

# 基于贝叶斯网络的大型复杂工程项目群进度风险分析

何清华<sup>1</sup> 杨德磊<sup>1</sup> 罗 岚<sup>2</sup> 马 亮<sup>3</sup> 李 丽<sup>1</sup>

(1. 同济大学 经济与管理学院; 复杂工程管理研究院, 上海 200092;

2. 南昌大学 建筑工程学院, 南昌 330031; 3. 上海大学 管理学院, 上海 200444)

**摘要:** 在项目群风险因素体系的基础上提炼了大型复杂工程项目群进度风险因素, 基于 113 份调查问卷和实例, 构建并验证了贝叶斯网络模型, 运用其学习、推理功能, 识别出大型复杂工程项目群进度风险的关键敏感因素和最大致因链, 进行进度滞后推理预测, 据此提出了大型复杂工程项目群进度风险管理的策略建议。

**关键词:** 大型复杂工程项目群; 进度风险; 贝叶斯网络

**DOI:** 10.13956/j.ss.1001-8409.2016.04.26

中图分类号: F062.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-8409(2016)04-0120-07

## Research of Large Scale and Complex Construction Programs' Schedule Risk Based on Bayesian Network

HE Qing-hua<sup>1</sup>, YANG De-Jei<sup>1</sup>, LUO Lan<sup>2</sup>, MA Liang<sup>3</sup>, LI Li<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Complex Engineering & Management, School of Economics and Management, Tongji University,

Shanghai 200092; 2. School of Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031;

3. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444)

**Abstract:** Based on the whole program risk factors system, this paper proposed the schedule risk factors of large scale and complexity construction program, 113 questionnaires and a case are collected to build and test Bayesian network that could identify key sensitivity factor and the biggest caucuses chain by learning and reasoning function, and then it forecasts the degree of schedule lag. Some strategies are proposed for large scale and complexity construction program.

**Key words:** large scale and complex construction program; schedule risk; bayesian network

我国新型城镇化的发展带动了大型复杂工程项目群的急剧增加, 这类项目投资规模大、建设周期长、未知风险多、复杂性高<sup>[1]</sup>, 进度目标的实现具有比一般项目更高的风险, 平均延迟率约为 20%, 而进度是很多大型复杂工程的首要目标<sup>[2]</sup>。因此, 如何识别影响工期的关键风险, 预测计划工期实现的可能性是项目群管理的关键内容。

美国麻省理工学院斯隆商学院 2007 年开展的大型复杂建设工程管理研究课题基于不确定性和风险提出了项目群管理策略, 是国外较早的项目群风险研究<sup>[1]</sup>。后来, 部分学者开始关注项目群的总体投资失控<sup>[3-5]</sup>等风险因素。国内研究主要关注项目群的组织集成与管理协同、社

会影响、利益相关者管理、管理模式、进度总控、质量、信息化等方面<sup>[1, 6-9]</sup>; 关于项目群风险研究, 主要从宏观视角关注影响项目整体的风险因素<sup>[10-12]</sup>。因此, 目前学者们关于进度风险的研究集中在一般项目管理领域, 大型复杂工程项目群进度风险管理研究尚处于起步阶段, 并未形成完整的风险管理体系, 更缺乏有针对性的量化研究。

鉴于此, 考虑到大型复杂工程的独特性, 本文选择适用于小样本的贝叶斯网络方法开展项目群的进度风险研究。首先, 基于专家访谈和文献梳理, 构建了大型复杂工程项目群的进度风险因素体系; 其次, 运用贝叶斯网络的学习、推理功能, 识别出项目群进度风险的关键敏感因素及最大致

收稿日期: 2015-08-30

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(71390523); 国家自然科学基金面上项目(71571137)

作者简介: 何清华(1971-), 男, 浙江东阳人, 博士、教授, 研究方向为复杂建设项目管理; 杨德磊(1982-), 女, 河南南阳人, 博士研究生, 研究方向为建设项目组织管理(通讯作者); 罗 岚(1986-), 女, 四川广元人, 博士、讲师, 研究方向为复杂项目管理; 马 亮(1984-), 男, 甘肃陇西人, 博士、讲师, 研究方向为复杂项目群组织管理; 李 丽(1990-), 女, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 研究方向为项目管理。

因链,对进度滞后程度进行推理预测;最后,通过南宁火车东站项目群的实例验证了贝叶斯网络的科学性与合理性,并提出了大型复杂工程项目群进度风险管理的策略建议。

### 1 大型复杂工程项目群初始风险因素识别

本文选用的研究方法是适用于解决数据不完备研究问题并可进行相对可靠预测的贝叶斯网络方法<sup>[13]</sup>。首先,通过文献 Kim 等<sup>[14]</sup>和 Taroun<sup>[15]</sup>对一般项目风险因素的分类和分析,得到较为初步的工程项目群整体风险因素,作为大型复杂工程进度风险识别的基础。然后,选取了10位参与过或正在参与大型复杂工程项目群建设且是该领域内知名学者的专家进行开放式访谈,访谈问题包括:(1)大型复杂工程项目群风险因素与一般工程风险因素的区别;(2)大型复杂工程项目群进度风险因素与其他风险因素的区别;(3)大型复杂工程项目群进度风险管理与控制的重点。同时,邀请各位专家对项目群整体风险因素中的进度风险按照李克特5分量表进行打分。

根据访谈结果,专家们较为一致认同的观点有:(1)大型复杂工程项目群风险具有非叠加性,项目群是由多个具有相互联系的子项目组成,项目群的风险因素由子项目的风险因素组成,但并非子项目风险因素的线性叠加,比子项目风险管理更加宏观和战略化;(2)大型复杂工程项目群进度风险比质量、成本风险等其他风险更能体现风险的层次性、传播性、隐藏性和高发性;(3)大型复杂工程项目群界面关系协调是进度风险管理的关键。基于以上观点及 Kim 等<sup>[14]</sup>与 Taroun<sup>[15]</sup>的建设项目风险分类方法,形成首次调整后的项目群进度风险因素识别体系,并结合访谈中专家的打分结果进行修正,最终得到项目群进度风险因素体系为调研问卷的问项,如表1所示。

表1 大型复杂工程项目群进度风险因素体系

分类	风险因素
环境风险	自然环境因素(气候)、政治因素(政府干预)、资金因素(业主融资)等外部环境以及合格的施工场地未及时移交或移交后不符合施工条件,以及子项目共用施工道路不畅通等内部环境风险
技术风险	勘查结果有误、勘察设计进度滞后、设计文件有误、设计变更频繁等勘察设计风险,进度目标规划不合理、总进度计划体系编制不合理、子项目内部施工组织安排不合理、项目间交叉施工组织及实施不合理、项目群进度检查与控制过程不力等实施风险
项目主体特征风险	政府审批程序冗杂、效率低下,征拆工作效率较低、业主项目群管理经验与水平不高、设计单位经验缺乏、施工单位管理和技术水平不高、监理单位现场监理能力和责任心缺乏
组织、管理风险	项目群组织结构及人员配备不合理、群信息集成平台不完善、各项目设计单位间缺乏沟通协作、各项目建设单位间缺乏沟通协作、项目群文化建设缺失
结构风险	项目数量及类型较多;子项目间关系复杂,项目间交叉施工较多

## 2 基于贝叶斯网络的大型复杂工程项目群进度风险建模

### 2.1 贝叶斯网络构建方法选择

贝叶斯网络(Bayesian Network)是一种使用概率统计对复杂不确定性问题进行推理和数据分析的方法<sup>[16]</sup>。该方法可以用主观方法有效地确定变量之间的关系,同时通

过实证数据对网络结构进行参数学习,降低参数的主观性。有效的结构学习方法是构建最优网络结构的关键。贝叶斯网络结构学习方法分为3类<sup>[17]</sup>:一是结合相关领域的专家经验和实地调研数据,确定贝叶斯网络结构;二是在软件中通过对大样本数据的训练,自动获得贝叶斯网络;三是在大样本的条件下,采用专家知识确定节点序列,使用 Matlab 编程和特定算法进行贝叶斯网络结构学习,确定最终的网络结构。基于样本数量限制和研究对象的特点,本文选用采用前文的专家访谈与问卷调研相结合的方法进行模型构建。

### 2.2 实证数据收集

本文采用滚雪球式的调研方法,问卷问项均为李克特5分量表,在2014年12月至2015年1月期间共发放156份,回收136份,回收率87%。剔除无效问卷,共得到113份有效问卷。使用 SPSS17.0 统计软件,对问卷进行数据统计分析, $\alpha$ 系数为0.927,大于0.9,表明本问卷的内在信度合理;KMO 值为0.712,大于0.7,说明因子分析的效度较好,Bartlett 检验结果  $p < 0.001$ ,达到显著水平,说明效度较好,可以进行因子分析。因此,本问卷是可信的,满足统计分析要求。

### 2.3 大型复杂工程项目群进度风险贝叶斯网络模型

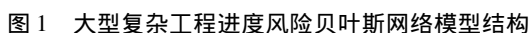
根据文献分析、专家访谈、实地调查的结果,确定网络结构中的父、子节点,分析贝叶斯网络中进度风险因素之间的因果关系,如业主项目群管理经验与水平→项目群管理的组织架构与人员配备不合理;项目群文化建设缺失→各项目建设单位间缺乏沟通协作,关系紧张;设计单位水平与经验不足→设计文件有误;项目群信息集成平台不完善→各项目建设单位间缺乏沟通协作,关系紧张;项目群总进度计划不合理→进度检查与控制过程不力等,共构建了31组因果关系。贝叶斯网络中风险因素间的相互关系,本文通过上述专家访谈结果及研究团队的工程经验来进行关联,由此初步得到大型复杂工程进度风险贝叶斯网络结构,如图1。

## 3 基于贝叶斯网络的大型复杂工程项目群关键风险因素推理分析

首先对问卷数据进行预处理。根据风险矩阵思想<sup>[14]</sup>,分别以风险因素可能造成影响的严重性及风险发生的概率建立二维矩阵,得出低、中、高3类风险,分别记为 R1、R2 和 R3,表示风险因素的严重程度,对数据进行风险等级规范化处理。其中,以0~4从低到高表示风险发生概率和各风险因素发生后造成进度滞后程度的5个等级,分别表示进度“不延迟”“延迟小于10%”“延迟10%~20%”“延迟20%~50%”“延迟大于50%”。

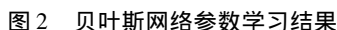
### 3.1 参数学习

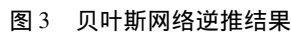
本文选用 GeNie2.0 软件来进行贝叶斯网络模型的推理分析。根据图1,使用经过预处理的数据进行贝叶斯网络模型的参数学习,以获得各个节点变量的条件概率分布。按照风险因素的评估等级分 R1、R2、R3 三个级别,对应每个节点变量的有3个状态,High 对应 R3,Medium 对应 R2,



### 3.2 逆向推理

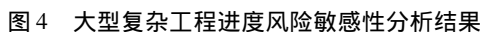
20% 的事件时,贝叶斯网络中的关键风险因素,得出图 3。可知,当将“进度滞后”节点的进度延迟程度大于 20% 的可能性设置为 100% 时,风险最高的 3 个事件为合格的施工场地未按时移交、项目间交叉施工组织及实施不善、项目群管理的组织架构与人员配备不合理,即当这 3 个事件中的一件或多件发生的时候,项目工期延迟程度大于 20% 的可能性较大。





响程度,帮助决策者主动采取应对措施,提前避免或最大程度减少进度滞后的发生<sup>[16]</sup>。图4为大型复杂工程项目

程度减少进度滞后的发生<sup>[16]</sup>。图4为大型复杂工程项目



群进度风险的贝叶斯网络模型敏感性分析结果,图中标注灰色的节点变量为造成进度延迟的敏感因素,包括项目群信息集成平台不完善、文化建设缺失、总进度计划不合理、组织架构与人员配备不合理、进度检查与控制过程不力、各项目建设单位间缺乏沟通协作并关系紧张、设计单位间缺乏沟通协作、项目间交叉施工安排不合理、各项目共用施工便道不畅通、设计文件有误、设计变更频繁、合格的施工场地未能按时移交等。以上节点的小幅变化可能对工程项目的进度滞后造成很大的影响,因此需要对这些敏感因素进行重点控制与管理,以提高工程的抗风险能力。

### 3.4 最大致因链分析

设定进度延迟的状态为100%,得到图5的分析结果,图中加粗的链路即为最大致因链,即业主项目群管理经验与水平不高、征地拆迁工作效率低是进度滞后的最大致因源头,而这两者导致的合格施工场地移交滞后、项目群文化建设缺失、项目群信息集成平台不完善、各项目建设单位间缺乏沟通协作且关系紧张、项目间交叉施工及实施不合理等构成致因链上的节点,是导致项目群进度滞后的重要因素,因此在对项目群进度进行管理时,应对这些因素进行重点管控。

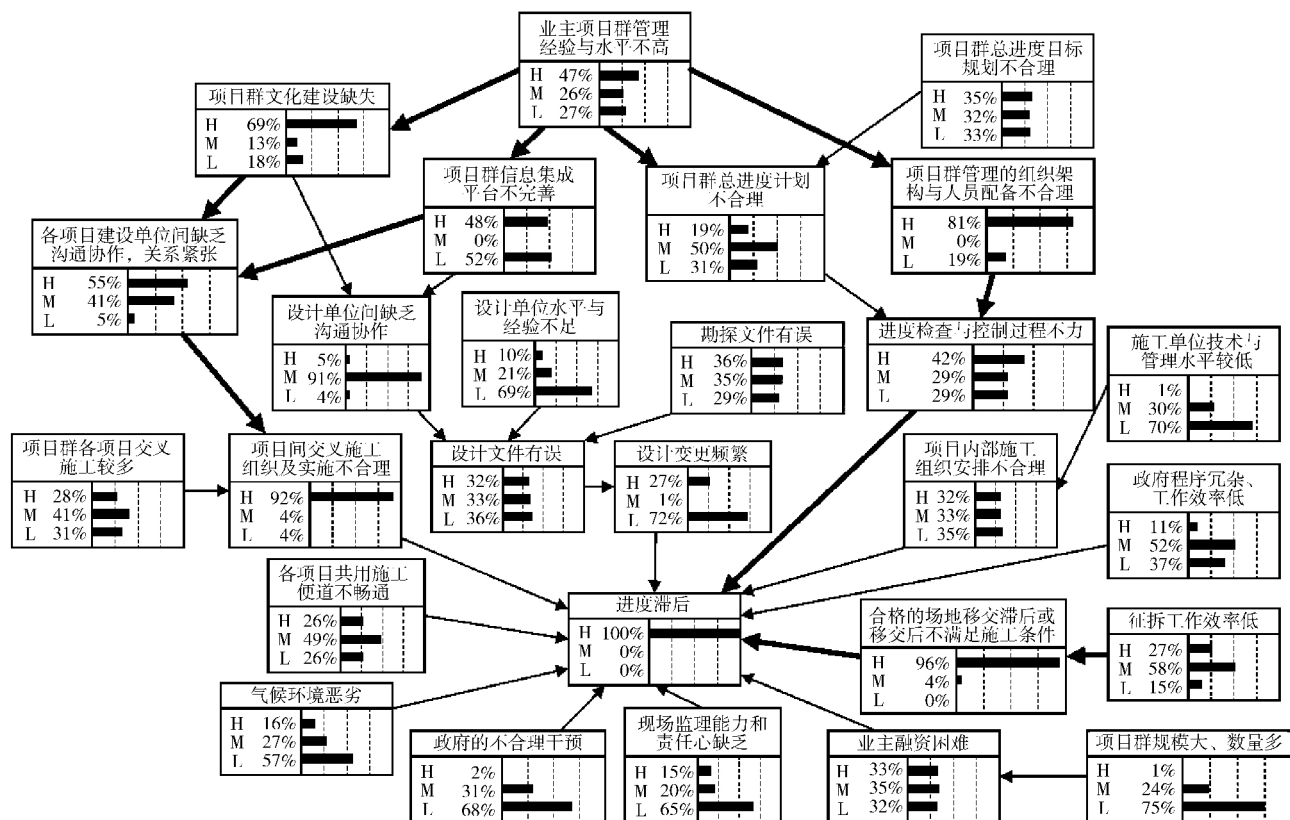


图5 大型复杂工程进度风险的最大致因链分析

根据大型复杂工程项目群贝叶斯进度风险模型的逆向推理、敏感性分析和最大致因链分析可知,合格的施工场地未按时移交、项目间交叉施工组织及实施不合理、项目群管理的组织架构与人员配备不合理3个因素为关键风险因素,因此在进行项目群进度管理的过程中需进行重点关注;业主项目群管理经验与水平不高、征地拆迁工作效率低2个因素为进度滞后的最大致因源头,若对这两个风险因素进行重点控制与管理,则可以从源头上切断风险链,最大限度减少进度延迟风险的发生。

### 4 实证分析

南宁火车东站项目群占地2.59平方千米,总投资约139亿元,包括轨道交通、长途客运站、公路、桥梁等19个项目,是迄今为止最为复杂的政府性大型基础设施项

目群,定于2014年12月28日建成并投入使用。本文首先将该项目群进度风险因素进行风险等级规范化处理,见表2。将表2结果导入贝叶斯网络模型,展开定量分析,运行结果如图6。

可看出,征地效率低、合格的施工场地未按时移交、项目间交叉施工较多且组织及实施不合理、气候环境恶劣等因素是关键风险因素(见“△”标识)。这主要是由于该项目引入了第三方项目管理团队进行组织设计与实施,使“项目群管理的组织架构与人员配备不合理”“业主项目群管理经验与水平不高”等主观方面风险较低,而由于南宁特定的气候条件给项目建设进度安排带来了很大不便,成为影响进度的关键因素之一。这一结果与贝叶斯网络模型的敏感性分析与最大致因链分析结果基本上吻合。

表2 南宁火车东站项目群进度风险因素分析

南宁火车东站项目群 风险类别		风险因素描述	风险评价		
			High	Medium	Low
环境风险因素					
气候环境恶劣	该市每年 3 月份到 9 月份为雨季 ,对于工程土方、基坑工程、混凝土浇筑、防水工程造成一定的影响		△		
业主融资困难	项目总投资 139 亿 ,得到市政府、市财政局和市土储中心等单位的支持 ,资金问题可控				△
合格的实施场地未能按时移交	那廖村、未成年管教所、汽车城等共 3886 亩待征拆土地; 地下有各种水管、输油管线、电缆 ,地上架设有 多条高压线; 需拆除正在运营使用的湘桂便线铁路和高速公路 ,涉及多个交通部门		△		
各项目共用施工便道不畅通	项目分布较为紧凑 ,多个项目施工车辆共用一条施工道路 ,面临施工便道的修建、维护、使用等问题				△
技术风险因素					
设计文件有误	设计单位水平及经验丰富 ,且设计信息流通顺畅				△
设计变更频繁	部分项目设计文件有误导致设计变更频繁 ,政府审批程序冗杂				△
项目群总进度计划不合理	根据项目群进度管理层级编制项目群总进度计划体系 ,并根据实际情况进行动态调整				△
项目群总进度目标规划不合理	市委、市政府所下达的东站运行任务期限 ,由总体项目咨询单位及各方深入研究得到				△
各项目内部施工组织安排不合理	在各施工单位的合理组织下 ,各项目内部施工安排合理				△
项目间交叉施工组织安排及实施不合理	因各项目建设单位间缺乏沟通协作 ,交叉施工的组织安排及实施存在一定风险		△		
进度检查与控制过程不力	指挥部派专人对各项目的进度每日例行检查 ,对进度滞后的情况缺乏有力的整改措施与手段		△		
项目主体特征风险					
政府审批程序冗杂、工作效率低	各项目前期文件审批工作程序冗杂 ,工作效率低 ,前期工作进度滞缓 ,拆除手续繁杂		△		
政府对工程的不合理干预	政府主导项目 ,多个环节存在政府干预 ,政府部门专业水平一般				△
征拆工作效率低	那廖村、烈士陵园、未成年管教所、超越汽车城等共 3886 亩待征拆土地 ,且征拆难度大		△		
项目群管理水平低	项目部成立现场建设指挥部 ,并聘请了国内一流的项目管理公司				△
设计单位水平与经验不足	设计单位为上海市政设计院、中铁工程设计院等 ,均具有丰富的市政、房建工程设计经验				△
施工单位技术与管理水平较低	施工单位为中铁隧道局、中铁五局、中建八局、广西荣和市政等 ,具有丰富的市政、房建工程经验				△
现场监理能力和责任心缺乏	监理单位为上海建科工程咨询有限公司、甘肃铁一院、广西恒基建设工程咨询有限公司等 ,经验丰富				△
组织管理风险					
项目群管理组织架构不合理	采用矩阵型组织结构 ,可以实现灵活、快速反应 ,职权分明、资源分配合理				△
项目群信息集成平台不合理或不完善	建立了以指挥部为中心的人工信息集成平台 ,从指挥部到各个施工单位均设置专门的信息专员				△
各项目建设单位间缺乏沟通协作	在指挥部的协调下 ,各项目建设单位间基本实现沟通顺畅				△
各设计单位间缺乏沟通协作	项目初期忽略了设计单位间的沟通协调 ,部分相互交叉的项目设计文件存在错误 ,需进行设计变更				△
项目群组织文化建设缺失	举办各种劳动竞赛、节假日活动、关键工程节点誓师大会、工程封顶庆功等文化建设活动				△
项目群结构风险					
项目群规模大、数量多	占地 2. 98 平方千米 ,包括轨道交通、长途客运站、公路、桥梁、地下空间、地面广场等 19 个项目	△			
子项目交叉施工较多	各个项目分布紧凑 ,在水平和垂直两个方向上均存在较多交叉施工 ,影响部分项目的正常实施	△			

注: △表示存在对应的风险状态

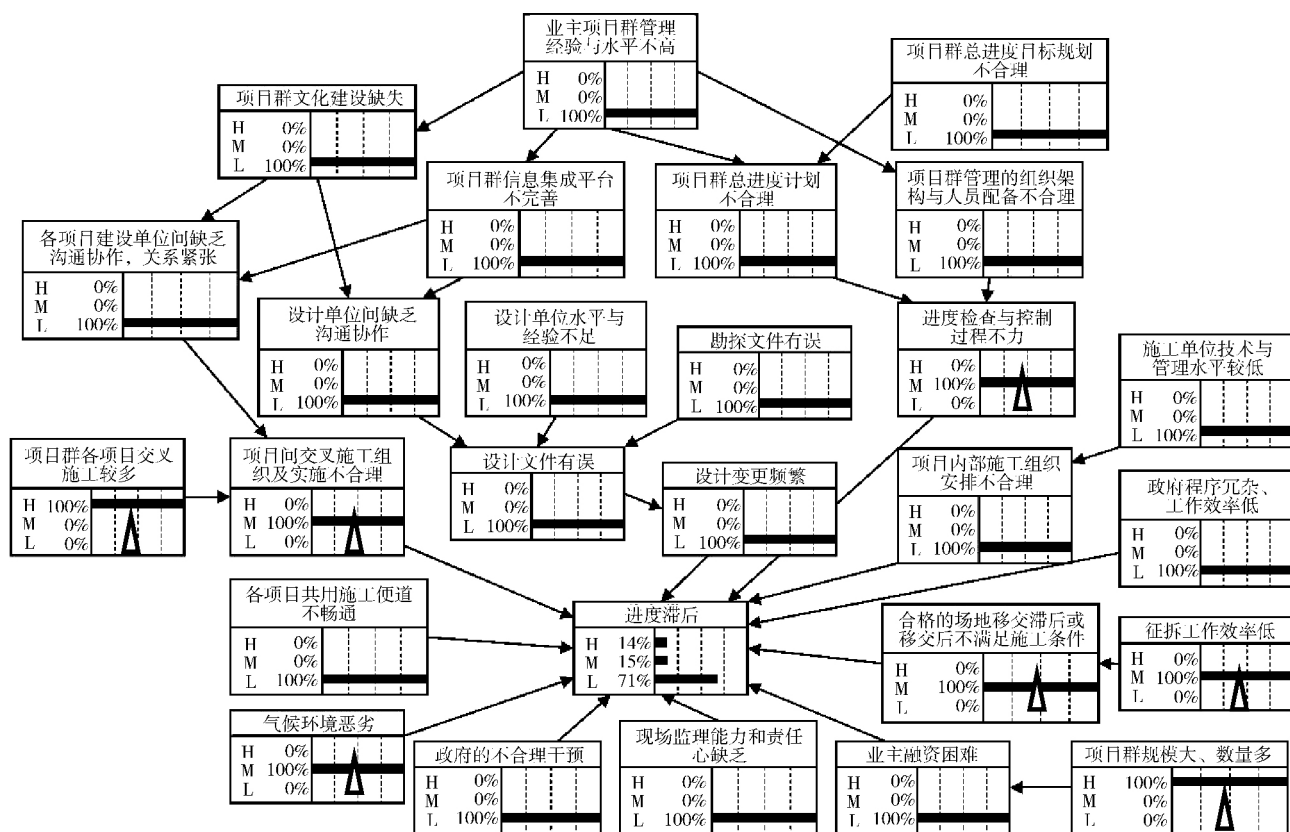


图6 南宁火车站项目群进度风险贝叶斯网络

该项目群原计划工期是24个月,根据贝叶斯网络计算概率结果对该项目群进度风险分析,见表3。

表3 南宁火车站项目群进度风险分析

进度超期的程度	进度超期的概率	进度超期值
小于10%	71%	小于2.4个月
10%~20%	15%	2.4~4.8个月
大于20%	14%	大于4.8个月

实际上,截至2014年12月28日,该火车站虽然实现了通车,但仅有凤凰岭路主线桥、快速集散系统B区、C区、站北二路、站南一路、南北广场建成投入使用,整个项目群在2015年2月6日才得以完工。因此,实际工期为25.3个月,比原计划延迟了1.3个月,与贝叶斯网络预测该项目有71%的概率延期不超过2.4个月的结果相符<sup>[14]</sup>。

## 5 研究结论

本文基于实证数据和实例,采用贝叶斯网网络的参数学习、逆向推理等功能构建了大型复杂工程项目群进度风险因素模型,识别了进度滞后的敏感性因素与最大致因链,为大型复杂工程进度风险管理提供了可操作性的参考依据。结果表明:(1)征地拆迁等前期因素对进度风险具有决定性影响,建设单位需要尽最大努力缩短前期各环节的时间消耗,为建设阶段争取更多的时间;(2)项目群组织管理水平、文化建设等软性因素是进行大型基础设施项目群进度控制的关键,而提高总承包单位的施工组织能力则可大大降低进度失控的风险;(3)大型基础设施项目群

业主多为一次性业主,实例中进度风险分析表明,引入第三方项目管理团队可以大大改善“业主项目群管理经验与水平不高”这一关键源头,降低主观因素导致的进度风险。本文并未对进度风险因素对大型复杂工程项目群进度滞后的影响机制进行深入研究,如将工作节点、时间节点等引入到贝叶斯网络中,将更加具有理论和实践意义。

## 参考文献:

- [1] 何清华,罗岚.大型复杂工程项目群管理协同与组织集成[M].科学出版社,北京,2014.
- [2] Assaf S A, Al-Hejji S. Causes of Delay in Large Construction Projects [J]. International Journal of Project Management, 2006, 24 (4): 349-357.
- [3] Khodakarami V, Abdi A. Project Cost Risk Analysis: A Bayesian Networks Approach for Modeling Dependencies between Cost Items [J]. International Journal of Project Management, 2014, 32 (7): 1233-1245.
- [4] Gündüz M, Nielsen Y, Özdemir M. Quantification of Delay Factors Using the Relative Importance Index Method for Construction Projects in Turkey [J]. Journal of Management in Engineering, 2012, 29 (2): 133-139.
- [5] Musabbir S R, Hadiuzzaman M, Rahman M M, et al. Innovative Risk Aperture Manipulation Model for Risk Management in Mega Project Construction [J]. TTEA (2015) 1-14 © STM Journals, 2015.
- [6] 马国丰,尤建新.关键链项目群进度管理的定量分析[J].系统工程理论与实践, 2007, 27 (9): 54-60. (下转第139页)

表5 NSGAII 不同条件下的最优解

	目标值 1( min)	目标值 2( 元)	目标值 3	开放供应点	开放配送中心	启用车辆
$S_1$	2698	1338590	3. 56	40 , 43	37 , 38 , 39	1 , 3 , 4 , 6 , 7 , 8 , 9 , 10
$S_2$	2698	1338590	3. 56	40 , 43	37 , 38 , 39	1 , 3 , 4 , 6 , 7 , 8 , 9 , 10
$S_3$	3250	1609970	5. 18	40 , 43	36 , 38 , 39	1 , 2 , 3 , 4 , 6 , 7 , 8 , 9 , 10

## 参考文献:

- [1] Afshar A , Haghani A. Modeling Integrated Supply Chain Logistics in Real - time Large - scale Disaster Relief Operations[J]. Socio - Economic Planning Sciences , 2012 , 46( 4) : 327 - 338.
- [2] Yi W , Ozdamar L. A Dynamic Logistics Coordination Model for Evacuation and Support in Disaster Response Activities[J]. European Journal of Operational Research , 2007 , 179( 3) : 1177 - 1193.
- [3] 王绍仁 , 马祖军. 震害紧急响应阶段应急物流系统中的 LRP [J]. 系统工程理论与实践 , 2011 , 31( 8) : 1497 - 1507.
- [4] Ozdamar L , Demir O. A Hierarchical Clustering and Routing Procedure for Large Scale Disaster Relief Logistics Planning [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review , 2012 , 48( 3) : 591 - 602.
- [5] Najafi M , Eshghi K , Dullaert W. A Multi - objective Robust Optimization Model for Logistics Planning in the Earthquake Response Phase[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review , 2013 , 49( 1) : 217 - 249.
- [6] 陈刚 , 张锦 , 付江月. 应急物资保障系统模糊多目标 LARP 研究[J]. 交通运输系统工程与信息 , 2014 , 14( 4) : 160 - 167.
- [7] Barbarosoglu G , Ozdamar L , Cevik A. An Interactive Approach for Hierarchical Analysis of Helicopter Logistics in Disaster Relief[J]. European Journal of Operational Research , 2002 , 140( 1) : 118 - 133.
- [8] 王恪铭 , 马祖军 , 周愉峰. 突发事件应急血液调剂问题的两阶段决策方法[J]. 交通运输系统工程与信息 , 2013 , 13( 1) : 169 - 178.
- [9] Rath S , Gutjahr W. A Math - heuristic for the Warehouse Location - routing Problem in Disaster Relief[J]. Computers & Operations Research , 2014 , 42: 25 - 39.
- [10] Abounacer R , Rekik M , Renaud J. An Exact Solution Approach for Multi - objective Location - transportation Problem for Disaster Response[J]. Computers & Operations Research , 2014 , 41: 83 - 93.
- [11] Chang F S , Wu J S , Lee C N , et al. Greedy - search - based Multi - objective Genetic Algorithm for Emergency Logistics Scheduling[J]. Expert Systems with Applications , 2014 , 41( 6) : 2947 - 2956.
- [12] Wang H , Du L , Ma S. Multi - objective Open Location - routing Model with Split Delivery for Optimized Relief Distribution in Post - earthquake[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review , 2014 , 69: 160 - 179.
- [13] Deb K , Pratap A , Agarwal S , et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA - II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation , 2002 , 6( 2) : 182 - 197.
- [14] 卫田 , 范文慧. 基于 NSGAII 的物流配送中车辆路径问题研究[J]. 计算机集成制造系统 , 2008 , 14( 4) : 778 - 784.
- [15] 付德强 , 张伟 , 吴先锋 , 等. 基于 NSGA - II 的灾害随机环境下应急储备库多目标选址决策模型研究[J]. 软科学 , 2013 , 27( 11) : 48 - 52.
- [16] Collette Y , Siarry P. Three New Metrics to Measure the Convergence of Metaheuristics towards the Pareto Frontier and the Aesthetic of A Set Solutions in Biobjective Optimization[J]. Computers & Operations Research , 2005 , 32( 4) : 773 - 792.

( 责任编辑: 石琳娜)

## ( 上接第 126 页)

- [7] Yu C , Sheng L , Yun L. Integration Management Framework of Large Complex Project Funded by Government[J]. Journal of Engineering Management , 2012 , 5: 013.
- [8] 乐云 , 蒋卫平. 大型复杂群体项目系统性控制五大关键技术——项目管理方法的拓展与创新[J]. 项目管理技术 , 2010 , 1: 36 - 38.
- [9] 程玉 , 韩建军. 基于 3G 网络的大型复杂工程进度信息管理研究浅议[J]. 建筑经济 , 2013 ( 4) : 102 - 104.
- [10] 杨建平 , 杜端甫. 重大工程项目风险管理中的综合集成方法[J]. 中国管理科学 , 1996 , 4( 4) : 24 - 28.
- [11] 雷丽彩 , 周晶. 基于全生命周期集成的大型工程项目风险控制模型[J]. 软科学 , 2011 , 25( 10) : 27 - 31.
- [12] 高武 , 洪开荣. 基于行为博弈的特大型工程项目复杂风险组合性均衡评价[J]. 江南大学学报: 人文社会科学版 , 2014 , 13( 5) : 73 - 77.
- [13] 齐佳音 , 马君 , 肖丽妍 , 等. 考虑客户风险修正的客户终生价值建模[J]. 管理工程学报 , 2015 , 2: 016.
- [14] Kim S Y , Van Tuan N , Ogunlana S O. Quantifying Schedule Risk in Construction Projects Using Bayesian Belief Networks[J]. International Journal of Project Management , 2009 , 27( 1) : 39 - 50.
- [15] Taroun A. Towards A Better Modeling and Assessment of Construction Risk: Insights from A Literature Review[J]. International Journal of Project Management , 2014 , 32( 1) : 101 - 115.
- [16] Jensen F V. An Introduction to Bayesian Networks[M]. London: UCL Press , 1996.
- [17] 胡明礼 , 张彩芬 , 朱建军. 基于贝叶斯网络推理的双重不确定信息集结模型[J]. 中国管理科学 , 2014 , 22( 002) : 135 - 141.

( 责任编辑: 杨 锐)