



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115755891 A

(43) 申请公布日 2023. 03. 07

(21) 申请号 202211356732.5

(22) 申请日 2022.11.01

(71) 申请人 宜昌测试技术研究所

地址 443003 湖北省宜昌市西陵区胜利三路58号

(72) 发明人 李超 曹璐 江兴隆 李源

艾艳辉 余湖清

(74) 专利代理机构 北京艾纬铂知识产权代理有

限公司 16101

专利代理师 许姣

(51) Int. Cl.

G05D 1/02 (2020.01)

权利要求书2页 说明书7页 附图2页

## (54) 发明名称

一种高海况下近水面航行器运动控制方法

## (57) 摘要

一种高海况下近水面航行器运动控制计算方法,根据近水面航行器应用场景,通过将水动力与航行深度相关联,建立参数摄动情况下运动模型;为了提高执行机构的响应速度和鲁棒性,提出专家控制-改进S面算法,从而准确描述该类航行器运动模型,提高该类航行器的运动预报精度、降低运动幅度。



1. 一种高海况下近水面航行器运动控制方法,包括以下步骤:

步骤S1:以航行器质心为坐标原点,定义欧拉角 $\theta$ 为姿态角,构建近水面航行器运动模型为:

$$M \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\xi} \\ \dot{\zeta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \\ \xi \\ \zeta \\ \theta \end{bmatrix} + A_1 \delta_b + A_2 \delta_s + F_1 + T_p + F_{wave}$$

式中, $M$ 、 $c$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $F_1$ 、 $T_p$ 、 $F_{wave}$ 分别为质量属性矩阵、流体动力系数矩阵、前舵舵角系数矩阵、后舵舵角系数矩阵、静力矩阵、推进力矩阵、波浪干扰力矩阵, $\delta_b$ 、 $\delta_s$ 为航行器执行结构即前、后舵,变量 $u$ 、 $w$ 、 $q$ 、 $\xi$ 、 $\zeta$ 、 $\theta$ 分别表示纵向速度、垂向速度、纵摇角速度、纵向位移、航行深度、纵摇角,形如 $\dot{u}$ 等为各变量加速度,其中流体动力系数为航行深度和纵摇角的函数;

步骤S2:基于该运动模型,对作为执行机构的舵采用改进S面算法进行控制,执行机构输出为:

$$\delta = (e^{k_1 x_E + k_2 (dx_E/dt)} - e^{-ak_1 x_E - ak_2 (dx_E/dt)}) / (e^{k_1 x_E + k_2 (dx_E/dt)} + e^{-ak_1 x_E - ak_2 (dx_E/dt)}) + \Delta \delta$$

其中, $\delta$ 为舵角, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $a$ 为控制响应速度的参数, $k_1$ 、 $k_2$ 根据实际运动响应去调节,初始值 $1 < k_1 < 5$ , $1 < k_2 < 5$ , $1 < a < 2$ , $x_E$ 为偏差、 $dx_E/dt$ 为偏差变化量, $\Delta \delta$ 为偏移纠正量。

2. 如权利要求1所述的控制方法,其特征在于,所述流体动力系数矩阵 $c$ 根据下式计算:

$$c = \begin{bmatrix} X_{uu}(\zeta)u & X_{ww}(\zeta)w - mq & X_{qq}(\zeta)q & 0 & 0 & 0 \\ mq & Z_w(\zeta) & Z_q(\zeta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_w(\zeta) & M_q(\zeta) & 0 & 0 & -mgh_\theta \\ \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中, $m$ 为航行器质量, $g$ 为重力加速度, $h_0$ 为初稳性高, $X_{uu}(\zeta)$ 、 $X_{ww}(\zeta)$ 、 $X_{qq}(\zeta)$ 为纵向流体动力关于纵向、垂向、垂向旋转的系数, $Z_w(\zeta)$ 、 $Z_q(\zeta)$ 为垂向流体动力关于垂向、垂向旋转的系数, $M_w(\zeta)$ 、 $M_q(\zeta)$ 为侧向旋转流体力矩关于垂向、垂向旋转的系数。

3. 如权利要求2所述的控制方法,其特征在于,所述偏移纠正量 $\Delta \delta$ 根据下式确定:

$$\Delta \delta = \alpha T \sum_{j=s}^b e(j)$$

$T$ 为时间间隔, $s$ 为将要形成稳定偏差时对应的迭代步数, $e$ 为目标量和当前状态的误差, $b$ 为迭代终止时间, $\alpha$ 为增益因子,取值范围: $1 < \alpha < 2$ 。

4. 如权利要求1-3中任一所述的控制方法,其特征在于,在所述步骤S2中,采用专家控制算法与改进S面算法结合,对作为执行机构的舵进行控制,包括:

S21: 当  $|x_E(k)| > M1$  时, 将运动信息的反馈结果传递到执行结构进行闭环控制, 设置增益系数  $kh$ ,  $kh = kh + 2 * (kh - 1)$ , 改进S面控制算法中的系数  $k_1(k) = kh * k_1(k-1)$ ,  $k_2(k) = kh * k_2(k-1)$ , 执行机构输出为:

$$\delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j)$$

其中,  $k, k-1$  表示当前时刻和上一时刻,  $x_E(k)$  表示  $k$  时刻偏差,  $x_E(k-1)$  表示  $k-1$  时刻偏差,  $dx_E(k)/dt$  表示  $k$  时刻偏差变化率,  $A$  为最大舵角,  $M1$  为规定的偏差接受度;

S22: 当  $x_E(k) \Delta x_E(k) > 0$  时:

(1)  $|x_E(k)| \geq M2$ , 执行机构的参数  $k_1, k_2$  分别取为  $kh * k_1, kh * k_2$ , 执行机构输出为:

$$\delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j);$$

(2)  $|x_E(k)| < M2$ , 执行机构输出表达式不变, 即:  $\delta(k) = \delta(k-1)$ ;

其中,  $\Delta x_E(k) = x_E(k) - x_E(k-1)$ ,  $M2$  为规定的偏差接受度,  $M2 < M1$ ;

S23:  $\Delta x_E(k) = 0$  即  $x_E(k) = x_E(k-1)$ , 执行机构按S22中的(1)策略输出;

S24:  $x_E(k) \Delta x_E(k) < 0, \Delta x_E(k) \Delta x_E(k-1) > 0 | x_E(k) = 0$ , 执行机构输出表达式不变, 即:  $\delta(k) = \delta(k-1)$ ;

S25:  $x_E(k) \Delta x_E(k) < 0, \Delta x_E(k) \Delta x_E(k-1) < 0$ :

(1)  $|x_E(k)| \geq M2, k_1(k) = kh * k_1(k-1), k_2(k) = kh * k_2(k-1)$ , 执行机构输出为:

$$\delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j) + khx_E(k);$$

(2)  $|x_E(k)| < M2$ , 设置抑制系数  $kd, k_1(k) = kd * k_1(k-1), k_2(k) = kd * k_2(k-1)$ , 执行机构输出为:

$$\delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j) + kdx_E(k);$$

S26:  $|x_E(k)| \leq e$ ,  $e$  为偏差精度, 加入积分环节减小稳态偏差,  $ki$  为积分项参数, 需根据反馈结果进行参数调节, 执行机构输出为:

$$\delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \Delta u + ki \int_0^t x_E dt$$

5. 根据权利要求4所述的控制方法, 其特征在于, 所述增益系数取为  $1 \sim 2$ , 抑制系数取为  $0 \sim 1$ 。

## 一种高海况下近水面航行器运动控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及近水面航行器运动控制领域,特别涉及一种高海况下近水面航行器运动控制计算方法。

### 背景技术

[0002] 近水面航行器航行深度介于水面航行器(如船舶)与潜器之间(如AUV),主体通过鳍舵控制改变航行深度,以降低波浪的影响,通过露出水面的桅杆与岸基和母船保持实时通讯。近水面航行器的结构特性和应用场景决定了其在下潜或上浮状态切换过程中吃水变化较大,吃水的大幅度变化会引起水动力性能和舵效的改变,导致水面和潜器的运动模型应用存在一定的局限性。另一方面,近水面航行器在高海况航行过程中仍然会受到波浪影响,引起自身垂荡和纵摇,影响航行安全。目前,水面航行器因具备充足的储备浮力无需设置垂直平面控制机构,其运动控制集中在水平面维度的航向保持或航迹跟踪;潜器航行深度较深,受表面波浪影响小,不存在吃水变化的问题。针对以上存在的问题,亟需建立一种适用于高海况下近水面航行器运动模型及航行稳定性控制的计算方法,提高该类航行器的运动预报精度、降低运动幅度。

[0003] 论文《双尾半潜无人艇近水面运动水动力特性研究》、《双尾半潜无人艇近自由液面操纵性研究》、《半潜式航行器运动特性研究》中用于描述近水面航行器的数学模型未考虑自由液面影响下的航行器参数摄动和波浪影响。论文《Free-running tests on a self-propelled submersible multi-state vehicle model》提出了自由液面对近水面航行器舵效有影响,并未建立相应的数学模型来描述。论文《潜深对半潜器附加质量影响分析》讨论了潜深对近水面航行器附加质量的影响,并未建立波浪干扰下的运动模型。

[0004] 对于近水面航行器运动控制问题的解决方法论文《基于PID控制的半潜式航行器缩比模型耐波性分析》、《滑模变结构控制在水下航行器舵机控制中的应用》所用的控制算法未考虑自由液面和波浪影响。

### 发明内容

[0005] 本公开提供一种适用于高海况下近水面航行器的运动控制计算方法,能够准确建立近水面航行器运动模型,并对航行稳定性进行有效控制。

[0006] 本公开提供的适用于高海况下近水面航行器的运动控制计算方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤S1:以航行器质心为坐标原点,定义欧拉角 $\theta$ 为姿态角,构建近水面航行器运动模型为:

$$[0008] \quad M \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\xi} \\ \dot{\zeta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \\ \xi \\ \zeta \\ \theta \end{bmatrix} + A_1 \delta_b + A_2 \delta_s + F_1 + T_p + F_{wave}$$

[0009] 式中,  $M$ 、 $c$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $F_1$ 、 $T_p$ 、 $F_{wave}$  分别为质量属性矩阵、流体动力系数矩阵、前舵舵角系数矩阵、后舵舵角系数矩阵、静力矩阵、推进力矩阵、波浪干扰力矩阵,  $\delta_b$ 、 $\delta_s$  为航行器执行结构即前、后舵, 变量  $u$ 、 $w$ 、 $q$ 、 $\xi$ 、 $\zeta$ 、 $\theta$  分别表示纵向速度、垂向速度、纵摇角速度、纵向位移、航行深度、纵摇角, 形如  $\dot{u}$  等为各变量加速度, 其中流体动力系数为航行深度和纵摇角的函数;

[0010] 步骤S2: 基于该运动模型, 对作为执行机构的舵采用改进S面算法进行控制, 执行机构输出为:

$$[0011] \quad \delta = (e^{k_1 x_E + k_2 (dx_E/dt)} - e^{-ak_1 x_E - ak_2 (dx_E/dt)}) / (e^{k_1 x_E + k_2 (dx_E/dt)} + e^{-ak_1 x_E - ak_2 (dx_E/dt)}) + \Delta \delta$$

[0012] 其中,  $\delta$  为舵角,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $a$  为控制响应速度的参数,  $k_1$ 、 $k_2$  根据实际运动响应去调节, 初始值  $1 < k_1 < 5$ ,  $1 < k_2 < 5$ ,  $1 < a < 2$ ,  $x_E$  为偏差、 $dx_E/dt$  为偏差变化量,  $\Delta \delta$  为偏移纠正量。

[0013] 进一步地, 所述流体动力系数矩阵  $c$  根据下式计算:

$$[0014] \quad c = \begin{bmatrix} X_{uu}(\zeta)u & X_{ww}(\zeta)w - mq & X_{qq}(\zeta)q & 0 & 0 & 0 \\ mq & Z_w(\zeta) & Z_q(\zeta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_w(\zeta) & M_q(\zeta) & 0 & 0 & -mgh_\theta \\ \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0015] 式中,  $m$  为航行器质量,  $g$  为重力加速度,  $h_\theta$  为初稳性高,  $X_{uu}(\zeta)$ 、 $X_{ww}(\zeta)$ 、 $X_{qq}(\zeta)$  为纵向流体力关于纵向、垂向、垂向旋转的系数,  $Z_w(\zeta)$ 、 $Z_q(\zeta)$  为垂向流体力关于垂向、垂向旋转的系数,  $M_w(\zeta)$ 、 $M_q(\zeta)$  为侧向旋转流体力矩关于垂向、垂向旋转的系数。

[0016] 进一步地, 所述偏移纠正量  $\Delta \delta$  根据下式确定:

$$[0017] \quad \Delta \delta = \alpha T \sum_{j=s}^b e(j)$$

[0018]  $T$  为时间间隔,  $s$  为将要形成稳定偏差时对应的迭代步数,  $e$  为目标量和当前状态的误差,  $b$  为迭代终止时间,  $\alpha$  为增益因子, 取值范围:  $1 < \alpha < 2$ 。

[0019] 进一步地, 在所述步骤S2中, 采用专家控制算法与改进S面算法结合, 对作为执行机构的舵进行控制, 包括:

[0020] S21: 当  $|x_E(k)| > M1$  时, 将运动信息的反馈结果传递到执行结构进行闭环控制, 设置增益系数  $kh$ ,  $kh = kh + 2 * (kh - 1)$ , 改进S面控制算法中的系数  $k_1(k) = kh * k_1(k-1)$ ,  $k_2(k) = kh * k_2(k-1)$ , 执行机构输出为:

$$[0021] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k) + k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k) - ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k) + k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k) - ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j)$$

[0022] 其中,  $k, k-1$  表示当前时刻和上一时刻,  $x_E(k)$  表示  $k$  时刻偏差,  $x_E(k-1)$  表示  $k-1$  时刻偏差,  $dx_E(k)/dt$  表示  $k$  时刻偏差变化率,  $A$  为最大舵角,  $M1$  为规定的偏差接受度;

[0023] S22: 当  $x_E(k) \Delta x_E(k) > 0$  时:

[0024] (1)  $|x_E(k)| \geq M2$ , 执行机构的参数  $k_1, k_2$  分别取为  $kh * k_1, kh * k_2$ , 执行机构输出为:

$$[0025] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j);$$

[0026] (2)  $|x_E(k)| < M2$ , 执行机构输出表达式不变, 即:  $\delta(k) = \delta(k-1)$ ;

[0027] 其中,  $\Delta x_E(k) = x_E(k) - x_E(k-1)$ ,  $M2$  为规定的偏差接受度,  $M2 < M1$ ;

[0028] S23:  $\Delta x_E(k) = 0$  即  $x_E(k) = x_E(k-1)$ , 执行机构按 S22 中的 (1) 策略输出;

[0029] S24:  $x_E(k) \Delta x_E(k) < 0, \Delta x_E(k) \Delta x_E(k-1) > 0 | x_E(k) = 0$ , 执行机构输出表达式不变, 即:  $\delta(k) = \delta(k-1)$ ;

[0030] S25:  $x_E(k) \Delta x_E(k) < 0, \Delta x_E(k) \Delta x_E(k-1) < 0$ :

[0031] (1)  $|x_E(k)| \geq M2, k_1(k) = kh * k_1(k-1), k_2(k) = kh * k_2(k-1)$ , 执行机构输出为:

$$[0032] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j) + khx_E(k);$$

[0033] (2)  $|x_E(k)| < M2$ , 设置抑制系数  $kd, k_1(k) = kd * k_1(k-1), k_2(k) = kd * k_2(k-1)$ , 执行机构输出为:

$$[0034] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j) + kdx_E(k);$$

[0035] S26:  $|x_E(k)| \leq e, e$  为偏差精度, 加入积分环节减小稳态偏差,  $ki$  为积分项参数, 需根据反馈结果进行参数调节, 执行机构输出为:

$$[0036] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \Delta u + ki \int_0^t x_E dt$$

[0037] 进一步地, 所述增益系数取为  $1 \sim 2$ , 抑制系数取为  $0 \sim 1$ 。

[0038] 本公开提供的近水面航行器的运动控制计算方法, 通过拟合流体动力系数与航行深度及姿态的关系, 建立了更全面的运动模型, 并将专家决策纳入控制策略生成中, 得到适用于高海清下的近水面航行器运动控制方法。

[0039] 与现有技术相比, 本公开的有益效果是: (1) 充分考虑近水面航行器姿态变化过程中的参数摄动, 更贴合该类航行器在实际海况中的运动情况, 可作为近水面航行器运动仿真计算方法;

[0040] (2) 基于该运动模型提出的专家控制-改进 S 面算法能够提高近水面航行器抗浪能力和操舵效率, 有效解决近水面航行器运动预报和提高航行控制精度;

[0041] (3) 专家控制-改进 S 面算法基本表达式简单, 根据航行器自带监测设备的反馈信息能够完成运动控制, 具有良好的实用性和通用性。

## 附图说明

[0042] 通过结合附图对本公开示例性实施例进行更详细的描述, 本公开的上述以及其它

目的、特征和优势将变得更加明显,其中,在本公开示例性实施例方式中,相同的参考标号通常代表相同部件。

[0043] 图1为近水面航行器基本结构图;

[0044] 图2为根据本公开的控制过程示意图;

[0045] 图3为几种算法对比图。

### 具体实施方式

[0046] 下面将参照附图更详细地描述本公开的优选实施例。虽然附图中显示了本公开的优选实施例,然而应该理解,可以以各种形式实现本公开而不应被这里阐述的实施例所限制。相反,提供这些实施例是为了使本公开更加透彻和完整,并且能够将本公开的范围完整地传达给本领域的技术人员。

[0047] 本公开提供一种高海况下近水面航行器运动控制计算方法,根据近水面航行器应用场景,通过将水动力与航行深度相关联,建立参数摄动情况下运动模型,为了提高执行机构的响应速度和鲁棒性提出专家控制-改进S面算法,从而准确描述该类航行器运动模型,提高该类航行器的运动预报精度、降低运动幅度。

[0048] 示例性实施例包括以下步骤:

[0049] 步骤1:如附图1所示,以航行器质心为原点建立运动坐标系 $G-x_1y_1z_1$ , $O-x_2y_2z_2$ 为大地坐标,定义欧拉角 $\theta$ 为姿态角,近水面航行器运动模型包含海浪干扰,得到表达式如下:

$$[0050] \quad M \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\xi} \\ \dot{\zeta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \\ \xi \\ \zeta \\ \theta \end{bmatrix} + A_1 \delta_b + A_2 \delta_s + F_l + T_p + F_{wave}$$

[0051] 变量 $u$ 、 $w$ 、 $q$ 、 $\xi$ 、 $\zeta$ 、 $\theta$ 分别表示纵向速度、垂向速度、纵摇角速度、纵向位移、航行深度、纵摇角,形如 $\dot{u}$ 等为各变量加速度, $M$ 、 $c$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $F_l$ 、 $T_p$ 、 $F_{wave}$ 分别为质量属性矩阵、流体动力系数矩阵、前舵角系数矩阵、后舵角系数矩阵、静力矩阵、推进力矩阵、波浪干扰力矩阵, $\delta_b$ 、 $\delta_s$ 为航行器执行结构即前、后舵。

[0052] 各矩阵的表达式如下:

$$[0053] \quad M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}}(\zeta) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Z_{\dot{w}}(\zeta) & Z_{\dot{q}}(\zeta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{\dot{w}}(\zeta) & J_y - M_{\dot{q}}(\zeta) & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 [0054] \quad \mathbf{c} &= \begin{bmatrix} X_{uu}(\zeta)u & X_{ww}(\zeta)w - mq & X_{qq}(\zeta)q & 0 & 0 & 0 \\ mq & Z_w(\zeta) & Z_q(\zeta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_w(\zeta) & M_q(\zeta) & 0 & 0 & -mgh_\theta \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 [0055] \quad \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} X_{\delta_b\delta_b}(\zeta)\delta_b \\ Z_{\delta_b}(\zeta) \\ M_{\delta_b}(\zeta) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} X_{\delta_s\delta_s}(\zeta)\delta_s \\ Z_{\delta_s}(\zeta) \\ M_{\delta_s}(\zeta) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} Z_0(\zeta) - P(\theta, \zeta)\sin\theta \\ M_0(\zeta) + P(\theta, \zeta)\cos\theta \\ z_c(\theta, \zeta)B(\theta, \zeta)\sin\theta + x_c(\theta, \zeta)B(\theta, \zeta)\cos\theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 [0056] \quad \mathbf{T}_p &= \begin{bmatrix} X_T \\ z_T X_T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_{wave} = \begin{bmatrix} 0.5\rho g\zeta_a k\gamma\cos\beta \int_L A(\xi)\cos(K\xi\cos\beta)d\xi \\ \rho\nabla[1 + Z_w\frac{\omega_e}{\omega}]\omega^2 e^{\frac{-\omega^2\xi}{g}}\zeta_a e^{i\omega_e t} \\ J_y(1 + M_q\frac{\omega_e}{\omega})\frac{\omega^4}{g}\cos\beta - \rho\nabla Z_w U\omega]e^{\frac{-\omega^2\xi}{g}}\zeta_a e^{i\omega_e t} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

[0057] 式中,  $m$ 为航行器质量,  $g$ 为重力加速度,  $h_0$ 为初稳性高,  $J_y$ 为侧向惯性矩,  $X_{uu}(\zeta)$ 、 $X_{ww}(\zeta)$ 、 $X_{qq}(\zeta)$ 为纵向流体力关于纵向、垂向、垂向旋转的系数,  $Z_w(\zeta)$ 、 $Z_q(\zeta)$ 为垂向流体力关于垂向、垂向旋转的系数,  $M_w(\zeta)$ 、 $s$ 为侧向旋转流体力矩关于垂向、垂向旋转的系数,  $X_u(\zeta)$ 、 $Z_w(\zeta)$ 、 $Z_q(\zeta)$ 、 $M_w(\zeta)$ 、 $M_q(\zeta)$ 为各对应流体力加速度系数,

$X_{\delta_b\delta_b}(\zeta)$ 、 $X_{\delta_s\delta_s}(\zeta)$ 、 $Z_{\delta_b}(\zeta)$ 、 $Z_{\delta_s}(\zeta)$ 、 $M_{\delta_b}(\zeta)$ 、 $M_{\delta_s}(\zeta)$ 为前、后舵产生的纵向、垂向、纵摇力矩系数,  $Z_0(\zeta)$ 、 $M_0(\zeta)$ 为初始垂向力系数和初始纵摇系数,  $P(\theta, \zeta)$ 、 $B(\theta, \zeta)$ 、 $x_c(\theta, \zeta)$ 、 $z_c(\theta, \zeta)$ 为重浮力差、浮力、浮心纵向位置、浮心垂向位置,  $X_T$ 为推进器推力,  $z_T$ 为推进器相对质心的垂向位置,  $\rho$ 为流体密度,  $\nabla$ 为航行器排水体积,  $\omega_e$ 为遭遇频率,  $\omega$ 为圆频率,  $\zeta_a$ 为波高、 $K$ 为波数、 $\beta$ 为浪向角、 $A(\xi)$ 航行器横剖面面积,  $\gamma$ 为效波倾角系数,  $U$ 为航速。

[0058] 上述各矩阵中,除流体动力系数矩阵外,均采用现有的计算公式进行计算。而其中,流体动力系数是航行深度 $\zeta$ 的函数,不同航行深度 $\zeta$ 的流体动力系数通过形如 $X_u(\zeta)$ 表达式体现,静力是航行深度 $\zeta$ 和纵摇角 $\theta$ 的函数,通过形如 $P(\theta, \zeta)$ 表达式体现,迭代计算过程中流体动力系数能够根据深度 $\zeta$ 和纵摇角 $\theta$ 实时更新。流体动力系数与航行深度 $\zeta$ 和纵摇角 $\theta$ 的关系,可通过对不同航行深度 $\zeta$ 、纵摇角 $\theta$ 下的航行器试验数据进行拟合得到。

[0059] 步骤2:优选采用本公开中提出的专家控制-改进S面算法对作为执行机构的舵进行控制。该算法将专家控制算法与改进S面算法相结合,将偏差、偏差变化率融入改进S面算

法,利用专家规则来进一步优化改进S面算法。

[0060] 改进S面算法基本表达式如下:

$$[0061] \quad \delta = (e^{k_1 x_E + k_2 (dx_E/dt)} - e^{-ak_1 x_E - ak_2 (dx_E/dt)}) / (e^{k_1 x_E + k_2 (dx_E/dt)} + e^{-ak_1 x_E - ak_2 (dx_E/dt)}) + \Delta \delta$$

[0062]  $k_1, k_2, a$ 为控制响应速度的参数,  $1 < a < 2$ ,  $x_E$ 为偏差、 $dx_E/dt$ 为偏差变化量,  $\Delta \delta$ 为偏移纠正量,表达式如下:

$$[0063] \quad \Delta \delta = \alpha T \sum_{j=s}^b e(j)$$

[0064]  $t$ 为总迭代时间,  $T$ 为时间间隔,  $s$ 为将要形成稳定偏差时对应的迭代步数,  $e$ 为目标量和当前状态的误差,  $b$ 为迭代终止时间,  $\alpha$ 为增益因子,取值范围:  $1 < \alpha < 2$ 。

[0065] 结合专家控制后的改进S面算法,具体包括如下:

[0066] 1)  $|x_E(k)| > M1$ ,此时航行器距离指定目标偏差较大,应增加控制量,达到迅速调整偏差的目的,为了避免过大超调,引起系统响应过快,该种情况下仍然需要将运动信息的反馈结果传递到执行结构,在传统开环控制的基础上,实现闭环控制。增益系数 $kh$ 取为 $kh = kh + 2 * (kh - 1)$ ,改进S面控制算法中的系数 $k_1(k) = kh * k_1(k-1)$ ,  $k_2 = kh * k_2(k-1)$ 。得到的执行机构输出为:

$$[0067] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j)$$

[0068]  $x_E(k)$ 表示 $k$ 时刻偏差,  $x_E(k-1)$ 表示 $k-1$ 时刻偏差,  $dx_E/dt$ 表示偏差变化率,  $A$ 为最大舵角,  $M1$ 为规定的偏差接受度,  $t$ 为总迭代时间,  $T$ 为时间间隔,  $s$ 为将要形成稳定误差时对应的迭代步数。

[0069] 2)  $x_E(k) \Delta x_E(k) > 0$ 即误差和误差增长量具有同一变化趋势,此时说明误差朝绝对值增大的方向发展;

[0070] (1)  $|x_E(k)| \geq M2$ ,表明误差较大,需要增加控制力度,设置增益系数 $kh$ ,执行机构的参数 $k_1, k_2$ 表示为 $kh * k_1, kh * k_2$ ,执行机构输出为:

$$[0071] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j)$$

[0072] (2)  $|x_E(k)| < M2$ ,表明误差不大,可以继续维护目前控制,执行机构的参数 $k_1, k_2$ 维持 $k_1, k_2$ ,执行机构输出表达式不变:

$$[0073] \quad \delta(k) = \delta(k-1)$$

[0074]  $M2$ 为规定的偏差接受度,  $M2 < M1$ ,  $\Delta x_E(k) = x_E(k) - x_E(k-1)$ 。

[0075] 3)  $\Delta x_E(k) = 0$ 即 $x_E(k) = x_E(k-1)$ ,表明误差保持不变,需要增加控制力度,执行机构按2)中的(1)策略输出。

[0076] 4)  $x_E(k) \Delta x_E(k) < 0, \Delta x_E(k) \Delta x_E(k-1) > 0 | x_E(k) = 0$ ,表明误差绝对值朝减小的方向变化或者已经达到平衡,执行机构输出表达式不变:

$$[0077] \quad \delta(k) = \delta(k-1)$$

[0078] 5)  $x_E(k) \Delta x_E(k) < 0, \Delta x_E(k) \Delta x_E(k-1) < 0$ ,表明误差曲线存在拐点。

[0079] (1)  $|x_E(k)| \geq M_2$ , 表明误差绝对值大, 增加控制强度,  $k_1(k) = kh * k_1(k-1)$ ,  $k_2 = kh * k_2(k-1)$ , 执行机构输出为:

$$[0080] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j) + khx_E(k)$$

[0081] (2)  $|x_E(k)| < M_2$ , 表明偏差绝对值小, 降低控制强度, 设置抑制系数  $kd$ ,  $k_1(k) = kd * k_1(k-1)$ ,  $k_2 = kd * k_2(k-1)$ , 执行机构输出为:

$$[0082] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \alpha T \sum_{j=s}^k x_E(j) + kdx_E(k)$$

[0083] 6)  $|x_E(k)| \leq e$  ( $e$  为误差精度), 表明误差已经较小, 应加入积分环节减小稳态误差,  $ki$  为积分项参数, 需根据反馈结果进行参数调节, 执行机构输出为:

$$[0084] \quad \delta(k) = A \frac{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} - e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})}{(e^{k_1(k)x_E(k)+k_2(k)(dx_E(k)/dt)} + e^{-ak_1(k)x_E(k)-ak_2(k)(dx_E(k)/dt)})} + \Delta u + ki \int_0^t x_E dt$$

[0085] 如附图2所示, 为具体实施例控制过程示意图。传感器获得的信息经过处理后, 根据制定的专家控制规则选用对应改进的S面算法对执行机构进行控制, 得到新的航行器状态, 与目标值进行比对得到偏差, 根据专家控制规则再次选用对应改进的S面算法对执行机构进行控制, 依次进行迭代循环, 直到达到控制目标。

[0086] 如图3所示, 为具体实施例航行器运动控制效果对比图: 航速8kn, 迎浪波高2.5m, 波周期8.8s, 航行器目标航行深度3m, 目标纵摇角 $0^\circ$ , 专家控制-改进S面算法和S面算法在四级海况下控制效果及舵角变化幅度的对比。航行器垂荡单幅值有义值分别为3.86m, 3.38m, 纵摇角单幅值有义值分别为 $6.24^\circ$ ,  $2.44^\circ$ 。在本公开提出的控制算法调节下, 航行器垂荡和纵摇角以及舵角变化幅值更小, 更益于降低航行器舵机负载。

[0087] 上述技术方案只是本发明的示例性实施例, 对于本领域内的技术人员而言, 在本发明公开了应用方法和原理的基础上, 很容易做出各种类型的改进或变形, 而不仅限于本发明上述具体实施例所描述的方法, 因此前面描述的方式只是优选的, 而并不具有限制性的意义。

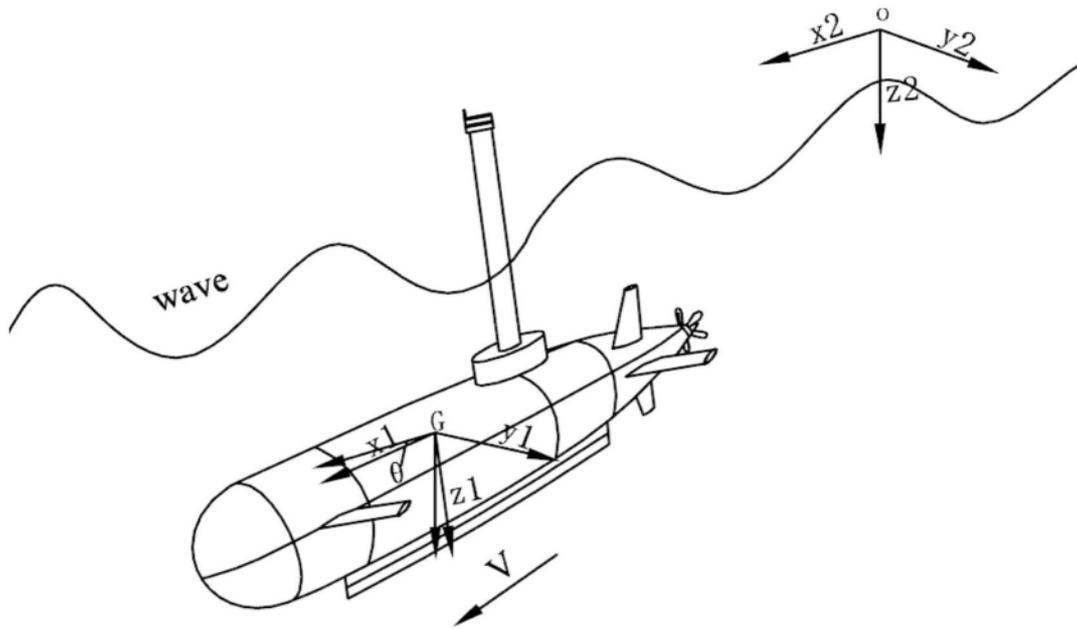


图1

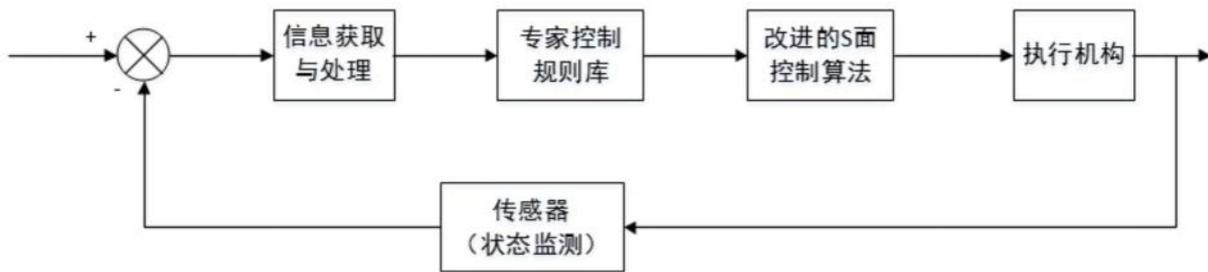
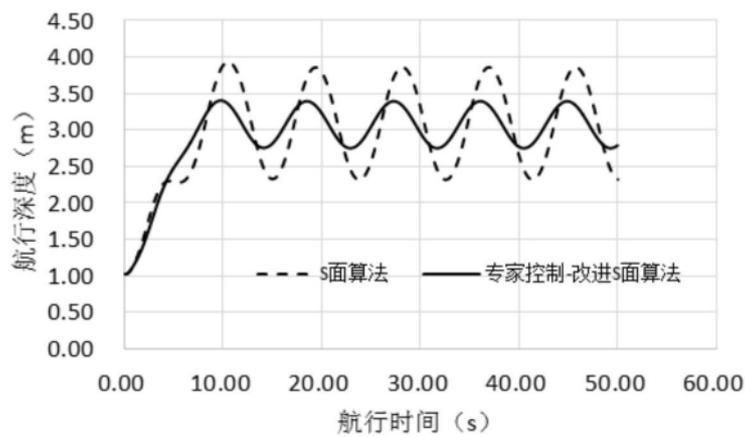


图2



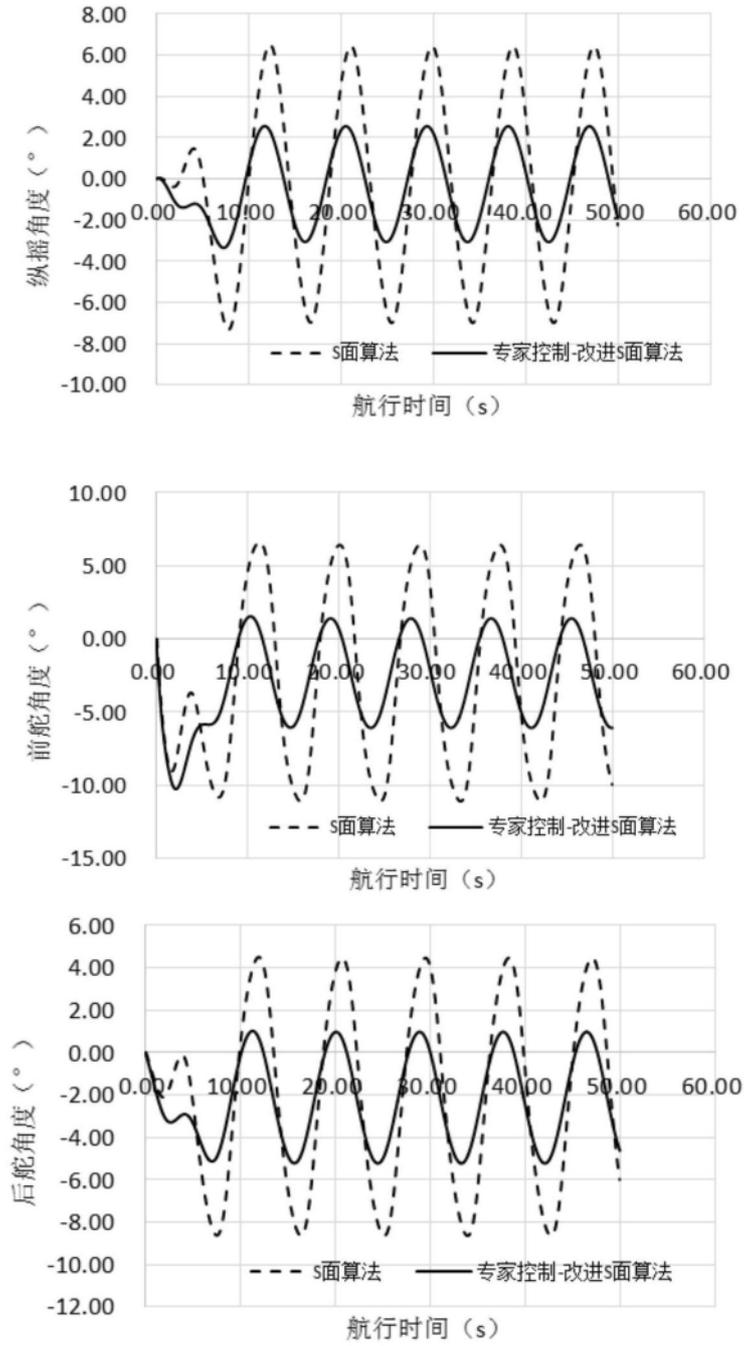


图3