

故障树方法值得学习  
故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)可通过分析系统的逻辑关系对系  
统做出可靠性预测, FTA 不仅可以进行定性分析, 还可以进行定量分析,  
在由上而下理清的逻辑关系中找出影响顶事件(记为 T)的所有因素, 并通  
过概率及关键重要度分析出割集, 进而找出最小割集。该方法可以剖析出  
造成故障的深层原因。

# 基于故障树模型的城市地下综合管廊应用 PPP 模式风险评价

丁晓欣, 刘 凯, 时淑君

即在城市地下建造一个隧道  
空间, 将电力、通信、燃气  
、供热、给排水等各种工程  
管线集于一体, 设有专门  
的检修口、吊装口和监测系统  
、实施统一规划、统一设计  
、统一建设和管理, 是保障  
城市运行的重要基础设施和  
“生命线”。

- (1. 吉林建筑大学 经济与管理学院, 吉林 长春 130118;
2. 吉林省绿色建造与管理研究中心, 吉林 长春 130114)

**摘 要:** 城市地下综合管廊工程项目应用 PPP 模式当前在国内已经开始大力推广和普及, 各地区经济发展水平不一, 项目推进程度以及社会资本参与项目的积极性也有所差别。为保障城市地下综合管廊工程项目应用 PPP 模式顺利开展, 其项目风险的影响不可忽视。借助故障树模型分析影响综合管廊工程项目应用 PPP 模式风险的因素, 归纳筛选对于 PPP 模式风险产生的基本事件; 通过确定对于基本事件关联度的大小, 确定在全生命周期阶段需要重视的基本事件, 对于基本事件的关联度大小进行排序判断得到入廊需求及收益、融资风险、地方政府财政能力、法律体系不健全、技术不完备、土地征拆问题、政府信用等 7 个对项目风险影响较大的因素。考虑到不同地区经济发展实力不同, PPP 项目的适应性存在差异, 通过改进关联度进行实证分析, 验证模型的科学性和实用性, 为城市地下综合管廊工程项目应用 PPP 模式风险管理提供一定指导。

**关键词:** 综合管廊; PPP; 风险; 故障树

中图分类号: F294 文献标识码: A 文章编号: 2095-0985(2020)01-0008-08

DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2020.01.002

## Risk Assessment of PPP Mode in Urban Underground Utility Tunnel Engineering Application Based on Fault Tree Model

DING Xiao-xin, LIU Kai, SHI Shu-jun

- (1. School of Economics and Management, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;
2. Jilin Province Green Construction and Management Research Center, Changchun 130114, China)

**Abstract:** The application of PPP mode in urban underground utility tunnel project has been vigorously promoted and popularized in China. The economic development level of each region is different, and the degree of project promotion and the enthusiasm of social capital participation projects are also different. In order to ensure the smooth application of the PPP model for the urban underground utility tunnel project, the impact of project risks cannot be ignored. Using the fault tree model, the factors affecting the risk of applying the PPP model in the integrated pipe corridor project are analyzed, the basic events generated by the PPP model risk are summarized, the basic events that need to be paid attention to during the whole life cycle are determined by determining the correlation degree of the basic events. Sorting and judging the correlation degree of basic events, seven factors that have a great impact on the project risk are obtained, including the demand and income of the corridor, the financing risk, the financial capacity of the local government, the imperfect legal system, the incomplete technology, the land acquisition and demolition, and the government credit. Considering the different economic development strengths of different regions, the adaptability of PPP projects is different. The empirical analysis is carried out by improving the correlation degree to verify the scientificity and practicability of the model, which provides some guidance for the application for PPP mode risk management in urban underground utility tunnel project.

**Key words:** utility tunnel; PPP; risk; fault tree

收稿日期: 2019-05-13 修回日期: 2019-07-10

作者简介: 丁晓欣(1964-), 女, 吉林长春人, 硕士, 教授, 研究方向为工程项目管理(Email: 554730420@qq.com)

通讯作者: 刘 凯(1992-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为工程项目管理(Email: 747737599@qq.com)

基金项目: 吉林省社会科学基金(2017B63)

是指政府与私人组织之间,  
为了提供某种公共物品和服  
务, 以特许权协议为基础,  
彼此之间形成一种伙伴式的  
合作关系, 并通过签署合同  
来明确双方的权利和义务,  
以确保合作的顺利完成, 最  
终使合作各方达到比预期单  
独行动更为有利的结果。

城市地下综合管廊作为市政基础设施建设的重要组成部分,当前已得到国家的大力支持和推广,并且是促进经济社会发展的一项重要举措。地下综合管廊可有效改善城市环境,改变城市“马路拉链”“空中蛛网”“井盖吃人”的现象。从长远角度看,与传统直埋敷设方式相比,地下综合管廊带来的经济价值是十分可观的;但由于地下综合管廊前期建设成本高,项目体量大,建设周期长,综合管廊工程这一动辄数十亿甚至上百亿的项目给地方财政带来不小的压力。自2014年以来国家陆续出台一系列政策开始大力推行政府与社会资本合作(Public-Private Partnership, PPP)模式,鼓励和支持引导社会资本参与到基础设施建设领域中来,从而缓解中央及地方政府的财政压力,降低地方债务风险,盘活存量资产,增加基础设施和公共事业领域的公共服务的有效供给。同时为基础设施建设拓宽了融资渠道,带来了更有效的管理经验。综合管廊作为基础设施领域的一项组成部分,在全国范围内掀起了应用PPP模式建设综合管廊的热潮;然而,由于综合管廊在我国处于刚刚起步阶段,在其应用PPP模式的成长发展当中也显现出一些问题,若要保证综合管廊项目应用PPP模式持久健康成长,其风险的防控及应对迫在眉睫。

**作为项目全生命周期的前期准备工作的重要一环,充分识别项目风险有利于对风险进行客观评价和实施有效管理**<sup>[1]</sup>,充分地评估风险对于帮助利益相关方规划有效的风险分配和缓解以及确保业务和项目的成功至关重要<sup>[2]</sup>。Tavakolan等<sup>[3]</sup>提出了建设项目中的风险互动网络,应用交叉矩阵相乘(Matrixed' Impacts Croises-Multiplication Appliance a un Classement, MICMAC)法分析表明契约异常对特定项目的其他风险影响最大。Khwaja等<sup>[2]</sup>提出了多属性风险评估模型,通过对部门和项目风险分析,并对利益相关者进行风险管理提出富有见地的对策和建议。Bing等<sup>[4]</sup>在英国PPP/PFI(Private Finance Initiative, 私人融资计划)项目中确定优先风险分配。其目的在于为公共部门客户准备一个实用的风险分配框架和矩阵以供招标文件使用,从而节省谈判和合同交易的时间。Bing等<sup>[5]</sup>采用贝叶斯更新技术为风险分配提供了一种新方法,重点是如何在公共客户和私人承包商之间分配风险管理责任。Akin-toye等<sup>[6]</sup>根据洛杉矶涉及55个地方当局PFI计划的问卷调查记录地方当局PFI发展的风险管理,得出主要影响有两个方面:(1)需要在公共部门风险评估的主题领域进行相关培训;(2)需要

为PFI计划制定适当和商定的风险评估和管理框架。Badi等<sup>[7]</sup>检查PFI背景下风险分配对可持续能源创新的影响项目交付模式,强调了适当的风险分配对PFI项目的重要性。注意感知资本成本风险作为创新的主要抑制因素的有害影响,强调了公共部门比较值(Public Sector Comparator, PSC)中明确反映可持续能源需求的必要性。

透析当前城市地下综合管廊应用PPP模式的运作情况,纵观项目全过程包括项目前期、实施期以及后期给项目利益相关方及项目所带来可预见的及不可预见的各种风险,为风险管理打好前期基调,进一步推动PPP模式应用于综合管廊工程项目规范有序发展。赵丹等<sup>[8]</sup>从社会资本的角度采用熵权法对实际项目进行了融资风险评价并验证了该评价方法的合理性。郭琦等<sup>[9]</sup>从投资者的风险管理角度出发,运用风险分解机构(Risk Breakdown Structure, RBS)与投资工作分解结构相结合的方法,系统分析水电BOT(Build-Operate-Transfer)项目各阶段可能面临的投资风险因素并构建了风险识别矩阵。张军<sup>[10]</sup>以LPS市综合管廊项目为例进行研究,分析了项目PPP风险管理的现状及成效,从社会资本方的角度为综合管廊提出了项目风险管理框架。向鹏成和宋贤萍<sup>[11]</sup>从融资方的角度识别出风险因素,建立了城市基础设施建设融资风险系统动力学模型,结合案例进行了仿真分析并对融资风险作出了系统评价。谷昊宸<sup>[12]</sup>以PPP模式的理论基础对长春市地下综合管廊项目的融资风险影响因素进行分析研究,并对主要的各个风险因素提出了相应的解决对策。汪婷<sup>[13]</sup>从社会资本方的角度,借助风险偏好博弈模型的分析并确定了10个需要项目参与方进行共担的风险因素。元霞等<sup>[14]</sup>分析了16个失败或出现问题的PPP项目案例总结出主要的风险影响因素并提出对应的措施及建议。赵佳<sup>[15]</sup>构建了适应综合管廊的PPP模式融资风险管理模型,运用博弈理论提出了风险分担的措施。目前对于PPP项目风险方面的研究较多集中于市政道路、养老服务等领域,针对综合管廊项目的风险研究较少,本文将结合大量现有项目案例以及专家访谈,利用故障树灰色分析的方法对我国地下综合管廊工程项目唯一试点省——吉林省城市地下综合管廊应用PPP模式存在的风险进行分析,筛选对于PPP模式风险产生的基本事件;通过灰色理论中结构函数确定各项基本事件关联度的大小,确定在风险控制过程中需要重视的基本事件。并采取有效措施进行风险规避,确保

PPP 模式应用于综合管廊工程项目有序发展。

## 1 综合管廊应用 PPP 模式风险识别

工程项目风险的控制是在全国各地 PPP 项目中普遍存在的难点。前期风险防控不到位,则很有可能导致后期工作得不到顺利进行,牵一发而动全身;项目烂尾、合同终止等问题屡见不鲜。

表 1 项目各阶段影响 PPP 模式在综合管廊工程应用的风险因素

项目阶段	具体风险因素及风险点
审批阶段	项目未通过审批;由于政府工作效率问题造成的建设审批缓慢或停滞、建设用地落实困难、配套设施不到位;施工准备手续、竣工验收工作导致的审批风险
设计阶段	政府部门要求改变项目功能性要求;合同实施时,项目公司提出一个比较经济的施工或运营方案,使项目功能性要求改变;项目的设计存在缺陷
投资阶段	前期资金未及时到位;人大预算审批未通过等政府方原因以及因政府方要求赶工期而导致的项目公司成本增加带来的风险
建设阶段	融资风险包括市场利率波动、融资金额不足、再融资不确定性、建设期金融环境波动等;土地包括土地的拆迁与补偿、历史遗留问题、土地及地下空间使用权属问题等;设计不当、设计变更引起的成本超预算或工期延长;施工技术不当、工程质量工艺低劣;分包方、供应商违约;工期延误;工地安全;劳动争端、罢工;劳动健康、安全;环境破坏;发现历史文物进行保护引起的成本增加或完工时间延后;地质条件等
运营阶段	运营成本超支;项目公司管理水平和能力缺陷导致经营能力和收益受损;项目公司运营服务质量不好导致受损;设施维护不到位;违法违规行;环境破坏;收益方面,入廊未能达到预期入廊占比造成运营期收费不足;超额收益;多边收益竞争;收费价格或调整受限制;政府补贴;项目公司破产;合同文件冲突等
移交阶段	特许期满后不能满足新的社会或市场要求;资产征用;项目移交时设施存在缺陷、移交费用超支等
法律和政策	违反融资合同、担保或抵押权实施或生效;超出政府方可控范围的法律变更及政策变化;政府方可控的法律变更;政府决策效率低;税收政策的变化

项目各阶段风险

此外,利率变化、通货膨胀以及税收调整所带来的经济风险,社会资本、政府、第三方的信用风险,自然不可抗力及政治不可抗力等风险,同样是综合管廊应用 PPP 模式所必须考虑的风险因素。

## 2 综合管廊应用 PPP 模式风险划分

根据以上识别出的风险以及专家调查问卷,过滤掉目前对综合管廊项目应用 PPP 模式影响不大的风险点,按其产生原因划分出当前影响综合管廊项目应用 PPP 模式的主要风险点,并进一步分析出影响程度更深的风险因素,见表 2。

表 2 综合管廊工程应用 PPP 模式风险划分

风险来源	风险类型
政治风险	政治决策失误、政治反对
经济风险	利率、通货膨胀、税收调整、入廊需求及收益、融资风险、地方政府财政能力
市场风险	项目唯一性(多边收益竞争)、管廊市场不成熟
法律政策风险	法律变更、法律体系不健全
信用风险	政府信用、社会资本信用、第三方信用
不可抗力	自然不可抗力、政治不可抗力
项目风险	技术不完备(设计施工缺陷)、工期延误、成本超支
其他	土地拆迁、资产征用

因此作为前期关键的一环,须牢牢把握风险问题,为项目做好扎实的基础,从而推进项目的顺利开展。根据财政部及发改委 PPP 项目库中城市地下综合管廊工程项目应用 PPP 模式的案例,结合吉林省建设厅以及吉林省内权威咨询单位、律师实务所等相关的调查及访谈,分析总结出项目各阶段影响 PPP 模式在综合管廊工程应用的风险因素,如表 1 所示。

(1) 政治风险: 主要包含政治决策、政治反对。项目审批阶段,政府对管廊项目的相关政策不了解,欠缺相关工程实践管理经验,可能会使一些不适合用 PPP 模式做的管廊项目获得审批;某些地区由于公众对综合管廊项目的认知度不够,在项目建设前期可能会引起公众的不满及反对。

(2) 经济风险: 在经济不断发展的大环境下,综合管廊 PPP 项目的合作期限在 10~30 年,一般不低于 25 年,在这样较长期限里,利率变动、通货膨胀、税收调整等可能随时都会发生,对社会投资成本产生或高或低的影响。在管线入廊及收费方面,管线单位入廊意愿不强,造成项目的实际收益与预算收益有较大差距,最终导致政府承担很大一部分的费用补贴支出,当政府所承担的费用超出当年公共财政支出预算,不仅会给政府带来财政压力,还会造成项目收入难抵成本,加大项目执行难度,导致项目难以为继。

(3) 市场风险: 合同中项目唯一性的设定是使包括管廊工程在内的 PPP 项目能够正常获得收益的一份保障,其次,虽然综合管廊工程在国外的的发展已经非常成熟,但在国内,尤其是应用 PPP 模式下的综合管廊项目还没有很成熟的实践经验可以借鉴,同时,由于各省的经济发展状况等省情



有一些差别,吉林省内更是缺乏相关的实践借鉴,管廊市场不够成熟,因此,吉林省应用 PPP 模式建设综合管廊也是处于探索尝试当中。

(4) 法律政策风险: 目前吉林省内没有关于管线强制入廊的法律政策,缺乏综合管廊 PPP 项目入廊及维护运营费的收费定价体制机制,使 SPV(Special Purpose Vehicle)公司向管线单位收取费用时没有可供参考的依据,可能会造成相关的系列纠纷。

(5) 信用风险: 双方应按合同约定执行,合作各方的信誉度、诚信度在一定程度上是综合管廊工程成功的关键影响因素<sup>[16]</sup>,依据相关信誉度评价指标,对合作各方做出全面的信用评估,为项目的顺利运作奠定可靠的信用基础。

(6) 项目风险: 技术不完备(设计施工缺陷)、工期延误、成本超支导致项目运行所需现金流不足,项目资金出现缺口或断裂,不能及时足额偿还项目贷款资本金、支付利息和经营成本等。

除此之外,自然灾害、政治不可抗力、土

地拆迁问题、资产征用等风险也是吉林省在 PPP 模式下建设城市地下综合管廊工程必须考虑的风险。

### 3 基于故障树的综合管廊应用 PPP 模式的风险分析

#### 3.1 故障树模型构建

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)可通过分析系统的逻辑关系对系统做出可靠性预测,FTA 不仅可以进行定性分析,还可以进行定量分析,在由上而下理清的逻辑关系中找到影响顶事件(记为  $T$ )的所有因素,并通过概率及关键重要度分析出割集,进而找出最小割集。该方法可以剖析出造成故障的深层原因<sup>[17,18]</sup>。基于上述识别出的影响综合管廊应用 PPP 模式的风险点,借助故障树模型对其进行评价分析,按对项目推进影响的重要性程度找出关键风险点,为下一步风险应对做准备。故障树构建如图 1 所示。

??? 风险划分我觉的有些问题,  
顶事件为非系统风险,  
其子事件却包含一些系统性风险

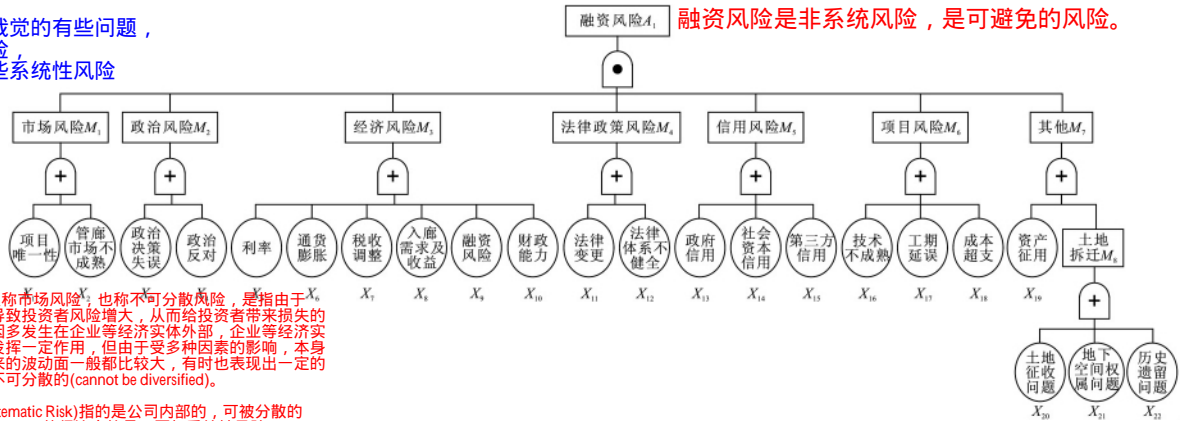


图 1 综合管廊工程项目应用 PPP 模式的风险故障树

根据每个基本事件的影响程度<sup>[19]</sup>不同,通过维数变换、提取特征矩阵故障特征,建立待检模式向量  $X_T$ :

$$X_T = [X_T(1), X_T(2), \dots, X_T(n)] \quad (2)$$

将典型故障特征矩阵  $(X_{Li})_{1 \times m}$  与待检模式向量  $(X_T(j))_{1 \times n}$  进行关联度计算。在得出的关联度中,首先根据关联度大小进行排序,关联度较大的基本事件则为综合管廊工程应用 PPP 模式中首要考虑的风险。

#### 3.2.2 模型求解

##### (1) 确定基本事件发生概率

对于基本事件发生概率的确定,可以采用专家库对于造成 PPP 模式应用于地下综合管廊工程风险的基本事件的概率进行测评,根据  $P=0.5 \times (a_i + b_i)$  ( $i=1, 2, \dots, 22$ ) 计算基本事件的概率。其中  $P$  为地下综合管廊风险基本事件概率值;

概率计算使用算术平均 ???

#### 3.2 故障树分析

##### 3.2.1 基本事件与风险的关联度确定

在整个故障树风险模型中,为寻求各基本事件对于系统影响的数值关系,确定系统变化的度量关系,可以依据各基本事件之间的关联度判断对于顶事件的影响程度。为此,在综合管廊工程项目应用 PPP 模式风险故障树模型中建立由各基本事件组成的特征矩阵  $X_L$ ,假设故障树中共有  $n$  个基本事件,其中最小割集的个数为  $m$ ,任意最小割集  $Li$  表示由  $n_i$  个基本事件组成的第  $i$  个数据,根据风险的基本事件建立特征矩阵:

$$X_L = \begin{bmatrix} X_{L1} \\ X_{L2} \\ \vdots \\ X_{Lm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{L1}(1) & X_{L1}(2) & \cdots & X_{L1}(n) \\ X_{L2}(1) & X_{L2}(2) & \cdots & X_{L2}(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{Lm}(1) & X_{Lm}(2) & \cdots & X_{Lm}(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

系统风险(Systematic Risk)又称市场风险;也称不可分散风险,是指由于多种因素的影响和变化,导致投资者风险增大,从而给投资者带来损失的可能性。系统性风险的诱因多发生在企业等经济实体外部,企业等经济实体作为市场参与者,能够发挥一定作用,但由于受多种因素的影响,本身又无法完全控制它,其带来的波动面一般都比较广,有时也表现出一定的周期性。此类系统风险是不可分散的(cannot be diversified)。

另一类非系统风险(non-systematic Risk)指的是公司内部,可被分散的结构性风险(could be diversified)。值得注意的是,要与系统性风险(systemic risk)进行区分, Systematic risk 与 Systemic risk 看起来很像,但是后者指的是会引发整个市场或系统崩溃的风险。

$a_i$ 、 $b_i$  分别为专家进行打分的最高值和最低值。  
基本事件的概率如表 3 所示。

表 3 基本事件的概率

编号	基本事件原因	概率	编号	基本事件原因	概率
$X_1$	项目唯一性	0.4	$X_{12}$	法律体系不健全	0.65
$X_2$	管廊市场不成熟	0.35	$X_{13}$	政府信用	0.4
$X_3$	政治决策失误	0.4	$X_{14}$	社会资本信用	0.45
$X_4$	政治反对	0.35	$X_{15}$	第三方信用	0.4
$X_5$	利率	0.59	$X_{16}$	技术不成熟	0.3
$X_6$	通货膨胀	0.35	$X_{17}$	工期延误	0.35
$X_7$	税收调整	0.4	$X_{18}$	成本超支	0.45
$X_8$	入廊需求及收益	0.65	$X_{19}$	资产征用	0.4
$X_9$	融资风险	0.45	$X_{20}$	土地征收问题	0.65
$X_{10}$	地方政府财政能力	0.65	$X_{21}$	地下空间权属问题	0.3
$X_{11}$	法律变更	0.3	$X_{22}$	历史遗留问题	0.65

在灰色理论中结构函数可以表示为:

$$\varphi(x) = x_1 + x_2 + \cdots + x_n \quad (3)$$

综合管廊工程项目应用 PPP 模式的结构函数为:

$$\varphi(x) = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 \quad (4)$$

式中:  $\varphi(x)$  为结构函数;  $M_i$  为基本事件的概率值。

在综合管廊工程项目应用 PPP 模式故障树模型中,假设最小割集可以由任意一个基本事件单独构成。在构建的特征矩阵中,将发生的基本事件在最小割集里的值设为“1”,并且将其余没有发生的基本事件的值设为“0”,那么特征矩阵可以表示为:

$$X_L = I \quad (5)$$

## (2) 待检模式向量求解

根据上文限定的条件在 PPP 模式应用于地下综合管廊工程风险故障树中的任意基本事件均可以作为最小割集,由发生的基本事件组成的集合为割集。而对于最小割集就是消除任意个数基本事件后,顶事件却不发生,那么这样的割集则被称为最小割集。任意基本事件发生的概率相互独立,互不影响。在模型中的顶事件的发生概率可按式(6)求得:

$$P = \begin{cases} 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) & \varphi(x) = \bigcup_{i=1}^n X_i \\ P = \prod_{i=1}^n P_i & \varphi(x) = \bigcap_{i=1}^n X_i \end{cases} \quad (6)$$

当存在基本事件发生个数  $m \geq 1$  时,就需要任意基本事件对于整个系统的贡献度,任意基本事件的贡献度  $I_j$  为:

$$I_j = \sum_{j \in L_i} \frac{P_i}{P_T} \quad (7)$$

对  $\{X_T(j)\}$  归一化处理得到矩阵  $X_T$ 。

## (3) 计算两极差

根据序列差得出最大差  $\Delta_{\max}$  和最小差  $\Delta_{\min}$ :

$$\Delta_{\max} = 1; \Delta_{\min} = 0。$$

## (4) 计算关联系数 相关系数

在  $\rho = 0.5$  时,关联系数为:

$$\varepsilon_{ij}(K) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(K) + \rho \Delta_{\max}} \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon_{ij}$  为关联系数的值;  $\Delta_{ij}(K)$  为风险因素  $K$  的序列差的值。

## (5) 计算关联度

根据公式计算基本事件的关联度:  $r_{ij} =$

$$\frac{1}{N} \sum_{L=1}^N \varepsilon_{ij}(L) \text{ 并对关联度大小进行排序,其中: } r_{ij}$$

为基本事件的关联度。根据计算结果推断出在 PPP 模式应用于地下综合管廊工程风险中需要高度重视的问题。

# 4 应用案例分析

2015 年 4 月,吉林省被确定为“综合管廊试点省”,也是目前国内唯一的综合管廊试点省,在依据上述模型对综合管廊应用 PPP 模式风险分析的基础上,以吉林省 T 市某地下综合管廊工程应用 PPP 模式案例进行实证分析。

## 4.1 项目概况

项目属于市政工程公共服务领域类项目,所属行业为地下综合管廊行业。项目位于吉林省 T 市境内,拟建管廊布置在市中心城区内关键市政管线所在道路以及列入规划拓展建设在内的城港经济带。合作期 30 年,其中建设期 5 年。项目的主要建设运营内容分为三部分:(1)新建并运营地下综合管廊 80.96 km(不含管线);(2)随管廊改造及恢复并运营市政道路 50.6 km(含路面、车行道、人行道、地上绿化设施景观、标牌标线、路灯等);(3)随管廊新建并运营市政道路 21.85 km(含路面、车行道、人行道、地上绿化设施、标牌标线、路灯)。项目总投资 657000 万元,采用可行性缺口补助的回报机制。项目当前处于执行阶段,尚未进入运营期。

## 4.2 项目投融资结构及风险评价

本项目资本金不少于项目总投资的 20%,约 15 亿元,项目投资所需其余资金由项目公司通过银行借款等方式解决,约 60 亿元。本项目资本金及贷款比例约为 2:8。项目资本金部分由中选社会资本和政府出资代表按照在项目公司中的股比

支付 在项目公司中 政府方与社会资本方所占股份比例分别为 20% 和 80%。本项目投资所需其余资金由项目公司通过银行借款等方式解决。项目公司在获得实施机构同意的前提下 ,可采用收费权质押和资产抵押的方式获得资金 ,并以相关收入作为还款来源。根据项目公司融资的需要 ,若需要股东担保 则由社会资本提供 政府方不提供担保。项目公司注册资本暂定为 15 亿元 ,项目建设期第一年支付额度不少于 1 亿元。该项目风险种类划分如表 4 所示。

表 4 T 市综合管廊应用 PPP 模式风险划分	
风险来源	风险类型
政治风险	政治决策失误
经济风险	入廊需求及收益、融资风险、地方财政能力
市场风险	项目唯一性( 多边收益竞争)、管廊市场不成熟
法律政策风险	法律变更
信用风险	社会资本信用、政府信用
不可抗力	政治不可抗力
项目风险	技术不成熟( 设计施工缺陷)、工期延误、成本超支
其他	土地拆迁、资产征用

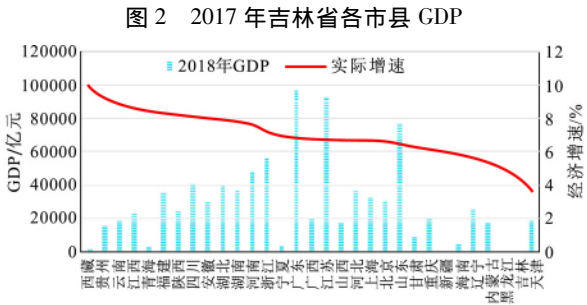
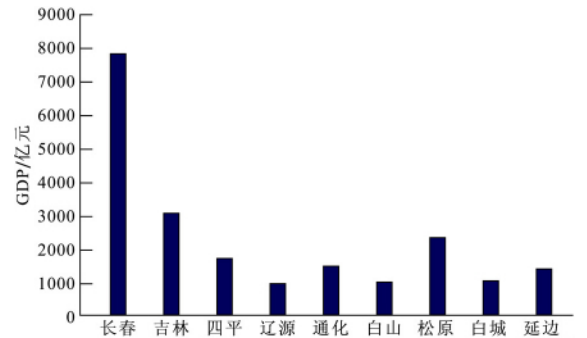
基本事件的概率如表 5 所示。					
表 5 基本事件的概率					
编号	基本事件原因	概率	编号	基本事件原因	概率
$X_1$	政治决策失误	0.4	$X_9$	政治不可抗力	0.35
$X_2$	入廊需求及收益	0.67	$X_{10}$	技术不完备	0.66
$X_3$	融资风险	0.64	$X_{11}$	工期延误	0.35
$X_4$	地方政府财政能力	0.65	$X_{12}$	成本超支	0.45
$X_5$	项目唯一性	0.4	$X_{13}$	土地征拆	0.67
$X_6$	管廊市场不成熟	0.35	$X_{14}$	资产征用	0.4
$X_7$	法律体系不健全	0.66	$X_{15}$	政府信用	0.66
$X_8$	社会资本信用	0.45			

对于 T 市综合管廊应用 PPP 模式风险故障树基本事件的贡献度的求解结果如表 6 所示。

表 6 任意基本事件贡献度					
编号	贡献度	编号	贡献度	编号	贡献度
$X_1$	0.400005069	$X_6$	0.350004435	$X_{11}$	0.350004435
$X_2$	0.670007435	$X_7$	0.660009582	$X_{12}$	0.450005702
$X_3$	0.640004173	$X_8$	0.450005702	$X_{13}$	0.670007435
$X_4$	0.650008236	$X_9$	0.350004435	$X_{14}$	0.400005069
$X_5$	0.400005069	$X_{10}$	0.660009582	$X_{15}$	0.660009582

依据上述模型可以得到城市地下综合管廊应用 PPP 模式风险对顶事件的贡献程度 ,而综合管廊应用 PPP 模式推进力度及其市场接受程度则因不同地区而存在一定差异 ,这对于反映不同地区综合管廊应用 PPP 模式的落地能力就显得有些束手无策。

不同地区、PPP 模式开展深度、资质不同、开发商深化综合管廊应用 PPP 模式设计程度 ,都会改变模型分析的结果。吉林省内各市县生产总值差距较大( 见图 2) ,长春市居前列 ,吉林、松原、四平、通化、延边居中等水平 ,辽源、白山、白城较低 ,从全国来看( 见图 3) ,吉林省经济总体发展缓慢 ,GDP 及经济增速低位运行 ,落后于全国平均水平 ,2017 年审计署点名批评吉林省虚增财政收入 ,在主动核减后 ,吉林省负债率 20.89% ,债务率高达 263.71% ,超出 90%~150%的安全线。



吉林省 8 个地级市 1 个自治州中共有 20 个管廊项目应用 PPP 模式进行规划建设 ,累计建设里程 723.073 km ,总投资达 669.34 亿元。各行政区域管廊工程应用 PPP 模式的项目数量分布如图 4 所示( 资料来源: 网络公开资料、2018 统计年鉴及《国民经略》公开信息) 。



依据吉林省 8 个地级市 1 个自治州为例 ,并且 9 个城市依次排列 ,可以认定对于模型的决策目标的影响程度也是依次排列 ,相邻地区影响程



度之差基本相等。因此,根据 AHP(Analytic Hierarchy Process) 权重构造判断矩阵如下:

$$U' = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{7} & \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{8} & \frac{1}{7} & \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

层次分析法  $U'$  为九阶正反矩阵,经过计算得出的最大的特征值  $\lambda_{\max} = 9.327$ ,对相应的特征向量进行归一化处理:

两两比较的判断矩阵

$W = (0.317161474 \ 0.233829026 \ 0.172095682, 0.126378821 \ 0.08492185 \ 0.065613147, 0.045383299 \ 0.030445171 \ 0.020521136)$ 。

对应随机一致性指标  $RI = 1.46$ ,一致性指标  $CI = \frac{\lambda_{\max} - 9}{9 - 1} = 0.0408809$ ,一致性比率指标  $CR = \frac{CI}{RI} = 0.0324452 < 0.1$ 。数据判断为可以接受,可以作为权重向量。

当前国内基本每个地区都在建设地下综合管廊,通过权重系数可以更为精确地反应地下综合管廊应用 PPP 模式进入市场的风险综合水平。

$$r_{ij}^* = \sum_{l=1}^i \left( A_l \sum_{j=1}^{k_l} a_{lj} \right) \quad (9)$$

式中:  $r_{ij}^*$  为加权关联度系数;  $A_l$  为综合管廊应用 PPP 模式的对象权重分配;  $a_{lj}$  为各风险在不同地区的权重分配。

根据改进关联度:  $r_{ij}^* = \sum_{l=1}^i \left( A_l \sum_{j=1}^{k_l} a_{lj} \right)$  对关联度大小进行排序。可以得出  $X_2$ (入廊需求及收益)、 $X_3$ (融资风险)、 $X_4$ (地方政府财政能力)、 $X_7$ (法律体系不健全)、 $X_{10}$ (技术不完备)、 $X_{13}$ (土地征拆问题)、 $X_{15}$ (政府信用)是需要高度重视的问题。

## 5 结 论

本文利用故障树模型分析城市综合管廊工程项目应用 PPP 模式风险的因素,归纳筛选对于 PPP 模式风险产生的基本事件;通过确定对于基本事件关联度的大小,确定在全生命周期阶段需要重视的基本事件,对于基本事件的关联度大小进行排序判断得到入廊需求及收益、融资风险、地方政府财政能力、法律体系不健全、技术不完备、土地征拆问题、政府信用等 7 个对项目风险影响较大的因素。主要结论如下:

(1) 针对 PPP 模式应用于综合管廊工程各阶段识别出的风险,究其根本,从项目风险产生原因的角度定性分析总结出 22 个风险因素,借助故障树模型根据风险关联度以及事件发生概率最终分析出影响顶事件的主要风险。

(2) 以 T 市某综合管廊项目为例,系统分析影响综合管廊项目应用 PPP 模式的风险,得到包含 15 个风险因素的风险识别矩阵,通过权重系数改进关联度使模型分析更为贴合实际,最终得出入廊需求及收益、融资风险、地方政府财政能力、法律体系不健全、技术不完备、土地征拆问题、政府信用等 7 个为综合管廊项目应用 PPP 模式需要高度重视的问题。

(3) 相对而言,欠发达地区或贫困地区应用 PPP 模式建设地下综合管廊较为艰难。除了试点城市及试点项目,普通综合管廊项目应用 PPP 模式由于缺乏资金支持,加上地方财政能力的匮乏,很难保证管廊项目正常的入廊收益,从而比较难以吸引社会资本参与进来。另外,土地征拆问题历来都是一大难题,同时由于图纸缺失等很多地区缺少对地下埋线清晰的掌控,造成项目难以继。因此相对于欠发达地区或贫困地区来说,应用 PPP 模式建设地下综合管廊需考虑和解决的问题较多。

## 参 考 文 献

- [1] 胡 丽,张卫国,叶晓甦. 基于 PPP 模式的城市基础设施融资风险识别研究[J]. 甘肃社会科学, 2011, (1): 234-237.
- [2] Mazher K M, Chan A P C, Zahoor H, et al. Fuzzy integral-based risk-assessment approach for Public-Private Partnership infrastructure projects[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2018, 144 (12): 04018111-1-15.
- [3] Tavakolan M, Etemadinia H. Fuzzy weighted interpre-

- tive structural modeling: improved method for identification of risk interactions in construction projects [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2017, 143( 11): 04017084-1-14.
- [4] Bing L, Akintoye A, Edwards P J, et al. The allocation of risk in PPP/PFI construction projects in the UK [J]. International Journal of Project Management, 2005, 23: 25-35.
- [5] Bing L, Ren Z. Bayesian Technique Framework for Allocating Demand Risk Between the Public and Private Sector in PPP Projects [C]//Proceedings of 6th International Conference on Service Systems and Service Management. IEEE, 2009: 837-841.
- [6] Akintoye A, Fitzgerald E, Hardcastle C. Risk Management for Local Authorities' Private Finance Initiative Projects [M]//RICS Research Foundation. Cobra: 1999: 81-91.
- [7] Badi S, Pryke S. Assessing the impact of risk allocation on sustainable energy innovation ( SEI) the case of private finance initiative ( PFI) school projects [J]. International Journal of Managing Projects in Business, 2016, 9( 2): 259-281.
- [8] 赵丹, 赵延超, 汪伦焰, 等. 城市地下综合管廊 PPP 项目融资风险评价研究 [J]. 城市勘测, 2018, ( s1): 171-175.
- [9] 郭琦, 闫海兰, 张扬. 基于 RBF 网络的水电 BOT 项目投资风险评估 [J]. 人民长江, 2017, 48( 8): 64-67.
- [10] 张军. LPS 市综合管廊项目 PPP 融资风险管理研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2017.
- [11] 向鹏成, 宋贤萍. PPP 模式下城市基础设施融资风险评价 [J]. 工程管理学报, 2016, 30( 1): 60-65.
- [12] 谷昊宸. 长春市地下综合管廊 PPP 项目融资风险管理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [13] 汪婷. 地下综合管廊 PPP 项目风险分担研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [14] 亓霞, 柯永建, 王守清. 基于案例的中国 PPP 项目的主要风险因素分析 [J]. 中国软科学, 2009, ( 5): 107-113.
- [15] 赵佳. 城市地下综合管廊 PPP 模式融资风险管理研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- [16] 胡丽, 张卫国, 叶晓甦. 基于 PPP 模式的城市基础设施融资风险识别研究 [J]. 甘肃社会科学, 2011, ( 1): 234-237.
- [17] 周雅珍, 胡金涛, 蔡云龙, 等. 基于故障树的水厂电源电气设备突发事件风险研究 [J]. 中国给水排水, 2012, 28( 13): 70-74.
- [18] 耿锐, 周律. 污水处理可靠性分析中改进故障树分析方法及应用 [J]. 中国给水排水, 2011, 27( 6): 16-20.
- [19] 杨太华, 郑庆华. 基于故障树方法的项目安全风险分析 [J]. 系统管理学报, 2009, 18( 5): 511-515.

( 上接第 7 页)

- [7] Zou Y, He C, Zhou Y, et al. Water Leakage Classification of Expressway Operation Tunnel Based on BP Neural Network [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Paris, France: Atlantis Press, 2012: 831-834.
- [8] 张立茂, 何云, 吴贤国, 等. 一种适用于运营地铁隧道的可移动式安全检测设备: 中国, CN206741005U [P]. 2017-12-12.
- [9] Dewan A, Caselitz T, Tipaldi G D, et al. Motion-based Detection and Tracking in 3D Lidar Scans [C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation ( ICRA). IEEE, 2016, 4508-4513.