

· 信息技术 ·



基于 BIM 技术的高桩码头施工进度优化*

原媛, 谢开云, 吴双飞

(上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要: 高桩码头工程通常规模大、专业性强、施工参与单位众多, 由此导致施工信息独立、时效性差, 且极大地影响工程进度, 造成施工成本浪费。针对此问题, 提出高桩码头工程施工进度优化算法, 并结合 BIM 技术建立 4D 施工管理方法。建立高桩码头 Revit 模型构件库, 以此构建相应码头三维信息可视化模型, 再结合高桩码头施工特点, 建立基于量子粒子群算法的高桩码头施工进度优化算法, 将施工进度优化算法与高桩码头 BIM 施工模型进行有机整合, 利用 BIMFILM 软件对施工工期信息进行施工全过程的跟踪优化和动态可视化管理。结果表明, 该方法实现了高桩码头工程施工进度优化的可视化和信息化管理, 所提出的动态优化算法有助于精准预测并同步优化码头施工进度安排、减少施工总成本、提高码头施工管理效率、拓宽 BIM 技术在水工领域的应用, 具有实际推广意义。

关键词: 建筑信息模型; 高桩码头; 信息管理; 量子粒子群算法; 施工进度优化

中图分类号: U 655.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0171-07

Optimization of construction schedule of high-piled wharf based on BIM technology

YUAN Yuan, XIE Kai-yun, WU Shuang-fei

(College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The project of high-piled wharf is usually large-scale, highly professional and various participants for construction, which leads to the independence and poor timeliness of construction information, and greatly affects the project schedule, resulting in waste of construction cost. In order to solve this problem, we propose an optimization algorithm of the construction schedule, and build a 4D construction management method combined with building information modeling (BIM) technology. We build the component library of the high-piled wharf's Revit model, construct the corresponding 3D information visualization model of the high-piled wharf, establish the construction schedule optimization algorithm of high-pile wharf based on the quantum particle swarm optimization algorithm in line with the construction characteristics, organically integrate the optimization algorithm for construction schedule with the BIM construction model of the high-piled wharf, and use BIMFILM software to carry out the optimization of construction period information and the dynamic visual management throughout the entire construction process. The results show that this method not only realizes the visualization and information management of construction schedule optimization, but also the proposed dynamic optimization algorithm helps to accurately predict and simultaneously optimize the construction schedule, reduce the total construction cost, and improve the efficiency of wharf construction management, which has expanded the application way of BIM technology in the field of hydraulic engineering with practical significance.

Keywords: building information modeling; high-piled wharf; information management; quantum particle swarm optimization algorithm; construction schedule optimization

收稿日期: 2021-10-25

*基金项目: 上海市网络化制造与企业信息化重点实验室开放课题项目 (KT20190601)

作者简介: 原媛(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为港口与海洋工程 BIM 技术。

建筑业经历了信息化阶段，正处于数字化阶段并向着智能化方向发展^[1]。在这样的大背景下，提高水工建筑领域的建设信息化、数字化、智能化的需求更为迫切^[2-3]。高桩码头作为一种重要的水工建筑形式，其规模大、结构复杂、构件杂且多^[4]，对其进行施工优化研究具有较高的专业性，而且优化施工进度的同时还要考虑施工费用的制约，寻求工期和成本均衡的优化方法，获得施工进度的最优安排，提高码头的建设水平。此外，高桩码头施工通常具有工程量大、工期长、施工工艺复杂、水上作业多、参与单位多、受风浪因素影响较大的特点^[5]。这些都给高桩码头的施工管理带来困难，各单位间工程信息容易缺乏协调、流通效率低、对最新动态把握不及时、信息的时效性差，从而影响工程进度，造成资源闲置和浪费。

建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 技术作为最前沿的理念常被用于施工进度优化中，如张建平^[6]开发基于 BIM 的高速公路 4D 建设动态可视化管理系统，对整体路线的宏观管理、工程标段中观管理、隧道或路桥的精细管理都实现了施工模拟、进度管理、资源管理、实时查询、历史查询等功能；林佳瑞^[7]建立施工资源配置自动仿真模型与模拟退火算法相结合，并以钢结构吊装工程为例，验证该方法在资源-进度优化的可行性；王永泉^[8]基于 BIM 技术、网络计划法、遗传算法建立钢结构网架工程的施工进度-费用优化体系，得到最佳进度安排计划；毕磊^[9]建立高桩码头 5D-BIM 系统，实现快速工程量测算和实时进度四维动态显示；吴尊奇^[10]通过可视化的施工模拟直观展示设计模型和施工安排，现场技术员在移动端填报实际开始与结束时间实现施工动态实时控制；王帅^[11]研究 BIM 技术在码头工程设计施工一体化中的应用，通过 BIM 模型实现高效沟通，利用 BIM 技术对项目重点、难点进行施工虚拟建造。

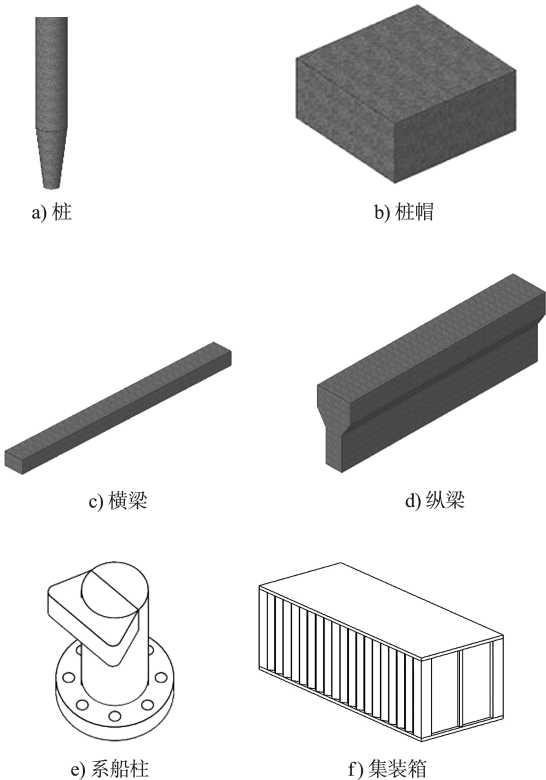
目前，尽管 BIM 技术在我国施工进度优化管

理领域的应用取得了一定成果，但研究与应用多集中在建筑业领域，在水工建筑领域的应用较少。而且大部分水工建筑领域的进度优化多为可视化模拟，如碰撞检查、虚拟建造，既缺乏优化理论支持，也难以定量分析优化结果。因此有必要针对高桩码头的施工特点及信息化施工管理需求，寻求信息化管理技术和工程项目优化理论相结合的方法，开展高桩码头施工进度优化的信息化研究，对 BIM 技术在水工建筑领域智能化施工综合管理的应用进行探索。

1 创建高桩码头 BIM 模型

通过建立高桩码头的构件族库，快速、准确地进行码头主体、附属设施和周边场景的三维建模，不仅能够直观展现码头样貌，有助于理解设计意图，而且模型中还包含构件几何尺寸，后续还可赋予材料、成本、施工工期等工程信息，为施工进度优化提供数据基础。

高桩码头构件的特殊性和复杂性要求设计人员自行构建码头主体构件和附属设施构件的对应族库，如图 1 所示。



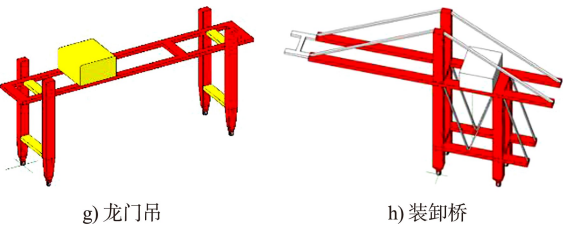


图 1 高桩码头主体和附属设施族库

布置好轴网和高程后,调用已建立的构件族插入到对应位置,实现码头整体的快速精准布置,最终的三维效果如图 2 所示。



图 2 码头三维建模最终效果

2 施工进度优化目标模型的建立

2.1 施工进度优化函数

工程项目的施工总成本包括直接成本 C_D 和间接成本 C_I ,与工期的关系如图 3 所示,其中 P 点代表施工总成本的最低点,也就是项目施工进度优化所要寻找的最优方案对应的函数最优点。

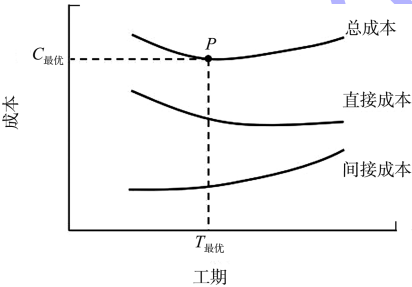


图 3 成本-工期关系曲线

施工的直接成本一般取决于人力、物力资源的提供量。如果要求缩短施工工期,则需要投入更多的人力、物力,直接成本 C_D 随之增加,但由于人力和物力资源的总量一定,当总工期缩短到一个极限值 T_{limit} ,将不再能够通过增加成本的方式继续缩短,此时对应于施工正常成本 C_{normal} ;反之,若要求降低直接成本,则工期将延长,但当成本降低到极限 C_{limit} 时将无法降低,此时对应正

常工期 T_{normal} 。假设每个工序的直接成本与其工期呈二次函数关系,如图 4 所示,该二次函数曲线最低点坐标为 (T_{normal}, C_{normal}) ,同时经过点 (T_{limit}, C_{limit}) 。

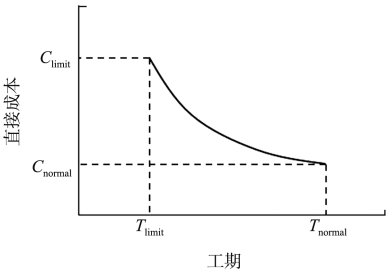


图 4 直接成本-工期关系曲线

所以,对于一个项目施工的第 i 个工序,其直接成本 C_D^i 的计算公式为:

$$C_D^i = a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i \tag{1}$$

由图 4 可得 a_i 、 b_i 、 c_i 的表达式为:

$$a_i = \frac{C_{limit}^i - C_{normal}^i}{(T_{limit}^i - T_{normal}^i)^2} \tag{2}$$

$$b_i = \frac{2(C_{normal}^i - C_{limit}^i)T_{normal}^i}{(T_{limit}^i - T_{normal}^i)^2} \tag{3}$$

$$c_i = \frac{(C_{limit}^i - C_{normal}^i)(T_{normal}^i)^2}{(T_{limit}^i - T_{normal}^i)^2} + C_{normal}^i \tag{4}$$

式中: C_D^i 为第 i 个工序的直接成本; x_i 为第 i 个工序的工期; T_{limit}^i 、 T_{normal}^i 分别为第 i 个工序的极限工期、正常工期; C_{limit}^i 、 C_{normal}^i 分别为第 i 个工序的极限成本、正常成本。

施工的间接成本主要包括项目管理费、雇员薪资等固定费用,假设为每日固定。所以间接成本 C_I 为:

$$C_I = c_1 T \tag{5}$$

式中: T 为总工期; c_1 为每日的间接费用。

根据以上假设,建立工期-成本优化目标函数,以目标函数最小为优化目标:

$$F_{MINIMIZE} = \sum_{i=1}^N (a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i) + c_1 T \tag{6}$$

式中: N 为项目的总工序数目。

2.2 施工进度优化约束条件

1) 假设工程施工的各个关键施工步骤不间断进行,且承包方投入的资金、人力足够支持进行

合理范围内的施工优化。

2) 第 i 个工序的优化工期应处于极限工期和正常工期之间, 则有 $T_{\text{limit}}^i \leq x_i \leq T_{\text{normal}}^i$ 。

(3) 施工进度优化后的工期之和不大于工程项目给定的计划总工期, 则有: $\sum_{i=1}^N x_i \leq \sum_{i=1}^N T_{\text{normal}}^i$ 。

3 施工进度优化算法

3.1 QPSO 算法流程

采用量子粒子群优化 (quantum particle swarm optimization, QPSO) 算法对该高桩码头主体施工进度进行优化。量子粒子群优化算法^[12-13]是一种基于群体智能的全局随机搜索算法, 其认为粒子以一定的概率密度出现在空间任何点处, 并以波函数描述粒子的状态, 波函数模平方是粒子出现的概率密度。因此粒子可在整个可行解空间中搜索, 寻找全局最优解。与基本粒子群算法相比, QPSO 算法在解空间中寻求最优解的能力更强。

QPSO 算法的流程为: 在以工序总数目 N 为维度的搜索空间中, 假设有 M 个代表工期-成本最优组合的潜在解所组成的群体 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ 。

算法迭代到第 t 步时, 第 j 个潜在解的工期为:

$$\mathbf{X}_j(t) = [X_{j,1}(t), X_{j,2}(t), \dots, X_{j,N}(t)] (j=1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

根据式(1)可得第 j 个潜在解的直接成本值。

在第 j 个潜在解的搜索经验中找到的最优工期组合称为个体经验最优位置, 即:

$$\mathbf{P}_j(t) = [P_{j,1}(t), P_{j,2}(t), \dots, P_{j,N}(t)] \quad (8)$$

将第 t 次迭代和 $t-1$ 次迭代得到的工期组合代入式(6)计算对应的总成本值, 使总成本更小的工期组合就是第 j 个潜在解的个体经验最优工期组合, 为:

$$\mathbf{P}_j(t) = \begin{cases} \mathbf{X}_j(t) & (f[\mathbf{X}_j(t)] < f[\mathbf{P}_j(t-1)]) \\ \mathbf{P}_j(t-1) & (f[\mathbf{X}_j(t)] \geq f[\mathbf{P}_j(t-1)]) \end{cases} \quad (9)$$

所有潜在解中使得总成本最小的工期组合即为群体全局最优工期组合, 称作群体全局最优位置, 即: $\mathbf{G}(t) = [G_1(t), G_2(t), \dots, G_N(t)]$, 由式(10)确定:

$$\mathbf{G}(t) = \mathbf{P}_g(t) \quad (10)$$

式中: g 为代表全局总成本值最小的工期组合的位置, $g \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

下面给出潜在解的更新公式: 在每一个工序的搜索空间中, 第 j 个潜在解依概率收敛于局部吸引子 $p_{j,i}(t)$ 。该局部吸引子以一定概率出现在个体经验最优位置和全局最优位置之间的任何一处。 $p_{j,i}(t)$ 的计算公式为:

$$p_{j,i}(t) = \varphi_i \cdot P_{j,i}(t) + [1 - \varphi_i] \cdot G_i(t) \quad (11)$$

式中: $p_{j,i}(t)$ 为第 t 次迭代中第 i 项工序第 j 个潜在解搜索到的最优工期组合; $G_i(t)$ 为第 t 次迭代中第 i 项工序 M 个潜在解中最优工期组合; φ_i 为 $(0, 1)$ 之间的随机数。

潜在解的更新公式:

$$X_{j,i}(t+1) = p_{j,i}(t) \pm b \cdot |C_i(t) - X_{j,i}(t)| \cdot \ln[1/u_{j,i}(t)] \quad (12)$$

式中: $u_{j,i}(t)$ 为 $(0, 1)$ 之间的随机数; b 为扩张-收缩因子, 用于控制算法的收敛速度, 常采用线性减小的取值策略, 计算公式见式(13); $C_i(t)$ 为当前群体所有个体最优平均位置, 其定义见式(14)。

$$\beta = \frac{(1.0 - 0.5) \times (\text{MAXITER} - t)}{\text{MAXITER}} + 0.5 \quad (13)$$

式中: MAXITER 为人为设定的总迭代次数。

$$C_i(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M P_{j,i}(t) \quad (14)$$

3.2 QPSO 算法的执行过程

步骤 1: 导入工程项目原始的成本、工期数据, 设置潜在解个数为 M 、总迭代次数 MAXITER、算法运行次数。

步骤 2: 初始化 N 项工序的工期 $X(0)$, 个体经验最优工期组合 $P(0)$ 和群体全局最优工期组合 $G(0)$ 。考虑优化工期的约束条件, 随机生成 M 种工期组合, 且每个工序的初始工期应处于极限工期和正常工期之间。根据式(6)分别计算这 M 种工期组合的总成本值, 总成本值最小的那组粒子是当前的群体全局最优工期组合。

步骤 3: 采用式(11)得到随机点的位置, 采用式(12)计算群体平均最优位置 $C_j(t)$ 。

步骤 4: 由式(12)对 M 种工期组合进行 1 次迭代更新。

步骤 5: 更新后, 根据式(6)计算当前 M 种工期组合的总成本值, 并与前一次迭代的总成本值作比较, 由式(9)确定 $P_j(t)$ 。

步骤 6: 采用式(10)确定当前群体全局最优工期组合, 并与前一次迭代结果作比较, 使得总成本值更小的工期组合作为群体全局最优位置。

步骤 7: 重复步骤 3~6, 直到满足循环结束条件, 即 QPSO 算法运行次数达到设定值。

4 施工信息

本文以某高桩梁板式码头主体施工过程作为施工进度优化的研究对象。码头施工过程和施工工艺共分为 10 个关键步骤, 假设各个步骤不间断进行, 如图 5 所示。

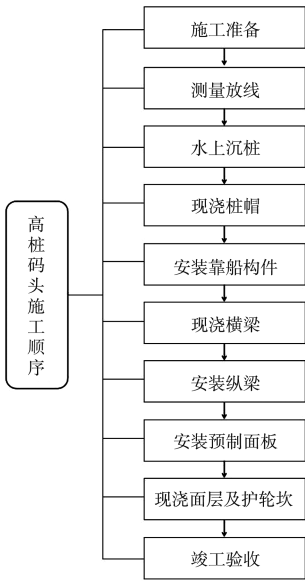


图 5 码头施工工序

基于 BIM 技术构建的项目三维模型自带各构件的工程信息, 可导出各构件的明细表, 再借助 BIM 工程量计算软件进行计算。预算人员根据软件得到的工程量和材料用量, 结合直观的三维模型, 在理解图纸的前提下估算各项工序的成本和工期。而当设计变更时, 由于 BIM 技术的参数化优势, 模型数据能够自动更新。将 BIM 技术应用于进度计划编制, 使得信息在设计人员和预算人员之间透明流畅地交互, 提高了数据收集、汇总和共享的效率和准确性。

考虑到码头体量巨大, 而每段结构基本相同, 因此本文在优化过程中将码头主体施工分为 4 个相同的分段进行, 取码头主体结构的 1/4 段作为项目施工进度优化的对象。

在进行优化前, 码头主体中 10 项施工工序的施工工期与成本数据见表 1。可以看出, 间接成本为 2 万元/d, 码头 1/4 主体的正常工期为 372 d。

表 1 码头 1/4 主体施工优化前的工期与成本

施工步骤	工期/d		直接成本/万元		正常总成本/万元
	正常工期	极限工期	正常成本	极限成本	
施工准备	15	12	10	14	40
测量放线	12	8	10	16	34
水上沉桩	60	50	50	70	170
现浇桩帽	30	25	30	40	90
安装靠船构件	40	30	18	28	98
现浇横梁	50	40	28	45	128
纵梁安装	40	30	20	30	100
预制面板安装	60	40	30	40	150
现浇面层及护轮坎	50	38	30	45	130
竣工验收	15	12	10	15	40
合计	372	285	236	443	980

5 优化结果分析

将工期和成本数据导入算法, 根据多次调试, 设定潜在解个数 M 为 50, 总迭代次数 MAXITER 设为 120, QPSO 算法运行次数为 10。得到的目标函数最优值与迭代次数之间的关系曲线见图 6。可以看出, 当迭代次数大于 80 时, 目标函数趋于一个定值, 为 900.3 万元, 而在迭代次数达到 20 次时, 总成本已经优化至 901 万元以下, 由此可见量子粒子群算法能以较少的迭代次数快速靠近最优值, 在施工进度优化问题中有着显著优势。

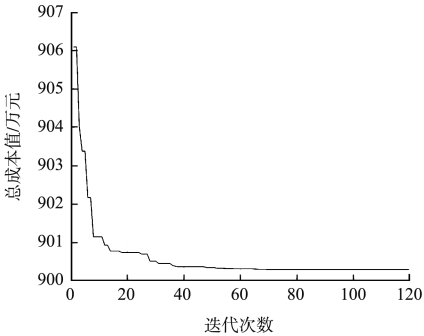
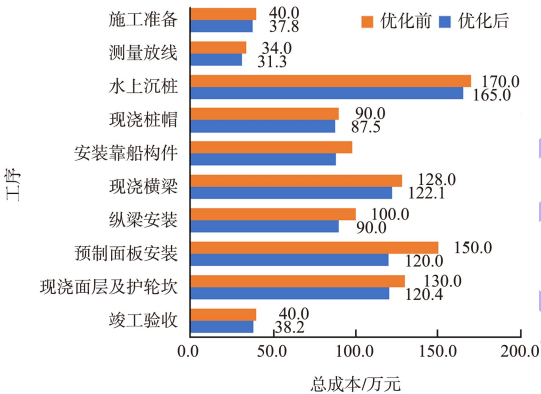


图 6 总成本值-迭代次数关系

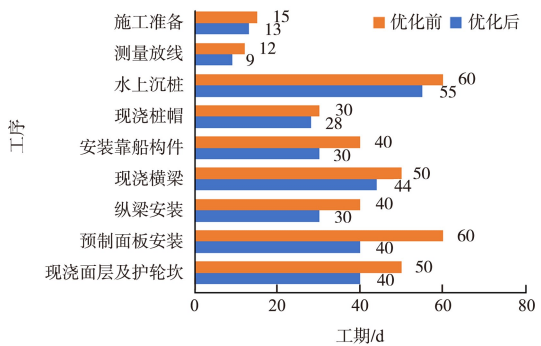
基于该算法，给出码头 1/4 主体优化后的施工工期与成本信息见表 2，码头 1/4 主体优化前后各项工序的总成本与工期对比见图 7。

表 2 码头 1/4 主体施工优化后的工期与成本

施工步骤	工期/d	直接成本/万元	总成本/万元
施工准备	13	11.8	37.8
测量放线	9	13.3	31.3
水上沉桩	55	55.0	165.0
现浇桩帽	28	31.5	87.5
安装靠船构件	30	28.0	88.0
现浇横梁	44	34.1	122.1
纵梁安装	30	30.0	90.0
预制面板安装	40	40.0	120.0
现浇面层及护轮坎	40	40.4	120.4
竣工验收	13	12.2	38.2
合计	302	296.3	900.3



a) 总成本



b) 工期

图 7 优化前后各项工序的总成本和工期的对比

对比表 1、2 可知，码头 1/4 主体优化前的正常总工期为 372 d，正常工期条件下的码头 1/4 主体的施工总成本为 980.0 万元。而优化后的总工期为 302 d，施工总成本降为 900.3 万元，与原正常工期相比缩短了 70 d，施工成本减少了 79.7 万元。

对于具体的施工步骤，优化效果最明显的是预制面板安装，其施工工期缩短了 20 d，这是由于该工期持续时间相对较长，出现预制速度和堆场存货能力与施工进度不匹配等问题的概率因此增大，且水上施工的工期受风浪等环境因素的影响很大，这对于施工工期的预先设置造成较大障碍。而项目中基于 BIM 模型的施工进度优化方案，不仅可以在工程开展之前尽可能对上述影响因素进行充分预演，帮助选择最稳妥的施工方 案，而且可以在项目进展过程中通过动态更新项目环境参数以及项目实际运行数据，利用优化算法及时优化项目进度安排，确保项目全生命周期的进度最优化。例如，通过对预制面板合理分片，或根据项目实际环境因素合理选用对恶劣突发天气适应度更高但造价更低的吊装工艺^[14]、驾桥机^[15]、面板结构形式^[16]等措施，缩短计划面板浇筑的工期，可以在保证工程质量的前提下有效提高施工效率。

此外，该优化模型不仅适用于本高桩码头工程，还可在此基础上结合其他水工建筑的工程实际情况进行模型的拓展和升级，为水工建筑工程的施工最优化提供解决方案。

6 基于 BIM 技术的施工进度管理

6.1 4D 模型建立

传统的施工进度管理通常采用横道图、网络计划图等方法，这些方法存在相互独立性和共享交互不透明性的问题^[17]，不能表现复杂工序，而且当实际工期和成本有所变化时，往往只能凭借施工管理人员的经验察觉偏差、调控进度，无法实现工程进度的全局优化和及时更新。而高桩码头的规模巨大、工序复杂、施工管理难度更大，亟需借助科学的优化算法和 BIM 技术的信息化优势提高其施工进度管理的时效性和透明性。

基于上述高桩码头的施工进度优化模型及优化数据，进一步采用与 Revit 软件相匹配的施工模拟软件 BIMFILM 进行施工进度管理，通过在三维模型中加入施工时间线，建立高桩码头 4D 施工模

型。首先将 Revit 软件中导出的高桩码头三维模型导入 BIMFILM 虚拟施工软件, 再根据施工工序对高桩码头构件进行分类管理, 为各个工序构件赋

予动画指令和动画指令的起止时刻, 展现码头施工关键节点的工程概况最终模型的施工管理界面如图 8 所示。

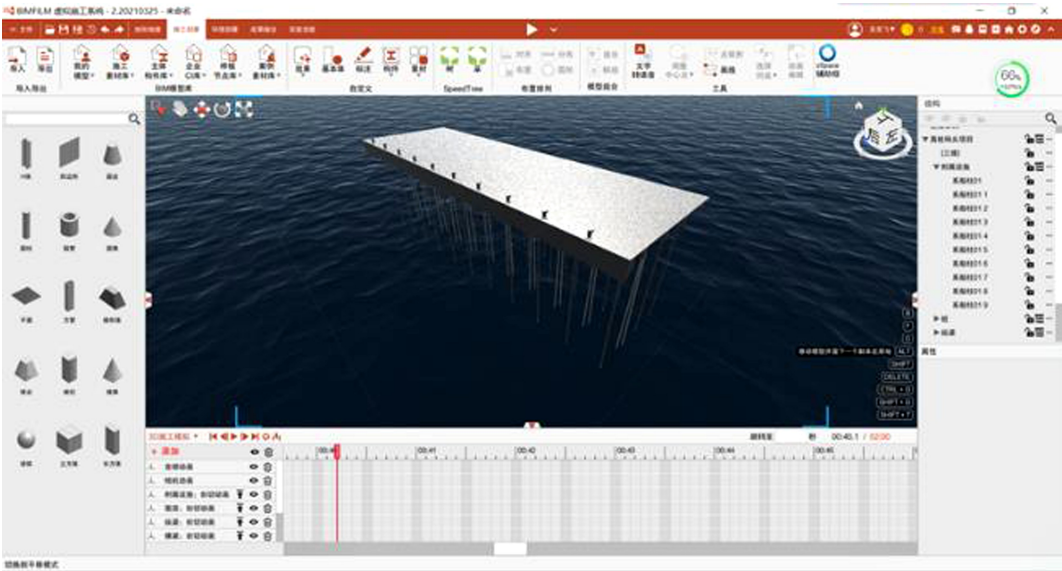


图 8 码头最终模型的施工管理界面

6.2 4D 模型优势

1)模拟施工全过程。施工前进行施工进度仿真模拟, 高度还原各工序施工的顺序与进度, 在考察进度编排是否合理的同时, 预先理解施工难点, 有助于实际施工中对进度的把控。

2)分析实际施工进度的偏差。由 4D 施工模型可获得任意时间节点的施工三维模型, 将实际施工情况与施工模型对比便可得到实际施工进度的偏差。可采用增加滞后关键工序和其后续工序的资源配置, 或压缩工序衔接时间等措施合理安排工程进度。

3)实现工程项目的快速动态优化管理。当遇到突发状况不得不延长未完成工序的工期, 或未完成工序的直接费用有所变化时, 比如材料价格涨跌、施工工艺改进、机械设备更换, 施工技术人员可将新的工期和成本数据导入进度优化算法, 根据优化后的工期创建新的 4D 施工模型, 全面安排施工进度。此外, 基于 4D 施工模型的动态管理可以使各参建方实时掌握项目的最近施工进度及施工方案, 利于及时沟通, 实现施工信息的多方交互和共享。

7 结语

1)BIM 技术能实现工程信息的无损传递, 从编制进度计划到管理施工进度, BIM 技术都能贯穿其中, 还能有效地解决工程项目各参与单位信息管理彼此独立、时效性差及沟通效率低等问题。

2)本文给出算法的计算式、流程及相应的解释, 建立通俗易懂、互操作性好的码头施工优化模型, 基于量子粒子群算法对高桩码头全生命周期的施工工期和成本进行优化, 通过实际工程项目验证其良好的优化效果。

3)综合优化算法、BIM 模型和 BIMFILM 软件, 构建引入时间参数的高桩码头施工进度 4D 信息化管理方法, 实现高桩码头建模和施工进度的四维最优化可视化管理。

参考文献:

[1] 马智亮, 蔡诗瑶. 基于 BIM 的建筑施工智能化[J]. 施工技术, 2018, 47(6): 70-72, 83.

[2] 王晋. 引导水运工程走上 BIM 之路[N]. 中国交通报, 2015-06-02(6).

[3] 倪寅. BIM 技术在水运工程中的应用[J]. 水运工程, 2018(4): 128-133, 166.

(下转第 183 页)