

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2018.05.011

# AUV 用高精度吸排油浮力调节系统

尹远<sup>1,2</sup>, 刘铁军<sup>1,2</sup>, 徐会希<sup>1,2</sup>, 石凯<sup>1,2</sup>, 李阳<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2.中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:**针对黑潮等海洋现象的长期、间歇性观测需求,研发了一种长期定点剖面观测 AUV 系统。为降低能耗,在观测间隔期间,采用浮力调节技术实现定深悬浮,并关闭主要设备实现休眠节能。传统的油囊式浮力调节系统不能精确测量调节量,难以满足 AUV 悬浮休眠节能的需求。为实现浮力调节量的精确控制,设计了一种内油箱为活塞式油缸的吸排油浮力调节系统,通过活塞位置的精确测量实现浮力调节量的精确测量和控制。试验结果表明,该浮力调节系统性能满足设计指标,调节精度可达到 10 mL,搭载该浮力调节系统的 AUV 可实现高精度定深控制和剩余浮力的精确调节。该研究为拓展 AUV 的作业模式、提高 AUV 作业时间奠定了基础,为高精度浮力调节系统的开发提供了设计参考。

**关键词:** AUV; 浮力调节; 长期观测

**中图分类号:** TH69      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-2029(2018)05-0066-06

针对海洋黑潮现象观测需求,开发了“长期定点剖面观测型 AUV 系统”。该系统的主要特点是:可在预定位置多次自主垂直潜浮(不小于 30 d,不小于 4 次/d),遍历该点所需观测海洋深度(最大 800 m),从而完成垂直剖面海洋要素测量;不观测期间,可实现水下悬浮,并休眠节能。为实现剖面垂直潜浮、低功耗休眠悬浮,在 AUV 艏、艉各布置一套浮力调节系统用于调节剩余浮力和纵倾。在该项目中,共开发了两种浮力调节系统。一种方案为吸排水浮力调节系统,其原理是设置一个海水活塞缸,海水活塞缸的无杆腔与海水连通,改变海水缸活塞位置就可以改变排水体积。海水缸活塞由液压驱动,其位置通过位移传感器精确测量,活塞位置与调节量精确对应,从而实现调节量的精确控制。搭载吸排水浮力调节系统的长期定点剖面观测型 AUV 已完成 4 次海上试验,包括浅海试验、深海试验和 2 次应用<sup>[1]</sup>,其性能和可靠性得到了有效验证。在开发吸排水浮力调节装置的同时,另外还开发了

一套吸排油方式的浮力调节装置。与吸排水浮力调节装置相比,吸排油浮力调节装置在重量、功耗方面有一定的优势。

吸排油浮力调节装置(通过吸排油调节剩余浮力状态)在浮标、水下滑翔机、AUV 上都得到了应用。浮标、水下滑翔机利用浮力调节装置为上浮下潜提供驱动力<sup>[2-5]</sup>。需要下潜时,通过液压泵或者内外压差将外油囊的液压油注入内油囊,减小排水体积。需要上浮时,利用液压泵将内油囊的液压油排入外油囊。AUV 上采用的油囊式浮力调节装置其原理与滑翔机上采用的类似<sup>[6-7]</sup>。

吸排油浮力调节装置通常采用皮囊作为内油箱,对浮力调节量的测量主要有两种方式。一种方式是对皮囊的运动进行导向,通过测量皮囊轴向位移计算调节量<sup>[8]</sup>。因皮囊变形不规则,其测量精度有限。另一种方式将内皮囊至于封闭腔,通过测量容腔压力、温度变化,推算浮力调节量,虽然采用参数校准、控制补偿等方法可将误差从 0.35 L 降低到

收稿日期 2018-08-10

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(XDA11040102)

作者简介:尹远(1984-),男,硕士,副研究员,主要研究方向为深海 AUV 及浮力调节系统开发。E-mail: yinyuan@sia.cn

0.14 L<sup>[9]</sup>,但因参数耦合及非线性等因素,将控制精度提到更高变得困难。此外,AUV 进行剖面观测和定深悬浮,需要在任意深度下具有双向浮力调节能力。采用双向泵进行吸排油,大深度时,外压力会作用在液压泵进油口,会对泵造成损伤。利用压差回油时,随着水深变化外压力变化范围较大,不同压差下,回油速度变化很大且与排油速度不等,给精细定深悬浮控制带来困难。与传统吸排油浮力调节装置相比,为长期定点剖面观测型 AUV 开发的吸排油浮力调节具有精度高、任意工作深度下双向调节且调节速度相等的特点。

## 1 总体设计

### 1.1 功能需求

#### (1) 定深悬浮

为了获取剖面海流信息,利用搭载的 75K ADCP 进行测量,其最大打底高度为 950 m,但最大测流深度为 500 m。当工作水深大于 500 m 时,考虑进行两次测流,在水面时进行一次测流,然后下潜至 400 m,在 400 m 进行定深悬浮测流。

在观测间歇期,AUV 下潜至海底,与海底保持一定的安全高度,通过精确调节剩余浮力和纵倾角,进行悬浮。此时,将多数设备关闭,只通过值班监管电路对深度、高度等信息进行监控,实现低功耗休眠。

#### (2) 实现 AUV 上浮和下潜运动的驱动

进行剖面观测时,需要 AUV 遍历整个观测点的深度剖面,利用螺旋桨推进实现上浮下潜时需要持续耗能,采用浮力调节装置调节一次即可持续上浮或下潜,驱动效率更高。此外,还可以不依赖操舵实现下潜或变深,具有更好的垂直面机动性能。

#### (3) 不同水文环境的浮力自适应能力

长期定点剖面观测 AUV 既可以进行定点长期观测,也可进行大范围走航观测。大范围航行时因水域密度变化,导致剩余浮力不同,造成 AUV 航行姿态变差或无法航行,需要对剩余浮力进行调节。此外,由于不同深度下密度、压缩量差异造成剩余浮力不同,也需要浮力调节装置平衡剩余浮力变化。

### 1.2 系统指标

根据功能需要,在长期定点剖面观测 AUV 上配置有两个浮力调节段,用于调节剩余浮力和纵

倾,如图 1 所示。两个浮力调节段与中间舱段构成整体密封结构。AUV 艏、艉为透水结构,设备独立密封。

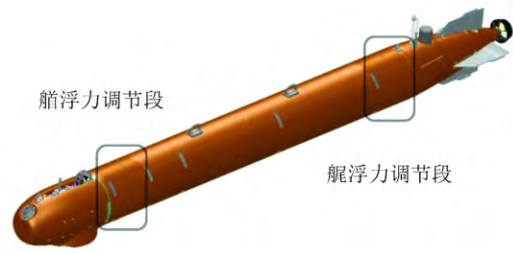


图 1 浮力调节装置在 AUV 上布置

Fig.1 Variable buoyancy system on the AUV

AUV 最大工作深度为 800 m,根据历史密度数据、估算的压缩量、期望的上浮下潜速度等因素,确定单个浮力调节装置的指标为:

调节体积:单个模块最大调节体积 7 L,调节速度 3.5 L/min,调节精度 0.02 L。

### 1.3 系统原理

AUV 垂直面运动方程可表示如下:

$$m \frac{d\omega}{dt} = B - k |\omega| \omega \quad (1)$$

式中  $\omega$  为垂向速度  $m$  为 AUV 有效重量  $B$  为剩余浮力  $k$  为水动力系数。提高浮力调节装置的分辨率可以提高 AUV 定深精度并能减小垂向漂移,对于实现低功耗休眠悬浮具有重要意义。

为实现高精度浮力调节,考虑采用活塞式油缸代替传统的皮囊作为内油箱,通过内油箱活塞位置的高精度检测实现浮力调节量的高精度控制。

浮力调节系统液压原理如图 2 所示。

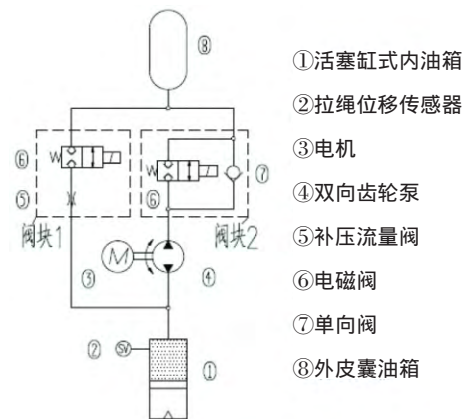


图 2 吸排油浮力调节系统原理图

Fig.2 Principle schematic of the variable buoyancy system

当需要增大浮力时,齿轮泵经过单向阀由内油箱向外皮囊注油;当需要减小浮力且水深较浅时,

阀块 2 电磁阀开, 齿轮泵经过电磁阀由外皮囊向内油箱注油; 当需要减小浮力且水深较大时, 阀块 1 电磁阀开, 外皮囊在外部水压下直接向内油箱注油, 此时齿轮泵不工作避免吸油口压力过大对泵造成损害。为避免不同深度下压力对回油速度的影响, 在阀块 1 中串联了一个补压流量阀, 经过该阀后, 回油速度不受深度影响。

## 2 浮力调节装置设计与实现

### 2.1 内油箱设计

为实现浮力调节量的精确测量, 将内油箱设计为活塞式油缸。活塞式油缸结构如图 3 所示。

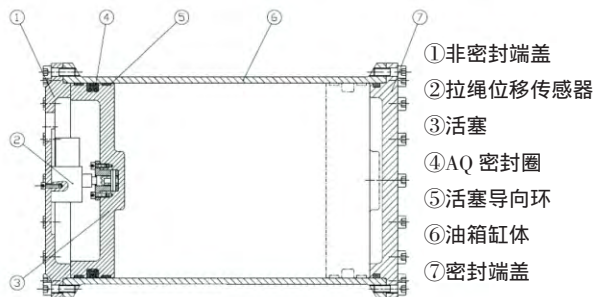


图 3 内油箱结构图

Fig.3 Structure drawing of internal oil tank

活塞式油缸与普通液压缸不同, 其活塞两端均为无杆腔, 结构与活塞式蓄能器类似。活塞式油缸内径为 200 mm, 行程为 260 mm, 调节量大于 8 L。为了减小空间, 采用了一个拉绳传感器对活塞位置进行精确测量, 拉绳传感器线性精度为 0.1% FS。

为克服活塞动密封的阻力, 避免造成齿轮泵吸油口负压, 拟对整个浮力调节舱段充气。考虑到耐压舱气密检测时充气至 0.15 MPa, 因此对浮力调节舱段充气 0.15 MPa。定点观测 AUV 整个耐压舱段被气密隔板分为 3 个气密舱室, 其中艏浮力调节段气密舱室空间较小, 约为 55 L。根据理想气体状态方程:

$$\frac{P \cdot V}{T} = C \quad (3)$$

忽略浮力调节时温度变化, 当内油箱由注满状态变为排空状态时, 浮力调节段绝对压力由  $P_1$  变为  $P_2$ 。艏浮力调节段气密舱室体积由约 55 L 变为 63 L, 舱内压力由 0.15 MPa 变化为 0.118 MPa, 压力变化 0.032 MPa, 未出现负压。

### 2.2 外油箱设计

外油箱采用橡胶油囊, 通过金属保护罩固定在

耐压端盖上。通过皮囊外圈的圆形凸起与保护罩端面的凹槽配合实现密封。

外皮囊的内径为  $\varnothing 364$  mm, 高度为 96 mm, 与外凸的耐压球盖组成的外油箱实际容量约为 9 L。为避免油囊内的液压油排出一部分后, 皮囊贴上耐压端盖球面, 导致排油不畅。设计时, 在耐压球盖与皮囊之间增加了一层塑料油槽, 塑料油槽内表面与耐压球盖贴合, 外表面上分布浅槽通向出油口。出油口设置有一个分流块, 分流块的侧向开有数个小孔, 顶部为球面, 当液压油回流内油箱后, 保护皮囊不被外压击穿。

外油箱的内部结构如图 4 所示。

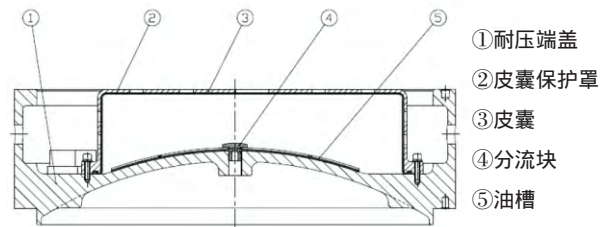


图 4 外油箱结构图

Fig.4 Structure drawing of external oil tank

### 2.3 液压系统

液压系统动力源设计时主要考虑降低噪音、提高输出效率。动力源传动设计时, 采用直流无刷直驱电机通过弹性联轴器直接与齿轮泵输出轴相连, 避免减速机带来的效率损失和产生的额外噪音。齿轮泵排量为 2 mL/r, 电机转速为 2 000 rpm 时, 输入功率需求为 0.627 kW, 所需扭矩为 2.99 N·m, 输出流量为 3.8 L/min (容积效率 95%)。选用的电机在 2 000 rpm 时最大连续输出扭矩为 3.88 N·m, 满足需求。

液压阀选用了 SUN 公司插装阀, 包括两个电磁锥阀、一个单向阀和一个补压流量阀。其中补压流量阀的最大流量为 0.4~23 L/min 可选, 根据动力源的输出流量, 将其设定为 4 L/min。液压阀分别安装在两个阀块上, 通过液压钢管与内外油箱相连。

## 3 试验验证

### 3.1 模拟潜水压力试验

吸排油浮力调节装置完成单元调试及联调后, 将艏、艉浮力调节段与中间舱段组成整体密封舱。利用大型压力罐对其性能进行了模拟潜水压力试验, 对浮力调节装置的主要性能进行了测试, 如图 5 所示。

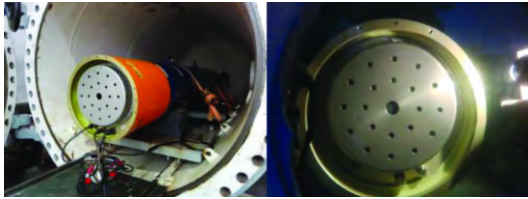


图 5 模拟潜水压力试验

Fig.5 Pressure test scene

(1) 最大工作深度

压力罐密封后进行注水加压,测试最大压力为 8.1 MPa。在 3 MPa、5 MPa、7 MPa 时,对浮力调节系统进行增大和减小浮力测试。各压力下,浮力调节系统浮力调节功能正常。

根据系统设计,当深度小于 50 m 时,通过齿轮泵由外皮囊向内油箱注油。当深度大于 50 m 时,打开电磁阀,在外压作用下外皮囊中液压油自动注入内油箱。利用模拟潜水压力试验,对回油方式切换功能也进行了测试。当外压力小于 0.5 MPa 时,控制内油箱活塞位置增大,电机启动、阀块 2 中电磁阀打开,由电机驱动齿轮泵吸油。当外压力大于 0.5 MPa 时,控制内油箱活塞位置增大,阀块 1 中电磁阀打开,在外压下自动回油。回油方式切换功能正常。

(2) 调节量

内油箱内径为 200 mm,设计行程为 262 mm。试验时,设定内油箱活塞调节范围为 1~261 mm,两端各预留了 1 mm 的缓冲区,最大调节量为 8.16 L。

(3) 调节速度

增大浮力、50 m 以浅减小浮力均由电机驱动齿轮泵实现,调节速度由电机速度决定。设置电机转速为 1 800 rpm,将内油箱活塞位置由 10 mm 增大至 240 mm 耗时 2 min,平均调节速度为 3.61 L/min。

当外压大于 0.5 MPa 时,在外压下皮囊中液压油自动回流内油箱。为保证不同外压下,液压油回流速度相同,采用了一个补压流量阀调节流速,设

表 1 不同外压下通过节流阀的流速

Tab.1 Flow rate via pressure compensated flow control valve under different external pressures

序号	外压力/MPa	排出油量/L	时间/s	流速/L·min <sup>-1</sup>
1	0.5	2	28.6	4.2
2	2.5	2	27.3	4.4
3	5	2	27.5	4.36
4	6	2	27.6	4.34
5	8	2	27.3	4.4

定流速为 4 L/min。在不同外压下,回油速度统计如表 1 所示。可见,虽然外压变化了十几倍,但流速变化不超过 5%,能有效保持流速的稳定。

(4) 调节精度

系统设计时,最初将调节门限设置为 50 μm。进行模拟潜水压力试验时发现,当由外油囊向内油箱注油时,到达调节位置附近时,电机一直间歇性运动不停。从数据上看,调节时实际位置小于目标位置,电机启动目的是往回调节,但一直达不到目标位置。虽然从位置检测上可以让调节分辨率足够小,但电机、齿轮泵有一定的机械特性,建立压力需要一定的时间,设置门限过小会超出泵的能力。将调节门限设置为 300 μm 后,电机间歇运动不停异常现象消失。按照内油箱活塞位置控制门限为 300 μm 计算,浮力调节系统调节精度为 9.42 mL。

3.2 水池试验

在水池,对搭载吸排油浮力调节系统的长期定点剖面观测 AUV 进行了下潜、上浮、定深悬浮功能调试。潜水器自水面可利用浮力调节系统实现无动力下潜,在预定深度可进行定深控制,通过精确调节减小垂向速度后可定深悬浮。在水池进行水下 2 m 定深悬浮如图 6 所示。在水下,可通过浮力调节系统排油上浮至水面。

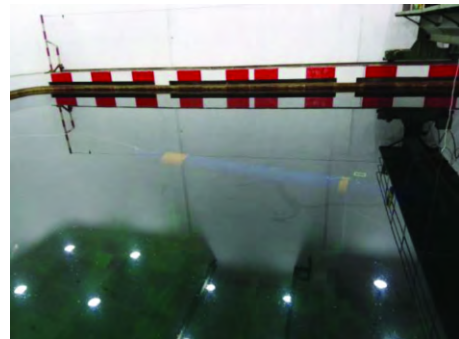


图 6 浮力调节功能水池调试

Fig.6 Pool test of buoyancy adjustment function

3.3 湖上试验

2017 年 11 月在千岛湖对长期定点剖面观测型 AUV 进行了湖上试验,经过对浮力调节系统的控制参数进行调整优化后,对 AUV 进行了航行和悬浮试验。

AUV 利用浮力调节系统进行水下定深,性能如图 7~图 8 所示。经过 10 min 的粗调节,水下定深 8 m 的深度偏差小于 0.3 m,垂向速度小于 0.05 m/s。再经过 10 min 精调平后,深度偏差值、垂向速度值均可以降低到 0.01 以内。粗调平后 AUV 以 2~5 kn 速

度航行时 纵倾角均在  $1^\circ$  以内。

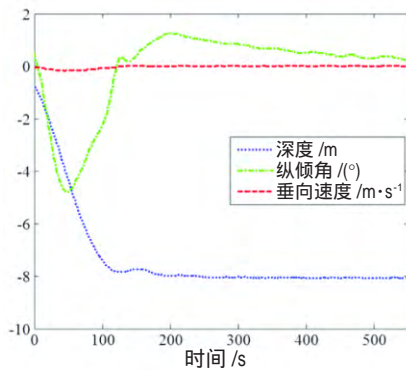


图 7 水下定深粗调

Fig.7 Experimental results of rough buoyancy adjustment

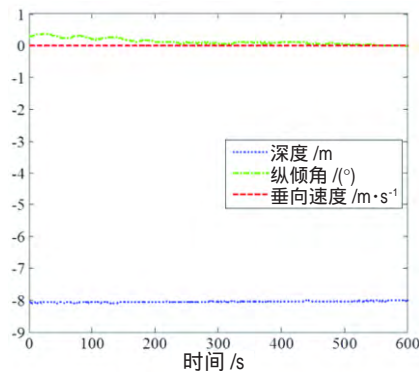


图 8 水下定深精调

Fig.8 Experimental results of precise buoyancy adjustment

在湖上也对悬浮休眠、值班监管功能进行了测试。AUV 经过定深精调后,垂向速度几乎保持为零,可认为剩余浮力为零,此时关闭 AUV 上设备进入休眠状态,只对深度进行监管,超出设定阈值时唤醒主控计算机。设定深度偏差阈值为 2 m 约 10 min 后 AUV 被唤醒,AUV 调节剩余浮力上浮至水面,如图 9 所示。AUV 在湖上不能长时间定深悬浮是因为湖水密度几乎不随深度变化,即使剩余浮力足够小仍能产生持续的微弱垂向运动,因此只进行流程测试。

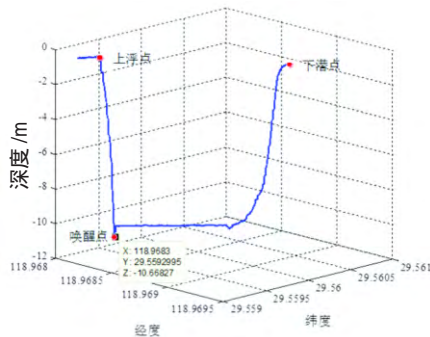


图 9 AUV 水下休眠监管测试

Fig.9 Underwater sleep and supervision test

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 活塞式内油箱 内油箱设计采用了活塞缸式油箱,解决了浮力调节量的精确测量问题。设计时担心活塞移动阻力太大,容易造成齿轮泵吸油时产生负压,造成吸油不畅。实际测试时,不施加外压,泵可正常吸油,未出现吸油不畅现象。从调试和测试结果来看,采用 AQ 封用于活塞缸密封时密封可靠、阻力较小。

(2) 恒流量自回油 浮力调节系统减小浮力时,可利用外压实现外皮囊中液压油自动回到内油箱,主要问题是外压不同回流速度也不同。这对于定深悬浮控制性能带来不利影响。通过实验表明增加补压流量阀可实现不同深度下回流速度的稳定,解决了压力不同回流速度变化的问题。

(3) 液压阀内漏影响 根据液压阀样本提供的性能参数,液压阀均存在不同程度的内漏。设计时,曾担心因为液压阀内漏,活塞在海水外压下不能保持位置,导致浮力持续减小。通过模拟潜水压力试验以及湖上试验表明液压阀内漏量可忽略不计,未对 AUV 剩余浮力造成影响。

### 4.2 结论

针对有些海洋现象的长期、间歇性观测需求,设计了 AUV 用吸排油式高精度浮力调节系统,通过休眠悬浮节能实现 AUV 长期间歇性观测。通过模拟潜水压力试验对浮力调节系统的最大工作压力、调节量、调节速度等性能进行了验证,通过湖上试验对利用浮力调节系统实现上浮、下潜、定深悬浮等功能进行了验证。采用液压泵配合节流阀的吸排油浮力调节系统可实现任意工作深度下的双向浮力调节,可实现定深控制、垂直剖面观测,提高了 AUV 作业的灵活性;采用活塞缸式内油箱,解决了浮力调节量的精确测量与控制问题,可将浮力调节的分辨率由 100 mL 以上提高至约 10 mL,可实现 AUV 剩余浮力的精确调节;搭载高精度双向调节浮力系统的 AUV,可实现无动力上浮下潜、垂直剖面观测、休眠悬浮,拓展了 AUV 的作业模式,特别是休眠悬浮功能使 AUV 工作时间由数十小时提高至数十天成为可能。

## 参考文献:

- [1] 水下机器人研究室, 探索 1000 自主水下机器人黄海应用航次创佳绩.[EB/OL].(2018-07-09). [http://www.sia.cn/xwzx/kydt/201807/t20180709\\_5040358.html](http://www.sia.cn/xwzx/kydt/201807/t20180709_5040358.html).
- [2] 陈璐, 潘彬彬, 曹正良, 等.自动剖面浮标研究现状及展望[J].海洋技术学报,2017,36(2): 1-9.
- [3] 史先鹏, Lembke Chad.一类水下自治漂流浮标的定深控制技术研究与应用[J].海洋技术学报,2014,33(5): 13-17.
- [4] J C Yu, A Q Zhang, W M Jin. Development and experiments of the sea-wing underwater glider[J] China Ocean Engineering, 2011, 25 (4): 723-736.
- [5] J Sherman, R E Davis, W B Owens, et al. The Autonomous Underwater Glider "Spray"[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 437-446.
- [6] 武建国,石凯,刘健,等. 6 000 m AUV“潜龙一号”浮力调节系统开发及试验研究[J].海洋技术学报,2014,33(5):1-7.
- [7] 方旭.油囊式浮力调节装置的研制[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [8] 俞建成,祝普强,金文明,等.一种水下机器人用自回油浮力调节装置. 200910220203.0[P]. 2009.11.27.
- [9] 赵勇.水下浮力调节系统设计及模拟实验技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.

## High Resolution Oil Bladder Type Variable Buoyancy System for Autonomous Underwater Vehicles

YIN Yuan<sup>1,2</sup>, LIU Tie-jun<sup>1,2</sup>, XU Hui-xi<sup>1,2</sup>, SHI Kai<sup>1,2</sup>, LI Yang<sup>1,2</sup>

1. *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 10016, Liaoning Province, China;*

2. *Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning Province, China*

**Abstract:** A long term station-keeping profile observing AUV is developed for the long-term and intermittent observation of ocean phenomena such as Kuroshio. In order to reduce energy consumption, a variable buoyancy system is used to achieve constant depth suspension during the observation interval, and the main equipment is shut down to achieve energy-saving sleep. The traditional oil bladder type variable buoyancy system is not able to accurately measure the regulation amount, so it is difficult to meet the AUV's requirements for suspension sleep as to save energy. In order to realize accurate control of buoyancy adjustment, a suction and drainage variable buoyancy system is designed, with internal tank as the piston cylinder. The precise measurement and control of buoyancy adjustment is realized by precise measurement of piston position. Experiment results show that the performance of the variable buoyancy system can meet the design requirements, with the adjustment accuracy reaching 10 mL. The AUV with the buoyancy control system can achieve high precision depth control and accurate adjustment of residual buoyancy. This work lays foundation for expanding AUV operation mode and improving AUV operation time, and provides a reference for the development of high precision buoyancy control system.

**Key words:** autonomous underwater vehicle (AUV); variable buoyancy system; long-term observation