

基于 HFACS-AHP 的钢结构工程 施工安全事故人因分析

周子惠

(兰州倚能电力设计咨询有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为探究导致钢结构工程施工安全事故发生的关键人为致因因素,文章收集了我国 85 起钢结构施工安全事故调查报告,基于此,构建适用于钢结构施工安全事故的人因分析与分类系统(HFACS)模型。此外,采用层次分析法(AHP)对所构建模型中的风险致因因素进行权重计算,确定导致钢结构施工安全事故发生的关键人为致因因素。结果表明:S41 工人违规操作、S31 工人状况不佳、S42 工人技能失误、S22 违规监督、S43 决策感知错误是导致钢结构施工安全事故发生的关键人为致因因素,最后从人因视角出发提出相应建议,以期降低钢结构施工的安全风险。

关键词:钢结构; 施工安全; 人因分析; HFACS; AHP

中图分类号:TU758.11; TU714

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)12-0095-06

doi:10.13402/j.gejs.2024.12.168

Human factors analysis of safety accidents in steel structure construction based on HFACS-AHP

ZHOU Zihui

(Lanzhou Yineng Electric Power Design Consulting Co., Ltd., Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to explore the key human factors that lead to safety accidents in steel structure construction, this article collected 85 investigation reports on steel structure construction safety accidents in China. Based on this, a Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) model suitable for steel structure construction safety accidents was constructed. In addition, the Analytic Hierarchy Process (AHP) is used to calculate the weights of risk factors in the constructed model, and to determine the key human factors that cause safety accidents in steel structure construction. The results showed that the key human factors causing steel structure construction safety accidents were the violation of operation by workers in S41, poor condition of workers in S31, skill errors of workers in S42, violation supervision in S22, and perception errors in S43 decisions. Finally, corresponding suggestions were proposed from the perspective of human factors to reduce the safety risks of steel structure construction.

Key words: steel structure; construction safety; human factor analysis; HFACS; AHP

钢结构在施工中具有可预制、可装配、可加工、可循环利用、零污染等特点,这为建筑工业化 and 标准化施工提供了有力支持。但是钢结构在施工过程中具有高空作业、平行交叉作业多、起重吊装重量大等问题,导致安全事故屡屡发生。事故致因分析指出,超过 90% 的事故是由人为因

素引起的^[1],因此对钢结构的施工安全事故进行人为风险致因研究,对于提升钢结构的施工安全具有至关重要的现实意义。

人的不安全行为是导致安全事故发生的最根本原因^[2],很多学者对事故人为致因进行了相关研究。胡韞频等^[3]结合工程实际改进 HFACS 方

收稿日期: 2024-03-18

作者简介: 周子惠(1986—),女,工程师,从事工程造价和工程管理研究。

法, 构建 IHFACS - BN 评价模型确定项目总体安全风险概率等级, 识别关键风险因素; 张振华等^[4]提出了适用于地铁运营系统的 HFACS 模型, 并采用 Apriori 算法对事故人为致因因素进行关联分析; 叶贵等^[5]提出了适用于建筑安全事故的 HFACS 模型并分析了各层次因素间因果关系; 刘全龙等^[6]基于 HFACS 模型, 以制造业机械伤害事故报告为样本, 研究导致机械伤害事故发生的关键路径, 并运用 ANP 法计算各致因因素的权重; 许素睿^[7]采用 HFACS 模型, 以近几年国内的电梯事故为样本, 进行电梯事故人因研究, 找出导致事故发生的高频人因。

以上各领域的学者对不同类型安全事故中的人为因素进行了深入研究, 可见人因分析和分类系统 (human factors analysis and classification system, HFACS) 模型对于事故人为致因的分解较为全面, 也可以看出该模型在其他安全生产领域也已被广泛应用, 但是在钢结构领域的应用还较为缺乏。鉴于此, 本文整理收集我国 85 起钢结构工程事故调查报告, 以此为样本构建适用于钢结构施工安全事故的 HFACS 人为风险致因评价模型, 再利用 AHP 方法, 从定性定量的角度出发, 识别导致钢结构工程施工安全事故发生的关键致因因素并提出相应建议, 以期提升钢结构工程施工的安全性。

1 钢结构施工安全事故 HFACS 模型的构建

人因分析和分类系统 (human factors analysis and classification system, HFACS) 模型是由 SHAPPELL 和 WIEGMANN 在 Reason 瑞士奶酪模型 (图 1) 的基础上开发的^[8]。该模型主要从组织影响、不安全监督、不安全行为前提和不安全行为 4 个方面出发对导致安全事故的人为因素进行分析, 是人为因素研究领域使用最广泛的一类模型, 它最早提出并广泛应用于航空领域。考虑到航空事故与钢结构工程施工安全事故之间存在差异, 如果要将 HFACS 模型应用于钢结构工程施工安全事故中, 需要根据这些差异进行项目定义的调整。本文以收集到的 85 起钢结构施工安全事故报告为依据, 删除报告中频率较少的因素, 合并

相似的因素, 对模型调整如下。

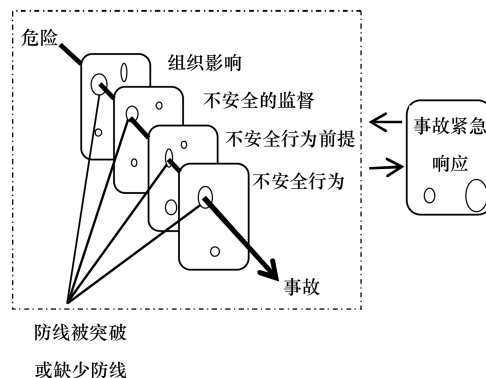


图 1 “Reason” 模型

1) 将原模型中的不安全监督层改为现场不安全监督, 将无法纠正问题改为纠正不及时; 2) 用工人状况不佳代替不安全行为层级中的操作者状态和人员因素; 3) 在不安全行为层级中加入自然环境不佳; 4) 合并不安全行为层级中的决策错误和感知错误为决策感知错误, 并将习惯性违规与偶然性违规合并为工人违规操作; 5) 如果钢结构施工事故现场得不到及时处理, 救援人员可能会面临救援困难, 难以进入现场救援被困人员, 被困人员可能会错失最佳救援时间。而且事故现场可能还存在进一步的危险和潜在风险, 如果不及处理, 更多的工人和相关人员可能会遭受伤害或丧生。因此本文在原有基础上加入了事故紧急响应层。改进后的 HFACS 模型如图 2 所示。

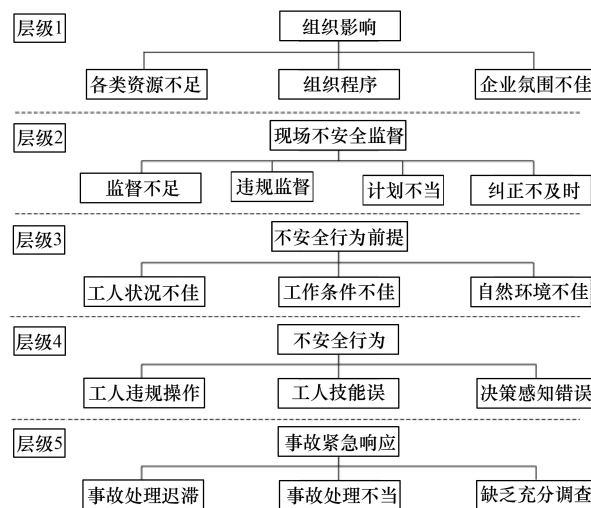


图 2 钢结构施工安全事故 HFACS 模型

2 致因因素的权重计算

层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP)

是 20 世纪 70 年代美国运筹学家 SAATY 提出来的。一种多目标决策方法，层次分析法通过加权求和的方式找到最优方案，是目前应用最普遍、研究最多的综合评价方法，主要思路是将评价系统逐级分解成层次结构对每一层次各要素按某原则进行逐对比较，写成比较判断矩阵，计算该层要素对于该准则相对重要性的权重及对于总体目标的组合权重^[9-10]。

层次分析法的主要步骤如下：

(1) 建立多层次结构模型(目标层，准则层，指标层)。

(2) 构建判断矩阵 A ，根据因素的重要性通过专家讨论，分别将各因素进行两两对比，确定各权重比例关系。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix}$$

式中： a_{ij} 是 A 中第 i 行第 j 列的元素， $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ，表示要素 i 与要素 j 相比的重要性。

判断矩阵因素的重要性标准尺度如表 1 所示。

表 1 因素重要性标准尺度

标度	含义
1	同等重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	强烈重要
9	极端重要
2,4,6,8	相邻判断的中间值
倒数	后者比前者的重要标度

(3) 计算权重向量，通过对判断矩阵进行特征向量计算，得到每个层次中因素的权重向量。

计算判断矩阵的特征向量($\bar{W}_i$)：

$$\bar{W}_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

特征向量($\bar{W}_i$)归一化：

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i}, (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (2)$$

求判断矩阵的最大特征 $\lambda_{\max}$ ：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n}, \sum_{i=1}^n \frac{[AW]_i}{W_i} (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (3)$$

(4) 一致性检验，一般认为一致性比率 $C_R < 0.1$ 时满足一致性要求。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (4)$$

其中 C_1 表示判断矩阵的偏离一致性指标； $C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} R_1$ 为表示平均随机一致性指标，根据矩阵阶数的不同取值如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性 R_2 取值

3	4	5	6	7	8	9	10
0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

若未通过一致性检验，再以专家意见和风险因素对于工程的影响程度为依据，重新调整判断矩阵，直到满足一致性检验标准，得出各风险因素的权重。

相对于单纯地凭借经验去选择最重要的指标因素而言，人们在只进行两两指标的判断时往往能做出比较准确的判断，这类确定核心指标因素的方法更为科学和准确^[10]。因此，基于调整之后的 HFACS 模型再结合所搜集整理的钢结构施工安全事故调查报告以及专家经验，得出钢结构施工安全事故 HFACS-AHP 分析结果，如表 3 所示。本文采用专家打分法，邀请了 10 名具有丰富安全管理经验的专家对各指标的相对重要性打分，以此构建判断矩阵，并进行一致性检验，所得判断矩阵一致性检验结果如表 4~9 所示。钢结构工程施工安全事故人为因素分析模型层次总排序及总一次性检验结果如表 10 所示。

从表 10 中可以看出，导致钢结构工程施工安全事故发生的前 5 个关键人为致因因素分别为 S41 工人违规操作、S31 工人状况不佳、S42 工人技能失误、S22 违规监督、S43 决策感知错误，所占权重分别为 0.287 4、0.126 0、0.120 7、0.092 1、0.076 1。从所得结果来看，与所收集的钢结构施工安全事故调查报告情况基本相符。

3 基于人因分析的相关建议

3.1 针对 S41 工人违规操作的建议

企业应加强安全教育和培训，确保所有员工都能接受必要的安全操作培训，包括正确使用安

表 3 钢结构施工安全事故 HFACS-AHP 分析结果

目标层	准则层	指标层	指标层解释
钢结构 施工安 全事故 HFACS 分析表 S	组织影 响 S1	各类资源不足 S11	机械、人员、安全措施、职工教育培训等资源投入不足等
		组织程序 S12	安全管理制度不完善,安全生产主体责任不明确,机械操作 规程未编制,缺乏制度执行力等
		企业氛围不佳 S13	企业领导安全生产责任心不强,企业员工安全生产意识 淡薄,缺少良好的安全生产文化等
	现场不安 全监督 S2	监督不足 S21	施工现场监督人员未对机械、材料进行定期检查,违规检 查力度不够等
		违规划监督 S22	监督过程中不遵守制度,违章指挥,允许无证人员上岗操 作,包庇质量不合格的工作等
		计划不当 S23	职工连续上班时间长,工作负荷过量,施工技术人员配 置不当,施工图纸编制误差等
		纠正不及时 S24	监理人员对不符合施工规范的施工过程纠正不及时,纠 正后施工工人也没有整改施工等
	不安全行 业前提 S3	工人状况不佳 S31	工人休息时间不足,处于疲劳或生病状态导致注意力不 集中,工人无相应工作资质,经验不足等
		工作条件不佳 S32	现场布置不合理,夜间施工照明不足,工人工作休息时噪 音过大等
		自然环境不佳 S33	雨雪,雾霾,高温,严寒等极端天气施工
	不安全 行为 S4	工人违规操作 S41	工人高处作业时不佩戴防护用具,高空抛物,动火作业违 规操作等
		工人技能失误 S42	工人作业时由于失误导致焊接触电,焊缝错边,施工工序 错误,设备使用不当等
		决策感知错误 S43	管理人员指挥决策失误,工人夜间施工感知错误等
	事故紧急 响应 S5	事故处理迟滞 S51	事故发生未及时发现,发生后没有及时采取救援措施等
		事故处理不妥 S52	未在最佳时机救援,未采取专业的救援手段,未采取合适 的处理方法等
		缺乏充分调查 S53	对事故原因未进行系统性的调查和分析,未确定事故的 根本原因和相关因素,不能防止类似事故再次发生等

表 4 S 层判断矩阵及检验结果

S	S1	S2	S3	S4	S5	W	$\lambda_{\max}=5.23$
S1	1	1/3	1/3	1/5	1/3	0.059 3	$C_I=0.057$
S2	3	1	1	1/3	3	0.197 0	
S3	3	1	1	1/2	4	0.226 2	$R_I=1.12$
S4	5	3	2	1	5	0.430 7	
S5	3	1/3	1/4	1/5	1	0.086 8	$C_R=0.052<0.1$

表 5 S1 层判断矩阵及检验结果

S1	S11	S12	S13	W	$\lambda_{\max}=3.053 9$
S11	1	2	3	0.527 8	$C_I=0.013 05$
S12	1/2	1	3	0.332 5	
S13	1/3	1/3	1	0.139 7	$C_R=0.052 3<0.1$

表 6 S2 层判断矩阵及检验结果

S2	S21	S22	S23	S24	W	$\lambda_{\max}=4.187$
S21	1	1/5	3	1/3	0.133 1	$C_I=0.062$
S22	5	1	5	1	0.445 2	
S23	1/3	1/5	1	1/3	0.076 9	$R_I=0.89$
S24	3	1	3	1	0.344 8	
						$C_R=0.069 4<0.1$

表 7 S3 层判断矩阵及检验结果

S3	S31	S32	S33	W	$\lambda_{\max}=3.018$
S31	1	3	2	0.550 0	$C_I=0.009$
S32	1/3	1	1	0.219 8	
S33	1/2	1	1	0.240 2	$C_R=0.017 5<0.1$

表 8 S4 层判断矩阵及检验结果

S4	S41	S42	S43	W	$\lambda_{\max}=3.054$
S41	1	5	5	0.593 6	$C_I=0.027$
S42	1/5	1	3	0.249 3	$R_I=0.51$
S43	1/5	1/3	1	0.157 1	$C_R=0.052\ 4<0.1$

表 9 S5 层判断矩阵及检验结果

S5	S51	S52	S53	W	$\lambda_{\max}=3.053$
S51	1	2	3	0.527 9	$C_I=0.026\ 7$
S52	1/2	1	3	0.332 5	$R_I=0.51$
S53	1/3	1/3	1	0.139 6	$C_R=0.052\ 3<0.1$

表 10 钢结构施工安全事故人为因素分析模型层次总排序及总一次性检验结果

Si 层级	S1	S2	S3	S4	S5	W	排序
Sii 层级	0.059 3	0.197 0	0.226 2	0.430 7	0.086 8		
S11 各类资源不足	0.527 8	—	—	—	—	0.042 2	10
S12 组织程序	0.332 5	—	—	—	—	0.026 6	13
S13 企业氛围不佳	0.139 7	—	—	—	—	0.011 2	16
S21 监督不足	—	0.133 1	—	—	—	0.027 5	12
S22 违规监督	—	0.445 2	—	—	—	0.092 1	4
S23 计划不当	—	0.076 9	—	—	—	0.015 9	14
S24 纠正不及时	—	0.344 8	—	—	—	0.071 3	6
S31 工人状况不佳	—	—	0.550 0	—	—	0.126 0	2
S32 工作条件不佳	—	—	0.219 8	—	—	0.050 3	8
S33 自然环境不佳	—	—	0.240 2	—	—	0.055 0	7
S41 工人违规操作	—	—	—	0.593 6	—	0.287 4	1
S42 工人技能失误	—	—	—	0.249 3	—	0.120 7	3
S43 决策感知错误	—	—	—	0.157 1	—	0.076 1	5
S51 事故处理迟滞	—	—	—	—	0.527 9	0.045 8	9
S52 事故处理不当	—	—	—	—	0.332 5	0.028 9	11
S53 缺乏充分调查	—	—	—	—	0.139 6	0.012 1	15

全设施的方法和重要性，制定并严格执行使用安全设施的规定，明确要求工人在施工中必须佩戴并正确使用安全设备；建立有效的反馈机制，及时向工人提供关于违规操作的反馈和建议，对违规操作进行正确的纠正和处理，包括适当的惩罚措施和相应的奖励机制；根据工作的复杂程度和特点，合理配置人员，确保工作岗位和任务得到适当的分工，从而降低违规操作的风险。

3.2 针对 S31 工人状况不佳的建议

企业应提供必要的医疗保健和健康服务，建立健康档案和定期体检制度，帮助工人及时发现和治疗健康问题；考虑员工个人情况和需求，提供灵活的工作安排，提供适宜的工作时间和休闲设施，使工人保持工作与生活的平衡；建立公平合理的薪酬制度，提供有竞争力的工资和福利待遇，确保按时支付工资，提供合理的福利，如年终奖金、绩效奖金等；关注工人的心理健康，提

供心理咨询和支持服务，建立员工互助机制，培养积极心态，帮助工人应对工作压力和困难；确保提供良好的工作条件和员工福利，如健康保险、休假制度、劳动合同等，关注员工的基本需求和福利，提高员工的生活质量和工作满意度。

3.3 针对 S42 工人技能失误的建议

企业应提供全面的培训，包括安全操作指导、危险识别和风险评估，确保工人具备必要的技能和知识以及掌握安全操作的规程、流程，提高工人的安全意识和技能水平；通过反复演练和实践，帮助工人熟悉工作流程和操作要点，鼓励工人参与持续学习和技能发展的机会，通过培训课程和经验分享等方式，提升他们的专业能力和技能素养，减少技能失误的概率。

3.4 针对 S22 违规监督的建议

企业应确立明确的监督制度和流程，通过培训和意识教育，提高监督人员的专业知识、技能

和法规意识,使监督人员具备判断、识别和处理违规行为的能力;建立有效的审核和检查程序,对各个层面的工作进行定期或不定期的审核和检查,确保监督工作的全面性、客观性和及时性;加强信息公开和透明度,对监督结果进行定期或不定期的公示;建立有效的举报机制,为监督人员和公众提供举报渠道和保密机制,以便于及时发现和查处违规行为,对违规行为进行严肃的调查和处理,依法追究责任。

3.5 针对 S43 决策感知错误的建议

企业管理人员应避免单一思维模式和依赖有限信息,而应使用多种信息来源和方法,进行全面的信息收集和分析,以减少认知偏差的发生;鼓励和促进团队合作和集体智慧的发挥,通过与他人讨论和分享观点,避免个人认知偏见的影响,从不同角度评估问题,得出更客观和全面的结论;保持持续学习和反思的心态,不断提升自己的决策能力和认知水平,通过总结和反思已经做出的决策,识别自己的认知失误,并针对性地进行改进;在关键决策中,寻求专业人士的意见和建议,专业人士可能具备更全面和专业的知识,能够提供有价值的观点和洞察力。

4 结 语

为了优化钢结构施工安全,本文通过收集我国多起钢结构施工安全事故调查报告,以此为依据对 HFACS 模型进行了调整,使其更好地适应钢结构施工的特点。其次,采用层次分析法对导致钢结构施工安全事故发生的人为致因因素进行了量化和评估,确定了 5 个对事故发生影响最为重要的人为致因因素。最后,从人因视角针对这 5

个因素提出了相应的改善措施,旨在减少钢结构施工安全事故的发生,促进钢结构施工的高效与安全。

参考文献:

- [1] 贾明涛. 行为安全管理在施工中的应用分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(7): 169 - 173.
- [2] REASON J. Human error [M]. Cambridge: Cambridge university press, 1990.
- [3] 胡韞频, 李超, 李宗亮, 等. 大跨度钢结构施工安全风险评价 IHFACS - BN 模型及应用[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 147 - 154.
- [4] 张振华, 朱琳, 刘志钢, 等. 基于 HFACS - MA 的地铁事故人为因素研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 219 - 223.
- [5] 叶贵, 陈梦莉, 汪红霞. 建筑安全事故人为因素分类研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(4): 131 - 13.
- [6] 刘全龙, 彭雨蒙, 赵盼, 等. 基于 HFACS 模型的制造企业机械伤害事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 51 - 59.
- [7] 许素睿. 基于 HFACS 的电梯事故人因分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(7): 70 - 75.
- [8] SHAPPELL S A, WIEGMANN D A. A Methodology for assessing safety programs targeting human error in aviation[J]. The International Journal of Aviation Psychology, 2009, 19(3): 252 - 269.
- [9] 孟令星, 谢广采, 付建明. 基于 AHP 与熵权的钢筋混凝土工程施工质量评价[J]. 工程建设, 2012, 44(5): 69 - 73.
- [10] 冉兴荣. 装配式建筑施工安全风险评价[J]. 工程建设, 2022, 54(9): 64 - 68.
- [11] 谢家贵, 马悦. 系统工程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2023.