

文章编号: 1001-4322(2006)01-0147-04

兰州重离子加速器冷却储存环 kicker 磁铁设计*

马力祯^{1,2}, 韩少斐¹, 何 源¹, 王 玥^{1,2}, 张军辉¹,
高大庆¹, 袁 平¹, 原有进¹, 夏佳文¹

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 介绍了兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)CSRm 引出 kicker 磁铁的物理设计、参数计算以及结构设计和加工。为了减小电感,使上升时间达到要求,CSRm 引出 kicker 磁铁采用分布式的传输线方案,同时将无感电容与磁铁并联以满足匹配的问题。磁铁用单匝线圈和铁氧体铁芯来降低电感、减少涡流损耗,并采取两台电源成对供电、导体一端共地的结构形式消除杂散电感和轴向场,这种方式不但消除了过桥的不利影响,而且可通过调节导体间距离方便的调节磁场均匀区宽度和磁铁电感。完成设计后磁铁电感小于 $1 \mu\text{H}$,在 140 mm 范围内磁场均匀度好于 $\pm 0.5\%$,最高磁场达到 0.038 T,最大峰值激磁电流约为 2.5 kA。

关键词: kicker 磁铁; 铁氧体; 电感; 磁场分布

中图分类号: TL503.9 **文献标识码:** A

kicker 磁铁是一种以快速脉冲方式工作的特殊二极磁铁,主要用于环形加速器束流的注入和引出系统中。兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)共需两套 kicker 磁铁,分别用于主环引出和实验环注入。kicker 磁铁的主要特点是其磁场的快速脉冲性,但所要求的最高磁场一般都比较低,为了得到快速脉冲的磁场,必须尽可能的降低磁铁的电感,而磁铁的电感与磁铁线圈匝数的平方成正比,所以,kicker 磁铁线圈的匝数一般都不超过两匝,但激磁电流一般都很大。为了减小涡流损耗,铁芯一般都用铁氧体材料。CSRm 引出 kicker 磁铁的参数见表 1。从磁铁参数来看^[1],CSRm 引出 kicker 磁铁的物理要求是非常苛刻的。

1 设计思想

为了减小磁铁加工、运行和调试的难度,并借鉴 CERN 和 GSI 的经验,CSRm 的 kicker 磁铁系统采用分布式的传输线方案,但磁铁本身采用集中方式,即每个磁铁模块只有一个铁芯单元组成,整个磁铁放置于真空室中。集中结构的 kicker 磁铁研制的关键是降低磁铁的电感和极快脉冲方式工作时的各种损耗。磁铁的损耗主要有铁芯、导线中的涡流损耗和导线中的欧姆损耗两部分。以极快脉冲方式工作时,涡流损耗占主导地位。所以,为了减小涡流损耗,铁芯选用电阻率极高的铁氧体材料制造。为了降低电源研制的难度,必须将磁铁电感降低到一定的值以下,这是 kicker 研制的难点和关键点。综合考虑后认为,CSRm 的 kicker 磁铁要求其电感必须降到 $1 \mu\text{H}$ 以下。如此小的磁铁电感,磁铁只能采用单匝结构,但这会使激磁电流很大;同时,由于回路式线圈的过桥部分将会产生附加的轴向场(类似于 Glasser 场)和相应的杂散电感。所以,采用每两个模块串联并用一对反极性电源供电的结构形式来消除杂散电感和轴向场,图 1 所示为其结构示意图。

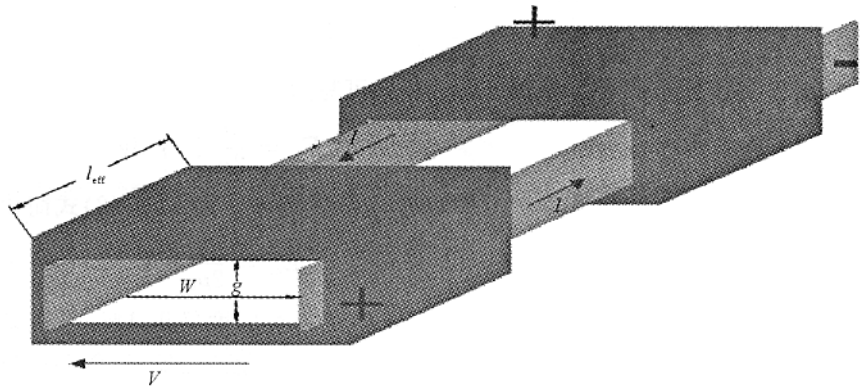


Fig. 1 One cell of the kicker magnet

图 1 等效的单匝 kicker 磁铁结构示意图

* 收稿日期:2005-05-24; 修订日期:2005-11-28

基金项目:国家杰出青年科学基金资助课题(10325522);同步辐射博士生创新中心研究生创新基金资助课题

作者简介:马力祯(1969—),男,甘肃省皋兰人,高级工程师,博士研究生,从事加速器磁铁设计与测量研究;malz@impcas.ac.cn。

将两边导体的一端共地,就构成了一个等效的单匝线圈磁铁,从而消除线圈过桥的不利影响^[2]。另外,这种结构还可以通过调节两个导体之间的距离来方便的调节好场区的宽度和磁铁的电感,以方便整个 kicker 系统的调试和各种参数间的平衡。

2 参数计算

2.1 磁场计算^[3]

按物理要求和磁场计算情况,磁铁的气隙取为 80 mm。图 2(a)为 kicker 磁铁横截面内的磁力线分布。计算得出,在距两边导体 15 mm 的范围内磁场均匀度可以好于 ± 0.005 。图 2(b)为 kicker 磁铁横截面内的磁场分布。所以,调节两导体之间的距离可以调节好场区宽度。导体间的距离为 180 mm 时可以得到所要求的好场区。最高场为 0.038 T 时所需的激磁电流约为 2.5 kA。

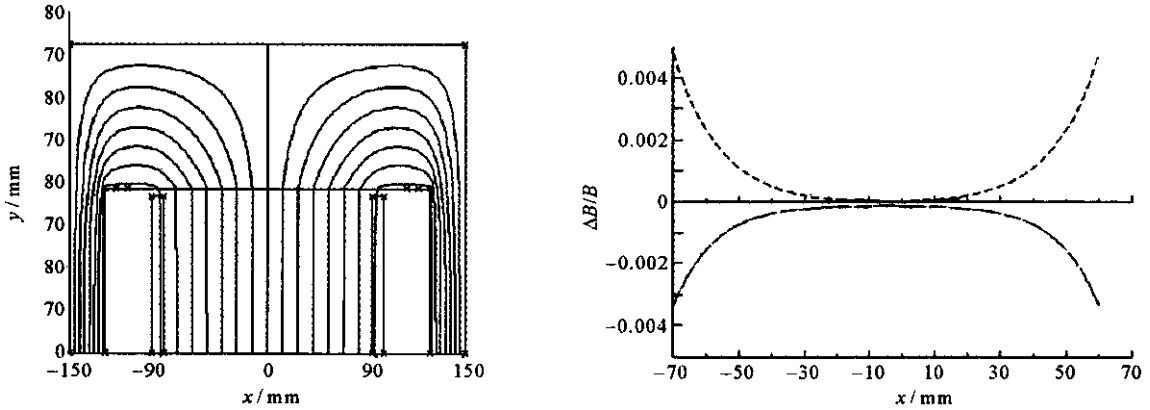


Fig. 2 Magnetic flux and field distribution in cross-section of kicker magnet

图 2 kicker 磁铁横截面内的磁力线和磁场分布图

2.2 电感计算

从图 2 中可以看到,在磁铁气隙中所有的磁力线都被约束在两导体之间,即气隙磁场只存在于两导体之间;导体间的距离决定了磁场存在的范围,一定场强时的磁场储能 E_m 的计算式为

$$E_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} dV \quad (1)$$

对于各向同性的线性导磁媒质,(1)式可写为

$$E_m = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (2)$$

假定在磁场存在的范围内的平均磁场值为 B ,体积为 V ,则(2)式简化为

$$E_m = \frac{1}{2\mu_0} B^2 V \quad (3)$$

对于 kicker 磁铁,由于在两导体之间的磁场均匀度好于 1%,可以认为所要求的气隙磁场即为磁场平均值;磁场的体积可以认为是以有效长度为边长、导体距离为宽度、气隙高度为高度的立方体体积,(3)式可写为

$$E_m = \frac{1}{2\mu_0} B_m^2 W g l_{\text{eff}} \quad (4)$$

式中: B_m 为平均气隙磁场、 W 为磁场区域宽度(导体之间的距离)、 g 为磁铁气隙高度、 l_{eff} 为磁铁有效长度。所以,可以通过调节导体之间的距离来调节磁铁的磁场储能。而磁场储能 E_m 与磁铁电感 L_m 和激磁电流 I 之间的关系可表示为

$$L_m = 2E_m / I^2 \quad (5)$$

式中的激磁电流 I 在气隙磁场和磁铁气隙为定值时是固定值。所以,磁场储能的改变对应着磁铁电感的改变,可以通过调节导体之间的距离来调节磁铁的电感。将所有的参数代入(4)和(5)式后,计算得到磁铁对单台电源的电感为 $0.8 \mu\text{H}$,在所要求的值以下。

对于这种等效单匝磁铁,磁铁对单台电源的电感也可以表示为

$$L_m = \frac{1}{2g} \mu_0 W l_{\text{eff}} \quad (6)$$

代入各值后得电感值 $L_m = 0.85 \mu\text{H}$, 在所要求的值以下。

当然, 电感的计算值不可能太精确, 所以在以后的调试过程中可以通过调节导体之间的距离来实现磁场均匀度、好场区宽度和磁铁电感之间的矛盾关系, 得到一个稳定可靠的 kicker 系统。

2.3 电参数计算

正常工作时 kicker 系统是一个脉冲高压系统, 对于磁铁本身, 其电压表示如下

$$V_m = IR + L_m(dI/dt) \tag{7}$$

由于线圈电阻非常小而脉冲非常快, 所以, 磁铁的电压主要是电感电压

$$V_m \approx L_m(dI/dt) \tag{8}$$

将电感值及电流的最快脉冲值代入(8)式计算得到磁铁的电压为 20.4 kV。由于是双极性电源, 两边导体的一端共地, 所以, 导体另一端的电压分别为 +20.4 kV 和 -20.4 kV, 结构设计时必须考虑足够的绝缘强度以满足绝缘要求。

在磁铁的各种损耗中, 由于采用铁氧体铁芯, 铁芯中的涡流损耗可以忽略不计, 导体中的涡流损耗的最大功率为 30 W, 欧姆损耗的最大功率 45 W, 辐射损耗忽略不计。总损耗不超过 100 W, 结构设计时考虑一定的热传导件就可满足冷却要求, 所以, kicker 磁铁采用自然冷却方式。

3 结构设计

kicker 磁铁采用六模块、三单元结构, 其总体布局如图 3 所示, 共有三对电源供电, 通过接地电阻在接地铜壳上共地。

图 4 为磁铁的横截面示意图, 最外面为 $\phi 450 \text{ mm}$ 的不锈钢真空室, 将铁氧体铁芯用不锈钢外壳牢牢固定为一个整体后外加接地和屏蔽铜壳。为了方便安装和检修, 将磁铁置于高精度导轨之上, 并加适当的定位装置。高压电缆的接插件采用金属与陶瓷的同轴封接件, 以保证真空和高压的双重要求, 同轴封接是为了降低电感值。

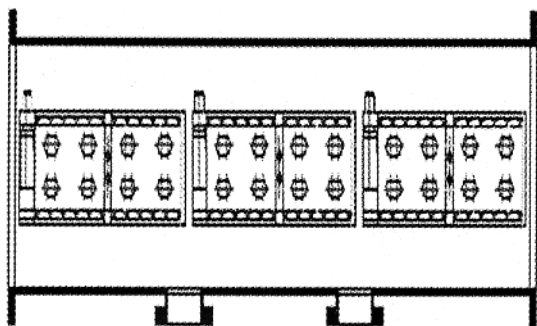


Fig. 3 Over view of the kicker magnet

图 3 kicker 磁铁总体布局图

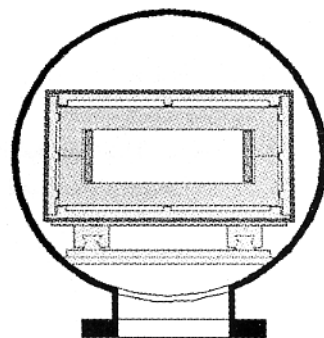


Fig. 4 Cross-section of the kicker magnet

图 4 kicker 磁铁横截面示意图

考虑到 kicker 磁铁将放置于极高真空之中, 因此所有的绝缘结构都采用出气率极低的材料。同时考虑到真空中的散热, 磁铁导体的所有绝缘部件将用导热性极好的氧化铍陶瓷制造。磁铁线圈的导体可以用作加热烘烤时的加热件。

导体之间的距离用螺栓推进机构调节。另外, 由于 kicker 工作时将会产生很大的脉冲磁力^[4], 导体上的磁力最大值将超过 10 000 N, 所以, 导体要可靠固定且必须与铁氧体铁芯之间留有足够的距离以防导体震动时损坏铁芯。完成设计后的 kicker 参数如表 1 所示。

表 1 kicker 磁铁参数

Table 1 Parameters of the kicker Magnet

number of module	6	good field region ($W \times H$)	140 mm \times 74 mm
raise time/ns	200	top time/ns	500
number of cell	3	$\Delta B/B_0$	$\pm 0.5\%$
number of power supply	6	maximum inductance/ μH	0.95
bending angle/mrad	1	maximum current/A	2 500
effective length/mm	295	maximum voltage/kV	± 20.4
maximum field/T	0.038	length/mm	2 250

4 结 论

对置于真空室内的集中参数的 kicker 磁铁来说,加工合格的铁氧体铁芯是最大的难点,因为要同时保证磁导率、真空出气率、电阻率以及机械尺寸等多方面的性能,还必须要求其单块的体积足够大以减少由于铁芯拼块对真空造成不利的影 响。CSR_m 引出 kicker 磁铁所用的铁氧体铁芯已由中国工程物理研究院研制成功,各种参数均满足要求。因此,参照国内外 kicker 研制的经验和样机测试的结果,研制出电感在 1 μ H 以下的集中参数 CSR_m 引出 kicker 磁铁是有把握的。另外,特殊的电感和好场区的可调节结构将很方便各种参数的调整 and 平衡,将为整个系统的调试提供极大的方便。

参考文献:

- [1] 夏佳文,詹文龙,魏宝文,等. 兰州重离子冷却储存环[J]. 原子核物理评论, 2001, **18**(1):35-36. (Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. HIR-FL-CSR heavy ion research facility. *Nuclear Physics Review*, 2001, **18**(1):35-36)
- [2] Dinkel J, Hanna B, Jensen C, et al. Development of a high quality kicker magnet system[R]. Fermi National Accelerator Laboratory, FER-MILAB-TM-1843, 1993.
- [3] Ducimetiere L, Jansson U, Schroder G H, et al. Design of the injection kicker magnet system for CERN's 14 TeV proton collider LHC[R]. European Organization for Nuclear Research, CERN-SL Division, CERN-SL-95-80 BT, LHC Note 337, 1995.
- [4] Grishanov B I, Podgorny F V, Rummler J, et al. Very fast kicker for accelerator applications[J]. *Nucl Instrum Meth A*, 1997, **396**:28-34.

kicker magnet design of HIRFL-CSR_m

MA Li-zhen^{1,2}, HAN Shao-fei¹, HE Yuan¹, WANG Yue^{1,2}, ZHANG Jun-hui¹,
GAO Da-Qing¹, YUAN Ping¹, YUAN You-jin¹, XIA Jia-wen¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, P. O. Box 31, Lanzhou 730000, China;*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The theoretic design, the 2-D magnetic field calculation and the electrical calculation of a kicker magnet for CSR_m extraction are described as well as the construction design and the manufacture of some key parts. In order to decrease the additional inductance of the magnet, a one-turn coil and ferrite cores are used in the magnet. Each pair of the magnets are powered by a pair of pulse power supplies. The designed inductance is less than 1 μ H and the field homogeneity is better than $\pm 0.5\%$ at the peak value of 0.038 T. The magnet meets all of the strict requirements.

Key words: Kicker magnet; Ferrite; Inductance; Magnetic field distribution

