

强流重离子加速器装置 2020 年年度报告

一、工程简介

强流重离子加速器装置（High Intensity heavy-ion Accelerator Facility，简称 HIAF）是国家“十二五”重大科技基础设施建设内容之一。项目选址广东省惠州市，建设周期 7 年，总投资约 23 亿元，由项目建设法人单位—中国科学院近代物理研究所负责建设，项目主管部门为中国科学院。



图 1.1 HIAF 装置总体布局图

强流重离子加速器装置将建设一台具有国际领先水平的下一代强流重离子加速器装置，具备产生极端远离稳定线核素的能力，可提供国际上峰值流强最高的低能重离子束流、最高能量达 4.25 吉电子伏每核子（GeV/u）的脉冲重离子束流和国际上测量精度最高的原子核质量测量谱仪，为鉴别新核素、扩展核素版图、研究弱束缚核结构和反应机制、特别是精确测量远离稳定线短寿命原子核质量提供国际领先的研究条件。

HIAF 项目建设内容主要包括加速器系统、实验终端系统、相关配套设施及土建工程等。加速器系统以直线加速器、同步加速器、储存环为主体，提供高流强、高能量、高品质的重离子束流，产生极端远离稳定线的放射性核素。实验终端系统围绕 HIAF 可提供的束流布局，为核物理、原子物理、核天体物理基础科学研究及材料、生物等应用技术研究提供国际领先的实验平台。

二、建设进展

2020 年是 HIAF 工程开工建设第二年，核心关键技术取得全面突破，样机研制进入测试和收尾阶段；六大工程重点专题已完成方案设计及优化，部分关键硬件开始样机加工及测试；各系统常规技术均已完成工艺方案设计的深化及优化，进入方案评审及首台套设备的采购加工阶段；土建完成 BIM 建模、施工图设计及土建施工招标，全面开始现场施工。

（一）核心关键技术

2020 年，核心关键技术取得全面突破，样机研制进入测试和收尾阶段。完成国际首台**超导离子源 Nb₃Sn 冷体半长度样机**的研制并成功测试，首次完成高电荷态 ECR 等离子体 45 GHz 高功率耦合匹配并产生强流高电荷态离子束，采用创新的微流道弧腔冷却技术解决了高功率密度等离子体弧腔冷却问题，利用先进的高温感应炉技术刷新了强流高电荷态铀离子束流强世界记录。**全储能快循环脉冲电源样机**研制取得阶段性重要进展，攻克了矢量整流、非对称 H 桥级联多电平高低压切换控制、大功率多变换器模块串并联、高性能全数字控制等一系列关键技术，实现了电源样机 5100A 脉冲输出，电流上升速率达 52000A/s，超过 38000A/s 设计指标；由此在国际上次首次实现了同步加速器中非谐振电源变的前励全储能工作方式验证，使得大型重离子加速器磁场上升速度达 12T/s、运行周期从几十秒缩短到 300ms 成为可能，从而极大提高重离子加速器运行效率。国内首台最新技术**高梯度、宽频带、快响应纳米软磁合金加载腔高频系统样机**研制过程中，搭建了国内首套软磁合金环性能测试测量评估平台，并联合企业通过材料与工艺的突破创新，建成国内首条高性能大尺寸磁合金环生产线；研制成功的直径 $\phi 750\text{ mm}$ 液冷磁合金环的性能参数在 0.1~5.33 MHz 频段内全面超越目前国际性能最好的同类产品，达到国际先进水平，不仅能满足 HIAF 需求，还可服务于国内外相关装置及其它行业需求。国际首创提出的**陶瓷内衬超薄壁极高真空室样机**加工完成，采用“先放置陶瓷环后进行薄壁焊接”工艺，达到了整体真空度优于 $5 \times 10^{-10}\text{ Pa}$ 的国际先进水平；通过长期对比试验，探索出氧化锆陶瓷 Au/Ti/Cu/Ti 多层薄膜镀金技术，显著提高了膜基接合力，并解决了“动态真空效应”这一国际难题；通过二十二轮铈稳定氧化锆陶瓷高温抗老化试验，获得了铈稳定氧化锆陶瓷材料在极高真空系统中的长期烘烤稳定性的验证数据。**BRing 快脉冲二极磁铁**完成全尺寸样机加工及阶段性测试，采用全胶粘分段叠压直铁工艺，实

现了磁铁高精度的技术要求，针对线圈的斜拉支撑强力固定设计，保证了快脉冲运行下的结构稳定；搭建了点线圈、稳态长线圈及动态矩阵线圈测试系统，完成了样机的稳态磁场测试和动态测试系统标定，经过端部削斜优化后稳态磁场实现了全磁场范围宽好场区 $\pm 2.0 \times 10^{-4}$ 高均匀度，优于设计指标。放射性次级束流线 HFRS 首次采用全新的**倾斜螺线管型线圈（简称 CCT）超导磁铁技术**，研制成功的半孔径四六极组合样机已完成目标电流满载励磁测试，四极和六极线圈同时励磁一次达到设计值，由此验证了 CCT 型四六极组合磁体技术的可行性以及磁体结构和工艺的可靠性。



图 2.1 全 Nb₃Sn 超导离子源冷体 1/2 样机低温测试现场



图 2.2 全储能快循环脉冲电源整机联调现场

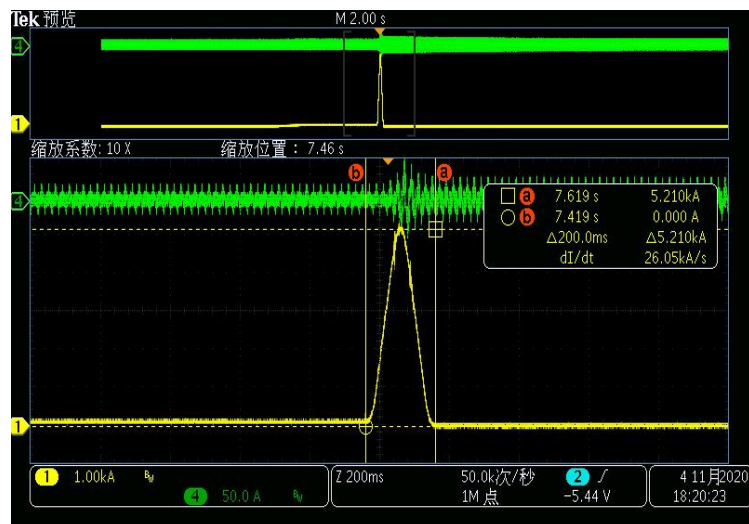


图 2.3 全储能快循环脉冲电源整机 5200A 单脉冲输出

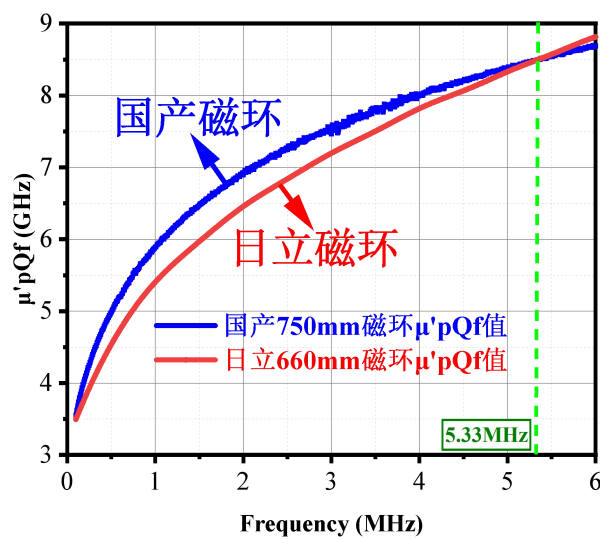


图 2.4 国产磁环与日立性能对比曲线



图 2.5 磁环生产线关键设备-等张力卧式横绕设备

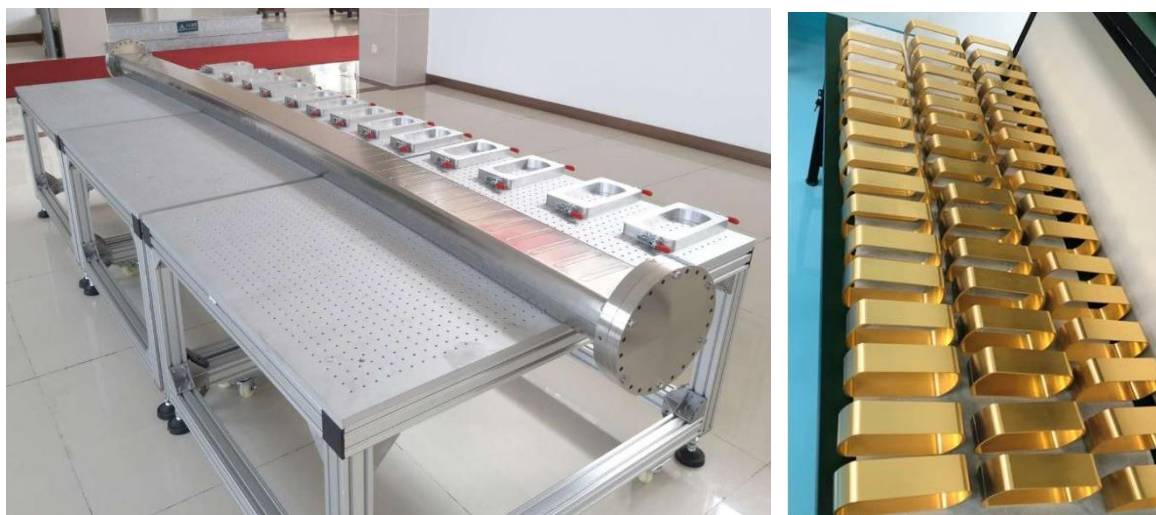


图 2.6 陶瓷内衬薄壁二极管真空室样机（左）及镀 Au/Ti/Cu/Ti 薄膜陶瓷环成品（右）



图 2.7 BRing 快脉冲二极管磁铁样机动态测试现场



图 2.8 HFRS 半孔径 CCT 四六极超导组合磁体样机低温测试现场

（二）工程重点专题

六大工程重点专题取得阶段性进展，已完成方案设计及优化，部分关键硬件开展了样机加工及测试。完全自主研发的**新一代加速器物理控制系统 PACS** 完成设计优化，在 HIRFL-CSR 上首次调试成功并上线运行，验证了 HIAF 新一代物理控制系统的先进性及可靠性。**快循环实时闭轨反馈专题**完成阻抗匹配新型 BPM 研制，开展高精度逐束团位置测量算法 FPGA 集成及测试。**机器保护专题**提出了基于束流光学的机器保护策略，设计同步联锁逻辑重构的环形连锁信号冗余架构，提供故障数据分析的后处理平台。**定时系统**完成高精度大动态延时数字电路及 TDC 技术的软硬件调试，开始与其他系统联合实验调试。**HFRS 辐射防护专题**完成非封闭局部屏蔽、插件式插拔、导轨转运及热室维修相结合的独特辐射防护方案设计及实验验证，完成 PF0 初级靶室样机的设计及招标，完成 Beam Dump 方案优化及机械设计。**低束损双向涂抹 Corner Septum**完成高均匀度多电位静电场逆向求解优化，建立多参数多方法优化模型，确定双辅助电极的极头结构，完成样机工艺设计。

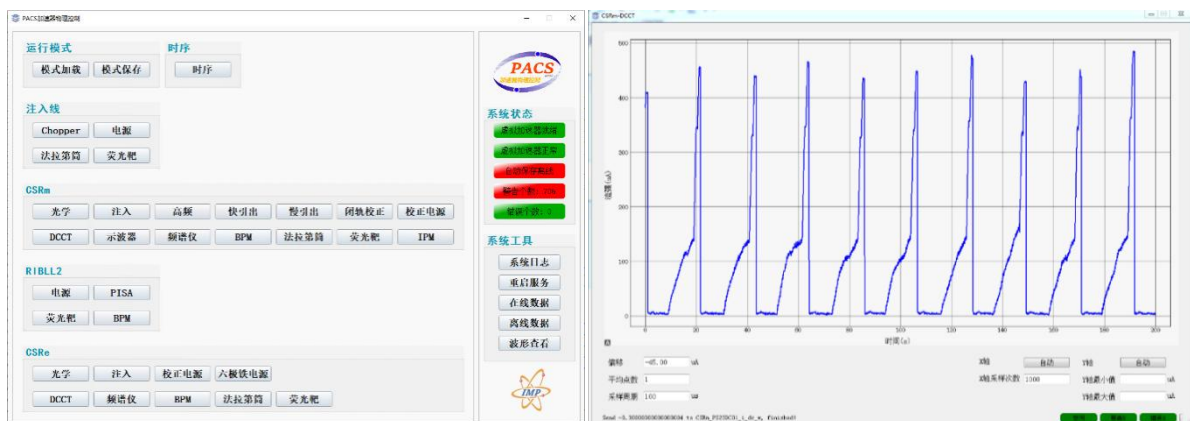


图 2.9 PACS-CSR 加速器物理控制系统主界面（左）及 CSRm DCCT 累积流强（右）

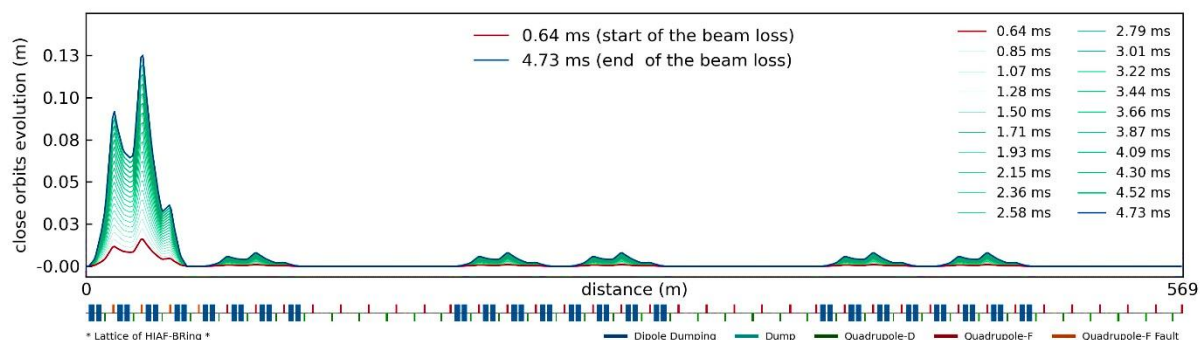


图 2.10 基于束流光学的快速泄放二极磁铁驱动的多圈 Beam dump 方案局部凸轨图

（三）常规技术设计

常规技术方案设计是整个 HIAF 加速器系统设计的重点内容，主要围绕工程方案优化、工艺水平提升、设备运行稳定和可靠等方面开展。常规技术由九个系统组成，包括前端与高功率剥离靶系统、磁铁系统、电源系统、辐射防护系统、束流反馈与机器保护系统、真空系统、控制系统、束诊系统与电子冷却系统。2020 年，根据 HIAF 项目总体 CPM 计划，各系统均已完成常规技术工艺方案设计的深化及优化，进入方案评审及首台套设备的采购加工环节，为 2021 年全面推进 HIAF 设备批量采购加工打下坚实基础。

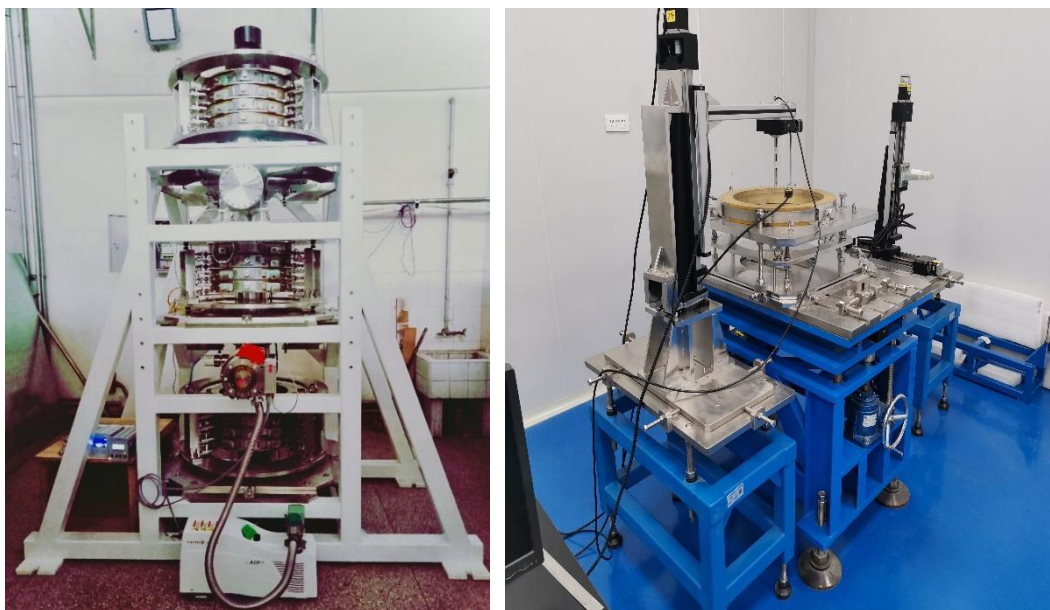


图 2.11 SRing 电子冷却高压测试平台（左）及磁轴测量平台（右）



图 2.12 基于真空陶瓷管道 Slot-ring 型 Pickup/Kicker 样机加工实物图

（四）土建及配套

在 HIAF 土建设计中引入建筑信息建模（BIM）技术，将大型机械装配体、配套系统（综合工艺管线）、建筑与 Revit 土建三维图进行合模。BIM 建模设计将建筑、加速器设备、配套设施的设计、施工、运行全周期整合于一个三维模型信息数据库中，搭建了完整的土建工艺设备模型。BIM 技术在 HIAF 的成功应用，为建筑结构与工艺设备的干涉检查、现场安装模拟、优化结构设计提供强有力的数据支撑，对提升工程质量、保证工程进度，提高装置性能、预留远期升级接口具有重要意义。

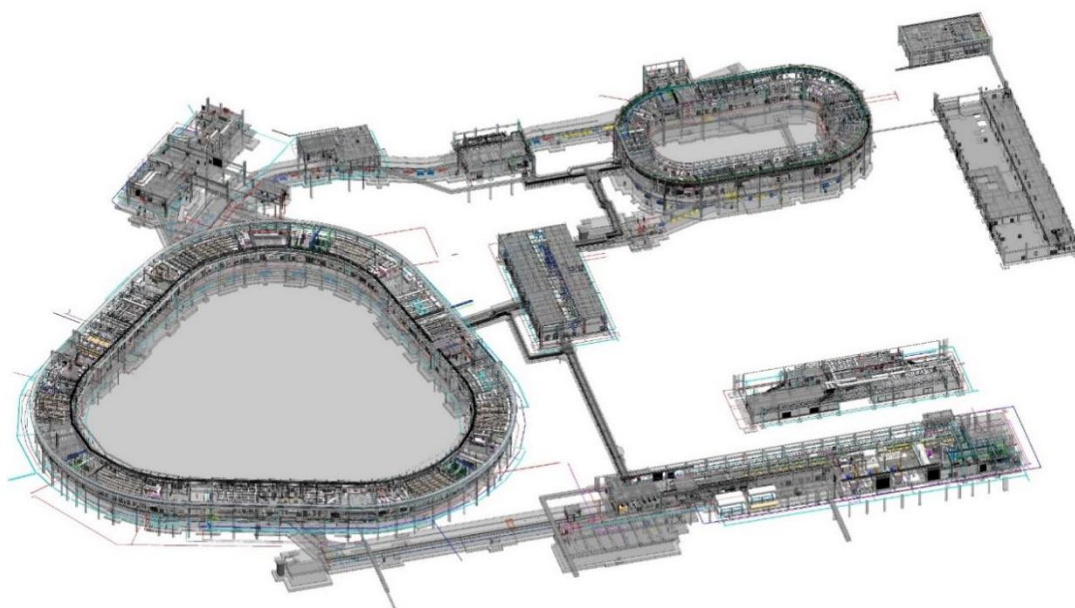


图 2.13 HIAF 园区整体建筑 BIM 模型

11 月，经过两年的紧张施工，HIAF 园区土石方工程完成了全部土石方开挖、边坡支护、防排洪、水土保持等现场施工。与此同时，项目组与设计单位共同优化细化施工图设计，现已 HIAF 国家投资全部建安工程施工及安装的招标，先行招标的运行楼已结构封顶，下一步将根据项目总体安排尽快推进加速器隧道及其余单体的施工建设。



图 2.14 HIAF 园区土建施工现场



图 2.15 HIAF 运行楼结构封顶

工艺配套方面，完成了水冷、空调、配电、接地网、电磁兼容、辐射防护等系统的初步设计，并全部通过专家评审，正在开展施工图设计。



图 2.16 HIAF 工艺空调设计线上评审

三、合作与交流

为贯彻落实国家节能减排政策，响应工信部节能环保发展规划，11月26日，近代物理研究所与南方电网综合能源股份有限公司在兰州签署战略合作协议，进一步优化HIAF及CiADS能源系统，提升能源效率。



图 3.1 近代物理研究所与南网能源公司战略合作协议签署现场

四、大事记

3 月 16 日 国家发展改革委副主任罗文率领国家复工复产调研组一行莅临 HIAF 和 CiADS 项目建设现场，调研两装置项目复工情况



图 4.1 国家发展改革委副主任罗文一行调研装置现场

6 月 24 日 HIAF 特殊消防设计通过由广东省住房和城乡建设厅组织的专家评审



图 4.2 HIAF 特殊消防设计评审现场

8 月 12 日 广东省副省长、中科院院士王曦一行调研 HIAF 及 CiADS 两大科学装置建设情况



图 4.3 HIAF 总指挥詹文龙院士向王曦副省长介绍两装置概况

9 月 5 日 惠州市委副书记、市长刘吉一行调研 HIAF 及 CiADS 两大科学装置建设进展

12 月 8 日 中科院副院长、党组成员张涛现场调研 HIAF 及 CiADS 两大科学装置建设进展

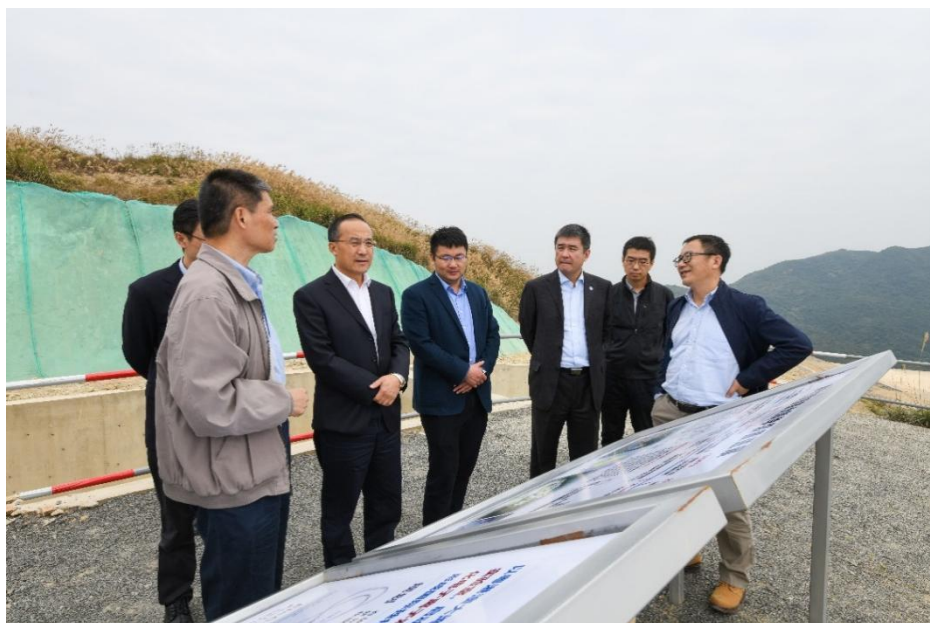


图 4.4 HIAF 总指挥詹文龙院士向张涛副院长介绍两装置概况

五、单位通讯录

单位：中国科学院近代物理研究所

地址：兰州市城关区南昌路 509 号

邮编：730000

网址：<http://hiaf.impcas.ac.cn/>

电话：0931-4969977

邮箱：hiaf.pmo@impcas.ac.cn

六、编委与责任编辑

编委：肖国青

编辑：王一涵、盛丽娜