

水下滑翔机垂直面运动优化控制

张少伟^{1,2}, 俞建成¹, 张艾群¹

(1. 中国科学院沈阳自动化所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 水下滑翔机是一种依靠水动力和净浮力驱动的新型水下机器人. 本文分析了滑翔机在垂直面滑翔时, 浮力变化和内置可动质量块位置变化对滑翔机运动状态的影响. 针对滑翔机在潜浮切换时, 由于机翼受力不对称产生的无升力现象而导致的切换过程不稳定的问题, 采用两点边值的优化控制方法, 规划了内置质量块的位置, 以消除滑翔机在潜浮切换过程中各个时刻产生的不对称无升力现象. 最后给出了滑翔机实际机械系统可接受的最优控制方案. 仿真表明了这种优化方法的有效性.

关键词: 水下滑翔机; 切换控制; 最优控制.

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Optimal control for underwater gliders in the vertical plane

ZHANG Shao-wei^{1,2}, YU Jian-cheng¹, ZHANG Ai-qun¹

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences,

Shenyang Liaoning 110016, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Underwater glider driven by net buoyancy and hydrodynamic forces is a new type of underwater vehicle. We investigate the variation of glider's motion states in different net buoyancies and with different positions of inner movable mass. When a glider switches from diving downward to upward, the "stall" (loss of lift) phenomenon occurs asymmetrically on the glider's wings. To eliminate this phenomenon, we use the Hamilton function in the two-point boundary problem model of switching to develop a program for manipulating the positions of inner movable mass to balance the asymmetrical stall phenomenon produced in any instance during the switching process. Finally, an optimal applicable control project is developed for controlling the glider's actual mechanical system. Simulations validate the efficacy of the proposed optimal control method.

Key words: underwater gliders; switching control; optimal control

1 引言(Introduction)

水下滑翔机是一种依靠机翼水动力和净浮力驱动、将浮标和 underwater 机器人技术结合的新概念水下机器人. 水下滑翔机通过间歇性的改变自身的净浮力和重心在垂直纵剖面的位置从而改变滑翔运动过程中机翼受到的水动力, 借助机翼的升力实现在垂直纵剖面的锯齿状运动; 通过重心位置在机翼面的侧向偏移产生的横滚力矩实现机身的横滚, 从而使机翼升力产生回转向心力分量实现滑翔机的三维螺旋运动. 由于净浮力的改变和重心位置改变是间歇性的, 因此滑翔机能耗非常小, 适用于长期、大范围的海洋环境监测.

1995年以来, 在美国海军研究局(ONR)的资助下, 美国研制了Slocum^[1], Seaglider^[2]和Spray^[3]等以电池或海洋温差为能源的水下滑翔机系统, 其续航时间一般可达200~300天, 航程达2000~7000 km, 航

行速度约为0.25 m/s. 国内王延辉等^[4]设计了基于温差驱动的水下滑翔机, 充分利用了海洋温差能, 并进行了湖上实验, 取得良好效果; 赵伟等^[5]设计了滑翔机的浮力调节系统, 并分析了浮力调节泵的动态性能, 通过内置压力传感器准确控制了浮力质量; 曾庆礼等^[6]从做功的角度规划了滑翔机的最佳路径, 并设计出了新型的高速、高效水下滑翔机; 程雪梅等^[7]介绍了国内外滑翔机研究成果与现状, 并探讨了滑翔机在机械结构设计、浮力精确控制等方面的关键技术.

在水动力计算方面, Tang^[8]设计了无缆水下机器人的水动力计算方法, 并采用CFD软件计算了无缆水下机器人在垂直面不同攻角和俯仰角情况下受到的水动力, 并将拟合的水动力系数和实际的试验作以对比, 验证了拟合结果的有效性; Geisbert^[9]采用USAERO软件计算了滑翔机的附加质量和附加

转动惯量,并建立了半物理的实验平台;武建国等^[10,11]基于Fluent软件计算了混合驱动水下滑翔机滑翔状态下机翼的水动力特性,给出了最大升阻比时对应的攻角,分析并优化了在浅海区水下滑翔机的航行效率.马峥等^[12]分析了滑翔机的水动力特性与能耗之间的关系,为滑翔机的结构设计和优化提供了条件.胡志强等^[13]基于 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型,计算分析了CR02水下机器人的水动力系数,并用实际水池拖曳实验验证了系数的可靠性.吴利红等^[14]从水动力特性出发对水下滑翔机主载体的线型、升降翼和稳定翼进行优化,为滑翔机的运动控制提供了参考.

在滑翔机垂直面动力学模型与控制分析方面,美国普林斯顿大学Leonard^[15]基于航天飞行器滑翔的原理和模型建立水下滑翔机的动力学模型,给出了水动力在小攻角滑翔情况下的近似表示形式;同时,Leonard给出了滑翔机在垂直面稳定滑翔时净浮力、滑翔机重心位置和滑翔机运动状态之间的关系,并基于线性二次最优控制(LQR)方法,设计了滑翔机在垂直面不同俯仰角下的切换控制方法.葛晖等^[16]基于广义的d'Alembert方程推到了变质心控制的水下滑翔机动力学方程,并进行了垂直面的弹道仿真.王延辉^[17]利用吉布斯-阿佩尔方程建立了水下滑翔机的动力学模型,分析了偏心质量块和平移质量块的共同作用对滑翔机运动的影响,并分析了滑翔机三维空间运动和垂直剖面运动的特性.

水下滑翔机的切换控制主要包括下潜(或上浮)状态下以不同俯仰角滑翔时的切换控制和从下潜到上浮(或从上浮到下潜)过程中的切换控制.对于从稳定向下滑翔切换到稳定向上滑翔(即潜浮切换运动)过程中,实际中采用的切换方法是先减小净浮力以使滑翔机速度减为0,随后通过移动内部动质量块来调整滑翔机的俯仰角,从而使滑翔机由向下运动切换到向上运动,最后改变净浮力,使滑翔机以某一速度稳态滑翔;Kraus等^[18]将最优控制引入到滑翔机的潜浮切换运动过程中,以浮力变化率和攻角变化作为最优控制的目标,将滑翔机的速度、攻角、浮力3个变化量作为状态量,基于哈密顿函数方程建立了一个离散的切换控制模型,将潜浮切换运动转换为两点边值问题求解,减小了切换时间.由于滑翔机浮力变化范围和动质量块移动范围均较小,滑翔机的切换控制策略主要是保证滑翔机切换运动的稳定性,并保证在切换过程中系统的状态在实际机械系统结构允许的范围内,因此对滑翔机锯齿形轨迹的切换控制方法分析以及滑翔机的运动规划具有重要意义.

本文介绍了中科院沈阳自动化所研制的sea-wing水下滑翔机的工程样机的机械结构和驱动模式;并给出了稳态滑翔时,滑翔机运动状态和控制量

之间的关系;最后将滑翔机的浮力变化量和内部动质量块的移动速度作为最优控制目标,将滑翔机的速度、攻角、俯仰角速度、俯仰角加速度、动质量块速度和浮力变化等6个动力学系统变量作为状态量,将动质量块的速度和浮力变化率作为最优控制目标,针对最优目标的不同权重,给出了滑翔机潜浮切换运动的最优控制解,并比较了不同权重情况下系统各状态的变化趋势.由于在实际系统中滑翔机的浮力采用油泵控制,浮力变化率为常量,因此给出了浮力变化率为常量时,动质量块速度的最优控制解.

2 水下滑翔机工作原理(Underwater gliders motion theory)

针对sea-wing,本文将滑翔机载体质量分为3个部分:调整滑翔机姿态的内置动质量块 m_{mr} 、滑翔机壳体静质量 m_{rb} 和浮力调节质量 m_b ,建立了如图1所示的动坐标系 $e_0(e_1, e_2, e_3)$ 和惯性坐标系 $E_0(i, j, k)$.质量块 m_{mr} 沿 e_1 方向的移动可改变滑翔机重心在 e_1 轴上的位置,从而改变滑翔机运动的俯仰角;当 m_{mr} 绕 e_1 转动 γ° 时,可以改变滑翔机重心在 e_2 轴上的位置,使滑翔机绕 e_1 横滚,利用升力在 $E_0 - ij$ 面上的分量实现三维螺旋运动(本文暂不讨论);通过改变浮力块 m_b 的大小来实现滑翔机的下潜和上浮.由于滑翔机稳态滑翔时绕 e_2 轴的力矩为0,因此滑翔机载体壳体静质量 m_{rb} 及其位置 r_{rbx} 确定了滑翔机动质量块 m_{mr} 初始平衡位置 $r_{mr\text{initial}}$.

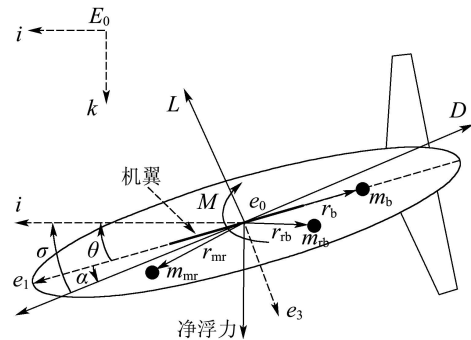


图1 滑翔机动坐标系与惯性坐标系

Fig. 1 Gliders inertial frame and body frame

滑翔机受到的净浮力为

$$\bar{m} = m_{rb} + m_{mr} + m_b - m, \quad (1)$$

当净浮力 $\bar{m} > 0$,滑翔机往下滑翔,反之,滑翔机往上滑翔.通常当浮力一定时,滑翔机系统的重心在不同的位置,可使滑翔机以不同的俯仰姿态滑翔.同时,在滑翔机俯仰角一定的情况下,改变滑翔机净浮力的大小可改变滑翔机的运动速度.

滑翔机绝大部分时间都工作在稳定的滑翔状态下,即将滑翔机动质量块位置和净浮力大小设定为一个常值,依靠水的升力和净浮力完成在固定俯仰

角下的滑翔运动. 当滑翔机从一个稳定的下潜过程切换到一个稳定的上浮过程时, 切换过程如图2所示, 滑翔机的净浮力在下潜和上浮两个状态下方向相反, 动质量块从其平衡位置一侧移动到另一侧. 由于滑翔机动力学系统是一个非线性系统, 净浮力变化至0时动质量块可能并没有移动到初始平衡位置; 当滑翔机净浮力的方向发生变化时, 动质量块可能没有从平衡位置的一侧移动到平衡位置另一侧, 就会出现滑翔机升力和净浮力方向相同, 此时滑翔机的姿态没有调整到与浮力相对应的姿态, 这就会造成滑翔机运动不稳定. 因此需要建立动质量块在不同位置、不同净浮力情况下与滑翔机稳态运动时各个运动状态之间的关系, 并深入分析在滑翔机潜浮切换过程中质心位置变化和浮力变化对滑翔机动力学系统稳定性的影响, 采用合适的控制策略提高滑翔机在切换过程中的稳定性.

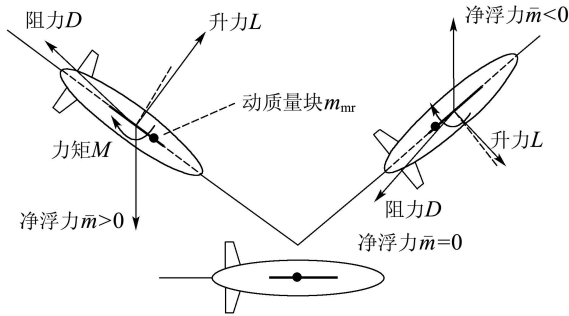


图2 滑翔机从下潜切换到上浮的过程

Fig. 2 Gliders switch from diving down to diving up

3 水下滑翔机垂直面动力学模型与控制方法分析(Dynamic model and control analysis of underwater gliders in the vertical plane)

本文将滑翔机的切换过程视为一个缓慢的过程, 忽略了滑翔机在切换过程中动质量块和滑翔机壳体质量块之间的相互作用力, 并结合sea-wing的实际机械结构: $-0.8 \text{ kg} \leq m_b \leq 0.8 \text{ kg}$, $0.3516 \text{ m} \leq r_{mrx} \leq 0.4516 \text{ m}$.

仅考虑动质量块位置、净浮力和滑翔机运动状态之间关系, 给出如下动力学模型^[1, 18]:

$$\dot{x} = V_x = V_1 \cos \theta + V_3 \sin \theta, \quad (2a)$$

$$\dot{z} = V_z = -V_1 \sin \theta + V_3 \cos \theta, \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = f_V = & Vq \sin \alpha \cos \alpha \left(\frac{m_{s1}}{m_{s3}} - \frac{m_{s3}}{m_{s1}} \right) - \\ & \frac{\bar{m}g}{m_{s1}} \cos \alpha \sin \theta + \frac{\bar{m}g}{m_{s3}} \cos \theta \sin \alpha - \\ & D \left(\frac{\sin^2 \alpha}{m_{s3}} + \frac{\cos^2 \alpha}{m_{s1}} \right) + L \sin \alpha \cos \alpha \left(\frac{1}{m_{s1}} - \frac{1}{m_{s3}} \right), \end{aligned} \quad (2c)$$

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} = f_\alpha = & q \left(\frac{m_{s3}}{m_{s1}} \sin^2 \alpha + \frac{m_{s1}}{m_{s3}} \cos^2 \alpha \right) + \\ & \frac{\bar{m}g}{V} \left(\frac{\sin \alpha \sin \theta}{m_{s1}} + \frac{\cos \alpha \cos \theta}{m_{s3}} \right) + \\ & \frac{D}{V} \sin \alpha \cos \alpha \left(\frac{1}{m_{s1}} - \frac{1}{m_{s3}} \right) - \\ & \frac{L}{V} \left(\frac{\sin^2 \alpha}{m_{s1}} + \frac{\cos^2 \alpha}{m_{s3}} \right), \end{aligned} \quad (2d)$$

$$\begin{aligned} \dot{q} = f_q = & \frac{1}{I_{s2}} (M - m_{mr}g(r_{mrx} \cos \theta + r_{mrz} \sin \theta) - \\ & m_{rb}g(r_{rbx} \cos \theta + r_{rbz} \sin \theta) + \\ & (m_{s3} - m_{s1})V^2 \sin \alpha \cos \alpha), \end{aligned} \quad (2e)$$

$$\dot{\theta} = f_\theta = q, \quad \dot{\bar{m}} = U_{\bar{m}}, \quad \dot{r}_{mrx} = U_{mrx}, \quad (2f)$$

其中: m_{s1} , m_{s3} , I_{s2} 分别对应为沿 e_1 , e_3 方向的广义质量和沿 e_3 方向的广义转动惯量; r_{mrx} , r_{mrz} , r_{rbx} , r_{rbz} 分别对应为质量块 m_{mr} , m_{rb} 在 e_1 , e_3 方向上的位置; 速度 V 为滑翔机在动坐标系下的合速度(侧向速度为0); 滑翔机的俯仰角和俯仰角速度分别为 θ , q ; 控制输入为动质量块的速度 U_{mrx} 和浮力变化率 $U_{\bar{m}}$; 在惯性坐标系下, 滑翔机在 i 向和 k 向的速度和位置分别为 V_x , V_z 和 X , Z ; 攻角 α 为动坐标系下滑翔机速度矢量和垂向速度 V_3 的夹角, 并有如下关系:

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2}, \quad \alpha = \arctan \frac{V_3}{V_1}, \quad (3)$$

式(2)中的升力 L 、阻力 D 和俯仰力矩 M 通常采用速度 V , 攻角 α 和俯仰角速度 q 来近似拟合^[15]:

$$D = (K_{D0} + K_D \alpha^2) V^2,$$

$$L = (K_{L0} + K_L \alpha) V^2,$$

$$M = (K_{M0} + K_M \alpha + K_q q) V^2.$$

3.1 滑翔机垂直面稳态分析(Steady motion analysis in the vertical plane)

为分析方便, 通常定义如图2所示航迹角 σ :

$$\sigma = \theta - \alpha,$$

在攻角 α 存在的情况下, 可以得到 σ 的范围为^[15]

$$\begin{aligned} \sigma \in & \left(\tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \left(\frac{K_{L0}}{K_L} + \sqrt{\left(\frac{K_{L0}}{K_L} \right)^2 + \frac{K_{D0}}{K_D}} \right) \right), \frac{\pi}{2} \right) \cup \\ & \left(-\frac{\pi}{2}, \tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \left(\frac{K_{L0}}{K_L} - \sqrt{\left(\frac{K_{L0}}{K_L} \right)^2 + \frac{K_{D0}}{K_D}} \right) \right) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

正号和负号分别代表向上滑翔和向下滑翔的两种情况. 在满足 σ 有解的情况下, 合理选取稳态滑翔时的 σ_{eq} , 可以求得相应稳定滑翔状态下的动质量块的攻角、俯仰角、合速度和位置如下:

$$\alpha_{\text{eq}} = \frac{K_L \tan \sigma_{\text{eq}}}{2K_D} (-1 + \sqrt{1 - 4 \frac{K_D}{K_L^2 \tan \sigma_{\text{eq}}} \left(-\frac{K_{D0}}{\tan \sigma_{\text{eq}}} + K_{L0} \right)}), \quad (5a)$$

$$\theta_{\text{eq}} = \tan^{-1} \left(\frac{L(\alpha_{\text{eq}}) \sin \alpha_{\text{eq}} - D(\alpha_{\text{eq}}) \cos \alpha_{\text{eq}}}{L(\alpha_{\text{eq}}) \cos \alpha_{\text{eq}} + D(\alpha_{\text{eq}}) \sin \alpha_{\text{eq}}} \right), \quad (5b)$$

$$V_{\text{eq}} = \frac{\sqrt{|\bar{m}_{\text{eq}}| g}}{\left((K_{D0} + K_D \alpha_{\text{eq}}^2)^2 + (K_{L0} + K_L \alpha_{\text{eq}})^2 \right)^{\frac{1}{4}}}, \quad (5c)$$

$$r_{\text{mrx}} = \frac{1}{m_{\text{mr}} g \cos \theta_{\text{eq}}} \left((m_{t3} - m_{t1}) V_{1\text{eq}} V_{3\text{eq}} - m_{\text{mr}} g r_{\text{mrz}} \sin \theta_{\text{eq}} + (K_{M0} + K_M \alpha_{\text{eq}} + K_q q_{\text{eq}}) V_{\text{eq}}^2 - m_{\text{rb}} g (r_{\text{rbx}} \cos \theta_{\text{eq}} + r_{\text{rbz}} \sin \theta_{\text{eq}}) \right). \quad (5d)$$

3.2 滑翔机垂直面潜浮切换控制方法分析 (Glider switch control analysis in the vertical plane)

在滑翔机从稳定向下滑翔切换到稳定向上滑翔的过程中, 应尽可能减小动质量块的速度和浮力变化率的波动, 因此将动质量块的速度和浮力变化率的平方和作为优化的目标函数, 将切换过程转化为一个两点边值问题, 取性能函数为

$$J = \int_0^{t_f} \frac{1}{2} (R_{\text{mr}} U_{\text{mr}}^2 + R_{\text{m}} U_{\text{m}}^2) dt. \quad (6)$$

分析滑翔机在时间 $t = [t_0, t_f]$ 内, 从初始状态:

$$\begin{cases} V(t_0) = V_0, \alpha(t_0) = \alpha_0, \theta(t_0) = \theta_0, \\ q(t_0) = q_0, \bar{m}(t_0) = \bar{m}_0, r_{\text{mr}}(t_0) = r_{\text{mr}0}, \end{cases} \quad (7)$$

切换到终止状态:

$$\begin{cases} V(t_f) = V_f, \alpha(t_f) = \alpha_f, \theta(t_f) = \theta_f, \\ q(t_f) = q_f, \bar{m}(t_f) = \bar{m}_f, r_{\text{mr}}(t_f) = r_{\text{mr}f}, \end{cases} \quad (8)$$

并满足实际机械系统约束条件:

$$\begin{cases} -0.8 \text{ kg} \leq m_b \leq 0.8 \text{ kg}, \\ 0.3516 \text{ m} \leq r_{\text{mr}} \leq 0.4516 \text{ m}. \end{cases} \quad (9)$$

当权重系数 R_{mr} , R_{m} 变化时, 可以分析滑翔机系统状态量的变化与控制输入的关系. 式(2)(6)–(8)可以等效为一个基于哈密顿函数的最优控制问题^[19], 式(9)为部分状态量的边界, 和实际机械结构的限制有关. 对应的广义拉格朗日函数为

$$J = \int_0^{t_f} \left[\frac{1}{2} (R_{\text{mr}} U_{\text{mr}}^2 + R_{\text{m}} U_{\text{m}}^2) + \lambda_V (f_V - \dot{V}) + \lambda_\alpha (f_\alpha - \dot{\alpha}) + \lambda_q (f_q - \dot{q}) + \lambda_\theta (f_\theta - \dot{\theta}) + \lambda_{\bar{m}} (U_{\bar{m}} - \dot{\bar{m}}) + \lambda_{r_{\text{mr}}} (U_{r_{\text{mr}}} - \dot{r}_{\text{mr}}) \right] dt. \quad (10)$$

通常取 $\lambda = [\lambda_V \ \lambda_\alpha \ \lambda_q \ \lambda_\theta \ \lambda_{\bar{m}} \ \lambda_{r_{\text{mr}}}]^T$ 为拉格朗日

乘子; $\mathbf{u} = [U_{\bar{m}} \ U_{r_{\text{mr}}}]$ 为控制输入; $\mathbf{x} = [V \ \alpha \ q \ \theta \ \bar{m} \ r_{\text{mr}}]^T$ 为滑翔机动力学系统的状态量. 得到相应的哈密顿函数为

$$H = \frac{1}{2} (R_{\text{mr}} U_{\text{mr}}^2 + R_{\bar{m}} U_{\bar{m}}^2) + \lambda_V f_V + \lambda_\alpha f_\alpha + \lambda_q + \lambda_\theta q + \lambda_{\bar{m}} U_{\bar{m}} + \lambda_{r_{\text{mr}}} U_{r_{\text{mr}}}, \quad (11)$$

所以有

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \dot{\lambda} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda} = \dot{\mathbf{x}}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = 0. \quad (14)$$

通过式(12)–(14)可求得最优的控制解 \mathbf{u}^* . 由式(14)可以得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_V}{\partial V} &= q \frac{\sin(2\alpha)}{2} \left(\frac{m_{s1}}{m_{s3}} - \frac{m_{s3}}{m_{s1}} \right) - \\ &2V(K_{D0} + K_D \alpha^2) \left(\frac{\sin^2 \alpha}{m_{s3}} + \frac{\cos^2 \alpha}{m_{s1}} \right) + \\ &V(K_{L0} + K_L \alpha) \sin(2\alpha) \left(\frac{1}{m_{s1}} - \frac{1}{m_{s3}} \right), \end{aligned} \quad (15a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_V}{\partial \alpha} &= Vq \cos(2\alpha) \left(\frac{m_{s1}}{m_{s3}} - \frac{m_{s3}}{m_{s1}} \right) + \\ &\frac{\bar{m}g}{m_{s1}} \sin \alpha \sin \theta + \frac{\bar{m}g}{m_{s3}} \cos \theta \cos \alpha + \\ &(K_{L0} + K_L \alpha) V^2 \cos(2\alpha) \left(\frac{1}{m_{s1}} - \frac{1}{m_{s3}} \right) - \\ &2K_D \alpha V^2 \left(\frac{\sin^2 \alpha}{m_{s3}} + \frac{\cos^2 \alpha}{m_{s1}} \right) - \\ &(K_{D0} + K_D \alpha^2) V^2 \sin(2\alpha) \left(\frac{1}{m_{s3}} - \frac{1}{m_{s1}} \right) + \\ &K_L \frac{\sin(2\alpha)}{2} V^2 \left(\frac{1}{m_{s1}} - \frac{1}{m_{s3}} \right), \end{aligned} \quad (15b)$$

$$\frac{\partial f_V}{\partial \theta} = -\frac{\bar{m}g}{m_{s1}} \cos \alpha \cos \theta - \frac{\bar{m}g}{m_{s3}} \sin \theta \sin \alpha, \quad (15c)$$

$$\frac{\partial f_V}{\partial q} = \frac{V \sin(2\alpha)}{2} \left(\frac{m_{s1}}{m_{s3}} - \frac{m_{s3}}{m_{s1}} \right), \quad (15d)$$

$$\frac{\partial f_V}{\partial \bar{m}} = -\frac{g}{m_{s1}} \cos \alpha \sin \theta + \frac{g}{m_{s3}} \cos \theta \sin \alpha, \quad (15e)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_\alpha}{\partial V} &= -\frac{\bar{m}g}{V^2} \left(\frac{\sin \alpha \sin \theta}{m_{s1}} + \frac{\cos \alpha \cos \theta}{m_{s3}} \right) + \\ &(K_{D0} + K_D \alpha^2) \cos \alpha \sin \alpha \left(\frac{1}{m_{s1}} - \frac{1}{m_{s3}} \right) - \\ &(K_{L0} + K_L \alpha) \left(\frac{\sin^2 \alpha}{m_{s1}} + \frac{\cos^2 \alpha}{m_{s3}} \right), \end{aligned} \quad (15f)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \alpha} &= q \sin(2\alpha) \left(\frac{m_{s3}}{m_{s1}} - \frac{m_{s1}}{m_{s3}} \right) + \\ &\frac{\bar{m}g}{V} \left(\frac{\cos \alpha \sin \theta}{m_{s1}} - \frac{\sin \alpha \cos \theta}{m_{s3}} \right) + \\ &(K_{D0} + K_D \alpha^2) V \cos(2\alpha) \left(\frac{1}{m_{s1}} - \frac{1}{m_{s3}} \right) + \end{aligned}$$

$$K_D \alpha V \sin(2\alpha) \left(\frac{1}{m_{s1}} - \frac{1}{m_{s3}} \right) -$$

$$K_L V \left(\frac{\sin^2 \alpha}{m_{s1}} + \frac{\cos^2 \alpha}{m_{s3}} \right) -$$

$$(K_{L0} + K_L \alpha) V \sin(2\alpha) \left(\frac{1}{m_{s1}} - \frac{1}{m_{s3}} \right), \quad (15g)$$

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial \theta} = \frac{\bar{m}g}{V} \left(\frac{\sin \alpha \cos \theta}{m_{s1}} - \frac{\cos \alpha \sin \theta}{m_{s3}} \right), \quad (15h)$$

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial q} = \frac{m_{s3}}{m_{s1}} \sin^2 \alpha + \frac{m_{s1}}{m_{s3}} \cos^2 \alpha, \quad (15i)$$

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial \bar{m}} = \frac{g}{V} \left(\frac{\sin \alpha \sin \theta}{m_{s1}} + \frac{\cos \alpha \cos \theta}{m_{s3}} \right), \quad (15j)$$

$$\frac{\partial f_q}{\partial V} = \frac{1}{I_{s2}} \left((m_{s3} - m_{s1}) V \sin(2\alpha) + \right.$$

$$\left. 2V(K_{M0} + K_M \alpha + K_q q) \right), \quad (15k)$$

$$\frac{\partial f_q}{\partial \alpha} = \frac{(m_{s3} - m_{s1}) V^2 \cos(2\alpha) + K_M V^2}{I_{s2}}, \quad (15l)$$

$$\frac{\partial f_q}{\partial \theta} = \frac{1}{I_{s2}} [m_{mr} g (r_{mrx} \sin \theta - r_{mrz} \cos \theta) +$$

$$m_{rb} g (r_{rbx} \sin \theta - r_{rbz} \cos \theta)], \quad (15m)$$

$$\frac{\partial f_\theta}{\partial q} = 1, \quad \frac{\partial f_q}{\partial q} = \frac{K_q V^2}{I_{s2}}, \quad (15n)$$

$$\frac{\partial f_q}{\partial r_{mrx}} = \frac{-m_{mr} g \cos \theta}{I_{s2}}, \quad (15o)$$

$$U_{\bar{m}}^* = -\frac{\lambda_{\bar{m}}}{R_{\bar{m}}}, \quad U_{r_{mrx}}^* = -\frac{\lambda_{r_{mrx}}}{R_{r_{mrx}}}. \quad (16)$$

由式(12)可以推得拉格朗日乘子 λ 的导数为

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial V} = -\dot{\lambda}_V = \lambda_V \frac{\partial f_V}{\partial V} + \lambda_\alpha \frac{\partial f_\alpha}{\partial V} + \lambda_q \frac{\partial f_q}{\partial V}, \\ \frac{\partial H}{\partial \alpha} = -\dot{\lambda}_\alpha = \lambda_V \frac{\partial f_V}{\partial \alpha} + \lambda_\alpha \frac{\partial f_\alpha}{\partial \alpha} + \lambda_q \frac{\partial f_q}{\partial \alpha}, \\ \frac{\partial H}{\partial \theta} = -\dot{\lambda}_\theta = \lambda_V \frac{\partial f_V}{\partial \theta} + \lambda_\alpha \frac{\partial f_\alpha}{\partial \theta} + \lambda_q \frac{\partial f_q}{\partial \theta}, \\ \frac{\partial H}{\partial q} = -\dot{\lambda}_q = \lambda_V \frac{\partial f_V}{\partial q} + \lambda_\alpha \frac{\partial f_\alpha}{\partial q} + \\ \lambda_\theta \frac{\partial f_\theta}{\partial q} + \lambda_q \frac{\partial f_q}{\partial q}, \\ \frac{\partial H}{\partial \bar{m}} = -\dot{\lambda}_{\bar{m}} = \lambda_V \frac{\partial f_V}{\partial \bar{m}} + \lambda_\alpha \frac{\partial f_\alpha}{\partial \bar{m}}, \\ \frac{\partial H}{\partial r_{mrx}} = -\dot{\lambda}_{r_{mrx}} = \lambda_q \frac{\partial f_q}{\partial r_{mrx}}. \end{array} \right. \quad (17)$$

式(17)中等号右侧的各个偏导项见式(15). 通常求解 \mathbf{u}^* 的过程如下^[19]: 可以先由式(16)求出最优的 $\mathbf{u}^* = \mathbf{u}[\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}]$ 的理论解; 然后将 \mathbf{u}^* 带入哈密尔顿正则方程(12)和(13), 通过微分方程求出最优的 $\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}$ 的表达式; 最后将 $\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}$ 反代入 $\mathbf{u}^* = \mathbf{u}[\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}]$, 就可以得到最优控制解, 在求解最优控制解过程中可通过程序限定状态量的范围(式(9)), 由于系统状态变量较多, 直接解偏微分方程较难, 通常采用数值算法求

解. 通过设置不同的权重, 可以分析出相应控制量对系统运动状态的影响.

4 滑翔机垂直面切换控制仿真(Glider switch control simulation)

通过水动力计算软件CFX计算了攻角变化时候滑翔机受到水动力和力矩, 并采用最小二乘方法拟合得到滑翔机垂直面水动力系数为

$$K_{D0} = 7.19, \quad K_D = 386.29,$$

$$K_{L0} = -0.36, \quad K_L = 440.99,$$

$$K_{M0} = 0.28, \quad K_M = -65.84, \quad K_q = -205.64.$$

滑翔机各部分质量、位置及转动惯量等如下:

$$m_{rb} = 54.28 \text{ kg}, \quad m_{mr} = 11 \text{ kg},$$

$$m = 65.28 \text{ kg}, \quad -0.8 \text{ kg} < m_b < 0.8 \text{ kg},$$

$$r_{rbx} = -0.0814 \text{ m}, \quad r_{rbz} = 0.0032 \text{ m},$$

$$r_{mrz} = 0.014 \text{ m}, \quad r_{mrz \text{ initial}} = 0.4016 \text{ m},$$

$$0.3516 \text{ m} < r_{mrx} < 0.4516 \text{ m}, \quad m_{s1} = 66.76 \text{ kg},$$

$$m_{s3} = 131.20 \text{ kg}, \quad I_{s2} = 23.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

由式(4)(5)可以给出滑翔机各种情况下稳态滑翔时的状态量; 随后给出了滑翔机从稳定的下潜滑翔切换到稳定的上浮滑翔切换过程的优化控制仿真, 取浮力绝对值 $|\bar{m}| = 0.4 \text{ kg}$ 时, 滑翔机下潜和上浮滑翔所对应两组稳定状态分别为

$$\mathbf{x}_0 = [0.4822 \text{ m/s} \quad 2\pi/180 \text{ rad} \quad -25\pi/180 \text{ rad}$$

$$0\pi/180 \text{ rad/s} \quad 0.4 \text{ kg} \quad 0.4160 \text{ m}],$$

$$\mathbf{x}_f = [0.4734 \text{ m/s} \quad -2\pi/180 \text{ rad} \quad 25\pi/180 \text{ rad}$$

$$0\pi/180 \text{ rad/s} \quad -0.4 \text{ kg} \quad 0.3891 \text{ m}].$$

选取的目标函数如式(6)所示. 选取权重比分别为

$$R_{mrx} : R_{\bar{m}} = 1 : 1, \quad R_{mrx} : R_{\bar{m}} = 2 : 1,$$

$$R_{mrx} : R_{\bar{m}} = 5 : 1, \quad R_{mrx} : R_{\bar{m}} = 10 : 1.$$

仿真中根据式(9)限定了浮力变化的范围和动质量块位置的范围, 这在实际机械系统的结构是一致的; 同时在仿真中限定俯仰角的变化范围为 $-60^\circ - 60^\circ$; 对于不同权重, 仿真得到的滑翔机的各个状态如图3、图4所示, 对应的浮力控制量、动质量块移动速度及滑翔机在惯性坐标系下的位置如图5所示; 从图3、图4中各个状态量可知, 滑翔机采用这种优化控制策略后, 不用将合速度 V 减为0, 同样完成了潜浮切换, 并且限定了俯仰角 θ 的范围, 滑翔机的攻击 α 变化范围也较小; 当浮力控制量权重越大时, 滑翔机的浮力变化越平稳, 滑翔机切换的合速度的最小值也越大; 当浮力控制量的权重越小时, 对应于动质量块移动速度权重越大, 滑翔机的俯仰角的变化也较小, 攻角的变化也较小, 动质量块的位置变化波动也较小, 并且保证了动质量块的移动和浮力的变

化均在限定的范围内. 由图5知, 当在浮力变化率和动质量块移动速度的权重比越小时切换, 滑翔机从

开始切换到完成切换的过程中, 在垂直面移动的距离越小.

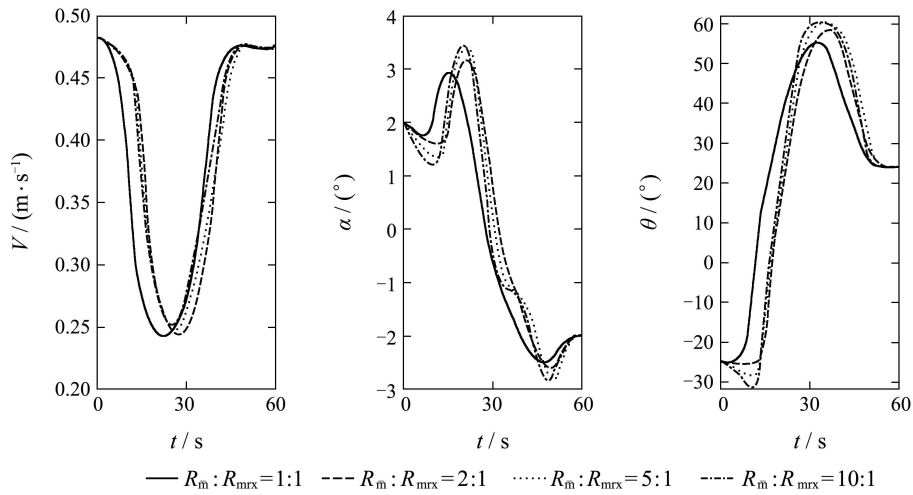


图3 不同权重下滑翔机的状态 V, α, θ

Fig. 3 Glider states V, α, θ with various weights

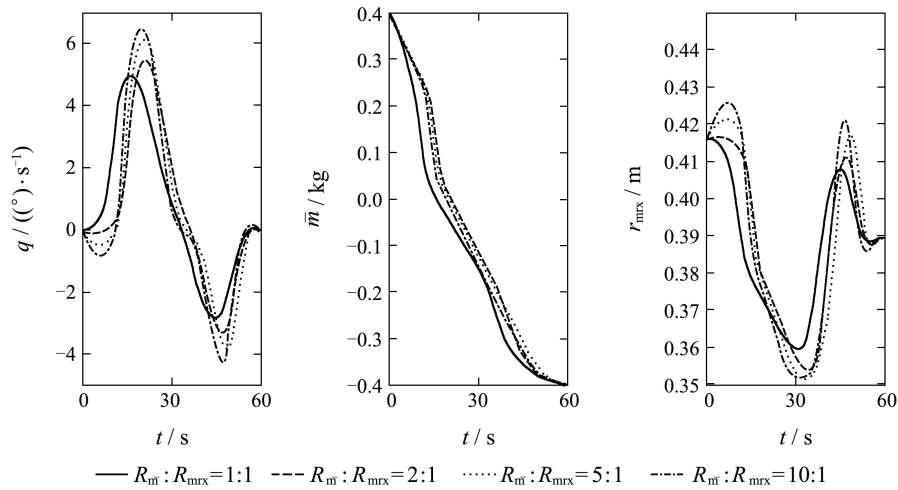


图4 不同权重下滑翔机的状态 q, \dot{m}, r_{mrx}

Fig. 4 Glider states q, \dot{m}, r_{mrx} with various weights

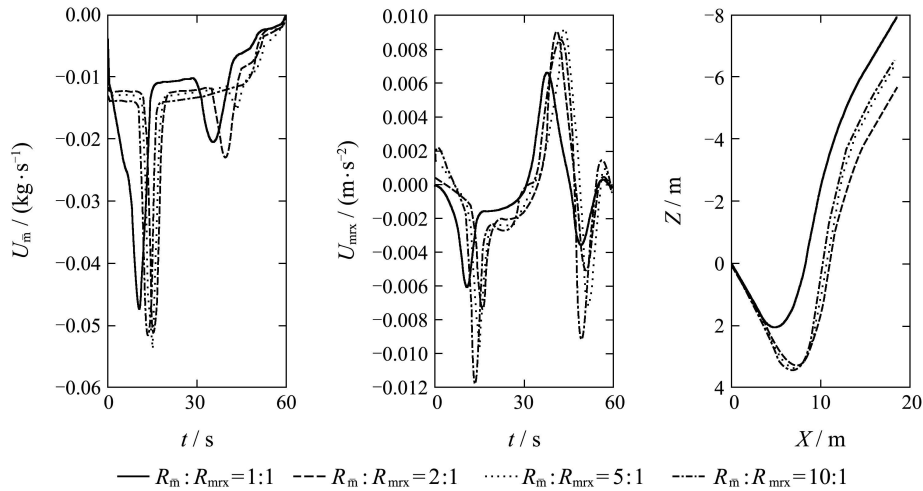


图5 不同权重下控制输入 $U_{\dot{m}}, U_{mrx}$ 及滑翔机在惯性坐标系下位置 X, Z

Fig. 5 Control inputs $U_{\dot{m}}, U_{mrx}$ and glider positions X, Z in the inertial frame with various control weights

通常滑翔机的浮力变化率是常值, 主要是改变动质量块的位置来完成切换, 这种情况下选用的目标函数为

$$J = \int_0^{t_f} \frac{1}{2} U_{\text{mrx}}^2 dt. \quad (18)$$

对应的切换时间为 $T = 60 \text{ s}$, 图6、图7给出了浮力变化为常值的情况下, 滑翔机各个状态的变化过程, 仿真表明系统的状态变化波动均较小; 对应的浮力控制量、动质量块速度控制量和滑翔机在惯性坐标系下的位置如图8所示。

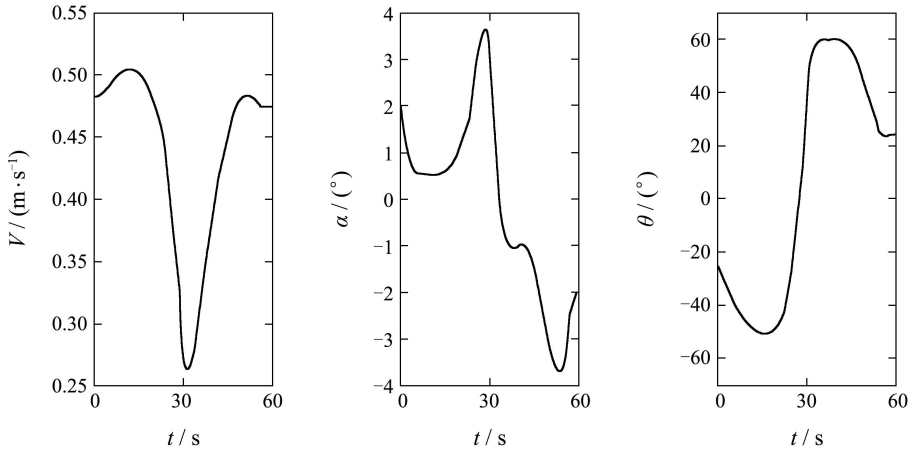


图 6 浮力变化率 $U_{\bar{m}}$ 为常值时滑翔机的状态 V, α, θ

Fig. 6 Glider states V, α, θ with constant $U_{\bar{m}}$

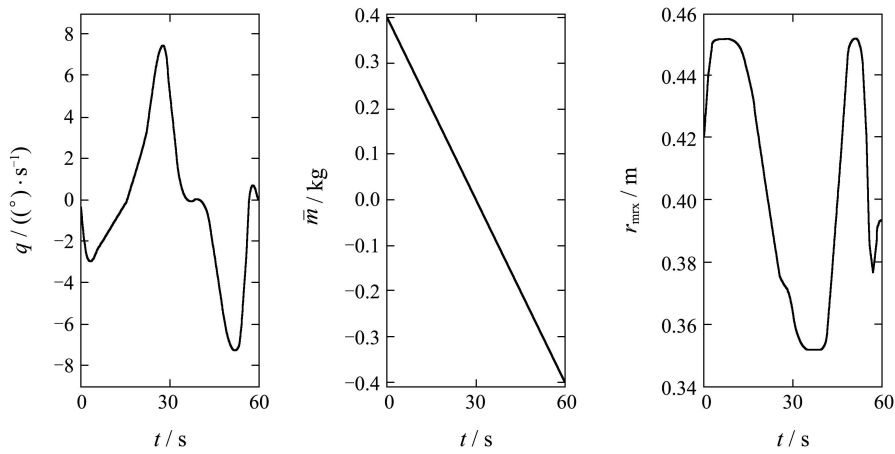


图 7 浮力变化率 $U_{\bar{m}}$ 为常值时滑翔机的状态 $q, \bar{m}, r_{\text{mrx}}$

Fig. 7 Glider states $q, \bar{m}, r_{\text{mrx}}$ with constant $U_{\bar{m}}$

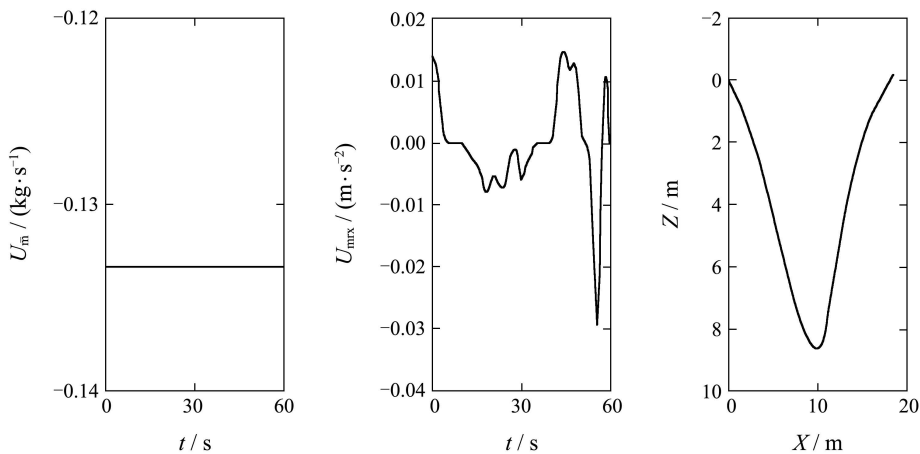


图 8 浮力变化率 $U_{\bar{m}}$ 为常值时, U_{mrx} 的变化和滑翔机载体坐标系下位置 X, Z

Fig. 8 Control inputs U_{mrx} and glider positions X, Z with constant $U_{\bar{m}}$

5 结论(Conclusion)

本文介绍了水下滑翔机在垂直面稳态滑翔时各个状态的解析解,并基于哈密尔顿函数建立了潜浮切换运动的动力学模型,给出了优化后的控制量和状态量;并比较了当控制量权重变化时,动力学系统各个状态量的变化趋势,分析了控制量对系统各状态的影响.由于在实际情况下滑翔机的浮力变化率为一个常值,本文给出了在浮力变化率为常值情况下动质量块的位置量,并给出了对应时刻的各个状态量和控制量,保证了动质量块移动量不超过限定的移动范围,且动力学系统各个状态的波动较小,在将来可以应用到实际的试验中进行分析.

参考文献(References):

- [1] WEBB D C, SIMONETTI P J, JONES C P. SLOCUM, an underwater glider propelled by environmental energy[J]. *Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 447 – 452.
- [2] ERIKSEN C C, OSSE T J, LIGHT R D, et al. Seaglider: a long range autonomous underwater vehicle for oceanographic research[J]. *Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 424 – 436.
- [3] SHERMAN J, DAVIS R E, OWENS W B. The autonomous underwater glider “Spray” [J]. *Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 437 – 446.
- [4] 王延辉, 王树新, 谢春刚. 基于温差能源的水下滑翔器动力学分析与设计[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 133 – 188.
(WANG Yanhui, WANG Shuxin, XIE Chungang. Dynamic analysis and system design on an underwater glider propelled by temperature difference energy[J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(2): 133 – 188.)
- [5] 赵伟, 杨灿军, 陈鹰. 水下滑翔机浮力调节系统设计及动态性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(10): 1772 – 1776.
(ZHAO Wei, YANG Canjun, CHEN Ying. Design and dynamic performance study of buoyancy regulating system of autonomous underwater glider[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2009, 43(10): 1772 – 1776.)
- [6] 曾庆礼, 张宇文, 赵加朋. 水下滑翔机总体设计与运动分析[J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 1 – 6.
(ZENG Qingli, ZHANG Yuwen, ZHAO Jiapeng. Design and hydrodynamic analysis of underwater glider[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(1): 1 – 6.)
- [7] 程雪梅. 水下滑翔机研究现状进展及关键技术[J]. 鱼雷技术, 2009, 17(6): 1 – 6.
(CHENG Xuemei. Development and key technologies of autonomous underwater glider[J]. *Torpedo Technology*, 2009, 17(6): 1 – 6.)
- [8] TANG S, URA T, NAKATANI T, et al. Estimation of the hydrodynamic coefficients of the complex-shaped autonomous underwater vehicle TUNA-SAND[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2009, 14(3): 373 – 386.
- [9] GEISBERT J S. *Hydrodynamic modeling for autonomous underwater vehicles using computational and semi-Empirical methods*[D]. Burrus Hall Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [10] 武建国, 陈超英, 王树新. 混合驱动水下滑翔器滑翔状态机翼水动力特性[J]. 天津大学学报, 2010, 43(1): 84 – 89.
(WU Jianguo, CHEN Chaoying, WANG Shuxin. Hydrodynamic characteristics of the wings of hybrid-driven underwater glider in glide mode[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(1): 84 – 89.)
- [11] 武建国, 陈超英, 王树新. 浅海水下滑翔器航行效率分析[J]. 中国机械工程, 2009, 3(20): 349 – 353.
(WU Jianguo, CHEN Chaoying, WANG Shuxin. Sailing efficiency analysis of shallow-sea underwater glider[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 3(20): 349 – 353.)
- [12] MA Z, ZHANG H, ZHANG N, et al. Study on energy and hydrodynamic performance of the underwater glider[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2006, 10(3): 53 – 60.
- [13] 胡志强, 林扬, 谷海涛. 水下机器人粘性类水动力数值计算方法研究[J]. 机器人, 2007, 29(2): 145 – 150.
(HU Zhiqiang, LIN Yang, GU Haitao. On numerical computation of viscous hydrodynamics of unmanned underwater vehicle[J]. *Robot*, 2007, 29(2): 145 – 150.)
- [14] 吴利红, 俞建成, 封锡盛. 水下滑翔机器人水动力研究与运动分析[J]. 船舶工程, 2006, 28(1): 12 – 16.
(WU Lihong, YU Jiancheng, FENG Xisheng. Hydrodynamic research and motion analysis of AUG[J]. *Ship Engineering*, 2006, 28(1): 12 – 16.)
- [15] LEONARD N E, GRAVER J G. Model-based feedback control of autonomous underwater gliders[J]. *Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 633 – 645.
- [16] 葛晖, 徐德民, 周秦英. 基于变质心控制的低速水下航行器动力学建模[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(3): 327 – 337.
(GE Hui, XU Demin, ZHOU Qinying. Dynamic modeling of a low speed underwater vehicle based on moving mass control[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2007, 26(3): 327 – 337.)
- [17] 王延辉. 水下滑翔器动力学行为与鲁棒控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
(WANG Yanhui. *Dynamical behavior and robust control strategies of the underwater gliders*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.)
- [18] KRAUS R, CLIFF E, WOOLSEY C, et al. *Optimal Control of an Undersea Glider in a Symmetric Pull-Up*[M]. Burrus Hall Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [19] 刘豹, 唐万生. 现代控制理论[M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 230 – 322.
(LIU Bao, TANG Wansheng. *Modern Control Theory*[M]. 3rd Ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 230 – 322.)

作者简介:

张少伟 (1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为水下滑翔机动力学与控制, E-mail: zswsia@126.com;

俞建成 (1976—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为水下滑翔机技术, E-mail: yjc@sia.cn;

张艾群 (1959—), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为水下机器人总体技术, E-mail: zaq@sia.cn.