

船舶动力定位系统控制器的设计

童进军 硕士研究生 上海交通大学自动化系[200030]

何黎明 博士研究生 上海交通大学自动化系[200030]

田作华 教授/博导 上海交通大学自动化系[200030]

摘要 提出了完整的基于船舶运动数学模型的动力定位系统,并且提供了定点控制和跟踪控制两种控制方法,在跟踪控制中引入船舶运动的参考轨迹模型。应用基于卡尔曼滤波的状态观测器得到控制所需的船舶低频信号,控制器的设计采用了考虑积分作用环节的改进 LQG 算法,同时引入前馈以补偿风力作用以及参考轨迹模型带来的影响。最后控制器的性能通过系统的仿真得到验证。

关键词 船舶 动力定位 跟踪控制 卡尔曼滤波 LQG 前馈补偿

中图分类号 U661.3

0 前言

动力定位系统(Dynamic Positioning System,简称 DP 系统)的研究随着人们对海洋资源开发力度的加大而日益得到重视。DP 系统就是在有风、浪、流的干扰情况下,不借助锚泊系统,如何利用自身的推力器系统使得船舶保持一定的位置和角度,或者按照预定的运动轨迹运动^[1,9]。

船舶在海面上的综合运动很复杂,一般分为风、流和二级波浪力引起的低频运动以及由于一级波浪力引起的高频运动。由于高频运动仅仅表现为周期性的振荡而不会导致平均位置的改变,为了避免不必要的能量浪费和推力器的磨损,一般从船舶测得的综合位置信息分离出低频信号然后加以控制,而不对高频信号进行控制。本文提供了详细的动力定位控制方案,包括定点控制(回复到参考点)以及跟踪控制(按照参考轨迹运动);系统采用基于卡尔曼滤波的状态观测器计算反馈和前馈需要的控制信号,控制规律是采用改进的 LQG 方法^[1,4,5]。

1 数学模型

在参考文献[11]中,作者详细的介绍了动力定位系统的数学模型,包括高频运动和低频运动模型;风、浪、流等环境干扰力的数学模型以及推力器的动态数学模型。

船舶的综合数学模型如下:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + Ew \\ z &= Hx + v\end{aligned}\quad (1)$$

式中, $x = [x_L^T, x_H^T, x_c^T, x_w^T, \tau^T]^T$ 为状态变量, $u = \tau_L + \tau_w$ 是输入向量,输出向量 $z = [z_x, z_y, z_\psi, z_{us},$

$z_{wd}]$ 分别表示船舶纵荡位置、横荡位置、艏摇角度、风速和风向。 v 和 w 都为零均值高斯白噪声。

2 动力定位控制器的设计

DP 控制器的设计包括前馈控制器和反馈控制器。前馈控制器主要是为了快速抵消风力带来的干扰,而反馈控制器则应用 LQG 控制规律对通过卡尔曼滤波器观测出来的信息进行定点控制和跟踪控制。在跟踪控制的时候,还要考虑由于参考模型的引入而需要附加的前馈控制部分^[6,7]。

2.1 卡尔曼滤波器设计

为了从测量信号中分离出低频信号,必须应用卡尔曼滤波器进行滤波^[2,3,4,5],将式(1)离散化得到

$$\begin{aligned}x(k+1) &= A(k)x(k) + B(k)u(k) + E(k)\omega(k) \\ z(k) &= H(k)x(k) + v(k)\end{aligned}\quad (2)$$

其中: $\omega(k)$ 属于 $(0, Q(k))$ 型的噪声;

$v(k)$ 属于 $(0, R(k))$ 型的噪声;

卡尔曼滤波器的算法如下:

- (1) 给定初始值: $\hat{x}(0), P(0)$
- (2) $\hat{x}(k|k-1) = A(k)\hat{x}(k-1)$
- (3) $P(k|k-1) = A(k-1)P(k-1)A^T(k-1) + E(k-1)Q(k-1)E^T(k-1)$
- (4) $K(k) = P(k|k-1)H^T(k)[H(k) \cdot P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1}$
- (5) $\hat{x}(k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)[y(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1)]$
- (6) $P(k) = (I - K(k)H(k))P(k|k-1)$
- (7) $k = k + 1$, 返回到(2)

2.2 控制器设计模型

考虑到船舶推力器的动态特性,船舶的设计模型可以写为:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\tau_c \quad (3)$$

式中,9 维状态估计变量 $\hat{x} = [\hat{x}_L^T, \hat{\tau}^T]^T$, 其中 $\hat{\tau}$ 表示估计的控制力向量,而 τ_c 表示需要加入的控制向量;矩阵 A, B 分别为

$$A = \begin{bmatrix} A_L & B_L \\ 0 & A_{thr} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 3} \\ -A_{thr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 参考模型

DP 研究除了定点控制外,还有一个重要的方面是跟踪控制。跟踪控制就是如何通过控制器产生一定的推力,使得船舶可以如何从某个设定点到新的设定点进行跟踪,这个运动可以是某个自由度单独的运动,也可以是三自由度的联合运动。为了描述跟踪控制,我们引入了如下的轨迹参考模型:

$$a_d^e + \Omega v_d^e + \Gamma x_d^e = \Gamma x_{ref}^e \quad (5)$$

其中三维向量 a_d^e, v_d^e, x_d^e 表示在固定坐标系下期望的船舶加速度、速度和位置轨迹曲线。向量 x_{ref}^e 表示新的参考坐标,设计参数矩阵 Ω, Γ 都正定。通过转换矩阵,也可以很方便的得到在关于随船坐标系的 a_d, v_d, x_d 向量的轨迹参考模型。

期望的加速度和速度向量 a_d^e, v_d^e 如果为 0 的话,其实就是定点控制,也即希望船舶不做任何移动。所以引入参考模型就在定点控制和跟踪控制两种控制模式中提供了平滑的过渡。

2.4 LQG 控制规律

控制器的控制规律采用 LQG 算法,此算法是通过取状态估计向量与期望状态向量的误差来产生一个比例反馈控制向量。反馈控制律使下式性能指标的最小化求得:

$$J = E \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (e^T Q e + \tau_{LQ}^T P \tau_{LQ}) dt \right\} \quad (6)$$

式中 e 为状态估计值与期望值之间的误差变量, $e = [e_1^T, e_2^T, e_3^T]^T$ 定义如下:

$$e_1 = [\hat{u}, \hat{v}, \hat{r}]^T \quad e_2 = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{\Psi}]^T \quad e_3 = \hat{\tau} - \tau_{FF} - \tau_d \quad (7)$$

其中 e_3 中的 τ_{FF}, τ_d 分别表示风力,以及模型参考的前馈力(后面有介绍)。对于线性时不变系统,可以求得最优控制律为:

$$\tau_{LQ} = -P^{-1} B^T R_{\infty} e \quad (8)$$

其中 R_{∞} 为下式 Ricatti 方程的解

$$R_{\infty} A + A^T R_{\infty} - R_{\infty} B P^{-1} B^T R_{\infty} + Q = 0 \quad (9)$$

2.5 考虑积分作用的改进的 LQG 反馈控制

考虑到 DP 系统中存在的非线性以及系统的扰动抑止性能,为了能够在纵荡、横荡位置和艏摇角度上获得稳定的零状态偏差,在控制律中引入 3 个积分作用,定义一个新的三维状态向量

$$\dot{z} = e_2 \quad (10)$$

因此我们就能定义一个增广矩阵向量

$\tilde{x} = [\hat{x}^T, z^T]^T$ 得到如下的增广状态方程:

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}\tau_{LQ} \quad (11)$$

矩阵 \tilde{A} 和 \tilde{B} 可由式(4)、(10)综合而来。据此我们可以得到新的 LQG 算法指标

$$J = E \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (e^T Q e + z^T Q_I z + \tau_{LQ}^T P \tau_{LQ}) dt \right\} \quad (12)$$

应用与式(8)、(9)相同的算法,可以求得相应的最优控制输入 τ_{LQ} 。

2.6 风力前馈控制器设计

风力对在海平面上行驶的船舶能产生很大的影响,为了快速的抵消由于风力带来的船舶扰动,一般在控制器设计中引入风力前馈控制。有关风力的运动模型可以参看文献[11],其前馈的控制规律如下:

$$\tau_{FF} = -G_w^{\wedge} \tau_{wind} \quad (13)$$

其中, τ_{wind}^{\wedge} 为船舶在纵荡、横荡和艏摇方向所受到的力和力矩。假设风在 3 个方向上是互不耦合的,则 G_w 是对称阵:

$$G_w = \text{diag}(g_{w1}, g_{w2}, g_{w3}) \quad (14)$$

其中 $0 \leq g_{wi} \leq 1 (i=1, 2, 3)$

2.7 参考模型前馈控制器

为了提高在跟踪控制的时候控制器的响应,可以根据参考模型的输入设计一个前馈控制器。前馈控制规律是:

$$\tau_d = M a_d + D v_d \quad (15)$$

其中 M, D 的意义参阅文献[11]。

2.8 综合控制规律

综合前面的控制作用,可以知道总的控制规律应该是:

$$\tau_c = \tau_{LQ} + \tau_{FF} + \tau_d \quad (16)$$

其中注意 τ_{LQ} 是考虑了积分作用后的最优控制向量。

3 系统仿真

为了验证上面所讨论的控制器设计,以某动力定位船舶为仿真对象进行了仿真,该实船的主要尺寸为:船长 280.9m,船宽 46.98m,船高 24.51m,排水量 20.5 万吨,吃水 18.38m。该船舶低频运动模型中的矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 1.0852 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0575 & -0.4087 \\ 0 & -0.4087 & 0.2153 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.0865 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0762 & 0.1510 \\ 0 & 0.0151 & 0.0031 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.1 定点控制仿真

给定系统偏差位置 $\Delta x = 50\text{m}, \Delta y = 50\text{m}, \Delta \Psi = 0$, 给定有义波高是 6 米, 选定艏摇角 $\Psi = 0$ 。系统的各个自由度上的位置以及推力仿真结果如图 1。

3.2 跟踪控制

按照式(4), 选取一定的船舶运动参考模型, 仍然考虑 $\Psi = 0$ 。在船舶沿纵荡方向移动 34.5 米, 在横荡方向朝反方向移动 34.5 米, 保持艏摇角度不变的情况下, 跟踪控制的仿真结果如图 2 所示, 其中实线表示理想的运动曲线, 而虚线表示实际的跟踪曲线。

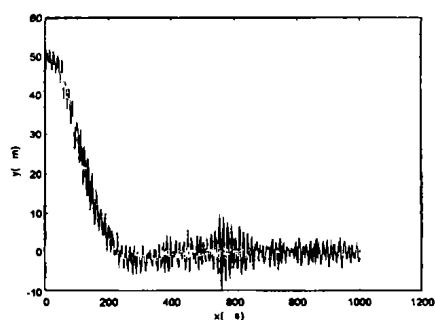


图 1.1 纵荡位置测量输出

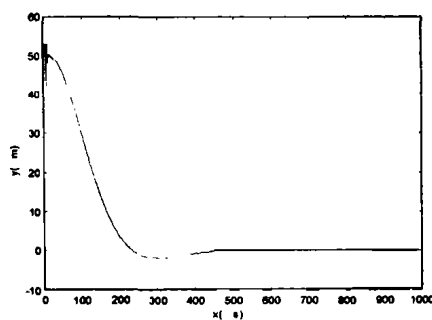


图 1.2 滤波后的低频纵荡位置

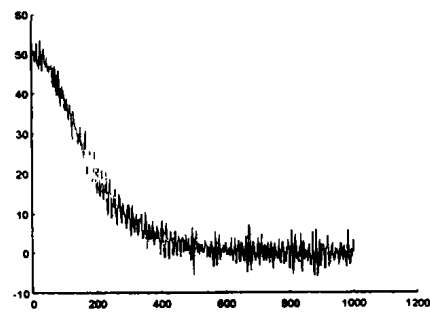


图 1.3 横荡位置测量输出

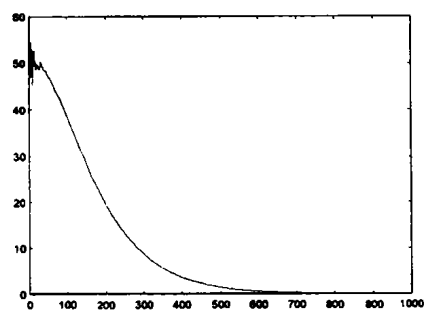


图 1.4 滤波后的低频横荡位置

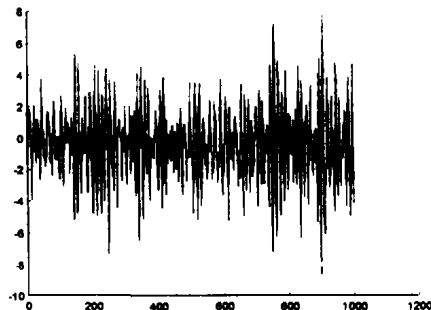


图 1.5 艏摇角度测量输出

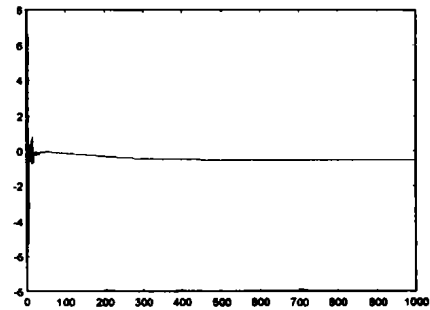


图 1.6 滤波后的低频艏摇角度

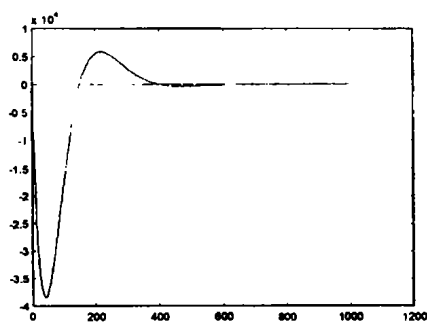


图 1.7 纵荡方向的实际控制力

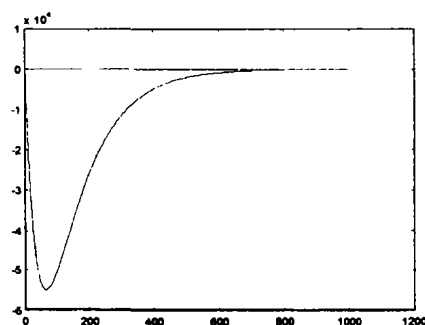


图 1.8 横荡方向的实际控制力

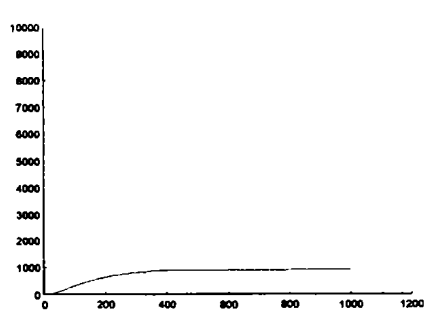


图 1.9 艏摇角度的实际控制力矩

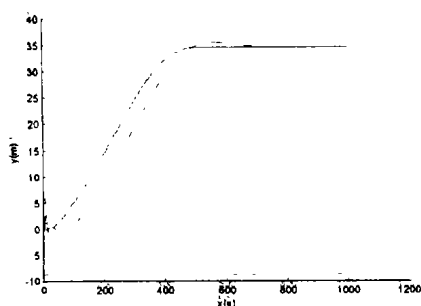


图 2.1 纵荡位置跟踪曲线

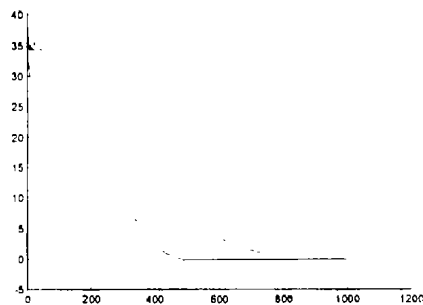


图 2.2 横荡位置跟踪曲线

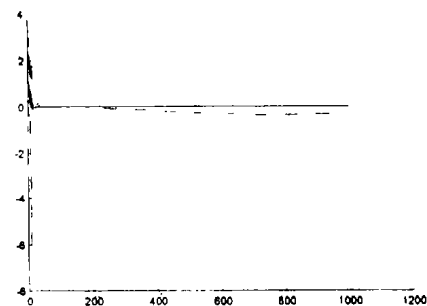


图 2.3 船摇角度跟踪曲线

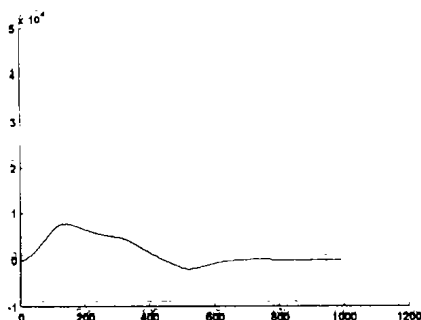


图 2.4 纵荡方向的控制力

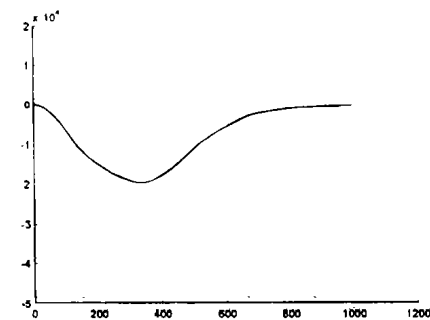


图 2.5 横荡方向的控制力

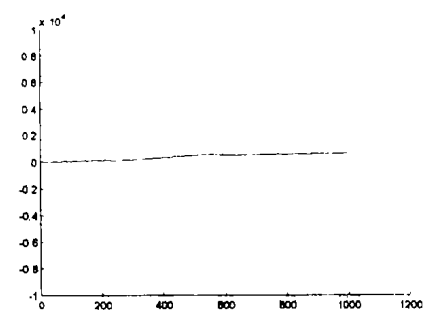


图 2.6 船摇角度的控制力矩

4 结 论

本文给出了一个完整的基于模型的船舶动力定位控制系统设计,引入了船舶运动的参考模型用来提供跟踪控制的合适的运动轨迹。系统应用卡尔曼滤波器从综合位置信号中估计低频运动信号,反馈控制器的设计是考虑积分作用的(或者说是增广的) LQG 算法。系统的定点控制和跟踪控制通过仿真都得到了很好的验证。

5 参考文献

- 1 T. Fossen. Guidance and control of ocean vehicles. New York: Wiley, 1994.
- 2 Antonio Loria. A separation principle for dynamic positioning of ships: Theoretical and experimental results. IEEE transactions on control systems technology, Vol. 8.
- 3 R. Ferreiro Garcia. Fam based controller as Kalman filter alternative applied to ship's dynamic positioning control.

IEEE 1994.

- 4 Balchen J G, Jenssen N A, Mathisen E et al. A dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control: Modeling, identification and control, 1980, 1(3): 135-63.
- 5 Fung P T K, Grimble M J. Dynamic ship positioning using a self-tuning Kalman filter. IEEE transactions on automatic control, 1983, Vol. AC-28, No. 3: 339-349.
- 6 季春群. 动力定位系统的控制方程和模型实验. 海洋工程, vol. 17, No. 4.
- 7 T. Fossen. Passive nonlinear observer design for ships using Lyapunov methods: full-scale experiments with a supply vessel. Automatic, (35)1999: 3-16.
- 8 陶尧森. 船舶耐波性. 上海交通大学出版社, 1985.
- 9 芮世民. 基于模糊控制海上作业系统动力定位的研究. 上海交通大学博士学位论文, 1999.
- 10 Saelid S, Jenssen N A, Balchen J G. Design and analysis of a dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control. IEEE transactions on automatic control, 1983, Vol. AC-28, No. 3: 331-338.
- 11 童进军, 何黎明, 田作华. 船舶动力定位系统的数学模型. 船舶工程, (5), 2002.

Design of Controller for Dynamically Positioning System of Ships

— by Tong Jinjun, He Liming and Tian Zuohua

Abstract: A dynamically positioning system based on its mathematical model which includes ship dynamics is presented in this paper. The paper also describes two control functions which provide station-keeping and tracking. A reference mode is used to calculate appropriate trajectories in tracking. A Kalman-filter-based state estimator is used to compute the low-frequency signals. The modified LQG feedback controller which integrates free integrators, wind feedforward and model reference feedforward controller are all applied in the DP controller design. Simulation results demonstrate the performance of the proposed controller.

Key words: Ship Dynamically positioning Tracking Kalman filter LQG Feedforward