

文章编号:1671-6833(2023)05-0108-06

基于 DBN 的艾尔西亚高等级公路施工进度风险评估

张 华^{1,2}, 彭朝晖³, 张 强³, 马萌濛³, 王亚伟³, 李宗坤^{1,2}

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 黄河实验室, 河南 郑州 450001; 3. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对传统贝叶斯网络(BN)方法较难实现施工进度风险动态评估的问题,在分析环境、组织、技术、管理等风险因素与施工进度风险之间因果关系的基础上,引入时间因素将贝叶斯网络横向扩展成具有 10 个时间段的动态贝叶斯网络(DBN),结合施工进度监测数据对施工进度风险进行动态评估。以 El Sillar(下文称艾尔西亚)高等级公路工程为例验证方法的合理性。结果表明:艾尔西亚公路工程施工进度风险整体可控,各时间段能够按期完工的概率在 60% 左右,延期风险呈先增后降的趋势,导致其工期延误的风险事件依次为环境风险、技术风险、组织管理风险、经济风险;DBN 模型考虑了风险因素的动态性,优于静态模型。基于 DBN 对公路工程施工进度动态风险进行分析,可为同类工程提供借鉴和参考。

关键词: 艾尔西亚高等级公路; 进度风险; 动态贝叶斯网络; 进度监测数据

中图分类号: TV698 **文献标志码:** A **doi:** 10. 13705/j. issn. 1671-6833. 2023. 02. 015

公路工程建设援助是中国支援其他国家基建、扩大对外交流的重要方式。由于援建公路工程建设规模和难度越来越大,其施工风险越来越高^[1]。研究表明,部分公路在施工期间存在严重的进度滞后问题,给当地经济和社会带来较大的负面影响^[2]。环境、技术、组织管理和经济因素是造成施工进度滞后的主要原因^[3],这些不确定和动态变化的风险事件给工程项目的进行带来了挑战。

国内外学者对工程施工工期进度风险进行了广泛的研究,戴幼学^[4]采用层次分析法对公路施工期风险进行评价,并根据不同风险评价等级提出相应的管控措施;王张军等^[5]提出了基于 WSR-GCM 方法的地铁 TBM 施工进度风险评价模型;蒋慧杰等^[6]采用模糊推理与概率计算相结合的方法对公路施工进度风险进行评价;张定邦等^[7]采用严重系数计算方法对公路延误的影响因素进行了排序;Hyun 等^[8]采用故障树和层次分析法对地铁 TBM 施工风险进行了分析;Mahamid 等^[9]通过问卷调查对巴勒斯坦某公路建设项目的绩效进行调查,发现导致公路工期滞后最重要的 5 个原因是时局、施工区域分割、经济因素、业主拖延付款和设备短缺;Moghayedi

等^[10]研究了公路施工过程中可能遇到的不确定性事件,并使用自适应神经模糊推理系统预测这些事件对工期的影响程度。目前针对公路施工进度风险的研究成果较多,然而这些研究主要集中在关键风险因素的识别以及管控方面,对风险因素的动态性没有深入分析。此外,这些方法较少考虑上下级事件间的因果关系,而在施工过程中各级事件均有一定关联性,必须予以充分考虑。

贝叶斯网络(Bayesian network, BN)^[11-13]是描述随机变量之间概率关系的有向无环图,它能够很好地解决各因素的不确定性以及风险事件的关联性问题,因此近年来在大型工程进度风险分析中应用广泛。但传统的贝叶斯网络都未考虑时间因素,因此只能得到工程的整体进度风险,无法分析进度风险的动态变化过程,在实际运用中存在一定的局限性。本文以艾尔西亚高等级公路施工进度风险为研究对象,将施工工期划分为 10 个时间段,引入时间因素将 BN 横向扩展成具有 10 个时间段的动态贝叶斯网络(DBN),从而建立公路工程施工进度风险动态评估模型,结合施工进度监测数据对风险概率进行更新,预测施工期间进度风险的动态变化,为其

收稿日期:2022-09-20;修订日期:2022-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51379192);中国水利水电第十一工程局有限公司科研项目(2022007A)

通信作者:李宗坤(1961—),男,河南邓州人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事水利与土木工程的风险评价与管理研究,E-mail:lizongkun@zzu.edu.cn。

引用本文:张华,彭朝晖,张强,等. 基于 DBN 的艾尔西亚高等级公路施工进度风险评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(5): 108-113. (ZHANG H, PENG Z H, ZHANG Q, et al. Construction progress risk assessment of El Sillar highway based on DBN[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(5): 108-113.)

风险管控提供理论依据。

1 动态贝叶斯网络模型

1.1 BN 模型

BN^[13] 主要由父、子节点,以及连接各节点的有向箭头组成,如图 1 所示,其中 A 、 B 为 C 的父节点, C 为子节点。

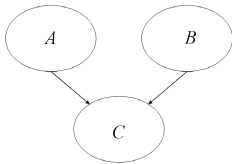


图 1 BN 示意图

Figure 1 Schematic diagram of BN

BN 的数学基础如式(1)和式(2)所示。

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)}; \tag{1}$$

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i)P(B_i). \tag{2}$$

式中: $P(B)$ 为事件 B 的发生概率; $P(B|A)$ 为事件 A 发生条件下,事件 B 发生的概率; $P(A|B_i)$ 称为似然率; n 为事件数。

有向无环图中所有变量的联合概率分布结果为 BN 的结果,图 1 的计算公式如式(3)所示。

$$P(A,B,C) = P(C|A,B)P(A,B) = P(C|A,B)P(A)P(B). \tag{3}$$

1.2 DBN 模型

在公路工程施工期内,不同时间段同一风险因素的发生概率是动态变化的,引入时间因素可实现由 BN 向 DBN 的转变,从而实现对工程进度风险的动态预测。构建 DBN 可分为两部分:一是构建先验网络 B_0 ,并定义初始时刻的联合概率分布 $P_{B_0}(X)$,表示各节点的初始关系;二是构建转移网络 $B \rightarrow$,转移网络中的节点及节点的条件概率与初始网络中完全相同。将施工期划分成若干时间段,然后定义同一风险事件在相邻时间段上的转移概率 $P(X_{t+1}/X_t)$ 。当数据充足且演变机理清晰时,转移概率可由马尔科夫假定或转移概率不变假定获得;当数据缺乏且演变机理不清晰时,转移概率由公路工程专家根据经验拟定^[14-15],转移概率在整个 DBN 中不变。在初始时刻,事件 X_1 的父节点是先验网络 B_0 中的节点;在 $t+1$ 时刻($t>0$),事件 X_{t+1} 的父节点为转移网络 $B \rightarrow$ 中的节点,如图 2 所示。DBN 中事件 X 在第 T 个时间段的联合概率分布为 $P(X_1, X_2, \dots, X_T)$,如式(4)所示。

$$P(X_1, X_2, \dots, X_T) = P_{B_0}(X_1) \prod_{t=1}^T P_{B \rightarrow}(X_{t+1}/X_t). \tag{4}$$

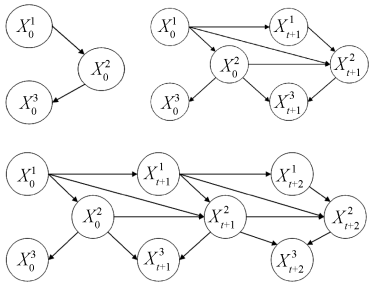


图 2 DBN 构成

Figure 2 Composition of DBN

式中: X_t^i 为第 T 个时间段中的第 i 个节点; $P_a(X_t^i)$ 为其父节点; n 为随机变量数。

DBN 中任意两相邻时间段间的转移概率如式(5)所示,节点的联合概率分布如式(6)所示。

$$P(X_{t+1}/X_t) = \prod_{i=1}^n P(X_{t+1}^i | P_a(X_t^i)). \tag{5}$$

$$P(X_{1:T}^1) = \prod_{i=1}^n P_{B_0}(X_1^i | P_a(X_1^i)) \cdot \prod_{t=2}^T \prod_{i=1}^n P_{B \rightarrow}(X_t^i | P_a(X_t^i)). \tag{6}$$

2 艾尔西亚高等级公路施工进度风险评估模型

2.1 项目概况

艾尔西亚双向 4 车道施工项目是在玻利维亚 2 个大城市科恰班巴和圣克鲁斯间 4 号公路的关键部分,工程全长 30.3 km,项目计划工期从 2018 年 6 月至 2022 年 10 月,将工期平分为 10 个时间段,其工程施工进度计划如图 3 所示。

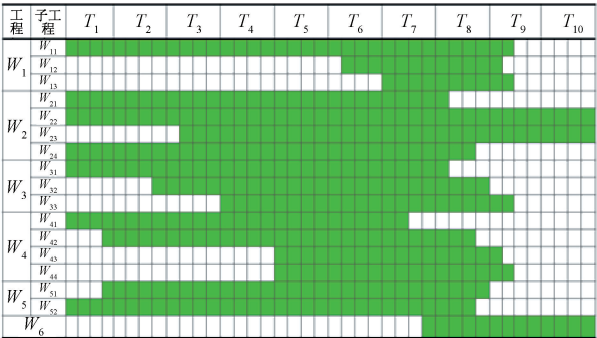


图 3 施工进度横道图

Figure 3 Bar chart of the construction progress

图 3 中 W_1 为道路工程, W_{11} 、 W_{12} 、 W_{13} 分别为路基开挖回填、基层、面层; W_2 为排水工程, W_{21} 、 W_{22} 、 W_{23} 、 W_{24} 分别为横向排水、纵向排水、加强排水、挡墙; W_3 为桥梁工程, W_{31} 、 W_{32} 、 W_{33} 分别为桩基、下部结构、上部结构和铺装; W_4 为隧洞工程, W_{41} 、 W_{42} 、 W_{43} 、 W_{44} 分别为洞口开挖及支护,隧洞开挖,隧洞路

面,排水、通风和照明; W_5 为边坡防护工程, W_{51} 和 W_{52} 分别为挡土墙和边坡排水系统; W_6 为信号标识。统计各时间段内的子工程数量(每月每项为 1 个)和雨季比例,如表 1 所示。采用层次分析法^[8,12,16]分析子工程对整体施工进度影响的权重,指标层为子工程的复杂性、重要性、施工难度,计算结果见表 2。由表 2 可知,隧道工程和桥梁工程的权重较高,排水、边坡防护和信号标志工程的权重较低。

表 1 各时间段的雨季比例和项目数

Table 1 Proportion of rainy season and number of projects in each time period		
时间段	雨季比例/%	子工程数量
T_1	0	30
T_2	75	37
T_3	100	43
T_4	0	48
T_5	75	56
T_6	100	59
T_7	0	63
T_8	75	55
T_9	100	22
T_{10}	0	12

表 2 各子工程对整体施工进度影响的权重

Table 2 Weight of the influence of each subject on the overall construction progress			
工程	工程权重	子工程	子工程权重
W_1	0.148	W_{11}	0.044
		W_{12}	0.046
		W_{13}	0.059
W_2	0.084	W_{21}	0.016
		W_{22}	0.018
		W_{23}	0.020
		W_{24}	0.250
W_3	0.213	W_{31}	0.064
		W_{32}	0.085
		W_{33}	0.068
W_4	0.383	W_{41}	0.15
		W_{42}	0.153
		W_{43}	0.038
		W_{44}	0.076
W_5	0.092	W_{51}	0.055
		W_{52}	0.037
W_6	0.080		

2.2 风险因素识别

风险因素识别是构建风险指标体系和风险评价的基础。高等级公路在施工过程中受到自然条件、施工技术、人为因素、经济因素等多方面因素的共同影响。通过查阅分析相关文献^[2,11],经 10 位专家筛

选与补充,得到艾尔西亚高等级公路施工进度滞后风险指标体系,如表 3 所示。其中,环境风险包括自然环境风险和社会环境风险。自然环境如降雨、温度、大风、滑坡等均会影响施工进度;社会环境风险包括行政干预(土地征迁、工程质量检查等)和一些突发事件。组织管理风险指建设过程中由于人员配备、信息共享、单位沟通、文化建设等因素带来的风险。经济因素也会给施工进度带来显著的影响,如原材料价格上涨、费率的变动等。

表 3 施工进度风险指标体系

Table 3 Risk index system of the construction progress		
一级指标	二级指标	指标来源
环境风险(E)	自然气候恶劣	文献[11]
	项目内部环境差	文献[11]
	行政干预	专家意见
	发生突发事件	专家意见
组织管理风险(M)	发生突发事件	专家意见
	人员配备不合理	文献[11]
	项目信息共享缺乏	文献[2]
	设计、施工单位沟通不顺畅	文献[2,11]
技术风险(T)	项目文化建设缺失	文献[11]
	勘察设计有误	文献[11]
	进度计划不合理	文献[11]
	技术应用不合理	专家意见
经济风险(F)	原材料价格上涨	专家意见
	费率变动	文献[11]
	企业融资能力弱	专家意见

2.3 施工进度动态风险评估模型

根据表 3 中的风险因素与施工进度滞后风险事件之间的因果关系,构造公路施工滞后风险的 DBN 模型。风险因素是 DBN 中最上层的父节点,施工进度滞后是 DBN 的最终节点。采用 GeNIe2.0 软件进行数据推理,首先进行 BN 推理,在此基础上结合施工进度的监测数据进行节点概率更新,通过机器学习对结果进行再次修正,实现贝叶斯理论和专家知识的相互补充,其流程如图 4 所示。

2.4 实证数据收集

根据风险矩阵理论^[15],以风险概率和严重性建立二维矩阵,将每个风险因素的状态分为高、中、低,即每个父节点都有高、中、低 3 种风险状态,并根据问卷调查结果确定每个状态的概率。同样,最终的推理结果也有 3 种状态,即工期正常、延期小于 20%、延期大于 20%。共发放 180 份问卷,回收得到 130 份有效问卷。问卷结果的 α 系数、KMO 值、Bartlett 检验结果均满足统计分析要求。

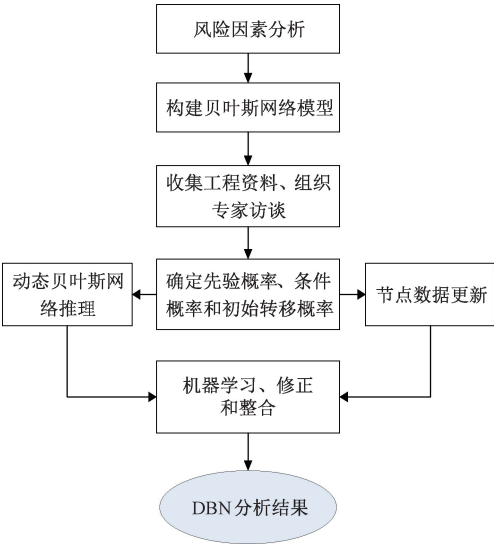


图 4 施工进度动态风险评估流程

Figure 4 Risk assessment process of construction progress

3 结果及分析

3.1 DBN 动态评估结果

将每个时间段内未完成项目的数量作为施工进度的监测数据,依次求出各节点的状态概率,输入 DBN 推理模型,结合施工进度监测数据,对 10 个时间段的先验概率进行更新,得到不同时间段公路施工滞后的概率,如图 5 所示。

由图 5 可知,艾尔西亚高等级公路施工进度滞后风险总体上呈现先增后降的趋势。各时间段工期正常的概率多数大于 60%,而工期延期大于 20% 的概率均小于 20%,说明该公路工期延误概率较小,

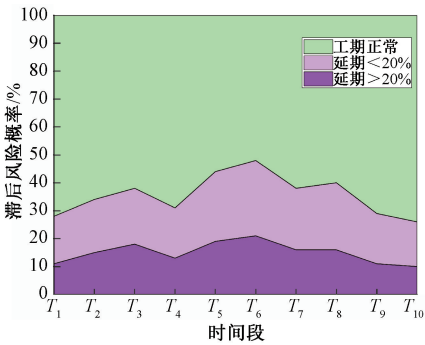


图 5 艾尔西亚公路工期滞后概率变化曲线

Figure 5 Delay probability change curve of construction progress of El Sillar highway

整体上处于可控范围。工期延期概率较大的时间段主要集中在 T_3 、 T_5 、 T_6 、 T_7 、 T_8 ,而工期延期大于 20% 的时间段进一步集中在 T_3 、 T_5 、 T_6 。这是因为 T_3 整个时间段处于雨季, T_5 时间段内子工程较多且对进度的影响较大, T_6 、 T_7 、 T_8 时间段不仅处于雨季,而且施工的子工程对进度的影响较大(表 1、表 2)。

分析风险因素发生概率的变化见图 6。 E 、 M 、 T 、 F 分别代表环境、组织管理、技术、经济风险; H 、 M 、 L 表示发生概率为高、中、低。

图 6(a)中,环境风险呈有规律的波动,即 $T_1 \sim T_4$ 、 $T_4 \sim T_7$ 、 $T_7 \sim T_{10}$ 时间段内都呈先升后降趋势。根据表 1 可知,这 3 个时间段内都经历了雨季比例从 $0 \rightarrow 75\% \rightarrow 100\% \rightarrow 0$ 的变化,降雨是环境风险的主导因素,这也验证了图 6(a)的合理性。图 6(b)和 6(c)中组织管理和技术风险的变化趋势相似,从 T_1 到 T_7 逐渐升高,从 T_7 到 T_{10} 降低。 T_1 到 T_7 到 T_{10} ,

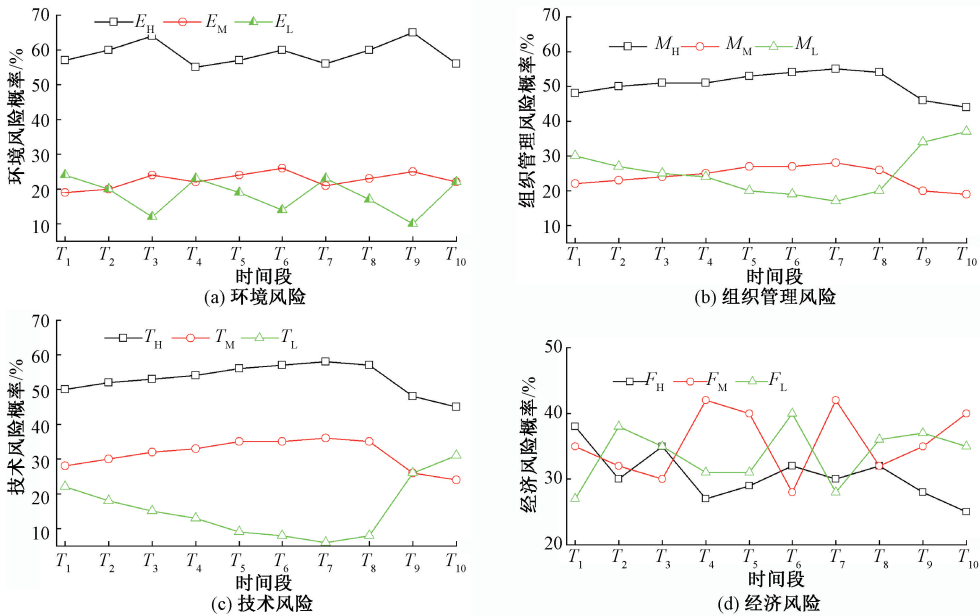


图 6 各风险事件发生概率的动态变化

Figure 6 Dynamic change of occurrence probability of each risk event

施工的子工程数从 30 个增加到 63 个,再降低到 12 个,且各子工程的权重也呈先增后降的趋势,子工程数量及其权重是影响组织管理风险和技术风险的主要因素。技术风险中包含新技术的应用,本项目的质控团队、技术工程师等大部分为当地人员,所以前期技术风险较大,随着新技术的熟练运用和项目数减少,后期的技术风险相应降低。图 6(d)中经济风险事件为高风险的概率显著低于其他事件,因为该项目是玻利维亚在建公路中投资最大的项目,受到当地行政部门的高度重视,且该项目由中国进出口银行融资支持。

3.2 DBN 与 BN 结果对比

根据 3.1 节推理结果,DBN 与 BN 的预测结果

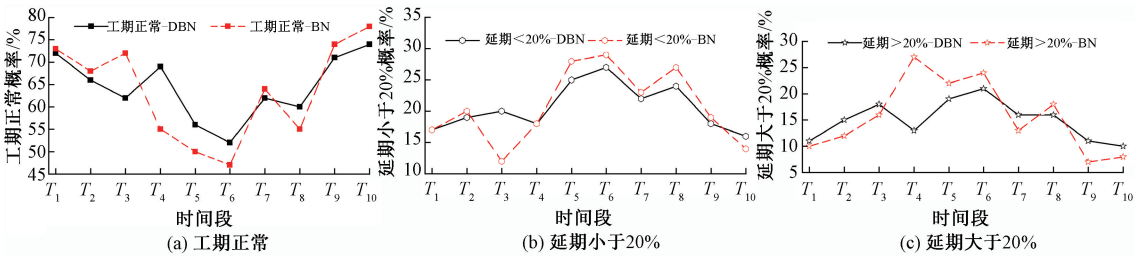


图 7 DBN 和 BN 评估结果对比

Figure 7 Comparison of assessment results of DBN and BN

4 结论

(1)该公路在各时间段能够按期完工的概率在 60%左右,延期风险呈先升后降的趋势;4 个风险因素发生的概率大小依次为环境风险>技术风险>组织管理风险>经济风险。相比于 BN 模型,DBN 模型不会因某一时间段的数据缺失或错误而使计算结果出现较大偏差,便于管理人员及时全面地掌握公路施工过程中的进度风险情况。

(2)在 4 个风险事件中,环境风险最大,因为项目所在地的年均降雨天数为 295 d,降雨给施工进度带来了较大的风险。因此,施工单位应加强雨季施工培训,以提高应对施工滞后风险的能力。组织管理风险属于相对可控因素,应加强对突发事件的应急措施管理,以保障施工的正常进行。技术风险也属于相对可控风险因素,降低技术风险需要加强技术培训,同时加强我国工程师与当地工程师的沟通协调。经济风险处于高风险状态的概率较低且平稳,但仍要时刻注意国际经济形势,降低施工中的经济风险。

参考文献:

[1] 王首绪,谢剑. 基于风险传播的高速公路项群风险评价[J]. 公路, 2016, 61(8): 151-156.

对比见图 7。由图 7 可知,BN 推理得出的工期正常、延期小于 20%、延期大于 20%的概率分别在 [47%,78%]、[12%,29%]、[7%,27%],而 DBN 推理结果分别在 [52%,74%]、[16%,25%]、[10%,21%],两者的变化趋势一致,但 BN 推理结果的波动较大。这是因为 BN 需要在每个时间段内都对父节点的先验概率进行重新评估,而 DBN 能够根据前一时刻的结果进行整合并反映到新的时刻,在某一时刻不会因数据缺失或错误而使结果出现较大偏差。此外,DBN 可避免重复的节点概率评估和计算,从而提高对施工进度滞后风险预测的效率。

WANG S X, XIE J. Risk assessment of expressway project group based on risk transmission [J]. Highways, 2016, 61(8): 151-156.
[2] 白礼彪,张璐瑶,孙怡晨,等. 公路工程项目组合施工进度风险防范策略[J]. 中国公路学报, 2021, 34(9): 203-214.
BAI L B, ZHANG L Y, SUN Y C, et al. Prevention strategy of highway project portfolio construction schedule risk[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(9): 203-214.
[3] HATEFI S M, TAMOSAITIENE J. An integrated fuzzy dematel-fuzzy anp model for evaluating construction projects by considering interrelationships among risk factors [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 25(2): 114-131.
[4] 戴幼学. Y 高速公路建设项目风险分析和控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
DAI Y X. Research on risk analysis and control of Y expressway construction project [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
[5] 王张军,顾伟红,李健强. 基于 WSR-GCM 的地铁 TBM 施工进度风险评价[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(9): 127-132.
WANG Z J, GU W H, LI J Q. Risk assessment of TBM construction schedule based on WSR-GCE [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(9): 127-132.
[6] 蒋慧杰,吴慧博,夏立明,等. 高速公路施工进度风

- 险评价[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2012, 18(2): 87-93.
- JIANG H J, WU H B, XIA L M, et al. The application of CPA and fuzzy probability analysis on risk evaluation of highway construction schedule[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2012, 18(2): 87-93.
- [7] 张定邦, 张航, 袁建议, 等. 西北地区公路工程建设项目延误原因分析[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(2): 95-100, 109.
- ZHANG D B, ZHANG H, YUAN J Y, et al. Cause analysis of road engineering construction project in northwest China[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(2): 95-100, 109.
- [8] HYUN K C, MIN S, CHOI H, et al. Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 121-129.
- [9] MAHAMID I, BRULAND A, DMAIDI N. Causes of delay in road construction projects[J]. Journal of Management in Engineering, 2012, 28(3): 300-310.
- [10] MOGHAYEDI A, WINDAPO A. Key uncertainty events impacting on the completion time of highway construction projects[J]. Frontiers of Engineering Management, 2019, 6(2): 275-298.
- [11] 何清华, 杨德磊, 罗岚, 等. 基于贝叶斯网络的大型复杂工程项目群进度风险分析[J]. 软科学, 2016, 30(4): 120-126, 139.
- HE Q H, YANG D L, LUO L, et al. Research of large scale and complex construction programs' schedule risk based on Bayesian network[J]. Soft Science, 2016, 30(4): 120-126, 139.
- [12] 葛巍, 焦余铁, 洪辛茜, 等. 基于 AHP-BN 法的溃坝生命损失风险评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(3): 8-12.
- GE W, JIAO Y T, HONG X Q, et al. Risk assessment of life loss caused by dam breach based on AHP-BN method[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(3): 8-12.
- [13] 陈远, 金蕊, 查亚闯. 基于贝叶斯网络的大型公共项目进度延误风险研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(2): 91-97.
- CHEN Y, JIN R, ZHA Y C. Research on delay risk of large complex public projects based on Bayesian network[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(2): 91-97.
- [14] 孙开畅, 李权, 徐小峰, 等. 施工高危作业人因风险分析动态贝叶斯网络的应用[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 28-35.
- SUN K C, LI Q, XU X F, et al. Risk analysis on human factors in operation of high risk construction based on dynamic Bayesian network[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 28-35.
- [15] LUU V T, KIM S Y, TUAN N V, et al. Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks[J]. International Journal of Project Management, 2009, 27(1): 39-50.
- [16] 李宗坤, 王特, 葛巍, 等. 基于 WBS-RBS 和 AHP 的港珠澳大桥人工岛建设风险分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(3): 62-66.
- LI Z K, WANG T, GE W, et al. Risk analysis of artificial island construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge based on WBS-RBS and AHP methods[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(3): 62-66.

Construction Progress Risk Assessment of El Sillar Highway Based on DBN

ZHANG Hua^{1,2}, PENG Zhaohui³, ZHANG Qiang³, MA Mengmeng³, WANG Yawei³, LI Zongkun^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Traditional Bayesian network (BN) method was difficult to ensure the dynamic assessment of construction progress risk, on the basis of analyzing the risk sources of construction progress lag, the time factor was introduced to horizontally expand the Bayesian network into a dynamic Bayesian network (DBN) with multiple time periods, and the construction progress risk was dynamically assessed in combination with the construction progress monitoring data. El Sillar highway project was taken as an example to verify the rationality of the method. The results showed that the construction progress risk of the El Sillar Highway Project was controllable as a whole, and the probability of completion in each period was about 60%. The risk of delay showed a trend of increasing first and then decreasing. The main factor causing the delay of the construction period was the environmental risk, the DBN model could consider the dynamics of risk factors, so it was superior to the static model. The dynamic risk analysis of highway construction progress based on DBN could provide reference for similar projects.

Keywords: El Sillar highway; progress risk; dynamic Bayesian network; progress monitoring data