

盾构法施工风险的多态贝叶斯网络模型分析

周 健^{1,2}, 王红卫^{1,2}, 吴邵海^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 地铁隧道具有投资规模大、风险因素多、社会影响大等特点,这决定了在施工过程中进行风险管理的必要性。鉴于风险的模糊性,很难用一个具体的概率值或概率区间来描述其发生概率,由此提出了用多个概率区间来分析盾构法施工过程中的风险。以划分地铁及地下工程风险概率等级的5个概率区间为度量标准,设计出风险因素概率等级调查表,通过专家调查法可统计出盾构法施工风险因素概率等级的概率分布;基于调查表,采用贝叶斯网络建立了分析风险事故概率等级概率分布的多态系统。利用该系统对某地铁隧道工程进行风险评估,得到了该工程的风险概率等级,并分析出相应风险概率等级下进出洞洞口密封效果不好、中轴线偏离过大造成管片破裂以及管片密封材料损伤、破坏等因素为重点控制因素。

关键词: 盾构法施工; 贝叶斯网络; 风险概率等级; 多态系统

中图分类号: TU473

文献标志码: A

Risk Analysis of Shield Construction by Polymorphic Bayesian Networks Model

ZHOU Jian^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}, WU Shaohai^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Subway tunnel is characterized by a large-scale investment, many risk factors, large social impact, which determines the need of risk management during the construction. In view of the fuzziness of risks, it is difficult to use an accurate probability or a probability interval to describe risks. Therefore, shield excavation risks are proposed to be analyzed by multiple probability intervals. Based on the five probability intervals which divide risk probabilities into five ranks in the subway and underground engineering, a risk factor questionnaire is designed, and the probability distributions of probability ranks about shield construction risk

factors can be figured out through expert survey method. According to the questionnaire, Bayesian Networks are applied to establishing a multi-state system to analyze the probability distributions. The multi-state system is used in the risk assessment of a subway tunnel, the probability rank of the project is figured out and at the corresponding probability rank, such risk factors as poor seal in the portals, axis deviation which causes segment failure and the damage, destruction of sealing material are considered as the key control objects.

Key words: shield construction; Bayesian Networks; risk probability rank; multi-state system

地下工程建设具有投资大、施工周期长、施工技术复杂、不可预见风险因素多和对社会环境影响大等特点,是一项高风险建设工程,风险管理已是地下建筑工程中不可分割的部分,而量化风险事故的发生概率是风险管理中的一个重要环节^[1]。

计算事故发生概率的常用方法有事件树分析法^[2]和故障树分析法^[3]。利用这两种方法进行计算时,首先应分别确定初因事件或基本事件的发生概率,这种确定性概率往往由专家经验得到。依据专家经验的调查法通常是由专家的评价结果和专家的权重系数计算出事故的具体发生概率值^[4]。但由于统计过程中各种因素的影响和专家经验的局限性,所得到的数据本身存在着不确定性,且这种具体的概率值不能充分地体现出每位专家的工程背景。模糊故障树法通过引入模糊集的概念,将常规故障树中的基本事件的发生概率模糊化,以考虑基本事件发生概率的不确定性,但这依然未能摆脱具体概率值的局限性,且该方法只能用单个区间对基本事件进行分析^[5-6]。信心指数法用多个概率区间对风险事故发生概率进行了较好的描述^[7],但信心指数的确定

仍具有很大的主观性,且该方法同样是基于专家对具体概率值的判断。

为了减小专家调查法的主观性和确定性概率的局限性,本文以划分概率等级的多个概率区间代替具体的概率值作为度量标准,依照概率区间设计出风险因素调查表,通过专家调查法统计出风险因素概率等级的概率分布。这种以区间代替数值的调查方法很大程度上减少了专家调查过程中的主观性和随机性,且多个概率区间可以客观地描述不同专家对同一风险事故发生概率大小不同的评估,充分体现了每位专家的工程经验。基于调查结果,结合贝叶斯网络(bayesian networks, BN)建立了多态系统,来分析风险事故的概率等级。

1 多态系统的分析流程

在风险评估过程中,风险事故发生概率的变化幅度往往比较大。以广州地铁盾构隧道为例,一号线黄沙站—长寿路站区间隧道开裂管片数占总数的16.0%;二号线赤岗站—鹭江站区间隧道开裂管片数占总数的3.4%^[5]。同样是管片开裂,但两者的发生概率相差很大,如果用1个概率值或单个概率区间则无法合理地反映这种现象;而从另一方面来讲,无论风险事故的概率值变化幅度多大,它们应分别属于一定的概率区间,都可以通过对概率区间的讨论来分析风险事故的发生状况,这就说明了用多个连续的概率区间为度量标准进行风险分析的合理性和必要性。据此,本文以地铁及地下工程风险概率等级的5个概率区间为度量标准,通过专家调查法统计出风险因素概率等级的概率分布,并由此分析相应风险事故的概率。在分析系统的失效概率时,假设事故只处于发生和不发生2种状态的模型属于二态系统;而本文所描述的概率等级具有5种状态,分析其概率分布的模型应属于多态系统。

文中利用多态系统进行风险分析的流程如下:首先通过对地铁隧道盾构法施工风险的识别,筛选出主要风险因素,依据风险概率等级标准的概率区间,设计出风险调查表;然后利用风险调查表对专家进行广泛调查,统计出风险因素概率等级的概率分布;同时,根据概率等级的5种状态利用贝叶斯网络构造多态分析系统;最后,将风险因素概率等级的概率分布输入到多态系统的贝叶斯网络中进行计算,依据计算结果对盾构法施工进行风险分析。该系统的分析流程如图1所示。

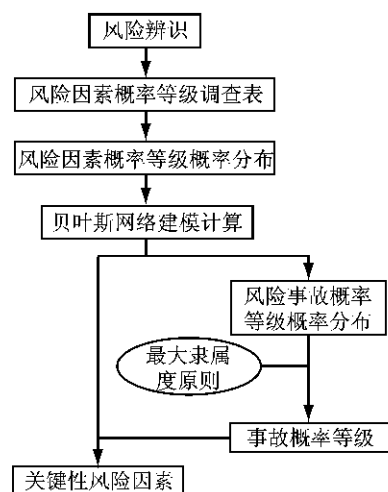


图1 多态系统分析流程

Fig.1 Analysis process of multi-state system

2 多态系统的分析步骤

2.1 风险因素概率等级调查表

参考相关文献对地铁隧道盾构法施工的风险进行辨识,在上海市南汇区地铁11号线施工技术人员的指导下,从中筛选出主要的风险因素和风险事故,忽略次要的风险因素和风险事故,结合地铁及地下工程建设期工程风险概率等级标准(表1),编制出风险调查表(表2)。表中的 P 为风险事故发生概率; A, B, C, D, E 是度量标准,在“[]”中选择相应风险因素的概率等级。

表1 风险概率等级标准

等级	事故描述	区间概率
A	不可能	$P < 0.01\%$
B	很少发生	$0.01\% \leq P < 0.1\%$
C	偶尔发生	$0.1\% \leq P < 1\%$
D	可能发生	$1\% \leq P < 10\%$
E	频繁	$P \geq 10\%$

2.2 风险因素概率等级概率分布

利用表2对专家进行调查,其结果处理方法可参考文献[4],将专家分为4个等级,专家权重如表3所示。本文将监理人员加入到施工技术人员之列。

调查结果数据的处理公式为

$$P_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \omega_{ijk}}{\sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^n \omega_{ijk}}, \quad i = 1, 2, \dots, 5, \quad j = 1, 2, \dots, 22 \quad (1)$$

式中: P_{ij} 表示风险因素 j 的概率等级为 i 时的概率; i 表示风险概率等级的个数; j 表示风险因素的个数; n 表示专家的人数; ω_{ijk} 表示判断风险因素 j 的概率等级为 i 的第 k 个专家所对应的权重系数。

表 2 盾构法施工风险因素调查表

Tab.2 Risk factors questionnaire during shield excavation

风险类别	风险事故	风险因素	发生概率 P
出洞风险 B_1	出洞漏水、漏浆 D_1	工作井土体加固效果不好 X_1	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		洞口密封效果不好 X_2	$A[], B[], C[], D[], E[]$
	出洞轴线偏离过大 D_2	盾构出洞时姿态调整不当 X_3	$A[], B[], C[], D[], E[]$
隧道推进风险 B_2	盾尾之前范围内风险 C_1	工作面失稳 D_3	盾构掘进参数选择不当 X_4
		超前地质预报不准确、不及时 X_5	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		盾构长时间滞留 X_6	$A[], B[], C[], D[], E[]$
	盾构推进受阻 D_4	超前地质预报不准确、不及时 X_5	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		障碍物清除不及时 X_7	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		盾构纠偏卡住 X_8	$A[], B[], C[], D[], E[]$
	中轴线偏离 D_5	盾构机出现故障未能及时维修 X_9	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		操作人员操作不当 X_{10}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		轴线控制测量失误 X_{11}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
	盾尾之后范围内风险 C_2	工作面前方地层处理或加固不当 X_{12}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		盾构机轴线偏离且纠偏不及时 X_{13}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
	隧道渗漏 D_6	管片密封材料损伤、破坏 X_{14}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		管片拼装不当, 受力不均而破坏 X_{15}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		管片在搬运、安装过程中受损 X_{16}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
	管片变形破坏 D_7	管片拼装不当, 受力不均而破坏 X_{15}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		中轴线偏离过大造成管片破坏 X_{17}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		野蛮施工造成管片破损 X_{18}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
进洞风险 B_3	进洞漏水、漏浆 D_9	管片破裂 X_{19}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		注浆参数不合理 X_{20}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
	进洞轴线偏离过大 D_{10}	盾尾密封不严 X_{21}	$A[], B[], C[], D[], E[]$
	进洞漏水、漏浆 D_9	工作井土体加固效果不好 X_1	$A[], B[], C[], D[], E[]$
		洞口密封效果不好 X_2	$A[], B[], C[], D[], E[]$
	进洞轴线偏离过大 D_{10}	进洞前 100 m 或 50 m 轴线探测检查失误 X_{22}	$A[], B[], C[], D[], E[]$

表 3 专家权重

Tab.3 Expert weights

级别	专家分级说明	专家权重
1 级	隧道工程领域元老级专家	1.0
	施工单位项目经理	
	高级职称以上的施工或监理单位技术人员	
2 级	中级职称的施工或监理单位技术人员	0.9
	高级职称以上的科研人员	
	高级职称以上的设计人员	
3 级	初级职称的工程技术人员	0.8
	中级职称的科研人员	
	中级职称的设计人员	
4 级	初级职称的设计人员	0.7
	初级职称的科研人员	

根据式(1)对调查结果进行计算, 可得到盾构法施工风险因素概率等级的概率分布。

2.3 风险事故概率等级的计算及分析

统计出风险因素概率等级的概率分布之后, 需要通过计算才能得到风险事故概率等级的概率分布, 故障树等传统方法不宜用于多态系统的建模计算^[8-9]。BN 具有强大的计算能力和推理能力, 其突出的优点就是能够解决故障树分析法和事件分析树法所不能解决的多态变量等问题。虽然在土木工程领域中的应用为数不多, 但 Tang Z 等指出在复杂项目

建设管理中 BN 是极具潜力的工具^[10]; 国内学者也有有力地推动了 BN 的应用和发展^[11-13]。以上文献往往注重 BN 在二态系统方面的应用, 而本文将利用 BN 在多态系统方面的计算优势来进行建模计算。

由于直接构建多态系统的 BN 模型比较繁琐, 故本文先建立多态系统的故障树, 再将故障树转化为多态系统的 BN 模型。参考表 2 中风险事故与风险因素的因果关系, 建立多态系统的故障树如图 2 所示, 变量 T 表示整体工程施工风险, 其他节点变量与表 2 一一对应。

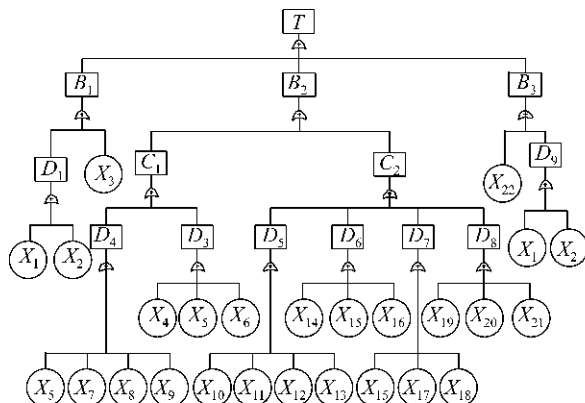


图 2 多态系统的故障树

Fig.2 Fault tree of multi-state system

根据多态故障树向 BN 转化的算法^[14],将图 2 中故障树转化为多态系统的 BN 模型.本文利用 Kevin Murphy 开发的 Bayes Net Toolbox(BNT)^[15] 构建 BN 模型,如图 3 所示,节点的符号与图 2 一一对应.

在确定条件概率时,采用父节点产生相同概率等级子节点的原则,并假设风险因素相互独立,具体确定方法见如下条件概率 $P(D_1|X_1, X_2)$:

$$P(D_1=A|X_1=A, X_2=\text{其他})=1,$$

$$P(D_1=A|X_2=A, X_1=\text{其他})=1,$$

$$P(D_1=A|X_1 \neq A, X_2 \neq A)=0$$

:

$$P(D_1=E|X_1=E, X_2=\text{其他})=1,$$

$$P(D_1=E|X_2=E, X_1=\text{其他})=1,$$

$$P(D_1=E|X_1 \neq E, X_2 \neq E)=0$$

式中:如果预先定义概率等级 A, B, C, D, E 依次升高,则“其他”表示的概率等级不高于所在等式的另一个概率等级.

将风险因素概率等级的概率分布输入到图 3 多态系统的 BN 模型中,可计算风险事故概率等级的概率分布.根据最大隶属度原则^[16-17],在风险事故概率等级的概率分布中选择最大概率值对应的概率等级作为风险事故的概率等级,结合多态系统的 BN 反向推理能力,进一步找出叶节点事故发生时的最大可能性路径和关键性风险因素.

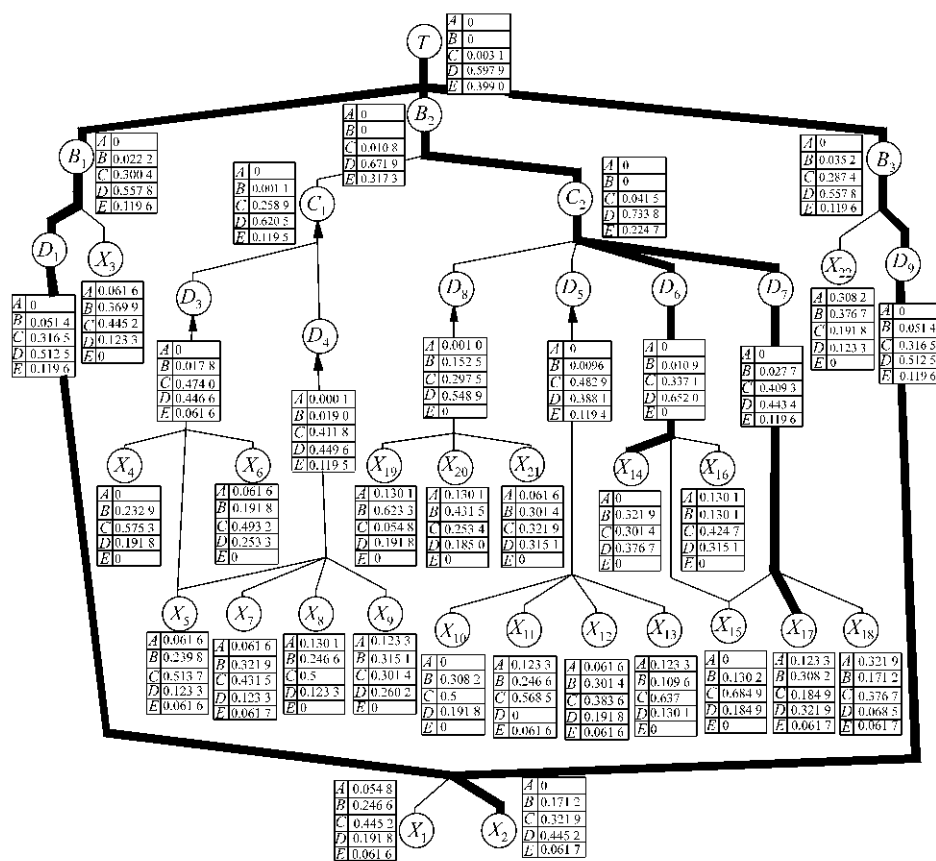


图3 多态系统的贝叶斯网络

Fig.3 Bayesian Networks of multi-state system

3 工程实例

3.1 工程概况

武汉市轨道交通钟家村站地处繁华商业区,是4号线和规划6号线叠岛换乘站.周边地貌上为三级阶地,除表层填土外,覆盖层主要由第四系上更新统冲、洪积老黏性土层,老黏性土混砂、碎石层及细砂混老黏性土层组成,该老黏土具有吸水膨胀和失水

收缩特性,遇水后强度会明显降低,并具有受扰动后强度降低的特性.下部基岩主要为志留系坟头组砂岩、泥岩、白垩系一下第三系砂砾岩、石炭系灰岩.在鹦鹉大道和汉阳大道交界处偶见石炭系炭质页岩.地层层底起伏大,地质情况复杂.本工程采用土压平衡盾构机,面临复杂的周边环境和老黏土的特殊工程特性,对盾构进出洞口、土层突变断面、承压水丰富地段、岩溶分布地段等特殊地段进行有效的风险控制是盾构法施工过程中必须解决的难题.

3.2 多态系统的计算和分析

利用调查表对 34 位专家和技术人员进行了问卷调查,根据式(1)对问卷调查结果进行数据处理,得到风险因素概率等级的概率分布,如图 3 所示.本文假设根节点事件相互独立,由根节点事件概率等

级的先验概率分布和条件概率计算非根节点事件概率等级的概率分布,计算结果如图 3 所示.具体算法参考文献[18].

依据风险事故概率等级的最大概率值,判断各个风险事故的概率等级如表 4 所示.

表 4 盾构法施工风险事故的概率等级

Tab. 4 Risk event probability ranks during shield excavation

风险事故	D_1	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	C_1	C_2	B_1	B_2	B_3	T
概率等级	D	C	D	C	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

由表 4 得知,地铁项目施工风险 T 概率等级为 D ,事故发生概率较大,应加强风险控制.利用多态系统的 BN 发现有 4 条最大可能性路径导致地铁项目施工风险 T 的概率等级为 D ,最大可能性路径分别为: $X_2 \rightarrow D_1 \rightarrow B_1 \rightarrow T$; $X_2 \rightarrow D_9 \rightarrow B_3 \rightarrow T$; $X_{14} \rightarrow D_6 \rightarrow C_2 \rightarrow B_2 \rightarrow T$; $X_{17} \rightarrow D_7 \rightarrow C_2 \rightarrow B_2 \rightarrow T$,如图 3 中粗线所示.依据最大可能性路径找出关键性风险因素分别为:进出洞洞口密封效果不好 X_2 ;管片密封材料损伤、破坏 X_{14} 和中轴线偏离过大造成管片破坏 X_{17} .当地铁项目施工风险 T 的概率等级出现为 D 时,应首先重点控制以上 3 个因素.

经分析可知,钟家村站两端区间隧道盾构法施工风险事故的发生概率较大,这与该区间岩溶发育、局部承压水水位高于车站地板的复杂地质条件相符.施工中应对关键性风险因素加强监控,加强超前地质预报和地层处理工作,重点预防复杂地段处中轴线偏离过大所造成的管片破坏.

4 结论

文中确定风险事故概率等级的方法不同于传统方法:传统方法是由风险因素发生概率确切值计算出风险事故概率确切值,再依据相关标准判定风险事故的概率等级;文中所建议的方法是由风险因素概率等级的概率分布计算出风险事故的概率等级概率分布,再依据相关标准直接判定风险事故的概率等级.

以专家调查结果为基础的多态系统着眼于对概率区间概率分布的分析,以概率区间代替概率值作为度量标准,可减少专家主观因素的影响;探讨概率区间的概率分布,可充分体现每位专家的不同经验;同时 BNT 构造的多态系统模型体现出较强的计算推理能力,既可根据风险因素概率等级的先验概率计算风险事故的概率等级概率分布,又可根据不同的风险事故概率等级反向推断出事故发生时的关键

性风险因素.以上特点使得该方法优于故障树等传统的分析法.

利用文中方法判断出武汉地铁隧道盾构法施工的风险概率等级为 D ,事故发生概率较大,这与复杂的地质条件较为符合;在叶节点事件风险概率等级为 D 的条件下推断出优先控制的关键性风险因素分别为:进出洞洞口密封效果不好,中轴线偏离过大造成管片破裂和管片密封材料损伤破坏.

参考文献:

- [1] FU Qixun, WANG Zhenzhong, JIA Tianjiao, et al. Summarize of Risk management Research in Subway tunnel engineering [C]// 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, [S. L.]: IEEE, 2010: 1-4.
- [2] HONG Eunsoo, LEE Inmo, SHIN Heesoon, et al. Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: Application to the design of shield TBM[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009: 269.
- [3] JIN N G, TANG L, FU C Q, et al. Risk analysis of tunnel lining using fault tree theory and entropy measurement [C]// Proceedings of the 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009: 207-212.
- [4] 边亦海,黄宏伟,李剑.可信性方法在深基坑施工期风险分析中的应用[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):70.
BIAN Yihai, HUANG Hongwei, LI Jian. Risk analysis in the construction stage of deep excavation engineering based on dependability method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1):70.
- [5] ZHAO Dongan, ZHENG Junjie, ZHENG Yewei. Risk analysis of shield tunnel segment failure based on fuzzy fault tree method[C]// 2010 Sixth International Conference on Natural Computation, [S. L.]: IEEE, 2010: 4247-4251.
- [6] 边亦海,黄宏伟. SMW 工法支护结构失效概率的模糊事故树分析[J].岩土工程学报,2006,28(5):664.
BIAN Yihai, HUANG Hongwei. Fuzzy fault tree analysis of failure probability of SMW retaining structures in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5):664.

(下转第 202 页)