

DOI: 10.16781/j.0258-879x.2019.11.1246

• 海洋军事医学 •

便携式遥操作海上落水人员捞救器的设计

褚璟¹, 魏高峰^{2*}, 张执南³, 李勇¹

1. 上海海事大学物流工程学院机电控制教研室, 上海 201306

2. 海军军医大学(第二军医大学)海军医学系海军军事卫勤与装备教研室, 上海 200433

3. 上海交通大学机械与动力工程学院现代设计研究所, 上海 200240

[摘要] **目的** 设计一种便携式遥操作海上落水人员捞救器。**方法** 结合海上具体环境和机载特性, 吸取现有海上救援器的优点, 利用质量功能展开法对捞救器进行功能分析与目标特性设计。从6种捞救器概念设计方案中选出最佳的三角捞救器, 并用STAR-CCM⁺软件进行表面压力分布仿真分析, 用ANSYS Workbench软件进行变形量、应力、应变能分析, 用失效模式和效果分析(FMEA)进行可靠性分析。**结果** 三角捞救器满足STAR-CCM⁺软件的表面压力分布仿真分析和ANSYS Workbench软件的变形量、应力、应变能分析, 达到了消耗能量低、敏捷性好的要求。对可靠性分析中可能出现的失效起因做了针对性处理。**结论** 本研究设计的便携式遥操作海上落水人员捞救器具有轻便、机动性强、安全性高等特点, 能为海上救援提供很大帮助, 具有一定的军事价值及社会、经济效益。

[关键词] 海上捞救; 便携式捞救器; 遥操作; 落水人员

[中图分类号] R 831.62 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2019)11-1246-07

Design of portable teleoperated marine rescue device

CHU Jing¹, WEI Gao-feng^{2*}, ZHANG Zhi-nan³, LI Yong¹

1. Department of Mechanical and Electrical Control, Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

2. Department of Naval Health Service and Medical Equipment, Faculty of Naval Medicine, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

3. Institute of Modern Design, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

[Abstract] **Objective** To design a portable teleoperated rescue device for persons who fell into the sea. **Methods** The function analysis of rescue device and the design of target properties were performed using the quality function deployment method by summarizing the advantages of existing marine rescuers, marine environment and airborne characteristics. The optimal triangle rescuer was selected from six conceptual design schemes. The simulated analysis of surface pressure distribution was carried out with STAR-CCM⁺ software. The deformation, stress and strain energy were analyzed with ANSYS Workbench software. The reliability analysis was performed with failure mode and effect analysis (FMEA). **Results** The triangle rescue device met the requirements of STAR-CCM⁺ analysis and ANSYS Workbench analysis, and achieved low energy consumption and good agility. The possible causes of failure in reliability analysis were dealt with accordingly. **Conclusion** The design of portable teleoperated marine rescue device has the characteristics of portability, strong maneuverability and high safety. It can provide great help for maritime rescue and has certain military, social and economic values.

[Key words] salvage at sea; portable rescue device; teleoperation; drowning personnels

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2019, 40(11): 1246-1252]

如今全球贸易和人员往来日益频繁, 海上船舶密度日益增大, 人员落水事故也随之增加。人员落水后, 在水中的时间越长面临的危险则越大, 因此救援时间十分宝贵。目前的救援方式主要是操纵

救援船只或飞机靠近落水人员后向其抛掷救生圈、救生衣等或者驾驶救生艇接近落水人员后将其救起。前者不能保证抛掷的准确度, 后者不能保证救援的速度, 加之海况的复杂程度可能超出预计, 因

[收稿日期] 2019-06-04

[接受日期] 2019-09-26

[基金项目] 装备军内科研重点项目(2016ZBYX09). Supported by Key Project of Military Equipment Research (2016ZBYX09).

[作者简介] 褚璟, 硕士生. E-mail: 137485223@qq.com

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-81871118, E-mail: highpeak8848@163.com

此救援手段仍有较大改进空间。无论是军用还是民用,都亟需符合救援要求,且轻便、机动性强的遥操作海上落水人员捞救器。

海上落水人员受到的潜在威胁较多,主要包括低温症、脱水、体力透支、海洋生物攻击等,这些因素对时间敏感性较高。一般情况下,落水人员若未溺亡且保持静止,在低温水域中生存极限为0℃以下海水5 min、2℃海水15 min、5℃海水60 min、10℃海水3 h^[1]。人体的核心温度一般维持在35℃以上,海上落水人员长期浸泡于低温水域中会出现体细胞代谢紊乱和因血液流动不畅而缺氧,从而导致落水人员进入昏迷状态,加速死亡。

世界各国海军都非常重视海上捞救技术的发展,据美军资料统计,20世纪60年代的捞救技术救起50%的落水人员需5 h,到了70年代中期缩短到1 h^[2]。马岛战争期间,英军“考文垂”号驱逐舰与“大西洋运送者”号运输舰被导弹击沉后449名舰员落水,因救援及时仅11人死亡;反观阿根廷方面,“贝尔格拉诺将军”号巡洋舰被鱼雷击沉后1 048名舰员落水,因救援不力导致368名阿根廷海军官兵葬身海底^[3]。

事实证明,海上捞救技术与装备的水平是海上落水人员能否存活的重要因素。在民用海事救援方面,对先进捞救技术与装备的需求显得更为紧迫。1999年11月24日,“大舜”号滚装船在山东烟台附近海域翻沉,当时因为装备落后、缺乏训练等原因未能及时救援,304名落水船员中仅22人生还(海水温度-5℃)^[4]。国务院发布的《“11·24”特大海难事故调查处理报告》明确指出“我国现行的搜寻、救助体制与形势不相适应,国家对搜救设施及事业经费的投入严重不足,搜救手段落后”,并建议理顺海上搜救体制、加强搜救力量、更新搜救船舶和设备等^[4]。2015年10月21日,东营外海一艘散货船发生意外翻船,交通运输部北海第一救助飞行队立刻对落水人员实施捞救,但是由于缺乏快速高效的捞救装备,7 h后才捞救出第1名落水人员^[5]。

在我国大力实施海洋强国战略的今天,无论是国防建设还是国家经济发展都亟需提升海上捞救的技术能力与装备水平。本研究所研制的便携式遥操作海上落水人员捞救器可以从岸边或救援船上释放,由救援人员遥控接近意识尚存的落水人员并搭

载其返回安全地带,或者托举落水人员出水暂时脱离危险等待救援,以代替救生艇、救援飞机对落水人员实施救助。

1 便携式遥操作海上落水人员捞救器功能分析与目标特性设计

质量功能展开法是一种在设计前期常用的工具,可以让设计者识别出市场和消费者最关切的产品特性,从而将更多的资源用于满足这些需求上。初步设计捞救器的质量为15 kg,载重量为100 kg(单次救援任务为1人),河海水密度为1.02 kg/L,捞救器使用半径为100 m(视距内)。

(1)考虑到捞救器的体积、动力、成本等要求,相比汽轮机、柴油机等,采用电机驱动是较为理想的驱动方式,它具有体积小、易控制等优点。

(2)吊舱式推进器作为近年发展较快的一种新型电力推进系统,目前有许多成熟的理论可供借鉴,因此在设计中着重参考了吊舱式推进器的相关研究。需要注意的是,虽然采用吊舱式推进器的船舶可以进一步优化船体线型、减少阻力^[6],但吊舱的存在影响了螺旋桨的水动力性能,在设计时应考虑吊舱对推进效率的影响^[7]。(3)为了保护落水人员,将吊舱推进器包裹在1个导管中,防止螺旋桨对落水人员造成二次伤害。导管螺旋桨在设计方面较为便利,应注意此时要把导管和螺旋桨看成一个整体^[8]。(4)为了检验设计的合理性和探索进一步的轻量化,除了分析模型的受力情况外,还要测出模型在弯曲、扭转等特殊工况下的变形应力分布。(5)我们通过采用ANSYS Workbench软件对捞救器的设计进行了有限元建模计算与分析检验^[9]。有限单元的划分和相关参数的建立也对分析的精度有很大影响^[10],在分析过程中需特别关注。

(6)轻量化是几乎所有产品的目标,而材料的轻量化是产品轻量化的一环。复合材料在重量和强度上都有突出的表现,近年来其已在航空等领域取得较为广泛的应用^[11]。我们在产品的选材上,除了塑料、金属等常用材料外,还考虑了复合材料的适用性。

综合来讲,本研究所设计的便携式遥操作海上落水人员捞救器应具有以下目标特性:只针对单个具备自我活动能力的正常落水人员,无需考虑落水人员完全丧失活动能力的情况;轻巧、便携,易

于抛投;可在 4 级以下海况正常工作;能遥控,可以快速到达落水人员所在位置。

2 便携式遥操作海上落水人员捞救器概念设计

质轻和便携的要求决定了捞救器设计应尽可能减少不必要的功能和零部件,只保留救援所需的功能;可遥控的要求决定了捞救器应装备电子元件和储能部件;在 4 级海况以下工作决定了其应有完善的密封设计;能搭载单人的要求决定了设计应考虑人的安全性和舒适性。

根据对捞救器的质量功能展开分析及上述设计目标完成功能分解,具体如下:将落水者的位

置信息传递给救援人员后,救援人员发送信息给捞救器遥控模块;遥控模块中的电源给遥控器提供电能,遥控器发送控制信息给安装在捞救器救援模块中的接收器;接收器收到信号后发送电机控制信息给推进器,控制推进器的电机转速,实现加速、减速、转向等运动方式;同时救援模块中的电池为接收器和推进器提供电能;救援模块抵达落水者所在位置后,落水者抓住救援模块中的浮板;救援模块携带落水者返回救援人员处。捞救器功能结构图见图 1。

根据上述功能结构及目标特性需求设计了 6 种捞救器机械结构方案,如图 2 所示。

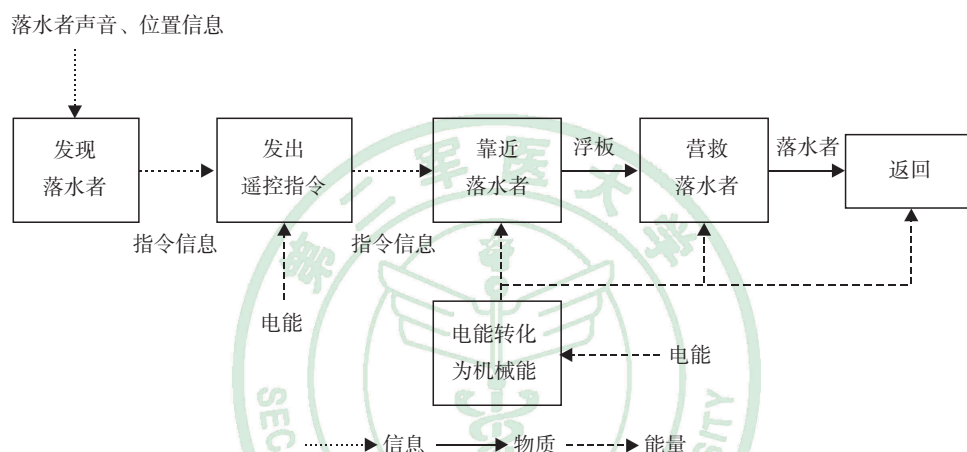


图 1 便携式遥操作海上落水人员捞救器功能结构图

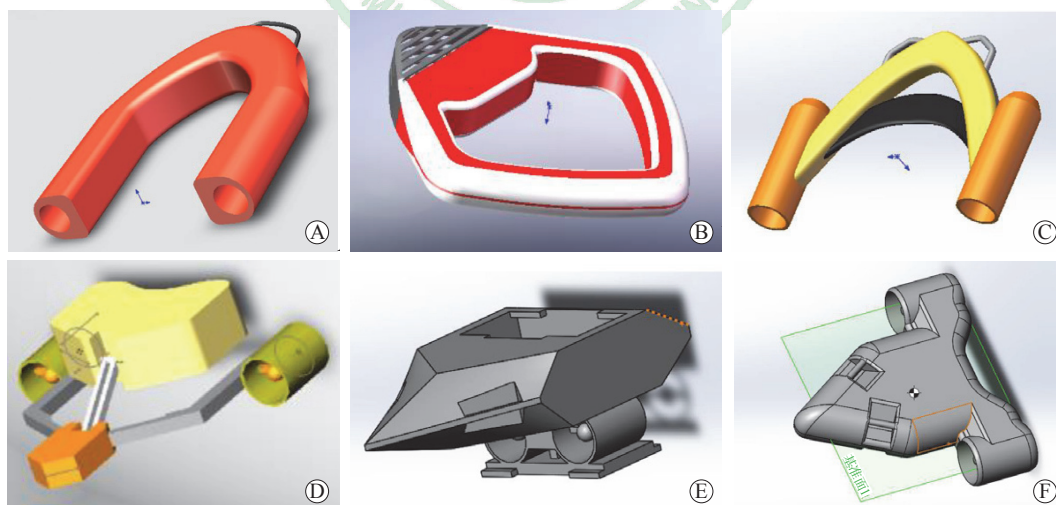


图 2 6 种便携式遥操作海上落水人员捞救器概念设计方案

A: U 型捞救器; B: 变种救生圈; C: A 型捞救器; D: 浮板分离捞救器; E: 推进分离捞救器; F: 三角捞救器

我们对上述 6 种海上落水人员便携式遥操作捞救器的技术概念设计方案进行了分析对比和研究,从制造难度、结构强度、便携程度、运动效率、创新性、舒适度等方面进行定量研究,最终形成各种方案的评分表。从表 1 可以看出方案 F 综

合评分最高,其中便携程度评分较低的主要原因是体积大,不过由于此项所占权重最低,因此对总分影响较小。对于结构强度和舒适度这 2 项权重最高的指标,方案 F 的评分最高。综合考虑,方案 F 最符合设计要求。

表 1 6 种便携式遥操作海上落水人员捞救器概念设计方案评分

项目	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D	方案 E	方案 F
制造难度/0.15 ^a	4.8	4.0	3.0	2.2	2.2	3.0
结构强度/0.3	4.0	3.2	3.2	2.6	5.0	4.8
便携程度/0.05	4.8	4.0	4.0	3.0	3.0	2.6
运动效率/0.15	2.8	3.2	2.8	3.8	4.0	4.0
创新性/0.1	1.8	1.2	3.2	4.8	4.8	3.0
舒适度/0.25	1.8	1.0	4.2	5.0	2.0	5.0
总分	3.21	2.61	3.40	3.56	3.56	4.17

^a: 各项附带数据为权重. A: U 型捞救器; B: 变种救生圈; C: A 型捞救器; D: 浮板分离捞救器; E: 推进分离捞救器; F: 三角捞救器

尽管参与评分的样本有随机性, 但得分仍然偏主观。为了得到客观的数据, 需要对建立的模型进行理论仿真。而为了使外形方案达到最优, 仅有 1 个方案进行仿真是不够的, 对所有方案进行仿真分析又太耗时, 因此从得分第二高的 2 个方案中挑选 1 个作为对比。方案 D 和方案 E 得分相同, 多数指标得分相近, 但前者的舒适度得分远高于后者。考虑到捞救器需要搭载落水人员, 应更加注意对落水人员的人体工学性, 故最终选择了方案 D。虽然此方案的结构强度得分最低, 但可以从改善棱角情况、增加壁厚等多方面入手提高结构强度, 而且该指标得分低只是相较其他方案而言, 不代表该设计的结构强度不够。

综上所述, 选出方案 D 浮板分离捞救器和方案 F 三角捞救器这 2 个方案进行仿真分析, 获得相应的表面压力云图、变形量云图、等效应力云图等。仔细对比后发现三角捞救器方案在大多数的分析中都优于推进浮板分离方案, 因此选择三角捞救器方案作为最终方案的原型。

3 便携式遥操作海上落水人员捞救器样机设计

3.1 机械结构设计 为了最大限度地达到密封效果, 零件和连接缝应越少越好。零件的设计又与加工方法密切相关, 适合的加工方法有激光切割和 3D 打印。

首先对三角捞救器模型应用 STAR-CCM⁺ 软件进行表面压力分布仿真分析, 得到的压力云图如图 3 所示。

捞救器表面的压力分布均匀, 没有明显的压力剧烈变化部位, 说明该方案的捞救器模型结构稳固, 没有因压力急剧变化而发生断裂的危险。另外, 捞救器表面压力越大则受到的阻力越大, 所需

的捞救器电机功率也就越大。结果表明, 该方案消耗的能量更低、敏捷性更好。

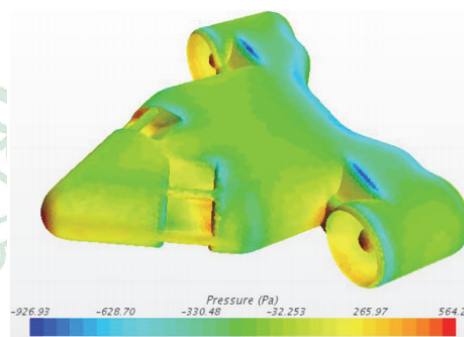


图 3 便携式遥操作海上落水人员三角捞救器压力云图

应用 ANSYS Workbench 软件对该方案的模型进行变形量、应力和应变能分析。仿真参数根据计算结果确定, 参数和结果如下: (1) 静水压力加载至 3/4 型深处; (2) 重力场为 9.8 m/s^2 ; (3) 运动速度达到 1 m/s 时, 依靠所选电机 (额定功率 150 W) 理论上可提供 150 N 推力, 考虑船身对螺旋桨的影响乘上推力减额系数 0.2 , 在每个推进器处设置正向推力 58.50 N ; (4) 每个推进器分别设置 1 kg 的质点模拟电机和螺旋桨质量, 中央平板内测设置 3 kg 质点模拟电池、电路板等设备的质量; (5) 正面迎水部分施加 49.50 N 的横向流体阻力, 从任意舷侧施加 60.92 N 的纵向流体阻力; (6) 浮板上表面施加 $1/3$ 人体质量载荷, 约为 25 kg ; (7) 两侧扶手处各施加 30 N 向后的拉力。

在仿真分析的过程中发现上下握把间的应力较为集中, 因此在应力集中部位作倒角, 进行优化处理。如图 4 所示, 经过优化处理后该处应力集中已经消失, 模型的最大应力值下降, 且出现最大应力处由表面转移到内部。

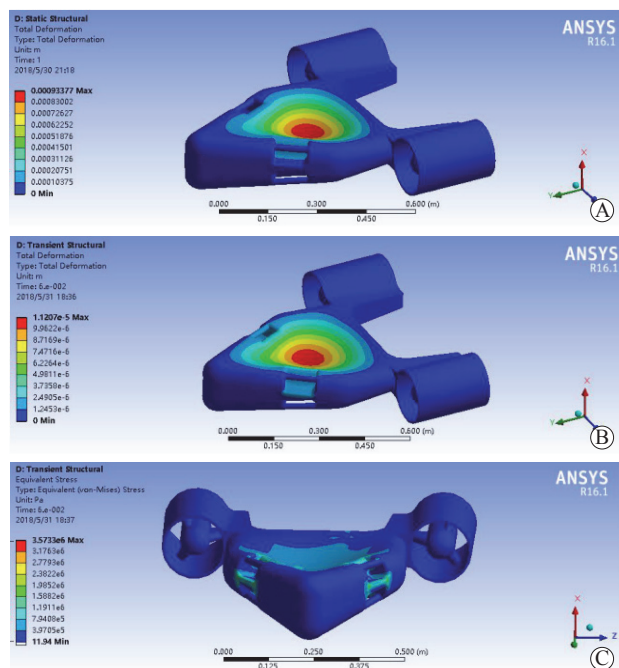


图4 便携式遥控海上落水人员三角捞救器
满载时应力应变图

A: 三角捞救器满载时总变形量图; B: 三角捞救器满载时最大激振力作用下变形量图; C: 三角捞救器满载时最大激振力作用下等效应力图

选材方面考量的是轻质、可靠,在非金属材料中强度比较高的几种塑料比金属更加符合要求。比如在仿真时设定的高密度聚氯乙烯(unplasticized polyvinyl chloride, UPVC; 即加少量塑化剂的聚氯乙烯),其质地轻便胜过金属,强度较高符合使用要求,稳定性佳(不同于高密度聚乙烯、聚丙烯等其他塑料遇光热氧易老化),最重要的是其流动阻力小(粗糙系数约为0.009),可以较好地改善在水中的行驶性能^[12]。此外丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, ABS)工程塑料与UPVC相比,除了变形温度略低外,也是一种可选的材料。

3.2 电机与螺旋桨选型 假定航速(v)为1.5 m/s,捞救器迎水面积(A)为0.128 m²,阻力系数(C_d)为0.615,又已知海水密度(ρ)为1 025 kg/m³,船所受阻力计算公式为 $F=1/2 \times \rho C_d A v^2$,代入各数据计算可得捞救器所受阻力为90.8 N,功率($P=Fv$)为136.2 W,即人在水中以大约1.5 m/s的速度运动需要136.2 W的动力,估算捞救器载人以1~2 m/s速度运动时总功率为100~200 W。

在各方面条件允许的情况下优先保证其整体的机械性能,故采用高功率密度的电机。3508

型电机的质量为365 g,外径42 mm,总长度98 mm,持续最大功率150 W,2台3508型电机最大功率达300 W,符合设计需求,而且在高功率下的持续转矩达到2.8 N·m。从功率的角度考虑,额定功率144 W,等效0.2马力。螺旋桨叶面直径不可过小,如果使用直径9 cm的螺旋桨,其额定功率有可能会降到原来的一半以下,不能满足设计要求,因此拟定的螺旋桨的型号为2叶直径5.9英寸(约15 cm)。

3.3 控制系统设计 选择STM32F4系列作为主控制器。该芯片采用32位RISC内核的Cortex-M4架构,工作频率180 MHz,有丰富的外部接口和内置存储器,可由2.0~3.6 V直流电供电;闪存2 MB,配合主控板上增强I/O端口,还有连接到总线的外设,支持同步动态随机存取内存(synchronous dynamic random-access memory, SDRAM)、单周期乘法和硬件除法运算;成本不高,具有各种信号接口(比如摄像头等),可以为产品升级预留空间。考虑到主控芯片采用STM32F4系列及电机的选择,最终确定主控芯片为STM32F427HH6的Robomaster开发版A型。

考虑到产品的耐用性、遥控器的可开发性,选取了DT7遥控器(当前内置容量为2 000 mAh的锂电池)与DR16接收器。该遥控器与接收器为著名无人机公司大疆创新科技有限公司的创新产品,质量稳定、耐用,距离稳定性及性价比比较优;信号强度较高,即使用防水塑料封闭也能保持远距离控制(通信距离在开阔室外能达到1 km),符合遥控水上捞救器的要求。DR16接收器输出信号为标准的DBUS协议数据,当遥控器与接收器建立连接后,接收器每隔14 ms通过DBUS发送1帧18字节数据。

4 便携式遥控海上落水人员捞救器可靠性分析与测试过程

4.1 捞救器可靠性分析 首先进行失效模式分析。通常采用两种方法:增量载荷法和分支限界法,但都无法保证筛选留下的单元是构成主要失效模式的必备单元。最后采用失效模式和效果分析(failure mode and effect analysis, FMEA)^[13],首先根据现有各部分设计方案对整个系统结构进行基本单元划分,单元划分后确定失效模式,根据

FMEA 标准确定严重度, 研究失效起因。

表 2 中列出的失效模式并不是该系统所有的失效模式, 省略的失效模式主要为 2 类: 一是发生频率过低, 二是该种失效模式可纳入其他失效模式。在确保表 2 能反映实际失效模式后, 根据

FMEA 开展顺序依次列出排名位于前 3 的失效模式: 叶片损坏、电机失灵、外壳渗漏或破裂。经过分析对比, 系统漏水是发生以上故障的主要原因, 因此在产品加工装配时要特别注意部件防水和连接处的防水处理。

表 2 失效模式和效果分析 (FMEA) 表

潜在失效模式	潜在失效后果	潜在失效起因	控制预防过程	频度	探测度	严重度	风险顺序数
信号无效	失控对落水者造成二次伤害或系统损坏、丢失等	遥控器失灵、接收器失灵, 信号传输受影响	编写无信号输入时系统运行状态	1	2	10	20
系统无供电	整机瘫痪	电源损坏、供电线路进水	对整个电控系统采取防水措施	2	3	8	48
电机失灵	无推动力	电机内部损坏、进水	电机选型, 电机螺旋桨连接处防水	5	6	8	240
叶片损坏	推动力降低、系统运行不平稳	运行中叶片接触异物	设计防护网, 选用坚固叶片	6	7	7	294
陀螺仪失灵	无法正常反馈机身姿态, 左右颠簸	陀螺仪或信号传递线路损坏	设计中保证陀螺仪不受过大干扰	1	4	5	20
蜂鸣器失灵	无法按设计报警	蜂鸣器损坏, 声音传播受阻隔	设计时为声音传递介质预留	1	4	6	24
外壳渗漏或破裂	电路暴露、短路	运行中碰撞、材料长期老化	外壳材料选择, 细节处形状设计	2	4	10	80

频度: 指在设计的使用寿命中某一特定失效起因发生的可能性; 探测度: 指零部件或子系统投产之前, 用现行预防设计控制方法探测潜在的失效起因能力的评价指标; 严重度: 一个已假定潜在失效模式发生时, 对零件、系统或用户影响后果的严重程度。
风险顺序数=频度×探测度×严重度

4.2 捞救器样机测试过程 利用 STAR-CCM⁺ 软件对捞救器模型表面压力分布进行仿真分析, 用 ANSYS Workbench 软件对模型进行变形量、应力、应变能分析, 均满足设计要求。测试过程如下: (1) 将经过防水处理的装置放于水中 2 h, 结果表明密封性良好。(2) 所有电子元器件单独测

试可用后, 在安装上捞救器前连接成工作回路, 经测试控制回路正常。(3) 最后将装置投放到湖中测试, 遥控器接收、发射信号良好, 可以在增加负载后正常工作。便携式遥操作海上落水人员捞救器样机如图 5 所示。

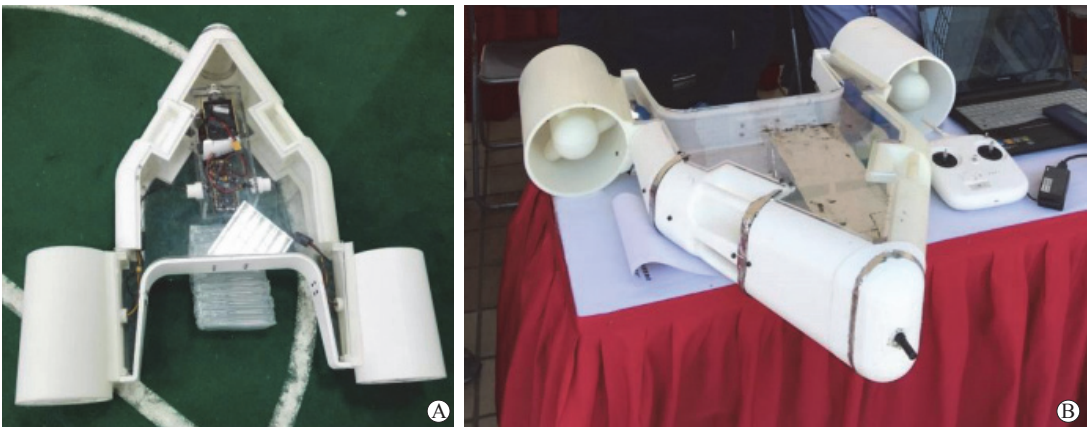


图 5 便携式遥操作海上落水人员三角捞救器样机
A: 样机俯视图; B: 样机侧视图

5 小 结

本研究的目的是代替救援船只和救援飞机救助海上落水人员,避免抛投救生圈或救生衣投偏的情况,对海上事故救援具有十分重要的意义。我们研制的便携式遥操作海上落水人员捞救器已经顺利完成捞救器模型的制作,将在完善其性能后投入使用。捞救器已采取较为全面的防水措施,在实验室完成了对电机保护壳等重要部件的抗冲击及防水性实验,能够满足使用要求,下一步计划在高海况等自然水域进行实践测试。另外,我们在捞救器内部填充了气囊,以保证捞救器在进水的条件下仍能提供足够浮力。为了适应更复杂的环境,还可以增加一些附加功能,例如用摄像头传送图像实现超视距遥控救援,为此我们在设计捞救器时预留了足够的空间。

本研究设计的便携式遥操作海上捞救器具有轻便、机动性强、安全性高等特点,能为海上救援提供很大的帮助,具有一定的军事价值和社会、经济效益。

[参 考 文 献]

- [1] 王刚义. 低温水域人体生理极限探索的体会[J]. 中国应用生理学杂志,2006,22:261-262,287.
- [2] 褚新奇. 海上救生难点与对策[J]. 海军医学杂志, 2002, 23:140-142.
- [3] 张建,喻锡成,王猛. 海上落水人员救捞装备现状及对我军的启示[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2016,23:242-246.
- [4] jasj. 山东烟大公司“11-24”特大海难事故[EB/OL]. (2012-12-27)[2019-05-30]. <http://safety.jian.gov.cn/news-show-2301.html>.
- [5] jasj. 东营 10.21 荣江 2003 轮沉没事故调查报告[EB/OL]. (2019-01-18)[2019-05-30]. <https://max.book118.com/html/2019/0101/5033012001001344.shtm>.
- [6] 马聘. 吊舱推进技术[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2007:7.
- [7] ISLAM M, VEITCH B, BOSE N, LIU P. Numerical study of hub taper angle on podded propeller performance[J]. J Jpn Soc Comput Fluid Dynam, 2006, 15: 86-93.
- [8] 中国船舶工业集团公司,中国船舶重工集团公司,中国造船工程协会. 船舶设计实用手册[M]. 3 版. 北京:国防工业出版社,2013:369.
- [9] 李帅,穆瑞芳,张壮志. 基于 ANSYS Workbench 拓扑优化对止动架轻量化的研究[J]. 船舶工程,2016,38:35-39.
- [10] 邹春平,陈端石,华宏星. 船舶结构振动特性研究[J]. 船舶力学,2003,7:102-115.
- [11] 吕岗. 基于复合材料的某飞机零部件轻量化研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [12] 梁亚运. UPVC 材料的疲劳与损伤研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.
- [13] 聂微. 工厂质量管理五大手册应用指南:最新版 APQP/CP/PPAP/FMEA/SPC/MSA 实施指南[M]. 北京:中国标准出版社,2010:187-209.

[本文编辑] 尹 茶