

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0155

# 基于 ESGA 遗传算法的水射流自驱 旋转喷头优化设计\*

陈源捷<sup>1</sup>, 陈正寿<sup>1</sup>, 杜炳鑫<sup>1</sup>, 谢应孝<sup>1</sup>, 姜 华<sup>2</sup>

(1. 浙江海洋大学船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022;

2. 太平洋海洋工程(舟山)有限公司, 浙江 舟山 316057)

**摘要:** 超高压水射流自驱旋转型喷头是目前广泛应用于船壁除锈的一种装置, 其布局方式直接影响船壁除锈的效率和质量, 目前喷头布局多依赖工程经验, 缺少准确的理论分析和优化技术支持。针对水射流自驱旋转型喷头的布局优化问题, 在传统遗传算法 (genetic algorithm, GA) 的基础上, 提出一种基于“锦标赛选择”的精英策略遗传算法 (elitist strategy genetic algorithm, ESGA), 该算法通过采用种群进化过程中精英个体直接保留到下一代的进化策略, 从而有效提高算法的全局收敛能力和算法的鲁棒性。结合旋转喷头扫掠冲击性能和轨迹特征, 以喷头移动路径垂直打击面上的能量分布均匀度为衡量标准, 建立超高压水射流自驱旋转型喷头的螺旋扫掠冲击离散化时间优化模型, 并分别利用两种遗传算法对其进行优化改进。对一字形水射流自驱旋转型喷头的布局优化研究发现, 经 ESGA 算法优化的旋转喷头, 其扫掠冲击能量分布均匀度较原喷头布局提升了 47.2%, 其收敛精度也高于 GA 算法。经对 ESGA 算法优化后的喷头实验验证发现, ESGA 优化方案较原设计方案除锈效率提高了 42.0%。改进的 ESGA 优化算法可行性强, 能够在收敛迭代次数较少的情况下得到水动力性能更好的喷头布局方案, 为旋转型喷头布局优化设计提供了理论依据和应用支持。

**关键词:** 船壁除锈; 旋转喷头; 遗传算法; 扫掠冲击; 布局优化

中图分类号: O358

国标学科代码: 13025

文献标志码: A

## Optimum design of self-driven rotary water-jet sprayer based on ESGA genetic algorithm

CHEN Yuanjie<sup>1</sup>, CHEN Zhengshou<sup>1</sup>, DU Bingxin<sup>1</sup>, XIE Yingxiao<sup>1</sup>, JIANG Hua<sup>2</sup>

(1. Naval Architecture and Maritime College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang, China;

2. Paxocean Engineering Co. Ltd., Zhoushan 316057, Zhejiang, China)

**Abstract:** The self-driven rotary sprayer using ultra-high-pressure water jet is widely used in the rust removal of ship hulls, and its layout directly affects the efficiency and quality of ship derusting. Hitherto, the design of sprayer layout primarily depends on practical engineering experiences, due to the lack of support from accurate optimization techniques and theoretical analysis. In order to solve the layout optimization problem associated with self-driven rotary sprayers using ultra-high-pressure water jet, an improved elitist strategy genetic algorithm (ESGA) based on conventional genetic algorithm (GA) is proposed. By designing appropriate evolutionary operations, the ESGA algorithm can skip crossover and mutation operations on the fittest individuals in the population, and then directly copy the fittest individual to the next generation. Thus, the global convergence ability and robustness of the algorithm are improved effectively. By fully combining the sweep impinging performance and trajectory characteristics of rotary sprayer, a sweep impinging discrete-time model for self-driven rotary sprayer using ultra-

\* 收稿日期: 2022-04-12; 修回日期: 2022-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(41776105); 舟山市科技计划项目(2019C21010); 浙江省属高校基本科研业务费(2021JD002)

第一作者: 陈源捷(1995—), 男, 硕士研究生, 1101693713@qq.com

通信作者: 陈正寿(1979—), 男, 博士, 教授, aaacz@163.com

high-pressure water jet is developed to quantify the evenness of impinging energy distribution on target surface perpendicular to the sprayer movement path. Aiming at enhancing the evenness of impinging energy distribution and improving hydrodynamic performance, the layout of self-driven rotary sprayer is optimized via the GA and ESGA algorithms. It is found that the evenness of the impinging energy distribution related to the self-driven rotary sprayer with a rod-like shape, which is optimized by the ESGA algorithm, is improved by 47.2% compared with that of the original layout scheme. The ESGA algorithm provides faster convergence speed and higher convergence precision, superior to the conventional GA. The experimental test results indicated that the rust-removing efficiency of self-driven rotary sprayer, optimized by the ESGA algorithm, is increased by 42.0% when compared with original layout scheme. It is worth noting that the improved ESGA algorithm optimization approach is feasible, and some sprayer layouts with better hydrodynamic performance can be easily achieved in fewer convergence iterations, providing adequate theoretical basis and application support for the layout optimization.

**Keywords:** rust removal of ship hull; rotary sprayer; genetic algorithm; sweep impinging; layout optimization

船舶由于长期浸泡在高盐海水中, 船体金属表面易锈蚀也易附着海洋生物, 极大地增加了船舶航行的阻力, 可使船舶降速约 10%, 油耗增加约 40%<sup>[1]</sup>, 大大降低了船舶的航行效率和使用寿命, 因此船舶须定期停靠船坞对船体锈层以及海洋附着物进行清理, 如图 1 所示。船舶除锈清洗是船舶维修过程的重要环节, 目前船企主要采用露天喷砂进行除锈, 不仅效率低, 而且易对环境造成污染, 难以实现绿色可持续发展<sup>[2]</sup>。因此研发高效、绿色、低耗、环保的高压水射流除锈清洁技术显得尤为重要。

超高压水射流自驱旋转型喷头以其清洗效率高、效果好等优势, 近年来逐渐成为船壁绿色除锈领域的主角, 得到各船企的广泛认可<sup>[3]</sup>, 如图 2 所示。对于超高压水射流成套装备, 大多专注于作为喷头载体的机器人平台的设计、控制和自动化提效等方面的研发, 而重要部件——喷头装置的水动力提效研究稍显滞后。目前, 国内采用的喷头装置, 其布局基本是沿用国外同类产品的设计参数或结合现场经验确定, 基于定量理论分析进而确定喷头空间布局, 以提高其水动力性能的基础性研究明显不足。



图 1 船体锈蚀与海洋附着物

Fig. 1 Hull corrosion and marine attachments



图 2 船壁面高压水射流除锈

Fig. 2 Rust removal on ship wall using high-pressure water jet

人工智能在水动力优化设计领域应用潜力大。因人工智能技术具有计算速度快、精度高、人工干预少等特点, 在优化设计领域应用广泛。Gero 等<sup>[4]</sup>基于精英非支配排序策略的遗传算法, 分析了流化装置的产率最大、空气流速最小的全局性问题。Yildizeli 等<sup>[5]</sup>采用快速精英遗传算法对撞击射流阵列的气动非接触式悬浮系统的悬浮能力和能耗进行了全局优化。AlHamaydeh 等<sup>[6]</sup>提出一种基于域修剪的改进遗传算法对海上风机支撑结构进行优化设计, 获得了最优的支撑桁架结构形式。Fu 等<sup>[7]</sup>基于快速精英非支配排序遗传算法的形状多目标优化法, 完成了低能耗型水下潜航器外形的水动力性能优化。

在喷嘴优化设计方面, 许多学者使用人工智能方法开展过一些有意义的尝试。Zain 等<sup>[8]</sup>采用遗传算法与模拟退火算法(simulated annealing, SA)相结合的方法对喷嘴水射流参数进行优化。Srinivasu 等<sup>[9]</sup>

发展了融合神经网络(artificial neural networks, ANNs)与遗传算法的单喷嘴优化方法,并验证了其较模糊算法更有效。虽然人工智能方法在喷嘴参数设计方面取得了较好的成效,但人工智能在喷头综合布局优化领域的研究却很少。喷头的优化布局涉及内部流道、喷嘴总数、孔径、直喷嘴数、侧喷嘴数、侧喷射角、输出扭矩、喷头转速、泵压和流量等众多控制因素,是一项非常系统化的工作。许多水射流自驱旋转型喷头由于平面布局不合理,射流扫掠船壁时冲击时间不足,会在壁面上留下明显的“剥离环”(局部欠喷),经常会采用放缓喷头整体平移速度的方法以确保全局清垢效果,从而又导致全局过喷的问题。既能实现扫掠轨迹较高清洗效率,又能保证喷头整体较快的平移速度,是改进超高压自驱旋转喷头水射流船壁除锈效率的关键。

针对超高压水射流旋转喷头的布局优化问题,本文中提出一种基于“锦标赛选择”策略的精英策略遗传算法(elitist strategy genetic algorithm, ESGA),以提高喷头在移动路径垂直打击面上的能量分布均匀度为主要目标,建立超高压水射流自驱旋转型喷头的螺旋扫掠冲击离散化时间优化模型,并利用遗传算法对其进行优化改进。ESGA 算法可使种群进化过程中最优个体直接保留到下一代从而得到全局最优解,以浙江修船企业在用的某一字形超高压水射流自驱旋转型船壁除锈喷头优化为例,对其移动路径上的能量分布均匀度进行理论分析,并实验验证用于提高水动力性能的喷头布局优化方案的可行性。

## 1 喷头特征参数分析

### 1.1 水射流旋转喷头结构

喷嘴是射流喷头系统的直接工作单元,直接影响喷头装置的实际效能。如图 3 所示,高压柱塞泵产生超高压水流,经收缩型喷嘴内孔的收缩段,将水的压力能聚集起来,并转化为动能,产生具有高强剥离冲击能力的超高速纯水射流,速度可达 700 m/s<sup>[10-11]</sup>,冲击壁面后产生较高的壁面打击压力和剪切应力。

水射流旋转喷头是除锈成套装置的核心零部件,它通过旋转轴与旋转接头相连。在进行除锈工作时,通过侧喷嘴以一定冲击角度冲击壁面,为喷头提供切向反冲力,如图 4 所示。自驱旋转喷头种类繁多,但都是依靠切向反冲力为喷头的自旋转提供旋转驱动力,一字形和十字形是常见的两种喷头结构形式。各喷嘴产生超高速斜向和垂向水射流,冲击船体外侧钢板,从而使自驱喷头高速旋转并循环打击到锈层上的各个点,在旋转射流打击压强、剪切应力、水楔等联合作用下导致锈层产生裂纹,脆性扩散直致锈层破坏,可有效清除船舶外壁面上的漆层、锈层和藻类、藤壶等海洋附着物,在此过程中产生的废水和废渣由真空回收装置回收,实现即除即干<sup>[12]</sup>。本研究选用浙江修船企业常用的以轻量化爬壁机器人为载体的轻便型 6 喷嘴一字形自驱喷头开展相关的优化设计工作,其结构如图 5 所示。

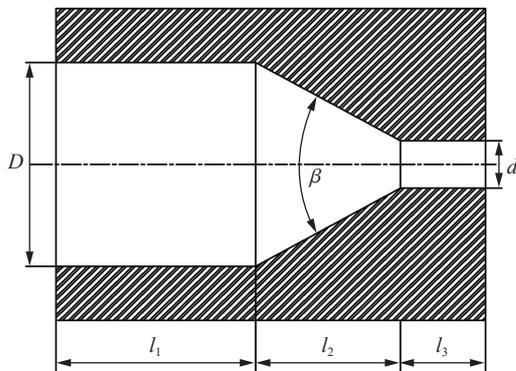


图 3 直圆锥收敛型喷嘴结构示意图  
Fig. 3 Structure diagram of straight cone convergent nozzle

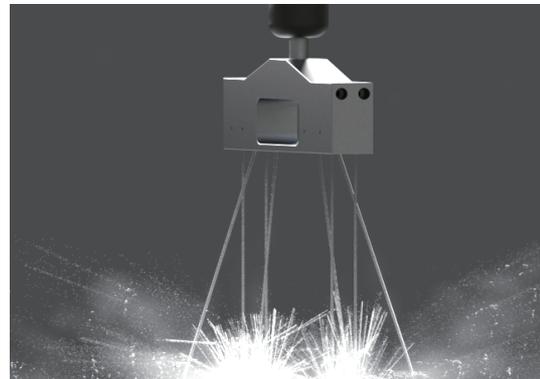


图 4 自驱型水射流旋转喷头工作示意图  
Fig. 4 Working schematic diagram of self-driven rotary water jet sprayer

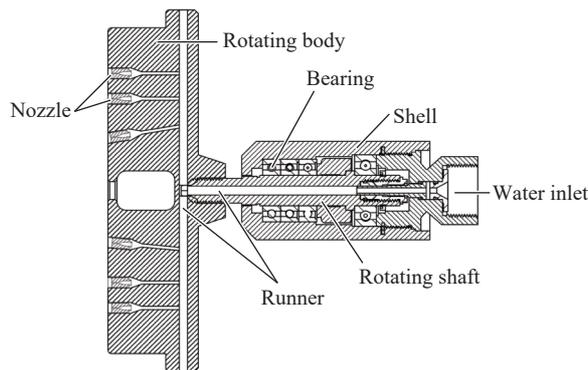


图 5 自驱旋转射流喷头结构

Fig. 5 Structure of self-driven rotary water jet sprayer

## 1.2 直圆锥型喷嘴结构

直圆锥型喷嘴是一种高效的直喷式喷嘴,产生的射流速度分布均匀,其中心轴线速度的聚集性和稳定性均优于其他类型喷嘴,已被广泛应用于水射流领域<sup>[13]</sup>。本文中均选用如图 3 所示的直圆锥型喷嘴,其中  $d$  为喷嘴出口直径,  $D$  为喷嘴入口直径,  $\beta$  为收敛角,  $l_1$  为入口段长度,  $l_2$  为过渡段长度,  $l_3$  为出口段长度。当长径比  $l_3/d=2\sim 3$  时,直圆锥型喷嘴的水动力性能处于最佳状态<sup>[14]</sup>。

喷嘴孔径  $d$  是水射流除锈喷嘴的关键参数之一,随着泵的流量和额定压力参数的确定,便可计算出与之相匹配的喷嘴孔径尺寸。泵的流量和额定压力与喷嘴孔径之间的关系为<sup>[10]</sup>:

$$d_m = 0.69 \sqrt{\frac{q}{\mu \sqrt{p}}} \quad (1)$$

式中:  $d_m$  为匹配的喷嘴孔径, mm;  $p$  为泵的压力, MPa;  $\mu$  为喷嘴流量系数, 其值小于 1;  $q$  为泵的流量, L/min。通过式(1)可以看出,喷嘴孔径微小的变化会对泵压产生明显的改变。对于多喷嘴的射流旋转喷头,由当量喷嘴孔径代入式(1)进行喷嘴性能计算,当量喷嘴孔径表示为<sup>[10]</sup>:

$$d_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中:  $d_c$  为当量喷嘴孔径,  $d_i$  为第  $i$  个喷嘴的孔径,  $n$  为喷嘴的数量。通过对喷嘴孔径的分析可以看出,对于一个给定孔径的喷嘴,其流量与压力成正比。

## 1.3 喷头空间布局分析

随着超高压水射流技术的发展,为适应多场景作业要求,对成套设备的喷头轻量化提出了更高要求,一字形水射流自驱旋转喷头成为基于中小灵活型移动载体平台的船壁除锈设备的首选方案。目前一字形自驱旋转喷头一般内嵌多个射流喷嘴,喷嘴数量的增加使得喷头结构越来越复杂。随着喷嘴数量的增加,喷嘴的布置形式尤为重要<sup>[15]</sup>,如图 6 所示。喷嘴数量太少,射流冲击力不足,无法完全剥离锈层;过多的喷嘴虽然有助于射流剥离锈层,但是射流之间的相互影响也由此增大,使喷嘴在除锈过程中射流的冲击能量不能得到充分的利用,因此喷嘴数量不宜过多也不宜过少<sup>[16]</sup>。当喷嘴冲击角过小时,会导致射流反冲力产生的旋转力矩无法抵消旋转轴上的摩擦力矩,使得喷头无法旋转起来;过大的偏转角虽然有助于克服摩擦力矩,使喷头加速旋转,但是过快的转速容易导致水射流雾化,降低水射流的打击力<sup>[2]</sup>,从而降低水射流的效率,因此选择合适的冲击角至关重要

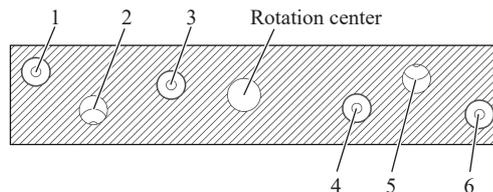


图 6 常规旋转射流喷头布置

Fig. 6 Layout of conventional rotary water jet sprayer

要。在实际应用中, 泵压、流量、喷嘴孔径、旋转半径给定的情况下, 本文中基于李安贵等<sup>[17]</sup>总结的双喷嘴旋转速度与各工况参数之间的关系, 以自旋转喷头达到某一预设旋转速度为目标, 计算各喷嘴的最佳冲击角。

## 2 基于 ESGA 遗传算法的喷头优化布局

### 2.1 数学模型

通过对旋转射流喷头运动时的扫掠冲击轨迹进行理论分析, 建立喷头的扫掠冲击离散化时间优化模型。然后结合实际工况, 如压力、流量、载体平台移动速度、喷头转速、喷嘴孔径、冲击角等, 研究不同喷头布局对冲击轨迹线疏密程度的影响。最后, 以旋转射流喷头移动路径垂直方向上的能量分布均匀度为优化目标, 建立优化目标函数, 利用基于“锦标赛选择”策略的 ESGA 算法对目标函数进行优化求解。

#### 2.1.1 喷头扫掠冲击轨迹模型

在进行自驱旋转射流喷头除锈作业时, 每个喷嘴的运动轨迹可以看作是喷嘴绕喷头旋转轴的匀速圆周运动与喷头整体相对较慢的匀速平移运动合成的结果<sup>[14]</sup>, 运动轨迹呈螺旋状。匀速平移运动的速度取决于载体机器人的爬行平移速度, 匀速圆周运动的转速由喷头的旋转力矩和阻尼力矩(摩擦力矩)共同决定, 如图 7 所示。喷头以角速度  $\omega$  做圆周运动, 喷头靶距为  $h$ , 喷嘴在圆周运动的作用下在清洗区域上留下最大外径为  $W$ (除锈的最大宽幅)的圆形轨迹。又因为喷头随载体平台机器人以匀速  $v$  平移, 喷嘴在清洗区域上留下长度为  $L$  的螺旋轨迹线。

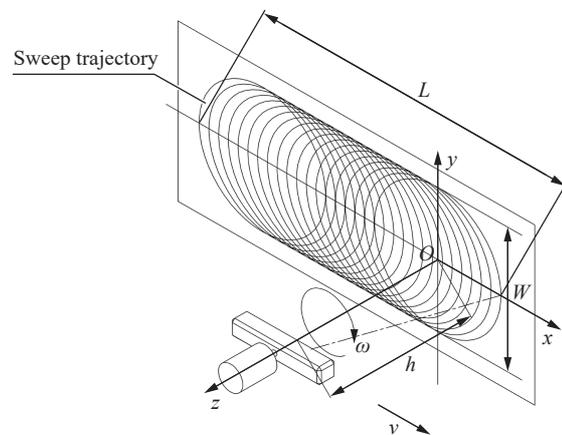


图 7 水射流旋转喷头除锈作业运动模型

Fig. 7 Motion model of rotary water jet sprayer for rust removal

在分析多喷嘴喷头的扫掠冲击轨迹时, 需对喷头装置做以下假设和简化: (1) 喷头为刚体; (2) 为避免有害振动, 喷头的结构均匀对称, 并且其几何中心与重心重合; (3) 不考虑喷头运动过程中气压脉动或者机械振动的影响; (4) 船舶外侧壁面为竖直平面。由于喷嘴随喷头一起运动, 因此把喷头的运动简化为喷嘴的运动。又因为喷头上每个喷嘴的运动规律都是相同的, 所以需先从单个喷嘴的运动情况开始研究。对单个喷嘴产生的射流束冲击到船壁的扫掠轨迹进行分析, 以该平面建立直角坐标系, 喷头中心投影位于原点。喷嘴在平面上的运动轨迹情况如图 8 所示。

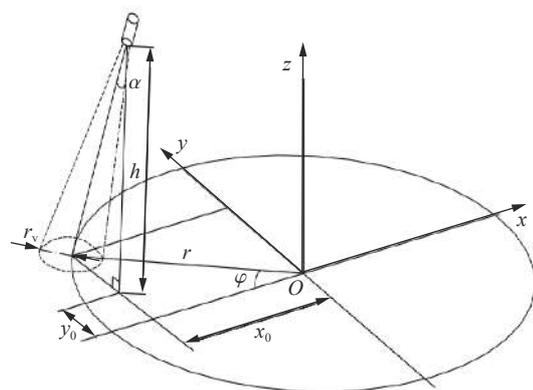


图 8 单喷嘴运动扫掠模型

Fig. 8 Sweep motion model of single nozzle

图 8 中:  $x_0$  为喷嘴到喷头中心沿  $x$  轴方向的距离,  $y_0$  为喷嘴到喷头中心沿  $y$  轴方向的距离,  $r$  为射流束打击船壁的实际旋转半径,  $\alpha$  为喷嘴的冲击角(为锐角),  $\varphi$  为喷嘴做圆周运动时在  $t=0$  时刻的初相角,  $r_v$  为喷嘴在船舶外板的有效打击半径。根据三角变换求得射流束打击船壁的实际旋转半径:

$$r = \sqrt{x_0^2 + (h \tan \alpha + |y_0|)^2} \quad (3)$$

单个喷嘴在平面上的运动轨迹是匀速圆周运动与沿  $x$  轴方向的匀速直线运动的合成, 所以高速射流束打击在船壁的扫掠轨迹方程为:

$$\begin{cases} x = r \cos(\omega t + \varphi) + vt \\ y = r \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\omega$  为喷头做匀速圆周运动时的角速度。其中:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{|y_0| + h \tan \alpha}{|x_0|}\right) \quad (5)$$

又因为  $\omega = 2\pi n_s/60$ , 其中  $n_s$  为喷头做匀速圆周运动时的转速, 代入式 (4) 中, 得到射流束的扫掠冲击轨迹方程为:

$$\begin{cases} x = r \left( \cos \frac{2\pi n_s}{60} t + \varphi \right) + vt \\ y = r \left( \sin \frac{2\pi n_s}{60} t + \varphi \right) \end{cases} \quad (6)$$

### 2.1.2 喷头扫掠冲击时间模型

在水射流自驱旋转喷头除锈作业过程中, 高速射流沿着螺旋轨迹打击船壁, 为了可以量化分析螺旋轨迹线的疏密程度(即射流打击能量分布均匀度), 提出一种喷头扫掠冲击时间模型。在冲击轨迹重叠区域的任意横坐标位置处, 在纵向均匀地取  $n_a$  个打击观测点, 如图 9 所示。图中,  $\Delta t$  为轨迹的采样时间,  $r_1$ 、 $r_2$  为射流打击点与观测点之间的距离。

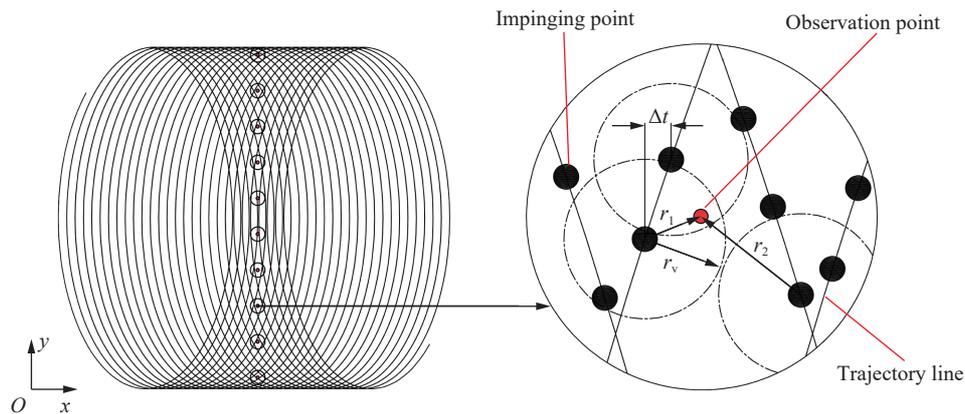


图 9 喷头扫掠冲击时间模型及观测点局部放大图

Fig. 9 Sweep impinging-time model of water jet sprayer and local enlargement around observation point

如图 9 所示, 为评估各喷嘴的水射流对船壁表面各点的打击贡献度, 将射流运动轨迹按一定时间间隔离散化为有限个射流打击点。根据实际一字形自驱旋转喷头除锈经验<sup>[18]</sup>, 发现相邻轨迹线的距离小于  $2d$  才能使除锈后表面洁净度到达 Sa2.5 级, 在此选定  $r_v = 2d$  作为射流束的有效打击半径。当观测点位于射流打击范围内( $r_1 \leq r_v$ )时视为一次有效打击; 当观测点未进入射流打击范围( $r_2 \geq r_v$ )时视为一次无效打击。喷头整体匀速平移一段时间内, 统计扫掠过程中观测点的有效打击次数。假设纵向上任一观测点的有效打击次数为  $N_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n_a$ ), 相邻两个射流打击点的时间间隔为  $\Delta t$ , 则某观测点的扫掠冲击累计时间为:

$$T_i = (N_i - 1) \Delta t \quad (7)$$

尽管喷头整体平移速度以及旋转的角速度都是均匀的, 但由于水射流的旋转速度方向不断变化, 造成射流能量在平移的垂直方向上不均匀分布。观测点处的射流能量分布与该点的扫掠冲击时间成正比, 因此只需研究扫掠冲击时间的变化规律, 便可获得射流能量分布规律。这里采用的计算方法是求以

一定扫掠时间内各观测点的累计冲击时间, 由式(6)可知, 因为射流冲击轨迹与载体平移速度、喷头布局、喷距、转速有关, 所以与轨迹相关的参数均会影响喷头扫掠累计冲击时间。

## 2.2 遗传算法介绍

遗传算法是建立在达尔文所奠定的自然进化原理之上的搜索算法, 也是历史上最早提出的基于种群的随机算法之一, 最早由 Holland<sup>[19]</sup> 于 1975 提出。遗传算法是一类为问题的最优解搜索解空间的算法, 将自然界中的进化概念转置到计算机中, 模拟自然界进化过程中的繁殖、交叉和基因突变现象, 利用遗传算子将个体随机组合, 从而形成新一代, 种群进化几代后根据优胜劣汰的原则从可能的解的种群中找出最优的个体。针对复杂并且大规模的优化问题, 遗传算法通常是具有竞争力的, 其应用领域已拓展到许多学科, 如组合优化、机器学习、函数优化、图像处理等。

## 2.3 目标函数建立

船壁除锈的实际工况给定之后, 影响射流能量分布的设计变量为喷头的布局参数(喷嘴的局部坐标), 对于一种确定的布局方案以及工况, 可以计算出旋转射流喷头的冲击时间列阵  $[T_1, T_2, T_3, \dots, T_{n_a}]^T$ 。将其看作一组随机子样, 可以得到该集合的均值  $\bar{T}$  和标准差  $S$  为:

$$\bar{T} = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} T_i \quad (8)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n_a - 1} \sum_{i=1}^{n_a} (T_i - \bar{T})^2} \quad (9)$$

式中: 均值  $\bar{T}$  可以反映出该布局方案下射流在观测点处的冲击时间平均水平,  $S$  用来衡量观测点处冲击能量分布的均匀度, 其值越小, 表明射流冲击能量分布越均匀。为了方便说明, 将旋转射流喷头布局优化模型写成如下形式:

$$\begin{cases} X_i = (x_i, y_i) & i = 1, 2, 3, \dots, n \\ F(X) = \sqrt{\frac{1}{n_a - 1} \sum_{i=1}^{n_a} (T_i - \bar{T})^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $X_i$  为求解的决策变量;  $x_i$  为第  $i$  个喷嘴到喷头中心沿  $x$  轴方向的距离;  $y_i$  为第  $i$  个喷嘴到喷头中心沿  $y$  轴方向的距离;  $F(X)$  为求解的目标函数, 为了使射流的冲击能量分布更均匀, 求解目标函数的最小值, 且满足约束条件:

$$1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \geq 0, \quad 1 - \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \geq 0 \quad (11)$$

$$g_i(x) = |x_i - x_j| - d_{\min} \geq 0 \quad i \neq j \quad (12)$$

式中:  $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$  分别为喷头几何设计变量值的上、下限;  $d_{\min}$  为任意两个喷嘴在  $x$  轴方向上的最小距离。在构造上述优化问题的遗传优化算法模型时, 首先对设定的决策变量进行试算, 令其自动满足决策变量上、下限的约束, 用于减少优化过程中计算的工作量, 这样只剩下线性不等式约束条件。由于遗传算法适用于无约束优化问题的求解, 所以需要进一步简化约束条件, 对于无法简化的约束条件, 采用罚函数将约束条件转化到目标函数中。即对式(12)的线性不等式约束建立罚函数:

$$c_i(x) = \begin{cases} 0 & g_i(x) < 0 \\ g_i(x) & g_i(x) \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

结合原先的评价函数, 将带约束的优化问题转化为无约束优化问题, 并且由于遗传算法的原理是寻找目标函数的最大值, 最终进一步变换的目标函数表达式为:

$$\Phi(X) = - \left[ 1 + K \sum_{i=1}^{n_c} c_i(x) \right] \sqrt{\frac{1}{n_a - 1} \sum_{i=1}^{n_a} (T_i - \bar{T})^2} \quad (14)$$

式中:  $K$  为惩罚系数, 一般取 10 左右<sup>[20]</sup>;  $n_c$  为线性不等式约束条件的个数。

## 2.4 设计变量编码方式

采用固定长度的二进制符号串对设计变量进行编码来表示群体中个体的基因, 基因由 0 和 1 组成, 基因的长度由设计变量的取值范围  $[U_{\min}, U_{\max}]$  以及编码精度  $\delta$  决定, 二进制编码长度与编码精度和取值范围之间的关系为:

$$2^l = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\delta} + 1 \quad (15)$$

式中:  $l$  为二进制符号串的长度,  $U_{\max}$  为设计变量的最大值,  $U_{\min}$  为设计变量的最小值,  $\delta$  为编码精度。假设设计变量的取值范围为  $[-60, 60]$ ,  $\delta$  取  $0.0001$ <sup>[21]</sup>, 解得  $2^l = 1200001$ 。又因为  $2^{20} \leq 2^l \leq 2^{21}$ , 所以基因长度  $l = 21$ 。对于基因的解码, 即把二进制编码串还原为十进制的设计变量值。编码串与设计变量之间的关系为:

$$x_e = U_{\min} + \left( \sum_{i=1}^l b_i 2^{i-1} \right) \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^l - 1} \quad (16)$$

式中:  $b_i$  为基因座上的基因值。假设种群中某个体的基因编码  $\text{bin} = 010100010101010001010$ , 决策变量取值范围为  $[-60, 60]$ , 则经过解码后,  $x_e = -21.8769$ 。

## 2.5 遗传操作算子

### 2.5.1 锦标赛选择

针对 GA 算法易早熟收敛、搜索效率低等问题, 本文中提出一种基于“锦标赛”的选择策略。首先, 每次随机地从种群中抽取数量为  $N$  的个体进行比较, 选择其中适应度最好的个体生成新一代子种群。不断重复此操作, 直到子种群规模达到父辈种群规模。抽取数量  $N$  为竞赛规模, 常取  $N = 2$  (二元锦标赛)。显然, 适应度较好的个体具有较大的“生存”机会。同时, 由于锦标赛策略以适应度作为选择的标准, 而与适应度的大小不成比例, 从而可以避免对最优个体的影响, 在一定程度上避免早熟收敛和停滞现象产生。

### 2.5.2 两点交叉

与 GA 算法不同, 在 ESGA 算法中, 交叉算子采用两点交叉策略。根据锦标赛选择后产生的新一代父辈种群两两随机配对, 若父辈种群大小为  $M$ , 则共有  $M/2$  对相互配对的个体组。对每个配对的个体组以较大的概率  $P_c$ , 随机在两个父辈基因座上选择两个交叉点, 并且交换两个交叉点之间的部分基因片段, 从而产生新的个体。交叉概率  $P_c$  的取值一般为  $0.75 \sim 0.90$ <sup>[21]</sup>, 其直接影响群体中交换的个体组数目  $M_c$ , 其中:

$$P_c = \frac{M_c}{M} \quad (17)$$

显然, 交叉概率与交叉个体组数目成正比, 与 GA 算法中的单点交叉相比, 两点交叉可以提高对可行域中的搜索能力。

### 2.5.3 变异

ESGA 算法中, 变异算子一般作为一种辅助算子, 它作用在个体的基因座上, 以较小的概率  $P_m$  改变基因座上的基因值<sup>[20]</sup>, 若基因座上原有的基因值为 1, 则变异操作将该基因值变为 0, 若基因座上原有的基因值为 0, 则变异操作将该基因值变为 1, 其中:

$$P_m = \frac{B}{Ml} \quad (18)$$

式中:  $B$  为每代中变异的基因数,  $M$  为每代中种群数目,  $l$  为个体的二进制基因编码长度。变异概率一般取值为  $0.001 \sim 0.01$ <sup>[21]</sup>, 合理设置变异概率利于增加种群的多样性, 同时能够避免算法早熟收敛。

### 3 实例优化分析

在上述遗传算法优化模型的基础上, 利用 Python 平台创建一个基于锦标赛策略的 ESGA 遗传算法的计算程序, 对浙江修船企业大量使用的某一字形水射流旋转喷头实施了实例优化分析。为了验证优化结果, 在此将其与 GA 算法的优化结果进行比较。

#### 3.1 实例描述

射流旋转喷头的最佳布局设计旨在确定其喷头结构、喷嘴数量以及喷嘴位置。由于喷头结构可以根据实际的应用场景进行设计, 喷嘴数量也是根据实际工况、喷头质量控制、总体布置等多方面因素综合考虑所决定。本文中在已确定喷头结构与喷嘴数量的情况下, 研究喷嘴位置布局优化。将一字形自驱旋转喷头作为研究对象, 利用上述遗传算法优化方法, 基于 Python 平台编制 GA 算法与改进后的 ESGA 算法的计算程序, 分别对喷头进行了优化布局设计, 并与原设计方案进行对比, 分析优化方案的可行性。

喷头模型采用笛卡尔坐标系, 以喷头前端矩形截面的中心为坐标原点,  $x$  轴沿截面的水平方向,  $y$  轴沿截面的垂直方向。水射流自驱旋转喷头结构按照设计图纸进行构建, 喷头前端矩形截面边长为  $100\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ , 结构采用一字形截面, 初始布置方案的喷嘴数量为 6 个, 喷嘴孔径为  $0.4\text{ mm}$ , 任意两个喷嘴在  $x$  轴方向上的距离不小于  $2\text{ mm}$ 。优化问题为: 喷嘴如何布置时, 使得衡量喷头打击船壁能量分布均匀度的扫掠冲击时间标准差最小。因此, 该算例的数学模型可以表述为:

设计变量:  $X = [x_1, x_2, \dots, x_6, y_1, y_2, \dots, y_6]$

优化目标:  $\min \Phi(X)$

约束条件: 
$$\begin{cases} |x_i| \leq 50 \\ |y_i| \leq 15 \\ |x_i - x_j| \geq 2 \quad i \neq j \end{cases}$$

#### 3.2 优化结果分析

选取交叉概率  $P_c = 0.8$ 、变异概率  $P_m = 0.01$ <sup>[20]</sup>。然后, 在 ESGA 算法的搜索过程中, 将初始种群的数量  $N_p$  分别设置为 10、20、30、40、50、60, 最大迭代次数设置为 45, 具体的目标函数搜索过程如图 10 所示。

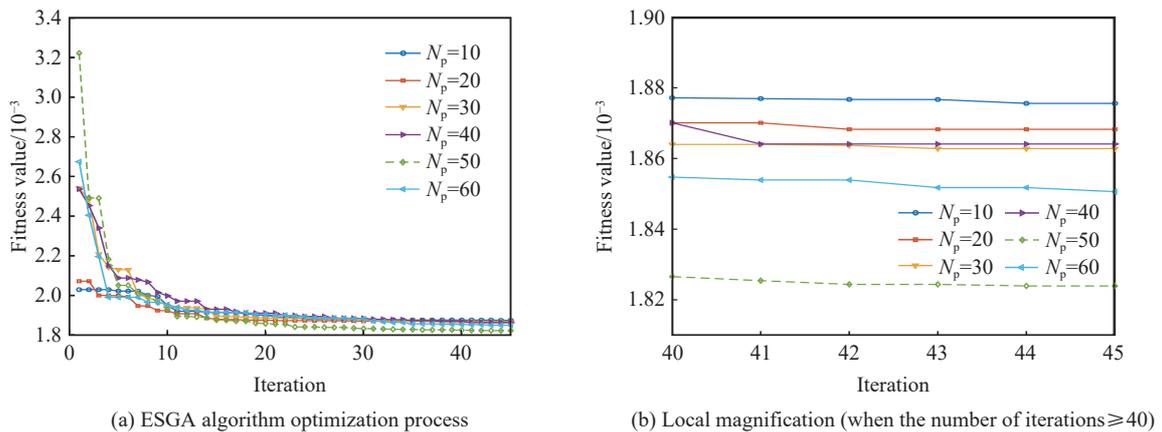
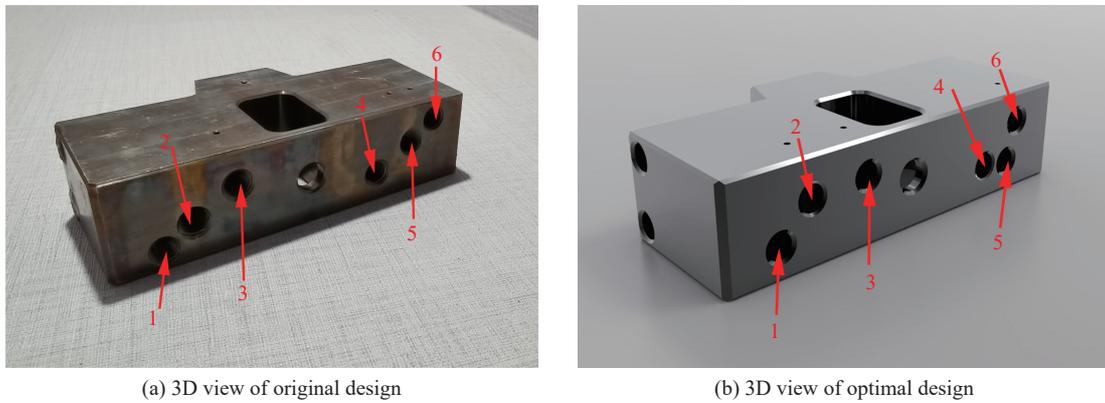


图 10 目标函数值的搜索过程  
Fig. 10 Search process of the objective function

图 10 中纵坐标为优化模型的目标值(扫掠冲击时间标准差最小值), 横坐标为遗传迭代次数。由此可见, 在水射流自驱旋转喷头布局优化迭代过程中, 目标函数值随着遗传迭代次数的增加而减小, 并呈单调下降趋势。不同初始种群规模具有不同的下降速率曲线以及不同的初始目标值, 当初始种群规模为  $10 \sim 40$  时, 开始阶段目标函数值及曲线下下降速率随着种群规模的增大而增大, 最终收敛结果基本保持在  $1.87 \times 10^{-3}$  附近。当初始种群规模为 50 时, 曲线下下降速率显著提高, 且最终收敛结果优化幅度增大, 并

保持在  $1.825 \times 10^{-3}$  附近。当初始种群规模大于 50 时, 曲线下降速率趋势改变, 最终收敛值保持在  $1.855 \times 10^{-3}$  附近, 且收敛结果优化幅度减小。种群规模为 50 的曲线, 在开始阶段其初始目标值最大并且下降速率最快, 最后趋于稳定的收敛时间最短。因此, 种群规模逐渐扩大, 算法的全局搜索能力及收敛能力会先增强后减弱。

为了方便确定旋转射流喷头中喷嘴的具体位置, 对其编号进行定位。该布置平面内共设有 6 个喷嘴, 图 11 中数字代表喷嘴所在位置的编号。从上述旋转射流喷头布局优化设计对比图中可以发现: (1) 在喷嘴布局上, 原方案呈对称分布, 而采用 ESGA 算法优化后所得到的喷嘴布局优化方案呈非对称分布, 越往喷头两侧喷嘴排布越紧密, 越靠近喷头中心喷嘴排布越稀疏, 这也恰好是当前高效型喷头布局的发展方向; (2) 由于布局优化以扫掠时间标准差最小值为优化目标, 所以优化结果反映射流能量分布趋势。显然, 优化后的方案增大了喷头两侧的射流能量, 同时减小了喷头中心附近的射流能量, 使得射流能量达到均衡, 也能够避免因中心附近局部过喷以及两侧漏喷而导致旋转射流喷头在冲击船壁锈层时留下少量的“剥离环”。



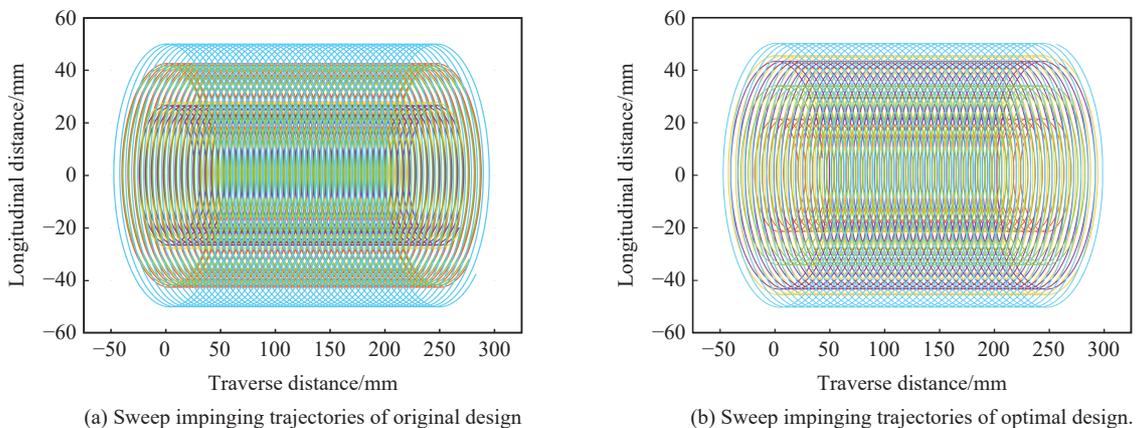
(a) 3D view of original design

(b) 3D view of optimal design

图 11 原设计方案与 ESGA 优化设计方案对比

Fig. 11 Comparison between original design and ESGA optimal design

为了更加直观地反映优化前后扫掠冲击轨迹密度分布的均匀程度, 将旋转射流喷头原布局方案与 ESGA 优化布局方案所对应的扫掠冲击轨迹进行对比, 如图 12 所示, 图中横坐标为喷头整体平移的横向距离, 纵坐标为喷头路径垂直方向上的距离。以冲击旋转半径的最大值为射流的最大覆盖范围, 可以看到经优化后所得的布局设计方案最大覆盖范围略优于原布局方案。因此, ESGA 算法能够在有限的射流旋转喷头几何尺寸设计域内, 最大程度地增大射流冲击扫掠的覆盖范围。



(a) Sweep impinging trajectories of original design

(b) Sweep impinging trajectories of optimal design.

图 12 原布局与 ESGA 优化布局方案冲击扫掠轨迹对比

Fig. 12 Comparison of sweep impinging trajectories between original layout and optimized layout by ESGA

从上述冲击扫掠轨迹线对比图中还可以发现, 喷头布局对轨迹线的疏密程度有一定影响, 显然优化布局方案下的轨迹线在路径垂直方向上的分布更加均匀, 而原布局方案的轨迹线为两侧稀、中间密。因此, 采用 ESGA 算法优化的布局方案能够满足在约束条件的前提下, 有效提高旋转射流喷头在冲击扫掠时的轨迹均匀度。

基于图 12 的轨迹分析发现, 稳定区域内, 其纵向冲击时间分布趋势基本相同。为了更加直观地体现出旋转喷头在横向移动时, 喷嘴在纵向不同位置的冲击时间对比情况, 在图 12 中冲击扫掠轨迹稳定区域内(横向距离 100~150 mm)的任一横坐标位置下, 均匀地在纵向实际扫掠范围, 即纵向(-50.1 mm, 50.1 mm)范围内, 取 400 个观测点。采用原喷头布局方案在扫掠宽度范围内, 各喷嘴和全部喷嘴的累计冲击时间分布如图 13(a)所示, 横坐标为观测点的扫掠范围, 纵坐标为观测点的扫掠冲击时间。可以发现, 原布局方案下的扫掠冲击时间分布两极分化现象严重, 在扫掠区域(-30 mm, -20 mm)和(20 mm, 30 mm)内, 其累计扫掠时间相对较长, 最大扫掠累计时间约 17 ms, 会导致局部过喷现象, 浪费射流能量, 甚至还可能损伤钢板基材。在扫掠区域(-50 mm, -44 mm)、(46 mm, 50 mm)、(-38 mm, -36 mm)、(36 mm, 38 mm)内, 其累计扫掠时间相对较短, 最大扫掠累计时间不超过 10 ms, 在兼顾整体均速平移的情况下, 两侧极有可能出现局部漏喷的情况, 使得冲击船壁锈层时留下明显的“剥离环”。

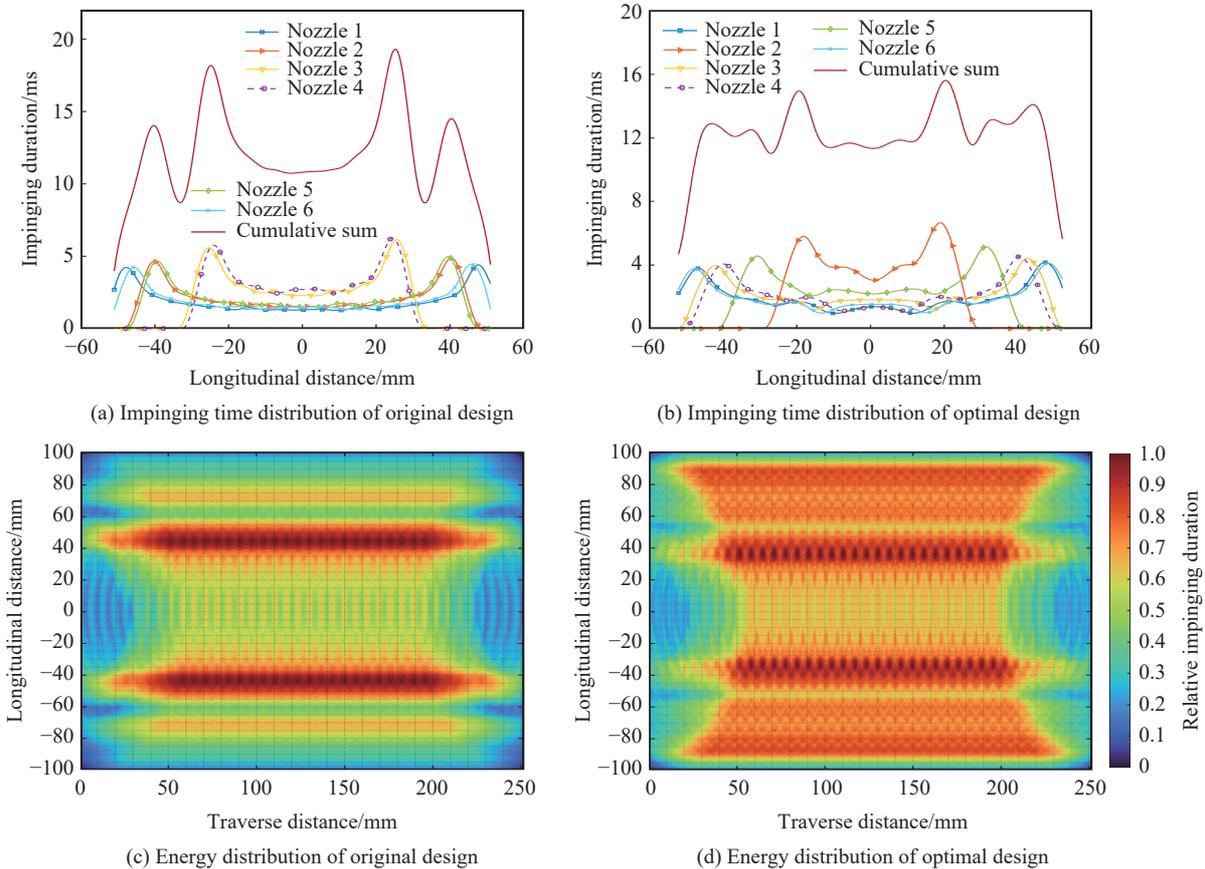


图 13 原喷头布局与 ESGA 算法优化后的冲击时间与能量分布对比

Fig. 13 Comparisons of impinging time and energy distribution between original and ESGA algorithm optimized schemes

采用 ESGA 算法优化后的喷头设计方案, 在扫掠宽度范围内的各喷嘴和全部喷嘴的累计冲击时间分布如图 13(b)所示。经 ESGA 算法优化布局喷头在定速旋转过程中, 在外侧扫掠区域(-50 mm, -44 mm)和(46 mm, 50 mm)内, 漏喷问题也得以有效解决。在扫掠区域(-30 mm, -20 mm)和(20 mm,

30 mm)内, 相较原方案, 过喷现象明显改善, 对应的扫掠冲击时间峰值分别下降 12.0% 和 15.0%。由于相邻喷嘴有最小尺寸间距的要求, 对喷头结构的整体优化带来一定限制, 导致该扫掠区域的冲击时间仍存在峰值效应, 在扫掠宽度范围内也做不到累计冲击时间均匀分布。在有效打击区域(-50 mm, 50 mm)内, 各观测点的扫掠冲击时间基本保持在 12 ms 以上。采用原喷头布局与 ESGA 算法优化后的能量分布如图 13(c)~(d)所示, 可以看出, 优化布局方案的打击能量分布均匀度要明显优于原布局方案, 因此, 经 ESGA 算法优化后的布局方案可以保证在扫掠宽度范围内具有更好的清垢除锈效果。

### 3.3 方法对比及分析

表 1 为原设计方案与 GA 算法与 ESGA 算法优化方案的对比结果。从优化结果可以看出, 由于布局优化目标的方向一致, GA 算法与 ESGA 算法以冲击时间的最小值为优化目标所得到的喷嘴布局分布趋势一致, 表明采用 ESGA 算法解决此类优化问题具有较好的稳定性。衡量能量均匀度的目标值越小, 均匀度越好, 相比于原方案, GA 算法对能量均匀度提升约 45.2%, ESGA 算法对能量均匀度提升约 47.2%。相比之下, ESGA 算法的优化幅度高于 GA 算法, 主要原因是采用“锦标赛选择”的 ESGA 算法可有效避免种群中最优个体因为杂交操作而被破坏, 把种群在遗传迭代过程中出现的最优个体(也称为精英个体)不进行配对交叉而直接保留到了下一代种群当中。

表 1 GA 算法与 ESGA 算法优化结果比较  
Table 1 Comparison of optimization results between GA algorithm and ESGA algorithm

优化方法	目标值
原设计	0.003 45
GA 算法	0.001 89
ESGA 算法	0.001 82

采用基于“锦标赛选择”的 ESGA 算法优化法开展旋转喷头布局优化的主要意义在于能够满足在约束条件的前提下, 不需要过多的布局设计经验也可以设计出比原方案更优的设计方案。但是由于喷嘴位置的改变, 可能也会改变喷头的主要结构, 因此需要对喷头的结构尺寸进行校核, 避免结构出现无法加工的问题<sup>[7]</sup>。

综上所述, 可以认为上述基于“锦标赛选择”的 ESGA 算法所得到的喷头布局优化结果在工程上是可以接受的, 算法的优化迭代步数在 45 步以内, 收敛速度快。因此该方案能够较快地得到喷头布局优化结果, 可以用于一字形旋转射流喷头结构设计前的喷嘴布局设计。

为充分验证优化结果的有效性, 基于船壁爬壁机器人载体平台, 以水线面以上钢制船壁基材表面达到 Sa2.5 为清洁标准, 开展了 6 喷嘴型原始旋转喷头和 ESGA 算法优化后旋转喷头清垢除锈效率的对比试验, 场地试验结果如表 2 所示。采用原设计方案的 6 喷嘴型旋转喷头, 平均单位时间清除面积 36.7 m<sup>2</sup>, 采用 ESGA 算法优化后的 6 喷嘴型旋转喷头, 平均单位时间清除面积 52.1 m<sup>2</sup>, 较原设计方案除锈效率提高 42.0%。

表 2 原方案与 ESGA 优化方案除锈效率比较

Table 2 Comparison of the rust-removing efficiency between original scheme and ESGA optimized scheme

试验	喷头设计类型	时间/min	有效清除面积/m <sup>2</sup>	核算单位时间清除面积/(m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	原设计方案	20	12.1	36.2
2	原设计方案	20	12.3	37.1
3	ESGA 算法优化方案	20	17.5	52.5
4	ESGA 算法优化方案	20	17.2	51.6

## 4 结 论

(1) 遗传算法在解决此类喷头布局优化问题具有较好的稳定性, ESGA 算法和 GA 算法优化后的结

果与原方案相比,其冲击能量分布均匀度分别提升了 47.2% 和 45.2%,前者优化幅度优于后者。

(2) 基于船壁爬壁机器人载体平台,以钢制船壁基材表面达到 Sa2.5 为清洁标准,对经 ESGA 算法优化后的喷头进行试验验证。试验结果表明,ESGA 优化方案较原设计方案除锈效率提高 42.0%。

该喷头布局优化技术不仅可以用于优化原布局方案,还可以根据实际技术要求直接在概念设计前期进行喷头快速布局设计。然而,该方法目前仍然存在一些不足,由于自驱旋转型喷头的布置较复杂,通常需要调整喷嘴的冲击角来使喷头达到期望的转速,而目前仅考虑喷头布局位置参数,未将喷头转速纳入优化约束中。因此,后续将针对上述问题进一步开展相关的研究工作,以更加全面、有效地解决此类问题。

## 参考文献:

- [1] ZHANG F F, SUN X R, LI Z P, et al. Influence of processing parameters on coating removal for high pressure water jet technology based on wall-climbing robot [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(5): 1862. DOI: 10.3390/app10051862.
- [2] 薛胜雄. 超高压水射流自动爬壁除锈机理与成套设备技术 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.  
XUE S X. Studies on the removal rust forming by UHP waterjetting auto-robot and its unit technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [3] 衣正尧, 弓永军, 王祖温, 等. 用于搭载船舶除锈清洗器的大型爬壁机器人 [J]. *机器人*, 2010, 32(4): 560–567. DOI: 10.3724/SP.J.1218.2010.00560.  
YI Z Y, GONG Y J, WANG Z W, et al. Large wall climbing robots for boarding ship rust removal cleaner [J]. *Robot*, 2010, 32(4): 560–567. DOI: 10.3724/SP.J.1218.2010.00560.
- [4] GERO M B P, GARCÍA A B, DEL COZ DÍAZ J J. A modified elitist genetic algorithm applied to the design optimization of complex steel structures [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(2): 265–280. DOI: 10.1016/j.jcsr.2004.07.007.
- [5] YILDIZELI A, CADIRCI S. Multi-objective optimization of multiple impinging jet system through genetic algorithm [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 158: 119978. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119978.
- [6] ALHAMAYDEH M, BARAKAT S, NASIF O. Optimization of support structures for offshore wind turbines using genetic algorithm with domain-trimming [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017: 5978375. DOI: 10.1155/2017/5978375.
- [7] FU X Y, LEI L, YANG G, et al. Multi-objective shape optimization of autonomous underwater glider based on fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 157: 339–349. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.055.
- [8] ZAIN A M, HARON H, SHARIF S. Genetic algorithm and simulated annealing to estimate optimal process parameters of the abrasive waterjet machining [J]. *Engineering with computers*, 2011, 27(3): 251–259. DOI: 10.1007/s00366-010-0195-5.
- [9] SRINIVASU D S, BABU N R. A neuro-genetic approach for selection of process parameters in abrasive waterjet cutting considering variation in diameter of focusing nozzle [J]. *Applied Soft Computing*, 2008, 8(1): 809–819. DOI: 10.1016/j.asoc.2007.06.007.
- [10] 屈长龙, 王喜顺. 基于 FLUENT 的高压水射流除锈的流场仿真及射流参数优化 [J]. *机械与电子*, 2016, 34(2): 24–27. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2257.2016.02.006.  
QU C L, WANG X S. Jet flow simulation and parameters optimization of high pressure water jet for derusting based on FLUENT [J]. *Machinery & Electronics*, 2016, 34(2): 24–27. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2257.2016.02.006.
- [11] CAI C, WANG X C, YUAN X H, et al. Experimental investigation on perforation of shale with ultra-high pressure abrasive water jet: shape, mechanism and sensitivity [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 67: 196–213. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.05.002.
- [12] 孙玲, 弓永军, 王祖温, 等. 超高压旋转清洗盘的设计及密封分析 [J]. *中国机械工程*, 2014, 25(13): 1715–1718. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.13.003.  
SUN L, GONG Y J, WANG Z W, et al. Design and sealing analysis of ultra-high pressure water cleaning rotary device [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(13): 1715–1718. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.13.003.
- [13] 陈正寿, 黄璐云, 杜炳鑫, 等. 超高压水射流喷头水动力特性研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(5): 053303. DOI: 10.11883/

bzycj-2021-0310.

CHEN Z S, HUANG L Y, DU B X, et al. Insight of hydrodynamic characteristics related to ultra-high pressure water jet rust removal sprayers [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5): 053303. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0310.

- [14] HUANG F, MI J Y, LI D, et al. Impinging performance of high-pressure water jets emitting from different nozzle orifice shapes [J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 8831544. DOI: 10.1155/2020/8831544.
- [15] HUANG H C, LI D H, XUE Z, et al. Design and performance analysis of a tracked wall-climbing robot for ship inspection in shipbuilding [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 131: 224–230. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.01.003.
- [16] ZHANG D, WANG H L, LIU J H, et al. Flow characteristics of oblique submerged impinging jet at various impinging heights [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(3): 399. DOI: 10.3390/jmse10030399.
- [17] 李安贵, 刘庭成, 丁宇. 影响双喷嘴旋转速度的参数研究 [J]. *中国安全科学学报*, 1999, 9(S1): 20–23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.1999.z1.005.
- LI A G, LIU T C, DING Y. Study on parameters of swirl speed affecting the twin water jet nozzle [J]. *China Safety Science Journal*, 1999, 9(S1): 20–23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.1999.z1.005.
- [18] XUE Y Z, SI H, CHEN G H. The fragmentation mechanism of coal impacted by water jets and abrasive jets [J]. *Powder Technology*, 2020, 361: 849–859. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.11.018.
- [19] HOLLAND J H. Genetic algorithms [J]. *Scientific American*, 1992, 267(1): 66–73. DOI: 10.1038/scientificamerican0792-66.
- [20] MOTLAGH A A, SHABAKHTY N, KAVEH A. Design optimization of jacket offshore platform considering fatigue damage using Genetic Algorithm [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 227: 108869. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108869.
- [21] GENTILS T, WANG L, KOLIOS A. Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm [J]. *Applied Energy*, 2017, 199: 187–204. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.009.

(责任编辑 曾月蓉)