



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111427356 A

(43)申请公布日 2020.07.17

(21)申请号 202010287977.1

(22)申请日 2020.04.13

(71)申请人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路  
1037号

(72)发明人 赵金 王旭东 耿涛

(74)专利代理机构 华中科技大学专利中心

42201

代理人 祝丹晴 李智

(51) Int. Cl.

G05D 1/02(2020.01)

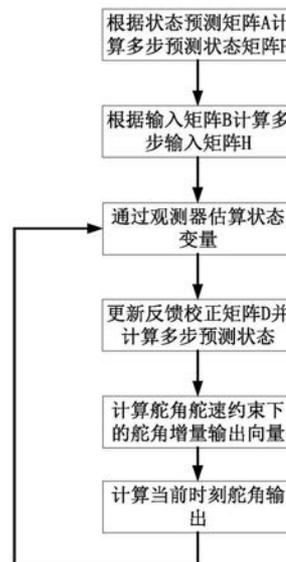
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

一种船舶航向区间控制方法和系统

(57)摘要

本发明公开了一种舵角舵速约束下的水面船舶航向区间控制方法和系统,属于船舶运动控制领域。本发明的方法包括:计算多步预测状态矩阵;计算多步输入矩阵;更新反馈校正矩阵并计算多步预测航向;根据当前方向舵角度计算舵角舵速约束下的舵角增量输出向量;取舵角增量输出向量的第一行作为当前时刻舵角增量输出。本发明适用于舵角舵速约束下的水面船舶航向区间控制,有利于减少船舶舵机机械结构的磨损,减少船舶航行过程中的能耗。



1. 一种船舶航向区间控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

根据航向控制增广状态空间方程中的状态预测矩阵A计算多步预测状态矩阵P,根据输入矩阵B计算多步输入矩阵H;

根据当前k时刻的航向角 $\varphi_k$ 和舵角 $\delta_{rk}$ ,通过观测器获取当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,并更新反馈校正矩阵D;

由所述当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,通过所述多步预测状态矩阵P、多步输入矩阵H和更新之后的反馈校正矩阵D获取多步预测状态变量 $\varphi$ ;

构建包含优化参考轨迹 $\alpha$ 、舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 和所述多步预测状态变量 $\varphi$ 的代价函数,结合舵角约束条件、舵速约束条件和区间约束条件,求解约束条件下的二次规划,从而获得舵角舵速约束下的舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 。

2. 如权利要求1所述的船舶航向区间控制方法,其特征在于,所述船舶航向控制增广状态空间方程为

$$\mathbf{x}_{k+1} = A\mathbf{x}_k + B\Delta\delta_{rk},$$

$$\text{其中 } \mathbf{x}_k = [v_k \quad r_k \quad \varphi_k \quad \delta_{rk}],$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$\Delta\delta_{rk}$ 是当前k时刻舵角增量输出向量, $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 是已知的水动力相关参数, $b_1, b_2$ 是已知的执行器相关参数, $v_k$ 是船舶的横向速度, $r_k$ 是船舶的艏向角速度, $\varphi_k$ 是航向角, $\delta_{rk}$ 是舵角。

3. 如权利要求2所述的船舶航向区间控制方法,其特征在于,所述多步预测状态矩阵

$$P = [CA \quad CA^2 \quad \dots \quad CA^{n_y}]^T,$$

所述多步输入矩阵

$$H = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{n_y-1}B & CA^{n_y-2}B & \dots & CB \end{bmatrix},$$

其中 $n_y$ 是预测步长,C为一个常值矩阵且 $C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$ ,所述多步输入矩阵H的列数为控制步长 $n_u$ 。

4. 如权利要求3所述的船舶航向区间控制方法,其特征在于,所述更新反馈校正矩阵D包括:

- 1) 在当前k时刻计算航向预测值  $pre\_φ_k = C * (Az_{k-1} + B * δ_{rk})$ ;
- 2) 获取实际值与所述航向预测值的误差  $e\_φ_k = φ_k - pre\_φ_k$ ;
- 3) 根据所述误差获取航向校正佳  $d\_φ_k = λ * e\_φ_k + (1 - λ) * d\_φ_{k-1}$ , 其中λ为小于1的常数,  $d\_φ_k$ 的初始值  $d\_φ_0 = 0$ ;

$$4) \text{ 由所述航向校正值更新反馈校正矩阵 } D = \begin{bmatrix} CA^0 \\ C(A + A^0) \\ C(A^2 + A + A^0) \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{n_y-1} CA^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d\_φ_k \\ 0 \end{bmatrix}^c$$

5. 如权利要求4所述的船舶航向区间控制方法, 其特征在于, 所述多步预测状态变量  $φ = Pz_k + HΔδ_r + D$ , 其中  $φ = [φ_{k+1} \ \dots \ φ_{k+n_y}]$ ,  $Δδ_r = [Δδ_{rk+1} \ \dots \ Δδ_{rk+n_u}]$ 。

6. 如权利要求5所述的船舶航向区间控制方法, 其特征在于, 所述代价函数  $J = \|Mα - φ\|_Q^2 + \|Δδ_r\|_R^2 = \|Mα - Pz - HΔδ_r - D\|_Q^2 + \|Δδ_r\|_R^2$ ,  $\|\dots\|_Q^2$  代表二范数, 权重矩阵为Q;  $\|\dots\|_R^2$  代表二范数, 权重矩阵为R; M为维数匹配矩阵。

7. 如权利要求6所述的船舶航向区间控制方法, 其特征在于, 所述舵速约束条件为

$$\begin{bmatrix} I_{n_u \times n_u} \\ -I_{n_u \times n_u} \end{bmatrix} Δδ_r - \begin{bmatrix} \overline{Δδ_r} \\ \underline{Δδ_r} \end{bmatrix} \leq 0,$$

其中  $\overline{Δδ_r}$  和  $\underline{Δδ_r}$  分别为舵速的上下限约束, 矩阵  $I_{n_u \times n_u}$  是维数等于控制步长  $n_u$  的单位矩阵。

8. 如权利要求6所述的船舶航向区间控制方法, 其特征在于, 所述舵角约束条件为

$$\begin{bmatrix} Cδ \\ -Cδ \end{bmatrix} Δδ_r - \begin{bmatrix} \overline{δ_r} - Lδ_r \\ -\underline{δ_r} + Lδ_r \end{bmatrix} \leq 0,$$

其中  $\overline{δ_r}$  和  $\underline{δ_r}$  分别为舵角的上下限约束, 矩阵  $Cδ = \begin{bmatrix} I & 0 & \dots & 0 \\ I & I & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ I & \dots & I & I \end{bmatrix}$  是维数等于控制

步长  $n_u$  的方阵,  $L = \begin{bmatrix} I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix}_{n_u \times 1}$ , 矩阵中的元素I为单位矩阵。

9. 如权利要求6所述的船舶航向区间控制方法, 其特征在于, 所述区间约束条件为

$$\begin{bmatrix} I_{n_m \times n_m} \\ -I_{n_m \times n_m} \end{bmatrix} α - \begin{bmatrix} \overline{α} \\ \underline{α} \end{bmatrix} \leq 0,$$

其中矩阵  $I_{n_m \times n_m}$  是维数等于  $n_m$  的单位矩阵,  $n_m$  为优化参考轨迹  $α$  的步长,  $\overline{α}$  和  $\underline{α}$  分别为优化参考轨迹的上下界。

10. 一种船舶航向区间控制系统,其特征在于,包括

多步预测状态矩阵获取模块,用于根据航向控制增广状态空间方程中的状态预测矩阵A获取多步预测状态矩阵P;

多步输入矩阵获取模块,用于根据航向控制增广状态空间方程中的输入矩阵B获取多步输入矩阵H;

反馈校正矩阵获取模块,用于根据当前k时刻的航向角 $\varphi_k$ 和舵角 $\delta_{rk}$ ,通过观测器获取当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,并更新反馈校正矩阵D;

多步预测模块,用于由所述当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,通过所述多步预测状态矩阵P、多步输入矩阵H和更新之后的反馈校正矩阵D获取多步预测状态变量 $\varphi$ ;

二次规划模块,构建包含优化参考轨迹 $\alpha$ 、舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 和所述多步预测状态变量 $\varphi$ 的代价函数,结合舵角约束条件、舵速约束条件和区间约束条件,求解约束条件下的二次规划,从而获得舵角舵速约束下的舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 。

## 一种船舶航向区间控制方法和系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于船舶运动控制领域,更具体地,涉及一种船舶航向区间控制方法和系统。

### 背景技术

[0002] 船舶航向控制对于现代船舶航行具有非常重要的意义,现代船舶的航向控制功能通常通过自动舵或具有类似功能的航向控制器实现。通过预设路径点和导航算法,船舶可以自动地航行至目的地港口,大大提高船舶航行的稳定性,减轻船员的工作负担。

[0003] 导航算法给出的参考航向多是一个固定航向,现有技术也多是针对航向定值控制这一问题,船舶在海洋中航行的过程中易受到风浪流等外界干扰,如果说采用航向定值控制,将航向保持在一个固定值,则需要在航行过程中针对外界干扰频繁打舵修正航向。船舶本身具有较大的质量,因此拥有很大的惯性,依靠打舵修正航向只能解决由外界干扰中低频部分造成的航向偏移,而针对外界干扰中的高频部分进行打舵修正效果有限且会加速舵机的磨损,增加船舶的功耗。

[0004] 不同于定值控制,区间控制的目的是将被控对象控制在一个给定的区间内而不是控制在一个给定的值。对于航行在海洋中的船舶来说,若将船舶的航向控制在一个给定的区间内,就能够一定程度上忽视外界干扰中的高频部分对航向控制的影响,并依靠导航算法依然可以使得船舶保持在给定的航线上从而顺利到达目的地。因此,亟需一种水面船舶的航向区间控制方法以减少打舵的频率和幅度。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术的缺陷,本发明的目的在于提供一种船舶航向区间控制方法和系统,旨在减少船舶舵机机械结构的磨损,并降低船舶航行过程中的能耗。

[0006] 为实现上述目的,本发明一方面提供了一种船舶航向区间控制方法,包括以下步骤:

[0007] 根据航向控制增广状态空间方程中的状态预测矩阵A计算多步预测状态矩阵P,根据输入矩阵B计算多步输入矩阵H;

[0008] 根据当前k时刻的航向角 $\varphi_k$ 和舵角 $\delta_{rk}$ ,通过观测器获取当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,并更新反馈校正矩阵D;

[0009] 由所述当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,通过所述多步预测状态矩阵P、多步输入矩阵H和更新之后的反馈校正矩阵D获取多步预测状态变量 $\varphi$ ;

[0010] 构建包含优化参考轨迹 $\alpha$ 、舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 和所述多步预测状态变量 $\varphi$ 的代价函数,结合舵角约束条件、舵速约束条件和区间约束条件,求解约束条件下的二次规划,从而获得舵角舵速约束下的舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 。

[0011] 进一步地,所述船舶航向控制增广状态空间方程为

$$[0012] \quad \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\Delta\delta_{rk},$$

[0013] 其中  $\mathbf{x}_k = [v_k \quad r_k \quad \varphi_k \quad \delta_{r_k}]$ ,

$$[0014] \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[0015] \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

[0016]  $\Delta\delta_{r_k}$ 是当前k时刻舵角增量输出向量,  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 是已知的水动力相关参数,  $b_1, b_2$ 是已知的执行器相关参数,  $v_k$ 是船舶的横向速度,  $r_k$ 是船舶的艏向角速度,  $\varphi_k$ 是航向角,  $\delta_{r_k}$ 是舵角。

[0017] 进一步地,所述多步预测状态矩阵

$$[0018] \quad P = [CA \quad CA^2 \quad \dots \quad CA^{n_y}]^T,$$

[0019] 所述多步输入矩阵

$$[0020] \quad H = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{n_y-1}B & CA^{n_y-2}B & \dots & CB \end{bmatrix},$$

[0021] 其中  $n_y$ 是预测步长,  $C$ 为一个常值矩阵且  $C = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$ , 所述多步输入矩阵  $H$ 的列数为控制步长  $n_u$ 。

[0022] 进一步地,所述更新反馈校正矩阵  $D$ 包括:

[0023] 1) 在当前k时刻计算航向预测值  $pre\_varphi_k = C * (Az_{k-1} + B * \delta_{r_k})$ ;

[0024] 2) 获取实际值与所述航向预测值的误差  $e\_varphi_k = \varphi_k - pre\_varphi_k$ ;

[0025] 3) 根据所述误差获取航向校正值  $d\_varphi_k = \lambda * e\_varphi_k + (1 - \lambda) * d\_varphi_{k-1}$ , 其中  $\lambda$ 为小于1的常数,  $d\_varphi_k$ 的初始值  $d\_varphi_0 = 0$ ;

$$[0026] \quad 4) \text{ 由所述航向校正值更新反馈校正矩阵 } D = \begin{bmatrix} CA^0 \\ C(A + A^0) \\ C(A^2 + A + A^0) \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{n_y-1} CA^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d\_varphi_k \\ 0 \end{bmatrix}.$$

[0027] 进一步地,所述多步预测状态变量  $\varphi = Pz_k + H\Delta\delta_r + D$ , 其中  $\varphi = [\varphi_{k+1} \quad \dots \quad \varphi_{k+n_y}]$ ,  $\Delta\delta_r = [\Delta\delta_{r_{k+1}} \quad \dots \quad \Delta\delta_{r_{k+n_u}}]$ 。

[0028] 进一步地,所述代价函数

$$[0029] \quad J = \|M\alpha - \varphi\|_Q^2 + \|\Delta\delta_r\|_R^2 = \|M\alpha - Pz - H\Delta\delta_r - D\|_Q^2 + \|\Delta\delta_r\|_R^2,$$

$\|\dots\|_Q^2$ 代表二范数, 权重矩阵为  $Q$ ;  $\|\dots\|_R^2$ 代表二范数, 权重矩阵为  $R$ ;  $M$ 为维数匹配矩阵。

[0030] 进一步地,所述舵速约束条件为

$$[0031] \quad \begin{bmatrix} I_{n_u \times n_u} \\ -I_{n_u \times n_u} \end{bmatrix} \Delta \delta_r - \begin{bmatrix} \overline{\Delta \delta_r} \\ \underline{\Delta \delta_r} \end{bmatrix} \leq 0,$$

[0032] 其中 $\overline{\Delta \delta_r}$ 和 $\underline{\Delta \delta_r}$ 分别为舵速的上下限约束,矩阵 $I_{n_u \times n_u}$ 是维数等于控制步长 $n_u$ 的单位矩阵。

[0033] 进一步地,所述舵角约束条件为

$$[0034] \quad \begin{bmatrix} C\delta \\ -C\delta \end{bmatrix} \Delta \delta_r - \begin{bmatrix} \overline{\delta_r} - L\delta_r \\ -\underline{\delta_r} + L\delta_r \end{bmatrix} \leq 0,$$

[0035] 其中 $\overline{\delta_r}$ 和 $\underline{\delta_r}$ 分别为舵角的上下限约束,矩阵 $C\delta = \begin{bmatrix} I & 0 & \dots & 0 \\ I & I & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ I & \dots & I & I \end{bmatrix}$ 是维数等于

控制步长 $n_u$ 的方阵, $L = \begin{bmatrix} I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix}_{n_u \times 1}$ ,矩阵中的元素I为单位矩阵。

[0036] 进一步地,所述区间约束条件为

$$[0037] \quad \begin{bmatrix} I_{n_m \times n_m} \\ -I_{n_m \times n_m} \end{bmatrix} \alpha - \begin{bmatrix} \overline{\alpha} \\ \underline{\alpha} \end{bmatrix} \leq 0,$$

[0038] 其中矩阵 $I_{n_m \times n_m}$ 是维数等于 $n_m$ 的单位矩阵, $n_m$ 为优化参考轨迹 $\alpha$ 的步长, $\overline{\alpha}$ 和 $\underline{\alpha}$ 分别为优化参考轨迹的上下界。

[0039] 本发明的另一方面还提供了一种船舶航向区间控制系统,包括

[0040] 多步预测状态矩阵获取模块,用于根据航向控制增广状态空间方程中的状态预测矩阵A获取多步预测状态矩阵P;

[0041] 多步输入矩阵获取模块,用于根据航向控制增广状态空间方程中的输入矩阵B获取多步输入矩阵H;

[0042] 反馈校正矩阵获取模块,用于根据当前k时刻的航向角 $\varphi_k$ 和舵角 $\delta_{rk}$ ,通过观测器获取当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,并更新反馈校正矩阵D;

[0043] 多步预测模块,用于由所述当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,通过所述多步预测状态矩阵P、多步输入矩阵H和更新之后的反馈校正矩阵D获取多步预测状态变量 $\varphi$ ;

[0044] 二次规划模块,构建包含优化参考轨迹 $\alpha$ 、舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 和所述多步预测状态变量 $\varphi$ 的代价函数,结合舵角约束条件、舵速约束条件和区间约束条件,求解约束条件下的二次规划,从而获得舵角舵速约束下的舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 。

[0045] 通过本发明所构思的以上技术方案,与现有技术相比,能够取得下列有益效果:

[0046] (1) 本发明提供的航向区间控制方法和系统将船舶的航向控制在一个给定的区间内,能够一定程度上忽视外界干扰中的高频部分对航向控制的影响,使得船舶在风浪流干扰中航行时保持在给定区间内并有效减少打舵次数,降低舵机等机械结构的磨损和船舶的能耗。

[0047] (2) 本发明提供的航向区间控制方法和系统中,在设计控制器的时候考虑了舵角和舵速的约束情况,提高了航向控制的稳定性。

### 附图说明

[0048] 图1是本发明实施例的算法流程示意图;

[0049] 图2是本发明实施例的半物理实验曲线图。

### 具体实施方式

[0050] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0051] 本发明实施例提供了一种舵角舵速约束下的水面船舶航向区间控制方法,包括以下步骤:

[0052] S1. 根据状态预测矩阵A计算多步预测状态矩阵P;

[0053] S2. 根据输入矩阵B计算多步输入矩阵H;

[0054] S3. 根据传感器读取的航向角 $\varphi_k$ 和当前k时刻舵角 $\delta_{r_k}$ 通过观测器估算当前k时刻状态变量估计值 $\mathbf{z}_k = [\mathbf{v}_k \quad r_k \quad \varphi_k \quad \delta_{r_k}]^T$ ,其中 $\mathbf{v}_k$ 是船舶的横向速度, $r_k$ 是船舶的艏向角速度。

[0055] S4. 更新反馈校正矩阵D并根据当前时刻估算的状态变量计算多步预测状态变量;

[0056] S5. 根据当前舵角 $\delta_{r_k}$ 计算舵角舵速约束下的舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ ;

[0057] S6. 取舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 的第一行作为当前时刻舵角增量输出,等待当前控制周期结束,返回步骤S3。

[0058] 下面对具体操作进行详细阐述:

[0059] 所述步骤S1具体包括:

[0060] 船舶航向控制增广状态空间方程为 $\mathbf{x}_{k+1} = A\mathbf{x}_k + B\Delta\delta_{r_k}$ ,其中 $\mathbf{x}_{k+1} =$

$$[\mathbf{v}_{k+1} \quad r_{k+1} \quad \varphi_{k+1} \quad \delta_{r_{k+1}}], A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, a_{11}, a_{12},$$

[0061]  $a_{21}, a_{22}$ 是水动力相关参数, $b_1, b_2$ 是执行器相关参数,上述参数均为已知参数,多步预测状态矩阵 $\mathbf{P} = [CA \quad CA^2 \quad \dots \quad CA^{n_y}]^T$ ,其中 $n_y$ 是预测步长,C为一个常值矩阵,且 $C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$ 。。

[0062] 所述步骤S2具体包括:

[0063] 计算得到多步输入矩阵 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{n_y-1}B & CA^{n_y-2}B & \dots & CB \end{bmatrix}$ ,其中多步输

入矩阵H的列数为控制步长 $n_u$ 。

[0064] 所述步骤S3具体包括:

[0065] 通过传感器得到当前k时刻的航向角 $\varphi_k$ 和舵角 $\delta_{rk}$ ,通过公式 $\mathbf{z}_k = (A - L * C)\mathbf{z}_{k-1} + B * \delta_{rk} + L * \varphi_k$ 得到当前时刻状态变量估计值,其中L是观测器增益矩阵,为一个常值矩阵。初始时刻的状态变量 $\mathbf{z}_0 = [0 \ 0 \ \varphi_0 \ 0]^T$ 即初始时刻横向速度为0,艏向角速度为0,航向角为 $\varphi_0$ ,舵角为0。

[0066] 所述步骤S4具体包括:

[0067] S4.1在当前k时刻计算航向预测值 $pre\_ \varphi_k = C * (A\mathbf{z}_{k-1} + B * \delta_{rk})$ 。

[0068] S4.2航向预测值与实际值的误差 $e\_ \varphi_k = \varphi_k - pre\_ \varphi_k$ 。

[0069] S4.3航向校正值得 $d\_ \varphi_k = \lambda * e\_ \varphi_k + (1 - \lambda) * d\_ \varphi_{k-1}$ ,其中 $\lambda$ 为小于1的常数, $d\_ \varphi_k$ 的初始值 $d\_ \varphi_0 = 0$ 。

[0070] S4.4更新反馈校正矩阵 $D = \begin{bmatrix} CA^0 \\ C(A + A^0) \\ C(A^2 + A + A^0) \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{n_y-1} CA^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d\_ \varphi_k \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

[0071] S4.5计算多步预测状态变量 $\varphi = P\mathbf{z}_k + H\Delta\delta_r + D$ ,其中 $\varphi =$

$[\varphi_{k+1} \ \dots \ \varphi_{k+n_y}]$ ,  $\Delta\delta_r = [\Delta\delta_{rk+1} \ \dots \ \Delta\delta_{rk+n_u}]$

[0072] 所述步骤S5具体包括:

[0073] S5.1构建代价函数 $J = \|\mathbf{M}\alpha - \varphi\|_Q^2 + \|\Delta\delta_r\|_R^2 = \|\mathbf{M}\alpha - P\mathbf{z} - H\Delta\delta_r - D\|_Q^2 + \|\Delta\delta_r\|_R^2$ ,  $\|\dots\|_Q^2$ 代表二范数,权重矩阵为Q。 $\|\dots\|_R^2$ 代表二范数,权重矩阵为R。矩阵P为步骤S1中的多步预测状态矩阵,矩阵H为步骤S2中多步输入矩阵,D为步骤S4中反馈校正矩阵。维数匹配矩阵M的作用是使得矩阵M和优化参考轨迹 $\alpha$ 的乘积的维度和预测步长匹配。

[0074] S5.2将S5.1中的代价函数J展开可得到

[0075]  $J = (\mathbf{M}\alpha)^T Q (\mathbf{M}\alpha) - (\mathbf{M}\alpha)^T Q (P\mathbf{z}) - (\mathbf{M}\alpha)^T Q (H \Delta \delta_r) - (\mathbf{M}\alpha)^T Q D - (P\mathbf{z})^T Q (\mathbf{M}\alpha) + (P\mathbf{z})^T Q (P\mathbf{z}) + (P\mathbf{z})^T Q (H \Delta \delta_r) + (P\mathbf{z})^T Q D - (H \Delta \delta_r)^T Q (\mathbf{M}\alpha) + (H \Delta \delta_r)^T Q (P\mathbf{z}) + (H \Delta \delta_r)^T Q (H \Delta \delta_r) + (H \Delta \delta_r)^T Q D - D^T Q (\mathbf{M}\alpha) + D^T Q (P\mathbf{z}) + D^T Q (H \Delta \delta_r) + D^T Q D + \Delta \delta_r^T R \Delta \delta_r$

[0076] S5.3代价函数J中的常数项对于求解没有影响,将代价函数J中的常数去掉得到新的代价函数 $J_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta\delta_r^T \\ \alpha^T \end{bmatrix} S \begin{bmatrix} \Delta\delta_r \\ \alpha \end{bmatrix} + f^T \begin{bmatrix} \Delta\delta_r \\ \alpha \end{bmatrix}$ ,其中矩阵 $S = \begin{bmatrix} 2H^T Q H + 2R & 2H^T Q M \\ 2M^T Q H & 2M^T Q M \end{bmatrix}$ ,

矩阵 $f = \begin{bmatrix} 2\mathbf{z}^T P Q M + 2D^T Q M \\ 2\mathbf{z}^T P Q H + 2D^T Q H \end{bmatrix}$

[0077] S5.4受机械结构和物理能量输出的约束,船舶的舵角不是无限大,转舵的速度也有上限,因此在设计控制器的时候需要考虑舵角和舵速的约束情况,否则设计出来的控制

器可能会导致航向控制的不稳定。

[0078] 考虑舵角舵速的约束和区间约束,将约束写成矩阵不等式形式,其中舵速约束可以写为 $\begin{bmatrix} I_{n_u \times n_u} \\ -I_{n_u \times n_u} \end{bmatrix} \Delta \delta_r - \begin{bmatrix} \overline{\Delta \delta_r} \\ \underline{\Delta \delta_r} \end{bmatrix} \leq 0$ ,  $\overline{\Delta \delta_r}$ 和 $\underline{\Delta \delta_r}$ 分别为舵速的上下限约束,矩阵 $I_{n_u \times n_u}$ 是维数等于控制步长 $n_u$ 的单位矩阵。

[0079] 舵角约束可以写为 $\begin{bmatrix} C\delta \\ -C\delta \end{bmatrix} \Delta \delta_r - \begin{bmatrix} \overline{\delta_r} - L\delta_r \\ -\underline{\delta_r} + L\delta_r \end{bmatrix} \leq 0$ ,其中 $\overline{\delta_r}$ 和 $\underline{\delta_r}$ 分别为舵角的

上下限约束,矩阵 $C\delta = \begin{bmatrix} I & 0 & \cdots & 0 \\ I & I & 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ I & \cdots & I & I \end{bmatrix}$ 是维数等于控制步长 $n_u$ 的方阵, $L = \begin{bmatrix} I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix}_{n_u \times 1}$ ,矩

阵中的元素I为单位矩阵。

[0080] 优化参考轨迹 $\alpha$ 的上下界约束即为区间边界,将优化参考轨迹的约束写成矩阵不等式的形式为 $\begin{bmatrix} I_{n_m \times n_m} \\ -I_{n_m \times n_m} \end{bmatrix} \alpha - \begin{bmatrix} \overline{\alpha} \\ \underline{\alpha} \end{bmatrix} \leq 0$ ,其中矩阵 $I_{n_m \times n_m}$ 是维数等于 $n_m$ 的单位矩阵, $n_m$ 为优化参考轨迹 $\alpha$ 的步长, $\overline{\alpha}$ 和 $\underline{\alpha}$ 分别为优化参考轨迹的上下界。

[0081] 上述约束可以统一写为矩阵不等式形式 $Cq \begin{bmatrix} \Delta \delta_r \\ \alpha \end{bmatrix} - Bq \leq 0$ ,其中 $Cq =$

$$\begin{bmatrix} I_{n_u \times n_u} & 0_{n_u \times n_m} \\ -I_{n_u \times n_u} & 0_{n_u \times n_m} \\ C\delta_{n_u \times n_u} & 0_{n_u \times n_m} \\ -C\delta_{n_u \times n_u} & 0_{n_u \times n_m} \\ 0_{n_y \times n_u} & I_{n_m \times n_m} \\ 0_{n_y \times n_u} & -I_{n_m \times n_m} \end{bmatrix}, Bq = \begin{bmatrix} \overline{\Delta \delta_r} \\ \underline{\Delta \delta_r} \\ \overline{\delta_r} - L\delta_r \\ -\underline{\delta_r} + L\delta_r \\ \overline{\alpha} \\ \underline{\alpha} \end{bmatrix}$$

[0082] S5.5结合S5.3中的代价函数 $J_1$ 和S5.4中的矩阵不等式约束,舵角舵速约束下的航向区间控制问题至此变成一个带约束的二次规划问题:

$$[0083] \quad J_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta \delta_r^T \\ \alpha^T \end{bmatrix} S \begin{bmatrix} \Delta \delta_r \\ \alpha \end{bmatrix} + f^T \begin{bmatrix} \Delta \delta_r \\ \alpha \end{bmatrix}$$

$$[0084] \quad \text{s. t.} \quad Cq \begin{bmatrix} \Delta \delta_r \\ \alpha \end{bmatrix} - Bq \leq 0$$

[0085] 使用成熟的二次规划求解工具即可求解得到解向量 $\begin{bmatrix} \Delta \delta_r \\ \alpha \end{bmatrix}$ ,该解向量包括舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 和优化参考轨迹 $\alpha$ 。

[0086] 所述步骤S6具体包括:

[0087] S6.1取舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 的第一行作为 $k+1$ 时刻的舵角增量 $\Delta \delta_{r_{k+1}}$ 。

[0088] S6.2计算 $k+1$ 时刻的舵角输出: $\delta_{r_{k+1}} = \Delta \delta_{r_k} + \Delta \delta_{r_{k+1}}$ 。

- [0089] 相对应地,本发明实施例还提供了一种船舶航向区间控制系统,包括
- [0090] 多步预测状态矩阵获取模块,用于根据航向控制增广状态空间方程中的状态预测矩阵A获取多步预测状态矩阵P;
- [0091] 多步输入矩阵获取模块,用于根据航向控制增广状态空间方程中的输入矩阵B获取多步输入矩阵H;
- [0092] 反馈校正矩阵获取模块,用于根据当前k时刻的航向角 $\varphi_k$ 和舵角 $\delta_{rk}$ ,通过观测器获取当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,并更新反馈校正矩阵D;
- [0093] 多步预测模块,用于由所述当前k时刻状态变量估计值 $z_k$ ,通过所述多步预测状态矩阵P、多步输入矩阵H和更新之后的反馈校正矩阵D获取多步预测状态变量 $\varphi$ ;
- [0094] 二次规划模块,构建包含优化参考轨迹 $\alpha$ 、舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 和所述多步预测状态变量 $\varphi$ 的代价函数,结合舵角约束条件、舵速约束条件和区间约束条件,求解约束条件下的二次规划,从而获得舵角舵速约束下的舵角增量输出向量 $\Delta \delta_r$ 。
- [0095] 图2是本发明实施例的半物理实验曲线图。由图2可以看出,船舶从初始航向 $30^\circ$ 变向至 $60^\circ$ 过程中,最大和最小舵角值始终处于舵角约束范围内,动舵过程中舵速也被控制在给定的舵速约束范围内。待船舶到达 $60^\circ$ 航向区间范围内以后,航向始终在给定区间的范围内变化,而舵角在整个过程仅动舵4次。
- [0096] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

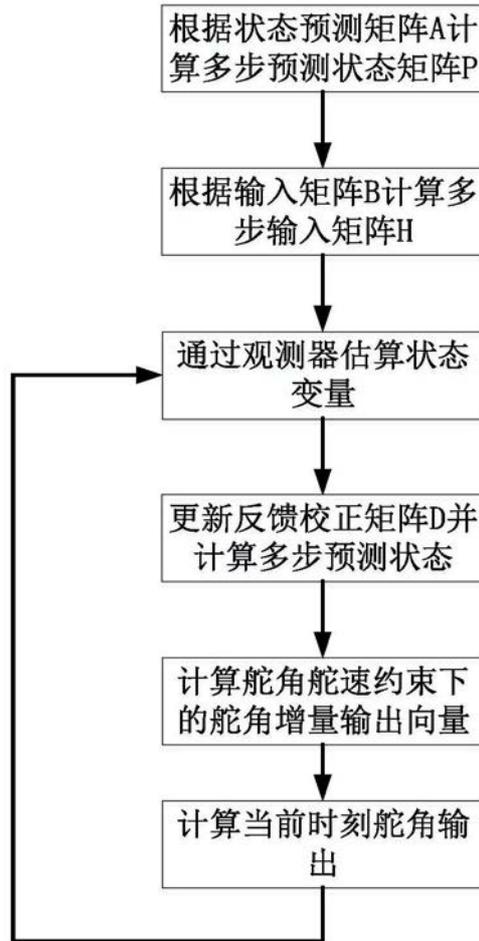


图1

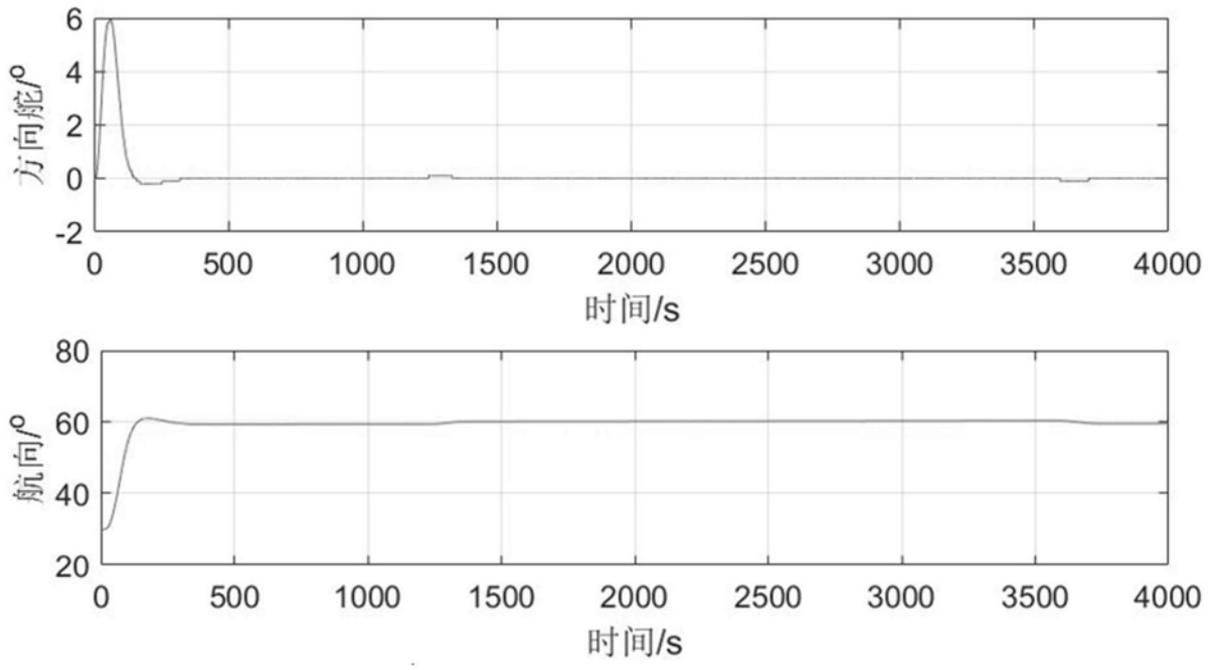


图2