

基于可视化仿真的隧道工程施工进度分析与控制研究

杨国文^{1,2}, 宋洋¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 云南电力投资有限公司, 昆明 650021)

[摘要] 介绍了基于 GIS 的隧道工程施工进度可视化仿真方法仿真模型; 提出了基于可视化仿真的隧道工程施工进度风险分析及决策方法, 使施工资源优化; 论述了基于可视化仿真的隧道工程施工进度 S 型曲线实时管理与控制方法; 最后进行了实例研究。

[关键词] 隧道施工; 可视化仿真; 优化分析; 实时控制

[中图分类号] TP391.9; U45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2007)06-0048-05

1 引言

隧道工程一般距离较长, 需布置支洞创造新的工作面, 因而开挖工序繁多, 施工强度大; 同时开挖断面小, 工作空间有限, 施工中各项工作相互制约、相互干扰; 由于地质条件多变化, 须采用相应的施工参数, 采取不同的施工措施, 给施工管理和快速施工带来一定的难度。为使系统高效协调地运行, 必须编制指导和控制系统运行的施工进度计划^[1]。施工进度控制, 与施工组织设计的其他各组成部分既密切联系又相互制约, 是一个系统工程问题, 必须运用系统分析的方法, 寻求合理解决。

计算机仿真技术实现了仿真建模、计算过程及结果的拟人化和形象化, 可实时跟踪和驾驭仿真过程, 实现对进度的实时管理与控制。

2 结合 GIS 的隧道施工进度可视化动态仿真

2.1 可视化仿真的建模思路及方法

2.1.1 全过程仿真建模 将隧道工程施工系统的可视化仿真模型划分成 2 个层次: 控制层模型

(CPM 层工序模型) 和实施层模型 (CYCLONE 层单元模型)^[2,3]。CYCLONE 层单元模型构成 CPM 层工序模型, CPM 层工序模型构成整体系统模型。利用 CPM 网络层可以进行整个工程的进度计划分析, 利用 CYCLONE 层仿真分析工程的施工工期, 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, 克服了循环网络仿真建模复杂的问题, 并利用了 CPM 网络的进度分析功能, 取长补短。

2.1.2 三维图形建模 利用空间几何建模技术, 在 GIS 等系统中建立系统仿真实体的空间模型, 并将建立的图形实体对象与仿真变量相对应。利用三维实体模型, 可以定义系统实体的位置、结构及其操作, 为仿真计算进行数据采集^[4]。另外, 利用仿真模型与仿真变量的对应关系, 结合仿真变量随时间变化的信息, 可以动态地反映仿真结果, 直观形象地揭示所仿真系统的运行规律。

2.2 全过程仿真模型及动态仿真计算

把整个工程分为最简单的分项工程。按照不同的施工工艺可以将这些单元模型组合成工序模型, 由 CPM 层模型调用。分部工程是施工中的进度控制的基本单位^[5], 是构成隧道工程系统仿真模型中

[收稿日期] 2006-04-03; 修回日期 2006-12-15

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50479048)

[作者简介] 杨国文 (1968-), 男, 云南保山市人, 天津大学建筑工程学院高级工程师, 从事水电建设管理工作; 通信作者: 宋洋 (1977-), 男, 天津市人, 博士, 天津大学讲师, 从事工程系统可视化仿真与优化研究, E-mail: songyang_tju@163.com

的 CPM 层模型元素。建立隧道工程系统施工全过程仿真模型分为两个步骤：根据各隧道施工的衔接关系及相互制约条件建立 CPM 网络模型；为模型中的仿真节点选择合适的 CYCLONE 层模型。以

TBM 法施工的隧道模型为例，说明仿真模型的建立。该工程的 CPM 层网络模型见图 1，采用 TBM 法施工的 CYCLONE 层网络模型见图 2。

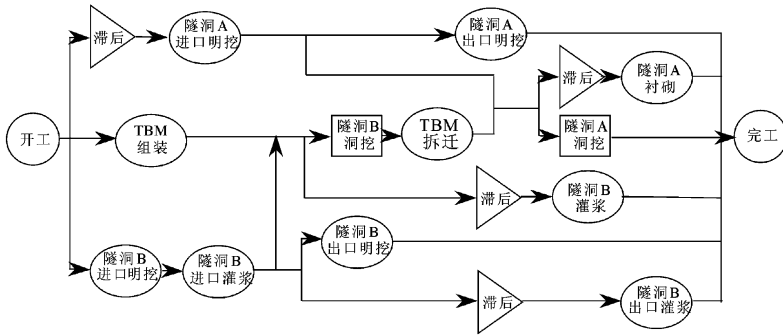


图 1 CPM 层网络模型

Fig.1 CPM network model

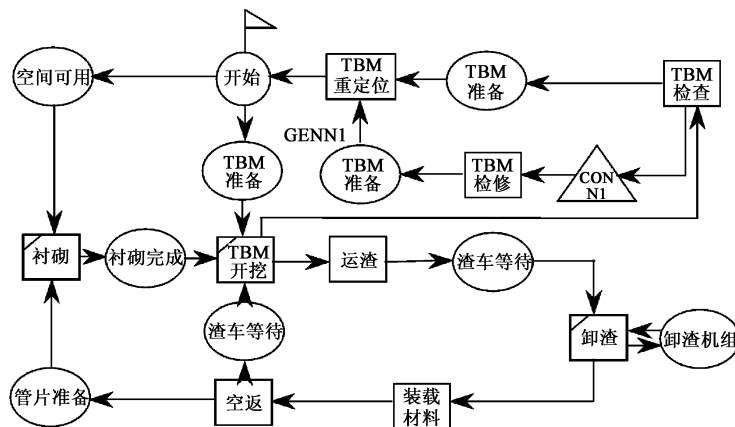


图 2 TBM 施工 CYCLONE 层网络模型

Fig.2 TBM construction CYCLONE network model

全过程动态可视化仿真在仿真过程中采用全程仿真钟和本地仿真钟。全过程仿真是两种仿真钟不断地推进和交互的过程。仿真开始，全程仿真钟启动，它采用时间步长推进法。时间步长推进法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，并相应地改变系统的状态，否则系统的状态不发生改变。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。之后对仿真结果进行各种分析与优化，并输出进度计划、横道图等结果。仿真流程见图 3。

3 基于可视化仿真的工程进度分析与优化

3.1 基于仿真的进度风险分析与风险决策

由于工程工期有不确定性，计算工期 TC 是一个随机变量。

应用上面讲述的进度仿真计算方法，可以对施工进度进行 N 次仿真，通过对每次仿真的结果作统计分析，可以用直方图近似地求出总工期的密度函数曲线， T_k 为第 k 次仿真的总工期。参数如下：

T_{max}, T_{min} 分别为 N 次仿真中总工期的最大、最小值， $T_H = (T_{max} - T_{min})/l$ 为分组组距， l 为分组的组数。将 N 次仿真结果按区间统计频数，便得到总工期 T 的近似分布密度函数 $f(T_i)$ 。

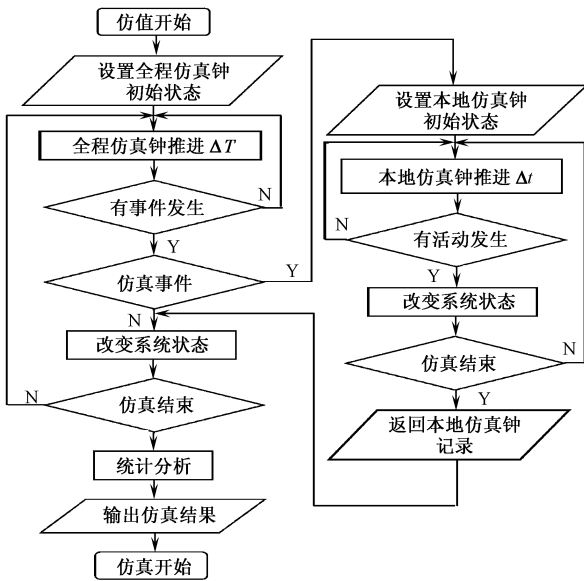


图3 全过程动态仿真流程图

Fig.3 Full process dynamic simulation flow chart

风险估计分两种情况:

1) 在有计划完工时间 TP 的情况下, 施工进度风险 $P(r) = P(TC > TP)$, 即对 N 次仿真结果进行统计, 统计 $TC_k > TP$ 的次数, 记为 M , 则施工进度计划风险为

$$P(r) = M/N \quad (1)$$

2) 在没有计划完工时间的情况下, 按制定总工期 T_i 完成工程的施工进度风险可以估计为

$$P(T_i) = 1 - \int_{r_{\min}}^{T_i} f(T_i) \quad (2)$$

按上述的概率分布可以方便地进行风险决策。比如根据计算的完工风险值, 可以决定是否增加施工力量, 了解是否能够按预计的工期完工, 如果达不到预计的工程量, 还要考虑由此产生的损失。实际上, 通常的方案有: **a.** 保持现状; **b.** 增加一小部分施工力量, 并由此增加费用, 以及如果完不成工期而造成的损失; **c.** 增加机械化的队伍, 否则就完不成任务。不同方案有不同的损失函数, 可以用期望报酬最大或期望损失最小作为依据来决策。

3.2 基于仿真的资源优化

笔者所研究的资源优化是指在工期有限的情况下, 力求资源均衡地消耗^[6], 在通过初始仿真计算得到工程的初始资源计划及各工序的初始仿真时间参数的前提下, 以施工期内的资源强度方差值最小为目标, 以工期一定、各工序的紧前紧后关系等作为约束条件, 建立了数学模型:

$$\min F = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [R(t) - R_m]^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R^2(t) - R_m^2$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} R(t) = \sum_{i=1}^N R_i(t) \\ R_i(t) = \begin{cases} R_i & T_s(i) \leq t \leq T_s(i) + T(i) \\ 0 & t < T_s(i) \text{ 或 } t > T_s(i) + T(i) \end{cases} \\ \max\{T_s(i) + T(i)\} \leq T_s(j) \\ T_c(i) \leq T_s(i) \leq T_l(i) \end{cases}$$

式中 T 为仿真计算得到的工程施工期; $R(t)$ 为工程 t 时刻的资源强度值; R_m 为工程的平均资源强度值; R_i 为 i 工序的资源强度值; $R_i(t)$ 为 i 工序 t 时刻的资源强度值; $T_c(i)$ 为 i 工序的最早可能开工时间; $T_l(i)$ 为 i 工序的最迟必须开工时间; $T_s(i)$ 为 i 工序的实际开工时间; $T(i)$ 为 i 工序的持续时间; j 为 i 工序的紧后工序; N 为工序的总数。

数学模型采用遗传算法求解, 进行遗传算法设计, 主要包括染色体结构和编码设计、遗传操作设计、约束条件的处理、流程设计等。

4 基于可视化仿真的施工进度 S 型曲线管理

在实际的工程施工管理中, 进度往往更多地表现为完成工程总量的百分比, 而不是完成时间的多少^[7]。因此, 进度 S 型曲线以完成工程总量的百分比, 即进度为独立变量, 工程的时间与费用是随进度变化的变量。通过累计计划与实际完成的工程量百分比以及相应的累计费用与花费时间, 绘制 S 型曲线^[8], 以控制工程的实施。

对应于任一检查日期, 绘制进度 S 型曲线必须有完成工程进度的百分比、计划持续时间、计划投资、实际工期及实际费用等数据。可以用进度偏差 TV 和费用偏差 CV 来描述工程的偏差情况。

一般来说, 工程进度与工程量有关, 而工程量又体现在费用上。为简化起见, 假定费用与各工程量成正比, 则费用随进度的变化是一直线。同时, 工程施工中期的进度增加相对于工程开工初期和临近结束时较为缓慢, 因此, 工期随进度的变化是一反转的 S 型曲线。

4.1 基于可视化仿真的隧道施工进度 S 型曲线

笔者采用仿真方法, 考虑工程施工中的众多因素, 建立隧道工程施工的仿真模型, 并引入随机仿真的概念, 得出工序的持续时间, 进而进行网络计划分析。每进行一次仿真计算可得到仿真成果的一

个样本值，多次计算，如 500 次，即可得到在不同的工程施工进度下仿真工期或费用的一组样本值，对样本进行统计分析，得出分布类型及其均值，即可作出包含均值、上下两组外包线在内的三组 S 型曲线，一起构成基于仿真的施工进度 S 型曲线。图 4 为每增加 10% 的施工进度所得到的 S 型曲线。

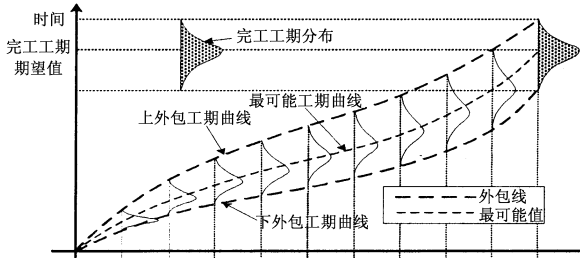


图 4 基于可视化仿真的隧道施工进度 S 型曲线
Fig.4 Tunnel construction schedule S curve based on visual simulation

外包线的取值可用概率统计确定，不同的施工进度均可得到一给定置信水平下的置信区间，即其上下外包值，连接所有数据值，便可绘制基于仿真的施工进度 S 型曲线。

4.2 基于可视化仿真的隧道施工进度 S 型曲线预测

基于仿真的进度 S 型曲线也以进度偏差、费用偏差来描述实际施工与计划之间的偏差情况，不过这里用均值 μ 来表示计划值，如图 5 所示。

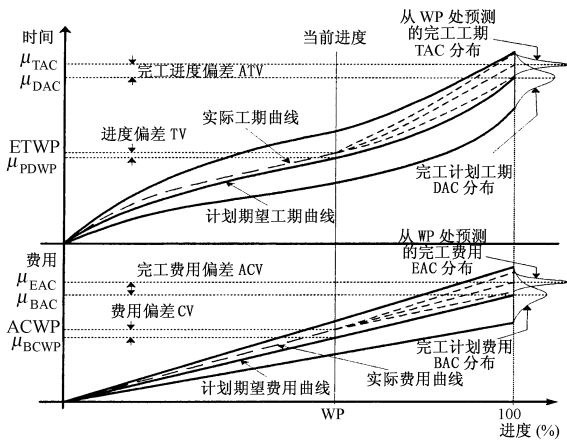


图 5 基于可视化仿真的隧道施工进度 S 型曲线预测

Fig.5 Tunnel construction schedule S curve forecasting based on visual simulation

费用偏差 CV 表示已完工程计划期望费用 (μ_{BCWP}) 与实际费用 (ACWP) 之间的差值；进度

偏差 TV 表示已完工程计划期望时间 (μ_{PDWP}) 与实际时间 (ETWP) 之间的差值，即

$$CV = \mu_{BCWP} - ACWP \quad (3)$$

$$TV = \mu_{PDWP} - ETWP \quad (4)$$

以当前检查时的施工进度为起点，对后续工程进行施工仿真，可以获得未完工程的施工工期及费用，由此进行实时的预测与控制。

从已完工程时起，对工程完工的工期与费用进行仿真预测，得到完工时的费用 (EAC) 和工期 (TAC) 的概率分布，于是工程完工时的费用偏差 (ACV) 即为完工时的计划期望费用 (μ_{BAC}) 与从当前进度处预测的完工期望费用 (μ_{EAC}) 之间的差额。同理，完工时的进度偏差 (ATV) 表示完工时的计划期望工期 (μ_{DAC}) 与从当前进度处预测的完工期望工期 (μ_{TAC}) 之间的差值，即

$$ACV = \mu_{BAC} - \mu_{EAC} \quad (5)$$

$$ATV = \mu_{DAC} - \mu_{TAC} \quad (6)$$

如果 ACV, ATV 均为正值，可接受，否则不可接受，需采取相应的工程措施进行控制。

采用仿真的方法，考虑已完和在建各工序之间的逻辑关系，对未完工序设定其施工状态进行施工仿真，结果符合客观实际。

4.3 施工进度计划的偏差分析及调整

调整施工进度计划首先要分析进度偏差的影响，步骤如下：

- 1) 分析出现进度偏差的工作是否为关键工作。如果为关键工作，则无论偏差大小，都将影响后续工作按计划施工，并使工程总工期拖后，必须采取相应措施调整后期施工计划，以确保计划工期。
- 2) 如果出现进度偏差的工作为非关键工作，则分析进度偏差时间是否大于总时差。如果某项工作的进度偏差时间大于该工作的总时差，都将影响后续工作和总工期，必须采取措施调整。

- 3) 如果进度偏差时间小于或等于该工作的总时差，则不会影响工程总工期，但是否影响后续工作，需分析进度偏差时间是否大于自由时差。如果某项工作进度偏差时间大于该工作的自由时差，应对后续的有关工作的进度安排进行调整；如果进度偏差时间小于或等于该工作的自由时差，则对后续工作毫无影响，不必调整。

对于不能满足进度要求的施工进度计划要进行调整，可适当的改变某些工作的逻辑关系，或适当压缩某些工序的持续时间。

5 工程实例

某隧道工程全线总长11 529.740 m,根据施工组织设计和进度要求采用TBM开挖。

5.1 工程施工进度的可视化动态仿真及风险分析

根据工程施工组织设计、各项洞室施工的衔接关系及相互制约条件,对隧道施工系统的施工程序进行分析研究,建立该工程施工全过程仿真模型。

通过VC++编程,实现工程施工全过程可视化动态仿真计算,仿真结果如表1所示,此外可以得出施工工期、施工进度计划、施工强度及施工强度高峰等结果,而且通过对施工强度的均衡优化,降低了施工强度高峰,提高人员和机械的利用率,从而降低生产成本。最后利用基于GIS的三维动态演示系统可以把整个施工过程演示出来。

表1 TBM法施工隧道仿真结果分析表

Table 1 TBM method construction simulation result analysis

地质段	地质段 1	地质段 2	地质段 3	地质段 4
循环时间/min	24	25	37	67
进度/m·月 ⁻¹	735	696	485	263
掘进时间比率/%	62.5	40	45	27
重定位时间比率/%	18.8	18	16.7	12.2
等待出渣时间比率/%	18.7	42	52.3	60.8
开工日期	2003-03-01			
完工日期	2003-12-31			

总工期9个月,按此工期的完工概率为93%,风险率7%,对工程顺利完工是较有把握的。

5.2 工程施工资源优化及可视化分析

在工程进度仿真计算的基础上,按标段对工程进行资源均衡优化,初始和均衡后的施工强度和出现时间如表2。

表2 初始和均衡优化后的施工强度高峰和出现时间

Table 2 The construction intensity apex and its start time of origin and optimized schedule plan

初始		均衡后	
最大强度	最大强度出现时间	最大强度	最大强度出现时间
(石方)0.995	2003/5-2003/6	0.975	2003/5-2003/6
(土方)2.63	2003/3-2003/4	2.54	2003/3-2003/4
(混凝土)0.63	2003/9-2003/10	0.61	2003/9-2003/10

该工程中基于仿真的三维动态可视化为分析上述过程提供了一种科学、简便、直观的工具。

5.3 工程施工进度S型曲线管理与控制

在工程实际开展过程中,偏差是不可避免的,笔者通过实时仿真结合S型曲线对工程进度进行管理与控制,通过及时采集工程施工信息,与进度计划进行对比,找到偏差并采取纠偏措施,对后续工程重新进行仿真计算,如此往复,直至工程顺利竣工。生成的工程进度S型曲线与均衡工程施工某时刻进度预测图表明,当前进度的工期完全处在计划S型曲线之内,说明当前的工期及投资控制符合计划进度的要求。同时,未完工程的预测S型曲线也完全处在计划S型曲线之内,并且在计划曲线的期望值附近,证明按照目前的施工状态进行未来工程的施工,其施工进度完全符合计划工期及费用的要求,因而可不必进行计划进度的调整。

6 结语

隧道工程的施工进度分析与管理是一项复杂的系统工程,涉及众多的工程动态信息。根据隧道工程施工的特点,阐述了隧道工程动态仿真方法,在进度仿真的基础上,进行了进度风险分析及资源优化,提出了基于可视化仿真的S型曲线管理方法,实现了直观的工程施工动态信息的管理与控制,为工程建设提供高效的管理和决策信息。在实际工程中的成功应用证明了该方法的科学性和实用性。

参考文献

- [1] 陈燕顺. 建筑工程项目施工组织与进度控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [2] 钟登华, 郑家祥, 刘东海, 等. 可视化仿真技术及其应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- [3] Zhong Denghua, Zhang Weibo, Li Jingru, et al. Study on dynamic visual simulation system for complex construction processes [C]. The Sixth International Conference for Young Computer Scientists, Hongzhou, China, 2001. 430~434
- [4] 杨学红, 胡志根. 基于petri网隧道施工过程的系统建模 [J]. 水电能源科学, 2001, 19(4): 33~36
- [5] Kamat V R, Martinez J C. Visualizing simulated construction operations in 3D [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2001, 15(4): 329~337
- [6] 林志荣. 网络计划中资源均衡优化的研究 [J]. 中国管理科学, 1999, 8(3): 39~43

(下转第57页)