

用于 46 T 全超导磁体装置的 26 T REBa₂Cu₃O_{7-δ} 高温超导内插磁体电磁设计研究^{*}

崔杰^{1,2}, 宋彭¹, 燕宇帆¹, 邵良俊¹, 王浩源¹, 刘方^{3,4}
冯峰², 瞿体明¹, 刘华军^{3,4†}

1. 摩擦学国家重点实验室, 清华大学机械工程系, 北京 100084;

2. 清华大学深圳国际研究生院, 广东深圳 518055;

3. 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 安徽合肥 230092;

4. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽合肥 230031

收稿日期: 2021-12-01; 接收日期: 2021-12-30

【摘要】 REBa₂Cu₃O_{7-δ} (REBCO) 高温超导带材具有良好的电磁性能和机械强度, 现已成为开发极高场超导磁体的重要基础材料. 本文基于 $T-A$ 方程提出了一种极高场 REBCO 内插磁体的参数化设计方法, 该方法在计算中考虑了超导屏蔽电流对磁体中心场强和应变分布的影响, 采用分步优化的方式从内向外依次确定各超导线圈的结构参数, 每个线圈的优化过程相对独立. 基于该设计方法, 本文给出了 46 T 全超导磁体中 26 T REBCO 内插磁体的电磁设计方案, 确定了主要线圈参数和工作电流. 该内插磁体由 4 个线圈同轴嵌套串联组成, 每个线圈都由 REBCO 带材绕制而成的双饼线圈 (Double Pancake, DP) 堆叠而成. 基于当前模型计算结果, 在给定的 20 T 背景场中, 当内插磁体工作电流达到 290 A 时, 磁体中心场强可达 46 T; 高温超导线圈中最大环向应变为 0.61%, 仍然处于危险区域.

关键词: 高温超导, 超导磁体, 屏蔽电流, 参数化设计

PACS: 84.71.Ba, 74.25.-q, 84.71.Mn

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.05.001

Electromagnetic Design of 26 T REBa₂Cu₃O_{7-δ} High Temperature Superconducting Insert Magnet for a 46 T Full Superconducting Magnet Device

CUI Jie^{1,2}, SONG Peng¹, YAN Yufan¹, SHAO Liangjun¹, WANG Haoyuan¹,
LIU Fang^{3,4}, FENG Feng², QU Timing¹, LIU Huajun^{3,4†}

1. State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055;

3. Energy Research Institute, Hefei National Science Center, Hefei 230092;

4. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

Received date: 2021-12-01; accepted date: 2021-12-30

^{*} 合肥综合性国家科学中心能源研究院科研项目(编号:21KZS207)和中国科学院战略性先导科技专项 B 类(编号:XDB25000000)资助的课题.

[†] liuhj@ipp.ac.cn

【Abstract】 REBa₂Cu₃O_{7- δ} (REBCO) high temperature superconducting tape has excellent electromagnetic properties and high mechanical strength, and has become an important material for the development of ultra high field (UHF) superconducting magnets. This paper proposes a parametric design method for the UHF REBCO insert magnet based on T - A formulation. The method considers the influence of the superconducting screening current on the magnetic field strength and strain distribution in the calculation, and adopts a step-by-step optimization method from the inside to the outside. The structural parameters of each superconducting coil are determined in turn, and the optimization process of each coil is relatively independent. Based on this design method, this paper presents the electromagnetic design scheme of the 26 T REBCO insert magnet in the 46 T full superconducting magnet, and determines the main coil parameters and operating current. The insert magnet is composed of 4 coils coaxially nested and series connected. Each coil is stacked by double pancakes (DPs) coil made of REBCO tapes. According to the simulation, in a given 20 T background field, at an operating current of 290 A, the magnetic field can reach 46 T; the maximum hoop strain in the HTS insert coil is 0.61%, still in a risky level.

Keywords: High temperature superconductor, Superconducting magnets, Screening current, Parametric design

PACS: 84.71.Ba, 74.25.-q, 84.71.Mn

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.05.001

Reference method: CUI Jie, SONG Peng, YAN Yufan, SHAO Liangjun, WANG Haoyuan, LIU Fang, FENG Feng, QU Timing, LIU Huajun, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0249 (2021)

1 引言

随着超导应用技术的不断发展,高场超导磁体已经广泛应用于生物医学、科学研究和电力能源等领域,如磁共振成像、核磁共振波谱仪、大型粒子加速器、磁约束受控核聚变实验装置、超导磁储能装置等^[1-5].

目前高场超导磁体主要的实现方式有以下几种:超导和常规电阻型水冷磁体组合的混合磁体、高温超导(High Temperature Superconductor, HTS)和低温超导(Low Temperature Superconductor, LTS)组合的全超导混合磁体、纯高温超导磁体等.首先是常规电阻型水冷磁体与超导内插磁体组合而成的混合型磁体.2017年,美国国家高场实验室的Hahn等人在31 T的常规水冷磁体中内插9.2 T的REBCO高温超导线圈,达到了40.2 T的极高场.2019年,Hahn等人^[6]通过在31.1 T的水冷磁体中内插14.4 T的REBCO线圈实现了45.5 T的直流磁场,创造了最高稳态磁场的世界纪录.但是常规电阻型水冷磁体的能耗高、体积大,因此越来越多的学者投入到全超导高场磁体的研究当中.2015年,美国麻省理工学院(MIT)的Iwasa等人^[2]给出了30.5 T全超导NMR磁体的结构设计方案,其中REBCO内插磁体提供18.8 T的中心磁场.2021年MIT的Park等人^[7]完成了1.3 GHz NMR磁体的835 MHz REBCO内插磁体的设计,以替代在2018年因失超而损坏的800 MHz REBCO内插磁体.2017年,美国国家高场实验室的Weijers等人^[8-10]完成了32 T/34 mm全超导磁体的设计和制造.国内近年来也开展了很多关于全超导高场磁体的研究工作.中国科学院电工研究所王秋良院士课题组开展了一系列高场超导磁体开发工作^[11-13],在2019年创造了32.35 T的全超导高场磁体世界纪录^[14].在高温超导磁体领域,2016年韩国SuNAM公司与美国MIT-FBML合作^[15],采用多宽度(Multi-Width)REBCO带材绕制了单个无绝缘(No Insulation, NI)磁体,在没有背景磁场的条件下实现了26.4 T的中心磁场.2018年SuNAM公司^[16]成功研制出用于轴子探测实验的18 T/70 mm无绝缘REBCO磁体,该磁体同样采用多宽度REBCO带材进行绕制,且磁体的工作电流/临界电流最大为0.876.

REBCO带材在高场下具有较高的临界电流密

度^[17,18],且具有良好的机械强度(纵向拉伸强度 >700 MPa)以承载高环向应力^[19,20],采用REBCO内插磁体成为当前开发极高场超导磁体的主流路线之一.REBCO磁体在励磁过程中会不可避免地会在带材内产生屏蔽电流,不仅会对磁场的均匀性和稳定性造成不利的影响,更会在带材内部产生非线性电流分布,导致局部环向应变的增加.国外的Hahn、Amemiya、Koyama等人均对高温超导磁体中的屏蔽电流效应进行过报道,认为其产生的屏蔽电流场会对磁体造成较大的影响^[19,21].日本的Yanagisawa等人^[22,23]发现通过电流扫描反转法可以有效地减小屏蔽电流的影响.2020年,美国MIT的李易等人^[24]通过实验证明采用刻划多芯的REBCO导体可以有效地抑制由屏蔽电流引起的带材内部的应变梯度,因为屏蔽电流大小与带材宽度成正比^[25],使用该类型的导体可以有效地抑制屏蔽电流产生的影响.清华大学的燕宇帆等人^[26,27]在高场REBCO磁体屏蔽电流感应磁场和应力方面开展了大量研究工作,其开发的电磁-机械耦合模型与实验结果相比具有很好的一致性,进一步提高了仿真计算精度.在控制线圈环向应变方面,国外学者也开展了相关研究,美国国家高场实验室^[8]采用高强度钢带并绕的方式来对REBCO线圈进行加固.美国MIT-FBML的Iwasa等人^[28]通过在双饼线圈外侧缠绕多匝的不锈钢带(也称为Over-Banding,OB)来提高线圈整体的机械强度,因为不锈钢带具有高弹性模量和高屈服强度,所以可以用来抑制REBCO内插磁体在运行过程中产生的大环向应变.

在REBCO磁体设计方面,韩国高丽大学的Kim等人^[29]在2015年提出了一种多宽度REBCO磁体的设计方法.该方法首先给出了基本的设计约束:1)给定磁体内外径和总高度;2)工作电流/临界电流最大为0.7.在此基础上以带材的宽度为自变量进行磁体的优化,优化目标为中心磁场 B_z 和CCD系数(磁体最大临界电流/最小临界电流).2018年,中国科学院电工研究所团队^[30]提出了一种改进后的REBCO内插磁体电磁设计方法,该设计方法以内插磁体的体积为优化目标、中心磁场强度和磁场均匀度为约束条件进行电磁设计与优化.在此基础上完成了27 T全超导NMR磁体中12 T REBCO内插磁体的电磁设计方案,该方案下的磁体最大环向应力为450 MPa、工作电流/临界电流最

大为 0.55.

2021 年起,中国科学院合肥物质科学研究院牵头开展了 46 T 极高场全超导磁体的研发,拟在 20 T 背场条件下,由 REBCO 内插磁体贡献 26 T 的磁场.本工作主要针对 26 T 的 REBCO 内插磁体进行电磁与结构优化设计,提出了一种基于 $T-A$ 方程^[31,32] 的 HTS 内插磁体参数化设计方法,在实现磁场目标的基础上,尽可能地将线圈承受的环向应变控制在较低水平,提高磁体的安全性和稳定性.与上述介绍的 REBCO 磁体设计方法不同的是,本文提出的磁体设计方法更关注磁体的力学性能,并在优化过程中考虑了屏蔽电流效应.

2 26 T REBCO 内插磁体结构

2.1 设计目标

26 T REBCO 内插磁体的主要设计目标有三个:1)REBCO 内插磁体的中心磁场要达到 26 T; 2)线圈承受的最大局部环向应变控制在安全水平(一般需要控制在 0.6% 以内);3)磁体的最大电流工作点(工作电流/临界电流)控制到一定范围内.约束条件主要为空间限制,REBCO 内插磁体的内径限制为 ≥ 17 mm,外径(即 LTS 的内径)限制为 ≤ 380 mm.此外,线圈之间需要为线圈骨架和布线留有一定的空间.总而言之,该内插磁体需要在有限的空间内达到 26 T 的中心磁场,同时要保证磁体运行在一个安全稳定的环境下.

2.2 磁体结构组成

为了达到中心磁场要求并控制线圈环向应变,该内插磁体采用多线圈结构.主要考虑到空间限制和应力分布两个因素:线圈数量过少,为了达到目标磁场就需要增加线圈的匝数,因此会导致线圈应力的集中;线圈数量过多,线圈骨架和布线空间会占用较多的空间,同时也不利于后期磁体的组装.综合考虑上述因素并借鉴以往经验,26 T REBCO 内插磁体决定采用四线圈(4-Coil)结构,具体的磁体结构如图 1 所示.

REBCO 内插磁体各个线圈高度均不相同,越靠近中心位置的线圈高度越低.采取该种设计方式主要考虑到磁场贡献饱和度问题,对于螺线管线圈而言,在高度方向上堆叠的 DP 数量越多,贡献的中心磁场就越大.但是随着 DP 数量增加会呈现出饱和性,而越内侧的线圈越容易达到饱和(即达到磁场

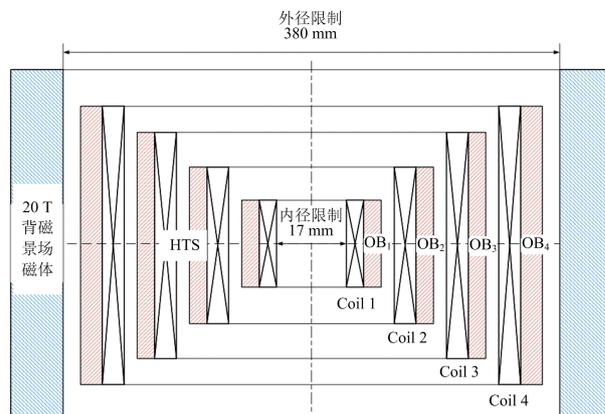


图 1 REBCO 内插磁体结构示意图:内侧由 4 个高温超导线圈同轴嵌套串联组成,外侧为 20 T 背景场磁体,OB 为绕制在线圈外侧的不锈钢带(用来抑制线圈的环向应变)

饱和所需的 DP 数量越少),所以从内向外线圈的高度逐渐增加,具体计算结果在下章节中详细讨论.

该内插磁体的线圈均由 REBCO 带材绕制的 DP 堆叠而成,相邻 DP 和 SP(单饼线圈 Single Pancake, SP)之间分别放置 0.53 mm、0.1 mm 的 G10 板,以起到绝缘的作用.每个线圈外侧都绕制一定厚度的 OB,以此来增强线圈的强度.内外相邻线圈间留有共 13 mm 的间隙,其中线圈骨架厚度 6 mm,布线间距 7 mm.所使用的 REBCO 带材基本参数如表 1 所示.

表 1 带材基本参数

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
带材厚度/ μm	65	65	150	150
哈氏合金并绕带厚度/ μm	0	0	30	30
带材宽度/mm	4	4	4.8	4.8
等效弹性模量/GPa	152.5	152.5	154.8	154.8

3 优化方法与设计方案

3.1 优化方法介绍

本研究提出的优化方法在建模过程中做了一些基本假设:1)在 REBCO 内插磁体外侧建立螺线管磁体模型,通过添加外部电流密度的方式来产生 20 T 的背景场,根据前期的优化工作发现背景场的分布对于计算结果影响较小;2)在力学计算中忽略了带材位移对环向应变的影响,但事实上带材会在电磁力作用下产生一定角度的偏转,尽管偏转角度较

小,但依然会对环向应变的计算产生一定的影响^[27];3)忽略了线圈相邻带材间的摩擦,假设相邻匝之间为光滑接触,上述关于力学模型做出的假设会使得线圈承受的环向应变的计算值偏高;4)由于宽度为 4.8 mm 的带材包含 4 mm 超导层和 0.8 mm 铜封装层,实际通流区域只有 4 mm 的超导层,因此在建模过程中将带材宽度等效为 4 mm,同时使用等效弹性模量进行线圈应变计算.

本研究采用参数化优化方法,首先确定 REBCO 内插磁体主要的结构参数,从中提取需要进行优化的参数作为自变量,给定各变量的取值范围,通过数值模拟计算不同参数组合下的结果(如环向应变、电流工作点等),根据优化结果确定磁体具体的结构参数.针对四线圈(4-Coil)结构的 REBCO 内插磁体而言,主要的优化参数有 9 个:工作电流 I_{op} 、 n_1 (线圈 1 径向匝数)、 OB_1 (线圈 1 外侧 Over-Banding 的厚度)、 n_2 、 OB_2 、 n_3 、 OB_3 、 n_4 、 OB_4 ,具体的优化流程如图 2 所示.

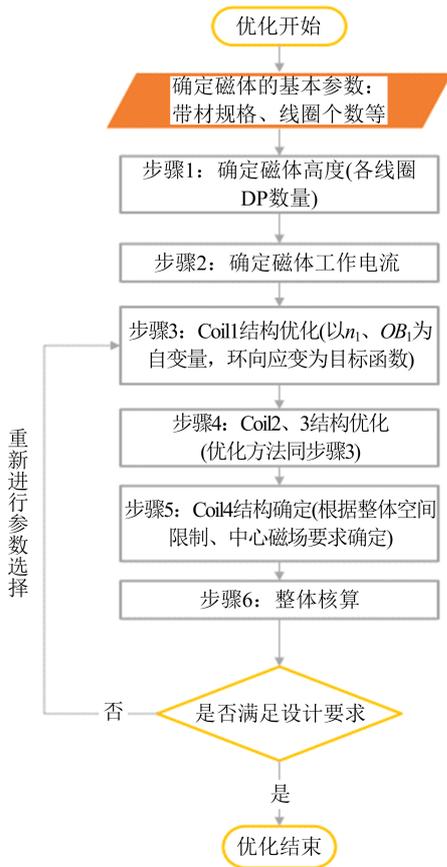
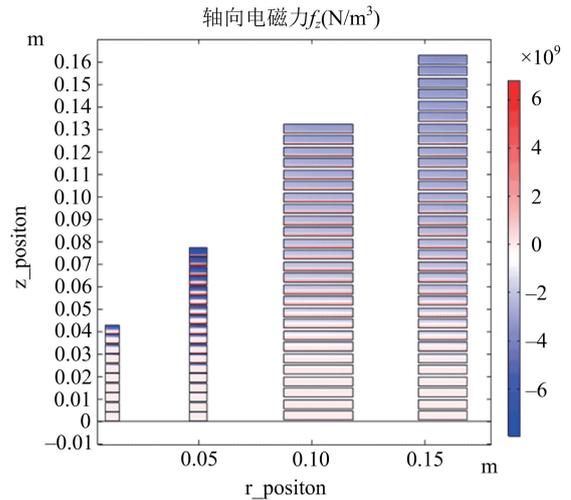


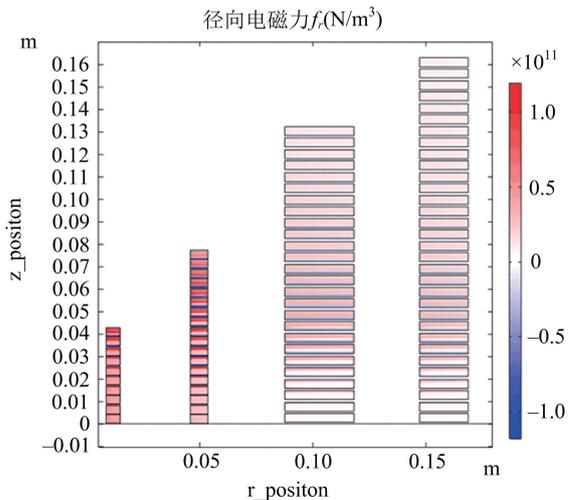
图 2 磁体结构优化流程图

由于 REBCO 磁体的对称特性,该优化方法在建模过程中采用了二维轴对称模型,以提高计算效

率.为模拟磁体实际励磁过程中的电流和应力分布,首先要对外侧的 LTS 进行励磁,达到额定目标值后再对内侧的 REBCO 线圈进行励磁,计算 REBCO 线圈在目标磁场情况下的电流和磁场分布,同时为了模拟 REBCO 线圈中产生的屏蔽电流,该模型使用了 T-A 方法进行计算.根据电流和磁场计算结果进而可以获取线圈内部电磁力的分布情况,如图 3 所示.



(a)轴向电磁力分布图



(b)径向电磁力分布图

图 3 REBCO 线圈电磁力分布

将电磁计算中得到的电磁力数据导入到力学模型中进行计算,该力学模型中只对单饼线圈进行建模,且考虑匝间接触.导入的电磁力数据加载到线圈区域上,通过计算可以得到线圈承受的环向应变、匝间接触力等参量.计算不同位置、径向匝数、OB 厚度下单饼线圈的力学性能参数,只需要修改几何模型的尺寸参数以及对应的电磁力数据就可以实现,具

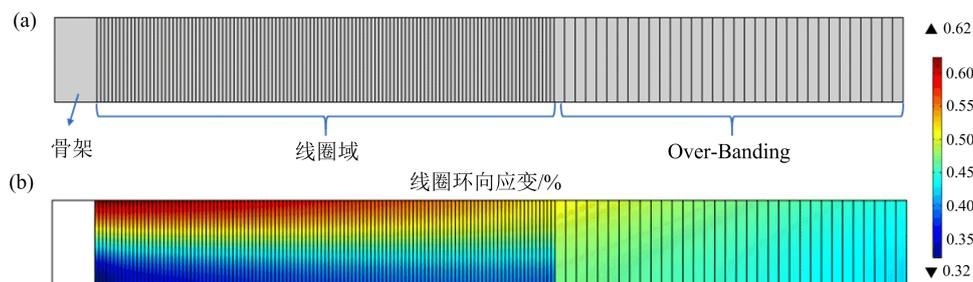


图 4 (a)单饼线圈力学计算模型;力学模型主要分为骨架、线圈域和 Over-Banding 三个部分;(b)单饼线圈环向应变计算结果

体的力学计算模型及计算结果如图 4 所示。

相比于均匀电流模型,该磁体仿真模型在计算中模拟了屏蔽电流效应,且所使用的力学计算模型考虑了不同匝带材之间的接触,所以计算结果更加准确.综上所述,该设计方法的优点在于:1)该方法采用分步优化的方式,从内向外依次确定各个 HTS 线圈的结构参数,且每个线圈的优化相对独立,优化效率更高;2)该方法在电磁计算中使用了 $T-A$ 议程,可考虑屏蔽电流效应的影响.

3.2 优化流程

1. 确定磁体高度(DP 数量)

初步给定线圈的径向匝数,计算不同 DP 数量下线圈对磁体中心磁场的贡献,即线圈高度饱和度计算.如图 5 所示,无论是内侧线圈还是外侧线圈,随着 DP 数量的增加,磁体的中心磁场贡献都会逐渐趋于平缓,呈现出饱和性.且线圈的位置越靠近中心,磁场贡献达到饱和时对应的 DP 数量越小.由于考虑到外侧 LTS 磁体的尺寸限制,所以将内侧 REBCO 磁体的整体高度控制在 350 mm 以内,根据计算结果确定各个线圈对应的 DP 数量,最终确定 4 个线圈对应的 DP 数量分别为 10、18、26 和 32.

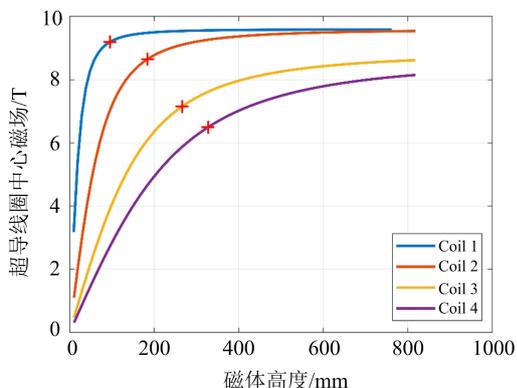


图 5 线圈磁场贡献随磁体高度变化曲线:超导线圈中心磁场随着磁体高度的增加呈现出饱和性,且越靠近磁体中心的线圈在磁场贡献达到饱和时对应的磁体高度越小

2. 确定工作电流 I_{op}

通过电磁计算可以发现线圈端部的电流工作点(工作电流 I_{op} /临界电流 I_c)较大,在通相同电流的情况下外侧线圈的最大电流工作点要大于内侧线圈,其主要原因是外侧线圈边缘处的线圈暴露在较大的垂直场当中.为了保证磁体的稳定运行,REBCO 内插磁体的最大电流工作点需要控制在一定水平内(一般将最大电流工作点控制在 0.75 以内偏转),磁体的通流大小及方式也需要根据这一指标来确定.通过前期的优化发现,当 REBCO 内插磁体的所有线圈都通相同大小的电流时,内侧线圈的电流工作点较低,没有充分利用其通流能力.针对这一问题,本研究对磁体工作电流的分布进行了优化,内侧线圈(Coil 1)通较大电流 I_{op1} ,外侧线圈(Coil 2、3、4)通较小电流 I_{op2} ,以充分利用内外侧线圈的通流能力.多次优化之后确定工作电流 $I_{op1} = 290$ A, $I_{op2} = 230$ A.

3. 内侧 Coil 1 结构优化

在线圈的 DP 数量和磁体工作电流确定之后,需要对 Coil 1 的结构进行优化设计,确定其关键结构参数.在优化过程中,以 Coil 1 的径向匝数 n_1 和 OB 厚度 OB_1 为自变量,给定取值范围,通过模拟计算不同参数组合下的环向应变结果.外侧的线圈及 LTS 磁体只需要为最内侧的 Coil 1 提供相应的背场,不需要考虑具体尺寸.具体来说,Coil 1 每选取一组结构参数,根据磁体的空间限制确定外侧 3 个线圈的总匝数,将其均匀分配到 3 个线圈,然后根据中心磁场的要求确定其通流大小,这一过程可以通过非线性优化函数实现.此外,在参数遍历的过程中要进行多次模拟计算,需要耗费大量时间和内存.为解决这一问题,本研究对模型中除 Coil 1 之外的其他域采用稀疏网格划分,由此可以在保证 Coil 1 线圈域计算精度的同时提高计算效率.

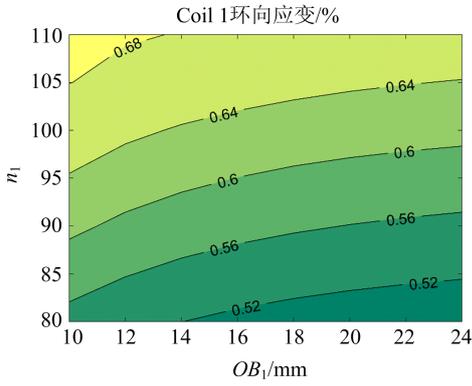


图 6 Coil 1 最大环向应变等值线图

通过参数扫描获取 Coil 1 的最大环向应变等值线图,如图 6 所示.具体参数选择考虑的因素主要是线圈承受的最大环向应变、磁场贡献和 OB 大小,其中线圈的环向应变水平是最主要因素,在此基础上尽可能提供更大的磁场.首先把环向应变 0.6% 作为边界,从而可行域就会缩小到图的右下方.若想尽可能地贡献更大的磁场,就需要更厚的 OB 去抑制环向应变.但是 OB 抑制环向应变的作用会趋于饱和,即当 OB 厚度增加到一定程度后其抑制作用会大幅减弱,同时还会占用更多的空间.综合考虑后,最终确定 Coil 1 的径向匝数 $n_1=95$ 、 $OB_1=18$ mm,在该参数组合下,Coil 1 的最大环向应变可以控制到 0.6% 附近,同时兼顾了磁场贡献和空间问题.

4. 外侧线圈结构优化

Coil 1 的结构参数确定后则将其固定,对外侧的 Coil 2 和 3 依次进行优化,采用的方法与上述 Coil 1 的优化方法相同,优化结果如图 7 所示.同样以线圈承受的最大环向应变为考虑因素,分别确定 Coil 2、3 的结构参数,其中 $n_2=120$ 、 $OB_2=21$ mm, $n_3=170$ 、 $OB_3=16$ mm.

在 Coil 1、2、3 结构确定后,根据磁场要求和磁体空间限制就可以确定 Coil 4 的径向匝数 n_4 和 OB 厚度 OB_4 ,其中空间限制如式(1)所示:

$$r_{\max} = r_{\min} + \sum_{i=1}^4 n_i \times t_i + \sum_{i=1}^4 OB_i + (\Delta_1 + \Delta_2) \times 3 + \Delta_1 \quad (1)$$

其中 r_{\max} 为磁体最大外径、 r_{\min} 为磁体最小内径、 n_i 为各个线圈的匝数、 t_i 为各个线圈带材厚度、 Δ_1 为线圈间的布线间隙、 Δ_2 为线圈骨架宽度,根据 Coil 1、2、3 优化结果以及式(1)最终确定 $n_4=120$ 、 $OB_4=16.3$ mm.在磁体结构全部确定之后,需要进行整

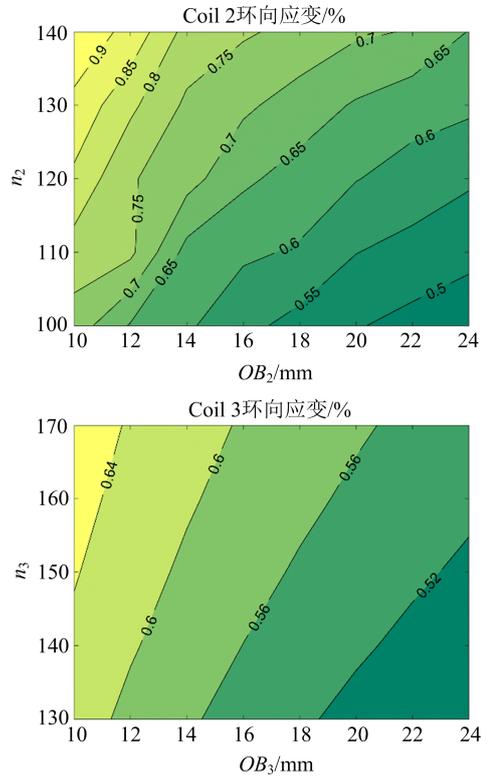


图 7 Coil 2、3 最大环向应变等值线图

体核算,主要目的有三个:一是对优化过程中得到的线圈最大环向应变进行校正;二是计算 Coil 4 的环向应变水平,如未达到合理范围,需要对内侧线圈的参数进行调整;三是计算 REBCO 内插磁体的电流工作点分布.具体的核算结果和讨论在 3.3 节中详细阐述.

3.3 26 T REBCO 内插磁体设计方案

通过上述结构优化工作,确定了 26 T REBCO 内插磁体设计方案,如表 2 所示,其中 a_1 、 a_2 分别为线圈的内半径、外半径.

REBCO 内插磁体的 4 个线圈分别贡献 7.71 T、6.75 T、7.48 T 和 4.8 T 的中心磁场,总用量为 14810.7 m.线圈承受最大环向应变的计算值分别为 0.60%、0.60%、0.61% 和 0.50%,虽然在优化过程中是根据 0.6% 的最大环向应变进行参数选择,但是由于最终确定的外侧线圈结构与优化时暂定的结构有所差异,所以最终的环向应变计算值也会存在一些误差.

基于上述给出的 26 T REBCO 内插磁体设计方案,本文针对电流工作点和环向应变两个关键参数进行整体核算.该设计方案对应的电流工作点如图 8 所示,其中 Coil 1 的最大电流工作点为 0.74

(小于 0.75),但是外侧的 Coil 2、3、4 的最大电流工作点分别为 0.81、0.86 和 0.88,均大于 0.8,处于较高水平,因此在下阶段结构设计中需要进一步优化.

表 2 26 T REBCO 内插磁体设计方案

方案类型	单位	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
a_1 值	mm	8.5	45.7	87.5	147.1
a_2 值	mm	14.7	53.5	118.1	168.7
径向匝数		95	120	170	120
OB 厚度	mm	18	21	16	16.3
电流值	A	290	230	230A	230A
带材厚度	μm	65	65	150	150
并绕厚度	μm	0	0	30	30
工程电流密度	A/mm^2	1115.4	884.6	319.4	319.4
铜层电流密度	A/mm^2	1812.5	1437.5	599.0	599.0
用线量	m	138.3	1345.6	5708.5	7618.2
总用线量	m	14810.7			
最大环向应变		0.60%	0.60%	0.61%	0.50%
中心场强	T	7.71	6.75	7.48	4.80

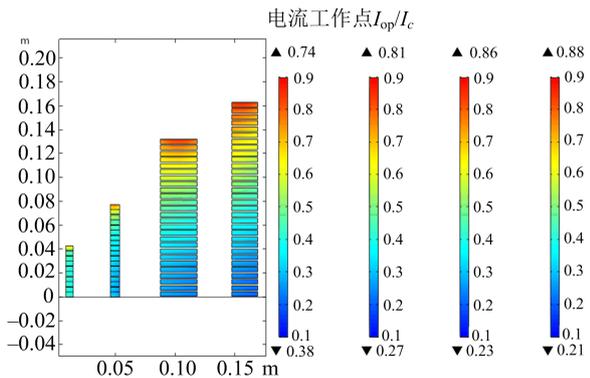


图 8 电流工作点分布:4 个线圈对应的最大电流工作点分别为 0.74、0.81、0.86 和 0.88,且最大值均出现在线圈的端部位置

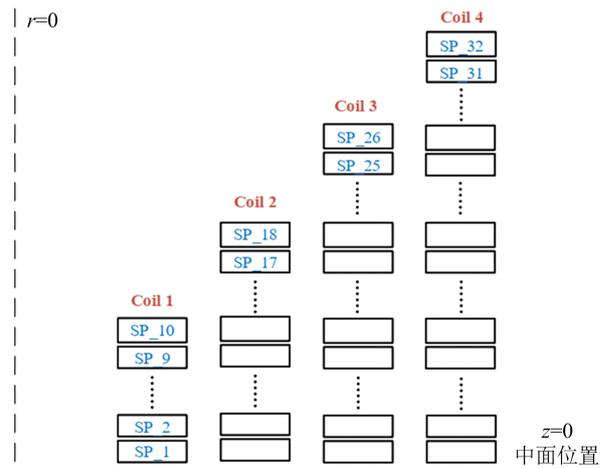


图 10 SP 位置示意图

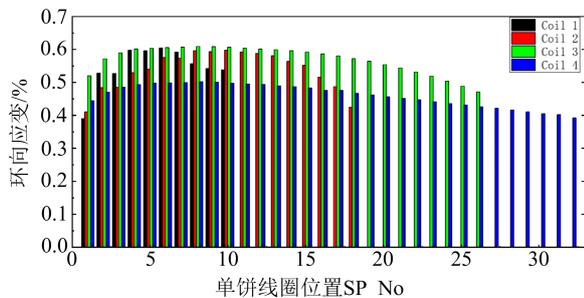


图 9 单饼线圈最大环向应变分布图:横坐标为单饼线圈位置(即 SP 编号,具体编号方式见图 10),纵坐标为单饼线圈对应的最大环向应变

磁体中单饼线圈最大环向应变分布图如图 9 所示,其中横坐标为单饼线圈位置 SP_No,编号从中面位置到线圈端部分别为 SP_1 到 SP_32,具体分布如图 10 所示.从图中可以看出,四个线圈对应的最大环向应变的计算值分别为 0.60%、0.60%、0.61%、0.50%.但由于计算模型忽略了带材角度倾斜和相邻带材间摩擦的影响,因此得到的环向应变计算值相比于实际情况可能是偏高的.

总体来看,不同线圈的环向应变分布是相似的,从中面位置到线圈端部 SP 的最大环向应变都是先

增大后减小. Coil 1、2、3、4 的最大环向应变分别出现在 SP_6、SP_10、SP_8 和 SP_7. 其实,线圈最大环向应变的分布取决于屏蔽电流和磁场分布,对于靠内侧的 Coil1 和 2 来说,磁场分布差异较小,环向应变主要由屏蔽电流(即电流分布情况)决定. 从中面位置到线圈端部位置,屏蔽电流的影响程度同样是先增大后减小,且最大值出现在靠近端部的位置,与图 9 中 Coil 1 和 2 的环向应变变化趋势相同. 而对于靠外侧的 Coil 3 和 4,在轴向上磁场的分布差异相对较大,屏蔽电流和磁场分布对线圈所受环向应变都有较大影响,所以发生最大局部环向应变的 SP 位置相较于 Coil 1 和 2 更远离线圈端部位置.

4 结论

本文以中心磁场强度为目标设计了 26 T REBCO 高温超导内插磁体,其中线圈所受最大环向应变和磁体最大电流工作点是主要的限制因素,该内插磁体将与 20 T 的低温超导磁体组合以实现 46 T 的极高场.

本文综合 26 T REBCO 内插磁体的设计要求和限制条件,提出了一种基于 $T-A$ 方程的高温超导内插磁体设计方法,该设计方法在模型计算中考虑屏蔽电流的影响,可以得到更为准确的中心场强、环向应变和径向应力值. 同时该方法采用分步优化的方式,从内向外依次确定各个 HTS 线圈的结构参数,且每个线圈的优化相对独立.

本文通过上述提到的磁体设计方法对 26 T REBCO 内插磁体进行了电磁设计与优化,磁体设计方案如表 2 所示,4 个线圈的径向匝数 n 分别为 95、120、170 和 120,OB 厚度分别为 18 mm、21 mm、16 mm 和 16.3 mm,其中 Coil 1 单独通电 $I_{op1} = 290$ A,Coil 2、3 和 4 通电 $I_{op2} = 230$ A,总用线量为 14810.7 m. 电流工作点最大值为 0.88,线圈承受最大环向应变的计算值分别为 0.60%、0.60%、0.61%、0.50%. 总体来看,磁体不同线圈对应的最大环向应变分布是相似的,从中面位置到线圈端部最大环向应变都是先增大后减小.

参 考 文 献

- [1] T. Tosaka, H. Miyazaki, S. Iwai, Y. Otani, M. Takahashi, K. Tasaki, S. Nomura, T. Kurusu, H. Ueda, S. Noguchi, A. Ishiyama, S. Urayama, H. Fukuyama, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26** (2016), 4402505.
- [2] Y. Iwasa, J. Bascunan, S. Hahn, J. Voccio, Y. Kim, T. Lecrevisse, J. Song, K. Kajikawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **25** (2015), 4301205.
- [3] R. Gupta, M. Anerella, J. Cozzolino, P. Joshi, S. Joshi, S. Plate, W. Sampson, H. H. Song, P. Wanderer, W. Chung, J. Kim, B. R. Ko, S. W. Youn, Y. K. Semertzidis, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29** (2019), 4602105.
- [4] B. N. Wan, G. S. Xu, *Chinese Science Bulletin*, **60** (2015), 2157.
- [5] 唐跃进,石晶,任丽. 超导磁储能系统(SMES)及其在电力系统中的应用[M]. 中国电力出版社,(2009),35.
- [6] S. Hahn, K. Kim, K. Kim, X. Hu, T. Painter, I. Dixon, S. Kim, K. R. Bhattarai, S. Noguchi, J. Jaroszynski, D. C. Larbalestier, *Nature*, **570** (2019), 496.
- [7] D. Park, J. Bascunan, Y. Li, W. Lee, Y. Choi, Y. Iwasa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **31** (2021), 4300206.
- [8] W. D. Markiewicz, D. C. Larbalestier, H. W. Weijers, A. J. Voran, K. W. Pickard, W. R. Sheppard, J. Jaroszynski, X. Aixia, R. P. Walsh, L. Jun, A. V. Gavrilin, P. D. Noyes, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **22** (2012), 4300704.
- [9] H. W. Weijers, W. D. Markiewicz, A. J. Voran, S. R. Gundlach, W. R. Sheppard, B. Jarvis, Z. L. Johnson, P. D. Noyes, J. Lu, H. Kandel, H. Bai, A. V. Gavrilin, Y. L. Viouchkov, D. C. Larbalestier, D. V. Abraimov, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **24** (2014), 4301805.
- [10] H. W. Weijers, S. T. Hannahs, T. P. Murphy, W. D. Markiewicz, A. V. Gavrilin, A. J. Voran, Y. L. Viouchkov, S. R. Gundlach, P. D. Noyes, D. V. Abraimov, H. Bai, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26** (2016), 4300807.
- [11] J. Liu, Y. Li, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26** (2016), 4602705.
- [12] L. Wang, Q. L. Wang, L. K. Li, L. Qin, J. H. Liu, Y. Li, X. N. Hu, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28** (2018), 4600805.
- [13] Y. Li, L. Wang, Q. L. Wang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28** (2018), 4602105.
- [14] J. H. Liu, Q. L. Wang, L. Qin, B. Z. Zhou, K. S. Wang, Y. H. Wang, L. Wang, Z. L. Zhang, Y. M. Dai, H. Liu,

- X. N. Hu, H. Wang, C. Y. Cui, D. G. Wang, H. Wang, J. S. Sun, W. S. Sun, L. Xiong, *Supercond. Sci. Technol.*, **33** (2020), 4300704.
- [15] S. Yoon, J. Kim, K. Cheon, H. Lee, S. Hahn, S. H. Moon, *Supercond. Sci. Technol.*, **29** (2016), 04LT04.
- [16] J. Kim, Y. Kim, S. Yoon, K. Shin, J. Lee, J. S. Jung, J. T. Lee, J. G. Kim, D. Kim, J. Yoo, H. Lee, S. H. Moon, S. Hahn, *Review of Scientific Instruments*, **91** (2020), 023314.
- [17] 周剑波, 戴银明, 王秋良, 王厚生, 李兰凯, 王磊, 勾衬衬, 胥靖文, 低温与超导, **44** (2016), 37.
- [18] C. Barth, G. Mondonico, C. Senatore, *Supercond. Sci. Technol.*, **28** (2015), 045011.
- [19] H. Maeda, Y. Yanagisawa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **24** (2014), 4602412.
- [20] 马衍伟, 肖立业, 科学通报, **50** (2005), 1.
- [21] 李易, 论文题目[D]. 清华大学, 2016.
- [22] Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, H. Ruixin, T. Takematsu, T. Takao, M. Takahashi, H. Maeda, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20** (2010), 744.
- [23] Y. Yanagisawa, Y. Kominato, H. Nakagome, T. Fukuda, T. Takematsu, T. Takao, M. Takahashi, H. Maeda, *Joint Conference on Transactions of the Cryogenic Engineering Conference (CEC)/International Cryogenic Materials Conference (ICMC) Spokane*, WA, Jun 13-17, 2012 p1373.
- [24] Y. Li, D. Park, W. Lee, Y. Choi, H. Tanaka, J. Bascunan, Y. Iwasa, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **30** (2020), 4702305.
- [25] M. Y. Wang, Z. Y. Li, Y. F. Yan, M. Zhang, J. Sheng, Z. Y. Hong, Z. J. Jin, Y. Iwasa, T. M. Qu, *Phys. Scr.*, **94** (2019), 105803.
- [26] Y. F. Yan, C. J. Xin, M. Z. Guan, H. J. Liu, Y. F. Tan, T. M. Qu, *Supercond. Sci. Technol.*, **33** (2020), 051t02.
- [27] Y. F. Yan, P. Song, C. J. Xin, M. Z. Guan, Y. Li, H. J. Liu, T. M. Qu, *Supercond. Sci. Technol.*, **34** (2021), 085012.
- [28] Y. Iwasa, S. Hahn, *Appl. Phys. Lett.*, **103** (2013), 253507.
- [29] Y. G. Kim, S. Hahn, K. L. Kim, D. G. Yang, H. G. Lee, *Current Applied Physics*, **15** (2015), 1134.
- [30] Y. Li, L. Wang, Q. L. Wang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28** (2018), 4602105.
- [31] M. Y. Wang, Z. Y. Li, Y. F. Yan, M. Zhang, J. Sheng, Z. Y. Hong, Z. J. Jin, Y. Iwasa, T. M. Qu, *Phys. Scr.*, **94** (2019), 105803.
- [32] F. Liang, S. Venuturumilli, H. Zhang, M. Zhang, J. Kvitkovic, S. Pamidi, Y. Wang, W. Yuan, *J. Appl. Phys.*, **122** (2017), 043903.