

基于结构安全的水工隧洞施工仿真系统研究

张玉贤¹, 张继勋¹, 任旭华¹, 王天兴²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团
中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 水工隧洞施工情况复杂,目前的施工仿真计算大多只考虑开挖而缺乏衬砌和灌浆因素,故没有体现隧洞完整的施工过程;施工动态仿真一般根据仿真结果采用预制动画的形式实现,其实现过程复杂,模型不易修改,隧洞施工过程中结构状况例如围岩稳定、锚杆等支护的安全难以直观地确定。考虑隧洞施工各个工序结合系统仿真的方法,调用开挖、衬砌及灌浆的 CYCLONE 模型得到更为准确的进度计划,基于 BIM 技术实现施工动态可视化。针对目前较少涉及隧洞结构安全与进度计划耦合仿真,提出基于映射概念与反馈技术的隧洞施工工期结构安全仿真方法,基于二次开发技术与数据库技术,采用 VB.NET + PYTHON 语言编制了一套水工隧洞施工仿真系统,实现与工程施工进度相结合的结构安全判断,为工程师提供良好的数据支持。

关键词: 施工仿真; 可视化; 结构安全; 水工隧洞

中图分类号: TV672⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0149-08

Simulations of hydraulic tunnel construction based on the concept of structural safety

ZHANG Yuxian¹, ZHANG Jixun¹, REN Xuhua¹, WANG Tianxing²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: The construction of hydraulic tunnels is complicated. In the current construction simulation calculations, excavation process is mostly considered without the data of lining and grouting process, so these simulations cannot reflect the complete construction process of the tunnel. The dynamic simulation of the constructions uses prefabricated animation which is based on the simulation results, so its implementation process is complicated. Furthermore, this model is not easy to modify, and the structural conditions such as the stability of surrounding rocks and anchors during the construction of the tunnel are difficult to determine intuitively. In view of these problems, the method of tunnel construction in combination with system simulation was adopted in this paper, the CYCLONE model of excavation, lining and grouting was used to get a more accurate schedule, and construction dynamic visualization based on BIM technology was implemented. Aiming at the coupling simulation of tunnel structural safety and schedule which is rarely involved at present, a structural safety simulation method based on mapping concept and feedback technology was proposed for tunnel construction. Based on the secondary development technology and database technology, the combination of VB.NET and PYTHON language was used to compile a simulation system of hydraulic tunnel construction. This system can provide an overall structural safety judgment based on construction progress and support engineers with better data output.

Key words: construction simulation; visualization; structural safety; hydraulic tunnel

收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-05-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1765204)

作者简介: 张玉贤(1996-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构工程。

通讯作者: 任旭华(1963-), 男, 江西定南人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高坝及复杂地基、地下结构稳定、水工建筑物除险加固技术。

1 研究背景

水工隧洞施工系统内部各部分之间相互制约又相互联系,导致隧洞在施工过程中难以确定合理的进度计划,隧洞开挖过程围岩稳定、初期支护以及衬砌的安全情况无法直观地确定,因此进行较准确的施工进度仿真与施工期结构安全状况判定的研究尤为重要。针对施工进度仿真问题, Halpin^[1] 首先提出了循环网络技术(cycle operation network, 即 CY-CLONE), 对循环施工过程进行模拟的同时, 也考虑了时间分布的随机性。钟登华^[2] 率先将循环网络仿真技术应用于隧洞施工仿真。胡连兴^[3] 采用系统仿真方法, 对亚碧罗地下洞室群的施工仿真及网络进度进行了研究。Wang 等^[4] 考虑施工环境的变化对参数的影响改进了碾压土石坝施工进度仿真的精确性。王晓玲等^[5] 将 CATIA (computer aided three-dimensional interactive application) 引入到引水隧洞施工进度可视化中, 提高施工进度仿真效率。余佳等^[6] 考虑隧洞施工过程中的机械故障对 CY-CLONE 模型进行了改进。从目前成果来看, 大部分隧洞施工进度仿真只是考虑开挖环节为仿真工序, 而将衬砌、灌浆等工序作为非仿真工序, 并且模型信息不能实现自动读取。针对施工过程中结构安全, 江权等^[7] 将智能科学引入地下工程施工过程, 通过开挖与支护优化对地下洞室施工过程结构稳定进行控制; Zhang 等^[8] 对桥梁建筑建立了集成结构分析与施工管理的信息模型; 南轩等^[9] 对某隧洞开挖过程中应力应变进行模拟, 并以隧洞围岩应力应变为目标, 对隧洞尺寸进行优化设计。上述研究考虑了不同的条件模拟施工期的结构安全状况, 但没有将施工进度与结构安全进行结合。撒文奇等^[10] 通过将数值模型分组建立地下洞室群的信息模型, 将支护信息以等效参数的形式反馈到围岩中, 实现了地下洞室群开挖过程中围岩稳定情况判断。Zhang 等^[11] 通过网格映射法建立了大坝等上部工程动态的施工信息模型。

随着 BIM (building information modeling) 技术在水利工程中的应用, 数据成为工程全生命周期信息传递的重要手段。如罗通等^[12] 基于 CAA 实现 CATIA 的二次开发完成渠道的三维设计研究, 很大程度上提高了设计效率; 陈国良等^[13] 以 IFC 格式为基础建立了 IFC-3DgeoMdl 模型, 将地质体中不同地质情况以及相互关系以数据的形式进行储存。本研究以引水隧洞作为对象, 依托 CATIA 平台, 开展基于可

视化技术的水工隧洞施工进度仿真实理论和施工期结构安全与反馈的研究, 为水工隧洞建设提供参考。

2 基于 CATIA 的水工隧洞三维模型

2.1 引水隧洞三维几何模型

三维基础模型不仅包含建筑物几何信息还要包含施工信息如断面桩号及断面面积等。水工隧洞建模是施工进度可视化仿真的基础, 在几何模型建立的过程中, 水工隧洞的开挖、衬砌、灌浆以及喷锚支护等模型, 存在着较高的重复利用率和较多的修改次数, 甚至在各种相似工程中也可以得到利用^[14]。骨架技术整体思想是先整体规划, 后局部细化设计。在对引水隧洞进行设计时, 根据已知的工程资料在 CATIA 中定位出隧洞轴线的起点和终点及轴线转折点, 得到隧洞轴线的具体位置, 在创成式曲面设计模块中按照各条隧洞的空间位置关系运用点、折线等命令生成骨架元素。

引水隧洞的断面形式和尺寸与围岩稳定条件、水力条件及施工条件有关, 设计中可能会发生变化。在设计过程中要不断地调整以适应不同的设计方案。参数化设计概念可用如下公式表示^[15]。

$$F(D, X) = 0 \quad (1)$$

式中: $F(f_1, f_2, \dots, f_n)$ 为一组参数方程; $D(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为 F 函数中的变量, 表示模型特征之间的约束关系, 比如相邻轴线的距离等; $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 F 函数中的变量, 表示模型几何尺寸、位置以及特征点的坐标。

知识工程包括知识工程规则和知识工程阵列。知识工程规则是一种类似于程序代码的语言。首先绘制隧洞不同断面的轮廓形状, 通过知识工程规则进行判断从而确定隧洞断面形状, 利用知识工程可以通过函数建立隧洞施工信息, 例如通过 AREA() 函数确定隧洞施工断面面积等。知识工程阵列是由条件语句(IF)和循环语句(FOR)组成的, 通过用户编写的要求可以重复生成特定的形状。利用参数化和知识工程技术可以建立隧洞开挖、衬砌、灌浆及锚杆支护的模板工程。图1展示了马蹄形断面隧洞的设计流程。

2.2 CATIA 二次开发技术

为了进行进度仿真计算, 需要将建立的三维基础模型中几何及施工信息储存在数据库中, 本文通过 CATIA 的二次开发技术得到模型参数及施工信息。编程访问 CATIA 对象有两种方法, 进程内和进程外。进程内是指通过编写 VBScript 脚本、CAT-

Script 脚本、VBA(visual basic application)脚本后,在 CATIA 中通过运行这些脚本来执行命令^[16]。进程外访问是指程序运行不由 CATIA 调用,在外部编写程序后,通过 COM(component object model)接口调用 CATIA,并执行命令,在这个过程中 CATIA 仅作为一个外部 OLE(object linking and embedding)自动化服务器^[17]。

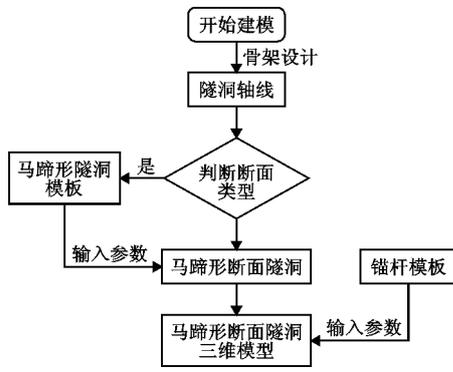


图 1 马蹄形断面隧洞设计流程图

本文利用 VB.NET 通过进程外的 OLE 自动化对象来操作 CATIA,首先利用 ADO(activex date object)技术将 VB.NET 与 Access 数据库相关联,利用 VB.NET 对当前活动的 CATIA 文件进行访问,依次读取各个部件的信息,并将读取的信息全部保存到数据库中,作为施工仿真的基础数据。其中部分代码如下:

```

Dim Doc AsPartDocument
Doc = CATIA.ActiveDocument
“VB.NET 连接到当前活动的 CATIA 文件”
Dim Sdnumber As Parameter
Sdnumber = Pmts.Item("隧洞编号")
“获得隧洞的体型参数”
rswangluo.Open("select * from 网络关系",
con, 3, 3)
“将获取的信息存入仿真数据库”
  
```

3 水工隧洞施工进度仿真技术

3.1 水工隧洞施工仿真原理

对水利水电工程施工管理系统而言,研究施工过程中的工序施工状况,将其作为离散系统已经足够^[18],离散系统采用“仿真钟”的手段来体现时间的推进。在动态仿真的过程中运用时间步长法,其规定采用某一单位时间为增量 Δt ,根据时间的进展,逐步地对系统活动进行判断及模拟。施工全过程的模拟中,时间步长不发生变化,根据各种工序间的关

系确定工程施工的初始状态作为系统状态的零点。模拟钟从零点开始增加规定的时间步长,并判断该过程中有无事件发生,如果有,则将 Δt 的终止时刻作为事件的发生时刻,并改变此时的系统状态,如果在“模拟钟”推进的时间内任何工序的状态都没有发生变化,则系统状态也不变化^[9]。离散系统仿真流程如图 2 所示。

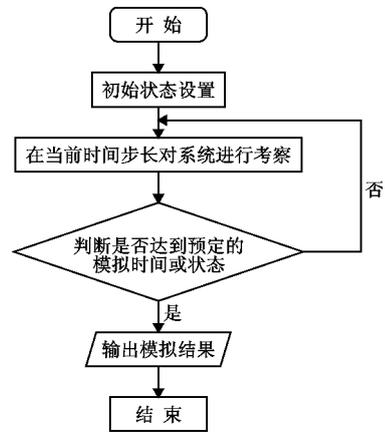


图 2 离散系统仿真流程图

3.2 水工隧洞施工仿真模型建立

水工隧洞施工是一个复杂的过程^[19]。为了更加准确模拟施工过程以及降低进度仿真模型的复杂程度,依据层次化、模块化的建模思想,将水工隧洞施工全过程分为两个层次:控制层模型和实施层模型。其中控制层根据 CPM 网络模型原理为所有工序制定紧前紧后关系,构成施工计划表,计划表中的节点采用 CYCLONE 模型,分别建立不同施工工序的进度仿真计算子程序,由此构成一个分层次的整体模型。隧洞施工的过程是由开挖、灌浆、衬砌等工序模块反复循环的过程,每一个模块又有多种工序组成,比如开挖模块由钻孔、爆破、通风散烟、安全检查等工序组成,在系统仿真的过程中,每种工序的施工方法、施工参数不变。CPM 网络计划模型对应着隧洞施工过程中的每个工序模块,它是施工进度的基础, CYCLONE 模型是 CPM 网络计划模型的实施,对应着模块的具体工序,本文主要考虑开挖、衬砌、灌浆的模块。

隧洞仿真参数来源复杂,受到多种因素的影响。模型参数的准确性与可靠性直接影响仿真计算的结果。由于隧洞施工条件复杂、工序繁多,难以准确地估计出每种工序的参数大小,本文考虑的模型参数类型有确定型、随机型。确定型参数如施工机械参数、隧洞断面尺寸等,参数在施工过程中不会发生变

化。随机型参数有自卸汽车卸渣时间、装载机装渣时间等,根据其不同的分布类型^[16],生成随机数,利用反函数的方法确定施工工序的完成时间。

3.3 施工进度可视化

进度计算结束后,建立进度数据库储存仿真计算结果,利用 CATIA 二次开发技术将施工进度仿真后的数据赋予到三维几何模型中,以初期支护为例,本文考虑在出渣完成后即时支护。在查询施工期某天的施工面貌时,从数据库中读取仿真计算结果,判断该天开挖工序累计施工进尺与所有锚杆模型的位置关系,将在累计施工进尺范围内的锚杆激活。利用上述原理,可将开挖、衬砌及灌浆等工序的施工进度进行直观展示。并且利用 BIM 建模软件参数化等特点的优势,动态地改变模型参数,实现施工状态的动画效果。

4 施工期结构安全与进度耦合

4.1 施工期结构安全仿真技术

当进度仿真结束后可以建立水工隧洞数值计算模型,以此确定施工期的结构安全状况,由于水工隧洞具有轴线长等特点,为了保证随进度变化的数值计算准确性,选取典型段建立水工隧洞局部精细化数值模型,即在隧洞施工轴线方向上的单元尺寸尽量满足单位施工工序的进尺的约数,本次仿真单元长度取为 1 m。根据水工隧洞的特点,将数值模型按照施工工序分为开挖单元组、衬砌单元组等。采用复制单元的方法建立支护单元,对于锚杆采用杆单元(T3D2)并嵌入(EMBEDDED)整体数值模型中。

数值模型建立完成后,需要对其进行处理,按照不同的施工工序与施工进尺对数值模型进行分组,以开挖工序为例,沿着隧洞轴线方向按照进尺的约数进行划分,处理结束后将所有单元分组信息储存在数据库中。并将单元组的位置信息(沿着施工轴线方向的分组信息)进行储存,隧洞有限元数值模型及分组如图 3 所示。

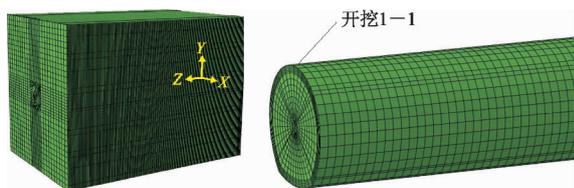


图3 隧洞有限元数值模型及分组示意图

图中“开挖 1-1”表示 1 号隧洞的开挖工序的第 1 个单元组。通过判断单元组的位置信息与累计

施工进尺的关系可以将单元组施工状态划分为 3 种:当施工累计进尺包含该单元组时,单元组为已完工状态;当施工累计进尺不包含该单元组时,单元组为未施工状态;当累计施工进尺不完全包含该单元组时,单元组为正在施工状态。

当进行工期内某天的数值计算时,判断该天的施工累计进尺,利用 SQL 语言搜索数据库中小于该进尺的单元,并根据施工工序进行储存,即将所有开挖单元储存至 E-REMOVE 单元组,将所有支护单元储存至 E-ADD 单元组中,对其进行相应的“杀死”或“激活”处理。

数值计算采用 ABAQUS 进行,系统为后台调用软件计算内核,采用 PYTHON 语言对 ABAQUS 进行二次开发。对 ABAQUS 二次开发主要有两种形式,一种对 INP 文件进行操作。一种对 CAE 进行操作,在进行施工期单元状态查询时,对 INP 文件操作需要不断地改变的文件内容且对于施工期任意一天需要重新判断单元位置与累计施工进尺的关系,消耗大量时间。本系统将所有单元组全部存储于 INP 文件后对 CAE 进行操作,将模型边界条件、分析步以及荷载等通过编程对数值模型进行处理,后台调用 ABAQUS 内核进行计算,对计算结束后的 ODB 文件编写脚本进行访问,提取工程师希望的数据以及云图进行展示。

4.2 施工期支护参数反馈分析技术

数值计算结束后,为使结果数据对施工进行反馈,需要对设计参数进行调整,本文主要以计算得到围岩数据以及锚杆数据对施工锚杆的支护参数进行调整。利用 BIM 建模软件的参数化设计将新的锚杆支护导入前处理软件进行单元划分后,重新导入无锚杆的数值模型中。为减少对数值模型的处理时间,支护参数反馈分析中不再对数值模型按照施工轴线方向分组处理,仅将数值模型按照施工工序划分为开挖、喷层、锚杆、衬砌等单元组。在数据库中建立节点信息数据库,包含节点编号以及对应的 X、Y、Z 坐标;单元信息数据库包含单元编号、每个对应的节点编号、单元的桩号信息以及单元所属的单元组。通过判断累计施工进尺与单元桩号的关系实现对单元的处理。将已经开挖的单元进行“杀死”,已经施工的支护单元进行“激活”。

依据上述原理,对 ABAQUS 的 INP 文件进行处理,INP 文件由关键字和数据行组成,包含数值模型所有的节点、单元以及单元分组信息,并且有固定的格式。通过对 INP 文件关键字的读取,利用编程语

言自动将信息存储到数据库中。

5 结合结构安全的引水隧洞施工进度仿真系统

5.1 系统开发目的及运行流程

引水隧洞施工进度仿真系统的开发目标是将隧洞施工进度与施工期结构安全状况进行直观地表达。为工程师提供一个施工期施工状态的数据支持,并根据系统对结构状况作出的数据修改支护的方案。系统的运行流程如图 4 所示。

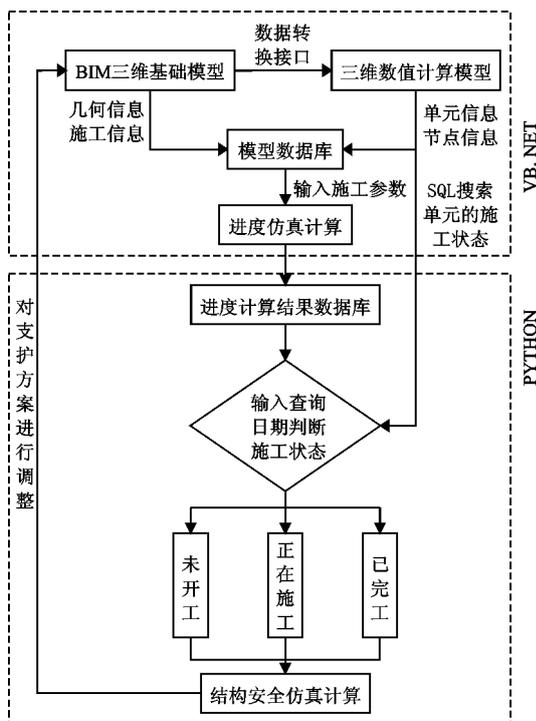


图 4 引水隧洞施工进度仿真系统运行流程

5.2 系统开发技术

整个系统采用 VB.NET 与 PYTHON 混合编程技术。VB.NET 进行进度计算与系统框架的编写, PYTHON 主要对 ABAQUS 进行二次开发^[20],通过编写脚本进行调用,整个系统中不会出现有限元计算的界面。通过向导式操作,用户可以计算出隧洞施工进度进而得到工期内任意一天的施工面貌,输入

材料的物理参数后可以计算结构的稳定情况,为隧洞的设计、施工提供良好的交互平台。

6 工程实例

以某一引水隧洞为例,选取典型段建立模型,隧洞总长为 300 m,断面形式为马蹄形断面,几何模型见图 5(a),隧洞施工采用钻爆法,由开挖、衬砌、灌浆等工序反复循环完成。本次仿真的开挖工序中测量、装药爆破、安全检查服从均匀分布,自卸汽车卸渣服从指数分布,装载机装渣时间服从正态分布,通风散烟及安全检查均取平均 0.5 ~ 1.0 h,考虑开挖后即时喷锚支护。施工开始时间为 2019 年 1 月 1 日,开挖进尺为 5 m/d,锚杆的间距为 1.2 m,排距为 1.5 m。在系统中输入施工参数,施工过程中若发生突发事件,在系统中可以加入突发事件的处理事件,当机械参数发生变化后,将此时已经计算结束的结果保存至数据库中,重新在系统中输入机械参数计算施工进度情况,经进度仿真计算后,完工时间为 2020 年 5 月 26 日,全部有效工期为 365 d,将进度仿真结果存到数据库中,图 5(b)为建立的水工隧洞模型及进度仿真结果数据库。

在系统中,输入工期内的任意 1 天,可以直观地查询该天的施工面貌。也可以以一定的时间间隔动态地展示施工状态。图 6 中展示的为不同施工天数的工序施工状态及施工面貌。

通过系统平台可以查询施工期任意一天的结构安全状况,在界面中输入材料的物理力学参数后自动生成脚本文件,采用 no GUI 的方式调用 ABAQUS 进行计算,当计算结束后,用户通过查看结果可以查询围岩位移、锚杆应力等参数从而判断该天的工程安全情况。各材料的主要物理力学参数见表 1,数值计算结果见图 7。

工程人员在设计阶段结合系统计算结果可以考虑缩短工期、节省投资,从而修改锚杆的设计方案;施工阶段现场工程师根据施工监测结果,可以利用系统计算改变锚杆支护方式的结构安全状况。

表 1 各材料的主要物理力学参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g · cm ⁻³)	凝聚力/GPa	内摩擦角/(°)
岩石	5	0.27	3.80	0.0012	35
混凝土	28	0.20	2.50		
锚杆	210	0.30	7.89		



图5 隧洞几何模型及施工信息

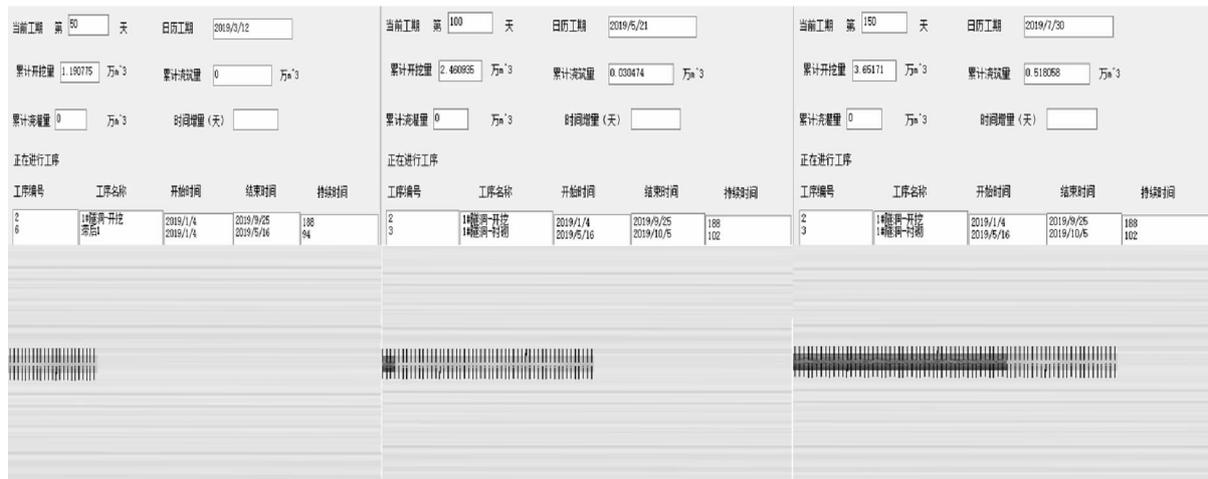


图6 不同施工天数的工序施工状态及施工面貌展示

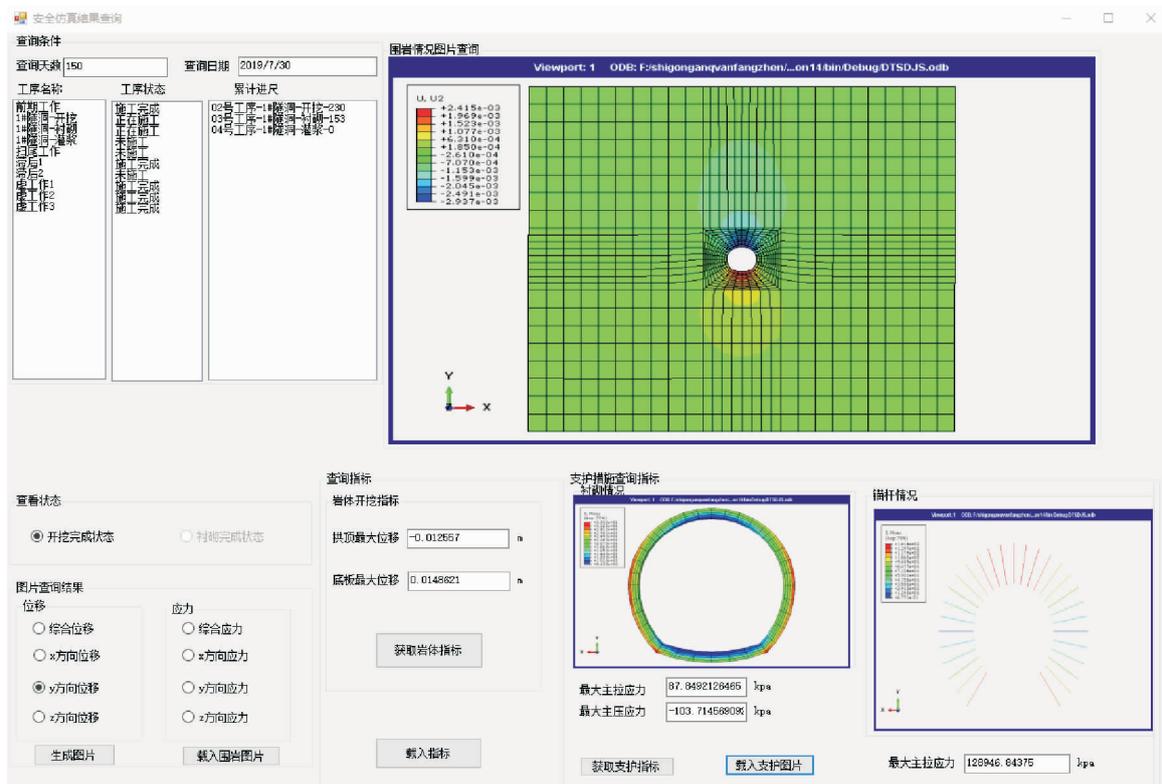


图7 数值计算结果界面

在系统中输入新的锚杆参数,包括锚杆间排距、锚杆长度及支护范围,间距为 1.2 m,排距为 3 m,系统自动以特定的格式输出,对输出锚杆进行划分单元,此时不需要对数值模型进行大量分组,仅对 INP 文件进行操作,按照关键字将数值模型信息储存到数据库中。表 2 为数据库中储存的字段名及类型。

将新生成的模型导入系统中可以得到新的支护条件下的结构安全状况,由图 8 可以看出,当排距变为 3 m 时,围岩位移仅增加 0.001 m,锚杆的最大拉应力增加 2 MPa,但仍在结构安全范围内,因此可以考虑将锚杆排距增加。显然,利用该系统也可以根据不同的施工进尺制定合理的施工进度计划。

表 2 数据库中储存的字段名及类型

数据库名称	字段名	字段类型
1. 节点数据库	节点编号	Long
	节点坐标 X	Float
	节点坐标 Y	Float
	节点坐标 Z	Float
2. 单元数据库	单元编号	Long
	节点编号 1	Long
	节点编号 2	Long

	单元进尺	Float
	单元分组	String

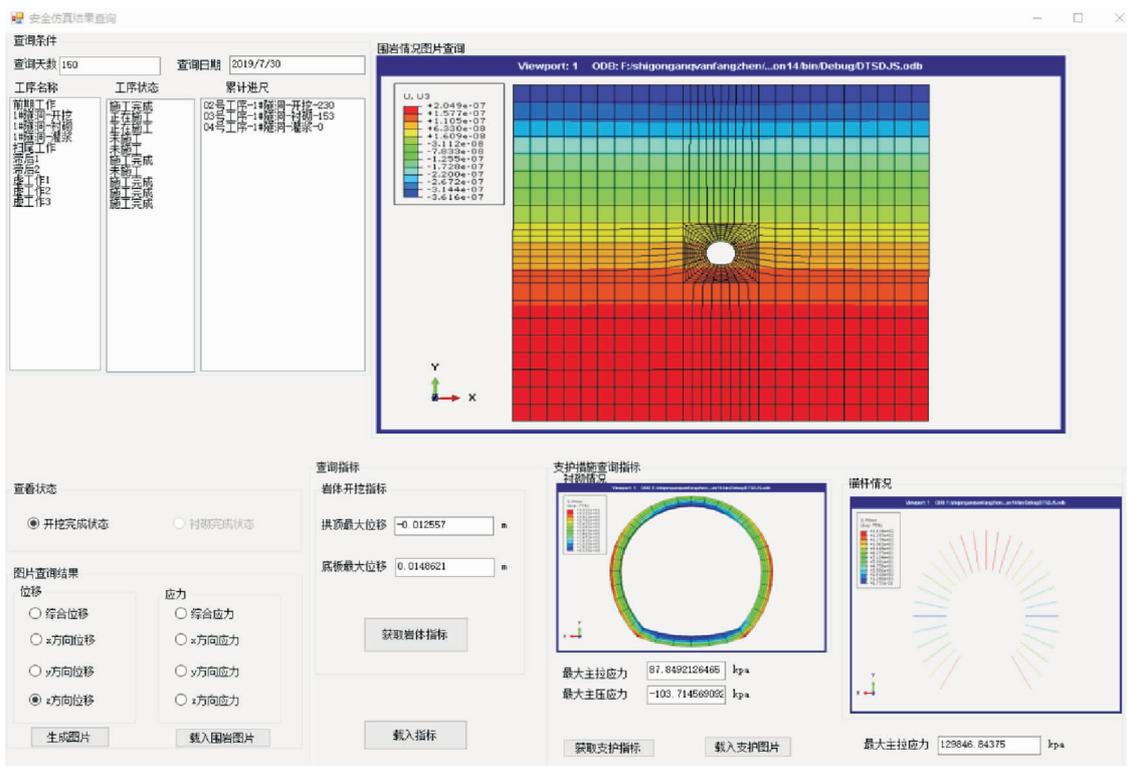


图 8 修改支护信息

7 结 论

本文以引水隧洞作为对象,依托 CATIA 平台,根据施工仿真的基本原理,对隧洞开挖、衬砌、灌浆等工序进行模拟,并在平台上实现隧洞施工信息获取、进度三维可视化以及施工期结构安全计算,具体成果与结论如下:

(1) 针对目前水工隧洞的建设,引入参数化的设计方法和知识工程技术实现模型的快速修改及施工信息的储存,建立了有时间属性的水工隧洞三维模型。

(2) 以 CPM 网络模型为基本框架,通过调用开挖、衬砌、灌浆的 CYCLONE 层模型得到更加精确的施工进度计划,并利用 CATIA 二次开发技术将进度计划与三维模型相关联,实现动态展示施工面貌。

(3) 引入映射概念,将单元组与施工状态进行对应,通过对有限元软件进行二次开发,动态地查询施工期结构的数值计算状况。根据数值计算结果,调整相应的锚杆参数,结合结构安全状况可以制定合理的施工进度计划。

(4) 通过 VB.NET + PYTHON 混合编程技术,为工程各参建方提供了一个可视化、可查询、可控制的

平台。

参考文献:

- [1] HALPIN D W. CYCLONE-method for modeling of job site processes[J]. Journal of the Construction Division, 1977, 103(C03): 489-499.
- [2] 钟登华. 隧洞循环施工过程模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 1987.
- [3] 胡连兴. 亚碧罗地下洞室群施工仿真与网络进度分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [4] WANG Qianwei, ZHONG Denghua, WU Binping, et al. Construction simulation approach of roller-compacted concrete dam based on real-time monitoring [J]. Journal of Zhejiang University - SCIENCE A, 2018, 19(5): 367-383.
- [5] 王晓玲, 区丽雯, 任炳昱, 等. 基于 CATIA 的引水隧洞施工动态可视化仿真[J]. 水利学报, 2018, 49(3): 369-378.
- [6] 余佳, 钟登华, 肖尧, 等. 基于机械故障精细分析的引水隧洞施工进度仿真[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(6): 638-648.
- [7] 江权, 冯夏庭, 李邵军, 等. 高应力下大型硬岩地下洞室群稳定性设计优化的裂化-抑制法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6): 1081-1101.
- [8] ZHANG Xiaoyang, LIN Jiarui, HU Zhenzhong, et al. Towards BIM-based model integration and safety analysis for bridge construction [C]//16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Osaka, 2016.
- [9] 南轩, 刘艳慧, 孙语晨, 等. 基于响应面分析的隧洞开挖过程优化设计研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 176-183.
- [10] 撒文奇, 张社荣, 张连明. 基于物联网的大型地下洞室群施工期动态安全评价与预警方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2301-2313.
- [11] ZHANG Sherong, DU Chengbo, SA Wenqi, et al. Bayesian-based hybrid simulation approach to project completion forecasting for underground construction [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2014, 140(1): 04013031.
- [12] 罗通, 练章华, 牟易升, 等. 基于 CATIA 二次开发的渠道三维设计研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 146-153.
- [13] 陈国良, 吴佳明, 钟宇, 等. 基于 IFC 标准的三维地质模型扩展研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 1-8.
- [14] 张社荣, 刘婷, 朱国金, 等. 基于 BIM 的长距离引调水工程三维参数化智能设计研究及应用[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 139-145.
- [15] 董甲甲, 杨磊, 杜燕林. 基于 CATIA 的重力坝可视化设计[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(5): 57-60.
- [16] 翟超. 弧形钢闸门数字化设计程序开发[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [17] ZHANG Zongke, XU Shengjie. Realization of ship damage stability calculation in CATIA by application development[C]//The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference. Cupertino: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2019.
- [18] 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(自然科学与工程技术版), 2003, 36(3): 347-352.
- [19] YU Jia, ZHONG Denghua, REN Bingyu, et al. Probabilistic risk analysis of diversion tunnel construction simulation [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(9): 748-771.
- [20] 曹金凤, 王旭春, 孔亮. Python 语言在 Abaqus 中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.