

文章编号: 1007-4627(2016)03-0286-05

## ADS 注入器 II 的 5 MeV 高能传输线的设计与搭建

贾欢<sup>1,2</sup>, 何源<sup>1</sup>, 原有进<sup>1</sup>, 袁辰彰<sup>1</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 韩少菲<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** ADS 先导专项的注入器 II 计划在将质子束通过一个 Cryomodule 加速到 5 MeV 后, 进行 10 mA 连续束流的调试, 以验证 ADS 低能段的强流超导直线加速器技术。为了将 50 kW 的束流功率沉积到束流垃圾站, 需要搭建一条高能束流传输线, 从超导段开始传输束流。采用两套三组合四极透镜控制束流包络及垃圾站的束流尺寸, 利用诊断真空室进行水平和垂直发射度的测量。为避免束流产生的真空管道损伤, 该传输线必须确保束流无损失地传输到垃圾站。

**关键词:** 束流传输线; 束流垃圾站; 四极磁铁; 磁场测量

**中图分类号:** TL501+.5; TL503.8; TL505      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhys-Rev.33.03.286

### 1 引言

中国 ADS 先导专项的注入器 II 由中国科学院近代物理研究所负责。注入器 II 由 35 keV 的 ECR 质子源、低能传输线、2.1 MeV 的 RFQ 加速器、中能传输线、超导段 (Cryomodule, CM)、高能传输线和束流垃圾站 (Beam Dump) 等组成<sup>[1]</sup>。为了验证 10 mA 连续束流通过超导腔的能力, 计划在第一个超导段冷质量体 (CM1) 把束流加速到 5 MeV 后, 进行连续束流的调试。由于束流功率达到了 50 kW, 超过了之前调试 RFQ 时的作为束流垃圾站的铜体法拉第桶的水冷能力 (30 kW 对应法拉第桶水温升高 50 摄氏度)<sup>[2]</sup>, 因此新的铝合金体的束流垃圾站将被采用 (设计束流功率 100 kW)。另外, 5 MeV 的质子束能量达到了能够产生中子的多条反应道的阈值<sup>[3-4]</sup>, 因此需要专门在垃圾桶外搭建能够屏蔽中子的聚乙烯墙 (PE Shielding), 以降低隧道内外的中子剂量。因此, 需要设计一条高能传输线, 实现 5 MeV 的束流参数测量, 将束流传输到垃圾站, 而且垃圾站上束斑的 RMS 尺寸可以在 10 mm 和 30 mm 之间调节。高能束线如果为简单的漂移段扩束, 是能够满足束流垃圾站的束流尺寸要求的, 如之前一直在用的移动测试平台。但注入器 II 的调试经验表明, 单独的漂移段会限制超导直线加速器的调束, 因为一方面垃圾站离超导段冷

质量体太近, 垃圾站的剂量和溅射粒子都会对冷质量体内的腔体造成负面影响; 另外一方面超导腔的高频散焦力很大, 在超导腔扫相过程中, 超导段出口的束流横向 TWISS 参数发生变化, 可能导致束流在达到垃圾站前损失。因此高能束线计划用四极磁铁将束流传输和匹配到垃圾站。

### 2 高能束线的动力学设计

高能束线计划分为二段三组合四极磁铁 (Triplet) 结构, 第一组 Triplet 的位置刚好可以聚焦超导段出口的束流, 在第一组与第二组 Triplet 之间放置诊断真空室, 测量束流的发射度, 剖面等参数。第二组 Triplet 后的束流漂移扩束到垃圾站。

5 MeV 高能束线上 1% 的束流损失对应 500 W 的功率沉积。这种程度的功率损失会产生两方面的效应, 一方面导致管道温度升高, 热胀冷缩导致密封面的破坏甚至导致管道融化; 另一方面导致长期运行后管道活化, 限制了加速器的可维护性。为了降低高能束线可能的束损, 相对于一般束流传输线设计中管道尺寸/RMS 包络约为 4~6 倍的比例, 高能束线采取了 10 倍的比例。高能束线设计和跟踪模拟用的是 Tracewin 程序, 模拟中采用的粒子数为  $1 \times 10^5$ , 流强为 10 mA。设计

收稿日期: 2015-10-21; 修改日期: 2015-12-11

基金项目: 中国科学院战略先导专项(XDA03020000); 国家自然科学基金资助项目(91426303)

作者简介: 贾欢(1986-), 男, 甘肃陇西人, 中級, 在职博士生, 从事加速器物理研究; E-mail: jiahuan@impcas.ac.cn

通信作者: 何源, E-mail: hey@impcas.ac.cn。

采用的初始 TWISS 参数和粒子分布来自超导段出口的粒子分布。图 1 为高能束线入口的粒子分布。表 1 为高能束线入口的粒子 TWISS 参数。从表 1 和图 1 可以得到超导段输出的束流为对称束, 水平与垂直方向的 twiss 参数几乎完全相同。图 2 为高能束线束流横向 RMS 包络。RMS 包络最大约为 5 mm, 相当于半孔

径 46.5 mm 的 1/9, 位于安全范围。图 3 为高能束线沿半径方向的不同功率量级的粒子的包络 (功率密度分布几率)。1 W 功率的曲线远小于真空孔径。图 4 为束流垃圾站上的剖面分布。束流尺寸约为  $\phi$  40 mm, 远小于 DUMP 的内径  $\phi$  40 mm。表 2 为高能传输线的主要参数。

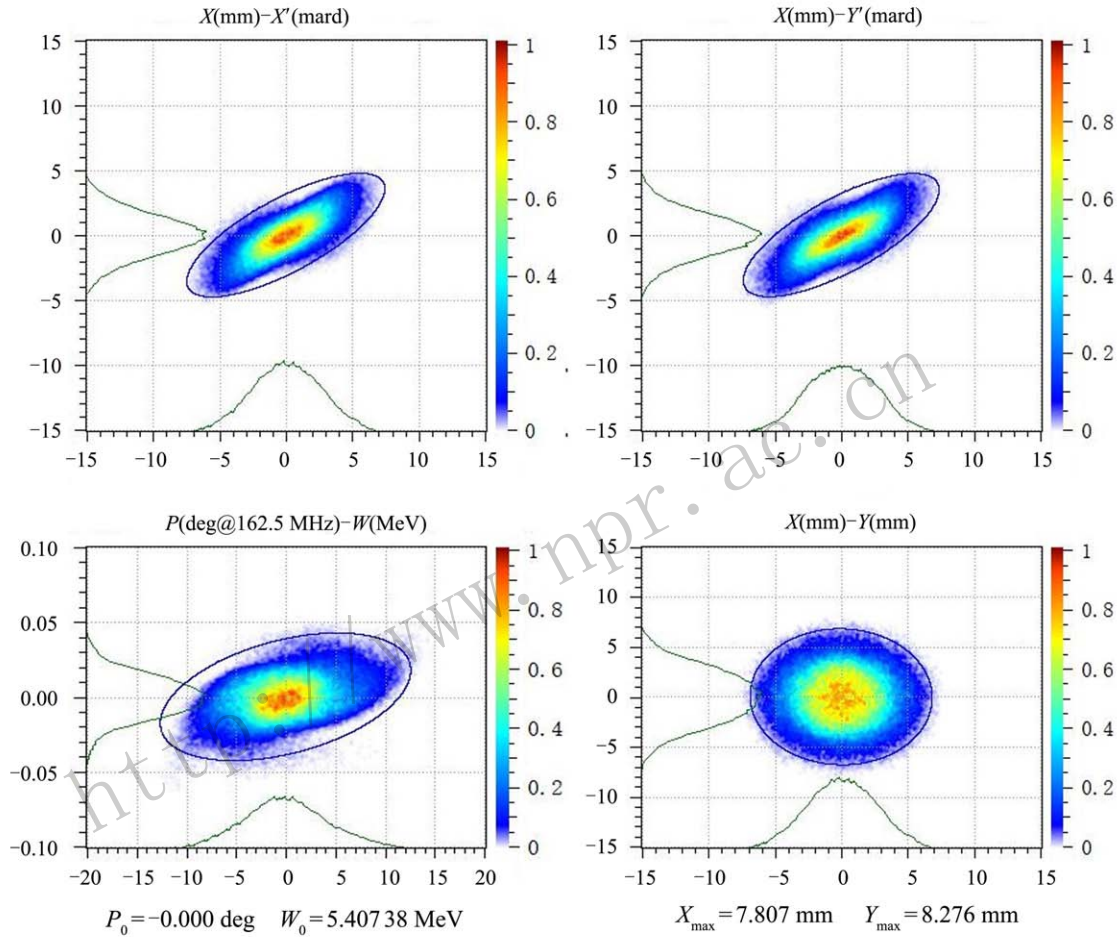


图 1 (在线彩图) 高能束线入口的粒子分布

表 1 高能束线入口的 TWISS 参数

参数	值
$\alpha_x$	-1.13
$\beta_x / (\text{m/rad})$	2.36
$\epsilon_x / (\pi \text{ mmmrad})$	0.29
$\alpha_y$	-1.09
$\beta_y / (\text{m/rad})$	2.30
$\epsilon_y / (\pi \text{ mmmrad})$	0.29
$\alpha_z$	0.46
$\beta_z / (\text{m/rad})$	1.94
$\epsilon_z / (\pi \text{ mmmrad})$	0.29

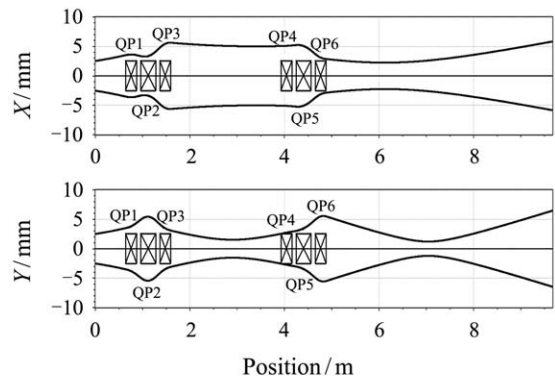


图 2 高能束线的束流横向 RMS 包络

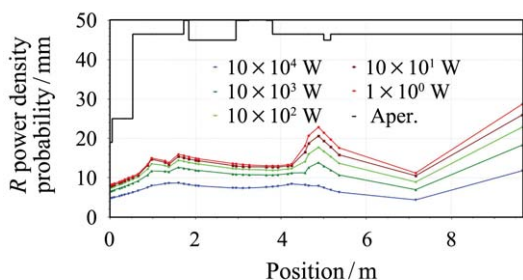


图 3 (在线彩图) 高能束线沿半径方向的不同功率量级的粒子的包络

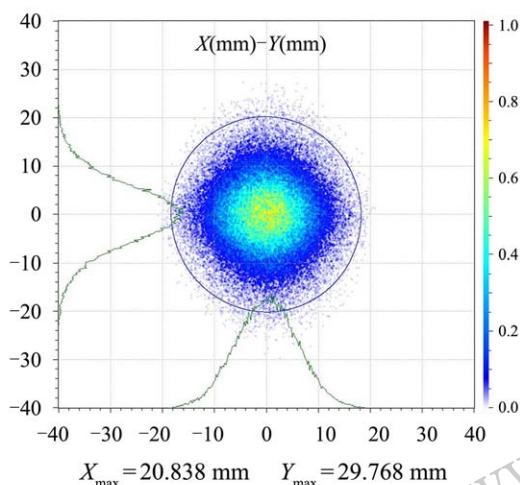


图 4 (在线彩图) 束流垃圾站上的 X-Y 剖面分布图

表 2 高能束线的主要参数

参数	值	参数	值
能量/MeV	5	孔径/mm	96
流强/mA	10	模式	连续/脉冲
长度/m	9.67	四极磁铁个数	6

### 3 误差分析及准直要求

对高能束线的误差分析主要是存在轨道误差的情况下, 考虑高能束线可能的束流损失情况。这是因为高能束线没有轨道校正磁铁, 新做的校正磁铁无法按时完成加工和测试。误差分析时用的磁铁的准直误差 RMS 值在 0.3 mm, 高能束线入口的束流偏差 RMS 值为 2 mm 和 5 mrad, 运行 50 次后给出平均束流功率损失。误差分析表明, 在 0.3 mm 的准直精度下, 没有束流损失在 高能束线。对于磁铁的准直要求, 经过妥协选择了 0.3 mm。

### 4 磁场测量

由于 6 台四极磁铁的设计和测试资料缺失, 因此需要重新测量磁场, 以便确定磁铁的梯度-电流系数和有

效长度。同时, 还需要标定四极磁铁的磁中心, 以达到 0.2 mm 的准直精度(激光跟踪仪的准直精度下限)。图 5 为 6 台四极磁铁沿轴线的磁场分布。通过四极磁铁的有效长度公式, 可以计算得到四极磁铁的有效长度。图 6 为四极磁铁的梯度/电流分布。从图 6 中可以看出高能束线用到的磁场梯度位于磁铁的线性区域。表 3 为统计后的 6 台四极磁铁的参数值。高能束线四极磁铁的最高工作梯度仅为 2.8 T/m, 远小于设计上限 15 T/m。两台长铁的有效长度分别比设计值偏差 -5.5 mm 和 -2.0 mm, 在设定加速器实际参数时会计入考虑。

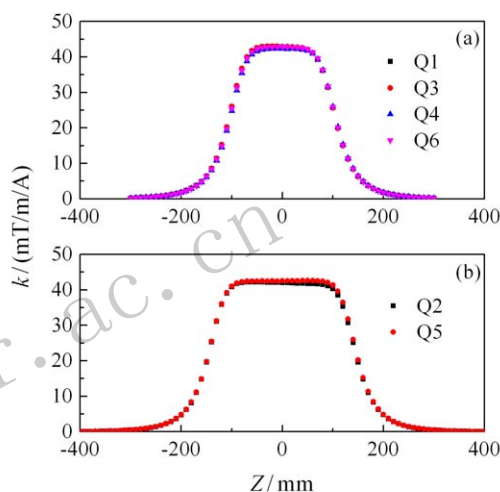


图 5 (在线彩图) 6 台四极磁铁沿轴线的梯度分布

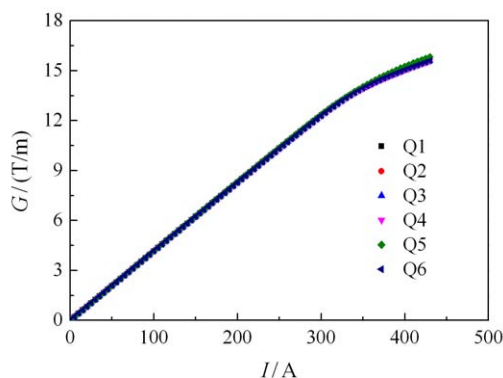


图 6 (在线彩图) 6 台四极磁铁励磁曲线

表 3 四极磁铁参数表

编号	梯度设计值 / (T/m)	有效长度 / mm	梯度-电流系数 / (T/m/A)	设计电流 / A
Q1	1.617	230.2	0.04142	39.0
Q2	-2.828	314.5	0.04141	68.3
Q3	2.256	229.8	0.04138	54.5
Q4	-0.155	229.9	0.04134	3.8
Q5	1.624	318.0	0.04152	39.1
Q6	-2.622	229.5	0.04131	63.5

## 5 高能束线元件布局

高能束线的元件布局见图7, 为了便于分别测量脉冲束及连续束的流强, 在束线中布置了1台交流电流变压器(ACCT)和1台直流电流变压器(DCCT)。高能束线中间的泵室有用于水平和垂直发射度测量的两套狭缝(Slit)和单丝(Wire)系统, 阻挡和测量束流流强的法拉第桶(FC), 以及测量束团长度的快法拉第筒(FFC)。此外, 束线中还包含两个Pill-Box腔, 用于束流能量和位置测量。束线末端设有Beam Dump和PE Shielding, 用于束流终止和辐射屏蔽。

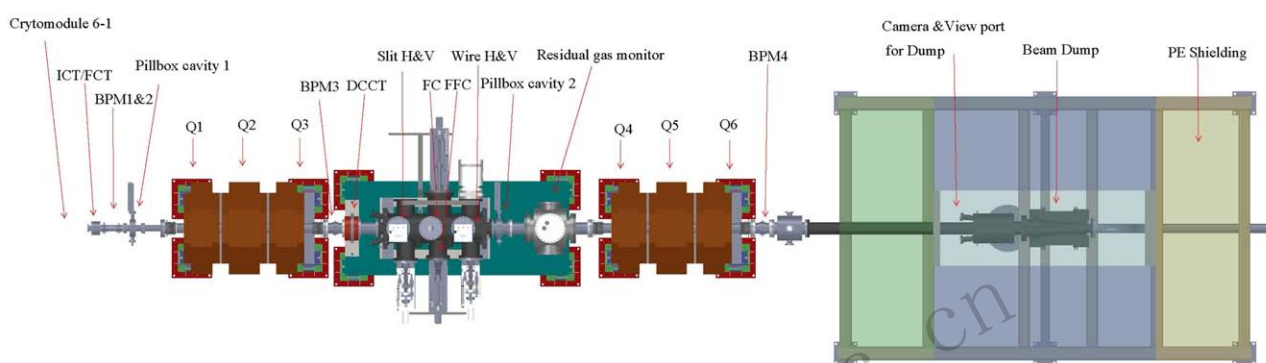


图7 (在线彩图) HEFT布局图

在束流垃圾站前的泵室安装了观察窗(View Port)和摄像头(Camera), 便于观测束流轰击到垃圾站产生的荧光, 在调束和运行时监测束斑大小。考虑到束流可能的损失及机器安全联锁保护, 在管道沿线布置了62个温度探头, 其中60个探头测量高能束线的15个位置的上下左右的温度分布, 另外2个探头测量垃圾站的入水温度。

## 6 总结

ADS 先导专项注入器II 的高能束线是为实现5 MeV, 50 kW连续束的传输到垃圾站以及增加超导段的调试能力而设计。模拟结果表明束流能够无损地传输到束流垃圾站。ADS 超导直线加速器的调试经验用在了该束线的设计和搭建中。高能束线已安装上线并

这些探针之前用在移动测试平台上, 在放到高能束线时只将泵室进行了更换。在束线入口有2个束流位置探测器(BPM), 在两套三组合透镜后各有1个束流位置探测器BPM, 这4个BPM可以测量轨道, 组合使用可以用飞行时间法测量能量。高能束线有2个Pill-Box腔可以测量连续束流的能散分布。高能束线还将测试基于带电粒子测量的剩余气体剖面探测器(Residual gas monitor)。

成功进行了5 MeV, 10 mA连续束流的调试。

## 参考文献:

- [1] WANG Zhijun, HE Yuan, LIU Yong, *et al*, Chinese Physics C, 2012, **36**(3): 256.
- [2] Lu Borui. Thermal Analysis of Fluid-Solid Coupled Heat Transfer For Beam Stop And FFC[D]. Master Thesis. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)  
(鲁博瑞. Beam Stop和FFC的耦合传热分析[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所. 2014.)
- [3] WU S C, HSIUNG G Y. Competition Effects in Proton-Induced Reaction on  $^{65}\text{Cu}$ . Chinese Journal of Physics. 1986, **24**(3): 204.
- [4] Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1972, **11**, 165.

## Design and Setup of 5 MeV HEBT Line of the CIADS Injector Scheme II

JIA Huan<sup>1,2</sup>, HE Yuan<sup>1</sup>, YUAN Youjin<sup>1</sup>, YUAN Chenzhang<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, HAN Shaofei<sup>1</sup>

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** A CW 10 mA, 5 MeV beam commissioning of CADS Injector II is planed recently to test the high power superconduction linac techniques. To transport 50 kW beam from linac to the beam dump, a high energy beam line (HEBT) line is designed and setup. Two Triplet are used to control the beam size along HEBT and at the beam dump. One diagnostics box is used for horizontal and vertical emittance measurement. To avoid damages to the vacuum pipe, beam should be transported to the beam dump without losses. The details of the HEBT design will be described in the paper.

**Key words:** HEBT; beam dump; quadrupole; field measurement

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

---

**Received date:** 21 Oct. 2015; **Revised date:** 11 Dec. 2015

**Foundation item:** Strategic Priority Research of Chinese Academy of Sciences Program(XDA03020000), National Natural Science Foundation of China (91426303)

**Corresponding author:** HE Yuan, E-mail: hey@impcas.ac.cn.