

H_{∞} 滤波器在船舶动力定位系统中的应用

李兰花, 夏国清

(哈尔滨工程大学 动力与核能工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 本文主要介绍了 H_{∞} 滤波器在动力定位系统中的应用。在船舶动力定位领域中, 通用的简化方法是将船舶的高频运动和低频运动分开来处理, 本文首先分别建立相应的线性数学模型, 然后为了使控制系统只响应船舶的低频运动而不响应高频运动, 利用 H_{∞} 滤波方法估计船舶位置和艏向低频运动, 同时剔除来自位置和艏向传感器中的高频运动分量和噪声。 H_{∞} 滤波器是针对某个被控对象设计的, 因此不同的被控对象它的方程也不同。仿真结果表明 H_{∞} 滤波器滤波效果很好。

关键词: 船舶动力定位系统; 高频运动; 低频运动; 线性模型; H_{∞} 滤波器

中图分类号: O231 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2005)11-0035-03

Application of H_{∞} Filtering to Dynamical Positioning of the Ship

LI Lan - hua, XIA Guo - qing

(School of Power and Nuclear Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper presents the linear model of the ship. The H_{∞} filtering is used to estimate the slow part of the ship movement and heading, and to filter out the high frequency movement and noise. The H_{∞} filter is presented for a certain ship model. The method presented in this paper is proved by simulation.

Key words: Ship; Dynamical positioning; High frequency motion; Low frequency; Linear model; H_{∞} filter

1 引言

在海洋开发和海洋工程中, 人们对于深海作业的浮式系统的定位方式日益重视。船舶动力定位系统是指船舶用自身的动力系统(舵、桨)来提供反力和反力矩以克服风、浪、流等环境力(力矩)的干扰, 使船舶保持在一定位置和方向的系统。它包括三部分内容: (1) 船位、艏向测量及传感器系统; (2) 计算机控制系统; (3) 推力器系统。控制系统只响应船舶的低频运动而不响应高频运动^[1]。

对于水面船舶来说, 动力定位系统的主要目的是实现水平面的位置和艏向三个自由度的控制。影响三个物理量定位精度的参数是来自传感器的测量误差、阵风、波浪、海流的干扰和推力器的响应速度等。其中, 波浪造成的船舶位置的移动包含两部分, 其一是二阶波浪力产生的慢漂运动使船舶缓慢地漂离原

来的位置, 动力定位系统要对这一运动加以控制; 其二是一阶波浪力产生的高频往复运动。动力定位系统很难并且也没有必要对高频位移进行控制, 因为这样会大大加速推力器系统的磨损和能量的消耗^[2]。故必须在船位估计中把这三个高频分量滤掉, 滤波器的作用是滤掉高频运动分量和测量噪声, 使控制器的输出比较平滑, 减少推力器不必要的动作, 减少耗能, 延长推力器寿命。为此本文主要研究为消除波浪影响的高频响应滤波器。滤波工作是计算机控制系统的一部分。

2 低频运动模型和高频运动模型

研究船舶运动领域中, 通用的简化方法是将船舶的高频运动和低频运动分开来处理, 分别建立相应的数学模型, 既要满足简单性原则, 又能提供足够的估计精度, 这里为了求解滤波器的方程, 仅介绍低频运动模型和高频运动模型的线性化方程^[3]。

低频运动模型:

$$\dot{x}_L = A_L x_L + B_L \tau + E_L \omega_L \quad (1)$$

$$y_L = C_L x_L + v$$

式中的状态变量 $x_L = [\eta^T, v^T]^T$, 其中 η^T 代表位置(纵荡、横荡、艏摇)向量; y_L 代表三维测量位置向量(包括纵荡、横荡、艏摇角度); v 是三维测量高斯白噪声; τ 控制力或力矩, ω_L 代表三维扰动变量。矩阵定义如下:

$$A_L = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -M^{-1}D \end{bmatrix}; B_L = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ M^{-1} \end{bmatrix}; E_L = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ M^{-1} \end{bmatrix}; C_L = [I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3}] \quad (2)$$

式(2)中惯量矩阵 M (包括水力附加质量)满足正定要求 $M = M^T > 0$ 如下所示:

$$M = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & mx_C - Y_r \\ 0 & mx_C - Y_r & I_z - N_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中 m 表示船舶质量, I_z 是转动惯量, 水力在纵荡、横荡、艏摇三个方向上由于各自加速度引起的附加质量 X_u, Y_v, N_r 均被定义为负数; 而 Y_r 则是由于横荡和艏摇的耦合而互相引起的附加质量。

D 代表线性水动力系数矩阵, 是严格正定的:

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

高频运动模型:

船舶的高频运动主要是由于一阶波浪力引起的, 并且认为纵荡、横荡和艏摇三个自由度上的高频运动是没有耦合的, 这三个自由度上的高频运动可以分别看作是附加了阻尼项的二阶谐波振荡器:

$$h(s) = \frac{2\zeta\omega_0\sigma_w s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (5)$$

其中: σ_w 是一个描述海浪强度的常数, ζ 是阻尼系数(一般取 0.05~0.3), 而 ω_0 是主导海浪频率

$$\omega_0 = \frac{4.85}{T_w}, \sigma_w = \sqrt{0.0185 T_w h_{\frac{1}{3}}} \quad (6)$$

3 H_∞ 滤波的数学描述

H_∞ 滤波是将鲁棒控制设计中引入的性能指标 H_∞ 范数应用于滤波, 以解决系统中存在的各种不确定性问题。 H_∞ 最优估计将噪声看成是能量有限的随机信号, 使系统的干扰到估计误差的闭环传递函数的 H_∞ 范数小于给定的正数 $\gamma^{[4,5,6,7]}$ 。

设广义被控对象的动态方程为

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u$$

$$z = C_1 x \quad (7)$$

$$y = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u$$

其中: $x \in R^{n \times 1}$, $z \in R^{m \times 1}$, $y \in R^{p \times 1}$, $w \in R^{q \times 1}$, $u \in R^{r \times 1}$; A, B, C, D 为相应维常数, 要估计的是受到干扰影响的向量 z , 它是状态 x 的线性组合; 如果不是估计状态向量的线性组合, 而是估计状态 x , 则 $C_1 = I$ 。

H_∞ 滤波问题是特殊的 H_∞ 控制问题。对式(7)如下假设:

(1) (A, B_1) 可控, (A, C_2) 可检测, (A, C_1) 可观测;

(2) $D_{21} B_1^T = 0$, $D_{21} D_{21}^T = I$ 。

这里假设(1)是估计器存在的条件; 假设(2)等同于一般二次型性能指标。估计器可表示为

$$\hat{z} = F(\gamma) \quad (8)$$

其中 \hat{z} 表示向量 z 的估计值。

为了使估计器的估计无偏差, 且具有预测修正结构, 则状态估计器应具备观测器的结构形式

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + K(y - C_2 \hat{x}), \hat{z} = C_1 \hat{x}, \hat{x}(0) = 0 \quad (9)$$

其中 K 为状态估计器的反馈增益矩阵, 令 $e = x - \hat{x}$, 则

$$\dot{e} = (A - KC_2)e + (B_1 - KD_{21})w, z - \hat{z} = C_1 e \quad (10)$$

由此可得干扰 w 到估计误差 Δz 之间的传递函数为

$$G_{\Delta zw} = \begin{bmatrix} A - KC_2 & B_1 - KD_{21} \\ C_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

对于具有有限能量的干扰 w 作用的线性定常系统式(7), H_∞ 最优估计的性能指标可写成

$$J = \|G_{\Delta zw}(s)\|_\infty = \sup_{w \in L_2[0, \infty)} \frac{\|z - \hat{z}\|_2^2}{\|w\|_2^2} < \gamma^2 \quad (12)$$

H_∞ 最优估计问题意味着设计一个估计器, 使得估计误差的能量小于噪声的 γ 倍, 如果 H_∞ 最优估计器的设计保证满足性能指标式(12), 那么就可以使估计误差限制在一个较低的水平上, 显然 γ 越小越好。

对于满足假设(1), (2)的有干扰作用的系统式(7), 给定正数 $\gamma > 0$ 使式(12)成立的充分必要条件是: 存在对称阵 X , 满足下列代数 Riccati 方程^[9]:

$$AX + XA^T - X[C_2^T C_2 - \gamma^{-2} C_1^T C_1]X + B_1 B_1^T = 0 \quad (13)$$

其中使估计器式(9)稳定的反馈增益阵为 $K = XC_2^T$ 。

4 仿真结果及其分析

以某船(总长 43.15m, 型宽 8.20m, 吃水 1.86m, 排水量 310t)为研究对象, 在 6 级风的情况下(取 $T_w = 8s$, $h_1 = 3m$), 进行仿真

实验。这里认为纵荡、横荡和艏摇三个自由度上的高频运动是没有耦合的,本文仅以艏向自由度为例进行滤波计算。 X, Y 自由度上的解算类似。

在仿真过程中,系统的输入信号采用阶跃信号,幅值为1,即设定艏向平衡点的艏向角为 1° ;线性海浪模型的输入信号为白噪声信号。为了对滤波器的各种性能进行分析,仿真分如下两种情况进行。

(1) 在理想情况下进行仿真研究。此时的仿真效果是衡量滤波器性能好坏的基本标准,如果滤波效果不好,那么一定说明该滤波器设计不成功。图1是理想情况下船舶动力定位控制系统的仿真结果。图2是受到海浪干扰时的仿真结果。从图2中可以看出,当系统受到海浪干扰后,输出不稳定。图3是加入滤波器之后的仿真结果。从图中可以看出航向输出平滑很多,这样减少了推力器不必要的动作,延长了推力器的寿命,节约能耗。

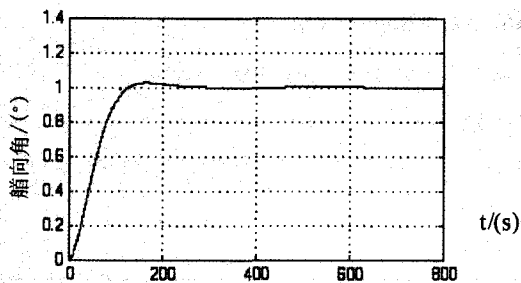


图1 理想情况下的航向响应曲线

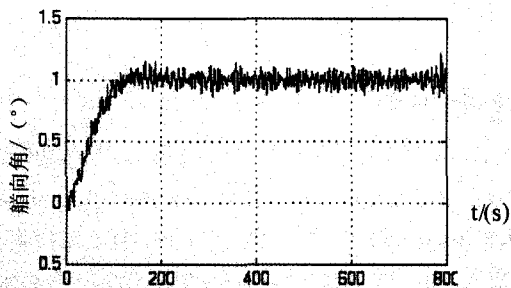


图2 受到海浪干扰时的航向响应曲线

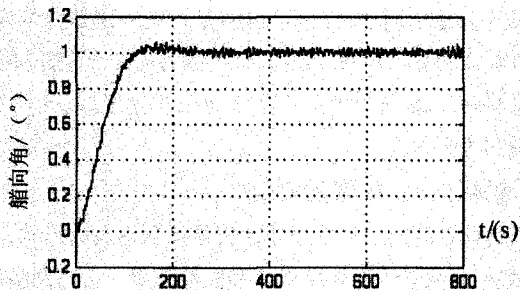


图3 受到海浪干扰时采用 H_∞ 滤波器时的航向响应曲线

(2) 在系统模型具有摄动的情况下进行仿真。风力由6级变为8级,取 $T_w = 12s$, $h_1 = 8m$, $\zeta = 0.5$ 。图4是没加滤波器时的

仿真情况,从图中可以看出航向输出波动很大。图5是加滤波器时的仿真结果,可以看出滤波器的滤波效果很好,输出改善了许多,达到了节能的效果。

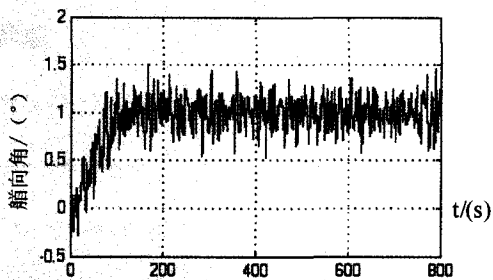


图4 船舶控制系统模型具有摄动且未加滤波器时的响应曲线

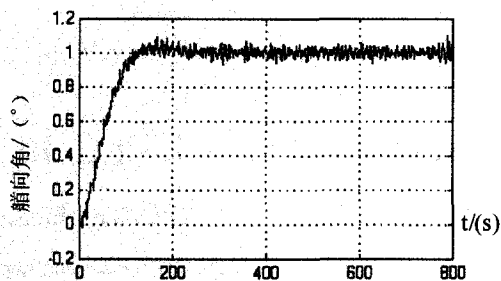


图5 系统模型具有摄动情况下采用 H_∞ 滤波器时的响应曲线

5 结论

从仿真结果可以看出,在波浪干扰的情况下,本文所采用的 H_∞ 滤波器能够有效的消除波浪干扰所引起的高频响应。

6 参考文献:

- [1] M.J. 摩根著. 近海船舶的动力定位[M]. 北京:国防工业出版社, 1984
- [2] 王宗义, 肖坤, 庞永杰. 船舶动力定位的数学模型和滤波方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(4): 24-28
- [3] 童进军, 何黎明, 田作华. 船舶动力定位系统的数学模型[J]. 船舶工程, 2002, (5): 27-29
- [4] 张显库, 王新屏. 一种具有鲁棒性的海浪干扰滤波器[J]. 中国造船, 2004, 45(4): 167-171
- [5] 段志勇, 袁信. H 滤波在GPS/INS组和导航系统中的应用研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(2): 189-193
- [6] 王艳东, 范跃祖. H_∞ 滤波在惯导系统地面快速对准中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(5): 516-518
- [7] R.N. BANAVAR, U.V. DESHPANDE. Robust Controller Design for a Nuclear Power Plant Using H_∞ Optimization[A]. Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control[C]. 1996, (12)
- [8] POOGYEON P, THOMAS K. H_∞ filtering via convex optimization[J]. Control, 1997, 66(1): 15-22
- [9] 藤井隆雄. リカッチ方程式の解の存在条件に關する一考察[A]. 計測自動制御學會論文集[C], 1988, (24): 198-200

作者简介:李兰花(1980-),女,吉林珲春人,硕士研究生,研究方向:潜器与水下机器人。