

# 上海 EBIT 装置的机械准直

陈永林 蒋迪奎 肖体乔 朱希恺 郭盘林 阎和平 王纳秀 盛树刚

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

**摘要** 采用准直望远镜对上海电子束离子阱 (EBIT) 装置进行机械准直, 制定了合理的准直方案, 设计了高精度的机械调节机构和良好的准直工艺, 并进行了试验。通过准直, 各组件的位置精度均达到设计指标, 目前上海 EBIT 可以稳定运行在高压 100keV 和束流 110mA 的条件下。

**关键词** 上海 EBIT 装置, 准直望远镜, 机械准直

**中图分类号** TB2

上海电子束离子阱 (EBIT) 装置是一台研究高电荷态离子相关物理的实验装置, 其主要组成部件包括电子枪、漂移管、超导线圈和收集器。EBIT 的基本工作原理是: 从电子枪发射出的电子束, 经电子枪和漂移管之间的高压间隙加速获得所需能量, 在超导线圈产生的强磁场压缩下获得高密度电子束, 电子束在漂移管中与中性原子或低电荷态离子逐级碰撞使离子达到高电荷态<sup>[1]</sup>, 电子束离开漂移管后减速, 最终被收集器俘获。EBIT 装置陷阱区结构如图 1 所示。

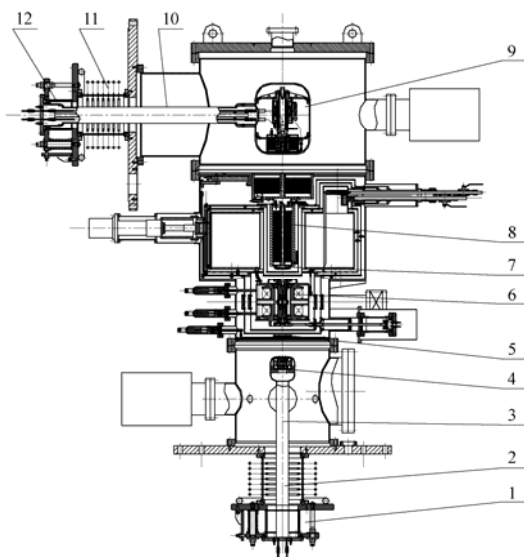


图 1 上海 EBIT 陷阱区总图

Fig.1 Overview of the ion trap region of Shanghai EBIT

1. Adjustment for electron gun; 2. Accelerator tube; 3. Steadying bar for electron gun; 4. Electron gun; 5. Upstream BPM; 6. Drift tubes assembly; 7. Downstream BPM; 8. Transport coils; 9. Electron collector; 10. Steadying bar for electron collector; 11. Accelerator tube; 12. Adjustment for electron collector

EBIT 是在强磁场的压缩下获得高密度电子束, 为了使漂移管中央的电流密度最大, 必须使从电子枪阴极发射出的电子束沿超导磁场的轴心运动, 因此必须保证电子枪、漂移管和超导线圈同心。此外, 为了使电子束在离开漂移管后能够顺利到达收集器, 还必须使漂移管、传输线圈和收集器同心<sup>[2,3]</sup>。如果装置的同心率不好不但影响束流密度, 而且会有杂散电子轰击到元件内壁产生二次电子和离子, 干扰束流, 影响装置的运行状态, 甚至会损伤元件和破坏低温系统的热平衡。因此, 必须进行准直, 以使各部件通孔中心线在一条直线上, 并与束流中心重合。参照日本 TOKYO EBIT 的运行经验, 为保证装置能正常稳定工作, 要求漂移管和超导线圈与电子枪阴极中心偏移量小于 0.08mm, BPM、传输线圈及收集器与电子枪阴极中心偏移量小于 0.14mm。因此, 我们设计了若干调节机构, 对各部件进行准直, 以保障整个装置的同心率达到要求。

## 1 准直方案

上海 EBIT 装置中, 漂移管组件直接安装在超导线圈骨架内, 必须能够在真空低温状态下进行准直调节。下游 BPM 组件装在传输线圈下部, 传输线圈直接安装在真空室上, 仅在安装时进行大气状态下准直调节。收集器悬臂支撑在真空室上, 在真空室气压变化情况下其位置有可能发生变化, 因此必须能够在真空状态下准直调节。准直时, 只对独立的部件进行调节, 部件内各元件的同心率通过台阶定位法, 靠精密机械加工来保证。

目前常用的准直方法有望远镜法、激光跟踪仪法和普通激光法<sup>[3-5]</sup>。采用激光跟踪仪法, 需要在真

第一作者: 陈永林, 男, 1977 年 11 月出生, 2002 年于南京工业大学获硕士学位, 现在中国科学院上海应用物理研究所从事上海光源研制工作

收稿日期: 2006-02-09, 修回日期: 2006-03-20

空内的部件上放置靶标，而普通激光法则要求产生沿着理想束流中心线的激光束，这些实施起来都十分困难。上海 EBIT 装置采用准直望远镜法准直。准直时，以电子枪为基准，调节 BPM、漂移管、传输线圈、以及收集器等部件的位置，达到准直精度要求，准直方案原理如图 2 所示。准直误差有以下几方面：(1) 准直望远镜的仪器误差  $\sigma_1=0.025\text{mm}$ ；(2) 以电子枪为基准建立基准线的误差  $\sigma_2=0.02\text{mm}$ ；(3) 测量各部件中心孔位时的人为测量误差  $\sigma_3=0.01\text{mm}$ 。根据误差传递均方根原理，总的测量误差为  $\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2}=0.034\text{mm}$ ，满足精度要求。

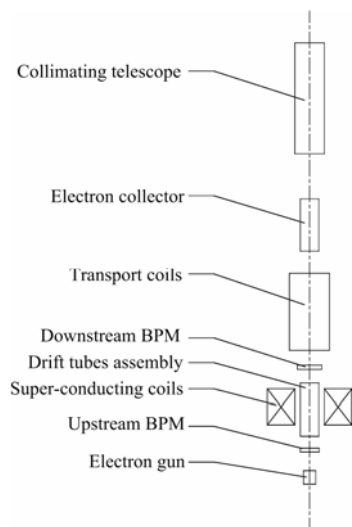


图 2 准直方案图

Fig.2 Schematic view for the alignment program

上海 EBIT 装置的准直与安装交叉进行。将漂移管、传输线圈等部件装到低温超导段真空室内组成低温超导段，将收集器装到收集器段真空室内组成收集器段，总装时各段间采用法兰对接方法安装。准直分两步进行，首先分别对这两段进行预准直，使各部件与本段上、下游法兰同心，然后进行整体准直，以便简化和方便准直过程。具体安装准直步骤如下：

(1) 组装超导线圈、漂移管、传输线圈、BPM、收集器等组件，保证各部件本身各元件同心。

(2) 安装电子枪段（不包括电子枪组件），利用模拟电子枪芯调节电子枪座。

(3) 低温超导段组装、预准直，将各组件调到与上下游法兰同心。

(4) 安装低温超导段，调节 BPM 组件、漂移管组件以及传输线圈组件。

(5) 收集器段组装、预准直，将收集器组件调到与上下游法兰同心。

(6) 安装收集器段，调节收集器组件。

(7) 真空状态下调节上游 BPM 组件、漂移管组件以及收集器组件。

(8) 低温真空状态下调节 BPM 组件、漂移管组件以及收集器组件。

## 2 机械调节机构及工装

传输线圈组件通过 4 根长臂支撑在真空室内，可实现水平面内  $X$ 、 $Y$  方向的调节。上游 BPM 组件安装在上游高压屏蔽差分抽气板上，在真空室上安装 2 个机械调节机构，成  $90^\circ$  方向布置，其调节机构与漂移管的类似。电子枪组件、收集器组件均处在  $-170\text{kV}$  的高电位，通过负电位支撑杆与调节机构连接，调节机构再通过加速管与真空室上的大法兰连接，加速管用于隔离  $-170\text{kV}$  到  $0\text{V}$  的电位差，这两个组件的调节机构类似，但二者的位置支撑方式不同，即电子枪垂直支撑，收集器由水平悬臂支撑，后者的设计、调节更加复杂。以下介绍漂移管和收集器组件的机械调节机构及相关工装设计。

### 2.1 漂移管组件机械调节机构

漂移管组件安装定位在小 LHe 容器内部的超导线圈骨架上，4 根等长均布的不锈钢丝将小 LHe 容器悬吊在大 LHe 容器下部，不锈钢丝控制漂移管  $Z$  轴向位置并承受小 LHe 容器、超导线圈及漂移管的重量。水平面上通过顶杆调节机构来调节小 LHe 容器的位置。顶杆调节机构分两层，每层 4 个，组成相互垂直方向。

调节机构必须有足够的调节精度，并能绝热。在调试过程中或两次实验间装置要经历从低温到室温的循环，小 LHe 容器的外径会随之发生变化，为避免损坏元件和再次准直，调节机构要能相应随之伸缩。为实现以上功能，将调节机构分成调节和顶杆两部分，用焊接波纹管将其连接并实现真空密封，如图 3 所示。为提高调节精度，调节部分采用差动螺杆结构，外螺纹螺距为  $1.5\text{mm}$ ，内螺纹螺距为  $1.25\text{mm}$ ，差动螺杆旋一圈顶杆只前进  $0.25\text{mm}$ ，在外壳均匀刻 50 刻度，调节精度可达  $0.005\text{mm}$ 。顶杆部分的前部采用环氧树脂棒以隔热。当温度从  $4.2\text{K}$  升到室温，小 LHe 容器外筒直径膨胀  $0.74\text{mm}$ ，在顶杆中部设置若干蝶形弹簧用于吸收此变形量，弹簧通过复合组合排列，负载与变形的关系按公式 (1) 计算<sup>[6]</sup>。

$$\begin{cases} P = \frac{f\delta^3}{\alpha D^2} \left[ \left( \frac{h_0}{\delta} - \frac{f}{\delta} \right) \left( \frac{h_0}{\delta} - 0.5 \frac{f}{\delta} \right) + 1 \right] \\ P_{\Sigma} = iP \\ f_{\Sigma} = nf \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P$  为单片弹簧负荷;  $P_{\Sigma}$  为弹簧总负荷;  $f$  为单片弹簧变形;  $f_{\Sigma}$  为弹簧总变形量;  $\delta$  为单片弹簧厚度;  $\alpha$  为辅助量, 根据弹簧内外径及弹簧材料的弹性模量计算;  $D$  为弹簧外径;  $h_0$  为单片弹簧极限行程;  $i$  为迭合层数;  $n$  为对合层数。

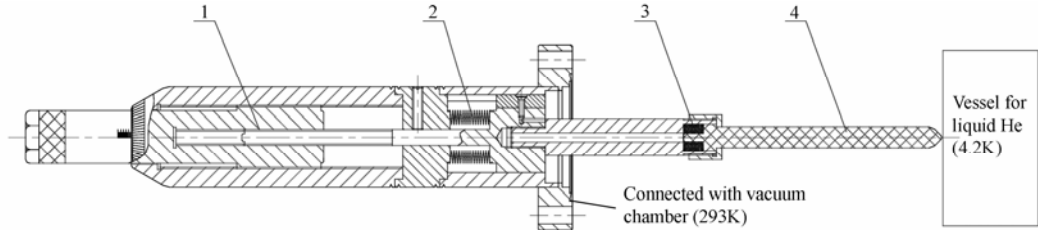


图 3 漂移管组件调节机构  
1. 差动螺杆; 2. 焊接波纹管; 3. 蝶形弹簧; 4. 绝缘顶杆

Fig.3 Adjustment of drift tubes assembly

1. Differential motion screw stem, 2. Welding bellows, 3. Butterfly springs, 4. Insulative rod

### 2.2 收集器组件机械调节机构

调节机构必须能够方便可调, 要有足够的调节精度和稳定性, 并要考虑加速管的受力。我们采用固定法兰与加速管连接, 调节法兰与负电位支撑杆连接, 两法兰间焊接波纹管实现真空密封, 四根均布的压缩弹簧螺母螺杆机构进行调节, 利用细牙螺纹以提高调节精度, 四根与弹簧螺母螺杆机构呈 45° 的固定螺杆在调节完成后将锁紧, 调节机构如图 4 所示。上、下两弹簧与中间左、右两弹簧受力不等, 每根弹簧负载与变形关系见式 (2) [7]:

$$\begin{cases} F_s = C\lambda \\ C = \frac{Gd^4}{8D_2^3m} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $F_s$  为单个弹簧的负载;  $\lambda$  为弹簧压缩量;  $C$  为弹簧刚度;  $G$  为弹簧材料剪切模量;  $d$  为弹簧丝径;  $D_2$  为弹簧中径;  $m$  为有效弹簧圈数。

大气状态下调节法兰两侧气压相等, 真空状态下两侧存在一个大气压差。调节机构需承受收集器组件的重力及力矩。根据以上分析, 调节机构的力学关系见式 (3):

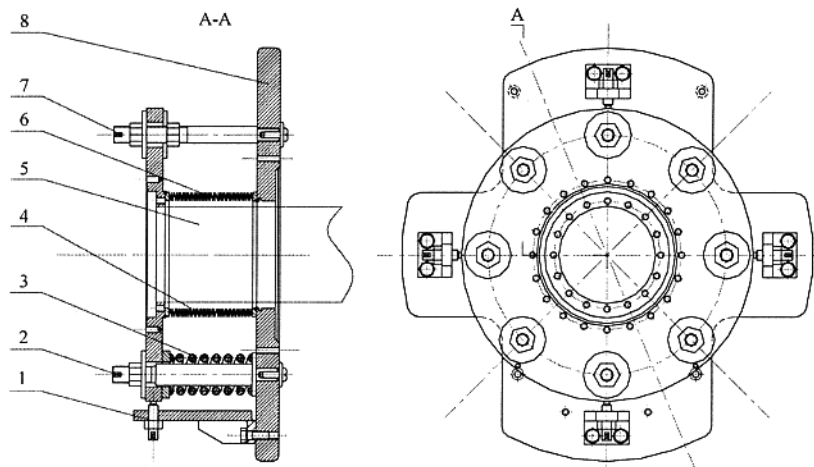


图 4 收集器组件调节机构

Fig.4 Adjustment of collector assembly

1. Carrier rods in X and Y directions; 2. Adjustable screw stems; 3. Springs; 4. Welding bellows; 5. Adjustable flange; 6. Steadying bars; 7. Fixed screw stems; 8. Fixed flange

$$\begin{cases} F_{BO} + F_a = F_{SO} \\ \Delta F_{SO} L = T \\ F_{SO} \xi > G_O \end{cases} \quad (3)$$

式中： $F_{BO}$  为四个调节螺母预紧力之和； $F_a$  为调节法兰两侧压力差，大气状态下等于 0，真空状态下等于大气压与焊接波纹管截面积之积； $F_{SO}$  为四个压缩弹簧所受压力之和； $\Delta F_{SO}$  为上、下两个压缩弹簧所受压力之差； $L$  为上、下两个压缩弹簧中心距； $T$  为由于收集器组件的重力在调节法兰处产生的力矩； $\xi$  为滑动摩擦系数； $G_O$  为收集器组件、负电位支撑杆、调节法兰重力之和。

根据式 (2)、(3)，通过迭代法，反复计算，设计了适当规格的弹簧，并校核了螺纹的受力状况。加速管由陶瓷环与金属环真空钎焊封接而成，不能受太大剪切力，将固定法兰切掉 4 个角，以减轻调节机构重量改善加速管受力状况。

### 2.3 准直工装

由于电子枪阴极亮度不够，必须设计模拟电子枪枪芯作为准直光源。模拟电子枪芯由光源件和基准件两个元件组成，光源件直接安装在电子枪座上，内部装有小灯泡，通过电子枪电源供电，基准件安装在光源件上部，其上下两个同心小孔作为准直基准，这两个元件间及与电子枪座的配合精度通过机械加工来保证。此外，准直望远镜的可调节支撑架、预准直靶标等均是必需的准直工装。为避免与收集器、电子枪调节机构相连的加速管承受过大的冲击力，设计了专用扳手进行准直调节。

## 3 试验

### 3.1 收集器组件调节机构调节试验

为考察调节机构的可调性、调节精度及稳定性，建立了试验装置。试验调节机构未设计固定螺杆，在支撑杆的端部装上靶标，用 30kg 的配重代替收集器组件，试验装置示意图见图 5。

试验表明调节机构具有良好的可调性和足够的精度，能够容易地将靶标中心调节到 (0, 0) 点。然而两周后再次观察靶标中心时发现，靶标中心坐

标为 (0.07mm, -0.12mm)，这很可能是由于调节机构的弹簧发生松弛，说明调节机构的稳定性不足。我们在调节机构中加四根固定螺杆，在调节时松开，调节结束后拧紧，以增加调节机构的稳定性。后来的试验表明，机构具有足够的稳定性，未再发生上述现象。

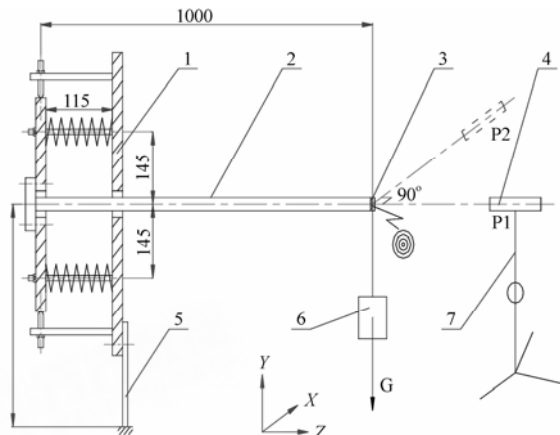


图 5 准直调节机构试验装置示意图  
1. 调节机构, 2. 支撑杆, 3. 反射目标, 4. 准直望远镜, 5. 角钢支架, 6. 配重, 7. 三脚可调支架  
Fig.5 Schematic view of the experiment device for collimating adjustment  
1. Adjustment assembly, 2. Steadying bar, 3. Target, 4. Collimating telescope, 5. Support frame, 6. Counterweight, 7. Adjustable support frame

### 3.2 低温超导段调节试验

在装置总装前，对低温超导段进行了低温励磁准直试验，试验中以上下游法兰中心为基准，对上游 BPM 和漂移管组件进行了准直调节。试验表明：  
(1) 在真空、低温状态下可以进行准直，调节机构具有足够的调节精度；(2) 抽真空、励磁对各组件位置无影响。

## 4 调试结果及运行状况

经过准直，以电子枪中心为基准，各组件的中心位置和偏移量见表 1，均达到了设计指标。2004 年底，上海 EBIT 顺利出束。目前装置正处在老练阶段，磁场达到 5T，高压达到 100kV，电子束流达到 110mA，已经进行了一些物理实验研究。

表 1 各组件中心位置  
Table 1 Position of the centres of various components

部件名称 Name of components	上游 BPM Upstream BPM	漂移管 Drift tubes assembly	传输线圈及下游 BPM Transport coils and downstream BPM	收集器 Electron collector
(X,Y)	(-0.01, -0.01)	(-0.02, 0.02)	(-0.07, +0.08)	(-0.1, -0.08)
$\sqrt{X^2 + Y^2}$	0.014	0.028	0.106	0.128

备注：以电子枪阴极中心为基准。南为 X 轴正向，东为 Y 轴正向。单位：mm。

Notes: Using the centre of the electron gun cathode as the base. Positive direction of X-axis: south, and positive direction of Y-axis: east. Unit: mm.

## 5 结论

上海 EBIT 装置机械准直方案合理, 调节机构满足精度要求, 工装设计能起到很好作用, 准直达到指标。准直工作对上海 EBIT 装置的成功安装及稳定正常工作起到了重要的作用。

### 参考文献

- 1 邹亚明. 物理, 2003, **32**(2): 98—104  
ZOU Yaming. Physics, 2003, **32**(2): 98—104
- 2 Levine M A, Marrs R E, Bardsley J N, *et al.* Nucl Instrum Meth Phys Res, 1989, **B43**: 431—440
- 3 Frederick J C, Junji A, Koichi I, *et al.* Phys Soc of Japan, 1996, **65**(10): 3186—3192
- 4 汪守金, 满开弟, 蔡国柱, 等. 测绘技术装备, 2002, **4**(2): 41—44  
WANG Shoujin, MAN Kaidi, CAI Guozhu, *et al.* Geomatics Technol Equip, 2002, **4**(2): 41—44
- 5 冯其波, 刘依真, 张斌, 等. 仪器仪表学报, 2005, **26**(1): 28—31  
FENG Qibo, LIU Yizhen, ZHANG Bin, *et al.* Chin Sci Instrum, 2005, **26**(1): 28—31
- 6 蔡春源. 新编机械设计手册. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993, 981—991  
CAI Chunyuan. New mechanical design manual. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1993, 981—991
- 7 刘鸿文. 材料力学. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1992, 108—113  
LIU Hongwen. Material Mechanics. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1992, 108—113

## Alignment of Shanghai Electron Beam Ion Trap facility

CHEN Yonglin JIANG Dikui XIAO Tiqiao ZHU Xikai GUO Panlin  
YAN Heping WANG Naxiu SHENG Shugang

*(Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)*

**Abstract** A collimating telescope was used to make alignment of the Shanghai Electron Beam Ion Trap (EBIT) facility. To get precise result, high precision adjustments and special tools were designed and adopted. Several experiments have been made to test the reliability and precision of these adjustments and tools. After careful alignment, the EBIT can be operated stably with an electron beam of 100kV/110mA. It was shown that the method of alignment is successful.

**Key words** Shanghai EBIT facility, Collimating telescope, Alignment

**CLC** TB2

作者: [陈永林](#), [蒋迪奎](#), [肖体乔](#), [朱希恺](#), [郭盘林](#), [阎和平](#), [王纳秀](#), [盛树刚](#), [CHEN Yonglin](#), [JIANG Dikui](#), [XIAO Tiqiao](#), [ZHU Xikai](#), [GUO Panlin](#), [YAN Heping](#), [WANG Naxiu](#), [SHENG Shugang](#)

作者单位: [中国科学院上海应用物理研究所](#), 上海, 201800

刊名: [核技术](#) [ISTIC](#) [PKU](#)

英文刊名: [NUCLEAR TECHNIQUES](#)

年, 卷(期): 2006, 29(8)

引用次数: 0次

## 参考文献(7条)

1. [邹亚明](#) [电子束离子阱及高电荷态离子相关物理](#) [期刊论文]-[物理](#) 2003(2)
2. [Levine M A](#), [Marrs R E](#), [Bardsley J N](#) [查看详情](#) 1989
3. [Frederick J C](#), [Junji A](#), [Koichi I](#) [查看详情](#) 1996(10)
4. [汪守金](#), [满开弟](#), [蔡国柱](#), [郭玉辉](#) [SMX激光跟踪仪在CSR准直安装中的应用](#) [期刊论文]-[测绘技术装备](#) 2002(2)
5. [冯其波](#), [刘依真](#), [张斌](#), [崔建英](#) [基于半导体激光光纤组件的激光准直仪](#) [期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 2005(1)
6. [蔡春源](#) [新编机械设计手册](#) 1993
7. [刘鸿文](#) [材料力学](#) 1992

## 相似文献(0条)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hjs200608003.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hjs200608003.aspx)

下载时间: 2010年4月13日