DOI: 10.3901/JME.2020.13.103

小型球形水底观测机器人设计分析与实现*

李艳生¹ 孙汉旭²

(1. 重庆邮电大学先进制造工程学院 重庆 400065;

2. 北京邮电大学自动化学院 北京 100876)

摘要: 面向水底信息获取和环境观测需求, 基于球状壳体抵抗水压能力强, 转动水阻力小, 便于姿态控制特点, 提出球形水底观测机器人构型, 由螺旋桨推进、姿态调节和复合滚动装置组成欠驱动六自由度水下移动平台, 球壳作为密闭舱保护内部电子器件, 结合重摆以滚动形式实现水底滚动。通过对机器人流体力学仿真计算出水动力系数并建立水下动力学方程, 进一步对机器人的螺旋桨推进、飞轮转向和球壳滚动进行分析, 得出球壳优化尺寸以及飞轮匹配惯量和球壳滚动特性。基于球形机器人水下移动平台和地面监控软件的水底观测系统架构, 研制出球形水底观测机器人原理样机, 结合机器人的构型和运动特点制定出降落、滚动和调姿三段式水底运动观测策略, 水池试验表明设计的球形水底观测机器人水中推进速度可达到 1.4 m/s, 水底移动速度可达到 0.5 m/s, 姿态调节速度可达到 30°/s, 能够实现水底图像采集, 辅助岸上科研人员执行水底观测任务。

关键词: 水下机器人; 球形机器人; 运动特性; 水底观测; 图像采集

中图分类号: TH113

Design and Development of Small Spherical Underwater Observation Robot

LI Yansheng¹ SUN Hanxu²

(1. School of Advanced Manufacturing Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065;

2. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: According to the demand of underwater information acquisition and environmental observation, a spherical underwater robot is proposed based on compression, rotational resistance and attitude control. A propeller, attitude adjusting and composite rolling device form an under-actuated and six-degree-of-freedom underwater mobile platform. Spherical shell can protect the internal electronics and achieve underwater rolling with heavy pendulums. The hydrodynamic coefficients are obtained by simulating and calculating, and the dynamic equation is established. Furthermore, propulsion, steering and rolling are analyzed, and optimal dimensions, flywheel inertia and rolling characteristics are obtained. The system architecture is integrated based on the robot and software interface, and the robot prototype is developed. According to the robot characteristics, a three-stage observation strategy of landing, rolling and posture adjustment is developed. The pool experiment shows that the designed spherical robot can reach a propulsion speed of 1.4 m/s, a rolling speed of 0.5 m/s, and an attitude adjusting speed of 30°/s. The image was taken at the bottom of the water, which can assist researchers to perform underwater observation tasks.

Key words: underwater robot; spherical robot; motion characteristics; underwater observation; image acquisition

0 前言

地表大部分被水所覆盖, 水下具有比陆地更丰富的生物、矿产和空间等资源, 获取这些资源的信

息对内陆湖泊或海洋的开发和利用尤为重要。一般可采用固定式传感器定点观测, 但对大面积水域观测需要传感器数量较多, 维护困难。也可采用移动式传感器, 利用水面船拖曳传感器进行水下移动观测, 但传感器深度受拖曳力限制而不能靠近水底运动, 因此对水底的观测能力不足^[1]。水下机器人可以作为水中移动平台, 搭载各种传感器进行水下观测, 具有活动范围大和灵活性高的特点, 给观测人员带来了极大便利^[2-3]。

* 国家自然科学基金(61803058, 51175048)和重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0385)资助项目。20190902 收到初稿, 20200307 收到修改稿

目前,具有流线型外形结构的滑翔类机器人因在水中航行快速和节能而被广泛用于水下观测^[4-5]。天津大学研制出融合浮力驱动技术的“海燕”系列滑翔机,中科院沈阳自动化所研发波浪滑翔机可作为多功能海洋观测平台^[6-7]。美国斯克里普斯海洋研究所研发 SOLO-TREC 机器人,在水下观测时还可吸收海水热能给所携带仪器设备供电^[8],但这些机器人的运动范围仅限于水面和水中,无法靠近水底观测。

在探测领域球形机器人以其独有的特性被广泛研究,球形水下机器人具有抗压性好,转动阻力小,姿态调节灵活的特点,比较适合对水下狭小空间进行观测^[9-11]。CHOI 等^[12]对悬挂多个螺旋桨的球形水下机器人进行了研究,SIMON 等^[13]研制出 MK 系列小型球形水下机器人,LIN 等^[14]研制出一款配置喷水推进器的球形水下机器人,这种配置多推进器的球形机器人具有很大的灵活性。孙汉旭等^[15]研制出仅配有一个推进器的 BYSQ-2 球形水下机器人,内部电动机驱动重摆装置来调节俯仰姿态。李艳生等^[16-17]搭建球形机器人虚拟环境,对水底滚动进行分析。

为了满足对水底进行观测的需求,在保证机器人安全性和运动灵活性的前提下,设计具有水中推进和水底滚动运动能力的水底观测机器人十分必要。本文首先根据水下观测任务要求,提出新机器人的总体构型,仅配置一个推进器,同时具有快速调节航向的能力。然后分别对水中推进能力、水中转向能力和水底滚动能力进行设计分析,并结合水底观测任务进行系统集成,提出降落、滚动和调姿的三段式观测策略。最后对这种水底观测机器人进行水下运动试验,结果表明可以作为水下移动平台执行水底观测任务。

1 机器人构型

水下机器人的构型设计要兼顾运动速度、转向灵活性、能源利用率和水底适应性等各方面性能,所以要结合具体任务需求和使用环境来制定方案。为了提供一个可搭载传感器并能执行水底观测任务的移动平台,机器人设计要满足观测性能,因此在设计水底观测机器人构型主要注重以下几点要求。

(1) 防止内部电子元件不被侵蚀,要求机器人壳体可封闭且抗压能力强。

(2) 能够到离岸水域执行观测任务,要求机器人可以水中运动。

(3) 能够近距离拍摄到水底图像,要求机器人

可以降落到水底。

(4) 能有效利用携带能量和长期观测,要求机器人不启动螺旋桨也可在水底移动。

(5) 能适应复杂水底环境,设计机器人结构时要考虑姿态的灵活控制且转向半径小。

主流的水下机器人的外形有腔体式和框架式两种结构,由于框架式结构很难保护内部电子器件且需要装载浮力材料,所以本文设计的水底观测机器人外形结构方案选择封闭的形式。类似于滑翔机的水下机器人,其形体对减小阻力有利,但生成转向力矩需要操舵且对运动速度和转向半径有要求,水底观测机器人不宜采用,因此采用正球形的封闭腔体式结构。球形外壳使转向水阻力系数几乎为零、低速下转向容易实现,并且在水底不易卡住,适合水底狭小空间。另外球体具有中心对称性,可以携带更多能源和传感器设备,同时球形外壳也可通过滚动使机器人达到水底移动和水底观测目的。

机器人水中驱动装置最常用的是螺旋桨,可在壳体外部安装多个螺旋桨来增大前进动力,同时控制螺旋桨的推力方向能够可产生转向力矩,因此通过简单矢量控制可实现机器人水下六自由度运动,但是传统螺旋桨大部分工作区间的推进效率较低,能耗较高,需要定时返回补充携带能源。本文的水底观测机器人要保证转向灵活性和能量利用率,采用单螺旋桨推进,水底观测机器人的总体构型如图 1 所示。

图 1 机器人构型图

图 1 所示机器人构型中,螺旋桨安装在导管内部,与安装在壳体外部不同,这种方案使机器人总体结构相对紧凑且保护好,可防止螺旋桨暴露在有坚硬岩石和带状缠绕物的水底。针对这种球状外壳方案,采用球形机器人常用的重摆机构生成重力矩来进行水中俯仰姿态驱动,采用航天飞行器常用的惯性飞轮生成转动力矩来进行航向姿态驱动。重摆和飞轮机构在机器人内部电动机驱动下可在球壳内摆动或转动,结合正球形的外壳具有转向阻力小的特点,可保证机器人的姿态调节灵活,低速运动时姿态的可控性和灵活性也不会受到限制。姿态调

节没有使用螺旋桨可增强自身携带能源利用率。在电动机驱动下通过重摆与球壳的相对转动来实现机器人在水底滚动, 这种多功能复合机构设计可以简化机器人主体结构复杂度。机器人构型上采用球状外形, 并且中心导管螺旋桨轴线、飞轮旋转轴线和重摆摆动轴线垂直布置, 其一维平动时飞轮和重摆的驱动力矩可保持航向角和俯仰角不变, 在螺旋桨推力作用下实现一维平动, 当飞轮和重摆驱动力矩按预定值驱动改变航向角和俯仰角, 配合导管螺旋桨推力实现机器人二维转动。机器人在水中悬停或匀速航行时机器人重摆使重心低于浮心可以提高静态稳定性, 同时伺服控制内置飞轮和重摆驱动力矩来增强动态稳定性。综上所述, 这种球形机器人可满足前文提到的执行水底观测任务要求。

2 流体力学计算

机器人流体力学仿真计算时需要确定流场的初值, 将其代入方程并不断迭代, 最后求出最终的流场状态值, 选用 Fluent 软件对机器人模型进行流体力学仿真, 仿真结果如图 2 所示。

图 2 流体仿真结果图

在图 2a 的模型图中, 根据机器人外形特征初步将机器人简化成螺旋桨和壳体组合的模型, 壳体直径 0.4 m, 导管直径 0.1 m, 绘制三维模型并设置 Fluent 仿真外部域流体速度为 0.5 m/s, 内部旋转流体域为 500 r/min。图 2b 是流速图, 可以看出球壳边缘流速较大, 导管内流速较小, 在螺旋桨附近出现流速极值点。图 2c 是壳体和螺旋桨的水压大小分布图, 分析可知环状压强的存在表明壳体运动受到水的阻力作用, 对比螺旋桨前后压强可知有推力产生。因此, 图 2 仿真结果表明只要螺旋桨推力大于

球壳阻力, 机器人就会在水中向前运动。

机器人的流体力学仿真完成阻力系数和附加质量系数计算, 水底观测机器人采用球状外壳, 球体具有中心对称性, 各向水动力系数基本一致, 转动水动力系数很小, C_D 是与形状有关的绕流阻力系数, R 表示球体半径, v 表示球体相对流体的速度, ρ 表示流体的密度, 球体水阻力 F_D 计算公式可用如下函数关系表示

$$F_D = C_D \rho \frac{v^2}{2} \pi R^2 \quad (1)$$

球形机器人绕流阻力系数 C_D 也可以通过流体力学有限元仿真来确定, 仿真时将机器人模型固定在水中, 设置周围流体的速度, 根据相对运动原理可计算出来机器人水阻力。采用 k -epsilon 模型计算, 球壳半径尺寸设置为 0.2 m, 提供稳定流场的圆柱形流体域为直径设为 4 m, 而内部球体不受流体域边界影响。同时设置入口流速为 0.4 m/s, 出口自由流动, 采用软件自适应方法进行网格划分, 在迭代求解过程中球形机器人绕流阻力系数变化如图 3 所示, 经过迭代解算后基本稳定在 0.42 左右。

图 3 绕流阻力系数迭代曲线

求取水阻力系数后, 运动分析还需进行附加质量系数仿真计算, 不同于前面的稳定场设定, 附加质量系数与机器人加速度有关, 所以需要 UDF 编程, 利用非稳态动网格技术计算。参数设置机器人以 0.5 m/s 匀速运动, 迭代解算使其收敛, 在 0.5 s 时刻加速度变为 0.2 m/s² 来驱动, 仿真阻力曲线会发生明显变化, 附加质量系数值根据变化程度来计算, 绕流阻力系数变化仿真结果如图 4 所示。当机器人以加速度 0.2 m/s² 突然加速运动, 从阻力系数跳变的过程, 可以看出阻力系数变化 0.25 左右, 通过下式(2)中阻力变化值除以加速度值可计算出附加质量系数值约为 31。

$$m_a = \frac{\Delta F_D}{a} = \frac{\Delta C_D \rho v^2 \pi R^2}{2a} \quad (2)$$

式中, a 为机器人的加速度。

图4 绕流阻力系数变化曲线

3 建模与分析

3.1 运动模型描述

机器人在水中运动速度可表示为 $[u \ v \ w \ p \ q \ r]$, 其六个自由运动不仅受本体质量 m 和转动惯量 $[I_x \ I_y \ I_z]$ 参数影响, 还与外部力 $F=[X \ Y \ Z \ K \ M \ N]$ 有关, 机器人本体坐标系定义将球壳球心位置作为原点, 将螺旋桨转动轴线方向作为 x 轴, 将重摆摆动轴线方向作为 y 轴, 将飞轮旋转轴线作为 z 轴。动力学方程建立要结合球形结构特点进行简化^[18], 当重心在球心处时动力学方程可简化成下式来表达

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr + wq) = X \\ m(\dot{v} - wp + ur) = Y \\ m(\dot{w} - uq + vp) = Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr = K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp = M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq = N \end{cases} \quad (3)$$

机器人水中运动受到的外部力 F 主要包括驱动力项和水动力, 即如下关系式成立

$$\mathbf{F} = \mathbf{M}_A \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

根据机器人驱动机构设计, 驱动力项为

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

球形水底观测机器人采用螺旋桨、飞轮和重摆驱动方案, 因此螺旋桨的前进推力 T 位于 x 轴, 重摆的俯仰力矩 τ_1 位于 y 轴, 飞轮的偏航驱动力矩 τ_2 位于 z 轴。球体外形结构方案具有对称性优势, 使得转动惯量和水动力各向参数基本一致, 其中水动力项附加质量项可简化为

$$\mathbf{M}_A = \begin{pmatrix} X_{\ddot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\ddot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\ddot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\ddot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\ddot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\ddot{r}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

根据简化的球体模型, 假设机器人平动附加质量 $X_{\ddot{u}} = Y_{\ddot{v}} = Z_{\ddot{w}} = m_\lambda$, 而球体的转动附加质量 $K_{\ddot{p}} = M_{\ddot{q}} = N_{\ddot{r}} = 0$ 。代入得哥氏力项为

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{v}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & 0 & 0 \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & 0 & 0 & 0 \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

舍去高阶小量的阻尼力项为

$$\mathbf{D}_2(\mathbf{v}) = \begin{pmatrix} X_u u^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v v^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w w^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p p^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q q^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r r^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

3.2 球壳尺寸设计

机器人尺寸设计要满足观测速度要求, 要考虑中心导管直径对机器人模型阻力系数的影响。机器人阻力与球体直径的关系可由阻力公式得出, 假设机器人要以 1 m/s 最大速度运动, 螺旋桨需要提供足够大的推力, 临界条件就是推力和阻力相等, K_T 为推力系数, D_l 为导管直径, D_q 为球壳直径, n 为螺旋桨转速, 由螺旋桨推力公式进一步得到直径函数关系式

$$D_q = \sqrt{\frac{K_T n^2 D_l^4}{0.056\pi} + D_l^2} \quad (9)$$

厂家提供了一种可产生 80 N 推力的螺旋桨推进器, 保持推力系数恒定要求螺旋桨结构其他参数不变, 仅将螺旋桨的直径作为变量, 在已知速度和螺旋桨最大推力条件下, 得出机器人直径与螺旋桨直径的尺寸关系曲线如图5所示。已知该种推进器的直径约为 0.1 m , 选用该种螺旋桨达到期望速度 1 m/s 时机器人的球体直径最可做到 0.75 m 。根据执行水底观测任务时满足机器人设计的要求, 考虑减小机器人尺寸来增加可靠性, 增大机器人运动速度, 经优化确定球壳直径可选为 0.4 m 。

图5 直径尺寸关系图

3.3 飞轮惯量匹配

机器人通过飞轮机构来进行转向和保持航向不变, 电动机要能够输出大力矩和高转速来驱动飞轮转动, 机器人获取电动机反作用力矩来调节航向角。飞轮与机器人的转动惯量比要满足转向灵活性的要求。机器人的球壳外表面与流体作用产生与旋转有关的外部水动力数值很小, 因此带有飞轮装置的整个机器人系统水中转向时角动量变化缓慢, 电动机输出力矩为 M , 飞轮和机器人的转动惯量为 J_1 和 J_2 , 飞轮的转角和转速为 φ_1 和 ω_1 , 机器人的转角和转速为 φ_2 和 ω_2 分, 机器人转动流体力速度系数和加速度系数为 k_1 和 k_2 , 机器人水平面内转动的简化动力学数学模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \omega_1 \\ \dot{\omega}_1 = \frac{M}{J_1} \\ \dot{\varphi}_2 = \omega_2 \\ \dot{\omega}_2 = -\frac{k_1 \omega_2}{J_2 - J_1 + k_2} + \frac{M}{J_2 - J_1 + k_2} \end{cases} \quad (10)$$

设置机器人的转动惯量为 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 飞轮转动惯量 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 水中转动速度系数和加速度系数为 0.1 和 0.01 , 在 Matlab 中通过优化 PID 参数可得机器人转向曲线如图 6 所示。可以看出电动机力矩输出平稳, 机器人在 7 s 内基本完成了 180° 的航向调整。多次调整飞轮惯量进行仿真, 可得出飞轮与机器人转动惯量比增大可以增加机器人的转向

图6 飞轮转向曲线图

机动性, 但是要受机器人体积制约, 转动惯量比在 0.05 和 0.1 之间性能优异。

3.4 水底滚动特性

根据上文提出的水底滚动的复合机构方案, 不需要再另外单独设计水底移动机构, 仅利用已有的重摆和球壳, 在滚动电动机的驱动下就可实现水底滚动。机器人与水底产生摩擦力 f , 移动速度 v 的驱动力由摩擦力提供, 水阻力为 F_D , 滚动电动机输出的动力矩 M , 驱动球壳相对于重摆转动。在不考虑球壳滑动的条件下建立机器人水底运动方程, C_D 表示水阻力系数, R 表示机器人球壳半径, J 表示球壳转动惯量, ρ 表示水的密度, λ 表示附加水动力质量系数, 水底滚动数学模型可简化表示为

$$\begin{cases} (m + \lambda)\dot{v} + C_D \rho \frac{v^2}{2} \pi R^2 = f \\ M - fR = J \frac{\dot{v}}{R} \end{cases} \quad (11)$$

在 ADAMS 中搭建的虚拟仿真模型, 搭建水底平板、球状壳体 and 重摆三个刚体模块, 重摆可与球壳相对转动, 设置成转动副并添加电动机驱动, 并添加接触副和摩擦力在水底。根据水动力仿真结果添加水阻力速度系数和加速度附加质量系数。机器人总质量 $m=40 \text{ kg}$, 滚动电动机转速 $\omega=\pi \text{ rad/s}$, 机器人水底滚动位移结果如图 7 所示。

图7 机器人水底滚动曲线图

4 观测策略与系统试验

水下机器人通常采用蛇形路径反复扫描的方式进行观测, 随着机器人在水中不断运动来获取机器人路径下方覆盖的水底信息, 但有时为了获取近距离的水底图像信息或需要机器人细致观察某处, 这种观测策略不能关闭螺旋桨来节省能量。因此为了满足水底观测需求, 结合球形机器人特点制定出如图 8 所示的降落、滚动和调姿的三段式水底观测策略。这种观测策略充分利用机器人水中垂向运动和水底滚动能力, 可以贴近水底观测, 同时水底移动时无需启用螺旋桨, 节省能源消耗, 有助于长时间对水底进行持续观测。

图8 观测策略示意图

本文设计的水底观测系统主要由水下球形机器人系统和地面监控软件组成,球形机器人作为移动平台搭载摄像机拍摄水底图像,而监控测软件用来发布岸上人员控制命令和获取观测图像结果。机器人配置有陀螺仪、编码器、深度计、超声波测距和位置声纳等运动控制用的传感器,也配置专用水下摄像头来进行水下图像采集。研制出的机器人物理样机如图9所示,其中图9a为球壳机械加工,图9b为机器人装配本体。

图9 机器人样机

为了验证新系统运行性能,通常需要对样机进行试验测试和数据分析^[19]。因此,应用研制的球形水底观测机器人系统执行水底观测任务试验。通过搭载不同的重摆配重块,根据提出的三段式控制策略,控制对水底周围环境进行拍摄,试验如图10所示,表明所设计的球形水底观测机器人具有水底观测能力。

对机器人水下运动性能进行试验测试,记录五次试验数据求取平均值来排除随机性,试验数据如表1所示。在推进试验中,螺旋桨输出最大推力,控制机器人匀速在2.1 s内通过3 m的路径,表明新机器人最大推进速度可达到1.4 m/s,比文献[18]中BYSQ-2机器人推进速度大。对机器人水中姿态控制试验中,陀螺仪回传数据统计可以得出机器人在6 s内完成了水平180°转向动作,2 s内完成60°俯仰角控制,证明了机器人具有灵活的姿态控制能力。控制机器人滚动电动机的转速,最短时间为5.9 s通过3 m的路径,表明最大水底移动速度可达到0.5 m/s,同时还发现在低速滚动时移动速度与机器人质量和滚动电动机转速正相关。

图10 水底观测试验图像

表1 试验数据(s)

记录时间	一	二	三	四	五	平均值
水中推进	2.1	2.0	2.2	2.3	2.1	2.1
水中转向	5.8	5.7	6.1	5.9	6.1	5.9
水中俯仰	2.1	1.8	1.9	2.0	1.8	1.9
水底滚动	6.1	6.2	5.7	5.9	5.8	5.9

5 结论

(1) 依据设计原则提出一种球形水底观测机器人总体构型,外壳采用球状腔体结构,中心配有导管螺旋桨,内部配有姿态调节和滚动复合机构,并通过Fluent软件流体仿真获取水动力系数。

(2) 结合对称结构进行化简,建立球形机器人水下运动模型,针对水底观测性能要求,对机器人水中推进、转向和水底滚动性能进行分析,得出壳体尺寸、匹配惯量和水底滚动特性。

(3) 结合机器人结构和运动特点提出降落、滚动和调姿的三段式水底观测策略,观测试验和运动性能试验结果表明设计的水底观测机器人水中推进速度可达到1.4 m/s,水底移动速度可达到0.5 m/s,姿态调节速度可达到30°/s,可实现水底图像的采集和回传。

参 考 文 献

- [1] LIU Shaojun, HU Jianhua, ZHANG Ruiqiang, et al. Development of mining technology and equipment for seafloor massive sulfide deposits[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(5): 10-17.
- [2] WANG Shuxin, SUN Xiujun, WANG Yanhui. Dynamic modeling and motion simulation for a winged hybrid-driven underwater glider[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(1): 97-112.
- [3] MEINIG C, LAWRENCE-SLAVAS N, JENKINS R, et al. The use of saildrones to examine spring conditions in the Bering Sea: Vehicle specification and mission performance[C]// Oceans. Washington: IEEE, 2016: 1-7.
- [4] TOWNSEND N C. Self-powered autonomous underwater

- vehicles: Results from a gyroscopic energy scavenging prototype[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(8): 1078-1086.
- [5] YU Zhenjiang, ZHENG Zhongqiang, YANG Xiaoguang, et al. Dynamic analysis of propulsion mechanism directly driven by wave energy for marine mobile buoy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(4): 710-715.
- [6] 田宝强, 俞建成, 张艾群, 等. 波浪驱动无人水面机器人运动效率分析[J]. 机器人, 2014, 36(1): 43-48, 68. TIAN Baoqiang, YU Jiancheng, ZHANG Aiqun, et al. Analysis on movement efficiency for wave driven unmanned surface vehicle[J]. Robot, 2014, 36(1): 43-48, 68.
- [7] 牛文栋, 王延辉, 杨艳鹏, 等. 混合驱动水下滑翔机水动力参数辨识[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 813-822. NIU Wendong, WANG Yanhui, YANG Yanpeng, et al. Hydrodynamic parameter identification of hybrid-driven underwater glider[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechani, 2016, 48(4): 813-822.
- [8] CHAO Yi. Autonomous underwater vehicles and sensors powered by ocean thermal energy[C]// Conference on Oceans. Shanghai: IEEE, 2016: 1-4.
- [9] 战强, 李伟. 球形移动机器人的研究进展与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 1-17. ZHAN Qiang, LI Wei. Research progress and development trend of spherical mobile robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 1-17.
- [10] 张胜, 方向, 赵志成, 等. 基于反馈线性化的软壳体球形机器人纵向运动控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 43-50. ZHANG Sheng, FANG Xiang, ZHAO Zhicheng, et al. Longitudinal motion controlling for a spherical rolling robot with soft shell based on feedback linearization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 43-50.
- [11] 李勋, 王亚彪, 黄荣辉, 等. 油浸式变压器内部检测机器人结构设计与分析[J]. 机械工程师, 2017(3): 35-38. LI Xun, WANG Yahu, HUANG Ronghui, et al. Structure design and analysis of oil-immersed transformer internal inspection robot[J]. Mechanical Engineer, 2017(3): 35-38.
- [12] CHOI H T, HANAI A, CHOI S K. Development of an underwater robot, ODIN-III[C]// IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas: IEEE, 2003: 836-841.
- [13] SIMON A W, DOMINIC J P C, PETER N G. The design and technical challenges of a micro-autonomous underwater vehicle (μ AUV)[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing: IEEE, 2011: 567-572.
- [14] LIN Xichuan, GUO Shuxiang. Development of a spherical underwater robot equipped with multiple vectored water-jet-based thrusters[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, 67(3): 307-321.
- [15] 兰晓娟, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 水下球形机器人 BYSQ-2 型的结构设计与优化[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(4): 11-14, 23. LAN Xiaojuan, SUN Hanxu, JIA Qingxuan, et al. Design and optimization of a spherical underwater vehicle BYSQ-2's structure[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(4): 11-14, 23.
- [16] 李艳生, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 一种摆式球形水下机器人水底滚动特性分析[J]. 中南大学学报, 2016, 47(11): 3664-3669. LI Yansheng, SUN Hanxu, JIA Qingxuan, et al. Analysis of rolling characteristics at water bottom for spherical robot with heavy pendulums[J]. Journal of Central South University, 2016, 47(11): 3664-3669.
- [17] 李艳生, 杨美美, 孙汉旭, 等. 一种摆式球形机器人水中俯仰运动的稳定控制方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 149-154, 189. LI Yansheng, YANG Meimei, SUN Hanxu, et al. A stability control method for pitching motion in water of a pendulum type spherical robot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 149-154, 189.
- [18] 兰晓娟, 孙汉旭, 贾庆轩. 水下球形机器人 BYSQ_2 的原理与动力学分析[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 20-23. LAN Xiaojuan, SUN Hanxu, JIA Qingxuan. Principle and dynamic analysis of a new-type spherical underwater vehicle[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(3): 20-23.
- [19] 李艳生, 杨美美, 芦娜, 等. 同心连接器的力学性能测试技术和系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 328-335. LI Yansheng, YANG Meimei, LU Na, et al. Research on testing technology and system of mechanical properties for a concentric connector[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 328-335.

作者简介: 李艳生(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为特种机器人、移动机器人。

E-mail: liyansheng@cqupt.edu.cn

孙汉旭, 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种机器人、空间机械臂。

E-mail: hxsun@bupt.edu.cn