### 第十届全国海洋航行器设计与制作大赛

### 暨2021“海上争锋”中国智能船艇挑战赛

### 参赛作品说明书

**作品名称：基于空化射流的网箱清理和修补机器人**

**学校名称：广东海洋大学**

**参赛者姓名：刘展旺 赖文川 徐贵俊 江明兴 吴绵奎**

**类别：**

A新概念创意设计

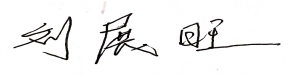
第十届全国海洋航行器设计与制作大赛

暨2021“海上争锋”中国智能船艇挑战赛组委会制

2021-4-6

关于参赛作品说明书使用授权的说明

本人完全了解第十届全国海洋航行器设计与制作大赛暨2021“海上争锋”中国智能船艇挑战赛关于保留、使用参赛作品说明书的规定，即：参赛作品著作权归参赛者本人，比赛组委会可以在相关主页上收录并公开参赛作品的设计方案、技术报告以及参赛作品的视频、图像资料，并将相关内容编纂收录在组委会出版论文集中。如作品有核心保密部分，请向组委会另行说明，将不予公开。

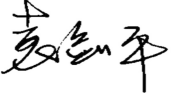
参赛队员签名：

C:\Users\asus\Desktop\图片2.png图片2

C:\Users\asus\Desktop\图片3.png图片3

C:\Users\asus\Desktop\图片4.png图片4



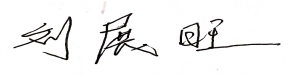
指导老师签名：



日期：2021年6月23日

保密承诺书

项目参与者共同承诺：本申报书《基于空化射流的网箱清理和修补机器人 》所有内容均不涉及国家秘密，也无敏感内容，若造成失泄密，由本项目申请人承担全部责任。

项目申请人签字：

C:\Users\asus\Desktop\图片2.png图片2

C:\Users\asus\Desktop\图片3.png图片3

C:\Users\asus\Desktop\图片4.png图片4



2021年 6月 23 日

作品简介

|  |  |
| --- | --- |
| 作品名称 | 基于空化射流的网箱清理和修补机器人 |
| 主要功能 | 1、能有效清理网箱网衣的各种附着物，同时该装置具有清洗效率高，不会对养殖的水产品产生影响，可有效降低对水体的污染等优势。  2、可对海洋网箱缺漏处进行无人修补，通过摄像头配合机械爪和机械臂的修复工作，使修复更加精确。 |
| 创新点 | 1.采用空化射流技术清洁装置，提高网箱清洁效率与降低对网箱的损害。  2.过滤装置采用类鱼鳃设计，可有效隔离海水中的杂质。  3.侧翼的机械臂与网箱修补装置对称安装于主体两侧的前后滑轨上，拓展了机械臂的作业空间，实现机械臂的清洁作用。 |
| 国内外水平对比 | 国内外网箱清理方式主要有：人工清洗、机械清洗、沉箱法、生物清洗法。但是，目前国内比较重视网箱研发，配套技术相对落后，存在网箱清洗困难和检测困难等问题。国外的挪威、智利、日本等国，网箱的配套设备相对先进，具有相对完善的一体化智能管理系统，正在逐步实现生产自动化、智能化。 |
| 应用前景 | 本装置利用空化射流清洗技术，可以快速、高效、安全的对各类水下设施进行清洗，清除表面附着的坚硬海生物。可广泛应用于船体清洗、螺旋桨清洗抛光、平台导管架海生物清除、海岸清洗、浮标码头清洗、养殖网箱清洗等领域。  目前网箱清洁市场需求大，该装置主要运用于集约化、规模化的网箱养殖中，运用空化射流技术与传统清理网箱的方法相比，其具有劳动强度低，清洗速率高，不会对养殖的水产品产生影响的优点，对环境造成的污染小，满足安全环保施工要求以及良好的经济性，同时与政府提倡的“保护海洋环境”政策相符。 |
| 其他 |  |

参赛作品说明

|  |
| --- |
| **作品名称：**  基于空化射流的网箱清理和修补机器人  **背景：**  我国网箱养殖业经历了30多年的发展，从近岸的小型传统养殖网箱到目前的集约化、规模化深海抗风浪网箱，现已发展成为水产养殖的一个新兴产业，在沿海各省具有相当大的规模。我国的海水养殖网箱由于大量集中于港湾内及近岸，水流交换较差，藻类、微生物附着情况比较严重，同时又缺乏安全、有效的网箱网衣防附着措施，而网衣本身又是无毒、多缝隙的，它能够有效的保护附着的生物，而且相对于体积比来说，它的表面积很大，在养殖喂食过程中，养殖的鱼类、海参、鲍鱼、贝类等未曾消化的营养物质在网箱内聚集也会加速污染生物的生长，鱼类的排泄物和残饵的存在，为藻类和细菌、微生物提供了充足的养分，也会加速附着在网箱网衣上的海藻的生长，长时间浸泡在水体中的网具因大量丝状藻类等附着物的迅速繁衍滋生，很快便会堵塞网眼，造成网箱的滤水性能降低，网箱内水体的溶解氧降低、波动大，网箱中的养殖生物因缺氧或滤食不到浮游生物而生长不良进而影响到养殖生物的正常生长速度、饲料效率、成活率和单产。另外，网箱网衣附着物的加剧也会增加网箱的整体重量，使网箱的阻力增加，严重影响到网箱的安全性和使用寿命。因此，解决生物污染是海上养殖网箱的一个重要问题，也是海上养殖企业、个人迫切需要解决的一个关键问题。    **创新点**：  1.采用空化射流技术清洁装置，使水射流束中，产生高密度空化泡，利用大量的空化泡在物体表面局部微小区域溃灭产生的强大微射流冲击力从而达到清理网箱网衣附着物的目的。  2.采用仿生类鱼鳃过滤装置，通过结成网状的“细筛”，用以阻挡海水中的杂质并随水流带出鳃外，起到过滤的作用。  3.侧翼多自由度的机械臂与网箱修补装置对称安装于主体两侧的前后滑轨上，通过摄像头配合工作，实现多角度的网箱修补需求。  **系统设计原理及实施：**  **（1）推进器：**  随着电机技术的不断进步和发展, 大型遥控水下航行器中的液压推进器逐渐被电机推进器所取代。永磁同步电机因具有控制性能好、可靠性高、设备简单、维护方便等优点, 成为水下推进器电机的首选。机器人采用的水下推进器如图所示。其结构由导管、螺旋桨、磁耦合器、永磁同步电机、驱动电路和端盖连接线组成。电机的转子连接磁耦合器的输入轴,由PMSM带动磁耦合联动装置, 磁耦合器的输出轴连接螺旋桨, 从而实现螺旋桨与电机转子的同步转动, 进而达到电力传动的效果。导管能够将桨叶的尾涡转化为导管的附着涡,有效地起到整流作用,增大推力。磁耦合器可以有效隔离海水, 实现水下推进器的静密封。  图 1水下推进器  **（2)机械臂：**  机械臂是机器人执行操作任务的主要部件之一，其主要功能是在与环境进行交互的过程中，能够准确接受指令，并精确地定位到三维（或二维）空间上的某一点进行规范性作业。我们机械臂采用的是碳纤维复合材料。该材料主要具有以下四点优势：  （1）能耗低：碳纤维复合材料的密度仅是钢材的 1/3，比铝合金轻 30% 左右，轻自重意味着机械臂运转过程中需要消耗的能量更少，运行更为轻便快捷。哪怕是能耗比只降低一点点，或者生产效率提升一点点，这在长周期和批量化工作中带来的效果都是巨大的。  （2）强度大：机械臂在实现轻自重的同时，更要保证自身具备足够的负载能力。机械手臂要承受的基本重量包括手臂本身的重量加上其手爪抓取工件的最大重量，碳纤维复合材料的比强度和比模量都比钢高，其抗拉强度一般都在3500 MPa 以上，是钢的 7~9 倍。这种高承载性能赋予了机器人向多元化功能方向发展的可能性。  （3）蠕变小：碳纤维复合材料热膨胀系数微乎其微，蠕变小，能够适应温差较大的工作环境。不仅通过降低自重，减少能耗，成倍地延长了工作周期，而且其在严寒、高温等恶劣气候环境下工作性能稳定，能够精确、快速地完成指令。  （4）耐疲劳:碳纤维复合材料具有良好的耐疲劳性，采用这种先进复合材料制作的零部件使用寿命长，用于维护或者更新的频率低。    图2 修补机械臂与辅助机械爪  **(4)水下摄像照明系统：**  由水下成像系统、摄像舱、紫外线防护装置、探照灯，基座等构成。本系统紫外线杀菌灯从舱外照射玻璃罩，减少了紫外线穿过玻璃罩造成的能量损失，且玻璃罩材料本身无需具有透过２７５ｎｍ 紫外线波段的性能，最终选择透光率可以达到９５％以上的硼硅酸盐作为玻璃罩的材质，玻璃罩与舱体之间采用粘结方式连接成一体。 在水下成像系统内增加辅助光源来保证目标物处的照度是十分必要的。ＬＥＤ灯具有光束集中，使用寿命长，结构紧凑等优点，所以选择ＬＥＤ灯作为该系统的辅助光源。针对海洋生物在设备上附着，将要形成成熟的生物膜体系的现象，该系统采取用紫外线照射的方式，在短时间内照射让海洋生物脱离附着，避免生物膜的继续成熟。  水下摄像照明系统的控制部分主要包括电机、驱动器、编码器、PLC的CPU模块和RS485模块以及I/O 模块等。系统由综合显示平台的上位机页面向放置于水下的设备发出指令，通过光纤路由器向控制舱集中供电、进行控制信号以及视频信号的传输。控制舱则通过水密插头向各舱分配信号，根据上位机发出的信号指令进行相应动作，接受运动状态反馈信息。  **(5)采用北斗卫星导航系统和声纳系统**  该机器人采用的定位装置为北斗卫星导航系统和主动声纳系统，之所以采用是因为北斗系统具有以下特点：  一是北斗系统空间段采用三种轨道卫星组成的混合星座，与其他卫星导航系统相比高轨卫星更多，抗遮挡能力强，尤其低纬度地区性能优势更为明显。二是北斗系统提供多个频点的导航信号，能够通过多频信号组合使用等方式提高服务精度。三是北斗系统创新融合了导航与通信能力，具备定位导航授时、星基增强、地基增强、精密单点定位、短报文通信和国际搜救等多种服务能力。  声纳装置由换能器基阵、发射机、定时中心、接收机、显示器、控制器等几部分组成。启动时，声纳装置发射某种形式的声信号．利用信号在水下传播途中障碍物或目标反射的回波来进行探测。由于目标信息保存在回波之中，所以可根据接收到的回波信号来判断目标的存在，并测量或估计目标的距离、方位、速度等参量。  **(6)空化射流装置：**  空化射流装置由射流管、泵、喷嘴、连接管、加压装置、动力装置、流速传感器，仿生类鱼鳃过滤装置等构成。该装置具有两个泵，每个泵对应一个喷管，进行网箱清洁工作时，首先先吸收海水，经过仿生类鱼鳃过滤装置对海水进行初步过滤，经过加压装置对其进行加压，同时管道处附带有流速传感器，可以根据工作任务需要对流速进行调整，从而达到清理网箱附着物的效果。  5b0988346c5a95e5d1611897562806b      图3 空化射流装置  **喷嘴几何模型**  对喷嘴圆柱段直径进行理论计算，设高压水泵输出压力为 P=20MPa，流量为 90L/min 即空化喷嘴入口压力为 20MPa，由于清洗盘布置了两个喷嘴，则喷嘴流量取 Q = 30 L/min，流量系数 μ 值取 0.6，依据高压水泵与流量最佳匹配，可以近似计算喷嘴圆柱段直径 d: 考虑到高压水泵  出口至喷嘴入口管路沿程压力损失，喷嘴圆柱段直径要减小 0.1 ～ 0.3mm为好，所以喷嘴圆柱段实际直径为d=2.3-0.3=2mm。清洗喷嘴拟采用空化效果较好的角型喷嘴，喷嘴内部结构示意图如图 3所示，收缩角取公认的最佳值 13.5 °，扩散角取为 60 °，圆柱段直径d=2mm，圆柱段、收缩段、扩散段长度分别取为4mm、5mm、喷嘴入口直径 6mm，长2mm。    图4 喷嘴内部结构示意图    图5 喷嘴外部结构示意图   1. **ROV壳体整体：**   ROV的外形采用箱式结构，主要有以下几个特点：   1. 流体阻力小，同等功率下提高其运动性能； 2. 满足刚度和强度的要求： 3. 便于根据实际需求布置设备和仪器； 4. 经济性好，工艺简单，便于加工和安装。   由于ROV是脐带缆供电，不同于AUV的电池供电，故有连续的动力做支撑。相对AUV常见的流线型设计，框架式设计阻力较大。然而从整体布局考虑，虽然牺牲了部分能耗和动力，但极大方便了各设备仪器的安装和固定，包括各类传感器、水下推进器、声纳，机械手等。  浮体材料设计：  浮体材料是ROV中的一个非常重要的组成部分，浮体材料的选取会对ROV整体性能的实现有非常大的影响。浮体材料布置在ROV上方是为了提高ROV的浮心位置，进而增加了稳心高度来提高了ROV的整体稳定性，且要保证ROV整体处为零浮力状态。浮体材料安装在载体框架上安全、简便且容易拆装。由于水下水况复杂，有发生碰撞的可能性，为保证浮体材料免受损坏，从而在浮体材料外表面增加了玻璃钢，起保护作用。  **（8）电缆**  随着海洋资源的日以开发，水下机器人的运用也越多越多,水下机器人的复杂运动需要使用到可扭转或三维高柔性电缆,组要求这些电缆可以拥有和使用于直线拖链系统中相似的使用寿命。芯线，束绞,屏蔽和护套材料必须要能承受弯曲时产生的挤压力以及由扭转运动产生的径向压力的变化。水下机器人电缆使用了高耐磨性能.特制护套材料,可有效保护经过扭转优化的绞合元件不受损坏。电缆结构：导体部分采用多股超细精绞无氧铜丝，符合VDE0295class6标准。绝缘部分采用特殊混合水下机器人电缆绝缘材料。内护套为特殊混合高柔性护套材料。屏蔽部分采用防氧化镀锡铜网编织屏障，编织密度≧85％以上，可有效防止各种信号的干扰。  **整体实施**  主体采用ROV类型，有缆操控，续航能里相对AUV较强。采用箱体式结构，具有良好的可塑性。箱体分为上、中，下三层。上层主脑部分装载有摄像头，中间为缆线接口处。中间层也装载有摄像头，旁边两端为探照灯，进行照明作用。中间层安装有两个主推进螺旋桨和两个辅助推进器，底部安装有两个底部推进器，便于机器人进行前后左右以及上下运动。空化射流装置位于小箱体结构中，箱体与顶部主脑和底部连接，箱体前部嵌有集成传感器装置。箱体两侧为仿生类鱼鳃入水口，可以对海水进行初步过滤。同时装配有侧扫声呐。下层结构安装辅助机械臂及修订机械臂并与滑轨连接可进行多自由度运动，机械臂上安装有摄像头，两个机械爪通过销轴与机械臂连接，可实现开合运动：上爪设置有压钉器和钉道组件，钉道设置有弹簧推钉器和U型修复针，当压钉器压出一个U型修复针至下爪的凹槽并产生形变后，从而将破损区域的两条边缘网线收拢钉紧，完成修复工作。空化射流装置里面设置有两个泵，每个泵负责一个喷管，操作时吸收海水，依次通过仿生类鱼鳃过滤装置，加压装置，同时管道处附带有流速传感器，用来根据实际情况调整喷速。最后空化气泡通过射流管对网箱网衣污垢和附着海生物进行清洁。  ca4aef3588f4d0901641a2a2edec740    图6 基于空化射流的网箱清理和修补机器人的工程图  图7 仿生类鱼鳃过滤装置  **基于六自由度的机械臂动力学建模**  对于n自由度旋转关节串联机器人的动力学方程为：  *H*（*q）+C（q，）+G（q）=τ，*式中*q*∈为关节角向量 ，*H*（*q）*∈为正定对称惯性矩阵，*C（q，）*∈为离心力和哥式力矩阵，*G（q）*∈为重力向量，*τ*∈为力矩控制输入向量。  以上推导的动力学方程中只包含刚体力学上的力，而未考虑摩擦力的影响，在典型工况中关节摩擦力大约相当于机械臂驱动力矩的25%，为了反应真实工况的动力学模型，需要考虑摩擦力的因素，一个合适的摩擦模型不仅能够正确的预测摩擦行为的物理行为，还能起到提高精度作用。目前主要应用的静态摩擦模型是库伦粘滞摩擦模型，利用库伦粘滞摩擦模型获得n自由度机械臂的各关节i（i=1，2，…，n）的摩擦力矩为： 式中：fci为库伦摩擦力矩系数，fvi为粘性摩擦力矩系数。因为库伦粘滞摩擦模型采用了一个连续的函数来逼近Stribeck摩擦模型，且利于控制各关节电机驱动的实现，所以采用该摩擦模型是合适的。因此n连杆串联机械臂的动力学模型表达式如下： 式中：τ *f* ∈*Rn*为库伦粘滞摩擦力矩向量。  **现有理论和技术：**  1.人工清洗法  具体有两种方法:一种是振动清洗法，网箱网目上如果滋生的是悬浮性有机附着物，可在水中直接清洗，操作人员将船划到网箱的一边，提起网衣，用手揉搓抖动，或使用硬质毛刷擦洗，或使用较长的竹条抽打。这种操作工作量大，要求工作细致，防止竹条、毛刷损害网衣，适合个体户小型养殖;另一种方式是结合分箱并箱，把网内的养植物全部倒入另外设置的网箱内,把网衣拿出水面运到岸上堆积起来，等附着的藻类腐烂后摊开曝晒晒干，在岸.上进行抽打、碾压的方式清洗，检查网箱无损后再重新组装，这种方式较上-种清洗彻底，但相对劳动强度更大，对网衣破坏性大。  2.机械清理法  这种方式首先要使用工程船，工程船上安装起吊网箱的吊机，船上同时配备高压清洗机、喷枪、胶管等，将工程船开至网箱附近，抛前后锚进行固定，先用吊机将网箱一侧吊离水面，用高压水枪冲洗网箱上的污物，然后换到另外一-侧，使用同样方式进行清洗。这种方法清洗比较干净，劳动强度降低，但是该方法对网衣上附着的动物较难清除，整套设备移动较困难，不适合大面积集约化的养殖区域。  3.药物清洗法  传统的药物清洗方法是将一定浓度的硝酸铜泼洒在网衣上,以杀死附着的丝状藻，但这种方法施药时对浓度要求极高，浓度小时效果不明显，浓度大时会对网箱内养殖的水产物造成伤害。目前市场也有使用网衣水性防污染涂料，它的作用是阻止水生生物的攀附，这种涂料在一-定程度上可阻止几类水生生物的攀附,但是无法百分之百的阻止所有生物的攀附，存在较多的缺陷，另外该种涂料作用时间受限，极大的增加了水产养殖的成本。   1. 空化射流水下清洗技术   空化是由于液流系统的局部低压(低于相应温度下该液体的饱和蒸气压)使液体蒸发而形成的空化泡(即气核，半径一般在20 μm以下)爆发性生长的描述。假设收缩段上下游压力分别为P1和P2，收缩段压力为Pc，水流速度为Vc，当Pc降至当地的水饱和蒸汽压力Pv，即Pc≤Pv 时，在收缩段内局部低压区将产生空化，空化泡在收缩截面的边界层内孕育并形成，在低压区内获得成长。可见，空化的实质即是流体在动力和热力的联合作用下，液体介质局部的液～气相变过程。  图8 收缩扩张管空化泡形成过程  空化数是用于判断空化是否发生的无量纲临界参数。压力和流速是空化发生的主要影响因素，在高围压的淹没空化射流下，如空化射流在水下的清洗作业，空化数的计算式可以简化表示为下游压力与喷嘴总压差的商：σ＝P2/(P1－P2)。当σ≤1时，可以产生空化作用；当σ≤0.5 时，可以产生稳定的空化射流。  当水在高速流动中局部绝对压力降至当地温度下的饱和蒸汽压时，溶解在水中的空气释放出来，形成许多微小的空化泡，空化泡溃灭引起强大的微射流冲击。空化射流就是人为地使水射流束中产生高密度空化泡，利用大量的空化泡在物体表面局部微小区域溃灭产生的强大微射流冲击力而达到清洗设施的坚硬污垢和附着海生物的目的。    图9 空化泡破裂过程    图 10空化射流原理  空化射流水下清洗技术，就是将空化作用引入水射流清洗技术中而形成的新型水下设施清洗技术，即人为地使水射流束中产生高密度空化泡，利用大量的空化泡在物体表面局部微小区域溃灭产生的强大微射流冲击力而达到清洗设施的坚硬污垢和附着海生物的目的。该技术不但具有高效、节能、环保、安全等优点，而且不伤害设施母材，极少或者完全不伤害原有的防腐层，可对船舶螺旋桨等设备薄片区域进行合理有效地清洗。  **应用前景**：  一，海洋石油结构物清洗  我国大型海洋结构物主要以桩腿式采油平台为主，预计未来半潜式采油平台将逐步增多。为保障平台和人员、设施安全，需要对其在一定的周期内进行有效清洗。随着海洋石油业的迅猛发展，大型海洋结构物越来越多，清洗任务迅速增加，高效、安全的空化射流清洗技术将成为一种必然的需要。  二，海底石油设施清洗  海洋石油工程包含大量诸如水下采油系统的海底石油设施，在复杂的海洋环境中对其进行合理有效的清洗困难重重。通过潜水员或者ROV携带清洗设备实施清洗作业是目前仅有的行之有效的方法。开发模块化、自动化的空化射流清洗设备可有效地解决水下设施的清洗难题。  三，船舶清洗  FPSO、船舶等在海洋环境中长时间运行，在吃水线以下船 体外壳表面将形成相当厚的海生物附着层和污垢层。船舶常年运行其外壳表面不可避免地生成大面积锈蚀，  在此基础上，藻类、贝壳等海生物的附着会形成紧密而坚硬的污垢层，如果长期得不到有效清洗，可形成厚达200mm的海生物附着层和污垢层，严重影响船舶的航行速度，增加燃料消耗成本，缩短船舶的使用寿命。在船舶清洗行业，空化射流清洗技术无疑拥有广阔的发展空间。  四，海岸工程清洗  在常见的海岸工程中，海洋生物污垢和淤泥等地长期积累直接影响港口、航道等正常运行；海洋生物的长期侵蚀对桥梁、防潮提等也有严重的不利影响，直接影响这些设施的坚固程度和使用寿命等。因此，对海岸工程进行清洗意义重大，空化射流清洗技术亦有广阔的应用空间。  五，完美搭载水下机器人进行水下清洗业务  利用空化射流清洗技术，可以快速、高效、安全的对各类水下设施进行清洗，清除表面附着的坚硬海生物。广泛应用于船体清洗、螺旋桨清洗抛光、平台导管架海生物清除、海岸清洗、浮标码头清洗、养殖网箱清洗等。  目前网箱清洁市场需求大，该装置主要运用于集约化、规模化的网箱养殖中，运用空化射流技术与传统清理网箱的方法相比，其具有劳动强度低，清洗速率高，不会对养殖的水产品产生影响，对环境造成的污染小，满足安全环保施工要求以及良好的经济性，同时与政府提倡的“保护海洋环境”政策相符。  **对后续工作意见建议：**   1. 制造成本的可控性   通过改变航行器所搭载的非必要模块以及功能模块的材质，降低航行器的制造成本，提升航行器的在民用领域的泛用性。   1. 工作环境的兼容性   通过改变航行器搭载的功能模块，使得航行器的功能更加全面，实现在不同的作业环境下的作业。  **参考文献：**  [1]林德芳 ,关长涛 ,黄文强.海水网箱养殖工程技术发展现状与展望[J].渔业现代化,2002(04):6-9  [2]王汉玉.水产养殖自身污染及其防治的探讨[J].农民致富之友,2018(16):242..  [3]宋协法. 网箱养殖配套设备的设计与试验研究[D].中国海洋大学,2006.  [4]申强龙. 有缆水下机器人结构设计与分析[D].杭州电子科技大学,2017.  [5]吴文祥,朱世强,靳兴来.基于改进傅里叶级数的机器人动力学参数辨识[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(02):231-237.  [6] 杨鹏,王晓周,王婕,张高巍.基于非线性干扰观测器的机械臂终端滑模控制[J].郑州大学学报(理学版),2019,51(01):78-83.  [7]管金发,邓松圣,郭广东,华卫星.空化射流角型喷嘴内流场的数值模拟[J].机床与液压,2012,40(23):46-50.  [8]陈光明,黄旋.基于高压水射流的船体清洗机器人关键技术分析[J].流体机械,2019,47(09):56-62.  [9]夏宝莹,刘望,郑金豹,黄皓,崔健.空化射流清洗技术及其在水下设施清洗中的应用[J].油气储运,2011,30(10):729-731+713. |