

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.251188

## 二次设备远程运维管控平台的研发与应用

任佳, 晋龙兴, 郭乐欣, 卢正飞

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 针对电力二次设备远程运维中传统保信系统告警信息杂乱、二次回路故障定位误差大、人工监盘误判率高, 且“感知-认知-决策”全链条存在明显短板的行业问题, 构建了融合告警信息精确分级分类、设备运行场景智能辨识、告警处置措施智能生成的二次设备智能监盘体系, 并研发对应的远程运维管控平台。智能监盘体系以自然语言处理与预训练模型实现告警标准化并建立动态迭代优化机制, 依托多维约束场景知识库与规则推理引擎完成设备运行场景辨识, 结合多策略检修信息滤除与“大模型+检索增强生成(retrieval-augmented generation, RAG)”技术生成告警处置方案。平台涵盖远方监视、巡视、控制、维护等功能, 按安全分区架构设计。平台已部署于某省级电网, 运行情况良好, 推动了二次设备运维从“现场依赖”向“远程智能”转型。

**关键词:** 智能监盘; 告警分级; 场景辨识; 远程运维管控

### Development and application of a remote operation and management platform for secondary equipment

REN Jia, JIN Longxing, GUO Lexin, LU Zhengfei

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** To address industry challenges in the remote operation and maintenance (O&M) of power system secondary equipment, such as disordered alarm information in traditional protection and control systems, large errors in secondary circuit fault localization, high misjudgment rates in manual monitoring, and significant deficiencies across the entire “perception-cognition-decision” chain, an intelligent monitoring system for secondary equipment is developed. This system integrates precise alarm classification and grading, intelligent identification of equipment operation scenarios, and automated generation of alarm handling measures, along with the development of a corresponding remote O&M management platform. The intelligent monitoring system standardizes alarm information using natural language processing and pretrained models, while establishing a dynamic iterative optimization mechanism. It relies on a multidimensional, constraint-based scenario knowledge base and a rule-based reasoning engine to achieve accurate identification of equipment operation scenarios. By combining multi-strategy maintenance-information filtering with large language models and retrieval-augmented generation (RAG) techniques, the system generates effective alarm handling solutions. The platform supports functions such as remote monitoring, inspection, control, and maintenance, and is designed based on a secure zoning architecture. It has been deployed in a provincial power grid and has demonstrated stable performance, promoting the transition of secondary equipment O&M from “on-site dependence” to “remote intelligence”.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2401000).

**Key words:** intelligent monitoring; alarm grading; scenario recognition; remote O&M management

## 0 引言

随着电网规模的持续扩张与智能化水平的飞速

提升, 电网安全稳定运行对二次设备的依赖日益增强。作为电网的“神经中枢”与“安全卫士”, 二次设备的健康状况直接关系到主网架的可靠性, 而传统依赖人工现场巡查与经验分析的运维模式, 已难以满足现代电网对实时性、精准性与高效性的苛刻要求<sup>[1-2]</sup>。现有研究表明, 尽管远程运维平台的建设

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401000);  
南方电网公司科技项目资助(090000KK52210169)

实现了数据的远程采集与功能的集中化,且在智能变电站继电保护在线运检、远程运维等领域,相关技术的研发与应用已经取得初步成果<sup>[3-4]</sup>,但在核心的智能分析层面仍存在显著不足——当前远程运维技术多聚焦于数据传输与集中监控,尚未突破“数据丰富但知识匮乏”的瓶颈,无法支撑复杂场景下的高效运维决策,尤其在多源设备协同、故障深度分析等方面存在明显不足<sup>[4-6]</sup>。这种不足在“感知-认知-决策”全链条中表现尤为突出。

在信息感知的底层,系统需处理来自不同厂家、型号和年代的二次设备所产生的海量、多源、命名各异的告警信号,形成严重的“语义鸿沟”<sup>[7]</sup>。以覆盖 300 座以上厂站的某省级电网为例,其不重名的信号点数超过 30 万,传统人工配置与识别方式效率低下,难以形成统一理解标准,即便在继电保护定值在线比对、电力物联网驱动的定值智能运维等技术应用中,仍未完全解决多源信号的标准化融合问题<sup>[4-7]</sup>;同时,远方操作许可的安全管控需求进一步凸显了信号语义统一的重要性,若基础信息感知存在偏差,将直接影响远程操作的安全性<sup>[8]</sup>。

在状态认知的中层,现有系统大多停留在对孤立告警信号的呈现与简单过滤,缺乏对信号间时序与逻辑关联的挖掘,故障分析严重依赖运维人员的经验性“信号拼图”。相关统计显示,一个复杂的电网故障分析从信号产生到最终定位,平均耗时可达 80 min 以上,这种处置延迟不仅与连锁故障态势感知技术的应用深度不足有关<sup>[9]</sup>,也受限于距离保护、暂态稳定评估等故障分析方法在多场景下的适用性<sup>[10-11]</sup>;此外,广域信息在继电保护实时评价中的应用尚未充分落地<sup>[12]</sup>;而面向智能变电站二次虚回路的失效风险动态识别等技术<sup>[13]</sup>,虽能提升特定环节的可靠性,但仍未解决广域、跨设备的多信号关联分析这一核心问题,导致电网快速故障隔离与恢复的需求难以满足<sup>[14-15]</sup>。

在决策应用层,处置措施的生成严重依赖值班人员的经验或手工查阅非结构化文档(如说明书、规程),导致专家知识以“孤岛”形式存在,难以复用、共享与传承。尽管现有研究者们已开始利用设备健康管理知识图谱、电网故障处置知识图谱等技术,探索电力系统知识的结构化存储与深度应用<sup>[16-17]</sup>,但图计算知识推理在电力系统中的应用仍受限于知识图谱的稀疏性<sup>[18]</sup>,且智能调控领域的知识图谱构建经验尚未完全迁移至二次设备运维场景<sup>[19]</sup>;同时,现有决策体系在安全性与智能化的融合上存在明显不足:一方面,难以满足保护电力系统韧性的需求<sup>[20]</sup>;另一方面,也缺乏有效抵御针对二次设备

的恶意网络攻击的能力<sup>[21]</sup>。这不仅对值班人员的业务水平提出了极高要求,在紧急情况下更容易因信息缺失或经验不足导致诊断出错,存在较大的安全风险<sup>[22]</sup>。

此外,在远程运维的实操环节,尽管基于文件方式的继电保护装置定值远方操作、双重交互确认机制的远方修改定值等技术已实现部分远程功能<sup>[23-24]</sup>,但这些技术多聚焦于单一操作场景,未形成覆盖“监视-巡视-控制-维护”全流程的一体化方案,难以支撑二次设备全生命周期的精细化管控。综上所述,当前二次设备远程运维领域在“感知-认知-决策-实操”全链条上均存在明显不足,亟需一套系统性的智能化技术体系实现根本性突破。

在此背景下,构建覆盖“监视-巡视-控制-维护”全流程的二次设备远程运维管控平台,成为突破传统运维瓶颈、实现电网集约化管控的必然需求<sup>[3]</sup>。本文围绕大型电网二次设备运维痛点,开展基于语义智能的监盘技术研究,旨在通过技术创新推动二次设备运维从“现场依赖”向“远程智能”转型,为超大型城市电网的安全高效运行提供技术支撑。这不仅是破解当前运维困境的现实需要,也为应对继电保护与安全控制新挑战、顺应智能电网发展趋势提供了可行的技术路径<sup>[22]</sup>。

## 1 二次设备运维管控功能架构

如图 1 所示,二次设备远程运维管控平台通过前置通信系统与调度数据网,实现对智能源端及子站设备的全面接入,构建了集远方监视、远方巡视、远方控制与远方维护于一体的完整技术体系。该平台通过四大核心功能模块的协同运作,实现了对二次设备全生命周期的远程精细化管控。

**远方监视模块:**作为平台的核心感知层,负责实时监测保护压板状态、定值信息、设备告警等关键运行参数,并集成故障分析与决策指挥功能,具备智能监盘与故障原因自动辨识能力。

**远方巡视模块:**专注于设备状态的周期性自动核查,支持定值自动核对、压板状态巡视,并具备差流越限预警与二次回路隐患智能识别能力。

**远方控制模块:**实现远程操作功能,包括定值区切换、软压板投退等常规操作,以及特定场景下的一二次设备联动控制。

**远方维护模块:**提供系统配置、设备建模、镜像验证等运维支撑功能,确保系统自身的可靠性与可维护性。

智能监盘方案作为二次设备远程运维管控平台的一个重要组成部分,以“监盘智能化、定级精准

化、场景自适应”为目标，其核心是构建一个名为“监盘值班智能体”的软件核心。该智能体通过模拟资深运维专家的认知决策过程，将杂乱的原始数

据转化为体系化的信息，为运行决策提供直接、可靠的依据。二次设备监盘总体方案如图 2 所示，由 3 个关键技术作为支柱。

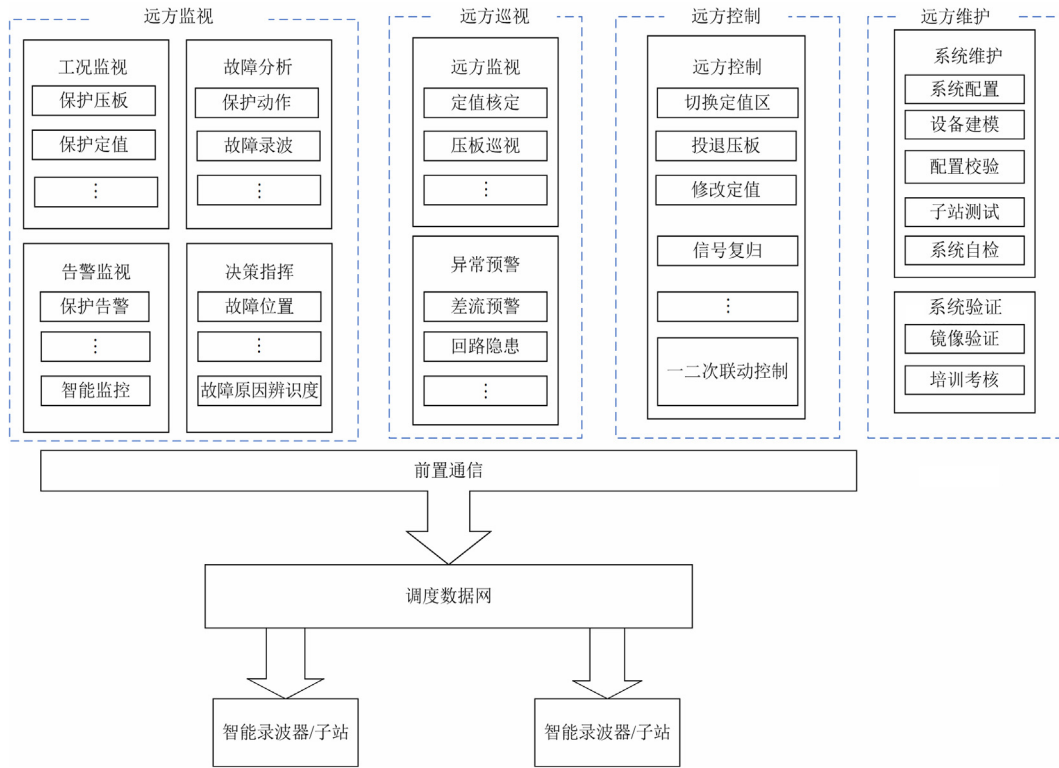


图 1 功能结构

Fig. 1 Software structure

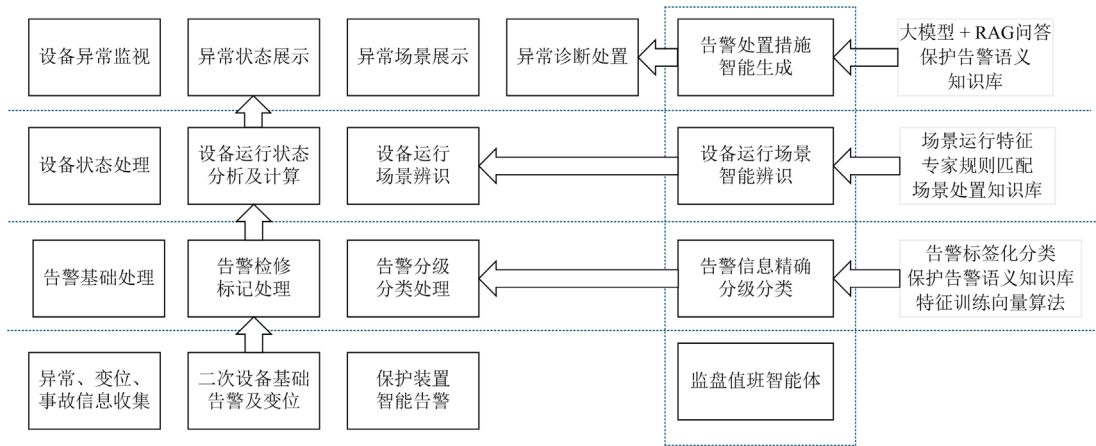


图 2 二次设备监盘总体方案

Fig. 2 Overall scheme of secondary equipment monitoring

1) 告警信息精确分级分类：作为体系的数据基石，解决“信息感知层”的碎片化问题。通过自然语言处理技术，将多源异构的告警信号进行语义标准化与精准定级，为上层分析提供高质量、规范化的数据输入。

2) 设备运行场景智能辨识：作为体系的分析中枢，解决“状态认知层”的关联缺失问题。在标准化数据的基础上，利用规则推理引擎，从离散的告警信息中识别出设备所处的特定运行场景，实现从“看到告警”到“看懂工况”的认知跃迁。

3) 告警处置措施智能生成：作为体系的智慧输出，解决“决策应用层”的知识孤岛问题。通过“大语言模型 + 检索增强生成”技术，为识别出的告警信息和场景即时生成可信的原因分析与处置建议，最终形成决策支持的闭环。

## 2 告警信息精确分级分类

告警信息精确分级分类是智能监盘的数据基石。本系统构建智能告警模块，通过自然语言处理技术实现告警信号的标准化与定级的自动化，为构

建智能监盘体系奠定坚实的数据基础。

系统构建智能告警模块，全面汇集子站二次设备异常诊断、主站二次设备异常诊断的设备异常信息，形成智能告警，向智能场景识别模块等提供基础信息。告警模块首先对多源异构的原始告警信号进行标准化预处理与专家标注，构建标准语义标签集；随后，基于预训练语言模型 BERT 构建深度学习模型，实现从原始告警名称到标准语义体系的精准分类映射，具体流程如图 3 所示。

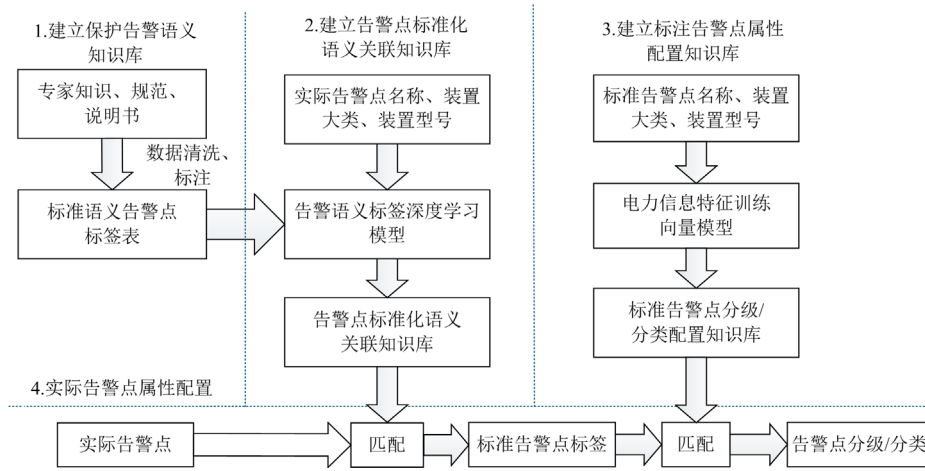


图 3 告警分级分类流程图

Fig. 3 Flow chart of alarm classification and grading

### 2.1 构建标准语义告警点标签集

二次设备告警信息最大的特点就是多源异构，主要包括设备技术规范  $D_{spec}$ 、运维规程  $D_{proc}$  及专家知识库  $D_{exp}$ 。三者构成原始数据池  $D_{raw} = \{D_{spec} \cup D_{proc} \cup D_{exp}\}$ 。针对原始数据池，首先进行无关字符滤除、编码标准化及文本归一化等预处理。然后由专家团队依据预设的语义标注映射函数  $f_{annot} : s_{raw} \rightarrow s_{std}$ ，将原始告警信号名称  $s_{raw}$  映射至标准化标签  $s_{std}$ ，生成高质量的标准语义告警点标签集  $D_{train} = \{(s_i, s'_i)\}_{i=1}^N$ ，其中  $N$  为标注样本总数， $s_i$  为第  $i$  个原始告警名称， $s'_i$  为其对应的标准标签。该标签集是驱动模型从通用语义空间迁移至电力专业语义空间的关键。

### 2.2 基于预训练语言模型的告警语义深度学习模型

告警标准化任务是一个序列分类问题，采用在通用语料上预训练的 BERT 模型对告警信号数据库进行处理，构建告警语义深度学习模型<sup>[26]</sup>。模型采用 BERT-base 版本，训练中设置学习率为  $2 \times 10^{-5}$ ，Batch Size 为 32，训练轮数为 10，使用 AdamW 优

化器，并在验证集上采用早停策略以防过拟合。给定输入序列原始告警名称  $s_i$ ，模型参数初始化为预训练 BERT 模型的权重  $\theta_{bert}$ ，模型通过多层 Transformer 编码器计算其上下文表征  $h = \text{BERT}(s_i; \theta_{bert})$ ，并经由一个附加的分类层预测其属于标准标签  $y$  的概率分布  $P(y|s_i)$ ，如式(1)所示。

$$P(y|s_i) = \text{Softmax}(W_{CLS} \cdot h_{CLS}) \quad (1)$$

式中： $W_{CLS}$  是分类层的权重矩阵，用于将 [CLS] 标记的隐藏状态向量映射到告警标准化任务的类别概率空间； $h_{CLS}$  为序列首字符 [CLS] 的隐层输出向量。

模型微调的目标是最小化预测分布与真实标注之间的交叉熵损失。对于一个批次的的数据，损失函数  $\zeta_{CE}$  定义为

$$\zeta_{CE} = -\frac{1}{B} \sum_{k=1}^B \sum_{c=1}^C 1_{\{y_k=c\}} \log P(y_k=c|s_k) \quad (2)$$

式中： $B$  为批次大小； $C$  为标准标签类别总数； $s_k$  代表原始告警名称(输入序列)，即第  $k$  个告警样本的文本描述； $y_k$  代表该告警样本对应的标准标签(真实类别)，即它所属的标准化告警类别； $1_{\{y_k=c\}}$  为指

示函数, 当  $y_k = c$  时值为 1, 否则为 0。通过使用 AdamW 优化器最小化  $\zeta_{CE}$ , 模型参数  $\theta = \{\theta_{bert}, W_{CLS}\}$  被迭代更新。通过这一过程, 模型得以精准捕捉电力二次系统告警文本的特定语义。

利用生成的模型  $M_{fine-tuned}$  对主站全量实际告警点集合  $S_{master} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  进行推理 (其中  $s_i$  为第  $i$  个原始告警名称, 含义同训练样本  $s_k$ ), 生成初步的标准化映射  $M_{pre} = \{(s, \arg\max P(y|s)) | s \in S_{master}\}$ 。为确保知识库的绝对可靠, 引入专家验证函数  $f_{verify} : M_{pre} \rightarrow M_{final}$ , 对模型输出进行校验与修正, 最终形成权威的、经过人工确认的标准映射集合  $M_{final}$ , 并据此构建“业务语义标准化告警点表库”  $S_{std}^{lib}$ 。系统同步自动构建“告警点标准化关联知识库”  $K_{map} = \{s \rightarrow s' | s \in S_{master}, s' \in S_{std}^{lib}\}$ , 该知识库作为实时应用的查询索引。

### 2.3 电力信息特征训练向量模型构建

在告警点标准化关联知识库的基础上, 基于余弦相似度的向量化告警分级, 建立标准化告警点属性配置知识库。告警分级问题被转化为高维语义空间中的最近邻搜索问题。

构建专家标注的分级样本集  $D_{grade} = \{(s'_j, l_j)\}$ , 其中  $l_j$  为告警级别 (如: 事故、异常、警告等)。使用模型  $\text{Sim}(s'_k, d_m) = \frac{\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{v}_m}{\|\mathbf{v}_k\| \|\mathbf{v}_m\|}$  作为语义编码器, 将任一标准化告警点名称  $s'$  映射为高维向量  $\mathbf{v}$ 。

$\mathbf{v} = M_{embed}(s') \in \mathbb{R}^d$ , 其中,  $d$  为向量维度。对于  $S_{std}^{lib}$  中的每个标准告警点  $s'_k$ , 计算其向量  $\mathbf{v}_k$  与  $D_{grade}$  中所有分级样本向量  $\mathbf{v}_m$  的余弦相似度, 如式(3)所示。

$$S_{im}(s'_k, d_m) = \frac{\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{v}_m}{\|\mathbf{v}_k\| \|\mathbf{v}_m\|} \quad (3)$$

则该告警点  $s'_k$  的最终级别  $L(s'_k)$  由最相似样本  $m^*$  的级别  $l_{m^*}$  决定, 如式(4)所示。

$$L(s'_k) = l_{m^*} \quad (4)$$

式中:  $m^* = \arg\max \text{Sim}(S'_k, d_m)$ 。

通过此流程自动化构建出“标准告警点分级知识库”  $K_{grade}$ 。

$$K_{grade} = \{s'_k \rightarrow L(s'_k) | s'_k \in S_{std}^{lib}\} \quad (5)$$

### 2.4 动态迭代优化机制

为应对概念漂移与新告警类型的出现, 采用闭环动态迭代优化机制。定义  $U$  为线上无法被  $K_{map}$  匹配的新告警点集合。该系统设定一个触发条件, 当

$|U| > \tau$  ( $\tau$  为预设阈值) 时, 启动优化流程。

1) 人工标注: 专家对  $U$  中的点进行标注, 生成增量数据集  $D_{inc} = \{(u_i, s'_{std}, i, l_i)\}$ 。其中  $u_i$  为原始新告警名称, 即线上无法被现有知识库匹配的第  $i$  个新告警点文本;  $s'_{std}$  为标准告警标签, 专家为  $u_i$  标注的、在标准告警点表库  $S_{std}^{lib}$  中对应的标准化名称;  $i$  为样本索引编号, 用于唯一标识增量数据集中的第  $i$  个标注样本;  $l_i$  为告警级别标签, 即专家确定的告警严重等级 (如事故、异常、警告等)。

2) 模型再训练: 将训练数据集  $D_{train}$  和增量数据集  $D_{inc}$  合并作为新的训练数据集, 并以更新后的数据集对模型进行新一轮微调, 更新参数  $\theta$ 。

3) 知识库更新: 将  $D_{inc}$  中的新标准点并入  $S_{std}^{lib}$ , 并依据向量化分级方法更新  $K_{grade}$ 。同时更新映射库  $K_{map} \leftarrow K_{map} \cup \{u_i \rightarrow s'_{std,i}\}$ 。

## 3 设备运行场景智能辨识

在单个告警信息精确分级分类的基础上, 根据多个在时序与逻辑上高度关联的告警信号构成的多维事件序列, 模拟专家思维, 实现运行场景的自动、实时辨识与设备健康状态的精准评估, 为构建新一代智能监控系统提供核心技术支撑。运行场景智能辨识核心在于将隐式的专家认知过程转化为可计算、可执行的显式模型。系统架构包含以下 3 个紧密耦合的核心层次。

1) 基于多维约束的场景知识库: 构建包含时序关系与逻辑约束的规范化场景特征库;

2) 规则化推理引擎: 实现实时数据流与场景特征的精准匹配;

3) 分层状态评估模型: 建立从设备级到系统级的健康状态评估体系。

这 3 个层次共同构成了从信号感知到工况认知的完整技术路径, 实现了监控范式从被动响应到主动认知的根本转变。

### 3.1 基于知识工程与时空约束的场景知识库构建

首先构建一个富含专家知识且机器可理解的场景知识库。对二次设备的主要运行场景进行系统化归类与形式化定义, 构建包含“电网故障与切除”等典型场景的知识体系。场景定义通过引入时序关系与逻辑关系的多维约束, 突破了传统简单信号列表的局限, 构建了精确的场景特征描述。

场景特征通过时序约束和逻辑约束共同定义, 形成完整的“场景-特征-处置”知识单元。以“电网故障与切除”场景为例, 其特征体现为严格的时

序约束与严谨的逻辑约束：即要求在极短时间窗内严格遵循“保护启动→跳闸出口→对应开关分位”的时序关系，并需满足所有事件的逻辑合取条件。这种基于时空约束的形式化建模方法，使得专家知识能够被准确转化为机器可执行的分析规则，为后续的智能推理奠定坚实基础。

具体实现中，首先进行场景的形式化定义。设备运行场景  $R$  可定义为如式(6)所示的四元组。

$$R = (R_{id}, R_{type}, R_{feat}, R_{act}) \quad (6)$$

式中： $R_{id}$  为场景唯一标识符； $R_{type}$  为场景类型，如  $R_{type} = \{\text{电网故障, 定值区切换, 装置检修, 通信中断}\}$ ； $R_{feat}$  为场景特征集合，是识别的核心，定义了触发该场景的充分必要条件； $R_{act}$  为场景对应的处置措施集合。

接着进行场景特征的多维约束建模。场景特征由事件集合、时序约束函数与逻辑约束函数共同定义，可形式化为一个三元组，如式(7)所示。

$$F \triangleq (E_{event}, T_{temp}, L_{logic}) \quad (7)$$

式中： $E_{event}$  代表构成场景的事件集合(如信号触发)， $E_{event} = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ ； $T_{temp}$  为时序约束函数，定义了事件发生的先后顺序与时间窗口； $L_{logic}$  为逻辑约束函数，定义了事件间的布尔逻辑关系。

通过对主要运行场景进行此类形式化枚举与定义，并配以相应的 Action，最终构建出结构化的场景判别知识库  $\kappa = \{R, R_2, \dots, R_m\}$ ，其中  $R_m$  为第  $m$  个运行场景。

### 3.2 基于规则推理引擎的场景实时匹配算法

采用基于产生式系统的规则化推理引擎作为场景匹配的“推理机”，该引擎将知识库中的场景定义转化为可执行的推理规则，其算法核心是多模式实时流匹配。

推理引擎的输入为实时告警数据流  $S(t) = \{s_1, s_2, \dots\}$ ，其中每个信号  $s_i$  均已经过前述的标准化处理。

对于知识库  $\kappa$  中的每一个场景  $R_k$ ，推理引擎检查在滑动时间窗口  $W$  内(根据场景类型动态设定，取值范围为 2~10 s，典型值为 7 s)，数据流  $S(t)$  是否满足  $R_k$  的特征集合所有约束条件，一旦满足，引擎立即判定设备进入  $R_k$  状态，并触发该场景对应的处置措施  $A_k$ ，推送给监控界面。

设备运行场景智能辨识与状态评估技术不仅是多种人工智能技术的简单应用，更是在深刻理解电力系统运维业务本质的基础上，进行的一次系统性理论建模与方法创新，为实现真正意义上的“场景

自适应”智能监盘奠定了坚实的核心能力。

## 4 告警处置措施智能生成

基于精准辨识场景，可以实现对异常告警的快速诊断与有效处置。基于“大语言模型+检索增强生成(retrieval-augmented generation, RAG)”的智能决策支持方案，攻克从“感知认知”到“决策智慧”的最后难题<sup>[26]</sup>。

### 4.1 基于多策略协同的检修信息滤除机制

为保障后续诊断分析聚焦于真实的设备异常，系统首先须对检修、调试等非正常运行状态下产生的无效告警进行精准滤除。对于无效告警的识别和滤除主要基于以下 4 个维度。

1) 挂牌状态辨识：系统在线集成调度控制系统、生产管理系统、子站硬压板、手动挂牌等多源信息，通过优先级判别与逻辑运算，直接确定设备的检修状态。

2) 拓扑关联辨识：对于可获取一次设备状态的站点，利用刀闸/接地刀位置、一二次设备关联关系，推理出二次设备的间接检修状态。

3) 时间有效性判别：设定时间延迟阈值  $\tau_{delay}$  与时间差阈值  $\tau_{gap}$ 。若设备告警时间与主站接收时间的绝对差值满足  $|t_{device} - t_{master}| > \tau_{delay}$ ，或同一批告警中任意两条的设备时间差  $|t_i - t_j| > \tau_{gap}$ ，其中  $t_i$ 、 $t_j$  分别为第  $i$  条和第  $j$  条告警的时间，则判定为无效历史信息并滤除。

4) 检修特征匹配：基于历史数据挖掘，构建检修时段告警特征库。通过实时告警与特征库的模式匹配，识别并滤除典型的检修伴随信号。

综上，检修信息滤除可形式化为一个综合判别函数。对于任一告警信号，其滤除条件为

$$D(s_i) = f_{tag}(s_i) \cup f_{topo}(s_i) \cup f_{time}(s_i) \cup f_{feat}(s_i) \quad (8)$$

式中： $f_{tag}$ 、 $f_{topo}$ 、 $f_{time}$ 、 $f_{feat}$  分别对应上述 4 个维度的判别函数。若  $D(s_i)$  为真，则判定告警  $s_i$  为无效检修信息并予以滤除。

### 4.2 基于 RAG 的告警处置智能体架构与工作流程

基于“大模型+RAG 技术”，构建一个具备持续学习能力的“告警处置智能体”，实现告警原因、处置措施的自动生成，完成了知识存储、检索与生成的闭环。检索器采用基于嵌入的语义检索(embedding-based retrieval)，使用预训练的 Sentence-BERT 模型将文档切片向量化。文本切片策略采用基于语义段落的动态分块，确保每个切片包含完整的操作步骤或故障描述。

基于“大模型+RAG技术”技术的“告警处置智能体”工作流程如图4所示,图中标注①—⑥分别如下。

① 对设备说明书、技术规程、缺陷记录等非结构化文档进行清洗、切片录入大模型,同时从文档中提取结构化知识形成二次告警知识库、知识图谱,并录入到“大模型+RAG技术”的知识库中,构成“增强检索知识库”,实现知识统一存储,构建告警处置智能体。

② 建模工具通过访问告警处置智能体,获取告警点的分级,并保存到模型库中。

③ 诊断处置决策模块从告警处置知识库中获取

用户手工编辑并确认的告警原因、处理措施;并将新生成的知识反馈给知识库,同步更新知识库。

④ 诊断处置决策模块中增加告警原因、处置措施展示界面,并支持自动/手工获取告警原因及处理措施,获取的途径有两种:从大模型智能体中获取或者从告警处置知识库中获取(默认方式)。

⑤ 值班人员在监盘界面上,针对具体的某条告警信息可以编辑其告警原因、处理措施,保存到告警处置知识库中。

⑥ 告警处置知识库中新增的数据同时被作为问答对增加到大模型增强检索知识库中,进一步完善模型。

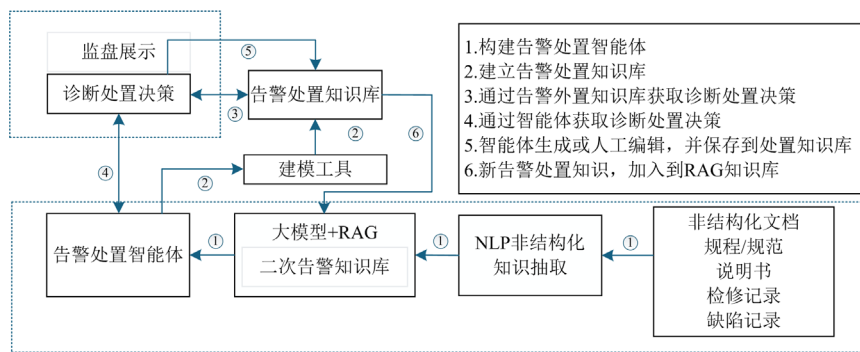


图4 告警处置措施智能生成方案

Fig. 4 Intelligent generation scheme of alarm handling measures

最后,值班人员通过值班监视界面监视二次设备异常告警,并且根据具体的告警信息分析告警发生的可能原因,给出告警的处置措施。

## 5 实施案例及效果

### 5.1 部署基本情况

二次设备远程运维管控平台在某省级电力调度控制中心开展应用,目前系统运行情况良好。随着智能电网建设的深度推进,该省级电网作为超大型城市核心电网,已形成覆盖325座厂站、近50万个二次设备信号点的复杂运维体系。电网二次设备远程运维管控平台的系统架构如图5所示,I区部署了工作站、数据服务器、二次运维管控服务器及前置服务器,通过电力调度数据网对接保信子站,负责保信类设备的数据交互;II区配备录波服务器与前置服务器,经电力调度数据网连接录波器,I、II区间以防火墙隔离;III区设有WEB服务器及多个WEB客户端,II、III区间通过隔离装置分隔,用于WEB端访问;整体通过分区隔离与专用数据网,实现不同类型二次设备的远程运维管控。

平台全面具备了远方监视、远方巡视、远程维护、远程状态检验和远方操作五大功能。该平台对

全网325座厂站近50万个二次设备信号点进行分层分级监视,监视广度由110kV及以上保护装置扩展至35kV及以下保护、备自投装置、配电终端等全类型变电二次设备,实现全电压等级管控、整体三道防线全局监视。图6是统一监控画面。

### 5.2 典型运行场景分析

如前所述,系统对主要运行场景进行了系统性的归类与枚举,并对其特征进行形式化定义。典型场景库K主要包括但不限于以下几类:瞬时性电网故障与切除、永久性电网故障与重合闸失败、保护装置定值区切换、保护装置定值修改、装置例行检修或调试、采样回路异常(如CT断线、PT断线)、二次通信中断(如GOOSE中断、SV中断)、装置硬件自检异常(如RAM错误、电源故障)等。以最具有代表性的“瞬时性电网故障与切除”场景为例,详细阐述其从原始信号到场景识别的全过程,以验证所提方法的有效性与工程实用性。

#### 1) 场景定义

场景类型 Type: 瞬时性电网故障与切除。

场景语义: 线路遭遇瞬时性故障,保护正确动作跳闸切除故障,随后故障电弧熄灭,重合闸成功动作恢复供电的典型过程。

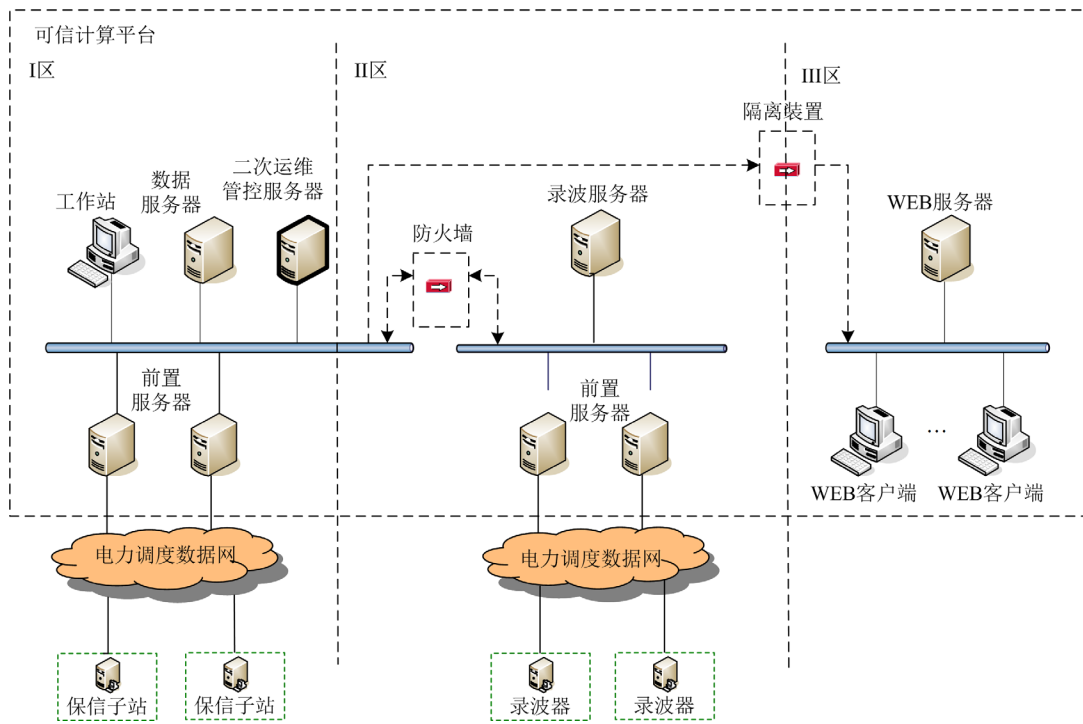


图 5 系统架构

Fig. 5 System structure



图 6 统一监控画面

Fig. 6 Unified monitoring screen

2) 场景特征的形式化描述

该场景的特征 Features 是一个包含多个事件、严格时序与逻辑约束的复合谓词。最终的形式化描述如表 1 所示。

3) 实际识别过程推演

假设某 220 kV 线路“供电甲线”发生瞬时性故障，不同厂家的保护装置产生的原始信号如表 2 所示，其中  $T_0$  表示产生第一个原始信号点的时间，

一般为启动信号。

表1 瞬时性电网故障形式化描述

Table 1 Formal description of transient power grid fault

核心事件集 E	E1: 保护启动
	E2: 保护跳闸出口
	E3: 对应开关由合位变为分位
	E4: 重合闸启动
	E5: 重合闸出口
	E6: 对应开关由分位变为合位
时序约束 Temporal	整个事件序列必须在时间窗口 $\Delta T_{total}$ (例如: 2 s) 内完成
	事件发生顺序必须满足: $E1 \rightarrow E2 \rightarrow E3 \rightarrow E4 \rightarrow E5 \rightarrow E6$
	保护动作时间 $T(E2) - T(E1)$ 应小于保护定值等
逻辑约束 Logic	$Logic = E_1 \wedge E_2 \wedge E_3 \wedge E_4 \wedge E_5 \wedge E_6$

表2 原始动作信号

Table 2 Original action signal

序号	时间戳	原始信号点名称 (厂家 A/厂家 B)	信号值
1	$T_0$	MSLine_Prot_Start/ MSLine_Prot_Begin	1
2	$T_0+15 \text{ ms}$	MSLine_Trip_Out/ MSLine_Prot_Trip	1
3	$T_0+80 \text{ ms}$	CB_MSLine_A_Open/ MSLine_CB_OFF	1
4	$T_0+800 \text{ ms}$	MSLine_AR_Start/ MSLine_Recloser_Act	1
5	$T_0+820 \text{ ms}$	MSLine_AR_Success/ MSLine_Reclose_OK	1
6	$T_0+900 \text{ ms}$	CB_MSLine_A_Close/ MSLine_CB_ON	1

识别步骤如下。

#### (1) 信号标准化映射

规则推理引擎接收到上述原始信号后, 首先查询“告警点标准化关联知识库”  $K_{map}$ , 将其映射为标准信号标签。经过映射, 表2中的序号1—6依次映射为“保护启动”、“跳闸出口”、“开关分位”、“重合闸启动”、“重合闸出口”、“开关合位”。

#### (2) 属性分类与规则匹配

推理引擎依据标准信号标签名进行条件匹配。具体而言, 场景规则库中对“瞬时性电网故障与切除”场景的判定, 要求同时出现“保护启动”、“跳闸出口”、“开关分位”、“重合闸启动”、“重合闸出口”及“开关合位”6类事件。

引擎将标准化后的信号流与规则进行匹配, 并校验信号的出现顺序是否符合规则定义的序列, 同

时校验信号之间的时间间隔是否满足设定的约束。

#### (3) 场景判定与输出

所有条件均满足且时序校验通过。推理引擎立即判定“供电甲线”发生“瞬时性电网故障与切除”场景。在监控界面上醒目提示该场景结论, 并自动推送与该场景绑定的标准处置措施。

此实例充分验证了本方法所具备的核心优势: 其卓越的泛化能力使得不同厂家的异构信号能通过标准化映射被统一识别, 无须针对特定设备编写差异化规则; 在认知层面, 系统实现了从罗列“保护启动”、“跳闸”等孤立信号到直接输出“瞬时性故障已切除”明确工况结论的深度跃迁, 完成了数据到知识的价值升华; 最终在处置层面, 该系统将运维人员从繁琐的信号关联分析中解放出来, 并提供精准的处置指导, 从而显著提升了应急响应效率。

实践证明, 本研究构建的场景智能辨识体系能够有效应对现场设备的复杂性与多样性, 为电网安全稳定运行提供了一套准确、高效且具备高度可推广性的智能化解决方案。

本系统在现有典型故障场景中表现稳定, 然而面对极端或多重并发故障的复杂工况, 其辨识与处置策略的鲁棒性仍有进一步优化空间。下一步研究将着重于扩展场景知识库的覆盖范围, 增强规则引擎对并发事件流的并行处理能力, 以提升系统在极端场景下的综合应对能力。

### 5.3 应用验证与性能评估

该技术在某省级电网实现全覆盖应用后, 二次设备重大缺陷提前发现率提升至85%。2024年通过该技术发现紧急缺陷20余起, 缺陷处理响应时间缩短40%, 在各自投装置异常告警处置中, 实现从发现问题到缺陷消除全程时间不足4h。系统能够自动识别并给出正确处理意见的告警数占总告警数的92%以上, 为电网安全运行提供了精准的状态感知能力。与多名资深运维专家独立标注结果对比得出, 场景识别准确率达到94.7%, 错误识别中以漏识别为主; 平均故障分析时间从80min缩短至8min, 规则库维护成本降低76.3%。

## 6 总结

本研究针对传统二次设备监盘模式的核心挑战, 构建了一套基于语义的智能监盘技术体系。该体系依托告警精确分级分类技术奠定数据基石, 围绕设备场景智能辨识技术实现认知跃迁, 并融合“大语言模型+RAG”技术生成处置措施, 形成智慧输出。由此, 系统遵循“数据标准化→场景认知化→决策智能化”的路径, 共同推动了运维模式从“现

场依赖”到“远程智能”的根本性转变。

该技术在某省级电网实现全覆盖应用后取得了良好的成效：告警智能分级分类准确率提升至 98% 以上，网省级主站日均处置告警量下降 95%，从根本上解决了信息过载问题；通过全量告警采集消除了监视盲区；基于运行状态计算与场景辨识实现了从局部告警到整体工况的认知转变；告警处置措施自动生成准确率超 95%；运维人员日均处置时间控制在 1 h 内，效率显著提升。

未来本体系将在 3 个方向持续深化：1) 推进知识图谱与因果关系推理的深度融合，实现跨设备故障的精准溯源与诊断；2) 探索数字孪生技术在预测性维护中的应用，构建设备全生命周期健康管理模型；3) 研究多智能体协同决策机制，实现从站端到电网全域的智能决策自动化。这些研究方向将推动系统从当前的分析诊断向预测预警和自主决策演进，为构建新一代电力系统智能运维体系奠定基础。本体系的技术路径与实践经验，为同类型电网的二次设备智能化建设提供了可复用的解决方案，具有广泛的推广应用价值。

## 参考文献

- [1] 葛亮, 秦红霞, 赵纪元, 等. 电网二次设备智能运维技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [2] 奚洪磊, 周震宇, 杨剑友, 等. 变电站继电保护智能运维技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [3] 朱峻永, 杨东赞, 王昕, 等. 面向智能变电站运维的连锁故障态势感知研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(16): 136-146.  
ZHU Junyong, YANG Dongzan, WANG Xin, et al. Research on cascading failure situation awareness for smart substation operation and maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(16): 136-146.
- [4] 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): 17-24.  
QIU Yutao, ZHOU Zhenyu, YANG Jianyou, et al. Research and application of remote operation and maintenance technology of relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 17-24.
- [5] 戴志辉, 杨鑫, 耿宏贤, 等. 基于电力物联网的继电保护定值智能运维系统研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(6): 50-58.  
DAI Zhihui, YANG Xin, GENG Hongxian, et al. Intelligent operation and maintenance system for relay protection setting based on power internet-of-things[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(6): 50-58.
- [6] 余江, 高宏慧, 史泽兵, 等. 继电保护远程运维系统报文合规检测及入侵阻断技术应用[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 135-143, 151.  
YU Jiang, GAO Honghui, SHI Zebing, et al. Application of message compliance detection and intrusion blocking technology in remote operation and maintenance system of relay protection[J]. Electric Power, 2024, 57(3): 135-143, 151.
- [7] 邓炼兴, 巩俊强, 姜云峰, 等. 智能电网继电保护定值在线比对和固化系统[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(4): 36-41.  
DENG Lianxing, GONG Junqiang, JIANG Yunfeng, et al. On-line comparison and curing system for relay protection settings of smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(4): 36-41.
- [8] 刘明慧, 汤震宇, 曹翔, 等. 保信主站远方操作许可安全管控系统研制与应用[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 412-419.  
LIU Minghui, TANG Zhenyu, CAO Xiang, et al. Research and application of remote operating permission security control system of protection information master station[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 412-419.
- [9] 朱峻永, 杨东赞, 王昕, 等. 面向智能变电站运维的连锁故障态势感知研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(16): 136-146.  
ZHU Junyong, YANG Dongzan, WANG Xin, et al. Research on cascading failure situation awareness for smart substation operation and maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(16): 136-146.
- [10] PUJARI R, ALAM M N. Review on distance relaying for the protection of modern power system networks[J]. IEEE Access, 2025, 13: 28861-28893.
- [11] POURSAEED A H, NAMDARI F. Online transient stability assessment implementing the weighted least-square support vector machine with the consideration of protection relays[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 10(1): 1-17.
- [12] 叶远波, 刘宏君, 张兆云, 等. 基于广域信息的继电保护实时评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 150-157.  
YE Yuanbo, LIU Hongjun, ZHANG Zhaoyun, et al. Research on real-time evaluation of relay protection based on wide area information[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 150-157.
- [13] 许家焰, 武芳瑛, 李瑞, 等. 智能变电站继电保护二次虚回路失效风险动态识别技术[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(1): 160-170.  
XU Jiayan, WU Fangying, LI Rui, et al. Dynamic identification technology for the failure risk of the secondary virtual circuit of relay protection in an intelligent

- substation[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(1): 160-170.
- [14] 叶远波, 程晓平, 张兆云, 等. 电力系统故障区域录波自动分析关键技术[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 93-99.  
YE Yuanbo, CHENG Xiaoping, ZHANG Zhaoyun, et al. Key technology of automatic analysis of fault area wave recording of power system[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 93-99.
- [15] 雷明, 陈一惊, 刘峰, 等. D5000 继电保护设备在线监视及分析应用提升[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1197-1202.  
LEI Ming, CHEN Yicong, LIU Feng, et al. Online monitoring and analysis system based on D5000 for relay protections[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1197-1202.
- [16] 李刚, 李银强, 王洪涛, 等. 电力设备健康管理知识图谱: 基本概念、关键技术及研究进展[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 1-13.  
LI Gang, LI Yinqiang, WANG Hongtao, et al. Knowledge graph of power equipment health management: basic concepts, key technologies and research progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 1-13.
- [17] 郭榕, 杨群, 刘绍翰, 等. 电网故障处置知识图谱构建研究与应用[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2092-2300.  
GUO Rong, YANG Qun, LIU Shaohan, et al. Construction and application of power grid fault handling knowledge graph[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2092-2300.
- [18] PU Tianjiao, TAN Yuanpeng, MA Zhenyuan, et al. Graph computing based knowledge reasoning in electric power system considering knowledge graph sparsity[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2025, 11(5): 2083-2093.
- [19] 戴志辉, 张富泽, 张近月, 等. 基于 MacBERT-BiLSTM-CRF 模型的继电保护装置缺陷知识图谱构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 131-143.  
DAI Zhihui, ZHANG Fuze, ZHANG Jinyue, et al. Construction method of a defect knowledge map of a relay protection device based on a MacBERT-BiLSTM-CRF model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 131-143.
- [20] ROUHANI S H, SU C L, SHABANI H R, et al. Resilient cyber-physical power protection systems using transient kinetic energy method[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2025, 21(8): 6324-6336.
- [21] GHOTBI-MALEKI M, AZZOUZ M A, SANAYE-PASAND M. Resilience enhancement of adaptive overcurrent protection for active distribution networks against relay-setting cyber-attacks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2025, 21(11): 9034-9044.
- [22] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.  
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [23] 侯先栋, 王邦惠, 刘伟, 等. 基于文件方式的继电保护装置定值远方操作方法[J]. 电力工程, 2018, 37(1): 147-152.  
HOU Xiandong, WANG Banghui, LIU Wei, et al. Approach of relay protection setting remote operation based on operating files[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 147-152.
- [24] 王刚, 张茜云, 黄玲, 等. 基于双重交互确认机制的远方修改定值功能研究与开发[J]. 智能电网, 2016, 4(1): 96-100.  
WANG Gang, ZHANG Xiyun, HUANG Ling, et al. Research and development of the function of remote modifying setting value based on bi-directional interaction acknowledgment mechanism[J]. Smart Grid, 2016, 4(1): 96-100.
- [25] GARDAZI N M, DAUD A, MALIK M K, et al. BERT applications in natural language processing: a review[J]. Artificial Intelligence Review, 2025, 58(6).
- [26] 马逸博, 陈希亮, 章乐贵, 等. 基于检索增强生成的任务规划方法综述[J/OL]. 计算机科学与探索: 1-35[2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5602.TP.20251212.1448.002>  
MA Yibo, CHEN Xiliang, ZHANG Legui, et al. A survey on retrieval-augmented generation for task planning[J/OL]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology: 1-35[2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5602.TP.20251212.1448.002>

收稿日期: 2025-11-01; 修回日期: 2025-12-24

作者简介:

任佳(1988—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为智能变电站、电力系统人工智能; E-mail: renjia@sz.csg.cn

晋龙兴(1987—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能变电站、继电保护; E-mail: jinlongxing@sz.csg.cn

郭乐欣(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: guolexin@sz.csg.cn

(编辑 周金梅)