

# 大深度水下滑翔机总体设计

叶鹏程<sup>1,2</sup>, 黄桥高<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072;  
2. 无人水下运载技术工信部重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 水下滑翔机 (Autonomous Underwater Glider, AUG) 是一种浮力驱动的自主水下航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV), 通过调整滑动质量块来改变重心与浮心的相对位置, 从而控制自身的运动姿态。完成了水下滑翔机的外形设计, 同时, 对其各系统组成部分进行了初步设计与布局。利用 MATLAB 软件基于计算得到的流体动力参数对滑翔机进行运动特性分析, 得出定常运动状态下攻角、俯仰角和水平速度等参量随重心水平位移和净浮质量之间的关系。最后使用 Simulink 软件对垂直面内滑翔机的运动模型进行弹道仿真, 验证了水下滑翔机总体设计方法的有效性和可行性。

**关键词** 水下滑翔机; 总体设计; 弹道仿真; MATLAB/Simulink

**中图分类号** TJ630.1: TP242.6 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2020)03-0223-07

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.03.009

## System Design of an Large-depth Autonomous Underwater Glider

YE Pengcheng<sup>1,2</sup>, HUANG Qiaogao<sup>1,2</sup>

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. Key Laboratory for Unmanned Underwater Vehicle, Xi'an 710072, China)

**Abstract** As a new kind of Autonomous Underwater Vehicle(AUV), Autonomous Underwater Gliders(AUG) move based on the principle of buoyancy-driven. They control their own state of motion through adjusting the sliding block to change the relative positions of the focus and the center of buoyancy. The shape of AUG is firstly designed, and meanwhile each system component is also preliminary designed and their general layout is conducted. Then, Matlab is used to obtain the motion characteristics of the AUG depending on the hydrodynamic parameters. Thus, the relationships between horizontal displacement of parameters (such as angle of attack (AOA), angle of pitch (AOP) and horizontal velocity) with the center of gravity in the steady condition and the net floating mass will be achieved. The trajectory of the AUG in the vertical plane is simulated and analyzed by using Simulink software. The results show the validity and feasibility of the presented system design method.

**Key words** AUV; system design; trajectory simulation; Matlab/Simulink

## 0 引言

海洋开发和利用势必需要先进的海洋设备,水

下航行器作为一种延伸人类对水下操作和感知能力的海洋开发和探测工具,获得了广泛关注<sup>[1]</sup>。水下航行器按是否搭载人员可分为载人水下航行器

收稿日期: 2019-12-24

作者简介: 叶鹏程 (1991-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事流体力学研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (61803306); 中国博士后科学基金 (2019M660264); 中央高校基本科研业务费资助项目 (3102019HHZY 03009)。

Manned Underwater Vehicle, MUV) 和无人水下航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) [2]。按照操作方式的不同, UUV 又可分为遥控水下航行器 (Remotely Operated Vehicle, ROV)、自主水下航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 和水下滑翔机 (Autonomous Underwater Glider, AUG) [3]。其中, MUV 需要人工操作, 不适合长时间、大深度航行。而 ROV 在使用过程中需要母船支援, 虽然便于控制, 但受缆绳限制, 活动范围有限。由于摆脱了线缆束缚, AUV 和 AUG 活动范围增大, 并且可以在水下灵活使用[4]。AUV 在使用过程中具有良好的机动性能, 可以按照既定线路航行或定点作业, 但是需要消耗大量能源, 要求定时补充能源, 因此无法保证大深度、远航程和长时间连续工作[5]。AUG 则依靠自身浮力驱动, 耗能极低, 能够更好地进行海洋开发和利用。AUG 不仅具有很好的机动性、可控性和隐蔽性, 而且拥有制造成本低、功耗低、噪声低、航程远以及工作深度大等优势, 符合长时间、大范围海洋探索需求[6-7]。

为了满足海洋军事需要和民用需求, 本文介绍了一种水下滑翔机总体设计方法。在水下滑翔机外形设计的基础上, 对主要组成系统进行布局, 对壳体进行结构设计。完成滑翔机动力参数计算, 对水下滑翔机进行动力学建模、运动特性分析及航行弹道仿真研究。

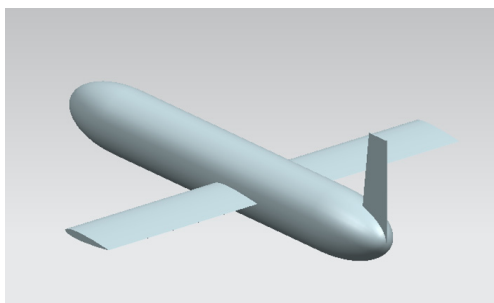


图1 AUG外形图  
Fig. 1 Shape of AUG

## 1 总体设计与布局

采用三维制图软件 Unigraphics NX (UG) 对水下滑翔机进行外形设计, 如图1所示。外形由主

体、滑翔翼和稳定尾翼构成, 总长 1 800 mm, 其中头尾部采用相同线型, 均为半椭球体, 中部为平行圆柱体, 主体外形设计参数见表1。滑翔翼采用 NACA0012 翼型, 设计参数见表2。稳定尾翼采用平面薄板。

表1 主体外形设计参数  
Table 1 Design parameters of AUG body

参数	取值	参数	取值
全长	1 800 mm	最大直径	250 mm
头部曲线段长	300 mm	尾部曲线段长	300 mm
长细比	7.2	排水量	(80±2) kg
壳体厚度	5 mm	肋板间距	120 mm

表2 滑翔翼设计参数  
Table 2 Design parameters of AUG wings

参数	取值	参数	取值
展长	1 650 mm	弦长	250 mm
展弦比	6.6	梢根比	1
面积	0.35 m <sup>2</sup>	后掠角	0

水下滑翔机主要由6大系统组成: 外部耐压壳体、滑翔翼和尾翼、姿态调节系统、变浮力驱动系统、通信控制系统和抛载系统。其中, 变浮力调节机构采用外部油囊式浮力调节机构, 姿态调节机构选用滚珠丝杆电池块传动机构。各个系统的布局如图2所示。

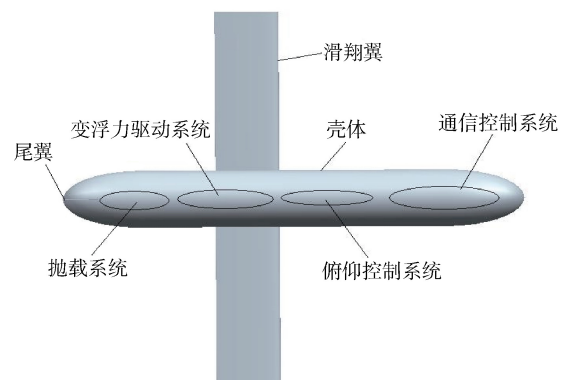


图2 AUG总体布局图  
Fig. 2 Overall layout of AUG

## 2 受力分析与运动建模

### 2.1 坐标系的定义

为了描述水下滑翔机运动, 本文定义 3 个坐标系<sup>[5]</sup>, 即地面坐标系  $O_0x_0y_0z_0$ 、载体坐标系  $Oxyz$  (以载体浮心为原点), 速度坐标系  $Ox_1y_1z_1$ , 如图 3 所示。水下滑翔机相对地面坐标系的姿态可用载体坐标系与地面坐标系之间 3 个欧拉角  $\theta$ 、 $\psi$ 、 $\phi$  来确定。在体坐标系中的重心速度矢量方向则由攻角  $\alpha$ 、侧滑角  $\beta$  确定, 如图 4 所示。

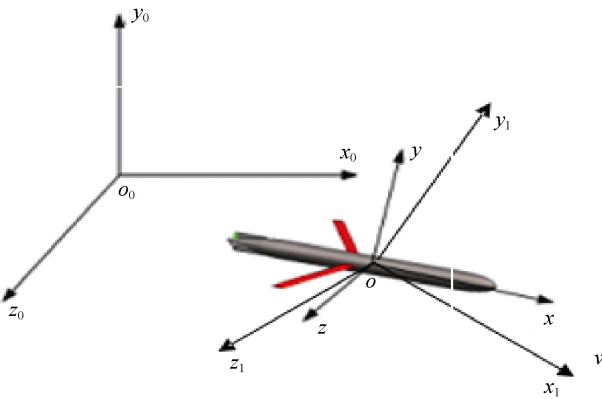


图 3 3 种坐标系示意图

Fig. 3 Three kinds of coordinate systems

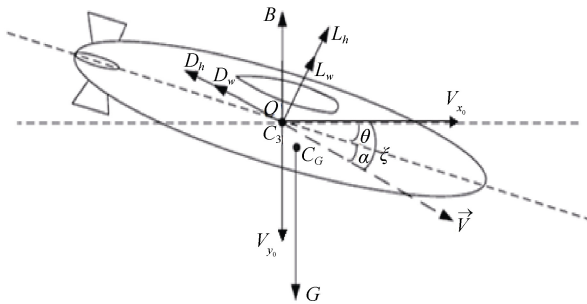


图 4 重心速度矢量示意图

Fig. 4 Velocity vector of the center of gravity

### 2.2 水下滑翔机数学模型

基于动量定理和动量矩定理建立空间运动方程较为复杂, 本文对其进行简化并考虑航行器附加质量  $\lambda_{11}$ 、 $\lambda_{22}$ 、 $\lambda_{26}$ 、 $\lambda_{66}$ , 得到纵平面内的运动方程<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{11})\dot{v}_x - my_G\dot{w}_z - mv_yw_z - mx_Gw_z^2 = & \\ - D \cos \alpha + L \sin \alpha + m_0g \sin \theta & \\ (m + \lambda_{22})\dot{v}_y + (mx_G + \lambda_{26})\dot{w}_z + mv_xw_z - my_Gw_z^2 = & \\ D \sin \alpha + L \cos \alpha + m_0g \cos \theta & \\ (J_{zz} + \lambda_{66})\dot{w}_z + (mx_G + \lambda_{26})\dot{v}_y - my_G\dot{v}_x + my_Gv_yw_z + & \\ mx_Gv_xw_z = M + mg(y_G \sin \theta - x_G \cos \theta) & \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{x}_0 = v_x \cos \theta - v_y \sin \theta$$

$$\dot{y}_0 = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta$$

$$\dot{\theta} = w_z$$

$$\xi = \theta - \alpha$$

$$\alpha = -\arctan(v_y/v_x)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

式中:  $m$ 、 $m_0$  分别为航行器质量和净浮质量;  $x_G$ 、 $y_G$  分别为航行器的重心水平位移和垂直位移;  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $w_z$  分别表示航行器在地面坐标系沿  $x_0$ 、 $y_0$  轴的水平速度、垂直速度和绕  $O_0z_0$  轴转动的角速度;  $D$ 、 $L$ 、 $M$  分别为水下滑翔机阻力、升力和俯仰力矩。

## 3 定常运动特性分析

定常滑翔是水下滑翔机的主要运动形式<sup>[9]</sup>, 研究其运动特性具有重要意义。当水下滑翔机作定常滑翔运动时, 其运动参数满足如下条件:

$$\dot{v}_x = \dot{v}_y = \dot{w}_z = w_z = 0, v_x = v_y = \theta = C \quad (2)$$

式中,  $C$  为参数。

定常运动受力平衡方程如下:

$$L \sin \alpha - D \cos \alpha + m_0g \sin \theta = 0$$

$$D \sin \alpha + L \cos \alpha + m_0g \cos \theta = 0 \quad (3)$$

$$M + mg(y_G \sin \theta - x_G \cos \theta) = 0$$

水下滑翔机流体动力参数计算结果如表 3 所示。其在定常滑翔运动时基本处于小攻角状态, 即  $\cos \alpha \approx 1$ ,  $\sin \alpha \approx \alpha$ 。采用数值软件 MATLAB 分析定常滑翔运动特性, 具体关系如图 5-10 所示。

从图 5 可知, 水下滑翔机的水平速度  $V_{x_0}$  受到弹道倾角  $\xi$  与净浮质量  $m_0$  影响: 当  $\xi$  一定时, 水

平速度  $V_{x_0}$  随净浮质量  $m_0$  单调变化。当  $m_0$  不变时，随着  $\zeta$  的增大， $V_{x_0}$  先增大后减小。图 6 给出了净浮质量  $m_0$  为 2 kg 不变时  $V_{x_0}$  与  $\zeta$  的关系。分析图 6 可知，弹道倾角  $\zeta$  在  $35.5^\circ$  左右时，滑翔机的水平速度最大。

分析图 7 可知，随着弹道倾角  $\zeta$  的变化，攻角  $\alpha$  的变化是在一定范围内，不同水下滑翔机由于设计参数不同，有效攻角范围也不同。为了防止弹道倾角出现急剧变化，有效攻角需设定在安全范围之内，即  $\pm 7^\circ$  之间。水下滑翔机运动特性研究应该有针对性地有效攻角范围内进行，从而避免大量仿真计算和试验，提高工作效率。

表 3 流体动力参数计算结果  
Table 3 Calculation results of the hydrodynamic parameters

参数	取值	参数	取值
$\lambda_{11}$	1.6 kg	$D$	$5.566V^2$ N
$\lambda_{22}$	696.5 kg	$L$	$695.873aV^2$ N
$\lambda_{26}$	$-78.4 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$M$	$-28.096aV^2 \text{ N} \cdot \text{m}$
$\lambda_{26}$	$24.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$		

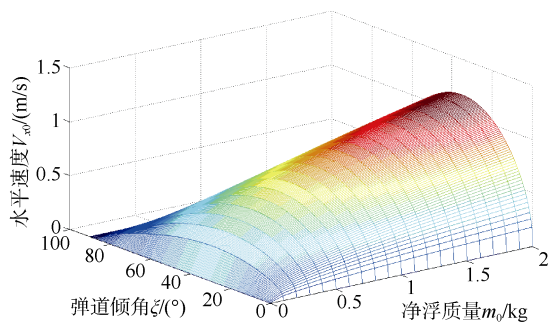


图 5  $V_{x_0}$  和  $\zeta$ 、 $m_0$  关系  
Fig. 5 The relation among  $V_{x_0}$  and  $\zeta$ 、 $m_0$

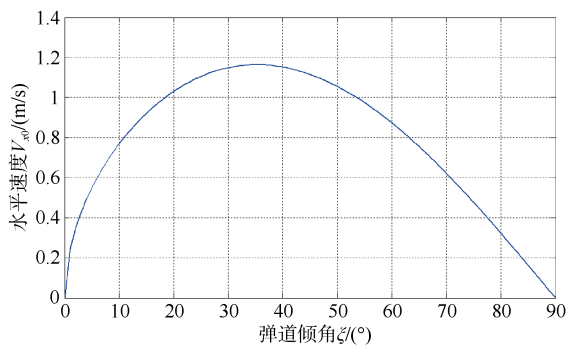


图 6  $V_{x_0}$  和  $m_0$  关系图  
Fig. 6 The relation between  $V_{x_0}$  and  $m_0$

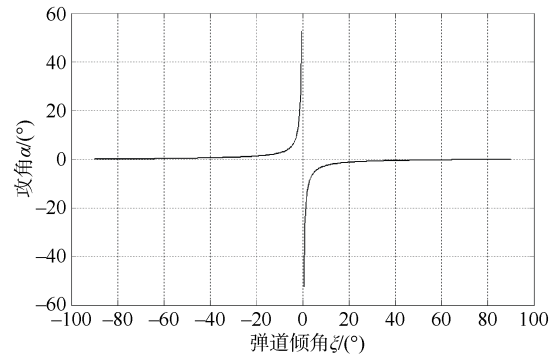


图 7  $\alpha$  与  $\zeta$  关系图  
Fig. 7 The relation between  $\alpha$  and  $\zeta$

分析图 8 可以发现：水下滑翔机攻角  $\alpha$  受重心水平位移  $x_G$  影响较大，随  $x_G$  增大而减小，而净浮质量  $m_0$  对攻角  $\alpha$  影响较小。

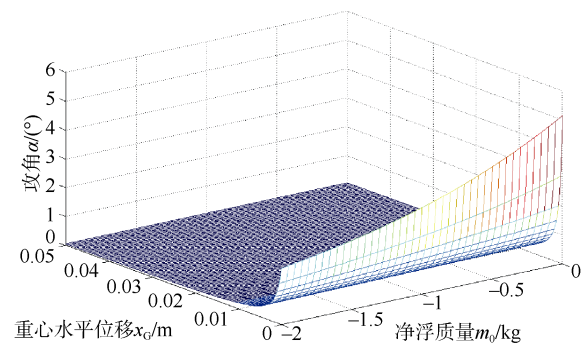


图 8  $\alpha$  与  $x_G$ 、 $m_0$  关系图  
Fig. 8 The relation among  $\alpha$  and  $x_G$ 、 $m_0$

分析图 9 可以发现，重心水平位移  $x_G$  对滑翔机俯仰角  $\theta$  影响较大， $\theta$  绝对值随  $x_G$  增大而增大，而净浮质量  $m_0$  对俯仰角  $\theta$  的影响较小。

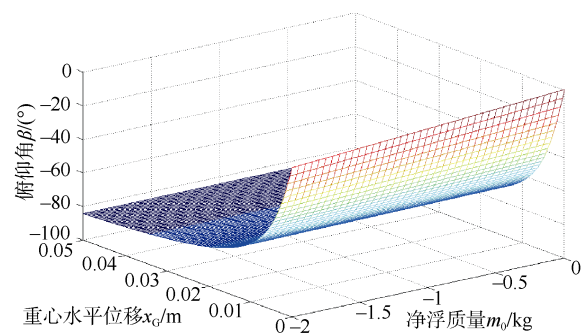


图 9  $\theta$  与  $x_G$ 、 $m_0$  关系图  
Fig. 9 The relation among  $\theta$  and  $x_G$ 、 $m_0$

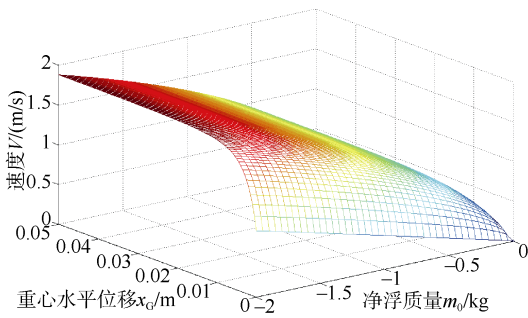


图 10  $V$  与  $x_G$ 、 $m_0$  关系图

Fig. 10 The relation among  $V$  and  $x_G$ 、 $m_0$

由图 10 可以看出,  $x_G$  和  $m_0$  对滑翔机速度  $V$  均有一定影响, 速度  $V$  随  $x_G$  和  $m_0$  单调增加。

### 4 Simulink 弹道仿真

本文研究的大深度水下滑翔机中, 变浮力驱动系统采用改变外部油囊体积来改变净浮力。姿态调节系统则由步进电机带动蜗轮蜗杆减速, 再传动给

滚珠丝杆, 由滚珠丝杆带动质量块滑动。假设变浮力调节系统匀速调整滑翔机外部油囊体积, 即净浮质量  $m_0$  是线性变化的, 满足如下条件:

$$m_0 = \pm dm * t_0 \tag{4}$$

式中:  $dm$  为每秒钟变化质量;  $t_0$  表示变浮力驱动系统有效工作时间。

另外, 姿态调节系统每秒钟移动的滑动质量块的位移是一定的, 即重心水平位移同样是线性变化的, 满足如下公式:

$$x_G = \pm dx * t_G \tag{5}$$

式中:  $dx$  为每秒钟重心沿  $Ox$  轴的位移变化量;  $t_G$  表示姿态调节系统工作时间。

利用 Simulink 建立水下滑翔机弹道仿真模块程序, 图 11 给出了仿真模型流程图。初始条件设置如下: 速度  $V$ 、俯仰角  $\theta$ 、角速度  $W_z$ 、重心水平位移  $x_G$ 、净浮质量  $m_0$  均为 0。控制条件和仿真结果分别见表 4 和表 5。

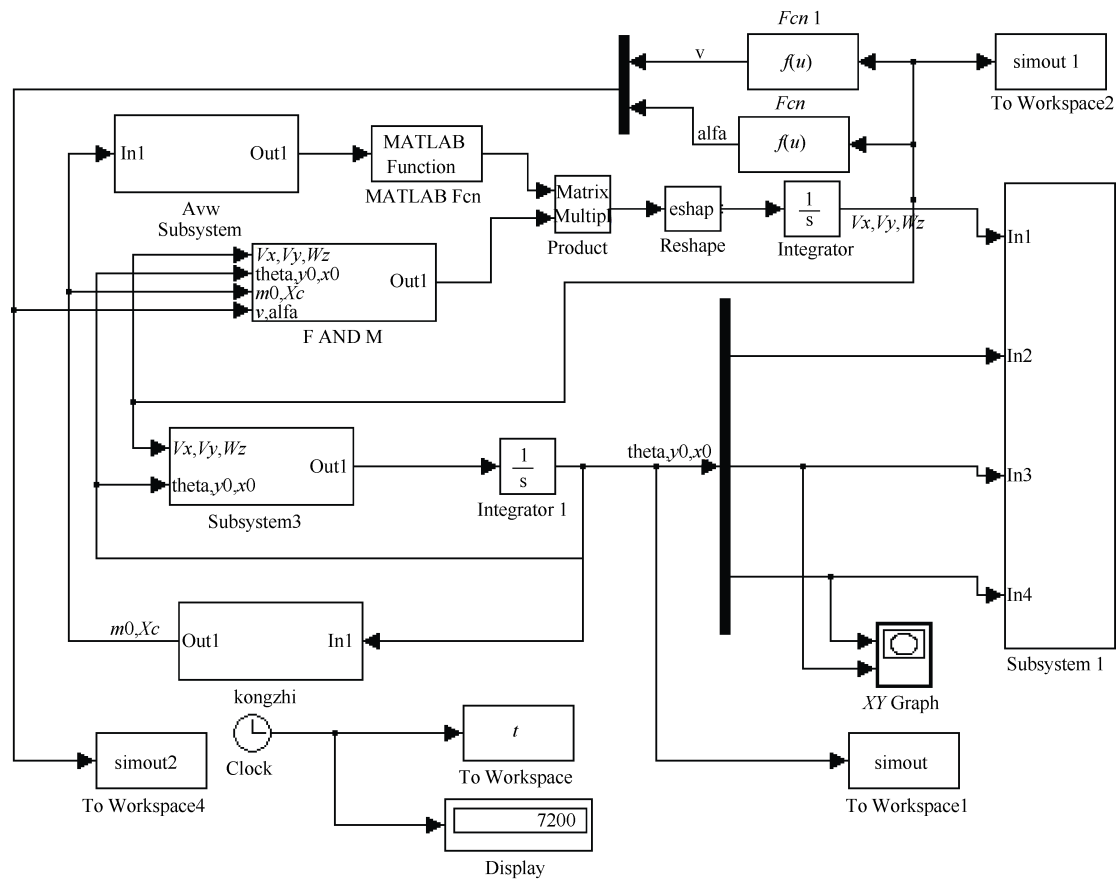


图 11 仿真模型流程图

Fig. 11 Flowchart of simulation model

表 4 控制条件  
Table 4 Control conditions

控制变量	目标值	变化速度	调节系统控制条件
$x_G$	$\pm 10$ mm	$dx = \pm 0.5$ m/s	深度为-20 m时, 滑块前移, 减小油囊体积; 深度为-1 000 m时, 滑块后移, 增大油囊体积
$m_0$	$\pm 2$ kg	$dm = \pm 0.05$ kg/s	

表 5 仿真结果  
TABLE 5 Simulation results

参数	取值	参数	取值
弹道倾角 $\zeta$	$\pm 29.6^\circ$	攻角 $\alpha$	$\pm 0.8^\circ$
稳定速度	1.32 m/s	稳定水平速度	1.15 m/s
最大深度	-1 007 m	最小深度	-13 m
超调深度	7 m		

使用 MATLAB 对仿真所得数据进行分析, 结果如图 12-17 所示。分析上述结果能够发现, 在净浮质量为 $\pm 2$  kg, 重心水平位移为 $\pm 0.01$  m 条件下, 水下滑翔机水平速度可以达到 1 m/s 以上, 满足任务要求。另外, 本文设计的水下滑翔机从下潜到上浮的过程转换大约需要 40 s 左右, 一个完整的下潜上浮周期大约需要 3 180 s, 调整时间占总时间 1.25%。稳定状态下弹道倾角为 $\pm 29.6^\circ$ 。

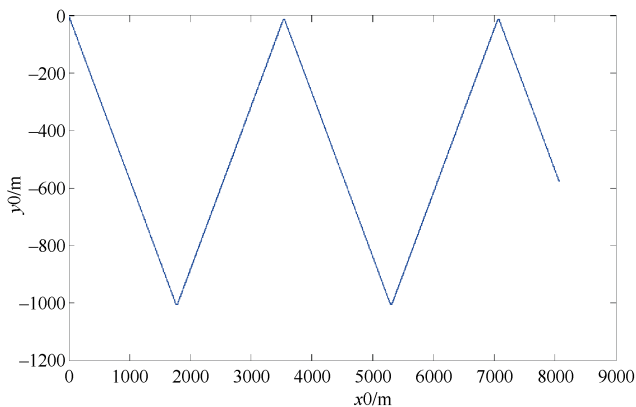


图 12 水下滑翔机弹道图  
Fig. 12 Trajectory of AUG

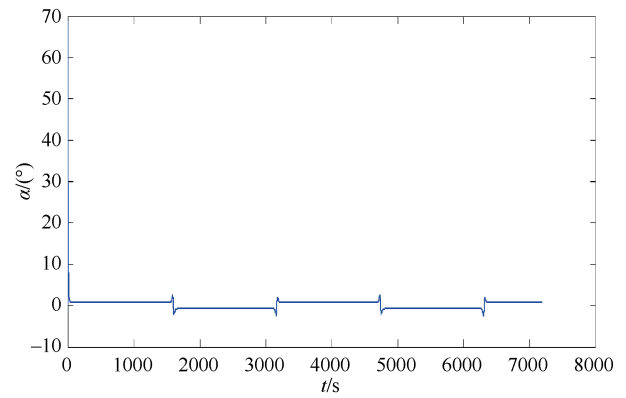


图 13 水下滑翔机攻角变化图  
Fig. 13 AOA variation of AUG

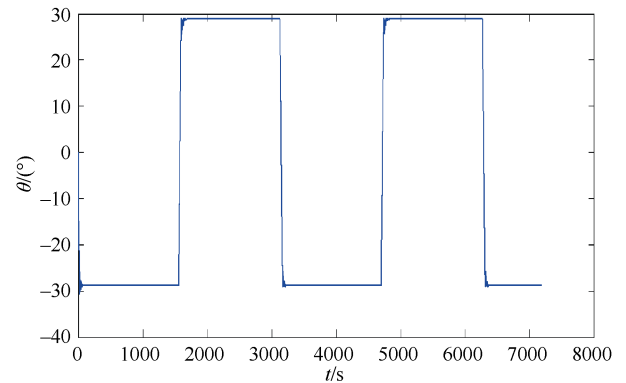


图 14 水下滑翔机俯仰角变化图  
Fig. 14 AOP variation of AUG

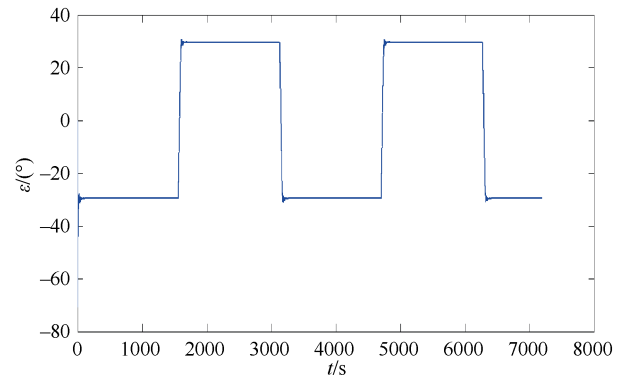


图 15 水下滑翔机弹道倾角变化图  
Fig. 15 Variation of AUG's trajectory inclination angle



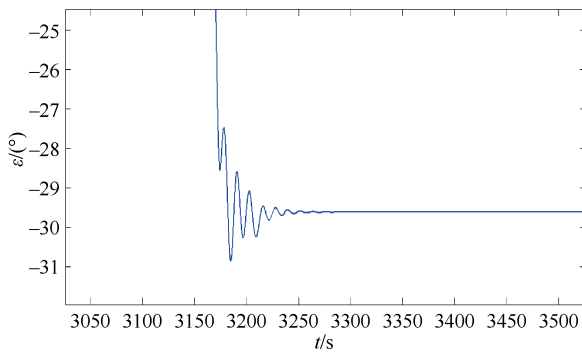


图16 弹道倾角突变处放大图

Fig. 16 Amplification and mutation of AUG's trajectory inclination angle

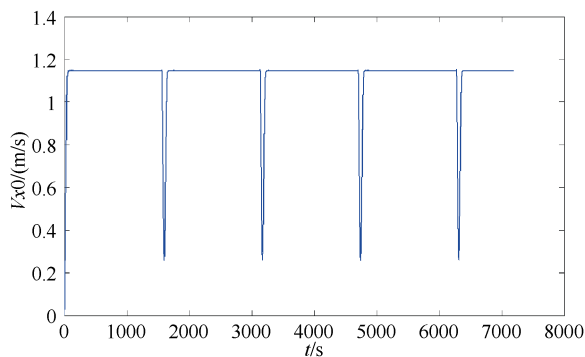


图17 水下滑翔机水平速度变化图

Fig. 17 Variation of AUG's horizontal velocity

## 5 结束语

本文对水下滑翔机外形进行了设计, 完成了滑翔机主要组成系统的布局, 对壳体进行了结构设计。另外, 利用经验公式完成水下滑翔机流体动力参数计算, 同时采用动量定理和动量矩定理对水下滑翔机进行动力学建模。在此基础上, 完成对水下

滑翔机定常运动特性分析, 并将分析结果应用到垂直面内的弹道仿真研究中, 仿真结果验证了水下滑翔机总体设计方法的有效性和可行性。

## 参考文献

- [1] 潘光, 宋保维, 黄桥高, 等. 水下无人系统发展现状及关键技术[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(2): 44-51.
- [2] 刘富樯. 无人水下航行器执行机构故障诊断与容错控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [3] 诸敏. 水下滑翔机设计优化与运动分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [4] 刘方. 混合驱动水下滑翔机系统设计与运动行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [5] 潘光. 鱼雷力学[M]. 西安: 陕西师范大学出版社, 2013.
- [6] SUN C Y, SONG B W, WANG P. Parametric geometric model and shape optimization of an underwater glider with blended-wing-body[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2015, 7(6): 995-1006.
- [7] MANLEY J, WILLCOX S. The wave glider: A new concept for deploying ocean instrumentation[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2010, 13(6): 8-13.
- [8] 严卫生. 鱼雷航行力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [9] SUN C Y, SONG B W, WANG P, et al. Shape optimization of blended-wing-body underwater glider by using gliding range as the optimization target[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2017, 9(6), 693-704.

(责任编辑: 张曼莉)