

用于微波电子枪注入器的 α 磁铁的设计和制造

黄永章 滕克俭 谢家麟

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

本文给出用于北京自由电子激光器的微波电子枪注入器的 α 磁铁的物理参数和物理设计,并报告了磁场测量的结果:好场区范围13.3cm;场梯度均匀度1.5%。经模拟计算和束流实验证明,这块 α 铁的设计和制造满足了微波电子枪高亮度注入器的要求。

北京自由电子激光器^[1]采用热阴极微波电子枪作为注入器^[2],热阴极微波枪的电子束团长约90ps,能量从0到1MeV连续分布。由于只需要把一部分高能量电子注入到加速器中,并且要求束团长度不长于4ps,所以采用 α 磁铁作为动量选择器和聚束器,同时 α 铁又是一个无色散的偏转系统,这样在束团内的能量散度将不引起束流有效发射度的增长和注入点的偏差。

一、电子在 α 磁铁内的运动

从 α 磁铁顶端观察,在磁铁中运动的电子轨道看起来象希腊字母“ α ”, α 磁铁中的场分布和通常的半块四极磁铁一样,但是电子却沿着一条不同的路线进入 α 铁中,参见图1。 α 磁铁的主要特点如下:

- 1) 可实现消色散偏转;
- 2) 有聚束作用;
- 3) 在垂直和水平面上均有交替的聚散焦作用。

文献[3,4]分析了 α 磁铁的性能,并且给出了一些解析公式,我们编写了 TRAF 程序^[2],通过模拟电子在磁铁中的运动轨道去研究它的性能。在 α 铁中二维磁场分布为:

$$\mathbf{B} = zG\hat{y} + yG\hat{z}, \quad (1)$$

式中 $G=dB/dz$ 是磁场梯度。在图1所示的直角坐标系中,电子的运动方程如下:

$$\begin{aligned} d^2x/dt^2 &= -azdy/dt + aydz/dt; \\ d^2y/dt^2 &= -aydx/dt; \\ d^2z/dt^2 &= azdx/dt, \end{aligned} \quad (2)$$

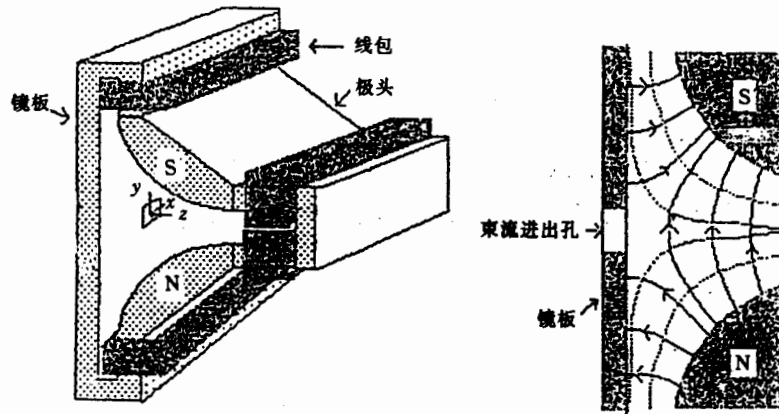


图1 α 磁铁的外形和场分布

这里 $a = -eG/\gamma m_e$. 图 2 示出不同能量的电子在 α 铁内的运动轨道, 如果所有的电子都以相同的角度 40.7° 入射, 那么它们将在同一注入点以相同的反射角 40.7° 出射, 这样就实现了 278.6° 的消色散偏转. 由于束流具有能散度, 电子束会在偏转平面的中心线上散开, 对于能量为 $\gamma m_e c^2$ 的电子, 其轨道与 z 轴的交点可由一简单公式得到:

$$z_{\max} = 75 \sqrt{\beta\gamma/G} (\text{cm}). \quad (3)$$

如果在中心线上放置一个狭缝, 那么就on能够选择具有特定能量的电子束. 另一方面, 不同能量的电子在 α 铁中运动的轨道长度 l 是不同的, 因此所需要的时间 $\tau = l/\beta c$ 也不同, 这就使得磁压缩相位成为可能. 压缩量可由下式给出:

$$\Delta\tau = \tau \frac{1}{\beta^2\gamma} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \Delta\gamma. \quad (4)$$

尽管电子进入 α 磁铁的位置和方向与进入四极磁铁的不同, 但由于 α 磁铁是四极场, 所以它仍具有聚、散焦力, 电子旋转一圈, 在水平和垂直两个平面上交替地受到聚、散焦力, 如图 3 所示. 在近中心轨道区域, 通过对偏离中心轨道的电子轨迹积分就能得到 α 铁的横向传输矩阵, 从 α 铁入口到中点的传输矩阵为:

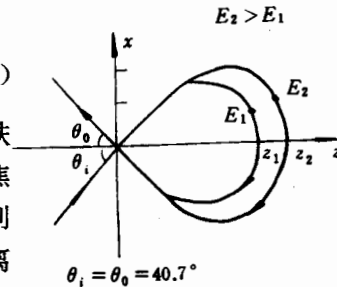


图2 不同能量的电子在 α 铁内的运动轨迹

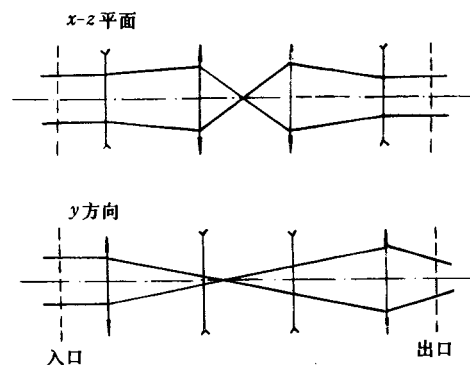
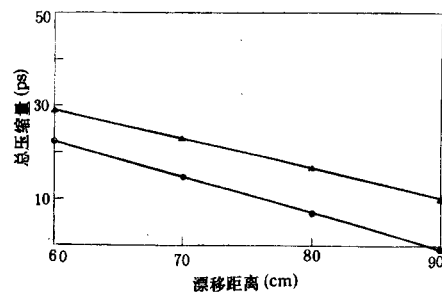
$$M_{x1} = \begin{pmatrix} 0 & 0.23z_{\max} \\ -4.35/z_{\max} & -2.8 \end{pmatrix}, M_{y1} = \begin{pmatrix} 0.074 & 1.2z_{\max} \\ -0.72/z_{\max} & 1.75 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

从 α 铁中点到出口的传输矩阵为:

$$M_{x2} = \begin{pmatrix} -2.8 & 0.23z_{\max} \\ -4.35/z_{\max} & 0 \end{pmatrix}, M_{y2} = \begin{pmatrix} 1.75 & 1.2z_{\max} \\ -0.72/z_{\max} & 0.074 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

二、 α 磁铁物理参数的选择和设计

1. 物理参数的选择

图3 α 磁铁的横向聚散焦作用图4 总压缩量与磁场梯度、
漂移长度、束能量的关系

\blacksquare $G=0.926\text{T/m}$ $E=0.8-1.0\text{MeV}$
 \blacktriangle $G=1.000\text{T/m}$ $E=0.9-1.1\text{MeV}$
 $x_{\text{max}}=13\text{cm}$

尽管可用多种形式的磁铁系统对一个能量-时间相关的束流进行消色散传输,并同时选择能区和压缩束团长度,但与其它磁铁系统相比, α 磁铁具有结构简单的优点。 α 铁的原理虽然早已被提出,但由于在应用上有一定的局限性,故实际使用不多。根据北京自由电子激光器注入器的物理设计,在 α 铁入口处的束流参数为能量0—1MeV;流强600mA;在 α 铁出口处,希望选取到束流能量为0.8—1.0MeV,流强达100—200mA;另外一个参数是束团长度,要求通过 α 铁的聚束,束团不长于4ps,而这个量是由微波枪、 α 铁、漂移距离三者共同决定的。因此,本工作提出的 α 磁铁的设计思想是:1)建立一个足够大的好场区,使中心能量0.9MeV、能散 $\pm 0.1\text{MeV}$ 的电子束获得足够的时间压缩量。图4给出总时间压缩与漂移长度的关系,由图可见,束团平均能量和需要的压缩量,决定了允许的漂移长度。2)有一定的好场区精度,以减小象差。3)有一定的场梯度和好场区余量,以适应今后使用条件的变化。根据北京自由电子激光器注入器的具体要求,提出了如下的设计参数:

好场区 0—13.0cm;

好场区内磁场精度 $|\Delta G/G| < 2\%$;

梯度范围 0—2T/m.

需要指出的是,有限尺寸的注入束流,对指定的注入角度要求十分严格。在我们的具体情况下, $\pm 1^\circ$ 的误差会导致束流打在输出管道,或是真空盒底板或盖板上,因此,注入前的运输系统应保证在 α 铁入口处有一平行束流,并且需要采用导向磁铁保证正确的入射角度。

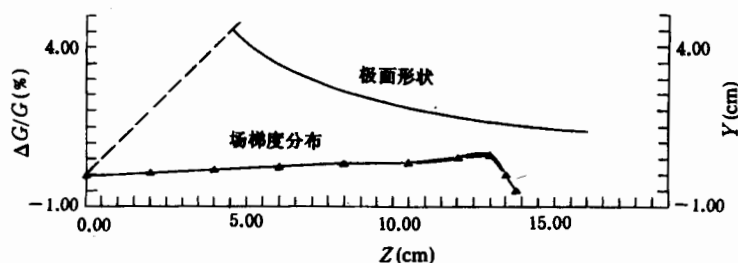
2. 极头形状设计

考虑到真空盒的安置及保证足够的好场区范围,极面内接圆半径取为6.4cm,极面为双曲线,极面方程为

$$yz = 20.48\text{cm}^2. \quad (7)$$

采用 POISSON 程序^[5]在 VAX-11-780 上进行极面形状设计,由于在极面双曲线断开处场梯度会下降,所以在断开处适当垫补,以在一定程度上扩大好场区范围,图5为极面形状和相应的计算场梯度分布。

由于镜板上要开一束流进出孔,这对场分布会有一些影响,一般认为只要开孔高度

图5 α 铁磁极面形状和场梯度分布

不大于镜板厚度,影响是不大的,因为镜板中心处的场强为0.我们做了这样一个计算,将中心开孔做成开缝,缝高2cm,计算表明在距镜板4cm以外的区域,对场梯度的影响小于1%,显然开孔的影响要比开缝小得多.

对极面形状误差的影响也做了计算,在极面较高处 $|\Delta Y| \leq 0.5\text{mm}$,极面较低处 $|\Delta Y| < 0.2\text{mm}$,计算结果表明,这样的误差对场梯度的影响小于1%,所以极面可用台阶或折线代替,以减小加工难度.

铁长的选择:由于实际场为三维场,若想使三维场与二维场近似相同,铁长必须远大于横向尺度,对于四极铁来说,场形不符的范围按内接圆直径估算.但 α 磁铁与此不同,离镜板较远处气隙已经很小了.为保险起见,铁长取为28cm.

三、 α 磁铁的制造和磁测结果

根据 α 磁铁的结构特点,采用四个线包在磁轭上励磁,如图1所示.线包串联供电,从功率的角度来说,这种供电方式将使直流功率增大一倍,但这样的线包加工方便.在最大场梯度为2T/m时,所需单线包安匝数为3277,导线采用截面为 $2 \times 7.2\text{mm}^2$ 的扁铜线.如电流密度设定为 $1.8\text{A}/\text{mm}^2$,则需要线圈130匝,总电流为26A,线包总压降13.1V.

由于磁极面为双曲线,而磁体又较长,这给加工带来较大困难.为了与现有的加工条件相适应,先用数控线切割机按照 α 铁磁极面双曲线制造一块样板,然后根据样板划线,在普通刨床上按曲面粗加工和精加工,再对比样板手工修正.这样的加工方法花的时间较长,手工技术起了相当大的作用,但对单件的复杂加工来说还是可行的.

完成加工后的部件装置,通过与极面相接触的圆柱芯棒,在平台上用高度千分表测量,使两极面平台处平行,并尽可能将平行度误差调到最小,然后打定位销固定.

在中科院高能所储存环室磁测组提供的装置上,用双线圈法对 α 磁铁场梯度分布进行了测量.两个线圈的中心距离为1cm,测量的主要目的是检查在 $y=0$ 平面上的场梯度分布以及开孔对场梯度所造成的影响,图6是实测场梯度分布,如果不考虑开孔的影响,那么场梯度峰值误差 $\Delta G/G = \pm 1.5\%$,与计算分布不同之处在于 $z=9.0-11.0\text{cm}$ 这段内场梯度偏低,需要垫补加以补偿.

从分布图上明显看出,开孔使得场梯度降低.这块 α 铁镜板厚2cm,开孔高度为2.5cm,孔截面为梯形,上底宽5cm,下底宽8cm.由于测量器件的限制,最靠近镜板的测量点处 $z=1.4\text{cm}$,即使在这一点,场梯度下降也达4.5%.在 $z=2.5\text{cm}$ 处,开孔对场梯度

的影响已小于1%。在 $z=1.4\text{cm}$ 处场梯度受到影响大于1%的区域宽度约6cm,这与开孔宽度接近。因此可以得到这样的结论:即在开孔不很大的情况下,场梯度受影响的区域约等于开孔的大小。

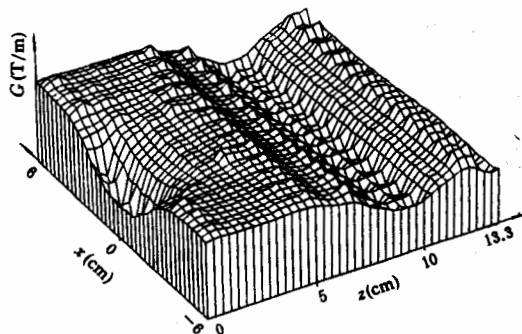


图6 实测 α 磁铁场梯度分布

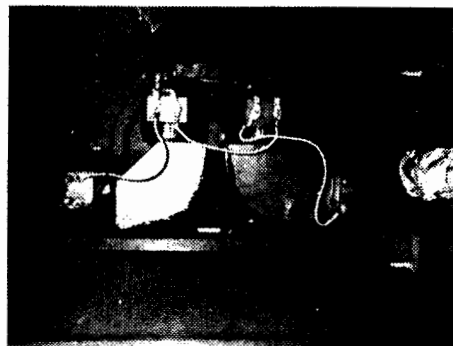


图7

四、小 结

这块 α 铁是国内设计和制造的第一块,通过这个工作,积累了一定的经验。图7为 α 铁实物照片。按实际场分布模拟电子运动轨迹,发现电子的出射角度偏差很小,只有 0.01° 。由于电子束能散很大($\pm 10\%$),由色差而造成的水平方向的位置离散也略大,为 $\pm 0.4\text{mm}$,假设电子束在磁铁入口处的直径为 4mm ,估算由此引起的水平发射度增长为20%,这是可以容忍的。这块 α 磁铁设计制造完成后,即投入微波电子枪的实验运行达两年多,实测束流参数表明,在 α 铁入口处的流强为 600mA 时,在 α 铁出口处的流强可达 150mA ,这部分电子的能量在 $0.8-1.0\text{MeV}$ 之间。束流被有效地消色散偏转 278.6° 进入直线加速器,在加速器后曾采用条纹照相机实测束团长度,由于条纹相机属于最新测量技术,目前,测量结果的离散较大,因此尚不能提供明确的实验结果。但从磁测和部分束流测量结果来看,这块 α 铁的设计和制造达到了微波枪注入器的要求。

作者感谢高能物理研究所尹兆升提供的 POISSON 程序和物理设计时进行的讨论,感谢高能所倪淦林,任芳林提供磁测条件和在磁场测量上所进行的讨论。

参 考 文 献

- [1] Xie Jialin, et al., *Nucl. Instru. & Meth. in Phys. Res.*, **A272**(1989), 40.
- [2] 黄永章, 博士论文, 中科院高能所, 1991.
- [3] H. A. Enge, *Rev. Sci. Instru.*, **34**(1963), 385.
- [4] G. A. Westenskow and J. M. J. Madey, "Owner's manual for the microwave electron gun", *HEPL Technical Note*, TN-86-1, 1986, Stanford University.
- [5] User's Guide for POISSON/PANDIRA.

Design and Fabrication of Alpha Magnet for an Microwave Electron Gun

HUANG YONGZHANG TENG KEJIAN XIE JIALIN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

ABSTRACT

This paper gives the motion of electrons in the alpha magnet firstly, then represents the physical design of an alpha magnet used in Beijing Free Electron Laser. The measured distribution of field gradient of the alpha magnet is reported. The field region with well distribution of $|\Delta G/G| < 1.5\%$ is from 0 to 13.3 cm. The simulation and beam test proved that this magnet meets the requirement of the microwave electron gun.