

# 载人潜水器空间运动仿真计算研究

赵桥生, 何春荣, 李德军, 彭超

(中国船舶科学研究中心 水动力学重点实验室, 无锡, 214082, Email: 2541086522@qq.com)

**摘要:** 基于空间六自由度运动模型, 对载人潜水器的空间运动进行了仿真计算。完了两个空间运动算例。算例 1 水平面作用推力和力矩, 但由于潜器上下不对称产生向上的水动力引起了垂直面运动, 进而导致潜水器做空间运动; 算例 2 水平面作用推力和力矩的基础上施加垂向推力, 实现了潜水器快速螺旋下潜运动。对两个空间运动算例进行仿真, 计算结果为该载人潜水器的空间运动特性分析提供了基础。

**关键词:** 载人潜水器; 模型; 仿真; 空间运动

## 1 引言

目前, 载人潜水器在海洋探索等方面应用广泛, 载人潜水器能够使科学家亲临海底现场, 进行实地考察、取样和测绘等作业, 同时操作机械手进行有效的水下作业<sup>[1-2]</sup>。潜水器动力学方程是复杂的非线性微分方程组, 主要是基于美国海军舰船研究与发展中心于 1967 年提出的潜艇六自由度运动模型发展而来<sup>[3]</sup>。孙晓芳<sup>[5]</sup>对潜水器的空间螺旋下潜的运动模拟, 但并未对运动过程中水动力进行研究。

马岭<sup>[4]</sup>利用深海载人潜水器的三自由度的动力学模型对潜浮运动仿真计算, 验证其潜浮性能。载人潜水器外形复杂, 运动数学模型的非线性强。本研究基于六自由度运动数学模型, 以某载人潜水器为研究对象, 完成了空间运动两个算例的仿真计算, 对仿真结果进行了分析, 为全面掌握载人潜水器的空间运动性能提供基础和参考。

## 2 载人潜水器六自由度模型

研究载人潜水器的六自由度运动时, 通过惯性坐标系与潜水器坐标系的转换, 可得到载人潜水器的空间运动学模型<sup>[6]</sup>。把潜水器看作为一个刚体, 对潜水器进行受力分析, 采用刚体运动动量定理和动量矩定理<sup>[7]</sup>, 可得到潜水器空间六自由度方程组:

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = \sum_i X_i \quad (1)$$

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = \sum_i Y_i \quad (2)$$

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = \sum_i Z_i \quad (3)$$

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} + pv - qu) - z_G(\dot{v} + ru - pw)] - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} = \sum_i K_i \quad (4)$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu)] - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} = \sum_i M_i \quad (5)$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} + ru - pw) - y_G(\dot{u} + qw - rv)] - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} = \sum_i N_i \quad (6)$$

其中，外力和外力矩包括螺旋桨推力、水动力、重力和浮力及力矩等，而环境引起的干扰力可由具体的作业环境进行分析，对于外力和外力矩建模可参考文献[6]，其中六自由度外力模型如下：

$$\sum_i X_i = \frac{1}{2} \rho L^4 [X'_{qq} q^2 + X'_{rr} r^2 + X'_{pr} pr] + \frac{1}{2} \rho L^3 [X'_u \dot{u} + X'_{vr} vr + X'_{wq} wq] + \frac{1}{2} \rho L^2 [X'_{uu} u^2 + X'_{vv} v^2 + X'_{ww} w^2 + X'_{uv} uv] - (W - B) \sin \theta + X_T \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum_i Y_i &= \frac{1}{2} \rho L^4 [Y'_r \dot{r} + Y'_p \dot{p} + Y'_{r|p|} r|p| + Y'_{p|p|} p|p| + Y'_{pq} pq + Y'_{qr} qr] \\ &+ \frac{1}{2} \rho L^3 [Y'_v \dot{v} + Y'_p up + Y'_r ur + Y'_q vq + Y'_{wp} wp + Y'_{wr} wr] + \\ &\frac{1}{2} \rho L^3 \left[ Y'_{v|p|} \frac{v}{|v|} (v^2 + w^2)^{1/2} |r| + Y'_{vww} vw^2 \right] + \frac{1}{2} \rho L^2 [Y'_0 u^2 + Y'_v uv + Y'_{vw} vw] \\ &+ \frac{1}{2} \rho L^2 Y'_{v|v|} v (v^2 + w^2)^{1/2} + (W - B) \cos \theta \sin \phi + Y_T \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum_i Z_i &= \frac{1}{2} \rho L^4 [Z'_q \dot{q} + Z'_{q|q|} q|q| + Z'_{pp} p^2 + Z'_{rr} r^2 + Z'_{rp} rp] + \frac{1}{2} \rho L^3 [Z'_w \dot{w} + Z'_{vr} vr + Z'_{vp} vp + Z'_q uq] \\ &+ \frac{1}{2} \rho L^3 Z'_{v|q|} \frac{w}{|w|} (v^2 + w^2)^{1/2} |q| + \frac{1}{2} \rho L^2 [Z'_0 u^2 + Z'_w uw + Z'_{|u|} u|w| + Z'_{vv} v^2 + Z'_{|v|} v|w|] \\ &+ \frac{1}{2} \rho L^2 [Z'_{ww} w (v^2 + w^2)^{1/2} + Z'_{v|w|} v (v^2 + w^2)^{1/2}] + (W - B) \cos \theta \sin \phi + Z_T \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sum_i K_i = & \frac{1}{2} \rho L^5 [K'_r \dot{r} + K'_p \dot{p} + K'_{r|p}|r| + K'_{p|p}|p| + K'_{pq} pq + Z'_{qr} qr] \\ & + \frac{1}{2} \rho L^4 [K'_v \dot{v} + K'_{vq} vq + K'_{vp} vp + K'_{vr} vr] + \frac{1}{2} \rho L^4 [K'_r ur + K'_p up + K'_{vww} vw^2] + \\ & \frac{1}{2} \rho L^3 [K'_0 u^2 + K'_v uv + K'_{|v|} v \left| (v^2 + w^2)^{1/2} \right| + K'_{vw} vw] + (y_G W - y_C B) \cos \theta \cos \phi \\ & - (z_G W - z_C B) \cos \theta \sin \phi + K_T \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sum_i M_i = & \frac{1}{2} \rho L^5 [M'_q \dot{q} + M'_{q|q}|q| + M'_{pp} p^2 + M'_{rr} r^2 + M'_{rp} rp] \\ & + \frac{1}{2} \rho L^4 [M'_w \dot{w} + M'_{vr} vr + M'_{vp} vp + M'_q uq + M'_{|w|} (v^2 + w^2)^{1/2} q] + \\ & \frac{1}{2} \rho L^3 [M'_0 u^2 + M'_w uw + M'_{|w|} w \left| (v^2 + w^2)^{1/2} \right| + M'_{vw} v^2 + M'_{|w|} |w|] + \\ & \frac{1}{2} \rho L^3 M'_{ww} \left| w \left( v^2 + w^2 \right)^{1/2} \right| - (x_G W - x_C B) \cos \theta \cos \phi - (z_G W - z_C B) \sin \theta + M_T \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum_i N_i = & \frac{1}{2} \rho L^5 [N'_r \dot{r} + N'_p \dot{p} + N'_{pq} pq + N'_{qr} qr] + \frac{1}{2} \rho L^5 [N'_{r|p}|r| + N'_{p|p}|p|] \\ & + \frac{1}{2} \rho L^4 [N'_v \dot{v} + N'_{vr} vr + N'_{vp} vp + N'_{vq} vq + N'_{vww} vw^2 + N'_r ur + N'_p up] + \\ & \frac{1}{2} \rho L^4 N'_{|v|} \left| (v^2 + w^2)^{1/2} \right| r + \frac{1}{2} \rho L^3 [N'_0 u^2 + N'_v uv + N'_{|v|} v \left| (v^2 + w^2)^{1/2} \right| + N'_{vw} vw] \\ & + (x_G W - x_C B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_C B) \sin \theta + N_T \end{aligned} \quad (12)$$

本研究的潜水器对象为某载人潜水器，水动力系数的来源于中国船舶科学研究中的水池模型试验<sup>[7]</sup>，表 1 列出部分纵向运动的水动力系数，全部的水动力学系数见参考文献<sup>[7]</sup>。

表 1 部分水动力系数 ( $\times 10^{-3}$ )

$X'_{\dot{u}}$	$X'_{uu}$	$X'_{vv}$	$X'_{ww}$	$X'_{q\dot{q}}$	$X'_{rr}$	$X'_{uw}$	$Y'_v$
-19.623	-37.700	-87.211	-69.597	-4.991	-33.400	37.548	...

### 3 空间运动仿真计算

载人潜水器的六自由度操纵运动方程是一个 12 个方程和 12 个变量的微分方程组<sup>[8]</sup>，该方程组是隐式的，进行变化，可得其显式形式，如果给定初始状态和推力大小，可对显式微分方程组进行求解，根据动力学模型和运动学模型，通过自编程序，实现对载人潜水器运动的模拟仿真，掌握载人潜水器的运动规律。

#### 3.1 空间运动仿真算例 1

推进器的输入推力： $T = [520N, 392N, 0, 0, 0, 1112N \cdot m]^T$ ；初始航速为 1kn，深度在 6000m，潜水器进行空间运动，仿真结果如下：

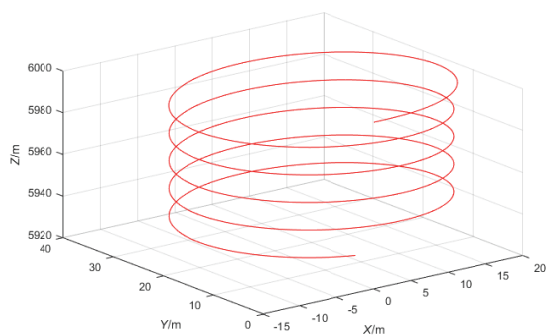


图 1 空间回转轨迹

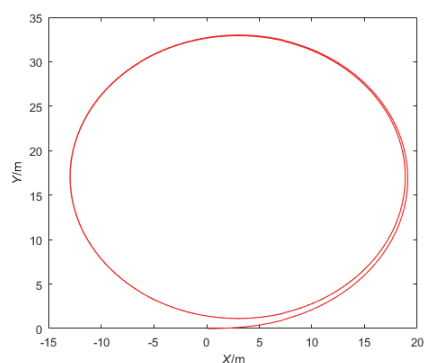


图 2 空间回转水平面投影

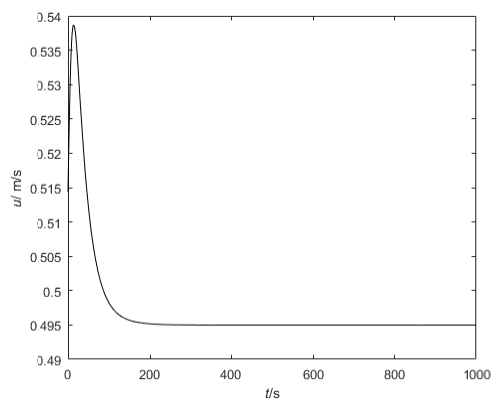


图 3 纵向速度时历曲线

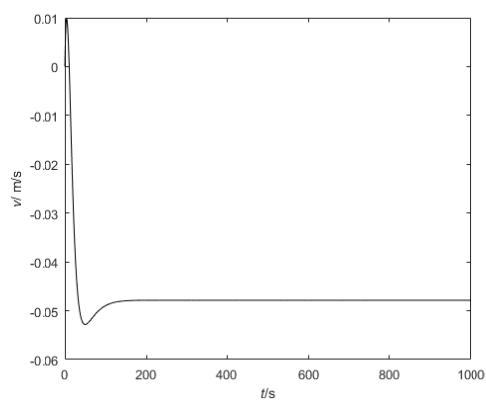


图 4 横向速度时历曲线

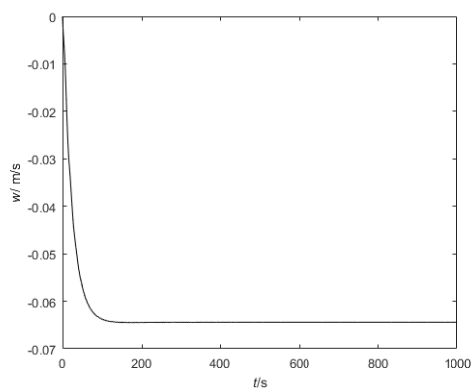


图 5 垂向速度时历曲线

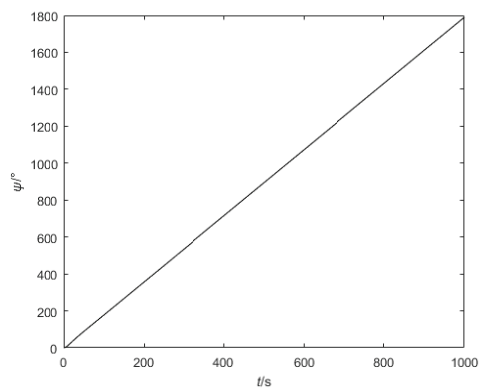


图 6 空间运动航向角时历曲线

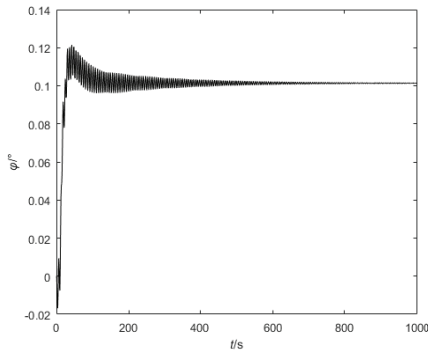


图 7 空间运动横倾角

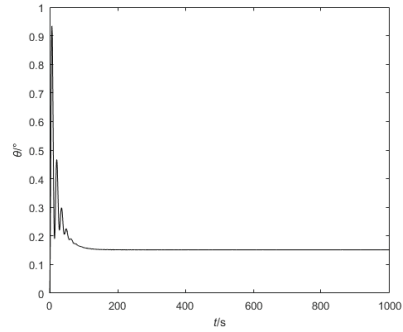


图 8 空间运动纵倾角

从仿真结果看，潜水器做空间运动，水平面内回转运动的半径为 31.5m，在  $t=200s$  以后，纵向速度为 0.5m/s，垂向升速为 0.062m/s，横向速度很小，横向速度对回转运动影响可忽略不计。潜水器上下不对称从而诱导产生垂直向上的水动力，进而导致潜水器即使在水平面的作用力和力矩作用下，也呈现空间运动的现象。

### 3. 2 空间运动仿真算例 2

推进器输入推力  $T = [595N, 496N, 595N, 0, -1076N \cdot m, 1405 N \cdot m]^T$ ；初始状态  $x_0 = [1kn, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 6000, 0, 0, 0]$ ，潜水器进行螺旋下潜运动，仿真结果如下图 9 至图 14 所示。

从计算仿真结果看，潜水器做空间螺旋下潜运动，螺旋运动的半径为 41.2m。纵向稳定速度为 0.62m/s，垂向升速为 0.13m/s。通过施加垂向推力，能有效快速实现潜水器螺旋下潜运动，下潜过程中垂向水动力逐渐增大。

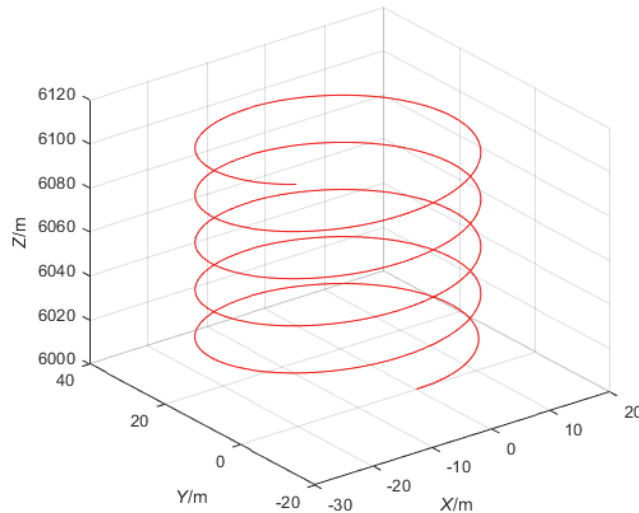


图 9 空间螺旋下潜运动轨迹

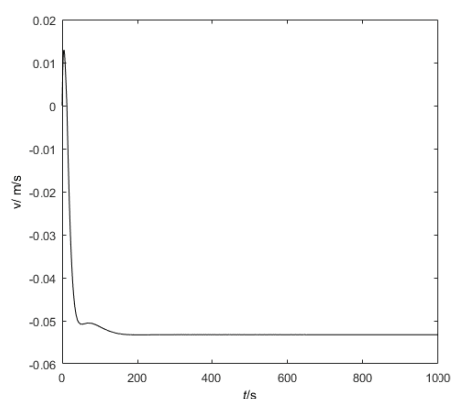


图 10 空间运动横向速度时历曲线

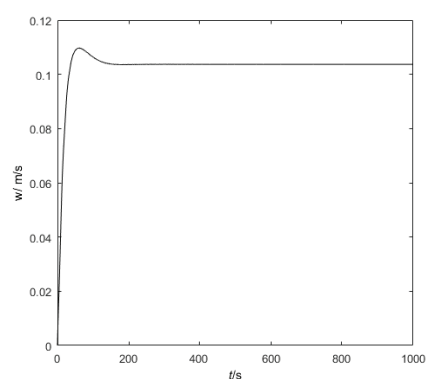


图 11 空间运动垂向速度时历曲线

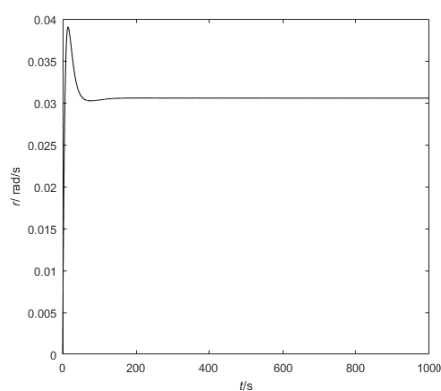
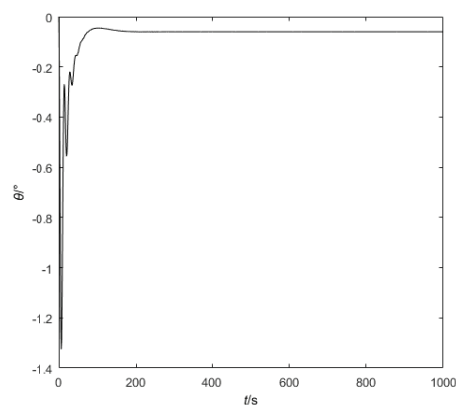


图 12 空间运动回转角速度时历曲线

图 13 空间运动纵倾角  $\theta$ 

## 4 总结

论文基于载人潜水器六自由度模型，结合风洞和旋臂水池中的模型试验得到的水动力学系数，对载人潜水器空间运动进行仿真计算，给出了两个算例的仿真结果。从仿真结果看：回转运动半径不大，反映载人潜水器的机动性很好。潜器线型上下不对称，导致产生向上的水动力引起即使水平面的力和力矩作用于潜水器，运动轨迹也是空间运动，而且垂向水动力具有很强的非线性；两者在轨迹上看都为螺旋运动，前者无垂向推力，而后者通过施加垂向推力，实现潜水器快速螺旋下潜运动。相关仿真结果，为掌握载人潜水器的空间运动性能提供了基础。

## 参考文献

- 1 刘涛, 王璇, 王帅, 等. 深海载人潜水器发展现状及技术进展[J]. 中国造船, 2012, 53(03): 233-243.

- 2 姜哲, 崔维成. 全海深潜水器水动力学研究最新进展[J]. 中国造船, 2015, 56(04):188-199.
- 3 Gertler M, Hagen G R. Standard Equations of Motion for Submarine Simulation[J]. Standard Equations of Motion for Submarine Simulation, 1967.
- 4 马岭, 崔维成. 载人潜水器潜浮运动的模拟[J]. 船舶力学, 2004, 8(3).
- 5 孙晓芳. 某智能潜水器操纵性能分析和运动仿真研究[D]. 2014.
- 6 魏延辉. UVMS系统控制技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017.
- 7 深海载人潜水器动力学建模研究及操纵仿真器研制[D]. 江南大学, 2009.
- 8 马骋, 连琏. 水下运载器操纵控制及模拟仿真技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

## Research on space motion simulation of manned submersible

ZHAO Qiao-sheng, HE Chun-rong, LI De-jun, PENG Chao

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082, Email: 2541086522@qq.com)

**Abstract:** In this paper, the space motion of manned submersible is simulated. Firstly, a six-degree-of-freedom space motion model of manned submersible is given. Then, the simulation study of the space motion is carried out. The asymmetry between the upper and lower parts of the submersible results in the upward hydrodynamic force, which leads to the space motion of the submersible, and the vertical hydrodynamic force has strong non-linearity. Finally, the simulation study of the space spiral motion is carried out, and the fast speed of the submersible is realized by applying vertical thrust.

**Key words:** Manned submersible; Model; Simulation; Space motion