第 34 卷第 12 期
2022 年 12 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 34，No. 12
Dec.，2022

·粒子束及加速器技术·

消色散 270°偏转磁铁系统设计及束流动力学研究*

李 佳[1,2]， 赵全堂[1,2]， 冉朝晖[1]， 龙渊铭[1]， 宗 阳[1]， 李宇伦[1,2]，
曹树春[1,2]， 申晓康[1,2]， 张子民[1,2]， 袁 平[1,2]

（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： 对三种常用结构的 270°偏转磁铁进行系统的分析研究，采用数值计算和模拟方法对双磁铁不对称偏转结构、三块 90°磁铁偏转结构和 70°+130°+70°偏转结构这三种不同的 270°偏转磁铁系统进行模拟，给出偏转系统的消色散传输条件，并且分析了束流包络在偏转系统和出口管道中的变化情况。经过分析对比，详细列出了三种结构的优势与劣势。双磁铁不对称结构适用于医用加速器，三块 90°磁铁偏转结构适用于需要在出口长距离漂移的辐照加速器，而 70°+130°+70°偏转结构可以满足出口一定距离的无损漂移，同时实现相对较低的成本，是工业辐照加速器较为经济适宜的选择。

关键词： 工业辐照电子加速器；270°磁铁偏转系统；束流动力学优化；消色散传输；射束偏转

中图分类号： TL53 **文献标志码：** A **doi**: 10.11884/HPLPB202234.220180

Design and beam dynamic analysis of 270° achromatic deflection magnet system

Li Jia[1,2]， Zhao Quantang[1,2]， Ran Zhaohui[1]， Long Yuanming[1]， Zong Yang[1]， Li Yulun[1,2]，
Cao Shuchun[1,2]， Shen Xiaokang[1,2]， Zhang Zimin[1,2]， Yuan Ping[1,2]

（1. *Institute of Modern Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*;
2. *College of Nuclear Science and Technology*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*）

Abstract: The 270° beam deflection system with magnets is widely used in medical electron linear accelerators and high-energy electron industrial irradiation accelerators. In this paper, three common structures of 270° deflection magnet are systematically analyzed and discussed. Numerical calculation and simulation methods are used for the two-magnet asymmetric deflection structure, the three 90° magnets deflection structure and the 70°+130°+70° deflection structure. The achromatic transmission conditions of the deflection systems are given, and the changes of beam envelope in the deflection and exit beam line are analyzed. After analysis and comparison, the advantages and disadvantages of the three structures are listed in detail, which has certain guiding significance for the selection of structures in specific application fields. The two-magnet asymmetric deflection structure is suitable for medical accelerators. The three 90° magnets deflection structure is suitable for irradiation accelerators that require long-distance drift at the exit. The 70°+130°+70° deflection structure can satisfy the non-destructive drift of a certain distance from the exit, and it achieves relatively low cost, therefore, it which is a more economical and suitable choice for industrial irradiation accelerators.

Key words: industrial irradiation electron accelerator, 270° magnet deflection system, beam dynamics optimization, achromatic transmission, beam deflection system

辐照加工技术主要指利用电子或者射线与物质相互作用产生的物理、化学和生物效应，使得物质形成人们所需性状的一种特殊手段[1]，在食品加工、环境治理、医疗设备和农业育种等领域都有着广泛的应用[2-4]。基于高能电子加速器的辐照装置通常由射束产生系统和射束偏转系统组成，射束产生系统主要指电子加速器，其包括注入

* 收稿日期：2022-06-02； 修订日期：2022-07-20
基金项目：中科院 STS 项目 (E12E701Y)；甘肃省自然科学基金项目 (21JR7RA103)；核能开发科研 (冷链病毒消杀) 项目 (HNKF2021001)
联系方式：李 佳，lijia@impcas.ac.cn。
通信作者：赵全堂，zhaoquantang@impcas.ac.cn。

器、加速腔和聚焦元件。射束偏转系统是实现偏转的磁铁组件，由于高能电子加速器通常采取水平安装方式，当需要满足垂直打靶的需求时，射束可以通过 90°或 270°偏转磁铁进入垂直平面[5-6]。单一 90°偏转磁铁为非消色差偏转，入射束的能量分散将会影响出射束在靶点上的位置，产生角度偏移，使得射野产生严重的不对称性[7]。当采用两个 45°磁铁和四极磁铁组合时可以满足消色散性能，但不便在垂直空间进行安装。而 270°偏转磁铁在实现垂直偏转的前提下，可以同时满足偏转和消色差的功能，所以辐照用高能电子加速器普遍采用 270°偏转磁铁的方案[8-10]。

270°消色差磁铁系统在历史沿革中有着不同的结构[11-12]，Brown 等人设计了由三块 90°磁铁组成的 270°消色散偏转系统，应用于 Varian Clinac 18 系列加速器，这种系统在调整射束轨道时较为便捷，但在垂直方向上的机器尺寸较大[13]。HUTCHEON 设计了由双磁铁组成的紧凑型消色散不对称 270°偏转系统[14]，这种结构设计可以有效减小偏转系统的尺寸，但是射束出射的焦距较短。刘迺泉推导了由两块均匀场磁铁和一块非均匀场磁铁组成的 270°偏转磁铁结构的消色散条件[7]，这种结构对射束的调节能力较强，然而梯度场区的设计和加工较为复杂。不同的应用场合对射束偏转系统的要求不同，医疗加速器中对输出束流的要求是低发射度、小束斑和射野均匀；而在工业辐照用高能电子加速器中，为了便于辐射防护和对消毒的流水线进行布局，加速器和辐照端往往有较大的垂直落差，所以需要射束在出口管道实现长距离的无损传输[15]。本文对几种不同的 270°消色差偏转系统的结构进行模拟研究，基于动力学分析总结了不同 270°磁铁偏转系统的消色散、偏转和聚焦性能。

1 270°磁铁偏转系统的消色散传输条件

1.1 双磁铁不对称 270°消色散方案

双磁铁不对称 270°偏转系统的结构如图 1 所示，主要元件包括两块角度不相等的偏转磁铁，束流在两块磁铁中的弯转半径相同。R.M.Hutcheon 和李泉凤等人对这种结构的传输矩阵进行了详细的推导[16]，为了使得束流在传输过程中实现消色散，需要实现的约束关系为

$$\eta_2 = \theta_2 - 45^\circ \tag{1}$$

$$\eta_1 = -\eta_2 \tag{2}$$

$$D = R\frac{2\cos^2\eta_2}{1+\sqrt{2}\sin\eta_2} \tag{3}$$

式中：D 为两块磁铁之间的漂移段长度，R 为束流在磁铁中的弯转半径，η_1 为第一块磁铁的出口极面角，η_2 为第二块磁铁的入口极面角，θ_2 为第二块磁铁的偏转角，与第一块磁铁的偏转角 θ_1 相加后为 270°。

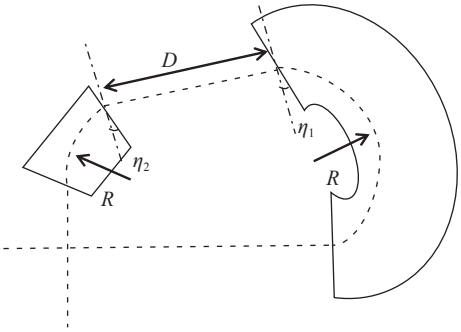


Fig. 1 Layout of the dual asymmetric 270° deflection magnet system

图 1 双磁铁不对称 270°偏转磁铁系统布局

在两块磁铁组成的 270°偏转系统中，束流的运动状态主要取决于每块磁铁的偏转角度以及第一块磁铁出口到第二块磁铁入口的极面角，根据约束公式(3)选择两块磁铁中间的漂移距离，使具有不同能量分散的射束相重叠来匹配两块磁铁的色散。而第一块磁铁的入口极面角和第二块磁铁的出口极面角不影响整个系统的消色散性能。

1.2 三块 90°磁铁的对称 270°消色散方案

对于三块 90°磁铁组成的 270°消色散偏转系统，主要元件是三块结构相同的 90°偏转铁，每块磁铁的弯转半径一致，整体的布局如图 2 所示。偏转系统关于中心轴面对称，D_1 和 D_4 分别为束流进入和射出 270°铁偏转系统的漂移段距离，D_2 和 D_3 为磁铁间的漂移段距离，其中 D_1=D_4，D_2=D_3。δ 为磁铁的极面角，三块磁铁的出口和入口极面角全部相等。

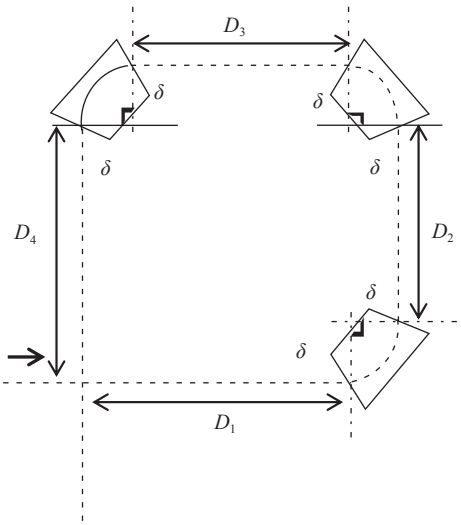


Fig. 2 Layout of the 270° deflection magnet system composed of three 90° magnets

图 2 三块 90°磁铁组成的 270°偏转磁铁系统布局

由三块磁铁组成的 270°偏转系统的传输矩阵主要包括三个部分：第一部分是弯转磁铁的传输矩阵，在不考虑高阶

场的情况下，如公式(4)所示，其中 r 为弯转半径，θ 为每块磁铁的偏转角度；第二部分是漂移段的传输矩阵，如公式(5)所示，a 为漂移段的长度；第三部分是入口出口边界极面角的传输矩阵，如公式(6)所示，δ 为入口和出口极面角的大小。

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}(r,\theta)=\begin{vmatrix} \cos\theta & r\cdot\sin\theta & r\cdot(1-\cos\theta) \\ \dfrac{-\sin\theta}{r} & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{d}}(a)=\begin{vmatrix} 1 & a & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{r}}(r,\delta)=\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \dfrac{\tan\delta}{r} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \tag{6}$$

由于每块磁铁的偏转角度都为 90°，所以 θ 的数值可以确定为 0.5π，将漂移段 D_1 和 D_4 统一定为参数 s_1，将漂移段 D_2 和 D_4 统一定为参数 s_2，可以得到整个系统的三阶传输矩阵为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M}_{\mathrm{trans}}\left(s_1,s_2,r,\delta,\theta=\frac{\pi}{2}\right)=&\boldsymbol{M}_{\mathrm{d}}(s_1)\cdot\boldsymbol{M}_r(r,\delta)\cdot\boldsymbol{M}_b\left(r,\frac{\pi}{2}\right)\cdot\boldsymbol{M}_r(r,\delta)\cdot\boldsymbol{M}_{\mathrm{d}}(s_2)\cdot\boldsymbol{M}_r(r,\delta)\cdot\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}\left(r,\frac{\pi}{2}\right)\cdot\\ &\boldsymbol{M}_r(r,\delta)\cdot\boldsymbol{M}_{\mathrm{d}}(s_2)\cdot\boldsymbol{M}_r(r,\delta)\cdot\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}\left(r,\frac{\pi}{2}\right)\cdot\boldsymbol{M}_r(r,\delta)\cdot\boldsymbol{M}_{\mathrm{d}}(s_1)\\ =&\begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}\end{aligned} \tag{7}$$

其中值得关注的关键矩阵元素是 M_{13} 和 M_{23}，它们分别为色散函数及色散函数的导数，如果要使偏转实现消色散，必须使 M_{13} 和 M_{23} 等于零。通过推导可得 M_{13} 和 M_{23} 的表达式，如公式(8)与公式(9)所示

$$\begin{aligned}M_{13}=&-\left(s_2\cdot\tan^2(-\delta)-2r\cdot\tan(-\delta)+r-s_2\right)\cdot\left[r\cdot s_1+s_1\cdot s_2-r^2+\tan(-\delta)\cdot\left(2r^2+r\cdot s_1+r\cdot s_2-s_1\cdot s_2\right)-\right.\\ &\left.\tan^2(-\delta)\cdot(2r\cdot s_1+r\cdot s_2+s_1\cdot s_2)+\tan^3(-\delta)\cdot s_1\cdot s_2\right]/r^2\end{aligned} \tag{8}$$

$$M_{23}=-(\tan(-\delta)-1)\cdot\left[s_2{}^2-r^2+4r\cdot s_2\cdot\tan(-\delta)+\tan^2(-\delta)\cdot\left(4r^2-2\cdot s_2{}^2\right)-4r\cdot s_2\cdot\tan^3(-\delta)+s_2{}^2\cdot\tan^4(-\delta)\right]/r^2 \tag{9}$$

为使公式(8)与公式(9)的数值等于零，使用 python 编写程序进行计算，得到了实现消色散传输的约束关系，如公式(10)所示。可以看出为了实现消色散传输，当弯转半径 r 和 s_2 是任意的变量时，其不同的取值会影响入口与出口极面角的大小。在之后的模拟分析中，可以基于这个约束关系来设计三块 90°磁铁组成的 270°偏转系统的结构参数。

$$[r-\tan(-\delta)\cdot s_2]^2=r^2-r\cdot s_2+s_2{}^2 \tag{10}$$

2　270°磁铁偏转系统的束流动力学

利用束流动力学软件 ELEGANT[17] 和 COSY Infinity[18] 对电子束在 270°偏转磁铁系统中的运动进行模拟分析，模拟软件基于束流中心粒子的坐标系进行追踪，便于观察任意位置的束流分布。为了满足我们设计的高能大功率辐照加速器 (10 MeV, 100 kW) 的需求，偏转系统入口处模拟的束流参数设置为能量 10 MeV，束团电荷量 90 pC，束团长度 1 ns，能散 1%，RMS 束斑大小 8 mm，横向发射度在 x 平面为 140 mm·mrad、y 平面为 20 mm·mrad 的电子束。在辐照加速器装置的结构布局中，电子束需要在距离系统出口极面 1.5 m 左右的位置实现聚焦，所以在进行 270°偏转系统的结构设计时重点关注了此条件。

2.1　两种 270°偏转系统的结构参数

270°偏转结构要实现消色散传输，磁铁的极面角度、半径和偏转角度需要满足相应的约束关系，在模拟软件 COSY Infinity 中写入两种 270°偏转系统的布局，在设定参数时写入公式(1)～(3) 及公式(10)中推导出的消色散条件，同时增加点对点成像的目标约束，约束如公式(11)所示，其中 M_{11}、M_{12}、M_{33} 和 M_{34} 皆为 270°偏转系统六维传输矩阵中的元素。最终优化得到两种 270°偏转系统的结构参数如表 1 所示。

表 1 两种 270°偏转系统的结构参数

Table 1 Structural parameters of two 270° deflection systems

description	magnet angle/(°)	radius/m	injection angle/(°)	exit angle/(°)	gap/m	drift/m	focus distance/m
two magnets	165.4, 104.6	0.1−1	5.73, −59.6	59.6, −14.3	0.03	0.023−0.23	0.1−1
three magnets	90, 90, 90	S_2/1.4	10.2, 10.2, 10.2	10.2, 10.2, 10.2	0.07	0.2−1(S_2)	>2

$$||M_{11}|-1|+||M_{33}|-1|+|M_{12}|+|M_{34}|=0 \tag{11}$$

对于双磁铁不对称 270°偏转结构，如果不考虑系统入口和出口极面的边缘场聚焦效应，当偏转半径增加时，实现消色散的漂移段距离会增加，出口的聚焦长度也会随之增加，三者之间的关系如图 3 所示，可以看出如果想要使束流在较长的出口管道实现无损传输，磁铁系统的尺寸会大大增加。

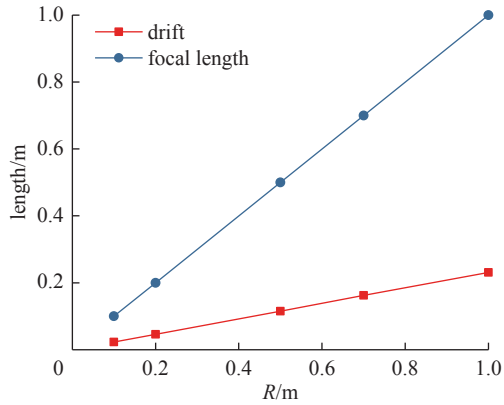
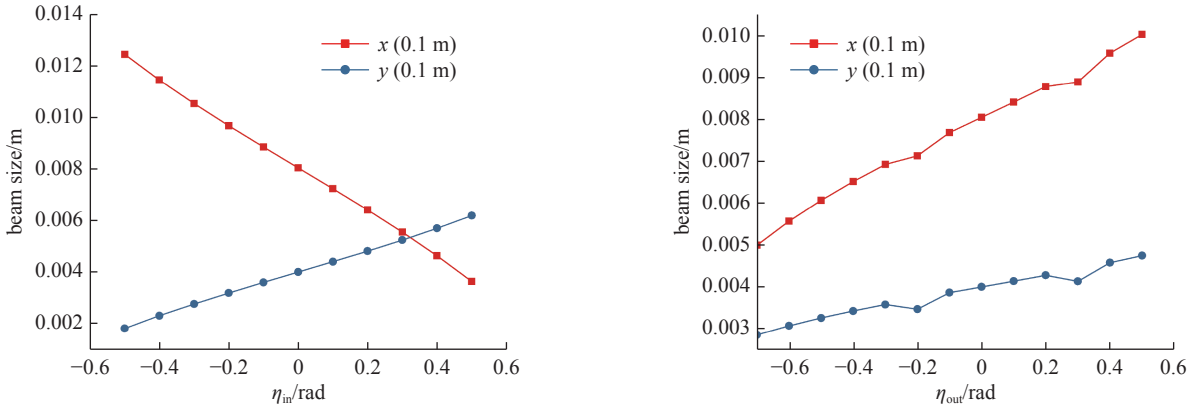


Fig. 3 Variation of drift space and focal length with radius of dual asymmetric 270° deflection system

图 3 双磁铁不对称 270°偏转系统漂移段和焦距随半径的变化

调节入口和出口的极面角可以改变束流在偏转系统中收敛或发散的趋势，若偏转发生在水平方向，极面角小于 0 时在水平方向可以实现聚焦作用，但是对垂直方向会有散焦作用[19]。由于双磁铁不对称 270°偏转结构的消色散性能不受第一块磁铁的入射极面角和第二块磁铁的出射极面角所影响，可以在选定其他双消色散相关参数的前提下，对出口和入口的极面角进行优化，利用边缘场聚焦效应，使得出射射束为平行束或收敛束。图 4 为选择半径为 0.1 m 时，系统入口和出口极面角的选择对出口 0.1 m 处束斑尺寸的影响。



(a) variation of beam size with entrance angle

(b) variation of beam size with exit angle

Fig. 4 Variation of beam size at the exit of the dual asymmetric 270° deflection system with the entrance and exit polar face angles

图 4 双磁铁不对称 270°偏转系统出口束斑尺寸随进出口极面角的变化

图 4(a)中的出口极面角设为 0，随着入口极面角的增大，x 和 y 方向束斑尺寸的变化趋势相反。图 4(b)中的入口极面角设为 0，x 和 y 方向的束斑尺寸都随着出口极面角的减小而减小，但是当出口极面角过小时，束斑在后段束线的增长会尤为明显，经过综合对比，出口极面角的值定为−14.3°。当出口极面角确定之后，在出口较短的漂移距离中，入口极面角的变化对束斑的影响呈现和图 4(a)中相同的趋势，而当束流漂移较长的一段距离后，入口极面角在零附近的取值会让 x 和 y 方向的束斑尺寸更加接近，而当入口极面角远小于零或者远大于零时，会导致 y 方向或 x 方向的束斑尺寸过大，最终选择入口极面角的数值为 5.73°。

对于由三块 90°磁铁组成的 270°偏转结构，根据公式(10)所推导的消色散条件，可以得到偏转结构的相关参数约束条件如图 5 所示。弯转半径、磁铁间的漂移段和磁铁的极面角在数值上呈正相关关系，这个特性和双磁铁不对称结构相同。当同时考虑消色散约束和点对点成像约束时，最优极面角通过 COSY Infinity 优化计算解得为 10.2°，此时偏转半径 r 和磁铁间漂移段 s_2 之间的关系满足约束关系如公式(12)所示，此时束斑在出口处的横向分布几乎与入口处相同，可以实现点对点的无损传输。

$$s_2 = 1.4r \tag{12}$$

2.2　两种 270°偏转系统中的束流传输

束流包络的变化可以影响偏转磁铁系统的磁气隙高度以及在管道中是否能实现无损传输，束流的发射度会影响辐照野的均匀度，所以需要对 270°偏转传输过程中束流参数的变化进行分析。将表 1 中得到的相关结构参数导入 ELEGANT 中，可以直观地观察到束流沿轨迹 s 的相关参数变化，设定偏转半径为 0.1 m，图 6 为束流在双磁铁不对称结构中的参数变化曲线，图 7 为束流在三块 90°磁铁偏转结构中的参数变化曲线。其中 s 为束流传输路径长度，σ_x 和 σ_y 为横向的束斑大小，ε_x 和 ε_y 为横向束流发射度，η_x 和 η_y 为色散函数，η'_x 和 η'_y 为色散函数的导数。从色散函数和发射度变化曲线可以看出两种结构都很好地实现了消色散功能。三块 90°磁铁组成的偏转结构对束斑尺寸的增长抑制得更好，图 7(a) 中束斑在 270°偏转系统入口和出口的大小基本保持一致，而图 6(a) 中束流虽然在出射时横向束斑较小，但是在漂移较远的距离后束斑尺寸的增长十分显著。为了验证上述规律，下面分析对比不同偏转半径下两种结构对横向束斑增长的抑制效果。

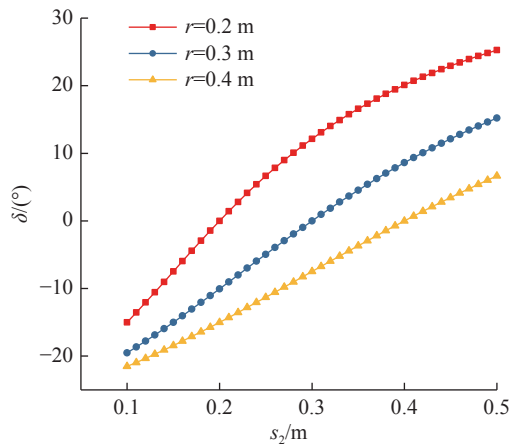
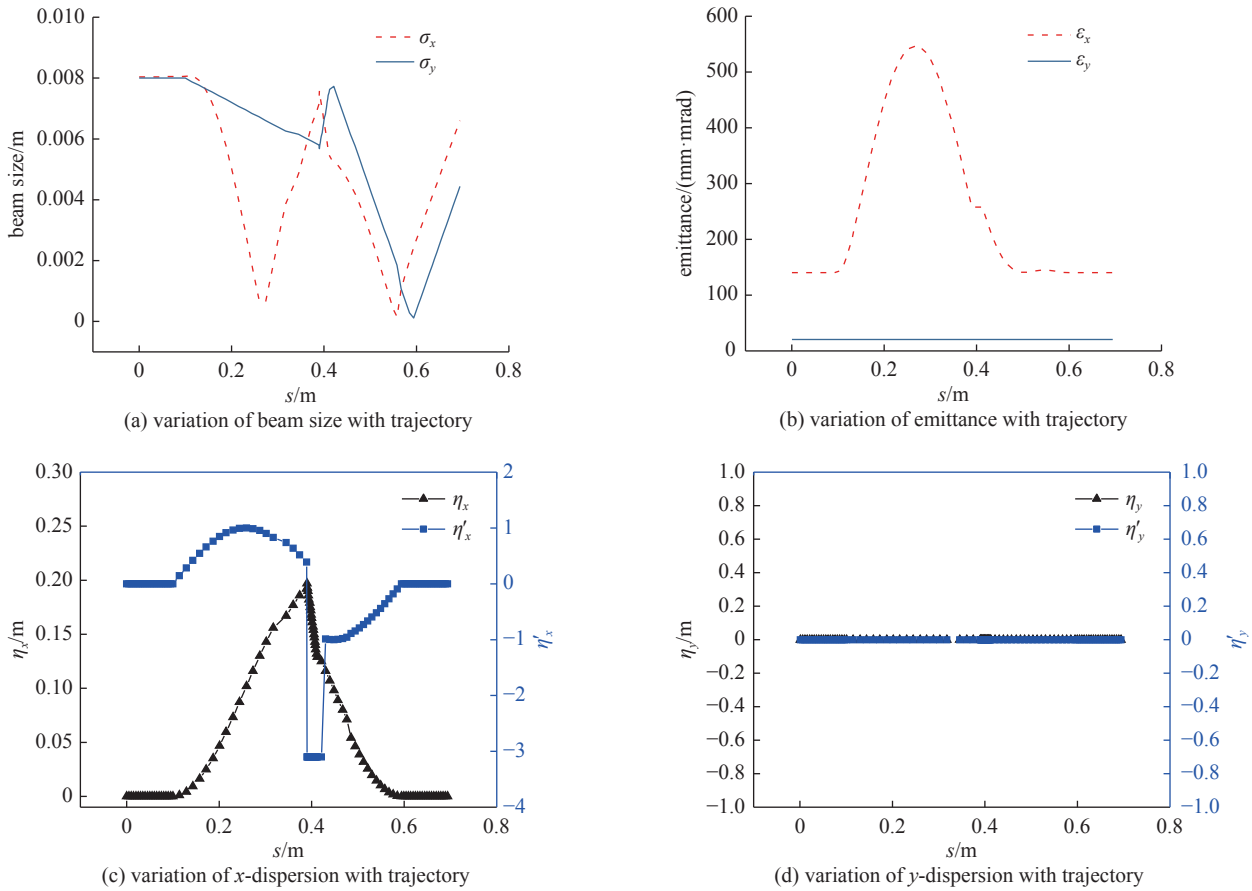


Fig. 5　Achromatic constraints of 270° deflection system composed of three 90° magnets

图 5　三块 90°磁铁组成的 270°偏转结构的消色散约束关系



(a) variation of beam size with trajectory

(b) variation of emittance with trajectory

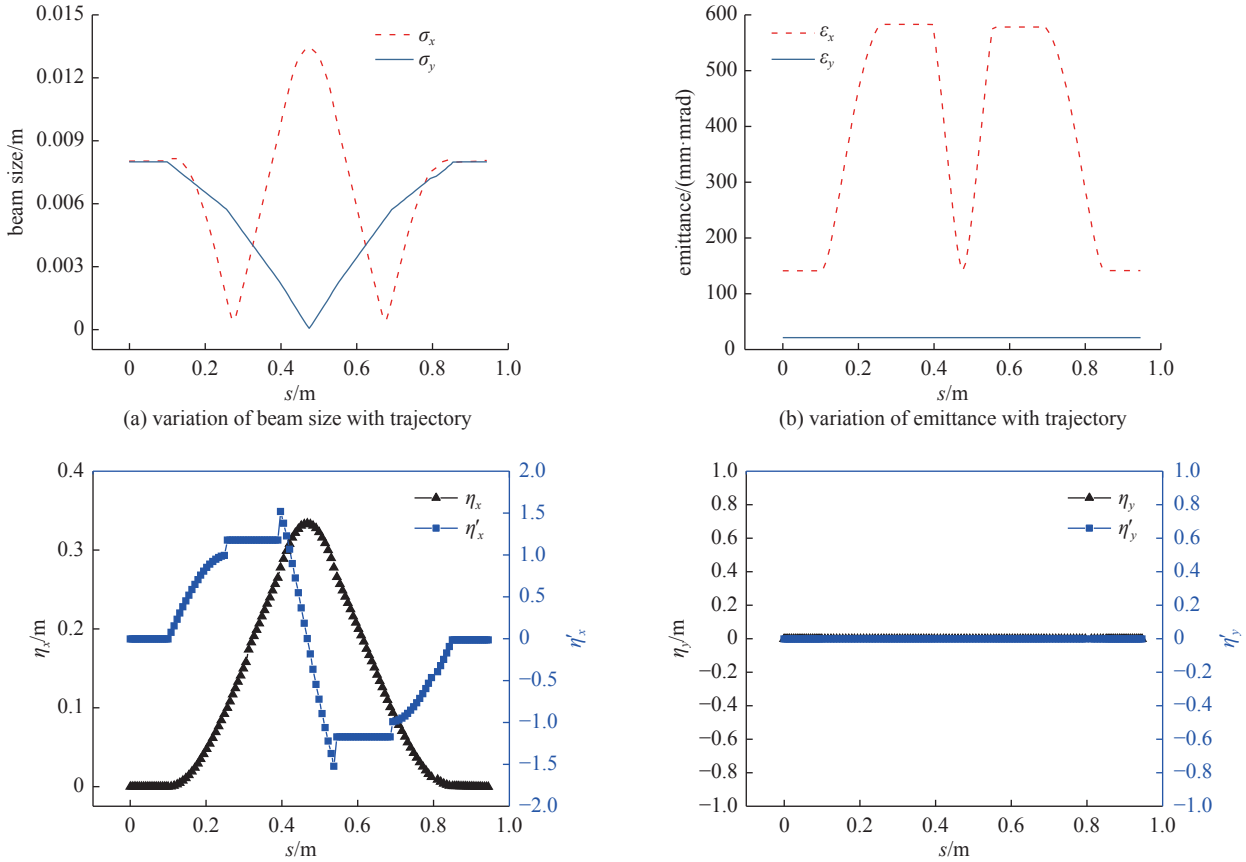
(c) variation of x-dispersion with trajectory

(d) variation of y-dispersion with trajectory

Fig. 6　Variation curve of beam parameters in dual-magnet asymmetric 270° deflection system

图 6　双磁铁不对称 270°偏转磁铁束流参数变化曲线

为了满足出口长距离漂移的需求，观察点的位置设置在 270°偏转系统出口的 1.5 m 处，两种 270°偏转结构的偏转半径发生变化时，由于磁铁消色散条件的约束，磁铁间的漂移段距离也会相应发生变化，通过模拟计算，得到两种 270°偏转结构距出口 1.5 m 处的束斑大小随着偏转半径的变化如表 2 所示，束流包络在不同结构中的变化表现出明显的规律，三块 90°磁铁组成的 270°偏转结构对横向束斑尺寸的增长抑制得更好，双磁铁结构的束斑过大主要



(a) variation of beam size with trajectory

(b) variation of emittance with trajectory

(c) variation of x-dispersion with trajectory

(d) variation of y-dispersion with trajectory

Fig. 7　Variation curve of beam parameters in 270° deflection system composed of three 90° magnets

图 7　三块 90°磁铁组成 270°偏转磁铁的束流参数变化曲线

表 2　两种 270°偏转系统在不同弯转半径下出口 1.5 m 处发射度和束斑的变化

Table 2　Changes of emittance and beam spot size at 1.5 m exit point of two 270° deflection systems under different turning radius

R/m	two magnets		three magnets	
	drift/m	σ_x,σ_y/(mm, mm)	drift/m	σ_x,σ_y/(mm, mm)
0.2	0.046	33.8, 32.5	0.28	8.72, 8.07
0.3	0.069	23.3, 21.7	0.42	8.53, 8.05
0.4	0.092	18.1, 16.3	0.56	8.41, 8.04
0.5	0.115	14.3, 12.4	0.7	8.31, 8.03

是由于出口束流的横向散角过大，在出口管道 1.5 m 的路径上束斑一直在增长，而三块 90°磁铁出口的束流接近平行束，横向束斑尺寸在出口管道中几乎没有增长。所以在同样的偏转半径下，如果对出口的聚焦长度的要求较低，小尺寸低成本的双磁铁结构是较优的选择，并且同时可以保证出口短距离内较小的束斑直径。但对于工业辐照高能电子加速器而言，三块 90°磁铁的结构更能满足束流在出口管道中长距离无损漂移的需求，但是值得注意的是这种结构下，第二块磁铁中的束流包络增长十分显著，且相对中心轨道向内侧偏移，导致设计时磁极间隙较大，磁铁制造成本较高。而在 270°磁铁结构中，由三块非 90°磁铁组成的对称结构可以有效地减小磁铁的尺寸从而更好地控制成本。

3　三磁铁小尺寸 270°偏转系统

由三块磁铁组成的 270°偏转磁铁系统除了三块 90°磁铁的方案以外，还可以采用一块大于 90°的磁铁和两块小于 90°的磁铁的结构，布局如图 8 所示，由于这种磁铁结构的可调节参数过多，数值计算较为困难，很难得出简洁的消色散约束关系，所以直接在 COSY Infinity 写入目标函数约束进行拟合，得到的结构参数如表 3 所示，主要元件包括一块 130°偏转磁铁和两块 70°偏转磁铁，偏转系统关于中心轴面对称，由于束流在垂直平面上的偏转高度（58 cm）低于同等偏转半径时三块 90°磁铁结构（68 cm），且磁铁中的束流包络增长较小，所以磁铁系统的尺寸小于三块

90°磁铁的偏转结构。

将拟合好的结构参数写入 ELEGANT 中得到的束流传输参数的变化如图 9 所示，图 9(b)、(c) 和 (d) 表明系统实现了消色散的功能，图 9(a) 中射束在出口管道的横向束斑尺寸呈现先减小后增大的趋势，射束直到漂移到出口 2 m 处，垂直方向上的束斑尺寸才和入口处的数值持平，这样的趋势能够满足出口长距离无损传输的需求。综上所述这种结构可以在保证出口长距离无损传输的前提下，同时实现较小的磁铁尺寸和较优的束流品质。

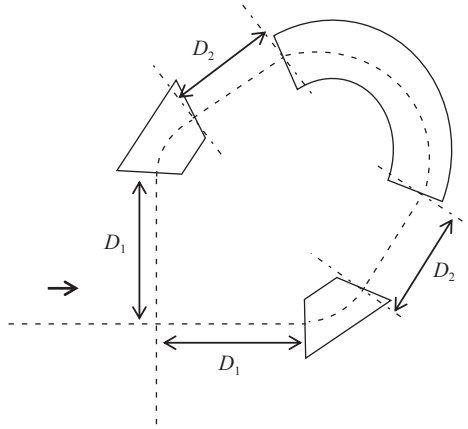


Fig. 8　Layout of the 270° deflection magnet system composed of three non-90° magnets

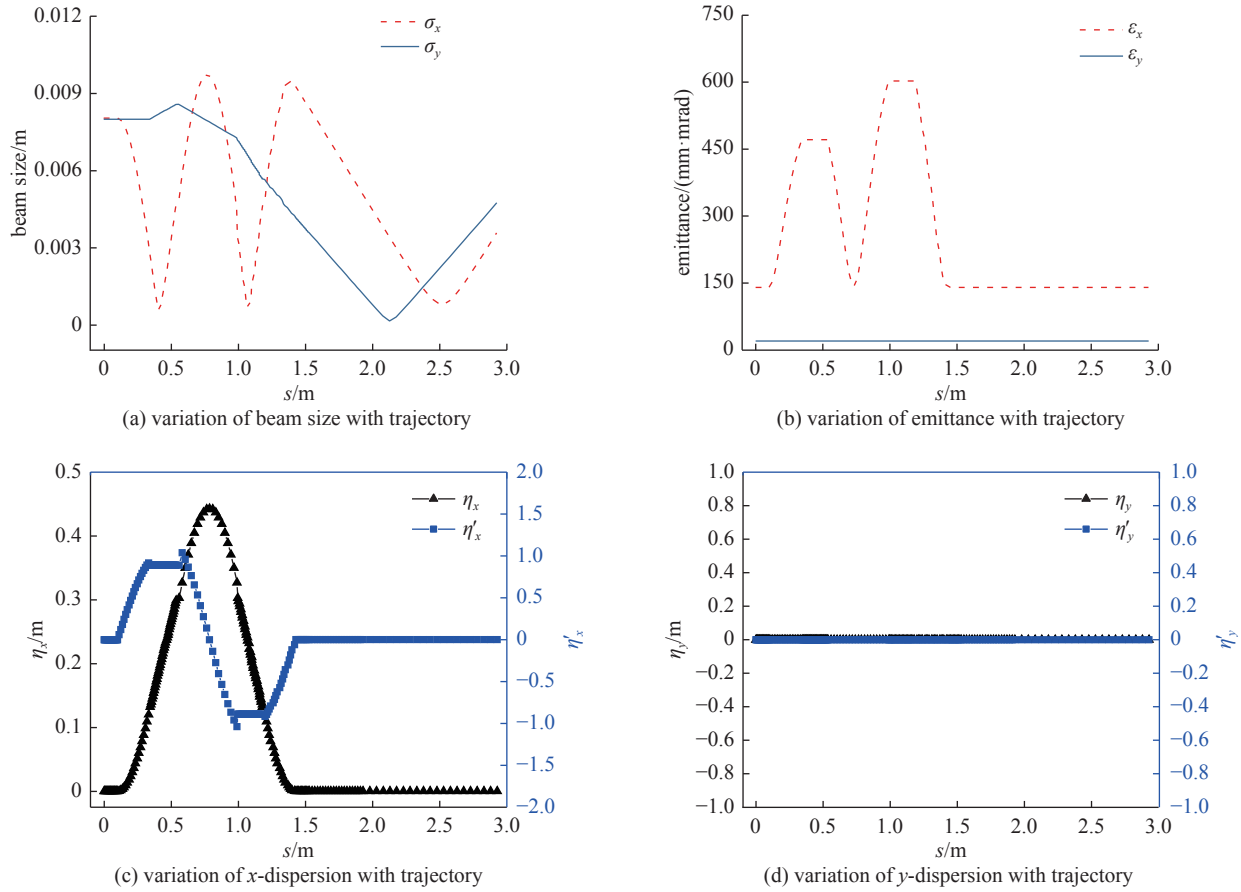
图 8　三块非 90°磁铁组成的 270°偏转磁铁系统示意图

综上分析，双磁铁不对称 270°偏转结构、三块 90°磁铁偏转结构和 70°+130°+70°的偏转结构都可以满足消色散偏转的需要，相关的设计指标和出口 1.5 m 处的束流参数列在表 4 中，双磁铁不对称 270°偏转结构的尺寸较小，但是磁铁设计相对较为复杂，并且射束出射后远距离漂移带来的束斑增长难以抑制，不适用于工业辐照型的加速器，而更能满足于医疗加速器短焦距、小束斑的需求。由三块 90°磁铁组成的 270°偏转结构可以实现射束在出口管道中长距离的无损传输，并且三块磁铁的模型一致，设计简单便于调节，但是垂直偏转尺寸较大，磁极间隙大，磁铁制造成本较高，适用于射束产生端和辐照端落差非常大的情况。由 130°磁铁和两块 70°磁铁组成的偏转结构能够在出口实现一

表 3　70°+130°+70°磁铁组成的 270°偏转系统结构参数

Table 3　Structural parameters of 270° deflection system composed of 70°+130°+70° magnets

magnet angle/(°)	radius/m	injection angle/(°)	exit angle/(°)	gap/m	drift /m	focus distance/m
70, 130, 70	0.2	0, 8, −4.3	−4.3, 8, 0	0.04	0.1924	2



(a) variation of beam size with trajectory

(b) variation of emittance with trajectory

(c) variation of x-dispersion with trajectory

(d) variation of y-dispersion with trajectory

Fig. 9　Variation curve of beam parameters in 270° deflection system composed of 70°+130°+70° magnets

图 9　70°+130°+70°组成 270°偏转磁铁的束流参数变化曲线

表 4 三种 270°偏转系统结构参数及出口 1.5 m 处束流参数

Table 4 Structural parameters of three 270° deflection systems and beam parameters at 1.5 m

type	magnet angle/(°)	radius/ m	injection angle/(°)	exit angle/ (°)	gap/ m	drift / m	focus length/m	σ_x,σ_y/ (mm, mm)	vertical height/cm
two magnets	165.4, 104.6	0.5	5.73, −59.6	59.6, −14.3	0.03	0.115	short	14.3, 12.4	98.4
three magnets	90, 90, 90	0.2	10.2, 10.2, 10.2	10.2, 10.2, 10.2	0.07	0.28	long	8.72, 8.07	68
70°+130°+70° magnets	70, 130, 70	0.2	0, 8, −4.3	−4.3, 8, 0	0.04	0.1924	medium	3.6, 4.75	58

定距离的无损传输，并且相对于三块 90°磁铁偏转结构而言磁极间隙小，磁体尺寸小，能够实现较优的偏转聚焦效果。

4 结 论

本文系统地分析研究了三种 270°消色散磁铁偏转系统的结构特性，给出了三种结构的设计参数及其对束流品质的影响，总结出了三种结构的优缺点。不同的磁铁系统在具体的应用场景下各有优劣。小尺寸的双磁铁不对称 270°偏转结构可以在出口短距离漂移的情况下保证低发射度小束斑的束流，适用于医疗加速器短焦距、小束斑的需求。由三块 90°磁铁组成的 270°偏转结构设计简单便于调节，磁铁制造成本较高，适用于射束产生端和辐照端落差非常大的情况。由 130°磁铁和两块 70°磁铁组成的偏转结构能够在出口管道实现约 2 m 距离的无损传输，系统整体偏转高度较低便于封装，在较低成本的同时能够实现较优的偏转聚焦效果，是工业辐照高能电子加速器用射束偏转系统较为经济适宜的选择。

参考文献：

[1] 李金海. 射频电子辐照加速器原理与关键技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020. (Li Jinhai. Principles and key technologies of radio frequency accelerators for electron irradiation[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2020)

[2] Cleland M R. Industrial applications of electron accelerators[R]. Zeegse, The Netherlands: CERN Accelerator School, 2006: 383-416.

[3] Amano Y. Atoms in industry: radiation technology supports development[N/OL]. Vienna: IAEA Bulletin, 2015. https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/56-3.

[4] Hamm R W. Review of industrial accelerators and their applications[R]. AP/IA-12, 2009.

[5] Shahzad A A, Patil B J, Pethe S N, et al. Design of electron beam bending magnet system for electron and photon therapy: a simulation approach[J]. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 2019, 57(7): 492-497.

[6] Akhter S, Bhoraskar V N, Dhole S D. 270° electron beam bending system using two sector magnets for therapy application[C]//Proceeding of IBIC 2012. 2012: 50-53.

[7] 杨绍洲, 杨光, 沈庆贤, 等. 医用电子直线加速器的射束偏转系统[J]. 中国医学物理学杂志, 2000, 17(3): 129-131,133. (Yang Shaozhou, Yang Guang, Shen Qinxian, et al. The beam bend magnet system of medical electron accelerator[J]. Chinese Journal of medical Physics, 2000, 17(3): 129-131,133)

[8] 刘迺泉. 270°消色差偏转磁铁束流传输特性[J]. 核科学与工程, 1983, 3(1): 79-89. (Liu Naiquan. Beam transport characteristics of the 270° doubly achromatic bending magnet[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1983, 3(1): 79-89)

[9] 陈万忠, 纪东泽, 成希革. 270°束流偏转系统研制[J]. 医学装备, 2009, 22(8): 46-48. (Chen Wanzhong, Ji Dongze, Cheng Xige. Development of 270° beam deflection system[J]. Medical Equipment, 2009, 22(8): 46-48)

[10] 李泉凤, 孔巢城, 郭冰琪, 等. 束流在270°偏转磁铁系统输运过程中的损失计算[J]. 高能物理与核物理, 2007, 31(8): 787-791. (Li Quanfeng, Kong Chaocheng, Guo Bingqi, et al. Calculation of the beam loss in the 270° bending magnet system of the medical accelerator[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2007, 31(8): 787-791)

[11] Chemerisov S D, Gromov R, Bailey J L, et al. Beamline design and beam diagnostic for Mo-99 production facility utilizing high power electron accelerators[R]. Argonne: Argonne National Lab, 2019.

[12] Shahzad A, Phatangare A B, Bharud V D, et al. Design and development of the 6-18 MeV electron beam system for medical and other applications[J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2017, 172(11/12): 931-951.

[13] Brown K L, Turnbull W G. Achromatic magnetic beam deflection system: 3867635[P]. 1975-02-18.

[14] Hutcheon R M, Heighway E A. A new compact doubly achromatic asymmetric two-magnet beam deflection system[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1981, 187(1): 81-87.

[15] Jongen Y, Abs M, Zaremba S, et al. Realignment of a diverging electron beam: a new beam delivery system for Rhodotrons[C]//Proceedings of 1997 Particle Accelerator Conference. Vancouver: IEEE, 1997: 3857-3859.

[16] 李泉凤, 邹昀. 双消色散270°偏转磁铁的物理设计[J]. 原子能科学技术, 1995, 29(5): 423-427. (Li Quanfeng, Zhou Yun. Physical design of a 270° double achromatic bending magnet[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1995, 29(5): 423-427)

[17] Michael B. User's Manual for elegant[EB/OL]. Michael Borland: Advanced Photon Source, 2016. https://www3.aps.anl.gov/forums/elegant/.

[18] M B, Makino K. COSY INFINITY 9.1 programmer's manual[EB/OL]. East Lansing: Michigan State University, 2011. http://cosyinfinity.org.

[19] 魏开煜. 带电束流传输理论[M]. 北京: 科学出版社, 1986. (Wei Kaiyu. Charged beam transport theory[M]. Beijing: Science Press, 1986)