

张雪华, 李政, 李静, 等. 多功能救援属具应用效能综合评价[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 151–157. [ZHANG Xuehua, LI Zheng, LI Jing, et al. Performance Comprehensive Evaluation of Large Multi-functional Rescue Attachments [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 151–157. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.026.]

多功能救援属具应用效能综合评价*

张雪华¹, 李 政², 李 静¹, 杜晓霞¹

(1. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049; 2. 烟台艾迪精密机械股份有限公司, 山东 烟台 264006)

摘 要: 为了检验新型多功能救援属具在结构设计、制作工艺、功能组合等方面在实际复杂灾害救援场景下的应用实效, 采用改进的 AHP、熵权法和模糊综合评价方法从工作能力、工作效率、协作能力、维护能力等四个方面对 2 种新研发的多功能救援属具进行了应用效能综合评价的研究, 构建了具有针对性及科学合理的评价指标体系, 制定指标测试方法。结果表明: 利用改进 AHP、熵权法、模糊综合评价相结合的方法能够进一步减少人为主观因素的影响, 提升评估结果的实用性和有效性; 多功能救援属具提升了实际救援行动的工作能力和工作效率, 应用效能评价结果同专家经验判断基本一致。

关键词: 地震建筑物救援; 多功能救援属具; 改进 AHP-熵-模糊综合评价法; 效能综合评价

中图分类号: U273.9; X4; X915.5; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)01-0151-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.026

在历次地震灾害救援行动案例中证实, 使用起重机、挖掘机、装载机等大型工程机械设备在灾害现场实施道路疏通、障碍清除、废墟清理、固堤疏浚等成效显著, 有效提高了救援队伍进入灾区、次生灾害排除和废墟救援的效率^[1-2]。美国、俄罗斯、日本等国家已经研发了多功能转向装载机、大型双臂工程机械、多功能救援车等专用大型多功能救援机械, 在地震等其他灾害的救援行动中得到应用^[3-5]。我国在该方面的研发是在汶川地震后, 相关企业相继研发了双臂多功能救援工程机械、多功能拆除机械、步履式挖掘机等救援专用工程机械^[6-8]。但是专用大型救援工程机械存在局限性, 重要的一点就是该类装备体型相对较大, 在山区道路狭窄的情况下难以保证运输至救援现场, 同时造价昂贵, 使用频率低, 加之维保费用高, 使其难以广泛配备, 因此研发可与通用工程机械装备快速对接的多功能救援属具具有重要应用意义。

多功能救援属具克服了通用工程机械存在的实际应用问题, 在地震发生后, 通过与在当地从事生产的大型通用工程机械快速对接, 可迅速转换成能够满足地震救援需求的专用大型工程机械, 符合我国地震应急救援实际需求。

我国在多功能救援属具的研究已取得一定进

展, 如孙骁^[9]研究了一种起缝支护救援工程属具, 在 SolidWorks 软件中完成了结构设计和虚拟装配, 并进行了静力学分析和运动学分析; 赵京等设计了钳剪抓一体多功能救援属具和开孔取芯破拆救援属具等, 并完成了部件设计优化、液压控制优化等研究^[10-12]。但都尚未开展救援属具的应用效能综合评价研究。

多功能救援属具应用效能综合评价是指通过建立一套科学合理的指标体系对多功能救援属具在救援行动中的应用质量和效果进行全面评估的活动, 以此来检验多功能救援属具在救援过程中发挥的实际作用, 有利于发现多功能救援属具在设计、制造过程中的问题, 切实提升救援能力和效率。由于多功能救援属具实际生产及应用较少, 当前鲜有对此类装备开展应用效能综合评价的研究。姜涛等^[13]从生产性能、基本功能、运输性能、安全性能、操作性能等方面, 利用层次分析法(AHP)-模糊综合评价方法对破拆开孔、剪切破碎扩张、抓取起吊救援属具开展了综合性能评估, 并阐述了指标体系存在的问题。笔者参加的“十三五”国家重点研发计划项目其中一项成果是产出五种大型多功能救援属具, 本文选取其中两种(图1), 通过构建科学合理的评价指标体系, 利用主客观结合的改进 AHP-熵-模糊综合评价方法对

* 收稿日期: 2021-06-26 修回日期: 2021-08-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0810206)

第一作者简介: 张雪华(1990-), 男, 汉族, 山东聊城人, 硕士, 工程师, 主要从事建筑物震害评估与应急救援装备技术研究。

E-mail: zhangxhua_nerss@163.com

通讯作者: 杜晓霞(1982-), 女, 汉族, 山西临汾人, 博士, 高级工程师, 主要从事地震应急救援与装备技术研究。

E-mail: duxx_bj@126.com

其在城市地震复杂灾害救援场景下的应用效能综合评价进行研究,以期能够真实评价出该装备在实际救援行动中的应用效能,为装备改进、产品选择提供参考。

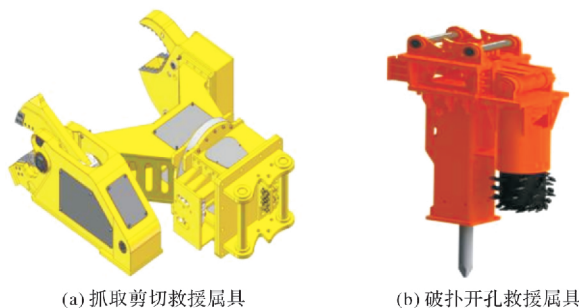


图1 多功能救援属具

1 评价指标体系及测试方法

本文参考现有工程机械及多功能救援属具评价研究,以提升救援行动能力和效率、保证废墟结构稳定状态为目标,考虑运输维护和人机协同等方面,以及当前建筑物废墟救援主要应用场景,建立符合装备特点,且满足完整性、系统性、一致性、可比性、可操作性及实用性原则的应用效能综合评价指标体系^[13-17]。

1.1 多功能救援属具的评价指标体系

本文分别建立了以上两种多功能救援属具的应用效能综合评价指标体系,指标体系包括目标层A、准则层B、指标层C。目标层为两种多功能救援属具,其下准则层有作业能力、作业效率、协作能力和维护能力等四个因素,准则层下又分别有多个具体评价指标。另两种属具使用操作和液压原理基本相同,故协作能力和维护能力两项准则及具体评价指标相同。

目标层A即待评价的两种救援属具:抓取剪切救援属具和破拆开孔救援属具,记为 U 。

准则层B下的作业能力是表现该属具装备设计和在救援过程中的功能实现能力,如抓取、剪切、破拆、开孔及其复合功能;作业效率体现的是实现相应功能时所用的时间;协作能力是属具各功能间、属具与挖掘机之间以及人与属具间的配合协调能力;维护能力是表现属具稳定、故障清除和日常维护保养的能力。记为 U_1 至 U_4 。

指标层C是准则层B各个准则下的具体评价指标,记为 $U_{ij}(i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, \dots, n; n$ 为各准则下指标个数)。

抓取剪切救援属具集剪切与抓取功能于一体,其可利用抓爪将物体抓住,再利用剪口将钢筋、方钢、工字钢、钢筋混凝土等较大建(构)筑物构件切断,进而分离移除,可防止剪落构件造成废墟的二次坍塌,从而在保证安全的前提下辅助救援行动,提升救援效率,指标体系见图2。

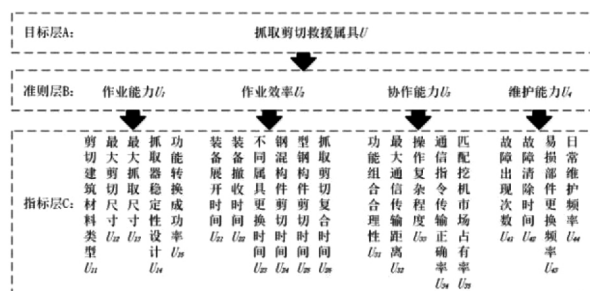


图2 抓取剪切救援属具指标体系

破拆开孔救援属具具有破拆和开孔功能,在救援行动中主要是实现钢筋混凝土板的快速开孔,辅助打通救援通道,指标体系见图3。

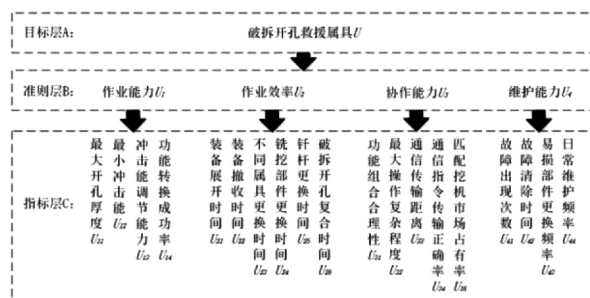


图3 破拆开孔救援属具指标体系

1.2 评价指标测试方法

由于当前对于救援属具应用效能综合评价的相关研究较少,对于其相关指标测试标准的研究几乎处于空白阶段。本文重点结合相似功能的手持救援装备测试标准、救援队救援指南^[17]、救援专家意见建议,同时借鉴属具标准和液压破拆工具标准^[18-20],对具体评价指标测试方法进行研究。

指标体系中有定性和定量两类指标,同时定量指标中匹配挖机市场占有率、易损部件更换频率、日常维护频率为制造厂家给出,定性及厂家给出指标在此不做研究,测试中所有操作员均为厂家及研发单位指定的技术人员。

两种救援属具共同指标测试方法:

(1)功能转换成功率是指多功能救援属具上集成的多种功能之间相互转换成功比例,衡量了属具功能间的动力转换顺畅性和功能配合性,是区别于单一属具的重要指标。在完成属具安装及调试后,操控属具多种功能间相互转换各10次,记录转换失败的次数。

(2)装备展开时间是衡量装备到达救援现场后开展工作的时间。将救援属具及匹配挖机停放于空旷场地,记录从挖机启动到属具抬起,并完成一次所有功能动作测试为止所用时间,测试3次,取最短计时。

(3)装备撤收时间是衡量装备完成某一区域救援工作后撤离现场所用时间。保持挖机启动和属具与挖机的安装状态,并停放于开阔场地,记录从机臂下落到与属具完全分离所用时间,测试3

次, 取最短计时。

(4) 不同属具更换时间是衡量在救援过程中为满足救援需求, 两种不同属具间更换所用的时间。该指标同展开和撤离指标有关联, 但重点在于测试救援过程中属具更换的流畅性。将安装属具的挖机和另一种属具停放于空旷场地并保持挖机启动状态, 记录从挖机机臂下落至安装上另一种属具并完成一次所有功能动作测试为止所用时间, 测试 3 次, 取最短计时。

(5) 最大通信传输距离。操控终端同机载接收器之间的距离。以说明书提供最大距离为起始值(若无说明则以 3 m 为起始值), 设置无线控制距离, 每个距离测量 3 次, 若全部成功则距离增加 0.5 m, 若有一次失败则减少 0.5 m, 记录最大距离值。

(6) 通信指令传输正确率。用于衡量属具同手持控制终端之间的数据传输情况。在手持控制终端和数据接收器最大通信传输距离的 80% 处操控属具, 测试 10 次, 记录指令与功能相符次数。

(7) 故障出现次数。记录在所有测试过程中故障出现次数。

(8) 故障清除时间。若出现故障则计算从故障查找到故障清除后完成一次全部功能测试为止的时间, 若无故障出现则计时为 0。

抓取剪切救援属具有评价指标测试方法:

(1) 剪切建筑材料类型。可衡量属具的应用建筑材料类型。对符合剪切尺寸的钢筋混凝土、型钢等建筑物构件进行剪切, 测试 3 次, 其中一次成功则认为可以剪切该类材料。

(2) 最大剪切尺寸。如说明书提供最大剪切尺寸(开口尺寸), 则以说明书提供值为初始值(如没有提供则以测量最大开口值为初始值), 让属具在规定时间内进行剪切, 测试 3 次, 至少有一次成功则增加初始值 10% (若一次都没有则减少 10%), 依次测试, 直至不能增加或减少为止, 记录最大尺寸值。

(3) 最大抓取尺寸。同最大剪切尺寸测试。

(4) 钢混构件剪切时间。使用符合最大剪切尺寸的建筑物标准钢筋混凝土梁柱构件, 保持属具闭口状态并接近构件, 记录从属具张口至完全分离构件为止的时间, 测试 3 次, 取最短时间。

(5) 型钢构件剪切时间。同钢混构件剪切时间测试方法。

(6) 抓取剪切复合时间。使用符合剪切和抓取两种功能的最大尺寸构件, 保持属具处于闭口状态并接近构件, 先抓取后剪切, 记录从属具张口抓取至完全剪切分离构件为止的时间, 测试 3 次, 取最短时间。

破拆开孔救援属具有评价指标测试方法:

(1) 最大开孔厚度。如说明书提供最大开孔厚度尺寸, 则以说明书提供值为初始值(如没有提供则以测量钎杆长度值为初始值), 让属具在规定时间内进行开孔, 测试 3 次, 至少有一次成功则增加初始值 10% (若一次都没有则减少 10%), 依次测

试, 直至不能增加或减少为止, 记录最大开孔厚度值。

(2) 最小冲击能。为保证倒塌建筑物的稳定性, 避免二次坍塌, 以最小冲击能衡量其对结构稳定性的影响, 测试方法参考国家标准^[20]。

(3) 铣挖部件更换时间。衡量铣挖部件更换时间对工作效率的影响。采用适用救援现场的工具, 计算从部件拆卸至更换完毕第一次功能测试成功为止的时间, 测试 3 次, 记录最短时间。

(4) 钎杆更换时间。同铣挖部件更换时间测试方法。

(5) 破拆开孔复合时间。使用符合破拆开孔功能的最大厚度构件, 保持属具处于闭口状态并接近构件, 记录从开始工作至开孔尺寸达到直径 60 cm 的圆孔为止的时间, 测试 3 次, 取最短时间。

2 评价方法研究

AHP 法是一种定性分析和定量分析相结合的评价方法, 通过构建层次结构、构造各层次判断矩阵、层次单排序和一致性检验、层次总排序和一致性检验等步骤完成指标权值的确定。但 AHP 法存在指标权重受人为主观因素影响大造成信息损失过多和若一致性检验不通过则计算繁琐的问题^[21-22]。因此本文利用改进 AHP 法求解各层指标权重, 同时采用熵权法对利用 AHP 法求得的各层指标权重进行客观修正, 以便减少主观因素的影响, 再者利用模糊综合评价方法对两种属具的应用效能进行综合评价。

2.1 改进 AHP 法^[22-24]

(1) 建立层次结构。针对评价目标及其影响因素构建阶梯型层次结构指标体系。

(2) 构造判断矩阵。采用专家调查法和三标度法对各层次因素两两之间的相对重要性进行打分, 得到各层次重要性矩阵 $R = [b_{ij}]_{n \times n}$, 其中相对重要程度 b_{ij} 的值计算如下:

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & P_i \text{ 比 } P_j \text{ 重要;} \\ 1, & P_i \text{ 与 } P_j \text{ 相同重要;} \\ 2, & P_j \text{ 比 } P_i \text{ 重要。} \end{cases} \quad (1)$$

判断矩阵 $P = [a_{ij}]_{n \times n}$ 计算如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{t_j - t_i}{t_{\min}} + 1, & t_i \leq t_j; \\ \left[\frac{t_i - t_j}{t_{\min}} \right]^{-1}, & t_i > t_j. \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为矩阵 R 的行之和。

(3) 解得判断矩阵 P 的最大特征值 λ 和特征向量 \bar{w}_i , 得到权重向量 W_i 。

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj}); \quad (3)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right]; \quad (4)$$

$$W_i = \bar{w}_i / \sum_{j=1}^n w_j \quad (5)$$

(4)一致性检验。通常认为当一致性比率 $CR < 0.1$ 时判断矩阵通过一致性检验。

$$CR = CI/RI \quad (6)$$

式中: $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$, RI 为平均随机一致性指标, 与矩阵阶数有关(表 1)。

表 1 矩阵阶数 n 与 RI 值对应关系

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.52

2.2 熵权法

使用熵权法对 AHP 法得到的权重向量进行修正, 可减少其主观性。熵权法用来判断某个指标的离散程度, 其有两个指标即熵值和差异系数, 熵值越大、差异系数越小表示该指标的重要程度越低, 在本评价方法中其使用的数据是归一化后的判断矩阵。对归一化后的判断矩阵计算其熵值向量 $E(e_1, e_2, \dots, e_n)$, 第 i 个评价指标的熵值为:

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n (a'_{ij} \ln a'_{ij}), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

第 i 个评价指标的偏差指数为:

$$g_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (8)$$

用差异系数 g_i 对权重向量 W_i 进行修正, 得到最终权重向量 W_i^* , 公式如下:

$$W_i^* = \frac{w_i g_i}{\sum_{i=1}^n (w_i g_i)} \quad (9)$$

2.3 模糊综合评价方法

模糊综合评判方法是基于模糊数学理论发展起来的, 是用数学方法对多因素所影响的事物或现象做出总的评价^[25]。其原理步骤主要有:

(1) 建立模糊对象因素集 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 和评判集 $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$, 其中 n 为指标个数, m 为评判等级个数, 一般可分为(优, 良, 中、差, 劣)或(好, 中, 差)。

(2) 建立单级隶属度矩阵 R' 。假设对第 i 个评价因素 U_i 进行单因素评价, 则得到一个相对于 v_i 的模糊向量:

$$R'_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij}) \quad (10)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$; $0 < r_{ij} < 1$ 。

若对 n 个因素进行综合评价, 则其是一个 n 行 m 列的矩阵, 即隶属度矩阵 R' 。

对于定性指标可采用百分比法, 即对该指标的每个评价等级次数与专家数的比例; 定量指标虽然可以定量表示, 但是由于专家认知和侧重点不同往往又具有模糊性, 因此对其进行模糊化处理, 本文采用广泛应用的半梯形分布函数作为隶属度函数, 具体如下:

设评判集中 v_j 和 v_{j+1} 为相邻两级标准, 且 $v_{j+1} > v_j$, 则 v_j 级隶属度函数为:

$$r_1 = \begin{cases} 1, & x_i \leq u_1; \\ \frac{u_2 - x_i}{u_2 - u_1}, & u_1 < x_i < u_2; \\ 0, & x_i > u_2. \end{cases} \quad (11)$$

$$r_2 = \begin{cases} 1 - r_1, & u_1 \leq x_i \leq u_2; \\ \frac{u_3 - x_i}{u_3 - u_2}, & u_2 < x_i < u_3; \\ 0, & x_i \leq u_1 \text{ 或 } x_i \geq u_3. \end{cases} \quad (12)$$

$$r_j = \begin{cases} 1 - r_{j-1}, & u_{j-1} \leq x_i \leq u_j; \\ \frac{u_{j+1} - x_i}{u_{j+1} - u_j}, & u_j < x_i < u_{j+1}; \\ 0, & x_i \leq u_{j-1} \text{ 或 } x_i \geq u_{j+1}. \end{cases} \quad (13)$$

根据上式, 计算评价指标 i 隶属于评判等级 j 的隶属度 r_{ij} , 则可生成 $n \times m$ 的隶属度矩阵 R' 。

(3) 建立多级模糊评价, 即从底层指标层依次开始评价至目标层, 从而得到目标层的模糊隶属度。指标权重向量同隶属度矩阵相乘即可得相对于上一层的模糊隶属度, 依次上推, 直至目标层。

$$R' = W_i^* \cdot R'_i \quad (14)$$

3 多功能救援属具综合效能评价

依据指标体系和测试方法, 通过专家调查法对多位救援专家和救援教官进行 AHP 法判断矩阵与定性指标评判等级的确定, 并结合多次实际救援场景测试的定量指标实测值。

3.1 抓取剪切救援属具综合效能评价

3.1.1 指标权重计算

(1) 准则层 B 对目标层 A 的判断矩阵 P_U 。经专家打分得到重要性矩阵 R_U 及公式(2)得到:

$$R_U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$R_U = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 7 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 3 \\ 1/3 & 3 & 1 & 5 \\ 1/7 & 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

对 P_U 进行归一化后, 利用公式(5)可以得出准则层 B 中因素相对于目标层 A 的权重向量:

$$W_U = [0.558, 0.1219, 0.2633, 0.0569] \quad (17)$$

(2)一致性检验。利用公式(4)和公式(6)求得最大特征值和 CR 为:

$$\lambda_{\max} = 4.1185; \quad (18)$$

$$CR = 0.043876 \quad (19)$$

$CR < 0.1$ 通过一致性检验。

(3)熵权法修正指标权重。根据 2.2 节内容可得:

$$W_U^* = [0.401, 0.312, 0.006, 0.281] \quad (20)$$

同理, 可计算得到指标层 C 对各准则层 B 的权重:

$$W_{U_1}^* = [0.231, 0.197, 0.231, 0.213, 0.128]; \quad (21)$$

$$W_{U_2}^* = [0.134, 0.024, 0.134, 0.254, 0.239, 0.214]; \quad (22)$$

$$W_{U_3}^* = [0.310, 0.064, 0.191, 0.310, 0.124]; \quad (23)$$

$$W_{U_4}^* = [0.438, 0.324, 0.183, 0.055]。 \quad (24)$$

3.1.2 模糊综合评价

分层级对抓取剪切救援属具应用综合效能评价指标体系进行模糊综合评判, 即分别对每一级指标所分解的二级指标进行模糊综合评判, 然后在与上一级指标权重进行模糊综合, 依次上推, 直至目标层。

(1) 建立因素集与评判级。依据指标体系可知因素集为:

$$U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}\}; \quad (25)$$

$$U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{25}\}; \quad (26)$$

$$U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}, U_{34}, U_{35}\}; \quad (27)$$

$$U_4 = \{U_{41}, U_{42}, U_{43}, U_{44}\}。 \quad (28)$$

评判级采用三级评判, 即:

$$V = \{V_1, V_2, V_3\} = \{\text{好}, \text{中}, \text{差}\}。 \quad (29)$$

定性指标的模糊隶属度依据专家打分确定, 即如有 10 位专家参与, 其中 3 位专家判定为好, 则好的隶属度为 0.3。

评判集对应的定量数值集如表 2 所示[数值单位: 尺寸(cm), 时间(min), 频率(h 或 d), 距离(m), 占有率(%)]。

(2) 构造隶属度矩阵。定性指标隶属度如下:

$$r_{U_{14}} = \{0.4, 0.6, 0\}; \quad (30)$$

$$r_{U_{31}} = \{0.5, 0.5, 0\}; \quad (31)$$

$$r_{U_{33}} = \{0.3, 0.6, 0.1\}。 \quad (32)$$

表 2 分值表

评语等级	好	中	差
剪切建筑材料类型 U_{11}	3	2	1
最大剪切尺寸 U_{12}	60	30	0
最大抓取尺寸 U_{13}	60	30	0
功能转换成功率 U_{15}	100	85	0
装备展开时间 U_{21}	2	5	10
装备撤收时间 U_{22}	2	5	10
不同属具更换时间 U_{23}	2	5	10
钢混构件剪切时间 U_{24}	5	10	30
型钢构件剪切时间 U_{25}	8	15	45
抓取剪切复合时间 U_{26}	10	30	60
最大通讯传输距离 U_{32}	5	3	2
通信指令传输正确率 U_{34}	100	85	0
匹配挖机市场占有率 U_{35}	90	75	0
故障出现次数 U_{41}	2	5	8
故障清除时间 U_{42}	30	60	90
易损部件更换频率 U_{43}	50	25	10
日常维护频率 U_{44}	30	15	7

定量指标隶属度依据式(11) - 式(13)可得:

$$r_{U_{11}} = \{1, 0, 0\}; r_{U_{12}} = \{0.9, 0.1, 0\}; \quad (33)$$

$$r_{U_{13}} = \{0.9, 0.1, 0\}; r_{U_{15}} = \{1, 0, \}; \quad (34)$$

$$r_{U_{21}} = \{0.5, 0.5, 0\}; r_{U_{22}} = \{0.5, 0.5, 0\}; \quad (35)$$

$$r_{U_{23}} = \{0.4, 0.6, 0\}; r_{U_{24}} = \{0, 0.8, 0.2\}; \quad (36)$$

$$r_{U_{25}} = \{0, 0.7, 0.3\}; r_{U_{26}} = \{0.2, 0.8, 0\}; \quad (37)$$

$$r_{U_{32}} = \{1, 0, 0\}; r_{U_{34}} = \{1, 0, 0\}; \quad (38)$$

$$r_{U_{35}} = \{0, 0.9, 0.1\}; r_{U_{41}} = \{1, 0, 0\}; \quad (39)$$

$$r_{U_{42}} = \{1, 0, 0\}; r_{U_{43}} = \{0.3, 0.6, 0.1\}; \quad (40)$$

$$r_{U_{44}} = \{0, 1, 0\}。 \quad (41)$$

准则层隶属度 $R'_{U_1}, R'_{U_2}, R'_{U_3}, R'_{U_4}$ 可由公式(14)计算得到。

(3) 模糊综合评价

一级模糊评价计算即可得准则层 B 所含 4 个准则的模糊隶属度:

$$R_1 = [0.8294, 0.1706, 0]; \quad (42)$$

$$R_2 = [0.1754, 0.7011, 0.1225]; \quad (43)$$

$$R_3 = [0.5863, 0.3812, 0.0315]; \quad (44)$$

$$R_4 = [0.8169, 0.1648, 0.0183]; \quad (45)$$

$$R' = [R'_1, R'_2, R'_3, R'_4]。 \quad (46)$$

二级模糊评价同样可得最终目标层 A 的评价隶属度矩阵:

$$R = [0.62, 0.34, 0.04]。 \quad (47)$$

该模糊隶属度矩阵表明抓取剪切救援属具在实际现场应用过程中有 0.62 的概率属于好, 有 0.34 的概率属于中, 有 0.04 的概率属于差。

3.2 破拆开孔救援属具综合效能评价

破拆开孔救援属具的综合效能评价计算过程同抓取剪切救援属具的综合效能评价计算过程, 在此只给出结果。

3.2.1 指标权重计算

从指标体系中可以看出破拆开孔救援属具与抓取剪切救援属具指标体系中准则层 B 中工作能力和工作效率存在差异, 协作能力和维护能力相同, 故计算工作能力和工作效率指标权重。

$$W_{U_1}^* = [0.092, 0.352, 0.352, 0.204]; \quad (48)$$

$$W_{U_2}^* = [0.289, 0.034, 0.224, 0.091, 0.091, 0.271]。 \quad (49)$$

3.2.2 模糊综合评价

工作能力和工作效率定量指标分值集同评判级的对应如表 3 所示:

表 3 分值表(部分)

评语等级	好	中	差
最大开孔厚度 U_{11}	20	10	0
最小冲击能 U_{12}	250	1 000	2 000
铣挖部件更换时间 U_{24}	20	40	60
钎杆更换时间 U_{25}	10	20	30
破拆开孔复合时间 U_{26}	10	30	60

定量指标隶属度为:

$$r_{U_{11}} = \{1, 0, 0\}; r_{U_{12}} = \{1, 0, 0\}; \quad (50)$$

$$r_{U_{24}} = \{0.1, 0.7, 0.2\}; r_{U_{25}} = \{0.3, 0.7, 0\} \quad (51)$$

$$r_{U_{26}} = \{0.1, 0.8, 0.1\}。 \quad (52)$$

两项准则中定性指标为冲击能调节能力, 其隶属度为:

$$r_{U_{13}} = \{0.3, 0.6, 0.1\}; \quad (53)$$

$$R_1 = [0.822\ 0, 0.157\ 6, 0.020\ 4]; \quad (54)$$

$$R_2 = [0.314\ 6, 0.640\ 1, 0.045\ 3]。 \quad (55)$$

二级模糊评价同样可得最终目标层 A 的评价隶属度矩阵:

$$R = [0.66, 0.31, 0.03]。 \quad (56)$$

该模糊隶属度矩阵表明破拆开孔救援属具在实际现场应用过程中有 0.66 的概率属于好, 有 0.31 的概率属于中, 有 0.03 的概率属于差。

4 总结

本文针对最新研发的两种多功能救援属具: 抓取剪切救援属具、破拆开孔救援属具, 开展了建筑物废墟救援现场应用的综合效能评价研究。从救援现场应用实效出发, 针对属具功能特点和应用场景, 构建了具有针对性的综合效能评价指标体系, 包含工作能力、工作效率、协作能力和维护能力四大方面, 每个方面具有 4~6 个具体评价指标, 并对定量指标的测试方法标准进行了研究; 使用改进的 AHP-熵权-模糊综合评价方法对其进行了应用效能评价, 得到以下结论:

(1) 抓取剪切救援属具、破拆开孔救援属具两种多功能救援属具应用综合效能评价结果表明其在一定的救援场景中分别有 0.62 和 0.66 的概率表现为好, 分别有 0.34 和 0.31 的概率表现为中, 0.04 和 0.03 的概率表现为差。

(2) 从准则层隶属度矩阵中可以看出, 其在工作能力和维护能力方面表现为好的概率均大于 0.81, 表明其工作能力较强, 维护简单; 在工作效率方面表现为中的概率较大, 其原因主要是由于在协作能力方面尚有提升空间。

(3) 通过对比熵权法修正前后的权重矩阵 W_U 、 W_U^* 可知, 使用熵权法修正 AHP 法得到的权重向量更加符合实际应用状况, 使用模糊综合评价方法得到的结果符合经验判断结果。

5 展望

在救援能力和救援效率需求日益增加的背景下, 大型机械辅助开展救援行动的作用更加凸显。本文针对两种新研发的大型多功能救援属具, 在实际救援场景需求和其功能特点的基础上, 首次构建了其综合效能测试评价指标体系, 并开展了其实际应用效能综合评价, 结果表明两种救援属具在一定的救援场景下具有较好的表现, 可以大大提升救援能力和救援效率, 并且具有易维护的特点, 未来具有较好的应用前景。

本文所采用的改进 AHP-熵权-模糊综合评价方法得到的结果与实际经验判断结果相吻合, 表明该方法在装备综合效能评价方面具有一定的适用性, 可为其他装备效能评价提供方法参考。另由于此为新研发的与大型机械相结合的救援属具, 其适用场景和应用评价指标构建, 以及指标

测试标准都还有待进一步研究; 同时在本指标体系中还存在较多的定性指标, 加之指标隶属度矩阵的等级确立使评价结果具有了较大的主观性, 还需探寻更加科学、客观的评价方法。

参考文献:

- [1] 尚红, 张国伟, 胡卫建, 等. 基于大型工程机械的城市地震灾害辅助营救属具技术初探[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(12): 122-128.
- [2] 谢明武, 康敬东, 潘晓军, 等. 工程机械应急救援现状及需求分析[J]. 建设机械技术与管理, 2013, 26(7): 129-131.
- [3] 章崇任. 国外新型应急救援工程机械[J]. 建设机械技术与管理, 2011, 24(7): 83-84.
- [4] ROSE A. The regional economic impact of an earthquake: direct and indirect effects of electricity lifeline disruptions[J]. Journal of Regional Science, 2002, 37(3): 437-458.
- [5] TSUKAGOSHI H, KITAGAWA A, ITO M, et al. Bari - bari - II: jack - up rescue robot with debris opening function [C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, 2009: 2209-2210.
- [6] 辛涛, 王县. 新型高机动应急救援破障车的探索与研发[J]. 中国应急救援, 2015, 39(7): 68.
- [7] 陈金凤, 周峰, 陈利明. 双动力双臂手智能型救援工程机器人技术升级路径[J]. 工程机械与维修, 2015(3): 50-52.
- [8] 王绍腾, 李勇, 吴继霞, 等. 由单一功能到多功能化的应急救援装备发展探讨[J]. 中国标准化, 2018(23): 82-87.
- [9] 孙晓. 起缝支护救援工程属具的结构设计与分析研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [10] 宋伯宸. 钳剪抓一体多功能救援属具的设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [11] 吴佳尉. 开孔取芯一体破拆救援属具的设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [12] 赵京, 陈映, 王春荣. 一种钳剪抓一体多功能工程属具 (201611178749.0) [P]. 2017-05-17.
- [13] 姜涛, 张玉龙, 李士博, 等. 大型多功能救援属具的综合性能评价体系[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 102-108.
- [14] 滕裕昌, 鄂卓茂, 刘长风, 等. 工程机械产品质量的综合评价体系[J]. 中国工程机械学报, 2003, 1(1): 91-95.
- [15] 王璐, 包革军, 王雪峰. 综合评价中一种新的指标选择方法[J]. 数理统计与管理, 2004, 23(1): 72-76.
- [16] HUANG Qilu, WANG Xin, LI Ruijie, et al. Study of the crane comprehensive evaluation index system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 148/149: 923-927.
- [17] 联合国人道主义事务协调办公室现场协调支持部门. IN-SARAG 国际搜索与救援指南[M]. 中国地震局震灾应急救援司, 译. 北京: 科学出版社, 2016: 270-283.
- [18] 全国凿岩机械与气动工具标准化技术委员会. GB/T32799—2016 液压破碎锤[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [19] 全国凿岩机械与气动工具标准化技术委员会. JB/T10844—2008 液压破碎锤[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] 全国凿岩机械与气动工具标准化技术委员会. GB/T5621—2008 凿岩机械与启动工具 性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 刘万祥, 滕文志, 杨玉剑, 等. 基于改进 AHP 和熵权法的新型雷达作战效能评估[J]. 空军预警学院学报, 2020, 34(1): 27-30.
- [22] SAATY T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 1-45.
- [23] 胡卫建, 颜军利, 赵京, 等. 废墟搜救机器人性能综合评价[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(17): 247-254.
- [24] HUANG Wenxin, CHENG Xinwen. Fuzzy evaluation of arable land suitability based on the three scale AHP method [C]//2015 23rd International Conference on Geoinformatics. IEEE, 2015: 1-4.
- [25] 张丽娜. AHP-模糊综合评价法在生态工业园区评价中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

Performance Comprehensive Evaluation of Large Multi – functional Rescue Attachments

ZHANG Xuehua¹, LI Zheng², LI Jing¹ and DU Xiaoxia¹

(1. *National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China*;
2. *Yantai Eddie Precision Machinery Co., Ltd, Yantai 264006, China*)

Abstract: In order to test the application effectiveness of the new multi – functional rescue attachments of excavator in actual complex disaster rescue scenarios in terms of structural design, manufacturing process and functional combination, an improved AHP – entropy – fuzzy comprehensive evaluation method was used to investigate the comprehensive application effectiveness of the attachments in work ability, work efficiency, collaboration ability and maintenance ability. A targeted and scientific and reasonable evaluation index system was constructed and the test methods was researched. The results show that the improved AHP – entropy – fuzzy method can further reduce the influence of human subjective factors, and improve the practicability and effectiveness of the evaluation results; in the actual rescue process, the multi – functional rescue equipment can greatly improve the work ability and rescue efficiency of actual rescue operations, and the application effectiveness evaluation results are basically consistent with expert experience judgments.

Key words: collapsed building rescue of earthquake; multi – functional rescue attachments; improved AHP – entropy – fuzzy comprehensive evaluation method; performance comprehensive evaluation

(上接第 150 页)

Quantitative Evaluation on the Overall Emergency Plans of Beijing – Tianjin – Hebei

LI Jian^{1,2}, XU Yi¹ and LIU Yiwen¹

(1. *School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China*;
2. *College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300372, China*)

Abstract: Emergency plan is important for dealing with emergencies, and strengthening the management of emergency plan has become an important task of the emergency management for government in the new era. In order to improve the quality of emergency plans in Beijing – Tianjin – Hebei region, the PMC – Index model is constructed to evaluate the overall emergency plan in this region, and to provide suggestions for plan optimization. The PMC – Index model is constructed to evaluate the overall emergency plans of the region, and the suggestions for optimizing the plans are provided. This paper selects five representative emergency plans in Beijing – Tianjin – Hebei as research samples. Firstly, based on the mining and analysis of the text of the emergency plans and referring to the existing research on the evaluation index of the emergency plan, the evaluation index system, including 9 first – level variables and 57 second – level variables, is established. Finally, the PMC – Index of each plan is calculated, and each plan is analyzed and optimized. The average PMC – Index of the five overall emergency plans is 7.89, which shows good performance on the whole. And two of them are excellent and three of them are good. The two first – level variables, standard for event classification and grading, recovery and reconstruction, are no scores lost, but there are scores lost in other first – level variables. It can be improved in these aspects according to the second – level variables.

Key words: public emergency; overall emergency plan; policy evaluation; policy modeling consistency index model; Beijing – Tianjin – Hebei