

可更换光纤测温传感器在水轮发电机定子绕组温度测量中的应用

陈珏良

(东方电气集团东方电机有限公司 四川 德阳 618000)

摘要: 水轮发电机定子绕组的运行温度是水轮发电机运行的一项重要指标,而传统的利用铂热电阻温度传感器(RTD)来实现定子绕组层间温度监测的方法存在传感器损坏后极难更换的问题。本文对主流的光纤测温技术进行了对比,并详细介绍了可更换光纤测温传感器的结构特点以及在安康电站 2# 机组上的应用情况。

关键词: 水轮发电机; 定子绕组; 层间; 可更换光纤测温传感器

0 引言

水轮发电机定子绕组的运行温度是评价水轮发电机运行状态的重要指标。同时这部分的温度数据直接接入了电厂保护系统中,成为电厂保护系统重点关注的监测值,因此对定子绕组监测用传感器的可靠性要求很高。

目前业内普遍采用铂热电阻温度传感器(RTD)实现对定子绕组的温度监测。长期以来,在水电站机组投运后定子测温 RTD 或多或少的出现故障,包括:由于 RTD 中铂材料在热的作用下会出现不一样的热膨胀,在振动、高温工况下会形成显微裂纹,使得 RTD 的机械强度下降,同时使引出电极的附着力下降以至脱落,导致阻值发生变化,测量不准;在 RTD 本体与引线交界过渡处,因为该处应力比较集中且又易扭曲,容易发生引出线折断的故障;铂电阻引出电极与外引出导线的焊接点在冷热交变及振动环境中发生开脱的故障。

由于定子绕组温度监测 RTD 通常是封装在定子层间垫条中,位于上下层线棒之间。在机组投运后,一旦发生 RTD 损坏的情况只有抽出定子上层线棒才可以对损坏的 RTD 进行更换,而抽取定子线棒会增加现场运维人员的工作量、影响机组的正常运行,同时机组的拆装可能会对机组内部的设备本体造成损害,带来新的安全隐患。如果不更换,随着机组投运时间的加长,RTD 的损坏数量累积到一定程度则会导致整个定子绕组温度成为一个监测盲区,严重影响机组的安全稳定运行。

为了解决铂热电阻温度传感器(RTD)易损且不易更换的难题,选取了本质绝缘、有更高电气安全性和测温稳定性且体积相对较小的光纤测温传感器来实现可更换光纤测温传感器的设计,并成功在真机上进行

了应用。

1 光纤测温传感器的分类

主流光纤测温技术包括基于光纤光栅原理、基于荧光原理、基于砷化镓原理三种技术路线。这三种光纤测温技术都能适用于本文所述的可更换式技术。

1.1 基于光纤光栅原理

光纤由芯层和包层组成,均为石英材料。通过对芯层掺杂其他物质,使芯层折射率从折射率 n_1 比包层折射率 n_2 大,形成光波传导,光就可在光纤的芯层中传输。当芯层折射率受到周期性调制后,会对入射的宽带光源进行选择反射,反射一个中心波长与芯层折射率调制相位相匹配的窄带光,起到光波选择性发射的作用。光纤布拉格光栅只对入射宽带光中满足布拉格条件的窄带光波进行反射,其他宽带光则透射过去。光纤布拉格光栅反射窄带光的中心波长 λ_B (也叫布拉格波长)用数学表达式为:

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

式中: n_{eff} — 光纤芯层的有效折射率,由材料本身确定;

Λ — 光栅空间周期,由刻栅时所确定的折射率调制的空间周期。

通过布拉格光栅制作的传感器属于光纤传感器的一种,基于光纤布拉格光栅传感过程是通过外界物理量对中心波长的调制来获取传感信息,因此,属于波长调制型光纤传感器。图 1 所示为光纤布拉格光栅传感原理图。

当外界某单一的物理量(温度、应力、压力、振动等)发生变化时,光栅周期 Λ 或耦合折射率系数 n_{eff} 会发生改变,光纤布拉格中心波长相应地发生变化。对式(1)求微分,获得波长偏移量 $\Delta\lambda_B$ 与折射率和光纤周期的变化量表达式如下:

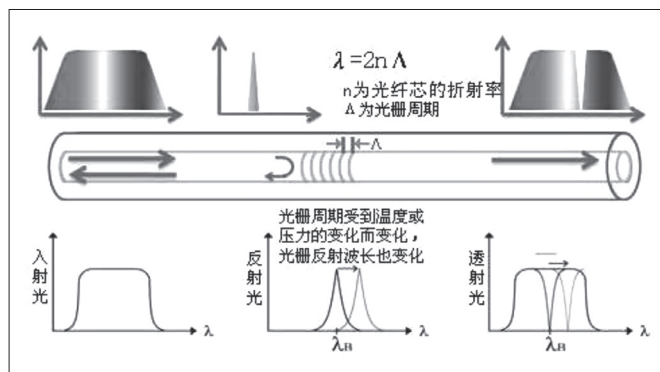


图1 光纤布拉格光栅传感原理图

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{eff}\Lambda \quad (2)$$

波长偏移量 就与物理量程一一对应关系, 解算波长偏移量可取得物理量的变化值, 通过初始波长的标定和设置即可获得被测物理量的准确值。

1.2 基于荧光原理

当光照射荧光物质时, 其内部电子获得能量从基态跃迁到激发态, 从激发态返回到基态的放出辐射能而使荧光物质发出荧光, 而在光被移除后持续发射荧光的时间取决于激发态的寿命, 该寿命就被称为荧光寿命。荧光寿命具有特性: 荧光寿命的长短由温度的高低决定。荧光寿命型温度传感器正是基于该特性的温度传感器。

根据半导体理论可知, 余辉的衰落直至消失实际上是光的淬灭过程, 温度的升高使得晶格振动的强度增强, 而晶格振动强度的增强又使得参与吸收的声子数增多, 最终导致光的淬灭过程缩短, 故荧光物质的温度高低决定了光的淬灭过程的快慢, 即决定了衰变时间常数的大小。图为荧光特性曲线。

温度与荧光信号 / 荧光余辉时间常数 τ 之间的关系公式为: $I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$, 温度 t 与荧光余辉时间常数 τ

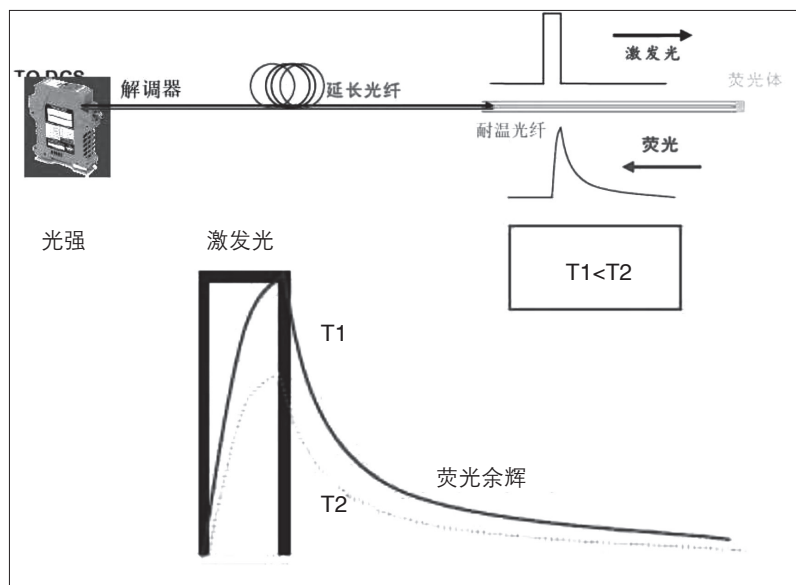


图2 荧光余辉特性曲线

为自然对数关联关系。

1.3 基于砷化镓原理

砷化镓半导体材料的能带结构由价带和导带组成, 在导带底和价带顶之间, 具有一定宽度的禁带隔离, 即为带隙 E_g ; 砷化镓作为一种直隙半导体材料, 受到光子激发后原子外层价电子吸收足够的光子能量, 电子从价带经由禁带跃迁到空的导带, 跃迁吸收光子的能量需满足半导体本征吸收的条件:

$$h\nu \geq E_g = h\nu_g \quad (3)$$

上式中, ν_g 为发生本征吸收光子的最低频率, 当光子频率小于 ν_g (波长大于 λ_g) 时, 砷化镓不能发生本征吸收, 砷化镓的吸收系数就急剧下降; 砷化镓发生本征吸收的临界光子能量对应的波长称为本征吸收限波长 λ_g , 即本征吸收边带, 吸收限波长 λ_g 与禁带宽度 E_g 的关系如下:

$$\lambda_g = C/\nu_g = Ch/E_g = 1.24/E_g \quad (4)$$

从上式中可以看出, 砷化镓不同禁带宽度 E_g 对应的吸收限波长 λ_g 不同。

在 20 ~ 973K 范围内, 砷化镓的禁带宽度与温度有如下关系:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\gamma T^2}{(\beta + T)} \quad (5)$$

其中, $E_g(0)$ 为温度为 0K 时禁带宽度的能量, β 和 γ 为与材料有关的常数, 对砷化镓来说, $E_g(0) = 1.522\text{eV}$, $\gamma = 5.8 \times 10^{-4}\text{eV/K}$, $\beta = 300\text{K}$; 砷化镓材料作为直隙半导体发生本征吸收波长满足: $\lambda_g = Ch/E_g = 1.24/E_g$, 可得吸收限波长 λ_g 随温度的变化如下:

$$\lambda_g(T) = \frac{1.24}{E_g(T)} = \frac{hc}{E_g(0) - \gamma T^2 / (\beta + T)} = \frac{1.24(\beta + T)}{E_g(0)(\beta + T) - \gamma T^2} \quad (6)$$

通过获得 λ_g 变化来获得温度信息, 实现温度测量, 如图 3 所示。

2 总体方案

本次技术在安康 2# 机的应用共布置 12 个定子绕组可更换光纤测温传感器, 采用每相每支路布置 1 支, 整体圆周均布的方式进行布置。在定子机座上对应布置 12 个接线盒, 用于布置光纤适配器, 每根层间垫条的引导管接至对应的接线盒中, 光纤传感器尾端采用 ST 接头, 通过光纤适配器与延长光缆连接, 延长光缆在定子机座上汇聚后经过桥架或波纹管汇入安装在风罩内的光纤传感器解调仪, 光纤传感器解调仪将光信号解调为温度数据。

如图 4 所示, 光纤传感器解调仪可以根据电站需要布置在风罩内或风罩外电气柜中, 可在此处实现温度监测数据的现地展示, 同时提

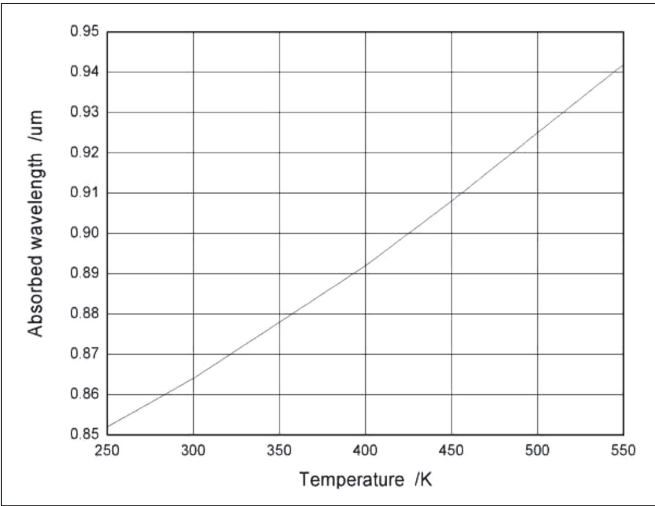


图 3 砷化镓吸收波长与温度的关系图

供数据存储、初步分析、阈值报警、数据导出等基本功能。同时提供 RS485、RJ45 等标准数据接口和 modbus TCP 等通信协议，支持将温度数据、报警信号上送至电站的监控系统中，同时也支持上送至电站的故障诊断上位机服务器中，结合机组工况参数及其他数据进行综合分析，

实现定子绕组运行状态的趋势评估和故障诊断。

定子层间垫条为环氧层压玻璃布板压制而成，其尺寸可根据不同水轮发电机结构特点进行定制。层间垫条中埋设有光纤传感器引导管，引导管的埋设深度可以根据水轮发电机监测需求进行调整，引导管与层间垫条一体成型压制而成。引导管为中空结构，光纤测温传感器与引导管中间有一定间隙，通过引导管光纤测温传感器可以直接插至需监测位置。

引导管从定子层间垫条一直延伸至水轮发电机机座等位置，方便运维人员进行操作。由于引导管紧靠定子线棒，因此引导管需用绝缘材料制成，具有较高的介电常数，最高使用温度不应低于 200℃，保证其在高电压、高温环境下的运行稳定性。同时由于从定子层间垫条引出至定子铁芯引导管需经过多次弯折，引导管具有一定的柔性，保证光纤测温传感器在引导管内部能够完成正常拆卸和安装。

安装时根据实际情况使用浸渍示温固化环氧胶的无碱玻璃纤维绝缘绑扎带将引导管与定子绕组低阻部分绑扎固定。引导管在弯曲绑扎时应保证有足够的弯曲半径；

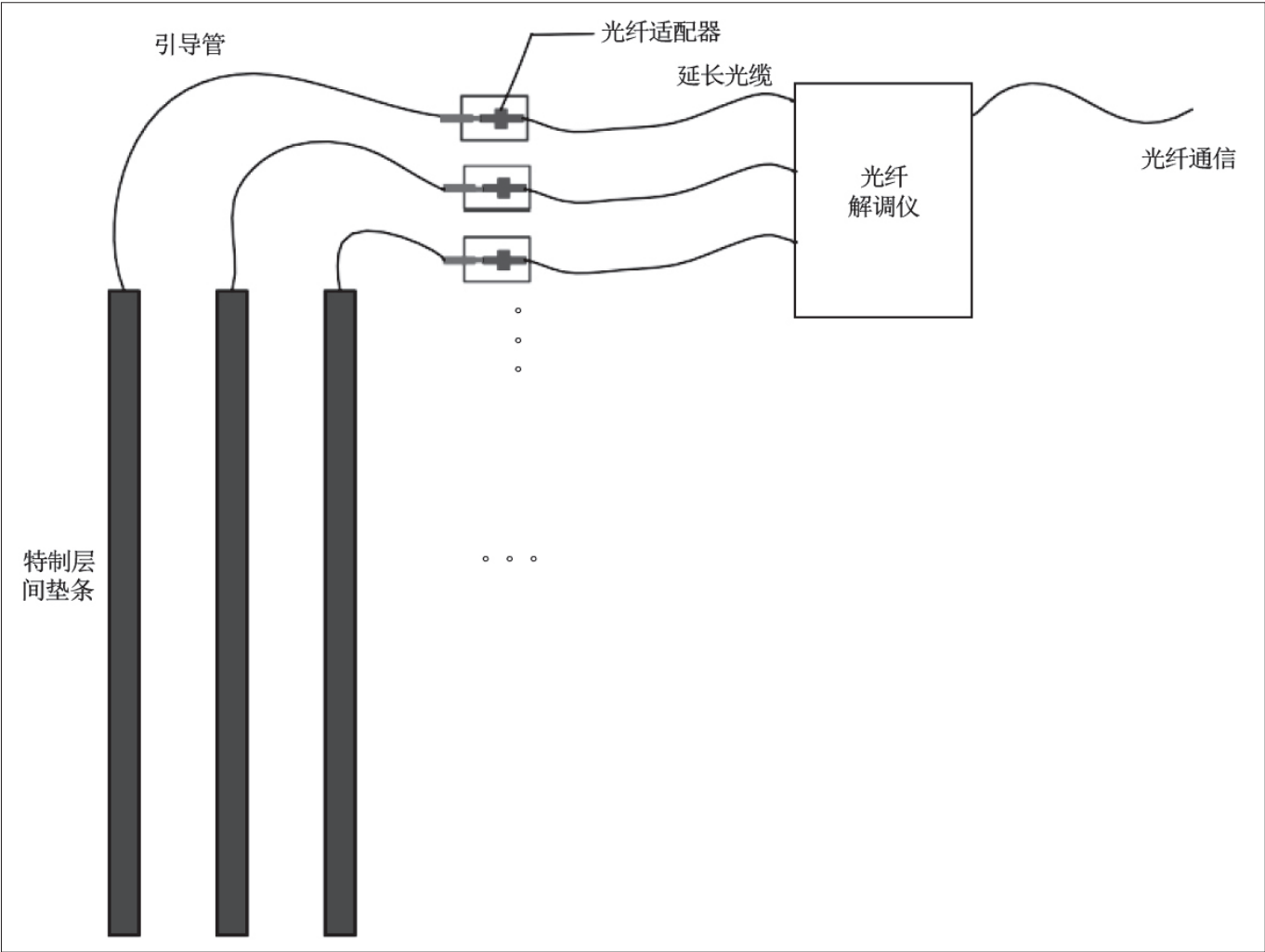


图 4 系统构成图

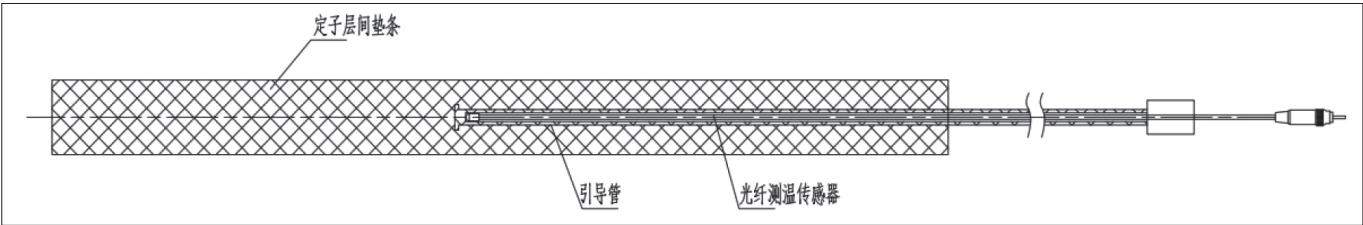


图 5 定子层间垫条截面图

绑扎紧度应在合适范围，避免引导管变形造成光纤测温传感器无法拆装；特别注意引导管绑扎位置不应超过定子绕组低阻部位，避免引导管将定子绕组高低阻部位连通。然后将引导管从上齿压板压指处穿出至定子机组，并通过扎带固定在定子机座上。

光纤测温探头通过适配器与延长光纤连接，适配器固定在接线盒中，集线盒焊接固定在定子机座适当位置。当运维人员需对光纤测温探头进行更换时，首先打开接线盒将前端光纤探头与连接适配器断开，将光纤探头从引导管中抽出；然后将新的光纤探头穿入引导管中至合适位置，并与适配器连接即可完成光纤测温传感器的更换。

本文所述方案能在埋设在定子层间垫条中的光纤传感器出现损坏时，不拆卸定子上层线棒，取出已经损坏的光纤测温传感器，将新的光纤测温传感器可靠地固定在原传感器位置，并实现安全准确的温度在线监测。同时通过合理地设计和布置保证了可更换光纤测温传感器电气性能的绝对安全，消除了新结构给水轮发电设备

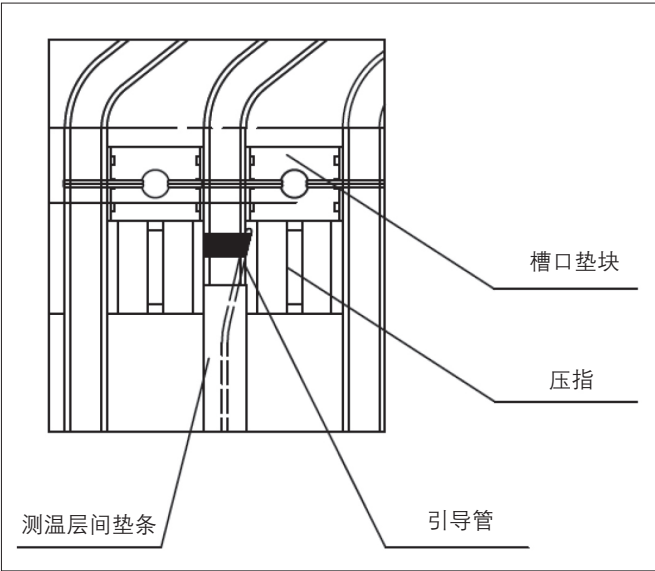


图 6 引导管绑扎示意图

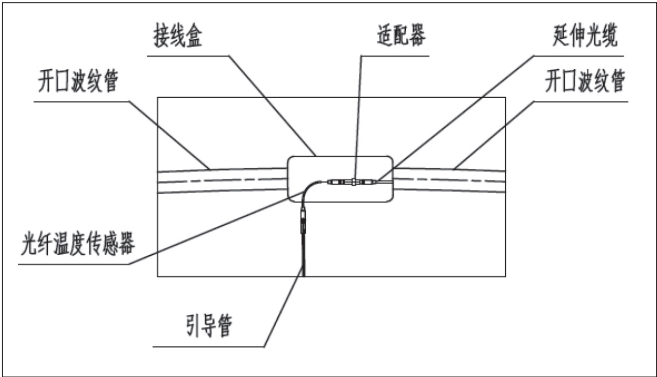


图 7 光纤传感器接线示意图

本体带来的安全隐患。目前该技术已经在安康电站 2# 机成功应用，在国内尚属首次。

3 结语

可更换光纤测温传感器在该电站安装完成后，能够准确、及时地获取水轮发电机组定子绕组层间的温度数据，同时运维人员能够便捷地对传感器进行拆除和更换。该电站可更换光纤测温传感器的成功应用，解决了水轮发电机组定子绕组层间测温传感器极难更换的难题，为可更换光纤测温传感器在水轮发电机组的全面应用提供了参考。

参考文献：

[1] 邹祖冰. 发电机组用测温 RTD 技术条件及故障对策探讨 [J]. 人民长江, 2014, 45(12): 100-102.
[2] 何海涛, 姚国珍. 光纤光栅解调技术在电力系统中的应用 [J]. 电力系统通信, 2010, 31(06): 42-45.
[3] 王光伟. 基于荧光光纤测温的开关柜温度在线监测系统研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

作者简介: 陈珏良 (1989.08-), 男, 汉族, 四川内江人, 本科, 工程师, 研究方向: 发电机组智能监测和智慧产品研发。