



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115951581 A

(43) 申请公布日 2023.04.11

(21) 申请号 202310018545.4

(22) 申请日 2023.01.06

(71) 申请人 江苏科技大学

地址 212100 江苏省镇江市丹徒区长晖路  
666号

(72) 发明人 戴晓强 李昂 黄鑫 曾庆军  
王莹

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限  
公司 32200

专利代理师 徐澍

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

权利要求书2页 说明书11页 附图3页

### (54) 发明名称

一种基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪  
控制方法

### (57) 摘要

本发明公开了一种基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法,包括如下步骤:步骤1:构建欠驱动水面高速无人艇的基础模型和坐标系;步骤2:在制导方法中,结合当前船速通过动态视线法对LOS前视园半径进行优化,在优化后的LOS前视园半径基础上结合横侧偏差率获取期望航向角;步骤3:在EMPC控制器离线状态中,通过白鹭群优化算法,对离线状态下的各个状态分区进行最优控制律求解,得到各个状态分区及对应分区上的线性控制律;步骤4:在EMPC控制器在线状态中,通过可达分区查找法查找步骤3中获得的对应分区上的线性控制律,控制无人艇运行跟踪上最后一个期望路径点,完成跟踪。本发明提升了控制精度,减小了横侧偏差,提高了制导参数的自适应能力。

1. 一种基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤1:构建欠驱动水面高速无人艇的动力学模型、运动学模型、固定坐标系、无人艇载体坐标系;

步骤2:在制导方法中,结合当前船速通过动态视线法对LOS前视园半径进行优化,在优化后的LOS前视园半径基础上结合横侧偏差率获取期望航向角,并根据实际航向角获得偏角;

步骤3:在控制方法的EMPC控制器离线状态中,通过白鹭群优化算法,对离线状态下的各个状态分区进行最优控制律求解,得到各个状态分区及对应分区上的线性控制律;

步骤4:在控制方法的EMPC控制器在线状态中,通过可达分区查找法查找步骤3中获得的对应分区上的线性控制律,用查询到的线性控制率控制无人艇运行,直至无人艇跟踪上最后一个期望路径点,完成跟踪控制过程。

2. 如权利要求1所述的基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法,其特征在于,所述步骤1中,所述欠驱动水面高速无人艇的动力学模型中的干扰模型包括:风干扰力模型、浪干扰力模型、流干扰力模型,具体公式为:

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{1}{m_{11}}\tau_x + \frac{1}{m_{11}}\tau_{wX} \\ \dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{d_{22}}{m_{22}}v + \frac{1}{m_{22}}\tau_{wY} \\ \dot{r} = \frac{m_{11}-m_{22}}{m_{33}}uv - \frac{d_{33}}{m_{33}}r + \frac{1}{m_{33}}\tau_N + \frac{1}{m_{33}}\tau_{wN} \end{cases}$$

式中,  $[u, v, r]^T$  表示无人艇的速度量,这里用  $m_{ii}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 表示为无人艇惯性水动力为USV在加速过程中受到周围水流惯性产生的力,具体表示为

$m_{11} = m - X_{\dot{u}}$ ,  $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$ ,  $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$ ;  $d_{11} = -X_u$ ,  $d_{22} = -Y_v$ ,  $d_{33} = -N_r$  为水动力阻尼系数;  $\tau_x$  为纵向推力,  $\tau_N$  为回转力,  $\tau_{wX}$  为纵向干扰力,  $\tau_{wY}$  为横向干扰力,  $\tau_{wN}$  为回转干扰力。

3. 如权利要求2所述的基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法,其特征在于,所述风干扰力模型为:

$$\begin{aligned} \tau_{wX}^{wind} &= \frac{1}{2} C_X(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_T \\ \tau_{wY}^{wind} &= \frac{1}{2} C_Y(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L \\ \tau_{wN}^{wind} &= \frac{1}{2} C_N(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L L \end{aligned}$$

式中,  $V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$  为相对风速,  $\gamma_R = \tan^{-1}(u_R/v_R)$  为相对速度,  $C_X$ 、 $C_Y$  为推力系数;  $C_N$  为力矩系数;  $\rho_w$  为空气密度;  $A_T$ 、 $A_L$  分别为横向纵向投影面积;  $L$  为无人艇总长度;  $V_R$  为风速。

4. 如权利要求2所述的基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法,其特征在于,所

述浪干扰力模型为:

$$\tau_w^{\text{wave}} = \frac{1}{2} \rho L \begin{bmatrix} \cos \chi \sum_{i=1}^m C_{Xb}(\lambda_i) \zeta_i^2(t) \\ \sin \chi \sum_{i=1}^m C_{Yb}(\lambda_i) \zeta_i^2(t) \\ \sin \chi \sum_{i=1}^m C_{Nb}(\lambda_i) \zeta_i^2(t) \end{bmatrix}$$

式中,  $\rho$ 为海水密度,  $\chi$ 为遭遇角,  $m$ 为海浪谱频率的分割数量,  $X_b, Y_b, N_b$ 为试验系数,

$\zeta_i(t) = \sum_{i=1}^m \sqrt{2S_\zeta(\omega) \Delta\omega} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i)$ 为海浪的波面方程,  $\lambda_i = 2\pi \frac{\omega_i^2}{g}$ 为波长。

5. 如权利要求2所述的基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法, 其特征在于, 所述流干扰力模型为:

$$\tau_w^{\text{flow}} = F_{Hr} - F_H$$

式中,  $F_{Hr} = -C(v_r) v_r - D(v_r) v_r$ 为海流干扰后的流体作用力,  $v_r = [u+u_c, v+v_c, r]^T$ 为水面无人艇运动对水流的相对速度的投影;  $F_H = -C(v) v - D(v) v$ 为流体相对运动而产生的作用力。

6. 如权利要求1所述的基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法, 其特征在于, 所述步骤2中, 通过当前船速对LOS前视园半径进行优化的公式如下:

$$R_k = e_L + e^{-\lambda U} k_L$$

式中,  $R_k$ 为LOS前视圆半径;  $e_L$ 为水面无人艇当前时刻距离期望航线的垂向距离;  $U$ 为当前航速;

在优化后的LOS前视园半径基础上结合横侧偏差率获取期望航向角的具体公式如下:

$$\varphi_{LOS} = \alpha \tan\left(\frac{y_{LOS} - y_t}{x_{LOS} - x_t}\right) + k_{LOS} \varphi_Y$$

式中,  $k_{LOS} = \frac{2}{1 + e^{(-k_p e_t d_t - k_d \dot{e}_t d_t)}} - 1$ ,  $\dot{e}_t = u * \cos(\varphi - \varphi_p) + v * \sin(\varphi - \varphi_p)$ ,

$$\varphi_Y = \left| \arctan\left(\frac{y_k - y_t}{x_k - x_t}\right) - \arctan\left(\frac{y_{LOS} - y_t}{x_{LOS} - x_t}\right) \right|, \quad e_t = \sqrt{(y_k - y_t)^2 + (x_k - x_t)^2} - R_k.$$

7. 如权利要求1所述的基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法, 其特征在于, 所述白鹭群优化算法中的判别条件为:

$$X_i = \begin{cases} X_{s,i}|_{c_i} & \text{if } y_{s,i}|_{c_i} < y_i \text{ or } r < 0.33 \\ X_i & \text{else} \end{cases}$$

## 一种基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及高速无人艇控制技术领域,具体涉及一种基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法。

### 背景技术

[0002] 路径跟踪技术作为无人艇安全、自主、精准和快速完成各项任务的重要保障,其控制目标是设计控制器使得无人艇精准的跟踪并保持在跟踪空间中一条独立于时间的期望路径上。欠驱动无人艇高速航行过程中存在非线性、模型不确定性、外界干扰时变性以及在实际工程应用中参数自适应性、控制器鲁棒性、跟踪效果稳定性和航行安全性等问题,因此设计自适应能力强、鲁棒性高、抗干扰能力强、实时性高的路径跟踪控制器,对高速无人艇任务适应能力、调试安全性将发挥重要作用。

[0003] 目前主要的控制方法有反步法、滑模控制、动态面控制、干扰观测器(Disturbance Observers, DO)、神经网络、自适应控制和模型预测控制等。但这些方法在实际应用中各有缺点,针对这些缺点,国内外研究人员提出了各种改进方案。如Sun Z等人针对积分滑模在船舶跟踪控制时会出现不可消除项 $\psi_c r_c$ ,进而影响系统稳定性的问题,提出了实际比例积分滑模的方法,在设计滑模面时额外考虑艏向角和位置跟踪误差,有效解决了这一问题。陈志娟针对欠驱动无人艇航行过程中舵机约束以及复杂海况干扰的影响,结合模型预测控制设计控制器解决舵角饱和问题,并利用径向基神经网络的训练逼近特点,通过对船舶历史信息的训练实现对外界干扰的逼近,补偿MPC,提高系统的鲁棒性。杨田田针对水面无人船的航迹控制问题,将LOS视线制导算法与预测函数控制相结合,提出了一种基于LOS+PFC的航迹控制系统,并采用模拟退火算法对预测控制算法进行最优控制序列求解,进一步提高航迹控制的准确性和实时性。

[0004] 现有最接近本文方法为陈天元硕士在基于显示模型预测控制的无人船航迹控制方法研究中提出的利用显示模型预测控制“离线计算,在线综合”的特点来解决无人船实际航行中的实时性要求的问题。该方法首先利用视线制导法(LOS)将无人船航迹控制简化为艏向控制,再将显示模型预测控制算法应用于无人船艏向控制问题中,在保证控制精度的同时,提高了计算速度,在一定程度上解决了高速航行时的实时性问题。

[0005] 上述最接近本文的技术方案,虽然在一定程度上减少了计算时间,但在实际控制时损失了一定的控制精度,因此需要在离线计算时,加入合适的算法对各个状态分区上的目标函数进行最优化求解,得到相应的最优控制律,以此来补偿损失的控制精度。同时传统的LOS制导法的参数自适应能力较弱,且易受环境干扰产生漂角,因此需要分别对直线和曲线制导进行改进,减少横侧偏差,提升路径切换时的自适应能力,使得USV能够更快的到达期望路径。

### 发明内容

[0006] 本发明提供了一种基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法,以解决现有技

术中会损失控制精度,制导法的参数自适应能力较弱,且易受环境干扰产生漂角的问题。

[0007] 本发明提供了一种基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法,包括如下步骤:

[0008] 步骤1:构建欠驱动水面高速无人艇的动力学模型、运动学模型、固定坐标系、无人艇载体坐标系;

[0009] 步骤2:在制导方法中,结合当前船速通过动态视线法对LOS前视园半径进行优化,在优化后的LOS前视园半径基础上结合横侧偏差率获取期望航向角,并根据实际航向角获得偏向角;

[0010] 步骤3:在控制方法的EMPC控制器离线状态中,通过白鹭群优化算法,对离线状态下的各个状态分区进行最优控制律求解,得到各个状态分区及对应分区上的线性控制律;

[0011] 步骤4:在控制方法的EMPC控制器在线状态中,通过可达分区查找法查找步骤3中获得的对应分区上的线性控制律,用查询到的线性控制率控制无人艇运行,直至无人艇跟踪上最后一个期望路径点,完成跟踪控制过程。

[0012] 进一步地,所述步骤1中,所述欠驱动水面高速无人艇的动力学模型中的干扰模型包括:风干扰力模型、浪干扰力模型、流干扰力模型,具体公式为:

$$[0013] \quad \begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{d_{11}}{m_{11}} u + \frac{1}{m_{11}} \tau_x + \frac{1}{m_{11}} \tau_{wX} \\ \dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{d_{22}}{m_{22}} v + \frac{1}{m_{22}} \tau_{wY} \\ \dot{r} = \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{33}} uv - \frac{d_{33}}{m_{33}} r + \frac{1}{m_{33}} \tau_N + \frac{1}{m_{33}} \tau_{wN} \end{cases}$$

[0014] 式中,  $[u, v, r]^T$  表示无人艇的速度量,这里用  $m_{ii}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 表示为无人艇惯性水动力为USV在加速过程中受到周围水流惯性产生的力,具体表示为

$m_{11} = m - X_{\dot{u}}$ ,  $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$ ,  $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$ ;  $d_{11} = -X_u$ ,  $d_{22} = -Y_v$ ,  $d_{33} = -N_r$  为水动力阻尼系数;  $\tau_x$  为纵向推力,  $\tau_N$  为回转力,  $\tau_{wX}$  为纵向干扰力,  $\tau_{wY}$  为横向干扰力,  $\tau_{wN}$  为回转干扰力。

[0015] 进一步地,所述风干扰力模型为:

$$[0016] \quad \tau_{wX}^{wind} = \frac{1}{2} C_X(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_T$$

$$[0017] \quad \tau_{wY}^{wind} = \frac{1}{2} C_Y(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L$$

$$[0018] \quad \tau_{wN}^{wind} = \frac{1}{2} C_N(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L L$$

[0019] 式中,  $V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$  为相对风速,  $\gamma_R = \tan^{-1}(u_R/v_R)$  为相对速度,  $C_X$ 、 $C_Y$  为推力系数;  $C_N$  为力矩系数;  $\rho_w$  为空气密度,单位  $\text{kg/m}^3$ ;  $A_T$ 、 $A_L$  分别为横向纵向投影面积;  $L$  为无人艇总长度,单位是  $\text{m}$ ;  $V_R$  为风速,单位是  $\text{m/s}$ 。

[0020] 进一步地,所述浪干扰力模型为:

$$[0021] \quad \tau_w^{\text{wave}} = \frac{1}{2} \rho L \begin{bmatrix} \cos \chi \sum_{i=1}^m C_{Xb}(\lambda_i) \zeta_i^2(t) \\ \sin \chi \sum_{i=1}^m C_{Yb}(\lambda_i) \zeta_i^2(t) \\ \sin \chi \sum_{i=1}^m C_{Nb}(\lambda_i) \zeta_i^2(t) \end{bmatrix}$$

[0022] 式中,  $\rho$ 为海水密度,  $\chi$ 为遭遇角,  $m$ 为海浪谱频率的分割数量,  $X_b, Y_b, N_b$ 为试验系数,  $\zeta_i(t) = \sum_{i=1}^m \sqrt{2S_\zeta(\omega) \Delta\omega} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i)$ 为海浪的波面方程,  $\lambda_i = 2\pi \frac{\omega_i^2}{g}$ 为波长。

[0023] 进一步地,所述流干扰力模型为:

$$[0024] \quad \tau_w^{\text{flow}} = F_{Hr} - F_H$$

[0025] 式中,  $F_{Hr} = -C(v_r) v_r - D(v_r) v_r$ 为海流干扰后的流体作用力,  $v_r = [u+u_c, v+v_c, r]^T$ 为水面无人艇运动对水流的相对速度的投影;  $F_H = -C(v) v - D(V) v$ 为流体相对运动而产生的作用力。

[0026] 进一步地,所述步骤2中,通过当前船速对LOS前视园半径进行优化的公式如下:

$$[0027] \quad R_k = e_L + e^{-\lambda U} k_L$$

[0028] 式中,  $R_k$ 为LOS前视圆半径;  $e_t$ 为水面无人艇当前时刻距离期望航线的垂向距离;  $U$ 为当前航速;

[0029] 在优化后的LOS前视园半径基础上结合横侧偏差率获取期望航向角的具体公式如下:

$$[0030] \quad \varphi_{LOS} = \alpha \tan\left(\frac{y_{LOS} - y_t}{x_{LOS} - x_t}\right) + k_{LOS} \varphi_Y$$

[0031] 式中,  $k_{LOS} = \frac{2}{1 + e^{(-k_P e_t d_t - k_d \dot{e}_t d_t)}} - 1$ ,  $\dot{e}_t = u * \cos(\varphi - \varphi_P) + v * \sin(\varphi - \varphi_P)$ ,

$$\varphi_Y = \left| \arctan\left(\frac{y_k - y_t}{x_k - x_t}\right) - \arctan\left(\frac{y_{LOS} - y_t}{x_{LOS} - x_t}\right) \right|, \quad e_t = \sqrt{(y_k - y_t)^2 + (x_k - x_t)^2} - R_k。$$

[0032] 进一步地,所述白鹭群优化算法中的判别条件为:

$$[0033] \quad X_i = \begin{cases} X_{s,i|c_i} & \text{if } y_{s,i|c_i} < y_i \text{ or } r < 0.33 \\ X_i & \text{else} \end{cases}$$

[0034] 本发明的有益效果:

[0035] 本方法针对传统模型预测控制在高速无人艇路径跟踪过程中参数计算量大,求解效率慢的问题,采用了显示模型预测控制的方法,同时在离线计算部分引入了白鹭群优化算法对各状态分区最优控制律的求解进行改进。结合ESOA算法和EMPC控制器的优点,利用白鹭群优化算法对参数、初值和目标函数等要求低,且存在分布寻优策略、全局收敛性好、

收敛迅速等优点,对目标函数进行最优求解,在整体上提升了高速无人艇路径跟踪的控制精度。同时,改进的LOS制导法包含了对干扰产生漂角的补偿,在一定程度上减小了横侧偏差,同时提高了制导参数的自适应能力。

### 附图说明

[0036] 通过参考附图会更加清楚的理解本发明的特征和优点,附图是示意性的而不应该理解为对本发明进行任何限制,在附图中:

[0037] 图1为本发明具体实施例中视线法制导示意图;

[0038] 图2为本发明具体实施例中白鹭群优化算法框图;

[0039] 图3为本发明具体实施例中优化算法收敛曲线对比图。

[0040] 图4为本发明具体实施例中可达分区算法流程图;

[0041] 图5为本发明具体实施例中控制系统框图。

### 具体实施方式

[0042] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,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,本领域技术人员在没有作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。

[0043] 本发明实施例提供一种基于改进EMPC的高速无人艇路径跟踪控制方法,包括如下步骤:

[0044] 步骤1:构建欠驱动水面高速无人艇的运动学、动力学数学模型。采用Fossen船舶动力学数学模型,将船舶六自由度模型简化为无人艇纵荡、横荡和艏摇三自由度的无人艇运动模型。

[0045] 1) 水面高速无人艇运动学模型:

$$[0046] \quad \begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (1)$$

[0047] 2) 水面高速无人艇动力学模型:

$$[0048] \quad \begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{d_{11}}{m_{11}} u + \frac{1}{m_{11}} \tau_X + \frac{1}{m_{11}} \tau_{wX} \\ \dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{d_{22}}{m_{22}} v + \frac{1}{m_{22}} \tau_{wY} \\ \dot{r} = \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{33}} uv - \frac{d_{33}}{m_{33}} r + \frac{1}{m_{33}} \tau_N + \frac{1}{m_{33}} \tau_{wN} \end{cases} \quad (2)$$

[0049] 式中,  $[x, y, \psi]^T$  表示无人艇的位置向量,  $[u, v, r]^T$  表示无人艇的速度量, 这里用  $m_{ii}$  (1, 2, 3) 表示为无人艇惯性水动力为USV在加速过程中受到周围水流惯性产生的力, 具体表示为  $m_{11} = m - X_{\dot{u}}$ ,  $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$ ,  $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$ ;  $d_{11} = -X_u$ ,  $d_{22} = -Y_v$ ,  $d_{33} = -N_r$  为

水动力阻尼系数;  $\tau_x$  与为纵向推力,  $\tau_N$  为回转力,  $\tau_{wX}$  为纵向干扰力,  $\tau_{wY}$  为横向干扰力,  $\tau_{wN}$  为回转干扰力。上述式中,  $X_u, X_{\dot{u}}, Y_v, Y_{\dot{v}}, Y_r, Y_{\dot{r}}, N_v, N_{\dot{v}}, N_r, N_{\dot{r}}, I_z$  是水动力系数。

[0050] 本具体实施例中的无人艇仅可产生纵向推力  $\tau_x$  和回转力  $\tau_N$ , 为了使模型更精确, 额外加入了外界干扰模型, 定义如下:

$$[0051] \quad \tau_w = \tau_w^{wind} + \tau_w^{wave} + \tau_w^{flow} = \begin{bmatrix} \tau_{wX}^{wind} + \tau_{wX}^{wave} + \tau_{wX}^{flow} \\ \tau_{wY}^{wind} + \tau_{wY}^{wave} + \tau_{wY}^{flow} \\ \tau_{wN}^{wind} + \tau_{wN}^{wave} + \tau_{wN}^{flow} \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0052] 式中,  $\tau_w^{wind}$  为风干扰力模型,  $\tau_w^{wave}$  为浪干扰力模型,  $\tau_w^{flow}$  为流干扰力模型。

[0053] 风速一般包含一个缓慢变化的分量(平均风速)和一个高频分量(阵风), 作业在水面无人艇上的合力和力矩通常根据相对风速  $V_R$  和相对速度  $\gamma_R$  来表示, 具体取决于:

$$[0054] \quad V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \quad (4)$$

[0055]  $\gamma_R = \tan^{-1}(u_R/v_R)$  (5)

[0056]  $\gamma_R = \tan^{-1}(u_R/v_R)$

[0057]  $V_R$  是  $x, y$  方向的合速度, 考虑水面无人艇在航行状态下的相对风速, 将风速沿随动坐标系分解:

[0058] (6)

$$[0059] \quad u_R = V_w \cos(\psi_R) - u + u_c$$

$$[0060] \quad v_R = V_w \sin(\psi_R) - v + v_c$$

[0061] 式中,  $\psi_R = \psi - \psi_w$  是风向和船艏向的相对角度, 对于大多数水面无人艇, 阵风无法通过控制系统进行补偿。但是通过风速风向计算缓慢变化的风力, 将缓慢变化的风力前馈给控制器, 作用在船上的风力和力矩公式如下:

$$[0062] \quad \tau_{wX}^{wind} = \frac{1}{2} C_X(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_T \quad (7)$$

$$[0063] \quad \tau_{wY}^{wind} = \frac{1}{2} C_Y(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L$$

$$[0064] \quad \tau_{wN}^{wind} = \frac{1}{2} C_N(\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L L$$

[0065] 式中,  $C_X, C_Y$  为推力系数;  $C_N$  为力矩系数;  $\rho_w$  为空气密度, 单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $A_T, A_L$  分别为横向纵向投影面积;  $L$  为无人艇总长度, 单位是  $\text{m}$ ;  $V_R$  为风速, 单位是  $\text{m}/\text{s}$ 。

[0066] 对于海上的波浪我们一般用线性叠加来描述, 为了预报水面无人艇在不规则海浪中所受的干扰力, 在水面无人艇耐波性理论中通常采用根据大量的海浪观测数据所统计的海浪谱对其进行描述, 常用的海浪谱有 PM 谱、单参数谱以及双参数谱, 本文采用国际船模水池会议所推荐的 ITTC 双参数海浪谱对不规则海浪进行预报, 公式如下:



$$[0067] \quad S_{\zeta}(\omega) = \frac{173\zeta_{w/3}}{T_1^4 \omega^5} \exp\left(-\frac{691}{T_1^4 \omega^4}\right) \quad (8)$$

[0068] 式中,  $\zeta_{w/3}$  为三一波高,  $\omega$  为波浪频率,  $T_1$  为平均波浪周期。

[0069] 根据海浪谱, 可以得到海浪的波面方程:

$$[0070] \quad \zeta_i(t) = \sum_{i=1}^m \sqrt{2S_{\zeta}(\omega) \Delta\omega} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (9)$$

[0071] 波长为:

$$[0072] \quad \lambda_i = 2\pi \frac{\omega_i^2}{g} \quad (10)$$

[0073] 最后, 根据波浪对船体作用力公式, 可得到海浪对水面无人艇的作用力计算公式如下:

$$[0074] \quad \mathbf{T}_w^{\text{wave}} = \frac{1}{2} \rho L \begin{bmatrix} \cos \chi \sum_{i=1}^m C_{Xb}(\lambda_i) \zeta_i^2(t) \\ \sin \chi \sum_{i=1}^m C_{Yb}(\lambda_i) \zeta_i^2(t) \\ \sin \chi \sum_{i=1}^m C_{Nb}(\lambda_i) \zeta_i^2(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0075] 式中,  $\rho$  为海水密度,  $\chi$  为遭遇角,  $m$  为海浪谱频率的分割数量,  $X_b, Y_b, N_b$  为试验系数, 可按 J.W English 等人试验所得的回归公式进行估计:

$$[0076] \quad \begin{cases} C_{Xb}(\lambda) = 0.05 - 0.2 \left(\frac{\lambda}{L}\right) + 0.75 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 - 0.51 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 \\ C_{Yb}(\lambda) = 0.46 + 6.83 \left(\frac{\lambda}{L}\right) - 15.65 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 + 8.44 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 \\ C_{Nb}(\lambda) = -0.11 + 0.68 \left(\frac{\lambda}{L}\right) - 0.79 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 + 0.21 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 \end{cases} \quad (12)$$

[0077] 记海流流速为  $V_c$ , 流向为  $\beta$ , 将流速沿海面固定坐标系进行分解:

$$[0078] \quad \begin{cases} u_c^E = V_c \cos \beta \\ v_c^E = V_c \sin \beta \end{cases} \quad (13)$$

[0079] 根据坐标转换公式可得:

$$[0080] \quad \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \end{bmatrix} \quad (14)$$

[0081] 将式3-22代入上式得:

$$[0082] \quad \begin{cases} u_c = V_c \cos(\beta - \psi) \\ v_c = V_c \sin(\beta - \psi) \end{cases} \quad (15)$$

[0083] 设水面无人艇运动对地速度在船体坐标系上的分量为 $u$ 、 $v$ ，水面无人艇运动对水流的相对速度的投影为：

$$[0084] \quad (16)$$

$$[0085] \quad v_r = [u+u_c, v+v_c, r]^T$$

[0086] 对于水面无人艇动力学模型，其流体相对运动而产生的作用力为：

$$[0087] \quad (17)$$

$$[0088] \quad F_H = -C(v)v - D(v)v$$

[0089] 使用相对速度对实际速度替换，可得海流干扰后的流体作用力：

$$[0090] \quad (18)$$

$$[0091] \quad F_{Hr} = -C(v_r)v_r - D(v_r)v_r$$

[0092] 差分后，可得到海流作用力：

$$(19)$$

$$[0093] \quad \tau_w^{\text{flow}} = F_{Hr} - F_H$$

[0094] 步骤2：在制导方法中，结合当前船速通过动态视线法对LOS前视园半径进行优化，在优化后的LOS前视园半径基础上结合横侧偏差率获取期望航向角，并根据实际航向角获得偏向角。假设当前时刻无人艇所在位置为点 $p_t(x_t, y_t)$ ，跟踪点期望圆心为点 $p_k(x_k, y_k)$ ，如图1所示。

[0095] 根据无人艇当前位置和期望圆心位置求得目标角度：

$$(20)$$

$$[0096] \quad \varphi_p = \arctan\left(\frac{y_t - y_k}{x_t - x_k}\right)$$

[0097] 根据圆跟踪方向求得期望路径点为：

$$(21)$$

$$[0098] \quad x_{LOS} = x_k + R_k * \cos(\varphi_p + d_t * k_t)$$

$$(22)$$

$$[0099] \quad y_{LOS} = y_k + R_k * \sin(\varphi_p + d_t * k_t)$$

[0100] 则可得期望航向角：

$$(23)$$

$$[0101] \quad \varphi_{LOS} = \arctan\left(\frac{y_{LOS} - y_t}{x_{LOS} - x_t}\right)$$

[0102] 在复杂海况环境下，无人艇进行圆路径跟踪时，会产生一个对航行方向造成干扰的漂角，为消除漂角影响，以及根据横侧偏差、横侧偏差变化律，设计一个S面控制得弧度纠偏制导律，来引导无人艇进行圆跟踪。

[0103] 无人艇距离期望路径横侧偏差为：

$$(24)$$

$$[0104] \quad e_t = \sqrt{(y_k - y_t)^2 + (x_k - x_t)^2} - R_k$$

[0105] 并且，横侧偏差变化率可得：

$$\dot{e}_t = u * \cos(\varphi - \varphi_p) + v * \sin(\varphi - \varphi_p) \quad (25)$$

[0107] 无人艇期望航向夹角为：

$$\varphi_Y = \left| \arctan\left(\frac{y_k - y_t}{x_k - x_t}\right) - \arctan\left(\frac{y_{LOS} - y_t}{x_{LOS} - x_t}\right) \right| \quad (26)$$

[0109] 根据上式可得无人艇纠偏后的期望航向为：

$$\varphi_{LOS} = \alpha \tan\left(\frac{y_{LOS} - y_t}{x_{LOS} - x_t}\right) + k_{LOS} \varphi_Y \quad (27)$$

[0111] 式中，

$$k_{LOS} = \frac{2}{1 + e^{(-k_p e_t \dot{d}_t - k_d \dot{e}_t \dot{d}_t)}} - 1 \quad (28)$$

[0113] 因此，再根据实际航向角  $\varphi$  与期望航向角的差值得到偏向角  $\varphi_\Delta$ ：

$$\varphi_\Delta = \varphi_{LOS} - \varphi \quad (29)$$

[0115] 路径段的更新。在选择路径  $P_{n+1}$  时，判断无人船是否在以  $P_n$  为圆心， $R$  为半径的圆内，如果满足，则跟踪下一路径  $P_{n+1}$ 。令无人船的当前位置为  $(x_n(t), y_n(t))$  满足：

$$[x_n - x(t)]^2 + [y_n - y(t)]^2 \leq R_k^2 \quad (22)$$

[0117] 将选择  $(x_{n+1}(t), y_{n+1}(t))$  作为下一路径的终点。根据水面无人艇距离期望路径的垂向距离以及当前水面无人艇航速，动态调节水面无人艇制导律的前视圆半径：

$$R_k = e_L + e^{-\lambda U} k_L \quad (23)$$

$$R_k = e_L + e^{-\lambda U} k_L$$

[0120] 其中， $e_L$  是水面无人艇当前时刻距离期望航线的垂向距离。

[0121] 对预测控制模型进行线性化处理，通过给定的期望状态、LOS算法处理后的期望航向角  $\varphi_{LOS}$  和当前状态的实际航向角得到的偏向角  $\varphi_\Delta$  来跟踪期望路径。式 (32) 表示参考系统方程，即在不考虑干扰情况下的参考轨迹：

$$\dot{x}R = f(xR, uR) \quad (32)$$

[0123] 在任意参考点  $(xR, uR)$  处对函数进行一阶泰勒展开，得到式 (33)

$$\dot{x} = f(xR, uR) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\substack{x=xR \\ u=uR}} (x - xR) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{x=xR \\ u=uR}} (u - uR) \quad (33)$$

[0125] 由式 (33) 减去 (32)，得到

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B\bar{u} \quad (34)$$

[0127] 其中,  $\tilde{x} = x - xR$ ,  $\tilde{u} = u - uR$ , A、B为雅可比矩阵。

[0128] 对新的预测模型也就是式 (34) 进行离散化处理。离散化处理的方法有很多, 比如龙格-库塔法等, 这里采用前向欧拉的方法进行处理, 得到式 (35) :

$$[0129] \quad \tilde{x}(k+1) = (TA + I)\tilde{x}(k) + TBu(k) \quad (35)$$

[0130] 其中, T为采样时间, I为单位矩阵, 结合式子可得:

$$[0131] \quad \tilde{x}(k+1) = \tilde{A}\tilde{x}(k) + \tilde{B}u(k) \quad (36)$$

$$[0132] \quad \tilde{y}(k) = P\tilde{x}(k) \quad (37)$$

[0133] 其中  $\tilde{A} = (TA + I)$ ,  $\tilde{B} = TB$ , P为单位矩阵。

[0134] 将上述式子进行变换, 化简为控制增量形式的状态空间模型:

$$[0135] \quad \tilde{x}(k+1) = \tilde{A}k\tilde{x}(k) + \tilde{B}k\Delta u(k) \quad (38)$$

$$[0136] \quad \tilde{y}(k) = \tilde{C}k\tilde{x}(k) \quad (39)$$

[0137] 其中  $\tilde{A}k = \begin{bmatrix} Ak & Bk \\ 0_{m \times n} & I_m \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{B}k = \begin{bmatrix} Bk \\ I_m \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{C} = [P \quad 0_{2 \times m}]$ ,

$$\tilde{x}(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix}。$$

[0138] 步骤3: 在控制方法的EMPC控制器离线状态中, 在约束条件的设置下, 通过白鹭群优化算法, 对离线状态下的各个状态分区进行最优控制律求解, 得到各个状态分区及对应分区上的线性控制律。

[0139] 约束条件设置: 由于无人船的螺旋桨和舵机受机械性能的影响, 其运动性能和速率是有限的, 高速航行时易出现饱和现象。所以, 设置在k时刻及预测时域内, 控制量极限、控制增量、输出量约束。

[0140] 目标函数的最优求解: 考虑到目标的速率和系统输入的控制量能量的损耗。以系统的状态量偏差、控制量以及控制增量构建目标函数, 目标函数如下:

$$[0141] \quad J = (Y - Y_{ref})^T Q (Y - Y_{ref}) + \Delta U^T R \Delta U \quad (32)$$

$$[0142] \quad J = (Y - Y_{ref})^T Q (Y - Y_{ref}) + \Delta U^T R \Delta U$$

[0143] 其中, Yref为期望值,  $\Delta U$ 为控制增量, Q和R为权重矩阵(根据控制的需要不断调整)。

[0144] 白鹭群优化算法由三个主要部分组成: 坐等策略、激进策略和判别条件。算法框图如图2所示。

[0145] 每个白鹭群可以由n支白鹭小队组成, 每支白鹭小队又包含三只白鹭, 其中白鹭A实行坐等策略, 白鹭B和白鹭C分别采用激进策略中的随机游走和包围机制。

[0146] 1) 坐等策略(白鹭A)。第*i*个白鹭A的观测方程可以描述为 $\hat{y}_i = A(X_i)$ ,每次迭代获取到的真实适应度 $y_i$ ,可求得观测方程中权重的伪梯度 $g_i$ ,于是白鹭A的更新位置表示如下:

$$[0147] \quad X_{a,i} = X_i + \exp(-t / (0.1 * t_{\max})) * 0.1 * \text{hop} * g_i \quad (41)$$

[0148] 其中*t*为当前迭代次数, $t_{\max}$ 为最大迭代次数,hop为自变量的可行域范围。

[0149] 2) 激进策略(白鹭B、白鹭C)。白鹭B为随机游走,更新位置的方式如下:

$$[0150] \quad X_{b,i} = X_i + \tan(r_{b,i}) * \text{hop} / (1+t) \quad (42)$$

[0151]  $r_{b,i}$ 是 $(-\pi/2, \pi/2)$ 之间的随机数。

[0152] 白鹭C为包围策略,更新位置的方式如下:

$$[0153] \quad D_h = X_{i_{\text{best}}} - X_i \quad (43)$$

$$[0154] \quad D_g = X_{g_{\text{best}}} - X_i \quad (44)$$

$$[0155] \quad X_{c,i} = (1-r_i-r_g) * X_i + r_h * D_h + r_g * D_g \quad (45)$$

[0156] 其中 $X_{i_{\text{best}}}$ 和 $X_{g_{\text{best}}}$ 分别为白鹭小队最优值和白鹭种群最优值, $r_h$ 和 $r_g$ 都是 $[0,1]$ 之间的随机数。

[0157] 3) 判别条件。白鹭小队的每只白鹭计算出更新的位置后,会共同决定白鹭小队的更新位置,形式如下:

$$[0158] \quad X_{Si} = [X_{a,i} \quad X_{b,i} \quad X_{c,i}] \quad (46)$$

$$[0159] \quad y_{s,i} = [y_{a,i} \quad y_{b,i} \quad y_{c,i}] \quad (47)$$

$$[0160] \quad c_i = \text{argmin}(y_{s,i}) \quad (48)$$

$$[0161] \quad X_i = \begin{cases} X_{s,i|c_i} & \text{if } y_{s,i|c_i} < y_i \text{ or } r < 0.33 \\ X_i & \text{else} \end{cases} \quad (49)$$

[0162] 白鹭小队将三只白鹭更新的位置及适应度与上一次迭代的适应度比较,如果有一只白鹭的更新位置要优于上一次迭代的位置,则采纳更新;若每一只白鹭的更新位置都要比上一回差,则有33%的概率采纳更新位置最优的方案。

[0163] 图3为白鹭群优化算法与粒子群算法的收敛曲线对比图,左半部图像为目标函数搜索空间,右半部为两种优化算法的收敛曲线,通过曲线对比,可明显看出白鹭群优化算法相较于粒子群算法收敛速度更快,求解精度更高。

[0164] 利用白鹭群优化算法求解最优控制增量序列,得到式(50):

$$[0165] \quad \Delta U^* = [\Delta u(t|t)^* \quad \Delta u(t+1|t)^* \quad \cdots \quad \Delta u(t+N_c-1|t)^*] \quad (50)$$

[0166] 步骤4:在控制方法的EMPC控制器在线状态中,根据高速无人艇传感器输出的实际状态量,采用可达分区查找法进行在线查找,判断状态分区,查找对应的最优控制律,将控制分量作用到无人艇。

[0167] 可达分区查找法算法流程图如图4所示,具体步骤如下:

[0168] 1) 对于初始状态 $x_0$ ,通过顺序查找法定位对应的子区域*n*;

[0169] 2) 根据子区域*n*得到对应的控制量*u*;

[0170] 3) 将该控制量作用于系统,在下一时刻检测系统状态量;

[0171] 4) 根据系统的状态量和可达分区搜索状态量所在状态分区。

[0172] 5) 重复(2)(3)(4),直至查表结束。

[0173] 将查表所得的最优控制分量式作用到高速无人艇上。

$$[0174] \quad u(t)^* = \Delta u(t|t)^* + u(t-1) \quad (51)$$

[0175] 整个控制系统框图如图5所示,本文改进了预测控制方法,采用LOS-ESOA-EMPC控制方法。通过建立欠驱动无人船的动力学模型作为预测控制的状态空间模型,将状态空间模型进行线性化、离散化等处理化为误差形式的控制增量方程作为系统模型,设定一条期望路径曲线,将期望路径均匀划分为多个期望点,获得期望点位置信息并根据当前无人艇状态采用改进的LOS制导算法计算期望航向角。期望航向角与实际航向角之间的误差作为EMPC控制器的输入,离线计算时,在初始状态和约束条件的设置下,采用白鹭群优化算法(ESOA)进行目标函数最优化求解,得到各个状态分区域及对应分区上的线性控制律,在线计算时,根据高速无人艇传感器输出的实际状态量,判断状态分区,查找对应的控制律,将控制分量作用到无人艇。根据规划好的期望路径,重复步骤1~3,待下一时刻,继续将高速无人艇测量传感器的实际值反馈给EMPC控制器,不断进行在线查找,直至高速无人艇跟踪至最后一个期望点。

[0176] 虽然结合附图描述了本发明的实施例,但是本领域技术人员可以在不脱离本发明的精神和范围的情况下作出各种修改和变型,这样的修改和变型均落入由所附权利要求所限定的范围之内。

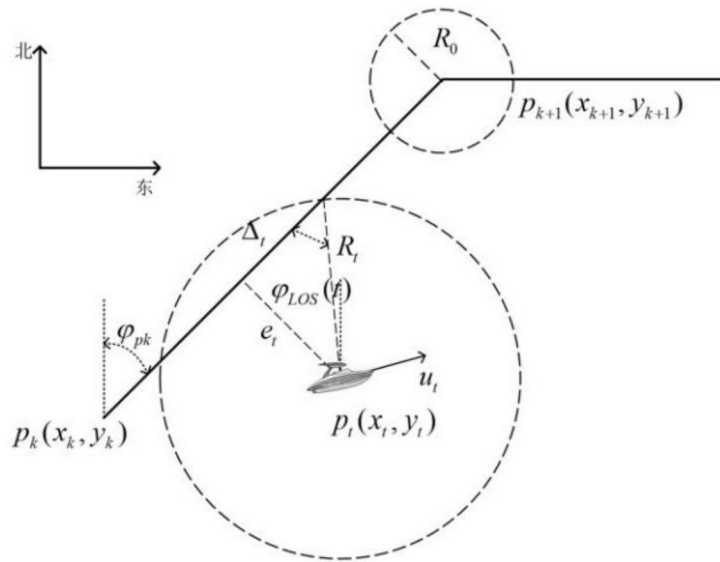


图1

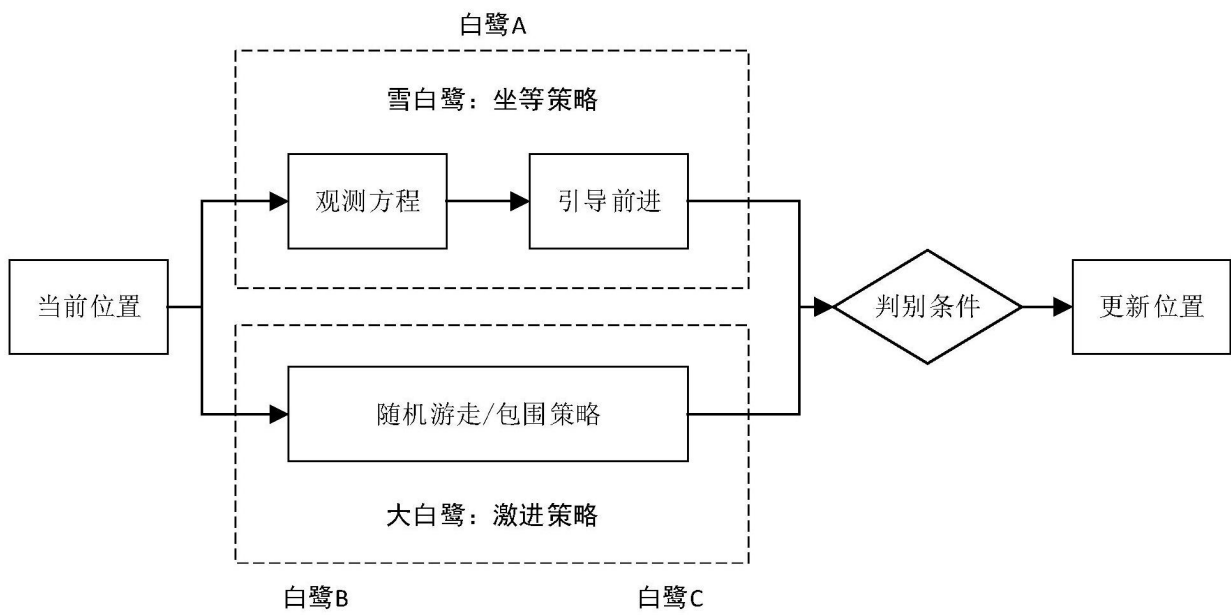


图2

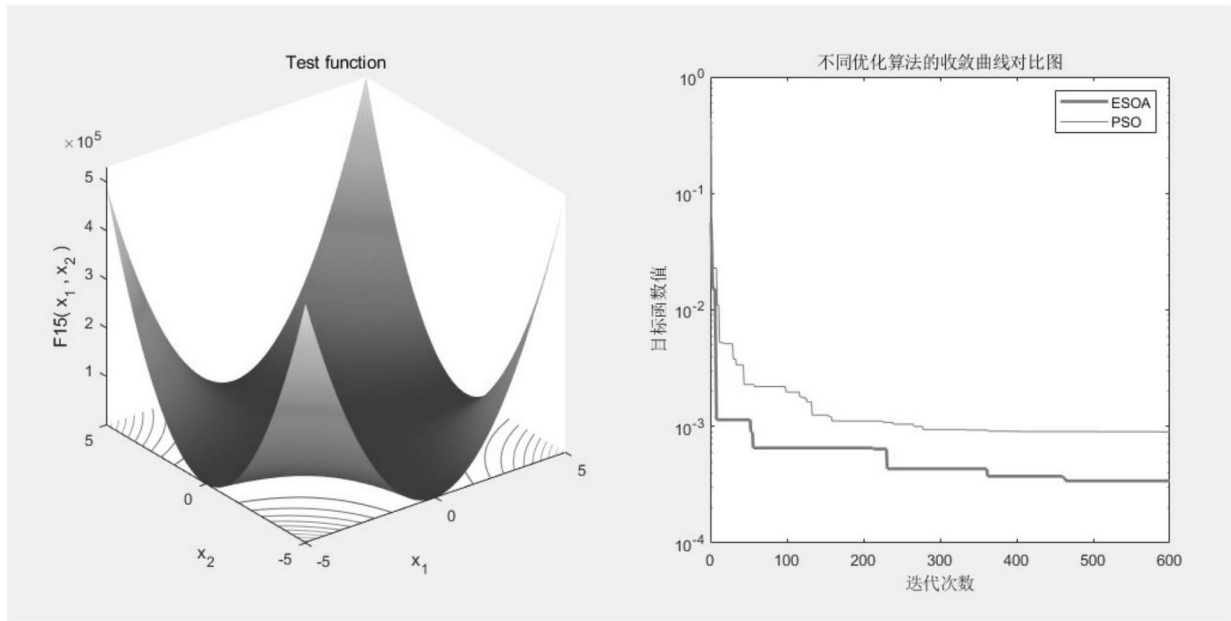


图3

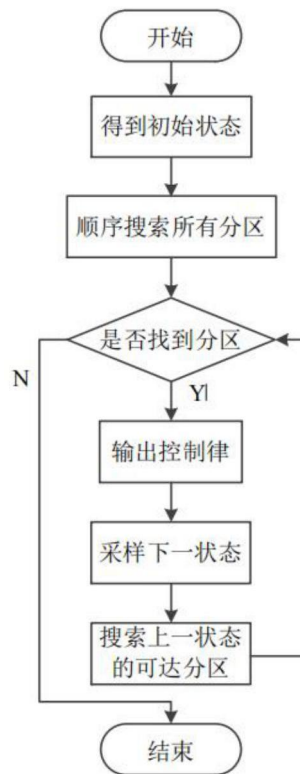


图4



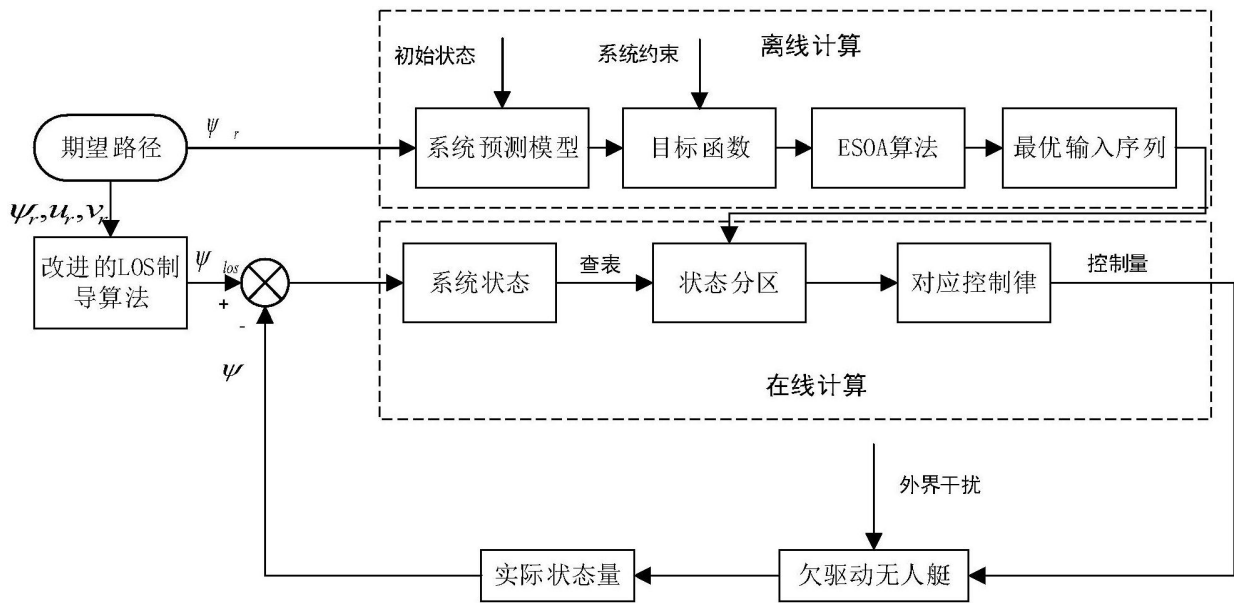


图5