

8-13-2020

## Application of Model Prediction Control in Ship Dynamic Positioning Simulator

Xiaobin Qian

*Lab. of Marine Simulation and Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Yin Yong

*Lab. of Marine Simulation and Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Xiufeng Zhang

*Lab. of Marine Simulation and Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Xiaofeng Sun

*Lab. of Marine Simulation and Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Application of Model Prediction Control in Ship Dynamic Positioning Simulator

### Abstract

**Abstract:** According to the requirement of ship Dynamic Positioning simulator control simulation system, a model predictive control scheme was proposed for DP simulator with the proportional integrator. Ship *Dynamic Positioning simulator was mainly used for training and competency assessment of DP operator. At present, DP Simulator mainly depends on imports and there is no domestic DP simulator with independent intellectual property rights. Dynamic Positioning controller is one of the key technologies, which determines the performance of DP simulator. Considering the unknown slowly-varying marine environment disturbance and vessel constraints, a dynamic positioning controller was designed based on the model predictive control with proportional integrator. The controller could overcome the environment disturbance by the constrained force to reach and maintain the desired position and heading. The simulation experiments verify the effectiveness of the proposed algorithm.*

### Keywords

dynamic positioning simulator, model predictive control, constrains, disturbance

### Recommended Citation

Qian Xiaobin, Yin Yong, Zhang Xiufeng, Sun Xiaofeng. Application of Model Prediction Control in Ship Dynamic Positioning Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2620-2625.

# 模型预测控制在船舶动力定位模拟器中的应用

钱小斌, 尹勇, 张秀凤, 孙霄峰

(大连海事大学 航海动态仿真和控制实验室, 大连 116026)

**摘要:** 针对船舶动力定位模拟器中控制仿真系统的需要, 提出了将含有积分器的模型预测控制算法应用于模拟器中。船舶动力定位模拟器主要用于动力定位操作人员的培训和适任评估, 目前国内尚未开发出具有自主知识产权、功能完备的动力定位模拟器, 主要依赖于国外进口。动力定位控制器是模拟器的核心技术之一, 决定了模拟器的品质。考虑到未知缓变的海洋环境扰动对船舶的影响以及船舶推力的限制, 设计了采用含有比例积分器的船舶动力定位模型预测控制器。该控制器能够使船舶在约束条件下克服外界扰动, 到达并保持期望位置。以一艘供给船为研究对象验证了算法的有效性。

**关键词:** 动力定位模拟器; 模型预测控制; 约束; 扰动

中图分类号: U666.158      文献标识码: A      文章编号: 1004-731X (2016) 10-2620-06

## Application of Model Prediction Control in Ship Dynamic Positioning Simulator

Qian Xiaobin, Yin Yong, Zhang Xiufeng, Sun Xiaofeng

(Lab. of Marine Simulation and Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** According to the requirement of ship Dynamic Positioning simulator control simulation system, a model predictive control scheme was proposed for DP simulator with the proportional integrator. Ship Dynamic Positioning simulator was mainly used for training and competency assessment of DP operator. At present, DP Simulator mainly depends on imports and there is no domestic DP simulator with independent intellectual property rights. Dynamic Positioning controller is one of the key technologies, which determines the performance of DP simulator. Considering the unknown slowly-varying marine environment disturbance and vessel constraints, a dynamic positioning controller was designed based on the model predictive control with proportional integrator. The controller could overcome the environment disturbance by the constrained force to reach and maintain the desired position and heading. The simulation experiments verify the effectiveness of the proposed algorithm.

**Keywords:** dynamic positioning simulator; model predictive control; constrains; disturbance

## 引言

动力定位(Dynamic Positioning, DP)船舶已经被广泛应用于海洋油气开发、海底管道铺设等海洋

工程领域。而船舶动力定位模拟器主要用于动力定位操作人员的培训和适任评估<sup>[1]</sup>。目前国内尚未具有自主知识产权、功能完备且符合挪威船级社要求的船舶动力定位模拟器, 主要依赖于国外进口。船舶动力定位模拟器作为一种介于理论研究和实际应用的闭环控制仿真系统, 其通过虚拟现实技术来模拟动力定位系统的功能和操作环境, 主要关键技术包括: 船舶运动数学模型、数据处理与滤波技术、



收稿日期: 2016-05-28      修回日期: 2016-07-11;  
基金项目: 国家 863 计划(2015AA016404), 海洋公益性行业科研专项(201505017-4), 中央高校基本科研业务费(3132016310);  
作者简介: 钱小斌(1989-), 男, 浙江嵊州, 博士生, 研究方向为交通信息工程和控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 2620 •

动力定位控制算法、推力分配算法、三维视景显示技术、计算机网络技术等, 而动力定位控制算法是动力定位模拟器的关键技术之一。

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC) 自上世纪 70 年代问世以来, 已经从最初在工业过程中应用的启发式控制算法发展成为一个具有丰富理论和实践内容的新的学科分支, 先后出现了动态矩阵控制、广义预测控制、滚动时域控制、双模预测控制等不同的算法<sup>[2-3]</sup>。模型预测控制算法的优势在于能够通过不断地预测和优化未来的动态行为显式地处理多变量约束的控制问题。目前, 国内对模型预测控制算法在动力定位系统的应用研究已取得了一些初步成果。文献[4]设计了卡尔曼滤波算法和动态矩阵控制算法相结合的动力定位控制器。文献[5]提出了基于线性核函数在线支持向量回归的模型预测控制方法。文献[6]采用鲁棒双模滚动时域控制器研究动力定位控制系统的高层控制模块的设计问题。文献[7]采用微分几何的方法设计了非线性模型预测控制。但上述文献均未给出非零值或零均值海洋环境扰动下动力定位控制效果。

针对船舶动力定位模拟器中控制系统的设计需求, 以一艘海洋支持船舶为研究对象, 设计了比例积分(Proportional Integral, PI)控制和模型预测控制相结合的船舶动力定位控制器。该控制器能够克服未知缓慢变化的海洋环境扰动对船舶的影响, 从而使船舶保持在期望位置和艏向。

## 1 问题的描述

动力定位船舶在海面上的运动模型可分为低频运动模型和高频运动模型。低频运动模型是船舶受到低频风、二阶波浪力以及海流等外界环境扰动所产生的低频运动, 而高频运动模型是船舶受到高频风和一阶波浪力的影响所产生的高频运动。为节省燃油消耗和推进设备的磨损, 控制器的设计通常只考虑动力定位船舶低频运动下的动力定位问题<sup>[8]</sup>。DP 船舶在自动位置和航向保持工作模式下只考虑纵荡、横荡和艏摇 3 个自由度的水平运动, 且运动

速度较小。如图 1 所示, 向量  $\eta = [x, y, \psi]^T$  表示船舶在北东坐标系  $O_0X_0Y_0$  下的位置和航向, 向量  $v = [u, v, r]^T$  表示船舶在随船坐标系下的水平运动速度和艏摇角速度, 则动力定位船舶在海面上低频运动的数学模型表示为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= \mathbf{R}(\psi)v \\ \mathbf{M}\dot{v} + \mathbf{D}v &= \tau + \tau_E \end{aligned} \quad (1)$$

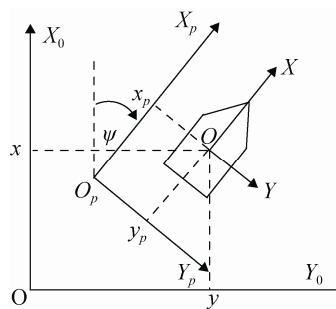


图 1 船舶运动参考坐标系

式中:  $\mathbf{M}$  为含附加质量的惯性矩阵, 是可逆且正定的。 $\mathbf{D}$  为线性的阻尼矩阵, 也是正定的。 $\tau$  表示推进器实际产生的推力,  $\tau_E$  是未知的扰动项, 代表缓慢变化的风浪流等环境扰动对船舶的干扰力和力矩。 $\mathbf{R}(\psi)$  为旋转矩阵, 表示为

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在自动位置和航向保持的工作模式下, 船舶首向变化很小, 可应用小角理论, 引入船体平行坐标  $O_pX_pY_p$ , 得到线性化的低频状态空间表达式:

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &= \mathbf{A}_c x_m + \mathbf{B}_c u + \mathbf{E}_c \omega \\ y &= \mathbf{C}_c x_m \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $x_m = [\eta_p^T, v^T]^T$  表示当前状态,  $y$  为当前位置和航向的输出,  $u$  为控制输入, 即  $u = \tau$ ,  $\omega$  表示未知、缓慢变化的海洋环境对船舶的恒值扰动力和力矩。各矩阵系数为:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_c &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ 0 & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_c = [0, \mathbf{M}^{-1}]^T \\ \mathbf{E}_c &= [0, \mathbf{M}^{-1}]^T, \quad \mathbf{C}_c = [\mathbf{I} \quad 0] \end{aligned} \quad (4)$$

针对式(3)所表示的系统, 本文采用了模型预

测控制算法来设计动力定位控制器,并引入积分环节,使动力定位船舶能够克服未知缓变的海洋环境扰动,到达并保持在指定位置  $\eta_d = [x_d, y_d, \psi_d]^T$ 。

## 2 基于状态空间模型的预测控制简介

模型预测控制利用过程模型预测系统在一定控制作用下未来的动态行为,并根据给定的约束条件和性能要求滚动地求解当前的最优控制,在每一步通过检测实时信息修正对未来动态行为的预测,可归纳为预测模型、滚动优化和反馈修正 3 个步骤<sup>[3]</sup>。

预测模型只强调模型的功能而不强调其结构形式,可用传递函数、阶跃响应、脉冲响应作为预测模型。近年来,预测控制吸收了现代控制理论的经验,研究人员趋向于直接采用状态空间模型来设计预测控制律。离散化的状态空间模型表示如下:

$$\begin{cases} x_m(k+1) = A_d x_m(k) + B_d u(k) + E_d \omega \\ y(k) = C_d x_m(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $x_m(k)$  表示第  $k$  时刻的系统状态;  $u(k)$  为系统的输入;  $y(k)$  为第  $k$  时刻的系统输出;  $\omega$  为缓慢变化的外界恒值扰动项;  $A_d$ 、 $B_d$ 、 $C_d$  和  $E_d$  为常数系统矩阵。

根据式(5)可得到

$$\begin{cases} \Delta x_m(k+1) = A_d \Delta x_m(k) + B_d \Delta u(k) \\ y(k+1) = C_d A_d \Delta x_m(k) + y(k) + C_d B_d \Delta u(k) \end{cases} \quad (6)$$

令  $x(k) = [\Delta x_m(k) \quad y(k)]^T$ , 引入积分环节,从而离散系统(6)得到一个含有积分器的增广状态空间模型,其消去了缓变的恒值扰动项,可表述如下<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别表示常数的增广矩阵系数,表示如下:

$$A = \begin{bmatrix} A_d & 0_{6 \times 3} \\ C_d A_d & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_d \\ C_d B_d \end{bmatrix}, C = [0_{3 \times 6} \quad I_{3 \times 3}] \quad (8)$$

根据式(7)预测未来  $N_c$  个控制时域下的  $N_p$  个系统输出 ( $N_c \leq N_p$ ):

$$\begin{aligned} y(k+1|k) &= CAx(k) + CB\Delta u(k) \\ y(k+2|k) &= CA^2x(k) + CAB\Delta u(k) + CB\Delta u(k+1) \\ &\vdots \\ y(k+N_p|k) &= CAx(k) + \sum_{i=1}^{N_p} CA^{N_p-i} B\Delta u(k_i + i - 1) \end{aligned} \quad (9)$$

用矩阵表述为:

$$Y = Fx(k_i) + \Phi\Delta U \quad (10)$$

式中:

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1) \end{bmatrix} Y = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ \vdots \\ y(k+N_p|k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0_{3 \times 3} & \cdots & 0_{3 \times 3} \\ CAB & CB & \cdots & 0_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}$$

与最优控制理论相似,模型预测控制求解最优系统输入的性能指标也采用二次型目标函数作为优化性能指标,同时考虑系统未来的输出参考轨迹  $R_s$ , 以系统的控制增量  $\Delta U$  表示二次目标函数<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} \min J &= (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U = \\ &= (R_s - Fx(k))^T (R_s - Fx(k)) + \cdots \\ &= (\Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U - 2\Delta U^T \Phi^T (R_s - Fx(k)))_{QP} \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\bar{R}$  为控制增量  $\Delta U$  的权重;  $\Phi^T \Phi + \bar{R}$  为 Hessian 矩阵,  $R_s = [I_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad \cdots \quad I_{3 \times 3}]^T r_s$ ,  $r_s$  为对角阵。

在无约束条件下,未来的最优控制输入为:

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (13)$$

选择第 1 个控制输入作为系统输入:

$$\Delta u(k) = P\Delta U \quad (14)$$

其中  $P = [I \quad 0 \quad \cdots \quad 0]$ 。

因而可得到下一时刻的控制输入为:

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k) \quad (15)$$

然而被控系统往往受到一定条件的约束,可分为硬约束和软约束,其中硬约束包括输入增量  $\Delta u^{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u^{\max}$  和输入幅值  $u^{\min} \leq u(k) \leq u^{\max}$  的约束,而软约束一般为系统的输出范围的约束  $y^{\min} \leq y \leq y^{\max}$ , 用  $\Delta U$  分别表示如下<sup>[10]</sup>:

控制增量约束:

$$\begin{bmatrix} -P \\ P \end{bmatrix} \Delta U \leq \begin{bmatrix} -\Delta u^{\min} \\ \Delta u^{\max} \end{bmatrix} \quad (16)$$

输入幅度约束:

$$\begin{bmatrix} -P \\ P \end{bmatrix} \Delta U \leq \begin{bmatrix} -u^{\min} + u(k-1) \\ u^{\max} - u(k-1) \end{bmatrix} \quad (17)$$

输出范围约束:

$$\begin{bmatrix} -P \\ P \end{bmatrix} \Delta U \leq \begin{bmatrix} -u^{\min} + u(k-1) \\ u^{\max} - u(k-1) \end{bmatrix} \quad (18)$$

从而, 式(12)、(16)、(17)和(18)构成了一个关于  $\Delta U$  的标准二次规划问题。

### 3 动力定位控制器设计

将模型预测控制应用于动力定位模拟器的设计原理如图 2 所示。船舶运动仿真系统根据自身推力和环境扰动实时求解船舶的运动状态, 控制器获取低频运动的船舶运动状态信息, 并通过推力分配得到各个推进器的推力来控制船舶的运动。本文采用模型预测控制算法设计动力定位控制器, 该控制器只考虑船舶在海面上低频运动的控制, 且假定所有状态可测, 同时将海洋环境扰动量设定为恒定且未知的。

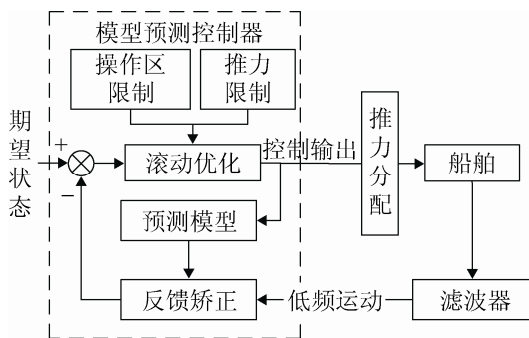


图 2 DP 模拟器中模型预测控制器设计原理

采用基于状态空间模型的预测控制算法来设计动力定位控制器的步骤如下:

- 1) 设定船舶的位置和艏向的初始值和期望值, 以及船舶运动的操作区和推力幅度的限制;
- 2) 将式(3)以时间步长  $h$  进行离散化, 得到离散化的状态空间方程, 同时引入积分环节, 得到离

散的增广状态方程;

3) 获取当前  $k$  时刻的船舶低频运动状态信息, 根据增广状态空间模型建立未来  $N_c$  个控制输入下的  $N_p$  个输出的预测模型;

4) 定义优化目标函数, 根据限制条件, 实时解算由式(12)、(15)、(16)和(17)构成的二次规划函数, 得到  $k$  时刻的控制增量, 从而计算得到  $k+1$  时刻的最优控制输出, 进行滚动优化;

5) 根据反馈的船舶运动状态信息直接作为用于计算的状态值, 返回第 3 步重新预测。

在实际运算过程中, 第 3 步中  $F$ 、 $\Phi$ 、 $\Phi^T \Phi$ 、 $\Phi^T F$  以及  $\Phi^T R_s$  为离线计算参数, 而第 4 步需在线求解, 因而单步计算时长主要取决于二次规划问题的求解速度, 本文采用 Hildreth 法求解二次规划问题<sup>[10]</sup>。

此外, 设计的过程中应合理地选择控制参数 ( $N_p$ 、 $N_c$ 、 $\bar{R}$ ), 其中预测时域  $N_p$  影响控制的稳定性和快速性, 当  $N_p$  较小时, 动态响应较快, 但稳定性和鲁棒性较差, 当  $N_p$  较大时, 稳定性, 动态响应较为缓慢; 而控制时域  $N_c$  表示其控制能力, 其值小于预测时域, 但  $N_c$  过大时, 控制系统稳定性下降; 控制权重  $\bar{R}$  影响控制增量  $\Delta u$  的变化, 较小的  $\bar{R}$  值可抑制控制量的剧烈变化。

### 4 仿真与实验结果

为验证模型预测控制算法应用在动力定位模拟器中的有效性, 以一艘动力定位供给船为实验对象, 进行了仿真实验。该供给船的船长 76.1 m, 船宽 18.8 m, 无因次惯性矩阵和阻尼矩阵分别为<sup>[11]</sup>:

$$M'' = \begin{bmatrix} 1.1274 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 1.8902 & -0.0744 \\ 0.0000 & -0.0744 & 0.0308 \end{bmatrix}$$

$$D'' = \begin{bmatrix} 0.0358 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.1183 & -0.0124 \\ 0.0000 & -0.0041 & 0.0308 \end{bmatrix}$$

仿真实验所设置的参数值如表 1 所示, 船舶的



起始位置是  $\eta = [0\text{ m } 0\text{ m } 0^\circ]^T$ ，期望位置为  $\eta_d = [10\text{ m } 10\text{ m } 10^\circ]^T$ ；环境扰动设置为：

$$\tau_E = \begin{bmatrix} -11.5 + 20.2\sin(0.02t)\text{kN} \\ 115 + 20\sin(0.02t)\text{kN} \\ 762 + 600\sin(0.02t)\text{kN}\cdot\text{m} \end{bmatrix}$$

其相当于 4 级海况下作业；仿真时间为 500 s，实验结果如图 3 和图 4 所示。

表 1 动力定位船舶的参数和初始化条件

仿真参数	设置值
初始位置和艏向	$[0\text{ m } 0\text{ m } 0^\circ]^T$
期望位置和艏向	$[10\text{ m } 10\text{ m } 10^\circ]^T$
纵向力限制	-1 000 kN~1 000 kN
横向力限制	-300 kN~300 kN
艏摇力矩限制	-7 620 kN·m~7 620 kN·m
控制时域	10
预测时域	150
仿真步长	0.5 s
仿真时间	1 000s

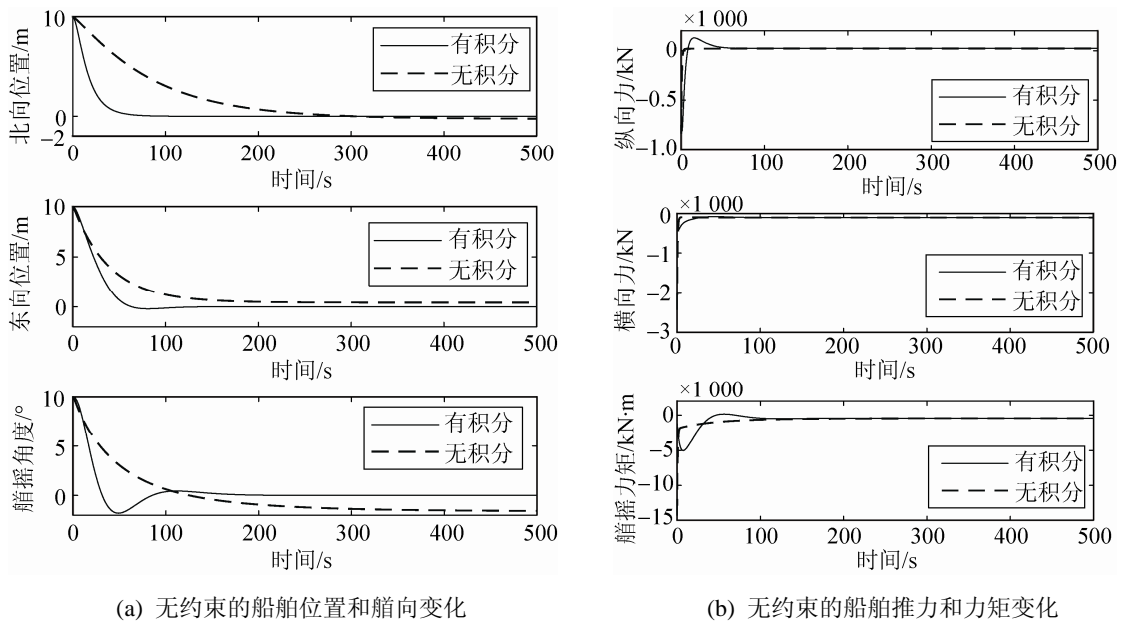


图 3 无约束的仿真结果

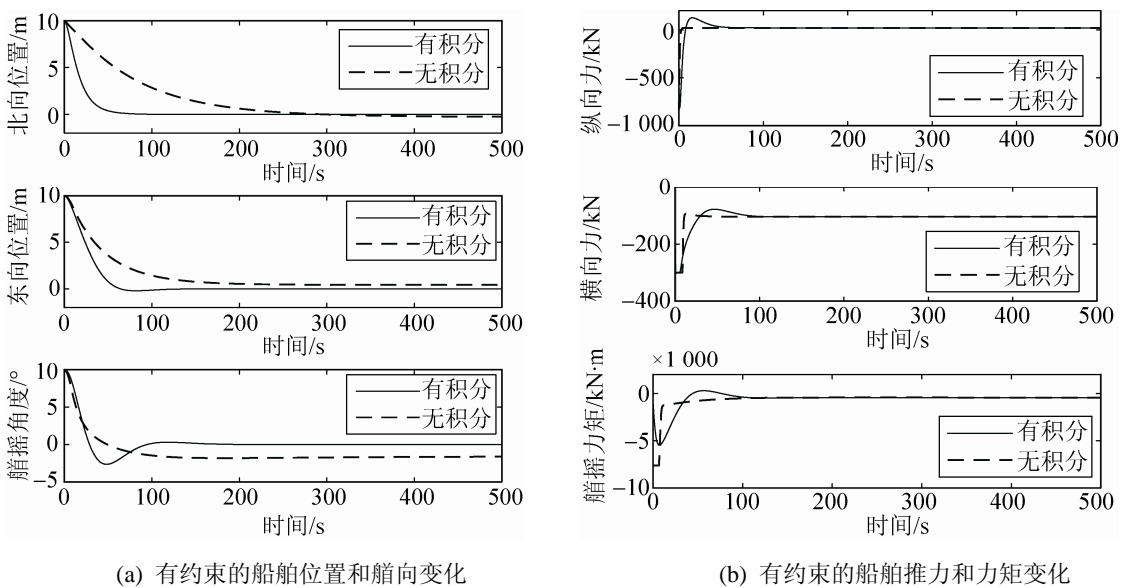


图 4 有约束的仿真结果

从图 3 和图 4 可以看出, a) 所设计的含有积分器的模型预测控制器在有、无约束条件下均能使船舶到达期望位置和艏向, 且系统动态响应较快; 在 0 s~60 s, 系统输出能够快速到达期望值附近, 60 s~80 s 期间, 船舶位置和首向变化缓慢并逐渐到达期望值, 80 s 后到达期望值并保持不变; 同时船舶推力受到限制时, 船舶的纵向力和横向力达到边界并保持一段时间, 然后缓慢变化并保持在与环境扰动值相反的状态, 克服了恒值海洋环境扰动; b) 而没有积分环节的模型预测控制算法虽然能够克服恒值海洋环境扰动并保持在一定的位置和艏向, 但并不能到达实验所设定的期望值。

因此, 本文所设计的船舶动力定位预测控制器控制性能效果较好, 系统动态响应较快, 引入积分环节后, 控制器能够克服海洋环境对船舶的扰动力和力矩, 使船舶保持在期望位置和艏向。

## 5 结论

本文根据船舶动力定位模拟器的开发需求, 设计了基于模型预测控制的船舶动力定位控制器。针对带有未知缓变扰动且执行机构受限的船舶动力定位系统, 基于线性化的状态空间模型, 提出了含有 PI 控制器的模型预测控制算法, 并将该算法应用于船舶动力定位模拟器的控制仿真系统中。最后以一艘供给船为研究对象验证了算法的有效性。下

一步的研究, 将对动力定位观测器、推力分配等进行研究, 实现动力定位控制系统的全部功能, 最终开发出具有自主知识产权的船舶动力定位模拟器。

## 参考文献:

- [1] Nautical Institute. Dynamic Positioning Operator's Training and Certification Scheme [M]. UK: Nautical Institute, 2014.
- [2] Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology [J]. Control Engineering Practice (S0967-0661), 2003, 11(7): 733-764.
- [3] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制-现状与挑战 [J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
- [4] 王元慧. 模型预测控制在动力定位系统中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [5] 邓志良, 胡寿松, 张军峰. 船舶动力定位系统的在线模型预测控制 [J]. 中国造船, 2009, 50(2): 87-96.
- [6] 刘芙蓉. 半潜船动力定位控制系统建模和仿真研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [7] 隋玉峰. 非线性模型预测控制在动力定位中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [8] Fossen T. Guidance and Control of Ocean Vehicles [M]. New York, USA: Wiley, 1994.
- [9] Fossen T I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control [M]. UK: Wiley, 2011: 199-213.
- [10] Liuping Wang. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB [M]. Germany: Springer, 2009.
- [11] Fossen T I, Sagatun S I. Identification of dynamically positioned ships [J]. Journal of Control Engineering Practice (S0967-0661), 1996, 4(2): 369-376.
- [12] (S1546-1955), 2015, 6(12): 1058-1063.
- [13] de Zelicourt D, Pekkan K, Kitajima H, et al. Single-step stereolithography of complex anatomical models for optical flow measurements [J]. Journal of Biomechanical Engineering-Transactions of the ASME (S0148-0731), 2005, 127(1): 204-207.
- [14] Cooke M N, Fisher J P, Dean D, et al. Use of stereolithography to manufacture critical-sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth [J]. Journal of Biomedical Materials Research part B-applied Biomaterials (S1552-4981), 2003, 64B(2): 65-69.
- [30] I R M S, N F M. Fundamentals of Stereolithography, a Useful Tool for Diagnosis in Dentistry [J]. Odovtos-International Journal of Dental Sciences (S2215-3411), 2015, 2(17): 13-19.
- [31] Z Z, S J. An improved slicing algorithm with efficient contour construction using STL files [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2015, 5-8(80): 1347-1362.
- [32] W X, W Q, T Z. An Algorithm Based on Layered Slice for Surface Projection Profile Path of Hot Cutting [J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience

(上接第 2619 页)