

# 北京慢正电子强束流磁场输运系统设计研究\*

曹兴忠<sup>1,2</sup> 王宝义<sup>2</sup> 于润升<sup>2</sup> 魏存峰<sup>1,2</sup> 薛德胜<sup>1</sup> 魏龙<sup>2;1)</sup>

1(兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室 兰州 730000)

2(中国科学院高能物理研究所核分析技术重点实验室 北京 100039)

**摘要** 针对基于北京正负电子对撞机的慢正电子强束流系统对输运磁场的设计要求,本文对不同规格的磁场输运线圈模型、长螺线管端口处磁场的补偿以及地磁场和弯管道对正电子束流的影响等进行了计算,提出适用于本系统传输慢正电子束流的输运磁场分布、补偿线圈、调整线圈的加工参数,计算表明,系统的总体磁场不均匀度小于 10%。实际运行束流测试表明,所设计的磁场系统能够很好的将慢正电子束流输运到约 16m 远的样品测量室,慢正电子束斑尺寸基本没有变化,满足慢正电子束流系统的设计要求。

**关键词** 慢正电子束 束流输运 磁场分布 补偿线圈

## 1 引言

慢正电子束流技术作为一种新型微观核探针,在核分析技术和材料科学研究中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。以放射性同位素为初级正电子源的慢正电子束流设备由于受放射源强度的限制,慢正电子束流流强一般较低,许多重要的实验技术无法实现。基于电子直线加速器(LINAC)的慢正电子束流线解决了慢正电子束流强度低的问题,为建立和开展新的实验方法提供了可能<sup>[2-5]</sup>。

北京慢正电子强束流项目采用北京正负电子对撞机(BEPC)电子直线加速器电子打靶的方式作为初级正电子源,从而产生高强度和高亮度的低能单色正电子束流。北京正负电子对撞机在目前电子能量约 1.3 GeV,脉冲宽度 2.5 ns,重复频率 12.5 Hz,流强为 1000 mA 时的运行模式下,慢正电子束流强度可以达到  $10^6/s$ ,经过准直流化后,慢正电子束流强度也可以达到  $10^5/s$  量级。对撞机二期工程改造(BEPC II)后,慢正电子束流强度可以达到  $10^8/s$  以上<sup>[6,7]</sup>。

慢正电子强束流系统由于受到地理位置和周围

环境的限制,同时为了进行能量选择,总长度约 16m 的真空输运管道共有 4 处  $\phi 400$  mm 的弯曲管道。由于在弯曲管道部分难以采用线圈的耦合方式来实现均匀磁场,所以采用缠绕螺线管线圈的方式,而在慢正电子直流化管道(Penning-Trap, P-T)、靶室以及样品室等其他部分,以不同规格的 Helmholtz 线圈方式提供均匀磁场。总体系统设计的磁场强度为 100 Gauss,磁场的均匀度小于 10%。

本工作通过对各种规格的线圈、调整线圈、螺线管模型参数以及线圈耦合、螺线管与螺线管端口处的磁场补偿、地磁场影响等进行了模拟计算,给出了束流系统所有磁场线圈、螺线管、补偿线圈、调整线圈的设计加工参数,计算得出总体磁场不均匀度小于 10%。实际运行测试表明,输运磁场系统满足慢正电子束流系统的设计要求,慢正电子束斑尺寸基本没有变化。

## 2 基本理论公式推导

磁场输运系统中基本的组成单元是线圈和螺线管,由此耦合得到需要的均匀磁场<sup>[8]</sup>。从基本理论

2003-09-08 收稿

\* 国家自然科学基金(19927001)和中国科学院大型科学仪器专项经费资助

1) E-mail: weil@mail.ihep.ac.cn

公式出发,推导各种不同耦合模型的磁场计算公式,如多个线圈叠加模型、螺线管耦合模型和接口处的磁场补偿模型等,同时计算得到不同线圈模型的各种参数,包括线圈缠绕匝数、线圈几何参数值和线圈电流值等数据。

根据毕奥-萨伐尔定律,电流元  $dl$  在  $r$  处产生的磁场可用下式表示:

$$dB = k \frac{Idl \sin\theta}{r^2} \quad (1)$$

式中  $k = \mu_0/4\pi$ ,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ,  $I$  为导线电流,  $\theta$  为电流元  $dl$  和  $r$  的夹角。

长直螺线管轴线上的磁场由(1)式推导得出,  $\theta$  角为轴线  $Z$  方向和  $dr$  的夹角:

$$B = \frac{\mu_0}{2} nI (\cos\theta_2 - \cos\theta_1), \quad (2)$$

长为  $L$  的螺线管产生的磁场:

$$B = \frac{\mu_0}{2} nI \left( \frac{Z - Z_0}{[R^2 + (Z - Z_0)^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{Z - Z_0 - L}{[R^2 + (Z - Z_0 - L)^2]^{\frac{1}{2}}} \right) Z, \quad (3)$$

式中  $R$  为线圈内径,  $Z_0$  为管道起始端坐标位置,  $n$  为线圈匝数,  $I$  为导线内的电流。

对于长为  $2L$  多层密缠绕线圈在轴线上任意点  $x$  处的磁场公式由上式积分得到,  $R_1$  和  $R_2$  分别是螺线管的内外半径:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{4L(R_2 - R_1)} \left[ (L - x) \ln \frac{R_2 + \sqrt{(x - L)^2 + R_2^2}}{R_1 + \sqrt{(L - x)^2 + R_1^2}} + (L + x) \ln \frac{R_2 + \sqrt{(x + L)^2 + R_2^2}}{R_1 + \sqrt{(L + x)^2 + R_1^2}} \right], \quad (4)$$

任意多个空心线圈的磁场公式可通过磁场叠加原理,由上式推导。

考虑到实际加工过程中,导线的堆积方式存在一定的占空,在实际参数的计算中必须考虑占空比的影响。

$$\lambda = \frac{MS_0}{l_x l_y} = \frac{\pi}{4} \times \frac{m}{1 + (m - 1) \times \frac{\sqrt{3}}{2}}, \quad (5)$$

式中总匝数  $M = Ln$ , 导线截面面积  $S_0 = \pi\phi^2/4$ ,  $l_x =$

$$L, l_y = \phi \left( 1 + (m - 1) \frac{\sqrt{3}}{2} \right), m = n \times \phi.$$

由于系统本身的输运磁场较弱且对均匀度有较高的要求,因此,地磁场的存在影响低能正电子在真空管道中的运行轨迹。北京地区地表处的地磁场强

度约 0.5 Gauss, 正电子的相对偏移量为

$$\begin{aligned} \Delta Y &= L \cdot \frac{-0.35}{B_s + 0.345} \cdot \frac{1}{S}, \\ \Delta X &= L \cdot \frac{-0.01}{B_s + 0.345} \cdot \frac{1}{S}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $X$  方向平行于地面,和管道轴线  $Z$  方向垂直,  $Y$  与地面和管道轴线  $Z$  方向垂直,  $L$  为磁场区长度,  $S$  为屏蔽因子。

一定能量的正电子束流经过弯管道时,其横向分量( $X$  方向和  $Y$  方向)受到弯管道的影响较大。若正电子能量为 100 eV, 发射角为 0, 初始位置为原点,在经过 1/4 弯曲管道( $\phi$  400 mm)后偏移

$$\begin{aligned} x &= 3.701 \times 10^{-1} \text{ mm}, \\ y &= 86.5 \times 10^{-1} \text{ mm}, \end{aligned} \quad (7)$$

束流经过弯曲管道之后横向偏移量比径向偏移量大一个数量级,是影响束流运输的一个重要因素。

以上原因导致束流在输运过程中偏移真空管道轴线位置,在管道的弯曲部分或间隔一定的距离位置安装调整线圈进行磁场补偿,可以通过调节调整线圈的磁场强度和方向,从而调整束流的运行轨迹。

### 3 计算结果与讨论

在满足系统磁场高均匀度分布的前提下,增大线圈间距有利于线圈和其他部件的安装。调整 Helmholtz 线圈间距,计算了多组线圈的叠加磁场。图 1 是 46 个空心线圈耦合的叠加磁场分布。空心线圈内半径为  $\phi$  100 mm、宽度为 60 mm,中心间距为 180 mm。可以看出叠加磁场分布在 93—103 Gauss 范围内,不均匀度  $\leq 5\%$ 。

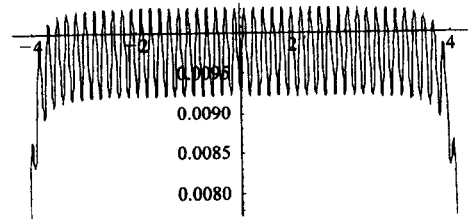


图 1 Pennig-Trap 磁场模拟分布  
横轴为线圈轴向位置(m);纵轴为磁场(T)。

在螺线管端口处,受真空管道法兰宽度的影响,磁场的降落幅度比较大。因此在螺线管接口位置,用空心线圈来补偿磁场。图 2 是两个间距为 140 的半无限长螺线管在经空心线圈补偿后的磁场分布,螺线管内径为  $\phi$  67 mm。补偿线圈内径为  $\phi$  120 mm,宽度为 100 mm。由图可以看出,磁场在 100—

117Gauss 范围内,不均匀度达到了设计的要求.

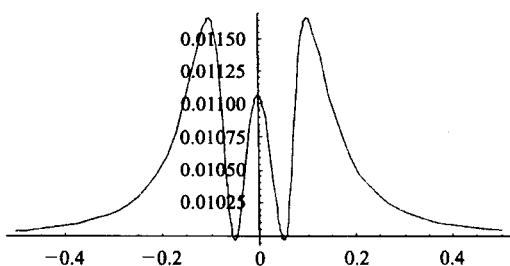


图 2 螺线管端口磁场模拟分布  
横轴为线圈轴向位置(m);纵轴为磁场(T).

由于靶室处几何尺寸的限制,靶室处磁场需要空心线圈和螺线管的过渡.图 3 是 6 个不同规格的空心线圈和半无限长螺线管过渡的磁场分布.可以看出,靶室中心处到束流管道的磁场分布保持在 100—112Gauss 范围内,有很好的均匀度.

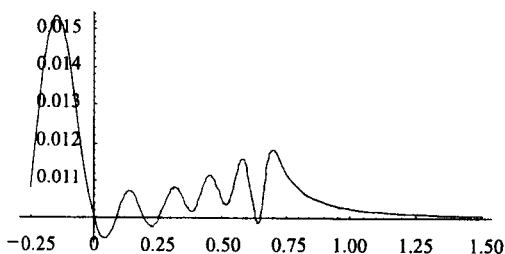


图 3 靶室处不同规格空心线圈和螺线管的过渡  
横轴为线圈轴向位置(m);纵轴为磁场(T).

慢正电子直流化管道部分是系统的关键部位,正电子在管道中需要 80 ms 的存贮和脉冲直流化展宽,正电子往返运动的路程约为  $10^5$  m,磁场均匀度直接影响到脉冲正电子束流的存贮时间和直流化效率.

图 4(a)是由长螺线管过渡到多组 Helmholtz 空心线圈的磁场分布.在直流化管道处,由空心线圈提供不均匀度  $\leq 5\%$  的均匀磁场.图 4(b)是样品室不同规格空心线圈和多组 Helmholtz 空心线圈磁场叠加分布,不均匀度  $\leq 5\%$ .整个系统磁场的模拟计算结果在图 5 中给出.可以看到,在经历了 5 处螺线管断接点,2 处螺线管和空心线圈之间的过渡,3 处 Helmholtz 空心线圈的耦合,整体磁场仍保持在 97—113Gauss 的范围内,不均匀度  $\sim 10\%$ ,达到了设计的基本要求.

正电子强束流磁场运输系统在安装调试之后,采用模拟电子束流对系统的传输效率等进行了测量,以获得运输系统的各项性能参数.

实验采用自制的灯丝热阴极作为电子源,热阴极发射出的电子,经过栅极加速后形成能量约 100 eV 的电子束流.在束流系统不同的位置放置电子

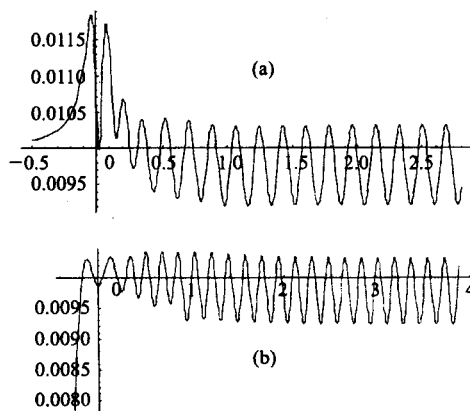


图 4 叠加磁场模拟分布  
横轴为轴向位置(m);纵轴为磁场(T).

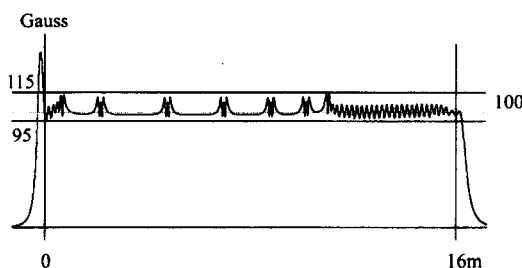


图 5 系统整体磁场分布的计算结果

的收集极以及 ZnS 荧光板,检测各收集极的电流强度和电子束斑.图 6(a)给出了在样品室内观察到的电子束斑形貌,束斑直径约 5 mm,束斑亮度随电子流强的增大而增加,改变调整线圈的电流,可以适当调整电子束斑的位置和形状.图 6(b)是在不同电子能量的条件下,在收集极测得的电流强度.可以看出,在 100Gauss 运输磁场的约束下,电子能量为 100

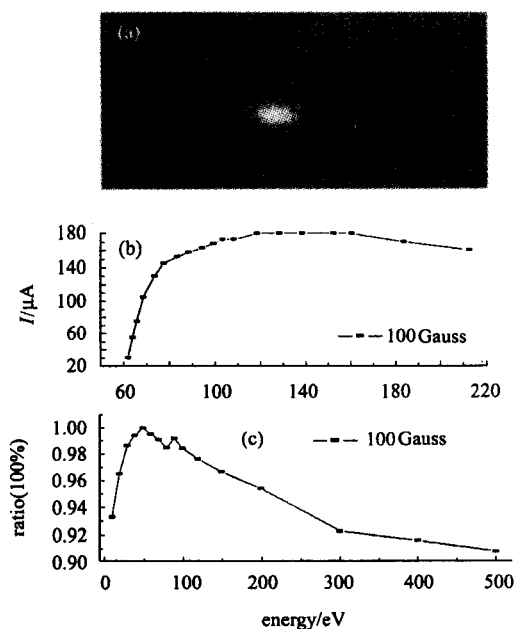


图 6 电子束流磁场运输系统调试

eV 时,在收集极收集到的电子数目基本达到饱和;当电子能量 > 200 eV 时,电子流强开始缓慢减弱,说明弯管道对能量较高电子进行了选择. 图 6(c)是测量了阴极电子总流强、栅极收集到的电子流强和样品室收集到的电子流强之间的关系之后,得到在 100 Gauss 运输磁场的约束下,运输系统对不同能量的电子束流的传输效率. 可以看到当电子能量在 50—100 eV 的范围内,传输效率最高,大于 98%.

本工作还采用 IP 成像板对脉冲正电子束流的形貌进行观测<sup>[9]</sup>. 电子加速器在目前的短脉冲工作模式下,系统真空保持在  $10^{-5}$  Pa,脉冲正电子束斑在运输管道中的直径约 15 mm,呈椭圆形分布,相对于慢化体尺寸( $\phi$  12 mm),慢正电子束斑有一定的变大.

实验证实了慢正电子强束流设备磁场运输系统的设计和安装,达到了设备的设计要求.

## 4 结论

螺线管和空心线圈耦合方式提供的磁场不均匀度达到小于 10% 的要求. 通过不同耦合模式的计算,得到磁场运输系统的整体分布,电子束流调试实验的结果表明运输系统的传输效率为 98%,弯管道处的磁场分布具有能量选择的作用,实现了磁场系统对脉冲慢正电子束流运输的目的. 调节调整线圈磁场强度可适当调整束流束斑的位置和形貌,表明地磁场和弯管道对束流的影响有所抑制.

## 参考文献 (References)

- Shultz J, Lynn K G. Rev. Mod. Phys., 1988, **60**:701
- Ley R. Materials Science Forum., 1992, **1927**:105—110
- Yoshida K et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**(7):1437
- Hulet L D et al. Nucl. Instr. and Meth., 1987, **B24/25**:905
- Akahane T, Chiba T, Shiotani N et al. Appl. Phys., 1990, **A51**:146
- YU R S et al. HEP & NP, 2001, **25**:135(in Chinese)  
(于润升等. 高能物理与核物理, 2001, **25**: 135)
- YU R S et al. Nucl. Tech., 2000, **23**(6):405(in Chinese)  
(于润升等. 核技术, 2000, **23**(6): 405)
- YU Run-Sheng et al. Nucl. Instr. and Meth., 2001, **A457**:419
- YU R S et al. Nucl. Tech., 2000, **23**(6): 401(in Chinese)  
(于润升等. 核技术, 2000, **23**(6):401)

## Design of the Magnetic Field System for Beijing Intense Slow Positron Beam Transportation \*

CAO Xing-Zhong<sup>1,2</sup> WANG Bao-Yi<sup>2</sup> YU Run-Sheng<sup>2</sup> WEI Cun-Feng<sup>1,2</sup>  
XUE De-Sheng<sup>1</sup> WEI Long<sup>2;1)</sup>

1(Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Material of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2(Key Laboratory of Nuclear Analysis Techniques, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** A slow positron beam with intensity of  $10^6$  e<sup>+</sup>/s produced by the Beijing Electron-Positron Collider (BEPC) is transported by the 100 Gauss magnetic field system with the oscillation less than 10%. In this paper, the distributions of magnetic field at target chamber, sample chamber and Penning-Trap storage are calculated systematically, and the parameters of solenoidal coils and steering coils are calculated respectively. The correction coils are designed to compensate the affect induced by the geomagnetic field and the bent tube. Results of electron beam experiment show that the positron beams are transported to sample chamber with the beam spot size basically unchanged, and the magnetic field distributions satisfy to the requirement of the slow positron beam system.

**Key words** slow positron beam, beam transportation, field distribution, compensatory coil

Received 8 September 2003

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19927001) and Special Fund for Large Scale Equipment of CAS (016A)

1) E-mail: weil@mail.ihep.ac.cn