

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2016.0395

## 模块化自主水下机器人的机械设计与实现

孟令帅<sup>1,2</sup>, 林扬<sup>1</sup>, 郑荣<sup>1</sup>, 徐红丽<sup>1</sup>, 谷海涛<sup>1</sup>, 贾庆勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 介绍了一种具有基本航行能力且可扩展其他功能的模块化水下机器人。利用 3 维设计软件 Solidworks 及计算流体力学软件 CFX 对外形进行分析优化, 降低水下机器人的功耗; 对各功能舱段及段与段的连接形式采用模块化设计, 结构简单, 便于更换维修; 此外还对耐压壳体强度及稳定性进行了理论计算及软件仿真。湖试证明, 该水下机器人利用自身携带的传感器可以完成基本航行功能, 包括自主定向航行、自主定速航行、自主定深航行、位置闭环航行等功能。

**关键词:** 自主水下机器人; 模块化; 外形设计; 结构设计

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-04-0395-07

## Mechanical Design and Implementation of a Modular Autonomous Underwater Vehicle

MENG Lingshuai<sup>1,2</sup>, LIN Yang<sup>1</sup>, ZHENG Rong<sup>1</sup>, XU Hongli<sup>1</sup>, GU Haitao<sup>1</sup>, JIA Qingyong<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A modular autonomous underwater vehicle is introduced, which has basic navigation ability and can realize other functions through extending. 3D parametric design software Solidworks and computational fluid dynamics software CFX are used to analyze and optimize the shape, which can reduce the power consumption. Modular design is adopted in every function module and the connection form between two sections, which simplifies the structure and makes maintenance easy. In addition, the theoretical calculation and software simulation are performed on the strength and stability of pressure hull. Lake tests prove that the autonomous underwater vehicle can complete basic navigation functions with their own sensors, such as independent constant-orientation sailing, independent constant-speed sailing, independent depth-keeping sailing and position closed-loop sailing.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle; modularization; shape design; structure design

### 1 引言 (Introduction)

随着人们不断加快对海洋的开发, 水下机器人已成为水下观察和水下作业方面最具潜力的开发工具<sup>[1]</sup>。目前, 水下机器人具有 2 个总体发展趋势: 1) 尺寸较大、成本较高的水下机器人, 目的是提高自主能力、续航能力, 增加负载能力; 2) 研制更小型、更廉价的水下机器人, 包括研究多个水下机器人的协调控制等技术。对于小型水下机器人, 鱼雷外形的水下机器人占多数。本文介绍了一种便携式自主水下机器人外形及模块化结构设计, 该水下机器人外形属于鱼雷型, 它具有模块化、体积小、重量轻、机动灵活等特点, 能够从各种支持平台上进行布放回收。该水下机器人可以完成水下观察、水下记录和搜索等作业任务, 可以在较大范围内

作业以及基于任务需要灵活配置不同功能模块的需求。试验证明, 该水下机器人航行性能稳定, 效果良好。其对水下机器人总体结构设计具有一定的借鉴和指导意义。

### 2 外形设计 (Shape design)

据 AUVAC (Autonomous Underwater Vehicles Application Center) 不完全统计, 全世界目前大约有 128 种不同种类的自主水下机器人平台。在这些不同种类的自主水下机器人平台中, 由于自主水下机器人的使用任务和工作环境, 以及研发团队的设计风格和技术积累等多方面的不同因素, 自主水下机器人外形有多种不同形式, 大致可以分为回转体形、立扁形、扁平形、多体形等<sup>[2]</sup>, 其中以鱼雷型自主水下机器人的数目居多。尽管回转体形自主水

下机器人数目较多,但它们的外形也会存在一些差异,特别是自主水下机器人的舱部外形,如图1所示。



图1 不同舱部外形水下机器人  
Fig.1 Different head shapes of AUV

在选择水下机器人外形时,需要考虑以下原则和要求:

- 1) 外形阻力小,航行性能好,保证水下机器人具有良好的运动特性;
- 2) 外壳具有足够的强度,保证水下机器人的安全;
- 3) 合理的内部空间,便于总体布置;
- 4) 具有良好的工艺性,便于机械加工。

根据水下机器人的外形设计原则,在水下机器人长度和长径比相同的情况下,以 REMUS100 AUV、Theseus AUV、Hugin100 AUV 和 Bluefin-21 的舱部外形为代表,设计了4种水下机器人舱部外形方案,如图2所示。4种方案舱部外形均为短径为 100 mm、长径为 400 mm 的椭圆回转体。水下机器人的总长度均为 1800 mm,圆柱体直径为 250 mm。

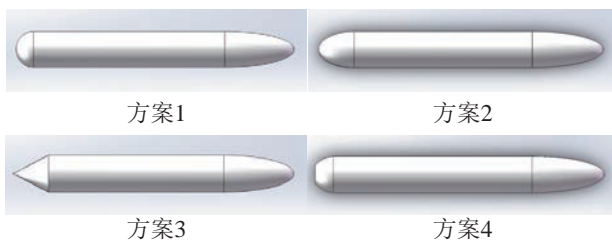


图2 水下机器人4种外形方案  
Fig.2 Four shape schemes of AUV

对以上4种方案进行水动力分析计算,计算所得的阻力如图3所示。

由图3可知,方案2外形的航行阻力最小,方案3外形的航行阻力最大。最后通过综合考虑内部空间以及航行阻力等因素,选择方案4作为便携式

自主水下机器人的外形。最终加工成型的便携式自主水下机器人如图4所示。

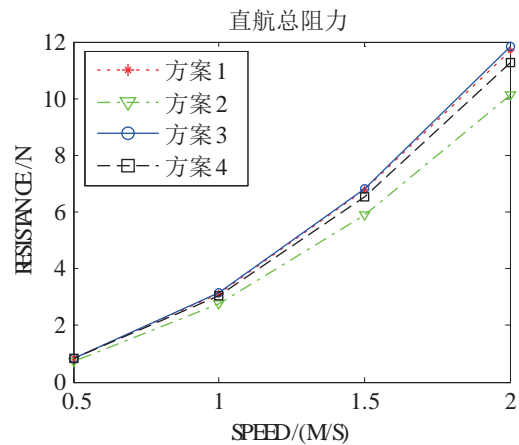


图3 4种方案水下机器人的航行阻力  
Fig.3 The sailing resistance of AUV based on the above four schemes



图4 便携式自主水下机器人  
Fig.4 Portable AUV

### 3 机械模块化设计 (Mechanical modular design)

为了提升自主水下机器人的性能、使用的方便性和通用性,降低研制风险,节约研制费用,缩短研制周期,保证批量生产,自主水下机器人整体设计的标准化与模块化是未来的发展方向。自主水下机器人采用模块化机械设计,不但可以加强各个系统的融合程度,提升机器人的整体性能,而且通过模块化的组合还能轻松实现任务的扩展和可重构<sup>[3]</sup>。

所谓模块化设计,简单地说,就是在对不同产品进行功能分析和分解的基础上,将某些要素组合在一起,构成一个具有特定功能的子系统。模块化通常具有3大特征:1) 相对独立性:可以对模块进行单独设计、制造、修改及存储,便于由不同专业化企业分别进行生产;2) 互换组合性:模块接口的结构、尺寸及参数标准化,容易实现模块的互换和组合,从而可以使模块满足更大数量的不同产品的

需求; 3) 通用性: 通用单元有利于实现模块在系列产品间的通用, 实现跨系列产品间模块的通用, 应具有典型性、通用性、兼容性<sup>[4]</sup>.

本次设计的便携式水下机器人按照机械模块化的思路分别设计了艏部段、能源段、控制导航段与艉部段. 其中, 每个模块段都具有独立的功能, 并且采用统一的段连接形式, 因此各个模块段可以有机地组合, 此外, 该水下机器人还可以扩展其他功能的模块段, 下面将对各模块段一一进行介绍.

### 3.1 艏部段

艏部段主要装有 2 个高分辨率摄像机、2 个照明灯和 1 个温度传感器. 2 个照明灯是为了摄像机更好地观察识别目标, 保证近距离时对摄像机视场的覆盖. 温度传感器主要是为了检测工作区域水的温度. 此外, 在艏部段上方还安装有一个起吊环, 便于水下机器人的布放与回收. 艏部段的结构示意图如图 5 所示.

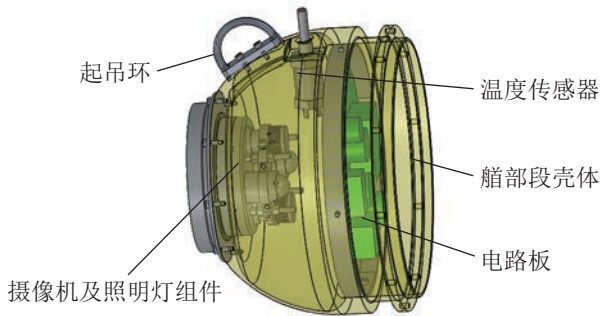


图 5 艏部段示意图  
Fig.5 The diagram of head part

### 3.2 能源段

能源段主要包含一个电池包、电池上电开关与电池充放电插头. 电池包为水下机器人提供安全航行和作业所需的能源. 与陆上相比, 水下能源受到更多不利因素的影响, 如缺少空气、燃料补充困难、废弃排放困难、承受海水高压等. 由于电池放到耐压壳体里面, 因此不必考虑承受海水高压以及缺少空气等问题. 经综合考虑后, 选择了能量密度高、使用寿命长、重量相对较轻、适应性强的锂电池. 电池上电开关与电池充放电插头分别用来对水下机器人进行上下电和充电. 能源段的结构示意图如图 6 所示.

### 3.3 控制导航段

控制导航段主要包括控制舱、无线网桥、无线电、频闪灯、GPS (全球定位系统)、多普勒测速仪 (DVL)、惯性测量单元、电子罗盘、深度计、入水传感器等. 控制舱是水下机器人的“心脏”, 用于

控制和协调水下机器人的运动; 无线网桥和无线电是水下机器人与操控平台传递信息的纽带; 频闪灯主要作用是当水下机器人浮出水面后, 便于操作人员及时发现其所在位置; GPS 提供水下机器人所在的位置信息; DVL 提供水下机器人的对底航行速度以及对底高度信息; 惯性测量单元提供水下机器人在水下或水面航行时的加速度信息; 电子罗盘主要提供水下机器人的姿态信息; 深度计提供水下机器人所处位置的深度信息; 入水传感器用于对水下机器人是否入水进行检测, 只有检测到水下机器人入水信号时, 水下机器人才会启动相应程序. 控制导航段的结构示意图如图 7 所示.

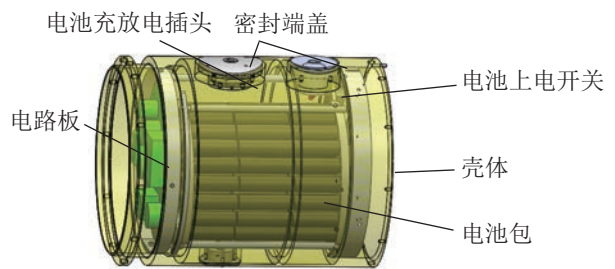


图 6 能源段示意图  
Fig.6 The diagram of energy part

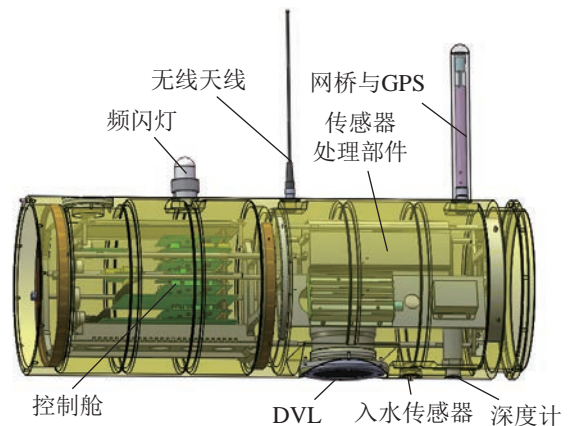


图 7 控制导航段示意图  
Fig.7 The diagram of control and navigation part

### 3.4 艉部段

艉部段主要包括推进器部件、艉舵部件以及电磁铁部件等. 推进器部件主要由一个主推电机与螺旋桨组成, 为了提高推进器的推进效率, 选择使用导管推进器. 艉舵部件主要由艉舵、舵机、齿轮箱以及舵轴组成, 主要作用是调节水下机器人的姿态. 电磁铁部件由 3 个电磁铁、电磁铁罩及压铁组成, 主要作用是当水下机器人完成任务或遇到紧急情况时抛掉压铁使水下机器人浮出水面, 保证水下机器人的绝对安全. 艉部段的结构示意图如图 8 所



示.

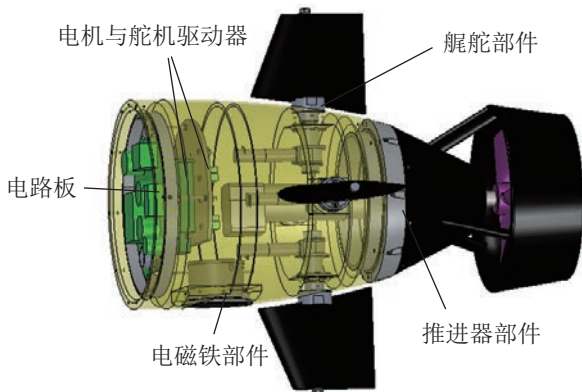
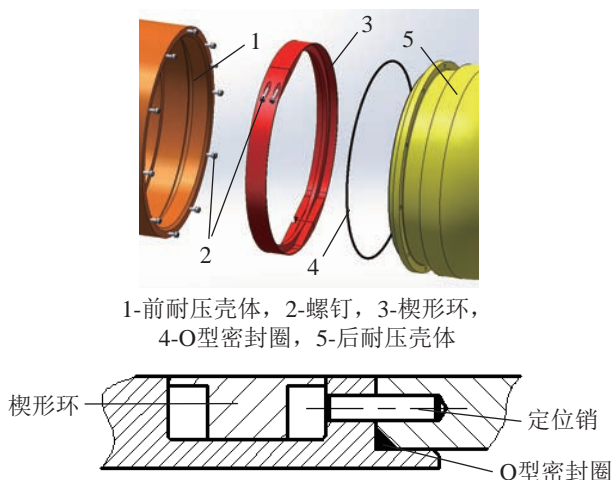


图8 艉部段示意图

Fig.8 The diagram of stern part

#### 4 舱段连接方式 (Tank connection mode)

采用模块化设计思想<sup>[5]</sup>,按各功能模块将水下机器人分为艏部段、能源段、控制导航段和艉部段,因此各功能段之间的连接形式也必须使用标准化的连接形式.各舱段采用O型橡胶密封圈倒角密封的形式进行密封,通过定位销定位、螺钉轴向连接的形式把各功能段连接在一起.使用楔形环包裹在舱段连接处来保证水下机器人的回转体流线形,以减小航行阻力,降低能耗,从而延长水下机器人在水下连续工作的运行时间.舱段连接的3维及2维示意图如图9所示.



1-前耐压壳体, 2-螺钉, 3-楔形环, 4-O型密封圈, 5-后耐压壳体

图9 舱段连接方式示意图

Fig.9 The diagram of tank connection mode

连接过程: 首先把O型密封圈4套到后耐压壳体5上,然后把耐压壳体5插入到前耐压壳1中,再使用螺钉2把前、后耐压壳体连接在一起,此时前、后耐压壳体已连在一起.最后使用楔形环3套到后耐压壳体5的槽道中来保证水下机器人的回转流线形.

#### 5 壳体结构设计 (Shell structure design)

耐压壳体主要用于承受海水压力,为内部电子器件装备、仪器设备提供一个安全的环境,保护它们不会因海水压力和腐蚀而受到破坏,同时还保持水下机器人的外形,以提高水下机器人的水动力特性,并避免与水下障碍物发生缠绕,所以耐压壳需要具有足够的强度和可靠密封性.

耐压壳体常用材料有钢、镁合金、钛合金、铝合金、复合材料、有机玻璃等.通过比较常用耐压壳体材料的性能,并考虑轻质、高强度、耐腐蚀等要求,选用7A04铝合金材料,该材料耐腐蚀性及焊接性较好,适合工作水深的耐压要求.7A04的具体参数见表1.

表1 7A04性能参数

Tab.1 The performance parameters of 7A04

材料名称	7A04
标准	GB/T437.1-2000
强度极限 $\sigma_b$ /MPa	> 530
屈服极限 $\sigma_s$ /MPa	> 400
安全系数	1.2
伸长率 /%	> 5
比重 $\rho$ /(t/m <sup>3</sup> )	2.850
材料密度 $\rho$ /(g/mm <sup>3</sup> )	2.82

耐压壳体结构形式主要包括球形、圆柱形、椭球形、锥形以及楔形等多种形式.一般对于工作深度低于800m的水下机器人,仍多数使用圆柱形结构,因为圆柱形耐压壳容易加工制造、内部空间利用率高、流体运动阻力小、容易进行内部设备的布置等等,故本水下机器人选择使用圆柱形的耐压壳体.

为了保证水下机器人能够在0~300m深的水中安全工作,对耐压壳体的强度和稳定性进行了理论计算及软件仿真.下面以长度最长的控制导航段壳体为代表进行分析,控制导航段的耐压壳体如图10所示.

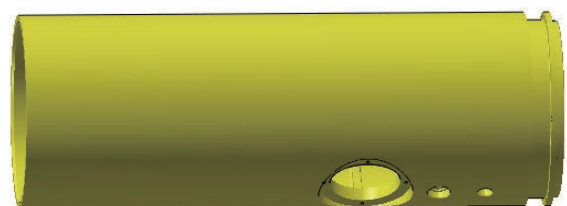


图10 控制导航段壳体

Fig.10 The shell of control and navigation part

圆柱形耐压壳体承受均匀外压,可以保证其外

形受到均匀的压缩, 此时均匀中面压应力为

$$\sigma = \frac{PR}{t} \tag{1}$$

式中,  $P$  为外压力,  $R$  为截面圆形半径,  $t$  为耐压壳体厚度.

根据《潜水器规范》, 并考虑到安全储备的要求, 壳体应力  $\sigma$  为

$$\sigma = \frac{P_j R}{t} \tag{2}$$

式中,  $P_j$  为计算压力.

耐压壳体应力应该满足:

$$\sigma \leq 0.85\sigma_s \tag{3}$$

式中,  $\sigma_s$  为材料的屈服强度.

当水下机器人在 300 m 深的水中航行时, 计算压力  $P_j = 3 \text{ MPa}$ , 把相关参数代入式 (2), 计算得到  $\sigma = 150 \text{ MPa} \leq 0.85\sigma_s$ , 故满足强度及稳定性要求.

下面用 Solidworks 中的 Simulation 对其强度及稳定性进行校核.

用 3.6 MPa 压力作用于耐压圆筒的外表面, 用标准网格进行应力解算运行, 得到图 11 所示的应力分布图和图 12 所示的位移分布图.

仿真结果显示控制导航段耐压壳体在承受 3.6 MPa 的外界压力时, 壳体受到的最大应力为 264.007 MPa, 最大合位移为 0.494 mm, 满足强度和稳定性设计要求.

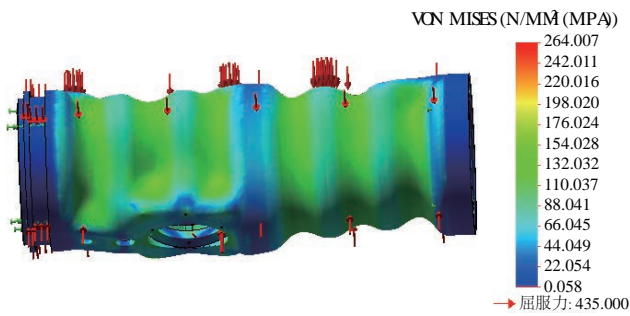


图 11 耐压壳体应力分布图

Fig.11 The stress diagram of pressure shell

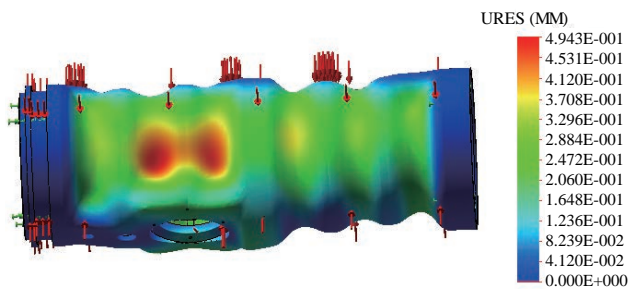


图 12 耐压壳体位移分布图

Fig.12 The displacement diagram of pressure shell

## 6 试验结果 (Experimental result)

为了检测水下机器人的基本航行功能及其载体性能, 2015 年 6 月在辽宁省棋盘山某湖区域进行了测试, 分别对水下机器人的每一项航行功能进行了多次测试, 获得大量试验数据. 下面以自主定向航行与位置闭环航行为例进行试验数据分析.

### 6.1 自主定向航行

自主定向航行是指水下机器人保持给定的航向角航行, 即使受扰偏离原航线, 水下机器人仍遵循原航向角继续航行. 该水下机器人所使用的定向传感器是 3 维电子罗盘模块 TCM5. 在湖试过程中, 水下机器人自主定向航行如图 13 所示, 试验过程中水下机器人航行状态比较平稳. 图 14 是根据实际定向试验数据画出的水下机器人期望航向与实际航向的对比曲线. 从图 14 可以看出, 水下机器人能较快达到期望航向, 并且与期望航向基本保持一致.

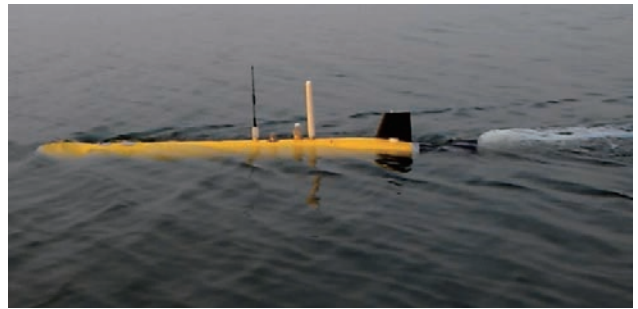


图 13 自主定向航行

Fig.13 The independent constant-orientation sailing

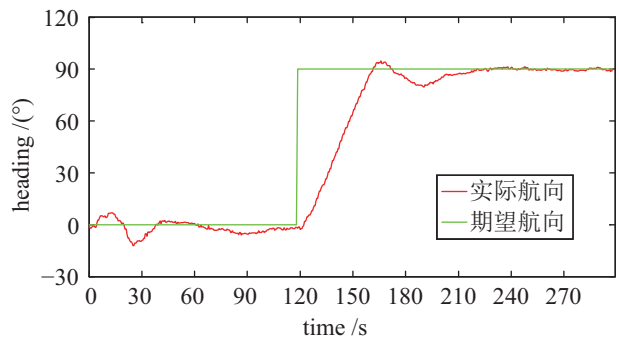


图 14 期望航向与实际航向对比曲线

Fig.14 The contrast between expected and real courses

### 6.2 自主定速航行

自主定速航行是指水下机器人能够自动地保持航速, 使其以固定的速度航行. 该水下机器人使用的速度传感器为 DVL 与 GPS. 水下机器人自主定速航行如图 15 所示, 图 16 是根据实际定速试验数据画出的水下机器人期望航速与实际航速的对比曲线. 从图 16 可以看出, 水下机器人可以较快达到

期望航速，尽管实际航速与期望航速有一定偏差，但航速维持比较稳定。



图 15 自主定速航行

Fig.15 The independent constant-speed sailing

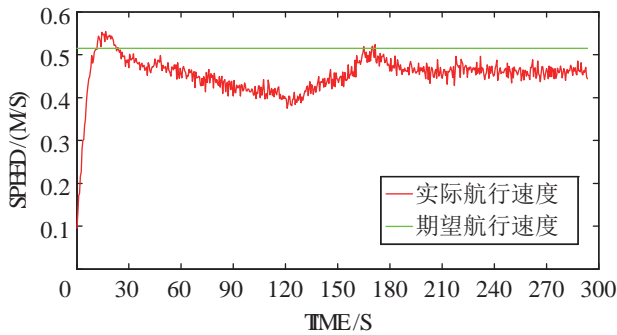


图 16 期望航速与实际航速对比曲线

Fig.16 The contrast between expected and real speeds

### 6.3 自主定深航行

自主定深航行是指水下机器人保持给定的深度值航行，即水下机器人在某一水平面内航行。水下机器人使用的传感器为压力传感器。水下机器人自主下潜如图 17 所示，图 18 是根据实际定深试验数据画出的水下机器人期望深度与实际深度的对比曲线。从图 17 可以看出，水下机器人可以实现平稳的下潜。从图 18 可以看出，水下机器人在水下定深效果不太理想，出现“海豚”现象，这主要是由于航速慢时舵效差及艏舵存在旷位。



图 17 自主定深航行

Fig.17 The independent depth-keeping sailing

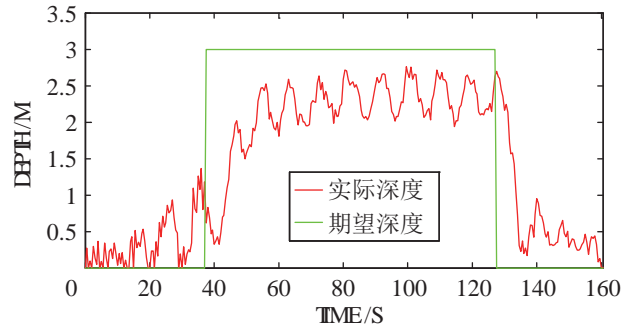


图 18 期望深度与实际深度对比曲线

Fig.18 The contrast between expected and real depths

### 6.4 位置闭环航行

位置闭环航行是指水下机器人能够准确到达提前设定区域的航行能力。该水下机器人所使用的位置闭环传感器是 GPS 与惯性测量单元。水下机器人位置闭环航行如图 19 所示，从图 19 可以看出，水下机器人正通过打舵改变航向以到达指定位置。图 20 是根据水下机器人位置闭环航行试验数据画出的期望位置与实际位置的对比曲线图。从图 20 可以看出，水下机器人可以达到所指定的期望位置。



图 19 位置闭环航行

Fig.19 The position closed-loop sailing

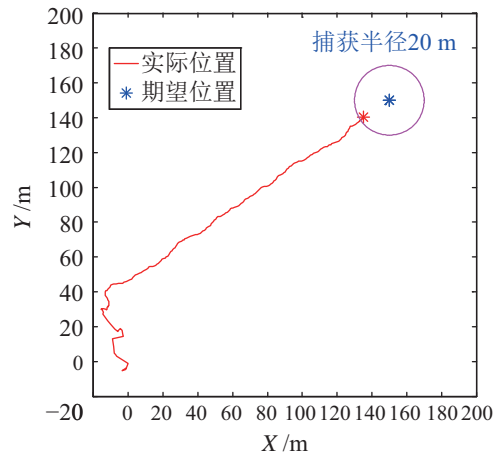


图 20 期望位置与实际位置对比曲线

Fig.20 The contrast between expected and real positions

## 7 结论 (Conclusion)

本文从机械设计和流体动力学角度，系统地描

述了水下机器人外形设计的要求, 采用模块化的设计思路设计水下机器人的各舱段以及舱段之间的连接形式, 并对耐压壳体的强度和稳定性进行了理论计算及软件仿真. 采用本设计方案设计的水下机器人在 2015 年 6 月完成了湖上试验, 经过试验分析表明, 该水下机器人性能稳定, 安全可靠, 能够满足水下机器人的基本航行功能, 同时也证明了本设计方案能较好地满足水下机器人设计要求, 对水下机器人的总体设计具有一定的借鉴和指导意义.

### 参考文献 (References)

- [1] 申雄, 徐国华, 余琨, 等. 一种欠定位水下机器人的目标搜索研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 153-158.  
Shen X, Xu G H, Yu K, et al. Research on target positioning strategy of an under-location underwater vehicle[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2): 153-158.
- [2] Meng L S, Lin Y, Xu H L, et al. Effects of front shapes of mini revolving AUV on sailing resistance characteristics[C]//IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1795-1799.
- [3] 徐玉如, 李彭超. 水下机器人发展趋势[J]. 自然杂志, 2011, 33(3): 125-132.  
Xu Y R, Li P C. Developing tendency of unmanned underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Nature, 2011, 33(3): 125-132.
- [4] 李治洋, 郭威, 葛新. 模块化水下机器人控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2012(1): 36-38.  
Li Z Y, Guo W, Ge X. Control system design for ROV based on modularization[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(1): 36-38.
- [5] 金碧霞. 一种模块化水下机器人的设计[J]. 机械与电子, 2014(4): 75-77.  
Jin B X. Design of a modular underwater robot[J]. Machinery & Electronics, 2014(4): 75-77.

### 作者简介:

孟令帅 (1989 -), 男, 博士生. 研究领域: 水下机器人结构设计, 水动力分析.