

# 激光与光电子学进展

## 光纤传感技术在超导磁体状态监测中的应用研究

杨颂<sup>1\*</sup>, 刘延超<sup>2</sup>, 雷咸道<sup>2</sup>, 方心宇<sup>1</sup>, 李文龙<sup>1</sup>, 方进<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>北京交通大学电气工程学院, 北京 100044;

<sup>2</sup>中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038

**摘要** 介绍了低温超导磁体和高温超导磁体在组装、降温及运行过程中对温度、应变等物理参量监测的需求;介绍了基于光纤光栅、布里渊散射、拉曼散射及瑞利散射的光纤传感技术的工作原理;总结了将上述光纤传感技术应用于低温超导磁体及高温超导磁体的温度及应变测量中的研究进展;归纳了上述研究中存在的问题,并对未来研究进行了展望。该综述有助于超导磁体领域,尤其是超导磁体稳定性研究领域的人员更直观、清晰、全面地认识光纤传感技术在提高超导磁体稳定性中的应用进展。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 超导磁体; 温度测量; 应变测量

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1106008

### Application of Optical Fiber Sensing Technology in State Monitoring of Superconducting Magnet

Yang Song<sup>1\*</sup>, Liu Yanchao<sup>2</sup>, Lei Xiandao<sup>2</sup>, Fang Xinyu<sup>1</sup>, Li Wenlong<sup>1</sup>, Fang Jin<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China;*

<sup>2</sup>*Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing, 100038, China*

**Abstract** The monitoring requirements of temperature, strain, and other physical parameters during the assembling, cooling, and operation of low-temperature and high-temperature superconducting magnets are introduced. The working principles of fiber-optic sensing technologies based on the fiber Bragg grating, Brillouin scattering, Raman scattering, and Rayleigh scattering are also introduced. The research progress of the above optical fiber sensing technologies in temperature and strain measurement of low-temperature and high-temperature superconducting magnets is reviewed. The existing problems in the above researches are summarized, and the future research is prospected. This review is helpful for researchers in the field of superconducting magnet, especially in the field of superconducting magnet stability, to understand the application progress of optical fiber sensing technology in superconducting magnet stability improvement intuitively, clearly, and comprehensively.

**Key words** fiber optics; fiber sensing; superconducting magnet; temperature measurement; strain measurement

**OCIS codes** 060.2370; 120.1880; 120.6780

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2020-11-24; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0201200)

\*E-mail: yangsong6636@163.com; \*\*E-mail: fangseer@sina.com

## 1 引言

超导现象自 1911 年被荷兰物理学家卡麦林·昂尼斯发现起,便引起了全世界各国科研工作者的广泛关注,至今已有近 110 年的研究及发展历史<sup>[1-3]</sup>。超导体不仅在临界温度下具有零电阻特性,而且在一定的条件下具有常规导体完全不具备的迈斯纳(Meissner)效应和约瑟夫森(Josephson)效应等电磁特性。超导体的这些特性使其在电气与电子工程领域具有很大的应用价值,诸如超导电缆、超导变压器、超导限流器、超导储能、超导电机、超导磁悬浮、超导核磁共振成像(MRI)装置、核聚变磁体等。作为当代科学领域中最重要研究课题之一,超导技术被认为是未来具有战略意义的高新技术,有着巨大的商业价值和广阔的应用前景。

超导磁体在运行时,往往处在极低温、大电流、强磁场的复杂多场环境下,其稳定性会受到更大的挑战,在某些情况下会出现失超的现象。失超现象是指当超导带材在局部受到机械、电磁、热等的干扰后,带材发生从超导态到正常态的不可逆转化<sup>[4]</sup>。带材一旦失超将会烧毁磁体,带来灾难性的后果,因此要想保证超导磁体稳定运行,必须对超导磁体的运行状态进行监测。传统的超导磁体运行监测方法大多都是基于电信号的,常用的方法有电压、温度和应变监测等,即在带材上布置一组测量点,得到各段电压、温度和应变等参量随时间的变化规律。但这些检测方法都有一定的局限性,复杂的电磁环境会对监测设备造成电磁干扰,监测设备也会对磁体系统产生一定的热扰动,尤其是利用监测设备对复杂的大型磁体结构的运行进行监测时,存在测量精度低、信号衰减大、布线麻烦等诸多问题<sup>[5]</sup>。

因此,为实现超导磁体安全可靠的运行,有必要研制出新的、稳定的超导磁体运行状态监测方法。光纤传感技术因具有系统体积小、质量轻、抗电磁干扰、对系统的热入侵小、传输速度快、测量精度高、可塑性好等一系列的优点,近年来被看作是可以替代传统电信号监测技术应用于超导磁体运行状态监测的一种技术手段。本文综述了光纤传感技术在高温超导磁体及低温超导磁体运行状态监测中的应用进展,指出了存在的问题并对未来的研究进行了展望。

## 2 超导磁体运行状态监测需求

### 2.1 低温超导磁体运行状态监测需求

超导磁体的分类有许多不同的标准,根据超导体转变为超导态的临界温度进行分类,超导磁体可以分为高温超导体(HTS)和低温超导体(LTS)。在强电应用领域,根据国际电工委员会(IEC)的定义,将临界温度在 25 K 以上的超导体定义为高温超导体,25 K 以下的超导体定义为低温超导体。

目前最为常见的 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 两种低温超导体已经在一些领域取得了较为广泛的应用,例如 NbTi 超导体可以应用于超导储能、超导电机,还能在医学、高能物理等领域发挥作用。而 Nb<sub>3</sub>Sn 超导体的超导态转变温度为 18 K 左右,在 4.2 K 时临界磁场强度可达 25 T,因此可以用于制作小型大磁场磁体<sup>[6]</sup>。对于低温超导体而言,其转变温度极低、工作温区小、导热快、最小失超能很小,受到很小的机械/温度扰动会迅速从超导态转变为正常态,但是失超传播速度很快。与高温超导体相比,低温超导体的失超易于监测。目前用于低温超导体的失超检测手段已经成熟,常用的手段主要包括电压检测法<sup>[7]</sup>、温升检测法<sup>[8]</sup>、压力检测法<sup>[8]</sup>、流速检测法<sup>[9]</sup>及超声波检测法<sup>[10]</sup>等。

但低温超导磁体运行于强磁场的的环境时,会受到洛伦兹力的影响,过大的洛伦兹力会破坏超导磁体的结构,使磁体失去稳定性。已有研究结果表明<sup>[11]</sup>:超导体的性能对力学响应(如应变、应力等)非常敏感,当 Nb<sub>3</sub>Sn 材料发生 0.4% 的应变时,临界电流将会降低 30%<sup>[12]</sup>。此外,低温超导磁体在组装过程中也难免受到应力影响,例如在降温过程中,由温度梯度产生的强大热应力有可能破坏磁体<sup>[13]</sup>。因此,为了保障磁体稳定运行,有必要监测磁体冷却和运行过程中的受力情况。在对低温超导磁体的应力监测方面,目前研究人员较多采用低温电阻应变片加补偿电路的方法,例如中国科学院近代物理研究所研发了带有温孔的 5 T 超导磁体,他们采用了低温电阻应变片来测量磁体在低温强磁场环境下的应变,并采用补偿方法消除温度和磁场噪声对应变测量的影响<sup>[14]</sup>。该设计虽然采用低温电阻应变片可以测量磁体的应变情况,但是采用补偿法消除噪声信号的能力有限、测量精度不高,而光纤光栅传感技术在低温超导体运行的液氦温区内对温度不敏感的特性,有利于低温超导磁体应变的精

确测量<sup>[15]</sup>。

## 2.2 高温超导磁体运行状态监测需求

1986 年 Bednorz 等<sup>[16]</sup>发现了具有 35 K 临界温度的 LaBaCuO 超导材料,这一发现拉开了高温超导体研究的序幕。通常高温超导体的临界温度都在液氮温度(77 K)以上,与低温超导体相比,高温超导体更加稳定,这是因为高温超导体比热容更大、临界温度更高,因而诱发高温超导体失超的最小失超能(MQE)更大。但是,在失超传播速度方面,高温超导体的失超传播速度比较慢,比低温超导体的失超传播速度低 2~3 个数量级,如此低的失超传播速度易造成热量聚集在失超区域,使得局部温度升高,从而烧坏磁体。高温超导带材在长度上的临界电流分布不均匀,因而高温超导体的失超具有随机性。以上高温超导体的失超特点导致其失超不易检测,因此,高温超导磁体的失超检测一直以来是高温超导磁体应用研究中的一个难点和热点。与低温超导磁体类似,传统的方法也是采用温度检测法和电压检测法对高温超导磁体进行失超检测。高温超导体失超时通常伴随着温升信号的出现,温度检测法即利用温度传感器检测高温超导体的温升信号,而电压检测法则基于失超时导体出现阻性信号的特点。高温超导体正常运行时处于超导态,没有出现可以检测的电压信号,但是当其受到外界扰动后,超导体两端出现可以检测的电压信号,通过监测导体两端电压即可监测导体失超的发生。对于监测单根导体运行情况而言,电压检测法快速、直接。但对于大型超导磁体而言,电压检测法极易受到复杂磁场的影响。此外,对于高温超导体而言,其运行温度升高到分流温度之后才出现可测量的电压信号,因此,理论上温度信号先于电压信号发生。综上,温度检测法更适用于高温超导磁体的失超检测。但是传统的 PT100 等温度传感器也是基于电信号的传感器,不但易受电磁干扰的影响,还存在布线复杂、传感器不易与导体结合等问题。因此迫切需要新的技术以突破高温超导磁体失超检测技术瓶颈。光纤传感器的测量基于光学传感信号,测量系统具有体积小、质量轻、抗电磁干扰等特点<sup>[17-19]</sup>,能极大地改善目前高温超导体失超检测技术所面临的困境。

此外,常见的高温超导体为易碎的陶瓷材料,在磁体运行时,超导线圈承受的巨大安培力也是破坏其稳定性的一个因素。不仅如此,与低温超导磁

体相类似,在导体降温阶段,随着温度的降低,超导体要承受较大的热应力,且在带材弯曲缠绕制作线圈时,小内径磁体内超导体可能沿着径向处于过度拉伸或压缩的状态。高温超导体的载流能力同样对应变敏感,不可逆的应变发生在导体上之后,导体临界电流将无法恢复到初值<sup>[20]</sup>。采用复合树脂浸渍超导磁体可加强其机械稳定性<sup>[21]</sup>,并实时对高温超导磁体的力学状态进行监测。同低温超导磁体类似,传统的方法也是采用低温电阻应变片监测磁体应变情况。目前用于高温超导磁体状态监测方面的技术是在低温超导磁体相关工作研究基础上发展起来的,将其应用于高温超导磁体状态监测方面还面临许多问题需要解决。在这种背景下,光纤传感技术能在很大程度上克服电测法测量所带来的不足,可以作为一种颇具前景的监测手段被用于高温超导磁体状态监测中<sup>[22]</sup>。

## 3 光纤传感技术的分类

光纤传感技术伴随着光纤通信技术的发展,始于 20 世纪 70 年代中期。与光纤通信技术不同的是,在光纤传感应用中,光纤既作为光波载体进行光的传输,同时也作为传感元件进行温度、应变等物理参量的测量。光纤传感技术按技术形式可分为分立式光纤传感技术和分布式光纤传感技术。常用于超导磁体状态监测的分立式光纤传感器主要是光纤布拉格光栅(FBG)传感器,分布式光纤传感技术是基于拉曼散射、瑞利散射等不同光学效应的传感技术。本节将针对常用的光纤传感技术的工作原理进行总结。

### 3.1 光纤光栅传感技术

1978 年加拿大科学家 Hill 等<sup>[23]</sup>首次发现了掺锗石英光纤的光敏特性,并制成了世界上第一个光纤光栅,这一发现使得光纤光栅走入人们的研究视野,而在 1993 年 Hill 团队又提出了采用相位掩模法这一全新的方法来制作光纤光栅<sup>[24]</sup>,这一方法克服了用全息干涉法制作光纤导致对写入装置要求很高这一弊端,使得光纤光栅的大规模商业生产成为了可能。经过近半个世纪的发展,光纤光栅已成为工程应用中一类不可或缺的传感器。

光纤布拉格光栅是通过将单模光纤纤芯横向暴露在具有周期性图案的强紫外线光下,光纤纤芯因强紫外线的曝光而永久增大,根据曝光图案进行固定的折射率调制得到。光纤光栅传感器的原理



是光纤纤芯对光波具有选择性。纤芯折射率在光纤轴向方向上呈周期性变化,这使得其对于入射光具有选择性,即只有满足特定条件的波长才能被纤

芯反射,其余波长的光都会被透射,测量原理如图 1 所示,其中  $I_i$ 、 $I_r$  和  $I_t$  分别为入射光强、反射光强和传输光强,  $\lambda$  表示波长。

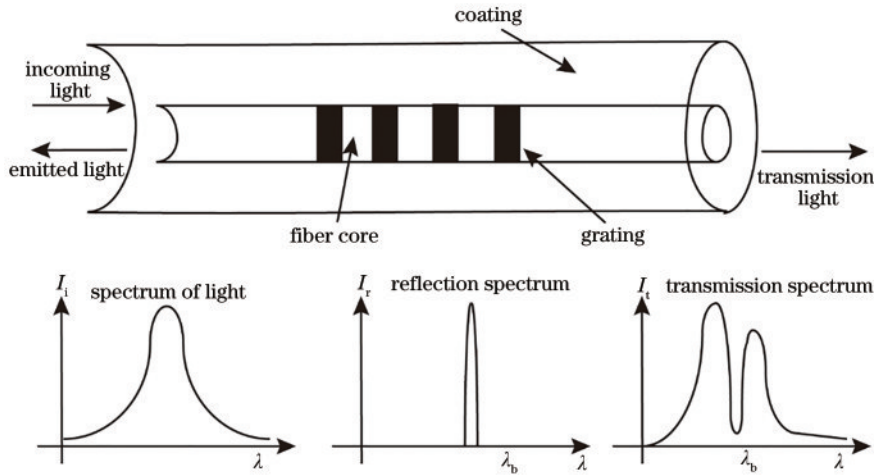


图 1 光纤光栅传感器工作原理

Fig. 1 Working principle of fiber grating sensor

光纤光栅的中心波长  $\lambda_B$  满足

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中:  $\Lambda$  为光栅的折射率调制周期;  $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率。外界环境温度或应变发生变化时,会引起折射率调制周期和有效折射率的变化,进而引起反射光波长发生偏移。通过监测反射光中心波长的变化,可以得知引起波长改变的外部信号的变化,进而得知温度、应变等物理量的变化情况。与普通光纤传感器相比,FBG 传感器也具有明显的优势。传统

光纤传感器主要通过测量光强大小或者观察干涉条纹的变化实现测量,这会导致测量结果易受到光源起伏、光纤弯曲损耗的影响,或者要求传感器中相位测量清晰且有固定参考点。而 FBG 传感器基于波长调制,能有效解决这一问题。另外,FBG 传感器不仅易埋入材料内部进行测量,且可以利用波分复用技术在一根光纤内串接多个布拉格光栅进行准分布式测量<sup>[25]</sup>,可应用在航天航空、电力工业、石油化工等领域中<sup>[26-28]</sup>,如图 2 所示。

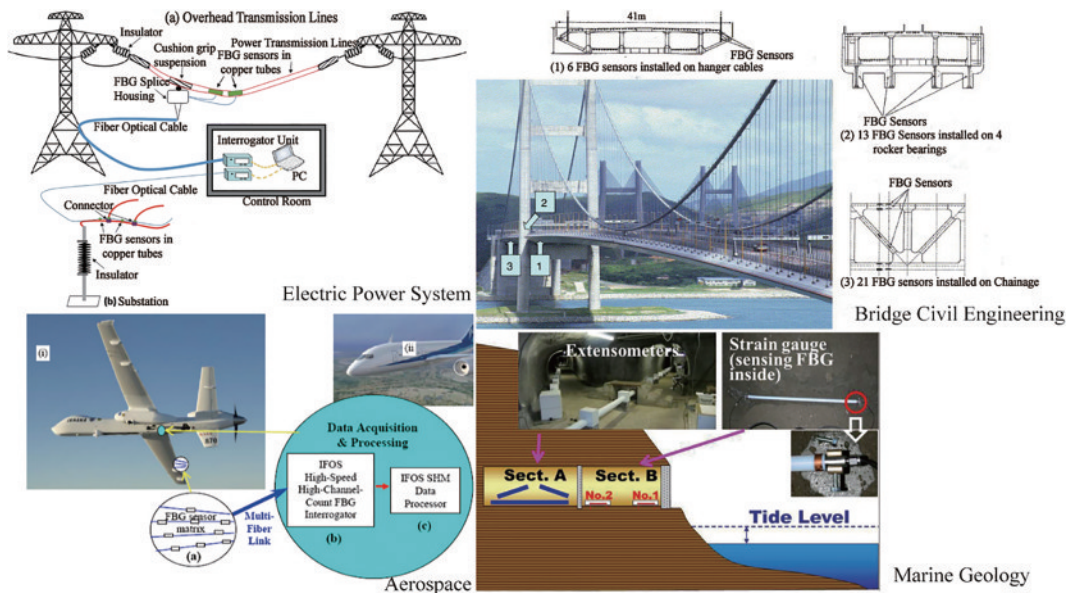


图 2 光纤光栅传感器应用领域<sup>[29-32]</sup>

Fig. 2 Applications of FBG<sup>[29-32]</sup>

### 3.2 拉曼光纤传感技术原理

早在 1980 年 Rogers<sup>[33]</sup>就提出了利用拉曼光纤系统进行测温的实验方案,随后,其测温所需的具体实验装置由 Hartog<sup>[34]</sup>研制成功。而拉曼测温技术应用于商业领域,是从 1987 年由英国 York 公司推出商业化的分布式拉曼光纤测温系统开始。

当光束进入光纤时,由于光纤是由掺杂石英制成的,光纤中传播光与纤芯中熔融的二氧化硅分子相互作用而使光束发生散射现象,具体包括瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射等,如图 3 所示。拉曼散射光的形成是因为光纤分子发生热运动并与光子发生能量交换,其具体形式是斯托克斯散射光和反斯托克斯散射光。由于布里渊散射频移大小与光纤温度和应力大小有关,所以可以应用布里渊散射的原理测量温度和应变信号变化,但应变信号与入射光相比频移很小,不易检测,且温度与应力会出现交叉敏感,导致测量系统比较复杂。基于布里渊散射的传感技术目前还在研发阶段,没有被大量投入工程应用中。而拉曼散射中的反斯托克斯散射光对温度变化敏感,斯托克斯散射光对温度变化不敏感,因此拉曼散射光谱调解原理是将对温度不敏感的斯托克斯光作为参考,测算反斯托克斯光与其比值,从而推算出温度变换。而分布式拉曼温度传感器是基于拉曼散射效应进行温度测量的,研究人员对拉曼散射光纤技术的研发较早,而其分布式的结构特点也使得它在长距离连续分布的温度场测

量中能较好地发挥作用,且能保证较高的空间分辨率和测量精度,可应用在灾害预防、工程设施状态监测等领域,是目前比较常用的温度传感技术<sup>[35-36]</sup>。

### 3.3 瑞利光纤传感技术

1998 年, Froggatt 和 Moore<sup>[37]</sup>发现应变变化会导致瑞利散射光谱发生偏移,提出了瑞利散射光谱所固有的指纹特性,并建立了基于光频域反射 (OFDR) 的瑞利分布式传感器模型。瑞利散射是光纤本身所固有的一种长期稳定的现象,当光纤制造完成之后,其折射率分布就是稳定的。瑞利光谱具有“指纹”特征是指同一片段光纤在不受外界环境影响的情况下其瑞利散射分布是稳定的。但当环境发生变化,如应力场、温度场等作用于光纤上时,光纤折射率会发生变化,导致瑞利散射光谱发生偏移。通过解析光谱偏移量与各个物理量之间的关系,即可由光谱得到温度、应变等物理场的信息,进而利用光纤实现对温度、应变等物理量的测量<sup>[38]</sup>。

基于光频域反射的瑞利光纤技术的测量精度高、抗干扰能力强,可用于温度、应力等物理量的传感测量,与拉曼散射相比,瑞利散射频移量较小,且相关技术比基于布里渊散射的技术更加成熟,设备也更加完善,国内外相关研究多将其应用于大气温度遥感探测、海水水下温度测量、火焰温度测量等相关应用中。

## 4 近年来光纤传感技术在超导磁体状态监测中的研究进展

光纤传感技术是通过模块处理得到光纤处光波信息的温度、应变等参数的传感技术,近些年来,已经有将光纤传感技术应用于电力测量领域的实例,如应用于电力系统光缆监测、设备温度监测等。随着应用超导技术的发展,许多学者已经开始逐渐将光纤传感技术应用于低温测量领域。

### 4.1 基于 FBG 传感技术的超导磁体温度和应变监测

FBG 传感器在常温测温领域的应用已日趋成熟,众多国内外学者对 FBG 在低温下的温敏特性也进行了大量的研究,在这一背景下,国内外相关学者开始将 FBG 传感器应用于高温超导磁体温度与应变监测方面。前期工作主要是将 FBG 传感器用于超导带材失超检测及其在低温下应力应变测量的可行性研究中。2009 年美国学者 Turenne 等<sup>[39]</sup>将 FBG 传感器固定于 YBCO 带材上,通过热脉冲触发失超进行失超检测实验,通过观察光纤波长偏移量

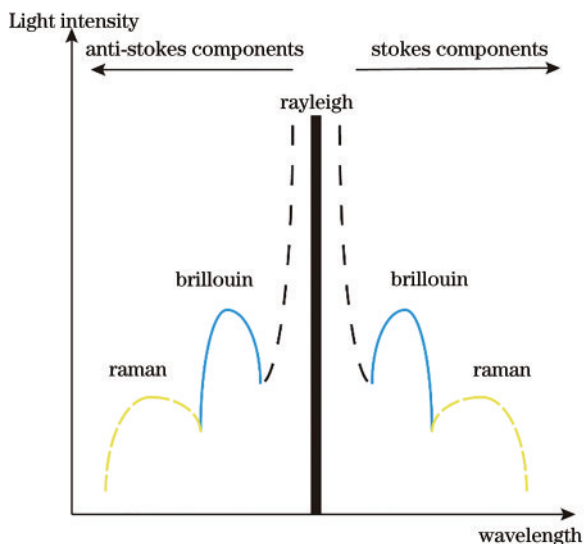


图 3 光纤中瑞利、布里渊、拉曼散射光

Fig. 3 Rayleigh, Brillouin, and Raman scattering light in optical fiber



监测超导带材运行过程中失超的发生,实验结果证明了将FBG用于超导带材失超检测的可行性。2017年以来,来自北京交通大学的Liu等<sup>[40-42]</sup>对低温下不同涂覆材料的FBG的温敏特性及FBG应用于高温超导带材失超检测进行了大量的研究,研究结果表明,低温下使用裸光纤进行测温时较稳定且可重复使用性很好,也最节约成本,并且使用裸光纤光栅传感器测量高温超导带材失超是可行的。在将FBG应用于超导体应变和应力测量方面,21世纪初英国克兰菲尔德大学的James等<sup>[43]</sup>就曾在2.2~280 K的温度范围内测量FBG的温度与应变响应,FBG的温度灵敏度随着温度的降低而显著降低,而FBG测量应变响应与温度变化无关。2004年,中国科学院电工研究所的冯遵安<sup>[44]</sup>使用悬梁臂的原理验证了FBG测量应变在低温环境下的可行性,并测得FBG传感器的应变与中心波长偏移量之间的关系,且FBG传感器在液氮温度内也能保持良好的线性特性。之后,对将FBG传感器应用于超导磁体应力应变监测也进行了相关研究。欧

洲核子研究组织的Chiuchiolo等<sup>[45-48]</sup>用FBG传感器测量小型线圈在降温过程及跑道型线圈在组装过程中所受的应变,将FBG测量结果与电阻应变片测量结果进行对比,实验结果表明FBG应变测量结果与电阻应变片测量结果具有一致性,因FBG传感器体积小、重量轻、布线容易、易嵌入监测结构内部,因此更适合应用在超导磁体状态监测工作中,而电阻应变片体积大、布线复杂,会导致低温装置热泄漏等问题。此外,华北电力大学的王银顺团队于2013年提出了一种用FBG测量高温超导单根带材交流损耗的方法(图4),通过标定FBG传感器波长改变量与交流损耗之间的关系,即可以达到对交流损耗进行测量的目的<sup>[49-51]</sup>。进一步地,北京交通大学的Liu等<sup>[52]</sup>也针对FBG应用于交流损耗测量进行了研究,实验用裸光栅和镀银光栅对4根带材堆叠的高温超导体在自场下的交流损耗进行测量,将实验结果与用Norris计算模型计算的结果进行了对比,验证了FBG用于测量高温超导堆叠导体交流损耗的可行性。

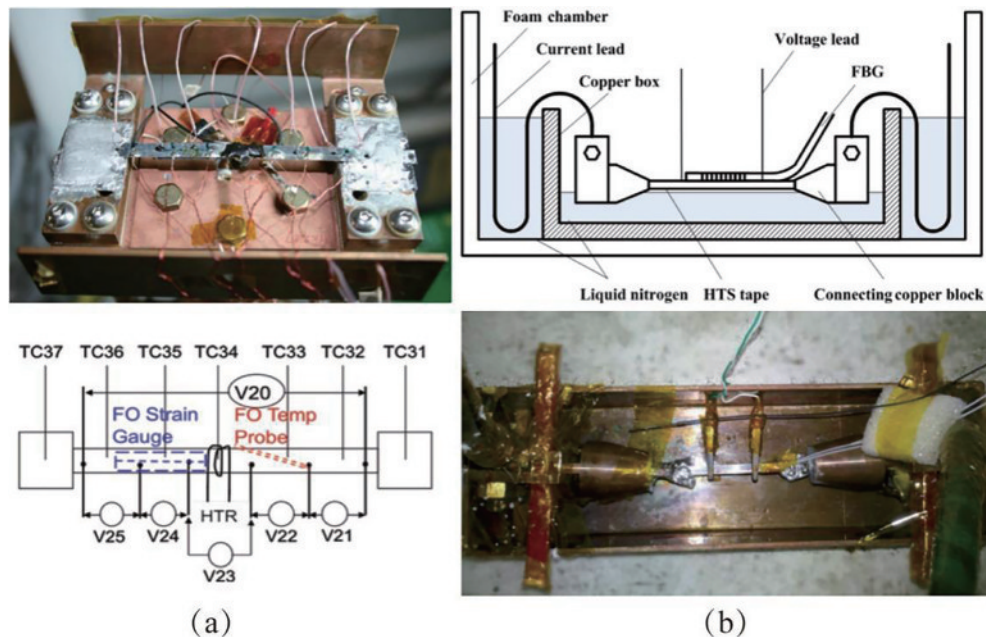


图4 基于FBG的高温超导体的应用。(a)应用FBG传感器测量超导带材失超<sup>[39]</sup>; (b)应用FBG传感器测量高温超导带材交流(AC)损耗<sup>[49-51]</sup>

Fig. 4 Applications of FBG-based high-temperature superconductor. (a) Measurement of superconducting tape quench based on FBG<sup>[39]</sup>; (b) measurement of AC loss of high-temperature superconducting tape by using FBG sensor<sup>[49-51]</sup>

虽然国内外学者们已经初步验证了FBG传感器在超导磁体状态监测中的可行性,但是,在其实现高温超导磁体状态检测的工程化应用之前还有很多问题需要解决。首先,FBG是点对点式测量

传感器,在对高温超导磁体温度进行检测时,即使可以利用波分复用(WDM)技术实现一根光纤上多个传感器的串联,各个传感器之间的物理间隔还是会导致磁体测温盲区的存在;其次,将FBG固定于

超导带材表面时,粘贴方式不妥会引起啁啾现象或空隙的存在会引起热传递下降的情况,这会严重影响实验结果的准确性;此外,虽然可以利用FBG传感器在液氮温区内只对应变敏感的特性进行低温超导体应变测量,但是由于FBG传感器在液氮温区内对温度和应变都敏感,在利用FBG传感器进行高温超导体的运行状态监测时,信号源影响仍然是测量中特别需要关注的问题。在利用FBG传感器对超导磁体进行温度监测时,文献[47]采用铝毛细管包裹FBG传感器以测量磁体温度变化,这避免了传感器受到电磁应变的影响,但采用铝毛细管包裹传感器无疑会增大传感器体积,并加大了传感器与磁体相互缠绕的难度。将FBG传感器应用于大型超导磁体状态监测方面的工作还处于起步阶段,实际操作过程中存在许多问题,如光纤和磁体的结合方式、如何保证传感器只受单一信号影响、如何消除光谱啁啾效应等,这些都是未来研究过程中亟待探索和解决的。

#### 4.2 基于拉曼分布式光纤传感技术的超导磁体失超检测技术

基于拉曼散射的分布式光纤测温技术虽然在电力系统常温测温领域有一些应用,但国内外将其应用于低温测温领域的研究还处于初步阶段。2015年,华北电力大学高兴军<sup>[53]</sup>将后向拉曼散射分布式低温测量系统应用于低温测量领域,在77~296 K的温度区间内测试了分布式光纤测温系统的特性,实验结果表明在温度变化比较缓慢的范围内,分布式光纤测温系统能比较精确地反映温度变化情况,所测实验数据与PT100铂电阻测温数据基本一致,而在250~100 K内温度变化比较迅速的范围内,分布式光纤测温系统相对于PT100铂电阻测温而言有所延迟,同一时间点光纤测温系统所测温度会高于pt100铂电阻所测温度,其差值保持在5 K左右,但温度延迟可以通过后期软件来弥补,即后向拉曼散射分布式光纤测温系统可以比较好地应用于低温环境下的测量。自2018年以来,上海交通大学Jiang等<sup>[54-55]</sup>将拉曼散射技术应用于无绝缘的高温超导线圈的失超检测中(图5),且针对分布式光纤测温系统在低温下反应有所延迟的情况进行了系统优化,优化后的实验系统由时间分辨率为15 ms的新型测量装置及直径为150  $\mu\text{m}$ 的表面涂覆有聚酰亚胺涂层的光纤组成,这极大地提高了测量的空间和时间分辨率。实验证实了由过电流引起

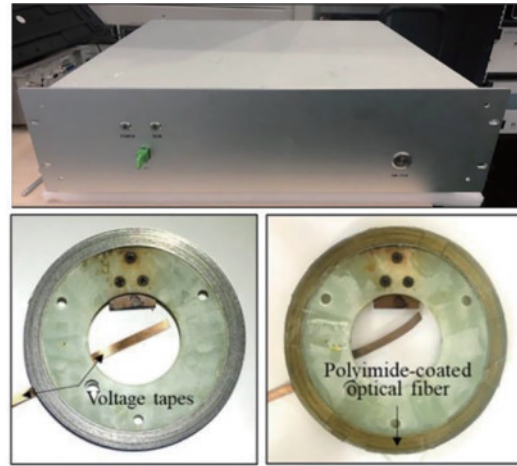


图5 用改进后的拉曼散射光纤技术测量高温超导线圈失超<sup>[54]</sup>

Fig. 5 Improved Raman scattering fiber technology for measuring quench of high temperature superconducting coils<sup>[54]</sup>

的高温超导线圈失超,拉曼散射技术可以对其温度变化进行分布式测量,这充分说明可以使用基于拉曼散射的分布式光纤测温系统进行高温超导线圈失超检测。此外,Lü等<sup>[56]</sup>还基于其所在团队发明的内封测量光纤的超导带材的专利<sup>[57]</sup>,对内封了测量光纤的超导带材绕制成的线圈进行了测试,以测试光纤经封装后用于测量超导线圈温度的可行性。实验在室温和液氮温度下分别进行了测试,并对线圈在通流情况下的温度分布进行了分布式测量,实验结果证明了将光纤内嵌带材制成线圈测量温度分布是可行的。华中科技大学的周考等<sup>[58]</sup>在77~287 K的温度区间内测试了4种不同封装材料对基于拉曼散射的分布式光纤测温的影响,相较于氟铁龙松套和紧套以及不锈钢套,聚烯烃紧套的稳定性更好,适用于低温下长距离温度测量。

将基于拉曼散射的分布式光纤用于高温超导磁体状态监测还面临许多问题亟待解决。首先影响光纤测温性能的因素很多,封装材料厚度影响传感速度与测温灵敏性,封装材料松紧影响低温下材料收缩进而对光纤产生影响,因而需要根据不同测量应用场景选择不同材料封装的光纤,而关于将拉曼光纤用于低温环境下测量的研究工作也相对较少,还需要进一步的研究。其次光纤与磁体相结合的方法也有待进一步研究,文献[56]中采用的将光纤嵌入超导带材的形式也只适用于比较厚的带材,且该方式在绕制成线圈过程中存在光纤易断裂的情况,因此其应用场景存在一定的局限性。虽然拉曼光纤能够实现长距离测温,但其空间分辨率不高,对于精度要求比较高的测量可



能难以满足要求,且在文献[53,55]的实验中均发现将基于拉曼散射的分布式光纤用于液氮温度下的温度测量会出现温度延迟现象,用于低温下的拉曼光纤测温系统无论是在硬件还是软件算法上都需要进一步的优化设计,以满足测量需求。虽然基于拉曼散射的分布式光纤应用在超导磁体状态监测方面还面临着许多问题,但是其应用前景广阔,其分布式测量特性有利于实现样本信息的连续读取,且能同时得到温度及位置信息,通过进一步优化算法设计,可提高时间和空间上的测量分辨率,通过研究低温下光纤封装材料与磁体缠绕方式,探寻最优的用于低温下的测量方案。

#### 4.3 基于瑞利分布式光纤传感技术的超导磁体失超检测技术

基于瑞利散射的分布式光纤传感技术在时间和空间上的分辨率较高,测量较精准,可以连续提取线圈内部任何位置的温度信息,是用于监测大型高温超导磁体的一种有效的方法,目前国内外许多学者都对其进行了相关研究。2013年,美国贝卡莱罗纳州立大学的 Chan 团队就用基于瑞利散射的分布式光纤对 YBCO 高温超导磁体进行了失超检测<sup>[59]</sup>,用于超导磁体失超检测的瑞利散射技术的计算量极大。而空间分辨率要求越高,数据处理量越大,导致数据采集和处理系统扫描光纤的时间分辨率越低,因而该团队提出了一种基于瑞利散射光纤的用于 YBCO 高温超导磁体的失超检测算法,以实现时间分辨率与空间分辨率的平衡。2016年 Scurti 等<sup>[60]</sup>又采用瑞利背向散射技术对小型高温超导线圈进行了失超检测测试(图 6),实验结果表明:与传统检测技术相比,瑞利背向散射光纤系统不仅能提高检测结果在空间上的分辨率,且能在局部峰值温升超过电流引起的温升之前就检测到热点,具有显著优势,并且其优势随着线圈尺寸及电流裕度的增加而更加明显。中国科学技术大学的陈斌等<sup>[22,61]</sup>采用基于瑞利散射的分布式光纤测温系统对在对利用 Bi-2223 带材绕制的双饼线圈施加加热脉冲时诱发的失超进行了温度分布监测,实验结果表明,分布式光纤光谱变化能真实地反映失超检测信号,且光谱偏移变化比电压信号提前 10 s 左右,这验证了该方法用于高温超导绝缘线圈失超检测的可行性。

将基于瑞利散射的光纤测温系统引入高温超导磁体稳定性监测中能有效提高测量的精度,但目前基于瑞利散射的分布式光纤测温系统还处于开

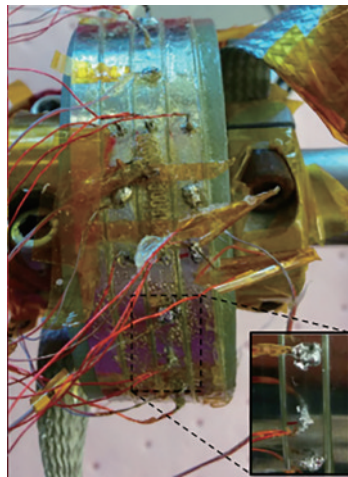


图 6 基于瑞利背向散射的分布式光纤对导体失超进行测试<sup>[60]</sup>

Fig. 6 Test of conductor quench using distributed optical fiber based on Rayleigh-backscattering<sup>[60]</sup>

发阶段,鲜有成熟商业产品问世,这无疑大大提高了研究的难度。目前研究人员对基于瑞利散射的分布式光纤测温系统在低温下传感特性的研究较少,常规光纤的工作温度为 $-50\sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,光纤处于液氮温区内时,将其用低温胶固定后会产生损耗,这时无法开展测量,因而需要研究特殊的耐低温光纤。而研究人员针对低温下分布式光纤传感特性的研究很少,还需要进一步通过实验探究不同涂层、封装材料以及粘贴材料等对光纤低温下温敏性能的影响。其次测量系统空间分辨率受激光器非线性扫频和相位噪声的影响很大<sup>[62-63]</sup>,而且由于空间分辨率数据庞大,系统在进行处理时会牺牲一定的计算时间,因而也需要优化算法设计。采用合适的算法使其在时-空分辨率上达到统一也是需要解决的关键问题。

## 5 结 论

经过二十多年的发展,研究人员对于高温超导体性能的研究已日趋成熟,高温超导体在粒子加速器及聚变磁体等方面都已有成熟的应用。但当前高温超导体失超检测及运行状态检测技术还不成熟阻碍了高温超导体广泛进入工程应用。近些年来,人们开始将光纤传感技术引入对高温超导体运行状态的监测中,光纤传感器因不易受到复杂环境的影响且易与导体缠绕结合,被视为是高温超导磁体状态监测领域行之有效的方案。

光纤传感技术应用于高温超导磁体运行状态监测是目前研究的热点方向之一,通过进一步探索



光纤传感器在低温环境下的测温机理,研发合适的光纤与磁体的缠绕方式,针对磁体不同应用场合综合使用各类光纤传感器,是将来进行高温超导磁体状态监测的有效途径。

### 参 考 文 献

- [1] Xiao L Y, Liu X H, Wang Q L, et al. Superconducting materials and their application status and development prospect [J]. *China Industry & Information Technology*, 2018(8): 30-37.  
肖立业, 刘向宏, 王秋良, 等. 超导材料及其应用现状与发展前景[J]. *中国工业和信息化*, 2018(8): 30-37.
- [2] Wu X C, Li Y S, Xu F. Development and application status of HTS materials[J]. *Development and Application of Materials*, 2014, 29(4): 95-100.  
吴兴超, 李永胜, 徐峰. 高温超导材料的发展和应用现状[J]. *材料开发与应用*, 2014, 29(4): 95-100.
- [3] Zhang B. Status and prospects of the development of superconducting materials [J]. *Advanced Materials Industry*, 2014(3): 53-55.  
张博. 超导电力材料发展的现状和前景[J]. *新材料产业*, 2014(3): 53-55.
- [4] Chen J X. Measurement of quench behavior of high temperature superconducting tapes by fiber grating [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 1-10.  
陈佳祥. 高温超导带材失超行为的光纤光栅测量研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 1-10.
- [5] Wu Q X, Xi D M, Jiang J J, et al. Temperature distribution detection of high temperature superconducting coils based on optical fiber temperature measurement technology [J]. *Cryo & Supercond*, 2021, 49(2): 22-25.  
吴琼欣, 席东民, 江俊杰, 等. 基于拉曼散射技术的高温超导线圈温度检测[J]. *低温与超导*, 2021, 49(2): 22-25.
- [6] Ma Y W. Recent developments of practical superconducting materials[J]. *Physics*, 2015, 44(10): 674-683.  
马衍伟. 实用化超导材料研究进展与展望[J]. *物理*, 2015, 44(10): 674-683.
- [7] Bernd S. Handbook of applied superconductivity [M]. Boca Raton: CRC press, 1998: 1-30.
- [8] Loyd R J, Bulc A M, Chang C L. Coil protection for the 20.4 MWh SMES/ETM[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, 27(2): 1716-1719.
- [9] Sugimoto M, Isono T, Koizumi N, et al. An evaluation of the inlet flow reduction for a cable in conduit conductor by rapid heating[J]. *Cryogenics*, 1999, 39(11): 939-945.
- [10] Ninomiya A, Sakaniwa K, Kado H, et al. Quench detection of superconducting magnets using ultrasonic wave[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1989, 25(2): 1520-1523.
- [11] Liu B, Wu Y, Liu F, et al. Axial strain characterization of the Nb<sub>3</sub>Sn strand used for China's TF conductor [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, 15(2): 3368-3371.
- [12] Zhou Y H, Wang X Z. Review on some key issues related to design and fabrication of superconducting magnets in ITER[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2013, 43(12): 1558-1569.  
周又和, 王省哲. ITER超导磁体设计与制备中的若干关键力学问题[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(12): 1558-1569.
- [13] Tang H M, Wang L, Du X Y, et al. Numerical study of cool-down or warm-up of the superconducting solenoid magnet in BEPC II [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, 35(5): 82-84.  
汤洪明, 王莉, 杜希阳, 等. BEPC II SSM超导磁体降温 and 升温过程数值研究[J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2007, 35(5): 82-84.
- [14] Guan M Z, Ma L Z, Wang X Z, et al. Stress and strain measurements on a 5 T superconducting magnet during coil excitation[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, 22(3): 9002404.
- [15] James S W, Tatam R P, Twin A, et al. Strain response of fibre Bragg grating sensors at cryogenic temperatures[J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(10): 1535-1539.
- [16] Bednorz J G, Müller K A. Possible high T<sub>c</sub> superconductivity in the Ba-La-Cu-O system [J]. *Zeitschrift Für Physik B Condensed Matter*, 1986, 64(2): 189-193.
- [17] Chen Y, An W Y, Liu H L, et al. Detection method using FBG sensing signal to diagnose rolling bearing fault [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1104004.  
陈勇, 安汪悦, 刘焕淋, 等. 利用FBG传感信号诊断滚动轴承故障的检测方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1104004.
- [18] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor [J]. *Chinese*

- Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0410001.  
章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0410001.
- [19] Zhang W, Su C Q, Zhang M, et al. Theory and method for improving optimization objective function in demodulation algorithm of fiber Bragg grating strain distribution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0206002.  
张伟, 苏超乾, 张梅, 等. 改进光纤光栅应变分布解调算法中优化目标函数的理论与方法[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0206002.
- [20] Liu D H. Quantitative study of thermal stability and mechanical behaviors in high-temperature superconducting coils[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 1-20.  
刘东辉. 高温超导线圈的热稳定性及力学行为的定量研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 1-20.
- [21] Cui Y M, Pan W J, Wu S T, et al. Study on VPI process of epoxy impregnating resin for cryogenic superconducting magnets in TOKAMAK[J]. Insulating Materials, 2001, 34(2): 44-46.  
崔益民, 潘皖江, 武松涛, 等. TOKAMAK 超导磁体用 VPI 浸渍树脂应用性能研究[J]. 绝缘材料, 2001, 34(2): 44-46.
- [22] Chen B. Research and related experiments of quench detection technology for high-temperature superconducting magnet [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 1-10.  
陈斌. 面向高温超导磁体失超检测技术研究及相关实验[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 1-10.
- [23] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [24] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [25] Jiang D S, He W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2002, 13(4): 420-430.  
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420-430.
- [26] Jiang H, Zhou Q X, Chen J, et al. Wavelength detection optimization of fiber Bragg grating sensing networks based on distortion spectrum[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006002.  
江灏, 周清旭, 陈静, 等. 畸变光谱下光纤布拉格光栅传感网络波长检测优化方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006002.
- [27] Chen J, Guo Y X, Zhu F D, et al. Fiber Bragg grating inclination sensor for transmission tower[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080602.  
陈剑, 郭永兴, 朱方东, 等. 用于输电铁塔的光纤布拉格光栅倾斜传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 080602.
- [28] Zhang X, Hou M S, Liu Z C, et al. Surface reconstruction algorithm of plate-shell structure based on fiber Bragg grating sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 090603.  
张旭, 侯茂盛, 刘智超, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 090603.
- [29] Chan T H T, Yu L, Tam H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: background and experimental observation [J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 648-659.
- [30] Liu Q, Tokunaga T, Mogi K, et al. Ultrahigh resolution multiplexed fiber Bragg grating sensor for crustal strain monitoring[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(3): 996-1003.
- [31] Moslehi B, Black R J, Faridian F. Multifunctional Fiber Bragg grating sensing system for load monitoring of composite wings [C]//2011 Aerospace Conference, March 5-12, 2011, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1-9.
- [32] El-Gammal H M, El-Badawy E S A, Rizk M R M, et al. A new hybrid FBG with a  $\pi$ -shift for temperature sensing in overhead high voltage transmission lines[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(1): 1-24.
- [33] Rogers A J. Polarization-optical time domain reflectometry [J]. Proceedings of SPIE, 1981, 236: 358-364.
- [34] Hartog A. A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1983, 1(3): 498-509.
- [35] Han Y W, Hao W J, Zhang L X, et al. Research of distributed optical fiber temperature measurement system based on Raman scattering principle[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(2): 342-345.  
韩永温, 郝文杰, 张林行, 等. 基于拉曼散射原理的

- 分布式光纤测温系统研究[J]. 半导体光电, 2013, 34(2): 342-345.
- [36] Chen J P, Li W L, Cai Z G. Review of distributed optical fiber Raman temperature measuring system [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2015, 32(3): 102-109.  
陈健沛, 李伟良, 蔡志岗. 分布式拉曼光纤测温系统研究进展[J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(3): 102-109.
- [37] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [38] Zhao M M. Study on distributed optical fiber sensor based on optical frequency domain reflectometry [D]. Hefei: Anhui University, 2020: 1-25.  
赵梦梦. 基于光频域反射技术的分布式光纤传感器研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2020: 1-25.
- [39] Turenne M, Johnson R, Hunte F, et al. Multi-purpose fiber optic sensors for high temperature superconducting magnets[C]//2009 23rd IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, June 1-5, 2009, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [40] Liu Y C, Fang J, Jia D Y, et al. Temperature characteristics of FBG sensors with different coatings for high temperature superconductor application[C]//2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), September 7-9, 2019, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2019: 1546-1550.
- [41] Liu Y C, Fisser M, Fang J, et al. Feasibility study of fiber Bragg grating sensor for quench detection of high temperature superconductors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1-6.
- [42] Liu Y C, Badcock R A, Fang X Y, et al. Selecting of FBG coatings for quench detection in HTS coils [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 1-5.
- [43] James S W, Tatam R P, Twin A, et al. Strain response of fibre Bragg grating sensors at cryogenic temperatures[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(10): 1535-1539.
- [44] Feng Z A. Study of strain in superconducting magnet by fiber Bragg grating and numerical simulation[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering of the Chinese Academy of Sciences, 2004: 15-54.  
冯遵安. 高温超导磁体应变的光纤探测与数值模拟[D]. 北京: 中国科学院研究生院(电工研究所), 2004: 15-54.
- [45] Chiuchiolo A, Bajko M, Perez J C, et al. Structural health monitoring of superconducting magnets at CERN using fiber Bragg grating sensors[C]//EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring, July 8-11, 2014, Nantes, France. Nantes: EWSHM2014, 2014.
- [46] Chiuchiolo A, Bajko H, Bajko M, et al. Advances in fiber optic sensors technology development for temperature and strain measurements in superconducting magnets and devices[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1-5.
- [47] Chiuchiolo A, Bajko H, Bajko M, et al. Embedded fiber Bragg grating sensors for true temperature monitoring in Nb<sub>3</sub>Sn superconducting magnets for high energy physics[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9916: 99160A.
- [48] Chiuchiolo A, Bajko M, Perez J C, et al. Fiber Bragg grating sensors based monitoring system for superconducting accelerator magnets[C]//2014 Third Mediterranean Photonics Conference, May 7-9, 2014, Trani, Italy. New York: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [49] Dai J S, Wang Y S, Zhao W J, et al. A novel calorimetric method for measurement of AC losses of HTS tapes by optical fiber Bragg grating [C]//2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, October 25-27, 2013, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2013: 124-127.
- [50] Dai J S, Wang Y S, Zhao W J, et al. A novel calorimetric method for measurement of AC losses of HTS tapes by optical fiber Bragg grating [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 1-4.
- [51] Dai J S. Experimental research on AC losses of HTS tapes by optical fiber Bragg grating[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014: 16-40.  
戴婧妹. 基于FBG的高温超导带材交流损耗的实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 16-40.
- [52] Liu Y C, Jiang Z N, Badcock R, et al. Study of calorimetric self-field AC loss measurement of HTS stacks using FBG sensors[J]. IEEE Transactions on



- Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-6.
- [53] Gao X J. Study on application of optical fiber sensing technology in high-temperature superconducting cables[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 38-48.  
高兴军. 光纤传感技术在高温超导电缆中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 38-48.
- [54] Jiang J J, Sheng J, Wu Q X, et al. Spatial and temporal resolution optimization on Raman distributed temperature sensor system for quench detection in a No-insulated coil[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1-5.
- [55] Jiang J J, Zhao Y, Hong Z Y, et al. Experimental study on quench detection of a No-insulation HTS coil based on Raman-scattering technology in optical fiber[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-5.
- [56] Lü Y Y, Jiang J J, Wang L B, et al. Experimental study on temperature distribution measurement of an optical fiber encapsulated coil in liquid nitrogen[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1590: 012050.
- [57] Hong Z Y, Wang Y W. Superconducting tape with measuring optical fibers sealed inside, and preparation method and device thereof: CN104157366A[P]. 2014-11-19.  
洪智勇, 王亚伟. 内封测量光纤的超导带材及其制备方法、装置: CN104157366A[P]. 2014-11-19.
- [58] Zhou K, Shi J, Wu Z C, et al. Study on temperature measurement performance of different packaged optical fibers at low temperature[J]. Low Temperature Physical Letters, 2019, 41(4): 308-314.  
周考, 石晶, 吴子辰, 等. 不同封装光纤低温测温性能研究[J]. 低温物理学报, 2019, 41(4): 308-314.
- [59] Chan W K, Flanagan G, Schwartz J. Spatial and temporal resolution requirements for quench detection in (RE)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> magnets using Rayleigh-scattering-based fiber optic distributed sensing[J]. Superconductor Science and Technology, 2013, 26(10): 105015.
- [60] Scurti F, Ishmael S, Flanagan G, et al. Quench detection for high temperature superconductor magnets: a novel technique based on Rayleigh-backscattering interrogated optical fibers[J]. Superconductor Science and Technology, 2016, 29(3): 03LT01.
- [61] Chen B, Li J G, Hu Y L, et al. Quench detection of Bi2223/Ag insulated double-pancake coil using distributed optic fiber sensor[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(3): 1-5.
- [62] Koshikiya Y, Fan X Y, Ito F. Influence of acoustic perturbation of fibers in phase-noise-compensated optical-frequency-domain reflectometry [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3323-3328.
- [63] Venkatesh S, Sorin W V. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(10): 1694-1700.