

# 面向高压配电柜温度在线检测方法与应用

纪顺峰

广东金晖隆开关有限公司 广东 汕头 515065

**摘要:** 因为高压配电柜触头部位容易产生高温, 这会给配电柜的正常工作带来不良的影响, 采用传统的人工监测方法很难及时发现高温点。所以, 为了能够准确地掌握高压配电柜内的高温位置, 本文对高压配电柜温度在线实时监测系统展开了分析和研究, 对光纤光栅传感器的测温原理、温度采集系统的结构进行了详细的介绍, 并确定了具体的温度传感器安装方式和在线监测系统设计。在矿山井下高压变电所的实践中发现, 该系统可以对各个触点的温度进行24小时不间断的监控, 监控精度高, 且成本低廉, 其监控结果还可以对后续的配电柜的维护和维修起到一定的指导作用。

**关键词:** 供电系统; 高压配电柜; 温度监测; 光纤栅传感器; 在线检测

## 引言

随着我国城市经济的飞速发展, 城市配电网的规模越来越大, 因此, 高压配电箱的数目也越来越多, 其运行状况将极大地影响到电网的稳定性。但是, 由于配电网的封闭性, 使得配电网的热失效率大大提高, 该问题受到了众多学者的重视。当前, 对配电箱过热故障的研究主要是通过对各部件的温度进行在线监测来解决。比如, 文献<sup>[1]</sup>提出了基于红外传感器的隔离触头温度测量方案, 文献<sup>[2]</sup>提出了基于 Zigbee无线传感器网络和 GPRS技术的配电柜温湿度监测方案。但是, 在上述研究中, 没有考虑到传感器布置的合理性, 也没有考虑到监测节点的数据能否充分地反映出部件的热状况, 因此, 对此问题的研究还有待于进一步深入。

在研究和开发配电柜温度在线监测设备的过程中, 测温方案主要采用了接触式测温、非接触式测温和间接测温。例如, 在文献<sup>[3]</sup>中所使用的测温方案是将温度传感器包装并固定在监控对象表面上的传统的接触式测温方案。但是, 由于没有一次侧和二次侧之间的电隔离, 这种方法一般被限制在电缆等带绝缘材料的元件上。以导热为基础的温度测量方法, 其响应速度受到限制。文献<sup>[4]</sup>采用了一种非接触式测温的方式, 利用了红外热像仪, 它拥有高精度和快速响应速度, 还可以有效地实现电气隔离。但是, 它的成本很高, 现在它只可以被用来进行定期离线检测, 还没有被用于在线监测。

本文正是针对上述问题, 研制开发的一种配电箱接线端在线监控系统。本系统以一种新型的接触式光纤栅式传感器为前端传感器, 不仅能有效地解决电隔离问题, 而且具有精度高, 响应速度快, 信号解调简单等优点, 更适合于在线监测。

## 1 高压配电柜在线测温技术综述

目前, 国内外许多科研院所及高校都在大力开展对配电箱温度实时检测技术的研究, 并开展了一系列的工作。在线测温技术可有效弥补人工测温不足, 对配电网的监控效果进行了进一步的改善<sup>[5]</sup>。在实践中, 通常采用的集中式温度测量方法有以下几种: 红外成像技术, 光纤栅传感器, 光电结合型测温<sup>[6]</sup>。本文将对这三者进行具体的比较分析。同时对光纤栅传感器进行详细说明。

### 1.1 测温技术对比

红外成像技术适用于高温或危险环境的非接触式测温, 光纤栅传感器具有高精度和抗干扰能力, 光电结合型测温技术适用于同时测量高温和低温物体的场景。接下来, 将对三种传感器在高压配电柜温度在线检测方面进行详细说明。

表 1 光纤光栅测温与光电结合型测温、红外传感器测温比较

比较内容	光纤光栅测温系统	光电结合型测温系统	红外传感器测温
测温精度	0.1~0.5℃	大于0.5℃	大于0.5℃
测量时间	系统中所有监测点(上千点)单次测需要逐点进行光电转换及网量时间小于1秒钟	网络扫描, 测量时间长, 难以实时监测	测量过程需要人工操作, 无法全天候全时段测量, 更不可能实现自动在线测量
抗干扰能力	免受电磁干扰	传感器输出信号需要进行光电转换后才能组网及传输, 抗干扰能力受限制, 且监测现场需要电源供电。	——
测量距离	超过45km	一般为几百米	——

与另外两者相比光纤光栅传感器测温在高压配电柜在线测温系统研究中具有高精度、高灵敏度、快速响应、长距离传输和抗电磁干扰等优势<sup>[7]</sup>,能够满足高压配电强电磁波干扰环境下,对温度监测精度和稳定性要求较高的应用场景,因此,本文在高压配电柜温度在线检测中研究中选择以光纤光栅传感器作为传感器件。

### 1.2 光纤光栅传感技术原理

光纤光栅温度传感器利用光纤的光敏性原理制成,当光纤的纤芯受到特定波长或较高强度的激光照射时,其折射率会永久性变化。通过制造具有周期性调制分布的光纤纤芯,当宽带光中的特定波长满足布拉格条件时,会被光纤光栅反射<sup>[8]</sup>。光纤光栅的反射率可以达到100%,实现按波长编码对传输光进行选择。通常将周期小于1微米的均匀周期光纤光栅称为光纤布拉格光栅(FBG, Fiber Bragg Grating的缩写)。

光栅布拉格条件:

式中:  $\lambda$ —布拉格波长;

$n$ —光的有效折射率

$\Lambda$ —光栅周期;

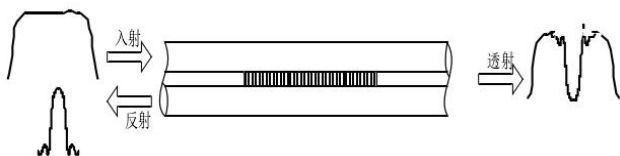


图1 光纤光栅原理图

光波在光纤光栅中传播时,符合布拉格条件的光线会被反射,而不符合布拉格条件的光线则会被透射。布拉格光栅反耦模式的有效折射率与光栅周期的联合确定了其反射与透射波长,光栅布拉格波长中上述参数任意参数发生变化的物理过程,都将引起波长发生偏移,并可根据偏移量的测定,获得外部物理参数的变化。从理论上讲,只要通过对两套波长变化的测量,就可以得到应力与温度的变化。对其它物理量,如电流,电压,浓度,液面,振动,加速度等,均可转化成温度和压力的改变,进而实现物理量的测量。在1550纳米窗口中,能够看到中心波长的温度系数是 $10.3\text{pm}/^\circ\text{C}$ ,应变系数是 $1.209\text{pm}/\mu\text{m}$ 。在此基础上,将布拉格光栅与温敏材料相结合,可增强其对温敏系数的敏感度,大幅提升其检测准确度。传感器的波长是指布拉格光栅反射谱上各峰的中心波长,随着应力的增加和温度的增加,布拉格光

栅的波长也随之增加。从图2中可以看出,在 $25\sim 35^\circ\text{C}$ 的温度下,具有1535.050纳米的光纤布拉格光栅传感器会变成1535.150纳米(每摄氏度大约10个 $\text{pm}$ )。现有的布拉格光栅检索系统主要工作在50 nm波段,即1520 nm~1570 nm波段。用FBG敏感分析器解调出布拉格FBG传感器的中心波长,并把它转换成数字信号。

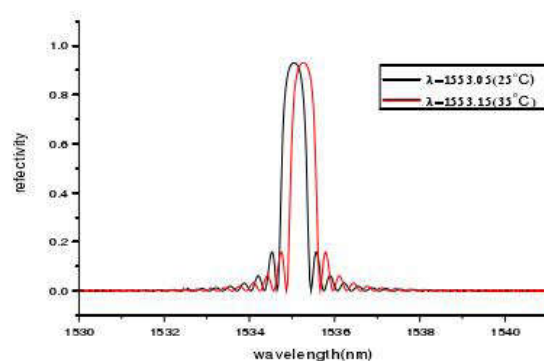


图2 传感器波长测试图

### 2 温度监测系统构成

由光纤、光纤光栅测温仪和工业控制计算机构成的高压配电柜温度在线监测系统。本系统是一种应用于配电网中有节点分布式实时监控的系统,其原理框图如图3所示。

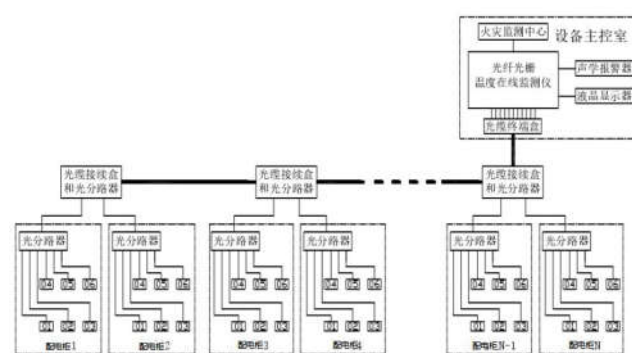


图3 温度监测系统构成

在变电所主控室内,装有多路光纤光栅式解调装置,可对配电网各柜体内的温度传感器进行采集。将采集到的数据传输到工业控制计算机中,对其进行存储、显示和分析,并发出相应的警告和警告。在每个配电柜中,都安装有高精度的探针式光纤光栅温度传感器。这些传感器被安装在对应的静触头上,可以快速、准确地对监测部位的温度进行检测,其分辨率小于 $0.1^\circ\text{C}$ 。

### 3 高压配电柜温度在线检测系统设计

#### 3.1 传感层

在现场使用的高压配电柜中,安装了光纤光栅温度传感器,并与光纤光栅在线监视器相结合,实现了对高

压配电柜中连接件的实时监控，并得到了实时的温度状况。通过在各高压配电箱的每一个连接处安装一个光纤光栅温度传感器，可以在2秒之内精确地检测到连接处的温度变化，分辨率小于0.1℃。传输光纤的外保护护套使用的是特富龙材料，这种材料不仅可以耐高温、耐高压，还具有较高的电气绝缘强度，同时还可以防止灰尘聚集，从而消除了柜内爬电的隐患。

### 3.2 传输解调层

#### 3.2.1 光信号传输网络

传输层对感知层发送过来的数据进行接收，之后再将数据向上层传送，而光纤本身可以充当数据传输的媒介。在高压配电箱中，所有的光纤光栅传感器均为单端出纤，并呈星状分布。图4中显示了安装的示意图。

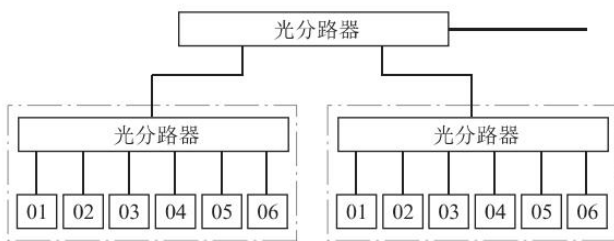


图4 光纤光栅安装示意图

为实现对各高压配电箱的监控，在配电箱中设置了一根光纤分束器。这种分束器是将同一台配电箱中的FBG传感器的尾线单独抽出，然后用并联的方法与光纤分束器相连。接着，把它接到一个FBG解调器上。光纤光栅解调仪的主要作用是对数据进行采集、分析和处理，最终以数字信息的形式将各监测点的波长和光功率信息显示出来，并将其发送出去。但是，在PC机上运行的用户程序，只能对解调服务器程序进行一次访问，不能满足实时性的要求。为此，我们给客户程序增加了一个计时器，并对用户的请求进行定时的发送。同时，还使用了多线程机制，通过一条主线程来完成主要的接口操作，一条定时器，一条数据处理线程来完成对数据的实时处理。

#### 3.2.2 光纤光栅解调系统

该系统主要包括：分散反馈驱动电路，光检测器，放大电路，滤波电路，主控制芯片（STM32f103），串行通讯电路，LCD，微机。在传送的光学信号中，含有由光纤光栅传感器收集到的温度信息，再由光电检测器转化成电流，再由放大器、滤波器等进行处理，最后传送到主控制芯片。图5中显示了总的结构图。

在工程中，光纤光栅传感器的解调系统由两个部分

组成，一个是光信号处理，另一个是电信号处理。其中，光学信号处理主要是对光纤布拉格光栅的反射波长进行追踪和分析，并将其转化为电参数。电信号处理部分主要是为了对由光信号处理模块转换而来的电号展开运算和处理，从而产生数字信息，并提取出高压配电柜待测点的温度信息后，将其显示在液晶屏上。

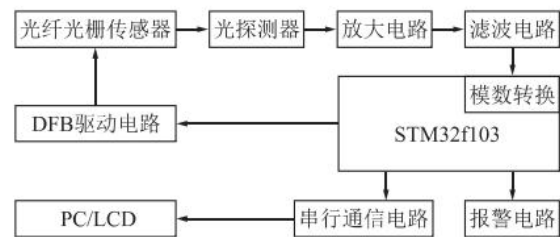
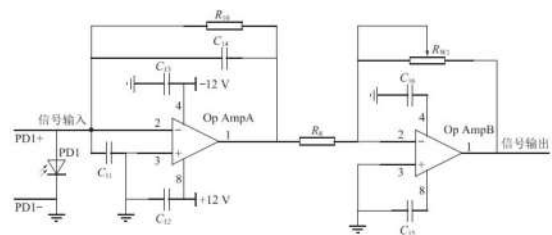


图5 光纤光栅解调系统

针对光电检测器输出的电流信号很弱的问题，提出了提高前级放大器增益的方法。但是，放大器的工作原理是将噪声与信号一起放大，而噪声又会对弱信号产生影响。所以，在该系统中，前置放大器是最重要的一环。前级放大电路的关键部件是运放，其特点是输入阻抗高，输出偏置电流小。图6中显示了该系统的电流-电压变换电路。

在图6所示的电流-电压变换电路中，使用了一种直接重叠的运算放大器（即，交叉电阻式放大器）。应用运放“虚短”、“虚断”原理实现电流到电压的变换。电压u和电流i之间的关系。该算法消除了运放输入偏置电压、输入偏置电流以及输出偏置电流等因素对测量结果的影响。为了解决输出信号太小的问题，在变换结束后，也加入了一阶信号放大电路。



$C_{11}$ 、 $C_{12}$ 、 $C_{13}$ 、 $C_{14}$ 、 $C_{21}$ 、 $C_{22}$ 、 $C_{23}$ 为电容； $R_1$ 、 $R_{10}$ 、 $R_{11}$ 为电阻；1、2、3、4、8为芯片引脚。

图6 电流电压转换电路

### 3.3 远程监控主站软件设计

工控机对采集到的波长和光功率信息进行计算，从而得到具体的温度信息。为便于现场监测，需要用图表、曲线等形式来表示温度数据。同时，监测中心还能在以太网端口上进行数据传输。光端接收到来自以太网的指令后，再经由专用的光纤传输线，传送至高配电箱的接点温度监测中心。详细内容见图7。

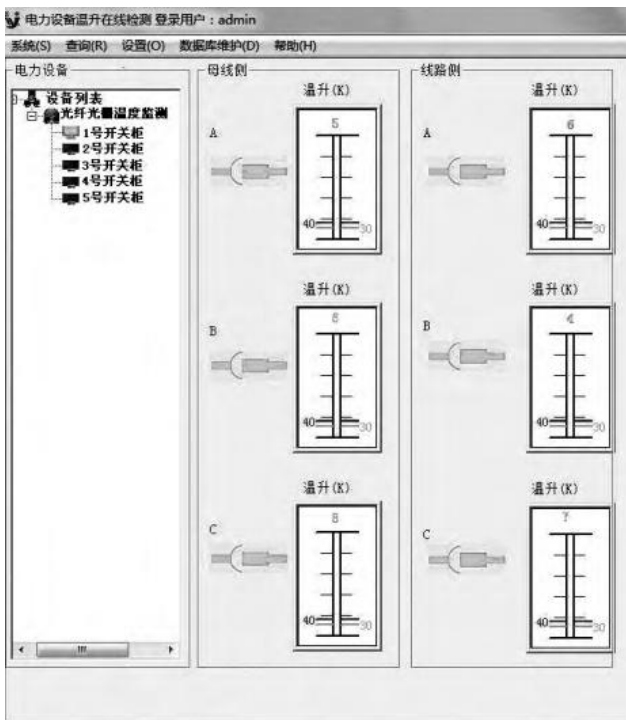


图7 温度在线监控中心

该系统的主要工作是对测温数据进行采集、解包、分析和存储。在监控中心的系统软件中,使用了以TCP/IP为基础的Socket通信机制,并使用了C/S结构。采用 SQL

Server数据库进行数据采集及监控系统中的温度数据的存储与管理。监测中心的监测接口软件具有下列主要功能:

(1) 登录界面: 为不同的用户分配帐号、角色和管理员的权利,并根据权利对系统的运行和管理。

(2) 数据展示: 将高压配电箱中的温度、空间、时间等信息,展示给用户,并提供历史数据查询、统计分析等功能。

(3) 异常报警功能: 以声光等形式,将异常数据部位、异常状态及演变趋势等信息展示出来,并用发送短信的方式,提示管理人员对异常信息展开及时的排查和处理。

(4) 终端机参数设定: 通过现场总线,设定终端机温度传感装置的特征参数,例如:GPS时钟对时,采集周期定时,报警值设定等。

(5) 系统自检: 系统自我检测排除故障。

#### 4 现场应用分析

在山西某矿高压变电站,通过两个多月的试运行,成功地实现了对配电箱温度的在线实时监控。当前,该监测系统具有数据采集精度高、数据传输效率高等特点。我们对配电柜内部的温度进行了监测,并将其与人工使用红外测温仪获得的温度进行了比较,具体的对比情况如下表2所示。

表2 温度监测结果

位置	监测对象	温度监测系统/℃	人工测温/℃	温升变化率/(℃·min <sup>-1</sup> )	误差/℃	外界温度/℃
进线柜	断路器A相	36.26	35.15	1.58	1.11	29
	断路器B相	35.48	35.79	0.98	-0.31	29
	断路器C相	34.96	33.89	1.18	1.17	29
母联柜	断路器A相	30.73	31.88	2.57	-1.15	29
	断路器B相	32.65	31.63	2.85	1.03	29
	断路器C相	31.91	30.63	2.65	1.28	29

据表2的数据,可以得出结论:温度在线实时监控可以根据预设的要求,实时监控高压配电柜中各个触头位置的温度,并计算出各个触头位置温度的变化率。在现场使用的时候,这个监控系统的传输速率可以达到256 kB/s,有效的覆盖范围可以超过45 KM,数据丢包率为0。由温度监测系统获得的触头温度和由人工测量获得的触头温度的差别在1.5℃以内,接触温度的最大变化率为2.8℃/min。监测结果达到了对高电压接触点的测量误差≤5℃,温度变化速率≤20℃/min的精确监控要求。

该系统可以实现对煤矿电力系统中高压配电柜24小时全天候、全天候、不间断、不间断的监控。经过现场使用,本系统可以在一定程度上提高高压配电柜的运行可靠性和稳定性,为煤矿的高效生产创造良好的供电条件。

#### 结束语

为解决传统高压开关柜温度监测方法存在的问题,并与高压开关柜智能化的发展趋势相结合,本文开发了一套实用性强的开关柜在线温度监测系统。本系统使用了一种以光纤光栅为核心的温度传感器,使其在实际应用中更加可靠、有效。在PC机上,用户可以方便地进行各种操作,实现对开关柜的高效、实时、在线监控。

#### 参考文献

- [1] 李强,周玉国.35kV高压配电柜柜内温度异常报警系统的设计[J].电测与仪表,2015,52(1):5.DOI:10.3969/j.issn.1001-1390.2015.01.016.
- [2] 王冠凌,凌有铸,于世海,等.智能温湿度控制系统在配电柜体内的应用[J].自动化与仪表,2008,23(5):4.

DOI:10.3969/j.issn.1001-9944.2008.05.012.

[3]于敬.高压配电柜在线测温技术的研究与应用[J].2020.

[4]李强.35kV高压配电柜柜内温度异常报警系统的设计[J].青岛理工大学[2023-08-18].

[5]王东.无线式中低压配电柜导体发热在线监测系统研究[D].天津大学[2023-08-18].

[6]冯健,吕志涛,吴志彬,等.超长混凝土结构的研究与应用[J].Prestress Technology, 8(03):33[2023-08-18]. DOI:10.59238/j.pt.2004.03.007.

[7]李强.35kV高压配电柜柜内温度异常报警系统的设计[D].青岛理工大学[2023-08-18].DOI:CNKI:CDMD:2.1014.346670.

[8]伍树溪.35kV高压配电柜柜内温度异常报警系统的设计[J].环球市场, 2017(6):2.