

一种新型冲击磁铁的理论分析和模拟计算

康文 韩谦 郝耀斗

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在国际上已有的冲击磁铁方案不能完全满足 BEPC II 储存环注入系统对冲击磁铁宽均匀场区、高均匀度和低束流阻抗的设计要求的情况下,提出了一种新型冲击磁铁的设计思想.理论分析和瞬态 OPERA 程序模拟计算的结果表明,在 $\Delta x = \pm 20\text{mm}$ 的范围内,中心平面上场的均匀性为 $\pm 0.6\%$, $y = 5\text{mm}$ 的平面上场的均匀性为 $\pm 0.7\%$, $y = 10\text{mm}$ 的平面上场的均匀性为 $\pm 2.9\%$,均优于 BEPC II 储存环注入对冲击磁铁的设计要求. MAFIA 程序模拟计算的束流阻抗 $Z/n(\text{eff})$ 小于 0.022Ω , 小于设计要求的 0.025Ω .

关键词 冲击磁铁 束流阻抗 场均匀性

1 引言

BEPC II 储存环的设计流强在 1A 以上,为了克服束流的不稳定性,必须严格控制整个环的束流阻抗,其设计要求大约是 BEPC 储存环的十分之一,因此 BEPC II 储存环冲击磁铁设计的首要要求是,束流阻抗应尽可能的小,要求有效阻抗 $Z/n(\text{eff})$ 不超过 0.025Ω . 另外由于直线加速器来的注入束流发射度较大,因此要求冲击磁铁好场区范围比较宽($\Delta x = \pm 20\text{mm}$),而且场的均匀性要求在中心平面内小于 $\pm 1\%$,在 $y = \pm 5\text{mm}$ 的平面内小于 $\pm 2\%$,在 $y = \pm 10\text{mm}$ 的平面内小于 $\pm 5\%$.

目前在国际上比较成功和普遍的,能够同时满足低束流阻抗和宽好场区且均匀性优于 $\pm 1\%$ 的冲击磁铁方案只有陶瓷真空盒加铁氧体磁轭的方案,这种方案的核心思想是用内壁镀金属膜的陶瓷管作为冲击磁铁的真空盒.陶瓷真空盒镀膜的目的方面是将束团的高频尾场屏蔽在盒内,防止其与铁氧体之间耦合,从而减小冲击磁铁的束流阻抗;另一方面保证冲击磁铁的脉冲磁场基本无衰减和无畸变地穿过金属膜进入真空盒,从而保持磁场的均匀性.然而对于 BEPC II 储存环注入冲击磁铁来说,由于真空盒尺寸较大($120\text{mm} \times 54\text{mm}$),而且脉冲磁场上升

时间相对来说也比较快(250ns),要使冲击磁铁的脉冲磁场基本无衰减和无畸变地穿过金属膜进入真空盒,镀膜的表面电阻要很大,大约为 11Ω ,因此镀膜的厚度将非常薄,制作起来几乎不可能,而且镜像电流损耗非常严重,陶瓷真空盒必须采用水冷,结构也变得非常复杂.

另一种低束流阻抗的冲击磁铁方案是由 DELTA 发明的所谓的“slotted-pipe kicker”^[1]的方案.它的设计思想是,在常规金属真空盒上下两个壁上开四个狭缝,将两边真空盒壁与其余部分分开,而只在一端与其他部分相连并接地,两边真空盒壁作为励磁导体与冲击磁铁脉冲电源相连,如图 1 所示.这种结构在真空盒上下两个壁上留有两个金属条,由于它们距离束流比较近,因此沿真空盒壁的镜像电流的绝大部分将从这两个金属条上流过,相应的尾场和 RF 损耗被大大的减小了.

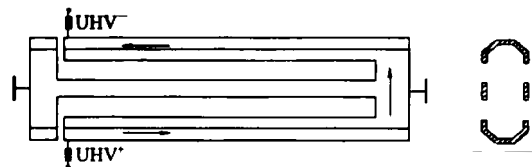


图 1 slotted-pipe kicker 原理图

然而在冲击磁铁上、下两个面上加入金属条严

重地破坏了场的均匀性,金属条的宽度越宽,束流阻抗越小,但场的均匀性却越差.对于 DELTA 和 SPEAR3^[2]设计的 slotted-pipe kicker 来说,由于它们对好场区的宽度和场均匀性的要求不是很高,束流阻抗和场均匀性的矛盾显得不是很突出.但是对于 BEPC II 储存环注入冲击磁铁来说则不然,这个矛盾就显得非常突出,瞬态 OPERA 程序模拟计算的结果表明,在满足场均匀性要求的条件下,镜像电流金属条宽度最大只能取 10mm,在这种尺寸下 MAFIA 程序模拟计算的结果表明,束流阻抗将是 DELTA 同类冲击磁铁的两倍以上;反之如果金属条宽度足够宽,从而能满足束流阻抗的要求,可是场的均匀性又变得令人无法接受.

鉴于以上两种在国际上常用的低束流阻抗的冲击磁铁方案都难以完全满足 BEPC II 对冲击磁铁的设计要求,我们提出了一种新型冲击磁铁的设计思想,从而使问题基本得到了解决.

2 新型冲击磁铁的发明

新型冲击磁铁是基于解决 slotted-pipe kicker 束流阻抗和场均匀性的矛盾而发明的.我们知道,在 slotted-pipe kicker 上、下两个面上加入金属条严重地破坏了场的均匀性,这是因为金属条在屏蔽了束流场的同时,也屏蔽了冲击磁铁的脉冲磁场.那么有没有办法使束流场被屏蔽的同时,绝大部分的冲击磁铁的磁场不被屏蔽呢?在内壁镀金属膜的陶瓷真空盒设计思想的启发下,我们创新性地提出了将 slotted-pipe kicker 上下两个面上的镜像电流金属条用内壁镀有一定宽度金属膜的陶瓷板取代的思想,这样一来束流阻抗和场均匀性的矛盾基本可以得到解决.

根据这种新的思想,我们对 BEPC II 储存环注入冲击磁铁进行了设计.图 2 是磁铁的横截面示意图,其中包括半径为 150mm 的圆柱形真空箱的横截面.磁铁内孔径为 90mm × 44mm,其两端通过金属过渡件光滑过渡到常规真空盒的孔径 120mm × 54mm.上下两个陶瓷板的宽度与磁铁水平外孔径相同,这样可以将陶瓷板和励磁导体联成一体,陶瓷板可以对励磁导体起到定位支撑的作用.陶瓷板内壁中心镀有金属膜,宽度为 34mm,它们对束流的场起到屏蔽作用的同时,使冲击磁铁的脉冲磁场基本无衰减和无畸变地穿过,镀膜在磁铁的两端通过过渡件与常规真空盒相连并接地.励磁导体板的一端与过渡件之间通过一段真空狭缝相隔离,并分别与

脉冲电源的正负高压相连,另一端则通过过渡件与常规真空盒相连并接地.励磁导体外侧镶嵌有冷却水管,它们不仅可以带走导体板上因同步光辐照和励磁电流以及涡流损耗产生的热量,而且也可以带走金属镀膜上因镜像电流和涡流损耗而产生的热量.为了增大金属膜与高压导体板之间的表面爬电距离,在陶瓷板上开了 4 个深度为 10mm 槽.

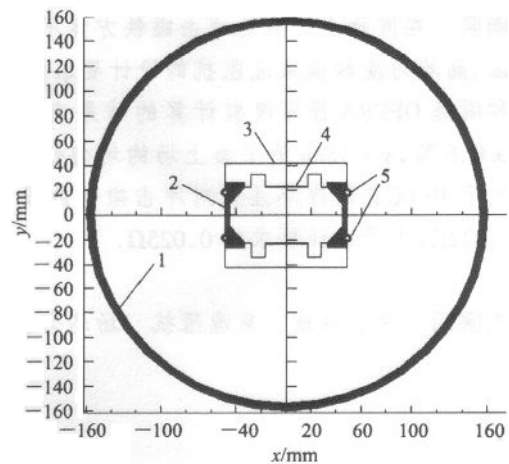


图 2 BEPC II 储存环冲击磁铁的示意图

1 真空箱, 2 励磁导体, 3 陶瓷板, 4 金属镀膜, 5 冷却水管.

3 新型冲击磁铁的理论分析

理论上新型冲击磁铁的磁场是励磁电流产生的磁场和金属镀膜内涡流产生的磁场的叠加.励磁电流的分布取决于励磁导体的形状和尺寸, BEPC II 储存环要求冲击磁铁的束流清晰区至少为 82mm × 38mm,而且必须与孔径为 120mm × 54mm 的常规真空盒实现光滑过渡连接,因此将冲击磁铁的孔径取为 90mm × 44mm,并且形状也与常规真空盒截面形状相匹配,如图 2 所示,这样励磁电流的分布及其决定的场分布就基本确定了.

陶瓷板内壁金属镀膜内的涡流产生的磁场是影响冲击磁铁场均匀性分布和造成场波形畸变的主要因素.根据电磁感应定律,当一均匀分布的脉冲磁场穿过长度为 l ,宽度为 w ,厚度为 d 的金属镀膜时,在宽度方向 x 处感应的涡流是

$$\frac{dI_c}{dx} = \frac{1}{R_{sq}} \frac{dB}{dt} x, \quad -\frac{w}{2} \leq x \leq \frac{w}{2} \quad (w \ll l),$$

平均涡流密度为

$$j = \frac{dI_c/dx}{d} = \sigma \frac{dB}{dt} x,$$

其中 $R_m = \frac{1}{\sigma d}$, 是镀膜的表面电阻, σ 为镀膜材料的电导率, $\frac{dB}{dt}$ 为励磁电流产生的磁场的变化率.

可见涡流沿 x 方向呈线性变化, 在 $x = 0$ 处涡流为 0, 在 $x = \pm w/2$ 处涡流分别达到正的最大值和负的最大值. 这样分布的涡流在 $x = 0$ 的平面上产生的磁场最强, 而且只有 y 分量. 对 BEPC II 的冲击磁铁, w 大约为 34mm, l 为 1600mm, $w \ll l$, 因此可以近似认为磁场沿 l 方向均匀分布, 这样就可以将三维问题简化为二维问题, 如图 3 所示. 假设磁铁间隙半高度为 h , 则上陶瓷板金属镀层 x 和 $-x$ 处的线电流元在场点 $A(0, y)$ 处产生的磁场为

$$dB_x = dB^+ \cos\theta - dB^- \cos\theta,$$

$$dB_y = dB^+ \sin\theta + dB^- \sin\theta,$$

其中 $dB^+ = dB^- = \frac{\mu_0 dI_c}{2\pi r^-}, \sin\theta = \frac{x}{r^-},$

因此 $dB_x = 0, dB_y = \frac{\mu_0 dI_c}{2\pi r^-} \cdot \frac{x}{r^-} \cdot 2.$

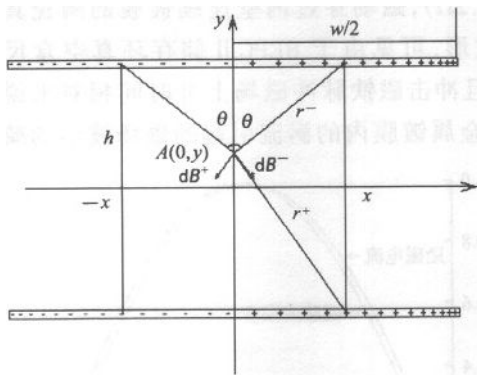


图3 涡流场计算示意图

同理, 下陶瓷板金属镀层 x 和 $-x$ 处的线电流元在场点 $A(0, y)$ 处产生的磁场为

$$dB_y = \frac{\mu_0 dI_c}{2\pi r^+} \cdot \frac{x}{r^+} \cdot 2,$$

因此

$$dB_x = \frac{\mu_0 dI_c}{2\pi r^+} \cdot \frac{x}{r^+} \cdot 2 + \frac{\mu_0 dI_c}{2\pi r^-} \cdot \frac{x}{r^-} \cdot 2,$$

$$r^{\pm} = \sqrt{x^2 + (h \pm y)^2}, dI_c = \frac{1}{R_m} \frac{dB}{dt} x dx,$$

$$B_c = \int_0^{w/2} \frac{\mu_0 dB/dt}{\pi R_m} \left(\frac{x^2}{x^2 + (h+y)^2} + \frac{x^2}{x^2 + (h-y)^2} \right) dx$$

$$= \frac{\mu_0 dB/dt}{\pi R_m} \left(w - (h+y) \arctg \frac{w}{2(h+y)} \right)$$

$$\left((h-y) \arctg \frac{w}{2(h-y)} \right). \quad (3)$$

假设励磁电流产生的磁场是幅度为 B_0 , 底宽为 τ 的半正弦波脉冲, 则有

$$B = B_0 \sin \frac{\pi t}{\tau}, \quad (4)$$

因此

$$B_c = \frac{\mu_0 B_0 \cos \frac{\pi t}{\tau}}{\pi R_m} \left(w - (h+y) \arctg \frac{w}{2(h+y)} - (h-y) \arctg \frac{w}{2(h-y)} \right). \quad (5)$$

根据电磁感应定律, 涡流产生的磁场总是抵消励磁电流产生的磁场的变化, 因此总磁场为

$$B_t = B - B_c. \quad (6)$$

可见如果励磁电流产生的磁场是均匀的, 那么涡流产生的磁场将使均匀性变差. 例如对于 BEPC II 注入冲击磁铁来说, $\tau = 500\text{ns}$, $w = 34\text{mm}$, $R_m = 0.2\Omega$, $h = 22\text{mm}$, 则在 $t = 222\text{ns}$ 时, $y = 0$ 处的涡流场为 $B_c = 1.11\% B_0$, $y = 5\text{mm}$ 处的涡流场为 $B_c = 1.22\% B_0$, $y = 10\text{mm}$ 处的涡流场为 $B_c = 1.52\% B_0$. 也就是说涡流场在 $t = 222\text{ns}$ 时, 在 $y = 0$, $y = 5\text{mm}$ 和 $y = 10\text{mm}$ 的平面上引起的冲击磁铁总磁场的均匀性大约为 1.11%, 1.22% 和 1.52%.

由(5)式可知在 $t = \tau/2$ 时, 涡流场应该为 0, 然而实际上由于镀层内不同时刻产生的涡流都具有一定的衰减时间, 任意时刻的涡流场都是此时此刻的涡流和在此之前所有时刻衰减滞后的涡流产生的磁场的叠加, 因此 $t = \tau/2$ 时, 涡流场并不为 0. 而且由于涡流的这种滞后效应, 使得涡流产生的磁场与励磁电流产生的磁场不同步, 这样叠加后的总磁场波形, 相对于励磁电流的波形就会产生一定的畸变. 对于宽度为 w 的两个平行的长方形金属镀膜, 涡流的衰减时间常数大约为^[3]

$$T \approx \frac{\mu_0 w}{\pi R_m}.$$

由以上分析可知, 无论涡流的大小, 还是涡流的衰减时间都与镀膜的宽度成正比, 与镀膜的表面电阻成反比, 为了减小金属镀膜内的涡流效应对冲击磁铁脉冲磁场的影响, 可以减小镀膜的宽度, 也可以选择表面电阻较大的材料镀膜.

金属镀膜陶瓷板屏蔽住束流场的条件是, 镀膜的厚度^[4]

$$d > dp \equiv \delta_b^2/d_c,$$

其中 δ_b 为束流产生的场在导体内的趋肤深度, d_c

为陶瓷板的厚度. 如果束团的特征频率 $\omega_b = c/\sigma_z$, σ_z 为束团的自然长度, 则有

$$\delta_b = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega_b \mu}} = 0.728 [\mu\text{m}] \sqrt{\frac{\rho [\mu\Omega \cdot \text{cm}] \sigma_z [\text{cm}]}{(\mu/\mu_0)}}$$

例如对于 BEPCII 储存环, $\sigma_z = 1.5\text{cm}$, 如果镀膜材料是电阻率为 $\rho = 25\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 的氮化钛, 陶瓷板厚度为 5mm , 则 $\delta_b = 4.5\mu\text{m}$, $dp \approx 0.004\mu\text{m}$. 一般情况下, 金属镀膜的厚度都在 $1\mu\text{m}$ 以上, 均满足屏蔽住束流场的条件, 因此从减小束流阻抗的角度看, 新型冲击磁铁和 slotted-pipe 冲击磁铁的原理是相同的, 可是由于镀膜的宽度可以比较宽, 新型冲击磁铁的效果会更好.

4 新型冲击磁铁的计算机模拟

为了验证新型冲击磁铁设计思想的正确性, 分别用瞬态 OPERA 程序和 MAFIA 程序对 BEPCII 储存环冲击磁铁的场分布和束流阻抗进行了模拟计算. OPERA 程序模拟计算的结果表明, 当陶瓷板金属镀膜的表面电阻为 0.2Ω 时, 可以得到非常好的场分布. 图 4 是磁场最大时的磁力线分布, 图 5 的 3 条曲线分别是中心平面、 $y = 5\text{mm}$ 的平面和 $y = 10\text{mm}$ 的平面内的磁场分布曲线. 由图 5 可见, 在 $\Delta x = \pm 20\text{mm}$ 的范围内, 中心平面上场的均匀性为 $\pm 0.6\%$, $y = 5\text{mm}$ 的平面上场的均匀性为 $\pm 0.7\%$, $y = 10\text{mm}$ 的平面上场的均匀性为 $\pm 2.9\%$, 均优于 BEPCII 储存环注入冲击磁铁的设计要求.

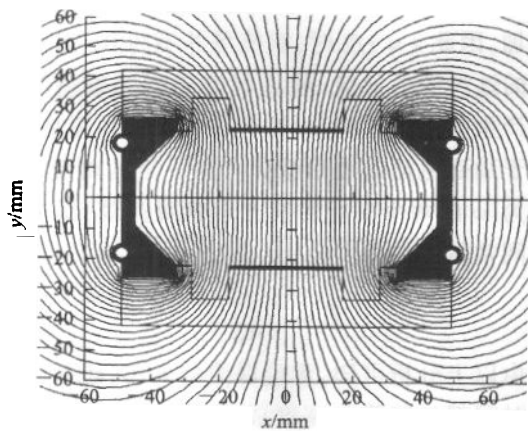


图 4 磁场最大时的磁力线分布

MAFIA 程序模拟计算的结果表明, 当金属镀膜的宽度为 20mm 时, 每个冲击磁铁的束流阻抗 Z/n (eff) 大约为 0.022Ω , 若金属镀膜的宽度增大到 34mm , 定性分析可以认为每个冲击磁铁的有效阻抗 Z/n (eff) 小于 0.022Ω , 因此束流阻抗也满足了设计

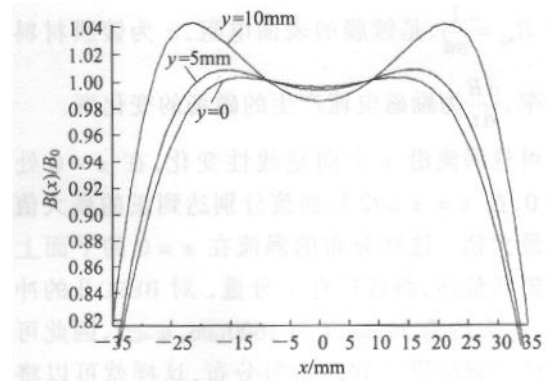


图 5 磁场分布曲线

要求.

图 6 中的两条曲线分别是励磁电流波形和相应的 OPERA 程序模拟得到的磁场波形, 可见磁场波形与励磁电流波形相比基本没有发生畸变, 只是由于金属镀层内涡流的滞后效应使磁场波形相对于电流波形有一点延迟. 为了便于进行比较, 图 7 给出了同样条件下 (相同的励磁电流波形, 相同的镀膜表面电阻 0.2Ω), 磁场穿过内壁连续镀膜的陶瓷真空盒后的波形, 可见由于 BEPC II 储存环真空盒尺寸较大, 而且冲击磁铁脉冲磁场上升时间相对来说也比较快, 金属镀膜内的涡流引起的磁场波形的畸变很

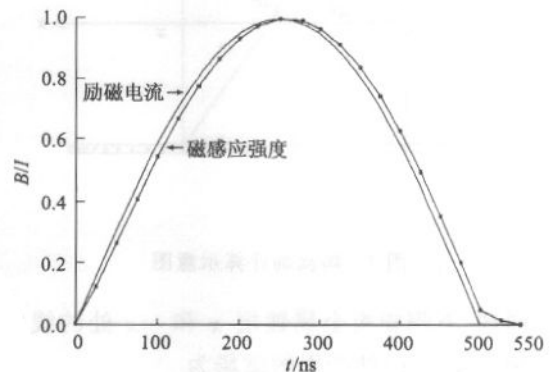


图 6 励磁电流波形和磁场

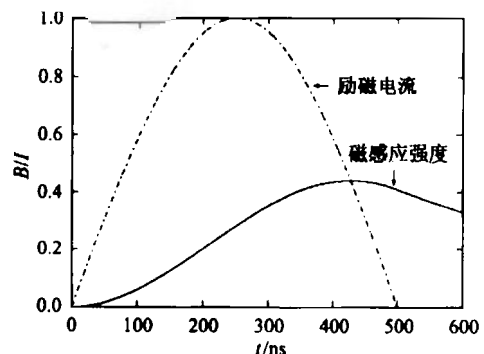


图 7 磁场穿过陶瓷真空盒后的波形

大,连续镀膜的陶瓷真空盒方案不能用于 BEPC II 冲击磁铁的设计,而本文提出的新型冲击磁铁却从根本上解决了这个问题。

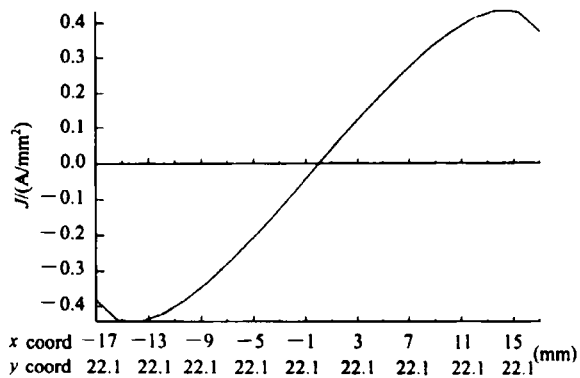


图8 镀膜内涡流密度的分布

图8是 OPERA 程序模拟得到的金属镀膜内的涡流密度分布,可见涡流密度沿 x 方向的分布基本与理论公式计算的结果相一致,其偏离来自于理论公式计算时假设场是均匀的,而 OPERA 程序模拟

时,磁场分布如图5所示,磁场在两侧迅速减小。

5 结论

在国际上已有的冲击磁铁方案不能完全满足 BEPC II 储存环注入系统对冲击磁铁设计要求的情况下,我们提出了一种新的冲击磁铁设计思想。根据这种新的设计思想,对 BEPC II 储存环注入冲击磁铁进行了设计,OPERA 程序和 MAFIA 程序模拟计算的结果表明,场的均匀性和束流阻抗均满足了设计要求。这种新型冲击磁铁不仅解决了 BEPC II 储存环注入冲击磁铁的设计难点,更为重要的是它发展了 slotted-pipe 型的冲击磁铁,成为具有更广泛应用前景的新型冲击磁铁。

感谢高能物理研究所加速器中心王九庆博士为我们设计的冲击磁铁计算束流阻抗及黄楠研究员对工作的大力支持。

参考文献 (References)

- 1 Blokesch C, Negrazus M et al. A Slotted-pipe Kicker for High-current Storage Rings. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1994, A338:151-155
- 2 Sebek J, Arnett D et al. SPEAR3 Injection Kicker System. 2001, PAC2001
- 3 Kurennoy S. Using a Ceramic Chamber in Kicker Magnets. 1995, SSCI-Prinprint-331, 5/95
- 4 CHAO W A, Tigner M. Handbook of Accelerator Physics and Engineering, World Scientific, 1999

Theoretical Analysis and Computer Simulation of a New Slotted Pipe Kicker Magnet

KANG Wen HAN Qian HAO Yao-Dou

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The physics design of BEPC II storage ring requires that the kicker magnets must have properties of wide uniform field region with high field uniformity and low beam impedance. In order to satisfy these requirements, a new slotted pipe kicker magnet is proposed. The results from theoretical analysis and OPERA program simulation show that the kicker magnet satisfies all requirements of BEPC II storage ring. In the range of $\Delta x = \pm 20\text{mm}$, the field uniformity is $\pm 0.6\%$ in the central plane, $\pm 0.7\%$ in the $y = 5\text{mm}$ plane and $\pm 2.9\%$ in the $y = 10\text{mm}$ plane. The simulated results of MAFIA program also show that the beam impedance of the kicker magnet is lower than 0.022Ω , and it is less than the required value of 0.025Ω .

Key words kicker magnet, beam impedance, field uniformity