

基于 BN-PERT 进度风险分析模型的 地铁项目进度风险分析*

李 潇¹ 胡志根¹ 杨 光² 宋子达¹

(1. 武汉大学水利水电学院, 430072, 武汉;

2. 中国水利水电第八工程局有限公司, 410004, 长沙//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 考虑城市地铁项目建设过程中的风险因素及其相关性和非主导线路对工期的影响, 在计划评审技术 (PERT) 的基础上, 建立了一种基于贝叶斯网络 (BN) 和修正 PERT 的 BN-PERT 进度风险分析模型。该模型以进度计划和风险贝叶斯网络为基础, 引入乐观系数反映决策者偏好, 利用语言变量描述专家等级判断, 采用模糊数将语言变量转化为概率值, 使用 BN 的概率推理功能和修正的 PERT 分析工程进度的期望工期和风险率。通过对某地铁工程的实例分析表明, BN-PERT 模型的计算结果较好地反映了工程风险的客观属性及其特征。

关键词 地铁; 期望工期; 进度风险; 贝叶斯网络; 修正计划评审技术

中图分类号 TU71: U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.06.003

Schedule Risk Analysis Model of Subway Project Based on Fuzzy Probability BN-PERT

LI Xiao, HU Zhigen, YANG Guang, SONG Zida

Abstract Considering the influence of risk factors, correlation and non-dominant lines on the duration, a BN-PERT project schedule risk analysis model based on Bayesian network (BN) and modified project evaluation and review technique (PERT) is established. On the basis of schedule development and risk BN, the optimistic coefficient is introduced into the model to reflect the preferences of decision makers; then, the linguistic variables are used to describe the grade judgment of experts, the fuzzy numbers are used to convert the linguistic variables into probability values, and the probability reasoning function of BN and the modified PERT are used to analyze the expected duration and the completion risk rate. The analysis of engineering examples shows that the calculation results of the BN-PERT model reflect better the objective properties and characteristics of engineering risks.

Key words subway; expected duration; schedule risk; BN; modified PERT

First-author's address School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, 430072, Wuhan, China

地铁大部分路段会经过城市的中心区域, 其建设施工工期直接影响到工程成本和相关单位的后续计划, 在一些重大项目中甚至会影响城市的经济和社会发展。因此, 寻找一种方便、有效的地铁工程进度风险分析方法具有重要意义。

文献[1]提出用计划评审技术 (PERT) 对工程进度进行风险评估; 文献[2]考虑了网络内非主导线路的影响, 提出了修正的 PERT 方法。以上方法只在进度网络内进行了分析, 没有考虑外界风险因素的影响。近来, 众多学者将贝叶斯网络 (BN) 用于风险分析中。文献[3]利用 BN 计算了气井井筒完整性失效概率; 文献[4]利用 BN 进行施工安全风险评估。在进度风险分析方面, 文献[5-7]将 BN 和关键路径法 (CPM) 结合在一起, 建立了 BN-CPM 进度风险模型, 讨论了风险因素相关性以及非叠加性的影响; 文献[8]提出结合贝叶斯理论和柔性网络计划的仿真方法, 并将其应用于地下洞室群时变施工进度风险预测中。上述研究虽然考虑了风险因素对工程进度的影响, 但缺乏对风险因素间相互影响的考虑。文献[9]耦合了改进的 PERT 和 BN, 进行堆石坝施工进度风险分析, 但忽略了远端风险因素对进度的直接影响。

针对目前工程项目进度风险分析的研究现状, 本文考虑风险因素及其相关性对地铁项目进度的影响, 建立了 BN-PERT 进度风险分析模型 (以下简

* 国家自然科学基金项目 (51779195)

为 BN-PERT 模型)。专家根据经验采用语言变量对风险发生的可能性做出等级判断,通过三角和梯形模糊数将语言变量转化为概率值;以 BN 的概率推理功能分析工序三种时间状态发生的概率,计算工序持续时间期望值;考虑次要线路对主导线路工期的影响,利用修正 PERT 对主导线路工期进行修正,最终求得地铁项目的期望工期和风险率。

1 基于专家经验的模糊概率

地铁项目进度分析时所需的节点概率可通过专家的经验给出。专家给出的点估计不同于客观的数据分析,会带有一定的主观判断,也可能由于专业领域和认知结构的差异性而存在认知偏差^[10],所以,与直接给出点估计相比,采用等级判断方向获得的概率将更为准确且容易^[11-12]。

1.1 专家语言变量分析

专家根据经验给出的等级判断称为语言变量。为了将这些语言变量最终转化为具体概率值,首先应引入模糊数对其进行模糊数化处理。每一个语言变量可以用一个模糊数 F 表示^[13-14]。常用的模糊数有三角模糊数和梯形模糊数 2 种,本文以下标 Tri 及 Tra 予以区分,三角模糊数表示为 $F_{\text{Tri}} = (a, b, c)$,梯形模糊数表示为 $F_{\text{Tra}} = (a, b, c, d)$ 。

为了进行计算分析,可引入 λ 截集。对于给定的 $\lambda \in [0, 1]$,称 $F_\lambda = \{x | x \in R, F(x) \geq \lambda\} = [f_{L,\lambda}, f_{R,\lambda}]$ 为模糊数 F 的 λ 截集,其中 $f_{R,\lambda}, f_{L,\lambda}$ 分别为 λ 截集的上、下界, λ 为模糊数的水平。 λ 截集反映了模糊数在 λ 水平上的状况,当 λ 取遍 $[0, 1]$ 内所有值时 λ 截集就能反映出模糊数的所有层次结构,本文 λ 取为 0, 0.1, 0.2, ..., 1.0。模糊数 λ 截集的集合形式为 $[f_L^\lambda, f_R^\lambda]$,三角模糊数的 λ 截集 $F_{\text{Tri},\lambda}$ 如式(1),梯形模糊数的 λ 截集 $F_{\text{Tra},\lambda}$ 如式(2)。

$F_{\text{Tri},\lambda} = [(b - a)\lambda + a, (b - c)\lambda + c]$ (1)

$F_{\text{Tra},\lambda} = [(b - a)\lambda + a, (c - d)\lambda + d]$ (2)

语言变量按事件发生的可能性大小可分为:非常高(VH)、高(H)、较高(CH)、中等(M)、较低(CL)、低(L)、非常低(VL)7个等级。由于较高、较低的模糊集合范围较其他语言变量大,而非常高、非常低的模糊集合最可能取值分别趋于0和1,因而这4个语言变量采用梯形模糊数表示,分别为 $F_{\text{CH}}, F_{\text{CL}}, F_{\text{VH}}, F_{\text{VL}}$;其他语言变量采用三角模糊数表示,相应为 $F_{\text{H}}, F_{\text{M}}, F_{\text{L}}$ 。每个模糊数对应的 λ 截集表示为 $F_{\text{VH},\lambda}, F_{\text{H},\lambda}, F_{\text{CH},\lambda}, F_{\text{M},\lambda}, F_{\text{CL},\lambda}, F_{\text{L},\lambda}, F_{\text{VL},\lambda}$ 。

语言变量、模糊数及对应的 λ 截集如表 1 所示。

表 1 模糊数形式和 λ 截集

语言变量	模糊数(F)	λ 截集(F_λ)
非常高	(0.8, 0.9, 1.0, 1.0)	$[0.1\lambda + 0.8, 1]$
高	(0.7, 0.8, 0.9)	$[0.1\lambda + 0.7, -0.1\lambda + 0.9]$
较高	(0.5, 0.6, 0.7, 0.8)	$[0.1\lambda + 0.5, -0.1\lambda + 0.8]$
中等	(0.4, 0.5, 0.6)	$[0.1\lambda + 0.4, -0.1\lambda + 0.6]$
较低	(0.2, 0.3, 0.4, 0.5)	$[0.1\lambda + 0.2, -0.1\lambda + 0.5]$
低	(0.1, 0.2, 0.3)	$[0.1\lambda + 0.1, -0.1\lambda + 0.3]$
非常低	(0, 0, 0.1, 0.2)	$[0, -0.1\lambda + 0.2]$

1.2 风险状态的概率

为了得到各种风险状态出现的概率,在 λ 截集中选出一个最具代表性的单值,这个过程称为去模糊化^[15]。去模糊化的方法有很多,本文采用积分值法^[16]进行去模糊化计算,由此可得到各种风险状态出现的概率 P ,其计算公式如下:

$P = e\mu_R(F) + (1 - e)\mu_L(F)$ (3)

式中: e 为乐观系数, $e \in [0, 1]$,由决策人员根据风险容忍度给出,反映其对模糊数区间上、下界的偏好。 $e = 0.5$ 时对应模糊数 F 去模糊化值的代表值。 $\mu_R(F)$ 和 $\mu_L(F)$ 分别为模糊数左右隶属函数反函数的积分值, $\mu_R(F)$ 和 $\mu_L(F)$ 用 λ 截集表示为:

$\mu(F) = 0.05(\sum_{\lambda=0.1}^1 f_\lambda + \sum_{\lambda=0}^{0.9} f_\lambda)$ (4)

式(4)中,若求取 $\mu_R(F)$,则 f_λ 应为 $f_{R,\lambda}$;若求取 $\mu_L(F)$,则 f_λ 应为 $f_{L,\lambda}$ 。

2 耦合 BN-PERT 进度风险的分析模型

2.1 BN 的概率推理

地铁项目包含地下、地面及市政交通等作业,具有投资高、工期长、施工组织复杂等特点,其工期受到多种风险因素及其相关性的影响。本文将 BN 的概率推理功能应用于地铁项目的进度风险分析中。

BN 可以从定量和定性 2 个方面解释^[17]:①定性方面。BN 表现为一个有向无环结构,可以反映出各风险因素节点间和它们与工序持续时间节点间的因果关系;②定量方面。BN 采用概率来量化各节点间的因果关系。BN 中涉及到的部分节点概率可以通过上文基于专家经验的模糊概率中所述方法求得。以风险因素节点 R_1, R_2, R_3 为例,其 BN 示意图如图 1 所示。其中: $P(R_1), P(R_2)$ 为节点

R_1 、 R_2 的边缘概率; $P(R_3 | R_1, R_2)$ 为节点 R_3 的条件概率; $P(R_{31})$ 、 $P(R_{32})$ 为节点 R_3 2 种可能状态发生的概率,如式(5)所示。

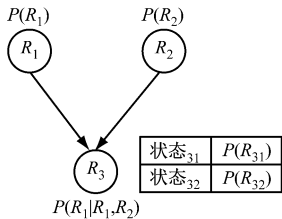


图1 贝叶斯网络举例示意图

$$P(R_{3k}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l P(R_{1i}, R_{2j}, R_{3k}) \quad (5)$$

式中:

k ——节点可能出现的状态;

m, l ——分别为节点 i, j 的状态数;

$P(R_{1i}, R_{2j}, R_{3k})$ ——风险节点 R_1 第 i 个状态、风险节点 R_2 第 j 个状态和风险节点 R_3 第 k 个状态同时出现的概率。

$P(R_{1i}, R_{2j}, R_{3k})$ 由 BN 的联合概率公式求得:

$$P(R_1, \dots, R_h) = \prod_{h=1}^n P(R_h | \Omega(R_h)) \quad (6)$$

式中: $\Omega(R_h)$ 表示节点 R_h 的所有父节点,当 $\Omega(R_h) = \emptyset$ 时, $P(R_h | \Omega(R_h))$ 即为边缘概率 $P(R_h)$ 。 \emptyset 表示空集; $P(R_h)$ 和 $P(R_h | \Omega(R_h))$ 根据专家经验由式(1)一式(4)计算得到。

2.2 修正 PERT 求解期望工期及风险率

PERT 的主要任务是求解项目的期望工期及风险率。针对经典 PERT 没有考虑到网络计划图中线路的共同作用而造成求得的期望工期偏小、计算精度不足的问题^[3],在其原期望工期 T 的基础上增加考虑次要线路影响后的工期修正值 ΔT ,从而得到修正后的期望工期 T^* 。其中 T 是工程项目各工序持续时间 T_i 之和。

$$T_i^* = a_i P(a_i) + m_i P(m_i) + b_i P(b_i) \quad (7)$$

式中:

a_i, m_i, b_i ——分别为第 i 个工序乐观、最可能、悲观持续时间;

$P(a_i)$ 、 $P(m_i)$ 、 $P(b_i)$ ——分别为第 i 个工序乐观、最可能、悲观持续时间状态发生的概率,可由式(5)、式(6)求得。

关键度 η 是判断主导线路和次要线路的依据, η 最小时对应的线路为主导线路。工期修正值 ΔT 、关键度 η 的计算公式为:

$$\eta = \frac{T_s - T}{\sigma_n} \quad (8)$$

$$\Delta T = |\varepsilon| \sigma \quad (9)$$

式中:

ε ——正态离差,可由主导线路和次要线路合成后的完成概率经查标准正态分布表求得;

σ ——主导线路标准差;

T_s ——规定工期;

σ_n ——所求 λ 对应线路的标准差。

求得期望工期 T^* 后,则可进行风险率的计算。风险率表示项目不能在期望工期 T^* 内完工的风险。建立完工概率密度函数(假设为正态分布函数),在满足以合同规定工期 T_s 为限制条件(按该工期完工的概率趋于 1)的情况下,可选择主导线路标准差 σ 作为概率密度函数的标准差,主导线路各工序最可能持续时间之和 T_m 为期望,此时由 $\frac{T^* - T_m}{\sigma}$ 查标准正态分布表得到完工概率 P^* ,进而计算出期望工期 T^* 内完工的风险率 r 。

$$r = 1 - P^* \quad (10)$$

3 实例分析

以某地铁车站土建预埋工程为例进行分析。该工程采用明挖顺作法施工,根据工程特点,分为 C1、C2 区域,分 2 期进行施工,合同规定工期为 1 423 d。工程的施工进度计划网络图如图 2 所示。

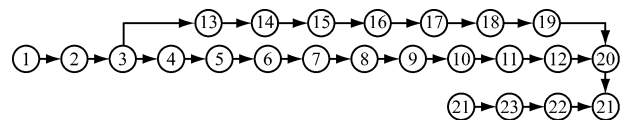


图2 某地铁车站施工进度计划网络图

由于该工程的工程活动和风险因素关系较多,全部列出篇幅过长,故本文仅给出工序 6(C2 区的基坑开挖及钢支撑安装)的详细分析过程。该工序施工期集中在冬季,需考虑降雨、降雪等天气因素(R_1)对工程进度的影响。工程施工区域的结构底板下分布有溶洞土和无充填溶洞,这种地质因素(R_3)可能产生坍塌、管涌等灾害影响土方开挖和基坑安全。某城际铁路火车站和该地铁线路工程同期开工建设,各方面接口关系复杂。同时,城市区域开挖需考虑地下铺设的各种管线,这种布置协调因素(R_2)也会影响施工进度。此外, R_1 和 R_2 还会影响劳动效率(R_4)、运输条件(R_5),进而间接影响

工期变化。考虑风险因素相关性和与远端风险直接影响,该工序的风险因素和工程活动 BN-PERT 图如图 3 所示。

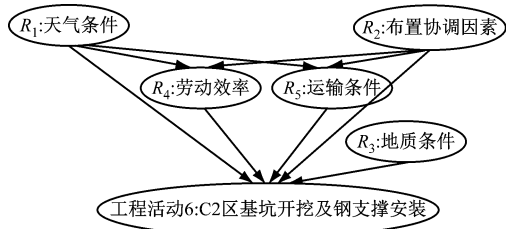


图3 工序的风险因素和工程活动 BN-PERT 图

该工序的风险因素和工程活动的先验概率和条件概率可由专家给出的评判语言变量经模糊方法求得,本文以天气条件 R_1 和运输条件 R_5 为例进行说明。风险因素有 2 种状态,分别为好(0)、坏(1)。针对风险因素 R_1 状态为好时发生的概率,专家给出语言变量如表 2 所示。

表2 风险因素 R_1 的专家语言变量

专家	天气条件
	好
1	低
2	较低
3	中
4	较低

根据其 λ 截集,采用算术平均法求得 4 位专家对地质因素的综合评判结果为:

$$F_{R_1,\lambda} = [0.1\lambda + 0.225, -0.1\lambda + 0.475] \quad (11)$$

本文的乐观系数 e 统一取为 0.5。根据式(1)一式(4)可得天气条件 R_1 的边缘概率 $P(R_1 = 0) = 0.35, P(R_1 = 1) = 0.65$ 。运输条件 R_5 受天气条件 R_1 和布置协调因素 R_2 影响,分 8 种情况用上述方法求得 R_5 的条件概率,计算结果如表 3 所示。

表3 风险因素 R_5 的条件概率

天气条件 R_1	布置协调 因素 R_2	运输条件 R_5	
		0	1
0	0	0.825	0.175
0	1	0.538	0.462
1	0	0.425	0.575
1	1	0.100	0.900

同理可得到其他风险因素的概率。根据三时估计法可知工序 6 有三种工期状态,分别为乐观持续时间(140 d)、最可能持续时间(150 d)、悲观持续

时间(160 d)。工序 6 的 5 种风险因素共产生 32 种组合,通过计算可得工序 6 在 3 种工期状态在不同风险组合下的概率为:

$$P(6) = \sum P(R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, 6) \quad (12)$$

考虑风险因素相关性的影响,根据风险因素的概率计算结果,由式(5)、式(6)可得三种工期状态可能发生的概率如表 4 所示。

表4 三种工期状态的发生概率

工期状态	乐观工期	最可能工期	悲观工期
工期/d	140	150	160
概率/%	14.69	62.13	23.18

根据期望公式可求得工序 6 的期望工期为 150.90 d,方差为 11.11 d。同理可以求得整个工程各个工程活动的期望工期和方差。

计算得到不考虑次要线路影响情况下项目的期望工期为 1 413.5 d,用修正 PERT 法对该期望工期进行修正。线路(1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-20-21-22-23-24)是主导路线,根据式(8)、式(9)求得工期修正值为 1.4 d,因而修正后的期望工期为 1 414.9 d。经计算,主导线路最可能工期值 1 404 d,同时由主导线路标准差 8.07 建立正态分布概率密度函数,此时查标准正态分布表可知,按规定工期 1 423 d 完工的概率为 0.990 7,满足限制条件,可将 PERT 和 BN-PERT 计算所得的期望工期代入式(10)求得各自的进度风险率。2 种方法计算得到的进度风险分析参数如表 5 所示。

表5 进度风险分析结果对比

算法	期望工期/d	完工概率/%	风险率/%
PERT	1 412.0	83.91	16.09
BN-PERT	1 414.9	91.16	8.84

4 结语

本文利用 BN-PERT 模型对地铁项目的进度风险进行了分析。该模型在某地铁工程实例的应用结果表明:

1) 与经典 PERT 相比,改进的 PERT 模型考虑了风险因素及其相关性对工程活动工期的影响,改善了三时估计值(1 412 d)的主观性,考虑了次要线路持续时间(1 402.5 d)的影响。计算得到主导线路持续时间修正值(1.4 d),进而求得改进后的期望工期(1 414.9 d),最后由该期望工期查得改进后的

(下转第 18 页)

表 8 牵引策略 2 下区间运行时间计算结果

运行模式	区间 1			区间 2		
	AW0 下区间 运行时间/s	AW3 下区间 运行时间/s	时间偏差/%	AW0 下区间 运行时间/s	AW3 下区间 运行时间/s	时间偏差/%
以最大能力速度运行	82.70	82.69	0.01	58.19	58.16	0.05
以节能速度运行	89.36	88.47	1.01	89.60	88.66	1.06

间偏差均不超过 2% ,远小于牵引策略 1 下的时间偏差,可满足 ATO 对区间运行时间的准点性要求。

4 结论

本文通过 ATO 的牵引计算仿真,分析了按当前载荷下最大牵引能力控制以及按 AW3 下最大牵引加速度控制两种 ATO 牵引策略在不同的列车载荷下对区间运行时间的影响。仿真结果表明,按 AW3 下最大牵引加速度控制可以减少载荷变化对区间运行时间波动的影响,具有更好的准点性能。

参考文献

[1] 石红国,彭其渊,郭寒英.城市轨道交通牵引计算算法[J].

(上接第 13 页)

风险率(8.84%)。改进后工期增加了 2.9 d,为原工期的 0.21%;风险率降低了 7.25%,为原风险率的 45.06%。改进后的方法较大幅度地降低了延期风险,为施工进度方案的选择提供了依据。

2) 与传统 BN 方法相比,引入语言变量进行专家等级判断,便于分析计算经验概率,改善了专家评判存在的主观性、认知偏差等问题。BN-PERT 模型为地铁项目工期和风险率提供了便捷而准确的计算方法,为工程进度管理与安全控制提供了技术支撑。

参考文献

[1] 续晓春. PERT 网络在工程风险估计中的应用初探[J]. 太原理工大学学报,2000(1): 87.
[2] 王卓甫,杨高升,杨建基,等. 水利水电施工中应用 PERT 的完工概率问题[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002(1): 44.
[3] 张弘,申瑞臣,袁光杰,等. 基于贝叶斯网络的气井井筒完整性风险评价[J]. 中国安全生产科学技术,2017(9): 132.
[4] 汪涛,廖彬超,马昕,等. 基于贝叶斯网络的施工安全风险概率评估方法[J]. 土木工程学报,2010(增刊2): 384.
[5] 刘俊艳,王卓甫. 工程进度风险因素的非叠加性影响[J]. 系统工程理论与实践,2011(8): 1517.
[6] 刘俊艳. 基于 BN-CPM 的工程进度风险因素相关性分析[J]. 水力发电学报,2011(6): 199.
[7] 刘俊艳,STEVEN D. 基于 BN-CPM 的工程活动相关性分析

交通运输工程学报,2004,4(3):30.

[2] 荀径,杨欣,宁滨,等. 列车节能操纵优化求解方法综述[J]. 铁道学报,2014,36(4):14.
[3] YIN J, TANG T, YANG L, et al. Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: a survey[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2017, 85:548.
[4] 饶忠. 列车牵引计算[M]. 北京:中国铁道出版社,2010:24.
[5] 朱晓敏,徐振华. 基于单质点模型的城市轨道交通列车动力学仿真[J]. 铁道学报,2011,33(6):14.

(收稿日期:2018-08-08)

[J]. 水力发电学报,2012(5): 302.

[8] 张社荣,杜成波,撒文奇,等. 基于贝叶斯理论的地下洞室群时变施工进度风险预测方法[J]. 系统仿真学报,2014(5): 1131.
[9] 钟登华,闫玉亮,张隼,等. 耦合改进 PERT 和 BBNs 的堆石坝施工进度风险分析[J]. 水利学报,2017(1): 52.
[10] FOX C R, CLEMEN R T. Subjective probability assessment in decision analysis: Partition dependence and bias Toward the ignorance prior [J]. Management Science, 2005, 51(9): 1417.
[11] SPEIRS-BRIDGE A, FIDLER F, MCBRIDE M, et al. Reducing overconfidence in the interval judgments of experts [J]. Risk Analysis, 2010, 30(3): 512.
[12] FENTON N E, NEIL M, CABALLERO J G. Using ranked nodes to model qualitative judgments in bayesian networks [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2007, 19(10): 1420.
[13] LIN C T, WANG M. Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1997, 58(3): 205.
[14] 金朝光,林焰,纪卓尚. 基于模糊集理论事件树分析方法在风险分析中应用[J]. 大连理工大学学报,2003,43(1):97.
[15] 陆莹,李启明,周志鹏. 基于模糊贝叶斯网络的地铁运营安全风险预测[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010(5): 1110.
[16] LIOU T S, WANG M J J. Ranking fuzzy numbers with integral value[J]. Fuzzy Sets & Systems, 1992, 50(3): 247.
[17] PEARL J. Fusion, propagation and structuring in belief networks [J]. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 241.

(收稿日期:2018-08-20)