

# 基于仿真的长距离引水隧洞施工全过程 进度实时控制与可视化分析研究

胡连兴<sup>1</sup>, 佟大威<sup>1</sup>, 焦 凯<sup>2</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 成都 610021)

[摘要] 长距离引水隧洞常具有埋深大、洞线长、洞径大和工程地质条件极其复杂等特点,各工序工程量大,相互间影响巨大,因此,在实际施工过程中内外环境和约束条件可能发生变化,使原定的施工进度计划与实际施工进度不可避免地产生偏差。如果这种偏差不及时纠正,将会越来越大,以致原计划进度起不到指导实际施工的作用。文章利用计算机仿真技术、控制论思想和虚拟现实技术,提出了基于仿真的长距离引水隧洞施工全过程进度实时控制与可视化分析方法,对施工进度的实时控制提供了可行性研究和科学依据。

[关键词] 长距离引水隧洞;施工进度;实时控制;可视化;仿真

[中图分类号] TV51 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)12-0097-06

## 1 前言

长距离引水隧洞常具有埋深大、洞线长、洞径大和工程地质条件复杂等特点。传统施工进度控制一般是依据开工前所制定的施工组织设计来进行的,而在实际施工过程中,内外环境和各种约束条件可能发生变化,使原定的施工进度计划与实际施工进度不可避免地产生偏差,这种偏差如不及时纠正,将会越来越大,以致原计划进度起不到指导实际施工的作用。文章利用计算机仿真技术、控制论思想和虚拟现实技术,提出了基于仿真的长距离引水隧洞施工全过程进度实时控制与可视化分析方法,对实时控制施工进度提供可行性研究和科学依据,确保项目管理人员准确、迅速地进行施工项目管理。

## 2 基于仿真的长距离引水隧洞施工全过程 进度实时控制原理

### 2.1 施工全过程仿真原理

长距离引水隧洞施工全过程仿真技术融合网络计划分析和数值仿真技术于一体,利用 CPM(critical path

method,关键路径法)网络计划技术和循环网络仿真技术<sup>[1]</sup>(cycle operation network, CYCLONE),并结合优化技术,对整个施工过程进行仿真计算和优化分析。

长距离引水隧洞仿真采用系统仿真的办法。系统分为连续性系统和离散系统<sup>[2]</sup>。前者是指系统状态随时间呈连续性变化,后者是指系统状态仅在有限的时间点发生跳跃性变化。对于工程施工系统,研究施工过程的变化与发展时,使用离散系统进行仿真已经足够了<sup>[3]</sup>。

离散系统仿真是用“仿真钟”<sup>[4]</sup>来体现“模拟时间”的运行轨迹。仿真钟采用时间步长法推进,以工序准备施工状态作为初始状态,以开始施工的时刻作为本地仿真钟的零点,从该点开始,向前推进一个时间步长  $\Delta t$ ,检测是否有满足条件的活动发生。如果有活动发生,则被认为发生在  $\Delta t$  的终止处,相应地改变系统的状态,重复上述做法直到该工序结束,并把本地仿真钟的状态及资源利用率等信息一同返回给当前工序,作为当前工序的仿真结果保存起来。依此办法,按时间顺序进行推进,对所有的仿真工序进行仿真,直到整个工程结束。长距离引水

[收稿日期] 2011-09-16

[基金项目] 国家自然科学基金(90815019);国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004);“十二五”国家科技支撑计划(2011BAB10B06)

[作者简介] 胡连兴(1985—),男,山东郓城县人,博士研究生,从事水利水电工程施工仿真与实时控制研究;E-mail:hulianxing3003@126.com

隧洞施工全过程仿真流程如图 1 所示。

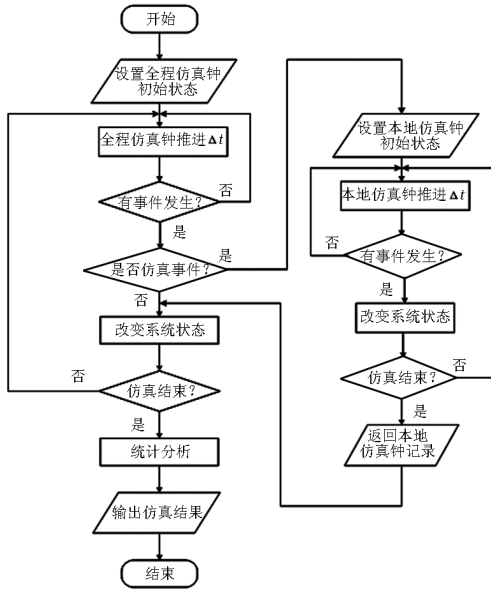


图 1 长距离引水隧洞施工全过程仿真流程

Fig. 1 Flow chart of long diversion tunnel whole construction process simulation

## 2.2 长距离引水隧洞施工系统仿真建模

长距离引水隧洞施工是一个动态过程,为了降低建模的复杂性,提高建模的效率,文章采用层次化、模型化建模的思想<sup>[5]</sup>,根据系统协调原理,将长距离引水隧洞施工仿真模型划分成两个层次:控制层模型和实施层模型。控制层模型采用 CPM 网络计划技术建立,称为 CPM 网络层模型;实施层模型采用循环网络仿真技术,称为 CYCLONE 层模型。

### 2.2.1 CPM 网络层仿真模型的建立

控制层模型对应着工程控制的基本单位——工序。工序作为一个基本控制单元,采用的施工方法、机械设备配置和人员等基本固定。长距离引水隧洞施工控制层 CPM 网络模型如图 2 所示。

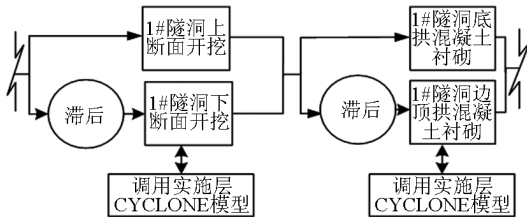


图 2 长距离引水隧洞施工控制层 CPM 网络模型

Fig. 2 CPM network model of long diversion tunnel construction control layer

### 2.2.2 CYCLONE 层仿真模型的建立

实施层模型反映控制层工序的施工工艺。以上断面开挖为例,长距离引水隧洞上断面开挖施工过程包括钻孔、装药、爆破、通风排烟、安全检查、支护、出渣等工艺,每个工艺构成实施层的一个模型单元。实施过程是循环往复的,采用循环网络(CYCLONE)技术对其进行建模分析。针对不同的施工工序的施工特点,可以建立不同施工工序的循环网络仿真模型,包括开挖工序、衬砌工序和灌浆工序。图 3 所示为开挖工序施工 CYCLONE 层仿真模型。

### 2.2.3 仿真模型参数的分类与确定方法

仿真模型参数是仿真系统的重要组成部分,也是模型方案设计的数据基础,参数的准确性与有效性直接影响到模型有效性评价及仿真结果的可信性与可用性。长距离引水隧洞施工系统仿真模型参数按照其性质和来源方式可分为确定型模型参数、随机型模型参数<sup>[6]</sup>。

1) 确定型模型参数指那些在系统运行过程中不发生改变,且能够客观地反映原型系统运行特征属性的参数,如隧洞的断面尺寸、出渣通道以及机械设备的有关性能指标等。

2) 随机型模型参数指那些在仿真运行过程中是不确定的,但可以通过统计分析方法或随机理论方法获得的模型参数,如装渣、卸渣时间等。文章研究了 9 种不同的随机分布类型,其名称及有关参数如表 1 所示。

表 1 随机分布类型的名称及其参数

Table 1 Designation and parameters of the random distribution

编号	随机分布类型的名称	参数 1	参数 2	参数 3	参数 4
1	均匀分布	0	0	Min	Max
2	正态分布	$\mu$	$\sigma$	Min	Max
3	指数分布	$\beta$	0	Min	Max
4	对数分布	$\mu_1$	$\sigma_1$	Min	Max
5	尔兰分布	$\beta$	$m$	Min	Max
6	$\gamma$ 分布	$\beta_r$	$\alpha$	Min	Max
7	泊松分布	$\lambda$	0	Min	Max
8	PERT	$p_1$	$p_2$	$p_3$	0
9	$\beta$ 分布 ( $\alpha_1, \alpha_2 > 0$ )	$\alpha_1$	$\alpha_2$	Min	Max

## 2.3 基于仿真的实时进度控制方法分析

### 2.3.1 进度偏差比较分析方法

长距离引水隧洞实际进度信息一般比较散乱,没有一个整体的概念,如果把这些信息反映到图表上,就可以直观、全面地了解实际进度信息。文章采用进度状态向量和进度动态曲线<sup>[7,8]</sup>(前锋线法)两种方法来描述实际进度与计划进度之间的偏差。

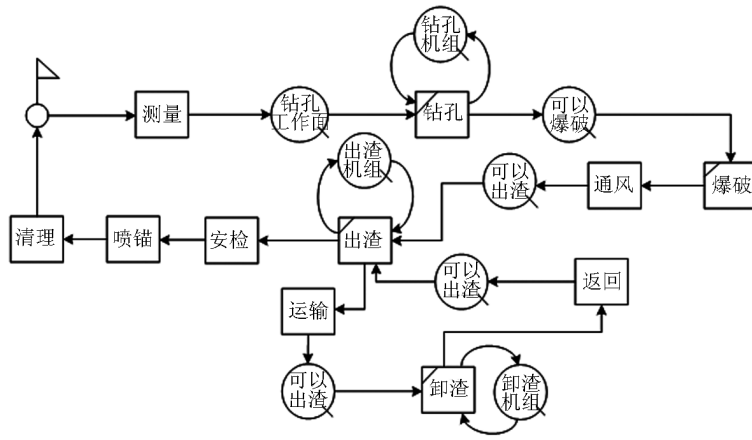


图3 开挖工序施工实施层 CYCLONE 模型

Fig. 3 CYCLONE model of drill-blasting process construction implementation layer

1) 进度状态向量。在进度控制中,任意时刻的工作状态有三种可能,一是未开始,二是已完成,三是正在进行。

设状态变量  $m_{it}$  表示在  $t$  时刻第  $i$  项工作  $a_i$  的状态,则有:

$$m_{it} = \begin{cases} -1 & \text{若 } a_i \text{ 工作在 } t \text{ 时刻还未开始} \\ 0 & \text{若 } a_i \text{ 工作在 } t \text{ 时刻正在进行} \\ 1 & \text{若 } a_i \text{ 工作在 } t \text{ 时刻已经结束} \end{cases}$$

假设工程共有  $n$  个工序,则在  $t$  时刻所有工作状态的集合构成了一个状态向量  $m_t$  :

$$m_t = \begin{bmatrix} m_{1t} \\ m_{2t} \\ \vdots \\ m_{nt} \end{bmatrix}$$

该向量中的元素只由  $-1, 0, 1$  构成,  $m_t$  为实际进度状态,即在  $t$  时刻工程中各项工作实际达到的进度状态。 $\overline{m}_t$  为计划进度状态,即在  $t$  时刻工程中各项工作计划达到的进度状态。 $d_t$  为  $t$  时刻实际进度状态与计划进度状态之差异,设:  $d_t = m_t - \overline{m}_t$  则  $d_t$  中各元素有 5 种可能的值:

$$d_{it} = \begin{cases} -2 & \text{(若工作 } a_i \text{ 进度滞后了两个状态,即计划已经完成但实际还未开始)} \\ -1 & \text{(若工作 } a_i \text{ 进度滞后了一个状态,即计划已经完成但实际正在进行)} \\ 0 & \text{(若工作 } a_i \text{ 的实际进度状态与计划一致)} \\ 1 & \text{(若工作 } a_i \text{ 进度提前了一个状态,即计划还未开始但实际正在进行)} \\ 2 & \text{(若工作 } a_i \text{ 进度提前了两个状态,即计划还未开始但实际已经完成)} \end{cases}$$

从工程开始到当前时刻的所有检查点的状态向量集合,可以构成进度状态矩阵和偏差矩阵。其中计划进度状态矩阵为  $\overline{M}_t = (\overline{m}_1, \overline{m}_2, \dots, \overline{m}_t)_{n \times t}$ , 实际进度矩阵为  $M_t = (m_1, m_2, \dots, m_t)_{n \times t}$ , 而进度偏差矩阵  $D = M_t - \overline{M}_t = (d_1, d_2, \dots, d_t)_{n \times t}$ 。上述矩阵反映了施工进度计划的执行过程,对于工程计划执行情况的评价和施工状态的预测提供了科学依据。

2) 进度动态曲线(前锋线法)。前锋线比较法是通过绘制检查时刻工程实际进度前锋线进行实际进度与计划进度的偏差比较。所谓前锋线是指在原

时标网络计划上,从检查时刻的时标点出发,依次将各项工作实际进展位置点连接而成的折线,如图 4 所示。

### 2.3.2 基于仿真的施工实时进度控制与预测方法

基于仿真的施工进度实时预测<sup>[9]</sup>是指根据任意时刻的实际施工情况,运用施工过程循环网络仿真技术,对剩余的工程施工过程进行仿真,确定剩余工程的工期以及各工序的时间参数,预测将来工程的施工进度。基于仿真的施工进度实时控制分析流程如图 5 所示。

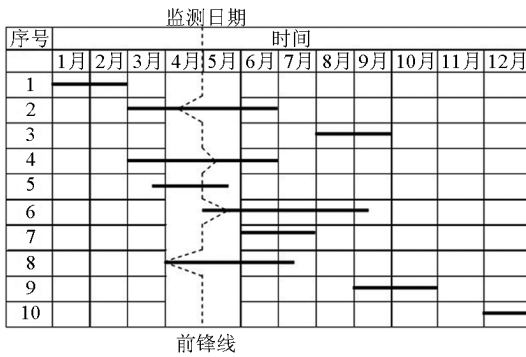


图4 前锋线比较法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the front line

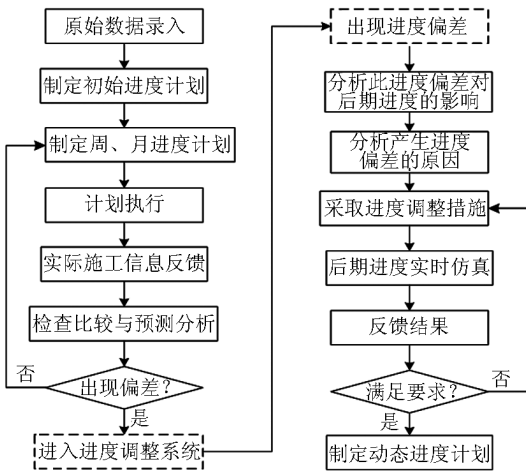


图5 基于仿真的施工进度实时控制分析流程图

Fig. 5 Real-time control flow chart of the construction schedule based on simulation

### 3 长距离引水隧洞施工实时进度可视化仿真方法

#### 3.1 基于 VR - Platform 的实时进度可视化仿真机制

长距离引水隧洞施工实时进度可视化仿真采用 VC++ 作为仿真计算平台, VR - Platform SDK 作为三维图形引擎, 通过仿真计算与 SDK 的实时交互来实现实时交互式仿真<sup>[10]</sup>。长距离引水隧洞施工进度实时交互式仿真与控制系统如图 6 所示, 它由仿真计算数据、三维场景数据库、系统仿真程序和实时交互程序等几个部分组成。

#### 3.2 施工进度实时交互式仿真系统的运行控制

为了实现对实时仿真系统的运行过程进行交互控制, 就要使用户不仅可以对真实施工场景进行观察和参与, 还能对仿真系统的状态进行控制<sup>[11]</sup>。在实时交互式仿真系统中, 用户可以实时地参与仿真

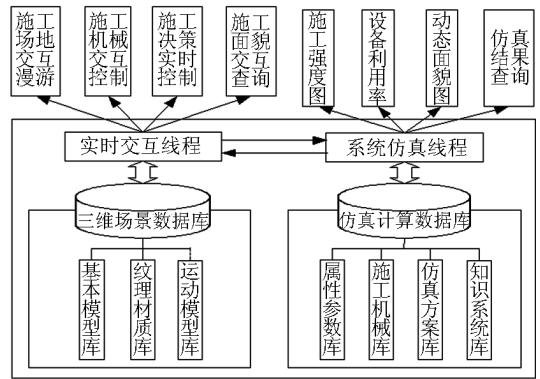


图6 长距离引水隧洞施工进度实时交互式仿真与控制系统框架

Fig. 6 Frame diagram of the construction schedule interactive simulation

系统的运行, 身临其境地体会系统状态的变化过程, 并做出交互控制。真实场景下的施工系统实时交互式仿真与控制原理如图 7 所示。

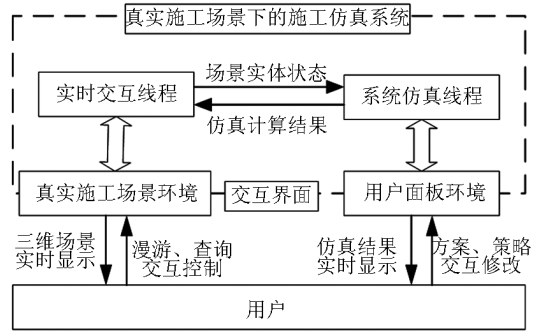


图7 真实场景下的施工系统实时交互式仿真与控制原理

Fig. 7 Interactive simulation and control principle of the construction system based on real scene

### 4 工程实例分析

#### 4.1 工程概况

某电站长距离引水隧洞群位于我国西南地区, 该工程引水隧洞群的单洞长约 16.67 km, 开挖洞径为 12.4 ~ 13.8 m, 最大埋深达 2 525 m。长距离引水隧洞群工序工作量大, 相互间影响巨大, 加之复杂的地质条件, 增加了执行施工进度的风险。文章以 1#引水隧洞为例, 对 1#隧洞进行实时控制与可视化分析。通过现场分析, 至 2011 年 3 月, 施工进度严重滞后, 按照原施工进度计划达不到 2012 年年底首台机组发电的要求, 需要通过实时仿真控制后续施工进度计划, 确保工程按时完工。

## 4.2 成果分析

利用施工进度实时仿真与可视化分析方法,可得到以2011年4月1日作为实时控制节点的1#引水隧洞后续工序施工进度计划。

### 4.2.1 仿真计算成果

1) 1#引水隧洞完工日期。至2012年12月13日,1#隧洞开挖、衬砌和灌浆施工完成,具备通水条件。

2) 施工关键路线。包括4月份节点工期、辅3-1-西上断面、辅3-1-西下断面、5#底拱台车安装、辅3-1-西边顶拱衬砌、7#横通道-辅3洞段衬砌完成、剩余洞段开挖、剩余洞段衬砌、1#洞灌浆、1#洞横通道封堵与清淤、1#洞具备充水条件。

3) 1#引水隧洞后续工序施工横道图。通过对施工进度动态仿真和实时控制的反复调整,可以得到后续工序施工的横道图,如图8所示。

### 4.2.2 长距离引水隧洞实时进度可视化仿真成果

利用VR-Platform三维互动仿真平台,结合长距离引水隧洞的实时进度,可以得到截至2011年4

月1日的可视化仿真成果。文章以上断面开挖进度为例,如图9所示。

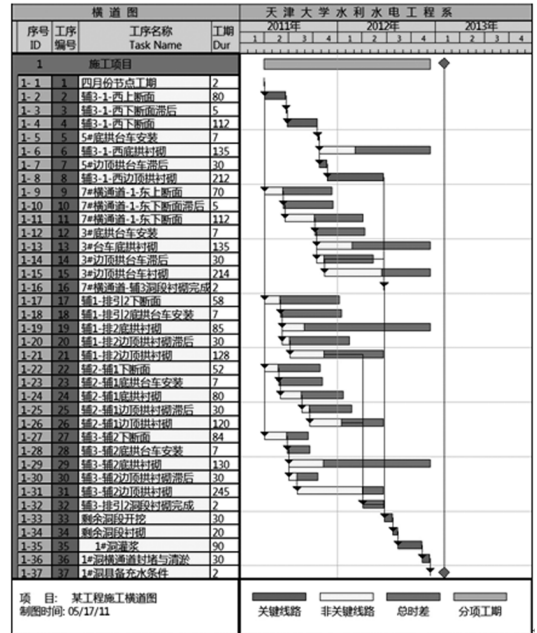


图8 1#引水隧洞施工进度实时控制横道图  
Fig. 8 Construction schedule real-time control bar chart of diversion tunnel 1

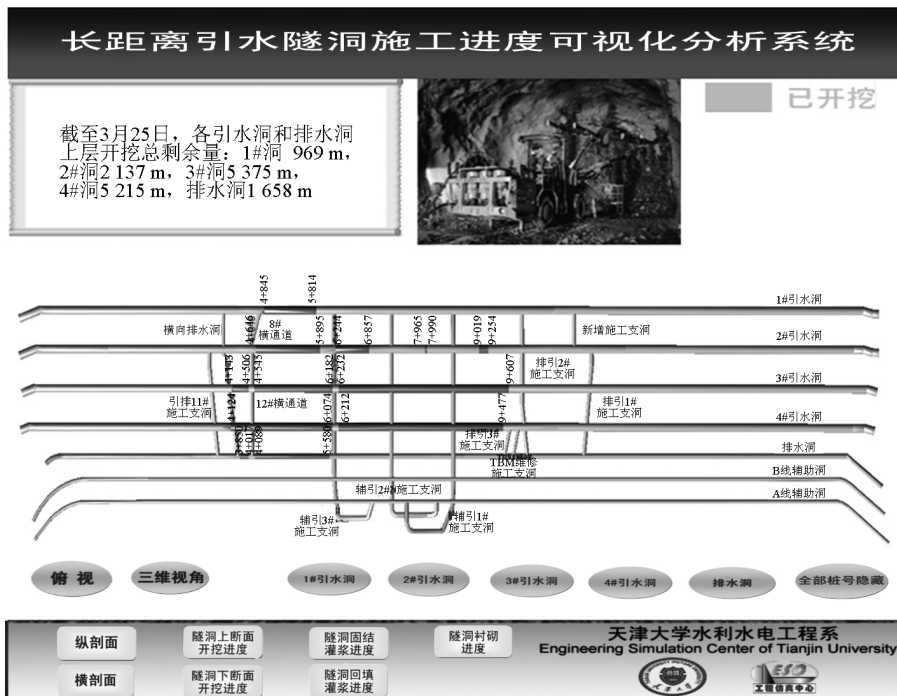


图9 长距离引水隧洞施工进度可视化仿真分析图

Fig. 9 Construction schedule visual simulation analysis chart of the long distance diversion tunnel

## 5 结语

文章提出了基于仿真的长距离引水隧洞施工全过程进度实时控制与可视化分析方法。通过对施工全过程进度实时仿真分析,可以得到任意时刻后续的施工进度计划,包括后续施工的关键路线、横道图等仿真成果;通过基于 VR - Platform 的实时进度可视化分析,可以实时得到任意时刻的三维进度形象面貌,包括开挖进度、衬砌进度和灌浆进度等。通过上述方法可以使项目管理人员及时发现和处理实际施工过程中出现的问题,预测后续施工进度。实例研究表明该方法可为工程项目实时控制提供强有力的技术支持,具有很强的实用价值。

### 参考文献

- [1] 钟登华,李景茹,刘奎建. 全过程动态仿真技术及其在大型工程施工管理中的应用[J]. 天津大学学报, 2003, 36(3): 347 - 352.
- [2] 康凤举. 现代仿真技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.
- [3] 温家林. 网络计划软件编制及其在施工仿真中的应用[D].

- 天津:天津大学,2008.
- [4] 刘奎建. 大型地下洞室群施工进度实时控制研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [5] 李景茹,钟登华,刘东海,等. 水利水电工程三维动态可视化仿真技术与应用[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 116 - 119.
- [6] 王 帅. 鲁地拉地下洞室群施工动态可视化仿真与优化研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [7] 钟登华,刘奎建. 基于实时仿真的地下洞室群施工进度预测与控制[J]. 天津大学学报, 2007, 40(6): 721 - 725.
- [8] Falco M D, Macchiaroli. Timing of control activities in project planning[J]. International Journal of Project Management. 1998, 16(1): 51 - 58.
- [9] 吴世勇,王 鹤. 锦屏二级水电站深埋长隧洞群的建设 and 工程中的挑战性问题[J]. 岩土力学与工程学报, 2010, 29(11): 2161 - 2171.
- [10] Carr Robert I. Cost, schedule and time variances and integration [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1993(6): 245 - 265.
- [11] Simaan Abourizk, Yasser Mohamed. Optimal construction project planning[C]//Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference(0780376145). San Diego: IEEE, 2002: 1704 - 1708.

# Whole construction process real-time schedule control and visual analysis of the long distance diversion tunnel based on simulation

Hu Lianxing<sup>1</sup>, Tong Dawei<sup>1</sup>, Jiao Kai<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Ertan Hydropower Development Company, Chengdu 610021, China)

[Abstract] Long diversion tunnel is often featured by great embedded depth, long tunnel line, large hole diameter and extremely complicated geologic conditions. The engineering quantity of each process is large, and the influence is enormous; therefore, the internal and external environment and constraint condition are changed in the actual construction, leading to the deviation between formerly construction schedule plan and actual construction schedule plan. If the deviation isn't corrected timely, the formerly plan can not guide the actual construction. In this paper, using computer simulation technology, control theory and virtual reality technology, the whole construction process real-time schedule control and visual analysis of the long distance diversion tunnel based on simulation are proposed. The feasibility study and scientific basis is provided for the real-time control of construction schedule.

[Key words] long diversion tunnel; construction schedule; real-time control; visual; simulation