特约专栏 INVITED SPECIAL COLUMN

DOI: 10.3969/j.issn.1006-348X.2026.03.005

基于多源信息融合的智能变电站继电保护智能诊断技术研究

丁 凯[1],王冠南[1],张 韬[1],黄 琛[1],贾 科[2]

(1.国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096;2.华北电力大学,北京 102206)

摘 要:随着新型电力系统构建与智能电网建设的推进,变电站继电保护系统不断朝智能化、网络化趋势演变,新一代智能变电站推广应用在即,这对继电保护运维检修形态影响深远。然而,目前智能变电站继电保护系统的缺陷智能诊断实用化效果仍存在不足,表现在智能保护设备评价工作缺乏统一数据支撑平台,省域继电保护在线监视与诊断分析准确率不高,故障检修效率低。文中立足于二次设备回路的光纤网络和常规电缆并存,二次设备的统一数据采集模型有待完善,远程诊断及故障检修工作效率不高等现状,以源端维护方式获取电网厂站端保护系统完整监测信息和缺陷异常事件信息,提出了在厂站端和主站端建立继电保护统一监测及诊断系统,为省域电网智能变电站继电保护智能化检修提供关键技术和装备支撑,为智能变电站继电保护缺陷诊断技术领域研究提供实践参考。

关键词:信息融合;智能变电站;继电保护;缺陷诊断

中图分类号:TM 743 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)03-0022-07

0 引言

随着新型电力系统构建与智能电网建设的全面推进,变电站自动化体系正经历深刻变革。作为“电网安全运行第一道防线”的继电保护系统,其技术形态持续向智能化、网络化方向演进。新一代智能变电站即将推广应用,对继电保护运维检修模式与作业形态影响深远。在此背景下,研究继电保护设备状态精准感知与缺陷智能诊断技术,对提升电网调控运行支撑能力具有重要意义[1-3]。

然而,受限于二次系统结构复杂性与历史建设差异,当前智能变电站继电保护系统缺陷智能诊断实用化水平仍存在不足。具体表现为三个方面:一是智能保护设备运行评价与缺陷分析缺乏统一区域级数据支撑平台,海量异构信息难以汇聚融合;二是省域继电保护在线监视与诊断分析准确率尚待提高,告警信息误报与漏报现象影响运维检修人员判断准确率;三是面对突发性保护异常事件,远程故障定位与检修决策的响应效率仍存在瓶颈,无法充分释放智能变电站的技术红利。

传统调控一体化系统侧重于一次设备运行工况监视,对于构成保护逻辑回路的二次虚回路及物理链路状态缺乏有效的全息感知手段,主站端难以获取支撑精准故障分析的完整源端数据。针对省域电网智能变电站继电保护运维的实际需求,文中立足于源端维护的技术思路,通过直接获取厂站端保护系统的完整监测信息与缺陷异常事件记录,突破厂站与主站间的信息壁垒,提出了覆盖厂站端与主站端的继电保护统一监测及诊断系统架构,以实现从二次回路状态监测到保护装置缺陷智能辨识的全流程贯通。基于厂站端在运设备的台帐信息、运行信息、缺陷信息及多信息融合技术,建立统一厂站端至主站端继电保护监测系统,为主站端实现全网保护智能化检修决策提供数据支撑,对于提高现场检修效率和供电可靠性具有现实意义。

1 厂站端在线监测模型

1.1 站端数据监测模型与可视化

IEC 61850模型是智能变电站继电保护系统数据核

收稿日期:2026-04-10

作者简介:丁凯(1997),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护技术研究。

心，搭建基础数据应用平台即是对模型文件分析与重构。文中通过对智能变电站SCD文件建模，构建满足智能变电站监测所需要的外部网络结构与数据交互环境。

基于VTD方法进行配置文件SCD解析（VTD-XML是一种无提取XML解析方法），形成智能变电站智能电子设备IED之间的回路关联关系以及虚端子列表及虚通道信息。具体步骤如下：1）配置文件SCD读取，以二进制形式读取文件至内存数据库；2）配置文件SCD解析，基于VTD对文件不同类型数据进行解析，并同样存储至内存数据库；3）结果分析，文件解析完毕后，通过遍历数据库，实现关联信息匹配，并将分析结果存储至业务数据库；4）可视化呈现，展示出IED属性信息和IED之间的关联关系，主要通过SVG展示网络连接图和JUNG展示逻辑连接图。

（1）网络连接图

将IED划归为不同电压等级和间隔的分组。在一个间隔内，基于IEC 61850划分不同类型IED。实现网络连接图解读确定对应的设备位置，完成设备与网络的布局。建立网络连接图SVG的具体方法是通过访问解析结果，将各个间隔及其对应IED列表缓存起来，并按照类型重新将IED布局[4-8]。

（2）逻辑连接图

逻辑连接图[9]可依据IED与其它设备的虚回路连接产生，核心在于展示IED设备之间逻辑连接的虚通道。可根据逻辑设备、相关虚通道、数据集表示的输入输出信息及完成IED分层的逻辑连接图。具体如下：a）遵循GRAPHML标准，生成具体虚端子图，仅保存外部虚端子及其对应关系；b）以根据GRAPHML文件中的数据，进行图的解析；c）对于图中显示的虚端子的每一个端子，进行图1所示的处理。

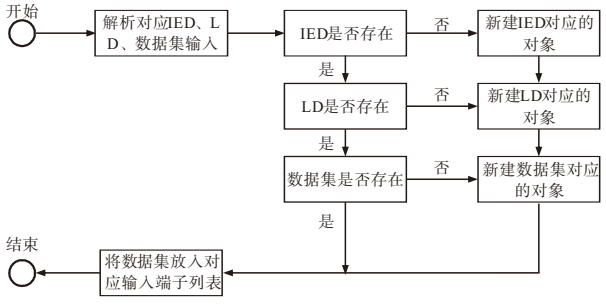

图1　连接端子处理流程图

（3）IED交互顺序图

变电站事件需要多个IED交互信息，在此过程中会涉及成千甚至上万条报文，而IED之间的交互顺序却相当不直观。为便于事件的查看并验证二次回路的正确性，文中采用了一种基于JUNG的可视化变电站智能电子装置信息交互方法。首先，在前述采用JAXB解析SCD文件时，获取变电站描述信息，包括IED描述信息、数据集描述信息、inputs描述信息、SMV报文、GOOSE报文、MMS报文、DO描述信息和DA描述信息；其次，对获取信息分类，并分别保存到MYSQL表；然后，抓取变电站相关事件，包括录波、GOOSE动作和MMS报告事件，包括发生的时间、DA信息和详细描述信息；最后，生成基于JUNG的可视化IED交互时序图，如图2所示。实现步骤及方法如下：

a）分别以每个事件的发生和接收的数据节点作为JUNG图的两个节点，事件发生时间作为JUNG的边，并对事件进行排序，遍历出所有事件发生的时间，生成IED交互时序图，图中以一个IED设备作为顶点，以交互关系作为连线。

b）根据JUNG对象在IED交互时序图中生成事件的编号及事件类型，生成便于理解的IED交互时序图。

c）图中用序号表示事件发生时间，箭头表示信息方向。

d）图中变电站箭头可展示事件的详情，包括事件信息、事件内容、数据集信息，以及事件变化的状态[10]。

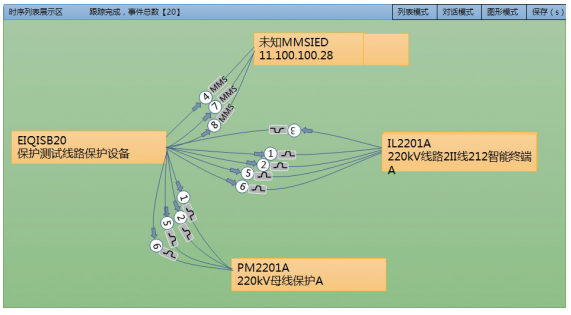

图2　IED交互顺序图

基于网络连接图、逻辑连接图、IED交互顺序图“三位一体”，将变电站事件信息交互用“可视化”方法直观表示，并按时间排列，显示IED之间的信息交互，便于查看变电站事件时刻不同IED设备之间的信息交互过程，并检查虚回路的正确性。

1.2　在线监测装置设计与实现

监测装置应用功能如图3所示，实现了站内配置文件信息、物理拓扑信息、保护设备运行巡视信息、二次回路通道状态信息的展示和收集。通过实时采集过

程层、站控层报文，校核变电站内虚回路状态及配置文件CRC正确性，为后续配置文件管理、保护设备动作/告警/变位记录、保护设备及二次回路缺陷分析与定位、以及全网域内设备状态分析评价奠定数据基础。

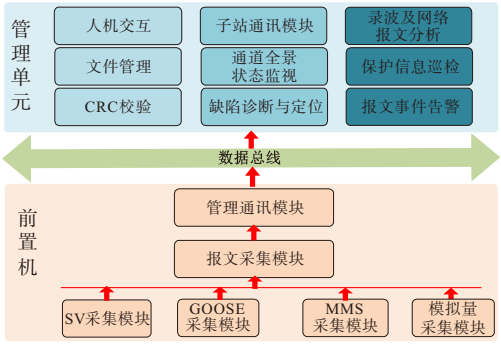

图3 应用功能

硬件平台及配置如图4所示。为满足报文记录时标精度要求，装置设计采用了自主研发的包含FPGA逻辑的IO卡，功能如下：a）可接收以太网报文，并对报文赋予精度为纳秒的硬件时标；b）百兆光口的接收/发送能力应该不小于80 Mbps；c）TPI（接口板）和MCU（主板）之间支持多路数据获取过程，可采用握手机制或推送机制；d）SFP光以太网接口用于接收IEC 61850-9-2规约SV报文，IEC 61850-8-1规约GOOSE报文，以及符合IEC 60044-9规约FT3报文。

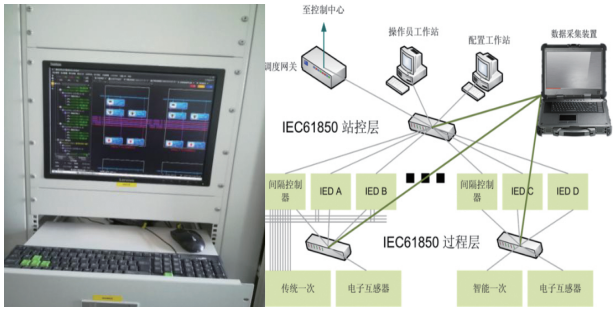

图4 硬件平台及配置

1.3 全景处理性能优化

为确保监测装置具备变电站全景数据的计算处理能力，文中提出了一种实时信息分流技术，基于Intel82576研究了PF_RING NDA模式，将内核数据直接映射到用户控件，减少内核数据的拷贝。结合智能站数据特点，对数据在内核进行预分组，确保装置具有处理千兆数据能力。其实现步骤如下：

1）修改网卡驱动

不同类型网卡启动读取数据的方式及时间不相同。针对不同驱动，PF_RING模块提供了统一钩子调用，修改网卡驱动，使其获得完整数据包，通过调用钩子，在设备驱动层将数据推送至PF_RING。

2）修改PF_RING

通过共享内存，PF_RING实现了一种快速有效的报文获取方法。由于PF_RING是通用报文捕获模块，依然使用BPF机制过滤报文。针对变电站报文特殊性，PF_RING将报文分类后，匹配出所有满足条件的共享内存，将报文写入这些共享内存。

3）创建共享内存

根据需要，不同的应用程序可以创建不同的共享内存。如SMV分析程序只接收SMV报文，则只需创建SMV类型的共享内存即可；而流量监控分析程序需要所有的报文，可以创建一个满足任何类型的报文的共享内存。因此，上层应用可以通过不同的参数，通知PF_RING创建不同类型的共享内存，而PF_RING则根据报文的类型筛选出相应的共享内存，并将该报文写入这些共享内存。

4）从共享内存中获取数据并开展分析

在创建了共享内存后，PF_RING通过Linux的POLL机制，可以及时通知用户进程有数据产生，减少空间切换的开销。通过该机制，上层应用无需频繁地检测共享内存是否有数据可读，这对SMV报文尤为重要，因为SMV的实时性极高，检测间隔过长容易造成共享内存因报文堆积而溢出。

2 主站端统一监测模型

2.1 创建标准化数据模型文件

智能变电站继电保护系统状态监测装置需要配置的业务数据模型以“碎片化”的形态分散于图纸设计、设备制造、现场施工、系统集成等各个环节中，信息内容巨大且分散，而又无任何一个阶段的资料能够完整描述智能变电站二次回路的关联要素。建设统一的继电保护系统状态监测平台需要对智能变电站的完整数据模型，在变电站系统配置文件SCD基础上进行补充构建，以完成对保护运行状态的完整监测和评价[11-14]。厂站端补充的状态监测模型以标准的格式化文件传输到调度端，这些补充模型包括一次设备拓扑及一、二次关联模型SSD、光纤物理网络模型SPCD及二次虚回路关联关系描述文件SVLD，它们

和SCD一起构成了主、子站之间模型文件集合。

2.2 一次拓扑及一、二次关联模型SSD

创建变电站间隔信息及一次拓扑和一、二次关联信息模型，厂站端二次设备状态监测装置需要补充创建该部分模型，并以IEC 61850规范体系保存为SSD文件格式。一次拓扑模型及一、二次关联模型将开关、刀闸状态的智能终端位置模型与开关、刀闸进行关联，把互感器及次级绕组与合并单元采样通道进行关联，把间隔与保护功能进行关联。

2.3 物理光纤网络模型SPCD

依据《智能变电站光纤回路建模及编码技术规范》(GB/T 37755—2019)的要求，补充添加智能变电站光纤网络模型，这是完整描述智能变电站二次回路的必要组成部分，也是创建保护设备运行状态完整评价业务模型的基础。智能变电站物理光纤网络模型包括如下几个方面：

1）区域、屏柜模型；

2）装置硬件板卡、端口配置模型。依据现场装置实际硬件配置创建模型；

3）光纤网络连线物理模型。智能变电站光纤网络的模型创建需要核对图纸设计与现场施工、系统集成配置的一致性。

2.4 二次虚回路关联模型SVLD

为清晰描述变电站过程层网络通信断链信号与二次虚回路对应关系、保护ICD文件与接收端子及物理端口描述规范等与二次虚回路相关联的信息内容，文中以变电站过程层二次回路数据订阅关系为基础，创建了二次虚回路描述文件SVLD。

二次虚回路描述文件SVLD中<SVLD/ SVLD>标签为根标签，描述属性有变电站名称和描述，配置版本号信息，其下级标签为二次设备<Unit/Unit>标签；<Unit/Unit>标签属性包括设备名称，描述和制造厂家等台账信息，每台二次设备包含开出虚端子定义表<Outputs/Outputs>、开入虚端子定义表<Inputs/Inputs>、二次虚回路订阅关系表<InputLinks/InputLinks>；<InputLinks/InputLinks>标签中描述了二次设备在智能变电站过程层所有的订阅关系，以及数据订阅过程链路的告警信号参引关系。在此期间把所有数据订阅按照GOOSE、SV发送方报文帧控制块对象进行归集，归集对象标签为<VirLink/VirLink>，属性包括发送装置名称和发送GOOSE/SV的APPID，及该GOOSE/SV数据订阅对应的断链告警参引，数据订阅对象关系使用<VirCircuit/>表达。

3 继电保护系统缺陷诊断方法

3.1 诊断模型及实现方案

基于缺陷特征信息，根据多方信息的逻辑关系，划分缺陷特征参数构建关系网络，从不同角度反映继电保护设备及回路的缺陷原因。同时，结合证据不确定推理理论，体现证据体对单个故障模式识别的可信度。具体实现步骤如下：

1）数据层。采用合并分析。当缺陷发生时，站内出现的二次系统配置信息、告警信息、网络在线监测信息等信息统称为原始数据，直接融合原始数据，并进行分类、融会。

2）特征层。在对告警信息筛选分类基础上，以通用知识结构进行表述，按照不同的一次设备、IED设备、通信网络状态进行缺陷特征匹配。

3）决策层。诊断过程中，根据缺陷特征信息分别进行IED工作状态、输入/输出回路完整性、通信网络性能、通信设备工作状态诊断，综合分析中间推理结果，最后输出诊断结果，并给出相关解释说明。

4）专家库建立及完善。缺陷诊断对象包括合并单元、保护装置、一次开关、测控装置、通信网络及装置。专家系统缺陷信息的充分程度决定了其推理规则的适用性，当有新的缺陷案例出现时，可通过学习机制更新专家系统规则库。

3.2 多源数据特征融合

缺陷与征兆因果关系难以量化评估，基于各征兆参量的设备缺陷判别，可有效提高诊断的准确性，降低漏判可能性[15-19]。在缺陷特征或告警信息不全的情况下，系统可通过具有关联关系的告警信息推测缺失的告警信息。特征层融合技术主要采用BP神经网络结合D-S证据理论进行推演。作为一种不确定的推理方法，证据理论的主要特点是满足比贝叶斯概率论更弱的条件，具有直接表达“不确定”与“不知道”的能力。

D-S证据理论先定义了上、下界概率的概念，其中：

$$\forall A \subseteq U \tag{1}$$

式中：A为识别框架U中的基元；$m(A)$为A的信度函数值。设$m_1,m_2,\cdots m_n$是识别框架U上的信度函数分配，m为识别框架U上联合后的信度函数分配，满足式(2)。

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus \cdots \oplus m_{n1} \tag{2}$$

通过式(2)可把n条独立的证据进行融合。采用基于可信度的证据体修改及基于局部冲突分布分配的合成规则进行证据融合，具体方法如下[20]：

1）对原始证据体进行归一化处理，得到各证据体的相对可信度，来表示证据体的相对可靠程度。$R_i(i=1,2,\cdots,n)$表示第i条证据体的可信度，r_i表示其相对可信度。

$$r_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{n} R_i} \quad (i = 1,2,\ldots,n) \tag{3}$$

2）对于一致性部分，按式(1)证据融合。对于冲突部分，通过改进的证据组合规则进行融合，将局部冲突在引起冲突的焦元之间分配。

$$\begin{cases} m(A) = \sum_{B \cap C \ldots = A} m_1(B)m_2(C)\cdots + f(A) \\ f(A) = m_1(A)m_2(P)\dfrac{r_1 m_1(A)}{r_1 m_1(A) + r_2 m_2(P)} \end{cases} \tag{4}$$

式中：B、C、P表示特征；$f(A)$为A的考虑相对可信度的附加函数。

特征融合的具体步骤为：(1) 从变电站事件告警信息中提取继电保护装置动作，以及一次开关分、合闸等信息；(2) 基于数字量信息，获取疑似缺陷故障集；(3) 根据疑似缺陷故障集中元件数量做判断：若个数为1，则转到(8)，否则转到(4)；(4) 对疑似缺陷故障集中的遍历每一个装置求取各装置的故障度；(5) 对疑似缺陷故障集中的故障度对应分析，得到各装置的故障表征概率；(6) 将故障度作为证据体，通过D-S证据理论进行融合；(7) 根据诊断决策模型分析融合结果，进行故障识别；(8) 得到诊断结果。

3.3 缺陷信息源模板设计

基准特征模型是当缺陷发生时，站控层、过程层网络的各种数据表征的组合情况。基于整个二次网络的通讯数据，抽离出当前缺陷的特征序列，通过当前缺陷特征序列与基准特征模型(信息源模板)进行匹配分析，从而实现对当前缺陷的诊断分析和定位。依据《变电站智能设备运行维护导则》(Q/GDW 751—2012)和《国家电网公司继电保护和安全自动装置缺陷管理办法》中总结得出21类典型缺陷，其中包括15类信号告警，6类硬接点告警[21]。

3.4 决策诊断与专家系统扩充

决策诊断技术使用朴素贝叶斯算法，旨在通过对历史数据的汇总分析，提高对问题的定位准确度。针对历次问题缺陷的专家定位结果，系统将出现问题的现象、数据及最终的结果保存下来，然后利用朴素贝叶斯算法进行结果预测。

考虑到以上两点，专家系统将一个个的诊断流程模板映射成系统上的规则引擎，每个规则引擎代表着对应的告警的分析流程，这样无论是现有告警规则引擎需要修改还是新增告警规则引擎都非常方便，对系统健壮性、可维护性和可扩展性方面的提高显而易见。采用Groovy动态语言，根据告警的诊断流程模板，建立专家库；当需要告警分析时，通过语义识别，从专家库匹配到对应规则，逐步推演得出结论。通过数据积累，发现新的缺陷样本后，可通过修编对应的“SV总告警”Groovy语言扩展专家样本，达到快速更新要求，如图5所示。

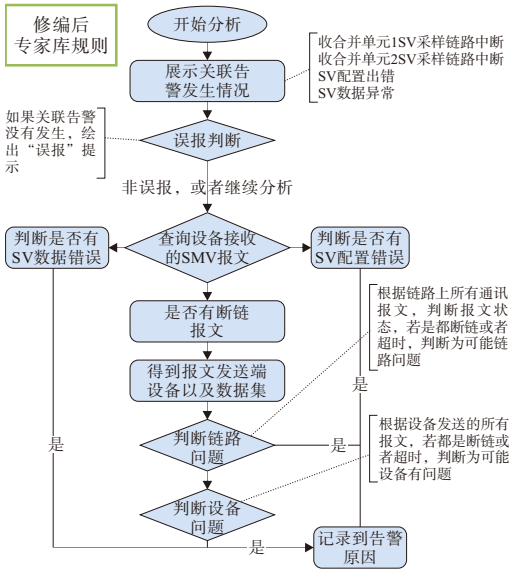

图5 SV总告警处理流程及专家库的扩充

3.5 自学习模型

二次设备各种缺陷现象和引发缺陷的原因并不是一对一关系，且故障现象可能对应多个二次设备缺陷。因此，利用模糊关系矩阵，运用自学习模糊推理，实现缺陷诊断。

1）建立缺陷征兆向量$\boldsymbol{X}$，表示缺陷集合，x_i代表缺陷现象：

$$\boldsymbol{X}=\{x_1,x_2,\cdots,x_m\} \tag{5}$$

2）建立缺陷原因向量$\boldsymbol{Y}$，表示缺陷原因集合，y_i代表缺陷原因：

$$\boldsymbol{Y}=\{y_1,y_2,\cdots,y_n\} \tag{6}$$

3）建立缺陷征兆向量与缺陷原因向量之间的模糊矩阵：

$$\boldsymbol{R}'=\begin{Bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{Bmatrix}=(r_{ij})_{m\times n}, \tag{7}$$

$$0\le r_{ij}\le 1,1\le i\le m,1\le j\le n$$

式中：$\boldsymbol{R}'$表示缺陷现象$\boldsymbol{X}$和到缺陷原因$\boldsymbol{Y}$上的一个模糊关系；r_{ij}反映了缺陷现象x_i与缺陷原因y_i相关性模糊值。r_{ij}越大，说明缺陷原因y_i与缺陷现象x_i的相关程度越大。

缺陷诊断的自学习模糊推理方法就是通过缺陷现象的隶属度和故障征兆向量与缺陷原因向量之间的模糊矩阵，求出故障原因的隶属度。假设诊断对象可能表现的征兆有m种，缺陷征兆向量为$\boldsymbol{X}=\{x_1, x_2, \cdots, x_m\}$，可能出现的缺陷原因有$n$种，缺陷原因向量为$\boldsymbol{Y}=\{y_1, y_2,\cdots, y_n\}$。那么缺陷征兆模糊向量$\boldsymbol{X}'$为：

$$\boldsymbol{X}'=(\mu_{x_1},\mu_{x_2}\cdots\mu_{x_m}) \tag{8}$$

式中：μ_{x_i}是诊断对象发生缺陷现象的x_i隶属度。

缺陷原因模糊向量$\boldsymbol{Y}'$为：

$$\boldsymbol{Y}'=(\mu_{y_1},\mu_{y_2}\cdots\mu_{y_n}) \tag{9}$$

式中：μ_{y_i}是诊断对象具有故障的隶属度，则y_i与式（8）具有模糊关系：

$$\boldsymbol{Y}'=\boldsymbol{X}'\cdot\boldsymbol{R}' \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{R}'$是模糊矩阵，将该算子具体化之后，可得到自学习模糊诊断公式：

$$y_j=\bigvee_{i=1}^{m}(x_i\wedge r_{ij})\ j=1,2,\cdots,n \tag{11}$$

诊断原则包括贴近度和择近原则等。

以某线路间隔为例，专家系统内预设的导致保护SV断链的原因有6个，如图6所示。在足够案例分析缺陷样基础上，发现导致SV断链的原因约有5%概率不在上述原因之列。结合现场SCD、报文及光字信息，专家系统通过归纳、学习总结出一套新的判断规则，即在正常运行情况下，如果保护SV断链光字点亮同时合并单元失电、母差SV断链光字也会被点亮，那么这个先前未知原因就是合并单元失电。通过对现场大量缺陷样本统计和分析，得到该光字告警原因的概率分布，利用自学习方法，调整相应的权重来提升缺陷分析的准确度。

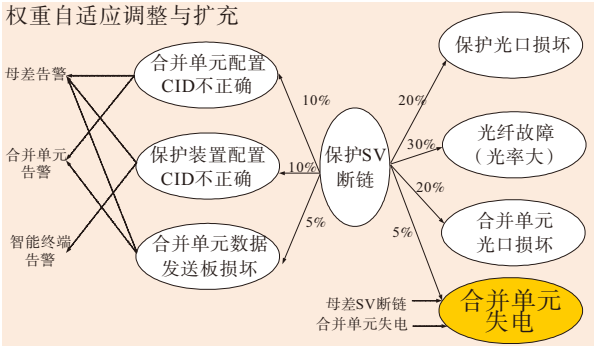

图6　自学习权重调整

4　结语

为提高继电保护系统缺陷智能诊断的实用化水平，文中提出了一种基于多元化信息融合的继电保护智能诊断关键技术设计思路和实现方法。1）提出了一种“物理布局-逻辑描述-过程遍历”图模映射组合技术，实现二次信息交互全过程动态展示；2）提出了一种智能变电站二次虚回路逻辑关联描述类标准化模型SVLD，实现了保护设备关联建模及可视化；3）提出了一种基于朴素贝叶斯算法、规则引擎的缺陷智能诊断技术，通过挖掘历史数据减少模型局限性。

文中提出的继电保护智能诊断系统可将“小时级”人工排查的缺陷诊断提升到“分钟级”的“智能诊断+人工确认”方式，可有效减轻运维人员压力、缩减缺陷定位时间。

参考文献：

[1] 冯军.智能变电站原理及测试技术[M].北京:中国电力出版社,2011.
[2] 李罗,朱静,白云飞,等.基于RTDS的合并单元性能测试研究[J].高压电器,2014,50(07):24-30.
[3] 张旭泽,郑永康,康小宁,等.智能变电站继电保护系统所面临的若干问题[J].电力系统保护与控制,2018,46(06):90-96.
[4] 杨威,王进虎,王娜.新一代智能变电站检修机制测试技术[J].智能电网,2016,4(02):209-212.
[5] 汪溢,黄曙,马凯.继电保护在线校核技术研究[J].热力发电,2016,45(08):87-93.
[6] 陈锦山,唐志军,何燕玲,等.智能变电站二次系统信息安全测试方法[J].广东电力,2017,30(09):75-80.
[7] 熊华强,万勇,桂小智,等.智能变电站SCD文件可视化管理和分析决策系统的设计与实现[J].电力自动化设备,2016,32(06):95-100.

[8] 杨毅,高翔,朱海兵,等.智能变电站SCD应用模型实例化研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(22):107-113.
[9] 张灿勇.一种智能变电站二次设备配置的高可视化展示方法:CN104239406A[P].2014-07-31.
[10] 高志远,黄海峰,徐昊亮,等.IEC 61850应用剖析及其发展探讨[J].电力系统保护与控制,2018,46(01):162-169.
[11] 梅德冬,周斌,黄树帮,等.基于IEC 61850第二版变电站配置描述的集成配置解耦[J].电力系统自动化,2016,40(11):132-136.
[12] 梅德冬,樊瑞,周斌.IEC 61850模型信息的规则表达与校核研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(03):131-136.
[13] 王智东,王钢,许志恒,等.一种改进的GOOSE报文HMAC认证方法(英文)[J].电网技术,2015,39(12):3627-3634.
[14] Anwar Adnan, Abdun Naser Mahmood. Cyber security of smart grid infrastructure [M]. The State of the Art in Intrusion Prevention and Detection, CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2014:449-472.
[15] 盛海华,王德林,马伟,等.基于大数据的继电保护智能运行管控体系探索[J].电力系统保护与控制,2019,47(22):168-175.
[16] 王智东,王钢,许志恒,等.结合域含义的GOOSE报文加解密方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016(04):63-70.
[17] 邓洁清,车勇,单强,等.基于标准中间过程文件的SCD版本比对的优化研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(14):95-99.
[18] 高翔,杨漪俊,姜健宁,等.基于SCD的二次回路监测主要技术方案介绍与分析[J].电力系统保护与控制,2014,42(15):149-154.
[19] 裘愉涛,周震宇,杨剑友,等.继电保护远程运维技术研究与应用[J].电力系统保护与控制,2018,46(18):7-24.
[20] 文清丰.基于多信息融合的电网故障诊断技术研究[D].保定:华北电力大学,2014.
[21] 张巧霞,贾伟华,叶海明,等.智能变电站虚拟二次回路监视方案设计及应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(10):123-128.

(上接第11页)

1)台账一致性图像识别校核:针对基础台账与现场实际不一致问题,提出基于YOLO-OBB的旋转目标检测方法,结合OCR文本识别技术,实现了设备铭牌中厂家名称、设备编号等关键信息的自动提取与系统比对,能够有效支撑大规模电网设备的台账自动化校核。

2)跨系统数据融合校核:在确保台账准确性的基础上,融合PMS3.0系统与用电信息采集系统的电压数据,构建均方根误差、皮尔逊相关系数、标准差等多维度指标,结合时钟偏移校验与时间序列分割技术,实现了电压数据的快速校核与异常类型的精准识别。

参考文献:

[1] 李颖秋.智能数字化技术对供电可靠性的影响分析[J].集成电路应用,2024,41(12):126-127.
[2] 刘润霖.配电网电能质量监测与改善技术研究[J].电力设备管理,2026(01):34-36.
[3] 刘希涛.基于用电信息采集数据的电能质量评估方法分析[J].集成电路应用,2025,42(10):334-335.
[4] 刘雨,薛琪,刘伟琦,等.电能质量监测数据的多源融合与不确定性建模分析[J].电工技术,2025(09):99-102.
[5] 王永强,王志强,廖思超,等.基于多模态优化的电力巡检图像识别技术研究[J].自动化与仪表,2026,41(02):160-164.

(上接第16页)

[6] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[A/OL]. arXiv, 2017. https://arxiv.org/abs/1706.03762.
[7] GULATI A, QIN J, CHIU C C, et al. Conformer: convolution-augmented transformer for speech recognition[A/OL]. arXiv, 2020. https://arxiv.org/abs/2005.08100.
[8] 韩亚旭,高鹭,张飞,等.基于DRSN-Conformer的电力调度语音识别[J].现代电子技术,2026,49(06):112-119.
[9] 金俣含.基于迁移学习和多任务学习的电力调度声学模型研究[D].北京:华北电力大学,2024.
[10] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[A/OL]. arXiv, 2018. https://arxiv.org/abs/1810.04805.
[11] 陈蕾,郑伟彦,余慧华,等.基于BERT的电网调度语音识别模型研究[J].电网技术,2021,45(08):2955-2961.
[12] 闫圣学.基于NE-BERT的电力调度语言模型研究[D].北京:华北电力大学,2024.
[13] 韩亚旭.面向电力调度场景的语音识别技术研究与应用[D].包头:内蒙古科技大学,2025.
[14] 王亚豪.电力调度系统的流式语音识别技术研究[D].包头:内蒙古科技大学,2023.
[15] 王邦鸿.基于国网电力调度场景下的智能语音识别系统的实现与优化[D].西安:西安电子科技大学,2024.
[16] 高卫恒,杨子,王文林.基于智能语音识别技术的电力调度主动安全监督策略研究[J].山西电力,2025(06):30-36.
[17] 郭萌,徐胜,陈锦龙,等.电力调度系统人员声纹特征AI回溯提取方法[J].微型电脑应用,2025,41(01):134-137.