

# 欧洲 FAIR 中超导二极磁体样机的初步设计与分析

秦织, 吴维越, 陈文革, 徐厚昌

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:**介绍了欧洲 FAIR 超导二极磁体样机设计的背景及设计要求, 以及磁体样机的几个大部件及其作用。用有限元分析软件 ANSYS 进行了线圈电磁性能分析, 得到其磁场、电感、储能随电流的变化曲线, 并对其中的一个部件线圈盒进行了结构分析, 为下一步的设计提供参考。

**关键词:**FAIR; 超导磁体; 初步设计; 有限元分析

## Preliminary design and analysis of superconducting dipole magnet for FAIR

Qinzi, Wu Weiyue, Chen Wenge, Xu Houchang

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

**Abstract:** This paper describes the background and requirements of the superconducting dipole magnet for FAIR in Europe. Main parts in this magnet are introduced. And electromagnetic performances of the coils have been fully analysed with the code ANSYS, which includes magnetic field, inductance and energy. Case of the coils is one of the important parts and its structure is analysed. This will afford information for further design.

**Keywords:** FAIR, Superconducting magnet, Preliminary design, Finite element analysis

## 1 引言

在德国的国家重离子研究中心 (Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH - GSI) 建造的国际反质子与离子加速器 (Facility for Antiproton and Ion Research - FAIR) 大科学工程计划, 是欧盟第六框架计划项目之一, 预计建设期 10 年, 总投资超过 10 亿欧元, 建成后将成为世界上开展物质基本结构研究的中心, 为相关物理及应用研究提供世界上独一无二的研究平台, 使一些最前沿领域的研究成为可能。

储存环是 FAIR 加速器大科学工程装置的一个重要部件, 它由收集环、累积和减速环、新试验环等组成。收集环除了用来快速冷却反质子和稀有同位素束外, 还将用做非常短寿命核的质量测量。累积和减速环的重要任务是累积能量。新试验环除了为核物理和原子物理提供稳定、放射性的重离子束外, 也可以用来减速反质子束和放射性离子束。

储存环中收集环的设计与制造将由德国 GSI 与中国科学院共同完成。其中: 中科院等离子体物理研究所负责设计与制造超导二极磁体超导线圈系统。

中科院等离子体物理研究所于 2006 年初开始进行相关技术的预研, 现已完成超导二极磁体超导线圈

系统的初步设计工作, 同时将与德国 GSI 最终确定该设计方案并进行制造与性能测试。本文主要介绍了超导二极磁体样机中的超导线圈及其相关部件的初步设计, 并利用有限元技术对其设计进行分析, 主要分析内容为: (1) 电磁分析, 以考查该磁体系统的电磁性能; (2) 力学分析, 以校核其主要承力结构的强度。

## 2 超导二极磁体样机的初步设计

超导二极磁体样机的几个主要部件分别为超导线圈与线圈盒、液氮槽、冷屏、杜瓦、支撑等 (见图 1)。

对于超导磁体系统而言, 其线圈是重要部分, 本线圈采用具有一定铜超比的铌钛/铜复合矩形导体, 导体的尺寸为  $1.17\text{mm} \times 1.93\text{mm}$ , 含绝缘的导体尺寸为  $1.73\text{mm} \times 2.54\text{mm}$ , 绕制方式为筒式密绕, 线圈匝数为  $22 \times 20 = 440$  匝, 在绕制过程中预留一匝的空间, 用于放置各种测量元件, 如: 温度传感器等。整个线圈的截面尺寸为  $48\text{mm} \times 50.8\text{mm}$ , 含绝缘的截面尺寸为  $52\text{mm} \times 54.8\text{mm}$ 。图 2 为超导二极磁体样机中超导磁体的截面图。绕制后的线圈经检查后将放入由低温下具有高强度的不锈钢 316LN 制造的线圈盒中, 并进行真空环氧浇注, 即 VPI (Vacuum Pressure Impregnation) 技术, 形成各种注胶绝缘层并成为一体结构。为保证系

收稿日期: 2007-04-09

作者简介: 秦织 (1982-), 女, 中国科学院等离子体物理研究所在职研究生, 主要从事结构设计与有限元分析计算。

统的安全运行,还布置有失超保护系统。线圈盒将承受来自超导线圈通电时产生的大部分电动力,以保护线圈正常运行。由于超导线圈拟在4.2K温区进行工作,整个系统采用浸泡冷却方式,即把带有线圈盒的超导线圈放入装有冷却剂的低温容器中,冷却剂是液氮,液氮将盛装在液氮槽中,在液氮槽外设有冷屏(亦称低温保持器)来保持系统的低温,以避免液氮的过渡消耗。冷屏上布置有“S”型冷却管道,管道内将通入液氮来隔绝来自外界的温度。整个系统最外一层为低温杜瓦,其功能一方面隔绝温度,另一方面提供真空环境,此外可作为超导线圈的调整和支撑平台。

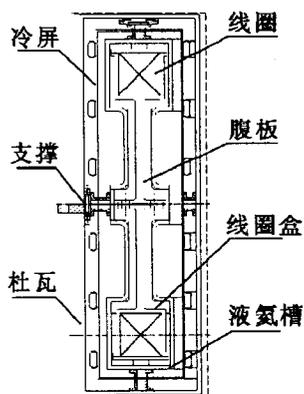


图1 超导二极磁体样机结构的立面图

Fig. 1 Cutaway view of the superconducting dipole magnet sample

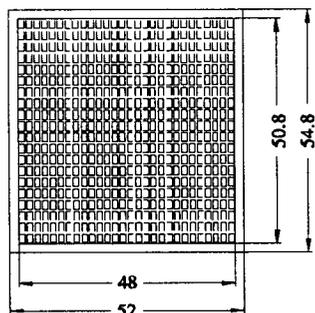


图2 超导磁体的截面图

Fig. 2 Cutaway view of the superconducting conductor

根据设计要求,要求样机磁铁磁场要从  $B = 0.15\text{T}$  到  $1.6\text{T}$  可调,磁场精度  $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。另外,超导线圈的冷屏要能方便地与磁铁铁芯装配和定位并满足物理要求,线圈的绝对位置精度为  $\pm 0.5\text{mm}$ ,包括线圈在满负荷时的受力变形。由于尺寸要求比较高,设计时候应进行线圈的受力计算和分析,同时考虑合适的线圈支撑结构,确保线圈的绝对位置精度为  $\pm 0.5\text{mm}$ 。

在设计中,线圈盒及其支撑结构是主要的承力部分。通电时,由于超导线圈在磁场作用下所产生的电磁力,在两个线圈的上下方向的分量为最大,因而,考

虑两个线圈及其线圈盒通过腹板连接成一体,以成为内力平衡结构。此外,在冷屏的外部布置了若干支撑件,并支撑在杜瓦的内侧表面上。该支撑件的材料选用绝缘复合材料,用来减少由杜瓦(室温)通过支撑件传递到冷屏的热负载。

### 3 超导二极磁体线圈结构的有限元分析

根据设计要求,首先需要分析超导二极线圈的磁场的分布情况及其大小,以确定是否满足物理要求。同时,掌握其电动力的分布情况,以此作为载荷来确定线圈的应力及变形情况。由于考虑到整个所建超导二极线圈结构的复杂性,若采用 ANSYS 软件的电磁—结构耦合分析计算,在建立合理的详细三维有限元模型时将需要大量的网格数,由此而产生过多的节点数。为此,本文在利用 PC 机进行分析时,采用两步计算,首先进行电磁性能分析,再利用电磁分析时所得到的电磁力作为载荷,并加以合适的边界条件对该结构进行力学性能分析。

#### 3.1 电磁性能分析<sup>[1]</sup>

在进行电磁性能分析时,本文对超导二极线圈结构进行简化,只考虑线圈(不含线圈盒及其它部件)及铁轭部分,如图3所示,由此而建立起三维有限元模型。为了掌握超导二极线圈结构中束流通道中磁场强度的分布及其均匀度,在有限元模型中对此区域网格进行细分,以提高计算精度。



图3 线圈及其铁轭的结构图

Fig. 3 Structure of the coil and yoke

在超导二极线圈结构中,铁轭可以使磁场相对集中,并减少漏磁。铁轭的相对磁导率是个非线性变量。图4为铁轭的  $B-H$  特性曲线。在进行电磁性能分析时,采用 ANSYS 的基于单元边的分析方法,可以避免用基于节点的连续矢量来进行有限元计算时会产生不精确的解。单元类型采用 SOLID117 单元,它是一个六面体单元,不仅支持线性材料特性,也支持非线性的

材料特性。此外,在该结构的外部建立空气场单元,来模拟磁场的在远处的无限耗散过程。通过该结构有限元的电磁分析计算,可以掌握线圈的磁通量密度、磁场强度、电磁力、电感、以及储能等参量<sup>[2]</sup>。

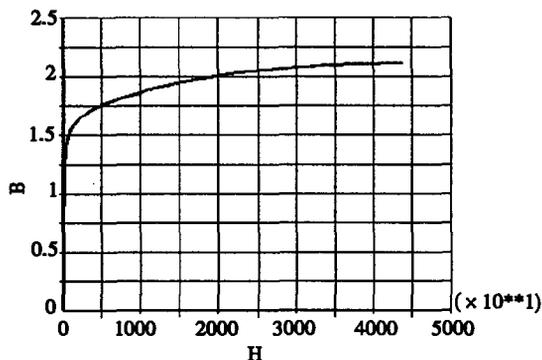


图 4 铁轭的 B-H 特性曲线  
Fig. 4 B-H curve of the yoke

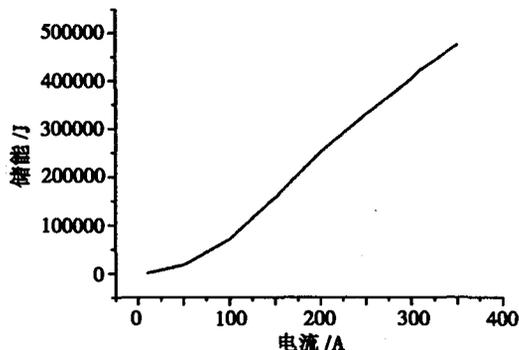


图 5 磁体储能随电流的变化曲线  
Fig. 5 Energy under different current

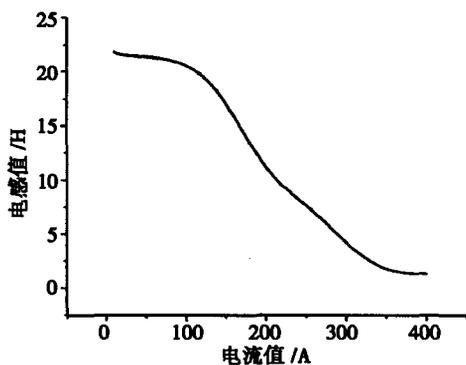


图 6 磁体电感随电流的变化曲线  
Fig. 6 Inductance under different current

在计算过程中,超导线圈将通入 310A 匝电流,其电流密度为  $64932380\text{A}/\text{m}^2$ ,同时,空气场及束流通道的相对磁导率为 1,以模拟其高真空环境。计算结果表明:超导线圈的最大磁场强度为 1.238T,位置在线圈的圆弧处。同时,由于铁轭具有非线性的相对磁导率,使得超导线圈的电感与储能随电流值的不同而变化。图 5 为超导线圈的匝电流从  $I = 10\text{A}$  到  $I = 350\text{A}$  时,其储能变

化曲线,图 6 为其电感变化曲线图。在通以额定的匝电流时,超导线圈的电感为 4.6H,储能为 422kJ。

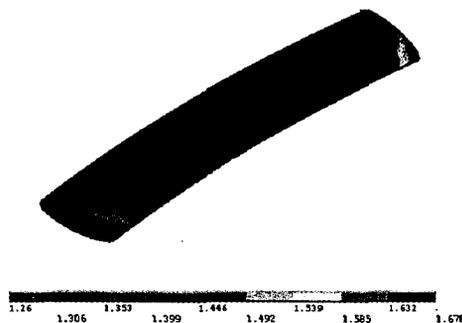


图 7 线圈通以额定匝电流时,其束流通道磁场分布云图  
Fig. 7 Magnetic field nephogram of the channel under rating current

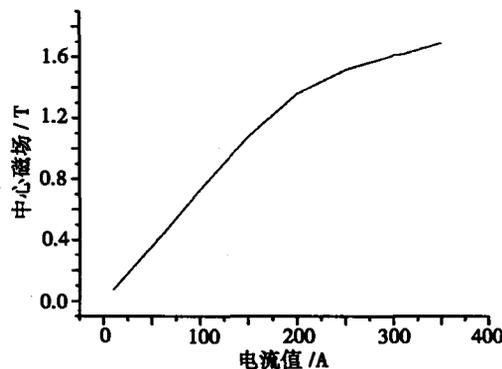


图 8 束流通道的中心磁场随电流的变化曲线  
Fig. 8 Center magnetic field under different current

在超导二极线圈结构中,束流通道(见图 3)是提供高能粒子运动的空间,具有超高真空度的要求,它是该结构的最关键部位,其磁场均匀度将会对系统的性能产生巨大的影响。为了考察其均匀度,在图 3 中将其画成实体的。从图 7 可以看出,磁场的均匀度较好,在线圈通以额定的匝电流时,其中心磁场的值为 1.678T,磁场的均匀度为:  $\pm 3 \times 10^{-4}$ 。此外,该束流通道的物理设计要求其中心磁场从 0.5T 到 1.6T 可调。图 8 为束流通道的中心磁场随电流变化的曲线。由图 8 可知:匝电流从 76A 到 290A,束流通道的中心磁场将从 0.5T 上升到 1.6T。

超导二极线圈结构中通以额定匝电流的线圈将在磁场作用下,产生较大的电磁力(洛伦兹力),为了减少超导线圈由电动力而产生的过大的应力,特别是产生较大的形变能而导致超导磁体性能下降,为此而设计线圈盒及其支撑结构。根据计算结果可知:在通以额定匝电流时,在每个线圈所在平面内,电磁力的分量为张力,其合力为零;在两个线圈的上下方向电磁力的分量为排斥力,其值为 202kN。图 9 为沿线圈周长的电磁力的分布曲线。

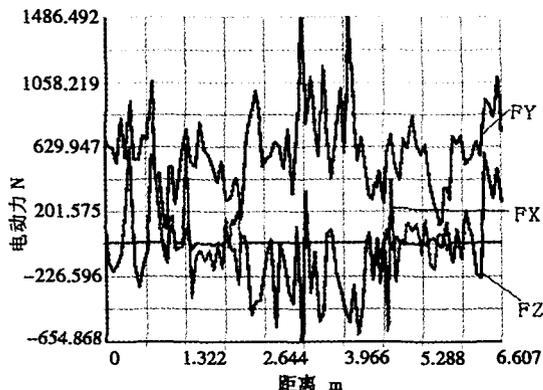
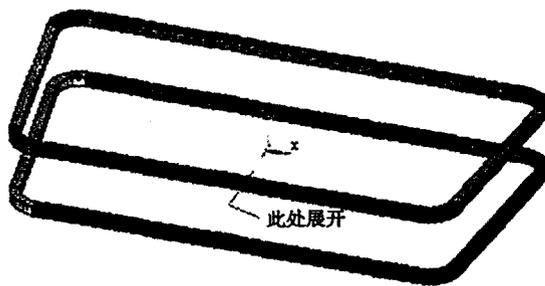


图9 电动力( $F_x, F_y, F_z$ )沿线圈路径展开图

Fig.9 Force value along the coil



### 3.2 力学分析<sup>[2]</sup>

超导二极线圈结构的力学分析,主要利用电磁分析所得到的电磁力作为线圈的载荷条件,并建立起线圈(含绝缘层)与线圈盒及其支撑部件的有限元分析模型,考虑结构的对称性,建模时只取其一半并加上对称边界条件。图10为线圈(含绝缘层)与线圈盒及其支撑的结构图。

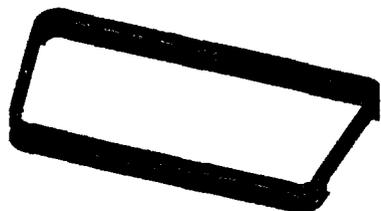


图10 线圈(含绝缘层)与线圈盒及其支撑部的结构图

Fig.10 Structure of the coil case with supports

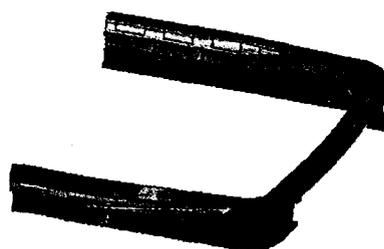


图11 线圈盒的结构变形云图

Fig.11 Distortion nephogram of the coil case

计算中,由于线圈的导体为铌钛/铜复合矩形导体,从超导导体的低温稳定性考虑,将采用大的铜超比,这样导体中铜的含量较大。本文在计算时拟采用纯铜的材料特性来代替线圈导体的材料特性,绝缘层的材料为G11,线圈盒及其支撑结构材料为316LN 不锈钢。表1为各组成部分在低温4.2K下的材料特性参数。

表1 材料特性参数<sup>[4]</sup>

Tab.1 The parameters of the materials

	弹性模量(Pa)			剪切模量(Pa)			泊松比		
	$E_x$	$E_y$	$E_z$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{zx}$	$\mu_{xy}$	$\mu_{yz}$	$\mu_{zx}$
超导体(铜)	1.38E11	1.38E11	1.38E11	\	\	\	0.338	0.338	0.338
绝缘复合材料	3.7E10	3.7E10	3.7E10	2.4E10	16E10	9.7E9	0.25	0.2	0.42
316LN 不锈钢	2.07E11	2.07E11	2.07E11	\	\	\	0.28	0.28	0.28

表中: $x$ 为绝缘子中绝缘复合材料的径向方向; $y$ 和 $z$ 为绝缘子中绝缘复合材料的轴向与环向方向。



图12 线圈盒的应力分布云图

Fig.12 Stress nephogram of the coil case

盒的中间位置,其最大应力为359MPa,位置在线圈盒支撑上的筋板处,如图12所示。而对于所采用的材料316LN来说,远小于其低温(4.2K)下的许用应力1100MPa<sup>[5]</sup>。超导线圈的最大位移为0.48mm,位于线圈的中间部位。其最大应力为42.4MPa,位置在线圈左右两边的梁的部位。由此可以看出,超导线圈上所产生的较大电磁力,将得到很好的传递,绝大部分将由线圈盒来承担。

根据计算可知:最大位移为0.52mm,出现在线圈

(下转第351页)

和改进产品可靠性的方法及规律性的资料。

加速试验在制冷机中对设计、制造和使用有以下主要作用。(a)迅速而准确地反映制冷机在设计、制造过程中的质量问题,从而便于及时采取纠正措施,特别能对各关键工艺或临界、漂移等参数进行快速而有效的判断并实施监控。(b)对不同批或生产线,不同的设计、工艺或材料之间的同类制冷机的质量进行快速对比。(c)了解制冷机的失效规律,为预测制冷机寿命提供依据。(d)了解制冷机的主要失效模式和失效机理,从而加以控制和排除。(e)确定制冷机的某些使用条件的允许限。(f)提供产品的降额因子,从而使使用者能了解产品在不同的温度、功耗以及其他有关环境下,产品的寿命或可靠性所呈现出的状况。(g)确定寿命加速因子,为正确的寿命试验设计提供依据,从而可以大量减少试验工作量。(h)帮助确定所选条件,为制定合理的可靠性筛选方案提供依据,不仅用于剔除早期失效,还能帮助对产品的可靠性进行分等分级。

因此,加速试验无论对制冷机制造方还是用户都是极为重要的。

按施加应力的方法不同,加速寿命试验可分为:恒定应力加速寿命试验、步进应力加速寿命试验和序进应力加速寿命试验三种类型。

在这三种试验方法中,恒定应力加速寿命试验和步进应力加速寿命试验应用得较为广泛,并且已经建立了国家标准 GB2689,因此,可以依据 GB2689 所规定的方

法,选择适宜的加速应力,采取加速试验的方法,用较短的时间,来确定或验证制冷机的可靠性水平。

### 3 结语

标准本身是信息资源的一种,是生产力要素之一。当标准与适当的生产力要素结合时可以产生新的生产力,从而促进科研、生产的发展。反之,当标准制定得失“度”或多年不修订,不适应生产力的发展情况时,就会对科研、生产的发展起阻碍作用。

以上提到的问题是斯特林制冷机在工程应用中所暴露出来的,也是制造方和用户迫切要求解决的。解决好了上述问题,不仅对国内生产的还是国外进口的制冷机都有一个统一的判定标准。同时,也会对我国国内制冷机的研制、生产水平及广泛应用起到极大的推动作用,因此,能尽快在国军标《斯特林制冷机通用规范》或其它文件中解决好上述问题是非常必要的。

### 参考文献

- 1 杨育中. 标准化专业工程师手册. 北京:企业管理出版社, 1997.
- 2 姚世全. 电磁兼容标准实施指南. 北京:中国标准出版社, 1999.

(上接第 315 页)

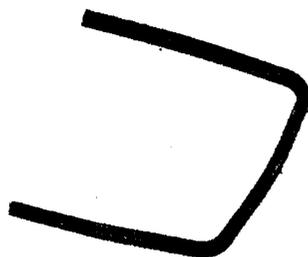


图 13 线圈的绝缘层上应力分布云图  
Fig. 13 Stress nephogram of the insulator

由于 G10 绝缘材料为多层复合材料,如果层间的剪应力过大,就会破坏绝缘层,从而影响其绝缘的性能。由图 13 的分析结果可以看出:绝缘层上的最大剪应力为 11.4MPa,绝缘层至少可以承受 85MPa 的剪应力<sup>[6]</sup>,因此绝缘层的设计可以满足要求其力学要求的。

### 4 结论

本文着重介绍了二极磁体超导线圈结构的初步设计以及所开展的有限元分析计算。通过分析计算表

明:超导二极磁体超导线圈结构的初步设计在能够满足其物理要求同时,其结构的力学性能也符合设计要求。下一步的工作将是完善该结构设计,进行制造和安装,同时进行低温性能测试以检验计算分析结果。

### 参考文献

- 1 唐兴伦,等. ANSYS 工程应用教程 - 热与电磁学篇. 北京:中国铁道出版社,2003.
- 2 ANSYS 电磁场分析指南.北京:美国 ANSYS 公司北京办事处.
- 3 张朝晖. ANSYS 工程应用范例入门与提高. 北京:清华大学出版社,2004.
- 4 秦织,等. 高强度氮气密复合材料绝缘子的性能研究. 低温与超导,2006,34(4):236-241.
- 5 陈文革. HT-7U 超导托卡马克核聚变装置纵场磁体结构的设计分析与磁体实验研究. 北京:中国科学院研究生院博士学位论文,2003.
- 6 Design Requirements and Guidelines Level1. Structural Material Database.