

文章编号: 1007-4627(2002)04-0399-04

## CSR 切割磁铁设计\*

马力祯, 何 源, 王 玥, 袁 平, 韩少斐, 原有进, 夏佳文

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)由一个主环(CSRm)和实验环(CSRe)构成. 两个储存环的束流注入与引出都需要借助于切割磁铁的导向来完成. 介绍了 CSR 的切割磁铁的物理设计和二维场计算.

**关键词:** 切割磁铁; 切割板; 杂散场; 磁场分布

**中图分类号:** TL503.8 **文献标识码:** A

### 1 引言

切割磁铁作为一种特殊的偏转二极磁铁, 主要用于环形加速器束流的注入和引出. 与普通的二极偏转磁铁相比, 切割磁铁有如下特点: (1)真空室两侧线圈结构极其不对称, 其中一侧用作切割板, 其厚度受到严格的限制, 有时达到毫米量级, 且需要在很高的电流密度下长期运行, 所以元件的设计和加工, 特别是线圈的设计和加工非常困难. (2)由于所要求的好场区紧靠切割板, 切割板中的电流将严重影响好场区的场分布, 所以, 为了得到理想的场分布, 必须对切割板中的线圈结构进行优化. (3)由于切割磁铁切割板外侧的杂散磁场会对环形加速器中的束流产生影响, 所以必须用特殊的方法将其降到很低的水平. 除以上特点外, 设计时还必须根据所要求的磁场的不同, 如恒定磁场、脉冲磁场以及脉冲频率的高低等, 选择不同的铁心材料, 如实心

铁、冲片铁以及铁氧体等.

在已投入运行的切割磁铁中, CERN-ISR 的切割磁铁采用冲片叠压铁心, 在主磁场为 1.5 T 和切割板厚度仅为 6 mm 的情况下, 同时采用屏蔽和反抵两种手段将其杂散磁场降到了  $1 \times 10^{-5}$  T 以下<sup>[1]</sup>. Fermi 实验室则采用铁氧体铁心, 利用铁磁材料屏蔽而将 0.6 T 和 1 200 Hz 脉冲主磁场的杂散磁场降到了  $1 \times 10^{-4}$  T 以下<sup>[2]</sup>. GSI 的切割磁铁采用冲片叠压铁心, 切割板的最小厚度为 1.5 mm, 用主磁场在屏蔽铜板中感应的涡流所产生的磁场来抵消杂散磁场, 在主磁场为 1.2 T 和 160 Hz 的情况下将杂散磁场降到了 0.1% 以下. 从以上情况可以看出, 我们可以通过多种途径达到降低杂散场、减小切割板厚度的目的. 但如何选择一种既能达到要求、适合 CSR 的实际情况, 又经济节约的方案则是一个很重要的问题. 表 1 列出了 HIRFL-CSR 4 台切割磁铁的设计参数.

表 1 HIRFL-CSR 注入引出系统需要的 4 台切割磁铁的具体参数

磁铁名称	用途	有效孔径 /(mm×mm)	场强 /T	场均匀度 /(%)	杂散场 /(%)	长度 /mm	偏转半径 /mm	偏转角 /mrad	切割板厚度 /mm
MS1	CSRm 注入	40×40	0.84	0.1	0.1	1 130	3 600	315	20
MS2	CSRm 引出	40×40	0.43	0.1	0.1	1 000	25 000	40	10
MS3	CSRm 引出	40×50	1.28	0.1	0.1	2 000	8 350	240	30
MS4	CSRe 注入	40×65	0.75	0.1	0.1	1 600	11 200	145	18

收稿日期: 2001-12-12; 修改日期: 2002-07-26

\* 基金项目: 国家科学工程

作者简介: 马力祯(1969-), 男(汉族), 甘肃皋兰人, 高级工程师, 从事电磁铁设计研究.

## 2 选型

切割磁铁通常有以下 3 种方式降低切割板外侧的杂散磁场:

(1)用铁磁材料屏蔽 这种方法是在切割板的外侧加一个屏蔽铁板,则切割磁铁的杂散磁通大部分都从屏蔽铁板中通过,只有很小一部分从屏蔽铁板外侧(即加速器的束流管道中)通过.这种方法的优点是结构简单、运行简便可靠,缺点是切割板的厚度难以减小;同时,因为是被动屏蔽,难以将杂散磁场降到很低的水平,特别是在主磁场较高的情况下,这种方法的效果很不理想.

(2)用铁磁材料屏蔽加辅助线圈反抵 在切割板的外侧加一个屏蔽铁板,同时在磁轭上加辅助线圈.同样,切割磁铁的杂散磁通大部分都从屏蔽铁板中通过;辅助线圈中的电流产生的磁通分两部分:一部分在气隙中与主线圈的磁通叠加,另一部分在屏蔽铁板中与杂散磁通相互抵消.由于后者磁通路径的磁阻比前者的小很多,所以辅助线圈中的电流产生的磁通大部分与杂散磁通相互抵消,只有很小一部分与主线圈的磁通叠加.因此,可以用很小的辅助电流产生的磁通来抵消屏蔽铁板中的杂散磁通,从而使屏蔽铁板中及其外侧(即加速器的束流管道中)的磁场降到很低,甚至为零.这种方法的优点是可将杂散磁场降到很低的水平,切割板的厚度较小,运行可靠.缺点是结构复杂,运行也相对复杂.

(3)用屏蔽铜板中的涡流产生的磁场抵消杂散磁场 这种方法是在切割板的外侧加一个比较厚的铜罩,在主磁场为脉冲场的情况下,将会在铜罩中产生很强的涡流,同时涡流将会产生相应的磁通,这个磁通与切割板外侧的杂散磁通相互抵消;在主磁场的脉冲频率高到一定值的情况下,产生的涡流将会抵消大部分的杂散磁通.这种方式在主磁场为脉冲场且频率较高的情况下特别方便,但不适合直流场和低频率脉冲场的情况,也很难将杂散磁场完全抵消.

HIRFL-CSR 切割磁铁的磁场可以为脉冲场,也可以为直流场,但脉冲频率很低且有较长的平顶时间,所以用第 3 种方案显然不太合适;而其杂散磁场要求降到主场的 0.1% 以下,切割板厚度最小的为 10 mm,所以选第 2 种方案比较合适.

## 3 电磁设计及二维磁场计算

### 3.1 电磁设计

HIRFL-CSR 注入引出系统共需要 4 台切割磁铁,铁心由冲片叠压而成.由于 4 台切割磁铁的好场区高度均为 40 mm,为降低制造成本,4 台磁铁用同一种冲片.为了减小风险,先加工 CSR<sub>m</sub> 引出线上切割板厚度为 10 mm 的 1 台切割磁铁 MS2 作为样机.以下皆以这台样机为例来讨论 CSR 切割磁铁的设计和计算.磁铁的气隙高度由磁场的好场区高度、真空室壁厚以及安装间隙三部分组成,通过计算得出气隙为 65 mm 左右.磁铁的总安匝数:  $AN=0.8g \times B/\eta$ , 其中:  $AN$  为安匝数(A),  $g$  为气隙高度(cm),  $B$  为气隙磁场( $10^{-4}$  T),  $\eta$  为激磁效率(此种结构取值 0.95); 计算并取整得:  $AN=23\ 500$ (A), 匝数选为 9 匝,即  $N=9$ ; 则电流计算并取整后为  $I=2\ 600$  A; 切割边的厚度为 10 mm, 所以选线规为:  $7 \times 7/\phi 4$ ; 内线圈选  $7 \times 7/\phi 4$  五根并绕.

根据以上值完成磁铁的初步设计,并进行二维场计算.

### 3.2 二维场计算

二维场计算所用的程序为 OPERA-2d<sup>[3]</sup>. 计算的目的是通过铁垫补等措施得到理想的二维场分布,同时,在不同的场水平下调整辅助电流  $I_s$  的值,使得屏蔽铁外侧的杂散场接近于零,得到辅助电流  $I_s$  与主电流  $I_m$  的关系曲线.根据二维场的计算结果,调整和完善电磁设计、完成结构设计.

计算结果表明切割磁铁在  $x$  方向(水平方向)的散场已接近于零.但是,从图 1 所示的切割磁铁要求的好场区中  $x$  方向的场分布中可以看出磁场的均匀性并不太理想,达不到所要求的 0.1% 的场均匀度.在靠近切割板( $x=490$  mm)处的区域内磁场有比较明显的增强.

显然,引起这种现象的因素是切割板中的电流.根据安培环路定律,在每一根载流导线周围均有环绕磁场,如果将此导线放入外磁场,环绕磁场将对外磁场产生影响,且越靠近导线,此影响越大.图 2 中菱形所示为靠近切割板处  $y$  方向(垂直方向)上的场分布.从图中可以看出,在每一匝导线的对应位置上,磁场都有明显的增大,此增大造成靠近切割板处的区域内磁场的增强.

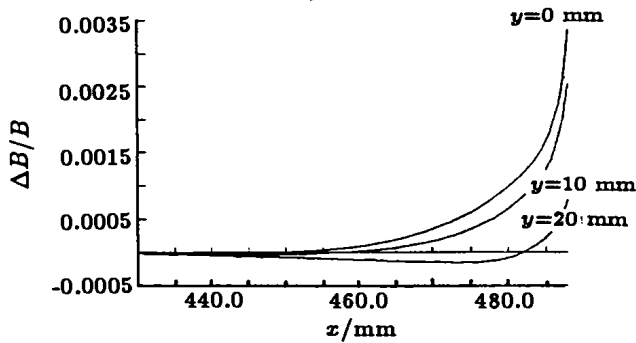


图 1 要求的好场区中  $x$  方向的场分布

证实, 将线圈的匝间绝缘降为 0.15 mm、对地绝缘降到 0.2 mm 以下该方法是可行的。

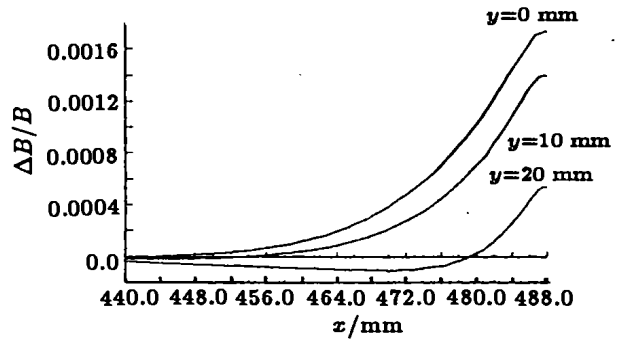


图 3 优化后好场区中  $x$  方向的场分布

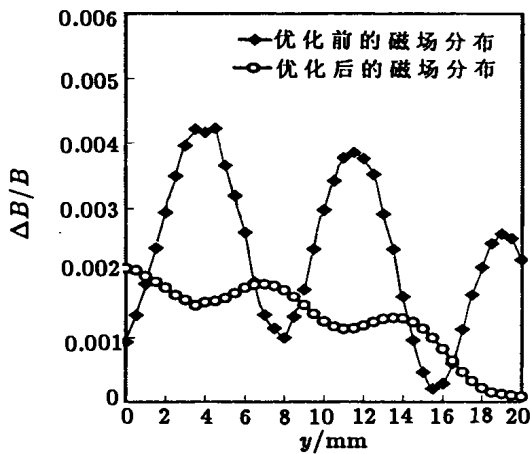


图 2  $x=488$  mm 处  $y$  方向上的场分布

既然磁场的畸变由切割板中的线圈电流引起, 为了得到满意的磁场分布, 只能对切割板的结构做优化. 通过多次的计算和理论分析得出, 减小切割板中导线的匝间绝缘以及线圈导线与铁芯的间隙可以有效地降低由此引起的不利影响. 在匝间绝缘小于 0.15 mm、线圈与铁芯的间隙小于 0.2 mm 的情况下可以得到满意的场分布. 从图 2 中圆圈所示可以看出, 在这种情况下每一匝导线的对应位置上磁场的增大被大地削弱了; 与此对应, 在所要求的好场区中也得到了较为满意的  $x$  方向的场分布. 图 3 所示为优化后好场中  $x$  方向的场分布. 为了便于比较, 图 4 给出了优化前后  $y=0$  处  $x$  方向的磁场分布. 由图可见在靠近 490 mm 处优化后的磁场分布有非常大的改善. 另外, 通过线圈的样品试验得到

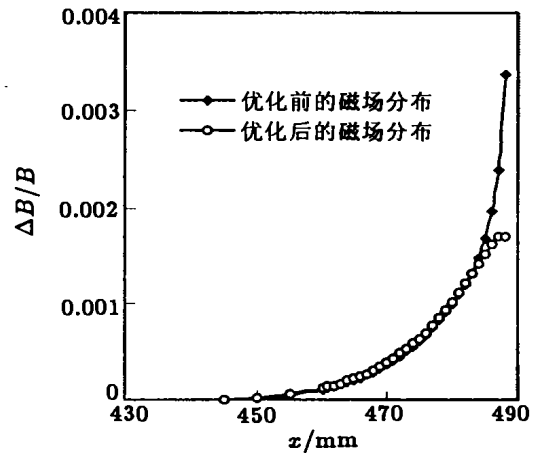


图 4 优化后  $y=0$  处  $x$  方向上的场分布

## 4 结论

从以上分析可以看出, 通过屏蔽和反抵两种方法的结合采用, 可以将切割板外侧的杂散磁场完全消除; 同时, 通过对冲片形状和线圈结构的优化可以得到满意的磁场分布. 但是, 这些都将会给磁铁的加工以及安装和拆卸带来很大的困难. 线圈的尺寸精度和上下面的平面度都必须好于 0.05 mm 才能可靠地安装和拆卸; 磁铁的调整装置的定位和重复精度也必须好于 0.03 mm 才能满足真空管道烘烤时磁铁的拆装要求. 所以, 整个磁铁的造价将会比较高.

## 参 考 文 献:

[1] Ratner L G, Lari R J, Bywater J A, et al. Design of a Low

Fringe Field Septum Magnet for Use at the CERN-ISR [A].

- International Conference on Magnet Technology [C]. Hamburg, Germany, May, 1990, 167.
- [2] Satti J A, Holmes S D. A Pulsed Septum Magnet for the Fermilab Antiproton Source [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985, NS-32(5): 3 628.
- [3] Vector Fields Limited. OPERA-2d User Guide and Reference Manual [M]. Oxford, 1999, 1-420.

## Design of Magnetic Septum of CSR\*

MA Li-zhen, HE Yuan, WANG Yue, YUAN Ping, HAN Shao-fei, YUAN You-jing, XIA Jia-wen  
(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** In order to satisfy the requirement of beam injection and extraction of CSR, four magnetic septums will be used in the accelerator. In the design, the shape of the lamination is optimized by 2-D magnetic field calculation. Also, in order to decrease the leakage field and obtain a satisfied field distribution, a special auxiliary coil and a shield iron plate are considered and as well as the construction of the septum leg is treated in a special way. As a result, the leakage field is almost zero and the inhomogeneity is less than 0.1% even in the area very near to the septum leg.

**Key words:** septum; septum leg; leakage field; field distribution

---

\* **Foundation item:** National Sciences Engineering