

兰州重离子研究装置 进展报告

第七卷

1988

中国科学院近代物理研究所 编辑

科学出版社

兰州重离子研究装置进展报告

第七卷

1988

中国科学院近代物理研究所 编辑

科学出版社

1991

内 容 简 介

中国科学院近代物理研究所从1976年开始重离子研究装置的建造工程。主要任务是把原有的1.5m回旋加速器改建成1.7m扇聚焦加速器作为注入器,另外新建一台能量常数 $K=450$ 的分离扇回旋加速器作为主加速器。该装置能把碳离子加速到100MeV/A,把氦离子加速到4.8MeV/A。此工程于1988年完成。

本卷共收录论文13篇,反映了工程进展状况,汇集了有关工程技术资料,可供从事加速器和重离子物理研究的科技人员及高等院校有关专业的师生阅读。

兰州重离子研究装置进展报告

第七卷

1988

中国科学院近代物理研究所 编著

责任编辑 郭德平

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

北京京辉印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1991年7月第一版 开本:787×1092 1/16

1991年7月第一次印刷 印张:7 1/2

印数:0001—880 字数:173 000

ISBN 7-03-002498-8/O·466

定价:1.00 元

目 录

1. 兰州重离子加速器建成出束.....	1
2. 兰州重离子加速器调束.....	33
3. 主回旋加速器真空系统的建造概况.....	42
4. 主回旋加速器高频发射机与腔体的进一步匹配联调.....	47
5. 两台 120kW 高频发射机的寄生振荡.....	51
6. 分离扇回旋加速器的注入与引出系统.....	55
7. 注入磁通道 MSi4 设计中的几个机械和真空问题.....	64
8. SSC 注入引出静电偏转板的结构设计.....	68
9. 高精度的磁场标定装置和测量系统.....	75
10. 兰州重离子加速器的束运系统.....	83
11. 束运线四极磁透镜参数计算与技术设计.....	91
12. 兰州重离子加速器后束运线真空系统的设计、安装和调试.....	97
13. 1.7m SFC 的改建、调束与运行.....	103

Contents

1. HIRFL Completion and Its First Beam.....	32
2. Beam Tuning of HIRFL.....	41
3. Construction of the Vacuum System of SSC.....	46
4. Further Adjustments for Better Matching Between RF Generators and Cavities of SSC.....	50
5. Parasitic Oscillations in Two 120kW RF Generators.....	54
6. Injection and Extraction System for SSC.....	63
7. Several Mechanical and Vacuum Problems of the Designing of Injection Magnetic Channel MSi4.....	67
8. Structure Design of the Injection and Extraction Electrostatic Deflector of SSC.....	74
9. Calibration Facility and Measurement System of Magnetic Field with High Accuracy.....	82
10. Transport Beam Line for HIRFL.....	90
11. Parameters Calculation and Design of Quadrupoles in Beam Line.....	96
12. Design, Installation and Adjustment of the Vacuum System for the Post Transport Beam Line of HIRFL.....	102
13. Rebuild, Beam Tuning and Operation of the 1.7 m SFC.....	111

1. 兰州重离子加速器建成出束

张恩厚 魏宝文 马受武 白国良 乔庆文 叶 峰

兰州重离子加速器(HIRFL)于1989年12月12日引出了50MeV/A C^{6+} 束流,它标志着我国自行设计、自行建造的重离子加速器基本建成,也标志着我国回旋加速器技术跨入了国际先进行列。本文简述了该加速器系统的技术指标和设计参数,主加速器设计、建造,注入器改建及系统联合调束的情况。

一、系统总体综述

兰州重离子加速器也常称为兰州重离子研究装置(HIRFL),其概貌示于图1.1,它由五个部分组成。

- ① 由原1.5m经典回旋加速器改建的1.7m扇聚焦等时性回旋加速器(SFC)作为注入器;
- ② 新建的分离扇回旋加速器(SSC)作为主加速器;
- ③ 65m长从注入器到主加速器的前束流输运线;
- ④ 110m长从主加速器到八个实验终端的后束流输运线;
- ⑤ 八个实验终端。

该加速器系统建设规模由我国开展低中能重离子核物理研究及重离子束应用研究对重离子束流的种类和束流品质的要求,以及我国当时科技和工业水平决定。HIRFL主要束流指标列于表1.1。

表 1.1 HIRFL束流指标

	FIG源	ECR源
离子种类	C—Xe	C—Ta
单核能量	100—5MeV/A	120—7.5MeV/A
束流强度	10^{12} — 10^{13} pps	10^{10} — 10^{12} pps
能散度	5×10^{-3}	5×10^{-3}
发射度	10mm mrad	10mm mrad

无论从加速的离子种类、束流强度,还是从束流能量、能散度和发射度来说,它都与当前国际上中低能区重离子加速器相当。可以开展核结构、重离子反应机制、新核素的合成及奇异核衰变性质的研究,同时可以开展固体物理、材料科学、辐射损伤和生物医学等学科的研究。

特别应该指出的是,当原设计中要求建设的第二注入器(20MeV串列静电加速器)停建后,如何发挥主加速器的潜力以提高该加速器系统的性能,一直是我们关注的重大问题。1986年,我们根据国内外加速器技术发展趋势及工程建设的财力情况,想方设法挤出经费,决定

从法国进口一台ECR离子源。使用ECR源后，不但能大大扩展加速离子种类，而且能适当提高束流能量。我们引进的CAPRICE型ECR离子源能够产生从C一直到Ta和W附近的多电荷重离子。

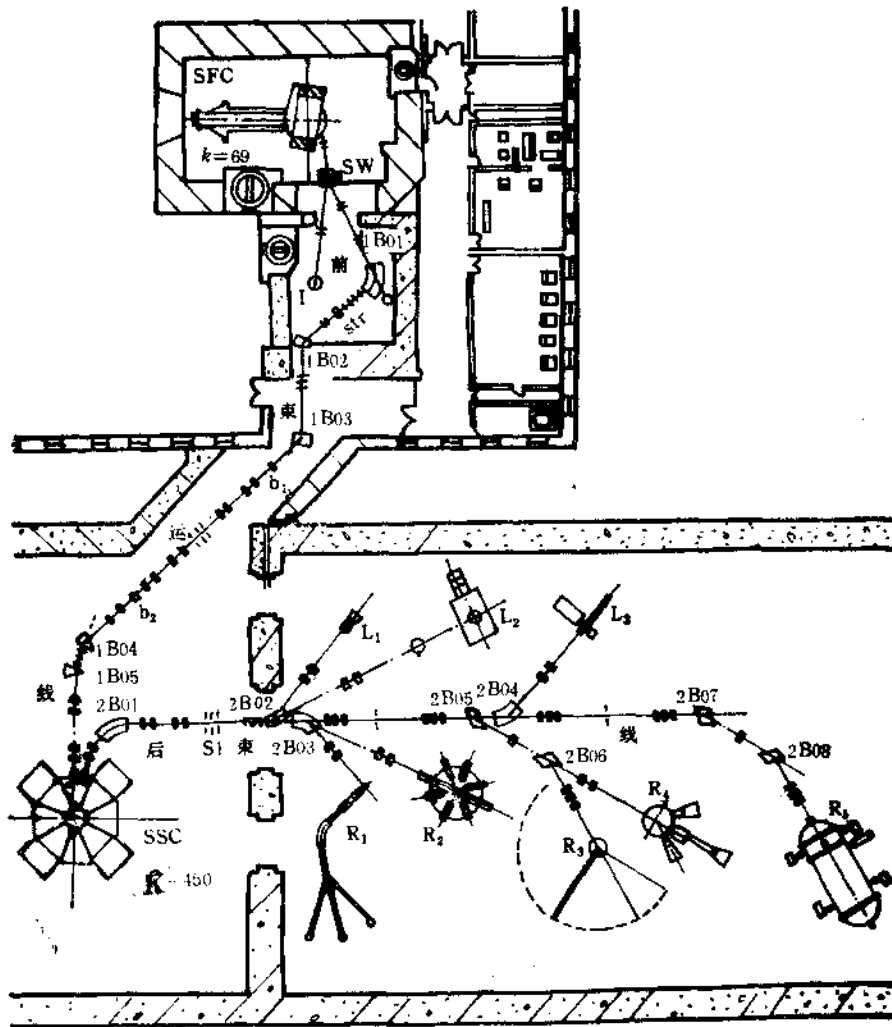


图1.1 兰州重离子加速器系统图

- R_1 : 在线同位素分离器; R_2 : 在束 γ 测量装置;
 R_3 : 重离子飞行时间谱仪; R_4 : 大面积位置灵敏电离室;
 R_4 : 2.4m直径圆柱形散射室; L_1 : 氢喷嘴传输快化学分离系统;
 L_1 : 重离子辐照装置; L_2 : 原子物理研究设备

根据总体束流指标的设计要求，通过束流动力学的计算，以及在设计过程中反复权衡，确定了注入器（SFC）和主加速器（SSC）基本设计参数，列于表1.2中。

从表1.2可以看出，本加速器系统中的两个等时回旋加速器是不等半径匹配。因为SFC是由原1.5m经典回旋加速器改建，其磁极面不可能再扩大；而新建的分离扇回旋加速器由于受到注入元件所要求的空间大小所限，不得不选取注入半径为1m（平均）。众所周知，对于不等半径匹配，必须满足：

表 1.2 SFC和SSC基本设计参数

	SFC	SSC
能量常数	69	450
最高磁场(T)	1.6(平均)	1.6(气隙)
磁场稳定度	10^{-6}	10^{-5}
高频频率(MHz)	6—18	6.5—14
频率稳定	1×10^{-8}	1×10^{-5}
幅度稳定	$1 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
相位稳定	$\leq 1^\circ$	$\leq 1^\circ$
加速谐波	1, 3, 5	2, 4, 6, 8, 10
真空室真空度(Pa)	6.65×10^{-4}	1.3×10^{-5}
注入半径(m)		1.00(平均)
引出半径(m)	0.75	3.21(平均)

$$F_1 R_1 = F_2 R_2 \quad (1)$$

$$N_1 H_1 F_1 = N_2 H_2 F_2 \quad (2)$$

式(1)由从SFC引出的束团与注入到SSC中束团的速度相等所要求,而式(2)则由相位匹配所决定。式中 F_1, R_1, H_1 分别表示SFC的粒子回旋频率、平均引出半径和谐波数, F_2, R_2, H_2 分别表示SSC的粒子回旋频率、平均注入半径和谐波数, N_1 和 N_2 分别为两个整数,表示SSC在相同高频相位下所接收到的两个相继束团的时间间隔内,SFC和SSC的高频振荡重复数。又因 $f_1 = H_1 N_1$, $f_2 = N_2 H_2$ (f_1, f_2 分别为SFC和SSC的RF频率),我们经计算便可以得到SFC和SSC的匹配参数,几种主要匹配模式列于表1.3中。

表 1.3 SFC 和 SSC 的参数匹配

模式	N_1/N_2	H_1/H_2	$f_1(\text{MHz})$	$f_2(\text{MHz})$	$F_2(\text{MC/s})$	$E(\text{MeV/A})$	$\eta(\%)$
A	3/2	3/6	6.0—9.3	9.0—14.0	1.5—2.33	4.8—11.7	50
B	1/1	3/4	6.5—14.0	6.5—14.0	1.6—3.5	5.6—27.1	100
C	1/2	3/2	13.0—18.0	6.5—9.0	3.3—4.5	23.3—46.0	50
D	3/2	1/2	6.0—9.3	9.0—14.0	4.5—7.0	48.0—124.8	50

二、主加速器 (SSC)

1. 主要参数和主体结构

(1) 设计参数的理论依据

在理想等时场硬边界近似条件下,对线性和非线性轨道动力学、空间电荷效应进行了计算和分析。分析了偏离理想条件的诸因素对加速器性能的影响,并依据HIRFL束流指标,我们选取了SSC能量常数为450。选取了扇数 $N=4$,扇角 $2\alpha=52^\circ$,有效气隙为7cm。在这种情况下,有足够强的轴向聚焦力和足够大的气隙使SSC的束流接收度足够大($>500\text{mm mrad}$),而引出能量在 $<120\text{MeV/A}$ 时工作路线不会穿过强共振线,非线性影响很小,轨道是稳定的。空间电荷效应可以不考虑。

从离子束的回旋频率与单核能之间的关系出发,选择了高频加速器系统工作频率为6.5—

14MHz。当考虑束流品质要求之后,确定了磁场与高频系统的各项公差要求。为了保证离子在SSC内运动过程中由于电荷交换而造成的损失不大于10%,确定真空工作压力的设计指标为 $1.3 \times 10^{-7} \text{Pa}$ 。SSC主要设计参数列于表1.4。

(2) 主体结构

SSC主体机械结构如图1.2所示,图1.3是建成后的SSC主体及部分束运线。

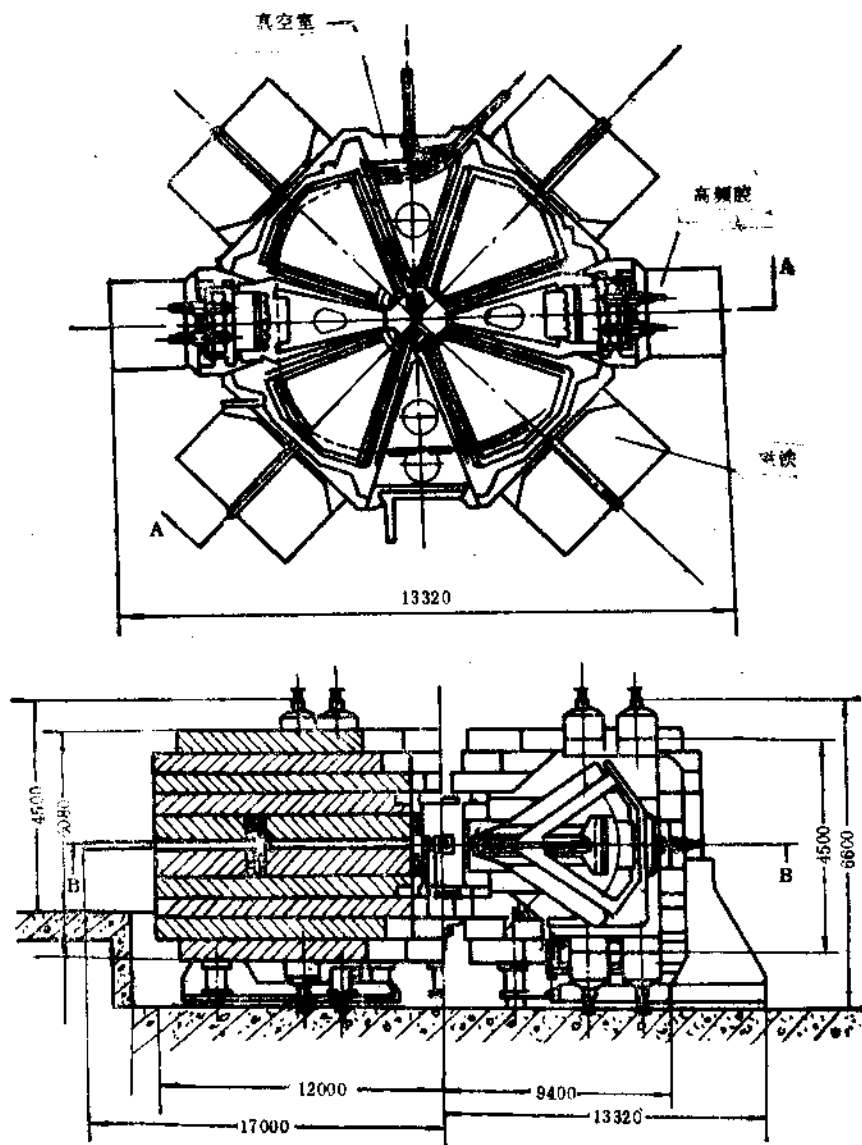


图 1.2 SSC主体机械结构

SSC主体主要由四台扇形磁铁、两个加速腔和一个大型真空室组成,注入引出元件装在真空室内,总重约2200t,轮廓尺寸约为 $\phi 12\text{m} \times 6.6\text{m}$,SSC主体为一个相互联接,彼此穿插的机械整体,其设计很具特色。如果仔细审视三大件机械结构,即可发现真空室是整体式结构,但不能脱离磁铁而独立,磁极和腔体又必须插入真空室内。但是,从受力角度来看,

表 1.4 SSC 主要设计参数

轨道参数:		最高电压	80—250 kV
平均注入半径	1.00m	高频功率	$2 \times 120 \text{ kW}$
平均引出半径	3.21m	谐波数	2—10
径向振荡频率	1.087—1.202	加速孔径	5cm
轴向振荡频率	0.712—0.864	Q值	6000—10 000
磁铁系统:		耦合环阻抗	20—100 Ω
扇 数	4 台	真空系统:	
扇 角	52°	真空室容积	100m ³
气 隙	10cm	工作压力	$1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
最高磁场	1.6 T	总气载	$1.8 \times 10^{-3} \text{ Pa m}^3/\text{s}$
垫补线圈	36对	有效抽速	$1.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$
高频系统:		聚束器:	
频率范围	6.5—14 MHz	频率范围	26—56 MHz
D盒数	2	谐波数	4
D盒角度	30°	最高电压	70 kV
		数量	2 台

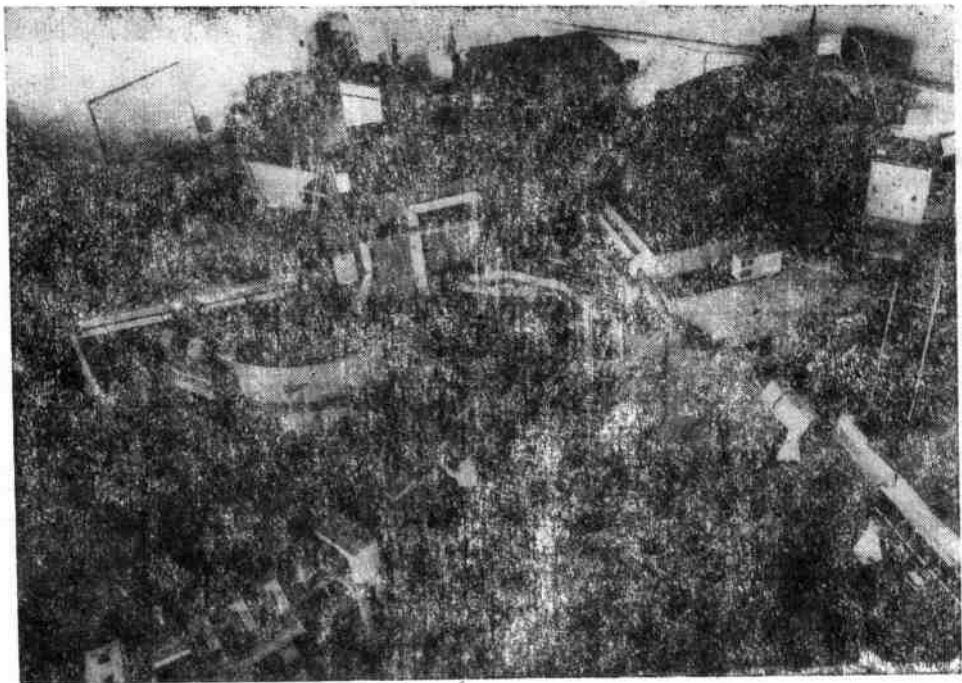


图 1.3 建成后的SSC主体及部分束运线

在巨大的大气压力、磁力和重力等作用下，三大件之间在应变方面又彼此相对地独立。真空室与加速腔体互相联接，但在工作状态时，只是软联接，前者应变传不到后者。同样，真空室与磁极之间也只是软联接，前者应变传不到后者。这样一个既相互依赖又相对独立的整体结构，在运行受力状态下，能够确保整体的稳定性，尤其能够确保四对磁极和两个D盒的几何位置稳定地工作在严格的公差范围之内。

2. 磁场系统

(1) 主要设计参数

磁场系统的目标就是建造一个满足总体束流指标和总体参数要求的等时性磁场。通过束流动力学计算、磁路设计和1/4模型实验，最后确定了磁场系统的主要技术设计参数（见表1.5）。从以后的叙述可以清楚地看出，磁场系统设计参数已圆满地达到。

表 1.5 SSC 磁场系统设计参数

扇数	4台	励磁安匝	$1.6 \times 10^5 \text{ AT}$
扇角	52°	励磁功率	560 kW
气隙	108 mm	垫补功率	110 kW
有效气隙	7 cm	磁场稳定度	$10^{-8}/8h$
最高磁场	1.6 T	垫补线圈	36对
磁铁因子	0.5778	场的不同性	5×10^{-6}
平均注入半径	100 cm	等时场精度	5×10^{-8}
平均引出半径	320.7 cm		

(2) 主要部件的设计与建造

SSC磁铁系统主要部件为：四台扇形铁心、与之相配的主线圈、垫补线圈、辅助线圈，1台主电源和64台垫补电源及调差电源，以及支撑磁铁的千斤顶。

a. 磁铁铁心 在1/4模型实验的基础上，经过反复对比，确定铁心采用超低碳钢锻件平放结构，每扇由12块组成，最大一块不超过50t，其结构及主要尺寸参见图1.4。

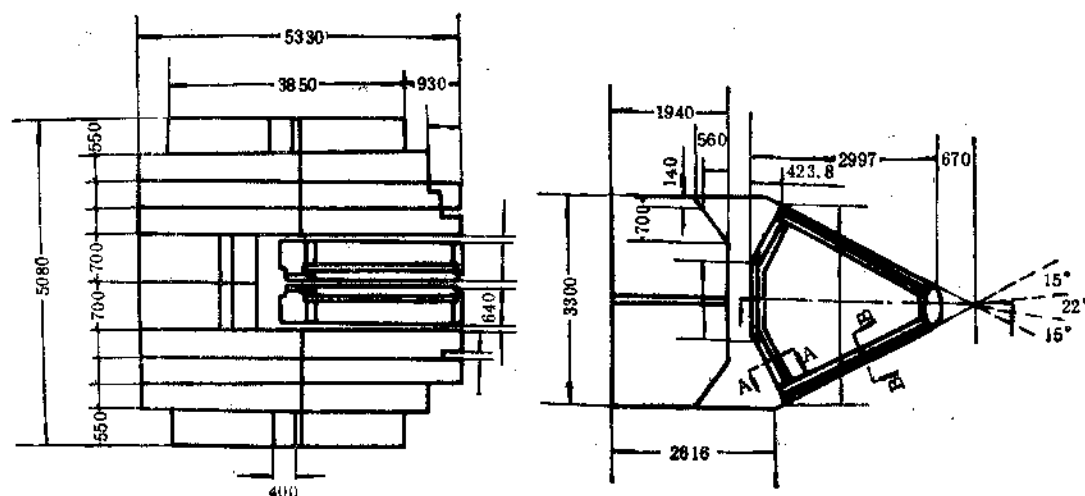


图 1.4 扇形磁铁铁心几何尺寸

在上下极心与相应的梁之间有10mm间隙，用于安放真空室盖板并防止梁的错动传递到极心上。极心边缘形状采用二台阶带一圆弧的近似Rogowski断面。为节省垫补功率，在沿 52° 径向扇边的二台阶处附加了适量的边缘垫铁，从而给出了平均场沿径向上升的分布。

为了确保磁铁的磁性能和机械性能，设计要求磁铁材料为含碳量 $\leq 0.06\%$ 的超低碳钢锻件，而且碳偏析和内部缺陷的限制也极其严格。第一重型机器厂采用一整套冶炼和热处理工

艺,保证了材质的要求,磁铁加工精度列于表1.6。

表 1.6 SSC 铁心加工精度

序号	精 度 项 目	设 计 要 求	实 测 值	备 注
1	极心上下表面	平面度 平行度 光洁度 0.08mm 0.16mm ∇_6	$0.06-0.08$ $0.05-0.13$ ∇_6	测周边厚度差
2	梁和立柱的上下表面	平面度 平行度 光洁度 0.10mm 0.20mm ∇_5	$0.08-0.10$ $0.05-0.10$ ∇_5, ∇_6	最大表面尺寸: 5330×3300 测周边厚度差
3	扇角 52°	极心 梁 $+30'' - 40''$ $\pm 2'$	$< \pm 6''$ $< \pm 20''$	
4	边缘垫铁	曲面轮廓度 表面光洁度 0.10 ∇_6	0.10 $\nabla_6 - \nabla_7$	

磁铁安装检测采用光学测量和精密机械测量工艺,确保了安装公差,主要结果列于表1.7。

表 1.7 磁铁系统安装检测主要结果

检 测 项 目		精 度 要 求 (mm)	检 测 结 果			
			1 扇	2 扇	3 扇	4 扇
极 心	气 隙	100	$+0.95$ $+0.20$	$+0.40$ $+0.25$	$+0.43$ $+0.345$	$+0.40$ $+0.34$
	气隙中心平面至SSC Q _m 面高度差	± 0.05	± 0.05	$+0.035$ 0.00	0.00 -0.02	$+0.035$ 0.00
	前端面 SSC 至 中心距离	670 ± 0.05	-0.04	$+0.02$	$+0.04$	-0.08
	中心线方位偏差	± 0.05	-0.04 -0.05	-0.04 -0.06	$+0.09$ $+0.02$	$+0.11$ $+0.08$
垫补线圈气隙			$+1.76$ 68 -0.02	$+2.05$ 68 $+0.60$	$+2.76$ 58 $+1.06$	$+2.08$ 68 $+0.37$

b.线圈 主线圈用 $21 \times 25\text{mm}$ 带 $\phi 10$ 冷却水孔的紫铜管绕制,上下线圈各分成6个线圈段,相邻两个线圈段并联成一对,各对之间串联。辅助线圈的安匝数为主线圈的2.5%,与主线圈一起放置于一个真空密封的316L不锈钢盒内($\mu \leq 1.01$)。

垫补线圈用 $\phi 8.2/2.5\text{mm}$ 氧化镁绝缘双层铜管绕制,嵌入一个真空密封的316L不锈钢盒子的底座上的槽中,此槽是依照 $C^{5+}50\text{MeV/A}$ 离子的 $H-E$ (硬边近似等时场)轨道而开的,加工精度要求严格。其中25对双匝线圈用于产生等时场,11匝单匝线圈各扇分别供电,为校正线圈。校正线圈中5对用于补偿注入区的磁场缺陷,而另6对则用于补偿磁场局部缺陷。

主线圈与垫补线圈均放入真空室内,主线圈套于上下极心上,而垫补线圈则固定于上下极面上。

c. 电源 在工程建设初期,我国大功率直流电源技术相当落后,为了满足工程需要,我所经过多年努力,终于突破各个技术难关,用串联晶体管调流加伺服前置调压的方式,使我国的大功率直流稳流电源技术达到世界先进水平。

磁场系统共有电源65台,最多时同时使用62台,3台备用。其规格、用途见表1.8。

表 1.8 磁场系统稳流电源规格及用途

电流/电压	稳 定 度 (8h)	调 变 度	数 量	用 途
4000 A/185 V	$\sim 5 \times 10^{-6}$	5×10^{-4}	1	主 线 圈
110 A/75 V	1×10^{-4}	5×10^{-4}	4+1	辅助线圈
300 A/75 V	1×10^{-4}	5×10^{-4}	25+1	等时线圈
300 A/30 V	1×10^{-4}	5×10^{-4}	32+1	校正线圈

(3) 磁场测量

a. 测磁系统 测磁系统是由测磁支架, Hall探头和支架控制及数据采集系统组成。测磁支架由气动装置驱动,最小步进 1° 。Hall片系Selmens公司的SBV-601,沿径向分布在测量臂上,用磁针定位法定位。测量臂由一个主臂和6段接长臂组成,可以有五种组合方式,以满足不同情况下测磁的需要。经常使用的是840—3420mm,共装有94个Hall片。综合支架加工,安装公差及Hall片定位偏差,在整个测量范围内,Hall片定位精度为:方位角 $\leq \pm 1'$,径向 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ 。用恒温装置使Hall片温度稳定于 $35 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。用NMR仪在标准磁铁上校准Hall片,对 V_H-B 曲线用5级多项式拟合,得到标定精度 $\sim 10^{-4}\text{T}$,长期稳定度 $\sim 1 \times 10^{-4}\text{T/周}$ 。

支架转动控制及测磁数据采集处理由一台YEE-8100微机及相应的接口线路执行。完成一次 360° 映象需时间约5h。

b. 励磁过程 图1.5是我们采取的SSC磁铁的励磁过程,过程的前一部分是为了得到好的场重复性,而后一部分则是为了使场尽快稳定下来。按这一过程励磁,在扇轴上得到场分布的重复性 $\leq 3 \times 10^{-4}$,对于高场达到稳定约需2h,而对于最低场则需约3h。

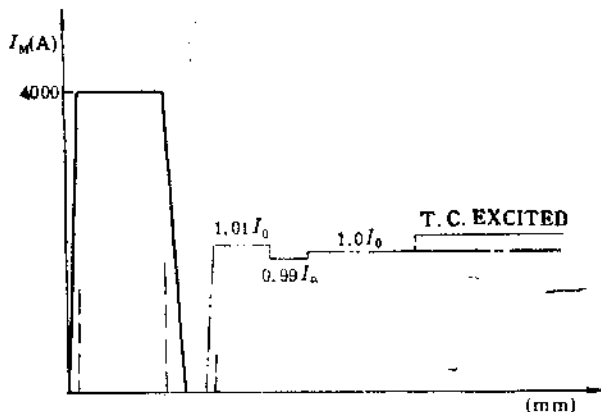


图 1.5 扇形磁铁励磁过程

c. 主要测量结果

场稳定性:使用一台B-NM20核磁共振磁强计(其准确度为 $3 \times 10^{-6}\text{T}$) 在 $\sim 1.4\text{T}$ 下监测,得到磁场长期稳定度为 $\sim 1 \times 10^{-6}/8\text{h}$ 。

测磁支架定位精度:用测量平均场分布对扇轴线的左右对称方法,推算出与之相应的Hall片在测磁臂上定位偏差。对同一场水平不同测量周期,在同一角度上磁场重复性为 $\pm 10^{-4}$,表明其方位角定位精度符合要求。

非扰动基础场:在0.6, 1.0, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7T的七个场水平下,四扇基础场在扇轴上最大偏差 $< 3 \times 10^{-3}$ 。用辅助线圈调差后,在参考点四扇场差 $< 1 \times 10^{-4}$ 。这些结果

表明四扇场的一致性好的。

边缘垫铁：在1.6T下，圆轨道平均场沿径向上升因子要求 $\gamma=1.05$ ，测量结果表明符合这一要求。

扰动基础场及其补偿：测量了0.6, 1.0, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7T下的带注入元件的扰动基础场。图1.6是注入元件对四扇基础场的扰动，实际上扇2与扇3已经经过边缘垫铁的补偿。可以看出，这两扇在小半径处似有一定的过补偿。图1.7给出了经校正线圈补偿后四扇基础场的剩余扰动量。从图中可以看出，扇2和扇3在130—150cm范围内仍有 $1.0\sim 1.5\times 10^{-3}$ T的剩余扰动量，这对调束来说是不利的。但谐波分析结果表明谐波幅值是可以接受的，对轨道的影响不很明显。

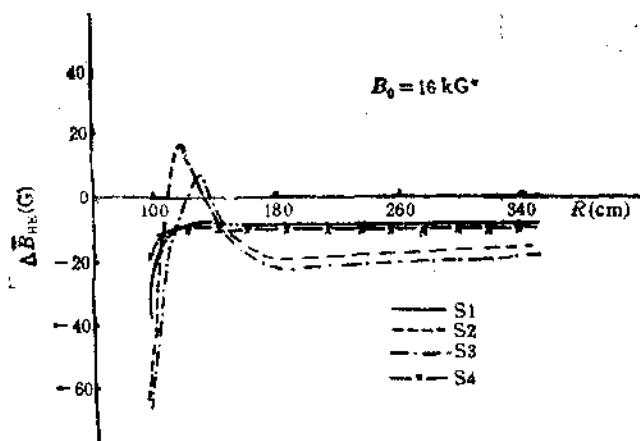


图 1.6 注入元件对四扇基础场的扰动（已经过垫铁补偿）

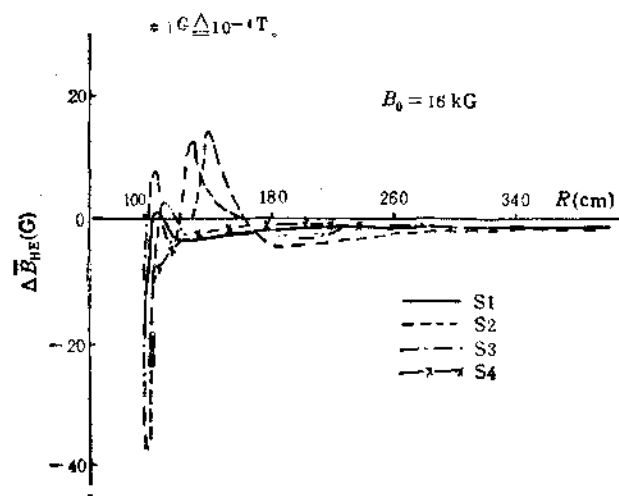


图 1.7 四扇基础场的剩余扰动

等时线圈、校正线圈效率测量：等时场的给定精度在一定程度上主要取决于线圈效率的精度。在0.6, 1.0, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.65T七个场水平下，将测量臂放在扇1中心线测等时线圈效率，而测校正线圈则放在扇3。由于我们使用负的等时线圈电流情况较多，因而取了 ± 120 A, ± 240 A四个水平，而校正线圈则取80, 160, 240A三个水平。为了消除剩磁影响，测量过程中电流只加不退。

必须指出：为了确保获取的大量数据准确无误，用Spline函数 $S_1(r)$ 和 $S_2(r)$ 拟合，用插值来检验无误后即告数据可靠。

d. 等时场建立

首先用四扇平衡方法使四扇非扰动基础场在扇轴上参考点 $r_0 = 252\text{cm}$ 的 $B(r_0)$ 的差别 $<10^{-4}\text{T}$ 。然后利用非扰动场图计算出静态平衡轨道 $(E, 0)$ ，对每条轨道可以得到两个比例数 k_b 及 k_r ：

$$k_b(r_{axis}, B_0) = B_{axis}/\bar{B}$$

$$k_r(r_{axis}, B_0) = r_{axis}/\bar{r}$$

其中

$$\bar{B} = \oint_{S,0} B(s) ds / \oint_{S,0} ds$$

$$\bar{r} = 1/2\pi \oint_{S,0} ds$$

对于任意给定的 A, Q, f_{rev} 的粒子，可以得到在扇轴上的等时场：

$$B_{axis}^{\text{iso}} = (Am_0 C^2/Q) \cdot (2\pi\gamma f_{rev}/C^2) \gamma k_b$$

式中

$$\gamma = (1 - \beta)^{-1/2}, \beta = (2\pi r_{axis,0}/k_r)(f_{rev}/C)$$

通过迭代可以得到精确的 B_{axis}^{iso} ，从而得到等时线圈的贡献量。

计算出注入元件扰动量之后，利用校正线圈对逐扇进行校正。

用已测得的线圈效率矩阵 M 及需要的场，用最小二乘法算出所需电流，一般经过2—3次迭代即可满足精度 $<5 \times 10^{-4}$ 。

测量了0.7—1.62T范围内7个等时场： C^{4+} -50MeV/A, C^{8+} -88MeV/A, N^{7+} -100MeV/A, Ne^{8+} -22.5MeV/A, Ar^{11+} -6.4MeV/A, Ar^{18+} -46MeV/A及 U^{86+} -10MeV/A；一次给定精度为1.2%，经过1，2次迭代后，精度为 5×10^{-4} 。对 C^{8+} -88MeV/A和 Ne^{8+} -22.5MeV/A两个场进行了360°映象，并进行了模拟加速。图1.8给出了 Ne^{8+} -22.5MeV/A实测场与等时场标准的偏差，而图1.9给出了该场下模拟加速的相移。

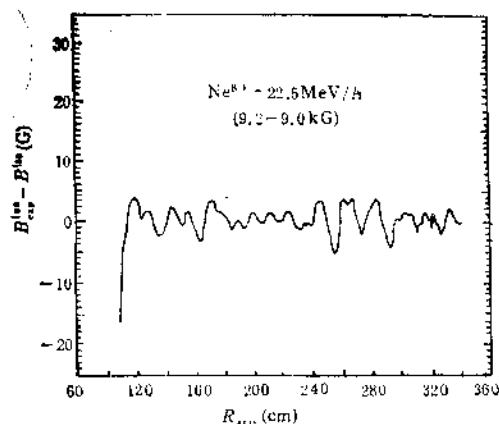


图 1.8 Ne^{8+} -22.5MeV/A实测场与等时场标准的偏差

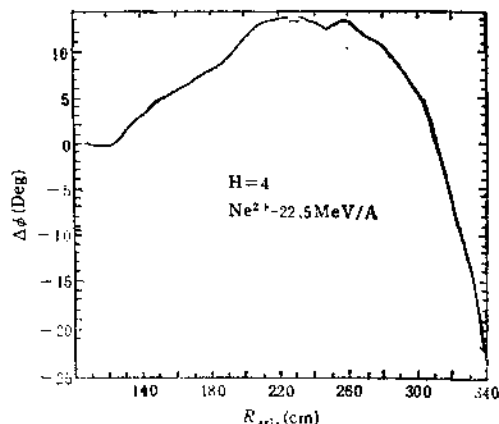


图 1.9 在整个模拟加速中束流相移

3. 真空系统

根据SSC的主要设计参数要求，我们决定选取整体式真空室结构和相应的排气系统。

(1) 真空室

真空室采用了整体结构，外形为一个不规则的扁盒子，容积约 100m^3 。直径10m，高

4.5m, 总重约65t, 内表面积为200m², 234个大小法兰孔用于安装不同的元件和部件。主要密封结构为纯铝菱形垫。

当基本结构确定后, 我们对真空室进行了力学分析计算, 采用有限单元法, 使用程序为SAP-5C。真空室为内无任何支撑的薄壳结构, 除了自重外, 主要受力来自大气压力, 上下受力分别约为 $7.8 \times 10^5 \text{N}$, 每一侧面受径向力约为 $9.8 \times 10^5 \text{N}$, 与磁铁相联的72个支撑, 用于传递大气压力(约 $20 \times 10^5 \text{N}$), 经过分析计算得出: 大法兰最大变形量为 $\delta_{\max} < 1.5 \text{mm}$ (一般应力值为 $\sigma < 6 \times 10^6 \text{N/m}^2$); 最大应力值为 $\sigma_{\max} < 10 \times 10^6 \text{N/m}^2$; 壳体与腔体大门之间的错动为 $\delta < 0.035 \text{mm}$ 。因此, 真空室是稳定可靠的, 其刚度、强度是符合要求的。

真空室装在磁铁之间, 因此, 对其材料选取必须兼顾各方面要求: ①为了避免对磁场的干扰, 材料相对磁导率 $\mu \leq 1.01$; ②具有良好的真空性能; ③具有良好的机械性能; ④具有良好的可焊性。根据上述条件, 最后选取了316L不锈钢。

真空室是一个庞然大物, 如果全部在工厂加工好后再运到兰州, 几乎是不可能的。因此, 只有在风华机器厂分为8大块和若干小块进行制造, 然后运到我所现场被焊成一个整体。密封焊接是真空室制造中首要难关, 密封焊缝总长约750m, 采用手工电弧焊。对焊工进行严格训练和考核, 严格控制焊接工艺流程, 所有密封焊缝均经过着色渗透液试验, X射线探伤和氦质谱检漏。结果表明: 所有焊缝大部分达到JB928-67规定的一级标准, 少部分达到二级标准。焊缝的相对磁导率 $\mu < 1.01$ 。对于每一个法兰密封面光洁度要求好于 $\nabla 7$, 不平度好于 $0.1/1000$ 。绝大部分法兰在工厂加工, 而几个较大法兰只有在现场用特殊方法和专用加工机械进行加工, 结果均达到要求。

为了确保平面度、垂直度和相关平面的平行度, 在真空室总体拼焊时, 在现场安装了光学测量系统, 并使用了相应的精密测量仪器与工具。

当真空室加工后, 我们采用了化学清洗方法对真空室进行清洗, 而不是传统的抛光工艺或机械方法。除了按照严格程序进行清洗外, 还制定了严格的环境卫生保护措施, 以求减少对真空室内表面的污染。

真空室是一薄壳整体结构, 起吊中几乎不允许变形, 风华厂设计了专门吊具, 安装后测量结果列于表1.9。

(2) 排气系统

真空室内装有主线圈、垫补线圈、高频腔体、注入引出元件及各种束流探针, 因而总出气表面积约1000m²。为了使真空系统达到总体设计指标, 设计了相应的排气系统。该系统用8台RKP-800型低温泵作为主抽泵、用4台TPH-5000型涡轮分子泵作为前级泵辅助泵, 用旋片式机械泵和机械增压泵作前级泵。整个系统有效抽速为160m³/s。

表 1.9 真空室安装检测结果

检 测 项 目	精 度 要 求	控 制 结 果			
		扇 1	扇 2	扇 3	扇 4
与SSC各扇中心线方位偏差	$< \pm 0.50$	+0.08	-0.32	+0.11	-0.45
中心平面至SSC Q _m 面的高度差	$< \pm 0.80$	-0.01	+0.57	-0.39	+0.32

原进口的RKP-800型低温泵在运行时必须使用液氮, 为此, 我们专门设置了一个液氮

车间生产液氮,但这给运行带来很多不便。为了解决这个问题,有关人员进行了大量计算和实验工作,最后设计了HIRFL800低温泵,不但可以不用液氮,而且性能也有提高,初步测试结果列于表1.10,最后结果还有待使用中继续测试。

表 1.10 $\phi 800$ 低温泵性能比较

	瑞士Balzerg	法国GANIL	HIRFL
极限真空(Pa)	1×10^{-8} (48h烘烤)	5×10^{-8} (48h烘烤)	$< 1 \times 10^{-8}$ (未烘烤)
抽速(l/s) H_2	10 000	10 000	30 000(带挡板)
N_2	17 000	20 000	22 000(带挡板)
H_2O	73 000		66 000
液氮耗量(l/h)	5	无	无
抽氢容量(barl)	80	26	14

(3) 结果

1986年9月,在只装入4对磁极情况下,进行试抽,从大气状态开始,经过约100h,只启动四台低温泵,就达到 8×10^{-8} Pa。在联合调束中,一般启动2—3台低温泵,可达 5×10^{-8} Pa。经测定,气载略大于设计值,抽空10h为: 1.7×10^{-8} Pa m³/s,但仍在允许范围内。用QMG-112四极质谱计分析了剩余气体成份,由于用酒精、丙酮擦洗未吹干,故显示出较高酒精、丙酮的成分。分析成分中 H_2 占26%, H_2O 占5%, N_2 占4%,系统达到了设计指标。

4. 高频系统

(1) 主要设计参数及系统组成

根据总体设计要求和束流动力学研究结果,在一系列模型实验基础上,确定了SSC高频系统技术设计参数。由于HIRFL的高频系统是一个有机整体,故注入器的有关高频问题也在这里阐述。HIRFL高频系统主要技术设计参数示于表1.11。

表 1.11 HIRFL 高频系统主要设计参数

	SSC	SFC	聚束器
谐振腔数	2	1	2
频段(MHz)	6.5—14	6—18	26—56
D电压(kV)	100—250	90—100	32—70
高频电压稳定度	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$	1×10^{-3}
相位稳定度(长期)	$< 1^\circ$	$< 1^\circ$	$< 4^\circ$
频率自动调谐精度	$\pm 5 \times 10^{-8}$	$\pm 1 \times 10^{-8}$	$\pm 1 \times 10^{-8}$
D盒角度	30°	180°	
末级功率管	TH537	TH537	FU113

粗略地讲,高频系统主要由SSC两台加速腔,注入器SFC一台加速腔,两台聚束器及相应的高频放大器和三个稳定系统组成。系统框图示于图1.10。

(2) SSC腔体

SSC加速腔在研制过程中选择了多个方案。根据总体要求,先后设计制作了五个模型腔体,进行了电气模拟实验和腔体特性参数设计方法的研究。只有采用沿径向上升的加速电压