文章编号: 1000-8152(2011)11-1525-09

动力学效应的动力定位船舶模型在线辨识算法

倪 菲^{1,2}, 赵言正¹, 叶 军², 朱 婷²

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200215; 2. 上海振华重工(集团)有限公司, 上海 200125)

摘要:由于船舶模型的高度非线性以及外界干扰力、推进器推力的无法测量性,导致它们的在线辨识和估计显得 十分困难.本文提出一种以动力学效应为基础,应用无味卡尔曼滤波器(unscented Kalman filters, UKF)进行动力定 位船舶动力学模型、外界载荷以及推进器推力在线辨识的算法.此算法能够在动力定位过程中不断求解船舶模型 和其受到的载荷力,使得拥有这些参数的船舶模型和载荷所反映出的动力学效应不断逼近传感器检测到的运动反 馈.基于此原理,用这些参数作为名义上的船舶模型、外界力、推进器推力就能够完成高效、自适应的定位控制.通 过控制仿真,证明了此算法的有效性和正确性.

Online dynamic-model recognition for dynamically positioning vessel by dynamic effect

NI Fei^{1,2}, ZHAO Yan-zheng¹, YE Jun², ZHU Ting²

Shanghai Jiaotong University, School of Mechanical Engineering, Shanghai 200215, China;
 Shanghai Zhenhua Heavy Industry Co., Ltd, Shanghai 200125, China)

Abstract: Due to the nonlinearity in a vessel model, and the immeasurable disturbance force as well as thruster forces, it is difficult to recognize the vessel model online. An online vessel-model-recognition algorithm based on unscented Kalman filters(UKF) and dynamic effect is proposed. By solving the vessel model associated with external loading forces during dynamical positioning, this algorithm continuously generates the dynamic effect which approaches the sensor feedback. Based on this principle, an effective and adaptive position control can be performed by the nominal vessel model, external and thruster forces. Simulation results in position control validate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: vessel dynamic positioning; online vessel model recognition; unsent Kalman filter; dynamic effect

1 引言(Introduction)

动力定位系统是一种高新控制技术,其广泛地应用于船舶及海上浮式作业平台.它是一种闭环的控制系统,在不借助锚泊系统的情况下,不断检测出船舶的实际位置与目标位置的偏差,再根据外界风、浪、流等外界扰动力的影响计算出使船舶恢复到目标位置所需推力的大小,并对船舶上各推力器进行推力分配,使各推力器产生相应的推力,将船舶尽可能地保持在所要求的海平面位置^[1,2].在实际应用中,船舶受到的外界扰动力包括风力、一阶波浪力、二阶波浪力和流力.其中一阶波浪力引起的运动约为0.3~1.6 rad/s之间,称为高频运动.而风、流、二阶波浪以及推进器引起的力为低频力.一阶波浪力比推进器推力大一个数量级以上,而且是周期运动.因此用推力去抵抗一阶波浪力是无效的,也是没有必要的^[3,4].船舶模型参数包括了船舶质

量、船舶转动惯量、船舶附加质量和水动力导数.这 些参数能够通过船模实验或实船海试确定,但试验 工作非常复杂、成本极高. 根据目前的文献来看, 针 对以上问题,一种解决方法是通过数值计算结合模 型实验完成船舶模型的计算. 文献[5]应用三维线性 势流理论讨论了有限水深中三维浮体水动力系数 Green函数法计算二维水动力,将切片法用于有限 深水中船舶纵向运动和波浪载荷的计算,研究了水 深对其的影响. 文献 [7]利用三维线性势流理论, 在 频域里研究船舶在浅水中的辐射问题,应用三维源 汇分布法对不同水深下船舶运动的水动力系数,包 括附加质量和阻尼系数等进行了数值计算与分析. 另外一种方法是通过系统辨识的方法辨识这些参 数. 文献[8]提出一种以增广的状态方程和扩展卡尔 曼滤波算法进行船舶运动模型参数辨识的算法. 文

基金项目: 上海市科委人才计划博士后基金资助项目(10R21421600); 上海市浦东新区博士后基金资助项目(274.10S19).

收稿日期: 2010-09-06;收修改稿日期: 2010-12-08.

献[9]则提出了应用离线最速下降最优的辨识方法. 文献[10]则用卡尔曼滤波器设计和分析动力定位系统,从中发现了并解决了船舶动力定位过程中低频振荡的问题.文献[11]和文献[12]都对一阶波浪的频率参数进行了辨识,以滤除高频运动部分.它们提出一般情况下,卡尔曼滤波器在高频干扰下应该是次优输出,而应用其描述的算法进行滤波后就可得到最优输出.从文献的研究来看,研究主要集中于控制算法和外界波浪的建模,以使卡尔曼滤波器输出最优.而在船舶模型辨识研究中,主要是数值计算建模和离线辨识两种.而进行动力定位船舶模型和载荷的在线辨识研究所见不多,数值计算建模和离线辨识的建模方法在实用中会有很多问题:

1) 数值计算建模很复杂, 而且需要模型修正, 成 本高, 耗时长.

 离线辨识需要做实船试验并采集大量数据, 而且需要做特定轨迹运动,以提高辨识效率.这样会 导致整个辨识周期很长,工作量大,对水域要求较高.

3) 即使完成了上述计算和辨识,在实际应用中 它们还要面对几个很难解决的问题: a) 船舶的装载 变化.装载量大小和载荷分布变化都将使数值计算 建模和离线辨识结果无法使用. b) 工况影响.比如浮 吊在工作时,船舶的质量、惯量、重心都在变化,同 样这也将导致数值计算建模和离线辨识结果无法使 用. c) 推进器推力.海流不但会对船舶本身产生影 响,还会对推进器产生影响,流速和推进器推力方向 共同决定了作用在船身上的推进力.所以无论是建 模还是离线辨识都很难计算推进器推力. d) 海流速 度和方向辨识.与风速不同,流速的大小和方向都无 法用传感器测量,所以需要在线辨识海流的速度和 方向以提供给控制系统计算前馈力,这也是建模计 算和离线辨识无法完成的.

很明显,为了解决上述问题,就需要在线辨识船 舶参数和作用于船舶上的载荷.因此,本文提出了基 于动力学效应的动力定位船舶模型与载荷的在线辨 识算法解决上述问题.

2 系统框架(System framework)

动力定位控制系统可以分为4个主要部分:

1) 信号处理和滤波.信号处理和滤波主要是滤 除高频运动,以防止推进器对高频运动产生响应.为 了消除低通滤波器的滞后作用,一般会采用卡尔曼 滤波器来完成此任务.由于船舶模型的高度非线性, 用扩展卡尔曼滤波器(EKF)或UKF将更加适合此种 应用.

2) 控制算法. 控制算法通过传感器反馈的数据、设定位置、船舶模型和船舶载荷计算出使得船

舶回到设定位置的推进力.

3) 动力分配算法. 控制算法给出的是两个平面 正交推力和一个转矩, 动力分配算法就是要将这些 力分配到各个推进器上.

4)船舶模型和船舶载荷辨识.船舶模型包括了 各种水动力系数,水动力导数等.船舶外载荷包括: 风、二阶波浪力和流力;船舶内载荷包括了推进器 推力.

船舶动力定位控制系统框架如图1所示.



图 1 动力定位控制系统框图

Fig. 1 System frame of dynamic positioning

整个控制系统的核心是UKF滤波器. 此滤波器 主要完成以下5个任务:

根据船模型以及外力、推进力估计船舶的位置、艏向和速度.并通过估计值与实际测量值之间的差值进行船模型更新.

2) UKF在滤波的同时,进行流方向和速度的辨 识,并结合船模型的水动力参数估算流力.

3) 结合推进器反馈值和辨识模型计算推力值.

4) 结合风速仪测量的风速计算风力.

5) 将推力、风力、流力、船模型和估计值与测量 值之差提供给控制器.

根据上述描述可知,动力定位控制是一个非常复杂的系统辨识和控制的系统.其复杂性表现为:船模型本身的非线性并且难以计算;流速流向无法测量; 推进器推力很难测定(实际上,推力可以通过实验测定,但是流速和流向无法测量,导致推力无法修正). 本文以5000 t驳船的动力定位系统作为仿真实验目标,安装两个全回转推进器,如图2所示.前推进器 到DGPS天线的距离是29.6m,后推进器到天线的距离是25.6m,两个推进器都布置在船的中轴线上.

可将整个船舶模型参数以及其他参数定义列 于附表1. 由附表1可知: UKF输出为34个参数, 根据 此34个参数还能计算推进器推力、风力、二阶波浪 力和剩余外力等,未建模扰动力和力矩被假设为白 噪声.



图 2 动力定位船舶布置

Fig. 2 The layout of dynamic positioning vessel

另外,本文的研究对象是动力定位船舶的控制系统,因此工况满足以下条件:

1) 船舶处于低速状态, 速度低于1 m/s, 角速度低于0.6 (°) /s.

2) 动力定位过程中,外界风、浪、流是缓慢变化
 的.所以对于滤波器来说,风、二阶波浪力和流力都
 是定向载荷(并不一定是恒定值,但其变化较慢,则
 对于滤波器来说,就能够自适应辨识它们).

3 船舶低频运动的动力学模型(Vessel dynamic model of low frequency)

船舶动力定位动力学模型一般采用分离模型,即 高频运动和低频运动分别处理^[10].在动力定位过程 中,低频运动是主要用于建模和受控模型.因此根据 现有研究,将动力定位船舶的低频运动动力学模型 表达如下^[13]:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{\rm x} & 0 & 0 \\ 0 & m_{\rm y} & -m_{\rm xy} \\ 0 & -m_{\rm xy} & m_{\rm f} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{\rm y} v_{\rm r} \\ 0 & 0 & m_{\rm x} u_{\rm r} \\ m_{\rm y} v_{\rm r} - m_{\rm x} u_{\rm r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\rm r} \\ v_{\rm r} \\ r \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -m_{\rm x} r & 0 \\ m_{\rm y} r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\rm c} \\ v_{\rm c} \\ r \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} -d_{\rm x} |u_{\rm r}| & 0 & 0 \\ 0 & -d_{\rm y} |v_{\rm r}| & -d_{\rm xy} \\ 0 & -d_{\rm xy} & -d_{\rm f} |r| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\rm r} \\ v_{\rm r} \\ r \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{\rm tx} \\ \tau_{\rm ty} \\ \tau_{\rm tf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{\rm wx} \\ \tau_{\rm wf} \\ \tau_{\rm wf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{\rm x} \\ n_{\rm y} \\ n_{\rm f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{\rm x} \\ g_{\rm y} \\ g_{\rm f} \end{bmatrix}), \quad (1)$$

其中:

$$\tau_{\rm tx} = \tau_1 \cos t_{\rm 1a} + \tau_2 \cos t_{\rm 2a},$$

$$\tau_{\rm ty} = \tau_1 \sin t_{\rm 1a} + \tau_2 \sin t_{\rm 2a},$$

$$\begin{aligned} \tau_{\rm tf} &= \tau_1(\sin t_{1\rm a})t_{1\rm l} - \tau_2(\sin t_{2\rm a})t_{2\rm l}, \\ \tau_1 &= t_{1\rm f}t_{1\rm s}, \ \tau_2 &= t_{2\rm f}t_{2\rm s}, \ u_{\rm r} = u - u_{\rm c}, \\ \tau_{\rm wx} &= w_{\rm cu}w_{\rm s}^{-2}\cos w_{\rm a}, \ \tau_{\rm wy} = w_{\rm cv}w_{\rm s}^{-2}\sin w_{\rm a}, \\ \tau_{\rm wf} &= w_{\rm cf}w_{\rm s}^{-2}\cos(2w_{\rm a}), \ v_{\rm r} = v - v_{\rm c}. \end{aligned}$$

将式(1)中的参数都认为是待辨识变量,则可以 将其简写为

$$\dot{T}_0 = F_0(T_0),$$
 (2)

$$T_{0} = (u, v, r, m_{x}, m_{y}, m_{f}, m_{xy}, d_{x}, d_{y}, d_{f}, d_{xy},$$
$$t_{1s}, t_{1a}, t_{1l}, t_{1f}, t_{2s}, t_{2a}, t_{2l}, t_{2f}, w_{s}, w_{a},$$
$$w_{cu}, w_{cy}, w_{cf}, q_{x}, q_{y}, q_{f}, u_{c}, v_{c}).$$

将DGPS测出经纬度和电罗经测出的艏向加入 动力学模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_0 \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(T_0) \\ \cos f - \sin f & 0 \\ \sin f & \cos f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \end{bmatrix}.$$
 (3)

将式(3)简写为

$$\dot{\chi} = F(\chi), \tag{4}$$

其中:

$$\begin{split} \chi &= (u, v, r, m_{\rm x}, m_{\rm y}, m_{\rm f}, m_{\rm xy}, d_{\rm x}, d_{\rm y}, d_{\rm f}, d_{\rm xy}, \\ & t_{1{\rm s}}, t_{1{\rm a}}, t_{1{\rm l}}, t_{1f,} t_{2{\rm s}}, t_{2{\rm a}}, t_{2{\rm l}}, t_{2{\rm f}}, w_{\rm s}, w_{\rm a}, \\ & w_{\rm cu}, w_{\rm cv}, w_{\rm cf}, g_{\rm x}, g_{\rm y}, g_{\rm f}, u_{\rm c}, v_{\rm c}, x, y, f). \end{split}$$

式(4)中除了*u*,*v*,*r*,*x*,*y*,*f*外,其他变量都是缓慢 变化量,所以其导数都为0.式中推进器转速、方 位、推力系数和推进器到控制点距离都是待辨识变 量,而由它们计算出来的推力作为输入量处理.

4 基于动力学效应和UKF的船舶模型在 线辨识(The online vessel model recognition based on dynamics effect and UKF)

对于船舶运动这样的高度非线性系统,无味卡尔曼滤波器(unscented Kalman filter, UKF)具有天生优势. UKF对于线性系统可以达到传统卡尔曼滤波器相当的滤波精度,对于非线性系统则不需要进行线性化近似,可以达到比扩展卡尔曼滤波器(extended Kalman filter, EKF)更高的滤波估计精度,而且UKF对滤波参数不敏感,鲁棒性强.首先,根据式(4)将其离散化,得下面的公式进行无味卡尔曼滤波:

$$\chi_{k+1} = F(\chi_k, V_k), \tag{5}$$

 $Y_{k+1} = H(x_{k+1}, y_{k+1}, f_{k+1}, w_{a,k+1}, w_{s,k+1}, \eta_{k+1}),$ (6) 其中: V_k, η_k 分别为零均值正态不相关动力学状态噪 声向量和观测噪声向量(其协方差为Q 和R); Y_{k+1} 为 观测向量,这里能够测量的值包括:船舶的经度、纬度、艏向、相对风速、相对风向.式(5)是一个高度非线性的系统模型,本文是通过龙哥库塔法求解下一个状态.

UKF不仅要估计船舶的位置,还要辨识船舶的 各种参数(见附表1和式(4)),参数的辨识对船舶控制 来说是非常重要的.当然UKF的运行需要一个初 始的船舶动力学的数学模型作为基础,这个模型是 通过粗略计算得到,不需要很精确.但是应用本文 的算法UKF能够根据动力学效应,船模型的能够不 断纠正,向实际的运动响应逼近.随着时间的流逝, UKF中的船模型的不确定性会逐渐减少,而且这种 过程是自适应的.事实上,附表1中描述的各种参数 都是随时间变化的,而不是一个固定值.只要它们的 变化是缓慢的,则整个滤波器始终可以有效工作.

然而有个很重要的问题是:实际情况下,不仅作 用在船体上的推进器推力和外力是无法测量的,而 且船舶本身的水动力系数和水动力导数也很难直接 确定,这导致整个船模型的估计无法完成.这就需要 一种方法将外力和水动力参数等都折算到统一基础 上,这样就可避开推进器推力和外力的测量和计算.

上述问题,可以通过动力学效应来解决.想象如 下情景: 一个1000 kg的物体在1000 N的作用下, 在一 秒后移动到1m远的位置.而一个1kg的物体在1N的 作用下,在一秒后也移动到1m远的位置,毫无疑问, 这两个位置是重合的. 这说明了一个简单原理: 系统 的动力学模型只是运动和动力上的描述,而其内部 和外部力并不需要确切的知道. 从动力定位的角度 来理解此问题:用测量系统测量了船舶的位置,所以 船舶的动力学响应是确实的. 而推力和转速有简单 的线性或非线性关系(此关系式确定的), 假设这种 简单关系已知,然后通过上述滤波方法使得滤波器 内部船舶模型符合测得的动力学响应,那么就可以 认为此时滤波器内部的船舶模型参数、外力、推力 等是"正确的".这里的"正确"是指动力学响应上 正确,而不是说船舶的数学模型参数就一定是真实 值. 但本文并不关心滤波器内部的参数是否就是真 实值,只要其通过滤波器估计的位置、速度符合测 量值就可以了.

上述原理也可以简化为图3: 通过假设的推力 系数(推力), 计算船舶的内载荷; 通过风力系数、船 模型、风速、风向等计算风力大小; 通过估计的流 速、流向和船模型计算流力大小. 将这些力施加在 船舶模型上, 并根据船舶的上一个状态, 可计算预 测的船舶响应: Ŷ_{k+1}将此响应与传感器测量到的响 应Y_{k+1}进行比较, 就得到了一个差值:

$$e = Y_{k+1} - \hat{Y}_{k+1}.$$
 (7)

用此差值修正推力系数、船模型、风力系数、流速、流向等,使得此差值为最小.实际上,上述流程是一个典型的UKF滤波过程,只是在推力和外力上应用了假设值.而且流程中隐含了一个转换关系:将推力、外力以及船舶模型等折算到了转速上(推力和外力折算到转速上比较好理解,但船舶模型折算到转速上比较难以理解,它们之间的关系并不十分清晰和直观).也可以理解为在某个转速下的推力能够抵抗外力,使目前的船舶模型产生怎样的运动响应.因此,笔者并不关心具体的推力和外力是多少,只要它们的关系能够使船舶产生符合传感器测量值的响应,而这个不断贴合的过程就是卡尔曼滤波过程,从而不断修正附表1中的各个参数.



图 3 动力定位的动力学效应和卡尔曼滤波原理 Fig. 3 The principle of dynamics effect and Kalman filter of dynamic positioning

所以,通过卡尔曼滤波器辨识出来的值(除去能 通过传感器测量到的5个值)都并非其实际值,而是 能够满足动力学响应的值.这样在做控制的时候,就 能够直接用这些滤波器辨识出来的参数作为控制参 数,这就是基于动力学效应的船舶动力定位在线系 统辨识的核心所在.

5 动力定位控制仿真(The control simulations of dynamic positioning)

为了验证上节理论的正确性,就需要进行仿真分析.这需要加入控制器、动力分配模块和推进器响应模型.下面将分别讨论它们.

5.1 线性二次型调节器控制模型(LQR model)

二次调节器是最优控制理论中的一种最广泛的 应用.根据式(4)可知船舶的动力学模型是非线性的, 但是可以将其简化为如下非线性系统:

$$\dot{x} = Ax + B\tau, \tag{8}$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix},$$
$$A_1 = \begin{bmatrix} -M_1^{-1}D_1 & 0 \\ T & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} M_1^{-1} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{split} M_{1} &= \begin{bmatrix} m_{\mathrm{x}} & 0 & 0 \\ 0 & m_{\mathrm{y}} & -m_{\mathrm{xy}} \\ 0 & -m_{\mathrm{xy}} & m_{\mathrm{f}} \end{bmatrix}, \\ D_{1} &= \begin{bmatrix} -d_{\mathrm{x}} & 0 & 0 \\ 0 & -d_{\mathrm{y}} & -d_{\mathrm{xy}} \\ 0 & -d_{\mathrm{xy}} & -d_{\mathrm{f}} \end{bmatrix}, \\ A_{2} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{q_{\mathrm{x}}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{q_{\mathrm{y}}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{q_{\mathrm{f}}} \end{bmatrix}, \\ B_{2} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{q_{\mathrm{x}}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{q_{\mathrm{y}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{q_{\mathrm{f}}} \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} \cos f - \sin f & 0 \\ \sin f & \cos f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ x &= \begin{bmatrix} u & v & r & x & y & f & \tau_{\mathrm{tx}} & \tau_{\mathrm{ty}} & \tau_{\mathrm{tf}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \\ \tau &= \begin{bmatrix} \tau_{\mathrm{cx}} & \tau_{\mathrm{cy}} & \tau_{\mathrm{cf}} \end{bmatrix}, \end{split}$$

*q*_x,*q*_y,*q*_f分别为推进器在Surge, Sway和Yaw方向上的一阶响应时间常数; *τ*_{cx},*τ*_{cy},*τ*_{cf}为根据式(8),通过 二次型调节器给出的3个方向上的推力和力矩的指 令值.显然,推进器被简化为一个一阶系统,这样的 简化是十分有效的,一般来说推进器都处于伺服控 制下,超调比较小.而时间常数的具体数值视推进器 性能而定,一般取为全回转推进器方位角转动的时 间常数即可.由于T的存在导致了整个系统的非线 性,但是本文可以将其离散化,每次迭代都重新计算 矩阵A.以上描述的是没有考虑到风、浪、流的控制 模型,如果要实现高效的控制,就必须将这些外界扰 动力作为前馈进入控制系统.根据式(4)的描述,可以 得到以下前馈力:

风力:

$$\tau_{\rm wx} = w_{\rm cu} w_{\rm s}^2 \cos w_{\rm a}, \ \tau_{\rm wy} = w_{\rm cv} w_{\rm s}^2 \sin w_{\rm a},$$
$$\tau_{\rm wf} = w_{\rm cf} w_{\rm s}^2 \cos(2w_{\rm a}).$$

流力:

$$\begin{bmatrix} \tau_{\rm ux} \\ \tau_{\rm uy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_{\rm x} & 0 \\ 0 & -d_{\rm y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\rm r} \\ v_{\rm r} \end{bmatrix},$$

其中 τ_{ux} , τ_{uy} 分别为流在船舶的艏向和舷向产生的力. 二阶波浪力为 g_x , g_y , g_f .

因此,最后得到的指令力是根据式(9)计算出的 反馈力、风力、流力和二阶波浪力的和值.整个控制 系统如图4所示.

$$\begin{bmatrix} \tau_{\rm cfx} \\ \tau_{\rm cfy} \\ \tau_{\rm cff} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{\rm cx} \\ \tau_{\rm cy} \\ \tau_{\rm cf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{\rm wx} \\ \tau_{\rm wy} \\ \tau_{\rm wf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{\rm x} \\ g_{\rm y} \\ g_{\rm f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{\rm ux} \\ \tau_{\rm uy} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中_{7cfx}, _{7cfy}, _{7cff}分别为最终给动力分配模块的船 舶3个方向上的指令力和力矩.



图 4 动力定位控制算法框图

Fig. 4 The principle of dynamics effect and Kalman filter of dynamic positioning

5.2 用非线性优化方法进行动力分配(Power distribution based on nonlinear optimization)

接下来的问题就是如何将 τ_{ex} , τ_{cy} , τ_{cf} 分配到前 后两个推进器上. 这就需要通过动力分配完成推进 器的指令分配. 一般来说方位角的时间常数要比旋 转响应的时间常数大, 所以最好的情况是方位角的 旋转要越小越好. 同样也需要消耗的能量越小越好. 这样就可以构成以下的最优化设计:

$$J = \min(|t_{1cs}| + |t_{2cs}| + 10 |t_{1ca} - t_{1ca0}| + 10 |t_{2ca} - t_{2ca0}|),$$
(10)
s.t.
$$\begin{cases} t_{1cs} < \max \text{speed}, \ t_{2cs} < \max \text{speed}, \\ t_{1ca} \notin \text{deadzone}, \ t_{2ca} \notin \text{deadzone}, \\ \tau_{cx} = t_{1f} t_{1cs} \cos t_{1ca} + t_{2f} t_{2cs} \cos t_{2ca}, \\ \tau_{cy} = t_{1f} t_{1cs} \sin t_{1ca} + t_{2f} t_{2cs} \sin t_{2ca}, \\ \tau_{cf} = t_{1f} t_{1cs} (\sin t_{1ca}) t_{1l} - t_{2f} t_{2cs} (\sin t_{2ca}) t_{2l}, \end{cases}$$
(11)

其中: t_{1cs} , t_{2cs} 分别为前后推进器的指令转速; t_{1ca} , t_{2ca} 分别为前后推进器的指令方位角; t_{1ca0} , t_{2ca0} 分别为前后推进器的前一次的指令方位角; maxspeed 为推进器最大转速, deadzone为推进器方位无法达到的死角.

5.3 控制仿真(Control simulation)

仿真实验包括以下几个主要部分,如图5所示.

 环境模拟.环境模拟包括:风速、风向模拟; 二阶波浪力模拟;洋流速度和方向模拟以及一阶波 浪力模拟.其中一阶波浪力是采用白噪声通过一个 成型滤波器产生船舶的高频运动^[13].

2)船舶动力学模型.船舶动力学模型包括低频 模型和高频模型.低频模型是基于式(4)的微分方程 解算.高频模型的运动直接叠加在低频模型上,从而 产生船舶的总运动.

3) 传感器模拟. 传感器模拟是将船舶动力学模型得到的响应叠加上测量白噪声以及加上各种传感器的时间标记传递给滤波和控制器.

4) 滤波器、控制器和动力分配.滤波器是本文的 讨论重点,通过第4节的滤波方法,得到船舶模型.再 用第5节的控制算法得到指令力,将指令力送入动力 分配中,产生对推进器的指令值从而最终作用在船 舶低频模型上.

5) 用户UI. 用户UI的图表输出功能可以图形化 的显示船舶的运动和滤波器以及控制器的各种参数. 而参数设定功能主要完成目标经纬度和艏向的 设定, 以及各种滤波器参数设定.

下面为仿真计算设定环境:

风速: 7~10 m/s;风向: 20° to True North; 流速:

0.8~1.1 m/s; 流向: 55°~65° to True North; 波浪 谱主频率: 0.5 rad/s; Pith和Roll频率: 0.5 rad/s; 前推 进器到天线位置: 29.6 m; 后推进器到天线位置: 25.6 m; GPS天线到前推进器位置: 6.1 m; MRU垂直 安装; 电罗经水平安装; DGPS传输协议: GGA, GST, VTG; DGPS更新频率: 1 Hz; MRU传输协议: PSXN; MRU更新频率: 10 Hz; 风速仪传输协议: MWV; 风速 仪更新频率: 10 Hz; 电罗经传输协议: HDT; 电罗经 更新频率: 15 Hz; 推进器反馈协议: 自定义; 推进器 反馈更新频率: 1 Hz; 推进器指令协议: 自定义; 推进



Fig. 5 The frame of control simulation of dynamic positioning

而船舶的参数和滤波器船舶参数初始值如表1所示: 定位控制的好坏可以通过判断3个指标: 1) 船舶目前的位置和目标位置之间的距离d_p; 2) 船舶目前 艏向和目标艏向之间的角度d_d; 3) 推进器在定位持续过程中转速和方位角的稳定性. 此稳定性的直观 意义就是推进器的转速和方位角应该尽量保持小的 变化, 这将极大减少推进器的机械和能量损耗.

控制仿真数据如图6所示.为了验证整个系统的在线辨识和自适应性,在定位控制开始后,仿 真将经过7个过程(见图6).在进入定位控制前,需 要3~4 min的船舶模型稳定期.无论定位控制开始与 否,整个滤波器都在运作,不断计算船舶模型.在定 位控制开始后,则控制器开始计算指令推力,并发送 给动力分配模块计算出推进器指令转速和方位角. 下面详细描述这7个过程: ① 定位控制开始. 定位控制开始时需要设定目标位置和艏向,这个设定可以通过手动输入. 为了方便,本文将定位控制开始时的船舶位置和艏向作为定位目标,此时目标艏向为83.6363°. 定位控制开始3 min左右,进入维持阶段,船舶基本稳定在目标值上(图6(a)(b));推进器输出稳定(图6(f)(g)).

② 目标位置改变.在750s左右的,目标位置被 重新设定,新的目标位置距离目前船舶位置的距离 是37m.船舶开始向新的目标位置靠近,推进器产生 相应响应,方位角和转速都有较大变化.

③ 目标艏向改变. 在800 s左右, 船舶还未达到 新目标位置时, 目标艏向被重新设定. 新的目标 艏向为113.8999°. 滤波器和控制器开始新的响应, 船舶在靠近目标位置的同时调整艏向. 在大概 1050 s的时候, 船舶到达新的目标位置和艏向, 定 位控制进入维持阶段,推进器输出稳定,由于风和流 相对艏向角度变大,推进器输出转速明显增加.

④ 风速改变. 在1220 s左右, 风速开始变化, 从 4 m/s逐渐增加. 到1400 s时, 风速达到了11 m/s. 同时 推进器推力略有上升, 船舶位置始终保持在设定位 置上, 说明滤波器能够及时对外界风力的变化产生 自适应的外力辨识评估.

⑤ 船舶质量改变.在1550~1800s之间,船舶的 质量由5000 t逐渐变化到6100 t.这也同时导致水动 力系数和水动力导数的改变,由图6可看出,船舶依 然保持在设定位置上,这说明滤波器和控制器能够 很好的适应新的质量,推进器推力变化不大,这主 要是因为在维持定位阶段船舶的速度、加速度很低, 几乎接近于零,见图6(c)(d)(e).

⑥ 流向改变. 在1950~2140 s之间, 流向逐渐由 北向65°变化到北向55°. 流向的变化, 导致流向和艏 向之间夹角变大, 从而横流增大, 导致推进器转速有 所增加. 但船舶保持在设定位置上, 变化不大.

⑦ 流速变化. 在2235~2440 s之间时, 流速由 0.8 m/s逐步加大到1.1 m/s. 由图6看出, 流速的改变 导致船舶位置稍微变化, 变化幅度不超过1.5 m. 基 本上还是保持在设定位置上. 流速增加, 使船舶上的 流力增加, 从而推进器转速有明显增加.

表1仿	真船舶参数和滤波器船舶参数初始值
Table 1 7	The parameters of simulated vessel and the
N	vessel initial value in filter

	船舶模型参数	船舶参数初始值
$u_{\rm c}/({\rm m}\cdot{\rm s}^{-1})$	0.693	0
$m_{ m x}$ / kg	4.40E + 06	$3.00\mathrm{E} + 06$
$m_{\rm f}$ / (kg·m ²)	$1.84\mathrm{E} + 09$	$1.50\mathrm{E} + 09$
$d_{\rm x}$ / (kg·s ⁻¹)	$-2.00\mathrm{E}+05$	$-1.00\mathrm{E} + 05$
$d_{\rm f}$ / (kg·m ² · s ⁻¹)	-1.30E + 08	-1.00E + 08
$w_{\rm cu}/({\rm N}{\cdot}{\rm m}^{-2})$	109.772	100
$w_{\rm cf}/({\rm N}{\cdot}{\rm m}^{-1})$	$-1.57\mathrm{E}+04$	-1.00E + 04
$t_{2f}/(N \cdot (r \cdot min^{-1})^{-2})$	$3.94\mathrm{E} + 04$	$3.00\mathrm{E} + 04$
t ₂₁ / m	-25.6	-10
$g_{ m y}$ / N	$1.00\mathrm{E} + 05$	0
$v_{\rm c} / ({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	0.338	0
$m_{ m y}$ / kg	$7.20\mathrm{E} + 06$	$5.00\mathrm{E} + 06$
$m_{ m xy}$ / kg	-4.00E + 04	-3.00E + 04
$d_{\rm y}$ / (kg·s ⁻¹)	$-6.00\mathrm{E}+05$	$-4.00\mathrm{E}+05$
$d_{\rm xy}$ / (kg·s ⁻¹)	-4.00E + 03	-3.00E + 03
$w_{\rm cv}/\left({ m N}{\cdot}{ m m}^{-2} ight)$	268.8619	200
$t_{1f}/(N \cdot (r \cdot min^{-1})^{-2})$	$3.94\mathrm{E} + 04$	3.00E + 04
t_{11} / m	29.6	10
$g_{\rm x}$ / N	$1.00\mathrm{E} + 05$	0
$g_{ m f}$ / Nm	$1.00\mathrm{E} + 06$	0





根据以上仿真数据,可以得到如下的结论:

1) 过程①~③说明本文描述的算法能够在线辨 识出基于动力学效应的船舶模型、外力以及推力, 从而完成定位控制.

2) 过程④~⑦则说明本文描述的算法能够自动适应船舶本身参数(质量,水动力导数)和外界环境(风、浪、流)的变化.最终效果为:在船舶参数和外界载荷的变化时,船舶依然能够保持在设定位置.

3) 在定位保持过程中,推进器的转速和方位角 变化不超过5%.说明滤波器能够有效滤除高频信号, 可以有效减少机械磨损和能源消耗.

4) 在定位保持过程中,无论是船舶参数的改变 还是外界载荷的变化,位置精度一直保持在2m范围 内,艏向精度为1.5°以内.

6 结论(Conclusion)

本文针对船舶动力定位控制系统的核心问题:船 舶模型和其载荷的在线辨识的问题进行了深入研 究,提出了基于动力学效应和UKF的辨识算法.此算 法从动力学响应的原理出发,通过无味卡尔曼滤波 器进行船舶模型及其载荷的在线辨识.并将滤波器 辨识到的参数和载荷代入二次调节器对船舶进行控 制仿真,仿真结果说明此算法不仅能够高效、节能 的完成定位控制;而且还能够在船舶模型以及外界 载荷变化的时候,自适应的完成各种参数的调节,从 而使船舶保持在设定位置上,位置精度保持在2m范 围内,艏向精度在1.5°内.

参考文献(References):

- FOSSEN T. Guidance and Control of Ocean Vehicles[M]. New York: Wiley, 1994.
- [2] LOUGH A. Dynamic Positioning[M]. British: Lioyd's Register Technical Association, 1985.
- [3] MORGAN M J. Dynamic Positioning of Offshore Vessels[M]. Okla: Petroleum Publishing Company, 1978.
- [4] BALCHEN J G, JENSSEN N A, MATHISEN E, et al. A dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control[J]. *Modeling, Identification and Control*, 1980, 1(3): 135 – 163.
- [5] 朱林生,黄素逸,戴遗山.有限深水域中浮体水动力系数的渐近特性[J].华中理工大学报,1994,22(4):64-68. (ZHU Linsheng, HUANG Suyi, DAI Yishan. Asymptotic characteristics of the hydrodynamic coefficient for a floating body on water of finite depth[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1994, 22(4): 64-48.)
- [6] 贺五洲,周正全.水深对船舶运动和波浪载荷的影响[J].中国造船,1997,136(1):1-7.
 (HE Wuzhou, ZHOU Zhengquan. The effects of water depth on the ship motion and sea loads[J]. *Shipbuilding of China*, 1997, 136(1):1-7.)
- [7] 姜哲,石珣,王磊.动力定位船舶水动力参数数值试验研究[J].实验室研究与探索,2005,24(12):14-17.
 (JIANG Zhe, SHI Xun, WANG Lei. The hydrodynamic coefficients of dynamic positioning ship[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2005, 24(12):14-17.)

- [8] 赵大明, 施朝健, 彭静. 应用扩展卡尔曼滤波算法的船舶运动模型 参数辨识[J]. 上海海事大学学报, 2008, 29(3): 5 – 9.
 (ZHAO Daming, SHI Chaojian, PENG Jing. Parameter identification to motion model of ship by extended Kalman filter[J]. *Journal* of Shanghai Maritime University, 2008, 29(3): 5 – 9.)
- [9] 边信黔, 严浙平, 施小成. 船舶动力定位系统参数辨识方法的研究[J]. 船舶工程, 1999, 21(1): 36 38.
 (BIAN Xinqian, YAN Zheping, SHI Xiaocheng. Parameter identification for ship dynamic positioning system[J]. *Ship Engineering*, 1999, 21(1): 36 38.)
- [10] SAELID S, JENSSEN N A, BALCHEN J G. Design and analysis of a dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1983, 28(3): 331 – 339.
- [11] TORSETNES G, JOUFFROY J, FOSSEN T I. Nonlinear dynamic positioning of ships with gain-scheduled wave filtering[C] //The 43rd

附录(Appendix)

IEEE Conference on Decision and Control. New York: IEEE, 2004: 5340 – 5347.

- [12] NGUYEN D T, QUEK S T. Reliability of switched model-based controller for vessel dynamic positioning with switching under estimated motion frequency[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic En*gineering, 2001, 132(021601): 1 – 9.
- [13] SORENSEN A J, SAGATUN S I, FOSSEN T I. Design of a dynamic positioning system using model-based control[J]. *Control Engineering Practice*, 1996, 4(3): 359 – 368.
- [14] JULER S J, UHLMANNN J K, DURRANT-WHYTE H F. A new approach for filtering nonlinear systems[C] //Proceedings of the American Control Conference. New York: IEEE, 1995: 1628 – 1632.
- [15] 施小成, 王元慧. 船舶动力定位海洋环境的建模与仿真[J]. 计算机 仿真, 2006, 23(11): 237 – 246.
 (SHI Xiaocheng, WANG Yuanhui. Marine environment modeling and simulation for dynamic positioning[J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(11): 237 – 246.)

11.					
船舶模型参数	计算方法	符号	船舶模型参数	计算方法	去符号
低频运动Surge/(m·s ⁻¹)	\checkmark	и	推进器2推力系数/(N·(r·min ⁻¹) ⁻²)	\checkmark	t_{2f}
低频运动Sway/(m·s ⁻¹)	\checkmark	v	推进器2推力/N	×	$ au_2$
低频运动Yaw/(rad·s ⁻¹)	\checkmark	r	推进器1到控制点距离/m	\checkmark	t_{11}
传感器测量的Surge/(m·s ⁻¹)	\checkmark	$u_{\rm s}$	推进器2到控制点距离/m	\checkmark	t_{21}
传感器测量的Sway/(m·s ⁻¹)	\checkmark	$v_{\rm s}$	Surge方向上的推力/N	×	$ au_{\mathrm{tx}}$
传感器测量的Yaw/(rad·s ⁻¹)	\checkmark	$r_{\rm s}$	Sway方向上的推力/N	×	$ au_{\mathrm{ty}}$
北位置/m	\checkmark	x	Yaw方向上的推力力矩/Nm	×	$ au_{ m tf}$
东位置/m	\checkmark	у	Surge方向未建模扰动力/N		$n_{\rm x}$
艏向/(°)	\checkmark	f	Sway方向未建模扰动力/N		$n_{ m y}$
相对风速/($m \cdot s^{-1}$)	\checkmark	$w_{\rm s}$	Yaw方向未建模扰动力矩/Nm		$n_{ m f}$
相对风向/(°)	\checkmark	$w_{\rm a}$	Surge方向剩余外力(二阶波浪力及其他)/N	\checkmark	$g_{\mathbf{x}}$
Surge方向风力系数/(N·m ⁻²)	\checkmark	$w_{\rm cu}$	Sway方向剩余外力(二阶波浪力及其他)/N	\checkmark	$g_{ m y}$
Sway方向风力系数/(N·m ⁻²)	\checkmark	$w_{\rm cv}$	Yaw方向剩余外力力矩(二阶波浪力及其他)/Nm	ı √	$g_{ m f}$
相对控制点的风力转矩系数/(N·m ⁻¹)	\checkmark	$w_{\rm cf}$	Surge方向风力/N	×	$ au_{\mathrm{wx}}$
海流速度在真北方向分量/(m·s ⁻¹)	\checkmark	$u_{\rm c}$	Sway方向风力/N	×	$ au_{ m wy}$
海流速度在东方向分量/(m·s ⁻¹)	\checkmark	$v_{\rm c}$	Yaw方向风力转矩/(Nm)	×	$ au_{ m wf}$
Surge方向相对流速/(m·s ⁻¹)	×	$u_{\rm r}$	Surge方向水动力系数/kg	\checkmark	$m_{\rm x}$
Sway方向相对流速/($m \cdot s^{-1}$)	×	$v_{\rm r}$	Sway方向水动力系数/kg	\checkmark	$m_{ m y}$
推进器1方位/(°)	\checkmark	t_{1a}	Yaw方向水动力系数/(kg·m ²)	\checkmark	$m_{ m f}$
推进器1转速/(r·min ⁻¹)	\checkmark	t_{1s}	Surge和Sway方向耦合水动力系数/kg	\checkmark	$m_{\rm xy}$
推进器1推力系数/(N·(r·min ⁻¹) ⁻²)	\checkmark	t_{1f}	Surge方向水动力导数/(kg·s ⁻¹)	\checkmark	$d_{\mathbf{x}}$
推进器1推力/N	×	$ au_1$	Sway方向水动力导数/(kg·s ⁻¹)	\checkmark	d_{y}
推进器2方位/(°)	\checkmark	t_{2a}	Yaw方向水动力导数/(kg·m²/s)	\checkmark	$d_{ m f}$
推进器2转速/(r·min ⁻¹)	\checkmark	t_{2s}	Surge和Sway方向耦合水动力导数/(kg·s ⁻¹)	\checkmark	d_{xy}

ß	付表 1	动力定位	船舶的参数	t	
Appendex Table 1	The p	arameters	of dynamic	positioning	vessel

*注:"√"表示直接UKF输出;"×"表示由UKF输出值计算.

作者简介:

倪 菲 (1980—), 男, 工程师, 博士, 研究方向为信号处理、模式 识别、系统辨识和船舶动力定位控制系统;

赵言正 (1965—), 男, 教授, 研究方向为机器人系统、智能控制 系统, E-mail: yzh-zhao@sjtu.edu.cn; **叶 军** (1967—), 男, 高级工程师, 上海振华重工集团有限公司, 电气事业部副总经理, 研究方向为软件工程、船舶动力定位控制系统软件架构, E-mail: yejun@zpmc.net;

朱 婷 (1982—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为计算机控制与 仿真建模, E-mail: zt58233721@hotmail.com.