

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.02.007

基于 Matlab/Simulink 的水下航行器建模与仿真

沈建森¹, 朱书平², 周徐昌¹

(1. 海军工程大学兵器工程系, 武汉 430033; 2. 海军 92474 部队, 海南 三亚 572018)

摘要: 为便于对水下航行器的运动弹道和运动控制进行计算机仿真, 建立一种基于 Matlab/Simulink 的水下航行器模型。利用矢量化建模方法, 给出水下航行器 6 自由度空间运动数学模型, 详细论述 Simulink 建模过程和 S 函数的实现方法, 并应用所建立的 Simulink 模型, 对水下航行器的开环运动、操纵性以及闭环运动控制相关问题进行仿真。仿真结果表明, 该系统符合水下航行器的实际运动规律。

关键词: 水下航行器; 运动建模; 仿真; Matlab/Simulink

中图分类号: TJ67 **文献标志码:** A

A Method for Modeling and Simulation of Underwater Vehicles Based on Matlab/Simulink

Shen Jiansen¹, Zhu Shuping², Zhou Xuchang¹

(1. Dept. of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. No. 92474 Unit of Navy, Sanya 572018, China)

Abstract: Matlab/Simulink modeling and simulation method is introduced for the trajectory and motion control compute simulation of underwater vehicles. The 6 degrees of freedom spatial motion mathematical model of underwater vehicles is established based on vector modeling means. The process of building simulink model and realizing the S function are discussed in details, and the structure-compacted universal simulation model of underwater vehicles is established. The simulation results of spatial motion, maneuverability and motion control showed the validity of the established model.

Key words: underwater vehicles; motion modeling; simulation; Matlab/Simulink

0 引言

水下航行器 (underwater vehicles) 是一种具有 6 自由度的耦合、非线性对象, 其运动方程是一组复杂的非线性微分方程组^[1-4]。建立合理的运动数学模型是研究水下航行器操纵性、进行弹道预报以及控制系统分析和设计的基础。国内外学者对水下航行器建模进行了深入研究, 其中, 挪威学者 Fossen 基于牛顿-欧拉和拉格朗日公式建立的矢量形式水下航行器运动方程, 具有通用性强、形式紧凑、便于进行理论分析的优点, 是目前国际上被广泛接受和采用的一种水下航行器运动模型^[1]。

计算机仿真在水下航行器研制过程中, 特别是初期阶段具有重要地位。Matlab 软件中的 Simulink 仿真环境具有强大的模块化和图形化建模与仿真能力, 是当前水下航行器运动和控制系统仿真的重要工具^[5-8]。由于水下航行器空间运动方程的复杂性, 如果完全利用 Simulink 的基础模块构建仿真模型将使模型结构复杂、可读性差, 且不易修改, 而基于简化的线性模型搭建仿真模型虽然实现简单, 但会

损失模型的耦合和非线性特性, 难以获得精确的仿真结果。因此, 笔者在矢量化数学模型的基础上, 以 Simulink 为平台, 结合 S 函数建立了结构清晰、通用性强的水下航行器的模块化仿真模型, 给出了详细的建模过程和仿真结果。

1 水下航行器 6 自由度空间运动方程

1.1 坐标系和运动参数

笔者采用图 1 所示坐标系, 包括地面坐标系 $E x_e y_e z_e$ 和载体坐标系 $B x_b y_b z_b$ 。

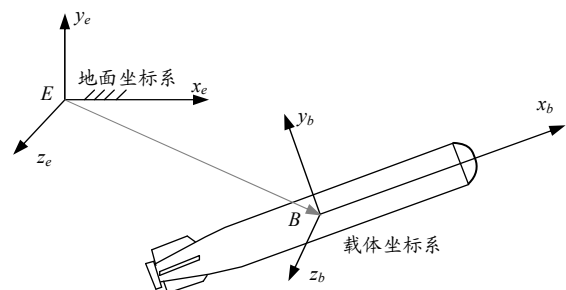


图 1 坐标系定义

地面坐标系和地球固连, 原点 E 选在发射点对

收稿日期: 2011-08-27; 修回日期: 2011-09-22

作者简介: 沈建森(1981-), 男, 浙江人, 博士研究生, 助理工程师, 从事水下航行器制导与控制技术研究。

应的水平面处, Ex_e 轴在指向北, Ey_e 轴铅直向上, Ez_e 指向东, 在忽略地球运动的情况下可视为惯性坐标系。载体坐标系原点 B 为航行器的浮心, Bx_b 轴沿纵轴指向头部, By_b 轴位于航行器纵对称平面内指向上方, Bz_b 轴与 Bx_b 、 By_b 构成右手坐标系。

运动参数包括^[1-2]:

1) 航行器在地面坐标系中的位置向量和姿态向量 $\mathbf{R}=[x_e, y_e, z_e]^T$, $\boldsymbol{\Theta}=[\varphi, \psi, \theta]^T$ 。

2) 载体坐标系下的航行器速度向量和角速度向量 $\mathbf{v}=[u, v, w]^T$, $\boldsymbol{\omega}=[p, q, r]^T$ 。

3) 航行器速度 U 和速度的流体动力角 α 、 β , 与载体坐标系下速度有如下关系:

$$\begin{cases} U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ \alpha = \arctan(-v/u) \\ \beta = \arcsin(w/V_T) \end{cases} \quad (1)$$

1.2 运动学方程

根据航行器速度在地面坐标系和载体坐标下的转换关系, 可得平动运动学方程:

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{C}_b^e \cdot \mathbf{v} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{C}_b^e = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\psi s\varphi - s\theta c\psi c\varphi & s\psi c\varphi + s\theta c\psi s\varphi \\ s\theta & c\theta c\varphi & -c\theta s\varphi \\ -c\theta s\psi & c\psi s\varphi + s\theta s\psi c\varphi & c\psi c\varphi - s\theta s\psi s\varphi \end{bmatrix}$ 为载体

坐标系到地面坐标系的转换矩阵, $c(\cdot) = \cos(\cdot)$,

$s(\cdot) = \sin(\cdot)$ 。

由航行器旋转角速度在地面坐标系和载体坐标系下的表示关系, 可得转动运动学方程^[2]:

$$\dot{\boldsymbol{\Theta}} = \begin{bmatrix} 1 & -\cos\varphi \tan\theta & \sin\varphi \tan\theta \\ 0 & \cos\varphi \sec\theta & -\sin\varphi \sec\theta \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (3)$$

1.3 动力学方程

Fossen^[1]将水下航行器视为六自由度刚体, 基于牛顿-欧拉和拉格朗日公式推导了载体坐标系下的矢量形式水下航行器动力学方程:

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \quad (4)$$

\mathbf{M}_{RB} 为刚体惯量矩阵, $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$ 为刚体科里奥利力和离心力相关矩阵。 $\mathbf{v}=[u, v, w, p, q, r]^T$ 为航行器的广义速度向量。 $\boldsymbol{\tau}_{RB}=[X, Y, Z, K, M, N]^T$ 为航行器受到的

广义合外力向量。

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & -mr & mq \\ mr & 0 & -mp \\ -mq & mp & 0 \\ -m(z_G r + y_G q) & my_G p & mz_G p \\ mx_G q & -m(z_G r + x_G p) & mz_G q \\ mx_G r & my_G r & -m(y_G q + x_G p) \\ m(z_G r + y_G q) & -mx_G q & -mx_G r \\ -my_G p & m(z_G r + x_G p) & -my_G r \\ -mz_G p & -mz_G q & m(y_G q + x_G p) \\ 0 & I_{zx} p + I_{zy} q + I_z r & -(I_{yx} p + I_{yz} q + I_{xz} r) \\ -(I_{zx} p + I_{zy} q + I_z r) & 0 & I_{xx} p + I_{yy} q + I_{zz} r \\ I_{yx} p + I_{yz} q + I_z r & -(I_{xx} p + I_{yy} q + I_{zz} r) & 0 \end{bmatrix}$$

其中: x_G, y_G, z_G 为航行器重心在载体坐标系下的坐标分量; I 为航行器相对载体坐标系的转动惯量。

合外力 $\boldsymbol{\tau}_{RB}$ 可分解为: 由定常运动引起的粘性类流体动力 $\boldsymbol{\tau}_\mu(U, \alpha, \beta, p, q, r)$, 非定常运动引起的惯性类流体动力 $\boldsymbol{\tau}_i(\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$, 重力和浮力产生的恢复力 $\boldsymbol{\tau}_R(G, B, x_G, y_G, z_G)$ 以及由推进器的推力 $\boldsymbol{\tau}_T(T, y_T, z_T)$, 环境扰动力暂不考虑。即有:

$$\boldsymbol{\tau}_{RB} = \boldsymbol{\tau}_\mu + \boldsymbol{\tau}_i + \boldsymbol{\tau}_R + \boldsymbol{\tau}_T \quad (5)$$

其中: G, B 分别为航行器的重力和浮力; T, y_T, z_T 为航行器尾部推进器产生的推力值和推力轴相对 Bx_b 轴的偏移量, 以上外力的具体表达式可见文献[2]。

2 基于 Simulink 和 S 函数的仿真建模

2.1 Simulink 模型结构

根据水下航行器运动数学模型, 在 Simulink 环境下构建仿真模型, 总体结构如图 2。

仿真模型的 4 个输入参数为: 差动舵角 dd 、直舵角 dr 、横舵角 de 和螺旋桨推力 T , 并预留了波浪力等环境扰动输入接口。

15 个输出参数包括: 航行器的 3 个线速度分量 (u, v, w) 、3 个角速度分量 (p, q, r) 、3 个位置分量 (x_e, y_e, z_e) 、3 个姿态角分量 (φ, ψ, θ) 以及合速度和流体动力角 (U, α, β) 。

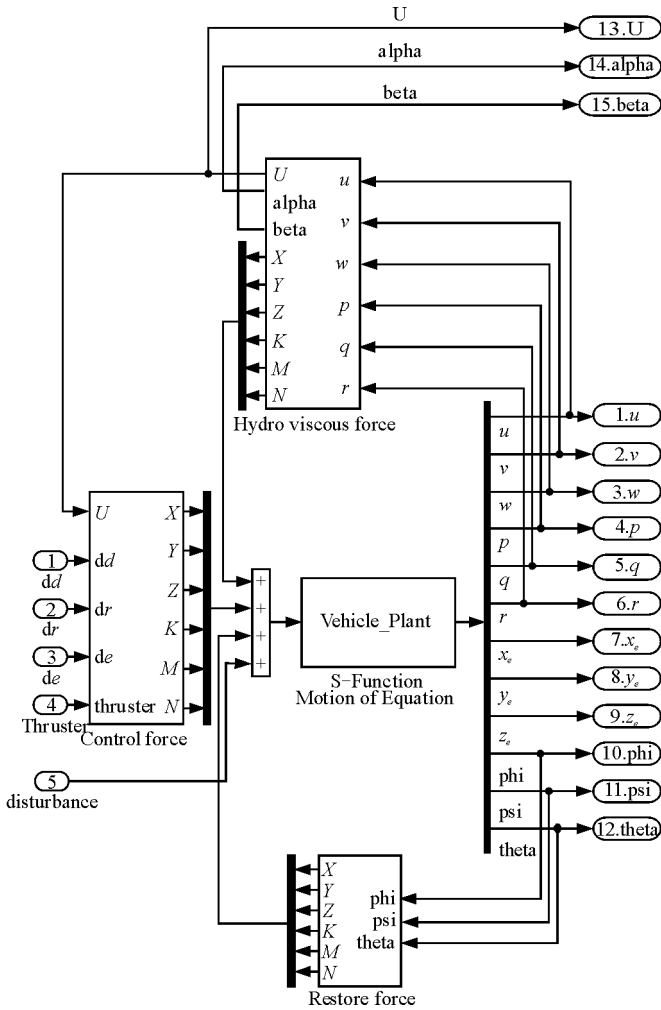


图 2 Simulink 仿真模型总体结构

2.2 运动方程 S 函数

S 函数 (System function) 是利用 Simulink 建立复杂仿真模型的一种有效方法, 它结合了 Simulink 框图简洁的特点和编程的灵活性, 提供了增强和扩展 Simulink 能力的强大机制。用户可以在 S 函数中实现复杂的动态系统或者各种自定义算法, 并通过封装为 S-Function 模块和其他模块一起进行图形化建模。S 函数的编写具有固定的格式可参见文献[9]。

图 2 中处理航行器运动方程的 Vehicle_Plant 模块 S 函数编写主要包括:

1) 主函数

```
function[sys,x0,str,ts]=Vehicle_Plant(t,x,u,flag)
```

功能: 设置标志位 flag 和对应的函数返回值。

2) 初始化函数

```
function[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes
```

功能: 设置系统相关维数、采样时间、和状态

向量 $x = [u, v, w, p, q, r, x_e, y_e, z_e, \phi, \psi, \theta]^T$ 的初始值。

3) 求导函数

```
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
```

功能: 求取状态变量的导数, 根据运动方程中的式 (2)~式 (4), 可求得状态的导数 \dot{x} 。

4) 输出函数

```
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
```

功能: 计算 S 函数的输出, 文中输出取状态向量 x 。

2.3 外力模块

仿真模型中计算航行器所受外力的模块由 Hydro viscous force 子系统 (Subsystem)、Restore force 子系统和 Control force 子系统组成。

各子系统的结构如图 3~图 5, 通过 Simulink 中的 Fcn (Function) 模块, 以 Vehicle_Plant 模块反馈的运动参数为输入计算航行器的外力。Velocity Convert 子系统中 (u, v, w) 到 (U, α, β) 的转换由式 (1) 完成。流体动力中的惯性力项以附加质量矩阵的形式体现在动力学方程中, 可以减少对反馈状态的求导运算、加快仿真速度和简化模型结构。粘性类流体动力中由操舵产生的部分和推力作为航行器的控制输入单独构建一个子系统。

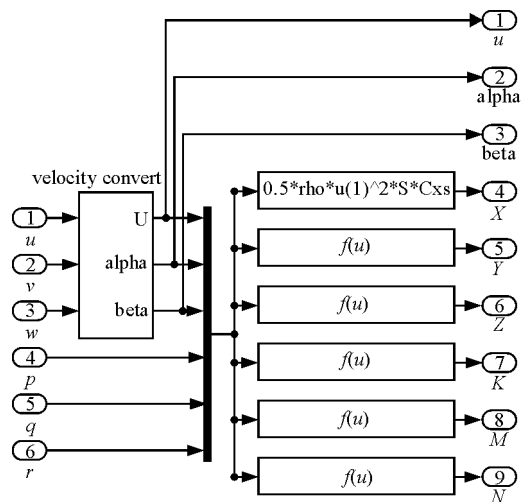


图 3 Hydro viscous force 子系统结构

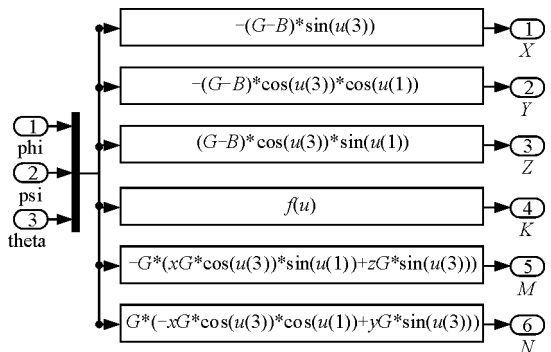


图 4 Restore force 子系统结构

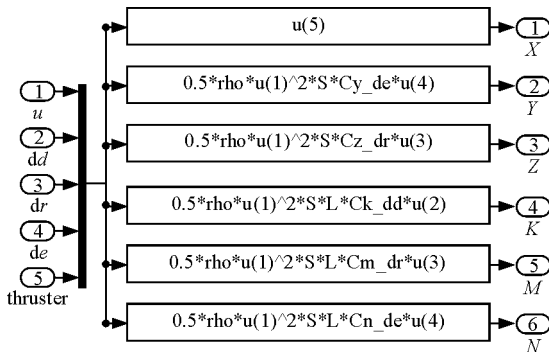


图 5 Control force 子系统结构

3 仿真分析

设水下航行器初始速度=2 m/s、初始深度=3 m, 即, 初始状态 $x_0=[2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, 推力为固定值 $T=500 \text{ N}$ 。

从图 6 航行器在水平面内的旋回运动仿真结果可以看出: 一定舵角范围内旋回半径随舵角增大而明显减小, 且由于横滚通道和偏航通道的耦合, 水平旋回时将引发航行器的横滚运动。

图 7 给出了水下航行器纵平面内 Z 形操舵下的俯仰角和弹道响应曲线, 符合实际操纵性规律。

图 8 为航行器从 5~15 m 定深控制的仿真结果, 采用 PID 控制的双环三参数方程^[2]:

$$K_{31}(\theta - \theta_c) + K_{32}r + K_{33}(y_e - y_c) = T_\delta \dot{\delta}_e + \delta_e \quad (5)$$

在不考虑外部扰动和系统不确定性的情况下, PID 控制可以取得良好的控制效果。

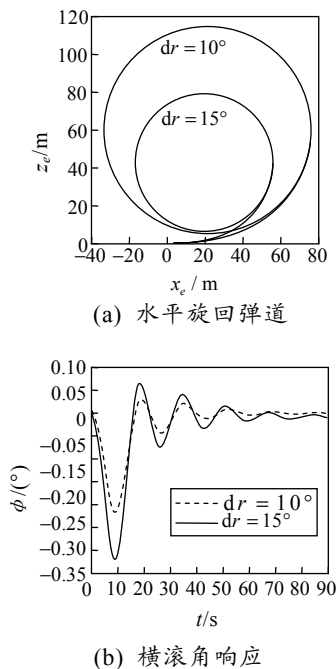


图 6 水平定常旋回仿真结果

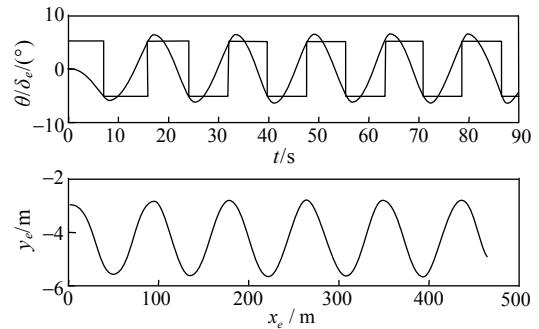


图 7 纵平面 Z 形操舵仿真结果

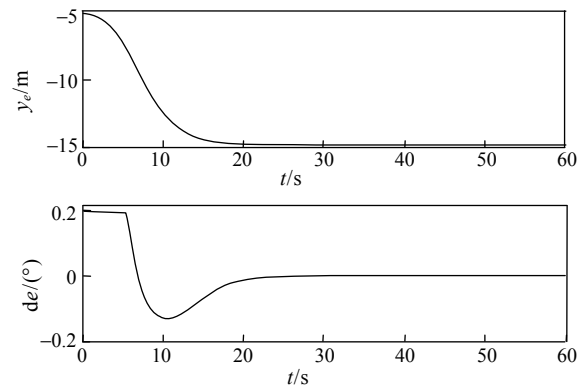


图 8 深度 PID 控制仿真结果

4 结束语

仿真结果表明: 该模型符合水下航行器的实际运动规律, 可以作为后续操纵性分析和控制器性能仿真的工具。下一步, 将考虑添加波浪等环境扰动模块, 以便进行复杂环境下的水下航行器运动仿真。

参考文献:

- [1] Fossen T I. Nonlinear Modeling and Control of Underwater Vehicles [D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1991.
- [2] 李天森. 鱼雷操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [3] 李殿璞, 赵爱民, 迟岩. 水下机器人运动控制和仿真的数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1997, 18(3): 22-30.
- [4] 严卫生. 某新型远程自主水下航行器建模研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(4): 457-462.
- [5] 潘瑛, 徐德民. 自主水下航行器空间运动矢量模型与仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(4): 538-540.
- [6] 王茂励, 赵国良. 鱼雷空间运动非线性数学模型的建立于仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(20): 4812-4814.
- [7] 高立斌, 康凤举, 张金涛, 等. 基于 Simulink 的鱼雷控制系统仿真 [J]. 计算机仿真, 2005, 22(2): 62-64.
- [8] 田立, 张谊军. Simulink 在鱼雷控制系统仿真中的应用 [J]. 机械与电子, 2009(5): 62-64.
- [9] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.