

一种用于低温超导体监测的单接收机分布式单模光纤测温系统

刘昌霞, 李 健

(上海拜安传感技术有限公司, 上海 200120)

摘要:为了解决常规测温系统采用双接收机机制时随时间变化导致测量误差大和定位精度低的问题,设计了一种用于低温超导体监测的单接收机分布式单模光纤测温系统,系统采用单接收机和抗偏振等方式,可实现对低温超导体快速、高定位精度的温度测量。根据系统设计方案搭建了温度测量精度、定位精度的测量实验系统,并在液氮下对低温超导进行了测试与分析。实验结果表明:当光纤处于 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的液氮区域时,测得平均温度为 $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,测温精度为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,定位精度为 0.4 m ,测温时间为 100 ms 。

关键词:低温超导;单接收机;高定位精度;分布式传感

中图分类号: TN253 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2023)01-0086-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Single receiver distributed single mode optical fiber temperature measuring system for low temperature superconductor monitoring

LIU Changxia, LI Jian

(Shanghai Baiantek Sensing Technology Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: In order to solve the problems of large measurement errors and low positioning accuracy caused by time changes in conventional temperature measuring system with dual receiver mechanism, a distributed single-mode optical fiber temperature measuring system with single receiver for low-temperature superconductor monitoring is designed. The system adopts single receiver and anti-polarization methods, which can realize rapid temperature measurement of low-temperature superconductor with high positioning accuracy. According to the system design scheme, the measuring experiment system of temperature measurement accuracy and positioning accuracy is set up, and the low temperature superconductivity is tested and analyzed in liquid nitrogen. The experimental results show that when the optical fiber is in the liquid nitrogen region of $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, the average temperature measured is $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$, the temperature resolution is $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, the temperature measurement accuracy is $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, the positioning accuracy is 0.4 m , and the temperature measurement time is 100 ms .

Key words: low temperature superconductivity, single receiver, high positioning accuracy, distributed sensing

0 引言

在液氮中,当超导体的材料出现问题时不能表现为超导状态,存在较大的电阻,造成导体发热甚至烧断。如果可以监测超导体的温度,在超导体升温初期

切断电流,则可保护超导体不被烧断。因此,非常有必要实时监测超导体的温度。

传统的超导体监测方法中,大多数采用铂电阻电学传感器进行温度测量。由于超导环境有电磁干扰,且电学传感器也会对超导体产生一定的热干扰,使得电学传感器对超导体的温度监测存在测温精度低、测温可靠性低、信号强度弱、点式传感器布设麻烦等问题^[1-4]。因此,迫切需要研究出准确、稳定且分布式连续的超导体运行状态监测方法。光纤传感技术具有抗电磁干扰、耐腐蚀、温度范围宽、可实现分布式监测等优点^[5],仅需要一根光纤作为感知的介质,就可以对超导体进行温度感知。本文采用单接收机分布式单模光纤

收稿日期: 2022-06-03。

作者简介:刘昌霞(1989—),女,上海人,硕士,光学工程师,2014年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,现任职上海拜安传感技术有限公司,负责上海市科技项目“轨道交通弓网关系光纤传感实时监测系统”,曾参与了国家重大科学仪器设备开发重点专项“分布式光纤应变监测仪”研究工作。



测温传感技术,实现超导体各个温度点的快速、准确和连续监测。

1 单接收机分布式单模光纤测温系统设计

对低温超导体进行温度测量时,需要对超导体升温点进行精准的定位。通常的测温系统因采用双接收机双路电信号放大系统而存在带宽和偏置的差异;同时,测量误差会随着双接收机通道系统使用时间的增加越来越大,影响温度测量时的定位精度和稳定性。因此,本文提出单接收机分布式单模光纤测温系统设计方案,系统原理图如图1所示。系统主要包括脉冲光源、掺铒光纤放大器(EDFA)、低通滤波器、正交扰偏器、50:50光耦合器、波分复用器(WDM)、单模传感光纤、微电子机械系统(MEMS)光开关、雪崩光电二极管(APD)、主控板、采集卡(DAQ)和工控机。其中,脉冲光源的工作波长为1550 nm,脉冲宽度为10 ns,脉冲光源可以根据监测光纤的长度进行脉冲宽度和重复频率的调节。

单接收机分布式光纤测温系统的工作原理如下:脉冲光源产生光脉冲,经EDFA放大、低通滤波器滤除带宽外的噪声后,再经过正交扰偏器消除单模光纤中偏振态的影响,进入50:50光耦合器分成2路光信号,分别与2个WDM相连;光脉冲在光纤中产生的背向散射光经WDM分离出波长为1450 nm的反斯托克斯光信号和波长为1663 nm的斯托克斯光信号;MEMS光开关对反斯托克斯光信号、斯托克斯光信号进行切换,以便被同一个接收机进行光/电转换,而主控板对2个MEMS光开关进行同步控制;电信号通过

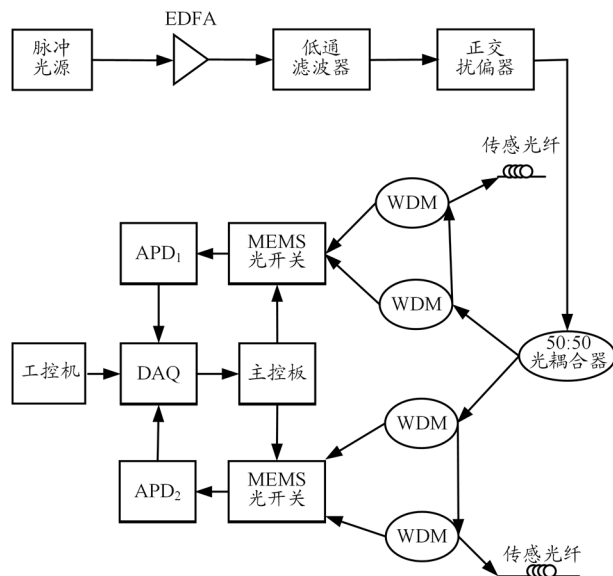


图1 单接收机分布式单模光纤测温系统原理图

DAQ的双通道进行同步采集,最终将高速模拟信号转换成数字信号显示在工控机的上位机界面上,可以直观地看出光纤沿线的温度分布曲线。

2 系统对比实验

2.1 单接收机对系统温度测量精度、定位精度的影响

本文根据系统设计方案搭建实验系统,验证系统的温度测量精度和定位精度。实验过程如下:从5 km的待测单模光纤中选取2 m长的光纤圈放入80℃的恒温水槽中,每次测量时间为3 s,然后取出光纤并降到常温;反复进行6次升温测量实验,每次保存整段光纤的温度原始数据,6次重复温度测量曲线图如图2所示。可以看出,在光纤长度为412.8 m处,6次实验的测量温度分别为79.55℃、79.21℃、79.06℃、79.02℃、79.53℃和79.31℃,温度测量精度在1℃之内。

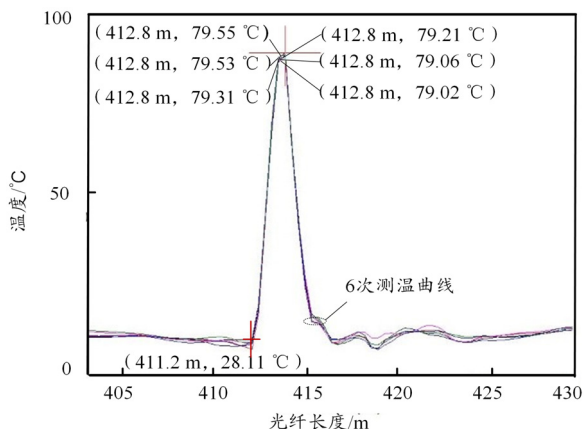


图2 单接收机温度测量曲线图

一般通过测量光纤升温段上升沿的10%~90%的区域来计算空间分辨率^[6]。图2中,测量信号上升沿最低点、最高点的光纤位置分别为411.2 m、412.8 m,上升沿长度为1.6 m,则空间分辨率为1.28 m^[6]。同时,6次测量的定位精度相差不到0.4 m,每次测量的位置点几乎重合。

2.2 双接收机对系统温度测量精度、定位精度影响

为了与双接收机系统进行对比,本文对双接收机系统也进行了温度测量和定位实验。实验过程与单接收机系统实验相同,得到双接收机温度测量曲线图如图3所示。可以看出,在光纤长度为1502.0 m处,6次实验测量温度分别为78.33℃、79.68℃、82.74℃、80.02℃、82.32℃和81.45℃,温度测量精度在5℃内;升温段上升沿最低点、最高点的光纤位置分别为1498.6 m、1502.2 m,上升沿长度为3.6 m,空间分辨率为2.88 m,6次测量的定位精度相差约1.2 m。

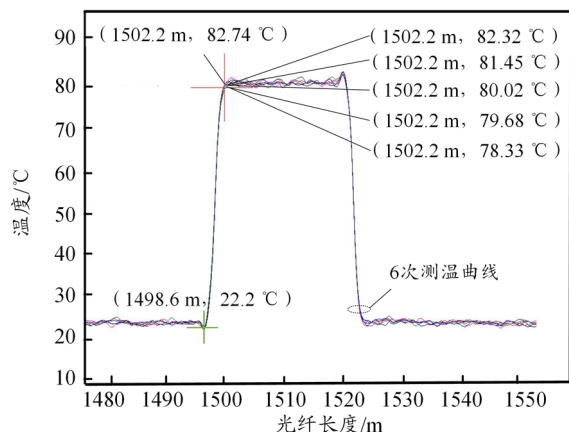
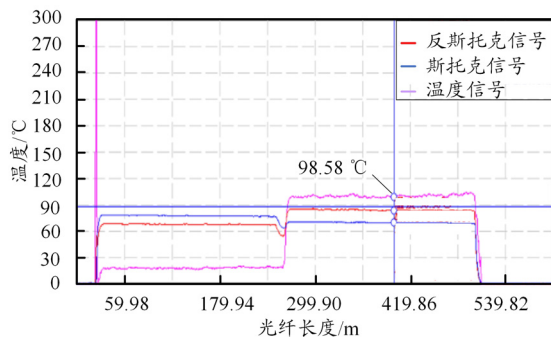


图3 双接收机温度测量曲线图

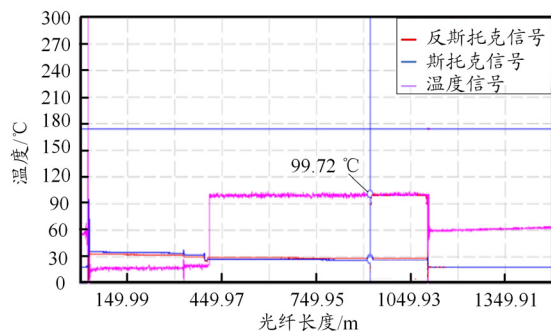
与双接收机方案相比,单接收机方案无带宽差异和偏置差异,且温度测量精度和定位精度更高。

2.3 偏振态对系统影响

受热应力、机械应力和纤芯截面不规则等因素影响,光纤中传输光的偏振态呈现随机变化。偏振态变化不仅导致干涉仪末端出现不同程度的偏振衰落,而且输出光功率信号形态畸变或有效幅值减小,从而使得分布式光纤传感的光功率信号幅值、形态呈现非均匀变化。取一段测试光纤,将光纤放置于 100 °C 的恒温水槽内,分别在正常偏振(不加正交扰偏器)、抗偏振(加正交扰偏器)情况下保温 1 h,得到偏振温度曲线如图 4 所示。可以看出,正常偏振下的温度曲线在



(a) 正常偏振(未加入正交扰偏器)



(b) 抗偏振(加入正交扰偏器)

图4 偏振温度曲线

98.58 °C上下波动,波动幅值为 ± 2 °C;在系统中加入正交扰偏器后,则温度曲线在 99.72 °C上下波动,波动幅值为 ± 0.5 °C。因此,抗偏振可以提升系统温度监测精度。

3 低温超导测试与分析

本文选用小弯半径单模光纤作为测温传感光纤。将小弯半径单模光纤的一端(长 20 m)封装在超导体内,然后将超导体放置于液氮槽中;光纤的另一端与分布式光纤测温系统设备相连,低温超导测试方案图如图 5 所示,实物图如图 6 所示。

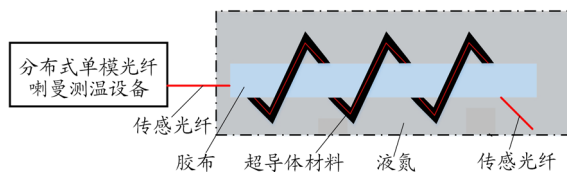


图5 低温超导测试方案图



图6 低温超导测温实验实物图

测试过程如下:首先,从常温到液氮区进行分布式温度标定,在温度测量范围内选取不同的温度点进行温度测量,并将 PT-100 铂电阻与光纤一起放入制冷机中,PT-100 铂电阻测量最低温度可以达到-200 °C,测温分辨率为 0.1 °C;然后,设置制冷机的温度值,再用 PT-100 铂电阻测量的温度值和喇曼散射比值数据进行多相拟合;最后,将喇曼散射比值数据代入到拟合公式中,从而修正温度值,并得出实际温度值。具体测试结果如图 7 所示。可以看出,图中光纤 112 m 处属于常温点区域,温度为 18.8 °C(室温为 19 °C);光纤 130 m、133 m、136 m 和 138 m 处属于液氮区,温度分别为-201.1 °C、-188.9 °C、-194.5 °C和-188.1 °C,平均温度(-193 °C)与液氮区温度(-196 °C)接近。根据系统测温精度计算方式(去掉最大值和最小值,其余的温度点取平均值),得出温度波动范围在 ± 3 °C内,温度测量精度高,速率较快(测温时间为 100 ms),满足低温超导体的温度监测。

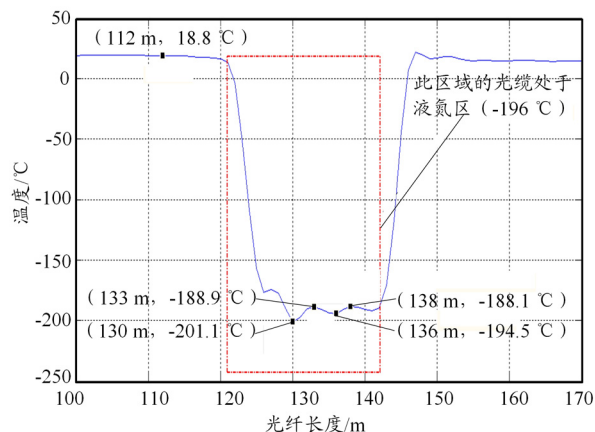


图7 光纤测量液氮中超导体的温度图

4 结束语

本文设计了一种单接收机分布式单模光纤测温系统,对液氮中的超导体进行温度监测,可以快速地测量出整段超导体的温度。由于单接收机没有带宽和

偏置的差异,具有较高的温度测量精度和定位精度。与传统只适用于多模光纤的测温系统相比,本文拓宽了测温系统的应用范围。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] CHEN B, LI J, HU Y, et al. Research and experiment on quench detection technology of HTS current leads based on distributed optical fibers[J]. Fusion Science and Technology, 2020, 76(2): 95-101.
- [4] 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.
- [5] 苟怡, 郭清华. 分布式光纤测温系统温度与定位补偿算法研究[J]. 检测技术与数据处理, 2021, 36(4): 83-86.
- [6] 朱海鹏. 基于喇曼散射效应的分布式光纤测温系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.