

兰州重离子研究装置 进展报告

第五卷

1986

中国科学院近代物理研究所 编辑

科学出版社

5

5

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设工程。主要任务是把原有的1.5m回旋加速器改建成1.7m扇束加速器作为注入器,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。预计本工程将于1988年完成。

为了及时反映工程进展、汇集工程技术资料,拟不定期编辑出版《兰州重离子研究装置进展报告》,以便与国内外同行进行技术交流。

本书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

第五卷

1986

中国科学院近代物理研究所 编辑

责任编辑 柴毓敏 王 旭

科学出版社出版

北京朝阳区门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988年9月第1版 开本:787×1092 1/16

1988年9月第1次印刷 印张:7

字数:158,000

ISBN 7-03-000532-5/O·139

定价: 6.50 元

PROCEEDINGS OF
HEAVY-ION RESEARCH FACILITY IN LANZHOU,
(HIRFL)

Vol. 5

1986

Compiled by Institute of Modern Physics, Academia Sinica

Science Press

1988

顾问 近代物理研究所名誉所长杨澄中教授

主编 魏宝文

副主编 乔庆文 闵 亚

编委 张恩厚 马守武 白国良 张守谨

张恕修 张振康 蒋维模 焦天枢

叶 峰

Advisor: Prof. Yang Chengzhong (Honorable director of IMP)

Chief editor: Wei Baowen

Vice-editors in chief: Qiao Qingwen Ming Ya

Members: Zhang Enhou Ma Shouwu

Bai Guoliang Zhang Shoujing

Zhang Shuxiu Zhang Zhenkang

Jiang Weimo Jiao Tianshu Ye Feng

前 言

为及时反映兰州重离子研究装置工程进展情况,并汇集工程技术资料以便与国内外同行进行技术交流,我们自 1982 年起已不定期地内部编辑出版《兰州重离子研究装置进展报告》三卷,供交换赠阅(1—3 卷我所尚有少量存刊,需要者可来信索取)。

为了便于国际交流,进一步满足国内广大读者的需要,从 1985 年(即从第四卷)起,仍由中国科学院近代物理研究所编辑,由科学出版社出版,向国内外发行。本卷主要报道 1985 至 1986 年主加速器(SSC)的研制和安装以及注入器(SFC)的安装和调试进展,共 14 篇。

编 者

• • •

Preface

In order to introduce the current progress of the project for Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL), collect engineering and technological data and promote the scientific exchange with the colleagues at home and abroad, we have edited and published nonperiodically three volumes of Progress Report on HIRFL inside since 1982, which can be provided for exchange and given free by the publisher (there are only a few in our institute, if need, please write us).

For the sake of the needs of our domestic and foreign readers and international exchange, from now on the progress report is still edited by Institute of Modern Physics (IMP), Academia Sinica and published by the Science Press, China. It is issued both at home and abroad.

The present issue, which gathers 14 papers, mainly reports the researching and installing of main accelerator (SSC) as well as the assembling and testing of injector (SFC) during the period from 1985 to 1986.

Editors

目 录

1. 兰州重离子加速器施工情况.....	(1)
2. HIRFL 调束与 SSC 参数预置	(9)
3. 分离扇加速器 (SSC) 加速轨道研究	(17)
4. 分离扇加速器 (SSC) 谐波场的初步研究	(30)
5. SSC 四扇磁铁的安装检测	(37)
6. 兰州重离子加速器大型真空室的建造.....	(43)
7. 兰州重离子加速器大型真空室的焊接制造.....	(47)
8. 兰州重离子加速器真空系统的初次运行.....	(59)
9. HIRFL 原型腔体的高频“锻炼”.....	(63)
10. 在使用 ECR 源时 SFC 和 SSC 之间的匹配参数.....	(70)
11. 用有限单元法计算高压静电场	(76)
12. HIRFL 束流线束流剖面监测器系统	(84)
13. γ -300 高频发射机输入系统改造	(89)
14. HIRFL 的辐射安全系统	(94)

Contents

1. Construction Progress of HIRFL	(8)
2. General Scheme of HIRFL Beam Tuning and Parameter Presetting of SSC····	(16)
3. The Study of the Accelerated Orbit in SSC	(29)
4. The Primary Study for the Harmonic Field of the Injection Region in SSC····	(36)
5. Assembling and Mechanical Measuring of the 4 Sector Magnets of SSC·····	(42)
6. Building of Large-Scale Vacuum Chamber of SSC for HIRFL	(46)
7. Welding of the Large-Scale Vacuum Chamber of the SSC for HIRFL······	(58)
8. First Operating of the Vacuum System for HIRFL SSC	(62)
9. The R. F. Conditionning for HIRFL Prototype Resonator	(69)
10. The Matching Parameters Between SFC and SSC with ECR Ion Source ···	(75)
11. Calculation of High Voltage Electrostatic Field by Finite-Element Method··	(83)
12. The Beam Profile Monitor Systems for the HIRFL Transport Line·······	(88)
13. Improvements in the Input System of the Γ -300 RF Generator	(93)
14. Radiation Safety System of HIRFL··································	(101)

1. 兰州重离子加速器施工情况

张恩厚 魏宝文 马守武

白国良 乔庆文 叶 峰

1980 年兰州重离子加速器大楼正式开工, 1981 年 SSC 磁铁铁芯开始投料生产, 标志着兰州重离子加速器工程进入施工阶段。经过几年的努力, 加速器大楼, 包括土建、水、通风、电设备安装, 已于 1984 年底竣工交付使用。SSC 的主要非标加工件在 1986 年底已陆续完成交货, 在现场进行了 SSC 主体安装和分系统调试。SFC 完成了分系统调试, 具备了调束的基本条件。前束线主体已经完成三分之二的加工量, 现正准备安装。

一、土建工程施工

加速器大楼由前、侧、后楼三部份组成。前楼为五层框架, 侧楼为四层框架结构, 筏形基础。后楼为两层大体钢筋混凝土结构, 箱式基础。建筑总面积 18049 平方米, 其中 SSC 大厅使用面积 750 平方米, 实验大厅使用面积 2200 平方米, 其余为加速器工艺房间和通用实验室。楼内安装通风、供水、配电和起重设备 1200 多台, 敷设动力电缆 60 公里, 管线 11 公里, 供电能力 7500 千伏安, 去离子水循环量 234 吨/小时, 通风能力 21 万立方米/小时。施工周期约四年。

加速器大楼土建施工的技术问题与一般工业厂房相同, 但也有一些特殊问题, 例如施工时大量地下水的排水问题, 大体积混凝土墙的施工问题, 电磁屏蔽室的施工和各种要求很高的接地线的施工问题等等。特别予以重视的是主加速器基础的设计与施工。设计时按直径为 12 米的面积上均载 2500 吨进行计算, 柱型基础用 L 形钢筋与主加速器大厅的箱式底板连成一个整体, 大大增加了基础的稳定性, 设计要求基础预压后的均匀沉降与不均匀沉降之和不大于 2 毫米。在施工时发现基础下局部有流砂(约 200 立方米), 进行了彻底清除, 用素混凝土填平以后再进行基础施工。1985 年 8 月 30 日—11 月 18 日利用已经到货的磁铁铁芯对加速器基础进行预压, 第一次加载时基础面开始下沉, 当加载 1830 吨持续 50 天后, 基础面下沉量逐渐稳定, 测到的最大下沉量为 2.27 毫米, 接着逐步卸载, 下沉量回升为 1.70 毫米。重复加载后基础面二次沉降量为 0.8 毫米。为避免不均匀沉降, 要求安装磁铁时要对称加载。估计经过一年的承载, 基础的稳定性完全可以满足设计要求。

土建工程在 1984 年 11 月通过了中国科学院的鉴定验收。鉴定评语是: 主加速器楼质量总评良好, 其主体结构质量优良, 装修合格。水、暖、电、通风等单机设备安装质量良好。

二、非标准设备加工

整个组合加速系统基本上是由非标准设备构成的。最先投入生产的大型非标件是 SSC 主磁铁铁芯,接着是稳流电源、真空室、高频发射机、加速腔体、束运线等。

本所工厂承担了 SFC 磁极头、扇块、离子源、静电偏转板、真空室和 SFC 与 SSC 之间前束运线磁透镜、弯曲磁铁、束运管道的加工,其余非标件由国内近 30 个厂家分别承制。一般非标件从签订合同到交货都要一年以上的的时间,有的加工周期长达四年之久。

前几年非标准设备不能按期交货已经严重地影响了工程的进度,1987 年工程建设计划是否能够实现,也将取决于注入引出元件等非标准设备是否能够按期交货。目前正在采取措施,以保证工程建设计划的实现。

非标准设备加工和安装质量对整个加速器工程的质量有着决定性的作用,所以非标准设备加工的质量控制便成为加速器工程建设的关键环节。质量控制的具体措施包括:

1. 工艺攻关。对加工中的关键技术都专门进行了攻关,例如超低碳超厚不锈钢板的焊接,无氧铜焊条,铜管小半径弯制,真空表面处理技术等等。通过攻关确定工艺流程、操作条件、工装要求,培训操作人员。与此同时还形成了一些有推广价值的新工艺和新产品。TX-1 清洗剂就是在真空表面处理攻关过程中研制出来的,目前这种产品已逐步推广到真空设备制造,电焊条生产和机修行业中使用。

2. 原材料检验。所有比较重要的原材料在下料前都进行取样复检并严格按设计要求决定取舍。复检项目既包括一般机械性能和电性能的复检,也包括磁性能,高频导电性能和真空性能等一些特殊要求的检验。对进口材料不能迷信,我们从瑞典进口的 316L 不锈钢板,就有一部分不符合要求,向厂家进行了索赔;由美国某公司进口的真空电容与原订货技术指标不符,厂家作了赔偿。对某些非常关键的材料,如主磁铁铁芯材料,则请厂家按我们的要求,进行专门试冶炼,待各项指标都满足设计要求后才正式炼制生产。

3. 中间检验。工件在加工过程中必须随时检验,进行质量跟踪,如果发现不合格,应根据情况修复使用或作报废处理。中间检验包括施焊过程中的焊缝着色检验、焊缝完成后的 X 光拍片检查、焊缝导电率检查、工件尺寸、平直度、光洁度等所有按常规技术要求应该进行的检查。检查合格后方可进行下一道工序。SSC 磁铁铁芯的毛坯在粗加工后及时进行了深伤,对不符合要求的几块毛坯,凡可补焊回用的,都得到妥善处理,凡不能回用的立即报废,既避免了浪费,又保证了工件质量。

当工件已组合成具有某一特定功能的部件时,及时组织联合测试,以验证工件设计质量和加工质量的好坏。SSC 腔体调谐机构组装完成后,及时进行了调节精度测试,测试合格后再进行下一道工序的施工。第一扇磁铁完成后进行了一扇原型磁铁实验,通过测磁,对磁铁的设计和加工质量予以肯定后才接着加工另外三扇。

4. 施工中的总体协调。尽管在设计阶段对加速器各部件技术要求已经确定。但由于有些部件之间相关部份在设计上本来就要求在施工时进行现场配作,以及因经验不足,在施工过程中会发现设计上某些考虑不周之处需要修改。所以,施工过程中根据具体情况随时进行必要的总体协调就显得十分重要。当然,无论怎样协调和修改都必须保证加速器总体性能指标不能降低。

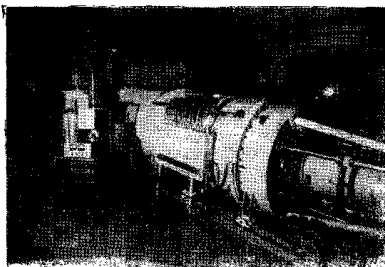


图 1.1 SFC 加速腔体与真空室对接成功

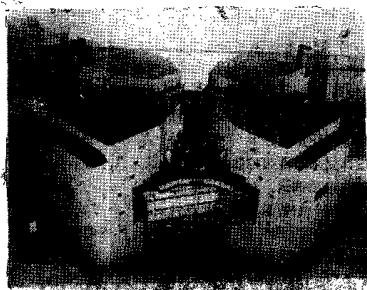


图 1.2 SSC 真空室与磁铁对接成功

为了解决主体三大件——磁铁、腔体和真空室之间的配接问题,对总体结构设计的合理性进行检验,先后进行了 SFC 和 SSC 主体试装,试装过程是比较顺利的。如 SSC 在试装过程中,进行了真空室在磁铁上 40 多个支撑部位垫片的配作和螺孔配钻,垫补线圈出线管的配焊,磁铁上主线圈、垫补线圈、固定架配作、腔体与真空室大法兰配作和 D 盒与磁铁相对位置的调整等。另外,从总体上考虑,对原设计也有一些局部的修改,譬如将四扇磁铁之间主线圈连接铜排和垫补线圈连接电缆由磁铁上部走线改到基础外围走线;腔体大门密封面增加了压条,以便在调试阶段频繁拆装过程中临时采用橡皮条密封等等。无疑,上述总体协调对保证各部件质量和主体安装一次成功是必不可少的。

5. 产品验收。一般情况下产品先在生产厂家初验,在现场安装后进行最后验收,验收后还要有一年至三年的保修期。验收中发现的质量问题,要由责任方及时解决,或以纪要形式明确责任,限期解决。为检验非标准设备质量,必须建立必要的测试手段,实际上某些特殊的、高水平的测试手段的建立是整个工程建设的重要组成部分,有些专用测试设备的研制本身又是一个相当规模的非标准项目,它们是基本建设的基本建设。已经建成的

测试设备,包括:最高磁场 21kG 的标准磁铁、各种专用的测磁支架、多探头自动测磁系统、真空检漏装置、漏率和出气率测试装置、大功率高稳定直流电源测量系统、高频电压、频率和相位测量装置、束流特性测量装置以及高精度光学测量系统等等。已建成的高精度光学测量系统的主要指标是:(i)光学坐标系统在直径 12 米空间内与理想坐标的位置误差 ≤ 0.10 毫米;(ii)水平测量误差 $\leq 0.3''$;(iii)高度测量精度 ≤ 0.10 毫米;(iv)距离测量精度 0.05—1.0 毫米;(v)角度测量精度 $5''$ — $10''$ 。其他测试手段的情况,多数已有专门文章介绍,不再烦述。这些测试手段的建成是工程建设中的一批重要成果,它们不仅满足了工程施工的需要,而且还可以为有关项目提供技术服务。

目前已经到货的非标设备绝大部分已达到了设计指标,而且有相当一部分质量优良,有些设备或设备的某些性能超过了设计要求。个别需要返修或进一步调试提高的设备,将在 1987 年内得到解决。

三、各系统施工情况

运转 20 余年的 Y-150 经典回旋加速器于 1984 年 2 月关闭,随后装上了新加工的 $\phi 1.7$ 米磁极头、螺旋形扇片、可调中心塞柱和测磁支架,完成了不带垫补线圈的测磁,修改了中心铁环和外铁环。之后装上同轴线圈和谷线圈,进行了等时场垫补与测量。为了消除测量系统误差,又用单探头进行了最后一轮测磁,测磁数据已经处理完毕,测磁精度为万分之一量级,主电源稳定度好于 $5 \times 10^{-3}/8$ 小时,测磁结果满意;磁场的一次谐波小于 5 高斯,达到了设计要求。高频腔体于 1985 年底交货,与原有发射机进行了初步联调后,即和真空室对接作最后调试。对接后真空度达 10^{-6} 托^{*}量级,冷态下测得的腔体频率范围为 5.5—18.3 兆赫, Q 值也都满足了设计要求。经过较长时间的 D 盒锻炼和假 D、假极等的修整,在 1986 年底 PIG 离子源起弧开始进行内靶调束。偏转引出系统正在进行最后的真空检漏。预计 1987 年上半年可引出束流。

SSC 真空系统。进口的 $\phi 800$ 低温泵和抽速 3500 升/秒的涡轮分子泵于 1986 年初到货。容积约 100 立方米的大型真空室现场完成拼焊和机加工之后于 1986 年 8 月正式吊装就位(图 1.3)。启动 4 台 $\phi 800$ 低温泵,经 120 小时抽空,真空室内真空度达 7.5×10^{-4} 帕,测到系统总漏率为 3×10^{-4} 帕·立方米/秒,真空室气载为 2.1×10^{-3} 帕·立方米/秒。真空室一次试抽成功,证明 SSC 真空系统的设计是好的,真空室的加工和排气系统的安装质量也是好的。SSC 真空系统是工程最先建成并经过运行考验的系统。

SSC 高频系统。两台 120 千瓦高频发射机已先后在现场利用假负载调试完毕并通过验收。达到的指标是:工作频段 6.5—14 兆赫,输出功率(在 6.5;8.64 和 14 兆赫下测试)为 120 千瓦,输出功率连续可调,输出交流声、噪声,高频机整机相位漂移,电压稳定值和机柜屏蔽等各项指标均满足设计要求。一台腔体已在现场安装好并与发射机进行了第一轮联调(图 1.4)。在 8.64 兆赫频率下将高频电压(连续波)锻炼到设计指标,结果基本满足设计要求,但在高频端和低频端腔-机匹配不佳,还需要对耦合环进行某些实验和修改。第二轮联调将安排在 1987 年底进行。SSC 的两个高频相位稳定机柜利用等效负载

* 1 托=133.322 帕

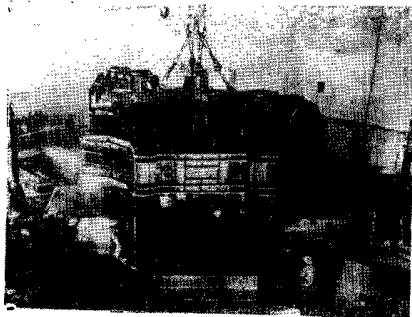


图 1.3 SSC 真空室吊装就位



图 1.4 SSC 高频腔-机联调

进行了验收,其相控环干扰抑制度在 30—3000 赫频段内,除 500 赫时低于设计指标 1 分贝之外,其余均满足设计要求。这两台机柜的输出讯号谐波杂波抑制度和 E-APC 环的慢漂移控制范围,相位控制范围,输出信号幅度稳定等也都得到了满意的结果。频率微调的电器部分,在腔体上进行了实地测试,通过了验收。聚束器的腔体、发射机、相稳柜都在加工之中,预计 1987 年上半年到货。

SSC 磁场系统。由于主线圈和垫补线圈交货严重拖期,只好把磁场测量安排在真空系统调试之后进行。在长达数月乃至一年的测磁期间,如何保持真空室内部的清洁是一个棘手的问题,但带着真空室测磁,数据会更加符合实际情况。至 1986 年底磁铁铁芯、线圈和测磁支架已基本安装完毕(图 1.5),下剩的水电连接将在 1987 年初完成。磁铁安装精度的测量结果是:水平方向四对极心机械中心面与理想平面之间的偏差在 $+0.035$ 毫米— -0.035 毫米范围之内;四扇极心中心线与理想中心线的偏差为 -0.06 毫米— $+0.11$ 毫米;极心鼻端距加速器中心点的偏差为 -0.08 毫米— $+0.04$ 毫米,达到了安装的技术



图 1.5 正式安装好的 SSC 测磁支架

要求。霍耳片的老化与校正都已完成，测磁方案已经制定。磁场系统的 60 多台直流电源部已初步调试完毕，预计 1987 年一季度可以开始测磁。

束流运输线。SFC 至 SSC 束运线上弯曲磁铁和管道已完成了三分之二的加工量。对十台磁透镜的测磁结果表明，它们的场梯度的均匀度为 7‰ 左右。74° 弯曲磁铁的场均匀度（在 r 方向上）在 18 厘米范围内好于 1‰，有效长度也达到了设计要求。24 台校正磁铁电源已经调试完毕，39 台大功率稳流电源已经就位，正在通电调试（图 1.6）。剥



图 1.6 SFC 至 SSC 束运线的稳流电源

离器已经到货，1987 年初可正式安装。SSC 至实验终端的束运线技术设计已完成，加工合同已签订，按照合同将于 1988 年内全部在现场安装调试好。

SSC 注入引出系统。按最近修订的计划 11 个注入引出元件，包括 4 个偏转磁铁，4 个磁通道，两个静电偏转板和一个 BUMP 线圈将在 1987 年中全部到齐。为了不影响磁场测量，另外加工了 MSi1, MSi2, MSi3 和 MSi4 的模拟铁块，待正式元件到货后再进行正式安装，并对注入引出区进行测磁。

自控与束诊系统。中央控制计算机已确定为 VAX8350 机, 进口合同 1987 年初签订。控制系统采用分散式智能控制方式, 各分控站的大部份设备已经到货, 高频系统分控站和真空系统分控站的手动部分已经在配合分系统调试中投入使用; 各类电源的控制、注入引出元件和探针位置控制、束流信号采集等均可与分系统调试同步进行。估计在 1988 年之前, 加速器的调束和运行只能采取各分控站分别控制的方式, 高一级的全部集中控制将在 1988 年之后逐步实现。前束运线上和 SSC 本体所设置的 50 多个探针, 包括狭缝、多丝室、法拉第筒、微分探针、相位探针等都已基本到货等待现场装配和调试(图 1.7)。

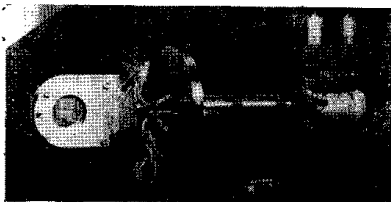


图 1.7 多丝室

辐射防护。按照国家规定, 辐射防护系统一定要与加速器的建设同时设计、施工、并投入运行。辐射屏蔽和通风系统都在土建施工时按辐射防护的设计要求建成并投入了使用。已经在加速器大楼周围建立了四个固定的环境监测站从 1986 年下半年开始记录监测点的 γ 和 n 的本底情况; 已经开展了十多年的环境植物、土壤、水和放射性气溶胶的取样监测仍在继续进行。“控制区”内共设 22 个剂量监测点, γ -(电离室) n -(BF₃ 管)正在加工, 估计 1987 年上半年可以交货, 剂量数据将通过 D. D. L 系统送到中控室, 以便及时了解起剂量情况。

1987 年的工程重点将是 SSC 磁场测量和 SFC 至 SSC 束运线的安装与调束, 为 1988 年加速器系统的总调束创造条件。

1. Construction Progress of HIRFL

Zhang Enhou Wei Baowen Ma Shouwu Bai Guoliang
Qiao Qingwen Ye Feng

Abstract

The brief history of HIRFL is recalled in this paper. The construction of the building for SSC was started in 1980. Since 1981 the sector magnets for SSC have been manufactured. After the effort in the several years, the building for SSC was completed in 1984. The main parts of the components of SSC have been finished by the end of 1986. A 100 M³ monolithic vacuum chamber was successfully put on the lower yokes of the sector magnets of SSC in March of 1986. Then the main coils, trim coils and RF cavities were assembled according to their designed positions. The first pumping of the vacuum system has been completed smoothly in September of 1986. Two 120 kW RF amplifiers have passed examination in situ. The south cavity was excited up to the rated 130 kV dec voltage at 8.64 MHz in December of 1986. The components of beam line from SFC to SSC have been manufactured by our own workshop.

2. HIRFL 调束与 SSC 参数预置

魏宝文 乔庆文

摘 要

给出了 HIRFL 调束的初步方案及 SSC 参数预置和几个调束程序的基本思想。最后给出了 SSC 参数预置的流程图。

一、HIRFL 调束初步方案

鉴于在开始调束时 HIRFL 的计算机控制系统尚处于初级阶段, 不具各闭环控制和优化控制功能, 调束将采用如下的方法:

1. 各子系统的物理指标与技术参数由中控室下达;
2. 根据中控室的指令, 各子系统对其设备的电磁和机械参数进行计算并预置;
3. 各子系统负责设备的开、停、数据获取、数据处理和安全联锁, 并根据中控室的指令, 对其设备的运行状态进行修改;
4. 跨系统的安全联锁和跨系统的数据处理(离线)由中控室负责。

为了满足以上调束需要, HIRFL 的初级控制系统具有以下的特点:

1. HIRFL 共设有注入器(SFC)、前束运线(L_1)、注入引出(IE)、磁场(M)、高频(R)、真空(V)和束流诊断(D)等7个分控站。分控站具有智能作用, 有自己的控制程序和数据处理程序;
2. 中控室除了水、通风、电常规控制、放射性剂量监测、安全联锁、触摸板和前端计算机之外, 尚备有离线处理计算机, 有程序库和数据库;
3. 中控室同各分控站之间备有传送数据和指令信息的通道;
4. 各注入引出元件前装有束流测量狭缝, 引出静电偏转板前装有引出探针, 沿磁铁扇中线装有4个径向探针用来测量束流分布和加速轨道形状, 沿一个谷中线装有15个中心相位探针用来优化等时场。

所以, HIRFL 的调束过程可初步设想如下:

1. 选定加速粒子和引出能量(A, E_{ex});
2. 用本文发展的程序计算下达各子系统的技术参数和物理指标;
3. SFC 调束——给出 SFC 引出束流的种类、电荷(q_i)、强度(I)、能量(E)、能散($\Delta E/E$)和发射度(ϵ);
4. L_1 调束——给出满足 SSC 要求的注入束流, 包括束流种类、电荷(q_i 经过剥离)、强度、能散(经过聚束)和发射度;
5. 注入系统调束——调节注入元件的几何位置(对所有磁元件来说, 仅在第一次调束