

基于知识图谱的配电网故障辅助决策研究

王骏东¹, 杨军¹, 裴洋舟¹, 詹祥澎¹, 周挺¹, 谢培元²

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北省 武汉市 430072;

2. 国网湖南省电力公司调控中心, 湖南省 长沙市 410007)

Distribution Network Fault Assistant Decision-making Based on Knowledge Graph

WANG Jundong¹, YANG Jun¹, PEI Yangzhou¹, ZHAN Xiangpeng¹, ZHOU Ting¹, XIE Peiyuan²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Dispatch Center of State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, Hunan Province, China)

ABSTRACT: Scheduling decision knowledge is usually stored in text files or databases on scheduling procedures, or in the experts' experience. Dispatchers need to rely on the large amount of professional knowledge support, the history data and the real-time grid situation awareness to make optimal decisions in a short time in the light of situation changes. In view of the complexity of the scheduling knowledge and the accuracy of the scheduling decision, an auxiliary decision method for the distribution network faults based on knowledge graphs is proposed. The fault scheduling knowledge map including the scheduling knowledge, the fault processing knowledge and the business process knowledge is constructed by using the power grid scheduling rules, the fault planning and the manual experience knowledge, and the knowledge representation formed by the power grid topology structure is constructed, and the fault planning and the fault processing cases are correlated in the form of event clusters. Then the Artificial Intelligence Markup Language (AIML) and the graph algorithm are combined to realize auxiliary knowledge question answering, case matching or business recommendation for distribution network scheduling faults, and generate the multi-objective distribution network reconstruction strategies through the fault feedback information and the real-time decision-making scenarios. Finally, a friendly and interactive application system for auxiliary decision making for fault dispatching is developed and put into online operation in the distribution network in Changsha city, Hunan Province. The recommendation algorithm and interactive strategy have been effectively verified, which shows that the system can provide fast, intelligent and accurate auxiliary decision support for dispatchers.

KEY WORDS: knowledge graph; distribution network; assistant decision-making; intelligent question answering; fault reconfiguration; second order conic programming

摘要: 调度决策知识存在于调度规程等文本文件、数据库以及专家经验中,调度员在故障处理时需要依赖大量的专业知识支撑、历史和实时电网态势感知,并根据情况变化在短时间内做出最优决策。针对调度知识复杂,调度决策实时性高等需求,提出了一种基于知识图谱的配电网故障辅助决策方法,利用电网调度规则、故障预案以及人工经验知识构建包含调度知识、故障处理知识、业务流程知识的故障调度知识图谱,构建以电网拓扑结构形成的知识表征,将故障预案及故障处理案例以事件簇形式进行关联。结合人工智能标记语言(artificial intelligence markup language, AIML)和图算法,实现配电网调度故障的辅助知识问答、案例匹配以及业务推荐等,通过故障反馈信息和实时决策场景完成多目标的配电网重构策略生成。最后,研发了具有友好交互性的故障调度辅助决策应用系统,并已在湖南长沙市配电网在线投运,验证了所提推荐算法及交互策略的有效性,表明该系统能够给调控人员提供快速、智能、准确的辅助决策支持。

关键词: 知识图谱; 配电网; 辅助决策; 智能问答; 故障重构; 二阶锥规划

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1677

0 引言

随着电力物联网的不断发展,电力大数据迎来新机遇^[1]。配电网作为与用户终端紧密相连的最后环节,是保证供电质量的关键^[2]。面对数据多样、复杂、孤岛化,与任务场景结合度高等新挑战,提升配电网数据感知认知智能水平以及规范故障处理能力对于调度工作具有重要意义^[3-4]。

配电网故障调度工作需要调控人员对于电网状态和数据的全局感知^[5]。以故障信息为关键点,

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018AAA0101502)。

Project Supported by National Key R&D Program of China

(2018AAA0101502) China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

依据调度规程、安全规程等工作规定，结合故障预案、历史故障记录以及调度经验，协调各部门做出快速准确的应对措施和工作部署，保证配电网短时间内恢复安全稳定经济运行。这种处置方式以经验和人工分析为主，强调知识和经验之间的关联^[6]。调控人员对于故障处置相关知识掌握、处理经验、查阅情况以及方案逻辑判断能力往往决定了故障处理效果^[5]，提升故障辅助决策能力能够进一步规范业务操作，减少误操作和安全事故的发生，优化处置策略，提升工作效率。

现有电网调度辅助系统如 EMS、D5000 以及 OPEN3000 侧重于数据采集、监控、安全校核等，调控云平台融入大数据与云计算技术逐渐向“智能型调度”升级^[6]，但对于以文本为主的知识型信息的处理能力较弱。电网故障调度决策存在数据片面性和处理方案局限性，需要数据-知识协同驱动^[7-8]，提升调控人员感知智能、认知智能、行为智能能力，在复杂故障场景下模仿调控人员筛选、思考、推理及制定故障处理方案使故障处理分析决策更全面精益^[9]。文献[10-11]分析了电网发展新特点与新挑战，提出知识图谱技术可作为提升电网智能化的重要解决手段。知识图谱^[12](knowledge graph)本质是一种语义网络的多关系图，对于复杂世界概念、实体及关系的知识建模，将非线性知识进行结构化表示，从而实现高效的存储、查询、计算等关系运算和复杂关系分析，具有可解释性^[13-14]，广泛应用于搜索引擎、社交平台、教育医疗等领域^[15]。针对电力领域而言，知识图谱技术优势主要体现在 3 个方面，首先能够将电力设备、网络拓扑结构、电力企业等多源异构电力数据进行统一表征及管理^[16]，从而辅助提升设备运维能力与数据整合搜索能力；其次，通过电力文本自然语言解析技术^[17]，将电力知识例如规程文件等非结构化数据融入知识图谱中，从而提供智能辅助决策支持；最后，可将电力知识图谱与深度学习、强化学习及符号推理等技术进行融合^[18]，探索解决更广泛的电网动态决策及智能推理任务。

配电网结构、设备实体关系、业务事件流程等都具有紧密的关系属性，与图数据的结构和表达具有一致性^[19]，且故障调度要求在短时间内整合高密度知识与信息进行分析，构建配电网故障调度本体模型和实体数据库，以数据逻辑模拟智慧生命记忆及思考方式^[20]，从而完成电网多源异构数据和多维复杂关系处理。目前，知识图谱技术在电力领域还处于初步探索阶段，已有研究主

要集中于电力知识图谱构建方法、电网数据融合及管理、简单查询推理和知识问答等。文献[11]提出了电网调度“邻域知识”模型与在线发现精细运行规则方法，但知识图谱内容局限于断面及其量化关系；文献[19]提出了“电网一张图”的构建方法，实现电网数据全面融合，但未考虑与业务场景知识关联。文献[21-23]融合现有电网多源数据构建电力设备知识图谱，实现智能搜索与可视化，主要侧重于非电网故障情况下的设备综合管理。文献[24-25]在电力系统网络拓扑图建模基础上，实现拓扑分析并行计算；文献[26]融入图计算平台，提出了电网多源信息系统集成方法，对于电网侧复杂系统分析水平有极大提升，但忽略了调控人员业务知识水平与场景人机交互性提升。在故障辅助处理方面，文献[10]提出了一种针对电网调度故障处置业务的知识图谱构建框架，为故障场景下辅助决策提供了解决思路；文献[27]构建了大停电知识图谱，提出一种大停电可视化查询方法；文献[28]针对调度系统基础平台构建知识图谱，辅助运维人员完成调度自动化系统业务故障分析，主要面向自动化操作系统故障问题，未涉及电力系统故障。此外，通过构建电网实体设备知识图谱，利用图搜索与不一致性检验，实现了电力设备缺陷记录的自动检索^[29]，低压配电网信息系统中的户变关系辨识^[30]，表现为在限定的领域图谱中实现相对功能。以上讨论了知识图谱在电力领域的设计思路、技术路线及应用场景。然而，目前的研究工作以概念框架为主，具体实施应用较少；多局限于部分图谱构建和单一功能实现，综合场景考虑不足；缺少人机便捷交互，算法忽略调控人员主导作用，未打破电网调控人员和知识图谱技术壁垒，且数据管理更新较为复杂。

为了弥补以上不足，本文首先综合考虑配电网故障情况下调控人员业务场景，设计整合电网数据与知识的故障调度知识图谱；其次采用 TF-IDF 与 TextRank 关键词联合抽取完成中文实体抽取以减少预训练过程，通过规则匹配与人工筛选保证数据完整准确；再次，结合故障调度业务需求，研究设计知识搜索与推理推荐机制，融入人机交互调度算法策略制定；研发了配电网故障调度辅助决策系统，将问答交互、搜索推荐、计算服务、可视化展示融入故障调度图谱应用中，利用对话交互模式及辅助功能模块消除调控人员知识图谱技术障碍，降低操作管理难度。

1 配电网故障调度知识图谱设计及构建

1.1 配电网故障调度知识图谱设计

知识图谱基于图数据模型进行存储和管理,本文采用基于 Neo4j 的标签属性图数据模型,宏观角度来说由节点(node)和关系(relationship)两种类型数据组成,节点存储实体(entity)信息,关系链接实体,节点和关系的属性(property)及标签(label)以键值对(key-value)形式存储。

Entity=Node:Label{Property1, Property2...}

Relationship=start node-[rel:Property3]-end node
式中: Label, Property1, Property2 为实体的标签及多个属性值,标签用来区分不同类型的节点,每个实体可含有一个或多个标签,零个或多个属性; start node, end node 表示头实体与尾实体, rel 表示关系名称, Property3 表示关系属性,实体间关系具有方向性。

知识图谱设计要结合场景考虑语义模型及业务模型,本文设计的配电网故障辅助决策总体框架如图 1 所示,包含数据层、知识图谱层、知识推理层和人机交互层。其中数据层将配电网故障调度决策中所需物理模型与知识模型进行统一,通过知识图谱层建立多源数据间关系链接,形成故障调度辅助决策知识图谱。在构建知识图谱基础上,知识推理层结合业务场景进行数据逻辑关联挖掘,以关键信息匹配、拓扑路径搜索、数据

挖掘统计等方法分析计算,在精细化场景中实现电力知识应用探索。人机交互层基于应用需求与场景实现从功能模块到智能搜索引擎与辅助决策助手的转变。

调度领域知识专业性强,数据多源异构且质量要求高,模型构建复杂等多种因素使得电力调度知识图谱设计难度大。根据配电网故障处理设计内容,调控人员业务处理实际需求,本文将配电网故障调度知识图谱分为实体部分和事件部分。实体部分包括调度规程、安全规定等概念实体以及电网拓扑结构、设备、部门人员信息等物理实体;事件部分包括故障处理、业务逻辑、故障预案与历史故障记录等。故障调度知识实体部分主要存在于调度规程、安全规程等文件以及调度专家经验中,事件部分存在于电网结构及历史数据文本中。

针对调度知识图谱源数据非结构化、知识关联复杂化,且需满足图谱准确性高及可视化效果好的特点,采用“自底向上”和“自顶向下”结合的方式进行创建,选择基于关键信息提取与专家经验结合的人工构建方法。

1.2 故障调度知识图谱实体部分构建

1.2.1 调度规程与安全规定

与常规知识库相比电力调度专业术语没有公开数据库,且含有少量数据源不足以覆盖电力调度知识图谱需求。此外,调度相关知识文本数量庞大,



图 1 基于知识图谱的配电网故障辅助决策总体框架

Fig.1 Framework of distribution network fault assistant decision-making based on knowledge graph

抽取专业术语能够极大简化图谱构建中知识抽取的工作量。对于电力专业术语无需多次抽取且电力调度专业术语在规程文本中多表现为部分章节或者全文的关键词。

TF-IDF 算法简单高效,能够筛选出局部文本中相对高频,而在整个文档分布较为集中的词语,但未考虑词汇出现的位置关系以及相邻词汇语义关联^[31]。TextRank 算法基于本文单元共现关系构建图模型^[32],能够考虑上下文词汇关系,可作为 TF-IDF 算法的补充。本文采用 TF-IDF 和 TextRank 结合的关键词抽取技术对调度规程和安全规程进行电力术语抽取以形成概念实体。

如图 2 所示,将两种算法抽取的关键词进行融合、筛选、修正,分类为操作术语、事故处理术语、运行术语以及故障术语,结合数据材料采用筛除方法进行术语补全,通过搜索匹配完成对于专业术语解释及相关调度规程和安全规程内容补充。

规程=规程术语: 规程类别{术语别名, 定义, 场景, 调度规定, 安全规定, 专家经验}。

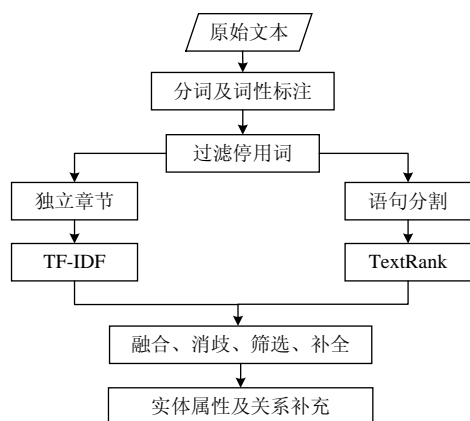


图 2 规程文本关键词处理流程

Fig. 2 Processing flow of key words for regulations

1.2.2 配电网网络拓扑结构知识图谱表征

配电网电力系统网络拓扑结构与图数据结构存在天然相似关系^[26],基于路径支路关联矩阵的辐射状配电系统可以表示为图结构,以电网拓扑中节点为知识图谱中实体,连接线或者开关用知识图谱中关系表示,节点的信息以属性形式存储在知识图谱中。此外,负荷与其他电力设备作为实体与电网拓扑节点链接,通过图推荐与图计算配合完成辅助决策。

系统节点=节点编号: 节点{运行参数、电力设备、负荷}。

线路=系统父节点-[链接:线路属性及参数]→系统子节点。

电力设备=设备名称, 设备{编号, 规定, 运行

信息、故障记录、生产信息}。

负荷=负荷编号: 负荷{上级节点、负荷等级、重要负荷、负荷情况}。

1.2.3 生产管理实体知识

生产管理实体知识主要包括故障调度相关部门、故障发生时部门业务流程关系、部门对应负责人信息等。电网发生故障时,各部门间的联络以及配合对于电网故障的及时正确处理至关重要,构建生产管理知识图谱有助于在故障发生时部门间快速决策与协同工作。

部门=部门名称: 部门{名称、职责任务、位置信息、负责人、联系方式}。

人员=人员姓名: 人员{姓名、所属部门、职务、年龄、联系方式、技能}

部门员工关系=人员-[属于]→部门。

1.3 故障调度知识图谱事件部分构建

1.3.1 故障处理一般原则

故障处理知识图谱以常见配电网故障分类作为实体,故障发生原因、故障属性、故障现象、故障处理办法及其相关专家经验形成多元组。

故障=故障类型: 部门{名称、别名、发生原因、属性、现象、处理办法、专家经验}。

1.3.2 业务逻辑

业务逻辑知识图谱包括常规调度任务的处理流程,因其关联复杂性,且对业务处理顺序逻辑性和操作规定准确性要求较高,采用人工构建方法进行梳理,以调度规程和调控人员经验作为该部分数据基础,充分调研故障调度实际工作情况,建立结合时间、场景、具体任务等的业务逻辑关系。

任务=操作任务: 任务{内容、场景、所涵盖操作、责任部门、专家经验}。

1.3.3 案例事件簇

针对半结构化文本故障预案和历史故障记录故障案例,利用模板模糊匹配方法提取故障的时间、位置、类型、原因等数据,以特征关键词形式来表示历史故障和故障预案,在图谱中自动生成及更新案例事件簇,形成对于单次故障的多尺度表征和多维度关联,从而实现故障发生时自动搜索匹配相关记录辅助决策。

故障预案=故障预案: 预案{故障地点、故障场景、故障类型、故障现象、故障处理步骤}。

故障历史记录=故障历史记录: 故障记录{时间、位置、类型、现象、发生原因、处理方法}。

1.4 故障调度知识图谱存储及管理

本文采用 Neo4j 作为知识图谱存储介质; Neo4j

是由 Java 实现的开源 NoSQL 图数据库^[33], 在近 5 年内一直是最受欢迎的图数据库^[34]。与 MySQL 数据库相比, Neo4j 存储更加灵活, 对于不同数量和深度均能确保零延迟。具有免索引邻接属性, 支持 ACID 特性, 提供了查询与展示一体可视化界面。

通过对多源异构数据进行处理, 基于所构建的知识图谱实体与事件部分并考虑数据类别与关联关系, 整合各部分数据模型设计的故障调度知识图谱数据结构如图 3 所示。构建网络核心数据索引, 提升检索效率; 对属性的唯一性进行约束, 限制删除强制属性查询, 以保证数据完整性。此外, Neo4j 页置换算法根据页面的使用频率进行微调实现高速缓存, 保证在统计学上的最优配置^[33]。

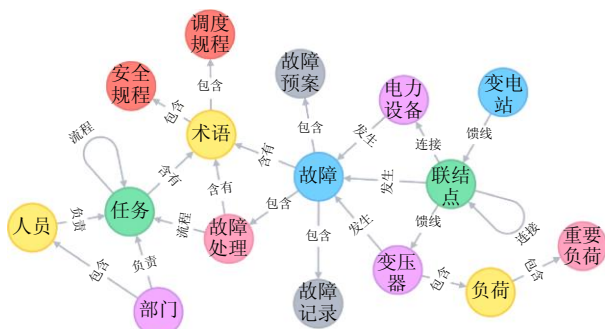


图 3 故障调度知识图谱数据结构
Fig. 3 Data structure of fault dispatching knowledge graph

故障调度知识图谱建立过程中,采用多图多库原则,不同数据模块以不同图部分保存在总图数据库中,对于单一数据部分同时采用单库保存备份。对于图数据库按等级权限进行区分,可实现子图访问控制及多人多机多角色管理,以保证数据安全性与灵活性。为避免调度人员由于数据库语言不熟悉所造成的数据库维护困难,以前端人机交互界面引导完成专业术语、业务流程、人员信息实时更新,案例事件簇自动生成并保存,从而实现了图谱内容高效增删改。

2 基于故障调度知识图谱的交互推理决策

2.1 基于知识图谱的调度辅助问答

类似于关系型数据库采用 MySQL 语言, Neo4j 数据库采用 Cypher 图数据库查询语言, 属于一种声明式图数据查询语言^[33], 具有丰富的表现力, 查询效率高。但对于调度工作人员管理图数据库学习 Cypher 需要数据库语言基础以及大量的时间和精力, 且对于实时决策操作效率低下。

为了满足开发和专业运营需求,本文结合业务需求和查询问答习惯,基于 AIML 所设计的调度辅助问答处理流程及示例如图 4 所示。首先通过

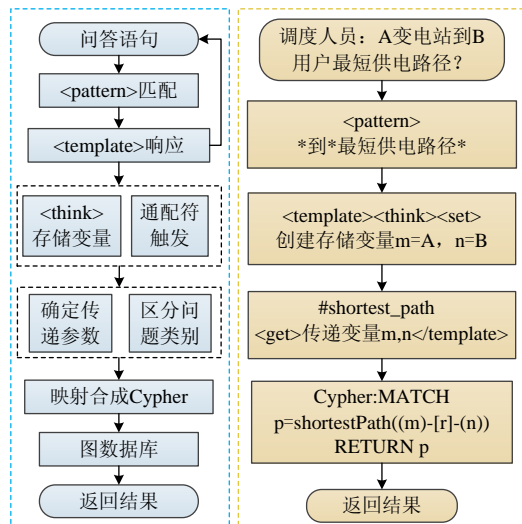


图 4 调度辅助问答处理流程及示例

Fig. 4 Processing flow and examples of dispatching auxiliary Q&A

<pattern>匹配问答语句，过程中考虑对话模糊性以及输入文字的歧义性，例如“A 到 B 最短供电路径？”、“A 到 B 供电距离最短路径”等都与图 4 示例问题相同，采用<srai>标签将调度人员问题归一化，再进行统一处理；针对例如“220 变电站”、“调负荷”等单位不明确及用语不规范问题，通过建立常见歧义词典再次问答以减少歧义并规范用语。匹配后在<template>响应过程中利用<think>配合<set>标签存储变量，以通配符“#”激活自定义函数例如“shortest_path”，根据<get>标签传参生成 Cypher 操作语句，采用文字、语音搭配 Neo4j 交互界面输出结果，从而最终实现调控人员与调度知识图谱交互智能检索问答，极大降低了图数据库操作门槛，提高工作效率。此外，故障调度过程中可随时调取问答模块完成调度知识的检索，以协助完成故障处理任务。

2.2 故障信息推送及故障记录

调度故障发生时,故障信息实时传回调控人员监控系统,根据故障发生的位置可自动推荐该区域故障预案,并匹配相关故障案例。同时,拟合人类的思维及工作模式,将实时故障信息包括故障设备、地点、状态、现象与贴合记忆网络的故障调度知识图谱中故障现象及故障案例等进行匹配,从同一设备故障案例簇、同类设备故障案例簇、同类设备故障处理原则 3 个方面。根据故障信息形成初始约束,建立实体链接,基于子图检索及路径关联故障案例簇与故障处理知识,统计历史故障信息,通过路径召回从而进一步实现知识搜索、计算与推荐。设存在同类设备 $E=(e_1, e_2, \dots, e_n)$ 共存在 m 类故障,设置所有可能发生的故障现象集

合为 A ，则 m 类故障都对应有经验故障现象子集 $A_m=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ ，每个故障案例簇 C 对应故障现象子集 C^a 。当设备 e_1 发生故障，且故障现象集合为 e_1^a 时具体流程如图 5 所示。

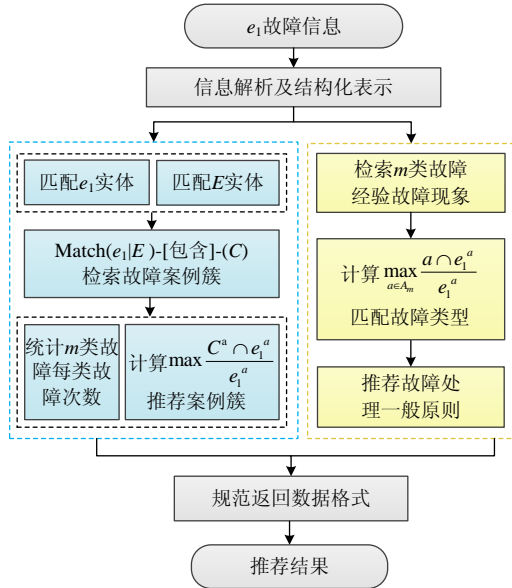


图 5 故障案例辅助推荐流程

Fig. 5 Auxiliary recommendation process for failure cases

在构建了故障案例功能模块的基础上，可实现案例事件簇的自动生成、保存及显示。Neo4j 前端界面可提供故障案例簇的可视化展示，提供更多的故障信息，有利于发现电网薄弱点。

2.3 业务流程推荐

根据 D5000 等智能综合监控系统故障判断或者现场检修人员反馈的故障信息，以故障类型为根实体节点，推荐与之对应的故障发生因素为调控人员提供决策参考和故障排查要点，利用基于调度规程、安全规程及专家经验梳理构建的故障调度业务流程知识图谱，结合故障类型依照任务逻辑推荐常规处理流程，且在过程中提示任务及操作中的调度规程与安全规定，同时可采用调度知识查询与问答检索模块进一步掌握调度规程与安全规定内容。

另外，调度工作需要地调、县调、运维检修部门、操作队等多部门合作完成，部门间高效准确的沟通联络与协调分工极其重要，因此在业务流程推荐的同时关联对应的责任部门，责任部门关联部门责任人与子任务负责人，为负责人节点嵌入包含联络方式等基本信息的属性键，进而实现调控人员故障任务处理中的决策提示与信息提示。

2.4 人工参与辅助重构及网络更新

当完成故障定位，实施故障隔离后对非故障失电区域进行网络重构，本文提出一种参考推荐信息

是在满足功率平衡、容量和电压约束以及配电网连通性和辐射状等^[35]约束下，参考故障推荐信息，完成包含网损小、恢复非故障负荷多、开关次数少等的人机交互场景适应多目标优化。

配电网网络拓扑结构知识图谱表征为 $G=(N,L)$ ，其中 N 为系统节点集， L 为支路集。节点 i 和节点 j 之间的支路表示为 ij 。引入布尔变量 X ， Y 分别表示负荷的投入、线路的投入。

1) 最小化损失的负荷成本。

$$\min f_1 = \pi_1 \sum_{r \in R} R_w \sum_{j \in N_L(r)} (1 - X_j) P_{L_j} \quad (1)$$

其中： π_1 是单位负荷成本； R 是按照中断损失分类负荷级别的集合，包括一级负荷，二级负荷和三级负荷； R_w 是每个类型负荷的权重。

2) 最小化网损成本。

$$\min f_2 = \pi_2 \sum_{ij \in L} i_{ij}^2 r_{ij} \quad (2)$$

其中： π_2 为单位网损成本； i_{ij} 为线路 ij 的电流； r_{ij} 为线路 ij 的电阻。

3) 最少开关操作成本。

$$\min f_3 = \pi_3 \sum_{s=1}^M |K_s - K_{s0}| \quad (3)$$

其中： π_3 为开关操作成本； M 为开关数； K_{s0} 和 K_s 分别为开关 s 的初始状态和重构后的状态，使用二进制 0 和 1 表示。

故障重构首要任务是恢复负荷损失，在保证尽可能恢复更多负荷的基础上，考虑网损与开关动作次数进行经济重构。开关操作成本与设备状况、人员、时间等因素密切相关，实时故障及工作情况决定了网损与开关操作次数重要程度。为使重构策略更加适用于实时场景，设置非负数控制策略变量负荷系数 α 、网损系数 β 、开关操作系数 χ ，调控人员可根据故障情况和任务场景调整变量系数或重要程度制定不同的故障重构策略。

总目标表示为

$$\min f = \alpha f_1 + \beta f_2 + \chi f_3 \quad (4)$$

配电网重构是一个混合整数非线性规划问题，潮流模型非凸性导致问题难以求解，利用松弛能够将配电网潮流模型转化为凸优化模型^[36]，将解空间投影至锥体上，从而转化为一个混合整数二阶锥规划(mixed integer second order conic programming, MISOCP)，从而通过现有的求解器(例如 CPLEX, GUROBI)快速获得全局最优解。

2.5 人机交互工作策略

本文设计的配电网故障调度人机交互策略如

图 6 所示。电网调度故障知识图谱实体及事件部分

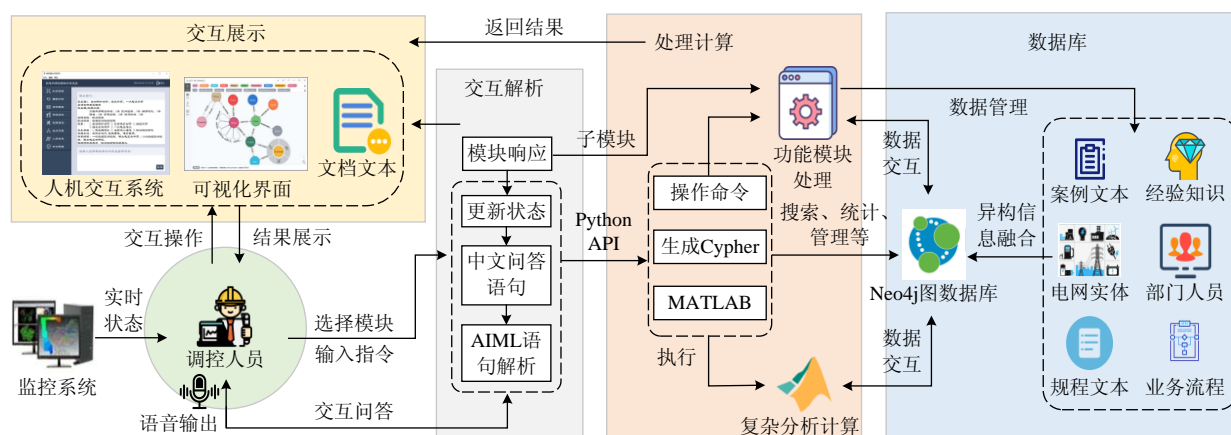


图6 配电网故障调度人机交互策略

Fig. 6 Human-computer interaction strategy for fault dispatch in distribution network

存储于图数据库 Neo4j 中, 调控人员以中文文字输入, 系统利用 AIML 解析输入含义, 依据解析结果生成指令完成图谱查询搜索、更新、管理等操作, 并按照问答逻辑完成交互。故障发生时以故障信息为基础完成故障预案、历史故障记录、故障类型的常规解决方法推荐。结合故障信息通过交互问答完成业务流程、调度规程、安全规定、部门人员信息的推荐与搜索。查询推荐过程中以文字、图可视化、数据表等多种形式呈现交互结果, 实现调控人员多角度直观掌握推荐信息。

针对故障决策缺乏人机互动问题, 修改目标决策过程, 以端到端优化策略生成改为调控人员决策生成。调控人员结合图谱推送的故障相关信息, 可通过对话完成切除及保留线路选择、是否切除负荷选择、是否考虑开关操作次数、网损优先或负荷优先等, 可满足多种调度场景进行重构。

3 故障调度辅助决策应用系统开发及测试

3.1 系统设计与开发

系统设计开发主要遵循 3 个原则: 一是通用性, 针对不同地区电网能够按照统一流程实现系统开发, 且知识数据便于共享传承; 二是面向业务, 所设计功能需在实际工作中具有实用性并贴合业务场景, 重点关注知识逻辑分析推荐与调控场景交互; 三是便捷性, 满足调控人员对于系统易操控、易理解及易管理的要求。

故障调度辅助决策系统采用 Python 的标准 GUI Tkinter 完成图形用户界面的开发。综合 MATLAB 计算高效特征, 知识图谱 Neo4j 搜索高效及可视化效果佳特点, Python 接口友好特性, 系统以用户对话交互为主要操作模式, 采用搭载 AIML 技术的 Python 处理完成 MATLAB 计算, Neo4j 显示及搜索。具体开发流程如图 7 所示。

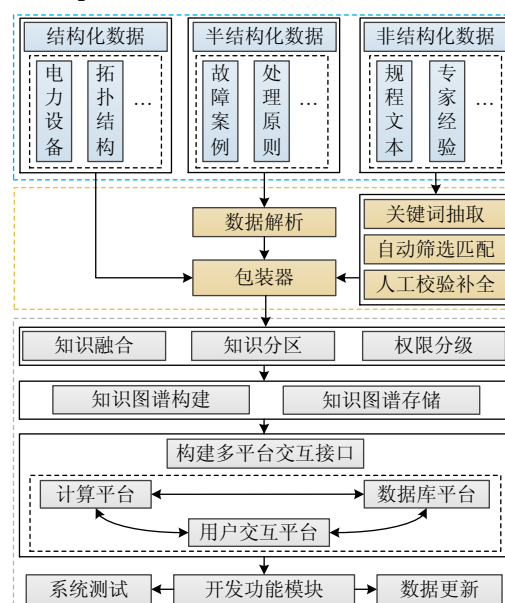


图7 配电网故障调度辅助决策系统开发框架

Fig. 7 Development framework of aided decision system for fault dispatching of distribution network

数据处理阶段针对故障案例、处理原则等半结构化数据可通过文本与网页解析转化为结构化数据; 对于非结构化数据例如规程文本, 利用 TF-IDF 和 TextRank 算法抽取长沙市地调规程关键词, 按照权重排序取各算法前 500 个单词节点, 筛选保留 TF-IDF 关键词 216 个, 保留 TextRank 关键词 190 个, 合并后共保留 245 个, 通过人工补全最终形成术语实体 305 个, 关键词抽取准确率超过 40%, 合并查全率达到 80%。结果表明通过抽取关键词能够有效减少实体构建工作量, 同时 TF-IDF 以高频词汇为基础对于电力规程文本关键词抽取效果更佳。

根据调度业务需求将术语进行分类, 基于术语自动搜索匹配规程文本段落从而实现实体扩充, 同时将专家经验补充到数据中, 最终将各种结构数据通过包装器处理为 Neo4j 可导入模式。所设计的故障调度知识图谱数据间存在耦合关系, 例如业务流

程中包含了事故处理术语，设备数据也囊括了拓扑、故障等信息，因此知识图谱构建过程中需将关联数据建立联系并进行融合，减少数据孤立与重复。此外，对知识图谱进行分区分级管理，可提升数据便捷性与安全性。

在完成知识获取、建模、管理基础上，通过应用程序接口实现计算、数据库及用户平台交互，根据知识应用需求开发功能模块。用户交互界面由功能模块按钮、用户输入框、交互输出框组成，选择模块切换子界面，如图 8 所示。



图 8 配电网辅助决策系统主界面

Fig. 8 Main interface of the distribution network assistant decision-making system

3.2 系统功能模块构成

为实现配电网调度辅助决策系统，共开发知识图谱、辅助问答、案例推荐、网络表征、故障重构、业务流程、人员信息和安全管理 8 个模块。模块的设计主要考虑数据类别兼容性、模块功能区分合理性以及满足系统实际操作流程中的智能便捷。

从数据层面考虑，基于数据更新速度及数据安全要求角度进行区分，调度规程与故障处理一般原则等数据更新速度较慢，且安全性要求较低，建立知识图谱模块实现此类数据增加、删除、修改等知识图谱模式与内容更新，通过子页面与引导信息能够提升操作便捷性；电力部门及人员信息属于相对机密数据且更新相对频繁，建立人员信息模块，实现部门及人员数据更新及操作用户等级权限管理；电网拓扑及参数属于实时数据，数据通信及更新模式不同，通过建立网络表征模块实现数据转换、电网网络拓扑结构表征及参数更新。

从模块功能层面考虑，知识图谱、人员信息及网络表征主要负责数据存储及更新，同时完成对应数据的可视化。除此之外，本文在调度故障辅助决策知识应用层面设计了电力知识搜索、推荐、智能问答及知识计算等功能，从问答功能出发，不同更新速度及类别的数据处理方法相对统一。因此建立

辅助问答模块负责知识图谱问答功能实现。故障处理过程中，结合故障处理一般方法，推送处理业务流程建议及相关规程要求，以知识搜索为主；故障预案及历史记录推荐，需要在完成知识搜索基础上进行匹配计算；故障重构阶段，不仅要搜索故障数据，还需要通过人机交互形成配电网重构策略，综合知识引导与数据计算实现功能。由于功能及实现流程不同，因此分别建立业务流程模块、案例推荐模块及故障重构模块。

从系统操作层面考虑，数据安全性是首要问题，为此设置享有不同权限的 4 类用户，包括调度主管人员、调度班长及各部门负责人、调控人员以及其他工作人员，根据级别划分数据访问权限，并在此基础上建立身份验证、使用记录调取以及数据库备份等系统管理功能，将此类功能整合到安全管理模块中。此外，将辅助问答模块设计为中枢模块，作为与用户交互的主要模块，且赋予其引导调用其他模块功能，从而提升系统智能便捷性。

3.3 系统应用及测试

用户可使用知识图谱模块的引导互动，通过知识图谱子界面选择增删改内容，实现知识图谱数据库更新，如图 9 所示。



图 9 知识图谱人机交互更新管理

Fig. 9 Update management of knowledge graph

系统针对各部分图数据内容设计模式，建立知识图谱路径及属性为基础的逻辑关系搜索，制定 AIML 多模式问答匹配和响应规则，实现基于配电网故障调度知识图谱的关联实体检索及多跳关系问答，从而提供精准的故障处理辅助决策数据及知识支持，如图 10 所示。

本文将该系统应用于湖南省长沙市某区域配电网完成故障辅助决策以验证该系统实用性及可行性。监控人员发现变压器 A 差动保护动作；线路 10、15、27 出现故障跳闸。

根据变压器故障信息，启动案例推荐模块，如图 11 所示，系统自动在图数据库检索变压器 A 故障案例簇，并统计故障历史数据，以故障信息为核



图 10 知识图谱辅助问答
Fig. 10 Knowledge graph aided question answering



图 11 变压器故障案例辅助决策推荐
Fig. 11 Auxiliary decision-making recommendation of transformer fault cases

心匹配出最大概率故障类型为匝间故障,在明确匝间短路故障事理本质基础上,通过已掌握故障现象与推送的故障经验现象进行比对,可通过检查变压器油是否发生咕噜声等手段进一步明确故障类型,以推荐的故障可能原因如变压器进水等为切入点查找故障发生原因,根据匹配的故障案例簇、处理办法及专家经验等形成初步处置方案。此外,在首次推荐后可根据现场实际情况,再次进行操作任务流程、其他故障类型推荐、故障记录详情等交互辅助完成决策。

线路跳闸故障后,线路 15 重合成功,线路 10、27 重合失败,启用业务流程模块,给出初步常规故障处理任务流程。利用网络表征数据结构,结合故障信息,提示相关部门及人员信息,如图 12 所示。此外,还将根据故障位置搜索故障预案,调取文档推送给调控人员。

根据变电站故障打印报告确定故障距离,通知输电运检安排巡线并发现线路 15 有放电痕迹,漂浮物造成,问答交互确定不影响运行并给出漂浮物处理方法。

现场检查发现线路 10、27 出现断线和倒杆,系统建议通过联络线倒转负荷。首先判断能否恢复非故障损失负荷,在满足全部恢复的情况下,调控人员结合推送信息进行交互问答,在系统子页面制

定重构策略,从而完成人机交互重构策略生成,如图 13 所示。



图 12 线路故障业务流程辅助决策推荐
Fig. 12 Auxiliary decision-making recommendation of line fault cases business process



图 13 配电网故障重构策略生成及交互
Fig. 13 Strategy generation and interaction of distribution network fault reconstruction

重构结果以数据文本与网络可视化结合展示,将数据集成至可视化节点中,进行关系参数更新。

重构结果可视化交互界面如图 14 所示,网络连接关系形象简洁,各类连接关系及实体通过不同颜色表征,同时可进行点击查看嵌入属性及图谱扩展等操作。对于重构策略可进行多次制定,在同一界面内可进行比较选择,通过选择的重构策略可再次推送与网络表征关联的任务流程。此外,在后续各阶段任务过程中可随时启动任意功能模块辅助调控人员完成故障处理工作,完整线路故障处理流程示意图如图 15 所示。

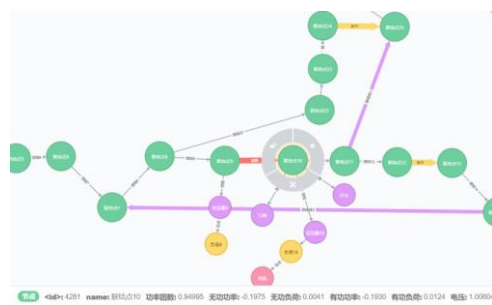


图 14 故障重构结果展示及交互界面
Fig. 14 Display and interactive interface of fault reconstruction results

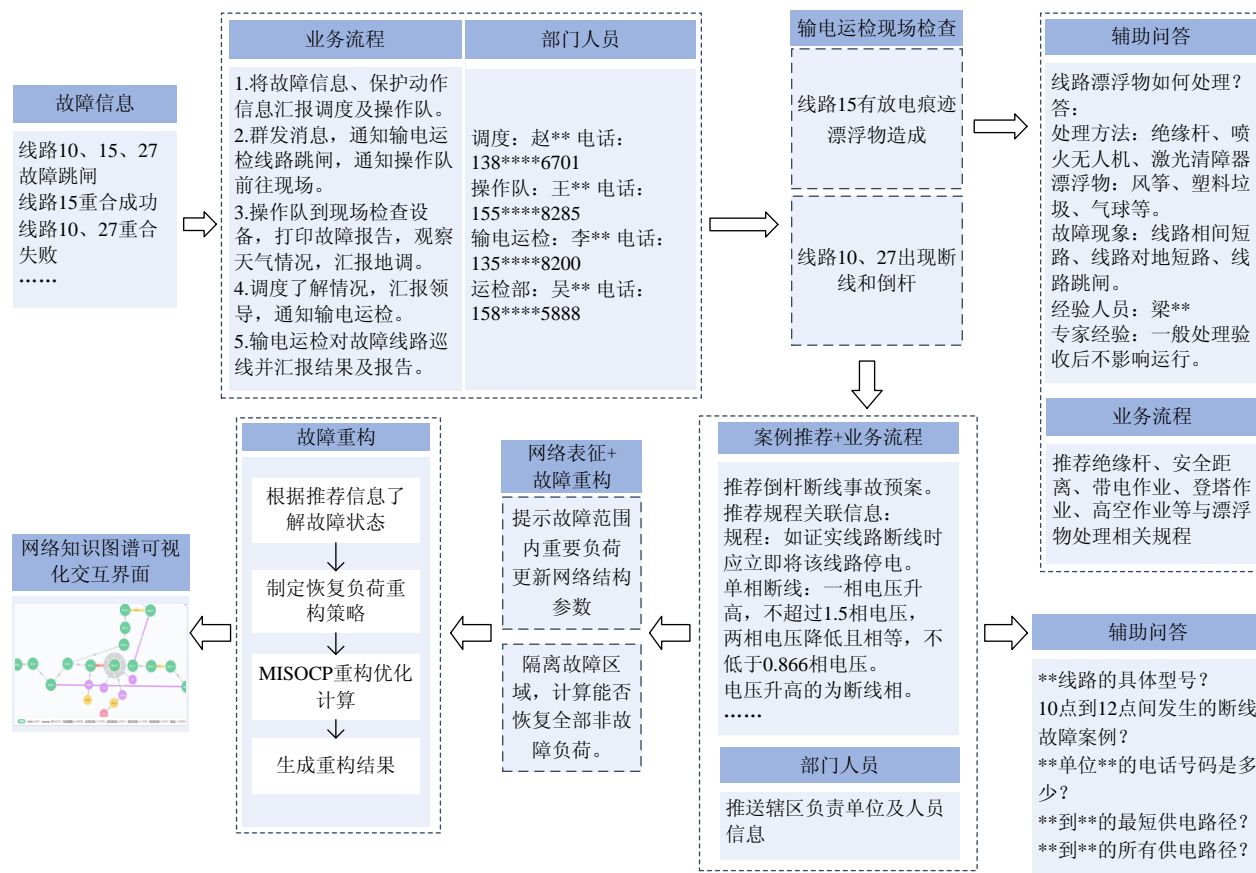


图 15 线路故障调度辅助决策流程示意图

Fig. 15 Schematic diagram of dispatching assistant decision progress for line fault

4 结论

新一代电网调控技术发展正在走向“物理模型+数据驱动+知识引导”的决策路线。本文提出一种基于知识图谱的配电网故障调度辅助决策方法,考虑调控运行任务实际场景,构建配电网故障调度知识图谱,以业务需求为导向研究交互推理决策应用思路 and 实现方法;最后开发了配电网调度辅助决策系统以实现数据管理、智能交互、辅助决策等功能,对知识图谱及其衍生技术在电力调控领域的应用进行了探索,并在湖南电网得到了运用,有效验证了所开发的系统各功能模块的科学性与实用性,在任务场景中能够进行知识指导与推荐决策,提升了调度人员的故障调控能力和配网安全运行水平,可为其他省市提高调度辅助决策能力提供一定参考。

知识图谱技术仍在不断创新,在电力领域的探索也处于起步阶段,未来将存在巨大的机遇与挑战。1) 电力系统场景复杂、数据异构、隐式知识提取及知识规则生成难度大,深入研究依赖于知识表示方式和数据逻辑结构与知识图谱数据模式的有效结合;2) 知识图谱思想是一种仿照高级生物思维方式,是一种逻辑判断处理中枢。将知识图

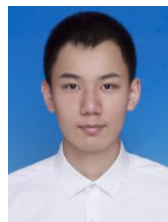
谱与电力系统模型与数据紧密关联,与态势感知和复杂计算进行融合互补才能发挥其巨大潜力;3) 面对未来电力系统数据不断增长,电力知识图谱设计及构建需强化扩展数据知识的关联性,可融合图像、音频、文本甚至抽象化信息等多模态信息实现更广泛的场景应用推荐,从而进一步探索深层知识演化、推理与交互。

参考文献

- [1] 王继业, 杜蜀薇. 勇立数字经济潮头 加快建设一流大数据中心[N]. 国家电网报, 2020-05-21(003).
WANG Jiye, DU Shuwei. Bravely stand at the forefront of the digital economy and accelerate the construction of a first-class big data center[N]. State Grid News, 2020-05-21(003)(in Chinese).
- [2] 卫泽晨, 赵凤展, 王佳慧, 等. 网格化中低压智能配电网评价指标体系与方法[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 249-255.
WEI Zechen, ZHAO Fengzhan, WANG Jiahui, et al. Gridding evaluation index system and method of MV and LV intelligent distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 249-255(in Chinese).
- [3] 李明节, 陶洪铸, 许洪强, 等. 电网调控领域人工智能技术框架与应用展望[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 393-400.
LI Mingjie, TAO Hongzhu, XU Hongqiang, et al. The technical framework and application prospect of artificial intelligence application in the field of power grid dispatching and control[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 393-400(in Chinese).
- [4] 刘念, 余星火, 王剑辉, 等. 泛在物联的配用电优化运行. 信息

- 物理社会系统的视角[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 1-12.
- LIU Nian, YU Xinghuo, WANG Jianhui, et al. Optimal operation of power distribution and consumption system based on ubiquitous internet of things: a cyber-physical-social system perspective[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 1-12(in Chinese).
- [5] LIU Zhichao, ZOU Yuping. Research on distribution network operation and control technology based on big data analysis[C]//Proceedings of the 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Tianjin: IEEE, 2018: 1158-1161.
- [6] 许洪强. 调控云架构及应用展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3104-3111.
- XU Hongqiang. Architecture of dispatching and control cloud and its application prospect[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3104-3111(in Chinese).
- [7] 王国政, 郭剑波, 马士聪, 等. 电力系统增强智能分析初探[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5079-5087.
- WANG Guozheng, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Preliminary study of power system enhanced intelligence analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5079-5087(in Chinese).
- [8] 闪鑫, 陆晓, 翟明玉, 等. 人工智能应用于电网调控的关键技术分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 49-57.
- SHAN Xin, LU Xiao, ZHAI Mingyu, et al. Analysis of key technologies for artificial intelligence applied to power grid dispatch and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 49-57(in Chinese).
- [9] 尚宇炜, 郭剑波, 吴文传, 等. 电力脑初探: 一种多模态自适应学习系统[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3133-3143.
- SHANG Yuwei, GUO Jianbo, WU Wenchuan, et al. Preliminary study of electric power brain: a multimodal adaptive learning system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3133-3143(in Chinese).
- [10] 乔骥, 王新迎, 闵睿, 等. 面向电网调度故障处理的知识图谱框架与关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5837-5848.
- QIAO Ji, WANG Xinying, MIN Rui, et al. Framework and key technologies of knowledge-graph-based fault handling system in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5837-5848(in Chinese).
- [11] 孙宏斌, 黄天恩, 郭庆来, 等. 面向调度决策的智能机器调度员研制与应用[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 1-8.
- SUN Hongbin, HUANG Tianen, GUO Qinglai, et al. Automatic operator for decision-making in dispatch: research and applications[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 1-8(in Chinese).
- [12] SINGHAL A. Introducing the knowledge graph: things, not strings[J]. Official Google Blog, 2012.
- [13] WANG Xiang, WANG Dingxian, XU Canran, et al. Explainable reasoning over knowledge graphs for recommendation [C]//Proceedings of the Thirty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence. Honolulu: AAAI, 2019: 5329-5336.
- [14] JI Shaoxiong, PAN Shirui, CAMBRIA E, et al. A survey on knowledge graphs: representation, acquisition and applications[J]. arXiv preprint arXiv: 2002.00388, 2020.
- [15] 饶子昀, 张毅, 刘俊涛, 等. 应用知识图谱的推荐方法与系统[J/OL]. 自动化学报, 2020: 1-17[2020-07-09]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200128>.
- RAO Ziyun, ZHANG Yi, LIU Juntao, et al. Recommendation methods and systems using knowledge graph[J/OL]. Acta Automatica Sinica, 2020: 1-17[2020-07-09]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200128>(in Chinese).
- [16] 刘广一, 戴仁昶, 路轶, 等. 电力图计算平台及其在能源互联网中的应用[J/OL]. 电网技术, 2020: 1-12[2020-12-12]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1432>.
- LIU Guangyi, DAI Renchang, LU Yi, et al. Electric power graph computing platform and its application in energy internet[J/OL]. Power System Technology, 2020: 1-12[2020-12-12]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1432>(in Chinese).
- [17] 佟佳弘, 武志刚, 管霖, 等. 电力调度文本的自然语言理解与解析技术及应用[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4148-4156.
- TONG Jiahong, WU Zhigang, GUAN Lin, et al. Power dispatching text analysis and application based on natural language understanding[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4148-4156(in Chinese).
- [18] CHEN Xiaojun, JIA Shengbin, XIANG Yang. A review: knowledge reasoning over knowledge graph[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 141: 112948.
- [19] 路轶, 汤亚宸, 刘广一, 等. 基于“电网一张图”的时空数据管理系统[J]. 供用电, 2019, 36(11): 12-19.
- LU Yi, TANG Yachen, LIU Guangyi, et al. Spatiotemporal data management system based on “one graph of power grid”[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(11): 12-19(in Chinese).
- [20] DUAN Yucong, SHAO Lixu, HU Gongzhu, et al. Specifying architecture of knowledge graph with data graph, information graph, knowledge graph and wisdom graph[C]//Proceedings of the 2017 IEEE 15th International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA). London: IEEE, 2017: 327-332.
- [21] HUANG Haichao, CHEN Yaojun, LOU Bing, et al. Constructing knowledge graph from big data of smart grids[C]//Proceedings of the 2019 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME). Qingdao: IEEE, 2019: 637-641.
- [22] TANG Yachen, LIU Tingting, LIU Guangyi, et al. Enhancement of power equipment management using knowledge graph[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia(ISGT Asia). Chengdu: IEEE, 2019: 905-910.
- [23] 汤亚宸, 方定江, 韩海韵, 等. 基于图数据库和知识图谱的电力设备质量综合管理系统研究[J]. 供用电, 2019, 36(11): 35-40.
- TANG Yachen, FANG Dingjiang, HAN Haiyun, et al. Research on power equipment quality integrated management system based on graph database and knowledge graph[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(11): 35-40(in Chinese).
- [24] 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.
- [25] DAI Jiangpeng, YAO Ziyang, ZHANG Guofang, et al. Graph computing-based real-time network topology analysis for power system[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Atlanta: IEEE, 2019: 1-5.
- [26] 刘广一, 王继业, 李洋, 等. “电网一张图”时空信息管理系统[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 7-17.
- LIU Guangyi, WANG Jiye, LI Yang, et al. “One graph of power grid” spatio-temporal information management system[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 7-17(in Chinese).
- [27] ZHANG Jun, BIAN Haifeng, RAO Guozheng, et al. Visual query method for large blackouts based on knowledge

- graph[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS). Chongqing: IEEE, 2019: 216-220.
- [28] 李新鹏, 徐建航, 郭子明, 等. 调度自动化系统知识图谱的构建与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 70-77, 157.
LI Xinpeng, XU Jianhang, GUO Ziming, et al. Construction and application of knowledge graph of power dispatching automation system[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 70-77, 157(in Chinese).
- [29] 刘梓权, 王慧芳. 基于知识图谱技术的电力设备缺陷记录检索方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 158-164.
LIU Ziquan, WANG Huifang. Retrieval method for defect records of power equipment based on knowledge graph technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 158-164(in Chinese).
- [30] 高泽璞, 赵云, 余伊兰, 等. 基于知识图谱的低压配电网拓扑结构辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 34-43.
GAO Zepu, ZHAO Yun, YU Yilan, et al. Low-voltage distribution network topology identification method based on knowledge graph[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 34-43(in Chinese).
- [31] 夏天. 词语位置加权 TextRank 的关键词抽取研究[J]. 现代图书情报技术, 2013(9): 30-34.
XIA Tian. Study on keyword extraction using word position weighted TextRank[J]. New Technology of Library and Information Service, 2013(9): 30-34(in Chinese).
- [32] MIHALCEA R, TARAU P. TextRank: bringing order into texts[C]//Proceedings of Empirical Methods in Natural Language Processing. Barcelona: EMNLP. 2004: 404-411.
- [33] 张织. Neo4j 权威指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [34] Knowledge Base of Relational and NoSQL Database Management Systems. DB-engines ranking of graph DBMS[DB/OL]. 2020[2020-09-10]. <https://db-engines.com/en/ranking/graph+dbms>.
- [35] 葛少云, 刘自发, 余贻鑫. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 22-26.
GE Shaoyun, LIU Zhifa, YU Yixin. An improved tabu search for reconfiguration of distribution systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 22-26(in Chinese).
- [36] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.



王骏东

在线出版日期: 2021-01-04。

收稿日期: 2020-10-09。

作者简介:

王骏东(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为知识图谱在电力系统中的应用, E-mail: wangjundong@whu.edu.cn;

杨军(1977), 男, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为电力系统运行与控制等, E-mail: Jyang@whu.edu.cn。

(责任编辑 王晔)