



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113110519 B

(45) 授权公告日 2021. 11. 30

(21) 申请号 202110578219.X

CN 112034707 A, 2020.12.04

(22) 申请日 2021.05.26

CN 106444813 A, 2017.02.22

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 108415257 A, 2018.08.17

申请公布号 CN 113110519 A

US 2012259437 A1, 2012.10.11

US 2014100674 A1, 2014.04.10

(43) 申请公布日 2021.07.13

US 2020249642 A1, 2020.08.06

(73) 专利权人 哈尔滨工程大学

张洁等. 一种非线性系统的自适应无模型预测控制方法.《工业仪表与自动化装置》.2014, (第01期),

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街145号

廖煜雷,等.无人艇重定义无模型自适应艏向控制方法与试验.《哈尔滨工程大学学报》.2020,第41卷(第1期),第37-43页.

(72) 发明人 廖煜雷 裴华仁 杜廷朋 王博 贾琪 谷秋实 李晔

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事务所 23109

Tianhe Wang等.Model Free Adaptive Pitch Control of a Flapping Wing Micro Aerial Vehicle with Input Saturation.《2020 IEEE 9th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)》.2020,第627-632页. (续)

代理人 于歌

(51) Int. Cl.

G05D 1/02 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 112034858 A, 2020.12.04

CN 109765907 A, 2019.05.17

CN 105116934 A, 2015.12.02

CN 109254585 A, 2019.01.22

审查员 王玮

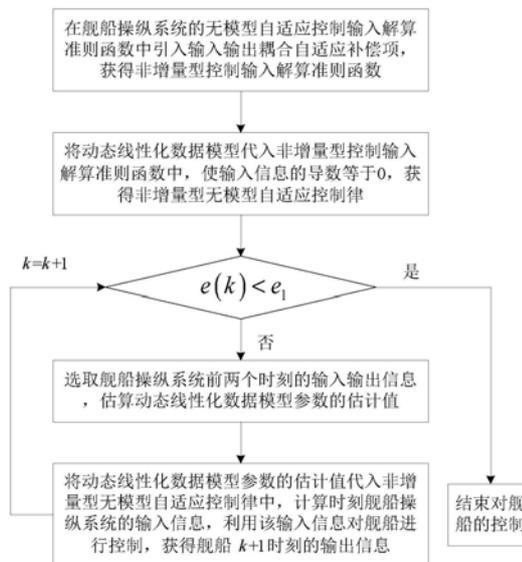
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法

(57) 摘要

一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,涉及舰船的自动运动控制技术领域。本发明是为了解决将MFAC直接应用于非自衡系统时,会降低系统稳定性的问题。本发明通过在原MFAC准则函数的基础上引入一个输入输出耦合自适应补偿项,进而重新设计了控制律,抵消被控系统的积分影响,使得改进算法得以应用于舰船艏向控制等非自衡系统。同时在控制律中引入的关于的系数项,自适应的调整其在控制律中的权重比,从而增大系统抵抗外界大扰动干扰与模型突变的能力。并且,自适应补偿项的权重系数 k_e 的引入还增大了算法可调灵活度。



CN 113110519 B

[接上页]

(56) 对比文件

冯增喜,等.MFAC和前馈补偿组合的VAV系统解耦控制仿真.《计算机仿真》.2014,第31卷(第9期),第402-406页.

Quanquan Jiang等.Heading Control of

Unmanned Surface Vehicle With Variable Output Constraint Model-Free Adaptive Control Algorithm.《IEEE Access》.2019,第7卷第131008-131018页.

1. 一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一:在舰船操纵系统的无模型自适应控制输入解算准则函数中引入输入输出耦合自适应补偿项,获得非增量型控制输入解算准则函数;

步骤二:将动态线性化数据模型代入非增量型控制输入解算准则函数中,使输入信息 $u(k)$ 的导数等于0,获得非增量型无模型自适应控制律;

步骤三:根据舰船操纵系统的历史输入输出信息,估算 k 时刻动态线性化数据模型参数 $\Phi(k)$ 的估计值 $\hat{\Phi}(k)$;

步骤四:根据步骤三获得的估计值 $\hat{\Phi}(k)$ 和步骤二获得的非增量型无模型自适应控制律,计算 k 时刻舰船操纵系统的输入信息 $u(k)$,舰船操纵系统执行该输入信息 $u(k)$,获得舰船 $k+1$ 时刻的输出信息 $y(k+1)$;

步骤一中,非增量型控制输入解算准则函数记为 $J[\cdot]$,该函数的输入为 $u(k)$, $k_r \Delta y(k+1) \cdot u(k-1)$ 为输入输出耦合自适应补偿项,则有:

$$J[u(k)] = [y^*(k+1) - y(k+1)]^2 + \lambda [u(k) - u(k-1)]^2 + k_r \Delta y(k+1) \cdot u(k-1),$$

其中, $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别为 k 时刻的舵角和艏向角、且分别作为舰船操纵系统的输入信息和输出信息, $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$, $y^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的期望艏向角, λ 为 $u(k)$ 的步长因子, k_r 为输入输出耦合自适应补偿项的权重系数。

2. 根据权利要求1所述的一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,其特征在于,在步骤二之后还包括判断步骤,所述判断步骤为:

将舰船在 k 时刻的期望艏向角 $y^*(k)$ 与艏向角 $y(k)$ 作差,获得 k 时刻的艏向偏差 $e(k)$,判断 $e(k)$ 是否小于预设偏差阈值,是则结束对舰船的控制,否则执行步骤三。

3. 根据权利要求2所述的一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,其特征在于,在步骤四之后,使 $k=k+1$,然后返回判断步骤。

4. 根据权利要求1、2或3所述的一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,其特征在于,步骤二中,动态线性化数据模型的表达式如下:

$$y(k+1) = y(k) + \Phi^T(k) \Delta H(k),$$

其中, $\Phi^T(k) = [\phi_y, \phi_u]$ 为 $\Phi(k)$ 的转置, ϕ_y 和 ϕ_u 分别为 k 时刻艏向角和舵角的模型参数, $\Delta H(k) = [\Delta y(k), \Delta u(k)]^T$, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$, $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别为 k 时刻的舵角和艏向角、且分别作为输入信息和输出信息。

5. 根据权利要求4所述的一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,其特征在于,步骤二中,非增量型无模型自适应控制律的表达式如下:

$$u(k) = \left[1 - \frac{k_r \hat{\phi}_u(k)}{\lambda + \hat{\phi}_u(k)^2} \right] u(k-1) + \frac{\rho_1 \cdot \hat{\phi}_u(k)}{\lambda + \hat{\phi}_u(k)^2} [y^*(k+1) - y(k)] - \frac{\rho_2 \cdot \hat{\phi}_u(k) \hat{\phi}_y(k) \Delta y(k)}{\lambda + \hat{\phi}_u(k)^2},$$

其中, $\hat{\phi}_u(k)$ 和 $\hat{\phi}_y(k)$ 分别为 ϕ_u 和 ϕ_y 的估计值, λ 为 $u(k)$ 的步长因子, k_r 为输入输出耦合自适应补偿项的权重系数, $y^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的期望艏向角, ρ_1 为期望输出偏差的步长因子, ρ_2 为实际输出偏差的步长因子。

6. 根据权利要求1、2或3所述的一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,其特征在于,步骤三中,舰船操纵系统的历史输入输出信息包括: $k-1$ 时刻的输入信息 $u(k-1)$ 、 $k-$

1时刻的输出信息 $y(k-1)$ 、 $k-2$ 时刻的输入信息 $u(k-2)$ 、 $k-2$ 时刻的输出信息 $y(k-2)$ 和 $k-1$ 时刻动态线性化数据模型参数的估计值 $\hat{\Phi}(k-1)$ 。

7. 根据权利要求6所述的一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,其特征在于,步骤三中,根据下式估算 k 时刻动态线性化数据模型参数 $\Phi(k)$ 的估计值 $\hat{\Phi}(k)$:

$$\hat{\Phi}(k) = \hat{\Phi}(k-1) + \frac{\eta \cdot \Delta H(k-1) \cdot [\Delta y(k) - \hat{\Phi}^T(k-1) \Delta H(k-1)]}{\mu + \|\Delta H(k-1)\|^2},$$

其中, $\eta \in (0, 1]$ 为惩罚因子, μ 为限制模型参数变化的权重系数,

$$\Delta H(k-1) = [\Delta y(k-1), \Delta u(k-1)]^T,$$

$$\Delta u(k-1) = u(k-1) - u(k-2),$$

$$\Delta y(k-1) = y(k-1) - y(k-2).$$

8. 根据权利要求1、2或3所述的一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,其特征在于,将步骤三获得的估计值 $\hat{\Phi}(k)$ 代入步骤二获得的非增量型无模型自适应控制律,获得 k 时刻舰船操纵系统的输入信息。

一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于舰船的自动运动控制技术领域。

背景技术

[0002] 良好的艏向控制是舰船完成各种任务的必备条件之一,但由于舰船的运动通常具有欠驱动性、大时滞性等特点,并且在航行中易受到风浪流等干扰,以及执行任务时自身水动力特性的巨大变化,使得常规的以数学模型为导向的运动控制策略并不适用。

[0003] 无模型自适应控制(Model-Free Adaptive Control, MFAC)是一种不依赖于被控对象的数学模型,仅依靠系统的动态输入输出(I/O)数据进行控制的方法。但是,由于舰船艏向控制属于非自衡系统,含有能使系统稳定性降低的积分环节,具体表现为在阶跃输入作用下,受控对象的输出无法达到稳定状态,而是无限的增大或减小。

发明内容

[0004] 本发明是为了解决将MFAC直接应用于非自衡系统时,会降低系统稳定性的问题,现提供一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法。

[0005] 一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤一:在舰船操纵系统的无模型自适应控制输入解算准则函数中引入输入输出耦合自适应补偿项,获得非增量型控制输入解算准则函数;

[0007] 步骤二:将动态线性化数据模型代入非增量型控制输入解算准则函数中,使输入信息 $u(k)$ 的导数等于0,获得非增量型无模型自适应控制律;

[0008] 步骤三:根据舰船操纵系统的历史输入输出信息,估算 k 时刻动态线性化数据模型参数 $\Phi(k)$ 的估计值 $\hat{\Phi}(k)$;

[0009] 步骤四:根据步骤三获得的估计值 $\hat{\Phi}(k)$ 和步骤二获得的非增量型无模型自适应控制律,计算 k 时刻舰船操纵系统的输入信息 $u(k)$,舰船操纵系统执行该输入信息 $u(k)$,获得舰船 $k+1$ 时刻的输出信息 $y(k+1)$ 。

[0010] 进一步的,在上述步骤二之后还包括判断步骤,所述判断步骤为:

[0011] 将舰船在 k 时刻的期望艏向角 $y^*(k)$ 与艏向角 $y(k)$ 作差,获得 k 时刻的艏向偏差 $e(k)$,

[0012] 判断 $e(k)$ 是否小于预设偏差阈值,是则结束对舰船的控制,否则执行步骤三。

[0013] 进一步的,在上述步骤四之后,使 $k=k+1$,然后返回判断步骤。

[0014] 进一步的,上述步骤一中,非增量型控制输入解算准则函数记为 $J[\cdot]$,该函数的输入为 $u(k)$, $k_r \Delta y(k+1) \cdot u(k-1)$ 为输入输出耦合自适应补偿项,则有:

[0015] $J[u(k)] = [y^*(k+1) - y(k+1)]^2 + \lambda [u(k) - u(k-1)]^2 + k_r \Delta y(k+1) \cdot u(k-1)$,

[0016] 其中, $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别为 k 时刻的舵角和艏向角、且分别作为舰船操纵系统的输入信息和输出信息, $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$, $y^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的期望艏向角, λ 为 $u(k)$ 的步长因子, k_r 为输入输出耦合自适应补偿项的权重系数。

[0017] 进一步的,上述步骤二中,动态线性化数据模型的表达式如下:

$$[0018] \quad y(k+1) = y(k) + \Phi^T(k) \Delta H(k),$$

[0019] 其中, $\Phi^T(k) = [\phi_y, \phi_u]$ 为 $\Phi(k)$ 的转置, ϕ_y 和 ϕ_u 分别为 k 时刻艏向角和舵角的模型参数, $\Delta H(k) = [\Delta y(k), \Delta u(k)]^T$, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$, $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别为 k 时刻的舵角和艏向角、且分别作为输入信息和输出信息。

[0020] 进一步的,上述步骤二中,非增量型无模型自适应控制律的表达式如下:

$$[0021] \quad u(k) = \left[1 - \frac{k_r \hat{\phi}_u(k)}{\lambda + \hat{\phi}_u(k)^2} \right] u(k-1) + \frac{\rho_1 \cdot \hat{\phi}_u(k)}{\lambda + \hat{\phi}_u(k)^2} [y^*(k+1) - y(k)] - \frac{\rho_2 \cdot \hat{\phi}_u(k) \hat{\phi}_y(k) \Delta y(k)}{\lambda + \hat{\phi}_u(k)^2},$$

[0022] 其中, $\hat{\phi}_u(k)$ 和 $\hat{\phi}_y(k)$ 分别为 ϕ_u 和 ϕ_y 的估计值, λ 为 $u(k)$ 的步长因子, k_r 为输入输出耦合自适应补偿项的权重系数, $y^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的期望艏向角, ρ_1 为期望输出偏差的步长因子, ρ_2 为实际输出偏差的步长因子。

[0023] 进一步的,上述步骤三中,舰船操纵系统的历史输入输出信息包括: $k-1$ 时刻的输入信息 $u(k-1)$ 、 $k-1$ 时刻的输出信息 $y(k-1)$ 、 $k-2$ 时刻的输入信息 $u(k-2)$ 、 $k-2$ 时刻的输出信息 $y(k-2)$ 和 $k-1$ 时刻动态线性化数据模型参数的估计值 $\hat{\Phi}(k-1)$ 。

[0024] 进一步的,上述步骤三中,根据下式估算 k 时刻动态线性化数据模型参数 $\Phi(k)$ 的估计值 $\hat{\Phi}(k)$:

$$[0025] \quad \hat{\Phi}(k) = \hat{\Phi}(k-1) + \frac{\eta \cdot \Delta H(k-1) \cdot [\Delta y(k) - \hat{\Phi}^T(k-1) \Delta H(k-1)]}{\mu + \|\Delta H(k-1)\|^2},$$

[0026] 其中, $\eta \in (0, 1]$ 为惩罚因子, μ 为限制模型参数变化的权重系数,

$$[0027] \quad \Delta H(k-1) = [\Delta y(k-1), \Delta u(k-1)]^T,$$

$$[0028] \quad \Delta u(k-1) = u(k-1) - u(k-2),$$

$$[0029] \quad \Delta y(k-1) = y(k-1) - y(k-2).$$

[0030] 进一步的,将上述步骤三获得的估计值 $\hat{\Phi}(k)$ 代入步骤二获得的非增量型无模型自适应控制律,获得 k 时刻舰船操纵系统的输入信息。

[0031] 本发明提供了一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,通过在原MFAC准则函数的基础上引入一个输入输出耦合自适应补偿项,进而重新设计了控制律,抵消被控系统的积分影响,使得改进算法得以应用于舰船艏向控制等非自衡系统。同时在控制律中引入的关于 $u(k-1)$ 的系数项,自适应的调整其在控制律中的权重比,从而增大系统抵抗外界大扰动干扰与模型突变的能力。并且,自适应补偿项的权重系数 k_r 的引入还增大了算法可调灵活度。

附图说明

[0032] 图1为具体实施方式一所述一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法的流程图;

[0033] 图2为具体实施方式一所述一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法的原理图。

具体实施方式

[0034] 公告日为2020年10月4日,申请专利号为CN112034858A,名称为《一种融合弱观测高阶输出数据的无模型自适应艏向控制方法》的专利文献提供了一种改进MFAC方法,通过

改进控制输入准则函数,在控制律中引入了一阶差分项 $\frac{\omega\phi_c(k)}{\lambda+|\phi_c(k)|^2} \frac{\Delta y(k)}{2T}$ 和二阶差分项 $\frac{\xi\phi_c(k)}{\lambda+|\phi_c(k)|^2} \frac{\Delta y(k)-\Delta y(k-1)}{2T^2}$ 。重置的艏向控制律加快了控制器的在线辨识、学习和控制过程,并解决了MFAC直接应用于非自衡系统控制时会出现振荡、发散的问题。

[0035] 公告日为2019年5月17日,申请专利号为201910163383.7,名称为《一种舰船用PID

无模型自适应航向控制算法》的专利文献将自适应比例项 $\frac{\hat{\phi}(k)}{\lambda+|\hat{\phi}(k)|^2} [e(k)-e(k-1)]$ 和自适

应微分项 $\frac{\hat{\phi}(k)}{\lambda+|\hat{\phi}(k)|^2} [e(k)-2e(k-1)+e(k-2)]$ 引入MFAC的控制律中,提出一种PID-MFAC算

法,解决了MFAC算法直接应用于舰船艏向控制时会发生严重超调、振荡甚至失稳的问题。

[0036] 公告日为2020年12月4日,申请专利号为202010863628.X,名称为《无模型自适应控制的改进方法》的专利文献针对原控制律存在响应慢及出现振荡现象的问题,引入了比例控制项 $\beta K [y^*(k+1) - y(k)] - \beta K [y^*(k) - y(k-1)]$;并在原MFAC控制器部分中引入抗饱和算法,以此提高系统控制精度。

[0037] 上述三项针对MFAC改进的专利文献均是从控制输出 $y(\cdot)$ 的角度,通过引入与控制输出 $y(\cdot)$ 相关的比例项、自适应比例项或自适应微分项的方式,弥补MFAC这类变积分式控制结构的不足,解决其直接应用于舰船艏向控制这类非自衡系统时的振荡问题。

[0038] 而本实施方式则是从控制输入 $u(\cdot)$ 的角度,引入自适应补偿项,自适应的调整上一时刻系统输入 $u(k-1)$ 在控制律中的权重,从而实现非自衡系统的稳定控制。具体如下:

[0039] 具体实施方式一:参照图1和图2具体说明本实施方式,本实施方式所述的一种舰船用非增量型无模型自适应艏向控制方法,包括以下步骤:

[0040] 步骤一:在舰船操纵系统的无模型自适应控制输入解算准则函数中引入输入输出耦合自适应补偿项,获得非增量型控制输入解算准则函数。

[0041] 具体的,非增量型控制输入解算准则函数记为 $J[\cdot]$,该函数的输入为 $u(k)$, $k_r \Delta y(k+1) \cdot u(k-1)$ 为输入输出耦合自适应补偿项,则有:

[0042] $J[u(k)] = [y^*(k+1) - y(k+1)]^2 + \lambda [u(k) - u(k-1)]^2 + k_r \Delta y(k+1) \cdot u(k-1)$,

[0043] 其中, $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别为 k 时刻的舵角和艏向角、且分别作为舰船操纵系统的输入信息和输出信息, $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$, $y^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的期望艏向角, λ 为 $u(k)$ 的步长因子, k_r 为输入输出耦合自适应补偿项的权重系数。

[0044] 步骤二:动态线性化数据模型的表达式如下:

[0045] $y(k+1) = y(k) + \Phi^T(k) \Delta H(k)$,

[0046] 其中, $\Phi^T(k) = [\phi_y, \phi_u]$ 为 $\Phi(k)$ 的转置, ϕ_y 和 ϕ_u 分别为 $y(k)$ 和 $u(k)$ 的模型参数,

$\Delta H(k) = [\Delta y(k), \Delta u(k)]$, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$ 。

[0047] 将上述动态线性化数据模型代入非增量型控制输入解算准则函数中,使输入信息 $u(k)$ 的导数等于0,则有非增量型无模型自适应控制律:

$$[0048] \quad u(k) = \left[1 - \frac{k_r \hat{\phi}_u(k)}{\lambda + \hat{\phi}_u(k)^2} \right] u(k-1) + \frac{\rho_1 \cdot \hat{\phi}_u(k)}{\lambda + \hat{\phi}_u(k)^2} [y^*(k+1) - y(k)] - \frac{\rho_2 \cdot \hat{\phi}_u(k) \hat{\phi}_y(k) \Delta y(k)}{\lambda + \hat{\phi}_u(k)^2},$$

[0049] 其中, $\hat{\phi}_u(k)$ 和 $\hat{\phi}_y(k)$ 分别为 ϕ_u 和 ϕ_y 的估计值, ρ_1 为期望输出偏差的步长因子, ρ_2 为实际输出偏差的步长因子。

[0050] 步骤三:将舰船在 k 时刻的期望艏向角 $y^*(k)$ 与艏向角 $y(k)$ 作差,获得 k 时刻的艏向偏差 $e(k) = y^*(k) - y(k)$,判断 $e(k)$ 是否小于预设偏差阈值 e_1 ,是则结束对舰船的控制,否则执行步骤四。

[0051] 步骤四:选取舰船操纵系统前两个时刻的输入输出信息,即: $k-1$ 时刻的输入信息 $u(k-1)$ 、 $k-1$ 时刻的输出信息 $y(k-1)$ 、 $k-2$ 时刻的输入信息 $u(k-2)$ 、 $k-2$ 时刻的输出信息 $y(k-2)$ 、以及 $k-1$ 时刻动态线性化数据模型参数的估计值 $\hat{\Phi}(k-1)$ 。

[0052] 根据下式估算 k 时刻动态线性化数据模型参数 $\Phi(k)$ 的估计值 $\hat{\Phi}(k)$:

$$[0053] \quad \hat{\Phi}(k) = \hat{\Phi}(k-1) + \frac{\eta \cdot \Delta H(k-1) \cdot [\Delta y(k) - \hat{\Phi}^T(k-1) \Delta H(k-1)]}{\mu + \|\Delta H(k-1)\|^2},$$

[0054] 其中, $\eta \in (0, 1]$ 为惩罚因子, μ 为限制模型参数变化的权重系数,

[0055] $\Delta H(k-1) = [\Delta y(k-1), \Delta u(k-1)]$,

[0056] $\Delta u(k-1) = u(k-1) - u(k-2)$,

[0057] $\Delta y(k-1) = y(k-1) - y(k-2)$ 。

[0058] 当 $\sqrt{\hat{\phi}_u(k)^2 + \hat{\phi}_y(k)^2} \leq \varepsilon$ 、 $\sqrt{[\Delta u(k-1)]^2 + [\Delta y(k-1)]^2} \leq \varepsilon$ 或 $\text{sign}[\hat{\phi}_u(k)] \neq \text{sign}[\hat{\phi}_u(1)]$

时, $\hat{\Phi}(k) = \hat{\Phi}(1)$, $k=1$ 即初始时刻。其中, $\text{sign}[\cdot]$ 表示符号函数, ε 为极小正数,本实施方式中取值为 10^{-3} 。

[0059] 步骤五:将步骤四获得的估计值 $\hat{\Phi}(k)$ 代入步骤二获得的非增量型无模型自适应控制律,计算 k 时刻舰船操纵系统的输入信息 $u(k)$,利用 $u(k)$ 对舰船进行控制,舰船操纵系统执行指令,艏向发生变化,获得舰船 $k+1$ 时刻的输出信息 $y(k+1)$,然后使 $k=k+1$,并返回步骤三。

[0060] 本实施方式通过无模型自适应控制输入解算准则函数中引入输入输出耦合自适应补偿项,解决了MFAC方法无法直接应用于舰船艏向控制这类非自衡系统的问题,避免了输出振荡。同时,本实施方式在控制律中引入的关于 $u(k-1)$ 的系数项,自适应的调整其在控制律中的权重比,从而提高了系统抵抗外界大扰动的能力。权重系数 k_r 增大了算法可调节灵活性,使算法更具有有一般性。

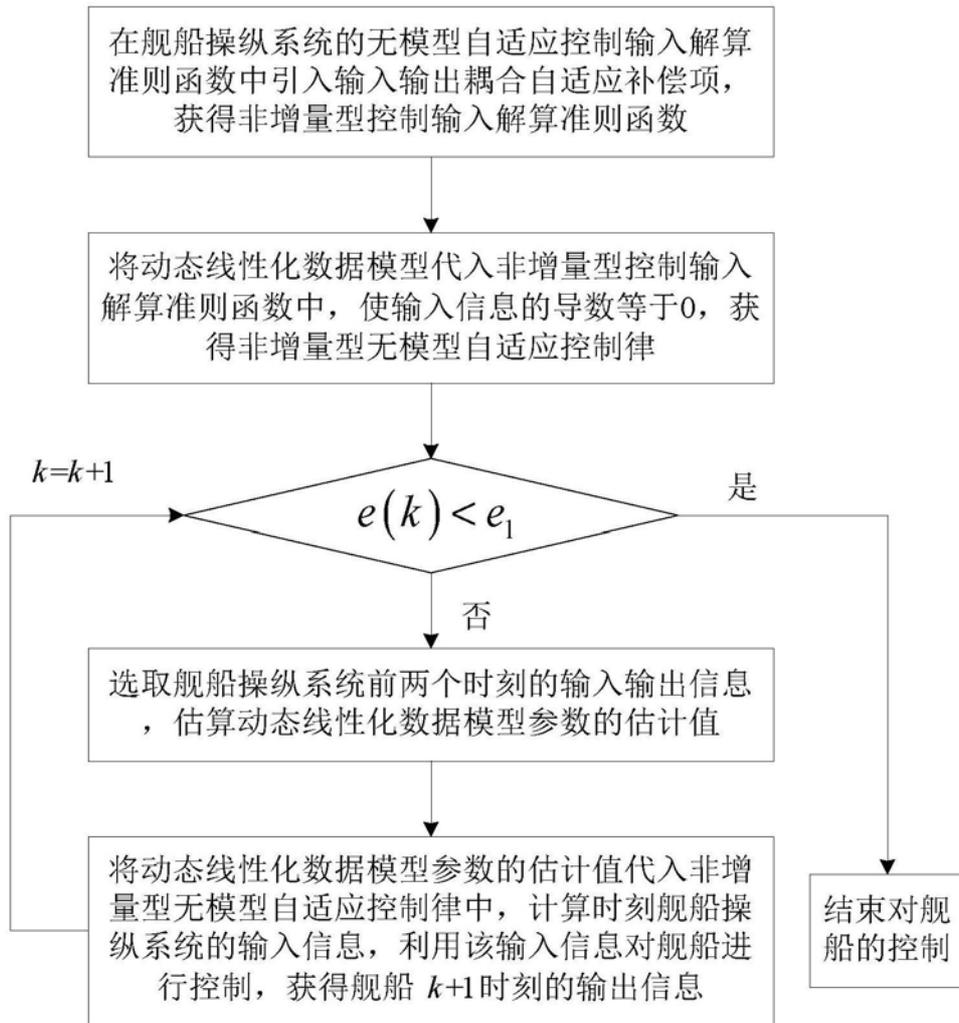


图1

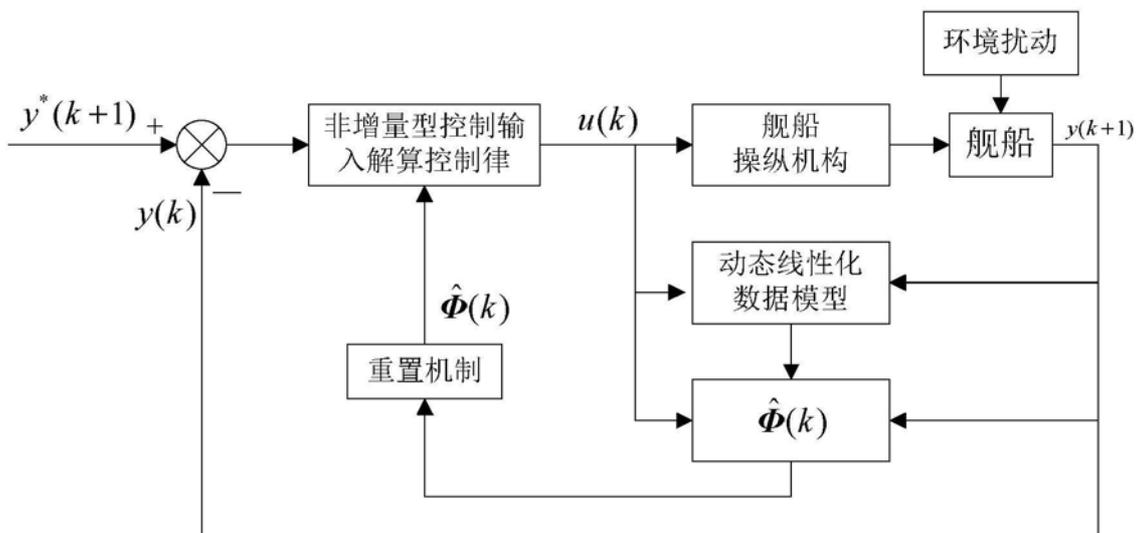


图2