

# 建筑抹灰作业工人上肢姿势不舒适度评价模型

余群舟, 郑智鹏, 郭林飞, 孟文辉

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 针对建筑业存在大量重复体力劳动及作业时间长等因素可能导致职业性肌肉骨骼疾患影响工人健康的现状,以建筑抹灰作业为对象,结合作业姿势相关理论及现场调查分析,提出了一种工人抹灰作业上肢姿势不舒适度评价的建模方法。运用 CATIA 软件进行人机工程学模拟,建立以关节力矩(肌肉负荷)表示的上肢姿势不舒适度评价模型,可以快速评价工人作业上肢不舒适度,为及时干预工人的不合理作业姿势减少肌肉骨骼疾患提供量化依据。同时,模型的建立方法也可为开展建筑业工人其他作业姿势的研究提供借鉴。

**关键词:** 建筑抹灰; 上肢作业姿势; 关节负荷; 不舒适度模型

中图分类号: TU714 文献标识码: A 文章编号: 2095-0985(2020)01-0031-06

DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.20200428.001

## Evaluation Model for Upper Limb Posture Discomfort of Workers in Construction Plastering

YU Qun-zhou, ZHENG Zhi-peng, GUO Lin-fei, MENG Wen-hui

(School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In view of the current situation that there are a lot of repetitive physical labor and long working hours in the construction industry, which may lead to the occupational musculoskeletal diseases affecting the health of workers, this paper takes the construction plastering as the object, combined with the related theory of working posture and the field investigation and analysis, puts forward a modeling method for evaluating the discomfort of upper limb posture of workers in plastering. By using CATIA software to simulate ergonomics, an evaluation model of upper limb posture discomfort expressed by joint moment (muscle load) is established, which can quickly evaluate the upper limb discomfort of workers, and provide quantitative basis for timely intervention of workers' unreasonable working posture to reduce musculoskeletal diseases. At the same time, the modeling method can also provide reference for the study of other working postures of construction workers.

**Key words:** plastering; upper limb posture; joint load; discomfort model

目前我国建筑行业存在着明显的“重安全、轻健康”的现象,即生产过程中更多重视的是工人的安全状态,而较少重视工人的健康状态。如赵挺生<sup>[1]</sup>、林世颢<sup>[2]</sup>、徐雷<sup>[3]</sup>等对安全管理、教育及立法方面进行了研究;樊哲<sup>[4]</sup>、李兵兵<sup>[5]</sup>等对建筑安全生产的标准化进行了研究;李钰<sup>[6]</sup>、郭红领<sup>[7]</sup>等研究了现代化技术在建筑安全管理中的运用等等。实际上流行病学研究发现,不合理

的作业姿势、重复性操作很可能会诱发职业性肌肉骨骼疾患(Work-related Musculoskeletal Disorders, WMSDs)<sup>[8~11]</sup>。建筑施工作业的环境特殊性和劳动强度大等特点,使建筑工人群体当中,出现职业性肌肉骨骼疾患的频次也较多,建筑工人平均缺勤率也较其它工种高<sup>[12]</sup>。

在建筑工人健康方面,杨德钦进行了施工工效学的理论性研究<sup>[13]</sup>,刘军进行了钢筋下料作业

收稿日期: 2019-06-20 修回日期: 2019-08-11

作者简介: 余群舟(1970-),男,湖北孝感人,博士,副教授,研究方向为城市轨道安全预警、建设工程施工风险管理(Email: yu-qunzhou@hust.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金(51678265; 71471072)

功效优化研究<sup>[14]</sup>; Ray<sup>[15]</sup>对工人姿势进行实时分析并提出了一种基于人机工程学的建筑工人姿态分类与实时监测系统; Roja<sup>[16]</sup>对建筑施工中的人机工程学进行了风险分析, Kulkarni<sup>[17]</sup>采用快速评估对建筑工人的姿势进行了分析等等, 大部分研究存在一定的局限性, 或是过于理论化, 或是未结合现场实际操作。故为对建筑业工人机体的生理状态(如舒适性、疲劳、损伤等)能够做到早期判断和干预, 本文以建筑抹灰作业为对象, 针对工人抹灰作业过程中较为简单且典型的上肢姿势进行研究, 通过对作业姿势定义及现场调研, 分析上肢不舒适度影响因素, 然后, 基于 CATIA(Computer Aided Three-dimensional Interactive Application)软件模拟上肢在一定抹灰负荷下的关节力矩(肌肉负荷)构建不舒适度预测模型, 为快速评价上肢不舒适性提供量化参考。

## 1 抹灰工人上肢姿势分析与模拟

### 1.1 上肢作业姿势

在研究抹灰作业工人上肢姿势时, 以身体躯干为平台(不考虑人体躯干的状态), 则上肢的肩、上臂、肘、前臂、腕和手部几个部分通过相连的关节相互之间形成一定范围内的角度, 这些角度与各个部分的组合便构成了一个个不同的上肢作业姿势。如图 1 表示的是工人正在进行天棚抹灰时右上肢的某个特定的姿势, 图中  $\gamma$   $\alpha$   $\beta$  等表示的是上肢的腕关节、肩关节、肘关节等的关节角, 这几个关节角与上肢的手部、前臂和上臂就组合成

了抹灰作业时上肢的一个作业姿势。

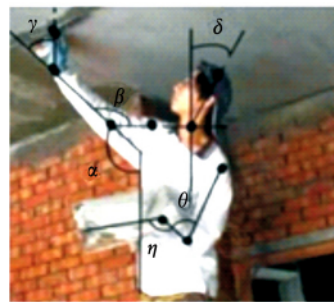


图 1 抹灰工人姿势示意

### 1.2 工人抹灰作业现场调查

#### (1) 调查目的

利用 CATIA 软件的人机工程学设计与分析模块来进行上肢关节负荷仿真实验, 借助抹灰工人在不同关节角度下的关节负荷来分析上肢作业姿势的舒适性时, 需要确定上肢各个关节角度变化范围及抹灰时手部基本负荷。为此, 我们进行现场调研, 主要目的为: 1) 确定上肢各个关节角度变化范围; 2) 抹灰作业手部基本负荷; 3) 通过调查有经验的工人, 定性判断较为舒适的上肢作业姿势。

#### (2) 调查开展

使用相机现场拍照、录像记录抹灰工人的作业过程, 通过对工人现场询问, 了解工作时关节角度变化的大致范围及抹灰时一般负荷。从视频中截取工人抹灰作业典型的作业姿势示意图, 如表 1 所示。

表 1 抹灰工人的作业上肢姿势图示

姿势	1	2	3	4
工人 1 作业姿势图像				
姿势	5	6	7	8
工人 2 作业姿势图像				

### 1.3 模拟参数确定

由于大部分人惯用右手进行作业,故以右手的抹灰作业姿势为例进行分析。选取人体右上肢的肩关节、肘关节和腕关节及5个姿势关节动作利用CATIA进行实验,结合现场调研,考虑抹灰负荷2 kg的前提下,确定各关节动作变化、姿势角度变化范围如表2所示,各关节动作姿势变化过程如图2所示。

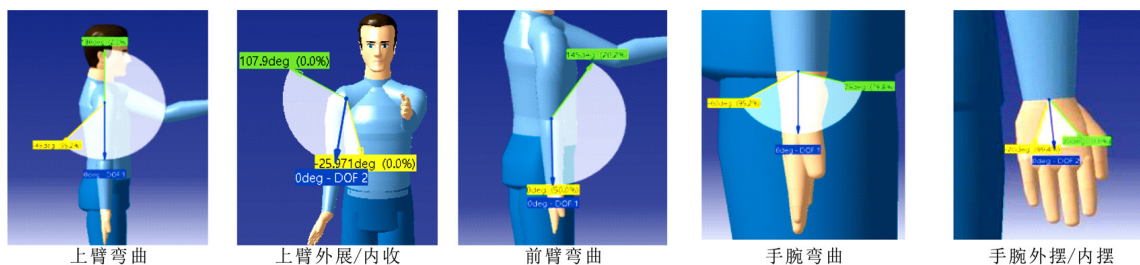


图2 关节动作变化过程

又因在使用不同百分位数的成年男子人体模型来模拟关节负荷时,尽管人体模型具有不同的身体、重量和肢体长度,抹灰负荷也在变化,但在完成每个姿势的模拟过程中,CATIA给出的关节负荷变化数据和规律均基本相似;同样,其人体姿势不舒适度的变化规律也基本相似<sup>[13]</sup>,因此,采用第50百分位的中国成年男子人体数据进行所有关节动作的实验。

为了满足作业需要,抹灰过程中工人上肢需要频繁交替变换静态姿势和动态姿势,作业姿势组成复杂,且与静态姿势相比动态姿势不易捕捉。因此,本文主要研究单一角度变化下的抹灰工人静态姿势的不舒适度,当不考虑时间因素时,静态姿势的不舒适度变为瞬态姿势的不舒适度<sup>[13]</sup>。

### 1.4 关节力矩(负荷)模拟

陈景辉、任金东<sup>[18]</sup>等的研究发现,肌肉负荷或关节力矩与姿势之间存在很大的关联,故通过关节力矩(作为肌肉负荷的一种度量)就可以来表征姿势不舒适度,从而建立不舒适度评价模型。

在CATIA中建立好作业工人抹灰姿势人体模型之后,通过姿势编辑器来调节人体模型的作业姿势。根据表2所确定的关节部位、关节动作、姿势角度变化范围,由初始直立的姿势开始,取其中一个关节姿势角度为变量,每隔5°来改变人体的作业姿势,由姿势角度变化范围的开始角度调节至终止角度,通过CATIA软件人体运动分析(HAA)模块中的生物力学单一动作分析(BSAA)给出不同关节动作姿势角度下的关节力矩。例

表2 实验中测试的关节部位、姿势关节动作、姿势角度变化范围

关节部位	姿势关节动作	姿势角度 $\theta$ 变化范围	
		开始角度/(°)	终止角度/(°)
肩关节	上臂弯曲	-60	+170
	上臂外展/内收	0	+80
肘关节	前臂弯曲	0	+140
腕关节	手腕弯曲	-60	+75
	手腕外摆/内摆	-20	+30

如,上臂弯曲20°是指在初始直立姿势下,调节人体模型使上臂向前方弯曲20°,通过BSAA输出上臂弯曲20°状态下的肩关节弯曲力矩的数据值为10.5,如图3所示。

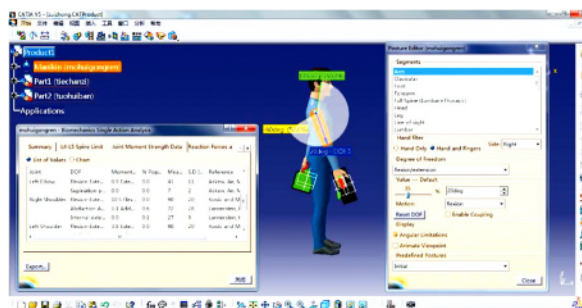


图3 生物力学单一动作分析输出  
上臂弯曲20°时的力矩数值

同理,通过BSAA输出的人体上肢部分关节姿势动作随关节角度变化的部分关节力矩 $M_{i\theta}$ (第 $i$ 个关节动作变化至 $\theta$ 角度时的力矩值)数据如表3。实验过程中发现调节不同关节角度后,手腕关节各自由度输出力矩无明显变化且均近似为零,故仅选取肩关节、肘关节为研究对象进行数据采集。

表3 上肢部分关节随关节角度变化的关节力矩 $M_{i\theta}$

角度 /(°)	肩		肘	角度 /(°)	肩		肘
	上臂 弯曲	上臂 外展/内收			上臂 弯曲	上臂 外展/内收	
-60	22.9	—	—	60	23.3	25.7	9.9
-55	22	—	—	65	24	27.4	10.4
-50	20.9	—	—	70	24.5	28.4	10.8
-45	19.7	—	—	75	24.8	29	11.1
-40	18.2	—	—	80	25	29.4	11.3

(续表)

角度 /(°)	肩		肘	角度 /(°)	肩		肘
	上臂 弯曲	上臂 外展内收	前臂 弯曲		上臂 弯曲	上臂 外展内收	前臂 弯曲
-35	16.6	—	—	85	25.1	—	11.4
-30	14.8	—	—	90	25	—	11.5
-25	12.8	—	—	95	24.8	—	11.4
-20	10.5	—	—	100	24.4	—	10.8
-15	8.1	—	—	105	23.9	—	10.4
-10	5.6	—	—	110	23.3	—	9.9
-5	2.9	—	—	115	22.5	—	9.4
0	0.2	3.1	0	120	21.6	—	8.8
5	2.6	5.7	1	125	20.6	—	8.1
10	5.3	8.2	2	130	19.4	—	7.4
15	5.9	10.6	3	135	18.1	—	—
20	10.5	12.9	3.9	140	16.6	—	—
25	12.8	15.2	4.9	145	14.9	—	—
30	15	17.3	5.7	150	13.1	—	—
35	16.9	19.2	6.6	155	11.2	—	—
40	18.6	20.8	7.4	160	9.1	—	—
45	20.1	21.4	8.1	165	6.9	—	—
50	21.4	14.1	8.8	170	4.6	—	—
55	22.4	19.6	9.4				

## 2 上肢姿势不舒适度建模及评价

### 2.1 关节力矩数据的标准化

为了便于分析研究,将关节力矩不舒适度实

验得到的表 3 部分关节力矩  $M_{i\theta}$  进行标准化处理,使得数值变化范围为 1~10,标准化公式为:

$$D_{i\theta} = \frac{M_{i\theta} - \min M_{i\theta}}{\max M_{i\theta} - \min M_{i\theta}} \times 10 \quad (1)$$

式中:  $i$  为第  $i$  个关节;  $\theta, \alpha, \beta$  分别为为关节动作变化角度;  $M_{i\theta}$  为第  $i$  个关节动作变化至  $\theta$  角度时的力矩值;  $\min M_{i\theta}$  为第  $i$  个关节动作变化至  $\beta$  角度时能取得最小力矩值;  $\max M_{i\alpha}$  为第  $i$  个关节动作变化至  $\alpha$  角度时能取得最大力矩值;  $D_{i\theta}$  为第  $i$  个关节动作变化  $\theta$  角度时力矩标准化后的值,即关节动作不舒适度指数。

以肩部弯曲为例,计算上臂向前弯曲  $20^\circ$  时,  $M_{i\theta} = 10.5$ ,  $\min M_{i\theta} = 0.2$ ,  $\max M_{i\alpha} = 25.1$ , 则肩部弯曲的不舒适度指数为  $D_{i\theta} = (10.5 - 0.2) \times 10 / (25.1 - 0.2) = 4.14$ , 同理,可计算其他关节所受力矩情况,表 4 即为人体上肢部分关节力矩标准化后  $D_{i\theta}$  的数值。

关节负荷大小、肌肉收缩程度与人体疲劳密切相关,关节力矩越大,可用力矩越小,肢体越不舒适;肌肉收缩程度越大,人就越容易感到疲劳<sup>[19]</sup>。根据标准化公式(1)可知,实验得出的标准化数值  $D_{i\theta}$  越大表示不舒适度感越强(越不舒适),数值越小代表不舒适度感越弱(越舒适)。

表 4 人体上肢部分关节力矩标准化数值  $D_{i\theta}$

角度/(°)	肩		肘	角度/(°)	肩		肘
	上臂弯曲	上臂外展内收	前臂弯曲		上臂弯曲	上臂外展内收	前臂弯曲
-60	9.116466	—	—	60	9.277108	8.593156	8.608698
-55	8.75502	—	—	65	9.558233	9.239544	9.043478
-50	8.313253	—	—	70	9.759036	9.619772	9.391304
-45	7.831325	—	—	75	9.879518	9.847909	9.652174
-40	7.228916	—	—	80	9.959839	10	9.826087
-35	6.586345	—	—	85	10	—	9.913043
-30	5.863454	—	—	90	9.959839	—	10
-25	5.060241	—	—	95	9.879518	—	9.913043
-20	4.136546	—	—	100	9.718876	—	9.391304
-15	3.172691	—	—	105	9.518072	—	9.043478
-10	2.168675	—	—	110	9.277108	—	8.608696
-5	1.084337	—	—	115	8.955823	—	8.173913
0	0	0	0	120	8.594378	—	7.652174
5	0.963855	0.988593	0.869565	125	8.192771	—	7.043478
10	2.048193	1.939163	1.73913	130	7.710843	—	6.434783
15	2.289157	2.851711	2.608696	135	7.188755	—	—
20	4.136546	3.726236	3.391304	140	6.586345	—	—
25	5.060241	4.60076	4.26087	145	5.903614	—	—
30	5.943775	5.39924	4.956522	150	5.180723	—	—
35	6.706827	6.121673	5.73913	155	4.417671	—	—
40	7.389558	6.730038	6.434783	160	3.574297	—	—
45	7.991968	6.958175	7.043478	165	2.690763	—	—
50	8.514056	4.18251	7.652174	170	1.767068	—	—
55	8.915663	6.273764	8.173913				



## 2.2 不舒适度模型构建

以肩部弯曲为例,将肩部关节弯曲角度 $\theta$ 、肩部弯曲的不舒适度指数 $D_{i\theta}$ 输入 SPSS20 软件当中,绘制得到随肩关节角度变化的不舒适度指数散点图,如图4所示。

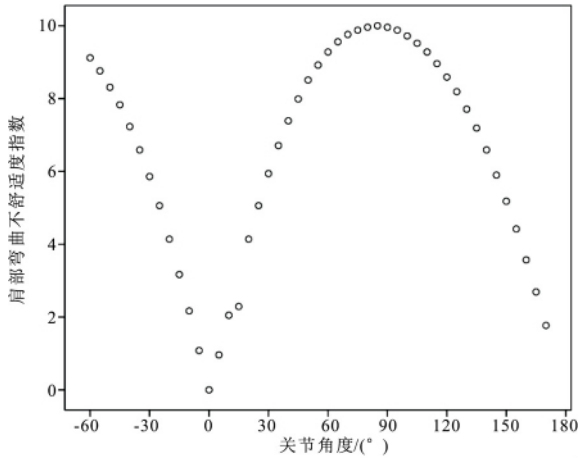


图4 肩部 $D_{i\theta}$ 随 $\theta$ 变化散点

从图4可以看出,肩部弯曲不舒适度指数随关节角度的变化呈现出明显的曲线变化规律,因此,可以采用多项式拟合曲线的方法。多项式拟合函数的一般形式<sup>[20]</sup>为:

$$y(x) = b_n x^n + b_{n-1} x^{n-1} + \cdots + b_1 x + b_0 \quad (2)$$

式中: $n$ 为多项式的阶数; $x$ 为自变量; $b_n$ 为自变量的系数; $y(x)$ 为因变量。

以肩部关节弯曲角度 $\theta$ 为自变量,肩部关节弯曲时的不舒适度指数 $D$ 为因变量,利用 SPSS20 软件进行回归分析,根据图4散点图分布形状、相关的数学理论及 SPSS20 曲线估计中存在的模型类别,选择软件中的“线性、二次项、立方”来构建它们之间的模型关系,得到拟合曲线如图5所示,拟合相关数据如表5。

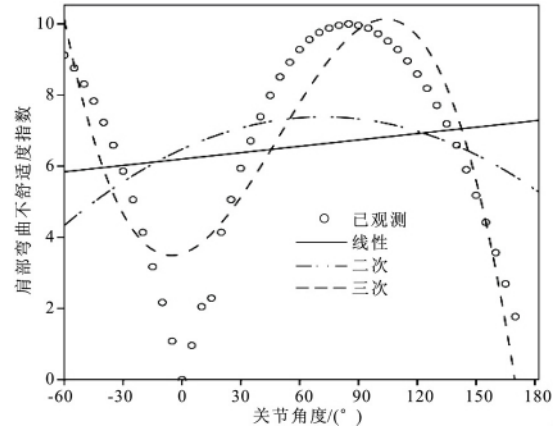


图5 肩部弯曲不舒适度曲线拟合

表5 模型汇总和参数估计值

方程	模型汇总					参数估计值			
	$R^2$	$F$	df1	df2	Sig.	常数	$b_1$	$b_2$	$b_3$
线性	0.019	0.891	1	45	0.350	6.200	0.006		
二次	0.081	1.928	2	44	0.158	6.475	0.025	0.000	
三次	0.813	62.286	3	43	0.000	3.537	0.017	0.002	$-1.018 \times 10^{-5}$

注:自变量:肩部关节角度;因变量:肩部弯曲不舒适度指数

拟合优度的统计量是可决系数(亦称确定系数) $R^2$ 。 $R^2$ 最大值为1,越接近1,说明回归曲线对观测值的拟合程度越好;反之,值越小,说明回归曲线对观测值的拟合程度越差。

通过表5的曲线回归分析可以看出:3次曲线的 $R^2$ 为0.813,该模型对数据有很好的解释能力,具有良好的拟合效果,所以最终选择3次曲线模型。由表5中各系数,可得到肩部弯曲的不舒适度模型为:

$$Y_1 = -1.018X^3 \times 10^{-5} + 0.002X^2 + 0.017X + 3.537 \quad (3)$$

式中: $Y_1$ 为肩部不舒适度值; $X$ 为上臂弯曲角度。

同理,多次利用 SPSS 回归分析的方法,就可以得到抹灰工人上肢其他部分关节在不同关节角度下的不舒适度指数方程的系数参数,如表6所示。

表6 人体上肢肩部、肘部关节不舒适度指数模型参数

$y(x) = b_n x^n + b_{n-1} x^{n-1} + \cdots + b_1 x + b_0$					
关节	不舒适度指数 $Y$	常数	$b_1$	$b_2$	$b_3$
肩	$Y_1$ (弯曲)	6.728	0.032	0.003	$-1.851 \times 10^{-6}$
	$Y_2$ (外展内收)	-0.162	0.269	-0.004	$2.976 \times 10^{-5}$
肘	$Y_3$ (弯曲)	-0.078	0.187	-0.000	$-5.355 \times 10^{-6}$

## 3 结 语

本文以建筑抹灰工人上肢作业姿势为例,通过 CATIA 输出关节力矩(负荷)并使用 SPSS 建立了抹灰工人上肢肩部、肘部弯曲不舒适度模型,对工人实际操作姿势不舒适性具有较高的拟合度,可以快速评价工人抹灰作业时上肢瞬时不舒适度,为及时干预工人的不合理作业姿势减少肌肉骨骼疾患提供量化依据,同时,模型的建立方法也

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.