

文章编号:1671-1556(2021)01-0001-07

基于系统动力学的建筑施工安全系统脆弱性仿真分析

罗 聪, 蔡春明, 卜 波

(南华大学土木工程学院, 湖南 衡阳 421000)

摘 要: 为系统分析建筑施工安全系统脆弱性的影响机理, 首先探讨了社会技术系统理论下各子系统影响因素之间的高接触与紧耦合性的特点; 然后以脆弱性理论为切入点, 建立了建筑施工安全系统脆弱性的系统动力学仿真模型, 采用三角模糊数和层次分析法确定了模型中各影响因素的权重系数和相关方程参数; 最后通过考虑不同子系统的投入方案对建筑施工安全系统脆弱性的暴露度、敏感度和适应度的影响程度进行仿真分析。结果表明: 建筑施工安全系统具有脆弱倾向性; 个人子系统、技术子系统和组织管理子系统分别对降低安全系统暴露度、敏感度和提高安全系统适应度有显著的作用, 在整个仿真周期内各子系统每单位投入产生的变化幅度分别为 17.07%、11.13% 和 15.60%, 并围绕起关键作用的子系统提出了针对性建议, 以期降低建筑施工安全系统的脆弱性风险, 提高工程安全管理水平。

关键词: 建筑施工; 安全系统; 脆弱性; 系统动力学; 仿真分析

中图分类号: X913.4; X948; TU714 文献标识码: A DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2021.01.001

Simulation Study on Vulnerability of Construction Safety System Based on System Dynamics

LUO Cong, QI Chunming, BU Bo

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421000, China)

Abstract: In order to systematically analyze the impact mechanism of the vulnerability of the construction safety system, this paper first discusses the characteristics of high contact and tight coupling between the various subsystem factors under the socio-technical system theory. Secondly, taking the vulnerability as the starting point, the paper establishes the system dynamics simulation model of building construction safety vulnerability. The paper adopts triangular fuzzy number and analytic hierarchy process to determine the weight coefficients of the influencing factors in the model, and establishes correlation equation. Finally, the paper applies simulation analysis to analyzing the impact of safety vulnerability including exposure, sensitivity, and fitness by considering input schemes for different subsystems. The results show that the construction safety system is vulnerable; the individual subsystem, the technical subsystem and the organizational management subsystem have significant effects on reducing the safety system exposure, sensitivity and improving the safety system fitness respectively, and the variation range of each unit of input is 17.07%, 11.13% and 15.60%, respectively. In order to reduce the vulnerability risk of construction safety system and improve the level of project safety management, the paper also puts forward some pertinent suggestions concerning the key subsystems.

Key words: construction building; safety system; vulnerability; system dynamics; simulation analysis

据住房和城乡建设部的通报数据显示, 2016—2019 年房屋市政工程无论是事故起数还是死亡人

收稿日期: 2020-07-01 修回日期: 2020-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41175117)

作者简介: 罗 聪(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为工程安全管理。E-mail: 13574486165@163.com

通讯作者: 蔡春明(1965—), 男, 教授, 主要从事建筑工程项目管理等方面的研究。E-mail: qcm108100@sina.com

数都呈逐年上升趋势,我国的建筑施工安全形势依旧严峻复杂^[1]。

近年来,为了减少建筑施工事故的发生,国内外学者对建筑施工安全系统中事故致因交互机理进行了研究,并积累了不少研究成果,主要集中在三个方面:①事故致因的统计描述性分析,如 Chi 等^[2]根据建筑施工事故报告对事故有关的环境因素、人的因素、伤害来源和事故类型等方面进行了统计分析研究;②各事故致因重要性程度的定量分析,如徐姣姣等^[3]对装配式建筑施工安全风险因素的关键程度进行了度量研究;③多层次事故致因间的交互分析,如 Eteifa 等^[4]采用社会网络分析来研究事故致因间的联系性,Wong 等^[5]运用 HFACS 对事故链进行分析。从现有研究来看,研究成果多从静态的角度出发来研究事故致因间的关系,难以综合反映建筑施工安全系统中多重要素间的变化规律及反馈机制,不能有效地分析建筑施工安全系统中不同资源投入对系统自身抵御风险能力的动态提升过程,而这正是系统脆弱性研究中需要重点关注的问题。

鉴于此,本文考虑到建筑施工事故的发生是系统的动态涌现行为^[6],拟从建筑施工安全系统脆弱性角度为切入点来构建系统动力学模型,并通过考虑不同子系统的投入方案来对建筑施工安全系统脆弱性的暴露度、敏感度和适应度的影响程度进行动态仿真分析,研究不同子系统影响因素对建筑施工安全系统脆弱性的影响程度,以期减少建筑施工事故提供管理决策思路。

1 建筑施工安全系统脆弱性的系统动力学模型

1.1 建筑施工安全系统在社会技术系统下子系统和因素划分

社会技术系统(Sociotechnical Systems)是由英国 Tavistoc 人际关系研究所提出来的概念^[7]。该理论认为一个系统的成功运行,依赖于个人子系统、技术子系统、组织管理子系统和内外部环境子系统之间的相容性。社会技术系统的子系统各要素之间存在着高接触和紧耦合性的特点,随着某要素的变化,会导致系统原有的稳定状态或秩序出现变化,促使组织或个人出现偏差,当系统自身的适应度无法调节时就会导致系统失调,甚至导致事故的发生。目前社会技术系统理论已被运用于航空、核电、能源如煤炭开采等领域,但较少运用于建筑施工领域。而建筑施工安全系统是典型的社会技术系统,其作

为社会系统受到作业人员、组织管理机构项目部、作业环境和自然环境等因素的影响;其作为技术系统,建筑物的建成都受到各分部分项工程的工序、施工组织方案以及各种工器具设备的影响。

社会技术系统的运用优势,一是相较其他系统事故致因模型,它将事故过程理解为多事件构成的复杂互联网络而不是简单的因果事故链^[8],更符合系统动力学的特点;二是其子系统划分详实,有较好的适用性。通过专家研讨和文献分析^[9-10],对建筑施工安全系统的各子系统进行定义和因素划分,个人子系统指实施具体工作的人员状态,主要包括工人违规操作、防护用品使用不当、安全心理水平和安全意识水平等因素;技术子系统指帮助任务顺利、安全完成的技术和工器具设备,主要包括各项施工组织技术方案制定、个人防护设备到位情况、现场检测监控设备、警告标记到位情况和作业设备运行情况等因素;组织管理子系统指机构对项目的管理和监督,主要包括施工现场安全检查与监督、安全教育培训和企业安全生产责任制度等因素;内外部环境子系统指环境对施工作业的影响,主要包括政府主管部门监督情况、天气情况、作业面稳定情况和作业面照明情况等因素。

1.2 建筑施工安全系统的脆弱性分析

脆弱性理论源于对自然灾害的研究,反映系统在内外扰动下的变化程度,以及从负面影响中恢复正常作业的能力^[11]。目前脆弱性理论发展为一种跨学科、综合性的研究视角并已运用到诸多领域。在我国安全工程领域,有关对脆弱性的研究多集中于应急管理和公共安全等方面^[12-13],而在建筑施工安全管理领域脆弱性的研究多集中在项目安全管理系统脆弱性评价方面^[14],缺乏考虑系统安全和动态分析。

在事故致因理论基础上,将脆弱性理论运用到建筑施工安全系统,能更好地反映不同因素扰动下安全系统的变化与恢复情况。因此,本研究采用被广泛认可的脆弱性理论模型中的 VSD(Vulnerability Scoping Diagram)模型来对建筑施工安全系统的脆弱性进行分析,该模型将脆弱性分为“暴露度—敏感度—适应度”3个特征要素^[12]。暴露度是指系统在扰动情况下的暴露程度,包括暴露位置、暴露时间和暴露频率等,在安全工程领域可理解为事故隐患程度,体现了系统受到外界扰动危害的几率。暴露度越高,受到危害的几率越大,系统脆弱性越高,事故发生频率的可能性也就越大。敏感度反映系统受到扰动时的反应程度,即反应时间、幅度和限度等。敏感度越高,系统脆弱性越大,在建筑施工事故分析中体现为对事故伤亡情况和事故经济损失造成的影响。适应度是指系统抵

抗外界扰动的能力大小,包括恢复速度、恢复时间和恢复程度等。适应度越大,系统脆弱性越小,在建筑施工事故分析中体现为对预备系统完备性、应急救援有效性和事故处理成本产生的影响。

本研究采用 VSD 模型的三个特征要素来反映建筑施工安全系统在内外外部扰动下(例如事故致因的发生)产生变化的程度,以及从扰动的负面影响中(偏离安全状态)恢复正常运行的能力。据此建立了建筑施工安全系统脆弱性概念模型,见图 1。

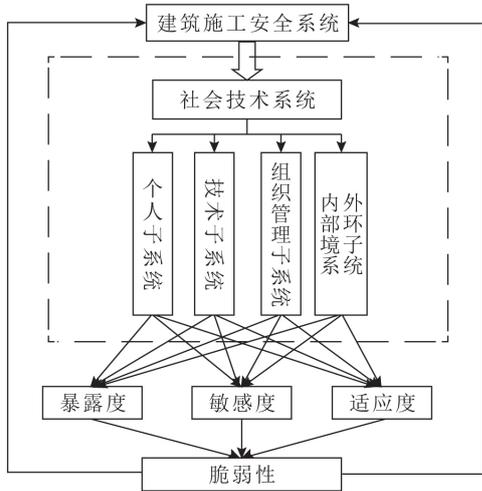


图 1 建筑施工安全系统脆弱性概念模型图

Fig. 1 Conceptual model diagram of the vulnerability of the building construction safety system

事故发生是图 1 中建筑施工安全系统、社会技术系统和脆弱性三者交互作用的结果,即社会技术系统中各子系统的不利影响因素(如安全培训不到位)的存在会促使系统暴露度、敏感度和适应度的变化,进而导致系统脆弱性增加,影响整个安全系统的稳定性。当不利因素的暴露时间和频率达到一定阈值时,安全系统将失稳。为了避免系统失稳而发生事故,安全系统将采取必要的措施提高自身抵御风险和恢复正常工作的能力。总之,建筑施工安全系统的事故演变是子系统各影响因素脆弱性联系不断被激发的过程。

1.3 建筑施工安全系统脆弱性的系统动力学仿真模型构建

1.3.1 建筑施工安全系统脆弱性的系统动力学流程图

建筑施工安全系统是多个子系统及影响因素相互作用影响的整体,其中每个影响因素对系统的暴露度、敏感度和适应度都会产生不同程度的影响,进而影响整个安全系统的脆弱性。为了反映各影响因素的正负变化对系统的影响,揭示系统中存在的反馈作用机制,本文结合社会技术系统的影响因素划分和概念模型,运用 Vensim 构建了包含 34 个影响因素的建筑施工安全系统脆弱性的系统动力学流程图,见图 2。

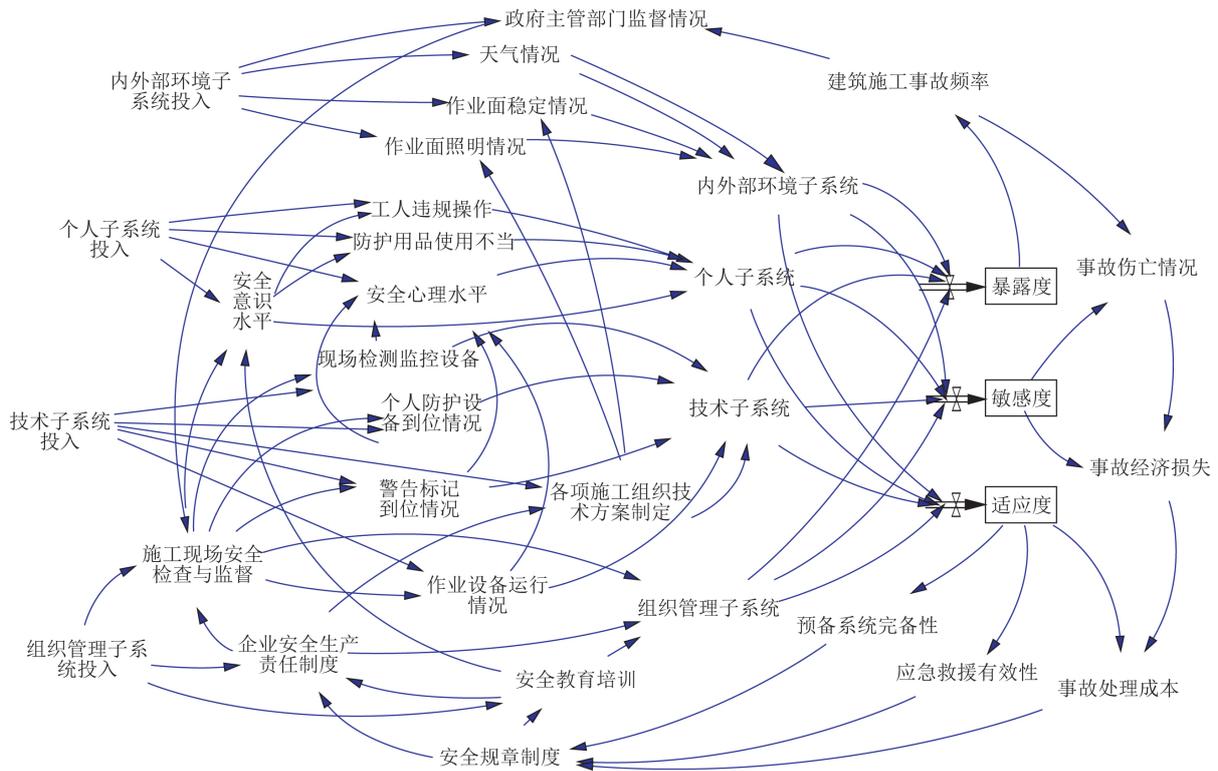


图 2 建筑施工安全系统脆弱性的系统动力学流程图

Fig. 2 System flow diagram of the vulnerability of the building construction safety system

由图 2 可以看出系统因素与脆弱性之间的相互作用关系,如以个人子系统为例,当作业人员的安全意识和安全心理水平薄弱时,工人的违规作业和防护用品使用不当等不安全行为增加,导致系统潜在的隐患增加,进而造成暴露度和敏感度提高,适应度降低,系统脆弱性增加,达到一定阈值将导致事故发生,事故伤亡情况等将影响政府主管部门的监督情况,事故处理成本等将影响安全规章制度的制定,以此来形成反馈机制,促进各子系统的投入增加。本文以个人子系统、技术子系统、组织管理子系统和内外部环境子系统的投入方案作为输入控制变量,来分析各子系统对建筑施工安全系统脆弱性的影响程度。

1.3.2 系统动力学模型各仿真参数及方程的确定

对模型相关变量的影响关系参数进行设定,是构建建筑施工安全系统脆弱性系统动力学模型的重要过程。需要考虑的是影响建筑施工安全系统脆弱性的多个影响因素存在一定的模糊性和主观性,一般难以用精确数值来度量,因此本文拟采用三角模糊数与层次分析法相结合的方法以尽量减少主观误差。其具体步骤如下:①将影响因素的重要度划分为 9 个等级,选取 3 名专家(分别为研究工程安全管理的教授、建筑施工现场的技术负责人和安全管理员)进行权重判定,并形成三个两两因素对比的矩阵 $P_y = (l_i, m_j, u_k)$ [其中, $y = 1, 2, 3; i, j$ 和 k 同上; u 为模糊集的上界, m 为一般值, l 为下界]; ②运用模糊数求平均值的公式[见公式(1)],得到一个三角模糊数; ③参考 Chamodrakas 等^[15]的去模糊化方法

[见公式(2)],得到因素权重判断的清晰值,形成最终的判断矩阵 $P = (x_1, x_2, x_3)$; ④根据判断矩阵,运用求根法得到各指标的权重,并进行一致性检验。具体计算公式如下:

$$P = \left(\frac{l_1 + l_2 + l_3}{3}, \frac{m_1 + m_2 + m_3}{3}, \frac{u_1 + u_2 + u_3}{3} \right) \quad (1)$$

$$R = \left(\frac{x_1 + 4x_2 + x_3}{6} \right) \quad (2)$$

限于文章篇幅,本文以建筑施工安全系统各子系统对适应度影响大小的权重计算为例,假设 $F_1 \sim F_4$ 分别代表个人子系统、技术子系统、组织管理子系统和内外部环境子系统,去模糊化的判断矩阵计算结果见表 1。

表 1 建筑施工安全系统各子系统对适应度影响大小的权重

Table 1 Weights of each subsystem of building construction safety system on fitness

因素	F_1	F_2	F_3	F_4	权重
F_1	1.00	0.82	0.56	2.22	0.218 1
F_2	1.44	1.00	0.79	2.61	0.284 3
F_3	1.94	1.50	1.00	3.28	0.380 9
F_4	0.62	0.40	0.34	1.00	0.116 7

$\lambda_{\max} = 4.22, CI = 0.07, RI = 0.08 < 0.10$, 满足一致性检验

根据上述方法,计算出建筑施工安全系统脆弱性系统动力学模型中其他指标权重,并建立相应的系统动力学方程,见表 2。

表 2 建筑施工安全系统脆弱性的系统动力学方程

Table 2 System dynamic equation of the vulnerability of building construction safety system

因变量	系统动力学方程表达式	初始值
个人子系统	$0.364 3 \times \text{安全意识水平} + 0.137 1 \times \text{安全心理水平} + 0.317 6 \times \text{工人违规操作} + 0.181 0 \times \text{防护用品使用不当}$	
技术子系统	$0.297 3 \times \text{个人防护设备到位情况} + 0.124 9 \times \text{作业设备运行情况} + 0.329 7 \times \text{各项施工组织技术方案制定} + 0.088 3 \times \text{现场检测监控设备} + 0.159 7 \times \text{警告标记到位情况}$	
组织管理子系统	$0.231 9 \times \text{企业安全生产责任制度} + 0.344 7 \times \text{安全教育培训} + 0.423 5 \times \text{施工现场安全检查与监督}$	
内外部环境子系统	$0.236 0 \times \text{作业面照明情况} + 0.248 0 \times \text{作业面稳定情况} + 0.1328 \times \text{天气情况} + 0.383 1 \times \text{政府主管部门监督情况}$	
暴露度	$0.449 2 \times \text{个人子系统} + 0.094 1 \times \text{技术子系统} + 0.157 9 \times \text{组织管理子系统} + 0.298 8 \times \text{内外部环境子系统}$	7.5
敏感度	$0.128 2 \times \text{个人子系统} + 0.397 3 \times \text{技术子系统} + 0.151 2 \times \text{组织管理子系统} + 0.323 3 \times \text{内外部环境子系统}$	6.2
适应度	$0.218 1 \times \text{个人子系统} + 0.284 3 \times \text{技术子系统} + 0.380 9 \times \text{组织管理子系统} + 0.116 7 \times \text{内外部环境子系统}$	5.0

2 建筑施工安全系统脆弱性的系统动力学仿真分析与对策

本文以某建筑施工项目为研究对象,将分析单位设为 1 个月,进行 12 个月的仿真,对该段时间内建筑施工安全系统的脆弱性进行动态监控。在分析

社会技术系统下各个子系统对建筑施工安全系统脆弱性的影响程度时,设定个人子系统、技术子系统、组织管理子系统和内外部环境子系统 4 个变量,并探讨每个变量变化 1 个单位引起暴露度、敏感度和适应度 3 个特征要素变化的规律。需要注意的是,3 个特征要素的初始值由系统实际运行状态获得,为无量纲变量,仅用来反映仿真结果中的变化趋势。

最后根据仿真结果对 VSD 模型的 3 个特征要素提出相应的预防对策,以期减少建筑施工安全系统的脆弱性,提高安全管理水平。

2.1 建筑施工安全系统暴露度的影响分析

图 3 体现了某子系统取值变化 1 个单位,其他子系统取值不变时,建筑施工安全系统暴露度的变化趋势。

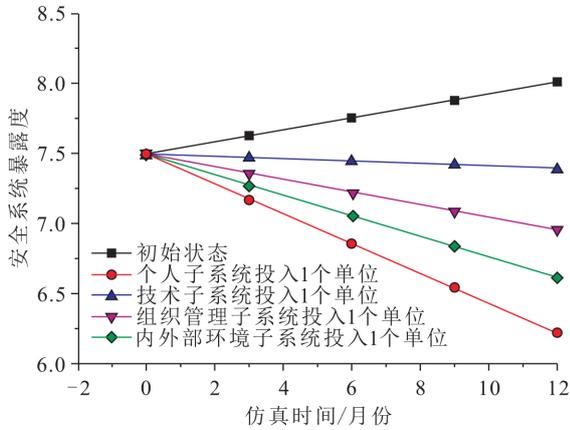


图 3 建筑施工安全系统暴露度的仿真走势

Fig. 3 Simulation trend of exposure degree of building construction safety system

由图 3 可见,建筑施工安全系统的暴露度在不采取干预措施的情况下呈现逐步上升趋势,一个仿真周期内增加幅度达到 6.93%,即事故发生的可能性在增加;当采取干预措施即增加子系统投入时,安全系统的暴露度均呈现下降趋势,其中增加个人子系统和内外部环境子系统的投入对减少安全系统暴露度的作用较大,组织管理子系统和技术子系统则次之。

表 3 反映了建筑施工安全系统暴露度仿真结果中暴露度的具体数值变化情况。

由表 3 可知,增加 4 个子系统的投入都会降低整个建筑施工安全系统的暴露度,减少事故的发生;当个人子系统投入 1 单位时,安全系统的暴露度 6 月份下降了 8.53%,12 月份下降了 17.07%,整体下降效果较为明显,其主要原因可能是工人的行为对暴露度有着重要的影响,有研究也表明工人的不安全行为是导致事故发生的主要原因^[16]。在施工现场工人的违规操作和防护用品使用不当等将会导致事故隐患程度增加,使整个系统的暴露度增加。例如在我国各省份的应急管理部(安监局)公布的建筑施工安全事故报告中,有多起因为高处临边作业

表 3 建筑施工安全系统暴露度的仿真结果

Table 3 Simulation results of exposure degree of building construction safety system

仿真时间/月份	初始状态		个人子系统投入 1 个单位		技术子系统投入 1 个单位		组织管理子系统投入 1 个单位		内外部环境子系统投入 1 个单位	
	暴露度	上升率/%	暴露度	上升率/%	暴露度	上升率/%	暴露度	上升率/%	暴露度	上升率/%
0	7.50		7.50		7.50		7.50		7.50	
3	7.63	1.73	7.18	-4.27	7.48	-0.27	7.36	-1.87	7.28	-2.93
6	7.76	3.47	6.86	-8.53	7.45	-0.67	7.22	-3.73	7.06	-5.87
9	7.89	5.20	6.54	-12.80	7.42	-1.07	7.09	-5.47	6.84	-8.80
12	8.02	6.93	6.22	-17.07	7.40	-1.33	6.96	-7.20	6.62	-11.73

的工人不系安全带等违规作业行为,将自己暴露在危险的作业环境中,最终导致高处坠落事故的发生。技术子系统、组织管理子系统和内外部环境子系统在仿真周期 12 个月的安全系统暴露度下降率分别为 1.33%、7.20%和 11.73%,整体下降效果都小于个人子系统。

2.2 建筑施工安全系统敏感度的影响分析

图 4 体现了某子系统取值变化 1 个单位,其他子系统取值不变时,建筑施工安全系统敏感度的变化趋势。

由图 4 可见,建筑施工安全系统的敏感度在不采取干预措施的情况下保持着上升趋势,一个仿真周期内增加幅度达到 21.29%(见表 4);但与暴露度的变化趋势不同,当采取干预措施即增加子系统 1 个

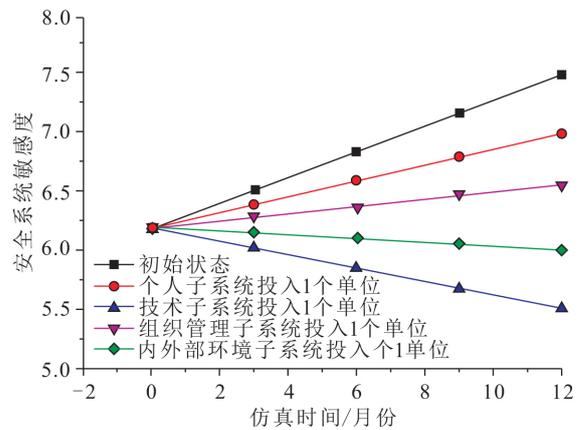


图 4 建筑施工安全系统敏感度的仿真走势

Fig. 4 Simulation trend of the sensitivity of building construction safety system

单位投入时,安全系统的敏感度既有上升趋势也有下降趋势,即技术子系统和内外部环境子系统的投入使整个仿真周期内安全系统的敏感度呈现下降趋势,而

个人子系统和组织管理子系统的结果却相反。

表 4 反映了建筑施工安全系统敏感度仿真结果中敏感度的具体数值变化情况。

表 4 建筑施工安全系统敏感度的仿真结果

Table 4 Simulation results of the sensitivity of building construction safety system

仿真时间/ 月份	初始状态		个人子系统 投入 1 个单位		技术子系统 投入 1 个单位		组织管理子系统 投入 1 个单位		内外部环境 子系统投入 1 个单位	
	敏感度	上升率/%	敏感度	上升率/%	敏感度	上升率/%	敏感度	上升率/%	敏感度	上升率/%
0	6.20		6.20		6.20		6.20		6.20	
3	6.53	5.32	6.40	3.23	6.03	-2.74	6.29	1.45	6.16	-0.65
6	6.86	10.65	6.61	6.61	5.85	-5.65	6.38	2.90	6.11	-1.45
9	7.19	15.97	6.81	9.84	5.68	-8.39	6.48	4.52	6.06	-2.26
12	7.52	21.29	7.01	13.06	5.51	-11.13	6.57	5.97	6.02	-2.90

由表 4 可知,当技术子系统投入 1 个单位时,建筑施工安全系统的敏感度 6 月份下降了 5.65%,12 月份下降了 11.13%,对降低安全系统的敏感度作用明显,其原因可能在于现场的一些技术条件能增加整个安全系统抵抗的反应能力,例如各项施工组织技术方案的落实,在面对事故发生时,有应急救援方案,会提高整个安全系统的反应速度,最大限度地减少事故的伤亡情况,又如现场监控设备的运用,也能较快地发现事故发生过程,有助于做好事故后处理工作,减少经济损失;当内外部环境子系统投入 1 个单位时,安全系统的敏感度 12 月份下降了 2.90%,对降低安全系统的敏感度也有重要的影响。因此,通过加强技术子系统和内外部环境子系统的耦合作用,双重下力,能有效地降低事故率及事故发生后的灾难程度。另外,组织管理子系统和个人子系统的投入虽然对安全系统敏感度的影响程度较低,但相较于初始状态的第 12 个月,安全系统的敏感度分别延缓上升了 15.32%和 8.23%。

2.3 建筑施工安全系统适应度的影响分析

图 5 体现了某子系统取值增加投入 1 个单位,其他子系统取值不变时,建筑施工安全系统适应度的变化趋势。

由图 5 可见,初始状态时建筑施工安全系统的

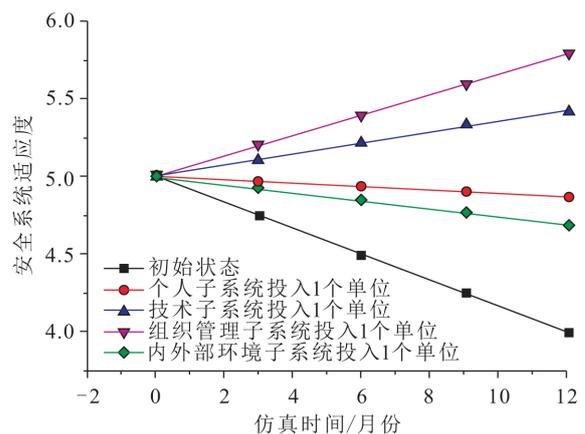


图 5 建筑施工安全系统适应度的仿真走势

Fig. 5 Simulation trend of the fitness of building construction safety system

适应度呈下降趋势,一个仿真周期内降低幅度为 20.20%(见表 5),说明不采取干预措施时,整个安全系统从干扰中恢复正常工作的能力下降较大;而当增加子系统投入时,相较于初始状态,整个安全系统的适应度都有所上升,其中组织管理子系统和技术子系统的投入使得整个仿真周期内安全系统的适应度呈现上升趋势,而个人子系统和内外部环境子系统的投入使其呈现缓降趋势。

表 5 建筑施工安全系统适应度的仿真结果

Table 5 Simulation results of the fitness of building construction safety system

仿真时间/ 月份	初始状态		个人子系统 投入 1 个单位		技术子系统 投入 1 个单位		组织管理子系统 投入 1 个单位		内外部环境 子系统投入 1 个单位	
	适应度	上升率/%	适应度	上升率/%	适应度	上升率/%	适应度	上升率/%	适应度	上升率/%
0	5.00		5.00		5.00		5.00		5.00	
3	4.75	-5.00	4.97	-0.60	5.11	2.20	5.20	4.00	4.92	-1.60
6	4.49	-10.20	4.93	-1.40	5.21	4.20	5.39	7.80	4.84	-3.20
9	4.24	-15.20	4.90	-2.00	5.32	6.40	5.59	11.80	4.76	-4.80
12	3.99	-20.20	4.86	-2.80	5.42	8.40	5.78	15.60	4.69	-6.20

表 5 反映了建筑施工安全系统适应度仿真结果中适应度的具体数值变化情况。

由表 5 可知,对建筑施工安全系统适应度影响最大的是组织管理子系统,在仿真的第 6 个月,整个安全系统的适应度上升了 7.80%,12 月份上升了 15.60%,其原因可能在于组织管理的正向学习作用,当事故发生后,组织管理者负责应急救援和事故调查,并针对事故调查报告展开安全生产教育,以提高整个安全系统的适应度;其次,当技术子系统增加 1 个单位投入时,整个仿真周期内安全系统的适应度也上升了 8.40%,对降低安全系统脆弱性具有重要的影响;虽然个人子系统和内外部环境子系统投入 1 个单位未能改变安全系统适应度下降的趋势,但相对于初始状态,整个仿真周期内安全系统的适应度分别提高了 17.40%和 14.00%,说明其对于延缓安全系统适应度的下降起到了重要作用。

2.4 对策分析

图 3 至图 5 的初始状态线表明建筑施工安全系统具有脆弱倾向性,在不采取干预措施的情况下,随着时间的增加,安全系统的暴露度和敏感度会不断提高,适应度会不断降低,整个安全系统的脆弱性提高,事故发生可能性增大。因此,对建筑施工安全系统脆弱性有关键影响的子系统及重要因素提出相应的干预对策具有重要的意义。具体对策如下:

(1) 建筑施工安全系统暴露度的影响分析表明,个人子系统的投入对减少安全系统暴露度的作用最大,建议加强作业人员安全教育培训力度,并落实好培训后的考核工作,以期提高作业人员的安全意识水平,最大程度地减少人的不安全行为。

(2) 对减少建筑施工安全系统敏感度作用最大的子系统是技术子系统,建议建设单位、监理单位和施工单位要高度重视各项施工作业技术方案的制定与落实,加强作业设备与警告标记的检查,以期减少物的不安全状态。

(3) 为了提高组织管理子系统对建筑施工安全系统适应度的影响,建议施工项目管理者要建立健全现场安全事故隐患排查隐患制度,尤其对已发现的隐患如监理发出的整改通知单要特别重视。

3 结论与建议

(1) 本文结合社会技术系统理论,以脆弱性中暴露度、敏感度和适应度 3 个特征指标为切入点,采用三角模糊数和 AHP 方法,构建了包含 34 个影响因素的建筑施工安全系统脆弱性的系统动力学仿真

模型,分析了社会技术系统理论中各子系统影响因素与暴露度、敏感度和适应度的相互作用关系。

(2) 建筑施工安全系统具有脆弱倾向性,在不采取干预措施的情况下,安全系统的脆弱性会逐步提高,一个仿真周期内安全系统的暴露度和敏感度分别增加了 6.93%和 21.29%,适应度下降了 20.20%。

(3) 影响建筑施工安全系统暴露度、敏感度和适应度的关键子系统分别为个人子系统、技术子系统和组织管理子系统,在整个仿真周期内,个人子系统、技术子系统和组织管理子系统每增加 1 个单位投入时,对降低安全系统暴露度、敏感度和提高安全系统适应度的变化幅度分别为 17.07%、11.13%和 15.60%。此外,围绕起关键作用的子系统,本文提出了加强落实作业人员培训考核制度、重视各项施工作业技术方案和建立健全现场安全事故隐患排查制度等建议,以期降低建筑施工安全系统的脆弱性风险,减少事故的发生。

(4) 本研究主要采用单变量控制法研究单个子系统变化对建筑施工安全系统脆弱性的影响程度,具有一定的局限性,后续将研究多个变量同时变动对安全系统脆弱性的影响。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部办公厅.住房和城乡建设部办公厅关于 2019 年房屋市政工程生产安全事故情况的通报 [EB/OL]. (2020-06-19) [2020-06-30]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/202006/t20200624_246031.html.
- [2] Chi S, Han S. Analyses of systems theory for construction accident prevention with specific reference to OSHA accident reports [J]. *International Journal of Project Management*, 2013, 31 (7):1027-1041.
- [3] 徐姣姣,江林,黄萍莉.基于系统动力学的装配式建筑安全风险影响因素分析[J].西华大学学报(自然科学版),2018,37(2):23-28.
- [4] Eteifa S O, El-adaway I H. Using social network analysis to model the interaction between root causes of fatalities in the construction industry[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2018, 34 (1): 04017045. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000567.
- [5] Wong L, Wang Y H, Law T, et al. Association of root causes in fatal fall-from-height construction accidents in Hong Kong [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2016, 142(7):04016018. 1-04016018. 12.
- [6] Leveson N G. *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety* [M]. Massachusetts: MIT Press, 2011.
- [7] Trist E A, Bamforth K W. Some social and psychological consequences of the longwall method of getting [J]. *Human Relations*, 1951, 4(1):3-38.

(下转第 43 页)

- industry[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(6): 04016035. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000604.
- [36] Ahn C R, Lee S H, Sun C, et al. Wearable sensing technology applications in construction safety and health[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2019, 145(11): 03119007. DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001708.
- [37] Goh Y M, Guo H W. FPSWizard: A web-based CBR-RBR system for supporting the design of active fall protection systems[J]. *Automation in Construction*, 2018, 85: 40-50.
- [38] Zhang Y M, Zhang M Y, Fang Q. Scoping review of EEG studies in construction safety[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(21): 4146. DOI: 10.3390/ijerph16214146.
- [39] Maman Z S, Yazdi M A A, Cavuoto L A, et al. A data-driven approach to modeling physical fatigue in the workplace using wearable sensors[J]. *Applied Ergonomics*, 2017, 65: 515-529.
- [40] Lee W, Lin K Y, Seto E, et al. Wearable sensors for monitoring on-duty and off-duty worker physiological status and activities in construction[J]. *Automation in Construction*, 2017, 83: 341-353.
- [41] Hasanzadeh S, Esmaili B, Dodd M. Measuring the impacts of safety knowledge on construction workers' attentional allocation and hazard detection using remote eye-tracking technology[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2017, 33(5): 04017024. DOI:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000526.
- [42] Potter R F, Bolls P D. *Psychophysiological Measurement and Meaning: Cognitive and Emotional Processing of Media* [M]. New York: Routledge, 2012: 50-80.
- [43] 朱滢. 实验心理学[M]. 4版. 北京: 北京大学出版社, 2016: 409-411.
- [44] Aryal A, Ghahramani A, Gerber B. Monitoring fatigue in construction workers using physiological measurements[J]. *Automation in Construction*, 2017, 82: 154-165.
- [45] Jebelli H, Hwangb S, Lee S. EEG-based workers' stress recognition at construction sites [J]. *Automation in Construction*, 2018, 93: 315-324.

(上接第 7 页)

- [8] Klockner K, Toft Y. Railway accidents and incidents: Complex socio-technical system accident modelling comes of age[J]. *Safety Science*, 2018, 110(Part B): 59-66.
- [9] Kleiner B M, Smith Jackson T L, Mills T H, et al. Design, development, and deployment of a rapid universal safety and health system for construction[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2008, 134(4): 273-279.
- [10] 姜盛玉, 陈国明, 李新宏, 等. 基于系统动力学的海洋平台安全脆弱性分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(5): 49-54.
- [11] 孙剑, 耿萌, 李恺. 城市基础设施系统脆弱性影响因素的 ISM 分析[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(5): 1663-1669.
- [12] 田水承, 张城镇. 安全科学与工程视域下脆弱性研究评述[J]. *西安科技大学学报*, 2018, 38(1): 8-16.
- [13] 梁伟, 李威君, 张来斌, 等. 基于 IVM-AHP 的人-机-环耦合系统应急救援脆弱性分析[J]. *安全与环境工程*, 2015, 22(2): 84-87, 91.
- [14] 贾增科, 邱苑华, 赵丽坤. 基于脆弱性理论的建筑安全管理研究[J]. *建筑经济*, 2015, 36(2): 97-100.
- [15] Chamodrakas I, Alexopoulou N, Martakos D. Customer evaluation for order acceptance using a novel class of fuzzy methods based on TOPSIS[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(4): 7409-7415.
- [16] Haslam R A, Hide S A, Gibb A G F, et al. Contributing factors in construction accidents[J]. *Applied Ergonomics*, 2005, 36(4): 401-415.