

耦合风险因素的大型地下厂房施工进度仿真分析

李明超,段志龙

(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:针对大型地下厂房施工影响因素众多、关系复杂的问题,从影响每个工序时间的风险事件出发,量化风险事件,建立耦合风险因素的地下厂房施工进度仿真模型,突破了地下厂房施工进度仿真传统模型中以工程整体为对象进行风险识别的不足,能够从工序底层考虑风险因素对施工工期的影响。进一步结合蒙特卡罗模拟方法,实现了耦合风险因素的地下厂房施工进度仿真计算与优化控制分析。工程实例分析表明,该方法不仅可计算考虑各种不确定风险因素下的大型地下厂房施工工期,而且能够深入分析工程进度对关键风险因素的敏感性,可为工程风险的防范和施工进度的控制分析提供依据。

关键词:水电站;地下厂房;施工进度仿真;风险控制;蒙特卡罗方法;敏感性分析

中图分类号:TV512 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)05-0039-06

Construction scheduling simulation integrated with risks of large-scale underground powerhouse//LI Mingchao, DUAN Zhilong(*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: The construction of large-scale underground powerhouse is very complicated and easily affected by risk events. The current methods for analyzing the risks are based on the whole construction, while the risk events directly affect the stages of production. In order to consider the influence of risk events, the integrated risk-scheduling model of large-scale underground powerhouse was established. Further, the process of risk-driven construction scheduling and optimal controlling was introduced by combining the Monte-Carlo method. The results, based on engineering examples, show that that the proposed method can not only calculate the construction schedule of large-scale underground powerhouse with many risk factors, but also achieve in-depth analysis of the sensitivity of key risk factors to the construction schedule. The simulation results can provide effective support to the prevention of project risks and the control of construction schedule.

Key words: hydropower station; underground powerhouse; construction schedule simulation; risk control; Monte-Carlo method; sensitivity analysis

随着我国水利水电建设事业的飞速发展和施工技术的不断改进,一批大型的水电站已经建成或正在建设,同时越来越多地将水电站厂房布置在地下,其规模也愈来愈大,如三峡、溪洛渡等水电站。地下厂房洞室群的施工是一项影响因素众多、关系复杂的系统工程,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,受到不良地质构造、施工技术水平、施工机械配置等众多因素影响与限制;各单项洞室的施工又是许多个作业组成的反复循环的过程,同时每个作业的工作时间大多是随机的,每个循环都可以产生随机排队拥堵现象;地下洞室群纵横交错,布置密集,高差大,施工通道少,在整个地下洞室群系统的施工过程中,不但各工序配合与相互干扰错综复杂,而且在安排各个洞室

施工先后顺序及隧洞施工顺序时,需要顾及交通运输等问题的影响^[1]。这些不确定性的风险因素往往使得大型地下厂房的施工进度难以满足计划安排,导致实际工期的延长而造成巨大的社会和经济损失。

目前工程项目施工进度计划与分析主要采用关键线路法(critical path method, CPM)和计划评审技术(program evaluation and review technique, PERT)^[2]。在 CPM 中,假定各子工序的施工时间为一确定值,而实际上子工序受许多的不确定性风险事件影响。虽然 PERT 给出了 3 种可能的时间估计,即乐观的时间估计、悲观的时间估计和最可能的时间估计,弥补了 CPM 的不足,但还是比较粗糙。Littlefield 等^[3]认为,工序的持续时间也可服从其他

随机分布,如三角分布、Gamma 分布等;Hulett^[4]通过分析认为三角分布更能反映工序时间的不确定性。王卓甫等^[5]基于影响施工进度的不确定性风险事件的分布情况,采用蒙特卡罗方法进行仿真计算;Wang 等^[6]运用蒙特卡罗方法和敏感性分析对工程全生命期进行了管理分析;余建星等^[7]提出了在工程风险分析中确定风险评级指标及标准的原则和方法;Kulk 等^[8]采用逻辑回归分析对风险因素进行量化;Liu 等^[9]在 EPC 工程中使用了模糊理论来量化工程中的风险事件,考虑了事件发生与影响之间的维度问题;杜修力等^[10]将网络分析法应用到地下工程风险评估中,对各风险因素进行分析和运算,为后期风险的管理和控制提供了科学依据;刘东海等^[11]通过柔性循环网络模型,突破了传统 PERT 中只考虑工序持续时间不确定性的限制,全面考虑了工序的持续时间柔性、顺序柔性和操作柔性;钟登华等^[12]通过对比削峰填谷模型、最小方差模型和遗传算法模型对实际工程的优化结果,得出遗传算法模型在处理工期一定、资源均衡的资源进度计划问题上,相对最优;这些研究成果从影响工程施工进度的不同因素角度来模拟分析工程进度安排和优化方案,取得了相应的成果;但其中对风险的识别主要是以工程整体为对象,较少从风险驱动影响工序时间的角度出发^[13-14]进行施工进度方案分析。本文从影响底层工序工期的角度进行风险识别,建立耦合风险的进度仿真模型,确定风险的发生概率及影响值,以风险驱动理论进行仿真,并对工程施工进度进行优化分析。

1 仿真建模

1.1 地下厂房施工过程风险因素分解

水电站地下厂房系统布置较为集中,主厂房、主

变室和尾调室等规模很大;同时,施工支洞在空间布置上纵横交错,形成多处交叉路口。地下洞室群施工十分复杂,作业面多,多个工序平行作业,且机械化程度高,施工中产生的有害物质不仅有爆破后的气体,还有装载机和汽车排放的气体、烟气,混凝土作业中产生的粉尘等,需要及时通过通风系统排出地下厂房;对施工运输问题若不能合理地规划或组织安排不当,极易造成车辆运行不畅,在交通要道或瓶颈部位往往形成车辆堵塞而影响施工的正常进行,严重影响工期。由于地下厂房施工的复杂性,从每一个工序出发,找到影响其工期的风险因素,能够更为客观地反映其实际施工过程。为了能够识别地下厂房的施工风险,本文采用分解分析法^[15],将复杂的大系统分解成若干便于识别的简单小系统,即将地下厂房的每个施工工序按照施工顺序再分解成更小的更容易识别的工序,同时结合施工经验,从而识别出施工中存在的各种主要风险。图 1 为经分析总结后得出的影响地下厂房施工进度的主要风险因素,各主要风险因素的具体说明见表 1,表中的风险因素可适用于同类工程。

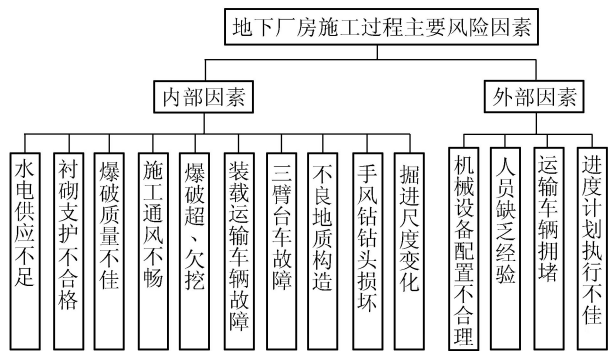


图 1 地下厂房施工风险因素分解结构示意图

1.2 地下厂房施工进度仿真模型

大型地下厂房开挖施工是一个相当复杂的过

表 1 主要风险因素

风险分类	影响因素	具体说明	风险特征值
内部因素	水电供应不足	水电供应等辅助工程不能满足当前工序需要	水电供需比
	衬砌支护不合格	在洞室开挖完成后,对洞室的衬砌支护质量不合格	衬砌厚度达标率、支护等级
	爆破质量不佳	在爆破后进行安全检查,发现规划外的岩石松动	岩石损失直径、岩石损失深度
	施工通风不畅	各种烟尘和废气未及时通过通风系统排出	洞内空气质量等级
	爆破超、欠挖	对洞室的轮廓爆破控制中,爆破未达到设计要求	超、欠挖体积
	装载运输车辆故障	装载车、运输车发生故障	运输车故障率
	三臂台车故障	由于人为操作或者地质条件,台车出现不工作现象	台车故障率
	不良地质构造	断层等不良的地质环境	岩性等级、岩体体积
	手风钻钻头损坏	由于地质条件,手风钻的钻头磨损较大	手风钻损坏率
	掘进尺度变化	施工工作面不良,减少掘进尺度	循环进尺
外部因素	机械设备配置不合理	钻爆、装载和运输车辆数量或者配置不合理	配置数量
	人员缺乏经验	对于突发事件,施工人员缺少相应施工经验	工人熟练度
	运输车辆拥堵	运输车辆的种类和数量较多时,会在叉口发生拥堵	堵车概率
	进度计划执行不佳	实际的工期与预期的工期有差距	进度百分比

注:表中风险特征值用以确定风险事件的影响值。

程,作业面多,钻孔、爆破、出渣、运输、喷锚支护、二次衬砌等多个工序平行作业,在进行耦合风险的施工进度模拟计算分析时,要详细分析其开挖的过程,建立如图2所示的开挖工序网络层。该网络层能够从底层关联工序时间的不确定因素,考虑风险因素对施工工期的影响,是建立仿真模型的基础。

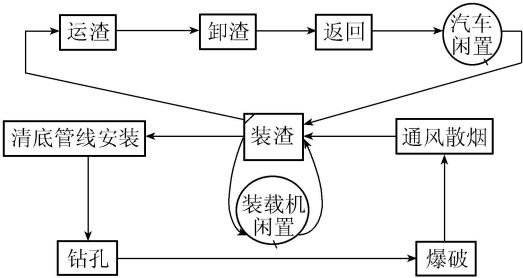


图2 地下厂房开挖工序网络层

采用施工过程循环网络理论^[1],根据地下厂房实际施工特点,考虑地下厂房施工过程的主要风险因素,建立其仿真模型。图3给出了一个示例模型,该模型将相关风险因素添加到相应的施工工序中,确定影响地下厂房施工进度每个工序风险事件的发生概率和影响值,即可得到耦合风险因素的地下厂房施工进度仿真模型。

2 仿真计算流程

2.1 风险事件定量分析

假定风险事件具有两个参数,即风险事件的发生概率 (possibility of occurrence) 及影响值 (impact value),通过实际调查统计,确定其定量属性。

a. 风险事件的发生概率:是指在每一次迭代中风险事件发生的可能性,用百分数表示。实际工程中,有些风险事件是一定发生的,如“进度计划执行不佳”;有些风险事件是有可能发生的,如“不良地

质构造”。由于同一类型风险事件在不同工程中发生的概率具有较强的随机性,该参数采用历史资料统计和专家打分相结合的方法来确定。

b. 风险事件的影响值:是指风险发生时,对相关工序工期的影响大小,取值区间为 $[-1,1]$,负值代表对工期有正影响,正值对工期有负影响。风险事件的影响值采用三角分布表示,该参数可由表1定义的风险特征值统计得到,但应注意同一种风险事件对不同工程影响值不同,具体要结合实际工程进行修正。进而引入风险因子,是指总的风险事件对工序的影响值,计算公式如下:

$$R_k = \sum_{i=1}^n P_i I_i \tag{1}$$

式中: R_k 为工序 k 所对应的风险因子; P_i 、 I_i 分别为与工序 k 相关的第 i 个风险事件的发生概率和影响值; n 为影响工序 k 的风险事件的总数。

2.2 考虑风险的蒙特卡罗模拟分析

蒙特卡罗模拟方法弥补了传统方法受人为因素影响大的不足,以概率统计理论为基础,以随机抽样为主要手段,利用随机数产生抽样样本进行统计分析,以求得统计值作为待解问题的数值解^[16]。耦合风险因素的蒙特卡罗模拟步骤如下:

a. 在每一次迭代过程中,假定第 i 个风险事件发生的概率为 P_i ,则在 $[0,1]$ 之间生成一个随机数 r_i ,如果 $r_i < P_i$,则认为该风险发生,同时认为风险事件对工序的影响值 I_i 具有不确定性,由其三角分布确定。

b. 根据式(1)计算出每个工序的风险因子。
c. 将步骤b中的风险因子加1,再乘以其相应工序的工期,即为该次仿真计算中工序的工期,计算公式为

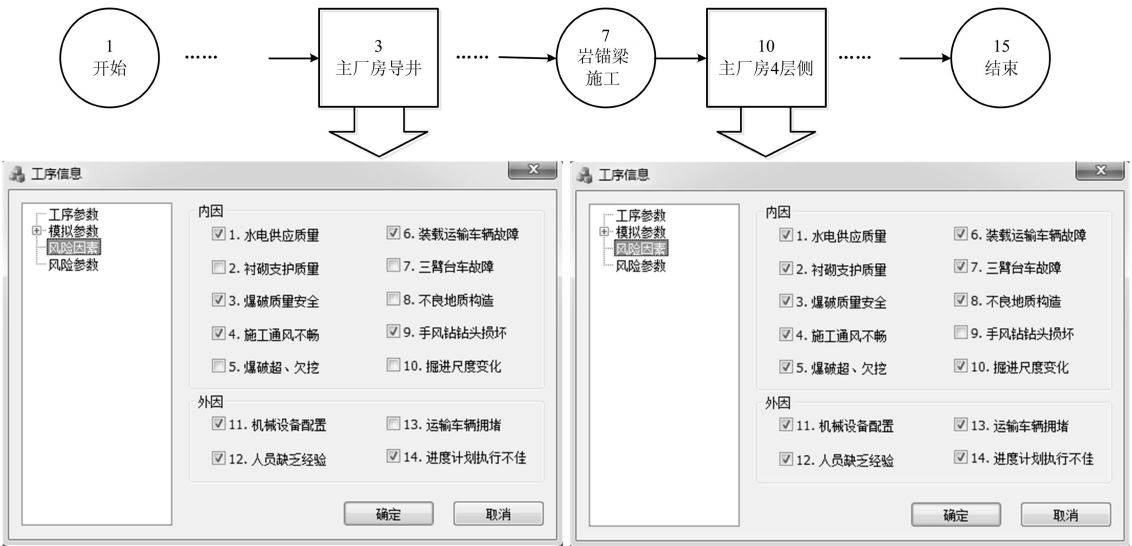


图3 耦合风险因素的地下厂房施工进度仿真模型

$$T'_k = T_k(1 + R_k) \quad (2)$$

式中: T'_k 为考虑风险事件影响后的工序 k 的工期; T_k 为未考虑风险事件影响的工序 k 的工期。

d. 计算出各个工序的工期,找出关键路径,计算出本次仿真的总工期。

e. 重复上述步骤,得到该工程的多次仿真计算结果。

f. 确定总工期的分组组距 T_g ,若仿真计算结果中总工期的最大值为 $T_{\max}$,最小值为 $T_{\min}$, l 为分组数,则组距 T_g 的计算公式为

$$T_g = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{l} \quad (3)$$

g. 确定区间边界,假定 $T_1 = T_{\min} + T_g$, $T_2 = T_1 + T_g$, $\dots$, $T_l = T_{l-1} + T_g$, 那么区间结果为 $[T_{\min}, T_1)$, $[T_1, T_2)$, $\dots$, $[T_{l-1}, T_l)$ 。

h. 统计落入各个区间的频数,计算频率值。

i. 根据步骤 h 的计算结果,画出总工期的频率分布图和完工概率曲线。

2.3 施工过程风险因素的敏感性分析

敏感性分析是在项目评价和决策中常用的一种不确定分析方法,是用来测定一个或多个因素的变化对目标的影响程度。地下厂房的施工过程受多种风险因素影响,但要确定对施工进度影响最大的风险因素,即关键风险事件,需进行敏感性分析。敏感性分析方法分为单因素敏感分析和多因素敏感分析,本文采用单因素敏感性分析确定关键风险事件,为后面进行有效合理地控制,达到优化施工进度之目的打基础。敏感性分析的步骤如下:

a. 针对项目的主要风险事件,确定其发生概率及影响值的最大变动幅度。

b. 在所有风险事件变动的幅度内,确定都可以达到的一个变动幅度。

c. 以步骤 b 得出的变动幅度,逐一改变风险事件的发生概率和影响值等仿真参数,其他风险事件不变,得到同一风险事件在不同发生概率下的施工进度方案。

d. 对步骤 c 得到的施工进度方案进行进度仿真,得到施工总工期,用总工期除以变动前的工期得到风险事件在变动幅度相同的情况下对总工期的影响值,影响值越大说明对总工期的影响越大。

2.4 影响施工进度的风险控制分析

风险控制的方法主要有风险回避、风险降低、风险抵消、风险分离、风险分散、风险转移、风险自留等^[17];同时,风险事件主要涉及机械、人员、管理和外界影响等 4 个方面,针对这 4 个方面分别采用相应的控制措施,如对机械设备定期进行检修、维护,

加强人员培训、提高专业技能,建立多种管理体系等,可减少风险事件对总工期的影响。

图 4 为耦合风险因素的地下厂房施工进度仿真的计算流程。

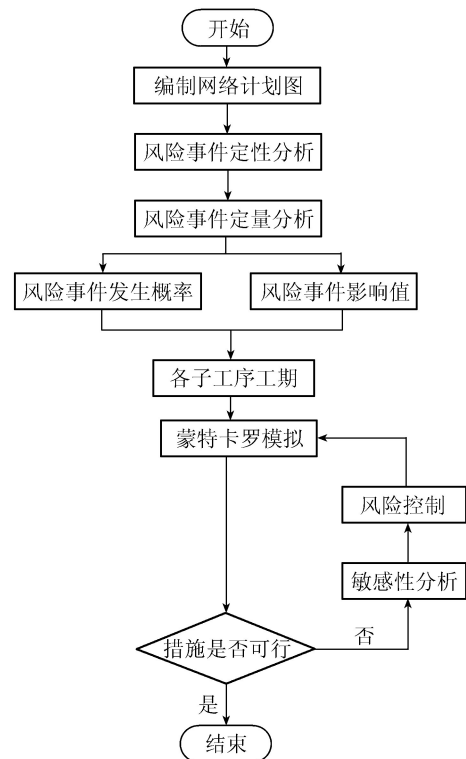


图 4 仿真计算流程

3 工程实例

3.1 工程概况

某水电站地下厂房系统主要由进水口、引水隧洞、地下主副厂房、母线洞、主变室、通风洞、尾水调压室、尾水隧洞等组成,其中主厂房长 396.0 m,上部顶拱跨度 31.0 m,下部边墙跨度 29.0 m,高 77.47 m,规模较大。各洞室主要位于花岗岩岩体中,受到断层构造的影响。该大型地下厂房的三维布置方案如图 5 所示。由于主厂房施工是整个系统的关键,本文以主厂房为分析对象,其施工进度网络仿真模型如图 6 所示,其中圆形图标为确定性工序,无须仿真计算;方形

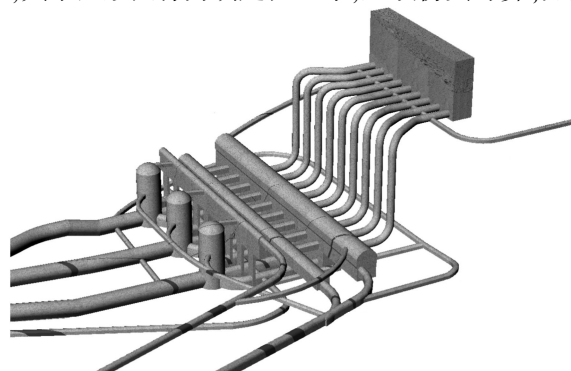


图 5 某水电站地下厂房布置

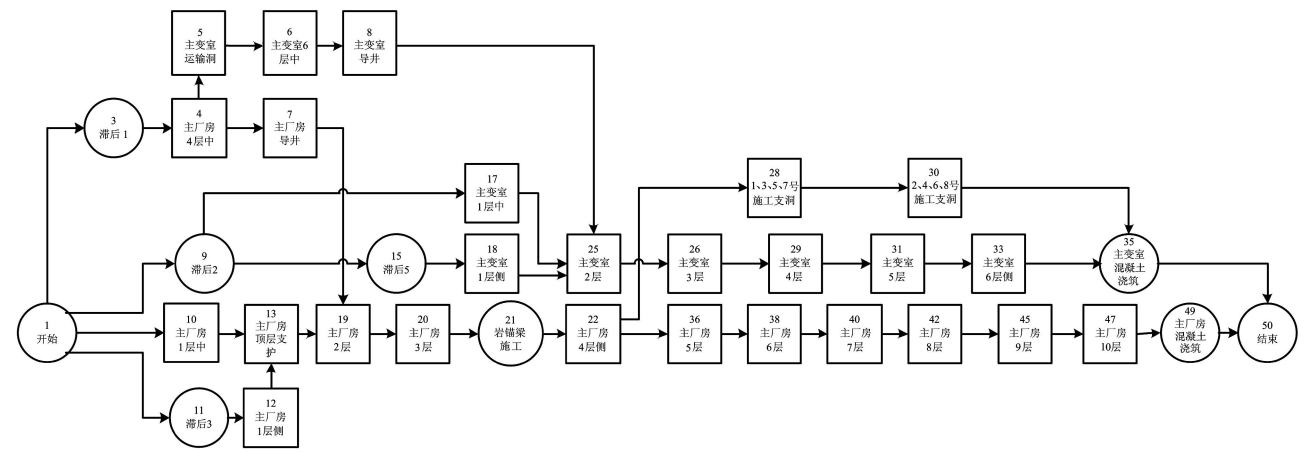


图6 主厂房施工进度网络仿真模型

图标为仿真工序,该工序的持续时间将由耦合风险因素的地下厂房施工进度仿真模型计算来确定。

3.2 风险事件定量分析

结合表1所示的风险特征值,通过对历史资料进行统计分析,并结合专家打分结果,得到影响该地下厂房施工进度的风险事件的发生概率和影响值如表2所示。

表2 风险事件参数

风险事件	发生概率/%	影响值		
		最小	最可能	最大
水电供应不足	15	0	0.100	0.200
衬砌支护不合格	20	0	0.075	0.200
爆破质量不佳	10	0	0.050	0.150
施工通风不畅	20	0	0.050	0.100
爆破超、欠挖	55	0	0.025	0.100
装载运输车辆故障	40	0	0.100	0.200
三臂台车故障	30	0	0.025	0.150
不良地质构造	80	0	0.050	0.250
手风钻钻头损坏	90	0	0.050	0.125
掘进尺度变化	50	0	0.025	0.100
机械设备配置不合理	70	0	0.050	0.100
人员缺乏经验	50	0	0.025	0.100
运输车辆拥堵	80	0	0.025	0.050
进度计划执行不佳	100	0	0.090	0.100

3.3 仿真计算与分析

基于所建立的主厂房施工进度网格仿真模型和相应的风险事件及其参数,总工期在1805~2657d之间,平均值为2144d,标准差为123d,图7为仿真总工期的概率分布图和完工概率曲线,其概率分布符合β分布。传统CPM的计算工期为1783d,从图7分析可知,该工期实际施工难以达到,所以有必要在开工前进行风险控制分析,对各种风险事件进一步分析,找到影响施工进度的关键风险事件,并提出相应的控制措施,为工程决策提供依据。

对各种风险事件进行敏感性分析,计算结果如表3所示,表中的回归系数表示风险事件对总工期的影响大小,即风险事件在相同的变化幅度下引起

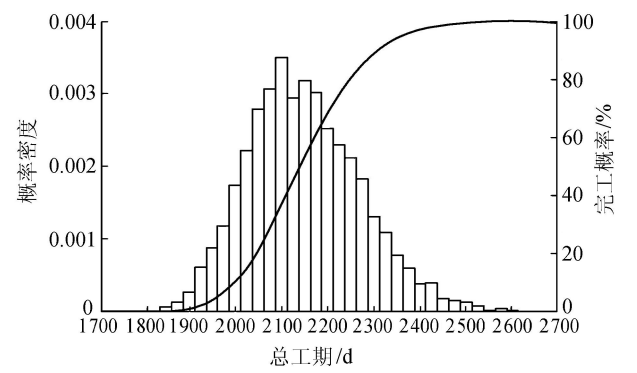


图7 仿真总工期概率分布图和完工概率曲线

总工期的变化幅度。从表3可知影响该工程施工进度的关键风险事件是“不良地质构造”,该关键风险事件属于外界影响,需采用多种技术手段,对该地区的地质情况加以详细分析,以减少地质情况的不确定性对工期的影响。

表3 风险事件敏感性分析

风险事件	回归系数	风险事件	回归系数
不良地质构造	0.52	进度计划执行不佳	0.22
装载运输车辆故障	0.46	爆破质量不佳	0.22
水电供应不足	0.37	掘进尺度变化	0.13
三臂台车故障	0.27	施工通风不畅	0.08
人员缺乏经验	0.25	运输车辆拥堵	0.05
机械设备配置不合理	0.24	手风钻钻头损坏	0.04
爆破超、欠挖	0.22	衬砌支护不合格	0.03

实际施工中可通过地质勘探数据和地质建模等手段来提前预报施工区的地质情况。结合之前实例工程资料,该风险事件的仿真参数可以控制在一定范围内,见表4;经过计算得到控制前后总工期的完工概率曲线,如图8所示,总工期的平均值从控制前的2144d缩短到2100d,减少了44d,施工进度得到

表4 关键风险事件控制前后数据

发生时间	发生概率/%	影响值		
		最小	最可能	最大
控制前	80	0	0.05	0.25
控制后	75	0	0.05	0.10

了一定程度的优化。

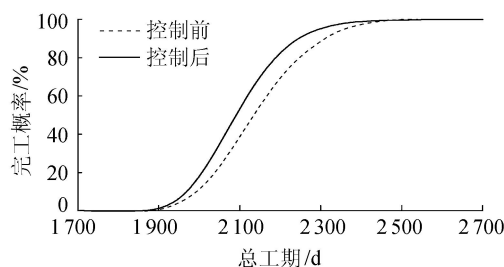


图8 控制前后总工期的累计概率曲线

4 结 语

本文从影响地下厂房施工工序时间的风险事件出发,量化风险事件,建立了地下厂房开挖网络模型,结合传统网络模型,建立了耦合风险因素的地下厂房施工进度仿真模型,突破了传统模型中对风险分析的不足,能够从工序底层考虑风险因素对施工工期的影响。结合蒙特卡罗模拟方法,提出了耦合风险因素的地下厂房施工进度仿真计算与优化控制分析方法。以某水电站地下厂房为实例开展仿真分析,得到了总工期的概率分布图和完工概率曲线,可确定合理的总工期;通过敏感性分析确定关键风险事件,并以“不良地质构造”关键风险为例进行控制分析,优化了工程进度,为工程风险的防范和施工进度控制分析提供了科学依据。

参考文献:

[1] 钟登华,刘东海.大型地下洞室群施工系统仿真实理论与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2003.

[2] 巴延廷.基于PERT的工程进度风险分析研究[D].大连:大连理工大学,2010.

[3] LITTLEFIELD T K,RANDOLPH P H. Reply:an answer to sasieni' s question on PERT times [J]. Management Science,1987,33(10):1357-1359.

[4] HULETT D. Practical schedule risk analysis[M]. London: MPG Books Group,2009.

[5] 王卓甫,陈登星.水利水电施工进度计划的风险分析[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(4):83-87. (WANG Zhuofu, CHEN Dengxing. Risk analysis of construction schedule for water resource projects [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1999, 27(4):83-87. (in Chinese))

[6] WANG N, CHANG Y, EL-SHEIKH A. Monte Carlo simulation approach to life cycle cost management [J]. Structure and Infrastructure Engineering,2012,8(8):739-746.

[7] 余建星,李成.工程风险分析中的风险当量及其评价标准[J].海洋技术,2004,23(1):48-51. (YU Jianxing, LI Cheng. The risk equivalent and its standard of estimate in engineering risk analysis [J]. Ocean Technology, 2004, 23

(1):48-51. (in Chinese))

[8] KULK G P,PETERS R J,VERHOEF C. Quantifying IT estimation risks[J]. Science of Computer Programming, 2009, 74(11/12): 900-933.

[9] LIU J,WU S,ZHAO X,et al. Application of fuzzy theory in contractor risk assessment under EPC model [C]// International Conference on Information Engineering and Computer Science. Piscataway, New Jersey: IEEE Publisher,2009:1-5.

[10] 杜修力,高云昊,张明聚,等.网络分析法及其在地下工程风险分析中的应用[J].土木工程学报,2010,43(增刊2):353-357. (DU Xiuli, GAO Yunhao, ZHANG Mingju, et al. Analytic network process and its application in risk assessment in underground engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Sup2):353-357. (in Chinese))

[11] 刘东海,黄培志.隧洞TBM施工过程柔性循环网络建模与仿真分析[J].土木工程学报,2010,43(10):115-121. (LIU Donghai, HUANG Peizhi. Flexible cyclic operation network modeling and simulation analysis of TBM construction process [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10):115-121. (in Chinese))

[12] 钟登华,李明超,张伟波,等.复杂工程施工系统资源优化模型及其应用[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2004,37(7):589-594. (ZHONG Denghua, LI Mingchao, ZHANG Weibo, et al. Resource optimization models and application for complex engineering construction system [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2004, 37(7):589-594. (in Chinese))

[13] 郭宇,刘尔烈.应用蒙特卡罗方法改进项目成本风险分析[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2002,35(2):199-202. (GUO Yu, LIU Erle. Two improvements in risk analysis for project cost using Monte Carlo methods [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2002, 35(2):199-202. (in Chinese))

[14] 金峰.基于风险驱动理论的费用风险分析方法[J].工程管理学报,2012,26(1):75-78. (JIN Feng. Project cost risk analysis based on risk driven theory in international engineering projects [J]. Journal of Engineering Management, 2012, 26(1):75-78. (in Chinese))

[15] 邓鹏.青草沙水库工程的风险识别[J].中国勘察设计,2010(9):69-72. (DENG Peng. Risk identification for Qinqaoshan reservoir works [J]. Chinese Survey and Design, 2010(9):69-72. (in Chinese))

[16] 李景茹.大型工程施工进度分析理论与应用[D].天津:天津大学,2003.

[17] 宋永嘉,张淙蛟,田林钢,等.水利工程风险量化问题的探讨[J].人民黄河,2004(9):33-34. (SONG Yongjia, ZHANG Congjiao, TIAN Lingang, et al. The discussing on the questions about risk quantification of hydraulic engineering [J]. Yellow River, 2004(9):33-34. in Chineses))

(收稿日期:2013-11-18 编辑:熊水斌)