王钊哲，潘志威. 基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统设计[J]. 智能计算机与应用，2026，16(5)：175-181. DOI：10.20169/j. issn. 2095-2163. 24080201

基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统设计

王钊哲[1,2]，潘志威[1,3]
（1 河钢数字技术股份有限公司，石家庄 050000；2 哈尔滨工业大学(深圳)，广东 深圳 518055；
3 雄安威赛博智能科技有限公司，河北 雄安 070001）

摘 要：随着智能电网和能源互联网的发展，电力行业产生了庞大、多源、异构且高度耦合的数据，这些数据难以有效利用。因此本文开发了基于知识图谱和 Transformer 的电力变压器智能运维系统。构建的知识图谱对多源异构数据进行了结构化处理与建模，更直观地呈现了数据之间的相关性，并在此基础上实现了对数据的预测与深层信息挖掘。测试结果表明，该系统在 10 天内对 3 种气体的预测结果与实际结果基本吻合，氢气、乙烷、甲烷的平均绝对误差分别为 0.529×10^{-6}、0.112×10^{-6} 和 0.187×10^{-6}，均保持在一个较低区间。并且对正常运行、高温预警和高温过热三种情况均可正常判断并给出了相应的状态预测。因此本研究系统充分利用了多维度和相互关联的异构数据，实现了深层信息挖掘。可为电力行业的智能化转型提供重要的技术支持和借鉴经验。

关键词：智能运维；电力变压器；Transformer；知识图谱
中图分类号：TP391.4 **文献标志码**：A **文章编号**：2095-2163(2026)05-0175-07

Design of power transformer intelligent operation and maintenance system based on Transformer

WANG Zhaozhe[1,2], PAN Zhiwei[1,3]
(1 HBIS Digital Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 2 Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3 Xiongan Weisaibo Intelligent Technology Co., Ltd., Xiongan 070001, Hebei, China)

Abstract: With the development of smart grids and energy Internet, the power industry has generated huge, multi-source, heterogeneous and highly coupled data, which is difficult to use. Therefore, this paper has developed the intelligent operation and maintenance system for power transformers based on knowledge graph and Transformer. The constructed knowledge graph constructs and models the multi-source heterogeneous data, and presents the correlation between the data more intuitively. On this basis, predicts the data and mine the deep information hidden in it. The test results show that the prediction results of the model within 10 days basically agree with the actual results, and the average absolute errors of hydrogen, ethane and methane are 0.529×10^{-6}, 0.112×10^{-6} and 0.187×10^{-6}, respectively, which are kept in a low interval. The normal operation, high temperature warning and high temperature overheating can be accurately identified, and corresponding state predictions are provided. Therefore, the system fully utilizes multi-dimensional and interrelated heterogeneous data to achieve deep information mining, and can provide important technical support and valuable experience for the intelligent transformation of the electric power industry.

Key words: intelligent operation and maintenance; power transformer; Transformer; knowledge graph

0 引 言

随着电力变压器监测技术的普及和应用，获得的与设备相对应的各种数据呈现几何级增长[1-3]。在这些海量数据中，既包含图像、时间序列这类欧几里得结构数据，也包含文本这类非欧几里得结构数据[4-5]。目前，研究主要集中在欧几里得数据上[6]。He 等[7]提出使用多输入和多输出的多隐藏层反向传播神经网络，提取各种电气和非电气特征进行状态监测和故障诊断。Wu 等[8]提出了一种改进的遗传算法(IGA)结合 XGBoost 形成混合诊断网络，深入探索变压器故障数据。Kari 等[9]基于溶解气体和

基金项目：2023 年工信部工业互联网创新发展工程(ZTZB-23-990-020)；河北省重大科技成果转化专项(23280101Z)。
作者简介：王钊哲(1992—)，男，学士。主要研究方向：计算机自动化。Email：wangzhaozhe@hbisco.com。
收稿日期：2024-08-02

电气测试数据,利用 D-S 理论建立了变压器评价系统。Xiang 等[10]采用最小二乘双支持向量回归(LSTSVR)的新模型,预测变压器油中溶解气体的浓度和发展趋势。然而,现有研究关于开放、模糊和非结构化文本数据的研究和应用较少[11]。Zhu 等[12]引入知识图谱在电力调度中,实现了对大量专业知识的有效管理和利用。Zhang 等[13]提出使用知识图谱实现自动问答信息处理任务。而 Transformer 网络模型作为近年来新兴的神经网络,可应用于知识图谱相关的领域,并且在电力系统中应用较少[14-15]。Liao 等[16]描述了 Transformer 网络模型在电力系统中故障诊断和功率流计算等关键应用中的研究趋势。

同时,在智能电网和能源互联网的推动下,电力设备的运维管理也面临着从状态维护向预测性维护的转变[17-18]。Liu 等[19]提出了基于实时检测平台的 220 kV 变电站故障信息系统的设计。Hua[20]采用基于 NET 框架的方法实现了变电站信息管理系统的构建。Takahashi 等[21]设计并开发了一种基于资产管理技术的电力设备维护策略决策工具。刘冰扬等[17]从状态监测、故障诊断和健康管理等层次,对设备数字化智能运维模式进行分析,论述了故障诊断系统的工作原理、组织架构及其工程应用实践。

就当前电力设备的运行与维护管理而言,一方面,由于缺乏专用且人性化的管理系统,手工管理在实际运行与维护管理业务中,占主导地位[22-23]。于小光等[22]基于电力设备的故障原因,优化了点检和定修的设备管理制度,实现了高炉电气设备长周期稳定运行。另一方面,大多数运行与维护管理系统的数据库作为专家系统的知识库,依赖人工制备,无法适应当前的大数据环境,而且难以存储和使用非欧几里得数据[24-25]。本文设计并构建了电力变压器智能运维系统,利用知识图谱技术对多源异构数据进行了结构化和建模。在此基础上,考虑到数据之间可能存在隐藏的关联信息,系统采用 Transformer 网络模型深度挖掘数据关系。系统的构建推动了变压器运行与维护,实现了三大转变:从事故后维护向事故前和事故中维护的转变,从基于计划的维护向基于大修的维护的转变,以及从专家经验的故障处理向基于数据分析的科学故障处理的转变。这些转变提高了变压器运行与维护管理的效率,对变压器的安全运行具有重大意义。

1 基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统整体设计

根据现有技术以及电力企业对电力变压器运行与维护管理业务的分析,对变压器运行与维护的每个环节进行了相应的功能定位,并设计了系统的功能架构,具体结构如图 1 所示。

基于多源异构数据输入,本研究构建了变压器知识图谱,并利用 Transformer 模型进行深度学习分析,将变压器状态划分为正常运行、潜在故障、已发故障和日常工作 4 种情况。系统根据不同情况设计了相应功能:正常运行下预测设备生命周期和制定维修保养计划;潜在故障下完成故障时间预测和准备计划;故障发生时分析原因并制定维护措施;日常工作中提供搜索查询等一般功能,从而实现对变压器的智能监测、诊断和维护,确保电力传输网络的稳定运行。

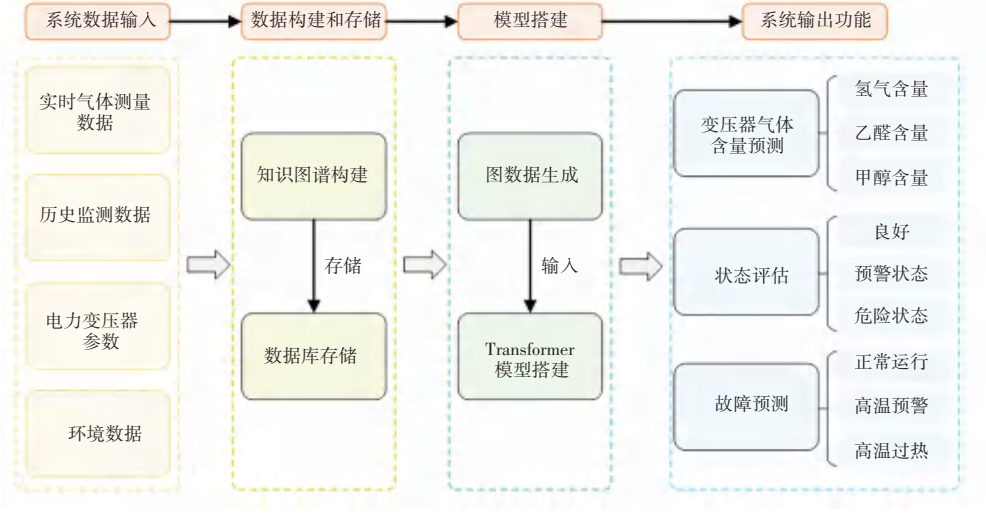


图 1 基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统功能架构

Fig. 1 Functional architecture of power transformer intelligent operation and maintenance system based on Transformer

1.1　基于电力变压器知识图谱的构建

电力变压器作为复杂的电力设备，其故障的产生往往受多维度、多种因素的共同影响。因此，系统利用电力变压器专业书籍、设备维护规则、故障案例报告以及维护专家的专业经验等文本知识数据，建立各种设备数据、症状、异常现象与故障类型、原因和对策之间的映射关系，实现电力变压器知识图谱的自动构建。知识图谱的主要数据节点及其详细描述见表 1。

系统构建的变压器知识图谱可以通过强大的查询功能，在非常短的时间内准确地查询海量信息，并对已查询的海量分散信息进行统计分析。通过使用变压器知识图谱，大量信息通过 Transformer 模型进行存储和可视化，并挖掘信息之间的深层关系和趋势，大幅拓展了对电力变压器文本数据信息的挖掘和利用能力。并且在变压器故障的情况下，该功能可以帮助变压器管理人员使用维护记录和设备维护程序等文本数据，快速确定变压器故障原因，并提供维护措施和其他反馈，提高了变压器管理人员在事故处理方面的管理效率。

表 1　知识图谱数据节点信息

Table 1　Information of data nodes in knowledge graph

节点类型	详细内容	示例
设备数据	变压器型号	T-100、T-200
	生产日期	2020 年 5 月
	安装日期	2021 年 6 月
	运行环境	高温、高湿度地区
	技术参数	额定电压：110 kV，额定容量：50 MVA，冷却方式：油浸风冷
症状	气体异常	碳氢气体含量异常
	噪声异常	高频声段、中高频交叉声段
	油温升高	油温升高至 60 ℃
	绝缘老化	绝缘电阻降低
	电流异常	空载电流过大
	油质劣化	油中水分含量超标，乙炔、甲烷气体浓度升高
异常现象	漏油	油箱漏油
	过热	绕组温度超过额定值
	异响	金属敲击声
	接地电流异常	接地电流过大
	频繁跳闸	保护装置误动作
故障类型	绕组故障	绕组短路、局部过热
	油路故障	油泵故障、油路堵塞
	冷却系统故障	冷却风扇故障
	铁芯故障	铁芯松动、绝缘损坏
	密封故障	密封件老化
	外部损伤	雷击、地震引发的结构损坏
原因	设计缺陷	结构设计不合理
	制造工艺问题	材料不达标
	维护不当	维护周期过长
	负荷过大	长时间超负荷运行
	环境影响	腐蚀性环境、高湿度
	使用不当	操作人员未按规范操作
对策	设备更换	更换严重老化设备
	定期维护	定期检查、更换易损件
	温度监控	安装智能温控装置
	油质检测	定期检测油质
	负荷管理	合理分配负荷
	绝缘处理	加强绝缘或更换老化绝缘材料

1.2 变压器故障预测功能

当变压器处于潜在故障状态时,变压器故障预测功能能够准确分析和预测变压器可能的故障时间和故障类型。工作状态下的电力变压器会受到各种因素的影响,并产生碳氢类气体。对于变压器的过热或放电故障,油中的气体含量通常会呈现异常变化。因此,本研究系统中构建了 Transformer 网络模型,用于挖掘气体含量和气体之间的关系,并实现了变压器故障的自动预测。当变压器发生故障时,系统可以根据变压器油中的气体含量水平快速对故障进行分类,为变压器管理人员制定维护安排和故障维护决策提供决策参考,提高了电力变压器的运行、维护管理质量和效率。

1.3 电力变压器状态评估功能

在变压器的正常运行场景下,状态评估是判断变压器健康状态和预测潜在故障的重要手段。变压器状态评估功能基于变压器的基本属性信息、运行信息、实验信息和故障信息数据,采用神经网络模型并结合特定的评估公式进行综合分析。具体而言,系统首先收集变压器的各项数据,包括电压、电流、功率因数等电气测试数据,变压器油中溶解气体的含量如乙炔、乙烯等溶解气体数据,绝缘油的电气特性、化学成分及污染物含量等绝缘油测试数据,以及变压器的负载、温度、湿度等运行数据。

状态评估的核心是变压器状态指数的计算,该指数具体计算公式如下:

$$\text{状态指数} = \sum_{i}^{n} (w_i \times \text{标准化指标值}_i) \quad (1)$$

其中,n 表示评估指标的总数,w_i 表示第 i 个指标的权重(由 AHP 方法确定),标准化指标值 i 是将各指标数据经过无量纲化和归一化处理后得到的值。

2 基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统关键技术方法

2.1 系统框架和存储数据库

该系统的开发采用了 Django 框架。该框架是一个由 Python 编写的开源 Web 应用程序框架,采用了 MVT 模型,与前端 Web 地址系统兼容。以下是系统的前后端具体说明:

2.1.1 前端说明

前端主要负责与用户进行交互,提供直观的操作界面和结果显示。本系统采用现代化的 Web 技术栈,具体包括但不限于 HTML、CSS 和 JavaScript,结合前端框架(如 React 或 Vue. js,根据实际项目需求选择)来构建用户交互界面。前端界面包括但不限于以下几个部分:

仪表盘:展示电力变压器的实时运行状态、健康指数、预测信息等关键数据。

查询与搜索:提供对变压器知识图谱的查询功能,用户可以通过输入关键词快速检索相关故障案例、维护措施等信息。

故障预测与报警:展示潜在故障预测结果,并在发现异常时及时通过前端界面向用户发出报警。

状态评估:展示变压器的当前状态评估结果,包括正常运行、高温预警、高温过热等状态,并提供相应的维护建议。

2.1.2 后端说明

后端作为系统的核心处理部分,负责数据处理、业务逻辑实现以及与前端的通信。本系统采用 Django 框架进行后端开发,利用 Django 的 MVT(Model-View-Template)模型进行系统设计,具体如下:

模型(Model):负责定义系统的数据结构,并通过 ORM(对象关系映射)技术与数据库进行交互。本系统使用 MySQL 和 Neo4j 两种数据库,MySQL 用于存储结构化数据,如变压器属性信息和实时监测数据;Neo4j 用于存储非结构化数据构建的知识图谱。

视图(View):负责处理前端请求,并调用相应的业务逻辑。视图层将业务逻辑处理后的结果传递给模板,或直接返回 JSON 等格式的数据给前端。

模板(Template):在 Django 中,模板用于生成 HTML 页面,通过 Django 的模板引擎,将视图层传递的数据渲染到 HTML 模板中,最终生成前端页面。但在本系统设计中,更多地将模板与前端框架结合使用,由前端框架直接渲染页面。

此外,Django 的 URL 分发器负责将用户的页面请求分发给不同的视图处理,并根据请求调用相应的模型和模板,完成业务逻辑的处理和结果的返回。

2.1.3 存储数据库

考虑到电力变压器数据类型的复杂性,该系统使用关系型数据库 MySQL 和非关系型数据库 Neo4j 来存储数据。其中,MySQL 数据库用于存储结构化数据,如变压器属性信息和变压器的实时监测气体数据;而 Neo4j 数据库用于存储从非结构化数据中提取的三元组,例如设备维护程序和故障案例报告,以构建电力变压器知识图谱。

MySQL 是经典且易于操作的关系型数据库。

由于该系统中的变压器属性信息和实时监测数据信息具有很强的相关性，因此使用 MySQL 数据库存储这些信息。在使用 MySQL 数据库时，系统根据不同的变压器存储信息创建相应的存储数据表，然后利用一对一、一对多和多对多等操作将相关的数据表关联起来，以便系统存储数据和进行联合表查询等操作。

而 Neo4j 数据库是一个成熟的图形引擎，具有出色的性能，并具有非关系型数据库的优秀特性。系统将知识融合后的文本信息保存到 Neo4j 数据库中，并利用 Neo4j 数据库构建电力变压器的知识图谱，从而大大提高了非结构化数据检索的性能。在 Neo4j 数据存储方面，系统采用了 Cypher 的 LOAD CSV 语句。CSV 文件可以通过 Cypher 直接加载到 Neo4j 中。三元组数据被转换为 CSV 格式进行存储，然后使用 LOAD CSV 方法使 Neo4j 读取数据。

2.2　电力变压器知识图谱的自动构建技术及应用

2.2.1　电力变压器知识图谱的自动构建技术

在知识图谱中，节点和边分别代表着实体和实体之间的关系，是构建知识图谱的基本单元。因此，在构建知识图谱时需要从文本中提取三元组。而在本研究系统中，电力变压器文本首先被分词处理，并且采用广泛兼容的 JSON 格式。然而，第一次分词的结果可能相对粗糙，其中可能包含与变压器相关程度较低的词汇。因此，引入了变压器专业词库以优化初始分词结果，并将单词的最终分词结果转换为向量表示。然后，采用了扩张门卷积神经网络（DGCNN）来提取三元组。最后，将提取的三元组集合导入到 Neo4j 图数据库中，从而完成了变压器知识图谱的自动构建过程。

2.2.2　变压器知识图推理技术

为了检索存储在 Neo4j 中的知识图谱，系统通过 Py2Neo 第三方库连接到 Neo4j 数据库，并根据需要查询信息。变压器知识图谱是一个庞大的知识结构网络，以变压器组件、故障现象和故障原因为节点，并根据相应的关系进行连接。当用户在系统中发起检索时，系统可以利用现有的知识图谱对输入信息进行语义分析，并将其映射到一个或多个实体与边关系中，然后根据连接到实体的边或连接到边的节点进行路径推理，最终在用户端输出高质量的搜索结果。

2.3　基于 Transformer 的电力变压器气体预测、故障诊断及状态评估技术

基于 Transformer 的电力变压器气体预测、故障诊断及状态评估技术流程如图 2 所示。首先，从电力变压器监测设备中收集溶解气体、温度、湿度等数据，并对其进行清洗和归一化处理。其次，构建气体之间的拓扑图，以学习和挖掘气体之间的关系。然后，设计基于 Transformer 网络模型，用于预测变压器油中溶解气体的变化趋势，并考虑气体含量与变压器故障类型之间的关系，利用知识图谱中关系信息，实现对变压器故障的准确诊断和预测。通过这一技术方案，可以有效提高电力系统的稳定性和可靠性。

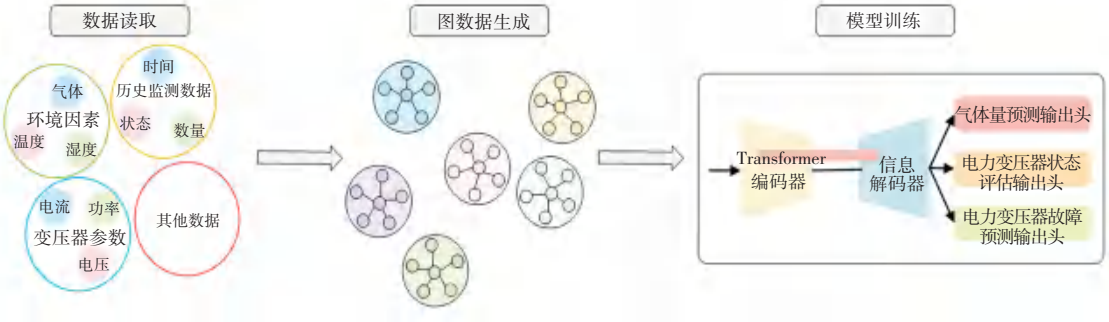


图 2　基于 Transformer 的电力变压器气体预测、故障诊断和状态评估技术流程图

Fig. 2　Technical flow chart of gas prediction, fault diagnosis and state assessment for power transformer based on Transformer

该系统从变压器的 4 个方面选择数据来进行预测，以建立变压器状态评估系统。首先，电气测试数据包括变压器的电压、电流、功率因数等参数，这些数据反映了变压器的电气特性和运行状态。溶解气体数据指的是变压器油中溶解气体的含量，其中特别关注的是乙炔、乙烯等气体，这些气体的生成与变压器内部的放电和热失控等故障有关。绝缘油测试数据包括油的电气特性、化学成分以及污染物含量等，这些数据能够反映变压器绝缘系统的健康状况。最后，运行数据包括变压器的负载、温度、湿度等参数，这些数据反映了变压器的实时运行状态。

该系统利用层次分析法确定了这 4 个方面数据

的重要性,并建立了相应的指标体系。为了挖掘这些指标之间可能的关系信息,该系统采用 Transformer 技术进行建模和分析。Transformer 是一种强大的深度学习模型,能够有效地捕捉数据之间的复杂关系。系统利用 Transformer 模型构建了指标之间的关系拓扑图,其中每个节点代表一个指标,而边代表指标之间的关联关系。通过 Transformer 模型对拓扑图进行训练和优化,系统能够学习到指标之间的隐含关系,从而更准确地评估变压器的状态。

为完成最终的评估模型,系统还建立了多层线性网络,将 Transformer 模型输出的关系特征与实际数据进行结合,使得系统能够综合考虑各个指标之间的关系,更全面地评估变压器的状态。通过充分考虑指标之间的关系,并利用 Transformer 方法获取信息,系统实现了更客观、准确的变压器状态评估,为电力系统的安全稳定运行提供了重要支持。

3 实验结果

为验证基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统的实际性能,本研究设计电力变压器气体预测实验和电力变压器状态评估与故障诊断实验分别进行。

3.1 电力变压器气体预测实验结果

为了验证基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统在电力变压器气体预测与故障诊断上的实际效果,本研究收集了变压器监测设备中 10 天的气体监测数据和设备运行情况,与模型的预测结果进行对比,具体结果如图 3 所示。

由图3可知,10天内模型对3种气体的预测结果与实际结果基本吻合,氢气、乙烯、甲烷的平均绝对误差分别为 0.529×10^{-6}、0.112×10^{-6}、0.187×10^{-6},均保持在一个较低区间。因此,本研究基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统可以很好地完成电力变压器的气体预测任务。

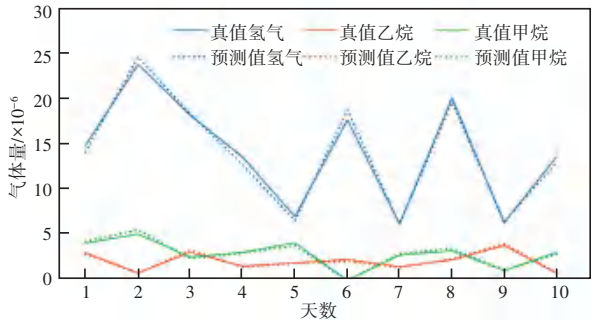


图 3 基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统的气体预测结果

Fig. 3 Gas prediction results of power Transformer intelligent operation and maintenance system based on Transformer

3.2 电力变压器状态评估与故障诊断实验结果

由于实时的电力变压器故障信息难以获取,本研究从过去故障数据中收集了正常运行、高温预警和高温过热 3 种状态下气体含量数据,并将其输入到基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统,对故障诊断结果进行判断测试并进行状态评估,测试结果见表 2。

由表 2 可知,本研究系统对正常运行、高温预警和高温过热 3 种情况均可正常判断并给出了相应的状态预测,因此本研究基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统可以很好地完成电力变压器的故障诊断和状态评估任务。

表 2 基于 Transformer 的电力变压器智能运维系统对故障诊断结果测试结果

Table 2 Test results of the fault diagnosis results of the intelligent operation and maintenance system of power transformer based on Transformer

	气体量情况			故障诊断情况		状态预测
	氢气/$\times10^{-6}$	乙烷/$\times10^{-6}$	甲烷/$\times10^{-6}$	真实结果	模型预测结果	
样本 1	13.4	2.8	3.9	正常运行	正常运行	良好
样本 2	35.0	56.6	88.9	高温预警	高温预警	预警状态
样本 3	121.0	326.5	241.8	高温过热	高温过热	危险状态

4 结束语

本研究将知识图谱技术应用于电力变压器智能运维系统,利用在变压器运行和维护过程中产生的大量多源异构数据构建了电力变压器知识图谱,从而增强了变压器运维系统对大规模数据的智能挖掘能力。同时,利用 Transformer 技术捕捉数据之间的多维耦合关系,改进了变压器故障分析和预测技术以及变压器状态评估技术,提升了神经网络模型的预测和推理能力、泛化能力和可解释性。电力变压器智能运维系统的构建实现了在变压器运行过程中的全方位管理。在正常运行期间,可进行智能问答关联搜索。在事故前和事故期间,警报可能导致故障事件的隐患,并推荐解决方案,便于维护计划的安

排。事故发生后，根据故障现象，准确定位故障原因，并提供维护策略。通过对电力变压器进行预测性维护，系统减少停机时间和消除不必要的维护，提高了电力变压器运维管理业务的效率。对于变压器的安全运行和电力系统的稳定性具有重要意义。

参考文献

[1] ZHANG J，ZHANG H，DING S，et al. Power consumption predicting and anomaly detection based on transformer and K-means[J]. Frontiers in Energy Research，2021，9：779587.

[2] ZHOU B，ZOU J，CHUNG C Y，et al. Multi-microgrid energy management systems：Architecture，communication，and scheduling strategies[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy，2021，9(3)：463-476.

[3] LIU L，WANG B，MA F，et al. A concurrent fault diagnosis method of transformer based on graph convolutional network and knowledge graph[J]. Frontiers in Energy Research，2022，10：837553.

[4] 吕华辉，明哲，樊凯，等. 基于数据感知融合的电力通信网络智能运维[J]. 电信科学，2024，40(1)：136-143.

[5] 薛峰峰. 低压配电物联网断路器及其智能运维系统分析[J]. 电气技术与经济，2023，31(9)：174-176.

[6] 于国旺，张志刚，翟延涛，等. 朔黄铁路牵引供电设备智能运维技术研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(11)：88-96.

[7] HE Y，ZHOU B，GUO S，et al. Meta ensemble learning with acoustic spectrum analysis for intelligent diagnosis of direct-buried transformer substations[C]//Proceedings of 2021 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia . Piscataway，NJ：IEEE，2021：539-544.

[8] WU Z，ZHOU M，LIN Z，et al. Improved genetic algorithm and xgboost classifier for power transformer fault diagnosis[J]. Frontiers in Energy Research，2021，9：745744.

[9] KARI T，GAO W，LIU Y，et al. Condition assessment of power transformer using fuzzy and evidential theory[C]//Proceedings of 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Piscataway，NJ：IEEE，2016：28-31.

[10] XIANG Q C，YANG L，YANG T F，et al. Prediction method of dissolved gas concentration in transformer oil based on LSTSVR model[C]//Proceedings of 2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation. Piscataway，NJ：IEEE，2020：29-32.

[11] 汪林. 电网安全信息系统智能运维监控云平台的应用[J]. 网络安全和信息化，2023(11)：38-40.

[12] ZHU K，ZHOU J，GUO X，et al. Review on knowledge graph and its application in power dispatching[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Power，Intelligent Computing and Systems (ICPICS). Piscataway，NJ：IEEE，2021：431-434.

[13] ZHANG F，ZHANG Y，XU T. A review of knowledge graph technology in the field of automatic question answering[C]//Proceedings of 2020 International Signal Processing，Communications and Engineering Management Conference (ISPCEM). Piscataway，NJ：IEEE，2020：177-180.

[14] 宗志龙，王纲，付庆. 电磁环境自动监测系统智能运维应用研究[J]. 四川环境，2023，42(5)：203-208.

[15] 陈鑫鑫. 基于智慧城轨的线网级供电智能运维系统网络安全防护体系研究[J]. 工业信息安全，2023(5)：37-42.

[16] LIAO W，BAK-JENSEN B，PILLAI J R，et al. A review of graph neural networks and their applications in power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy，2021，10(2)：345-360.

[17] 刘冰扬，赵爽. 故障预测与健康管理在钢铁企业的应用[J]. 河北冶金，2022(11)：81-86.

[18] 牛朋超. 基于多传感信息融合的高速公路机电设备智能运维监控方法[J]. 交通工程，2024，24(1)：75-78.

[19] LIU Y，SU J，LIU F. Design about real-time fault detection information system of the transformer substation[C]//Proceedings of 2009 International Conference on Computer Engineering and Technology. Piscataway，NJ：IEEE，2009，2：197-200.

[20] HUA J. The realization of the support system of the Substation in. NET Framework[C]//Proceedings of 2010 Second International Conference on Future Networks. Piscataway，NJ：IEEE，2010：391-394.

[21] TAKAHASHI T，OKAMOTO T. Development of asset management support tools for oil-immersed transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2016，23(3)：1643-1647.

[22] 于小光，李维亚，黄新宇. 高炉电气设备的零故障管理[J]. 河北冶金，2011，33(10)：78-79.

[23] 李浦涛. 配电自动化系统中的智能运维技术分析[J]. 电子技术，2023，52(12)：186-187.

[24] 张永珍，陈秀玲，李明，等. 高速公路机电设备智能运维系统建设[J]. 中国交通信息化，2024，26(1)：114-117.

[25] 蒋佳琳. 基于物联网的电网智能运维创新技术分析[J]. 集成电路应用，2023，40(12)：210-211.