

基于光纤光栅的燃煤电厂高压开关柜内接头温度在线监测

刘辉

山西漳山发电有限责任公司

DOI:10.12238/jpm.v6i4.7931

[摘要] 光纤光栅 (FBG) 技术因其高灵敏度和优良的抗干扰能力, 已被广泛应用于温度监测领域。本研究设计了一种基于 FBG 的温度监测系统, 特别针对高压开关柜内接头温度监测进行深入探讨。系统通过 FBG 传感器捕捉温度变化, 采用光谱解调技术实时获取温度信息。实验结果表明, 系统具有高精度、高稳定性, 并能有效监测到温度超标的风险, 及时报警以防止设备故障。实验数据表明, 温度变化范围为 4°C 至 7°C , 测量误差在 0.1°C 至 0.3°C 之间, 系统在不同环境下表现出色。本文对系统进行了优化建议, 提出未来在传感器布置和数据处理方面可进一步改进, 以实现更精准的温度监控。

[关键词] 光纤光栅 (FBG); 温度监测; 系统设计; 实验分析

On-line monitoring of joint temperature in coal-fired power plant based on fiber grating

Liu Hui

Shanxi Zhangshan Power Generation Co., LTD.

[Abstract] Optical fiber grating (FBG) technology has been widely used in the field of temperature monitoring because of its high sensitivity and excellent anti-interference capability. This study designed a temperature monitoring system based on FBG, especially for joint temperature monitoring in high voltage switchgear. The system captures temperature changes through the FBG sensor and uses spectral demodulation technology to obtain temperature information in real time. The experimental results show that the system has high precision and high stability, and can effectively monitor the risk of exceeding the temperature, and timely alarm to prevent equipment failure. Experimental data show that the temperature varies from 4°C to 7°C , the measurement error ranges from 0.1°C to 0.3°C , and the system performs well in different environments. This paper optimizes the system and proposes further improvements in sensor layout and data processing in the future to achieve more accurate temperature monitoring.

[Key words] optical fiber grating (FBG), temperature monitoring, system design, experimental analysis

1 光纤光栅 (FBG) 技术原理

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 是一种利用光纤中周期性折射率变化形成的光学器件, 广泛应用于传感、通信等领域。FBG 的核心原理基于布拉格衍射原理, 当一束宽光谱的光信号通过具有周期性折射率变化的光纤时, 光纤内的周期性结构会选择性地反射某一特定波长的光。这个特定的反射波长称为布拉格波长 (λ_B)。由于光纤中折射率的变化与温度、应力等物理量密切相关, 因此通过监测 FBG 的布拉格波长变化, 可以实时获取物理参数的变化信息。FBG 光纤光栅的制造通常是通过在光纤中采用紫外激光照射, 诱发其核心区域折射率发生周期性变化, 从而形成光栅结构。光栅周期、长度及光纤的折射率变化等因素决定了反射波长的特性。FBG 技术具有较高的灵敏度和良好的重复性, 因此能够精确测量温度、应力、压力、位移等物理量。

FBG 光纤传感器的优点在于其分布式、抗电磁干扰、兼具高精度和高稳定性。与传统的电子传感器相比, 光纤传感器的信号传输不会受到电磁干扰, 且能够在高温、高压、腐蚀等恶劣环境下稳定工作。此外, 光纤本身的细小、灵活和耐用使得 FBG 在很多复杂环境中都有广泛的应用, 例如在桥梁、隧道、核电站等基础设施监测中, 以及在航空航天、地震监测、医疗等领域的应用。通过精确测量反射波长的偏移, 工程师可以实时监测和诊断结构健康状况, 预测潜在的故障并采取相应措施。随着科技的不断进步, FBG 技术的应用范围也在逐渐扩展。在智能制造、能源管理等多个领域, FBG 光纤传感器为安全监控、环境监测、设备维护等提供了更为可靠的数据支持, 其应用前景也日益广阔。

2 高压开关柜内接头温度监测的重要性

高压开关柜是电力系统中重要的设备之一, 负责实现电流

的开关操作和电力的分配。然而，随着电流负荷的增加，开关柜内部的接头部位往往会出现较高的温度，若无法有效监测和控制这些温度，可能会导致设备的故障，甚至引发火灾等安全事故。因此，对高压开关柜内接头温度进行实时监测是确保电力系统安全、可靠运行的关键措施之一。

首先，接头温度升高通常是由于电流通过接头时产生的电阻热，这种热量会导致接头表面温度上升，特别是在接头接触不良或老化的情况下，温度升高会更加显著。温度的持续升高可能会导致金属接头材料的损坏，如接头变形、熔化等，从而影响电流传输效率，甚至引发更严重的电气故障。此外，高温还可能加速电缆和绝缘材料的老化，进一步降低设备的使用寿命。

通过实时监测高压开关柜内接头的温度，能够及时发现接头接触不良、老化或过载等问题，避免温度过高导致设备故障甚至事故的发生。温度传感器（如光纤传感器、热电偶、红外传感器等）能够提供精确的温度数据，并通过智能系统进行数据分析和预警。一旦监测到温度异常升高，系统能够自动触发报警并采取预防措施，如调整负荷、切断电源等，以避免潜在风险。

此外，高压开关柜内接头温度监测系统的建设和应用对于延长设备的使用寿命和减少维护成本也具有重要意义。通过早期发现潜在问题并及时进行维修，可以大大降低设备故障率，减少停运时间，从而提高电力系统的运行效率和稳定性。对于电力公司而言，投资建设温度监测系统是一项长远的、安全保障型投入，有助于提升整体电网的运行可靠性。

随着智能化技术的发展，现代电力系统中的温度监测系统已经趋向自动化和数字化，这使得对高压开关柜温度的监控更加精确和实时，且能够实现远程监测和智能分析，从而为电力系统的安全运营提供更为坚实的技术保障。

3 基于 FBG 的温度监测系统设计

3.1 系统架构

基于 FBG（光纤光栅）的温度监测系统设计通常包括几个关键组成部分：光纤传感器、光源、解调器、数据采集模块、处理单元和显示终端。系统的架构需要确保高精度、实时性以及可靠性，以便能够准确监测温度的变化并及时报警。

系统架构的核心是 FBG 传感器，它通过反射不同波长的光来实现温度变化的感知。每个 FBG 传感器都有一个特定的布拉格波长，当环境温度变化时，光纤中的折射率也会发生变化，从而改变反射波长。温度变化会引起布拉格波长的偏移，进而反映出温度的变化。为了有效地采集温度信息，多个 FBG 传感器可以被分布在需要监测的区域内，通过光纤连接到解调系统。

光源用于向光纤中发送光信号，通常使用宽光谱的光源如白光 LED，能够覆盖较宽的波长范围。解调器则负责分析从 FBG 传感器返回的光信号，并通过测量布拉格波长的变化来计算出温度值。数据采集模块通过高速数据采集卡将解调器获得的数据传输到中央处理单元，后者进行进一步的数据分析和处理。

整个系统的设计还需要一个稳定的电源，保障各个模块的正常运行。同时，系统的通信方式可以采用有线（如以太网）

或无线（如 Wi-Fi、ZigBee）传输，确保数据能够实时传输到中央服务器或监控终端，供操作人员进行远程监控和分析。

为了确保系统能够在不同的应用场合下稳定运行，设计过程中还需考虑环境的恶劣性，如高温、高湿度以及电磁干扰等因素。这要求系统在硬件选型时要具备抗干扰性，并通过合适的封装和保护措施，延长其使用寿命，确保其长期稳定性。

3.2 FBG 传感器的布置与安装

FBG 传感器的布置与安装是温度监测系统设计中的重要环节，其精确性和合理性直接影响到监测系统的性能。一般来说，FBG 传感器可以按需布置在不同的监测位置，通常以光纤布线的方式进行分布。布置方式的选择主要依据监测区域的温度变化特性以及所需监测的精度。

在高压电力设备或工业环境中，温度变化往往是局部的，可能集中在接头、电缆或设备的特定部位，因此传感器布置应当优先考虑这些高风险区域。例如，在电力变电站中，FBG 传感器可以布置在开关柜的接头处、电缆连接部位以及电气元件的周围，以便及时捕捉到温度升高的信号，避免因局部过热而引发故障。

FBG 传感器的安装方式通常有两种：一种是直接嵌入式安装，另一种是表面安装。对于直接嵌入式安装，可以通过将 FBG 传感器嵌入到设备的结构中或与设备接触的关键部位，从而实现精确的温度监测。这种方法能够提供更为准确的温度信息，特别是在需要监测结构内部温度的应用中。表面安装则适用于表面温度变化的监测，如监测电缆表面的温度。

此外，为了确保 FBG 传感器能够稳定工作，安装过程中需要考虑光纤的布线问题。光纤应避免受到过度拉伸、弯曲或压迫，同时要保证光纤的连接稳定，避免接触不良引发信号衰减。光纤的接头位置也应根据实际情况进行合理选择，保证信号的传输稳定。传感器的固定装置应采用合适的材料，以防止长期使用过程中产生因温差变化或机械振动导致的损坏。

总之，FBG 传感器的布置与安装应遵循科学合理的原则，在确保监测精度的同时，还要兼顾系统的安装便利性与维护性。

3.3 数据采集与处理

数据采集与处理是基于 FBG 的温度监测系统的关键环节，直接影响到系统的实时性和准确性。FBG 传感器本身仅能够提供关于温度变化的光信号，而这些信号需要经过适当的采集和处理，才能转化为有意义的温度数据。

首先，光源发出的光信号通过 FBG 传感器返回的反射光会因温度变化而产生布拉格波长的偏移。解调器通过分光技术测量反射光的波长，从而获得温度变化的信息。由于 FBG 传感器的每个感应点具有唯一的反射波长，因此可以通过解调器同时读取多个传感器的数据。

数据采集模块的作用是将解调器输出的信号转换为数字信号，并通过合适的接口（如串口、以太网接口等）传输到处理单元。数据采集卡一般具有高精度的模数转换功能，能够确保信号的精确采集。随着传感器数量的增加，数据采集系统需要具备多通道同步采集的能力，确保能够同时获取各个传感器的温度数据。

在数据传输到中央处理单元后，处理单元对采集的数据进

行分析和计算。通常，处理单元会使用计算机或嵌入式系统进行数据存储、处理与实时监控。首先，系统会对原始温度数据进行滤波，去除噪声，并通过校准算法对数据进行修正。然后，通过数据分析，系统会根据设定的阈值判断是否存在温度异常，如果发现异常，立即启动报警系统，提示操作人员采取相应的措施。

为了提升数据处理的效率和可靠性，现代系统往往结合云计算与大数据技术，能够实现温度数据的远程存储与分析，支持历史数据的回溯和趋势预测，进一步增强监控系统的智能化水平。对于重要的温度监测点，系统还可设置多级预警机制，根据不同温度级别提供不同的响应措施。

总之，数据采集与处理环节的设计要确保系统能够实时、

准确地获取温度信息，并在出现异常时及时发出警报，从而保证监测系统的高效运行与设备的安全运行。

4 实验与结果分析

在基于 FBG 的温度监测系统设计与实施过程中，实验验证了系统在不同环境条件下的性能。为了评估该系统的实际效果，我们在多个监测点进行了一系列的温度测试，并结合实际数据对系统的准确性、可靠性和响应能力进行了分析。

实验选取了五个具有典型温度变化特征的监测点：开关柜接头、电缆连接点、电气元件、设备外壳和接线端子。每个监测点安装了 FBG 温度传感器，通过对比初始温度和在一定时间内的温度变化，来验证温度监测系统的准确性和反应速度。以下是实验结果的汇总数据：

表 1 实验数据

传感器位置	初始温度 (°C)	温度变化 (°C)	最终温度 (°C)	测量误差 (°C)	是否超温
开关柜接头	25	5	30	0.20	否
电缆连接点	28	6	34	0.30	是
电气元件	30	7	37	0.25	是
设备外壳	27	4	31	0.10	否
接线端子	29	5	34	0.15	是

结果分析

从表格中可以看到，五个测试点的温度变化情况呈现出一定的规律性。每个监测点的初始温度不同，但经过一定时间后，都显示出了不同程度的温度升高。在这些监测点中，电缆连接点、电气元件和接线端子的最终温度均超过了设定的安全温度阈值，标记为“超温”，而开关柜接头和设备外壳的最终温度则未超出安全范围。

(1) 温度变化与误差分析

从实验数据来看，温度变化值的范围从 4°C 到 7°C 不等，表明不同部位的温度变化幅度差异较大。温度变化量的大小与电流负荷、电气元件的工作状态以及外部环境温度等因素密切相关。FBG 传感器的测量误差普遍较小，误差值都控制在 0.1°C 到 0.3°C 之间。具体而言，设备外壳的误差最小，仅为 0.10°C，开关柜接头的误差为 0.20°C，而电缆连接点和电气元件的误差相对较大，分别为 0.30°C 和 0.25°C。这表明，系统的测量精度非常高，适用于高精度温度监测要求。

(2) 超温情况的评估

通过温度监测系统的监测结果，我们可以发现，三个监测点的温度超过了设定的安全阈值，提示这些区域可能存在过热的风险。特别是在电气元件和电缆连接点处，由于负载较大或接触不良，导致了显著的温升，这些问题可能会加速设备的老化，甚至导致设备故障。通过及时的温度监测，系统能够在问题发生之前提供预警，从而避免安全隐患。

(3) 系统响应速度

系统的响应速度在测试中表现出色。每个监测点的温度变化都能在短时间内被 FBG 传感器准确捕捉并反馈到数据处理模块。系统能够迅速计算出温度变化，并对其进行分析。无论是温度的轻微波动，还是较大的变化，都能在极短时间内传递到中央处理单元，保证了系统的实时性和高效性。

(4) 实际应用中的可靠性

在整个实验过程中，基于 FBG 的温度监测系统展现了较高的稳定性。在长时间运行下，系统没有出现数据丢失、信号中断等问题。此外，系统在不同环境条件下的表现都十分稳定，无论是外部环境温度的变化，还是设备内部的电磁干扰，系统都能够保持良好的监测精度。

(5) 系统优化建议

尽管实验结果证明了该系统的高精度和高可靠性，但仍有一些可以改进的地方。例如，传感器的安装位置和布线的优化可以进一步提高温度监测的覆盖范围和响应速度。在一些高负荷、高温度波动的环境中，可能需要增加更多的传感器来实现更细致的监测。此外，系统的数据处理算法可以进一步优化，以提高温度变化预测的准确性，尤其是在处理突发性温度变化时。

5 结论

通过此次实验与结果分析，基于 FBG 的温度监测系统展示了在多个监测点的高效和准确性，尤其在高风险区域（如电缆连接点和电气元件）能够提供早期预警。实验数据表明，系统在不同环境下的稳定性良好，且测量误差较小，能够为温度敏感设备提供及时的保护和监控。未来，随着技术的进一步发展和优化，该系统有望广泛应用于各类高压设备、工业环境以及建筑物的温度监测中，为设备的安全运行提供可靠保障。

[参考文献]

- [1]基于集成学习的光纤光栅传感网络入侵行为检测[J]. 要丽娟; 郭银芳.激光杂志, 2023 (11)
- [2]高压开关柜头温度监测技术的研究综述与展望[J]. 杨威; 吴明孝; 石磊; 高嵩.电工电气, 2022 (06)
- [3]光纤光栅传感技术及其在电力系统中的应用[J].杨洪磊; 梁仕斌; 李川; 昌明; 李英娜.中国电力教育, 2013 (29)