

AI 驱动的港口智能设计平台构建与应用研究

黄睿奕¹, 陶然^{2,3*}

(1. 中国交通信息科技集团有限公司, 北京 101399; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 中国交通建设股份有限公司, 北京 100088)

摘 要: 针对港口工程设计面临数据碎片化、知识复用困难及专业工具协同差等障碍, 探索以人工智能驱动设计流程再造的技术路径, 构建了一套覆盖总体布置、工艺、结构三大专业的智能设计系统。构建融合实例方案、自然条件与规范规则的三维标准化数据底座, 利用定制化 OCR、知识图谱和向量数据库实现多源异构知识的语义化治理。搭建以大语言模型领域微调与 JSON Schema 约束为语义理解引擎、以检索增强生成架构支撑知识问答、集成连续梁有限元求解器与参数化模式化钢筋建模引擎为核心算法的 AI 通用基础底座。经项目应用验证, 总体专业资料检索与主尺度计算耗时分别缩短 50% 和 60% 以上; 工艺专业通过能力计算耗时缩短 90%; 结构专业配筋图绘制耗时缩短 70%, 单段设计周期从 15 d 压缩至 5 d。综合设计成本降低 20%, 设计周期缩短 30%。以标准化数据底座为基础、领域知识内嵌的多算法协同为核心、人机协同交互为范式的技术方案, 是 AI 深度赋能港口工程设计的有效路径, 可为水运行业数智化转型提供可复制的系统参考。

关键词: 智慧港口; 人工智能; 智能设计; 知识库; 港口工程

中图分类号: U6; U691; TP27 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-7874(2026)09-0043-09

doi: 10.7640/zggwjs202609007

Construction and application of AI-driven intelligent port design platform

Huang Ruiyi¹, Tao Ran^{2,3*}

(1. China Communication Information & Technology Group Co., Ltd., Beijing 101399, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 3. China Communications Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: To address fragmented data, difficult knowledge reuse, and poor software interoperability in port engineering design, an AI-driven approach to design workflow re-engineering was explored. A set of intelligent design systems covering overall layout, process, and structure has been constructed. A 3D standardized data foundation integrating project case, natural condition, and regulatory rule databases was built. Multi-source heterogeneous design knowledge was semanticized via customized OCR, knowledge graphs, and vector databases. A general-purpose AI infrastructure was built, featuring domain-fine-tuned large language models with JSON Schema constraints for semantic understanding, a retrieval-augmented generation architecture for standards-based question answering, and an embedded continuous beam finite element solver with a parametric pattern-based rebar modeling engine as core algorithms. After the project application verification, time for data retrieval and principal dimension calculation in general layout was reduced by over 50% and 60%; throughput capacity calculation time in handling technology was reduced by 90%; rebar detailing drawing time in structural design was reduced by 70%, compressing

收稿日期: 2026-03-09 修回日期: 2026-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFB2604900)

作者简介: 黄睿奕 (1988—), 女, 湖南株洲人, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程新技术研究与应用。

*通讯作者: 陶然, E-mail: taoran1@cccltd.cn

the single-segment structural design cycle from 15 days to 5 days. Overall design costs decreased by 20%, with a 30% cycle reduction. The paradigm—built upon a standardized data foundation, driven by multi-algorithm collaboration with embedded domain knowledge, and realized through human-machine collaborative interaction—offers an effective pathway for empowering port engineering design with AI and a replicable reference for the digital and intelligent transformation of the water transport industry.

Key words: smart port; artificial intelligence; intelligent design; knowledge base; port engineering

0 引言

港口作为铁路、公路、航空和管道等多种运输方式的连接枢纽,其工程设计质量直接关系到国家综合交通运输体系的运转效率与安全韧性^[1]。智慧港口和绿色港口建设对港口工程设计提出了更高的数字化与智能化要求,推动行业加速向智慧设计方向转型^[2-3]。

近年来,BIM技术在水运工程领域的应用已取得长足进步。标准体系建设方面,交通运输部于2019年发布JTS/T 198-1—2019《水运工程信息模型应用统一标准》^[4]等系列标准,王伟正等^[5]、望毅等^[6]从模型体系层级架构、分类编码、协同方式等方面为行业BIM应用提供规范性框架。协同设计领域,杨彪等^[7]基于Vault平台实现Civil 3D多专业“零件级”数据协同,芦志强等^[8]、邹艳春等^[9]分别在高桩码头和LNG码头工程中探索了设计施工一体化的BIM应用模式。三维地质建模方面,王帅等^[10]开发了MR-Geo系统实现了岩土属性信息的地质模型生成与出图,杨锡镠等^[11]研发了岩土勘察计算机辅助系统。结构设计智能化方面,崔冠辰等^[12]实现了LNG码头BIM正向设计,李娇娇等^[13]提出了可封装配筋模式的钢筋语言实现参数化三维钢筋快速建模,陈青红等^[14]通过建模规则标准化和接口开发实现了BIM模型到有限元计算模型的数据自动传递,范文彰等^[15]基于Dynamo开发了装配式高桩码头设计计算一体化插件。工程数字化管理方面,黄庆等^[16]提出基于BIM云平台的计量支付方法,曾昱等^[17]搭建了基于数据集成技术的航道工程预警平台,钱原铭等^[18]研发了自主可控的航道设计BIM软件。

从智能化设计角度审视,现有研究仍存在以下不足:

- 1) BIM应用多集中在三维可视化、协同设计和碰撞检查等基础层面,方案生成、参数决策、结构计算与图纸绘制仍高度依赖人工经验;
- 2) 缺乏系统化的设计知识库和高质量训练

数据集,既有工程经验无法被AI模型有效学习和复用;

- 3) 总体布置、工艺、结构等核心专业之间缺乏数据驱动的智能协同机制,尚未打通从设计意图输入到设计成果输出的端到端AI流水线。

针对上述问题,本文提出并构建了一个以人工智能技术为驱动力的港口智能设计整体解决方案,核心内容包括:构建涵盖实例方案、自然条件和规范规则的三维标准化数据底座;搭建具备语义意图提取、智能检索、工具驱动等能力的AI通用基础底座;开发覆盖总体布置、工艺、结构三大专业的多智能体协同设计平台。本文将系统阐述平台从数据治理、算法构建到工程集成的完整技术路径,并结合实际工程进行应用成效分析。

1 港口工程智能设计概况

港口工程设计是一个涉及总体布置、装卸工艺、水工结构、给排水、供配电、建筑、暖通、技术经济等多专业协同的复杂系统工程。总体、工艺和结构是主导专业,其设计流程呈现典型的串行耦合特征:总体专业确定平面布局、泊位尺度和水域主尺度等总体方案;工艺专业在此基础上进行装卸设备选型、工艺流程设计和通过能力核算;结构专业则依据总体和工艺的输出成果,进行码头结构选型、构件设计和施工图绘制。

综合以上分析,港口工程智能设计的核心难题可凝练为3个层面:

- 1) 数据层面——如何在训练样本有限的条件下,有效实现设计知识的语义化和结构化治理;
- 2) 算法层面——如何将港口设计的专业领域知识精确嵌入AI模型和求解算法中;
- 3) 集成层面——如何在打通多专业数据壁垒的前提下,将独立的AI能力点集成为覆盖设计全流程的协同平台。

2 功能架构

针对上述3个层面的核心难题,港口AI智能设计平台采用“三库五力三应用”的总体架构,见

图 1。该架构自下而上分为数据底座层(三库)、AI 通用基础层(五力)和智能设计应用层(三应用)

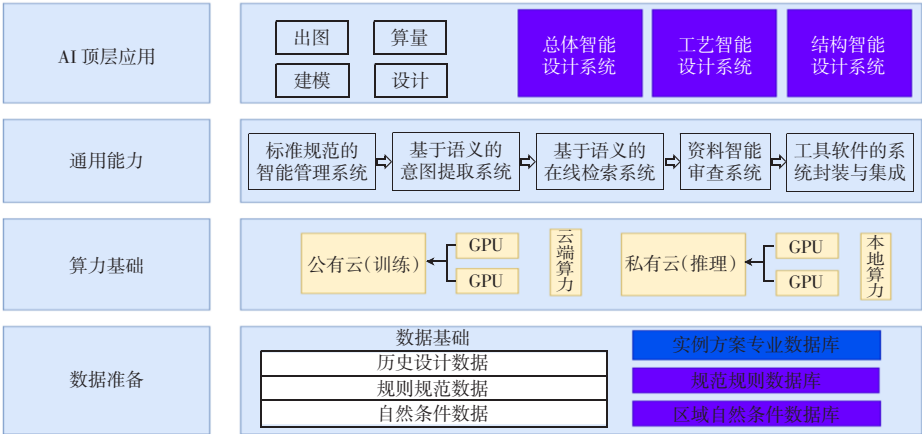


图 1 港口 AI 智能设计平台架构图

Fig. 1 Architecture diagram of AI intelligent design platform for port

2.1 数据底座层

数据底座是平台的基石,由三大专业数据库构成,通过标准化的整编流程实现原始数据到高质量数字资产的转化。

2.1.1 实例方案数据库

实例方案数据库将 59 个典型码头项目按照总体、工艺、结构三大专业整编为“一文一图”的标准格式。“文”是该专业重点语义的结构化表达,包含项目名称、地理位置(按国家-省-市-港区四级编码)、项目阶段、港口类型、码头货种、泊位吨级、结构类型与形式等标准字段;“图”是代表性设计图纸,包括总平面布置图、工艺流程图和典型断面图。数据库覆盖了集装箱、油品、散货等各类常见码头类型,以及高桩、板桩、重力式等各类常见结构类型,为 AI 模型提供了多样化的学习样本。

2.1.2 自然条件数据库

自然条件数据库将全国范围内 23 个主要港区的地形、水文、气象、地质等多维数据,按照统一的分类标签体系进行结构化存储。数据字段涵盖潮汐类型及特征潮位值(极端高水位、设计高水位、设计低水位、极端低水位)、波浪要素(常浪向、强浪向及其出现频率、波高与周期)、风要素(常风向、强风向及风玫瑰图)、泥沙条件、地震烈度等设计所需的关键自然参数。该数据库与 BIM 三维地质模型融合,可支撑设计条件的自动提取和空间分析。

2.1.3 规范规则数据库

规范规则数据库收录港工专业常用规范 135 本,涵盖国家标准、行业标准和团体标准,并通过知识抽取技术将规范中的约束规则转化为可执行的逻辑表达式。数据库还包含主要厂家(上海振华、青岛海西、大连重工等)的港机设备技术参数(整机重量、额定起重量、轮压、轨距等)、各类设计船型尺度表以及疏浚施工船舶资料,为工艺设备选型和结构荷载计算提供了完整的基础数据支撑。

2.1.4 数据库的动态更新机制

为确保数据的时效性和覆盖面,数据库采用“存量集中突击录入+增量依托档案系统持续补充”的双轨更新机制。对于已竣工的历史项目,组织专项团队进行集中标准化整编入库;对于新立项及在建项目,在设计流程中增设标准化数据提交节点,要求各专业在方案评审、施工图交付等关键里程碑按“一文一图”格式提交成果至实例方案数据库。规范规则数据库则通过定期跟踪行业标准发布动态,实现新增规范及修订条文的实时更新。自然条件数据库对接国家海洋环境监测网络,实现水文气象数据的定期同步。

2.1.5 数据底座与 AI 能力的双向交互机制

三大数据库并非孤立存储的数据仓库,而是通过标准化的数据接口与上层 AI 功能模块形成紧密的映射与驱动关系,其数据流向与功能支撑逻辑见表 1。

表 1 数据底座与 AI 能力的双向交互机制

Table 1 Bidirectional interaction mechanism between data foundation and AI capabilities

数据底座	数据流向	支撑的 AI 核心功能
实例方案数据库	提供结构化案例特征参数	1) 基于语义的在线检索(相似案例匹配); 2) 资料智能生成(设计模板填充与参考)
规范规则数据库	提供可计算的设计约束	1) 标准规范的智能管理(语义化规范问答); 2) 资料智能审查(合规性自动校验)
自然条件数据库	提供项目所在地环境参数	1) 基于语义的意图提取(设计条件补全); 2) 工具软件的数据驱动(自动提取计算边界条件)

3 类交互机制的实现路径如下:

1) 实例方案数据库→在线检索与资料生成。当用户在平台输入拟建项目的基本信息(如“天津港, 10 万吨级, 集装箱码头”)后, 基于语义的在线检索模块将输入文本向量化, 在实例方案数据库的向量索引中快速匹配语义最近邻的历史案例, 为总体、工艺和结构三大专业提供设计模板推荐。资料智能生成模块则从匹配到的历史案例中提取设计说明的结构框架与典型参数, 辅助自动生成新项目的设计文档。

2) 规范规则数据库→标准规范管理与资料智能审查。规范规则数据库通过知识抽取技术将 135 本港工规范的约束规则转化为可计算的结构化知识三元组。标准规范的智能管理模块基于该数据库构建知识图谱, 为用户提供带溯源链接的规范智能问答服务。资料智能审查模块则调用规范规则数据库中的约束规则集, 对设计图纸和文档进行逐条合规性比对, 自动发现不符合规范的设计元素并输出修改建议。

3) 自然条件数据库→意图提取与工具软件驱动。当用户输入设计意图(如“设计天津港某散货码头”)时, 基于语义的意图提取模块解析出项目位置信息后, 自动从自然条件数据库中调取该港区的水文、气象、地质等设计条件, 补全至结构化的设计参数集。随后, 工具软件的系统集成与驱动模块从数据库中获取设计水位、波浪要素等关键参数, 作为码头前沿高程、设计水深、泊位长度等主尺度计算的边界条件, 自动传递至下游计算软件完成设计工作。

2.2 AI 通用基础层

AI 通用基础层是平台的中枢引擎, 通过五大核心功能模块对下连接数据底座、对上赋能设计应用。

各模块的功能定位与技术实现如下所述。

2.2.1 标准规范智能管理

该模块的核心功能是将标准规范中复杂的约束规则进行语义化提取, 对实例方案中的图纸数据通过定制化 OCR 识别进行数字化转化, 构建规范规则向量知识库及知识图谱。其技术实现包括 2 个层面:

1) 对规范文本进行知识抽取, 采用 BERT-BiLSTM-CRF 序列标注模型对“结构构件”“设计参数”“荷载类型”“约束条件”4 类实体进行自动标注, 再通过基于实体位置编码的注意力关系分类模型抽取实体间的约束关系三元组;

2) 对历史图纸数据进行定制化 OCR 识别, 基于港口设计图纸的特征(规范字体、工程符号、布局规律)进行领域适应性训练。该模块的输出为结构化的约束规则集, 供在线检索和资料审查模块调用。

2.2.2 基于语义的意图提取

该模块以领域微调后的大语言模型为推理引擎, 对用户输入的自然语言指令进行语义解析。技术实现路径为:

1) 对开源大语言模型基座进行港口设计领域的指令微调, 训练样本涵盖方案生成、参数查询、计算驱动、规范问答等多类设计情境, 采用 LoRA 低秩适配方法在仅更新约 0.1% 参数量的前提下实现领域适应性训练;

2) 为每类设计意图预定义严格的 JSON Schema 约束, 确保 LLM 输出的结构化参数可以被下游软件直接解析。通过该机制, 系统可以将“设计 1 个 10 万吨级集装箱码头, 考虑天津港水文条件”等自然语言表述解析为包含意图类别和槽位参数的结构化 JSON 对象, 驱动后续的模板匹配和自动计算。

2.2.3 基于语义的在线检索

该模块利用嵌入模型将文本资料和图纸特征

转化为统一的高维向量表示, 存入基于 HNSW 索引的向量数据库。当用户进行查询时, 系统对查询语句同步向量化, 在向量空间中快速定位语义最相似的历史案例或规范条款, 实现“用文件搜文件”和“用文字搜图纸”的跨模态模糊检索。HNSW 算法通过构建多层图索引结构, 将高维空间中的近似最近邻搜索复杂度从 $O(N)$ 降至 $O(\log N)$, 确保在大规模数据集上实现毫秒级检索响应。

2.2.4 资料智能审查

该模块读取设计资料并抽取关键参数信息, 依据规范规则数据库中已语义化的约束条件, 对设计图纸和方案进行一致性审核和合规校验。审查功能的核心实现路径是将规范中的构造要求显式化为可执行的 IF-THEN 规则。审查内容还包括图纸标注与模型属性的一致性检验、设计说明中的参数与计算书数值的交叉验证等。审查结果以批注形式定位至图纸和文档的相应位置, 并附带修改建议。

2.2.5 工具软件的系统集成与驱动

该模块作为连接 AI 语义理解能力与传统设计工具的执行枢纽, 能够实现 2 部分功能: 1) 对港口设计中涉及的弹性地基梁求解器、配筋计算模块、BIM 建模软件等工具进行系统封装, 形成标准化的调用接口; 2) 利用上游语义意图提取模块输出的结构化参数, 通过脚本驱动或 API 调用等方式自动化执行下游软件的计算、建模和出图等功能。

该模块采用“结构化参数传递+脚本化功能调用”的技术路径, 打通从自然语言指令到软件自动执行的完整链路。

技术实现示例包括: 将弹性地基梁求解器、配筋计算模块等自研计算程序封装为 Python 函数, 定义标准化的 JSON 输入参数接口和输出结果格式, 由上游模块传入参数后自动完成计算并返回结果至平台; 对于 Revit、AutoCAD 等软件提供 COM 自动化接口的商用设计软件, 系统通过调用 Revit API 的 IExternalCommand 接口实现程序自动化驱动, 完成梁构件建模和出图等操作, 替代人工重复性软件操作。

5 个模块之间存在清晰的数据依赖与调用关系: 标准规范智能管理模块输出的结构化约束规则集, 是语义在线检索和资料智能审查模块的知识来源; 基于语义的意图提取模块输出的结构化

设计参数, 是工具软件驱动模块的功能执行依据, 也是资料智能审查模块的校验对象; 基于语义的在线检索模块可为意图提取模块提供上下文参考信息, 辅助意图消歧与参数补全。五大模块通过上述数据流关系构成了有机协同的 AI 基础能力体系。

2.3 智能设计应用层

港口工程 AI 智能设计平台分为“智慧方案”和“自动设计”2 个阶段, 二者之间通过标准化的共享参数化模板库实现数据的无缝传递与协同。

智慧方案阶段的核心任务是生成码头结构的初始设计方案。系统根据用户输入的项目位置、项目类型、项目等级等基本信息, 从自然条件数据库中快速匹配设计条件, 从实例方案数据库中检索相似历史项目的信息, 通过模糊匹配算法推荐初始的平面、工艺和结构设计方案。设计人员从推荐的方案中进行选择确认后, 系统再自动从设计模板库中调用对应的平面总体布置模板、工艺流程模板和码头断面模板, 将初始方案的关键参数进行匹配替换, 最终生成一个标准化的方案数据包。

自动设计阶段的核心任务是在智慧方案输出的初始方案的基础上进行核算与深化, 生成满足各项规范要求的详细设计成果。该阶段接收智慧方案阶段输出的方案数据包, 从中提取所需的输入参数, 匹配结构类型和工艺设备等信息, 调用规范规则数据库确定设计荷载和验算内容。设计人员确认后, 系统通过工具软件驱动模块自动调用相应的计算软件和配筋模式文件, 完成内力计算、配筋设计、三维钢筋模型创建和配筋图纸生成等工作。

共享参数化模板库是衔接 2 个阶段的数据传递枢纽。方案数据包采用结构化的 JSON 格式, 包含各项对应核心信息。

1) 平面设计参数: 项目坐标基准、泊位吨级、设计船型主尺度、泊位长度、岸线长度、码头前沿设计顶高程、码头前沿设计底标高、停泊水域宽度等;

2) 工艺设计参数: 装卸工艺方案类型、主要工艺设备选型及配置表、设计年吞吐量、通过能力计算结果、堆场容量等;

3) 结构设计参数: 码头结构类型(高桩/重力式/板桩等)、结构形式、排架间距、桩基类型及

规格、断面主要尺寸等。

下游各专业模块通过解析该 JSON 数据包,自动获取各自所需的输入参数,确保专业间数据的一致性和可追溯性,实现了从方案推荐到详细设计的全流程数据贯通。

3 技术实现路径

3.1 多源设计数据的语义化治理技术

1) 定制化工程图纸 OCR 识别

港口设计图纸具有标注字体相对规范、工程符号体系统一、图面布局规律性强的特点。基于这些领域特征,在通用 OCR 框架基础上进行了定制化训练。技术流程采用“检测-识别”两阶段架构:首先使用改进的 EAST 文本检测器定位图纸中所有文字和工程符号区域,然后通过领域微调的 CRNN+Attention 识别网络将像素区域转化为可编辑的文本和数值信息。训练数据来源于历年典型项目图纸的标注样本,特别加强了对标高符号(∇)、坡度符号、剖切符号、焊缝符号等工程专用标识的识别能力。

2) 规范文本的知识抽取与图谱构建

对 135 本港工规范的文本内容进行结构化知识抽取是规则数据库构建的关键环节。技术路径采用“实体识别—关系抽取—图谱存储”流水线:在实体识别阶段,使用 BERT-BiLSTM-CRF 序列标注模型,对规范文本中的结构构件(横梁、桩帽、面板等)、设计参数(保护层厚度、配筋率等)、荷载类型(门机荷载、均布荷载等)、约束条件(不应小于、应大于等)4 类实体进行自动标注;在关系抽取阶段,采用基于实体位置编码的注意力关系分类模型,识别实体之间的约束关系三元组,如“受力主筋-保护层厚度- $\geq 50\text{ mm}$ ”(最小值约束);最终,抽取出的数万条结构化关系存入图数据库,形成可查询、可推理的港口设计知识图谱。

3) 多模态向量数据库构建与索引

为实现跨模态的语义检索,各类异构数据被统一映射到高维向量空间。文本数据通过领域微调后的 Sentence-BERT 模型映射为 768 维语义向量(微调语料包含港口设计领域 10 万余句对);图纸数据通过预训练 ResNet-152 卷积神经网络提取几何特征后经全连接层降维至相同的向量维度。所有向量存入向量数据库并建立 HNSW(分层可导航小世界)索引,该算法通过构建多层图结构,将高维空间中的近似最近邻搜索复杂度从 $O(N)$ 降至

$O(\log N)$, 实现毫秒级的语义检索响应。

3.2 大模型驱动的设计意图解析技术

1) 领域指令微调与结构化输出约束

为实现对工程师自然语言指令的精准理解,项目对开源大语言模型基座(LLaMA 系列)进行港口设计领域的指令微调(Instruction Fine-tuning)。训练样本超过 1 万条,涵盖方案生成、参数查询、计算驱动、规范问答等多类设计情境,每条样本均含有人工标注的意图类别和槽位填充信息。微调采用 LoRA(Low-Rank Adaptation)低秩适配方法,在仅更新约 0.1% 参数量的前提下实现领域适应性训练。

为解决大语言模型输出格式存在不可控、无法直接驱动下游软件的问题,系统为每类设计意图预定义了严格的 JSON Schema 约束。以结构计算指令为例,Schema 定义了 beam_type、loads、crane_capacity 等必填字段及其枚举值范围,确保 LLM 输出的结构化 JSON 可被有限元求解器直接解析。经测试,在 JSON Schema 约束下输出的结构化参数解析成功率达到 97% 以上。

2) 检索增强生成 RAG 架构下的知识问答

规范问答系统采用 RAG(Retrieval-Augmented Generation)架构。离线阶段,将 135 本规范文本按“章节-段落-公式”进行分层分块,通过嵌入模型向量化后建立索引;在线阶段,用户查询经向量化后,首先在向量数据库中召回语义最相关的 Top-K 个文本块,随后将这些文本块作为上下文与查询一并送入大语言模型,由模型从中提取关键信息并生成带溯源链接的答案。该架构有效规避了大语言模型在专业领域可能产生的“幻觉”问题——所有生成内容必须基于检索到的规范原文,答案均可追溯至具体条款号和页码。

3.3 结构设计全流程自动化技术

3.3.1 基于领域规则推理的方案生成算法

高桩码头方案设计需同时满足排架间距、分段长度、悬臂尺寸、结构缝宽度等多个参数的耦合约束。项目研发了基于蒸馏搜索思想的方案生成算法:首先建立各目标参数的数学约束关系方程,将码头总长度 L 、排架间距期望值 s_0 、结构缝宽度 d 等输入参数代入约束模型;随后采用迭代蒸馏策略,逐轮排除不满足均值化要求和设计习惯的劣质解,从百万级解空间中快速筛选出综合最优解集。最后,根据断面宽度和基桩类型等输

入条件, 采用边界约束传播算法生成排架内纵梁间距和基桩布置方案。

3.3.2 内嵌连续梁有限元求解器的内力自动计算

在 Autodesk Revit 环境中集成了定制化的连续梁弹性地基求解器, 用于梁构件的内力自动化计算。求解器采用矩阵位移法, 将梁离散为 2 节点 4 自由度欧拉-伯努利梁单元, 通过组装单元刚度矩阵建立整体刚度方程:

$$\mathbf{K}\{\mathbf{d}\}=\{\mathbf{F}\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为整体刚度矩阵; $\mathbf{d}$ 为节点位移向量; $\mathbf{F}$ 为节点力向量。

求解器的核心在于荷载的自动处理和等效转化。对于作用在单元上的非节点荷载(均布力、集中力、弯矩等), 系统内嵌了基于虚功原理的等效节点力计算链。以单元内集中力 P 为例, 等效节点力计算公式为:

$$Q_i=\frac{Pb^2}{l^3}(l+2a) \quad (2)$$

式中: Q_i 为左端等效竖向剪力; P 为作用在单元上的外部集中力; a 为集中力作用点到梁左端的距离; b 为集中力作用点到梁右端的距离; l 为梁单元长度, $l=a+b$ 。

$$M_i=\frac{Pab^2}{l^2} \quad (3)$$

式中: M_i 为左端等效弯矩。

$$Q_j=\frac{Pa^2}{l^3}(l+2b) \quad (4)$$

式中: Q_j 为右端等效竖向剪力。

$$M_j=-\frac{Pa^2b}{l^2} \quad (5)$$

式中: M_j 为右端等效弯矩。

求解器按 5 跨连续梁模型计算, 均载效应采用“逐跨加载+包络求和”策略, 门机荷载按双机作业 4 种间距分别计算, 流动机械荷载考虑多种联合作业工况。最终按 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》完成承载能力极限状态和正常使用极限状态的荷载组合。求解器采用 C# 语言编写, 借助 MathNet.Numerics 库完成矩阵求逆, 在 Revit 进程内直接完成求解, 计算结果与专业结构分析软件对比误差小于 2%。与 Revit 的接口采用 Revit API (IExternalCommand 接口) 实现, 计算过程中的异常构件(如截面超出规范适用范围)由 try-catch 机制捕获并反馈至用户界面。

3.3.3 参数驱动模式化钢筋建模与自动出图

参数驱动模式化钢筋建模与自动出图系统包含两大核心引擎。

1) 模式化钢筋建模引擎

将标准化构件(横梁、纵梁、桩帽等)的钢筋配置方案编写为领域特定的“配筋模式文件”——一种参数化脚本语言, 定义每种钢筋的形状函数、定位规则和数量计算逻辑。钢筋空间位置通过构件几何参数(梁高 H 、梁宽 B 、保护层厚度 c 等)精确表达。模式文件中设置“`AiInterface`”映射字段, 建立“下层主筋直径”“箍筋间距”等自然语言术语与脚本内部变量的对应关系, 使得大语言模型从用户输入中解析出的参数值可直接驱动模式文件的变量修改。

2) 指令化自动制图引擎

将制图过程封装为可解释执行的指令集, 包括创建剖面视图、标注钢筋编号、生成钢筋材料表、设置视口比例、导出 DWG 图纸文件等标准操作。指令解释器逐条解析指令序列并通过 Revit API 完成相应操作。标注文本的自动排布采用基于碰撞检测的迭代优化算法, 避免标注重叠。

3.4 资料智能审查技术

审查功能实现路径是将规范中的构造要求显式化为可执行的 IF-THEN 规则。以高桩码头横梁为例, 构造要求“受力主筋保护层厚度不应小于 50 mm”转化为检查逻辑: IF component_type == "main_beam" AND rebar_type == "main" THEN check (cover >= 50 mm)。对于文字逻辑一致性审查, 采用跨文档实体对齐算法——从设计说明、计算书和图纸中分别抽取同名实体参数值进行交叉比对, 不一致者标记为异常。审查结果以批注形式定位至图纸和文档的相应位置, 并附修改建议。

4 应用及效果

4.1 应用概况

平台采用“云端 AI 推理+本地桌面交互”的混合部署架构。AI 底座的核心服务(大语言模型推理、向量检索、OCR 识别)部署于集团私有云 GPU 服务器集群(配备 NVIDIA A100/A800 GPU), 保障数据安全和多用户并发能力; Web 端的总体设计和工艺设计系统通过浏览器访问; 结构智能设计系统作为 Revit 插件部署于工程师本地图形工作站(配备 NVIDIA RTX A5000 专业图形卡), 通过 Revit API 实现高保真三维交互。平台已经在 6 家

设计院投入试应用,累计支撑20余个港口设计项目。

4.2 各专业应用成效

1) 总体设计

以天津港某集装箱码头工可阶段为例,设计师在平台输入项目位置、吨级和货种后,系统3 s内从59个案例中匹配出相似度最高的5个历史项目供参考。船型组合功能以“到港比例最大化”为目标穷举推荐最优方案。水域主尺度计算模块自动提取自然条件数据库中的天津港潮位数据进行计算。实测结果表明:资料查找时间缩短50%以上,水域与陆域主尺度计算时间缩短60%以上。

2) 工艺设计

系统依据设计参数自动匹配并生成多套工艺方案,推荐全套装卸设备配置表(含型号和数量),自动完成泊位年通过能力、堆场容量和地面箱位数、大门车道数3套计算,一键生成符合工可编制要求的设计说明。通过能力计算时间缩短90%,查找参考工艺流程图纸时间缩短80%,确定工艺设备时间缩短50%。

3) 结构设计

以高桩码头典型结构段为例,设计师在方案设计模块输入总长、总宽、高程等少量参数后,系统自动生成排架布置和断面方案,经确认后自动计算所有构件尺寸。在内力计算环节,以自然语言描述荷载条件(如“该梁需承受40 t 45 m 门机荷载和30 kN/m 均载”),系统自动解析荷载、建立有限元模型、输出内力包络值。出图环节仅需指定配筋要求(如“下层主筋 $\phi 25$ mm+ $\phi 22$ mm,箍筋 $\phi 14$ mm 间距250 mm”),系统在15 min内生成全套配筋图(含立面图、断面图和钢筋材料表)。实测结果表明:配筋图绘制时间缩短70%,单个结构段完整设计周期从传统15 d压缩至5 d。

4) AI 模块性能指标

意图提取准确率在典型设计指令场景下达到93%;规范问答系统(RAG 架构)回答准确率超过95%,答案可溯源率100%;定制化图纸OCR识别字符准确率超过98%,工程符号识别准确率超过95%。

4.3 综合效益

自动化设计流程减少约25%的人力投入,智能校审功能将设计常见错误率降低约15%,减少了施工阶段返工成本。综合测算,设计成本节约

20%,设计周期缩短30%。平台作为集成企业数十年设计经验的“数字知识库”,显著加速了青年设计人才的培养进程。

5 结语

1) “数据治理先行”是工程智能化不可逾越的基础步骤。高质量的结构化数据是AI模型发挥价值的决定性前提。在港口设计这类专业壁垒高、数据格式杂、训练样本少的领域,投入充分的前期资源进行专业数据的标准化整编和知识抽取,是后续所有AI功能奏效的根本保障。

2) “领域知识内嵌”是工程AI区别于通用AI的本质特征。无论排架设计的规则推理算法、连续梁求解器的荷载组合逻辑,还是配筋模式文件中的构造要求编码,均体现了对港工专业Know-How的精确算法化。脱离这些深度嵌入的领域知识,通用AI模型无法产出具有工程可行性的设计成果。

3) “人机协同”是当前工程智能化的最应用范式。坚持“智能推荐、人工确认、AI执行”的交互模式,使AI定位于超级助手角色,负责复杂计算、模式匹配和重复操作,聚焦创造性决策和专业判断,是平台能够在短期内获得一线设计人员认可并实现规模化推广的关键。该模式使AI定位于超级助手角色——负责复杂计算、模式匹配和重复操作,工程师则聚焦创造性决策和专业判断——是平台能够在短期内获得一线设计人员认可并实现规模化推广的关键。

4) 平台目前的功能覆盖仍然以总体布置、工艺、结构三大主导专业为主,港口设计全链条中的给排水、暖通、供配电、工程概预算等专业尚未纳入智能协同体系。此外,当前设计流程主要集中在前期方案和初步设计阶段,向施工图详细设计和施工阶段BIM交付的纵深延伸是下一步迭代的重点方向。未来工作将围绕“全专业覆盖”和“全周期贯通”2个维度持续深化平台的智能化能力。

参考文献:

- [1] 姜明宝. 智慧港口建设的全面系统阐释:《智慧港口设计与实践》书评[J]. 港口科技, 2024(4): 20.
Jiang M B. Comprehensive systematic exposition of smart port construction: A book review of *Design and Practice of Smart Ports* [J]. Port Science & Technology, 2024(4): 20.
- [2] 许家帅, 鲍可馨, 马瑞鑫, 等. 智慧水运发展综述与展望[J]. 水道港口, 2025, 46(1): 1-11.

- Xu J S, Bao K X, Ma R X, et al. Review and outlook on the development of smart water transport[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2025, 46(1): 1–11.
- [3] 贺林林, 彭银霞, Al-Mogahed Ahmed, 等. 智慧港口建设发展研究综述[J]. *水道港口*, 2025, 46(1): 12–20.
- He L L, Peng Y X, Al-Mogahed A, et al. Review of the construction and development of smart ports[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2025, 46(1): 12–20.
- [4] JTS/T 198–1—2019 水运工程信息模型应用统一标准[S].
- JTS/T 198–1—2019 Unified standard for application of building information modeling in port and waterway engineering[S].
- [5] 王伟正, 邹艳春, 陈青红. 水运工程信息模型体系研究及应用[J]. *水运工程*, 2021(4): 141–146.
- Wang W Z, Zou Y C, Chen Q H. Research and application of model system in port & waterway BIM[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2021(4): 141–146.
- [6] 望毅, 陈青红, 刘松. 水运工程勘察设计企业 BIM 技术体系探索[J]. *水运工程*, 2018(8): 109–112.
- Wang Y, Chen Q H, Liu S. Exploration on BIM technology system for port & waterway engineering survey and design companies[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2018(8): 109–112.
- [7] 杨彪, 章旭, 陈家悦, 等. Civil 3D 在港口工程 BIM 协同设计中的应用[J]. *水运工程*, 2022(7): 230–234.
- Yang B, Zhang X, Chen J Y, et al. Application of Civil 3D in BIM collaborative design of port engineering[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(7): 230–234.
- [8] 芦志强, 苏东升, 崔峰. 集装箱码头设计施工一体化 BIM 应用[J]. *中国港湾建设*, 2018, 38(8): 36–39, 48.
- Lu Z Q, Su D S, Cui F. Integrated BIM technology application for design and construction of container terminals[J]. *China Harbour Engineering*, 2018, 38(8): 36–39, 48.
- [9] 邹艳春, 王伟正, 贺军昌. BIM 技术在液化天然气码头工程中的应用[J]. *水运工程*, 2017(7): 160–164.
- Zou Y C, Wang W Z, He J C. Application of building information modeling in liquefied natural gas terminal[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2017(7): 160–164.
- [10] 王帅, 崔峰, 陈证钢, 等. 基于 BIM 的水运工程地质三维设计系统开发与应用[J]. *水运工程*, 2021(6): 200–205, 237.
- Wang S, Cui F, Chen Z G, et al. Development and application of geological 3D design system based on BIM technology in port & waterway engineering[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2021(6): 200–205, 237.
- [11] 杨锡鏊, 谢正坚, 张惠丽. 水运工程岩土勘察计算机辅助系统[J]. *水运工程*, 2019(8): 165–170.
- Yang X L, Xie Z J, Zhang H L. Computer aided system for geotechnical investigation on port and waterway engineering[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2019(8): 165–170.
- [12] 崔冠辰, 艾绍平, 李娇娇, 等. 液化天然气(LNG)码头的 BIM 正向设计[J]. *港工技术*, 2022, 59(6): 79–84.
- Cui G C, Ai S P, Li J J, et al. Forward design of LNG terminal in BIM mode[J]. *Port Engineering Technology*, 2022, 59(6): 79–84.
- [13] 李娇娇, 冀珂帆, 崔冠辰, 等. 水运工程设计的混凝土构件配筋标准化方案研究[J]. *港口航道与近海工程*, 2025, 62(4): 51–54.
- Li J J, Ji K F, Cui G C, et al. Research on standardized reinforcement scheme for concrete components in water transport engineering design[J]. *Port, Waterway and Offshore Engineering*, 2025, 62(4): 51–54.
- [14] 陈青红, 吴伟书. 基于 BIM 的高桩码头结构计算数据传递[J]. *水运工程*, 2025(4): 164–169.
- Chen Q H, Wu W S. Data transfer for structural calculation of high-piled wharf based on BIM[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2025(4): 164–169.
- [15] 范文彰, 徐传超. 基于 Dynamo 的高桩码头桩基 BIM 设计优化[J]. *水运工程*, 2025(3): 222–227, 242.
- Fan W Z, Xu C C. BIM design optimization of pile foundation of high-piled wharf based on Dynamo[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2025(3): 222–227, 242.
- [16] 黄庆, 廖一鸣, 谭晓东. 基于 BIM 云平台的航道工程计量支付管理方法与应用[J]. *中国港湾建设*, 2022, 42(9): 75–80.
- Huang Q, Liao Y M, Tan X D. Measurement and payment management method and application of waterway engineering based on BIM cloud platform[J]. *China Harbour Engineering*, 2022, 42(9): 75–80.
- [17] 曾昱, 廖一鸣, 牛作鹏, 等. 基于数据集成技术的航道工程 BIM 预警平台研究与应用[J]. *水运工程*, 2022(4): 151–156.
- Zeng Y, Liao Y M, Niu Z P, et al. Research on BIM early-warning platform for waterway engineering based on data integration technology and its application[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(4): 151–156.
- [18] 钱原铭, 陈良志, 朱峰. 自主知识产权的航道设计 BIM 软件的研发与工程应用[J]. *水运工程*, 2024(4): 150–156.
- Qian Y M, Chen L Z, Zhu F. Development and engineering application of BIM software for channel design with independent property rights[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2024(4): 150–156.