

单向扫描磁铁边界形状对性能的影响

郁庆长

(中国科学院高能物理研究所,北京)

蔡仁康

(上海科学技术大学射线应用研究所)

摘 要

本文研究单向扫描磁铁出口边界形状对扫描性能的影响。适当改变出口边界形状可以改善磁铁的扫描均匀度,并减少不利的磁铁聚焦作用。

一、引 言

在辐照加速器、离子注入机及其它一些带电粒子束装置上设置有扫描系统,它能使粒子束均匀地照射在辐照面的指定区域上。我们称这个区域为扫描区域,它的面积一般比束斑面积大得多。

扫描系统可分为电扫描系统、磁扫描系统和机械扫描系统,还有由这几种系统混合而成的系统。本文讨论磁扫描系统,其主要部分是扫描磁铁,通常采用均匀场磁铁。

选用直角坐标系。假定粒子束沿 x 方向进入扫描磁铁,其磁场沿 y 方向。如果磁铁的磁感应强度周期性地变化,那么粒子束将在 x 方向作周期性的扫描运动。我们称束只在一个方向扫描的系统为单向扫描系统,以别于在两个方向扫描的双向扫描系统。单向扫描系统的扫描区域近似为长条矩形。矩形的长度(沿扫描方向)远大于束斑直径,而其宽度(沿磁场方向)约等于束斑直径^[1,2]。为了使扫描区域不过窄,单向扫描系统要求束在辐照面上形成较大的束斑。由于磁铁对束有聚焦或散焦作用,在扫描过程中束斑的大小也在变化。

本文研究单向扫描磁铁的边界形状对系统扫描均匀度和聚焦、散焦作用的影响。

二、常规扫描磁铁的扫描均匀度

常规的扫描磁铁其磁场是均匀的,入口等效边界面和出口等效边界面相互平行,粒子束入射方向垂直于边界面(图1)。磁铁的磁感应强度按三角波波形变化。设磁铁有效长度为 l ,磁铁出口等效边界面到辐照面的距离为 L ,辐照面为平面且平行于磁铁边界面。当磁铁磁感应强度为0时粒子束沿直线 AC 通过磁铁射到扫描区域中的 O 点;当磁铁磁感应强度增加到 B 时粒子束沿弧 \widehat{AD} 通过磁铁射到扫描区域中的 E 点, E 点与 O 点的距离为^[1]

$$S = l \operatorname{tg}(\theta/2) + L \operatorname{tg} \theta. \quad (1)$$

这里 θ 为束的偏转角。设粒子的磁刚度为 $B_0 \rho$ ，由于 $\sin \theta = lB/B_0 \rho$ ，扫描速度

$$\begin{aligned} v &= \frac{ds}{dt} = \frac{ds}{d(\sin \theta)} \frac{l}{B_0 \rho} \frac{dB}{dt} \\ &= \left[\frac{l}{\sin^2 \theta} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) + \frac{L}{\cos^3 \theta} \right] \frac{l}{B_0 \rho} \frac{dB}{dt}. \end{aligned} \quad (2)$$

设扫描区域束的剂量率分布为 $R(x, y)$ ，引入

$$R_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) dy, \quad (3)$$

它描述扫描方向上的一维剂量率分布。对单向扫描系统常用 $R_1(x)$ 代替 $R(x, y)$ ，它和扫描速度成反比。当磁铁磁感应强度按三角波波形变化时 $|dB/dt|$ 为常数，因此

$$R_1 \propto \left[\frac{1}{\sin^2 \theta} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) + \frac{L}{l \cos^3 \theta} \right]^{-1}. \quad (4)$$

图2中标有 $a/l = \infty$ 的曲线是常规扫描磁铁的剂量率分布曲线 (a 为磁铁出口边界曲率半径)。计算时取 $L = 8l$ 。可以看出这时的剂量率分布是不太均匀的。这种不均匀性的产生是由于 B 正比于 $\sin \theta$ 而 S 却近似地正比于 $\operatorname{tg} \theta$ 。我们称它为几何不均匀性。

通常定义单向扫描系统的扫描均匀度为

$$\eta = 1 - \max |R_1(x) - \bar{R}_1| / \bar{R}_1. \quad (5)$$

\bar{R}_1 为 R_1 的平均值。系统的扫描角 θ_{\max} 越大，扫描均匀度就越小。在扫描区域的两端 R_1 的变化很大，端部的宽度约等于束斑直径。在一般情况下不利用端部的束。在利用式(5)求扫描均匀度时也不计入端部。

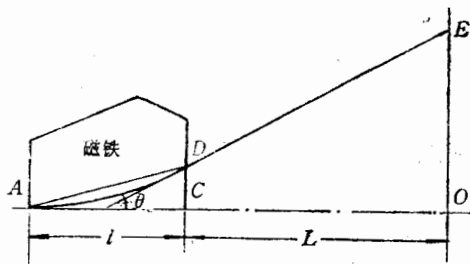


图1 常规的扫描磁铁

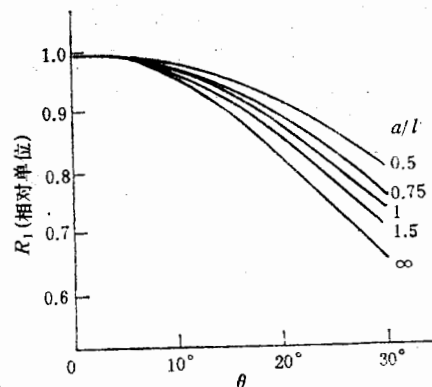


图2 扫描磁铁的剂量率分布曲线

三、扫描磁铁出口边界形状与扫描均匀度的关系

提高扫描均匀度的一种方法是改变磁铁出口边界形状。图3所示的扫描磁铁出口等效边界是圆弧形，它的半径为 a ，圆心到入口等效边界的距离为 b 。磁铁有效长度 $l =$

$a + b$. 显然 $a > 0$, b 可正可负 (b 为负时圆弧的圆心在磁铁入口之外). 束通过磁铁时出射点 D 的 x 和 z 坐标为

$$x = a \sin \phi, \quad z = a \cos \phi + b, \quad (6)$$

ϕ 为出射点处边界法线方向与束入射方向所成的角. 由于

$$x = z \operatorname{tg}(\theta/2), \quad a^2 = x^2 + (z - b)^2, \quad (7)$$

可解出

$$z = [b \cos(\theta/2) + \sqrt{a^2 - b^2 \sin^2(\theta/2)}] \cdot \cos(\theta/2). \quad (8)$$

引入 $h = lB/B_0\rho$, 因为 $\sin \theta = zB/B_0\rho$,

$$h = \frac{l}{z} \sin \theta = \frac{2l \sin(\theta/2)}{b \cos(\theta/2) + \sqrt{a^2 - b^2 \sin^2(\theta/2)}}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S &= z \operatorname{tg}(\theta/2) + (L + l - z) \operatorname{tg} \theta \\ &= \left[L + l - \frac{z}{2} \sec^2(\theta/2) \right] \operatorname{tg} \theta \\ &= \left[L + a + \frac{b}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{a^2 \sec^2(\theta/2) - b^2 \operatorname{tg}^2(\theta/2)} \right] \operatorname{tg} \theta. \end{aligned} \quad (10)$$

此处利用了 $\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg}(\theta/2) = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \theta \sec^2(\theta/2)$.

根据 $R_1 \propto \frac{1}{v}$ 和 $v = \frac{dS}{dh} \frac{l}{B_0\rho} \frac{dB}{dt}$, 可以画出不同扫描磁铁的剂量率分布曲线. 图2是一组计算结果 ($L = 8l$, $|dB/dt|$ 为常数). 由图可知, 随着出口边界曲率半径减小, 扫描均匀度将增加. 对于扫描角较大的系统, 选取较小的 a/l , 可以提高扫描均匀度. 当然 a/l 过小的磁铁实际上是难于制作的.

四、扫描磁铁的聚焦与散焦作用

在双向扫描系统中, 扫描区域两个方向的长度都远大于束斑直径, 因此磁铁的聚焦与散焦作用对于扫描系统的性能没有显著影响. 但对于单向扫描系统, 扫描区域沿磁场方向的宽度等于束斑直径, 束斑大小的变化将使扫描区域各处具有不同的宽度. 这虽然对 $R_1(x)$ 的均匀性影响不很大, 但却会使某些地方 $R(x, y)$ 变化较多. 一些辐照加速器的束需要通过薄窗照射到处于大气中的辐照物上, 在强束流情况下, 如果由于磁铁过强的聚焦作用使得薄窗上局部区域的剂量率增高太多, 就会使薄窗局部过热以致破坏.

磁铁在磁场方向的聚焦作用在磁铁入口和出口处产生, 均匀磁场本身在磁场方向没有聚焦和散焦作用. 把磁铁入口和出口看作两个薄透镜, 它们在磁场方向的焦距(聚焦时为正, 散焦时为负)分别为

$$-\frac{B_0\rho}{B} \operatorname{ctg} \phi_i \quad \text{和} \quad \frac{B_0\rho}{B} \operatorname{ctg}(\theta - \phi - \phi_0), \quad (11)$$

其中 ϕ_i, ϕ_0 为磁铁入口和出口延伸边缘场修正量

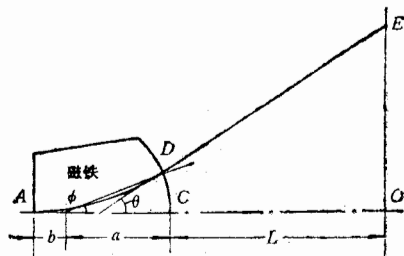


图3 出口边界为圆弧形的扫描磁铁

$$\psi_i = \frac{KgB}{B_0\rho}, \quad \psi_0 = \frac{KgB l + \sin^2(\theta - \phi)}{B_0\rho \cos(\theta - \phi)}, \quad (12)$$

g 为磁铁间隙, K 为与磁极边缘形状有关的常数, $0 < K < 1$ ^[3]. 当 $(\theta - \phi)$ 不太大时 $\psi_0 \approx \psi_i$.

从式(11)和(12)可看出:

1. 磁铁入口起散焦作用. 磁铁出口当 $\psi_0 < \theta - \phi$ 时起聚焦作用, $\psi_0 > \theta - \phi$ 时起散焦作用.

2. 由于 $\theta \approx lB/B_0\rho$, $\psi_0 \approx KgB/B_0\rho$, 而通常 $l > Kg$, 因此对于常规扫描磁铁 ($\phi = 0$) 出口将起聚焦作用. 对于出口边界为圆弧的磁铁, 随着 a 的减少, 出口的聚焦作用将减弱, 甚至有可能变为散焦作用.

3. 磁铁入口与出口的聚焦与散焦作用近似与 B^2 成正比.

由上所述可知, 对于常规扫描磁铁和出口边界曲率半径 a 较大的扫描磁铁, 它将对束起聚焦作用. 这种聚焦作用是我们所不希望的. 因此在设计强束流的单向扫描系统时应考虑采取适当措施. 例如有的辐照加速器设有附加线圈产生振荡磁场使束“抖动”, 以消除束在靠近扫描区域端部处由于束斑缩小造成的薄窗过热.

磁铁在扫描方向的聚焦作用对系统性能影响不大, 在此不予讨论.

以上讨论了单向扫描磁铁边界形状对系统性能的影响. 可以看出, 适当改变边界形状可以提高系统的扫描均匀度和减少不利的聚焦作用. 另一个对扫描磁铁性能有很大影响的因素是扫描磁场波形. 对此将另文讨论.

参 考 文 献

- [1] 原第一机械工业部机械工业自动化研究所, 大功率电子辐照加速器电子光学设计, 发表于全国加速器技术交流会, 成都, 1979.
 [2] 桂伟燮、李泉凤, 第四次全国粒子加速器学术年会论文集, 北京, 1989, p. 573.
 [3] K. L. Brown, SLAC-75, 1967.

INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE POLE EDGE ON THE PERFORMANCE OF SINGLE-DIRECTION SWEEPING MAGNET

YU QINGCHANG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

CAI RENKANG

(Applied Radiation Institute, Shanghai University of Science and Technology)

ABSTRACT

In this paper the influence of the shape of the exit edge of the single-direction sweeping magnet on its performance is studied. The proper change of the shape of exit edge can improve the sweeping homogeneous degree and decrease unfavourable focusing effect of the magnet.