

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.01.010

# 城市轨道交通 PPP 项目系统脆弱性研究

凤亚红, 马慧圆, 刘瑞华

(西安科技大学管理学院, 西安 710054)

**摘要:** 在界定城市轨道交通政府与社会资本合作模式(public-private partnership, PPP)项目脆弱性概念与分析其形成机理的基础上, 通过大量案例和相关文献, 识别出对城市轨道交通 PPP 项目脆弱性产生影响的多个因素, 从敏感性、适应性和暴露性 3 个维度建立系统动力学模型, 定性与定量分析各影响因素间的因果关系, 并选取实际案例验证该模型的适用性, 并对模型中的常量进行系统动力学仿真分析, 识别出城市轨道交通 PPP 项目脆弱性的关键影响因素。仿真结果表明, 人员沟通有效性、特许权协议合理性和社会资本经济实力会对城市轨道交通 PPP 项目脆弱性产生显著影响, 在项目中要重点关注这 3 个因素。

**关键词:** 城市轨道交通; PPP; 脆弱性; 系统动力学

**中图分类号:** F283

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6073(2023)01-0065-08

## System Vulnerability of Urban Rail Transit PPP Project

FENG Yahong, MA Huiyuan, LIU Ruihua

(College of Management, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054)

**Abstract:** By defining the concept of vulnerability of urban rail transit PPP projects and analyzing their formation mechanisms by using a large number of relevant cases and literature, multiple factors affecting the vulnerability of urban rail transit PPP projects were identified. The system dynamic model was constructed from the three dimensions of sensitivity, adaptability, and exposure, and the causal relationships among various influencing factors were analyzed qualitatively and quantitatively. Then, a practical case was selected to verify the applicability of the model, and the constants in the model were simulated and analyzed to identify the key factors affecting the vulnerability of urban rail transit PPP projects. The simulation results showed that the communication effectiveness of personnel, reasonableness of franchise agreement, and economic strength of social capital have a significant impact on the vulnerability of the project, and these three factors should be the focus of the project.

**Keywords:** urban rail transit; PPP; vulnerability; system dynamic

随着低碳交通概念的提出, 城市轨道交通的低能耗、高效率等特点逐渐被社会和公众青睐, 越来越多的人使用城市轨道交通方式出行。截至 2021 年底, 我国内地累计有 50 个城市开通城市轨道交通, 运营线路超 9 000 km, 部分城市的轨道交通日客运量也由

之前的几万人次增长到上千万人次<sup>[1]</sup>。但城市轨道交通项目具有建设规模大、投资回收期长等特点, 加之我国政府财政资源紧缩, 政府与社会资本合作模式(public-private partnership, PPP)已成为该领域中多元化融资的重要手段。PPP 模式可以撬动社会资金, 缩

收稿日期: 2021-11-01 修回日期: 2022-03-05

第一作者: 凤亚红, 女, 博士, 副教授, 从事项目管理研究, 2437578442@qq.com

基金项目: 教育部人文社会科学规划基金项目(21YJA630078); 陕西省教育厅软科学研究计划一般项目(2021KPM149)

引用格式: 凤亚红, 马慧圆, 刘瑞华. 城市轨道交通 PPP 项目系统脆弱性研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 65-72.

FENG Yahong, MA Huiyuan, LIU Ruihua. System vulnerability of urban rail transit PPP project[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 65-72.

短前期工作周期,缓解政府财政压力,也可以引进社会资本的先进技术和管理经验,为社会和公众提供更好的服务。但城市轨道交通 PPP 模式在我国起步较晚,理论和实践研究都不够丰富,仍面临很多风险。纵观现有研究,对风险 3 要素(危险源、系统脆弱性、后果)中的危险源和风险后果的研究已经相对成熟,但是其中最重要的一环——系统脆弱性的研究还是相对薄弱。

系统脆弱性最早起源于对生态系统的研究,后来被应用于多个领域。目前的研究内容主要涉及脆弱性概念的界定<sup>[2]</sup>、脆弱性与风险的关系<sup>[3]</sup>、脆弱性评估框架的建立以及脆弱性的评价方法和对策分析等<sup>[4-5]</sup>。在工程项目领域,我国部分学者对项目脆弱性的研究也有一些成果,向鹏成等<sup>[6]</sup>使用复杂网络理论对跨区域重大工程项目系统脆弱性进行评估;季闯等<sup>[7]</sup>引入可靠性理论对 PPP 项目的脆弱性进行评估;吴和成等<sup>[8]</sup>借助网络模型对 PPP 项目的脆弱性进行评价;白海卫等<sup>[9]</sup>基于突变理论的基本原理,对新建地铁项目的脆弱性进行评价等。

但是现有研究还存在着两点不足:①对城市轨道交通 PPP 项目的脆弱性进行研究的文献过少。作为运载量极大的 PPP 项目,当其系统脆弱性较高时,不但会给社会资本带来经济损失,还会对社会造成不可估量的后果。②现有文献对脆弱性的评价缺乏整体、系统观。在对影响因素识别时,没有对系统边界进行区分,这不利于对脆弱性本质的理解及影响因素的识别与分析;且现有研究使用的方法多将项目当成一个静态的、封闭的系统,未考虑系统的流动性,不能对脆弱性的未来趋势进行很好地预测,这意味着不能系统、全面地提出降低脆弱性的措施,而系统动力学方法恰好能弥补以上不足。因此,本文利用系统动力学方法对城市轨道交通 PPP 项目的脆弱性进行研究,运用 Vensim 软件建立因果回路图和存量流量模型,定性定量分析各影响因素间的关系,并选取实际案例对其脆弱性进行分析,确定城市轨道交通 PPP 项目脆弱性关键影响因素,以便对其脆弱性进行更好地控制。

## 1 PPP 项目脆弱性内涵及形成机理

脆弱性作为项目系统内部的一种属性,通常被用来描述系统的健康程度,系统的脆弱性越高,表示该系统抵御外部不利环境的能力越弱,最终造成的风险后果越大<sup>[3]</sup>。根据脆弱性的一般定义,本文将城市轨

道交通 PPP 项目脆弱性定义为:城市轨道交通 PPP 项目系统暴露于不利环境时,系统自身抵抗不利事件的影响并从中恢复的能力。其脆弱性是城市轨道交通 PPP 项目与所在环境相互作用的一种结果,既考虑系统内部条件的影响,又考虑内部条件和外部环境的相互作用,如图 1 所示。

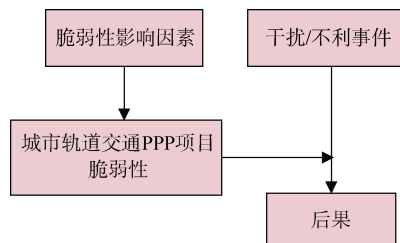


图1 城市轨道交通 PPP 项目脆弱性分析结构  
Figure 1 Vulnerability analysis structure chart of urban rail transit PPP projects

系统脆弱性是系统的一种客观属性,由脆弱性影响因素诱发,它本身并不会对项目造成任何负面影响,只有在外部不利事件的作用下,才会表现出与其相关联的诱发机制<sup>[7]</sup>,并在此作用下对项目造成实际的风险后果。由此可见,加强对脆弱性影响因素的控制,可以有效避免不利后果的产生,提高项目管理效率。

一般来说,脆弱性的内涵离不开敏感性、适应性和暴露性 3 个要素。敏感性是指系统对不利扰动的敏感程度,即系统在承受一定强度的扰动后损失的难易水平;适应性是指系统在受到不利扰动影响后的自我调整,恢复甚至改变不利状态的能力;暴露性是指系统暴露于不利扰动的可能性,即系统在外部不利环境影响下发生风险后果的可能性。

## 2 PPP 项目脆弱性影响因素

本文结合城市轨道交通 PPP 项目的特点,采用案例分析和文献识别方法,对国内外城市轨道交通 PPP 项目脆弱性影响因素进行识别。

### 2.1 基于案例的脆弱性影响因素识别

城市轨道交通 PPP 项目系统脆弱性具有隐蔽性,在系统正常运转时无法体现。因此,由城市轨道交通 PPP 项目出现的事件或事故是了解其脆弱性的重要途径<sup>[10]</sup>。通过查阅城市轨道交通 PPP 项目事故相关的文献和网络收集案例的方法,收集到近年来国内外出现的 200 起城市轨道交通 PPP 项目事故。经过分析发现,事故类型主要有 9 种:其中列车故障占比 21%;恐怖袭击占比 7%;土建设施事故占比 8%;停电事故占比

9%；自然灾害占比 4%；火灾事故占比 6%；列车相撞占比 11%；列车脱轨占比 23%；乘客事件占比 11%。

对事故案例进行分析时发现导致这些事故的原因主要有：人员安全意识差、设备可靠性低、施工质量不合格、选址处地理环境复杂、管理能力低和经验少、教育培训力度不足、自然灾害等，这些因素可以作为城市轨道交通 PPP 项目的脆弱性影响因素。

2.2 基于文献的脆弱性影响因素识别

为全面识别出城市轨道交通 PPP 项目脆弱性影响因素，在案例识别的基础上，通过文献分析法对脆弱性影响因素再次识别，识别出的影响因素如表 1 所示。

表 1 城市轨道交通 PPP 项目脆弱性影响因素  
文献分析

Table 1 Document analysis of factors influencing vulnerability of urban rail transit PPP projects

序号	脆弱性因素	说明	文献来源
1	经济、金融环境	金融和资本市场的成熟度，通货膨胀的变化幅度	6, 7, 8, 11, 12, 13
2	政策及法律因素	相关政策和法律政策的完善程度	6, 7, 8, 12, 14, 15
3	公众态度	公众对项目的支持力度	6, 7, 12, 14, 16
4	项目管理能力	项目参与方对项目的管理有效程度	6, 7, 14, 15, 16
5	社会资本经济实力	社会资本的融资能力、财务风险管控能力	6, 7, 14, 16
6	参与主体态度	参与主体对项目持有的重视程度	6, 7, 12, 14, 15, 16
7	相关经验	政府和社会资本参与该类项目的次数和积累的经验	6, 7, 12, 14, 16
8	政府作为	项目运行过程中政府的积极作为程度	6, 7, 12
9	项目所处地理位置	项目的地理位置优劣势程度	6, 7, 8, 12, 14, 16
10	项目资本结构	政府和社会资本在项目中的资金构成和出资关系比例	12, 15
11	项目规模	项目规模大、技术复杂，易受不利影响的程度	6, 7, 8, 13, 14, 16
12	项目目标达成度	项目目标的达成情况	13, 16
13	沟通有效性	参与方的沟通合理、信息传递有效程度	6, 7, 8, 14, 15
14	特许权协议合理性	机制措施的合理完善程度，风险分配合理程度	6, 7, 8, 13, 14, 15
15	履约情况	政府和社会资本方履行合同约定程度	6, 12

将识别到的因素进行整理，合并概念相似的因素，并根据对城市轨道交通 PPP 项目系统脆弱性的定义，删除系统边界外的影响因素(如经济、金融环境、社会

环境、政治环境、自然环境等)，仅从系统内部寻求影响因素，并将剩下的影响因素按照脆弱性的 3 个维度进行分类。

敏感性主要由项目自身情况决定；适应性主要由项目参与方能力方面的因素决定；暴露性由项目需求条件方面的因素决定<sup>[12]</sup>。各维度下的影响因素及其衡量指标如表 2 所示。

表 2 城市轨道交通 PPP 项目脆弱性影响因素  
Table 2 Factors influencing the vulnerability of urban rail transit PPP projects

维度	影响因素	衡量指标
敏感性	项目规模	项目投资额
	项目所处地理位置	项目地理位置劣势
	项目目标达成度	社会目标达成度
		经济目标达成度
适应性	项目资本结构	项目资本结构合理程度
	项目管理者能力	相关经验
		管理能力
	参与主体态度	社会资本对项目重视程度
		政府对项目重视程度
	政府作为	政府作为情况
暴露性	履约情况	履约程度
	社会资本经济实力	社会资本经济实力
		沟通有效性
		人员安全意识
	建设运营质量	技术能力
		风险分配合理程度
	特许权协议合理性	机制措施完整程度
		合理选择程度
		设备损耗程度
	设备可靠性	设备维修质量

3 基于系统动力学的评价模型

3.1 建立因果关系图

一个系统内部是不断流动的，正是因为这种流动使系统时刻保持动态平衡，因果关系图能够清楚地反映出各因素的相互联动。根据表 2 中确定的城市轨道交通 PPP 项目脆弱性影响因素，3 个维度作为 3 个子系统，每个子系统都会对项目脆弱性指数产生影响。利用 Vensim 软件，建立城市轨道交通 PPP 项目脆弱性影响因素的因果关系图，如图 2 所示，其中箭头所指“+”号代表该因素对另一因素具有正向促进作用；“-”号则表示负向抑制作用。

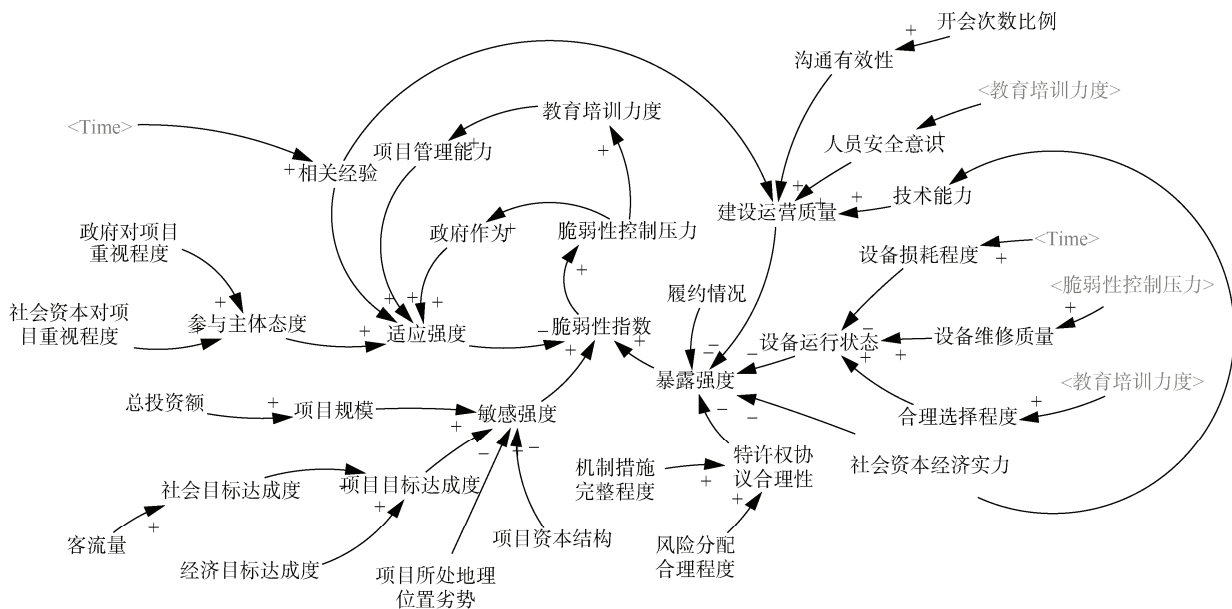


图2 城市轨道交通PPP项目脆弱性因果关系

Figure 2 Causal relationship diagram of the vulnerability of urban rail transit PPP projects

### 3.2 建立存量流量模型

因果关系图仅能定性反映出各变量之间的关系,在此基础上,还需要对变量进行加工,使其能定量反映出系统随各变量的变化情况,以便根据存量流量图建立系统动力学模型,城市轨道交通PPP项目脆弱性的存量流量见图3。在系统动力学中,水平变量即存量,为累计量,表示系统所处状态,为管理者决策提供信息基础;速率变量即流量,流量使存量发生变化,

表征存量变化的速率。从因果关系图中可以看出:敏感强度、适应强度、暴露强度、建设运营质量和设备运行状态这5个变量用来表示变量的积累,是水平变量。水平变量相对应的速率变量为:敏感强度变化量、适应强度变化量、暴露强度变化量、建设运营质量变化量和设备性能变化量,教育培训力度、脆弱性控制压力和时间作为影子变量,表示该变量被多次调用,其余变量都为辅助变量或常量。

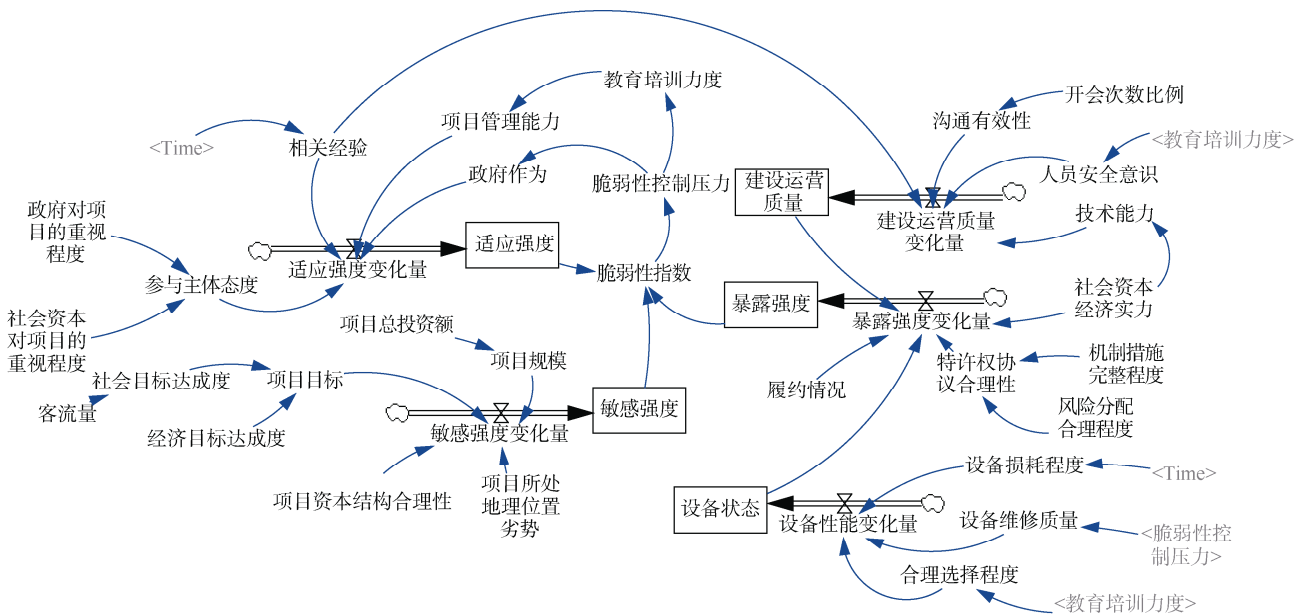


图3 城市轨道交通PPP项目脆弱性存量流量

Figure 3 Vulnerability inventory flow chart of urban rail transit PPP projects



### 3.3 构建系统动力学方程

在存量流量图的基础上,需要对各变量之间的关系用方程进行界定。各影响因素对城市轨道交通 PPP 项目脆弱性的影响能力取决于该因素的权重。因此,需要先对各影响因素的权重进行计算。本文采用熵权法进行权重的计算,邀请 5 位具有丰富 PPP 经验的专家和学者对城市轨道交通 PPP 项目每个子系统下的影响因素按照其重要程度进行打分(打分界定在 1 到 5 分,其中 1 分为不重要,2 分为可能重要,3 分为重要,4 分为很重要,5 分为特别重要)。

根据熵权法求权重的定义,首先要对各指标的打分矩阵 $[X_{ij}]_{m \times n}$  ( $n$  为指标数,  $m$  为专家数,  $X_{ij}$  为第  $i$  个指标第  $j$  个专家的评价值)进行归一化处理,归一化后得到标准矩阵  $Y=[Y_{ij}]_{m \times n}$ 。

$Y_{ij}$  的计算公式为

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (1)$$

式中:  $\max(X_i)$  和  $\min(X_i)$  分别表示该指标的最大和最小得分,各指标权重的计算步骤如下。

1) 计算第  $i$  个指标第  $j$  个专家的评分占该指标下所有专家评分的比重  $P_{ij}$ :

$$P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{j=1}^m Y_{ij}} \quad (2)$$

2) 计算第  $i$  个指标的熵值  $E_i$ :

$$E_i = -k \sum_{j=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

式中:  $k=(\ln n)^{-1}$ ; 如果  $P_{ij}=0$ , 则  $\lim_{P_{ij}=0} P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ 。

3) 确定各指标的权重  $W_i$ :

$$W_i = \frac{1 - E_i}{k_0 - \sum E_i} \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

式中:  $k_0$  为每个子系统下二级指标的个数。

经过计算,各影响因素的权重见表 3。

表 3 城市轨道交通 PPP 项目脆弱性影响因素权重汇总  
Table 3 Summary of the weights of factors affecting the vulnerability of urban rail transit PPP projects

因素	权重	因素	权重	因素	权重
敏感强度	0.344	项目规模	0.183	—	—
		项目资本结构	0.297	—	—
		项目所处地理位置	0.256	—	—
		项目目标达成度	0.264	社会目标达成度	0.491
适应强度	0.316	项目管理能力	0.111	—	—
		相关经验	0.288	—	—
		政府作为	0.490	—	—
		参与主体态度	0.111	政府对项目重视程度	0.654
暴露强度	0.340	建设运营质量	0.119	社会资本对项目重视程度	0.346
				人员沟通有效性	0.276
				人员安全意识	0.14
				技术能力	0.276
		设备可靠性	0.129	相关经验	0.308
				设备损耗程度	0.625
				合理选择程度	0.184
				设备维修质量	0.191
		履约情况	0.139	—	—
		社会资本经济实力	0.358	—	—
		特许权协议合理性	0.255	机制措施完整程度	0.642
				风险分配合理程度	0.358

依据表 3 得到的各影响因素权重,建立系统动力学方程。由于篇幅限制,本文仅列出最后的函数关系表,如表 4 所示。其他变量皆为常量,其数值由具体项目得到。

表 4 各影响因素函数关系

Table 4 Function relation of each influencing factor

序号	变量类别	名称	函数关系
1	状态变量	敏感强度	敏感强度=INTEG(敏感强度变化量, 0)
2		适应强度	适应强度=INTEG(适应强度变化量, 0)
3		暴露强度	暴露强度=INTEG(暴露强度变化量, 0)
4		建造质量	建造质量=INTEG(建造质量变化量, 0)
5		设备运行状态	设备运行状态=INTEG(设备性能变化量, 0)
6	速率变量	敏感强度变化量	0.183×项目规模-0.264×项目目标-0.297×项目资本结构+0.256×项目所处地理位置
7		适应强度变化量	0.111×项目管理能力+0.288×相关经验+0.490×政府作为+0.111×参与主体态度

续表

序号	变量类别	名称	函数关系
8	速率变量	暴露强度变化量	$-(0.119 \times \text{建设运营质量} + 0.129 \times \text{设备可靠性} + 0.358 \times \text{社会资本经济实力} + 0.139 \times \text{履约情况} + 0.255 \times \text{特许权协议合理性})$
9		建设运营质量变化量	$0.276 \times \text{人员沟通有效性} + 0.14 \times \text{人员安全意识} + 0.276 \times \text{技术能力} + 0.308 \times \text{相关经验}$
10		设备性能变化量	$0.184 \times \text{合理选择程度} + 0.191 \times \text{设备维修质量} - 0.625 \times \text{设备损耗程度}$
11	辅助变量	脆弱性指数	$0.344 \times \text{敏感强度} - 0.316 \times \text{适应强度} + 0.34 \times \text{暴露强度}$
12		相关经验	WITH LOOK WP(Time, [(0, 0)–(20, 1)], (2, 0.1)(4, 0.14), (6, 0.2), (8, 0.3), (10, 0.4), (12, 0.45), (14, 0.5), (16, 0.63), (18, 0.75), (20, 0.85))
13		人员沟通效率	开会次数比例
14		技术能力	IF THEN ELSE(社会资本经济实力 $\leq$ 0.3, 0.35, IF THEN ELSE(社会资本经济实力 $\leq$ 0.5, 0.46, IF THEN ELSE(社会资本经济实力 $\leq$ 0.8, 0.68, 0.82)))
15		教育培训力度	$0.57 \times \text{SMOOTH}(\text{脆弱性控制压力}, 3)$
16		人员安全意识	$0.49 \times \text{SMOOTH}(\text{脆弱性控制压力}, 2)$
17		脆弱性控制压力	$0.65 \times \text{SMOOTH}(\text{脆弱性指数}, 2)$
18		项目管理能力	$0.72 \times \text{SMOOTH}(\text{教育培训力度}, 2)$
19		设备维修质量	$0.75 \times \text{SMOOTH}(\text{脆弱性控制压力}, 2)$
20		政府作为	$0.64 \times \text{SMOOTH}(\text{脆弱性控制压力}, 2)$
21		项目规模	IF THEN ELSE(项目总投资额 $\leq$ 100, 0.44, IF THEN ELSE(项目总投资额 $\leq$ 200, 0.55, IF THEN ELSE(项目总投资额 $\leq$ 400, 0.76, 0.9)))
22		设备损耗程度	WITH LOOK UP(Time, [(0, 0)–(20, 1)], (0, 0), (2, 0.05), (4, 0.1), (6, 0.16), (8, 0.23), (10, 0.31), (12, 0.43), (14, 0.55), (16, 0.79), (18, 0.92), (20, 1)))
23		项目目标	$0.491 \times \text{社会目标达成度} + 0.509 \times \text{经济目标达成度}$
24		特许权协议合理性	$0.642 \times \text{机制措施完善程度} + 0.385 \times \text{风险分配合理程度}$
25		社会目标达成度	IF THEN ELSE(客流量 $\leq$ 50, 0.53, IF THEN ELSE(客流量 $\leq$ 100, 0.62, IF THEN ELSE(客流量 $\leq$ 200, 0.71, IF THEN ELSE(客流量 $\leq$ 500, 0.88, 0.98))))
26		设备合理选择程度	$0.69 \times \text{SMOOTH}(\text{教育培训力度}, 2)$
27		参与主体态度	$0.654 \times \text{政府对项目的重视程度} + 0.346 \times \text{社会资本对项目的重视程度}$

4 案例分析

4.1 案例介绍

在实证阶段,本文选取多个案例对模型进行验证,限于篇幅,仅以杭州某城市轨道交通 PPP 项目作为案例进行展示,其他案例不再详细说明。

该项目的开工时间为 2007 年,竣工时间为 2012 年,项目处于杭州市的一条骨干路线,地理位置较优。项目概算总投资额为 221 亿元,特许经营期为 25a。项目的资本构成比例为 1:2.7,社会资本方通过贷款、融资租赁等多种方式融资约 59.6 亿元。该项目实行政

府定价管理,风险分配较为合理,机制措施相对完善。在项目中各参与方态度积极,多次进行有效沟通解决了项目中出现的难题。由项目的基本信息和相关资料对常量进行设定,取值均在(0.1)之间,具体见表 5。该模型设定的仿真时长为 20a,步长为 1a。

4.2 结果输出与分析

4.2.1 基础仿真分析

输入各方程和设定值之后,利用 Vensim 软件进行数据仿真分析,得到城市轨道交通 PPP 项目的脆弱性变化趋势,如图 4 所示。

表 5 常量数值估计  
Table 5 Constant estimation

变量名称	参数估计	变量名称	参数估计	变量名称	参数估计
项目总投资额/亿元	221	社会资本经济实力	0.85	项目资本结构合理程度	0.75
开会次数比例	0.6	机制措施完善程度	0.88	政府对项目重视程度	0.9
履约情况	0.9	风险分配合理程度	0.85	社会资本对项目重视程度	0.85
日客流量/万人次	200	项目地理位置劣势	0.22	经济目标达成度	0.85

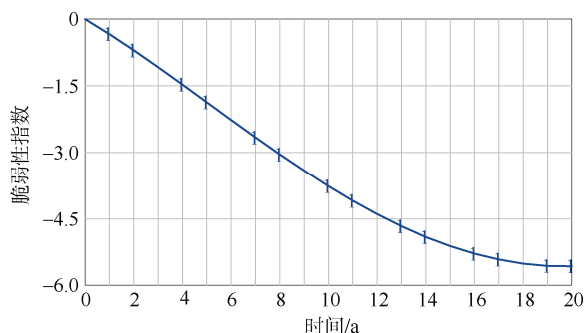


图4 脆弱性指数趋势变化

Figure 4 Diagram of trend change of vulnerability index

由图4可以看出,城市轨道交通PPP项目的系统脆弱性会随着时间的变化逐渐降低,最终趋于稳定。这与图3得到的因果回路图相符,因为本文所建立的系统动力学模型中包含脆弱性指数的所有反馈回路均为负反馈回路,代表系统会通过自身调节来降低脆弱性指数。且在实际情况中,由于项目各参与方的管理能力较强、对项目比较重视和遇到问题积极作为等,项目在运行期间很少发生脆弱性事件,脆弱性较低。可见,本文建立的系统动力学模型符合实际要求,具有适用性。

#### 4.2.2 对比仿真结果分析

在建立的存量流量图中,根据控制变量原则,以案例数据为基础,通过调整模型中常量的数值,分析各影响因素对城市轨道交通PPP项目脆弱性的影响程度。文中常量都以其基础数据为依据,分别将其数值提高和降低10%、30%,同时保持其他数据不变,模拟各影响因素对城市轨道交通PPP项目脆弱性的影响。通过对得到的仿真图进行分析,得到如下结果:

人员沟通有效性、特许权协议合理性和社会资本经济实力这3个常量会引起脆弱性指数的大幅度变化,是影响城市轨道交通PPP项目系统脆弱性的关键因素;项目目标达成度、履约程度、参与主体重视程度和项目资本结构合理性对脆弱性指数虽有所影响,但是影响程度不大;其他因素对脆弱性指数的影响几乎可以忽略不计。

综上,为降低城市轨道交通PPP项目系统脆弱性,促进项目的可持续发展,提出以下建议:

1) 选择经济实力强的社会资本方。城市轨道交通PPP项目的前期建设和后期运营维护都需大量资金投

入,但是它的投资回收期较长,在投资回收期内又会面临各种风险,这对社会资本的经济实力提出严格的要求。

2) 提高人员的沟通有效性。在PPP项目的建设中,各参与方要积极组织会议,对项目可能出现或者已经出现的问题进行讨论,合理规划并提出解决办法。要保证每周召开几次组内会议,确保参与方有关项目的不同想法得到重视。

3) 保证特许权协议的合理完备性。在城市轨道交通PPP项目中,特许权协议是保证项目成功的重要前提。协议中不仅规定了项目的特许期、项目的风险分担框架,也会对项目的各种机制措施进行规定,因此,必须要求特许权协议合理完整,确保项目有条不紊地运行。

此外,建立的城市轨道交通PPP项目系统动力学模型也有利于政府和社会资本的双向选择。在项目前期,政府可通过对社会资本的能力、经验和信誉进行评估,判断该社会资本的加入对项目脆弱性的影响,进而选择是否与其建立伙伴关系;社会资本可通过考察项目自身条件和政府作为情况等,判断项目脆弱性的高低,选择是否加入到该项目中来。

## 5 结论

为研究城市轨道交通PPP项目的脆弱性,本文首先对国内外相关文献和事故案例进行分析,识别出项目脆弱性影响因素,从敏感性、适应性和暴露性3个维度建立系统动力学模型,对项目脆弱性各影响因素间的关系进行定性和定量分析。最后选择杭州某城市轨道交通PPP项目对其脆弱性进行分析,在此基础上对模型中的常量进行仿真分析,得到了对城市轨道交通PPP项目脆弱性产生显著影响的3个关键因素。本文建立的系统动力学动态评价模型,充分考虑了各影响因素间的相互关系,能够有效识别出城市轨道交通PPP项目脆弱性的关键影响因素,实现了对项目脆弱性的动态监测,为维护项目可持续发展提供了坚实的理论基础。

#### 参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2021年度统计和分析报告[R]. 北京, 2022.
- [2] TURNER B L, KASPERSON R E, MATSON P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability

- science[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [3] ZHANG H L, et al. A redefinition of the project risk process: Using vulnerability to open up the event-consequence link[J]. International journal of project management, 2007, 25(7): 694-701.
- [4] RIEDEL I, GUÉGUEN P, DALLA MURA M, et al. Seismic vulnerability assessment of urban environments in moderate-to-low seismic hazard regions using association rule learning and support vector machine methods[J]. Natural hazards, 2015, 76(2): 1111-1141.
- [5] GUO N, GUO P, SHANG J. Project vulnerability analysis: A topological approach[J]. Journal of the Operational Research Society, 2020, 71(8): 1233-1242.
- [6] 向鹏成, 李佳. 跨区域重大工程项目脆弱性研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(9): 2383-2390.
- XIANG Pengcheng, LI Jia. Research on system vulnerability of interregional large-scale construction projects[J]. Systems engineering-theory & practice, 2016, 36(9): 2383-2390.
- [7] 季闯, 黄伟, 袁竞峰, 等. 基础设施 PPP 项目脆弱性评估方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(3): 613-622.
- JI Chuang, HUANG Wei, YUAN Jingfeng, et al. Vulnerability evaluation method of infrastructure PPP project[J]. Systems engineering-theory & practice, 2016, 36(3): 613-622.
- [8] 吴和成, 徐璐. 基础设施PPP项目脆弱性影响因素研究[J]. 工程管理学报, 2019, 33(2): 92-96.
- WU Hecheng, XU Lu. A study on vulnerability factors of infrastructure PPP projects[J]. Journal of engineering management, 2019, 33(2): 92-96.
- [9] 白海卫, 宋守信, 王剑晨, 等. 新建工程穿越既有地铁项目脆弱性评价研究[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(3): 102-108.
- BAI Haiwei, SONG Shouxin, WANG Jianchen, et al. Assessment of vulnerability for system of new construction crossing the existing metro[J]. Urban rapid rail transit, 2019, 32(3): 102-108.
- [10] 袁朋伟, 宋守信, 董晓庆, 等. 城市轨道交通系统脆弱性因素辨识模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(5): 110-118.
- YUAN Pengwei, SONG Shouxin, DONG Xiaoqing, et al. Vulnerability identification model of urban rail transit system[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2014, 14(5): 110-118.
- [11] 罗珍妮, 黄喜兵. 绿色建筑经济的脆弱性评价[J]. 四川建筑, 2018, 38(4): 21-24.
- [12] 史玉芳, 宋平平. 城市轨道交通 PPP 项目成功关键影响因素研究[J]. 建筑经济, 2019, 40(8): 42-47.
- SHI Yufang, SONG Pingping. Research on key influencing factors of PPP project success in urban rail transit[J]. Construction economy, 2019, 40(8): 42-47.
- [13] FIDAN, G, DIKMEN I, TANYERR A M, et al. Ontology for relating risk and vulnerability to cost overrun in international projects[J]. Journal for computing in civil engineering, 2011, 25(8): 302-315.
- [14] 邢必果, 张建新, 陈月. 基于 SD 模型的绿色建筑项目系统脆弱性研究[J]. 工程管理学报, 2020, 34(4): 112-117.
- XING Biguo, ZHANG Jianxin, CHEN Yue. Research on system vulnerability of green buildings based on SD model[J]. Journal of engineering management, 2020, 34(4): 112-117.
- [15] 薛怡宁, 张云宁, 欧阳红祥. 可持续发展视角下 PPP 项目脆弱性研究[J]. 工程管理学报, 2018, 32(6): 58-63.
- XUE Yining, ZHANG Yunning, OUYANG Hongxiang. Research on the vulnerability of PPP projects from the perspective of sustainable development[J]. Journal of engineering management, 2018, 32(6): 58-63.
- [16] 张余钰, 郝生跃. 城市轨道交通 PPP 项目关键成功因素及作用机理研究: 基于国内外典型案例分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 116-128.
- ZHANG Yuyu, HAO Shengyue. Research on critical success factors and mechanism of PPP project of urban rail transit—based on the analysis of typical cases at home and abroad[J]. China civil engineering journal, 2020, 53(7): 116-128.

(编辑: 王艳菊)