干式变压器智能系统构建策略及关键技术研究

雍明超[1]，王　磊[2]，祁　招[1]，庞杰锋[1]，姜睿智[1]，孟　乐[1]，王胜辉[1]，邵向阳[1]

（1. 许继集团有限公司，河南 许昌 461000；2. 国网河南省电力公司电力科学研究院，河南 郑州 4500011）

摘要：针对干式变压器在运维中存在的智能化程度较低、运维不便的现状，计及多种因素提出了智能干式变压器的构建策略，根据应用需求的异同设计了基础型、强化型和全感增强型三种差异化智能化方案。为支撑干式变压器的智能化功能，研究了智能干式变压器在线监测数据预处理方法、故障预警、高温异常处理及变压器寿命预测等核心算法，并提出了具体的实现方法。最后结合物联感知终端在 10 kV 干式变压器上进行了功能验证，结果表明可实现设备状态感知、健康评估及能效管理，能够支撑设备的智能运维，具有较大的应用意义及推广前景。

关键词：干式变压器；物联感知终端；故障分析；寿命预测；智能运维

Research on construction strategy and key technology of intelligent system for dry-type transformer

YONG Mingchao[1], WANG Lei[2], QI Zhao[1], PANG Jiefeng[1], JIANG Ruizhi[1], MENG Le[1], WANG Shenghui[1], SHAO Xiangyang[1]

(1. XJ Group Co., Ltd, Xuchang 461000, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the current situation of low intelligence and inconvenient operation and maintenance of dry-type transformer in operation and maintenance, considering many factors, the construction strategy of intelligent dry-type transformer is proposed. According to the similarities and differences of application requirements, three differentiated intelligent schemes of basic type, enhanced type and full sense enhanced type are designed. In order to support the intelligent function of dry-type transformer, the core algorithms such as on-line monitoring data preprocessing method, fault early warning, high-temperature anomaly processing and transformer life prediction of intelligent dry-type transformer are studied, and the specific implementation method is put forward. Finally, combined with the IOT sensing terminal, the function is verified on the 10 kV dry-type transformer. The results show that it can realize equipment state sensing, health assessment and energy efficiency management, support the intelligent operation and maintenance of equipment, and has great application significance and promotion prospect.

Key words: dry-type transformer; construction strategy; failure analysis; life prediction; intelligent operation and maintenance

国家电网有限公司总部科技项目资助（面向配电物联网的多维监测与运行辅助决策关键技术研究：5400-202024116A-0-0-00）

0 引言

目前，由于干式变压器具有成本低、耐热\导热性能好和节能环保等一系列优点，在配电网、煤矿和石化等行业的应用及其广泛[1-3]。干式变压器作为供电系统的重要元件，其设备的健康运行直接影响工矿企业的生产可靠性和安全性。众多研究机构和设备厂家对干式变压器的故障机理和监测方法进行了长期的技术研究和应用实践，文献[4]对各类配电变压器质量进行了长时间的监控，发现温升、局部放电等现象在运行中经常导致绝缘故障的共性问题。文献[5]分析了干式变压器老化会造成绝缘材料中的电场分布畸变严重，进而影响变压器的运行寿命等问题。文献[6-7]建立了多传感器信息融合的干式变压器的故障监测与预警系统，支撑了全矿井数字化的建设。文献[8]实现了基于云服务的干式变压器远程监测终端，对干式变压器的温度、电参量进行实时监测，并根据温度对风机等进行就地联动。文献[9-10]基于变压器在线监测参量提出了智能化诊断算法。文献[11-17]探讨了干式变压器绝缘故障发生机理、表现特征等理论问题，并对多种局部放电技术在干式变压器绝缘诊断的应用方法及效果进行了分析。文献[18-19]对干式变压器的寿命损失计算方法及评判要求进行了详细阐述。

虽然干式变压器智能化理论研究取得了一定的成效，但是针对干式变压器的智能化手段还更多地停留在单一参量监测、离线分析等阶段，难以满足新技术的发展和设备运维的要求。基于此构建了干式变压器基础型、强化型和全感增强型三种差异化智能方案，并对在线监测数据预处理方法、故障预警、高温异常处理及变压器寿命预测等核心边缘计算算法进行了理论及实现方法的研究，以支撑干式变压器的实时状态感知、健康评估。

1 干式变压器智能系统构建策略

目前，由于配电网、工矿企业等用户运维人员的缺乏，且设备一旦出现故障会造成巨大的经济损失，亟需改变以前粗犷式的维护，实现精准主动运维，从而节约人力、物力。因此，在干式变压器设备生产、优化运行和运维检修等全寿命周期内通过技术手段实现 “可观、可测和可控”，实现精益化管理及资产价值最大化是一个迫切的需求。基于此，以一二次融合、物联网技术为基础构建干式变压器智能系统，实现设备实时状态感知、故障智能研判，具有较大的意义[10,16]。

1.1 智能干式变压器功能分析

智能干式变压器由变压器本体、附件、智能物联感知终端及感知设备共同组成。欲实现干式变压器的智能运维，需要对电气量、设备状态量和环境量进行实时监测及智能分析。通过加装电压电流互感器进行电气量的测量，实现电压、电流、功率、功率因数、频率、谐波、电压合格率、过电压、欠电压、缺相、失电压、功率因数越限、频率偏差、三相不平衡度和谐波含有率等的计算和判别，此类功能类似于配电台区TTU的功能；设备状态量感知主要通过加装桩头测温传感器、光纤测温传感器等各类传感设备，实现设备状态的精准感知，并以此信息为基础进行设备健康状况的判断；环境量的监测主要通过水浸、烟雾传感器和视频设备等对干式变压器的工作环境进行监控，实现设备运行环境、安防和设备状态的实时感知。智能物联感知终端实现对各类数据的采集、边缘计算及对外交互，其功能及设备接口见表1。

1.2 干式变压器智能系统方案

智能干式变压器系统遵循“云管边端”物联网体系，通过智能物联感知终端聚合所有传感器信息，并以应用软件（APP）方式实现业务功能的自由扩展，实现干式变压器的状态感知、健康评估及能效管理等功能[20-21]。智能物联感知终端实现干式变压器的状态实时采集与处理，并通过无线/有线方式以IEC 104或MQTT物联网协议与主站系统进行数据交互，智能干式变压器系统方案如图1所示。

表 1　智能干式变压器系统功能及传感接口分析

Tab. 1 Analysis of function and sensing interface of intelligent dry-type transformer system

功能大类	功能小类	功能描述	数据来源及接口
电气监测	电气量测量	测量电压、电流、功率、功率因数、频率和谐波	
	电能质量管理	电压合格率、三相不平衡度、谐波含有率等电能质量指标的监测统计	互感器，交流信号
	电能量采集	正反向有功电度量、四象限无功电度量	
	开入量采集	采集柜门开合状态、风机状态和烟雾报警等信号	开关量信号，24 V 开入量
状态监测	绕组温度监测	采集绕组及铁心温度	荧光测温传感器，RS 485 接入
	桩头温度监测	采集变压器 A、B、C 三相桩头温度	感应取电表带式传感器，RS 485 接入
	局部放电监测	采集三相局部放电信号	高压侧安装高频耦合传感器，RS 485 接入
	环境温湿度监测	采集变压器环境的温度、湿度	有线传感器，RS 485 接入
	振动信号监测	采集变压器本体振动信号	加速度传感器，RS 485 接入
	水浸监测	采集变压器部署地的水浸情况	开关量接入
	烟雾监测	采集变压器烟雾状态	开关量接入
	视频监控	采集变压器及周边视频信息	RJ 45 网口接入
智能物联感知终端	边缘计算	通过温度预测变压器的剩余寿命	数据来源于绕组温度监测
		变压器绝缘性能分析	数据来源于局部放电监测、绕组温度监测等
		本体过温、过载、过电压、欠电压、断相、水浸和火灾等异常工况检测，根据异常工况结果对风机进行联动控制	数据来源于绕组温度、桩头温度和交流量等
			数据来源于异常工况检测结果

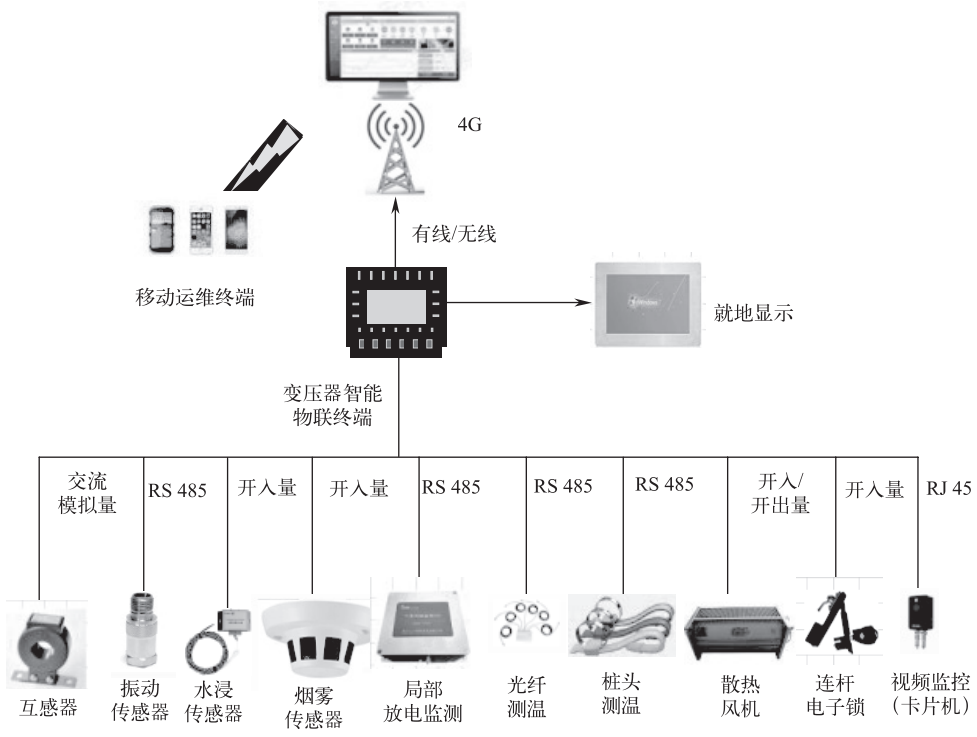

图 1　智能干式变压器系统方案

Fig. 1 Scheme of intelligent dry-type transformer system

1.3 智能干式变压器传感部署及构建方案

根据干式变压器的设备特点及应用环境，按照一体化设计原则，在干式变压器本体上部署互感器、振动传感器、水浸传感器、局部放电传感器、光纤测温传感器及智能物联终端等设备，实现干式变压器本体关键信息的实时监测、分析和联动处理。智能物联感知终端安装于干式变压器本体顶部，其底座固定在高低压绝缘子支架上，可以根据变压器侧出线的位置沿着绝缘子支架调整。同时在变压器安装框架上部署安装烟雾传感器、智能锁和视频监控等设备，实现对环境信息的监控及安全保护，实现设备的状态感知要求[6,8,11,15,17]。综合考虑应用的需求及运行场景，干式变压器智能系统可以分为基础型、强化型和全感增强型等几种类别，具体功能约束见表2。

表 2 智能干式变压器差异化配置原则

Tab. 2 Differential configuration principle of intelligent dry-type transformer

类别	功能约束
基础型	①配置互感器，测量电流、电压，用于谐波分析和三相不平衡等；②配置温度传感器，测量低压母排、桩头温度；③、配置环境温湿度传感器，测量环境温湿度信息
强化型	①加装光纤测温设备，测量三相线圈和铁心温度；②加装水浸传感器，用于监测变压本体水浸情况；③加装振动传感器，用于监测变压器振动信号
全感增强型	①加装烟雾传感器，用于监测变压烟雾；②加装局放传感器，监测变压器局放信号（选配）；③加装智能锁，用于柜前、后柜门的智能操作；④加装视频监控设备，具有视频和热成像功能，用于变压器的实时监控和变压器热成像温度监测

干式变压器的工况条件对防爆、防尘和防水的要求较高，尤其是在有瓦斯、煤尘且有潜在爆炸危险的矿井下应用时，应基于“强化型”或“全感增强型”的典型配置方案进行选择，并且采用具有防爆性能的智能物联终端通过光纤方式与站端交互。而对配电网、矿井地面工作的干式变压器则选用“基础型”即可满足要求。由于局部放电监测在干式变压器中的应用暂时没有取得有效成效，难以真正指导实际的运维工作，且造价较高，仅建议在试点时选用作为定性参考的依据或学术研究。

2 干式变压器智能物联终端构建

智能物联终端起到数据的采集、边缘计算和对外交互的作用，是干式变压器智能系统的核心。

2.1 智能物联终端硬件系统构建

终端采用自主可控的龙芯LS2K系列的CPU芯片、FMK50T4系列的FPGA芯片进行设计，主要由CPU模块、通信接口模块、交流采集模块和开入开出扩展模块等组成，其中CPU的主频为800 MHz，内存为2 GB、存储器为8 GB，整体功耗小于25 W。终端硬连接接口具有4路电流（1 A）、3路电压（220 V/380 V）、1路零序电压（10 V）共8路交流模拟量的采集功能，交流采集模块支持24点、32点、48点和80点采样，可根据实际需求设定。终端提供24 V内激励方式的4路开入量接口，用于接入水浸传感器、烟雾传感器及智能锁等设备的状态信息，同时具备6路硬开出接点，用于联动控制等处理。终端通信接口提供6路RS 485通信接口，用于接入光纤测温、桩头测温、环境温度度、局部放电和振动传感器等监测参量，其中2路支持RS 485/RS 232切换，串口速率可根据实际情况选用1 200 B/s、2 400 B/s、4 800 B/s、9 600 B/s、19 200 B/s和11 5200 B/s。终端硬件架构如图2所示。

2.2 智能物联终端软件系统构建

智能物联终端软件系统由底层的操作系统、设备驱动模块、接口API和应用业务程序四大部分组成。操作系统模块根据应用要求在Linux系统上定制裁剪而成，是智能物联终端系统调度、任务分配、文件操作、数据存储和管理等功能的支撑模块。设备驱动模块是终端硬件设备的驱动接口，是外围设备正常运行的保障。接口API是业务应用功能的接口程序，主要用于业务相关的数据处理、数据通信及构建容器功能框架等，为业务程序提供基础函数接口。应用业务程序基于轻量化LXC容器技术以支持各类APP灵活部署，实现电气量监测、状态监测和边缘计算等全部的应用功能[20-24]，终端软件系统架构如图3所示。

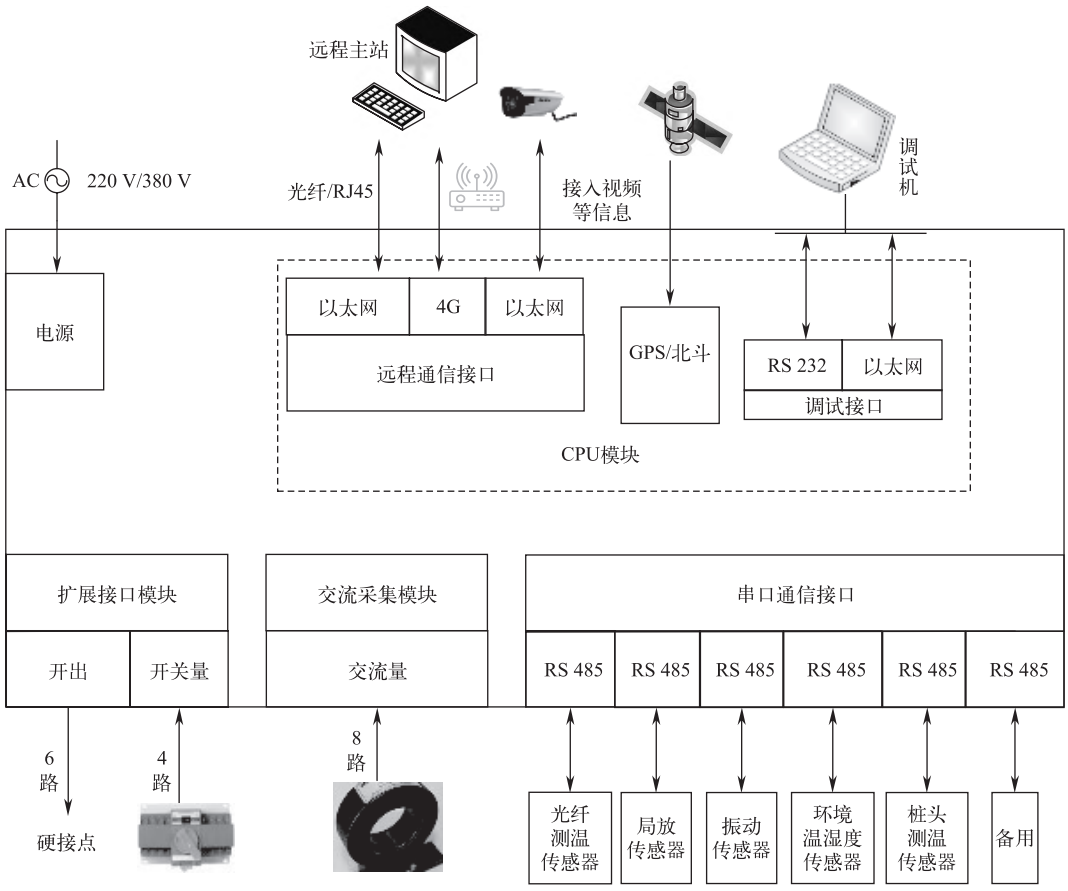

图 2　硬件系统构成图

Fig. 2 Hardware system composition diagram

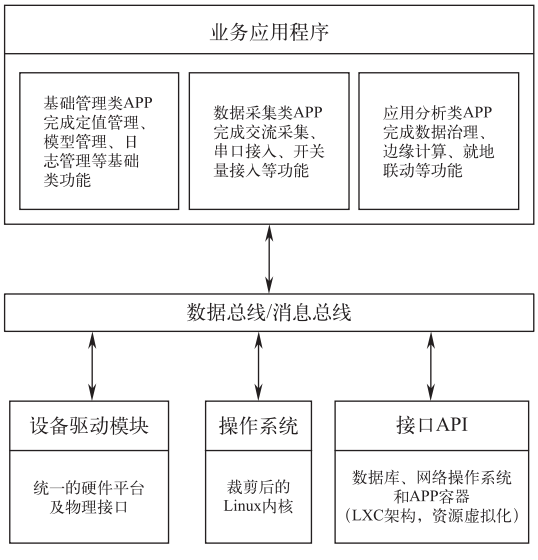

图 3　软件系统结构框架

Fig. 3 Software system architecture framework

终端软件系统可以部署4个以上的容器，单个容器支持部署多个应用APP软件，实现软件定义终端。各业务应用APP基于微应用架构进行设计，APP间采用MQTT方式交互，信息建模采用JSON+Profile方式进行，可以根据业务实际需求随需装载，灵活应用。

2.3　智能物联终端箱体设计

根据干式变压器的特殊应用场合，智能物联终端必须满足严酷的运行条件，部分场合同时要具备防爆功能。基于此，采用复合铸铝材料，利用一体成型的工艺进行箱体的制造。同时在箱体外喷砂后喷涂不低于100 μm的浆粉，使箱体具有强度高、耐化学性酸碱腐蚀的功能。在对外交互接口方面，统一采用航空插头进行电气连接，适于在环境恶劣的场所安装。并且在交流采集端口增加过热、过载和大电流限流保护措施，能够承受5倍最大工作电流10个周波的冲击。物联终端箱体结构如图4所示。

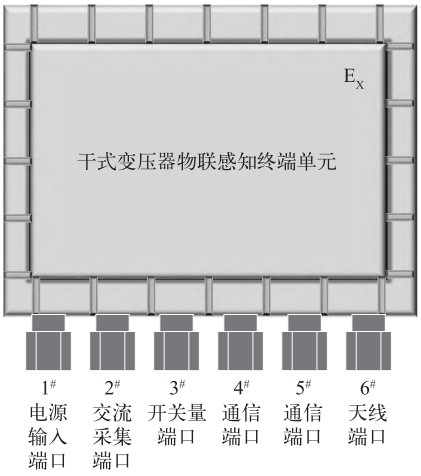

图 4　智能物联终端箱体结构示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of Intelligent IoT Terminal Box Structure

由图4可知，1号端口为电源输入端口，用于供电电源线缆的接入。2号端口为电流、电压等交流量线缆的接入端口。3号端口用于接入状态信息、联动控制开入开出的线缆。4号与5号端口为通信端口，用于接入各类传感设备的RS 485信号、对外网络通信和设备功能调试等通信线缆。6号端口为预留的天线接口通道，箱体整体的防护等级可达到为IP68。

3　设备边缘计算技术及实现

干式变压器智能化的主要功能有电气量监测、状态监测和边缘计算等几部分，其中数据预处理是边缘计算的基础，设备故障预警、异常处理和设备寿命预测等是智能化功能的核心。

3.1　数据预处理技术

干式变压器的桩头温度、绕组温度等主要表征设备故障的量值都是缓变量，并且由于传感器、采集设备及环境的影响均可能会引入干扰噪声，对测量的实时值进行分析并不能真正反映设备的实际状况。为了提高数据的可用性及后续分析的准确性，采用滑动窗中值滤波的方法进行数据的预处理。算法预设一个长度为N的滑动窗，每采集一次数据将量值放入滑动窗的尾部，而丢弃原来滑动窗最前的一个数据，滑动窗沿时间滑动，则窗口中始终有N个数据，同时对窗口内数据排序并把中位数作为滤波后值输出为后续分析使用[21]，算法原理及数据处理流程分别如式（1）和图5所示。

$$y(i+k)=\text{median}(x(i),x(i+1),...,x(i+N-1)) \quad (1)$$

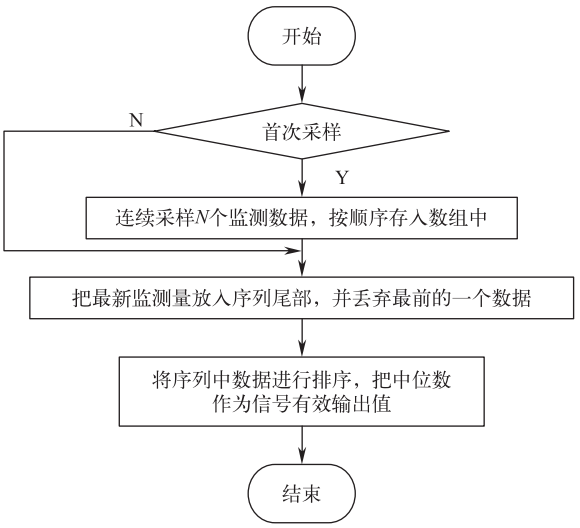

图 5　数据预处理算法流程

Fig. 5 Data preprocessing algorithm flow

由于干扰点存在的时间短、偶然性大，采用滑动窗中值滤波算法能较好的抑制干扰点，后续算法使用的数据均为通过中值滤波处理后的数据。

3.2　基于温度的故障分析算法

对干式变压器的绕组及高压侧电缆头进行实时温度监测可以实时获取温升变化情况，并可以间接反映设备故障。对预处理后的温度数据进行阈值判断、温度突变判别、三相不平衡判别等综合分析，其判别算法为

$$\begin{cases} T_n > T_{\text{set1}} \\ \left|\Delta T_n\right| > T_{\text{set2}} \\ \left|\Delta T_\varphi\right| > T_{\text{set3}} \end{cases} \quad (2)$$

式中，T_n为某相桩头或绕组的温度数据；$|\Delta T_n|$为统计相邻周期内温度变化量；$|\Delta T_\varphi|$为相间同类温度的差值；T_{set1}、T_{set2}和T_{set3}分别为用于温度超限、温度突变和相间温度不平衡温度变化的设定阈值。

当满足式（2）任一条件，即可判断为变压

器温度告警。

3.3 设备故障预警算法

为更好地分析设备故障状态，提出利用区间统计数据进行方差分析的设备预警算法[22]。其算法的基本原理是：首先对设备的桩头温度等监测数据通过预处理剔除相应的干扰信号；然后对该区间内的监测数据进行数理统计，计算出一二级预警的置信区间。最后对该监测量进行一阶差分（求导）运算，计算出监测数据的变化率，根据该监测数据和变化率得出预警状态，其算法流程如图6所示。

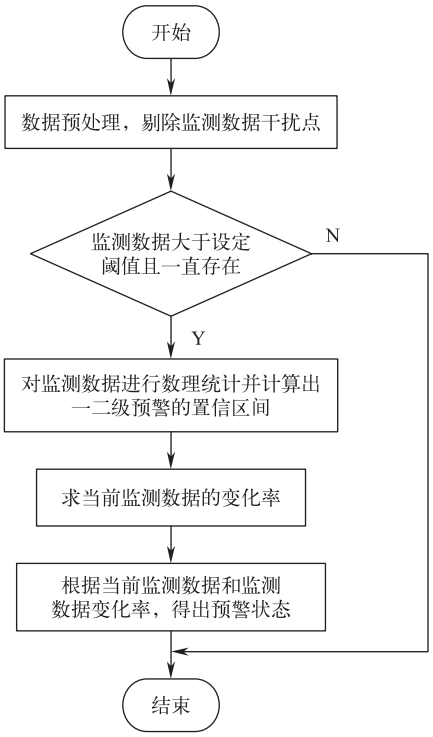

图 6 故障预警算法流程

Fig. 6 Fault warning algorithm process

一二级预警的置信区间公式为

$$\left[\bar{X}-\text{defVariance}K_1\times\sigma,\bar{X}+\text{defVariance}K_1\times\sigma\right] \quad (3)$$

$$\left[\bar{X}-\text{defVariance}K_2\times\sigma,\bar{X}+\text{defVariance}K_2\times\sigma\right] \quad (4)$$

式中，X、σ分别为该区间内监测量的均值和标准差；defVarianceK_1，defVarianceK_2分别为一二级预警的常数因子，需根据实际运行情况设定。

通常对不同故障进行模拟得出尽可能多的故障样本，设置置信水平为95%或以上计算出常数因子。当一级预警变化率阈值（SlopeK_1）和二级预警变化率阈值（SlopeK_2）根据实际情况设定后，即可进行设备预警的判别，其判据的具体流程为：

1）当该某项监测数据处于（X − defVariance$K_1\times\sigma$，$\bar{X}$+defVariance$K_1\times\sigma$）区间内时，则判定为正常状态。

2）当某项监测数据处于[$\bar{X}$ + defVariance$K_1\times\sigma$，$\bar{X}$+defVariance$K_2\times\sigma$)区间内且变化率＞SlopeK_1时，则判定为一级预警状态。

3）当某项监测数据≥$\bar{X}$+defVariance$K_2\times\sigma$且变化率在（SlopeK_1，SlopeK_2]区间时，则判定为一级预警状态。

4）当某项监测数据大于$\bar{X}$ + defVariance$K_2\times\sigma$且变化率＞SlopeK_2时，则判定为二级预警状态。

5）当某项监测数据处于($\bar{X}$ − defVariance$K_2\times\sigma$，$\bar{X}-$defVariance$K_1\times\sigma$]区间内且变化率＞SlopeK_1时，则判定为一级预警状态。

6）当某项传感数据≤$\bar{X}-$defVariance$K_2\times\sigma$且变化率在（SlopeK_1，SlopeK_2]区间时，则判定为一级预警状态。

7）当某项传感数据＜$\bar{X}-$defVariance$K_2\times\sigma$且变化率＞SlopeK_2时，则判定为二级预警状态。

3.4 变压器高温异常处理

通过综合三相绕组温度、铁心温度、烟雾传感数据及变压器负载率等参数进行变压器高温异常处理的判断。首先根据三相绕组温度、铁心温度进行分析计算，联动烟雾传感器信息综合判断变压器火灾跳闸和变压器高温跳闸结论。然后通过电气量计算出配变负载率，并根据阈值判断出变压器的过载跳闸状态。最后融合变压器火灾跳闸、过载跳闸及高温跳闸状态值综合判断出变压器跳闸信息并触发相应的出口，其算法流程如图7所示。

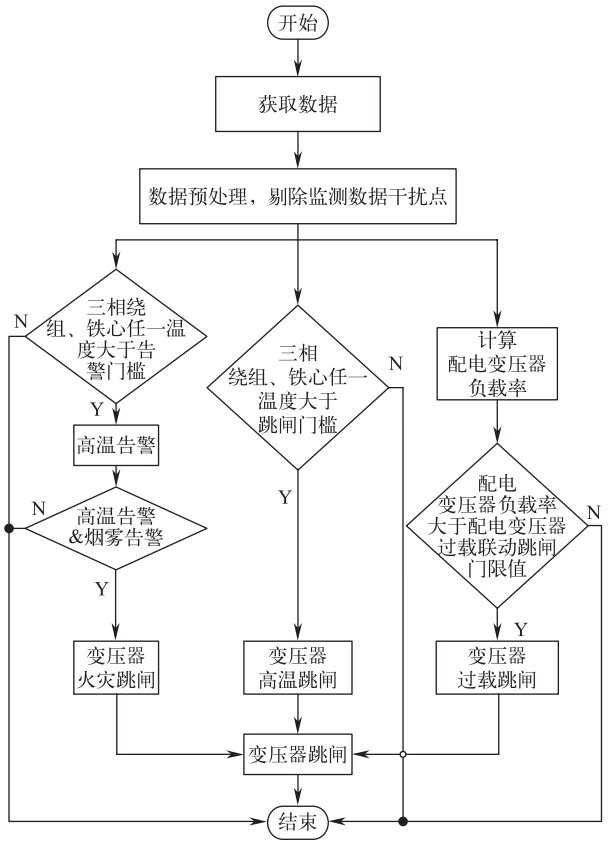

图 7　变压器高温异常处理流程

Fig.7 High temperature abnormality handling process of transformer

3.5　干式变压器寿命预测分析

为了准确地计算变压器寿命，根据光纤绕组测温的监测数据，参照文献[19]的部分思想进行实际计算。首先统计出1 h内的三相绕组的平均温度的最大值，乘以热点系数计算出最大计算热点温度，设为T_{max}；然后基于热老化率分析干式变压器的寿命损失值，干式变压器寿命老化率计算公式一般按照20年（180 000 h）计算，但是干式变压器的设计寿命要求一般按照30年（262 800 h）年或其他值，不可直接套用计算。需要根据实际情况以180 000 h为基准进行寿命损失系数（t）折算。以30年为例，其寿命损失的系数为1.46（262 800 / 180 000 =1.46）。当最大计算热点温度大于最高热点温度定值，直接触发变压器跳闸，否则根据热点温度每增加6 ℃老化率加倍、热点温度低于额定值6 ℃，寿命损失速率减半的原则，并结合寿命损失系数可以得出1 h内损失寿命计算公式为

$$\text{Prelife}=\max\left(2^{\frac{T_{max}-T_{set}}{6}}\tau,\ 0.5\tau\right) \tag{5}$$

最后根据计算的结果，更新干式变压器的剩余寿命和实际运行时间，其实现流程如图8所示。

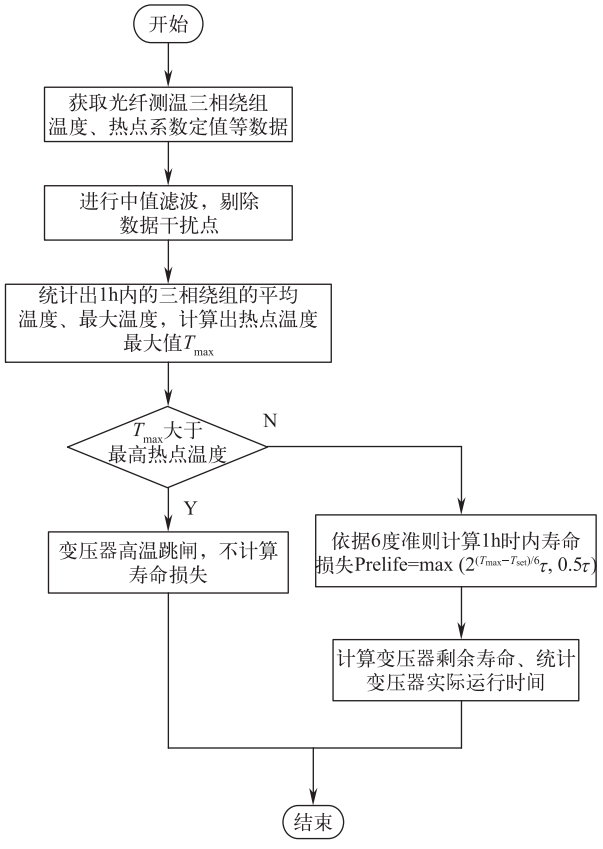

图 8　干式变压器寿命预测算法流程

Fig. 8 Life prediction algorithm flow of dry-type transformer

4　应用分析

根据图1所示的干式变压器全感知系统方案，分别结合某公司10 kV干式变压器本体进行功能验证，该变压器的耐热等级为F级，故最高绕组热点温度定值设置为145 ℃[19]。经测试验证，其基本参数、序分量、负载率、损耗、电能质量、电压越限告警、断相、失电压、停电、重载告警和过载告警等均能根据电气量监测信息实现智能分析。终端运行状态、柜门、风机、烟雾和水浸等状态能够实时采集并能根据温度等进行联动，能够实现干式变压器的智能化。根据3.5

节的计算方法，对此干式变压器选取不同时刻施加不同温度对其寿命预测功能进行验证，其寿命预测的测试结果见表3。

表 3　寿命预测的测试结果

Tab. 3 Test results of life prediction

T_{max}/℃	上次剩余寿命 /h	损耗寿命 /h	剩余寿命 /h
104	261 760.39	0.73	261 759.66
111.2	261 752.19	0.73	261 751.46
112	261 756.31	0.81	261 755.50
116	261 754.69	1.46	261 753.23
150		高温跳闸	

5　结束语

针对干式变压器的智能运维需求，以一二次融合技术及物联网技术为基础，构建了干式变压器基础型、强化型和全感增强型三种差异化智能方案。同时对在线监测数据预处理方法、故障预警、高温异常处理及变压器寿命预测等核心边缘计算算法进行了理论及实现方法的研究。配合某公司10 kV干式变压器进行了整体测试，测试表明可实现实时状态感知、健康评估，支撑设备的全生命周期的智能运维，具有较大的应用前景。

干式变压器智能化是配电网及工矿企业设备智能运维的必然选择，由于干式变压器状态数据的积累不足，很多基于大数据的故障处理方法无法应用。后续还需要设备厂商、用户等在传感器的一二次融合设计、故障数据的积淀及设备故障算法的仿真应用等方面进行深度合作，实现各类应用场景的差异化配置标准及优化故障分析模型，真正达到设备状态检修及智能运维的要求。

参考文献

[1] 张承志，韩谢村．10 kV干式变压器的选型[J]．电网技术，2007(S2)：391-393．

[2] 蔡定国，唐金权．干式变压器用绝缘材料、绝缘结构与系统综述[J]．绝缘材料，2019，52(11)：1-8．

[3] 戚宇祥，宋丹菊，郑玲．立体卷铁心敞开式干式变压器的结构技术特点和发展前景[J]．变压器，2018，55(6)：32-38．

[4] 张锦，付超，应斯，等．配电变压器产品的国家监督抽查结果和质量问题分析[J]．变压器，2017，54(3)：64-69．

[5] 任鹏，刘红磊，李云鹏，等．基于活化能的干式绝缘设备的寿命预测方法及应用研究[J]．绝缘材料，2021，54(3)：91-97．

[6] 万志强，宋建成，雷志鹏，等．矿用干式变压器绝缘在线监测及故障诊断预警系统研制[J]．工矿自动化，2013，39(10)：1-5．

[7] 温敏敏，宋建成，宋渊，等．矿用隔爆型干式变压器故障预警系统设计[J]．煤炭科学技术，2014，42(5)：72-76，80．

[8] 陈尔奎，贾萌，韩清春．基于云服务的干式变压器远程监控终端设计[J]．电测与仪表，2019，56(3)：97-102．

[9] 李世光，薛寒，李珍，等．基于优化模糊Petri网的矿用变压器故障诊断[J]．工矿自动化，2017，43(5)：54-57．

[10] 许倩文，吉兴全，张玉振，等．基于栈式稀疏自编码器的矿用变压器故障诊断[J]．工矿自动化，2018，44(10)：33-37．

[11] 宋建成，朱晶晶，田慕琴，等．干式变压器Nomex绝缘气隙缺陷局部放电特性[J]．高电压技术，2018，44(12)：4071-4082．

[12] 唐建伟，苏红，严家明，等．矿用干式变压器局部放电模式识别方法[J]．工矿自动化，2019，45(1)：76-80．

[13] 温敏敏，宋建成，宋渊，等．基于局部放电统计特征参量分析的矿用干式变压器绝缘状态评估[J]．高电压技术，2014，40(8)：2398-2405．

[14] 张玉振，吉兴全，于永进，等．基于时空信息融合的矿用变压器绝缘状态评估方法[J]．工矿自动化，2017，43(9)：75-82．

[15] 靳西婵，魏幼平．局部放电检测技术在矿用变压器故障诊断中的应用[J]．煤矿机械，2013，34(12)：254-256．

[16] 唐建伟，苏红，严家明，等．矿用干式变压器局部放电模式识别方法[J]．工矿自动化，2019，45(1)：76-80．

[17] 任鹏，刘红磊，李云鹏，等．基于活化能的干式绝缘设备的寿命预测方法及应用研究[J]．绝缘材料，2021，54(3)：91-97．
[18] 黎剑锋，蔡定国，唐金权，等．基于GB/T1094．12—2013的干式牵引整流变压器寿命损失计算[J]．变压器，2016，53(8)：12-15．
[19] 电力变压器　第12部分：干式电力变压器负载导则：GB/T 1094．12—2013[S]．
[20] 刘远龙，潘筠，王玮，等．用于泛在电力物联网的配电变压器智能物联感知终端技术研究[J]．电力系统保护与控制，2020，48(16)：140-146．
[21] 雍明超，路光辉，牧继清，等．高压开关综合监测装置的设计[J]．高压电器，2017，53(9)：38-45．
[22] 雍明超，路光辉，王伟杰，等．一种局部放电在线监测预警方法[P]．河南：CN105301453A，2016-02-03．

作者简介

雍明超（1984—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为高压设备智能化及智能运维。

（收稿日期：2022-06-21）