



基于模糊层次分析的相控阵无损检测仪器 可靠性分配方法

江境宏, 刘桂雄

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 层次分析法一定程度受到主观因素影响, 该文综合层次分析法与三角模糊数方法提出一种基于模糊层次分析的相控阵无损检测仪器可靠性分配方法。通过引入模糊参数降低可靠性分配决策过程的主观性, 以熵最小原则作为参数选择依据, 使方法能够更充分、客观、综合地反映专家意见。应用表明, 相控阵无损检测仪器主机可靠性分配结果有效、可行, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 可靠性分配; 层次分析法; 三角模糊数; 无损检测仪器

中图分类号: TH39

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)01-0014-05

Reliability allocation method of phased array nondestructive testing instruments based on fuzzy analytic hierarchy process

JIANG Jinghong, LIU Guixiong

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: As the analytic hierarchy process (AHP) is affected by subjective factors, a new method for reliability allocation of phased array nondestructive testing instruments based on fuzzy analytic hierarchy process is proposed, using AHP and triangular fuzzy numbers. The subjectivity of reliability allocation decision process is reduced by introducing fuzzy parameters. The parameters are selected based on the principle of minimum entropy, which makes the method reflect expert opinions more fully, objectively and comprehensively. The application results show that the reliability allocation result of the phased array nondestructive testing instrument motherboard is effective and feasible, and has engineering application value.

Keywords: reliability allocation; analytic hierarchy process (AHP); triangular fuzzy number; nondestructive testing instrument

0 引言

相控阵无损检测仪器可靠性分配是仪器可靠性

设计的关键环节, 通过在可靠性指标约束下将可靠性量值分配到仪器各个单元。当前仪器可靠性分配

收稿日期: 2018-03-23; 收到修改稿日期: 2018-05-04

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项 (2013YQ230575)

作者简介: 江境宏 (1992-), 男, 广东揭阳市人, 硕士研究生, 专业方向为仪器可靠性分析。

方法主要包括 AGREE 分配法^[1-2]、层次分析法^[3-4]、模糊评价可靠性分配法^[5-6]、智能算法可靠性分配法^[7-8]等。其中, AGREE 分配法通过考虑仪器各单元复杂性、重要性进行可靠性分配, 但有时仪器各单元的重要度因子确定困难; 层次分析法通过建立仪器层次结构模型, 由专家评判构造判断矩阵进行可靠性分配, 方便实用, 但判断矩阵主观因素影响较大; 模糊评价分配法通过利用因素集、评价集、评判矩阵求解模糊子集及加权秩进行可靠性分配, 但计算过程复杂; 智能算法分配法通过利用数学方法辅助计算进行可靠性分配, 全局搜索能力好, 但模型求解过程复杂。鉴于相控阵无损检测仪器主机可靠性分配环节仅需衡量各组成模块层次, 而层次分析法能定性、定量考察影响可靠性分配因素, 模糊评价分配方法能减低分配结果的主观性, 本文综合三角模糊数与层次分析法提出一种基于模糊层次分析的可靠性分配方法, 并且以小型 256 超声相控阵无损检测仪器主机为对象实现可靠性分配, 验证该方法的有效性与其可行性。

1 相控阵无损检测仪器主机模块划分与可靠性指标分析

小型 256 超声相控阵无损检测仪器是具有数字化前端的高档相控阵检测系统, 兼备线扫、扇扫、S 扫、3D 实时成像功能, 图 1 为小型 256 超声相控阵无损检测仪器整体实物图。



图 1 小型 256 超声相控阵无损检测仪器整体实物图

仪器主机部分主要分为发射模块、接收信号调理模块、回波信号处理模块等模块, 其中发射模块主要功能是形成高压脉冲, 控制发射时序和发射信号放大; 接收信号调理模块主要功能是通道选择与

信号放大; 回波信号处理模块主要功能是完成波束合成及信号处理。每个模块失效都会产生系统故障, 故这些模块在结构上属于串联形式, 图 2 为小型 256 超声相控阵无损检测仪器主机可靠性框图。

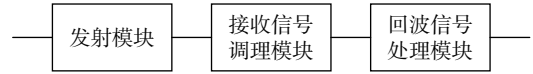


图 2 小型 256 超声相控阵无损检测仪器主机可靠性框图

设计要求中给出小型 256 超声相控阵无损检测仪器主机的平均故障间隔时间 $MTBF \geq 1\ 500\ h$, 则等效失效率 $\lambda = 1/MTBF \leq 6.667 \times 10^{-4}/h$, 若取余量系数 $a=0.2$, 那么仪器主机目标失效率 $\lambda_s = \lambda/(1+a) = 5.556 \times 10^{-4}/h$ 。

2 基于模糊层次分析仪器主机可靠性分配方法

基于模糊层次分析仪器主机可靠性分配方法思路是建立仪器主机模糊层次分析结构模型简图, 根据专家意见给出模糊评分, 再通过设定隶属度 α 、乐观指数 σ 进行模糊转换, 利用熵最小原则确立 α 、 σ 取值, 从而求出各模块可靠性指标权重。图 3 为基于模糊层次分析的仪器主机可靠性分配方法流程图。

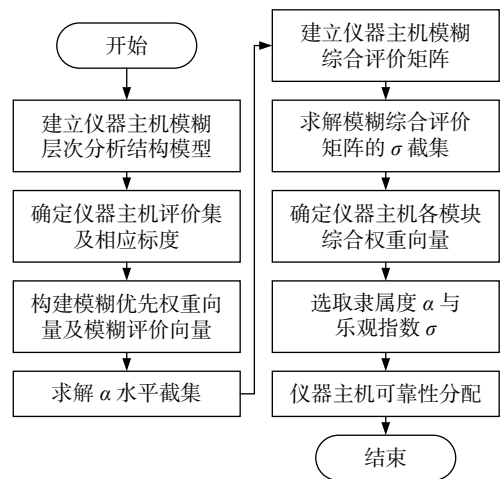


图 3 基于模糊层次分析的仪器主机可靠性分配方法流程图

2.1 建立仪器主机模糊层次分析结构模型

图 4 为超声相控阵无损检测仪器主机模糊层次分析结构模型简图。仪器主机可靠性影响因素包含于目标层、准则层、对象层等层次, 目标层有仪器主机目标失效率 λ_s , 准则层包含技术水平、复杂度、重要性、工作环境等影响仪器主机可靠性因素, 对象层则包括仪器主机的发射模块、接收信号调理模

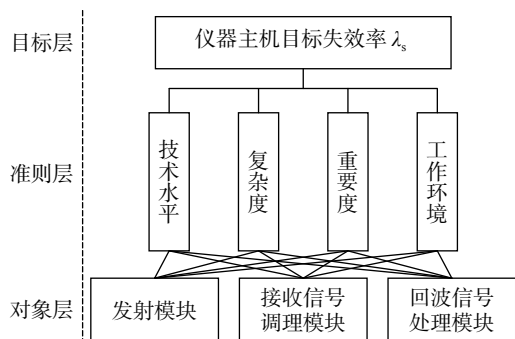


图4 仪器主机模糊层次分析结构模型简图

块、回波信号处理模块。

2.2 确定仪器主机评价集及相应标度

仪器主机评价集是针对仪器主机模糊性给出有限个分级评价的集合,各个分级评价的模糊评分构成相应标度,本文采用5级评价,各评价的模糊评分分别为 $\bar{1}$ 、 $\bar{3}$ 、 $\bar{5}$ 、 $\bar{7}$ 、 $\bar{9}$ 。为便于量化评价,需分别从准则层相对于目标层、对象层相对于准则层的评价集与标度两个方面确定仪器主机评价集及相应标度。

对于准则层技术水平、复杂度、重要度、工作环境等影响因素相对于目标层模糊优先权重,以{不重要,一般重要,较重要,重要,非常重要}为评价集,相应评价标度为 $\{\bar{1}, \bar{3}, \bar{5}, \bar{7}, \bar{9}\}$ 。

对于对象层各模块相对于准则层技术水平、复杂度、重要度、工作环境等影响因素模糊评价,分别采用{不成熟,一般成熟,较成熟,成熟,非常成熟}、{简单,一般复杂,较复杂,复杂,非常复杂}、{不重要,一般重要,较重要,重要,非常重要}、{恶劣,较恶劣,中等,较好,好}作为评价集。对象层模块相对于准则层技术水平、复杂度、重要度、工作环境等影响因素模糊评价标度原则是:技术水平成熟模块应分配较低失效率、复杂模块应分配较高失效率、重要模块应分配较低失效率、工作环境恶劣模块应分配较高失效率,并且可得出表1所示的仪器主机技术水平、复杂度、重要度、工作环境等影响因素评价集及其相应标度。

2.3 模糊优先权重向量及模糊评价向量

确定完仪器主机评价集及相应标度,需构建准则层技术水平、复杂度、重要度、工作环境等影响因素模糊优先权重向量。可由专家给出影响因素重要程度模糊评价,根据表1进行标度转换得出模糊优先权重向量,记为

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1 \quad \tilde{w}_2 \quad \tilde{w}_3 \quad \tilde{w}_4]^T \quad (1)$$

其中 $\tilde{w}_j(j=1, 2, 3, 4)$ 表示第 j 个影响因素模糊优先权

表1 仪器主机影响因素评价集及其相应标度

标度	影响因素			
	技术水平	复杂度	重要度	工作环境
$\bar{1}$	非常成熟	简单	非常重要	好
$\bar{3}$	成熟	一般复杂	重要	较好
$\bar{5}$	较成熟	较复杂	较重要	中等
$\bar{7}$	一般成熟	复杂	一般重要	较恶劣
$\bar{9}$	不成熟	非常复杂	不重要	恶劣

重,如 \tilde{w}_1 表示技术水平重要程度模糊优先权重。

同样,由专家依次相对于第 $j(j=1, 2, 3, 4)$ 个影响因素给出第 $i(i=1, 2, 3)$ 个模块模糊评价,转换成相应标度得出该模块模糊评价向量为

$$\tilde{C}_i = [\tilde{c}_{i1} \quad \tilde{c}_{i2} \quad \tilde{c}_{i3} \quad \tilde{c}_{i4}] \quad (2)$$

将模糊评价向量进行组合,令 $\tilde{c}_{ij}(i=1, 2, 3; j=1, 2, 3, 4)$ 表示第 i 个模块相对于第 j 个影响因素模糊评价,如 \tilde{c}_{11} 表示发射模块相对于技术水平模糊评价,那么可得到评价矩阵:

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_1 \\ \tilde{C}_2 \\ \tilde{C}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{c}_{11} & \tilde{c}_{12} & \tilde{c}_{13} & \tilde{c}_{14} \\ \tilde{c}_{21} & \tilde{c}_{22} & \tilde{c}_{23} & \tilde{c}_{24} \\ \tilde{c}_{31} & \tilde{c}_{32} & \tilde{c}_{33} & \tilde{c}_{34} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.4 求解 α 水平截集

三角模糊数 \tilde{x} 的 α 水平截集求解公式为

$$\tilde{x}^\alpha = [\tilde{x}_l^\alpha, \tilde{x}_u^\alpha] = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, (a_2 - a_3)\alpha + a_3] \quad (4)$$

选取三角模糊数为 $\bar{1}$ 、 $\bar{3}$ 、 $\bar{5}$ 、 $\bar{7}$ 、 $\bar{9}$,表2为三角模糊数数学特征表。

表2 三角模糊数数学特征表

模糊数 \tilde{x}	数学特征			
	a_1	a_2	a_3	\tilde{x}^α
$\bar{1}$	1	1	3	$[1, 3-2\alpha]$
$\bar{3}$	1	3	5	$[1+2\alpha, 5-2\alpha]$
$\bar{5}$	3	5	7	$[3+2\alpha, 7-2\alpha]$
$\bar{7}$	5	7	9	$[5+2\alpha, 9-2\alpha]$
$\bar{9}$	7	9	9	$[7+2\alpha, 9]$

综合式(4)、表2,可求出模糊优先权重向量 α 水平截集,令 $\tilde{w}_j^\alpha = [\tilde{w}_{jl}^\alpha, \tilde{w}_{ju}^\alpha](j=1, 2, 3, 4)$,记为

$$\tilde{W}^\alpha = [\tilde{w}_1^\alpha \quad \tilde{w}_2^\alpha \quad \tilde{w}_3^\alpha \quad \tilde{w}_4^\alpha]^T \quad (5)$$

同理,令 $\tilde{c}_{ij}^\alpha = [\tilde{c}_{ijl}^\alpha, \tilde{c}_{iju}^\alpha](i=1, 2, 3; j=1, 2, 3, 4)$,求得模糊评价矩阵 α 水平截集为

$$\tilde{C}^\alpha = \begin{bmatrix} \tilde{C}_1^\alpha \\ \tilde{C}_2^\alpha \\ \tilde{C}_3^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{c}_{11}^\alpha & \tilde{c}_{12}^\alpha & \tilde{c}_{13}^\alpha & \tilde{c}_{14}^\alpha \\ \tilde{c}_{21}^\alpha & \tilde{c}_{22}^\alpha & \tilde{c}_{23}^\alpha & \tilde{c}_{24}^\alpha \\ \tilde{c}_{31}^\alpha & \tilde{c}_{32}^\alpha & \tilde{c}_{33}^\alpha & \tilde{c}_{34}^\alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.5 建立仪器主机模糊综合评价矩阵

三角模糊数之间乘法运算公式为 $\tilde{x}_1^\alpha \otimes \tilde{x}_2^\alpha = [\tilde{x}_{1l}^\alpha, \tilde{x}_{2l}^\alpha, \tilde{x}_{1u}^\alpha, \tilde{x}_{2u}^\alpha]$, 由模糊评价矩阵元素与其相应模糊优先权重相乘, $\tilde{a}_{ij}^\alpha = \tilde{c}_{ij}^\alpha \otimes \tilde{w}_j^\alpha = [\tilde{c}_{ijl}^\alpha \tilde{w}_{jl}^\alpha, \tilde{c}_{iju}^\alpha \tilde{w}_{ju}^\alpha]$ ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3, 4$) 表示第 i 个模块相对于第 j 个影响因素模糊综合评分, 得到仪器主机模糊综合评价矩阵为

$$\tilde{A}^\alpha = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11}^\alpha & \tilde{a}_{12}^\alpha & \tilde{a}_{13}^\alpha & \tilde{a}_{14}^\alpha \\ \tilde{a}_{21}^\alpha & \tilde{a}_{22}^\alpha & \tilde{a}_{23}^\alpha & \tilde{a}_{24}^\alpha \\ \tilde{a}_{31}^\alpha & \tilde{a}_{32}^\alpha & \tilde{a}_{33}^\alpha & \tilde{a}_{34}^\alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.6 求解模糊综合评价矩阵的 σ 截集

通过引入乐观指数 σ ($\sigma \in [0, 1]$), 可求解三角模糊数 σ 截集, 转换公式为

$$x_\sigma^\alpha = \tilde{x}_{1l}^\alpha \tilde{x}_{2l}^\alpha + \sigma (\tilde{x}_{1u}^\alpha \tilde{x}_{2u}^\alpha - \tilde{x}_{1l}^\alpha \tilde{x}_{2l}^\alpha) \quad (8)$$

由式 (8), 可求得仪器主机模糊综合评价矩阵 σ 截集, 将模糊综合评价矩阵转换为非模糊综合评价矩阵, $a_{ij} = \tilde{c}_{ijl}^\alpha \tilde{w}_{jl}^\alpha + \sigma (\tilde{c}_{iju}^\alpha \tilde{w}_{ju}^\alpha - \tilde{c}_{ijl}^\alpha \tilde{w}_{jl}^\alpha)$ ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3, 4$) 表示第 i 个模块相对于第 j 个影响因素综合评分, 记为

$$A_\sigma^\alpha = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.7 确定仪器主机各模块综合权重向量

对非模糊综合评价矩阵中各元素归一化, 归一化后矩阵记为

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \end{bmatrix}$$

令 s 为非模糊综合评价矩阵中所有元素的和 (即 $s = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 a_{ij}$), 则有:

$$g_{ij} = \frac{a_{ij}}{s} \quad (10)$$

归一化处理后将矩阵各行元素相加, $w_i = \sum_{j=1}^4 g_{ij}$ ($i=1, 2, 3$) 表示第 i 个模块失效率综合权重, 得到仪器主机发射模块、接收信号调理模块、回波信号处理模块等 3 个模块综合权重向量为

$$W = [w_1 \quad w_2 \quad w_3]^T \quad (11)$$

2.8 选取隶属度 α 、乐观指数 σ

根据前面求出的综合权重向量元素均为隶属度 α 、乐观指数 σ 的二元函数, 需确定 α 、 σ 取值, 记为 α_a 、 σ_a , 才能得出确切综合权重。

下面利用熵最小原则确定 α_a 、 σ_a , 信息熵 H 用来描述系统的有序程度^[9-10], 其表达式为

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (12)$$

信息熵越大, 表明各模块综合权重越接近, 则专家意见对于可靠性分配作用越小。根据前面可得仪器主机熵值 H_s 为

$$H_s = - \sum_{i=1}^3 w_i \ln w_i \quad (13)$$

为使专家意见发挥最大作用, α_a 、 σ_a 应使仪器主机熵值 H_s 最小, 即满足条件:

$$H_s(\alpha_a, \sigma_a) = \min \{H_s(\alpha, \sigma)\} \quad (14)$$

上式确定 α_a 、 σ_a 后, 将其代入式 (11) 即可得出仪器主机发射模块、接收信号调理模块、回波信号处理模块等 3 个模块综合权重值。

2.9 仪器主机可靠性分配

以仪器主机各模块综合权重分别乘以仪器主机目标失效率, λ_i ($i=1, 2, 3$) 为第 i 个模块分配的失效率, 即可得到各模块失效率:

$$\lambda_i = \lambda_s \cdot w_i \quad (15)$$

3 可靠性计算与仿真例

邀请 10 位具有超声相控阵无损检测仪器设计开发经验的专家给出评价, 每一项去掉最高、最低评价取均值作为综合评价, 得出准则层模糊优先权重向量为

$$\tilde{W} = [\tilde{9} \quad \tilde{3} \quad \tilde{5} \quad \tilde{7}]^T$$

同样得到对象层模糊评价矩阵为

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} \tilde{7} & \tilde{5} & \tilde{1} & \tilde{7} \\ \tilde{5} & \tilde{9} & \tilde{3} & \tilde{9} \\ \tilde{1} & \tilde{3} & \tilde{5} & \tilde{3} \end{bmatrix}$$

利用式 (4)~式 (15) 逐步求解, 可得出仪器主机综合权重向量:

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\sigma(-148\alpha + 148) + 12\alpha^2 + 50\alpha + 58}{\sigma(-12\alpha^2 - 422\alpha + 434) + 40\alpha^2 + 148\alpha + 138} \\ \frac{\sigma(-12\alpha^2 - 150\alpha + 162) + 16\alpha^2 + 68\alpha + 54}{\sigma(-12\alpha^2 - 422\alpha + 434) + 40\alpha^2 + 148\alpha + 138} \\ \frac{\sigma(-124\alpha + 124) + 12\alpha^2 + 30\alpha + 26}{\sigma(-12\alpha^2 - 422\alpha + 434) + 40\alpha^2 + 148\alpha + 138} \end{bmatrix}$$

通过 Matlab 软件编写程序, 存储并输出仪器主机熵值 H_s 随 α 、 σ 变化情况, 图 5 为 H_s 随 α 、 σ 变化情况仿真结果图。

可以看出, H_s 在 $\alpha=0$ 、 $\sigma=0$ 处取得最小值 $H_{s\min} = 1.0459$, 即可求得 $\alpha_a=0$ 、 $\sigma_a=0$, 进而获得:

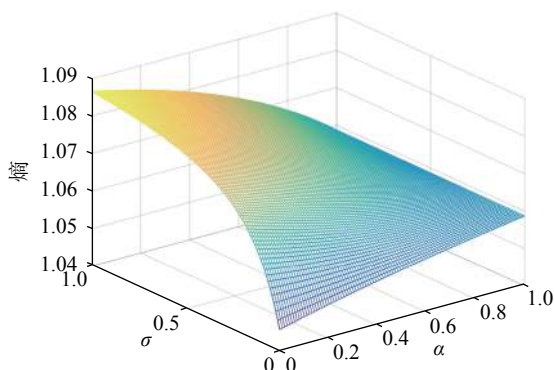


图5 H_s 随 α 、 σ 变化情况仿真结果图

$$W = \begin{bmatrix} \frac{58}{138} & \frac{54}{138} & \frac{26}{138} \end{bmatrix}^T$$

这表示仪器主机发射模块、接收信号调理模块、回波信号处理模块等应分配的失效率 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_s \cdot w_1 = 2.335 \times 10^{-4} / \text{h} \\ \lambda_2 = \lambda_s \cdot w_2 = 2.174 \times 10^{-4} / \text{h} \\ \lambda_3 = \lambda_s \cdot w_3 = 1.047 \times 10^{-4} / \text{h} \end{cases}$$

可以看出,发射模块、接收信号调理模块分配较高失效率,回波信号处理模块分配最低失效率。对比专家意见得出的模糊评判矩阵,回波信号处理模块除重要度外各项评分均为最低,其应分配最低失效率,发射模块虽只在技术水平方面评分最高,但该影响因素模糊优先权重最大,故其应分配较高失效率,接收信号调理模块各项评分均较高,其也应分配较高失效率,可知分配结果与专家意见一致。

4 结束语

本文研究一种基于模糊层次分析的相控阵无损检测仪器主机可靠性分配方法,其思路是综合层次分析法能定性、定量考察影响可靠性分配因素,以及模糊评价分配方法能减低分配结果的主观性。实际计算例表明,得出发射模块、接收信号调理模块、回波信号处理模块等3个模块失效率分别为

$\lambda_1=2.335 \times 10^{-4} / \text{h}$ 、 $\lambda_2=2.174 \times 10^{-4} / \text{h}$ 、 $\lambda_3=1.047 \times 10^{-4} / \text{h}$,经对比模糊评判矩阵可知,分配结果与专家意见一致。

参考文献

- [1] DU G P, HE L D, FANG J X, et al. A modified AGREE reliability allocation method research in power converter[C]//2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2014.
- [2] 葛杨, 邱志明, 肖亮, 等. 弹药转运系统的可靠性设计及性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(9): 890-895.
- [3] LI M Z, TANG Y, ZENG J D, et al. Reliability allocation for wafer stage system of lithography based on AHP[C]//2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, 2012.
- [4] 邵旭飞, 宋保维, 毛昭勇, 等. 串联系统可靠性分配的模糊层次分析方法[J]. 弹箭与制导学报, 2007(1): 250-253, 256.
- [5] CHANG K H. A more general reliability allocation method using the hesitant fuzzy linguistic term set and minimal variance OWGA weights[J]. Applied Soft Computing, 2017, 56(7): 589-596.
- [6] SRIRAMDAS V, CHATURVEDI S K, GARGAMA H. Fuzzy arithmetic based reliability allocation approach during early design and development[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(7): 3444-3449.
- [7] WANG Q, WANG J. A novel adaptive particle swarm optimization algorithm with foraging behavior for reliability redundancy allocation problem[C]//2016 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu), 2016.
- [8] SHEIKHALISHAHI M, EBRAHIMPOUR V, SHIRI H, et al. A hybrid GA-PSO approach for reliability optimization in redundancy allocation problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1): 317-338.
- [9] 刘丽娜, 刘涛. 钢箱梁电弧喷铝防腐涂层无损检测图像分析[J]. 中国测试, 2015, 41(11): 124-128.
- [10] 都衡, 潘宏侠. 基于局域波信息熵的高速自动机故障诊断[J]. 中国测试, 2014, 40(1): 115-118, 136.

(编辑:商丹丹)