

不良地质条件下长距离引水隧洞施工全过程进度 仿真与实时控制研究

胡连兴，钟登华，佟大威*

(水利工程仿真与安全国家重点实验, 天津 300072)

摘要：长距离引水隧洞常具有大埋深、长洞线、大洞径、高地应力水平、极其复杂的工程地质条件等特点。大埋深和高地应力引起的岩爆及高涌水等地质问题对施工进度计划安排和控制影响非常大，尤其是对不良地质段的施工进度控制是整个工程能否按时完工的重中之重。结合循环网络的系统仿真与网络进度计划分析技术，提出了针对不良地质条件下长距离引水隧洞施工全过程进度仿真与实时控制方法。该方法可以对实时进度施工方案的变更和选择提供可行性研究和科学依据，为准确、迅速进行实时进度控制提供技术支持，增强实时施工进度的可控性。

关键词：长距离引水隧洞；不良地质；施工进度仿真；实时控制

中图分类号：TV51 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2012)03-0497-07

作者简介：胡连兴(1985 -)，男，博士研究生，主要从事水利水电工程施工仿真与实时控制研究。E-mail: hulianxing3003@126.com。

Simulation and real-time control of whole construction progress of long-distance diversion tunnels under unfavorable geological conditions

HU Lian-xing, ZHONG Deng-hua, TONG Da-wei

(State Key Laboratory Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin 300072, China)

Abstract: The long-distance diversion tunnel is often characterized by great embedded depth, large hole diameter, long tunnel line, high ground stress and extremely complicated geologic conditions. Geologic issues like rock burst and high water gushing caused by big embedded depth and high ground stress have great influences on the construction schedule arrangement and control, especially the construction progress control for bad geological section, which is a key to the periodical completion of the whole project. Combined with the circular network system simulation and network project analysis technique, a simulation and real-time control method for the whole construction progress of long distance diversion tunnels under unfavorable geological conditions is presented. This method can provide feasible study and scientific basis for change and selection of real-time progress of construction scheme so as to realize accurate, fast real-time schedule control and to enhance the construction progress of real-time control.

Key words: long-distance diversion tunnel; unfavorable geological condition; construction progress simulation; real-time control

0 引言

长距离引水隧洞常具有大埋深、长洞线、大洞径、高地应力水平和复杂工程地质条件等特点。大埋深和高地应力引起的岩爆及高涌水等地质问题对施工进度计划安排和控制影响非常大，尤其是对不良地质段的施工进度控制是整个工程能否按时完工的重中之重。传统进度控制一般是依据开工前所制定的施工组织设计来控制的。而在实际施工过程中，内外环境和各种约

束条件（比如不良地质条件）可能发生变化，使原定的施工进度计划与实际施工进程不可避免地要产生偏差，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。本文结合循环

基金项目：国家自然科学基金项目（90815019）；国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目（51021004）；“十一五”国家科技支撑计划项目（2008BAB29B05）

收稿日期：2011-07-29

*通讯作者

网络仿真与网络进度计划分析技术, 利用计算机仿真技术和控制论思想, 根据长距离引水隧洞的特点, 提出了针对不良地质条件下长距离引水隧洞施工全过程进度仿真与实时控制方法, 对实时施工方案的变更和选择提供可行性研究和科学依据。确保施工项目管理人员准确、迅速地进行施工进度实时控制。

1 施工全过程进度仿真原理

长距离引水隧洞施工全过程进度仿真采用系统仿真方法, 系统可分为连续性系统和离散性系统^[1]。连续性系统是指系统状态随时间呈连续性变化, 离散性系统是指系统状态仅在有限的时间点发生跳跃性变化。针对长距离引水隧洞工程施工来讲, 采用离散系统就已满足要求了。本文利用离散系统仿真方法来进行长距离引水隧洞施工全过程仿真研究^[2]。

离散系统仿真的基本原理是使用“仿真钟”^[3]来表达“模拟时间”的轨迹。全过程进度仿真技术采用两个层次的模型进行建模, 在仿真过程中需要设置两个“仿真钟”: “全程仿真钟”和“本地仿真钟”。“全程仿真钟”用于记录系统模型的仿真运行轨迹, 它采用时间步长推进法。它是以某一规定的单位时间 ΔT 为增量, 每推进一步检验是否有事件发生, 如果有则认为发生在 ΔT 的终止处, 并相应地改变仿真系统的状态。当有“仿真工序开始”事件发生时, “全程仿真钟”记录当前状态, 然后转移到仿真工序模型, 启动“本地仿真钟”, 设置模型初始状态。“本地仿真钟”也采用时间步长法推进。以工序准备施工的状态作为初始状态, 以开始施工的时刻作为本地仿真钟的零点。向前推进一个时间步长 Δt , 然后对工序模型中的所有节点进行扫描, 检测是否有满足条件的活动发生, 同时跟踪各种资源的使用情况。如果有活动发生, 它们被认为发生在 Δt 的终止处, 相应地改变系统的状态, 统计各种资源的使用时间或空闲时间。重复上述作法直到该工序结束, 然后把控制权返回给全程仿真钟, 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事件, 作为当前事件的仿真结果保存起来。然后全程仿真钟继续推进, 重复上述过程, 直到整个工程结束。然后对仿真结果进行各种分析与优化, 并输出施工进度计划、横道图、关键路线、施工强度等结果。长距离引水隧洞施工全过程仿真流程图 1 所示。

用时间步长法进行仿真时, 时间步长的选取是一个很重要的问题。选取的时间步长愈小, 仿真的系统状态与真实状态就愈吻合, 仿真的精度愈高。相反, 当时间步长取得过大时, 虽然能缩短运行时间, 但容易丢失系统的某些信息或导致仿真状态的失真, 降低

仿真精度。因此, 需要根据不同层次仿真的需要设置时间步长。在系统模型层, 可选取较大的时间的步长, 以天为单位。在工序模型层, 主要面向具体施工的各个环节, 如隧洞开挖中的钻孔、爆破、出渣等活动, 可以采用较精确的时间步长, 以分钟为单位, 从而满足仿真运行时间和仿真精度的要求。具体可参见系统真实状态和仿真状态图, 如图 2 所示。

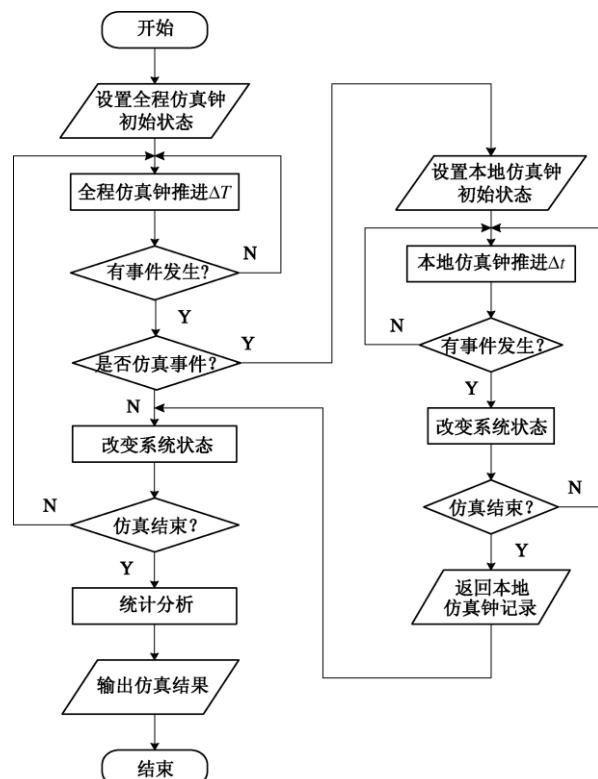


图 1 长距离引水隧洞施工全过程仿真流程图

Fig. 1 Flow chart of simulation of whole construction process of long-distance diversion tunnels

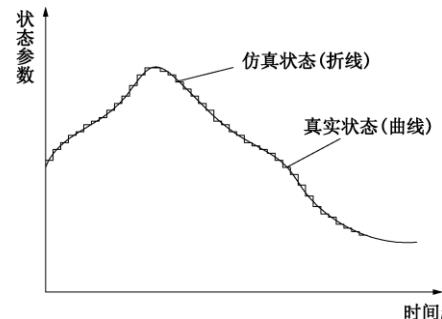


图 2 仿真系统真实状态与仿真状态对比图

Fig. 2 Comparison between true condition and simulation state of simulation system

2 不良地质条件下长距离引水隧洞施工进度仿真分析

2.1 不良地质条件下施工分析

长距离引水隧洞常处于大埋深的山体中, 在施工过程中, 岩爆和地下水是影响工程施工进度的主要地质问题, 确保岩爆段和突涌水点的施工进度是工程能否正常完工的主要保障。

(1) 岩爆段施工分析

长距离引水隧洞发生岩爆常以轻微岩爆为主, 部分洞段发生中等岩爆, 局部洞段会发生的强烈岩爆, 极少洞段会发生极强岩爆。其中强岩爆与极强岩爆对施工进度的影响较大。因此需要对施工中出现岩爆的洞段采取主动的预防和支护措施。根据工程施工中岩爆的破坏方式、岩体应力水平、岩石强度等进行分类^[4], 结合钻爆法的施工特点, 可以得到如下施工措施。

a) 爆破参数控制

根据工程施工经验, 岩爆洞段采用钻爆法施工时, 常采用短进尺、少装药、控制爆破频率和光面爆破的施工工艺, 达到降低围岩表面层应力的目的。轻微岩爆区和中等岩爆区开挖进尺控制在 2.0~2.5 m 左右; 强岩爆和极强岩爆区开挖进尺控制在 2 m 以内。尽可能采取全断面开挖, 减少围岩应力平衡破坏。

b) 围岩应力释放

在开挖后立即向工作面洞壁喷洒高压水, 并同时利用炮眼及锚杆孔向岩体深部注水, 达到降低围岩强度、增强其塑性的目的, 最终降低岩爆的剧烈程度。

c) 围岩支护措施

在开挖后及时进行支护, 采用临时支护与永久支护相结合进行支护。首先在初喷混凝土、钢筋网片、防岩爆锚杆等措施的保护下, 及时进行全断面系统锚杆的安装和二次混凝土的喷射; 其次在强和极强岩爆区根据围岩稳定性随机布置钢筋拱肋; 最后强岩爆围岩段隧洞后期采用全断面钢筋混凝土衬砌。

d) 施工顺序调整

对于岩爆洞段, 需要调整施工顺序: 檐除松裂岩石—喷纳米纤维混凝土—在边顶拱处向岩体内部钻孔一向孔内灌高压水。通过上述工序的施工, 可以加快围岩内部应力的释放。

(2) 突涌水段施工分析

长距离引水隧洞的高压地下水通常与地下岩溶管道紧密相连, 在进行高压灌浆封堵时, 在部分裂隙或者涌水孔中有浆液漏出, 使灌浆压力达到一定程度时升压就异常困难。随着对地下水处理认识的加深和经验总结, 为了达到环境保护和快速掘进的要求, 施工中地下水处理采用“预报在先、快速掘进、择机封堵”^[4]的原则。对于不同类型、不同流量、不同压力、不同部位的地下水, 可采取不同的施工方案。

a) 低压小流量地下水施工措施

对低压小流量的渗滴水、线状渗水, 通过分流孔

分流泄压和侧向注浆等方法加以一次性封堵。

b) 高压小流量集中涌水施工措施

对水量较小的高压集中涌水洞段, 采用钻孔的方式分流泄压, 孔口安装导流管和阀门, 使涌水点水量减小, 然后进行注浆。

c) 高压大流量管道集中出水施工措施

由于大涌水管道流的存在, 灌浆材料直接注入起到的封堵作用很小, 因为浆液在还没有凝固前就会被大管道流稀释并冲走。因此, 首先利用相邻洞室开横通道反向掘进贯通出水洞段, 再采取分流和卸压方案对涌水点进行处理, 随后再择机进行封堵。

2.2 不同工序仿真参数选取

长距离引水隧洞主要施工工序包括开挖工序、衬砌工序和灌浆工序。其中开挖工序包括上断面开挖和下断面开挖; 衬砌工序包括底拱衬砌和边顶拱衬砌; 灌浆工序包括回填灌浆和固结灌浆。开挖工序采用钻爆法施工, 主要施工设备包括手风钻、三臂台车、装载机、运输汽车; 衬砌工序采用衬砌台车施工, 主要施工设备包括底拱衬砌台车、边顶拱衬砌台车和运输汽车; 灌浆工序采用灌浆台车施工, 主要施工设备包括灌浆台车、钻机和运输汽车等设备。

2.3 仿真模型的建立

长距离引水隧洞施工速度快, 开挖过程中制约因素众多、地下施工空间狭窄和相互间制约因素众多等特点, 因此施工干扰大、施工组织复杂成为长距离引水隧洞施工的突出特点。长距离引水隧洞开挖是一个动态的施工过程, 为了降低其仿真计算建模的复杂性并提高建模的效率, 本文采用层次化、模型化建模的思想^[5], 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。

控制层模型对应着工程控制的基本单位——工序, 它是施工中进度和质量控制的基础。工序作为一个基本控制单元, 采用的施工方法不变, 配备的机械设备和人员等基本固定。控制层采用 CPM 网络模型描述。其中, 节点表示工作; 箭线表示工作间的逻辑关系。如图 3 所示。

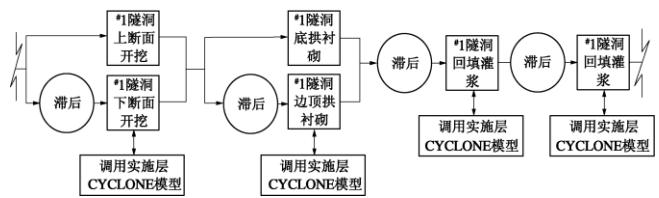


图 3 长距离引水隧洞施工控制层 CPM 网络模型

Fig. 3 CPM network model for construction control layer of long-distance diversion tunnels

实施层模型是控制层工序的具体施工工艺。以上

断面开挖为例,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。对于不同的施工工序的施工特点,可以建立不同的循环网络仿真模型。如图 4~6 所示分别为开挖工序、衬砌工序和灌浆工序施工实施层 CYCLONE 模型。

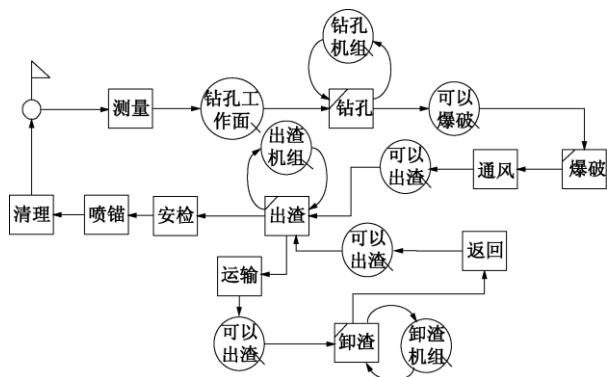


图 4 钻爆法施工实施层 CYCLONE 模型

Fig. 4 CYCLONE model for implementation layer of drill-blasting construction

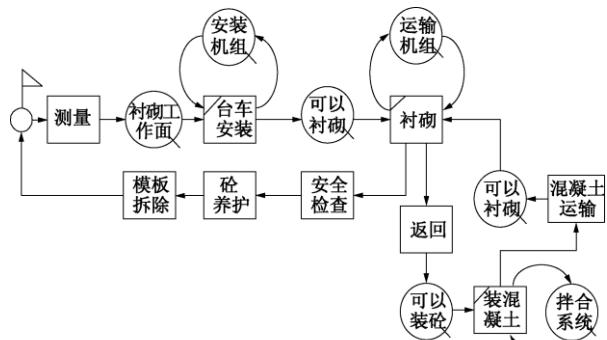


图 5 衬砌施工实施层 CYCLONE 模型

Fig. 5 CYCLONE model for implementation layer of lining construction

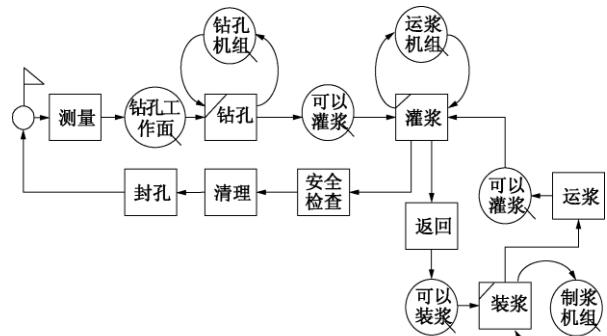


图 6 灌浆施工实施层 CYCLONE 模型

Fig. 6 CYCLONE model for implementation layer of grouting construction

度实时控制方法研究

3.1 长距离引水隧洞施工进度实时控制原理

施工进度计划从制定到实施是一个动态的过程,它引导施工全过程的一系列步骤,贯穿整个工程建设的始终。计划能否实现,关键在于工序实施过程中的控制。控制的过程就是使工程的实际进度与计划进度保持协调一致的过程^[6],研究控制过程的理论被称为控制论。控制论所研究的对象是控制系统,控制系统又由自身特性分为开环系统和闭环系统。反馈系统是闭环系统的产物,是目前应用最广的控制系统,而施工进度控制系统就是一种反馈控制系统^[7]。长距离引水隧洞施工进度控制依据动态控制、分级控制、反馈控制和循环控制等基本原理。各原理的概念描述如下:

(1) 动态控制原理

长距离引水隧洞施工进度控制是一个不断进行的动态控制,也是一个循环进行的过程。从工程施工开始,实际进度就出现了运动的轨迹。实际进度按照计划进度进行时,两者相吻合;当实际进度与计划进度不一致时,便产生超前或落后的偏差。分析偏差的原因,采取必要的施工措施,调整施工计划,使两者重新吻合,确保实际工作按计划进行。

(2) 分级控制原理

长距离引水隧洞施工是一个复杂的系统工程。施工进度实时控制的前提是编制工程施工的各种进度计划,包括施工总进度计划、单位工程进度计划、分部分项工程进度计划等,这些计划组成一个施工进度计划系统。计划的编制对象由大到小,计划的内容从粗到细。编制时从总体计划到局部计划,逐层进行控制目标分解,以保证计划控制目标的落实。执行计划时,从月(周)作业计划开始实施,逐级进行控制,从而达到对整体工程施工进度的目标控制。这就是施工进度的分级控制原理。

(3) 反馈控制原理

施工信息反馈是施工进度实时控制的主要环节,施工过程中的实际进度信息反馈给施工进度控制的管理人员,经比较分析做出决策,调整进度计划,使其符合工期目标。施工进度控制的过程也就是信息反馈的过程,根据实际进度信息,分析进度计划,利用网络计划的工期优化或资源优化理论调整计划。

(4) 循环控制原理

长距离引水隧洞施工进度控制的全过程包括计划、实施、检查、比较、确定调整措施和再计划的循环往复的过程。从编制施工进度计划开始,经过实际施工过程中情况,收集相关实际进度的信息,比较和分析施工实际进度与计划进度之间的偏差,找出产

3 基于仿真的长距离引水隧洞施工进

生的原因和解决的方法, 确定调整措施, 再修改原进度计划, 形成一个封闭的循环系统。

根据上述的各种施工进度实时控制的基本原理, 结合长距离引水隧洞的施工特点, 可以得到施工进度实时控制的基本原理, 如图 7 所示。

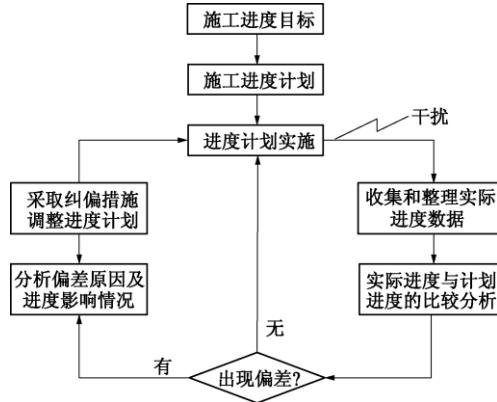


图 7 施工进度实时控制基本原理

Fig. 7 Real-time control principle of construction progress

3.2 长距离引水隧洞施工进度实时控制流程

上文明确阐述了长距离引水隧洞施工进度控制的原理和方法, 同时也提出了施工进度亟待解决的主要问题。根据上述原理和要求, 建立实时控制系统的模型。该系统是由主体工程、施工人员、工程管理者、初始施工进度、实时进度控制、施工实际进度和信息反馈系统所组成的交互控制模型^[8]。

在模型中, 工程原始数据的提取, 初始网络计划的生成、检查比较预测分析、调整计划方案、动态进度计划的生成均由计算机完成, 并由工程管理者通过人机交互给予干预和决策。施工进度实时控制系统可作为工程管理者的科学工具。本系统利用了数据库技术、计算机绘图技术^[9]和科学的计算手段, 使本系统方便、准确、直观、明确地向施工管理者提供信息。长距离引水隧洞施工进度实时控制流程如图 8 所示。

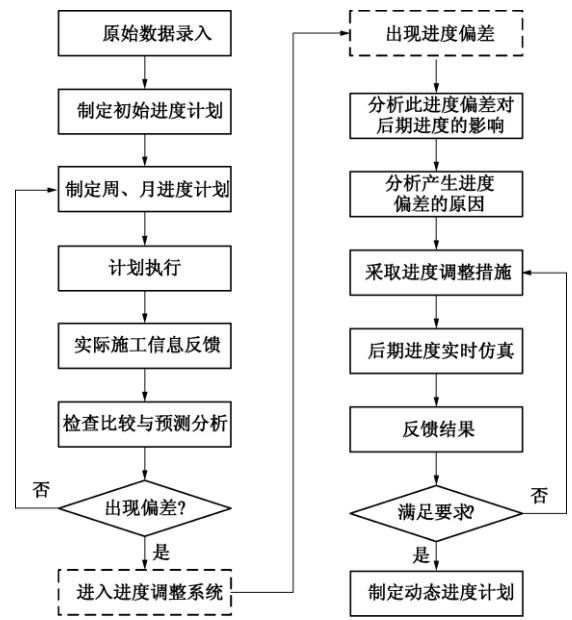


图 8 长距离引水隧洞施工进度实时控制流程

Fig. 8 Flow chart of real-time control of construction schedule of long-distance diversion tunnel

4 工程实例分析

结合上文所提到的长距离引水隧洞施工全过程进度仿真与实时控制的原理与方法, 以某水电工程长距离引水隧洞群^{#1}引水隧洞为例, 该水电站引水隧洞单洞长 16.67 km, 开挖洞径为 12.4~13.8 m, 最大埋深 2525 m。具有深埋长隧洞的特点, 岩爆防治、高压地下水处理难度大, 影响工期。引水隧洞开挖支护、混凝土衬砌、高压灌浆等工序工作量大, 相互间影响巨大, 使引水隧洞的完工工期具有很大的不确定性。尤其是岩爆段施工、高涌水段排水等不良地质条件的存在, 大大增加了施工进度完成的风险。至 2011 年 5 月份, 施工进度严重滞后, 按照原施工进度计划施工, 根本达不到 2012 年首台机组发电的要求。本文以 2011 年 5 月底作为工期控制节点, 对后续施工进度计划进行实时控制分析, 为确保首台机组发电提供科学依据。

4.1 #1 引水隧洞施工现状分析

根据现场情况施工情况分析, 截止到 2011 年 5 月底, #1 引水隧洞上断面开挖、下断面开挖、边顶拱衬砌和底拱衬砌工序施工情况统计如表 1 所示。

表 1 #1 引水隧洞施工情况统计表

Table 1 Construction situations of diversion tunnel No. 1

施工项目	累计完工量/m	剩余工程量/m	滞后/月
上断面开挖	16546	124	1
下断面开挖	13830	2840	4
底拱混凝土衬砌	4506	12164	5
边顶拱混凝土衬砌	2034	14636	6
回填灌浆	130	16540	5
固结灌浆	628	16042	4

4.2 #1引水隧洞不良地质情况下施工分析

(1) #1引水隧洞岩爆洞段施工分析

#1引水隧洞沿线经过的主要地层为三叠系中统的大理岩，自西向东分别为T2z杂谷脑组大理岩、T2b白山组大理岩、T2y盐塘组大理岩。其余为碎屑岩，有T1绿片岩和T3砂板岩，#1引水隧洞工程地质条件很复杂，具体可参见#1引水隧洞工程地质剖面图，如图9所示。

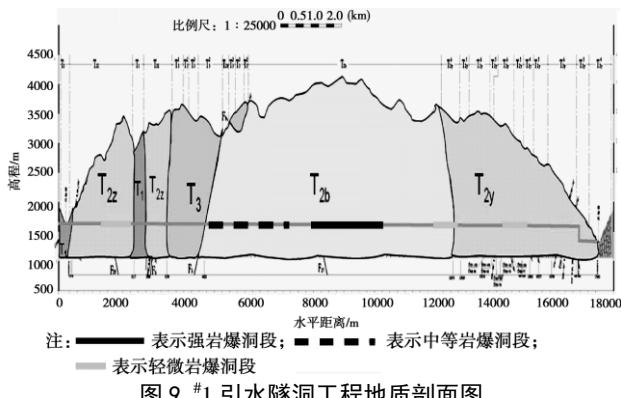


图9 #1引水隧洞工程地质剖面图

Fig. 9 Geological section of diversion tunnel No. 1

#1引水隧洞发生岩爆的洞段主要以轻微岩爆为主，约占整条隧洞的12.45%；部分洞段会发生中等岩爆，约占4.67%；局部洞段会发生强岩爆和极强岩爆，约占1.73%。其中强岩爆与极强岩爆对工程进度的影响较大。如图9所示。

(2) #1引水隧洞突涌水洞段施工分析

从#1引水隧洞水文地质情况看，桩号4+500~7+300m段穿越中部第五、第六出水带，具有“流量大、水压高、突发性强”的特点。第五出水带(5+532~7+679、5+620~7+590)主要沿NW~NNW向结构面出水。该带雨季稳定流量约0.8m³/s，流量较稳定；第六出水带(4+471~5+420、4+485~5+455)主要沿NE~NW向结构面出水，属强富水地层。该带雨季时稳定流量为2.0m³/s，流量较稳定。

4.3 #1引水隧洞工序仿真参数选取

根据完工工期的要求，并考虑不良地质等因素对施工进度的影响，针对目前施工状况，可以对不同工序施工参数进行选取，具体可参见表2所示。

表2 施工机械设备配置表

Table 2 Arrangement of construction machines

施工 工序	施工机械						
	施工 工作面	三臂 台车	手 风钻	装 载机	运输 汽车	边顶拱 台车	底拱 台车
上断面开挖	2	1	8	2	16	—	—
下断面开挖	8	4	32	8	80	—	—

底拱混凝土衬砌	10	—	—	—	30	—	10
边顶拱混凝土衬砌	15	—	—	—	45	15	—
灌浆	10	2	30	—	40	—	—

4.4 #1引水隧洞施工进度仿真控制成果分析

利用上文所提到的施工进度仿真和实时控制的方法，建立#1引水隧洞施工进度仿真和实时控制模型，可得到以2011年6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。

(1) #1引水隧洞完工日期

至2012年9月20日，#1引水隧洞开挖、衬砌和灌浆基本完成，具备充水条件。

(2) 施工关键路线

6月1日实时控制节点、辅3-1-西下开挖、C4-#10边顶拱台车衬砌、#1洞剩余洞段灌浆、#1洞灌浆检查、缺陷处理与清淤、#1洞具备充水条件。具体可参见图10所示的#1引水隧洞控制性工序施工工期安排图和表3所示的施工进度网络计划优化成果表（部分）。

(3) 基于实时控制的#1引水隧洞横道图

根据上文所提到的施工进度实时控制的理论方法，通过对施工进度动态仿真和实时控制的反复调整，可以得到满足工期要求的实时控制横道图。如图11所示。

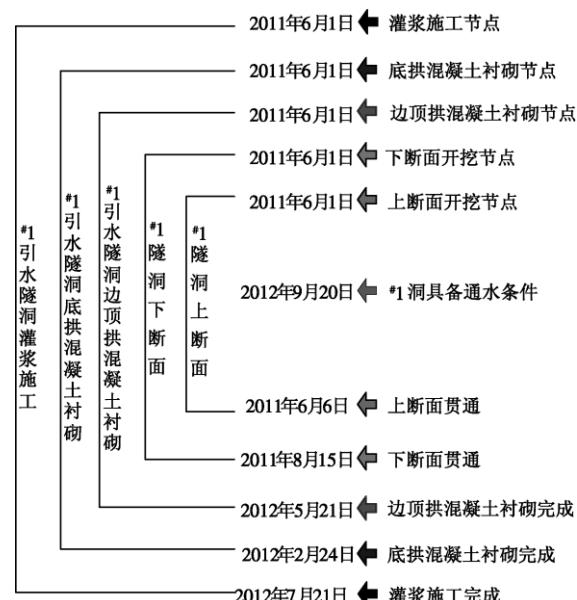


图10 #1引水隧洞控制性工序施工工期安排图

Fig. 10 Arrangement of control process of diversion tunnel No. 1 during construction period

表3 施工进度网络计划优化成果表（部分）

Table 3 Optimized results of construction schedule

工序 名称	开始 时间	结束 时间	历 时	总 时差	自由 时差	月 进尺

#7-1-#9 横通道开挖	2011-06-01	2011-09-014	60	417	0	300
辅3-1-辅2下开挖	2011-06-01	2011-08-04	64	413	0	300
C4-#9边顶拱衬砌	2011-070-1	2012-03-27	270	55	55	100
C4-#4底拱衬砌	2011-06-01	2011-12-23	205	272	0	120
C4-#4边顶拱衬砌	2011-06-01	2012-05-16	350	5	0	110
C4-#3边顶拱衬砌	2011-06-01	2012-04-26	330	25	0	110
C4-#3底拱衬砌	2011-06-01	2012-02-24	268	209	0	120
C4-#1边顶拱衬砌	2011-06-01	2012-04-26	330	25	0	110
C4-#2底拱衬砌	2011-06-01	2011-07-31	60	417	0	120
#1洞绿片岩段施工	2011-06-01	2012-03-10	283	194	0	20
#1洞段灌浆	2011-06-01	2012-05-06	340	16	16	2500
#1洞灌浆检查	2012-07-21	2012-08-20	30	0	0	—
缺陷处理与清淤	2012-08-20	2012-09-19	250	0	0	—
#1洞具备充水条件	2012-09-19	2012-09-20	1	0	0	—

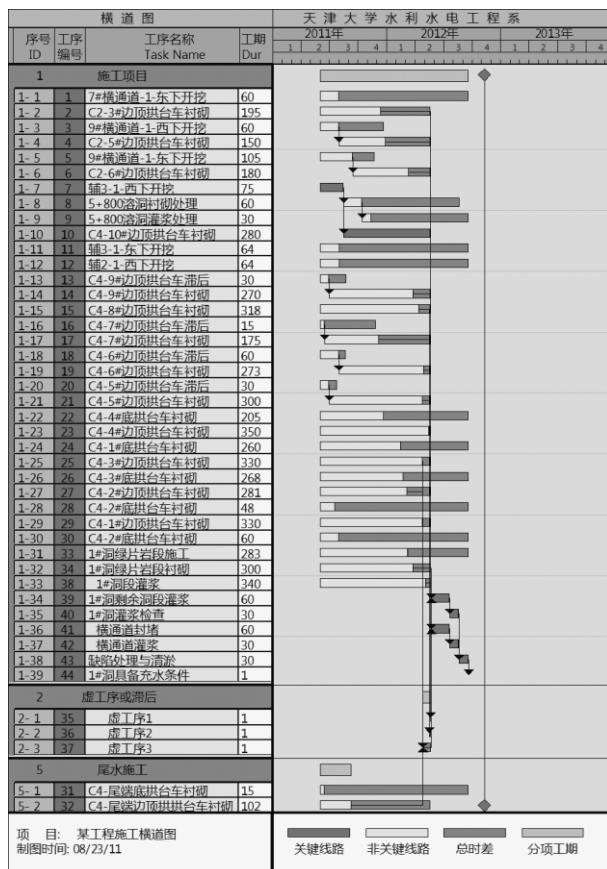


图 11 #1 引水隧洞施工进度实时控制横道图

Fig. 11 Real-time control of construction schedule for diversion tunnel No. 1

5 结语

本文提出了针对长距离引水隧洞施工进度仿真与实时控制理论方法。通过对长距离引水隧洞施工全过程进度仿真，可以得到初始施工进度计划。但由于长距离引水隧洞实际施工过程常遇到岩爆和高涌水等不良地质条件，同时还要受到其他外在因素和人为因素等的影响，势必造成施工进度的滞后，增大工程完工的风险，为项目管理人员进行施工管理带来很大的困难。利用计算机仿真技术，结合施工进度仿真与实时控制系统，针对任意时刻施工情况，结合后续工程完工要求，进行施工进度实时控制，得到后续施工工序的施工进度计划，为施工方案可行性研究和评价提供科学依据。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] 胡肇枢, 王卓甫. PERT 网络计算分析之补充[J]. 河海大学学报, 2002, 30(1): 29 - 34. (HU Zhao-shu, WANG Zhuo-fu. Supplement to analysis of PERT network calculation[J]. Journal of Hohai University, 2002, 30(1): 29 - 34. (in Chinese))
- [2] 王孝坤, 石勇民. 工程项目进度控制系统的研制开发[J]. 东北公路, 2003, 26(2): 134 - 136. (WANG Xiao-kun, SHI Yong-min. Study on plan control system of project item[J]. Northeastern Highway, 2003, 26(2): 134 - 136. (in Chinese))
- [3] 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. (LIU Kui-jian. Real-time control for construction scheduling of large scale underground structure group[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [4] 吴世勇, 王鸽. 锦屏二级水电站深埋长隧洞群的建设和工程中的挑战性问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2161 - 2171. (WU Shi-yong, WANG Ge. Challenge issues in construction and project of large-scale deep-buried tunnel group of Jinping II[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2161 - 2171. (in Chinese))
- [5] TOMMELEIN I D, CARR R I, ODEH A M. Knowledge based assembly of simulation networks using construction designs, plans, and methods[C]// Proc 1994 Winter Simulation Conf, IEEE, Piscataway, N J, 1999: 1145 - 1152.
- [6] 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. (ZHONG Deng-hua, LIU Kui-jian. Schedule forecasting and control based on real-time simulation of underground structure group construction[J]. Journal of Tianjin University,

- 2007, **40**(6): 721 - 725. (in Chinese))
- [7] FALCO M D, MACCHIAROLI R. Timing of control activities in project planning[J]. International Journal of Project Management, 1998, **16**(1): 51 - 58.
- [8] 胡程顺. 水电工程进度控制及其优化方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2005. (HU Cheng-shun. Optimization of construction schedule and control method in hydroelectric project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese))
- [9] 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. (LI Jing-ru, ZHONG Deng-hua, LIU Dong-hai, et al. Methodology and application of three-dimensional dynamic visual simulation of hydraulic and hydroelectric engineering[J]. Journal of System Simulation, 2006, **18**(1): 116 - 119. (in Chinese))