

海浪扰动下水下航行器的动力定位性能分析

曹永辉

(西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 水下航行器动力定位是通过对水下航行器的多个螺旋桨推进器的转速、推力进行控制调节以抵御外界环境扰动, 体现了水下航行器在外界环境扰动下执行各种任务的能力。通过对随机波浪扰动下的水下航行器前向动力定位进行建模仿真, 分析得到各个状态特性与环境扰动分量对水下航行器动力定位性能的影响。进行了水下航行器的运动方程和螺旋桨动力学特性的精确建模; 再针对波频扰动下的变参数问题以及控制器的鲁棒性和自适应性要求, 建立了水下航行器动力定位滑模控制器; 最后, 将 PM 谱的随机波浪扰动应用于动力定位仿真研究, 仿真结果显示, 螺旋桨的动力学特性、幅值限制以及波浪的流速与加速度信息直接影响了水下航行器的动力定位性能。

关键词: 自治式水下航行器; 动力定位; 滑模控制; 波浪扰动; 螺旋桨模型

中图分类号: TP24 文献标识码: B

Dynamic Positioning Performance of AUV under Sea Wave Disturbances

CAO Yong - hui

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

ABSTRACT: Autonomous Underwater Vehicles dynamic positioning, which is an important criterion of AUV performance, could resist environment disturbances such as currents and waves by adjusting thruster rotating speed. Influences of system states and wave disturbances on performance of AUV dynamic positioning were analyzed by modeling and simulation of AUV surge dynamic positioning under random wave disturbances. First, a precision model of equation of motion of AUV and a thruster dynamic model were presented. Secondly, a sliding mode controller for AUV surge dynamic positioning is proposed to meet robustness and self-adaptation requirements. The final simulation results under PM spectrum based wave disturbances show that the thruster dynamic characteristic, magnitude limitation and wave velocity and acceleration speed have direct influences on AUV dynamic positioning performance.

KEYWORDS: AUV; Dynamic positioning; Sliding mode control; Wave disturbance; Thruster model

1 引言

随着自治式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)技术的不断发展^[1], 其应用范围逐渐由传统的环境勘测、信息采集向水下作业方向发展, 而具备动力定位^[2]能力是自治式水下航行器进行水下作业必不可少的条件。动力定位技术在船舶上的应用与研究现在已经比较成熟, 船舶动力定位因为其阻尼大, 对高频扰动的响应不灵敏, 通常只考虑低频环境扰动, 并且只有水面 3 个自由度, 目前已有各种类型的动力定位船舶应用于海洋工程建设^[3]。目前还没有可以实用的自治式水下航行器动力定位系统。要实现自治式水下航行器动力定位还存在很多关键技术需要解决,

如对高频环境扰动的测量、响应、抑制问题, 波频扰动下的变参数问题以及扰动控制器的鲁棒性和自适应性问题。

本文针对波浪扰动下自治式水下航行器的动力定位性能进行研究, 以期获得影响水下航行器的动力定位性能的各种影响因素。首先, 建立了自治式水下航行器的运动方程, 并建立了适用于动力定位控制的螺旋桨系统的动力学方程; 其次, 针对波频扰动下的变参数问题以及控制器的鲁棒性和自适应性要求, 设计了动力定位滑模控制器; 最后, 在随机波浪扰动下的进行了动力定位仿真, 不但验证了所设计的控制器的有效性, 而且还对随机波浪扰动中各种状态分量以及执行器的动态特性对动力定位控制性能的影响进行了分析, 为以后自治式水下航行器动力定位的进一步的研究工作奠定了基础。

2 数学建模

2.1 水下航行器前向运动模型

为了建立水下航行器的空间运动方程,以水下航行器的几何中心为原点 o , x 轴沿轴线指向航行器艏部, y 轴指向右侧, z 轴指向下方,确立水下航行器体坐标系 $o-xyz$,将体坐标系的线速度和角速度项用向量 $\dot{x} = [u, v, w, p, q, r]^T$ 表示,定义为地面坐标系内水下航行器的位置与姿态角为 $\dot{x} = [X, Y, Z, \phi, \theta, \psi]^T$,矢量 $f = [X_f, Y_f, Z_f, K_f, M_f, N_f]$ 为外部施加的作用力和力矩,从而建立水下航行器的空间三维运动方程如下:

$$\begin{aligned} m[\dot{u}_r - v_r r + w_r q - x_c(q^2 + r^2) + y_c(pq - \dot{r}) + z_c(pr + \dot{q})] \\ = X_f \\ m[\dot{v}_r + u_r r - w_r p + x_c(pq + \dot{r}) - y_c(p^2 + r^2) + z_c(qr - \dot{p})] \\ = Y_f \\ m[\dot{w}_r - u_r q + v_r p + x_c(pr - \dot{q}) + y_c(qr + \dot{p}) - z_c(p^2 + q^2)] \\ = Z_f \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y) qr + I_{xy} (pr - \dot{q}) - I_{yz} (\dot{q} - \dot{r}) - I_{xz} (pq + \dot{r}) + \\ m[y_c(\dot{w}_r - u_r q + v_r p) - z_c(\dot{v}_r + u_r r - w_r p)] = K_f \\ I_y \dot{q} + (I_z - I_x) pr - I_{xy} (qr + \dot{p}) + I_{yz} (pq - \dot{r}) + I_{xz} (p^2 - r^2) \\ - m[x_c(\dot{w}_r - u_r q + v_r p) - z_c(\dot{u}_r - v_r r + w_r q)] = M_f \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x) pq - I_{xy} (p^2 - q^2) - I_{yz} (pr + \dot{q}) + I_{xz} (qr - \dot{p}) \\ + m[x_c(\dot{v}_r + u_r r - w_r p) - y_c(\dot{u}_r - v_r r + w_r q)] = N_f \end{aligned}$$

式中的下标“ r ”表示相对于流体的速度。

而在水下航行器动力定位研究中,将其六自由度空间运动方程^[3]分解为前向运动方程、侧向运动方程和垂向运动方程分别进行分。本文主要针对水下航行器的前向运动进行研究,水下航行器前向动力定位的目的是在忽略鳍舵对水下航行器的影响的条件下,只依靠主螺旋桨的推力和转速控制使水下航行器保持在某个前向位置上。

水下航行器前向运动方程中包含的状态量为前向相对速度 u_r 和绝对位移 X 。假设水下航行器处于重浮力平衡,且重心和浮心重合,水下航行器的纵轴 ox 和地面坐标系的 OX 轴重合,则水下航行器的前向运动方程为:

$$\begin{aligned} m \ddot{u}_r &= X_f + T_x \\ \dot{X} &= u_r + u_f \end{aligned} \quad (1)$$

其中 X_f 和 T_x 为流体作用力和螺旋桨推力在水下航行器 ox 轴的分量。

2.2 螺旋桨动力学建模

处于系柱状态的螺旋桨的稳态推力 T 与转速 n 的平方成正比^[3]:

$$T = K_T \rho D^4 n | n | \quad (2)$$

其中 D 是螺旋桨直径, n 是转速, ρ 为流体密度, K_T 为推力系数。

当螺旋桨在流体中以一定的速度 u_r 前进时推力系数有所减小,此时推力为:

$$T = K_T \rho D^4 n | n | + \gamma_0 J \rho D^4 n | n | \quad (3)$$

其中 γ_0 是 K_T 曲线的斜率, $J = u_r / n D$ 是进速比。

实际的动力定位系统中,螺旋桨的动态特性也是必须要考虑的一个问题,因为它可能导致控制输出的相位滞后和幅值的降低。螺旋桨的动态特性可表示为:

$$\dot{T} = 1/\tau (T - T_{com}) \quad (4)$$

综合式(3)和(4)可以得到螺旋桨的动力学模型如下^[4]:

$$\dot{T} = (\gamma u_r | n | + \beta n | n | - T) / \tau \quad (5)$$

其中 T 是推力,参数 τ 是时间常数, $\gamma = \gamma_0 \rho D^3$ 是由于当螺旋桨在水中前进而造成的推力减小系数, $\beta = K_T \rho D^4$ 是推力相对于转速的关系

3 水下航行器动力定位控制器设计

根据式(1)和(5),并将各项流体作用力代入后可以得到

$$\begin{aligned} \dot{X} &= u_r + u_f \\ \dot{u}_r &= T - \alpha u_r | u_r | \\ \dot{T} &= (\gamma u_r | n | + \beta n | n | - T) / \tau \end{aligned} \quad (6)$$

其中 u_f 为流体速度,其中包含了海流、波浪等环境扰动分量, $\alpha = X_{uu} / (m + X_u)$ 。

针对波频扰动下的流体动力参数变化问题以及控制器的鲁棒性和自适应性要求,采用滑模控制方法建立前向动力定位控制器,滑动面定义为位置偏差的函数:

$$\sigma = (\frac{d^2}{dt^2} + \kappa \frac{d}{dt} + \xi)(X - X_c) \quad (7)$$

σ 的导数定义为:

$$\dot{\sigma} = -\eta \text{sat}(\sigma/\phi) \quad (8)$$

其中 κ, ξ, η 和 ϕ 为控制器可调参数, X_c 为输入状态指令。基于 Lyapunov 分析,由于 $\sigma \dot{\sigma} < 0, \forall t \geq 0$, 定义滑动面能够保证稳定性^[4]。从而可得控制器的输入为

$$\begin{aligned} n^2 &= [-\eta \text{sat}(\sigma/\phi) - 2\alpha u_r (\alpha u_r^2 + \gamma u_r n + T) + T/\tau - \ddot{u}_f \\ &- \gamma n (u_r + \alpha u_r^2 + \gamma u_r n + T) + \dot{x}_c + \xi (u_r + u_f - \dot{x}_c) - \kappa \\ &(\alpha u_r^2 + \gamma u_r n + T + \dot{u}_f - \ddot{x}_c)] \tau / \beta \end{aligned} \quad (9)$$

式中 u_r 为水下航行器的相对速度, u_f 为流体速度。由方程(9)可以看出,控制输入是系统状态量、流体速度 u_f 及其一阶导数 \dot{u}_f 、二阶导数 \ddot{u}_f 和输入指令的函数,这使控制律变的极复杂,实际应用存在困难,必须对其进行一些简化。

由于讨论的是水下航行器的动力定位问题,此时水下航行器的速度较低,因此可以忽略螺旋桨推力方程中的推力减小项,将其作为未建模扰动,则式(9)简化为:

$$\begin{aligned} n^2 &= [-\eta \text{sat}(\sigma/\phi) - 2\alpha u_r (\alpha u_r^2 + T) + T/\tau - \ddot{u}_f + \dot{x}_c + \\ &\xi (u_r + u_f - \dot{x}_c) - \kappa (\alpha u_r^2 + T + \dot{u}_f - \ddot{x}_c)] \tau / \beta \end{aligned} \quad (10)$$

4 水下航行器动力定位仿真

为了验证上面建立的水下航行器前向动力定位滑模控

制器的性能,使用“211”工程建设的“外场试验平台”水下航行器进行仿真验证。

4.1 基于 PM 谱海浪的动力定位仿真

基于 PM 谱生成一组波浪时间序列^[5],动力定位仿真结果的位置响应曲线如图 1 所示,由图 1 可以看出水下航行器的动力定位误差保持在 $\pm 0.05\text{m}$ 以内,显示出较好的动力定位效果。

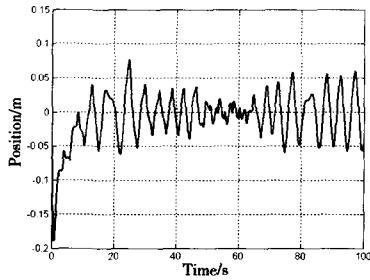


图 1 全部扰动状态前馈的位置响应曲线

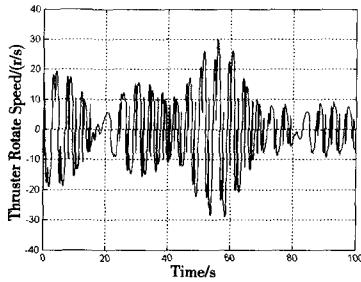


图 2 推进器转速响应曲线

需要指出的是,在图 1 所示的仿真过程中,我们假设波浪扰动的所有状态分量都是已知的,但在水下航行器动力定位控制过程中,很难获得波浪扰动的全部状态分量,因此需要确定波浪扰动的各个状态分量对动力定位滑模控制器性能的影响。分别就仅流速已知与流速及其一阶导数已知两种情况重复上述仿真给出,得到的仿真结果如图 3,5 所示。图 3 为仅流速 u_f 已知时的水下航行器动力定位位置响应曲线,图 5 为流速 u_f 及其一阶导数 \dot{u}_f 已知时的水下航行器动力定位位置响应曲线。

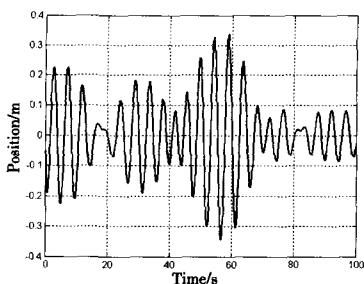


图 3 仅使用 u_f 前馈的位置响应曲线

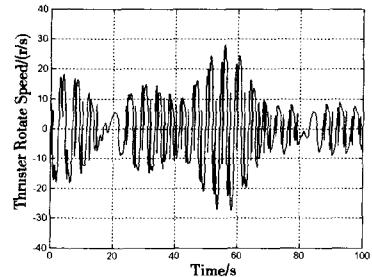


图 4 推进器转速响应曲线

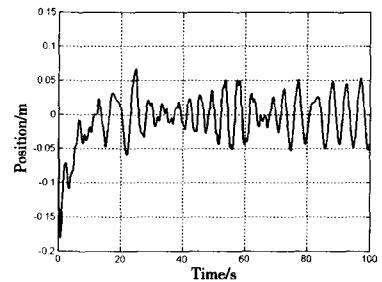


图 5 使用 u_f 及 \dot{u}_f 前馈的位置响应曲线

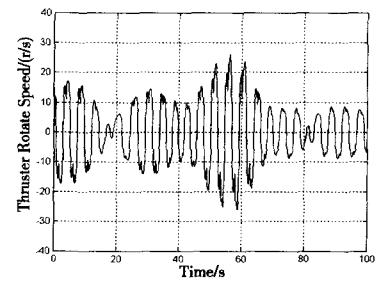


图 6 推进器转速响应曲线

由图 1,3,5 可以看出,使用全部扰动状态和使用流速及其一阶导数前馈的动力定位控制性能没有什么差别,而仅仅使用流速前馈的定点控制性能相比之下却大为降低。

根据上面的仿真的比较结果,可以确定仅使用流速及其一阶导数,就能够获得期望的水下航行器动力定位性能。因此,可以将式(10)表示的滑模控制器的输入修改为如下形式:

$$\begin{aligned} n^2 = & [-\eta \text{sat}(\sigma/\phi) - 2\alpha u_r (\alpha u_r^2 + \gamma u_r n + T) + T/\tau - \gamma n \\ & (u_r + \alpha u_r^2 + \gamma u_r n + T) + \dot{x}_c + \xi (u_r + u_f - \dot{x}_c) - \kappa \\ & (\alpha u_r^2 + \gamma u_r n + T + u_f - \dot{x}_c)] \tau / \beta \end{aligned} \quad (11)$$

4.2 水下航行器最优前向动力定位性能

通过使用基于 PM 谱的波浪扰动调节滑模控制器的控制参数,能够得到水下航行器最优前向动力定位性能,此时的水下航行器位置响应和推进器转速响应结果见图 7 和图 8。由图 7 中可以看出,水下航行器的位置控制波动在 $\pm 0.02\text{m}$ 范围内。但是再观察图 8 可以发现:由于在仿真计

算过程中没有考虑到螺旋桨的动力学特性以及其物理限制问题,螺旋桨的正反转变化极为频繁,这是实际上的螺旋桨无法实现的,因此水下航行器在海浪扰动下的最优动力定位性能应在考虑螺旋桨转速的动力学特性并且不超出其物理限制的条件下确定。

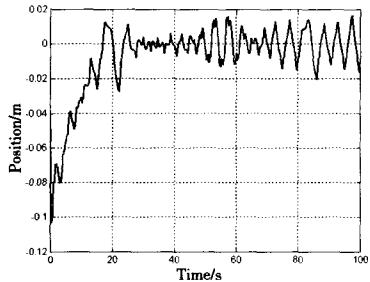


图7 水下航行器最优位置响应曲线

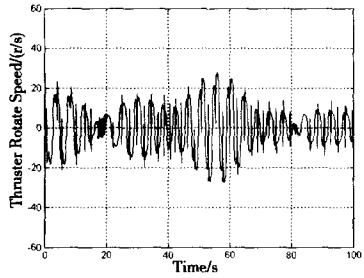


图8 推进器转速响应曲线

4.3 执行器受限的水下航行器动力定位性能

由于螺旋桨的动力学特性以及其物理限制直接影响到螺旋桨的推力变化速率和所能产生的最大推力值,因此水下航行器的动力定位性能应在考虑螺旋桨转速的动力学特性并且不超出最大转速限制的条件下确定。

假设螺旋桨转速的最大值为 $n_{max} = 20 \text{ r/s}$, 并将螺旋桨的转速变化特性作为一个时滞系统处理, 同时转速变化率的最大值为 $\dot{n}_{max} = 10$, 采用式(11)重复上述仿真过程, 得到的结果如图9和图10所示, 由图中可以看出, 由于转速幅值限制的存在, 在波浪扰动强度较大的 50s ~ 62s 时间段上, 螺旋桨转速到达了极限, 无法提供更大的作用力, 因此此时间段的水下航行器的位置波动较大。同时, 由于螺旋桨的转速变化速率限制的存在, 使螺旋桨的推力在海浪扰动变化较大时无法达到控制指令的要求, 不能很好的抑制海浪扰动对水下航行器动力定位性能的影响, 使动力定位精度下降。

从上面的螺旋桨转速的变化速率限制和转速幅值限制的仿真结果可以得出, 为了保证水下航行器在环境扰动作用下实现动力定位, 螺旋桨系统除了能够提供足够的推力以外, 其必须要具有一定的响应速率, 对于环境扰动的变化能够快速适应。

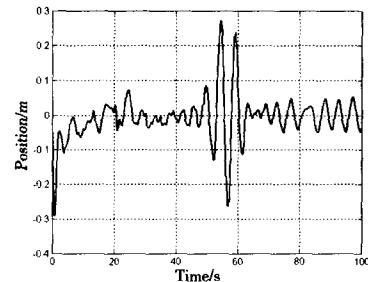


图9 的位置响应

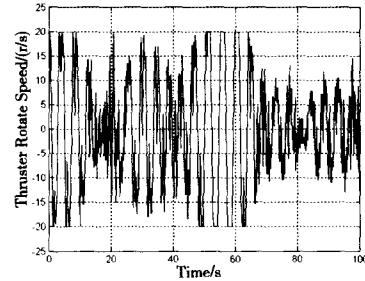


图10 转速响应曲线

5 总结

水下航行器动力定位是一个复杂的过程, 需要综合考虑测量、预测、通讯、控制等各个方面的因素, 本文的研究工作证明: 由于水下航行器的工作频带更高, 螺旋桨响应速度更快, 在海浪扰动的速度及其一阶导数可以测量或预估的情况下, 能够通过前馈控制抑制和补偿海浪扰动。由于本文在仿真过程中没有考虑到波浪扰动的测量与预测, 只分析了海浪扰动各个状态分量以及螺旋桨的动力特性与幅值限制对水下航行器动力定位性能的影响, 水下航行器的实际动力定位性能还需要在综合考虑上述情况的基础上通过进一步的详细分析计算确定。

参考文献:

- [1] 封锡盛. 从有缆遥控水下机器人到自治水下机器人[J]. 中国工程科学, 2000-12, 2(12):29-33.
- [2] 赵志高, 杨健民. 动力定位系统发展状况及研究方法[J]. 海洋工程, 2002, 20(1):91-97.
- [3] M J 摩根, 耿惠彬译. 近海船舶的动力定位[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [4] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [5] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2002.



[作者简介]

曹永辉(1978-), 男(汉族), 江苏省淮阴人, 讲师, 博士, 主要研究领域为水下航行器数字化设计, 动力定位技术, 新型水下航行器研究等。