

强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体传热实验与模拟分析

葛正福^{1,2}, 李超¹, 刘伟¹, 孙利星², 陈传¹

(1. 西安聚能超导磁体科技有限公司, 陕西 西安 710018;

2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体在医学成像、磁悬浮列车等领域具有巨大的应用潜力。研究出于减小强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体实验成本与耗时。对10 T的传导冷却型Nb₃Sn-NbTi超导磁体进行有限元建模和实体传热实验。实验结果显示, NS线圈、NT线圈、导冷板、二级冷头四部件在励磁阶段的温度仿真数据与实验数据的变化趋势一致, 对应的最大相对误差分别为5.3%、4.6%、3.4%、3.1%, 均处于可控范围内。实验结果证明, 所设计的强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体仿真模拟传热分析模型具有一定的实用性。

关键词: 强磁场; 超导磁体; 传热实验; 有限元模型; 温度; 仿真

中图分类号: TP391.9; TL631 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0094-05

Heat Transfer Experiment and Simulation Analysis of Nb₃Sn NbTi Superconducting Magnet with Strong Magnetic Field

GE Zheng-fu^{1,2}, LI Chao¹, LIU Wei¹, SUN Li-xing², CHEN Chuan¹

(1. Xi'an Superconducting Magnet Technology Co., Ltd., Xi'an 710018 China;

2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048 China)

Abstract: Strong magnetic field Nb₃Sn-NbTi superconducting magnets have enormous application potential in fields such as medical imaging and maglev trains. This study aims to reduce the experimental cost and time consumption of Nb₃Sn-NbTi superconducting magnets with strong magnetic fields. Finite element modeling and solid heat transfer experiments are conducted on a 10 T conduction cooled Nb₃Sn-NbTi superconducting magnet. The experimental results show that the temperature simulation data of the NS coil, NT coil, cooling plate, and secondary cooling head during the excitation stage show consistent trends with the experimental data, with corresponding maximum relative errors of 5.3%, 4.6%, 3.4%, and 3.1%, all within a controllable range. The experimental results demonstrate that the simulation and heat transfer analysis model of the strong magnetic field Nb₃Sn-NbTi superconducting magnet designed in this study has certain practicality.

Keywords: strong magnetic field; superconducting magnets; heat transfer experiment; finite element model; temperature; simulation

0 引言

超导磁体能在极低的温度下无电阻地导电, 使它们在产生强磁场时非常有效率。但超导磁体实验成本较高, 实验周期较长, 影响了这一行业的知识进步和传播^[1-2]。本研究的主题即为探索有利于提高超导磁体传热实验效率的方法。大量专家学者为高效开展超导磁体实验进行了各种研究。Sullivan K D等人使用小型加速器磁体来模拟超导磁体加速器在运行中的状态, 实验结果显示, 模拟数据与实验数据之间具有较好的一致性^[3]。杨绪佳等人建立了考虑微/细/宏观关联的非线性力电磁耦合本构模型, 还提出了从原子尺度A15晶体结构到超导体微结构与宏观非均质Nb₃Sn复合超导体的多尺度模拟模型。

仿真计算和实验结果显示, 设计出的模型具有较好的电、磁、热耦合行为描述和识别能力^[4]。对比国内外的研究发现, 虽然前人为减少超导磁体实验成本设计了大量模拟模型, 但单独针对应用前景较好的强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体的传热实验进行的仿真模型研究还很罕见。另外, 当前有限元技术在工程和设计领域取得了较多的应用成果^[5-7]。所以本研究创新性地结合超导磁体理论与有限元建模技术搭建了10 T Nb₃Sn-NbTi超导磁体的传热实验仿真模型。

1 强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体结构与传热分析模型设计

1.1 强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体结构与传热设计

为确保强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体的正常运行,

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52371142)

收稿日期: 2024-02-20

有必要搭建低温恒温器条件下的三维有限元计算模型。但在搭建这一模型之前,首先需要设计出强磁场 Nb₃Sn-NbTi 超导磁体的系统结构^[8-10]。本研究选择应用前景较广的 10 T 传导冷却超导磁体作为研究对象,而且这种超导磁体不需要充填或更换低温介质,人员操作与系统维护成本更低^[11]。按照低温恒温器和超导线圈目标磁场强度,设定结构体的参数如下。强磁场 Nb₃Sn-NbTi 超导磁体结构中的无低温介质、一级与二级制冷功率分别不能低于 35 W@ 50 K、1.6 W@ 4.3 K,外杜瓦室温孔径 120 mm,真空度小于 1×10^{-3} Pa。此次设计的 10 T 的 Nb₃Sn-NbTi 超导磁体组主要组成部件有冷屏、导冷结构、线圈组件、(gifford-mcmahon, GM) 制冷机、外杜瓦等。具体来说,线圈组件位于冷屏的内部,GM 制冷机输出的冷量被导冷板传导至线圈,以起到确保线圈温度低于临界超导温度。线圈通过 300 A 的两条引线连接电源,且电流的引线为二元形式,无氧铜料电线连接着外杜瓦室温端、一级冷头,高温超导电流同时连接着一级与二级冷头。而且磁体系统的质量、室温孔直径、长宽高、中心磁场强度、冷却方式分别为 512 kg、Φ 120 mm、710 mm × 750 mm × 1 485 mm、10 T、制冷机传导冷却。

线圈组件外部缠绕 NbTi 线圈、内部嵌套 Nb₃Sn 线圈,还需在温孔位置、内外线圈间隔位置加装支撑筒^[12]。从 Stefan-Boltzmann 定律可知,过大温区会带来外杜瓦磁体部件的过大辐射热。所以需要在磁体组件与外杜瓦结构之间加装冷屏装置,以降低辐射热,冷屏材料选用低发射率的材质,比如铜、铝、银等。冷屏结构中各零件采用螺栓连接,上凸起材料选用具有优良导热性的紫铜,筒体、端板使用低温条件下的导热率也相对高的 Al 1100,结合行业经验,上凸起端板厚度、上凸部件的高度与厚度、筒体壁厚分别设置为 5 mm、380 mm、2 mm、3 mm。再设计支撑结构,考虑到该组件需要对磁体起到支撑作用且兼顾热传导效果,因此制造材料得选择导热性较差的物质,从而确保该部件从低温域跨越到高温域时传入的热量尽可能小。具体来看,支撑部件应该由 6 根轴向拉杆、8 根径向拉杆组成,且各拉杆按两侧对称方式分布,拉杆选用导热率较低且质量较轻的 G10 材料较为合适。无磁不锈钢被选为外杜瓦的制造材料,并按照光亮方式整理焊接制成,其密封漏率需要低于 3×10^{-8} mbar·L/s。杜瓦圆筒的筒身厚度为 4 mm、左端板与右端板的厚度均为 15 mm、它在室温下的孔径是 120 mm,它的上凸起部件的高度、壁厚、密封板厚度分别设置为 480 mm、10 mm、10 mm。

完成强磁场 Nb₃Sn-NbTi 超导磁体硬件结构设计后,再进行磁体结构的传热计算设计。如果结构中的真空度满足设计标准,系统中的剩余气体对流换热、导热这两种现象对研究结果的影响消耗,可以被忽略,而且组件

表面热负载也可以看作是辐射热形式的,也即可以按照 Stefan-Boltzmann 定理来分析各表面间的辐射热量。传热方面,磁体系统传导热主要是电流引线及支撑杆漏热带来的,可按照电学的负载发热公式计算。当高温超导(high temperature superconducting, HTS)电流引线在一般工作情况下,产生的引线漏热可以被当作全部来自两端的温度差,也即整个工作过程没有焦耳热存在,因此可以按照傅里叶公式计算对应的漏热。磁体系统的焦耳热计算过程较为简单,这里不作展开。传热计算方面,根据上述设计参数,可以计算出 10 T 的传导冷却 Nb₃Sn-NbTi 超导磁体在室温端至一级冷头、一级冷头至二级冷头位置中的整体热负载,见表 1。观察表 1 数据可知,超导磁体系统在加电到设计电流 145 A 条件时,一级静态总漏热为 26.74 W,二级静态总漏热为 0.329 5 W,可见磁体在常规运转状态下的双级制冷机能够满足制冷要求。

表 1 超导磁体在两种位置中的整体热负载

位置	热负载类型	结构	设计电流励磁热负载/W	静态热负载/W
室温端至一级冷头	辐射	冷屏	2.91	2.91
	传导	电流引线	9.76	9.76
		支撑结构	1.69	1.69
		信号线	0.40	0.40
	焦耳	电流引线	11.98	/
总计	/	26.74	14.76	
一级冷头至二级冷头	传导	电流引线	0.128	0.128
		支撑结构	0.070	0.070
		信号线	0.01	0.01
	交流损耗	/	0.116	/
	辐射	冷屏	0.005 5	0.005 5
总计	/	0.329 5	0.213 5	

1.2 强磁场 Nb₃Sn-NbTi 超导磁体热分析仿真模型搭建

现在设计强磁场 Nb₃Sn-NbTi 超导磁体在低温恒温器条件下的三维有限元计算模型。温度场的模拟采用 Workbench 稳态热分析模块完成,设置的材料热导率数据见表 2。

表 2 材料热导率数据

编号	材料名称	材料简称	4 K 温度下的热导率	40 K 温度下的热导率
*1	铝材	Al 1100	8.9	59.7
*2	磁本体	/	0.13	0.85
*3	无氧铜	OFC	615	1 466
*4	不锈钢 316L	S31603	0.26	4.28
*5	G10 拉杆	/	0.089	5.98

温度场模拟计算前,还需对数据进行预处理,以提高温度场模拟精度,具体如下。磁体系统中的制冷机是运转较为独立的模块,仅与一二级冷头、电机底座接触,因

其它内部温度场对整个磁体温度分布的影响可以被忽略。因此在有限元模型中可以将制冷机部件替换为和二级冷头具有相同大小的印记面,从而便于为其添加温度边界条件。磁体系统模型按照体生成网格法搭建,一般情况下采用四面体网络构建模型,但在合适的位置也可以使用楔形、六面体构建模型。得到网格的无关性解后,验证计算发现,模型的网格质量处于0.90~1.02区间,符合建模要求,模型中网格数量为92万。再设置模型的边界条件,令二级冷头接触面降温后,稳定温度为2.5 K,励磁稳流阶段的温度为3 K。拉杆外端温度设为室温,磁体的表面添加上辐射换热,对应45 K环境温度,辐射率设为0.043,磁体加电时的生热率为 2.3 W/m^3 。有限元模型试运行后发现,最低温度存在于磁体系统导冷板和二级冷头的连接位置为3 K,最高温出现在支撑杆件在室温端的部位为294.96 K,且冷板连接自支撑杆的部位温度分布均匀,符合磁体的设计要求。

线圈组件、励磁与引线降温的模拟模型试运行后发现,线圈结构的最大温度、最小温度分别为3.84 K、3.46 K,均满足超导临界温度条件。且当系统加电到设计电流后,双级制冷机能应对系统降温需求。

再设计冷屏温度的模拟模型。考虑到冷屏可以起到减少系统热辐射作用,这对系统表面的辐射提出了更高的要求,因此必须使用光亮板加工处理。同时冷屏的温度还会影响二级冷头对应负载,可见冷屏设计的关键在于让冷屏温度分布尽可能均匀,同时一直低于液氮温度。现在选中Al 1100、无氧铜两种材料进行仿真模型测试,分析其温度分布,用于选出冷屏的最佳制造材料。冷屏有限元模型同样按照体生成方式形成网格,且冷屏的圆筒、温孔需添加Sweep方法,最后建立的冷屏有限元模型共含472.461 3万个网格,网格质量处于0.78~1.04区间。运行后发现,无氧铜材方案下,励磁稳定工况最大温差是2.63 K,静态工况的最大温差1.25 K。Al 1100方案下,静态工况与励磁稳定工况的最大温差分别为3.75 K、10.98 K。虽然无氧铜方案下,冷屏温度分布更均匀,且满足设计要求,但材料价格比Al 1100高数倍,因此综合

考虑选择Al 1100作为冷屏的制造材料,并使用紫铜和无氧铜加工软连接、温孔冷屏部位。

2 强磁场 $\text{Nb}_3\text{Sn-NbTi}$ 超导磁体传热实验

2.1 传热实验设计

为了验证此次设计的10 T $\text{Nb}_3\text{Sn-NbTi}$ 超导磁体仿真模型的实用性,现在设计一项10 T $\text{Nb}_3\text{Sn-NbTi}$ 超导磁体传热实验。实验系统的主要组成部分为低温恒温器、制冷机系统、磁体组件、温度监视器、霍尔测试设备、超导电源。用户通过远程操作方式实时获取实验数据。磁体的冷却方式为传导冷却。压缩机为密闭型氮气压缩机。信息采集系统用于获取整个实验过程中磁体各测点的温度、电压、电流数据。信息采集系统中包含超导电源、温度监视器、霍尔检测仪器。其中霍尔仪器用于检测记录磁体中的最高场强。超导磁体传热实验设备布置示意图见图1。

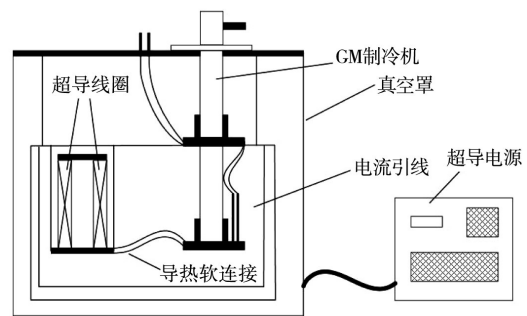


图1 超导磁体传热实验设备布置结果

2.2 传热实验结果分析

实验结束后,统计磁体在降温过程中各组件的温度变化,整个实验过程中电流、磁场随时间变化,见图2。图2(a)中“K1”“K2”“K3”“K4”“K5”“K6”分别代表二级冷头、导冷板、铌三锡(Nb_3Sn , NS)线圈、铌钛(NbTi , NT)线圈、一级冷头、冷屏组件的温度。图2(a)为低温恒温器真空度降低至 $2.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 后启动制冷机与水冷系统降温后得到的各部件温度变化曲线,设定降温时长为55 h,设定的冷屏、线圈降温目标值分别为40 K、10 K。观察图2(a)可知,当降温流程刚开始时,各部件的温度均处于200 K~

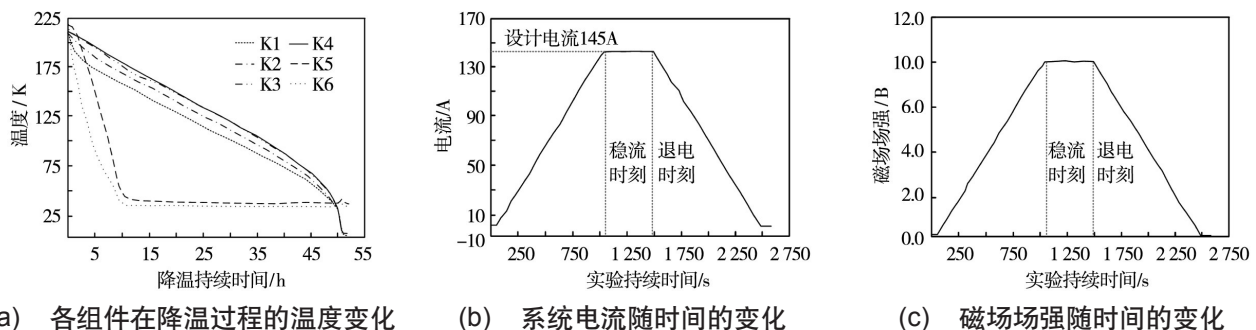


图2 磁体温度、电流、磁场随时间的变化统计

225 K范围内。对于二级冷头、导冷板、NS线圈与NT线圈,随着降温的进行,温度呈现线性降低的变化趋势,当降温45 h后,它们的降温速度迅速加快,最终降低到2.5 K~4.0 K范围内,远低于设定的10 K目的,达到了降温目标。对于冷屏,降温处理开始后即开始快速降温,当时间达到10 h后,温度稳定在40 K左右,且变化微小,低于50 K,也满足降温要求。观察图2(b)、图2(c)可知,实验开始后,随着系统电流增加,场强也不断增加,当系统电流达到设计电流后,场强也稳定在10.0 T左右,稳流600 s后,电流按照线性规律开始下降。整个实验过程,系统电流、磁体场强均无明显波动,说明设计出的实验系统合理,且符合物理实验要求。

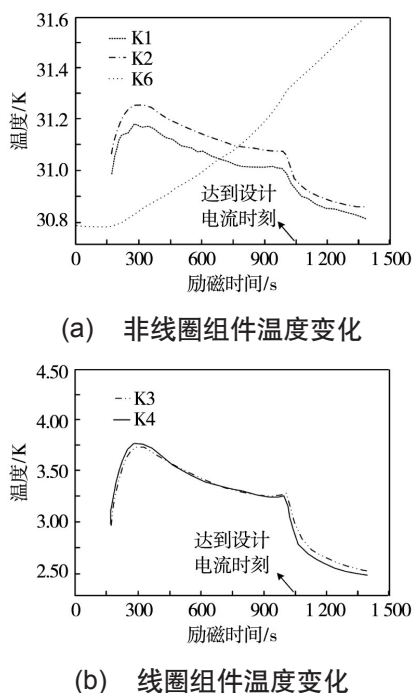


图3 励磁阶段各部件的温度变化统计

再对比参与励磁阶段的各部件温度变化情况,见图3。图3(a)、图3(b)分别代表参与励磁阶段的非线圈组件、线圈组件温度变化曲线。励磁阶段的开始时间即为实验开始的时间。观察图3(a),随着实验进行,电流的增加,二级冷头的温度呈现单调递增变化趋势,导冷板冷屏温度呈现波动下降趋势,并最终下降至30.8 K左右。图3(b)可知NS线圈和NT线圈随着励磁时间的增长,也出现波动下降的变化趋势,并最终下降到2.50 K左右。

最后对比NS线圈、NT线圈、导冷板、二级冷头四部件在励磁阶段的温度实验值与有限元模型计算值,见图4。图4(a)、图4(b)、图4(c)、图4(d)分别为NS线圈、NT线圈、二级冷头、导冷板的温度变化曲线,横轴均为励磁进度,纵轴均为对应部件的温度,实线为实验系统的数据、虚线为本项目建立的有限元模型计算数据。观察图4可知,NS线圈、NT线圈、导冷板、二级冷头四部件在励磁阶

段的温度仿真数据与实验数据的变化趋势一致,对应的最大相对误差分别为5.3%、4.6%、3.4%、3.1%,均处于可控范围内。图4数据证明本项目建立的强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体有限元仿真模型实用性良好。可以被应用到一些对精度要求不是非常高的强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体传热实验模拟之中。

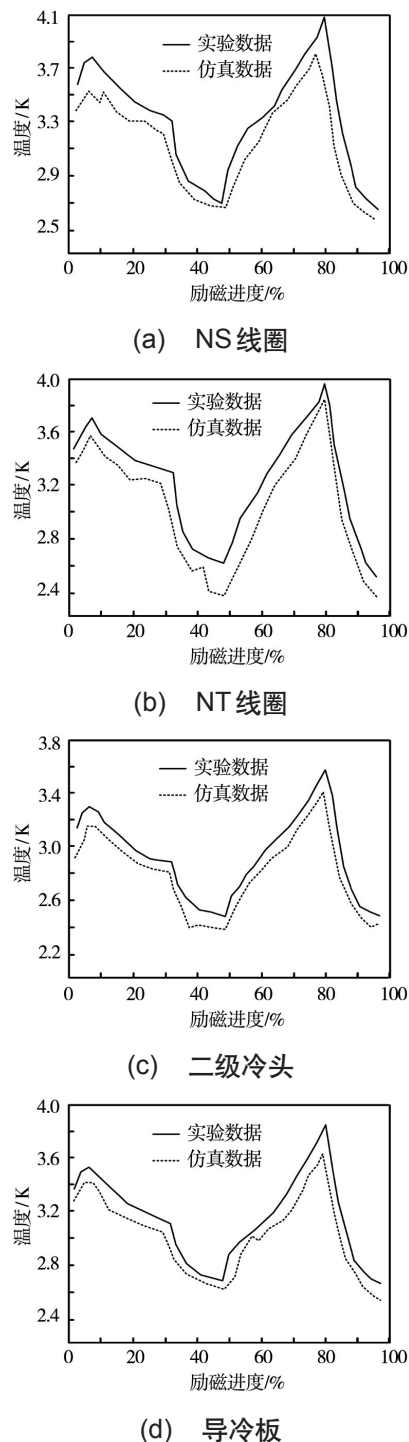


图4 励磁阶段多部件实验与仿真模型温度数据对比

3 结束语

本研究以10 T的传导冷却型Nb₃Sn-NbTi超导磁体

为对象,设计了对应的有限元模型,并开展传热实验。实验结果如下:对于二级冷头、导冷板、NS线圈与NT线圈的温度最终降低到2.5 K~4.0 K范围内,远低于设定的10 K目的,达到了降温目标。对于冷屏,降温处理10 h后,温度稳定在40 K左右,且变化微小,低于50 K,也满足降温要求。整个实验过程,系统电流、磁场强度均无明显波动,说明设计出的实验系统合理。随着实验进行,电流的增加,二级冷头的温度最终分别下降至30.8 K左右、2.50 K左右。NS线圈、NT线圈、导冷板、二级冷头四部件在励磁阶段的温度仿真数据与实验数据的变化趋势一致,对应的最大相对误差分别为5.3%、4.6%、3.4%、3.1%,均处于可控范围内。实验与仿真模型分析结果证明本项目建立的强磁场Nb₃Sn-NbTi超导磁体有限元仿真模型实用性良好。能在一些非高精度场景中替代实物进行传热分析。但本研究的缺点在于没能探索更多不同场强的超导磁体仿真模型,这将是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] 宁新福,程明,朱新凯,等.双定子场调制超导电机超导磁体电磁特性的分析与计算[J].中国电机工程学报,2022,42(16):6064-6073.
- [2] 刘士菟,王磊,王路忠,等.电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J].西南交通大学学报,2023,58(4):734-753.
- [3] Sullivan K D, Sen A, Sullivan M C. Investigating the magnetic field outside small accelerator magnet analogs via experiment, simulation, and theory[J]. American Journal of Physics, 2023, 91(6): 432-439.

(上接第93页)

给用户,实现能源数据的安全快速检索。在实验分析中,通过与其他方法的对比,充分验证了所提方法的实用性,在现实应用中具备更优的检索效果。接下来研究中,将采用自然语言处理技术进一步分析用户检索意图,增强检索性能,给用户提供更优质的网络检索服务,帮助能源领域的相关企业完成决策制定。

参考文献:

- [1] 罗涛,孙阔,张章,等.多能源数据驱动的电力信息物理系统综合态势感知模型[J].可再生能源,2021,39(3):395-400.
- [2] 王建训.基于PCI总线的电力能源数据多通道同步采集方法[J].电子设计工程,2022,30(14):64-67,72.
- [3] 吴飞,罗晓开,韩璐,等.基于双对抗自编码器的跨模态检索[J].模式识别与人工智能,2020,33(12):1115-1121.
- [4] 冯姣,陆昶谕.基于残差注意力网络的跨媒体检索方法[J].计算机科学,2021,48(S1):122-126.
- [5] 崔晓飞,徐策,林国成.基于多维数据环境的电力数据中心安全生产分析系统[J].自动化技术与应用,2021,40(7):42-44,52.
- [6] 韩亚茹,闫连山,姚涛.基于元学习的深度哈希检索算法[J].计算机应用,2022,42(7):2015-2021.

[4] 杨绪佳,何宇新,张鑫,等.Nb₃Sn高场复合超导临界性能力学变形效应的多尺度模拟[J].力学学报,2022,54(3):719-731.

[5] 江志磊,孔德山,佟宇宁,等.基于有限元分析的高压电缆环流异常检测抑制系统设计[J].自动化技术与应用,2023,42(10):50-53,156.

[6] 黄兴,刘文波.基于有限元的方向舵分配机构延寿技术研究[J].计算机测量与控制,2023,31(7):207-213.

[7] 解淑英.基于有限元法的汽车发动机连杆应力与疲劳分析模型及应用[J].微型电脑应用,2022,38(10):32-34,49.

[8] 王朋元,王旭东,吴巍,等.HL-LHC双孔径校正超导磁体低温测试实验研究[J].低温与超导,2022,50(3):24-30.

[9] 侯治龙,朱自安,赵玲,等.大孔径真空压力浸蜡超导磁体稳定化及保护[J].低温与超导,2021,49(2):18-98.

[10] 陈顺中,王秋良,孙万硕,等.3T动物磁共振成像传导冷却超导磁体研究[J].电工技术学报,2023,38(4):879-888.

[11] 马士卓,王慧,杨文将,等.基于比较电压法的超导磁体临界电流测试[J].电工电能新技术,2022,41(4):7.

[12] 张子健,张启勇,成安义.CRAFT超导磁体平台冷却用超临界氮循环泵性能分析[J].低温与超导,2023,51(3):14-19.

作者简介:葛正福(1982-),男,在读博士,研究方向:超导电工材料应用。

[7] 刘明轩,张黎明,王昊,等.运用ULBP的高分辨率遥感影像感知哈希完整性认证算法[J].测绘通报,2021(12):22-27.

[8] 刘婉婷,梁晓萍,张瀚匀.基于感知哈希的图像检索系统[J].现代计算机,2021,27(24):136-139,143.

[9] 姜倩玉,王凤英,贾立鹏.基于感知哈希算法和特征融合的恶意代码检测方法[J].计算机应用,2021,41(3):780-785.

[10] 曹增新,蒋程,朱龙辉.基于分块离散余弦变换感知哈希算法与ResNet模型的供电安全图像管理[J].西安工程大学学报,2021,35(6):62-68,75.

[11] 刘玉鑫,程明,李泽华,等.高压柜操作机器人协调操作感知控制方法[J].自动化技术与应用,2023,42(11):49-52.

[12] 吴悦,雒江涛,刘锐,等.基于感知哈希和切块的视频相似度检测方法[J].计算机应用,2021,41(7):2070-2075.

[13] 崔凯.煤矿主煤流自动传输系统智能视觉监控设备的设计与实现[J].自动化技术与应用,2023,42(8):137-140.

作者简介:萧展辉(1975-),男,硕士,高级工程师,研究方向:数据资产管理。