

基于集对联系数和可变模糊集的起重机金属结构安全评价

李爱华,姚 柔,马如宏,董晓慧

(盐城工学院 机械工程学院,江苏 盐城 224051)

摘要:针对起重机金属结构安全评价时确定相对隶属度的不足和最大隶属度原则不适用的问题,提出了以组合赋权法和可变模糊集理论相结合的评价方法。该方法将评价指标的评分结果转化为评价向量,依据可变模糊集理论中的相对差异度函数确定相邻两级指标的相对差异度;利用层次分析法和信息熵法分别确定起重机金属结构的主观和客观权重,运用集对联系数融合主客观权重;由组合权重和相对差异度矩阵确定综合相对隶属度,并通过变换组合参数进行综合评价,同时经计算得到评价对象的安全等级;最后,以某造船门式起重机金属结构变形缺陷的评价为例,验证了该模型的合理性和可行性。

关键词:起重机;金属结构;安全评价;可变模糊集;集对联系数

中图分类号:TH21

文献标识码:A

文章编号:1671-5322(2018)04-0011-07

起重机广泛运用于港口码头、工矿企业、铁路运输、农场林区等场所,是现代生产生活中不可缺少的机械设备^[1]。起重机金属结构通常占整机重量的60%~70%,它不仅对整机起着重要的支撑作用,还往往决定着整台起重机的使用寿命,因此起重机金属结构缺陷对安全生产和国民经济具有较大的影响。据统计,起重机金属结构故障虽然仅约占事故总数的4.6%,但是造成的后果往往就是机毁人亡的恶性事故^[2]。因此,对起重机金属结构进行安全评估对减少人员伤亡和经济损失具有重要意义。

近年来已有学者对起重机金属结构安全评价做了不少研究。胡静波等^[1]采用模糊层次综合分析法,对桥门起重机的金属结构进行了安全评价;徐格宁等^[3]利用改进层次分析法,对履带起重机起升机构进行了安全评价;赵章焰等^[4]研究了基于模糊层次综合评判法的造船起重机金属结构安全性评价方法;李波^[5]应用人工神经网络建立了门式起重机的安全评价模型;舒文杰等^[6]利用SVM建立了桥式起重机的金属结构安全评价系统;王卫辉等^[7]研究了一种基于模糊神经网络的桥式起重机安全评估系统;黄凯等^[8]采用模糊

综合评价法对起重机金属结构进行了研究,并运用层次分析法(AHP)确定指标权重,根据最大隶属度原则确定安全等级,该方法有两个不足:一是最大隶属度原则可能会产生误判,二是单一的层次分析方法未能兼顾指标的客观权重。鉴于此,本文利用集对联系数融合主客观权重,结合可变模糊集理论,克服模糊综合评价法在计算隶属度、权重,以及确定评价等级方面的不足,建立起起重机金属结构的安全评价模型。

1 基于集对联系数的组合权重

1.1 指标的评价矩阵和评价向量

假设评价等级为 $h(h=1,2,\dots,c)$,根据专家打分得到 m 个评价指标对不同等级状态的评价矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1c} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

专家评价结果计算公式如下:

$$r_{ih} = \frac{n}{N} \quad i = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, c \quad (2)$$

式中: r_{ih} 为专家评价结果, n 为评判指标 i 为 h 级的专家数, N 为参加评估的专家总人数。

传统的专家打分确定评价指标技术状态的方法,主观因素较大,对评价标准不能充分定量利用。为了减少人为不利因素的影响,利用可变模糊集描述评价指标与评价标准的关系,确定综合隶属度,再取每个等级指标取值范围的中值构成向量 \mathbf{P} , 则去模糊化后得到评价指标的评价向量 \mathbf{S} 。

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}_{m \times c} \mathbf{P}^T \quad (3)$$

1.2 评价指标组合权重的确定

权重反映了评价指标对于评价对象的重要程度,各个评价指标都需要合理地分配权重。主观赋权法取决于专家的经验 and 知识,主观性强;客观赋权法根据评价指标的客观信息,通过数理计算得到权重,客观性强,但是没有考虑专家经验^[9];主客观综合赋权法,可以减少不同方法得到权重之间的差异,提高评价结果的合理性。

1.2.1 基于层次分析法的权重确定

层次分析法是美国运筹学家 saaty 于 1978 年提出的对复杂问题作出决策的方法^[10]。在实际综合评价过程中,评价指标对系统的影响通常是不同的,需要对评价指标的重要程度作出正确的评估。各指标的权重常用层次分析法确定,层次分析法确定权重的一般步骤为:建立判断矩阵、重要性排序和一致性检验^[11]。

1.2.2 基于信息熵的权重确定

熵用来表征事物出现的不确定性,申农(C. E. Shannon)最先将热力学中熵的概念引入信息论^[12]。如果评价对象某一指标的熵值越小,则其不确定性越小,指标所具有的信息量越大,其在评价过程中所起的作用也越大,指标的权重也就越大;反之,指标的权重就越小。假设评价对象有 m 个评价指标,每个评价指标又有 c 种状态(评价等级),则第 j 个评价指标的信息熵 H_j 为^[13]:

$$H_j = -n \sum_{j=1}^c (p_{jn} \ln p_{jn}) \quad (4)$$

式中: p_{jn} 为各指标处于不同等级的概率; n 为系数, $n = 1/\ln c$ 。当 $p_{jn} = 0$ 时,为了使 $p_{jn} \ln p_{jn}$ 有意义,此时令 $p_{jn} \ln p_{jn} = 0$ 。

设 $v_j = 1 - H_j$, 则第 j 个指标的熵权计算公式为:

$$w_j = \frac{v_j}{\sum_{j=1}^m v_j} \quad (5)$$

由于起重机变形评价指标的评价矩阵 \mathbf{R} 是根据专家打分获得的,也就是 p_{jn} 是已知的,因此根据式(4)、式(5)可以求得客观权重 w_j 。

1.2.3 基于集对联系数的组合赋权^[14]

假设通过层次分析法获得主观权重 $w(1) = [w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1m}]$, 通过信息熵法获得客观权重 $w(2) = [w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2m}]$, 由于主观权重和客观权重的向量分量往往是不同的,将获得的两种权重分量按大小排序,写成区间形式,记第 j 个指标的权重区间数

$$w_j = [w_j^-, w_j^+] \quad (6)$$

式中: w_j^- 为主客观权重分量中较小的分量, w_j^+ 为主客观权重分量中较大的分量。

根据上述第 k 个指标的权重区间数,可得联系数形式的权重为

$$w_j = \frac{w_j^- + w_j^+}{2} + \frac{w_j^+ - w_j^-}{2} i \quad (7)$$

则第 k 个指标组合权重联系数的模

$$r_{w_j} = \sqrt{\left(\frac{w_j^- + w_j^+}{2}\right)^2 + \left(\frac{w_j^+ - w_j^-}{2}\right)^2} \quad (8)$$

将 r_{w_j} 归一化处理,得组合权重

$$w_j^* = r_{w_j} / \sum_{j=1}^m r_{w_j} \quad (9)$$

2 可变模糊集评价方法

根据陈守煜教授可变模糊集理论中对立统一原理、质量互变与否定之否定综合定理、差异度函数等概念^[15],可变模糊评价模型在起重机金属结构变形安全评价上的具体步骤如下^[16]:

(1)构建评价指标体系和评价标准。

(2)分别利用 AHP 法和信息熵法确定起重机金属结构变形评价指标的主客观权重,利用集对分析联系数融合主客观权重,确定指标的权重向量 $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

(3)在起重机金属结构变形安全评价中,将待评价对象的 m 个指标 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 根据 c 个安全等级的评价准则建立标准值区间矩阵

$$\mathbf{Y} = [a_{ih}, b_{ih}] \quad i = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, c \quad (10)$$

式中 a_{ih}, b_{ih} 分别为指标 x_i 在级别 h 标准值区间的上、下界。

(4)根据指标 X_i 的实际情况,确定级别 h 的点值映射矩阵 \mathbf{K} 。由文献[15]有

$$k_{ih} = \begin{cases} a_{i1}, & h = 1 \\ (a_{ih} + b_{ih})/2, & h = 2, 3 \dots c - 1 \\ b_{ic}, & h = c \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

式中 k_{ih} 为差异度为 1 的评价指标值。

结合标准值区间矩阵 Y 和式(11),建立点值映射矩阵

$$K = (k_{ih}) \quad (12)$$

(5)建立评价对象相对差异度为 1、0 的点值映射矩阵 T 。假设评价对象的指标值 x_i 落入映射矩阵 K 相邻两级 (h 与 $h + 1$) 的区间 $[k_{ih}, k_{i(h+1)}]$ 内, $h = 1, 2, 3, \dots, c - 1$, 由于区间 $[k_{ih}, k_{i(h+1)}]$ 内存在相对差异度为 0 的渐变式质变点 b_{ih} , 将 $b_{ih} (h = 1, 2, 3, \dots, c - 1)$ 插入矩阵 K 的元素 k_{ih} 与 $k_{i(h+1)}$ 之间, 得到评价对象相对差异度为 1、0 的点值映射矩阵

$$T = (k_{i1}, b_{i1}, k_{i2}, b_{i2}, \dots, k_{i(c-1)}, b_{i(c-1)}, k_{ic}) \quad i = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, c \quad (13)$$

(6)建立相对差异度矩阵。指标值 x_i 落入区间 $[k_{ih}, k_{i(h+1)}]$ 时指标 i 特征值相对差异度 $d_{ih}(u)$ 计算公式如下:

$$d_{ih}(u) = \begin{cases} \frac{b_{ih} - x_i}{b_{ih} - k_{ih}}, & x_i \in [k_{ih}, b_{ih}] \\ -\frac{b_{ih} - x_i}{b_{ih} - k_{i(h+1)}}, & x_i \in [b_{ih}, k_{i(h+1)}] \end{cases} \quad (14)$$

$$d_{i(h+1)}(u) = -d_{ih}(u) \quad (15)$$

根据物理概念,小于 h 级、大于 $h + 1$ 级指标 i 的相对差异度都为 -1 , 即

$$\begin{cases} d_{i < h}(u) = -1 \\ d_{i > (h+1)}(u) = -1 \end{cases} \quad (16)$$

根据式(14)~式(16),得到差异度矩阵

$$D = (d_{ih}(u))_{m \times c} \quad (17)$$

(7)根据评价指标的权重和相对差异度矩阵,计算综合相对隶属度向量 $v = (v_1(u), v_2(u), \dots, v_h(u))$ 。

$$v_h(u) = \left\{ 1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [w_i(1 - d_{ih}(u))]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i(1 + d_{ih}(u))]^p} \right]^{\frac{a}{p}} \right\}^{-1} \quad (18)$$

式中: p 为距离参数, $p = 1$ 时是海明距离, $p = 2$ 时是欧氏距离; a 为优化准则参数, $a = 1$ 为最小一乘方准则, $a = 2$ 为最小二乘方准则。 p 、 a 称为可变模型参数, 显然它们的组合情况有

4 种。

(8)对综合隶属度向量 v 作归一化处理, 得到最终的归一化综合隶属度向量 v' 。其中

$$v^h = \frac{v_h(u)}{\sum_{h=1}^c v_h(u)}, h = 1, 2, \dots, c \quad (19)$$

针对模糊概念在分级条件下最大隶属度原则不适用的原则,采用级别特征值公式计算待评价对象的安全等级特征值。

$$H(u) = \sum_{h=1}^c (v'_h \times h) \quad h = 1, 2, \dots, c \quad (20)$$

式中: v'_h 为归一化相对隶属度向量, h 为标准等级向量, $H(u)$ 为评价对象的安全等级特征值。

(9)根据可变模糊集理论关于变换模型中参数的特性,改变参数 a 和 p , 取评价对象安全等级特征值的平均值,根据等级判别准则,最终确定评价对象的安全等级。等级判别准则公式为^[17]:

$$\begin{cases} 1 < H(u) \leq 1.5 & \text{属于 1 级} \\ h - 0.5 < H(u) \leq h + 0.5 & \text{属于 } h \text{ 级} \\ h = 2, 3, \dots, c - 1 \\ c - 0.5 < H(u) \leq c & \text{属于 } c \text{ 级} \end{cases} \quad (21)$$

3 实例分析

3.1 评价对象和评价指标体系

起重机金属结构变形不但影响其使用性能,还会危及整台起重机的安全。起重机主梁发生下挠,起重小车由跨中向端部行驶会产生溜车现象,既降低了小车的使用寿命,又会造成运行机构的损坏;小车由端部向跨中运行,受重力作用,会出现溜车自行滑移的现象,给吊钩定位带来困难。如果主梁发生水平弯曲,则可能发生小车轮夹轨和脱轨事故。金属结构变形是起重机整体结构发生破坏的征兆,对其进行安全评价,掌握金属结构技术状态,可以预防因结构变形造成的安全事故。基于此,应用可变集理论对起重机金属结构变形进行安全评价。

变形对起重机金属结构构件的影响需要考虑变形的位 置、性质、数量、应力状态等因素,通常定量的检测和变形计算非常复杂,一般根据专家经验评定。为了与文献[8]起重机金属结构变形安全评估方法进行比较,采用文献[8]中的评价指标体系对某在役造船门式起重机结构变形缺陷进行安全评价,将该起重机结构变形评价系统分为

主梁、柔性腿、刚性腿 3 个一级子系统,各子系统又细分为若干反映其变形的主要指标。具体评价指标如图 1 所示。

3.2 评价标准

根据文献[8],起重机金属结构的安全等级可以划分为 5 级,如表 1 所示。其中 1 级为优,变形对造船起重机的安全没有影响;2 级为良,变形对造船起重机的安全有一定的影响;3 级为中,变形对造船起重机的安全有较大影响;4 级为差,变形对造船起重机的安全有很大影响;5 级为不合格,变形对造船起重机的安全影响极大。

3.3 评价指标和评分向量

由 5 名评价人员按照表 1 对某造船门式起重机的变形评价指标进行打分,各项指标的打分结果见表 2^[8]。

根据式(3),得到评价指标的分值向量

$$S = (0.66, 1.82, 0.78, 0.48, 0.38, 0.54, 0.48, 0.2, 0.5)$$

3.4 基于集对联系数组合权重的确定

根据 AHP 法、信息熵法获得造船门式起重机 9 项金属结构变形评价指标的主观权重 w_1 、观权重 w_2 ,其中主观权重引自文献[8]。运用集对联系数组合赋权方法计算各评价指标的权重如表 3 所示。

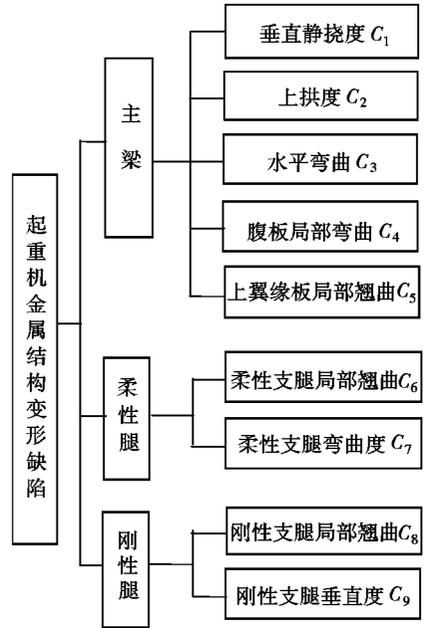


图 1 造船门式起重机金属结构变形评价指标体系
Fig.1 the evaluation index system for metal structure deformation of shipbuilding gantry crane

表 1 造船门式起重机金属结构变形评价标准

Table 1 Assessment criteria for metal structure deformation of shipbuilding gantry crane

评价指标	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
垂直静挠度 C_1	$f/[f] \leq 0.4$	$0.4 < f/[f] \leq 0.6$	$0.6 < f/[f] \leq 0.8$	$0.8 < f/[f] \leq 1.0$	$f/[f] > 1.0$
上拱度 C_2	$1.8 \leq g/[g] < 2$	$1.6 \leq g/[g] < 1.8$	$1.4 \leq g/[g] < 1.6$	$1.0 \leq g/[g] < 1.4$	$g/[g] < 1.0$
水平弯曲 C_3	$w/[w] \leq 0.4$	$0.4 < w/[w] \leq 0.6$	$0.6 < w/[w] \leq 0.8$	$0.8 < w/[w] \leq 1.0$	$w/[w] > 1.0$
腹板局部弯曲 C_4	$f_q/[f_q] \leq 0.4$	$0.4 < f_q/[f_q] \leq 0.6$	$0.6 < f_q/[f_q] \leq 0.8$	$0.8 < f_q/[f_q] \leq 1.0$	$f_q/[f_q] > 1.0$
上翼缘板局部翘曲 C_5	$y_q/[y_q] \leq 0.4$	$0.4 < y_q/[y_q] \leq 0.6$	$0.6 < y_q/[y_q] \leq 0.8$	$0.8 < y_q/[y_q] \leq 1.0$	$y_q/[y_q] > 1.0$
柔性支腿局部翘曲 C_6	$z_r/[z_r] \leq 0.4$	$0.4 < z_r/[z_r] \leq 0.6$	$0.6 < z_r/[z_r] \leq 0.8$	$0.8 < z_r/[z_r] \leq 1.0$	$z_r/[z_r] > 1.0$
柔性支腿弯曲度 C_7	$z_w/[z_w] \leq 0.4$	$0.4 < z_w/[z_w] \leq 0.6$	$0.6 < z_w/[z_w] \leq 0.8$	$0.8 < z_w/[z_w] \leq 1.0$	$z_w/[z_w] > 1.0$
刚性支腿局部翘曲 C_8	$z_g/[z_g] \leq 0.4$	$0.4 < z_g/[z_g] \leq 0.6$	$0.6 < z_g/[z_g] \leq 0.8$	$0.8 < z_g/[z_g] \leq 1.0$	$z_g/[z_g] > 1.0$
刚性支腿垂直度 C_9	$z_c/[z_c] \leq 0.4$	$0.4 < z_c/[z_c] \leq 0.6$	$0.6 < z_c/[z_c] \leq 0.8$	$0.8 < z_c/[z_c] \leq 1.0$	$z_c/[z_c] > 1.0$

表2 评价指标评分结果
Table 2 Marks of elevation indexes

指标	1级	2级	3级	4级	5级
C_1	0	0.2	0.8	0	0
C_2	0.6	0.4	0	0	0
C_3	0	0	0.6	0.4	0
C_4	0.2	0.6	0.2	0	0
C_5	0.4	0.6	0	0	0
C_6	0	0.8	0.2	0	0
C_7	0.2	0.6	0.2	0	0
C_8	1	0	0	0	0
C_9	0	1	0	0	0

3.5 可变模糊集相对综合隶属度向量的计算

根据上面起重机金属结构变形可变模糊集评价方法,将表1各级指标标准区间表示为区间矩阵。

$$Y = \begin{bmatrix} \leq 0.4 & [0.4,0.6] & [0.6,0.8] & [0.8,1.0] & \geq 1.0 \\ [2,1.8] & [1.8,1.6] & [1.6,1.4] & [1.4,1.0] & \leq 1.0 \\ \leq 0.4 & [0.4,0.6] & [0.6,0.8] & [0.8,1.0] & \geq 1.0 \\ \leq 0.4 & [0.4,0.6] & [0.6,0.8] & [0.8,1.0] & \geq 1.0 \\ \leq 0.4 & [0.4,0.6] & [0.6,0.8] & [0.8,1.0] & \geq 1.0 \\ \leq 0.4 & [0.4,0.6] & [0.6,0.8] & [0.8,1.0] & \geq 1.0 \\ \leq 0.4 & [0.4,0.6] & [0.6,0.8] & [0.8,1.0] & \geq 1.0 \\ \leq 0.4 & [0.4,0.6] & [0.6,0.8] & [0.8,1.0] & \geq 1.0 \\ \leq 0.4 & [0.4,0.6] & [0.6,0.8] & [0.8,1.0] & \geq 1.0 \end{bmatrix}$$

表3 评价指标权重
Table 3 Weights of assessment indexes

评价指标	w_1	w_2	权重区间数	权重联系数	r_{w_k}	w_k^*
C_1	0.154	0.116	[0.116,0.154]	0.135 + 0.019i	0.136	0.130
C_2	0.125	0.098	[0.098,0.125]	0.112 + 0.014i	0.112	0.107
C_3	0.098	0.098	[0.098,0.098]	0.098 + 0i	0.098	0.094
C_4	0.071	0.069	[0.069,0.071]	0.07 + 0.001i	0.070	0.067
C_5	0.042	0.098	[0.042,0.098]	0.07 + 0.028i	0.075	0.072
C_6	0.144	0.116	[0.144,0.116]	0.13 + 0.014i	0.131	0.125
C_7	0.216	0.069	[0.069,0.216]	0.143 + 0.074i	0.160	0.153
C_8	0.038	0.168	[0.038,0.168]	0.103 + 0.065i	0.122	0.116
C_9	0.113	0.168	[0.113,0.168]	0.141 + 0.028i	0.143	0.137

根据Y矩阵和式(11)、式(12),得到差异度为1的点值映射矩阵

$$K = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 1 \\ 2 & 1.7 & 1.5 & 1.2 & 1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.9 & 1 \end{bmatrix}$$

根据矩阵Y和K得到差异度为1,0的点值映射矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.45 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 0.95 & 1 \\ 2 & 1.8 & 1.7 & 1.6 & 1.5 & 1.4 & 1.2 & 1.1 & 1 \\ 0.4 & 0.45 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 0.95 & 1 \\ 0.4 & 0.45 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 0.95 & 1 \\ 0.4 & 0.45 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 0.95 & 1 \\ 0.4 & 0.45 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 0.95 & 1 \\ 0.4 & 0.45 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 0.95 & 1 \\ 0.4 & 0.45 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 0.95 & 1 \\ 0.4 & 0.45 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 0.95 & 1 \end{bmatrix}$$

根据指标的评分向量S、矩阵T和式(14)~式(17),得到相对差异度矩阵

$$D_{ih}(u) = \begin{bmatrix} -1 & -0.6 & 0.6 & -1 & -1 \\ 0.1 & -0.1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0.2 & -0.2 & -1 \\ -0.6 & 0.6 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 0.6 & -0.6 & -1 & -1 \\ -0.6 & 0.6 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} 1 < H(u) \leq 1.5 & \text{优,属于1级} \\ 1.5 < H(u) \leq 2.5 & \text{良,属于2级} \\ 2.5 < H(u) \leq 3.5 & \text{中,属于3级} \\ 3.5 < H(u) \leq 4.5 & \text{差,属于4级} \\ 4.5 < H(u) \leq 5 & \text{不合格,属于5级} \end{cases} \quad (22)$$

根据表(1)的评价标准和式(21),建立等级判别准则如下:

根据式(18)~式(19),以及表3评价指标的组合权重,得到4种模型组合下的隶属度向量,再由式(20)得到该造船门式起重机金属结构变形的等级特征值,其加权平均值为1.97,根据式(22)的等级判别准则,判定该起重机的变形等级为2级,具体评价结果见表4。

表 4 基于可变模糊集的安全性评价结果

Table 4 Results of safety grades based on variable fuzzy sets

模型组合参数	相对隶属度向量	级别特征值	H 均值	评价等级
$a = 1, p = 1$	(0.2910, 0.4865, 0.1851, 0.0374, 0)	1.97		
$a = 1, p = 2$	(0.2790, 0.4111, 0.2299, 0.0800, 0)	2.11		
$a = 2, p = 1$	(0.2160, 0.7083, 0.0735, 0.0023, 0)	1.86		
$a = 2, p = 2$	(0.2472, 0.5842, 0.1551, 0.0135, 0)	1.93	1.97	2级

3.6 结果分析

由各评价指标的分值向量 $S = (0.66, 1.82, 0.78, 0.48, 0.38, 0.54, 0.48, 0.2, 0.5)$, 以及表1的评价标准,可以看出,该起重机的大部分指标在1级和2级之间,指标 C_1 垂直静挠度和 C_3 水平弯曲处于3级的状态。根据可变模糊集,判定该起重机变形缺陷对安全的影响等级为2级,与实际状况基本相符。

为了将不同方法的评价结果进行比较分析,将文中所提方法与文献[8]的评价结果列于表5。由表5可知,这两种方法得到结果是一致的,都是2级。文献[8]采用的是模糊层次分析法,运用最大隶属度原则确定影响等级,但是安全等级评价中最大隶属度原则并不适用^[18],因此文献[8]的结果虽然正确,但是运用的理论方法存在缺陷。可变模糊安全评价模型根据平均等级特征值和等级判别准则,确定起重机变形对安全的影响等级则更加合理,此外文中所提方法充分利用了评价指标的分值与评价标准等级之间的关系,确定各指标的隶属度信息,更有利于对起重机的变形状况作出客观、合理的描述与分析。

表 5 不同方法评价结果的比较

Table 5 Comparisons of the evaluation results of different methods

评价方法	评价等级
集对联系数组合赋权和可变集理论	2级
模糊层次分析法 ^[8]	2级

4 结论

为定量评价起重机金属结构缺陷对起重机安全性的影响,根据评价指标体系和评价标准,提出了基于集对联系数组合赋权和可变模糊集的起重机金属结构缺陷评价模型。模型将起重机金属结构评价指标的评分结果转化成评价指标向量,根据可变模糊理论分析指标向量与评价标准等级之间的差异度,充分利用指标值和评价标准所提供的信息,克服了模糊层次分析法最大隶属度原则确定评价等级的不足;针对指标权重确定方式单一的不足,模型运用集对联系数融合层次分析法和信息熵方法计算主客观权重,获得组合权重,从而兼顾了专家经验和客观数据,使得评价结果更加合理。

参考文献:

- [1] 胡静波,庆光蔚,王会方,等. 基于模糊层次综合分析法的桥门式起重机分级评价[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(1):187-192.
- [2] 孙启云. 起重机事故分析及预防措施[J]. 四川水力发电,2012,31(s1):149-152.
- [3] 徐格宁,李鹏. 基于3标度层次分析法的履带起重机起升机构安全工作状态综合评价[J]. 安全与环境学报,2013,13(4):240-243.
- [4] 赵章焰,刘祥伟,苏力,等. 基于FAHP法的造船起重机结构安全性评价研究[J]. 港口装卸,2012(3):12-15.
- [5] 李波,陈定方,陶德馨,等. 基于人工神经网络的起重机安全评价[J]. 起重运输机械,2006(9):52-55.
- [6] 舒文杰,徐桂芳,魏国前,等. SVM的起重机金属结构安全评估研究[J]. 机械设计与制造,2014(12):269-272.
- [7] 王卫辉,孟小胴,强宝民,等. 桥式起重机安全评估指标体系研究和系统设计[J]. 中国安全生产科学技术,2013,9(9):155-159.
- [8] 黄凯,李淑娟,李向东. 基于模糊层次分析法的造船门式起重机变形结构缺陷安全评估[J]. 起重运输机械,2012(12):51-55.
- [9] 黄必清,何焱,王婷艳. 基于模糊综合评价的海上直驱风电机组运行状态评估[J]. 清华大学学报(自然科学版),2015,55(5):543-549.
- [10] 陈可嘉,金炼. 航空公司飞行安全灰色区间层次评价[J]. 中国安全科学学报,2015,25(8):146-151.
- [11] 郑绍羽,李素芹. 混合型指标基坑支护方案优选的改进TOPSIS法[J]. 中国安全科学学报,2014,24(5):98-103.
- [12] 李玲玲,刘敬杰,凌跃胜,等. 物元理论和证据理论相结合的电能质量综合评估[J]. 电工技术学报,2015,30(12):383-391.
- [13] 郑一峰,李龙,房玮,等. 基于信息熵-未确知测度理论的公路桥梁耐久性评价[J]. 东北大学学报(自然科学版),2014,35(8):1206-1210.
- [14] 赵玉铃,张廉. 基于联系数的组合赋权电能质量评估[J]. 数学的实践与认识,2013,43(23):99-107.
- [15] 陈守煜,王子茹. 基于对立统一与质量互变定理的水资源系统可变模糊评价新方法[J]. 水利学报,2011,42(3):253-261.
- [16] 邹强,周建中,周超,等. 基于可变模糊集理论的洪水灾害风险分析[J]. 农业工程学报,2012,28(5):126-132.
- [17] 陈守煜,薛志春,李敏,等. 基于可变集的围岩质量等级识别原理与判别方法[J]. 黑龙江大学学报,2014,5(4):1-7.
- [18] 李亚兰,陈志新,王佳运. 多级模糊模式识别模型在地质环境质量评价中的应用[J]. 地球科学与环境学报,2004,26(4):90-93.

Safety Assessment of Crane Metal Structure Based on Set Couplet Coefficient and Variable Fuzzy Sets

LI Aihua, YAO Rou, MA Ruhong, DONG Xiaohui

(College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

Abstract: In view of the insufficiency of determining relative membership degree and the inapplicability of the principle of maximum membership degree in safety evaluation of crane metal structure, an evaluation method based on combination weighting method and variable fuzzy set theory is proposed. The method transforms the evaluation result of evaluation index into evaluation vector, and determines the relative difference degree of two adjacent indexes according to the relative difference function of variable fuzzy set theory. The subjective and objective weights of crane metal structure are determined by analytic hierarchy process and information entropy method, and the subjective and objective weights are fused by set couplet coefficient. The comprehensive relative membership degree is determined by the combination weight and relative difference matrix, and the comprehensive evaluation is carried out by transforming the combination parameters. At the same time, the safety grade of the evaluation object is calculated. Finally, the rationality and feasibility of the model are verified by an example of evaluating the deformation defects of metal structure of a shipbuilding gantry crane.

Keywords: crane; metal structure; safety assessment; variable fuzzy sets; set couplet coefficient

(责任编辑:李华云)