

多元磁四极微束形成系统的 离子光学特性

茅乃丰

(中国科学院原子能研究所)

肖意轩 蔡志国 徐建铭

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

利用矩阵方法和轨迹跟踪方法计算和分析了具有不同配置方式和励磁模式的32种多元磁四极微束形成系统的离子光学特性。

一、引 言

早在三十年代微细电子束就已经用于高分辨率电子显微镜、扫描电子显微镜和阴影电子显微镜^[1]。而利用微细离子束进行微细加工和分析的历史却不长^[2-4]。离子微束用于微细分析所提供的分析信息的品质要比电子微束的好,种类也要多。因此,七十年代以来核子能量为 MeV 量级的离子微探针有了很大的发展^[5,6]。它们在生物学、医学、地质学、矿物学、材料科学、冶金学、半导体科学、固体物理、腐蚀、催化和考古学等范围很广的学科领域中得到了应用。

离子微束的形成方法有两种:一种是准直方法;另一种是聚焦方法,如采用多元磁四极^[6-9]、多元静电四极、超导螺线管、径向静电场环形透镜等。

本文尝试对多元磁四极系统的离子光学特性进行比较全面的分析研究。这些系统不仅组成方式多样,几何尺寸各异,而且励磁高低也不同。所研究的内容不仅包括不同系统实现双聚焦的条件、缩小率、象的形变、各级固有象差、束斑尺寸、束包络,还包括对不同系统的设计参数,如四极孔径、场梯度、励磁功耗的比较和分析。

二、系统离子光学特性的计算方法

为了描述磁四极微束系统的离子光学特性,引入如图1所示的坐标系统^[10]。图中 z 轴与系统的光轴,即参考轨迹重合; x 和 y 轴分别处于水平面和垂直面内。任意离子在系

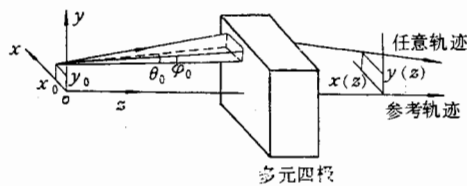


图 1 坐标系统

统中的运动可以用该离子在任意位置 z 处的五个广义坐标, 即其轨迹相对于参考轨迹的位置、角度和动量分散 $x(z)$ 、 $\theta(z)$ 、 $y(z)$ 、 $\varphi(z)$ 和 $\delta(z)$ 来描写. 将它们写成关于 $x_0 = x(0)$ 、 $\theta_0 = \theta(0)$ 、 $y_0 = y(0)$ 、 $\varphi_0 = \varphi(0)$ 和 $\delta_0 = \delta(0)$ 的多重泰勒展开式:

$$\begin{cases} x(z) = \sum (x/x^* \theta^\mu y^\lambda \varphi^\nu \delta^\chi) x_0^* \theta_0^\mu y_0^\lambda \varphi_0^\nu \delta_0^\chi \\ \theta(z) = \sum (\theta/x^* \theta^\mu y^\lambda \varphi^\nu \delta^\chi) x_0^* \theta_0^\mu y_0^\lambda \varphi_0^\nu \delta_0^\chi \\ y(z) = \sum (y/x^* \theta^\mu y^\lambda \varphi^\nu \delta^\chi) x_0^* \theta_0^\mu y_0^\lambda \varphi_0^\nu \delta_0^\chi \\ \varphi(z) = \sum (\varphi/x^* \theta^\mu y^\lambda \varphi^\nu \delta^\chi) x_0^* \theta_0^\mu y_0^\lambda \varphi_0^\nu \delta_0^\chi \end{cases} \quad (1)$$

式中求和分别对 κ 、 μ 、 λ 、 ν 和 χ 进行, 并从零开始包括所有正整数. 括弧 $(x/x^* \theta^\mu y^\lambda \varphi^\nu \delta^\chi)$ 等是展开式系数的记号, 称为系统的传输系数或传输矩阵元, 是 z 的函数. 显然, 在 $z = z_i$ 象平面上, 这些系数就是系统的象差系数, 或称为固有象差系数, 以别于寄生象差系数. 而与指数 $\kappa + \mu + \lambda + \nu + \chi = 0, 1, 2, \dots$ 相对应的系数又分别称为零级、一级、二级……系数. 由于采用图 1 坐标系统, 零级系数为零. 此外, 由于四极场对水平面和垂直面对称, 因此只有系数括弧的分子和分母中 x 和 θ 的幂次和为偶数, y 和 φ 的幂次和也为偶数的那些固有象差系数才可能不为零. 于是(1)式简化为

$$\begin{cases} x(z) = (x/x)x_0 + (x/\theta)\theta_0 + (x/x\delta)x_0\delta_0 + (x/\theta\delta)\theta_0\delta_0 + \text{高级固有象差项} \\ y(z) = (y/y)y_0 + (y/\varphi)\varphi_0 + (y/y\delta)y_0\delta_0 + (y/\varphi\delta)\varphi_0\delta_0 + \text{高级固有象差项} \end{cases} \quad (2)$$

类似地可以写出关于 θ 和 φ 的相应表达式. 表 1 列出了系统的主要固有象差系数及其对离子束成象的影响.

计算系统离子光学特性, 包括象差系数和束包络的一种简易的方法是传输矩阵方法^[11-14]. 采用矩阵方法的计算程序很多, 如 TRANSPORT^[15,16]、OPTIC^[16]、TRIO^[17]、IONBEAM^[18] 等. 其中, TRANSPORT 能够计算由多种元件组成的一、二级传输矩阵和束矩阵. 并能进行系统的优化设计和公差计算. TRIO 则是一个三级传输矩阵程序.

计算离子光学特性的另一种方法是轨迹跟踪法, 其相应计算程序如 RAYTRACE^[19,20]、SOTRM^[20] 等. 其中 RAYTRACE 广泛用于带电粒子谱仪设计, 象差系数计算到五级, 边缘场分布表示成带指数函数的形式^[19]

$$G(z) = \frac{G_0}{1 + \exp \left[\sum_n C_n (z/2a)^n \right]} \quad (3)$$

式中 C_n 为系数, a 为四极孔半径, z 轴原点选在四极场的有效边界上. 实测表明, 两个相邻四极在公共边缘场区的合成场接近于各个四极单独存在时场的叠加^[21].

本文将采用矩阵法 (TRANSPORT 程序) 计算系统的一、二级离子光学特性; 综合利

表 1 多元磁四极微束形成系统的主要固有象差

象差的级别	象差系数	说 明
一级固有象差	(x/x) (y/y)	放大系数,一般很小且互不相等,常引用缩小率 $DM_x = 1/(x/x), DM_y = 1/(y/y)$
	(x/θ) (y/φ)	象散系数,对于理想微束系统两个系数均为零
二级固有象差	$(x/\theta\delta)$ $(y/\varphi\delta)$	色 差
三级固有象差	(x/θ^2) $(x/\theta\varphi^2)$ $(y/\theta^2\varphi)$ (y/φ^3)	球 差

用矩阵法和轨迹跟踪法 (TRIO 和 RAYTRACE 程序) 计算系统的三级象差。

三、一、二级离子光学特性

本文讨论的多元磁四极系统的组成和几何布局如图 2 所示。图中 (a)、(b) 和 (c) 分别是二元、三元和四元系统。

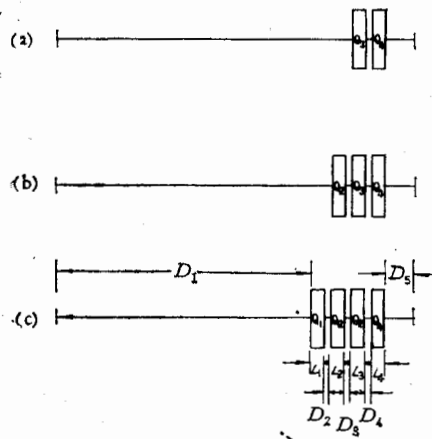


图 2 系统的组成和几何布局

由于系统是双向聚焦的,一级象散系数为零。

因此,由(2)式,系统的非零一、二级固有象差系数仅为 (x/x) 、 (y/y) 、 $(x/x\delta)$ 、 $(x/\theta\delta)$ 、 $(y/y\delta)$ 和 $(y/\varphi\delta)$ 。

表 2 列出了具有相同几何参数,但不同配置方式和励磁模式的多元磁四极系统的一、二级离子光学特性。其几何参数称为基本几何参数,它们是 $D_1 = 500\text{cm}$, $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_0 = 10\text{cm}$, $D_2 = D_3 = D_4 = D_5 = 4\text{cm}$, $D_5 = 10\text{cm}$ 。计算中设参考离子的动量为 $70\text{MeV}/c$, c 为光速。表中所列系统一共有 23 种配置方式。例如

\overline{CDCD} 配置方式表示系统由四个四极组成;各四极在水平面内对离子束依次聚焦 (C)、散焦 (D)、聚焦 (C)、散焦 (D);第一、四两个四极和第二、三两个四极的励磁电流分别以反向串联的方式联合调整。在 23 种配置的系统,有的还具有不同的励磁模式。这是因为系统实现双向聚焦的场梯度的解不是唯一的,有的解场梯度较低,有的则较高。励磁不同,束在水平面和垂直面内出现的中间象的个数 m 和 n 也就不同。当系统在低励磁模式下工作时, $(m, n) = (0, 0)$ 。在表 2 探讨的具有不同配置和励磁的 32 种系统中, \overline{CDCD} IV01 系统^[22]在水平面和垂直面上的缩小率相同, $DM_x = DM_y$, 因而能够形成无形变一级象。下面在分析各种不同系统的特性时就常以与该系统对照的方式进行。

小率

DM

达二

表 2

的系

 $(m,$ $x\delta)$

在数

 $(y/;$

励磁

1. 缩小率 不同系统的缩小率 DM_x 和 DM_y , 相差很大. 一般说来, 低励磁系统的缩小率要低一些, 其大小近 10^4 量级; 高励磁系统则要高得多, 如有的可达 10^2-10^4 量级.

为了反映象面积的缩小, 引入面缩小率 $DM_s = DM_x \cdot DM_y$, 和归一化面缩小率 DM_s/DM_{s0} . 这里 DM_{s0} 是 IV01 系统的 DM_s 值. 由表可见, 各系统的 DM_s/DM_{s0} 值相差达二个数量级.

2. 象的形变 系统在两个面上的缩小率的比值 DM_x/DM_y , 反映了象的一级形变. 如表 2 所列, 具有反对称配置的 IV01 系统 $DM_x/DM_y = 1$, 象无形变; 而不具有反对称配置的系统 $DM_x/DM_y \neq 1$, 其值分布在 $10^{-4}-10^1$ 范围内.

总体上看来, 低励磁系统的象的形变较小, 高励磁系统的则较大. 但也有例外, 如 $(m, n) = (1, 0)$ 的 IV05、IV09-2 和 IV12 系统, 它们的象的形变都较小.

3. 二级固有象差 由表 2 可见, 就每一个系统而言, 它的四个非零二级象差系数 $(x/x\delta)$ 、 $(x/\theta\delta)$ 、 $(y/y\delta)$ 和 $(y/\varphi\delta)$ 的大小都差不多(指绝对值). 但由于束的初始半散角在数值上比半宽度大得多(如 $\theta_0 = \varphi_0 = 0.2\text{mrad}$, $x_0 = y_0 = 0.0025\text{cm}$), 因此 $(x/x\delta)$ 和 $(y/y\delta)$ 项对象差的贡献要比 $(x/\theta\delta)$ 和 $(y/\varphi\delta)$ 项小得多.

其次, 低励磁系统的 $(x/\theta\delta)$ 和 $(y/\varphi\delta)$ 值大体在 $5 \times 10^{-3}-2 \times 10^{-2}$ 范围内, 但高励磁系统的上述系数一般要高几倍甚至一个量级.

4. 束包络 图 3 给出了 III 04 和 IV 01 系统中离子束在水平面和垂直面上的包络图.

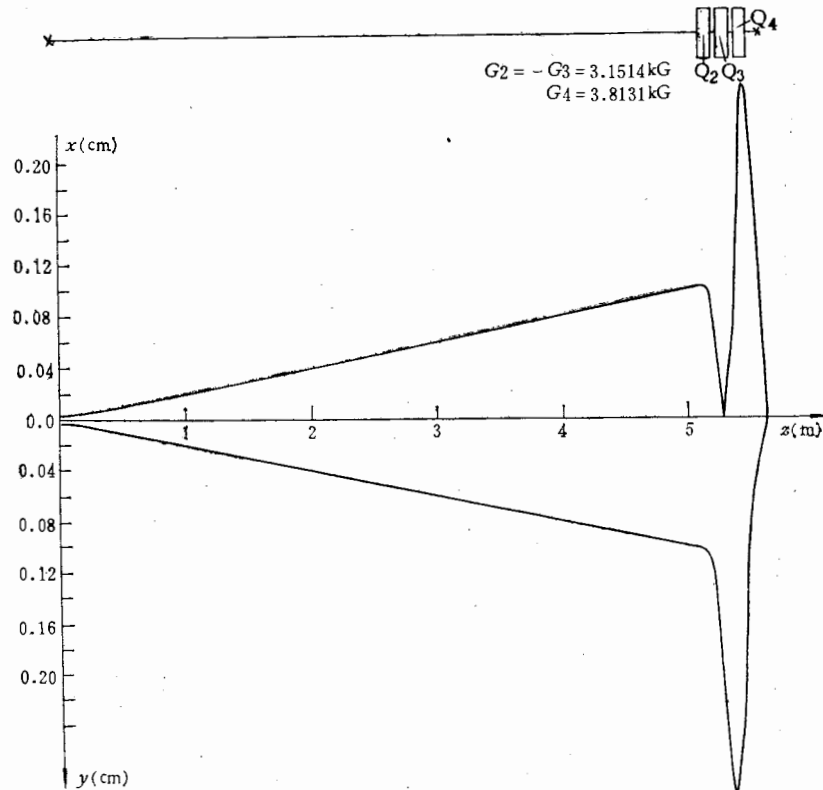


图 3.1 III 04 系统束包络图

表2 一、二级离

系统 编号	配置 方式	励磁 模式	G_1	G_2	G_3	G_4	P/P_0	DM_x	DM_y	DM_z/DM_{z0}	DM_x/DM_y	(x cm)
			kG/cm	kG/cm	kG/cm	kG/cm		cm/cm	cm/cm			
II01	CD	(0,0)			1.4610	-2.8756	1.39	-9.11E0	-6.91E1	3.61E0	1.32E-1	2.
III01	CDD	(0,0)		1.0864	-1.0864	-1.2757	0.53	-5.45E0	-4.80E1	1.50E0	1.14E-1	2.
III02	CDD	(0,0)		1.1019	-1.1643	-1.1643	0.53	-5.50E0	-4.61E1	1.46E0	1.19E-1	2.
III03	CDD	(0,0)		1.1089	-1.2010	-1.1089	0.52	-5.54E0	-4.53E1	1.44E0	1.22E-1	2.
III04	CDC	(1,0)		3.1514	-3.1514	3.8131	4.61	1.03E2	-2.47E1	-1.46E1	-4.17E0	-4.
III05	CDC	(0,0)		1.0605	-2.2063	-2.2063	1.46	-1.91E1	-1.74E1	1.91E0	1.10E0	9.
III06	CDC	(0,0)		1.1864	-2.0754	1.1864	0.95	-1.02E1	-2.31E1	1.36E0	4.42E-1	1.
III07	CCD	(0,0)		0.5636	0.5636	-2.5944	0.99	-6.62E0	-7.56E1	2.87E0	8.76E-2	2.
III08	CCD	(1,0)		15.3482	3.6977	-3.6977	35.23	1.62E1	-3.33E3	-3.10E2	-4.86E-3	-2.
III09	CCD	(1,0)		3.9956	6.9367	-3.9956	10.73	7.08E0	-1.04E3	-4.23E1	-6.81E-3	-1.
IV01	CD \overline{CD}	(0,0)	0.7474	-1.7813	1.7813	-0.7474	1.00	1.32E1	-1.32E1	1.00E0	1.00E0	1.
IV02-1	CD \overline{CC}	(0,0)	0.4202	-1.5639	1.5639	0.4202	0.70	-2.74E1	-7.74E0	1.22E0	3.54E0	1.
-2		(1,0)	1.7082	-2.5030	2.5030	1.7082	2.46	1.71E1	-7.18E0	-7.03E-1	-2.38E0	-2.
IV03-1	CD \overline{DD}	(0,0)	0.9503	-0.8752	-0.8752	0.9503	0.45	-6.50E0	-1.95E1	7.28E-1	3.33E-1	1.
-2		(1,0)	3.2129	-1.3807	-1.3807	3.2129	3.28	2.18E2	-2.65E1	-3.32E1	-8.25E0	-8.
-3		(1,1)	3.9847	-6.6876	-6.6876	3.9847	16.24	1.61E3	2.92E1	2.70E2	5.53E1	-6.
IV04	CD \overline{DD}	(0,0)	0.8679	-0.5808	-0.5808	-0.8679	0.29	-3.78E0	-3.77E1	8.19E-1	1.00E-1	3.
IV05	CC \overline{DC}	(1,0)	3.5205	3.2752	-3.2752	3.5205	6.20	1.48E2	-1.11E2	-9.48E1	-1.33E0	-5.
IV06-1	CC \overline{CD}	(1,0)	3.4563	2.5284	2.5284	-3.4563	4.92	1.10E1	-1.37E3	-8.62E1	-8.03E-3	-1.
-2		(2,0)	4.1717	9.5893	9.5893	-4.1717	14.65	-4.73E0	-2.00E4	5.43E2	2.37E-4	3.
IV07-1	CD \overline{CD}	(0,0)	0.9987	-1.5294	0.9987	-1.5294	0.89	-4.95E0	-2.91E1	8.25E-1	1.70E-1	2.
-2		(0,1)	1.4612	-3.7893	1.4612	-3.7893	4.42	-1.82E0	1.17E2	-1.22E0	-1.56E-2	1.
-3		(1,1)	3.6042	-4.0834	3.6042	-4.0834	7.95	2.91E1	-1.79E2	2.99E1	1.63E-1	-2.
IV08	CD \overline{DD}	(0,0)	0.9337	-0.7896	-0.9337	0.7896	0.40	-5.98E0	-2.11E1	7.25E-1	2.83E-1	1.
IV09-1	CC \overline{DC}	(0,0)	0.4787	0.4787	-1.6937	0.4787	0.48	-6.05E0	-3.08E1	1.07E0	1.97E-1	1.
-2		(1,0)	3.5190	3.5190	-3.3110	3.5190	6.45	1.40E2	-1.17E2	-9.38E1	-1.19E0	-5.
-3		(2,0)	5.7186	5.7186	-3.8152	5.7186	15.10	-1.58E1	-1.92E2	1.75E1	8.23E-2	1.
IV10	CC \overline{CD}	(1,0)	3.4156	3.4156	2.2559	-3.4156	5.37	9.06E0	-1.56E3	-8.12E1	-5.81E-3	-1.
IV11	CC \overline{DD}	(0,0)	0.3966	0.3966	-0.3966	-1.8933	0.54	-4.40E0	-6.61E1	1.67E0	6.66E-2	2.
IV12	CC \overline{DC}	(1,0)	3.2734	3.2734	-3.2734	3.5328	5.98	1.47E2	-1.04E2	-8.78E1	-1.41E0	-5.
IV13-1	CD \overline{CC}	(0,0)	0.8961	-1.7247	0.8961	0.8961	0.72	-1.55E1	-1.00E1	8.94E-1	1.55E0	5.
-2		(1,0)	1.8813	-2.4485	1.8813	1.8813	2.23	2.93E1	-8.43E0	-1.42E0	-3.47E0	5.

子光学特性

$(x/x\delta)$	$(x/\theta\delta)$	$(y/y\delta)$	$(y/\varphi\delta)$	$(x/x)_m$	$(x/\theta)_m$	$(y/y)_m$	$(y/\varphi)_m$	x_m	y_m
cm/cm%	cm/mrad%	cm/cm%	cm/mrad%	cm/cm	cm/mrad	cm/cm	cm/mrad	cm	cm
2.33E-2	1.21E-2	1.91E-2	1.04E-2	1.00E0	5.28E-1	1.72E0	9.30E-1	0.11	0.19
2.81E-2	1.39E-2	1.65E-2	8.79E-3	1.00E0	5.14E-1	1.62E0	8.55E-1	0.10	0.17
2.79E-2	1.39E-2	1.66E-2	8.83E-3	1.00E0	5.14E-1	1.62E0	8.54E-1	0.10	0.17
2.78E-2	1.38E-2	1.66E-2	8.86E-3	1.00E0	5.14E-1	1.62E0	8.54E-1	0.10	0.17
-4.83E-2	-2.43E-2	1.28E-1	6.71E-2	-2.61E0	-1.31E0	2.82E0	1.47E0	0.26	0.30
9.14E-3	5.05E-3	3.44E-2	1.81E-2	1.00E0	5.14E-1	1.52E0	7.99E-1	0.10	0.16
1.49E-2	7.75E-3	2.80E-2	1.48E-2	1.00E0	5.14E-1	1.60E0	8.41E-1	0.10	0.17
2.21E-2	1.11E-2	2.08E-2	1.12E-2	1.00E0	5.14E-1	1.95E0	1.04E0	0.10	0.21
-2.09E-1	-1.07E-1	1.28E0	6.65E-1	-1.79E0	-9.23E-1	8.36E1	4.33E1	0.19	8.66
-1.56E-1	-7.92E-2	4.04E-1	2.11E-1	1.00E0	5.14E-1	2.50E1	1.31E1	0.10	2.61
1.43E-2	7.68E-3	2.53E-2	1.31E-2	1.00E0	5.00E-1	1.36E0	6.96E-1	0.10	0.14
1.38E-2	7.49E-3	3.10E-2	1.57E-2	1.20E0	6.46E-1	1.19E0	6.11E-1	0.13	0.12
-2.82E-2	-1.34E-2	1.37E-1	6.99E-2	1.00E0	5.00E-1	1.89E0	9.68E-1	0.10	0.19
1.83E-2	9.11E-3	2.44E-2	1.27E-2	1.00E0	5.00E-1	1.56E0	8.01E-1	0.10	0.16
-8.40E-2	-4.12E-2	1.37E-1	6.98E-2	-5.85E0	-2.87E0	3.32E0	1.69E0	0.57	0.34
-6.72E-1	-3.29E-1	-6.20E-1	-3.15E-2	-4.14E1	-2.03E1	-3.20E0	-1.62E0	4.06	0.33
3.17E-2	1.51E-2	1.54E-2	8.06E-3	1.00E0	5.00E-1	1.57E0	8.15E-1	0.10	0.16
-5.88E-2	-2.96E-2	5.99E-1	3.04E-1	-3.80E0	-1.91E0	1.23E1	6.26E0	0.38	1.25
-1.25E-1	-6.22E-2	4.99E-1	2.54E-1	-1.28E0	-6.37E-1	3.50E1	1.78E1	0.13	3.56
3.29E-1	1.62E-1	6.68E0	3.39E0	1.00E0	5.00E-1	3.95E2	2.00E2	0.10	40.10
2.51E-2	1.23E-2	1.55E-2	8.15E-3	1.00E0	5.00E-1	1.52E0	7.78E-1	0.10	0.16
1.02E-1	4.86E-2	-6.44E-2	-3.27E-2	.00E0	5.00E-1	-2.94E0	-1.49E0	0.10	0.30
-2.50E-1	-1.23E-1	-1.12E-1	-5.69E-2	-3.65E0	-1.79E0	-4.44E0	-2.24E0	0.36	0.45
1.99E-2	9.84E-3	2.32E-2	1.21E-2	1.00E0	5.00E-1	1.56E0	8.04E-1	0.10	0.16
1.90E-2	9.39E-3	2.51E-2	1.32E-2	1.00E0	5.00E-1	1.82E0	9.47E-1	0.10	0.19
-5.58E-2	-2.82E-2	6.34E-1	3.22E-1	-3.57E0	-1.80E0	1.29E1	6.56E0	0.36	1.31
1.28E-1	6.27E-2	2.48E0	1.26E0	-1.18E0	-5.85E-1	3.02E1	1.53E1	0.10	3.06
-1.28E-1	-6.34E-2	5.67E-1	2.88E-1	-1.07E0	-5.34E-1	3.99E1	2.03E1	0.10	4.06
2.57E-2	1.24E-2	1.90E-2	1.00E-2	1.00E0	5.01E-1	1.88E0	9.86E-1	0.10	0.20
-5.84E-2	-2.94E-2	5.60E-1	2.85E-1	-3.77E0	-1.90E0	1.15E1	5.87E0	0.38	1.17
9.04E-3	4.93E-3	3.82E-2	1.95E-2	1.00E0	5.00E-1	1.44E0	7.40E-1	0.10	0.15
-2.76E-2	-1.31E-2	1.30E-1	6.60E-2	1.00E0	5.00E-1	2.01E0	1.03E0	0.10	0.21

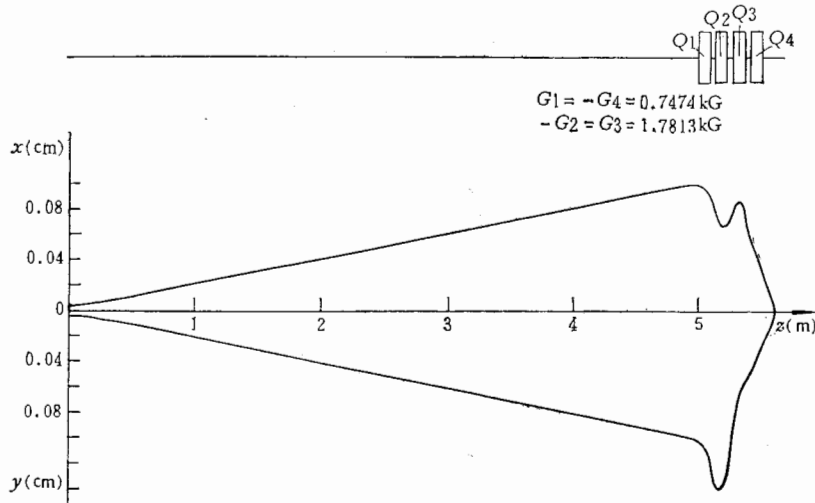


图 3.2 IV 01 系统束包络图

包络计算中,束在物缝处的初始相空间取为正椭球,其半轴长分别为 $x_0 = y_0 = 0.0025\text{cm}$, $\theta_0 = \varphi_0 = 0.2\text{mrad}$ 和 $\delta_0 = 0.05\%$ 。表 2 还列出了各系统中水平束包络和垂直束包络的最大半宽度 x_m 和 y_m ,以及传输过程中系数 (x/x) 、 (x/θ) 、 (y/y) 和 (y/φ) 的绝对极值 $(x/x)_m$ 、 $(x/\theta)_m$ 、 $(y/y)_m$ 和 $(y/\varphi)_m$ 。从这些图表可以看到:

第一,束包络的最大半宽度出现在四极范围内。因此这一宽度决定了四极的有效孔径。

第二,对于低励磁系统,包络的最大半宽度一般小于 0.2cm ;但高励磁系统则要大多,有的甚至大到低励磁系统的几十倍。不过也有例外,如 $(m,n) = (1,0)$ 的 III04 系统, $x_m = 0.26\text{cm}$, $y_m = 0.30\text{cm}$ 。

第三,由于束的初始半散角比半宽度在数值上大得多,因此束包络的最大半宽度主要取决于束的初始半散角。于是,对于给定系统,为了减小束包络和四极孔径,应减小束的初始半散角。

5. 四极的场梯度和系统的功耗 表 2 同时列出了各四极的场梯度 G_1, G_2, G_3 和 G_4 , 以及反映系统功耗大小的归一化量 P/P_0 , 其中 $P = \sum_{i=1}^4 G_i^2 z$, P_0 为 IV01 系统的 P 值。

由表可见,低励磁系统四极的场梯度在 $(1-2)\text{kG/cm}$ 以下,高励磁系统则要高得多,如有的高于 3kG/cm ,其功耗也比低励磁系统的高几倍到一个量级。

下面进一步探讨改变几何参数时,系统一、二级光学特性的变化。几何参数的改变范围是: $D_1 = 300(100)600\text{cm}$, $D_2 = 2(2)8\text{cm}$, $D_3 = 5(5)20\text{cm}$, $L_0 = 6(4)18\text{cm}$ 。而归一量 DM_x/DM_{x0} 和 P/P_0 仍以取基本几何参数的 IV01 系统的相应量归一。计算结果表明:

1. D_1 增大时,系统的缩小率 DM_x 和 DM_y 、二级象差系数 $(x/\theta\delta)$ 和 $(y/\varphi\delta)$ 、传输过程中极值 $(x/\theta)_m$ 和 $(y/\varphi)_m$ 以及束包络的最大半宽度 x_m 和 y_m 均近似随 D_1 线性增加;而归一化面缩小率 DM_x/DM_{x0} 则随 D_1 平方增加。

2. 四极间距 D_i 减小时, 系统的缩小率增大, 场梯度和功耗也有明显增加。

3. D_i 减小时, 系统的缩小率增大, 场梯度和功耗也增加。对高励磁系统, D_i 的减小还将使象的形变加剧。

4. 四极长度 L_0 的增加将减小四极的场梯度和功耗。如当 L_0 从 6cm 增加到 18 cm 时, 场梯度下降 5 倍左右, 功耗下降近一个量级。但这时系统的缩小率也有所下降。

四、三级象差

由于场的对称性, 有关 x 和 y 的非零三级固有象差系数分别只有 12 项, 它们是 $(x/x^3), (x/x^2\theta), (x/x\theta^2), (x/x\delta^2), (x/xy^2), (x/xy\varphi), (x/x\varphi^2), (x/\theta^3), (x/\theta\delta^2), (x/\theta y^2), (x/\theta y\varphi), (x/\theta\varphi^2), (y/y^3), (y/y^2\varphi), (y/y\varphi^2), (y/y\delta^2), (y/x^2y), (y/xy\theta), (y/\theta^2y), (y/\varphi^3), (y/\varphi\delta^2), (y/x^2\varphi), (y/x\theta\varphi)$ 和 $(y/\theta^2\varphi)$ 。

我们首先利用 RAYTRACE 程序计算了某些系统的主要三级象差系数。计算中四极边缘场系数 $C_0 = 0.1122, C_1 = 6.2761, C_2 = -1.4982, C_3 = 3.5882, C_4 = -2.1209, C_5 = 1.7230$ 。和用 TRIO 程序计算所得结果相比, 两者吻合得较好。因此, 各系统的全部三级象差系数就用算题时间较短的 TRIO 完成。

计算结果表明, 在全部 24 项三级象差中, 与系数 $(x/\theta^3), (x/\theta\varphi^2), (y/\varphi^3)$ 和 $(y/\theta^2\varphi)$ 相应的项是主要的, 这些项比其它项大几倍, 甚至上数量级。表 3 列出了各系统的这四个主要象差系数。由表可见, 高励磁系统的三级象差要比低励磁的大, 甚至大到几个量级。

五、象 特 性

离子束在象平面上的特性综合列于表 3。除各主要象差系数外, 表中还列出了当 $x_0 = y_0 = 0.0025\text{cm}, \theta_0 = \varphi_0 = 0.2\text{mrad}$ 和 $\delta_0 = 0.05\%$ 时, 与上述象差系数相应的各项象差, 以及在两个平面上这些象差的绝对值之和 W_{Tx} 和 W_{Ty} 。显然这两个和值分别反映了样品表面象斑的半宽度和半高度的主要部分。从这些结果不难看出:

1. 对于上述初始条件离子束, 所有低励磁系统都具有很好的微束形成特性。例如 IV01 系统可形成半宽和半高小于 $4\mu\text{m}$ 的近方形象斑; III05 系统象斑的半宽和半高分别为 $2.1\mu\text{m}$ 和 $4.0\mu\text{m}$ 等。

2. 某些高励磁系统也具有较好的微束形成特性。如 III04 系统象斑的半宽和半高分别为 $6.3\mu\text{m}$ 和 $2.4\mu\text{m}$, IV13-2 系统为 $2.6\mu\text{m}$ 和 $14\mu\text{m}$ 等。

3. 上述系统虽然都有较好的成象特性, 但象斑大小仍有差别, 而且象斑具有不同的形变, 因而可以在不改变系统几何参数的情况下, 通过改变配置方式和励磁模式使系统形成经过不同束形变换的微束。

4. 对于上述初始离子束, 低励磁系统的象斑尺寸主要取决于系统的一级半宽度, 二级象差对象斑尺寸的贡献是次要的, 三级的贡献更小。因而, 为了减小这类系统的象斑尺寸, 首要的是减小束的初始半宽和半高, 其次是减小束的初始动量分散。例如, 若将束的初始半宽和半高从 $25\mu\text{m}$ 减到 $10\mu\text{m}$, IV01 系统象斑的半宽和半高将减到 $1.9\mu\text{m}$ 和 $2.6\mu\text{m}$ 。

n,
络
值
孔
得
系
要
的
3,
得
范
归
表
过
加;

表3 各级主要象差系

系统	配置	励磁	DM_x	$(x/\theta\delta)$	(x/θ^2)	$(x/\theta\varphi^2)$	DM_y	$(y/\varphi\delta)$	(y/φ^3)
编号	方式	模式	cm/cm	cm/mrad%	cm/mrad ²	cm/mrad ³	cm/cm	cm/mrad%	cm/mrad ³
II01	CD	(0,0)	-9.11E0	1.21E-2	-8.74E-4	-8.65E-3	-6.91E1	1.04E-2	-4.85E-3
III01	CDD	(0,0)	-5.45E0	1.39E-2	-7.58E-4	-5.24E-3	-4.80E1	8.79E-3	-1.46E-3
III02	CDD	(0,0)	-5.50E0	1.39E-2	-7.72E-4	-5.42E-3	-4.61E1	8.83E-3	-1.48E-3
III03	CDD	(0,0)	-5.54E0	1.38E-2	-7.78E-4	-5.50E-3	-4.53E1	8.86E-2	-1.50E-3
III04	CDC	(1,0)	1.03E2	-2.43E-2	2.03E-2	2.50E-2	-2.47E1	6.71E-2	-1.03E-1
III05	CDC	(0,0)	-1.91E1	5.05E-3	-3.48E-4	-3.13E-3	-1.74E1	1.81E-2	-6.24E-3
III06	CDC	(0,0)	-1.02E1	7.75E-3	-5.19E-4	-4.82E-3	-2.31E1	1.48E-2	-5.18E-3
III07	CCD	(0,0)	-6.62E0	1.11E-2	-2.63E-4	-5.06E-3	-7.56E1	1.12E-2	-5.49E-3
III08	CCD	(1,0)	1.62E1	-1.07E-1	5.11E-2	7.57E1	-3.33E3	6.65E-1	-8.30E2
III09	CCD	(1,0)	7.08E0	-7.92E-2	1.28E-2	4.37E0	-1.04E3	2.11E-1	-2.43E1
IV01	CDCC	(0,0)	-1.32E1	7.68E-3	-7.88E-4	-3.75E-3	-1.32E1	1.31E-2	-3.24E-3
IV02-1	CDCC	(0,0)	-2.74E1	7.49E-3	-1.08E-3	-1.74E-3	-7.74E0	1.57E-2	-2.39E-3
-2		(1,0)	1.71E1	-1.34E-2	5.93E-4	5.00E-3	-7.18E0	6.99E-2	-4.25E-2
IV03-1	CDDC	(0,0)	-6.50E0	9.11E-3	-4.55E-4	-2.98E-3	-1.95E1	1.27E-2	-1.70E-3
-2		(1,0)	2.18E2	-4.12E-2	1.59E-1	3.57E-2	-2.65E1	6.98E-2	-5.88E-2
-3		(1,1)	1.61E3	-3.29E-1	8.17E1	7.34E-1	2.92E1	-3.15E-1	8.95E-1
IV04	CDDD	(0,0)	-3.78E0	1.51E-2	-6.40E-4	-3.66E-3	-3.77E1	8.06E-3	-6.99E-4
IV05	CCDC	(1,0)	1.48E2	-2.96E-2	5.98E-2	7.08E-1	-1.11E2	3.04E-1	-7.96E0
IV06-1	CCCD	(1,0)	1.10E1	-6.22E-2	8.89E-3	6.55E0	-1.37E3	2.54E-1	-4.71E1
-2		(2,0)	-4.73E0	1.62E-1	-2.38E-2	-8.44E2	-2.00E4	3.39E0	-9.76E4
IV07-1	CDCC	(0,0)	-4.95E0	1.23E-2	-7.58E-4	-6.49E-3	-2.91E1	8.15E-3	-2.02E-3
-2		(0,1)	-1.82E0	4.86E-2	-3.80E-3	-5.28E-2	1.17E2	-3.27E-2	3.16E-2
-3		(1,1)	2.91E1	-1.23E-1	2.20E-1	4.95E-1	1.79E2	-5.69E-2	1.19E-1
IV08	CDDC	(0,0)	-5.98E0	9.84E-3	-4.75E-4	-3.04E-3	-2.11E1	1.21E-2	-1.57E-3
IV09-1	CCDC	(0,0)	-6.05E0	9.39E-3	-2.06E-4	-3.40E-3	-3.08E1	1.32E-2	-4.06E-3
-2		(1,0)	1.40E2	-2.82E-2	5.04E-2	7.46E-1	-1.17E2	3.22E-1	-9.34E0
-3		(2,0)	-1.58E1	6.27E-2	-1.44E-2	-4.97E0	-1.92E2	1.26E0	-2.26E2
IV10	CCCD	(1,0)	9.06E0	-6.34E-2	7.26E-3	6.67E0	-1.56E3	2.88E-1	-6.82E1
IV11	CCDD	(0,0)	-4.40E0	1.24E-2	-1.92E-4	-2.45E-3	-6.61E1	1.00E-2	-2.67E-3
IV12	CCDC	(1,0)	1.47E2	-2.94E-2	5.85E-2	6.09E-1	-1.04E2	2.85E-1	-6.54E0
IV13-1	CDCC	(0,0)	-1.55E1	4.93E-3	-2.89E-4	-2.36E-3	-1.00E1	1.95E-2	-5.07E-3
-2		(1,0)	2.93E1	-1.31E-2	7.13E-4	4.24E-3	-8.43E0	6.60E-2	-4.39E-2

坐标系

数、象差及象斑尺寸

$y/\theta^2\varphi$	x_0/DM_x	$(x/\theta\delta)/\theta_0\delta_0$	$(x/\theta^2)\theta_0^2$	$(x/\theta\varphi^2)/\theta_0\varphi_0^2$	W_{rx}	y_0/DM_y	$(y/\varphi\delta)/\varphi_0\delta_0$	$(y/\varphi^2)/\varphi_0^2$	$(y/\theta^2\varphi)/\theta_0^2\varphi$	W_{ry}	
$cm/mrad^2$	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	
E-3	-1.14E-3	-2.74	1.21	-0.07	-0.69	4.71	-0.36	1.04	-0.39	-0.09	1.88
E-3	-5.96E-4	-4.59	1.39	-0.06	-0.42	6.46	-0.52	0.88	-0.12	-0.05	1.57
E-3	-6.47E-4	-4.54	1.39	-0.06	-0.43	6.42	-0.54	0.88	-0.12	-0.05	1.59
E-3	-6.73E-4	-4.52	1.38	-0.06	-0.44	6.40	-0.55	0.89	-0.12	-0.05	1.61
E-1	-1.03E-1	0.24	-2.43	1.62	2.00	6.29	-1.01	6.71	-8.27	-8.21	24.20
E-3	-3.42E-3	-1.31	0.51	-0.03	-0.25	2.10	-1.44	1.81	-0.50	-0.27	4.02
E-3	-2.13E-3	-2.44	0.78	-0.04	-0.39	3.65	-1.08	1.48	-0.41	-0.17	3.14
E-3	-4.43E-4	-3.78	1.11	-0.02	-0.40	5.31	-0.33	1.12	-0.44	-0.04	1.93
E2	-3.27E-1	1.54	-10.73	4.09	6.1E3	6.1E3	-0.01	66.50	-6.6E4	-26.14	6.6E4
E1	-3.02E-2	3.53	-7.92	1.02	3.5E2	3.6E2	-0.02	21.10	-1.9E3	-2.42	2.0E3
E-3	-3.74E-3	-1.89	0.77	-0.06	-0.30	3.02	-1.89	1.31	-0.26	-0.30	3.76
E-3	-6.14E-3	-0.91	0.75	-0.09	-0.14	1.89	-3.23	1.57	-0.19	-0.49	5.48
E-2	-1.19E-2	1.47	-1.34	0.05	0.40	3.26	-3.48	6.99	-3.40	-0.96	14.83
E-3	-9.92E-4	-3.85	0.91	-0.04	-0.24	5.04	-1.28	1.27	-0.14	-0.08	2.77
E-2	-2.89E-1	0.11	-4.12	12.71	2.85	19.79	-0.95	6.98	-4.70	-23.12	35.75
E-1	3.95E1	0.02	-32.93	6.5E3	58.74	6.6E3	0.86	-31.45	71.62	3.2E3	3.3E3
E-4	-3.68E-4	-6.61	1.51	-0.05	-0.29	8.46	-0.66	0.81	-0.06	-0.03	1.56
E0	-9.11E-1	0.17	-2.96	4.78	56.64	64.55	-0.22	30.43	-6.4E2	-72.86	7.4E2
E1	-5.17E-2	2.28	-6.22	0.71	5.2E2	5.3E2	-0.02	25.37	-3.8E3	-4.14	3.8E3
E4	-2.72E-1	-5.29	16.18	-1.91	-6.8E4	6.8E4	-0.00	3.4E2	-7.8E6	-21.74	7.8E6
E-3	-1.11E-3	-5.06	1.23	-0.06	-0.52	6.87	-0.86	0.82	-0.16	-0.09	1.93
E-2	8.52E-4	-13.71	4.86	-0.30	-4.22	23.09	0.21	-3.27	2.53	0.07	6.08
E-1	8.11E-2	0.86	-12.26	17.56	39.58	70.26	0.14	-5.69	9.50	6.49	21.82
E-3	-8.61E-4	-4.18	0.98	-0.04	-0.24	5.44	-1.18	1.21	-0.13	-0.07	2.59
E-3	-6.68E-4	-4.13	0.94	-0.02	-0.27	5.36	-0.81	1.32	-0.32	-0.05	2.50
E0	-8.61E-1	0.18	-2.82	4.03	59.67	66.70	-0.21	32.22	-7.5E2	-68.86	8.5E2
E2	-4.16E-1	-1.58	6.27	-1.15	-4.0E2	4.1E2	-0.13	1.3E2	-1.8E4	-33.26	1.8E4
E1	-3.84E-2	2.76	-6.34	0.58	5.3E2	5.4E2	-0.02	28.84	-5.5E3	-3.07	5.5E3
E-3	-1.64E-4	-5.69	1.24	-0.02	-0.20	7.15	-0.38	1.00	-0.21	-0.01	1.60
E0	8.33E-1	0.17	-2.94	4.68	48.74	56.53	-0.24	28.48	-5.2E2	-66.66	6.2E2
E-3	-3.65E-3	-1.61	0.49	-0.02	-0.19	2.31	-2.49	1.95	-0.41	-0.29	5.14
E-2	-1.47E-2	0.85	-1.31	0.06	0.34	2.56	-2.96	6.60	-3.51	-1.17	14.24

5. 对于高励磁系统情况有所不同。其象的一级半宽和半高很小,而二级色差,特别是三级角象差却比较大。因此,为了减小象斑尺寸,应尽量减小束的初始散角和动量分散。例如,将 θ_0 和 φ_0 从0.2 mrad减到0.1 mrad,将 δ_0 从0.05%减到0.01%,则III04系统象斑的半宽和半高将减到0.9 μm 和3.7 μm 。

6. 对离子束初始相空间的限制是有限的。因此为了进一步改善象特性,特别是三级象差很大的高励磁系统的象特性,需要考虑象差校正。八极场可以有效地校正系统的三级角象差。在三级角象差校正之后,由初始动量分散引起的二级色差就成了象差主项。

六、结 束 语

文中列出了不同系统的全部离子光学特性,为微束系统配置方式和励磁模式的选择以及系统参数设计提供了详尽的数据。

由于不同系统的离子光学特性互不相同,低励磁和高励磁两类不同模式系统相差更大,因此,一个系统只要在设计时给四极励磁留有一定余地,就可能在系统加工、安装之后,通过改变系统的配置方式和励磁模式,成为具有不同离子光学特性的新系统。

高励磁模式系统的缩小率比低励磁系统的大得多。因此,在高励磁模式下工作是提高微束系统水平的一个可能途径。但是,高励磁系统的象差要大一些,四极的场梯度也要高一些。因此需要进一步探讨象差校正问题。而加长四极长度却不失为减小场梯度的可行方法。

原子能研究所徐欣欣等同志参加了部分数值计算,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Koichi Kanaya et al., 电气试验所汇报 33, 11(1969), 1.
- [2] R. L. Seliger and P. A. Sullivan, Electronics 53, 7, 142(1980).
- [3] [日]微细加工技术编辑委员会编, 微细加工技术, 科学出版社, 1983.
- [4] T. B. Pierce, Proc. Euratom Meeting on Practical Aspects of Activation Analysis with Charged Particles, p. 53, Grenoble, 1965.
- [5] J. A. Cookson, Nucl. Instr. and Meth., 165(1979), 477.
- [6] G. J. F. Legge, Nucl. Instr. and Meth., 197(1982), 243.
- [7] F. Watt et al., IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-28(1981), 1413.
- [8] F. Watt et al., Nucl. Instr. and Meth., 197(1982), 65.
- [9] G. W. Grime et al., Nucl. Instr. and Meth., 197(1982), 97.
- [10] 茅乃丰, 带电粒子光学系统设计和计算机程序, 北京电机学会加速器专业委员会专题讲座讲义, 1981年5月, 北京.
- [11] K. L. Brown, SLAC-75, Rev. 3, 1972.
- [12] 茅乃丰, 质谱学杂志, 4, 2(1983), 27; 4, 3(1983), 16.
- [13] K. L. Brown et al., Nucl. Instr. and Meth., 141(1977), 393.
- [14] D. Heckk, Nucl. Instr. and Meth., 143(1977), 423.
- [15] K. L. Brown et al., SLAC-91, Rev. 2, 1977; K. L. Brown et al., CERN 80-04, 1980.
- [16] J. D. Larson, OPTIC II A Beam Transport Program, Version 32, BNL, 1977.
- [17] T. Matsuo et al., 质量分析, 24(1976), 19.
- [18] D. Heck and E. Kasseckert, KFK 2379, (1976), p. 130.
- [19] H. A. Enge and S. B. Kowalski, Proc. 3rd Int. Conf. on Megnet Technology, Hamburg (1970), p. 366.
- [20] E. R. Close, UCRL-19823, Lawrence Berkeley Lab., Berkeley, California, 1970.

- [21] P. W. Hawkes, *Quadrupoles in Electron Lens Design* (Adv. in Electronics and Electron Physics, Supplement 7), Academic Press, New York, 1970.
- [22] А. Д. Дымников и др., *ЖТФ* 35. (1965), 431.

ION OPTICAL CHARACTERISTICS OF MAGNETIC QUADRUPOLE MULTIPLY MICROBEAM-FORMING SYSTEMS

MAO NAI-FENG

(Institute of Atomic Energy, Academia Sinica)

XIAO YI-XUAN, CAI ZHI-GUO XU JIAN-MING

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The ion optical characteristics of 32 magnetic quadrupole multiplet microbeam-forming systems with different configurations and excitation modes are calculated and analysed by the use of matrix and ray-tracing methods.