间进行的讨论.

参 考 文 献

- 1 Brautigam W, Brings R. 14th Inter Conf on Cycl and Their Appl, 1995, 280~283

Stability Requirement of Main Parameters at HIRFL

TANG Jingyu

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

Abstract The stability of the main parameters at HIRFL accelerator complex, which is important to get high extraction efficiency of the beams from cyclotrons has been studied. The RF amplitude stability and the stability of main magnetic field are the key parameters. The reasonable requirements for the parameters at HIRFL and the measures to reach them are proposed.

Key Words RF amplitude stability RF cavity resonance frequency stability beam phase stability main magnetic field stability beam phase loop control