

紧凑拉伸试样参比电位差接线点布局的优化方法

薛 河, 苟思育, 倪陈强

(西安科技大学机械工程学院, 陕西西安 710054)

摘 要: 紧凑拉伸试样参比电位差接线点布局多凭经验, 本文提出了一种基于遗传算法对紧凑拉伸试样参比电位差接线点寻优的方法. 采用有限元法对拉伸试样的电位场分析, 构建遗传算法的参比电位差模型, 寻求最佳参比电位差值, 得到紧凑拉伸试样最佳接线点位置. 结果表明, 两个参比电位差接线点之间的距离对参比电位差影响较大, 靠近电流输入端与拉伸试样右上端内侧区域为最佳接线点位置.

关键词: 紧凑拉伸试样; 遗传算法; 参比电位差; 最佳接线点; 有限元法; 裂纹监测

中图分类号: TP206+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2020)07-1396-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.07.020

An Optimal Method for the Layout of Potential Difference Wiring Points of the Compact Tensile Specimen

XUE He, GOU Si-yu, NI Chen-qiang

(School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The layout of the wiring points of the reference potential difference of the compact tension specimen is mostly based on experience, in this paper, a genetic algorithm is proposed to optimize the tension specimen reference potential wiring points layout. The finite element method is used to analyze the potential field of the tensile specimen, the reference potential difference model of the genetic algorithm is constructed, the best reference potential difference value is found, and the optimal wiring point position of the compact tensile specimen is obtained. The results show that the distance between the reference potential difference wiring points has great influence on the reference potential difference, it is close to the current input and the inner part of the upper right end of the tensile specimen are the optimal wiring points position.

Key words: compact tensile specimen; genetic algorithm; reference potential difference; optimum wiring point; finite element method; crack monitoring

1 引言

在模拟核电高温高压水环境的高压釜中测试核电结构材料环境致裂裂纹扩展速率是核电重要结构选材和安全评价的重要工作之一^[1], 然而核电站实际运行工况复杂, 实时监测裂纹扩展速率的手段相对较少^[2], 直流电位差法(Direct Current Potential Drop, DCPD)是其中应用最广泛和最重要的方法之一^[3], DCPD法裂纹监测时需要解决的关键问题是裂纹长度与电位差之间的关系^[4].

高温高压水环境中应力腐蚀开裂实验周期长, 且

整个实验需要在纳米级测试精度下进行^[5], 温度波动会引起试样电阻率发生变化造成激励电流的波动, 从而导致测试仪器的零点漂移对电位差信号形成很大的干扰^[6]. 参比电位差法^[7-9]对抑制零点漂移和电流波动具有较好的效果, 这种方法是在试样上任意选取两点电位作差作为参比电位差(Reference Potential Difference/Drop, RPD), 在测试过程中同时对主电位差(反映裂纹变化)和 RPD 进行测量, 利用 RPD 对主电位差进行补偿修正, RPD 探测点的位置布局会对参比电位差的准确性和主电位差的补偿量造成重要影响, 如何合理的选取 RPD 探测点位置消除其他因素对裂纹测量影

不同裂纹长度试样上任意两点的电位,单位为 μV .

可测性是指两探测点之间电位差值,即电位差,电位差越大,可测性越好,电位差越小,可测性越差;裂纹无关性是指不同裂纹长度,相同两个探测点间电位差之差的数值大小,差值越小,裂纹的无关性越好,差值越大,裂纹的无关性越差.

任意两个接线点之间的距离为:

$$d_n = \sqrt{|i-p|^2 + |j-q|^2} \quad (10)$$

其中 d_n 为任意两个探测点之间的距离,单位为 mm .

3 遗传算法及参数的选择

3.1 遗传算法的实现

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种通过模拟生物界自然进化过程搜索最优解的方法,其算法流程如图3所示.遗传算法相对于传统算法更利于全局择优,因此选用遗传算法实现参比电位差接线点布局寻优的问题^[11-13].

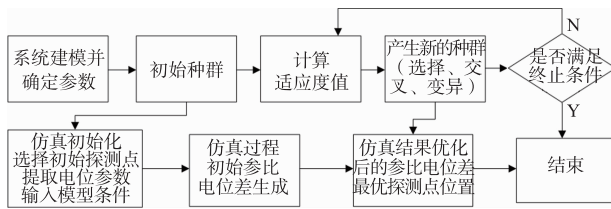


图3 遗传算法流程图

遗传算法对接线点布局的优化主要通过对参比电位差寻优,得到最佳参比电位差数值及所有可能出现的最佳探测点位置.研究表明,电位差法对裂纹的分辨率在裂纹长度小于 0.55mm 时,可达到 $(6 \sim 8)\mu\text{V}$,裂纹长度超过 1mm 以上时,分辨率^[14]可达到 $(3 \sim 5)\mu\text{V}$.根据仪器的测量范围与分辨率(大于 0.01% 的主电位)进行初步筛选电位值,穷举搜索得到随机两个探测点之间的参比电位差值,由于这些参比电位差值数目过多,且没有规律可循,可用遗传算法对适应度函数进行寻优,得到可能出现的最优探测点位置和最佳参比电位差值,以初始裂纹长度 a_0 为研究对象,简述遗传算法的实现过程.

(1) 编码与解码

采用二进制的编码方式,以建立电位差的可测性、裂纹无关性数学模型为条件.对探测点的电位差值进行寻优,得到初步筛选后的电位差,再对初始种群进行编码和解码操作.假设目标函数的取值范围为 $[\alpha_i, \beta_i]$,将 x 的解空间划分为 99999 等分,且满足:

$$(\alpha_i - \beta_i) \times 10^4 \leq 2^{n_i} - 1 \quad (11)$$

解码的过程相当于编码的逆运算,是将解空间中基因串变为解空间中实际值的过程,实际的求解过程

如式(12).

$$X_i = a_i + \text{decimal}(0001010\cdots 01) \times \frac{b^i - a^i}{2^{n_i} - 1} \quad (12)$$

以上述建立的目标函数为研究对象,设置自变量 x_i 对应的染色体长度及使上式成立的最小整数 n_i .

(2) 适应度函数求解

适应度函数的设计是影响优化效果的关键因素之一.穷举搜索求解的电位差数目较多,且呈现离散的点,总数为 79800 个,权衡控制系统稳定性、准确性、快速性和较强的抗干扰能力等多方面需求的基础上^[15],选择初始裂纹长度 a_0 ,由于目标函数求解得到的参比电位差值较为离散,为了使遗传算法收敛速度较快并能准确的得到最优个体,通过 MATLAB 对目标函数求解的参比电位差值进行线性拟合,拟合后的函数为八次傅里叶级数,选取拟合后的函数为适应度函数,如式(13)所示.

$$\begin{aligned} f(x) = & C + a_1 \cos(\omega x) + b_1 \sin(\omega x) + a_2 \cos(2\omega x) \\ & + b_2 \sin(2\omega x) + a_3 \cos(3\omega x) + b_3 \sin(3\omega x) \\ & + a_4 \cos(4\omega x) + b_4 \sin(4\omega x) + a_5 \cos(5\omega x) \\ & + b_5 \sin(5\omega x) + a_6 \cos(6\omega x) + b_6 \sin(6\omega x) \\ & + a_7 \cos(7\omega x) + b_7 \sin(7\omega x) + a_8 \cos(8\omega x) \\ & + b_8 \sin(8\omega x) \end{aligned} \quad (13)$$

运用遗传算法寻优,求解最佳参比电位差,再对不同的两条裂纹长度 a_0 和 a_{23} 相同探测点的电位差值作差,得到裂纹无关性参比电位差之差的数值.

(3) 遗传算法的操作

将拟合后的参比电位差适应度函数进行新个体选择,求解出每个参比电位差个体被选中的概率,再逐个进行概率的求和排序,满足小于适应度函数值,进行一次个体的选择,直到不满足条件为止,然后进一步扩大适应度函数的范围,进行多次选择,最终得到更多较优的参比电位差个体^[16].

选择操作后,除去最优和淘汰后的参比电位差个体,将剩余的参比电位差个体按照适应度大小进行排序,利用轮盘赌的方式再次进行交叉操作^[17],得到新的种群个体,交叉是从选择较优的个体中产生新的个体,扩大种群的数量.

交叉得到新的参比电位差种群再进行变异操作,变异率的取值范围^[18]为 $0.0001 \sim 0.1$.通常对于目标函数较大(小)的种群,选择较小(大)的变异率^[19].交叉和变异的公式如式(14)和式(15)所示.

$$p_c = 0.7 + (0.9 - 0.7) \text{rand}(m, n) \quad (14)$$

$$p_m = 0.01 + (0.05 - 0.01) \text{rand}(m, n) \quad (15)$$

其中 p_c 表示交叉概率, p_m 表示变异概率, $\text{rand}(m, n)$ 即生成 m 行 n 列的 $0 \sim 1$ 之间的随机数,重复遗传算法的操作过程,直到得到目标函数最优解时停止.

3.2 模型的参数选择

有限元提取 CT 试样探测点的电位,材料的力学性能及几何参数的选取如表 1 所示。

裂纹长度不同,遗传算法求解过程中适应度函数的参数值也不同,以初始裂纹 a_0 为例,遗传算法寻求最佳参比电位差值和最佳接线点位置过程中的适应度函

数为八次傅里叶级数,如式(13),其中未知参数的值如表 2 所示。

遗传算法实现过程中,建立的目标函数取值范围为 $[0, 6097]$,选择种群的大小 N 为 100,染色体的长度 X_i 为 10,迭代次数为 1000 次,交叉概率 p_c 为 0.8,变异概率 p_m 为 0.1。

表 1 材料的力学性能及试样的几何参数

材料	屈服极限 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	杨氏模量 E/GPa	泊松比 ν	电导率 $\sigma_s/(\text{S}/\text{mm})$	试样厚度 B/mm	初始裂纹 a_0/mm	W/mm	c/mm
316L	221	193	0.253	1450	12.5	12.5	25	2.5

表 2 适应度函数参数取值

参数	C	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4
数值	100.2	-3.964	6.436	-5.83	8.29	-4.52	-9.84	0.141	2.157
参数	a_5	b_5	a_6	b_6	a_7	b_7	a_8	b_8	ω
数值	2.649	1.071	0.508	-0.72	-1.15	-0.99	-1.89	-1.82	0.0011

4 结果与分析

4.1 遗传算法的寻优结果

裂纹增长长度 a_n 取值为 12.5, 13 …… 23.5 每 0.5mm 增长一次,共计 22 次,仿真实验基于裂纹原始长度 $a_0 = 12.5\text{mm}$,有限元提取探测点 k 的电压值,穷举搜索得到的参比电位差个数 n 为 79800,参比电位差值分布较散,线性拟合后的参比电位差数目为 6097,如图 4(a) 所示。

遗传算法寻优后,得到较优的参比电位差个体,迭代 1000 次,可测性最优的探测点为图 4(b) 中红色的标记部分,裂纹长度 a_n 每增长 0.5mm 时,不同裂纹长度对应的最优参比电位差值 U 和两个探测点位置及坐标,如表 3 所示。

表 3 择优后参比电位差的数值

序号 n	裂纹长度 a_n/mm	参比电位差 U	探测点位置 $k_1(i,j)$	探测点位置 $k_2(p,q)$
1261	12.5	154.6	30(0,14)	368(26,11)
1286	13	155.3	30(0,14)	370(27,10)
1316	13.5	156.5	30(0,14)	373(27,7)
...				
2193	22.5	174.6	30(0,14)	337(5,4)
2278	23	175.5	30(0,14)	278(3,12)
2403	23.5	177.4	30(0,14)	215(13,14)

由表 3 可知,不同裂纹长度对应的最优参比电位差数值不同,两个探测点位置也不相同,随着裂纹长度的增加,最优参比电位差数值逐渐变大。

为了更加直观的反映裂纹无关性,选择初始裂纹

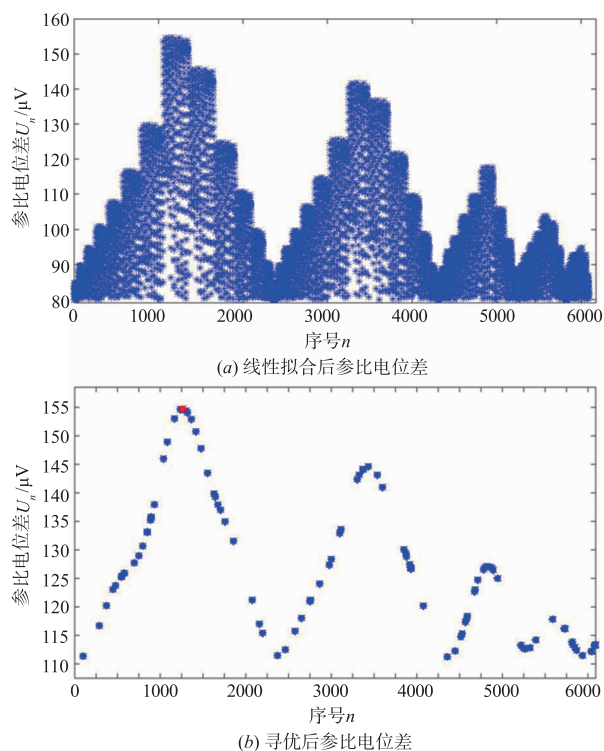


图 4 遗传算法对可测性寻优图

长度 a_0 与最终裂纹长度 a_{23} 进行分析,将不同裂纹长度,相同两个探测点的参比电位差作差,构建裂纹无关性的数学模型,线性拟合后的个体数为 313,拟合后的个体分布较为规律如图 5(a) 所示。经过遗传算法寻优,得到最终裂纹无关性的择优图。

可测性最优为图 5(b) 中标红的点,不同裂纹长度,相同探测点的最优参比电位差之差 ΔU_n 与探测点位置及坐标,如表 4 所示。

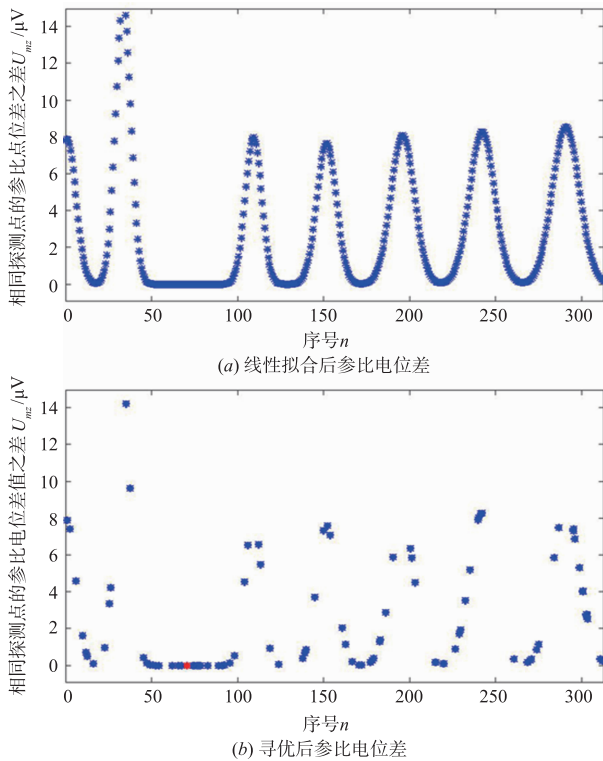


图5 遗传算法对裂纹无关性寻优图

表4 择优后参比电位差之差的数值

裂纹长度 a_m/mm	裂纹长度 a_n/mm	参比电位 差之差 ΔU	探测点位置 $k_1(i,j)$	探测点位置 $k_2(p,q)$
12.5	23.5	0.0249	28(0,12)	109(1,2)
12.5	23	0.012	28(0,12)	194(2,3)
12.5	22.5	0.0799	28(0,12)	131(10,14)
...				
13	23.5	0.1305	30(0,14)	132(11,14)
13	23	0.022	29(0,13)	288(12,12)
13	22.5	0.004	29(0,13)	355(13,11)
...				
13.5	23.5	0.2153	30(0,14)	37(6,15)
13.5	23	0.2047	30(0,14)	37(6,15)
13.5	22.5	0.2243	30(0,14)	37(6,15)

由表4可知,不同裂纹长度,相同的两个探测点的电位差之差不同,临近增长的两条裂纹长度,遗传算法寻优后得到裂纹无关性最佳的两个探测点位于相近的范围内分布。

A为电流输入端区域,B为裂纹尖端的区域,C为拉伸试样右上侧区域,D为拉伸试样右上侧内部区域,综合遗传算法对裂纹长度进行可测性和裂纹无关性寻优,可以得到较优的参比电位差探测点位于电流输入端附近的区域A和拉伸试样右上侧内部区域D,距离裂

纹越远的地方,裂纹无关性最好,由于电流输入点处电压值特别大,为了确保接线位置的准确性及便于加载拉伸,去除电流输入点和加载孔附近不合理的最优探测点,得到紧促拉伸试样参比电位最佳的接线点位置如图6所示,黑色的点代表较优参比电位差探测点。

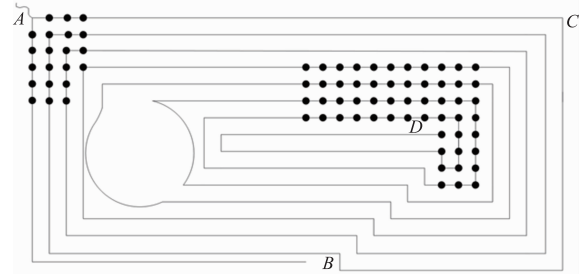


图6 参比电位差最佳接线点位置

4.2 可测性与裂纹无关性分析

4.2.1 可测性分析

对于遗传算法寻优后的参比电位差可测性进行分析, k_1, k_2 是从探测点位置 k 中随机选取的两个探测点位置,以裂纹长度 12.5mm 为研究对象,选取一个不同位置探测点 k_1 ,研究 CT 试样电位差数值 U_n 与另一个探测点 k_2 之间关系,进而分析参比电位差的可测性,可测性的曲线图如图7所示。

由图7(a)可知,探测点 k_1, k_2 选择裂纹尖端和电流输入端附近区域,距离裂纹和电流输入点越近,参比电位差值越大,可测性越好,因此,可测性较好的探测点位置是距离电流输入点和裂纹较近的点。由图7(b)可知,探测点位于 $k_2 = 63$ 附近,参比电位差值相对减小,表明参比电位差的变化与两个探测点 k_1, k_2 之间的距离有关,距离越远,参比电位差越大,可测性越好。探测点沿着 CT 试样同侧的位置向内扩展,参比电位差的可测性相同。

4.2.2 局部裂纹无关性分析

遗传算法对拉伸试样可测性寻优结果可知,最优的一个探测点位置 k 集中在 30、31、120、122,因此,选取一个探测点位置 $k_1 = 30$,由于裂纹增长长度小于 1.5mm 时,参比电位差的变化不明显,因此,为了更加精确的反应裂纹无关性,选择裂纹长度分别为 12.5mm 和 23.5mm 进行裂纹无关性比较,分析电流输入端区域 A、裂纹尖端的区域 B 和拉伸试样右上侧区域 C 与参比电位差之差之间的关系,裂纹无关性曲线如图8所示。

由图8分析可知,探测点距离裂纹越远,无关性越好,距离裂纹越近,无关性越差;两探测点的选取位置都距离裂纹较远时,两探测点间距越大,裂纹的无关性越好;距离加载孔越近的位置裂纹无关性最好,几乎不受裂纹增长的影响,但裂纹无关性最差的地方在 CT 试样的右上侧边上。

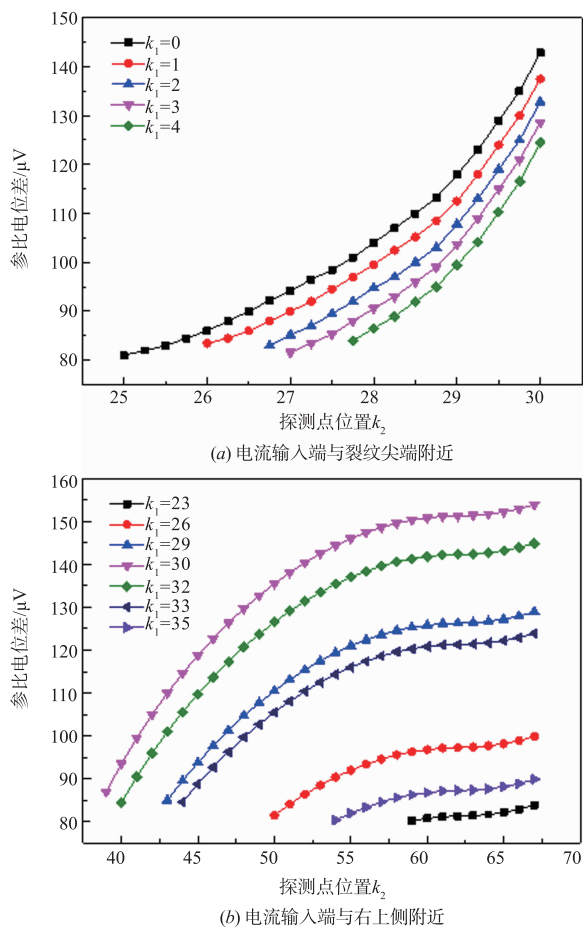


图7 可测性曲线

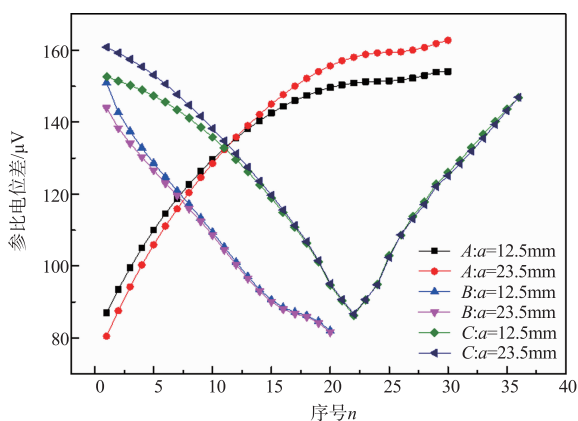


图8 裂纹无关性曲线

5 结论

本文提出了一种遗传算法寻求紧凑拉伸试样参比电位差最优接线点布局的方法,分析结果表明:参比电位差接线点布局大大影响了仪器监测裂纹增长的稳定性;两个探测点之间的距离对参比电位差影响较大,距离越远,可测性越好,但裂纹无关性越差;遗传算法与

MATLAB 线性拟合法结合,可以快速、大范围的寻求最佳接线点位置,得到较为精准的参比电位差值;靠近电流输入端和拉伸试样右上侧内部区域为最佳接线点位置.

参考文献

- [1] Spitas V, Spitas C, Michelis P. Real-time measurement of shear fatigue crack propagation at high-temperature using the potential drop technique [J]. Measurement, 2008, 41 (04): 424 - 432.
- [2] Nayeb-Hashemi H, Swet D, Vaziri A. New electrical potential method for measuring crack growth in nonconductive materials [J]. Measurement, 2004, 36 (02): 121 - 129.
- [3] Antonarurajah A, Ramos V P, Fazluddin S B, Rand B. Evaluation of the electrical potential drop technique in the determination of crack growth resistance-curves of carbon composites and carbon bonded refractories [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40 (02): 373 - 380.
- [4] 李智军, 薛河. 直流电位降裂纹测深仪的数值标定 [J]. 西安科技大学学报, 2012, 32 (01): 116 - 120.
Li zhijun, Xue he. Numerical calibration of crack monitor based on direct current potential drop [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2012, 32 (01): 116 - 120. (in Chinese)
- [5] 董立谨. 核电主回路安全端金属焊接件结构特征与应力腐蚀行为研究 [D]. 东北大学, 2014.
- [6] Minnebruggen K V, et al. Crack growth characterization in single-edge notched tension testing by means of direct current potential drop measurement [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2017, 156 (01): 68 - 78.
- [7] Hicks M A, Pickard A C. A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical potential drop technique for crack length determination [J]. International Journal of Fracture, 1982, 20 (02): 91 - 101.
- [8] Spitas V, Spitas C, Michelis P. A three-point electrical potential difference method for in situ monitoring of propagating mixed-mode cracks at high temperature [J]. Measurement, 2010, 43 (07): 950 - 959.
- [9] Antonarurajah A, Ramos V P, Fazluddin S B, Rand B. Evaluation of the electrical potential drop technique in the determination of crack growth resistance-curves of carbon / carbon composites and carbon bonded refractories [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40 (05): 373 - 380.
- [10] 倪陈强, 薛河, 崔英浩. 直流电位降法裂纹监测试验中接线点位置分析 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (24): 122 - 125.
Ni Chenqiang, Xue He, Cui Yinghao. Analysis on wire layout in crack monitoring test using direct current potential drop method [J]. Hot Working Technology, 2016, 45

- (24):122–125. (in Chinese)
- [11] 李正军,袁银麟,等. 基于遗传算法的标准光源设计方法[J]. 量子电子学报,2019,36(02):143–150.
Li Zhenjun, Yuan Yinlin, et al. Design method of standard light sources based on genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2019, 36 (02): 143 – 150. (in Chinese)
- [12] Mayur V Andulkar, Shital S Chiddarwar. Incremental approach for trajectory generation of spray painting robot [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2015, 42 (03):228–241.
- [13] Wei S, Zheng C, Lin C. Multi-objective optimization of cooling air distribution of grate cooler with different inlet temperatures by using genetic algorithm[J]. Science China (Technological Sciences), 2017, 60(01):345–354.
- [14] Wenyu Zhang, Jiepin Ding, Yan Wang, Shuai Zhang, Zhiying Xiong. Multi-perspective collaborative scheduling using extended genetic algorithm with interval-valued intuitionistic fuzzy entropy weight method[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 53(01):249–260.
- [15] 杨泽青,张炳寅,等. 自适应遗传算法在直线电机进给系统伺服参数优化中的应用研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 1(09):08–13.
Yang Z Q, Zhang Bingyan, et al. Application of adaptive genetic algorithm in servo parameter optimization of linear motor feed system[J]. Mechanical Science and Technology, 2019, 1(09):08–13. (in Chinese)
- [16] Ashtiyani M, Navaei Lavasani S, Asgharzadeh Alvar A, Deevband M R. Heart rate variability classification using support vector machine and genetic algorithm[J]. Journal of Biomedical Physics & Engineering, 2018, 8(04):423–434.
- [17] 刘尚典,赵毅强,等. 基于遗传算法的少态节点活性提升方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(08):1546–1551.
Liu Shangdian, Zhao Yi, et al. A method to enhance the activity of few-state nodes based on genetic algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2019, 53(08):1546–1551. (in Chinese)
- [18] Gholami A, et al. Uncertainty analysis of intelligent model of hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization with ANFIS to predict threshold bank profile shape based on digital laser approach sensing[J]. Measurement, 2018, 121(05):294–303.
- [19] Jennifer Arthur, Rian Bahrn, Jesson Hutchinson, Sara A Pozzi. Genetic algorithm for nuclear data evaluation applied to subcritical neutron multiplication inference benchmark experiments [J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 133(01):853–862.

作者简介



薛 河(通信作者) 男,1961年出生于上海. 现为西安科技大学教授、博士研究生导师. 研究方向为计算机辅助工程、结构安全性评价.
E-mail: xue_he@hotmail.com



苟思育(通信作者) 女,1995年生于陕西咸阳. 西安科技大学机械学院硕士研究生. 主要研究方向为测试信号处理.
E-mail: 17791423378m@sina.cn