



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108983612 A

(43)申请公布日 2018.12.11

(21)申请号 201810894995.9

(22)申请日 2018.08.08

(71)申请人 华南理工大学

地址 511458 广东省广州市南沙区环市大道南路25号华工大广州产研院

(72)发明人 戴诗陆 彭云根 李烈军 罗飞

(74)专利代理机构 广州市华学知识产权代理有限公司 44245

代理人 李斌

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

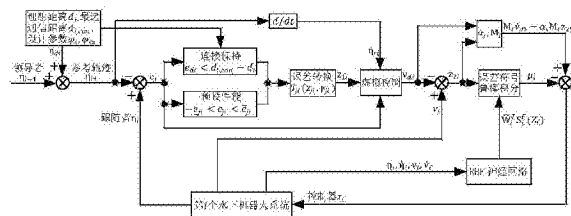
权利要求书4页 说明书9页 附图5页

(54)发明名称

一种具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法,该方法包括下述步骤:建立水下机器人编队动态模型;建立虚拟领导者模型;考虑预设性能和连接保持;将保证预设性能和连接保持问题转化为保证转化误差的渐进稳定性问题;后推设计法设计虚拟控制器;应用径向基(RBF)神经网络逼近系统模型不确定;设计基于误差符号鲁棒积分的自适应神经网络控制器。本发明方法保证了跟踪误差的暂态性能和跟随者与领导者之间的连接保持问题,在不确定系统动态和外界扰动情况下,运用基于误差符号鲁棒积分的自适应神经网络控制策略,能很好补偿神经网络重构误差和未知的外界扰动,从而实现跟踪误差的渐进收敛,提高了设计方案的实用性。



1. 一种具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法,其特征在于,包括下述步骤:

步骤(1):建立n个水下机器人编队动态模型,并考虑控制系统的外界时变扰动;

步骤(2):建立虚拟领导者模型,从而确定虚拟领导者和真实领导者的位置关系;

步骤(3):根据步骤(2)建立的虚拟领导者模型,计算水下机器人的位置跟踪误差,并考虑预设性能和连接保持问题;

步骤(4):将保证预设性能和连接保持问题转化为保证转化误差的渐进稳定性问题;

步骤(5):采用后推设计法设计虚拟控制器以保证转化误差的渐进收敛;

步骤(6):应用径向基神经网络逼近系统动态模型不确定;

步骤(7):设计基于误差符号鲁棒积分的自适应神经网络控制器。

2. 根据权利要求1所述的具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法,其特征在于,步骤(1)中所述的建立n个水下机器人编队动态模型:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_i = J_i(\eta_i)v_i \\ M_i \dot{v}_i + C_i(v_i)v_i + D_i(v_i)v_i + g_i(\eta_i) + \tau_{di} = \tau_i \end{cases}$$

其中,  $\eta_i = [x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, \psi_i]^T$  为第i个水下机器人的位置和方向输出,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $\dot{\eta}_i$  表示  $\eta_i$  的导数;  $v_i = [u_i, v_i, \omega_i, p_i, q_i, r_i]^T$ , 其中  $u_i, v_i, \omega_i$  分别对应于  $x_i, y_i, z_i$  位置上的线速度,  $p_i, q_i, r_i$  分别对应于  $\phi_i, \theta_i, \psi_i$  方向上的角速度;  $\dot{v}_i$  表示  $v_i$  的导数;  $J_i(\eta_i)$  是旋转矩阵;  $M_i$  是对称正定的惯性矩阵;  $C_i(v_i)$  是科氏力和向心力矩阵;  $D_i(v_i)$  是阻尼矩阵;  $g_i(\eta_i)$  是水下机器人受到的引力和浮力影响的向量;  $\tau_i$  为控制输入量;  $C_i(v_i)$ 、 $D_i(v_i)$ 、 $g_i(\eta_i)$  为模型不确定量,  $\tau_{di}$  代表水流量;  $C_i(v_i)$ 、 $D_i(v_i)$ 、 $g_i(\eta_i)$ 、 $\tau_{di}$  都作为外界时变干扰项。

3. 根据权利要求1所述的具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法,其特征在于,步骤(2)中所述的建立虚拟领导者模型:

$$\eta_{ri} = \eta_{i-1} + \eta_{di}$$

其中,  $\eta_{ri}$  表示虚拟领导者轨迹,即跟随者  $\eta_i$  的理想位置状态;  $\eta_{i-1}$  表示真实领导者轨迹;  $\eta_{di}$  表示虚拟领导者与真实领导者位置  $\{x, y, z\}$  和方向角  $\{\phi, \theta, \psi\}$  上的误差,  $\eta_{di} = [-d_i \cos(\varphi_i) \cos(\varphi_{ix}), d_i \cos(\varphi_i) \sin(\varphi_{ix}), -d_i \sin(\varphi_i), 0, 0, 0]^T$ ,  $d_i$  表示理想的距离,  $\varphi_i$  和  $\varphi_{ix}$  为  $\eta_{di}$  的设计参数。

4. 根据权利要求1所述的具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法,其特征在于,步骤(3)中,具体过程如下:

首先定义第i个水下机器人在跟随者与领导者编队结构中的轨迹跟踪误差为:  $e_i = \eta_i - \eta_{ri}$ , 其中  $e_i = [e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}, e_{\phi i}, e_{\theta i}, e_{\psi i}]^T$ ,  $e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}$  为  $x_i, y_i, z_i$  位置上的误差,  $e_{\phi i}, e_{\theta i}, e_{\psi i}$  为  $\phi_i, \theta_i, \psi_i$  方向上的误差; 然后定义第i个水下机器人在跟随者与领导者编队结构中的位置跟踪误差,具体如下:

$$e_{di} = \sqrt{e_{xi}^2 + e_{yi}^2 + e_{zi}^2}$$

为保证跟随者  $\eta_i$  与领导者  $\eta_{i-1}$  之间的正常通信,即连接保持,则位置跟踪误差  $e_{di}$  满足通信范围约束条件:  $e_{di} < d_{i,con} - d_i$ , 其中,  $d_{i,con}$  表示跟随者  $\eta_i$  与领导者  $\eta_{i-1}$  之间能保持通信的最

远距离;连接保持的通信范围是一个以虚拟领导者 $\eta_{ri}$ 为球心, $d_{i,con}-d_i$ 为半径的球;当跟踪误差 $e_i$ 渐进收敛至0时,表明跟随者 $\eta_i$ 无限靠近虚拟领导者 $\eta_{ri}$ ,此时跟随者 $\eta_i$ 处于理想的通信位置;为了保证连接保持的通信范围约束条件,同时保证跟踪误差 $e_i$ 满足预设的暂态性能,引入如下的预设性能约束条件:

$$-e_{ji} < e_{ji} < \bar{e}_{ji}$$

其中 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $j = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$ ,  $e_{ji}$ 和 $\bar{e}_{ji}$ 为指数递减的性能函数,满足如下公式:

$$\begin{cases} \bar{e}_{ji} = (\bar{e}_{ji,0} - \bar{e}_{ji,\infty}) \exp(-\kappa_{ji}t) + \bar{e}_{ji,\infty} \\ \underline{e}_{ji} = (\underline{e}_{ji,0} - \underline{e}_{ji,\infty}) \exp(-\kappa_{ji}t) + \underline{e}_{ji,\infty} \end{cases}$$

其中, $\bar{e}_{ji,0}$ 、 $\bar{e}_{ji,\infty}$ 、 $\underline{e}_{ji,0}$ 、 $\underline{e}_{ji,\infty}$ 、 $\kappa_{ji}$ 为性能函数的正的设计参数;初始值和稳态值满足: $\bar{e}_{ji,0} \geq \bar{e}_{ji,\infty}$ ,  $\underline{e}_{ji,0} \geq \underline{e}_{ji,\infty}$ ;根据指数递减性质,有 $\bar{e}_{ji} \leq \bar{e}_{ji,0}$ ,  $\underline{e}_{ji} \leq \underline{e}_{ji,0}$ , 则 $|e_{ji}| \leq \max\{\bar{e}_{ji,0}, \underline{e}_{ji,0}\}$ ;定义 $e_{mxi} = \max\{\bar{e}_{xi,0}, \underline{e}_{xi,0}\}$ ,  $e_{myi} = \max\{\bar{e}_{yi,0}, \underline{e}_{yi,0}\}$ ,  $e_{mzi} = \max\{\bar{e}_{zi,0}, \underline{e}_{zi,0}\}$ ,  $e_{mi} = (e_{mxi}^2 + e_{myi}^2 + e_{mzi}^2)^{\frac{1}{2}}$ , 则有不等式: $e_{di} < e_{mi}$ , 通过调整 $e_{mi}$ 值,即调整 $\bar{e}_{ji,0}$ 和 $\underline{e}_{ji,0}$ ,使得: $e_{mi} < d_{i,con}-d_i$ ,从而保证 $e_{di} < d_{i,con}-d_i$ ,即保证通信;当 $e_{ji}$ 满足 $-e_{ji} < e_{ji} < \bar{e}_{ji}$ 时,则跟踪误差的最大偏差比 $\max\{\bar{e}_{ji,0}, \underline{e}_{ji,0}\}$ 更小,而收敛速度比指数递减函数 $\exp(-\kappa_{ji}t)$ 更快,即保证了跟踪误差的暂态性能。

5. 根据权利要求1所述的具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法,其特征在于,步骤(4)中所述的将保证预设性能和连接保持问题转化为保证转化误差的渐进稳定性问题,具体设计如下:

$$e_{ji} = \bar{e}_{ji} T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji})$$

其中 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $j = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$ ;  $T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji})$ 是一个光滑严格递增的转换函数,具体公式如下:

$$T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) = \frac{e^{z_{ji}} - e^{-z_{ji}}}{e^{z_{ji}} + \gamma_{ji}^{-1} e^{-z_{ji}}}$$

其中, $\gamma_{ji} = \underline{e}_{ji}/\bar{e}_{ji}$ ,  $z_{ji}$ 为转换误差,  $-\gamma_{ji} < T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) < 1, \forall z_{ji} \in L_{\infty}$ ,  $L_{\infty}$ 表示一个有界空间;当且仅当 $z_{ji}=0$ 时,  $T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji})=0$ ;因此,转换误差 $z_{ji}$ 与跟踪误差 $e_{ji}$ 的关系可表示为: $z_{ji} = \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{e_{ji}}{\underline{e}_{ji}}\right) - \frac{1}{2} \ln\left(1 - \frac{e_{ji}}{\bar{e}_{ji}}\right)$ ,对转换误差 $z_{ji}$ 求导得: $\dot{z}_{ji} = \rho_{ji} \dot{e}_{ji} - \delta_{ji} e_{ji}$ , 其中,

$$\begin{cases} \rho_{ji} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\underline{e}_{ji} + e_{ji}} + \frac{1}{\bar{e}_{ji} - e_{ji}} \right] > 0, \\ \delta_{ji} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\dot{\underline{e}}_{ji}}{\underline{e}_{ji}(\underline{e}_{ji} + e_{ji})} + \frac{\dot{\bar{e}}_{ji}}{\bar{e}_{ji}(\bar{e}_{ji} - e_{ji})} \right] \end{cases}$$

定义  $\mathbf{q}_i = \text{diag}[\mathbf{q}_{xi}, \mathbf{q}_{yi}, \mathbf{q}_{zi}, \mathbf{q}_{\phi i}, \mathbf{q}_{\theta i}, \mathbf{q}_{\psi i}]$ , 同理,  $\delta_i = \text{diag}[\delta_{xi}, \delta_{yi}, \dots, \delta_{\phi i}]$ ,  $\mathbf{z}_{1i} = [\mathbf{z}_{xi}, \mathbf{z}_{yi}, \dots, \mathbf{z}_{\phi i}]^T$ ,  $\mathbf{z}_{1i}$  表示位置  $\{x, y, z\}$  和方向角  $\{\phi, \theta, \psi\}$  的转换误差矢量, 则有:  $\dot{\mathbf{z}}_{1i} = \mathbf{q}_i \dot{\mathbf{e}}_i - \delta_i \mathbf{e}_i$ ; 由以上可知, 当转换误差  $\mathbf{z}_{ji}$  有界, 则有  $-\gamma_{ji} < T_{ji}(\mathbf{z}_{ji}, \gamma_{ji}) < 1$ , 从而有  $-\underline{e}_{ji} < \mathbf{e}_{ji} < \bar{e}_{ji}$ ; 当转换误差  $\mathbf{z}_{ji}$  渐进收敛到 0 时, 跟踪误差  $\mathbf{e}_{ji}$  也渐进收敛到 0, 即转换误差  $\mathbf{z}_{ji}$  的渐收敛可同时保证预设性能和跟踪误差  $\mathbf{e}_{ji}$  的渐收敛, 进而保证跟随者  $\eta_i$  和领导者  $\eta_{i-1}$  之间的连接保持; 所以, 设计的控制器应能保证转换误差  $\mathbf{z}_{ji}$  的渐进收敛。

6. 根据权利要求 1 所述的具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法, 其特征在于, 步骤 (5) 中所述的后推设计法设计虚拟控制器, 具体过程如下:

基于后推设计方法引入如下变换函数:  $\mathbf{z}_{2i} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{di}$ , 其中,  $\mathbf{z}_{2i}$  表示速度跟踪误差;  $\mathbf{v}_{di}$  表示第  $i$  个水下机器人的虚拟控制输入, 具体设计为:

$$\mathbf{v}_{di} = \mathbf{J}_i^{-1} \mathbf{q}_i^{-1} (-\mathbf{K}_i \mathbf{z}_{1i} + \mathbf{q}_i \dot{\eta}_{ri} + \delta_i \mathbf{e}_i)$$

其中,  $\mathbf{K}_i$  为虚拟控制输入的设计参数, 满足  $\mathbf{K}_i = \mathbf{K}_i^T > 0$ ; 通过对  $\mathbf{z}_{2i} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{di}$  求导, 并在等式两边同乘以惯性矩阵  $\mathbf{M}_i$  得到:  $\mathbf{M}_i \dot{\mathbf{z}}_{2i} = -\mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_i - \mathbf{D}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_i - \mathbf{g}_i(\eta_i) - \boldsymbol{\tau}_{di} + \boldsymbol{\tau}_i - \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{v}}_{di}$ , 引入辅助跟踪误差  $\mathbf{z}_{3i}$ :

$$\mathbf{z}_{3i} = \dot{\mathbf{z}}_{2i} + \alpha_i \mathbf{z}_{2i}$$

其中,  $\mathbf{z}_{3i} = [\mathbf{z}_{31,i}, \mathbf{z}_{32,i}, \mathbf{z}_{33,i}, \mathbf{z}_{34,i}, \mathbf{z}_{35,i}, \mathbf{z}_{36,i}]^T$ ;  $\dot{\mathbf{z}}_{2i}$  为  $\mathbf{z}_{2i}$  的导数;  $\alpha_i$  为辅助跟踪误差的正的设计参数。

7. 根据权利要求 1 所述的具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法, 其特征在于, 步骤 (6) 中所述的应用径向基神经网络逼近系统动态模型不确定, 具体过程如下:

令  $\mathbf{f}_i = -\mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_i - \mathbf{D}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_i - \mathbf{g}_i(\eta_i)$ , 导数  $\dot{\mathbf{f}}_i = [\dot{f}_{1i}, \dot{f}_{2i}, \dots, \dot{f}_{6i}]^T$ , 则根据径向基神经网络的逼近原理, 未知项  $\dot{\mathbf{f}}_{li}$  表示为:

$$\dot{f}_{li} = \mathbf{W}_{li}^{*T} \mathbf{S}_{li}(\mathbf{Z}_i) + \epsilon_{li}(\mathbf{Z}_i) \quad \forall \mathbf{Z}_i \in \Omega_{\mathbf{Z}_i}, \quad l = 1, 2, \dots, 6$$

其中,  $\mathbf{W}_{li}^*$  为理想权值,  $\mathbf{Z}_i = [\mathbf{v}_i, \dot{\mathbf{v}}_i, \eta_i, \dot{\eta}_i]^T$  为神经网络输入,  $\mathbf{S}_{li}$  为径向基函数,  $\epsilon_{li}$  为重构误差; 由于  $\mathbf{W}_{li}^*$  是未知的, 用神经网络权值  $\hat{\mathbf{W}}_{li}$  估计  $\mathbf{W}_{li}^*$ 。

8. 根据权利要求 1 所述的具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法, 其特征在于, 步骤 (7) 中所述的设计基于误差符号鲁棒积分的自适应神经网络控制器, 该控制器具体设计为:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{v}}_{di} - \alpha_i \mathbf{M}_i \mathbf{z}_{2i} - \boldsymbol{\mu}_i$$

其中, 误差符号鲁棒积分项  $\boldsymbol{\mu}_i$  为:  $\boldsymbol{\mu}_i = (\mathbf{k}_{si} + 1)(\mathbf{z}_{2i} - \mathbf{z}_{2i,0}) + \int_0^t [\hat{\mathbf{W}}_i^T \mathbf{S}_i^F + (\mathbf{k}_{si} + 1) \alpha_i \mathbf{z}_{2i} + \hat{\boldsymbol{\beta}}_i \text{sgn}(\mathbf{z}_{2i})] d\sigma$ , 其中  $\mathbf{k}_{si}$  为误差符号鲁棒积分项的设计参数;  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数;  $\hat{\boldsymbol{\beta}}_i$  为自适应增益, 用来补偿扰动和神经网络重构误差;  $\hat{\mathbf{W}}_i^T \mathbf{S}_i^F \triangleq [\hat{\mathbf{W}}_{1i}^T \mathbf{S}_{1i}, \hat{\mathbf{W}}_{2i}^T \mathbf{S}_{2i}, \dots, \hat{\mathbf{W}}_{6i}^T \mathbf{S}_{6i}]^T$  为未知项  $\dot{\mathbf{f}}_i$  的估计; 神经网络权值和自适应增益

的更新率分别设计为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{W}}_{li} = k_{li} S_{li} z_{3l,i}, & l = 1, 2, \dots, 6 \\ \dot{\hat{\beta}}_i = k_{bi} z_{3i}^T \text{sgn}(z_{2i}) \end{cases}$$

其中,  $k_{li}$  为神经网络权值更新率的设计参数,  $k_{bi}$  为自适应增益更新率的设计参数。

## 一种具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及水下机器人的编队控制领域,特别涉及一种具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法。

### 背景技术

[0002] 近几十年,随着人口的增加和陆地资源的短缺,对海洋的开发已经成为了社会经济健康发展的必然要求。广阔的海底世界蕴藏着丰富的油气等矿物资源和生物资源,而人类对海洋的探索只有5%左右,尚有95%的海洋都是未知的,尤其是深海区域。但是,深海巨厚的水体和海水对光线的吸收作用,以及海底通信的复杂性,使得探索难度非常大。相比于人类潜入海底工作,水下机器人具有更好的机动性和操作性,同时能够保证人身安全,是深入海底探索的有利工具。所以,水下机器人研究受到了很多学者的关注。对于执行如海洋资源开采、海洋监测、救援等水下任务,单个水下机器人的工作能力总是有限的,单独完成任务往往需要更多的时间和成本,而多个水下机器人互相合作,更高效,同时也具备更大的容错率。

[0003] 多个水下机器人的控制即编队控制,其目标是设计控制器使得多个机器人能保持一个既定的编队几何形状,并能按预期完成任务。典型的编队控制方法有:基于行为控制(behavior-based)、虚拟构造控制(virtual structures)和领导者跟随者控制(leader-follower)。每种方法都有其优缺点,而由于简单和可扩展性,领导者跟随者编队控制方法被普遍采纳。水下机器人编队控制的难点在于:水下复杂的环境,使得机器人系统动态模型具有不确定性,无法精确获得;同时,水流等干扰要求系统具备很强的鲁棒性。在前人的工作中,很多单纯采用自适应的方法去估计系统不确定性,但由于估计误差和外部扰动的存在,系统状态最终是一致有界,而无法达到渐进稳定。深水工作对通信质量也有更高的要求,传感器设备在水下传导范围有限,这就要求机器人与机器人之间应始终保持一定的距离,即连接保持。此外,为了改善系统的鲁棒性和提高操作的精确度,还需要保证编队跟踪误差的暂态性能,即更小的超调量和更快的收敛率。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术中的缺点与不足,提供一种具备预设性能和连接保持的水下机器人编队方法,该方法既能补偿系统的动态模型不确定性,又能补偿外界未知扰动,保证了跟踪误差的暂态性能和跟随者与领导者之间的通信连接,并最终实现编队跟踪误差的渐进收敛。

[0005] 为实现以上目的,本发明采取如下技术方案:

[0006] 一种具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法,包括下述步骤:

[0007] 步骤(1):建立n个水下机器人编队动态模型,并考虑控制系统的外界时变扰动;

[0008] 步骤(2):建立虚拟领导者模型,从而确定虚拟领导者和真实领导者的位置关系;

[0009] 步骤(3):根据步骤(2)建立的虚拟领导者模型,计算水下机器人的位置跟踪误差,

并考虑预设性能和连接保持问题；

[0010] 步骤(4)：将保证预设性能和连接保持问题转化为保证转化误差的渐进稳定性问题；

[0011] 步骤(5)：采用后推设计法设计虚拟控制器以保证转化误差的渐进收敛；

[0012] 步骤(6)：应用径向基神经网络逼近系统动态模型不确定；

[0013] 步骤(7)：设计基于误差符号鲁棒积分的自适应神经网络控制器。

[0014] 作为优选的技术方案，步骤(1)中所述的建立n个水下机器人编队动态模型：

$$[0015] \quad \begin{cases} \dot{\eta}_i = J_i(\eta_i)v_i \\ M_i\dot{v}_i + C_i(v_i)v_i + D_i(v_i)v_i + g_i(\eta_i) + \tau_{di} = \tau_i \end{cases}$$

[0016] 其中， $\eta_i = [x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, \psi_i]^T$ 为第i个水下机器人的位置和方向输出， $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ； $\dot{\eta}_i$ 表示 $\eta_i$ 的导数； $v_i = [u_i, v_i, \omega_i, p_i, q_i, r_i]^T$ ，其中 $u_i, v_i, \omega_i$ 分别对应于 $x_i, y_i, z_i$ 位置上的线速度， $p_i, q_i, r_i$ 分别对应于 $\phi_i, \theta_i, \psi_i$ 方向上的角速度； $\dot{v}_i$ 表示 $v_i$ 的导数； $J_i(\eta_i)$ 是旋转矩阵； $M_i$ 是对称正定的惯性矩阵； $C_i(v_i)$ 是科氏力和向心力矩阵； $D_i(v_i)$ 是阻尼矩阵； $g_i(\eta_i)$ 是水下机器人受到的引力和浮力影响的向量； $\tau_i$ 为控制输入量； $C_i(v_i)$ 、 $D_i(v_i)$ 、 $g_i(\eta_i)$ 为模型不确定量， $\tau_{di}$ 代表水流量； $C_i(v_i)$ 、 $D_i(v_i)$ 、 $g_i(\eta_i)$ 、 $\tau_{di}$ 都作为外界时变干扰项。

[0017] 作为优选的技术方案，步骤(2)中所述的建立虚拟领导者模型：

$$[0018] \quad \eta_{ri} = \eta_{i-1} + \eta_{di}$$

[0019] 其中， $\eta_{ri}$ 表示虚拟领导者轨迹，即跟随者 $\eta_i$ 的理想位置状态； $\eta_{i-1}$ 表示真实领导者轨迹； $\eta_{di}$ 表示虚拟领导者与真实领导者位置 $\{x, y, z\}$ 和方向角 $\{\phi, \theta, \psi\}$ 上的误差， $\eta_{di} = [-d_i \cos(\varphi_i) \cos(\varphi_{ix}), d_i \cos(\varphi_i) \sin(\varphi_{ix}), -d_i \sin(\varphi_i), 0, 0, 0]^T$ ， $d_i$ 表示理想的距离， $\varphi_i$ 和 $\varphi_{ix}$ 为 $\eta_{di}$ 的设计参数。

[0020] 作为优选的技术方案，步骤(3)中，具体过程如下：

[0021] 首先定义第i个水下机器人在跟随者与领导者编队结构中的轨迹跟踪误差为： $e_i = \eta_i - \eta_{ri}$ ，其中 $e_i = [e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}, e_{\phi_i}, e_{\theta_i}, e_{\psi_i}]^T$ ， $e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}$ 为 $x_i, y_i, z_i$ 位置上的误差， $e_{\phi_i}, e_{\theta_i}, e_{\psi_i}$ 为 $\phi_i, \theta_i, \psi_i$ 方向上的误差；然后定义第i个水下机器人在跟随者与领导者编队结构中的位置跟踪误差，具体如下：

$$[0022] \quad e_{di} = \sqrt{e_{xi}^2 + e_{yi}^2 + e_{zi}^2}$$

[0023] 为保证跟随者 $\eta_i$ 与领导者 $\eta_{i-1}$ 之间的正常通信，即连接保持，则位置跟踪误差 $e_{di}$ 满足通信范围约束条件： $e_{di} < d_{i,con} - d_i$ ，其中， $d_{i,con}$ 表示跟随者 $\eta_i$ 与领导者 $\eta_{i-1}$ 之间能保持通信的最远距离；连接保持的通信范围是一个以虚拟领导者 $\eta_{ri}$ 为球心， $d_{i,con} - d_i$ 为半径的球；当跟踪误差 $e_i$ 渐进收敛至0时，表明跟随者 $\eta_i$ 无限靠近虚拟领导者 $\eta_{ri}$ ，此时跟随者 $\eta_i$ 处于理想的通信位置；为了保证连接保持的通信范围约束条件，同时保证跟踪误差 $e_i$ 满足预设的暂态性能，引入如下的预设性能约束条件：

$$[0024] \quad -\underline{e}_{ji} < e_{ji} < \bar{e}_{ji}$$

[0025] 其中 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ， $j = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$ ， $\underline{e}_{ji}$ 和 $\bar{e}_{ji}$ 为指数递减的性能函数，满足如下公式：

$$[0026] \quad \begin{cases} \bar{e}_{ji} = (\bar{e}_{ji,0} - \bar{e}_{ji,\infty}) \exp(-\kappa_{ji}t) + \bar{e}_{ji,\infty} \\ \underline{e}_{ji} = (\underline{e}_{ji,0} - \underline{e}_{ji,\infty}) \exp(-\kappa_{ji}t) + \underline{e}_{ji,\infty} \end{cases}$$

[0027] 其中,  $\bar{e}_{ji,0}$ 、 $\bar{e}_{ji,\infty}$ 、 $\underline{e}_{ji,0}$ 、 $\underline{e}_{ji,\infty}$ 、 $\kappa_{ji}$  为性能函数的正的设计参数; 初始值和稳态值满足:  $\bar{e}_{ji,0} \geq \bar{e}_{ji,\infty}$ 、 $\underline{e}_{ji,0} \geq \underline{e}_{ji,\infty}$ ; 根据指数递减性质, 有  $\bar{e}_{ji} \leq \bar{e}_{ji,0}$ 、 $\underline{e}_{ji} \leq \underline{e}_{ji,0}$ , 则  $|e_{ji}| \leq \max\{\bar{e}_{ji,0}, \underline{e}_{ji,0}\}$ ; 定义  $e_{mxi} = \max\{\bar{e}_{xi,0}, \underline{e}_{xi,0}\}$ ,  $e_{myi} = \max\{\bar{e}_{yi,0}, \underline{e}_{yi,0}\}$ ,  $e_{mzi} = \max\{\bar{e}_{zi,0}, \underline{e}_{zi,0}\}$ ,  $e_{mi} = (e_{mxi}^2 + e_{myi}^2 + e_{mzi}^2)^{\frac{1}{2}}$ , 则有不等式:  $e_{di} < e_{mi}$ , 通过调整  $e_{mi}$  值, 即调整  $\bar{e}_{ji,0}$  和  $\underline{e}_{ji,0}$ , 使得:  $e_{mi} < d_{i,con} - d_i$ , 从而保证  $e_{di} < d_{i,con} - d_i$ , 即保证通信; 当  $e_{ji}$  满足  $-\underline{e}_{ji} < e_{ji} < \bar{e}_{ji}$  时, 则跟踪误差的最大偏差比  $\max\{\bar{e}_{ji,0}, \underline{e}_{ji,0}\}$  更小, 而收敛速度比指数递减函数  $\exp(-\kappa_{ji}t)$  更快, 即保证了跟踪误差的暂态性能。

[0028] 作为优选的技术方案, 步骤(4)中所述的将保证预设性能和连接保持问题转化为保证转化误差的渐进稳定性问题, 具体设计如下:

$$[0029] \quad e_{ji} = \bar{e}_{ji} T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji})$$

[0030] 其中  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $j = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$ ;  $T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji})$  是一个光滑严格递增的转换函数, 具体公式如下:

$$[0031] \quad T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) = \frac{e^{z_{ji}} - e^{-z_{ji}}}{e^{z_{ji}} + \gamma_{ji}^{-1} e^{-z_{ji}}}$$

[0032] 其中,  $\gamma_{ji} = \underline{e}_{ji} / \bar{e}_{ji}$ ,  $z_{ji}$  为转换误差,  $-\gamma_{ji} < T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) < 1, \forall z_{ji} \in L_{\infty, \infty}$  表示一个有界空间; 当且仅当  $z_{ji} = 0$  时,  $T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) = 0$ ; 因此, 转换误差  $z_{ji}$  与跟踪误差  $e_{ji}$  的关系可表示为:  $z_{ji} = \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{e_{ji}}{\underline{e}_{ji}}\right) - \frac{1}{2} \ln\left(1 - \frac{e_{ji}}{\bar{e}_{ji}}\right)$ , 对转换误差  $z_{ji}$  求导得:

$\dot{z}_{ji} = \varrho_{ji} \dot{e}_{ji} - \delta_{ji} e_{ji}$ , 其中,

$$[0033] \quad \begin{cases} \varrho_{ji} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\underline{e}_{ji} + e_{ji}} + \frac{1}{\bar{e}_{ji} - e_{ji}} \right] > 0, \\ \delta_{ji} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\dot{e}_{ji}}{\underline{e}_{ji}(\underline{e}_{ji} + e_{ji})} + \frac{\dot{\bar{e}}_{ji}}{\bar{e}_{ji}(\bar{e}_{ji} - e_{ji})} \right] \end{cases}$$

[0034] 定义  $\varrho_i = \text{diag}[\varrho_{xi}, \varrho_{yi}, \varrho_{zi}, \varrho_{\phi i}, \varrho_{\theta i}, \varrho_{\psi i}]$ , 同理,  $\delta_i = \text{diag}[\delta_{xi}, \delta_{yi}, \dots, \delta_{\psi i}]$ ,  $z_{1i} = [z_{xi}, z_{yi}, \dots, z_{\psi i}]^T$ ,  $z_{1i}$  表示位置  $\{x, y, z\}$  和方向角  $\{\phi, \theta, \psi\}$  的转换误差矢量, 则有:  $\dot{z}_{1i} = \varrho_i \dot{e}_i - \delta_i e_i$ ; 由以上可知, 当转换误差  $z_{ji}$  有界, 则有  $-\gamma_{ji} < T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) < 1$ , 从而有  $-\underline{e}_{ji} < e_{ji} < \bar{e}_{ji}$ ; 当转换误差  $z_{ji}$  渐进收敛到 0 时, 跟踪误差  $e_{ji}$  也渐进收敛到 0, 即转换误差  $z_{ji}$  的渐收敛可同时保证预设性能和跟踪误差  $e_{ji}$  的渐收敛, 进而保证跟随者  $\eta_i$  和领导者  $\eta_{i-1}$  之间的连接保持; 所以, 设计的控制器应能保证转换误差  $z_{ji}$  的渐收敛。

[0035] 作为优选的技术方案, 步骤(5)中所述的后推设计法设计虚拟控制器, 具体过程如



下:

[0036] 基于后推设计方法引入如下变换函数:  $z_{2i} = v_i - v_{di}$ , 其中,  $z_{2i}$  表示速度跟踪误差;  $v_{di}$  表示第  $i$  个水下机器人的虚拟控制输入, 具体设计为:

$$[0037] \quad v_{di} = J_i^{-1} q_i^{-1} (-K_i z_{1i} + q_i \dot{\eta}_{ri} + \delta_i e_i)$$

[0038] 其中,  $K_i$  为虚拟控制输入的设计参数, 满足  $K_i = K_i^T > 0$ ; 通过对  $z_{2i} = v_i - v_{di}$  求导, 并在等式两边同乘以惯性矩阵  $M_i$  得到:  $M_i \dot{z}_{2i} = -C_i(v_i)v_i - D_i(v_i)v_i - g_i(\eta_i) - \tau_{di} + \tau_i - M_i \dot{v}_{di}$ , 引入辅助跟踪误差  $z_{3i}$ :

$$[0039] \quad z_{3i} = \dot{z}_{2i} + \alpha_i z_{2i}$$

[0040] 其中,  $z_{3i} = [z_{31,i}, z_{32,i}, z_{33,i}, z_{34,i}, z_{35,i}, z_{36,i}]^T$ ;  $\dot{z}_{2i}$  为  $z_{2i}$  的导数;  $\alpha_i$  为辅助跟踪误差的正的设计参数。

[0041] 作为优选的技术方案, 步骤(6)中所述的应用径向基神经网络逼近系统动态模型不确定, 具体过程如下:

[0042] 令  $f_i = -C_i(v_i)v_i - D_i(v_i)v_i - g_i(\eta_i)$ , 导数  $\dot{f}_i = [\dot{f}_{1i}, \dot{f}_{2i}, \dots, \dot{f}_{6i}]^T$ , 则根据径向基神经网络的逼近原理, 未知项  $\dot{f}_{li}$  表示为:

$$[0043] \quad \dot{f}_{li} = W_{li}^{*T} S_{li}(Z_i) + \epsilon_{li}(Z_i) \quad \forall Z_i \in \Omega_{Z_i}, \quad l = 1, 2, \dots, 6$$

[0044] 其中,  $W_{li}^*$  为理想权值,  $Z_i = [v_i, \dot{v}_i, \eta_i, \dot{\eta}_i]^T$  为神经网络输入,  $S_{li}$  为径向基函数,  $\epsilon_{li}$  为重构误差; 由于  $W_{li}^*$  是未知的, 用神经网络权值  $\hat{W}_{li}$  估计  $W_{li}^*$ 。

[0045] 作为优选的技术方案, 步骤(7)中所述的设计基于误差符号鲁棒积分的自适应神经网络控制器, 该控制器具体设计为:

$$[0046] \quad \tau_i = M_i \dot{v}_{di} - \alpha_i M_i z_{2i} - \mu_i$$

[0047] 其中, 误差符号鲁棒积分项  $\mu_i$  为:  $\mu_i = (k_{si} + 1)(z_{2i} - z_{2i,0}) + \int_0^t [\hat{W}_i^T S_i^F + (k_{si} + 1)\alpha_i z_{2i} + \hat{\beta}_i \text{sgn}(z_{2i})] d\sigma$ , 其中  $k_{si}$  为误差符号鲁棒积分项的设计参数;  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数;  $\hat{\beta}_i$  为自适应增益, 用来补偿扰动和神经网络重构误差;  $\hat{W}_i^T S_i^F \triangleq [\hat{W}_{1i}^T S_{1i}, \hat{W}_{2i}^T S_{2i}, \dots, \hat{W}_{6i}^T S_{6i}]^T$  为未知项  $\dot{f}_i$  的估计; 神经网络权值和自适应增益的更新率分别设计为:

$$[0048] \quad \begin{cases} \dot{\hat{W}}_{li} = k_{li} S_{li} z_{3l,i}, & l = 1, 2, \dots, 6 \\ \dot{\hat{\beta}}_i = k_{bi} z_{3i}^T \text{sgn}(z_{2i}) \end{cases}$$

[0049] 其中,  $k_{li}$  为神经网络权值更新率的设计参数,  $k_{bi}$  为自适应增益更新率的设计参数。

[0050] 本发明相对于现有技术具有如下的优点和效果:

[0051] (1) 本发明的水下机器人编队方法运用预定性能受限方法, 保证了跟踪误差的暂态性能, 提高了系统的鲁棒性;

[0052] (2) 本发明的水下机器人编队方法保证了跟随者与领导者之间的通信连接;

[0053] (3) 本发明的水下机器人编队方法在系统模型不确定和未知扰动情况下, 实现系

统渐进稳定。

### 附图说明

- [0054] 图1为本实施例的水下机器人编队结构示意图；  
 [0055] 图2为本实施例的水下机器人编队的整体控制框图；  
 [0056] 图3、图4、图5为本实施例的跟随者输出在 $x_i, y_i, z_i$ 位置的跟踪误差示意图；  
 [0057] 图6、图7、图8为本实施例的跟随者输出在 $\phi_i, \theta_i, \psi_i$ 方向的跟踪误差示意图；  
 [0058] 图9为本实施例的自适应增益 $\hat{\beta}_i$ 示意图；  
 [0059] 图10为本实施例的水下机器人编队轨迹跟踪示意图。

### 具体实施方式

[0060] 为了使本发明的目的、技术方案以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的详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用于解释本发明，并不限于本发明。

[0061] 实施例

[0062] 本实施例针对如图1所示的水下机器人编队结构，其中，XYZ表示大地坐标， $x_b y_b z_b$ 表示水下机器人的体坐标； $u, v$ 和 $\omega$ 为水下机器人的线速度； $\phi, \theta, \psi$ 表示欧拉角，分别为滚转角、俯仰角和偏航角； $p, q, r$ 为对应的角速度。

[0063] 如图2所示，一种具有预设性能和连接保持的水下机器人编队控制方法，包括下述步骤：

[0064] 步骤(1)：建立 $n$  ( $n$ 取4)个水下机器人编队动态模型，并考虑控制系统具有的外界时变扰动；

[0065] 所述水下机器人编队动态模型为：

$$[0066] \quad \begin{cases} \dot{\eta}_i = J_i(\eta_i) v_i \\ M_i \dot{v}_i + C_i(v_i) v_i + D_i(v_i) v_i + g_i(\eta_i) + \tau_{di} = \tau_i \end{cases}$$

[0067] 其中， $\eta_i = [x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, \psi_i]^T$ 为第 $i$ 个水下机器人的位置和方向输出， $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ； $v_i = [u_i, v_i, \omega_i, p_i, q_i, r_i]^T$ ，其中 $u_i, v_i, \omega_i$ 分别对应于 $x_i, y_i, z_i$ 位置上的线速度， $p_i, q_i, r_i$ 分别对应于 $\phi_i, \theta_i, \psi_i$ 方向上的角速度； $J_i(\eta_i)$ 是旋转矩阵； $M_i$ 是对称正定的惯性矩阵； $C_i(v_i)$ 是科氏力和向心力矩阵； $D_i(v_i)$ 是阻尼矩阵； $g_i(\eta_i)$ 是机器人受到的引力和浮力影响的向量； $\tau_i$ 为控制输入量； $C_i(v_i)$ 、 $D_i(v_i)$ 、 $g_i(\eta_i)$ 为模型不确定量， $\tau_{di}$ 代表水流量； $C_i(v_i)$ 、 $D_i(v_i)$ 、 $g_i(\eta_i)$ 、 $\tau_{di}$ 都作为外界时变干扰项。

[0068] 在本实施例中，系统的各物理量单位均采用国际单位制，针对水下机器人的系统参数设计如下：

$$[0069] \quad M_i = \begin{bmatrix} m_{11i} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_{66i} \end{bmatrix}, \quad D_i(v_i) = \begin{bmatrix} d_{11i} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & d_{66i} \end{bmatrix},$$

$$[0070] \quad C_i(v_i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & m_{33i}\omega_i & -m_{22i}v_i \\ 0 & 0 & 0 & -m_{33i}\omega_i & 0 & m_{11i}u_i \\ 0 & 0 & 0 & m_{22i}v_i & -m_{11i}u_i & 0 \\ 0 & m_{33i}\omega_i & -m_{22i}v_i & 0 & m_{66i}r_i & -m_{55i}q_i \\ -m_{33i}\omega_i & 0 & m_{11i}u_i & -m_{66i}r_i & 0 & m_{44i}p_i \\ m_{22i}v_i & -m_{11i}u_i & 0 & m_{55i}q_i & -m_{44i}p_i & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0071] \quad g_i(\eta_i) = [0, 0, 0, z_g m g \cos(\theta_i) \sin(\phi_i), z_g m g \sin(\theta_i), 0]^T,$$

$$[0072] \quad \tau_{di} = [300+150 \sin(0.5t), -1000+300 \cos(0.2t)+300 \sin(0.2t), 1000+120 \cos(3t), 1200 \sin(0.2t) 200 \cos(0.8t), 150 \sin(t), 30 \sin(0.2t) - 120 \cos(0.5t)]^T,$$

$$[0073] \quad n=4, m_{11i}=1116, m_{22i}=m_{33i}=2133, m_{44i}=36.7, m_{55i}=m_{66i}=4061, d_{11i}=25.5, d_{22i}=d_{33i}=138, d_{44i}=10, d_{55i}=d_{66i}=490, m=1089.8, z_g=0.0065, g=9.8.$$

[0074] 步骤(2):建立虚拟领导者模型,确定虚拟领导者和真实领导者的位置关系,具体为:

$$[0075] \quad \eta_{ri} = \eta_{i-1} + \eta_{di}$$

[0076] 其中,  $\eta_{ri}$  表示虚拟领导者轨迹,即跟随者  $\eta_i$  的理想位置状态;  $\eta_{i-1}$  表示真实领导者轨迹;  $\eta_{di}$  表示虚拟领导者与真实领导者位置  $\{x, y, z\}$  和方向角  $\{\phi, \theta, \psi\}$  上的误差,  $\eta_{di} = [-d_i \cos(\varphi_i) \cos(\varphi_{ix}), d_i \cos(\varphi_i) \sin(\varphi_{ix}), -d_i \sin(\varphi_i), 0, 0, 0]^T$ ,  $d_i$  表示理想的距离,  $\varphi_i$  和  $\varphi_{ix}$  为  $\eta_{di}$  的设计参数。

[0077] 本实施例中,针对虚拟领导者模型设计的相关参数如下:

[0078] 取  $d_1=0, d_2=d_3=d_4=2, \varphi_i = \pi/2, \varphi_{ix} = \pi/6$ ; 所以有  $\eta_{r1} = \eta_0$ , 全局领导者  $\eta_1$  的参考轨迹  $\eta_0$  选为:

$$[0079] \quad \begin{cases} \eta_0 = [1.5t, 0, 0, 0.3, -0.5, 0.6]^T, & \text{if } t \leq t_c \\ \eta_0 = [1.5t_c + 30\sin(t'), 30(1 - \cos(t')), 0, 0.3, -0.5, 0.6]^T, & \text{if } t > t_c \end{cases}$$

[0080] 其中,  $t$  表示仿真时间,  $t_c$  表示直线部分仿真时间,  $t'$  表示正余弦角度; 选取  $t_c=50, t'=0.05(t-t_c)$ , 当  $t \leq t_c$ , 编队轨迹为一条直线, 当  $t > t_c$ , 编队轨迹为平面上半径为30米的圆; 针对  $\eta_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 的初始值选为:  $\eta_1(0) = [1.5, 1.5, -1.5, 0, 0, 0]^T, \eta_2(0) = [0, 0, -3, 0.3, 0.5, -0.5]^T, \eta_3(0) = [1.5, 1.5, -4.5, 0, 0, 0]^T, \eta_4(0) = [0, 0, -6, 0.5, -0.5, 0.3]^T$ 。

[0081] 步骤(3):根据步骤(2)建立的虚拟领导者模型,计算水下机器人在跟随者与领导者编队中的位置跟踪误差,并考虑预设性能和连接保持问题;具体过程如下:

[0082] 首先定义第  $i$  个水下机器人在跟随者与领导者编队结构中的轨迹跟踪误差为:  $e_i = \eta_i - \eta_{ri}$ , 其中  $e_i = [e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}, e_{\phi_i}, e_{\theta_i}, e_{\psi_i}]^T$ ,  $e_{xi}, e_{yi}, e_{zi}$  为  $x_i, y_i, z_i$  位置上的误差,  $e_{\phi_i}, e_{\theta_i}, e_{\psi_i}$  为  $\phi_i, \theta_i, \psi_i$  方向上的误差; 然后定义第  $i$  个水下机器人在跟随者与领导者编队结构中的位置跟踪误差, 具体如下:

$$[0083] \quad e_{di} = \sqrt{e_{xi}^2 + e_{yi}^2 + e_{zi}^2}$$

[0084] 为保证跟随者  $\eta_i$  与领导者  $\eta_{i-1}$  之间的正常通信,即连接保持,则位置跟踪误差  $e_{di}$  满足通信范围约束条件:  $e_{di} < d_{i,con} - d_i$ , 其中,  $d_{i,con}$  表示跟随者  $\eta_i$  与领导者  $\eta_{i-1}$  之间能保持通信的最远距离; 连接保持的通信范围是一个以虚拟领导者  $\eta_{ri}$  为球心,  $d_{i,con} - d_i$  为半径的球; 当

跟踪误差 $e_i$ 渐进收敛至0时,表明跟随者 $\eta_i$ 无限靠近虚拟领导者 $\eta_{ri}$ ,此时跟随者 $\eta_i$ 处于理想的通信位置;为了保证连接保持的通信范围约束条件,同时保证跟踪误差 $e_i$ 的暂态性能,引入如下的预设性能约束条件:

$$[0085] \quad -\underline{e}_{ji} < e_{ji} < \bar{e}_{ji}$$

[0086] 其中 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $j = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$ ,  $\underline{e}_{ji}$ 和 $\bar{e}_{ji}$ 为指数递减的性能函数,满足如下公式:

$$[0087] \quad \begin{cases} \bar{e}_{ji} = (\bar{e}_{ji,0} - \bar{e}_{ji,\infty}) \exp(-\kappa_{ji}t) + \bar{e}_{ji,\infty} \\ \underline{e}_{ji} = (\underline{e}_{ji,0} - \underline{e}_{ji,\infty}) \exp(-\kappa_{ji}t) + \underline{e}_{ji,\infty} \end{cases}$$

[0088] 其中, $\bar{e}_{ji,0}$ ,  $\bar{e}_{ji,\infty}$ ,  $\underline{e}_{ji,0}$ ,  $\underline{e}_{ji,\infty}$ ,  $\kappa_{ji}$ 为性能函数正的设计参数,初始值和稳态值满足 $\bar{e}_{ji,0} \geq \bar{e}_{ji,\infty}$ ,  $\underline{e}_{ji,0} \geq \underline{e}_{ji,\infty}$ ;根据指数递减性质,有 $\bar{e}_{ji} \leq \bar{e}_{ji,0}$ ,  $\underline{e}_{ji} \leq \underline{e}_{ji,0}$ , 则 $|e_{ji}| \leq \max\{\bar{e}_{ji,0}, \underline{e}_{ji,0}\}$ ;定义 $e_{mxi} = \max\{\bar{e}_{xi,0}, \underline{e}_{xi,0}\}$ ,  $e_{myi} = \max\{\bar{e}_{yi,0}, \underline{e}_{yi,0}\}$ ,  $e_{mzi} = \max\{\bar{e}_{zi,0}, \underline{e}_{zi,0}\}$ ,  $e_{mi} = (e_{mxi}^2 + e_{myi}^2 + e_{mzi}^2)^{\frac{1}{2}}$ , 则有不等式: $e_{di} < e_{mi}$ , 通过调整 $e_{mi}$ 值,即调整 $\bar{e}_{ji,0}$ 和 $\underline{e}_{ji,0}$ ,使得: $e_{mi} < d_{i,con} - d_i$ ,从而保证 $e_{di} < d_{i,con} - d_i$ ,即保证通信;当 $e_{ji}$ 满足 $-\underline{e}_{ji} < e_{ji} < \bar{e}_{ji}$ 时,则跟踪误差的超调量比 $\max\{\bar{e}_{ji,0}, \underline{e}_{ji,0}\}$ 更小,而收敛速度比指数递减函数 $\exp(-\kappa_{ji}t)$ 更快,即保证了跟踪误差的暂态性能。

[0089] 本实施例中,针对性能函数设计的相关参数如下:

$$[0090] \quad \bar{e}_{xi} = \underline{e}_{xi} = \bar{e}_{yi} = \underline{e}_{yi} = (3 - 0.1) \exp(-0.1t) + 0.1,$$

$$[0091] \quad \bar{e}_{zi} = \underline{e}_{zi} = \bar{e}_{\phi i} = \underline{e}_{\phi i} = \bar{e}_{\theta i} = \underline{e}_{\theta i} = \bar{e}_{\psi i} = \underline{e}_{\psi i} = (1 - 0.05) \exp(-0.1t) + 0.05.$$

[0092] 图3至图8分别刻画了跟随者 $\eta_i$ 输出在 $x_i, y_i, z_i$ 位置和 $\phi_i, \theta_i, \psi_i$ 方向的具有暂态性能约束的跟踪误差,误差的超调量限制在预设的范围内,且获得较快的收敛速度,最终,跟踪误差能渐进收敛到0。所以,本实施例的控制方法具有很好的鲁棒性。

[0093] 步骤(4):将保证预设性能和连接保持问题转化为保证转化误差的渐进稳定性问题,具体设计为:

$$[0094] \quad e_{ji} = \bar{e}_{ji} T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji})$$

[0095] 其中 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $j = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$ ;  $T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji})$ 是一个光滑严格递增的转换函数,具体公式如下:

$$[0096] \quad T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) = \frac{e^{z_{ji}} - e^{-z_{ji}}}{e^{z_{ji}} + \gamma_{ji}^{-1} e^{-z_{ji}}}$$

[0097] 其中, $\gamma_{ji} = \underline{e}_{ji} / \bar{e}_{ji}$ ,  $z_{ji}$ 为转换误差,  $-\gamma_{ji} < T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) < 1$ ,  $\forall z_{ji} \in L_{\infty}$ ; 当且仅当 $z_{ji} = 0$ 时,  $T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) = 0$ ; 因此,转换误差 $z_{ji}$ 与跟踪误差 $e_{ji}$ 的关系可表示为:

$$z_{ji} = \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{e_{ji}}{\underline{e}_{ji}} \right) - \frac{1}{2} \ln \left( 1 - \frac{e_{ji}}{\bar{e}_{ji}} \right), \text{对转换误差 } z_{ji} \text{ 求导得: } \dot{z}_{ji} = \varrho_{ji} \dot{e}_{ji} - \delta_{ji} e_{ji}, \text{ 其中,}$$

$$[0098] \quad \begin{cases} \varrho_{ji} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\underline{e}_{ji} + e_{ji}} + \frac{1}{\bar{e}_{ji} - e_{ji}} \right] > 0, \\ \delta_{ji} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\dot{\underline{e}}_{ji}}{\underline{e}_{ji}(\underline{e}_{ji} + e_{ji})} + \frac{\dot{\bar{e}}_{ji}}{\bar{e}_{ji}(\bar{e}_{ji} - e_{ji})} \right] \end{cases}$$

[0099] 定义  $\varrho_i = \text{diag}[\varrho_{xi}, \varrho_{yi}, \varrho_{zi}, \varrho_{\phi i}, \varrho_{\theta i}, \varrho_{\psi i}]$ , 同理,  $\delta_i = \text{diag}[\delta_{xi}, \delta_{yi}, \dots, \delta_{\psi i}]$ ,  $z_{1i} = [z_{xi}, z_{yi}, \dots, z_{\psi i}]^T$ ,  $z_{1i}$  表示位置  $\{x, y, z\}$  和方向角  $\{\phi, \theta, \psi\}$  的转换误差矢量; 则有:  $\dot{z}_{1i} = \varrho_i \dot{e}_i - \delta_i e_i$ ; 由以上可以知道, 当转换误差  $z_{ji}$  有界, 则有  $-\gamma_{ji} < T_{ji}(z_{ji}, \gamma_{ji}) < 1$ , 从而有  $-\underline{e}_{ji} < e_{ji} < \bar{e}_{ji}$ ; 当转换误差  $z_{ji}$  渐进收敛到 0 时, 跟踪误差  $e_{ji}$  也渐进收敛到 0, 即转换误差  $z_{ji}$  的渐收敛可同时保证预设性能和跟踪误差  $e_{ji}$  的渐收敛, 进而保证跟随者  $\eta_i$  和领导者  $\eta_{i-1}$  之间的连接保持; 所以, 设计的控制器应能保证转换误差  $z_{ji}$  的渐收敛。

[0100] 步骤 (5): 采用后推设计法设计虚拟控制器以保证转化误差的渐收敛, 具体过程如下:

[0101] 基于后推设计方法引入如下变换函数:  $z_{2i} = v_i - v_{di}$ , 其中,  $z_{2i}$  表示速度跟踪误差;  $v_{di}$  表示第  $i$  个水下机器人的虚拟控制输入, 具体设计为:

$$[0102] \quad v_{di} = J_i^{-1} \varrho_i^{-1} (-K_i z_{1i} + \varrho_i \dot{\eta}_{ri} + \delta_i e_i)$$

[0103] 其中,  $K_i$  为虚拟控制输入的设计参数, 满足  $K_i = K_i^T > 0$ ; 通过对变换函数求导, 并在等式两边同乘以惯性矩阵  $M_i$  得到:  $M_i \dot{z}_{2i} = -C_i(v_i)v_i - D_i(v_i)v_i - g_i(\eta_i) - \tau_{di} + \tau_i - M_i \dot{v}_{di}$ , 引入辅助跟踪误差  $z_{3i}$ :

$$[0104] \quad z_{3i} = \dot{z}_{2i} + \alpha_i z_{2i}$$

[0105] 其中,  $z_{3i} = [z_{31,i}, z_{32,i}, z_{33,i}, z_{34,i}, z_{35,i}, z_{36,i}]^T$ ;  $\dot{z}_{2i}$  为  $z_{2i}$  的导数;  $\alpha_i$  为辅助跟踪误差的正的设计参数。

[0106] 本实施例中, 针对虚拟控制器设计的相关参数如下:  $K_i = \text{diag}[0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5]$ ;  $\alpha_i = 200$ 。

[0107] 步骤 (6): 应用径向基 (RBF) 神经网络逼近系统动态模型不确定, 具体过程如下:

[0108] 令  $f_i = -C_i(v_i)v_i - D_i(v_i)v_i - g_i(\eta_i)$ , 导数  $\dot{f}_i = [\dot{f}_{1i}, \dot{f}_{2i}, \dots, \dot{f}_{6i}]^T$ , 则根据径向基 (RBF) 神经网络的逼近原理, 未知项  $\dot{f}_{li}$  表示为:

$$[0109] \quad \dot{f}_{li} = W_{li}^{*T} S_{li}(Z_i) + \epsilon_{li}(Z_i) \quad \forall Z_i \in \Omega_{Z_i}, \quad l = 1, 2, \dots, 6$$

[0110] 其中,  $W_{li}^*$  为理想权值,  $Z_i = [v_i, \dot{v}_i, \eta_i, \dot{\eta}_i]^T$  为神经网络输入,  $S_{li}$  为径向基函数,  $\epsilon_{li}$  为重构误差; 由于  $W_{li}^*$  是未知的, 用神经网络权值  $\widehat{W}_{li}$  估计  $W_{li}^*$ 。

[0111] 步骤 (7): 设计基于误差符号鲁棒积分的自适应神经网络控制器, 该控制器具体设计为:

$$[0112] \quad \tau_i = M_i \dot{v}_{di} - \alpha_i M_i z_{2i} - \mu_i$$

[0113] 其中, 误差符号鲁棒积分项  $\mu_i$  为:  $\mu_i = (k_{si} + 1)(z_{2i} - z_{2i,0}) + \int_0^t [\widehat{W}_i^T S_i^F +$

$(k_{si} + 1)\alpha_i z_{2i} + \hat{\beta}_i \text{sgn}(z_{2i})] d\sigma$ , 其中,  $k_{si}$  为误差符号鲁棒积分项的设计参数, 本实施例中, 选取  $k_{si} = 0.5$ ;  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数;  $\hat{\beta}_i$  为自适应增益, 用来补偿扰动和神经网络重构误差, 如图9所示, 表明自适应增益  $\hat{\beta}_i$  的有界性;  $\hat{W}_i^T S_i^F \triangleq [\hat{W}_{1i}^T S_{1i}, \hat{W}_{2i}^T S_{2i}, \dots, \hat{W}_{6i}^T S_{6i}]^T$  为未知项  $f_i$  的估计; 神经网络权值和自适应增益的更新率分别设计为:

$$[0114] \quad \begin{cases} \dot{\hat{W}}_{li} = k_{li} S_{li} z_{3l,i}, & l = 1, 2, \dots, 6 \\ \dot{\hat{\beta}}_i = k_{bi} z_{3i}^T \text{sgn}(z_{2i}) \end{cases}$$

[0115] 其中,  $k_{li}$  为神经网络权值更新率的设计参数,  $k_{bi}$  为自适应增益更新率的设计参数。在本实施例中, 神经网络权值的更新率设计为:  $\dot{\hat{W}}_{li} = k_{li} S_{li} z_{3l,i}, l = 1, 2, \dots, 6$ ;  $\hat{\beta}_i$  的更新率为  $\dot{\hat{\beta}}_i = k_{bi} z_{3i}^T \text{sgn}(z_{2i})$ ;  $k_{bi} = 5$ ;  $k_{li} = 15$ , 神经网络中心为  $[-1.5, 1.5]$ , 宽度为  $0.8$ 。如图10展示了编队轨迹跟踪效果, 跟随者  $\eta_i$  与领导者  $\eta_{i-1}$  保持一个理想的位置关系, 即它们可以保证通信连接。

[0116] 以上所述实施例仅表达了本发明的几种实施方式, 其描述较为具体和详细, 但不能因此而理解为本发明专利范围的限制。应当指出的是, 对于本领域的普通技术人员来说, 在不脱离本发明构思的前提下, 还可以做出若干变形和改进, 这些都属于本发明的保护范围。因此, 本发明专利的保护范围应以权利要求所述为准。

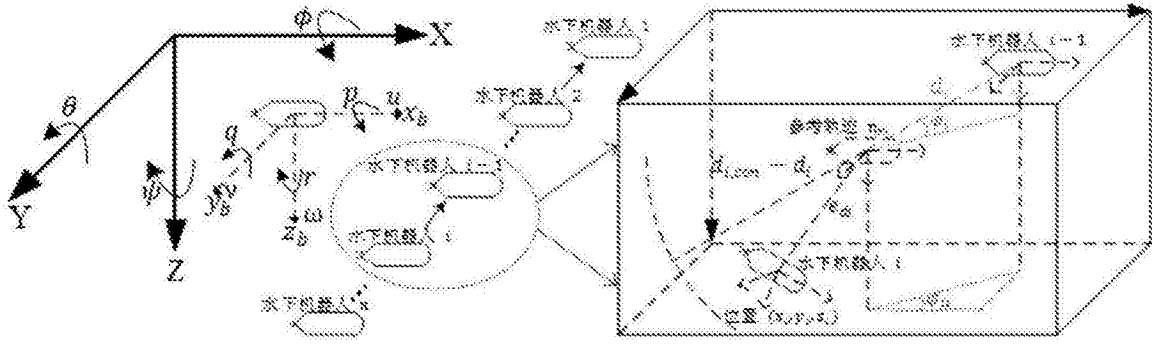


图1

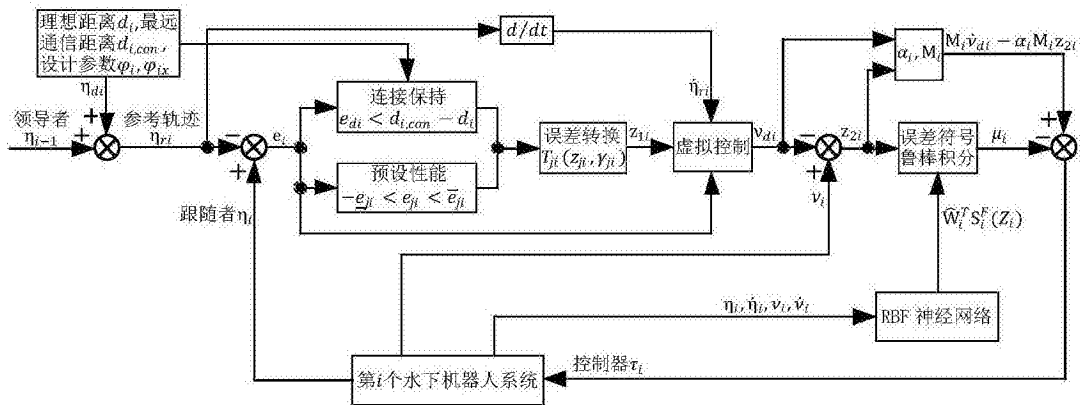


图2

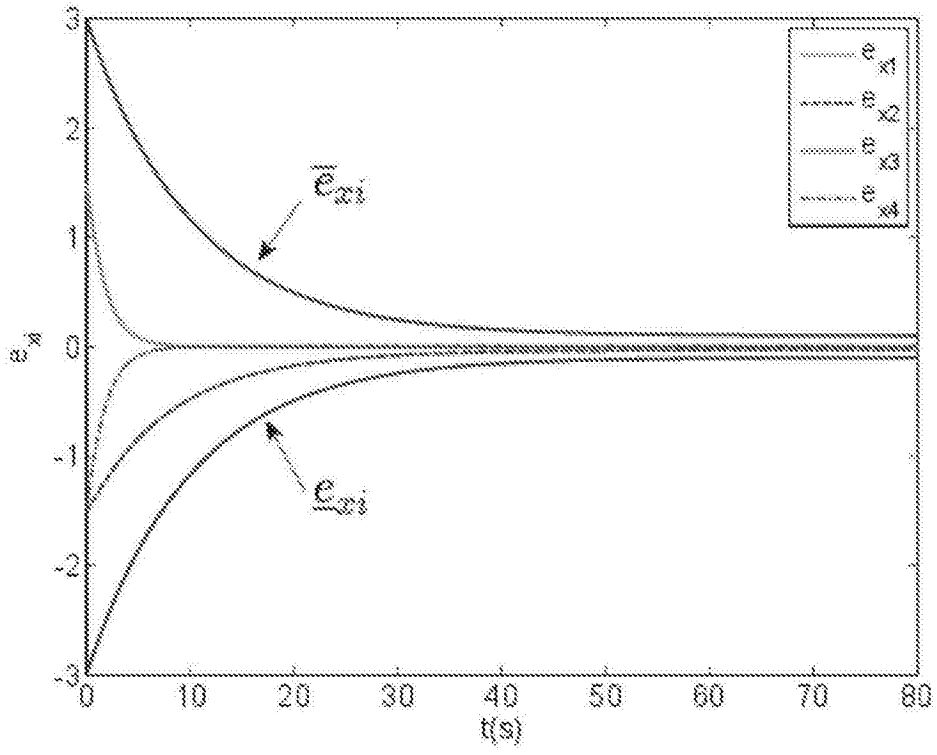


图3

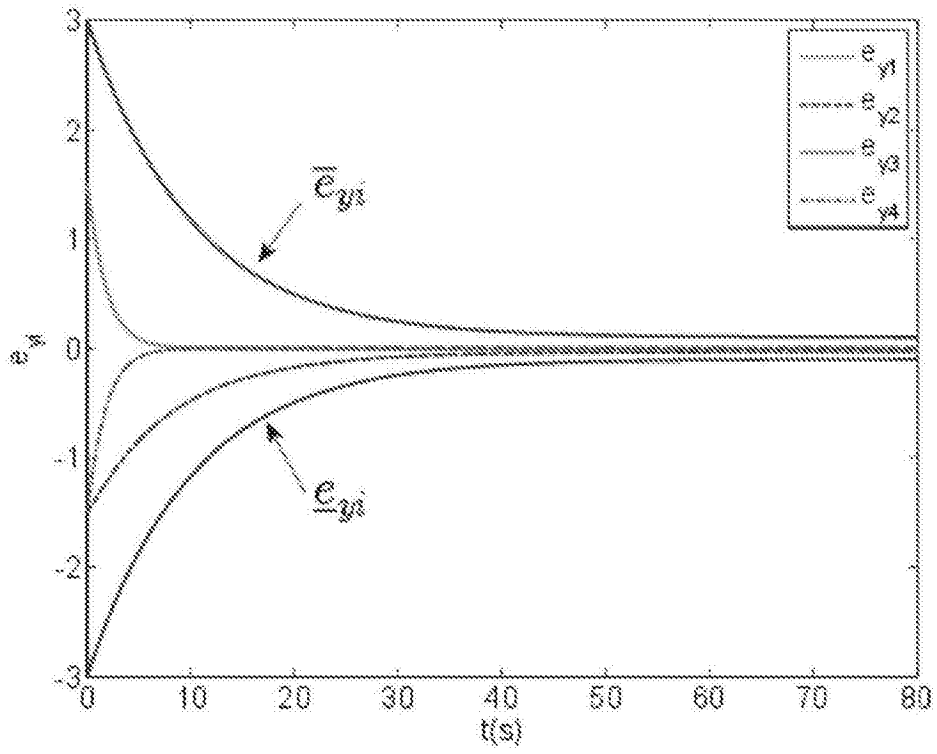


图4



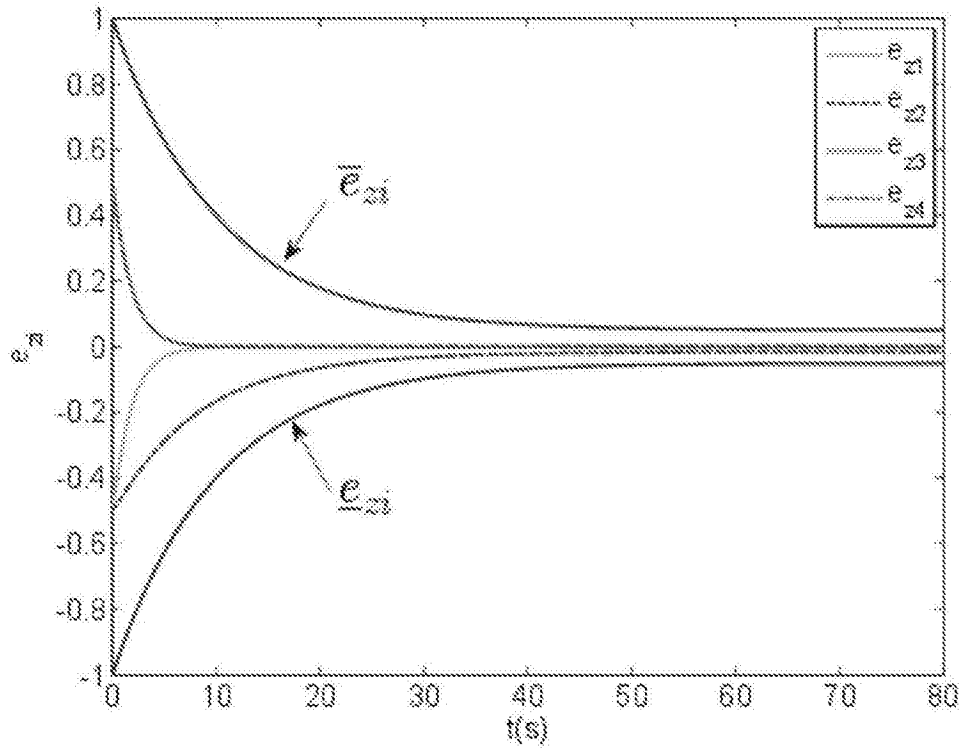


图5

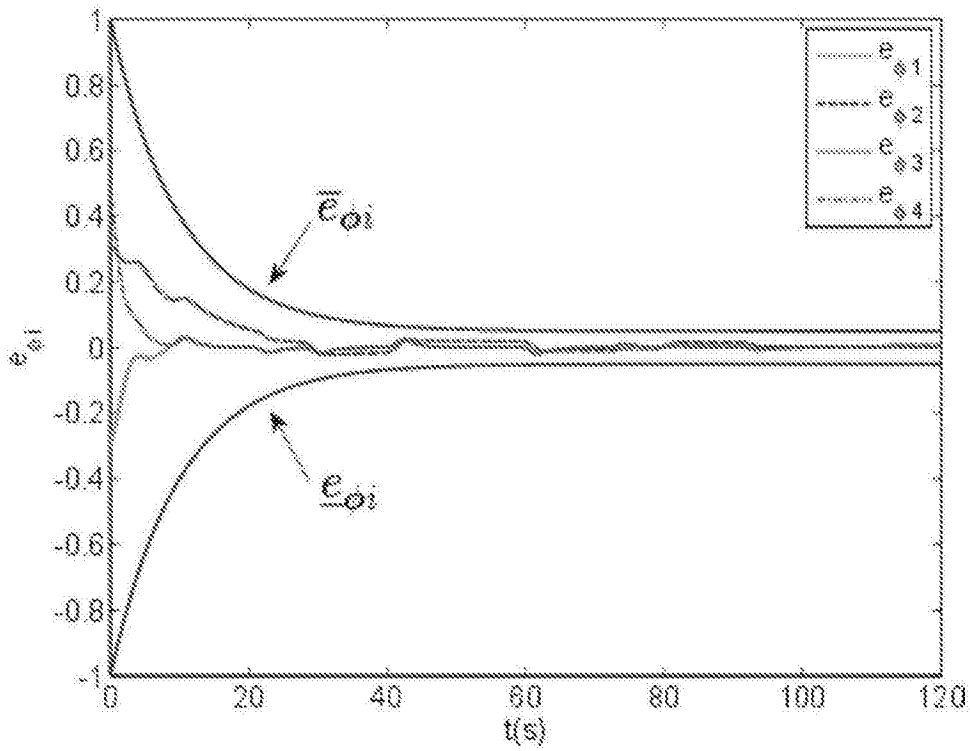


图6

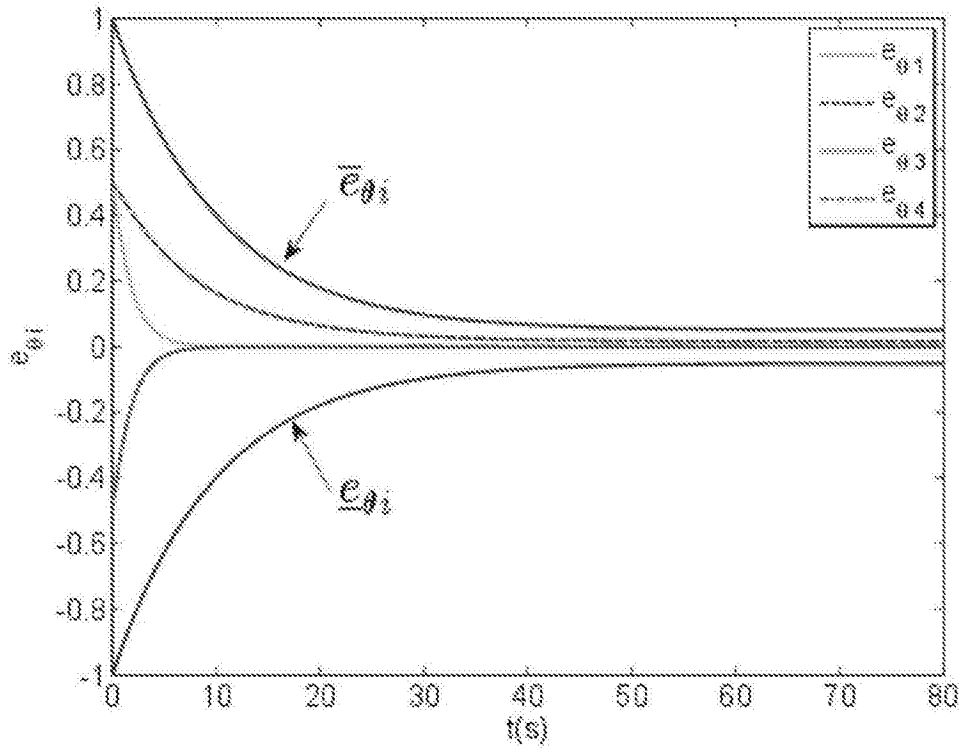


图7

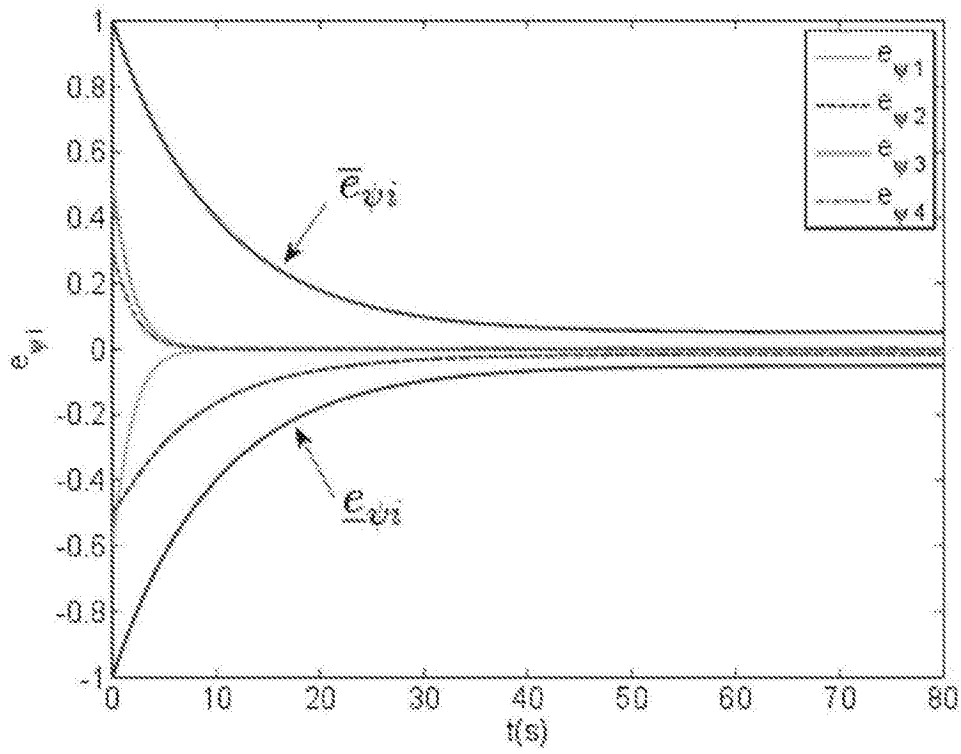


图8

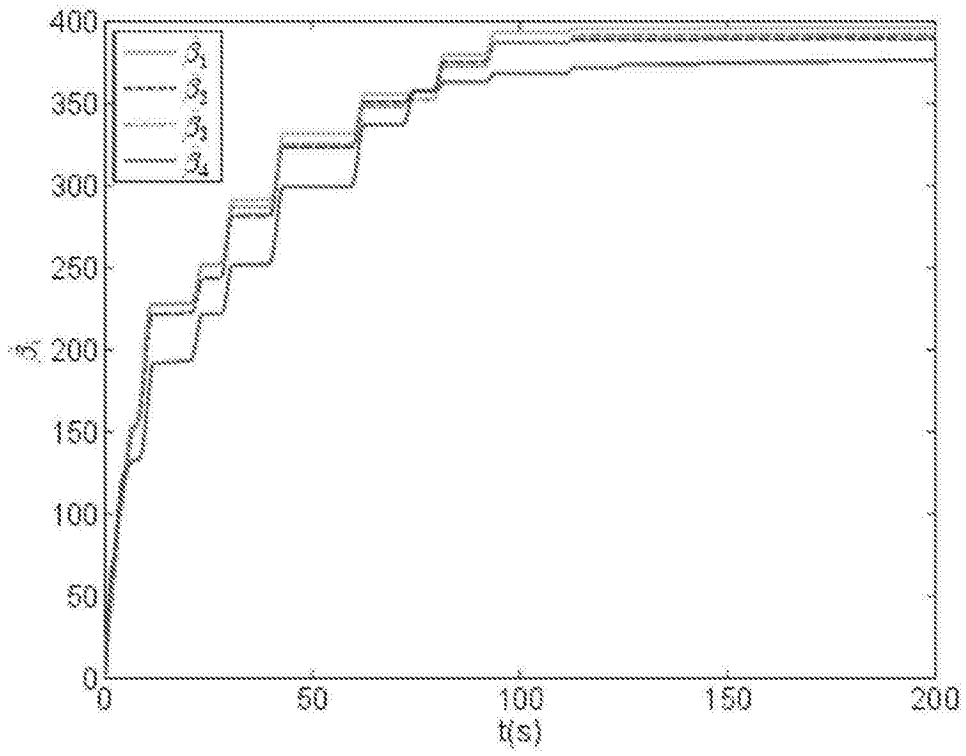


图9

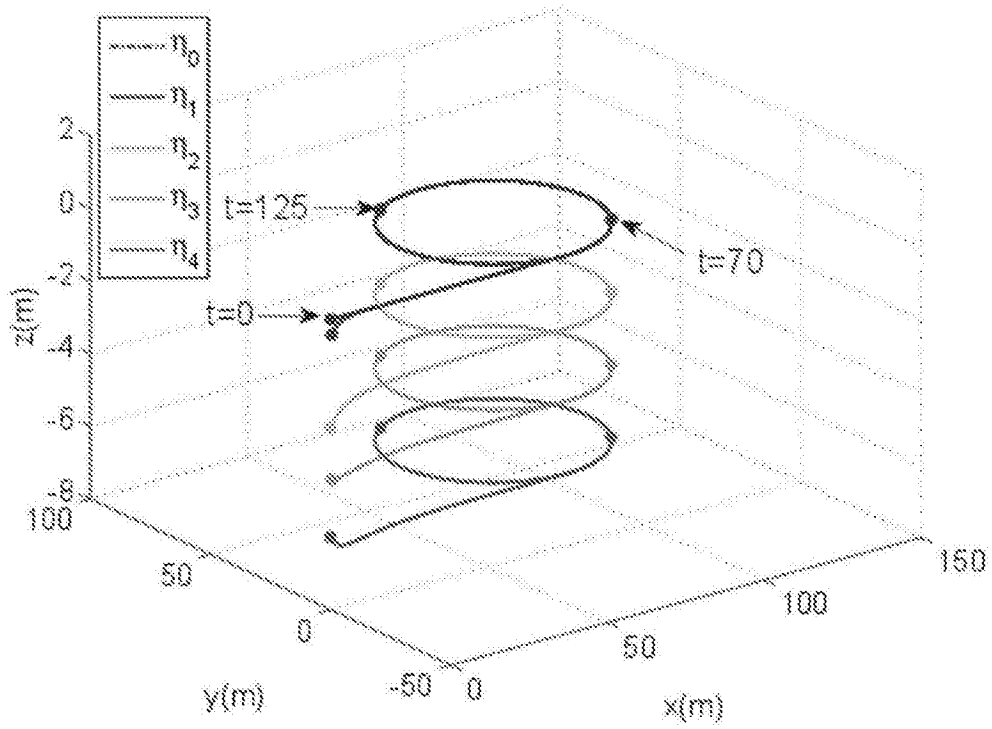


图10