

文章编号: 2095-2163(2022)04-0070-07

中图分类号: TP23

文献标志码: A

U型动力救生装置的仿真优化分析

闫炳成, 曹乐, 金厚鑫, 汪新坤, 杨 诞

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 针对落水者的安全快速营救问题,提出了对U型动力救生装置优化设计方案。该方案从减阻外形、动力优化、安全性优化分析三个角度出发,采用基于UGNX11.0软件创建U型动力救生装置的三维模型,获得符合人体工学的结构设计;基于Solidworks flow simulation进行计算流体力学(CFD)仿真分析,获得优化的减阻外形和动力模块设计,最后在UGNX11.0和ANSYS Workbench 2019 R3软件的协助下,实现对U型动力救生装置的静力学与碰撞的有限元分析(FEA),以检验优化其结构强度、刚度和抗冲击性。综上,仿真实验结果分析可知,所得装置能够安全、快速、可靠地营救落水者。可为水上救援及公共安全领域的设备研发提供一定的参考。

关键词: U型动力救生装置; 三维建模; 减阻外形; CFD; FEA; 碰撞

Simulation and optimization analysis of U-shaped dynamic life-saving devices

YAN Bingcheng, CAO Le, JIN Houxin, WANG Xinkun, YANG Dan

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] Aiming at the problem of safe, reliable, quick and timely rescue of the overwhelmed, an optimized design scheme for the U-shaped dynamic life-saving device is proposed. The solution is divided into three perspectives, which are drag reduction shape, dynamic optimization and safety optimization. The three-dimensional model of the U-shaped dynamic life-saving device is created based on UGNX11.0 software to obtain an ergonomic structural design; computational fluid dynamics (CFD) simulation analysis is conducted based on Solidworks flow simulation to obtain optimized drag reduction shape and dynamic module design. Therefore, with the assistance of UGNX11.0 and ANSYS Workbench 2019 R3 software, a finite element analysis (FEA) of the statics and collision of the U-shaped dynamic life-saving device is realized to verify and optimize its structural strength, stiffness and impact resistance. In summary, the analysis of the simulation experiment results shows that the device can safely, quickly and reliably rescue people who fall into the water. It can provide a certain reference for the field of water rescue and the research and development of public safety equipments.

[Key words] U-shaped dynamic life-saving devices; three-dimensional modeling; drag reduction shape; CFD; FEA; collision

0 引言

随着蓝色海洋经济的蓬勃发展,海上对外贸易与交流日益频繁,海难事故也时有发生,并造成了巨大的人员伤亡^[1]。据卫生部统计,全国每年约有57 000人死于溺水,相当于每天150多人溺水死亡^[2]。2021年7月20日河南遭遇百年不遇暴雨^[3],造成多人失踪及遇难。如何对落水者实现安全可靠、快速及时的水域营救以及使施救人员低风险、低伤害地展开施救行为过程,成为当前水上救援领域亟需解决的难题。高超楠等人^[4]提出一种水上多功能遥控U型救生装置,并做了可行性分析。

李永正等人^[1]、李双月等人^[5]分别对U型救生装置的阻力性能及流体性能进行研究,得到不同负载下的阻力变化理论。本文提出一种对U型动力救生装置的优化设计方案。该方案将进一步从流线减阻结构和人体工学设计、动力模块设计、安全性优化分析三个方面着手,对U型动力救生装置的流线外形、舒适度、高效快速救援以及安全性进行优化设计。

流线减阻结构,基于UGNX11.0软件建立三维模型,在CFD软件Solidworks flow simulation中优化其流体外形,可使装置获得更快的水中航行速度,减少水中航行的阻力,缩短救援时间,同时抑制水花上

基金项目: 国家自然科学基金(61703270)。

作者简介: 闫炳成(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:无人船舶设计、无人船集群避障;曹乐(1986-),男,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向:动力学与协同控制、MEMS器件动态特性;金厚鑫(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:图像图形处理;汪新坤(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:硬件电路开发;杨 诞(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:生物信号采集与识别。

通讯作者: 曹乐 Email: caole00012@163.com

收稿日期: 2021-09-01

扬,从而减少水花对落水者脸部的冲击及视线干扰,以防再生对落水者的伤害。人体工学设计,从落水者握持U型动力装置的舒适度出发,减少因U型动力装置本身的结构原因造成落水者握持的手臂麻木,而失去握持能力导致二次落水的现象。

动力模块设计,直接决定了救援能力及救援的速度,如何研发设计高效输出的动力模块是该部分设计的关键。根据喷射推进器和整流罩的设计原理,在Solidworks flow simulation软件的帮助下,设计出了一款输出较强的动力模块。

安全性优化分析,基于UGNX11.0 Nastran 结构分析模块和Ansys Workbench 2019 R3 软件实现,主要包括上下侧施压、头部施压和横向碰撞等方面的有限元分析实验,以检验和优化装置在结构强度和刚度以及抗冲击能力的可靠性与安全性。

综上,本文从减阻外形和人体工学的结构设计、高效的动力输出、安全性优化分析三方面,对U型动力救生装置进行三维模型设计、CFD 仿真对比、FEA 分析检验优化,使其具备快速、可靠、安全、稳定营救落水者的能力。

1 流线结构分析

1.1 结构设计

动力救生装置的结构,借鉴了潜艇和动车头部

的流线型布局,如图1所示,采用了德国西门子公司的UGNX11.0 软件进行三维实体模型设计。针对装置的减阻外形、水花上扬问题和人体工学原理,设计出水阻力小,正反对称的U型结构及提升握持舒适度的下巴板面和三角孔形把手,如图2所示。该装置的正视图(图2(b))及左视图(图2(d))具有类似潜艇流线布局的水动外形;其头部中间的凸面舱,是装置的主控制舱,而外形则类似动车头部的流线曲面。主体材料采用ABS工程塑料,由3D打印增材制造加工完成,该材料强度高,韧性好,有较高的抗冲击能力,易上色着色,可利用3D打印等方式便捷加工^[6]。



图1 潜艇及动车外部流线型结构

Fig. 1 External streamlined structure of the submarine and high-speed train

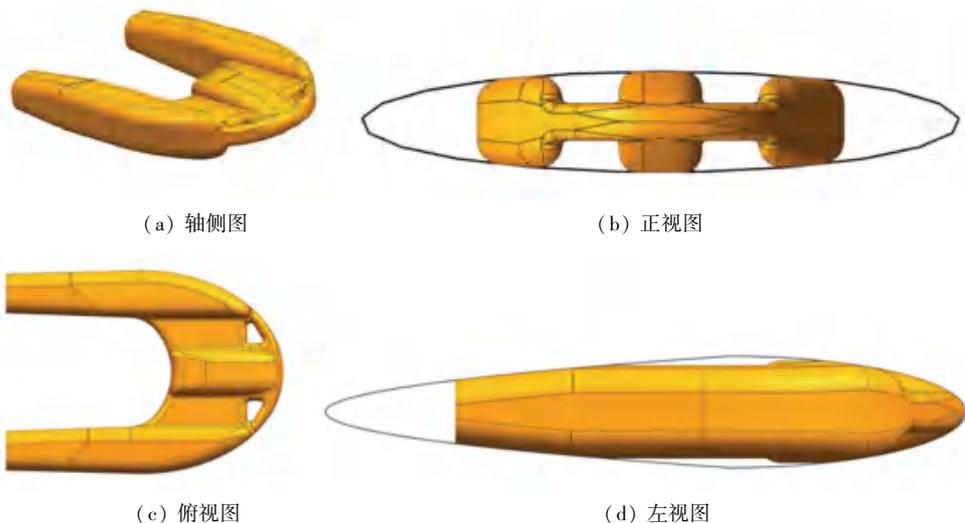


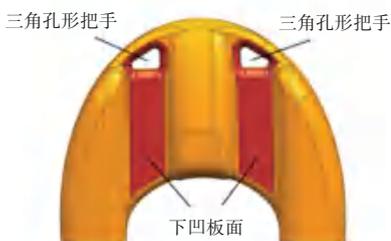
图2 U型动力救生装置的结构

Fig. 2 The structure of the U-shaped power life-saving devices

下巴板面和三角孔形把手设计,如图3(a)红色所示,下巴板面形成对落水者手臂胳膊的多面支撑,直板可降低握持时手臂曲度,方便握持,三角孔形把手可使落水者的手部四指均匀受力,握持更有力、更

牢固,如图3(b)所示。而如图3(c)所示的斜边握持方式,易造成手部的滑动和对小拇指等部位的挤压,从而影响落水者手部抓稳效果。通过UG NX 11.0 软件的人体建模模块对三角孔形把手设计进行

剖解与分析,在人体舒适度标准 porter1998 下,手部获得绿色评价,表明其具有舒适的握持姿态。该设计不仅可提升舒适度,同时可防止浪花对手部的拍打,并在发生撞击时可保护手部的安全。



(a) 下巴板面和三角孔形把手设计



(b) 三角孔形把手握持方式



(c) 斜边把手

图3 人体工学的握持设计

Fig. 3 Ergonomic grip design

总结上文的结构设计,可列出 U 型动力救生装置的各项性能参数,见表 1。

表 1 U 型动力救生装置的各项性能参数

Tab. 1 Performance parameters of U-shaped power life-saving devices

| 项目名称 | 参数 |
|----------------------------|---------------------------|
| 缩小比 | 1 : 2.5 |
| 原尺寸/mm | 1 012.72 * 723.81 * 205.6 |
| 3D 图输出原外侧体积/m ³ | 0.067 9 |
| 可提供浮力/N | 255.23 |

该理论浮力值大致相当于海事船检部门认证和符合国家标准(GB-4302-2008)^[7-8]的水域救援专用 2.5 kg 型救生圈的浮力值,可承重 110 kg 以下。

1.2 水阻力仿真测试

水阻力的仿真测试,基于计算流体力学(CFD)

实现。CFD 技术将运动学、流体力学和计算机技术紧密结合在一起,已经成为解决各类阻力计算的重要工具^[9]。当前,CFD 被广泛应用于各类水域设备的阻力优化和水动力特性的研究中^[10-11]。

CFD 软件通常将水看成是不可压缩的粘性流体,分析该类流体,通常从质量、动量、能量以及流动状态四个角度进行。针对水阻力的仿真,一般忽略热传导与热交换,因此,能量守恒可以忽略。

根据质量守恒,得到其连续性方程为^[12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为^[9, 12-13]:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u'_i u'_j) \quad (2)$$

其中, ρ 为流体密度; \bar{u}_i 为雷诺平均速度分量; p 为压力时均值; u_i, u_j 分别为流体的动量在坐标系下的分量; u'_i, u'_j 为速度分量; σ_{ij} 为应力张量分量。

湍流模型为 $k - \varepsilon$ 型,该方程由湍动能 k 方程和湍动能耗散率 ε 方程组成,其模型参数通过试验拟合得到,可较好地适用于浮力、阻力等的仿真计算中。Standard $k - \varepsilon$ 湍流模型的输运方程为^[14-15]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \bar{u}_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\rho \varepsilon}{\sigma_k} \right) + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2} + G_k - Y_m + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \bar{u}_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\rho \varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_j^2} + C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon_2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中, k 为湍动能; μ_t 为湍流动力粘性系数, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, C_μ 为常数; μ 为黏度; σ_k 为 k 的湍流普朗特数; ε 为湍动能耗散率; G_k 为平均速度梯度产生的湍流项; G_b 为浮力产生的湍流动能; Y_m 为因扩散而产生的湍流; S_k 为用户定义的源项; $C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} G_k$ 为生成项; $C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k}$ 为耗散项; $C_{\varepsilon_1}, C_{\varepsilon_2}$ 均为常数。

本文结合 CFD 软件 Solidworks flow simulation 2018,对 U 型动力救生装置进行水阻力仿真测试,以通过对比找出最优的流线型结构。将 3 种外形结构不同、体积大小相同的 U 型的动力装置置于匀速 5 m/s 的流动计算域中,计算其在三维水域空间中的阻力大小,进而获得阻力最小的动力救生装置外形。

1号船为市场在售某款U型救生装置,2号为加装了整流设计的某型动力救生装置,3号为本文U型动力救生装置,对比结果见表2。

表2 不同U型动力救生装置阻力仿真对比

Tab. 2 Comparison of resistance simulation of different U-shaped power life-saving devices

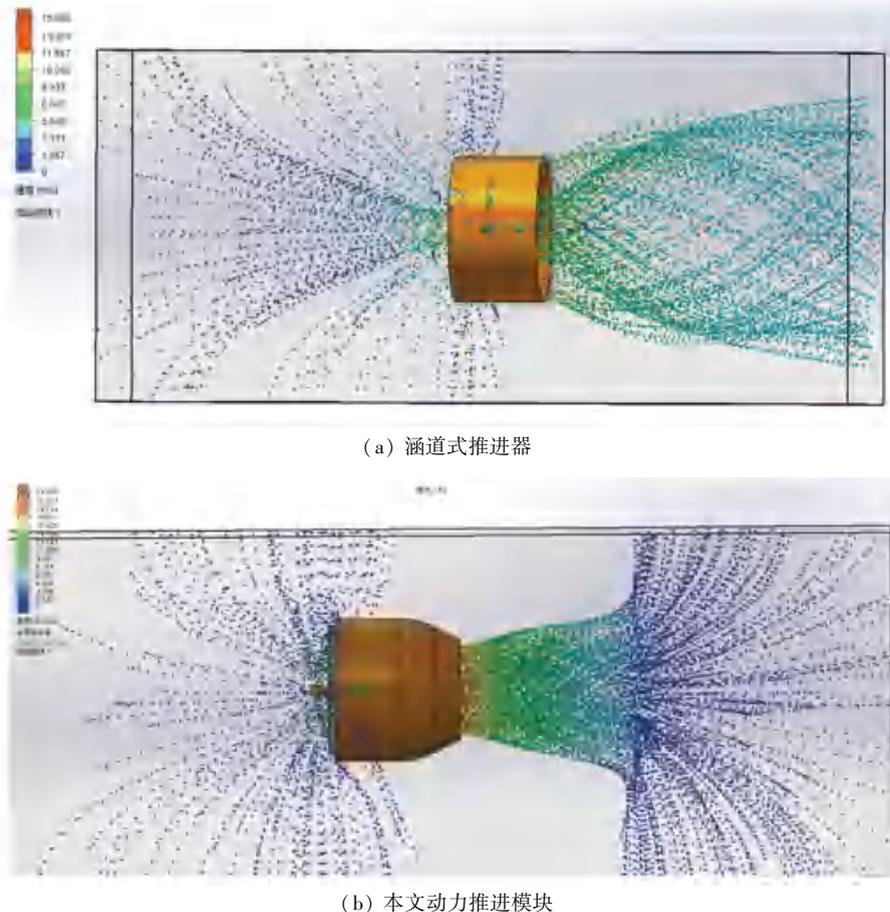
| 编号 | 仿真图 | 阻力/N |
|--------------|---|--------|
| 1号U型救生装置 |  | 115.51 |
| 2号动力救生装置 |  | 86.25 |
| 3号本文U型动力救生装置 |  | 54.79 |

通过以上的结果可发现,3号装置相比于其它2款阻力最小,从而表明了该外形设计具有较优的减

阻能力,可显著提升装置的移动速度。3号装置的U形内侧有更少的蓝色低压流体,代表着拥有更少的水花上扬现象。

2 动力模块设计分析

对于落水者的救援往往是比较紧急的,时间就是生命,而快速救援需要较强输出能力的动力模块。该动力模块采用了CYS型强磁无刷电机, KV值为3 600,最大功率为900 W。在Solidworks flow simulation软件的帮助下,进行了水中动力模块位置限定的对比仿真实验,如图4所示。图4(a)为相同功率的涵道式推进器,图4(b)为本文结合整流罩设计和喷泵原理设计的动力推进模块。从CFD实验的结果来看,图4(a)展示的涵道式推进器尾部喷口速度为14.4 m/s,推力大小为5.6 kg;图4(b)动力模块的尾部喷口可实现高达23.6 m/s的高速射流,推力大小为9.26 kg。通过对比发现,图4(b)动力模块拥有更强的动力输出,故U型动力救生装置选择图4(b)中显示的动力模块。



(a) 涵道式推进器

(b) 本文动力推进模块

图4 动力模块 CFD 结果

Fig. 4 CFD results of the power module

将搭载了双动力模块的 U 型动力救生装置,置于静流的水中进行仿真测试,该双动力模块均达到了近 17 m/s 的喷口射流速度,从而使 U 型动力装置

实现了 4.89 m/s 的空载移动速度,没有出现空化现象,如图 5 所示。

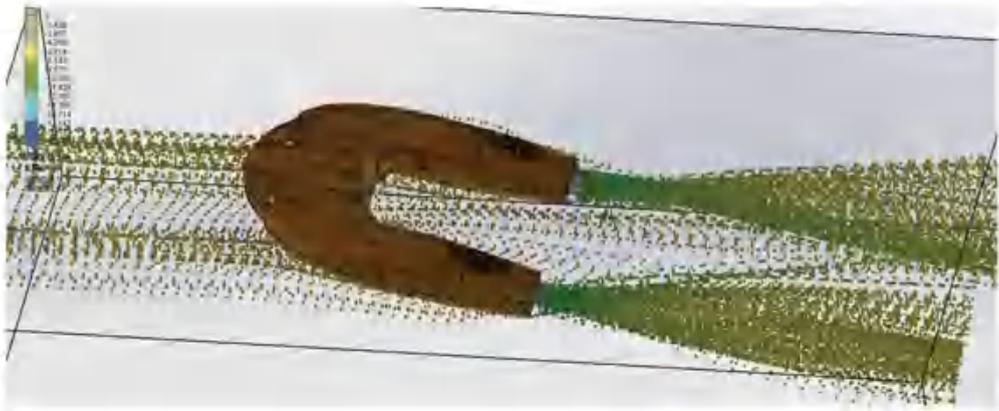


图 5 U 型动力救生装置仿真效果

Fig. 5 Simulation results of U-shaped dynamic life-saving devices

3 安全性优化分析

3.1 内部结构设计

水上救援设备的安全性与稳定性,直接关乎救援的成功与否。为了实现安全救援的目标,需要 U 型动力装置具有良好的浮性和结构强度,综合这 2 方面,本文借鉴了船舶多舱室的设计,对 U 型动力救生装置的内部进行小舱室栅格结构设计,如图 6 所示。如此,局部损伤漏水可限制在一个或几个栅格舱室内,从而避免了大面积的渗水导致浮力显著降低的现象。同时,相比于单舱室对整体结构的强度也有提升。



图 6 U 型动力救生装置内部栅格结构

Fig. 6 Internal grid structure of U-shaped dynamic life-saving devices

3.2 静力学有限元分析

本文从静力学分析和动态碰撞两方面,对 U 型动力救生装置的结构强度进行优化分析中。静力学分析中,采用了 UGNX11.0 软件的有限元分析模块,进行上、下两侧施压分析和头部施压分析。上、下侧施压,针对落水者对 U 型动力救生装置的驾驶握持

行为的受力状况展开,如图 7(a) 所示;手部与把手包裹结合部分布置 500 N 作用力,胳膊接触面布置 1 000 N 作用力,如图 7(b) 所示;静力学有限元分析结果如图 7(c) 所示。结果表明,该 U 型救生装置表面的把手处产生了最大为 0.004 94 mm 的形变量,由此可知,因落水者驾驶而产生的受力形变将是非常小的,可忽略不计,进一步证明该 U 形动力救生装置上、下侧的强度和刚度设计合理安全。

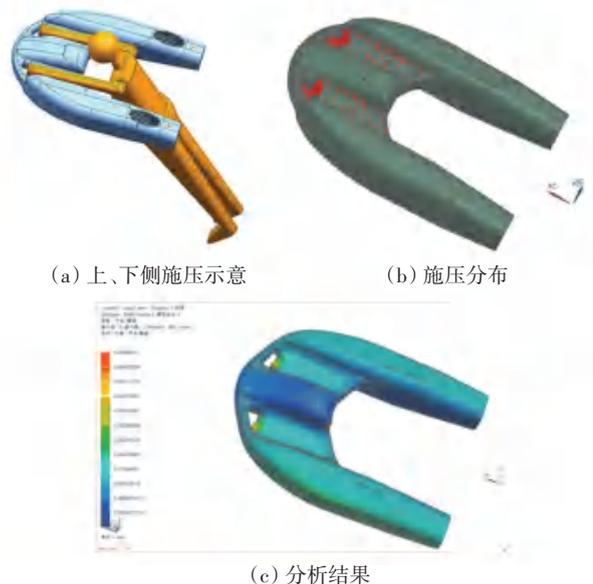


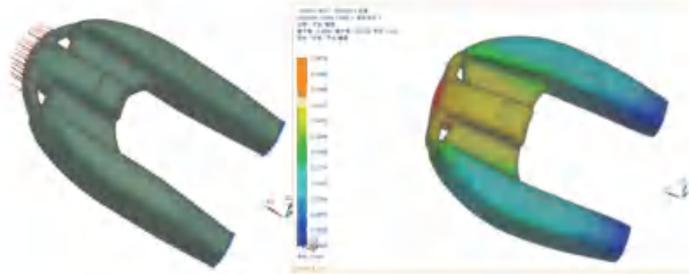
图 7 静力学有限元分析(150 kg 分布式上、下侧加压)

Fig. 7 Static finite element analysis (150 kg distributed upper and lower side pressurization)

头部施压,如图 8(a) 所示,可从纵向角度检验结构强度和刚度,在施加 1 500 N 的静压力后,得到如图 8(b) 的有限元分析结果。图 8(b) 显示,在其

头部产生了最高为 0.041 8 mm 的形变量,主要承力部位在两动力模块的中间结合部,该形变量同样非常小,可忽略不计,表明该 U 形动力救生装置的纵

向结构强度和刚度设计合理;从头部受力形变的趋势,可以看出把手部虽有变形,但仍有足够空间保护手部的安全。



(a) 头部施压 (b) 有限元分析结果

图 8 静力学有限元分析 (150 kg 头部加压)

Fig. 8 Static finite element analysis (150 kg head pressurization)

3.3 碰撞安全性有限元分析

对于载人设备的结构强度和安全性全面检验,往往会采用碰撞的方式,例如汽车的碰撞安全性测试等。本文基于 ANSYS Workbench 2019 R3 软件,对该 U 型动力救生装置做了碰撞动力学有限元分析实验。该实验分为 2 组,一组不包覆橡胶,如图 9(a) 所示;另一组在 U 型动力救生装置的头部包覆减震材料 10 mm 的橡胶 rubber2,如图 9(b) 所示。设置 2 组 U 型动力救生装置均以 54 km/h (约为空载最高运动时速的 3 倍) 的速度冲向铝合金板材障碍物。由此可得,无橡胶和有橡胶的碰撞力学有限

元分析结果分别如图 10、图 11 所示。碰撞结果显示,瞬时冲击等效应力平均值达到了 14.21 MPa,该值小于 ABS 工程塑料 3D 打印制品的压缩强度 28.4 MPa 和拉伸强度 27.1 MPa,属于安全范围;其冲击能量达到 46.86 J,包覆橡胶 rubber2 材料后,可有效吸收大约 1/4 的冲击能量,在 8 J 以下的冲击能量可被橡胶材料直接缓冲掉,U 型动力救生装置几乎不会承受冲击。此外,碰撞冲击易引起 U 型动力救生装置的震动,包覆橡胶组比未包覆橡胶组震动幅度减少 19.8%,持续时间减少一半以上。



(a) 不包覆橡胶 (b) 头部包覆橡胶

图 9 碰撞有限元分析网格划分

Fig. 9 Meshing of collision finite element analysis



图 10 碰撞力学有限元分析 (无橡胶)

Fig. 10 Finite element analysis of collision mechanics (without rubber)

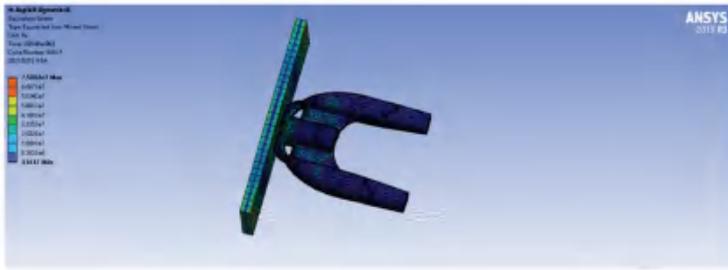


图 11 碰撞力学有限元分析(含橡胶)

Fig. 11 Finite element analysis of collision mechanics (including rubber)

由此可见,橡胶材料可有效减缓碰撞对 U 型动力救生装置的影响,利于提升装置的稳定性和耐用性。为使救生装置更加安全、可靠,故对 U 型动力救生装置的头部包覆 10 mm 厚的橡胶材料。

4 结束语

从 CFD 仿真优化结果来看,该 U 型动力装置具备较好的流体外形,水阻力小,一定程度上抑制了水花上扬现象,具有强大的动力输出,无空化现象,提升了该动力救生装置的动力输出效率;从静力学有限元分析结果来看,其材料选择及强度设计合理,仿真工

况下有极小的形变量,从碰撞的有限元分析结果来看,头部包覆减震橡胶垫,可有效提升装置的防碰撞能力,具备较高的安全性。在 UGNX11.0 相应模块的帮助下,对握持的舒适度进行了提升。综上分析,可获得各项参数均优异的 U 型动力救生装置,如图 12 所示,该 U 型动力救生装置可实现更安全、更快速、更可靠地营救落水人员。不足之处在于选择了 ABS 塑料 3D 打印加工整体结构,如换用高密度聚乙烯外壳辅以硬质聚氨酯无孔泡沫填充,可进一步提升 U 型动力救生装置的承载能力。本文可为水上救援和公共安全领域的设备研发提供一定参考。

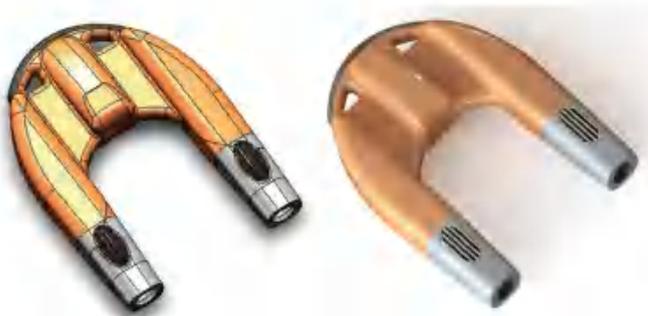


图 12 U 型动力救生装置优化设计结构外形图与效果图

Fig. 12 Outline drawing and effect drawing of U-shaped dynamic life-saving devices optimized design structure

参考文献

- [1] 李永正,曹稼秀,张瑞瑞,等. 新型救生装置流场性能数值模拟[J]. 船舶工程, 2020, 42(05): 51-55, 89.
- [2] 刘涛. 小型便捷式水上救生装置的研发[D]. 大连:大连工业大学, 2018.
- [3] 卞瑞鹤. 众志成城战洪魔—河南抗击持续性强降雨纪实[J]. 农村·农业·农民(A版), 2021(08): 22-24.
- [4] 高超楠,王帅军,李永平,等. 水上多功能遥控救生装置设计[J]. 机械工程师, 2020(04): 45-47.
- [5] 李双月,刘卓俊,张瑞瑞,等. U 型救生装置阻力性能研究[J]. 江苏船舶, 2019, 36(05): 12-15.
- [6] 姚中贺,朱晓艳. ABS 材料在工业设计领域的应用[J]. 化工管理, 2020(28): 119-120.
- [7] 国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准目录—2008 年度[M]. 北京:中国标准出版社, 2009.
- [8] 陈卫平,李力. 国内航行海船个人救生设备配备及检查要求[J]. 中国船检, 2019(11): 80-83.

- [9] 李和明. CFD 技术在大型游艇粘性流场阻力仿真中的应用[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(14): 13-15.
- [10] 肖丹. 基于 CFD 的船舶阻力性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
- [11] 王兴茹. 潜艇尾流空间演化及流场特性仿真分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [12] 孙丰泰,韩兆林. 基于 CFD 的不同船首倾角船体阻力特性仿真研究[J]. 机械与电子, 2020, 38(10): 21-26.
- [13] 郑跃洲,王冬姣,薛乃耀,等. 无人艇集成电机推进器设计及流体动力数值仿真[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(23): 74-79.
- [14] 邵夏勇,张治国,李国能,等. 基于 SolidWorks Flow Simulation 的热电制冷箱装配体安装架构的仿真优化[J]. 发电技术, 2021, 42(03): 374-381.
- [15] 张显雄,张志田,张伟峰,等. 五种湍流涡粘模型在二维方柱绕流数值模拟中的对比研究[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(02): 339-349.
- [16] 叶旋,涂华锦. 3D 打印用 ABS 研究进展[J]. 中国塑料, 2019, 33(12): 101-108.