

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.022

字轮式水表数字定位与分割方法研究

杨聪聪, 姜金华

(上海第二工业大学 智能制造与控制工程学院, 上海 201209)

摘 要: 针对因环境变化造成水表字轮区域定位不准、传统分割昏暗以及场景字符区域时常出现数字与背景大面积粘连等问题, 提出预处理结合 Hough 圆检测与直线检测的方法实现字轮区域定位, 同时提出一种改进海鸥分割算法: 一是 Halton 序列初始化种子, 保证种子分布的均匀性和多样性; 二是非线性权重因子增强海鸥算法寻优能力, 将改进的海鸥优化算法用于水表数字与背景分割。实验表明: 定位算法针对图片模糊、反光等特殊水表图像字符区域定位精度高、抗干扰能力强, 同时改进的海鸥算法在分割复杂背景下的水表字符时相较传统分割, 能有效减少数字与背景的粘连, 提高字符识别准确率。

关键词: 水表; Hough 圆检测; 直线检测; 海鸥优化算法; Halton 序列; 自适应权重

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2026)01-0121-05

Research on Digital Positioning and Segmentation Method of Wheel-type Water Meter

YANG Congcong, JIANG Jinhua

(School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: To address the problem of inaccurate positioning of the water table character wheel region due to environmental changes and large-area adhesion between the digits and the background caused by the traditional segmentation of the character region in dim and other scenes, this paper proposes a preprocessing method combining the Hough circle detection and the straight line detection to realize the positioning of the character wheel region, and meanwhile puts forward an improved seagull segmentation algorithm: initialized seed Halton sequences guaranteeing the uniformity and diversity, and the nonlinear weight factor enhancing the optimization ability of seagull algorithm and applying the improving seagull optimization algorithm to water meter number and background segmentation. Experiments show that the proposed localization algorithm has strong localization accuracy and anti-interference ability for special water meter image character areas such as fuzzy pictures and reflections, and the improved seagull algorithm can effectively reduce the adhesion between the digits and the background and improve the accuracy of character recognition compared with the traditional segmentation when segmenting the water meter characters in the complex background.

Keywords: watermeter; Hough circle detection; linear detection; seagull optimization algorithm; Halton sequence; adaptive weighting

0 引言

水表的智能化识别可以大大提升抄表计费工作的效率和准确性^[1]。识别的核心是通过有效的图像处理方法来解决字符定位、分割和识别。本文针对现阶段传统算法对水表字轮区域定位和分割困难的问题展开了研究。

在字符区域定位问题上, 先验知识统计字符区域大概位置^[2]实现字符区域定位; 模板匹配水表字符区域 H 和 m^3 ^[3]实现字符区域定位; 直线检测字符区域边缘直线^[4]实现字符区域的定位。上

述方法均是在固定场景下实现水表字符区域定位, 对于自然环境下采集的水表图像定位精度较低。本文提出一种预处理结合 Hough 圆检测与直线检测的方法, 能够有效提高字符区域定位的准确率, 同时反光等特殊环境下的水表图像均能实现字符区域的有效定位, 算法抗干扰能力与稳定性强。

深度学习方法、群智能算法以及其他分割方法在目标与背景分割的问题上均取得了一些成果, 其中群智能算法收敛快, 灵活性强, 搜索范围广, 其发展前景较好^[5]。张俊宝^[6]提出了基于改进 PSO 的二维 Otsu 分割算法, 可以快速、准确、稳

第一作者简介: 杨聪聪(1997—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为图像处理、数字识别、群智能算法, 137473562@qq.com。

定地获取分割阈值。闫哲等^[7]提出一种改进的鲸鱼优化算法与最大熵算法相结合算法,分割效果更精确,且提高了运算速度。WANG 等^[8]将莱维飞行引入樽海鞘群算法提升了算法搜索空间来增强图像分割能力。其他如麻雀算法^[9]、遗传算法^[10]等在图像分割中也取得了一些成果。

DHIMAN 等^[11]提出海鸥优化算法。标准海鸥优化算法与其他智能算法相比具有调参方便、操作简单等优点^[12]。传统海鸥分割算法初始化种子在空间区域内随机生成分布均匀性差,种群多样性较差。同时,传统海鸥全局线性搜索容易使算法搜索能力不足。针对上述问题,本文采用海鸥优化 OTSU 实现图像分割,提出 Halton 初始化海鸥种子点,另一方面使用非线性搜索策略增加算法搜索能力,实现水表数字与背景分割。

本文方法总体分成 3 步:第 1 步,预处理后,通过 Hough 圆检测与 Hough 直线检测获取表盘与水表直线坐标信息;第 2 步,根据坐标信息完成原图像中字符区域的校正和提取;第 3 步,利用改进的海鸥优化算法,完成复杂背景下字符的分割,最后通过 OCR 与模板匹配证明分割算法可以有效提升数字识别的准确率。总体流程如图 1 所示。

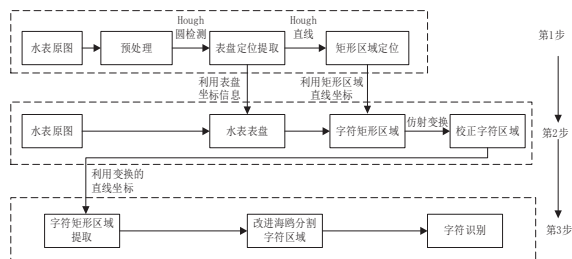


图 1 总体流程图

1 图像预处理

在进行水表表盘定位和字轮区域定位时,对采集的水表图像进行预处理,其目的是为了减少噪声干扰同时突出边缘信息,提高其定位准确率和效率。以下为图像预处理步骤。

1.1 图像的灰度化

为减少水表彩色图像计算量,通过灰度化^[13]的方法将图像从 3 个通道变为 1 个通道以显示图像信息。根据人眼对红绿蓝 (RGB) 三原色的敏感程度不同而加权,经式(1)实现灰度化。

$$G_{\text{ray}}(i,j) = 0.299 \cdot R(i,j) + 0.518 \cdot G(i,j) + 0.114 \cdot B(i,j) \quad (1)$$

式中 (i,j) 为图像中某个点的坐标。

1.2 边缘检测

对灰度化水表图像进行检测时,Sobel^[14]边缘检测算子可以清晰提取表盘的圆轮廓以及字符区域的直线。Sobel 边缘检测算子是从垂直和水平方向计算梯度效果,其中卷积模板分别为 $F_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 和 $F_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$ 。灰度图像像素点分别与 F_x 和 F_y 进行卷积运算,再通过梯度幅值计算式(2)进行 Sobel 算子边缘提取。

$$|F| = |F_x| + |F_y| \quad (2)$$

1.3 形态学处理

针对边缘检测完成的水表图像,在凸显水表细节信息的过程中,少量噪声易被误认为是图像细节信息而得到增强。为减少干扰噪声,对图像进行删除小面积区域的形态学操作,在凸显图像水表表盘和字符区域细节信息的同时提高后续定位的精度和速率。

2 定位与分割

水表原图在预处理完成后,结合 Hough 圆检测^[15]和 Hough 直线检测^[16]完成表盘和字符矩形直线坐标的获取。

1) Hough 圆检测

已知在图像空间中一个圆可以表示为

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 = r^2 \quad (3)$$

式中: (x_0, y_0) 为检测图像中圆的圆心坐标; r 为圆的半径; (x_i, y_i) 为图像中检测圆的圆周上的点。

目前实现图像空间中圆轮廓的检测最为广泛的方法是 Hough 圆检测,其基本原理是将图像空间中的像素点映射到参数空间中,通过选取参数空间中的多个圆锥面交点实现图像空间中圆的检测。图 2 展示了图像空间中圆边缘点的像素点映射至三维参数空间后所形成的锥面簇。

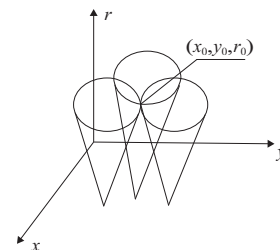


图 2 圆在参数空间中的映射

在 Hough 圆检测算法中通过定义的三维极坐

标参数空间 (x, y, r) ,将图像空间中所有可能是圆边缘点的像素点通过遍历图像像素以 r 变化的方式映射到参数空间中,当检测到图像空间中真正的圆,对应到参数空间中就是多个像素点形成的圆锥面簇的交点,该交点即为图像空间中检测的圆。接着通过最小外接矩形分割出表盘区域。

2) Hough 直线检测

提取的表盘采用 Hough 直线检测字符区域上下边缘的直线。Hough 直线变换利用点与线的对偶性把图像空间中的直线检测问题转换为参数空间中寻找峰值的问题。

图像空间中通过某个像素点的多条直线用 Hough 变换将其变换到参数空间中,用极坐标方式表达为

$$L = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4)$$

式中: θ 为垂直距离直线与 x 轴的夹角,范围在 $[-90^\circ, 90^\circ]$; L 为垂直距离。

在 Hough 变换的过程中,算法将图像空间中像素点依次代入式(4),通过改变 θ 值,得到每个旋转角度对应的 L 值。因此图像空间中通过某一像素点的所有直线映射到霍夫空间中就成为一条曲线,依次遍历整幅图像中的像素点,就会在霍夫空间中得到多条曲线,曲线交点(峰值点)即为图像空间中检测到的直线。

3) 图像旋转校正

直线检测标注两个端点坐标,对比两个端点的横坐标值,起点为 x 较小值,终点为 x 较大值,根据定义的起点和终点利用式(5)实现图像的旋转校正。

$$\beta = \arctan \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (5)$$

式中: β 为偏移角度; (x_1, y_1) 为起点坐标; (x_2, y_2) 为终点坐标。

依据旋转角度,以图像中心为旋转中心进行新坐标的计算,如式(6)、式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} x_{12} \\ y_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ y_{11} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_{22} \\ y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{21} \\ y_{21} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: (x_{11}, y_{11}) 、 (x_{21}, y_{21}) 为校正前水表直线坐标; (x_{12}, y_{12}) 、 (x_{22}, y_{22}) 为仿射变换后的水表直线坐标。

3 改进海鸥优化的 OTSU 算法

本文利用上述表盘和矩形区域直线坐标信息

实现在原图像中字符区域的提取。主要是因为字符区域处于复杂环境当中,传统阈值分割方法无法有效解决数字与背景粘连的问题。因此本文利用改进的海鸥优化二维 OTSU 实现数字与背景的分割,减小数字与背景粘连。

3.1 海鸥优化算法

1) 迁徙(全局)

a) 避免碰撞。算法为避免海鸥之间发生碰撞利用附加控制变量 A 来控制。

$$C_i(t) = A \cdot X_i(t) \quad (8)$$

式中: $C_i(t)$ 为新位置; t 为迭代次数; $X_i(t)$ 为当前位置; A 为惯性权重因子。

$$A = f_c - [t \cdot f_c / M_{\text{axiter}}] \quad (9)$$

式中: f_c 为常数 2,控制 A 的变化频率; t 为迭代次数; A 从 2 线性下降到 0; M_{axiter} 表示最大迭代次数。

b) 最佳位置方向。在参数 A 的控制下,海鸥个体会向全局最优位置移动。

$$M_i(t) = B \cdot (X_{bi}(t) - X_i(t)) \quad (10)$$

$$B = 2 \cdot A^2 \cdot r_d \quad (11)$$

式中: $M_i(t)$ 为最佳位置方向; $X_{bi}(t)$ 为最佳海鸥位置; B 为随机因子; r_d 为 $[0, 1]$ 内的随机数。

c) 最优位置。海鸥朝着全局最优位置所在的方向移动从而到达新的位置。

$$D_i(t) = |C_i(t) + M_i(t)| \quad (12)$$

式中 $D_i(t)$ 为海鸥移动的新位置。

2) 攻击(局部)

海鸥会不断地改变攻击的角度和速度,以螺旋运动的方式进攻目标。 x 平面、 y 平面和 z 平面中的运动描述如下:

$$x = p \cdot \cos \theta_{rd} \quad (13)$$

$$y = p \cdot \sin \theta_{rd} \quad (14)$$

$$z = p \cdot \theta_{rd} \quad (15)$$

$$p = u \cdot e^{\theta_{rd} v} \quad (16)$$

式中: p 为螺旋运动的半径; θ_{rd} 是在 $(0, 2\pi)$ 中随机角度值; u 、 v 为常数 1。海鸥的攻击位置如下

$$X_{mi}(t) = D_i(t) \cdot x \cdot y \cdot z + X_{bi}(t) \quad (17)$$

式中 $X_{mi}(t)$ 为海鸥新位置。

3.2 改进的海鸥优化算法^[17-18]

1) Halton 序列初始化种子

传统海鸥算法采用随机在二维空间的位置上生成种子,无法保证种子在解空间分布的均匀性。针对种子随机化的问题,本文采用 Halton 序列^[19-20]来产生初始化种子,使种子能够均匀地分布到空间中的不同位置,提升种群的多样性。

对于 Halton 序列,实现过程如下:首先选取两个质数作为基础量,将两个基础量通过函数变换展开,组成一系列均匀分布且不重复的点,其展开过程如下式所示。

$$n = \sum_{i=0}^m c_i \cdot p^i - c_m \cdot p^m + \cdots + c_2 \cdot p^2 + \cdots + c_0 \quad (18)$$

$$\sigma(n) = c_0 \cdot p^{-1} + c_1 \cdot p^{-2} + \cdots + c_m \cdot p^{-m-1} \quad (19)$$

$$H(n) = [\sigma_1(n), \sigma_2(n)] \quad (20)$$

式中: $n \in \mathbf{N}$; p 为大于等于 2 的质数,表示 Halton 序列基础量; c_i 为 $\{0, 1, 2, \dots\}$ 的常数; $\sigma(n)$ 为序列函数; $H(n)$ 为二维均匀 Halton 序列。图 3 所示为随机初始化种群跟 Halton 初始化种群分布。

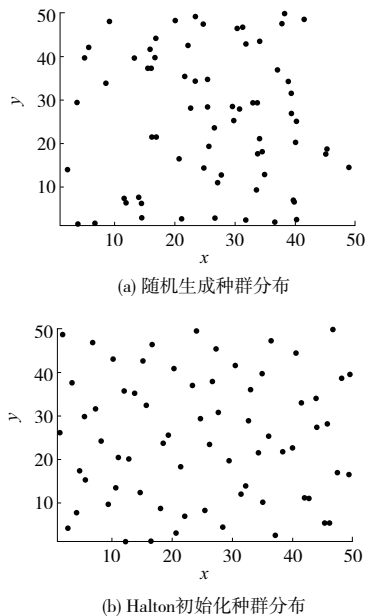


图 3 初始化种群分布

由图 3 可以看出随机生成种群分布相对集中,无法均匀的分布到二维空间中,而 Halton 初始化种群可以均匀的分布到二维空间当中,种群多样性与随机生成相比较多。

2) 自适应权重因子

传统海鸥算法(SOA)中海鸥的迁徙行为是线性变化的,这种搜索方式导致 SOA 搜索能力不足,因此本文提出一种非线性搜索控制公式,如式(21)所示

$$A_1 = f_c \cdot \{1 - \cos^2[(\pi/2) \cdot (t/M_{\text{axiter}} - 1)]\} \quad (21)$$

通过函数动态调整可以使惯性权重 A_1 在前期具有较高的权重,保持种群的多样性的同时增强了全局寻优能力,在后期快速下降增强了算法局部寻

优能力。图 4 所示为权重因子 A_1 的变化过程。

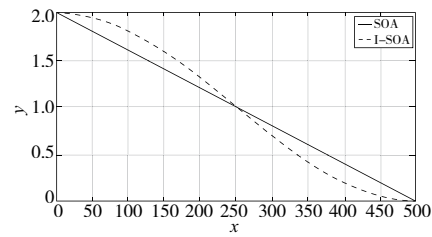


图 4 权重因子

3.3 改进海鸥优化 OTSU 的具体过程

1) 初始化海鸥参数:种群数量 N 、迭代次数 M_{axiter} 、频率 f_c 、种群搜索范围、常数 u 和 v 、 r_d 以及 θ_{rd} 。

2) 计算适应度值:以二维 OTSU 作为适应度函数,计算适应度值 $X_i(t)$ 。

3) 更新全局位置:找出较好位置 $X_{\text{bi}}(t)$,根据较好位置所在方向 $M_i(t)$ 和避免碰撞的位置 $C_i(t)$,得到海鸥移动最佳位置 $D_i(t)$ 。

4) 通过攻击半径 r ,计算攻击位置 (x, y, z) ,根据每只海鸥的 $X_{\text{bi}}(t)$ 和 $D_i(t)$,更新海鸥新的位置 $X_i(t)$ 。

5) 重复步骤 2)~步骤 4),直到达到最大迭代次数而停止。

6) 输出最优解:根据算法找到的最优阈值 $X_i(t)$ 实现图像分割。

4 实验仿真与结果分析

为证明本文定位算法相比先验知识、模板匹配、直线检测的优越性。实验选取四类水表图像:图像模糊、昏暗、存在旋转角度以及存在反光的情况。

本文定位算法与先验知识方法相比无需提前统计字符区域大概位置,与模板匹配相比不需要制作大量模板,与直线检测相比能有效排除水表之外等干扰直线对水表定位的影响。同时,对上述 4 类特殊条件下的水表图像,本文均能实现字符区域的准确定位,如图 5 所示。



图 5 本文定位结果图

为进一步验证本文算法定位精度,使用 4 种方法进行实验。对采取的同一批包含光照不均、图片模糊、正常等 300 张水表图片,定位分割出包

含待识别数字的准确率如表 1 所示。

表 1 定位分割准确率

定位方法	原图/张	定位 正确/张	定位 错误/张	定位 准确率/%
先验知识统计	300	183	117	61.0
模板匹配	300	216	84	72.0
直线检测	300	200	100	66.7
本文	300	273	27	91.0

综上所述,本文定位算法在复杂自然环境下的定位精度均高于先验知识统计、模板匹配、直线检测,分别提高了 30.0 个百分点、19.0 个百分点、14.3 个百分点。

在数字与背景分割时,海鸥初始化种群数量为 30,最大迭代次数设置为 100, $f_c = 0$, 种群搜索范围为分割图片的分辨率大小, u 和 v 为相关常数, r_d 以及 θ_{nd} 为随机数。算法分割如图 6 所示。

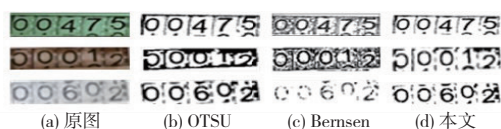


图 6 分割效果

从图 6 可以看出 OTSU、Bernsen 分割效果较差,保留了太多的背景像素点。相反改进的海鸥优化算法有效减小了数字跟背景粘连的面积,提高了分割效果。

为验证改进算法对字符识别准确率影响,实验随机挑选出 100 张待识别字符图片,使用 OCR 和模板匹配算法分别进行验证。两种识别算法准确率如表 2 所示。由表 2 可以看出,改进海鸥分割的识别准确率相较于 OTSU、Bernsen 有大幅提升。其中,在 OCR 识别验证时分别提升了 15 个百分点、31 个百分点,在模板匹配验证时分别提升了 11 个百分点、23 个百分点。

表 2 识别准确率 单位: %

验证算法	分割算法		
	OTSU	Bernsen	本文
OCR	81	65	96
模板匹配	83	71	94

5 结语

从自然环境下采集的民用水表图像,由于拍摄环境光照不均、昏暗或者图片模糊等都会对读

数区域的定位与待识别数字与背景分割造成影响。本文提出的预处理结合 Hough 圆检测与直线检测的方法可有效实现水表图像质量差等场景下读数区域的准确定位,同时针对特殊环境下的水表图像,改进的海鸥算法相较于 OTSU、Bernsen 能有效减少目标与背景的粘连,提升分割效果与数字识别的准确率。

参考文献:

- [1] 严冰,唐旭晟,朱博文. 基于机器视觉的水表分拣系统研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(1): 184-188.
- [2] 吴梦麟. 机械式数字仪表字符定位方法[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2007, 29(4): 93-97.
- [3] 薛亮. 基于机器视觉的冷水水表自动检定系统研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2019.
- [4] 岳辰. 基于 OpenCV 的水表读数智能识别系统的软件实现[D]. 成都:电子科技大学, 2019.
- [5] 董维振,陈燕. 基于改进被囊群算法的图像多阈值分割方法[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(7): 2093-2102.
- [6] 张俊宝. 基于改进 PSO 理论的二维 Otsu 分割算法[J]. 电光与控制, 2010, 17(7): 35-37.
- [7] 闫哲,刘宏达. 改进鲸鱼算法的二维最大熵图像分割研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(3): 195-199.
- [8] WANG S K, JIA H M, PENG X X. Modified salp swarm algorithm based multilevel thresholding for color image segmentation [J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2019, 17(1): 700-724.
- [9] 马小晶,贺航,王宏伟,等. 基于改进麻雀搜索算法的最大指数熵分割方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 6983-6992.
- [10] 邓秋菊,王宁,钟怡. 基于 HSV 空间的多相隐写图像阈值分割方法仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(9): 167-170.
- [11] DHIMAN G, KUMAR V. Seagull optimization algorithm; theory and its applications for large-scale industrial engineering problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 165: 169-196.
- [12] 李祥杰,孙志军,孟焯,等. 基于改进海鸥优化算法的履带式拉挤机牵引装置控制研究[J]. 现代制造工程, 2023(6): 144-149.
- [13] 陈佳豪,杨建蒙,翟永杰,等. 基于平均灰度值与随机森林算法的光伏组件积灰程度预测[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 107-114.
- [14] 宋倩男,刘光柱,武乐林,等. 基于 Sobel 的 FPGA 图像边缘检测系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(13): 68-73.

(下转第 154 页)

参考文献:

- [1] LI B, MELKOTE S N. Fixture clamping force optimisation and its impact on workpiece location accuracy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(2): 104-113.
- [2] PADMANABAN K P, ARULSHRI K P, PRABHAKARAN G. Machining fixture layout design using ant colony algorithm based continuous optimization method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9): 922-934.
- [3] 陈禹至, 陈蔚芳, 施圣杰. 一种薄壁件柔性多点加工工装布局优化技术[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 61-63.
- [4] 王运巧, 梅中义, 范玉青. 薄壁弧形件装夹布局有限元优化[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 214-217, 223.
- [5] RUI X, BESTLE D. Reduced multibody system transfer matrix method using decoupled hinge equations[J]. International Journal of Mechanical System Dynamics, 2021, 1(2): 182-193.
- [6] 马创业, 田威, 胡俊山, 等. 铣削工业机器人数字孪生驱动模型的构建与验证[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(4): 160-163.
- [7] 田威, 李鹏程, 缪云飞, 等. 大型复材薄壁构件工业机器人高精度原位铣边加工新方法[J]. 机械工程学报, 2025, 61(7): 120-133.
- [8] 白权. 大型舱体构件原位加工双机器人协同高精度控制方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- [9] 刘少睿, 田威, 沈建新, 等. 面向机器人原位加工的大型飞船舱体变位姿态优化方法[J]. 2023, 40(3): 239-252.
- [10] 崔光裕. 大型舱体类构件机器人铣削加工系统动力学建模与振动抑制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- [11] 崔光裕, 李波, 乐毅, 等. 弱刚性构件双机器人协同加工振动抑制方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2024, 44(1): 147-152, 203.
- [12] 孙连军. 大型弱刚性构件机器人旋转超声铣削颤振主动抑制及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- [13] ZHAN Z H, RUI X T, RONG B, et al. Design of active vibration control for launcher of multiple launch rocket system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2011, 225(3): 280-293.
- [14] 芮筱亭, 于海龙, 何斌, 等. 舰炮振动分析的多体系统有限元传递矩阵法[J]. 兵工学报, 2007, 28(9): 1036-1040.
- [15] 陈坤. 机器人铣削加工动态响应分析与颤振机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [16] 刘辛军. 大型复杂构件机器人原位高性能铣削加工技术及装备[D]. 北京: 清华大学, 2023.
- [17] 张剑龙. 航空复材构件机器人制孔/铣边高精度加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- [18] 刘淑杰, 张磊. 大型薄壁件多点位自动化柔性支撑系统的位置优化研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(1): 115-120.
- [19] 王张浩, 李东升, 翟雨农. 弱刚性薄壁件夹具布局优化方法研究概述[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 118-135.
- [20] 刘洋, 关世玺, 赵宏, 等. 薄壁结构件的随动定位支承布局优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(10): 10-15.

收稿日期: 2024-01-17

(上接第 125 页)

- [15] 屈源昊, 张丰收, 昌继宝, 等. 基于 Hough 变换和深度学习的条形码识别[J]. 现代电子技术, 2025, 48(1): 157-162.
- [16] 潘新, 李海伟, 张函力, 等. 基于优化 Hough 变换的铆接高度差亚像素检测方法研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(17): 102-108, 121.
- [17] 闫向彤, 张健, 乔煜哲, 等. 基于改进海鸥优化算法的 BP 神经网络及其应用[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(7): 165-168.
- [18] 陈将宏, 李伟亮, 王羲沐. 基于反向变异海鸥优化算法的最优潮流计算[J]. 燕山大学学报, 2024, 48(5): 396-407.
- [19] 董跃华, 李俊, 朱东林. 基于 Halton 序列改进蝠鲼算法的 K-means 图像分割[J]. 电光与控制, 2023, 30(2): 91-98.
- [20] 钟华庚, 罗高生, 王芳, 等. 一种 Halton 序列的 HDRRT 移动机器人融合规划算法[J]. 控制与决策, 2023, 38(6): 1551-1559.

收稿日期: 2024-01-02