

中文引用格式:祝连波,虞芷绮,陶玉,等. 基于三度空间的智慧工地安全管理成熟度评价[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(9): 36-44.

英文引用格式:ZHU Lianbo, YU Zhiqi, TAO Yu, et al. Maturity evaluation of safety management in smart construction site based on trio spaces[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 36-44.

基于三度空间的智慧工地安全管理 成熟度评价*

祝连波 教授, 虞芷绮**, 陶玉, 方海祥
(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215009)

中图分类号: X921

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1160

资助项目: 智能建造关键基础科研项目(SJC2023002)。

【摘要】 为提升施工企业智慧工地安全管理水平,构建科学、适用的智慧工地安全管理成熟度评价指标及评价模型。首先,基于三度空间理论,采用文献分析法、德尔菲法、实地调研法,构建智慧工地安全管理成熟度评价指标体系,包括5个一级评价指标和24个二级评价指标;其次,运用博弈论-组合赋权法确定评价指标的权重;然后,基于可拓云模型构建成熟度评价模型,提出5个安全管理成熟度等级;最后,以苏州市中国中医科学院大学(东区)项目为例进行实例分析。结果表明:该智慧工地安全管理成熟度评分为78.304,安全管理成熟度等级为标准级,与工地实际安全管理情况相符,验证了模型的科学性和有效性;由优先区域改进法分析得出优先改进的指标为:人员不安全行为重复发生率、人员危险行为识别预警准确率、安全巡检闭环率、智能安全防护设备配备率和设备不安全状态监测预警准确率。

【关键词】 三度空间; 智慧工地; 安全管理成熟度; 组合赋权; 可拓云模型

Maturity evaluation of safety management in smart construction site based on trio spaces

ZHU Lianbo, YU Zhiqi, TAO Yu, FANG Haixiang

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou Jiangsu 215009, China)

Abstract: In order to improve the level of safety management in smart construction sites, it was necessary to establish a scientific and applicable evaluation index system and an evaluation model. Firstly, based on the trio spaces theory, the literature analysis method, the Delphi method and the field survey method were employed to construct a maturity evaluation index system of safety management in smart construction sites, including 5 first-level indicators and 24 second-level indicators. Secondly, the weights of these evaluation indicators were determined by the game theory-combination weighting method. A maturity evaluation model was then constructed based on the extension cloud theory, putting forward five maturity levels. Finally, the maturity evaluation model of safety management was applied to a smart

* 文章编号:1003-3033(2025)09-0036-09; 收稿日期:2025-04-18; 修稿日期:2025-06-19

** 通信作者:虞芷绮(2000—),女,江苏昆山人,硕士研究生,主要研究方向为智慧工地安全管理。E-mail:2683813931@qq.com。

construction site in Suzhou. The results show that the maturity score of safety management in this smart construction site is 78.304, with a standard level, which is consistent with the actual safety management condition on-site, and the validity and scientificity of this model are verified. Through the priority area improvement method, the repeated incidence of unsafe behavior of personnel, accuracy rate of dangerous behavior identification and early warning, closed-loop security inspection rate, allocation rate of intelligent security protection equipment and accuracy rate of equipment unsafe state monitoring and early warning should be improved first.

Keywords: trio spaces; smart construction site; maturity level of safety management; combination weighting; extension cloud model

0 引 言

2020 年,住房和城乡建设部等部门在颁布《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》后,智慧工地的建设在全国 24 个试点城市如火如荼地进行^[1]。然而,2022 年,我国房屋市政工程生产安全事故共 564 起;2023 年,为 584 起,比 2022 年增长 3%^[2]。由此可见:建设工程安全管理任重而道远,尤其是推行智慧工地管理后,在工地安全管理方面仍存在很多待改进和完善的地方。成熟度模型可判断事物目前的发展阶段和水平,提供改进路径。因此,如何构建智慧工地安全管理成熟度模型,确定智慧工地安全管理成熟度等级并提出改进对策,对提升智慧工地安全管理水平具有重要意义。

综合国内外专家关于智慧工地和安全管理成熟度的研究成果^[3-5],提出智慧工地安全管理成熟度的定义为:在工地施工过程中,结合新型信息化技术与传统安全管理手段,对人的行为、设备的状态、环境因素进行计划、组织、控制、协调,使安全管理达到全面、准确、系统、先进、智慧的程度。

近年来,国内外学者已形成多种成熟度评价模型,广泛应用于各种领域的安全管理评价,在建筑业取得了一些研究成果。如郭海东等^[6]运用网络层次分析法确定权重,结合三元区间构建建筑企业安全管理能力成熟度评价模型;郑霞忠等^[7]运用熵权法确定权重,结合未确知测度理论,构建建筑企业职业健康安全管理成熟度评价模型;ASAHKISSIEDU 等^[8]运用德尔菲法和层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 构建了一个安全、健康和环境管理成熟度模型;TRINH 等^[9]运用德尔菲法构建建筑企业的安全文化韧性成熟度评价模型;赵平等^[10]运用测量模型确定权重,用云模型进行综合评价,构建建筑施工企业现场安全管理成熟度评价模

型;王兴^[4]为评价智慧工地应用成熟度,构建了智慧工地应用成熟度模型;李华等^[5]将本质安全理论运用于智慧工地中,利用连续区间有序加权平均算子和未确知测度法建立智慧工地本质安全度评价模型。目前为止,这些研究取得了一定的成果,但在方法上,多运用 AHP、熵权法、德尔菲法等,依托较单一的方法确定权重,存在一定的片面性;在内容上,安全管理成熟度在智慧工地方面仍然缺乏研究,且智慧工地安全管理评价指标相对较少。

鉴于此,笔者拟结合智慧工地安全管理成熟度概念,基于三度空间理论,从物理、社会、信息 3 个维度构建智慧工地安全管理成熟度评价指标体系;建立基于博弈论组合赋权——可拓云的智慧工地安全管理成熟度评价模型,并将模型应用于苏州市某项目的智慧工地中,得到成熟度等级,并提出改进建议,以期提升施工企业智慧工地安全管理水平。

1 智慧工地安全管理成熟度定义及指标

三度空间理论由 KASAI 等^[11]提出,是指将城市看作一个由物理、社会、信息维度组成的空间,随后,方东平等^[12]在“系统的系统”理念下,以基础设施、建筑、医疗等系统为例,阐述城市韧性的内涵。目前,该理论应用于城市韧性、地铁车站、装配式建筑中。首先,智慧工地的本质是施工场地,是物理空间;其次,施工过程中需要各组织间的沟通协作,是社会空间;最后,智慧工地在施工过程中会产生大量的信息,形成一个信息空间。综上所述,智慧工地作为一个综合性的系统,物理空间、社会空间和信息空间是相互依存、相互影响的,其安全管理工作可从物理、社会、信息 3 个维度进行研究。

1.1 基于三度空间的智慧工地安全管理定义

三度空间理论的核心是将问题看作是一个由物

理空间、社会空间、信息空间共同组成的整体系统^[13]。智慧工地安全管理是指利用信息化技术,识别、分析、控制施工过程中与人员、设备、材料、环境相关的危险源,以减少安全事故的发生^[14]。结合三度空间和智慧工地安全管理的定义,提出基于三度空间的智慧工地安全管理定义:通过综合运用物联网、大数据、人工智能等先进技术,在物理空间中实现施工现场的全面感知与实时监控,确保实体环境、设备的安全可控;在信息空间中构建大数据高效处理与分析平台,挖掘数据价值以预测风险;在社会空间中强化人员协作、制度执行与行为决策,促进多方参与和共同治理,形成安全管理的强大合力。因此,在上述定义基础上,界定智慧工地安全管理中三度空间的概念。

物理空间是智慧工地中除人以外的实体和现场环境组成的空间,如安全防护设备、监测预警设备、安全布置、安全文化氛围、气候环境等,是安全管理的物质基础层。社会空间是由智慧工地中相关人员及活动行为构成的空间,如安全管理制度、员工安全

教育培训等,是安全管理的组织层。信息空间由物联网、建筑信息模型等新兴信息技术以及它们产生的信息流、构建的安全平台系统构成,如安全管理平台、安全技术等。不同于传统工地,三度空间理论强调信息空间对智慧工地智能化、信息化的重要性,是安全管理向智能化转变的过渡层。

1.2 智慧工地安全管理成熟度评价指标体系

为使智慧工地安全管理成熟度评价指标尽量系统完整,基于三度空间理论解构智慧工地安全管理体系。通过分析智慧工地安全管理相关的文献^[5,14-15]、智慧工地相关标准^[16-18],初步提取出30个出现频率较高的二级评价指标,再应用德尔菲法,邀请10位智慧工地、安全管理、成熟度方面的专家筛选初级指标,删除8个指标,补充2个指标,形成24个二级指标;并进行专家访谈和智慧工地实地调研,对筛选指标进一步修改完善,得到最终的评价指标体系(仅适用于大型工业与民用建筑的智慧工地),如图1所示。

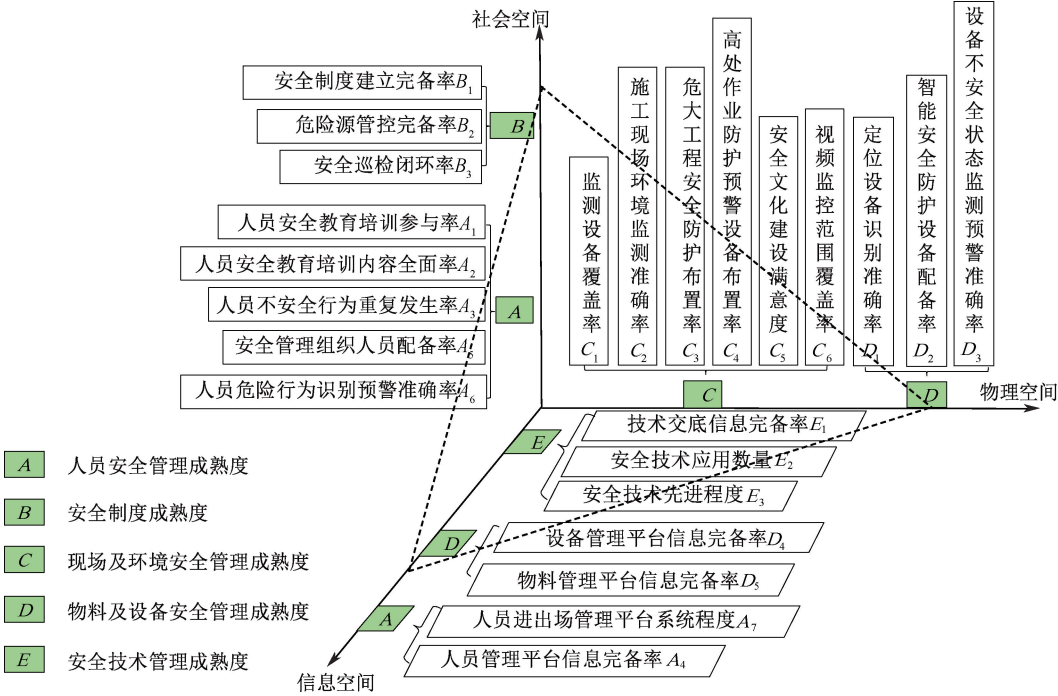


图1 三度空间视角下智慧工地安全管理成熟度评价指标体系

Fig.1 Maturity evaluation index system of safety management in samrt construction site in trio spaces

1.3 评价指标打分标准

1.3.1 定量指标计算方法

图1中,大部分指标为定量指标,现将各指标计算公式列出(为后续计算方便,改为百分制形式),

见表1。

表1中,有些数据从智慧工地中得到,有些数据需要根据国家规定或相关智慧工地建设与评价标准汇总得到。

表 1 定量指标计算方式

Table 1 calculation methods for quantitative index

指标	计算方式
A_1	智慧工地中参与安全教育培训人员数/智慧工地中所有人员数 $\times 100$
A_2	智慧工地中培训的内容/所列出的培训内容 $\times 100$
A_3	(1-重复发生的不安全行为次数/监测到的全部的不安全行为次数) $\times 100$,进行正向化处理
A_4	智慧工地信息管理平台中记录的人员信息项目种类/全部的人员信息项目种类 $\times 100$
A_5	安全管理组织中不同人员类型的数量/应设置的人员数量 $\times 100$
A_6	识别和预警到正确的危险行为次数/识别和预警到的危险行为总次数 $\times 100$
B_1	智慧工地中编制的安全制度内容项数/应涉及到的安全制度内容项数 $\times 100$
B_2	已有相应管控措施的危险源个数/危险源总个数 $\times 100$
B_3	已闭环处理的问题数量/总巡检问题数量 $\times 100$
C_1	智慧工地中监测设备数量/应布置的监测设备数量 $\times 100$
C_2	监测到的环境状况与实际符合的天数/总天数 $\times 100$
C_3	危大工程中实际布置的安全防护数量或面积/应布置的安全防护数量或面积 $\times 100$
C_4	布置的高处作业防护或预警设备/应布置的高处作业防护或预警设备 $\times 100$
C_6	视频监控面积/智慧工地总面积 $\times 100$
D_1	工地人员在施工现场定位精度在 0~5 m 内,若定位无误差为 100 分,定位误差在 5m 为 60 分,按照线性评分
D_2	已配备的智能安全防护设备数量/应配备的智能安全防护设备总数 $\times 100$
D_3	识别和预警的正确设备不安全状态次数/识别和预警的设备不安全状态总次数 $\times 100$
D_4	智慧工地信息管理平台中记录设备信息的项目种类/全部设备信息项目种类 $\times 100$
D_5	智慧工地信息管理平台中记录物料信息的项目种类/全部物料信息项目种类 $\times 100$
E_1	完备的技术交底个数/总的技术交底个数 $\times 100$
E_2	智慧工地中应用的安全技术数量/总结的安全技术数量

1.3.2 定性指标计算方法

由于图 1 的评价指标中有定性指标,需要评价者根据工地的实际情况、自身经验进行打分。为后续(3.3 节)评价者更客观地评价智慧工地安全管理成熟度,参考目前智慧工地的地方标准和安全规范,将各评价指标划分为 5 级,每一级别都有各自的特征和分值,篇幅有限,此处仅列出 A_7 指标各评价等级的特征(若实际情况存在 2 个等级中的情况,则按低等级来),具体如下:

- 1) 初始级[0,60)分。未形成人员进出场管理平台,施工现场出入口由专门的负责人员进行管理。
- 2) 简单级[60,70)分。出入口处设置门禁系统,通过刷卡或人脸识别技术,验证进出工地的人员身份,对外来人员,需要进行登记才能进入。
- 3) 标准级[70,80)分。系统采用云端管理模式,能够实时同步数据。管理人员通过云端平台实时查看工地人员进出情况。
- 4) 良好级[80,90)分。在人员进入场地时能自动识别人员是否佩戴安全防护设备,并在未佩戴时发出提示。
- 5) 优秀级[90,100]分。人员进出场管理平台与人员管理平台相结合,系统将不正确的人员上传到管理人员平台,以便后期进行二次学习教育。

2 智慧工地安全管理成熟度评价模型

2.1 基于博弈论的 AHP-熵权法组合赋权

AHP 是一种主观赋权方法,主要通过专家利用 1~9 标度法打分构建判断矩阵,并基于这些判断矩阵确定各评价指标的相对重要性,进而求解出各指标的权重。熵权法是一种客观赋权法,通过计算各指标的信息熵确定其权重,信息熵值越小,说明该指标的离散程度越大,即数据之间的差异越明显,该指标对综合评价的影响(即权重)就越大。博弈论是研究决策参与者之间相互作用的数学理论。在组合赋权中,不同的权重计算方式被看作是博弈的参与者,它们之间的权重关系被看作是一种博弈过程。利用主客观权重离差极小化的思想,使组合赋权后的最终权重更准确。

为避免权重的主观随意性,采用博弈论对 AHP 法和熵权法进行组合赋权,主要步骤参见文献[19]。

2.2 基于可拓云模型的综合评价

可拓云模型既考虑了数据的模糊性和随机性^[20],又较好地解决了多指标综合性评价的不相容问题,故采用可拓云模型进行评价。

2.2.1 确定成熟度等级标准云

根据各成熟度等级的评估值范围作为一个双边约束区间 $[C_{\min}, C_{\max}]$,利用下式得出各等级的标准云模型 (E_x, E_n, H_e)

$$\begin{cases} E_x = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2} \\ E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \\ H_e = s \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为常数,此处暂取 0.1; E_x 、 E_n 、 H_e 为云模型的云数字特征。

2.2.2 计算综合评判矩阵

对于定性指标,邀请 k 位专家对各指标进行打分,将各指标的分值平均值视为一个云滴 $\bar{x}_t$, 利用下式计算出 k_{ij} ; 对于定量指标,计算出数值即为 $\bar{x}_t$:

$$\bar{x}_t = \frac{1}{k} \sum_{s=1}^k x_{ts} \quad (2)$$

$$k_{ij} = \exp \left[-\frac{(\bar{x} - E_x)^2}{2(E'_n)^2} \right] \quad (3)$$

式中: x_{ts} 为第 s 位专家对第 t 个指标的打分值; E'_n 为 E_n 的均值; k_{ij} 为第 i 个指标的打分平均值与第 j 等级的关联度,在隶属度判断矩阵中表示第 i 行,第 j 列的元素, $j=1,2,\cdots,5; i=1,2,\cdots,n$ 。

构建隶属度判断矩阵 K

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{25} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{n5} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于 E'_n 为正态随机数,故需进行多次计算提高数据准确性。对各关联度进行 n 次计算并求取平均值:

$$k'_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^n k_{ij1} + k_{ij2} + \cdots + k_{ijh}}{n} \quad (5)$$

最终的综合判断矩阵

$$K' = \begin{bmatrix} k'_{11} & k'_{12} & \cdots & k'_{15} \\ k'_{21} & k'_{22} & \cdots & k'_{15} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k'_{n1} & k'_{n2} & \cdots & k'_{n5} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.3 计算综合评判向量 D 并验证

$$D = w^* \cdot K' = (d_1, d_2, \cdots, d_5) \quad (7)$$

式中 w^* 为组合权重向量集。

根据隶属度最大原则, $d_b = \max_{j=1,2,\cdots,5} \{d_j\}$, 则成熟度等级为 b 级。

$$r = \frac{\sum_{j=1}^5 j d_j}{\sum_{j=1}^5 d_j} \quad (8)$$

式中: r 为智慧工地安全管理成熟度等级特征值; d_j 为综合评判向量 D 中的各分量数值。

为验证评判结果的可靠性,引入置信度因子 θ , 当 $\theta < 0.01$ 时,评价结果可信, θ 的计算方式如下:

$$E_{rx} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i(x)}{n} \quad (9)$$

式中 $r_i(x)$ 为第 i 次计算的成熟度等级特征值。

$$E_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i(x) - E_{rx})^2}{n}} \quad (10)$$

$$\theta = \frac{E_m}{E_{rx}} \quad (11)$$

2.2.4 Matlab 仿真

验证可拓云模型的评价结果,利用下式计算各评价指标的云数字特征 (E_{xt}, E_{nt}, H_{et}) ; 根据组合权重加权汇总,得到最终评价云数字特征 (E'_x, E'_n, H'_e) 。利用 Matlab 编程正向云发生器生成云滴图,直观反映评价等级。

$$E_{xt} = \bar{x}_t = \frac{1}{k} \sum_{s=1}^k x_{ts} \quad (12)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_t - \bar{x}_t)^2 \quad (13)$$

式中 S 为样本标准差。

$$E_{nt} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_t - \bar{x}_t| \quad (14)$$

$$H_{et} = \sqrt{S^2 - E_n'^2} \quad (15)$$

2.3 智慧工地安全管理成熟度等级划分

将成熟度等级划分为 5 个等级,具体的特征描述见表 2。

表 2 成熟度等级划分规则

Table 2 Classification rule of maturity level		
等级	特征描述	分值
初始级	企业没有利用信息化技术对建筑工地进行安全管理,是传统的工地安全管理	[0,60)
简单级	对建筑工地中的安全管理有了初步的信息化技术投入,仍处于起步阶段	[60,70)
标准级	信息技术开始发展起来,并应用于安全管理,侧重于信息的收集与传播	[70,80)
良好级	安全管理的信息技术进一步发展,侧重对数据的分析、应用,管理偏向精细化	[80,90)
优秀级	智慧工地中的安全管理达到智能化程度,形成安全管理的智能化集成应用	[90,100]

3 智慧工地安全管理成熟度评价模型应用

为验证评价指标体系和评价模型的科学性和有效性,以江苏省苏州市中国中医科学院大学(东区)项目中的智慧工地为例,进行安全管理成熟度评价。该项目的施工单位是中建三局集团有限公司,建于苏州市吴中区,总建筑面积 161 594 m²。该智慧工地使用建筑信息模型技术、智慧工地信息管理平台,给员工配备智能安全帽、智能安全带等。

3.1 确定成熟度等级标准云

根据 1.2 节所述,智慧工地安全管理成熟度分别有 5 个等级和对应的评分区间,利用式(1)计算各等级的标准云,见表 3。

3.2 确定评价指标权重

考虑到地区性差异,邀请 12 名江苏省的专家

表 3 成熟度等级标准云参数

成熟度等级	评分界限	标准云模型参数
初始级	(0,60)	(30,10,0.1)
简单级	[60,70)	(65,1.667,0.1)
标准级	[70,80)	(75,1.667,0.1)
良好级	[80,90)	(85,1.667,0.1)
优秀级	[90,100)	(95,1.667,0.1)

(4 名智慧工地安全管理领域的教授,3 名智慧工地相关技术工程师,3 名智慧工地安全管理人员,2 名智慧工地操作人员)填写评价指标重要性调查问卷,统计问卷数据,为避免极端数据,去掉每一指标中的最大值和最小值,取平均值,根据 2.1.1 计算主观权重和客观权重;求解线性组合系数为 0.816 和 0.184,通过组合赋权计算出综合权重,见表 4。

表 4 评价指标的权重

指标	AHP 法主观权重	熵权法客观权重	组合权重	指标	AHP 法主观权重	熵权法客观权重	组合权重	指标	AHP 法主观权重	熵权法客观权重	组合权重
A ₁	0.051 2	0.031 8	0.047 6	B ₂	0.025 3	0.034 4	0.027 0	D ₁	0.044 3	0.037 9	0.043 1
A ₂	0.029 3	0.038	0.030 9	B ₃	0.072 3	0.046 1	0.067 5	D ₂	0.075 6	0.042	0.069 4
A ₃	0.077 5	0.034 4	0.069 6	C ₁	0.023 8	0.037 3	0.026 3	D ₃	0.059 9	0.046 1	0.057 4
A ₄	0.027 2	0.057 5	0.032 8	C ₂	0.020 6	0.036 2	0.023 5	D ₄	0.037 1	0.043	0.038 2
A ₅	0.024 0	0.061 3	0.030 8	C ₃	0.037 6	0.040 4	0.038 1	D ₅	0.032 5	0.037 6	0.033 4
A ₆	0.073 9	0.043 8	0.068 4	C ₄	0.027 7	0.048 6	0.031 5	E ₁	0.056 6	0.046 6	0.054 7
A ₇	0.028 2	0.037 5	0.029 9	C ₅	0.018 8	0.048 6	0.024 3	E ₂	0.044 1	0.034 4	0.042 3
B ₁	0.043 9	0.046 2	0.044 3	C ₆	0.031 6	0.036 2	0.032 4	E ₃	0.037 2	0.034 4	0.036 7

3.3 确定综合评价矩阵

对于定性指标,邀请 12 位与本智慧工地相关的专家(4 名安全管理人员,4 名技术工程师,4 名项目经理)和 23 名操作人员填写智慧工地安全管理成熟度调查问卷,去除最大值和最小值后,取评分的平

均值;对于定量指标,根据本智慧工地实际情况进行计算获得数值,利用式(3)一式(6)进行 Matlab 软件编程,经过 1 000 次重复计算($n=1\ 000$),最终得到评价指标的云隶属度,根据隶属度最大原则,得到各指标的评价结果,见表 5。

表 5 评价指标隶属度

指标	数值	初始级	简单级	标准级	良好级	优秀级	评价结果	指标	数值	初始级	简单级	标准级	良好级	优秀级	评价结果
A ₁	82.9	0.000	0.000	0.000	0.450	0.000	良好级	C ₃	74.5	0.000	0.000	0.955	0.000	0.000	标准级
A ₂	81.2	0.000	0.000	0.001	0.077	0.000	良好级	C ₄	73.6	0.000	0.000	0.701	0.000	0.000	标准级
A ₃	72.1	0.000	0.000	0.219	0.000	0.000	标准级	C ₅	82.5	0.000	0.000	0.000	0.325	0.000	良好级
A ₄	75.9	0.000	0.000	0.863	0.000	0.000	标准级	C ₆	83.5	0.000	0.000	0.000	0.665	0.000	良好级
A ₅	78.5	0.000	0.000	0.111	0.001	0.000	标准级	D ₁	82.4	0.000	0.000	0.001	0.298	0.000	良好级
A ₆	74.4	0.000	0.000	0.937	0.000	0.000	标准级	D ₂	71.2	0.000	0.001	0.075	0.000	0.000	标准级
A ₇	81.2	0.000	0.000	0.001	0.077	0.000	良好级	D ₃	72.3	0.000	0.000	0.269	0.000	0.000	标准级
B ₁	80.3	0.000	0.000	0.007	0.020	0.000	良好级	D ₄	81.4	0.000	0.000	0.001	0.098	0.000	良好级
B ₂	78.4	0.000	0.000	0.124	0.001	0.000	标准级	D ₅	82.5	0.000	0.000	0.000	0.323	0.000	良好级

续表 5

指标	数值	初始级	简单级	标准级	良好级	优秀级	评价结果	指标	数值	初始级	简单级	标准级	良好级	优秀级	评价结果
B_3	73.7	0.000	0.000	0.738	0.000	0.000	标准级	E_1	82.5	0.000	0.000	0.000	0.325	0.000	良好级
C_1	76.5	0.000	0.000	0.666	0.000	0.000	标准级	E_2	78.9	0.000	0.000	0.066	0.002	0.000	标准级
C_2	79.6	0.000	0.000	0.024	0.006	0.000	标准级	E_3	79.3	0.000	0.000	0.038	0.003	0.000	标准级

3.4 确定评价等级和可信度检验

利用式(14)计算出综合评判向量 $D = (0.000, 0.001, 0.266, 0.102, 0.000)$, 根据式(8)—式(11), 利用 Matlab 编程得出置信度因子 $\theta = 0.003 < 0.01$, 结果可信。该智慧工地安全管理成熟度得分为 78.304, 根据隶属度最大原则和表 3 等级划分标准可知:该项目智慧工地安全管理成熟度为标准级。根据式(12)—式(15), 计算出评价云数字特征为 $(78.304, 3.459, 2.076)$, 运用 Matlab 绘制综合评价云滴图, 如图 2 所示, 得出的云滴曲线与第三条标准级云滴曲线最接近, 说明评判结果与云滴图结果一致。

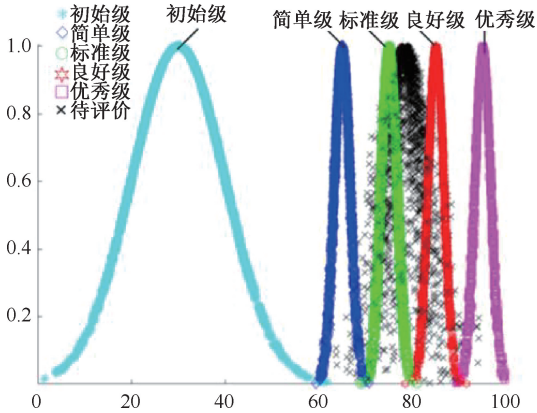


图 2 智慧工地安全管理成熟度综合评价云滴图

Fig. 2 Comprehensive evaluation cloud status diagram of safety maturity in smart construction site

3.5 评价结果分析和提高安全管理成熟度建议

通过现场调研,该项目的智慧工地在施工前使用建筑信息模型技术进行场地安全布置规划、检查是否有空间冲突碰撞问题;管理人员采用智慧工地信息管理平台对劳务人员进行实名制管理,建立电子档案;对机械设备进行信息化管理,在管理平台中录入设备的基本信息和维护信息,方便员工在使用前查看设备状态。操作人员在工地中必须佩戴智能安全帽,高处作业时佩戴智能安全带等。该智慧工地的安全管理实际情况与标准级描述相符。现场调研的结果与利用模型分析的结果基本一致,因此,组合赋权可拓云智慧工地安全管理成熟度模型具有一定的科学性和有效性。

优先区域改进法将 4 个象限划分成优势、机会、维持和改进区域,根据各区域的特点,为各指标提供初步的改进建议。该智慧工地安全管理成熟度等级为“标准级”,说明仍有较大的潜力向“良好级”转变。为此,采用优先区域改进法确定重点改进指标,结合指标在良好级的描述特征和工地实际情况,提出针对性改进建议。

根据表 4 和表 5 中的权重和评分作为纵坐标和横坐标,绘制安全管理成熟度评价指标分布,如图 3 所示。

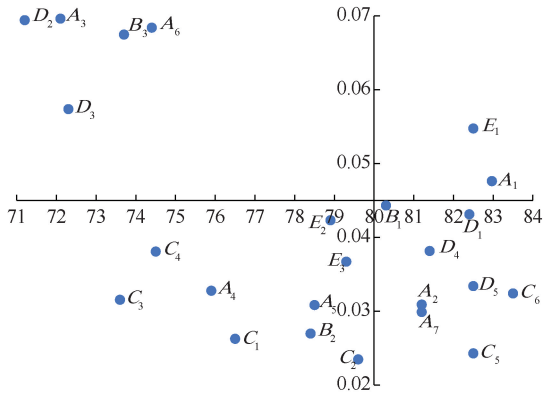


图 3 评价指标分布

Fig. 3 Distribution diagram of evaluation index

以最小和最大权重的平均值和评价结果等级为分界线将各指标划分在 4 个象限中,各象限的改进策略见表 6。

表 6 各象限改进分析

Table 6 Improvement analysis of each quadrant	
区域	改进策略
I (优势区)	此类指标相对成熟,应保证这些方面的投入和管理,确保其维持在良好级
II (改进区)	此类指标重要性大,评价等级低,应优先改进,争取向良好级转变
III (机会区)	此类指标对整体影响不大,在优先改进 II 象限指标的同时,应兼顾此类指标
IV (维持区)	此类指标不是核心指标,应定期检查,维持这些方面的现状

由图 3 和表 6 可知:处于第 II 象限的 A_3 、 A_6 、 B_3 、 D_2 和 D_3 为优先改进指标,需要优先改进。其次, A_4 等第 III 象限的 9 个指标为标准级,也需要向良好级

改进。分析上述指标可以发现,在该智慧工地中,人员不安全行为重复发生频率较高,但安全教育方面的等级是良好级,说明不安全行为的发生除了要考虑安全教育外,还有其他因素会对其产生影响,如工作压力、倦怠感等。同时,由于设备不灵敏、算法不智能等问题,人员和设备的不安全识别预警准确率较低,可能会在工人正确操作的情况下发出警报,影响工人的操作,进而导致工人不安全行为发生。安全管理组织中主要涉及传统的安全员、安全监理等,对新型设备的功能缺乏深入了解,导致安全管理信息化水平较低。安全巡检闭环率较低,是因为巡检结果处理不及时,导致问题无法得到及时解决导致,深入调查发现,部分施工人员态度散漫,安全意识不足,施工现场经常有监理和施工员“扯皮”现象。目前,智慧工地中使用的安全防护设备主要是智能安全帽、智能安全带等,智能防护设备配备率较少,尤其是针对特种作业的人员而言。且智能安全帽在使用过程中仅有定位功能,未集成疲劳监测、坠落预判等算法。危大工程和高处作业的防护布置存在重复布置和遗漏布置的现象,同时,场地中存在监控死角,经调查,是由于在场布前缺乏软件深度模拟,建筑信息模型的动画模拟仅浮于表面。人员管理平台信息完备率低,部分员工不愿意填写较隐私信息,担忧个人隐私泄露或不当使用。针对上述分析,基于三度空间视角,结合工地现场情况和14个需要改进的指标,提出智慧工地安全管理成熟度提升建议:

1) 物理空间。通过设备升级、布局优化和持续运维,为安全管理的动态需求和复杂环境提供物质基础。升级和替换灵敏度低的传感器设备,确保实时响应环境变化与设备状态;深度模拟设备的摆放位置,使监测设备、防护设备布点合理,无死角覆盖工地内所有关键区域;定期检查和校准设备,清理环境监测设备表面的污垢和杂质,防止影响准确性;持续运维与升级设备,确保设备始终处于最佳状态并

适应不断变化的安全需求。

2) 社会空间。通过关注员工身心健康、注重技术人员培养,全面提升安全管理水平,确保安全生产。建立有效的安全监管机制,及时纠正和处罚员工的不安全行为;完善操作规范,保证每一项操作制度都明确提出安全要求和操作标准;提高安全巡检闭环率,每周或每月总结监测到的不安全行为,再次对员工培训教育,使员工提高安全意识;关注员工的工作状况和身体健康状况,确保在感到疲劳时能够得到充分的休息与调整;注重技术人员的培养和引进,确保有足够的技术人员参与智慧工地的安全管理工作。

3) 信息空间。通过集成信息技术,构建模块化、安全高效的管理平台,实现信息共享、智能决策和数据完备性。集成人工智能、物联网、大数据技术,深度融合员工、设备、物料管理平台,实现信息共享、智能决策;将管理平台划分为不同的功能模块,每个模块独立开发、测试,提高平台的可维护性和可扩展性;整合不同平台的信息,提高数据的完备性和各子平台的集成度。

4 结 论

1) 运用文献分析法、德尔菲法、实地调研等方法,从信息、社会、物理3个层面,提出智慧工地安全管理成熟度的5个一级评价指标和24个二级评价指标体系。

2) 根据目前智慧工地评价政策和管理情况,提出智慧工地安全管理成熟度的5个等级,建立博弈论组合赋权——可拓云模型的智慧工地安全管理成熟度评价模型。

3) 将构建的评价指标体系及评价模型应用于苏州市某智慧工地中,利用模型分析的结果与现场调研结果基本一致,验证了该模型的科学性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于公布智能建造试点城市的通知[Z]. 2023-05-08.
- [2] 住房和城乡建设部. 房屋市政工程生产安全事故情况[EB/OL]. <https://zlaq.mohurd.gov.cn/fwmh/bjxcjgl/fwmh/pages/default/index.html>.
- [3] XU Maozeng, NIE Xiuying, LI Heng, et al. Smart construction sites: a promising approach to improving on-site HSE management performance[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49: 104-114.
- [4] 王兴. 智慧工地应用成熟度评价体系研究:以L项目为例[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.
WANG Xing. The evaluation system of smart construction site application maturity: taking L project as an example[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2022.

- [5] 李华, 张旭旭, 高红, 等. 智慧工地本质安全度评价方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(1): 139–145.
LI Hua, ZHANG Xuxu, GAO Hong, et al. Research on evaluation method for intrinsic safety degree of smart construction site[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(1): 139–145.
- [6] 郭海东, 李慧民, 孟海. 基于 ANP-区间数的建筑企业安全管理能力成熟度评价[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(4): 145–150.
GUO Haidong, LI Huimin, MENG Hai. Evaluation of construction enterprise safety management capability maturity based on ANP-interval number[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(4): 145–150.
- [7] 郑霞忠, 郭雅薇, 陈述. 建筑企业职业健康安全管理体系成熟度评价[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(12): 146–150.
ZHENG Xiazhong, GUO Yawei, CHEN Shu. Maturity evaluation of OHSMS in construction enterprises based on uncertainty measurement[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(12): 146–150.
- [8] ASAHKISSIEDU M, MANU P, BOOTH C A, et al. An integrated safety, health and environmental management capability maturity model for construction organisations: a case study in Ghana[J]. Buildings, 2021, 11(12): 645–662.
- [9] TRINH M T, FENG Yingbin. A maturity model for resilient safety culture development in construction companies[J]. Buildings, 2022, 12(6): 733–750.
- [10] 赵平, 刘康, 黎晓东. 基于 M-CM 的建筑施工企业现场安全管理成熟度评价[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 182–187.
ZHAO Ping, LIU Kang, LI Xiaodong. On-site evaluation criteria for the safety management maturity of the construction enterprises based on the M-CM[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(1): 182–187.
- [11] KASAI S, LI Nan, FANG Dongping. A system-of-systems approach to understanding urbanization-state of the art and prospect[J]. Smart and Sustainable Built Environment, 2015, 4(2): 154–171.
- [12] 方东平, 李在上, 李楠, 等. 城市韧性: 基于“三度空间下系统的系统”的思考[J]. 土木工程学报, 2017, 50(7): 1–7.
FANG Dongping, LI Zaishang, LI Nan, et al. Urban resilience: a perspective of system of systems in trio spaces[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(7): 1–7.
- [13] 王秉, 史志勇, 朱菁菁, 等. 面向三元空间的安全态势感知路径[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 15–21.
WANG Bing, SHI Zhiyong, ZHU Jingjing, et al. Research on safety & security situation awareness path for ternary space[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 15–21.
- [14] 郭纯兵, 阎卫东, 李宇鹏, 等. 基于系统动力学的智慧工地安全脆弱性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(8): 42–50.
GUO Chunbing, YAN Weidong, LI Yupeng, et al. Study on safety vulnerability of smart construction sites based on system dynamic[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(8): 42–50.
- [15] 韩豫, 孙昊, 李宇宏, 等. 智慧工地系统架构与实现[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(24): 107–111.
- [16] DB37/T 5287—2024, 智慧工地建设技术标准 [S].
DB37/T 5287–2024, Technical standard for smart construction site[S].
- [17] T/CISAGD 002—2024, 智慧工地建设与评价标准 [S].
- [18] T/ZABI001—2024, 长三角区域智慧工地评价标准 [S].
- [19] 唐猛, 康向涛, 高璐, 等. 基于博弈论与 TOPSIS 法煤与瓦斯突出危险性评价研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2021, 40(5): 77–86.
TANG Meng, KANG Xiangtao, GAO Lu, et al. Study on risk assessment of coal and gas outburst based on game theory and TOPSIS[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2021, 40(5): 77–86.
- [20] 潘寒川, 刘丹阳, 张煜睿, 等. 基于组合赋权-可拓云的城市轨道交通线路运营安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 160–166.
PAN Hanchuan, LIU Danyang, ZHANG Yurui, et al. Urban rail transit line operation safety evaluation based on combined weighting-extension cloud method[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 160–166.

作者简介: 祝连波 (1973—), 女, 湖南湘乡人, 博士, 教授, 主要从事工程安全管理方面的研究。E-mail: lbzhu@mail.usts.edu.cn。