



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112506052 B

(45) 授权公告日 2022.05.31

(21) 申请号 202011335693.1

CN 108594656 A, 2018.09.28

(22) 申请日 2020.11.24

CN 107861382 A, 2018.03.30

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 109283941 A, 2019.01.29

申请公布号 CN 112506052 A

CN 111941432 A, 2020.11.17

(43) 申请公布日 2021.03.16

Rongxin Cui 等. Adaptive sliding-mode attitude control for autonomous underwater vehicles with input nonlinearities.《Ocean Engineering》.2016, 第123卷第45-54页.

(73) 专利权人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市友谊西路127号

Rongxin Cui 等. Extended State Observer-Based Integral Sliding Mode Control for an Underwater Robot With Unknown Disturbances and Uncertain Nonlinearities.《IEEE Transactions on Industrial Electronics》.2017, 第64卷(第8期), 第6785-6795页.

(72) 发明人 崔荣鑫 蒋春宇 严卫生 陈乐鹏

(74) 专利代理机构 西安匠星互智知识产权代理

有限公司 61291

专利代理师 陈星

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109814386 A, 2019.05.28

审查员 张慧慧

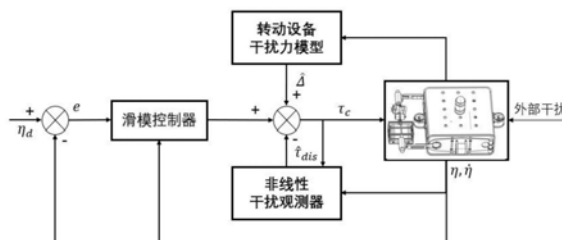
权利要求书2页 说明书7页 附图6页

(54) 发明名称

一种水下考古机器人抗云台转动干扰控制方法

(57) 摘要

本发明提出了一种水下考古机器人抗云台转动干扰控制方法。该方法由前馈补偿和反馈控制两部分构成。前馈补偿由以下两部分构成：1) 利用模型先验信息，对云台转动设备使用牛顿-欧拉迭代法进行动力学建模，求解其对机器人本体部分产生的耦合作用力和力矩。2) 将外部环境扰动、建模误差以及云台转动设备干扰计算误差视为集总干扰，使用非线性干扰观测器对其进行估计。反馈控制部分使用滑模控制，在定义跟踪误差并构建滑模面后，为降低滑模抖振现象，在指数趋近律中引入了饱和函数。本发明充分利用机器人云台结构的先验信息进行力学计算，无需安装外部设备，并克服了外部环境扰动、建模误差等其他干扰的影响。



CN 112506052 B

1. 一种水下考古机器人抗云台转动干扰控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:建立水下考古机器人六自由度运动模型:

$$\begin{cases} M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v + g(\eta) + \Delta = \tau_c + \tau_{dis} \\ \dot{\eta} = Jv \end{cases}$$

其中, $\eta$ 为水下考古机器人在地面坐标系下的广义位姿矢量, $J$ 为水下考古机器人载体坐标系到地面坐标系的坐标转换矩阵, $v$ 为水下考古机器人在载体坐标系下的广义速度矢量, $M_{RB}$ 为水下考古机器人的惯性系数矩阵, $C_{RB}(v)$ 为水下考古机器人的哥氏力和向心力矩阵, $g(\eta)$ 为水下考古机器人的恢复力和力矩; $\Delta$ 为水下考古机器人上安装的云台转动设备对机器人本体部分产生的耦合作用力和力矩; $\tau_c$ 为水下考古机器人推进器产生的控制力和力矩, $\tau_{dis}$ 为水下考古机器人系统的集总干扰;

步骤2:迭代计算云台转动设备产生的耦合作用力和力矩

$$\hat{\Delta} = [f_c, n_c]^T$$

$$f_c = J_c^{-1}F_c$$

$$n_c = J_c^{-1}[N_c + P_c \times F_c] + P_{corg} \times f_c$$

其中, $\hat{\Delta}$ 为云台转动设备对水下考古机器人本体部分产生的耦合作用力和力矩的计算值,由力 $f_c$ 和力矩 $n_c$ 组成; $J_c$ 为水下考古机器人载体坐标系到固连坐标系的坐标转换矩阵,所述固连坐标系为以云台转动轴在云台转动设备内部的中点为原点设立的坐标系,可保证转动过程中载体坐标系原点到固连坐标系原点的位置矢量不变,云台无转动时固连坐标系各坐标轴与载体坐标系坐标轴对应平行; $P_c$ 为固连坐标系原点到云台转动设备质心的位置矢量在固连坐标系的表达, $P_{corg}$ 为载体坐标系原点到固连坐标系原点的位置矢量在载体坐标系的表达, $F_c$ 和 $N_c$ 分别为云台转动设备在质心处受到的力和力矩,其表达式为:

$$F_c = m_c \dot{v}_{cs}$$

$$N_c = I_{cs} \dot{w}_c + w_c \times I_{cs} w_c$$

其中, $m_c$ 为云台转动设备的质量, $I_{cs}$ 为云台转动设备在质心处的转动惯量矩阵, $w_c$ 和 $v_{cs}$ 分别为云台转动设备质心在固连坐标系下的角速度和线速度,表达式为:

$$w_c = J_c w + \dot{\Theta}_c$$

$$\dot{v}_{cs} = \dot{w}_c \times P_c + w_c \times (w_c \times P_c) + \dot{v}_c$$

其中, $\Theta_c$ 为云台转动设备在舵机控制下的旋转角度, $w$ 为水下考古机器人在载体坐标系下的角速度, $v_c$ 为固连坐标系原点在固连坐标系下的线速度,表达式为:

$$\dot{v}_c = J_c [\dot{w} \times P_{corg} + w \times (w \times P_{corg}) + \dot{v}]$$

其中, $v$ 为水下考古机器人在载体坐标系的线速度;

步骤3:设计非线性干扰观测器估计集总干扰

$$\begin{cases} \dot{z} = -Lz + L[C_{RB}(v)v + g(\eta) + \hat{\Delta} - \tau_c^* - p(v)] \\ \hat{\tau}_{dis} = z + p(v) \end{cases}$$

其中, $\hat{\tau}_{dis}$ 为集总干扰的估计值, $\tau_c^*$ 为上一时刻的控制输出且其初始值为0, $z$ 为辅助中间

变量,  $L = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 1)$  为观测器增益矩阵,  $l$  为观测器增益矩阵的对角线元素,  $p(v)$  定义为:

$$\dot{p}(v) = LM_{RB}\dot{v}$$

步骤4: 基于步骤2和步骤3的估计计算结果, 对步骤1设计的水下考古机器人六自由度运动模型, 采用以下控制律进行控制: 所述控制律为:

$$\tau_c = M_{RB}J^{-1}[-hs - k \text{sat}(s) - \lambda(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d) + \ddot{\eta}_d + JM_{RB}^{-1}(C_{RB}(v)v + \hat{\Delta} - \hat{\tau}_{dis} + g(\eta)) - \dot{J}v]$$

其中,  $s = \lambda e + \dot{e}$  为滑模面,  $\eta_d$  为期望位姿矢量,  $e = \eta - \eta_d$  为跟踪误差,  $\lambda$  为满足Hurwitz条件的正常数, 滑模面的趋近律为指数趋近律; 滑模面  $s = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6]^T$ , 指数趋近律为  $\dot{s} = -hs - k \text{sat}(s)$  且  $h > 0, k > 0$ , 其中趋近律中的饱和函数定义为:

$$\text{sat}(s) = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_6 \end{bmatrix}, q_i = \begin{cases} 1 & s_i > \zeta \\ \frac{s_i}{\zeta} & |s_i| \leq \zeta, i = 1, 2, \dots, 6 \\ -1 & s_i < -\zeta \end{cases}$$

$\zeta$  为边界层的宽度。

2. 根据权利要求1所述一种水下考古机器人抗云台转动干扰控制方法, 其特征在于, 步骤1中, 所述水下考古机器人系统的集总干扰包括外部环境干扰、水动力干扰和云台转动设备干扰计算误差。

3. 根据权利要求1所述一种水下考古机器人抗云台转动干扰控制方法, 其特征在于, 步骤2中, 使用牛顿-欧拉迭代法计算云台转动设备产生的耦合作用力和力矩。

## 一种水下考古机器人抗云台转动干扰控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及的是水下机器人控制技术领域,具体为一种水下考古机器人抗云台转动干扰控制方法。

### 背景技术

[0002] 我国拥有广袤的海域、绵长的海岸线和密集的内陆水域,其蕴藏着种类繁多、数量巨大的水下文物,急需得到发掘和保护。为克服人工潜水考古方式成本高、危险性大和效率低的问题,水下机器人技术被引入水下考古领域。水下考古机器人除可实现水下六自由度运动外还安装有云台执行机构,可独立控制多普勒速度仪、声学及光学检测装置的旋转角度,使其满足水下考古作业中多种情形下的导航和检测需求。

[0003] 但在该种机器人作业过程中,由于云台转动设备的质量和体积相对较大,在转动时会对机器人本体部分产生不可忽视的耦合干扰,可能会导致机器人运动失稳。此外,水下考古机器人是一个具有很强非线性特性的系统,其在作业过程中也会受到水下复杂环境的未知干扰。这要求控制系统必须能同时处理云台转动干扰与其他扰动的影响。

[0004] 目前国内外缺少关于云台转动设备干扰下水下机器人控制的相关研究,与之最为类似的为水下机械臂运动干扰下的相关研究。针对水下机械臂造成的干扰,研究者的应对方法主要有以下三种:第一种是在机械臂上安装力传感器,计算干扰力的大小。这种方法的优点是不需要控制器进行额外的处理;主要缺点为所需成本太高,且受力传感器性能制约。第二种是进行大量水池实验,得出机械臂以不同频率运动时产生的干扰对载体航行器某自由度的影响曲线。这种方法的优点是理论清晰;主要缺点是工作量大,且实验室数据忽略了复杂外界环境干扰的影响。第三种方法是将机械臂运动产生的干扰作为系统总体干扰的一部分进行处理。这种方法的优点是控制器设计不需要额外考虑耦合干扰的问题;主要缺点为浪费了既有的设备先验信息,在一定程度上限制了控制器的效果提升。

### 发明内容

[0005] 水下考古机器人在进行水下六自由度运动的同时需要实现变角度多视图探测,为实现该探测功能,水下考古机器人在硬件结构上采用了云台执行机构,可独立控制安装于云台上的多普勒速度仪、声学及光学检测装置的旋转角度。

[0006] 本发明针对云台转动设备会对水下考古机器人本体部分产生耦合干扰的问题,并考虑到水下考古机器人系统控制中的模型不确定性及外部干扰未知,提出了一种水下考古机器人抗云台转动干扰控制方法。

[0007] 该方法由前馈补偿和反馈控制两部分构成。前馈补偿由以下两部分构成:1) 利用模型先验信息,对云台转动设备使用牛顿-欧拉迭代法进行动力学建模,求解其对机器人本体部分产生的耦合作用力和力矩。2) 将外部环境扰动、建模误差以及云台转动设备干扰计算误差视为集总干扰,使用非线性干扰观测器(Nonlinear Disturbance Observer, NDO)对其进行估计。反馈控制部分使用滑模控制,在定义跟踪误差并构建滑模面后,为降低滑模抖

振现象,在指数趋近律中引入了饱和函数。

[0008] 本发明充分利用机器人云台结构的先验信息进行力学计算,无需安装外部设备,并克服了外部环境扰动、建模误差等其他干扰的影响。

[0009] 本发明的技术方案为:

[0010] 所述一种水下考古机器人抗云台转动干扰控制方法,包括以下步骤:

[0011] 步骤1:建立水下考古机器人六自由度运动模型:

$$[0012] \quad \begin{cases} M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v + g(\eta) + \Delta = \tau_c + \tau_{dis} \\ \dot{\eta} = Jv \end{cases}$$

[0013] 其中, $\eta$ 为水下考古机器人在地面坐标系下的广义位姿矢量, $J$ 为水下考古机器人载体坐标系到地面坐标系的坐标转换矩阵, $v$ 为水下考古机器人在载体坐标系下的广义速度矢量, $M_{RB}$ 为水下考古机器人的惯性系数矩阵, $C_{RB}(v)$ 为水下考古机器人的哥氏力和向心力矩阵, $g(\eta)$ 为水下考古机器人的恢复力和力矩; $\Delta$ 为水下考古机器人上安装的云台转动设备对机器人本体部分产生的耦合作用力和力矩; $\tau_c$ 为水下考古机器人推进器产生的控制力和力矩, $\tau_{dis}$ 为水下考古机器人系统的集总干扰,包括外部环境干扰、水动力干扰和云台转动设备干扰计算误差;

[0014] 步骤2:使用牛顿-欧拉迭代法计算云台转动设备产生的耦合作用力和力矩

$$[0015] \quad \hat{\Delta} = [f_c, n_c]^T$$

$$[0016] \quad f_c = J_c^{-1} F_c$$

$$[0017] \quad n_c = J_c^{-1} [N_c + P_c \times F_c] + P_{corg} \times f_c$$

[0018] 其中, $\hat{\Delta}$ 为云台转动设备对水下考古机器人本体部分产生的耦合作用力和力矩的计算值,由力 $f_c$ 和力矩 $n_c$ 组成; $J_c$ 为水下考古机器人载体坐标系到固连坐标系的坐标转换矩阵,所述固连坐标系为以云台转动轴在云台转动设备内部的中点为原点设立的坐标系,可保证转动过程中载体坐标系原点到固连坐标系原点的位置矢量不变,云台无转动时固连坐标系各坐标轴与载体坐标系坐标轴对应平行; $P_c$ 为固连坐标系原点到云台转动设备质心的位置矢量在固连坐标系的表达, $P_{corg}$ 为载体坐标系原点到固连坐标系原点的位置矢量在载体坐标系的表达, $F_c$ 和 $N_c$ 分别为云台转动设备在质心处受到的力和力矩,其表达式为:

$$[0019] \quad F_c = m_c \dot{v}_{cs}$$

$$[0020] \quad N_c = I_{cs} \dot{w}_c + w_c \times I_{cs} w_c$$

[0021] 其中, $m_c$ 为云台转动设备的质量, $I_{cs}$ 为云台转动设备在质心处的转动惯量矩阵, $w_c$ 和 $v_{cs}$ 分别为云台转动设备质心在固连坐标系下的角速度和线速度,表达式为:

$$[0022] \quad w_c = J_c w + \dot{\Theta}_c$$

$$[0023] \quad \dot{v}_{cs} = \dot{w}_c \times P_c + w_c \times (w_c \times P_c) + \dot{v}_c$$

[0024] 其中, $\Theta_c$ 为云台转动设备在舵机控制下的旋转角度, $w$ 为水下考古机器人在载体坐标系的角速度, $v_c$ 为固连坐标系原点在固连坐标系下的线速度,表达式为:

$$[0025] \quad \dot{v}_c = J_c [\dot{w} \times P_{corg} + w \times (w \times P_{corg}) + \dot{v}]$$

[0026] 其中, $v$ 为水下考古机器人在载体坐标系的线速度;

[0027] 步骤3:设计非线性干扰观测器估计集总干扰

$$[0028] \quad \begin{cases} \dot{z} = -Lz + L[C_{RB}(v)v + g(\eta) + \hat{\Delta} - \tau_c^* - p(v)] \\ \hat{\tau}_{dis} = z + p(v) \end{cases}$$

[0029] 其中,  $\hat{\tau}_{dis}$  为集总干扰的估计值,  $\tau_c^*$  为上一时刻的控制输出且其初始值为0,  $z$  为辅助中间变量,  $L = \text{diag}(\ell, \ell, \ell, \ell, \ell, \ell)$  为观测器增益矩阵,  $\ell$  为观测器增益矩阵的对角线元素,  $p(v)$  定义为:

$$[0030] \quad \dot{p}(v) = LM_{RB}\dot{v}$$

[0031] 步骤4:基于步骤2和步骤3的估计计算结果,对步骤1设计的水下考古机器人六自由度运动模型,采用以下控制律进行控制:所述控制律为:

$$[0032] \quad \tau_c = M_{RB}J^{-1}[-hs - k \text{sat}(s) - \lambda(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d) + \ddot{\eta}_d + JM_{RB}^{-1}(C_{RB}(v)v + \hat{\Delta} - \hat{\tau}_{dis} + g(\eta)) - \dot{J}v]$$

[0033] 其中,  $s = \lambda e + \dot{e} = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6]^T$  为滑模面,  $\eta_d = [x_d, y_d, z_d, \varphi_d, \theta_d, \psi_d]$  为期望位姿矢量,  $e = \eta - \eta_d$  为跟踪误差,  $\lambda$  为满足Hurwitz条件的正常数,滑模面的趋近律为指数趋近律  $\dot{s} = -hs - k \text{sat}(s)$  且  $h > 0, k > 0$ , 其中趋近律中的饱和函数定义为:

$$[0034] \quad \text{sat}(s) = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_6 \end{bmatrix}, q_i = \begin{cases} 1 & s_i > \zeta \\ \frac{s_i}{\zeta} & |s_i| \leq \zeta \\ -1 & s_i < -\zeta \end{cases}, i = 1, 2, \dots, 6$$

[0035] 其中,  $\zeta$  为边界层的宽度。

[0036] 有益效果

[0037] 本发明充分利用水下考古机器人模型的结构信息,优选使用牛顿-欧拉迭代法计算出了云台转动设备在舵机控制下发生旋转时对机器人本体部分的耦合作用力和力矩,将其作为前馈补偿的一部分用于控制器设计中,有效降低了云台转动干扰对水下考古机器人运动的影响。

[0038] 同时,考虑到作业工程中水下考古机器人的运动还会受到外部环境扰动、建模误差以及云台转动设备干扰计算误差等因素的影响,本发明将以上几项视为集总干扰,优选设计非线性干扰观测器(NDO)对其进行估计。NDO集总干扰估计值与云台转动干扰计算值共同构成了控制系统的前馈补偿部分。

[0039] 反馈控制部分采用滑模控制,在前馈补偿降低了系统整体干扰的情况下,整个系统的控制项增益会随之降低,这对抑制滑模控制的抖振问题有积极作用,同时优选设计的饱和函数代替指数趋近律中的符号函数,进一步抑制了滑模控制的抖振现象。

[0040] 前馈补偿和反馈控制共同构成了抗云台转动干扰控制系统,解决了水下考古机器人在存在云台转动设备干扰、外部环境扰动以及建模误差等情况下的控制问题。

[0041] 本发明的附加方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

### 附图说明

[0042] 本发明的上述和/或附加的方面和优点从结合下面附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中:

[0043] 附图1为一种带云台转动设备的水下考古机器人结构图。

[0044] 附图2为水下考古机器人抗云台转动干扰控制系统。

[0045] 附图3为分别采用本发明所提出的控制器、基于NDO的滑模控制、基于转动干扰力补偿的滑模控制和滑模控制进行的轨迹跟踪实验整体结果图。

[0046] 附图4为轨迹跟踪实验中四种控制方法在x方向的误差。

[0047] 附图5为轨迹跟踪实验中四种控制方法在y方向的误差。

[0048] 附图6为轨迹跟踪实验中四种控制方法在z方向的误差。

[0049] 附图7为轨迹跟踪实验中四种控制方法的航向角。

[0050] 附图8为采用本发明所提出的控制器进行轨迹跟踪实验时NDO估计的集总干扰。

[0051] 附图9为采用本发明所提出的控制器进行轨迹跟踪实验时云台转动设备对水下考古机器人本体部分产生的耦合作用力和力矩。

[0052] 附图10为采用本发明所提出的控制器进行轨迹跟踪实验时在指数趋近律中使用饱和函数sat(s)时的推进器推力。

[0053] 附图11为采用本发明所提出的控制器进行轨迹跟踪实验时在指数趋近律中使用符号函数sgn(s)时的推进器推力。

### 具体实施方式

[0054] 下面详细描述本发明的实施例,所述实施例是示例性的,旨在用于解释本发明,而不能理解为对本发明的限制。

[0055] 本实施例中根据某型号水下考古机器人设定模型参数: $m_c = 10.55\text{kg}$ ,  $P_{\text{corg}} = [-0.104\text{m}, -0.040\text{m}, 0.518\text{m}]^T$ ,  $P_c = [0.009\text{m}, -0.002\text{m}, -0.007\text{m}]^T$ , 云台转动设备在质心处的转动惯量矩阵为  $I_{c_s} = \text{diag}(0.21, 0.44, 0.47)$ , 单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。观测器增益对角线元素为  $\ell = 1.1$ ; 控制器所用参数为  $\lambda = 1, h = 0.4, k = 0.2, \zeta = 1$ 。设置水下考古机器人的初始航向角  $\psi$  为  $60^\circ$ , 初始俯仰角  $\theta$  和横滚角  $\varphi$  均为  $0^\circ$ , 初始位置为坐标原点。将均值为0、方差为0.1的高斯白噪声作为外部环境干扰,其数值的更新周期为5秒;存在模型误差  $M_{AM}\dot{v} + C_{AM}(v)v + D(v)v$ , 其中,  $M_{AM}$  为附加质量矩阵;  $C_{AM}(v)$  是附加哥氏力和向心力矩阵;  $D(v)$  为阻尼矩阵。设计跟踪轨迹为:

$$[0056] \begin{cases} x_d = 10\sin(t/30) \\ y_d = 10 - 10\cos(t/30) \\ z_d = 0.1t \\ \psi_d = \arctan[\dot{y}_d / \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{z}_d^2}] \\ \theta_d = \varphi_d = 0 \end{cases}$$

[0057] 设计云台转动设备的转动规律为:  $0\text{s} < t < 40\text{s}$  时, 俯仰角按  $10\sin(\pi t/80)$  进行转动;  $60\text{s} < t < 100\text{s}$  时, 偏航角按  $10\sin(\pi t/80)$  进行转动。

[0058] 首先,建立水下考古机器人六自由度运动模型:

$$[0059] \quad \begin{cases} M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v + g(\eta) + \Delta = \tau_c + \tau_{dis} \\ \dot{\eta} = Jv \end{cases}$$

[0060] 其中, $\eta$ 为水下考古机器人在地面坐标系下的广义位姿矢量, $J$ 为水下考古机器人载体坐标系到地面坐标系的坐标转换矩阵, $v$ 为水下考古机器人在载体坐标系下的广义速度矢量, $M_{RB}$ 为水下考古机器人的惯性系数矩阵, $C_{RB}(v)$ 为水下考古机器人的哥氏力和向心力矩阵, $g(\eta)$ 为水下考古机器人的恢复力和力矩; $\Delta$ 为水下考古机器人上安装的云台转动设备对机器人本体部分产生的耦合作用力和力矩; $\tau_c$ 为水下考古机器人推进器产生的控制力和力矩, $\tau_{dis}$ 为水下考古机器人系统的集总干扰,包括外部环境干扰、水动力干扰和云台转动设备干扰计算误差;

[0061] 其次,使用牛顿-欧拉迭代法计算云台转动设备产生的耦合作用力和力矩

$$[0062] \quad \hat{\Delta} = [f_c, n_c]^T$$

$$[0063] \quad f_c = J_c^{-1}F_c$$

$$[0064] \quad n_c = J_c^{-1}[N_c + P_c \times F_c] + P_{corg} \times f_c$$

[0065] 其中, $\hat{\Delta}$ 为云台转动设备对水下考古机器人本体部分产生的耦合作用力和力矩的计算值,由力 $f_c$ 和力矩 $n_c$ 组成; $J_c$ 为水下考古机器人载体坐标系到固连坐标系的坐标转换矩阵,所述固连坐标系为以云台转动轴在云台转动设备内部的中点为原点设立的坐标系,可保证转动过程中载体坐标系原点到固连坐标系原点的位置矢量不变,云台无转动时固连坐标系各坐标轴与载体坐标系坐标轴对应平行; $P_c$ 为固连坐标系原点到云台转动设备质心的位置矢量在固连坐标系的表达, $P_{corg}$ 为载体坐标系原点到固连坐标系原点的位置矢量在载体坐标系的表达, $F_c$ 和 $N_c$ 分别为云台转动设备在质心处受到的力和力矩,其表达式为:

$$[0066] \quad F_c = m_c \dot{v}_{cs}$$

$$[0067] \quad N_c = I_{cs} \dot{w}_c + w_c \times I_{cs} w_c$$

[0068] 其中, $m_c$ 为云台转动设备的质量, $I_{cs}$ 为云台转动设备在质心处的转动惯量矩阵, $w_c$ 和 $v_{cs}$ 分别为云台转动设备质心在固连坐标系下的角速度和线速度,表达式为:

$$[0069] \quad w_c = J_c w + \dot{\Theta}_c$$

$$[0070] \quad \dot{v}_{cs} = \dot{w}_c \times P_c + w_c \times (w_c \times P_c) + \dot{v}_c$$

[0071] 其中, $\Theta_c$ 为云台转动设备在舵机控制下的旋转角度, $w$ 为水下考古机器人在载体坐标系的角速度, $v_c$ 为固连坐标系原点在固连坐标系下的线速度,表达式为:

$$[0072] \quad \dot{v}_c = J_c [\dot{w} \times P_{corg} + w \times (w \times P_{corg}) + \dot{v}]$$

[0073] 其中, $v$ 为水下考古机器人在载体坐标系的线速度;

[0074] 再次,设计非线性干扰观测器(NDO)估计集总干扰

$$[0075] \quad \begin{cases} \dot{z} = -Lz + L[C_{RB}(v)v + g(\eta) + \hat{\Delta} - \tau_c^* - p(v)] \\ \hat{\tau}_{dis} = z + p(v) \end{cases}$$

[0076] 其中, $\hat{\tau}_{dis}$ 为集总干扰的估计值, $\tau_c^*$ 为上一时刻的控制输出且其初始值为0, $z$ 为辅



助中间变量,  $L = \text{diag}(\ell, \ell, \ell, \ell, \ell, \ell)$  为观测器增益矩阵,  $\ell$  为观测器增益矩阵的对角线元素,  $p$  (v) 定义为:

$$[0077] \quad \dot{p}(v) = LM_{RB}\dot{v}$$

[0078] 然后, 基于步骤2和步骤3的估计计算结果, 对步骤1设计的水下考古机器人六自由度运动模型, 采用以下控制律进行控制: 所述控制律为:

$$[0079] \quad \tau_c = M_{RB}J^{-1}[-hs - k \text{sat}(s) - \lambda(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d) + \ddot{\eta}_d + JM_{RB}^{-1}(C_{RB}(v)v + \hat{\Delta} - \hat{\tau}_{dis} + g(\eta)) - \dot{J}v]$$

[0080] 其中,  $s = \lambda e + \dot{e} = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6]^T$  为滑模面,  $\eta_d = [x_d, y_d, z_d, \varphi_d, \theta_d, \psi_d]$  为期望位姿矢量,  $e = \eta - \eta_d$  为跟踪误差,  $\lambda$  为满足Hurwitz条件的正常数, 滑模面的趋近律为指数趋近律  $\dot{s} = -hs - k \text{sat}(s)$  且  $h > 0, k > 0$ , 其中趋近律中的饱和函数定义为:

$$[0081] \quad \text{sat}(s) = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_6 \end{bmatrix}, q_i = \begin{cases} 1 & s_i > \zeta \\ \frac{s_i}{\zeta} & |s_i| \leq \zeta, i = 1, 2, \dots, 6 \\ -1 & s_i < -\zeta \end{cases}$$

[0082] 其中,  $\zeta$  为边界层的宽度。

[0083] 最后, 针对上述控制律, 采用李雅普诺夫稳定性原理证明其稳定性。

[0084] 取李雅普诺夫候选函数:

$$[0085] \quad V = \frac{1}{2}s^T s + \frac{1}{2}\tilde{d}^T \tilde{d}$$

[0086] 其中,  $\tilde{d} = JM_{RB}^{-1}(\tau_{dis} - \hat{\tau}_{dis})$ 。认为扰动的变化相对于干扰观测器的动态而言是缓慢的, 即  $\dot{\tau}_{dis} = 0$ 。

[0087] 对V求关于时间的导数, 则有:

$$[0088] \quad \dot{V} = s^T \dot{s} + \tilde{d}^T \dot{\tilde{d}} = s^T \dot{s} - \tilde{d}^T JM_{RB}^{-1} \dot{\tau}_{dis}$$

[0089] 由于对NDO有  $\dot{\tau}_{dis} = L(\tau_{dis} - \hat{\tau}_{dis})$ , 且由  $L = \text{diag}(\ell, \ell, \ell, \ell, \ell, \ell)$  可得  $JM_{RB}^{-1}L = LJM_{RB}^{-1}$ , 进一步得到

$$[0090] \quad \begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{s} + \tilde{d}^T \dot{\tilde{d}} = s^T \dot{s} - \tilde{d}^T JM_{RB}^{-1} \dot{\tau}_{dis} \\ &= s^T [\lambda(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d) - \ddot{\eta}_d] + \\ &\quad s^T JM_{RB}^{-1} J^T [J^{-T}(\tau_c + \tau_{dis}) - J^{-T}(C_{RB}(v) - M_{RB}J^{-1}\dot{J})J^{-1}\dot{\eta} - J^{-T}(g(\eta) + \Delta)] - \tilde{d}^T L\tilde{d} \end{aligned}$$

[0091] 将控制律代入上式, 考虑到云台转动设备干扰计算误差包含于集总干扰估计误差之中, 进一步得到

$$[0092] \quad \begin{aligned} \dot{V} &= s^T [-hs - k \text{sat}(s)] + s^T \tilde{d} - \tilde{d}^T L\tilde{d} \\ &= -s^T k \text{sat}(s) - h \|s\|^2 + s^T \tilde{d} - \ell \|\tilde{d}\|^2 \end{aligned}$$

[0093] 根据如下放缩事实:  $s^T \tilde{d} \leq \|s\| \|\tilde{d}\|$ , 得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -s^T k \operatorname{sat}(s) - h \|s\|^2 + \|s\| \|\tilde{d}\| - \ell \|\tilde{d}\|^2 \\ [0094] \quad &= -s^T k \operatorname{sat}(s) - \left( \sqrt{h} \|s\| - \frac{\|\tilde{d}\|}{2\sqrt{h}} \right)^2 - \left( \ell - \frac{1}{4h} \right) \|\tilde{d}\|^2 \end{aligned}$$

[0095] 其中,有

$$[0096] \quad s^T k \operatorname{sat}(s) = k(s_1 q_1 + s_2 q_2 + \dots + s_6 q_6), s_i q_i = \begin{cases} |s_i| & |s_i| > \zeta \\ \frac{s_i^2}{\zeta} & |s_i| \leq \zeta \end{cases}$$

[0097] 可以得到  $s^T k \operatorname{sat}(s) \geq 0$ 。设计参数时满足  $\ell - \frac{1}{4h} > 0$ , 则有  $\dot{V} \leq 0$ , 当且仅当  $s = \tilde{d} = 0$  时  $\dot{V} = 0$ , 由此可证, 该闭环控制系统是渐进稳定的。

[0098] 针对本实施例中带云台转动设备的水下考古机器人模型, 设计使用四种控制器进行仿真对比, 控制方式分别为本发明提出的控制器即基于NDO和云台转动干扰补偿的滑模控制器、基于NDO的滑模控制器、基于云台转动干扰补偿的滑模控制器和普通滑模控制器。由图3可以看出四种控制器均能实现轨迹跟踪控制, 但效果存在差异。由图4、图5和图6可见, 随着云台转动干扰补偿和NDO的加入, 位置误差在逐渐减小。其中, 缺少NDO的后两种控制器存在稳态误差, 而缺少云台转动干扰补偿的第二种和第四种控制器则受云台转动设备干扰的影响其位置误差呈现波动性。由图7可见, 后两种控制器航向角控制效果较差, 第二种控制器控制效果较好, 误差接近0并存在较弱波动性, 第一种控制器效果最好, 误差很快收敛并基本保持为0。综合比较可知, 本发明提出的控制器控制效果最优, 位置误差与航向角误差能以最快的速度收敛为0。图8和图9分别为使用本发明提出的控制器进行仿真实验时NDO估计的集总干扰以及云台转动设备产生的耦合作用力和力矩。由图10和图11对比可知, 本发明中饱和函数的引入对抑制滑模控制的抖振现象有积极作用。

[0099] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例, 可以理解的是, 上述实施例是示例性的, 不能理解为对本发明的限制, 本领域的普通技术人员在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

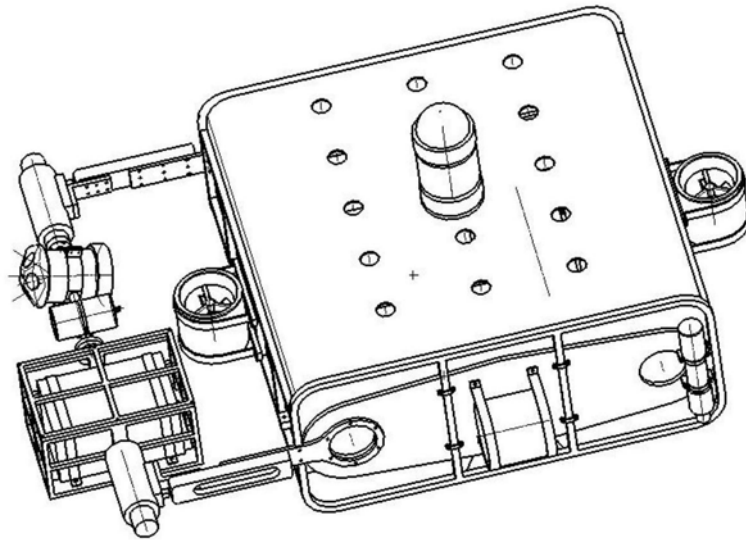


图1

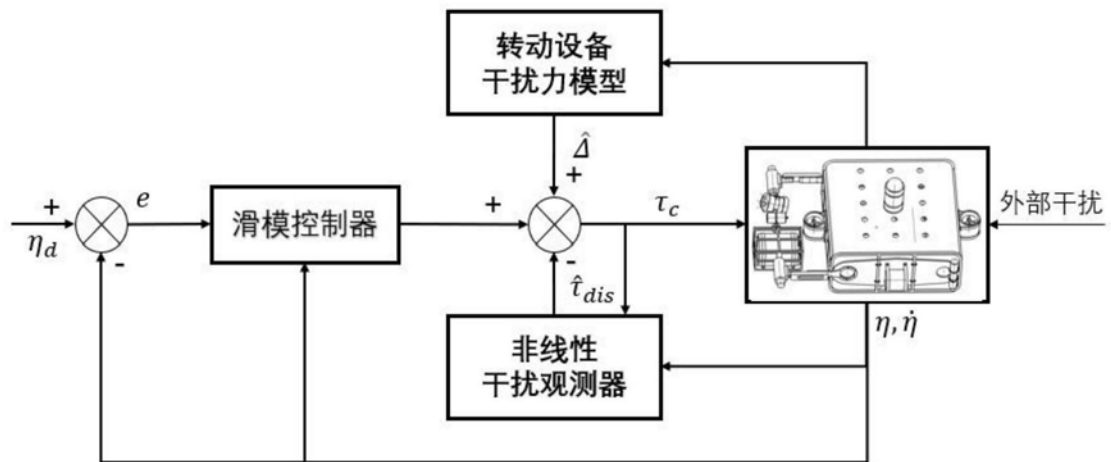


图2

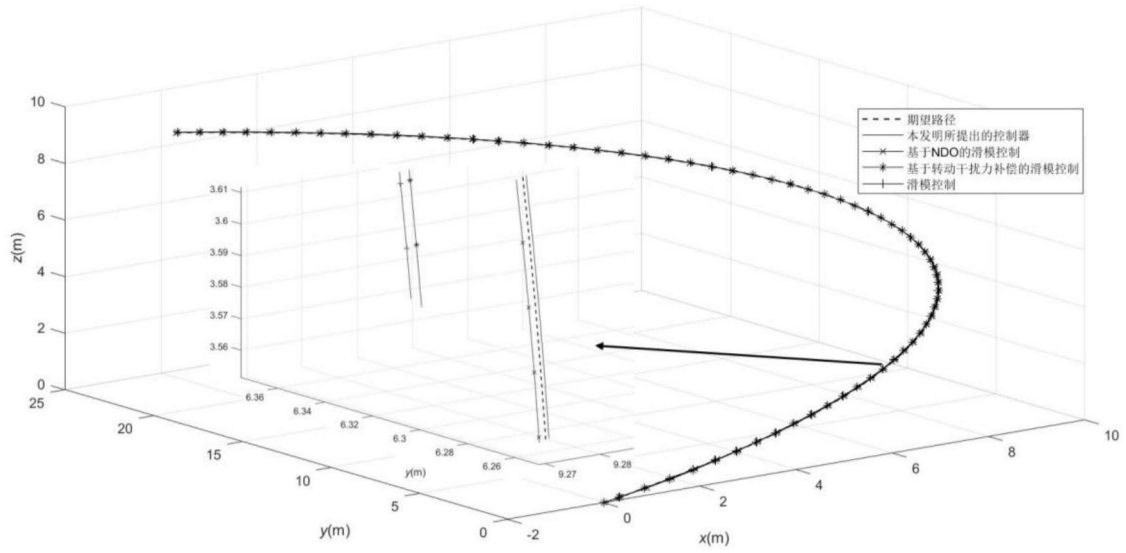


图3

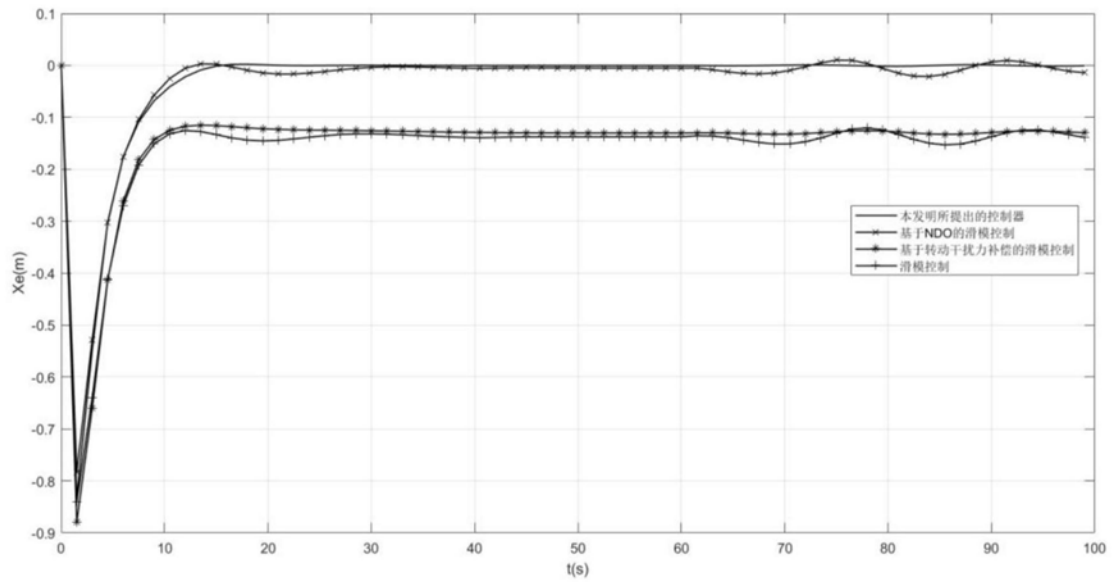


图4

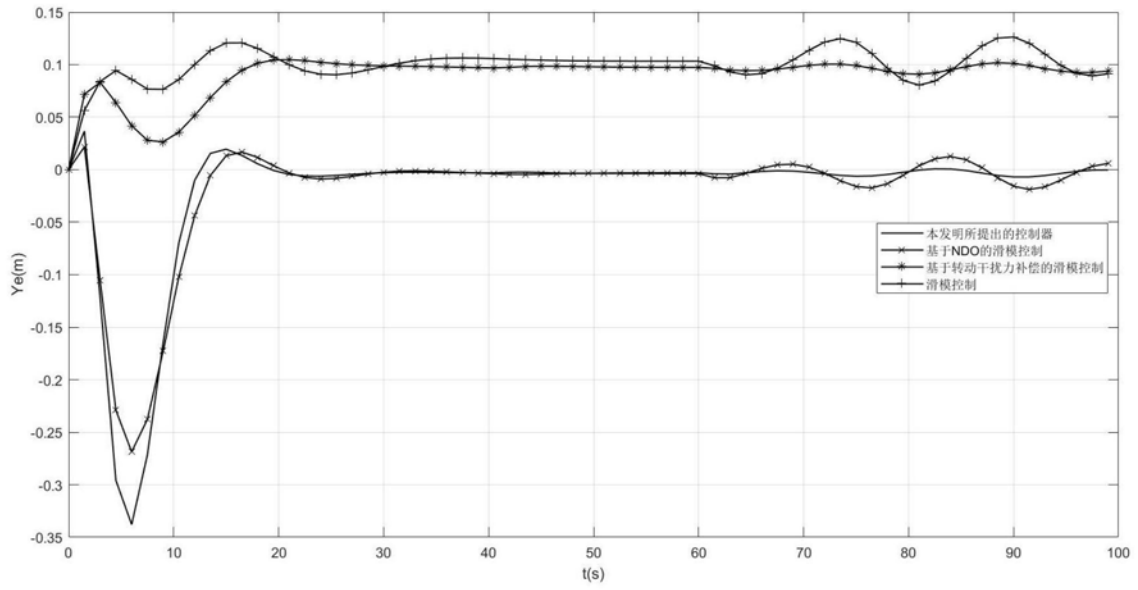


图5

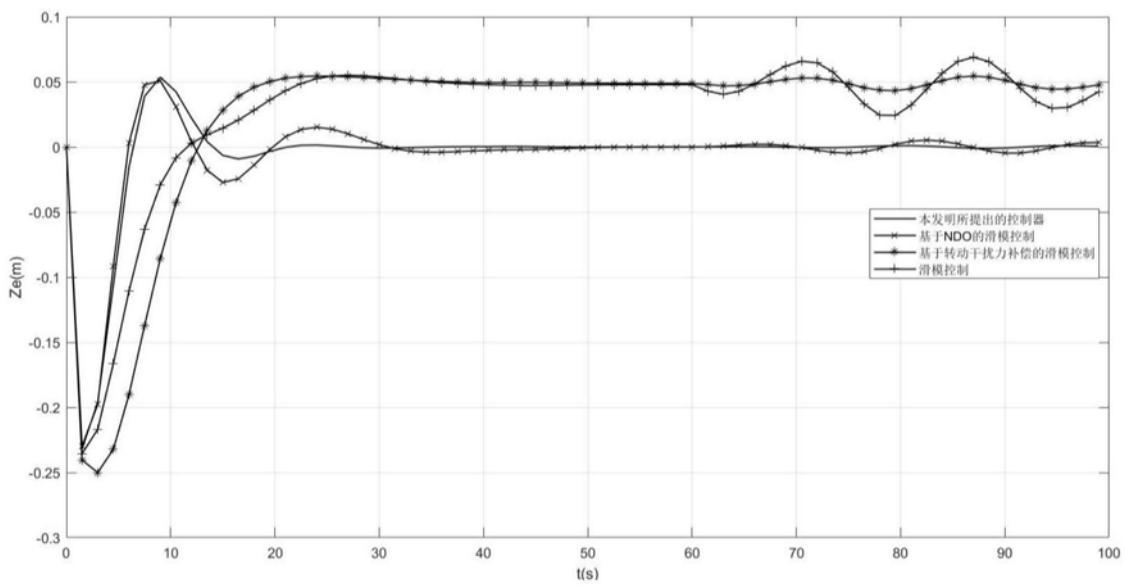


图6

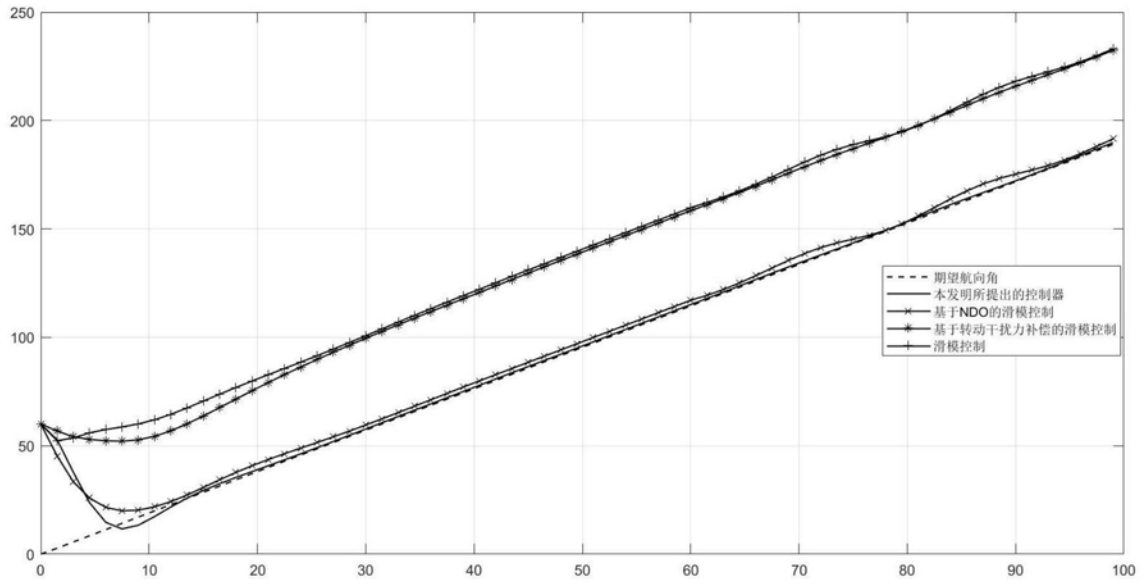


图7

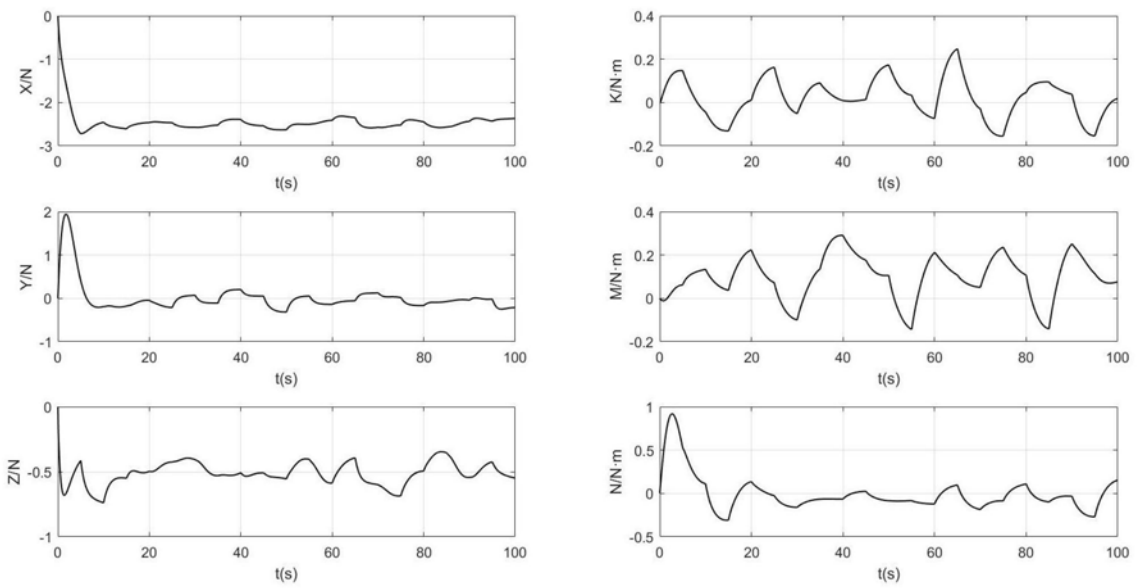


图8

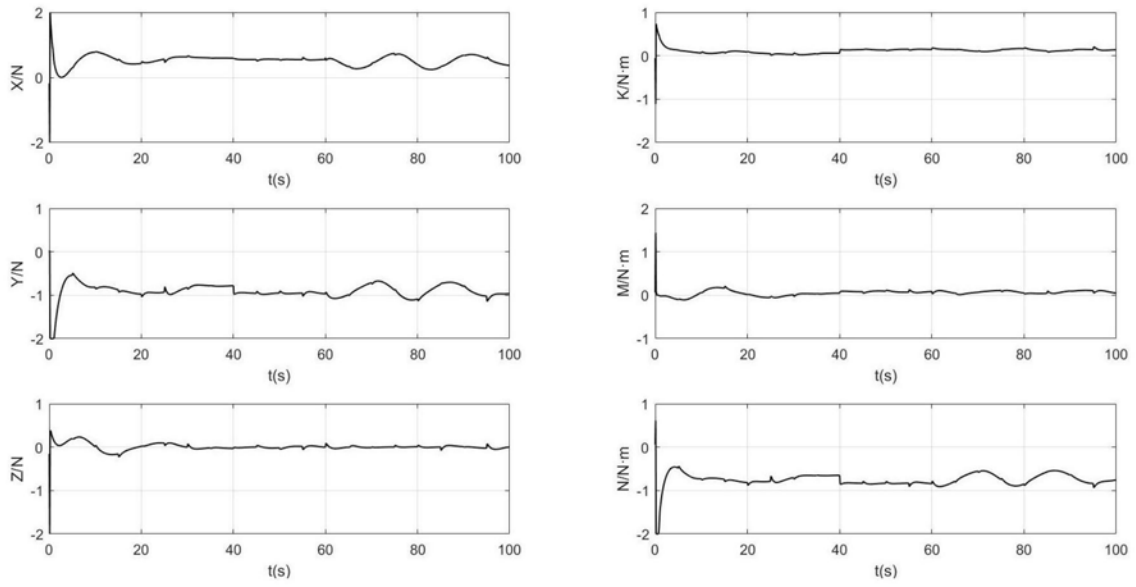


图9

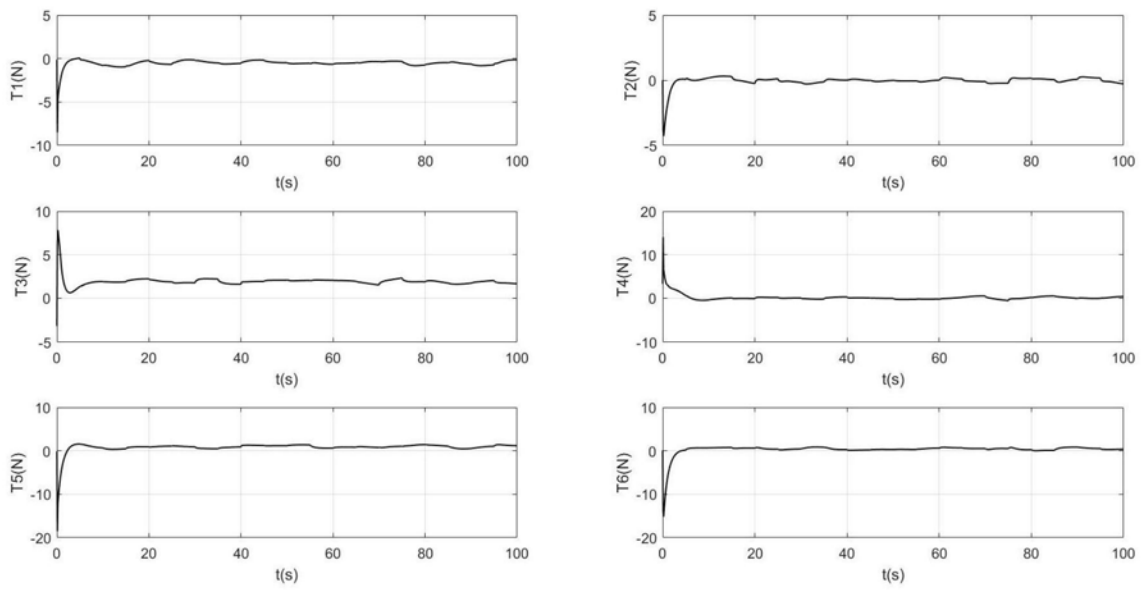


图10

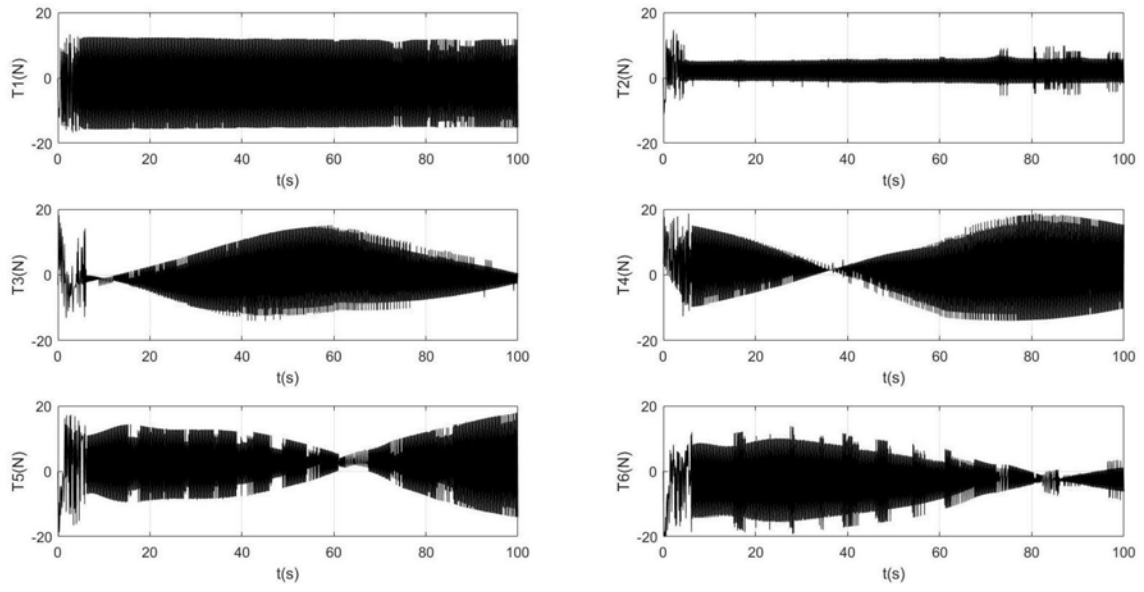


图11