

文章编号: 1007-4627(2019)03-0329-07

电子束在 α -磁铁模型中传输模拟与优化

朱云亮^{1,2}, 曹树春¹, 袁平¹, 张京京¹, 申晓康¹, 张子民^{1,†}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 在电子直线加速器设计中, α -磁铁通常被用来压缩脉冲长度, 采用热阴极微波电子枪和 α -磁铁相结合的设计, 可以获得皮秒或亚皮秒量级脉冲长度的电子束。电子束在 α -磁铁中的传输过程较为复杂, 相关文献介绍的研究成果均是基于理想模型, 且有镜板开孔的 α -磁铁的束流传输研究, 对 α -磁铁的使用具有重要的指导作用。本文首先简单介绍了用于高能电子成像装置的 α -磁铁模型的设计, 对电子束在理想模型与 α -磁铁模型中传输模拟结果进行对比分析, 验证了所构建模型可以有效地实现脉冲纵向压缩的结论。此外, 对以优化角度进入 α -磁铁和在空间电荷效应影响下的单束团及多束团束流动力学模拟结果进行了讨论, 提出通过减小入射角度来补偿 α -磁铁与电子枪之间增加四极磁铁组, 优化了束流发射度和束团尺寸。

关键词: α -磁铁; 束流动力学; 发射度增长; 空间电荷效应; 传输优化

中图分类号: TL53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.03.329

1 引言

超短脉冲电子束可以直接应用于脉冲辐解实验, 也可以用来产生太赫兹波^[1]和自由电子激光^[2-3]等, 具有广泛的应用范围和良好的发展前景。为了产生超短脉冲电子束, 束团长度压缩技术尤为关键, 束团长度的压缩方式通常有两种: 磁压缩和速度压缩, 其中磁压缩的主要方式有 α -磁铁压缩和Chicane结构压缩^[4]。 α -磁铁在1963年提出以后^[5], 为带电粒子束的纵向压缩提供了一种便捷的方式。热阴极微波电子枪可以提供高横向品质、高电荷量的电子束, 但其脉冲长度较长且能散较大, 而 α -磁铁具有脉冲长度压缩和能量选择的功能, 两者相结合可以提供皮秒量级甚至是飞秒量级的低能散电子束。由于这种组合设计方式简单、方便并且造价较低, 使 α -磁铁得到较为广泛的应用, Stanford Synchrotron Radiation Lightsource (SSRL)的注入器^[6]和北京自由电子激光(BFEL)^[7-8]等装置均采用了这种设计。

Borland^[9]率先对 α -磁铁进行了详细的讨论, 给出了 α -磁铁的传输矩阵以及电子在 α -磁铁中的运动方程, 并开发了计算程序Elegant^[10]。该软件内置了基于传输矩阵的 α -磁铁模型, 许多同类型加速器在设计中使用

该软件进行注入段的参数优化。但是, 该软件在计算中没有考虑空间电荷效应对束流传输的影响, 对强流电子束的传输计算结果不准确。Hama^[11]利用三维时域有限差分法分析了电子束在 α -磁铁中传输时空间电荷效应的作用, 对其横向运动和纵向运动过程分别进行了详细的讨论。Pulsar Physics开发的粒子传输计算程序General Particle Tracer (GPT)^[12]利用计算粒子在传输过程中相互之间的库仑力, 可以准确地分析空间电荷效应对束流传输的影响, 为 α -磁铁的研究提供了一个可靠的工具。

中国科学院近代物理研究所计划建造一台用于高能电子成像研究的电子直线加速器^[13], 该电子直线加速器主要由热阴极微波电子枪、 α -磁铁和3 m长行波加速管等器件组成, 其中, α -磁铁是获得低能散、强流、短脉冲束流的关键部件。在该装置中, α -磁铁拟采用非对称四极子结构设计, 用于压缩电子束团脉冲长度, 并通过位于真空盒中的狭缝筛除能量较低电子以减小束流能散。

本文首先对用于高能电子成像装置的 α -磁铁设计进行简单介绍, 然后利用计算程序GPT模拟电子束在 α -磁铁模型中的传输, 对空间电荷效应影响下的束团尺寸与束流发射度的变化进行分析, 对比分析理想场分布与

收稿日期: 2018-10-26; 修改日期: 2019-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11435015); 国家国际合作专项—政府间国际科技创新合作资助项目(2016YFE0104900); 中国科学院科研装备研制项目(28Y740010); 甘肃省青年科技基金计划(18JR3RA379)

作者简介: 朱云亮(1991-), 男, 河南浚县人, 在读博士研究生, 从事核技术及应用研究; E-mail: zhuyyl@impcas.ac.cn

† 通信作者: 张子民, E-mail: zzm@impcas.ac.cn.

模型场分布下的束流发射度与束团尺寸的变化。对优化入射角度后的束流传输进行模拟，同时分析双束团传输情况下的束流参数变化，最后利用四极磁铁对进入 α -磁铁的束流参数进行匹配。

2 α -磁铁设计

α -磁铁的平面示意图如图 1 所示，在理想的 α -磁铁中，磁场分布可以表达为

$$\mathbf{B} = g(\mathbf{i}z + \mathbf{j}0 + \mathbf{k}x), \quad (1)$$

其中： g 是磁场梯度； $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别是图 1 坐标系中 x, y, z 方向的单位矢量，其磁场分布基本上是四极磁铁的一半。在 $z=0$ 平面上，电子的轨道方程为

$$y = \int \frac{mv_0 - \frac{qg}{2}x^2}{\sqrt{m^2v^2 - (mv_0 - \frac{qg}{2}x^2)^2}} dx, \quad (2)$$

其中： m 为电子静止质量； v 为电子速度； $v_0 = v \cdot \sin\theta_0$ ； θ_0 为电子运动方向与 x 轴的夹角； q 为电子电荷。由方程(2)可知，当电子在 $(x=0, y=0)$ 点以与 x 轴夹角为 40.71° 进入 α -磁铁时，将从同一位置以相同大小角度出射，从而实现 278.6° 的消色散偏转。不同能量的电子在 x 轴上最大位置 X_{\max} 以及在 α -磁铁内的轨道长度 S 可以表示为

$$X_{\max} = 75.05 \sqrt{\frac{\beta\gamma}{g}} \text{ (cm)}, \quad S = 191.65 \sqrt{\frac{\beta\gamma}{g}} \text{ (cm)}, \quad (3)$$

其中： $\beta = v/c$ ； $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ； g 的单位为 Gs/cm ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$)。由公式(3)可知，不同能量的电子在 α -磁铁中的 X_{\max} 不同，其轨道长度也不同。 α -磁铁对束团长度的压缩主要通过不同能量的电子通过的路径差

来实现，束团压缩量与 α -磁铁的磁场梯度及电子能量有关。此外，在 α -磁铁中心线上设置狭缝，选择合适能量范围的电子，可以降低 α -磁铁出口处的束流能散，以适合在行波加速管中加速^[9, 14]。

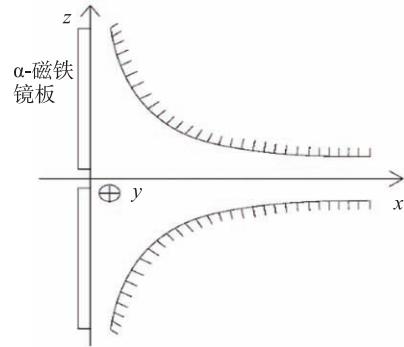
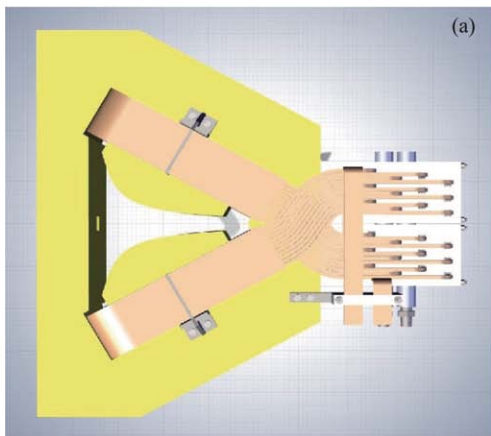


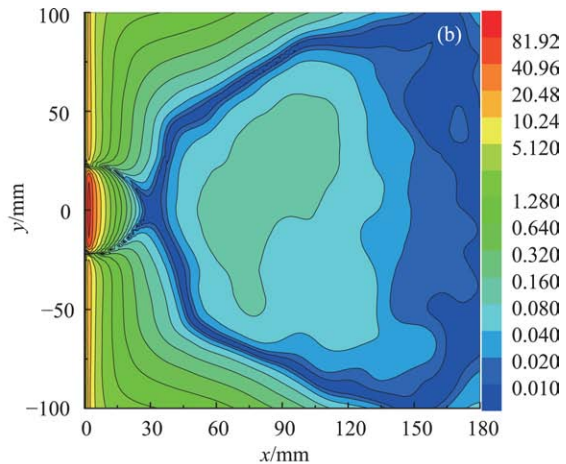
图 1 α -磁铁平面示意图(xOz 平面)

在热阴极微波电子枪注入模式下的高能电子成像实验平台中，所使用的电子枪为 APS 型、1.6 Cell 的热阴极微波电子枪，阴极直径为 3 mm，在电子枪出口处束流能量范围为 $0 \sim 2.98 \text{ MeV}$ ，束团长度约为 350 ps。为在加速管出口获得束团长度小于 4 ps 的低能散束流并保证一定的设计冗余， α -磁铁的磁场梯度最高需要达到 500 Gs/cm，在 x 方向上的好场区范围需达到 200 mm，好场区内磁场精度优于 1%。

由于要在 α -磁铁镜板上开一个束流进孔，而该进孔对磁场分布的影响大小与镜板厚度有关^[15]。为减小开孔影响，镜板厚度设计为 100 mm，开孔高度为 32 mm，在 y 方向上的宽度为 42 mm，镜板开孔在 xOy 平面上的投影为梯形，底边与腰夹角为 45° 。 α -磁铁的设计图以及在 xOy 平面上 B_z 与理想值相对偏差的模拟结果(磁场梯度为 506.7 Gs/cm)如图 2 所示。在 xOy 平



(a) α -磁铁设计图



(b) xOy 平面上 B_z 值与理论值的相对偏差

图 2 (在线彩图) α -磁铁设计图及 xOy 平面上 B_z 值与理论值的相对偏差

面上, 磁场偏差较大区域主要出现在开孔处附近, 且偏差区域与开孔大小基本相同。由于在开孔附近的磁场偏差不可避免, 而在该设计中磁场偏差较大区域在 x 方向的长度小于 30 mm, 相较于电子在 α -磁铁中所经过的路径长度, 该偏差长度在可接受的范围内, 可以满足好场区设计要求。

3 传输过程模拟与分析

热阴极微波电子枪阴极发射电流密度与阴极温度有关, 该装置在典型工作状态下的阴极发射电流密度

约为 20.21 A/cm^2 , 一个 RF 周期内热阴极发射的电荷量为 2 nC 时, 在电子枪出口处可以得到束团电荷量约为 290 pC 的电子束。在 高能电子成像装置中, 为了获得低能散、短脉冲的电子束, 通过 Elegant 程序模拟, 对 α -磁铁中的电子能量选择范围进行了研究, 结果显示当保留束流能量顶部范围为 5% 的电子时, 可以满足成像的要求。在电子枪出口处, 束流能量顶部范围为 5% 的电子束分布如图 3 所示, 束流参数为: 电荷量约为 144 pC , 束团横向尺寸 σ_x, σ_y 分别为 $1.24, 1.24 \text{ mm}$, RMS 束流发射度为 $\varepsilon_x=1.74 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, $\varepsilon_y=1.74 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 束团长度 (RMS 值) 为 2.66 ps 。

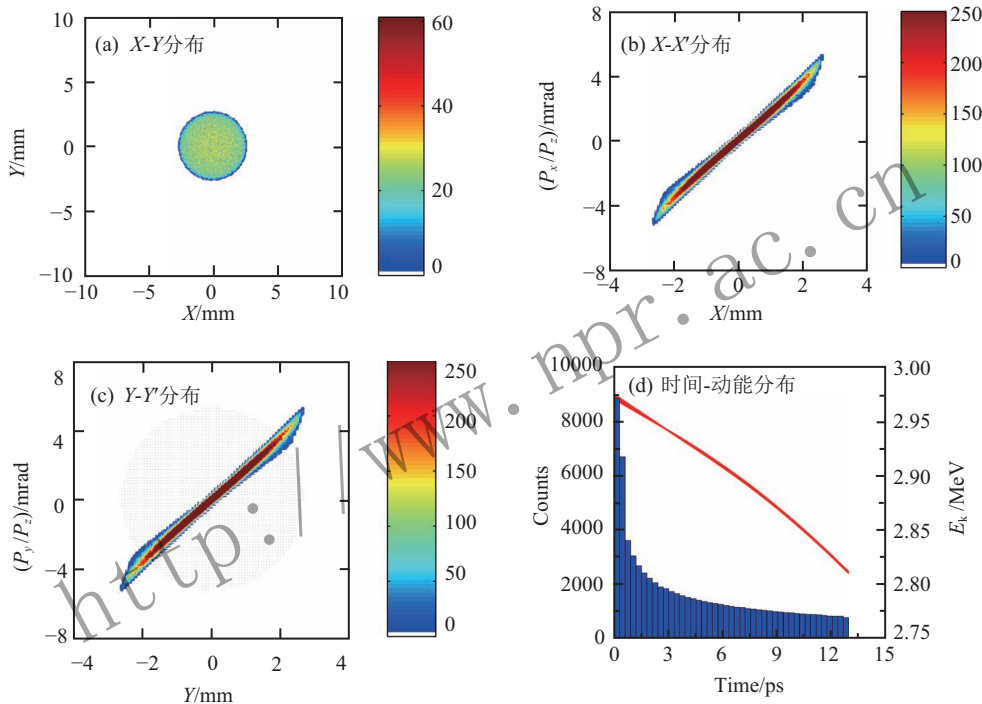


图 3 (在线彩图) 电子枪出口处 5% 能量范围电子横向相空间分布以及时间-动能分布

由电子在纵向上的分布可知, 电子的能量与电子在时间上的分布是相关的, 在同一束团内, 能量高的电子总是位于束团的头部, 这一分布特性有利于进行电子束的脉冲宽度压缩。电子束经过 α -磁铁时, 能量不同的电子通过时所用时间不同, 电子束的时间分布将发生改变, 低能电子追赶上甚至反超高能电子, 从而实现脉冲宽度压缩。

3.1 理论角度入射传输模拟

为了对磁铁模型进行验证, 将理想 α -磁铁磁场数据与前面建立的模型磁场数据导入 GPT 中, 以上述热阴极微波电子枪出口束流为初始束流, 使其经过 0.15 m 的漂移段后以 40.71° 的角度进入 α -磁铁中。当 α -磁铁的

磁场梯度为 500 Gs/cm 时, 利用 GPT 程序进行束流动力学模拟, 两种不同磁铁模型的模拟结果对比如表 1 所列。基于 α -磁铁模型的束流动力学模拟中, 电子束经过刮束后在 α -磁铁模型出口处的横向相空间分布以及时间动能分布如图 4 所示。

表 1 两种模型模拟结果对比

出口参数	理想 α -磁铁模型	α -磁铁模型
束团尺寸 σ_x/mm	2.59	2.81
束团尺寸 σ_y/mm	1.22	1.35
发射度 $\varepsilon_x/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	7.95	5.47
发射度 $\varepsilon_y/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	2.86	3.61
RMS 束团长度/ps	0.66	0.66

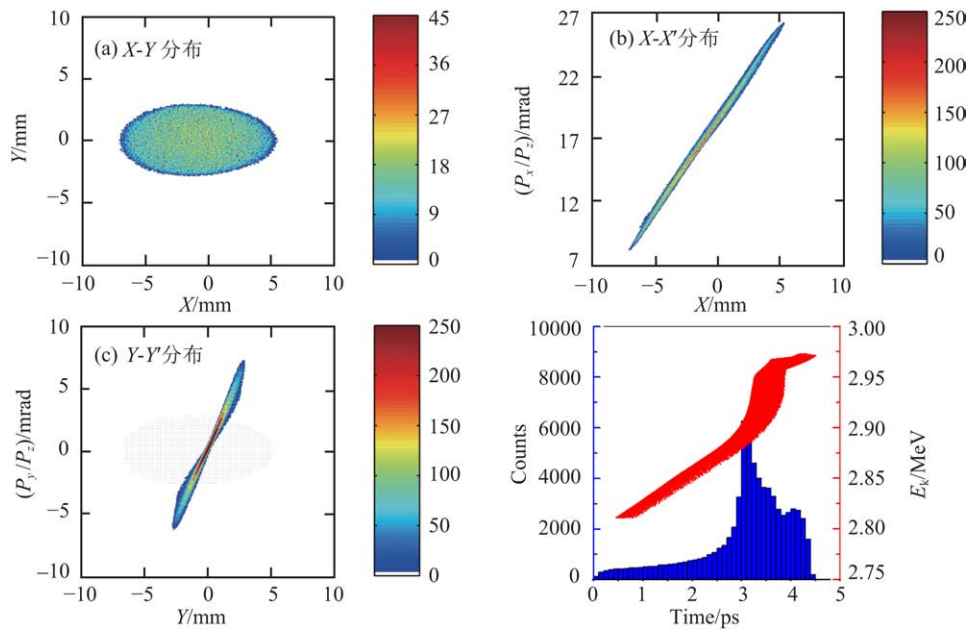


图 4 (在线彩图) α -磁铁模型出口处 5% 能量范围电子横向相空间分布以及时间-动能分布

在有镜板开孔的磁铁模型出口, 束流传输方向相较于理论传输方向出现了约 0.97° 的角度偏差, 该偏差主要由束流进出孔内的磁场所致。由于在 α -磁铁模型中磁场分量 B_y 不严格为零, 而该磁场分量只对 Y 方向发射度的增长有贡献, 在 Y 方向上没有出射角度与出射位置的偏移。在理想场分布的 α -磁铁模型模拟中, 磁场严格按照理论分布, 而建立的 α -磁铁模型优化了极头设计, 所以模拟结果显示 X 方向的发射度增长得到了一定的抑制。

对比有束流进出孔的 α -磁铁模型与理想模型的磁场分布可知, 场分布差异主要出现在镜板上的束流进出孔内, 该差异对电子的路径长度的影响可以忽略不计, 所以两种模型下的脉冲长度压缩效果基本相同, 电子束经过纵向压缩后的 RMS 束团长度均为 0.66 ps。由于在上述模拟中的漂移节长度较短, 束团有过压缩的情况, 通过调整漂移节的长度和加速管中的加速相位, 可以在实验终端处获得更短的电子束。

3.2 优化入射角度传输模拟

α -磁铁由于镜板上束流进出孔的存在, 磁场分布相较于理想场有较大偏差, 该磁场偏差导致理论计算的消色差角度出现变化, 进而影响束流传输。电子束在有镜板开孔的 α -磁铁模型中传输的模拟研究发现, 当束流以理论角度进入 α -磁铁模型内时, 束流出射角度与出射位置在 X 方向上会出现较大偏差, 束流通过 α -磁铁后在 $x=0$ 平面上入射位置与出射位置不重合, 为使两点重合, 利用 GPT 将入射角度优化为 40.2° , 此时 α -磁铁

模型仍然可以视为一个理想的非等时消色差元件^[16]。

当一个电子束团以优化后的角度进入有镜板开孔的 α -磁铁模型中时, 在 α -磁铁出口处的束流参数为: 束团尺寸 $\sigma_x = 2.81$ mm, $\sigma_y = 1.35$ mm; RMS 束流发射度 $\varepsilon_x = 4.58$ π mm·mrad, $\varepsilon_y = 3.61$ π mm·mrad; RMS 脉冲长度为 0.65 ps。该条件下的模拟结果显示, 束流经过 α -磁铁模型后, 束流发射度变化较小, 束团尺寸稍有增长, 即 α -磁铁镜板内磁场对束流传输的影响可以通过减小入射角进行校正。束流经过 α -磁铁模型后的出射方向与入射方向相同, 但束流中心位置在 X 方向上有偏移, 该偏移量可以利用校正磁铁进行传输轨道校正。

在 高能电子成像装置中, 由位于 α -磁铁前端的热阴极微波电子枪提供具有一定时间间隔的脉冲电子束。电子束在 α -磁铁中的运动轨迹形状类似于希腊字母 α , 两个电子束团在 α -磁铁内部运动时距离有时较近, 两者之间存在相互作用。采用双束团追踪模拟的方法, 对两个束团在 α -磁铁内的传输进行分析, 可以研究空间电荷效应对多束团传输的影响。

在 α -磁铁模型出口, 位置在前的束团(束团 1)与位置在后的束团(束团 2)的模拟结果对比如表 2 所列。与上述的单束团模拟对比可知, 两个束团 X 方向上束团尺寸在空间电荷效应影响下均明显增长, 并且电子束的发散角度增大, 因此 X 方向发射度有显著变化。为了在 α -磁铁出口处获得发射度较小的束流, 通常在热阴极微波电子枪与 α -磁铁之间利用四极磁铁对束流参数进行匹配, 抑制束流发射度与束团尺寸的增长。

表 2 双束团模拟束流参数对比

束流参数	束团1	束团2
束团尺寸 σ_x/mm	3.23	2.31
束团尺寸 σ_y/mm	1.44	0.16
发射度 $\varepsilon_x/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	10.99	6.60
发射度 $\varepsilon_y/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	4.40	2.10
RMS束团长度/ps	0.63	0.73

表 3 发射度优化束线元件布置及参数

元件	长度	磁场梯度	单位
D1	0.025	—	m
QD1	0.05	0.657 2	T/m
D2	0.1	—	m
QF2	0.05	1.228 8	T/m
D3	0.1	—	m
QD3	0.05	0.689 8	T/m
D4	0.275	—	m
α -磁铁	—	500	Gs/cm

4 束流传输优化

在上述的传输模拟中, α -磁铁与电子枪之间的距离为 0.15 m, 束流发射度和束团尺寸在没有参数匹配的情况下增长显著。由于 α -磁铁与电子枪之间的束流传输段需要安装轨道校正、束流测量等元件, 两者之间距离远大于 0.15 m, 束流发射度和束团尺寸的增长会更加严重。为抑制束流发射度和束团尺寸的增长, 利用四极磁铁对进入 α -磁铁的电子束进行参数匹配, α -磁铁与电子枪之间距离相应地延长至 0.65 m, 优化后的传输束线布置及元件参数如表 3 所列。

在单束团优化传输模拟中, 经过发射度优化后, 电子束在 α -磁铁模型出口的分布如图 5 所示, α -磁铁出口处的束团横向尺寸为 $\sigma_x=2.08\text{ mm}$, $\sigma_y=1.49\text{ mm}$, 束流横向发射度分别为 $\varepsilon_x=4.70\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, $\varepsilon_y=3.55\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。X 方向发射度增长得到有效抑制, 而 Y 方向发射度在 α -磁铁内的增长抑制效果不明显。通过延长漂移距离, 有效地抑制了过压缩效应, 在

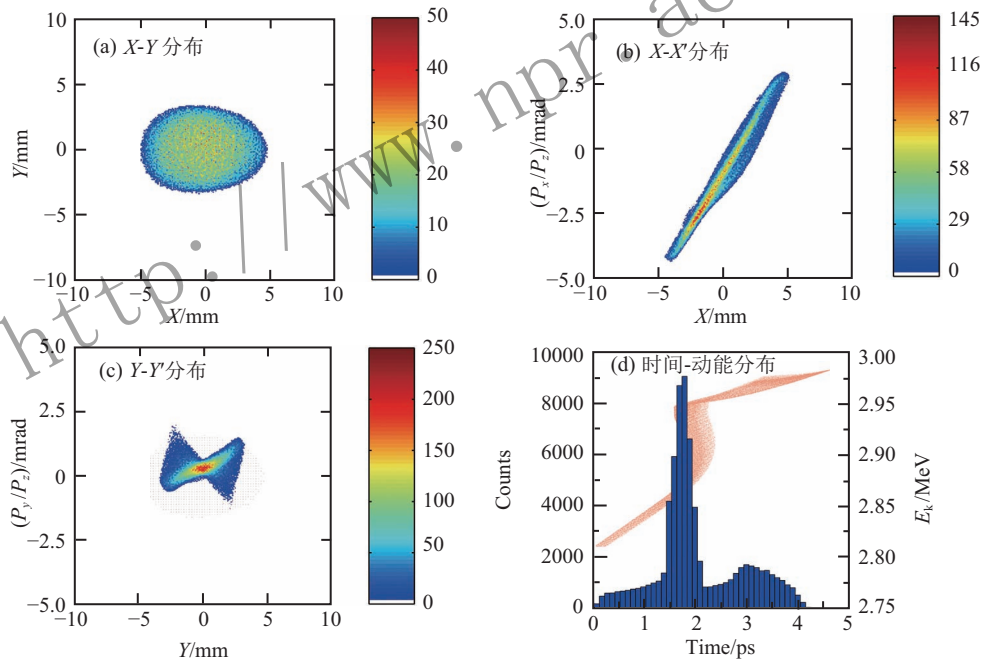


图 5 (在线彩图)发射度优化后电子束横向相空间分布以及时间-动能分布

α -磁铁出口可以得到束团长度为 0.59 ps 的电子束。

在双束团模拟中, 由于束团尺寸在 α -磁铁内部的增长不明显, 束团之间的相互作用对束流传输的影响也减弱。经过注入匹配后, 束团 1 在 X 方向发射度增长减小, Y 方向发射度没有明显变化; 束团 2 的 X 方向发射度相较于优化前无较大变化, Y 方向束团尺寸仍然有减小。因此, 在进行多束团传输优化时, 需根据不同的传输情况进行针对性优化。

5 结论

本文利用 3D 粒子追踪程序 GPT 对强流电子束在有镜板开孔的 α -磁铁模型中的传输过程进行了模拟, 模拟结果表明, 建立的应用于高能电子成像的电子直线加速器的 α -磁铁模型可以实现脉冲纵向压缩, 但 X 方向的发射度增长较为严重, 该发射度的增长主要由空间电荷效应所致, 另外电子束在 α -磁铁内横向运动与纵向运

动的耦合对发射度增长也有贡献。 α -磁铁镜板上束流进出孔对束流传输的影响主要体现为出射角度与入射角度的不对称, 可以通过减小入射角度来补偿; 优化入射角后的单束团模拟结果表明, 束流横向发射度有明显增长, 导致束团尺寸在 X 方向上出现增长, 而 Y 方向束团尺寸由于磁场的对称性而增长不明显。开展了双束团模拟研究, 结果表明, 后一电子束会引起前一电子束的束流发射度的显著增长, 尤其是 X 方向发射度。通过在热阴极微波电子枪与 α -磁铁之间增加四极磁铁组对束流进行匹配, 可以有效地抑制 X 方向发射度与束团尺寸的增长。

参考文献:

- [1] KUNG P, LIHN H C, WIEDEMANN H, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1994, **73**(7): 967.
- [2] MADEY J M J. *Journal of Applied Physics*, 1971, **42**(5): 1906.
- [3] WINICK H, BANE K, BOYCE R, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 1994, **347**(1-3): 199.
- [4] WIEDEMANN H, BOCEK D, HERNANDEZ M, *et al.* *Journal of Nuclear Materials*, 1997, **248**(1): 374.
- [5] ENGE H A. *Review of Scientific Instruments*, 1963, **34**(4): 385.
- [6] BORLAND M, GREEN M C, MILLER R H, *et al.* Performance of the 2 MeV Microwave Gun for the SSRL 150 MeV LINAC [C]// Proceedings of Linear Accelerator Conference 1990. Nantwich: JP Scientific Ltd, 2013: 761.
- [7] LIU Hongxiu. *Nucl Instr and Meth A*, 1990, **294**(1): 365.
- [8] HUANG Yongzhang, WU Gang, ZHANG Lingyi, *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, **7**(3): 354. (in Chinese) (黄永章, 吴钢, 张令翊, 等. *强激光与粒子束*, 1995, **7**(3): 354.)
- [9] BORLAND M. A High-brightness Thermionic Microwave Electron Gun[D]. California: Stanford University, 1991: 385.
- [10] BORLAND M. *Elegant: a Flexible SDDS-compliant Code for Accelerator Simulation*, Advanced Photon Source Light Source Note LS-287, 2000.
- [11] HAMA H, HINODE F, KASAMSOOK K, *et al.* Space Charge Effect for Short Electron Bunches in an Alpha Magnet [C]// Proceeding of FEL08 Korea: Pohang Accelerator Laboratory, 2009: 305.
- [12] VANDER GEER S B, DE LOOS M J. *General Particle Tracer User Manual Version 3.35* [M]. Netherlands: Pulsar Physics, 2018.
- [13] ZHAO Quantang, CAO Shuchun, LIU Ming, *et al.* *Nucl Instr and Meth A* 2016, **832**(1): 144.
- [14] XIAO Xiaoguang, HU Kesong, LI Zhenghong, *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(8): 817. (in Chinese) (肖效光, 胡克松, 李正红, 等. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(8): 817.)
- [15] HUANG Yongzhang, TENG Kejian, XIE Jialin. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1993, **17**(9): 790. (in Chinese) (黄永章, 滕可俭, 谢家麟. *高能物理与核物理*, 1993, **17**(9): 790.)
- [16] ZHU Yunliang, YUAN Ping, CAO Shuchun, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2018, **911**(1): 74.

Simulation and Optimization of Electron Bunches Transport in an Alpha Magnet Model

ZHU Yunliang^{1,2}, CAO Shuchun¹, YUAN Ping¹, ZHANG Jingjing¹, SHEN Xiaokang¹, ZHANG Zimin^{1,†}

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

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Thermionic RF gun-based electron accelerators can produce ultrashort electron beams. The alpha magnet is used for bunch compression. The transmission process of electron bunch in the alpha magnet is complicated. The research results described in the related literature were based on the ideal model, and the study of beam transmission in an alpha magnet which have an entrance hole in the mirror plate was important for the use of alpha magnet. The design model of alpha magnet is presented, which is the important part of high energy electron radiography facility. The beam transport properties between the ideal model and the alpha magnet are compared by beam dynamics simulation. It is verified that the designed alpha magnet model can effectively compress the electron bunch length. The beam dynamics under the optimization injection angle and space charge effects was discussed. It was found that the effects of the mirror plate entrance hole can be compensated by reducing the injection angle. The multi-bunch simulation results were also reported. The beam emittances and bunch sizes can be optimized by installing some quadrupole magnets between the thermionic RF gun and the alpha magnet.

Key words: alpha magnet; beam dynamics; emittance growth; space charge effect; transmission optimization

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

Received date: 26 Oct. 2018; **Revised date:** 16 Jan. 2019

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11435015); International S&T Cooperation Program of China (2016YFE0104900); Instrument Developing Project of Chinese Academy of Sciences (28Y740010); Natural Science Foundation for Young Scientists of Gansu Province (18JR3RA379)

† **Corresponding author:** ZHANG Zimin, E-mail: zzm@impcas.ac.cn.