



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116520834 A

(43) 申请公布日 2023. 08. 01

(21) 申请号 202310447042.9

(22) 申请日 2023.04.24

(71) 申请人 安徽建筑大学

地址 230601 安徽省合肥市经济技术开发区紫云路292号

(72) 发明人 王萍 王文凯 张振亚 丁伟
张红艳 殷涛 高娇娇 张朋朋
杨泽丞

(74) 专利代理机构 南京思宸知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 32548

专利代理师 王真

(51) Int. Cl.

G05D 1/02 (2020.01)

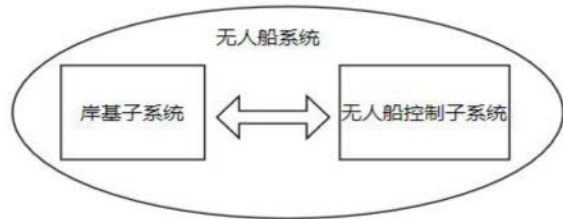
权利要求书3页 说明书12页 附图3页

(54) 发明名称

一种低能耗的无人船巡航方法

(57) 摘要

本发明公开了一种低能耗的无人船巡航方法,包括岸基子系统、无人船子系统,所述无人船子系统包括定位导航模块、激光雷达模块、电池模块、动力控制模块和工控机,所述工控机通过WiFi模块与地面站无线连接,通过对无人船进行三自由度的运动学和动力学建模,分析真实环境中的风浪流对无人船的影响,并根据无人船运动时的能耗计算公式建立无人船能耗模型。基于能耗模型能够得到特定环境下不同巡航速度的能量消耗情况,利用该模型对航向控制策略及速度控制策略进行优化。通过约束航行中高耗能的减速制动行为、因偏航引起的频繁调整船头行为,以及采用低能耗的巡航速度,共同实现了在有风浪环境下的低能耗巡航控制。



1. 一种低能耗的无人船巡航方法,包括岸基子系统、无人船子系统其特征在于:所述无人船子系统包括定位导航模块、激光雷达模块、电池模块、动力控制模块和工控机,所述工控机通过WiFi模块与地面站无线连接,具体步骤如下:

步骤一:参数获取、包括无人船参数数据和任务水域环境数据;

步骤二:模型带入、在不考虑无人船自身弱电部分的电量消耗外,无人船所消耗的能量可以理解螺旋桨在克服环境阻力的情况下,驱动船匀速行驶一段距离所做的功。

$$\text{则根据公式} \begin{cases} \tau_x = (m - X_u) \dot{u}_r + X_u u_r - (m - Y_v) u_r r - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_X S_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L \zeta^2 \cos \chi C_{X1}(\lambda) \\ \tau_y = (m - Y_v) \dot{v}_r + Y_v v_r - (m - X_u) u_r r - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_Y S_L - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L \zeta^2 \sin \chi C_{Y1}(\lambda) \\ \tau_N = (I - N_r) \dot{r} + N_r r + (m - Y_v) v_r u_r - (m - X_u) u_r v_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_Z S_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L \zeta^2 \sin \chi C_{N1}(\lambda) \end{cases} \quad (1)$$

式中 m 为无人船重量, X_u 是纵荡方向的线性阻力系数, Y_v 是横荡方向的线性阻力系数, N_r 是艏摇方向的线性阻力系数, I_z 是关于 Oz 轴的惯性矩,推力包括船体推进器推力 τ_r 以及环境中的风推力 τ_{wind} 、浪推力 τ_{wave} 、流推力 τ_{current} 等对船体产生的载荷, C_X 、 C_Y 、 C_N 为无人船空气阻力系数、 S_r 为横向投影面积, S_L 为纵向投影面积, L 为船长单位 m , V_{wind} 为相对风速,单位是 kn 、 ζ 为波浪的幅度, χ 为航向与波浪的夹角, $C_{X1}(\lambda)$ 为波浪的力与力矩的系数,可由经验公式求得; u 是速度矢量 V 在纵荡方向上的速度分量、 v 是速度矢量 V 在横荡方向上的速度分量、 r 是速度矢量 V 在艏摇方向上的速度分量;

可以得到无人船在有干扰环境中匀速直线行驶的能量消耗模型:

$$W = W_X + W_Y + W_N = \tau_X * x + \tau_Y * y + \tau_\psi * \psi \quad (2)$$

式中 τ_x 为纵荡方向上的推力、 τ_y 为横荡方向上的推力、 τ_z 为艏摇方向上的推力,可由公式直接求出。 x 为纵荡方向上运动的距离、 y 为横荡方向上运动的距离、 ψ 为艏摇方向上运动的转角。

无人船推力可由公式计算得出:

$$\tau_L = \tau_R = \rho_{\text{水}} n^2 D_P^4 k_T (J_P) \quad (3)$$

在一个具体的水域中,我们首先可以利用特定设备获取水面风速、流速、浪高等环境等级,并计算出对船运动产生的干扰大小,再按照式(1)动力学模型,推导出无人船以某速度匀速行驶所需推力大小,最后通过式(4)能耗模型可以求解无人船在该速度下的单位能耗,在风浪环境中,随着船速越高,船所受阻力越大,维持特定速度匀速行驶便需要更大推力,会加大能耗,所以能够利用该模型求解出最低能耗行驶速度;

步骤三:无人船当前信息获取、无人船控制子系统得到的岸基子系统发布的规划路径、规划路径具体为是由一系列转化成直角坐标系行驶的点坐标组成,这些点依次连接形成多条直线路径,每条直线都能计算出与正北方向的夹角,作为船期望航向角 ψ_d ;

步骤四:偏差计算、通过可变半径的自适应LOS引导律,也就是将视距圆半径拓展为 n 倍船长加上可变的横向最小偏移距离,具体如下:

- 1) 计算当前无人位置与期望路径之间的最小横向偏离距离 r_{min} ;
- 2) 以 $R = r_{\text{min}} + nL$ 为半径作视距圆;
- 3) 计此时的视线航向角 ψ_{los} ;

4) 求出期望航向调整量 δ_r 。

按照改进后的LOS算法,可以帮助无人船在有较大航向偏差时也很快求得航向角偏差大小;

步骤五:偏差调整、无人船控制子系统利用求得的船与航线的横向偏移距离 r_{min} 进行位置纠偏。由于船本身有大惯性、长延后的特性,往往当船出现很大的航向偏差时LOS引导律才会做出更新航向指令。因此利用横向偏移量作为位置偏航的判断标准,给横向位置偏移量设置阈值 r_m ,当 $r_{min} > r_m$ 时,计算出 δ_r 进行纠偏。实际航向大小 ψ_{los} 及舵角更新量 δ_r 的具体计算公式如下:

$$\psi_{los} = \arctan\left(\frac{y_{los}(t) - y(t)}{x_{los}(t) - x(t)}\right) \quad (5)$$

$$\delta_r = \psi_d - \arctan\left(\frac{y_{los}(t) - y(t)}{x_{los}(t) - x(t)}\right) \quad (6)$$

其中 $y_{los}(t) - y(t)$ 是每一时刻的横向偏移量,也可通过式(9)计算出。

根据计算出需要调整的舵角 δ_r ,通过PID控制生成对应的匹配转速,完成航向调整。PID航向控制方程为:

$$\delta_r = K_p \psi_e + K_d \psi_e' + K_i \int \psi_e dt \quad (7)$$

式中 ψ_e 代表航向角误差。按照改进后的LOS制导律快速得到航向角偏差,并生成需要调整的舵角 δ_r ,之后采用PID控制器快速响应,使航向调整到与规划直线一致;

步骤六:低能耗、无驱动停船、采用提前停止制动,利用水阻力减速的方法减速过冲,降低能耗。具体步骤为:

1) 进行停船实验,测试从最优能耗速度 V_{best} 无驱动减速到静止的距离 X_0 ;

2) 将总长度为 X 的规划直线分为匀速段 X_v 和停船段 X_0 ,即

$$X = X_v + X_0 \quad (8)$$

3) 在匀速段进行PID速度控制,航速控制方程为:

$$u_r = K_{pl} u_e + K_{dl} u_e' + K_{il} \int u_e dt \quad (9)$$

将匀速段巡航时的目标航速为最低能耗速度 V_{best} , u_r 为需要调整得速度大小, u_e 为实际巡航速度与目标偏差。

4) 在停船段,即离终点距离还剩 X_0 时,传感器检测周围环境,无障碍情况下则进无驱动减速停船。

考虑到无人船在运动到某一终点时会直接前往下一点,并不需要精准地停留在某一点处,故认为在终点一个船宽半径圆范围内均可。

2. 根据权利要求1所述的一种低能耗的无人船巡航方法,其特征在于:步骤一中无人船参数数据和任务水域环境数据包括但不限于船长、两个推进器的间距、迎风面积、风速风向、波浪高和流速流向。

3. 根据权利要求1所述的一种低能耗的无人船巡航方法,其特征在于:步骤二中利用模型求解最低能耗的行驶速度的具体步骤为:

1) 获取船长、船宽、迎风面积等参数、利用CFD仿真得出无人船具体的水动力导数;

2) 获取任务水域风速风向、波高波长、流速流向等环境参数;

3) 将1)和2)中获取的数据带入公式(1)中得到无人船动力学模型;

4) 设置一组符合实际任务需求的无人船巡航速度,无人船按照这些巡航速度分别行驶一段距离,按照公式(4)计算不同巡航速度行驶时的整体能量消耗;

5) 求出能耗最低的一组,得到最低能耗速度 V_{best} 。

4. 根据权利要求1所述的一种低能耗的无人船巡航方法,其特征在于:步骤四中具体的可变半径的自适应LOS引导律算法步骤为从(5)到(9):

若一条期望路径起始点分别为 $B(bx, by)$ 、 $E(ex, ey)$,无人船位置为 $P(x, y)$ 。无人船现在位置偏离现在期望路径的最小距离 r_{min} 利用海伦公式可求得。 a 、 b 、 c 分别是三点围成三角形的边长, s 是三点围成的面积。

$$a = \sqrt{(bx - ex)^2 + (by - ey)^2} \quad (10)$$

$$b = \sqrt{(bx - x)^2 + (by - y)^2} \quad (11)$$

$$c = \sqrt{(ex - x)^2 + (ey - y)^2} \quad (12)$$

$$s = \sqrt{p * (p - a) * (p - b) * (p - c)} \quad (13)$$

$$r_{min} = \frac{2*s}{a} \quad (14)。$$

一种低能耗的无人船巡航方法

技术领域

[0001] 本发明属于无人船技术领域,具体涉及一种低能耗的无人船巡航方法。

背景技术

[0002] 随着节能环保理念的推广,越来越多的无人船由燃油驱动变成电池驱动。但在无人船领域,研究者更关注无人船完成特定任务的能力,较少有研究者致力于行驶过程的节能研究。无人船的运动由动力电池提供能源,电池的大小直接决定了无人船的续航能力,但能量密度越大的电池往往重量也大,这对于小型无人船的整体性能是致命的。为了增加无人船的续航能力,目前国内外常用的办法有:优化船体结构减小行船阻力、采用多能源混合增强续航、采用复合材料降低船重等措施。但这些方法大多要求在设计之初就完成改造,对于现有的无人船续航能力的提升没有实际帮助。

[0003] 在工程实践中通常采用两种办法来扩展无人船的续航能力,一种是配备多块可替换电池,一块电池电量不足时返航更换新电池,但这样会增加成本;另一种通过规划一条距离最短的路径或者耗时最短的路径,这种方法对于一些有大角度转弯的路线跟踪效果不佳,并且频繁调整航向还会增加船舶航行阻力,适用性有限。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种低能耗的无人船巡航方法,以解决的问题。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供如下技术方案:一种低能耗的无人船巡航方法,包括岸基子系统、无人船子系统,所述无人船子系统包括定位导航模块、激光雷达模块、电池模块、动力控制模块和工控机,所述工控机通过WiFi模块与地面站无线连接,具体步骤如下:

[0006] 步骤一:参数获取、包括无人船参数数据和任务水域环境数据;

[0007] 步骤二:模型带入、在不考虑无人船自身弱电部分的电量消耗外,无人船所消耗的能量可以理解为螺旋桨在克服环境阻力的情况下,驱动船匀速行驶一段距离所做的功。

$$[0008] \quad \begin{cases} \tau_x = (m - X_u) \dot{u}_r + X_u u_r - (m - Y_v) u_r r - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_X S_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L \zeta^2 \cos \chi C_{X1}(\lambda) \\ \tau_y = (m - Y_v) \dot{v}_r + Y_v v_r - (m - X_u) u_r r - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_Y S_L - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L \zeta^2 \sin \chi C_{Y1}(\lambda) \\ \tau_N = (I - N_r) \dot{r} + N_r r + (m - Y_v) v_r u_r - (m - X_u) u_r v_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_Z S_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L \zeta^2 \sin \chi C_{N1}(\lambda) \end{cases} \quad (1)$$

[0009] 式中 m 为无人船重量, X_u 是纵荡方向的线性阻力系数, Y_v 是横荡方向的线性阻力系数, N_r 是艏摇方向的线性阻力系数, I_z 是关于 Oz 轴的惯性矩,推力包括船体推进器推力 τ_r 以及环境中的风推力 τ_{wind} 、浪推力 τ_{wave} 、流推力 τ_{current} 等对船体产生的载荷, C_X 、 C_Y 、 C_N 为无人船空气阻力系数、 S_r 为横向投影面积, S_L 为纵向投影面积, L 为船长度单位 m , V_{wind} 为相对风速,单位是 kn 、 ζ 为波浪的幅度, χ 为航向与波浪的夹角, $C_{X1}(\lambda)$ 为波浪的力与力矩的系数,可由经验公式求得, u 是速度矢量 V 在纵荡方向上的速度分量、 v 是速度矢量 V 在横荡方向上的速度分量、 r 是速度矢量 V 在艏摇方向上的速度分量;

[0010] 可以得到无人船在有干扰环境中匀速直线行驶的能量消耗模型:

$$[0011] \quad W = W_X + W_Y + W_N = \tau_X * x + \tau_Y * y + \tau_\psi * \psi \quad (2)$$

[0012] 式中 τ_X 为纵荡方向上的推力、 τ_Y 为横荡方向上的推力、 τ_ψ 为艏摇方向上的推力,可由公式(3-13)、(3-14)直接求出。 x 为纵荡方向上运动的距离、 y 为横荡方向上运动的距离、 ψ 为艏摇方向上运动的转角,可由公式

$$[0013] \quad \tau_L = \tau_R = \rho_{\text{水}} n^2 D_P^4 k_T (J_P) \quad (3)$$

[0014] 直接求出。 x 、 y 、 ψ 分别代表无人船运动的距离及转角;

[0015] 式中 S_r 、 S_L 分别为横向和纵向投影面积, L 为船长度单位 m , V_{wind} 为风速,单位是 kn 。

[0016] 在一个具体的水域中,我们首先可以利用特定设备获取水面风速、流速、浪高等环境等级,并计算出对船运动产生的干扰大小,再按照式(1)动力学模型,推导出无人船以某速度匀速行驶所需推力大小,最后通过式(4)能耗模型可以求解无人船在该速度下的单位能耗,在风浪环境中,随着船速越高,船所受阻力越大,维持特定速度匀速行驶便需要更大推力,会加大能耗,所以能够利用该模型求解出最低能耗行驶速度;

[0017] 步骤三:无人船当前信息获取、无人船控制子系统得到的岸基子系统发布的规划路径、规划路径具体为是由一系列转化成直角坐标系行驶的点坐标组成,这些点依次连接形成多条直线路径,每条直线都能计算出与正北方向的夹角,作为船期望航向角 ψ_d ;

[0018] 步骤四:偏差计算、通过可变半径的自适应LOS引导律,也就是将视距圆半径拓展为 n 倍船长加上可变的横向最小偏移距离,具体如下:

[0019] 1) 计算当前无人位置与期望路径之间的最小横向偏离距离 r_{min} ;

[0020] 2) 以 $R = r_{\text{min}} + nL$ 为半径作视距圆;

[0021] 3) 计此时的视线航向角 ψ_{los} ;

[0022] 4) 求出期望航向调整量 δ_r 。

[0023] 按照改进后的LOS算法,可以帮助无人船在有较大航向偏差时也很快求得航向角偏差大小;

[0024] 步骤五:偏差调整、无人船控制子系统利用求得的船与航线的横向偏移距离 r_{min} 进行位置纠偏。由于船本身有大惯性、长延后的特性,往往当船出现很大的航向偏差时LOS引导律才会做出更新航向指令。因此利用横向偏移量作为位置偏航的判断标准,给横向位置偏移量设置阈值 r_m ,当 $r_{\text{min}} > r_m$ 时,计算出 δ_r 进行纠偏。实际航向大小 ψ_{los} 及舵角更新量 δ_r 的具体计算公式如下:

$$[0025] \quad \psi_{\text{los}} = \arctan\left(\frac{y_{\text{los}}(t) - y(t)}{x_{\text{los}}(t) - x(t)}\right) \quad (5)$$

$$[0026] \quad \delta_r = \psi_d - \arctan\left(\frac{y_{\text{los}}(t) - y(t)}{x_{\text{los}}(t) - x(t)}\right) \quad (6)$$

[0027] 其中 $y_{\text{los}}(t) - y(t)$ 是每一时刻的横向偏移量,也可通过式(9)计算出。

[0028] 根据计算出需要调整的舵角 δ_r ,通过PID控制生成对应的匹配转速,完成航向调整。PID航向控制方程为:

$$[0029] \quad \delta_r = K_p \psi_e + K_d \psi_e' + K_i \int \psi_e dt \quad (7)$$

[0030] 式中 ψ_e 代表航向角误差。按照改进后的LOS制导律快速得到航向角偏差,并生成需

要调整的舵角 δ_r ，之后采用PID控制器快速响应，使航向调整到与规划直线一致；

[0031] 步骤六：低能耗、无驱动停船、采用提前停止制动，利用水阻力减速的方法减速过冲，降低能耗。具体步骤为：

[0032] 1) 进行停船实验，测试从最优能耗速度 V_{best} 无驱动减速到静止的距离 X_0 ；

[0033] 2) 将总长度为 X 的规划直线分为匀速段 X_v 和停船段 X_0 ，即

$$[0034] \quad X = X_v + X_0 \quad (8)$$

[0035] 3) 在匀速段进行PID速度控制，航速控制方程为：

$$[0036] \quad u_r = K_{pl}u_e + K_{dl}'e + K_i \int u_e dt \quad (9)$$

[0037] 将匀速段巡航时的目标航速为最低能耗速度 V_{best} ， u_r 为需要调整得速度大小， u_e 为实际巡航速度与目标偏差。

[0038] 4) 在停船段，即离终点距离还剩 X_0 时，传感器检测周围环境，无障碍情况下则进无驱动减速停船。

[0039] 考虑到无人船在运动到某一终点时会直接前往下一点，并不需要精准地停留在某一点处，故认为在终点一个船宽半径圆范围内均可。

[0040] 优选的，步骤一中无人船参数数据和任务水域环境数据包括但不限于船长、两个推进器的间距、迎风面积、风速风向、波浪高和流速流向。

[0041] 优选的，步骤二中利用模型求解最低能耗的行驶速度的具体步骤为：

[0042] 1) 获取船长、船宽、迎风面积等参数、利用CFD仿真得出无人船具体的水动力导数；

[0043] 2) 获取任务水域风速风向、波高波长、流速流向等环境参数；

[0044] 3) 将1)和2)中获取的数据带入公式(1)中得到无人船动力学模型；

[0045] 4) 设置一组符合实际任务需求的无人船巡航速度，无人船按照这些巡航速度分别行驶一段距离，按照公式(4)计算不同巡航速度行驶时的整体能量消耗；

[0046] 5) 求出能耗最低的一组，得到最低能耗速度 V_{best} 。

[0047] 优选的，步骤四中具体的可变半径的自适应LOS引导律算法步骤为从(5)到(9)：

[0048] 若一条期望路径起始点分别为 $B(bx, by)$ 、 $E(ex, ey)$ ，无人船位置为 $P(x, y)$ 。无人船现在位置偏离现在期望路径的最小距离 r_{min} 利用海伦公式可求得。 a 、 b 、 c 分别是三点围成三角形的边长， s 是三点围成的面积。

$$[0049] \quad a = \sqrt{(bx - ex)^2 + (by - ey)^2} \quad (10)$$

$$[0050] \quad b = \sqrt{(bx - x)^2 + (by - y)^2} \quad (11)$$

$$[0051] \quad c = \sqrt{(ex - x)^2 + (ey - y)^2} \quad (12)$$

$$[0052] \quad s = \sqrt{p * (p - a) * (p - b) * (p - c)} \quad (13)$$

$$[0053] \quad r_{min} = \frac{2 * s}{a} \quad (14)。$$

[0054] 本发明的技术效果和优点：以低能耗为目标，从能耗层面优化典型的巡航控制策略，在不改变船体结构、不增加大量传感器、也不影响船自身作业性能的前提下，给现有的电机驱动的无人船提供一种可行的低能耗巡航方案，提出可调半径视距圆LOS制导，一方面使得无人船能够快速获得航向偏差，另一方面也能利用横向偏移距离及时进行纠偏，共同降低因频繁调整船体带来的行船阻力，利用能耗模型求解出特定环境下能耗最低的巡航速

度,并以此作为无人船巡航速度,改进停船控制策略,约束高耗能的制动减速行为;

[0055] 通过对无人船进行三自由度的运动学和动力学建模,分析真实环境中的风浪流对无人船的影响,并根据无人船运动时的能耗计算公式建立无人船能耗模型。基于能耗模型能够得到特定环境下不同巡航速度的能量消耗情况,利用该模型对航向控制策略及速度控制策略进行优化。通过约束航行中高耗能的减速制动行为、因偏航引起的频繁调整船头行为,以及采用低能耗的巡航速度,共同实现了在有风浪环境下的低能耗巡航控制。

附图说明

[0056] 图1为本发明的系统图;

[0057] 图2为本发明的无人船控制子系统单元图;

[0058] 图3为本发明的LOS制导示意图;

[0059] 图4为本发明的流程图。

具体实施方式

[0060] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0061] 本发明提供了一种低能耗的无人船巡航方法,包括岸基子系统、无人船子系统,所述无人船子系统包括定位导航模块、激光雷达模块、电池模块、动力控制模块和工控机,所述工控机通过WiFi模块与地面站无线连接,具体步骤如下:

[0062] 步骤一:参数获取、包括无人船参数数据和任务水域环境数据;

[0063] 步骤二:模型带入、在不考虑无人船自身弱电部分的电量消耗外,无人船所消耗的能量可以理解为螺旋桨在克服环境阻力的情况下,驱动船匀速行驶一段距离所做的功。

$$[0064] \quad \text{则根据公式} \begin{cases} \tau_x = (m - X_u) \dot{u}_r + X_u u_r - (m - Y_v) u_r r - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_X S_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L \zeta^2 \cos \chi C_{X1}(\lambda) \\ \tau_y = (m - Y_v) \dot{v}_r + Y_v v_r - (m - X_u) u_r r - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_Y S_L - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L \zeta^2 \sin \chi C_{Y1}(\lambda) \\ \tau_N = (I - N_r) \dot{r} + N_r r + (m - Y_v) v_r u_r - (m - X_u) u_r v_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_Z S_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L \zeta^2 \sin \chi C_{N1}(\lambda) \end{cases} \quad (1)$$

[0065] 式中 m 为无人船重量, X_u 是纵荡方向的线性阻力系数, Y_v 是横荡方向的线性阻力系数, N_r 是艏摇方向的线性阻力系数, I_z 是关于 Oz 轴的惯性矩,推力包括船体推进器推力 τ_r 以及环境中的风推力 τ_{wind} 、浪推力 τ_{wave} 、流推力 τ_{current} 等对船体产生的载荷, C_X 、 C_Y 、 C_N 为无人船空气阻力系数、 S_r 为横向投影面积, S_L 为纵向投影面积, L 为船长度单位 m , V_{wind} 为相对风速,单位是 kn 、 ζ 为波浪的幅度, χ 为航向与波浪的夹角, $C_{X1}(\lambda)$ 为波浪的力与力矩的系数,可由经验公式求得 u 是速度矢量 V 在纵荡方向上的速度分量、 v 是速度矢量 V 在横荡方向上的速度分量、 r 是速度矢量 V 在艏摇方向上的速度分量;

[0066] 可以得到无人船在有干扰环境中匀速直线行驶的能量消耗模型:

$$[0067] \quad W = W_X + W_Y + W_N = \tau_X * x + \tau_Y * y + \tau_Z * \psi \quad (2)$$

[0068] 式中 τ_X 为纵荡方向上的推力、 τ_Y 为横荡方向上的推力、 τ_Z 为艏摇方向上的推力,可

由公式(3-13)、(3-14)直接求出。 x 为纵荡方向上运动的距离、 y 为横荡方向上运动的距离、 ψ 为艏摇方向上运动的转角,可由公式

$$[0069] \quad \tau_L = \tau_R = \rho_{\text{水}} n^2 D_p^4 k_T (J_P) \quad (3)$$

[0070] 直接求出。 x 、 y 、 ψ 分别代表无人船运动的距离及转角;

[0071] 式中 S_r 、 S_L 分别为横向和纵向投影面积, L 为船长单位 m , V_{wind} 为风速,单位是 kn 。

[0072] 在一个具体的水域中,我们首先可以利用特定设备获取水面风速、流速、浪高等环境等级,并计算出对船运动产生的干扰大小,再按照式(1)动力学模型,推导出无人船以某速度匀速行驶所需推力大小,最后通过式(4)能耗模型可以求解无人船在该速度下的单位能耗,在风浪环境中,随着船速越高,船所受阻力越大,维持特定速度匀速行驶便需要更大推力,会加大能耗,所以能够利用该模型求解出最低能耗行驶速度;

[0073] 步骤三:无人船当前信息获取、无人船控制子系统得到的岸基子系统发布的规划路径、规划路径具体为是由一系列转化成直角坐标系行驶的点坐标组成,这些点依次连接形成多条直线路径,每条直线都能计算出与正北方向的夹角,作为船期望航向角 ψ_d ;

[0074] 步骤四:偏差计算、通过可变半径的自适应LOS引导律,也就是将视距圆半径拓展为 n 倍船长加上可变的横向最小偏移距离,具体如下:

[0075] 1) 计算当前无人位置与期望路径之间的最小横向偏离距离 r_{\min} ;

[0076] 2) 以 $R = r_{\min} + nL$ 为半径作视距圆;

[0077] 3) 计此时的视线航向角 ψ_{los} ;

[0078] 4) 求出期望航向调整量 δ_r 。

[0079] 按照改进后的LOS算法,可以帮助无人船在有较大航向偏差时也很快求得航向角偏差大小;

[0080] 步骤五:偏差调整、无人船控制子系统利用求得的船与航线的横向偏移距离 r_{\min} 进行位置纠偏。由于船本身有大惯性、长延后的特性,往往当船出现很大的航向偏差时LOS引导律才会做出更新航向指令。因此利用横向偏移量作为位置偏航的判断标准,给横向位置偏移量设置阈值 r_m ,当 $r_{\min} > r_m$ 时,计算出 δ_r 进行纠偏。实际航向大小 ψ_{los} 及舵角更新量 δ_r 的具体计算公式如下:

$$[0081] \quad \psi_{\text{los}} = \arctan\left(\frac{y_{\text{los}}(t) - y(t)}{x_{\text{los}}(t) - x(t)}\right) \quad (5)$$

$$[0082] \quad \delta_r = \psi_d - \arctan\left(\frac{y_{\text{los}}(t) - y(t)}{x_{\text{los}}(t) - x(t)}\right) \quad (6)$$

[0083] 其中 $y_{\text{los}}(t) - y(t)$ 是每一时刻的横向偏移量,也可通过式(9)计算出。

[0084] 根据计算出需要调整的舵角 δ_r ,通过PID控制生成对应的匹配转速,完成航向调整。PID航向控制方程为:

$$[0085] \quad \delta_r = K_p \psi_e + K_d \psi_e' + K_i \int \psi_e dt \quad (7)$$

[0086] 式中 ψ_e 代表航向角误差。按照改进后的LOS制导律快速得到航向角偏差,并生成需要调整的舵角 δ_r ,之后采用PID控制器快速响应,使航向调整到与规划直线一致;

[0087] 步骤六:低能耗、无驱动停船、采用提前停止制动,利用水阻力减速的方法减速过冲,降低能耗。具体步骤为:

[0088] 1) 进行停船实验,测试从最优能耗速度 V_{best} 无驱动减速到静止的距离 X_0 ;

[0089] 2) 将总长度为 X 的规划直线分为匀速段 X_V 和停船段 X_0 ,即

$$[0090] \quad X = X_V + X_0 \quad (8)$$

[0091] 3) 在匀速段进行PID速度控制,航速控制方程为:

$$[0092] \quad u_r = K_{p1}u_e + K_{d1}u'_e + K_{i1}\int u_e dt \quad (9)$$

[0093] 将匀速段巡航时的目标航速为最低能耗速度 V_{best} , u_r 为需要调整得速度大小, u_e 为实际巡航速度与目标偏差。

[0094] 4) 在停船段,即离终点距离还剩 X_0 时,传感器检测周围环境,无障碍情况下则进无驱动减速停船。

[0095] 考虑到无人船在运动到某一终点时会直接前往下一点,并不需要精准地停留在某一点处,故认为在终点一个船宽半径圆范围内均可。

[0096] 具体的,步骤一中无人船参数数据和任务水域环境数据包括但不限于船长、两个推进器的间距、迎风面积、风速风向、波浪高和流速流向。

[0097] 具体的,步骤二中利用模型求解最低能耗的行驶速度的具体步骤为:

[0098] 1) 获取船长、船宽、迎风面积等参数、利用CFD仿真得出无人船具体的水动力导数;

[0099] 2) 获取任务水域风速风向、波高波长、流速流向等环境参数;

[0100] 3) 将1)和2)中获取的数据带入公式(1)中得到无人船动力学模型;

[0101] 4) 设置一组符合实际任务需求的无人船巡航速度,无人船按照这些巡航速度分别行驶一段距离,按照公式(4)计算不同巡航速度行驶时的整体能量消耗;

[0102] 5) 求出能耗最低的一组,得到最低能耗速度 V_{best} 。

[0103] 具体的,步骤四中具体的可变半径的自适应LOS引导律算法步骤为从(5)到(9):

[0104] 若一条期望路径起始点分别为 $B(bx, by)$ 、 $E(ex, ey)$,无人船位置为 $P(x, y)$ 。无人船现在位置偏离现在期望路径的最小距离 r_{min} 利用海伦公式可求得。 a 、 b 、 c 分别是三点围成三角形的边长, s 是三点围成的面积。

$$[0105] \quad a = \sqrt{(bx - ex)^2 + (by - ey)^2} \quad (10)$$

$$[0106] \quad b = \sqrt{(bx - x)^2 + (by - y)^2} \quad (11)$$

$$[0107] \quad c = \sqrt{(ex - x)^2 + (ey - y)^2} \quad (12)$$

$$[0108] \quad s = \sqrt{p * (p - a) * (p - b) * (p - c)} \quad (13)$$

$$[0109] \quad r_{min} = \frac{2 * s}{a} \quad (14)。$$

[0110] 工作原理:首先无人船自身的运动姿态包括平动和转动两种,具体表现为六个自由度的运动,即纵荡、横荡、垂荡以及纵摇、横摇、艏摇,为降低船舶控制的复杂性,通常只考虑平动状态,即对船的纵荡、横荡、艏摇三个自由度进行建模。

[0111] 所示描述无人船三维空间运动的符号均参照国际拖曳水池会议推荐来定义的,表1总结了描述无人船运动的符号定义:

[0112] 表1无人船符号定义

自由度	运动	力或力矩	线(角)速度	位置(欧拉角)
1	纵荡	X	u	x
2	横荡	Y	v	y
3	垂荡	Z	w	z
4	横摇	K	p	φ
5	纵摇	M	q	θ
6	首摇	N	r	ψ

[0114] 对六自由度运动进行简化,引入如下定义:

$$[0115] \quad P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} \tag{15}$$

[0116] 其中P为位置和欧拉角矢量,V为速度矢量,F为力和力矩矢量,由此可得到无人船三自由度的运动学方程为:

$$[0117] \quad \dot{P} = RV \tag{16}$$

$$[0118] \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \tag{17}$$

[0119] 而无人船运动中水动力及力矩是不可忽视的,Fossen在总结已有的整体型和分离型模型的基础上,提出了一种统一的水动力模型,即一阶K-T模型,将船的受力分为刚体力、流体动力、推动力和干扰力,该模型水动力方程可表示为:

$$[0120] \quad M\dot{V} + C(V)V + D(V)V = \tau \tag{18}$$

[0121] 该模型是描述船舶运动控制的基础,使无人船能够精准地控制其位置、速度和姿态,后面将在此基础上计算无人船的能耗,其中,M为质量矩阵,C(v)为科里奥利及向心力矩阵,D(v)为阻尼矩阵用来描述船受阻力情况,V是无人船速度矢量,\tau为推动器推力与环境共同的作用力,这些系数均有其计算公式,分别为:

$$[0122] \quad M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_u & & \\ & m - X_v & \\ & & I_z - N_r \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$[0123] \quad C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ -c_{13} & -c_{23} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & -m_{22}v \\ & & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$[0124] \quad D(v) = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & & \\ & Y_v & \\ & & N_r \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$[0125] \quad \tau = \tau_r + \tau_{wind} + \tau_{wave} + \tau_{current} \quad (22)$$

[0126] 上式中, m 为无人船重量, X_u 是纵荡方向的线性阻力系数, Y_v 是横荡方向的线性阻力系数, N_r 是艏摇方向的线性阻力系数, I_z 是关于 Oz 轴的惯性矩, 推力包括船体推进器推力 τ_r 以及环境中的风推力 τ_{wind} 、浪推力 τ_{wave} 、流推力 $\tau_{current}$ 等对船体产生的载荷。总体而言, 对于一个特定的无人船船体, 该动力学模型中的 M 、 $C(v)$ 、 $D(v)$ 是确定的, 可以利用CFD仿真或者船模的水池拖拽实验得出。自身推力, 环境中的风、浪、流推力下面依次列出。

[0127] 无人船的实际工作环境通常不会是平静地水面, 波浪及洋流、风等都会对无人船的运动产生影响, 增加船航行阻力, 影响无人船实际续航里程。为了使建立的能耗模型更贴近真实场景, 特别对常见的海风、波浪、洋流环境干扰进行建模, 直接引入比较经典的模型进行环境干扰的分析。

[0128] 风的干扰在水域中是最普遍的, 在国家船舶检验局风速的测定标准下, 相对风速对无人船的推力模型可表示如下:

$$[0129] \quad \tau_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{空气} V_{wind}^2 \begin{bmatrix} C_x S_r \\ C_y S_L \\ C_N S_L L \end{bmatrix} \quad (23)$$

[0130] 式中 C_x 、 C_y 、 C_N 为无人船空气阻力系数, 与船体形状、面积、光滑度有关, 一般在0.3-0.6之间。 S_r 为横向投影面积, S_L 为纵向投影面积, L 为船长度单位 m , V_{wind} 为相对风速, 单位是 kn 。

[0131] 无人船在波浪环境中行驶, 会受到干扰力作用, 影响航向及航迹, 采用国际船模水池会议推荐波浪载荷模型, 根据波浪对船体的作用力, 可以得到波浪对无人船的作用力公式。即:

$$[0132] \quad \tau_{wave} = \frac{1}{2} \rho_{水} g L \zeta^2 \begin{bmatrix} \cos \chi C_{x1}(\lambda) \\ \sin \chi C_{y1}(\lambda) \\ L \sin \chi C_{M1}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (24)$$

[0133] 式中 ζ 为波浪的幅度, χ 为航向与波浪的夹角, $C_{x1}(\lambda)$ 为波浪的力与力矩的系数, 可由经验公式求得。

[0134] 洋流本质上是水的移动, 可以将其速度叠加到无人船的航行速度上, 在目前的水面无人船操纵建模仿真中, 通常采用了定常均匀流的假设, 即水域内各片区的流速大小和方向均是相同的。洋流对无人船运动的主要影响体现在相对运动上, 可用无人船与洋流的相对速度代替, 洋流模型可表示为:

$$[0135] \quad \tau_{current} = C(V_r) V_r - C(V) V + D(V_r) V_r - D(V) V \quad (25)$$

[0136] V 是无人船速度矢量, V_r 是洋流的相对速度矢量, 将上述三种环境干扰加入统一水动力模型可以得到纵荡、横荡、艏摇三自由度无人船的动力学模型, 即将公式3-8、3-9、3-10、3-11代入公式3-4中并整理可得:

$$[0137] \begin{cases} \tau_x = (m - X_u) \dot{u} + X_u u - (m - Y_v) \dot{v} - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_X S_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L^2 \cos \chi C_{X1}(\lambda) \\ \tau_y = (m - Y_v) \dot{v} + Y_v v - (m - X_u) \dot{u} - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_Y S_L - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L^2 \sin \chi C_{Y1}(\lambda) \\ \tau_z = (I - N_r) \dot{r} + N_r r + (m - Y_v) \dot{u} - (m - X_u) \dot{v} - \frac{1}{2} \rho_{\text{空气}} V_{\text{wind}}^2 C_Z S_r - \frac{1}{2} \rho_{\text{水}} g L^2 \sin \chi C_{N1}(\lambda) \end{cases} \quad (1)$$

[0138] 用无人船统一水动力模型,可以表述无人船在水域环境航行时的力与力矩。我们假设水域环境中的干扰在一段时间内是稳定的,则利用水文测绘相关设备可以获取任务水域风速风向、波高波长、流速流向等环境参数。至此,船自身产生的推力是动力学模型中唯一的变量,不同的推力对应不同的船运动状态;根据此模型,后续可利用CFD仿真或进行船模水池拖拽实验得出具体的水动力导数。所研究的无人船推进器由尾部两个对称放置的固定角度螺旋桨组成,依赖这两个推进器给无人船提供推力,完成前进、转向等运动。推进器的推力矩阵可以表示为:

$$[0139] \tau_r = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_L + \tau_R \\ 0 \\ (\tau_L - \tau_R) * \frac{B}{2} \end{bmatrix} \quad (26)$$

[0140] 如公式(3)所示:

$$[0141] \tau_L = \tau_R = \rho_{\text{水}} n^2 D_p^4 k_T (J_P) \quad (3)$$

[0142] 其中, n 为转速、 D_p 为螺旋桨直径、 $k_T (J_P)$ 为推力系数,对于特定环境,螺旋桨推力整体可求。根据(3)推力公式可以看出,电机转越快整体推力越大,无人船船速度也会越快。根据(1)建立的无人船动力学模型可以看出,在环境干扰不变的情况下,船自身推力变化,船体阻力随之变化。船速度过快超过一定范围时,环境所带来的阻力会指数型增长,使得单位时间内能耗增加,下面将据此建立无人船能耗模型,分析行驶速度和环境干扰对能耗的影响,找到最低能耗对应的船速。

[0143] 根据前两节建立的运动学模型以及动力学模型,我们可以求出船在推力和风浪干扰力作用下的运动状态,并对无人船在匀速直线运动时的耗能进行计算。在不考虑无人船自身弱电部分的电量消耗外,无人船所消耗的能量可以理解为螺旋桨在克服环境阻力的情况下,驱动船匀速行驶一段距离所做的功。

[0144] 则根据公式(1)可以得到无人船在有干扰环境中匀速直线行驶的能量消耗模型:

$$[0145] W = W_X + W_Y + W_N = \tau_X * x + \tau_Y * y + \tau_\psi \quad (4)$$

[0146] 式中 τ_X 为纵荡方向上的推力、 τ_Y 为横荡方向上的推力、 τ_ψ 为艏摇方向上的推力,可由公式(26)、(3)直接求出。 x 为纵荡方向上运动的距离、 y 为横荡方向上运动的距离、 ψ 为艏摇方向上运动的转角,可由公式

$$[0147] \tau_L = \tau_R = \rho_{\text{水}} n^2 D_p^4 k_T (J_P) \quad (3)$$

$$[0148] W = W_X + W_Y + W_N = \tau_X * x + \tau_Y * y + \tau_\psi * \psi \quad (4)$$

[0149] 直接求出, x 、 y 、 ψ 分别代表无人船运动的距离及转角;

[0150] 在一个具体的水域中,我们首先可以利用特定设备获取水面风速、流速、浪高等环境等级,并计算出对船运动产生的干扰大小,再按照式(1)动力学模型,推导出无人船以某速度匀速行驶所需推力大小,最后通过式(4)能耗模型可以求解无人船在该速度下的单位能耗。在风浪环境中,随着船速越高,船所受阻力越大,维持特定速度匀速行驶便需要更大推力,会加大能耗,所以能够利用该模型求解出最低能耗行驶速度。

[0151] 利用模型求解最低能耗的行驶速度的具体步骤为:

[0152] 1) 获取船长、船宽、迎风面积等参数、利用CFD仿真得出无人船具体的水动力导数;

[0153] 2) 获取任务水域风速风向、波高波长、流速流向等环境参数;

[0154] 3) 将1)和2)中获取的数据带入公式(1)中得到无人船动力学模型;

[0155] 4) 设置一组符合实际任务需求的无人船巡航速度,无人船按照这些巡航速度分别行驶一段距离具体利用动力模块自动调节螺旋桨转速使船保持匀速,按照公式(4)计算不同巡航速度行驶时的整体能量消耗;

[0156] 5) 求出能耗最低的一组,得到最低能耗速度 V_{best} 。

[0157] 船舶航行时对能耗影响程度最大的两个因素分别是风浪环境中的航向和航速。由于实际水域充满风浪,不同的航向有不同的迎风面积,调整合适的船头朝向有助于减小航行时的阻力,帮助降低能耗。在不同海况下,保持同一船速的螺旋桨转速截然不同,同样越高的航速可能需要耗费更多的能源,通过能耗模型可以找到一个能耗最低的巡航速。

[0158] 无人船在自动巡航的时候通常分为两步,首先是调整航向,根据LOS引导律调整船头朝向以及偏航纠偏操作,使航向快速与期望航线一致;接着执行速度控制,使得无人船到达终点完成巡航。

[0159] 因此,分别在航向控制策略上和航速控制策略上进行节能方面的优化,本方法的突出之处在于:

[0160] 1) 提出可调半径视距圆LOS制导,一方面使得无人船能够快速获得航向偏差,另一方面也能利用横向偏移距离及时进行纠偏,共同降低因频繁调整船体带来的行船阻力。

[0161] 2) 利用能耗模型求解出特定环境下能耗最低的巡航速度,并以此作为无人船巡航速度。

[0162] 3) 改进停船控制策略,约束高耗能的制动减速行为。

[0163] 无人船控制子系统得到的岸基子系统发布的规划路径是由一系列转化成直角坐标系行驶的点坐标组成,这些点依次连接形成多条直线路径,每条直线都能计算出与正北方向的夹角,作为船期望航向角 ψ_d 。

[0164] 传统的LOS制导律以船当前位置为圆心,以数倍船长的固定长度为半径画圆,圆与直线交点的处是船航行的可视距离。通过交点坐标与船位置坐标可以求得船视线航向角 ψ_{los} ,即当前航向,通过令无人船的航向角保持在一个视线角内,船舶可以自主地收敛到期望的直线路径上。

[0165] 但当目标点较远时,实际环境中的风浪等干扰会导致与规划路径有较大的偏差,当航迹偏差超过固定半径后,将与规划直线没有交点,引导策略将会失效。

[0166] 针对这个问题,提出可变半径的自适应LOS引导律,将视距圆半径拓展为 n 倍船长加上可变的横向最小偏移距离,具体如下:

[0167] 1) 计算当前无人位置与期望路径之间的最小横向偏离距离 r_{\min} ;

[0168] 2) 以 $R=r_{\min}+nL$ 为半径作视距圆;

[0169] 3) 计此时的视线航向角 ψ_{los} ;

[0170] 4) 求出期望航向调整量 δ_r 。

[0171] 算法1)的具体步骤为从(4-1)到(4-5):

[0172] 若一条期望路径起始点分别为 $B(bx, by)$ 、 $E(ex, ey)$, 无人船位置为 $P(x, y)$ 。无人船现在位置偏离现在期望路径的最小距离 r_{\min} 利用海伦公式可求得。 a 、 b 、 c 分别是三点围成三角形的边长, s 是三点围成的面积。

$$[0173] \quad a = \sqrt{(bx - ex)^2 + (by - ey)^2} \quad (10)$$

$$[0174] \quad b = \sqrt{(bx - x)^2 + (by - y)^2} \quad (11)$$

$$[0175] \quad c = \sqrt{(ex - x)^2 + (ey - y)^2} \quad (12)$$

$$[0176] \quad s = \sqrt{p * (p - a) * (p - b) * (p - c)} \quad (13)$$

$$[0177] \quad r_{\min} = \frac{2*s}{a} \quad (14)$$

[0178] 按照改进后的LOS算法,可以帮助无人船在有较大航向偏差时也很快求得航向角偏差大小,控制两驱动螺旋桨以不同转速完航向调整。

[0179] 同时,无人船控制子系统利用求得的船与航线的横向偏移距离 r_{\min} 进行位置纠偏。由于船本身有大惯性、长延后的特性,往往当船出现很大的航向偏差时LOS引导律才会做出更新航向指令。因此利用横向偏移量作为位置偏航的判断标准,给横向位置偏移量设置阈值 r_m ,当 $r_{\min} > r_m$ 时,计算出 δ_r 进行纠偏。实际航向大小 ψ_{los} 及舵角更新量 δ_r 的具体计算公式如下:

$$[0180] \quad \psi_{\text{los}} = \arctan\left(\frac{y_{\text{los}}(t) - y(t)}{x_{\text{los}}(t) - x(t)}\right) \quad (5)$$

$$[0181] \quad \delta_r = \psi_d - \arctan\left(\frac{y_{\text{los}}(t) - y(t)}{x_{\text{los}}(t) - x(t)}\right) \quad (6)$$

[0182] 其中 $y_{\text{los}}(t) - y(t)$ 是每一时刻的横向偏移量,也可通过式(4-5)计算出。

[0183] 根据计算出需要调整的舵角 δ_r ,通过PID控制生成对应的匹配转速,完成航向调整。PID航向控制方程为:

$$[0184] \quad \delta_r = K_p \psi_e + K_d \psi_e' + K_i \int \psi_e dt \quad (7)$$

[0185] 式中 ψ_e 代表航向角误差。按照改进后的LOS制导律快速得到航向角偏差,并生成需要调整的舵角 δ_r ,之后采用PID控制器快速响应,使航向调整到与规划直线一致。

[0186] 在风浪环境中,若航行方向平行于风向,则船受阻力最小,航向改变会加大迎风面积,增加行船阻力,进而增加行船能耗。因此及时对偏航情况进行纠正,使无人船保持航向稳定,有助于减少风阻,延长续航里程。

[0187] 传统的速度控制策略通常将纵向速度设为固定值,而且很少考虑船自身停船能力,导致当到达一条直线终点切换到下一条直线上时会出现较大的“过冲”,驶出终点范围后才进行转向切换航线,由此也造成了能耗的浪费。此外,电机突然反转也会产生磨损、加大电池消耗。针对这个问题,采用提前停止制动,利用水阻力减速的方法减速过冲,降低能

耗。具体步骤为：

[0188] 1) 进行停船实验,测试从最优能耗速度 V_{best} 无驱动减速到静止的距离 X_0 ;

[0189] 2) 将总长度为 X 的规划直线分为匀速段 X_v 和停船段 X_0 ,即

$$[0190] \quad X = X_v + X_0 \quad (8)$$

[0191] 3) 在匀速段进行PID速度控制,航速控制方程为;

$$[0192] \quad u_r = K_{pl}u_e + K_{dl}u'_e + K_{i} \int u_e dt \quad (9)$$

[0193] 将匀速段巡航时的目标航速为最低能耗速度 V_{best} , u_r 为需要调整得速度大小, u_e 为实际巡航速度与目标偏差。

[0194] 4) 在停船段,即离终点距离还剩 X_0 时,传感器检测周围环境,无障碍情况下则进无驱动减速停船。

[0195] 考虑到无人船在运动到某一终点时会直接前往下一点,并不需要精准地停留在某一点处,故认为在终点一个船宽半径圆范围内均可;

[0196] 综上所述整体本发明以低能耗为目标,从能耗层面优化典型的巡航控制策略,在不改变船体结构、不增加大量传感器、也不影响船自身作业性能的前提下,给现有的电机驱动的无人船提供一种可行的低能耗巡航方案,提出可调半径视距圆LOS制导,一方面使得无人船能够快速获得航向偏差,另一方面也能利用横向偏移距离及时进行纠偏,共同降低因频繁调整船体带来的行船阻力,利用能耗模型求解出特定环境下能耗最低的巡航速度,并以此作为无人船巡航速度,改进停船控制策略,约束高耗能的制动减速行为;

[0197] 通过对无人船进行三自由度的运动学和动力学建模,分析真实环境中的风浪流对无人船的影响,并根据无人船运动时的能耗计算公式建立无人船能耗模型。基于能耗模型能够得到特定环境下不同巡航速度的能量消耗情况,利用该模型对航向控制策略及速度控制策略进行优化。通过约束航行中高耗能的减速制动行为、因偏航引起的频繁调整船头行为,以及采用低能耗的巡航速度,共同实现了在有风浪环境下的低能耗巡航控制;

[0198] 该方法包含两个层面的优化措施:在航向控制策略的优化中,提出可调半径视距圆LOS制导,一方面使得无人船能够快速获得航向偏差,另一方面也能利用横向偏移距离及时进行纠偏,共同降低因频繁调整船体带来的行船阻力。在航速控制策略的优化中,将规划直线分为匀速巡航段和减速停船段。利用能耗模型求解出特定环境下能耗最低的巡航速度,并以此作为无人船巡航速度。此外,在减速停船段约束高耗能的减速制动行为,在周围无障碍的前提下进行无驱动减速,减少过冲现象。通过在航向控制和航速控制策略两个方面进行优化,共同实现无人船的低能耗巡航。

[0199] 最后应说明的是:以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,对于本领域的技术人员来说,其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

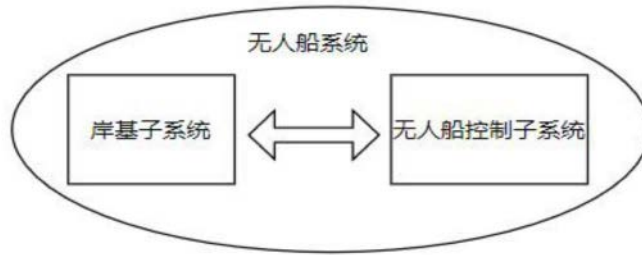


图1

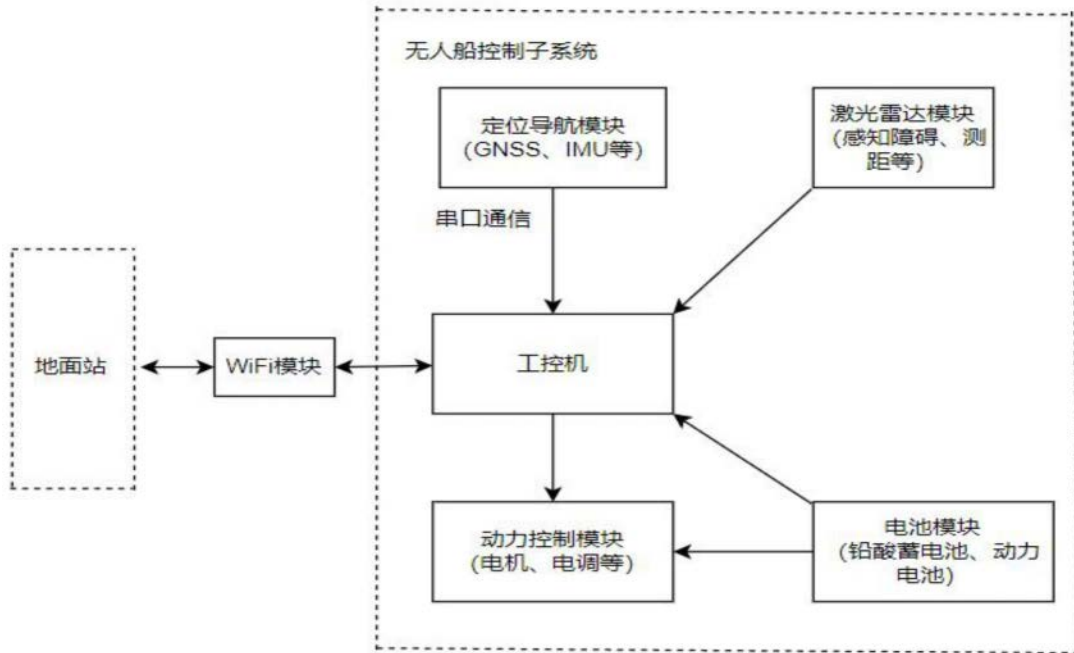


图2

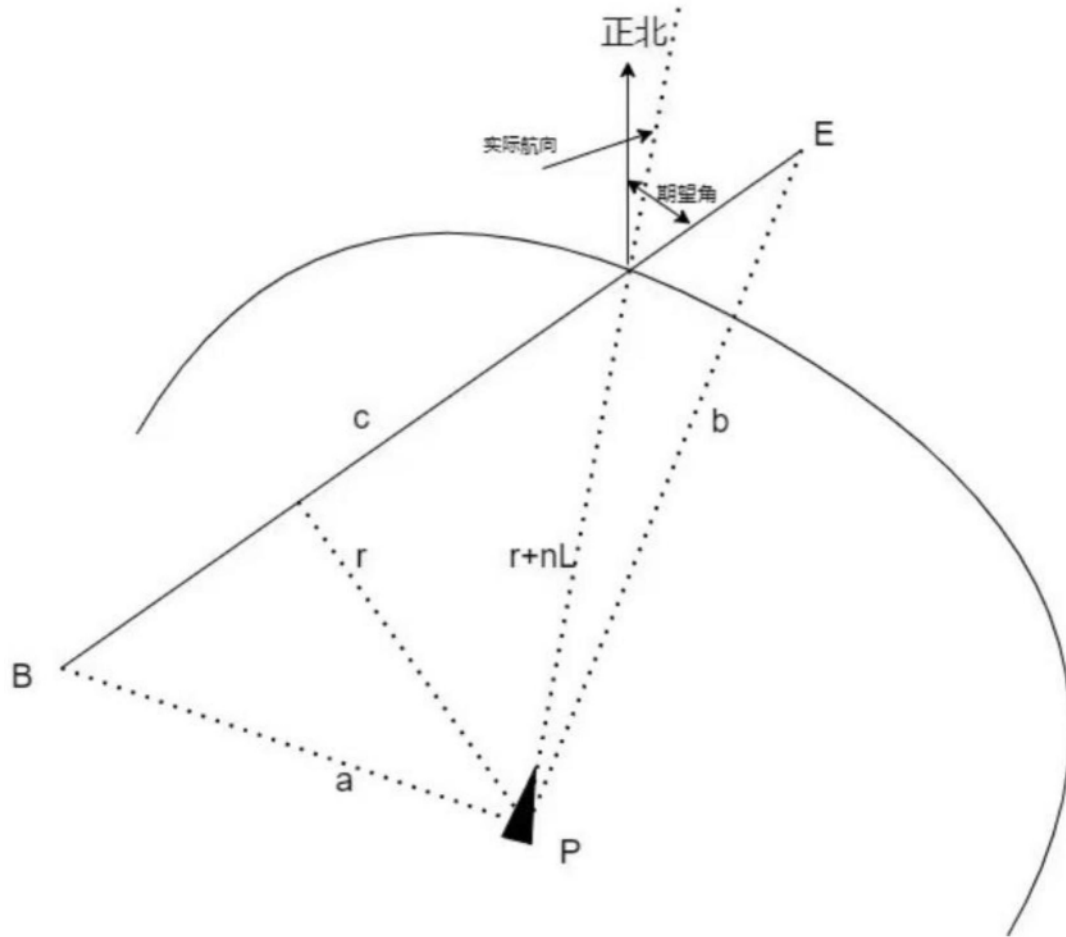


图3

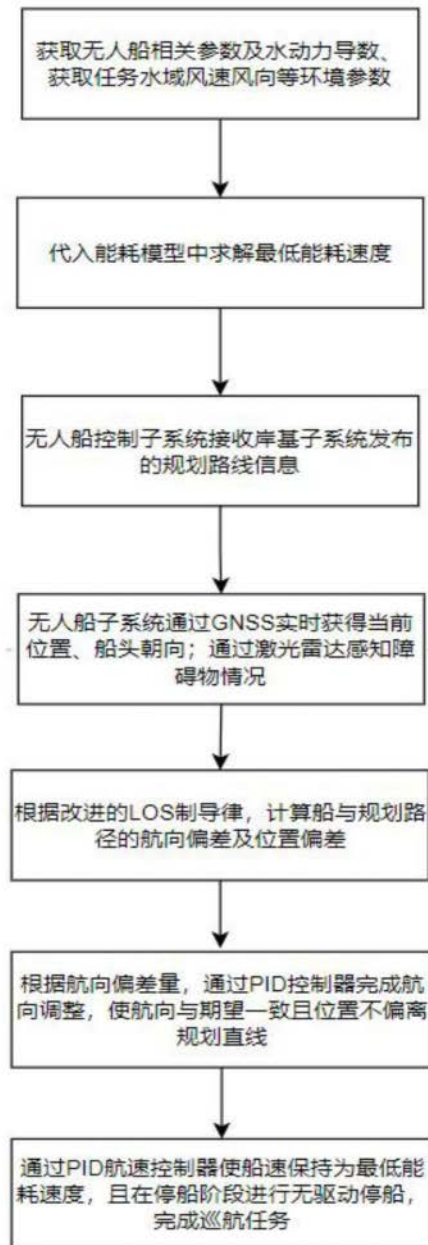


图4