

文章编号:1671-7953(2007)05-0077-03

现代船舶动力定位系统设计

李文魁^{1,2}, 陈永冰², 田蔚风¹, 蒋志营³

(1. 上海交通大学 电信学院仪器系导航与控制研究所, 上海 200240;

2. 海军工程大学 电气与信息学院, 武汉 430033;

3. 海军 91821 部队, 饶平 广东 515729)

摘要: 围绕现代动力定位系统的设计问题, 讨论系统的构建、数学建模、控制器设计和推力器的推力分配, 重点给出了基于扩展 Kalman 滤波的动力定位 LQG 控制器设计算法。

关键词: 船舶动力定位系统; 系统设计; 扩展卡尔曼滤波; 线性二次高斯型

中图分类号: U661.33 **文献标识码:** A

Design of the modern ship dynamic positioning system

LI Wen-kui^{1,2}, CHEN Yong-bing², TIAN Wei-feng¹, JIANG Zhi-ying³

(1. Dept. of Instrumentation Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Navy Engineering University, Wuhan 430033, China;

3. Navy 91821 Unit Raoping 430033, China)

Abstract: On the design of modern dynamic positioning system, this paper discusses the system construction, mathematical modeling, controller design and thrust allocation. A LQG control algorithm based on the extended Kalman filter for dynamic positioning is presented.

Key words: ship dynamic positioning system; system design; extended Kalman filter; linear quadratic Gauss

动力定位系统 DP(dynamical positioning)主要应用于海上作业的船舶(如科学考察船、深海救生船、生产油轮、潜水器支持船、平台支持船、管道和电缆敷设船)和海上平台(海洋钻井平台等)的定点系泊,此外还可用于相对 ROV 和潜水器的轨迹控制。相对传统系泊形式(如锚泊系统等),它定位精度更高、灵活性更好、适用于多种海况,机动性强,成本不随水深增加而增加,操作方便,对于海洋开发和海军现代化建设均具有重要的意义。

1 系统结构及工作原理

1.1 结构

动力定位系统主要由位置测量系统、控制系统和推力系统三部分组成,见图 1。

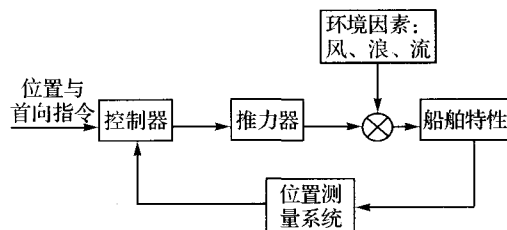


图1 动力定位系统框图

1.1.1 位置测量系统

用于测量船舶(平台)相对某参考点的位置。完整的位置测量系统由定位参考单元(水声定位系统、张紧索、差分 GPS 等)、首向测量单元(罗经等)、环境参考单元(测风仪等)和垂直参照单元(惯性测量单元、加速度计等)组成。

1.1.2 控制系统

控制系统根据外部环境条件(风、浪、流)计算船舶所受的扰动力,然后由扰动力与测量位置,计算保持船位所需的作用力。

1.1.3 推力器系统

推力器系统用于产生抗衡干扰力的推进力。推力器包括主螺旋桨推进器、全向转动螺旋桨、导

收稿日期:2007-03-15

修回日期:2007-04-17

作者简介:李文魁(1973—),男,博士生。

基金项目:海军工程大学自然科学基金资助项目
(HGDJJ05013)

管螺旋桨和隧道螺旋桨和侧向推力器。各推进器根据需要安装在船的不同位置,用以产生纵向推力和横向推力及力矩,实现推力联合调控。

1.2 原理

通过位置测量系统检测当前船位相对目标船位的偏差,采集环境参数(风、浪、流),计算使船舶恢复到目标位置所需的推力,并对各推力器的推力进行分配,确定各推力器的推进方向、螺距及转速,推力器产生的推力使船舶(平台)保持设定的航向和船位。

2 系统建模

船舶在推力器、风、流、海浪的共同作用下产生纵荡、横荡、升沉三种平动和横摇、纵倾和转首三种转动运动。每种运动都是低频分量和高频分量的合成。低频分量主要由螺旋桨推力、舵力、流力和风力和缓变的二阶浪力产生,而高频分量主要由高频的一阶波浪力产生。

2.1 船舶低频运动模型

分别建立地理坐标系 $O_N X_N Y_N Z_N$ 和载体坐标系 $O_B X_B Y_B Z_B$, 见图 2。

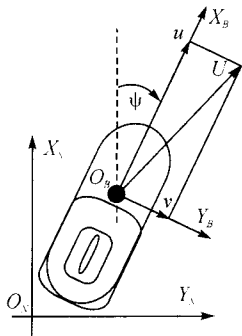


图 2 载体系与地理系

X_B 轴、 Y_B 轴、 Z_B 轴分别指向船首、右舷和龙骨。在地理坐标系中选取船舶位置矢量 $\eta = (x, y, \psi)^T$, (x, y) 为船位, ψ 为航向, 在载体坐标系中选取船舶速度矢量 $v = (u, v, r)^T$, 分别为纵荡、横荡和转首速度。船舶运动学方程和动力学方程如下:

$\dot{\eta} = R(\psi)v$ (1)

$M\dot{v} + Dv = \tau_c + R^T(\psi)b$ (2)

式中: $R(\psi)$ ——转换矩阵,

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

M, D ——质量阵和阻尼阵;

τ_c ——由推进力、风力和二阶波浪力合成的作用力;

b ——未建模动态, 可用一阶 Markov 偏差模型描述;

$\dot{b} = -T_b^{-1}b + E_b w_b$ (3)

其中: $w_b \in R^3$ ——零均值高斯白噪声。

2.2 船舶海浪频率下的运动模型

白噪声驱动的船舶浪频率状态方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= A_w \xi + E_w w_w \\ \eta_w &= C_w \xi \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ξ ——波幅, $\xi \in R^6$;

η_w ——海浪引起的船位和航向矢量,

$\eta_w = [x_w, y_w, \psi_w]^T$;

w_w, A_w, E_w, C_w ——高斯白噪声, $w_w \in R^3$,

$A_w = [0, I_{3 \times 3}; -\Omega^2 - 2\Lambda\Omega]$,

$E_w = [0_{3 \times 3}, K_w]^T, C_w = [0, I]$;

Ω ——自然频率阵, $\Omega = \text{diag}\{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$;

Λ ——阻尼阵, $\Lambda = \text{diag}\{\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3\}$;

K_w ——增益阵, $K_w = \text{diag}\{K_{w1}, K_{w2}, K_{w3}\}$ 。

测量方程为:

$y = \eta + \eta_w + v$ (5)

式中: $v \in R^3$ ——测量噪声^[2]。

3 基于 EKF 滤波的 LQG 控制器设计

现代 DP 系统常采用前馈控制加反馈控制的多回路控制。前馈控制主要用于快速抵消风力干扰, 反馈控制实现定点或跟踪控制, 见图 3。

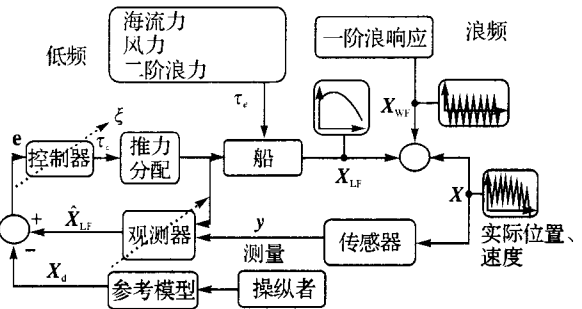


图 3 动力定位系统控制回路

为避免不必要的能量消耗, 可采用滤波技术将高频运动和低频运动分离, 并滤除有害的高频运动。Kalman 滤波采用状态递推, 采样和修正在一个周期内完成, 无相位滞后, 在系统短时间无信号时仍能正常工作, 非常适用于 DP 系统设计。

对于动力定位这样复杂的非线性系统,传统的PID控制效果受到很大限制。当航速、装载及海况发生变化,控制器参数整定困难。最优控制和Kalman滤波结合的线性二次高斯型(LQG)可克服以上困难。

Kalman滤波器接收测量的船舶运动综合位置信息,实现以下功能:1)滤除测量噪声和船舶高频运动信号;2)给出船舶低频运动的状态估计值,该估计值反馈提供给LQ最优控制器;3)状态递推,实时修正低频估计值。

设状态矢量 $x=[\xi, \eta, b]^T$,控制量 $u=\tau$,过程噪声 $w=[w_w, w_b]^T$,由式(1)~(5),建立如下Kalman滤波模型:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + Bu + Ew \\ y &= Hx + v\end{aligned}\quad (6)$$

式中: $B=[0 \ 0 \ 0 \ M^{-1}]^T$, $E=[E_w \ 0 \ E_b \ 0]^T$,
 $f(x)=[A_w \xi \ R(\psi)v - T_b^{-1}b \ M^{-1}[-Dv + M^{-1}R^T(\psi)b]]^T$,
 $H=[0 \ I \ 0 \ C_w]$ 。

扩展Kalman滤波(EKF)算法如下:

$$\begin{aligned}K_k &= P_k H^T [H P_k H^T + R]^{-1} \\ \hat{x}_k &= \bar{x}_k + K_k (y_k - H \bar{x}_k) \\ \hat{P}_k &= (I - K_k H) \bar{P}_k (I - K_k H)^T + K_k R K_k^T\end{aligned}\quad (7)$$

$$\bar{x}_{k+1} = f_k(\hat{x}_k, u_k)$$

$$\bar{P}_{k+1} = \Phi_k \bar{P}_k \Phi_k^T + \Gamma_k Q \Gamma_k^T$$

式(7)分别为卡尔曼增益阵、状态估计更新、误差方差更新、状态估计递推和误差方差递推。

初始条件为:

$$\bar{x}_0 = x_0, \bar{P}_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] = P_0。$$

设参考位置矢量 $\hat{\eta}_d = [x_d, y_d, \psi_d]^T$,定义偏差量 $e_2 = R^T(\psi_d)[\hat{\eta} - \hat{\eta}_d]^T$, $e_1 = \dot{e}_2$ 其中位置矢量估计 $\hat{\eta} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{\psi}]^T$ 由滤波器输出,取二次型性能指标:

$$J = E \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T e^T Q e + \tau_{PD}^T P \tau_{PD} dt \right\}$$

式中, $Q=Q^T \geq 0$, $P=P^T \geq 0$, τ_{PD} 为比例微分控制力,控制器输出 τ_c 由LQG反馈控制律计算:

$$\dot{\tau}_1 = -A_w \tau_1 + G_1 e_2\quad (8)$$

$$\tau_c = -G_P e_2 - G_D e_1 + \tau_1 + -G_w \hat{\tau}_w$$

式中,比例增益阵 G_P 和微分增益阵 G_D 通过求解Riccati方程得到, τ_1 为积分项,风力 $\hat{\tau}_w$ 可由风速、风向和船体参数计算,该项用于风力前馈补偿。

4 推力分配

推力器系统用于产生船舶纵轴和横轴方向的推力及力矩,来抗衡作用于船上的干扰力和干扰力矩。一艘动力定位船上配备多个推力器,如主螺旋桨、侧推器、全向方位推进器。设计中需要对各推力器进行推力分配,确定各推进器的转速和方向。推力分配平衡方程如下:

$$\tau_c = T_{3 \times r}(\alpha) K u_c\quad (9)$$

式中: r ——推进器个数;

α ——螺旋桨轴线相对船首尾线夹角;

u_c ——每个推进器的推力;

K ——力系数阵,为对角阵;

T ——推力器配置阵。

以图4所示推进器配置结构为例,其推力器配置矩阵如下。

$$T_{3 \times 5} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & 0 & 0 & \cos \alpha_4 & \cos \alpha_5 \\ \sin \alpha_1 & 1 & 1 & \sin \alpha_4 & \sin \alpha_5 \\ l_{ba} \sin \alpha_1 & l_{bt} & -l_{st} & -l_p \cos \alpha_4 & l_p \cos \alpha_5 - b_s \sin \alpha_5 \end{bmatrix}$$

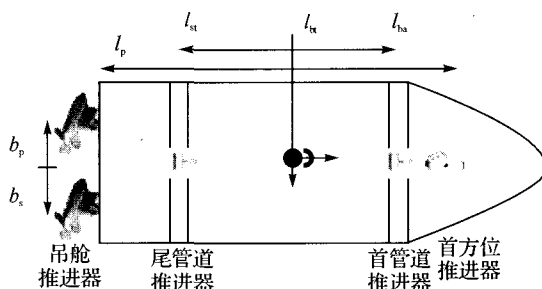


图4 推进器分布

5 结束语

推力分配可以化为最优化问题求解。在满足力平衡的基础上,取目标函数为位置误差和能量消耗,考虑推力器效率以及推力器之间的相互作用,分配策略即化为求解非线性方程组的最优化问题。

随着海上油气生产不断向深海延伸,DP系统必将得到更大发展。

参考文献

- [1] 何崇德.“大洋一号”科学考察船动力定位系统的设计[J].船舶工程,2004,26(2):24-28.
- [2] Antonio Loria, Thor I Fossen, Elena Panteley. A Separation Principle for Dynamic Positioning of Ships: Theoretical and Experimental Results[J]. IEEE Transactions on control systems technology, 2000,8(2):332-343.