



面向高桩码头施工的知识图谱及 工艺规划方法研究

温承永^{1,2}, 应宗权^{1,2}, 林美鸿^{1,2}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 针对在地质条件较差、海况条件较差甚至恶劣的区域进行港口建设的工程问题, 采用面向对象法对施工实体进行知识提取, 创建高桩码头施工知识图谱框架体系。通过三元组对高桩码头施工知识进行关键信息的表示, 采用图卷积网络实体对齐方法按照预制构件、施工工艺和质量控制要求知识图谱等 3 个层级进行知识融合。采用施工因素相似计算方法计算具体工程条件下目标数据与知识图谱内典型工艺条件数据的编辑距离, 确定整体施工工艺流程, 通过约束规则决策树对施工本体进行生产资源、技术标准、安全风险、综合评价等方面的约束, 明确具体工艺环节中的关键施工参数, 优化施工工艺的逻辑路线。采用虚幻引擎平台创建高桩码头海上施工推演系统, 通过设计蓝图脚本程序实现了不同建造条件下打桩工艺的智能规划及停桩条件的智能决策。

关键词: 高桩码头; 海上施工; 知识图谱; 施工因素相似计算方法; 工艺规划; 智能决策

中图分类号: U655.4; U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0177-09

Knowledge graph and process planning for pile-supported wharf construction

WEN Chengyong^{1,2}, YING Zongquan^{1,2}, LIN Meihong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: In view of the engineering problem of port construction in the area with poor geological condition, poor or even bad sea condition, the object-oriented method is adopted to extract the knowledge of construction entities and establish the construction knowledge graph system of pile-supported wharf. The key information of construction knowledge of pile-supported wharf is represented by triplet, and the knowledge fusion is carried out according to three levels of knowledge graphs of prefabricated component, construction process and quality control requirements by the entity alignment method of graph convolutional network. The construction factor similarity calculation method is used to calculate the Levenshtein distance between the target data and the typical process condition data in the knowledge graph under specific engineering conditions, and the overall construction process flow is determined. The constraint rule decision tree is used to impose constraints on the construction body in terms of production resources, technical standards, safety risks and comprehensive evaluation, and key construction parameters in the specific process are clarified, then the logical route of construction technology is optimized. The Unreal Engine is used to create the offshore construction inference system of pile-supported wharf, and the intelligent planning of pile driving process and the intelligent decision of pile stopping condition under different construction conditions are realized by designing blueprint script.

Keywords: pile-supported wharf; marine construction; knowledge graph; construction factor similarity calculation method; process planning; intelligent decision

收稿日期: 2024-08-20

作者简介: 温承永 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程施工方面的研究。

为了应对加入世界贸易组织 (World Trade Organization, WTO) 后国际航运市场的激烈竞争, 我国的港口航道和海岸工程在近二十余年得到了前所未有的发展。随着对天然气、石油、渔业等海洋资源的大力开发, 良好的天然港湾开发逐渐饱和, 根据航运功能的需求, 在地质条件较差、海况条件较差甚至恶劣的区域进行港口建设成为当今工程热点问题^[1]。高桩码头以其优异的性能、良好的荷载传递能力及适用性, 已成为地质条件较差、海况条件较差区域进行快速建港的较常见码头结构形式^[2-3]。

知识图谱 (knowledge graph, KG)^[4] 是谷歌提出的用于增强搜索引擎的一种技术方法, 最初的目的是增加搜索与显示之间的关联, 使搜索结果具有完整的知识体系。目前, 知识图谱在互联网搜索引擎、人工智能 (artificial intelligence, AI) 问答等方面应用日趋成熟, 并在建筑施工领域中逐渐推广。由于工业制造、建筑施工过程具有较为固定的工艺环节, 相似生产、建造环境的工程案例对于特定施工项目工艺环节的抉择和关键参数的确定具有一定的借鉴作用。因此, 研究工艺知识之间的关联、理解及推理, 实现工业制造、建筑施工工艺智能抉择和关键参数择优配置成为行业内广泛关注的工程问题之一。

建筑行业大量学者采用知识图谱方法对建筑关键问题进行研究。汪珂^[5]基于深度学习方法创建水电工程施工安全隐患知识图谱, 通过水电工程施工安全隐患治理推理及修正方法, 实现水电工程施工安全智能化管理; 杨雨霞^[6]创建珊溪水库的防洪知识图谱, 提出一种水库防洪优化调度模型, 采用贝叶斯、模糊评判等方法实现防洪方案智能决策; 朱广宇等^[7]将城市轨道交通突发事件相关的场景信息进行结构化处理, 采用知识图谱和关系图卷积神经网络创建交通突发事件预测模型, 解决了传统突发事件预测方法中存在的确定性高、准确率低等问题; 王所智^[8]采用知识图谱对“智能铁路”管理中多个要素的相互关系进行

精准描述, 通过对施工过程物料需求关系的推理预测, 实现施工组织管理和施工要素智能决策。

目前知识图谱方法在建筑行业的应用主要侧重于采用系统性方法对建筑工程的实施进行智能化管理, 且在高桩码头施工工艺决策和关键施工参数抉择方面的研究较少。本文针对高桩码头施工过程的关键工艺及控制参数进行知识提取, 形成高桩码头施工知识图谱, 采用施工因素相似度计算方法快速拟合出初步的整体施工工艺, 再根据高桩码头具体建造条件下的约束规则对施工细节进行优化调整, 从而实现高桩码头施工工艺的智能规划。

1 高桩码头施工知识图谱设计

知识图谱通常按照三元组结构 $\langle h, r, e \rangle$ 对知识信息进行描述, 其中 h 和 e 为知识图谱中的节点, r 为知识图谱中节点间的关系^[9]。施工知识图谱的创建包括将施工知识信息从非结构化文本中进行提取, 将施工信息以结构化形式进行表示, 再将相互关联的施工信息 (如土建分部的轨道梁预埋件浇筑与机电分部的轨道梁安装) 进行知识融合, 生成可视化的施工知识图谱。

1.1 系统研究方法

高桩码头施工过程涉及结构、管道、机电、仪控等多项分部工程, 每项分部工程内包含多项分项工程, 每项分项工程内包含多项工序。上述分项工程中不仅存在差异性的分项工程或工序, 也存在大量共性的分项工程或工序。例如, 结构工程中有预制钢梁高强螺栓初拧、终拧扭矩控制问题, 机电工程中同时存在码头起重机钢轨高强螺栓初拧、终拧扭矩控制问题。又如, 预制桩海上打桩、预制梁海上安装、预制板海上安装等分项工程中均存在施工船舶吊装工序, 面临着海上船舶作业窗口期的选择问题。因此, 为了提升系统效率、减少系统冗余, 采用面向对象法对高桩码头施工知识图谱进行创建^[10]。高桩码头施工对象本体见图 1。

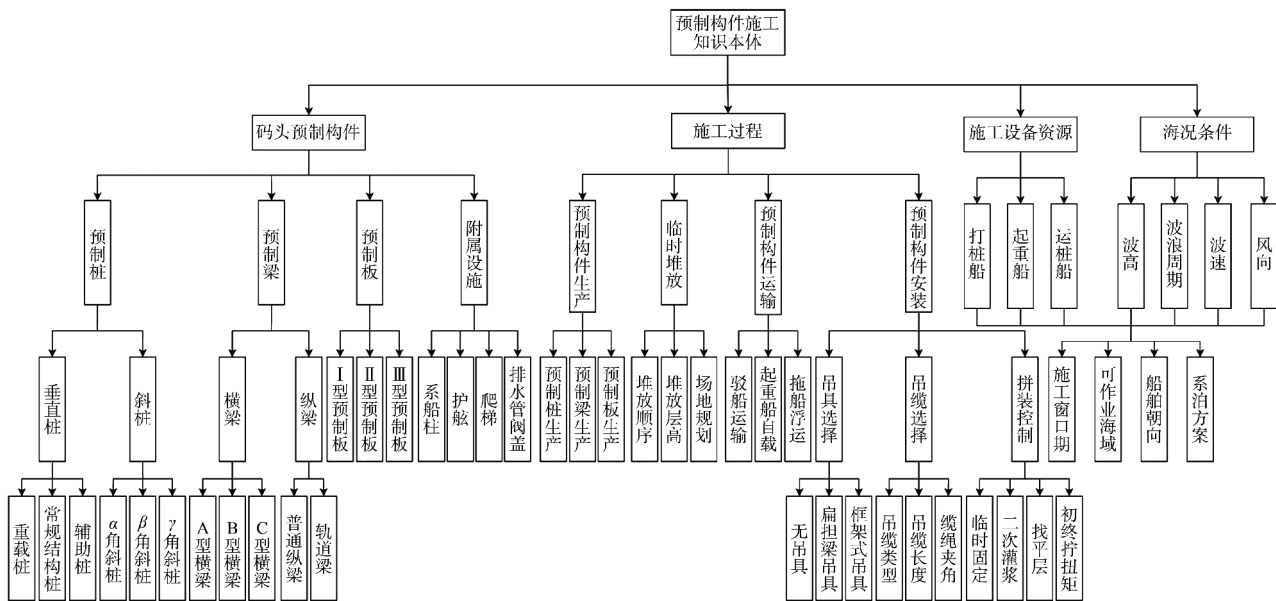


图1 高桩码头施工对象本体
Fig. 1 Construction objects of pile-supported wharf

1.2 施工知识的表示

本文将高桩码头施工知识图谱体系具体细分为预制构件、施工工艺和质量控制要求知识图谱3类,通过不同知识层级的构建,实现高桩码头施工知识的形式统一化及知识本体的实例化,具体的施工知识表示见表1。

表1 施工知识		
Tab. 1 Construction knowledge		
图谱类型	三元组元素	包含内容
预制构件	Component	编码、名称、基础信息描述
	Component_feature	产品规格参数表
	Feature	预制构件施工特征信息
施工工艺	Process	工艺编码、名称、内容
	Process_parameter	施工方案、设计报告等
	Parameter	施工关键参数信息
质量控制要求	Parameter	主控参数编码、名称
	Parameter_requirement	技术标准、规范等
	Requirement	参数阈值

1.3 施工知识的融合

知识融合是知识管理的一个重要部分,可以将多个信息源内的知识进行合并,实现分布式信息的集中化处理^[11]。对于高桩码头施工知识的融合,旨在合并冗余信息提升知识对象的可重用性,减少不同知识图谱间的信息矛盾,降低系统容错率。前述3类知识图谱中,存在大量重复或关联

度极高的信息,例如施工工艺知识图谱与质量控制要求知识图谱均包含某特定工艺下的施工关键参数,而该施工关键参数又与预制构件的形式密切相关,通过知识融合实现不同知识图谱之间的交互。

本文采用图卷积网络(graph convolutional network, GCN)实体对齐的方法。该方法以预制构件编码、施工工艺编码、施工关键参数编码为输入或输出数据,采用式(1)对3层GCN网络模型进行卷积信息操作,将高桩码头施工知识图谱体系中的预制构件、施工工艺和质量控制要求知识图谱进行知识融合。

$$H_{output} = s(\hat{Q}^{-\frac{1}{2}} \hat{P} \hat{Q}^{-\frac{1}{2}} H_{input} W) \tag{1}$$

式中: H_{output} 为另一个知识图谱中编码相关联的输出数据矩阵; s 为激活函数; $\hat{P} = P + I$, 其中 I 为 $n \times n$ 单位矩阵, P 为一个 $n \times n$ 的邻接矩阵,代表两个知识图谱之间的关联信息, n 为特征节点数量; H_{input} 为以一个知识图谱中编码为驱动的输入数据,为顶点特征矩阵; $\hat{Q}$ 为 $\hat{P}$ 的对角节点度矩阵; W 为权重矩阵。

1.4 施工知识图谱的创建

高桩码头施工知识图谱创建流程大体上可按3部

分进行划分：第 1 部分是基于各类典型的高桩码头施工工艺对相关施工过程的知识进行抽取，形成以预制构件、施工工艺和质量控制要求知识图谱为基础的施工知识上层本体；第 2 部分是数据源，主要是需要使用施工知识图谱进行工艺预演和智能决策的具体项目涉及的施工数据信息，具体包含工程所在地的地质情况、施工区域的海况、可调遣的资源、执行技术标准；第 3 部分是具体项

目的高桩码头施工知识图谱，可以认为是对第 1 部分施工知识上层本体的实例化，以具体项目的施工数据作为驱动，通过对施工知识上层本体的遍历，过滤非相关信息，精简知识的树形结构，从而快速确定制约施工的几条关键路线，为实现下一步的施工工艺智能决策提供先提条件。高桩码头施工知识图谱创建流程见图 2。

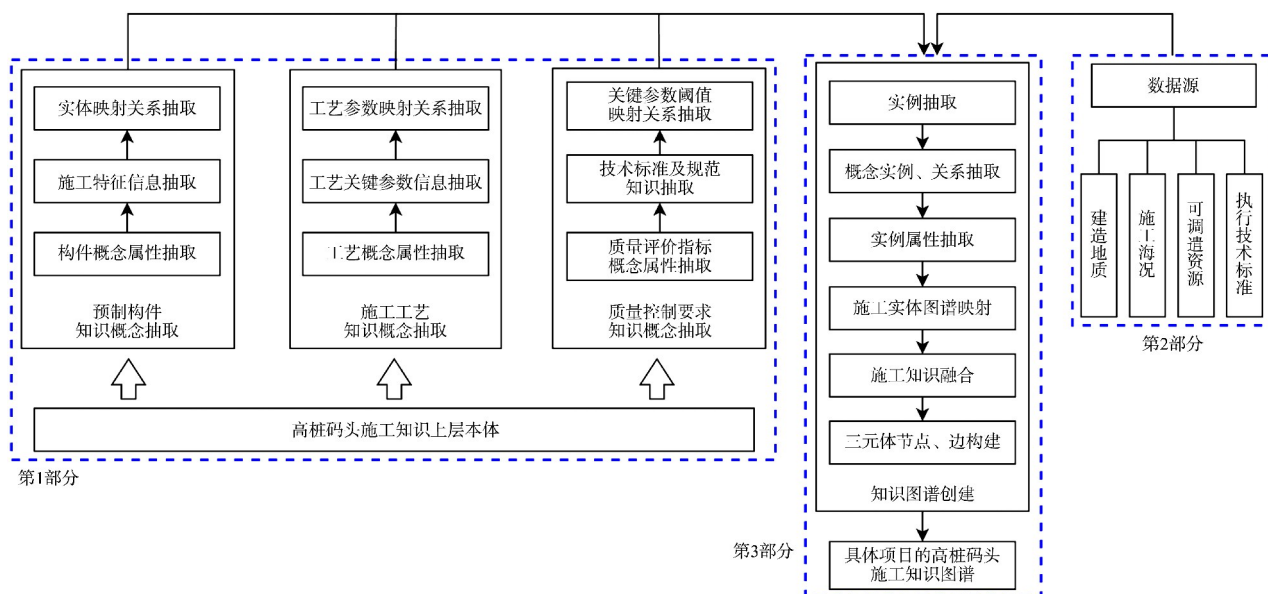


图 2 高桩码头施工知识图谱创建流程

Fig. 2 Establishment procedure for knowledge graph of pile-supported wharf construction

2 施工工艺规划方法设计

随着行业标准化的不断推进，泊位、码头集装箱、散货皮带机等码头主体均采用统一的标准尺寸进行设计，目前诸多建造的码头在结构形式、构件类型、构件安装间距等方面具有极大的相似性。尤其是片区化项目群或相同建港处中远期扩建规划，使得高度相似的码头结构物在高度相似的地质、海况环境下陆续开建。在传统模式中，技术人员凭借经验对拟建码头施工任务编制施工方案，因此对技术人员的知识储备、工程经验、对实施现场的掌握情况要求非常高。知识图谱可以综合考虑各方面施工因素对施工信息进行集成，先采用施工因素相似度计算的方法对知识库进行遍历，快速拟合出初步的整体工艺流程，再通过具体项目下的约束规则对建造环境下的施工细节

进行优化调整，从而实现施工工艺的智能规划。

2.1 施工因素相似度计算方法

高桩码头施工信息通过三元组的描述文本语句进行存储，本文采用编辑距离 (Levenshtein distance, LD) 算法，将具体项目的目标数据 S 与知识图谱内典型工艺对应的条件数据 T 进行遍历对比，对两者的描述文本语句进行相似度分析，选择相似度最高的一种或相似度较高的几种典型工艺作为初步施工工艺。编辑距离是指由目标数据 S 变化到条件数据 T 所需最少的编辑操作次数^[12]。

基于具体高桩码头项目的施工知识图谱及特定数据源，选择 m 项关键指标参数，构造一个 $1 \times m$ 的目标数据矩阵 $S = (s_1 s_2 \cdots s_m)$ 。以典型施工工艺为因变量，对高桩码头施工知识上层本体进

行数据源的知识抽取,选择 n 项关键指标参数作为自变量,构造一个 $1 \times n$ 的条件数据矩阵 $T = (t_1 t_2 \cdots t_n)$ 。

构造一个 S 与 T 的 $(m+1) \times (n+1)$ 阶匹配关系矩阵 D :

$$D = [d_{i,j}] \quad 0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n \quad (2)$$

按照以下关系定义矩阵 D 内的元素 $d_{i,j}$:

$$d_{i,j} = \begin{cases} i & j=0 \\ j & i=0 \\ \min(d_{i-1,j-1}, d_{i-1,j}, d_{i,j-1}) + a_{i,j} & i,j>0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 $a_{i,j}$ 为编辑代价,按照以下规则进行表述:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 0 & s_i = t_j \\ 1 & s_i \neq t_j \end{cases} \quad (i=1,2,\cdots,m; j=1,2,\cdots,n) \quad (4)$$

矩阵 D 构造完成后,矩阵右下角元素 $d_{m,n}$ 即为矩阵目标数据矩阵 S 和条件数据矩阵 T 之间的编辑距离 D_L , $D_L = d_{m,n}$ 。则施工因素相似度 $\text{Sim}(S, T)$ 为:

$$\text{Sim}(S, T) = 1 - \frac{D_L}{\max(m, n)} \quad (5)$$

2.2 基于约束规则的工艺规划方法

采用施工因素相似度计算方法,结合具体项目的数据源信息可以初步确定高桩码头施工的大概工艺流程,采用约束规则决策树的方法对已确定的各个施工环节进行条件约束,具体约束内容包含生产资源约束、技术标准约束、安全风险约束、综合评价约束等,旨在明确具体工艺环节的适配参数和优化施工工艺的逻辑路线,实现高桩码头建造工艺的智能规划。以某高桩码头施工过程中打桩工艺环节为例,对决策树进行构建,决策树由节点和有向边构成,节点在横向和纵向2个维度上进行延展。

高桩码头打桩工艺根节点延展出示泊式打桩船打桩工艺、由陆向海打桩平台推进工艺、起重机上驳船工艺等典型的主干节点,基于前述章节施工因素相似度计算方法,在其中比选出相似度最高的系泊式打桩船打桩工艺作为初步的方案^[13]。系泊式打桩船打桩工艺主干节点按照其包含的具

体工序,由系泊(I级干节点)、运桩(II级干节点)、吊桩(III级干节点)、抱桩(IV级干节点)、插桩(V级干节点)及打桩(VI级干节点)在横向上组成。每级干节点按照关键工序控制参数,在纵向上进一步延展为枝节点和叶节点,并受相应的约束规则限定。

例如,系泊(I级干节点)的约束规则为在打桩船有限元模型中创建锚点分配数量、锚链布置形式、打桩船朝向、抛锚缆长、锚缆预张力等关键输入参数的不同组合工况,在水动力软件中计算船舶关键部位的运动响应结果,以结果中打桩船的横摇运动和抱桩器的垂荡运动作为关键约束参数,并采用如下加权计算的约束规则进行工艺规划和最优参数配置:

$$\theta_{\max}/\theta + \eta_{\max}/H \leq 1 \quad (6)$$

式中: $\theta_{\max}$ 和 $\eta_{\max}$ 分别为计算工况下打桩船横摇运动响应极值和抱桩器垂荡运动响应极值; θ 和 H 分别为打桩船横摇运动响应阈值和抱桩器垂荡运动响应阈值,采用施工海域3h随机海况下打桩船横摇运动响应极值和抱桩器垂荡运动响应极值的数学期望值计算而得。

3 高桩码头海上施工推演系统研发

3.1 研发环境

高桩码头海上施工推演系统基于虚幻引擎(Unreal Engine)平台进行开发,该平台最初主要应用在3D游戏制作行业,近年来在电影、动画、建筑等行业中逐渐广泛应用,结合高桩码头海上施工虚拟推演的需求特点,具有以下优势功能^[14]:

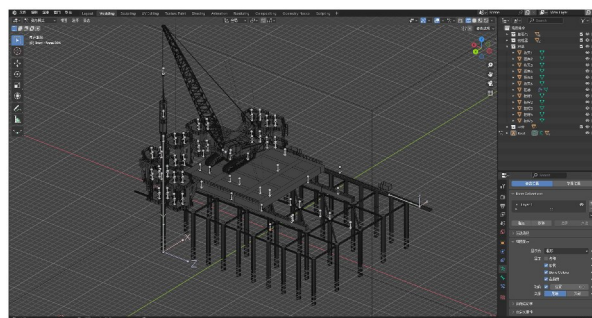
1) 内置蓝图(Blueprints)模块,具有丰富且成熟的事件脚本资源,通过可视化编程,降低编程门槛和难度,利于关系复杂的施工知识图谱数据库、多工况施工逻辑动作及多线路工艺流程创建; 2) 内置物理引擎环境,可通过重力场、瞬态场等功能有效模拟不同工况的施工海域、预制件海上高空吊装等施工场景; 3) 内置优秀的渲染引擎,具有实时渲染的功能,所见即所得,通过设置系统光照、材质等参数,构造高仿真的工艺推演虚

拟环境,有利于方案优化时进行更强的头脑风暴。

3.2 系统逻辑设计

为实现虚拟系统中海上打桩施工推演,首先,创建由骨骼驱动的施工装备几何模型,即骨骼网格体模型。其次,对骨骼位姿信息进行参数化设定,生成各类施工动作或状态的片段,即动画序列,根据前述工艺规划方法编写不同动作或状态的转换逻辑条件,即制作施工动画蓝图。最后,基于设计文件及技术规范对关键施工工序中的控制参数进行阈值限定,从而推演得出最优的施工方案。

在打桩船、打桩平台、起重机等施工装备模型中,根据机械结构特点创建骨骼体,以预制桩、预制构件为控制目标,采用反向运动学的方法对施工装备模型进行骨骼绑定,打桩船骨骼网格体模型见图 3a),打桩平台骨骼网格体模型见图 3b)。



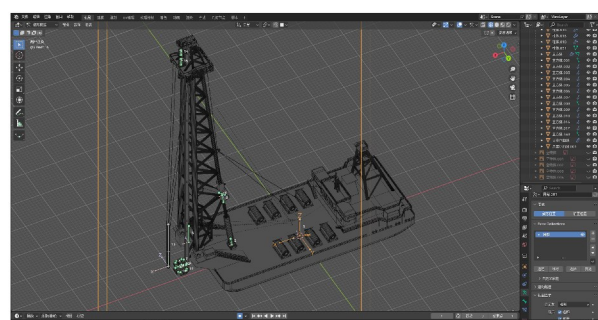
b) 打桩平台

图 3 骨骼网格体模型

Fig. 3 Skeletal mesh model

通过打桩船骨骼网格体模型创建扒杆平放、扒杆垂直摆放、起重转盘回旋、液压锤提升、液压锤下落、抱桩器合拢等多项施工动画序列。在虚幻引擎平台使用骨骼混合空间脚本进行动画序列的组合和融合,以状态机为载体书写各工序流转的逻辑条件,实现不同施工动作、状态之间的互相切换。

根据设计文件中停桩条件的规定,在虚拟环境下采用蓝图节点创建不同地质环境下的停桩判断函数,由打桩位置信息确定持力层的地质参数,通过对不同地质环境下的停桩判断函数的遍历,智能获取该工况下的停桩判断方式。停桩标准逻辑流程见图 4。



a) 打桩船

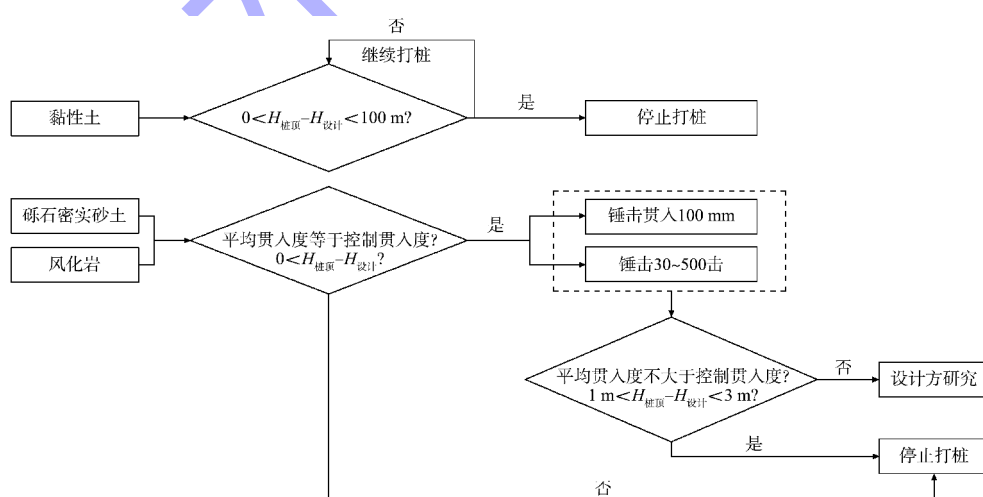


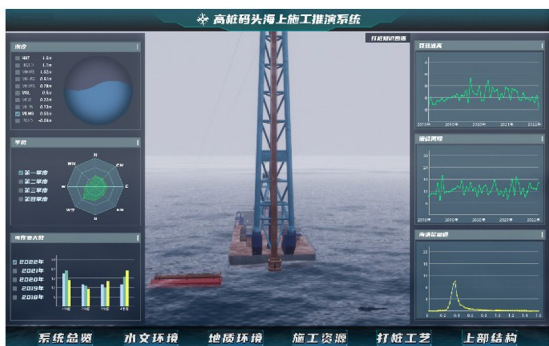
图 4 停桩条件逻辑流程

Fig. 4 Logic process of stopping drive pile

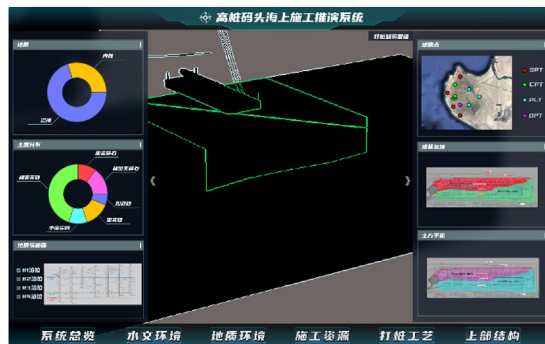
3.3 施工质量分析

高桩码头施工周期较长,其中海上打桩作业持续时间通常可达2~3 a,时间跨度大,不同时期下的潮汐、季风、波浪条件变化复杂,不同施工时期内对施工作业窗口的判别与决策工作复杂。码头不同泊位的距离较远,打桩位置在平面上呈较强的区域型分布,各个打桩位置的地质条件不相同,从而不同位置的停桩准则不同。根据码头功能结构的不同,不同的码头区域,其下部结构桩基的类型各不相同(包含预应力高强混凝土桩、预制混凝土桩、钢管桩等),不同类型预制桩的调度、施工排布管理复杂。综上,海上打桩施工过程涉及的施工元素多,各个施工元素之间相互关联,传统工艺通过输入准确的施工工况、选择准确的施工准则进行施工控制。

在虚幻引擎编程环境中,基于对高桩码头建造常见工艺、典型工程案例、技术标准等的知识融合,采用蓝图脚本、代码程序创建高桩码头施工知识图谱,形成一套高桩码头海上施工推演系统。该系统高度集成水文观测统计数据、海况推演报告、波浪预测报告、地质勘察报告等多方面施工环境信息,通过图、表、曲线等多媒体方式给管理者提供施工环境和资源的可视化管理窗口,实现了多元化施工元素的融合管理。水文环境工况管理界面见图5a),地质环境工况管理界面见图5b)。



a) 水文环境



b) 地质环境

图5 工况管理界面

Fig. 5 Condition management interface

以特定建造环境参数、设备资源状态、技术要求等为输入条件,通过深度学习等方法从知识图谱中进行施工知识的抽取和施工工艺规划,创建高桩码头特定工程条件和建造需求下的施工知识图谱。以不同施工区海况特征值(波幅、波长、波速、波向等)为自变量,通过对自变量的改变,获得不同海况下推荐的最佳打桩工艺,实现打桩工艺的快速抉择。非恶劣海况、恶劣海况下海上打桩的工艺规划见图6。



a) 非恶劣海况

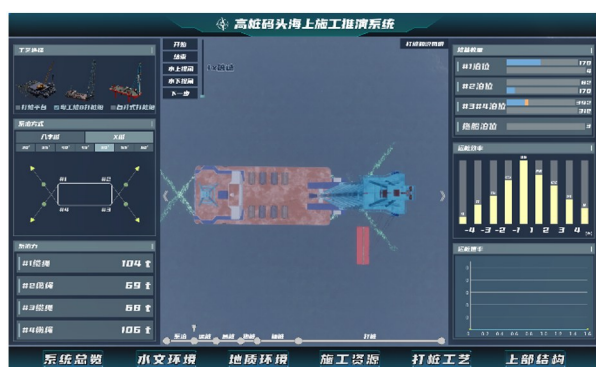


b) 恶劣海况

图6 非恶劣海况、恶劣海况下海上打桩的工艺规划

Fig. 6 Technology planning of pile driving under normal sea condition and bad sea condition

在非恶劣海况施工窗口期,基于特定海域、特定施工期下打桩船的运动响应分析计算,对打桩船的系泊方案进行工艺推演和锚点布置方案智能抉择,保证特定海况条件下打桩船的稳定及定位效率。根据不同的打桩精度需求,制定详细的打桩施工窗口区间,提高打桩船的使用率。基于打桩区域地质插分模型,通过对不同区域下桩锤配重、落高的打桩虚拟推演,实现不同地质条件下打桩工艺的差异化管理,提升打桩质量和效率。在现场安装相关传感器,以贯入深度、垂直度、桩顶坐标、夹桩器应力等桩体响应数据为驱动,实现停桩条件的智能决策。系泊方式推演界面见图 7a),水下打桩推演界面见图 7b)。



a) 系泊方式推演



b) 水下打桩推演

图 7 系泊方式和水下打桩推演界面

Fig. 7 Deduction interface of mooring method and driving pile underwater

4 结论

1) 本文采用面向对象法按照预制构件、施工工艺和质量控制要求知识图谱对高桩码头施工知识图谱体系进行设计,通过不同知识层级实现高

桩码头施工知识的信息统一化和实例化,以特定的工程建造数据为驱动,从知识图谱中快速确定制约施工的几条关键路线,为实现施工工艺智能决策提供先提条件。

2) 本文采用编辑距离算法,通过对具体项目目标数据与高桩码头施工知识图谱内典型工艺条件数据的遍历对比,以施工因素相似度为判断依据,选择相似度最高的一种或相似度较高的几种典型工艺作为初步施工工艺,实现高桩码头施工整体工艺的智能化、快速化选择。

3) 本文采用约束规则决策树的方法对已确定的高桩码头施工整体工艺中各个施工环节进行条件约束,进一步确定具体工艺环节中最佳配置参数,优化施工工艺的逻辑路线,实现高桩码头建造工艺的智能规划。

4) 本文基于虚幻引擎(Unreal Engine)平台研发出一套高桩码头海上施工推演系统,通过设计蓝图脚本实现虚拟环境下打桩船、打桩平台等施工装备的施工关键动作,以多元化施工元素融合管理,实现了不同海况条件下打桩工艺的智能规划及停桩条件的智能决策。

参考文献:

- [1] 赵彦阳,高勇.恶劣海况下码头工程施工工效提升方法[J].水运工程,2023(8):209-212,218.
ZHAO Y Y, GAO Y. Construction efficiency improvement methods of wharf engineering under severe sea conditions [J]. Port & waterway engineering, 2023(8): 209-212, 218.
- [2] 王兴坤,孙国峰,张轩维.高桩码头施工新工艺应用[J].水运工程,2019(S1):9-11,110.
WANG X K, SUN G F, ZHANG X W. Application of new construction technology for high pile wharf [J]. Port & waterway engineering, 2019(S1): 9-11, 110.
- [3] 缪晨辉,曾晖,王晓光.高桩码头构件吊装新技术[J].水运工程,2016(2):176-180.
MIAO C H, ZENG H, WANG X G. New technology of components installation in piled wharf [J]. Port & waterway engineering, 2016 (2): 176-180.
- [4] STEINER T, VERBORGH R, TRONCY R, et al. Adding realtime coverage to the google knowledge graph [C] //

- GLIMM B, HUYNH D. Proceedings of the 2012th International Conference on Posters & Demonstrations Track. Aachen: RWTH Aachen University, 2012: 65-68.
- [5] 汪珂. 基于知识图谱的水电工程施工安全隐患治理措施智能决策[D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- WANG K. Intelligent analogy of safety hazard management in hydroelectric engineering onconstruction based on knowledge graph [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2023.
- [6] 杨雨霞. 水库防洪调度决策方案的智能优选模型研究: 以珊溪水库为例[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- YANG Y X. Intelligent optimization of reservoir flood control dispatch decision-making scheme modelstudies: take the Shanxi Reservoir as an example [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [7] 朱广宇, 张萌, 裔扬. 基于知识图谱的城市轨道交通突发事件演化结果预测[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(3): 949-957.
- ZHU G Y, ZHANG M, YI Y. Prediction of evolution results of urban rail transit emergencies based on knowledge graph [J]. Journal of electronics & information technology, 2023, 45(3): 949-957.
- [8] 王所智. 铁路隧道钻爆法施工组织管理知识图谱构建及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- WANG S Z. The construction and application of knowledge graph for construction organization and management with railway tunnel drilling and blasting method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [9] 杨伟凯, 王艳, 纪志成. 面向知识图谱的智能生产系统工艺知识推理方法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(4): 773-785.
- YANG W K, WANG Y, JI Z C. Knowledge graph-based process knowledge reasoning method for intelligent production system [J]. Journal of system simulation, 2023, 35(4): 773-785.
- [10] 黄利江, 李云鹏, 宫思明, 等. 基于参数化工艺模板的智能工艺设计[J]. 机床与液压, 2023, 51(18): 84-89.
- HUANG L J, LI Y P, GONG S M, et al. Intelligent process design based on parametric process template [J]. Machine tool & hydraulics, 2023, 51(18): 84-89.
- [11] 赵晓娟, 贾焰, 李爱平, 等. 多源知识融合技术研究综述[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 459-473.
- ZHAO X J, JIA Y, LI A P, et al. A survey of the research on multi-source knowledge fusion technology [J]. Journal of Yunnan University (natural sciences edition), 2020, 42(3): 459-473.
- [12] 王艳青. 基于数字孪生和知识图谱的生产线工艺规划方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- WANG Y Q. Research on process planning method of production line based on digital twin and knowledge graph [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [13] 苏静波, 陈东余, 林美鸿, 等. 高桩码头结构安全评价指标及其敏感性分析[J]. 水运工程, 2019(5): 48-53.
- SU J B, CHEN C Y, LIN M H, et al. Safety assessment indictors and sensitivity analysis of high-piled wharf structure [J]. Port & waterway engineering, 2019(5): 48-53.
- [14] 李梅, 姜展, 满旺, 等. 基于虚幻引擎的智能矿山数字孪生系统云渲染技术[J]. 测绘通报, 2023(1): 26-30.
- LIM, JIANG Z, MAN W, et al. Study on could rendering technology of intelligent mine digital twin system using unreal engine [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2023(1): 26-30.

(本文编辑 王璁)

声 明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿邮箱网址: www.sygc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部