

柔性水下悬停机器人的液气相变驱动及制造

张鸿健, 韩捷, 蒋维涛, 牛东, 刘红忠

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决传统水下机器人功耗大、噪声大、机电特征易被探测的缺点,受河鲀应激防御时体型变化的启发,设计并制造了一种基于液气相变驱动的柔性水下悬停机器人(简称悬停机器人)。机器人基体由柔性硅橡胶材料制成,内部预设一腔体,腔体内封装低沸点驱动液体(3MTM NovecTM 7000,沸点 35℃),通过加热驱动液体使其发生液气相变,作用在内腔壁面上的饱和蒸气压使悬停机器人的体积发生变化从而改变悬停机器人的浮力;通过控制驱动温度实现悬停机器人的上浮下潜运动与定深悬停。实验表明:悬停机器人在自封装 15 mL 驱动液体时的驱动温度范围为 50~100℃,最大可提供约为自重 1.95 倍的浮力;在驱动温度为 53℃时,可实现定深悬停;在驱动温度范围内,浮力测量值误差小于 5%。基于液气相变驱动的柔性水下悬停机器人避免了传统的机电驱动传动,自带工质,尺寸小质量轻,适合水下复杂环境作业;工作功耗小,驱动过程无噪声。

关键词: 水下监测;悬停机器人;液气相变驱动;定深悬停

中图分类号: TP242.3;TP242.6 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202102002 **文章编号:** 0253-987X(2021)02-0010-08



OSID 码

Liquid-Gas Phase Change Driving and Manufacturing of Flexible Underwater Hovering Robot

ZHANG Hongjian, HAN Jie, JIANG Weitao, NIU Dong, LIU Hongzhong

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The ocean contains abundant resources, and the world has a major demand for the development of ocean resources. Underwater robots are an important tool to realize the development of marine resources. To solve the disadvantages of the traditional underwater robots, such as high power consumption, high noise, and easy detection of electromechanical characters, inspired by the body shape changes during the stress defense of the puffer, a flexible underwater hovering robot based on liquid-gas phase change driving (hovering robot for short) is designed and manufactured. The base is made of flexible silicone rubber material, and one internal cavity is preset, in which encloses a low-boiling-point driving liquid (3MTM NovecTM 7000, boiling point 35℃) is enclosed. Heating the driving liquid causes the liquid-gas phase change, and the saturated vapor pressure acting on the inner cavity wall surface causes volume change of the hovering robot to change its buoyancy. By controlling the driving temperature, the hovering robot dives up and down or stays in fixed depth hovering. Experiments show that the driving temperature is ranged within 50–100℃ as the hovering robot contains 15 mL of self-encapsulating driving liquid, and a maximum buoyancy of about 1.95 times than its own weight

收稿日期: 2020-07-16。 作者简介: 张鸿健(1996—),男,硕士生,蒋维涛(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51625504,51827805,51675421)。

网络出版时间: 2020-09-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200914.1604.004.html>

can be achieved; when the driving temperature is $53\text{ }^{\circ}\text{C}$, it can hover at fixed depth; within the driving temperature range, the buoyancy measurement error is less than 5%. The flexible underwater hovering robot driven by liquid-gas phase change avoids the traditional electromechanical drive transmission. It has its own working medium, small size and light weight.

Keywords: underwater monitoring; hovering robot; liquid-gas phase change drive; fixed-depth hovering

地球上的海洋面积为 3.6 亿 km^2 , 占地球总面积的 71%。海洋中蕴含着丰富的渔业资源和化石资源, 对人类的生存与社会发展起着重要作用。随着海洋资源开发进程的推进, 海洋资源保护与海洋资源的高效利用对人类社会的进步起着关键作用。简单依靠人力探测是不能满足对海洋环境保护以及海洋资源开发的迫切需求, 为了适应对海洋资源的大规模开发利用, 研究和发展用于水下监测、探测的各种水下机器人、水下深潜器、监测平台已经成为我国^[1]和各国人民的重大需求。

早在 1960 年, 美国就研制成功了世界上第一台水下机器人 CURV-1, 并利用其成功找到并打捞了一枚遗失在海底的氢弹^[2]。此后, 水下机器人技术得到越来越多的关注并取得快速发展。目前, 水下监测平台或水下深潜器多采用电机驱动, 辅以螺旋桨或叶轮推进。美国 Seabotix 公司研制了一款用于水下监测的低成本水下航行器 LBV150^[3], 由 4 个直流无刷推进器驱动, 尺寸约为 0.5 m , 总质量为 11 kg , 设计下潜深度为 150 m , 设计速度为 1.5 m/s , 可实现定深定向运动。此类水下机器人动力充足, 工作稳定, 但是传统水下机器人存在多个电机、活塞、连杆、关节、铰链^[4]等, 多级传动中能量损失较大, 噪声大, 结构复杂且笨重, 容易影响甚至破坏水下环境。

水下机器人驱动的另一思路是仿照海洋生物进行结构设计, 采用智能驱动材料如形状记忆合金、电活性聚合物材料等进行驱动^[5]。中国海洋大学王举田等设计了一款基于 SMA 驱动的仿水母机器人^[6], 经测试在 12 V 电压下运动速度可达 44.4 mm/s 。目前, 基于智能材料驱动的水下机器人的主要挑战为^[7-8]: ①不能完全回避机电驱动和传动, 如以形状记忆合金作为驱动器, 带动机械传动系统实现运动时, 难以避免机电传动噪声; ②采用新型驱动材料, 如形状记忆合金、离子聚合物等, 难以兼顾驱动力与驱动形变, 从而难以适应水下驱动需求。如采用离子聚合物作为驱动材料, 虽然所需驱动电压

小, 驱动频率大, 但是驱动力和驱动功率较小, 导致其工作推力较小, 水下移动速度较慢^[9-11]。针对愈加复杂的水下环境, 柔性软材料水下机器人成为新的研究方向, 软材料水下机器人通常由弹性高分子聚合物^[12]如橡胶、硅胶等制成。软体机器人变形自由度多, 可承受较大变形, 柔顺性好^[13], 质量较轻, 适合水下压强较大, 环境复杂的特殊工况。气压驱动是水下软体机器人的主要驱动方式之一^[14-16], 其响应速度快, 输出力大^[17], 工作噪声小, 不会影响水下生态环境, 但气压驱动软体机器人需要外带气泵及复杂的气路控制系统, 结构复杂且运动时受线缆约束, 运动自由度低。

受河鲀应激防御时体型变化的启发, 本文提出了一种新型的自带工质、可远程操控的液气相变驱动方法, 设计并制造了一种基于液气相变驱动的柔性水下悬停机器人。机器人内设腔体并自带低沸点液气相变驱动液体, 通过对驱动液体加热使其部分汽化, 产生的饱和蒸气压作用在腔体内壁上, 使柔性腔体膨胀, 从而使悬停机器人的体积发生变化, 最终实现悬停机器人的上浮下潜运动与定深悬停。悬停机器人工作功耗低且无噪声, 大大降低了传统水下机器人机械驱动与传动导致的噪声与能量损失, 同时自带工质, 体积小质量轻, 适合复杂的水下工作环境。

1 悬停机器人设计原理

1.1 悬停机器人结构设计

河鲀体形浑圆, 在水中可以灵活旋转, 但是其在水中游动主要依靠胸鳍的推动, 移动速度较慢, 很容易成为捕食目标。因此, 河鲀进化出了一种与一般鱼类迥然不同的防御机制, 在受到威胁时, 会将大量空气或水吸入其极具弹性的胃中, 短时间内使体型膨胀数倍从而吓退捕食者。本文受河鲀应激防御时体型变化的启发, 设计了一种基于液气相变驱动的柔性水下悬停机器人。悬停机器人基体由柔性硅橡胶材料制成, 外形仿照河鲀设计, 外部呈流线型; 基

体内预设一腔体封装有低沸点驱动液体,并设有温控装置,主要结构如图1所示。

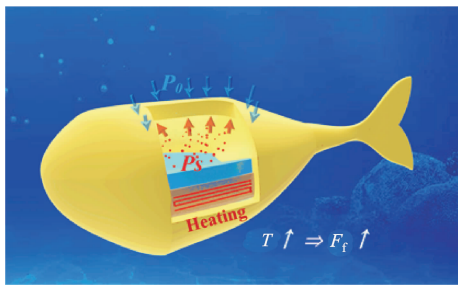


图1 悬停机器人结构及驱动原理

悬停机器人通过内部的温控装置使内腔封装的低沸点驱动液体发生液气相变,在液气相变过程中,产生的饱和蒸气压作用在柔性腔体内壁上,使整个基体体积发生明显变化,从而改变其浮力。当驱动温度升高,驱动液体部分汽化,作用在内壁上的饱和蒸气压增大,悬停机器人膨胀,体积增大从而浮力增大;当驱动温度降低,部分气体液化,作用在内壁上的饱和蒸气压减小,悬停机器人收缩,体积减小从而浮力减小。整个过程与河鲀防御时吸排水时体积变化的过程类似。

1.2 液气相变驱动原理

悬停机器人由柔性基体与低沸点驱动材料构成。在基体内部封装有低沸点驱动液体,通过加热驱动液体使部分液体汽化,驱动液体汽化后产生的饱和蒸气压作用在柔性腔体内壁上使其膨胀,悬停机器人的体积发生变化从而改变其浮力,最终实现上浮下潜运动与定深悬停,驱动原理如图1所示。

当驱动温度超过驱动液体沸点时,驱动液体吸热并部分汽化,在驱动温度一定时,液相与气相保持平衡,液气相变处于动态平衡。在平衡状态下,作用在柔性腔体内壁上的压强为驱动材料在该温度下的饱和蒸气压 P_s 。饱和蒸气压是指在密闭环境中,特定温度下,与液体处于相平衡的蒸气所具有的压强。驱动液体的饱和蒸气压 P_s 表示为^[18]

$$\ln P_s = k_1 - \frac{k_2}{T} \quad (1)$$

式中: T 为驱动温度; k_1 、 k_2 由驱动液体材料决定。同时,考虑悬停机器人的水下工作环境,在腔体外壁作用的静水压强为

$$P_0 = \rho_w gh \quad (2)$$

式中: h 为悬停机器人的工作水深。饱和蒸气压与静水压强同时作用在腔体的内外壁面上,当驱动温度 T 改变时,腔体内驱动液体的饱和蒸气压改变,

悬停机器人的体积 V 变化,最终改变其浮力 F_f 。 F_f 计算式如下

$$F_f = \rho_w g V \quad (3)$$

此外,当悬停机器人的浮力 F_f 与其自身重量相等时,可实现其在水中一定深度处的悬停。

1.3 超弹性材料本构模型

悬停机器人由柔性硅橡胶材料 Ecoflex 00-30 制成, Ecoflex 00-30 属于超弹性材料。受外力作用时,超弹性材料的几何特性常表现为非线性变化^[19-21],其弹性模量无法使用线性公式描述,常采用应变能密度函数来表示其力学特性。常用的函数模型有 Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型^[22-23]、Yeoh 模型等,其中 Yeoh 模型(缩减多项式模型)通过单轴拉伸实验数据即可拟合出其应力-应变特性,简单方便,适合模拟材料应变不超过 150% 的较大变形。故本文采用 Yeoh 模型建立 Ecoflex 00-30 材料的应力应变关系, Yeoh 模型应变能密度函数为

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (4)$$

式中: N 为材料应变能密度函数阶数; C_{i0} 、 D_i 为材料实验确定的参数;对于 Ecoflex 00-30 材料认为其完全不可压缩,取 $J = 1$; I_1 为 Green 应变张量中的第 1 个不变量,计算式为

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (5)$$

其中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为拉伸实验中测定的轴向、径向、周向主拉伸比。对于 Ecoflex 00-30 材料,利用 Yeoh 双参数模型即可在一定范围内拟合出其应力-应变特性^[22], Yeoh 应变能密度函数可表示为

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 \quad (6)$$

2 悬停机器人的结构设计与仿真

2.1 结构设计

悬停机器人整体结构外形仿照河鲀,总体尺寸约为 65 mm×30 mm×26 mm,鱼身整体呈流线型,在鱼身中部设有空腔用于封装驱动液体,鱼身顶部设计为平面,可用于携带水下摄像机等负载。悬停机器人基体由柔性硅橡胶材料 Ecoflex 00-30 制成, Ecoflex 00-30 材料的密度为 1.07 g/cm³、弹性模量 63 kPa、泊松比为 0.47。内腔体形状近似为圆柱体,直径约为 25 mm,长度为 30 mm,设计壁厚为 3 mm,设计可封装驱动液体 15 mL。驱动液体材料为 3M™ Novec™ 7000,沸点为 35 ℃,密度为 0.92 g/cm³。悬停机器人整体设计质量为 29 g。

2.2 驱动过程的仿真

通过改变驱动温度,封装在悬停机器人内腔的驱动液体发生液气相变,引起作用在腔体内壁面上的压力变化,从而使腔体的体积发生变化,实现悬停机器人的浮力变化。通过计算发现,在小于 15.5 m 的深度范围内,静水压强远小于驱动液体的饱和蒸气压,故仿真分析中忽略静水压强对悬停机器人的体积变形影响。当驱动温度超过驱动液体的沸点时,驱动液体部分汽化,处于液气平衡共存状态;当驱动液体不完全转化为气体时,在不同的驱动温度下,相变过程总是处于动态平衡的。悬停机器人在驱动过程中存在 3 个驱动状态,如图 2 所示。状态 I:当驱动液体全部为液态或仅少量液体转化为气体时,悬停机器人体积基本保持不变,为液相预膨胀阶段。状态 II:当加热到一定驱动温度时,驱动液体部分或大部分转变为气体时,液相与气相达到液气平衡时,为液气平衡膨胀驱动阶段。状态 III:当驱动液体全部转变为气体时,内腔氛围全部为气体,腔体外壁张力逐渐达到最大值,约束悬停机器人的最大变形,为气相平衡阶段。在液气平衡膨胀驱动阶段,随着驱动温度的不断升高,液气相变的转变程度逐渐加大,悬停机器人体积逐渐增大,为主要驱动阶段。当驱动液体全部汽化后,驱动状态转变为加热气体驱动,随着驱动温度的上升,气体体积变化速率十分缓慢,驱动过程基本停止,故本文主要讨论悬停机器人的液气平衡膨胀驱动阶段。

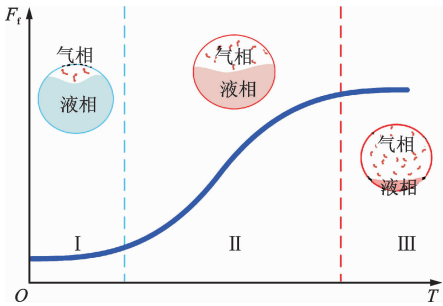


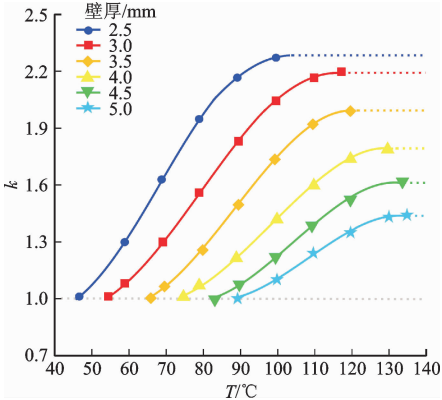
图 2 液气相变驱动阶段

悬停机器人主要发生形变的部分为其内腔体,内腔体形状可简化为一直径为 20 mm、长度为 30 mm 的圆柱体,腔体壁厚为 3 mm。悬停机器人采用 Yeoh 模型通过拉伸试验测量得到材料应力-应变曲线,通过最小二乘法拟合后得到材料模型参数。对于超弹性材料 Ecoflex 00-30, $C_{10}=0.12\text{ MPa}$, $C_{20}=0.02\text{ MPa}$, $D_1=D_2=D_3=0$ 。

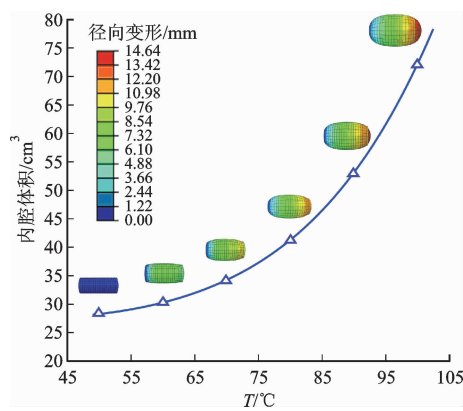
如前文所述,悬停机器人的最佳工作状态为驱动液体部分转化为气体时,因此仿真只讨论液气平

衡膨胀驱动阶段(50~100℃)。使用 Abaqus/Standard 有限元模型分析悬停机器人的内腔体,设置仿真模型中的单元属性为 20 节点二次六面体单元(C3D20RH),并采用二次杂交公式进行计算以便于收敛。

为设置悬停机器人内腔的最佳壁厚,分别在壁厚为 2.5、3、3.5、4、4.5、5 mm 的内腔内壁上施加不同驱动温度下的饱和蒸气压,通过仿真计算出在不同驱动温度下内腔膨胀产生的浮力值,并计算出在不同驱动温度下浮力与悬停机器人自重比 k ,用以表征不同壁厚的内腔的膨胀能力,如图 3a 所示。仿真结果表明,内腔壁厚越小,浮力与悬停机器人自重比 k 越大,悬停机器人内腔的膨胀变形能力越强。图 3a 说明,当内腔壁厚为 2.5 mm 时,内腔的膨胀变形能力最强,考虑到在后续的翻模制备过程中(见下文 3.1 节),如果内腔壁厚过薄会导致内腔变形过大,驱动液体蒸发过程出现泄漏,从而导致悬停机器人失效的情况。图 3a 表明,内腔壁厚为 3 mm 时,其最大浮力自重比($k=2.18$)与壁厚为 2.5 mm 时的情况($k=2.24$)相差不大,且驱动温度范围更宽,悬停机器人的可控性较壁厚为 2.5 mm 时更好。另



(a) 不同内腔壁厚时的浮力自重比



(b) 内腔变形仿真

图 3 悬停机器人的壁厚确定与变形仿真

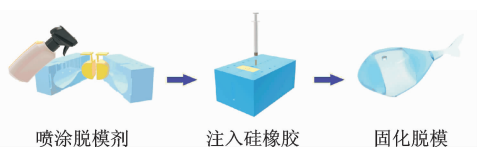
外,壁厚如果过薄,悬停机器人的隔热能力差,将提高驱动功耗,同时增大对水下悬停机器人周围环境温度的影响。故综合考虑悬停机器人制备工艺要求、低功耗要求与可操控性要求,同时为了不影响水下环境,设置内腔壁厚为 3 mm。

此外,在内腔体模型的内壁面上分别施加不同驱动温度下对应的饱和蒸气压,从而获得在不同驱动温度下悬停机器人的膨胀效果。通过仿真结果可以发现,悬停机器人内腔体积随着驱动温度的升高,发生了明显的增大。通过提取悬停机器人膨胀后内腔内壁面上各点的总位移,拟合出变形曲线后进行积分,得到悬停机器人变形后的体积,如图 3b 所示。根据悬停机器人的温度-体积曲线可知,通过调整驱动温度可实现其浮力控制,最终实现悬停机器人的上浮下潜运动与定深悬停。

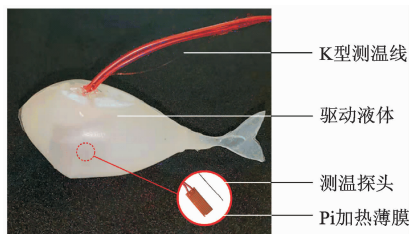
3 液气相变驱动实验及分析

3.1 悬停机器人的制造

采用翻模法制备悬停机器人的基体。模具采用光固化 3D 打印方法制备,分为外模具和内腔占位模具,制备工艺流程如图 4a 所示:①将 Ecoflex 00-30 的 A、B 液按质量 1:1 比例混合,搅拌 5 min 后,真空处理 3 min 去除材料内气泡;②在外模具和内腔占位模具的表面均匀喷涂脱模剂,静置 30 min;③将模具组装好后用注射器将 Ecoflex 00-30 注入模具内,真空处理 1 min,去除模具内 Ecoflex 00-30 的微小气泡;④40 ℃ 下固化 4~5 h,待悬停机器人固化成型后脱模,使用无水乙醇对悬停机器人超声清洗 8 min,并对进线开口处做亲水处理;⑤将 Pi 加热薄膜与温度传感器清洗后插入内腔中,注入 3MTM NovecTM 7000 液体 15 mL,再将新配制的 Ecoflex



(a) 制备工艺



(b) 实物模型

图 4 悬停机器人的制备与实物模型

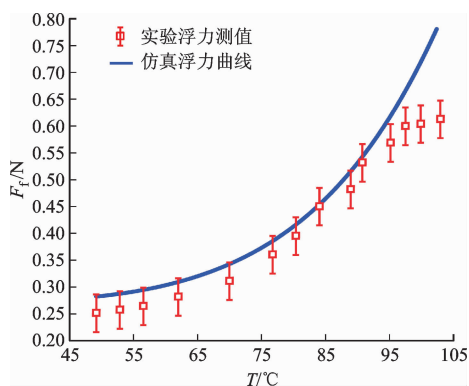
00-30 在 140 ℃ 下预固化 2~4 min 后,在黏性较大时封住进线入口。封装时,若存在 Ecoflex 00-30 固化效果不佳的情况,在 Ecoflex 00-30 中掺入质量分数为 0.05% 的碳纳米管或石墨烯,激光加热辅助固化^[24],最后制成的悬停机器人实物模型如图 4b 所示。此外,悬停机器人通过线缆进行加热的驱动方式,可进一步优化为采用远程遥控的无线加热驱动方式^[25],摆脱线缆局限。

3.2 液气相变驱动实验及分析

实验中,利用 PID 温度控制仪控制驱动温度,同时使用温度传感器和测力计对悬停机器人在不同温度下产生的浮力进行测量,如图 5a 所示。所采用的温度传感器为开普森超细 K 型热电偶,温度测定范围为 0~200 ℃。Pi 加热薄膜插在悬停机器人内腔中,PID 温度控制仪实时控制驱动温度,内腔环境温度由温度传感器实时反馈。悬停机器人产生的浮力通过一组滑轮改变方向后,通过测力计测量值计算得出。在进行浮力测试前,悬停机器人在设定的驱动温度下驱动至少 5 min,待测力计读数稳定后再进行测量,最终得到在不同驱动温度下悬停机器人的浮力,如图 5b 所示。



(a) 液气相变驱动实验



(b) 实验测定温度-浮力曲线

图 5 悬停机器人浮力测定实验

实验表明,在预膨胀阶段,驱动温度从环境温度(20 ℃)升高到沸点附近(约 50 ℃)时,悬停机器人腔体内的驱动液体绝大部分处于液态,整体未表现出明显的膨胀变形,产生的浮力小于自重(约为 0.29 N), $0 < F_f < 0.29$ N。当驱动温度高于沸点(50~

100 ℃)时,悬停机器人开始稳定膨胀变形,内腔壁上压力逐渐增大,在驱动温度升高的过程中产生连续的膨胀变形,浮力逐渐增大。当驱动液体全部转变为气体时,悬停机器人的体积随驱动温度变化越来越慢,浮力基本保持不变。通过实验数据可知,悬停机器人内腔封装 15 mL 驱动液体时,在 50~100 ℃的驱动温度下,可提供 0.3~0.56 N 的浮力,最大浮力是其自重的 1.95 倍。仿真数据与实测数据的增长趋势一致,随着驱动温度的升高,悬停机器人的浮力逐渐增大。实验测定浮力与仿真值存在一定误差,实验值相对仿真值较小,主要是由于悬停机器人内封装的 Pi 加热片与驱动液体为面接触,不能同时加热所有驱动液体,存在热传导延迟,可能出现加热不充分的现象,导致实验温度下的饱和蒸气压略小于相应温度下的理论饱和蒸气压,从而使实验测定浮力值偏低;同时还存在材料误差,由于固化后的 Ecoflex 00-30 材料在较高温度(约 90 ℃)下变形较大时,材料内微小孔隙增大,会出现气体外渗。虽然对贴合处进行了亲水处理,封装时两部分 Ecoflex 00-30 很难实现完美贴合,产生的微小孔隙导致气体外渗,贴合程度对悬停机器人的整体密封性产生相当大的影响。此外,测量误差与温度控制误差一定程度上也会影响实验结果。

悬停机器人可实现定深度悬停,最终悬停高度 h 表示为

$$h = h_0 + vt \tag{7}$$

式中: h_0 初始位置; v 为悬停机器人的上浮速度,由驱动温度决定; t 为上浮时间。为了实现悬停机器人的定深度悬停,使悬停机器人初始位置位于水底,首先升高驱动温度,使悬停机器人上浮;当悬停机器人接近可悬停位置时,降低驱动温度,使其减速向上,停止在可悬停深度;若上浮高度超过了可悬浮深度,则需要再降低驱动温度,使其向下运动最终停止在可悬停深度。如图 6 所示,当驱动温度稳定在 53 ℃(± 2 ℃)时,悬停机器人可悬浮在距水面约 180 mm 处,悬浮位置精度为 ± 10 mm。根据图 5b,由浮力仿真数据,当驱动温度设置在 55 ℃时,悬停机器人可提供的浮力为 0.3 N,约等于悬停机器人的自重,在此驱动温度下可以实现悬停机器人的水下悬停。实验中的悬停机器人可悬停驱动温度与通过仿真得到的可悬停驱动温度基本一致。

此外,通过调整悬停机器人内腔封装驱动液体量,可以改变其在不同驱动温度下的浮力。分别测量了内腔封装 15、20、25 mL 时,悬停机器人在特定

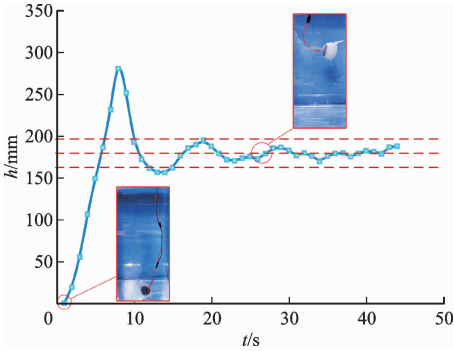
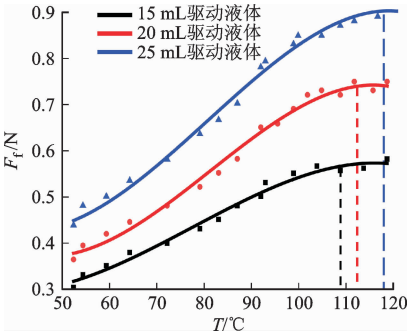
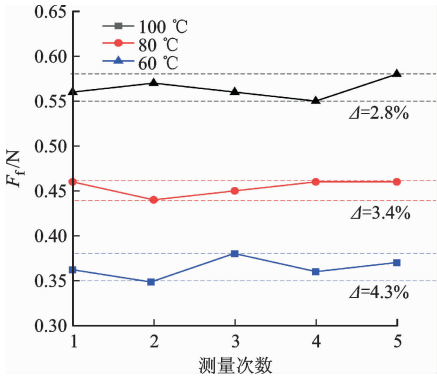


图 6 悬停机器人定深度悬停位置曲线

驱动温度下的浮力曲线,如图 7a 所示。由于内腔封装液体量的差异,悬停机器人的液气平衡膨胀阶段所对应的温度范围存在差异,而且内腔封装的驱动液体越多,产生的浮力越大,驱动温度范围越宽。当悬停机器人内腔封装 25 mL 驱动液体时,驱动温度范围可达 50~125 ℃,最大可提供 0.93 N 的浮力,为悬停机器人自重的 2.4 倍。显然,只要在悬停机器人内腔封装更多的低沸点驱动液体,就可以获得更宽的温度操控范围以及更大的浮力。同时,为了验证悬停机器人驱动能力的可重复性,分别在不同驱动温度下多次测量了内腔封装 15 mL 驱动液体的悬停机器人的浮力,如图 7b 所示,悬停机器人在不同的驱动温度下的浮力变化范围在 ± 0.02 N



(a) 变封装量的浮力测试



(b) 悬停机器人浮力的重复性测试

图 7 悬停机器人的驱动性能测试

以内,浮力变化范围 Δ 不超过 5%。

4 结 论

(1) 本文设计并制造了一种新型的基于液气相变驱动的柔性水下悬停机器人,通过对封装在悬停机器人内腔的驱动液体进行加热,使驱动液体在特定温度范围内保持在液气平衡状态,使悬停机器人的体积发生变化,从而改变悬停机器人的浮力,实现悬停机器人的上浮下潜运动与定深悬停。实验结果表明:内腔封装 15 mL 驱动液体的悬停机器人最大可提供约为其自重 1.95 倍的浮力;悬停机器人在驱动温度为 53℃ 时可在水下 180 mm 处悬停;通过调整其内腔封装的驱动液体的量,可获得更大的浮力。

(2) 本文所设计的悬停机器人的驱动可重复性较好,相同温度下多次测量其浮力变化不超过 5%。相较于传统的水下机器人,噪声小,功耗小,并且由硅橡胶软材料制成体积较小,非常适合狭窄复杂的水下工况,在很多领域都有很好的应用前景,如水下资源勘探、水下救援等。

(3) 本文提出的基于液气相变驱动的柔性水下悬停机器人,可根据工作环境需求,选用不同沸点的驱动液体,实现多工况驱动,从而拓展该机器人的使用范围。

参考文献:

- [1] 王燕, 张志锋, 姚子伟, 等. 我国海洋环境保护标准化的现状、需求和建议 [J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(4): 36-39.
WANG Yan, ZHANG Zhifeng, YAO Ziwei, et al. Current status, requirement analysis and suggestion on marine environmental protection standardization [J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(4): 36-39.
- [2] 许竞克, 王佑君, 侯宝科, 等. ROV 的研发现状及发展趋势 [J]. 四川兵工学报, 2011, 32(4): 71-74.
- [3] SAKAGAMI N, IBATA D, IKEDA T, et al. Development of a removable multi-DOF manipulator system for man-portable underwater robots [C]// The Twenty-First International Offshore and Polar Engineering Conference. [S. l.]: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011: 279-284.
- [4] 梁艺鸣, 曹许诺, 陈祥平, 等. “刚-柔”共融型仿生机器鱼 [J]. 中国科学(技术科学), 2018, 48(12): 1295-1301.
LIANG Yiming, CAO Xunuo, CHEN Xiangping, et al. Bio-inspired rigid-soft coexisting robotic fish [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(12): 1295-1301.
- [5] 徐丰羽, 孟凡昌, 范保杰, 等. 软体机器人驱动、建模与应用研究综述 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 64-75.
XU Fengyu, MENG Fanchang, FAN Baojie, et al. Review of driving methods, modeling and application in soft robots [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2019, 39(3): 64-75.
- [6] 王举田. 基于 SMA 驱动的仿生水母机器人技术研究 [D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2015: 25-31.
- [7] 王成军, 李帅. 软体机器人研究现状 [J]. 微纳电子技术, 2019, 56(12): 948-955, 991.
WANG Chengjun, LI Shuai. Research status of the soft robot [J]. Micronanoelectronic Technology, 2019, 56(12): 948-955, 991.
- [8] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13.
WANG Tianmiao, HAO Yufei, YANG Xingbang, et al. Soft robotics: structure, actuation, sensing and control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 1-13.
- [9] ZHANG Yajun, WANG Lanlan, GAO Wei, et al. Bioinspired from butterfly wings: programmable actuation of isolated rods architectures for magnetic-assisted microswitches [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(7): 075014.
- [10] DE GREEF A, LAMBERT P, DELCHAMBRE A. Towards flexible medical instruments: review of flexible fluidic actuators [J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 311-321.
- [11] HU Ying, LIU Jiaqin, CHANG Longfei, et al. Actuators: electrically and sunlight-driven actuator with versatile biomimetic motions based on rolled carbon nanotube bilayer composite [J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(44): 1704388.
- [12] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists [J]. Angewandte Chemie, 2011, 50(8): 1890-1895.
- [13] TSUJ T, FUKUDA O, SHIGEYOSHI H, et al. Biomimetic impedance control of an EMG-controlled prosthetic hand [C]// Proceedings of 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 377-382.
- [14] 鲍官军, 张亚琪, 许宗贵, 等. 软体机器人气压驱动结构研究综述 [J]. 高技术通讯, 2019, 29(5): 467-

- 479.
- BAO Guanjun, ZHANG Yaqi, XU Zonggui, et al. Review on pneumatic-driven structure for soft robot [J]. Chinese High Technology Letters, 2019, 29(5): 467-479.
- [15] 吕泽良, 黄超雷, 陈正泉. 气动软体机器人执行器的控制与研究 [J]. 装备制造技术, 2018(11): 5-8.
- LÜ Zeliang, HUANG Chaolei, CHEN Zhengquan. Control and research of pneumatic software robot actuator [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018 (11): 5-8.
- [16] 费燕琼, 庞武, 于文博. 气压驱动软体机器人运动研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 14-18.
- FEI Yanqiong, PANG Wu, YU Wenbo. Movement of air-driven soft robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 14-18.
- [17] KANG Rongjie, BRANSON D T, ZHENG Tianjiang, et al. Design, modeling and control of a pneumatically actuated manipulator inspired by biological continuum structures [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2013, 8 (3): 036008.
- [18] 衣守志, 王强, 马沛生. 饱和蒸气压测定方法评述 [J]. 天津轻工业学院学报, 2001, 16(2): 1-4.
- YI Shouzhi, WANG Qiang, MA Peisheng. A review of determination methods for vapor pressure [J]. Journal of Tianjin University of Light Industry, 2001, 16 (2): 1-4.
- [19] OGDEN R W. Non-linear elastic deformations [J]. Engineering Analysis, 1984, 1(2): 119.
- [20] MOONEY M. A theory of large elastic deformation [J]. Journal of Applied Physics, 1940, 11(9): 582-592.
- [21] YEOH O H. Some forms of the strain energy function for rubber [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1993, 66(5): 754-771.
- [22] ZHANG Xi, WANG Gang, XIA Peng, et al. Finite element analysis and experimental study on contact pressure of hydraulic support bud-shaped composite sealing ring [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(10): 168781401667484.
- [23] OGDEN R W. Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids [J]. Proceedings of the Royal Society of London: A Mathematical and Physical Sciences, 1972, 326(1567): 565-584.
- [24] HAN Jie, JIANG Weitao, NIU Dong, et al. Untethered soft actuators by liquid-vapor phase transition: remote and programmable actuation [J]. Advanced Intelligent Systems, 2019, 1(8): 1970080.
- [25] HAM S W, KUANG J X, VANONI D J. Wireless power for heating or cooling: US20110056215 [P]. 2011-03-10.

(编辑 杜秀杰)