

# 超高压水射流自驱旋转喷头空间布局优化

赵文涛<sup>1</sup> 陈正寿<sup>1\*</sup> 陈源捷<sup>2</sup> 杜炳鑫<sup>1</sup> 谭小利<sup>3</sup>

1. 浙江海洋大学船舶与海运学院, 舟山, 316022

2. 浙江大学海洋学院, 舟山, 316021

3. 太平洋海洋工程(舟山)有限公司, 舟山, 316057

**摘要:**为提高超高压水射流旋转喷头水动力性能与除锈效率,提出了一种基于粒子群优化算法的布局优化策略。通过分析旋转喷头的运动特征,建立了扫掠冲击轨迹模型、累计冲击持续时间模型和自驱旋转模型,其中,自驱旋转模型揭示了喷嘴布局对自旋转速度的影响,并为冲击角设定提供理论依据。以水射流能量分布均匀性和扫掠冲击宽度为衡量标准,构建了双目标优化模型,并采用粒子群优化算法求解最佳喷嘴空间布局;结合自驱旋转模型确定对应冲击角参数。最后,以浙江修造船企业常用的“一”字形16喷嘴旋转喷头为例,进行了实际优化试验,结果表明,经优化后喷头的扫掠冲击能量分布均匀度较原设计提高了22.81%,除锈效率提高了约11.2%。

**关键词:**超高压;冲击射流;布局优化;除锈效率;粒子群优化算法

**中图分类号:**O358;TP29

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.012

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Spatial Layout Optimization of Ultra-high-pressure Water Jet Self-driven Rotary Sprayer

ZHAO Wentao<sup>1</sup> CHEN Zhengshou<sup>1\*</sup> CHEN Yuanjie<sup>2</sup> DU Bingxin<sup>1</sup> TAN Xiaoli<sup>3</sup>

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

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang, 316021

3. Paxocean Engineering Zhoushan Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang, 316057

**Abstract:** To enhance the hydrodynamic performance and rust-removal efficiency of the UHP water jet rotary sprayers, a novel layout optimization strategy was proposed based on the PSO algorithm. The sweep impinging trajectory, accumulative impinging-duration, and self-rotary models were successively established based on a fully motion characteristics analysis of the rotary sprayers. The self-rotary model revealed the influences of nozzle spatial layout on rotational speed and provided a theoretical basis for determining the attack angle. By regarding the uniformity of water jet impinging energy distribution and the sweep impinging width as evaluation criteria, a bi-objective optimization model was established. Then, the optimal spatial layouts of the nozzles were obtained via PSO algorithm, and the corresponding attack angles were derived from the self-rotary model. Finally, an actual optimization experiment was conducted using a rod-like shape 16-nozzle rotary sprayer commonly adopted in a shipyard of Zhejiang. Results show that the optimized design improves the uniformity of sweep impinging energy distribution by 22.81% and increases rust-removal efficiency by approximately 11.2%.

**Key words:** ultra-high-pressure (UHP); impinging jet; layout optimization; rust-removal efficiency; particle swarm optimization (PSO) algorithm

### 0 引言

船体表面的高盐锈蚀和贝藻类附着是制约航运业绿色发展与船舶运维效率的共性难题。一方面,严重的腐蚀会降低船舶结构强度,缩短船舶使

用寿命;另一方面,大面积凸起的膨胀锈层和海洋贝藻类附着物会增加航行阻力,影响船舶航行经济性。因此,对船体定期除锈和重新喷涂成为船舶维护和保养的重要工作。

凭借效率高、环境污染低、不损伤基材、能量集中等优点,超高压水射流除锈技术逐渐被国内各大修船企业所接纳<sup>[1]</sup>。其原理是水经过高压设备增压,通过细小的喷嘴孔道形成超高速水射流,随后冲击到靶面上,对锈层产生脆性破坏以达到

收稿日期:2025-05-20

基金项目:国家自然科学基金(41776105);舟山市关键和共性技术攻关项目(2025C03004);舟山市科技局一般项目(2023C41010)

除锈目的<sup>[2]</sup>。喷嘴是流体射流发生装置的基本元件,其性能直接影响超高压水射流的冲击效果。内嵌多喷嘴的旋转除锈喷头能成倍提高除锈效率,适用于工业化大规模作业要求,已成为船体除锈设备的首选<sup>[3]</sup>。对于超高压水射流成套装备,国内外相关研究多集中于喷头载体系统,如爬壁机器人和无人高空作业平台的研发等,关于旋转喷头装置的水动力性能提效分析比较欠缺,尚处于起步阶段<sup>[4-5]</sup>。

为了更好地提高超高压水射流除锈系统的整体效率,研究人员探索了两种主要方法。第一种是增大系统操作压力<sup>[6]</sup>,虽可以提高清洁效率,但通常会增加能源需求,并可能导致衬底损坏和安全性降低<sup>[7]</sup>。第二种是使用额外的超高压喷嘴或直径更大的喷嘴<sup>[8]</sup>,尽管可以显著提高效率,但是需要更大功率的柱塞泵,并伴随更高的财力和研发投入。这两种方法都依赖于经验工程实践,而非理论优化框架,且忽视了水射流的水动力特性,易导致旋转除锈喷头设计的偏差。为了解决这一问题,缩小理论优化与实际工程应用之间的差距,开发更高效、更节能的超高压水射流除锈系统势在必行。优化分布式超高压喷嘴在旋转除锈喷头中的空间布局成为了一种可行的解决方案。

自驱旋转喷头的布局优化属于典型的工程拓扑优化问题,涉及高度非线性目标函数及复杂约束条件。智能优化算法凭借其强大的全局搜索能力和自适应特性,能够有效处理此类非线性复杂问题,帮助设计者在庞大的设计空间中找到最优解。HUANG等<sup>[9]</sup>提出了一种基于改进人工鱼群算法的光纤 Bragg 光栅传感器网络优化方法,旨在最大化给定传感器数量的覆盖率。JIN等<sup>[10]</sup>基于粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 提出了一种天线布局优化方法,该方法在保障最优性能的同时提高了收敛速度。RIZK-ALLAH等<sup>[11]</sup>提出了一种基于模式搜索的混合平衡优化器 EO-PS,用于风电场内风力涡轮机的布局优化,旨在寻找风力涡轮机的最佳位置。时光辉等<sup>[12]</sup>提出了一种结合移动可变形组件法和人工神经网络的智能优化方法,可显著提高空气舵加筋设计的效率和精度。在超高压水射流领域,陈源捷等<sup>[13]</sup>和宋寒冬等<sup>[14]</sup>分别利用改进的精英策略遗传算法和秃鹰搜索算法,对“一”字形和“十”字形旋转喷头的空间布局进行了优化,与原始设计相比,优化后的方案显著提高了除锈效率,验证了智能优化算法在多喷嘴旋转喷头布局优化中的可行

性。然而,这些研究未考虑喷嘴冲击角的设计,也缺乏系统的优化理论框架,主要集中在实际问题的提出和解决。值得注意的是,超高压喷嘴冲击角的选择对旋转除锈喷头的水动力性能具有重要影响<sup>[3]</sup>。

针对超高压水射流旋转喷头的空间布局优化问题,本文在陈源捷等<sup>[13]</sup>提出的优化模型基础上,建立了一个具有实际意义的自驱旋转模型。该模型在已知动力学和几何参数的前提下,可用于分析同类型多喷嘴自驱旋转喷头的旋转冲击特性。为了提高除锈效率,通过对旋转喷头运动的深入分析,提出了以提高能量分布均匀性和最大扫掠宽度为目标的双目标优化模型。采用 PSO 算法进行求解,得到超高压喷嘴的最佳空间布局,并通过自驱旋转模型计算得到相应的冲击角。该综合优化策略不仅包括理论参数的确定,还涵盖了具体布局的实现。

## 1 喷头组成结构及工作原理

### 1.1 水射流旋转喷头结构

自驱旋转喷头结构如图 1 所示,由分布式超高压喷嘴、旋转轴、旋转接头、旋转体、阻尼机构和高压水封等部件组成<sup>[15]</sup>。旋转体是该结构的核心组成部分,通过旋转轴连接到旋转接头。超高压喷嘴通常以不同的倾角分布在旋转体前端的表面上。纯水通过旋转轴进入旋转体,经加压后从喷嘴喷出,形成具有不同喷射倾角的超高速水射流。具有倾角的水射流为旋转体的连续旋转提供旋转扭矩,当旋转扭矩大于阻力矩时,会驱动旋转喷头绕轴做圆周运动,进而对船体表面产生冲击并形成环形凹槽。

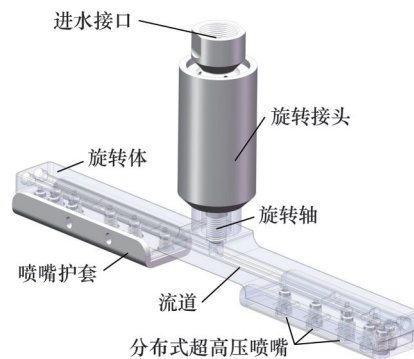


图 1 自驱旋转喷头结构

Fig.1 Structure of self-driven rotary sprayer

### 1.2 分布式超高压喷嘴结构

超高压喷嘴是产生高速水射流的关键部件,直接影响旋转除锈喷头的作业效果<sup>[16]</sup>。直圆锥收敛形喷嘴具有集中的速度分布和优越的流体动力

性能,相比其他类型的喷嘴,能够更有效地将超高压柱塞泵的静压转化为动压,从而产生速度达700 m/s的超高压水射流。这种水射流在目标靶面产生较高的壁面压力和剪切应力,可实现有效的剥离冲击,因此,本文旋转喷头均选用图2所示的直圆锥收敛形喷嘴。该喷嘴的纵截面(沿轴线方向)可分为进口段(I)、收缩段(II)和出口段(III)三个部分。其中,进口段与高压软管相连;收缩段旨在缩小流动截面,从而迅速提高流体速度;出口段则用于稳定流体流动,确保纯水从喷嘴出口以高速喷射,形成能量集中的高压水射流。

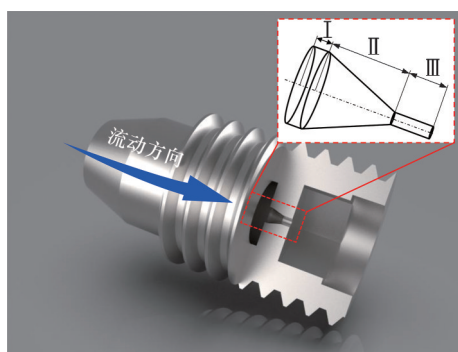


图2 直圆锥收敛形喷嘴结构<sup>[16]</sup>

Fig.2 Structure of straight-cone convergent nozzle<sup>[16]</sup>

### 1.3 除锈原理

超高压水射流技术利用高压水射流有效地去除船体基底上的残留涂层,如腐蚀和藻类。旋转除锈喷头的水动力性能直接影响超高压水射流装置的冲击剥离效果。整体除锈过程如图3所示。最初,由于摩擦力(如关节和轴的摩擦)和有限的旋转扭矩,旋转喷头保持静止(图3a);当超高压达到特定阈值时,旋转扭矩克服摩擦阻力,旋转喷头开始旋转(图3b);随着旋转扭矩和摩擦力达到平衡,喷头以稳定的转速旋转,在锈蚀表面上产生显著的剪切作用,并形成环形凹槽(图3c);此外,在喷头旋转过程中还伴随着所搭载载体(如机器人和专用高架车等)的平移运动,两种运动形式叠

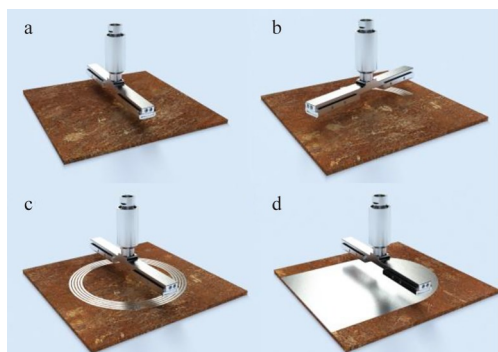


图3 旋转喷头工作示意图

Fig.3 Working diagram of rotary sprayer

加,超高压射流在壁面上的打击点运动轨迹呈螺旋状,多个喷嘴的喷射轨迹累加后,便会在目标壁面形成“带状”的清洁区域(图3d)。随着超高速水射流不断地冲击船体外侧钢板,锈层在旋转射流打击压力、剪切应力和水楔等联合作用下产生裂纹,冲击瞬间呈脆性扩散直至锈层破坏。超高压水射流所具有的强大冲击剥离作用,可有效清除船舶外壁面上的漆层、锈层,以及藻类、藤壶等海洋附着物,达到对船舶表面清洗的目的。

## 2 布局优化分析与模型建立

本节在分析多喷嘴旋转喷头运动特征的基础上,建立了扫掠冲击轨迹模型、累计冲击持续时间模型和自驱旋转模型。扫掠冲击轨迹模型研究了靶距、冲击角等工艺参数对扫掠轨迹的影响;累计冲击持续时间模型提出了一种量化方法,通过计算每个观测点的累计冲击时间,评估冲击轨迹密度;自驱旋转模型为喷嘴空间布局中冲击角的设定提供了理论依据。最后,为提高除锈效率,构建了以能量分布均匀性和冲击扫掠宽度为目标的双目标优化模型,并采用PSO算法求解最佳喷嘴空间布局。

### 2.1 数学建模

在建立多喷嘴旋转喷头空间布局优化模型之前,针对喷头装置作如下假设与简化:①喷头为刚体;②喷头为轴对称结构,以避免潜在的有害振动;③忽略运动过程中压力脉动或机械振动的影响;④船体外侧为竖直平面。

#### 2.1.1 扫掠冲击轨迹模型

在大面积除锈作业中,自驱型水射流喷头包含平移和旋转两种运动形式。匀速平移运动的速度由运动载体决定,而旋转运动速度大小则取决于喷头的旋转扭矩和阻力矩。为便于分析,对单喷嘴产生的射流束冲击到目标壁面的扫掠轨迹进行简化建模。单喷嘴的扫掠冲击轨迹是平移运动与匀速圆周运动合成的结果,如图4所示,以该喷头中心在目标平面上的投影为原点建立直角坐标系, $(x_0, y_0)$ 表示喷嘴在目标壁面上的初始投影坐标, $\alpha$ 为喷嘴的冲击角(锐角), $\varphi$ 为喷嘴初始时刻的相位角, $r$ 为射流束打击目标壁面的实际旋转半径, $r_c$ 为喷嘴在目标壁面的有效打击半径, $h$ 为喷头的靶距,相关轨迹分析详见文献[13]。

#### 2.1.2 累计冲击持续时间模型

当多个喷嘴安装在旋转喷头上时,不同旋转半径的轨迹叠加使冲击路径变得更加复杂。为了

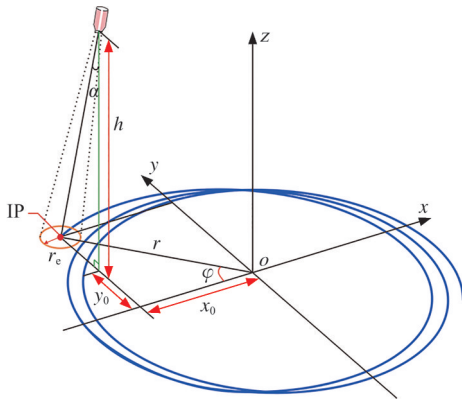
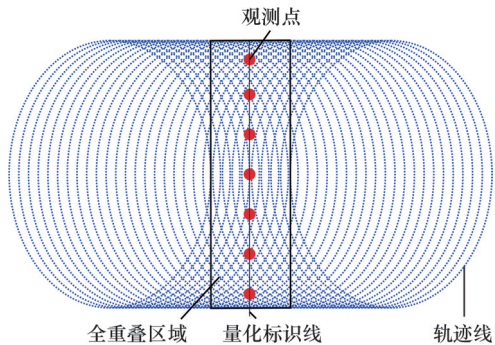


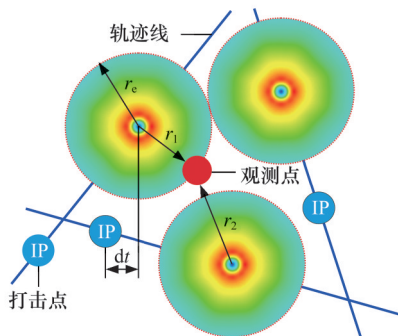
图4 单喷嘴运动扫掠模型

Fig.4 Sweep motion model of single nozzle

更有效地量化这些轨迹的密度,引入了累计冲击持续时间模型,如图5所示,在冲击轨迹全重叠区域的量化标识线处,纵向均匀地取 $n_s$ 个打击观测点。该模型能够计算任意观测点上水射流冲击的累计持续时间。图5中,每条轨迹使用毫秒级的时间间隔进行离散,当该时间间隔足够小时,可以近似认为水射流的运动为线性。图中蓝点表示离散的水射流打击点(即IP点),红点为选定观测点。在观测点周围随机选取两个打击点,并将它们到观测点的距离分别记为 $r_1$ 和 $r_2$ , $dt$ 表示采样时间间隔。



(a) 累计冲击持续时间模型示意图



(b) 观测点局部放大图

图5 累计冲击持续时间模型观测点局部放大图

Fig.5 The accumulative impinging-duration model

根据薛胜雄等<sup>[17]</sup>的试验研究和HUANG等<sup>[3]</sup>的数值模拟,当IP点与观测点之间的距离小于 $2d$

( $d$ 为喷嘴直径)时,除锈表面的洁净度可达Sa2.5级,因此,将有效打击半径 $r_e$ 定义为 $2d$ 。当观测点完全位于有效撞击范围内(即 $r_1 \leq r_e$ )时,视为有效打击;当观测点完全不在有效撞击范围内(即 $r_2 > r_e$ )时,视为无效打击。通过统计扫掠过程中观测点的有效打击次数 $N_i (i=1, 2, \dots, n_s)$ ,可以在给定的移动时间内计算每个观测点的总累积冲击时间 $T_i$ :

$$T_i = (N_i - 1)dt \quad (1)$$

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。相关分析详见文献[13]。

### 2.1.3 自驱旋转模型

具有一定冲击角的水射流以一定速度从喷嘴喷出,会使喷头产生一定的反冲扭矩,致使旋转体绕旋转轴旋转。该反冲扭矩在克服摩擦扭矩后,使喷头旋转角速度增加,同时提供相应的动量矩,以实现除锈喷头自驱旋转。大量研究表明,在压力或流量等水力参数确定的情况下,水射流的除锈效率在很大程度上取决于除锈喷头的旋转速度。基于龙明庆<sup>[18]</sup>通过力学方法给出的旋转速度计算公式,本文提出一种物理意义更明确的自驱旋转喷头模型,旨在分析喷头转速与其各特征参数的关系,并最终实现对水射流喷头旋转速度的预测。自驱旋转模型的计算表达式如下<sup>[19]</sup>:

$$J \frac{d\omega}{dt} = Q(v \sin \alpha - \omega R)R - M \quad (2)$$

式中: $J$ 为旋转部分的转动惯量; $\omega$ 为喷头旋转的角速度; $t$ 为时间; $Q$ 为水流量; $v$ 为水射流在喷嘴出口处的喷射速度; $R$ 为水射流的旋转半径; $M$ 为系统总阻力矩。

阻力矩 $M$ 主要由滑动摩擦力矩 $M_s$ 、黏性摩擦力矩 $M_v$ 和空气阻力矩 $M_a$ 三部分组成。其中, $M_s$ 来源于密封件与轴承间的固体接触摩擦,其大小与 $\omega$ 无关,视为常数; $M_v$ 来源于密封间隙内流体的黏性剪切作用,因其量级(约为 $1.01^{-2} \omega$ )远小于式(2)中的动量矩 $Q\omega R^2$ ,在模型计算中予以忽略<sup>[20-21]</sup>; $M_a$ 是由空气与旋转体表面的直接接触引起的,其大小与 $\omega^2$ 成正比。综上, $M$ 可简化为

$$M = M_s + M_v + M_a = M_s + C_1 \omega^2 \quad (3)$$

$$C_1 = (C_D \rho_a W_s L_s^4) / 4$$

式中: $C_1$ 为综合空气阻力系数; $C_D$ 为空气阻力系数,值为常数1; $\rho_a$ 为空气密度,标准状况下其值为 $1.293 \text{ kg/m}^3$ ; $W_s$ 、 $L_s$ 分别为喷头迎风面的宽度和长度。

忽略喷嘴进出口高度差并令出口静压为0,

结合伯努利方程与连续性方程,考虑喷嘴内黏性剪切与湍流引起的能量损失,出口射流速度  $v$  的简化计算式如下:

$$v = \phi \sqrt{\frac{2p_m}{\rho(1-\beta^4)}} \approx \phi \sqrt{\frac{2p_m}{\rho}} \quad (4)$$

式中:  $p_m$  为喷嘴入口静压, Pa;  $\rho$  为截面的流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\beta$  为喷嘴收敛比(出口与入口直径比,通常极小可忽略);  $\phi$  为速度系数,用于修正理论计算与实际喷射速度的偏差。

对于多喷嘴除锈喷头产生的多股喷射水流,其转速  $\omega$  应满足:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i (v_i \sin \alpha_i - \omega R_i) R_i - M \quad (5)$$

其中,  $n$  为喷嘴的数量;下标  $i$  表示第  $i$  个水射流的特征参数。假设各喷嘴能量分配均匀,则各喷嘴出口流速  $v_i = v$ , 对应流量  $Q_i = v_i A \rho$ ,  $A$  为喷嘴管道的横截面积。

### 2.2 双目标优化模型

在本研究中,超高压柱塞泵的限制流量决定了安装在超高压水射流自驱旋转喷头上的喷嘴数量  $N_s$ 。旋转喷头的基本参数特征可以通过  $N_s$  和布局模式  $L$  来描述。布局模式  $L$  由一个  $2 \times N_s$  的矩阵表示,其中第一行表示  $x$  坐标,第二行表示  $y$  坐标。矩阵中的每一列  $j(j=1, 2, \dots, N_s)$  表示第  $j$  个喷嘴的位置,其定义如下:

$$L = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{N_s} \\ y_1 & y_2 & \dots & y_{N_s} \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据第 2.1.2 节,水射流扫掠冲击能量的均匀性可通过沿量化标识线分布的累积冲击持续时间标准差  $\sigma_T$  来表征:

$$S(L, h, a, n_{\text{rpm}}, v_p, d) = \sigma_T = \sqrt{\frac{1}{N_s - 1} \sum_{i=1}^{N_s} (T_i^2 - N_s \bar{T}^2)} \quad (7)$$

式中:  $\bar{T}$  为所有观测点的平均累计冲击持续时间;  $n_{\text{rpm}}$  为喷头的旋转速度;  $v_p$  为运动载体的平移速度。

目标函数  $S$  的值越小,意味着水射流的扫掠冲击能量分布越均匀,旋转喷头的水动力性能越优越。此外,扫掠宽度  $W$  是另一关键评价指标:

$$W = \min(|x^* - x^*|) \quad (8)$$

其中,  $x^*, x^*$  为集合  $\Omega = \{x^*, x^* | T_i - T_{\text{th}} = 0\}$  的元素;  $T_{\text{th}}$  为累计有效冲击时间阈值。优化算法的目标是在不增加额外喷嘴数量和不改变泵压的前提下,提高全重叠区域内累计冲击持续时间的均匀性,同时增大扫掠宽度的最大值,故双目标优化模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} \min & S \\ \max & W \\ \text{s.t.} & -L_s/2 \leq x_i \leq L_s/2 \\ & -W_s/2 \leq y_i \leq W_s/2 \\ & \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq 20d \\ & i, j = 1, 2, \dots, N_s, \text{ 且 } i \neq j \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在旋转除锈喷头空间布局优化设计中,必须充分考虑布局方案在工程实践中的可行性,特别是相邻喷嘴之间的最小间距问题。若两个相邻的超高压喷嘴位置过于接近,可能会导致装配困难。为确保装配的可行性,需综合考虑喷嘴外径、螺纹尺寸、材料强度等结构因素。为此,相邻超高压喷嘴之间的最小间距应不小于其允许的中心距离。根据有限元计算得到的保守结果,最小间距被设定为  $20d$ 。

### 2.3 粒子群优化算法

PSO 算法是一种基于生物智能的优化算法<sup>[22]</sup>。该算法通过模拟鸟群觅食的行为,不断迭代更新粒子的位置和速度,以寻找全局最优解。在 PSO 算法中,每个粒子具有当前第  $i$  维的位置  $x_{pi}(x_{pi1}, x_{pi2}, \dots, x_{piD})$  和速度  $v_{pi}(v_{pi1}, v_{pi2}, \dots, v_{piD})$ , 同时记录到目前为止所达到的最佳位置  $P_{gi}(P_{gi1}, P_{gi2}, \dots, P_{giD})$ 。粒子通过繁殖更新规则不断改进位置,逐步逼近全局最优解。更新规则如下:

$$v_{piD}^{(k+1)} = v_{piD}^{(k)} + c_1 r_{p1} (P_{giD}^{(k)} - x_{piD}^{(k)}) + c_2 r_{p2} (P_{gD}^{(k)} - x_{piD}^{(k)}) \quad (10)$$

$$x_{piD}^{(k+1)} = x_{piD}^{(k)} + v_{piD}^{(k+1)} \quad (11)$$

式中:  $D$  为粒子位置的维度;  $k$  为迭代次数;  $c_1, c_2$  为加速常数;  $P_{gD}^{(k)}$  为群体在第  $k$  次迭代时的全局历史最优位置;  $r_{p1}, r_{p2}$  为取值范围在  $[0, 1]$  内的两个独立随机数序列,旨在通过引入随机扰动机制以增强算法的全局寻优能力并防止早熟收敛<sup>[23]</sup>。

为了提高 PSO 算法的收敛性,SHI 等<sup>[24]</sup>引入了惯性因子,该因子表示粒子在当前状态下继承的速度。通过调整惯性因子  $\omega_p$ ,可以在全局搜索和局部搜索之间实现平衡,从而有效避免过早收敛于局部最优解,表达式如下:

$$v_{piD}^{(k+1)} = \omega_p v_{piD}^{(k)} + c_1 r_{p1} (P_{giD}^{(k)} - x_{piD}^{(k)}) + c_2 r_{p2} (P_{gD}^{(k)} - x_{piD}^{(k)}) \quad (12)$$

PSO 算法过程概括如下:①初始化粒子群,为每个粒子随机分配初始位置和速度。②计算每个粒子的适应度值,并记录其当前最佳位置。③将当前适应度值与粒子历史最佳适应度值  $P_{Bi}$  进行比较。如果当前适应度更优,则更新该粒子的局部最佳位置;否则,保留历史最佳位置不变。④将每个粒子的局部最佳位置  $P_{Bi}$  与全局最佳位置  $g_{\text{best}}$  进行比较,如果某个粒子的局部最佳位置

更优,则更新全局最佳位置。⑤根据粒子的当前速度、位置以及个体和全体历史最佳位置,更新每个粒子的速度和位置。⑥判断是否满足算法的终止条件,如果已满足,则停止迭代,否则,返回步骤②,继续优化。

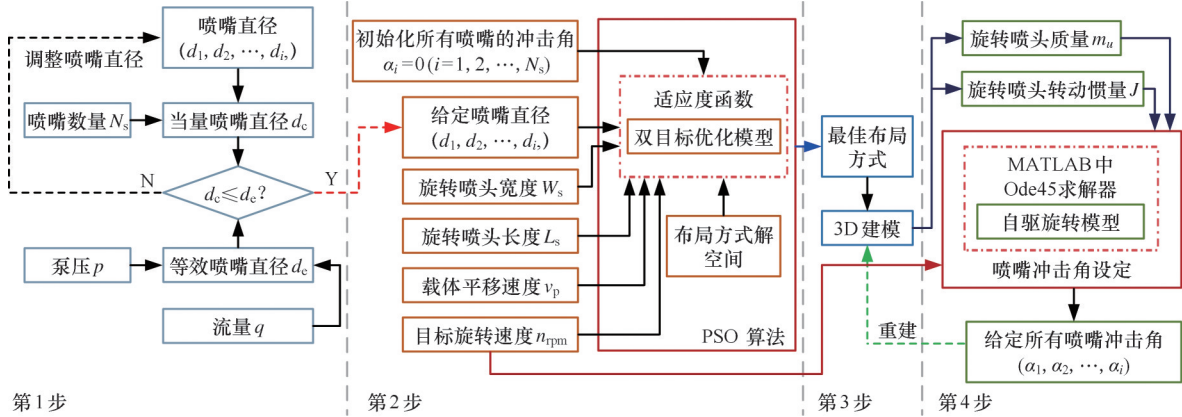


图6 旋转喷头布局优化流程

Fig.6 Design workflow for the rotary sprayer

1)为了实现超高压柱塞泵的最佳性能,合理选择喷嘴直径。不合适的喷嘴直径可能会导致水流压力不足,进而影响流体的速度和覆盖范围。分别计算当量喷嘴直径  $d_c$  与等效喷嘴直径  $d_e$ :

$$d_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_s} d_i^2} \quad (13)$$

$$d_e = 0.69 \sqrt{\frac{q}{\mu_r \sqrt{p}}} \quad (14)$$

式中:  $d_i$  为第  $i$  个喷嘴的孔径;  $q$  为泵的流量, L/min;  $\mu_r$  为喷嘴流量系数, 其值小于 1;  $p$  为泵的压力, MPa。

通过两者大小关系可判断当前喷嘴直径是否匹配泵的性能要求: 当  $d_c \leq d_e$  时, 说明喷嘴直径合适; 反之, 若  $d_c > d_e$ , 则需要调整喷嘴直径以满足柱塞泵的性能标准。

2)基于所提出的双目标优化模型, 旋转喷头的布局优化以提高水射流能量分布均匀性和最大化扫掠冲击宽度为主要目标。优化模型综合考虑了布局模式、喷嘴冲击角、喷嘴直径、载体平移速度和旋转速度等多个关键控制因素。由于喷嘴的冲击角与喷头转速密切相关, 在初步优化阶段假定所有喷嘴冲击角为零, 以排除其对优化结果的干扰, 重点寻找旋转喷头的最佳布局位置。

3)在第2)步确定的最优布局基础上, 建立三维几何模型, 并精确测量其质量与转动惯量等参数, 为后续自驱旋转模型中理论转速的计算提供必要输入。

4)参考 HUANG 等<sup>[3]</sup>通过数值模拟所确定的

### 3 案例分析

#### 3.1 布局优化策略

基于 PSO 算法的超高压水射流旋转除锈喷头布局优化策略如图 6 所示。具体设计步骤如下。

最佳转速范围, 进一步对喷嘴冲击角进行微调, 以实现旋转喷头在目标转速下的稳定运行。为建立时间与转速之间的关系, 利用 MATLAB 中的 Ode45 工具箱求解式 (5)。若理论计算所得转速与预期存在偏差, 可通过小幅调整喷嘴冲击角进行修正。这一过程确保了转速的精确控制, 并且能够灵活调整以满足设计和性能标准。

#### 3.2 问题设置

本研究旨在优化超高压水射流旋转喷头中喷嘴的空间布局及其冲击角设置。旋转喷头的结构设计通常依据具体作业场景进行调整, 喷嘴数量则依据工作条件确定。选取浙江某修造船企业常用的“一”字形 16 喷嘴超高压旋转除锈喷头作为研究对象, 采用 PSO 算法对其空间布局进行优化设计。通过对比优化前后的喷头布局方案, 系统评估所提出优化策略在提高作业性能方面的可行性与有效性。

PSO 算法的超参数设置如下: 粒子总数  $S_s = 50$ ;  $D = 16$ ;  $k = 100$ ;  $\omega_p = 0.4$ ;  $c_1 = c_2 = 2.05$ 。旋转喷头内嵌 16 个直径为 0.3 mm 的直圆锥收敛形喷嘴 ( $N_s = 16$ ), 且所有喷嘴内腔特性一致。喷头总长 330 mm、总宽 40 mm, 总质量不超过 2.7 kg。为满足除锈作业要求, 旋转喷头的转速设定在 1800~2100 r/min 之间, 载体的平移速度  $v_p = 60$  mm/s。超高压柱塞泵的工作压力保持在 250 MPa。为了计算全重叠区域的累计冲击持续时间分布, 沿量化标识线等间距设置了 300 个的观测点 ( $n_s = 300$ )。

### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 布局优化分析

图7展示了未优化与经PSO算法优化后的超高压水射流旋转除锈喷头喷嘴空间布局。如图7所示,优化后的喷嘴在中心区域的布置较为稀疏,两侧边缘密度明显增加,呈现“中间疏、两侧密”的特征。这种布局方式有效契合了旋转喷头的轨迹特点:在中心全重叠区域,轨迹线高度集中,若喷

嘴分布过密,容易造成冲击能量堆积(冲击持续时间过长),从而引发“过喷”现象,这不仅会降低除锈均匀性,还可能对基材造成损伤;而边缘区域则存在“漏喷”风险,影响覆盖效率。调整喷嘴布置后,不仅减小了能量过载区的范围,还扩大了有效的扫掠宽度,提高了整体除锈效率。其中,N4、N5、N11、N12和N13等喷嘴空间位置的调整尤为关键。

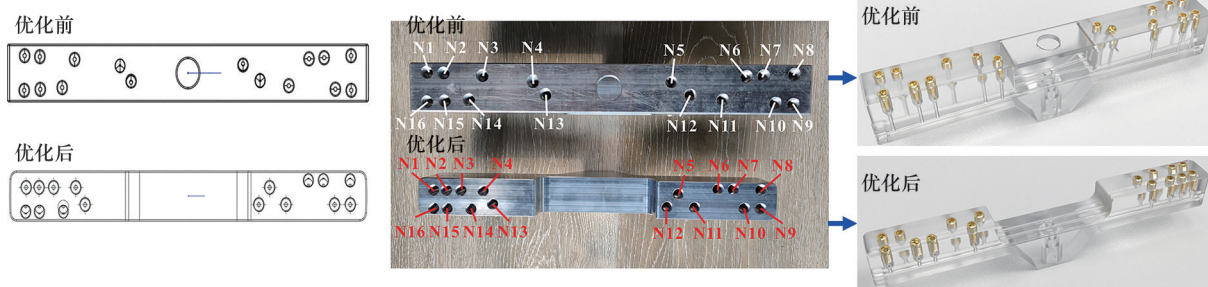
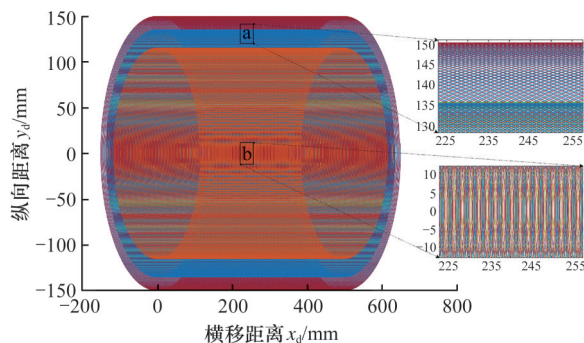


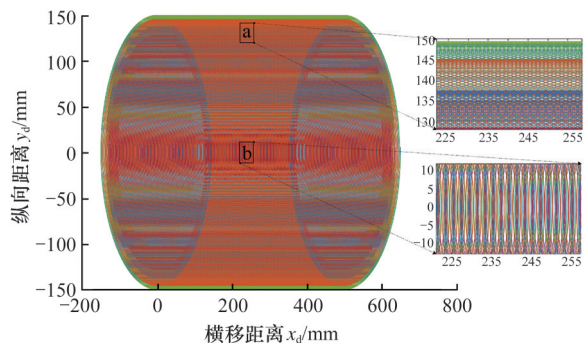
图7 优化前后旋转喷头空间布局及冲击角设定对比

Fig.7 Comparison of the spatial layouts and attack angles of the unoptimized and PSO-optimized rotary sprayers

旋转喷头的空间布局优化旨在最小化每个观测点的累积冲击持续时间标准差。这个优化目标确保了水射流能量分布的均衡。优化前后旋转喷头的 $\sigma_T$ 值分别为 $5.7 \times 10^{-3}$ 和 $4.4 \times 10^{-3}$ ;经PSO算法优化后喷头的扫掠冲击能量分布均匀度较原设计提高了22.81%。通过优化设计发现,水射流能量在喷头两侧有所增加,而在中心区域附近减少,避免了因能量分布不均造成的“环状非剥离带”现象。



(a) 优化前扫掠冲击轨迹线



(b) 优化后扫掠冲击轨迹线

图8 优化前后扫掠冲击轨迹线对比

Fig.8 Comparison of the sweep impinging trajectories of the unoptimized and PSO-optimized rotary sprayers

#### 3.3.2 螺旋轨迹分析

扫掠冲击轨迹的密度直接决定了水射流对目标壁面的覆盖均匀性,进而影响除锈效果。较高的轨迹密度虽可提高除锈效率,但过度集中则可能导致冲击持续时间过长,存在损伤基材的风险;相反,较低的轨迹密度可能导致除锈不完全。因此,在设计超高压水射流喷嘴布局时,合理控制冲击轨迹密度至关重要。

图8展示了优化前后旋转喷头扫掠冲击轨迹线对比情况,横轴与纵轴分别表示旋转喷头在除锈作业时的横向和垂直距离。图8a显示,未优化喷头的扫掠冲击轨迹在除锈区域上下边缘分布稀疏,而在中间区域则显得较为密集。相比之下,经PSO算法优化后,冲击轨迹线的整体分布更加均匀,尤其在除锈区域的上下边缘覆盖更为充分,有效扩大了水射流的扫掠冲击范围。

上设置了300个观测点,用于计算不同喷嘴布局下各点的累计冲击时间。图9所示为优化前后旋转喷头的累计冲击持续时间分布,横坐标表示观测点位置。结果表明,未优化的旋转喷头在(-64 mm, -34 mm)和(35 mm, 63 mm)的扫掠区域,累计冲击持续时间相对较长,最长约为20.5 ms。这可能导致局部过喷,水射流能量浪费,并对钢基材

#### 3.3.3 累计冲击持续时间分析

为了更直观地对比优化前后累计冲击持续时间的分布情况,在扫掠全重叠区域的量化标识线

造成潜在损坏；相反，在(-85 mm, -68 mm)和(68 mm, 84 mm)、(-127 mm, -114 mm)和(114 mm, 128 mm)、(-145 mm, -135 mm)和(135 mm, 146 mm)等的扫掠区域，累积冲击时间相对较短，最长不足 7.7 ms，可能会导致局部漏喷现象。而经 PSO 算法优化后的旋转喷头可以很好地解决局部过喷和漏喷的问题。与原始喷头相比，优化后旋转喷头在(-64 mm, -34 mm)和(35 mm, 63 mm)区域的累计冲击持续时间峰值分别缩短了 22.06% 和 22.74%。尽管由于邻近喷嘴之间存在最小间距要求，使得累计冲击持续时间曲线中仍出现了若干局部最大值，但本文所提的布局优化策略在一定程度上缓解了这一问题。由于除锈宽度的限制，完全均匀的累计冲击持续时间分布难以实现，但 PSO 算法的应用显著提高了超高压旋转除锈喷头结构的整体性能。

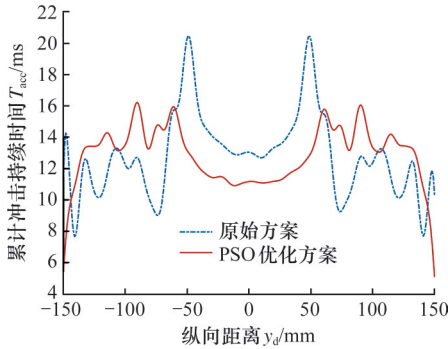


图9 优化前后旋转喷头累计冲击持续时间对比  
Fig.9 Comparison of the accumulative impinging durations for unoptimized and PSO-optimized rotary sprayers

为全面评估累计冲击持续时间在目标壁面的分布特征，在  $x$  轴和  $y$  轴方向上均匀布置了大量观测点。图 10 所示为优化前后喷头在整个目标壁面上的累计冲击持续时间相对值  $T_R$  的三维分布。结果表明，优化布局显著改善了水射流能量分布的均匀性，相较于原始布局，优化后的水射流能量分布更加均匀。

### 3.3.4 转速分析

图 11 所示为优化后旋转喷头在不同压力下转速随时间的变化趋势。从图 11 中可以明显看出，旋转喷头的转速在初期迅速增加，随后趋于稳定，这一结果为 1.3 节中讨论的喷头除锈运动模型提供了支持。此外，喷头的转速随泵压力的增大而提高。具体而言，当泵压力分别为 125、150、175、200、225、250 MPa 时，旋转喷头的转速分别为 1319.4、1468.6、1604.1、1729.1、1845.7、1955.4 r/min。特别是在 250 MPa 工况下，旋转喷头的转

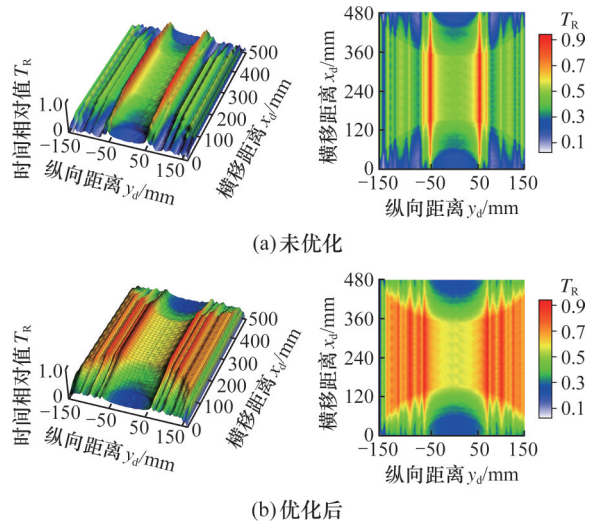


图 10 优化前后的累计冲击持续时间相对分布对比  
Fig.10 Comparison of the relative distributions of accumulative impinging durations for unoptimized and PSO-optimized rotary sprayers

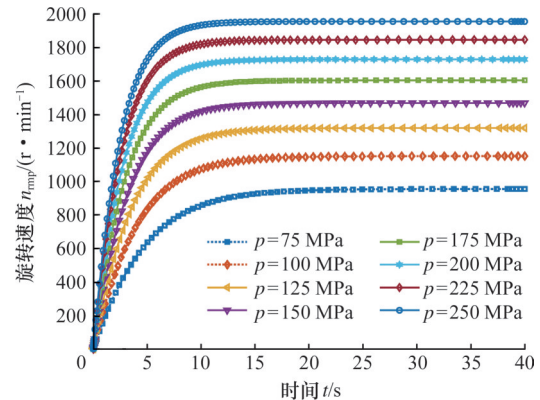


图 11 经 PSO 优化后的旋转喷头在不同压力下转速变化曲线图  
Fig.11 Variation in rotational speed under different pressures for PSO-optimized rotary sprayer

速位于预期范围内，进一步验证了所设定的冲击角已满足目标要求。

## 4 试验验证

### 4.1 除锈性能测试

为了全面评估优化结果的有效性，对优化前后的超高压旋转喷头在除锈效率方面进行了详细的对比试验。如图 12 所示，试验使用的爬壁机器人搭载了经 PSO 算法优化后的旋转除锈喷头，并爬升至水线面以上的钢制船壁进行除锈。试验的主要目标是实现船体基材 Sa2.5 级洁净度标准。测试时间统一为 15 min，爬壁机器人平移速度根据整个船体除锈路径的要求进行设定。为减小随机误差，每项试验在相同条件下重复 5 次。试验结果表明，对水线面以上漆层，未优化的旋转喷头平均除锈面积为 38.53 m<sup>2</sup>/h，而采用 PSO 算法优化

后的旋转喷头平均除锈面积为 43.39 m<sup>2</sup>/h,除锈效率提高了 11.2%。未优化的旋转喷头最大除锈宽度为 254.8 mm,优化后的旋转喷头最大除锈宽度为 287.2 mm。以上结果表明,PSO 算法的优化显著提高了超高压旋转喷头的除锈效果,进一步验证了本文提出的布局优化策略的可行性与有效性。



图 12 爬壁机器人上搭载的旋转除锈喷头试验快照  
Fig.12 Experimental test snapshot of the rotary de-rusting sprayer device using a wall-climbing carrier platform

#### 4.2 转速测试

为了验证自驱旋转模型的有效性,并评估优化后旋转除锈喷头在特定泵压力环境下是否能达到预期的旋转速度,利用自主搭建的喷头转速测试系统开展模型试验<sup>[19]</sup>。超高压柱塞泵的额定压力为 300 MPa,额定流量为 39 L/min。试验装备主要包括优化后的自驱旋转喷头、高压软管、喷头固定台、压力调节器、XSM 转速表(量程 0~45 000 r/min、最小刻度 0.1 r/min、精度 ±0.02%)和霍尔传感器等,试验设备与装配如图 13~图 15 所示。

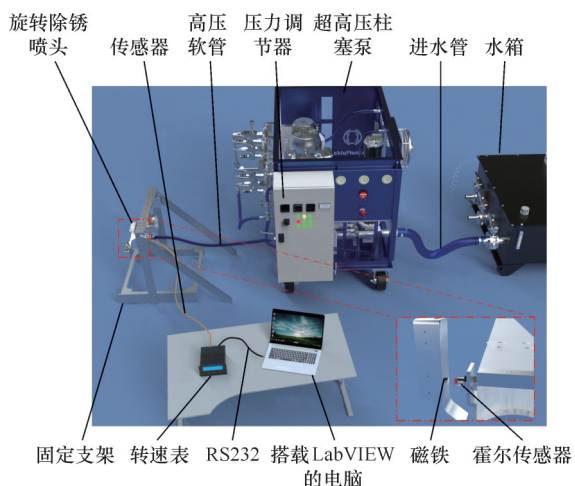


图 13 超高压水射流转速测试系统装配图  
Fig.13 Assembly diagram of speed testing system via ultra-high-pressure water jet

图 14 和图 15 展示了各试验部件之间的连接关系。水源由恒定水箱 1 提供,以确保进入管道 2 的流量稳定。超高压柱塞泵 3 由三相异步电动机



图 14 超高压柱塞泵系统  
Fig.14 Ultra-high-pressure plunger pump system

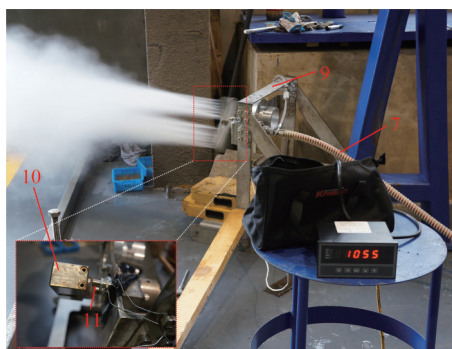


图 15 转速测量系统  
Fig.15 Rotation-speed measurement system

4 驱动,电动机转速的变化可调节输出水流量。柱塞泵与具有恒压功能的压力调节器共同工作,以连续调节输出水流的压力。压力数值通过压力表 5 显示。水经柱塞泵增压后,通过圆柱形滤水器 6 进行净化,形成超高压纯水,并通过高压软管 7 输送至旋转除锈喷头。为确保操作安全,整个高压系统都配备了防护罩 8。安装支架 9 用于支撑整个转速测量系统,确保其稳定运行。超高压旋转除锈喷头 10 与霍尔传感器 11 一同固定于支架上,且传感器间距可调,以实现对其旋转速度的精确测量。

因为泵在压力转换后需要足够的时间才能达到所需的稳定压力,故每组试验使用超高压柱塞泵的最小稳定时间至少为 120 s。为了确保试验结果的准确性并减小误差,所有试验均进行了 3 次重复,最终记录了平均值。不同压力下经 PSO 算法优化后的转速变化如图 16 所示,可以看出,随着压力的增大,转速逐渐增大。这表明,理论预测与试验结果之间具有较高的一致性,误差范围保持在 8% 以内。除 75、125、200、225、250 MPa 等情况外,通过自驱旋转模型计算的转速值通常高于相应的试验值。这一差异可能源于在假设理想化伯努利流体时低估了射流的冲击速度,从而导致实际转速低于理论计算值。

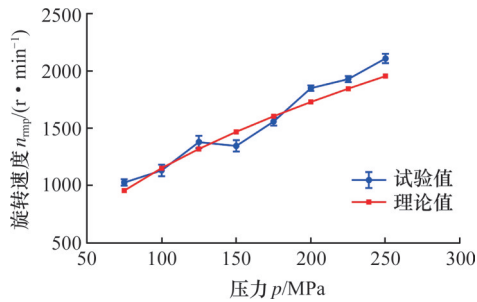


图16 理论转速与试验转速结果比较图

Fig.16 Theoretical and experimental comparison of rotation speeds

## 5 结论

1)与以往仅涉及单目标的布局优化方式不同,通过对除锈喷头运动特征的分析,建立了一个双目标优化模型,旨在提高除锈喷头的扫掠冲击能量分布均匀性和最大冲击扫掠宽度。

2)提出一个物理意义更明确的自驱旋转模型,分析了喷头转速与其各特征参数的关系,并最终实现了对水射流喷头转速的预测。该模型为超高压喷嘴冲击角的设定提供了重要指导。通过实际试验验证,所提出的自驱旋转模型能够准确预测旋转喷头的转速,误差小于8%。

3)通过对浙江某修造船企业常用的“一”字形16喷嘴旋转除锈喷头进行优化,并结合实际试验,结果表明优化后的喷头在冲击能量分布均匀度上提高了22.81%,在除锈效率上提高了11.2%。这一结果进一步验证了所提出优化策略的有效性。

4)尽管本文所讨论的超高压水射流旋转喷头空间布局优化策略具有广泛的工程应用前景,但需要注意的是,该策略目前仅适用于特定类型的旋转喷头,如“一”字形和“十”字形。未来的研究应扩展至更复杂的情况,例如不同类型的喷嘴或不同几何结构的自驱旋转喷头,以进一步提高该优化策略的适用性和实用性。

### 参考文献:

[1] 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.  
YI Zhengyao, GONG Yongjun, WANG Zuwen, et al. Large Wall Climbing Robots for Boarding Ship Rust Removal Cleaner[J]. Robot, 2010, 32(4): 560-567.

[2] 沈娟.高压水射流喷嘴的设计及其结构优化[D].苏州:苏州大学,2014.  
SHEN Juan. High Pressure Water Jet Nozzle Design and Structural Optimization[D]. Suzhou: Suzhou University, 2014.

[3] HUANG L Y, CHEN Z S. Effect of Technological Parameters on Hydrodynamic Performance of Ultra-high-pressure

Water-jet Nozzle [J]. Applied Ocean Research, 2022, 129: 103410.

[4] ZHAO W T, CHEN Z S, DU B X, et al. CFD Analysis on Hydrodynamic Characteristics of Ultra-high-pressure Water Jets; Stationary vs. Translating Nozzle Conditions [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2025, 19(1): 2552894.

[5] CHEN Y, CHEN Z. A Prediction Model of Wall Shear Stress for Ultra-high-pressure Water-jet Nozzle Based on Hybrid BP Neural Network [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2022, 16(1): 1902-1920.

[6] NI L X, CHEN Z S, LIU Z, et al. Hydrodynamic Analysis of Ultra-high Pressure Water Derusting Nozzle [C]// Proceedings of the ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. Shanghai, 2020; ISOPE-I-20-3119.

[7] HANSON B R, ORLOFF S B. Rotator Nozzles More Uniform than Spray Nozzles on Center-pivot Sprinklers [J]. California Agriculture, 1996, 50(1): 32-35.

[8] LI H, JIANG Y, XU M, et al. Effect on Hydraulic Performance of Low-pressure Sprinkler by an Intermittent Water Dispersion Device [J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(2): 521-532.

[9] HUANG J, ZENG J, BAI Y, et al. Layout Optimization of Fiber Bragg Grating Strain Sensor Network Based on Modified Artificial Fish Swarm Algorithm [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65: 102583.

[10] JIN S, JIA Y, WEI J. A Method about Antenna Layout Optimization on Particle Swarm Optimization [C]// Proceedings of the 2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE). Shanghai, 2015: 400-404.

[11] RIZK-ALLAH R M, HASSANIEN A E. A Hybrid Equilibrium Algorithm and Pattern Search Technique for Wind Farm Layout Optimization Problem [J]. ISA Transactions, 2023, 132: 402-418.

[12] 时光辉,贾宜播,郝文字,等.基于数据驱动的舵面结构优化设计[J].力学学报,2023,55(11):2577-2587.  
SHI Guanghui, JIA Yibo, HAO Wenyu, et al. Optimal Design of Rudder Structures Based on Data-driven Method [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(11): 2577-2587.

[13] 陈源捷,陈正寿,杜炳鑫,等.基于ESGA遗传算法的水射流自驱旋转喷头优化设计[J].爆炸与冲击,2023,43(2):130-143.  
CHEN Yuanjie, CHEN Zhengshou, DU Bingxin, et al. Optimum Design of Self-driven Rotary Water-jet Sprayer Based on ESGA Genetic Algorithm [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(2): 130-143.

[14] 宋寒冬,陈正寿,杜炳鑫,等.基于改进秃鹰算法的自旋转水射流喷头布局优化方法[J].计算机集成制造系统,2025,31(9):3485-3500.  
SONG Handong, CHEN Zhengshou, DU Bingxin, et al. Layout Optimization Method of Self-driven Water-jet Rotating Sprinkler Based on Improved Bald Eagle Search Algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2025, 31(9): 3485-3500.

[15] CHEN Z, ZHAO W, LI J, et al. An Advanced Framework for the Layout Optimization of Multi-nozzle Rotary Derusting Sprayer Using CFD-IBES Methods [J]. Applied Ocean Research, 2025, 161: 104662.

(下转第644页)