

干式变压器工业物联网温度 实时在线监测技术分析

陈恒云¹ 庞 勇²

(1. 重庆祥龙电气股份有限公司 2. 重庆市黔江区泰来宏达自来水有限公司)

摘要：本文针对干式变压器工业物联网温度实时在线监测技术展开分析，结合相关不利因素分析，将产品使用寿命与温度作为突破口，在明确二者之间关系的基础上，对其实时在线温度系统进行研究，通过实例 ZQSCBH17-1000/10 干式牵引整流变压器绕组植入光纤，经过工业物联网温度实时在线监测，保证绕组温度测量数据精度，为干式变压器的寿命估算提供准确的计算数据，进而保证干式变压器整体运行质效。

关键词：干式变压器；在线监测；温度预测；报警提示；测温仪

0 引言

近年来，受经济结构影响，社会对电力资源的需求增加的同时，对电力运行的安全性、可靠性的要求越来越高；为更好满足用电质量标准，降低电力事故概率，相关工程技术人员需加强对电气设备（变压器）的质量控制管理，同时也要加强对运行过程的监管。针对干式变压器而言，作为变电设备，对于整体电气性能、热稳定性能具有更严格要求。现阶段，机场、高铁、城市轨道交通等基础设施均需依靠稳定电力系统持续、可靠运行，输变电设备的可靠运行受负荷情况、环境温度、设备质量等多方面因素影响。为有效延长干式变压器使用寿命，利用在线监测技术，结合干式整流变压器绕组光纤植入实例，建立物联网温度监控系统，综合、全面分析变压器运行状态，一旦产生异常事故情况，监控系统可实现报警提示、实时运行状态显示，便于相关运行人员及时解决变压器

故障问题，保证干式变压器的安全可靠运行。

1 干式变压器温度与寿命关系的研究

受涡流、谐波等方面影响，干式变压器在运行期间，一旦有电流通过，变压器就会产生热量，在温度持续变化的背景下，变压器会达到产热、散热相平衡的状态。从本质上来说，干式变压器绝缘问题作为其核心要点，对整体运行质量具有决定性的影响。针对干式变压器绝缘老化而言，变压器温升是主要因素，作为不可逆的现象，增加变压器温度在线实时监测，预防产品超温长时间运行，从而减少变压器运行寿命。在额定负载条件下，谐波、散热条件差异等均会导致变压器温度提升，变压器寿命估算计算方式为：

$$L = a \times e^{bT} \quad (1)$$

式中， a 为时间常数， h ； T 为热点温度， K ； b 为温升常数。

在计算变压器寿命损失的过程中，工程技术人员往往对绕组的平均温升进行计算，由于干式变压器材料导热性、生产工艺等差异导致绕组热点温度具有不确定性，需加强对生产过程的质量控制。受运行负载条件、环境温度的不同，变压器绕组热点温度也具有差异性，即环境温度高、负载大的条件下，整体寿命影响会更大。

2 干式变压器工业物联网温度监控系统研究

2.1 设计思路

针对干式变压器工业物联网温度监控系统而言，通过植入干式变压器绕组光纤测温传感器，精确测量绕组热点温度，实时监测变压器温度的过程中，借助变压器寿命估算法，精准计算变压器的寿命。在此基础上，全面收集计算数据，并借助物联网管理平台，通过对温度、变压器寿命等数据实时整合，并实时显示变压器的运行状态，便于相关人员分析预测变压器发生故障概率情况，并制定相应的维护、检修计划。

干式变压器温度监控系统功能主要包括电源、数据采集、GPRS 通信等模块，通过外界透传云与上位机进行连接，即可实现远程监控目标。以 GPRS 无线通信模块为例，在具体应用过程中，可将其与 GPS 技术相结合，实现无线传输、异步收发传输等功能。在各模块相互配合的情况下，可实现数据采集目标，例如，干式变压器电流、三相温度、功率、绝缘老化率、剩余理论寿命等参数，满足干式变压器运行情况的实时监测，进而为其运行质量提供保障。

2.2 实现方法

2.2.1 干式变压器绕组光纤传感器植入技术

干式变压器绕组低压为箔绕线圈，高压绕组一般分段层式线圈或连续式线圈，箔绕线圈与高压层式绕组植入位置层间加 4~5mm 网格布，在线圈绕制时根据

需要位置植入光纤传感器，在 4mm 网格上开槽放置光纤，要求槽宽 3.5~4mm，槽长度 30mm 以上，保证光纤出线沿着绕组出线圈切线方向。开槽参考图 1 所示，然后将玻璃布带裁剪去除弹性；在距离测温探头尾端 10mm 左右处缠绕，缠绕过程中可与垫块试配，缠绕直径以卡紧卡槽，且不挤压光纤产生形变为宜，如图 2 所示。

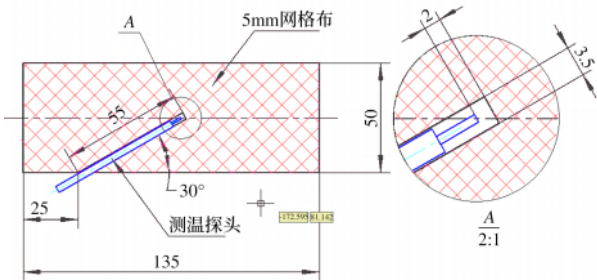


图 1 网格布开槽示意图

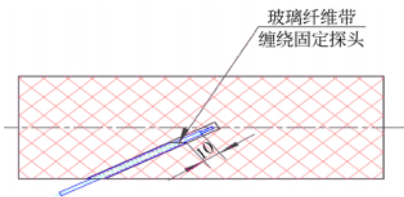


图 2 固定探头示意图

调整光纤传感探针位置，保持光纤传感探针感温点尾端距离开槽顶端留有约 2mm 空隙，用多余玻璃布带继续缠绕垫块一圈，尾端涂适量胶水粘接，光纤从线圈出来后用 DMD 绝缘纸筒包裹保证光纤在引出时不受挤压；注意保持光纤的自由状态，不要让光纤有硬折弯保证其弯曲半径至少大于 50mm，将多余光纤盘好（要求盘圈内直径大于 15CM，捆绑点大于 2 个），固定于线圈上，引至出线面板一侧，从线圈上端部引出。

2.2.2 监控中心需求分析

与常规变压器远程监控系统相比，工业物联网温度监控系统可实现对变压器的统一管理，在具体应用过程中，通过对全部监控终端数据进行传输，推动工

业智能化发展，在实现单个站点温度测量的基础上，可对多个站点同时监测。通过借助 GPRS 无线数据传输设备，可使变压器站点与工业物联网云端监控平台相连接，结合实际情况，利用数据分析技术，有效实现温度监测、超温报警目标。另外，监控中心具有基本信息维护功能，可实现对历史数据的综合分析，便于相关人员对监控数据进行自主处理，保证监控中心的安全性，整体功能如图 3 所示。

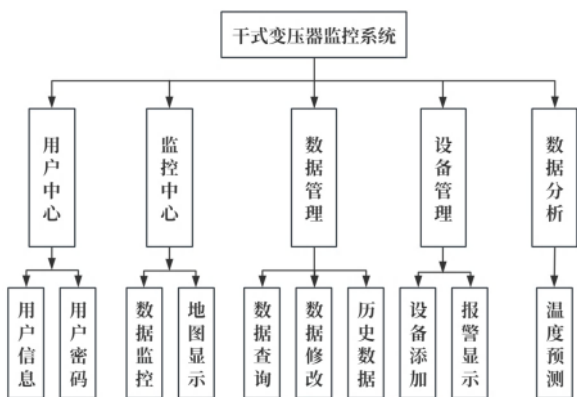


图 3 干式变压器监控系统主要功能

监控中心主要涉及地图显示、数据监控，结合实际情况，通过对变压器型号、三相温度、环境温度、绝缘老化率、剩余理论寿命等数据实时显示，并充分发挥地图列表的优势，使其对变压器的地理位置进行呈现，进而提升管理效率。以故障预判为例，通过上位机软件系统，可顺利规划温度预测曲线，实现温度、故障预测与预判目标。

2.2.3 数据传输

数据传输作为监控中心的关键组成部分，结合监控中心实际特点，可调用 DLL 动态链接库，作为一个独立的文件，可充当监控中心的函数库，以此实现数据传输目标。在具体实施过程中，DLL 可实现模块化处理目标，结合具体情况，促使程序各功能模块处于相对独立状态，增强程序运行的简洁性。相关人员

需根据数据传输目标，优化函数接口程序指令，实现数据高质量传输目标。在调用 DLL 过程中，需对服务器进行连接，并合理设置发送内容。基于客观事实出发，在顺利完成数据交互目标之后，应立即结束程序调用，充分断开其与服务器的连接。

2.2.4 温度预测

为实现干式变压器温度预测目标，建立 VC++ 工程使其直观显示温度变化趋势。在具体实施过程中，可借助 Chart 组件，对于温度数据呈现方式实施优化，通过采用折线图的方式，对坐标格式、图形颜色等属性实施管理，实现整体数组的全面显示。同时，可借助 Timer 组件，结合监控需求，设定定时器，通过不断动态刷新数据，保证温度预测图的合理性，实现温度信息的实时性，进而实现实时预测目标。

2.2.5 设备定位

在下位机监控终端运行期间，为实现设备定位目标，可借助 GPRS 模块定位变压器，并基于百度地图 API 对监控设备位置地图实时处理，采用经纬度的方式，实现数据传输目标。在具体操作过程中，可添加 API 库，并根据变压器设备监控目标，合理载入地图信息。在创建完成之后，需合理设定地图放大倍数，优化显示设置，增强设备定位的精准、清晰性^[3]。

2.2.6 报警提示

在干式变压器运行期间，不可避免受相关不利因素的干扰，为实现对故障问题的及时处理，可借助监控中心报警功能，结合变压器监控目标，合理设置温度报警提示，便于能够及时提醒运行人员变压器的故障状态。针对干式变压器而言，结合三相绕组信息，基于客观事实出发，一旦任一相产生温度异常变化并超过额定报警值，则会自动弹出报警提示框，通常情况下，以 130℃ 为标准，一旦超过则会立即进行报警提示，具体提示信息包括温度报警、设备编号等，以此提升故障处理效率。

2.2.7 监控界面

针对干式变压器监控界面，应结合远程监控中心目标、需求进行合理设计，顺利实现用户端信息处理目标。在这一过程中，相关人员可调用 DLL，充分发挥其数据传输功能，实现数据报警、修改、查询，在此基础上，利用温度预测等技术，实现人机交互目标。为保护用户信息的安全性，应做好用户账号登录等工作，在顺利进入用户中心之后，主要包括设备运行状态、监控设备数量、报警设备数量、通讯密码、服务器地址等多项信息，从全局入手，实现设备监控状态的综合分析。从监控中心模块来看，其主要包括地图展示、数据列表，实现对干式变压器设备安装地点、三相数据、运行状态日期等显示，保证监控信息的全面覆盖。

2.2.8 上位机软件系统

在对干式变压器温度监测过程中，需结合具体需求，应用上位机软件系统，充分发挥实时数据远程监控、温度变化异常预警、历史数据回放、温度导出至 Excel、高温报警等功能。为实现温度变化的高效管理，主要是采用人机交互界面，通过打造高效工程平台，在面向客户的前提下，顺利实现多用户权限管理目标。针对软件系统主要功能而言，通过将其上传至工业物联网管理平台，实现对温度数据的高效处理、整合，并借助云组态，结合具体情况，对干式变压器运行状态、温度实时显示、故障情况进行可视化处理，针对温度测量技术指标如表 1 所示。

表 1 温度测量技术指标

序号	测量点数	六个点
1	测温范围	0~200℃
2	温度分辨率	0.1℃
3	测温频率	1Hz
4	通道数量	6

在明确温度测量技术指标的前提下，应明确电气规格，例如，供电电源、跳闸继电器、风机控制继

电器、故障继电器、报警继电器、供电电源、数字输出等参数，保证实际规格的合理性。

2.3 测温光纤传感技术分析

2.3.1 荧光光纤测温仪

针对干式变压器监控系统，其主要是借助荧光光纤测温仪的优势，建立测温系统，结合故障监测目标，利用光纤传感器、监控主机、光纤测温仪、人机交互软件等构件，实现设备内多点温度的全面、实时监测。针对荧光光纤测温仪应用原理而言，光纤具有电磁绝缘性、宽频带等优势，可结合实际情况，顺利打破电子温度传感器的限制。在具体应用过程中，通过利用温度实现对光信号的综合调制，进而实现远距离传输目标。同时，光纤具备可弯曲传输、质量小的优点，将光纤本身作为传感元件，实现对光强度、相位的检测。总的来说，需依靠光纤温度传感器的作用，实际信息如表 2 所示^[4]。

表 2 光纤温度传感器的机理与特点

机理分析	特点分析
光吸收	吸收砷化镓等半导体
荧光	激发荧光与温度的相关性
光干涉	白光、薄膜干涉
光散射	瑞利、喇曼散射
热致光辐射	光导棒、石英

荧光光纤测温仪在应用期间，需借助光纤传感器的优势，使其对具有温度信息的光信号进行接收，并结合具体需求，将其解调为合理的温度数值，进而实现高效温度测量目标。针对应用模式而言，相关人员需合理规划报警设定值，如果实际测量值较大，会直接发出报警信号。结合实际功能分析，主要包括声光报警、温度显示、故障诊断等情况，确保其能够顺利适用于各种规模的实际应用需求。从应用优势方面来看，应用荧光光纤测温仪可在一定程度上避免影响绕组的绝缘系统，由于测温嵌件探头尺寸较小，在具体操作中，可直接对变压器绕组绝缘头直接浇注。在充分发挥其不导电优势

的情况下，保证探头可以靠近绕组，提升测温结果的准确性，有效保证产品电气性能。

2.3.2 工业物联网监测与传统测温的对比分析

工业物联网监测与传统测温对比如表 3 所示。

表 3 工业物联网监测与传统测温对比

序号	项目	传统测温	工业物联网监测
1	测温原理	采用 Pt 电阻测温，是基于电阻的热效应进行温度测量，即电阻体的阻值随温度的变化而变化的特性	采用荧光光纤测温，是基于稀土荧光物质的材料特性实现，荧光寿命的长短取决于温度的高低。
2	安装方式	由于是金属热电阻和半导体热敏电阻，只能安装在低压线圈端部或铁心预留浇注孔内	光纤不受电磁信号干扰，耐腐蚀，电绝缘好，可与导线并绕在高压、低压线圈内，也可装在铁心预留孔内，实现全方位监测。
3	测温精度及范围	精度为±2℃；范围为-40~200℃，测量点远离发热点，误差大	精度为±1℃；范围为-40~260℃，由于是沿导线并绕，测温更准确。
4	传输方式	485 接口	485、Modbus、GPRS 无线通信模块，将其与 GPS 技术相结合，实现无线传输、异步收发。

3 工业物联网温度实时监测系统应用实例

3.1 干式整流变压器光纤测温点布置位置

应用铁路系统的 ZQSCBH17-1000/10 干式牵引整流变压器如图 4 所示，高压绕组、低压绕组均为轴向分裂结构，测温点植入 12 点光纤测温点，均为上部

绕组距绕组电抗高度上端 1/3、幅向距绕组内径侧 1/3 处线饼处，下部绕组距绕组电抗高度上端 1/4、幅向距绕组内径侧 1/3 处线饼处，通过 ST 型光纤连接器接入实时监测系统。

3.2 工业物联网温度实时监测系统主界面

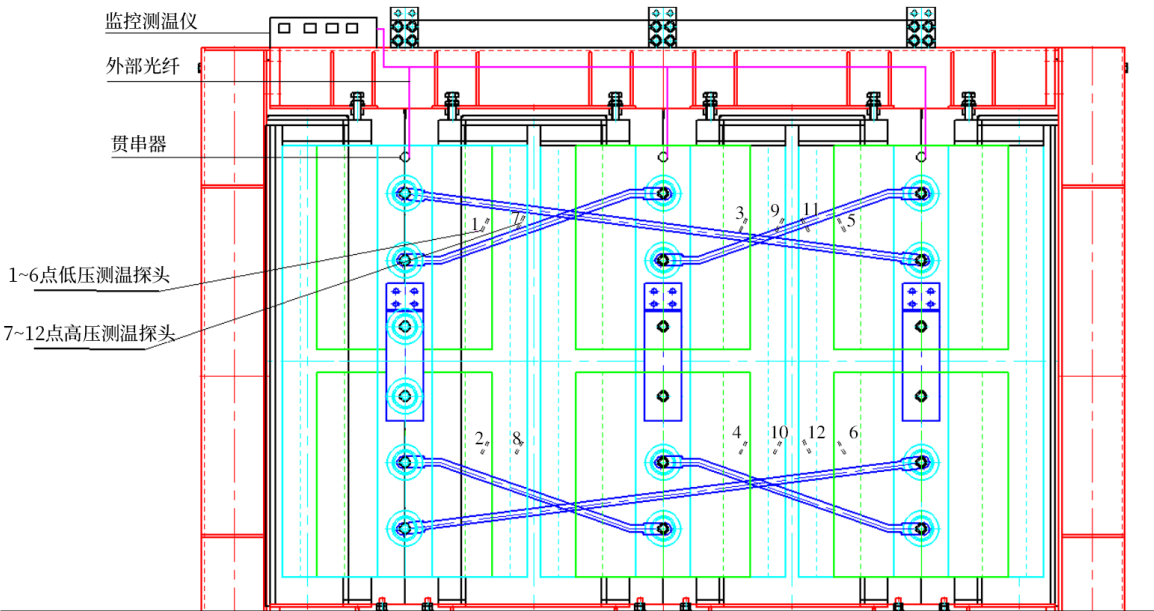


图 4 ZQSCBH17-1000/10 干式牵引整流变压器测温点分布

工业物联网在线监控系统如图 5 所示，是在可编程序控制器自动控制的基础上进一步开发出的智能化监视和遥控系统，实现人机对话和系统的显示。监控系统主要包括主界面、人员管理系统、自控监视系统、自控遥控系统、数据管理系统以及相关资料和帮助系统。



图 5 工业物联网温度实时监测系统主界面图

3.3 工业物联网温度实时监测系统数据分析

根据牵引整流变压器在 100% 额定负载条件下，V 级绝缘耐热等级温升限值 75K，工业物联网温度监测系统通过采集干式变压器绕组最热点温度数据实时监测，ZQSCBH17-1000/10 干式牵引整流变压器采用传统 PT100 测量绕组温度 90℃，变压器工程设计计算绕组平均温升 68K，光纤探头测量热点温度能准确反映绕组绝缘老化状况，并通过程序算法估算变压器寿命，监测数据如表 4 所示。

表 4 工业物联网温度实时监测数据 (环境温度 25℃)

光纤探头位置	显示温度/℃	热点温升/K	寿命估算/年
位置 1	100.2	75.2	45.8
位置 2	99.6	74.6	45.9
位置 3	101.3	76.3	45.7
位置 4	101.1	76.1	45.6
位置 5	100.8	75.8	45.8
位置 6	103.7	78.7	45.2
位置 7	102.4	77.4	45.3
位置 8	100.8	75.8	45.8
位置 9	101.6	76.6	45.6
位置 10	104.2	79.2	45.1
位置 11	103.3	78.3	45.2
位置 12	100.7	75.7	45.8

以上监测系统实测热点温升平均值为 76.6K，比工程设计计算平均温升高 8.6K，比传统测量方法温升高 11.6K，利用工业物联网温度监测系统采用光纤直接测绕组温度更准确，寿命满足 40 年技术要求。

4 结束语

综上所述，结合工业物联网通信技术，建立干式变压器工业物联网温度在线监测系统，有利于实现干式变压器的稳定运行。在具体应用过程中，通过借助荧光光纤测温仪、上位机软件系统，实现对变压器设备的统一化、专业化、标准化管理。同时，基于干式变压器温度变化，合理预测变压器绝缘寿命老化情况，便于相关人员提前预防，有效减少经济损失。远程监控系统的技术应用对于干式变压器应用具有划时代意义，不仅顺应了未来工业自动化发展趋势，同时还有利于减少故障危害，为电力系统可靠稳定运行提供有力的技术保障。

参考文献

[1] 王东阳，蔡小虎，夏颖怡，等.干式车载牵引变压器绕组区域动态温度计算模型 [J].铁道学报，2024，46（4）：38-46.

[2] 郭蕾，蔡丰林，袁帅，等.动车组干式车载牵引变压器质量-热点温升均衡优化 [J].交通运输工程学报，2023，23（5）：152-162.

[3] 杨青，李庆庆，胡清钟，等.基于物联网的干式变压器智能工厂研究及应用 [J].大众科技，2023，25（7）：100-103.

[4] 郑茗泽.干式变压器温控传感器故障诊断与恢复方法研究 [D].昆明：云南师范大学，2023.

(收稿日期：2024-09-27)