

文章编号: 1007-4627(2015)S1-0005-05

ADS 强流质子加速器低能传输段发射度匹配研究

武启, 贾欢, 马鸿义, 张文慧, 方兴, 杨尧, 马保华, 王辉, 孙良亭, 何源, 赵红卫

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 研制了一套强流质子源及低能传输线 (LEBT) 注入器用于 ADS 质子直线加速器。质子源产生 35 keV 强流束经过低能传输段聚焦进入射频四极 (RFQ) 入口。低能传输段不匹配是强流 RFQ 中引起束流丢失的主要原因。不同加速段的束流匹配是减少束流损失与抑制发射度增长的重要手段。束流损失导致 RFQ 电极表面受热变形而引起高频打火, 降低 RFQ 长期运行的稳定性。针对以上问题, 研究 LEBT 发射度在不同的实验条件下如何实现加速器更好的匹配。研究结果表明, LEBT 出口束流在 35 keV, 10 mA 下, 束流发射度小于 $0.2 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 当 LEBT 螺线管电流为 210 和 270 A 时, 束流在 RFQ 入口满足匹配条件。

关键词: ADS 加速器; ECR 质子源; LEBT; 发射度

中图分类号: TL501.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.S1.5

1 引言

2011 年中国科学院率先启动加速器驱动嬗变研究装置的预研项目 (China Initiative Accelerator Driven System, 简称 C-ADS)^[1-2]。2011 年 1 月 11 日的中国科学院院长办公会议审议批准“未来先进核裂变能”作为 A 类战略性先导科技专项实施。该先导专项由 ADS 嬗变系统和钍基熔盐 (TMSR) 核能系统两大部分组成。其中 ADS 嬗变系统面向我国核能发展战略需求, 针对核裂变能可持续发展中核废料安全处置这一世界性难题。ADS 的基本原理是, 首先利用加速器产生的高能质子束轰击重金属靶引起散裂反应, 然后以宽能谱的散裂中子作为外中子源驱动和维持次临界堆芯中的核嬗变反应。强流质子加速器是加速器驱动嬗变研究装置的基本组成部分, 其作用主要是用来产生强流、高功率质子束, 通过质子束轰击散裂靶产生高通量中子来维持次临界堆内持续链式反应, 从而达到嬗变核废料的目的。随着直线加速器技术的发展, 国际上有一批强流加速器装置正在立项或已经建成正在投入运行。如美国散裂中子源 SNS^[3], 中国散裂中子源 C-SNS^[4], 以色列超导加速器装置 SARAF^[5] 及中国加速器驱动嬗变系统 C-ADS^[6]。

随着超导技术的发展, 超导加速腔和超导磁体的利用, 可大幅度降低加速器的功率消耗, 提高加速器性能, 使超导加速器在经济上和技术上具有巨大的优越

性。为此, 项目选择超导直线加速器方案, 整个系统由强流质子源、低能传输线 (LEBT)、射频四极 (RFQ) 加速器系统、中能传输线、超导直线加速器、中能匹配段和高能超导直线加速器构成。LEBT 是此项目的关键之一, 其主要性能决定整个超导直线加速器的束流指标。低能传输段间不匹配是加速器减少束流损失及发射度增长的关键之一。束流损失会导致 RFQ 电极表面受热变形及引起高频打火, 大大降低了 RFQ 长期运行的稳定性。本文在离线的 2.45 GHz 强流质子源及低能传输段平台进行测试研究, 用 Allison 发射度测量装置获得低能传输段出口的发射度参数, 针对低能段不同的聚焦参数对发射度进行测试, 并与束流模拟结果进行比较, 对低能传输段与 RFQ 入口的匹配进行研究。

2 实验方法

2.1 实验装置

2.45 GHz 的强流质子源及 LEBT 实验平台布局如图 1 所示。整个实验装置主要由四部分组成: 微波馈入系统、源体、引出系统、束流传输部分及束流诊断系统。微波馈入系统由 2M210 型磁控管 (频率 2.45 GHz)、BJ-26 矩形波导激励器、环形器、电动三销钉调谐器、高压隔离器、过渡波导和微波窗组成。质子源源体由全永磁铁钨集成, 主要目的产生轴向磁场, 这样离子源体结构紧凑, 操作方便可靠, 大大降低造价及运维成

收稿日期: 2015-03-20; 修改日期: 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (91126004); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目 (11221064)

作者简介: 武启 (1983-), 男, 山西朔州人, 工程师, 硕士, 从事强流质子源及低能传输线研究; E-mail: wuq@impcas.ac.cn。

本。三电极引出系统包括不锈钢等离子体电极、抑制电极、地电极、高压电源和抑制电极电源。

低能传输段主要是将离子源引出束流高效地传输到 RFQ 加速器入口处，并实现束流的光学匹配。低能传输段主要由两组螺线管透镜、校正铁、真空室、斩波器电极及限流锥组成。其中校正铁嵌入螺线管内形成紧凑型一体化装置，这样很好地缩短了传输线长度，束流传输线结构紧凑并且减小了束流发射度增长及聚焦元件

带来的像差。

诊断系统分别由第一诊断室与第二诊断室两个组成。法拉第筒与单丝扫描仪置于第一诊断室。法拉第筒用于测试离子源引出混合束流强度。单丝用于测试束流剖面，从中得出其束流密度分布及束流包络。Allison 发射度探测器及束流阻挡器 (Beam stop) 位于第二诊断室，主要是测试束流二维相图分布及 Twiss 参数。

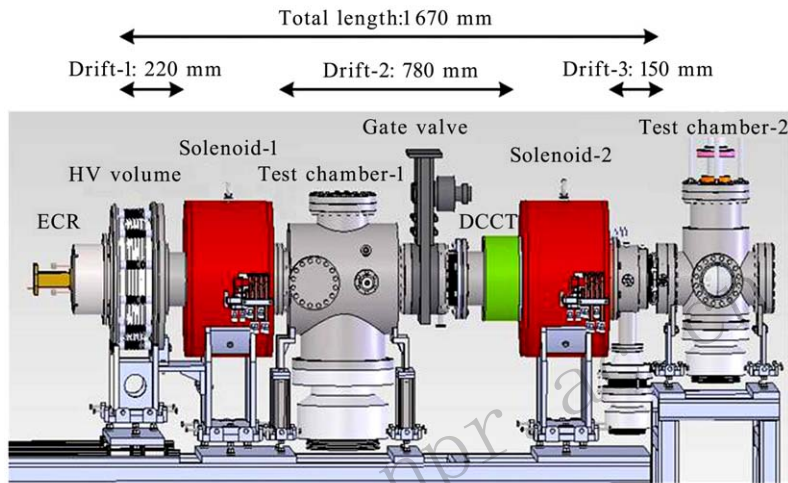


图 1 (在线彩图) 2.45 GHz ECR 质子源及 LEBT 布局图

目前已经完成 ADS 注入器 I 强流质子源研制任务，并且针对不同的 RFQ 设计，完成配套的 LEBT 的研制，已经在中国科学院高能物理研究所现场完成安装调试，如图 2 所示。

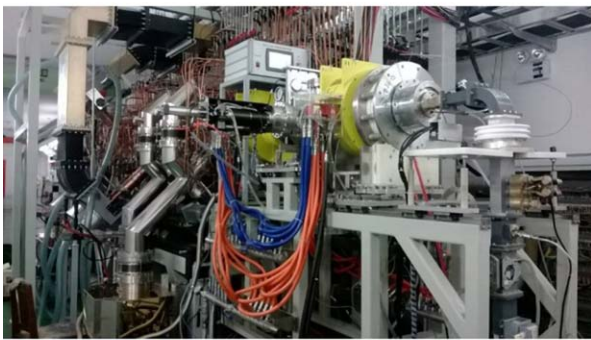


图 2 (在线彩图) 2.45 GHz ECR 质子源及 RFQ 现场布局

2.2 发射度测试方法

发射度探测器主要由前狭缝、电偏转板、后狭缝及水冷杯构成，前狭缝是位置取样，扫描束流的位置；电偏转板和后狭缝是角度取样，确定束流的角度大小；前后狭缝缝宽 0.15 mm。水冷杯接收偏转束流，可以得出某位置某角度的束流的密度。通过对偏转板进行电压扫

描(-1 kV~+1 kV)，确定不同位置不同角度的束流密度大小，就可以在相空间中确定束流的相图及密度分布，也就得到了束流的发射度。

某个位置一定角度的束流能被法拉第筒接受，必定满足

$$X' = \frac{L_{\text{eff}} \times V}{4gU}$$

这里 X' 是某个位置束流的角度值； L_{eff} 为探测器的有效长度； g 为偏转板的间距； V 为两偏转板之间的电压； U 为离子源的引出电压。

对直流束流来说，测量电子学不需要采用接收信号同步电路，这样大大简化了电子学测量的复杂程度。但是强流发射度测量中会有较高的噪声本底，数据处理方法的选择对测量的发射度会有很大影响。不同的处理方法，结果会有差异。我们采取了扣除基本本底测量方法。具体方法：一个扫描周期内，大量采样数据，取最大值作为此时的一个采样数据点，最后将采集到的数据除去测量数据中束流强度的最大值 5% 的就可以得到所需要的数据。

3 实验结果及讨论

由于测试 LEBT 出口的质子束发射度相图，所以

只能在离线的离子源测试平台进行测试研究, Alison 发射度探测器垂直安装于第二诊断室。在 RFQ 现场上线之前, 用 Alison 类型的发射度测量装置进行发射度测量。由于离子源为 2.45 GHz 的 ECR 离子源, 放电室的约束磁场是轴对称磁场, 因此离子源产生的束流应该也是轴对称的圆形束, 经过对称磁场的螺线管聚焦传输后, LEBT 出口束流为轴对称束流。因此测量垂直方向 ($Y-Y'$) 的发射度, 也就是 $X-X'$ 方向发射度。图 3 给出了 LEBT 出口测量的典型的发射度。LEBT 中束流能

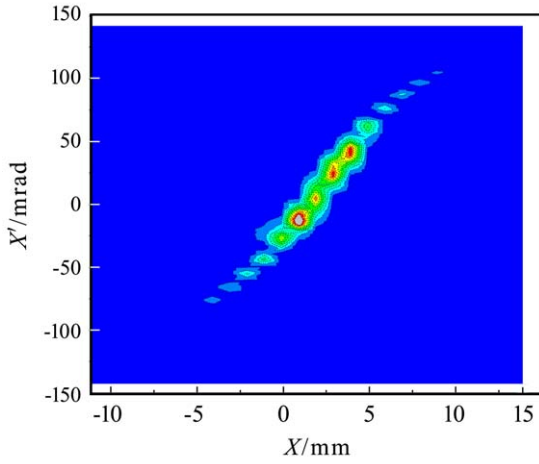


图 3 (在线彩图) LEBT 出口 10 mA/35 keV 下, 质子束发射度相图分布

量 35 keV, 连续波束流强度 10 mA, 1# 螺线管磁场强度 1566 G, 2# 螺线管磁场强度 2487 G。测试得到的束流均方根归一化发射度为 $0.126 \pi \text{mm}\cdot\text{mrad}$, twiss 参数 $\alpha = -4.2$, $\beta = 25.6 \text{ cm/rad}$ 。从图 3 中看出, 发射度相图位于第一三象限, 束流呈发散状态, 表明离子源引出束流经过双螺线管聚焦后在探测器前形成束腰。参考二维相空间椭圆方程的矩阵表述^[7-8], 可以知道包络关系与束流相椭圆系数矩阵 σ 关系,

$$X' = \sqrt{\sigma_{22}} = \sqrt{\gamma\varepsilon}, \quad (1)$$

$$X = \sqrt{\sigma_{11}} = \sqrt{\beta\varepsilon}, \quad (2)$$

$$r_{12} = r_{21} = \frac{-\alpha}{\sqrt{\beta\gamma}}, \quad (3)$$

式中: α , β , γ 为 Twiss 参数。由于是轴对称系统, 把图 3 中 twiss 参数代入上式, 可得束流包络与散角分别为 $X_{\text{RMS}} = 1.92 \text{ mm}$, $X'_{\text{RMS}} = 32.5 \text{ mrad}$, 相椭圆的倾斜程度 0.97。而从图中得知, 束流的包络半径为 7 mm, 约为 4 倍的均方根包络。按照加速器调试要求, 先从低流强开始调试, 为此测试了引出高压 35 kV, 束流 3 mA, 2 mA 的发射度。图 4(a) 给出了 LEBT 出口 3 mA 的发射度相图, 发射度大小为 $0.05 \pi \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。图 4(b) 测试 35 keV/2 mA 的发射度相图。发射度为 $0.049 \pi \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。

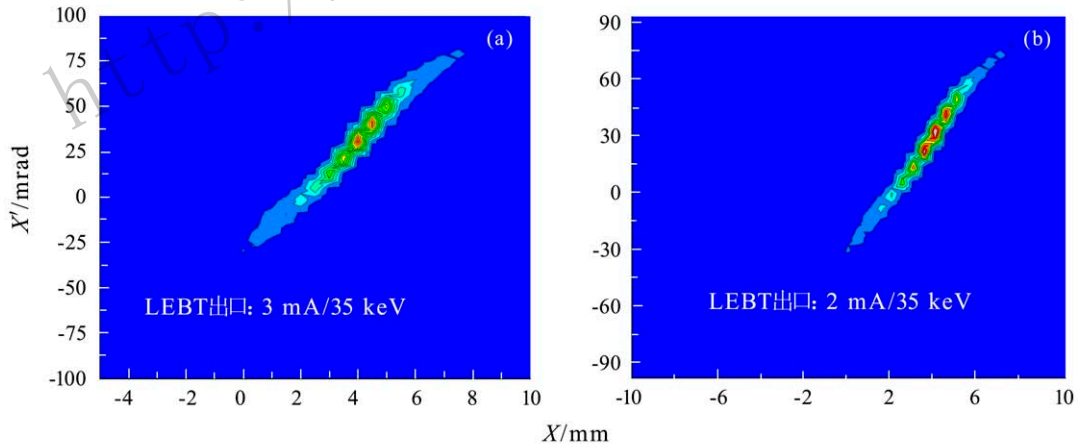


图 4 (在线彩图) LEBT 出口为 3 mA/35 keV 及 2 mA/35 keV 下, 质子束发射度相图分布

由于 RFQ 对注入质子束品质要求非常严格, 对束流发射度及形状都有确定的要求。ADS 注入器 II RFQ 入口接受度要求参数为 $\alpha = 1.21$, $\beta = 4.79 \text{ cm/rad}$, 均方根归一化发射度 $\varepsilon \leq 0.3 \pi \text{mm}\cdot\text{mrad}$, 注入器 I RFQ 入口匹配点参数为 $\alpha = 2.41$, $\beta = 7.72 \text{ cm/rad}$, 均方根归一化发射度 $\varepsilon \leq 0.2 \pi \text{mm}\cdot\text{mrad}$ ^[9]。由于 ADS 直线加速器在连续波模式下运行, 必须保证 LEBT 出口发

射度满足 RFQ 接受度要求, 否则束流会损失到 RFQ 电极表面, 引起电极打火及损坏。因此, 在 LEBT 与 RFQ 联合调束之前, 必须在离线状态下测量 RFQ 入口的具体参数, 确定 LEBT 及离子源的运行参数后进行 RFQ 在线调试。图 5 给出了引出束流 35 kV, 10 mA 不同聚焦状态下, twiss 参数 α , β 的变化规律。从前面测试的发射度大小完全满足 RFQ 入口的发射度要

求, 但是 twiss 参数是否满足, 需要进一步分析研究。第一种实验方法是在 LEBT 出口束流强度维持在 10 mA 状态下, 改变 LEBT 中聚焦螺线管的参数, 在第二诊断室进行发射度测试。经过多组选择, 最终确定在第二个螺线管加载磁场 2486 G 状态下保持不变, 改变第一个螺线管的电流参数, 获取束流发射度相关参数。如图 5 所示。第二个螺线管加载电流 270 A (2468 G), 第一个螺线管加载电流从 150 ~ 210 A 进行测试。由于 Alison 探测器距离 RFQ 入口匹配点为 9.5 cm, 当第一个螺线管在 $I_1 = 170$ A, $I_2 = 270$ A 的条件下, $\alpha = -4.35$, $\beta = 27$ cm/rad, 用矩阵方法进行简单推算得到的 $\alpha = 2.21$, $\beta = 7.74$ cm/rad, 满足了 RFQ 注入器 I 入口匹配。而当第一个螺线管在 $I_1 = 210$ A, $I_2 = 270$ A 的条件下, $\alpha = -4.84$, $\beta = 34.6$ cm/rad, 推算得到 $\alpha = 1.3$, $\beta = 4.1$ cm/rad, 满足了注入器 II RFQ 的匹配点要求。

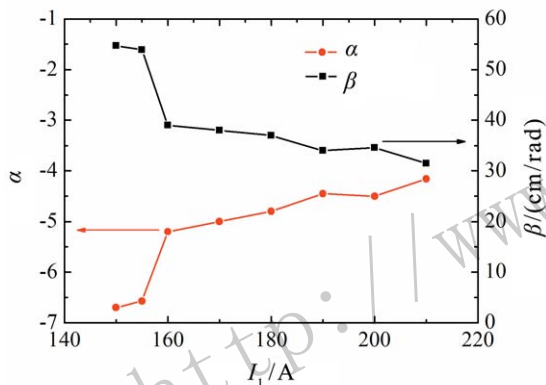


图 5 (在线彩图) 35 keV、10 mA 引出束流状态下, twiss 参数 α , β 随螺线管磁场的变化曲线

第二种方法研究 LEBT 与 RFQ 的匹配, 首先计算了注入器 II 的 RFQ 的接受度。计算 RFQ 接受度的方法为, 用 Track 程序输入 10^5 个粒子, 设定 Y 方向的发射度远大于设计值, 而另外两个方向, 即能散和 X 方向的发射度远小于设计值, 然后将所有丢失在 RFQ 内的粒子统计出来, 画出这些粒子的初始 $Y - Y'$ 相空间分布, 这些粒子中间的空白区域就是能够通过 RFQ 的粒子, 也即 RFQ 的接受度。RFQ 垂直方向的接受度为图 6 中的空白区域。而在测量 LEBT 发射度时, 我们得到了匹配状态下的螺线管参数为 $I_1 = 210$ A, $I_2 = 270$ A, 以及测量得到的发射度相图, 忽略空间电荷效应, 直接将粒子分布反推到 RFQ 入口, 得到了 RFQ 入口位置的发射度, 即图 6 中间的彩色部分。从图 6 中的获取的发射度与接受度关系, 可以得出 RFQ 入口的发射度与接受度实现了匹配。

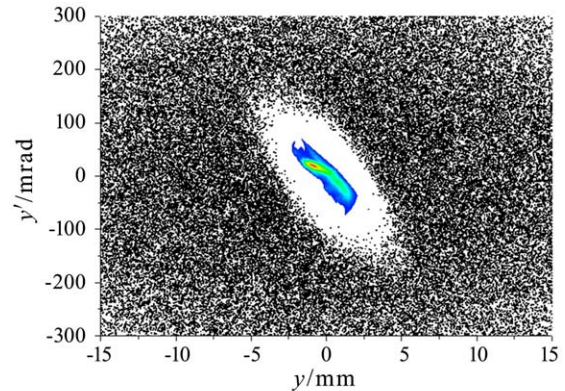


图 6 (在线彩图) RFQ 接受度与 LEBT 出口发射度相图

4 结论

本文介绍了 ADS 强流质子源及 LEBT 平台建设状态, 研究了引出束流能量在 35 keV 下, 连续波模式下 LEBT 出口的发射度相图及 twiss 参数变化。通过 Alison 探测器及电子学测试第二诊断室束流相图分布, 得出 LEBT 出口发射度远远小于 $0.2 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 并且在不同的聚焦状态下, 完全可以满足注入器 I, II 中 RFQ 入口的匹配, 保证了 RFQ 高效的传输及运行。

参考文献:

- [1] FANG Shouxi, WANG Naiyan, HE Duohui, *et al.* Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2009, **24**(6): 641. (in Chinese) (方守贤, 王乃彦, 何多慧, 等. 中国科学院院刊, 2009, **24**(6): 641.)
- [2] WANG Zhijun, HE Yuan, WANG Wangsheng. Chinese Physics C. 2013, **37**(4): 047003.
- [3] THOMAE R, GOUGH R, KELLER R, *et al.* Review of Scientific and Instruments, 2002, **73**(5): 2016.
- [4] LI Haibo, SHEN Li, ZHOU Guozhong, *et al.* Nuclear Techniques, 2015, **38**: 060402-1.
- [5] PIEL C, DUNKEL K, PEKELER M, *et al.* Beam Operation of the Saraf Light Ion Injector[C]. Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007.
- [6] ZHAN Wenlong, XU Hushan. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3): 375. (in Chinese) (詹文龙, 徐珊珊. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 375.)
- [7] XIA Huiqin, LIU Chunliang. Beam Transport Theory[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University press, 1991: 30. (in Chinese) (夏慧琴, 刘纯亮. 束流传输原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 30.)
- [8] WEI Kaiyu. Charged beam transport theory[M]. Beijing: Science Press, 1986: 74. (in Chinese) (魏开煜. 带电束流传输理论[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 74.)
- [9] WU Q, ZHANG Z M, SUN L T, *et al.* Review of Scientific and Instruments. 2014, **85**: 02A703.

Research of Emittance Matching on the Low Energy Beam Transport Line for ADS Proton LINAC

WU Qi¹⁾, JIA Huan, MA Hongyi, ZHANG Wenhui, FANG Xing, YANG Yao,
MA Baohua, WANG Hui, SUN Liangting, HE Yuan, ZHAO Hongwei

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: An intense ECR proton source and low energy beam transport (LEBT) system have been developed for the proton Linac of China Initiative Accelerator Driven Sub-Critical system (C-ADS). The proton source can deliver stable 35 keV proton beams to the entrances of the downstream Radio-Frequency Quadrupole (RFQ). The optics mismatching between the LEBT sections is the main reason that leads to the beam loss in the intense RFQ. Optimum beam matching between the different accelerator sections is one of the key points to reduce the beam losses and emittance growth. For CI-ADS driver Linac system, beam loss at continuous wave operation mode leads to thermal deformation and sparks in the RFQ, and thus has big impact to the reliability of RFQ. Therefore, this paper was mainly studied how to achieve good beam matching and reduce beam losses between LEBT and RFQ. Experiments study show that beam emittance at the LEBT exit is less than $0.2 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ when the 10 mA/35 keV was extracted from the LEBT. The emittance meets the matching requirement of the RFQ entrance when the currents of solenoids lens were sets to 210 and 270 A.

Key words: ADS accelerator; ECR proton source; LEBT; emittance

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 20 Mar. 2015; **Revised date:** 10 Aug. 2015

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(91126004); Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(11221064)

1) E-mail: wuq@impcas.ac.cn.