



超导离子源铌三锡六极线圈镜像磁场约束结构的优化设计

朱丽 吴巍 俞树荣 陈玉泉 梅恩铭 马鹏 姚庆高 孙良亭

Optimum Design of the Magnetic Mirror Structure for Testing Nb₃Sn Sextupole Coil

ZHU Li, WU Wei, YU Shurong, CHEN Yuquan, MEI Enming, MA Peng, YAO Qinggao, SUN Liangting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020034>

引用格式:

朱丽, 吴巍, 俞树荣, 陈玉泉, 梅恩铭, 马鹏, 姚庆高, 孙良亭. 超导离子源铌三锡六极线圈镜像磁场约束结构的优化设计[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(4):854–858. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020034

ZHU Li, WU Wei, YU Shurong, CHEN Yuquan, MEI Enming, MA Peng, YAO Qinggao, SUN Liangting. Optimum Design of the Magnetic Mirror Structure for Testing Nb₃Sn Sextupole Coil[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(4):854–858. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020034

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

医用加速器装置的离子源进气系统控制

Design of Ion Source Gas Control Used in Heavy Ion Medical Machine

原子核物理评论. 2019, 36(4): 441–446 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.441>

斯格明子在均匀磁场中的性质 (英文)

Skyrmion Properties in an Uniform Magnetic Field

原子核物理评论. 2017, 34(1): 8–12 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.01.008>

强磁场与涡旋场中的夸克胶子物质

Quark Gluon Matter in Strong Magnetic and Vortical Fields

原子核物理评论. 2020, 37(3): 414–425 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNP29>

均匀磁场下碳离子笔形束的剂量变化分析及位置修正方法

Dose Variation Analysis and Position Correction Method for Carbon-ion Pencil Beams under Uniform Magnetic Fields

原子核物理评论. 2020, 37(1): 88–96 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019038>

储存环HIAF-SRing等时性模式的非线性磁场影响研究

Effects of Field Imperfections in the Isochronous Mode of the HIAF-Sring

原子核物理评论. 2018, 35(2): 147–153 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.147>

CSR-LINAC IH-RFQ的高频电磁设计

RF Structure Design for CSR-LINAC IH-RFQ

原子核物理评论. 2018, 35(2): 140–146 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.140>

文章编号: 1007-4627(2020)04-0854-05

超导离子源铌三锡六极线圈镜像磁场约束结构的优化设计

朱丽^{1,2}, 吴巍^{2,†}, 俞树荣¹, 陈玉泉², 梅恩铭², 马鹏³, 姚庆高², 孙良亭²

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050;
2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
3. 西部超导聚能有限公司, 西安 710018)

摘要: 中国科学院近代物理研究所正在进行国际首台 45 GHz 全铌三锡超导离子源 FECR(Fourth Electron Cyclotron Resonance) 磁体的研制, 该离子源磁体线圈由六个铌三锡超导六极线圈和四个铌三锡超导螺线管线圈组成。由于单根超导导线绕制异形六极线圈(非标准鞍型)技术难度大, 且铌三锡超导性能对应力敏感, 为了测试单个铌三锡六极线圈性能能否达到设计指标, 基于铝合金壳层结构和 Bladder-Key 精确预紧技术, 设计了镜像磁场约束结构。本工作主要阐述了运用 ANSYS 参数化设计编程对镜像磁场结构进行优化设计的过程和优化后的镜像磁场结构, 确定了室温预应力大小, 并给出了线圈经过室温预紧、冷却降温和加电励磁后的最大等效应力。进一步结合实际六极线圈制作公差($\pm 0.1\text{ mm}$), 分析和评估了公差对镜像磁场结构中六极线圈预应力施加的影响。

关键词: 镜像磁场结构; 铌三锡; 六极线圈; 应力; 公差

中图分类号: TL503.3; TM55

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020034

1 引言

由中国科学院近代物理研究所承担的强流重离子加速器装置 HIAF(High Intensity heavy ion Accelerator Facility)^[1-2] 和低能量强流离子加速器装置 LEAF(Low Energy heavy ion Accelerator Facility) 都将采用国际首台第四代 ECR 离子源 FECR^[3-5]。45 GHz 高电荷态 ECR 离子源将实现基于全铌三锡股线复合超导磁体的国际首创。该超导磁体由六个六极线圈和四个螺线管线圈组成(如图 1 所示)。由于六极线圈采用高场铌三锡单线绕制在芯轴上, 线圈两端配上铝青铜端靴后, 进行高温热处理和环氧真空浇注, 存在绕制难度大、热处理工艺复杂和外形尺寸精度难控制的问题, 所以有必要利用

镜像磁场约束结构完成对六极线圈电磁性能的测试, 为 FECR 离子源磁体提供可靠的六极线圈。

欧洲核子研究中心(CERN)于 1989 年首次提出用于单个线圈(基于铌三锡卢瑟福电缆、束流孔径 $\phi 50\text{ mm}$ 二极磁体)测试的镜像磁场约束结构^[6]: 其中一个线圈装配到镜像磁场约束结构中, 另一个线圈用铁轭作磁轭来逼近线圈真实运行工况的磁场和电磁力分布。该线圈在 4.3 K 下经过几次失超锻炼后成功励磁到 10.2 T, 创造了新的场强记录。区别于 CERN 的镜像测试结构, 针对 FECR 样机磁体中的单个半长度铌三锡六极线圈, 我们采用 Bladder-Key^[7-13] 精确预应力控制技术和铝合金壳层约束结构, 设计了能够提供预应力的镜像磁场约束结构^[14], 包括沿六极线圈径向方向的径向约束结构和沿轴向方向的约束结构, 如图 2 所示。由于 FECR 离子源磁体同样采用室温预应力装配技术 Bladder-Key, 所以镜像磁场约束结构的研制也为 FECR 磁体探索和积累了技术基础。

镜像磁场约束结构的核心部分是沿线圈径向方向的结构, 其工作原理是将 Bladder(金属高压水囊, 施加预应力的装置) 插入镜像磁场结构, 利用水压机给 Bladder 打一定水压使其膨胀撑开铝合金壳层结构, 并将设

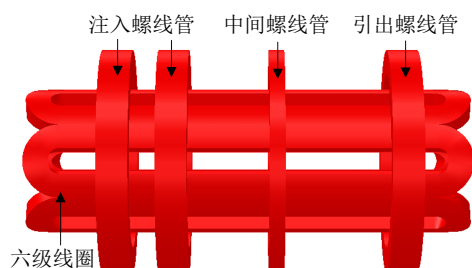


图 1 (在线彩图)FECR 磁体

收稿日期: 2020-06-05; 修改日期: 2020-06-30

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器设备研制项目(11427904)

作者简介: 朱丽(1984-), 女, 甘肃平凉人, 高级工程师, 博士研究生, 从事超导磁体系统机械结构设计; E-mail: zhuli@impcas.ac.cn

† 通信作者: 吴巍, E-mail: wuwei@impcas.ac.cn.

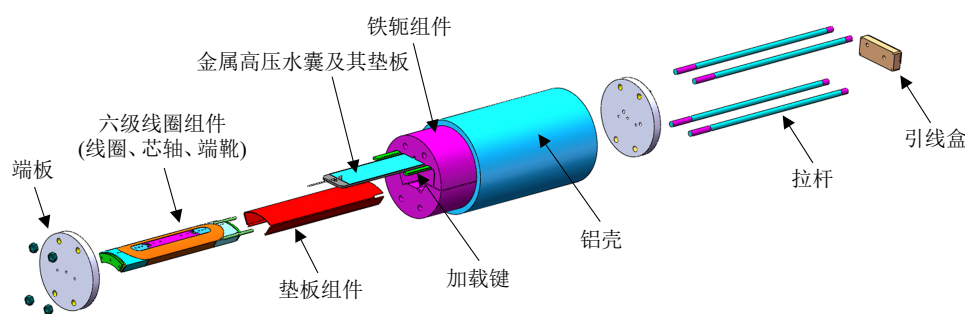


图2 (在线彩图) 镜像磁场约束结构的三维模型

设计一定厚度过盈量的加载键插入键槽以填充 Bladder 打开的间隙，随后将 Bladder 泄压并取出，这时由于加载键厚度过盈量的存在，这个结构会保持对线圈的预紧力；再将整个结构降温至 4.3 K 后，由于外层铝合金壳的热收缩系数大于铁轭组件，会进一步对线圈进行预紧。至此，六极线圈径向方向预应力加载完成。

本文主要介绍铌三锡六极线圈镜像磁场结构的核心主体部分，包括 ANSYS 机械模型、电磁-结构耦合优化设计过程；在此基础上依据测量臂对六极线圈外形测量结果模拟线圈外形垫平，并分析偏差对镜像磁场约束结构中线圈受力情况的影响。

2 优化设计

2.1 机械模型

采用 ANSYS 参数化设计编程进行铌三锡六极线圈镜像磁场结构的电磁-结构耦合优化设计。在 ANSYS 经典界面中利用自底向上的建模方法对四分之一镜像磁场结构进行建模，模型包括内径 100 mm 和厚度 38 mm 的六极线圈组件（铌三锡线圈和 DT4 芯轴）、厚度 2 mm 的 G10 垫板、厚度 4 mm 的不锈钢垫板、铁轭组件（衬垫、上铁芯和下铁芯）、316LN 不锈钢加载键、外径 340 mm 和厚度 20 mm 的 AL7075 铝壳，如图 3 所示。利用二维机械模型完成镜像磁场结构的优化设计、预装配设计及预应力加载。

2.2 电磁-结构耦合优化设计

2.2.1 电磁分析

对镜像磁场结构模型指定材料属性，除 DT4 材料需输入 B-H 曲线外，其他材料相对磁导率均设置为 1。采用四边形 8 节点或 6 节点三角形平面单元 Plane233 对模型进行网格划分，共形成 6806 个节点和 1976 个单元。对所有对称轴 $\pm 90^\circ$ 节点施加沿电磁方向矢量为 0 的边界条件。选择所有六极线圈单元，利用 Bfe 命令施加电流密度载荷 343 A/mm^2 (对应 800 A)。求解完成后保存

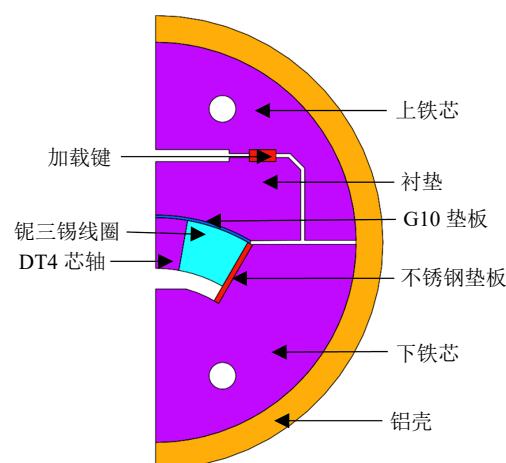


图3 (在线彩图) 二维 ANSYS 模型

计算结果，并建立结构分析工作名进行结构分析。

2.2.2 结构分析

将磁场分析单元 Plane233 转化为高阶 8 节点二维结构单元 Plane183。表 1 列出了镜像磁场结构的材料属性（其中六极线圈物性参数取自美国劳伦斯伯克利国家实验室）。为保证能够将磁场分析求得的电磁力准确加载到线圈单元上，结构分析时对机械模型不重新划分网格。

表 1 有限元模型材料各向同性参数^[13]

材料	弹性模量/Gpa		热膨胀系数/ (10^{-6} K^{-1})	泊松比
	293K	4.3 K		
Sextupole coil	41	41	11.6	0.3
AL7075	70	79	14.5	0.34
DT4	213	224	6.82	0.28
SS 316LN	193	210	9.83	0.28
G10	30	30	24.4	0.3

在镜像磁场结构中，ANSYS 使用接触对（线圈/芯轴、线圈和芯轴/G10 垫板、线圈/不锈钢垫板、G10 垫板/衬垫、不锈钢垫板/下铁芯、加载键/衬垫、加载键/上铁芯、上下铁芯/铝壳）完成接触计算。利用接触

对实现不同物体之间的载荷传递,其中接触单元采用 3 节点高阶抛物线单元 Conta172,目标单元采用 Trage169。通过加载键和上铁芯间的接触过盈量 Interference 完成 Bladder-Key 对线圈的径向预紧分析,即过盈量 Interference 代表了实际室温装配过程中插入的不锈钢薄片。

在镜像磁场结构的对称轴上,通过 Dsymm 命令施加对称边界条件。基于多载荷步对有限元模型在室温预紧、冷却降温 and 加电励磁下进行非线性计算,对应的载荷步依次为:(1) Bladder 打压:在衬垫和上铁芯上施加均布压应力载荷;(2) 室温预应力:在接触分析中,指定加载键和上铁芯间的接触过盈量 Interference;(3) 降温预应力:保持室温装配分析中施加的载荷不变,在此基础上,设置参考温度为 293 K,通过 Bfunit 命令给整个模型施加温度载荷 4.3 K;(4) 加电励磁:保持降温分析中施加的载荷不变,利用 Iread 命令导入磁场分析求解得到的洛伦兹力结果文件,完成线圈励磁。

2.2.3 优化设计

对镜像磁场结构进行电磁-结构耦合优化设计过程中,依据机械设计标准,通过不断调整机械模型尺寸(主要包括铝壳内径和厚度、Bladder-Key 尺寸和位置)、室温预应力 Interference 参数、Bladder 打压值和模型材料,得到了镜像磁场约束结构。

镜像磁场结构的电磁分析结果如图 4 所示。在 800 A 设计电流下,铌三锡六极线圈上最高场强位于线圈内侧,数值 8.55 T,达到了负载线的 80%。

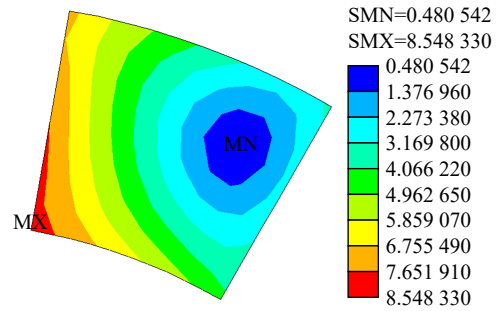


图 4 (在线彩图)线圈的磁场分布

镜像磁场结构预应力由室温下的接触过盈量和液氮温区下的热应力提供。机械结构设计的基本要求为:保证降温后施加到线圈上的预应力大于设计场强对应的电磁力,以限制线圈励磁过程中的位置移动^[15],其中线圈的最大等效应力小于 150 MPa。结构优化设计的结果:

(1) 在室温 Bladder-Key 过程中,Gap(打开间隙)随着 Bladder 压力值的增大而增大,即 Bladder 压力和 Gap 间存在良好的线性关系。在此基础上,给出了镜像磁场约束结构实际装配中 Bladder 最大打压值 20 MPa;室温预紧加载键的过盈量为 200 μm 。

(2) 图 5(a) 和 (b) 分别为镜像磁场结构经历室温预紧、冷却预紧和加电励磁后六极线圈的等效应力和接触压力云图。从中可以看出,线圈最大等效应力为 122 MPa,位于线圈内径靠外侧处;线圈和芯轴之间始终保持接触状态,接触压力最小为 24.9 MPa。说明在加电励磁过程中,线圈和芯轴之间没有分离,即镜像磁场约束结构给线圈上提供了足够的预应力。

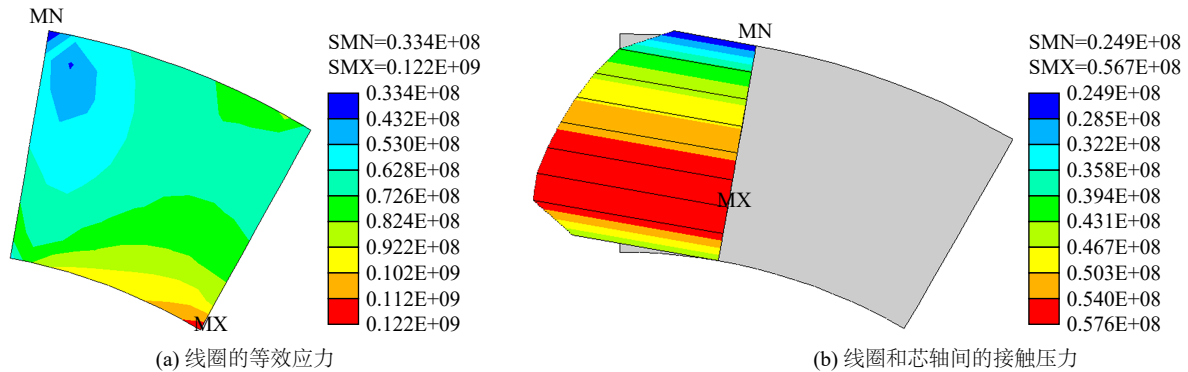


图 5 (在线彩图)结构分析

3 公差分析

六极线圈外形复杂,包括平面、圆弧面和复杂曲面。线圈采用 $\phi 1.3\text{ mm}$ 的单根高场铌三锡圆线绕制,共计 34 层,682 匝。绕制后需进行热处理和真空环氧浸渍(采用 CTD101KTM)以达到线圈外形尺寸精度要求。线圈存在绕制难度大、制作工艺复杂和尺寸精度难控制等

问题。经过和西部超导材料科技股份有限公司的联合攻关,研制出了第一台半长度铌三锡六极线圈,见图 6(a)所示。利用测量臂(CMM)对线圈实际外形尺寸(上弧面和两个侧面,见图 6(b))进行测量后,结果显示上弧面和侧面公差均在 $\pm 0.1\text{ mm}$ 范围内。

首先根据线圈外形尺寸公差,在保持室温预应力加载键过盈量 200 μm 和冷缩预应力不变的前提下,利用

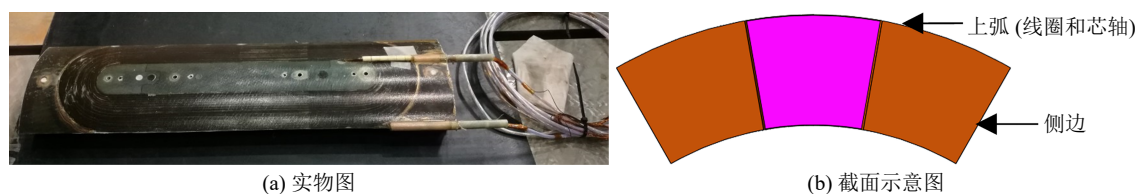


图6 (在线彩图) 半长度铌三锡六极线圈

二维 ANSYS 机械分析模型, 模拟线圈外形偏差 (偏差量从 -0.1 mm 依次增长到 0.1 mm), 进行了三种情况分析: (1) 侧边尺寸理想, 上弧偏差; (2) 上弧尺寸理想, 侧边偏差; (3) 上弧和侧边都存在偏差。

镜像磁场约束结构依次经历室温组装、冷却降温 and 加电励磁后, 线圈最大 Von-Mises 应力和最小接触压力如图 7 所示。从图 7(a) 可以看出, (1) 最大 Von-Mises 应力位于线圈侧边, 与偏差几乎成线性关系, 应力随尺寸偏差的增大而增大。(2) 仅有上弧或侧边偏差时, 当偏差量为 0.1 mm , 对应的等效应力分别为 133 和 144 MPa , 且相对于上弧尺寸偏差量, 侧边尺寸偏差对镜像磁场结构中线圈的应力影响更加显著; (3) 线圈上弧和侧边尺寸同时存在偏差时, 偏差每增加 0.01 mm , 对应的应力增加 $3 \sim 4\text{ MPa}$; 当偏差量达到 0.1 mm 时, 线圈的等效应力为 157 MPa 。

线圈和芯轴间的最小接触压力与偏差也呈现出一定的线性关系, 接触压力与偏差量同时变化, 见图 7(b)。偏差量为 0.1 mm 时接触压力在只考虑上弧偏差时为 29.4 MPa , 只有侧边偏差时为 34.2 MPa , 上弧和侧边同时存在偏差时为 39.4 MPa 。

基于上述分析结果, 可以看到线圈外形尺寸偏差对于线圈应力的影响, 因此在进行结构预应力装配时, 为

了通过镜像磁场约束结构给六极线圈施加均匀的预应力, 首先需要对线圈外形进行垫补。且分析表明, 线圈侧边的尺寸偏差对于线圈上的应力影响更大, 需要通过调整侧边垫补片的厚度进行优先补偿, 例如对于该实测线圈的侧边, 其尺寸偏差范围为 $0.02 \sim 0.1\text{ mm}$ (左侧) 和 $0.02 \sim 0.08\text{ mm}$ (右侧), 对应的将左侧垫补片的厚度整体减小 0.06 mm , 右侧垫补片减小 0.05 mm , 则侧边尺寸偏差范围分别调整为 $\pm 0.04\text{ mm}$ 和 $\pm 0.03\text{ mm}$, 按照模拟的侧边偏差量和线圈最大等效应力的关系, 在线圈上弧达到理想尺寸的前提下, 通过垫补该线圈的最大应力相对于设计值的偏差约为 $\pm 8.8\text{ MPa}$ [参考图 7(a)], 对应的线圈和芯轴的接触压力偏差为 $\pm 3.7\text{ MPa}$ [参考图 7(b)], 最小接触压力依然维持在正值, 保证了线圈和芯轴的接触状态。通过分析, 基于目前的工艺加工完成的六极线圈的尺寸误差分布 ($\pm 0.04\text{ mm}$) 能够满足应力施加均匀性的要求, 而线圈尺寸和设计尺寸的偏差 ($\pm 0.1\text{ mm}$) 可以通过垫补片的厚度调整进行补偿。2019 年对第一台半长度铌三锡六极线圈在镜像磁场约束结构中依次进行了室温组装、冷却降温 and 加电励磁, 实验结果显示: 在没有失超的情况下, 线圈一次性加电到设计电流 800 A , 达到了负载线的 80% 。说明镜像磁场约束结构设计合理。

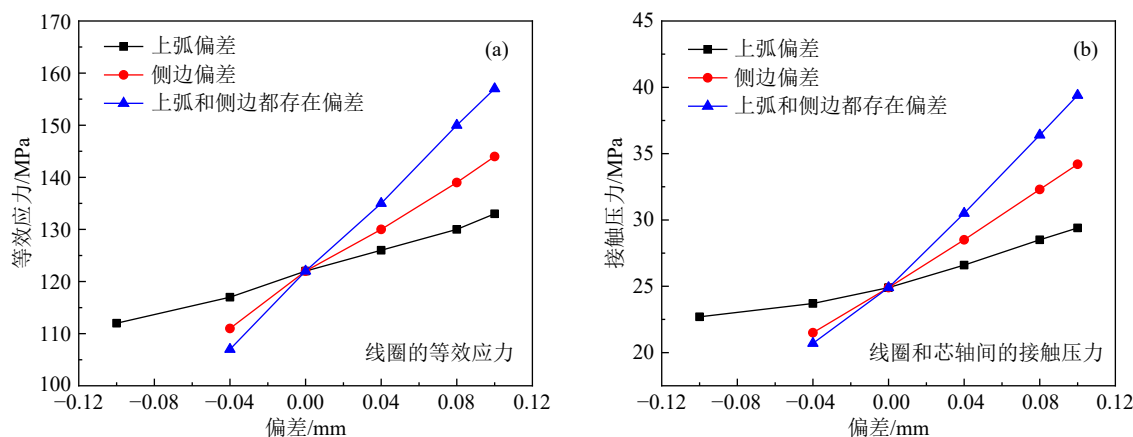


图7 (在线彩图) Mirror 结构公差分析

4 结论

利用 ANSYS 参数化设计编程, 在电磁-结构耦合分析过程中, 通过不断调整机械模型尺寸 (主要包括铝壳

内径和厚度、Bladder-Key 尺寸位置)、室温预应力 Interference 参数、Bladder 打压值和模型材料, 最终优化出了镜像磁场约束结构; 确定了室温装配过程中 Bladder 最大打压值 20 MPa 和预应力加载键过盈量为

200 μm , 为实际镜像磁场约束结构组装提供指导; 给出了六极线圈经过室温组装、冷却降温 and 加电励磁后的最大等效力 122 MPa, 线圈和芯轴间的最小接触压力 24.9 MPa; 依据六极线圈实际测量尺寸公差, 模拟了其镜像磁场结构中线圈受力的影响, 并给出了参考的垫平补偿方案, 确定了对线圈尺寸公差的要求, 为镜像磁场约束结构的实际装配提供了依据。

参考文献:

- [1] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2013, 317(1): 263.
- [2] MA X, WEN W Q, ZHANG S F, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2017, 408(1): 169.
- [3] SABBI G S, HAFALIA A, JUCHNO M, et al. HIAF: Design of the Nb_3Sn Superconducting Magnet System for the 45 GHz ECR Ion Source at IMP LBNL Report, 2001036[R]. San francisco: LBNL, 2017.
- [4] JUNCHNO M, HAFALIA A, LU W, et al. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2018, 28(3): 4602806.
- [5] RAVAIOLI E, HAFALIA A, JUNCHNO M, et al. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2018, 28(3): 4700906.
- [6] ASNER A, PERIN R, WENGER S, et al. First Nb_3Sn , 1 m Long Superconducting Dipole Model Magnets for LHC Break the 10Tesla Field Threshold[C]//11th International Conference on Magnet technology, Tsukuba, Japan, 1989: 36.
- [7] CASPI S, GOURLAY S, HAFALIA R, et al. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2001, 11(1): 2272.
- [8] HAFALIA R R, BISH P A, CASPI S, et al. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2002, 12(1): 47.
- [9] CASPI S, BARTLETT S E, DIETDERICH D R, et al. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2004, 14(2): 235.
- [10] FERRACIN P, BARTLETT S E, CASPI S, et al. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2005, 15(2): 1132.
- [11] BARTLETT S E, CASPI S, DIETDERICH D R, et al. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2005, 15(2): 1136.
- [12] CASPI S, AMBROSIO G, ANDREEV N, et al. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2006, 16(2): 358.
- [13] PAN H, ARBELAEZ D, FELICE H, et al. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2019, 29(5): 4100706.
- [14] ZHU Li, WU Wei, YU Shurong, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(12): 4035. (in Chinese)
(朱丽, 吴巍, 俞树荣, 等. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(12): 4035.)
- [15] ZHANG Kai. Mechanical Analysis and Experiments on 12T and Higher Bore Field Superconducting Accelerator Dipole Magnet[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
(张恺. 面向12T及以上的超导二极磁体的力学分析及实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.)

Optimum Design of the Magnetic Mirror Structure for Testing Nb_3Sn Sextupole Coil

ZHU Li^{1,2}, WU Wei^{2,†}, YU Shurong¹, CHEN Yuquan², MEI Enming², MA Peng³, YAO Qinggao², SUN Liangting²

(1. School of Petrochemical Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China;

3. Xi'an Superconducting Magnet Technology Co., LTD, Xi'an 710018, China)

Abstract: The Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences is developing the new Nb_3Sn superconducting magnet system for the fourth-generation 45 GHz ECR source(FECR). The FECR magnet coils includes six Nb_3Sn superconducting sextupole coils and four Nb_3Sn solenoid coils. Because of the technical difficulty of winding shaped sextupole coils (non-standard saddle type) from a single superconducting wire and the stress sensitivity of Nb_3Sn superconductivity, a magnetic mirror structure based on an aluminum shell-based structure and Bladder & Key technology was devised to test whether the performance of a single Nb_3Sn sextupole coil can meet the design specifications. This paper describes the detailed optimum design process of the magnetic mirror structure using the ANSYS Parameter Design language (APDL), presents the optimized mirror structure, the determination of the room-temperature prestress and gives the maximum equivalent stress during room temperature assembly, cool-down, and magnet excitation. Furthermore, the effects of the pre-stress applied to the sextupole coil in the mirror structure was also analyzed and assessed in the context of the sextupole coil fabrication tolerance (± 0.1 mm).

Key words: magnetic mirror structure; Nb_3Sn ; sextupole coil; stress; toleran

Received date: 05 Jun. 2020; Revised date: 30 Jun. 2020

Foundation item: Major Research Instrument and Equipment Development Project of NSFC(11427904)

† Corresponding author: WU Wei, E-mail: wuwei@impcas.ac.cn.