



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114967714 B

(45) 授权公告日 2024. 11. 01

(21) 申请号 202210728589.1

(22) 申请日 2022.06.24

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 114967714 A

(43) 申请公布日 2022.08.30

(73) 专利权人 湖南大学  
地址 410082 湖南省长沙市岳麓区麓山南路1号湖南大学

(72) 发明人 边有钢 杨静心 徐彪 秦洪懋  
胡满江 秦兆博 秦晓辉 谢国涛  
王晓伟 丁荣军

(74) 专利代理机构 广州容大知识产权代理事务所(普通合伙) 44326  
专利代理师 刘新年

(51) Int. Cl.

G05D 1/43 (2024.01)

G05D 109/30 (2024.01)

(56) 对比文件

韩涛.多关节水下机器人方案设计与关键技术应用.控制与信息技术.2023,全文.

审查员 刘明进

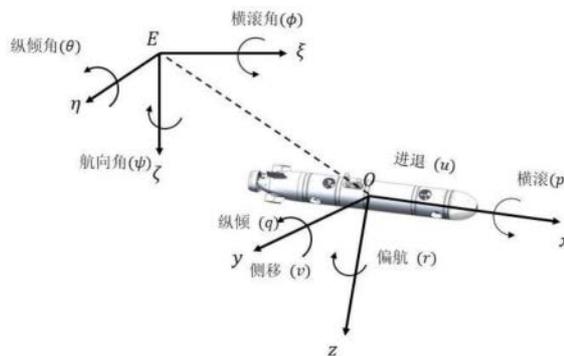
权利要求书4页 说明书9页 附图1页

(54) 发明名称

一种自主式水下机器人抗扰运动控制方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种自主式水下机器人抗扰运动控制方法,包括如下步骤:步骤1,建立自主式水下机器人动力学和运动学简化线性模型;步骤2,建立系统名义模型;步骤3,构造扰动观测器;步骤4,设计名义模型预测控制器;步骤5,设计辅助模型预测控制器;步骤6,测量下一时刻的系统状态,将该时刻作为新的当前时刻,返回步骤3。本发明的自主式水下机器人抗扰运动控制方法,建立双层模型预测控制框架,能够有效应对不确定性带来的影响并且跟踪参考值,具有更好的控制效果。



1. 一种自主式水下机器人抗扰运动控制方法,其特征在于:包括如下步骤:

步骤1,建立自主式水下机器人动力学和运动学简化线性模型,将其转化为状态空间下的连续时间模型,并对其进行离散化得到系统的离散时间模型;

步骤2,建立系统名义模型,用于作为名义模型预测控制器的预测方程,将系统状态和控制输入约束转化为名义系统的收紧的状态和控制输入约束;

步骤3,构造扰动观测器,将扰动变量视作扩展的状态量,估计系统扰动值,并将该估计值发送给辅助预测控制器;

步骤4,设计名义模型预测控制器,构造代价函数,求解有限时域优化问题,得到名义最优控制输入以及相应的名义状态;

步骤5,设计辅助模型预测控制器,接收名义预测输入和输出信号以及扰动观测器提供的扰动信号,针对实际系统模型求解最优控制,并将控制序列的首个控制量作用于自主式水下机器人系统;

步骤6,测量下一时刻的系统状态,将该时刻作为新的当前时刻,返回步骤3;所述步骤3中构造扰动观测器的具体步骤如下:

步骤31,将扰动视作新增的状态量加入不确定系统,建立如下线性状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\delta + \hat{w} + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \\ \hat{w} = \beta + H\hat{x} \end{cases}$$

其中状态估计值 $\hat{x} = [\hat{z}, \hat{\theta}, \hat{q}]^T$ ,输出估计值 $\hat{y}$ ,L、H为观测器增益矩阵, $\hat{w}$ 为扰动估计值, $\beta$ 为一个辅助变量;

步骤32,计算状态估计误差和扰动误差:

$$e_x = x - \hat{x}$$

$$e_w = w - \hat{w}$$

然后对 $e_x$ 求导得到:

$$\dot{e}_x = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ae_x + e_w - L(y - \hat{y})$$

获得扰动估计的一阶导数:

$$\dot{\hat{w}} = HLCe_x + \dot{\hat{w}}$$

其中扰动的导数的估计值 $\dot{\hat{w}} = H(A\hat{x} + B\delta + \hat{w}) + \dot{\beta}$ ;步骤33,将状态估计误差和扰动估计误差组成如下估计误差系统:

$$\dot{G} = \begin{bmatrix} A - LC & I \\ -HLC & 0 \end{bmatrix} G + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} e_w$$

其中 $G = [e_x^T \ e_w^T]^T$ , $e_w = \dot{w} - \dot{\hat{w}}$ 表示扰动的导数的估计误差;

所述步骤4中设计名义模型预测控制器,构造代价函数,求解有限时域优化问题,得到名义最优控制输入以及相应的名义状态的具体步骤如下:

步骤41,对每个采样时刻设计最优控制输入,将名义系统状态驱使到目标点并最小化

代价函数,构造的代价函数如下:

$$J = \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\bar{x}_{i|k} - x_{\text{ref}}\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\bar{\delta}_{i|k}\|_R^2 + \|\bar{x}_{N_p|k} - x_{\text{ref}}\|_P^2$$

其中 $x_{\text{ref}}$ 为目标状态向量, $N_p$ 为预测时域, $Q$ 、 $R$ 分别表示预测状态、控制输入的正定加权矩阵, $P$ 为终端权重矩阵,通过求解Riccati方程得到;

步骤42,满足名义预测模型约束以及名义状态约束和名义控制约束,名义状态和名义控制分别被约束在实际约束的子集内:

$$\bar{x}_{i|k} \in \bar{\mathbb{X}}$$

$$\bar{\delta}_{i|k} \in \bar{\mathbb{D}}$$

在预测时域内最后一个预测区间所要满足的状态约束:

$$\bar{x}_{N_p|k} \in \mathbb{X}_f$$

终端约束 $\mathbb{X}_f$ 满足 $A_K \mathbb{X}_f \subset \mathbb{X}_f$ ,  $\mathbb{X}_f \subset \mathbb{X} \ominus \mathbb{Z}$ ,  $K\mathbb{X}_f \subset \mathbb{D} \ominus K\mathbb{Z}$ 这些条件,其中, $A_K = A+BK$ , $\mathbb{Z}$ 为一个鲁棒不变集;

步骤43,在有限时域内表示任意时刻k的最优控制问题:

$$J^* = \min_{\bar{\delta}_{\cdot|k}, \bar{x}_{\cdot|k}} J$$

$$\text{s. t. } \forall i \in \mathbb{N}_0^{N_p-1}$$

$$\bar{x}_{i+1|k} = A\bar{x}_{i|k} + B\bar{\delta}_{i|k}$$

$$\bar{x}_{0|k} = x_{0|k}$$

$$\bar{\delta}_{i|k} = K\bar{x}_{i|k}$$

其中, $\bar{\delta}_{\cdot|k} = \{\bar{\delta}_{i|k}\}_{i=0, \dots, N_p-1}$ ,  $\bar{x}_{\cdot|k} = \{\bar{x}_{i|k}\}_{i=0, \dots, N_p}$ ,线性反馈增益 $K$ 通过线性二次型调节器求得。

2. 根据权利要求1所述的自主式水下机器人抗扰运动控制方法,其特征在于:所述步骤2中名义系统的收紧的状态和控制输入约束具体表示为:

$$\bar{\mathbb{X}} = \{\bar{x} \in \mathbb{R}^m \mid \alpha x_{\min} \leq \bar{x} \leq \alpha x_{\max}\}$$

$$\bar{\mathbb{D}} = \{\bar{\delta} \in \mathbb{R}^n \mid \gamma \delta_{\min} \leq \bar{\delta} \leq \gamma \delta_{\max}\}$$

其中, $\alpha$ 和 $\gamma$ 表示(0,1)范围内的缩紧系数。

3. 根据权利要求2所述的自主式水下机器人抗扰运动控制方法,其特征在于:所述步骤5中针对实际系统模型求解最优控制的方式求解以下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\delta_{i|k}} \sum_{i=0}^{N_p} \|\mathbf{x}_{i|k} - \bar{\mathbf{x}}_{i|k}\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\delta_{i|k} - \bar{\delta}_{i|k}\|_R^2 \\ \text{s. t. } \forall i \in \mathbb{N}_0^{N_p-1} \\ \mathbf{x}_{i+1|k} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{i|k} + \mathbf{B}\delta_{i|k} + \hat{\mathbf{w}}_{i|k} \\ \mathbf{x}_{i|k} \in \mathbb{X} \\ \delta_{i|k} \in \mathbb{D} \end{aligned}$$

其中  $\delta_{i|k} = \{\delta_{i|k}\}_{i=0, \dots, N_p-1}$ ,  $\hat{\mathbf{w}}_{i|k}$  由扰动观测器估计得到。

4. 根据权利要求3所述的自主式水下机器人抗扰运动控制方法, 其特征在于: 所述步骤1中建立自主式水下机器人动力学和运动学简化线性模型, 将其转化为状态空间下的连续时间模型, 并对其进行离散化得到系统的离散时间模型的具体步骤如下:

步骤11, 定义所需的坐标系: 惯性坐标系和随体坐标系, 惯性坐标系固定于地面, 随体坐标系固定于自主式水下机器人, 其中  $E-\xi\eta\zeta$  表示惯性坐标系,  $0-xyz$  表示随体坐标系;

步骤12, 定义自主式水下机器人在随体坐标系内的六个自由度的速度  $\mathbf{V} = [u \ v \ l \ p \ q \ r]^T$  及相对于固定坐标系的位置和姿态角  $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$ , 自主式水下机器人运动方程如下:

$$\mathbf{M}\mathbf{V} + \mathbf{C}(\mathbf{V})\mathbf{V} + \mathbf{D}(\mathbf{V})\mathbf{V} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{V}$$

其中,  $\mathbf{M}$  为刚体质量与附加质量矩阵之和,  $\mathbf{C}(\mathbf{V})$  为科氏力和向心力矩阵,  $\mathbf{D}(\mathbf{V})$  为阻尼矩阵,  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  为回复力矩,  $\boldsymbol{\tau}$  为推进系统输入矩阵,  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$  为惯性坐标系与随体坐标系之间的雅可比转换矩阵;

步骤13, 假设水平面的相关状态量横向速度  $v$ 、航向角速度  $p$ 、横滚角速度  $r$ 、横滚角  $\varphi$  均近似为0, 纵向速度  $u$  的变化是平缓稳定的,  $u$  近似为一个常数, 只考虑自主式水下机器人在垂向的  $x-z$  平面内的运动, 对模型进行解耦, 建立简化的垂向三阶深度控制模型如下:

$$\begin{cases} \dot{z} = -u\theta \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{q} = \frac{\mathbf{M}_q u q - (z_g W - z_b B_1)\theta + \mathbf{M}_\delta u^2 \delta}{I_y - \mathbf{M}_{\dot{q}}} + \tau_q + \Delta_q \end{cases}$$

其中,  $z$  为惯性坐标系下的垂向深度,  $\theta$  为纵倾角,  $q$  为纵倾角速度,  $\delta$  是舵角,  $I_y$  为绕  $y$  轴转动惯量,  $\mathbf{M}_q$ 、 $\mathbf{M}_\delta$ ,  $\mathbf{M}_{\dot{q}}$  为附加质量矩阵,  $W$  为重力,  $B_1$  为浮力,  $\Delta_q$  表示模型不确定部分,  $\tau_q$  表示由洋流和风浪引起的外界时变扰动;

步骤14, 利用传感器采集自主式水下机器人的位置信息和姿态信息, 将  $z$ 、 $\theta$ 、 $q$  作为状态量, 舵角  $\delta$  为控制输入,  $\mathbf{x} = [z, \theta, q]^T$  用于描述自主式水下机器人的深度控制问题, 将上述模型转换为状态空间方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{B}_c \delta + \Delta_w$$

其中,状态转移矩阵  $A_c = \begin{bmatrix} 0 & -u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{z_g W - z_b B_1}{I_y - M_{\dot{q}}} & \frac{M_{\dot{q}} u}{I_y - M_{\dot{q}}} \end{bmatrix}$ , 输入矩阵  $B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{M_{\delta} u^2}{I_y - M_{\dot{q}}} \end{bmatrix}$ ; 按采

样时间  $\Delta T$  对连续时间状态空间方程进行离散化得到:

$$x_{k+1} = A x_k + B \delta_k + w_k$$

其中,状态  $x_k \in \mathbb{R}^m$ , 控制输入  $\delta_k \in \mathbb{R}^n$ ,  $A = e^{A_c \Delta T}$ ,  $B = B_c \cdot \int_0^{\Delta T} e^{A_c \tau} d\tau$ 。

5. 根据权利要求4所述的自主式水下机器人抗扰运动控制方法,其特征在于:所述步骤14中假设扰动有界,且有界集为一个凸集,表示为:  $W = \{w \in \mathbb{R}^m | -w_{\max} \leq w \leq w_{\max}\}$ , 其中  $w_{\max}$  为扰动上界。

6. 一种应用权利要求1至5任意一项所述的自主式水下机器人抗扰运动控制方法的系统,其特征在于:包括数据采集装置、计算单元、执行机构和驱动机构,所述计算单元用于搭载上述方法,并执行方法后控制执行机构和驱动机构,所述数据采集装置包括姿态传感器和深度传感器,姿态传感器用于采集水下信息、机器人姿态和惯导信息,并对信息进行均值滤波,深度传感器用于测量到水面的高度距离。

## 一种自主式水下机器人抗扰运动控制方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于自主式水下机器人控制技术领域,特别是关于一种自主式水下机器人抗扰运动控制方法及系统。

### 背景技术

[0002] 水下机器人是一种在海洋环境中代替人类完成各类复杂作业的水下设备。自主式水下机器人凭借其灵活、自主、智能等特点,越来越多地被用于海洋科学考察、救援打捞、海底资源勘测等领域。在各种应用场景中,自主式水下机器人能够高质量地实现定深、下潜上浮、悬停定位等位姿控制是其精确高效完成任务的必要条件。

[0003] 自主式水下机器人的控制技术是其核心技术。由于自主式水下机器人具有高度非线性、强耦合性等特性,使得其在运动控制中的应用更加困难。另外,海洋环境中动态洋流、风浪、深水压力等常见复杂的环境,都将极大地影响到水下机器人的运动控制。基于以上这些特点,很难建立一个精确的自主式水下机器人的控制模型,往往会忽略某些未建模动态建立简化模型,导致建立的模型与实际并不相匹配,从而影响到控制精度。

[0004] 目前对自主式水下机器人的运动控制方法研究,主要包括PID控制、模糊控制、滑模控制、神经网络控制和自适应控制等各种方法,也有将两种或两种以上控制方法相结合的技术,如模糊滑模变结构控制、自适应神经网络控制等。其中,华中科技大学所拥有的专利“一种水下机器人深度区间控制方法和系统”(专利号:202010310143.8)公开了一种在舵角舵速约束下的水下机器人深度区间控制方法和系统,有利于减少打舵的频率和幅度,但是此方法未在优化过程中考虑扰动,仅依靠控制器自身的鲁棒性,可能无法保证存在较大扰动时控制效果。清华大学所拥有的专利“一种基于模型预测控制的水下机器人路径跟踪控制方法”(专利号:201811383664.5)公开了一种基于模型预测控制的水下机器人路径跟踪控制方法,模型预测控制方法通过在线数值优化和滚动时域实现,处理控制输入的约束,具有一定的鲁棒性,但仍不足以处理模型不确定性和外界干扰。因此有必要提出一种可以有效处理扰动的鲁棒预测控制方法,以保证存在不确定性情况下自主式水下机器人系统能够严格满足约束条件,同时有效提高系统鲁棒性。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术存在的不足,本发明的目的是解决自主式水下机器人在未知有界扰动下的运动控制问题,并提出一种具有鲁棒性的控制方法及系统。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了如下技术方案:一种自主式水下机器人抗扰运动控制方法,包括如下步骤:

[0007] 步骤1,建立自主式水下机器人动力学和运动学简化线性模型,将其转化为状态空间下的连续时间模型,并对其进行离散化得到系统的离散时间模型;

[0008] 步骤2,建立系统名义模型,用于作为名义模型预测控制器的预测方程,将系统状态和控制输入约束转化为名义系统的收紧的状态和控制输入约束;

[0009] 步骤3,构造扰动观测器,将扰动变量视作扩展的状态量,估计系统扰动值,并将该估计值发送给辅助预测控制器;

[0010] 步骤4,设计名义模型预测控制器,构造代价函数,求解有限时域优化问题,得到名义最优控制输入以及相应的名义状态;

[0011] 步骤5,设计辅助模型预测控制器,接收名义预测输入和输出信号以及扰动观测器提供的扰动信号,针对实际系统模型求解最优控制,并将控制序列的首个控制量作用于自主式水下机器人系统;

[0012] 步骤6,测量下一时刻的系统状态,将该时刻作为新的当前时刻,返回步骤3。

[0013] 作为本发明的进一步改进,所述步骤2中名义系统的收紧的状态和控制输入约束具体表示为:

$$[0014] \quad \bar{\mathbf{X}} = \{\bar{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^m | \alpha \mathbf{x}_{\min} \leq \bar{\mathbf{x}} \leq \alpha \mathbf{x}_{\max}\}$$

$$[0015] \quad \bar{\mathbf{D}} = \{\bar{\delta} \in \mathbb{R}^n | \gamma \delta_{\min} \leq \bar{\delta} \leq \gamma \delta_{\max}\}$$

[0016] 其中, $\alpha$ 和 $\gamma$ 表示(0,1)范围内的缩紧系数。

[0017] 作为本发明的进一步改进,所述步骤3中构造扰动观测器的具体步骤如下:

[0018] 步骤31,将扰动视作新增的状态量加入不确定系统,建立如下线性状态观测器:

$$[0019] \quad \begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\delta + \hat{\mathbf{w}} + \mathbf{L}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{w}} = \beta + \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}} \end{cases}$$

[0020] 其中状态估计值 $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{z}, \hat{\theta}, \hat{q}]^T$ ,输出估计值 $\hat{\mathbf{y}}$ , $\mathbf{L}$ 、 $\mathbf{H}$ 为观测器增益矩阵, $\hat{\mathbf{w}}$ 为扰动估计值, $\beta$ 为一个辅助变量;

[0021] 步骤32,计算状态估计误差和扰动误差:

$$[0022] \quad \mathbf{e}_x = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$$

$$[0023] \quad \mathbf{e}_w = \mathbf{w} - \hat{\mathbf{w}}$$

[0024] 然后对 $\mathbf{e}_x$ 求导得到:

$$[0025] \quad \dot{\mathbf{e}}_x = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_w - \mathbf{L}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})$$

[0026] 获得扰动估计的一阶导数:

$$[0027] \quad \dot{\hat{\mathbf{w}}} = \mathbf{H}\mathbf{L}\mathbf{C}\mathbf{e}_x + \dot{\hat{\mathbf{w}}}$$

[0028] 其中扰动的导数的估计值 $\dot{\hat{\mathbf{w}}} = \mathbf{H}(\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\delta + \hat{\mathbf{w}}) + \dot{\beta}$ ;步骤33,将状态估计误差和扰动估计误差组成如下估计误差系统:

$$[0029] \quad \dot{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{H}\mathbf{L}\mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{G} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{e}_w$$

[0030] 其中 $\mathbf{G} = [\mathbf{e}_x^T \ \mathbf{e}_w^T]^T$ , $\mathbf{e}_w = \dot{\mathbf{w}} - \dot{\hat{\mathbf{w}}}$ 表示扰动的导数的估计误差。

[0031] 作为本发明的进一步改进,所述步骤4中设计名义模型预测控制器,构造代价函数,求解有限时域优化问题,得到名义最优控制输入以及相应的名义状态的具体步骤如下:

[0032] 步骤41,对每个采样时刻设计最优控制输入,将名义系统状态驱使到目标点并最小化代价函数,构造的代价函数如下:

$$[0033] \quad J = \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\bar{x}_{i|k} - x_{\text{ref}}\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\bar{\delta}_{i|k}\|_R^2 + \|\bar{x}_{N_p|k} - x_{\text{ref}}\|_P^2$$

[0034] 其中 $x_{\text{ref}}$ 为目标状态向量, $N_p$ 为预测时域, $Q$ 、 $R$ 分别表示预测状态、控制输入的正定加权矩阵, $P$ 为终端权重矩阵,通过求解Riccati方程得到;

[0035] 步骤42,满足名义预测模型约束以及名义状态约束和名义控制约束,名义状态和名义控制分别被约束在实际约束的子集内:

$$[0036] \quad \bar{x}_{i|k} \in \bar{\mathbb{X}}$$

$$[0037] \quad \bar{\delta}_{i|k} \in \bar{\mathbb{D}}$$

[0038] 模型在预测时域内最后一个预测区间所要满足的状态约束:

$$[0039] \quad \bar{x}_{N_p|k} \in \mathbb{X}_f$$

[0040] 终端约束 $\mathbb{X}_f$ 满足 $A_K \mathbb{X}_f \subset \mathbb{X}_f$ ,  $\mathbb{X}_f \subset \mathbb{X} \ominus \mathbb{Z}$ ,  $K\mathbb{X}_f \subset \mathbb{D} \ominus K\mathbb{Z}$ 等条件。其中, $A_K = A + BK$ ,  $\mathbb{Z}$ 为一个鲁棒不变集;

[0041] 步骤43,在有限时域内表示任意时刻 $k$ 的最优控制问题:

$$[0042] \quad J^* = \min_{\bar{\delta}_{\cdot|k}, \bar{x}_{\cdot|k}} J$$

$$[0043] \quad \text{s. t. } \forall i \in \mathbb{N}_0^{N_p-1}$$

$$[0044] \quad \bar{x}_{i+1|k} = A\bar{x}_{i|k} + B\bar{\delta}_{i|k}$$

$$[0045] \quad \bar{x}_{0|k} = x_{0|k}$$

$$[0046] \quad \bar{\delta}_{i|k} = K\bar{x}_{i|k}$$

[0047] 其中, $\bar{\delta}_{\cdot|k} = \{\bar{\delta}_{i|k}\}_{i=0, \dots, N_p-1}$ ,  $\bar{x}_{\cdot|k} = \{\bar{x}_{i|k}\}_{i=0, \dots, N_p}$ ,线性反馈增益 $K$ 通过线性二次型调节器求得。

[0048] 作为本发明的进一步改进,所述步骤5中针对实际系统模型求解最优控制的方式为求解一下优化问题:

$$[0049] \quad \min_{\delta_{\cdot|k}} \sum_{i=0}^{N_p} \|x_{i|k} - \bar{x}_{i|k}\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\delta_{i|k} - \bar{\delta}_{i|k}\|_R^2$$

$$[0050] \quad \text{s. t. } \forall i \in \mathbb{N}_0^{N_p-1}$$

$$[0051] \quad x_{i+1|k} = Ax_{i|k} + B\delta_{i|k} + \hat{w}_{i|k}$$

$$[0052] \quad x_{i|k} \in \mathbb{X}$$

[0053]  $\delta_{i|k} \in \mathbb{D}$

[0054] 其中  $\delta_{i|k} = \{\delta_{i|k}\}_{i=0, \dots, N_p-1}$ ,  $\hat{w}_{i|k}$  由扰动观测器估计得到。

[0055] 作为本发明的进一步改进,所述步骤1中建立自主式水下机器人动力学和运动学简化线性模型,将其转化为状态空间下的连续时间模型,并对其进行离散化得到系统的离散时间模型的具体步骤如下:

[0056] 步骤11,定义所需的坐标系:惯性坐标系和随体坐标系,惯性坐标系固定于地面,随体坐标系固定于自主式水下机器人,其中E- $\xi\eta\zeta$ 表示惯性坐标系,0-xyz表示随体坐标系;

[0057] 步骤12,定义自主式水下机器人在随体坐标系内的六个自由度的速度  $V = [u \ v \ 1 \ p \ q \ r]^T$  及相对于固定坐标系的位置和姿态角  $\eta = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$ ,自主式水下机器人运动方程如下:

[0058]  $MV + C(V)V + D(V)V + g(\eta) = \tau$

[0059]  $\dot{\eta} = J(\eta)V$

[0060] 其中,M为刚体质量与附加质量矩阵之和,C(V)为科氏力和向心力矩阵,D(V)为阻尼矩阵,g( $\eta$ )为回复力矩, $\tau$ 为推进系统输入矩阵,J( $\eta$ )为惯性坐标系与随体坐标系之间的雅可比转换矩阵;

[0061] 步骤13,假设水平面的相关状态量横向速度v、航向角速度p、横滚角速度r、横滚角 $\varphi$ 均近似为0,纵向速度u的变化是平缓稳定的,u近似为一个常数,只考虑自主式水下机器人在垂向的x-z平面内的运动,对模型进行解耦,建立简化的垂向三阶深度控制模型如下:

[0062] 
$$\begin{cases} \dot{z} = -u\theta \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{q} = \frac{M_q u q - (z_g W - z_b B_1)\theta + M_\delta u^2 \delta}{I_y - M_{\dot{q}}} + \tau_q + \Delta_q \end{cases}$$

[0063] 其中,z为惯性坐标系下的垂向深度, $\theta$ 为纵倾角,q为纵倾角速度, $\delta$ 是舵角, $I_y$ 为绕y轴转动惯量, $M_q$ 、 $M_\delta$ , $M_{\dot{q}}$ 为附加质量矩阵,W为重力, $B_1$ 为浮力, $\Delta_q$ 表示模型不确定部分, $\tau_q$ 表示由洋流和风浪引起的外界时变扰动;

[0064] 步骤14,利用传感器采集自主式水下机器人的位置信息和姿态信息,将z、 $\theta$ 、q作为状态量,舵角 $\delta$ 为控制输入, $x = [z, \theta, q]^T$ 用于描述自主式水下机器人的深度控制问题。将上述模型转换为状态空间方程:

[0065]  $\dot{x} = A_c x + B_c \delta + \Delta_w$

[0066] 其中,状态转移矩阵  $A_c = \begin{bmatrix} 0 & -u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{z_g W - z_b B_1}{I_y - M_{\dot{q}}} & \frac{M_q u}{I_y - M_{\dot{q}}} \end{bmatrix}$ , 输入矩阵  $B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{M_\delta u^2}{I_y - M_{\dot{q}}} \end{bmatrix}$ 。

按采样时间  $\Delta T$  对连续时间状态空间方程进行离散化得到:

[0067]  $x_{k+1} = A x_k + B \delta_k + w_k$

[0068] 其中,状态  $x_k \in \mathbb{R}^m$ , 控制输入  $\delta_k \in \mathbb{R}^n$ ,  $A = e^{A_c \Delta T}$ ,  $B = B_c \cdot \int_0^{\Delta T} e^{A_c \tau} d\tau$ 。

作为本发明的进一步改进,所述步骤14中假设扰动有界,且有界集为一个凸集,表示为:  
 $\mathbb{W} = \{w \in \mathbb{R}^m | -w_{\max} \leq w \leq w_{\max}\}$ ,其中 $w_{\max}$ 为扰动上界。

[0069] 本发明另一方面提供了一种应用上述方法的系统,包括数据采集装置、计算单元、执行机构和驱动机构,所述计算单元用于搭载上述方法,并执行方法后控制执行机构和驱动机构,所述数据采集装置包括姿态传感器和深度传感器,姿态传感器用于采集水下信息、机器人姿态和惯导信息,并对信息进行均值滤波,深度传感器用于测量到水面的高度距离。

[0070] 本发明的有益效果:

[0071] (1) 本发明建立双层模型预测控制框架,能够有效应对不确定性带来的影响并且跟踪参考值,具有更好的控制效果;

[0072] (2) 本发明利用扰动观测器估计由自主式水下机器人系统不确定性带来的预测误差,并对估计的扰动进行补偿,使得实际状态轨迹靠近名义系统状态轨迹,提高控制精度;

[0073] (3) 本发明显式地处理状态和控制约束并严格保证约束满足,并将自主式水下机器人系统状态保持在一条以名义状态轨迹为中心的管道内,提高系统控制鲁棒性。

## 附图说明

[0074] 图1为本发明中自主式水下机器人运动的惯性坐标系和随体坐标系;

[0075] 图2为本发明提供的实施例中自主式水下机器人深度控制的框架图。

## 具体实施方式

[0076] 下面将结合附图所给出的实施例对本发明做进一步的详述。

[0077] 以自主式水下机器人的深度控制为例,具体步骤如下:

[0078] 步骤一:根据自主式水下机器人的运动学和动力学模型建立简化的预测模型。

[0079] 首先定义所需的坐标系:惯性坐标系和随体坐标系,惯性坐标系固定于地面,随体坐标系固定于自主式水下机器人,如图1所示,其中E- $\xi\eta\zeta$ 表示惯性坐标系,0-xyz表示随体坐标系。

[0080] 然后定义自主式水下机器人在随体坐标系内的六个自由度的速度 $V = [u \ v \ l \ p \ q \ r]^T$ 及相对于固定坐标系的位置和姿态角 $\eta = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$ ,自主式水下机器人运动方程如下:

$$[0081] \quad MV + C(V)V + D(V)V + g(\eta) = \tau$$

$$[0082] \quad \dot{\eta} = J(\eta)V$$

[0083] 其中,M为刚体质量与附加质量矩阵之和,C(V)为科氏力和向心力矩阵,D(V)为阻尼矩阵,g( $\eta$ )为回复力矩, $\tau$ 为推进系统输入矩阵,J( $\eta$ )为惯性坐标系与随体坐标系之间的雅可比转换矩阵。

[0084] 假设水平面的相关状态量横向速度v、航向角速度p、横滚角速度r、横滚角 $\varphi$ 均近似为0,纵向速度u的变化是平缓稳定的,u近似为一个常数,只考虑自主式水下机器人在垂向的x-z平面内的运动,对模型进行解耦,建立简化的垂向三阶深度控制模型如下:

$$[0085] \quad \begin{cases} \dot{z} = -u\theta \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{q} = \frac{M_q u q - (z_g W - z_b B_1)\theta + M_\delta u^2 \delta}{I_y - M_q} + \tau_q + \Delta_q \end{cases}$$

[0086] 其中,  $z$  为惯性坐标系下的垂向深度,  $\theta$  为纵倾角,  $q$  为纵倾角速度,  $\delta$  是舵角,  $I_y$  为绕  $y$  轴转动惯量,  $M_q$ 、 $M_\delta$ ,  $M_q$  为附加质量矩阵,  $W$  为重力,  $B_1$  为浮力,  $\Delta_q$  表示模型不确定部分,  $\tau_q$  表示由洋流和风浪引起的外界时变扰动。

[0087] 系统的未建模动态为内部扰动, 海洋洋流、风浪等带来的多种不确定性为外部扰动, 将内部扰动  $\Delta_q$ 、外部扰动  $\tau_q$  均看作有界扰动并等效为系统的总扰动  $\Delta_w$ 。

[0088] 利用传感器采集自主式水下机器人的位置信息和姿态信息, 将  $z$ 、 $\theta$ 、 $q$  作为状态量, 舵角  $\delta$  为控制输入,  $x = [z, \theta, q]^T$  用于描述自主式水下机器人的深度控制问题。将上述模型转换为状态空间方程:

$$[0089] \quad \dot{x} = A_c x + B_c \delta + \Delta_w$$

$$[0090] \quad \text{其中, 状态转移矩阵 } A_c = \begin{bmatrix} 0 & -u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{z_g W - z_b B_1}{I_y - M_q} & \frac{M_q u}{I_y - M_q} \end{bmatrix}, \text{ 输入矩阵 } B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{M_\delta u^2}{I_y - M_q} \end{bmatrix}。$$

[0091] 按采样时间  $\Delta T$  对连续时间状态空间方程进行离散化得到:

$$[0092] \quad x_{k+1} = A x_k + B \delta_k + w_k$$

$$[0093] \quad \text{其中, 状态 } x_k \in \mathbb{R}^m, \text{ 控制输入 } \delta_k \in \mathbb{R}^n, A = e^{A_c \Delta T}, B = B_c \cdot \int_0^{\Delta T} e^{A_c \tau} d\tau。$$

[0094] 由于水下环境的复杂性和时变性, 难以通过模型或传感器获得扰动的准确值, 可以假设扰动有界, 且有界集为一个凸集, 可以表示为:  $\mathbb{W} = \{w \in \mathbb{R}^m \mid -w_{\max} \leq w \leq w_{\max}\}$ , 其中  $w_{\max}$  为扰动上界。

[0095] 步骤二: 建立自主式水下机器人系统名义模型并计算名义约束。

[0096] 首先根据系统的实际物理情况和机构的饱和约束设置状态和控制输入约束条件。自主式水下机器人的下潜速度与纵倾角、转矩相关, 较大的纵倾和转矩使其迅速下潜, 但不宜过大。为了保证运动时的安全、稳定, 必须满足一定的纵倾约束条件, 以避免发生翻滚等现象。因此, 所给状态约束包括对纵倾角和纵倾角速度的约束, 控制输入约束指允许输入的舵角变化的范围:

$$[0097] \quad \mathbb{X} = \{x \in \mathbb{R}^m \mid x_{\min} \leq x \leq x_{\max}\}$$

$$[0098] \quad \mathbb{D} = \{\delta \in \mathbb{R}^n \mid \delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}\}$$

[0099] 其中, 集合  $\mathbb{X}$ 、 $\mathbb{D}$  都是包含原点在内的紧凸集,  $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 、 $\delta_{\min}$ 、 $\delta_{\max}$  是已知的常数。

[0100] 名义模型是指忽略系统的所有不确定性, 在控制系统中建立的虚拟但精确已知的模型, 写成状态空间形式:

$$[0101] \quad \bar{x}_{k+1} = A \bar{x}_k + B \bar{\delta}_k$$

[0102] 其中,  $\bar{x}_k$  为k时刻的名义状态,  $\bar{\delta}_k$  为k时刻的名义控制输入。

[0103] 实际模型与名义模型之间相差的部分:

$$[0104] \quad \tilde{x}_k = x_k - \bar{x}_k$$

[0105] 根据自主式水下机器人系统状态和控制约束计算名义系统的状态、输入约束。由于忽略了系统不确定性, 名义系统相比于实际系统有更紧凑的约束, 计算名义状态约束和名义控制约束是在实际的约束基础上进行收紧, 分别表示为:

$$[0106] \quad \bar{\mathcal{X}} = \{\bar{x} \in \mathbb{R}^m \mid \alpha x_{\min} \leq \bar{x} \leq \alpha x_{\max}\}$$

$$[0107] \quad \bar{\mathcal{D}} = \{\bar{\delta} \in \mathbb{R}^n \mid \gamma \delta_{\min} \leq \bar{\delta} \leq \gamma \delta_{\max}\}$$

[0108] 其中,  $\alpha$  和  $\gamma$  表示 (0, 1) 范围内的缩紧系数。

[0109] 步骤三: 利用扰动观测器估计系统扰动。首先将扰动视作扩展状态量加入不确定系统, 建立如下线性状态观测器:

$$[0110] \quad \begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\delta + \hat{w} + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \\ \hat{w} = \beta + H\hat{x} \end{cases}$$

[0111] 其中状态估计值  $\hat{x} = [\hat{z}, \hat{\theta}, \hat{q}]^T$ , 输出估计值  $\hat{y}$ , L、H 为观测器增益矩阵,  $\hat{w}$  为扰动估计值,  $\beta$  为一个辅助变量。

[0112] 状态估计误差和扰动估计误差如下:

$$[0113] \quad e_x = x - \hat{x}$$

$$[0114] \quad e_w = w - \hat{w}$$

[0115] 然后对  $e_x$  求导得到:

$$[0116] \quad \dot{e}_x = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ae_x + e_w - L(y - \hat{y})$$

[0117] 那么扰动估计的一阶导数可以表示为:

$$[0118] \quad \dot{\hat{w}} = HLCe_x + \dot{\hat{w}}$$

[0119] 其中扰动的导数的估计值  $\dot{\hat{w}} = H(A\hat{x} + B\delta + \hat{w}) + \dot{\beta}$ 。

[0120] 状态估计误差和扰动估计误差组成如下估计误差系统:

$$[0121] \quad \dot{G} = \begin{bmatrix} A - LC & I \\ -HLC & 0 \end{bmatrix} G + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} e_w$$

[0122] 其中  $G = [e_x^T \ e_w^T]^T$ ,  $e_w = \dot{w} - \dot{\hat{w}}$  表示扰动的导数的估计误差。

[0123] 通过设计适当的观测器增益矩阵, 使所述误差系统的特征值均位于左半复平面, 使其估计误差收敛于零, 从而保证该扰动观测器的稳定性。所获得的扰动估计值将被反馈至辅助预测控制器, 尽可能抵消扰动给被控对象带来的影响。

[0124] 步骤四: 设计名义模型预测控制器, 计算预测时域内的最优名义控制输入。

[0125] 对每个采样时刻设计最优控制输入, 将名义系统状态驱使到目标点并最小化代价函数。控制目标为不考虑系统不确定性和未知时变外扰的情况下, 设计名义输入舵角, 使预

测时域内名义状态与给定参考状态值之间误差最小,代价函数反映了系统对各个预测阶段状态和输入的控制要求,采用如下形式的代价函数:

$$[0126] \quad J = \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\bar{x}_{i|k} - x_{\text{ref}}\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\bar{\delta}_{i|k}\|_R^2 + \|\bar{x}_{N_p|k} - x_{\text{ref}}\|_P^2$$

[0127] 其中 $x_{\text{ref}}$ 为目标状态向量, $N_p$ 为预测时域, $Q$ 、 $R$ 分别表示预测状态、控制输入的正定加权矩阵。 $P$ 为终端权重矩阵,通过求解Riccati方程得到。

[0128] 求解最优问题需满足名义预测模型约束以及名义状态约束和名义控制约束。在有限时域内,任意时刻 $k$ 的最优控制问题表示为:

$$[0129] \quad J^* = \min_{\bar{\delta}_{\cdot|k}, \bar{x}_{\cdot|k}} J$$

$$[0130] \quad \text{s. t. } \forall i \in \mathbb{N}_0^{N_p-1}$$

$$[0131] \quad \bar{x}_{i+1|k} = A\bar{x}_{i|k} + B\bar{\delta}_{i|k}$$

$$[0132] \quad \bar{x}_{0|k} = x_{0|k}$$

$$[0133] \quad \bar{\delta}_{i|k} = K\bar{x}_{i|k}$$

[0134] 其中,  $\bar{\delta}_{\cdot|k} = \{\bar{\delta}_{i|k}\}_{i=0, \dots, N_p-1}$ ,  $\bar{x}_{\cdot|k} = \{\bar{x}_{i|k}\}_{i=0, \dots, N_p}$ , 线性反馈增益 $K$ 通过线性二次型调节器求得。

[0135] 名义状态和名义控制输入分别被约束在实际约束的子集内:

$$[0136] \quad \bar{x}_{i|k} \in \bar{\mathbb{X}}$$

$$[0137] \quad \bar{\delta}_{i|k} \in \bar{\mathbb{D}}$$

[0138] 模型在预测时域内最后一个预测区间所要满足的状态约束:

$$[0139] \quad \bar{x}_{N_p|k} \in \mathbb{X}_f$$

[0140] 终端约束 $\mathbb{X}_f$ 满足 $A_K \mathbb{X}_f \subset \mathbb{X}_f$ ,  $\mathbb{X}_f \subset \mathbb{X} \ominus \mathbb{Z}$ ,  $K\mathbb{X}_f \subset \mathbb{D} \ominus K\mathbb{Z}$ 等条件。其中,  $A_K = A + BK$ ,  $\mathbb{Z}$ 为一个鲁棒不变集。

[0141] 该优化问题希望预测状态尽可能接近目标状态值以及输入的舵角尽可能小。求解上述优化问题得到名义最优控制序列 $\bar{\delta}_{\cdot|k}^*$ 及相应的名义状态序列 $\bar{x}_{\cdot|k}^*$ ,并发送给下层的控制器,作为辅助预测控制器的参考指令。

[0142] 步骤五:设计辅助预测控制器,基于实际预测模型设计控制策略。

[0143] 由于自主式水下机器人系统会受到扰动影响,未来状态轨迹可能会与名义预测轨迹不同。为了抵消扰动的影响,通过设计辅助预测控制器,使得系统状态和控制输入靠近名义序列。求解以下优化问题:

$$[0144] \quad \min_{\delta_{\cdot|k}} \sum_{i=0}^{N_p} \|x_{i|k} - \bar{x}_{i|k}\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} \|\delta_{i|k} - \bar{\delta}_{i|k}\|_R^2$$

$$[0145] \quad \text{s. t. } \forall i \in \mathbb{N}_0^{N_p-1}$$

$$[0146] \quad x_{i+1|k} = Ax_{i|k} + B\delta_{i|k} + \hat{w}_{i|k}$$

$$[0147] \quad x_{i|k} \in \mathbb{X}$$

$$[0148] \quad \delta_{i|k} \in \mathbb{D}$$

[0149] 其中  $\delta_{\cdot|k} = \{\delta_{i|k}\}_{i=0, \dots, N_p-1}$ ,  $\hat{w}_{i|k}$  由扰动观测器估计得到。

[0150] 最终的控制信号  $\delta_{\cdot|k}^*$  是通过步骤四和步骤五求解两个优化问题得到, 将序列的首个控制信号  $\delta_{0|k}^*$  作为舵角信号作用给被控对象。

[0151] 步骤六: 测量下一时刻的系统状态, 将该时刻作为新的当前时刻, 返回步骤三。

[0152] 本实施例另一方面提供了一种系统, 包括数据采集装置、计算单元、执行机构和驱动机构, 所述计算单元用于搭载上述方法, 并执行方法后控制执行机构和驱动机构, 所述数据采集装置包括姿态传感器和深度传感器, 姿态传感器用于采集水下信息、机器人姿态和惯导信息, 并对信息进行均值滤波, 深度传感器用于测量到水面的高度距离, 在考虑未建模动态和动态洋流、风浪等造成的未知扰动情况下, 建立满足状态和控制约束的系统模型, 并结合扰动观测器设计双层模型预测控制器。上层针对名义模型设计名义预测控制器, 求出名义输入以及名义状态, 使得名义状态与参考值误差最小。下层针对实际模型设计辅助预测控制器, 求解实际作用于自主式水下机器人的控制输入, 以补偿名义状态与实际状态之间的误差。该方法能够保证自主式水下机器人系统状态严格保持在目标状态的较小邻域内波动以精确地实现运动控制。

[0153] 以上所述仅是本发明的优选实施方式, 本发明的保护范围并不局限于上述实施例, 凡属于本发明思路下的技术方案均属于本发明的保护范围。应当指出, 对于本技术领域的普通技术人员来说, 在不脱离本发明原理前提下的若干改进和润饰, 这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

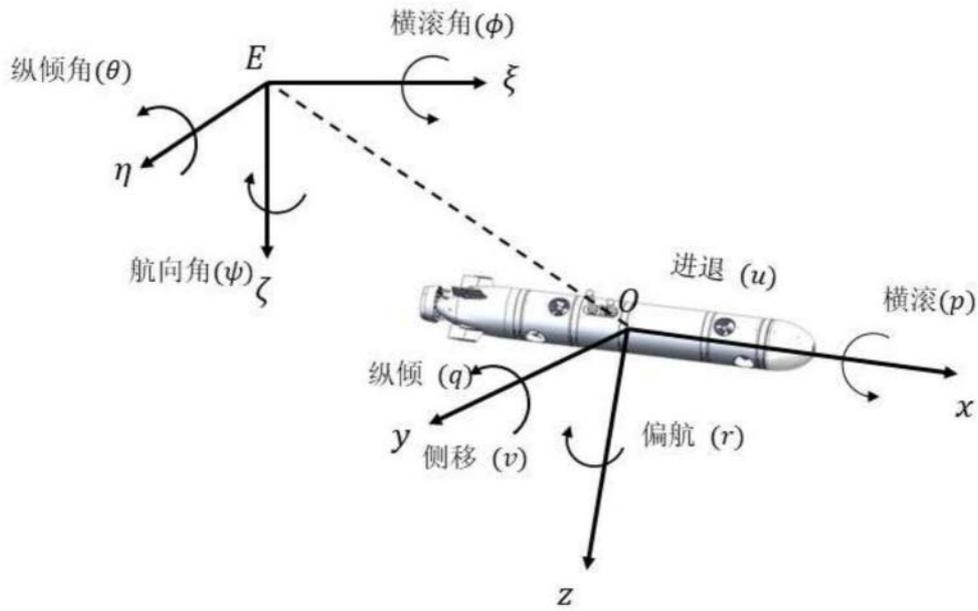


图1

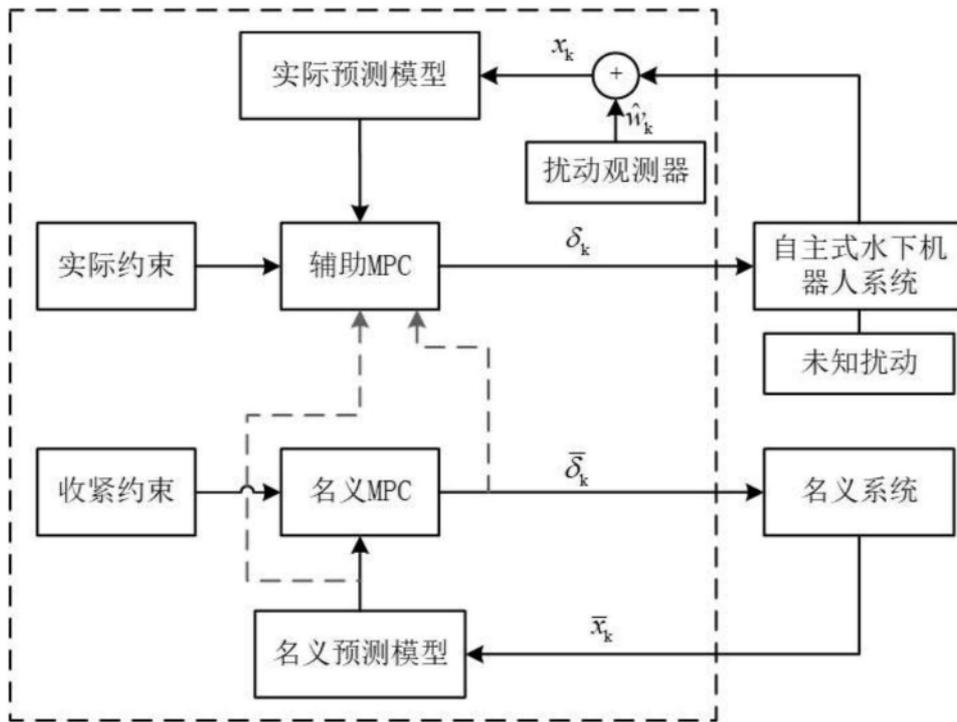


图2