



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103407443 A

(43) 申请公布日 2013. 11. 27

(21) 申请号 201310293593. 0

(22) 申请日 2013. 07. 11

(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 李娟 宋大成 王成龙 王宏健
高海涛 陈兴华

(51) Int. Cl.

B60V 1/11 (2006. 01)

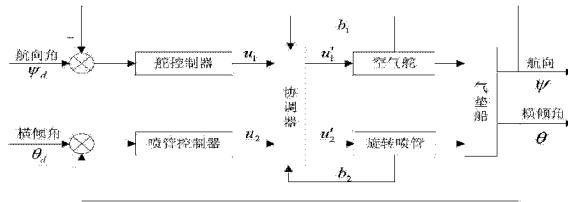
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种气垫船航行安全性的协调控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种采用双通道控制的气垫船航
行安全性的协调控制方法。本发明包括：通过姿
态传感器测量气垫船的航行状态参数信息；将状
态参数信息及操纵机构信息转换为数字信号；根
据期望航向角和反馈的气垫船实际航向角计算出
航向偏差；舵控制器解算并输出控制信号；喷管
控制器解算并输出控制信号；计算协调后的控制
量；控制气垫船运行到期望工况下。本发明在协
调控制过程中，两种控制器同时工作，舵控制器完
成航向跟踪任务，喷管控制器则对气垫船的横倾
进行控制，通过执行机构作用于运动模型，最终提
高气垫船运动的安全性。



1. 一种气垫船航行安全性的协调控制方法, 其特征在于:

(1) 通过姿态传感器测量气垫船的航行状态参数信息, 包括航向角、横倾角, 通过角度传感器测量气垫船的操纵机构信息, 包括空气舵角, 喷管旋转角度;

(2) 将状态参数信息及操纵机构信息转换为数字信号, 通过串口送入气垫船驾控系统计算机;

(3) 根据期望航向角和反馈的气垫船实际航向角计算出航向偏差, 输入给舵控制器, 根据气垫船安全限界设定的期望横倾角和反馈的气垫船实际横倾角计算出横倾偏差, 输入给喷管控制器;

(4) 舵控制器解算并输出控制信号:

计算误差变量 z_1 和 z_2 , $\begin{cases} z_1 = \psi - \psi_d \\ z_2 = \dot{\psi}_d - a_1 \end{cases}$, 其中 ψ_d 为期望航向角, ψ 为反馈的气垫船实际航向角, a_1 为虚拟控制量, $a_1 = -c_1 z_1$, c_1 为设定的大于 0 的常数;

计算滑模面 σ , $\sigma = k_1 z_1 + z_2$, k_1 为设定的大于零的常数;

计算边界层函数 $\text{sat}(\sigma)$:

$$\text{sat}(\sigma) = \begin{cases} -1 & \sigma < -\phi \\ \sigma/\phi & |\sigma| \leq \phi \\ 1 & \sigma > \phi \end{cases}$$

其中, $\phi > 0$, 表示边界层的厚度;

计算控制量并输出控制信号:

$$u_1 = k_{c2}[-k_1(z_2 - c_1 z_1) + \dot{\psi}_d + a_1 - h(\sigma + \beta \text{sat}(\sigma))] - k_{c1}\dot{v} - k_{c3}(z_2 + \dot{\psi}_d + a_1) - \hat{F} \text{sat}(\sigma)$$

其中, $k_{c1} \sim k_{c3}$ 均表示气垫船模型试验系数, h 和 β 为正常数, \hat{F} 为系统所受扰动的最大估计值;

(5) 喷管控制器解算并输出控制信号:

计算误差变量 z_3 和 z_4 , $\begin{cases} z_3 = \theta - \theta_d \\ z_4 = p - a_1 \end{cases}$, 其中 θ 表示气垫船的横倾角, θ_d 表示期望横倾角, $p = \dot{\theta}$ 为气垫船的横倾角速度, z_3 为横倾角误差, a_1 为虚拟控制量;

取虚拟控制量:

$$a_1 = -c_2 z_3 + \dot{\theta}_d$$

其中 c_2 为正常数,

选取控制律为:

$$u_2 = I_x(\dot{a}_1 - z_3 - c_3 z_4) - F$$

其中, c_3 为大于零的常数, F 代表系统中扰动项的最大估计值;

(6) 以舵控制器和喷管控制器的输出作为输入量, 同时将空气舵产生的横倾力矩 b_1 及

旋转喷管产生的回转力矩 b_2 引入到协调器中, 计算协调后的控制量 :

将空气舵舵角表示为 δ , 产生的横倾力矩 b_1 为 :

$$b_1 = 2 * S_r * [C_{ry0}(\delta) * P_{duct0} + C_{ry1}(\delta) * P_{duct1}] * z_r$$

其中, S_r 表示舵受力面积, $C_{ry}(\delta)$ 表示舵力系数, 该系数的值由舵角 δ 决定, P_{duct} 表示舵上动压头, 下标 0 与 1 分别表示两空气舵其中的一个, z_r 表示空气舵的垂向安装位置 ;

喷管角表示为 φ , 产生的回转力矩 b_2 为 :

$$b_2 = 2 * T_n * \sin(\varphi / 57.3) * x_n$$

其中, T_n 表示喷嘴产生的推力, x_n 表示喷管的水平安装位置 ;

计算协调后的控制量 :

$$\begin{cases} u'_1 = u_1 - b_2 \\ u'_2 = u_2 - b_1 \end{cases}$$

其中, u_1 为舵控制器的输出量, u_2 为喷管控制器的输出量, b_1 为空气舵反馈回的横倾力矩, b_2 为旋转喷管反馈回的回转力矩, u'_1 为协调后空气舵控制量, u'_2 为协调后旋转喷管控制量 ;

(7) 将协调器调整后的控制量输出, 作为执行机构空气舵与旋转喷管的动作指令, 控制气垫船运行到期望工况下。

一种气垫船航行安全性的协调控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种采用双通道控制的气垫船航行安全性的协调控制方法。

背景技术

[0002] 气垫船是以静态空气压力支撑船体，能够高速运行于水汽表面，具有两栖性的一种高性能船，由于气垫船偏航阻尼小，受风浪影响大，运动时参数变化剧烈，存在“高速易埋首，低速易翻船”的现象，因此对气垫船的运动进行控制是很有必要的。

[0003] 全垫升气垫船的稳定性较为复杂，包括垂向稳定性和纵向、横向稳定性。垂向稳定性主要依靠对垫升系统的控制来实现，纵向稳定性一般认为问题不大。横向稳定性又可以分为静横稳性和动横稳性，静横稳性由船体的结构决定，动横稳定性主要由横倾角和侧滑角这两个参数作为衡量标准，受环境风的影响较大。这是由于在环境风为顺风的情况下，如果气垫船回转时倾斜过大，船体底部气室会产生较大的泄流，加上触水一侧的围裙与水面接触的面积增大，会造成气垫船的阻力增大，转向速度变慢，回转半径增大，这与期望的快速、稳定的转向是不符的。而在逆风情况下则相反，容易因回转过快而出现甩尾的现象。因此为了提高横稳定性，需要对气垫船的横倾进行控制。

[0004] 对于现有气垫船的研究成果进行检索，在 CNKI 中发现气垫船的协调控制方法有付明玉等在《模糊 - 反步串级控制方法在气垫船航迹保持中的应用》一文中提出的航向与回转率协调控制。该文通过设计控制律并进行切换，能够改善操控水平，更为精确的跟踪航迹。其中没有对横倾运动进行控制，这与本发明提出的双通道协调控制方法有很大不同。为了提高气垫船航行的安全性，考虑两控制回路之间的相互影响，设计协调控制方法能够解决这一问题。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种提高气垫船运动安全性的气垫船航行安全性的协调控制方法。

[0006] 本发明的目的是这样实现的：

[0007] (1) 通过姿态传感器测量气垫船的航行状态参数信息，包括航向角、横倾角，通过角度传感器测量气垫船的操纵机构信息，包括空气舵角，喷管旋转角度；

[0008] (2) 将状态参数信息及操纵机构信息转换为数字信号，通过串口送入气垫船驾控系统计算机；

[0009] (3) 根据期望航向角和反馈的气垫船实际航向角计算出航向偏差，输入给舵控制器，根据气垫船安全限界设定的期望横倾角和反馈的气垫船实际横倾角计算出横倾偏差，输入给喷管控制器；

[0010] (4) 舵控制器解算并输出控制信号：

[0011] 计算误差变量 z_1 和 z_2 ， $\begin{cases} z_1 = \psi - \psi_d \\ z_2 = \dot{\psi}_d - \dot{\psi} \end{cases}$ ，其中 ψ_d 为期望航向角， ψ 为反馈的气垫船

实际航向角, a_1 为虚拟控制量, $a_1 = -c_1 z_1$, c_1 为设定的大于 0 的常数;

[0012] 计算滑模面 σ , $\sigma = k_1 z_1 + z_2$, k_1 为设定的大于零的常数;

[0013] 计算边界层函数 $\text{sat}(\sigma)$:

$$[0014] \quad \text{sat}(\sigma) = \begin{cases} -1 & \sigma < -\phi \\ \frac{\sigma}{\phi} & |\sigma| \leq \phi \\ 1 & \sigma > \phi \end{cases}$$

[0015] 其中, $\phi > 0$, 表示边界层的厚度;

[0016] 计算控制量并输出控制信号:

$$[0017] \quad u_1 = k_{c2}[-k_1(z_2 - c_1 z_1) + \dot{\psi}_d + \dot{a}_1 - h(\sigma + \beta \text{sat}(\sigma))]$$

$$[0018] \quad -k_{c1}\dot{v} - k_{c3}(z_2 + \dot{\psi}_d + a_1) - \hat{F} \text{sat}(\sigma)$$

[0019] 其中, $k_{c1} \sim k_{c3}$ 均表示气垫船模型试验系数, h 和 β 为正常数, \hat{F} 为系统所受扰动的最大估计值;

[0020] (5) 喷管控制器解算并输出控制信号:

[0021] 计算误差变量 z_3 和 z_4 , $\begin{cases} z_3 = \theta - \theta_d \\ z_4 = p - \alpha_1 \end{cases}$, 其中 θ 表示气垫船的横倾角, θ_d 表示期望横倾角, $p = \dot{\theta}$ 为气垫船的横倾角速度, z_3 为横倾角误差, a_1 为虚拟控制量;

[0022] 取虚拟控制量:

$$[0023] \quad a_1 = -c_2 z_3 + \dot{\theta}_d$$

[0024] 其中 c_2 为正常数,

[0025] 选取控制律为:

$$[0026] \quad u_2 = I_x(\dot{\alpha}_1 - z_3 - c_3 z_4) - F$$

[0027] 其中, c_3 为大于零的常数, F 代表系统中扰动项的最大估计值;

[0028] (6) 以舵控制器和喷管控制器的输出作为输入量, 同时将空气舵产生的横倾力矩 b_1 及旋转喷管产生的回转力矩 b_2 引入到协调器中, 计算协调后的控制量:

[0029] 将空气舵舵角表示为 δ , 产生的横倾力矩 b_1 为:

$$[0030] \quad b_1 = 2 * S_r * [C_{ry0}(\delta) * P_{duct0} + C_{ry1}(\delta) * P_{duct1}] * z_r$$

[0031] 其中, S_r 表示舵受力面积, $C_{ry}(\delta)$ 表示舵力系数, 该系数的值由舵角 δ 决定, P_{duct} 表示舵上动压头, 下标 0 与 1 分别表示两空气舵其中的一个, z_r 表示空气舵的垂向安装位置;

[0032] 喷管角表示为 φ , 产生的回转力矩 b_2 为:

[0033]

$$b_2 = 2 * T_n * \sin(\varphi / 57.3) * x_n$$

[0034] 其中, T_n 表示喷嘴产生的推力, x_n 表示喷管的水平安装位置;

[0035] 计算协调后的控制量:

$$[0036] \begin{cases} u'_1 = u_1 - b_2 \\ u'_2 = u_2 - b_1 \end{cases}$$

[0037] 其中, u_1 为舵控制器的输出量, u_2 为喷管控制器的输出量, b_1 为空气舵反馈回的横倾力矩, b_2 为旋转喷管反馈回的回转力矩, u'_1 为协调后空气舵控制量, u'_2 为协调后旋转喷管控制量;

[0038] (7) 将协调器调整后的控制量输出, 作为执行机构空气舵与旋转喷管的动作指令, 控制气垫船运行到期望工况下。

[0039] 本发明的有益效果在于:

[0040] 本发明在协调控制过程中, 两种控制器同时工作, 舵控制器完成航向跟踪任务, 喷管控制器则对气垫船的横倾进行控制, 通过执行机构作用于运动模型, 最终提高气垫船运动的安全性。

附图说明

[0041] 图 1 为空气舵与旋转喷管协调控制系统框图;

[0042] 图 2 为 45 度风, 风速 10 米 / 秒下协调控制前与协调控制后气垫船控制效果图;

[0043] 图 3 为 45 度风, 风速 10 米 / 秒下协调控制前与协调控制后气垫船横倾角变化曲线;

[0044] 图 4 为 135 度风, 风速 10 米 / 秒下协调控制前与协调控制后气垫船控制效果图;

[0045] 图 5 为 135 度风, 风速 10 米 / 秒下协调控制前与协调控制后气垫船横倾角变化曲线。

具体实施方式

[0046] 下面结合附图对本发明做进一步描述。

[0047] 本发明的气垫船航行安全性的协调控制方法由控制部分和协调部分组成; 控制部分包括空气舵控制回路和旋转喷管控制回路; 空气舵控制回路由舵控制器、空气舵和气垫船组成; 旋转喷管控制回路由喷管控制器、旋转喷管和气垫船组成; 协调部分是在两个控制回路之间加入一个协调器。

[0048] 本发明的气垫船航行安全性的协调控制方法为:

[0049] (1) 利用姿态传感器测出气垫船当前的运动参数信息, 并转换为数字信号;

[0050] (2) 运动参数信息分别送入两个控制器, 经过控制器解算并输出控制信号;

[0051] (3) 两个控制器的输出送入协调器中, 同时反馈回由空气舵和旋转喷管产生的力矩, 转换为数字信号送入协调器中;

[0052] (4) 根据空气舵与旋转喷管之间的关系, 在协调器中设定协调分配算法, 根据输入的反馈力矩, 对两个控制器的输出进行补偿, 实现协调控制;

[0053] (5) 将控制器产生的数字控制信号转换为模拟信号并分别输出给执行机构;

[0054] (6) 系统由执行机构控制, 在控制指令的作用下, 最终达到期望的状态。

[0055] 本发明的气垫船航行安全性的协调控制方法还包括:

[0056] 1、所述的气垫船的状态参数信息包括: 当前的航向角、横倾角、空气舵当前舵角和旋转喷管的喷管角。

[0057] 2、所述的两个控制器是空气舵舵控制器和旋转喷管的喷管控制器，分别采用反步滑模控制方法和反步法进行设计。

[0058] 3、所述的反步滑模控制方法是将滑模控制方法与反步法进行结合的方法，以航向偏差为输入量，由算法解算得出输出量。

[0059] 4、所述的协调器是协调空气舵控制回路与旋转喷管控制回路的，实质是根据执行机构的反馈量对期望的控制量进行补偿，从而得到精确的控制量。

[0060] 本发明的工作原理是：本发明的核心部分是提高航行安全性的气垫船协调控制系统设计，是双通道控制与协调控制方法的结合。

[0061] 气垫船安全航行协调控制系统包括控制部分和协调部分，控制部分包括空气舵控制回路和旋转喷管控制回路；空气舵控制回路由舵控制器、空气舵和气垫船组成，用来对气垫船航向进行控制，实现快速稳定的跟踪设定航向的目的；旋转喷管控制回路由喷管控制器、旋转喷管和气垫船组成，用来对气垫船的横倾进行控制，实现减小横摇提高航行安全性的作用；

[0062] 舵控制器采用结合反步法的滑模变结构方法设计，其实质是对航向偏差进行处理，经算法解算出对应的控制量，送入执行机构空气舵中。控制器设计步骤如下：

[0063] 首先定义误差变量：

$$\begin{cases} z_1 = \psi - \psi_d \\ z_2 = \dot{z}_1 - a_1 \end{cases}$$

[0065] 其中， ψ_d 表示期望航向， z_1 表示航向误差， z_2 表示误差的导数与虚拟控制量 a_1 的偏差，虚拟控制量可选取 $a_1 = -c_1 z_1$, $c_1 > 0$ ，根据反步法设计思想，定义 Lyapunov 函数：

$$[0066] V_1 = \frac{1}{2} z_1^2$$

[0067] 因此有： $\dot{V}_1 = z_1 z_2 - c_1 z_1^2$

[0068] 由 Lyapunov 稳定性定理可知，需要保证 $\dot{V} \leq 0$ ，才能够使得设计的系统稳定。考虑到与滑模变结构方法的结合，因此重新定义 Lyapunov 函数如下：

$$[0069] V_2 = \frac{1}{2} (z_1^2 + \sigma^2)$$

[0070] 其中， σ 为滑模面，根据线性构造的原则，定义滑模面 $\sigma = k_1 z_1 + z_2$ ，其中 $k_1 > 0$ 。则

$$[0071] \dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \sigma \dot{\sigma} = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma (k_1 \dot{z}_1 + \dot{z}_2)$$

$$[0072] = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma [k_1 (z_2 - c_1 z_1) + \dot{z}_2]$$

$$[0073] = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma [k_1 (z_2 - c_1 z_1) + (k_{e1} \dot{v} + k_{e3} x_2 + u + f_2) / k_{e2} - \ddot{\psi}_d - \dot{a}_1]$$

$$[0074] = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma [k_1 (z_2 - c_1 z_1) + (k_{e1} \dot{v} + k_{e3} (z_2 + \dot{\psi}_d + a_1) + u + f_2) / k_{e2} - \ddot{\psi}_d - \dot{a}_1]$$

[0075] 选取控制律如下：

$$[0076] u_1 = k_{e2} [-k_1 (z_2 - c_1 z_1) + \ddot{\psi}_d + \dot{a}_1 - h(\sigma + \beta \operatorname{sgn}(\sigma))]$$

$$[0077] - k_{e1} \dot{v} - k_{e3} (z_2 + \dot{\psi}_d + a_1) - F \operatorname{sgn}(\sigma)$$

[0078] 其中, $k_{c1} \sim k_{c3}$ 均表示模型中的系数, h 和 β 为正常数, F 为系统所受扰动的最大值。

[0079] 接着对模型内存在的不确定项 F 进行估计, 其值用 \hat{F} 来表示, 那么 F 的估计误差就可表示为 $\tilde{F} = F - \hat{F}$ 。

[0080] 重新定义 Lyapunov 函数如下:

$$[0081] V_3 = V_2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{F}^2$$

[0082] 其中, γ 为正常数, 对该函数整理可得:

$$[0083] \dot{V}_3 = \dot{V}_2 - \frac{1}{\gamma} \tilde{F} \dot{\tilde{F}}$$

$$[0084] = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma [k_1 (z_2 - c_1 z_1)]$$

$$[0085] + (k_{c1} \dot{v} + k_{c3} (z_2 + \dot{\psi}_d + a_1) + u + F) / k_{c2} - \ddot{\psi}_d - \dot{a}_1 - \frac{1}{\gamma} \tilde{F} \dot{\tilde{F}}$$

$$[0086] = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma [k_1 (z_2 - c_1 z_1)]$$

$$[0087] + (k_{c1} \dot{v} + k_{c3} (z_2 + \dot{\psi}_d + a_1) + u + \hat{F}) / k_{c2} - \ddot{\psi}_d - \dot{a}_1 - \frac{1}{\gamma} \tilde{F} (\dot{\tilde{F}} - \gamma \sigma)$$

[0088] 此时, 取控制律为

$$[0089] u_1 = k_{c2} [-k_1 (z_2 - c_1 z_1) + \dot{\psi}_d + \dot{a}_1 - h(\sigma + \beta \text{sat}(\sigma))]$$

$$[0090] - k_{c1} \dot{v} - k_{c3} (z_2 + \dot{\psi}_d + a_1) - \hat{F} \text{sat}(\sigma)$$

[0091] 同时, 取模型中不确定项 F 的自适应律为 $\dot{\tilde{F}} = \gamma \sigma$, 重新代入 \dot{V}_3 并整理, 可得

$$[0092] \dot{V}_3 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 - h \sigma^2 - h \beta |\sigma|$$

[0093] 只要参数选择合理, 使得 $\dot{V}_3 < 0$ 成立, 就可以保证所设计的系统是稳定的。

[0094] 喷管控制器采用反步方法设计, 定义横倾角误差及其一阶导数如下:

$$[0095] \begin{cases} z_3 = \theta - \theta_d \\ z_4 = p - \alpha_1 \end{cases}$$

[0096] 其中, θ_d 表示期望横倾角, z_3 为横倾角误差, $p = \dot{\theta}$ 为气垫船的横倾角速度,

$\alpha_1 = -c_2 z_3 + \dot{\theta}_d$ 为虚拟控制量。根据 Lyapunov 稳定性定理, 定义 Lyapunov 函数:

$$[0097] V_4 = \frac{1}{2} z_3^2$$

[0098] 并对其求导可得:

$$[0099] \dot{V}_4 = z_3 \dot{z}_3 = z_3 (z_4 + \alpha_1 - \dot{\theta}_d) = -c_4 z_3^2 + z_3 z_4$$

[0100] 其中, c_4 为大于 0 的常数。

[0101] 如果 $z_4 = 0$, 则 $\dot{V}_4 \leq 0$ 。为了保证在 $z_4 \neq 0$ 这样的情况下也成立, 需要进一步进行

设计。

[0102] 重新定义 Lyapunov 函数如下：

$$[0103] V_5 = V_4 + \frac{1}{2} z_4^2$$

[0104] 对其求导可得：

$$[0105] \dot{V}_5 = \dot{V}_4 + z_4 \dot{z}_4 = -c_3 z_4^2 + z_4(z_3 + \dot{z}_4)$$

[0106] 由于：

$$[0107] \dot{z}_4 = \dot{p} - \dot{\alpha}_1 = \frac{1}{I_x}(u_2 + \tilde{f}) - \dot{\alpha}_1$$

[0108] 将 \dot{z}_4 代入 \dot{V}_5 的表达式, 可得：

$$[0109] \dot{V}_5 = -c_3 z_3^2 + z_4(z_3 + \frac{1}{I_x}(u_2 + \tilde{f}) - \dot{\alpha}_1)$$

[0110] 为保证 $\dot{V}_5 \leq 0$, 选择控制量

$$[0111] u_2 = I_x(\dot{\alpha}_1 - z_3 - c_3 z_4) - F$$

[0112] 其中 c_3 大于零, I_x 为系统中横摇转动惯量, F 代表系统中所受扰动的上界。

[0113] 协调部分是在两个控制回路之间加入一个协调器。因为空气舵和旋转喷管控制回路之间存在相互关联, 空气舵在动作时会产生较大的回转力矩及横倾力矩, 在转向的同时会对气垫船的横倾运动产生较大影响; 同样, 旋转喷管在使用时, 也会产生横倾力矩与回转力矩, 会对气垫船的航向产生影响。在两控制回路之间加入协调器, 空气舵控制航向的同时, 使旋转喷管产生的回转力矩作为反馈信号, 对舵控制器的输出量进行补偿, 从而改善空气舵的控制效果。在利用旋转喷管对横倾控制的同时, 加入空气舵产生的横倾力矩作为反馈输入, 能够及时的控制横倾运动, 减轻船体的横倾振荡。

[0114] 协调器的输入量为舵控制器的输出量 u_1 、喷管控制器的输出量 u_2 、由空气舵反馈回的横倾力矩 b_1 和旋转喷管反馈回的回转力矩 b_2 , 输出为空气舵控制量 u'_1 及旋转喷管控制量 u'_2 。根据补偿规则, 输入量与输出量之间存在如下关系：

$$[0115] \begin{cases} u'_1 = u_1 - b_2 \\ u'_2 = u_2 - b_1 \end{cases}$$

[0116] 本实施例中采用的测量系统包含姿态传感器、角度传感器, 气垫船驾控系统计算机内含气垫船安全航行协调控制软件, 执行机构采用空气舵与旋转喷管。

[0117] 结合图 1, 气垫船安全航行协调控制系统包括控制部分和协调部分, 控制部分包括空气舵控制回路和旋转喷管控制回路; 空气舵控制回路由舵控制器、空气舵和气垫船组成, 用来对气垫船航向进行控制, 实现快速稳定的跟踪设定航向的目的; 旋转喷管控制回路由喷管控制器、旋转喷管和气垫船组成, 用来对气垫船的横倾进行控制, 实现减小横摇提高航行安全性的作用。两控制回路之间通过协调器来减小回路间相互的影响。

[0118] 其安全航行协调控制包括如下步骤：

[0119] (1) 通过姿态传感器测量气垫船的航行状态参数信息, 包括航向角、横倾角等状态。通过角度传感器测量气垫船的操纵机构空气舵舵角及喷管旋转角度；

[0120] (2) 状态参数信息及操纵机构信息转换为数字信号,通过串口送入气垫船驾控系统计计算机中;

[0121] (3)计算机对采集的信息进行处理:根据设定期望航向角 ψ_d 和反馈的气垫船实际航向角 ψ 计算出航向偏差,作为输入给舵控制器;根据气垫船安全限界设定的横倾角和反馈的气垫船实际横倾角计算出横倾偏差,作为输入给喷管控制器。

[0122] (4) 空气舵控制回路根据反步滑模变结构控制方法,设计舵控制器,其输入为航向误差,控制器输出舵角控制指令信号来满足航向跟踪的需求,计算步骤如下:

[0123] 步骤(1):根据公式 $\begin{cases} z_1 = \psi - \psi_d \\ z_2 = \dot{\psi}_1 - a_1 \end{cases}$,计算 z_1 和 z_2 ,其中 a_1 为虚拟控制量, $a_1 = -c_1 z_1$,

c_1 为大于零的常数。

[0124] 步骤(2):根据公式 $\sigma = k_1 z_1 + z_2$ 计算滑模面 σ , k_1 为大于零的常数。

[0125] 步骤(3):计算边界层函数 $\text{sat}(\sigma)$ 如下:

$$[0126] \text{sat}(\sigma) = \begin{cases} -1 & \sigma < -\phi \\ \sigma/\phi & |\sigma| \leq \phi \\ 1 & \sigma > \phi \end{cases}$$

[0127] 其中, $\phi > 0$,表示边界层的厚度。通过选取不同的 ϕ 值来对系统的跟踪误差进行调节。

[0128] 步骤(4):计算控制量:

$$[0129] u = k_{c2}[-k_1(z_2 - c_1 z_1) + \ddot{\psi}_d + \dot{a}_1 - h(\sigma + \beta \text{sat}(\sigma))]$$

$$[0130] -k_{c1}\dot{\psi} - k_{c3}(z_2 + \dot{\psi}_d + a_1) - \hat{F} \text{sat}(\sigma),$$

[0131] 其中, $k_{c1} \sim k_{c3}$ 均表示气垫船模型试验系数, h 和 β 为正常数, \hat{F} 为系统所受扰动的最大估计值。

[0132] (5) 旋转喷管控制回路采用反步法设计,控制器输入为横倾误差,控制旋转喷管转向实现减小横倾振荡的作用,计算步骤如下:

[0133] 步骤(1):定义误差变量如下:

$$[0134] \begin{cases} z_3 = \theta - \theta_d \\ z_4 = p - \alpha_1 \end{cases}$$

[0135] 其中, θ 表示气垫船的横倾角, θ_d 表示期望横倾角, z_3 为横倾角误差, $p = \dot{\theta}$ 为气垫船的横倾角速度, α_1 为虚拟控制量,可根据控制系统的需求进行取值。

[0136] 步骤(2):取虚拟控制量:

$$[0137] \alpha_1 = -c_2 z_3 + \dot{\theta}_d$$

[0138] 其中 c_2 为正常数。

[0139] 步骤(3):选取控制律为:

$$[0140] u = I_x(\dot{\alpha}_1 - z_1 - c_3 z_2) - F$$

[0141] 其中, c_3 为大于零的常数, F 代表系统中扰动项的最大估计值。

[0142] (6) 协调部分的计算。

[0143] 空气舵控制航向的同时,使旋转喷管产生的回转力矩作为反馈信号,对舵控制器的输出量进行补偿调整,从而改善空气舵的控制效果;在利用旋转喷管对横倾控制的同时,加入空气舵产生的横倾力矩作为反馈输入,对期望控制量进行调整,能够及时的控制横倾运动,这样能够减少能量消耗,快速稳定的控制气垫船完成期望的目标。协调部分以两控制器的输出作为输入量,同时将空气舵产生的横倾力矩 b_1 及旋转喷管产生的回转力矩 b_2 引入到协调器中。

[0144] 步骤(1):将空气舵舵角表示为 δ ,根据舵模型及其特性,产生的横倾力矩 b_1 根据下式计算:

$$[0145] b_1 = 2 * S_r * [C_{ry0}(\delta) * P_{duct0} + C_{ry1}(\delta) * P_{duct1}] * z_r$$

[0146] 其中, S_r 表示舵受力面积, $C_{ry}(\delta)$ 表示舵力系数,该系数的值由舵角 δ 决定。 P_{duct} 则表示舵上动压头,下标0与1分别表示两空气舵其中一个, z_r 表示空气舵的垂向安装位置。

[0147] 步骤(2):旋转喷管角表示为 φ ,根据喷管模型,那么产生的回转力矩 b_2 可由下式计算:

[0148]

$$b_2 = 2 * T_n * \sin(\varphi / 57.3) * x_n$$

[0149] 其中, T_n 表示喷嘴产生的推力, x_n 表示喷管的水平安装位置。

[0150] 步骤(3):计算协调后的控制量,根据补偿规则,按照以下公式计算:

$$[0151] \begin{cases} u'_1 = u_1 - b_2 \\ u'_2 = u_2 - b_1 \end{cases}$$

[0152] 其中, u_1 为舵控制器的输出量, u_2 为喷管控制器的输出量, b_1 为空气舵反馈回的横倾力矩, b_2 为旋转喷管反馈回的回转力矩, u'_1 为协调后空气舵控制量, u'_2 为协调后旋转喷管控制量。

[0153] (7) 将协调器调整后的控制量输出,作为执行机构空气舵与旋转喷管的动作指令,控制气垫船运行到期望的工况下。

[0154] 对本发明提供的气垫船航行安全性的协调控制方法进行了模拟试验,模拟在有海风干扰情况下对气垫船的运动进行控制,并分别给出了协调控制前与协调控制后气垫船控制效果图。试验结果见附图2-5。从中可以看出,应用协调控制策略后,气垫船的横倾角减小,横摇振荡变弱,漂角减小,运动的安全性有了很大提高。

[0155] 本发明的优点在于系统结构设计简单,当有外界扰动作用时,控制器能够保持良好的控制精度和稳定性。可实际应用于气垫船自动驾驶系统设计中。

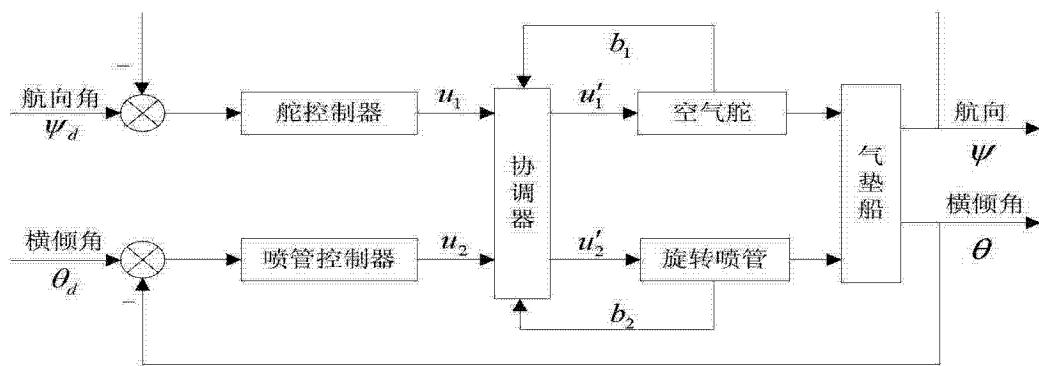


图 1

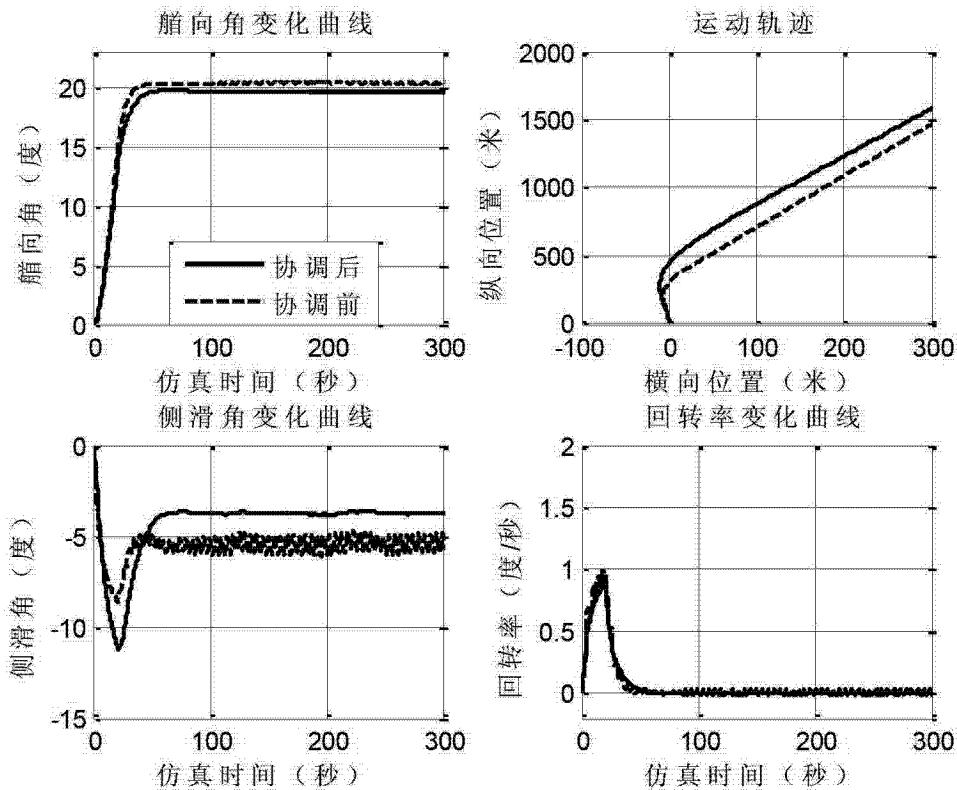


图 2

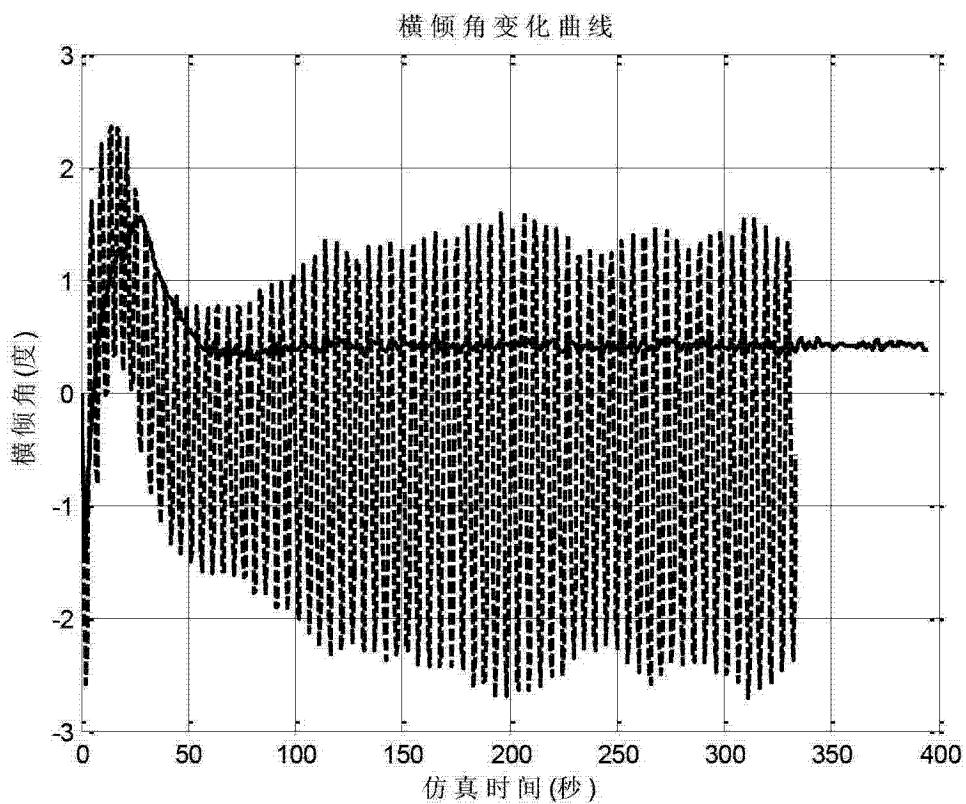


图 3

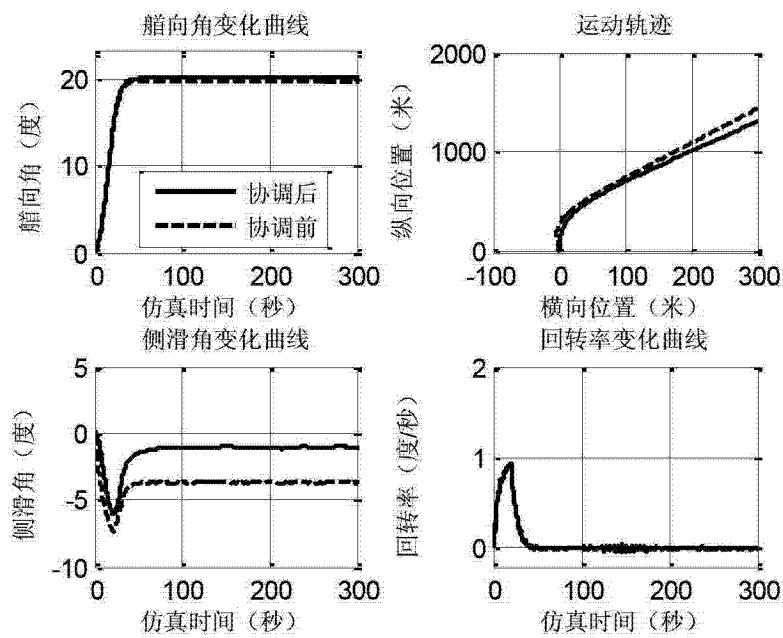


图 4

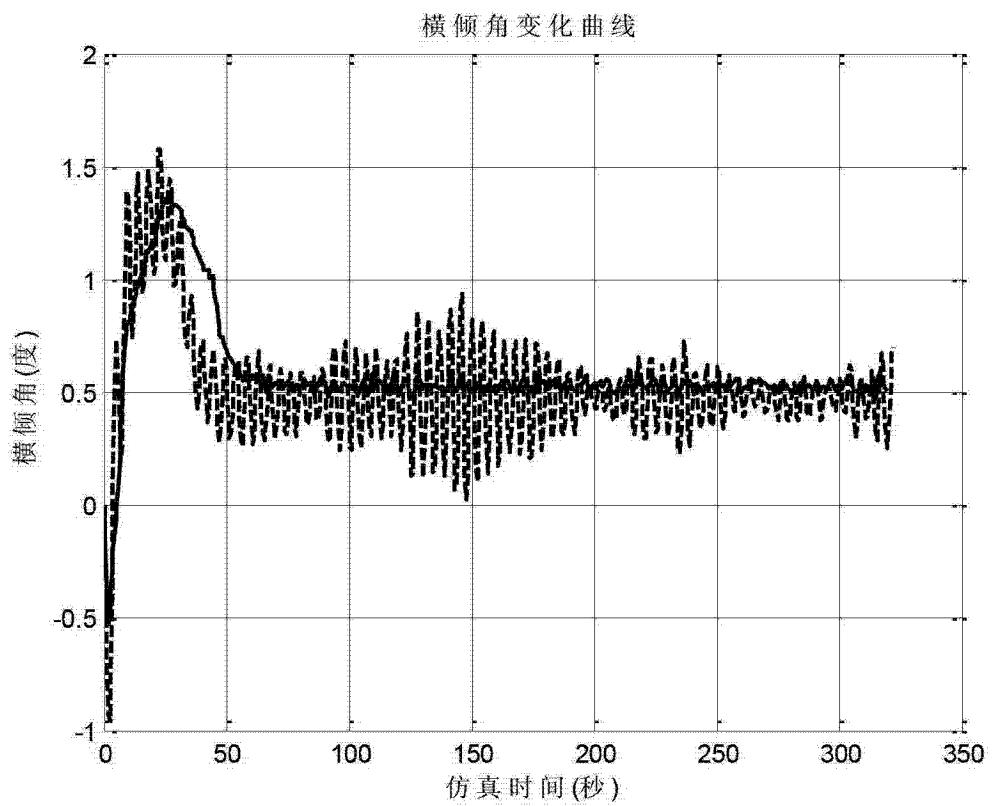


图 5