

跨层次视角下建筑工人安全行为预警

贾广社¹, 何长全^{1,2}, 陈玉婷², 孙继德¹

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 多伦多大学 土木工程系, 多伦多 M5S 1A5)

摘要: 以行为安全理论为基础, 根据文献分析和人员访谈, 基于跨层次的系统视角构建了建筑工人安全行为预警体系。根据该体系, 制作了调查问卷, 面向现场建筑工人进行了数据收集, 并采用反向传播(BP)神经网络对该体系进行了训练和测试。结果表明: 仿真得出的输出值和实际安全行为数据一致性较高, 训练后的神经网络模型仿真能力较强, 该评价体系能有效地对建筑工人的安全行为进行评价和预警。根据阈值, 把安全行为分为优秀、良好、较差等 3 个等级, 并针对预警结果采取不同的安全干预方案, 从而提高安全管理能力, 改进项目安全绩效。

关键词: 建筑工人; 安全行为; 预警系统; 神经网络; 安全绩效

中图分类号: X924.3

文献标志码: A

Early Warning of Construction Workers' Safety Behavior from Cross-level Perspective

JIA Guangshe¹, HE Changquan^{1,2}, CHEN Yuting², SUN Jide¹

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto M5S 1A5, Canada)

Abstract: Based on the theory of behavior safety, the literature analysis and personnel interviews, the early warning system for the safety behavior of construction workers was established from a cross-level systematic perspective. According to the system, the questionnaire was designed, the data were collected from construction sites, and the system was trained and tested by back propagation (BP) neural network. The results show that output values of the simulation accord well with the actual safety behavior data, and the simulation ability of the trained neural network model is competitive. The evaluation system could effectively evaluate and predict the safety behavior of the construction workers. At the same time, safety behavior was sorted into

three grades (excellent, good and poor) according to the threshold, and different safety intervention programs should be adopted to enhance the safety management ability and improve the projects' safety performance.

Key words: construction worker; safety behavior; early warning system; neural network; safety performance

建筑业是世界上最危险的行业之一^[1], 而 80% 以上的安全事故是由不安全行为引起的^[2-4]。特别是对于重大工程, 随着安全监管压力的增加和安全需求的提高, 管理重心逐步下移, 建筑工人安全行为已成为安全管理的重要内容。很多项目配备了安全监控系统, 对现场的安全行为进行监测, 通过无线传感等先进技术获得建筑工人的生理状态和空间轨迹等监测数据, 以保证项目现场的安全状态可测、受控。然而, 由于建筑工人流动性强, 安全知识基础薄弱, 安全行为数据量大, 对安全行为进行预警和控制仍然是当前安全管理的难点之一。对建筑工人安全行为进行有效地预警, 可以把不安全行为遏制在萌芽状态, 保障生产安全。

在理论研究方面, 国内外学者对安全行为的影响因素从不同视角进行了研究, 但如何应用于安全行为管理实践则未能进一步深化。Goh 等^[5]基于计划行为理论, 认为主观规范是影响建筑工人安全行为的关键变量。Choi 等^[6]根据社会认同理论, 指出建筑工人的安全行为受到社会认同作用的影响。Fang 等^[7]和 Zhang 等^[8]发现, 监督者行为与建筑工人安全行为存在直接和间接的影响。Chen 等^[9]认为个体韧性和安全氛围是安全绩效的重要影响因素。Zhou 等^[10]考虑了个人经验因素对安全行为的影响。梅强等^[11]探讨了安全文化的三个维度对安全行为的直接和间接作用。以上因素分别属于组织、个体等不同

收稿日期: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(71472139)

第一作者: 贾广社(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为大型建设项目管理和工程社会学。

E-mail: jiagsh803@tongji.edu.cn

通信作者: 何长全(1982—), 男, 讲师, 博士生, 主要研究方向为建设项目安全管理。E-mail: 1610315@tongji.edu.cn

层次,不同层次的因素如何共同对安全行为产生影响^[12]等问题则需要进行深入分析。

学者们对安全行为如何进行监测和控制也开展了创新性探索,但大部分属于实时监控和事后控制。Melo等^[13]研究了无人飞行器在建筑工地安全行为监控中的应用。Li等^[14]开发了主动式施工管理系统,用于监测和提高安全绩效。蒋中铭等^[15]通过实验方法分析了奖励和处罚措施对安全行为的影响效果。虽然控制措施十分必要,但是主要关注点在于正在发生和已经发生的行为,无法针对可能发生的不安全行为进行事先预防。如何结合安全行为影响机制和监测结果对建筑工人安全行为进行预警,并根据预警结果进行针对性干预从而提高安全管理效果,是需要解决的问题。

由此可见,建筑工人安全行为作为一个研究热点,学者们对其影响因素、监测方法、控制措施等方面进行了研究,但对于建筑工人安全行为预警的研究尚不够全面深入。在已有文献中,大部分研究侧重于组织或个体因素对安全行为的影响,未能综合考虑两方面因素的共同作用^[12],系统性不足,无法对安全行为进行有效地预控。同时,由于安全行为具有差异性、动态性、隐蔽性等特点,因此安全行为影响因素关系界定不易被确定,影响权重客观性不足,安全行为评价结果也不够精确。本文基于跨层次视角,通过文献分析和人员访谈,建构安全行为预警体系,并通过问卷调查收集相关数据。采用反向传播(BP)神经网络对安全行为预警体系进行训练、测试和检验,并根据验证后的预警体系对不安全行为进行早期预警,有助于建设项目安全绩效的改进,提升安全治理水平。

1 理论基础

Christian等^[12]采用元分析的方法,建立了安全行为绩效的集成模型。在该模型中,影响安全行为的因素包括情境因素(安全氛围、安全领导)和个体因素(心理特征、安全知识、工作态度和安全感),两者共同对安全行为(安全遵守和安全参与)产生作用,进而影响安全结果(安全事故、人员伤亡)。这一理论模型指出了个体因素和情境因素对安全行为同等重要,两者交互作用下安全行为的影响机理是重要的研究启示,也是本文的理论基础。需要指出的是,该模型虽然构建了基本框架,但其中的情境因素和个体因素尚不够完善,也未进行实证检验。

Hofmann等^[16]依据社会交换理论,发现领导成员交换(LMX)和组织支持影响安全绩效,并受到安全沟通和安全承诺的中介作用。Eid等^[17]根据真诚领导理论,构建了安全绩效理论模型,并提出了研究假设。真诚领导理论认为,真诚领导(自我意识、关系透明度、道德观念、过程平衡)通过安全氛围影响安全绩效(安全行为、事故或伤亡、险兆事件等),而心理资本(自我效能、希望、韧性、乐观)在安全氛围和安全绩效间起到调节作用。真诚领导理论明确提出了心理资本对安全行为的影响效应,认为真诚领导者的沟通能力能够通过安全氛围影响安全行为,并建议进行跨层次的研究。Jitwasinkul等^[18]采用贝叶斯信用网络,分析了安全领导、管理承诺和安全沟通等因素对安全行为的作用。Shen等^[19]研究了变革型领导对安全行为的影响,发现变革型领导通过领导成员交换、安全氛围以及知识和动机的中介作用间接影响安全行为。在以上研究成果的基础上,对安全行为关键因素进行了改进,除安全氛围和安全领导外,整合了心理资本因素,并扩充了安全能力的内涵,使得安全行为的前置变量更加完善。

根据以上文献梳理和理论模型,可以从组织方面和个体方面归纳出安全行为四个关键影响因素,如表1所示。

表1 安全行为关键影响因素

Tab.1 Key factors of safety behavior		
层次	关键影响因素	文献依据
组织	安全氛围	Christian等 ^[12] 、Eid等 ^[17] 、Shen等 ^[19]
	安全领导	Christian等 ^[12] 、Hofmann等 ^[16] 、Eid等 ^[17] 、Jitwasinkul等 ^[18] 、Shen等 ^[19]
个体	心理资本	Eid等 ^[17]
	安全能力	Christian等 ^[12] 、Shen等 ^[19]

此外,根据安全行为理论,通过增强安全行为来减少不安全行为,从而有效提升安全绩效^[2]。安全行为受到安全氛围、管理模式、个人能力、安全经验等多种因素的影响,影响机制具有非线性、联动性、复杂性等特点。国内外学者对安全行为的影响机制进行了广泛而深入的研究^[5-10],也对安全行为的监测和干预措施进行了分析^[13-15],但两者之间存在一定程度的割裂,融合程度不足。本文研究致力于弥补这一缺陷,建立组织-个体跨层次安全行为预警体系,依据关键影响因素和安全行为数据,对建筑工人进行事先诊断和筛选,发现不安全行为高发人群,据此进行定点干预,从而提高安全管理效率。具体的研究思路为:首先,构建建筑工人安全行为预警体系,建立神经网络模型;然后,对该模型进行学习和训练,探

寻安全行为的内在规律;最后,对建筑工人的安全行为进行预警,并根据预警结果采取相应的安全干预措施,进而从根本上提高安全管理的针对性和有效性,增强本质安全。

2 跨层次视角下安全行为预警体系

根据上述文献和人员访谈以及安全行为关键影响因素的系统分析,建立了建筑工人安全行为预警体系,如图 1 所示。该预警体系主要考虑组织影响、管理方式、人员因素等“软”因素的影响,暂不考虑技术因素、物理因素等“硬”因素的作用。该预警体系共有 4 个二级指标、17 个三级指标,从组织和个体两个方面对建筑工人的安全行为进行系统评价。

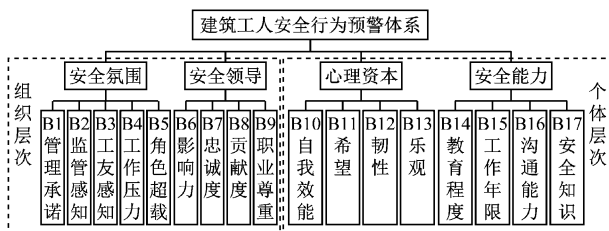


图 1 建筑工人安全行为预警体系

Fig. 1 Early warning system for safety behavior of construction workers

安全氛围包含五个三级指标,分别为管理承诺、监管感知、工友感知、工作压力和角色超载。安全氛围指员工对安全的关注和整体感知^[20],是影响安全绩效的重要预测指标^[21]。其中,管理承诺是项目管理层对安全方面的责任和重视程度,监管感知是建筑工人感受到的安全监管者的态度和措施,工友感知是建筑工人对工友安全状态的评价,工作压力是由资源不足等因素带来的压力,角色超载是工人由于工作时间过长等原因导致的压力过大的现象。这五个因素共同构筑了项目整体安全氛围。

根据领导成员交换理论,把安全领导分成四个维度,即影响力、忠诚度、贡献度和职业尊重。领导成员交换理论认为,更亲密的领导者-成员关系能够激励下属更加积极主动地完成工作任务^[22]。影响力是指领导者在下属心目中的形象和地位,忠诚度是领导者对下属的支持程度,贡献度是下属对领导者的支持程度,职业尊重是下属对领导者的知识、能力和技能的赞赏程度。领导成员交换能够促进安全参与行为,改善安全氛围^[19],从而有助于安全行为绩效的提升。

依据心理资本理论,可以把心理资本划分为以

下四个方面:自我效能、希望、韧性和乐观。心理资本是个体表现出来的积极的心理状态^[23],这种独特的个人资源能够促使个体实施积极的行为并产生高绩效。自我效能是个体运用自己的能力达成特定目标的信念,希望是个体在实现目标过程中的方法、步骤及灵活应变能力,乐观是个体通过积极的归因模式所带来的良好心态,韧性是个体从逆境、失败或重大变革中恢复的能力。心理资本能够直接影响安全行为^[24],也能够通过安全氛围间接影响安全行为^[25],从而影响安全绩效。

建筑工人的安全能力从以下四个方面来衡量:教育程度、工作年限、沟通能力和安全知识。这四个方面会影响建筑工人的安全认知,进而内化为安全经验和习惯,并导致不同的安全行为模式。沟通能力是个体在社会交往方面运用有效的和适当的方法进行沟通的能力^[26]。积极的安全氛围和较高的沟通密度相联系^[27],沟通能力的提升可以使沟通密度提升,并进一步对安全行为产生影响。

安全氛围、安全领导、心理资本和安全能力共同构成了建筑工人安全行为的预警体系。安全氛围和安全领导属于组织层面的因素,心理资本和安全能力属于个体层面的因素,从而建立起跨层次的安全行为预警体系。

3 基于 BP 神经网络的安全行为仿真

BP 神经网络是一种按逆向误差传播算法训练的多层前馈网络^[28],也是目前应用最广泛的神经网络模型之一^[29]。BP 神经网络有以下三个层次:输入层、隐含层和输出层。数据由输入层输入后,首先通过非线性的映射关系把信息依次传递到隐含层和输出层,然后根据输入结果的期望要求,再反向把信息由输出层依次反馈到隐含层,经过正向和反向的多次迭代,达到最终的预测结果。该神经网络基于人工神经网络理论,能够对不完全信息进行学习和训练,对认知、决策、行为等复杂过程机制进行仿真和模拟,并被广泛地应用于评价、预测、预警等管理领域。

3.1 数据收集

本文研究的数据通过调查问卷的方式采集,采用纸笔作答的形式进行问卷填写,调查对象为三个项目的现场建筑工人,每份问卷的填写时间约为 15~20 min。本次调查共发放问卷 200 份,回收问卷 194 份,其中有效问卷 135 份,回收率为 97%,有效率为 70%。影响有效率的主要原因有答案雷同、填写

不全、选项单一等。问卷包括三个部分:第一部分为基本信息,第二部分为影响因素,第三部分为安全行为。在第一部分调查问卷中,经过统计分析,调查对象的人口统计学信息如表 2 所示。由表 2 可知,调查对象的年龄、岗位分布较为平均,有较好的代表性。在性别分布中,虽然绝大部分是男性,但比较符合工地的实际情况。

表 2 调查对象的人口统计学信息

Tab.2 Demographic information of the respondents

统计类别	属性	频次/人	百分比/%
性别	男	124	91.85
	女	11	8.15
年龄	25 岁及以下	16	11.85
	26 岁至 29 岁	28	20.74
	30 岁至 39 岁	41	30.37
	40 岁及以上	50	37.04
岗位	焊工	33	24.45
	普工	30	22.22
	木工	17	12.59
	瓦工	13	9.63
	钢筋工	11	8.15
	水电工	9	6.67
	机械工	6	4.44
	其他	16	11.85

在第二部分和第三部分的调查问卷中,对建筑工人安全行为及其影响因素进行测量。影响因素包括安全氛围、安全领导、心理资本、安全能力等四个方面,采用李克特 5 级量表进行打分,1 代表“完全不同意”,5 代表“完全同意”。安全行为包括安全遵守和安全参与两个方面,也采用李克特 5 级量表,根据安全行为发生频率,1 代表“从不”,5 代表“常常”。调查问卷核心部分题项设置情况如表 3 所示。

表 3 调查问卷核心部分题项设置

Tab.3 Core items of the questionnaire

关键因素	题项	来源	题项举例
安全氛围	20	Chen 等 ^[9] 和 McCabe 等 ^[30-31]	我们的管理部门经常进行安全检查
安全领导	12	Liden 等 ^[32]	我尊重班长的的工作知识和工作能力
心理资本	24	Luthans 等 ^[33]	我通常能自如地应对工作中的压力
安全能力	12	Trenholm 等 ^[26]	我知道怎样有效地发送和接收信息
安全行为	6	Neal 等 ^[34]	我工作时遵守正确的安全程序

调查问卷的拟定经过了文献分析、专家修改、人员访谈、工人试填等环节,信度较好。调查问卷的结构、题项和语意经过了两位安全管理专家和五位高级工程师的检查和讨论,仔细修改了每个题项的用词和表达方式,以符合一线建筑工人的习惯用法。最后,在调查问卷中设置了七道反向题目,以减少社会期许效应的影响。通过以上各种措施,确保调查问卷题目设置的合理性和有效性。

3.2 BP 神经网络学习

3.2.1 BP 神经网络建模

将问卷调查所获得的 135 份有效数据进行归一化处理,并把这些数据分为测试集和训练集两部分。把其中随机抽取的 15 份数据作为测试数据,另外 120 份数据作为训练数据。

归一化后的调查数据如表 4 所示。表 4 中,每一行表示某个建筑工人 17 个指标(见图 1)得分和安全行为得分,每个数字是各个得分归一化后的结果。

表 4 调查数据

Tab.4 Survey data

编号	各指标得分																	安全行为
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	
1	0.73	0.80	0.50	0.60	0.40	0.67	0.67	0.67	0.73	0.70	0.63	0.67	0.70	0.80	0.20	0.64	0.76	0.70
2	0.80	0.83	0.80	0.70	0.40	0.87	0.53	0.80	0.80	0.87	0.97	0.83	0.83	0.80	1.00	0.80	0.92	0.80
3	0.87	0.70	0.60	0.60	0.40	0.67	0.60	0.73	0.67	0.77	0.73	0.70	0.67	1.00	0.80	0.80	0.80	0.73
4	0.77	0.73	0.60	0.60	0.40	0.67	0.73	0.73	0.80	0.77	0.73	0.67	0.77	1.00	1.00	0.72	0.68	0.70
5	0.83	0.80	0.60	0.70	0.20	0.80	0.73	0.73	0.87	0.87	0.60	0.80	0.83	0.80	0.60	0.80	0.92	0.83
6	0.80	0.80	0.70	0.80	0.60	0.80	0.60	0.73	0.80	0.77	0.73	0.77	0.60	1.00	0.20	0.72	0.68	0.80
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
133	0.83	0.80	0.60	0.80	0.80	0.80	0.60	0.60	0.80	0.70	0.77	0.77	0.80	0.20	0.20	0.76	0.84	0.70
134	0.97	0.80	0.60	0.80	0.80	0.80	0.53	0.60	0.80	0.77	0.73	0.77	0.80	0.20	0.20	0.76	0.84	0.70
135	1.00	0.73	0.60	0.80	0.80	0.87	0.73	0.53	0.87	0.70	0.73	0.70	0.73	0.40	0.20	0.76	0.84	0.73

本文研究把 17 个三级指标得分作为输入值,把安全行为得分作为输出值,建立神经网络模型。17 个三级指标即为输入层,代表 17 个神经元,安全行为为输出层。为提高仿真速度,把隐含层设为一层,

其神经元个数参照如下经验公式^[28]:

$$h = \sqrt{n + m} + \alpha \tag{1}$$

式中: h 是隐含层的神经元数量; n 是输入层的神经元数量; m 是输出层的神经元数量; α 是 1~10 的常

数. 根据式(1), 并经过反复试算, 较优的隐含层数量选定为 14, 即在“17-14-1”BP 神经网络模式下, 识别率较高.

3.2.2 BP 神经网络训练

依据上述构建的网络模型, 采用 MatlabR2012b 软件^[35]进行仿真训练. 具体训练参数设置如下所示: 输入层向隐含层的传递函数为‘tansig’, 隐含层向输出层的传递函数为‘purelin’, 训练函数为‘trainlm’, 显示时间间隔为 50, 学习速率为 0.025, 学习动量为 0.25, 最大训练次数为 5 000, 训练均方根误差为 0.000 01. 训练完成后, 使用 sim() 进行仿真结果输出, 并绘制仿真图形. 仿真输出代码为 output=sim(net, ptest’), 仿真图形代码为 plot(output, ‘ok’).

3.3 训练及预警结果

训练结果如图 2 所示. 经过 60 次迭代后开始快速收敛, 到第 90 次迭代时达到训练目标.

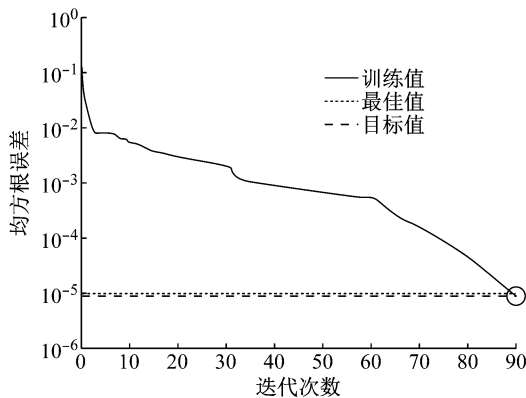


图 2 BP 神经网络训练结果
Fig.2 Training results of BP neural network

神经网络训练集中输出值和目标值之间的相关关系如图 3 所示. 相关系数为 0.999 81, 接近于 1, 说明采用学习后的神经网络得到的安全行为训练结果和建筑工人安全行为调查问卷中所填的得分结果一致性较高, 差异较小. 该结果也说明“17-14-1”神经网络预测准确度较高, 仿真能力较强.

神经网络测试集中的仿真结果如图 4 所示. 由于安全行为是安全绩效的重要指标^[7], 因此把安全行为的两个阈值分别设定为 0.65 和 0.85. 把安全行为表现分为以下三类: 如果满分为 100 分, 得分大于 85 分的建筑工人, 类别为“优秀”, 表明其具备优秀的安全行为习惯, 应挖掘其好的安全行为经验和做法, 加以表彰和推广; 得分在 65~85 分的建筑工人, 类别为“良好”, 说明其安全行为良好, 处在正常的安全状态; 得分在 65 分以下的建筑工人, 类别为“较

差”, 说明其存在严重的安全隐患, 需要重点监测和干预.

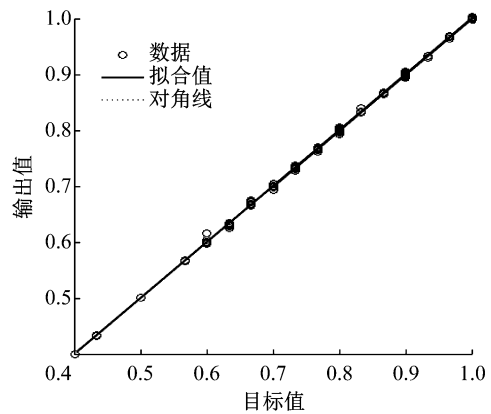


图 3 训练集输出值和目标值相关关系
Fig.3 Correlation between output value of training set and target value

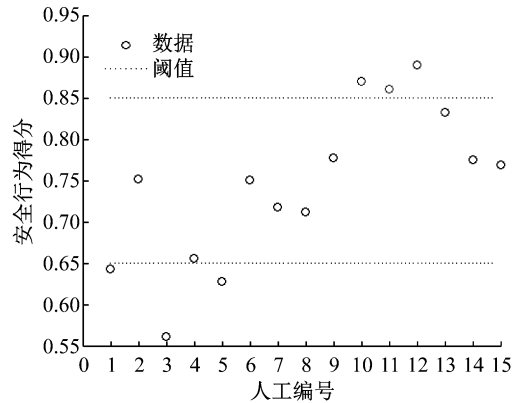


图 4 测试集仿真结果
Fig.4 Simulation results of test set

测试集的预警结果为: 编号为 10~12 的三位工人得分超过 85 分, 安全行为等级为优秀; 编号为 2、4、6~9、13~15 的九位工人得分为 65~85 分, 安全行为等级为良好; 编号为 1、3、5 的三位工人得分低于 65 分, 安全行为等级为较差, 需要进行及时预警, 采取安全行为诊断、安全沟通交流、安全培训教育等手段, 发现背后隐患, 提高安全能力.

4 分析与讨论

从安全行为的视角出发, 根据文献分析和人员访谈, 针对建筑工人安全行为构建了预警评价体系, 并采用 BP 神经网络对该体系进行了训练和测试. 结果表明, 由 4 个二级指标及 17 个三级指标构成的评价体系能有效地对建筑工人的安全行为进行评价和预警, 有助于解决安全行为监控效率低下、安全行为评价失真等管理难题, 并促使建筑工人对自身的安

全行为进行反省和思考,把被动管理变为主动控制,提升安全遵守和安全参与水平,改进安全绩效。

在以往的研究中,偏重分析组织或个体因素对安全行为的影响。本文构建了基于组织(安全氛围、安全领导)和个体(心理资本、安全能力)的跨层次安全行为预警模型,所含指标更全面,系统性较强。此外,采用人工神经网络的分析方法,能够避免传统评价方法中存在的评价指标之间关系不易界定、权重确定主观性较强、评价结果不易重现等缺点,并能够针对海量数据进行多次学习训练,从而使得评价权重具有均衡性和客观性,评价结果更加合理有效。采用该预警方法,能够对安全行为进行预控,而非仅仅对安全行为进行实时监控和事后整顿,因而有助于从根源上减少不安全行为,提高安全管理效果。

另外,使用人工神经网络对安全行为进行测评和预警,也能够使安全管理重心下移,从管理层扩大到项目、班组、工人层面,并能够根据测评和预警结果,有针对性地采取表彰推广、持续精进、警示整改等不同的安全干预策略,增强安全治理能力。该预警体系也可以常态化地使用,定期(如每月、每季度)对建筑工人安全行为进行诊断,建立个人化的安全行为档案,并根据诊断结果制定个性化的安全行为提升方案,进而能够使安全行为实践有案可查,安全绩效评价有据可依,安全经验教训有处可循,有效改善建筑工人流动性大而导致的管理难题,构建可追溯的安全治理系统,促进安全管理水平的持续提升。

5 结论与展望

以行为安全理论为基础,从组织-个体跨层次的系统视角构建了建筑工人安全行为预警体系。根据该体系,制作了调查问卷,并面向现场建筑工人进行了数据收集。在此基础上,运用人工神经网络方法,建立了“17-14-1”三级结构的神经网络模型,利用训练集数据对该仿真模型进行了反复学习,采用测试集数据对该模型进行了检测。结果表明,仿真得出的输出值和实际安全行为数据一致性较高,说明训练后的神经网络模型仿真能力较强,可用于安全行为评价和预警。利用测试集数据进行了安全行为预警,根据安全行为阈值,把安全行为分为优秀、良好、较差等三个等级,并针对仿真结果采取不同的安全干预方案,提高项目安全管理效果。

限于研究时间以及数据的可获得性,本文中所

使用的调查数据采集于哈尔滨、石家庄和内蒙古乌海三个城市,数据覆盖范围有限,使得研究结论的应用范围存在一定的局限性。同时,本文中所构建的安全行为预警体系,虽然经过了数据验证,但是只包含了其中的关键影响因素,这也是未来需要改进的地方。在后续研究中,将进一步扩大数据采集范围,使得研究结论更具有适用性,并与国外的相关研究结论进行对比,探索建筑工人安全行为的标杆式管理方法,以助力我国建筑业安全治理实践。

参考文献:

- [1] FANG D, WU H. Development of a safety culture interaction (SCI) model for construction projects [J]. *Safety Science*, 2013, 57(8):138.
 - [2] HEINRICH H W, PETERSEN D, ROOS N. *Industrial accident prevention* [M]. New York: McGraw-Hill, 1950.
 - [3] SALMINEN S, TALLBERG T. Human errors in fatal and serious occupational accidents in Finland [J]. *Ergonomics*, 1996, 39(7):980.
 - [4] HSE (Health and Safety Executive). *Strategies to promote safe behavior as part of a health and safety management system* [R]. Edinburgh: The Keil Center, 2002.
 - [5] GOH Y M, SA'ADON N F B. Cognitive factors influencing safety behavior at height: a multimethod exploratory study [J]. *Journal of Construction Engineering & Management*, 2015, 141(6): 04015003.
 - [6] CHOI B, AHN S, LEE S H. Construction workers' group norms and personal standards regarding safety behavior: social identity theory perspective [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2017, 33(4):04017001.
 - [7] FANG D, WU C, WU H. Impact of the supervisor on worker safety behavior in construction projects [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2015, 31(6):04015001.
 - [8] ZHANG P, LI N, FANG D, *et al.* Supervisor-focused behavior-based safety method for the construction industry: case study in Hong Kong [J]. *Journal of Construction Engineering & Management*, 2017, 143(7):05017009.
 - [9] CHEN Y, MCCABE B, HYATT D. Impact of individual resilience and safety climate on safety performance and psychological stress of construction workers: a case study of the Ontario construction industry [J]. *Journal of Safety Research*, 2017, 61:167.
 - [10] ZHOU Q, FANG D, WANG X. A method to identify strategies for the improvement of human safety behavior by considering safety climate and personal experience [J]. *Safety Science*, 2008, 46(10):1406.
 - [11] 梅强,张超,李雯,等. 安全文化、安全氛围与员工安全行为关系研究:基于高危行业中小企业的实证[J]. *系统管理学报*, 2017, 26(2):277.
- MEI Qiang, ZHANG Chao, LI Wen, *et al.* Relationship among safety culture, safety climate and staffs' safety behavior: an empirical analysis of SMEs in high-risk industry [J]. *Journal of*

- Systems & Management, 2017, 26(2):277.
- [12] CHRISTIAN M S, BRADLEY J C, WALLACE J C, *et al.* Workplace safety: a meta-analysis of the roles of person and situation factors [J]. Journal of Applied Psychology, 2009, 94(5):1103.
- [13] MELO R R S D, COSTA D B, ÁLVARES J S, *et al.* Applicability of unmanned aerial system (UAS) for safety inspection on construction sites [J]. Safety Science, 2017, 98: 174.
- [14] LI H, LU M, HSU S C, *et al.* Proactive behavior-based safety management for construction safety improvement [J]. Safety Science, 2015, 75(5):107.
- [15] 蒋中铭,方东平,张铭宗. 基于实验设计的建筑工人安全相关行为仿真[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2014(10):1327.
JIANG Zhongming, FANG Dongping, ZHANG Mingzong. Experiment-based simulations of construction worker safety behavior [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2014(10):1327.
- [16] HOFMANN D A, MORGESON F P. Safety-related behavior as a social exchange: the role of perceived organizational support and leader-member exchange [J]. Journal of Applied Psychology, 1999, 84(2):286.
- [17] EID J, MEARNS K, LARSSON G, *et al.* Leadership, psychological capital and safety research: conceptual issues and future research questions [J]. Safety Science, 2012, 50(1):55.
- [18] JITWASINKUL B, HADIKUSUMO B H W, MEMON A Q. A Bayesian belief network model of organizational factors for improving safe work behaviors in Thai construction industry [J]. Safety Science, 2016, 82(3):264.
- [19] SHEN Y, JU C, KOH T Y, *et al.* The impact of transformational leadership on safety climate and individual safety behavior on construction sites [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(1):45.
- [20] ZOHAR D. Safety climate in industrial organizations: theoretical and applied implications [J]. Journal of Applied Psychology, 1980, 65(1):96.
- [21] ZOHAR D. Thirty years of safety climate research: reflections and future directions [J]. Accident Analysis & Prevention, 2010, 42(5):1517.
- [22] 夏征农,陈至立,陆雄文. 大辞海:管理学卷[M]. 上海:上海辞书出版社,2011.
XIA Zhengnong, CHEN Zhili, LU Xiongwen. Big lexicon: management volume [M]. Shanghai: Shanghai Lexicography Press, 2011.
- [23] LUTHANS F, AVOLIO B J, AVEY J B, *et al.* Positive psychological capital: measurement and relationship with performance and satisfaction [J]. Personnel Psychology, 2007, 60(3):541.
- [24] WANG D, WANG X, XIA N. How safety-related stress affects workers' safety behavior: the moderating role of psychological capital [J]. Safety Science, 2018, 103:247.
- [25] SEO H C, LEE Y S, KIM J J, *et al.* Analyzing safety behaviors of temporary construction workers using structural equation modeling [J]. Safety Science, 2015, 77:160.
- [26] TRENHOLM S, JENSEN A. Interpersonal communication [M]. 7th ed. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [27] LIAO P C, LEI G, FANG D, *et al.* The relationship between communication and construction safety climate in China [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(4):887.
- [28] 姜金贵,宋艳,杜蓉. 管理建模与仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 2018.
JIANG Jingui, SONG Yan, DU Rong. Management modeling and simulation [M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [29] 夏才初,周开方,程怡,等. 基于BP神经网络的公路风吹雪雪深预测模型[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2017, 45(5):714.
XIA Caichu, ZHOU Kaifang, CHENG Yi, *et al.* Prediction model of snow depth of snowdrift on highway based on back propagation neural network [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2017, 45(5):714.
- [30] MCCABE B Y, ALDERMAN E, CHEN Y, *et al.* Safety performance in the construction industry: quasi-longitudinal study [J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2017, 143(4):04016113.
- [31] MCCABE B, LOUGHLIN C, MUNTEANU R, *et al.* Individual safety and health outcomes in the construction industry [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(12):1455.
- [32] LIDEN R C, MASLYN J M. Multidimensionality of leader-member exchange: an empirical assessment through scale development [J]. Journal of Management, 1998, 24(1):43.
- [33] LUTHANS F, YOUSSEF C M, AVOLIO B. Psychological capital [M]. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- [34] NEAL A, GRIFFIN M A. A study of the lagged relationships among safety climate, safety motivation, safety behavior, and accidents at the individual and group levels [J]. Journal of Applied Psychology, 2006, 91(4):946.
- [35] 何逢标. 综合评价方法的MATLAB实现[M]. 北京:中国社会科学出版社, 2010.
HE Fengbiao. Comprehensive evaluation method of MATLAB implementation [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2010.