

基于 BIM 的碾压混凝土坝施工进度-成本联合管控

黄建文^{1,2}, 毛宇辰¹, 王 东¹, 祝建军³, 周宜红^{1,2}

- (1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
3. 三峡新能源盐城大丰有限公司, 江苏 盐城 224100)

摘要:为解决施工进度与成本联动性不强, 施工过程中缺乏对进度及成本的有效监控, 难以及时发现偏差并调整实施计划等问题, 将建筑信息模型(BIM)和改进挣值法应用于碾压混凝土坝施工进度-成本联合管控中。通过建立大坝三维模型, 用 Primavera 6.0 软件编制进度计划, 计算施工成本, 再将进度、成本信息导入 Navisworks 软件, 实现大坝三维模型与进度-成本信息的匹配关联, 构建基于 BIM 的大坝施工期 5D 进度-成本可视化模型及动态联合管控信息平台。利用平台 API 接口和 C#. NET 语言二次开发插件实现大坝施工进度-成本的仿真模拟和任意时刻施工面貌及浇筑单元的进度、成本、资源配置和浇筑强度等信息可视化查询; 监测建造过程中改进挣值指标的动态变化并预警, 及时调整实施计划实现施工进度-成本联合管控。工程应用验证了基于 BIM 的碾压混凝土坝施工进度-成本联合管控技术的实用性和优越性, 具有推广价值。

关键词:水电工程; BIM-5D; 碾压混凝土坝; 可视化管理; 进度-成本联合管控; 改进挣值法

中图分类号: TV51; TV642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2019)05-0066-07

Construction schedule-cost joint control of RCC dams based on BIM//HUANG Jianwen^{1,2}, Mao Yuchen¹, WANG Dong¹, ZHU Jianjun³, ZHOU Yihong^{1,2} (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Three Gorges New Energy Yancheng Dafeng Co., Ltd., Yancheng 224100, China)

Abstract: In order to solve the problems such as weak linkage between construction schedule and cost, lack of effective monitoring on schedule and cost during construction, difficult to find the deviation and adjust construction plans in time, this paper introduced a method which applies BIM technology and improved earned value method to construction schedule-cost joint control of RCC dams. By establishing a 3D model of the dam, using Primavera 6.0 software to prepare a construction schedule and calculate the construction costs, and importing construction schedule and cost information into Navisworks software, the relevance matching of the 3D model and the schedule-cost information was realized. Also a 5D construction schedule-cost information visualization model and a dynamic joint management platform based on BIM during construction period was established. Secondary development plug-ins based on C#. NET and API interface can realize analogue simulation of the schedule-cost and visual information query at any time such as construction appearance and schedule, cost, resource allocation, pouring strength of the placing unit. Monitoring the dynamic changes of improved earned value indicators, early warning during construction and adjusting construction plans can realize schedule-cost joint control during the construction. The engineering application verifies the practicability and superiority of the technology, which possesses the value of popularization.

Key words: hydropower engineering; BIM-5D; RCC dam; visualization management; construction schedule-cost joint control; improved earned value method

碾压混凝土坝工程具有建设工程量大、工期要求紧、施工强度高等特点, 已在我国水利水电工程建设中应用广泛^[1]。进度和成本目标在施工过程中密切相关、相互影响^[2]。碾压混凝土坝施工受施工

条件复杂、设计变更频繁、施工信息共享程度低等因素带来的进度-成本失控问题, 成为困扰水电承包商项目管理成败的难题^[3]。如何合理控制施工成本同时保障施工进度, 实现二者的动态联合管控, 综合

基金项目: 国家自然科学基金(51879147)

作者简介: 黄建文(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事工程项目管理研究。E-mail: jwhuang@ctgu.edu.cn

达成项目施工管理的目标将是重中之重。

建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 能有效地集成项目全生命周期中建筑物几何信息、进度信息、成本信息、资源及施工强度等属性信息,实现工程各参建方、部门之间信息传递共享,能够避免由于信息共享度低、共享慢而导致的进度延误及成本超支,已在建筑行业得到广泛应用^[4]。美国斯坦福大学工程中心最早提出 4D 理论,随着 BIM 技术发展,逐渐形成以三维模型为基础,不断添加各类别信息的 n D 模型。王婷等^[5-7]将 3D BIM 模型与进度计划文件关联,实现了 4D 进度可视化模拟、现场布置演示和三维技术交底,并运用到房建、基坑及桥梁施工领域;张连营等^[8-10]将进度、成本共同集成构建了 5D 信息平台,实现了可视化模拟及多维度信息查询;Davies 等^[11-12]建立云 BIM 模型,实现 BIM 信息实时共享。上述学者将多类别工程信息与 3D BIM 模型关联,提升了工程信息的集成度和管理效率,实现了可视化施工模拟、工程信息查询共享,但在进度和成本目标联合控制优化方面的研究较少。随着水利水电工程信息化概念的提出,领域内专家和学者也将 BIM 理念应用到水利水电工程设计、施工与管理中。肖彬等^[13]运用 Bentley 旗下软件进行水电站厂房内部各专业的协同设计和碰撞检查,弥补了二维设计的不足,优化了设计方案。苗倩^[14]通过 Navisworks 软件中的 TimeLiner 模块进行施工三维动态演示,实现了大坝施工过程的可视化展示。王仁超等^[15-16]通过引入工业基础类 (industry foundation classes, IFC) 标准,构建了基于 BIM 的混凝土浇筑施工信息模型,提升了建模效率和自动化程度。Smith^[17]提出了造价信息数据处理的 5D 模型,提高了成本管理的效率。邱世超等^[18]引入 5D 技术和 IFC 标准,建立了多维度信息模型,并开发了模型动态可视化管理系统。综上所述,广大学者在水利水电设计、施工过程三维可视化、多维信息关联集成以及 IFC 标准的应用开发方面做出了大量研究,使多维 BIM 模型的构建效率提升,信息集成和协同共享度更高。但是进度-成本信息的联动性仍然不强,施工过程中进度-成本信息缺乏有效的监控及预警,进度、成本计划调整滞后且难以同时兼顾,进度-成本联合管控难度大。

为了解决以上问题,本文结合 BIM 技术和改进挣值法,将坝体三维模型与进度信息和成本信息进行匹配关联,构建碾压混凝土坝 IFC 信息模型和 5D 进度-成本联合管控信息平台,通过平台 API 接口和 C#. NET 语言开发的插件实现碾压混凝土坝施工全过程信息查询、进度-成本可视化仿真模拟及监测预

警,以期为碾压混凝土坝施工进度-成本联合管控提供思路。

1 进度-成本动态联合管控信息平台架构

项目进度和成本控制是随着项目的进展而持续进行的,是一个动态调整过程,项目在执行过程中,会遇到各种干扰因素使实际进度和成本偏离原目标^[19]。采用挣值法对项目执行过程中的进度和成本偏差进行分析是一种常见的项目管理办法^[20]。本文结合 BIM 技术构建碾压混凝土坝 5D 进度-成本动态联合管控信息平台,其架构如图 1 所示。

该平台采用 Autodesk Navisworks 作为联合管控信息平台的中枢,基于 AutoCAD 建立碾压混凝土坝三维模型,使用 Primavera 6.0 编制及修改进度、成本计划,施工过程各类属性信息整合存储在 Access 数据库中,便于二次开发插件的调用。将三维模型与进度、成本及资源等属性信息导入 Navisworks 并按照一定规则集成,实现大坝三维模型、进度信息模型、成本信息模型及资源等属性信息的关联,形成 BIM-5D 信息模型。在此基础上对施工进度-成本进行可视化模拟,当模拟结果不符合施工需要,可以返回 Primavera 6.0 软件对进度、成本计划进行调整,并再次关联 BIM-5D 信息模型。通过 Navisworks 二次开发的插件实现进度-成本信息的可视化和施工资源信息查询,结合改进挣值法开发插件对进度、成本偏差进行监测预警,将信息反馈给项目参与方,找出偏差原因,及时调整实施计划,实现进度、成本的动态优化调整和联合管控。

IFC 标准是由国际协同工作联盟 (International Alliance for Interoperability, IAI) 应用面向对象技术所建立的信息标准,可作为 BIM 技术的主流信息交换标准^[21],已广泛应用于建筑工程领域。为适应 AEC (Architecture, Engineering and Construction) 领域的复杂性,IFC 提供了扩展方法,可实现对水利水电工程领域的 IFC 结构扩展^[22]。根据碾压混凝土坝施工信息模型的特点和进度-成本联合管控信息平台架构,将大坝实体信息、工程量信息、进度信息、成本信息以及资源信息之间建立联系,用 EXPRESS-G 视图描述 IFC 标准下的碾压混凝土坝 5D 施工信息模型如图 2 所示。该信息模型可用于碾压混凝土坝施工信息集成管理,并易于与其他 IFC 标准化的管理平台实现数据共享。

2 进度-成本动态联合管控信息平台构建

2.1 大坝混凝土浇筑三维模型构建

进行大坝施工过程可视化仿真模拟前,需要划

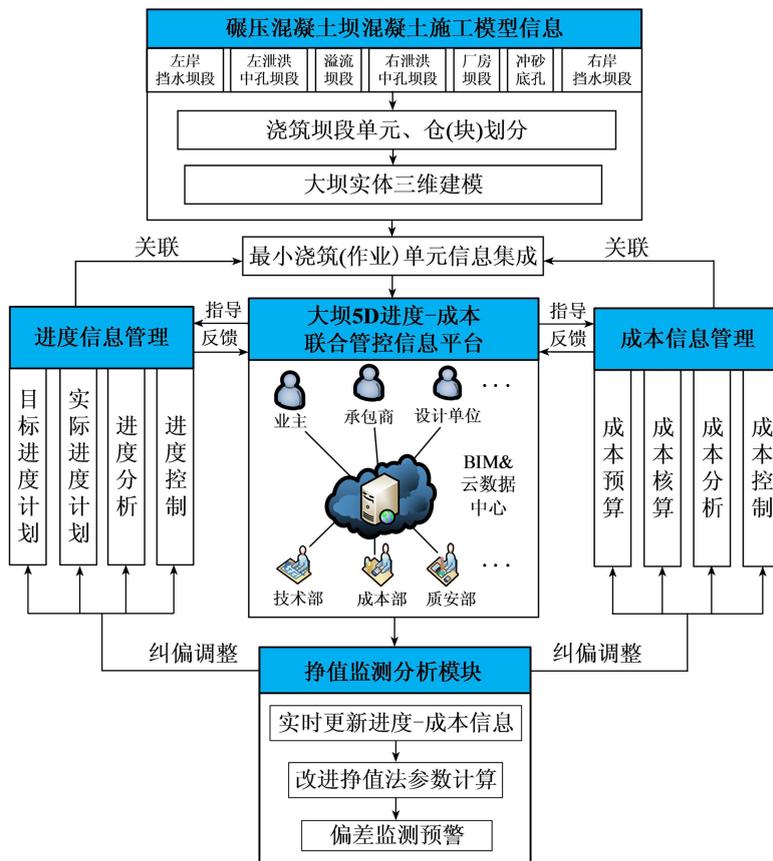


图1 碾压混凝土坝进度-成本动态联合管控信息平台架构

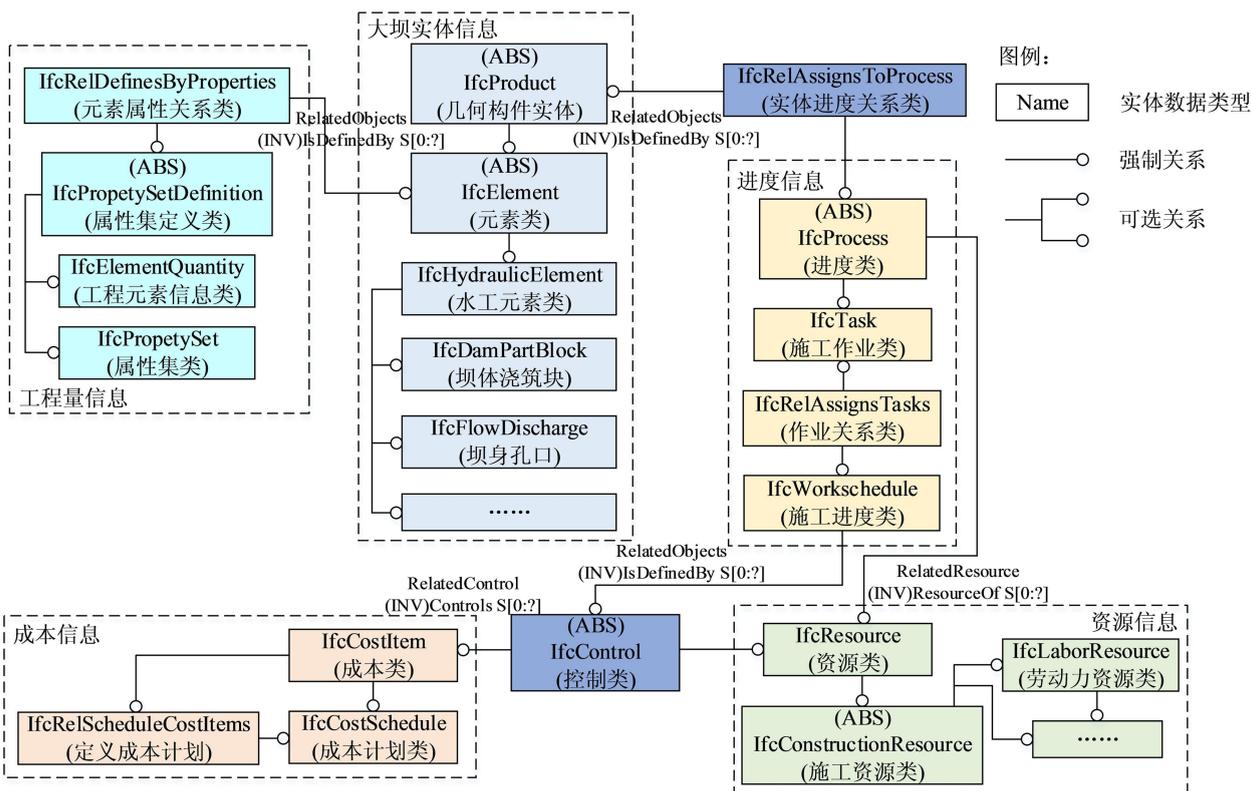


图2 IFC 标准下的碾压混凝土坝施工信息集成模型

分大坝三维实体模型。通常以大坝工作分解结构 (work breakdown structure, WBS) 和实际浇筑施工分层为依据,在高程上对各水平坝段进行划分,如

图3所示。由于水工构筑物施工时不同约束区的应力控制要求不同,因此基础强约束区(浇筑块高程为0~0.2L,其中L为浇筑块边长),基础弱约束区

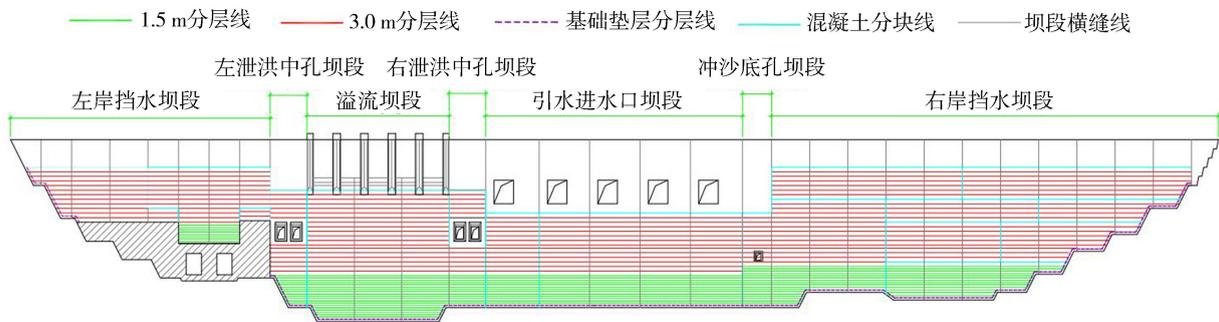


图3 大坝混凝土浇筑分层示意图

及非约束区(浇筑块高程大于 $0.2L$)的浇筑层厚度 Δh 和浇筑间歇期 Δt 取值不同,浇筑块的高程和浇筑日期分别为

$$\begin{cases} H_i(m+1) = H_i(m) + \Delta h \\ T_i(m+1) = T_i(m) + \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\Delta h = \begin{cases} 1.5 \text{ m} & 0 \leq H_i(m) \leq 0.2L \\ 3 \text{ m} & H_i(m) > 0.2L \end{cases}$

$\Delta t = \begin{cases} 5 \text{ d} & 0 \leq H_i(m) \leq 0.2L \\ 7 \text{ d} & H_i(m) > 0.2L \end{cases}$

式中: $H_i(m)$ 为 i 坝段第 m 个浇筑块的高程; $T_i(m)$ 为 i 坝段第 m 个浇筑块的浇筑日期。

利用 AutoCAD 内嵌的 AtuoLisp 语言二次开发的插件可快速对各坝段、浇筑层(块)进行切分和相关参数的提取^[23],形成最小浇筑作业单元即浇筑块,每个浇筑块有唯一对应的进度-成本信息。

2.2 施工进度信息、成本信息与三维模型关联

Primavera 6.0 项目管理软件由美国引进,作为 P3E/C 的后续版本,拥有更好的交互和强大的功

能,已广泛应用于核电、水电等长周期大型建设项目施工进度、成本管理中^[24-25]。在 Navisworks 软件中的 TimeLiner 模块中导入运用 Primavera 6.0 编制的大坝混凝土施工进度计划文件,即可实现进度信息与三维模型关联。

统计大坝混凝土浇筑工程量,参考定额规范,计算出对应三维模型和进度计划的各浇筑块的人工费、材料费、机械费、总成本等,并保存到 Access 数据库。将施工成本信息导入 Navisworks,通过映射规则将各施工作业任务的成本信息与工程构件匹配,完成成本信息与三维模型的关联。

2.3 施工动态模拟与可视化查询

施工进度、成本信息与大坝三维模型在 Navisworks 软件中关联后,形成大坝施工期 5D 进度-成本动态联合管控信息平台,利用 TimeLiner 的模拟功能,可以模拟大坝施工过程中进度执行及成本使用情况,并以不同颜色区分构件的进度状态,如图 4 所示。Navisworks 软件中提供 .NET API 接口,基于 Microsoft Visual Studio 2013 软件平台和 C#语

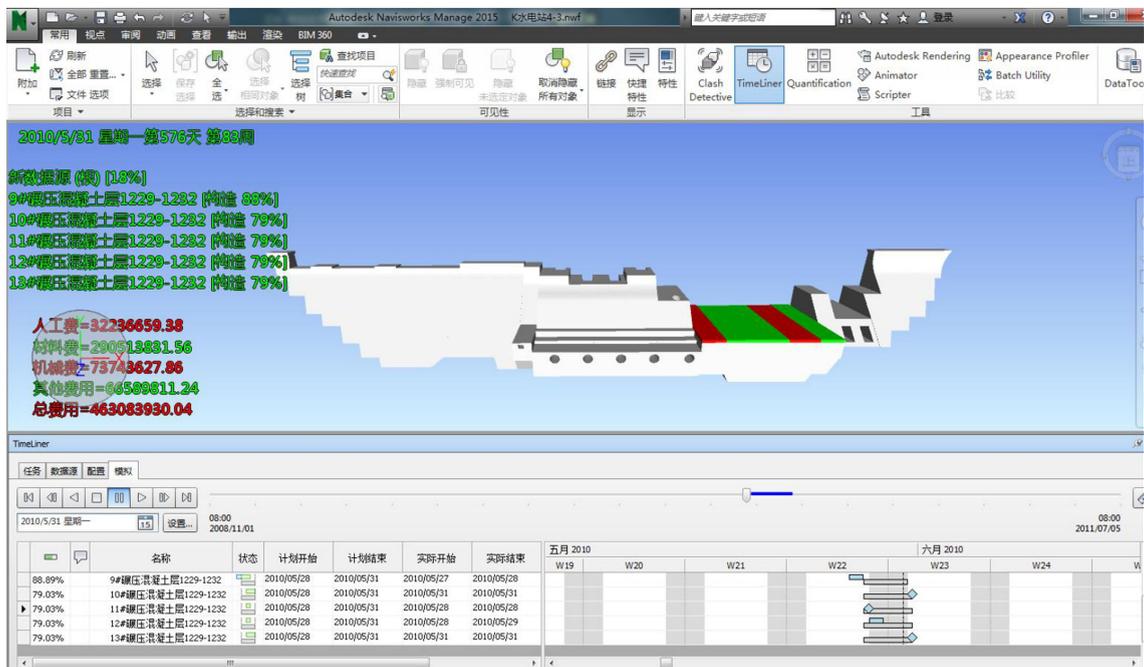


图4 施工进度-成本可视化模拟

言编译 Navisworks 窗口插件实现大坝浇筑施工进度面貌查询、浇筑强度查询。

3 基于改进挣值法的进度-成本动态联合管控

挣值法是分析进度与成本偏差的控制方法,传统挣值法将目标实际与计划进行对比分析,测量计划工作预算成本 P_V 、已完工作实际成本 A_C 、已完工作预算成本 E_V 之间的差异,计算进度偏差 S_V 和成本偏差 C_V 来衡量项目的执行情况^[26]。但一个项目的成功与否与多个管理任务目标的实现有关,除了进度、成本之外,质量、安全也是不可或缺的要素,传统挣值法不能反映工程质量和安全的实际情况,也无法衡量质量、安全整顿工作对项目进度、成本的影响。本文对传统挣值法的监测要素进行优化,将质量和安全因素纳入挣值计算和分析体系,再利用 Navisworks 软件 API 接口和 C#. NET 语言二次开发的挣值分析插件自动整理数据、计算挣值指标和绘制挣值曲线,提升挣值监测预警的工作效率。

考虑质量、安全因素对项目进度、成本的影响后,当在检查时点 t_1 时,满足质量、安全标准下的已完工工程量为 Q_1^* ,对应实际工期为 $t_1 + t_Z + t_A$,则 t_1 时点的实际工程量 Q_1 可以表示为

$$Q_1 = \frac{t_1}{t_1 + t_Z + t_A} Q_1^* \quad (2)$$

$$\text{其中 } t_Z = \begin{cases} \max(y_{Fu} - T_F) & \max(y_{Fu}) > T_F \\ 0 & \max(y_{Fu}) \leq T_F \end{cases}$$

$$t_A = \begin{cases} \max(y_{Av} - T_A) & \max(y_{Av}) > T_A \\ 0 & \max(y_{Av}) \leq T_A \end{cases}$$

式中: t_Z 、 t_A 分别为进行质量修复、安全整改对项目工期的影响时间; y_{Fu} 为第 u 项质量问题所影响的工程延误时间; T_F 为质量问题影响下,该工程所在路径的总时差; y_{Av} 为第 v 项安全问题所影响的工程延误时间; T_A 为安全问题影响下,该工程所在路径的总时差。

根据上述参数和预算单价 C_0 可进行如下计算:

$$E_V^* = Q_1 C_0 \quad (3)$$

$$S_V^* = E_V^* - P_V \quad (4)$$

$$S_{PI} = \frac{E_V^*}{P_V} \quad (5)$$

$$A_C^* = Q_1^* C_1 + Z_f + A_f \quad (6)$$

$$C_V^* = E_V - A_C^* \quad (7)$$

$$C_{PI} = \frac{E_V}{A_C^*} \quad (8)$$

其中

$$Z_f = \sum_{u=1}^n f_{Zu}$$

$$A_f = \sum_{v=1}^m f_{Av}$$

式中: C_1 为实际单价; E_V^* 、 S_V^* 、 A_C^* 、 C_V^* 分别为采用改进挣值法计算的已完工程预算成本、进度偏差、已完工程实际成本、成本偏差; S_{PI} 、 C_{PI} 分别为进度绩效指数和成本绩效指数; f_{Zu} 为对工程第 u 项质量问题进行修补的成本; f_{Av} 为对工程第 v 项安全问题进行修补的成本; Z_f 为对工程 n 项质量问题进行修复的总成本; A_f 为对工程 m 项安全问题进行修复的总成本。

施工期间不断录入实际进度、成本信息,并设置挣值监测时点定期监测,设置偏差预警阈值来实现对进度-成本的监测预警。设成本偏差程度指标为 α ,进度偏差程度指标为 β ,则其计算公式如下:

$$\alpha = \frac{C_V^*}{E_V} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{S_V^*}{P_V} \quad (10)$$

项目管理者根据项目实际情况设置预警阈值和监测间隔节点。假设偏差指标的允许偏移范围为 $\pm\sigma$,偏差指标的极限偏移边界为 $\pm\varepsilon$,当偏差指标的偏移范围在 $\pm\sigma$ 到 $\pm\varepsilon$ 之间,则发出预警信号,让管理者采取纠偏措施进行控制;当偏差指标的偏移范围在 $\pm\varepsilon$ 之外,发出信号提醒管理者重新制定进度-成本基准计划,以此实现进度-成本动态联合管控。

4 工程应用

4.1 工程概况

某水电站大坝为碾压混凝土重力坝,共由 31 个坝段组成,从左岸到右岸依次为:挡水坝段(1~8号)、左岸泄洪中孔坝段(9号)、溢流坝段(10~12号)、右岸泄洪中孔坝段(13号)、厂房坝段(14~18号)、冲沙底孔坝段(19号)、右岸挡水坝段(20~31号)。坝顶高程 1303 m,坝体最低高程 1184 m,最大坝高 119 m。

4.2 施工进度模拟和可视化查询

设置施工模拟时间段、视图等选项后,Navisworks 可以直接生成施工过程中进度、成本的模拟动画,指定时间节点检验进度、成本计划实施的合理性并指导计划修改。

在进度面貌查询插件中,可以按日期选项查询大坝的施工面貌、进度、成本和施工资源信息(图 5);在浇筑强度查询插件中,可查询任意时间段混凝土浇筑强度;在成本分析插件中,主要从人工费、材料费、施工机械使用费以及总成本 4 个方面对模拟结果进行分析,可查看任意时间段的施工成本强度柱状图和累计曲线图。

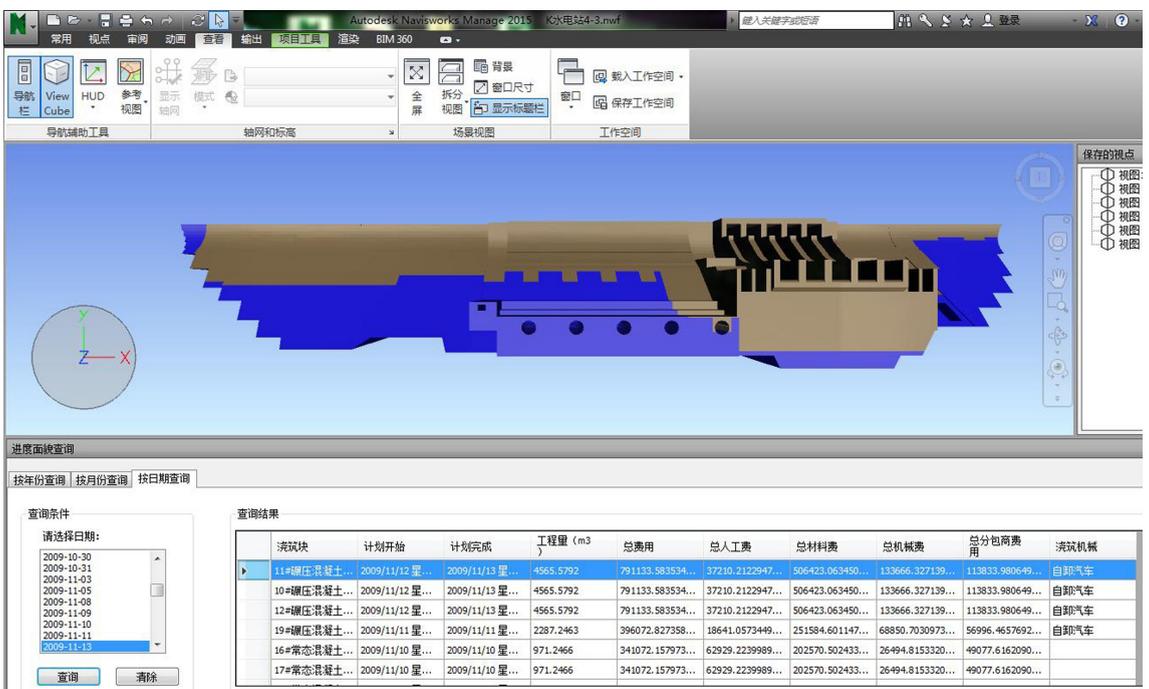


图5 坝体施工面貌查询

4.3 施工进度-成本联合管控

将大坝混凝土浇筑开工以来统计的进度、成本计划与实际数据导入挣值分析插件中,对2008年11月至2010年5月的工程数据进行分析,产生的挣值分析曲线图能够清晰了解项目的发展趋势。图6、图7分别为挣值曲线图和偏差趋势图。

$P_V = 3792.95$ 万元、 $A_C = 3483.73$ 万元、 $E_V^* = 3445.90$ 万元、 $A_C^* = 4184.30$ 万元;偏差指标为 $S_V = -104.06$ 万元、 $C_V = 205.16$ 万元、 $S_V^* = -347.05$ 万元、 $C_V^* = -495.42$ 万元、偏差程度指标为 $\alpha = 13.43\%$ 、 $\beta = 9.15\%$;设置预警边界为 $\sigma = 12.50\%$ 、 $\varepsilon = 25.00\%$ 。由上述结果可知,按照传统挣值法计算, $C_V > 0$, $S_V < 0$,表明该阶段项目成本节约、进度滞后。在考虑质量和安全因素下用改进挣值法计算, $C_V^* < 0$,说明工程实际成本较计划成本超支, $S_V^* < S_V$,说明工程实际施工进度较计划进度更为滞后,且成本超支和进度滞后是由于安全和质量问题引起的。将进度、成本的偏差程度计算值和预警边界阈值进行对比可知,成本偏差程度超出阈值,发出预警信息,提醒项目管理者及时找出偏差原因并修改计划。通过以上对比可知,传统挣值法在工程项目管理中会忽视其他因素对项目的影响,面临失效,基于改进挣值法和监测预警机制,管理者可以根据挣值监测预警的信息及时采取措施,加强工程的安全管理和质量控制,指导后续施工。

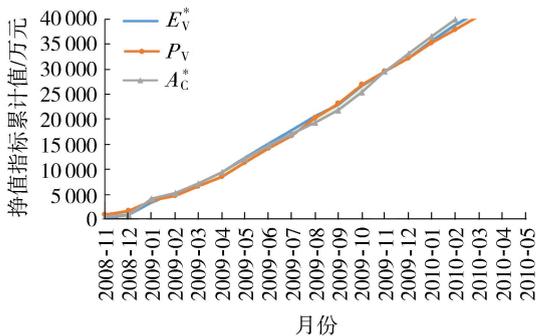


图6 挣值指标累计曲线

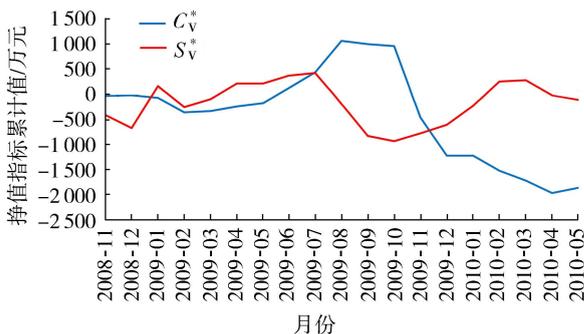


图7 偏差指标变化趋势

以月为单位监测记录项目实际进度、成本信息并录入5D联合管控信息平台,选取2009年1月作为监测节点,计算的挣值指标为 $E_V = 3688.88$ 万元、

5 结语

本文结合BIM技术和改进挣值法原理,将碾压混凝土坝三维实体模型与施工进度信息和成本信息进行关联,构建了基于BIM技术的碾压混凝土坝5D施工进度-成本可视化模型及联合管控信息平台。通过5D进度-成本信息可视化模型实现碾压混凝土坝浇筑施工过程的仿真模拟,动态展示坝体浇筑施工过程中施工成本随施工进度的变化,开发

并运用插件将施工过程中任意时刻大坝的进度面貌、施工成本、浇筑强度及设备资源信息以图形的形式直观的在 5D 信息平台中展示,为施工组织管理提供参考。

基于改进挣值法相关理论开发挣值分析插件,能快速统计 5D 信息平台的挣值数据并生成挣值指标曲线。项目管理者按实际情况设置检查时点和偏差预警阈值,根据挣值插件动态监测信息和偏差预警信息判断项目进度-成本的执行情况,及时对项目进度-成本的计划做出优化调整,实现碾压混凝土坝施工进度-成本的动态联合管控,提高项目管理效率及效益。

参考文献:

[1] 龙起煌, 郑治. 中国碾压混凝土坝技术[J]. 水利水电技术, 2013, 44(8): 11-14. (LONG Qihuang, ZHENG Zhi. Technology for construction of RCC dams in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(8): 11-14. (in Chinese))

[2] 王卓甫, 李红仙, 杨建基. 水利水电施工进度问题研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(3): 14-17. (WANG Zhuofu, LI Hongxian, YANG Jianji. Research summary of construction schedule of water conservancy and hydropower [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(3): 14-17. (in Chinese))

[3] 张社荣, 潘飞, 史跃洋, 等. 基于 BIM-P3E/C 的水电工程进度成本协同管理研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 103-112. (ZHANG Sherong, PAN Fei, SHI Yueyang, et al. Collaborative schedule-cost management of hydropower projects based on BIM and P3E/C[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(10): 103-112. (in Chinese))

[4] LIU H X, Al-HUSSEIN M, LU M. BIM-based integrated approach for detailed construction scheduling under resource constraints [J]. Automation in Construction, 2015, 53: 29-43.

[5] 王婷, 池文婷. BIM 技术在 4D 施工进度模拟的应用探讨[J]. 图学学报, 2015, 36(2): 306-311. (WANG Ting, CHI Wenting. Discussion on the application of BIM technology in the field of 4D construction schedule[J]. Journal of Graphice, 2015, 36(2): 306-311. (in Chinese))

[6] 于丽娜, 吴迈, 耿会宣. BIM 技术在基坑施工中的应用研究[J]. 图学学报, 2017, 38(4): 582-588. (YU Lina, WU Mai, GENG Huixuan. Application of BIM visualization technology in foundation pit engineering [J]. Journal of Graphice, 2017, 38(4): 582-588. (in Chinese))

[7] 马少雄, 李昌宁, 徐宏, 等. 基于 BIM 技术的大跨度桥梁施工管理平台研发及应用[J]. 图学学报, 2017, 38(3): 439-446. (MA Shaoxiong, LI Changning, XU Hong, et al. Research and application of construction management platform for long-span bridge on BIM-based

technology[J]. Journal of Graphice, 2017, 38(3): 439-446. (in Chinese))

[8] 张连营, 于飞. 基于 BIM 的建筑工程项目进度-成本协同管理系统框架构建[J]. 项目管理技术, 2014, 12(12): 43-46. (ZHANG Lianying, YU Fei. Construction of project progress-cost collaborative management system framework based on BIM [J]. Project Management Technology, 2014, 12(12): 43-46. (in Chinese))

[9] 袁振民, 王要武. 基于 BIM 和网络计划技术的建设工程施工进度-成本研究[J]. 工程管理学报, 2015, 29(4): 95-100. (YUAN Zhenmin, WANG Yaowu. Research on construction time-cost in construction projects based on BIM technology and network planning technique [J]. Journal of Engineering Management, 2015, 29(4): 95-100. (in Chinese))

[10] 陈祥赉, 董娜, 熊峰, 等. 基于 BIM 的某项目进度与成本控制研究[J]. 施工技术, 2014, 43(增刊 2): 580-583. (CHEN Xiangyun, DONG Na, XIONG Feng, et al. Research on schedule and cost control of a project based on BIM [J]. Construction Technology, 2014, 43(Sup2): 580-583. (in Chinese))

[11] DAVIES R, HARTY C. Implementing "Site BIM": a case study of ICT innovation on a large hospital project [J]. Automation in Construction, 2013, 30: 15-24.

[12] MATTHEWS J, PETER E D, LOVE, et al. Real time progress management: re-engineering processes for cloud-based BIM in construction [J]. Automation in Construction, 2015, 58: 38-47.

[13] 肖彬, 杭旭超. BIM 技术在伊辛巴水电站厂房设计施工阶段的应用与探索[J]. 水利规划与设计, 2018(2): 74-76. (XIAO Bin, HANG Xuchao. Application and exploration of BIM technology in the design and construction stage of the plant of Isinba Hydropower Station [J]. Water Resources Planning and Design, 2018(2): 74-76. (in Chinese))

[14] 苗倩. BIM 技术在水利水电工程可视化仿真中的应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 139-142. (MIAO Qian. Application of BIM technology in visual simulation of water conservancy and hydropower engineer [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2012, 30(10): 139-142. (in Chinese))

[15] 王仁超, 曹永雷. BIM 在混凝土坝工程施工信息管理中的应用[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(12): 118-121. (WANG Renchao, CAO Yonglei. Application of BIM to construction information management for concrete dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(12): 118-121. (in Chinese))

[16] 赵继伟, 魏群, 张国新. 水利工程信息模型的构建及其应用[J]. 水利水电技术, 2016, 47(4): 29-33. (ZHAO Jiwei, WEI Qun, ZHANG Guoxin. Construction and application of water resources project information model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(4): 29-33. (in Chinese))

(下转第 88 页)