

兰州重离子研究装置 进展报告

第 六 卷

1987

中国科学院近代物理研究所 编辑

科学出版社

主 编 魏宝文

副主编 乔庆文 闵 亚 叶 峰

编 委 马受武 白国良 张守谨 张恩厚

张恕修 张振康 焦天枢 蒋维模

Chief editor: Wei Baowen.

Vice-editors in chief: Qiao Qingwen Min Ya Ye Feng

Members: Ma Shouwu Bai Guoliang Zhang Shoujin Zhang Enhou Zhang Shuxiu

Zhang Zhenkang Jiao Tianshu Jiang Weimo

目 录

1. 1.7m SFC 束动力学研究	1
2. 1.7m SFC 外离子源轴向注入物理设计	8
3. SSC 扇形磁铁铁心	16
4. SSC 扇形磁铁垫补线圈	25
5. SSC 四扇磁铁磁场平衡	32
6. SFC 磁场的建立	41
7. SFC 束流相位测量与磁场再垫补	48
8. 注入引出系统的磁通道	56
9. 注入引出弯曲磁铁	66
10. 后束运真空系统	76
11. 冷却水流量自动监测系统	80
12. SSC 高频腔粗调谐控制系统	84
13. HIRFL 的束流诊断与控制	89
14. SFC 束流探针控制与数据采集系统	98
15. SFC 中心区各部件的自动控制	103
16. 油分路器电阻的温度补偿及其理论计算	107
17. IBM PC/XT 微机和 7075 数表的 GPIB 接口	113
18. 5211 RS19 型彩色显示器及其应用	118
19. 间热阴极 PIG 源在 SFC 上的使用和改进	122

Contents

1. The Beam Dynamics Study for 1.7m SFC	7
2. The External Ion-Source System Design for 1.7m SFC	15
3. Iron Core of the Sector Magnet of SSC	24
4. Trim Coils for the Sector Magnets of SSC.....	31
5. The Balance for 4 Sector Magnetic Fields of SSC.....	40
6. Performance of SFC Magnetic Field.....	47
7. Beam Phase Measurement and Optimization of SFC Magnetic Field.....	55
8. Magnetic Channels for the Injection and Extraction System	65
9. Bending Magnets for the Injection and Extraction System	75
10. Vacuum System for the Post Transport Beam Line of HIRFL	79
11. The Automatic Acquisition System for the Cooling Water System of the SSC Cavity	83
12. The Coarse Tuning System for the SSC Cavity.....	88
13. Beam Diagnostics and Control in HIRFL.....	97
14. A Control System for SFC Probe Driving and Beam Acquisition	102
15. The Control of the Devices in the Center Region of SFC	106
16. Temperature Compensation of the Sampling Resistor in Oil Diverter and Its Theoretical Calculation.....	112
17. Interface GPIB Between IBM PC/XT and DVM 7075	117
18. Characteristic and Application of the 5211 RS19 Colour TV.....	121
19. PIG Ion Source with Indirectly Heated Cathode for SFC.....	125

1. 1.7m SFC 束动力学研究

马 钟 仁

一、绪 论

兰州 1.7m 扇形聚焦回旋加速器 (SFC) 是由原有 1.5m 经典回旋加速器 (γ -150) 改装而成的。改装后的加速器, 主要用途是作为兰州重离子加速器 (HIRFL) 的注入器, 要求可变能量, 等时性加速。单独使用时, 可以加速氦至氙的较轻离子。作为注入器时, 对碳至氙的多种重离子进行组合加速。配用 ECR 离子源后, 单独工作可以提供氦束, 组合加速, 有可能向上扩展到铀。

加速器改建工作从 1976 年开始预研, 至 1987 年调出首束, 耗时 11 年。1976 年至 1978 年为预研阶段。根据磁场的硬边近似和束动力学的解析分析, 我们提出了场形的初步设计, 按漏磁系数法和有效等位面法设计了磁极系统, 并做了 1/3 模型磁铁实验。对实验数据进行处理和分析, 提出了原型磁铁设计。1979 年 12 月做了原型磁场测量。使用实测数据, 在本所计算机 DJS-6 上用数值积分法做了大量的束动力学研究工作, 对场形作了鉴定, 对束动力学性质和场公差影响作了定量判断。在此基础上提出了垫补线圈的设计。1984 年至 1985 年做了垫补实验, 并对磁场进行精测。数据处理工作是十分繁重的。根据精测数据, 完成了最后的轨道设计工作, 为调束提供了参数, 为束流诊断提供了参考依据, 同时解决了束流诊断的数据处理方法。

1987 年 5 月 7 日, 首次调出 $^{12}\text{C}^{4+}$ 束流。加速器开始供束, 并为调 $^{16}\text{O}^{5+}$, $^{20}\text{Ne}^{4+}$ 做好了准备。束动力学研究工作告一段落。研究重点转向中心区参数优化和基本程序的实用化。

二、兰州 1.7m 回旋加速器的设计特点

总的来说, 兰州 1.7m 回旋加速器的动力学设计, 是一种保守设计。我们充分考虑了加速重离子的动力学特点, 选取 $^{14}\text{N}^{4+}$ 离子作为代表粒子, 兼顾了能量可调和离子种类的可变性。磁场工作范围在 0.8T 至 1.6T 之间, 离子种类从 $^2\text{D}^{+}$ 至 $^{136}\text{Xe}^{8+}$, 要实现等时性加速, 磁场的宽容度要十分大。我们参考了日本东京大学的经验, 对磁极断面做了等 B 处理。由于加速器首先保证加速重离子的性能, 将轴向聚焦频率限制在 $0.1 < Q_z < 0.3$ 的范围内。确保重离子避开 $Q_z = \frac{1}{3}$ 的共振。扇块设计中, 螺角取得较小, 外半径处只有 33° , 随径向呈线性分布。而实际场分布中, 引出半径处 $r_s = 30.4^\circ$, 其中 r_s 定义为 $\text{tg}^{-1}\left(r \frac{d}{dr} \phi_3\right)$, ϕ_3 是磁场 3 次谐波 (基波) 的相角, r 是半径。取较小的螺角值, 是因为

径向稳定区可以近似表示为

$$A = \sqrt{\frac{(Q_z^2 - 1)^2}{K^2} - \frac{r \cdot b_1}{KB}}$$

式中 b_1 是场公差一次谐波幅值, K 是一个和螺角有关的量。从非线性方程的分析出发, 我们得到了 Q_z 、 K 的很繁琐的展式, 各项合并后可以看出, 螺角取得小, 径向稳定区变宽, 因而允许磁场有较大的场公差 b_1 。对于重离子加速来说, 这一问题十分重要。因为重离子 $Q_z \approx 1$, $(Q_z^2 - 1)^2$ 是一个很小的量, 径向稳定性十分不好, 可能使扇块加工成为不切实际的事。

当我们取得磁场的原型实验数据后, 我们立即用数值计算方法对径向稳定性进行了研究, 图 1.1 是中心区附近的径向运动相图, 图 1.2、图 1.3 是粒子进入透镜区后的径向运动相图。

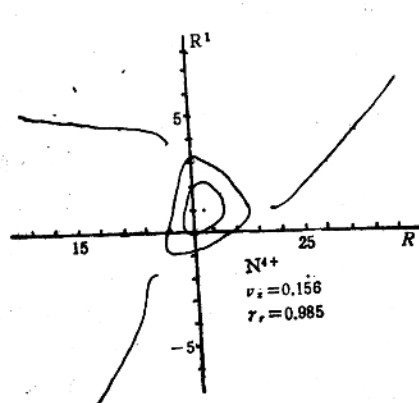


图 1.1

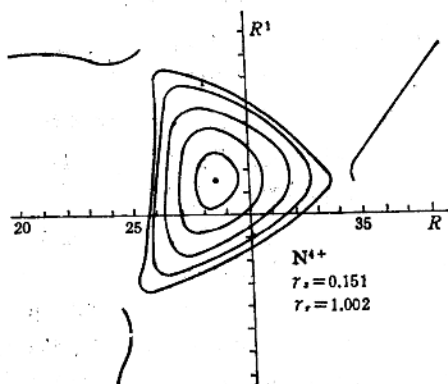


图 1.2

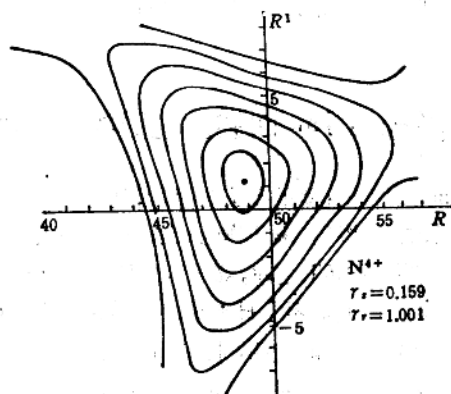


图 1.3

从实际调束情况看, 轨道即使偏心数厘米, 束流也能加速到底。这为高次谐波加速具有较大圈间距的离子创造了有利条件。

三、平衡轨道性质和各种公差的影响

离子在加速器中心面上的运动方程如下:

$$r'' - 2 \frac{r'^2}{r} - r = - \frac{e \sqrt{r'^2 + r^2}}{mcv} \left(r H_z + \frac{r'^2}{r} H_r \right)$$

在计算机上,直接用龙格-库塔法进行求解。由于 $Q_r \approx 1$, 在求闭合轨道时,由给定初值 r_0, r'_0 , 经过 240° 的积分以后,由下式给出修正值:

$$\begin{cases} r_0^* = \frac{1}{3} (r_0^\circ + r_{120^\circ} + r_{240^\circ}) \\ r_0'^* = \frac{1}{3} (r_0'^\circ + r_{120'} + r_{240'}) \end{cases}$$

在实际计算中,若用下列修正值,则稳妥得多:

$$\begin{cases} r_0^* = \frac{1}{2} r_0^\circ + \frac{1}{4} r_{120^\circ} + \frac{1}{4} r_{240^\circ} \\ r_0'^* = \frac{1}{2} r_0'^\circ + \frac{1}{4} r_{120'} + \frac{1}{4} r_{240'} \end{cases}$$

求出闭合轨道初值以后,给以各种扰动及场公差,即可得出这些因素的影响。为了进一步研究径向和轴向运动的相互影响,以及轴向聚焦情况,可采用下一组运动方程:

$$\begin{aligned} r'' - 2 \frac{r'^2}{r} - r &= - \frac{e \sqrt{r'^2 + r^2 + z'^2}}{mcv} \left[r H_z - z' H_\varphi - \frac{r' z'}{r} H_r + \frac{r'^2}{r} H_z \right] \\ z'' - 2 \frac{z' z''}{r} &= - \frac{e \sqrt{r'^2 + r^2 + z'^2}}{mcv} \left[r' H_\varphi - r H_r - \frac{z'^2}{r} H_r + \frac{z' r'}{r} H_z \right] \end{aligned}$$

其中 H_φ, H_r 可以由 H_z 及其径向导数求得,而这些导数,我们用三次样条函数来求。

基于平衡轨道的计算,可以较准确地求得粒子沿平衡轨道运动的周期。由此可以近似求得等时性加速所需的垫补量,对平均场进行修正后,可以再次计算平衡轨道的周期,反复迭代,达到要求精度为止。这方面的细节,我们在本刊另一篇文章“SFC 磁场的建立”中有详细介绍。

四、加速过程的计算机模拟

在运动方程中加入电场的作用 $e \cdot E$ 项,方程就成了动态的了。通常,在透镜区,我们把电场作用看为越隙时的突然变化 (δ 函数过程)。根据越隙相位,粒子得到的能量和动量都是特定的,可以推导出加速过程对粒子轨迹的影响,因此每次越隙后,要对粒子能量(相应地为 v)和 r' 进行修正。在中心区,我们通常采用笛卡尔坐标,直接将龙格-库塔基尔法用于牛顿运动方程对时间 t 求解,其运动方程如下:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{e}{m} E_x \cdot \cos(h\omega t + \varphi_0) + \frac{e}{cm} H_z \cdot y \\ \ddot{y} = \frac{e}{m} E_y \cdot \cos(h\omega t + \varphi_0) - \frac{e}{cm} H_z \cdot x \end{cases}$$

有时,我们也采用轨迹方程计算:

$$\begin{cases} p_r' = [p_\theta + (e/m_0)B(r, \theta)]r p_\theta + (e/m_0)E_r \\ p_\theta' = \frac{1}{r} \{ (e/m_0)E_\theta - p_r [(e/m_0)B(r, \theta) + 2P\theta] \} \\ r' = P_r \\ \theta' = P_\theta \end{cases}$$

其中, $E_r = \frac{\partial V}{\partial r}$, $E_\theta = \frac{\partial V}{\partial \theta}$, 当然, $V = V_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$. 在所有这些计算中, 步长都取得很小, 相当于空间 1° . 若步长较大, 积分过程中能量有较大的累积误差. 因此必须引进能量函数, 对能量进行校正. 能量函数如下:

$$J = E_K + eV(x, y, z) \cdot \sin(\tau)$$

将量 J' 的方程并入方程组中进行计算, 即可得知粒子的能量. 我们参考上海核子研究所的经验, 在后期的中心区研究中, 采用了这一方程.

图 1.4 是典型的中心区轨迹, 图 1.5 是加速器设计阶段我们得到的典型的粒子径向运动相图.

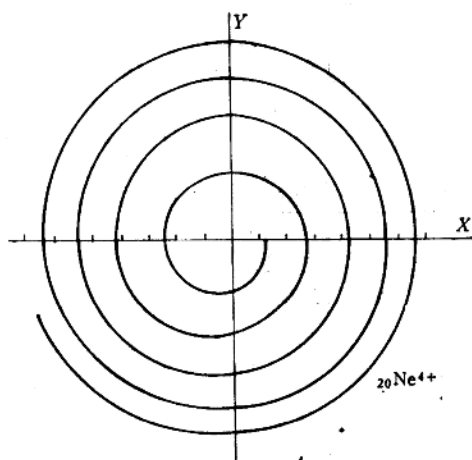


图 1.4

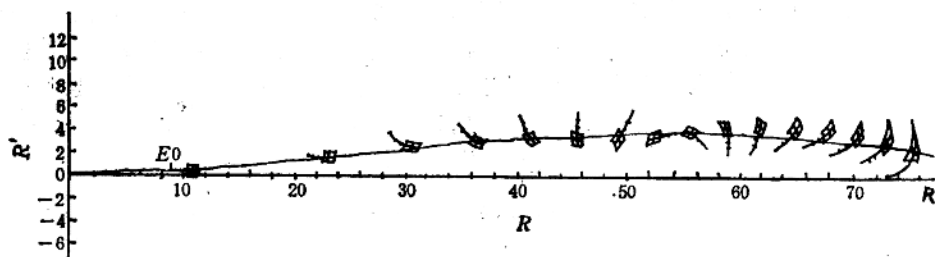


图 1.5

五、参数的优化

加速器建成以后,面临的是调束和运行。束动力学研究工作必须提供调机参数。加速器是一个庞大复杂的系统。对这样一个多参数系统,参数之间的最佳搭配,是束动力学必须研究解决的问题。对一些比较单纯的多参数问题,如场形的最佳垫补,我们可以用最小二乘法或线性规划法进行满意的处理。因为它的目标函数十分单纯,仅仅是场公差。各个监测点上的偏差进行均方处理,使问题变得易于解决。在“SFC 磁场的建立”一文中,我们有详尽的讨论。对于涉及束动力学的问题,问题大不一样。首先,目标是多参数的,这些参数互相制约,很难给出一个简单的目标函数来,再则,各参数对目标的影响是不平衡的,而且是相互牵制的,使得问题的处理很难收敛。优化过程中求解是十分费时间的,而由于目标对参数的依赖不是单调的,用回归法得到的结果往往误差过大。我们选用 SCDD 法对引出参数进行优化。给定引出束流初值后,改变两段偏转板的电压,使引出束在预定幅角处,接近给定的 r 、 r' 数值。同时也就确定了两段偏转板的几何位置。这一问题的解决是十分成功的。 r 、 r' 的精度达到万分之一,在微处理机上计算,也仅需数分钟。其过程如下:

极小化 $f(x)$, 而给定约束为

$$g_i(x) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, n$$

而 $x \in E^n$, 用 G 表示问题的可行域,引进综合约束函数:

$$S(x) = \left\{ \sum_{i=1}^p h_i^2(x) + \sum_{i=1}^m \left[\frac{g_i(x) - |g_i(x)|}{2} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

选定初始点 $x^{(0)}$ 和初始步长 t_0 , 让 $S_0 = \alpha t_0$, 可得到初始近似可行域 $G_0 = \{x | x \in E^n, S(x) \leq S_0\}$ 。从点 $x^{(0)}$ 出发,对目标函数 $f(x)$ 按负梯度方向以步长 t_0 进行下降迭代。若所得的点属于 G_0 ,则从此点出发,再对 $f(x)$ 进行下降迭代,否则,从此点出发对综合函数 $S(x)$ 按负梯度方向以步长 $S_0 = \beta t_0$ 进行下降迭代。一般地,当已得点 $x^{(k)}$ 属于第 k 次可行域 $G_k = \{x | x \in E^n, S(x) \leq S_k\}$,则从点 $x^{(k)}$ 出发对 $f(x)$ 按 $x^{(k)}$ 点的负梯度方向以步长 t_k 进行下降迭代,并要求所得之点 $x^{(k+1)}$ 属于 G_k 。若 $x^{(k+1)}$ 不属于 G_k ,则从此点出发取步长 $S_k = \beta t_k$ 对 $S(x)$ 进行下降迭代直至得到属于 G_k 的点,并把它作为 $x^{(k+1)}$ 点。

在偏转板引出参数优化时,我们选目标函数为在给定引出点束流的 r 、 r' 和给定值的偏离小于允许误差。而我们给定的约束条件是两段偏转板的电压小于许用值。

对于中心区参数的优化,问题要复杂得多。我们的目标是:在透镜区入口,两次越隙相角要尽量接近于 0° ,束流转 360° 的径迹,和两段 180° 平衡轨道之间的偏离最小。而给定的约束,从离子源引出的初相绝对值不能太大。实际进行也可以把初相限定。而变量则包含有中心泵浦场、离子源位置参数(及初相)。这方面的探讨,我们取得了较好的进展,在一定的初值条件下,可以收敛。目前,我们继续调试程序,希望实际可用。

六、技 巧

用解析法研究束动力学问题,得到一系列解析公式,各参数之间的相互关系十分明了,在加速器预研、设计阶段可以得到重要的参考依据。但这些结果多数作了近似,只能定性或半定量研究。为了得到工程所能接受的精度,展式中需保留高次项,因而变得十分繁琐。这时需要有高度的组合技巧,找出级数相关项反推回去。解决非线性问题时,进行正则变换,凑出哈密顿量,需要十分敏锐的判断力。数学技巧是成败的关键。

在数值计算时,由于计算机小和慢,编程技巧也是十分重要的。最大限度地使用内存资源,尽可能多地采用加减运算代替其他类型的运算,用连乘代替幂运算,用简单级数代替某些函数运算,使大型程序运行在8小时以内结束,中型程序在3.5小时内结束。对盘的使用,要十分珍惜,程序设计时,必须合理地读写盘,免除不必要的磨损。过分频繁的交叉读写会使设备严重受损。

在解决优化问题时,凡涉及到求轨,耗时都较多,选取适当的优化手段,合理选取步长,松弛系数,步长的缩减系数等,使问题尽快收敛。在调程序时,可以降低精度要求,省去次要变量(赋以大致合理的值),这样可以很快摸索出经验来。

参 考 文 献

- [1] 马钟仁、刘占稳、魏宝文,《兰州重离子研究装置进展报告》第四卷(1985),科学出版社。
- [2] 马钟仁,1.7米回旋加速器1:3模型磁铁实验《粒子加速器会议文集》,1980。
- [3] 万耀青等,《最优化计算方法常用程序汇编》(内部资料)。

1.The Beam Dynamics Study for 1.7m SFC

Ma Zhongren

Abstract

The feature, the aspect, the method and the result of the beam dynamics study for 1.7 m SFC are briefly described. Both the design of magnetic field and beam tuning are based on this work. The measured beam data show that the design is correct

2. 1.7m SFC 外离子源轴向注入物理设计

唐靖宇

一、引言

70年代以来, ECR 离子源技术取得很大发展^[1,2,3], 世界上越来越多的实验室已采用或正在考虑采用轴向注入^[4,5,6,7]的外离子源方案. 同内离子源(一般为 PIG 源)相比, ECR 离子源可以产生更高的电荷态并能提供更强的束流.

兰州近代物理所直径为 1.7m 的扇聚焦迴旋加速器, 是作为重离子迴旋加速器的注入器. 它可以把 Q/A 在 0.25 到 0.5 之间的粒子加速到 4.3 至 17.5 MeV/u. 过去采用间接热式阴极 PIG 离子源, 现也准备采用 ECR 离子源. 因此需要建立相应的轴向注入系统, 把束流输送到加速器的中心平面上.

在本设计方案中, 整个外离子源轴向注入系统分为以下几个单元:

a. ECR 离子源和引出单元: 正离子束流经源口的负高压吸极引出后, 由二个 GLASER 磁透镜与后面束线匹配.

b. 电荷态分析、选择单元: 由两块偏转角均为 45° 的分析磁铁和一个 Triplet 磁四极透镜组组成. 它的作用是去除掉束流中不需要的成份.

c. 中间束流传输单元: 由两个绕 z 轴各旋转 22.5° 和 -22.5° 的 Septet inverter (七透镜组, 见后面) 组成. 它除了完成束流传输外, 还使束流绕 z 轴旋转 90° .

d. 垂直偏转单元: 将束流垂直偏转 90° , 并与加速器的轴向孔的中心轴一致. 其组成和电荷态分析单元一样.

e. 注入匹配和聚束单元: 用四块磁四极透镜完成注入匹配. 在加速器轴孔中安置三个 GLASER 磁透镜来聚焦束流. 聚束器也安装在轴向孔中, 它可以使注入效率或引出效率提高几倍.

f. 静电反射镜: 使束流偏转 90° 后进入加速器中心平面, 并和中心区轨道条件匹配.

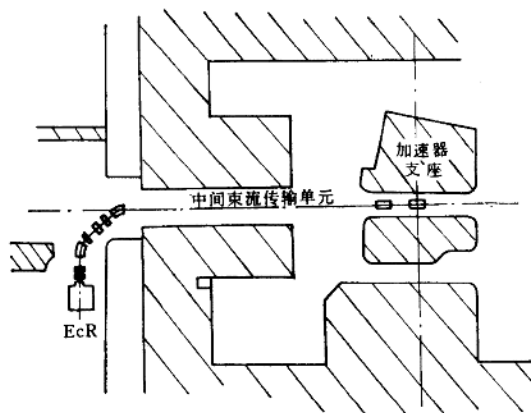
其中 a、b、c、d 四个单元构成束线部分, 后二个单元为注入部分. 束线传输计算采用国际通用的 TRANSPORT^[8] 程序.

整个束线是消色差和消球差的, 各单元的四维传输矩阵均是 (或接近) I 或 $-I$ (单位矩阵). 整个束线的传输矩阵为

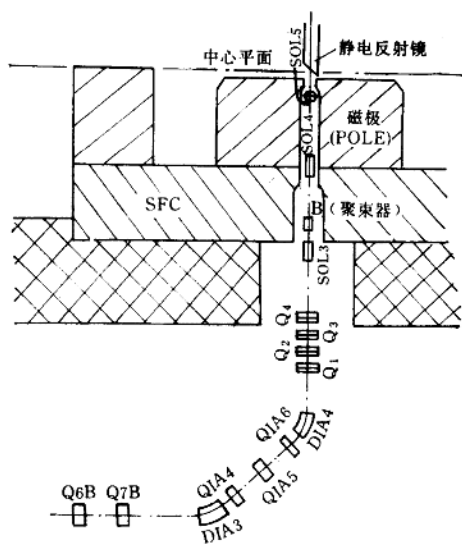
$$R = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/M \end{pmatrix}$$

M 由源口匹配决定.

图 2.1 为整个外离子源系统安排示意图。



(a)



(b)

图 2.1 外离子源轴向注入系统安排示意图

二、束线和注入系统物理设计

2.1 对束线和注入系统的要求

一般情况下,作为加速器系统的一部分,束线和注入系统应满足一定的要求。下面列出的几条不一定都能满足,实际情况总是有所取舍^[8]。

- 较高的传输效率;
- 对数量最少的传输元件,束流包络足够小;
- 较好的电荷分析能力;

- d. 调试、操作方便;
- e. 尽量减小空间电荷效应的影响;
- f. 象差较小;
- g. 较低的成本和较小的能源消耗。

2.2 ECR 离子源和引出单元

ECR 离子源是法国 Grenoble 的 CEN 实验室制造的, 为 CAPRICE 型, 见图 2.2. 预计今年下半年到货。

假设从源口引出来的束流发射度是 $152.5\text{mm} \cdot \text{mrad}$, 是轴对称发散束, 源口半径为 2.5mm . 为了与后面束线的接受度椭圆相匹配, 必须发射度形状变化. 经过两个 GLASER 磁透镜, 在电荷态分析单元的起点, 即本单元的中点, 形成 X、Y 方向包络均为 9.5mm 的双腰. 本单元的束流传输矩阵是 (不考虑轴对称束流的绕轴旋转):

$$R = \begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & 1/M \end{pmatrix}$$

因为源口附近还存在着 ECR 源的镜线圈的杂散场, 实际调束时要对理论计算的结果进行修正。

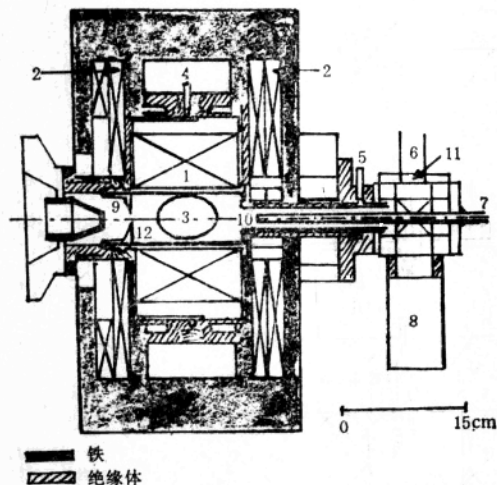


图 2.2 CAPRICE 型离子源: (1) 磁铁, (2) 螺线管线圈, (3) 闭 ECR 表面, (4) 冷却水入口, (5) 冷却水出口, (6) 微波入口, (7) 气体入口, (8) 涡轮分子泵, (9) 离子引出口, (10) 气体注入管, (11) 微波窗, (12) 可移动的真空室

2.3 电荷态分析、选择单元

因为从离子源引出的重离子束其电荷态都有一个分布, 而不是单一的电荷态, 甚至还含有其它元素的离子. 而能在加速器中产生谐振加速的只有

某个特定荷质比 (q/m) 的粒子. 为了减少加速器的高频负载, 同时也为了减弱后面的束线和注入线的空间电荷效应, 有必要在源口附近将不需要的粒子过滤掉. 这就是电荷态分析、选择单元的主要任务. 它的原理类似于磁谱仪。

这种特殊的磁谱仪的分辨率为:

$$\delta q/q = 2\delta p/p = 2(2x_M/R_{16})$$

其中 $\delta q/q$ 为谱仪所能达到的电荷态分辨率, $\delta p/p$ 为动量分辨率, $2x_M$ 为狭缝的宽度, R_{16} 是狭缝处的色散 (六维传输矩阵元)。

选取 $2x_M = 20\text{mm}$, $R_{16} = 970\text{mm}$, 则 $\delta p/p \sim 2.1\%$, $\delta q/q \sim 1/24$. 并不是电荷分析单元的动量分辨越高越好, 那样可能使所需要的束流也损失了. 通常动量分辨率选择比入射束流的磁刚度分散 (这里约为 0.5%) 大一些就行了. 另外, 提高动量分辨率会使单元的长度增加. 因为回旋加速器本身具有很高的 q/m 分辨能力, 不必耽心引出束流的质量。

为了实现单元化操作,这一单元的束流传输矩阵除 R_{16} 、 R_{25} 不为零外,其余同一 (R_{56} 也不为零,不过因为是连续束流,其存在对束流传输没有影响)。 R_{16} 、 R_{25} 通过与垂直偏转单元组成对称消色差可以消除掉。由于本单元本身不是消色差的,若束流动量分散为 0.5%,则造成水平方向的投影发射度的增加为 $\Delta s_x/s_x = 5.1\%$ 。

2.4 中间传输单元

这一单元的任务是将束流传输到下一个单元,同时为了使电荷态分析单元和垂直偏转单元组成对称消色差,本单元还必须将束流绕 z 轴旋转 $\frac{\pi}{2}$ 。它也实现了点到点、腰到腰的理想传输。

本单元可分为等价的两部分。每个由七个磁四极透镜对称地放置。这七个透镜组, S. KATO 称为 Septet beam inverter^[10]。它可以对束流实现反演变换,其四维束流传输矩阵具有以下形式:

$$T(0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

如将这个透镜组整体绕 z 轴旋转 θ 角,则其传输矩阵为 $T(\theta) = S(2\theta)T(0)$, $S(\theta)$ 为将束流绕 z 轴旋转 θ 角的变化矩阵。将本单元的两个 inverter 分别旋转 $\pi/8$ 和 $-\pi/8$, 则可得到单元的传输矩阵:

$$T(\pi/8)T(-\pi/8) = S\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

本单元的中点也是双腰,只是由于进行了反演和旋转变换,相点之间的相对位置发生了变化。但是,作束流诊断,这仍是一个很好的位置。

2.5 垂直偏转单元

这一单元基本上和第二单元(电荷态分析单元)一样,通过中间传输单元的旋转,它们构成了对称消色差,且总的传输矩阵为 $+I$,其自由振荡相移为 $2k\pi$ (k 为整数)。这满足“二级消色差”条件^[12],它使二级几何象差自动消失。

2.6 注入匹配和聚束单元

用四块磁四极透镜可以完成 X、Y 两个相平面上的相椭圆匹配。注入系统的设计通常反过来进行,先进行中心区的匹配,然后经过静电反射镜、GLASER 磁透镜、“洞透镜”反推回来,再用上面说的四块磁四极透镜完成与束线的匹配。

因为在回旋加速器的轴向孔中存在着旋转对称的、从中心平面往外逐渐减弱的磁场,它不仅起聚焦作用,且造成束流的旋转,称为“洞透镜”^[11]。另外两个螺线管和“洞透镜”一起起约束束流的作用。最后一个磁透镜将束流强聚焦到静电反射镜上。

聚束器可以放在两个螺线管之间,因为从离子源引出的束流是连续的,而加速器中心区的相位接受度是很有限的,在 $\pm 10^\circ RF$ 的情况下,连续束流的传输效率约为 6%。聚束

器可以使传输效率提高 3—5 倍。通过和加速器的高频频率一致或倍频的高频电场的调制,并选择好两个高频之间的相位关系,使在第一个加速间隙处和在加速相位附近形成高密度的束流团,这样较多的束流成份能够在加速器的稳相区内加速到最终能量。聚束电压通常为几百伏。聚束效率可达到 20% 以上^[7]。

2.7 静电反射镜

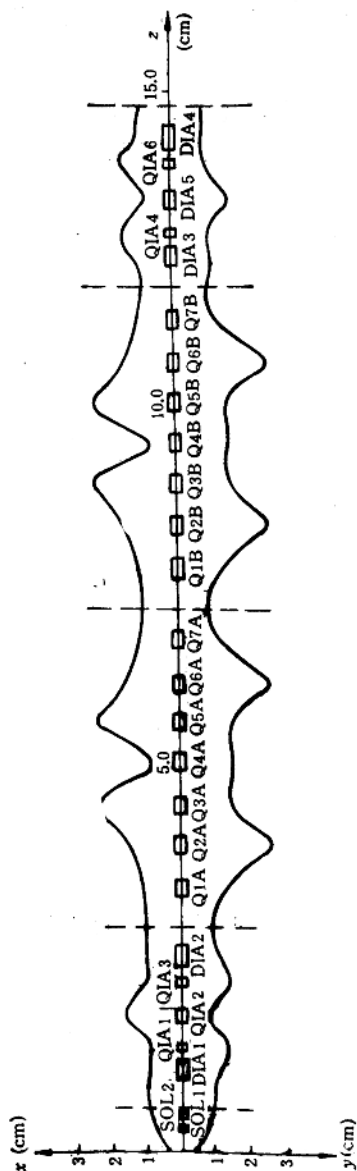
静电反射镜的作用是在中心平面附近把轴向束流偏转 90° ,使之进入中心平面^[13]。静电

反射镜通常是由一个电极和一个相距几毫米的网状电极组成。电极平面与中心平面近似成 45° 角,网状电极朝着束流来向。网状电极接地,平板电极加静电正高压。高压和源口吸极高压差不多 ($5 \sim 25 \text{ kV}$)。入射束穿过栅网进入近似均匀的电场,先是减速,然后再加速,但束流方向已从轴向变为径向(水平方向)了,并穿过栅网。栅网的传输效率约为 90%。为了使反射过程和在第一次加速前粒子不受到高频电场的影响,通常在反射镜的外面加屏蔽盒。

2.8 束线和注入线的整体描述

束线和注入线的总长度约为 18m,其中束线长约 15m,注入线长约 3m。水平束线距地面 1.3 m。中间传输单元的束流管道的外径为 80mm,其余部分为 60mm。管道真空为 $133 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 或更高,使由管道中剩余气体引起的束流损失小于 10%。图 2.3 为束线部分的束流包络。

图 2.3 束线部分束流包络



为了便于调束和运行,在每个单元的起始位置安装束流诊断装置,一些单元的中间位置也应安装。这些诊断装置包括多丝正比室、法拉第筒和光栏等。这些位置的相椭圆大都为双腰,调试很方便。由于元件的安装和制造技术误差,束流传输是非理想的,即,会引起束流发射度的变化和中心轨迹的偏离。误差计算表明,在束流发射度较大时,技术误差引起的发射度变化可以忽略,而中心轨迹的偏离则不能忽略。因束运管道较粗,对束流中心偏移的限制较松。第一付导向磁铁放在中间传输单元之后,第二付导向磁铁放在最后一个 GLASER 磁透镜之前。可能在聚束器前也要放上一付导向磁铁。导向磁铁处的中心轨迹偏离不超过 2mm。

因为低能重离子束的磁刚度很低,而在一般情况下地磁的磁场就有零点几高斯,现在加上加速器的杂散磁场可达几高斯。这时如果束线较长,这些杂散磁场就有可能使束流中心偏离轴线。例如对 2.0 高斯的杂散场,若束流的磁刚度为 $30\text{kG}\cdot\text{cm}$,束运线长度为 9m (相当于在第一付导向磁铁附近),计算束流中心的偏移为 27mm ,这时靠导向磁铁很难校正了。必须在管道的外面包上一层磁屏蔽合金。

三、空间电荷效应

这也是由于束流能量低和高电荷态所带来的问题。从 ECR 离子源引出的束流强度可达几个毫安,此时的空间电荷效应相当严重。经过电荷分析单元的筛选后,束流强度降到 $100\sim 200\mu\text{A}$ 以下,空间电荷效应大大减弱。但到了迴旋加速器的轴孔中,由于束流包络变得很小,空间电荷效应又变得很严重。对四极透镜来说,空间电荷效应造成的透镜强度变化可近似用下式表示:

$$S^2/K^2 \sim \frac{I}{\pi C \epsilon_0 \beta^2 r^2 B' \bar{a}^2}$$

式中 I 为束流强度, ϵ_0 为束流发射度大小, B' 为透镜磁场梯度, $\bar{a}$ 为平均束流包络。

若 $I \sim 200\mu\text{A}$, $\epsilon_0 \sim 1.5 \times 10^{-4}\pi\text{m}\cdot\text{rad}$, $\beta \sim 0.005$, $r \sim 1.0$, $B' \sim 10^6\text{T/cm}$, $\bar{a} \sim 1.5\text{cm}$, 则

$$S^2/K^2 \sim 0.08.$$

国际上已有计算空间电荷效应的计算机程序,如 MIRKO。本系统也准备采用这种程序计算。

由于束流空间电荷效应的影响,会使在未计入空间电荷力时匹配好的发射度变为失配。但这种失配可通过增加透镜梯度等元件参数来达到部分补偿,使束流发射度在匹配点保持基本匹配。在尽可能的情况下,提高源口吸极电压,即增加束流磁刚度,可以减弱空间电荷效应的影响。但提高源口电压会受到加速器中心区匹配和静电反射镜电场强度极限的限制。本系统采用了磁元件也有利于减弱空间电荷效应的影响,因为在磁场中存在空间电荷中和效应。

四、现 状

ECR 离子源正在法国进行测试,预计今年下半年运到兰州。束运线上的元件正在安排技术设计和加工。SFC 的磁测工作也在准备。作者准备进行静电反射镜和中心区匹配等方面的物理设计。注入线的具体设计要等加速器的轴向和中心区磁场测定以后才能进行。

作者非常感谢魏宝文、马钟仁二位导师的指导和热情鼓励。也感谢尹全民老师、沈志清老师和其他老师的帮助和讨论,尹全民老师还提供了 TRANSPORT 程序。

参 考 文 献

- [1] D. J. Clark, Ninth Int. Conf. on Cyclo. and Their Appli, p. 231.