



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109828462 A

(43)申请公布日 2019.05.31

(21)申请号 201910123250.7

(22)申请日 2019.02.18

(71)申请人 哈尔滨工程大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街145号哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

(72)发明人 李晔 潘恺文 廖煜雷 王磊峰 张蔚欣 卢倪斌 李子圆 武皓微

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器及控制方法

(57)摘要

本发明提供的是一种波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器及控制方法。利用相似原理,结合波浪滑翔器变航速下的艏向响应方程参数变化规律,实现扩张状态观测器参数的自适应调节。利用扩张状态观测器得到波浪滑翔器艏向、艏向变化率和所受扰动的状态信息,将状态信息输入曲面控制器,并针对扰动调节曲面偏移量进行补偿。通过跟踪微分器安排过渡过程,降低波浪滑翔器期望艏向突变时艏向响应的超调。本发明的方法,使波浪滑翔器在不同航速、不同干扰下均能实现可靠、响应效果优良的艏向控制,提升了波浪滑翔器潜体艏向控制鲁棒性。控制器参数少易调节,具有变航速下参数自适应能力,解决了变航速下波浪滑翔器潜体艏向控制问题,提高了控制器的适用性。



1. 一种波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器,由三部分串联结构组成,分别为跟踪微分器TD、扩张状态观测器与曲面控制器,其特征是:所述扩张状态观测器中的扰动补偿参数 b 根据波浪滑翔器的当前航速进行实时调节,扰动补偿参数 b 为波浪滑翔器潜体艏向非线性一阶KT方程中 K 与 T 的比值,在不同航速下利用相似原理得到扰动补偿参数 b ;所述扩张状态观测器实时估计系统的总干扰,并调节曲面控制器的曲面偏移值进行干扰补偿。

2. 一种基于权利要求1所述的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器的控制方法,其特征是:

第一步:在一个无海流干扰的工况下进行波浪滑翔器回转运动试验与Z型操舵试验,记录波浪滑翔器的在这个工况下的航速 V_0 与艏向响应;

第二步:建立波浪滑翔器潜体艏向非线性一阶KT方程,并利用回转运动试验与Z型操舵试验的试验数据辨识波浪滑翔器潜体的参数,之后利用相似原理推算出其他航速下波浪滑翔器潜体的参数;

第三步:将波浪滑翔器期望艏向 ψ_E 输入跟踪微分器安排过渡过程 x_1 ,并得到其微分信号 x_2 ;

第四步:主控计算机依据航速传感器反馈的波浪滑翔器的当前航速 V 计算并更新扩张状态观测器中的扰动补偿参数 b ;

第五步:将当前波浪滑翔器潜体艏向 ψ_G 输入扩张状态观测器,输出3个艏向响应系统的内部状态信息;

第六步:将扩张状态观测器输出的艏向响应系统的内部状态信息中艏向与角速度信息分别与跟踪微分器输出的期望艏向逼近量及其近似微分作差得到误差信号,将误差信号与艏向响应系统的内部状态信息中的扰动信号输入曲面控制器,由曲面控制器输出控制系统期望舵角 δ_E ;

第七步:主控计算机控制舵机转至期望舵角 δ_E ,并返回第三步进行下一节拍的控制。

3. 根据权利要求2所述的的控制方法,其特征是:浪滑翔器潜体的参数包括应舵指数 T 、回转性指数 K 、模型非线性项系数 α ,无海流干扰的工况下航速 V_0 下的参数为 K_0 、 T_0 、 α_0 ,所述利用相似原理推算出的其他航速下波浪滑翔器潜体的参数是指,在航速 V 下波浪滑翔器潜体的操纵性系数利用无海流干扰的工况下航速 V_0 下操纵性参数推导得出,表示为:

$$\begin{cases} K_v = K' / \left(\frac{L}{V} \right) = K_0 \left(\frac{V}{V_0} \right) \\ T_v = T' / \left(\frac{V}{L} \right) = T_0 \left(\frac{V_0}{V} \right) \\ \alpha_v = \alpha' / \left(\frac{V^2}{L} \right) = \alpha_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 \end{cases}$$

其中: L 为波浪滑翔器潜体长度。

4. 根据权利要求3所述的的控制方法,其特征是所述依据航速传感器反馈的波浪滑翔器的当前航速 V 计算并更新扩张状态观测器中的扰动补偿参数 b 具体包括:

$$b = \frac{K_v}{T_v} = V^2 \frac{K_0}{T_0}。$$

5. 根据权利要求2或3或4所述的的控制方法,其特征是曲面控制器的控制模型为:

$$\begin{cases} u_E = 2.0 / (1.0 + \exp(-k_1 e - k_2 \dot{e})) - 1.0 - z_3 / b \\ \delta_E = \delta_{\max} u_E \end{cases}$$

其中 e 、 \dot{e} 为归一化的误差信号; u_E 为归一化的控制力输出; k_1 、 k_2 分别为对应偏差和偏差变化率的控制参数; δ_{\max} 为最大输出舵角; δ_E 为期望舵角。

波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器及控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种波浪滑翔器的艏向控制装置,本发明也涉及一种波浪滑翔器的艏向控制方法。

背景技术

[0002] 波浪滑翔器作为一种新型海洋观测平台,不采用传统航行器螺旋桨推进的方式,通过捕获海洋中的波浪能转化为自身航行的动力,利用太阳能为控制系统提供电力,具备长航时,大航程的作业能力。同时,波浪滑翔器还具备运营成本低,对环境零污染,恶劣海况下生存能力强等特点。因此,波浪滑翔器被广泛用于各种长期的,大范围的海洋观测任务,如气象信息收集、生物迁徙跟踪、海洋环境监测等。

[0003] 由于波浪滑翔器航行动力是由波浪能转化而来的,而非借助于稳定可控的螺旋桨等推进设备,因此在航行过程中波浪滑翔器的航速处在一个绝对值很小的数值区域内,最大约3kn,且航速是不可控制的。虽然波浪滑翔器航速变化的绝对值较小,但其相对改变量相比于其他航行器是非常大的。根据船舶操纵性知识可知,当航速相对变化量较大时,对航行器艏向控制响应影响非常大。当波浪滑翔器在低海况环境下航行时,艏向控制响应速度会大幅降低,此时,传统的PID艏向控制器在控制波浪滑翔器潜体艏向时,由于艏向响应速度慢,会造成积分项大量累积,引起艏向控制超调或者发散,而如果减小积分项系数则会引起系统在稳态干扰下收敛速度慢,控制效果差。如若针对不同的航速下的艏向控制设置多组PID参数,则会消耗大量的调试时间。因此不同航速下,尤其是超低航速下的波浪滑翔器艏向控制是波浪滑翔器航行控制中不可忽视的问题。

[0004] 自抗扰控制理论中,扩张状态观测器可以根据系统的输入和输出来对系统的内部信息和扰动情况进行实时观测和估计。然而自抗扰控制器中参数众多,调节参数复杂,且参数的设置受响应模型的影响,在变航速下波浪滑翔器的艏向响应模型参数变化较大,这也增加了自抗扰控制方法的应用难度。传统的曲面控制器具有响应快,鲁棒性强,控制参数调节简单等众多优点,常用于水面机器人的艏向控制。当受控系统存在内部或外部的稳态干扰时,需要设置曲面控制器的偏移值对干扰进行补偿。然而在波浪滑翔器航行的过程中,随着海流的变化,波浪滑翔器潜体艏向的稳态干扰不是恒定的,这便使曲面控制器的偏移值设定造成了困难。

[0005] 公开号为CN 104865968A的专利文件中公开的一种采用串级自抗扰控制技术的四旋翼飞行器悬停控制方法中,通过串级自抗扰技术设计四旋翼飞行器悬停控制策略,将系统的模型不确定性和系统内外部扰动估计用扩张状态观测器实时估计并补偿。公开号为CN 104865968A的专利文件中公开的技术方案与本发明考虑波浪滑翔器艏向响应模型和相似原理,进而提出的一种波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制方法,用以解决变航速、艏向响应模型参数大幅改变下的波浪滑翔器潜体艏向控制问题有本质不同。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种能够提升波浪滑翔器在不同航速与海流干扰条件下的艏向控制鲁棒性的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器。本发明的目的还在于提供一种基于本发明的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器的控制方法。

[0007] 本发明的目的是这样实现的：

[0008] 本发明的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器，三部分串联结构组成，分别为跟踪微分器TD、扩张状态观测器与曲面控制器，所述扩张状态观测器中的扰动补偿参数 b 根据波浪滑翔器的当前航速进行实时调节，扰动补偿参数 b 为波浪滑翔器潜体艏向非线性一阶KT方程中 K 与 T 的比值，在不同航速下利用相似原理得到扰动补偿参数 b ；所述扩张状态观测器实时估计系统的总干扰，并调节曲面控制器的曲面偏移值进行干扰补偿。

[0009] 基于本发明的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器的控制方法包括如下步骤：

[0010] 第一步：在一个无海流干扰的工况下进行波浪滑翔器回转运动试验与Z型操舵试验，记录波浪滑翔器的在这个工况下的航速 V_0 与艏向响应；

[0011] 第二步：建立波浪滑翔器潜体艏向非线性一阶KT方程，并利用回转运动试验与Z型操舵试验的试验数据辨识波浪滑翔器潜体的 K 、 T 、 α 参数，之后利用相似原理推算出其他航速下波浪滑翔器潜体的 K 、 T 、 α 参数；

[0012] 第三步：将波浪滑翔器期望艏向 ψ_E 输入跟踪微分器安排过渡过程 x_1 ，并得到其微分信号 x_2 ；

[0013] 第四步：主控计算机依据航速传感器反馈的波浪滑翔器的当前航速 V 计算并更新扩张状态观测器中的扰动补偿参数 b ；

[0014] 第五步：将当前波浪滑翔器潜体艏向 ψ_C 输入扩张状态观测器，输出3个艏向响应系统的内部状态信息；

[0015] 第六步：将扩张状态观测器输出的艏向响应系统的内部状态信息中艏向与角速度信息分别与跟踪微分器输出的期望艏向逼近量及其近似微分作差得到误差信号，将误差信号与艏向响应系统的内部状态信息中的扰动信号输入曲面控制器，由曲面控制器输出控制系统期望舵角 δ_E ；

[0016] 第七步：主控计算机控制舵机转至期望舵角 δ_E ，并返回第三步进行下一节拍的的控制。

[0017] 本发明的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制方法，首先利用相似原理，结合波浪滑翔器变航速下的艏向响应方程参数变化规律，实现扩张状态观测器参数的自适应调节。利用扩张状态观测器得到波浪滑翔器艏向、艏向变化率和所受扰动的状态信息，将状态信息输入曲面控制器，并针对扰动调节曲面偏移量进行补偿。通过跟踪微分器安排过渡过程，降低了波浪滑翔器期望艏向突变时艏向响应的超调。所述的一种自适应波浪滑翔器艏向控制方法，使波浪滑翔器在不同航速下，不同干扰下均能实现可靠的、响应效果优良的艏向控制，提升了波浪滑翔器潜体艏向控制鲁棒性。控制器参数少易调节，具有变航速下参数自适应能力，解决了变航速下波浪滑翔器潜体艏向控制问题，提高了控制器的适用性。

[0018] 本发明针对波浪滑翔器的航速特点设计了一种自适应艏向控制率，提升了波浪滑翔器在不同航速与海流干扰条件下的艏向控制鲁棒性。

[0019] 本发明结合跟踪微分器、扩张状态观测器与曲面控制器的特点，考虑波浪滑翔器

艏向响应模型和相似原理,提出一种参数少,具有变航速下参数自适应能力的自适应艏向控制方法。解决不同航速下波浪滑翔器潜体艏向控制问题。

[0020] 公开号为CN 104865968A的专利文件中公开的技术方案与本发明的考虑波浪滑翔器艏向响应模型和相似原理,但是本发明提出的一种波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制方法,用以解决变航速、艏向响应模型参数大幅改变下的波浪滑翔器潜体艏向控制问题与公开号为CN104865968A的专利文件有本质不同。

[0021] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:利用相似原理,将波浪滑翔器不同航速状态下的潜体操纵性系数变化规律引入扩张状态观测器的参数调节,既减小了参数调节的难度,又使扩张状态观测器在波浪滑翔器航速变化产生模型摄动时具有良好的自适应性。同时,本发明结合了曲面控制器参数调节方便的特点,通过跟踪微分器、扩张状态观测器与曲面控制器的串联结构,使波浪滑翔器在不同航速下的潜体艏向控制均具有可靠的、响应迅速的抗稳态干扰能力,提升了波浪滑翔器艏向控制的鲁棒性。

附图说明

[0022] 图1为本发明的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制系统结构示意图;

[0023] 图2为本发明的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制方法流程图。

具体实施方式

[0024] 下面结合附图举例对本发明作进一步描述。

[0025] 实施例一:

[0026] 本发明的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制器为串联结构,由三部分组成:分别为跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器与曲面控制器。其中扩张状态观测器中的扰动补偿参数 b 根据波浪滑翔器的当前航速进行实时调节。扰动补偿参数 b 为波浪滑翔器潜体艏向非线性一阶KT方程中 K 与 T 的比值,在不同航速下利用相似原理得到扰动补偿参数 b 。扩张状态观测器实时估计系统的总干扰,并调节曲面控制器的曲面偏移值进行干扰补偿。

[0027] 本发明的波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制方法包括如下步骤:

[0028] 第一步:在一个无海流干扰的典型工况下进行波浪滑翔器回转运动试验与Z型操舵试验。记录波浪滑翔器的在这个工况下的航速 V_0 与艏向响应。

[0029] 第二步:建立波浪滑翔器潜体艏向非线性一阶KT方程,并利用试验数据辨识波浪滑翔器潜体的 K 、 T 、 α 参数。之后利用相似原理推算出其他航速下波浪滑翔器潜体的 K 、 T 、 α 参数。

[0030] 第三步:将波浪滑翔器期望艏向 ψ_E 输入跟踪微分器安排过渡过程 x_1 ,并得到其微分信号 x_2 。

[0031] 第四步:主控计算机依据航速传感器反馈的波浪滑翔器的当前航速 V 计算并更新扩张状态观测器中的扰动补偿参数 b 。

[0032] 第五步:将当前波浪滑翔器潜体艏向 ψ_G 输入扩张状态观测器,输出3个艏向响应系统的内部状态信息。

[0033] 第六步:将扩张状态观测器输出的艏向响应系统的内部状态信息中艏向与角速度信息分别与跟踪微分器输出的期望艏向逼近量及其近似微分作差得到误差信号,将误差信

号与艏向响应系统的内部状态信息中的扰动信号输入曲面控制器,由曲面控制器输出控制系统期望舵角 δ_E 。

[0034] 第七步:主控计算机控制舵机转至期望舵角 δ_E ,并返回第三步进行下一节拍的控制。

[0035] 实施例二:

[0036] 波浪滑翔器由浮体、潜体组成,浮体和潜体之间通过系缆连接。所述浮体上安装有主控计算机与航速传感器,所述潜体上安装有艏向传感器与舵机。航速传感器测量波浪滑翔器的当前航速 V ,艏向传感器测量潜体艏向 ψ_G ,主控计算机通过变航速自适应艏向控制方法计算期望舵角 δ_E ,并控制舵机完成对潜体艏向的控制。

[0037] 结合图1描述本发明中波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制系统结构示意图。所述的一种波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制包括:艏向控制器为串联结构,由三部分组成:分别为跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器与曲面控制器。其中扩张状态观测器中的扰动补偿参数 b 根据波浪滑翔器的当前航速进行实时调节。扰动补偿参数 b 为波浪滑翔器潜体艏向非线性一阶KT方程中 K 与 T 的比值,在不同航速下利用相似原理得到扰动补偿参数 b 。扩张状态观测器实时估计系统的总干扰,并由曲面控制器的曲面偏移值进行干扰补偿。

[0038] 结合图2描述本发明中波浪滑翔器变航速下自适应艏向控制方法的步骤如下:

[0039] 第一步:在一个无海流干扰的典型工况下进行波浪滑翔器回转运动试验与Z型操舵试验。记录波浪滑翔器的在这个工况下的航速 V_0 与艏向响应,

[0040] 第二步:建立波浪滑翔器潜体艏向非线性一阶KT方程,即:

$$[0041] \quad \dot{r} = -\frac{1}{T}r + \frac{K}{T}\delta + \frac{\alpha}{T}r^3 \quad (1)$$

[0042] 其中 T 为应舵指数(时间常数), K 为回转性指数, α 为模型非线性项系数(Norbbin系数), \dot{r} 为波浪滑翔器潜体回转角加速度, r 为波浪滑翔器潜体回转角速度。依据试验数据利用最小二乘法等常用的模型辨识方法辨识波浪滑翔器在航速 V_0 时潜体的 K_0 、 T_0 、 α_0 参数。波浪滑翔器潜体的无因次操纵性系数为:

$$[0043] \quad \begin{cases} K' = K_0 \left(\frac{L}{V_0} \right) \\ T' = T_0 \left(\frac{V_0}{L} \right) \\ \alpha' = \alpha_0 \left(\frac{V_0^2}{L} \right) \end{cases} \quad (2-1)$$

[0044] 其中 L 为波浪滑翔器潜体长度。根据相似原理,在航速 V 下波浪滑翔器潜体的操纵性系数可以利用航速 V_0 下操纵性参数推导得出。即:

$$[0045] \quad \begin{cases} K_v = K' / \left(\frac{L}{V} \right) = K_0 \left(\frac{V}{V_0} \right) \\ T_v = T' / \left(\frac{V}{L} \right) = T_0 \left(\frac{V_0}{V} \right) \\ \alpha_v = \alpha' / \left(\frac{V^2}{L} \right) = \alpha_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 \end{cases} \quad (2-2)$$

[0046] 第三步:将波浪滑翔器期望艏向 ψ_E 输入跟踪微分器安排过渡过程 x_1 ,并得到其微分信号 x_2 。离散形式的跟踪微分控制器表示如下:

$$[0047] \quad \begin{cases} fh = fhan(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h) \\ x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hfh \end{cases} \quad (3)$$

[0048] 其中, $fhan(x_1(k), x_2(k), r, h)$ 为最速控制综合函数,表达式如下:

$$[0049] \quad \begin{cases} d = rh^2, a_0 = hx_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d^2 + 8d|y|} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d) / 2 \\ S_y = (\text{sign}(y + d) - \text{sign}(y - d)) / 2 \\ a = (a_0 + y - a_2)S_y + a_2 \\ S_a = (\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d)) / 2 \\ fhan = -r(a/d - \text{sign}(a))S_a - r\text{sign}(a) \end{cases} \quad (4)$$

[0050] $v(k)$ 表示随时间变化的输入信号,即波浪滑翔器期望艏向 $\psi_E(k)$; $x_1(k)$ 表示对输入信号的跟踪值; $x_2(k)$ 表示输入信号的变化率; r 为快速因子; h 为控制节拍。

[0051] 第四步:主控计算机依据航速传感器反馈的波浪滑翔器的当前航速 V 计算并更新扩张状态观测器中的扰动补偿参数 b 。

$$[0052] \quad b = \frac{K_v}{T_v} = V^2 \frac{K_0}{T_0} \quad (5)$$

[0053] 第五步:将当前波浪滑翔器潜体艏向 ψ_0 输入扩张状态观测器,输出3个艏向响应系统的内部状态信息。

$$[0054] \quad \begin{cases} e = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}fal(e, \alpha_{01}, \delta_1) + bu(k)) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_{03}fal(e, \alpha_{02}, \delta_1) \end{cases} \quad (6)$$

[0055] 其中:

$$[0056] \quad fal = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e), |e| > \delta_1 \\ \frac{e}{\delta_1^{1-\alpha}}, |e| \leq \delta_1 \end{cases} \quad (7)$$

[0057] $y(k)$ 为系统的输出,即波浪滑翔器当前潜体艏向 $\psi_G(k)$; $u(k)$ 为系统的控制量,即波浪滑翔器当前舵角 $\delta(k)$; z_1 为扩张状态观测器输出的潜体艏向, z_2 为潜体回转角速度估计; z_3 为系统扰动估计; β_{01} , β_{02} 和 β_{03} 为增益系数; δ_1 为可调参数; h 为控制节拍。

[0058] 第六步:将扩张状态观测器输出的艏向响应系统的内部状态信息中艏向与角速度信息 z_1 、 z_2 分别与跟踪微分器输出的期望艏向逼近量及其近似微分 x_1 、 x_2 作差得到误差信号并进行归一化。将归一化的误差信号与艏向响应系统的内部状态信息中的扰动信号输入曲面控制器,由曲面控制器输出控制系统期望舵角 δ_E 。曲面控制器的控制模型为:

$$[0059] \quad \begin{cases} u_E = 2.0 / (1.0 + \exp(-k_1 e - k_2 \dot{e})) - 1.0 - z_3 / b \\ \delta_E = \delta_{\max} u_E \end{cases} \quad (8)$$

[0060] 其中 e 、 \dot{e} 为归一化的误差信号; u_E 为归一化的控制力输出; k_1 、 k_2 分别为对应偏差和偏差变化率的控制参数,根据曲面控制器的特性,一般取为3.0左右; δ_{\max} 为最大输出舵角; δ_E 为期望舵角。

[0061] 第七步:主控计算机控制舵机转至期望舵角 δ_E ,并返回第三步进行下一节拍的控制。

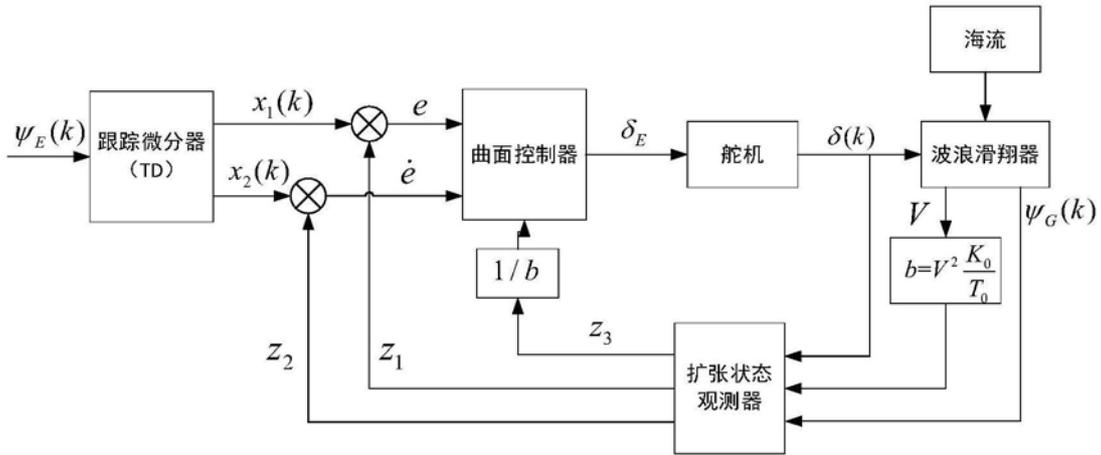


图1

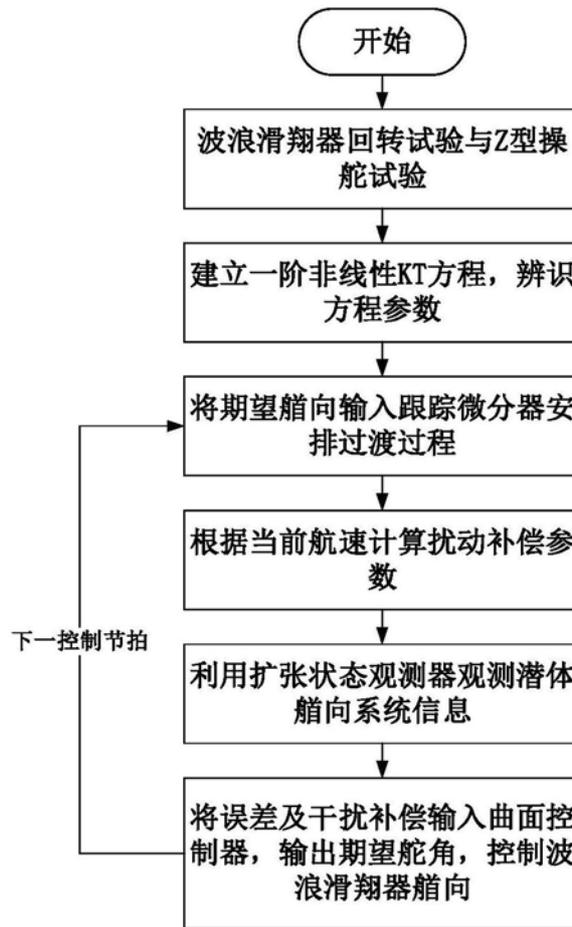


图2