

基于滤食特征的水面垃圾清理装备的仿生设计与评估

张宁, 刘迪, 李昆鹏
(西华大学, 成都 610039)

摘要: **目的** 探索海洋水面垃圾清理装备的仿生设计过程和模态分析的有效性。**方法** 前期采用自上而下的仿生学设计方法, 分别模仿河蚌和火烈鸟的独特滤食结构, 得出两种水面垃圾清理装备的仿生设计方案, 并介绍了基本的设计流程; 后期运用有限元方法对两种成果分别进行模态分析。**结果** 河蚌方案模型的一阶固有频率均低于 30 Hz, 满足设计要求; 火烈鸟方案模型需改进后进行再次评价。**结论** 仿生设计方法可以为水面垃圾清理装备的设计过程提供参考。此外, 采用有限元方法对产品外形、结构进行模态分析, 具备有效性。整个设计与评估闭环过程, 可以较好地指导仿生创新设计, 实现产品的多样化创新。

关键词: 仿生设计; 模态分析; 水面垃圾清理装备; 滤食特征

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)18-0048-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.18.007

Bionic Design and Evaluation of Surface Garbage Cleaning Equipment Based on Filter Feeding Characteristics

ZHANG Ning, LIU Di, LI Kun-peng
(Xihua University, Chengdu 610039, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the effectiveness of bionic design process and modal analysis of ocean surface garbage cleaning equipment. In the early stage, based on the top-down bionics design method, two bionic design plans for surface garbage cleaning equipment were obtained respectively by imitating the filter feeding characteristics of clams and flamingos, and the basic design process was also introduced. In the later stage, the finite element method was applied to carry out the modal analysis on the two results. The first-order natural frequency of the clam model was lower than 30 Hz, which met the design requirements. The model for flamingo plan needed to be re-evaluated after improved. The bionic design method can provide reference for the design process of surface garbage cleaning equipment. In addition, the finite element method is effective for modal analysis on product shape and structure. The whole closed-loop process of design and evaluation can better guide bionic innovative design and realize diversified innovation of products.

KEY WORDS: bionic design; modal analysis; surface garbage cleaning equipment; filter feeding characteristics

随着人们对海洋的过度开发, 全球海洋垃圾每年增加近 800 万吨, 导致海水污染、海洋动物濒临灭绝。现在, 人们已经意识到海洋污染的严重性, 纷纷开发水面垃圾清理装备来对海洋进行清洁。仿生设计学以自然界生物的“形”、“色”、“肤”、“功能”、“结构”等为研究对象, 寻求产品形态、结构、功能、肌理、色彩和意象各方面的突破与创新^[1-2]。已有学者学习海洋

生物智慧, 运用仿生学方法来为海洋装备提供灵感^[3]。比如马宏宇^[4]模仿海豚结构设计了一款游艇; 王振龙等人^[5]模拟乌贼运动原理, 指导设计了一款水下机器人; 吕建刚等人^[6]将蛇怪蜥蜴的高速踏水结构应用于水上推进装置设计等。此类研究均取得了较好效果, 但将仿生设计方法运用于水面垃圾清理领域, 还比较少见。同时, 现有仿生领域研究者多关注于设计方法

收稿日期: 2019-05-12

基金项目: 西华大学工业设计教学团队支持项目 (05050034)

作者简介: 张宁 (1987—), 女, 山东人, 博士, 西华大学讲师, 主要从事交互设计方面的研究。

与过程研究,但在成果评估方法上往往依赖感性评价方法,不够深入和完善^[1]。本文首先探索模仿生物独特的滤食性特征,实现水面垃圾清理装备的创新设计,并在后期对两组设计成果进行模态分析。

1 滤食性特征与污水净化

滤食性动物迄今已出现数亿年,它们并非采用追逐猎物的方式觅食,而是通过一个特殊的过滤结构摄食水中的浮游生物。滤食结构在净水工作中起重要作用,一些滤食性动物能通过摄食沉水植物、有机碎屑等间接降低水体的氮磷含量^[7]。孟顺龙等人^[8]的研究发现,在西五里湖中投放河蚌、螺蛳、鲢、鳙等滤食性动物后,水体透明度有了明显提升。海洋中的滤食性动物种类丰富,大型滤食性动物如鲸鲨,每天要吞吐上千立方米的海水,其中包含较大尺寸的污染物;小型滤食性动物如贝类,每天流经贝体过滤的水也可达数十升,贝类在吸入海水和食物的同时,也会吸入粒径小于5 mm的微塑料。但是生物无法消化降解塑料等污染物,最终会积存在体内。滤食性结构的原理即为吸收污染水体,过滤固体垃圾后排出纯净水体,因此,滤食性动物也被称作“生态系统工程师”。

本文选择河蚌和火烈鸟两种动物作为仿生对象。原因在于两种动物均属于典型滤食动物,但具有截然不同的形态、功能特征与滤食器官。河蚌生活在湖泊、池沼、河流等水底,依靠蚌壳的开闭进行滤食。火烈鸟生活在咸水湖、环礁湖等地区,是唯一完全采用滤食方式进食的鸟类,用喙部在水下收集小虾和植物。模拟两种动物的滤食特征,可以得到多样化的产品形态与结构方案。

2 基于滤食特征的水面清理装备仿生设计

基于两种差异较大的滤食特征,简化采用KIM等人^[9]提出的“自上而下”的仿生设计模式^[4],完成水面垃圾清理装备造型与关键结构的仿生设计方案。设计过程主要包括:选择仿生生物,提取相应生物信息结构;生物与产品的外形、结构融合;产品概念设计,三维建模;概念评价,结合感性评价,重点针对振动因子进行模态分析。评估结果较差的方案需进行改进设计,直至方案符合结构稳定性要求。

2.1 生物信息提取

1) 河蚌。形体特征方面,见图1a,贝壳两片,左右对称,前端钝圆,后端稍尖。壳形多变化,两壳相等,壳面光滑,壳顶部刻纹常为同心圆型或折线型。两壳膨胀,后背部有时具后翼。滤食特征方面,蚌壳的开闭造成水流,食物随水进入蚌体。水流沿鳃丝向上移至鳃的基部,然后移动到唇瓣,小颗粒通过唇瓣进入口腔。过滤后的水分在两腮相交处,由两蚌壳猛

闭排出体外。每24 h经蚌体内的水可达40 L。蚌类的行动能力较弱,但当蚌遇到敌害时,斧足快速回缩,双壳急剧收缩以御外敌,是垃圾清理装备进行复杂环境作业时合适的仿生对象。

2) 火烈鸟。形体特征方面,见图1b,它们将鸟喙倒过来,避免湖水打湿头部。喙部形态具有流线型特征,在俯身捕食时速度极快,嘴短而厚,上嘴中部突向下曲,下嘴较大成槽状。滤食特征方面,火烈鸟的舌头像水泵一样工作,把水沿着边缘部吸进嘴里,喙的结构内部存在着一排排的纤维片,能把水里的食物过滤出来。过滤后的水分沿边喙部排出体外。火烈鸟主要用于零散垃圾的收集及处理,可精准定位垃圾的位置,是进行水面以下垃圾清理作业时合适的仿生对象。

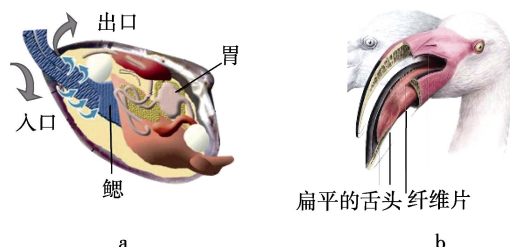


图1 生物外形结构本征提取与表达

Fig.1 Extraction and expression of biological shape and structure

2.2 生物与水面垃圾清理装备的外形和结构

装备制造技术条件限定了其不可能特别具象地表现仿生对象。垃圾处理装置流程包括:垃圾吸入,装置将垃圾通过吸力从装置尖端的进水口吸入到装置内;过滤,水从过滤片的缝隙中流出并从出水口排出;垃圾存放,通过动力,将垃圾带入存放位置。核心外形与结构包括:装备的外形A、污染吸入口B、水质过滤器C、垃圾存放位置D。生物结构特征在水面清理装备中的运用见图2。

2.2.1 河蚌方案

装备的外形A,提取蚌体膨胀的外壳,两片左右对称,前端钝圆,后端稍尖;污染吸入口B,模仿蚌壳的张开造成水流吸入;过滤装置C,模仿鳃丝结构;垃圾存放位置D,模仿斧足结构。

2.2.2 火烈鸟方案

装备的外形A,鸟喙呈锥状,上喙部分短于下喙;污染吸入口B,鸟喙轮廓线的提取;过滤装置C,提取了舌头上锯齿的元素和宽扁的舌头;垃圾存放位置D,宽大的下颚可应用于装置的垃圾处理结构。

2.2.3 设计方案与三维展示

1) 河蚌设计方案见图3。在海洋水面垃圾清理装备的设计上,主要以河蚌的整体外形特征为主。在

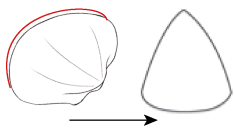
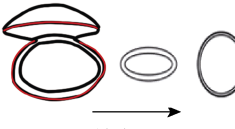
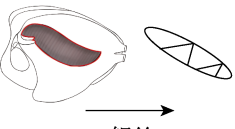
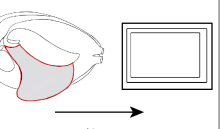
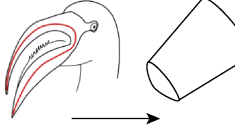
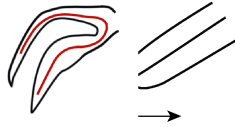
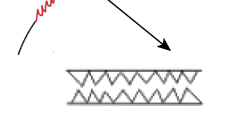
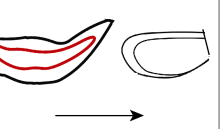
	产品造型 A	进水口 B	过滤装置 C	垃圾存储 D
河蚌方案	 外壳形状	 蚌壳开口	 鳃丝	 斧足
火烈鸟方案	 喙部外形	 喙部简化	 纤维片	 下嘴

图 2 生物结构特征在水面清理装备中的运用
Fig.2 Application of biological structure characteristics in surface cleaning equipments

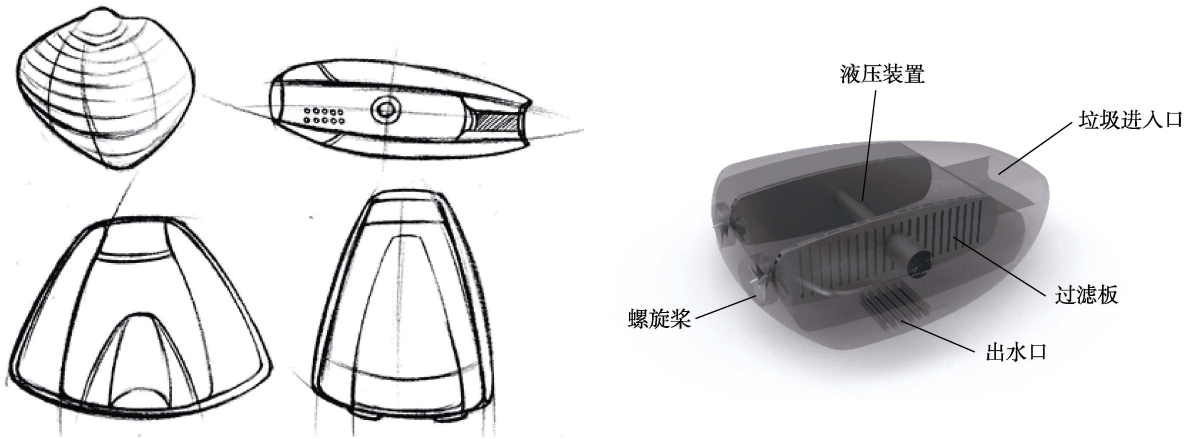


图 3 河蚌设计方案
Fig.3 Design plan of the clam

污染吸入口和水质过滤器的设计上，需要呼吸器官鳃的水循环和摄食系统配合。实际场景（河蚌）见图 4，河蚌方案整体外形类似中型的船。清理装备的后部拥有较大的空间，能够存储收集到的海洋漂浮垃圾。在清理装备的内部配有液压装置，能将收集到的垃圾通过液压使其方便存储。装备的右部是过滤网，海水可以直接过滤，留下海面垃圾在设备中暂时存储，回收



图 4 实际场景（河蚌）
Fig.4 Actual scene (clam)

的垃圾会被转移到岸上再进行专业清理和处理。设备的后部还配备两个螺旋桨，除了可以控制设备的行使速度和方向，还能在机身后方形成水流，使漂浮的垃圾更容易随着水流进入船体。

2）火烈鸟设计方案见图 5。鸟喙的锥形结构可用作垃圾处理装置的外观造型，舌头上的锯齿可用作垃圾处理装置的过滤结构，下颚部分可用作装置的垃圾处理部分。整体造型为流线型，减少在水中的阻力。实际场景（火烈鸟）见图 6，火烈鸟水面清理仿生装备主要用于零散垃圾的收集及处理，通过大范围扫描，精准定位垃圾的位置。装置前端是进水口，通过向前的推动力将垃圾和水带入装置内。装置内配备自动过滤系统，包括横杆弹簧装置和过滤层板，呈十字方向连接。水流进入前，活动过滤层板与海平面平行；水与垃圾进入后，活动过滤层调整至与海平面垂直。通过横杆弹簧的带动，将过滤层从装置的前端入水口带往出水口方向，垃圾被挤压至装置末端，海水直接从出水口滤出。垃圾集中于装置后端，垃圾积满后，通过人为收集进行后期处理。

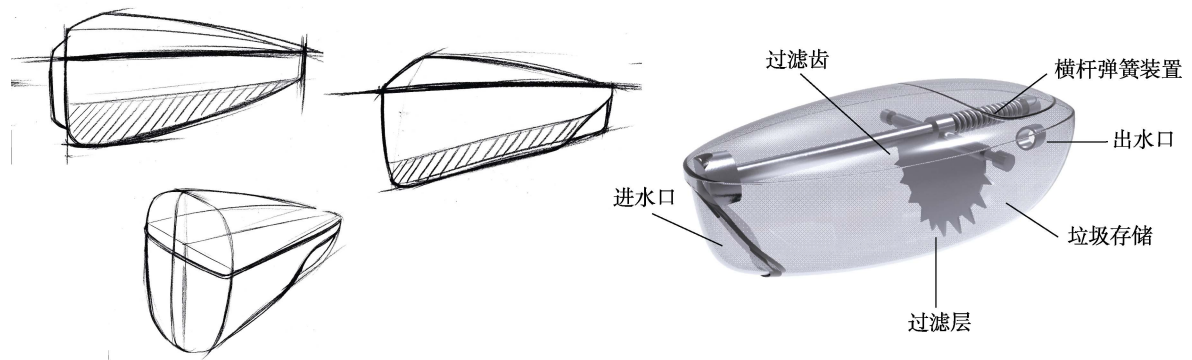


图 5 火烈鸟设计方案
Fig.5 Design plan of the flamingo



图 6 实际场景（火烈鸟）
Fig.6 Actual scene (flamingo)

3 模态分析

海洋环境十分复杂,为了避免与海洋生物相互干扰,需要在仿生学产品上安装声学驱鱼装置,避免产品受到鱼群、大型鱼类的撞击。为了防止产品结构与声学驱鱼装置发生共振进,现有研究多采用感性评价^[10-11]等方法对产品外形进行评价,但是此类方法并不适合外形结构稳定性问题的评价。

本文在结构设计阶段采用有限元方法进行模态分析^[12],为产品设计提供参考。殷勇勤等人^[13]的研究给出了海洋中常见鱼类对声音的感知情况,见表 1。

表 1 常见鱼类对声音的感知情况
Tab.1 Sound perception of common fish

鱼种	频率/Hz	反应情况
真鲷	200	30%受惊吓
蓝鳍金枪鱼	500	有惊吓
日本鳀	300	受惊吓最好感知度
沙丁鱼	300	感知最好频率
鲙	325	68%有反应
鲱	1000	反映最强
鲱	30~5000	明显逃逸

为了保证产品结构安全可靠且不受鱼群影响,其一阶固有频率应远离声学装置的发声频率,即应小于 30 Hz,如表 1。

模态是指产品结构的固有振动特性,一般与产品的材料、形状、内部结构有关。每一个模态都有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。分析这些模态参数的过程称为模态分析。

对于多自由度系统,其矩阵形式的动力学方程可写为:

$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}=\{f\} \quad (1)$$

其中: $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ 均为 $N \times N$ 矩阵,分别为质量、阻尼和刚度矩阵, N 为系统自由度。在无阻尼自由振动情况下,式(1)可简化为:

$$[M]\{\ddot{x}\}+[K]\{x\}=0 \quad (2)$$

式(2)的特征值方程为:

$$[[K]-\lambda[M]]=0 \quad (3)$$

在已知结构刚度、质量矩阵的情况下,求解得到向量 λ ,有:

$$f_i=\sqrt{\lambda_i}=\sqrt{\frac{K_i}{M_i}}(i=1,2,\cdots,N) \quad (4)$$

其中: f_i 即为结构第 i 阶模态所对应的频率。

利用有限元分析软件 Abaqus,对上述两种仿生学方案模型进行了结构动力学响应分析。两种方案的一阶振型和频率,云图线反映模型不同位置处的变形位移情况。模态计算结果表明,火烈鸟方案模型在进水口位置变形较大,而河蚌方案模型的变形主要位于模型两侧。振型和频率见图 7,河蚌方案模型的一阶频率较低,为 28.6 Hz,见图 7a;火烈鸟方案模型的一阶频率最高,为 43.2 Hz,高于方案安全设计的上限 30 Hz。河蚌方案模型的一阶固有频率低于 30 Hz,因此满足设计要求。火烈鸟方案需要进一步修改完善,调整产品外形结构后重新进行结构评估,见图 7b。

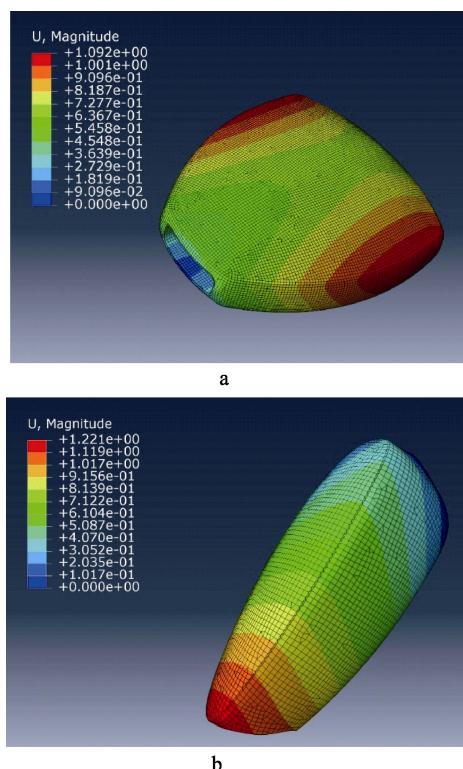


图7 振型和频率

Fig.7 Vibration mode and frequency

4 结语

生物的滤食特征进化来源于远古时期,此种进食方式高效环保,是生态系统的一个重要组成部分。然而,此类结构的仿生模拟在海洋装备设计中应用较少。本文在总结河蚌和火烈鸟两类形态差异化极大的滤食结构后,分别设计两款功能侧重点有所差异的水面垃圾清理装备。为了避免与海洋生物相互干扰,设计后期采用有限元方法对两组模型进行模态分析,有效地评测了模型的结构安全可靠。对于一阶频率较高,容易变形的方案需要进行修正改进后再次进行模态分析,直至整个设计符合安全性能要求。研究表明,基于滤食特征的仿生学方法,可有效应用于水面垃圾清理装备的创新设计。

参考文献:

- [1] 罗仕鉴, 张宇飞, 边泽, 等. 产品外形仿生设计研究现状与进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 138-155.
- [2] 杜鹤民. 基于产品语义的形态仿生设计方法研究[J]. 包装工程, 2015, 36(10): 60-63.
- [3] 胡红忠, 孟永刚, 赵军. 源于海洋动物形体特征研究的仿生设计[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 240-241.
- [4] 马宏宇. 游艇外观造型的仿生设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [5] MA Hong-yu. Bionic Design of Yacht Appearance Modeling[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [6] 王振龙, 杭观荣, 王扬威, 等. 乌贼游动机理及其在仿生水下机器人上的应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 1-9.
- [7] WANG Zhen-long, HANG Guan-rong, WANG Yang-wei, et al. Swimming Mechanism of Squid/Cuttlefish and Its Application to Biomimetic Underwater Robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 1-9.
- [8] 吕建刚, 高飞, 宋彬, 等. 基于蛇怪蜥蜴踩水机理的仿生推进装置数值计算方法研究[J]. 机械工程学院学报, 2012, 24(5): 26-30.
- [9] LYU Jian-gang, GAO Fei, SONG Bin, et al. Research on the Method of Numerical Calculation for Propulsion Unit Based on the Mechanism of the Basilisk Lizard Running on the Water[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2012, 24(5): 26-30.
- [10] 邹俊良, 杨京平, 杨虎. 水生植物-滤食性动物用于水产养殖废水净化的研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, 39(4): 444-451.
- [11] ZOU Jun-liang, YANG Jing-ping, YANG Hu. Purification and Removal of N and P from Aquaculture Wastewater Using Hydrophytes and Filter Feeder Creatures[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2013, 39(4): 444-451.
- [12] 孟顺龙, 陈家长, 胡庚东, 等. 滤食性动物放流对西五里湖的生态修复作用初探[J]. 中国农学通报, 2009, 25(16): 225-230.
- [13] MENG Shun-long, CHEN Jia-chang, HU Geng-dong, et al. Preliminary Study on Eco-restoration Effect of Releasing Suspension-feeding Animal on West Wuli Lake[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(16): 225-230.
- [14] KIM S J, LEE J H. Parametric Shape Modification and Application in a Morphological Biomimetic Design[J]. Advanced Engineering Informatics, 2015(29): 76-86.
- [15] CHANG H C, LAI H H, CHANG Y M. A Measurement Scale for Evaluating the Attractiveness of a Passenger Car Form Aimed at Young Consumers[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007(37): 21-30.
- [16] 石夫乾, 孙守迁, 徐江. 产品感性评价系统的模糊D-S推理建模方法与应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(3): 361-365.
- [17] SHI Fu-qian, SUN Shou-qian, XU Jiang. Fuzzy Dempster-Shafer Evidence Theory and Its Application to Product Kansei Evaluation System[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(3): 361-365.
- [18] 刘延柱, 陈文良, 陈立群. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [19] LIU Yan-zhu, CHEN Wen-liang, CHEN Li-qun. Vibration Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [20] 殷勇勤, 吕友林, 赵传达, 等. 声学驱鱼技术研究[J]. 船舶与海洋工程, 2017(4): 26-31.
- [21] YIN Yong-qin, LYU You-lin, ZHAO Chuan-da, et al. A Research on the Acoustic Fish Herding Technology[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2017(4): 26-31.