

# 基于自适应局部交替遗传算法的线缆绝缘厚度检测

刘付渝杰<sup>1,2</sup>, 马宏园<sup>2</sup>, 许浩然<sup>3,4</sup>, 宋俊儒<sup>5</sup>, 罗睿<sup>6</sup>, 李杨<sup>1</sup>

- (1. 广东工业大学 计算机学院, 广州 510006; 2. 广东省茂名市质量计量监督检测所, 广东 茂名 525000;  
3. 中山大学 智能工程学院, 广东 深圳 518107; 4. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055;  
5. 广东省特种设备检测研究院茂名检测院, 广东 茂名 525000;  
6. 广东省茂名市应急物资储备中心, 广东 茂名 525000)

**摘要:** 针对传统线缆绝缘厚度测量方法存在效率低和准确度差的问题, 提出一种基于自适应局部交替遗传算法 (ALA-GA) 的绝缘厚度检测方法; 该方法利用 ALA-GA 算法在试件图像的内外边缘交替搜索从而获得最优绝缘厚度位置; 该算法引入试件先验结构知识, 根据试件截面边缘曲率特征自适应选取初始种群, 从而保证初始种群基因的优质性和多样性; 将交叉和变异操作置前, 对于试件截面内外边缘局部交替地自适应改变交叉和变异的方式, 从而提高遗传算法的求解速度; 为了不丢失任一边缘的优质基因, 对交叉、变异后得到的新种群和原种群共同执行后置选择操作; 每获得一个最优检测位置, 剔除该位置附近的其余解, 如此迭代执行 ALA-GA 算法以获得精确的绝缘厚度检测结果; 对比实验以及能力验证表明, 基于 ALA-GA 方法的时间代价为 0.6~0.7 s, 最薄点测量误差为 0.001 2~0.001 5 mm, 平均测量误差为 0.001 3~0.001 7 mm, 测量重复性为 0.001 8~0.002 1 mm, 均优于现有先进方法, 且对不规整线缆泛化能力良好。

**关键词:** 机器视觉; 遗传算法; 光缆电缆; 自动测量; 绝缘厚度; 检验检测

## Cable Insulation Thickness Detection Based on ALA-GA

LIUFU Yujie<sup>1,2</sup>, MA Hongyuan<sup>2</sup>, XU Haoran<sup>3,4</sup>, SONG Junru<sup>5</sup>, LUO Rui<sup>6</sup>, LI Yang<sup>1</sup>

- (1. School of Computer Science and Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
2. Quality & Metrology Supervision Testing Institute, Maoming 525000, China;  
3. School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-Sen University, Shenzhen 518107, China;  
4. Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China;  
5. Maoming Branch of Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research, Maoming 525000, China;  
6. Maoming Material Reserve Center, Maoming 525000, China)

**Abstract:** Aiming at the low efficiency and poor accuracy of traditional cable insulation thickness measurement methods, an insulation thickness detection method based on adaptive local alternating genetic algorithm (ALA-GA) is proposed. The method uses the ALA-GA algorithm to alternately search the inner and outer edges of the specimen image so as to obtain the optimal insulation thickness position; The algorithm introduces the priori structural knowledge of the specimen, adaptively selects the initial population according to the curvature characteristics of the specimen cross-section edges, and ensures the high quality and diversity of the initial population genes. The crossover and mutation operations are placed in the front, and the crossover and mutation modes are changed locally and adaptively for the inner and outer edges of the specimen section, so as to improve the solution speed of the genetic algorithm; In order not to lose the high-quality genes of any edge, the post-selection operation is achieved by the original population and new population obtained after the crossover and mutation; An optimal detection position is obtained every time, and other solutions near the position are eliminated, the ALA-GA algorithm is iterated to obtain the result of accurate insulation thickness detection. Comparison experiments and capability verification show that the ALA-GA-based method has a time cost of 0.6~0.7 s, a thinnest point measurement error of 0.001 2~0.001 5 mm, an average measurement error of 0.001 3~0.001 7 mm, and a measurement repeatability of 0.001 8~0.002 1 mm, the method is superior to existing advanced methods, and has a good general capability for irregular cables.

**Keywords:** machine vision; genetic algorithm; electric or optical cable; automatic measurement; insulation thickness; inspection and testing

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-01-08。

基金项目: 广东省市场监督管理局科技项目(2024CZ11); 广东省茂名市科技计划项目(220420094550422)。

作者简介: 刘付渝杰(1991-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 刘付渝杰, 马宏园, 许浩然, 等. 基于自适应局部交替遗传算法的线缆绝缘厚度检测[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 55-63, 71.

## 0 引言

线缆是电线、电缆以及光缆等的统称，是社会经济生活正常运作必不可少的基础材料，其质量问题举足轻重。目前有效的线缆标准对绝缘厚度检测项目的最小值和平均值的要求非常严苛<sup>[1]</sup>，以 2.5 mm<sup>2</sup> 的 60227 IEC 01 (BV) 电缆为例，绝缘厚度平均值不得小于规定值 0.8 mm<sup>[2]</sup>，最小值可小于规定值，但不得小于规定值的 90%~0.1 mm，即最小值不得小于 0.62 mm<sup>[3]</sup>。但在生产领域仍常有厚度太薄达不到国家标准要求的情况。目前国家标准的检验手段仍停留在使用读数显微镜或光学放大投影仪等设备与人工观察相结合的方式，主观影响大，效率低，操作困难<sup>[2,4]</sup>，且有重复性及再现性差等表现<sup>[4]</sup>，造成质量把控效果不佳。线缆绝缘厚度的检测与线缆的耐压试验、绝缘电阻以及各种力学性能（抗张强度、断裂伸长率等）关系密切。如果绝缘厚度不均匀、最小厚度值小于标准值会导致线缆使用寿命缩短，在使用中发生击穿，导致漏电、短路甚至损坏电器设备、发生火灾等严重事故<sup>[5]</sup>。

近年来，一些学者结合机器视觉技术对线缆的绝缘厚度进行自动化测量。文献 [6-8] 提出一种基于 Hough 圆检测定位圆心的射线遍历方法，首先确定试件近似圆的圆心，以圆心为起点向外引射线每隔 1° 遍历得到绝缘最薄处，然后以最薄处射线为基准每隔 60° 附近处取极小值作为绝缘厚度测量结果，但只适用于截面外形近似圆的试件。文献 [9] 提出一种基于切线法定位圆心的铠装电缆截面厚度自动测量方法，采用平行切线方法确定线缆几何中心，通过几何中心做射线测量绝缘厚度。文献 [10] 针对绝缘层轮廓点提出一种基于候选点归并搜索算法，能根据绝缘层颜色提取候选点，再通过遍历候选点得到绝缘厚度，但只能获得次优解。文献 [11] 应用主轴分析方法、多尺度梯度算法和通用子像素重定位来更精确地标注物体表面来定位物体边缘，从而计算出绝缘厚度。文献 [12] 通过改进插值方法在保证计算精度提高的情况下，还显著提高了边缘信息提取的速度，并将其应用于电缆材料的厚度图像测量系统中，实现了精确快速的测量。

虽然结合机器视觉技术进行线缆绝缘厚度检测已有诸多研究，但主要技术路线为圆检测射线法，仍存在以下几个不足：

- 1) 只适用于截面为近似圆的试件，面对其他不规整线缆测量偏差大，准确度低，泛化能力差；
- 2) 时间代价高，难以满足大规模自动化快速检测的实时性需求；
- 3) 同一试件在不同拍摄角度下的测量结果重复性差，不具备多视图一致性。

对于一般工业相机拍摄得到线缆截面图像而言，其提取得到的边缘信息求解空间较大、时间复杂度高。以普通 600 万像素工业相机为例，2.5 mm<sup>2</sup> 的线缆截面外边缘像素点多达 20 000 多个，内边缘像素点多达 15 000 多个，其对

应的解空间多达  $3 \times 10^9$ 。因此，上述求解线缆绝缘厚度的问题，实质是较大解空间下的最优化问题，求解最优化问题的方法一般可总结为 3 种：枚举法、启发式算法<sup>[13]</sup>和搜索算法<sup>[14]</sup>。枚举法在解空间较大的情况下求解效率较低；启发式算法通用性差，需要针对不同线缆确定其特有的启发式规则；搜索算法旨在问题的解空间中找到满足特定条件的解，但计算成本高，无法充分利用问题先验知识。

搜索算法主要有粒子群优化算法 (PSO, particle swarm optimization)<sup>[15]</sup>、蚁群优化算法 (ACO, ant colony optimization)<sup>[16]</sup>和遗传算法 (GA, genetic algorithm) 等<sup>[17-18]</sup>。PSO 算法简单，易于实现，适用于连续优化问题，但对于复杂问题，容易受困于局部最优解，导致提前收敛，且性能高度依赖于参数选择；ACO 具有分布式计算和自适应性，适用于组合优化问题，在图论和路径规划方面表现优异，但在大规模问题上收敛速度相对较慢，需要时间来建立和强化蚁群的路径信息，且对问题建模要求较高，不适用于没有明显路径结构的问题；GA 适用于各种问题，尤其在搜索空间大且复杂的情况下表现优秀，但传统 GA 在处理大规模问题时需要较多计算资源，随着搜索空间的增加，复杂度会显著提高，在问题搜索空间有很多局部最优解的情况下，早期容易收敛到次优解。

通过搜索算法结合启发式思想，一方面，有助于搜索算法克服局部最优陷阱，另一方面，启发式思想能够利用问题领域的特定信息提高搜索效率，尤其当问题结构或约束较为复杂时。

为此，本文提出一种基于自适应局部交替遗传算法 (ALA-GA, adaptive locally-alternate genetic algorithm) 的线缆绝缘厚度检测方法。本方法不仅提高检测准确度，而且显著提高检测效率，对于业内的大规模不规整线缆实时检测问题具有较高的推广和应用价值。

## 1 线缆绝缘厚度数学模型

### 1.1 模型定义与约束条件

依照国家现行的线缆绝缘厚度检测方法标准 GB/T 2951.11-2008<sup>[4]</sup>，线缆绝缘厚度检测需 3 个试件，每个试件共需测量 6 点<sup>[19]</sup>。在任何情况下，首次测量应在绝缘最薄处进行，且对于不规整截面试件（扇形导体、绞合导体等），6 个厚度点的位置需要尽可能取较小值且均匀分布于整个边缘空间，如图 1 所示。

通过机器视觉技术采集得到试件截面图像，利用边缘检测技术<sup>[20-21]</sup>提取得到由多个像素点组成的内外边缘信息，将内边缘像素数组（以下简称内边缘）记为  $C_{in}$ ，外边缘像素数组（以下简称外边缘）记为  $C_{out}$ 。一个绝缘厚度测量位置由一个内边缘像素点和一个外边缘像素点  $x_{j,k}$  组成，可表示为：

$$\begin{cases} I_j \in C_{in} \\ O_k \in C_{out} \\ x_{j,k} = (I_j, O_k); 0 \leq j \leq n-1, 0 \leq k \leq m-1 \end{cases} \quad (1)$$

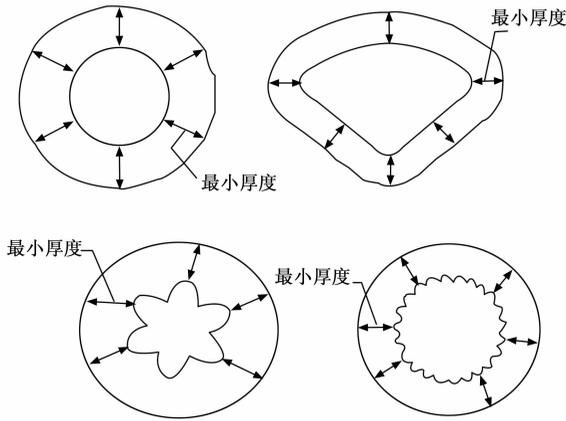


图 1 国家标准中的绝缘厚度测量示例图

其中:  $I_j$  和  $O_k$  分别为内外边缘像素点坐标,  $n$  和  $m$  分别为内外边缘数组长度。

### 1.2 绝缘厚度表示与目标函数

一个测量位置的绝缘厚度为该位置的内边缘像素点和外边缘像素点的直线距离, 可表示为:

$$dst(x_{j,k}) = \|I_j - O_k\| \quad (2)$$

其中:  $\|\cdot\|$  表示第二范数。

由式 (1), 所有绝缘厚度测量位置可以表示为:

$$X = \{x_{0,0}, x_{0,1}, \dots, x_{(n-1),(m-1)}\} \quad (3)$$

由式 (3) 所有绝缘厚度值可以表示为:

$$dst(X) = \{dst(x_{0,0}), dst(x_{0,1}), \dots, dst[x_{(n-1),(m-1)}]\} \quad (4)$$

根据现行国家标准 GB/T 2951.11-2008<sup>[4]</sup>, 任何情况下都应从最薄绝缘厚度处开始测量, 最薄绝缘厚度测量位置  $x_m^1$  可表示为:

$$\begin{cases} x_m^1 \in X \\ dst(x_m^1) = \min[dst(X)] \end{cases} \quad (5)$$

故把内外边缘间的最短距离作为目标函数。

## 2 基于 ALA-GA 的绝缘厚度检测方法

GA 相较于其他方法是独立于具体问题场景的, 这使得 GA 算法对不同问题场景具有鲁棒性和泛化性。

但在线缆绝缘厚度检测方法中直接使用 GA 会遇到如下问题:

- 1) 不能最大限度地保证基因的优质性和多样性;
- 2) 编码方式不符合实际, 容易错过最优解;
- 3) 遗传过程中容易陷入早熟困境, 搜索能力不强。

对于线缆绝缘厚度检测任务, 遗传算法若要快速搜索到全局最优解, 在遗传方式、初始种群生成、遗传算子设计 (选择、交叉、变异) 等方面必须遵循国家标准的约束而做出改进。

### 2.1 检测算法流程设计

由于检测线缆绝缘厚度需要同时遍历试件内外边缘,

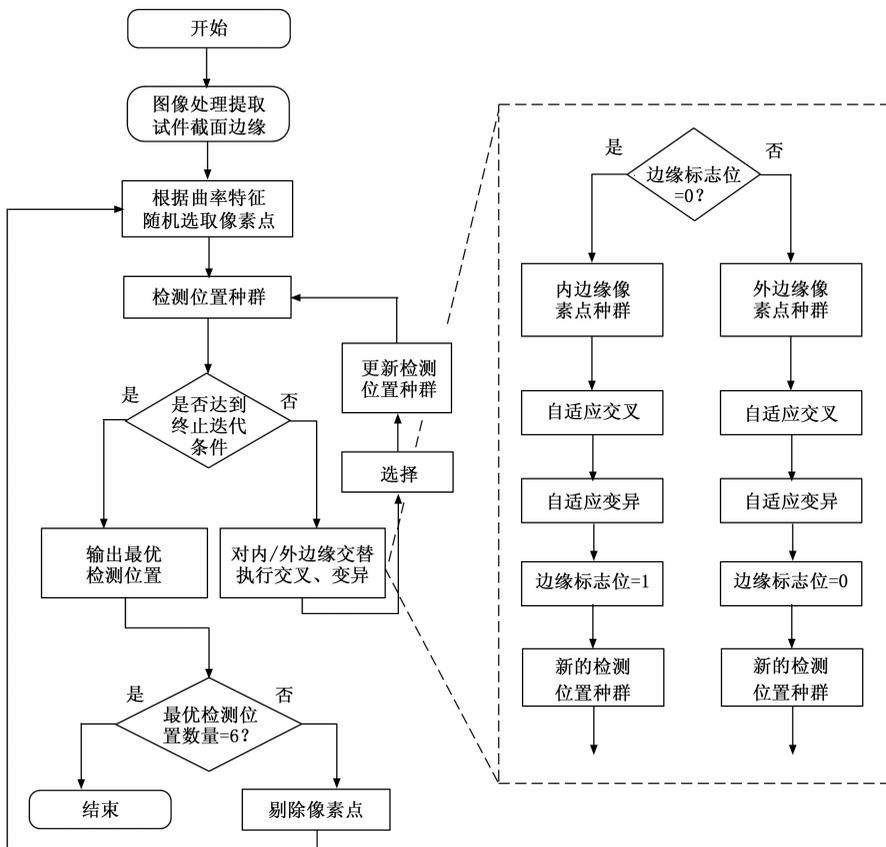


图 2 自适应局部交替遗传算法的检测流程

且检测位置由内外边缘像素点共同组成, 内外边缘对求解结果的联系紧密, 若同时对内外边缘使用传统遗传算法进行概率搜索, 则无法保证局部搜索能力, 容易错过全局最优解。因此, 本文提出一种自适应局部交替的遗传算法并应用于线缆绝缘厚度检测中, 整体流程如图 2 所示。具体流程如下:

1) 通过图像处理技术采集到试件截面图像, 并提取其内外边缘信息;

2) 通过图像处理技术计算截面曲率大小, 根据局部曲率大小自适应地随机在内外边缘选取像素点;

3) 遍历计算内外边缘像素点距离, 取其最小值作为检测位置个体, 生成初始检测位置种群;

4) 判断当前种群是否达到停止迭代进化的条件, 如果达到终止迭代条件 (迭代次数达到限值或解在给定数量的代际之间不再变化), 则输出最优检测位置并转向 7), 否则转向 5);

5) 对检测位置种群中的内外边缘执行局部交替自适应变异和交叉操作, 即相比传统遗传算法的多参数合并编码遗传而言, 本方法每次只对一个参数执行遗传操作, 并和另外一个暂未遗传的参数共同生成新的检测位置种群;

6) 对新、旧检测位置种群进行选择操作并更新检测位置种群, 转向 4);

7) 如果检测位置个数为 6, 则算法结束, 否则转向 8);

8) 对当前内外边缘剔除一定比例的像素点, 转向 2)。

下面给出基于 ALA-GA 的检测算法的伪代码描述。

输入: 线缆试件图像, 个体编码方法  $C$ , 个体适应度评价函数  $E$ , 检测位置种群  $P$ , 种群大小  $M$ , 交叉算子  $\Gamma$ , 变异算子  $\phi$ , 选择算子  $\varphi$ , 遗传终止迭代条件  $T$ , 检测终止条件  $I$

输出: 6 个最优绝缘厚度检测位置及厚度值 (含最薄绝缘厚度)

过程:

```
(1) Begin
(2) Get contours of sample;
(3) For i=0 to I do
(4)   Initialize Pi(0) by curvatur
(5)   If (t≤T) do
(6)     Output best detection locations
(7)     i=i+1
(8)   If (i 6) do
(9)     End
(10)   Else:
(11)     Delete pixel points
(12)   Else:
(13)     If contourFlag = 0:
(14)       Adaptive local-alternate crossover operation
to Pi(t)
(15)       Adaptive local-alternate Mutation operation
to Pi(t)
(16)       contourFlag=1
(17)   Else:
(18)     Adaptive local-alternate Crossover operation
```

```
to Pi(t)
(19)       Adaptive local-alternate Mutation operation
to Pi(t)
(20)       contourFlag=0
(21)       Globally mix and match
(22)       Globally select operation to Pi(t)
(23)       Update Pi(t)
(24)   End
```

## 2.2 自适应局部交替遗传算法 (ALA-GA)

本文提出的自适应局部交替遗传算法 (ALA-GA) 在传统遗传算法的基础上结合线缆绝缘厚度检测问题进行改进, 其中自适应局部交替的概念如下:

1) 自适应: 表示结合线缆曲率特征和适应度自适应进行初始种群生成、交叉和变异等操作;

2) 局部交替: 表示每次只在线缆截面某一边缘像素点基因执行遗传操作, 逐次交替执行进而获得全局最优解。

### 2.2.1 多染色体独立编码

由于线缆截面内外边缘像素点是与数组索引一一对应且按照索引顺序排列的, 所以可对像素点的所在数组索引进行编码; 另外在图像处理中, 连续的像素点往往具有密切的关联性。为了更好地在局部区域逼近最优解, 本文选择格雷码编码方法而非传统的二进制编码。格雷码编码<sup>[22]</sup>的特点是相邻两个整数在编码中仅有一个码位的差异, 这导致编码相邻的像素点数组索引在搜索空间中相对接近, 在传统二进制编码中, 相邻整数的二进制表示有多个位的不同, 单个位置的变化会导致映射的整数发生较大跳跃, 容易错过局部优质解。例如对于像素点索引 7 和索引 8, 使用 4 位二进制编码分别为 0111 和 1000, 而使用同样 4 位格雷码编码分别为 0100 和 1100, 可以看出使用二进制编码从索引 7 搜索到索引 8 需要 3 个编码位置同时发生变异, 而格雷码仅需 1 个编码位置。

由于格雷码在表示连续整数索引更加紧凑, 这种相邻点的相似性使得格雷码在局部搜索时能更加精细地定位最优解, 能有效增强遗传算法的局部搜索能力, 并且便于计算机对交叉、变异等生物学遗传概念的具象化实现。

由于外边缘数组长度必定大于内边缘, 故根据外边缘的数组长度确定格雷码编码位数, 分别对内外边缘像素点索引进行编码。例如, 若外边缘长度为 935, 则编码位数为 10 位, 外边缘编码如表 1 所示。这种灵活的编码方式使得算法能够根据图像大小自适应地选择编码长度, 提高了算法的适应性和通用性。

表 1 外边缘像素点的编码规则

像素点	索引	格雷码编码
(302,55)	0	0000000000
...	...	...
(372,373)	432	0101101000
...	...	...
(301,55)	935	1001110100

若一个绝缘厚度测量位置个体由  $C_{in}$  中的第 243 个像素点  $I_{243}$  和  $C_{out}$  中的第 457 个像素点  $O_{457}$  组成, 其中,  $I_{243} = (332, 297)$  和  $O_{457} = (347, 380)$ , 则该位置个体表现型可表示为:

$$x_{243,457} = (I_{243}, O_{457}) = [(332, 297), (347, 380)] \quad (6)$$

对于多变量的优化问题来说, 传统遗传算法采用多参数级联编码或者交叉编码的方式, 将个体所有参数共同编码至同一串染色体基因型中<sup>[23]</sup>, 对于绝缘厚度的求解而言, 检测位置的内外边缘像素点关系非常密切, 采用多参数合并编码的方式会导致局部搜索能力不足, 而 ALA-GA 提出多染色体独立编码 (MIC, multichromosome independent coding) 方式, 对不同的参数分别编码, 不同的参数可看作独立的染色体基因型, 后续对这些染色体基因型分别交替执行遗传操作。

对于式 (6)  $x_{243,457}^T$  的下标索引进行 MIC 得到染色体基因型如图 3 所示。

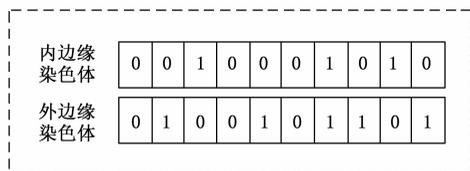


图 3 某绝缘厚度位置个体编码示意图

### 2.2.2 适应度函数设计

在遗传算法中, 适应度函数的设计对算法的性能起着至关重要的作用。适应度函数的目标是准确反映个体的优劣程度, 以便算法能够根据这些信息进行搜索。本文面临的问题是绝缘厚度最小化, 因此适应度函数的设计需要直接反映绝缘厚度的优劣, 可通过绝缘厚度直接取倒数转换得到:

$$f(x_j, k) = 1/dst(x_j, k) \quad (7)$$

由式 (7) 可得, 当某检测位置的绝缘厚度越小时, 该位置个体的适应度值越大。这种设计保证了适应度函数能够准确地反映出绝缘厚度的优劣, 使得遗传算法能够朝着最小化绝缘厚度的方向进行搜索。

### 2.2.3 初始种群的生成

初始种群的优劣直接决定遗传过程的快慢, 结合试件实际特点, 试件边缘的曲率表示着边缘的弯曲程度, 由于试件边缘的凹陷处曲率一般较大, 因此对于任何形状截面的线缆试件在曲率较大处更可能取得较薄绝缘厚度, 所以为了保证初始种群基因的优质性与丰富性, 通过局部曲率提取算法 (LCEA, local curvature extraction algorithm) 计算试件截面的曲率特征, 该算法步骤如下:

- 1) 根据像素点多少将边缘分割为  $m$  段线段, 其中  $m$  为分割系数;
- 2) 计算线段中点到线段左端点连线与  $x$  轴夹角  $\alpha$ ;
- 3) 计算线段中点到右端点与  $x$  轴的夹角  $\beta$ ;

4) 计算线段中点的曲率  $c = \frac{\alpha - \beta}{2g + 1}$ , 其中  $g$  为线段长度;

5) 遍历计算所有线段的曲率。

由此, 对所有线段曲率进行排序, 从小到大分为  $n$  个曲率区间。每个线段的随机样本数量取决于该线段曲率处于的区间, 即若线段的曲率在第  $k$  个曲率区间中, 则在该线段随机选取  $k$  个像素点, 其中  $1 \leq k \leq n$ 。

故可得到  $n$  个初始选取的  $C_{in}$  样本点和  $C_{out}$  样本点, 遍历计算  $C_{in}$  上每个样本点与  $C_{out}$  样本点之间的距离, 取其最小值对应的  $C_{out}$  样本点组成一个绝缘厚度检测位置个体, 如此可得一些绝缘厚度检测位置作为初始种群。

### 2.2.4 自适应局部循环异位交叉和变异

传统遗传算法中的交叉是一个概率事件, 搜索速度较慢。本文由于将选择运算置后, 对当前边缘像素种群则不经选择, 直接随机选择两个不同个体进行交叉和变异操作。交叉、变异过程如下:

1) 依次选择个体的某条染色体;

2) 根据个体的适应度大小, 对染色体基因型进行自适应交叉和变异;

3) 若子代编码在定义域中则结束, 否则将子代编码减去对应边缘最大编码作为其基因型。

其中, 对于上述过程的 2, 由于使用格雷码编码, 在低适应度情况下的概率搜索速度较为缓慢, 故设计一种提升鲁棒性的 sigmoid 非线性自适应计算方式, 融入约束指数函数改善算子适应性, 能更好地跳出局部最优解, 改进后的交叉、变异算子概率由式 (8) (9) 确定:

$$P_c = P_{c1} + \frac{P_{c2}}{1 + e^{\lambda \cdot (f - f_{\max}) / (f_{\max} - f_{\min})}} \quad (8)$$

$$P_m = P_{m1} + \frac{P_{m2}}{1 + e^{\mu \cdot (f - f_{\max}) / (f_{\max} - f_{\min})}} \quad (9)$$

其中:  $f_{\max}$  为种群个体最大适应度,  $f_{\min}$  为种群个体最小适应度,  $f_{\text{avg}}$  为种群平均适应度,  $f$  为要交叉的两个个体中较小的适应度。

由式 (8) 和式 (9) 可知, 当个体适应度较低时, 交叉率和变异率逼近最大值, 加速解的搜索速度; 而当个体适应度较高时, 由 sigmoid 函数约束其趋近最低水平, 保护优秀个体的染色体不被破坏。

另外, 为了进一步提高算法搜索效率, 交叉、变异方式由表 2、表 3 确定, 其中  $f'$  为个体适应度。某次遗传操作如图 4 所示, 根据适应度确定交叉方式为随机双位交叉, 个体 1 变异方式随机单点变异, 个体 2 变异方式为随机双点变异。

表 2 交叉方式规则

适应度条件	交叉方式
$f \geq f_{\text{avg}}$	随机单位交叉
$f < f_{\text{avg}}$	随机双位交叉

表 3 变异方式规则

适应度条件	变异方式
$f' \geq f_{avg}$	随机单点变异
$f' < f_{avg}$	随机双点变异

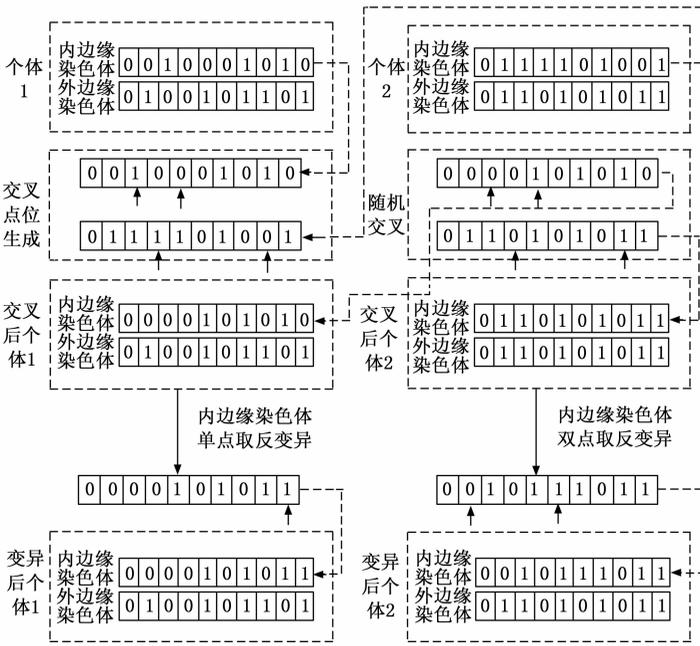


图 4 某次交叉、变异操作

### 2.2.5 染色体混合配对

由于内外边缘像素点位置都对绝缘厚度有重要的影响，任一边缘像素点都会引起绝缘厚度变化，若对于 2.3.1 提出的 MIC 得到的编码进行传统交叉、变异和选择操作，会

因两个染色体同时发生变化而丢失优质基因。故为了提高算法的局部搜索能力，本文提出内外边缘染色体混合配对更新机制 (CMUM, chromosome mix-and-match updating mechanism)，即当前种群个体某边缘染色体完成交叉和变异后的子代并不直接形成新种群，而是和种群所有个体另一边边缘染色体混合并进行遍历配对，如图 5 所示，将适应度高的两两染色体配对形成新的个体，进而生成全新的检测位置种群，以执行后续选择操作。

### 2.2.6 选择

传统遗传算法的选择操作采用轮盘赌策略，且在交叉和变异之前<sup>[23]</sup>，用于选择适应度较高的个体执行遗传操作，选择能力、效率和范围相对不足，为了进一步加速算法收敛，将选择操作置后，并且对新旧种群共同执行精英保留策略，扩大精英保留的选择范围，进一步提高全局收敛性。即当前边缘  $n$  个像素点染色体经过交叉和变异后，生成新的  $n$  个像素点，由 2.2.5 的染色体混合配对遍历计算生成的新的像素点和另一边边缘像素点间的距离，取其最小值的组合作为新的检测位置种群，进而得到新的检测位置种群，将旧的检测位置种群和新的位置种群按照适应度从大到小进行排序，去除重复的个体，取前  $n$  个个体作为下一轮的检测位置种群，如此可以确保较优个体的基因遗传到下一代种群，具体步骤如下：

- 1) 按式 (2) 遍历计算交叉、变异后像素点距离，取其中  $n$  个较小距离的像素点组合作为新的检测位置种群  $P_{new}$ ；
- 2) 根据式 (7) 计算  $P_{new}$  的适应度大小；
- 3) 将新种群  $P_{new}$  和旧种群  $P_{old}$  所有个体按适应度从大到小排序，去除重复个体，取前  $n$  个个体作为下一轮的检测位置种群。

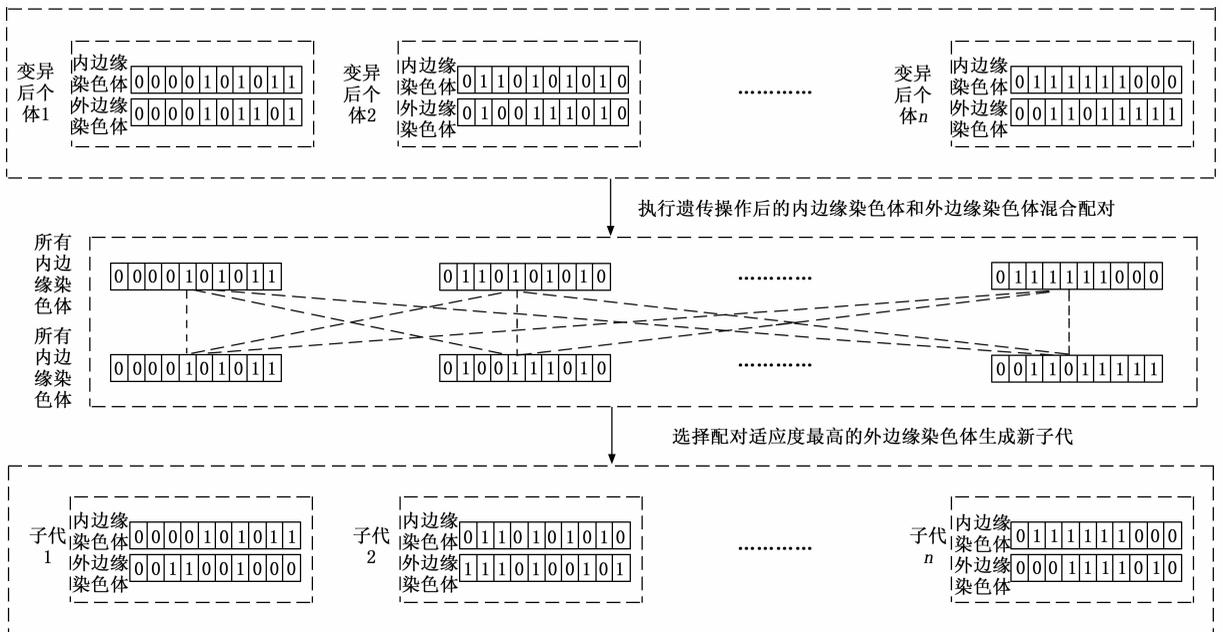


图 5 染色体混合配对更新机制

### 3 算法实验与结果分析

#### 3.1 不同方法性能对比实验

为了验证 ALA-GA 在线缆绝缘厚度检测中的有效性, 使用广州海科思 Accura III 2010 影像测量仪采集线缆图像 (图 6), 通过 Python-3.9.7 和 OpenCV-4.5.5.62 实现了所提出算法, 使用传统标准方法和在电脑主机 (Intel i5-3470, CPU @ 3.20 GHz, 16 GB RAM, Window 10 系统) 运行不同的机器视觉算法程序对 3 种不同线缆标准试件图像 (图 7) 进行了大量的对比实验。

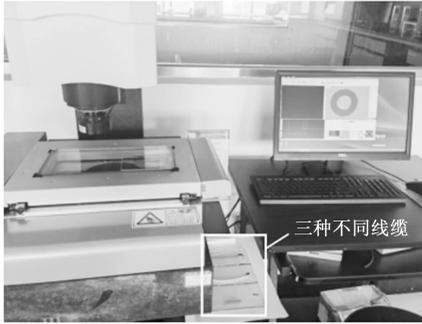


图 6 图像采集设备

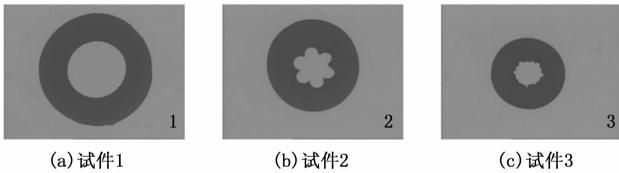


图 7 线缆绝缘标准试件图像

(试件 1 为规整线缆, 试件 2、3 为不规整线缆)

ALA-GA 的主要参数设置如表 4 所示。

表 4 ALA-GA 的主要参数

参数	符号	取值
分割系数	$m$	5
种群大小	$M$	50
迭代次数	$iter$	50
交叉概率	$P_{c1}, P_{c2}$	0.3, 0.6
变异概率	$P_{m1}, P_{m2}$	0.2, 0.5
自适应系数	$\lambda, \mu$	2, 5
剔除系数	$\alpha$	0.8

使用 ALA-GA 对线缆试件根据局部曲率特征生成的检测位置种群 (以试件 3 为例) 和进行绝缘厚度检测的过程 (以试件 2 为例) 分别如图 8 和图 9 所示。可以看出, 根据曲率特征生成初始检测位置种群集中在线缆试件边缘凹陷处, 对于不规整试件而言, 内外边缘弯曲程度大的地方能测出更薄的绝缘厚度, 大大提高生成种群拥有优质基因的概率, 从源头上缩小了解空间。

另外, 使用 GA、PSO 和 ACO 对同样的试件 2 图像进行对比检测分析, 如图 10 所示, 可看出, 其他方法容易陷

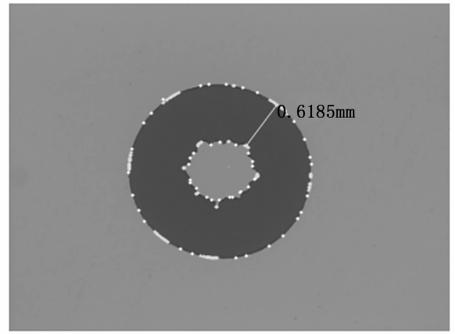


图 8 根据局部曲率特征生成的检测位置种群 (试件 3)

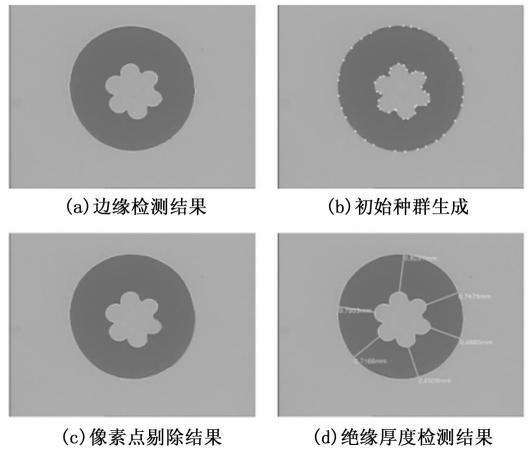


图 9 线缆绝缘厚度检测结果 (试件 2)

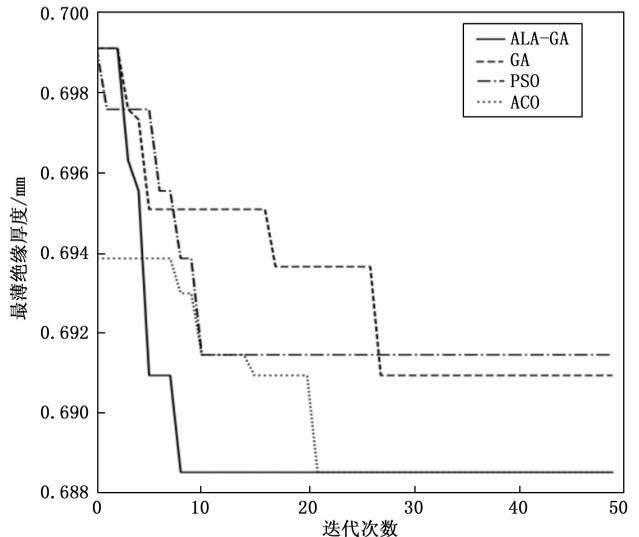


图 10 最薄绝缘厚度检测曲线对比

入早熟, 且收敛速度慢, 而 ALA-GA 在 10~20 代就能收敛到全局最优解。

本文使用不同方法对不同试件不同角度进行了 100 次独立测量, 其平均检测时间、最薄绝缘厚度偏差、平均绝缘厚度测量偏差和最薄绝缘厚度测量标准差如表 5 所示

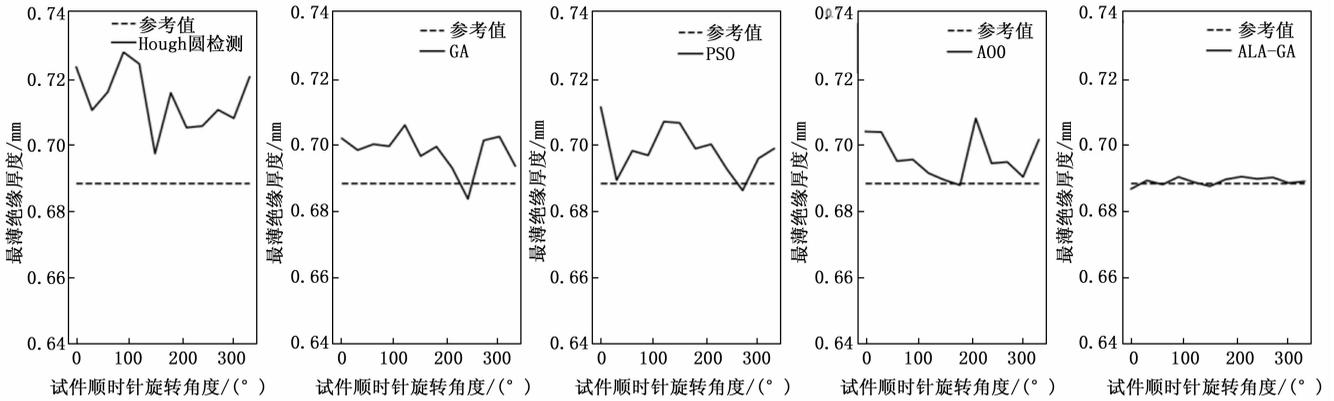


图 11 不同算法最薄绝缘厚度随试件旋转角度变化图

(其中由于人工传统方法受设备限制, 精度为 0.001 mm), 表中加粗数据表示最优算法。本文在表 5 中采用测量偏差<sup>[24-25]</sup>来评价数据, 其测量偏差的计算公式如下:

$$\sigma = |\gamma - \mu| \quad (10)$$

其中:  $\gamma$  为实测值,  $\mu$  为真值或参考值。

表 5 不同方法评价指标对比

方法	平均检测时间/s	最薄绝缘厚度测量偏差/mm	平均绝缘厚度测量偏差/mm	最薄绝缘厚度测量标准差/mm
规整试件				
传统人工方法	301	0.015	0.011	0.017 1
Hough 圆检测	7.2	0.010 8	0.009 1	0.009 5
遗传算法(GA)	3.2	0.008 3	0.008 1	0.005 6
粒子群优化算法(PSO)	2.8	0.006 5	0.008 7	0.005 9
蚁群算法(ACO)	2.5	0.006 8	0.007 3	0.005 5
自适应局部交替遗传算法(ALA-GA)	<b>0.6</b>	<b>0.001 2</b>	<b>0.001 3</b>	<b>0.001 8</b>
不规整试件				
传统人工方法	413	0.014	0.013	0.013 5
Hough 圆检测	7.0	0.018 2	0.019 3	0.018 6
遗传算法(GA)	3.5	0.006 7	0.008 6	0.007 1
粒子群优化算法(PSO)	3.1	0.007 3	0.009 7	0.005 7
蚁群算法(ACO)	2.9	0.006 5	0.007 1	0.005 3
自适应局部交替遗传算法(ALA-GA)	<b>0.7</b>	<b>0.001 5</b>	<b>0.001 7</b>	<b>0.002 1</b>

根据表 5 的详细数据分析可得出以下几点结论:

1) 在试件测量方面, 传统的人工方法依赖于感官观察和主观判断, 因此时间代价较高且重复性差。在规整试件上, 人工方法的测量误差较大, 这表明人工方法无法提供一致的测量结果。然而, 在不规整试件上, 人工方法的测量误差略优于基于 Hough 圆检测的机器视觉方法。这是因

为人工观察能够根据试件的不规则形状作出更精确的判断, 而 Hough 圆检测方法受到形状复杂性的影响而导致测量误差增加。

2) 基于 Hough 圆检测的机器视觉技术结合试件近似形心确定和射线遍历的方法具有较小的时间代价。然而, 对于不规整试件, 其最优的绝缘厚度检测位置连线往往不经过形心, 导致该方法的测量误差较大, 这表明在处理不规整形状的试件时, 该方法不够准确。

3) 机器视觉技术结合遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、蚁群算法(ACO)和自适应局部交替遗传算法(ALA-GA)的方法在时间代价、测量偏差和重复性方面表现出色, 尤其是 ALA-GA 方法在测量重复性方面表现优异。这表明结合这些优化算法的机器视觉方法在试件测量中取得了显著的优势, 尤其是 ALA-GA 方法表现最优。

另外, 对不同旋转角度的同一标准试件图像进行最薄绝缘厚度检测的结果显示, ALA-GA 在测量重复性方面受样品放置姿态影响最小。这进一步表明了 ALA-GA 方法对试件放置姿态变化的鲁棒性和良好的测量重复性。该特性对于实际应用中存在的试件位置变化至关重要, 表明 ALA-GA 方法在实际线缆检测中具有良好的鲁棒性和测量一致性。

### 3.2 能力验证

本文使用不同方法参加中国国检测试控股集团股份有限公司组织的电线电缆产品绝缘厚度的能力验证计划<sup>[26-27]</sup>, 样品及包装如图 12 所示, 其结果如表 7 所示。



图 12 能力验证样品及包装

表 7 不同方法对能力验证样品的测试数据

方法	平均绝缘厚度/mm
传统人工方法	0.841
Hough 圆检测	0.821 3
GA	0.813 1
PSO	0.813 7
ACO	0.812 3
ALA-GA	0.806 6
参考值[27]	0.805

在本次线缆绝缘厚度检测的能力验证中, 通过与参考值的对比, 得到了不同方法的偏差结果。其中, 传统人工方法、Hough 圆检测、遗传算法 (GA)、粒子群优化算法 (PSO)、蚁群算法 (ACO) 与参考值的差值分别为 0.036 0、0.016 3、0.008 1、0.008 7、0.007 3 mm。而 ALA-GA 方法在相同的测试条件下测量偏差仅为 0.001 6 mm。通过 Z 比分数的评估, ALA-GA 的 Z 比为 -0.02, 这表明其偏差处于可接受的水平, 并且相较于其他方法, ALA-GA 在偏差方面更为稳定, 且相对其他方法时间代价也为最小, 故可证实 ALA-GA 在检测线缆绝缘厚度的有效性和优越性, 对于尤其需要高效率、高精度的工业生产及检测活动中优势明显。

#### 4 结束语

本文提出了一种基于 ALA-GA (Adaptive Locally-Alternate Genetic Algorithm) 交替搜索线缆截面内外边缘的线缆厚度检测方法。相较于传统的机器视觉测量方法, 该方法克服了仅能应对简单线缆截面结构的局限, 从而扩大了适用范围并显著加快了检测速度。同时, 本文针对线缆试件的实际特点, 对传统的遗传算法进行了改进, 包括初始种群生成、交叉、变异以及遗传方式等方面, 以更好地适应线缆绝缘厚度检测的需求。

在初始种群生成方面, 结合线缆试件的特殊性, 本文通过引入先验知识和问题特征, 采用结合曲率特征生成初始种群, 不仅提高了初始种群的质量, 也有助于加速算法的收敛过程。交叉和变异是遗传算法中关键的演化操作。本文通过对线缆试件的特殊结构进行分析, 优化了交叉方式, 使得在种群中更好地传递和组合有利信息。同时, 在变异操作中, 引入了自适应机制, 使得算法能够更灵活地调整变异策略, 从而更好地适应线缆厚度检测的特殊任务。选择方式着眼于提高算法的全局搜索能力。本文结合线缆试件的复杂结构, 调整选择方式, 使其更灵活地在全局范围内搜索, 确保算法能够更好地发现全局最优解。

通过大量的对比实验分析, 本文提出的方法在适用范围、减小误差、重复性、再现性和效率等方面均表现出显著提高。这为实际线缆检测提供了更为可靠和高效的解决方案, 具有广泛的应用前景。

未来的研究方向将聚焦于生产领域实时线缆截面视觉输入的绝缘厚度检测, 旨在满足生产领域对异构线缆绝缘

厚度实时动态控制的需求, 进一步提高算法的泛化能力。通过在实际生产环境中进行测试和验证, 将使得该算法更好地适应各种线缆结构和工作条件, 为线缆制造及检测提供更为可靠的质量控制工具。

#### 参考文献:

- [1] 周文华, 陈均贤. 低压类电线电缆绝缘厚度测量装置 [J]. 中国高科技, 2020 (5): 125-126.
- [2] GB/T 5023.3-2008. 额定电压 450/750 V 及以下聚氯乙烯绝缘电缆 第 3 部分: 固定布线用无护套电缆 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008: 2-9.
- [3] GB/T 5023.1-2008. 额定电压 450/750 V 及以下聚氯乙烯绝缘电缆 第 1 部分: 一般要求 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008: 4-5.
- [4] GB/T 2951.11-2008. 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 11 部分: 通用试验方法——厚度和外形尺寸测量——机械性能试验 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008: 2-11.
- [5] 杜冠廷. 基于机器视觉的电缆绝缘厚度测量研究 [J]. 广东建材, 2017, 1 (1): 28-31.
- [6] 邹丽君. 基于图像处理的电缆绝缘层厚度测量的研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009.
- [7] 谢莉杰, 吴启震. 基于 Matlab 的电缆绝缘护套厚度测量系统的设计与实现 [J]. 质量技术监督研究, 2015, 39 (3): 182-184.
- [8] 刘 罡. 基于机器视觉的电线电缆绝缘厚度检测研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- [9] 王爱军, 田东哲, 李宇翔, 等. 基于切线法定位圆心的电缆横截面几何尺寸自动测量方法的设计与实现 [J]. 郑州大学学报 (理学版), 2018, 50 (2): 111-115.
- [10] 王昊天. 基于图像的电缆几何参数检测算法研究及应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [11] JI L W, LI Z. Measurement of cable thickness based on sub-pixel image processing [C] //IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Chengdu, IEEE, 2011, 3: 38-41.
- [12] BIAN J H, WANG J L, XU S, et al. A cable sheath material thickness measurement method based on image measurement technology [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 182: 477-481.
- [13] ABUALIGAH L, YOUSRI D, ABD ELAZIZ M, et al. Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 157: 107250.
- [14] ZAMAN H R R, GHAREHCHOPOGH F S. An improved particle swarm optimization with backtracking search optimization algorithm for solving continuous optimization problems [J]. Engineering with Computers, 2021: 1-35.
- [14] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future [J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80 (5): 8091-8126.

(下转第 71 页)