

# 基于SEM的高速公路夜间养护施工作业风险分析

范金华<sup>1</sup>, 邹乐平<sup>2</sup>, 戚绍仁<sup>2</sup>, 田震<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 安全科学与工程研究所, 广东 广州 510641; 2. 广东长大道路养护有限公司, 广东 广州 510897)

**摘要:**为分析高速公路夜间养护施工作业风险的影响因素,定量评估各因素对夜间养护施工作业风险的影响程度,该文通过文献综述、事故数据、问卷调查等方式提炼出影响作业风险的5个一级指标和36个二级指标,构建评估体系;以343份夜间养护施工作业风险调查问卷为样本,通过结构方程模型(SEM)构建一阶及二阶验证性因子分析模型。结果表明:驾驶员的因素对作业风险的影响效果最大,其次是作业区、车辆、道路和环境;5个一级指标之间除了环境对车辆影响不显著之外,其余指标相互之间均存在显著影响。

**关键词:**结构方程模型(SEM);高速公路;夜间养护施工作业;定量评估

**中图分类号:**U415.1

**文献标志码:**A

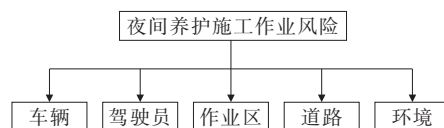
## 0 引言

高速公路夜间养护施工作业是一种高风险作业。事故统计分析研究表明,夜间养护施工作业事故率、致死率远高于日间养护施工<sup>[1]</sup>。为分析高速公路施工作业区风险,Zhang等<sup>[2]</sup>、Li等<sup>[3]</sup>、孟祥海等<sup>[4]</sup>对作业相关风险因素进行了辨识;Wei等<sup>[5]</sup>对不同照度条件下的事故严重程度进行了研究;张云雨<sup>[6]</sup>、吴彪等<sup>[7]</sup>对作业区风险因素进行风险评估;刘纪坤等<sup>[8]</sup>提出对作业过程中的重点风险因素辨识的LECT评价法;Rahman等<sup>[9]</sup>研究动态信息标志对驾驶员车速的控制效果。当前的研究主要集中于高速公路日间养护施工作业或新建、改扩建施工作业的风险因素辨识和评价,对高速公路夜间养护施工作业风险定量分析缺乏系统的研究。因此,结合结构方程模型(Structural Equation Model, SEM)对高速公路夜间养护施工作业风险进行定性和定量分析具有较高的研究价值。

广东省高速公路养护里程已连续多年位列中国第一,夜间养护施工作业量大。在问卷调查的基础上,使用SEM方法分析夜间养护施工作业的影响因素以及各因素之间的关系,为提高高速公路夜间养护施工作业的风险防范水平提供技术支持。

## 1 评价指标体系构建

基于交通事故统计数据以及一线管理经验,本文从驾驶员、车辆、道路、环境、作业区5个维度建立高速公路夜间养护施工作业风险的评估体系,如图1所示。



## 2 研究方法

### 2.1 调查问卷建立

在5个维度基础上编制调查问卷,问卷涵盖的调研指标如表1所示,在每个指标中设定相应的问题,每个问题的回答采用李克特七点法进行设定,答者可对每个问题从1~7分选择打分回答。本调研主体为施工领域专家及学者、长大道路养护公司某项目部的安全管理人员,以电子调查问卷与现场纸质调查问卷相结合的方式共发放380份问卷,筛选有效问卷343份,有效率为90.2%。在收集到问卷数据后,

整理成标准的.csv格式文件,导入AMOS软件进行在缺陷的指标,确保SEM分析指标的可靠性和基本的效度和信度检验,查找并剔除问卷设计中存效性的。

表1 作业风险评估观测变量(二级指标)

编号	观测变量	编号	观测变量	编号	观测变量
1	年龄 $D1$	14	交通流量 $E4$	27	操作错误 $W6$
2	驾龄 $D2$	15	交通组成 $E5$	28	监护失误 $W7$
3	性别 $D3$	16	指示标识视认性 $E6$	29	作业区设置 $W8$
4	夜间视距 $D4$	17	车速限制 $H1$	30	作业区照明 $W9$
5	超速驾驶 $D5$	18	车道数量 $H2$	31	交安设施 $W10$
6	疲劳驾驶 $D6$	19	路面条件 $H3$	32	施工时间 $W11$
7	危险性驾驶行为 $D7$	20	几何特征 $H4$	33	车辆类型 $V1$
8	攻击性驾驶行为 $D8$	21	作业区位置 $H5$	34	超载超限 $V2$
9	驾驶失误 $D9$	22	作业人员疲劳施工 $W1$	35	制动失效 $V3$
10	紧急避让 $D10$	23	作业人员的不安全行为 $W2$	36	爆胎 $V4$
11	温度 $E1$	24	岗位技能和知识掌握水平 $W3$	37	车辆失控 $V5$
12	光线 $E2$	25	岗前教育培训及交底情况 $W4$	38	施工车辆故障 $V6$
13	天气情况 $E3$	26	违章指挥 $W5$	39	施工车辆进出场 $V7$

## 2.2 收敛信度检验

本研究根据Kline<sup>[10]</sup>的二阶段模式进行验证式因素分析(CFA)测量模式变量缩减,直至测量模型配适度达到可接受水平,再进行完整的SEM模型评估。在CFA过程中,发现 $D1$ 、 $D3$ 、 $D10$ 这3个二级指标因素的负荷量分别为0.434、0.214和0.376,均小于

0.50,不满足配适度的要求,因此本文对上述3个指标进行剔除,使驾驶员维度的模型配适度达到可接受水平。对所有维度进行CFA分析,其负荷量为0.614~0.863,且达到显著;其组成信度(CR)为0.889~0.918,平均方差萃取量(AVE)为0.443~0.617,其维度信度分析如表2所示。

表2 维度信度分析

维度	二级指标	参数显著性估计				因素负荷量 (Std.)	题目信度 (SMC)	组成信度 (CR)	收敛效度 (AVE)
		Unstd.	S.E.	t-value	P				
驾驶员	$D2$	1.000				0.700	0.490	0.918	0.616
	$D4$	0.990	0.069	14.369	***	0.828	0.686		
	$D5$	1.137	0.076	14.924	***	0.863	0.745		
	$D6$	1.170	0.080	14.662	***	0.846	0.716		
	$D7$	1.007	0.075	13.442	***	0.772	0.596		
	$D8$	1.058	0.080	13.154	***	0.754	0.569		
	$D9$	1.079	0.087	12.454	***	0.713	0.508		
	$E1$	1.000				0.763	0.582	0.906	0.617
	$E2$	1.162	0.077	15.020	***	0.790	0.624		
环境	$E3$	1.111	0.074	15.005	***	0.789	0.623		
	$E4$	1.113	0.076	14.734	***	0.776	0.602		
	$E5$	1.059	0.072	14.672	***	0.773	0.598		
	$E6$	1.133	0.072	15.698	***	0.821	0.674		
	$H1$	1.000				0.805	0.648	0.889	0.615
	$H2$	1.025	0.065	15.662	***	0.788	0.621		
道路	$H3$	0.864	0.058	14.850	***	0.754	0.569		
	$H4$	0.926	0.064	14.401	***	0.736	0.542		
	$H5$	1.046	0.062	16.798	***	0.835	0.697		

续表2

维度	二级 指标	参数显著性估计				因素负荷量 (Std.)	题目信度 (SMC)	组成信度 (CR)	收敛效度 (AVE)
		Unstd.	S.E.	t-value	P				
作业区	W1	1.000				0.653	0.426	0.897	0.443
	W2	1.246	0.108	11.546	***	0.725	0.526		
	W3	1.126	0.104	10.851	***	0.673	0.453		
	W4	1.107	0.104	10.639	***	0.657	0.432		
	W5	1.023	0.098	10.403	***	0.640	0.410		
	W6	1.071	0.107	10.029	***	0.614	0.377		
	W7	1.049	0.101	10.337	***	0.635	0.403		
	W8	1.065	0.101	10.528	***	0.649	0.421		
	W9	1.289	0.111	11.572	***	0.727	0.529		
	W10	1.278	0.115	11.147	***	0.695	0.483		
	W11	1.104	0.106	10.392	***	0.639	0.408		
车辆	V1	1.000				0.756	0.572	0.909	0.588
	V2	1.055	0.074	14.331	***	0.763	0.582		
	V3	1.027	0.074	13.949	***	0.745	0.555		
	V4	1.112	0.079	14.152	***	0.754	0.569		
	V5	1.049	0.076	13.766	***	0.736	0.542		
	V6	1.058	0.070	15.195	***	0.804	0.646		
	V7	1.021	0.067	15.235	***	0.806	0.650		

本模型除了工作区收敛效度略低于0.5外,但仍属于可接受水平,其余均符合Hair等<sup>[11]</sup>和Fornell等<sup>[12]</sup>的标准。在信度检验并调整后,保证了SEM指标数据支撑达到信度要求。下文将进行效度检验,确保SEM分析前其指标数据的有效性。

2.3 区别效度检验

区别效度分析验证不同的两个维度之间的相关性是否存在统计上的差异。在2.2节收敛效度检验合格的基础上,本文利用AMOS软件对2.2节的新数据结构进行分析,结果如表3所示。

表3 区别效度检验

维度	收敛效度 (AVE)	环境	车辆	驾驶员	工作区	道路
环境	0.617	0.785				
车辆	0.588	0.101	0.767			
驾驶员	0.616	0.276	0.419	0.785		
作业区	0.443	0.330	0.341	0.432	0.666	
道路	0.615	0.261	0.224	0.303	0.293	0.784

由表3可以看出:每个对角线的收敛效度(AVE)平方根均大于其左侧及下方的Pearson相关值,因此,所有5个维度之间的问卷答案具有显著的效度区别。在数据的信效度得到检验和修正后,进

行SEM分析,探索各因素相互间的关联影响程度。

3 SEM分析

3.1 结构统计模型的建立

挑选9个常见的指标进行整体模型的配适度评估,包括卡方值( $\chi^2$ )、自由度(df)、卡方值/自由度( $\chi^2/df$ )、配适度指标(GFI)、调整后的配适度指标(AGFI)、标准适配指数(NFI)、拟合指数(CFI)、平均近似误差均方根(RMSEA)、标准化均方根(SRMR),其评估结果如图2和表4、5所示。除了环境对于车辆的回归系数影响不显著( $P=0.458$ )外,其余维度相互之间均存在显著的影响。

由表4的拟合度检验结果可知:绝大部分指标均符合一般SEM研究的标准,除了GFI、AGFI、NFI达不到0.9以上标准,但仍然符合Doll等<sup>[13]</sup>和Baumgartner等<sup>[14]</sup>建议的0.8以上的水准,表明模型拥有不错的适配度。利用AMOS建立上述各个因素相应的拓扑模型结构,并且进行结构统计模型一阶风险分析,具体如图2所示。图2中36个观测变量的标准化路径系数均大于0.6,满足使用条件,可以进行二阶验证性因

子分析,进而确定高速公路夜间养护施工作业风险与一级指标之间的关系。

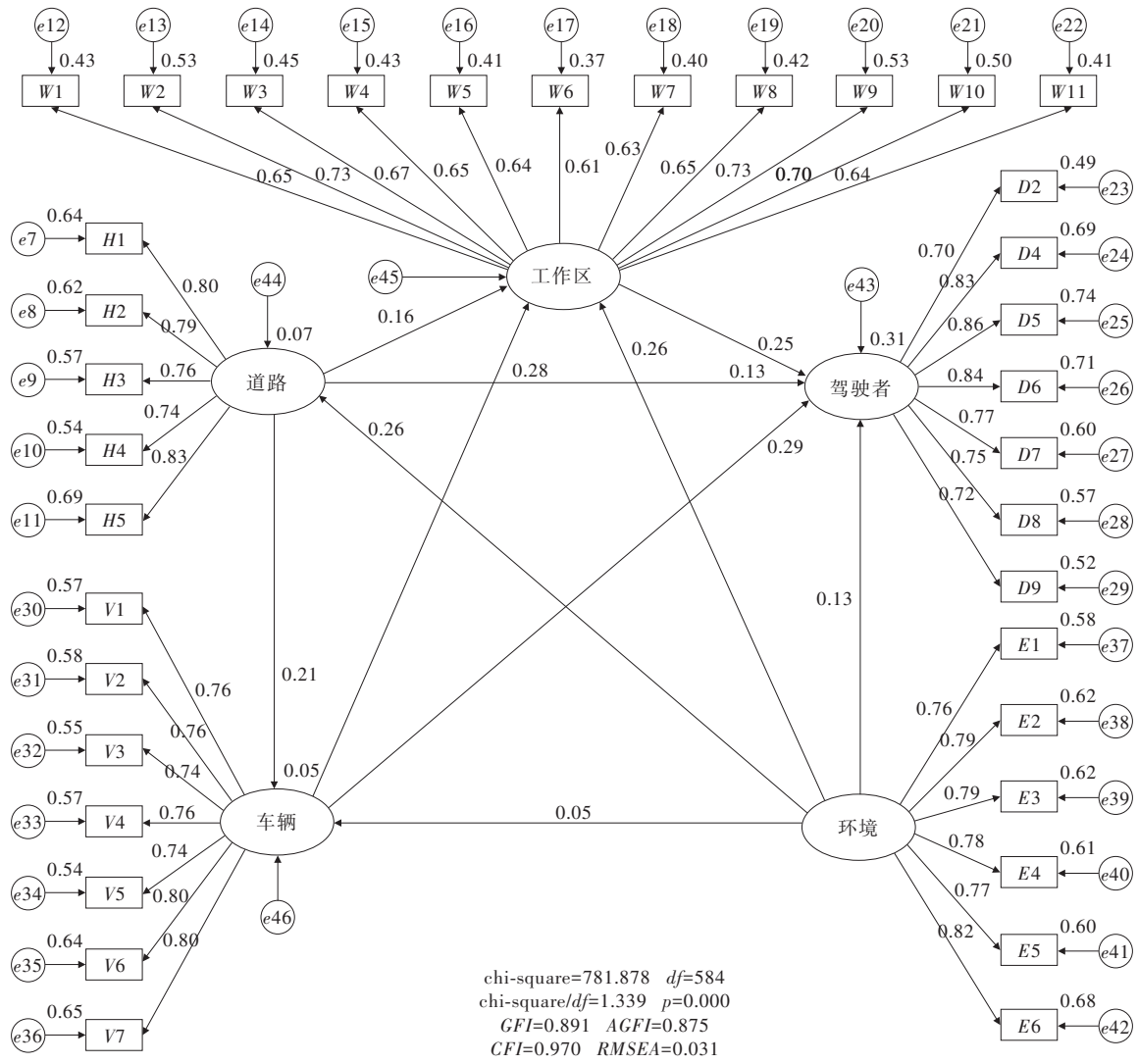


图2 高速公路夜间养护施工作业风险结构统计模型

表4 标准化分析结果的拟合度检验

名称	$\chi^2$	df	$\chi^2/df$	GFI	AGFI	NFI	CFI	RMSEA	SRMR
理想值	越小越好	—	<3	>0.9	>0.9	>0.9	>0.9	<0.08	<0.05
拟合值	781.878	584	1.339	0.891	0.875	0.892	0.970	0.031	0.0426

表5 模型路径系数

维度	标准化估计值	非标准化估计值	标准误差	t值	p值
	Std.	Unstd.	S.E.	C.R.	P
道路 ← 环境	0.261	0.311	0.072	4.310	***
车辆 ← 道路	0.212	0.158	0.046	3.392	***
车辆 ← 环境	0.045	0.040	0.054	0.741	0.458
作业区 ← 道路	0.163	0.095	0.035	2.739	0.006
作业区 ← 车辆	0.278	0.218	0.047	4.649	***

续表5

维度	标准化估计值	非标准化估计值	标准误差	t值	p值
	Std.	Unstd.	S.E.	C.R.	P
作业区 ← 环境	0.260	0.180	0.042	4.335	***
驾驶员 ← 道路	0.252	0.306	0.076	4.000	***
驾驶员 ← 作业区	0.129	0.091	0.040	2.302	0.021
驾驶员 ← 车辆	0.292	0.278	0.056	4.947	***
驾驶员 ← 环境	0.130	0.109	0.047	2.310	0.021

### 3.2 二阶验证性因子分析

通过 AMOS 分析,本模型的二阶验证性因子分析模型结果如图 3 所示,各配适度指标均在合理范围内。对比一阶和二阶模型的卡方值,并通过 AMOS 求解得目标系数为 0.984,表明二阶高速公路夜间养护施工作业风险结构统计模型具有较强的代表性。比较标准化路径系数可知,驾驶员对夜间养护施工作业风险的影响路径系数最大,约为 0.70;环境的路

径影响最小,约为 0.42。综上,各一级指标对夜间养护施工作业风险的影响大小为:驾驶员(0.70)>作业区(0.65)>车辆(0.53)>道路(0.46)>环境(0.42)。

### 3.3 结果分析

由图 3 可知:

(1) 在驾驶员维度的 7 个二级指标中,超速驾驶(0.86)对一级指标驾驶员的影响程度最大,疲劳驾驶(0.84)和夜间视距(0.83)次之。

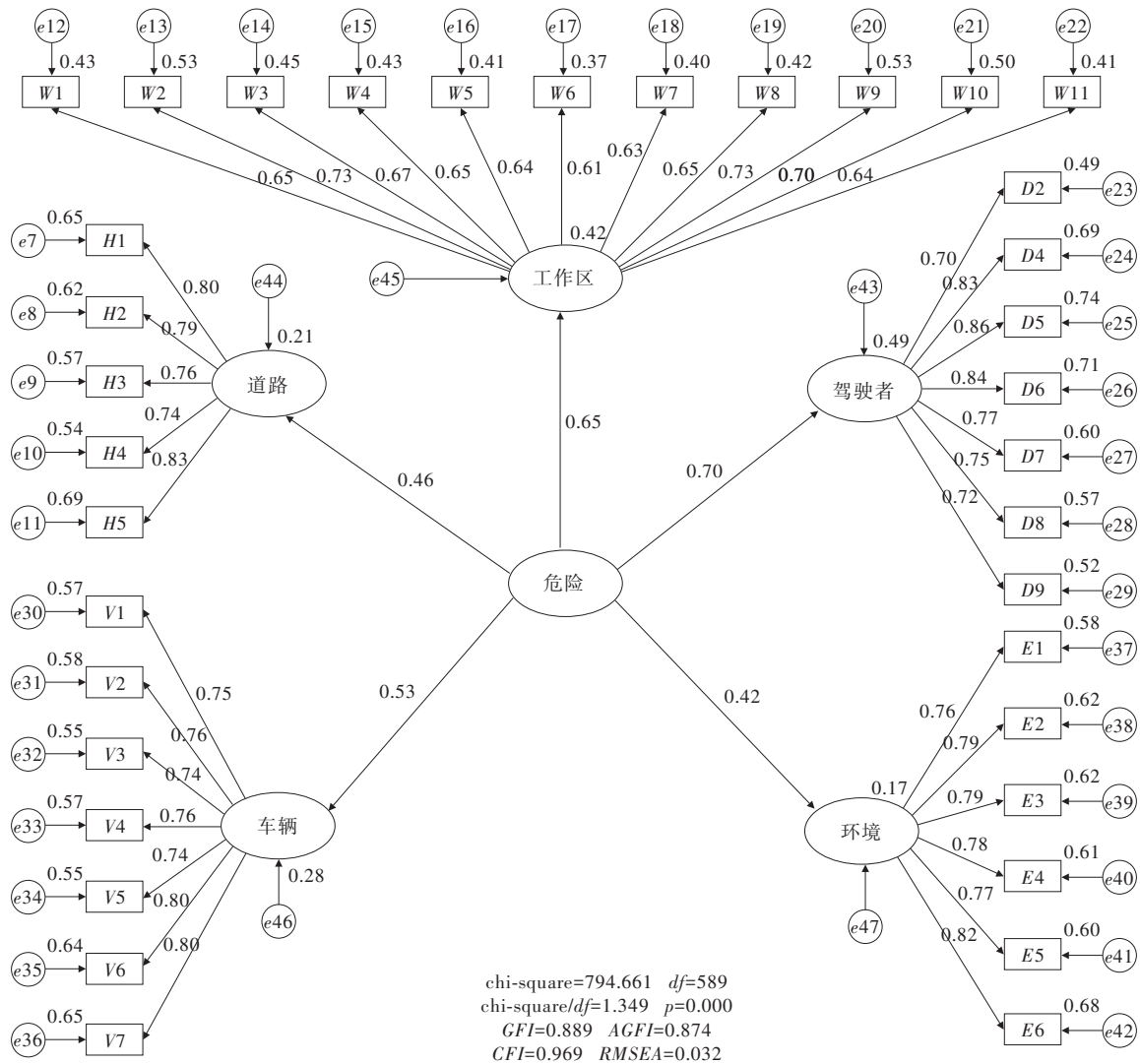


图3 二阶验证性因子分析模型

(2) 在作业区维度的 11 个二级指标中,员工的不安全行为(0.73)以及作业区的照明情况(0.73)对一级指标作业区的影响程度最大。

(3) 在车辆维度的 7 个二级指标中,施工车辆故障(0.80)以及施工车辆进出场(0.80)对一级指标车辆的影响程度最大。

(4) 在道路维度的 5 个二级指标中,作业区的位

置(0.83)对一级指标道路的影响系数最大,道路限速(0.80)的影响程度次之。

(5) 在环境维度的 6 个二级指标中,指示标识视认性(0.82)对一级指标环境的影响系数最大。

由上述结果可知,驾驶员对夜间养护施工作业风险影响程度最大,其次是作业区,这与交通事故统计得到的数据记录基本一致,间接说明本模型分析



的合理性与科学性,因此在分析驾驶员与作业区时,可以着重考量这两个维度。

## 4 结 论

本研究通过相关文献综述、事故数据、问卷调查等方式提炼出影响夜间作业风险的 5 个一级指标和 36 个二级指标,通过对高速公路夜间养护施工作业的 SEM 模型构建并结合实际对象进行研究,得出以下结论:

(1) 二阶验证性因子分析模型拟合度良好,且除了环境对于车辆影响的回归系数不显著外,其余维度相互之间均存在显著的影响,说明高速公路夜间养护施工作业风险的主要影响因素模型是合理的。

(2) 5 个一级指标对作业风险的影响程度大小依次为驾驶员、作业区、车辆、道路和环境。驾驶员和作业区是影响夜间作业风险的关键因素,因此加强驾驶员及作业区的管控能有效降低高速公路夜间作业的风险。

(3) 超速驾驶、疲劳驾驶、夜间视距、员工不安全行为、作业区照明情况、施工车辆故障、施工车辆进出场、作业区位置、道路限速和指示标识视认性 10 个二级指标是所有二级指标中最值得关注的影响因素,这与事故统计结果基本一致。

(4) SEM 方法可实现夜间养护施工作业风险的定量评估,也可以应用到类似相关的工业作业风险评估中。

### 参考文献:

- [1] COTTRELL B H. Improving night work zone traffic control [R]. Virginia Transportation Research Council, 1999.
- [2] ZHANG K R, HASSAN M. Crash severity analysis of nighttime and daytime highway work zone crashes[J]. PLoS One, 2019, 14(8): e0221128.
- [3] LI Y, BAI Y. Highway work zone risk factors and their impact on crash severity[J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(10): 694-701.
- [4] 孟祥海, 徐汉清, 史永义. 高速公路施工作业区追尾风险及其突出影响因素识别[J]. 公路交通科技, 2012, 29(12): 133-138.
- [5] WEI X X, SHU X, HUANG B S, et al. Analyzing traffic crash severity in work zones under different light conditions [J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, 2017(1): 1-10.
- [6] 张云雨. 基于 AHP-FCE 的高速公路作业区占道施工风险评估研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [7] 吴彪, 许洪国, 戴彤焱. 基于 DEMATEL-ISM 的高速公路作业区交通安全影响因素辨识[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5): 130-136.
- [8] 刘纪坤, 刘恩宇, 郭红娟, 等. 山区高速公路施工过程风险评价模型研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 303-307.
- [9] RAHMAN M M, STRAWDERMAN L, GARRISON T, et al. Work zone sign design for increased driver compliance and worker safety[J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 106: 67-75.
- [10] KLINE R B. Principles and practice of structural equation modeling 2nd ed[M]. New York: Guilford Publications, 2005.
- [11] HAIR J F, BLACK W C, BABIN B J, et al. Análise multivariada de dados[M]. Porto Alegre: Bookman Editora, 2009.
- [12] FORNELL C, LARCKER D F. Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error[J]. Journal of Marketing Research, 1981, 18(1): 39-50.
- [13] DOLL W J, XIA W D, TORKZADEH G. A confirmatory factor analysis of the end-user computing satisfaction instrument[J]. MIS Quarterly, 1994, 18(4): 453 - 461.
- [14] BAUMGARTNER H, HOMBURG C. Applications of structural equation modeling in marketing and consumer research: A review[J]. International Journal of Research in Marketing, 1996, 13(2): 139-161.