

# 强流回旋加速器综合试验装置的研制

张天爵, 李振国, 储诚节, 邢建升, 管锋平, 钟俊晴, 纪彬, 葛涛, 殷治国, 侯世刚, 潘高峰, 姚红娟, 吕银龙, 王振辉, 吴隆成, 林军, 贾先禄, 魏素敏, 温立鹏, 王峰, 夏乐, 蔡红茹, 解怀东, 陈荣范, 张艳, 张素平, 刘庚首, 邹俭, 安世忠, 杨建俊, 毕远杰, 杨芳

中国原子能科学研究院, 北京 102413

E-mail: tjzhang@ciae.ac.cn

2010-09-05 收稿, 2010-10-28 接受

国家自然科学基金资助项目(10775185, 10805080)

**摘要** 为了实验研究强流回旋加速器的整机设计技术、主磁铁和束流诊断等关键部件的设计与加工工艺技术, 完成 100 MeV 回旋加速器的设计验证, 并为今后逐步提高流强创造试验条件, 目前在中国原子能科学研究院已建成一台 10 MeV, 430  $\mu\text{A}$  的强流负氢回旋加速器综合试验装置, 包括负氢离子源、轴向注入系统、中心区、主磁铁与主线圈、高频谐振腔、剥离引出系统等主体设备, 以及配套的高频功率源、各类高压、稳流电源、电气、诊断、控制、真空、水冷、气动、安全连锁等系统. 本文报告了该装置的设计与各系统研制以及整机束流调试结果等工作.

## 关键词

回旋加速器  
主磁铁  
高频系统  
束流诊断

强流质子束不仅在国防核技术中, 在核物理、材料科学、生命科学等多学科的基础研究中, 以及在能源、工农业、医疗健康等多个国民经济领域的应用研究中, 都有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>, 因而推动了我国强流回旋加速器若干先进技术研究进程的<sup>[4]</sup>. 自 2001 年以来, 中国原子能科学研究院研究了从强流负氢束的产生、注入、加速到剥离引出质子束的加速器理论和工程技术, 包括强聚焦直边扇形磁铁、高稳定度高频加速系统、高效率注入、引出系统、束流动力学与束流损失等若干强流回旋加速器的前沿问题. 通过对研究内容的统筹安排, 在单项技术实验研究后, 已集成为一套强流回旋加速器综合试验装置 CYCIAE-CRM. 该装置既是一台强流回旋加速器的综合试验平台, 可用于试验在建工程 100 MeV 回旋加速器的关键设计和长远的 mA 量级、MW 功率强流加速器技术研究, 也是我国第一台具有自主知识产权、可加速负氢离子到 10 MeV、剥离引出质子束的紧凑型回旋加速器, 为 PET 回旋加速器产业化和商品化打下基础. 其主要技术参数见表 1.

表 1 强流回旋加速器综合试验装置的主要技术参数

束流			离子源	
加速离子	内靶束流	引出束流	型式	弧功率
H <sup>-</sup> , 10 MeV	H <sup>-</sup> , 430 $\mu\text{A}$	质子, 230 $\mu\text{A}$	外部多峰 负氢源	2.5 kW
磁铁结构				束流引出
扇数	叶片角度	主磁场	线圈功耗	
4	50°~54°	1.75 T	6 kW	剥离引出
高频系统				控制
高频功率	D 合数	频率	D 电压	
13.5 kW	双 D, 30°	70.5 MHz	40 kV	PLC 全自动控制

## 1 10 mA 多峰负氢离子源的研制

为了获得多峰离子源高的等离子体密度, 经过多种材料、不同形状的比对, 在上百次实验的基础上, 最终确定钽的独特形状灯丝作为离子源的热灯丝. 采用围绕放电腔磁极极性交替变化的永久磁铁组合, 每两块交替磁铁间还布置了切向磁铁, 从而形成非常强的约束等离子体的多峰磁场. 改变传统的插入

放电腔导磁金属棒的方法过滤电子,在最靠近束流引出口的一层永磁铁中,用磁化方向相差  $90^\circ$  的过滤磁铁替代切向磁铁,并将形成多峰场的磁铁中  $180^\circ$  相对的两磁极极性翻转;在三引出电极系统的吸极之中镶入两对横截面为  $3\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  的永磁体,形成外场过滤电子,并校正负氢离子的引出方向。

通过上述提高多峰场强度、发展独特的外场电子磁过滤等技术,负氢离子产额和引出束流强度得到提高,离子源的平均流强高于  $10\text{ mA}$ 。建立的离子源实验台架如图 1(a),通过大量的实验调试,可长期稳定获得高于  $10\text{ mA}$  的负氢束。图 1(b)给出了束流的截面图,半高宽仅  $5\sim 7\text{ mm}$ 。

## 2 注入系统与中心区的研制

(i) 注入系统的设计和建造。为与中心区螺

旋偏转板的接收度匹配,注入线采用一个螺线管透镜和一对四极磁铁做横向聚焦。分别研究了不同中性化率对注入强流束包络的影响,为适合 CYCIAE-CRM 注入系统光学匹配计算,改进了 TRANSOPTR 程序,计算设计中发展了大调变度磁场中的螺旋型静电偏转板、主磁铁注入芯柱中杂散磁场、第一圈循环束的匹配目标等束流光学处理方法,这样准确描述复杂注入过程的强流束数值模拟,有效地提高了注入效率。轴向注入线的布局图与研制完成后的注入系统如图 2 所示。

(ii) 螺旋静电偏转板和中心区的设计。螺旋型偏转板将垂直注入的束流,在中心区磁场作用下,螺旋地注入到水平的加速器中心面上,注入过程中电场力始终保持与中心粒子运动轨道垂直,维持注入能量不变。偏转板基本参数如表 2。

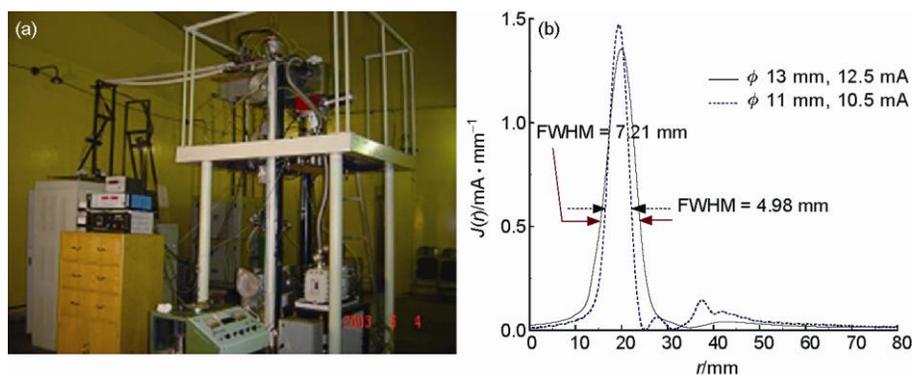


图 1 负氢离子源实验台架(a)和引出束流的截面图(b)

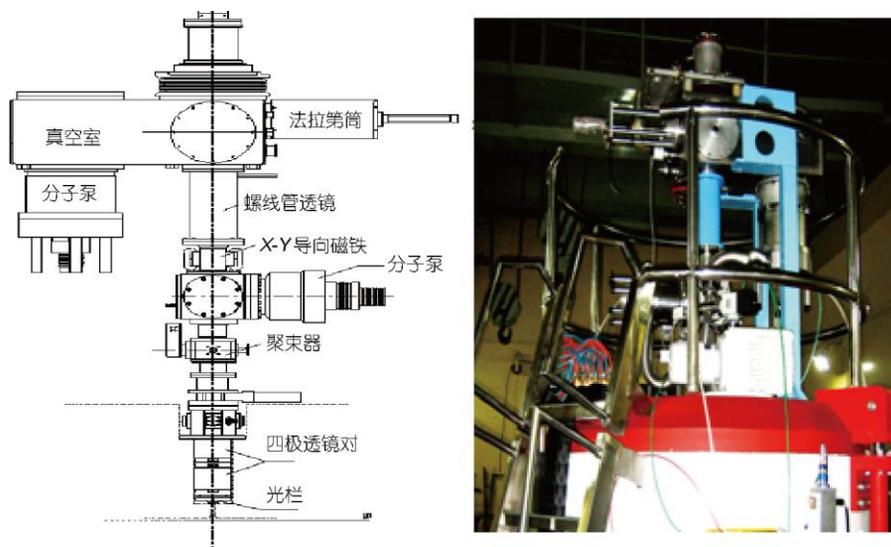


图 2 轴向注入线的布局图和实物照片

表 2 CYCIAE-CRM 偏转板的基本参数表

注入能量	电极高度 $h$	电偏转半径 $A$	倾斜参数 $k'$	电极间隙	电极宽度	电压	入口旋转角度
30 keV	31 mm	32.06 mm	0	8 mm	16 mm	$\pm 7.46$ kV	$260^\circ$

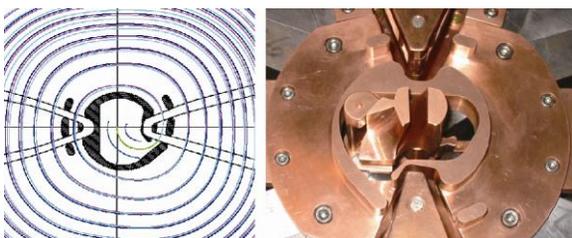
在设计中心区时, 我们研究发展了从机械设计的 AUTOCAD 图纸到物理设计的电极数字化离散网格的自动转换等技术, 深入研究了中心区狭小空间内复杂电极边界形成的高频场、螺旋形静电偏转板的高压电场、大调变度的静态磁场等多物理场耦合的束流动力学问题, 实现了 CYCIAE-CRM 中心区高频接收度高达  $40^\circ$ , 良好对中的轨道跟踪结果和中心区及偏转板的照片见图 3.

(iii) 偏转板和中心区的加工和安装. 根据偏转板的中心轨道和电极四条边界的数据及电极高度等, 开发了从物理设计到数控加工的专用程序, 从而解决了复杂非标部件螺旋静电偏转板的加工技术难题. 中心区曲面电极结构由多轴联动加工完成, 由于中心区上下两个法兰要求平行度小于  $0.01$  mm, 法兰平面采用研磨加工方法. 中心区地电极与高频 D 板头部的电极间隙要求严格, 在安装过程中, 制作了专用的“电极间隙通止规”, 将电极间隙精度控制在  $\pm 0.05$  mm<sup>[5]</sup>.

### 3 束流损失研究

由于负氢离子的最外层电子的结合能非常低, 只有  $0.755$  eV, 所以在负氢回旋加速器中存在多种束流损失. 最主要的两种是由于洛仑兹力和真空中的残余气体引起的剥离损失.

加速器运行时, 剥离损失的束流将轰击真空室并出射中子和  $\gamma$ , 产生很高的辐射剂量. 在回旋加速器中, 活化包括两部分: 一是损失的束流将真空室内壁活化, 另一个是在真空室壁上产生的级联中子的活化, 生成的放射性核素在真空室内部产生剩余剂

图 3  $40^\circ$ 相宽内的束流轨道和中心区及偏转板照片

量场. 束流损失的研究和剂量场模拟结果对真空系统提出了明确的技术要求, 并选定真空室材料以减少残余剂量.

### 4 主磁铁的研制

该装置的主磁铁设计方案为主磁铁磁极采用紧凑型结构, 选择 4 叶片磁极; 加速器的磁极采用直边扇形形状, 既满足加速器物理的要求, 也方便磁极和高频腔等部件的加工和安装; 磁极间气隙为变气隙结构, 既可减小大半径磁极的角宽度, 还可获得加速流束所需的足够大的轴向聚焦力; 加速器采用深谷区的模式, 增加磁场的调变度, 进一步提高了磁场的轴向聚焦力.

(i) 主磁铁的物理设计. 粒子所能达到的最终能量由磁刚度决定, 中心平面的磁场峰值选择为  $1.75$  T, 磁极扇形叶片角度选取为  $52^\circ$ , 则  $10$  MeV H-粒子的引出半径约为  $41$  cm; 选取磁极半径为  $45$  cm, 磁极气隙为  $2.3$  cm. 通过大量的磁场数值理论研究和束流动力学分析, 实现了直边扇形变气隙垫补边缘场以达到有效提高轴向聚焦力的目的; 通过对主磁铁各参数的协同调整, 粒子的滑相可控制在  $\pm 10^\circ$  内, 轴向自由振荡频率大于  $0.5$ , 且在大半径区避免出现 walkinshaw 共振. 基于理论计算磁场, 通过对强流负氢束在磁场下的强流束流动力学理论研究, 确定了强流束的运动轨迹和发射度等品质参数. 通过中心平面磁场  $B_r$  分量、一次谐波等对束流发射度影响的研究, 确定了主磁铁机械加工和安装的精度要求.

(ii) 主磁铁的机械设计和加工. 主磁铁的加工制造是整个强流回旋加速器综合试验装置建造的关键, 它对我国的精密加工技术是一个挑战. 如何保证 4 对磁极加工后的角度完全一致、磁极的装配完全中心对称、磁极间变气隙的控制等都是机械设计和加工的重点和难点. 因此在主磁铁的加工和制造前, 设计和加工了一套在角度及其对称性上完全符合磁极理论要求的专用模板, 通过模板控制磁极的角度和对称性均好于  $0.003^\circ$ . 发明并设计加工了一个用于紧凑型深谷区直边扇形磁极安装的专用工装, 解决了磁

极安装精度高等技术难题; 通过不断摸索研究, 制成了特殊材料的铣刀, 一把铣刀加工完 8 个磁极的表面, 仍然无超差的磨损; 这些措施有效地保证了磁极气隙高度偏差小于 0.02 mm. 通过严格控制主磁铁加工的质量, 其各项指标在最终装配后均符合设计要求.

(iii) 主磁铁磁场的测量与垫补. 磁场测量采用极坐标取点方式. 设计磁场测量仪时, 发明了定位系统和驱动系统分离的测量方式. 在角度方向, 通过角度编码器和伺服系统控制霍尔探头的角度位置. 在径向方向, 采用高精度的测量块来控制探头的径向位置. 在纵向位置上, 设计了用于调节旋转臂高度的支撑模块. 经过安装测试, 磁场测量仪在径向位置的精度为 0.1 mm, 角度位置上的精度为 5".

磁场垫补采用自主发展的连续曲面的等时性磁场精密垫补方法, 该方法垫补精密且简化了镶条在数控机床上的加工步骤, 缩短了加工时间和垫补次数. 在磁场测量和垫补过程中, 粒子的相位漂移变化和轴向聚焦力变化分别见图 4 和 5.

为了获得强流束以及好的束流品质, 通过束流动力学对束团的模拟分析对磁场测量和垫补提出具体的要求: 一次谐波在中心区和引出区小于 15 G, 在加速区一次谐波小于 5 G. 通过磁场数值研究, 我们发展了一种新的方法, 即利用不对称精密数控加工磁极两侧的镶条以减小非理想谐波场, 该方法有效地减小了不同半径位置上的一次谐波, 而且保证了磁场的等时性. 一次谐波垫补结果见图 6. 该算法的提出与实践, 有效降低了对主磁铁内部缺陷的技术要求, 为解决大型加速器磁铁工程采用铸件的技术

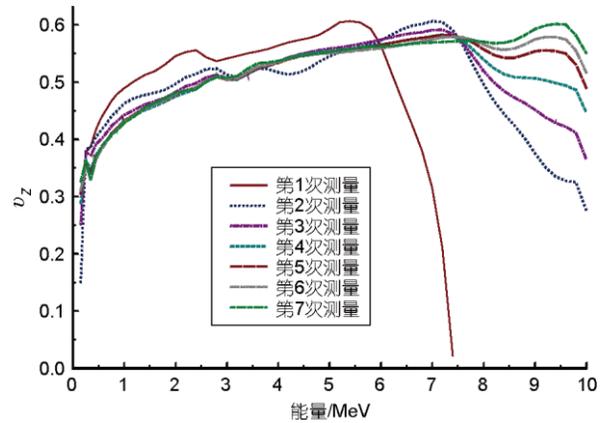


图 5 轴向聚焦力的变化图

术难题提供了实验依据.

### 5 高频系统的研制

在高频腔的设计过程中, 解决了空间限制带来的紧凑型回旋加速器高  $Q$  谐振腔的设计难题. 在调试过程中建立了“腔体-传输线-发射机”模型, 解决了加速器特有的传输线寄生振荡问题. 经两年多调试改进, 高频系统运行稳定, 其间遇到了一些问题, 如低电平系统电压环路的控制稳定性调整, 检波器灵敏度的调整, 以及电压环路控制器零点频率的修改等.

(i) 高频发射机. 高频发射机采用阴地线路, 增益高, 效率高. 末级放大器通过调整输入输出环路及末级腔内电感, 可实现工作频率调节, 覆盖 69~72 MHz 频率范围. 高频发射机的假负载输出功率为 13.9 kW.

(ii) 频率反馈闭环系统和幅度反馈闭环系统. 频率闭环反馈系统是在腔体短路端用电感取样信号装置拾取高频信号, 与从定向耦合器拾取的正向信号一起进行鉴相, 通过比较两信号的相位差按比例

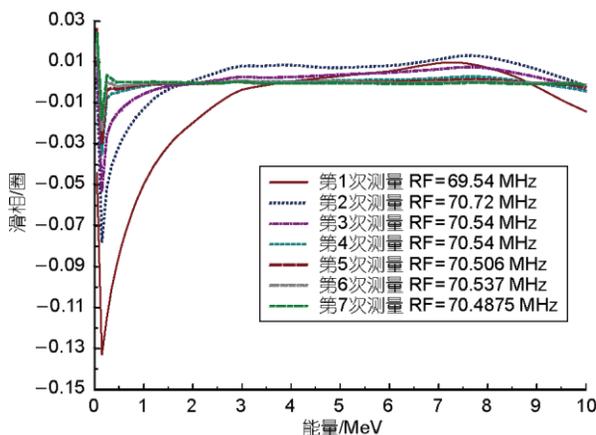


图 4 粒子的相位移动图

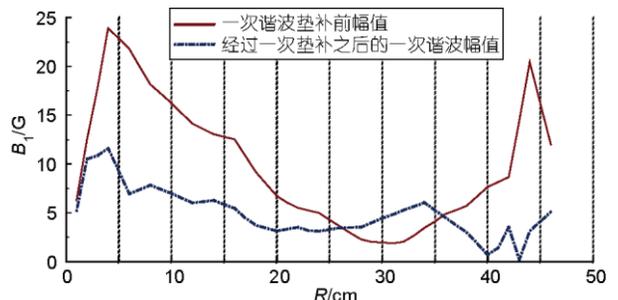


图 6 主磁场一次谐波的垫补结果

调节频率微调马达,使腔体谐振频率与信号源频率保持一致.幅度闭环反馈系统是取样信号检波后与预先设置好的基准信号进行比较,产生一个误差信号来控制衰减器输出的信号大小,以调节高频发射机的功率输出,稳定腔体D电压.

(iii) 高频聚束器.为提高加速器的注入效率,对到达静电偏转板的粒子进行纵向聚束,使大部分离子都能被捕获加速,我们设计了双间隙单漂移栅网结构的聚束器.在小束流情况下,聚束效率可以达到2.4左右.

(iv) 高频谐振腔.由于空间限制等因素,且要求能够承受高功率馈入、稳定运行、提供均匀的加速电压,考虑到高频腔体的频率范围,提出了结合类三角形腔和同轴等阻抗传输线于一体的方案,腔体结构见图7.采用三维数值模拟方法设计并制作了木模型腔,木模腔的频率测量结果与计算结果误差在3%以内.根据木模腔测试结果,优化高频腔各参数,加工实际应用的高频腔.经测试,谐振腔的 $Q$ 值为3682,D电压分布见图8.

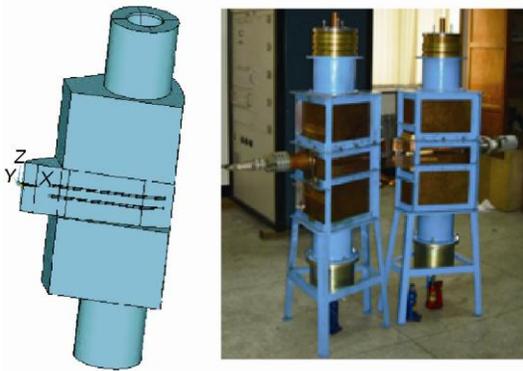


图7 腔体结构图和实物图

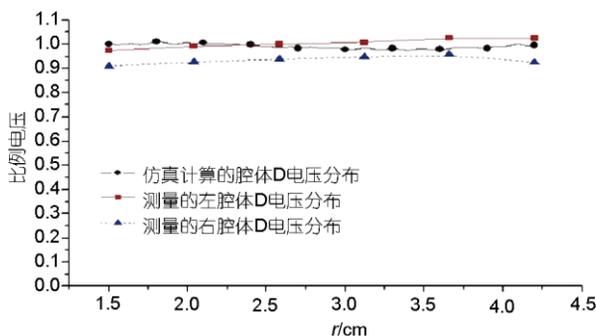


图8 D电压分布图

## 6 真空系统的研制

真空系统分为离子源、注入线真空系统和主真空系统.由束流损失研究结果提出静态真空度的要求为 $1 \times 10^{-6}$  mbar ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ).运行时离子源通入 $9 \text{ cm}^3/\text{min}$ 高纯氢,动态真空度分别为离子源真空室 $3 \times 10^{-5}$  mbar,注入管道 $1 \times 10^{-5}$  mbar,主真空室 $2 \times 10^{-6}$  mbar.

加速器主真空系统采用聚苯醚代替普通的扩散泵油,很好地解决了油污染问题,并减少了负氢离子的剥离损失.采用氟橡胶密封圈代替普通的丁氟密封圈,降低了辐射剂量对密封材料老化的影响,延长了密封圈在强流环境中的使用寿命.所有元件的表面进行镀镍、抛光等处理以减少表面出气.

根据各元件的出气率、漏率和通入的氢气量,基于上述真空度要求,离子源排气泵选抽速1500 L/s的分子泵,注入管道选抽速600 L/s的分子泵,主真空室选2台抽速2400 L/s的扩散泵.设计管道形状形成差分系统以减少离子源送气对主真空的影响.

## 7 引出系统的研制

剥离引出具有引出效率高、束流损失小等优点.本系统在 $180^\circ$ 方向角下对称设置一套剥离靶系统而实现双向剥离引出,大大地提高了束流利用效率.

剥离引出系统设计为垂直插入式,提高了装置的自屏蔽和运行稳定性,其结构紧凑、控制简洁、运行可靠,适用于医用小型回旋加速器国产化.剥离靶头为3膜片可自动更换,通过控制步进电机转动角度和角度编码器反馈来更换剥离膜,由高精度编码器反馈定位剥离膜角度并控制引出束方向.

通过研究剥离效率与能量沉积、膜寿命等之间的关系,确定选用碳剥离膜,密度为 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,剥离效率为99.97%.而在载束实验中,束流的引出效率为99.87%.

## 8 束流诊断系统的研制

综合试验装置的束流诊断系统可以分为3个部分:注入线部分、回旋加速器内部和引出区部分.

(i) 注入线诊断设备. (1) 法拉第筒.特殊设计的法拉第筒除了用来测量注入束流大小以外,还可测量束流径向分布、离子源出口的束流发射度.其基本结构为狭缝-方筒状.法拉第筒收集的束流信号

经过电流-电压转换器,转换为电压信号输出.采用永磁铁抑制收集的电子以提高对负氢离子束的测量精度.(2)直流束流无拦截测量仪.成功研制了DCCT系统,并完成了测试实验,可精确测量0~10 mA直流束流流强,灵敏度达到0.4%,可以在加速器运行状态下无阻拦、实时、动态地监测束流的强度.(3)双丝扫描系统和发射度测量仪.为直接测量高能、强流束的束流截面,我们研制了一套双丝扫描系统,其中双金属丝采用耐高温材料、90°交叉垂直、相互绝缘安装,双丝的束流信号线分别独立引出.对发射度测量仪进行了改进,采用多缝单丝法来测量发射度,以适应强流负氢束的特殊要求.

(ii)加速器内部的束流监测.径向插入靶主要用来测量束流的径向截面和轴向截面,采用阻拦式测量方式.径向插入靶采用五指结构,靶头由5个分离的探头组成.径向靶靶头的位置通过步进电机和电位器来控制,精度达到0.1 mm.径向插入靶的安装图及头部结构见图9.

束流相位靶由多组分离的电容板组成,以解决微弱高频信号拾取与处理的技术问题,采用对称安装,径向等间距排布在谷区对称面上(图10),通过测量束流在各相位靶上感应的相位信号,判断不同半径上实际磁场与等时性磁场的偏差.

(iii)引出区的束流监测.综合试验装置引出质

子束流功率大于5 kW,在设计法拉第筒头部时需重点考虑功率密度分布和水冷散热问题.图11为法拉第筒头部,法拉第筒内部结构采用三级锥形角的锥形结构.绝大部分束流将进入第二级和第三级部分区域,通过增大锥面倾斜度,有利于增大束流的接收面积,改善散热效率,避免局部功率密度过高.

## 9 控制系统的研制

控制系统设计中,结合工程实际和装置设备布置,在实现基本遥控功能的同时,着力提高系统的易用性和功能集成,优化控制流程,以运行人员为目标用户,以简化操作步骤、高稳定性为设计思想.

在智能化方面,为达到强流回旋加速器的低束流损失和高稳定性,加速器主磁场、高频系统和剥离引出系统都采用了闭环调节.为保证加速器各器元件的安全运行,控制系统可以在瞬间切断射频激励,停止加速器供束,封锁偏转板高压、插入注入线法拉第筒等构成多重安全连锁.

在硬件设计上,通过对PLC的编程实现加速器设备的联锁和监测功能,计算机通过PLC获取各种数据,实现各种高级的控制功能,同时为操作人员提供人机界面.PLC程序采用STL作为编程语言,自上而下进行软件开发.

在通讯设计上,主控制器与上位计算机通过PROFIBUS现场总线连接,满足了设备监测与控制数据通信的需求,也为未来装置设备升级、快速数据



图9 径向插入探测靶图



图10 相位靶系统实验图

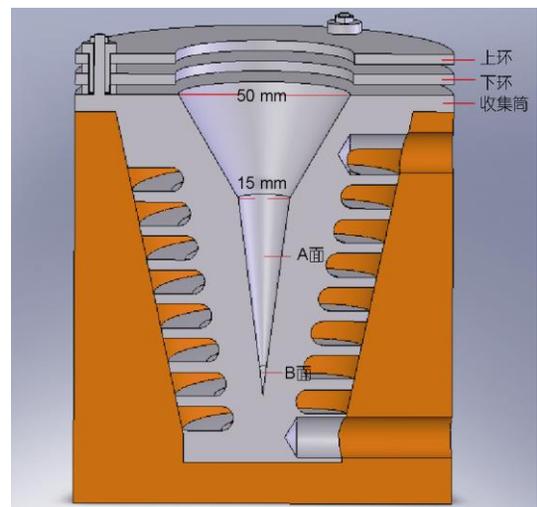


图11 法拉第筒头部结构

采集和传输等潜在需求打下硬件基础。

到引出位置的加速效率约 94.5%。

## 10 束流调试结果

经过近 3 年的束流调试, 该装置内靶束流强度达到  $430\ \mu\text{A}$ , 并通过长时间运行考验, 8 h 运行的束流稳定度好于 0.5%(图 12); 包括注入线的传输效率、偏转板的注入效率、RF 的相位俘获与加速效率的总效率达到 17.7%。在高频占空比为 64%、离子源引出流强为 2.30 mA 时, 剥离靶上的流强为  $231.14\ \mu\text{A}$ , 引出流强为  $230.85\ \mu\text{A}$ , 引出效率为 99.87%; 从中心区

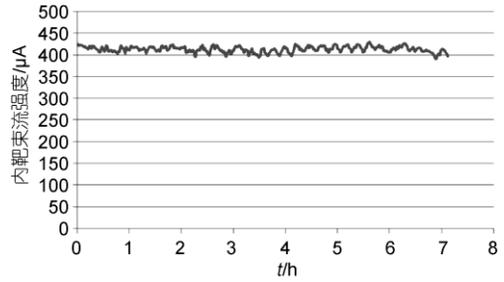


图 12 长时间运行的内靶束流强度

## 参考文献

- 1 Cooper N G. LANSCE into the Future. LA-UR-06-0515, LANL, 2006
- 2 Seidel M. Production of a 1.3 MW proton beam at PSI. In: Proceedings of 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto, 2010, TUYRA03
- 3 Kubota K. From tumor biology to clinical PET: A review of positron emission tomography (PET) in oncology. Ann Nuclear Med, 2001, 15: 471—486
- 4 张天爵, 樊明武, 李振国, 等. 强流回旋加速器技术的研究进展. 科学通报, 2009, 54: 2169—2176
- 5 姚红娟. CYCIAE-100 回旋加速器轴向注入与中心区理论和实验研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2008