

文章编号: 1007-4627(2011)01-0055-03

二极铁均匀场修正*

唐兵, 崔保群, 马瑞刚, 姜冲, 马鹰俊, 陈立华, 蒋渭生

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: HI-13 串列加速器升级工程中的 ISOL 高质量分辨谱仪要求 20000 的质量分辨率, 分析磁铁磁场均匀性要求好于 1×10^{-5} 。要达到这样高的磁场均匀性, 必须对磁铁进行垫补。介绍了二极铁表面线圈垫补均匀场的设计方法和制作工艺, 并且基于现有的一块 C 型二极铁对表面线圈垫补均匀场的方法进行了实验研究。实验结果表明, 采用表面线圈垫补后, 场均匀性提高了一个数量级, 积分场的均匀性从 5×10^{-4} 提高到 3×10^{-5} 。

关键词: 二极铁; 表面线圈; 场均匀性

中图分类号: TL503.8 **文献标识码:** A

1 引言

在离子质谱计设计中往往要求具有很高的质量分辨率, 然而分析磁铁磁场的不均匀性不可避免地引起像差, 使高分辨率的获得变得十分困难。基于现有的机加工能力和装配水平, 二极铁磁场均匀性仅能达到约 2×10^{-4} 。中国原子能科学研究院正在开展的串列加速器升级工程中, 需要建造一套在线同位素分离器(Isotope Separator On Line), 质量分辨率为 20000。为了解决束流能散过大导致谱仪质量分辨率低的问题, 谱仪采用大小铁双能量结构削弱能量色散^[1]。其中大铁偏转半径为 2.5 m, 偏转角度为 100° , 要求磁场均匀性好于 1×10^{-5} 。对于这么大尺寸的磁铁要达到 1×10^{-5} 的磁场均匀性, 必须采用一种切实可行的方法对磁铁进行垫补。

为了提高二极铁磁场均匀性, 长期以来人们采用了很多办法, 例如, (1) 在磁极边沿加铁垫补, 为了垫补积分场, 还可以在磁铁出入口位置加各种不同尺寸的垫片^[2]; (2) Halbach 采用在磁极内设置垫补导线^[3-4]; (3) 磁极内加均匀气隙^[5]; (4) 通过对磁极面进行反复的测磁再加工, 从而得到满意的磁场分布。本文采用表面线圈(Surface coil)^[6]的方法对磁场进行垫补。采用表面线圈的方法具有很多优点, 它可以在磁铁加工完成后进行, 简化了磁铁的设计和制造工艺, 对于现有的磁铁也可以使用这

种方法对磁场进行优化。同时, 该方法还具有设计简单、相对费用较低和占用磁铁轴向空间小等优点。

2 表面线圈的原理、设计和制作

所谓表面线圈就是在二极铁上、下磁极面上沿磁场等场线路径设置电流导线, 当这些导线通以一定的电流时就可以在磁铁气隙内产生一附加场, 该附加场与原磁场的均匀量分布相同、方向相反。所以, 该附加场与原磁场叠加就可以达到改善磁场分布均匀性的目的。要得到原磁场的分布, 需要对整个磁极面进行磁场测量, 然后再使用计算机作出磁场分布的等场线。当然, 计算机给出的等场线是一些封闭或者断开的曲线, 为了导通电流, 还需要对等场线进行修改。将闭合的等场线开一小口, 并与相邻的导线连接起来形成螺旋状的导线回路, 对断开的曲线添加一些外部回路导线使各导线连接起来。每根导线对应的磁场变化量相等, 所以通过每根导线的电流相同, 通过对等场线的修改, 将线路板的每根导线都串连起来, 整块线路板仅需要一台电源供电。图 1 给出了磁场等场线分布, 图 2 给出了对等场线进行修改后做成的表面线圈电路板。

表面线圈的电流值取决于相邻磁场等场线的磁场差值。由环路定理可以得到, $I = \oint H \cdot dl$,

$$I = \int_{l_0} \frac{B_0}{\mu_0} dl + \int_{l_1} \frac{B_1}{\mu_1} dl,$$

即

* 收稿日期: 2010-05-06; 修改日期: 2010-09-02

* 基金项目: HI-13 串列加速器升级工程项目

作者简介: 唐兵(1982—), 男(汉族), 四川内江人, 在职研究生, 从事加速器物理研究; E-mail: tangb364@ciae.ac.cn

其中 $\int_{l_1} \frac{B_1}{\mu_1} dl$ 代表磁轭中磁场对路径的积分，而 $\int_{l_0} \frac{B_0}{\mu_0} dl$ 是气隙中磁场对路径的积分。磁轭磁导率 μ_1 远大于空气的磁导率 μ_0 ，所以 $\int_{l_1} \frac{B_1}{\mu_1} dl$ 可忽略，

$$I \approx \int_{l_0} \frac{B_0}{\mu_0} dl。$$

假设 ΔB 为相邻两条等场线磁感应强度的差值，二极铁气隙高度为 $2G_0$ ，则流过相邻两个等场区分界线的电流强度为

$$I = \frac{2G_0}{\mu_0} \Delta B，$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。为了保证对称，一般会在上下磁极面上各设置一块表面线圈，两个表面线圈的电流导线串联，通过表面线圈的导线电流强度为

$$I = \frac{G_0}{\mu_0} \Delta B。$$

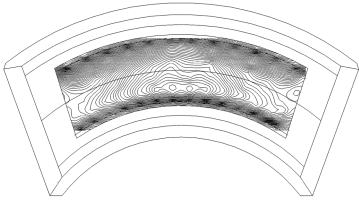


图 1 磁铁中平面磁场分布 ($B_0 = 0.3 \text{ T}$ ，每根等场线 $5 \times 10^{-6} \text{ T}$)

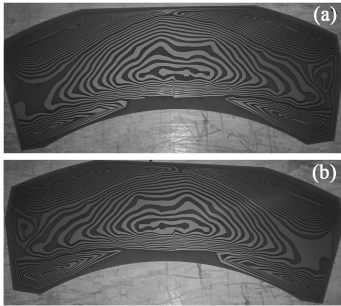


图 2 表面线圈照片 ((a) 正面, (b) 反面)

表面线圈的制作采用印刷电路板的蚀刻工艺。绝缘基板板厚 1.5 mm，铜箔厚 0.7 mm。双面板使电流连续分布，正面是奇数等场线的连接导线，反面是偶数等场线连接的导线，正反面的导线串联。本文对现有的一块 C 型磁铁进行垫补。该磁铁偏转半径 55 cm，偏转角度 90° ，气隙高 6 cm，磁极宽 28 cm，入口和出口极面旋转角都为 25° ，设计磁感应强度为 0.1—0.8 T。好场区 ($\pm 7 \text{ cm}$) 内径向磁场均匀性约 4×10^{-4} ，如图 3(a) 所示。

垫补前磁铁中平面磁场的等场线分布如图 1 所示，平均磁场约为 0.3 T，每两根等场线的磁场差为 5×10^{-6} ，因此，该表面线圈需要的电流为 0.12 A。根据该场分布加工完成的表面线圈如图 2 所示。考虑到边缘场的影响，距离磁铁出入口边界 1 个气隙 (6 cm) 以内的磁场不垫补。

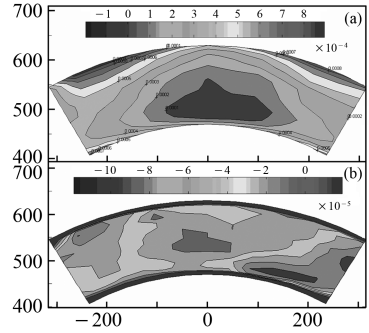


图 3 垫补前、后磁场均匀性分布 (a) 无垫补线圈 (b) 有垫补线圈。

3 实验结果和讨论

将加工完成的表面线圈安装在磁极面上，并且通以适当电流，磁场均匀性得到明显改善。如图 3 所示，当磁铁磁场约为 0.3 T 时，垫补前，中平面好场区范围内 ($\pm 7 \text{ cm}$) 磁场均匀性约 7×10^{-4} ，垫补后 (表面线圈电流 0.12 A) 磁场均匀性好于 1×10^{-4} 。当然对于离子轨迹来说，更为关心积分场。图 4 给出了垫补前后积分场 $\int B dl$ 的分布。可以看出，在好场区范围内，积分场均匀性从垫补前的 5×10^{-4} 提到到 3×10^{-5} ，提高了一个数量级。

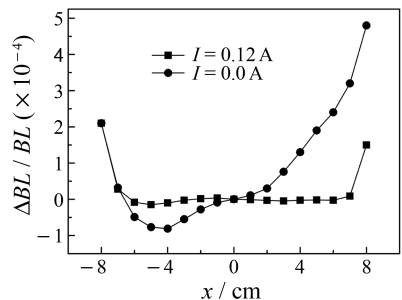


图 4 垫补前、后积分场均匀性比较 ($B_0 = 0.3 \text{ T}$)

需要指出的是表面线圈电流并不与磁铁磁感应强度成正比，仅与磁感应强度变化量有关。在不同磁感应强度下磁场分布不同 (见图 5(a))。但是，在好场区 ($\pm 7 \text{ cm}$) 内，表面线圈电流为 0.12 A 时就得到很好的磁场分布。磁场从 0.1—0.3 T 分布基本一致，垫补后磁感应强度沿径向变化量小于 $2 \times$

10^{-5} (见图 5(b))。由于磁饱和效应的影响, 当磁感应强度再增大时, 磁场分布会发生明显变化, 低场

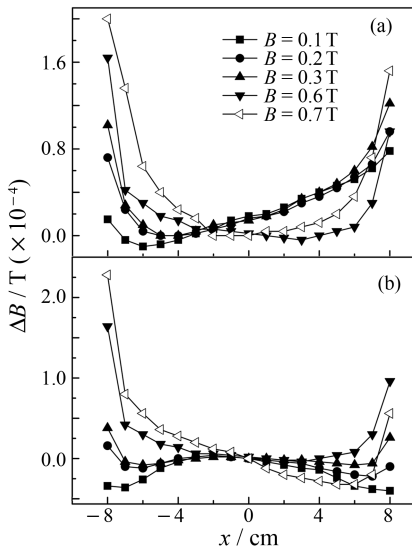


图 5 垫补前、后磁场变化量分布($\theta=0^\circ$)
(a)无垫补线圈, (b)有垫补线圈。

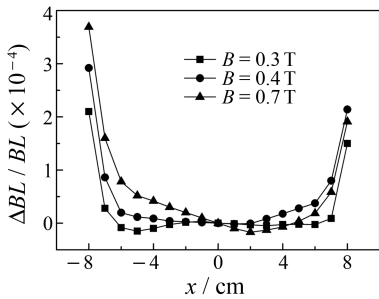


图 6 不同磁感应强度下垫补后积分场沿径向分布

下设计的表面线圈垫补将很难达到好的效果。当磁感应强度为 0.7 T 时, 积分场垫补后的均匀性仅 1×10^{-4} (见图 6)。如果需要较大的磁场范围, 可在一个较低磁场 B_1 和一个较高磁场 B_2 做两个相应的表面线圈, 其电流分别为 I_1 和 I_2 , 当磁场 B 在 B_1 和 B_2 之间时, 可通过调节两个线圈的电流 I_1 和 I_2 得到满意的磁场分布。

实验证明, 用表面线圈的方法可有效提高磁场的均匀性, 该方法方便、简单, 还可用于改善现有磁铁的均匀性。

参考文献 (References):

- [1] Peng Zhaohua, Guan Xialing, Cui Baoqun. Atomic Energy Science & Technology, 2006, 40(2): 133 (in Chinese). (彭朝华, 关遐令, 崔保群. 原子能科学技术, 2006, 40(2): 133.)
- [2] Wanderer P, Jackson J, Jain A. The SNS Ring Dipole Magnetic Field Quality. Proceedings of EPAC 2002, Paris, CEA; 2002, 1317.
- [3] Halbach K. Nucl Instr & Meth, 1973, 107: 515.
- [4] He Yuan, Xiong Hui, Liu Weijun, et al. High Energy Physics & Nuclear Physics, 2003, 27(6): 532 (in Chinese). (何源, 熊慧, 刘维军, 等. 高能物理与核物理, 2003, 27(6): 532.)
- [5] Okuma Y. Nucl Instr & Meth, 1972, 102: 317.
- [6] Czok U, Moritz G, Wollnik H. Nucl Instr & Meth, 1977, 140: 39.

Modification of Dipole Homogeneity Field*

TANG Bing¹⁾, CUI Bao-qun, MA Rui-gang, JIANG Chong, MA Ying-jun, CHEN Li-hua, JIANG Wei-sheng
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The mass resolving power of ISOL's spectrometer for Beijing Radioactive Ion-beam Facilities project is 20000, which requires the field uniformity of the magnet better than 1×10^{-5} . To achieve such a high uniformity field, field optimize is indispensable. This paper presents the design method, manufacture techniques and experiment results of surface coils, which are set on pole face of a dipole to improve the magnetic field homogeneity. The integral field uniformity with surface coil is optimized to 3×10^{-5} from 5×10^{-4} , which is improved roughly an order of magnitude.

Key words: dipole; surface coil; homogeneity

* Received date: 6 May 2010; Revised date: 2 Sep. 2010

* Foundation item: HI-3 tandem upgrade project

1) E-mail: tangb364@ciae.ac.cn