

## 具有输入延时的锚泊自动定位系统保性能控制

苏晓宇<sup>1</sup>, 金鸿章<sup>1</sup>, 姜述强<sup>1</sup>, 林峰<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 黑龙江大学信息与网络建设管理中心, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 从半潜式平台定位系统的经济性及安全性角度出发, 提出基于锚链切换控制的自动锚泊定位系统新方案. 针对方案中具有输入延时及不确定性的特点, 设计了带有输入延时的保性能控制器, 以产生抵抗环境扰动所需的控制输入. 基于LMI方法给出控制器存在的充分条件, 通过求解相应的线性矩阵不等式得到系统的保性能控制律. 仿真结果表明, 所设计的控制器能有效解决锚泊自动定位系统的参数不确定性及输入延时问题, 从而提高系统的精度和性能.

**关键词:** 锚泊定位; 定点定位; 保性能控制; 输入延时; 不确定性

**中图分类号:** U675.92

**文献标志码:** A

## Guaranteed cost control for automatic mooring positioning system with input delay

SU Xiao-yu<sup>1</sup>, JIN Hong-zhang<sup>1</sup>, JIANG Shu-qiang<sup>1</sup>, LIN Feng<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Information and Network Construction Management Center, Heilongjiang University, Harbin 150080, China. Correspondent: SU Xiao-yu, E-mail: sxy13936494350@163.com)

**Abstract:** Aiming at the economy and security of the positioning system in semi-submersible, a new scheme based on mooring line switching control is presented. Considering the input delay and uncertainty, the guaranteed cost control with input delay is designed to calculate the control forces to resist disturbing forces. Sufficient conditions are established to assure the existence of the guaranteed cost controller in terms of LMI, and the guaranteed cost controller with input delay is obtained by solving the linear matrix inequality. The simulation result shows that the controller can solve the problems of parameter uncertainties and the input delay, so that it improves the accuracy and performance of the system.

**Key words:** mooring positioning; setpoint positioning; guaranteed cost control; input delay; uncertainty

### 0 引言

海上油气作业要求平台在较长时间内保持位置精度, 因此, 平台定位系统的设计尤为重要. 在定位技术方面, 国内外研究主要涉及动力定位及锚泊定位. 动力定位系统响应速度快、机动性好, 适合深水作业; 锚泊定位系统在使用、维护、成本和安全性方面具有较强优势<sup>[1]</sup>. 为了改善传统锚泊定位系统定位精度较低的缺点, 从而更好地发挥锚泊定位的优势, 本文从经济性及安全性角度出发, 提出一种新的基于锚链切换原则的自动锚泊定位方案. 该方案采用4台三链轮锚机对12条锚链进行切换控制以代替传统的控制方法(采用12台锚机分别控制12条锚链的收放). 新方

案减少了锚机的使用数量, 从而降低了系统的总成本, 保证了经济性. 由于切换思想的引入, 可在确保定位精度的基础上, 通过合理确定锚链的切换阈值来实现锚链张力场的均匀分布, 避免锚链因受力不均而断裂, 从而提高自动锚泊定位系统的安全性.

在该方案中, 锚链与锚机的切断-接合-收放-到达阈值的过程中, 存在一定的输入延时. 此外, 海洋扰动的不确定性会导致系统方程中的水动力参数具有不确定性. 延时及不确定性的存在容易导致平台定位系统稳定性能变差, 甚至不稳定. 为了解决上述问题, 本文给出一种具有输入延时的保性能控制器的设计以产生抵抗环境扰动的控制合力(力矩). 该方法

收稿日期: 2013-01-21; 修回日期: 2013-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279039); 国家工业和信息化部海洋装备工程装备科研项目(工信厅装[2009]91).

作者简介: 苏晓宇(1985-), 女, 博士生, 从事海洋平台定位技术的研究; 金鸿章(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 从事船舶运动控制及其特辅装置等研究.

对于所有允许的不确定性及输入延时是渐近稳定的,且闭环系统的性能指标不超过某一个确定的上界<sup>[2-3]</sup>.此外,由于要实现平台的定点定位,将具有输入延时的保性能控制扩展到基于误差向量的形式.

## 1 自动锚泊定位系统方案

半潜式平台对于海洋扰动引起的水平运动不具有回复力,需安装定位系统使平台的位移控制在要求范围内<sup>[4]</sup>.为了确保平台的作业性能及设备安全,本文提出具有自动切换及收放锚链、均衡锚链张力分布及应急释放锚链等功能的自动锚泊定位系统,系统原理如图1所示.

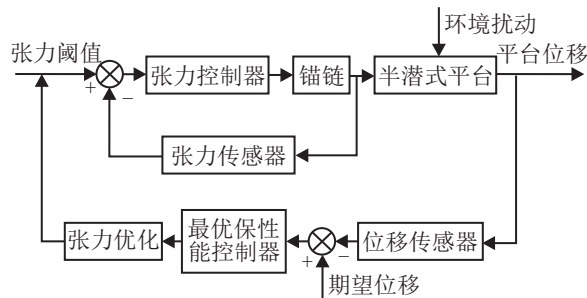


图1 锚泊自动定位系统原理

由保性能控制器计算出在环境扰动下,平台定位到期望位置所需的控制合力.张力优化算法将控制合力分配给12条锚链,并将计算出的优化值作为锚链切换阈值.随动机构通过控制锚链的收放来保证张力达到阈值,使平台保持在所要求的位置.传统方案采用12台锚机控制12条锚链的收放以产生控制输入,新方案将其改良为仅由图2所示的4台三链轮卧式锚机分别对12根锚链进行切换控制.

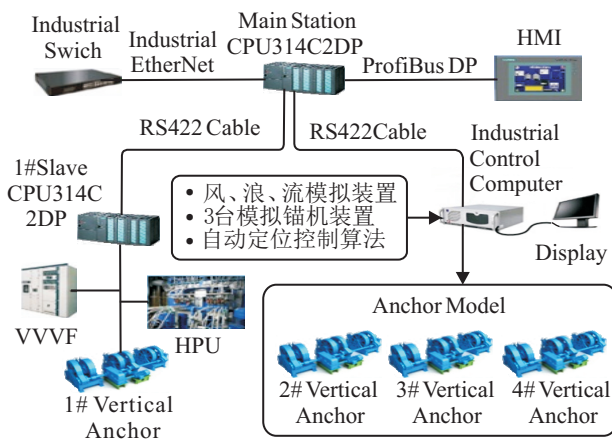


图2 锚泊自动定位系统试验与仿真

中央控制站向4台锚机发送指令,控制4条锚链的收放(即每台锚机的驱动装置只与其中的1条锚链结合,其余2条锚链处于切断状态).当与驱动装置所接合的锚链张力达到设定阈值后,控制站发送指令控制锚机驱动装置进行切换,与另1条锚链接合,并进

行收放.这种控制方式在保证平台定位精度的基础上,降低了系统的总成本,兼顾了锚链张力场的均匀分布,避免了因张力分配不均而引起的锚链断裂.

## 2 锚泊自动定位平台的数学模型

对于平台定位系统而言,平台的运动速度很小,即阻尼力可近似为线性的<sup>[5]</sup>,平台水平方向的低频控制模型一般可表示为

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)v, \\ M\dot{v} + \bar{D}v = \Gamma + R^T(\psi)b. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\eta = [x, y, \varphi]^T$  为固定坐标系下的平台纵荡位移、横荡位移及艏摇角度;  $v = [u, v, r]^T$  为运动坐标系下相应的速度向量;  $R(\psi)$  为旋转矩阵;  $M$  为质量矩阵;  $\bar{D}$  为阻尼矩阵;  $\Gamma = [F_x, F_y, N_z]^T$  为锚链张力及低频环境扰动力在水平方向上的合力(力矩);  $b \in R^3$  为未建模的环境力(力矩).

假设艏向角相对于期望值的变化不大,可应用小角理论,非线性的旋转矩阵可近似为单位矩阵<sup>[6]</sup>.基于此假设条件并计入输入延时及参数不确定性,平台自动锚泊定位系统控制模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t - \tau) + \\ (B + \Delta B)w(t), \\ x(t) = \varphi(t), t \in [-\tau, 0]. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $x = [v^T, \eta^T]^T$  为状态向量;  $u(t - \tau)$  为水平方向的控制输入;  $w(t)$  为海洋扰动向量;  $\tau$  为系统输入延迟时间;  $\varphi()$  为系统的初始条件;  $\Delta A, \Delta B$  为系统模型中的参数不确定性,且有

$$A = \begin{bmatrix} -M^{-1}\bar{D} & \mathbf{0}_3 \times 3 \\ \mathbf{I}_3 \times 3 & \mathbf{0}_3 \times 3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} M^{-1} \\ \mathbf{0}_3 \times 3 \end{bmatrix}.$$

## 3 锚泊自动定位系统控制器设计

### 3.1 带有输入延时的保性能控制器设计

保性能控制可保证对于所有允许的不确定性及输入延时,闭环系统是渐近稳定的,并具有一定的鲁棒性<sup>[7]</sup>.针对带有输入延时的不确定性系统,本文假设所考虑的参数不确定性是范数有界的,且具有如下形式:

$$[\Delta A \ \Delta B] = DF(t)[E_a \ E_b]. \quad (3)$$

其中:  $D, E_a, E_b$  为适当维数的已知常矩阵,反应不确定性的结构信息;  $F(t) \in R^{i \times j}$  为未知矩阵.针对系统(2),定义二次型性能指标为

$$J = \int_0^{\infty} x^T Q x + u^T R u dt,$$

其中  $Q, R$  为给定的正定对称加权矩阵.

假设输入延时的上界为  $\tau$ , 则研究的问题为: 设计状态反馈控制律,使得闭环系统(2)对于满足  $0 \leq \tau \leq \tau$  的任意输入延时及所有允许的不确定性是渐近

稳定的,且相应的闭环性能指标存在上界:  $J \leq J^*$ .

**定理 1** 对于不确定输入延时系统(2),当且仅当存在正定对称矩阵  $P, S_1, S_2, \bar{Q}$ , 矩阵  $K$  和标量  $\mu_i > 0$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ), 使得对于所有允许的不确定性及  $0 \leq \tau \leq \bar{\tau}$  的任意输入延时,下列不等式成立:

$$\begin{aligned} \psi(P, S_1, S_2, \bar{Q}, K, \mu, \tau) &< 0; \\ \mu_3 I - E_b \bar{Q} E_b^T &> 0, S_1 - \mu_4 D D^T > 0, \\ S_2 - \mu_5 D D^T &> 0; \\ P^{-1} - S_1 - S_2 &\geq 0, \bar{Q} - K P^{-1} K^T \geq 0. \end{aligned} \quad (4)$$

则闭环系统(2)是鲁棒渐近稳定的,且  $u(t) = Kx(t)$  是系统的保性能控制律. 其中

$$\begin{aligned} \psi() = & (A + BK)^T P + P(A + BK) + \mu_1^{-1} E_a^T E_a + \\ & P(\mu_1 D D^T + \mu_2 D D^T) P + \mu_2^{-1} K^T E_b^T E_b K + \\ & \tau P[B \bar{Q} B^T + \mu_3 D D^T + B \bar{Q} E_b^T (\mu_3 I - E_b \bar{Q} E_b^T)^{-1} \\ & \times E_b \bar{Q} B^T] P + \tau [A^T (S_1 - \mu_4 D D^T)^{-1} A + \\ & \mu_4^{-1} E_a^T E_a + K^T B^T (S_2 - \mu_5 D D^T)^{-1} B K + \\ & \mu_5^{-1} K^T E_b^T E_b K]. \end{aligned}$$

**证明** 设  $x(t)$  为系统(2)的状态量,且有  $u(t) = Kx(t), w(t) = 0$ , 根据牛顿-莱布尼兹公式,可得

$$\begin{aligned} x(t - \tau) = & x(t) - \int_{-\tau}^0 \dot{x}(t + \vartheta) d\vartheta = \\ & x(t) - \int_{-\tau}^0 [Ax(t + \vartheta) + BKx(t + \vartheta - \tau)] d\vartheta. \end{aligned}$$

将  $x(t - \tau)$  代入系统(2), 可得

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & (A + BK)x(t) - BK \int_{-\tau}^0 [Ax(t + \vartheta) + \\ & BKx(t + \vartheta - \tau)] d\vartheta. \end{aligned} \quad (5)$$

根据上述结果,定义 Lyapunov 函数为

$$V(x) = x^T(t) P x(t) + \delta(x, t), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \delta(x, t) = & \int_{-\tau}^0 \int_{t+\vartheta}^t x^T(\zeta) A^T S_1^{-1} A x(\zeta) d\zeta d\vartheta + \\ & \int_{-\tau}^0 \int_{t+\vartheta-\tau}^t x^T(\zeta) K^T B^T S_2^{-1} B K x(\zeta) d\zeta d\vartheta, \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $P, S_i$  为对称正定矩阵. 对  $V(x)$  求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = & x^T(t) [(A + BK)P + P(A + BK)]x(t) + \\ & \eta_1(x, t) + \eta_2(x, t) + \dot{\delta}(x, t), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\eta_1(x, t) = -2 \int_{-\tau}^0 x^T(t) P B K (A + BK)x(t + \vartheta) d\vartheta,$$

$$\eta_2(x, t) = -2 \int_{-\tau}^0 x^T(t) P B K x(t + \vartheta - \tau) d\vartheta,$$

$$\begin{aligned} \dot{\delta}(x, t) = & \tau x^T(t) [A^T S_1^{-1} A + K^T B^T S_2 B K]x(t) - \\ & \int_{-\tau}^0 x^T(t + \vartheta) A^T S_1^{-1} A x(t + \vartheta) d\vartheta - \end{aligned}$$

$$\int_{-\tau}^0 x^T(t + \vartheta - \tau) K^T B^T S_2^{-1} B K x(t + \vartheta - \tau) d\vartheta.$$

对任意向量  $u, v$  及适当维数的正定对称矩阵  $E$  而言<sup>[8]</sup>,  $-2u^T v \leq u^T E u + v^T E^{-1} v$ . 由于  $S$  为正定对称矩阵, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) \leq & x^T(t) [(A + BK)^T P + P(A + BK) + \\ & \tau P B K \times 2 S_2 K^T B^T P + \tau A^T S_1^{-1} A + \\ & \tau K^T B^T S_2^{-1} B K]x(t). \end{aligned} \quad (9)$$

应用文献[9]中的引理,对于满足  $\mu_4 I - E_b \bar{Q} E_b^T > 0, S_1 - \mu_4 D D^T > 0, S_2 - \mu_5 D D^T > 0$  的任意大于零的标量  $\mu_i$ , 存在

$$\dot{V}(x) \leq x^T(t) \psi(P, S_i, \bar{Q}, K, \mu, \tau) x(t). \quad (10)$$

其中  $\psi()$  为关于  $\tau$  的单调上升函数, 其计算方法已在文中给出. 由此可推导出  $\dot{V}(x) < 0$ , 即闭环系统(2)是鲁棒渐近稳定的, 且  $u(t) = Kx(t)$  为系统的保性能控制律.  $\square$

为了便于求解,下面将定理1以线性矩阵不等式的形式表述,并给出相应的系统上界.

**定理 2** 对于不确定输入延时系统(2)及所定义的性能指标,给定  $\bar{\tau} > 0$  和正定矩阵  $Z$ . 如果存在正定对称矩阵  $X, P, S_1, S_2, \bar{Q}$ , 矩阵  $W$  和标量  $\mu_i > 0$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ), 使得对所有允许的不确定性及满足  $0 \leq \tau \leq \bar{\tau}$  的任意输入延时,下列矩阵不等式成立:

$$\left\{ \begin{aligned} & \begin{bmatrix} M() & G() & L() & \bar{\tau} N() & X & W^T & X \\ G^T() & -J_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L^T() & 0 & -\bar{\tau} J_\tau & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\tau} N^T() & 0 & 0 & -J_1 & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & 0 & 0 & -Q^{-1} & 0 & 0 \\ W & 0 & 0 & 0 & 0 & -R^{-1} & 0 \\ X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z^{-1} \end{bmatrix} < 0, \\ & \begin{bmatrix} \bar{Q} & W \\ W^T & X \end{bmatrix} > 0, X - S_1 - S_2 \geq 0, \end{aligned} \right. \quad (11)$$

则系统是鲁棒渐近稳定的,  $u(t) = WX^{-1}x(t)$  为系统(2)的一个状态反馈保性能控制律, 相应的系统上界为

$$\begin{aligned} J^* = & \varphi^T(0) P \varphi(0) + \\ & \int_{-\tau}^0 \varphi^T(\vartheta) (W X^{-1})^T Z W X^{-1} \varphi(\vartheta) d\vartheta, \end{aligned} \quad (12)$$

$$M(X, W, \mu_i, \bar{\tau}) =$$

$$X A^T + A X + W^T B^T + B W +$$

$$\bar{\tau} B \bar{Q} B^T + (\mu_1 + \mu_2) D D^T + \bar{\tau} \mu_3 D D^T,$$

$$G(X, W) = [X E_a^T \quad W^T E_b^T],$$

$$N(X, W) = [X A^T \quad X E_a^T \quad W^T B^T \quad W^T E_b^T],$$

$$J_1 = \text{diag}\{\mu_1 I, \mu_2 I\}, J_\tau = \mu_3 I - E_b \bar{Q} E_b^T, \\ J_2 = \text{diag}\{P - \mu_4 D D^T, \mu_4 I, P - \mu_5 D D^T, \mu_5 I\}.$$

**证明** 假设系统(2)的初值为零, 则选取如下 Lyapunov 函数:

$$V_1(x) = x^T(t) P x(t) + \delta(x, t) + \int_{t-\tau}^t x^T(\vartheta) (W X^{-1})^T Z W X^{-1} x(\vartheta) d\vartheta. \quad (13)$$

从定理1的证明过程可得

$$\dot{V}_1(x) = x^T(t) \psi() x(t) + x^T(t) (W X^{-1})^T Z W X^{-1} \times \\ x(t) - x^T(t-\tau) (W X^{-1})^T Z W X^{-1} x(t-\tau).$$

定义  $X = P^{-1}$ ,  $W = K X$ . 矩阵不等式(4)两端分别左乘和右乘矩阵  $X$ , 再应用矩阵的 Schur 补性质即可得到式(11). 同时, 矩阵不等式(11)成立, 可以推导出

$$\dot{V}_1(x) + x^T(t) Q x(t) + x^T(t) K^T R K x(t) < 0, \quad (14) \\ \int_0^\infty x^T(t) Q x(t) + x^T(t) (K^T R K x(t)) dt < \\ - \int_0^\infty \dot{V}_1(x) dt.$$

将式(14)代入上式, 可得

$$\int_0^\infty \delta(x, t) = \int_0^\infty \int_{-\tau}^0 [x^T(t) A^T S_1^{-1} A x(t) - x^T(t+\vartheta) A^T S_1^{-1} A x \\ (t+\vartheta)] d\vartheta dt + \int_0^\infty \int_{-\tau}^0 [x^T(t) K^T B^T S_2^{-1} B K x(t) - \\ x^T(t+\vartheta-\tau) K^T B^T S_2^{-1} B K x(t+\vartheta-\tau)] d\vartheta dt. \quad (15)$$

由于闭环系统是渐近稳定的, 系统在  $t \rightarrow \infty$  时,  $x(t) \rightarrow 0$ . 在零初始条件下可得出  $\int_0^\infty \delta(x, t) dt = 0$ , 即

$$\int_0^\infty x^T(t) Q x(t) + x^T(t) K^T R K x(t) dt < \\ - \int_0^\infty \dot{V}_1(x) dt = x^T(0) P x(0) + \int_{-\tau}^0 x^T(\vartheta) (W X^{-1})^T Z W X^{-1} x(\vartheta) d\vartheta. \quad (16)$$

因此, 可以得出

$$\int_0^\infty x^T(t) Q x(t) + u^T(t-\tau) R u(t-\tau) dt \leq \\ \varphi^T(0) P \varphi(0) + \int_{-\tau}^0 \varphi^T(\vartheta) (W X^{-1})^T Z W X^{-1} \varphi(\vartheta) d\vartheta = J^*. \quad (17)$$

由此可知,  $u(t) = W X^{-1} x(t)$  为系统(2)的一个状态反馈保性能控制律,  $J^*$  为相应的闭环性能指标的上界.  $\square$

锚泊自动定位的期望输出不恒等于零, 需定义关于误差向量的保性能控制, 使闭环系统(2)能够跟踪给定的期望输出  $y_d$ . 定义误差向量为

$$e(t) = y(t) - y_d = x(t) - y_d. \quad (18)$$

此时, 系统(2)的保性能控制律为<sup>[10]</sup>

$$u(t) = K e(t) + \nu, \quad (19)$$

其中:  $K = W X^{-1}$ ,  $\nu = -B^+ A y_d$ ,  $B^+$  为矩阵  $B$  的伪逆. 相应的性能指标上界为

$$J^* = e^T(0) P e(0) + \int_{-\tau}^0 e^T(\vartheta) (W X^{-1})^T Z W X^{-1} e(\vartheta) d\vartheta.$$

### 3.2 张力优化策略

应用上述控制策略得到的是使平台定位到目标位置所需的水平方向的合力(力矩), 这里需将合力分配给12条锚链. 张力分配应保证各锚链张力的均匀分布<sup>[11]</sup>, 定义目标函数为各锚链张力差的平方和, 即

$$\min F = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} (T_i - T_j)^2. \quad (20)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^{12} T_i \cos \varphi_i = -F_x, \quad \sum_{i=1}^{12} T_i \sin \varphi_i = -F_y, \\ \sum_{i=1}^{12} T_i d_i (\cos \varphi_i \sin \theta_i + \sin \varphi_i \cos \theta_i) = -M, \\ T_{\min} \leq T \leq \frac{T_{\max}}{k}.$$

其中:  $F_x, F_y, M$  分别为纵荡、横荡方向的控制力及横摇方向的控制力矩(由保性能算法计算得出);  $T_i$  为锚链的张力值;  $\varphi_i$  为锚链布置角度;  $\theta_i$  为着链点与平台中心的连线与  $x$  轴的夹角;  $d_i$  为着链点到平台中心的距离;  $k$  为安全因子. 约束条件中的等式约束用来保证海洋平台的位置, 不等式约束则用来保证锚链的安全性, 可用遗传算法求解上述优化问题.

### 4 仿真研究

为验证上述控制方法的性能, 对半潜式海洋平台在一年一遇海洋环境扰动下的纵荡运动进行仿真研究. 为了有效利用 Matlab 中 LMI 工具箱, 半潜式平台采用无因次参数描述, 即

$$M = \begin{bmatrix} 1.0653 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0672 & -0.4093 \\ 0 & -0.4093 & 0.2108 \end{bmatrix}, \\ \bar{D} = \begin{bmatrix} 0.0853 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0772 & 0.0153 \\ 0 & 0.0153 & 0.0048 \end{bmatrix}.$$

由此可推导出状态方程(2)的系数矩阵  $A, B$ . 为了节约篇幅, 仅给出纵荡运动的参数, 即

$$-1 \leq r_{1,2} \leq 1, \\ A = \begin{bmatrix} -0.0801 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.9387 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ D = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, E_a = \begin{bmatrix} 0.0082 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_b = \begin{bmatrix} -0.3020 \\ 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}.$$

系统性能指标的加权矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}, R = [10], Z = I, \bar{\tau} = 2.$$

根据定理2, 求解矩阵不等式, 可得

$$u(t) = Ke(t) - B^+ Ay_d = [0.0374 \quad 0.0026]e(t) + [0.0853 \quad 0]y_d. \quad (21)$$

相应的系统性能上界为  $J^* = 0.1249$ .

设期望输出  $y_d = [0 \quad 10]$ , 在上述保性能控制律的作用下, 平台纵荡运动的仿真结果如图3所示.

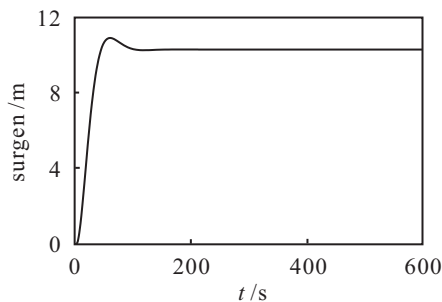


图3 平台纵荡位置输出

设横荡及艏摇方向的期望输出  $\bar{y}_d = [0 \quad 5 \quad 0 \quad 1]$ , 可得平台横荡及艏摇方向上的运动曲线如图4所示.

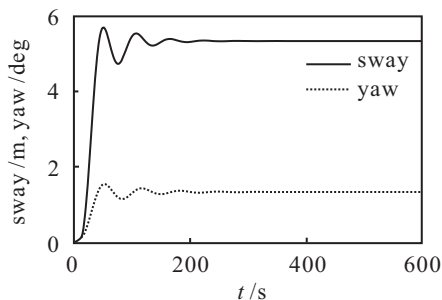


图4 平台横荡及艏摇位置输出

由图4可知, 所设计的控制器能够在一定的输入延时及参数不确定的情况下, 实现平台的定点定位, 并能保持系统的稳定性. 平台的运动存在一定的稳态误差, 但远小于平台控制在工作水深3%的要求.

## 5 结论

本文提出的定位方案在保证海洋平台定位要求的基础上, 兼顾了锚链力场的均匀分布, 提高了安全性. 同时, 由于该锚泊定位系统仅采用4台三链轮锚机即可实现原有12台锚机的功能, 降低了系统的总成本, 保证了经济性. 针对所提出方案具有输入延时特性, 同时考虑系统的参数不确定性, 基于误差向量设计了带有输入延时的保性能控制器, 解决了由于输入延时及系统参数不确定性对平台定位系统设计造成的困难, 能够实现平台的任意点定位. 仿真结果表明了该控制器的可行性和有效性.

## 参考文献(References)

- [1] Sorensen A. Structural issues in the design and operation of marine control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2005, 29(1): 125-149.
- [2] 纪志成, 朱嵘嘉, 沈艳霞. 一类不确定线性时滞系统的保性能研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(8): 943-946. (Ji Z C, Zhu R J, Shen Y X. Study on the guaranteed cost control for a class of uncertain time-delay systems[J]. Control and Decision, 2005, 20(8): 943-946.)
- [3] Gao J, Huang B. Delay-dependent robust guaranteed cost control of an uncertain linear system with state and input delay[J]. International J of Systems Science, 2005, 36(1): 19-26.
- [4] Stansberg C. Slow-drift pitch motions and air-gap observed from model testing with moored semisubmersibles[C]. ASME 2007 Proc of the 26th Int Conf on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. San Diego, 2007: 659-668.
- [5] Berntsen P, Aamo O, Leira B. Ensuring mooring line integrity by dynamic positioning: Controller design and experimental tests[J]. Automatic, 2009, 45(5): 1285-1290.
- [6] 金鸿章, 苏晓宇, 胡晓东, 等. 计入锚索阻尼的锚泊自动定位系统建模及控制器设计[J]. 中国造船, 2012, 53(3): 51-58. (Jin H Z, Su X Y, Hu X D, et al. Modeling and simulation of mooring positioning semi-submersible platform when accounting for mooring line damping[J]. Ship Building of China, 2012, 53(3): 51-58.)
- [7] Chen Wuhua, Guan Zhihong. Delay-dependent Guaranteed cost control for uncertain discrete-time systems with both state and input delays[J]. J of the Franklin Institute, 2004, 34(1): 419-430.
- [8] Kosmidou O I, Boutalis Y S, Hatzis C. An LMI optimization approach for Guaranteed cost control of systems with state and input delays[J]. Informatics in Control, Automation and Robotics, 2006, 10(2): 117-123.
- [9] Li Yu, Jian Chu. An LMI approach to Guaranteed cost control of linear uncertain time-delay systems[J]. Automatica, 1999, 39(6): 1155-1159.
- [10] 徐建省, 王永骥. 一类约束条件下的跟踪保性能控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(5): 976-979. (Xu J S, Wang Y J. Tracking guaranteed-cost control under a class of constrains[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(5): 976-979.)
- [11] Shafieefar M, Rezvani A. Mooring optimization of floating platforms using a genetic algorithm[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(10): 1413-1421.

(责任编辑: 闫妍)