

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211721

智能变电站继电保护智能运维系统自动配置技术研究

许尧¹, 马欢¹, 许崑鹏¹, 于和林¹, 杨经超², 毛玉荣²

(1. 国网安徽省电力有限公司超高压分公司, 安徽 合肥 230022; 2. 武汉凯默电气有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘要: 为提高继电保护智能运维信息采集配置的效率及正确性, 提出一种基于知识图谱的智能运维系统信息采集自动配置技术。基于继电保护相关规范建立继电保护装置数据输出端口的标准化模型, 依据专家知识按照 IED 类型建立智能运维系统信息采集点与继电保护装置标准化数据输出端口的关联关系, 形成智能运维系统信息采集配置知识图谱本体。结合智能运维系统的历史配置数据进行知识学习, 建立智能运维系统信息采集配置知识图谱。基于二次设备数据输出端口地址信息与继电保护装置数据输出端口的标准化模型的相似性计算, 自动将二次设备数据输出端口地址匹配到标准信息端口地址实现知识融合, 并引入 CBOW 模型增强语义理解, 提高实体相似性算法的精度。实例验证结果表明, 基于知识图谱的智能运维系统信息采集自动配置技术可有效提高智能运维系统配置效率, 保证配置的正确性。

关键词: 智能运维; 信息采集; 自动配置; 知识图谱; 编辑距离; CBOW 模型

Self-configuration technology of an intelligent operation and maintenance system of intelligent substation relay protection

XU Yao¹, MA Huan¹, XU Chanpeng¹, YU Helin¹, YANG Jingchao², MAO Yurong²

(1. Ultrahigh-voltage Branch of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China;

2. Wuhan Kemov Electric Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: To improve the efficiency and correctness of intelligent operation and maintenance information collection and configuration of relay protection, this paper proposes a self-configuration technology based on a knowledge graph. Based on the relevant specifications of relay protection, a standardized model of the data output port of the relay protection device is established, and according to expert knowledge, the relationship between the information collection point of the intelligent operation and maintenance system and the standardized data output port of the relay protection device is established according to the type of IED. Then the knowledge map ontology of the information collection and configuration of the intelligent operation and maintenance system is formed. Combined with the historical configuration data for knowledge learning, a knowledge map of information collection and configuration is established. Based on the similarity calculation between the address information of the data output port of the secondary equipment and the standard model of the data output port of the relay protection device, the data output port of the secondary equipment is automatically matched to the standard information interface to realize knowledge fusion. A CBOW model is introduced to enhance semantic understanding and improve the accuracy of entity similarity algorithm. The example verification results show that the information collection and self-configuration technology of the intelligent operation and maintenance system based on a knowledge graph can effectively improve the configuration efficiency and ensure the correctness of the configuration.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51277135).

Key words: intelligent operation and maintenance; information collection; automatic configuration; knowledge graph; edit distance; CBOW model

0 引言

电网的安全稳定运行依赖继电保护的正确动作,

基金项目: 国家自然科学基金资助(51277135); 国家电网有限公司科技项目资助(B31203210004)

保护的正确动作依赖运维人员对变电站进行日常巡视与定期检验。随着变电站规模的增大、复杂度提高, 电网安全稳定运行的要求与运维压力的矛盾日益突出^[1-3]。传统运维模式难以适应变电站运维需求, 必须由传统运维向智能运维方向转变。智能运维系统通过继电保护及其二次回路的状态感知、诊

断与评价,指导运行维护人员的工作,实现变电站日常巡视和定期检验模式转变为主动状态检修模式^[47],可大大减轻运维工作量,提高保护运维的效率,提升保护运行的可靠性。

智能运维系统状态感知需要建立其信息采集与二次设备数据输出端口地址信息间的映射关系。目前采取依据 IED 端口的文本描述,人工映射端口地址信息至相关信息采集点的方式进行配置。在变电站中,尤其是高电压等级的变电站,设备种类、数量繁多,信号配置复杂,配置工作量大,在工程配置中易出现错配、漏配等问题。由于各厂家设备 ICD 文件中数据输出端口信息的不规范性,难以实现自动映射^[8-10]。

针对以上问题,引入知识图谱技术,利用知识图谱在构建知识网路与展示知识关联方面的巨大优

势^[11-17],基于继电保护九统一规范及智能运维系统历史配置数据,构建智能运维系统信息采集与二次设备数据输出端口地址信息间的关联知识图谱,工程实施时基于知识图谱实现智能运维系统的自动配置,提高智能运维系统配置效率,保证配置的正确性。

1 智能运维系统工程配置

智能运维系统架构如图 1 所示,系统建立了信息采集模型及全景可视化、二次虚回路监视、光纤链路监视、二次设备状态监视、一二次状态不一致监视、同源数据比对、跳合闸回路诊断、智能巡视等业务模板。系统基于信息采集配置及各业务模板的实例化配置实现智能变电站二次系统分层全景可视化监视及二次设备故障智能诊断分析。

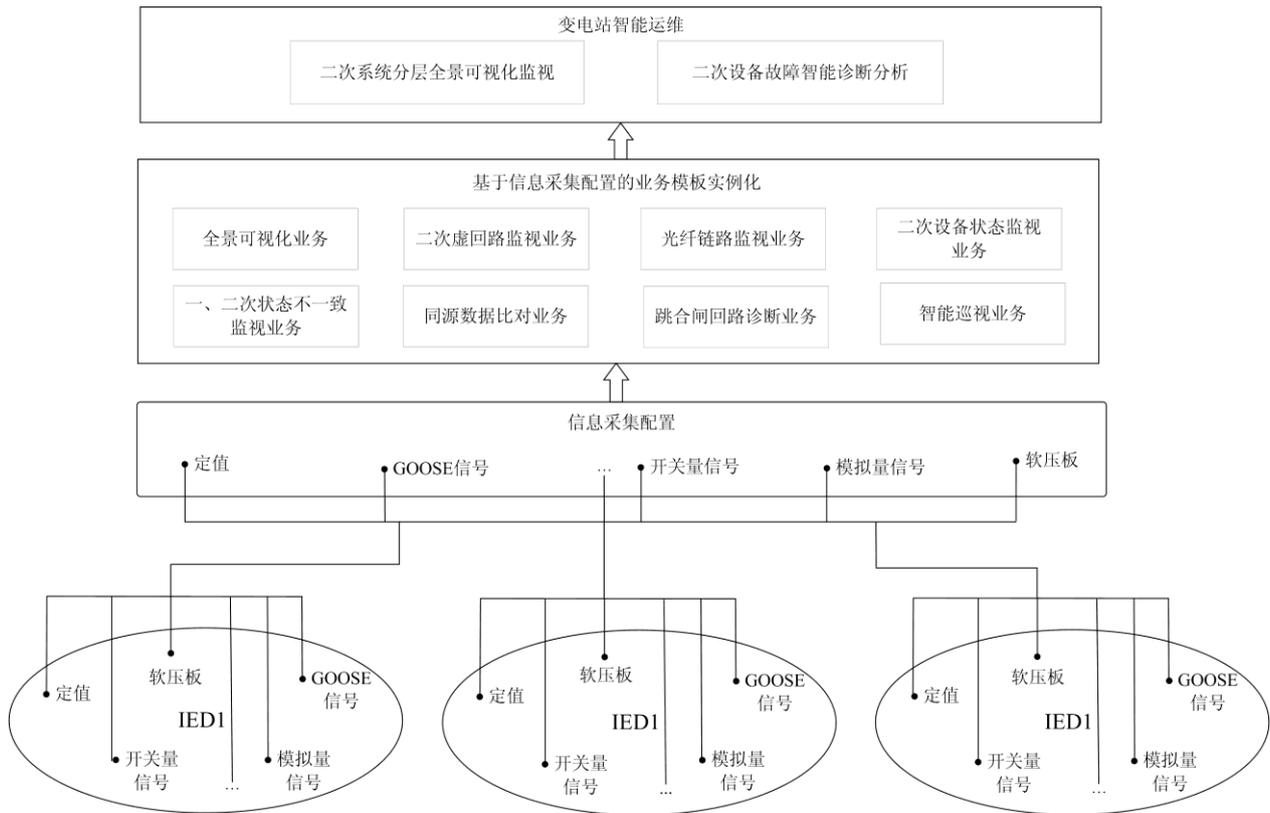


图 1 智能运维系统架构

Fig. 1 Architecture of intelligent operation and maintenance system

智能运维系统工程配置包括系统信息采集配置和各业务模板实例化配置。如图 1 所示,信息采集配置将 SCD 文件中各 IED 的定值、压板、GOOSE 信号、开关量信号、模拟信号映射到智能运维系统信息工程配置模型对应的信息采集点,实现各 IED 运行信息采集。依据信息采集的配置将智能运维系

统工程配置模型中各业务模板关联的信号进行实例化,进而实现业务模板的实例化配置。以跳合闸诊断业务为例说明业务模板的实例化过程。

智能运维系统中基于 IED 类型及 IED 的信息采集模型建立各类型 IED 的跳合闸回路诊断模板,完成信息采集配置后,系统依据信息采集配置将跳合

闸回路诊断模板中的 IED 及信息采集点实例化实现跳合闸回路诊断业务模型的实例化配置，过程如图 2 所示。

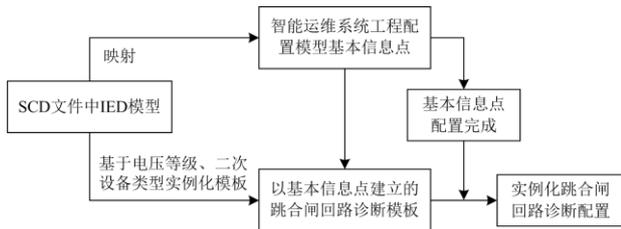


图 2 跳合闸回路诊断业务配置

Fig. 2 Configuration flow of tripping and closing circuit diagnosis service

智能运维系统工程配置的主要工作是信息采集的配置，目前采取依据 IED 端口的文本描述，人工映射 IED 的端口地址信息至智能运维系统对应信息采集点的方式进行配置。但变电站内二次设备种类、数量繁琐，尤其是高电压等级的变电站，如 500 kV 变电站，二次设备数量超过 200 个，人工配置时间长达一个月。不适应变电站建设工期短、人员紧张的现状。本文利用知识图谱在构建知识网路与展示知识关联方面的巨大优势，基于继电保护九统一规范及历史配置数据构建信息采集配置的知识图谱实现智能运维信息采集的自动配置。

2 智能运维系统信息采集配置知识图谱构建

本文采用自顶向下的方法构建智能运维系统信息采集点与二次设备数据输出端口地址信息间的关联知识图谱，如图 3 所示。继电保护九统一规范对继电保护的输出信息进行统一规范，建立了继电保护装置数据输出端口的标准化模型。智能运维系统按 IED 类型对需要采集的信息进行建模，依据专家知识按照 IED 类型建立智能运维系统信息采集点与九统一继电保护装置标准化数据输出端口模型间的关联关系，形成知识图谱本体。

基于智能运维系统的历史配置数据进行知识学习，解析智能运维系统历史配置文件，获取智能运维系统信息采集点与二次设备数据输出端口地址信息间的关联关系，并依据知识图谱本体中智能运维系统信息采集点与继电保护装置标准化数据输出端口模型间的关联关系，建立继电保护装置标准化数据输出端口模型与二次设备数据输出端口地址信息间的关联关系，构建如图 4 所示的智能运维系统信息采集配置知识图谱。

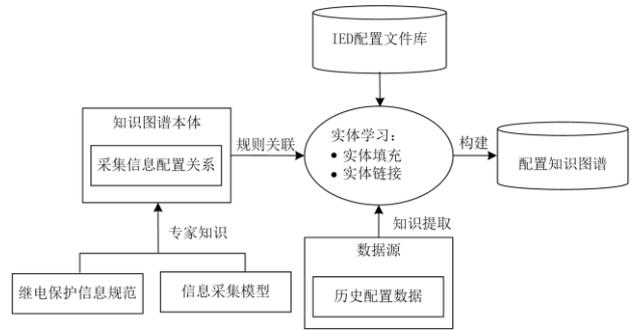


图 3 知识图谱构建方法

Fig. 3 Knowledge graph construction method

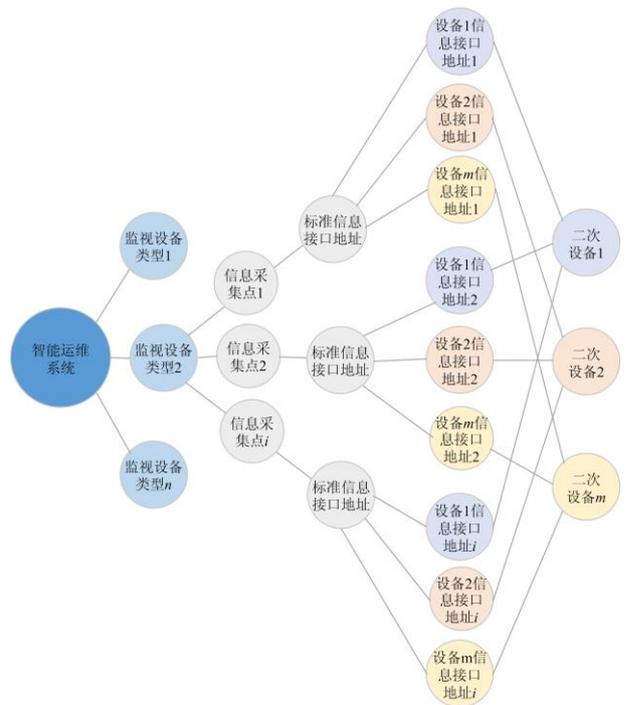


图 4 智能运维系统信息采集配置知识图谱

Fig. 4 Knowledge map of the information collection configuration of the intelligent operation and maintenance system

利用智能运维系统历史配置数据建立知识图谱具有一定的局限性，因此本文基于二次设备数据输出端口地址信息与九统一继电保护装置数据输出端口的标准化模型的相似性计算，自动将二次设备数据输出端口地址匹配到标准信息接口地址，并进行人工校验，从而建立二次设备数据输出端口地址信息与智能运维系统信息采集点的关联关系实现知识融合。知识融合实现流程如图 5 所示，解析包含目标 IED 的 SCD 文件或 ICD 文件提取目标 IED 的各信息接口地址，依据目标 IED 的设备类型在知识图谱本体中查找需要配置的信息采集点及其对应的标

准信息接口地址,计算目标 IED 的各信息接口地址与标准信息接口地址的相似性^[18-21],相似性最大的一对自动建立匹配关系。设置匹配的阈值,相似性低于阈值的匹配关系采用人工确认,可确保匹配的正确性。

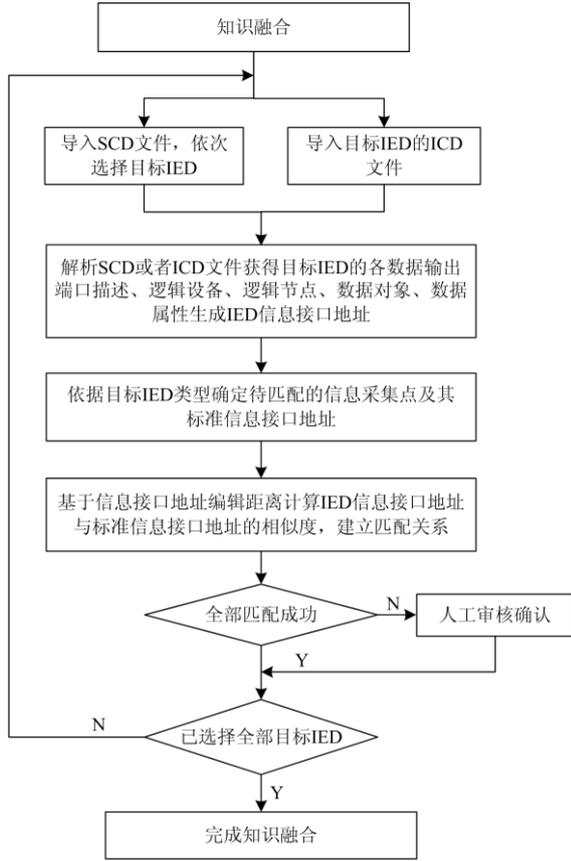


图5 知识融合流程

Fig. 5 Process of knowledge fusion

采用编辑距离衡量信息接口地址的相似度,信息接口地址的相似性计算对组成信息接口地址的描述、逻辑设备、逻辑节点、数据对象、数据属性 5 个属性分别计算相似性,取其加权平均值作为信息接口地址的相似性。对数据输出端口的逻辑节点与数据对象属性进行标准化处理,去除属性的前后缀,避免不同厂家设备前后缀差异引起的编辑距离计算的差异。两个字符串间的编辑距离如式(1)所示。

$$D(S, S')_{ij} = \begin{cases} \max(i, j) & \text{if } \min(i, j) = 0 \\ \min \begin{cases} D_{i-1, j-1} + a \times 1_{(S_i \neq S'_j)} \\ D_{i-1, j} + b \\ D_{i, j-1} + c \end{cases} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D(S, S')_{ij}$ 表示字符串 S 中前 i 个字符与字符串 S' 中前 j 个字符之间的编辑距离,当 i, j 分别取

字符串 S, S' 长度时, $D(S, S')_{ij}$ 即为两个字符串的编辑距离; $D_{i-1, j-1} + a \times 1_{(S_i \neq S'_j)}$ 、 $D_{i-1, j} + b$ 、 $D_{i, j-1} + c$ 分别表示替换 S'_j 、删除 S_i 以及插入 S'_j 操作; $1_{(S_i \neq S'_j)}$ 为指示函数, $S_i \neq S'_j$ 时值为 1, 否则值为 0; a, b, c 分别代表三种操作的权重。

基于编辑距离的相似度 $s(S, S')$ 如式(2)所示。

$$s(S, S') = 1 - \frac{D(S, S')}{\max(\text{Len}(S), \text{Len}(S'))} \quad (2)$$

式中, $\text{Len}(S)$ 、 $\text{Len}(S')$ 分别表示字符串 S 与 S' 的长度。

对于信息接口地址的描述,基于编辑距离的相似性计算停留在字面上的比较,未考虑“同义词”和“近义词”因素,本文引入 Word2Vector 提高对原文语义关系的理解,改进编辑操作权重设置。

替换操作权重的大小应与两个词的相似性大小相反,假设两个词的词向量的余弦相似度为 k ,防止 k 为 0 时替换操作权重无意义,则取两个词替换操作的权重 c ,如(3)所示。

$$c = \frac{1}{1+k} \quad (3)$$

本文取删除和插入操作的权重 $b=1, c=1$,则两个字符串间的编辑距离如式(4)所示。

$$D(S, S')_{ij} = \begin{cases} \max(i, j) & \text{if } \min(i, j) = 0 \\ \min \begin{cases} D_{i-1, j-1} + \frac{1}{1+k_{i,j}} \times 1_{(S_i \neq S'_j)} \\ D_{i-1, j} + 1 \\ D_{i, j-1} + 1 \end{cases} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $k_{i,j}$ 为 S_i, S'_j 的词向量 S_i, S'_j 的余弦相似度,如式(5)所示。

$$k_{i,j} = \frac{S_i \cdot S'_j}{\|S_i\| \times \|S'_j\|} \quad (5)$$

二次设备的信息接口地址为短文本,因此本文采取 Word2vec 中 CBOW 模型进行词汇向量化表征^[22-25],如图 6 所示, V 为词典的词汇量, N 为隐藏层维度,模型输入 C 个 One-Hot 向量, W_1, W_2 为输入层和隐藏层权重,隐藏层词向量平均值 h 如式(6)所示。

$$h = \frac{1}{c}(x_1 + x_2 + \dots + x_c)W_1 \quad (6)$$

输出层向量 u 如式(7)所示。

$$u = hW_2 \quad (7)$$

目标词汇用 u_0 表示,则模型的损失函数 E 如式

(8)所示。

$$E = \log \sum_{i=1}^V \exp(u_i) - u_0 \quad (8)$$

通过随机梯度下降算法不断更新矩阵 W_1 、 W_2 达到 E 的极小值，并最终求得各词语的词向量值。

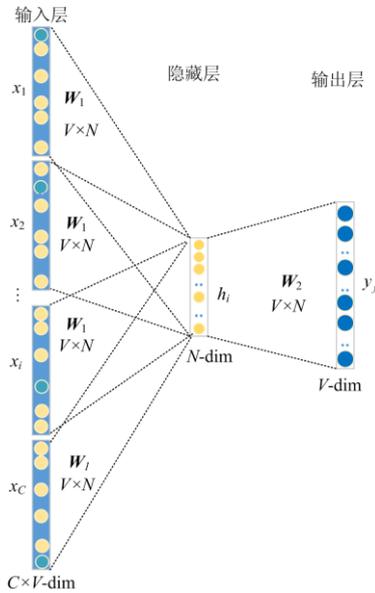


图 6 CBOW 模型
Fig. 6 CBOW model

利用大量变电站 SCD 文件提出二次设备的信息接口地址作为样本，在利用 jieba 分词^[26]前引入电力专业名词后增强分词效果，分词后进行模型训练。

3 基于知识图谱的智能运维系统信息采集自动配置

智能变电站中各二次设备的模型信息都集成在全站配置 SCD 文件中，文件结构如图 7 所示，文件采用层级结构，所有二次设备在 SCD 文件中均表现为一级 IED 节点及其节点内嵌套的各层子节点信息。配置前解析 SCD 文件获取需要监测的 IED，并从其层级节点中获得数据输出接口地址及描述形成该 IED 的信息接口地址。

配置时以知识图谱中二次设备为出发点，按图 8 中箭头所示路径进行查找匹配。以 SCD 文件解析的 IED 的设备型号信息在知识图谱中查找需要监测的 IED 对应的二次设备，以在 SCD 文件中解析提取的该 IED 的各信息接口地址匹配知识图谱中的信息接口地址，匹配到标准信息接口地址，从而匹配到智能运维系统的信息采集点，实现智能运维系统信息采集的自动配置。

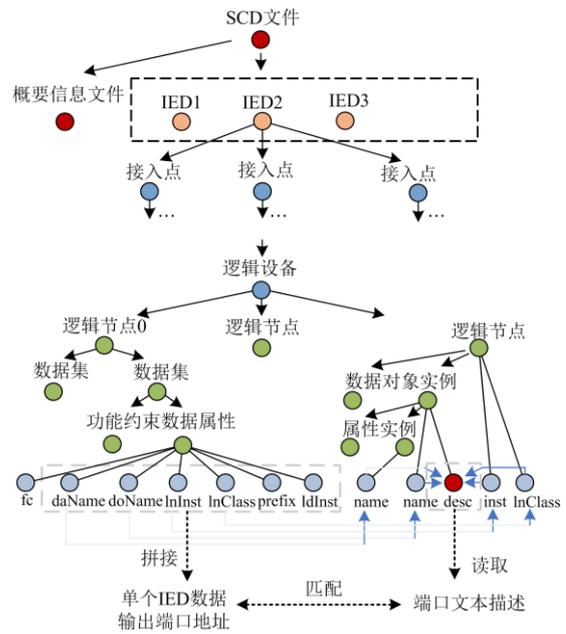


图 7 SCD 文件解析示意图
Fig. 7 Schematic diagram of SCD file parsing

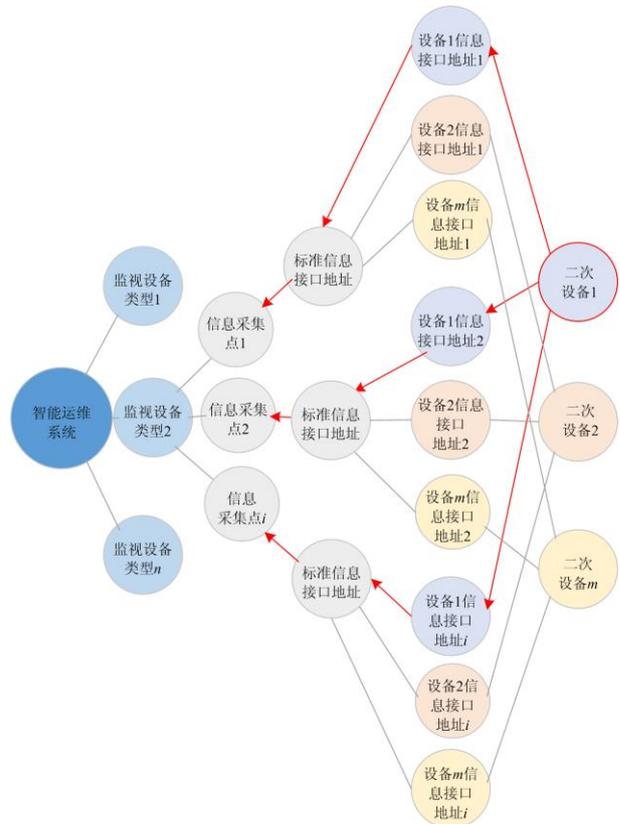


图 8 自动配置路径
Fig. 8 Automatic configuration path

配置时若在知识图谱中无法匹配到对应的二次设备，则通过设备类型查找智能运维系统中该类设

备的信息采集点及其对应的标准信息接口地址,然后通过 IED 的信息接口地址与标准信息接口地址的相似性计算匹配及人工校验实现二次设备信息接口地址与智能运维系统信息采集点的关联配置,并将该关联关系储存到知识图谱中实现知识更新。

4 实例验证

为验证本文所提配置方法的有效性,以智能运维系统历史配置数据中选取 10 个 500 kV 智能变电站、20 个 220 kV 智能变电站和 10 个 110 kV 智能变电站的配置数据作为配置样本,样本包含超过 6 000 个 IED 的配置数据,随机选取 9 个 500 kV、18 个 220 kV 和 9 个 110 kV 变电站的配置数据作为训练集,构建知识图谱,余下的配置数据作为测试集,衡量方法的有效性。

样本数据中每条配置子项为智能运维系统一个信息采集点及其配置的二次设备接口地址信息,某条配置子项如下:

```
<item name="跳闸软压板" type="MMS"
scdRef="PROT/goPTRC1.TrStrp" desc="跳闸软压板"
basicVal="1" dataSet="dsRelayEna" strMO="M">
```

包含了 name(信息采集点名称)、type(信息采集点类型)、scdRef(SCD 文件中 IED 设备信息接口参引)、desc(SCD 文件中 IED 设备信息接口描述)、

basicVal(信息点基准值)、dataSet(信息点所在数据集)、strMO(该信息是否为必配项)7 个属性,提取 name、scdRef、desc 属性,形成一条对应关系,如信息采集点:跳闸软压板→二次设备信息接口地址:跳闸软压板-PROT/goPTRC1.TrStrp。

在构建的知识图谱本体中包含信息采集点:跳闸软压板→标准信息接口地址:跳闸软压板-PROT/PTRC.TrStrp 的关联关系,因此可以形成一条检索路径。

信息采集点:跳闸软压板→标准信息接口地址:跳闸软压板-PROT/PTRC.TrStrp→二次设备信息接口地址:跳闸软压板-PROT/goPTRC1.TrStrp。

按照以上方式构建智能运维系统信息采集知识图谱片段如图 9 所示,从左到右依次是智能运维系统监测的二次设备类型、该二次设备对应的信息采集点、信息采集点对应的标准信息接口地址、标准信息接口地址关联的二次设备端口地址、对应的二次设备。

智能运维系统信息采集点依照保护的技术规范做最大化建模,不同厂家及类型的保护配置的功能不同,可能存在不包含某一信号的情况,如图 9 中某厂家 PRS-753A-FA-G-D 线路保护装置未配置三相不一致保护功能,则不具有“三相不一致跳闸”信号。

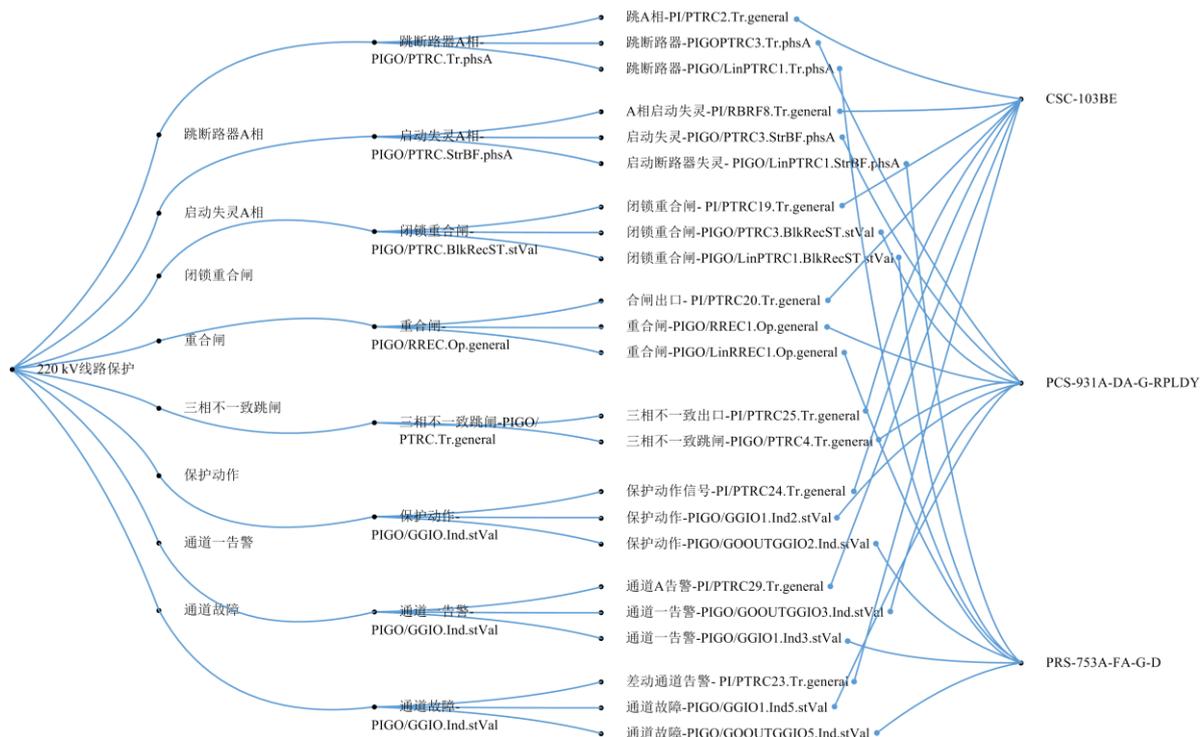


图 9 智能运维系统信息采集配置知识图谱片段

Fig. 9 Fragment of knowledge map of intelligent operation and maintenance system information collection configuration

基于构建的知识图谱,对测试集进行智能运维系统工程配置,某 220 kV 变电站智能运维系统信息采集点、跳合闸回路诊断业务配置结果如图 10、图 11 所示。图 10 中 PL2054B-220 kV 排线 2054 主

一保护第二套保护智能运维采集的信息均成功映射到智能运维系统的信息采集点,基于信息采集点的映射实现了跳合闸回路诊断业务的自动配置,配置结果如图 11 所示。

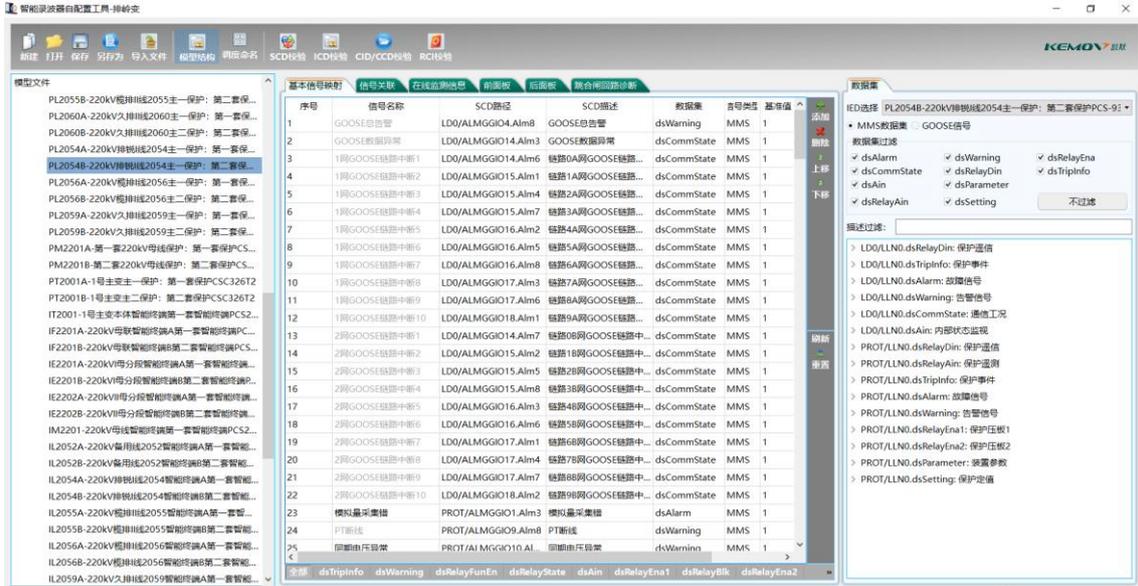


图 10 基本信息点自动配置

Fig. 10 Automatic configuration of basic information points

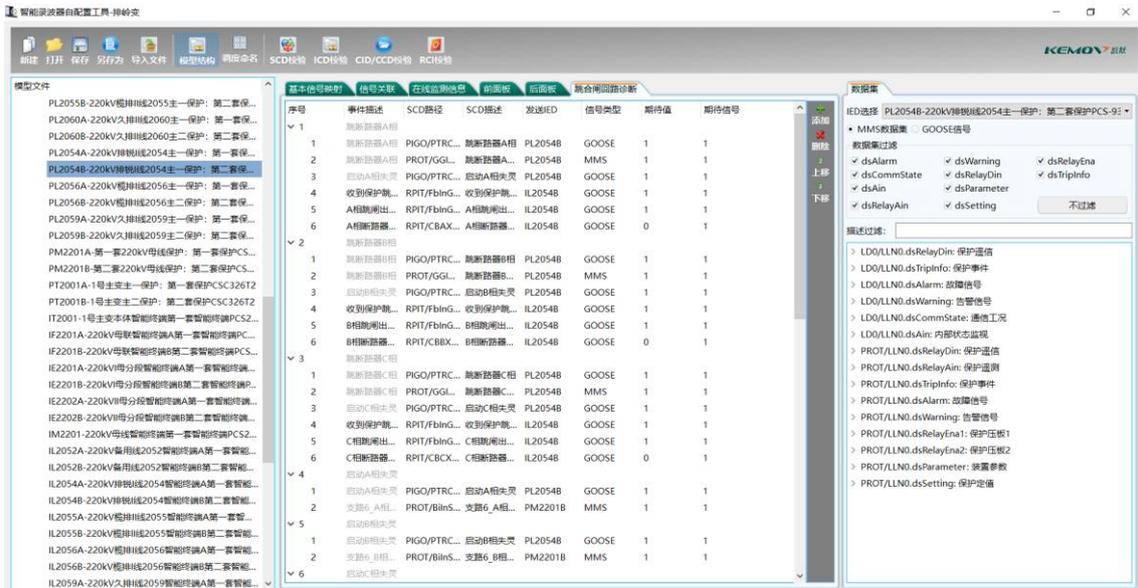


图 11 跳合闸回路诊断自动配置

Fig. 11 Automatic configuration of trip circuit diagnosis

测试集的配置结果统计如表 1 所示,由于不同厂家类型保护设备功能配置存在差异,智能运维系统工程配置模型的信息采集点依照保护技术规范做最大化建模,测试集中存在部分未配置的信息点,此部分信息采集点在保护设备的模型中没有对应的

信息接口地址,智能运维系统业务模板不做处理。配置时若在知识图谱中无法匹配到对应的二次设备,通过 IED 的信息接口地址与标准信息接口地址的相似性计算匹配及人工校验实现二次设备信息接口地址与智能运维系统信息采集点的关联配置,保

证配置正确率 100%。

表 1 测试结果

Table 1 Test results

变电站	类别	数目	正确率
500 kV	正确配置信息点	25 641	100%
	错误配置信息点	0	
	未配置信息点	115	
220 kV-1	正确配置信息点	12 469	100%
	错误配置信息点	0	
	未配置信息点	83	
220 kV-2	正确配置信息点	13 832	100%
	错误配置信息点	0	
	未配置信息点	67	
110 kV	正确配置信息点	6 321	100%
	错误配置信息点	0	
	未配置信息点	32	

5 结论

针对智能变电站继电保护智能运维系统信息采集点多、保护模型的不规则无法直接实现自动映射等问题,本文提出一种基于知识图谱的继电保护智能运维系统自动配置方法,基于继电保护规定及专家知识构建知识图谱本体,利用智能运维系统历史配置数据进行知识学习,构建智能运维系统信息采集配置知识图谱,并通过二次设备信息接口地址的相似性计算匹配实现知识融合。利用智能运维系统历史配置数据作为样本验证所提方法的有效性。基于知识图谱的继电保护智能运维系统自动配置技术,可有效提高智能运维系统配置效率,保证配置的正确性,解决了智能运维系统人工配置工作量大、工作效率低、周期长的问题,有利于智能电网的稳定运行。

参考文献

- [1] 宋璇坤,韩柳,鞠黄培,等. 中国智能电网技术发展实践述[J]. 电力建设, 2016, 37(7): 1-11.
SONG Xuankun, HAN Liu, JU Huangpei, et al. A review on development practice of smart grid technology in China[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(7): 1-11.
- [2] 张瑶,王傲寒,张宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 180-187.
ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 180-187.
- [3] ZHOU Long, ZHANG Di, WU Weijie, et al. A comparative study on grid resource utilization rate between China Southern Power Grid and National Grid Plc of UK[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 277-284.
- [4] 彭龙,宁剑,王毅,等. 状态估计研究模式设计及应用[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 169-175.
PENG Long, NING Jian, WANG Yi, et al. Design and application of state estimation research model[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 169-175.
- [5] 王馨尉,吕勃翰. 人工智能技术在电力调度自动化系统应用研究[J]. 山东电力技术, 2020, 47(7): 41-47.
WANG Xinwei, LÜ Bohan. Application of AI technology on power dispatching automation system[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(7): 41-47.
- [6] 林国贤,林峰,黄金魁,等. 面向智能运检管理的变电站运动目标立体匹配算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 128-134.
LIN Guoxian, LIN Feng, HUANG Jinkui, et al. Research on a stereo matching algorithm for substation moving goal oriented to intelligent transportation inspection management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 128-134.
- [7] 彭志强,周航,韩禹. 智能变电站自动化设备透明运维系统构建与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 156-163.
PENG Zhiqiang, ZHOU Hang, HAN Yu. Construction and application of transparent operation and maintenance system for intelligent substation automation equipment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 156-163.
- [8] 尹相国,何楷,靳婷婷,等. 智能变电站二次回路可视化的设计与实现[J]. 电气时代, 2018(11): 85-87.
YIN Xiangguo, HE Kai, JIN Tingting, et al. Design and implementation of secondary loop visualization in intelligent substation[J]. Electric Age, 2018(11): 85-87.
- [9] 韩伟,姜帅,马伟东,等. 基于短地址关联数据标识的智能变电站虚回路可视化技术研究及应用[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 95-101.
HAN Wei, JIANG Shuai, MA Weidong, et al. Research and application of virtual circuit visualization technology in smart substation based on the short address associated data identification[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 95-101.
- [10] 袁明旭,余洋,童晓阳,等. 智能变电站 ICD/CID/SCD 模型内容差异检查方法及工具[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 118-124.
YUAN Mingxu, YU Yang, TONG Xiaoyang, et al. Difference checking method and software of the ICD/CID and SCD in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 118-124.
- [11] 施正钗,郑俊翔,周泰斌,等. 基于语义分析的设备监控告警信息知识图谱构建研究[J]. 浙江电力, 2020,

- 39(8): 83-87.
SHI Zhengchai, ZHENG Junxiang, ZHOU Taibin, et al. Study on knowledge graph construction of equipment monitoring and alarming information based on semantic analysis[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(8): 83-87.
- [12] DAI Renchang, LIU Guangyi, WANG Zhiwei, et al. A novel graph-based energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(3): 1845-1853.
- [13] 王萌, 王靖婷, 江胤霖, 等. 人机混合的知识图谱主动搜索[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(12): 2501-2513.
WANG Meng, WANG Jingting, JIANG Yinlin, et al. Hybrid human-machine active search over knowledge graph[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(12): 2501-2513.
- [14] 王智悦, 于清, 王楠, 等. 基于知识图谱的智能问答研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(23): 1-11.
WANG Zhiyue, YU Qing, WANG Nan, et al. Survey of intelligent question answering research based on knowledge graph[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(23): 1-11.
- [15] 巩宇, 李碧薇, 李德华, 等. 基于知识图谱的电力设备故障知识库构建方法[J]. 计算机科学与技术, 2021, 39(4): 72-77.
GONG Yu, LI Biwei, LI Dehua, et al. Construction method of power equipment fault knowledge based on knowledge graph[J]. Computer Science and Technology, 2021, 39(4): 72-77.
- [16] 刘鹏, 季知祥. 基于知识图谱的二次设备缺陷智能诊断与识别应用研究及实现[J]. 电力信息通信, 2021, 19(5): 31-38.
LIU Peng, JI Zhixiang. Research and implementation of intelligent diagnosis and recognition of secondary equipment defects based on knowledge graph[J]. Electric Power ICT, 2021, 19(5): 31-38.
- [17] GUTIÉRREZ L, KEITH B. A systematic literature review on word embeddings[C] // International Conference on Software Process Improvement, Springer, 2018, Cham: 132-141.
- [18] 蒋逸雯, 李黎, 李智威, 等. 基于深度语义学习的电力变压器运维文本信息挖掘方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4162-4172.
JIANG Yiwen, LI Li, LI Zhiwei, et al. An information mining method of power transformer operation and maintenance texts based on deep semantic learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4162-4172.
- [19] 范卫东, 冯晓伟, 董金星, 等. 基于历史数据语义相似度的智能变电站虚端子自动连接[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 179-186.
FAN Weidong, FENG Xiaowei, DONG Jinxing, et al. Automatic connection of virtual terminals of smart substation based on semantic similarity of historical data[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 179-186.
- [20] SHAMSUL H M. An improved vulnerability exploitation prediction model with novel cost function and custom trained word vector embedding[J]. Sensors, 2021, 21(12): 4220-4220.
- [21] 黄震. 面向自动问答系统的短文本相似度计算[J]. 信息技术与信息化, 2020(11): 200-201.
HUANG Zhen. Short text similarity calculation for automatic question answering system[J]. Information Technology and Informatization, 2020(11): 200-201.
- [22] 王辉, 潘俊辉, 王浩畅, 等. 基于改进的 CBOW 与 BI-LSTM-ATT 的文本分类研究[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(7): 1372-1376.
WANG Hui, PAN Junhui, WANG Haochang, et al. Text classification research based on improved CBOW and BI-LSTM-ATT[J]. Computer & Digital Engineering, 2021, 49(7): 1372-1376.
- [23] 牛雪莹, 赵恩莹. 基于 Word2Vec 的微博文本分类研究[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(8): 256-261.
NIU Xueying, ZHAO Enying. Research on Chinese weibo text classification based on Word2Vec[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(8): 256-261.
- [24] 陆尹浩. 一种基于 Word2Vector 与编辑距离的句子相似度计算方法[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(5): 146-147.
LU Yin hao. A calculation method of sentence similarity based on Word2Vector and edit distance[J]. Computer Knowledge and Technology, 2017, 13(5): 146-147.
- [25] 彭俊利, 谷雨, 张震, 等. 融合单词贡献度与 Word2Vec 词向量的文档表示[J]. 计算机工程, 2021, 47(4): 62-67.
PENG Junli, GU Yu, ZHANG Zhen, et al. Document representation fused with term contribution and Word2Vec word vector[J]. Computer Engineering, 2021, 47(4): 62-67.
- [26] 曾小芹. 基于 Python 的中文结巴分词技术实现[J]. 信息与电脑, 2019, 31(18): 38-39, 42.
ZENG Xiaoqin. Technology implementation of Chinese Jieba segmentation based on Python[J]. China Computer & Communication, 2019, 31(18): 38-39, 42.

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2022-01-26

作者简介:

许尧(1984—), 男, 高级工程师, 从事电力系统自动化及继电保护方面的研究工作;

毛玉荣(1989—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: jiangzhuoyan@kemov.com

(编辑 张爱琴)