

大语言模型支持的输变电工程 BIM三维设计专家系统

齐立忠¹, 荣经国¹, 张苏¹, 何幸², 李翔中²

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 102209; 2. 北京构力科技有限公司, 北京市 100011)

摘要:【目的】针对输变电工程三维设计中传统工具规范整合不足、设计验证效率低等问题,探索建筑信息模型(building information modeling, BIM)与大语言模型协同机制,构建智能化设计辅助系统以提升规范动态映射与知识服务能力。【方法】提出大语言模型赋能的BIM三维设计专家系统:1)基于Qwen2.5模型解析输变电工程规范,提取三元组结构,构建知识图谱;2)开发混合检索框架动态映射BIM构件属性与知识实体,结合向量知识库增强语义匹配;3)集成检索增强生成(retrieval augmented generation, RAG)技术构建问答系统,通过BIMbase平台实现三维模型与规范数据的智能交互。【结果】徐州变电站应用表明:1)知识图谱三元组提取准确率达92%;2)BIM构件规范映射覆盖率达85%;3)问答系统响应时间为1.45 s,专业解答准确率达91%(较基线提升32.8%)。【结论】建立了BIM与大语言模型动态协同机制,验证了知识图谱增强检索在电力工程设计中的有效性。该系统通过规范-模型双向映射与智能问答显著提升了设计质量,为智能电网提供了可扩展技术范式。

关键词:输变电工程;大语言模型;建筑信息模型(BIM);知识图谱;问答系统

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)11-0047-11

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.11.005

Expert System for BIM 3D Design in Power Transmission and Transformation Engineering Supported by Large Language Model

QI Lizhong¹, RONG Jingguo¹, ZHANG Su¹, HE Xing², LI Xiangzhong²

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. Beijing Glory PKPM Technology Co., Ltd., Beijing 100011, China)

ABSTRACT: [Objective] To address the issues of insufficient integration of traditional tool specifications and low efficiency in design validation in the 3D design for power transmission and transformation projects, this study explores the collaborative mechanism between BIM and large language models to construct an intelligent design assistance system that enhances dynamic specification mapping and knowledge service capabilities. [Methods] A large language model-powered BIM 3D design expert system is proposed. The Qwen 2.5 model is used to parse the specifications of power transmission and transformation projects, extract triplet structures, and build a knowledge graph. A hybrid retrieval framework is developed to dynamically map BIM component attributes with knowledge entities, enhanced by vector-based knowledge databases for improved semantic matching. RAG technology is integrated to build a question - answering system, enabling intelligent interaction between the 3D models and specification data via the BIMbase platform. [Results] The application at a Xuzhou substation demonstrated that 1) the knowledge graph triplet extraction accuracy reached 92%, 2) the coverage rate of BIM component-to-specification mapping achieved 85%, and 3) the question - answering system had a response time of 1.5 s, with a professional answer accuracy of 94% (a 31.2% improvement over the baseline). [Conclusion] This study established an innovative dynamic collaboration mechanism between BIM and large language models, validating the effectiveness of knowledge graph-enhanced retrieval in power engineering design. Through bidirectional mapping between specifications and models and intelligent question - answering, the system significantly improved the design quality, providing a scalable

technical paradigm for smart grids.

This work is supported by State Grid Corporation of China Science and Technology Project (No. 5200-202356129A-1-1-ZN).

KEYWORDS: transmission and transformation engineering; large language model; building information modeling (BIM); knowledge graph; question answering system

0 引言

随着信息技术的快速发展,建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 技术在输变电工程中的应用日益广泛,已从基础建模扩展至涵盖设计、施工、运维的全生命周期管理,成为提升工程效率与质量的关键因素^[1-4]。与此同时,大语言模型 (large language model, LLM) 作为人工智能领域的一项突破性进展,已经在多个行业中展示了其强大的语义理解和生成能力^[5]。在电力行业,大语言模型的应用正逐渐从理论探索走向实际操作层面,为解决复杂问题提供了新的思路和工具。

在输变电工程领域,BIM 技术的价值不断深化。一方面,BIM 标准化框架的构建有效规范了数据交换与应用场景:文献[6]提出了特高压工程 BIM 规范框架;文献[7]实现了 BIM 与地理信息系统 (geographic information system, GIS) 平台融合的电气设备模型数据管理;文献[8]采用 3D GIS+BIM 平台实现了数字化电力设施信息全尺度管理。另一方面,BIM 的应用已贯穿输变电工程全生命周期,从造价管控体系构建^[9]、自动算量^[10],到三维可视化施工控制^[11],并进一步应用于动态安全巡检与设备状态监控^[12-13]。然而,现有 BIM 应用主要聚焦于模型构建、信息管理与流程可视化,在如何深度融入专业知识、特别是动态关联并验证设计决策是否符合快速更新的行业规范方面,其智能化辅助能力仍有待提升。

面对快速更新的技术标准和日益复杂的工程环境,设计师在实际工作中仍面临显著挑战。传统设计辅助工具普遍缺乏对庞杂行业规范和专业知识的整合与动态关联能力,迫使设计师耗费大量时间手动查阅文档、验证设计方案合规性,并在多个分散的资料源间频繁进行数据核对。这一过程不仅效率低下、增加了人为错误的风险,也严重制约了设计迭代优化的速度与质量。

近年来,人工智能技术在工程知识管理领域取得突破性进展^[14],多项研究已证实 LLM 在规范条文解析^[15]和设计决策支持^[16]方面的有效性。在电力工程领域,学者们通过构建电力工程知识本体^[17]提升 BIM 模型的信息集成能力,将语言模型应用于电力设备故障诊断^[18]以及电力数据实体识别^[19]。在电力领域知识增强层面,文献[20]通过引入检索增强生成 (retrieval augmented generation, RAG) 技术,结

合电力规范知识库构建专用框架 (如 Meta-RAG),有效缓解了通用大模型在专业领域数据稀缺导致的“幻觉”问题,为电力标准数字化转型提供了新的技术路径^[21]。在任务适配与多模态分析方面,LLM 展现出较强的零样本与小样本学习特性:文献[22]融合 LLM 与图神经网络等技术,提高了模型在电力设备缺陷诊断、系统仿真等场景中的性能;文献[23]探究了其在输变电工程中电源结构调整、需求预测及风险预警中的应用潜力。研究还表明,通过提示工程与领域知识微调,LLM 可有效支撑功率预测、最优潮流计算等高复杂度任务的求解^[24]。

尽管 BIM 和 LLM 各自在输变电工程中取得了积极进展,但 BIM 与 LLM 的协同机制尚未建立,难以实现设计规范与三维模型的动态映射,严重限制了其协同价值的发挥。导致当前的设计辅助支持系统难以实现规范知识的动态呈现,在输变电三维设计中,设计师难以便捷地获取和验证相关规范要求,增加了人为错误的风险,制约了设计迭代优化的效率。

鉴于此,本文提出了一种基于大语言模型支持的输变电工程 BIM 三维设计专家系统,旨在通过智能化手段解决上述问题。相比现有研究,该系统利用人工智能技术对 BIM 构件属性与输变电工程规范依据进行了映射,为辅助支持复杂电网工程的数字化设计提供了全新的解决方案。最后,通过实际案例应用与验证,展示了该系统在提升设计质量和效率方面的潜力,为进一步推动电力工程建设领域的技术创新提供了重要参考。

1 大语言模型支持的输变电工程 BIM 三维设计专家系统构建

1.1 系统框架

本文构建的大语言模型支持的输变电工程 BIM 专家系统由知识图谱构建、BIM 属性映射与专业知识问答三部分构成,如图 1 所示。系统首先通过大语言模型解析输变电工程规范文本,构建包含构件属性、设计规范与施工标准的知识图谱;接着开发基于混合检索的 BIM 属性动态映射框架,将三维模型构件与知识图谱实体关联,支持设计参数的实时校验与修正建议生成;最终集成向量知识库构建领域增强的大语言模型问答系统,形成设计辅助、规范依据追溯与解决方案生成的交互问答。

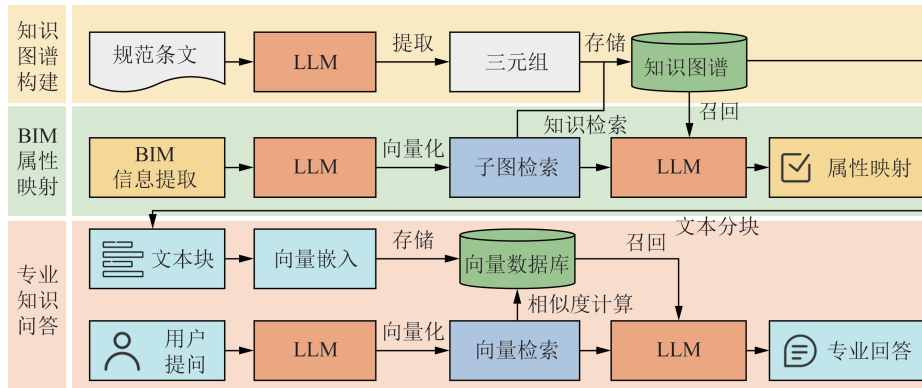


图 1 系统框架

Fig. 1 System framework

1.2 基于大语言模型的知识图谱构建

1.2.1 输变电工程领域文本数据分析

电力工程作为复合型系统工程,其输变电项目具有典型的多阶段特征,涵盖规划、施工到退役的全周期流程管理^[9]。在智能建造背景下,数字化输变电工程广泛采用三维设计技术^[25-26],从变电站建设到输电线路部署均需严格遵循技术标准体系,任何环节的规范性都将直接影响电力网络运行稳定性。

针对设计辅助支持的需求,核心质量管控环节在于实现BIM模型数据与标准条款的智能映射。本文通过构建输变电工程三维设计标准框架,整合了三大类规范内容: BIM建模标准规范、输变电BIM建模标准规范以及专业规范文本,形成覆盖全流程的数字化设计辅助依据体系,如表1所示。

通过对输变电工程规范的文本分析,发现其具备如下特点:1)复合性,专业术语体系具有高度学科特性,涉及“防雷接地”“分裂变压器”等专业概念;文本结构采用复合句式,如规定电缆桥架平行敷设需预留不小于0.2 m的维护间距,采用“当...时,应...”的典型条件句式;2)关联性,标准体系存在跨文本关联特性,例如电气工程需同时遵循《民用建筑电气设计标准》与《建筑电气工程施工质量验收规范》,通过交叉引用实现技术标准的协同统一;3)限定性:技术参数限定方面,如规定管线与蒸汽管道间距下限及隔热要求;执行强度分级通过情态词体现,其中“严禁”构成绝对限制,“宜”则形成弹性指导原则。

1.2.2 基于大语言模型的三元组提取

在基于大语言模型的知识图谱构建过程中,三元组提取是关键步骤之一。三元组通常由主语(Subject)、谓语(Predicate)和宾语(Object)组成,用于表示知识图谱中的基本事实或关系^[9-10]。对于输变电工程领域,通过大语言模型进行三元组提取的具体过程如图2所示。

1)文本预处理。

表 1 输变电工程领域相关规范

Table 1 Relevant specifications of power transmission and transformation engineering

类型	名称
BIM 建模标准规范	《建筑信息模型制图标准》
	《建筑信息模型设计交付标准》
	《BIM标准系列命名规则》
	《建筑信息模型施工应用标准》
输变电 BIM 建模标准规范	《输变电工程三维设计模型交互规范》
	《输变电工程三维设计软件基本功能规范》
	《输变电工程三维设计建模规范》第1.2部分
专业规范文本	《输变电工程数字化移交技术导则》第1.2部分
	《输变电工程设计阶段常见问题清册》
	《变电站总布置设计技术规程》
	《架空输电线路基础设计技术规程》
	《变电站建筑结构设计技术规程》
	《换流站建筑结构设计技术规程》
	《民用建筑电气设计标准》

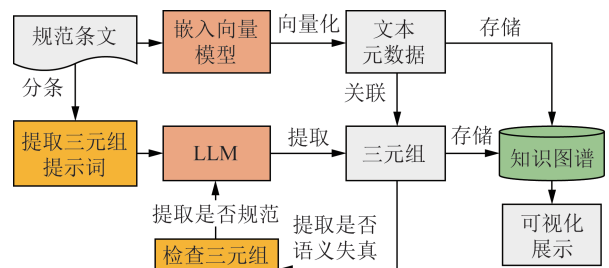


图 2 基于大语言模型的知识图谱构建流程

Fig. 2 Knowledge graph construction process based on LLM

将输变电工程领域的规范标准进行分条处理,将表格内容转化为文本语句,将每条条文作为文本

元数据。这些规范条文包含了丰富的专业知识和规定,是构建知识图谱的重要信息来源^[27]。同时利用嵌入模型(embedding model)将输入的非结构化数据规范条文文本转换为结构化数值向量,与后续提取的三元组相互关联,存储于建立的知识图谱数据库中,便于后续的处理和计算。

2)三元组提取。

根据对输变电工程规范文本行文特点的深入分析,将输变电工程规范文本中的实体关系定义

为R,两个实体之间的关系则采用三元组的形式进行表示,即<E_i, R, E_j>。其中,E_i和E_j分别代表不同的实体,R为其中的映射关系,如图3所示。将预处理后的文本输入大语言模型,利用其自然语言处理能力从复杂的文本数据中自动提取出有用的知识,并将其组织成结构化的形式,通过设计的提示词进行三元组的提取与一致性检查,通过验证的三元组将被存储到知识图谱中。

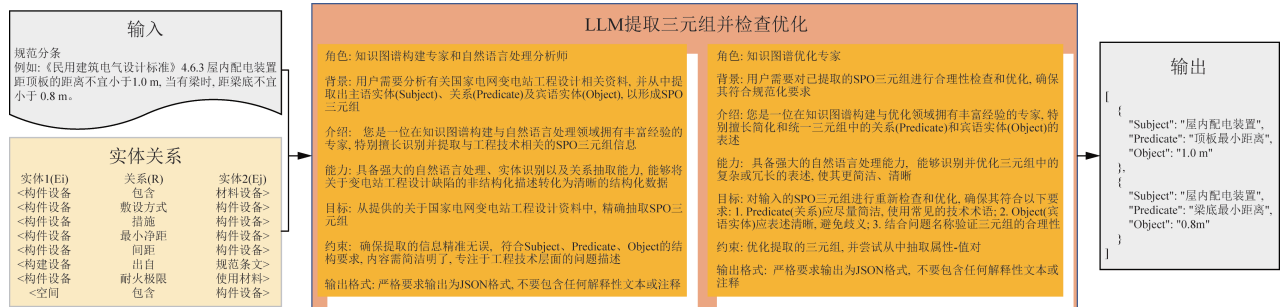


图3 基于大语言模型的三元组提取示例

Fig. 3 Example of triple extraction based on LLM

1.2.3 知识图谱构建与可视化

在完成实体与关系的自动化抽取后,对抽取结果进行人工核验,修正识别错误和遗漏问题,以确保数据的准确性和完整性。采用属性图模型进行数据建模,所有信息以节点与关系的拓扑结构呈现。其中,关系定义了节点间的连接方式,同时具备方向属性,确保数据模型的逻辑方向性。节点和关系均可被赋予多个标签作为分类标识,区分不同数据类别。属性则以键值对形式存储,为节点和关系提供扩展描述信息。国家电网有限公司定期发布工程设计阶段常见问题清册,对设计常见问题进行重点防治,以指导工程设计、规范设计评审工作。图4所示为输变电工程设计常见问题知识图谱,其中不同节点颜色代表着不同专业,包含:变电一次、变电二次、变电土建、线路电气以及线路结构等专业。

1.3 基于知识图谱增强检索的BIM属性映射

1.3.1 BIM模型信息映射与提取

输变电工程BIM模型属性映射是在知识图谱构建的基础上实现的,在进行三维设计过程中,提取相关属性信息,将BIM模型信息与知识图谱中的数据进行映射与展示,以辅助设计,增加设计规范性。建立BIM模型信息与知识图谱的映射关系,如图5所示,将BIM模型与知识图谱中的构件实体进行实体映射、属性映射。

根据《输变电工程数据移交规范》GB/T 38436—2019要求,三维模型属性数据应具有扩展性、唯一标识性^[28]。BIM属性信息包括设备编码、设计参数、设

备参数、管理参数、建设参数、运维参数等,各类参数信息分别对应设计阶段、施工阶段、运维阶段。拓扑属性指的是构件的几何特性,包括其位置以及与其他对象的相对关系。例如,《民用建筑电气设计标准》8.13.2条“照明母线槽可吊装于吊顶内部,也可侧装于建筑物或构筑物墙体表面,固定点距离不宜大于3 m”。BIM模型的拓扑属性可以通过BIM平台获取,例如通过计算得到实体间的位置距离、判断构件是否属于房间。

1.3.2 知识图谱增强检索框架

RAG是一种融合信息检索与大语言模型的技术,通过动态整合外部知识库资源,提升自然语言处理任务的准确性与时效性^[20,29]。输入问题时,系统从外部预构建的大规模知识库或文档索引中检索相关内容,将检索结果与原始问题共同输入生成模型,在外部知识的引导下生成更精准、高质量的回复。基于知识图谱增强检索的BIM属性映射框架如图6所示,在BIM信息提取后,将构件实体在知识图谱的构件实体中进行检索,召回知识图谱中规范信息,最终通过大语言模型生成可读性文本辅助设计。

1.3.3 知识图谱子图检索

实体节点是在构建知识图谱时三元组中的主体或客体,通过实体节点的匹配,返回相匹配的子图,即一系列三元组,例如<构件,关系,构件><构件,属性,值>等。文本元数据在文本预处理时向量化存储在知识图谱中,并通过“来自于”关系与相应的三元组相连。文本元数据节点检索将返回构件相关规范

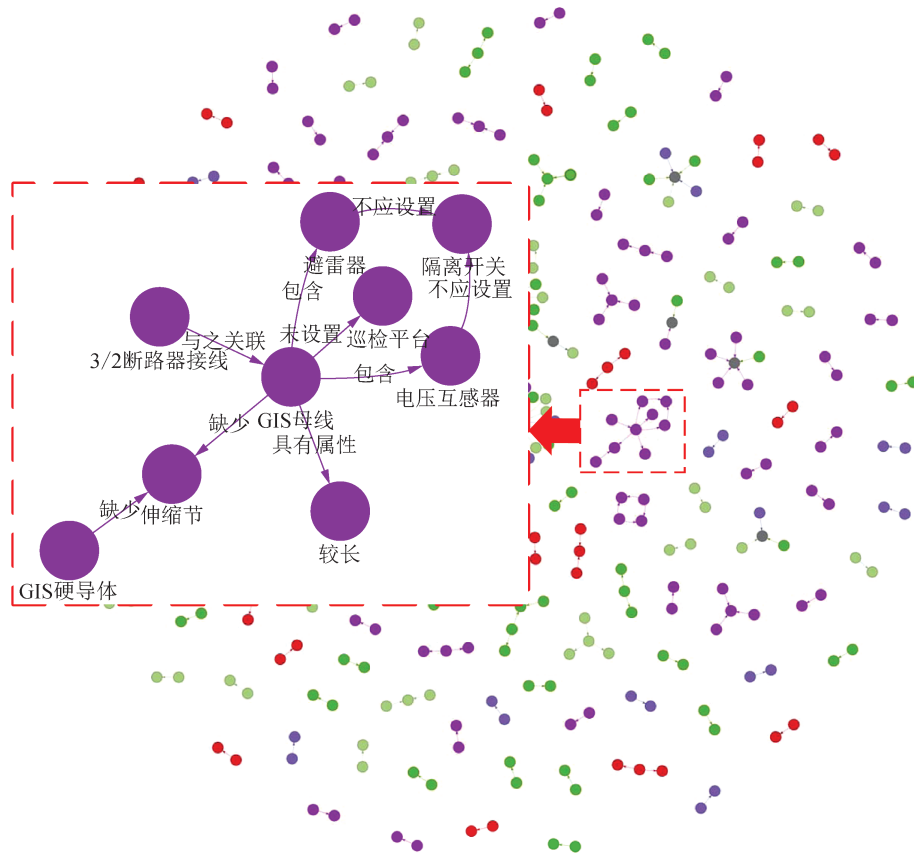


图 4 输变电工程设计常见问题知识图谱

Fig. 4 Knowledge graph of common problems in power transmission and transformation engineering design

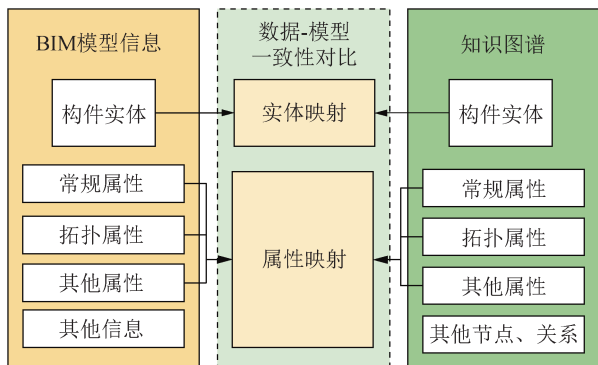


图 5 BIM 模型信息与知识图谱映射关系

Fig. 5 Mapping relationship between BIM model and knowledge graph

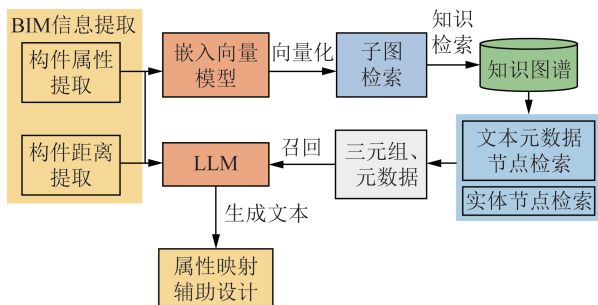


图 6 知识图谱增强检索BIM属性映射框架

Fig. 6 BIM attribute mapping framework based on knowledge graph RAG

元数据。

在探讨知识图谱的知识召回机制时,采用一种混合检索策略能够显著提升信息检索的准确性和效率。这种策略同时考虑了粗、细粒度两种检索方式,进而提供了一个全面的数据检索框架,如图 7 所示。具体而言,在将 BIM 模型信息向量化后,采取两种主要的检索方式融合:文本元数据节点检索和实体节点检索。

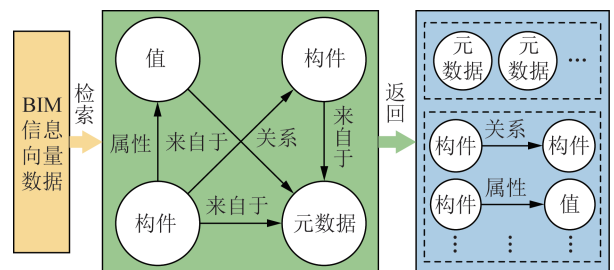


图 7 子图检索策略

Fig. 7 Strategy of subgraph retrieval

文本元数据节点检索则是通过对文本元数据进行预处理并转换为向量表示,存储于知识图谱中,并通过“来自于”关系与相应的三元组相连。当进行文本元数据节点检索时,寻找最相关的文本描述,根据相似度筛选候选项,计算得分 $S_{metadata}$,返回与特定构件相关的规范性元数据。

实体节点是在构建知识图谱时三元组中的主体或客体所代表的具体 BIM 构件或其属性。通过匹配这些实体节点,根据相似度计算得分 S_{node} ,返回候选节点与其相关的三元组,如<构件,关系,构件><构件,属性,值>等,形成一个逻辑上连贯的子图。这种方式能够快速定位到查询的具体内容,并且通过遍历知识图谱连接不同的节点,执行复杂的多步查询和推理任务,提升信息检索的精度和深度。最后将检索获得的子图与节点得分进行权重分配,如式(1)所示,按照最终得分进行排序召回信息到大语言模型,进行下一步检查。

$$S_{Final} = \alpha \cdot S_{metadata} + (1 - \alpha) \cdot S_{node} \quad (1)$$

式中: $S_{metadata}$ 表示文本元数据检索得分; S_{node} 表示图谱节点检索得分; α 为平衡系数,在实验中通过交叉验证确定为 0.6,即更侧重于语义匹配结果,同时兼顾结构关联性。

通过分析构件信息与规范信息之间深层次内在映射关系,可以实现对实体信息、属性信息的精准提取和有效整合。基于知识图谱增强检索的 BIM 属性映射,能够动态整合外部知识资源,提供输变电工程 BIM 三维设计相关标准规范,使用大语言模型支持辅助,提升设计的效率与准确性。

1.4 基于大语言模型的专家问答系统开发

1.4.1 向量知识库构建

在文本预处理阶段中,规范条文文本转换的数值向量是向量知识库的数据源。向量数据库存储的核心功能是为高维向量数据提供结构化、高效率的存储管理^[30-31]。这些向量存在于高维空间中,其中每一个维度都代表着某种特定的特征或属性。输变电工程三维设计中,文本经嵌入模型转化为向量后,向量数据库通过优化存储结构(如量化编码、分层索引)实现工程设计规范数据的存取。

本文采用通用向量化模型 granite-embedding 对规范条文进行向量化处理,将每段文本映射为 768 维的密集向量,以便于后续的检索操作。采用主成分分析,从高维嵌入到二维空间映射,以便于可视化分析,相应的向量空间可视化结果如图 8 所示。图中每个点代表着一条规范文本,颜色深浅代表距离投影平面的距离,红点代表查询问题文本经过向量化以及降维后在向量知识库中的位置关系。

1.4.2 问题检索与回答生成

1)问题检索。

基于向量的搜索方法利用语义嵌入技术来检索

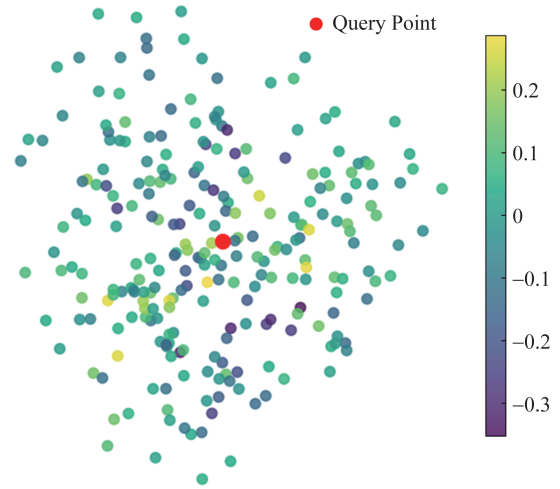


图 8 向量知识库空间可视化

Fig. 8 Visualization of vector knowledge base

与查询语义最相关的前 k 个段落。首先,通过相同的向量化模型将用户查询转化为对应的向量表示,然后计算与知识库集合中的所有向量之间的相似性,最后根据相似度排序,检索出最相关的结果,如式(2)、(3)所示。

$$\mathbf{e}_{query} = E_{\text{Embedding}}(\text{query}) \quad (2)$$

$$\text{Top-}k(\mathbf{e}_{query}, \mathbf{E}) = \arg \max_{\mathbf{e}_v \in \mathbf{E}} \text{sim}(\mathbf{e}_{query}, \mathbf{e}_v) \quad (3)$$

式中: $E_{\text{Embedding}}(\cdot)$ 表示使用嵌入模型将用户文本 query 转化为向量, \mathbf{e}_{query} 为转化后的查询文本向量; $\text{Top-}k(\cdot, \cdot)$ 表示从 \mathbf{E} 中选出 \mathbf{e}_{query} 最相似的前 k 个向量,函数 $\text{sim}(\cdot, \cdot)$ 用来计算查询文本向量与知识库中向量的余弦相似度,其计算过程如式(4)所示。

$$\text{sim}(\mathbf{e}_{query}, \mathbf{e}_v) = \frac{\mathbf{e}_{query} \cdot \mathbf{e}_v}{\|\mathbf{e}_{query}\| \cdot \|\mathbf{e}_v\|} \quad (4)$$

2)回答生成。

在回答生成阶段,根据问题检索步骤中确定的最相关文本块被收集起来形成专业知识文集。将这些文本片段与初始问题文本相连接,以“作为输变电工程三维设计专业,根据以下知识”、“回答以下问题”拼接检索知识与查询,共同作为输入馈送给大规模语言模型,进而产生既包含上下文信息又具备专业深度的回答内容。

2 系统实现与验证

2.1 开发平台选择

本文旨在研究基于大语言模型支持的输变电工程 BIM 三维设计专家系统,选用 BIMbase 作为 BIM 开发平台进行输变电工程三维模型设计,并接入大语言模型与知识图谱。

中国建筑科学研究院 PKPM 开发的 BIMbase 基

于国产自主 BIM 平台开发^[32],产品覆盖领域广泛,包含协同、总图电气、照明、建筑、结构、给排水、暖通、移交等设计模块协同设计,开发接口丰富,并且用户可以根据自己的功能需求利用其二次开发的接口实现新功能开发,适合国内使用环境。

本文中大语言模型采用开源的 Qwen2.5,其在遵循指令、生成文本、理解结构化数据以及生成结构化输出方面表现良好。Qwen2.5 支持最多达 128 k tokens 的上下文长度,并能生成多达 8 k tokens 的文本^[33]。嵌入模型选用 granite-embedding-278 M,其为纯文本密集双编码器嵌入模型,为给定的文本块生成固定长度的向量表示,可用于文本相似性、检索和搜索应用程序。向量数据库选用 chromaDB,存储和查询高维向量数据。

2.2 实验结果分析

在知识图谱构建过程中,使用了开源模型 Qwen2.5 对 15 份相关标准文件进行了处理,实现了三元组的自动化提取。将输变电工程设计标准中实际完成三元组抽取的数据作为数据集,并将理想情况下期望能得到的数据作为验证集。编写测试脚本,计算各分类评估指标,以评估模型性能,判断是否满足预期要求。实验结果显示,在测试集上,三元组提取的准确率为 92%,召回率为 89%。准确度为计算预测为正类的样本中实际为正类的比例,而召回率是计算实际为正类的样本中被正确预测为正类的比例^[31]。经过人工校正后,知识图谱的完整性和准确性得到了显著提升。

此外,基于知识图谱增强检索的 BIM 属性映射实验表明,该方法在构件属性信息提取和设计规范匹配方面表现优异,其综合准确率达到 92%。在一座变电站 BIM 模型验证中,能够覆盖 85% 的构件(模型严格依照《输变电工程三维设计模型交互规范》等相关标准建立^[34],简称《标准》)。该模型共计包含 11 584 个构件,符合《标准》定义的构件占比:75.5%,未覆盖构件主要为非标定制设备或附属设施。同时在用户界面展示与交互体验上获得了高度评价,进一步验证了系统的实用价值和效率。

在专家问答系统测试阶段,针对 200 条输变电工程设计专业问题,分别由知识图谱混合增强检索的大语言模型、Meta-RAG 增强的大语言模型^[20]与未增强的大语言模型生成回答,平均响应时间和回答准确率如表 2 所示。实验结果表明,尽管增强检索的大语言模型在平均响应时间上略有增加(1.25 s 至 1.45 s),但其回答准确率显著提升(从 67% 提高至 91%),体现了知识图谱增强检索在提升专业问答系

统性能方面的优越性。与 Meta-RAG 增强的大语言模型相比,由于在知识图谱中进行了混合检索,耗时变慢(1.38 s 至 1.45 s),但借助图谱结构有效提升了回答准确率(提升约 10%)。用户反馈表明,该系统能够有效为工程师提供精准的专业解答,减少了查阅文档的时间成本。

表 2 问答生成评估

Table 2 Assessment of Q&A generation

模型类型	平均响应时间/s	回答准确率/%
未增强检索的大语言模型	1.25	67
Meta-RAG 增强的大语言模型	1.38	83
知识图谱增强检索的大语言模型	1.45	91

2.3 系统实现与展示

为验证专家系统可行性,本文选择徐州市一座 220 kV/110 kV/10 kV 变电站作为验证对象。该变电站主变容量为 3×180 MVA,为周边地区提供稳定的电力支持。基于 BIMBase 平台构建了该变电站的三维模型,项目整体效果图如图 9 所示。

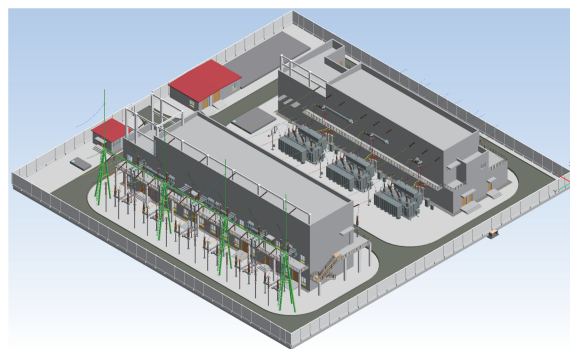


图 9 输变电工程 BIM 模型

Fig. 9 BIM model of power transmission and transformation engineering

在进行具体操作时,当选择输变电工程中的某个 BIM 模型并点击“查询选中构件”功能后,系统将提取选中构件的相关属性信息(例如名称:“矩形母线桥”等),并在知识图谱中执行映射查询。此时,在界面左侧会显示与设计相关的常见问题列表,包括问题名称、描述、原因及其解决方案,以辅助设计人员避免类似错误;右侧则呈现选中构件的知识图谱子图,如图 10 所示。此外,通过点击“查看完整知识图谱”,用户可以在新窗口中拖动节点来浏览整个图谱,并通过鼠标悬停获取详细信息,如图 11 所示。

在实际应用中,若用户在问题框中输入“变电工程中母线相关常见问题有哪些?”并点击“提交问题”,系统将根据输变电工程领域的专业知识库提供



图 10 BIM 构件知识图谱查询

Fig. 10 Knowledge graph query of BIM component

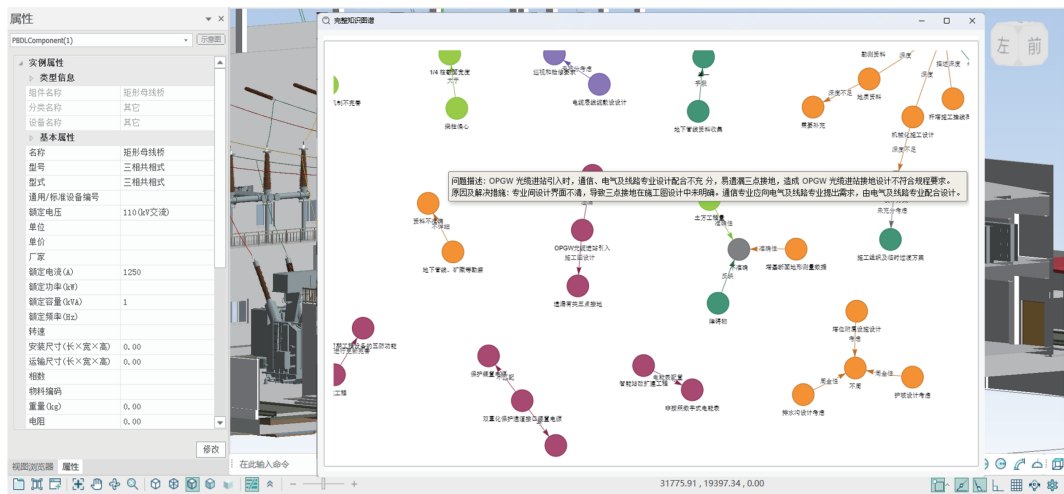


图 11 悬停查看知识图谱详细信息

Fig. 11 Hover over the knowledge graph for details

相应的解答。同时,通过访问历史问题记录,用户可以查阅以往的问答内容,例如“携带式电气设备接地需要注意什么”问题,该解答不仅引用了《电气装置

安装工程接地装置施工及验收规范》GB 50169—2016 中第 3.6.1 和 3.6.2 条的规定,还结合这些规定给出了清晰易懂的回答,如图 12 所示。

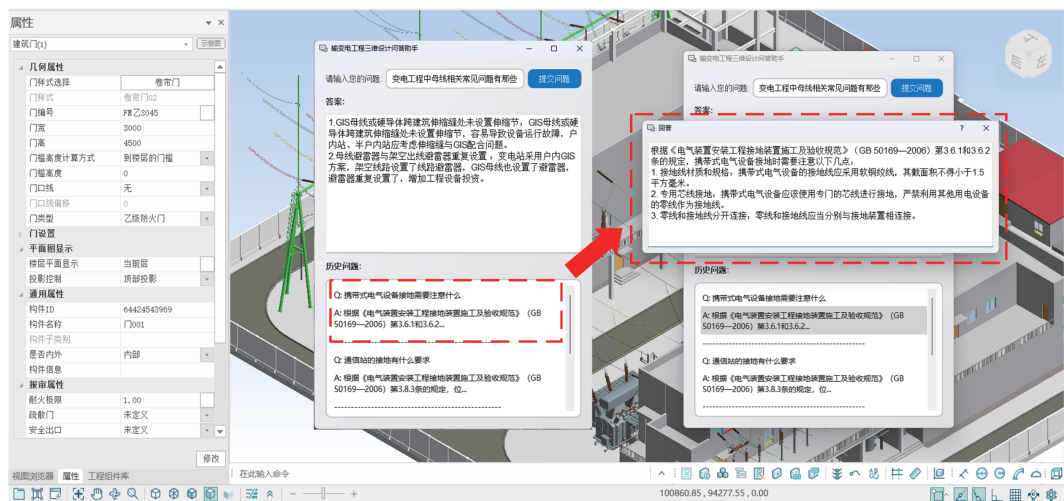


图 12 输变电工程三维设计问答

Fig. 12 Q&A on 3D design of power transmission and transformation engineering

3 结 论

本文针对输变电工程三维设计中的知识整合与辅助支持应用需求,提出一种大语言模型赋能的 BIM 设计专家系统。通过构建融合规范标准与设计常见问题的知识图谱,建立 BIM 模型属性与知识实体的映射机制,结合语义增强的智能问答技术,形成“知识解析-属性关联-建议生成”的智能化辅助设计支持体系。该系统在徐州变电站工程应用表明,构件映射覆盖率达 85%,专业问题解答准确率较基线模型提升 32.8%。研究成果验证了大语言模型在电力工程知识转化与设计辅助中的核心价值,为复杂电网工程系统的数字化设计范式革新提供了技术参考。

尽管该系统已展现出良好的应用潜力,但仍存在若干改进空间:一是,知识图谱构建依赖人工校验,后续将引入规则引擎提升三元组抽取一致性,并开发可视化编辑工具辅助纠错;二是,BIM 模型与设计规范尚未实现动态联动更新,未来将建立标准版本管理机制与变更影响分析功能;三是,系统当前以中文为主,面对方言或国际项目时泛化能力有限,计划引入多语言模型和跨语言映射机制加以扩展。同时,进一步改善用户体验,简化操作流程,并考虑将应用扩展至设施运维阶段,实现全生命周期的管理支持。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

齐立忠进行了研究思路设计、研究方案设计、研究方案可行性调查分析;荣经国收集数据,采集、清洗与分析数据;张苏、何幸、李翔中参与了论文写作和修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

4 参 考 文 献

- [1] 周圣栋,解蕾,宋若晨,等. 基于 BIM 的变电站数字化建设管控平台构建及应用[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 142-147.
ZHOU Shengdong, XIE Lei, SONG Ruochen, et al. Building and application of substation digital construction management platform based on BIM[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 142-147.
- [2] 官澜,李奥森,韩念遐,等. 基于数字化三维模型的架空输电线路设计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 105-109.
GUAN Lan, LI Aosen, HAN Nianxia, et al. Design of overhead transmission lines based on digital three-dimensional model [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 105-109.
- [3] 同嘉. 基于 BIM 全景可视化的架空电力线磁场三维仿真计算研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 169-175.
TONG Jia. Study of overhead power line magnetic field 3D simulation calculation based on BIM panoramic visualization [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 169-175.
- [4] 张广平,何世洋,任鹏飞,等. BIM 技术在 750 千伏变电站设计的应用[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1234-1238.
ZHANG Guangping, HE Shiyang, REN Pengfei, et al. Application of BIM technology in the design of 750 kV substation [J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 1234-1238.
- [5] MAJUMDER S, DONG L, DOUDI F, et al. Exploring the capabilities and limitations of large language models in the electric energy sector[J]. Joule, 2024, 8(6): 1544-1549.
- [6] 齐立忠,刘定,张卓群,等. 基于 BIM 技术的特高压工程数字化建设综述[J]. 电力建设, 2025, 46(2): 61-73.
QI Lizhong, LIU Ding, ZHANG Zhuoqun, et al. Review of digital construction of UHV projects based on building information modeling technology [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(2): 61-73.
- [7] 王兴华,王彦峰,雷翔胜,等. 电气设备在 BIM 与 GIS 中的几何与语义一致性[J]. 南方电网技术, 2022, 16(12): 29-37.
WANG Xinghua, WANG Yanfeng, LEI Xiangsheng, et al. Congruent mapping between BIM and GIS for geometric and semantic information of electrical device [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 29-37.
- [8] 周亮,蔡钧,丁一波,等. 基于 IFC 的输变电工程三维数字化管理平台研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 7-12.
ZHOU Liang, CAI Jun, DING Yibo, et al. Research on 3D digital management platform of power transmission construction project based on IFC [J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 7-12.
- [9] 李燕,郭嘉成,冯笑峰,等. 智慧基建背景下基于 BIM 技术的输变电工程全生命周期造价管理研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(10): 58-65.
LI Yan, GUO Jiacheng, FENG Xiaofeng, et al. Research on life cycle cost management of power transmission and transformation projects based on BIM technology under the background of smart infrastructure [J]. Construction Economy, 2022, 43(10): 58-65.
- [10] 杜春宇,周亮,陈培智,等. 基于 BIM 的输变电工程自动算量分析研究[J]. 建筑经济, 2020, 41(10): 64-68.
DU Chunyu, ZHOU Liang, CHEN Peizhi, et al. Research on BIM based automatic statistics analysis of engineering quantity of power transmission and transformation project [J]. Construction Economy, 2020, 41(10): 64-68.
- [11] 任春光,孟长虹,史卓鹏,等. 智能变电站施工控制的三维可视化系统研究和设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(9): 79-83.
REN Chunguang, MENG Changhong, SHI Zhuopeng, et al. Research and implementation of 3D visualization system based on intelligent power station construction control [J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(9): 79-83.
- [12] JIANG Q, LIU Y D, YAN Y J, et al. BIM-based 3-D multimodal reconstruction for substation equipment inspection images [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 5031714.
- [13] LOGGIA R, FLAMINI A. Electrical safety enhanced with BIM, SCADA and digital twin integration: a case study of a MV-LV

- substation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 2725-2731.
- [14] 徐涛, 邹泽华, 胡仁焱, 等. 基于BiGRU+CRF深度学习模型的水电站调度运行知识图谱构建方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 180-189.
XU Tao, ZOU Zehua, HU Renyan, et al. A construction method of dispatching operation knowledge graph of hydro power stations based on BiGRU + CRF deep learning model [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 180-189.
- [15] LEE J, AHN S, KIM D, et al. Performance comparison of retrieval-augmented generation and fine-tuned large language models for construction safety management knowledge retrieval[J]. Automation in Construction, 2024, 168: 105846.
- [16] 覃思中, 郑哲, 顾毅, 等. 大语言模型在建筑工程中的应用测试与讨论[J]. 工业建筑, 2023, 53(9): 162-169.
QIN Sizhong, ZHENG Zhe, GU Yi, et al. Exploring and discussion on the application of large language models in construction engineering [J]. Industrial Construction, 2023, 53(9): 162-169.
- [17] 姜文明, 齐立忠, 张苏, 等. 基于知识图谱的电网工程建筑信息模型质量检查方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(3): 807-814.
JIANG Wenming, QI Lizhong, ZHANG Su, et al. Quality inspection method of electric power engineering building information model based on knowledge graph [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(3): 807-814.
- [18] 肖发龙, 吴岳忠, 沈雪豪, 等. 基于深度学习和知识图谱的变电站设备故障智能诊断[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 66-74.
XIAO Falong, WU Yuezhong, SHEN Xuehao, et al. Intelligent fault diagnosis of substation equipment on the basis of deep learning and knowledge graph [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 66-74.
- [19] 田雪涵, 董坤, 赵剑锋, 等. 基于增强优化预训练语言模型的电力数据实体识别方法[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 100-107.
TIAN Xuehan, DONG Kun, ZHAO Jianfeng, et al. Entity recognition method for power data based on enhanced optimization pre-trained language model [J]. Smart Power, 2024, 52(6): 100-107.
- [20] 王合庆, 魏杰, 景红雨, 等. Meta-RAG: 基于元数据驱动的电力领域检索增强生成框架[J/OL]. 计算机工程, 2024: 1-11. (2024-12-25) [2025-04-23]. <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0070415>.
WANG Heqing, WEI Jie, JING Hongyu, et al. Meta-RAG: metadata-driven enhanced generation framework for power domain retrieval [J/OL]. Computer Engineering, 2024: 1-11. (2024-12-25) [2025-04-23]. <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0070415>.
- [21] 马超, 李武峰, 陈羽飞, 等. ChatGPT类大语言模型赋能电力标准数字化转型的核心技术、技术特征及应用展望[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1727-1746.
MA Chao, LI Wufeng, CHEN Yufei, et al. Core technologies, technical characteristics, and application prospects of ChatGPT class big language models on the digital transformation of standards in electric power field [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1727-1746.
- [22] 李莉, 时榕良, 郭旭, 等. 融合大模型与图神经网络的电力设备缺陷诊断[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(10): 2643-2655.
LI Li, SHI Rongliang, GUO Xu, et al. Diagnosis of power system defects by large language models and graph neural networks [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2024, 18(10): 2643-2655.
- [23] 曹伟, 张莉, 郭静, 等. 基于大语言模型的低碳电力市场发展应用前景[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 8-16.
CAO Yi, ZHANG Li, GUO Jing, et al. Prospects for development of low-carbon electricity markets based on large language models [J]. Smart Power, 2024, 52(2): 8-16.
- [24] 牛泽原, 李嘉媚, 艾芊. 大语言模型在电力系统中的应用初探[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1327-1336.
NIU Zeyuan, LI Jiamei, AI Qian. Preliminary exploration of the application of large language models in power systems [J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1327-1336.
- [25] 贾震江, 刘宇穗. 协同、三维设计技术在数字化电厂建设中的应用[J]. 电力建设, 2011, 32(4): 83-86.
JIA Zhenjiang, LIU Yusui. Application of collaborative 3D design in digitalized power plant [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(4): 83-86.
- [26] 胡君慧, 盛大凯, 鄯鑫, 等. 构建数字化设计体系, 引领电网建设发展方向[J]. 电力建设, 2012, 33(12): 1-5.
HU Junhui, SHENG Dakai, QIE Xin, et al. Establishment of digital design system of power transmission & transformation project for power grid construction and development [J]. Electric Power Construction, 2012, 33(12): 1-5.
- [27] 韩文军, 王庭华, 彭晶, 等. 输变电工程数据管理技术标准体系框架研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(22): 224-229.
HAN Wenjun, WANG Tinghua, PENG Jing, et al. Research on standard system framework of power transmission and distribution project data management technology [J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(22): 224-229.
- [28] 输变电工程数据移交规范: GB/T 38436—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Engineering data handover specification for power transmission and transformation: GB/T 38436—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [29] 任海玉, 刘建平, 王健, 等. 基于大语言模型的智能问答系统研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(7): 1-24.
REN Haiyu, LIU Jianping, WANG Jian, et al. Research on intelligent question answering system based on large language model [J]. Computer Engineering and Applications, 2025, 61(7): 1-24.
- [30] 王思丽, 李慧佳, 孟庆洪, 等. 基于深度学习模型的领域知识库语义检索服务实现研究[J]. 图书馆学研究, 2024(10): 40-49.
WANG Sili, LI Huijia, MENG Qinghong, et al. Research on the implementation of semantic retrieval service for domain knowledge base based on deep learning model [J]. Research on Library Science, 2024(10): 40-49.
- [31] 王帅, 何文春, 王甫棣, 等. 大语言模型融合知识图谱与向量检索的问答系统[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(32): 13902-13910.

- WANG Shuai, HE Wenchun, WANG Fudi, et al. Question answering system based on large language model integrating knowledge graph and vector retrieval [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(32): 13902-13910.
- [32] 黄立新, 马恩成, 张晓龙, 等. PKPM 的“BIM 数据中心及协同设计平台”[J]. *建筑科学*, 2018, 34(9): 42-49, 129.
- HUANG Lixin, MA Encheng, ZHANG Xiaolong, et al. PKPM BIM data center and collaborative design platform [J]. *Building Science*, 2018, 34(9): 42-49, 129.
- [33] YANG A, YANG B S, ZHANG B C, et al. Qwen2.5 technical report [DB/OL]. (2024-12-09) [2025-04-29]. <http://arxiv.org/abs/2412.15115>.
- [34] 电力规划设计总院. 输变电工程三维设计模型交互及建模规范: NB/T 11199—2023 [S/OL]. (2023-05-26) [2025-01-29]. <https://hbba.sacinfo.org.cn/stdDetail/4fd5f719c3fe7d98ff5a90434>

4b104a4f06c6991f1e3cee101d33cb52a9d2a6c.

收稿日期: 2025-04-29 修回日期: 2025-06-05

作者简介:

齐立忠(1968),男,博士,正高级工程师,通信作者,主要研究方向为电网工程规划设计,E-mail:qilizhong@chinasperi.sgcc.com.cn;

荣经国(1988),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电网工程数字化;

张苏(1989),女,博士,高级工程师,主要研究方向为电网工程数字化;

何幸(1989),女,本科,初级工程师,主要研究方向为 BIM 数字化技术;

李翔中(1987),男,硕士,初级工程师,主要研究方向为 BIM 数字化技术。

(编辑 张小飞)