

一种水下足式机器人的设计方案研究

李芳野¹, 陈锴迪¹, 高飞¹, 张海波¹, 余丽佳¹, 许晖², 徐昕¹

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 2. 西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 海洋蕴含着丰富的自然资源, 对海洋资源的合理开发与运用可以极大地缓解能源短缺问题, 但由于海洋的复杂环境所带来的资源开发难度也不容忽略; 针对这系列问题, 对一种新型水下航行器进行研究, 开展了水下足式机器人的总体设计分析, 并通过三维建模对机器人进行结构设计; 利用 ANSYS 对机器人关键运动部件进行应力分析, 对机器人的设计进行完善; 利用 FLUENT 软件进行流体模拟仿真, 计算得到机器人腿部在水下运动时的受力特性; 使用 Adams 软件对机器人的运动进行动力学仿真, 计算机器人腿部扭矩输出特性; 结合仿真结果对机器人的硬件系统进行选型, 完成水下足式机器人的总体设计。

关键词: 海洋自然资源; 水下足式机器人; 流体仿真分析; 动力学仿真; 总体设计

Research on the Design Scheme of an Underwater Legged Robot

LI Fangye¹, CHEN Kaidi¹, GAO Fei¹, ZHANG Haibo¹, SHE Lijia¹, XU Hui², XU Xin¹

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The ocean contains abundant natural resources, the rational development and utilization of marine resources can greatly alleviate energy shortage, but resource exploitation cannot be ignored due to the complex environment of the ocean; In response to this problem, a new underwater vehicle is studied, the overall design and analysis of the underwater legged robot are carried out, and the structure analysis of the robot is accomplished through three-dimensional modeling; The stress analysis of key moving components of the robot is completed by ANSYS software, and the design of the robot is improved; FLUENT software is used to perform the fluid simulation and calculate the torque output characteristics of the robot legs; Combined with the simulation results, the hardware system of the robot is selected to complete the overall design of the underwater legged robot.

Keywords: marine resource; underwater legged robot; fluid simulation analysis; dynamic simulation; overall design

0 引言

随着人类社会的不断发展, 人类对自然资源的需求不断增加, 在近几百年的发展过程中, 陆地不可再生资源已逐渐走向枯竭。然而, 人类发现海洋资源极其丰富, 海洋底部除了用于数量庞大的石油、天然气、煤矿等资源外, 甚至还储藏有大量的可燃冰^[1]。因此, 合理开发利用海洋资源, 将极大地缓解人类目前所面临的能源短缺问题。

由于受到海洋纵深、海洋环境和海洋地理纬度的影响, 人类直接对海洋的探索和综合观测的能力受到极大的限制。国外海洋学家提出了无人自主遥感平台的概念, 使其成为探索与开发海洋自然资源的重要工具^[2]。科学技术经历了一个多世纪的发展, 涌现了众多类型的水下机器人。水下机器人的蓬勃发展, 一方面克服了由于人类生理因素造成的对浩瀚海洋的恐惧, 另一方面为探测与开发海洋自然资源带来了极大的便利。

但是由于海底流体情况相对复杂, 一般会给常规水下航行器的运动控制带来巨大的挑战^[3]。因此通常要求航行

器控制系统具有良好的鲁棒性, 一方面航行器需要克服水下乱流对机器人本体运动的影响, 另一方面有些作业机器人还需要克服机械臂工作时对机身相对静止姿态的影响。因此, 为更好地实现对海底资源的探测与开发, 突破复杂地理环境对机器人运动的限制, 混合型水下机器人将成为更优的选择。

目前常见的混合型水下机器人一般以无人潜水器 (ROV, remote operated vehicle) 为载体, 并搭载履带以实现水底地面的通过性。科学界对传统的 ROV 和履带式水下机器人的研究已经足够深入, 并且这种机器人的实际应用已经足够成熟。因此出于科学研究的目的, 本文提出一款新概念混合型水下机器人^[4-11]。

2018年, 由 Roque Saltaren 等人研发了一款混合型水下机器人, 该机器人以猿猴为仿生对象^[12]。机器人用 24 个自由度的液压机构为各个活动关节提供驱动力, 并且搭载了 8 台水下推进器实现水下的游动。该机器人可以像 ROV 一样在水中自由移动, 也可以像猿猴一样, 在水底以两足姿态走动。2013 年中国科学技术大学以 AQUA 水下机器人

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-03-05。

作者简介: 李芳野(1996-), 男, 内蒙古赤峰市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事运载火箭地面设备方向的研究。

引用格式: 李芳野, 陈锴迪, 高飞, 等. 一种水下足式机器人的设计方案研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 259-266.

为基础, 研究出了一款基于五连杆机构的可变性鳍—腿两栖机器人^[13]。机器人的可变性鳍—腿机构通过关节处牵引绳的松弛与拉紧, 实现了鳍、腿状态之间的相互切换。在陆地行走时, 通过拉紧绳索, 鳍—腿机构变成半圆形的腿, 可以实现在陆地上的行走与奔跑; 在水下游泳时, 将鳍内的张紧绳放松, 鳍—腿机构变成一条柔性的鳍, 通过柔性鳍的划水运动, 来获得对机器人本体的驱动力。

为克服传统遥控无人潜水器的局限性, 本文设计了一种基于传统 ROV 的水下六足机器人, 使其既具备水下航行器水下巡游的特点, 又兼具陆地足式机器人地面行走的特点。当水下足式机器人处于巡游状态时, 一方面可以实现传统 ROV 的前进后退、横移和上浮下潜等运动, 另一方面可实现俯仰、偏航、横滚等动作; 当其在水底行走时, 它又具备足式机器人的高稳定性、高通过性、强适应性等特点。机器人在水底执行任务时, 可以用腿支撑机器人的本体, 以减弱水底乱流对机器人姿态的稳定性造成影响^[14-15]。

这种水下足式机器人可以满足水下探测与作业需求的同时, 也可以应用于国防建设领域, 比如深海侦察、水雷排爆、舰船底部检查等军事领域。本文针对该水下六足机器人进行了实验样机的总体设计, 为未来研究工作奠定基础。后续将针对不同应用场景的需求设计了几种行走步态, 并利用仿生学原理实现对水下六足机器人运动步态的稳定控制与平滑转换。这对于研究此类水下足式机器人的实用功能, 和完善多足机器人的控制算法有实际的应用意义^[16-17]。

1 水下六足机器人总体设计分析

以水下六足机器人作为研究对象, 机器人由不同模块组成, 并具备水下探测能力。机器人通过线缆进行供电, 利用网线与岸基计算机通信。该水下六足机器人除了具备传统 ROV 的水下巡游功能外, 还需具备在水下行走的能力(仅考虑硬质地面), 并根据特定工作环境的需要, 可以在不同步态模式之间进行切换。

1.1 功能要求

在研究国内外先进水下机器人所具备的性能基础上, 提出了该水下六足机器人应具备的以下基本功能:

1) 水下六足机器人具备传统 ROV 的巡游功能, 能够完成六个自由度方向上的运动, 包括上浮下潜、前进后退、横移、偏航、俯仰和横滚运动。

2) 水下六足机器人在水底作业时, 能够在水底行走, 同时具备多个行走步态和各个步态之间平滑切换的能力。

3) 水下六足机器人利用自身传感器能与控制系统实时交互, 向上位机实时传输视频图像, 并将机器人的深度、高度、姿态和关节角度等数据信息保存到上位机。

1.2 主要参数和技术指标

该水下六足机器人的主要参数如表 1 所示, 其技术指标如表 2 所示。其中, 机身尺寸为机器人躯体的尺寸, 整体尺寸为机器人整体的尺寸。

表 1 水下六足机器人主要参数

名称	符号	单位	数值
机身長	L	mm	550.0
机身寬	W	mm	500.0
机身高	J	mm	370.0
整体長	L'	mm	565.0
整体寬	W'	mm	590.0
整体高	J'	mm	495.0
最大离地間隙	D	mm	120.0
质量	M	kg	29.394
机器人排水体积	V	m^3	0.030
绕 O_x 轴转动惯量	I_x	$kg \cdot m^2$	0.949
绕 O_y 轴转动惯量	I_y	$kg \cdot m^2$	1.047
绕 O_z 轴转动惯量	I_z	$kg \cdot m^2$	1.380
重心位置	(x_G, y_G, z_G)	mm	(0, 0, 0)
浮心位置	(x_B, y_B, z_B)	mm	(0, 0, 40)

表 2 水下六足机器人技术指标

指标	数据
结构形式	框架式
最大工作深度	100 m
水平推力	≤ 16 kgf
垂向推力	≤ 20 kgf
巡游模式最大航速	2.0 kN
行走模式最大速度	0.3 m/s
推进器布置方式	水平 4 个, 垂向 4 个
电源	300 VDC

2 水下六足机器人总体结构设计

在设计过程中, 通常把水下机器人的结构形式分成两类: 封闭式和框架式。框架式结构对总体设计要求较低, 制作成本低, 且具备较高的功能扩展性, 但流线型较差, 通常使用在低速水下机器人。本文所研究的水下六足机器人航行速度(水下巡游和水底行走)要求较低(最大航速约为 2 kN, 可认为是低速运行), 对功能扩展性要求较高, 故采用框架式结构, 以实现方便拆装、检修和设备安装。

2.1 机器人整体结构设计

如图 1(a) 所示, 为该水下六足机器人的三维结构模型。机器人整体采用框架式结构, 搭载 8 台 BlueROV-T200 推进器, 其中 4 台推进器呈水平斜对角放置, 用以提供机器人在水下巡游时水平方向的推力; 4 台推进器为垂直方向布置, 一方面用以提供机器人在水下巡游时竖直方向上的推力, 另一方面用以提供机器人在水底行走时的下压力。在机器人的两侧, 分别装备了 3 条 C 型腿和 3 台腿部驱动电机。

水下六足机器人的主要组成部分包括推进器、浮力材料、C 型腿模块、控制舱(包括主控系统、驱动系统、通信系统和部分传感器等)、电源舱和机身。结构布局如图 1(b) 所示。

各模块在水下六足机器人系统中起到如下作用:

- 1) 机身: 作为水下六足机器人的躯干结构, 安装并且保护了机器人系统的零部件;
- 2) C 型腿模块: 当水下六足机器人在水底行走过程中, 起到支持和驱动水下六足机器人前进的作用;
- 3) 浮力材料: 机器人安装浮力材料, 用以给机器人提供浮力补偿, 使机器人整体在水中呈现零浮力状态;
- 4) 控制舱: 提供水下密封环境, 保证内部电子元器件的正常运行。其中控制舱内部的主控系统负责实现机器人的运动, 驱动系统负责驱动腿部电机的动力输出, 传感器负责获取机器人自身的姿态和水下周围环境信息;
- 5) 电源舱: 对 300 V 直流电进行变压, 并向机器人各模块提供 24 V 和 12 V 的直流电;
- 6) 推进器: 向水下六足机器人提供巡游时的动力和水底行走过程中的下压力。

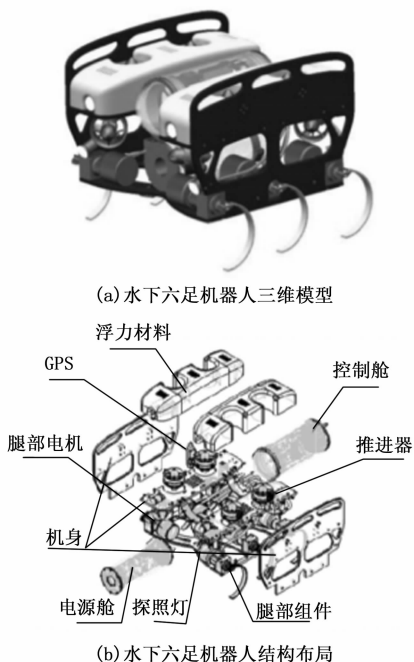


图 1 水下六足机器人结构图

2.2 机器人腿部结构设计

为增强水下六足机器人的动平衡性, 以及降低机器人的机械加工成本, 本文为机器人腿部所设计的 C 型腿、电机与减速器、套筒、O 形圈、旋转变压器、轴承、驱动器以及其他紧固件均采用相同的设计, C 型腿结构如图 2 所示。

本文初步选用弹性较好的 65 Mn 钢材来加工水下六足机器人的 C 型腿, 用以吸收机器人的腿落地时瞬间产生的冲击, 保证机器人在行进过程中机身的稳定性。由于直流无刷电机具有转矩优异、过载能力强、启动扭矩大、启动电流小、可靠性高、体积小等特点, 因此选用直流无刷电机为机器人的 C 型腿提供驱动力矩。为了精确控制机器人的运动姿态, 需要获取机器人腿部的准确的角度, 因此选

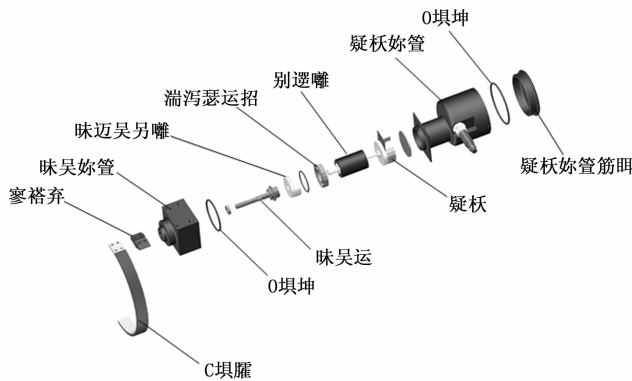


图 2 C 型腿结构图

用旋转变压器作为腿部角度传感器。为了保证机器人腿部能在水下正常的工作, 需要对腿部驱动电机、驱动板等电子元器件进行密封处理, 故采用套筒对其进行水下环境的密封保护。

根据本文的设计指标, 当水下六足机器人在水底行走时四台垂直布置的推进器共需要产生 80 N 的垂向力, 因此要求机器人腿部材料具有一定的刚性。由于机器人在行走过程中腿部与地面的接触是非连续的, 腿部由摆动到落地的瞬间会产生一定的冲击。为了降低冲击力对机器人的影响, 并增强机器人行走时的平衡性, 因此腿部材料需要具备一定的弹性。

本文设计的水下六足机器人可认为是零浮力, 即机器人所受到的浮力与自身重力平衡。因此, 当机器人在水下行走时, C 型腿所受到的载荷均由四台垂直布置的推进器产生。根据对机器人的动力学分析可知, 当 C 型腿处于直立状态时, 单条腿所受到的静载荷最大, 约为 40 N, 此时 C 型腿所产生的形变量最大。根据机器人整体结构的设计需求, 设计 C 型腿的直径为 170 mm, 宽度为 20 mm。利用 ANSYS 分析不同厚度的 C 型腿在此工况下所产生的形变与应力, 仿真分析结果如图 3 所示。具体 ANSYS 仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同厚度下的 C 型腿形变与应力分析结果

厚度/mm	2.5	3.0	3.5
最大形变量/mm	9.97	5.85	3.72
最大应力/MPa	155.08	106.49	77.66

根据以上仿真结果和表格数据可知, 在该工况下, 三种厚度的 C 型腿最大形变量和最大应力均满足 65 MN 弹簧钢材料属性的极限要求。同时, 考虑到该水下六足机器人的四台垂直推进器可产生的最大合力为 200 N, 且在特殊情况下会适当增加推进器的推力。为了避免达到材料的屈服极限, 故本文采取厚度为 3.5 mm 的 C 型腿。

水下六足机器人在水底行走的过程中, 腿部电机的驱动力矩一部分用以克服 C 型腿在水中旋转时产生的流体阻力, 另一部分用以克服 C 型腿与地面接触时产生的摩擦力。

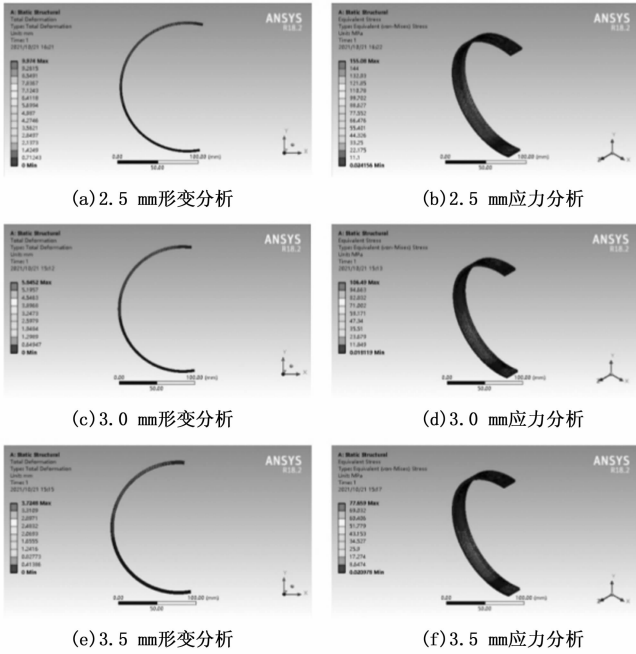


图 3 不同厚度下厚度 C 型腿的形变与应力分析

当 C 型腿接触地面时，这两种力会产生耦合，此时分析腿部电机所需的驱动力矩会比较困难。故本文将其解耦，分别进行仿真分析。

为计算 C 型腿在水中以不同速度转动所需要的驱动力矩，本文使用 FLUENT 软件，利用计算流体动力学方法 (CFD, computational fluid dynamics) 对 C 型腿进行数值模拟^[20-24]。整个流场的计算流域网格如图 4 所示，C 型腿网格如图 5 所示。整体流域的网格数量约为 90 万，网格质量约为 0.31；C 型腿的面网格数量约为 6 300，网格质量约为 0.27。

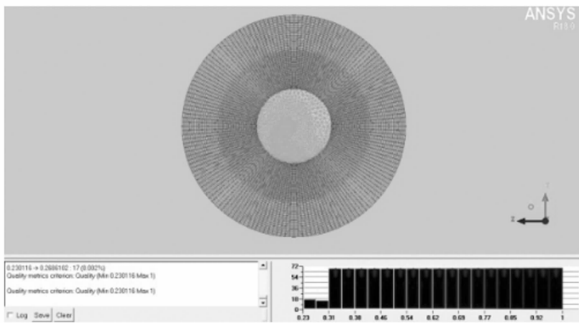


图 4 整体流域与网格质量



图 5 C 型腿面网格

经 CFD 数值计算，得到不同速度下的数值模拟结果，如图 6~9 所示。

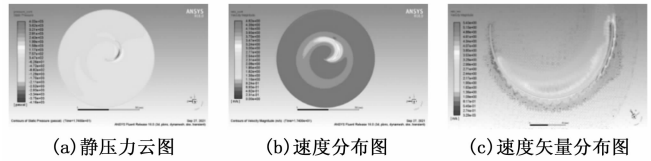


图 6 1 r/s 时的数值模拟结果

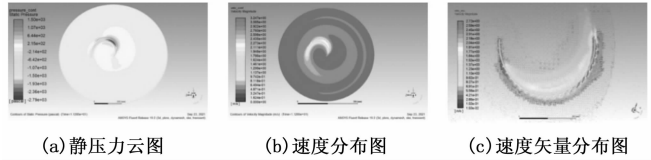


图 7 2 r/s 时的数值模拟结果

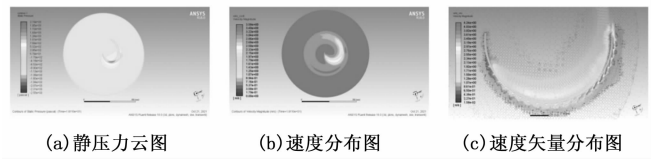


图 8 3 r/s 时的数值模拟结果

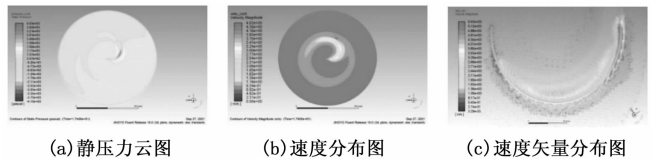


图 9 4 r/s 时的数值模拟结果

具体 FLUENT 仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同转速下 C 型腿受到的流体阻力

转速 r/s	流体阻力/(N·mm)	转速 r/s	流体阻力/(N·mm)
0	0	2.5	588.4
1	103.7	3	847.8
1.5	245.3	3.5	1 135.9
2	386.6	4	1 414.8

利用 MATLAB 将表 4 内的数据进行拟合，拟合所得曲线如图 10 所示，并得到 C 型腿转速与流体阻力关系方程，

$$M_x = 79.20\omega^2 + 42.95\omega - 6.07 \quad (1)$$

式中， M_x 为流体阻力矩 (N·mm)， ω 为转速 (r/s)。

由式 (1) 可知，C 型腿转速与流体阻力关系方程为二次函数。因此，可根据此关系式推算 C 型腿以某速度转动时，腿部电机所需要提供的驱动力矩。

根据机器人的受力分析结论可知，当机器人以三足支撑状态 (即三角步态) 行走时，腿部电机所需要提供的驱动力矩最大。为获取驱动力矩的数值，本文用 Adams 软件对机器人进行动力学仿真，导入机器人三维模型的 Parasolid 文件，并设置好相应的阻力参数、材料属性、碰撞系数等参数，所得仿真结果如图 10 与图 11 所示。

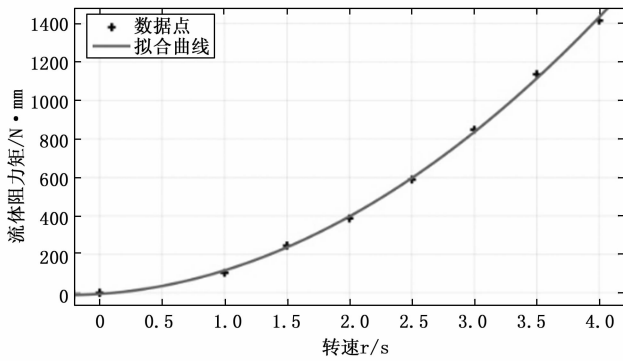
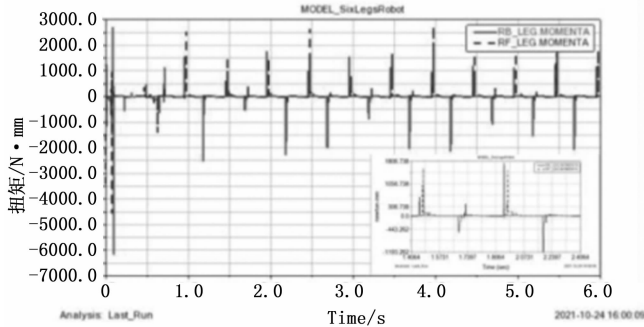
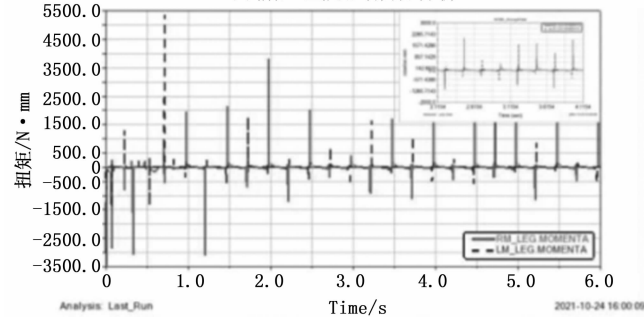


图 10 转速与流体阻力关系曲线



(a) 前后C型腿驱动力矩分析



(b) 中间C型腿驱动力矩分析

图 11 水下机器人 C 型腿驱动力矩分析

当机器人以三角步态行走时, 前后腿所需要的驱动力矩如图 10 所示。0~1.5 s 期间, 为机器人由初始位置向三角步态调整的阶段, 在此阶段腿部落地瞬间会产生较大的冲击, 因此电机需要提供较大的瞬时扭矩, 约为 6 100 N·mm。1.5~6 s 为机器人三角步态行走阶段, 此阶段 C 型腿落地瞬间电机同样需要输出约为的瞬时扭矩 2 500 N·mm。当腿落地稳定后并与地面产生滚动接触时, 电机需要提供约 310 N·mm 的驱动力矩。

当机器人以三角步态行走时, 中间腿所需要的驱动力矩如图 11 所示。0~1.5 s 期间, 为机器人由初始位置向三角步态调整的阶段, 在此阶段腿部落地瞬间会产生较大的冲击, 因此电机需要提供较大的瞬时扭矩, 约为 5 500 N·mm。1.5~6 s 为机器人三角步态行走阶段, 此阶段 C 型腿落地瞬间电机同样需要输出约为的瞬时扭矩 2 000 N·mm。当

腿落地稳定后并与地面产生滚动接触时, 电机需要提供约 580 N·mm 的驱动力矩。

水下六足机器人的电机选型所面临的问题与其他类型机器人电机选型面临的问题不同。首先, 电机和减速器组合的使用工况是一个运行速度非常大的区间。例如当机器人攀爬台阶或跨越障碍物时, 机器人腿部需要低速转动以产生较大的扭矩; 当机器人高速奔跑或以较高的占空比行走时, 机器人腿部需要电机提供一般大小的扭矩来产生较高的转速。而在一些其他电机应用领域, 电机在短时间内以空载扭矩和空载转速运行的案例很少。

综合考虑机器人 C 型腿在水下旋转和行走所需要的驱动力矩大小, 以及 C 型腿转动的速度区间, 因此本文选用 maxon EC 45 flat 作为机器人腿部的驱动电机。该电机具有体积小、输出扭矩大、使用寿命长和耐冲击等优势, 搭配使用 GP 42 C 行星齿轮减速箱, 可实现 C 型腿在较大运行速度区间内工作。电机及减速器参数如表 5~6 所示。

表 5 maxon EC 45 flat 电机参数表

电机参数类型	参数值
电机类型	直流无刷电机
额定电压/V	24
空载转速/rpm	6 710
额定转速/rpm	5 240
最高允许转速/rpm	10 000
空载电流/mA	185
额定转矩/mNm	83.4
额定电流/A	2.33
堵转转矩/mNm	780
堵转电流/A	23.3
最大效率/%	83
最大径向载荷/N	20

表 6 GP 42 C 行星齿轮减速器参数表

减速器参数类型	参数值
减速比	28:1
精确减速比	138/5
级数	2
转动惯量/g·cm ²	9.1
最大连续转矩/Nm	7.5
最大瞬时转矩/Nm	11.3
最大连续输入转速/rpm	8 000
最大效率/%	81
最大径向载荷/N	240

最终, 水下六足机器人的 C 型腿结构如图 12 所示。

2.3 机器人腿部密封设计

为保证机器人腿部可以在水下正常、安全、稳定的工作, 需要对腿部关键部位进行密封设计。C 型腿电机的密封设计如图 13 所示。

密封分为静密封和动密封, 其中电机套筒端盖处、电

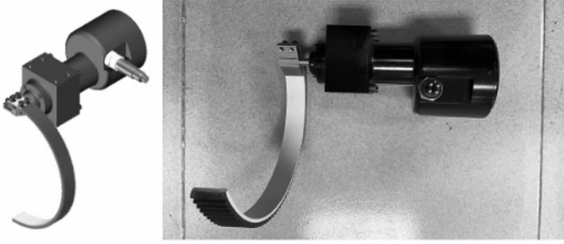


图 12 C 型腿总装结构图与实物装配图

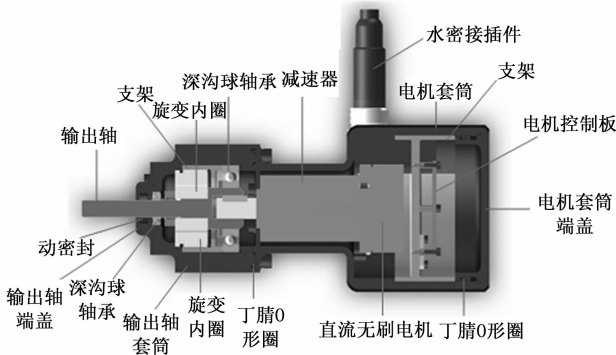


图 13 C 型腿电机密封设计

机套筒与旋变套筒连接处均采用静密封，输出轴采用动密封。为表示 O 形圈的压缩程度，定义压缩比例 ϵ ，一般取 $\epsilon = 15 \sim 25\%$ ^[18-19]，压缩比的表达式为：

$$\epsilon = \frac{d_0 - h}{d_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中， d_0 为 O 形密封圈的截面直径 (mm)； h 为 O 形密封圈沟槽深度 (mm)。

O 形密封圈沟槽的设计深度 h 和宽度 b ^[19] 计算公式为：

$$h = (1 - \epsilon) \cdot d_0 \quad (3)$$

$$b = \beta \cdot d_0 \quad (4)$$

式中， β 为密封圈沟槽的宽度系数，本文取 $\beta = 1.3$ ， $\epsilon_{静} = 20\%$ ， $\epsilon_{动} = 13\%$ 。

本文设计水下六足机器人最大工作水深为 100 m，其最大压强约为 0.98 MPa。通常情况，当工作压强 $p < 10$ MPa 时，静密封和动密封都不需要设置挡圈。根据第六版《机械设计手册》，两处静密封分别选用 69 × 2.65-GB/T 3465.1-2005 O 形橡胶密封圈和 51.5 × 2.65-GB/T 3465.1-2005 O 形橡胶密封圈。根据式、便可计算得到沟槽尺寸。

为了防止液体沿着输出轴进入电机内部，通常采用两个 O 形圈径向布置的方式进行动密封设计。但是这种设计一方面会产生较大的摩擦力，降低电机的传动效率；另一方面，这种密封方式耐磨性差，从而降低动密封系统的使用寿命。本文采用 C 形滑环式组合密封，其具有摩擦力小、耐磨性好、耐腐蚀等优点，以此提高动密封性能。

3 水下六足机器人控制系统方案设计

实现水下六足机器人运动控制的关键问题是如何选配合理的机器人硬件系统和如何搭建合理的软件系统^[20-21]。

控制系统是机器人的核心组成部分，它起到的作用是接收外部控制命令和环境反馈信息，并让机器人准确且迅速地运动并完成规定的动作任务。控制系统包含了执行实时任务的微控制器、实现机器人动作的伺服控制系统以及获取机器人姿态与位置信息和周围环境信息的传感器等。由于控制系统是一个庞大的信息处理系统，因此搭建一个实时性好、效率高的机器人控制系统对于实现本文水下六足机器人的运动控制具有重大作用。

3.1 控制系统的总体设计要求

考虑到水下六足机器人是本文的被控对象，并具有多个活动关节。因此控制该机器人运动需要协同各个关节角度之间的关系，才能使得机器人在行进过程中姿态更加稳定。由于机器人的运动方式具有复杂性，因此对于控制系统提出以下要求：

- 1) 关节角度的精确性。本文采用角度控制，因此为实现更协调的运动姿态，腿部电机输出轴需有灵敏的位置信息传感器以实现较高的控制精度。
- 2) 关节具有较大的转速区间。由于机器人需要具有低负载高速奔跑和高负载低速行走的能力，因此机器人腿部关节需要具备较大的调速范围。
- 3) 关节角度之间的协同。机器人具有 6 个腿部关节，各个关节角度之间配合的协同性，决定了机器人行走姿态的稳定性。

3.2 控制系统的组织结构设计

根据研究发现动物的运动多数由大脑—神经（脊髓）—肌肉耦联系统所产生的，脊髓神经发生节律性周期信号刺激肌肉发生节律性运动（如呼吸、心跳、行走等），大脑可对节律运动产生不同程度上的干预^[22-24]。利用仿生学原理，本文水下六足机器人的控制系统组织结构采用分层递阶式智能控制系统，如图 14 所示，按照功能可将其分为三个部分：组织级、协调级与执行级，与动物的大脑—神经（脊髓）—肌肉系统相互对应。其中结构各层级功能如下：

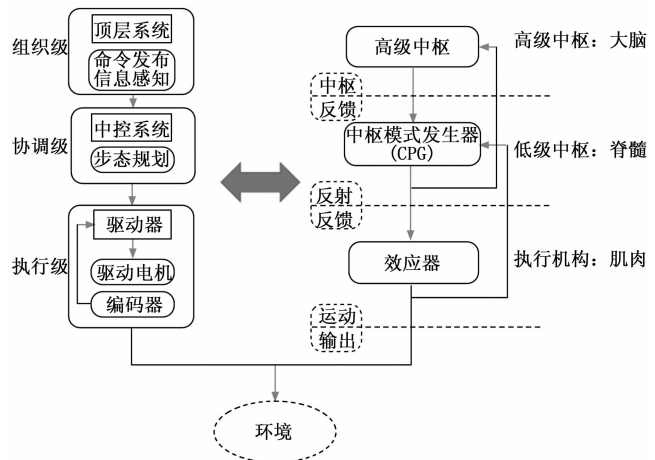


图 14 水下六足机器人控制系统组织结构图

组织级与动物的高级中枢对应，相当于大脑，一方面能够根据需求进行运动规划，另一方面可以处理外部环境

感知信息并对机器人的运动进行相应的调节, 最终向协调级发布控制指令。本文水下六足机器人采用岸基 PC 机作为组织级, 向水下六足机器人内部的主控计算机 (协调级) 发布控制指令。

协调级与动物的低级中枢对应, 相当于脊髓内部的中枢模式发生器, 用以产生动物的节律运动活动, 对底层执行级进行控制。本文采用 Raspberry Pi 作为节律运动发生控制器, 基于 CPG 运动控制算法并根据上层协调级指令和底层执行级反馈信号生成水下六足机器人运动步态控制信号, 并将该无量纲的控制信号映射到 C 型腿的关节角度, 根据角度信号值向腿部电机驱动器发布角度控制指令。

执行级与动物的效应器对应, 相当于运动神经末梢所支配的肌肉, 用以实现运动活动。在本文水下六足机器人中, 执行级主要包含电机、旋转变压器和电机驱动器。

协调级是整个水下六足机器人运动控制系统中的重要组成部分, 也是研究机器人步态控制的核心, 包括水下六足机器人的步态生成、速度控制、方向控制和姿态调节等。

3.3 控制系统的硬件设计

图 15 为水下六足机器人控制系统的硬件系统结构图, 包含的硬件有: 主动计算机、直流无刷电机及其驱动器、推进器、摄像头、照明灯以及各类传感器。

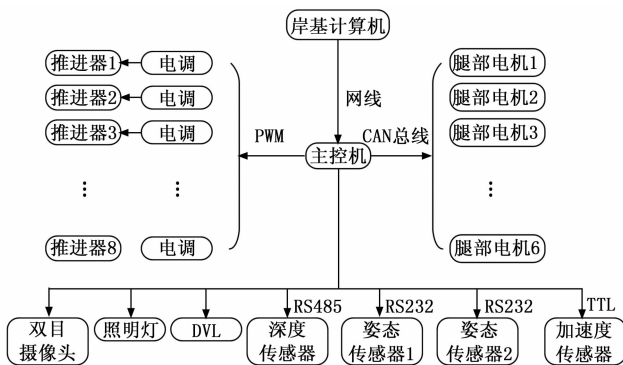


图 15 水下六足机器人硬件系统结构图

1) 主控计算机: 本文选用 Raspberry Pi 作为水下六足机器人的主控计算机, 其作用是接收顶层 PC 机的控制指令、CPG 运动控制算法的解算、向电机发送角度控制指令和采集并处理传感器信息等。该主控计算机搭载 Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit @ 1.5 GHz 处理器, 包含 4 个 USB 接口、1 个千兆以太网接口、6 路串口、40pin GPIO 口, 满足机器人使用要求。运行 Ubuntu 18.04 系统, 使用 Python 编程语言实现对机器人运动步态的控制。

2) 直流无刷电机及其驱动器: 根据本文章节 2.3.2 所述, maxon EC 45 flat 直流无刷电机为水下六足机器人 C 型腿的驱动电机, 选用自制的直流无刷电机驱动器用以控制电机的转动, 并搭配使用旋转变压器实现对电机旋转角度的闭环控制。

3) 推进器: 为了提供水下六足机器人巡游时的动力以及水底行走时的下压力, 本文选用 BlueRobotics 公司生

产的 T200 推进器。该推进器供电电压在 7~12 V 之间, 最大功率可达 360 W, 最大转速可达 3 751 rpm。在 12 V 电源供电下, 最大可以产生正向 3.71 kgf、反向 2.92 kgf 的推力。

4) 深度传感器: 为了获取水下六足机器人在水中当前工作的深度, 需要搭载压力传感器, 压力传感器的工作原理是测量当前水的压强, 然后通过计算转换成水深。本文选用 MPM4730 智能压力变送器作为水下六足机器人的深度传感器, 该传感器采用压阻式压力变送器技术, 并结合数字化温度补偿和非线性修正技术, 具有高精度 ($\pm 0.15\%$)、高稳定性等特点。其体积小、重量轻、量程大, 符合本文机器人选型要求。

5) 姿态传感器: 本文研究对象为水下六足机器人在水底行走时的运动步态控制, 因此获取机器人的姿态信息可以判断控制效果。HWT901B 姿态传感器内置 10 轴传感器和 RM3100 模块, 模块内含高精度陀螺仪、地磁场传感器和加速度计。为快速准确求解机器人的实时运动姿态, 采用了先进的动力学解算算法和卡尔曼滤波算法。该传感器测量精度为 0.05° , 且稳定性高, 数据输出频率最高可达 200 Hz, 满足本文水下六足机器人的设计要求。

4 结束语

本文针对水下六足机器人总体方案进行了设计。通过对国内外水下足式仿生机器人的研究, 开创性的设计了一款水下六足机器人, 使该机器人具备了 ROV 的巡游功能和足式机器人的行走特点。该机器人采用了一种兼具车轮和节肢类腿特点的 C 型腿, 提升了机器人面对水下地面复杂环境的适应性和通过性。在结构设计的基础上, 对 C 型腿进行强度分析和水下行走时的力矩分析, 选定了弹性腿的材料和确定了腿部驱动电机的选型。同时, 设计了水下六足机器人的控制系统, 包括控制系统组织结构设计和控制系统的硬件设计。

参考文献:

- [1] 范士波. 深海作业型 ROV 水动力试验及运动控制技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [2] WHITT C, PEARLMAN J, POLAGYE B, et al. Future vision for autonomous ocean observations [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 697.
- [3] 刘泽发. 观测型 ROV 航行控制系统设计及运动控制技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [4] AKIZONO J, TANAKA T, NAKAGAWA K, et al. Seabottom roughness measurement by aquatic walking robot [C] // *Oceans'97. MTS/IEEE Conference Proceedings. IEEE*, 1997, 2: 1395-1398.
- [5] SI J, CHIN C. An adaptable walking-skid for seabed ROV under strong current disturbance [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2014, 13 (3): 305-314.
- [6] YUE C. Study on a novel water-jet-based father-son spherical underwater robotic system [D]. *IEEE International Conference*

on Mechatronics & Automation. IEEE, 2015.

[7] GASIOROWSKI M, SZCZEPANIAK R, STABRYN S. A mobility analysis of using the Rhex-type mobile robot in various surroundings [J]. Journal of KONES, 2018, 25: 175 - 180.

[8] SARANLI U, KODITSCHKEK D E. Design and analysis of a flipping controller for RHex [D]. Michigan Univ. Ann. Arbor Dept of Electrical Engineering and Computer Science, 2003; 2 - 11.

[9] KOMSUOGLU H, MCMORDIE D, SARANLI U, et al. Proprioception based behavioral advances in a hexapod robot [C] // Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). IEEE, 2001, 4: 3650 - 3655.

[10] ALTENDORFER R, MOORE N, KOMSUOGLU H, et al. Rhex: A biologically inspired hexapod runner [J]. Autonomous Robots, 2001, 11 (3): 207 - 213.

[11] GALLOWAY K C, HAYNES G C, ILHAN B D, et al. X-RHex: A highly mobile hexapedal robot for sensorimotor tasks [J]. Technical Reports, 2010; 3 - 22.

[12] SCARAMUZZA D, SIEGWART R, MARTINELLI A. The international journal of robotics research [J]. The International Journal of Robotics Research, 2009, 28 (2): 149 - 171.

[13] GEORGIADES C, GERMAN A, HOGUE A, et al. AQUA: an aquatic walking robot [C] //2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No. 04CH37566). IEEE, 2004; 3525 - 3531.

[14] GEORGIADES C, NAHON M, BUEHLER M. Simulation of

an underwater hexapod robot [J]. Ocean Engineering, 2009, 36 (1): 39 - 47.

[15] SATTAR J, DUDEK G, CHIU O, et al. Enabling autonomous capabilities in underwater robotics [C] //2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2008; 3628 - 3634.

[16] DUDEK G, GIGUERE P, PRAHACS C, et al. Aqua: An amphibious autonomous robot [J]. Computer, 2007, 40 (1): 46 - 53.

[17] DUDEK G, JENKIN M, PRAHACS C, et al. A visually guided swimming robot [C] //2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2005; 3604 - 3609.

[18] 刘子俊, 崔皆凡. 海洋机器人水下电机的深水密封研究 [J]. 机器人, 1997 (1): 62 - 65.

[19] 袁夫彩, 陆念力, 王立权. 水下船体表面清刷机器人密封的设计 [J]. 润滑与密封, 2007 (05): 69 - 72.

[20] 汪昆鹏. 水下六足机器人移动系统力学建模及仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[21] 罗庆生, 罗霄. 仿生四足机器人技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.

[22] 徐维超. 小型六足机器人运动控制系统设计与实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

[23] 邹有阳. 六足机器人落脚点规划与足底花纹设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

[24] 张志远. 五自由度水下作业机器人结构设计与水动力学研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

⋯⋯⋯ (上接第 258 页)

参考文献:

[1] 李志勋. 某型号姿控动力系统气体减压阀性能测试系统设计 [J]. 火箭推进, 2011, 37 (6): 61 - 66.

[2] 张伟, 任再青. 某型飞机发动机喷口电磁阀测试系统的设计 [J]. 液压气动与密封, 2015 (10): 34 - 36.

[3] 卢逸斌, 吴睫, 谢芳, 等. 运载火箭电磁阀测试数据处理技术 [J]. 现代工业经济和信息化, 2015, 92: 52 - 54.

[4] 戴李刚, 张明亮, 赵玲玲, 等. 基于 LwIP 协议的电磁阀采集技术研究 [J]. 上海航天, 2020, 37 (S2): 193 - 196, 205.

[5] 王浩, 许化龙. 基于 PC104 的测试系统抗干扰设计 [J]. 弹射与导弹学报, 2009 (2): 293 - 302.

[6] 张稳稳, 欧阳娟, 白永林, 等. PC104 串口通信在工程中的应用 [J]. 微计算机信息, 2006, 22 (1/2): 57 - 59.

[7] 林建. DSP 信号处理器的典型应用及前景展望 [J]. 机电信息, 2004, 1: 37 - 41.

[8] 付荣国, 周庆敏. 基于 TLV320AIC23 和 TMS320VC5416 的语音系统设计 [J]. 微计算机信息, 2007, 35: 192 - 193, 199.

[9] 陈芳兰, 李学敏, 吴辉. 基于 PC104 与 DSP 的串行通信设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2014, 12: 71 - 71.

[10] 郝业. 基于 PLX9030 的网络性能测试卡设计与实现 [J]. 计算机与网络, 2008, 14: 49 - 51.

[11] 鄂君, 罗振京. 电磁阀信号测试集成技术研究 [J]. 航天国防科学技术报告, 2004: 112 - 115.

[12] 郝贵欣, 周吉, 张华. 一种电磁阀智能测试系统 [J]. 火箭推进, 2013, 5: 92 - 97.

[13] 蒋瑜. 姿控发动机试验阀门电流信号采集系统设计 [J]. 火箭推进, 2006, 6: 56 - 59.

[14] 李蕊, 黄学武, 郑华耀, 等. 电磁阀特性测试仪的设计 [J]. 机电设备, 2008, 25 (1): 12 - 15.

[15] 刘勇奎, 刘向东, 王春霞. 一个抽取边界曲线特征点的新算法 [J]. 计算机应用研究, 2006, 23 (6): 148 - 152.

[16] 张榛. 电磁阀动态响应特性的有限元仿真与优化设计 [J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34 (5): 53 - 56.

[17] 刘忠, 刘卫萍, 何谦. 高速开关电磁阀动态响应建模与仿真 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2009, 32 (3): 53 - 57.

[18] 程祝媛, 许志红. 基于 LABVIEW 软件的电磁阀动态特性仿真系统 [J]. 电工电气, 2012, 4: 15 - 20.

[19] 杨继志, 郭敬. 基于 LabView 的阀门试验数据采集系统 [J]. 机电产品开发与创新, 2011 (9): 77.

[20] 赵忠兴, 苏成志, 孙伟, 等. 电磁阀协同动作特性曲线特征点提取研究 [J]. 测控技术, 2012, 12: 30 - 32.

[21] 王银花, 孙涛. 基于小波变换的采样问题研究 [J]. 绥化学院学报, 2018, 6: 137 - 140.