# 藤壶清理机器人清洁刀具优化分析

石晓畅[a]，杨昌胜[b]，马文彬[c]
（海南大学，a. 机电工程学院；b. 信息与通信工程学院；c. 海洋科学与工程学院，海口 570100）

**摘 要：**[目的]为有效处理船体藤壶附着引起的阻力增加和能耗上升问题，[方法]提出一种基于切削理论的清洁刀具设计方法。通过经典切削与挤压切削理论建立动力学模型，在此基础上，利用 ABAQUS 建立藤壶与船体的理想化附着模型，对单藤壶与双藤壶工况进行有限元仿真。[结果]研究表明：当刀具前角为 20°时，既能满足藤壶移除需求，又能降低阻力和能耗。清洁刀具产生的应力均显著高于藤壶黏附强度，验证了刀具前角 20°的可行性。与目前船体清洁机器人采用的超声空化技术相比，清洁刀具方法在清理效率、受力均匀性及多体附着情况下的适用性方面均具有优势，显示出良好的工程应用前景。[结论]研究成果可为藤壶清理机器人清洁刀具设计提供一定参考。

**关键词：**藤壶清理；正交切削理论；挤压切削；有限元分析；最大黏附强度
**中图分类号：**U672.7; TH-39 **文献标志码：**A 【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2026.10.02

# Optimization Analysis of Cleaning Blades for Barnacle Removal Robots

SHI Xiaochang[a], YANG Changsheng[b], MA Wenbin[c]
(Hainan University, a. Faculty of Mechatronic Engineering; b. Faculty of Information and Communication Engineering; c. Faculty of Marine Science and Engineering, Haikou 570100, China)

**Abstract:** [Purpose] To address the increased resistance and energy consumption caused by barnacle attachment on ship hulls, [Method] a cleaning blade design method based on cutting theory is proposed. A dynamic model is established using classical cutting and extrusion cutting theories. On this basis, an idealized adhesion model of barnacles on the hull is developed in ABAQUS, and finite element simulations are performed for single and double barnacle scenarios. [Result] The results indicate that a tool rake angle of 20° can both meet barnacle removal requirements and reduce resistance and energy consumption. The cleaning blade generates stresses significantly higher than the barnacle adhesion strength, verifying the feasibility of a 20° rake angle. Compared with the ultrasonic cavitation technology currently used in ship hull cleaning robots, the cleaning blade method demonstrates advantages in cleaning efficiency, stress uniformity, and applicability under multi-barnacle attachment conditions, indicating promising engineering application potential. [Conclusion] The research results can provide some references for the design of cleaning blades for barnacle removal robots.

**Key words:** barnacle removal; orthogonal cutting theory; extrusion cutting; finite element analysis; maximum adhesion strength

## 0 引言

藤壶是一种小型的海洋甲壳类动物[1]，通常附着在坚硬的表面上，如岩石、码头桩、船底、浮标、甚至鲸鱼和海龟等生物体表面。藤壶的附着对船只和海洋工程结构物可能带来多方面的负面影响，大量藤壶附着会显著增加船只的水下阻力，导致燃油消耗上升，并可能损坏海洋结构物的表面材料。例如，10 万吨级油船在中度生物污染情况下，阻力

**收稿日期：**2025-10-12；**修回日期：**2025-12-05；**录用日期：**2025-12-09
**基金项目：**国家自然科学基金重点项目（52231012）；海南大学高层次人才科研启动经费（KYQD(ZR)-22060）。
**作者简介：**石晓畅（2001—），女，硕士研究生。研究方向：船舶藤壶清理。

增加可达 30%，使燃油消耗增加高达 12 t/d，直接导致运营成本上升和碳排放急剧增加[2]。另外，藤壶还会破坏船体的水动力结构，改变金属表面的特性，从而加剧腐蚀问题[3]。对于用于海洋观测的水下仪器，尤其是高精度传感器，微生物污垢会影响测量精度，而藤壶则会显著缩短仪器的使用寿命[4]。

清洁船体藤壶通常在干船坞内进行[5]，主要通过高压水枪、清洁刀或者化学清洁剂来处理船体表面的污垢和锈迹，但干船坞清理藤壶成本高、耗时长，且可能损伤防污涂层，影响燃油经济性，同时产生的污染物可能对环境造成影响。自 20 世纪 60 年代开始，为了提高清洁船体藤壶效率，各国科研人员陆续研发出由潜水员操控的水下清洗设备，但由于水下环境变幻莫测，潜水员在作业过程中面临多种挑战与风险，为进一步降低人力的投入，并实现机器人自主执行船体附着生物的清理，智能化的水下清洗技术因此诞生[5]。

JOTUN 公司与康斯堡海事公司联合开发了 Hull-Skater 船舶清洗机器人，该机器人采用滚刷技术清理船体，并配备 4 个磁性轮以实现灵活移动，然而，在高曲率和复杂表面上，其吸附和清洁能力存在一定挑战[6]。HACHICHA 等[7]提出 ARMROV 水下清洁方案，利用机械臂覆盖水下船体区域，降低操作难度并减少能量消耗，但受特定吨位限制。韩国 SLM 公司推出 CHIRO 清洗系统，可在 8 h 内完成一艘长达 300 m 商船的清洁作业[8]。土耳其 Remora Technology 公司发布 Neta 水下清理机器人，采用履带和螺旋桨驱动，并可通过手机软件进行操控[9]。

国内对这个领域研究较晚，昆明海威机电研究所研发 SQ-101 水下清洗装备，利用推进器附着船体并履带行驶，但清理效率较低[10]。青岛飞马滨公司推出柔性负压空化系统，并将海水作为介质[11]。哈尔滨斑之斓公司发布 BLUCR 系列，2022 年 3 号和 4 号型号在唐山港试验并完成清刷任务[12]。天津瀚海蓝帆推出一款船体清洗机器人 JH-IV，可携带各种类型的清洁刷盘清洗船体藤壶，可适用于多类型的清洗场景，清洗率达 900 $m^2/h$[13]。以上船体清洗机器人都是采用转刷技术或者负压空化技术，对船体的藤壶效果并不是很理想。王立权等[14]基于正交切削理论和 Peel Zone 方法，设计海洋钢桩清刷机器人并建立切削力模型，利用有限元方法验证其误差小于 15%，分析表明刀具前角对清理效果影响显著，建议在设计中避免过度减小前角。藤壶清理机器人采用清洁刀具清理藤壶仅在一些专利或者理论中提出，并没有深入的研究。根据对不同生理阶段藤壶的附着情况调研[15]，将相关参数整理于表 1。

表 1　藤壶不同阶段的附着情况

Tab. 1　Attachment of Barnacles at Different Stages

| 阶段 | 形式 | 移除力/N | 强度/MPa |
|---|---|---|---|
| 腺介幼体 | 暂时黏结 | ＜0.000 5 | 0.16～0.29 |
| 腺介幼虫 | 永久黏结 | ＜0.019 0 | 0.94 |
| 壳状幼体 | 永久黏结 | ＜0.350 0 | 0.18 |
| 成年藤壶 | 永久黏结 | ＜180.000 0 | 0.94 |

由表 1 可知，当藤壶进入成体阶段，其移除所需的最大力达到 180 N，同时对应的黏附强度为 0.94 MPa。因此，只要所设计的清洁机构能够施加超过 0.94 MPa 的去除作用，即可实现船体表面的清洁功能[16]。本文以船体藤壶为代表，通过藤壶模型和藤壶清理机器人的清洁刀机构，分析刀具前角对切削力的影响，并确定最优刀具前角。随后，在 ABAQUS 中模拟最优前角对应的清洁应力，并与藤壶黏附强度（0.94 MPa）进行比较，以验证清洁机构在理论上的清洁性能，为藤壶清理机器人刀具优化设计提供参考。

## 1　藤壶清理机器人设计原理分析

本文设计了一款船舶藤壶清理机器人，其整体结构见图 1。该机器人配备有磁履带和推进器，可实现对船体表面的稳固吸附，并具备灵活的移动能力，适应船体复杂的曲面结构。在海底光线较暗的环境下，集成的照明装置可提供稳定的可视条件，有效提升作业可见性。机器人搭载的高清摄像头可实时采集船体表面图像，并通过图像传输模块将画面回传至陆地控制终端，结合目标识别程序，系统能够对船体表面的藤壶附着物进行精准识别与定位。在机器人前端安装了清洁刀具，采用挤压切削法对藤壶进行机械清除。该方法将正交切削理论与挤压破坏机制相结合，在保证清理效率的同时，最大程度避免对船体结构造成损伤，从而实现高效、安全的藤壶清理作业。

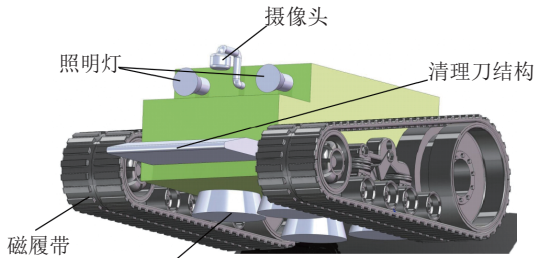



图 1　藤壶清理机器人模型

Fig. 1　Barnacle-Cleaning Robot Model

当需要清理船体藤壶时，将机器人放置于船体表面，通常从水线附近或污损较为严重的区域开始

作业。机器人底部配备有电磁磁履带系统，在接触船体钢制外壳后，通过通电激活电磁铁，产生磁力实现稳固吸附，确保整机牢固贴附于船体表面，无需外部支撑装置，即可在水下独立作业。机器人通过左右履带的差速控制完成转向与路径规划，实现沿船体表面自主移动，能够适应包括弧形、凹凸或倾斜等复杂曲面结构的船体表面。推进器安装在机器人底部的 4 个角，其推进方向垂直于船体表面，主要用于控制机器人贴近或脱离船体，在机器人贴附稳定并执行表面清理任务时，推进器不参与移动驱动。移动过程中，机器人搭载的高清摄像头同步开启，实时采集船体图像，并通过图像识别模块进行处理，利用目标识别算法识别藤壶附着区域并进行定位，生成位置信息，为清理单元的精准作业提供依据。

识别完成后，机器人前端的清洁刀具开始作业。该刀具基于挤压切削原理运作：通过与藤壶表面接触并施加一定角度与速度，将其壳体结构剪切并剥离，从而实现对藤壶的高效去除。整个切削过程充分考虑了力的作用方向与船体材料的耐受能力，确保在清理的同时不会对船体造成明显划痕或破坏。为应对水下光线不足的挑战，机器人还自动开启照明模块，对作业区域进行补光，提高图像识别与清理精度。清理过程中，机器人可实时反馈图像及清理效果至陆地控制终端，供操作者监控、调整策略。在完成指定区域的清理任务后，机器人可继续移动至下一作业区段，重复上述过程，直至整船表面清理完毕。任务完成后，机器人可自主返回起始点，再由操作者回收至水面。

## 2　清洁刀模型

### 2.1　清洁刀动力学模型

切削力模型见图 2。图 2 中：$\gamma_0$ 为理论前角；$\gamma_e$ 为有效前角；$a_c$ 为藤壶高度；$r_n$ 为平刃半径。

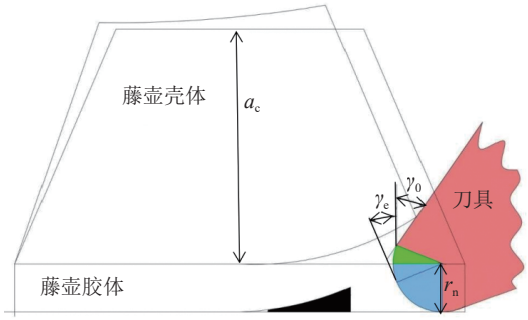



图 2　切削力模型

Fig. 2　Cutting Force Model

藤壶依靠自身分泌的藤壶胶黏附在刚性基底上，由于其胶质层上方逐渐生成坚硬的钙质外壳，并且附着时间越长，结合越加牢固，因此清除难度增大。传统刀具虽具有较高锋利度，但在切削藤壶时易损伤船体，并且刀具寿命较短。因此，本文采用经典切削方法，结合挤压切削的方法[17]，利用钝圆形切削刃产生的挤压效应，对其进行理论分析。在挤压切割过程中，理论前角 $\gamma_0$ 可能不参与实际切割过程，因为切割的厚度接近刀具钝圆边缘（Tool Blunt Round Edge, TBRE）半径的几个数量级。此时的切削力是由 TBRE 的有效前角产生的，藤壶与 TBRE 之间的接触点的切线方向与垂直方向之间的夹角称为接触点位置的有效前角 $\gamma_e$，计算式为

$$\gamma_e=\begin{cases}\arcsin\left(\dfrac{|r_n-a_c|}{r_n}\right) & a_c\leqslant r_n\left(1+\sin\gamma_0\right)\\ \gamma_0 & a_c>r_n\left(1+\sin\gamma_0\right)\end{cases}\tag{1}$$

作用在刀具上的切削力 $F$ 主要由 3 部分组成：挤压作用产生的挤压力 $F_p$、剪切作用产生的剪切力 $F_s$ 和由于滑动作用而产生的摩擦力 $F_f$。

挤压力是在挤压切割过程中，由刀具的钝圆边缘和有效前角区域共同对藤壶材料产生的局部压应力引起的。为近似估算藤壶受到的挤压力，本研究采用接触面积与应力估算相结合的方法，计算式为

$$F_p=9.8k\sigma_{eq}a_w r_n\theta_p\frac{\pi}{180}\tag{2}$$

式中：$k$ 为计算参数，$k$=0.204；$\sigma_{eq}$ 为藤壶材料等效抗压强度，$\sigma_{eq}$=0.94；$a_w$ 为切割宽度；$\theta_p$ 为挤出角度范围。

由于实际刀具制造加工因素存在刀具前角，因此需要根据切削深度与 TBRE 的关系对挤出角度范围进行分段求解：

$$\theta_p=\begin{cases}\arccos\left(\dfrac{r_n-a_c}{r_n}\right) & a_c\leqslant r_n\\ \dfrac{\pi}{2}+\gamma_e & a_c>r_n\end{cases}\tag{3}$$

在剪切过程中，每个点位置的瞬时有效前角值不同，不能用统一的有效前角计算，应根据此时材料的位置来确定，那么每个点的瞬时有效前角为

$$\gamma_e=\arcsin\left(\cos\theta\right)\tag{4}$$

在计算剪切力时，应根据不同位置计算不同的剪切力，最后进行叠加计算。$x$ 和 $y$ 方向的剪切力分量分别可表示为

$$F_{s,x}=\begin{cases}\displaystyle\int_0^{\arccos\left(1-\frac{a_c}{r_n}\right)} r_n A_1\sin\theta\mathrm{d}\theta & a_c\leqslant r_n\\ \left[a_c-r_n\left(\sin\gamma_0+1\right)\right]A_1 & r_n\left(1+\sin\gamma_0\right)\leqslant a_c\\ \displaystyle\int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\gamma_e} r_n A_1\sin\theta\mathrm{d}\theta & r_n\leqslant a_c\leqslant r_n\left(1+\sin\gamma_0\right)\end{cases}\tag{5}$$

$$A_1=\frac{\tau_s a_w\cos\left(\beta-\gamma_e\right)}{\sin\varphi\cos\left(\varphi+\beta-\gamma_e\right)} \tag{6}$$

$$F_{s,y}=\begin{cases}\displaystyle\int_0^{\arccos\left(1-\frac{a_c}{r_n}\right)} r_n A_2\sin\theta\mathrm{d}\theta & a_c\leqslant r_n\\ \left[a_c-r_n\left(\sin\gamma_0+1\right)\right]A_2 & r_n\left(1+\sin\gamma_0\right)\leqslant a_c\\ \displaystyle\int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\gamma_e} r_n A_2\sin\theta\mathrm{d}\theta & r_n\leqslant a_c\leqslant r_n\left(1+\sin\gamma_0\right)\end{cases} \tag{7}$$

$$A_2=\frac{\tau_s a_w\sin\left(\beta-\gamma_e\right)}{\sin\varphi\cos\left(\varphi+\beta-\gamma_e\right)} \tag{8}$$

式（4）～式（8）中：$F_{s,x}$ 和 $F_{s,y}$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向的剪切力分量；$A_1$ 和 $A_2$ 为计算参数。

### 2.2 清洁刀动力学模型结果分析

通过对模型进行求解，得到前角与切削力之间的关系，见图 3。由图 3 可知，刀具前角对切削力有较大的影响，当前角在 0°～50°范围内，前角越小，所需要的切削力越大；当前角在 50°～90°范围内，切削力随前角变化的趋势相对平缓。当前角约为 20°时，其对应的切削力大小接近藤壶所需的最大移除力（180 N）。在清理过程中，清洁刀所产生的切削力会引起大小相等、方向相反的反作用力。随着切削力的增大，该反作用力也会随之增强，不仅会加速刀片磨损，还会增加藤壶清理机器人在推进过程中的阻力与能耗[18]。相反，若刀具前角设计不合理导致切削力过小，则难以有效破除成年藤壶的硬壳结构[19]，从而降低清洁效率。综合考虑藤壶的移除需求以及刀具的使用寿命，最终选取 20°作为清洁刀具的优化前角参数。

## 3 清洁刀机构对藤壶的有限元分析

### 3.1 建立藤壶的理想化模型

通过查阅相关资料并结合实地调研发现，成年藤壶主要由胶质部分和壳体部分构成。一般情况下，成熟藤壶的直径大约为 10 mm，而较大的个体直径可达 50 mm。为了提高建模的可靠性，在近岸区域挑选了分布较为密集、形态相对一致的藤壶样本。利用千分尺进行测量，并配合系统抽样的方法，分别记录了样本的最大直径、最小直径及垂直高度等关键几何参数。对测得的数据进行统计计算，得到各项尺寸指标的平均值，具体见表 2。在此基础上，为了在仿真分析中改善网格划分效果并降低计算复杂度，通过多次调整几何尺寸进行验证，最终确定了理想化的藤壶模型参数，见表 3。表 2 和表 3 中：$\overline{D}_1$为抽样平均大圆直径；$\overline{D}_2$为抽样平均小圆直径；$\overline{R}_1$为抽样平均大圆半径；$\overline{R}_2$为抽样平均小圆半径；$\overline{H}$为抽样平均模型高度；$\overline{B}$为抽样平均模型壁厚；$D_1$ 为理想化模型的大圆直径；$D_2$ 为理想化模型的小圆直径；$R_1$ 为理想化模型的大圆半径；$R_2$ 为理想化模型的小圆半径；$H$ 为理想化模型的高度；$B$ 为理想化模型的壁厚。

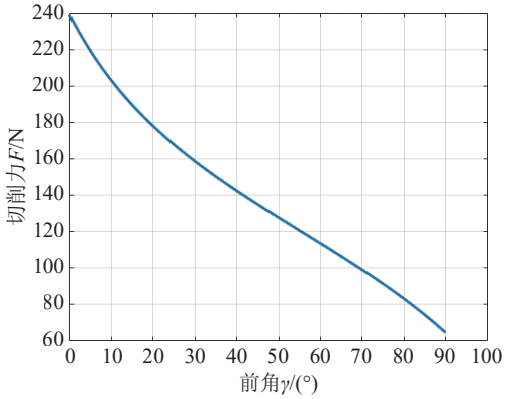



图 3 前角与切削力之间的关系曲线

Fig. 3 Relationship Curve of Front Angle and Cutting Force

表 2 藤壶的抽样平均尺寸

Tab. 2 Sampling Average Size of Barnacles

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| $\overline{D}_1$/mm | 10.46 |
| $\overline{D}_2$/mm | 6.53 |
| $\overline{R}_1$/mm | 5.23 |
| $\overline{R}_2$/mm | 3.27 |
| $\overline{H}$/mm | 8.48 |
| $\overline{B}$/mm | 1.47 |

表 3 藤壶的理想化模型尺寸

Tab. 3 Dimensions of the Idealized Barnacle Model

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| $D_1$/mm | 10.50 |
| $D_2$/mm | 6.50 |
| $R_1$/mm | 5.25 |
| $R_2$/mm | 3.25 |
| $H$/mm | 8.50 |
| $B$/mm | 1.50 |

根据压强公式和表 1 中的成年藤壶的移除力计算可得，藤壶与船体接触面积为 191.4 mm$^2$，根据圆形面积公式计算可得，藤壶胶体与船体接触面半径约为 7.8 mm[16]。

### 3.2 清洁藤壶有限元分析

针对单个附着在船体表面的藤壶模型开展清洁力仿真研究，并利用 ABAQUS 进行整体建模。其中，藤壶下方采用矩形钢板来模拟船体壁面，尺

寸（长×宽×高）设定为 200 mm×200 mm×20 mm。建模后先对模型参数进行设置，根据对藤壶区域的调研，设定藤壶外壳密度为 5 000 kg/m$^3$，杨氏模量为 1×10$^{11}$ Pa，泊松比为 0.3；藤壶胶体密度为 1 190 kg/m$^3$，杨氏模量为 3×10$^9$ Pa，泊松比为 0.1；船体和刀片采用钢材料，密度为 7 850 kg/m$^3$，杨氏模量为 2×10$^{11}$ Pa[16]。设定模型边界条件，将船体设定为固定约束，将刀具前角设定为 20°，藤壶处于静态液体环境下。为验证仿真结果的准确性，采用自定义网格对整个模型进行划分，并采用更小尺寸的四面体单元对藤壶外壳和胶体进行划分，以便更准确地展示其变形结果。

在清理作业中，理想状态是刀具结构能够直接作用于藤壶壳体的底部暴露区域。然而在实际情况下，刀具往往难以与壳体底部充分接触。为此，在藤壶外表面任选一条母线，并按照距底部由近及远的顺序，在母线上依次取 6 个位置进行仿真分析，结果见图 4。将所得仿真结果与目前船体清洁机器人所使用的超声空化技术的仿真结果[16]进行对比，并绘制应力变化折线图，见图 5。

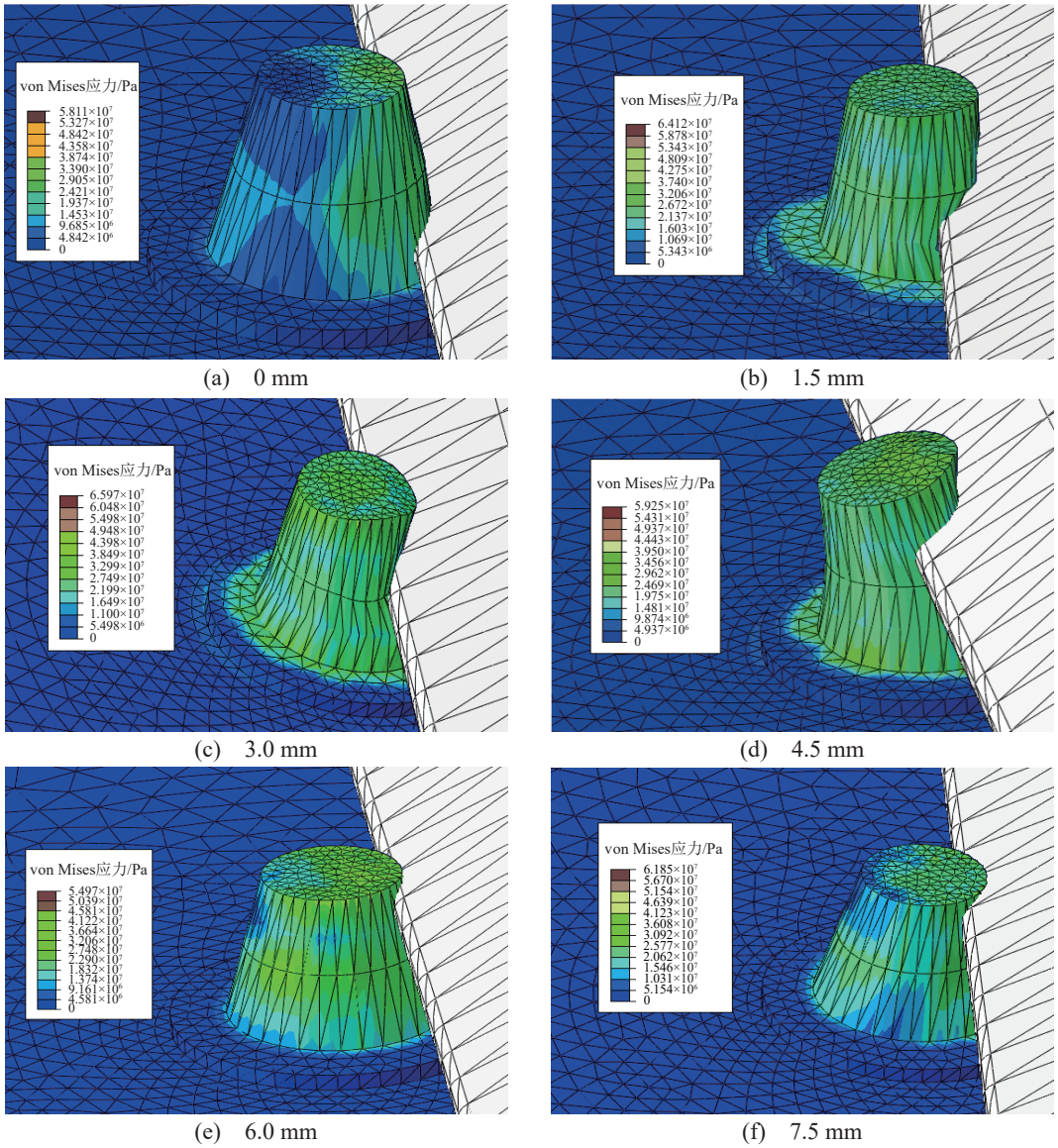



图 4　刀具距离藤壶底部不同距离情况下藤壶胶体与船体接触面产生的清洁应力（单藤壶模型）

Fig. 4　Cleaning Stress on the Barnacle Adhesive Base-Hull Contact Interface at Different Distances from the Bottom of the Barnacles to the Cutting Tool (Single Barnacle Model)

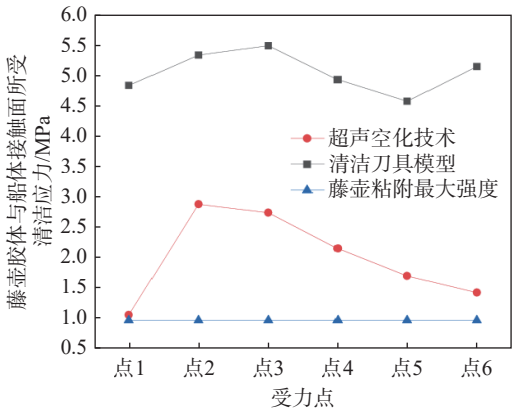


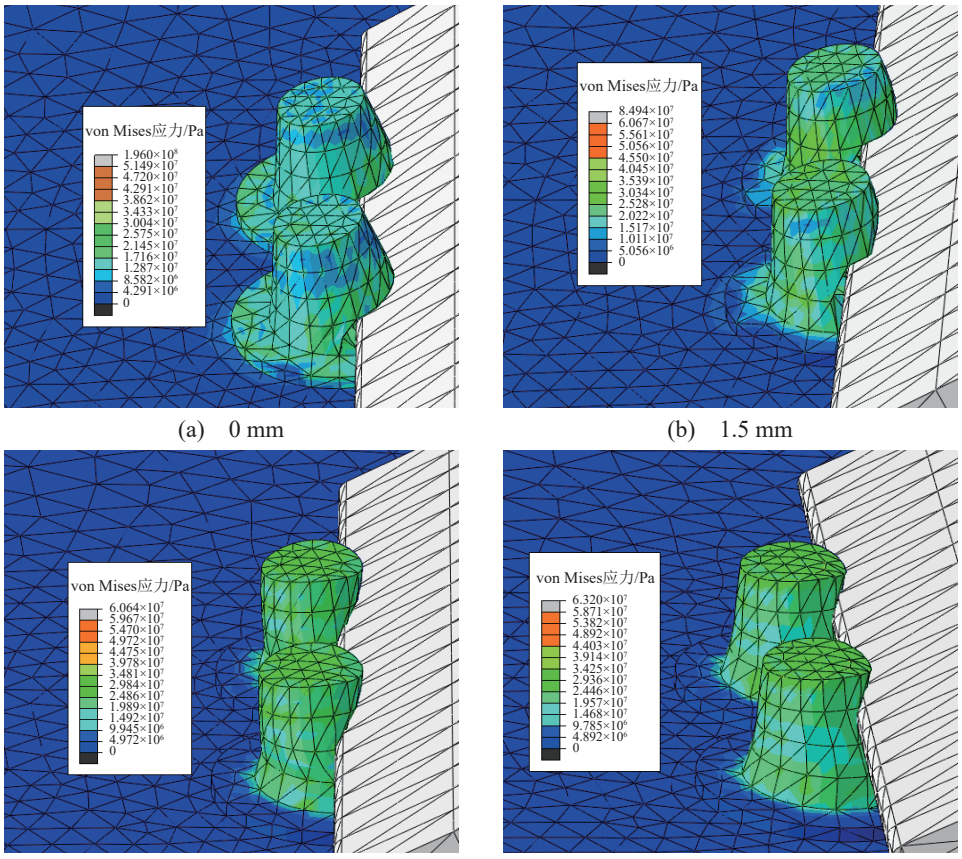

**图 5　不同清理技术产生的最小清洁应力折线**

Fig. 5　Minimum Cleaning Stress Lines Generated by Different Cleaning Techniques

由图 4 可知，单个藤壶的最低清洁应力值达到 4.581 MPa，约为藤壶与船体之间最大黏附强度的 4 倍以上，同时藤壶模型出现了明显的位移。这说明在当前设定的清洁刀具参数条件下，刀具对藤壶表面产生的应力已充分超过其与船体之间的黏附强度阈值，能够有效破坏藤壶与船体之间的结合界面，实现可靠的清除效果。

由图 5 可知，蓝色折线表示藤壶与船体之间的最大黏附强度，红色折线代表采用超声空化技术清理藤壶时产生的清洁应力[16]，灰色折线为清洁刀具模型所对应的应力分布。清洁刀具模型产生的清洁应力约为超声空化技术的 2 倍，且其最小应力值仍显著高于藤壶的最大黏附强度。由于船体表面藤壶主要以成体形态存在，而超声空化技术清除成体藤壶的效率仅约为 30%，因此清洁刀具模型在清除效率与应力输出方面均具有明显优势。清洁刀具模型不仅能够有效克服藤壶的附着力，实现彻底清理，而且由于应力集中于藤壶与船体界面处，对船体表层结构的影响较小，具备较好的安全性与可行性。

在此基础上，为进一步验证清洁刀具在复杂附着环境下的适应性和清理稳定性，本文在单个藤壶模型的基础上，扩展建立了双藤壶附着模型，以模拟船体表面藤壶成群聚集的实际情况。除增加一个藤壶外，其余仿真条件与单藤壶模型保持一致。刀具距离藤壶底部不同距离情况下藤壶胶体与船体接触面产生的清洁应力见图 6。双藤壶不同受力点产生的最小清洁应力折线见图 7。

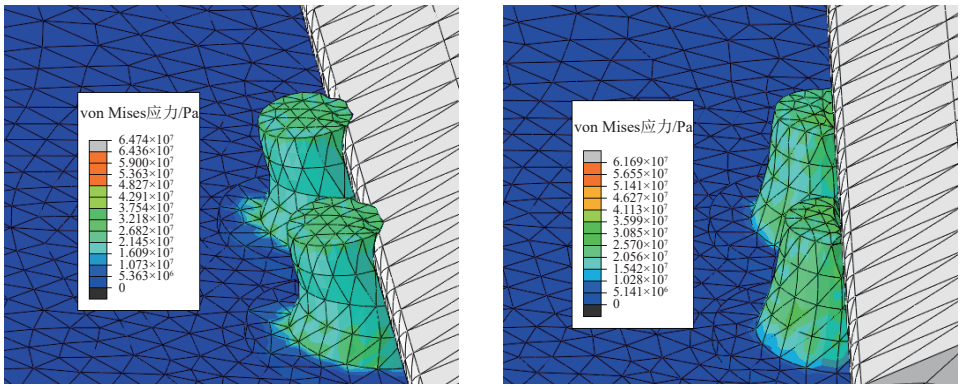



(a)　0 mm　　(b)　1.5 mm

(c)　3.0 mm　　(d)　4.5 mm

**图 6　刀具距离藤壶底部不同距离情况下藤壶胶体与船体接触面产生的清洁应力（双藤壶模型）**

Fig. 6　Cleaning Stress on the Barnacle Adhesive Base-Hull Contact Interface at Different Distances from the Bottom of the Barnacles to the Cutting Tool (Double Barnacle Model)




(e) 6.0 mm　　(f) 7.5 mm

**图 6　刀具距离藤壶底部不同距离情况下藤壶胶体与船体接触面产生的清洁应力（双藤壶模型）（续）**

Fig. 6　Cleaning Stress on the Barnacle Adhesive Base-Hull Contact Interface at Different Distances from the Bottom of the Barnacles to the Cutting Tool (Double Barnacle Model) (Continued)

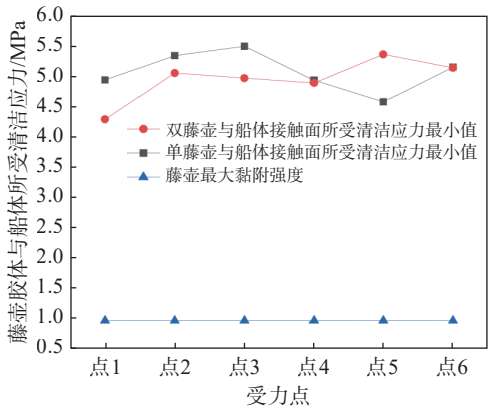



**图 7　双藤壶不同受力点产生的最小清洁应力折线**

Fig. 7　Minimum Cleaning Stress Line Generated by Different Stress Points of Double Barnacles

由图 7 可知，清洁刀具模型在清理单藤壶和双藤壶时产生的清洁应力均稳定在藤壶与船体之间最大黏附强度的 4 倍左右，并且 2 种情况下的应力差距较小。这表明，无论是单个藤壶还是相邻双藤壶，清洁刀具均能够提供足够的应力克服附着力，实现有效剥离。在具体比较中，单藤壶模型的最小清洁应力出现在点 5，双藤壶模型的最小应力则位于点 1，显示双藤壶的存在会对局部受力位置产生一定影响，但最小应力值仍明显高于藤壶最大黏附强度，保证了清理的连续性和稳定性。同时从图 7 可以看出，在双藤壶工况下，清洁刀具仍能保持清洁应力均匀分布，使多体附着条件下的清理效率和可靠性得到保证。因此，清洁刀具模型不仅能够有效清除单个藤壶，也能在多体聚集情况下保持稳定清理性能，相比超声空化技术更适用于船体藤壶高效脱除的工程应用。

## 4　结论

1）针对船体藤壶清理问题，通过将经典切削理论与挤压切削方法相结合，建立了清洁刀具的动力学模型。分析结果表明，当刀具前角为 20°时，其切削力在藤壶所需的移除力附近，既能够有效清理藤壶，又能避免因切削力过大而导致的反作用力增加、刀片磨损加剧以及清理机器人能耗提升等问题，最终选取 20°作为清洁刀具的优化前角参数，为后续有限元仿真分析提供了可靠的理论支撑。

2）通过建立藤壶与船体的理想化附着模型，并将清洁刀具前角设为 20°，采用有限元方法进行仿真研究。结果显示，论单藤壶还是双藤壶工况下，刀具在藤壶表面产生的清洁应力均远高于藤壶黏附强度的 4 倍左右，表明优化后的清洁刀具在理论上能够实现对藤壶的高效剥离，清洁性能稳定可靠。

3）与目前船体藤壶清理机器人采用的超声空化技术单藤壶清理结果相比，清洁刀具模型在应力绝对值和分布均匀性上具有明显优势。并且在双藤壶工况下，刀具仍能保持较高的最小应力和稳定的受力分布，保证了多体附着情况下的清理效果。这表明清洁刀具模型不仅能够有效应对多体聚集，显示出优良的工程可行性和可靠性。

## 参考文献：

[1] 陈长春, 项凌云, 刘汉奇. 海洋污损生物藤壶的附着与防除[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 621-624.
CHEN C H, XIANG L Y, LIU H Q. Attachment and Prevention of Marine Fouling Barnacles[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(4): 621-624.

[2] SONG C, CUI W. Review of Underwater Ship Hull Cleaning Technologies[J]. Journal of Marine Science and Application, 2020, 19: 415-429.

[3] SCIANNI C, GEORGIADES E. Vessel In-Water Cleaning or Treatment: Identification of Environmental Risks and Science Needs for Evidence Based Decision Making[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 467-475.

[4] NINA B, TORFINN S, OLIVER F. Efficacy Testing of Novel Antifouling Systems for Marine Sensors[J]. Ocean Engineering, 2021, 240: 109983.

[5] 王继祥, 张增猛, 李洪波, 等. 船体表面海生物水下清洗机器人研究现状及关键技术进展[J]. 船舶工程, 2024, 46(2): 146-164.
WANG J X, ZHANG Z M, LI H B, et al. Current Status and Key Technological Advances of Underwater Cleaning Robots for Marine Organisms on Ship Hulls[J]. Ship Engineering, 2024, 46(2): 146-164.

[6] EICH M, BONNIN P F, GARCIA F E, et al. A Robot Application for Marine Vessel Inspection[J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(2): 319-341.

[7] HACHICHA S, ZAOUI C, DALLAGI H, et al. Innovative Design of an Underwater Cleaning Robot with a Two Arm Manipulator for Hull Cleaning[J]. Ocean Engineering, 2019, 181: 303-313.

[8] SLM. SLM Underwater Hull Cleaning Robot[EB/OL]. [2024-03-24]. https://www.slm-global.com/page/solution02.

[9] ANADOLU A. Yerli Karina Temizleme Aracı Ithal Ikamesi Sağlıyor[EB/OL]. [2024-03-24]. https://www.aa.com.tr/tr/teknofest/yerli-karina-temizleme-araci-ithal-ikamesi-sagliyor/2675829.

[10] 昆明海威机电技术研究所. SQ-101 水下清洗机器人[EB/OL]. [2024-06-19]. hhttps://www.ksechw.com/products/4/.
Kunming Haiwei Electromechanical Technology Research Institute. SQ-101 Underwater Cleaning Robot[EB/OL]. [2024-06-19]. hhttps://www.ksechw.com/products/4/.

[11] 央视网. 国内首台水下清洗机器人下水[EB/OL]. [2024-06-20]. https://tv.cctv.com/2020/08/09/VIDEo8K5UzJOaRDgUbFVrTxB200809.shtml.
CCTV. The First Domestic Underwater Cleaning Robot Launched[EB/OL]. [2024-06-20]. https://tv.cctv.com/2020/08/09/VIDEo8K5UzJOaRDgUbFVrTxB200809.shtml.

[12] 哈尔滨斑之斓海洋科技有限公司. 斑斓海洋 BLUCR 3 号、4 号机器人成功下水[EB/OL]. [2024-06-19]. https://www.banzhilancom/newsinfo/4740630.html.
Harbin BanZhiLan Marine Technology Co., Ltd. BanZhiLan Marine BLUCR Robots No. 3 and No. 4 Successfully Launched[EB/OL]. [2024-06-19]. https://www.banzhilan.com/newsinfo/4740630.html.

[13] 天津瀚海蓝帆海洋科技有限公司. 船舶大坝清洗机器人多波束测深系统的实际测量效率[EB/OL]. [2024-06-19]. http://tjhhlf.com/sys-nd/12.html.
Tianjin Hanhai Lanfan Marine Technology Co. , Ltd. Actual Measurement Efficiency of Multibeam Echo Sounding System on Ship and Dam Cleaning Robots[EB/OL]. [2024-06-19]. http://tjhhlf.com/sys-nd/12.html.

[14] 王立权, 李超, 陈凯云, 等. 海洋钢桩清刷机器人清除黏附藤壶的力学研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(2): 259-265.
WANG L Q, LI C, CHEN K Y, et al. Mechanical Study on the Removal of Adhered Barnacles by Marine Steel Pile Cleaning Robots[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(2): 259-265.

[15] 夏慧. 船舶表面生物附着规律与清刷机器人研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
XIA H. Study on the Patterns of Marine Biofouling on Ship Surfaces and Cleaning Robots[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[16] 李佳霖. 复合吸附式船体清洁水下机器人结构设计与性能分析[D]. 山东烟台: 烟台大学, 2023.
LI J L. Structural Design and Performance Analysis of a Composite Suction-Type Underwater Hull Cleaning Robot[D]. Yantai, Shandong: Yantai University, 2023.

[17] SHA Z, SHI L, YIN J, et al. Research on Cutting Force of Extrusion Cutting Process Based on Material Flow Characteristics[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 122: 83-96.

[18] ALBITAR H, DANDAN K, ANANIEV A, et al. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(1): 7-21.

[19] 易定和, 欧阳清, 周泽均. 船体藤壶附着模型的建立及清除藤壶的仿真研究[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(2): 195-198.
YI D H, OUYANG Q, ZHOU Z J. Establishment of a Model for the Attachment of Ship Barnacles and Simulation Study on the Removal of Barnacles[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(2): 195-198.