

迴旋加速器引出管道离子光学系统的设计问题

周政 萧春 萧意軒 唐觉春 董振杰

一、引言

本文讨论了偏转磁铁和磁四极透镜对的成象条件，并给出一些不同参数的偏转磁铁和磁四极透镜对的成象曲线。

我们曾对离子光学系统的设计问题进行了一些调研，对离子光学系统上常用的元件，如偏转磁铁、磁四极透镜的性能，进行了一些计算，积累了一些数据资料。现将这些数据整理出来，供有关的同志参考。

二、有关偏转磁铁的数据

本文只讨论利用边缘场聚焦的偏转磁铁。图 1 是这种磁铁的磁极面的示意图，图中画出一条粒子轨迹。磁极是两个平行平面。假设磁场是均匀的，动量为 P_0 的粒子在磁场中轨道的曲率半径为 ρ_0 。上下磁极在粒子进出口边缘上有两块可以同步转动的铁块，转动的轴线为端面的轴线，它与磁场方向平行。通过进出口端面的中心轴线 O 和 O' ，曲率半径为 ρ_0 的圆弧轨道称为磁铁中的中心轨道，它的曲率中心是 P ，中心张角是 α （称 α 为偏转磁铁的偏转角）。当动量为 P_0 的粒子垂直于 PO 并通过 O 点入射时（沿 QO 入射），它就沿中心轨道 OO' 运动，并以垂直于 $O'P$ 的方向离开磁铁（沿 $O'R$ 运动）。 $QOO'R$ 总称为中心轨道。

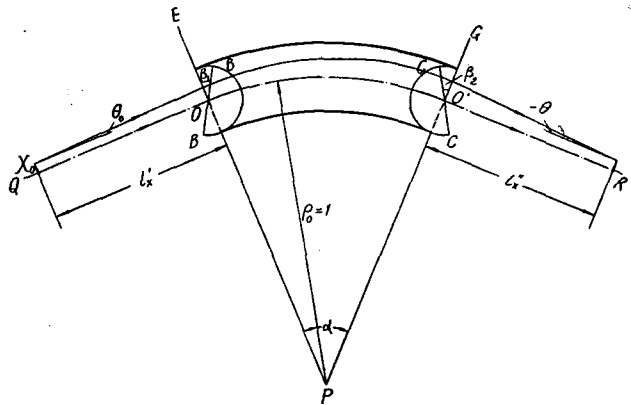


图 1 偏转磁铁的 XOZ 面

转动进出口端的铁块，就改变了磁极进出口边缘与径向直线的夹角。进口端的夹角为 β_1 ，出口端的夹角为 β_2 ，如图 1 所示。当端面外法线和粒子轨道曲率中心分别在中心轨道的两侧时， β 角为正，反之为负。

讨论时，选择 Z 轴与中心轨道重合， Y 轴和磁场方向平行， X 轴垂直于 YZ 平面。从物（或象）在 Z 轴上的投影沿 Z 轴到磁铁入口（或出口）的距离称为物距（或象距）。讨论粒子沿 X 方向运动时，物距和象距分别用 l_x 和 l_x' 表示，讨论粒子沿 Y 方向运动时，物距和象距分别用 l_y 和 l_y' 表示。讨论偏转磁铁时，长度都以 ρ_0 为单位。

象距 l_x' （或 l_y' ）由磁铁参量 $(\alpha, \beta_1, \beta_2)$ 及物距 l_x （或 l_y ）决定，它们之间的关系是^[1]

$$l'_x = \frac{1 + \tan \alpha \left(\tan \beta_1 + \frac{1}{l'_x} \right)}{\tan \alpha - \left(\tan \beta_1 + \frac{1}{l'_x} \right) - \tan \beta_2 \left[1 + \tan \alpha \left(\tan \beta_1 + \frac{1}{l'_x} \right) \right]}, \quad (1)$$

或

$$l'_y = \frac{\alpha + l'_y (1 - \alpha \tan \beta_1)}{l'_y [\tan \beta_2 + (1 - \alpha \tan \beta_2) \tan \beta_1] - (1 - \alpha \tan \beta_2)}. \quad (2)$$

通常采用的成象方式有:

(1), l'_x 和 l'_y 取正值, 并且相等, 即 $l'_x = l'_y = l'$. 对于一定的 l' , 通常有一系列的 β_1 和 β_2 组合, 能使得 $l''_x = l''_y = l''$. 这种聚焦方式称为实物点双聚焦.

(2), l'_x 和 l'_y 取负值, 并且相等, 即 $l'_x = l'_y = -|l'|$. 同样对每一个 l' 值有一系列的 β_1 和 β_2 组合, 使得 $l''_x = l''_y = l''$. 这种聚焦方式称为虚物点双聚焦.

(3), l'_x 和 l'_y 一正一负, 使得如果 $\beta_1 = \beta_2 = 0$, 则在一个方向(如 x 方向)成象比要求的象点远, 在另一方向(如 y 方向)成象较近. 调节 β_1 和 β_2 , 增强一个方向(如 x 方向)的聚焦力, 把象点拉近; 同时减弱另一方向的聚焦力(如 y 方向)把象点推远, 最后使两个方向都成象在需要的地点, 得到 $l''_x = l''_y = l''$. 这种聚焦方式称为“一推一拉”双聚焦.

从图 2 到图 7 给出了 $\alpha = 15^\circ, 35^\circ, 60^\circ$ 三种偏转磁铁在几种 $l'_x = l'_y = l'$ 时的双聚焦成象曲线, $l''-\beta_1$ 及 $\beta_2-\beta_1$ 曲线. 由图 2, 图 4 和图 6 可以看出, 当 l' 一定时, α 愈小, l'' 愈大, $l''-\beta_1$ 曲线也愈陡. α 一定时, l' 愈大, l'' 愈小. 在图上只画到 $l' = 3$ 为止, 实际上 l' 可一直增大到无穷, 在 $l' \rightarrow \infty$ 的 $l''-\beta_1$ 曲线下面是 l' 为负值时的双聚焦成象曲线(即虚物点双聚焦). 利用这些曲线便能求出一定的 l' 和 l'' 下所要求的 β_1 和 β_2 . 由于不宜选用过大的 β_1 和 β_2 (例如大于 45°), 也不希望工作在 $l''-\beta_1$ 曲线很陡的部分, 所以当 α 较小(例如小于 $20^\circ-30^\circ$), 或虽

然 α 比较大但物距较短时, 不宜选用实物点双聚焦, 宜于采用虚物点双聚焦. 只有当 α 和 l' 都比较大时, 才能采用实物点双聚焦.

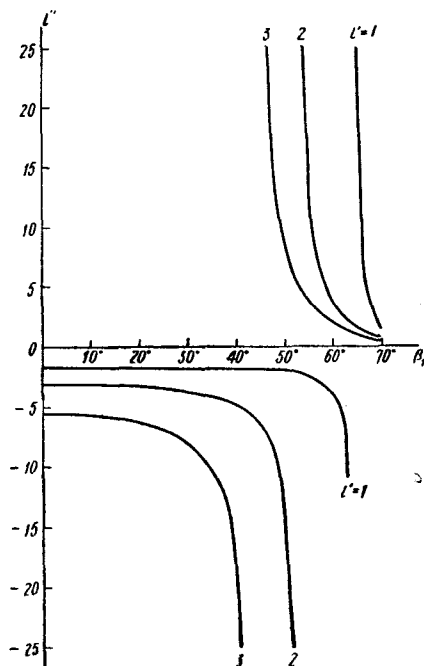


图 2 $\alpha = 15^\circ, l'_x = l'_y = l'$ 时的
双聚焦成象曲线
($n = 0$)

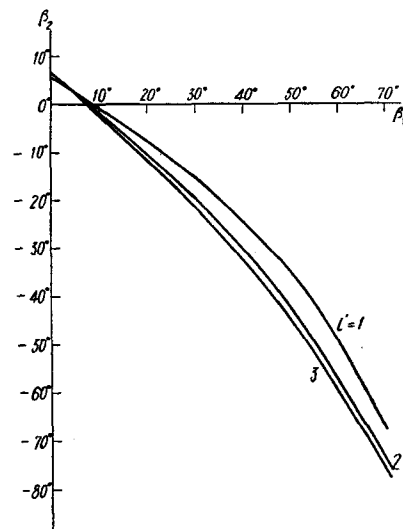


图 3 $\alpha = 15^\circ, l'_x = l'_y = l'$ 时的
双聚焦成象曲线
($n = 0$)

常常在 $l'_x = l'_y$ 的条件下,找不到合适的 β_1 和 β_2 使系统成象在所要求的 l'' 处。这样就要放弃 $l'_x = l'_y$, 即 x, y 方向物点重合的条件。这时要先估计需要选用的 l'_x 和 l'_y , 然后画出选定的 l'_x 和不同的 β_2 值下 $l''-\beta_1$ 曲线, 及给定的 l'_y 和不同的 β_2 值下 $l''-\beta_1$ 曲线。图 8—12 给出了 $\alpha = 60^\circ$ 时, 几种 l'_x 和 l'_y 的成象曲线。这些曲线分别称为 x, y 方向的成象曲线。为求出成象在 l''

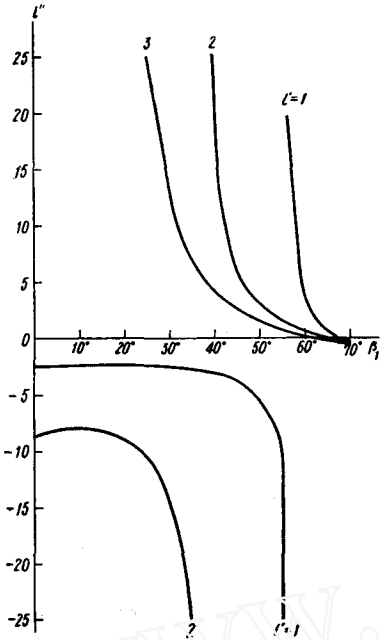


图 4 $\alpha = 35^\circ, l'_x = l'_y = l$ 时的双聚焦成象曲线 ($n = 0$)

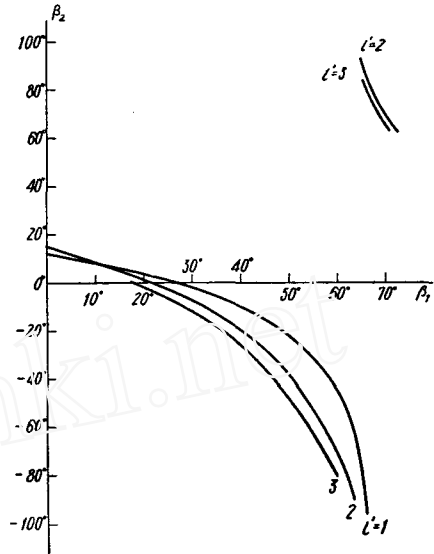


图 5 $\alpha = 35^\circ, l'_x = l'_y = l'$ 时的双聚焦成象曲线 ($n = 0$)

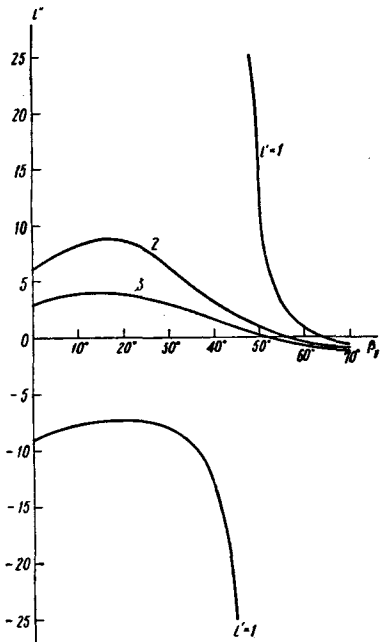


图 6 $\alpha = 60^\circ, l'_x = l'_y = l$ 时的双聚焦成象曲线 ($n = 0$)

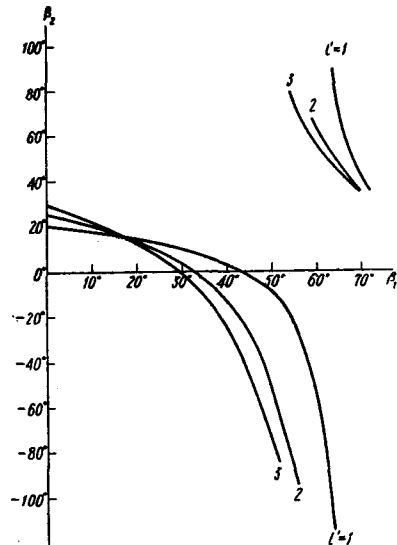


图 7 $\alpha = 60^\circ, l'_x = l'_y = l'$ 时的双聚焦成象曲线 ($n = 0$)

处所要求的 β_1 和 β_2 ，只要在 x 和 y 方向成象曲线上通过纵轴上 l'_1 点画一条水平线，利用它和各成象曲线的交点的 β_1 和 β_2 值就可以在以 β_1 、 β_2 为坐标轴的平面上画出 β_1 - β_2 曲线来。 x 、 y 两个方向的 β_1 - β_2 曲线的交点，就决定了对于选定的 l'_x 和 l'_y 成象在 l'_1 处所需要的 β_1 和 β_2 值。如果得不到交点或者交点不合适，便要改变 l'_x 或 l'_y 。采用这种方案时， l'_x 和 l'_y 可都取正值或都取负值，也可一正一负。后一方案即“一推一拉”方案用得较多，其中尤以 l'_y 取负值而

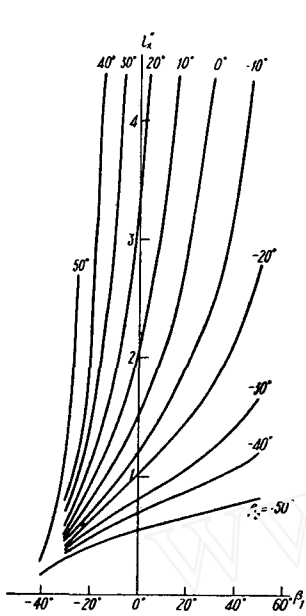


图8 $\alpha = 60^\circ$, $l'_x = 2.0$ 时的成象曲线

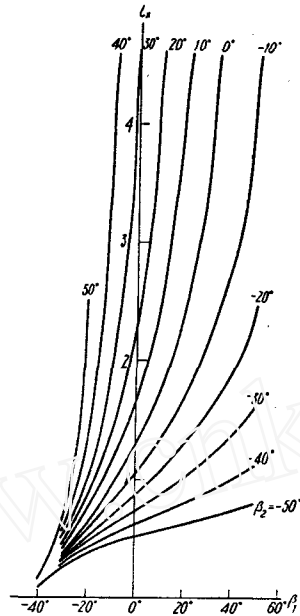


图9 $\alpha = 60^\circ$, $l'_x = 2.5$ 时的成象曲线

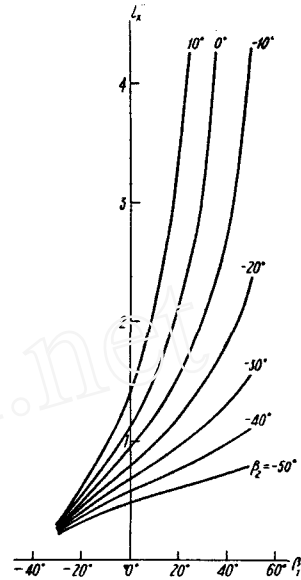


图10 $\alpha = 60^\circ$, $l'_x = 3.0$ 时的成象曲线

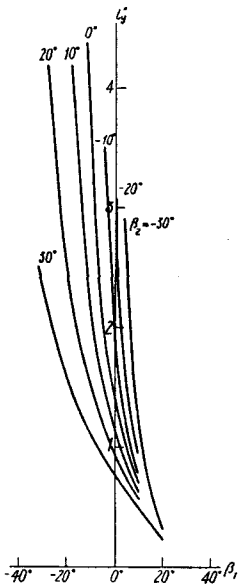


图11 $\alpha = 60^\circ$, $l'_y = -2.5$ 时的成象曲线

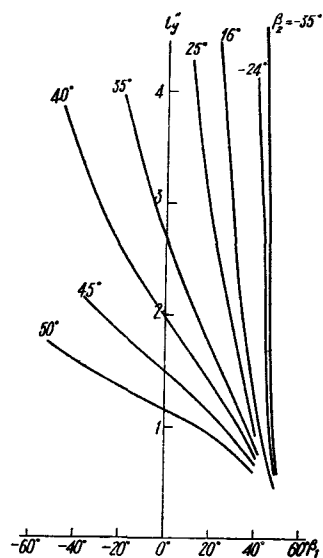


图12 $\alpha = 60^\circ$, $l'_y = 2.0$ 时的成象曲线

l'_x 取正值为最多。因为 l'_y 取负值就表示束流在 y 方向是以会聚的趋势进入偏转磁铁的，因而磁极间隙的高度就可以小一些。当然虚物点双聚焦也有这个优点，不过放大倍数常会大些，而且当 α 比较大时，象距 l'' 也太小，故不宜采用。

特别需要指出的是，在 β_2 等于零时可以省去出口端的转动铁块，这在出口端有几个管道时很有利。由于少了 β_2 这个参量，成象条件受到一些约束。但在我们遇到的一些情况中，同样能够成象，性能和 $\beta_2 \approx 0$ 时相差很少。图 13—15 给出了 $\beta_2 = 0$ 时的几种磁铁的成象曲线。

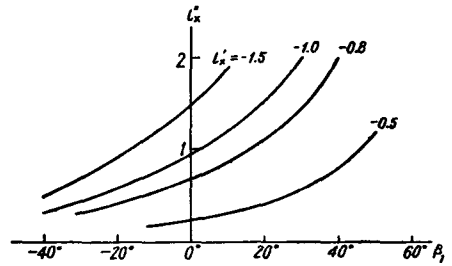


图 13 $\alpha = 20^\circ, \beta_2 = 0$ 时的 x 方向成象曲线

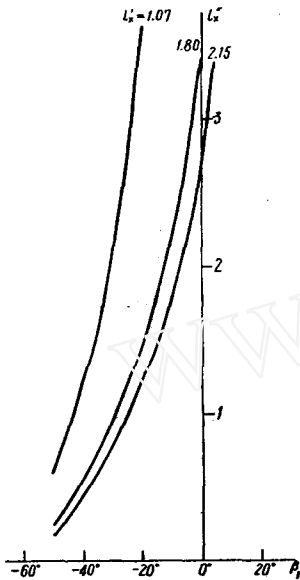


图 14 $\alpha = 45^\circ, \beta_2 = 0$ 时的 x 方向成象曲线

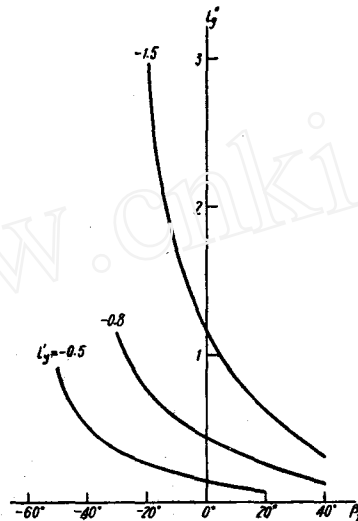


图 15 $\alpha = 20^\circ, \beta_2 = 0$ 时的 y 方向成象曲线

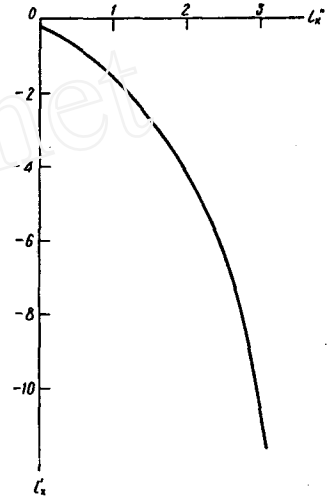


图 16 $\alpha = 13^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 0$ 时的 x 方向成象曲线 ($n = 0$)

当 β_1 也等于零时，即通常的没有边缘聚焦作用的偏转磁铁。图 16 是 $\alpha = 13^\circ$ 时的这种偏转磁铁的 x 方向成象曲线，在 y 方向没有聚焦作用。

三、有关磁四极透镜的数据资料

根据文献[2]，四极透镜对的成象条件为：

在 x 方向：

$$\begin{aligned} \coth(K_2 + \phi_2) &= -\frac{K_2}{K_1} [\tan(K_1 + \phi_1) + SK_1] & S_{ix}K_2 > 1, \\ \th(K_2 + \phi'_2) &= -\frac{K_2}{K_1} [\tan(K_1 + \phi_1) + SK_1] & S_{ix}K_2 < 1, \end{aligned} \quad (3)$$

其中：

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \tan^{-1} S_{ox} K_1, \\ \phi_2 &= \coth^{-1} S_{ix} K_2, \\ \phi'_2 &= \th^{-1} S_{ix} K_2 \end{aligned}$$

在 y 方向:

$$\begin{aligned} \tan(K_2 + \phi_2) &= -\frac{K_2}{K_1} [\coth(K_1 + \phi_1) + SK_1] & S_{oy}K_1 > 1, \\ \tan(K_2 + \phi_2) &= -\frac{K_2}{K_1} [\text{th}(K_1 + \phi_1') + SK_1] & S_{oy}K_1 < 1, \end{aligned} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tan \phi_2 &= S_{iy} K_2, & K_1 S_{oy} > 1, \\ \text{th} \phi_1' &= S_{oy} K_1, & K_1 S_{oy} < 1, \\ \coth \phi_1 &= S_{oy} K_1, & & \end{aligned}$$

上面 $K_1 = k_1 L$, $K_2 = k_2 L$, 而 k_1 和 k_2 分别是第一和第二透镜的场强参数, 定义为 $k^2 = \frac{1}{Br} \cdot \frac{dB}{dx}$, Br 是粒子的磁刚度. 设 Z 轴和透镜的光轴(场强为零的中心轴)重合. 而 S_{ox} 和 S_{oy} 分别是 x 和 y 两个方向在 Z 轴上成像位置到第二个透镜出口端的距离. S 是两个透镜间无场空间的长度. S_{ox} , S_{oy} , S_{ix} , S_{iy} 和 S 都以单个透镜的长度 L 为单位. 利用(3)式和(4)式, 可算出当 S 为常数, S_{ox} , S_{oy} 为某一定值时的 S_{ix} 对 K_1, K_2 及 S_{iy} 对 K_1, K_2 的关系数据. 现给出了两组 $S_{ix}-K_1$, 和 $S_{iy}-K_1$ 曲线, 如图 17 和 18. 这些曲线称为四极透镜的成像曲线. 利用这些曲线, 用类似的方法, 便能求得给定的成像条件下所需要的透镜参数 K_1, K_2 .

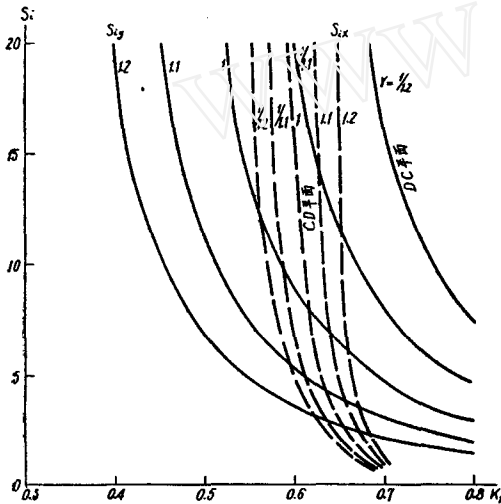


图 17 物距 $S_0 = 8L$ 时的四极透镜成像曲线

CD 平面代表先聚后散平面,
DC 平面代表先散后聚平面;
 $\gamma = K_2/K_1$; $S = 1.3L$.

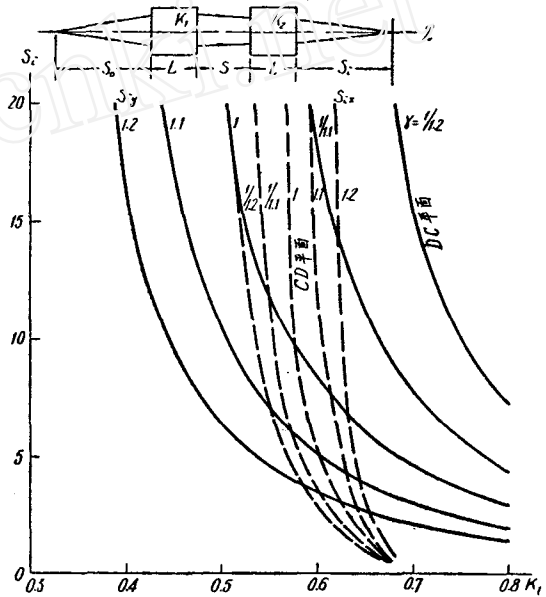


图 18 物距 $S_0 = 10L$ 时的四极透镜成像曲线

CD 平面代表先聚后散平面,
DC 平面代表先散后聚平面;
 $\gamma = K_2/K_1$; $S = 1.3L$.

当透镜对放在偏转磁铁前面时, 透镜的象点就是磁铁的物点. 如果通过透镜后成象在磁铁入口之前, 并且 $S_{ix} = S_{iy}$, 则磁铁是实物点; 在磁铁入口之后, 即为虚物点. 如果 $S_{ix} \neq S_{iy}$, 并使 y 方向成象在磁铁入口之后, x 方向成象在磁铁入口之前, 磁铁就将以“一推一拉”方式成象.

参 考 文 献

[1] S. Penner, *Rev. Sci. Instr.*, **32**, 150 (1961).
[2] H. A. Enge, *Rev. Sci. Instr.*, **30**, 248 (1959).