

文章编号:1673-0062(2013)04-0009-04

串列加速器分束并行束线概念设计

朱 飞¹, 邹树梁^{2*}

(1. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 核能经济与管理研究中心, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:为了使分束并行管道得到足够束流流强, 首先对光阑分束孔径处束流流强进行理论计算, 得出光阑孔径参数与束流流强之间函数关系式; 在此基础上对理论计算进行了模拟验证, 并考察了不同分束孔径下束流发射度的变化; 最后对整条束流线结构布局进行分析计算, 得出各光学元件参数。计算结果准确可信, 能够满足核物理实验终端用户对束流品质要求。

关键词:并行束线; 发射度; 束流光学

中图分类号:TL501

文献标识码:B

Conceptual Design of Parallel Beam Lines for Tandem Accelerator

ZHU Fei¹, ZOU Shu-liang^{2*}

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. Nuclear Energy Economy and Management Research Center, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to get enough beam current for each parallel beam line, the beam intensity distribution along aperture on the diaphragm is calculated to deduce a function which is verified by computer program for simulating charged particle beam transport systems, based on this function relationship between emittance of beam and the different aperture parameters on diaphragm is analyzed. At the end, a conceptual design of parallel beam line is given and the parameters of the optical elements are calculated. The results are accurate and credible, quality of beam can reach the requirements of user for nuclear physics experiments.

key words: parallel beam; emittance; beam optics

中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器作为核物理国家实验室的主要装置, 具有质子和各

种重离子的加速能力, 其更换离子种类方便, 束流单色性好, 能量连续可调^[1]; 每年运行供束 3500

收稿日期: 2013-09-09

作者简介: 朱 飞(1988-), 男, 湖南衡阳人, 南华大学核科学技术学院硕士研究生. 主要研究方向: 粒子加速器束流光学. * 通讯作者.

小时左右,主要服务于核物理基础研究、核数据获取实验、核技术应用实验等^[2]. 现依据实验终端用户需求,将某条束流管道中束流分出一部分用作其他实验,其流强应不低于原流强的 1% 且尽可能较大,以¹⁹⁷Au³⁰⁺ 离子作为设计要求,能量为 350 MeV. 本文的主要内容将围绕束流流强大小与分束光阑孔径参数展开,得出最优关系,设计束流线整体布局,计算光路参数.

1 流强分布分析

在加速器行业中,通常定义束流的前进方向为 z ,平行于地为 x ,垂直于地为 y . 束流在 x 和 y 方向的投影通常满足二维高斯分布,高斯分布宽度分别为 σ_x 和 σ_y . 当束流的半宽度为 3 倍分布宽度时,99% 的束流都已经被包含^[3];为了简化问题,认为束流被限制在一个长短轴分别为 $3\sigma_x$ 和 $3\sigma_y$ 的椭圆中,束流在 x 和 y 方向上投影的束斑强度大小满足二维高斯分布. 其密度函数为:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (1)$$

2 流强计算与分析

粒子经过串列加速器加速,束流通过双单元磁四极透镜在 X 方向上连续两次散焦^[4],使得束流在 X 方向上大面积散开,漂移 1.5 m 后放置一光阑,光阑上有对称 3 小孔,一部分束流将通过小孔穿出,另一部分将被光阑挡掉;其中中心孔半径为 r ,两边分束孔半径为 r_0 ,孔径边缘相距为 R . 见图 1 所示.

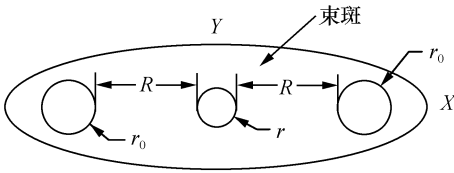


图 1 光阑

Fig. 1 Aperture on diaphragm

设中心孔径原点坐标为 $(0, 0)$, 半径为 r , 则运用式(1)其通过的束流强度为:

$$I(\sigma_x, \sigma_y, r) = \int_{-r}^r \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy \quad (2)$$

同理可得两边分束孔径处通过束流强度为:

$$I_0(\sigma_x, \sigma_y, r, R, r_0) = \int_{r+R}^{r+R+2r_0} \int_{-\sqrt{r_0^2-[x-(r+R+r_0)]^2}}^{\sqrt{r_0^2-[x-(r+R+r_0)]^2}} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \times$$

$$e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy \quad (3)$$

考察束斑特性与束流强度关系,可将光阑上孔径进行简化,认为光阑上的小孔为半宽度为 r 与 r_0 的正方形,则积分式(2)、式(3)可改写为:

$$I(\sigma_x, \sigma_y, r) = 4 \int_0^r \int_0^r \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy \quad (4)$$

$$I_0(\sigma_x, \sigma_y, r, R, r_0) = 2 \int_{r+R}^{r+R+2r_0} \int_0^{r_0} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} dx dy \quad (5)$$

式(4)、式(5)积分结果为:

$$I(\sigma_x, \sigma_y, r) = 4 \left[\Phi\left(\frac{r}{\sigma_x}\right) - \Phi(0) \right] \times \left[\Phi\left(\frac{r}{\sigma_y}\right) - \Phi(0) \right] \quad (6)$$

$$I_0(\sigma_x, \sigma_y, r, R, r_0) = 2 \left[\Phi\left(\frac{r+R+2r_0}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{r+R}{\sigma_x}\right) \right] \times \left[\Phi\left(\frac{r_0}{\sigma_y}\right) - \Phi(0) \right] \quad (7)$$

式(6)、式(7)中 $\Phi(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 为增函数,其中 $\Phi(0) = 0.5$. 对 I 函数式,若 σ_x, σ_y 增大,则 I 减小;若 r 增大,则 I 增大,反之亦然. 对 I_0 函数式,方程后端项同 I ,现考察前端项部分.

设 $a = \Phi\left(\frac{r+R+2r_0}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{r+R}{\sigma_x}\right)$, 则:

$$\frac{\partial a}{\partial \sigma_x} = \Phi'\left(\frac{r+R+2r_0}{\sigma_x}\right) - \Phi'\left(\frac{r+R}{\sigma_x}\right)$$

即:

$$\frac{\partial a}{\partial \sigma_x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{r+R+2r_0}{\sigma_x}\right)^2}{2}} \times \left(\frac{r+R+2r_0}{\sigma_x}\right)_{\sigma_x} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{r+R}{\sigma_x}\right)^2}{2}} \times \left(\frac{r+R}{\sigma_x}\right)_{\sigma_x} \quad (8)$$

令

$$\frac{\partial a}{\partial \sigma_x} = 0 \Rightarrow (r+R) e^{-\frac{(r+R)^2}{2\sigma_x^2}} - (r+R+2r_0) \times e^{-\frac{(r+R+2r_0)^2}{2\sigma_x^2}} = 0 \quad (9)$$

又 $\sigma_x > 0$, 解得:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2r_0(r+R+r_0)}{\ln\left(1 + \frac{2r_0}{r+R}\right)}} \quad (10)$$

当 R 远大于 r 及 r_0 时, $\sigma_x \approx r+R+r_0$, 则 I_0 在此点处取得极大值,即束斑特性满足式(10),分束孔径处流强将取得最大.

3 模拟计算

在上述理论计算中,认为 Y 向束斑特性 σ_y 为不变量,仅变动 σ_x ,且当 $\sigma_x \approx r + R + r_0$ 时, I_0 在此点处取得极大值.但在实际加速器运行调束过程当中,此种情况不会出现, Y 向束斑特性 σ_y 必将随 σ_x 变化而变化;由于双单元磁四极透镜是对束流

在 X 方向上进行散焦,同时对束流在 Y 方向上进行聚焦,因此 Y 向束流包络较小,则可以将光阑 Y 向孔径做的大些,使得光阑分束小孔变为长条形状,其半宽度仍为 r_0 ,可使 Y 向束流全部通过小孔.运用束流光学计算软件 Turtle^[5] 对理论结果进行模拟计算,以孔径参数 $r = 2\text{ mm}$, $R = 12\text{ mm}$, $r_0 = 2\text{ mm}$ 为例,计算结果见表 1 所示.

表 1 模拟计算
Table 1 Simulation calculation

束斑特性/mm		I 束流相对强度		I_0 束流相对强度		磁场强度/kG	
σ_x	σ_y	理论	模拟	理论	模拟	QX	QY
16	4	0.095	0.999	0.06	0.06	-2.7	-3.0
23.333	5	0.072	0.07	0.056	0.054	-3.61	-3.61
10	1.667	0.165	0.163	0.042	0.044	-1.5	-1.6

由表 1 计算结果可知,在 Y 向束流全部包括在小孔内的情况下,随着 σ_x 的增大, I 束流相对强度是逐渐变小的;而 I_0 束流相对强度在 $\sigma_x = 16$ 处取得极大值,理论计算与模拟结果符合的较好.

基于上述分析结果,对于不同的 σ_x ,总可以找出一点使得 I_0 在此处取得极大值,现考察 σ_x 与孔径参数之间关系,此时 Y 向束流全部包括在小孔内;计算结果见表 2,表 3,表 4 所示.

表 2 $\sigma_x = 10\text{ mm}$, $\sigma_y = 1.67\text{ mm}$ 时模拟计算
Table 2 Simulation calculation for $\sigma_x = 10\text{ mm}$, $\sigma_y = 1.67\text{ mm}$

孔径参数/mm			I 束流相对强度		I_0 束流相对强度		I_0 发射度($\text{mm} \times \text{mrad}$)	
r	R	r_0	理论	模拟	理论	模拟	X	Y
1	6	3	0.079	0.082	0.144	0.145	3×1.6	4×5
2	6	2	0.158	0.161	0.096	0.097	2×1.1	4×5
3	6	1	0.235	0.239	0.048	0.048	1×0.65	4×5

表 3 $\sigma_x = 16\text{ mm}$, $\sigma_y = 4\text{ mm}$ 时模拟计算
Table 3 Simulation calculation for $\sigma_x = 16\text{ mm}$, $\sigma_y = 4\text{ mm}$

孔径参数/mm			I 束流相对强度		I_0 束流相对强度		I_0 发射度($\text{mm} \times \text{mrad}$)	
r	R	r_0	理论	模拟	理论	模拟	X	Y
1	12	3	0.05	0.048	0.09	0.091	3×1.6	12×8
2	12	2	0.099	0.095	0.06	0.06	2×1.2	12×8
3	12	1	0.148	0.145	0.03	0.03	1×0.6	12×8

表 4 $\sigma_x = 23\text{ mm}$, $\sigma_y = 5\text{ mm}$ 时模拟计算
Table 4 Simulation calculation for $\sigma_x = 23\text{ mm}$, $\sigma_y = 5\text{ mm}$

孔径参数/mm			I 束流相对强度		I_0 束流相对强度		I_0 发射度($\text{mm} \times \text{mrad}$)	
r	R	r_0	理论	模拟	理论	模拟	X	Y
1	19	3	0.035	0.036	0.063	0.062	3×1.7	14×10
2	19	2	0.069	0.072	0.042	0.042	2×1.1	14×10
3	19	1	0.103	0.105	0.021	0.02	1×0.6	14×10

由上述理论模拟计算可知,在左右分束孔径中心位于极大值处,若 r_0 越大,则 I_0 越大;若 r_0 为定值, σ_x 越小,则 I_0 越大.在左右分流孔径中心位

于极大值处,若 r_0 为定值,对不同的 σ_x ,其 X 向发射度大致相同; Y 向发射度随 σ_y 变大而变大.

4 束流线光路设计

束流通过光阑上的小孔将束流分成三份,考虑到实际工程中光学元件的安装余量,小孔孔径边缘间距应当至少保证在 10 mm 以上;现对分束小孔分出的束流进行光路设计,选取孔径参数为 $r = 2\text{ mm}$, $R = 12\text{ mm}$, $r_0 = 2\text{ mm}$,束斑特性 $\sigma_x = 16\text{ mm}$,

$\sigma_y = 4\text{ mm}$,此时 Y 向束流全部包括在小孔内; I_0 相对流强预计可达 6%,束流发射度为 X 向 $2\text{ mm} \times 1.2\text{ mrad}$, Y 向 $12\text{ mm} \times 8\text{ mrad}$. 光路的起点为光阑分束小孔,束流通过光阑分束小孔,依次经过切割磁铁,偏转磁铁,双单元四极磁铁最后传输到靶上. 束流线流程见图 2 所示. 束流包络见图 3 所示.

其中 KP 为束流成腰处. 光路参数见表 5 所示.

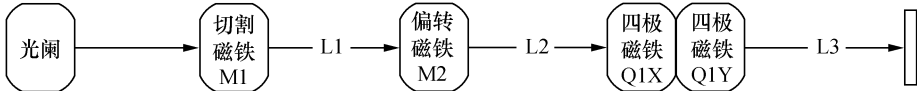


图 2 束流线流程图
Fig. 2 Layout of beam line

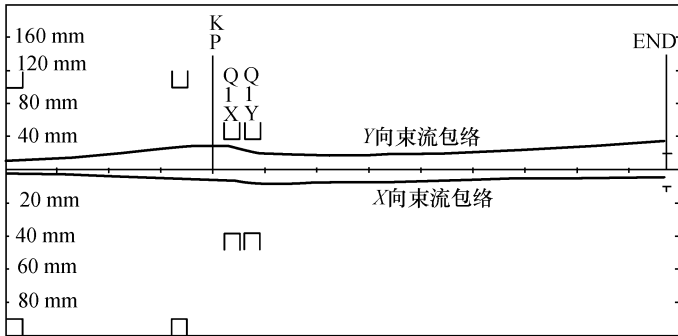


图 3 束流包络图
Fig. 3 Beam envelope

表 5 光路参数

Table 5 Main parameters of beam line

元件	参数
切割磁铁 M1	偏转角 3° , 偏转半径 6 302 mm, 磁场强度 2 kG
漂移段 L1	2863 mm
偏转磁铁 M2	偏转角 17° , 偏转半径 1 050.3 mm, 磁场强度 12 kG
漂移段 L2	728 mm
双单元四极磁铁 Q1XQ1Y	297 mm + 84 mm + 297 mm, 孔径 76.2 mm, 最大场梯度 0.95 kG/cm
漂移段 L3	7 822 mm

通过调节双单元四极磁铁 Q1X, Q1Y 场强大小, 调节束斑在靶上的分布形状, 进而满足终端用户进行核物理实验需求.

5 结 论

通过分析束流满足高斯分布条件下, 计算光阑孔径参数对流强大小的影响, 得出孔径参数与束斑特性最优函数关系式; 将理论计算与软件模拟进行比对, 结论真实可信; 设计束流线结构布局, 计算光学传输元件参数, 束流品质可以达到终端实验用户需求.

参考文献:

[1] 余觉先, 田亚民. HI-13 串列加速器介绍 [R]. 北京: 原子能出版社, 1984.

[2] 胡跃明, 阚朝新, 包轶文, 等. 北京 HI-13 串列加速器 20 年 [R]. 北京: 原子能出版社, 2009.

[3] 范钦珊. 数学手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[4] 吕建钦. 带电粒子束光学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

[5] Carey D C, Brown K L. A user's manual of computer program for simulating charged particle beam transport systems [CP]. U. S. : Department of National Technical Information Service, 1982. <http://lss.fnal.gov/archive/nal/fermilab/>