

水轮发电机定子温度监测现状及新型温度监测技术探析

高涛 刘云平 王超

(东方电气集团东方电机有限公司 四川 德阳 618000)

摘要: 水轮发电机定子重点区域温度机组运行状态的重要表征。在新型电力系统中, 现有的定子温度监测存在监测范围小、监测技术单一且可靠性不足的现状。定子监测设备失效增加了发电设备运行的安全隐患与设备运维难度。本文分析了水轮发电机定子产热散热机理、现有监测技术原理及失效模式, 并探讨了多种新型温度监测技术在定子相关区域的可行性, 为拓展定子区域监测范围, 提高监测可靠性、机组运行安全性与运维便利性提供了参考。

关键词: 水轮发电机定子; 温度监测; 光纤测温; RFID 测温; 红外测温

0 引言

水轮发电机定子由机座、铁芯、线圈、端箍、铜环及基础螺杆等部件组成^[1], 是整个水轮发电机组的核心部件。水轮发电机定子部套重要部件种类较多, 数量较大, 产热较多。按照要求, 在空冷 F 级绝缘下, 水轮发电机定子线圈温升应控制在 110K (检温计法), 定子铁芯温升应控制在 105K (检温计法)^[2]。过高的温度大大提高了设备发生故障的概率, 不利于机组长期安全运行。为实时掌握机组运行状态, 定子线圈、定子铁芯、定子压指等区域设有温度在线监测点。

目前, 水轮发电机定子区域温度在线监测, 行业内普遍认同并采用铂热电阻温度传感器。长期以来, 定子铂热电阻温度传感器损坏是水轮发电机组运行中相对高发的故障类型之一, 增加了电站设备运行维护的难度。新型电力系统对水轮发电机运行可靠性有着更高的要求, 研究新型定子温度监测技术, 是水轮发电机安全可靠运行、便捷运维的迫切需求。

1 水轮发电机 (空冷式) 定子产热散热机理

1.1 产热机理

机组在运行过程中产生的损耗详见表 1, 主要分为电气损耗与机械损耗, 而电气损耗又包括基本损耗和附加损耗 (或杂散损耗)^[3]。定子线圈铜损耗、定子铁芯铁损耗, 以及绕组附加铜损耗、定子齿和端部结构附加损耗是发电机内部的主要热量来源。空冷式机组的冷却风可以带走一部分热量, 剩余部

表 1 定子主要损耗分类表

损耗类别				产生原因
电气损耗	基本损耗	定子线圈铜耗		负载电流的电阻损耗
		定子齿和轭铁损耗		主磁通交变引起的磁滞及涡流损耗
	附加损耗（杂散损耗）	附加铁损耗	定子齿附加损耗	定转子磁场三次谐波
			端部结构件中附加损耗	端部漏磁场在结构件中的涡流损耗
		附加铜损耗－定子线圈导体中心附加损耗		槽漏磁引起的电流趋表现象及股线处在槽漏磁场不同位置而产生的循环电流及涡流损耗
机械损耗	风磨损耗			冷却气体与定子表面摩擦

分将导致发电机相关部件的温度升高。

1.2 散热机理

空冷式水轮发电机定子线圈的温度受多个因素影响, 包括发电机的冷却风量、定子散热结构、发电机运行工况、冷却器进水温度及散热能力等, 其内在的散热机理非常复杂, 具有强耦合、非线性、瞬时性和滞后性等特点。结合水轮发电机定子结构和传热学基本理论, 可以得到水轮发电机定子线圈、定子铁芯的传热方式及路径 (图 1)。

从图 1 可看出, 定子线圈的传热路径包括三条: 一是部分热量穿过定子槽楔在其表面以对流换热方式传递给气隙内空气; 二是部分热量穿过主绝缘在其表面以对流换热方式传递给风沟内气体; 三是剩下的线圈热量通过主绝缘以热传导方式

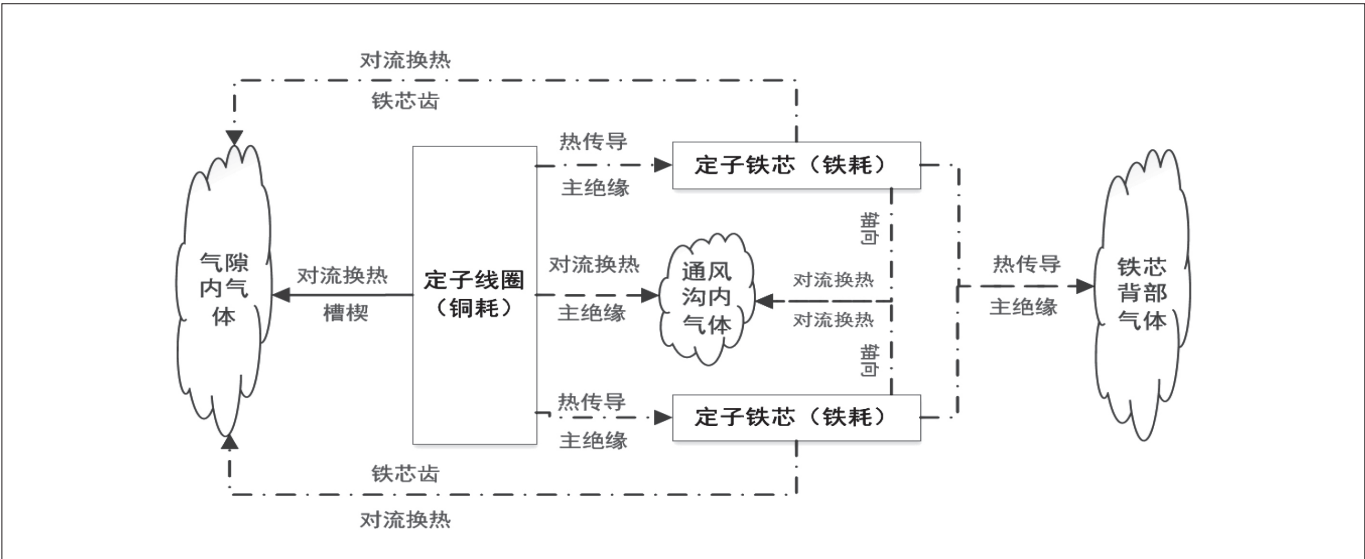


图 1 定子线圈传热方式及路径

传递给定子铁芯，然后和定子铁芯损耗一起以对流换热方式被分别传递给铁芯背部、气隙空间和通风沟内的气体。携带热量的气隙内气体、通风沟内气体、铁芯背部气体，在发电机强迫冷却作用下，按照发电机冷却风路流动至空气冷却器，最终由空气冷却器的冷却水将热量带至发电机机坑外。

2 发电机定子测温技术现状

2.1 测点布置

基于定子产热散热机理及重点部件，水轮发电机定子区域温度测点大多设置在线棒槽部（层间）、铁芯和压指等位置（图 2）。

典型的定子线圈测温电阻常常安装在上下层线棒之间的层间垫条内，设置原则为：（1）按照每相每

支路为单位，均匀设置；（2）覆盖层间下部、层间中部、层间上部三个位置，并均匀布置。

现有的线棒温度测点体系能较为全面地反映每相每支路线棒槽部区域的温度，但是由于测温电阻本身及封装容易发生故障，受限于测点安装方式，使得无论是层间上部、中部、下部三个位置的任一位置发生 RTD（Resistance Temperature Detector）故障，都不能及时更换，该处将会成为监测盲点，只能等待大修、将线棒拔出来之后才能对故障 RTD 进行更换，这给机组状态监测、安全运行带来了极大隐患。

定子铁芯温度测点一般布置在定子铁芯背部，兼顾了运行温度测量的需要以及运维的可行性。但是传感器损坏需要检修或更换时，仍需将空气冷却器吊出，方可实施。定子压指温度测点则是部署在定子上下压指的侧面。此外，空冷器的冷风、热风区域均布置有温度测点。

此外，空冷器的冷风、热风区域均布置有温度测点。

2.2 热电阻测温技术原理

热电阻 RTD 是中低温区最常用的一种温度测量元件，其主要特点是测量精度高，且性能稳定。热电阻大都由纯金属材料制成，基于金属导体的电阻值随温度的增加而增加这

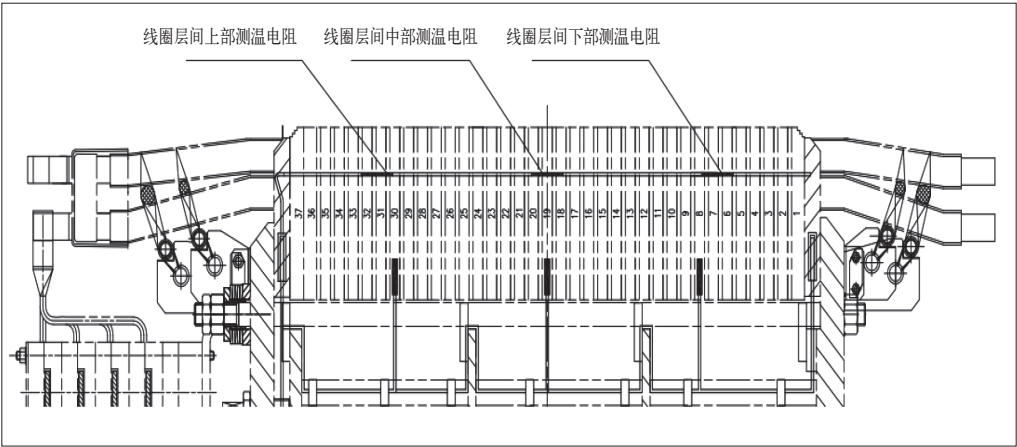


图 2 定子线圈温度测点布置示意图

一特性完成温度测量^[4]。一般情况下,金属热电阻的阻值 R_t 与温度 t 的关系式如下:

$$R_t = R_{t_0} [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (1)$$

式中: R_t —温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值(Ω);

R_{t_0} —温度为 $t_0^\circ\text{C}$ 时的电阻值(一般情况下, t_0 为 0°C)(Ω);

α —电阻温度系数(一般情况下, α 不是常数,在不同温度下具有不同的数值)。

水轮发电机普遍采用铂热电阻进行温度监测。我国最常用的铂电阻有 $R_0=10\Omega$ 、 $R_0=100\Omega$ 、 $R_0=1000\Omega$ 等几种。它们的分度号分别为pt10、pt100、pt1000,其中,pt100的应用最为广泛。

2.3 铂电阻测温传感器失效模式

通常,RTD的结构比较简单,机械应力是其损坏的主要原因。根据以往的研究结果,铂热电阻温度传感器发生的失效模式有以下几种类型^[5]:

(1)阻值不稳,即测得阻值时高时低,在一定范围内波动;

(2)阻值突变,即在测量过程中突然出现高阻值,随即又正常;

(3)阻值高,测得的阻值略高于标准值;

(4)阻值特高,测得的阻值很高或接近于无穷大;

(5)阻值低,测得的阻值小于标准值或接近于0。

3 发电机定子新型测温技术路线浅析

3.1 基于射频识别的测温技术

射频识别技术(RFID)是一种通过无线射频进行非接触式双向通信的自动识别技术。该技术用于温度监测具有装置体积小、识别速度快、安全性高和环境适应性好、系统布置便捷和线缆敷设少等诸多优点,目前在电网中电力设备的高压开关柜及高压电缆等多个场景下得到了应用。

该技术测温装置主要由终端服务器、读写器、天线和传感标签/模组等组成。天线的原理与作用类似雷达,天线将处理器传来的射频信号定期发射,传感器接收到射频信号后,将温度信号以射频形式返回。一个天线可以对应任意多个辐射范围内设定对应编码的传感器。基于此技术进行温度监测,具有“无线无源”的特点:数据通过无线方式传输,同时传感器无需供电,工作能量来自阅读器发射的射频信号。

射频式非接触测温为单点式测温,因传感标签工程造价较低,适用于部件数量较多、相互遮挡较少的静止部件,如定子绝缘盒的温度在线监测。

3.2 红外监测技术

一切温度高于绝对零度的物体都会向外界发出红外辐射,辐射大小主要与物体材料类型、物理与化学结构特征、波长和温度等因素有关。基于以上原理,采用红外热像仪可以记录构件的红外热图,并以灰度差或伪彩色形式表现物体各点的温度差。

根据引起温差的方式不同,还可进一步划分为主动式和被动式:主动式温差主要来源于光学、超声及涡流等激励源;而被动式温差则依靠被测部件自身散发的热量,红外热成像测温技术具有非接触、面监测、不受电磁干扰和探测距离远等优点。

红外测温适用于分布区域较大,部件数量较多的静止部件,如定子线棒端部的温度在线监测。

3.3 光纤测温技术

3.3.1 光纤光栅测温

光纤光栅,是通过一定的工艺过程,在光纤纤芯形成空间相位光栅。当宽带光通过光纤光栅时,会产生波长选择性反射,反射窄带光中心波长与芯层折射率调制相位相匹配。在外界温度发生变化时,光栅栅距发生变化,反射窄带光中心波长也随之移动。因此,通过精确地测量光栅反射光的波长变化量,就可以获得光纤光栅温度。

3.3.2 荧光式测温

该方法为光纤单点测温,当荧光物质的照射光被移除后,其持续发射荧光的时间称为该物质的荧光寿命,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。

3.3.3 基于砷化镓材料的光纤测温

砷化镓测温是基于砷化镓(GaAs)对光的吸收/透射特性,而温度变化对该半导体的影响是可以预测的。通常将GaAs晶体位于光纤温度传感器的测量端,当该晶体被多重波长的光照射时,会依据温度吸收不同波长的入射光,同时将剩余没有吸收的波长的光反射回去。因此,通过检测反射光的光谱,即可换算出测量温度。

光纤测温技术具有免疫电磁干扰的突出优点,加之其使用寿命长,因此在发电机电磁环境复杂的定

表 2 水轮发电机定子区域温度综合监测方案设计

测点位置	建议 测点数量	新型测温技术 路线（推荐）	备注
线棒槽部 （层间上部）	≥ 1/ 相 / 支路	光纤测温	(1) 定子内部区域； (2) 线棒数量较多，产生热量的主要区域及故障相对高发区域； (3) 直接反映主绝缘表面温升，对评估线棒主绝缘状态及寿命有较高价值； (4) 光纤测温技术免疫电磁干扰，适用于强电磁场恶劣环境，本征安全，且寿命较长； (5) 建议采用可更换式测温结构
线棒槽部 （层间中部）	≥ 1/ 相 / 支路	光纤测温	
线棒槽部 （层间下部）	≥ 1/ 相 / 支路	光纤测温	
铁芯（上部）	≥ 0.03/ 槽	光纤测温	(1) 定子重要部件； (2) 涉及区域范围较大，产生热量的主要区域及故障相对高发区域； (3) 温升大小对主绝缘状态及寿命影响大； (4) 光纤测温技术免疫电磁干扰，适用于强电磁场恶劣环境，本征安全，且寿命较长； (5) 建议采用可更换式测温结构
铁芯（中部）	≥ 0.03/ 槽	光纤测温	
铁芯（下部）	≥ 0.03/ 槽	光纤测温	
定子汇流环	≥ 2/ 相 / 支路	光纤测温	(1) 定子重要部件； (2) 大电流流经，产生热量的主要区域及故障相对高发区域； (3) 光纤测温技术免疫电磁干扰，适用于强电磁场恶劣环境，本征安全，且寿命较长
定子主引出线	3	光纤测温	
定子绝缘盒	≥ 0.08 只 / 槽	射频测温	(1) 定子重要部件； (2) 绝缘盒数量较多，处于线棒端部，故障相对高发； (3) 射频测温性价比较高，适应绝缘盒点位较多、分布范围广的特征； (4) 可较好反映线棒端头温升，及时预警线棒端头引振动等导致的焊接处虚接、脱开等故障
定子线棒上端部	根据设备视场角及安装距离确定，建议全圆覆盖	红外测温	(1) 定子重要部件； (2) 红外监测为面监测，适用于线棒端部结构件密集的特征，可较好反映线棒端部温升

子槽部线棒层间、定子铁芯、定子压指、定子汇流环、定子主引出线和空气冷却器等区域温度监测有较大的应用价值。

4 结语

为及时、全面、可靠地掌握水轮发电机运行状态，提高发电机组运行安全性，需要提高现有测温技术的可靠性，并且研究射频、红外及光纤等新型测温技术在发电机定子等关键部件的应用。

目前，已有一些新型温度监测技术在电力相关场景取得了积极的运用效果，可以结合技术特点与定子各类需在线监测温度场景特征，开展新型监测技术选型，拓展定子监测范围，提高监测的可靠性及机组运行安全性和运维便利性。表 2 为水轮发电机定子区域温度综合监测方案。

水轮发电机组运行安全要求高，新型监测在水轮发电机真机部署时，仍需要针对具体场景，做好充分的理论验证及试验验证。

参考文献：

[1] 陈锡芳．水轮发电机设计与计算 [M]．北京：机械工业出版社，1982:31-32.

[2]GB/T 7894-2009, 水轮发电机基本技术条件 [S]．北京：中国标准出版社，2009.

[3] 白延年．水轮发电机设计与计算 [M]．北京：机械工业出版社，1982:121-124.

[4] 杨军，谢凤祥．水电站测温电阻常见故障原因分析及解决方法 [J]．人民长江，2012, 43 (22) :88-90.

[5] 高天云．天荒坪抽水蓄能电站热电阻失效机理分析 [J]．自动化仪表，2003 (02) :19-21.