

冷铁轭超导螺线管磁场的优化设计*

李青^{1,2;1)} 马力祯¹ 何源¹ 吴巍^{1,2} 卞文龙^{1,2} 姚庆高^{1,2}

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 文章介绍了冷铁轭超导螺线管磁场的优化设计. 运用各种优化方法结合有限元磁场计算软件 opera, 依次对主线圈、冷铁轭、端部垫补线圈进行优化设计, 最终达到设计要求.

关键词 超导螺线管 冷铁轭 磁场优化 正交试验设计 0.618法

1 引言

本文主要介绍超导螺线管磁场的优化设计方法. 该螺线管是用来作为霍尔片高场标定的标准磁体使用, 磁体要求中心磁感应强度为3T, 在 $\Phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的区域内均匀度好于 1×10^{-4} .

在结构上, 整个超导螺线管分为三个部分: 主线圈、冷铁轭、端部垫补线圈(见图1). 主线圈是产生磁场的主要部分, 其使用超导线的量最大, 因此对该部分的优化可以在很大程度上节约成本. 对超导线圈装配铁轭虽然可以减少线圈外部漏磁, 但是铁轭的引入会使磁场计算难度加大, 这需要一种新的方法来研究. 在主线圈的端部增加垫补线圈来获得磁场的高均匀度, 同时这种设计也可以节约超导线. 在冷却方式上, 采用浸泡式冷却.

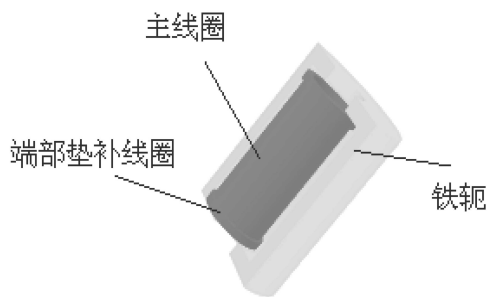


图1 磁体结构示意图

超导螺线管的优化设计过程分为3个步骤: 1) 主线圈的优化设计; 2) 冷铁轭尺寸的优化设计; 3) 端部垫补线圈的优化设计.

2 主线圈的优化设计

图2给出主线圈各个参量的意义. 通常在设计此类的超导磁体时, 线圈的内径尺寸 a 是已知的. 设线圈的平均电流密度为 J , 则螺线管在 Z 轴上的磁场表达式为^[1]

$$B(0, Z) = \frac{2\pi}{10} a J \left[(z + \beta) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (z + \beta)^2}}{1 + \sqrt{1 + (z + \beta)^2}} - (z - \beta) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (z - \beta)^2}}{1 + \sqrt{1 + (z - \beta)^2}} \right], \quad (1)$$

式中 $\alpha = \frac{a + x_1}{a}$, $\beta = \frac{x_2}{2a}$, $z = \frac{Z}{a}$. 当 $Z = 0$ 时, 式(1)可化为中心磁场的表达式:

$$B_0 = B(0, 0) = \frac{2\pi}{10} x_2 J \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}, \quad (2)$$

式(1)和(2)中, 磁场 B 的单位为Gs, J 的单位为 A/mm^2 , 线圈的尺寸单位cm. 螺线管中最大磁场与中心磁场的近似关系为

$$B_m/B_0 = (1 + 0.64/4^\beta). \quad (3)$$

线圈采用 $1.25\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ 的矩形截面NbTi线, 该超导线的近似 $B - I_c$ 曲线为

$$I_c = -129.4 \times B + 1239.6, \quad (4)$$

其中 B 为超导线所处的磁场值, 单位为T. I_c 为临界电流, 单位为A. 超导线上的运行电流 $I_{op} = J \times A_{\text{平均}}$, $A_{\text{平均}}$ 为考虑包绝缘和固化后单匝线的面积.

2008 - 01 - 07 收稿

* 中国科学院近代物理研究所所长基金(0615010SZO)和中国科学院西部之光人才培养计划项目(0715060XLO)资助

1) E-mail: liqing@impcas.ac.cn

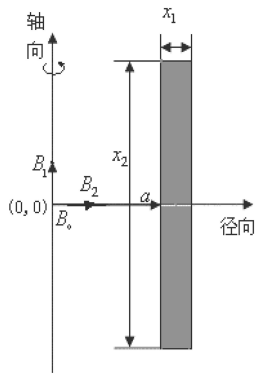


图2 主线圈各参数

主线圈是产生磁场的主要部分,考虑到增加的垫补线圈和铁轭会对中心磁场有贡献,在设计时可令主线圈在中心产生的磁场为2.5T.同时设计在 $\Phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的区域内均匀度约为 5×10^{-4} .由以上分析可以得到以下的数学描述:

1) 目标函数: $V_{\text{体积}} = \pi \cdot x_2 \cdot [(x_1 + a)^2 - a^2]$ 最小

2) 约束条件: $B_0 = 2.5 \text{ T}$, $I_{op}/m \leq -129.4B_m + 1239.6$ (其中 m 为电流裕度,取0.3)

$$0 \leq (B_0 - B_1)/B_0 \leq 5 \times 10^{-4}.$$

利用优化分析软件1stopt对以上数学描述进行编程,经计算可以得到 x_1, x_2 和 I_{op} 的值,将 x_1, x_2 和 I_{op} 转化成径向层数 $n1$ 和轴向匝数 $n2$ 以及 J 后的结果为

$$n1 = 11, n2 = 381, J = 158 \text{ A/mm}^2.$$

利用磁场计算软件Opera对优化出的结果进行验证,可以得到中心磁场及均匀度的值为

$$B_0 = 2.564829 \text{ T},$$

$$\text{径向均匀度 } U_r = 2.913559 \times 10^{-4},$$

$$\text{轴向均匀度 } U_y = 5.871831 \times 10^{-4}.$$

可见优化设计达到了预计的目标.

3 冷铁轭尺寸的优化设计

由于冷铁轭距离线圈较近,因此铁轭对磁场的贡献较大.但是铁轭的引入会带来非线性效应,使磁场

的计算变得复杂,从而很难得到铁轭尺寸与磁场的关系式.下面采用正交试验设计与有限元数值模拟相结合的方法进行研究.

铁轭的结构由以下4个因素决定,各参数示意图如图3所示:

- 铁轭筒壁内半径 r
- 铁轭筒壁半高度 H
- 铁轭筒壁厚度 $h1$
- 铁轭两端端板厚度 $h2$

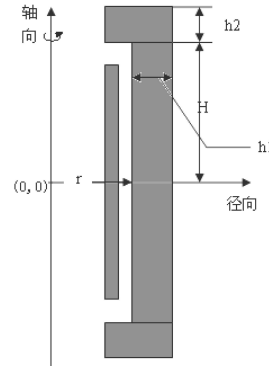


图3 铁轭参数示意图

考察的目标有3个:中心磁场 B_0 、径向均匀度 U_r 、轴向均匀度 U_y .正交试验设计是用于多因素试验的一种方法,它是从全面试验中挑选出部分有代表的点进行试验,这些代表点具有“均匀”和“整齐”的特点.通常情况下,正交试验通过正交表来安排试验.正交表是用于安排多因素试验的一类特别的表格,每个正交表有一个代号 $L_n(q^k)$,其中 L 表示正交表, n 是试验总数, q 是因素的水平数, k 是表的列数,表示最多能容纳的因素个数^[2].在进行试验前,先选定一个大的范围进行,表1为各因素的取值范围:

表1 第一次正交试验各因素的取值范围

因素	取值范围
r/mm	100.8—322.56
H/mm	250—525
$h1/\text{mm}$	20—86
$h2/\text{mm}$	20—86

表2 第一次正交试验设计安排及结果(单位: mm)

	r	H	$h1$	$h2$	B_0/T	$U_r \times 10^{-4}$	$U_y \times 10^{-4}$
1	100.8	250	20	20	2.650527	1.703499	3.437443
2	100.8	387.5	53	53	2.728502	1.292035	2.625662
3	100.8	525	86	86	2.728788	1.292906	2.627449
4	221.76	250	53	86	2.700970	1.354913	2.732020
5	221.76	387.5	86	20	2.634346	3.053567	6.151533
6	221.76	525	20	53	2.629782	3.159564	6.365066
7	322.56	250	86	53	2.698285	1.286714	2.598638
8	322.56	387.5	20	86	2.607484	2.809632	5.661851
9	322.56	525	53	20	2.594860	2.977004	5.998396

现利用正交表 $L_9(3^4)$ 安排试验, 并用 Opera 计算出 B_0 , U_r , U_y 值, 具体的实验方案及模拟结果见表 2. 对表 2 中 9 次试验结果中的均匀度进行直观的分析, 例如对 U_r 来说, 将各因素各水平的进行平均后可以得到分析图 4. 从图 4 中可以看出对于 U_r 来说, 铁轨尺寸的最优组合是

$$r = 100.8, H = 250, h1 = 53, h2 = 86 \text{ (单位: mm)}.$$

同理, 可以分析得到对于 U_y 来说, 铁轨尺寸的最优组合为

$$r = 100.8, H = 250, h1 = 86, h2 = 86 \text{ (单位: mm)}.$$

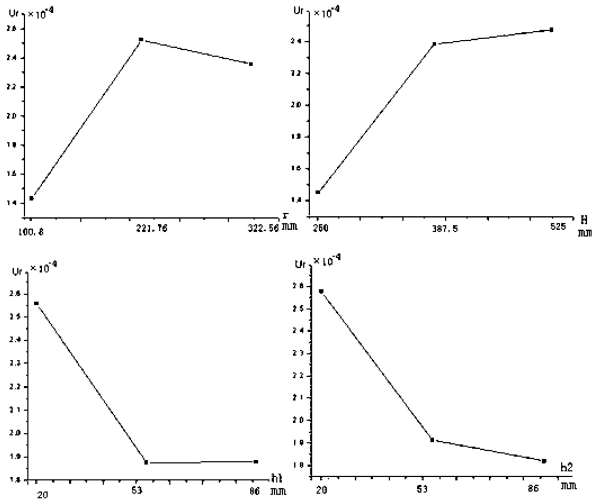


图 4 U_r 各因素各水平分析图

为了找到均匀度更好的尺寸, 需再进行几次正交试验. 每一次试验均在上一次试验得到的优化点附近取一定的范围进行, 范围大小是上一次的 1/2. 仍用表 $L_9(3^4)$ 安排试验, 最终得到对于 U_r , U_y 均最优的铁轨尺寸:

$$r = 100.8, H = 250, h1 = h2 = 77.75 \text{ (单位: mm)}.$$

在实际情况下, 不一定就要选择以上最优的铁轨尺寸进行设计, 因为需要考虑到杜瓦大小、绕组线圈的冷却空间及补偿线圈所占的空间等设计要求. 综合各方面的考虑, 选择一个合适的尺寸为

$$r = 130, H = 252, h1 = h2 = 55 \text{ (单位: mm)}.$$

该尺寸的磁场结果为

$$B_0 = 2.718023 \text{ T}, \\ U_r = 1.550089 \times 10^{-4}, U_y = 3.131583 \times 10^{-4}.$$

4 端部垫补线圈的优化设计

为了达到所要求的均匀度, 采用加垫补线圈的形式来提高均匀度. 新增的两个小线圈(垫补后的线圈结构示意图见图 5)所产生的磁场是中心小、两边大, 而主线圈所产生的场是中间大、两边小, 当垫补线圈

选择合适的尺寸后, 可以使总磁场在中心的小区域内达到很高的均匀度.

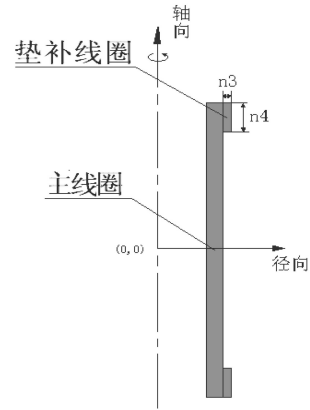


图 5 端部垫补线圈示意图

经过以上两步, 可以知道线圈在轴向的长度和主线圈在径向方向与铁轨之间的距离, 从而可以得到垫补线圈在径向层数 $n3$ 、轴向匝数 $n4$ 的范围:

$$n3 \text{——} 1 \sim 22, n4 \text{——} 1 \sim 190.$$

确定好 $n3$, $n4$ 的范围后, 便可以利用 0.618 法得到对于均匀度来说的最优结果:

$$n3 = 8, n4 = 21.$$

该优化点处的磁场结果为

$$B_0 = 2.740086 \text{ T},$$

$$U_r = 2.554867 \times 10^{-6}, U_y = 4.515880 \times 10^{-6}.$$

由于中心磁场还没有达到物理要求, 而且在前面设计时所留的电流裕度较大, 因此可以通过适当调整电流密度来达到中心磁场的要求. 将电流密度调整到 $J = 173 \text{ A/mm}^2$, 利用 opera 进行模拟计算, 得到的结果为

$$B_0 = 2.999613 \text{ T},$$

$$U_r = 6.61373 \times 10^{-6}, U_y = 1.185698 \times 10^{-5}.$$

由结果可以看出, 已经达到设计要求.

当电流密度提高到 173 A/mm^2 后, 均匀度会变差. 如果当调整电流密度后, 均匀度变差而不能达到设计要求, 则需要新的电流密度下重新用优选法对垫补线圈进行优化. 通常经过 2~3 次的优选之后, 磁场要求可以达到. 但由于以上结果已经达到要求, 所以不需要重新计算.

5 结论

通过以上各步的优化设计, 采用科学、合理的优化设计方法, 可以在较大程度上减少工作量并能达到设计要求.

参考文献(References)

- 1 LIN Yu-Bao. Cryogenics and Superconductivity, 1990.5 (in Chinese)
(林玉宝. 低温与超导, 1990.5)
- 2 FANG Kai-Tai, MA Chang-Xing. Orthogonal and Uniform Experiment Design. Beijing: Science Press, 2001.10 (in Chinese)
(方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计. 北京: 科学出版社, 2001.10)

Optimization Design of Magnetic Field on Cold Yoke Superconducting Solenoid*

LI Qing^{1,2;1)} MA Li-Zhen¹ HE Yuan¹ WU Wei^{1,2} BIAN Wen-Long^{1,2} YAO Qing-Gao^{1,2}

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 optimized design of magnetic field for a cold yoke superconducting solenoid is introduced in this paper. Using some kinds of optimization designs and OPERA, we optimize the main solenoid, cold yoke and compensated winding. Through this design, the requests of the superconducting solenoid are realized.

Key words superconducting magnet, cold yoke, optimization design of magnetic field, orthogonal design

Received 7 January 2008

* Supported by Director Foundation of Institute of Modern Physics of CAS (0615010SZO) and Western Light Talents Training Program of CAS (0715060XLO)

1) E-mail: liqing@impcas.ac.cn