基于知识图谱和机器学习的油气田地面方案智能平台建设

宋　旭[1]　李宏斌[2]　单吉全[3]　章　瑞[3]　王永东[4]　许　斌[3]

1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司，　北京　102200；
2. 大庆油田有限责任公司，　黑龙江　大庆　163712；
3. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司，　陕西　西安　710018；
4. 大庆油田设计院有限公司，　黑龙江　大庆　163712

摘　要：油气田地面方案设计涉及的油气田类型、工程类型、设计专业、成果资料类型等众多，方案设计工作专业度高、难度大且复杂，方案设计质量过于依赖个人工作经验，存在方案成果共享、再利用程度低等问题，亟需通过信息化、智能化手段解决。以地面工程知识体系为基础，基于知识图谱和机器学习融合技术构建油气田地面方案智能平台以实现智能检索、智能辅助设计、智能辅助审查等应用场景，自动推荐油气田地面工程项目周边环境、采标、相似工艺方案、审查要点、历史专家意见，自动抽提项目报告中的关键技术指标、经济指标和主要工程量，智能推送对比分析结果等应用。通过在北一区断西东块二类抗盐聚合物产能建设项目方案和龙西地区塔21-4 区块产能建设方案的试用验证，油气田地面方案智能平台可节约资料检索耗时，实现“一键即得”，提升自查自审质量、有效减少项目多轮审查频次，实现项目资料在线管理、共享应用，提高设计、审查工作效率超50%，有效提高方案设计审查工作质效。油气田地面方案智能平台可为类似油气田地面建设方案提供参考。

关键词：油气田；地面方案设计；知识图谱；机器学习

DOI：10.3969/ j. issn. 1006-5539. 2025. 01. 004

Development of an intelligent platform for oil and gas field surface development scheme based on knowledge graph and machine learning

SONG Xu[1], LI Hongbin[2], SHAN Jiquan[3], ZHANG Rui[3], WANG Yongdong[4], XU Bin[3]

1. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology Co., Ltd., Beijing, 102200, China;
2. Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163712, China;
3. PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China;
4. Daqing Oilfield Design Institute Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163712, China

Abstract: The design of surface development scheme of oil and gas fields involves multiple types of oil and gas fields, projects, engineering disciplines, and deliverable data. The design work for the

收稿日期：2024-02-04

基金项目：中国石油勘探与生产公司重点项目“配套信息化项目地面工程模块(2021 年度)”(KTYSCFGS2021-1)

作者简介：宋　旭(1982-)，女，黑龙江大庆人，高级工程师，硕士，主要从事油气田开发生产及安全环保信息化、智能化建设工作。E-mail：songx_dod@ petrochina. com. cn

development scheme is highly specialized, difficult, and complex. The quality of development scheme design relies too much on individual work experience, and there are issues such as low level of sharing and reuse of development scheme results that urgently need to be resolved through information technology and intelligent approaches. Based on the knowledge system of surface facilities, this paper integrates knowledge graphs and machine learning technology to develop intelligent application scenarios: intelligent retrieval, intelligent assisted design, and intelligent assisted review. It is able to generate automatic recommendation of the surrounding environment, standard selection, similar process schemes, review points, and historical expert opinions of surface facilities engineering. It can also automatically extract key technical indicators, economic indicators, and main engineering bill of quantities from project reports, and provides intelligent push of comparative analysis results and other applications. Through the application of the Class Ⅱ salt-resistant polymer production capacity building project plan in the Duanxi East Block of the North-1 District and the production capacity building plan in the Ta21-4 Block of the Longxi District, it is concluded that the intelligent support platform for oil and gas field surface development scheme design can save data retrieval time, achieve "one-click access", improve the quality of internal-inspection and internal-audit, effectively reduce the frequency of multiple rounds of project review, achieve online management and sharing of project data, increase the work efficiency of design and review personnel by more than 50% and effectively improve the efficiency and quality of development scheme design and review. This intelligent platform can provide reference for similar oil and gas field surface development in the future.

Keywords: Oil and gas fields; Surface development scheme design; Knowledge graph; Machine learning

0　前言

油气田地面方案设计主要包括地面工程可行性研究、地面工程建设方案、地面工程初步设计,科学先进的方案设计是油气田地面施工建设、生产运行、安全环保的基础保障,抓好方案设计的审查对保证施工生产安全、节约投资将起到重要作用[1-2]。中国石油每年开展油气田建设工程项目前期论证和方案设计千余项,随着标准化设计、模块化建设深入开展及一体化集成装置的广泛推广,提质提速效果明显,但方案设计审查工作量依然庞大。

目前,油气田地面方案设计业务现状主要存在以下问题。

1)油气田地面方案设计涉及的油气田类型、工程类型、设计专业、成果资料类型等众多,方案设计工作专业度高、难度大且复杂,需查找并核对大量的管理规定、标准、方案、案例等资料。

2)油气田地面方案设计的质量过于依赖方案设计人员工作经验。方案编制过程以手工查找资料、手动检索汇总对比为主,分析结论主要依赖个人经验,工作效率低、方案质量良莠不齐。

3)设计单位历年积累的方案成果量大,多以文档资料形式为主,分散存储于各单位或个人手中,新工程项目难以有效借鉴历史优秀方案,文档资料成果共享、再利用程度低。

4)油气田地面方案设计审查工作主要依赖专家经验,为保证方案质量,经常需要组织多轮审查,耗时长。

随着信息技术的迅猛发展,大数据、知识图谱、机器学习等新技术的研究迎来了高速发展黄金期,中国人工智能技术取得了显著的发展成效,已被应用到各行业[3-5]。信息化、智能化为油气生产企业提质增效、数字化转型、高质量发展提供有力支撑[6-10]。本文基于知识图谱和机器学习融合技术探索油气田地面方案智能平台的研究与应用,旨在基于人工智能融合技术,实现标准规范智能推送、工艺方案智能推送、审查要点智能推送、技术经济指标智能对比分析、经济估/概算智能抽提、智能检索等智能功能,减轻油气田地面方案设计审查工作难度和工作量、提升方案设计审查的工作效率和质量,进一步保障油气田地面工程高水平、高质量、高效率。

1　知识图谱和机器学习融合技术研究

1.1　油气田地面工程领域知识体系研究

知识图谱是一个用"关系"连接"本体"和"实体"

的网状知识结构，以图谱方式对获得的数据和知识内容进行提取、消歧、融合、加工、管理、输出的技术方法。它以结构化的形式描述客观世界中概念、实体及其之间的关系，将信息表达成更接近人类认知世界的形式，提供了一种更好地组织、管理和理解海量信息的能力[11-14]。

通过梳理油气田地面方案设计和管理业务问题及智能化需求，基于对油气田地面方案设计相关国标、行标、企标、案例总结，以及地面工程建设历史优秀项目的可研、初设、审查要点等约 7 万份文件资料的分析和条目化拆解，结合油气田地面方案设计领域的行业知识基础、知识体系结构、实体数据关系及知识成果经验，建立油气田地面方案设计领域知识体系构建方法，步骤如下。

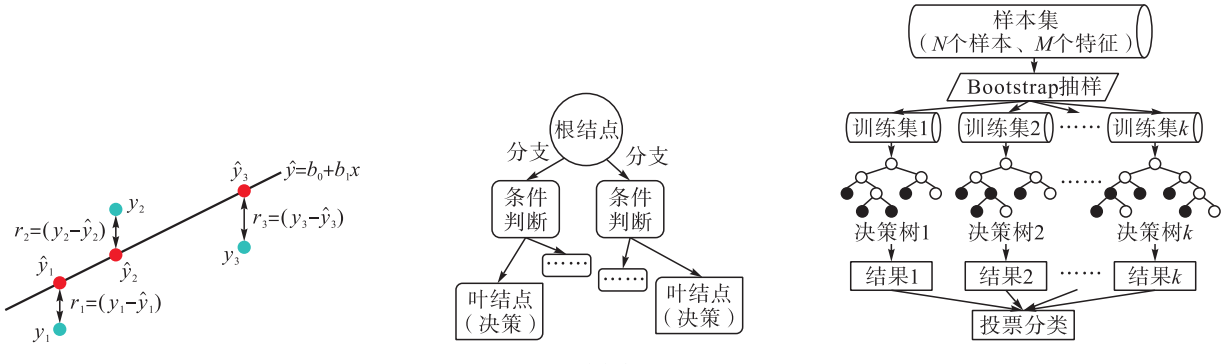
1）建立行业知识基础。建立专业分词（地面工程可行性研究、地面工程方案设计、地面工程初步设计、地面生产、地面完整性等），释义词条、同义词/ 上位词/ 下位词等。

2）构建知识体系结构及数据关系。基于油气田地面方案设计相关管理规定、标准规范、成果文献、案例总结、事故事件及地面工程建设历史优秀项目成果资料，按照业务管理流程（工程方案编制计划、工程方案设计、工程方案审查等）、业务对象（油藏条件、地面工艺、地面设备等）、专业技术理论（处理工艺模拟计算、材料力学、流体力学、结构力学等）等方面，构建知识体系结构。按专业分类、关键字、关键内容等条件构建业务数据知识关系，油气田地面方案设计核心专业包括油气集输、油气处理、油气管道、油气储运、配管、采出水处理等。以油气集输专业为例，将其按审查重点、深度审查、技术审查逐层细分，如按业务特点将技术审查细分成工艺基本要求、原油集输管道、天然气集输管道、天然气凝液和液化石油气输送管道、管道敷设、材料及管道组成件 6 个子项，再依次根据具体工艺要求进一步细分，进而构建油气集输专业的业务本体；将各油气生产企业历史典型项目的可研报告、初步设计、批复文件、专家意见、施工数据，以及参考的审查要点、标准规范、专业手册等资料中有关油气集输专业和子项的章节、段落、关键词作为实体属性，将原始数据转化为图谱数据，经过知识表示、知识获取、知识融合等过程，对业务本体、实体属性和关系进行分级建模，并进行知识评估与更新，不断迭代。

3）输出知识成果经验。以数据湖为数据基础，基于云平台微服务技术，根据标准规范智能推送、工艺方案智能推送、审查要点智能推送、技术经济指标智能对比分析、经济估/ 概算智能抽提、智能检索等不同场景，形成基于图谱的数据服务、算法推荐，增强推荐系统的准确性，支持智能场景应用。

1.2 智能算法模型融合构建技术研究

机器学习是涉及概率论、统计学、逼近论、凸分析、算法复杂度理论等多领域的交叉学科，专门研究计算机如何模拟或实现人类的学习行为，以获取新知识或新技能，重新组织已有知识结构使之不断改善自身性能。油气田地面方案智能平台应用的机器学习算法包括监督学习（线性回归、决策树、深度学习）、无监督学习（K 均值聚类）、强化学习（深度强化学习）、时序数据分析（循环神经网络）、集成学习（随机森林）等[15-17]。典型机器学习算法见图 1，机器学习算法在油气田地面方案设计业务中的应用场景见表 1。



a）线性回归
a）Linear regression algorithm

b）决策树
b）Decision tree model

c）随机森林
c）Random forest

图 1 机器学习算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of machine learning algorithms

注：y 为因变量（输出变量）；x 为自变量（输入变量）；b_0 为回归常数；b_1 为回归系数；r 为误差。

表 1　机器学习算法在油气田地面方案设计业务中的应用场景表

Tab. 1　Application scenarios of machine learning in design business of oil and gas field surface scheme

机器学习算法	应用场景
线性回归	预测设计压力、负荷率等油气田地面方案设计的关键指标
决策树	根据不同的工艺特征和历史数据制定决策,如确定最佳的设备选型
深度学习	在大规模方案设计数据中学习复杂的非线性关系,优化油气田地面方案设计过程的参数选择,提高方案设计效率
K 均值聚类	识别相似的区块区域和工艺,辅助相似工艺策略设计,提高方案设计效率
深度强化学习	优化控制策略,提高方案设计效率和质量
循环神经网络	对时间序列数据进行建模,如预测压力、处理量等参数的变化趋势
随机森林	结合多个模型的预测结果,提高方案设计参数的准确性

知识图谱和机器学习本质上都是知识的存储和表达形式。知识图谱的优势在于通过业务知识图谱化建立知识体系结构,形成的知识数据关系更准确,有良好的可解释性;机器学习的优势在于通过算法组合构建应用场景算法模型,显现预测、推荐、问答等涌现能力,适用范围更广。将知识图谱与机器学习相互匹配使用可更好地发挥两种技术路线优势,解决更多的应用场景问题,提高机器学习模型的准确率。尤其对于要求准确性较高的油气田地面方案、油气生产问题,采用知识图谱为机器学习模型提供数据、约束内容范围,以保证预测、推荐、回答内容的准确性和真实性;同时,在知识图谱构建阶段利用机器学习模型衍生出各类数据、算法加工模型,亦可提高知识图谱构建速度并降低人工工作量。因此,通过知识图谱与机器学习技术融合,构建智能算法模型,为业务应用提供智能化支持。

2　油气田地面方案智能平台构建

2.1　功能需求分析

油气田地面方案管理分为方案设计阶段和方案审查阶段,油气田地面方案管理流程见图 2。研发智能辅助方案设计模块以解决方案设计阶段查阅并核对大量的管理规定、标准、方案、案例等资料耗时费力,以及已有方案成果再利用率低的问题;研发智能辅助方案审查模块以辅助快速开展方案结构审查、经济技术指标审查等工作,亦可辅助设计人员开展自查自审,进一步提升方案质量;研发智能知识检索工具,以便高效检索油气田地面工程领域数据知识,提高工作效率。

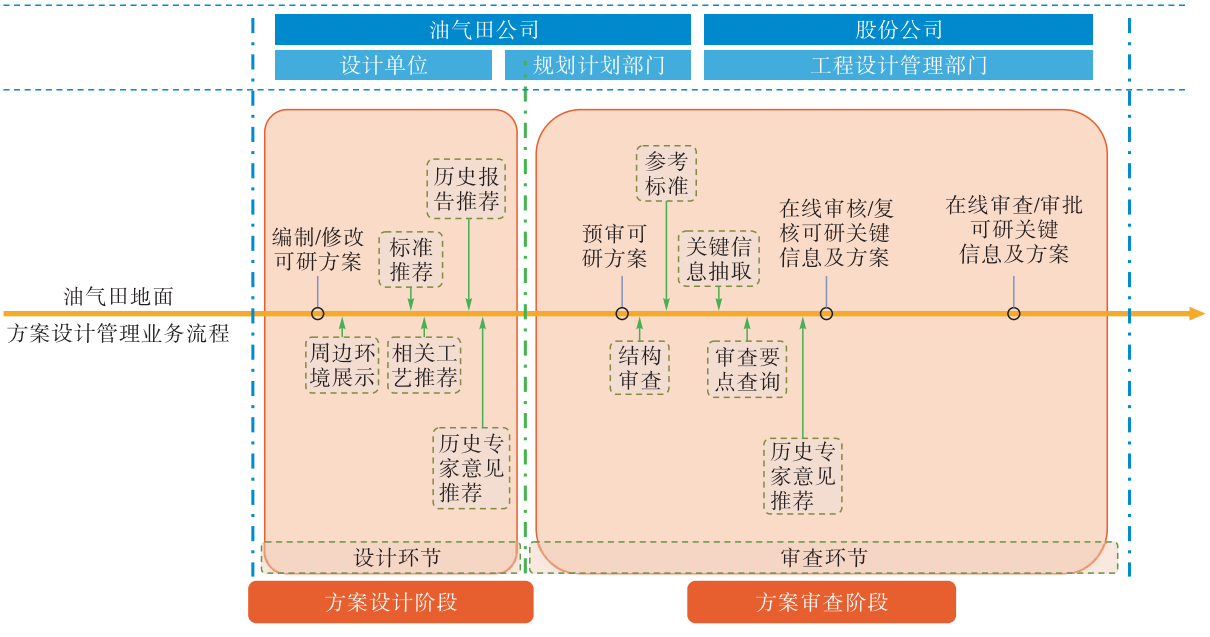


图 2　油气田地面方案管理流程图

Fig. 2　Flow chart for management of oil and gas field surface solutions

智能辅助方案设计模块需根据指定项目条件,智能推送同类项目的报告、历史专家意见等;根据项目类型、类别和专业,智能推送设计专业相关的标准规范、规定、审查要点等内容;根据油气田地面方案或初步设计的基

础情况，制定方案编制模板，自动生成对应方案初稿，提高方案编制效率和规范性。

智能辅助方案审查模块需在线自动检查方案的关键章节和内容是否完整、准确；自动抽取审查所涉及的相关标准规范、审查要点，进一步辅助审查工作提速、提效；自动抽提关键技术指标、经济指标和主要工程量，辅助审查人员分析决策；对可研报告、建设方案及初步设计文件进行深入分析，对主要工艺技术方案（包括主要设备、材料选型、主要技术经济指标等）自动关联历史优秀方案和专家审查意见，分析工艺方案是否先进、经济、合理，推荐最优方案，智能辅助方案审查工作。

智能知识检索工具应可提供油气田地面工程基础信息和生产数据的一站式检索，分专业根据方案文档类型提供非结构化文档的分类检索，结合用户个性化需求，提供全库检索和分类检索等灵活多样的检索方式，实现油气田地面工程领域知识的高效检索。

2.2 总体架构

油气田地面方案智能平台总体架构见图 3，基础设施层包括计算服务、存储服务、网络服务及安全服务资源；数据层包括标准规范、审查要点、可研/ 初设、专家意见、批复文件等非结构化资料，同时，共享油气水井生产数据管理系统（A2）、中国石油地理信息系统（A4）、采油与地面工程运行管理系统（A5）、油气生产物联网系统（A11）等结构化数据资源；知识分析层包括数据预处理、知识图谱构建管理、知识标注与抽提、人工智能计算、人工智能模型管理等知识分析技术；智能应用层包括支撑业务场景的各智能应用。同时，通过项目控制、单位控制等方式细化访问权限，以保证数据合规、安全应用[18-20]。

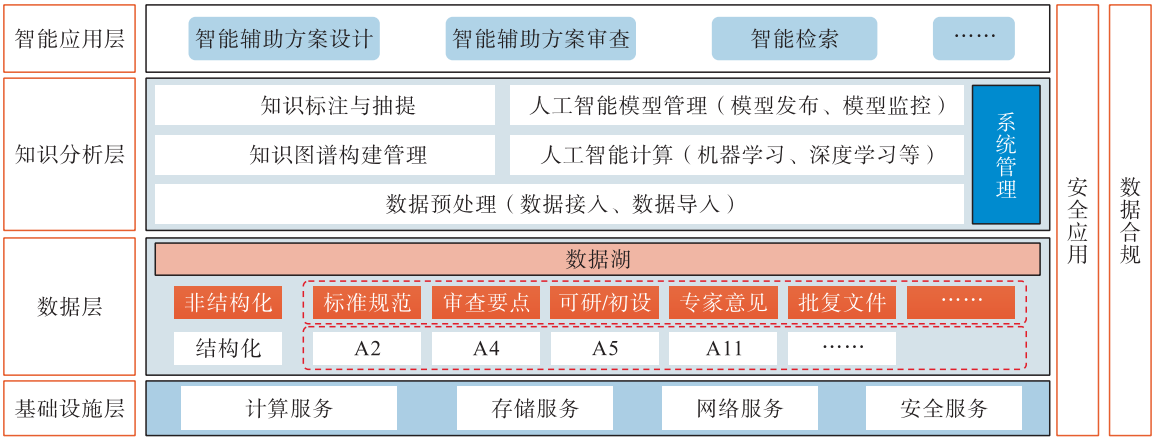


图 3 油气田地面方案智能平台总体架构图

Fig. 3 Overall architecture diagram of intelligent support platform for oil and gas field surface solutions

2.3 功能设计与实现

油气田地面方案智能平台基于大数据、人工智能、知识图谱等技术，建立知识分析平台，实现知识标注与抽提、知识体系展示、智能模型和智能算法的在线管理；以油气田地面工程知识体系为基础，构建智能辅助设计、智能辅助审查、智能检索应用场景，支撑油气田地面方案的智能辅助设计、审查工作。油气田地面方案智能平台功能框架见图 4。

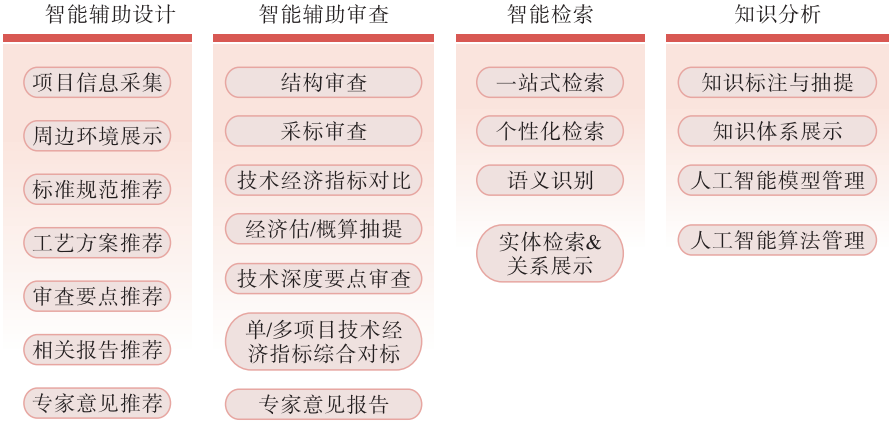


图 4 油气田地面方案智能平台功能框架图

Fig. 4 Functional framework diagram of intelligent support platform for oil and gas field surface solutions

2.3.1　智能辅助方案设计模块

通过智能辅助方案设计模块录入项目名称、类型、性质、建设单位及设计专业等信息，上传区块产能建设、老区负荷能力、站场生产运行现状等相关资料，自动提取关键数据、指标，实现辅助方案设计推荐工作。

1）周边环境展示。基于 A4、A5 系统，在编制可研报告、方案、初步设计文件时，输入项目位置即可智能展示相关区域内的区块、井、站、管道、周边设施、地形地貌等信息。便于设计人员对周边区域的井、站、管道的位置、负荷情况进行核实，并基于线性回归算法、决策树模型、深度学习算法构建知识推荐模型，智能推荐相关区域内的历史可研报告、方案、初步设计、专家意见等文件。

2）标准规范推荐。根据项目类型、专业类型、提高采收率方式等关键信息，基于决策树模型、深度学习算法构建知识推荐模型，智能推荐设计专业类型所涉及的相关标准规范。同时，支持标准规范的全文在线查阅。

3）工艺方案推荐。设计人员编制可研、方案、初设时，智能辅助设计模块根据项目类型、项目类别、专业类型、提高采收率方式，及区块产能建设相关资料中的关键指标，基于决策树模型、深度学习算法构建知识推荐模型，叠加 K 均值聚类、随机森林算法，智能推荐相关多种工艺方案，供设计人员做方案对比分析及优化。

4）审查要点推荐。结合油气田地面工程各专业审查要点内容，利用知识图谱平台对各专业审查要点内容进行分类分解标注，并推荐设计专业相关的审查要点，辅助设计人员开展方案编制工作。

5）相关报告推荐。根据各类工程项目画像，基于决策树模型、深度学习算法构建知识推荐模型，根据设计单位、产能建设资料中的相关工艺，推荐与待编制方案项目类似项目的历史报告，推荐结果以列表方式展现，支持报告名称、项目名称、项目类型、项目类别、业务对象类型、设计单位、建设单位等信息检索。

6）专家意见推荐。根据各类工程项目画像，基于决策树模型、深度学习算法构建知识推荐模型，根据设计专业分类自动推送类似项目的历史专家意见，辅助设计人员参考和自查。

2.3.2　智能辅助方案审查模块

智能辅助方案审查模块可根据待审查项目的关键信息自动推送审查结果，辅助检查方案的关键章节和内容是否完整、准确；自动抽取推送审查专业所涉及的相关标准规范、审查要点；自动抽提项目报告文件中的关键技术指标、经济指标和主要工程量，推动对比分析结果，辅助审查专家提出审查意见。

1）结构审查。自动将审查专家上传的可研报告、建设方案、初步设计文件与相关编制规定进行对比，自动判断文档结构、章节内容是否存在缺失的情况，如有不符合或缺失的章节，则在功能界面右侧进行逐项提示，供审查专家参考，以提高可研报告或初步设计的审查效率和质量。

2）采标审查。以各专业的标准规范文件为数据基础，基于决策树模型、深度学习算法构建知识推荐模型，根据智能匹配规则，自动判断是否采用现行的标准规范，并智能推荐审查专业所涉及的相关标准规范内容。

3）技术经济指标对比。根据方案报告的建设规模、井及站场类型和数量、投资效益等关键技术经济指标数据，基于线性回归算法、决策树模型、深度学习算法、循环神经网络模型算法、随机森林算法构建知识推荐模型，与同类项目相关指标进行对比，提升项目的审查深度和技术性。

4）经济估/ 概算抽提。根据方案报告内容对经济估/ 概算关键数据进行抽提展示。智能抽提可研报告、建设方案、初步设计文件中投资估/ 概算章节和关键经济技术指标数据及各专业主要工程量，辅助经济评价审查。

5）技术深度要点审查。结合油气田地面工程各专业审查要点、深度审查和技术审查内容，基于知识图谱及线性回归算法、决策树模型、深度学习算法构建知识推荐模型，自动区分待审专业，自由匹配相关专业工艺的审查要点知识，并推送项目方案技术深度的合理性建议。

6）单/ 多项目技术经济指标综合对标。针对单项目不同阶段可研报告、初设文件中设计规模、井站数量、占地面积、单位投资及项目投资等技术经济指标的一致性分析；针对同类不同工程项目间设计规模、井站数量、占地面积、单位投资及项目投资等技术经济指标的合理性分析。

7）专家意见报告。根据各类工程项目画像，基于决策树、深度学习算法构建知识推荐模型，为审查专业自动推送类似项目的历史专家意见，辅助设计人员或审查专家开展自查或逐级专业审查工作，并结合本次审查意见形成专家意见报告。

2.3.3　智能检索模块

智能检索支持一站式检索、个性化检索、语义识别、实体检索与关系展示等检索方式，打造油气田地面工程专属“石油百科”，实现地面工程领域知识的高效检索，大幅减少设计人员或审查专家收集查找资料的时间。

1）一站式检索集合地面工程井、站、管道、设备等基础信息和生产数据，及可研报告、方案设计和初步设计、专家意见、审查要点、设计常见问题、标准规范等非结构化知识成果，打造一站式检索引擎。

2)个性化检索支持用户根据个性化需要,自定义设置个人默认检索“自画像”;支持全库检索和分类检索,检索方式支持精准检索、模糊检索、结果中检索以及多维度组合条件检索。

3)语义识别自动识别用户检索意图,基于知识图谱技术,直接回答答案或对比“石油百科”数据、词条释义的文本相似性,进一步显示词条释义的内容。

4)实体检索与关系展示,支持从知识图谱中提取实体属性信息,以图的方式直观显示知识间的层次联系。

3 应用效果

通过组织 8 家设计院选取 20 余项油气田地面工程建设项目的试用与验证,尤其通过对北一区断西东块二类抗盐聚合物产能建设项目方案和龙西地区塔 21-4 区块产能建设方案的试用证明,油气田地面方案智能平台能够满足设计人员知识检索、知识推送与方案自查的需求;智能辅助审查模块可自动针对方案文档结构的完整度推送审查建议结果,并提醒重点检查项,可逐一列出方案应参考的标准规范、审查要点信息,自动检查经济估算与工程量是否一致,同时,自动与同类型方案的技术经济指标值进行对比,辅助项目技术经济指标的合理调整与优化;智能辅助设计模块可为设计人员提供项目地理位置、参考的专业标准规范、参考的相似项目工艺比选方案和成果篇章,以及历史相似项目的专家意见和审查要点等资料,可节约资料检索耗时,实现“一键即得”,提升自查自审质量、有效减少项目多轮审查频次,提高设计、审查工作效率超 50% ,有效提高方案设计审查工作质效。

4 结论

油气田地面方案智能平台的研发与应用可有效提升方案设计审查工作效率和质量,根据本文的探索与实践,可知智能化功能的应用效果主要依赖于专业领域知识图谱体系和机器学习模型的训练效果,需要有清晰的场景设计、构建合理的专业领域知识图谱体系,可优先从小应用场景需求出发,按照业务领域、专业用户要求、智能应用需求、业务功能、算法模型、图谱关系、实体数据支撑等逐步依次开展。

目前,油气能源领域应用的人工智能技术主要包括语音语义识别、图像识别、机器学习、知识图谱、数字孪生等。人工智能技术迅猛发展,将生成式人工智能带入各种生活场景,进一步开启并推动生成式人工智能技术在油气能源领域的研究和应用,大模型通过预训练在大型文本语料库上学习到的语言模式来自主生成自然语言文本,可进一步弥补决策式人工智能技术难以在无标准模版的前提下自主编制方案并择优推荐技术的缺陷。

参考文献:

[1] 汤 林,云 庆.油气田地面生产系统提质增效助力上游业务高质量发展[J].油气田地面工程,2019,38(1):1-6.
TANG Lin, YUN Qing. Quality improvement and efficiency increase of oil and gas field surface production system promotes high quality development of upstream business [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38 (1): 1-6.

[2] 宋 旭,赵雪峰,李宏斌,等.油气田地面工程智能化建设探索[J].油气田地面工程,2021,40(7):1-5.
SONG Xu, ZHAO Xuefeng, LI Hongbin, et al. Exploration on intelligent construction of oil and gas field surface engineering [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2021, 40 (7): 1-5.

[3] 王同良.油气行业数字化转型实践与思考[J].石油科技论坛,2020,39(1):29-33.
WANG Tongliang. Practice and thinking of oil and gas industrial digitalization transformation [J]. Oil Forum, 2020, 39 (1): 29-33.

[4] 梅 刚.油气田智能化建设初步构想[J].世界石油工业,2019,26(4):48-53.
MEI Gang. Preliminary conception of oil and gas field intelligent construction [J]. World Petroleum Industry, 2019, 26 (4): 48-53.

[5] 刘志忠,刘晓垒.油田智能化建设的构想与实践[J].信息系统工程,2020(8):128-129.
LIU Zhizhong, LIU Xiaolei. Conception and practice of oilfield intelligent construction [J]. China CIO News, 2020 (8): 128-129.

[6] 罗 娟,张 钰.油气田开发中大数据及人工智能的应用[J].中国管理信息化,2021,24(24):108-109.
LUO Juan, ZHANG Yu. Application of big data and artificial intelligence in oil and gas field development [J]. China Management Informationization, 2021, 24 (24): 108-109.

[7] 陈文静,孙远灿,牛鑫科.大数据时代下人工智能的应用[J].无线互联科技,2022(4):74-75.
CHEN Wenjing, SUN Yuancan, NIU Xinke. Application on artificial intelligence in the big data era [J]. Wireless Internet Technology, 2022 (4): 74-75.

[8] 赵大伟,杨 帆,刘忠宇.采油厂地面工程智能化建设构想[J].油气田地面工程,2020,39(9):75-80.
ZHAO Dawei, YANG Fan, LIU Zhongyu. Ideas of intelligent construction for the surface engineering of oil production plant [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2020, 39 (9): 75-80.

[9] 匡立春,刘 合,任义丽,等.人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J].石油勘探与开发,2021,48

(1):1-11.
KUANG Lichun, LIU He, REN Yili, et al. Application status and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48 (1): 1-11.

[10] 朱天寿,谭中国,吕永杰,等.长庆油气田地面工程数字化建设关键技术[J].石油规划设计,2013,24(1):19-23.
ZHU Tianshou, TAN Zhongguo, LYU Yongjie, et al. Key technologies for digital construction of surface engineering in Changqing oil and gas field [J]. Petroleum Planning and Design, 2013, 24 (1): 19-23.

[11] 李婧璇.基于知识图谱技术的油水井生产信息图谱构建方法[J].中国管理信息化,2022,25(12):124-126.
LI Jingxuan. Method of constructing oil and water well production information atlas based on knowledge atlas technology [J]. China Management Informationization, 2022, 25 (12): 124-126.

[12] 陆　枫.基于 Neo4j 的人员关系知识图谱构建及应用[J].软件工程,2022,25(9):5-8.
LU Feng. Construction and application of personnel relationship knowledge graph based on Neo4j [J]. Software Engineering, 2022, 25 (9): 5-8.

[13] 胡吉颖,谢　靖,钱　力,等.基于知识图谱的科技大数据知识发现平台建设[J].数据分析与知识发现,2019,3(1):55-62.
HU Jiying, XIE Jing, QIAN Li, et al. Construction of technology big data knowledge discovery platform based on knowledge graph [J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2019, 3 (1): 55-62.

[14] 于升峰.面向科技智库的知识图谱系统构建[J].智库理论与实践,2021,6(1):56-64.
YU Shengfeng. Construction of mapping knowledge system for science and technology think tanks [J]. Think Tank: Theory & Practice, 2021, 6 (1): 56-64.

[15] 赵京胜,肖　娜,高　翔.基于自然语言处理的能源领域知识图谱[J].信息技术与信息化,2018(5):55-58.
ZHAO Jingsheng, XIAO Na, GAO Xiang. Energy domain knowledge graph based on natural language processing [J]. Information Technology and Informatization, 2018 (5): 55-58.

[16] 吕昊远,俞　璐,周星宇,等.半监督深度学习图像分类方法研究综述[J].计算机科学与探索,2021,15(6):1-12.
LYU Haoyuan, YU Lu, ZHOU Xingyu, et al. Review of semi-supervised deep learning image classification methods [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15 (6): 1-12.

[17] 刘　全,翟建伟,章宗长,等.深度强化学习综述[J].计算机学报,2017,40(1):1-25.
LIU Quan, ZHAI Jianwei, ZHANG Zongchang, et al. A survey on deep reinforcement learning [J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40 (1): 1-25.

[18] 刘　伟,闫　娜.人工智能在石油工程领域应用及影响[J].石油科技论坛,2018,37(4):32-40.
LIU Wei, YAN Na. Application and influence of artificial intelligence in petroleum engineering area [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2018, 37 (4): 32-40.

[19] 杨　勇.胜利油田勘探开发大数据及人工智能技术应用进展[J].油气地质与采收率,2022,29(1):1-10.
YANG Yong. Application progress of big data & AI technologies in exploration and development of Shengli Oil-field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29 (1): 1-10.

[20] 杜金虎,时付更,张仲宏,等.中国石油勘探开发梦想云研究与实践[J].中国石油勘探,2020,25(1):58-66.
DU Jinhu, SHI Fugeng, ZHANG Zhonghong, et al. Research and practice of dream cloud for exploration and development of PetroChina [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (1): 58-66.