

基于模糊集与改进证据理论的建筑工程安责险费率厘定

申建红, 万索妮, 隗 健, 徐文慧

(青岛理工大学 管理工程学院, 山东 青岛 266520)

摘 要: 建筑行业安全生产责任保险费率的合理厘定对安全生产责任保险的实施具有决定性影响。在施工安全风险评价指标体系的基础上, 利用 COWA 算子对各个指标进行赋权, 根据隶属度函数构造 mass 函数, 采用改进证据理论的融合算法以及线性加权法合成多位专家的评价意见, 得到工程项目的安全风险等级, 由此确定安全风险调整系数。同时考虑施工企业以往安全事故发生情况进行安全生产责任保险费率的调整, 实现差别化费率的激励杠杆作用, 推动安全生产责任保险在建筑行业的发展。

关键词: 模糊集; D-S 证据理论; 安全生产责任保险; 费率厘定

中图分类号: TU714 文献标识码: A 文章编号: 2095-0985(2020) 01-0016-05

DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2020.01.003

Calculation Method of Work Safety Liability Insurance Rate for Construction Enterprises Based on Fuzzy Set and Improved Evidence Theory

SHEN Jian-hong, WAN Suo-ni, WEI Jian, XU wen-hui

(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: The reasonable rate of production safety liability insurance in construction industry has a decisive influence on the implementation of production safety liability insurance. On the basis of the construction safety risk evaluation index system, COWA operator is used to assign weights to each index, The mass function is constructed according to the membership function, and the evaluation opinions of multiple experts are synthesized by the fusion algorithm of improved D-S evidence theory and the linear weighting method. The safety risk level of the project is obtained, and the adjustment coefficient of safety risk is determined. At the same time, considering the past safety accidents of construction enterprises, we adjust the premium rate of safety production liability insurance, to realize the incentive leverage of differential premium rate and promote the development of safety production liability insurance in the construction industry.

Key words: fuzzy sets; D-S evidence theory; production safety liability insurance; rate determination

建筑业是我国高危行业之一,近三年全国范围内数据统计结果显示:2015 年建筑安全事故 422 起,死亡 554 人;2016 年建筑安全事故 634 起,死亡 735 人;2017 年建筑安全事故 692 起,死亡 807 人。建筑安全形势依然严峻。2016 年我国出台了《中共中央国务院关于推进安全生产领域改革发展的意见》,明确提出建立健全安全生产责任保险制度,在建筑施工等高危行业领域强

制实施安全生产责任保险(以下简称安责险)。2017 年 12 月我国有关部门又联合印发了《安全生产责任保险实施办法》(以下简称实施办法)的通知,进一步规范了安责险的实施工作。安责险的强制实施与规范开展将有效预防事故的发生,提高建筑生产企业的风险管控水平。

实施办法明确指出,制定各行业领域安责险基准指导费率,实行差别化费率和浮动费率,实现

收稿日期: 2019-04-07 修回日期: 2019-07-16

作者简介: 申建红(1970-),男,山东青岛人,博士,教授,研究方向为工程质量与安全管理(Email: sjhqwr@163.com)

通讯作者: 万索妮(1995-),女,山东威海人,硕士研究生,研究方向为工程项目管理(Email: sony02040330@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金(71471094);“十三五”山东省高等学校人文社会科学研究平台项目(新型智库)

安责险的费率动态调整机制。关于安责险合理费率的厘定问题,我国学者已在化工等行业进行了研究^[1-2],但针对建筑工程行业安责险费率的厘定鲜有研究。汪红霞等^[3]基于模糊综合评判模型评估建筑工程安全风险得到安全度,将其作为保险费率的调整系数,采用了修正法厘定费率。这种方法考虑了工程项目具有单一性的特点,有利于差别费率的实现,发挥费率对企业的激励杠杆作用,但模糊综合评价法不能很好地处理施工安全风险评价中较强的不确定性与明显的主观性。因此,采用客观有效的方法评估工程安全风险对于安责险费率的厘定变得尤为重要。另外,施工企业以往安全事故发生情况是衡量施工企业安全生产水平的一项重要指标,基于其重要性亦单独设定调整系数,以健全费率动态调整机制。

证据理论可以将定性评价定量化,降低人为因素的影响,较好地处理不确定性信息^[4]。本文基于模糊集与改进证据理论模型对工程项目的施工安全进行风险评价,将安全风险指标的模糊评语集映射到证据理论的识别框架中,运用隶属度函数构造 mass 函数,再利用改进后的证据理论数据融合算法对多位专家的评价意见综合处理,从而实现了对施工安全风险的定量评价,以评价结果为依据确定工程项目的风险调整系数,并考虑企业过往安全生产事故情况,以修正建筑工程安责险费率。

1 基于修正法的建筑工程安责险费率的确定

安责险费率的厘定是建筑工程安责险推广过程中的重要环节,工程项目的安全风险状况应是安责险费率厘定需要考虑的重点^[5]。建筑行业

不同企业、同一企业不同施工项目之间的安全风险不尽相同,采用统一费率将不利于安责险的推广应用。实施办法明确指出,制定各行业领域安全生产责任保险基准指导费率,实行差别化费率与浮动费率。建筑工程安责险费率可根据各省市统一制定的行业基准指导费率作为基本费率,采用修正法厘定费率,其计算公式为:安责险费率 i = 基本费率 $\times a_1 \times a_2$ (a_1 为考虑工程项目施工安全评估风险的调整系数; a_2 为考虑施工企业过往安全生产事故率与等级的调整系数)。

2 工程项目施工安全风险评估

2.1 施工安全风险评价指标体系的建立

工程项目的施工是一个复杂的生产系统,具有较多的影响因素。长期室外作业、施工材料机械与施工作业人员高度集中、流动性与临时性突出以及工艺复杂等均不同程度地增加了项目施工的安全风险,所以投保项目的安全管理水平对于项目的安全生产而言至关重要。另外,施工企业的安全生产管理水平也对其发挥着重要作用,投保项目的安全生产需要施工企业制定相应的安全管理制度,从制度层面去约束和管控项目存在的各种风险因素。因此本文在对工程项目安全生产风险识别的基础上,从施工企业、投保项目及其安全管理角度,参考 JGJ/T 77-2010《施工企业安全生产评价标准》,并结合以往研究的相关文献和建筑生产实际,按照系统性、实用性、有效性的原则,从施工企业的安全管理制度、工程项目危险程度、资质、机构和人员管理、工程项目现场安全管理以及工程项目的安全技术管理五个方面建立工程项目施工安全风险评价指标体系。如图1所示。

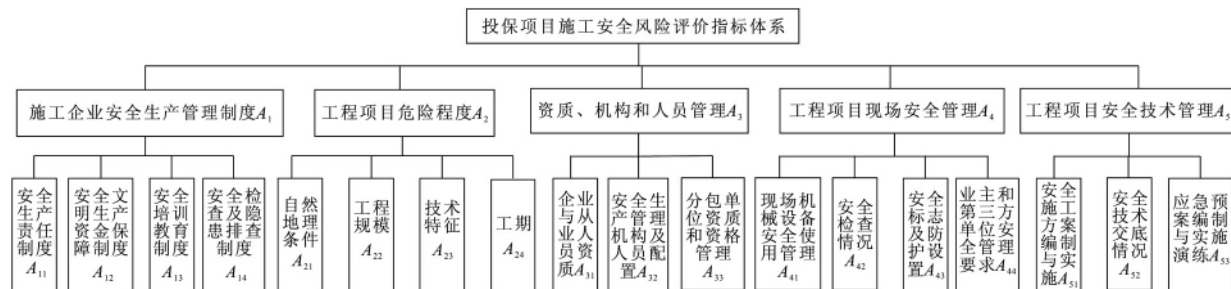


图1 工程项目施工安全风险评价指标体系

2.2 指标权重的确定

工程项目施工安全风险指标体系中各个指标的重要性各不相同,需对指标赋权。COWA 算子是通过改变数据集结方式而得到的具有多种变化形式的 OWA 算子,该算子通过对数据进行差别

对待使得两端影响较大值的干扰被减弱,从而使赋权结果更加客观有效。因此为了降低专家所作出的主观评价可能出现的极端值对赋权结果的影响,本文采用 COWA 算子确定各安全风险指标权重。

具体赋权步骤如下^[6~8]:

(1) 指标 A_{ij} 的决策数据集为 $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ 根据大小关系对数据进行重新排序得新数列 b_i 即 $(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in})$ 。

(2) 利用组合数的方法求取新数列 b_i 的权重, 加权向量的计算公式为:

$$w_{j+1} = C_{n-1}^j / \sum_{k=0}^{n-1} C_{n-1}^k = \frac{C_{n-1}^j}{2^{n-1}}, j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

式中: C_{n-1}^j 表示在 $n-1$ 个数据中任意 j 个数据的排列组合数。

(3) 利用 w 对数据进行赋权处理, 可得指标 A_i 的绝对权重值 $\bar{\omega}_i$ 为:

$$\bar{\omega}_i = \sum_{j=1}^n w_j b_{ij} \quad w_j \in [0, 1] \quad (2)$$

(4) 计算一级指标 A_i 的相对权重 ω_i :

$$\omega_i = \bar{\omega}_i / \sum_{i=1}^m \bar{\omega}_i \quad (3)$$

2.3 模糊集与改进证据理论的安全风险评价模型构建

证据理论是一种具备较强理论基础的不确定性推理方法。专家对工程项目各个施工安全风险指标的独立评价结果作为各信息源所提供的证据, 利用 Dempster 合成算法合成各条证据, 以提高评价的置信程度^[9]。影响工程项目施工安全的定性风险因素较多, 该方法能够有效降低专家评价的主观性与不确定性。

2.3.1 建立风险指标评语集及风险评价等级辨别框架

(1) 建立指标评语集

在评价过程中, 专家倾向于通过模糊语言进行评价, 为较准确灵活地反应专家对项目安全的评估意见, 本文将指标评语集表示为 $U = \{\text{非常低, 很低, 较低, 一般, 较高, 很高, 非常高}\}$, 各评语用 u_h ($h=1 \sim 7$) 表示, 并采用 7 个类 ($k=1 \sim 7$) 充分表示各模糊评语。模糊指标评语集的定义如表 1 所示^[10, 11]。

表 1 模糊指标评语集(u_{ik}^h) 的定义

评语	类						
	1	2	3	4	5	6	7
非常低	1	0.75	0	0	0	0	0
很低	0.25	1	0.75	0	0	0	0
较低	0	0.25	1	0.75	0	0	0
一般	0	0	0.5	1	0.5	0	0
较高	0	0	0	0.75	1	0.25	0
很高	0	0	0	0	0.75	1	0.25
非常高	0	0	0	0	0	0.75	1

(2) 建立风险评价等级辨别框架

在证据理论中, 评价标准通常由若干评价等级构成, 一般令 $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_l, \dots, \theta_m\}$, 即识别框架, 其中 θ_l 可以表示为某个评价等级。本文将投保项目的施工安全风险评价结果划分为 5 个等级 ($m=5$), 评语集 $\theta = \{\text{很小, 较小, 一般, 较大, 极大}\}$ 。为使专家对各安全风险指标的评语映射为风险评价等级, 同样将各评价等级用 7 个类进行定义^[10, 11], 如表 2 所示。

表 2 安全风险评价等级($u_k^{\theta_l}$) 的定义

等级	类						
	1	2	3	4	5	6	7
很小	1	0.75	0	0	0	0	0
较小	0	0.25	1	0.5	0	0	0
一般	0	0	0.25	1	0.5	0	0
较大	0	0	0	0.25	1	0.5	0
极大	0	0	0	0	0	0.75	1

2.3.2 模糊语义转化为 mass 函数

将专家 t 对投保项目施工安全风险指标 A_{ij} 的评价 u_h 映射为风险评价等级 θ_l 的隶属度函数, 即专家 t 的指标评语 u_h 和识别框架中 θ_l 的匹配程度可表示为:

$$u_{ijt}(\theta_l) = \sum_{k=1}^7 (u_{tk}^{u_h} \wedge (u_k^{\theta_l})) / \sum_{k=1}^7 (u_{tk}^{u_h} \vee (u_k^{\theta_l})) \quad (4)$$

式中: $0 \leq u_{ijt}(\theta_l) \leq 1$; \wedge 表示 \min 运算; \vee 表示 \max 运算。

将式(4)中专家 t 评价所得的隶属度函数构造成证据理论中的基本概率分配函数(即 mass 函数), 对其归一化可得:

$$m_{ijt}(\theta_l) = u_{ijt}(\theta_l) / \sum_{l=1}^5 u_{ijt}(\theta_l) \quad (5)$$

式中: $m_{ijt}(\theta_l)$ 表示专家 t 对于 A_{ij} 的模糊评价结果在 θ 中各安全风险等级的 mass 函数。

2.3.3 基于模糊集与改进证据理论的评价过程

为避免利用证据理论进行数据融合计算时发生证据冲突, 以及随着专家人数增加计算量增长较快的问题, 本文引入基于权值分配与矩阵分析的合成算法, 有效提高了高冲突下各评价证据融合的准确性, 并缩短了运算时间^[12, 13]。具体评价过程为:

专家 t 对各风险指标的评价所构成的 mass 函数表示为:

$$M = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{t1} & m_{t2} & m_{t3} & m_{t4} & m_{t5} \end{pmatrix}。$$

将 M_1 的转置与 M_2 相乘得矩阵 R , 再将 R 中的主对角线元素所构成的列向量与 M_3 相乘, 可得一个新矩阵 R' 。则 R' 中主对角线上的元素总和即为 Dempster 合成算法的分子部分, 两个矩阵 R 和 R' 中所有非主对角线上的元素的总和即为冲突程度 K 。

同理, 对 t 位专家对项目的安全风险评价结果进行逐一合成, 此时, 冲突程度 K 可表示为合成中所得所有矩阵的非主对角线上的元素之和。之后通过改进后基于权值分配的合成法则计算合成后各指标所对应的评价等级的概率值:

$$m(A) = \begin{cases} 0 & A = \emptyset \\ \sum_{A_i \cap B_j \cap C_k \cdots = A} m_1(A_i) m_2(B_j) m_3(C_k) \cdots + f(A) & A \neq \emptyset \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f(A) = Kq(A)$ 表示证据冲突的概率分配函数, 其中 $q(A) = \sum_{i=1}^n m_i(A) / n$, 且 $f(A) \geq 0$, $f(\emptyset) = 0$, $\sum_{A \subseteq \theta} f(A) = K$ 。

最后, 将安全风险指标 A_{ij} 的 $m(A_{ij})$ 结合所对应的权重, 对所有指标的 mass 函数融合:

$$m(A) = \sum_{i=1}^4 \omega_i \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij} m(A_{ij}) \quad (7)$$

式中: n_i 为指标 A_i 所含子指标个数。合成后所得 $m(A)$ 即为工程项目的安全风险分别处于 5 个评价等级的概率。

2.3.4 保险费率的确定

针对处于不同安全生产风险和状况的工程项目, 建筑工程安责险的调整系数应具有差别性。本文设各评价等级 θ_i 所对应的风险调整系数为 a_{1i} , 若投保工程的风险评价等级高于平均水平, 则令 $a_{1i} > 1$, 反之 $a_{1i} < 1$, 在保险公司可接受的一定调整范围内, 风险评价等级越低则 a_{1i} 值越小^[3]。所以本文按照等步长将保险公司可接受的风险调整系数取值区间离散化处理, 各离散值组成向量 B 对费率进行调整。同时, 实施办法中指出事故记录和等级应作为费率调整的一项因素, 根据企业安全事故的发生次数与事故等级进行费率调整。因此本文参考部分省市安责险实施方案中相关规定及其他学者的有关研究, 依据施工企业安全事故记录确定调整系数 a_2 , 具体取值建议见表 3。最后对所有风险指标合成的 mass 函数加权平均处理, 则最终安全风险评价结果为 $a = a_1 a_2 = m(A) B a_2$ 。

通过调整系数可以实现建筑工程安责险的差别化费率与浮动费率, 与投保工程的安全生产状况紧密联系, 发挥安责险的激励杠杆以及对施工企业起到奖优罚劣的作用, 促使企业加强针对投保工程的安全风险的管理。

表 3 事故记录调整系数值

上年事故情况	调整系数
前连续三年未发生安全事故	0.8
前连续两年未发生安全事故	0.9
上年度未发生安全事故	1.0
上年度发生一起一般事故	1.1
上年度发生一起较大事故	1.2
上年度发生一起重大及以上级别事故	1.3

3 建筑工程安责险费率厘定计算

某承包企业房屋建筑施工项目位于我国某沿海城市, 该项目总建筑面积约 521074 m², 现根据该项目工程性质及造价取该城市建筑施工行业基准指导费率作为基准费率, 聘请专家对该施工项目进行施工安全评价, 以确定该施工项目安责险的合理费率。

3.1 指标权重的确定

首先对一级指标 $A_1 \sim A_5$ 赋权, 请聘请的 6 位专家对投保的工程项目各风险指标的重要度打分, 为使打分数据规范和统一, 设定分值在 0~5 分之内并为 0.5 的整倍数, 指标的重要性越高则分值越大。具体评价结果见表 4。

表 4 指标赋权评价结果

指标	专家打分					
	1	2	3	4	5	6
A_1	4.0	4.5	3.0	3.5	3.0	3.5
A_2	4.5	3.5	3.5	3.0	4.0	3.5
A_3	4.0	3.0	2.5	3.0	3.5	4.0
A_4	4.5	5.0	4.5	5.0	4.0	4.5
A_5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.5	4.0

运用上述 COWA 算子赋权步骤可计算出一级指标 $A_1 \sim A_5$ 的权重: $\omega = (0.1823, 0.1864, 0.1726, 0.2374, 0.2212)$, 同理各二级安全风险指标的权重分别为: $\omega_1 = (0.27, 0.25, 0.25, 0.23)$, $\omega_2 = (0.24, 0.24, 0.30, 0.22)$, $\omega_3 = (0.36, 0.33, 0.31)$, $\omega_4 = (0.29, 0.23, 0.22, 0.26)$, $\omega_5 = (0.39, 0.35, 0.25)$ 。

3.2 基于模糊集与改进证据理论的建筑工程安责险费率的厘定

本文邀请了 3 位符合资质的专家评价该工程项目的施工安全风险大小情况, 各位专家给出的评价意见见表 5。

表 5 专家评价意见

专家	指标																	
	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{41}	A_{42}	A_{43}	A_{44}	A_{51}	A_{52}	A_{53}
1	u_4	u_4	u_4	u_5	u_4	u_4	u_3	u_4	u_2	u_5	u_4	u_4	u_5	u_6	u_4	u_4	u_4	u_6
2	u_3	u_5	u_3	u_4	u_3	u_4	u_2	u_3	u_2	u_4	u_4	u_4	u_4	u_5	u_3	u_5	u_5	u_6
3	u_5	u_3	u_4	u_5	u_3	u_3	u_2	u_4	u_3	u_5	u_4	u_3	u_5	u_6	u_4	u_5	u_4	u_5

根据 2.3.1 及 2.3.2 节所介绍的方法将上述专家对该项目的施工安全风险评价意见转化为 mass 函数,例如,专家 1 对安全风险指标 A_{11} 的评价意见为 u_4 。根据式(4)(5)该模糊评语对各评价等级的隶属度转化得到的 mass 函数为 $m_{111}(\theta_1) = 0.0000$, $m_{111}(\theta_2) = 0.2443$, $m_{111}(\theta_3) = 0.5878$, $m_{111}(\theta_4) = 0.1679$, $m_{111}(\theta_5) = 0$ 。同理可得专家 1 关于其他安全风险指标的 mass 函数以及专家 2、3 关于各安全风险指标的 mass 函数。

采用基于权值分配与矩阵分析的证据理论数据融合算法对 3 位专家关于该工程项目的安全风险指标的 mass 函数进行合成,其结果如表 6。

表 6 数据融合结果

指标	很小	较小	一般	较大	极大
A_{11}	0.0159	0.3212	0.4280	0.2192	0.0158
A_{12}	0.0159	0.3212	0.4280	0.2192	0.0158
A_{13}	0.0150	0.3631	0.5081	0.1138	0.0000
A_{14}	0.0000	0.1399	0.4601	0.3697	0.0302
A_{21}	0.0297	0.5316	0.3604	0.0783	0.0000
A_{22}	0.0150	0.3631	0.5081	0.1138	0.0000
A_{23}	0.2840	0.5698	0.1258	0.0147	0.0000
A_{24}	0.0150	0.3631	0.5081	0.1138	0.0000
A_{31}	0.2840	0.5698	0.1258	0.0147	0.0000
A_{32}	0.0000	0.1399	0.4601	0.3697	0.0302
A_{33}	0.0000	0.2045	0.6602	0.1353	0.0000
A_{41}	0.0150	0.3631	0.5081	0.1138	0.0000
A_{42}	0.0000	0.1399	0.4601	0.3697	0.0302
A_{43}	0.0000	0.0320	0.2000	0.5047	0.2287
A_{44}	0.0150	0.3631	0.5081	0.1138	0.0000
A_{51}	0.0000	0.1399	0.4601	0.3697	0.0302
A_{52}	0.0000	0.1775	0.5619	0.2459	0.0146
A_{53}	0.0000	0.0320	0.2000	0.5047	0.2287

根据各指标的权重及式(7)对表 6 的数据进行逐层数据融合,融合结果见表 7。

表 7 指标 mass 函数合成

指标	很低	低	中	高	很高
A_1	0.0120	0.2900	0.4554	0.2275	0.0152
A_2	0.0992	0.4656	0.3580	0.0756	0.0000
A_3	0.1022	0.3147	0.4018	0.1692	0.0100
A_4	0.0083	0.2389	0.4293	0.2587	0.0573
A_5	0.0000	0.1247	0.4261	0.3564	0.0741
合成	0.0403	0.2783	0.4153	0.2250	0.0345

由表 7 可知,该投保工程的施工安全风险处

于一般风险评价等级,为使建筑工程安责险费率既满足保险公司的利益需求,又可以被施工企业所接受。按等步长将修正系数的可调整范围进行离散化处理,设定 $B = (0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4)$, 则: $a_1 = m(A) \cdot B = (0.0403, 0.2783, 0.4153, 0.2250, 0.0345) \times (0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4)^T = 0.9804$

已知该企业前连续两年都未发生安全事故,则可根据表 3 建议得 $a_2 = 0.9$, 则本投保项目的安全费率为: $i = \text{基本费率} \times a_1 \times a_2 = \text{基本费率} \times 0.88$ 。结果表明本施工项目的安全风险略低,保险费率也略低于基本费率,保证了保险费率与项目实际风险大小相对应。

4 结 论

(1) 建筑工程安责险的实施是加强施工安全事故预防与风险管控的重要举措,保险费率的厘定对其实施效果具有决定性影响。工程项目施工安全风险的评价及建筑生产企业以往安全事故情况对合理费率的厘定至关重要,采用调整系数修正法更加符合实际且简单可行。

(2) 采用隶属度函数构造 mass 矩阵,运用改进的证据理论模型对工程项目的施工安全风险大小进行评估,能够降低评价结果的主观性,使工程项目风险调整系数的确定更加准确地反映实际情况。

(3) 建筑工程安责险费率的厘定考虑了工程项目的施工安全风险大小以及施工企业以往安全事故情况,有利于保险公司与施工企业达到“双赢”,推动安责险在建筑业的顺利发展。

参 考 文 献

- [1] 张景钢,项小娟. 煤炭企业安全生产责任险保费计算方法研究[J]. 煤炭经济研究, 2018, 38(6): 53-57.
- [2] 钱城江,张明广,陈胤廷,等. 化工企业安全生产责任保险保费计算方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(5): 150-156.
- [3] 汪红霞,叶 贵. 基于模糊综合评判模型的建筑工程安责险费率厘定[J]. 统计与决策, 2014, (1): 186-188.

(下转第 36 页)

可为开展建筑业工人其他作业姿势研究提供借鉴。

但是,由于本研究仅以单一变量研究抹灰工人上肢局部静态姿势的不舒适度,存在一定的局限性且对于不舒适度的评判没有定量的标准,如何快速确定关节角度以达到快速确定不舒适度等问题都应在后续研究中解决。

参 考 文 献

- [1] 赵挺生,王 欣,唐菁菁,等. 建设工程安全生产管理理念创新研究[J]. 土木工程学报,2010,43(s2): 379-383.
 - [2] 林世颢. 以人为本理念视域下的农民工教育培训探究——以重庆市建筑业为例[D]. 重庆: 西南大学,2013.
 - [3] 徐 雷,李文成,张 永. 论以人为本理念视域下《建筑法》的不足与完善[J]. 西安建筑科技大学学报(社会科学版),2017,36(1): 64-70.
 - [4] 樊 哲. 关于建筑安全标准化管理模式的分析[J]. 中国标准化,2017,(4): 96-97.
 - [5] 李兵兵. 建筑行业安全生产标准化管理体系建立及可行性研究[D]. 天津: 天津大学,2015.
 - [6] 李 钰,吕建国. 基于 BIM 和 VR/AR 技术的地铁施工信息化安全管理体系[J]. 工程管理学报,2017,31(4): 111-115.
 - [7] 郭红领,于言滔,刘文平,等. BIM 和 RFID 在施工安全管理中的集成应用研究[J]. 工程管理学报,2014,28(4): 87-92.
 - [8] 黄阿美,颜 萍,王亚南,等. 南疆地区护士职业性肌肉骨骼疾患发生的影响因素分析[J]. 护理研究,2016,30(25): 3107-3111.
 - [9] 郭智屏,刘新霞,刘浩中,等. 制造行业生产工人职业性肌肉骨骼疾患影响因素[J]. 中国职业医学,2017,44(4): 459-462.
 - [10] Brooks P M. The burden of musculoskeletal disease — a global perspective [J]. Clinical Rheumatology, 2006,25(6): 778-781.
 - [11] Lundberg U. Psychophysiology of work: stress, gender, endocrine response, and work-related upper extremity disorders [J]. American Journal of Industrial Medicine, 2002,41(5): 383-392.
 - [12] 杨永坚,胡传来,谢宝明. 建筑工人慢性肌肉骨骼损伤危险因素 Logistic 回归分析[J]. 中华劳动卫生职业病杂志,1998,16(3): 170-172.
 - [13] 杨德钦. 施工工效学原理与方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2006.
 - [14] 刘 军,陈雁高. 集成 ECRS 与 MOD 法的钢筋下料作业工效优化[J]. 水力发电,2017,43(8): 71-75.
 - [15] Ray S J, Teizer J. Real-time construction worker posture analysis for ergonomics training [J]. Advanced Engineering Informatics, 2012,26(2): 439-455.
 - [16] Roja Z, Kalkis H, Reinholds I, et al. Ergonomics risk analysis in construction operations [J]. Agronomy Research, 2016,14(1): 211-219.
 - [17] Kulkarni V S, Devalkar R V. Postural analysis of building construction workers using ergonomics [J]. The International Journal of Construction Management, 2019,19(6): 464-471.
 - [18] 陈景辉,任金东,陆善彬,等. 驾驶员姿势舒适性评价的研究[J]. 汽车工程,2013,35(6): 548-552.
 - [19] 张丽珍,邵 祺,杨加庆,等. 基于肌肉骨骼负荷的上肢姿势不舒适度评价方法[J]. 工业工程与管理,2017,22(5): 88-93.
 - [20] 徐龙飞,郭津津,李 宁. 螺杆泵性能特性曲线的多项式拟合[J]. 起重运输机械,2016,(1): 86-90.
- +++++
- (上接第 20 页)
- [4] 申建红,盖立庭,梁竞之. 基于 D-S 证据理论的深基坑施工风险评价[J]. 工程管理学报,2018,32(5): 109-113.
 - [5] 毕树柏,陈 兵,李 群. 风险评估方法在安全生产责任保险的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(8): 29-34.
 - [6] Yager R R. Families of OWA operators [J]. Fuzzy Sets and System, 1993,59(2): 125-148.
 - [7] 申建红,张云华,张胜昔. 基于 G-COWA 的工程项目界面风险评价[J]. 土木工程与管理学报,2016,33(3): 16-21.
 - [8] 徐泽水. 拓展的 C-OWA 算子及其在不确定多属性决策中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2005,(11): 7-13.
 - [9] 郭进平,尚旭光,卢才武. 基于 D-S 理论的企业安全绩效综合评定研究[J]. 中国安全科学学报,2011,21(4): 150-155.
 - [10] Wang J, Yang J B, Sen P. Safety analysis and synthesis using fuzzy sets and evidential reasoning [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995,47: 103-118.
 - [11] 杨 萍,刘卫东. 基于证据理论的群决策层次评价方法研究[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(2): 42-44.
 - [12] 王 姣,范科峰,莫 玮. 基于模糊集和 DS 证据理论的信息安全风险评估方法[J]. 计算机应用研究,2017,34(11): 3432-3436.
 - [13] 奚婷婷. 多传感器数据融合中 DS 证据理论算法的改进与应用[D]. 无锡: 江南大学,2009.