

兰州重离子研究装置 进展报告

(兰州重离子加速器研制报告专集)

第 八 卷

1 9 8 9

中国科学院近代物理研究所 编辑

科学出版社

内 容 简 介

中国科学院近代物理研究所从 1976 年开始建造重离子研究装置。主要任务是新建一台作为主加速器的能量常数 $K=450$ 的分离扇回旋加速器, 另外把原有的 1.5 m 回旋加速器改建成 1.7 m 扇聚焦回旋加速器作为注入器。该装置在采用 ECR 源情况下能把碳离子加速到 120 MeV/A, 把 Ta 离子加速到 7.5 MeV/A。加速器装置已于 1988 年 12 月首次引出离子束流。

为了及时反映工程进展、汇集工程技术资料, 我们不定期编辑出版《兰州重离子研究装置进展报告》, 以便与同行进行技术交流。本书也可供从事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 八 卷

1989

中国科学院近代物理研究所 编辑

责任编辑: 鄢德平

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

编辑编码: 100707

《冰川冻土》编辑部 微机编排

中国科学院兰州科中彩印厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1990 年 8 月第一次印刷 印张: 8 3/4

印数: 001—900 字数: 193 000

ISBN 7-03-002185-1/O·410

定 价: 8.40 元

**PROCEEDINGS OF HEAVY-ION
RESEARCH FACILITY
IN LANZHOU**

(HIRFL)

Vol. 8

1 9 8 9

Compiled by Institute of Modern Physics, Academia Sinica

Science Press

1 9 9 0

主 编 魏宝文

副主编 乔庆文 叶 峰

编 委 马受武 白国良 叶 峰 乔庆文

张守谨 张恩厚 张恕修 张振康

焦天枢 蒋维模 魏宝文

Chief editor: Wei Baowen

Vice-editors in chief: Qiao Qingwen, Ye Feng

Members: Ma Shouwu, Bai Guoliang, Ye Feng, Qiao Qingwen,

Zhang Shoujin, Zhang Enhou, Zhang Shuxiu,

Zhang Zhenkang, Jiao Tianshu, Jiang Weimo, Wei Baowen

前 言

研制建造兰州重离子加速器,经历了十余个春秋,它于1988年12月建成并胜利出束。从此,我国的重离子回旋加速器进入了国际先进行列。

在70年代后期,法国、日本和中国差不多同时起步研制加速重离子的大型室温分离扇回旋加速器。在各自的研制过程中,虽然都要花力量去解决超出当时水平的一些技术问题,但对我们中国的加速器工作者来说,面临的超出当时国内水平的技术问题要比法国、日本的多许多。我们积极地进行了国际交流,然而最重要的还是用我们自己的智慧和可能具备的条件一项一项地来研制。从1982年开始,每年一卷的《兰州重离子研究装置进展报告》记录了整个研制过程,也报导了各项理论和实验的研究结果。《兰州重离子研究装置进展报告》已出了七卷,为在国内进行广泛学术交流和促进我国加速器技术的发展,起到了良好的作用。

国家科委于1989年11月对兰州重离子加速器进行了技术鉴定。为了向国家鉴定委员会汇报,我们编写了一套研制报告,包括总系统的概述、分系统的分述和束流品质测试等共12篇。这些报告虽也描述了研制过程,但都以主要篇幅叙述了设计要求和最后研制结果。根据兰州重离子加速器工程领导小组意见,我们把这套研制报告汇编成《兰州重离子研究装置进展报告》的第八卷,为全面反映兰州重离子加速器情况,作为本卷的附录,也收入了ECR离子源、实验终端和辐射防护的简介材料。

编 者

1990年2月

目 录

1. 兰州重离子加速器概述	(1)
2. 磁场系统	(23)
3. 高频系统	(38)
4. 真空系统	(48)
5. SSC 的注入引出系统	(53)
6. 束运系统	(62)
7. 注入器系统	(71)
8. 自动控制与束流诊断系统	(77)
9. 束流强度与发射度测量	(87)
10. 束流能散测量	(91)
11. HIRFL 联合调束	(97)
12. 对几种典型离子的模拟加速	(105)

附 录

A. ECR 离子源	(114)
B. 实验终端	(119)
C. 辐射防护与剂量监测系统	(121)

CONTENTS

1. Survey of Heavy-ion Research Facility at Lanzhou (HIRFL)	(20)
2. Sector Magnet System	(37)
3. The RF System	(47)
4. The Vacuum System	(52)
5. Injection and Extraction System of SSC	(61)
6. The Transport Beam Line	(70)
7. Injector	(76)
8. The Control and Beam Diagnostic System	(87)
9. The Beam Intensity and Emittance Measurements	(90)
10. Beam Energy Dispersion Measurement	(96)
11. HIRFL Commissioning	(103)
12. Computer simulation of Accelerated Ions	(113)

1. 兰州重离子加速器概述

张恩厚 魏宝文 马受武 白国良 乔庆文 叶 峰

一、引言

为适应科学研究、工农业生产、辐射医疗以及国防建设诸多方面的需要,加速器的理论与技术得到了不断的发展,加速器的类型也不断增多.许多种类的小型电子加速器,大都用于工业和医疗;各类加速电子或质子的高能加速器,主要用于粒子物理研究;各类加速重离子的加速器,基本都用于原子核物理研究.

原子核物理在获得许多重大成就之后,在60年代拓广到一个新的前沿领域——重离子核物理,同时促进了重离子加速器的发展.进入70年代以来,在美、法、西德、日、英、苏等许多科技先进的国家,兴起了建造各种重离子加速器的热潮——由改建到新建,由加速部分离子到加速全离子,由低能、中能进而到高能,发展迅速.兰州重离子加速器(HIRFL)就是为在我国开展重离子核物理研究和重离子束应用研究,自70年代酝酿起步,继而设计建造的.

现在运转着重离子加速器,主要有直线型、高压型和回旋型三类.美国LBL的Superhilac和西德GSI的Unilac,是最早加速重离子的直线加速器.属高压型的串联静电加速器,在成功地运用了一些新技术后获得很大的发展.端电压为20MV、25MV、30MV的串联静电加速器陆续建成运转,但进一步提高端电压是相当困难的.从近10多年的情况看,回旋型的重离子加速器的发展最为引人注目.

在图1.1和表1.1中示出了主要的低、中能重离子回旋加速器的基本情况.按出束时间,似乎可以把它们的发展划为三批:第一批是自60年代中到80年代初陆续出束运转的(表1.1中的7—10),能量常数 K 都不高,都还不能加速全离子;第二批是自80年代初陆续出束运转的(表1.1中的4—6),主加速器都采用常温分离扇回旋加速器, K 值都较高,都有加速全离子的能力;第三批是自1985年以后陆续出束运转的(表

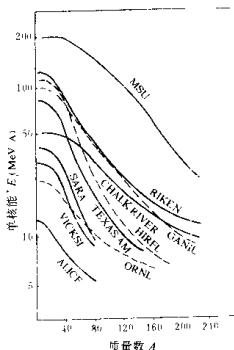


图 1.1 国际重离子加速器 $E-A$ 曲线

* 表示离子的每核子获得的动能

1.1 中的 1—3), 主加速器都是超导回旋加速器, K 值进一步提高, 如美国的 MSU 的 K500+K800 可把轻的重离子加速到 $200\text{MeV}/A$ 。现在可以说常温回旋加速器技术已相当成熟, 而超导回旋加速器技术仍在发展, 还有些困难有待进一步克服。

表 1.1 国际重离子回旋加速器

	器名 / 单位 (国家)	主加速器	注入器	可加速离子 能量(MeV / A)	出束时间
1	MSU(美)	$K=800(\text{SC})$	$K=500(\text{SC})$	200 轻重离子 20 U 离子	1987
2	TEXAS AM(美)	$K=500(\text{SC})$		80 轻重离子 8 A=150	1987
3	CHALK RIVER(加)	$K=520(\text{SC})$	Tandem13MV	50 轻重离子 10 U 离子	1985
4	GANIL(法)	$K=400$	$K=400$	100 轻重离子 8 U 离子	1982
5	RIKEN(日)	$K=540$	Linac / $K=70$	135 轻重离子 13 U 离子	1986
6	HIRFL(中)	$K=450$	$K=69$	120 轻重离子 7.5 Ta 离子	1988
7	SARA(法)	$K=160$	$K=90$	40 C 离子 10 Kr 离子	1982
8	ORNL(美)	$K=100$	Tandem25MV	25 轻重离子 $\sim 6 A \approx 170$	1979
9	VICKSI(西德)	$K=130$	Tandem 8MV	32 轻重离子 9 Kr 离子	1977
10	ALICE(法)	$K=75$	Linac	16 轻重离子 6 Kr 离子	1965

表 1.2 几台大型分离扇回旋加速器的主要参数

器 名	频 段 (MHz)	B_{max} (T)	V_{max} (kV)	P (Pa)	已加速束流举例 (MeV / A) (PPS)*		
GANIL	7—14	1.73	200	6.6×10^{-6}	N^{7+}	60	7.1×10^{11}
					Ne^{10+}	60	2.8×10^{11}
					Ar^{16+}	60	2.3×10^{11}
					Ar^{14+}	27	4×10^{10}
					Ca^{16+}	60	2×10^{10}
					Kr^{26+}	35	2×10^{10}
					Xe^{32+}	23	4×10^9
RIKEN	20—45	1.8	250	1.3×10^{-5}	N^{6+}	26	2.7×10^{11}
					Ar^{13+}	26	3×10^{11}
					Ar^{12+}	21	1×10^{11}
					Cu^{18+}	17	3.3×10^9
HIRFL	6.5—14	1.75	250	1.3×10^{-5}	C^{6+}	~ 50	2×10^{11}

* 英文缩写, 表示每秒粒子数。

兰州重离子加速器属上述第二批, 它的主加速器同 GANIL 的和 RIKEN 的大致相当, 它们的主要参数和已加速的束流情况列于表 1.2。从表 1.2 可以看出, 所列三台大

型分离扇回旋加速器的基础磁场 B_{max} 、加速电压 V_{max} 、工作真空 P 等，都是彼此相近的。在国际重离子回旋加速器行列中，第二批中的 2 台（HIRFL 刚投入运行）以它们良好的束流品质和高束流稳定性为核物理学家所称赞。第一批的 3 台，尽管调试中遇到了不少困难，运行状况也不尽如人意，但在 MSU 的 $K=800$ 上最近取得的进展，显示了它们光明的前景。所以，在 12 届国际回旋加速器会议的总结报告中认为它们各有千秋，并希望各自都为回旋加速器的发展做出贡献。

中国科学院近代物理研究所 70 年代初将一台 1.5m 经典回旋加速器改装，实现了 C、N、O 等重离子的加速，在我国率先进行了一系列重离子核物理研究。1972 年 10 月，在兰州召开了首届中国核物理学会，与会专家一致明确认为，重离子核物理和高能核物理是当代核物理的两个前沿领域，并建议在我国逐步创造条件开展这两方面的研究工作。近物所在初步开展重离子核物理研究的基础上，受到核物理学界的上述建议的鼓舞，便开始考虑大型重离子加速器的研制方案。

我们的方案必须有先进的技术指标，也必须立足于我国的实际。在分析了各种方案的优缺点及其技术难点，同时也考查了我国的工业技术基础之后，我们选定了回旋型方案。这个方案以分离扇回旋加速器为主加速器，它的理论与技术都发展自经典回旋加速器。因为我国有建造和运转经典回旋加速器的经验，我所又有改装经典回旋加速器加速重离子的实践，所以对我们来说，这个方案是最有把握实现的。

从实现“全离子”加速出发，方案确定为主加速器配接两台注入器，第一注入器为扇聚焦回旋加速器，第二注入器为串列静电加速器。由于经费原因，后来决定第二注入器缓建。为了节约经费和集中力量于主加速器研制，决定将我所原有的 1.5m 经典回旋加速器改建为 1.7m 扇聚焦回旋加速器来做第一注入器。分离扇回旋加速器（能量常数 $K=450$ ）与扇聚焦回旋加速器（ $K=69$ ）组合，在用 PIG 离子源情况下，可实现 C-Xe 的加速，在用 ECR 离子源情况下，加速离子可扩展到 Ta 附近。这个计划于 1976 年 11 月，由国家计委批准。十多年来，经过方案论证、模型实验、物理设计、技术设计、施工设计、非标加工和安装调试，重离子加速器终于建成，并于 1988 年 12 月 12 日引出了约 $50\text{MeV}/\text{A}$ 的 C^{6+} 束流。经近十多个月的试运行证明，我国自行设计，自行建造的大型重离子加速器已全部达到了设计指标，与国际上同类型的中低能重离子加速器水平相当。它的建成标志着我国回旋加速器技术已跨入了国际先进行列，并为我国开展重离子物理的基础研究和应用研究提供了条件。

二、系统综述

兰州重离子加速器（HIRFL）其概貌示于图 1.2，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) 从注入器到主加速器的前束流输运线（ $\sim 65\text{m}$ ）；
- (4) 从主加速器到八个实验终端的后束流输运线（总长 $\sim 110\text{m}$ ）；

(5) 八个实验终端.

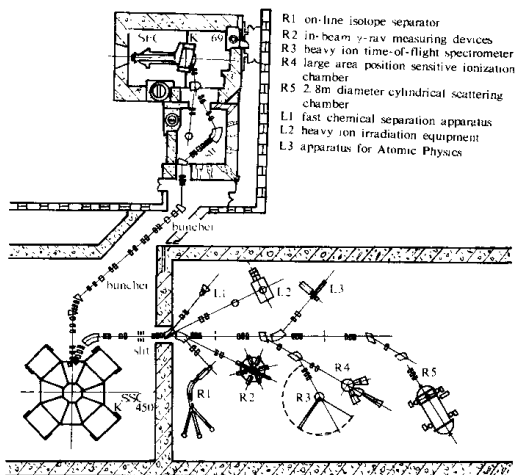


图 1.2 兰州重离子加速器系统图

(The General Layout of HIRFL)

R1. 在线同位素分离器; R2. 在束 γ 测量装置; R3. 重离子飞行时间谱仪; R4. 大面积位置灵敏电离室; R5. 2.8m 直径圆柱形散射室; L1. 快化分离系统; L2. 重离子辐照装置; L3. 原子物理研究设备

表 1.3 HIRFL 主要设计指标

离子种类	C-Ta
单核能量	120-7.5MeV / A
束流强度	10^{10} - 10^{12} PPS
能散	$\sim 5 \times 10^{-3}$
发射度	$\sim 10\pi$ mm mrad

HIRFL 的主要设计指标列于表 1.3, 而表 1.4 和表 1.5 分别给出了为保证表 1.3 的指标所必须达到的技术参数和 SFC、SSC 之间的匹配参数.

在 HIRFL 的建造过程中, 我们始终同国内外同行保持着紧密的联系和交流, 并从这些交往中吸取有益的经验. 例如, 近年来 ECR 重离子源技术的迅速发展和它在加速器上的广泛使用以及它的高稳定性引起了我们极大的关注. 为了提高 HIRFL 的加速能

表 1.4 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(间隙)
磁场稳定度	10^{-5}	10^{-5}
高频频率(MHz)	6-18	6.5-14
频率稳定	1×10^{-5}	1×10^{-6}
幅度稳定	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
相位稳定	$\leq 1^\circ$	$\leq 1^\circ$
加速谐波	1, 3	2, 4, 6
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(平均)	3.21(平均)

表 1.5 SFC 与 SSC 的参数匹配

模式	N_1, N_2	H_1/H_2	f_1 (MHz)	f_2 (MHz)	F_2 (MC/s)	E (MeV/A)	η (%)
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	46.0-124.8	50

力和束流品质, 我们千方百计地节约经费, 增加了 ECR 离子源的建设计划, 这样可使加速离子种类从 Xe (氙) 扩展到 Ta (钽), 引出能量也相应提高, 且束流稳定性也将大大提高. ECR 源可望于 1991 年中投入使用.

三、SSC 的预先研究

1. 理论研究

在理想等时场硬边近似的条件下, 对线性和非线性轨道动力学特性, 空间电荷效应和相运动进行了计算, 分析了偏离理想条件的诸因素对加速器的性能的影响. 依据 HIRFL 的束流指标, 选取了 SSC 的能量常数为 450, 扇叶 $N=4$, 扇角 $2\alpha=52^\circ$, 间隙 = 10cm. 在这种情况下, 有足够强的轴向聚焦力和足够大的间隙使 SSC 的束流通过, 而且都不穿过强共振线, 非线性影响很小, 轨道是稳定的, 在 HIRFL 的束流强度下空间电荷效应很小, 可以不予考虑.

从表 1.5 出发, 选择了高频频率为 6.5-14MHz. 为了保证离子在 SSC 内由于电荷

交换的损失不大于 10%，确定真空室工作压力为 $1.3 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。SSC 主要设计参数列于表 1.6。

表 1.6 SSC 主要设计参数

轨道参数		高频功率	
平均注入半径	1.00m	谐波	$2 \times 120 \text{kW}$
平均引出半径	3.21m	加速孔径	2-10
径向振荡频率	1.087-1.202	Q 值	5cm
轴向振荡频率	0.742-0.864	耦合环阻抗	6000-10000
磁铁系统		耦合环阻抗	
扇数	4 台	真空系统	20-100 Ω
扇角	52°	真空室容积	100m ³
气隙	10cm	工作压力	$1.3 \times 10^{-5} \text{Pa}$
最高磁场	1.6T	总气载	$1.8 \times 10^{-3} \text{Pa m}^3/\text{s}$
垫补线圈	36 对	有效抽速	$1.4 \times 10^2 \text{m}^3/\text{s}$
高频系统		聚束器	
频率范围	6.5-14MHz	频率范围	26-56MHz
D 盒数	2	谐波数	4
D 盒角度	30°	最高电压	70kV
最高电压	100-250kV	数量	2 台

2. 实验研究

为了在技术上实现各项设计指标，验证设计的可行性，我们对各个重要技术难关均进行了模型实验研究或预研。

(1) 扇形磁铁模拟实验

建立了两台 1/4 模拟磁铁，验证了磁路设计方法；进行了场形测量和等时场垫补实验；选取了极头断面，确定了边缘垫铁的几何形状，并测量了两扇间谷区场分布。这些实验为磁铁设计提供了依据，并为轨道动力学研究提供了磁场数据。

(2) 高频加速腔模拟实验

加速腔体结构先后经过了横腔-竖腔-弯腔-“燕式”腔的演变过程，共做过四种型式五个模型，对各种结构的腔体进行了测试和腔体设计方法的研究。1/2 波长结构的谐振腔可产生沿径上升的加速电场，对束团产生“相压缩”效应。竖腔高度过长，弯腔的转动调谐板稳定性难以解决且体积过大，最后选定了类似法国 GANIL 的“燕式”斜腔，结构稳定，调谐方便。

(3) 注入引出元件模拟实验

对注入引出系统的弯曲磁铁、磁通道和 BUMP 场线圈进行了模拟实验研究，对弯

曲磁铁 C 窗框型和 C 混合型进行了 1:1 的模拟实验, 同时进行了二维场计算. 设计了一台自补偿空气芯型实验磁通道, 放在无基础场的磁铁气隙中进行了测量. 用一个比较简单的线圈, 进行了 BUMP 场线圈模拟实验. 结果表明: 在 400—500A 时即可得到 $(7-10) \times 10^{-3} \text{T/cm}$ 的强场梯度, 可满足设计要求. 这些实验对注入引出元件设计提供了依据.

(4) 磁铁材料预制

为了解决我国缺乏制造大型超低碳钢锻件经验的难题, 我们与北京重型机械厂和富拉尔基第一重型机器厂签订了两项试制低碳钢锻件的合同. 经过他们的努力, 试制得到了满意的结果, 并取得了经验, 为决定磁铁材料和结构打下了基础.

(5) 高稳定度大功率直流稳流电源研制

在 70 年代末期, 我国大功率直流稳流电源技术还相当落后, 甚至找不到研制单位, 不得不考虑进口. 在这种形势下, 为了满足工程需要, 我们组织了专门力量进行技术攻关, 用串联晶体管加伺服前置调压的方式, 陆续研制了多种规格的电源样机, 并转到西整厂生产, 其中在西整厂协作下研制的 4000A / 185V 主磁场电源长期稳定度为 $5 \times 10^{-6} / 8\text{h}$, 达到国际先进水平. 不但满足了工程需要, 并为国家节约了大量外汇.

(6) 相位稳定系统模拟实验

HIRFL 共有 5 个高频腔体, 要求它们之间的相对相位稳定必须好于 1° . 对于这样一个宽频带不同频率系统来说是一个很难的课题. 当初同电源的情况类似, 甚至找不到研制的厂家. 在这种情况下, 不得不自己组织力量进行研究, 终于获得了稳定度好于 1° 的桌上试验结果. 这项工作得到了石家庄 54 所的大力支持. 54 所后来承担了该项研制任务.

上述预研的满意结果, 为 HIRFL 的设计与建造奠定了坚实的技术基础.

3. 结构研究

SSC 的磁铁、真空室、高频腔、注入引出部件及部分束诊探针均汇集于直径约 12m, 高约 5.5m 的空间中. 如何设计好主体结构, 是保证加速器性能的一个关键.

(1) SSC 扇形磁铁采用平放结构

对厚钢板迭焊竖放结构, 锻件平放结构和铸件平放结构等进行了对比和国内制造工艺调查, 在磁铁材料试制工作完成后, 决定采用锻件平放结构.

(2) 真空室采用大型整体结构

大型 (包含磁极和线圈) 和小型 (不包含磁极和线圈) 方案进行对比, 而在决定采用大型方案之后, 又对整体和组合结构进行比较, 最后确定大型整体结构.

(3) 加速腔采用半波长燕式斜腔

在方案设计初期, 曾考虑采用“平顶波”技术, 它可大大改善束流散度, 提高束流强度, 但实现这项技术有三个难点, 一是谐波腔设计, 二是相位稳定, 三是束流的越隙效应. 这三点在短期内都难以解决, 经研究决定放弃. 这样, 腔体结构很快得以确定.

(4) 改进磁场垫补技术

为了降低磁场垫补功率, 采用了边缘垫铁. 为了抵消注入元件对等时场产生的干扰, 采用了垫铁补偿和鼻子线圈补偿同时并用的办法.

(5) 注入半径定为 1m

为确定 SSC 注入半径,曾研究过 0.75m、0.9m 以及 1m 三种方案,为确保注入元件所需空间,最后采用了 1m 的方案。

四、SSC 主体结构

SSC 主要由四台扇形磁铁、两台高频加速腔和一个真空室组成,注入引出元件装入真空室内。总体结构示于图 1.3 和图 1.4。



图 1.3 建成后的 SSC 主体及部分束流线

每台扇形磁铁由 12 块低碳钢锻件组成,重约 500t,四扇总重 2000t,上下梁与磁极之间各放三个垫块,以保持 10mm 间隙,用以减小极心变形和放置真空室膜盖。磁极间距离由抗磁不锈钢块严格保持为 $100^{+0.16}$,主线圈和调差线圈共装于一个不锈钢盒内,而垫补线圈固定于磁极面上。每台磁铁由三个可三维调整的液压千斤顶支撑。

大型整体结构真空室由 316L 不锈钢拼焊而成,容积约 100m^3 ,净重约 65t。内部无任何支撑,是一个非刚性体。上下各有 16 块刚性支承块,分别固定于上下梁上。为了不使真空室膜盖受损,这些支承在垂直方向是刚性的,而在其它方向都是挠性的,以吸收磁铁和真空室相对变形引起的位移。有四根预应力拉杆与每扇磁铁的立柱相连,以平衡径向受力。南北谷各有四根预应力拉杆相连于磁铁上、下梁上,以增加稳定性。真空室所受的巨大径向压力,由中心支承环平衡。

两台加速腔体及其大门各装于一台行车上,腔体推入真空室后,腔体大门与真空室密封连接,腔体重量则由三个千斤顶支撑。

主体结构设计中遇到的难点主要有:

1. 主要部件重量大,精度高,配合严;

2. 结构复杂, 空间狭小, 互相交叉;
3. 相关件必须兼顾平衡.

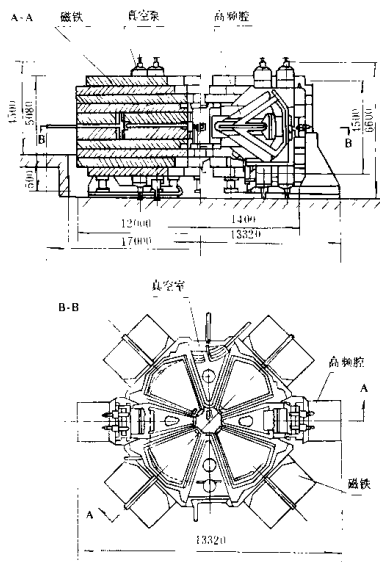


图 1.4 SSC 主体机械结构

最后确定的主体结构是合理的, 兼顾了以上三点, 是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.

五、SSC 各系统的建造

1. 磁场系统

表 1.7 列出了磁场系统达到的主要指标.

表 1.8 是加工精度测量结果.

采用了光学测量和精密机械测量工艺, 确保了安装精度, 主要结果列于表 1.9. 磁场系统共用大功率直流稳流电源 65 台, 用途列于表 1.10.

表 1.7 SSC 磁场系统主要指标

最高磁场	1.6 T
励磁电流	1.6×10^5 HT
励磁功率	550 kW
垫补功率	110 kW
磁场稳定度	$10^{-5}/8\text{h}$
场的重复性	5×10^{-4}
等时场精度	5×10^{-4}

表 1.8 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	0.08mm	0.06—0.08
		平行度	0.16mm	0.05—0.13
		光洁度	$\nabla 6$	$\nabla 6$
2	梁和立柱的 上下表面	平面度	0.10mm	0.05—0.10
		平行度	0.20mm	0.05—0.10
		光洁度	$\nabla 5$	$\nabla 5, \nabla 6$
3	扇角 52°	极心	$+30'' -40''$	$< \pm 6''$
		梁	$\pm 2'$	$< \pm 20''$
4	边缘垫铁	曲面轮廓度	0.10	0.10
		表面光洁度	$\nabla 5$	$1.5—1.7$

表 1.9 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
气 隙	$100^{+0.66}_{-0.30}$	+0.35	+0.40	+0.43	+0.40
		+0.20	+0.25	+0.345	0.34
气隙中心平面至 SSCQm 面高度差	± 0.05	± 0.05	+0.035	0.00	+0.035
			0.00	-0.02	0.00
前端面至 SSC 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	-0.04	+0.09	+0.11
		-0.05	-0.06	+0.02	+0.08
垫补线圈气隙		$68^{+1.76}_{-0.02}$	$68^{+2.05}_{-0.60}$	$68^{+2.76}_{-1.06}$	$68^{+2.08}_{-0.37}$