

# 惠州抽水蓄能电站地下洞室群施工建模与仿真

洪 坤<sup>1</sup>, 张社荣<sup>1</sup>, 张加贝<sup>2</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072 2 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 分析了惠州抽水蓄能电站地下洞室群的施工特点, 从层次化、模块化的思路出发, 充分利用关键路径技术 (CPM) 和循环网络仿真技术 (CYCLONE) 的特点, 建立了施工工序模型和整体施工网络模型, 并对惠州抽水蓄能电站地下洞室群施工全过程进行了仿真建模。通过将整体施工网络模型与地下洞室群施工组织设计相结合, 对惠州抽水蓄能电站地下洞室群施工进行数字仿真, 确定了洞室群合理的施工工期, 施工进度安排、关键路线与施工强度等。此方法已应用在实际工程中, 证明了该建模方法和整体模型的正确性和可行性。

**关键词:** 惠州; 抽水蓄能电站; 地下洞室群; 施工; 仿真

**中图分类号:** TV 512 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X (2008) 04-0069-05

## Modeling and Simulation for the Construction of Underground Cavern Group of Huizhou Pumped Storage Station

HONG Kun<sup>1</sup>, ZHANG She-rong<sup>1</sup>, ZHANG Jia-bei<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract** By analyzing the construction characteristics of underground cavern group of Huizhou pumped storage station and taking advantage of critical path method (CPM) network technique as well as complex cyclic operation network (CYCLONE) technique, working procedure models and whole construction network model are created by means of hierarchical and modular method to simulate the overall construction. Through the combination of the established models with construction design of underground cavern group, the digital simulation result is obtained which can consequently determine the time limit for the project, arrangement of the process, key construction route and construction intensity. This method is applied to a practical project, which testifies the correctness and feasibility of this modeling method and overall model.

**Key words** Huizhou pumped storage station; underground cavern group; construction; simulation

### 0 引言

地下洞室群的施工开挖量大、施工强度高、施工条件复杂, 无论在开挖、支护衬砌和施工组织等方面都与地面露天作业有很大的差别, 是一个极其复杂的过程。在整个地下厂房系统的施工过程中, 由于地下洞室群系统纵横交错, 布置密集, 高差大, 施工通道少, 使得各工序配合与相互干扰错综复杂; 在安排各洞室施工先后顺序及隧洞施工顺序时, 需要顾及工程的总工期、围岩稳定以及施工强度等问题的影响。仅依靠设计人员采用传统的方法分析计算, 难以确定合理的施工机械设备配套方案, 难以制定合理的施工进度计划和施工组织设计方案<sup>[1]</sup>。因此, 有必要采用科学的建模方法和仿真技术, 全面系统地分析研究地下厂房系统施工中各因素, 相互协调各洞室开挖的工序, 使施工组织设计更加科学, 达到施工快速、经济、安全之目的。

地下洞室群洞室的施工是一个由钻孔、爆破、出渣等各种作业组成反复循环的过程。根据此特点, 本文

收稿日期: 2008-01-12 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (项目编号: 50479048)。

第一作者简介: 洪坤 (1961-), 男, 教授级高工, 主要研究方向: 洞穴施工建模等。E-mail: hongkun@fdm.is.com

提出了利用关键路径技术 (CPM) 和循环网络技术 (CYCLONE) 进行建模的方法, 利用 CPM 技术和 CYCLONE 技术的优点, 建立了各施工工序的模型和洞群施工的整体仿真模型. 通过将整体网络模型与惠州抽水蓄能电站 (以下简称惠蓄) 施工组织设计工作相结合, 对地下洞室群施工进行了数字仿真计算, 确定了洞群的施工周期和施工强度.

## 1 层次化与模块化建模方法

对于地下洞室群这样一个复杂的施工系统而言, 可将其分解为相对简单和独立的子系统, 而子系统间的相互联系和影响可通过在子系统模型间设置相应的耦合接口加以协调, 这样可将各个子模型拼接起来而构成整体系统模型. 施工系统的运行规律同样也可以通过施工系统模型中各个体的属性与状态的变化来反映. 由于施工系统也是存在多个层次, 总工程可以分为单项工程、单位工程、分部工程、分项工程等多个层次. 因而, 可以采用层次化的建模方法. 惠蓄电站施工的层次化结构如图 1 所示. 在不同洞群的开挖施工中, 通常需要采用不同的施工方法和施工工序, 对于这些重复使用的施工方法或工序便可以采用后文所述的 CYCLONE 层单元模型来构建, 然后连同其属性封装起来之后便构成一个工序模型. 这个过程就是施工模型的模块化.

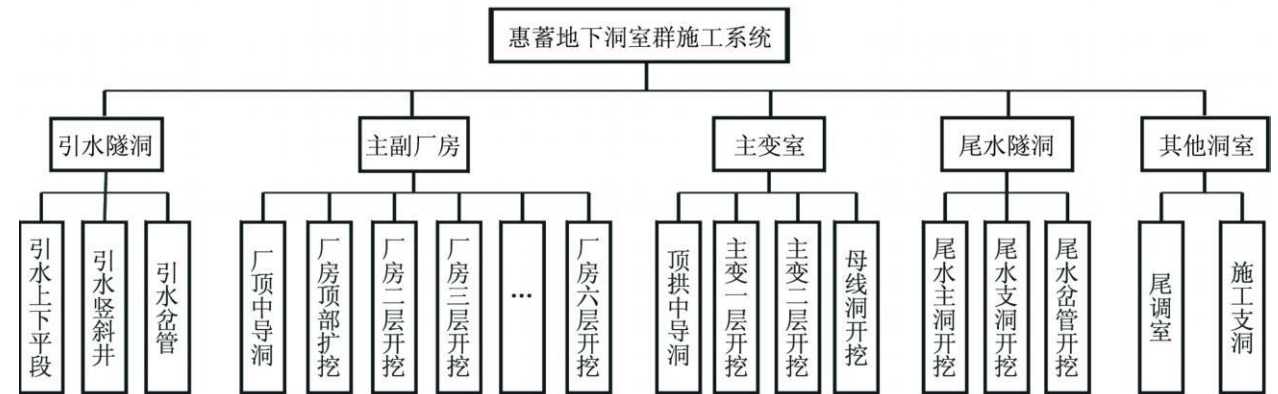


图1 层次化建模示意图

Fig.1 Schematic diagram of hierarchical modeling

## 2 施工仿真模型的建立

地下洞室群施工是一项复杂、带有随机因素的系统, 难以用解析数学模型描述. 各洞室的施工过程是一个由多道工序组成的反复循环过程, 对于这类工程的施工, 若采用一般网络模型 (CPM /PERT) 来表达整个工程的循环施工过程是极其复杂的, 其节点或矢线数甚至可能成千上万, 也难以反映施工过程中的随机因素影响.

鉴于上述问题, 本文使用网络计划分析方法中的 CPM /CYCLONE 结合模型来建模. 将惠蓄地下洞室群施工仿真模型划分成 2 个模型层次: CPM 层工序模型 (控制层模型) 和 CYCLONE 层单元模型 (实施层模型). CYCLONE 层单元模型构成了 CPM 层工序模型基础, 而 CPM 层工序模型又构成了整体施工的网络模型.

### 2.1 CYCLONE 层单元模型

CYCLONE 层单元模型是由流水单元、节点和矢线构成的<sup>[3 4]</sup>. CYCLONE 层单元模型节点定义了五种特定的图示符号来描述各种状态, 根据施工作业及逻辑关系, 将它们用矢线连接起来, 并加入控制机制, 构造出图示模型来表达实际施工过程. CYCLONE 层模型组成详细内容见参考文献 [3].

CYCLONE 层单元模型是在施工中不能再细分的一个工作任务或操作, 它是构成工序和施工方法的基础. 通过把不同单元和节点通过矢线用一定合理的方式组合就能构成一道工序, 即构成一个 CPM 层工序模型. 在施工过程中, 施工工序的状态变化、流动和相互关系都是要通过这个单元模型来体现.

## 2.2 CPM 层工序模型

CPM 层工序模型由工序模型、矢线、滞后和工序属性组成<sup>[3]</sup>. 建立 CPM 层工序模型类似于建立单代号网络图, 首先应明确施工中各工序之间的时间、空间及逻辑关系, 然后利用工序模型和工序矢线将其表示出来. CPM 层工序模型组成详细内容见参考文献 [3].

CPM 层工序模型是建立施工系统仿真模型的重要部件, 它是由几个单元模型按照逻辑关系或者时序关系组成的. 施工系统仿真模型以工序作为部件模型, 将模型建立所需的仿真属性封装在其中, 建立一个模块, 便于仿真程序调用.

CPM 层工序模型在实际的施工中代表一个施工方法或施工工序. 比如在施工方法上可分为顺序施工、平行施工、漏渣法施工、导洞法施工、竖井施工、全断面施工等. 那么就可以按照这些施工方法和顺序, 使用 CYCLONE 层单元模型建立一个 CPM 层工序模型. 图 2 就是使用 CYCLONE 层单元模型来描述全断面施工工序模型.

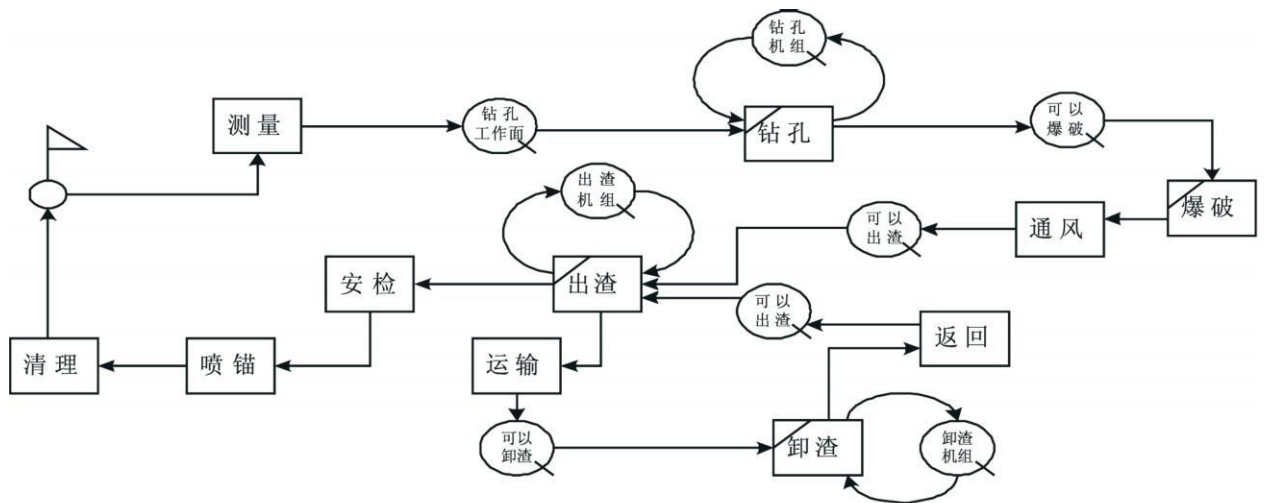


图2 用CYCLONE层模型构成的全断面施工模型

Fig.2 Full face construction method model constituted of CYCLONE layer model

## 2.3 整体仿真模型的建立

由于整个施工过程是由多种不同的工序组成, 所以整个施工网络仿真模型则由封装好的 CPM 工序模型构成. 根据各项洞室施工的衔接关系及相互制约条件以及地下厂房施工系统的施工程序, 就可以将 CPM 工序模型作为基础模块对整个施工系统进行构建, 得到整个系统的 CPM 层网络模型, 即施工的关键路径. 基于此整体模型, 在施工中就可以利用 CPM 网络对整个工程项目的进度计划分析, 利用 CYCLONE 层单元模型来分析工程的施工步骤, 资源利用率等情况. 这种建模方式兼顾了仿真的整体性和细节性, 而且克服了一般网络仿真建模复杂的问题, 同时利用了 CPM 网络的进度分析功能, 取长补短, 达到了方便、实用的目的. 惠蓄工程地下洞室群施工 CPM 层网络模型, 如图 3 所示.

## 3 惠蓄地下洞室群施工过程仿真分析

### 3.1 系统仿真原理

系统可分为连续性系统和离散性系统<sup>[4]</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, 作为离散系统来进行已经足够了. 将惠蓄地下洞室群施工系统作为离散系统进行仿真研究, 离散系统仿真的基本概念就是使用“仿真钟”<sup>[5]</sup>, 用它来体现“模拟时间”的运行轨迹<sup>[6,7]</sup>. 在惠蓄地下洞室群施工仿真中由于采用了两个层次的模型进行建模, 故在仿真实现过程中相应地设置两个“仿真钟”: “全程仿真钟”和“本地仿真钟”. 全过程仿真就是两种仿真钟不断地推进和交互的过程.

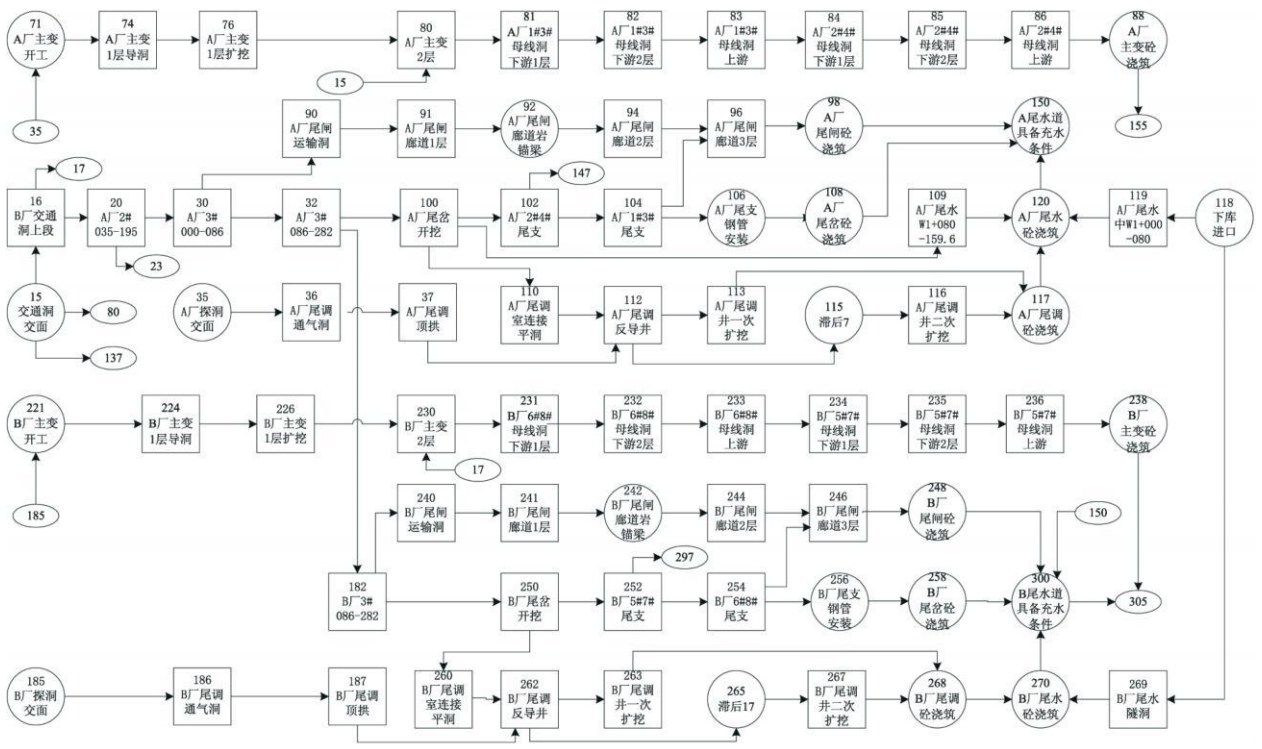


图3 整个施工的CPM层网络仿真模型  
 Fig.3 CPM layer simulation model of whole construction

仿真开始前将全程仿真钟和每个本地仿真钟都初始化为零. 仿真开始, 全程仿真钟启动, 它采用时间步长推进法. 它是以某一规定的单位时间  $\Delta T$  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  $\Delta T$  的终止处, 并相应地改变系统的状态, 否则系统的状态不发生改变. 当检测到有“仿真工序开始”事件发生时, 全程仿真钟保留当时的状态, 启动它的本地仿真钟, 设置模型初始状态, 然后进行工序的仿真计算.

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. 从该点开始, 向前推进一个时间步长  $\Delta t$ , 然后对工序模型中 CYCLONE 层单元模型所有节点进行扫描, 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  $\Delta t$  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. 重复上述做法直到该工序结束, 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. 惠蓄地下洞室

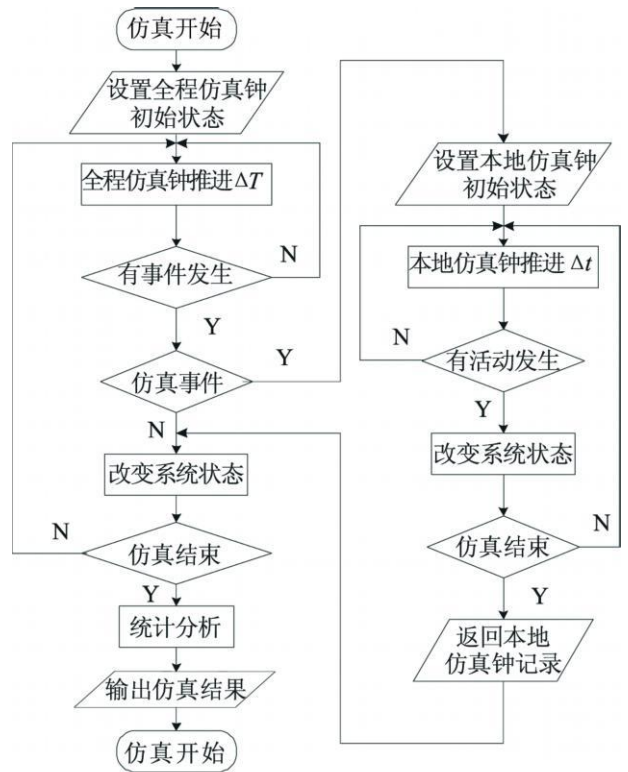


图4 地下洞室群施工仿真流程图  
 Fig.4 Flow chart of simulation for underground cavern group construction

群施工仿真流程见图 4

### 3.2 施工仿真参数

惠蓄地下洞室群系统主副厂房共分 6 层开挖; 主变室分 2 层开挖; 尾水洞 2 条, 尾水支洞 8 条; 洞室上层开挖均采用中导洞先行, 两侧跟进的方法. 地下洞群的施工工序非常多而且繁杂, 每个任务中的工作参数可以通过工程实际经验和查找文献 [3] 中的相关公式来确定.

本文以图 2 中 CYCLONE 层模型中的“出渣”复合节点为例说明仿真参数的设置. 出渣作业采用 15 t 蓄电池机车牵引 4 辆 3 m<sup>3</sup> 梭车出渣, 速度服从正态分布, 重行速度均值为 3 km/h, 方差为 0.5 km/h; 空行速度为 12 km/h, 方差为 0.8 km/h. 设每隔 1 000 m 设一道错车道, 错车时间 3 min, 卸车时间每辆梭车 5~8 min, 服从指数分布; 出渣通道长度按开挖完的洞长 250 m 计算.

### 3.3 仿真成果分析

按照惠蓄工程施工组织设计对地下厂房系统的施工程序、施工运输线路等情况进行分析, 然后结合整体仿真模型进行施工仿真计算, 便可以得出单洞开挖循环作业情况以及各单项工程开挖的平均时间、月进尺、施工总历时等施工参数. 仿真计算得到的主要洞室开挖仿真的部分成果见表 1.

表 1 主要洞室开挖仿真成果(部分)

Tab 1 Simulation result of main cavern excavation( part)

项 目	循环进尺 /m	循环时间 /h	月平均进尺 /m	月平均强度 /m <sup>3</sup>	工期 /d
A 厂 0# 上游侧上平	3	21.4	84.1	6721.9	297
A 厂 0# 下游侧上平	3	21.4	84.2	6709.8	116
B 厂 0# 下游侧上平	3	21.4	84.1	6677.1	111
B 厂 0# 上游侧上平	3	21.4	84	6704.6	291
A 厂 1# 3# 引支下游	3	12.3	146.6	3225.9	10
A 厂 2# 4# 引支下游	3	12.2	147.8	3225.9	10
A 厂 1# 3# 引支上游	3	12.3	146.4	3352.7	26
A 厂 2# 4# 引支上游	3	12.3	146.5	3352.7	26
A 厂下平洞开挖	3	21.4	84	6671.9	79
B 厂 6# 8# 引支下游	3	12.3	146.6	3176.8	11
B 厂 5# 7# 引支下游	3	12.2	147.3	3176.8	11
B 厂 6# 8# 引支上游	3	12.4	145.7	3128.2	19
B 厂 5# 7# 引支上游	3	12.3	146.1	3301.9	18
B 厂下平洞开挖	3	21.5	83.7	6737.8	80
A 厂厂房 1 层导洞	2	17.1	70.3	8418.9	55
.....	.....	.....	.....	.....	.....
A 厂厂房 5 层保护层	8	16.4	293.5	4779.8	20
A 厂厂房 6 层	5	22.7	132.3	7063.8	27
B 厂厂房 1 层导洞	2	17.1	70.2	8404.6	56
B 厂厂房 1 层扩挖	3.5	16.6	126.4	7530.7	32
B 厂厂房 2 层中梯段	5	22.7	132.2	10487.5	43

表 1 中这些信息可以合理安排施工, 及时做出相应的调整. 例如, 在平行施工过程中, 钻孔工作和出渣工作同时进行, 持续时间长的工序为关键工序, 一般情况下应该使两者的持续时间相差不多, 否则应该调整人员、设备的配备情况, 使施工过程趋于合理.

通过仿真得到的所有数据表格中的工期长度就可以确定整个施工工程中的工程总工期、厂房系统总工期、引水系统总工期、尾水系统总工期等信息. 并且通过整体的 CPM 层网络图可以确定出施工的关键工序和路径, 为施工人员配备、装置配备、工期把握提供了重要的依据.

(下转第 80 页)

## 4 结论

1) 尽管该市东西两面为高约 200~400 m 的高山,但由于渠道风较突出,因此山谷风不明显,被渠道风形成的系统风所掩盖。

2) 高原山区城市由于下垫面粗糙度较大,使风速高度指数较平原地区的大很多,也高于导则推荐的城市风速高度指数,使不稳定、中性、稳定条件下风速高度指数分别达到 0.518 0.594 0.615

3) 在年平均风速,相同大气稳定性和源参数下,采用实测拟合  $p$  值预测的最大落地浓度及其出现距离分别比使用导则推荐  $p$  值预测结果减少 22.2%~30.2%, 9.4%~12.4%。因此,如果采用导则推荐的风速高度指数进行预测,在城市大气环境规划等工作中将导致测算的城市大气环境容量偏小,进而影响城市的经济社会发展。

致谢 感谢 个旧市环境监测站对现场观测工作的大力支持和昆明理工大学周崇本老师对现场观测的帮助!

### 参考文献:

- [1] 国家环境保护局. HJ/T2 2-93 环境影响评价技术导则大气环境[S], 1994
- [2] 马文斗. 空气污染控制工程·第二版[M]. 北京:冶金工业出版社, 1994
- [3] 沈武艳,张朝能,宁平. 化工厂大气污染扩散风洞模拟实验[J]. 环境科学导刊, 2007, 26(1): 1-3
- [4] 傅抱璞,于静明. 南京 164米铁塔观测风速廓线的研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1981, 4: 552-561
- [5] 王宝民,刘辉志,桑建国,等. 大风条件下城市冠层流场模拟[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 255-264
- [6] 郝吉明,马广大. 大气污染控制工程·第二版[M]. 北京:高等教育出版社, 2002
- [7] Environmental Sciences Research Laboratory. Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion[R]. Research Triangle Park, 1981.

(上接第 73页)

## 4 结语

本文在地下洞室群施工建模仿真中融合了网络计划分析和数字仿真技术,采用以简单的 CPM 网络做框架,调用封装好的比较复杂的 CYCLONE 层模型的思想,解决了 CPM 不适合处理复杂具有循环特征的工程和 CYCLONE 技术过于专业的问题,取长补短,达到方便使用的目的。然后根据建立起来的整体施工网络模型利用数字仿真技术进行了仿真,获得了施工进度、关键路径等仿真结果。

利用此方法对惠蓄地下洞室群的实际工程施工进行建模和仿真研究,仿真结果得到各单项洞室的施工工期、施工进度安排、关键路线与施工强度等信息,为惠蓄地下洞室群施工具体工作提供了科学依据,大大提高了地下厂房系统施工组织设计的现代化水平。同时也证实该项技术为优化安排施工进度,制定经济合理的施工管理方案提供了有效的工具。

### 参考文献:

- [1] 钟登华. 隧洞循环施工过程模拟研究[D]. 天津:天津大学, 1987
- [2] HALPNDH. CYCLONE-method for modeling job site processes[J]. Journal of Construction Division ASCE, 103, 1977 489-499.
- [3] 钟登华,刘东海. 大型地下洞室群施工系统仿真理论与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004
- [4] 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
- [5] 肖田元,张燕云,陈加栋. 系统仿真导论[M]. 北京:清华大学出版社, 2000
- [6] 谢行皓. 建筑工程系统仿真[M]. 北京:科学出版社, 2001
- [7] 熊光楞. 连续系统仿真与离散事件系统仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 1991.