

文章编号: 1007-4627(2010)03-0280-04

# HIRFL 微束辐照装置偏转磁铁的安装准直\*

王少明, 陈文军, 杨胜利, 蔡国柱, 郭艺珍, 周光明, 满开第, 宋明涛

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 微束辐照装置是将辐照样品的束斑缩小到  $\mu\text{m}$  量级, 能够对辐照粒子进行准确定位和精确计数的实验平台, 是开展辐照材料学、辐照生物学、辐照生物医学和微加工的有力工具。 $\mu\text{m}$  量级的束流对设备的准直安装也提出了极高的要求, 对于 HIRFL 系统微束线上的二极磁铁, 由于其所所在位置的空间相当狭小, 使得设计就位时磁铁的位置及角度与地面做基准时的不同, 这给安装准直工作带来了挑战。通过引入变化的基准坐标值的办法, 有效解决了这一难题, 使全部磁铁安装误差都控制在了要求的公差范围之内。

**关键词:** HIRFL; 微束装置; 磁铁; 激光跟踪仪; 准直安装

**中图分类号:** TL      **文献标识码:** A

## 1 引言

随着核物理及相关实验对加速器束流品质的要求不断提高及加速器技术的发展, 准直测量在加速器技术中的重要作用亦日益凸显。准直的最终目的是使得真空管道中心与物理设计的束流道相重合, 但是众所周知, 相当部分的束流输运管道周围有磁铁包裹。既然如此, 那么要保证真空管道的位置精度, 必然首先要保证磁铁的位置精度。本文试图以兰州重离子研究装置(HIRFL)新建的一条束流线为例, 来说明不垂直于地面束流线上磁铁的安装准直问题。

## 2 重离子微束装置简介

重离子微束装置是开展辐照生物学和辐照材料科学研究的有力工具<sup>[1]</sup>, 在环境分析和微加工等领域也具有独特的优势和潜在的应用前景<sup>[2]</sup>。中能重离子微束装置是以 HIRFL 提供的中能和低能重离子束为基础, 在 HIRFL 实验大厅预留的分支兴建的, 束流输运线布局如图 1 所示。在 HIRFL 实验大厅的预留接口处, 用  $30^\circ$  二极磁铁(以下简称二极铁) R0B1 将束流水平导向地下室入口方向, 以三组合

四级透镜 R0Q1—R0Q3 聚焦形成物点, 采用两台  $45^\circ$  的二极铁 R0B2 和 R0B3 辅以 R0Q4 构成对称消色差系统, 在铅锤面偏转后形成垂直向下传输束流<sup>[3]</sup>。置于磁铁间的狭缝在限制束流发射角的同时又进行能量分析。在束流线末端用高梯度三组合四级透镜 R0Q5—R0Q7 强聚焦束流, 形成  $\mu\text{m}$  束。系统物距很长而像距很短, 可以得到 15:1 的像放大率。设定物狭缝宽度为  $15 \mu\text{m}$  原则上可使像宽达到  $1 \mu\text{m}$ 。微束终端共有 3 种类型的磁铁, 其中二极铁和 HIRFL 系统中同类型的磁铁物理指标和规格基本相同。采用冲片磁铁的工艺, 利用已有的冲模和

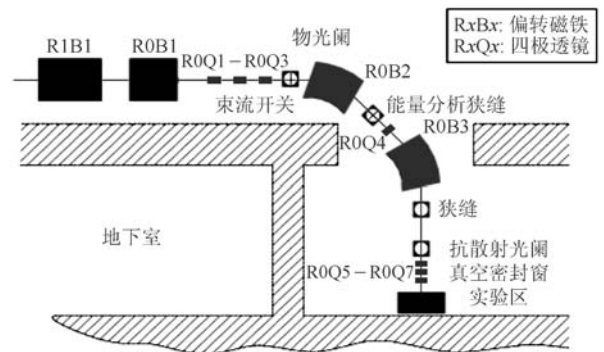


图 1 中能重离子微束辐照装置示意图

\* 收稿日期: 2010-01-19; 修改日期: 2010-04-08

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(973 计划项目)(2010CB34201)

作者简介: 王少明(1971-), 男(汉族), 甘肃天水人, 工程师, 硕士, 从事加速器测量准直研究;

E-mail: wangsm@impcas.ac.cn

叠压设备加工。定位辐照的精确度和定位辐照的准确度是微束装置的两个最主要指标<sup>[4]</sup>。然而磁铁安装位置精度,必然影响定位辐照的准确度。我们为仅以地面洞口处二极铁 R0B3 的安装准直为例来介绍本文提出的方法。

### 3 束流输运线弯曲段磁铁的几何布局

微束流线由两块二极铁 R0B2, R0B3 和一块四极透镜 R0Q4 构成。其中位于地面洞口处的二极铁 R0B3 由于其所处的特殊地形,使得安装准直相当费时费力。洞口示意图见图 2。束流通往地下室洞口形状由大小两个矩形呈上下小台阶形构成,其中下面的台阶用来作磁铁的承重点。洞口入口(上口)处大小为 1300 mm×2400 mm,出口(下口)大小为 1220 mm×2350 mm,而二极铁 R0B2, R0B3 尺寸大小为 670 mm×850 mm×1800 mm,重约 6.5 t,偏转半径为 2 m,偏转角度 45°,极面场强 1.5 T,要求安装精度为不大于 0.5 mm。加上磁铁支承调节设备也要占用一定的空间,而且调节旋钮在洞口以下约 300 mm。磁铁既大且重,安装洞口相当狭小,安装人员几乎无法容身,其测量调节的困难可想而知。

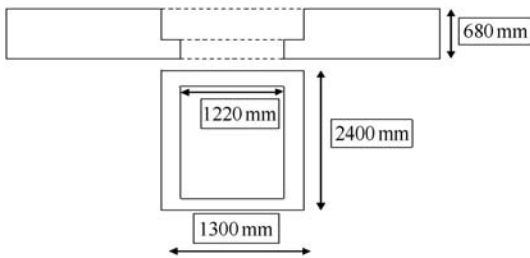


图 2 地面通往地下室的洞口

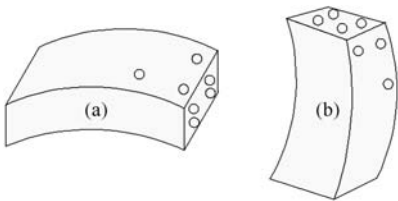


图 3 磁铁安装前后基准示意图

(a) 安装前的偏转磁铁; (b) 安装就位后的偏转磁铁。

特别值得一提的是,束流线弯曲段的几块磁铁,在上线安装前测量的基准靶标点,在上线后位置及角度均与当初测量的基准坐标发生了变化(见图 3)。这使准直工作面临新的困难,如何解决这一

安装中的难题,保证安装的精度,这是本文探讨和研究的中心内容所在。

### 4 激光跟踪仪及其软件简介

采用美国 Faro 公司生产的 SMX4500 激光跟踪仪及其配套软件 insight4.0 来安装,激光跟踪仪是一种三维坐标测量机,主要由激光发生器、光学反射镜(SMR)和控制系统(TCU)等部分组成,激光发生器发出的激光照射到光学反射镜上,激光束按原方向反射回跟踪仪,根据红外激光传播的时间和波长来计算距离。SMX4500 可以在 0—24 m×270°×120°的空间内获得高精度的测量结果,其径向测距精度为 10 μm+0.8 μm/m,横向测距精度为 18 μm+4 μm/m。具有独特的自动瞄准、绝对距离测量和实时观测等功能。配套软件 Insight 功能十分强大,它有离散点和连续扫描两种测量方式可供选择,可以构建点、线和坐标系等基本图形元素的测量,也可测量抛物面、球、双曲面和圆锥体等复杂形状的几何体,还可运用 Bundle 功能实现转站进行联系多站测量的功能。

### 5 安装准直方法

基本准直方法沿用 HIRFL 冷却储存环 HIRFL-CSR 磁铁的准直方法,详细步骤和方法见文献[5, 6]。磁铁安装前为使安装使用的坐标系统一,首先在地面及地下室恰当位置布设适当数量的控制网点(NEST 靶标点),并在地面束流线坐标系下测量其坐标。布设控制网点的位置时要考虑仪器(激光跟踪仪)通视和架设仪器时恢复坐标系方便。然后进行磁铁基准靶标点的建立及测量,结果见表 1。

表 1 磁铁基准靶标点坐标值

点号	X	Y	Z
R0B3-1	628.02	242.18	-784.15
R0B3-2	608.79	-257.09	-785.17
R0B3-3	-159.51	233.87	-740.93
R0B3-4	-158.67	-230.16	-741.87
R0B3-5	-286.16	240.11	-192.53
R0B3-6	-286.38	-216.18	-194.46
R0B3-7	-89.14	272.39	783.52

该结果是在磁铁在地面搁置时建立的。由于磁铁就位后的位形与地面搁置时的位形之间存在一个

22.5°的夹角, 这样在调节过程中, 所观测的靶标值将无法与基准测量值对应起来。由于夹角的影响, 调节量和观测值之间也产生了分量的移动, 因此有必要知道就位后的基准靶标值, 这对于 insight 来说是容易实现的。具体结果见表 2。

表 2 旋转就位后的磁铁基准靶标点坐标值

点号	X	Y	Z
R0B3-1	484.07	242.17	880.28
R0B3-2	492.38	-257.10	862.90
R0B3-3	745.52	233.87	136.16
R0B3-4	746.07	-230.16	137.29
R0B3-5	287.34	240.11	-190.72
R0B3-6	289.20	-216.19	-190.19
R0B3-7	-689.82	272.38	-382.22

表 1 和表 2 间的关系为

$$X_T = RX, \quad (1)$$

其中  $R$  表示  $3 \times 3$  的旋转矩阵,  $X$  和  $X_T$  分别为旋转前后的基准矩阵, 大小为  $n \times 3$ ,  $n$  为焊接的靶标数目。通常, 如果存在平移量, 则相应的公式应改为

$$X_T = RX + \Delta, \quad (2)$$

其中  $\Delta$  为  $3 \times 1$  的矢量。在磁铁安装时首先恢复控制网, 将坐标系转换到相应的元件坐标系, 然后将坐标系绕某轴旋转到与重力方向(即支撑方向)相重合。这一步尤为关键, 对于大多数类似束流线的设备安装, 这一步也是能否快速成功高精度安装的关键所在。再进一步转到 Insight 的实时监测窗口, 反复调节磁铁, 直到满足误差要求为止。最后根据实测结果与旋转后的靶标数据应用最小二乘法拟合, 经过 19 次迭代, 得到最终测量调节结果。

对 R0B3 的调节结果如下:

$$\Delta X = 0.392, \Delta Y = -0.088, \Delta Z = -0.407,$$

$$R_X = 0.815, R_Y = -0.303, R_Z = -0.433$$

其中  $\Delta$  为 3 个方向的平移量,  $R$  为 3 个旋转量。从调节结果可以看出, 3 个平移量偏差均小于 0.5 mm, 满足设计要求。通过对微束流线进行的一些调束实验表明, 这一结果完全满足该辐照装置的高

精度要求。

## 6 结论

对于大型加速器的建造而言, 由于空间条件的限制, 以及为了提高加速器的利用效率, 加速器各设备的布局往往不是平面结构, 而是一种复杂的空间结构布局。而这必然导致地面向上和向下束流线的存在, 甚至于斜束流线的存在。进行适当的坐标变换, 将设备基准坐标值的 3 分量之一变换到承重方向, 是解决这类设备安装准直难题的关键所在。对于其他大型高精度要求设备的安装准直也有借鉴意义。中能重离子微束辐照装置以兰州重离子加速器为基础, 提供中能重离子并兼顾低能重离子的  $\mu\text{m}$  束流。目前已经完成总体安装, 束流调试工作正在进行中。调试成功后, 将成为国内首台能够提供中能重离子微束的公共实验平台, 为我国生命科学和材料科学等诸多研究领域创造实验条件。

## 参考文献 (References):

- [1] Sheng Lina, Song Mingtao, Liu Jie, *et al.* Nuclear Physics Review, 2009, **26**(3): 215(in Chinese).  
(盛丽娜, 宋明涛, 刘杰, 等. 原子核物理评论, 2009, **26**(3): 215.)
- [2] Legge G J F. Nucl Instr and Meth, 1997, **B130**: 9.
- [3] Song Mingtao, Sheng Lina, Wang Zhiguang, *et al.* Chinese Physics C(HEP&NP), 2008, **32**(Suppl): 259(in Chinese).  
(宋明涛, 盛丽娜, 王志光, 等. Chinese Physics C(HEP & NP), 2008, **32**(增刊): 259.)
- [4] Metzger S, Fischer B E. Microelectronic Engineering, 1996, **31**: 41.
- [5] Wang Shaoming, Man Kaidi, Cai Guozhu, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(5): 797(in Chinese).  
(王少明, 满开第, 蔡国柱, 等. 强激光与离子束, 2005, **17**(5): 797.)
- [6] Cai Guozhu, Wang Shaoming, Man Kaidi, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(10): 1592(in Chinese).  
(蔡国柱, 王少明, 满开第, 等. 强激光与离子束, 2005, **17**(10): 1592.)

# Alignment of Dipole Magnet in Micro-beam Line of HIRFL<sup>\*</sup>

WANG Shao-ming<sup>1)</sup>, CHEN Wen-jun, YANG Sheng-li, CAI Guo-zhu, GUO Yi-zhen,  
ZHOU Guang-ming, MAN Kai-di, SONG Ming-tao

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

**Abstract:** Microbeam irradiation facility is a experiment platform, which can reduce the beam-spot on the irradiated sample to micrometer level, and can accurately locate and count the radioactive particles. It is a powerful research tool for the irradiation material science, irradiation biology, irradiation biomedicine and micro mechanical machining. The microbeam irradiation facility requires the precise work for installation and alignment. These conditions make magnet's change for directions and positions because the location space of dipole magnets in micro-beam line of HIRFL(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou) is very small. It is a challenge for the installatior and alignment work of magnets. It was solved by transforming coordinates of benchmarks of magnets, which controlled the error of magnet setup within error tolerance range.

**Key words:** HIRFL; micro-beam setup; magnet; laser tracker; installation and alignment

---

\* **Received date:** 19 Jan. 2010; **Revised date:** 8 Apr. 2010

\* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program of China(973 Program)(2010CB34201)

1) **E-mail:** wangsm@impcas.ac.cn