

# 基于建运一体化的高速公路 PPP 项目 SEM-SD 风险分析研究

胡韞频<sup>1</sup>, 明 璽<sup>1</sup>, 李 军<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉市工程建设标准定额管理站, 湖北 武汉 430000)

**摘要:**高速公路 PPP 项目的建运一体化管理过程涉及风险因素较多, 为保证运营期绩效的实现需对项目建设期风险进行有效前置管理。从项目公司视角对高速公路 PPP 项目建运两阶段风险进行分析, 通过实地调研与文献分析识别两阶段风险, 运用粗糙集动态约简关键风险因素, 并建立高速公路 PPP 项目建运一体化风险 SD 模型; 进而利用结构方程模型 SEM 计算得出各风险因素之间的权重及各变量的相互关系。选取典型项目进行实例分析, 结果表明, 各风险因素对项目绩效的影响大小排序为运营期成本超支风险、运营收入不足风险、建设成本超支风险、建设质量风险、进度完工风险, 且建设期多种风险耦合会加剧运营期风险, 导致项目绩效与理想收益之间的偏离。

**关键词:**高速公路; 建运一体化; PPP; 风险管控; 系统动力学方法

**中图分类号:** F283; F542    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1008-7192(2022)01-0085-08

PPP 模式涉及相关利益者众多、合作周期长, 高速公路项目系统复杂, 规模庞大, 建设周期长等特点都加剧了高速公路 PPP 项目风险的不可预见性及管理难度, 为保证 PPP 项目运营期绩效的实现, 需对项目实施建运一体化管理, 特别是在建设期进行有效的前置风险管理。

近年来, 国内外诸多学者对高速公路 PPP 项目的风险管理领域进行了相关研究。廖石云等<sup>[1]</sup>定性分析了两个典型基础设施 PPP 项目的主要风险, 并提出相应的对策。慈正开<sup>[2]</sup>从社会资本方的角度定性识别高速公路 PPP 项目全生命周期的重点法律风险。这类定性研究缺少定量的方法分析, 故部分学者尝试使用定量的研究方法识别风险, 袁义淞<sup>[3]</sup>通过 ISM 模型识别高速公路项目的集成融资风险; Lakshya 等<sup>[4]</sup>采用蒙特卡洛风险模拟研究公路基础设施的财务风险; 孙燕芳等<sup>[5]</sup>通过未来现金流量识别高速公路项目证券化融资风险; 已有研究多集中于项目的投融资风险, 对 PPP 项目建设期和运营期的风险识别仍有不足。另有部分学者采用定量的研究方法进行高速公路 PPP 项目风险评价,

王松江等<sup>[6]</sup>引入多元联系数法理论进行评价; Kh-waja 等<sup>[7]</sup>提出 Choquet 模糊积分模型应用于交通基础设施 PPP 项目的风险评估。Jie Li 等<sup>[8]</sup>运用模糊层次分析法对某 PPP 高速公路项目进行风险评估; 但现有文献研究较少考虑风险之间的相互影响及联系, 缺少对建设期及运营期两阶段风险的联动研究。高崇阳等<sup>[9]</sup>建立系统动力学模型探讨电建项目中存在的各种风险因素及其之间的相互联系。向鹏成等<sup>[10]</sup>提出了 SD(system dynamics)模型在处理高阶非线性风险相互之间联系方面的优势。白芙蓉等<sup>[11]</sup>通过系统动力学理论揭示了风险因素反馈高阶次、动态性的特性。陈伟等<sup>[12]</sup>应用 SD 模型仿真模拟预制构件质量多因素之间的动态反馈交互作用。考虑到系统动力学可以动态地分析复杂系统中风险的发生对项目的影响环节以及风险之间的内部影响关系, 本文拟采用系统动力学方法建立建运一体化风险模型。王军武等<sup>[13]</sup>提出对难以量化的影响因素可以采用结构方程模型来进行赋值。任立等<sup>[14]</sup>提出结构方程模型 SEM(structural equation modeling)中潜在变量间的相互关系符合 SD 模型研究的特征

收稿日期: 2021-07-06

**作者简介:** 胡韞频(1968-), 女, 武汉理工大学土木工程与建筑学院副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为工程项目管理; 明 璽(1995-), 女, 武汉理工大学土木工程与建筑学院硕士研究生, 研究方向为工程项目管理。E-mail: 409263155@qq.com

及要求,肯定了通过结构方程模型确定变量的可行性。因此考虑将结构方程模型与系统动力学结合应用于高速公路 PPP 项目风险研究。

基于此,通过运用 SEM 和 SD 方法,考虑从项目公司角度出发,建立 SEM-SD 的高速公路 PPP 项目建运一体化风险研究模型,以期通过运营期的绩效要求指导建设期的实践,对建运一体化高速公路 PPP 项目风险管控提出相关借鉴意义。

## 一、建运一体化风险识别

### 1. 风险因素识别

风险识别是对工程建设过程中可能发生,并影响工程项目目标实现的事件进行识别,为风险分析提供前提<sup>[15]</sup>。首先对财政部中心官方网站收录的高速公路 PPP 项目实施方案进行收集,整理实施方案中的项目风险,在此基础上通过专家访谈与文献调研,确定建运两阶段出现频次最高的风险因素 28 个(表 1)。

表 1 风险清单

类别	风险因素
建设期风险	工程变更
	进度完工风险
	成本超支
	技术风险
	建设质量风险
	设计风险
	土地获取风险
	施工供应风险
	配套设施风险
	管理协调风险
运营期风险	合作方违约风险
	建设安全风险
	运营成本超支
	运营延迟和中断
	服务质量风险
	运营收入不足风险
政治风险	最低需求风险
	运营安全风险
	审批延误风险
	征地拆迁风险
经济风险	法律变更
	政府信用风险
	通货膨胀
	资金风险
环境风险	付费调价风险
	利率变化
	不可抗力
	(其他)不良气候、不良的地质条件

### 2. 风险因素约简

直接将搜集到的风险因素拟合到系统动力学中会使系统冗余,造成动态性不足,针对高速公路 PPP 项目的特点,采用粗糙集理论的动态约简算法,删除带有冗余信息的风险因素,有效提取关键风险因素,提高模型模拟效率<sup>[16]</sup>。

粗糙集属性约简就是在保持信息系统分类能力不变的条件下,依赖于数据,而非以前的经验和知识,通过属性缩减来减少其中不相关或不重要的属性。具体步骤如下:通过对财政部政府与社会资本合作中心官方网站收录的典型高速公路 PPP 项目进行数据收集,确定知识系统  $B = (C, D)$ ,其中  $C$  为条件属性集, $D$  为决策属性集,从知识系统中逐一删除条件属性  $C_i$ ,计算删除  $C_i$  后的不可分辨关系  $INDC/\{C_i\}(D)$ ,若删除后的  $INDC/\{C_i\}(D) = INDC(D)$ ,属性  $C_i$  不必要可以被删除;否则,属性  $C_i$  及其列中的所有信息应存储在  $B$  中,重复上述步骤,直至得到简化后的知识系统。

基于此理论,邀请专家对前文调研的收录于财政部政府与社会资本合作中心官方网站的高速公路 PPP 项目风险因素及项目风险等级进行评价,运用收集的数据,利用 matlab 软件进行编程约简风险因素,最后整理关键风险因素 16 个(表 2)。

## 二、模型建立

### 1. 模型方法概述

系统动力学 SD 以复杂反馈理论为基础、计算机仿真技术为手段,是一种定量与定性相结合的动态评价方法,可以动态地分析复杂系统中风险的发生对项目的影响环节以及风险之间的内部影响关系。本文考虑通过构建风险子系统、建设期子系统和运营期子系统,以系统动力学方法为研究手段实现三个子系统的整体仿真。

在数据收集及处理方面,本文根据具体需求采用客观数据收集及专家打分法。结构方程模型 SEM 作为一种多元统计技术,能够同时处理多个原因、多个结果的关系,容许变量存在测量误差,并且能够测量整体模型的拟合程度<sup>[17]</sup>。考虑到各风险因素之间复杂的交互关系,所以选取结构方程模型作为风险赋权方法,使风险因素间的赋值与方程的建立更具客观性。

表 2 高速公路 PPP 项目建运关键风险因素

一级指标	二级指标	主要内容
建设期风险 $R_1$	工程变更 $R_{11}$	勘察设计方案存在的缺陷或政府方提出的变更
	进度完工风险 $R_{12}$	未达到预定的工期目标
	成本超支 $R_{13}$	劳动力、原材料、设备等成本超支
	建设安全风险 $R_{14}$	人员安全事故
		配套设施安全事故
		环境安全事故
运营期风险 $R_2$	建设质量风险 $R_{15}$	工程质量不符合要求、未能按图按合同施工、无法达到使用标准
	技术风险 $R_{16}$	路基路面,桥梁隧道等技术故障、工艺不当
	运营成本超支 $R_{21}$	高速公路及其附属工程日常维护费,人工费,税费等超支
	服务质量风险 $R_{22}$	公路维护、收费站服务区等服务质量低下、不能满足公众需求
	运营收入不足风险 $R_{23}$	高速公路收费价格下降、交通量减少、服务区收益不足
	运营安全风险 $R_{24}$	人员安全事故
政治风险 $R_3$	法律变更 $R_{31}$	税收制度的变更、行业标准的改变、其他法律法规变更
	政府信用风险 $R_{32}$	政府部门信用缺失、政府腐败
经济风险 $R_4$	利率变化 $R_{41}$	利率变动
	通货膨胀 $R_{42}$	成本超支、收益不足
环境风险 $R_5$	不可抗力 $R_{51}$	地震、洪水、暴乱
	其他 $R_{52}$	不良气候、不良的地质条件

2. 因果关系图构建

根据高速公路 PPP 项目建运两阶段风险因素之间相互影响,联立政治风险、经济风险与环境风险,确立各风险因素之间的关系;根据建设期三大目标控制机理,以成本、进度、质量为主要因素确立建设期各因素之间关系;根据运营期实际运营操作管理,以运营期收入、运营期成本为主要因素确立运营期各因素之间关系;最后通过风险因素对建设期与运营期其他因素的影响,构

建高速公路 PPP 项目建运一体化因果关系。基于上述说明运用 VENSIM 软件建立因果关系图(图 1),以其中一条因果回路为例进行说明:建设质量风险→运营管理费→运营期成本→运营期实际收益→收益偏差→质量控制→建设质量风险,表明建设质量风险增加会增加运营期管理费,继而增加运营期成本,降低运营期实际收益,增大与预期收益的偏差,进而采取质量控制措施降低建设质量风险。

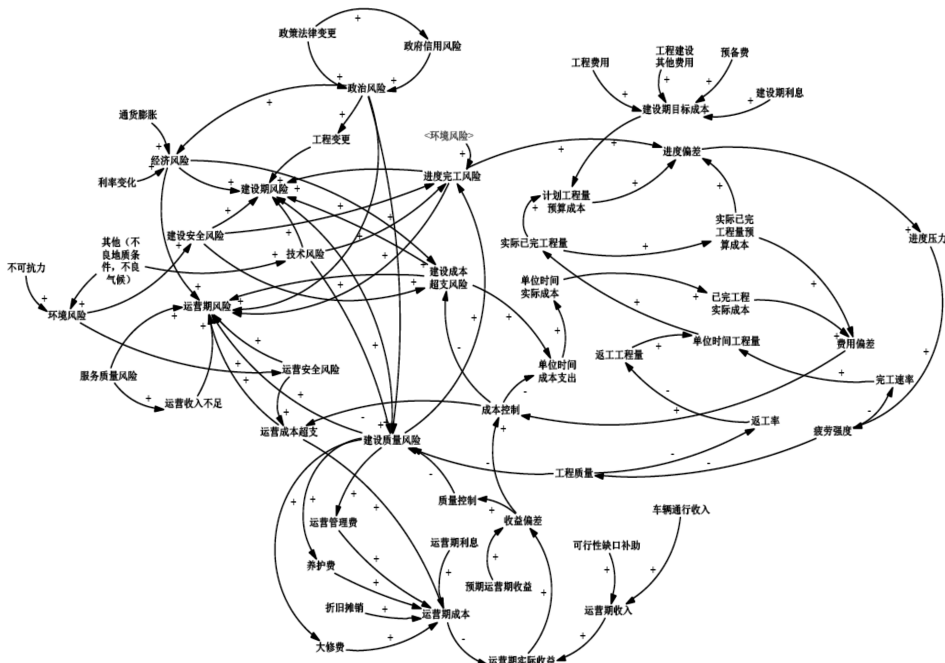


图 1 高速公路 PPP 项目建运一体化风险因果关系



表 3 信度效度分析结果

检测指标	数值
Cronbach's Alpha 系数	0.875
KMO	0.843

将分析有效的数据导入 AMOS 软件,得到 SEM 模型的各路径系数(图 4)。

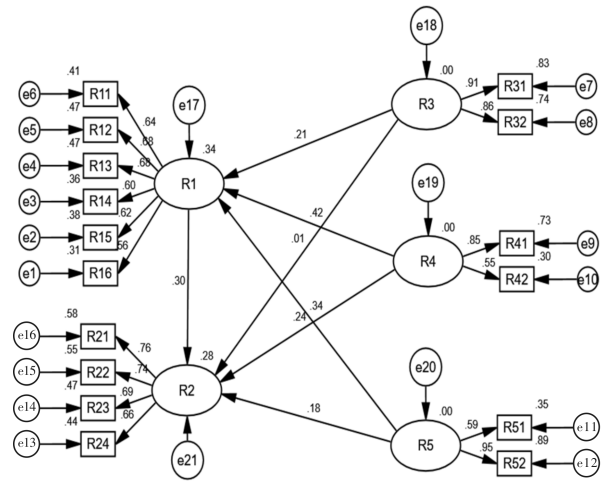


图 4 风险因素 SEM 标准化模型

模型建立后通过各检验指标分析,验证模型的拟合度,检验结果如表 4 所示,指标基本符合要求,证明模型拟合较好。

表 4 模型拟合检验

拟合参数	估计值	评价标准
$\chi^2/df$	1.256	$\leq 2$
GFI	0.934	$\geq 0.90$
AGFI	0.924	$\geq 0.90$
NFI	0.820	$\geq 0.90$
RMSEA	0.049	$\leq 0.08$
IFI	0.963	$\geq 0.90$
TLI	0.927	$\geq 0.90$
CFI	0.961	$\geq 0.90$
PCLOSE	0.844	$\geq 0.05$

基于以上模型及检验结果,通过式(1)计算各风险因素权重,以建设期风险为例可计算出建设期各风险因素权重(表 5)。

表 5 建设期风险因素权重

风险因素	权重
工程变更 $R_{11}$	0.169
完工风险 $R_{12}$	0.180
成本超支 $R_{13}$	0.180
建设安全风险 $R_{14}$	0.159
质量风险 $R_{15}$	0.164
技术风险 $R_{16}$	0.148

由此建设期风险可表示为:工程变更  $\times 0.169 +$  完工风险  $\times 0.18 +$  成本超支  $\times 0.18 +$  建设安全风险  $\times 0.159 +$  质量风险  $\times 0.164 +$  技术风险  $\times 0.148$ ,依此类推确定其他风险因素的权重及风险表达式。

(2)项目数据赋值。其他变量量化和模型模拟所需的数据都是通过实际项目施工文件和项目现场调查收集的,主要变量数据展示如表 6 所示。

表 6 主要变量数据

变量名	变量值
工程费	670 676
工程建设其他费	190 013
预备费	20 120
建设期利息	35 520
通货膨胀	0.02
利率变化	0.05
服务质量风险	0.39
不可抗力	0.02

(3)变量方程建立。基于前项工作、项目管理相关理论、三个子系统相关关系建立变量方程,主要函数表达式如表 7 所示。

表 7 主要变量函数表达式

变量名称	类型	变量函数表达式
建设期风险熵增量	速率	(工程变更 $\times 0.169 +$ 完工风险 $\times 0.18 +$ 建设成本超支风险 $\times 0.18 +$ 技术风险 $\times 0.148 +$ 质量风险 $\times 0.164 +$ 建设安全风险 $\times 0.159$ ) + PULSE TRAIN(1, 1, 1, 3)
建设期风险	状态	INTER(建设期风险熵增量, 0)
运营期净收益	辅助	运营期收入 - 运营期成本
实际已完工程量	状态	INTER(单位时间工程量, 0)

3. 模型检验

SD 模型建立后需对模型进行检验,验证所开发的模型是否能够合理地反映真实的系统。本文通过对各变量之间的逻辑关系及赋值进行进一步检验,以运营期收入为例来验证模型的有效性,用 vensim 输出检验结果(图 5),可行性报告中显示的运营期收入与模型测算的运营期收入基本一致,且分别设置 1、0.5、0.25 时间步长,该变量基本没有变化,说明该模型合理有效。

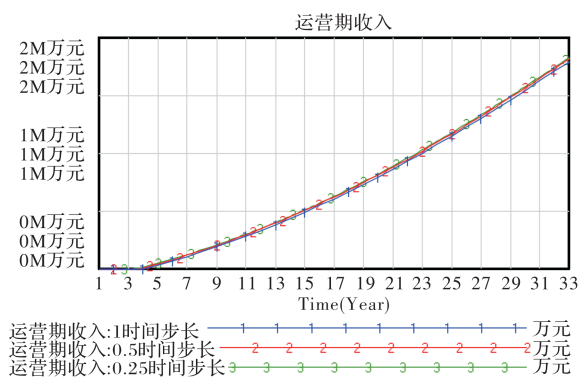


图5 运营期收入模型检验结果

#### 4. 模型仿真与分析

以逐年累计净收益为分析指标进行无风险存在和所有风险均存在两种情况下的模型仿真模拟(图6)。在无风险情况下,累计净收益变化如图5虚线所示,在第13年、第23年、第33年有大修理费支出,造成累计净收益小幅向下波动,总体趋势呈现增长状态并在27.82年转为正值,说明项目开始盈利;在所有风险均存在的情况下累计净收益变化情况如图6实线所示。同理,在第13年、第23年、第33年有小幅波动,整体变化增幅较慢,累计净收益持续为负值且与理想预期偏离较大,说明亟待对该项目风险进行严格管控。

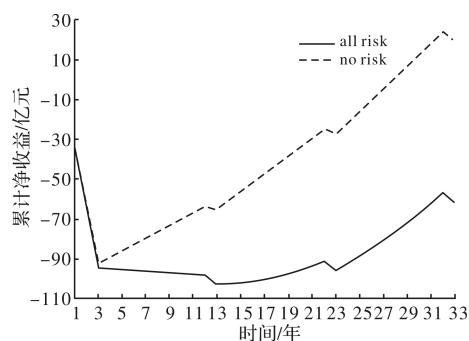


图6 两种情况模拟结果

根据三个子系统之间的相互联系,提取进度完工风险、建设成本超支风险、建设质量风险、运营收入不足风险及运营成本超支风险五个相关风险因素,模拟五个风险因素分别存在于系统中时净收益的变化趋势,模拟结果如图7所示。

进度完工风险独立存在时,模拟结果如图7标\*曲线所示,项目于3.44年完工,建设期工期延误,累计净收益在27.84年转为正值。

建设质量风险独立存在时,模拟结果如图7标菱形曲线所示。由于质量风险会造成返工工程量

增加,导致建设期工期延误,项目于3.11年完工,累计净收益在27.85年转为正值。

建设成本超支风险独立存在时,模拟结果如图7标+曲线所示,累计净收益增幅较前两种情况放缓且于28.4年转为正值。

当运营成本超支和运营收入不足风险单独存在时,模拟结果分别用图7中标o曲线与标x曲线表示,累计净收益一直处于负值,表明项目绩效未能满足要求,因为运营期风险大小会受建设期风险因素的影响,因此建设期多种风险耦合会加剧运营期风险,运营期风险会加剧项目绩效与理想收益之间的偏离。

由此可得,各风险因素对项目绩效的影响大小分别为运营期成本超支风险>运营收入不足风险>建设成本超支风险>建设质量风险>进度完工风险。

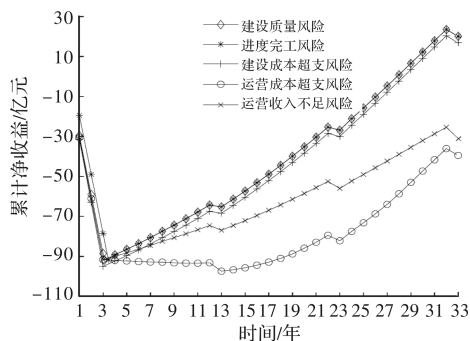


图7 五种风险模拟结果

根据上述模拟结果,基于本文研究目的及风险子系统的逻辑结构,探究建设期风险因素对运营期风险影响大小,对影响运营期风险的建设成本超支风险、进度完工风险、建设质量风险设置不同风险值进行模拟,risk1与risk2分别指其他风险值不变时建设成本超支风险的两种不同风险状态(图8);同理risk3与risk4指其他风险值不变时进度完工风险的两种不同风险状态(图9);risk5与risk6指其他风险值不变时质量风险的两种不同风险状态(图10),不同背景下运营期风险模拟结果如图8~图10所示。

根据模型方程建立与赋值,建设期成本超支风险、进度完工风险、建设质量风险由其影响因子风险值及权重决定,在建设周期内,风险效果累计,导致三种风险呈增长趋势,进入运营期后三种风险不变,但其风险效果仍会对运营期风险产生影响,运

营期风险受其影响因子及权重影响,风险值增加,导致运营期风险增加,累计风险值呈上升趋势,根据模型参数输出三种风险因素对运营期风险影响幅度(表 8)。

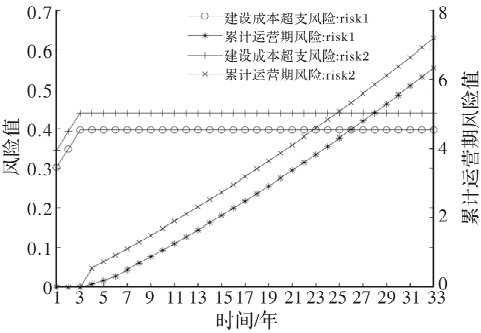


图 8 不同建设成本超支风险下累计运营期风险结果

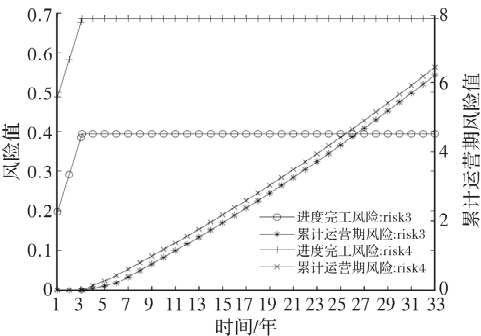


图 9 不同进度完工风险下累计运营期风险结果

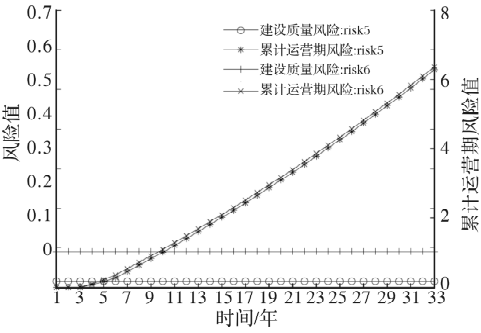


图 10 不同建设质量风险下累计运营期风险结果

表 8 不同风险下运营期风险增幅情况 %

风险类型	建设成本超支风险	进度完工风险	建设质量风险
增幅	4.36	29.04	7.50
累计运营期风险	85.38	22.55	8.23

可以看出,当进度完工风险与建设质量风险增幅大于建设成本超支风险时,引起的运营期风险增幅反而较小,而建设期成本超支风险增幅较小,引起运营期风险增幅较大,可见建设成本超支风险对运营期影响最大。为了减少运营期的风险,在进行

高速公路 PPP 项目建设期管理时,需着力控制建设成本。

四、结 论

通过实际项目调研及文献分析识别高速公路 PPP 项目建运两阶段风险,运用粗糙集约简方法删除冗余的风险因素,结合结构方程模型和系统动力学方法建立 SEM-SD 模型对高速公路 PPP 项目的建设期和运营期阶段风险进行相互关联分析,得出如下结论及建议。

(1)无风险存在时,模型结果显示项目正常运行。所有风险均存在的情况下运营期净收益持续为负值且与理想预期偏离较大,说明亟待对项目风险进行严格管控。

(2)对影响项目绩效的风险因素进行分析,运营期成本超支风险影响最大,进度完工风险影响相对较小。

(3)建设期多种风险耦合会加剧运营期风险,运营期风险会加剧项目绩效与理想收益之间的偏离,基于建设期风险对运营期风险影响程度分析,可以得出建设成本超支风险对运营期影响最大。

(4)从项目公司角度来看,为提高高速公路 PPP 项目的收益,保证运营期目标的有效实现,需在建设期实践中重点关注成本控制,在项目决策阶段制定合理的成本进度计划,制定统一完备的资金支付制度;在建设实施过程中,加大资金使用的监管力度,若存在成本偏差,及时采取相应的成本控制措施,降低因成本超支而运营期收入不足的可能性。

参 考 文 献

[1] 廖石云,肖彦,刘章胜. “一带一路”基础设施 PPP 项目面临的 风险与对策[J]. 建筑经济, 2019, 40(11): 9 - 13.

[2] 慈正开. 论高速公路 PPP 项目社会资本投资人的法律风险防范[J]. 公路, 2018, 63(5): 219 - 221.

[3] 袁义淞. 基于 ISM 模型和模糊综合评判的 BOT-TOT-PPP 项目集成融资风险研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2014, 39(5): 109 - 116.

[4] KUMAR L, JINDAL A, VELAGA N R. Financial risk assessment and modelling of ppp based indian highway infrastructure projects[J]. Transport Policy, 2018(62): 2

- 11.
- [5] 孙燕芳,杨欣月,王晓月. 高速公路 PPP 项目资产证券化融资的风险及其防范[J]. 财会月刊, 2019(9): 164 - 170.
- [6] 王松江,陈中奎. 多元联系数法在高速公路 PPP 项目风险评价中的应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(2): 130 - 142.
- [7] MAZHER K M, CHAN A P, ZAHOOOR 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).
- [8] LI J, ZOU, PXW. Fuzzy ahp-based risk assessment methodology for ppp projects[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137(12): 1205 - 1209.
- [9] 高崇阳,邵辉,毕海普,等. 电力建设项目风险管理的系统动力学模型[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(10): 137 - 143.
- [10] 向鹏成,聂晟,贾富源. 基于 SD 模型的海绵城市建设风险传导效应评价研究[J]. 建筑经济, 2020, 41(2): 108 - 114.
- [11] 白芙蓉,曾天浩,邵慧. 管廊 PPP 项目可持续性风险系统动力学仿真研究[J]. 财会月刊, 2020, 884(16): 133 - 139.
- [12] 陈伟,孙翔君,王朝晖,等. 装配式建筑预制构件质量链管控 SD 模型[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(6): 14 - 20.
- [13] 王军武,陈旭婷,吴寒. 基于 SD 模型的地铁盾构施工人员安全能力仿真[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(5): 108 - 114.
- [14] 任立,吴萌,甘臣林,等. 基于 SEM - SD 模型的城市近郊区农户土地投入行为决策机制仿真研究[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 286 - 297.
- [15] 张秀东,王基铭. 大型石化项目风险管理与项目绩效的关系[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(1): 41 - 52.
- [16] 赵辉,董骅,屈微璐. 构建基于改进系统动力学的环保 PPP 项目风险动态评价体系[J]. 财会月刊, 2017(27): 65 - 71.
- [17] 陈伟,武亚帅,邹松,等. 基于 SEM 的装配式建筑建造成本影响因素分析[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(5): 50 - 55.

## A Research of SEM-SD Risk Analysis of Expressway PPP Project Based on Construction-operation Integration

HU Yun-pin<sup>1</sup>, MING Zhao<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Wuhan Engineering Construction Standard Quota Management Station, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Expressway PPP projects involve many risk factors in the process of integrated construction-operation management. Effective pre-management of risks is required during the construction period to ensure the realization of the performance in the operation period. From the perspective of the project company, this paper analyzes the risks of expressway PPP project in both stages of construction and operation. The study identifies the two-stage risks by field research and literature analysis, employs Rough Sets to dynamically reduce the key risk factors and thus establishes System Dynamics (SD) model of the construction-operation integration risk of expressway PPP project. The calculation of Structural Equation Modeling (SEM) is used to determine the weight of each risk factor and the correlation of variables. Typical projects are selected for example analysis. The results show that impact size of various risk factors on project performance is ranked as cost overrun risk in operation period, insufficient operating income risk, construction cost overrun risk, construction quality risk, and schedule completion risk. Moreover, the multiple risk coupling in the construction period will aggravate the risks in the operation period and intensify the deviation between the project performance and the ideal return.

**Key words:** expressway project; construction-operation integration; PPP; risk control; System Dynamics

【编辑 高婉炯】