

文章编号: 1007-4627(2010)04-0440-05

FAIR 项目 Super-FRS 超导二极磁铁端部优化*

姚庆高^{1,2}, 马力祯^{1, #}, 张小奇¹, 何源¹, 袁平¹, 张斌¹, 吴巍², 韩少斐¹, 张思玲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 100049)

摘要: 介绍了 Super-FRS 超导二极磁铁的磁场优化和端部削斜方案, 采用 OPERA 软件对活极头进行削斜计算, 得出合理的活极头尺寸, 使各场下的积分均匀度在要求范围内达到了 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 。最后将计算的积分场均匀度与磁场测量的结果进行比较, 结果吻合得较好, 验证了这种端部活极头优化计算方法的正确性。

关键词: 超导磁铁; 积分场均匀度; 活极头; 端部削斜

中图分类号: TM153 **文献标识码:** A

1 引言

国际反质子与离子研究装置(FAIR)项目中的超级碎片分离谱仪 Super-FRS(Super FRagment Separator)主要由前分离与主分离组成, 并将束流注入到低能、高能和加速环等 3 个区。其中分布在谱仪上的 24 台二极磁铁由中国合作组负责完成, 中国科学院近代物理研究所承担了超导二极磁铁样机铁芯的研制与磁铁的总体测试。

二极磁铁磁场的均匀性会直接影响束流品质, 均匀区宽度直接决定了二极磁铁的接收度, 所以对 Super-FRS 二极磁铁样机 FAIR 工程组有着严格的好场区和均匀度的要求。此二极磁铁采用超导、H 型和直铁结构的方案, 设计指标如表 1 所示。

磁铁设计的最大难点是要在好场区范围内整个工作场区的积分场均满足高均匀度要求, 而在此磁铁中, 万分之一的相对精度相当于实际尺寸(沿束流方向的中心线磁铁长度为 2020 mm)的 0.2 mm, 这对活极头削斜调整是很困难的。为此, 在几个方面进行了综合考虑: 首先在总体设计上, 需对冲片结构做一个详尽的分析, 通过有限元软件对磁场计算出合理的冲片尺寸, 同时考虑尺寸的误差对磁场的影响情况; 其次在加工制造上严格控制尺寸误

差; 然后采用活极头, 通过其端部削斜来提高精度。

表 1 物理设计指标

名称	指标
磁场范围/T	0.16—1.6
偏转角度(°)	15
偏转半径/m	12.5
有效长度/m	2.126
有效孔径	(± 190 mm) \times (± 70 mm)
气隙高度/mm	170
积分场均匀度	$\pm 3 \times 10^{-4}$
$\Delta(\int B dl) / \int B dl$	

本文将以理论计算与实际测量相结合的方式介绍磁铁的活极头端部削斜情况。

2 磁场模拟

Super-FRS 二极磁铁采用了超导线圈、温铁和温孔结构, 铁芯材料主体采用宝钢生产的 0.5 mm 硅钢片(B50AS-1)的冲片叠压而成。冲片为 H 型, 见图 1。总体梯形叠压(两端面成 15°角)。线圈位置与冲片钝化槽的尺寸误差控制在 ± 0.05 mm 之内。为进行端部磁场优化设计, 需进行三维建模。

* 收稿日期: 2010-03-11; 修改日期: 2010-03-25

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(2008CB817701); 中国科学院近代物理研究所推进项目(08CSRWX100)

作者简介: 姚庆高(1980—), 男(汉族), 湖北竹溪人, 工程师, 博士研究生, 从事加速器磁铁设计与测量研究;

E-mail: yaoqinggao@impcas.ac.cn

通讯联系人: 马力祯, E-mail: malz@impcas.ac.cn

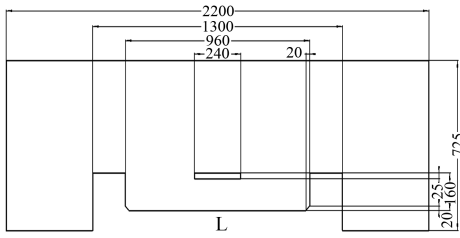


图 1 冲片结构图

在 OPERA 3D 计算软件中, 有 Modeller 和 Pre-Processor 两种建模方法^[1], 其中前一种方法方便快捷, 可对各类形状的磁体进行建模计算, 但对量化削斜计算不太实用。而采用 Pre-processor 可进行精细调整, 以满足万分之一的积分场分布。

2.1 Pre-processor 建模

Pre-processor 建模方法可以概括为由点及面、由面及体法。根据磁场的对称性建立四分之一模。方法为: 首先利用冲片的每点坐标建立第一个基本面(磁铁中心横截面的 1/2), 基本面由若干个四边形和三角形组成, 如图 2 所示(其中附在主铁芯上的 4 块铁为焊接板); 再拉伸基本面至适当位置以组成多个层(需考虑 7.5° 的偏转角度进行拉伸)。为了进行端部的削斜计算, 建模时应特别突出活极头: 在拉伸成体时设计为 3 层(每层 25 mm), 并沿横向方向平分为 24 等份(如图 2 所示, 如需进行更

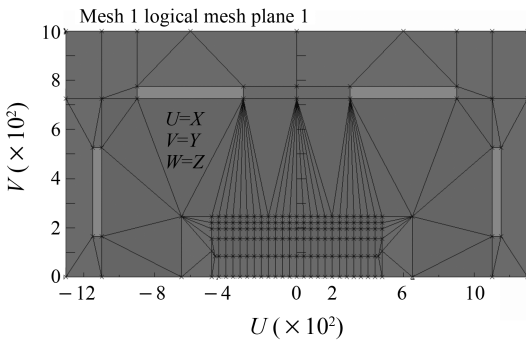


图 2 基本面

详尽的分析提高计算精度, 可将活极头的 3D 建模进一步细化, 但这直接影响计算速度)。通过此建模方法, 在模拟计算时就可以借助调节活极头端部上的坐标来进行精细量化的削斜, 它比 Modeller 建模方法相对灵活。活极头采用常用的电工纯铁(DT4)材料。

2.2 端部优化

由于磁铁端部效应的影响, 在主场中叠加了高阶磁场分量, 这对磁铁的积分场分布产生了一定的影响, 所以必须对端部实施削斜。二极磁铁端部效应引入的是一个局部的负六极磁场, 因此补偿一个合适的正六极磁场是端部削斜的主要目的^[2]。

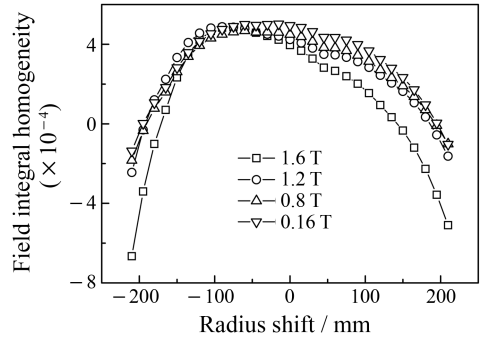


图 3 在 Rogowski 曲线削斜后不同磁场状态下的积分场均匀度

先采用标准的 Rogowski 曲线进行端部削斜, 实际应用中为方便加工和计算, 使用折线代替曲线, 一般情况下采用三折线, 计算后得出积分场均匀度的分布趋势如图 3 所示。按此趋势对活极头的形状进行总体的削斜考虑, 对其端部进行变量削斜计算, 基本形状大致是 x 的二次曲线^[3]。由于 Super-FRS 二极磁铁既不是直铁也不是标准的扇形铁(梯形结构), 所以削斜的形状略有不同, 中间并非是削斜的最深处。通过不断调整削斜面上的节点坐标进行模拟计算, 得出最后的活极头削斜截面如图 4 所示, 图 4(a)给出了罗高斯基曲线削斜, 图 4(b)

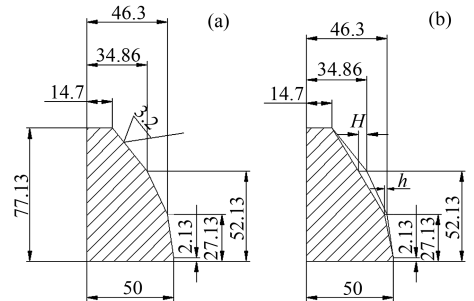


图 4 端部削斜截面图

(a) Rogowski 曲线, (b) 复杂削斜。

是在罗高斯基曲线基础上进行的复杂变量削斜(图中的 H 值和 h 值是沿横向方向的变量), 两个面的坐标垂直变化曲线如图 5 所示, 其中坐标调整分段

进行,而在实际的加工中进行平滑处理。图 6 给出了活极头的极面俯视图(960 mm 为极面宽度,活极头每层厚 25 mm,共分为 3 层,总厚 75 mm,20 mm 为端板厚度)。图 7 给出了常规线圈测试时安装在磁铁端部的活极头。

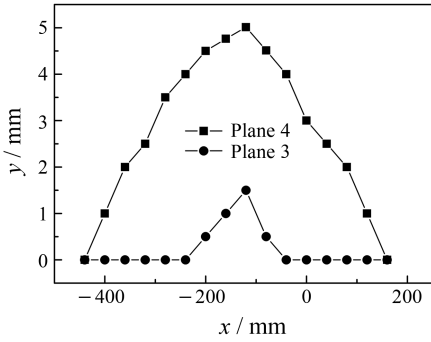


图 5 复杂削斜曲线

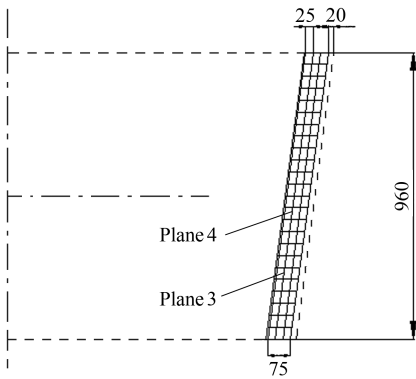


图 6 活极头俯视图

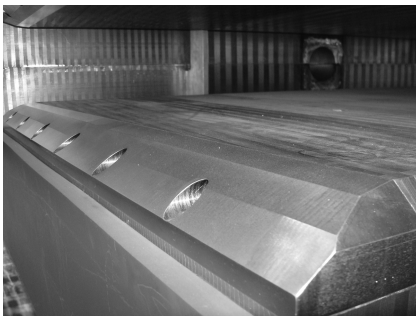


图 7 安装在磁铁上的活极头

3 优化设计结果

通过 3D 模拟计算得出的理想结果,还需进行相关的实际磁场测量进行验证^[4]。

为优化设计提供参考,同时考虑到拆装方便及测试成本,先制作一个与超导线圈同尺寸的常规线圈

圈替代进行低电流测量,这样可以检验计算精度。通过测量分析可知在低场情况下磁测值与计算值符合得较好,证明 OPERA 有限元软件计算的精度能够满足设计要求,可以进行超导线圈下的测量。

3.1 超导线圈测量

测磁内容主要包括点测及积分场测量。利用积分线圈测量可以检验活极头削斜形状是否满足均匀度的要求,这里采用一个长约 3.8 m 的特制线圈进行积分场均匀度的测量。

超导线圈经降温至 4.2 K 后,处于超导态,用电源加载电流至一定值以励磁整个磁铁,在电流状态稳定后,利用电机驱动长线圈在磁铁径向方向的 ±200 mm 范围内以固定步长(这里为 5 mm/step)移动,测磁路径如图 8 所示。然后通过计算机及积分器系统获取磁通量变化引起的线圈端电压积分值。

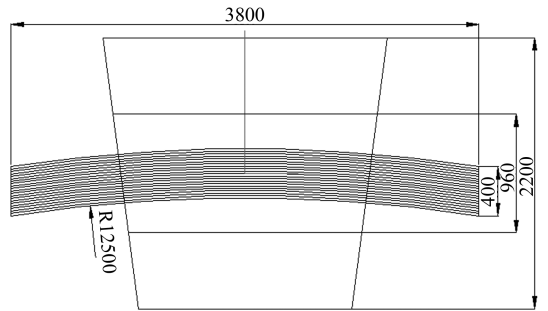


图 8 积分路径

3.3 计算与测量结果比较

考虑到磁铁运行时的整个工作场区为 0.16—1.6 T 及铁磁性材料的非线性。将高(1.6 T)、中高(1.2 T)、中(0.8 T)和低(0.16 T)4 个场区下的积分场均匀度的计算值与测量值列为比较对象。OPERA 3D 计算数据处理方法如下:将计算的积分长度与积分线所在的好场区位置进行二阶拟合,得出二阶公式,然后再从积分长度中扣除二极分量与四极分量,从而得出有关高阶量的值^[5],即为均匀度。

依据长线圈的测量数据,分析处理并与计算值进行比较,如图 9 所示。可见 4 种励磁状态下的积分场均匀度都在 2×10^{-4} 左右,而在高场的情况下可达 1×10^{-4} ,测量与计算差别小,趋势基本一致,端部优化情况理想。主要不同的地方在于图(a)和(b)中横坐标为 100 mm 左右的地方均匀度表现得

略有不同, 原因是由于高场情况下端部饱和使得磁

力线重新分布造成的。

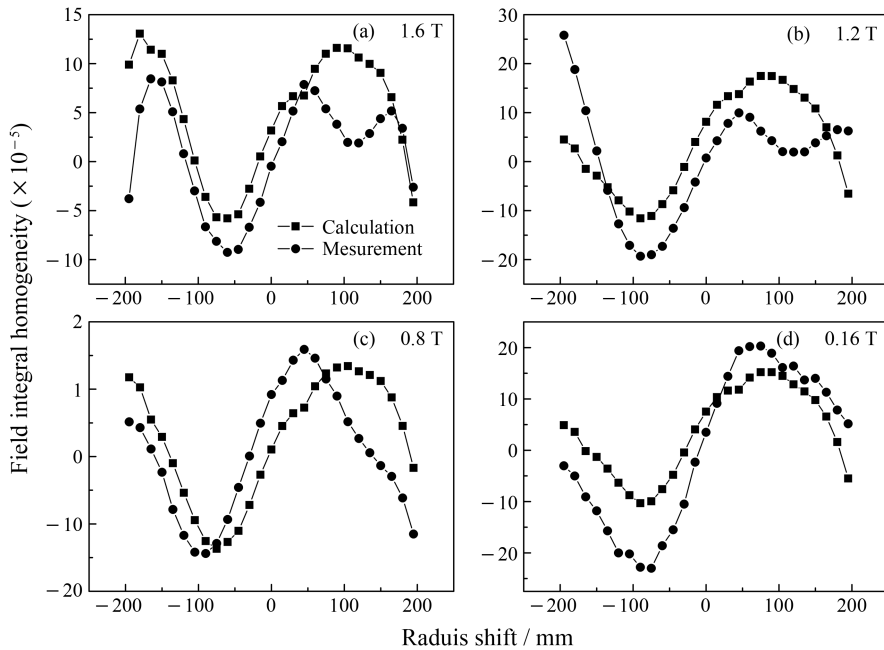


图 9 在不同场区下 OPERA-3D 计算与长线圈测量结果的比较

4 结论

通过 OPERA-3D 计算得到的活极头优化形状, 在加工时进行光滑处理后, 可以很好地满足积分场分布均匀度要求。计算值与测量值符合得很好, 这证明了 OPERA-3D 有限元软件在这种磁铁设计过程中具有很高的模拟精度。这种通过反复计算再根据实验结果反馈的信息来调整点坐标的方法灵活性好, 尤其对于大型的磁铁设计, 该方法更显示其有效性。

参考文献 (References):

- [1] Vector Fields Limited, OPERA-2d\3d User Guide and Reference Manual. England, 1999-2004.
- [2] Li Quanfeng. Magnetic Numerical Calculation and Magnet De-

sign. Beijing: Press of Tsinghua University, 2002, 166—167 (in Chinese).

(李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计. 北京: 清华大学出版社, 2002, 166—167.)

- [3] Zhao Jijiu, Yin Zhaosheng. The Technology of Particle Accelerator. Beijing: Higher Education Press, 2006, 44—51 (in Chinese).

(赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术. 北京: 高等教育出版社, 2006, 44—51.)

- [4] He Yuan. Magnetic Measurement System for CSR and its Applications. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2003, 48—50 (in Chinese).

(何源. CSR 测量系统的建立及应用. 北京: 中国科学院研究生院, 2003, 48—50.)

- [5] Yao Qinggao, Ma Lizhen, He Yuan, *et al.* Chinese Physics, 2008, **C32**(Supp. I): 19 (in Chinese).

(姚庆高, 马力祯, 何源, 等. 中国物理 2008, **C32**(增刊 I): 19.)

End Optimization of Dipole Magnet of Super-FRS for FAIR^{*}

YAO Qing-gao^{1,2}, MA Li-zhen^{1, #}, ZHANG Xiao-qi¹, HE Yuan¹, YUAN Ping¹,

ZHANG Bin¹, WU Wei², HAN Shao-fei¹, ZHANG Si-ling¹

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The end optimization of dipole magnet of Super-FRS for FAIR by OPERA-3D has been introduced in this paper. By using a complicated chamfer, the integral field homogeneity which is better than 2×10^{-4} can be obtained. In addition, the paper also introduced the comparison between the magnetic field measurement result and calculation one, which confirms the method of the removable pole end chamfer very well.

Key words: superconducting magnet; integral field homogeneity; removable pole; end chamfer

* **Received date:** 11 Mar. 2010; **Revised date:** 25 Mar. 2010

* **Foundation item:** Major State Basis Research Development Program of China(973 Program) (2008CB817701); Promotion Project of Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences(08CSRWX100)

Corresponding author: Ma Li-zhen, E-mail: malz@impcas.ac.cn