

城市轨道交通 PPP 项目 运营期风险评估研究

吴守荣 王程程 阎祥东

(山东科技大学土木工程与建筑学院 山东青岛 266590)

摘 要 采用层次分析法和系统动力学法,对城市轨道交通 PPP 项目运营期风险因素进行识别,建立风险系统流程图;在层次分析法和熵值法确定风险因素权重的基础上,运用 Vensim PLE 软件评估项目的总体风险水平,得出城市轨道交通 PPP 项目运营期风险 SD 模型仿真结果。

关键词 轨道交通;PPP 项目;系统动力学;风险评估;系统流程图;Vensim PLE 软件;SD 模型

中图分类号 U231;F272.13 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2016)05-0036-05

以地铁为代表的城市轨道交通项目在一些城市中快速发展,使得轨道交通的建设需求和巨大的资金需求之间的矛盾也越来越严峻,政府以 PPP 融资模式为契机,与社会资本合作,吸收大型企业资本金,很好地缓解了城市轨道交通类项目建设的资金压力。

PPP 融资模式下政府给予私营企业回收资本的特许经营期,在特许经营期内风险水平的度量既是项目正常运营的前提,也是政府和私营企业双赢的关键。城市轨道交通项目是一个复合动态系统,风险因素具有隐藏性、复杂多变性、相互影响性等特点,运用研究元素间因果关联性的系统动力学理论得出的风险水平评估更合理、更科学。

1 城市轨道交通 PPP 项目运营期风险分析

轨道交通 PPP 项目资金需求大、参与者多、公益服务性与盈利性共存,既要通过社会服务满足政府的公益性要求,同时要获得预期收益满足投资方的盈利要

求,整个 PPP 模式很好地诠释了政府部门和私营企业之间的优势互补、利益共享^[1-2]。在较长的特许经营期内,影响 PPP 项目平衡收支的不确定性因素称之为运营期风险,主要是由轨道交通设备、人员、环境及信号系统的不协调配合引起的,任何一方出现问题都会给项目带来影响,这同时也决定了其运营期风险的复杂多样性。

基于按风险起因分类的原则,参考相关案例,运用风险核对表法对运营期风险因素进行识别,将初步模糊评价后不符合大环境的,以及对相关案例用实践经验进行分析后表明影响水平较低的指标剔除^[3],确定项目的风险因素为市场风险、完工风险、安全风险、经营管理风险和不可抗力风险共五大风险类型。

本文风险分类单纯地考虑了会对运营期带来显著影响的因素,所以把安全、经营管理风险单独列为两大风险。将经济、法律因素的影响归入了市场风险中,基于系统动力学,建立风险识别流并考虑了风险因素之间的交互关联影响,完工风险中质量无法达到预期标准或者遗留的质量问题,以及建设成本控制超支对后期运营带来的影响,所以本文的运营期风险考虑了完工风险。

1.1 市场风险

市场是城市轨道交通项目运营的基础,其主要风险源有新建或改建其他的项目而带来的商业竞争,由于经济前景的不确定性产生的价格变化,以及社会政治环境、人口变化、法律法规调整等因素导致的人们对于此种交通方式的认可度、需求度和利用度的变化,主要包括价格风险及需求风险。

1.2 完工风险

城市轨道交通项目多为大型、复杂的长期建设项目,建设过程中的工期、成本、质量控制、资金分配等实

收稿日期: 2016-08-03 修回日期: 2016-08-11

作者简介: 吴守荣,男,教授,研究方向:工程项目管理、交通运输规划与管理、矿山建设,171118593@qq.com

施情况与进程将直接影响项目的运营和发展。工程质量控制失效,导致潜在的安全风险因素增多,会影响运营期的正常运营。另外,PPP 模式合同关系复杂,任何一方出现信用问题,如未经政府方同意,社会资本方擅自出租、质押转让项目经营权或变更索赔等,都会导致成本控制失效,收益减少,使投资者不能获得预期收益,这就破坏了社会效益最大化下平衡项目收支所依存的基础^[4]。

1.3 安全风险

安全风险是运营期最易发生,也是影响最大的风险,包括人员安全、设备安全及环境安全。轨道交通车站为人口密集地,当人员、设备、环境、管理四大因素之间关系不协调时就容易出现突发事件。乘客们又大多缺乏应急能力,发生突发安全事故时,现场人员疏散难度较大,工作人员组织协调能力不够时^[5],将带来经济损失和社会影响,甚至可能造成大批人员伤亡。

1.4 经营管理风险

国家发改委于 2015 年实施的新文件中规定了部分特许经营期内的政府补贴机制^[6],但由于目前我国市场经济发展进程中,对于开发应用 PPP 模式于城市轨道交通项目上的市场化运作,缺乏一定的运营管理经验。由运营服务质量及工程设计不合理带来的维护费用增加,政府在管理过程中越权过度干预^[7],对价格和利润进行限制,项目公司缺乏经验使运营期管理不当,操作系统不够完善等因素都会引起风险的发生。

1.5 不可抗力风险

不可抗力风险主要指项目在运营前期及运行中无法预测并采取措施防范,发生时又无法回避的风险事件,主要指地震、洪涝灾害等自然风险以及恶意暴乱等社会风险。

2 系统风险流图的构建

2.1 系统动力学简介

系统动力学指通过建立流图,直观描述积分变量与辅助变量之间的正反馈与负反馈关系,模拟因素为相互作用下项目发展动态的理论。其中,选取具有代表性的可视化建模软件—Vensim PLE 来进行仿真模拟,建立仿真模型,在建模过程中运用箭头线将运营期风险因素间的因果关系联系起来,箭头的指向代表了极性,其中正反馈具有同向强化的作用,负反馈具有反向调节的行为^[8]。

2.2 确定系统边界

本实例中系统边界点是指轨道交通 PPP 项目的风险系统与整个基础设施项目大环境的分割界限点,即风险因素。令 U 为风险评价指标集, $U = \{u_1, u_2, u_3 \cdots u_n\}$, n 为一级指标个数,用层次分析法对每一个一级风险指标做二次分解细化, $U = \{u_{n1}, u_{n2}, u_{n3} \cdots u_{nm}\}$, m 为所属第 n 个指标的二级指标个数。将与建模密切相关的风险量归入边界内,并选取细化后对项目影响显著的 12 项二级风险因素作为本模型的边界点。

2.3 建立系统风险流图

轨道交通运营期风险因素是一个交互错杂的动态系统,各子系统之间不是孤立存在的,某个阶段的风险出现后依附于人员、设备、环境等扩散传递,进而影响整个城市轨道交通系统的稳定状态。基于系统动力学变量间相互影响反馈的特点,应用系统动力学仿真软件 Vensim PLE 建立图 1 所示的系统动力学风险识别流图,用单向箭头线明确各风险因素间的相互联系。

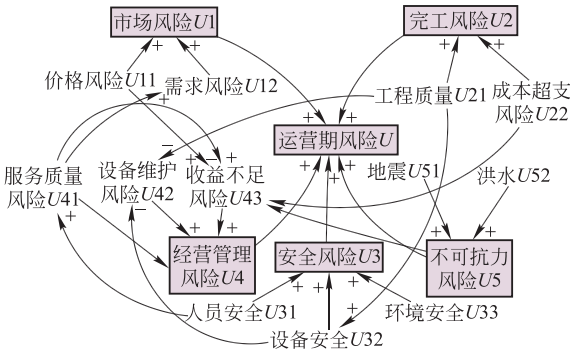


图 1 风险识别流

2.4 运营管理风险反馈环分析

根据风险反馈识别模型对引起这些风险的主要因素流以及风险引起的结果流进行识别,选取具有代表性的“经营管理风险”进行详细的识别说明。

在 PPP 模式下主要依靠收取车票的方式来平衡成本支出,票价的高低以及现场服务质量的好坏直接影响着人们的需求,加上现场流动人员的乘车素质和应急安全能力都会带来收支的波动,容易引起收益不足的风险。项目建设过程中遗留的质量问题、设备安全问题等都会使得设备维护风险增加。因此,运营期经营管理风险受到服务质量、设备维护以及项目收益风险的直接影响,同时又处于价格风险、需求风险等因素交互关联的影响作用下。

由辅助变量—服务质量风险 $U41$ 逐级反向追溯,得到如图 2 所示的经营管理风险反馈环。每项运营期风险原因树分枝上的风险因素越多,该风险受各因素的影响越大,运营期间越容易发生,同时给项目带来的不利影响越大,反之亦然。

同理,对二级风险因素使用树模拟可知,风险后果越多,该风险引起的损失越严重。在运营过程中要对此风险高度重视,采取积极预防措施,以免次生风险的发生。

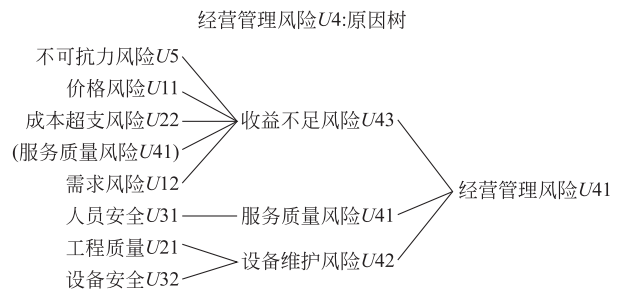


图 2 风险因素反馈环

3 城市轨道交通系统 SD 模型的建立

3.1 系统边界变量赋值

模型中需要的参数有各风险变量的初始值、辅助变量的权重参数等^[9],为使模拟结果更符合项目实际,采用系统动力学中的综合集成赋权法进行每项指标 U_{nm} 权重 ω_{nm} 的计算,考虑每项风险因素的功能性,用层次分析赋权法确定主观权重,同时考虑因素间的差异性用熵值法确定客观权重,组合权重 $\omega_{nm} = p_1\omega_{1,nm} + p_2\omega_{2,nm}$,其中

$$p_1 = \frac{(\sum_1^m \omega_{1,nm})^2}{\sqrt{(\sum_1^m \omega_{1,nm})^2 + (\sum_1^m \omega_{2,nm})^2}}$$
$$p_2 = \frac{(\sum_1^m \omega_{2,nm})^2}{\sqrt{(\sum_1^m \omega_{1,nm})^2 + (\sum_1^m \omega_{2,nm})^2}}$$

3.1.1 用层次分析法确定主观权重 $\omega_{1,nm}$

首先,采用 1~9 的标度来表示各指标之间的相对重要程度,构造两两判断矩阵 R ,经营管理风险 $U4 = \{\text{服务质量风险 } U41, \text{设备维护风险 } U42, \text{收益不足风险 } U43\}$,请有经验的建筑行业专家对识别出的风险评价指标集因素进行重要度分配和打分,经过专家的判断决策得到经营管理风险各级指标的判断矩阵,计算判断矩阵的特征值和最大值,进行层次单排序的一致性检验(见表 1)。

表 1 经营管理风险相关因素的判断矩阵

$R4$	$U41$	$U42$	$U43$	$\omega_{1,4m}$
$U41$	1	1/5	1/4	0.101
$U42$	5	1	2	0.565
$U43$	4	1/2	1	0.334
$\lambda_{\max} = 3.0248, CI = 0.0124, C.R. = 0.021 < 0.1$				

其中, λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值, CI 为不一致程度指标, RI 为平均随机一致性指标(为常数,查表可得), $C.R. = CI/RI$ 为一致性检验系数,当 $C.R. \leq 0.1$ 时满足一致性检验。表 1 $CR < 0.1$, 满足一致性检测。最终得到引起经营管理风险的所有二级风险因素的权重系数分别为服务质量风险 $\omega_{1,41} = 0.101$, 设备维护风险 $\omega_{1,42} = 0.565$, 收益不足风险 $\omega_{1,43} = 0.334$, 同理计算其他风险权重。

3.1.2 用熵值法确定客观权重 $\omega_{2,nm}$

采用 5 级评判方法,每个评价等级分别对应风险等级的大小,依次为高、较高、一般、较低、低^[10],记为 $V = \{V1, V2, V3, V4, V5\} = \{\text{高, 较高, 一般, 较低, 低}\} = \{0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1\}$ 。总结专家对影响项目的风险因素等级大小评价的结果,得到表 2 所示的专家评价样本统计表,表中数据代表每项风险等级下专家选择人数百分比 N_{mj} ($m = 1, 2, 3$ 代表经营管理层下二级风险的个数; $j = 1, 2 \cdots 5$ 代表 5 级风险等级个数,下文公式中字母代表相同含义)。

表 2 专家评价样本

阶段	风险类型	高	较高	中等	较低	低
经营管理风险 U4	服务质量风险 $U41/\%$	20	30	30	10	10
	设备维护风险 $U42/\%$	10	10	10	50	20
	收益不足风险 $U43/\%$	20	20	30	20	10

计算经营管理风险层下第 m 项指标的比重 X_{mj} 和指标信息熵 e_m ^[11]

$$X_{mj} = \frac{V_j N_{mj}}{\sum_1^5 V_j N_{mj}}, e_m = -k \sum_1^5 X_{mj} \ln X_{mj}, k = 1/\ln j。$$

最后,计算信息熵冗余度 $d_m = |1 - e_i|$,则指标权重为 $\omega_{nm}^2 = \frac{d_m}{\sum_1^3 d_m}$,经营管理风险权重系数 $\omega_{2,4m}$,计算结果如表 3 所示。

在经营管理风险层下, $p_1 = 0.566, p_2 = 0.434$, 则组合权重 $\omega_{4m} = (0.173, 0.489, 0.338)$ 。



表 3 熵值法确定客观权重

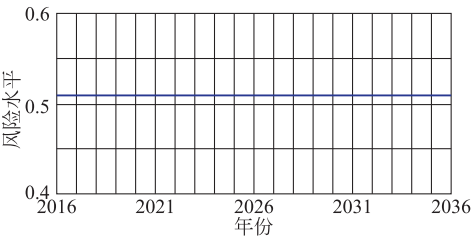
风险因素	X_{mj}					e_m	d_m	$\omega_{2,4m}$
U_{41}	0.310 3	0.362 1	0.256 8	0.051 7	0.01 7	1.303 1	0.303 1	0.267 2
U_{42}	0.236 8	0.184 2	0.131 6	0.394 7	0.052 6	1.441 4	0.441 4	0.389 2
U_{43}	0.333	0.259 3	0.277 8	0.111 1	0.018 5	1.389 7	0.389 7	0.342 0

3.2 建立方程

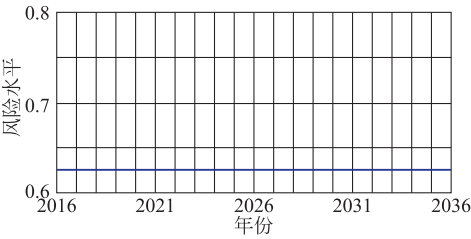
选择 Vensim PLE 软件,对建立的风险识别流进行模拟,将编辑器中出现的可以影响经营管理风险的全部因素选入,赋予相应权重,得到经营管理风险 = $0.173 \times$ 服务质量风险 + $0.489 \times$ 设备维护风险 + $0.338 \times$ 收益不足风险。选择类型为辅助变量,按同样方法对其他风险因素进行计算,完成仿真方程的输入。

3.3 仿真模拟

模型建立完成后,进行模拟,借鉴已完工案例特许经营期,将 SD 模拟的仿真时长设为 25 年,仿真步长为 1 年。点击工具栏上的  按钮,选择任何一项风险因素变量,点击工具栏的  按钮,即可得到该风险因素的风险水平模拟图。不同子系统风险水平的变化量共同加权为城轨系统 PPP 项目总体运营期的风险水平(见图 3)。



(a)经营管理风险U4



(b)运营期风险U

图 3 SD 风险模拟结果

4 模拟结果分析

1) 由模型模拟的结果得出,城市轨道交通 PPP 项目运营期总体风险水平(0.621 6)为中等偏上。这是

由于 PPP 作为一种探索应用的融资模式,将 PPP 模式与城市轨道交通项目相结合的市场化运作模式经验不足,在运营过程中易出现问题,风险水平略高。

2) 在以上所有风险中,经营管理风险权重值为 0.505 8,为最严重风险,轨道交通系统在运营过程中后期设备系统老化、服务管理松懈等问题出现后,必然有一些不可控的风险出现,使得经营管理风险总体水平较高。其中,收益不足风险(0.333 9)极易发生,投资者能否获得预期收益是 PPP 项目是否成功的关键,应当提前做好预警及风险应对方案。

3) 安全风险(0.336 8)为运营过程中第二大风险因素,应该采取相应措施进行预防控制,如定期进行设备的检测维修,加强对车站工作人员组织能力以及引导疏通能力的培训,做好安全警示、方向指引等,将风险损耗降到最低。同时,政府作为监督者,应组织专业人员对 SPV 公司(special purpose vehicle,特殊目的公司)进行监督,严格控制好工程质量、运营维护等工作。

4) 在市场风险中,价格风险影响显著,作为公共服务设施,在票价的制定上要顺应民意,借鉴其他大城市的票价制定情况,同时政府要给与一定的政策扶持,保证投资方的产出与收益平衡。

5 实例分析

5.1 项目简介

2009 年竣工后顺利运营的北京地铁 4 号线,是我国内地首先采用 PPP 模式的轨道交通项目,全长 28.65 km,共设 24 个车站,连接西城区南北,包括土建工程和机电设备工程两大部分。采用政府与北京京港地铁有限公司共同出资的 PPP 融资模式,特许经营期为 30 年。途径车站、景区等客流量大的区域,并允许站内商业营运,市场收益领先于其他地铁路线^[12]。以 4 号线为例,运用系统动力学法,对其进行运营期风险水平评估。

5.2 运营期风险评估

基于图 1 风险识别流和地铁 4 号线的工程实际,对系统边界变量赋值,确定主观权重和客观权重。运营期风险层下相关判断矩阵和专家评分如表 4、5 所示,按上文所述步骤进行 SD 模型的仿真模拟,得到系统动力学下的运营期风险水平 SD 模拟结果见图 4。

根据以上 SD 模拟结果可知,该地铁运营期风险水平为 0.510 9,属于中等水平,表明该项目运营期运营状况良好,与地铁的实际运行状况相符。

表 4 4 号线风险因素判断矩阵

R	U1	U2	U3	U4	U5
U1	1	1/5	1/7	1/3	3
U2	5	1	1/3	1/3	5
U3	7	3	1	3	5
U4	3	3	1/3	1	5
U5	1/3	1/5	1/5	1/5	1

表 5 4 号线风险因素专家评价样本

风险类型	高	较高	中等	较低	低
U1/%	10	20	30	20	20
U2/%	5	20	40	25	10
U3/%	30	20	40	10	0
U4/%	20	30	30	15	5
U5%	0	5	40	40	15

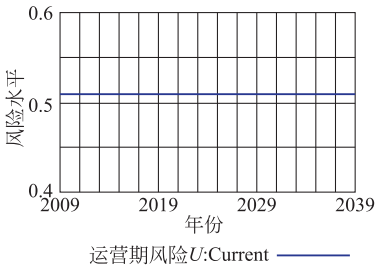


图 4 4 号线 SD 风险模拟结果

6 结论

1) 经过实例论证得到,基于系统动力学建立的城市轨道交通 PPP 项目的风险识别流,符合我国轨道交通系统的大环境,采用层次分析法和熵值法相结合的综合集成赋权法,消除了专家个人主见对权重带来的误差,模拟的 SD 模型能系统预评估运营期风险水平,为以后的轨道交通项目运营期风险管理提供了参考依据。

2) 在项目建设前期,可根据工程实际,调整风险识别流中的风险因素,重新分配风险权重进行风险水

平再评估,有利于对不同项目风险系统提前建立风险应对方案,减小运营期的损失。

3) 基于本文的 SD 风险模型评估结果,对不同的风险因素采取不同的应对措施,如通过加强设备保养维护、提高运营管理服务水平等来降低安全风险的经营管理风险的发生概率。同时,还需要制定合理的风险分担机制,明确政府和社会资本方的责任,确保风险发生后能快速处理,从而实现 PPP 模式的双赢。

参考文献

[1] 袁明霞. 城市轨道交通项目 PPP 融资模式的风险识别[J]. 现代经济信息, 2015(10): 414.

[2] 孔荣. 轨道交通项目 BOT + TOD + EPC 模式的思考[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(3): 60 - 64.

[3] 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(1): 60 - 65.

[4] 滕铁岚, 袁竞峰, 李启明. 城市轨道交通 PPP 项目回报机制的案例对比分析[J]. 建筑经济, 2016(2): 31 - 35.

[5] 陈鹏, 张璋. 影响城市轨道交通安检速度的乘客特征分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016(5): 5 - 14.

[6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 基础设施和公用事业特许经营管理办法[A]. 北京, 2015.

[7] 李虹, 黄丹林. PPP 项目风险管理研究综述[J]. 建筑经济, 2014(6): 37 - 41.

[8] 宁晓倩. 基于系统动力学的软件开发项目管理[D]. 上海: 复旦大学, 2004.

[9] 马伶俐. 城市轨道交通运营期耦合研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[10] 闫国栋. 基于系统动力学的建设工程风险管理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[11] 赵萌, 任嵘嵘, 李刚. 基于模糊熵-熵权法的混合多属性决策方法[J]. 运筹与管理, 2013(6): 78 - 83.

[12] 田振清, 任宇航. 北京地铁 4 号线公私合作项目融资模式后评价研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011(12): 5 - 9.

(编辑: 郝京红)

Research on Risk Level Assessment of Urban Rail Transit PPP Project in Operation Period

Wu Shourong Wang Chengcheng Yan Xiangdong

(School of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590)

Abstract: This paper identifies risk elements of urban rail transit PPP project in operation period and sets up risk system flow diagram with adoption of the analytic hierarchy process and the system dynamics. It evaluates the overall risk level of the project with Vensim PLE on the basis of confirming the weight of risks with the analytic hierarchy process and the entropy method and then finds out risk SD model simulation results of rail transit during operation period.

Key words: rail transit; PPP project; system dynamics; risk level assessment; system flow diagram; Vensim PLE; SD model