

文章编号:1009-3087(2013)01-0098-09

大型地下洞室群施工期结构安全与进度耦合实时仿真

撒文奇,张社荣*,杜成波,王高辉

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要:大型地下洞室群施工安全与进度受突发不良地质状况影响较大,实时确定不良地质对施工结构安全与进度的综合影响具有重要工程意义。通过建立实际施工状态“集合”与3维全尺度数值模型模拟状态“集合”之间的实时动态映射关系,以数值模拟技术为主要手段,结合并行计算方法,实现对地下洞室群施工过程的结构安全与进度耦合实时仿真。将突发不良地质状况映射到数值模型上,根据实时仿真结果对不良地质段施工的结构安全性进行预测评估,对不满足安全要求的施工状态提出相应的处理措施,并对处理效果进行实时仿真预测,将确定的处理措施以施工参数的形式反馈给施工进度控制系统,实时评价处理措施对总体施工进度影响。最后基于Python+VB.net混合编程技术开发了大型地下洞室群施工期结构安全与进度耦合实时仿真系统,该系统实现了地下工程安全施工与进度控制的现场办公一体化,为地下工程现场施工的安全与进度控制提供了技术支持。

关键词:地下洞室群;实时仿真;结构安全;进度控制;动态映射

中图分类号:X947

文献标志码:A

Coupling Real-time Simulation of Structure Safety and Schedule of Large-scale Underground Cavern Group During the Construction Period

SA Wen-qi, ZHANG She-rong*, DU Cheng-bo, WANG Gao-hui

(State Key Lab. of Hydraulic Eng. Simulation and Safety, Tianjin Univ., Tianjin 300072, China)

Abstract: By establishing the real-time dynamic mapping relationship between the set of the actual construction state and the set of the emulation mode of the three dimensional and full scale numerical model, with numerical simulation technology as the main means, and combining with parallel computing method, the function of coupling real-time simulation of structure safety and schedule during the full process of construction was realized. The bad geological conditions were mapped to the numerical model, then according to the real-time simulation results, the prediction and evaluation of the structure safety with bad geological conditions were made, treatment measures were put forward if the safety of construction state does not meet requirements, and the treatment effect was predicted by real-time numerical simulation. The determined treatment measures were converted to construction parameters to feedback to construction schedule control system, and the influence on the construction schedule caused by treatment measures was evaluated simultaneously. Finally, based on a mixed programming technology with Python and VB.net, a large-scale underground cavern group construction structure safety and schedule coupling real-time simulation system was developed. The system realized the field office integration of underground cavern group construction safety and schedule control, which provides great technical support to safety and schedule control of underground cavern group construction.

Key words: underground cavern group; real-time simulation; structural safety; schedule control; dynamic mapping

在水利水电工程建设中,地下洞室群是大型水电站厂房布置的重要选择形式之一,且随着水电站

规模的不断加大,施工的时间、空间、广度及难度都在迅速增加。然而由于地下工程规模大,施工前的地质勘探工作很难准确了解施工区域内的地质情况,只能根据有限多个地质钻孔信息来推测工程区域的整体地质情况,这就造成了在实际开挖施工过程中不可避免出现突发不良地质状况,例如断层破碎带等。当发生不良地质状况时,如何能够在施工

收稿日期:2012-08-11

基金项目:国家创新研究群体科学基金资助项目(51021004)

作者简介:撒文奇(1985—),男,博士生.研究方向:水工结构设计系统开发. E-mail: tjudam@126.com

*通信联系人 E-mail: tjuzsr@126.com

现场实时、准确评价其对工程结构安全及施工进度产生的综合影响,在结构安全得到保障的前提下,实时准确预知工程的施工进度,控制工程在规定的工期内顺利完成显得尤为重要。

随着数值模拟技术和计算机技术(并行计算)发展的不断成熟,在地下洞室群施工仿真模拟方面也取得了丰硕的成果,几乎涵盖了地下工程施工的所有领域,同时也使得大型数值实时仿真成为可能。冯夏庭^[1-3]等结合岩石力学多元监测信息提出了高效快速的岩体力学参数综合集成智能反演方法,并以此为基础建立能够跟踪指导施工过程的岩石工程稳定性动态智能反馈分析方法;江权^[4]等基于反馈分析方法对锦屏二级地下厂房围岩局部不稳定问题进行实时动态反馈分析;王刚^[5]等通过数值仿真计算及反演分析确定岩体的物理力学参数、地层初始地应力等参数,在此基础上建立了地下洞室群施工期快速反馈分析实用方法;付成华^[6]等开发了 BAFES 软件系统,该软件可实现地下洞室力学参数反演分析、开挖预报过程的可视化。以上研究成果都在工程施工期的指导起到一定的积极作用,但是对如何根据实际施工状态实时、动态、快速、自动改变数值模型的模拟状态的研究及工程施工期结构安全与进度的耦合研究涉及较少。

综上所述,本研究根据工程前期地质勘测获得的有限信息,建立能够反映工程实际和满足工程精度的工程 3 维全尺度数值模型,随着施工进度不断推进揭示的新地质信息,通过建立的实际施工状态与 3 维全尺度数值模型模拟状态之间的实时动态映射方法,实现对数值模型进行实时修改更新,保证实时仿真预测结果的正确性,进而从施工安全与进度两个角度综合预测评价施工处理措施的可行性。最后,利用 VB.net + Python 脚本语言的混合编程技术对 Abaqus 进行二次开发,开发了 1 套大型地下洞室群施工期结构安全与进度耦合实时仿真系统,有效的提高了地下洞室群现场施工指导的效率与科学性。

1 模拟状态实时动态映射

地下洞室群施工期结构安全实时仿真中关键问题就是用于结构安全仿真的数值模型能否在满足工程要求的精度下,真实客观的模拟(映射)实际的工程施工状态。施工状态包含 2 部分内容,分别为工程各工作面实时的施工进度状态(除去已开挖完成的部分)和工程区域内实时的地质状态(突发不良

地质)。在数值模拟范围内来讲,除几何尺寸外,均可以转化为数值模型的初始条件及边界条件。因此如果能够正确建立工程实际施工状态到 3 维全尺度数值模型的实时动态映射关系,即可实现地下洞室群施工过程的实时结构仿真。

1.1 实时动态映射中的元素

映射是指两个集合中元素与元素之间的对应关系。为了研究地下洞室群施工实时仿真,把这个概念引入到地下洞室群施工安全实时仿真中来,建立施工状态集合(记为 X)与数值模型模拟状态集合(记为 Y)之间的实时动态映射关系,记为 $X \rightarrow Y$,或 $y = f(x)$, f 称为映射函数。就是要找到一个映射“函数 f ”,将 X 中的元素与 Y 中的元素建立对应的映射关系。通过建立的映射关系,在任意的施工状态都能找到对应的数值模型的模拟状态,达到实时数值仿真的目的。

由于实际施工状态分为施工进度状态(记为 x_{1i})和地质状态(记为 x_{2i})两部分内容,故要建立的映射是一个多对一的关系,见图 1。从 2 个“集合”中元素的物理意义来看,想要建立的映射实际上是一种区域的对应。与数学中常规集合最大的不同是其中包含的元素具有不确定性、随机性,故首先必须明确 2 个集合中的元素。

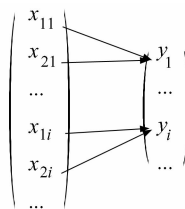


图 1 集合映射关系

Fig. 1 Relationship between set X and Y

1) 实际施工进度状态子“集合”元素(x_{1i})

施工工序是地下洞室群施工工艺的最基本组成单位,1 个地下洞室群施工过程就是由很多的工序组成。施工工序分为非仿真工序和仿真工序 2 类^[7]。仿真工序是在施工中施工时间需要模拟的工序,这些工序大多数都包含 1 个需要循环作业的施工过程,而这些工序也恰是岩体的开挖工序。故仿真工序之和就构成了实际开挖进度状态这个子“集合”。

2) 实际地质状态子“集合”元素(x_{2i})

实际地质状态就是指每个施工进度状态所揭示的地质信息,即所有施工进度状态所揭示的地质信息之和为地质状态子“集合”。故此子集合的元素 x_{2i} 与施工进度状态元素 x_{1i} 的数目相等,总是成对出现的。元素 x_{2i} 分为 2 种情况,1 种是与工程前期地质勘

测的结果相同,此部分地质信息已经在数值模型建立之初被考虑,即已经映射到数值模型上;另 1 种是与工程前期地质勘测的结果不同,称为突发不良地质,此种情况的元素需要实时动态映射,将在 1.3 节中详细讲述。

3) 数值模型模拟状态“集合”元素(y_i)

本研究中所用的数值模拟方法主要是有限单元法(FEM, finite element method)。其基本思想是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域,并通过他们边界上的节点相互联结为一个组合体。故从数值模拟方法原理可以看出,数值模型的最基本组成单位是单元。故单元组合之和构成了数值模型模拟状态“集合”。

1.2 施工进度状态的实时动态映射

施工进度状态实时动态映射的思路是:根据工程实时的施工进度信息,将已经开挖完成区域岩体,通过映射“函数 f ”在数值模型中找到与之对应的单元组,按照实际施工顺序将其有序“杀死”,达到模拟施工进度状态的目的。

明确了集合中元素之后,开始建立映射“函数 f ”。首先根据实际情况将数值模型分为开挖体和围岩两个部分。施工进度状态子“集合”只与开挖体部分对应(围岩部分与地质状态子“集合”对应,在下节中讲述)。接着按照地下洞室群施工组织设计中规定的实际开挖施工工序中的仿真工序,将 3 维数值模型的开挖体部分单元进行分块,每个仿真工序(1 个开挖区域)在 3 维数值模型中都会对应并且唯一对应 1 个单元块(组)。如图 2 所示。

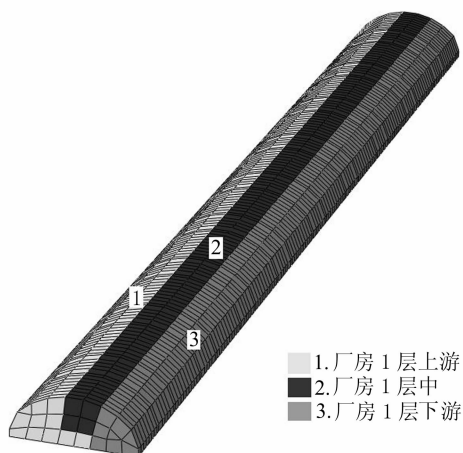


图 2 厂房 1 层施工工序对应单元分块

Fig. 2 Element division of the first layer powerhouse procedure

在施工中某个时间点,施工工序有 3 种状态:已经施工完毕、正在施工、未施工。在工程进度横道图管理中采用进度状态向量和矩阵来表示工作的进度状态。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:

$$m_{it} = \begin{cases} -1, & \text{若 } a_i \text{ 在工作时间 } t \text{ 时刻还未施工;} \\ 0, & \text{若 } a_i \text{ 在工作时间 } t \text{ 时刻正在施工;} \\ 1, & \text{若 } a_i \text{ 在工作时间 } t \text{ 时刻已经结束} \end{cases} \quad (1)$$

若工程共有 n 项施工工序,则在 t 时刻所有工序状态的集合构成了一个状态向量 $\mathbf{m}_t^{[8]}$, 则:

$$\mathbf{m}_t = \begin{bmatrix} m_{1t} \\ m_{2t} \\ \vdots \\ m_{nt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在工作时间 t 时刻,首先判断状态向量 $\mathbf{m}_t$ 中每个施工工序 m_{it} 的值,若 $m_{it} = -1$,表明此工序还未施工,则不用在 3 维数值模型进行映射;若 $m_{it} = 1$,表明工序已经施工完毕,则此工序对应的单元块全部要被映射,即单元块中全部的单元都要被杀死;若 $m_{it} = 0$,表明此工序正在施工,则此工序对应的部分单元块需要被映射,即单元块中实际开挖完成的单元需要被杀死,未开挖部分不能被映射。由于 3 维数值模型是按照 1:1 的比例建立的,工序的实际长度与模型的长度是一致的,故根据 t 时刻正在施工工序的开挖累计进尺即可判断单元块中哪些单元需要映射。故施工进度实时映射可以简单描述为:读入 t 时刻的施工进度数据,首先判断 $\mathbf{m}_t$ 状态向量中每个施工工序的 m_{it} 值,根据每个值的映射法则去寻找需要在 3 维数值模型中杀死的单元。

在实际施工中实际开挖顺序与计划会产生差异,在设计阶段只对计划顺序方案进行了可行性评价,如何实时评价开挖顺序修改对工程施工安全与进度的综合性影响具有重要的工程意义。根据以上的方法,通过用户输入各施工工序的预测开挖进尺在数值模型上实时映射未来某时刻的施工进度状态,从而实时预测评价开挖顺序修改的影响。

1.3 突发不良地质的实时动态映射

突发不良地质(主要研究断层破碎带与层间层内错动带)实时动态映射的思路是:根据工程施工过程中实时揭示的突发不良地质段的范围,通过映射“函数 f ”在数值模型中找到与之对应区域的单元组,实现不良地质介质弱化带^[8-10]的实时动态映

射。对于不良地质段特殊处理措施的模拟,首先通过公式量化为等效的岩石力学参数,进而实时折算到断层介质弱化带区域内的岩石力学参数,达到模拟不良地质特殊处理措施的目的。

1) 不良地质介质弱化带的动态映射

虽然突发不良地质的出现具有突发性,但是它的出现总是对应着某个施工进度状态,故仍然可以利用施工状态向量 $\mathbf{m}_i$ 来进行映射。在工作时间 t 时刻,首先判断状态向量 $\mathbf{m}_i$ 中每个施工工序的 m_{iu} 值,若 $m_{iu} = -1$,表明此工序还未施工,则此工序不会揭示突发不良地质信息;若 $m_{iu} = 1$,表明工序已经施工完毕,则此工序所揭示的突发不良地质已经被映射;若 $m_{iu} = 0$,表明此工序正在施工,当发现不良地质时,此施工工序对应一个累计开挖进尺,此时的掌子面即为不良地质的起始位置,通过现场勘测确定不良地质在开挖轴线方向的发展长度与掌子面平面内的发展深度,从而在数值模型上映射对应区域内的单元组,此单元组即为不良地质介质弱化带。

2) 系统支护措施的等效映射

地下洞室群支护方案中洞壁围岩一般布置大量的系统锚杆,并喷射了一定厚度的钢纤维混凝土。考虑到数值计算难以模拟这些数量众多的系统锚杆,因此采用文献[11]采用的等效法,将系统锚杆改善岩体的作用等效到岩体力学参数的提高上,如式(3):

$$\begin{cases} C_1 = C_0 + \eta \frac{\tau s}{ab}; \\ \varphi_1 = \varphi_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_0 、 φ_0 为岩体的粘聚力和内摩擦角; C_1 、 φ_1 为锚固岩体的粘聚力和内摩擦角; τ 为锚杆材料的抗剪强度; s 为锚杆的横截面面积; a 、 b 分别为锚杆的纵、横向间距; η 为粘聚力综合经验系数,一般取为 2 ~ 5。

对于钢纤维喷射混凝土支护,采用 Abaqus 软件自带的 Shell 单元模拟加以模拟^[12]。将喷层抗力反向施加在开挖面上,进行弹塑性求解。混凝土喷层提供的单位抗力 P_s 为:

$$P_s = \frac{2\delta\tau_b}{b\sin\alpha} \quad (4)$$

式中: δ 为混凝土喷层的厚度; b 为剪切区高度; τ_b 为混凝土抗剪强度; α 为岩体剪切角, $\alpha = 45 - \varphi/2$, φ 为岩体内摩擦角。与模拟开挖过程恰好相反,通过将 Shell 单元先“死”后“生”的方法来实现。

3) 不良地质介质弱化带处理措施等效映射

本研究中共设置了锚杆加强支护、钢支撑、固结灌浆及混凝土喷层 4 种不良地质的处理措施。其中混凝土喷层模拟方法与上述方法相同,只是提高不良地质段的 Shell 单元参数;固结灌浆提高围岩强度效果难以用确定公式衡量,故需要做现场试验确定灌浆后的围岩参数,直接输入系统。以下简单介绍锚杆加强支护及钢支撑的模拟方法。

在不良地质处理措施中会经常用到预应力锚杆,故采用文献[13]采用的等效方法,通过引入预应力锚杆修正系数 k_T 考虑不良地质段锚杆预应力的作用,如式(5):

$$k_T = 1 + \frac{Q}{20ei} \quad (5)$$

式中: Q 为单根锚杆施加的预应力, kN; e 、 i 分别为锚杆间、排距, m; 将 k_T 代入式(6)即可得到加强支护后的围岩参数:

$$\begin{cases} ID = k_T \frac{l}{ei}, \\ C^p = C' \left(1 + \frac{ID}{10}\right), \\ \varphi^p = \tan^{-1} \left[\tan \varphi' \left(1 + \frac{ID}{10}\right) \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中, l 为锚杆的长度, C^p 、 φ^p 分别为锚固围岩峰后黏聚力和内摩擦角的修正参数, C' 、 φ' 分别为峰后围岩对应于不同塑性应变的岩体参数,具体见文献[13]。

钢支撑的模拟采用文献[14]采用的等效方法,将钢支撑的弹性模量折算到不良地质段混凝土喷层上,施加在 Shell 单元上,如式(7):

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_c} \quad (7)$$

式中, E 为折算后混凝土弹模, E_0 为原混凝土弹模, S_g 为钢拱架截面积, E_g 为钢材弹模, S_c 为混凝土截面积。

2 施工期结构安全与进度的实时耦合

2.1 施工期结构安全与进度实时耦合方法

进度与安全是地下洞室群施工中两个相互影响、相互制约的重要方面,单独强调任何一个都是不合理的。本研究通过建立的地下洞室群施工结构安全实时仿真方法将进度与安全进行有效结合,使指导工程施工更加科学有效。具体思路为:当计划施工状态与实时施工状态发生差异时,首先利用结构安全实时仿真方法初步确定施工处理措施,在保证工程安全的前提下,将施工措施反馈给施工进度控制管理子系统,从施工进度角度去实时评价初步确

定的处理措施的可行性,对进度不可接受的处理措施用实时仿真方法进行循环优化,直到找到能够同时满足施工安全与进度的处理措施,实现二者的实时耦合。具体过程见图 3。

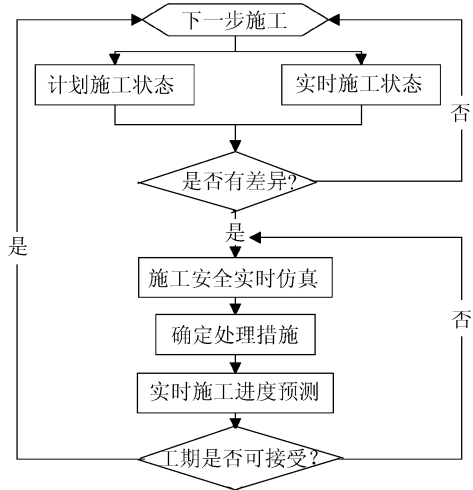


图 3 施工结构安全进度耦合方法

Fig.3 Coupling method of construction safety and schedule

2.2 施工期结构安全与进度实时耦合的实现

在地下洞室群施工过程中,当实际施工状态和计划施工状态产生差异时,为保证之后施工的安全进行,必须增加处理措施。引入处理措施的施工工序其持续时间势必会受到一定程度的影响,当单工

序或多工序持续时间发生变化时,进而可能会对施工总工期产生影响,导致工程不能按时竣工,此时需要对拟定的处理措施方案提前进行调整。因此问题的关键在于如何量化处理措施对工序持续时间以及施工总工期的影响上。

基于上面的分析,采用基于循环网络和网络计划实时仿真的施工进度预测方法^[8]来量化处理措施对施工进度的反馈,评价处理措施方案的可行性。

地下洞室群单项工序的实施过程包括测量、钻孔、装药、爆破、通风散烟、安全检查、初期支护、出渣、二次喷锚、清理等多项工作,这个过程循环进行,采用循环网络仿真技术可以很好地对这一过程进行模拟,定量获得各个单项工序的持续时间,在循环网络模型中,上述各项工作均为模型中的一个节点,如图 4 所示。

对于文中提出的锚杆加强支护、钢支撑、固结灌浆及混凝土喷层 4 种不良地质的处理措施,均可将由施工安全实时仿真确定的该处理措施的施工参数,转化为相应的工作量,进而可以获得实际施工完成该工作量所需的工作时间,此增加的工作时间可作为“二次喷锚”节点的持续时间参数输入到循环网络模型中进行处理措施影响下的工序仿真,获得该工序包含处理措施后的剩余工作时间。

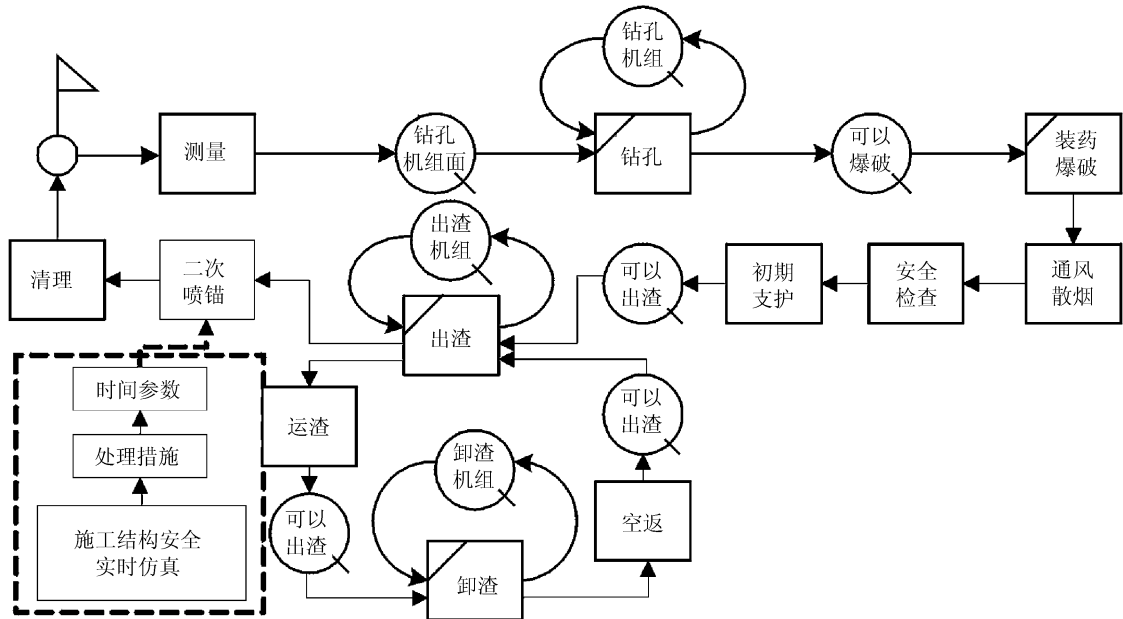


图 4 循环网络仿真模型

Fig.4 Model of circulation network simulation

当获得各个单项工序持续时间的变化后,可通过基于网络计划技术的施工进度仿真方法预测出整体工程的施工进度和总工期的变化,以评价处理措施方案是否可行。依据网络计划模型,将工程当前

的施工进度情况(各工序的剩余工作时间,可通过调用循环网络模型仿真获得)作为模型的基本输入,计算各个工序的时间参数以及整体网络的关键线路,进而可以预测出后期整体施工进度和总工期。

对于为满足结构安全要求而需要对工序施工顺序进行调整的情况而言,可通过改变受影响工序在网络计划模型中的紧前紧后关系进行考虑。

3 大型地下洞室群施工工期结构安全与进度耦合实时仿真系统

3.1 系统开发目标

地下洞室群施工工期结构安全与进度耦合实时仿真系统的开发目标是将工程施工工期结构安全实时仿真与施工进度实时仿真进行有效结合,实现工程安

全施工与进度控制的现场办公一体化,为现场决策者指导工程施工提供有力的科学依据,在工程安全得到保障的前提下,快速、优质完成工程施工。决策者不但可以通过该系统实现初始地应力与岩石力学参数的实时反演功能,而且可以基于反演结果对工程问题(例如发现突发不良地质、施工顺序调整)进行实时结构安全与施工进度仿真,从安全与进度2个角度对工程问题进行评价,实现了施工安全与进度的有效结合,使得地下洞室群现场施工管理水平更加科学、有效。图5为系统运行流程图。

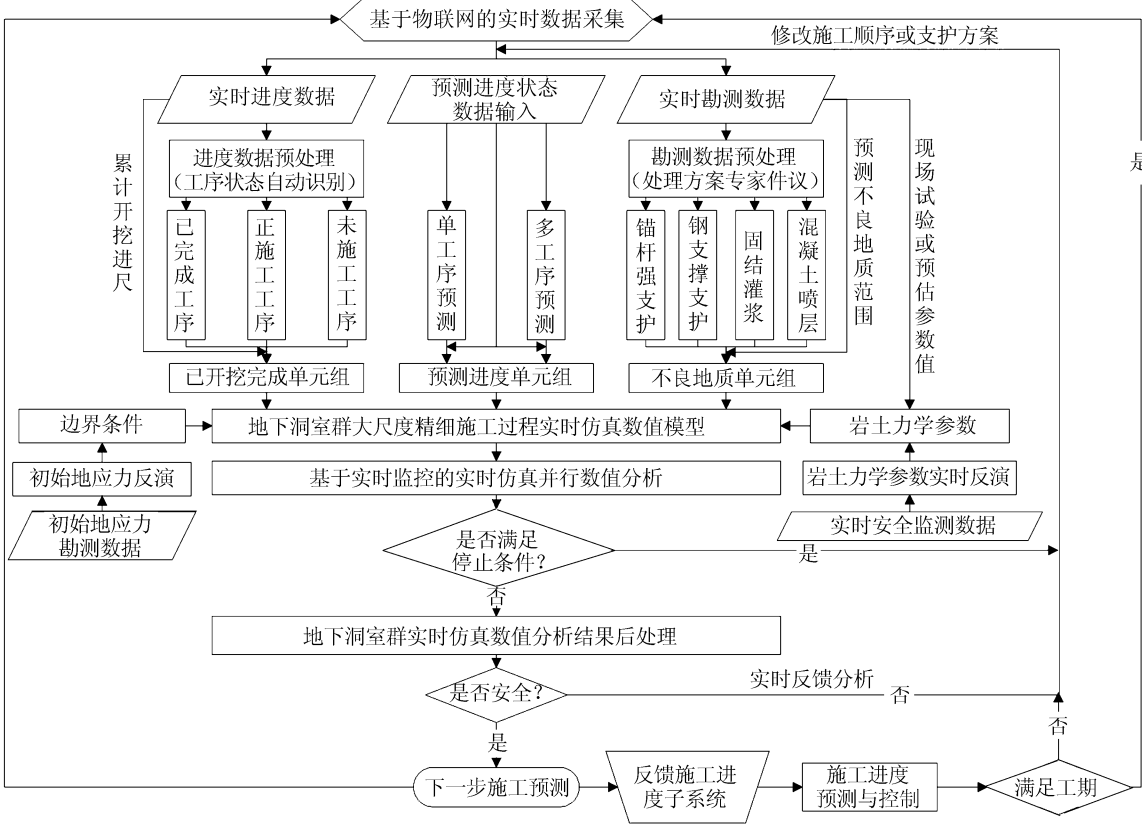


图5 系统运行流程图

Fig.5 System operation flow chart

需要特别指出的是以上看似复杂、困难的过程全部通过简单的 GUI 界面由决策人员在施工现场完成,涉及的困难的操作及有限元分析过程都被封装在系统内部(全程不会出现有限元软件界面),通过后台内核运行完成,故完全不需要使用者具备深厚的有限元分析知识。

3.2 系统开发中关键技术

数值模型的模拟状态实时映射方法及施工安全与进度耦合实时仿真的实现已经在前面做了详细阐述,在此只对系统开发中其它关键技术做简要讲解。本系统很多功能都是基于 Abaqus 软件开发的,选择 Python 脚本语言为二次开发语言。

1) 初始地应力场与岩石力学参数反演分析
初始地应力场反演与岩石力学参数反演在地下工程数值仿真中的作用很大。地应力场反演为数值模型确定合理的边界条件;岩石力学参数反演为数值模型确定较贴近真实的材料输入参数,此为该系统实时仿真正确性的基本前提。岩石力学参数反演的具体方法为:首先用户输入待反演参数的取值范围,通过正交设计或均匀设计试验方法生成待反演参数样本,利用开发的反演样本循环自动数值计算功能得到每组样本的监测点计算值,最后输入 BP 神经网络模型中进行训练,训练满足精度后,根据输入的实际位移监测值利用基因遗传算法进行寻

优得到反演结果。地应力反演的方法基本与参数反演相同,区别在于根据地应力勘测资料代替位移监测值。

2) Python 脚本程序与主系统实时数据通讯

Python 脚本程序编写好之后保存为后缀名为 *.py 的文本文件,代码文件不需要编译,可以直接在 cmd 窗口中输入“abaqus cae noGUI = myscript.py”后台内核运行计算任务,这就涉及到脚本程序如何与主系统 GUI 操作进行实时数据通讯的问题^[15]。

受到程序开发中自定义构造函数的启发,本系统将 Python 脚本程序开发为功能独立的“程序函数”,即通过在脚本程序开发中设置形式参数的方式来实现数据的通讯及程序的重复利用。首先用户通过主系统的 GUI 操作设置将要进行的分析任务及实际参数,主系统会自动生成后台计算预处理本地文件,然后自动识别指定功能的脚本“程序函数”,“程序函数”读取本地文件中的实际参数并匹配自身的形式参数,匹配成功后则后台执行指定的计算任务,实现二者的实时通讯。

3) 有限元计算实时监控

此功能的目的在于通过实时监控计算过程中某些场变量的变化,及时快速发现分析任务中存在的问题,进而提示用户采取措施,避免提交计算任务后等待很长时间,得到的却是一个错误或者不可用的计算结果,浪费了计算时间。具体方法为:首先在 GUI 界面中设置想要监控的位置(节点)、监控信息(位移、应力等)及监控条件(一般为上限值),将设置保存到预处理文件中。Python 程序读取文件后,利用 keywordBlock.insert() 函数在 Abaqus 关键字中设置用户设定的监控输出请求,在构造的 monitor-DataValue(jobName, messageType, data, userData) 函数中设置监控条件,当超出监控条件时,通过 mdb.jobs[jobName].kill() 函数终止分析任务。

4 工程实例应用

国内某大型水电站采用的是地下厂房布置,包含引水洞、主副厂房、主变室、调压室、母线洞及尾水隧洞等,详见图 6。

当主厂房 1 层中工序施工到累计开挖进尺为 232 m 时发现了 1 条大断层破碎带,破碎带在主厂房纵轴线方向发展长度约为 9 m,在主厂房横断面内上下游侧平均发展深度为 14 m,顶拱以上发展深度约为 5 m,顶拱以下发展深度约为 32 m。读取实

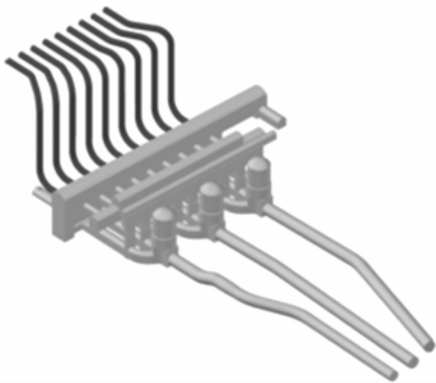


图 6 地下厂房系统 3 维模型

时的施工进度状态向量 m_i 发现,当时共有 6 个正在施工的工序,具体施工进度数据详见表 1。通过系统的施工状态映射方法,将工程实时的开挖进度与现场勘测的破碎带数据信息实时映射到数值模型上,数值模型的施工进度与不良地质的模拟状态如图 7 所示(由于数值模型较大,只集中展示了正在施工工序部分及含不良地质部分围岩)。

表 1 正在施工工序实时进度

Tab. 1 Real-time schedule of construction procedure			
正在施工 工序	实时累计开 挖进尺/m	正在施工 工序	实时累计开 挖进尺/m
厂房一层上游侧	149.3	主变室一层上游侧	67.4
厂房一层中	233.5	主变室一层中	212.8
厂房一层下游侧	82.7	主变室一层下游侧	145.6

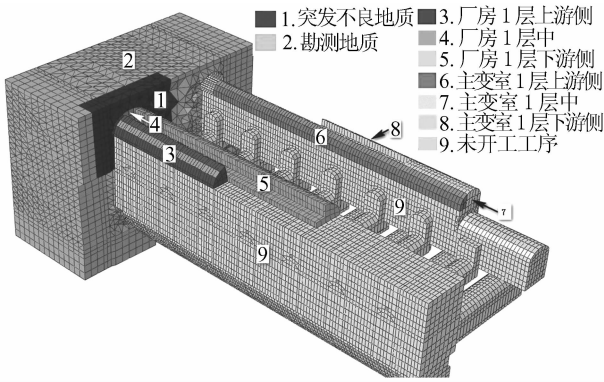


图 7 数值模型施工进度状态映射

Fig. 7 Construction schedule state mapping on numerical model

根据突发不良地质的发展范围,主厂房开挖前 5 层包含 13 个工序会穿过此区域,在实际系统应用中可以详细研究单独每个工序穿越不良地质段开挖时的工程结构安全性,由于篇幅所限将部分工序分组合并研究,详见表 2。首先,利用系统的岩石力学参数实时反演功能,基于现场位移监测资料对不良

地质段的参数进行反演,反演结果(折算系统支护后)见表 3。从反演的结果及现场勘测来看,断裂带岩石破碎,为了保证开挖稳定性,先对其进行灌浆处理,经现场检验处理效果见表 3。然后,在系统 GUI 界面中依次输入 3 组工序穿越不良地质段的完成时间,利用系统的实时仿真功能计算不良地质段在系统支护下及灌浆后的开挖结构安全性,计算过程中由于拱肩最大位移超出了设定的控制范围(类比相似工程确定,本研究取 20 mm),计算实时监控功能终止了计算任务。接着,经过比较选择了预应力锚杆/锚索加强支护的处理措施,根据工程经验反复试算后,初步确定的开挖支护方案为:开挖进尺 1.5 m,主厂房顶拱选择预应力锚杆的加强支护措施,具体参数为预应力 $T = 125\text{ kN}$,长度 $L = 9\text{ m}$,分布为 $@1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$;边墙选择预应力锚索的加强支护措施,具体参数为预应力 $T = 1\,500\text{ kN}$,长度 $L = 20\text{ m}$,分布为 $@3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ 。需要指出的是在试算过程中实时监控功能避免了大量无效计算时间。

表 2 穿越突发不良地质段施工工序

Tab.2 Construction procedures that through fault

工序名称	分组	研究目的	工序名称	分组	研究目的
厂房 1 层中	1	顶拱支护	厂房 1 层上游侧	1	顶拱支护
厂房 1 层下游侧	1	顶拱支护	厂房 2 层上游侧	2	边墙支护
厂房 2 层下游侧	2	边墙支护	厂房 3 层上游侧	2	边墙支护
厂房 3 层下游侧	2	边墙支护	厂房 4 层中梯段	3	边墙支护
厂房 4 层上游侧	3	边墙支护	厂房 4 层下游侧	3	边墙支护
厂房 5 层中梯段	3	边墙支护	厂房 5 层上游侧	3	边墙支护
厂房 5 层下梯段	3	边墙支护			

表 3 突发不良地质岩石力学参数

Tab.3 Rock mechanics parameters of fault

参数类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	容重 / $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 c/MPa
反演结果	4.5	0.32	22.5	31	0.4
灌浆后	6.0	0.30	22.5	39	0.6

最后将确定的加强支护方案以施工参数的形式反馈给施工进度管理子系统进行进度预测。折算后

的施工参数为:顶拱开挖工序每个循环延误时间约为 3 h,边墙开挖工序约为 1 h。经过预测发现,增加该加强支护方案后的施工工期较原计划拖延了 153 h。拖延总工期较长,返回实时计算功能对处理措施进行改进,适当增大锚杆/锚索排距与预应力大小,最终确定的支护方案为:顶拱选择预应力锚杆的加强支护措施,具体参数为预应力 $T = 850\text{ kN}$,长度 $L = 9\text{ m}$,分布为 $@1.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$;边墙选择预应力锚索的加强支护措施,具体参数为预应力 $T = 2\,400\text{ kN}$,长度 $L = 20\text{ m}$,分布为 $@3.0\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 。折算后的施工参数为:顶拱开挖工序每个循环延误时间约为 2 h,边墙开挖工序约为 0.6 h。经过预测发现,增加该加强支护方案后的施工工期较原计划拖延了约 90 h。由于不良地质发生在关键线路的工序上,故采取处理措施后必然会对总工期产生影响,若想使后期施工进度满足计划要求,需要在施工中采取补救措施,弥补该不良地质段处理措施延误的工期。例如从总时差较大的工序(例如尾闸室工序)中调配部分施工资源到此工序,增加施工强度,一直持续到完全弥补拖延的时间,再将资源调回原工序,从而保证工程如期完工。

5 结 论

本研究以 3 维并行数值模拟技术为主要手段,建立了地下洞室群施工工期结构安全实时仿真与进度反馈预测方法,并以该方法为核心自主开发了大型地下洞室群施工工期结构安全与进度耦合实时仿真系统。结合本研究成果在实际工程中的应用得出以下结论:

- 1)引入数学中集合的概念,建立实际施工状态“集合”与数值模型模拟状态“集合”之间的实时动态映射方法,实现了实时施工进度状态与突发不良地质状态在数值模型上的动态映射模拟。
- 2)以区域分解并行有限元法为基础,建立了基于并行计算的地下洞室群实时仿真方法及高性能并行计算集群平台,提高了实时仿真的计算效率。
- 3)通过建立的实时结构安全仿真方法实现地下洞室群施工工期结构安全与施工进度的耦合分析,从工程安全与进度两个角度综合评价施工处理措施的可行性,从而建立了施工进度与安全的互馈机制,实现了施工安全与进度控制管理的现场办公一体化。
- 4)利用 VB. net + Python 脚本语言的混合编程技术对 Abaqus 软件进行二次开发,开发了一套大型

地下洞室群施工期结构安全与进度耦合实时仿真系统。工程实际应用表明,该系统能够切实解决地下洞室群施工过程中遇到的问题,有效提高地下洞室群现场施工指导水平。

参考文献:

- [1] Feng Xiating, Zhou Hui, Li Shaojun, et al. System of intelligent evaluation and prediction in space-time for safety of rock engineering under hazardous environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1741 – 1756. [冯夏庭, 周辉, 李邵军, 等. 复杂条件下岩石工程安全性的智能分析评估和时空预测系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1741 – 1756.]
- [2] Feng Xiating, Zhou Hui, Li Shaojun, et al. Integrated intelligent feedback analysis of rock mechanics and engineering problems and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1737 – 1744. [冯夏庭, 周辉, 李邵军, 等. 岩石力学与工程综合集成智能反馈分析方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1737 – 1744.]
- [3] Feng Xiating, Jiang Quan, Xiang Tianbing, et al. Intelligent and dynamic design method of large cavern group and its practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 433 – 448. [冯夏庭, 江权, 向天兵, 等. 大型洞室群智能动态设计方法及其实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 433 – 448.]
- [4] Jiang Quan, Hou Jing, Feng Xiating, et al. dynamic feedback analysis and engineering control of surrounding rock local instability in underground powerhouse of Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1899 – 1907. [江权, 侯靖, 冯夏庭, 等. 锦屏二级水电站地下厂房围岩局部不稳定问题的实时动态反馈分析与工程调控研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1899 – 1907.]
- [5] Wang Gang, Jiang Yujing, Li Shucui. Rapid feedback analysis method for underground caverns during construction[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2011, 41(8): 133 – 142. [王刚, 蒋宇静, 李术才. 大型地下洞室群施工期快速反馈分析实用方法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2011, 41(8): 133 – 142.]
- [6] Fu Chenghua, Qin Weixing, Chen Shenghong, et al. development and application of rock-mass mechanical parameters back analysis software system for underground cavern[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 577 – 581. [付成华, 秦卫星, 陈胜宏, 等. 地下洞室岩体力学参数反演软件系统开发与应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 577 – 581.]
- [7] 钟登华, 刘东海. 大型地下洞室群施工系统仿真实验理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 9 – 18.
- [8] He Ping, Li Zhixiong, Lu Yuanzhong, et al. Overview of researches on fault simulation by finite element method[J]. North Western Seismological Journal, 2011, 33(2): 186 – 194. [和平, 李志雄, 陆远忠, 等. 断层面的有限单元模拟方法综述[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 186 – 194.]
- [9] Wang Ren, He Guoqi, Yin Youquan, et al. A mathematical simulation for the pattern of seismic transference in north china[J]. Acta Seismologica Sinica, 1980, 2(1): 32 – 42. [王仁, 何国琦, 殷有泉, 等. 华北地区地震迁移规律的数学模拟[J]. 地震学报, 1980, 2(1): 32 – 42.]
- [10] Rawnsley K K. Joint development in perturbed stress field near faults[J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14(8/9): 939 – 951.
- [11] Jiang Quan. Study on model and stability of surrounding rock of large underground caverns under high geo-stress condition[D]. Wuhan: The Chinese Academy of Science, 2007. [江权. 高地应力下硬岩弹脆塑性劣化本构模型与大型地下洞室群围岩稳定性分析[D]. 武汉: 中国科学研究生院, 2007.]
- [12] Zuo Shuangying, Xiao Ming, Lai Ying. Numerical analysis of excavation and anchorage effect on complex underground caverns of a hydropower station with flac3d[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(4): 432 – 436. [左双英, 肖明, 来颖. 基于 flac3d 的某水电站大型地下洞室群开挖及锚固效应数值分析[J]. 武汉大学学报工学版, 2009, 42(4): 432 – 436.]
- [13] Gao Qian, Song Jianguo, Yu Weijian, et al. Design and numerical simulation of rock bolting and shotcrete for deep tunnels with high stress in Jinchuan Mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 279 – 284. [高谦, 宋建国, 余伟健, 等. 金川深部高应力巷道锚喷支护设计与数值模拟技术[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 279 – 284.]
- [14] Wu Bo, Liu Weining, Gao Bo, et al. 3D simulation and analysis on construction behavior of forked metro tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3081 – 3086. [吴波, 刘维宁, 高波, 等. 地铁分岔隧道施工性态的三维数值模拟与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3081 – 3086.]
- [15] Wu Xiangdong, Liu Zhigang, Wan Mi, et al. Study and development on the application of Abaqus in the sheet metal rapid forming simulation based on Python[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 68 – 72. [吴向东, 刘志刚, 万敏, 等. 基于 Python 的 Abaqus 二次开发及在板料快速冲压成形模拟中的应用[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 68 – 72.]