DOI: 10. 19650/j.cnki.cjsi.J2006154

面向阵型保持的 UUV 集群绿色动态控位方法研究*

徐 健,刘梦雄,陈光佳,李 娟,陈 冬

(哈尔滨工程大学 哈尔滨 150001)

摘 要:主从式水下无人航行器(UUV)集群在执行协同观探测任务时,既需要保持在阵地部署的观探测阵型,又需要以较少的 能耗完成该任务。首先,对上述过程中的 UUV 低能耗绿色动态控位及阵型保持需求进行了分析,并针对以上需求设计了面向 主从式 UUV 集群阵型保持的绿色动态控位策略。其次,在 UUV 绿色动态控位策略的主导下,对涉及到的基于粒子群寻优的全 局最优推力规划及基于改进广义预测控制的实时滚动优化两种控制方案分别进行了具体的设计。仿真结果表明,相比于传统 PID 控制,上述控制策略及控制方法能够将控制时间由 200 s 缩减为 60 s,在满足 UUV 集群协同观探测任务需求的前提下,以 更低的能耗完成动态控位任务。

Research on green dynamic positioning of UUV for formation maintenance

Xu Jian, Liu Mengxiong, Chen Guangjia, Li Juan, Chen Dong (Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: It is necessary to maintain the observation and detection formation deployed at the position and complete the task with less energy consumption when the master-slave unmanned underwater vehicle (UUV) cluster performs the collaborative observation and detection task. Firstly, the requirements of UUV low-energy green dynamic positioning and formation maintenance are analyzed. Secondly, under the dominance of the UUV green dynamic positioning strategy, two control schemes of the global optimal thrust planning based on particle swarm optimization and real-time rolling optimization based on the improved generalized predictive control are specifically designed. Compared with the traditional PID control, simulation results show that the control strategy and control method can reduce the control time from 200 s to 60 s. And the dynamic control task can be completed with lower energy consumption on the premise of meeting the requirements of UUV cluster collaborative view detection task.

Keywords: unmanned underwater vehicle; collaborative formation maintenance; green dynamic positioning control; particle swarm optimization; predictive control

0 引 言

随着海洋开发与探索工作的深入开展,单体无人航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)难以完成诸多 复杂任务,而UUV集群具有时空及功能分布的特点,可 以提升作业效率,因此UUV协同观、探测可有效应用于 对敌方目标的信息搜集、探查和监视^[1-2]。

在协同观探测期间,UUV 集群需要实现在阵地内以

如何在保证 UUV 机动性能的条件下,减少 UUV 执 行机构的数量及动车频率是 UUV 低能耗技术研究的重 点难点。曹建春等^[4]根据船舶动力定位时的航行环境确

观探测阵型进行长时间值守。此外,UUV 集群采用声纳进行群间通信及定位,为保障水声设备的工作环境,可以通过降低 UUV 推进器的动车频率来降低 UUV 集群整体 叠加在环境中的辐射噪声,以此减少水声声纳受到的环境干扰,提高 UUV 携载的水声声纳探测性能,最终提升 UUV 集群的协同观探测效果^[3]。

收稿日期:2020-03-05 Received Date:2020-03-05 * 基金项目:国家自然科学基金(51609046)项目资助

定各个外力变换,细化了推力分配优化问题中的目标函 数及约束条件,进而设计了基于遗传算法的多目标算法 完成优化求解。邓节军[5]提出了基于动力分配的船舶能 耗最优化算法,该方法采用电力推进,研究了船舶在服务 航速模式下的电机功率,设计使能耗趋于最优的动力分 配方案及推进器控制量。余婷婷等[6]采用粒子群优化算 法对推力分配问题进行了优化设计及仿真。在绿色控制 器设计方面,常见的研究工作多集中于两方面,1)提升控 制器控制品质,提高控制系统对时变海洋环境的鲁棒性, 减少执行机构由于高频振荡引起的频繁动车操作:2)建 立系统的能耗总模型,然后利用优化算法如粒子群算法、 蚁群算法等对运动要素进行求解^[7],如郭兴海等^[8]就利 用了量子粒子群优化算法完成了 AGV 路径规划。对于 船舶能耗计算及自身能量管理方面的研究,目前较为成 熟的成果多集中于船舶能耗模型的建立。对于燃料消耗 情况的监控,Salla 等^[9]开发了一套监控软件,有助于评 估并降低不同工况下的能耗。在能量管理方面,刘乐 等^[10]设计了一种基于粒子群优化算法的模糊控制器,并 以此为核心设计能量管理策略,试验分析表明,该设计能 够很好地适应混合动力船舶能量管理系统,实现节能减 排的预期效果。

本文旨在提出一种 UUV 集群绿色动态控位方案,使 UUV 集群在保持观探测阵型及控位精度的前提下,降低 UUV 的动车频率,降低噪声及能量消耗,提升 UUV 作业 时长及作业安全性^[11-13]。

1 UUV 集群协同观探测的动态控位需求分析

针对 UUV 集群的协同观探测任务,工程上有一字形 阵型、三角形阵型和矩形阵型 3 种典型阵型。本文提出 柔性阵型保持的概念,即 UUV 集群的群员在各自的控位 区域内以低速机动进行小范围运动。

1.1 一字形阵型的 UUV 位姿保持需求分析

主从式 UUV 集群横一字形阵型如图 1 所示。设定 群员的间距由集群中心向外逐步扩大,即 $d_2 \ge 2d_1$ 。



图 1 UUV 集硅模一子形体型 Fig.1 One line formation of UUV swarm

主 UUV 在目标定位点进行精确控位;各从 UUV 则 在各自目标定位点为中心的圆形区域进行小范围机动。 各 UUV 的最大机动范围一致,记横一字形阵型最大长度 为 d_i ,最大宽度为 d_w ,记从 UUV 最大机动范围的半径 为 r_o

考虑到集群的协同观探测任务,设 l_s 为群员间最短 安全距离; l_c 为 UUV 所搭载的通信设备的最远通信距 离; d_{min} 为各群员均在各自设定的机动范围内时, d_{max} 主 UUV 与从 UUV 间可能出现的最短距离.需满足:

$$d_{\max} = d_2 + r \le l_c \tag{1}$$

$$d_{\min} = d_1 - r \ge l_s \tag{2}$$

由阵型保持需求,设定主 UUV 在预设航行不变条件 下精确控位,各从 UUV 也需要保持各自的航向。

1.2 三角形阵型的 UUV 位姿保持需求分析

主从式 UUV 集群三角形阵型如图 2 所示,各从 UUV 的最大可机动范围与主、从 UUV 间距成正比。三角形阵型两边可近似扩大到两条机动范围带,当从 UUV 均在机动带内的目标控位区域内时,即认为阵位保持成功。





如图 2 所示,记三角形阵型左右两侧机动带的开角 为 α_{bud} ,阵型开角为 α_{tri} ,阵型边长为 d_{sl} 。为避免各从 UUV 均处于边界时形成的阵型近似于五边形,设定 $\alpha_{\text{bud}} \leq 30^{\circ}$ 。

在三角形阵型中,根据相似三角形定理:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{r_1}{r_2}$$
 (3)

$$r_{1} = d_{1} \times \tan\left(\frac{\alpha_{\text{bnd}}}{2}\right)$$
$$r_{2} = d_{2} \times \tan\left(\frac{\alpha_{\text{bnd}}}{2}\right)$$
$$(4)$$

$$r_n = d_n \times \tan\left(\frac{\alpha_{\text{bnd}}}{2}\right)$$

考虑安全距离约束及通信距离约束可得:

$$d_{\min} = d_1 - r_1 \ge l_s \tag{5}$$

$$d_{\min} = d_1 = d_2 + r_2 \le l_s \tag{6}$$

$$d_{\max} = d_{sl} = d_2 + r_2 \leq l_c$$

1.3 矩形阵型的 UUV 位姿保持需求分析

UUV 集群矩形阵型如图 3 所示,各从 UUV 的最大机

)

动范围半径均为r。



$$d_{\max} = d + r \tag{8}$$



Fig.3 Rectangular formation of UUV swarm

2 面向阵型保持的绿色动态控位策略设计

UUV 的绿色动态控位,即是使 UUV 以尽可能少的 能耗,完成其动态控位控制过程^[14]。降低 UUV 的动车 频次,是实现 UUV 绿色动态控位的核心理念^[15]。

借鉴 Green-DP 的思想,本文将 UUV 的控位区域由 单点扩大至水平面内固定大小的圆形区域。为各从 UUV 划定 3 个不同级别的工作区域,如图 4 所示。为达 到集群探测阵地自守位条件下的最佳探测性能,引入刚 性守位区和柔性守位区的概念。II 级区域为刚性守位 区,刚性守位区是出于安全、通信及几何特性加入的,由 前面动态控位需求分析中各 UUV 的最大机动范围围成。 I 级区域为柔性守位区,是从节能角度加入的, I 其大小 受阵型保持精度的影响,对阵型精度要求越高,则 I 级工 作区域的半径越小,反之则越大。



图 4 主从式 UUV 集群中从 UUV 工作区域划分 Fig.4 Slave UUVs working area in UUV swarm

以各从 UUV 的目标定位点、动态控位能力、工作区 域半径 r,形成 UUV 的刚性守位区。当 UUV 位于刚性守 位区外,则需要立刻进入守位区以内。在柔性守位区时, 各 UUV 只需对航向进行实时控制,UUV 在 II 级工作区 域时,则需要尽快回到柔性守位区内。 借鉴八旋翼无人机上的混杂控制思想^[16],设计控位 策略,如图 5 所示。使 UUV 在距离目标定位点不同远近 处,均有一套与其相匹配的控制方案,能根据 UUV 不同 状态,适时地调整其控制输出。



Fig.5 Green dynamic positioning flow of slave UUV in lead-slave UUV swarm

当 UUV 位于Ⅲ级工作区域时,需要立刻进入刚性守 位区内。此时航路较远,UUV 耗能较大,因此认为此时 造成了 UUV 能量的主要损耗。所以在该种情况下,以最 小耗能为目标,通过粒子群寻优,计算最优的全局加速度 与时间分配方案。直至 UUV 完成规划任务,切换至运动 终点所在区域的控位模式。

当 UUV 处于Ⅱ级区域时,认为其状态较为危险,需要及时回到目标点处,此时对 UUV 的位置、航向均进行精确控制。

当 UUV 位于 I 级区域时,认为其进入了稳定的动态 控位状态,此时控位要求较 II 级区域时有所降低,所以只 精确控制 UUV 的航向,而不控制其位置。 0)

(

3 UUV 绿色动态控位方法设计

3.1 基于能耗优化的大偏差绿色动态控位方法设计

UUV 动态控位过程中的优化目标函数主要考虑 UUV 的运动消耗及机械损耗两部分^[17],其中运动消耗包 括 UUV 从当前点到目标定位点的直线距离运动做功 E. 及克服海流作用力做的功 E: 机械损耗是由 UUV 机械 结构的机械效率带来的,是一个关于时间的函数,待优化 目标为 UUV 运动过程能耗与 UUV 机械损耗总和,由此 可得优化目标的两个子函数:

$$f_1 = E(v) = E_m + E_c \tag{9}$$

$$f_2 = kT(v) \tag{1}$$

式中:f1代表了 UUV 的运动耗能;f,代表了系统的作用 时间:设 k 为机械的损耗系数。设海流为匀速定向定常 流,UUV 通过水平辅推将横向上的海流作用力分解抵 消,航向朝向目标定位点方向并保持该方向,随后过程中 无需 UUV 转艏改变方向,则横向上水平辅推保持原推力 以抵消海流作用,纵向上粒子群算法求解出的最优速度 及加速度规划方案如图6所示。



图 6 基于粒子群寻优的 UUV 加速度规划 Fig.6 Acceleration planning for UUV based on particle swarm optimization

为了使 UUV 的运动规划尽可能地与实际贴合并避 免加速度的频繁变化,设定 UUV 的运动包含匀加速-匀 速-匀减速3段。为了避免超调冲击,设定 UUV 到达目 标定位点时的速度为0.且总航程距离等于初始点与目 标点间的距离。UUV 克服海流做功 E_{a} 包含其在 x 轴、y 轴两个方向的能耗 $E_x \, E_v$ 。 设 UUV 在动态控位过程中 其最大运动速度为 v_{max},则 UUV 从当前点到目标定位点 的直线距离运动做功 E_m 只与 UUV 质量及最大运动速度 v_{max}有关,式(9)和(10)可进一步写成:

$$f_{1} = \frac{1}{2}mv_{\max}^{2} + \frac{1}{2}\rho C_{X}(\alpha_{c})A_{TS}V_{c}^{2} \cdot s_{x} +$$

$$\frac{1}{2}\rho C_{\rm Y}(\alpha_{\rm c})A_{\rm IS}V_{\rm c}^2 \cdot s_{\rm y} \tag{11}$$

 $f_2 = kt_3$ (12)

式中: $C_x(\alpha_c)A_xV^2/2$ 为海流对 UUV 纵向上产生的干扰 力: $\rho C_{v}(\alpha_{a})A_{v}V^{2}/2$ 为海流对 UUV 横向上产生的干扰 力; $C_x(\alpha_c)(C_y(\alpha_c))$ 为流向角 α_c 对应的纵向(横向)海 流阻力系数; α_{e} 为海流相对 UUV 的流向角; $A_{TS}(A_{LS})$ 为 UUV 纵(横)向迎流面积: V_{a} 为海流速度: $s_{a}(s_{a})$ 为 UUV 在海流作用下沿 x 轴的航行距离。

根据前文设定,UUV 运动的总距离,即为 UUV 初始 位置距目标定位点的距离 l, 且到达终点时要求 UUV 速 度为0。则可得到以下约束条件,其中 ama 由 UUV 推进 器基本参数计算获得。

$$\begin{cases} |a_{1}| \leq a_{\max} \\ |a_{2}| \leq a_{\max} \\ 0 \leq t_{1} \leq t_{2} \leq t_{3} \\ a_{1}t_{1} = -a_{2}(t_{3} - t_{2}) \\ \int_{0}^{t_{1}} a_{1}tdt + \int_{t_{1}}^{t_{2}} vdt + \int_{t_{2}}^{t_{3}} a_{2}tdt = l \\ R B L \dot{x} \Lambda \varphi, \\ \end{cases}$$
(13)

$$J = \tau_1 f_1 + \tau_2 f_2 \tag{14}$$

将式(11)~(13)代入,通过权重系数将两个优化子 函数转换成待优化的单目标函数。

$$J = \tau_{1} \cdot \frac{1}{2} m a_{1}^{2} t_{1}^{2} + \tau_{1} \cdot \frac{1}{2} \rho C_{X}(\alpha_{c}) A_{\text{TS}} V_{c}^{2} \cdot (l - V_{c} t_{3} \cos \alpha_{c}) + \tau_{1} \cdot \frac{1}{2} \rho C_{Y}(\alpha_{c}) A_{\text{TS}} V_{c}^{2} \cdot (V_{c} t_{3} \sin \alpha_{c}) + \tau_{2} \cdot k t_{3}$$
(15)

其中
$$t_1 = \frac{v_{\max}}{a_1}, t_3 = \left(\frac{v_{\max}}{a_1} + \frac{l - \frac{v_{\max}^2}{2a_1} - \frac{v_{\max}^2}{2a_2}}{v_{\max}} + \frac{v_{\max}}{a_2}\right), 则$$

待优化求解的变量为 a_1, a_2, v_{max} ; 即为 UUV 匀速段的 速度。

设初始种群大小为 500,学习因子 $c_1 = c_2 = 0.5$,惯性 因子 $\omega = 0.8$, 选择最大迭代次数为 500;设定 UUV 加速 及减速段的加速度大小相同,即 $a_1 = a_{20}$

3.2 基于模型预测滚动优化的小偏差绿色动态控位方 法设计

各 UUV 单体的一般运动形式为低速运动,机动性要 求较弱,并且 UUV 的运动趋势可以根据自身的当前状 态、执行机构的输出以及由传感器所感知的环境信息进 行适当估计,以控制偏差作为输入,执行机构控制量作为 输出,采用改进的广义预测控制考虑 UUV 柔性区域动态 控位的控制器设计^[18-19],UUV 在刚性守位区内时的绿色 动态控位原理,如图7所示。

考虑到在总体上重点要求 UUV 降低功耗、降低动车



图 7 UUV 在刚性守位区内时的绿色动态控位原理

Fig.7 Green dynamic positioning principle of UUV in rigid guard area

频次、降低辐射噪声,故设计性能指标函数为:

$$J = \sum_{j=1}^{m} \mu(y(k+j), y_{d}, R_{1}, R_{2}) +$$

$$\sum_{j=1}^{m} \lambda(j) \left[\Delta u(k+j-1) \right]^{2} +$$

$$\sum_{j=1}^{m-1} \varphi(j) \left[y(k+j+1) - y(k+j) \right]^{2}$$
(16)

式中: R_1 、 R_2 分别为柔性守位区和刚性守位区半径, $R_1 < R_2$; C_1 、 C_2 为根据经验设定的常数, $C_1 < C_2$ 。

式(16)中第3项将UUV的输出量变化量也作为性能指标函数的一项,能够抑制输出量的超调及跟踪期望状态时产生的波动,使UUV的控制输出量更平稳地跟踪目标状态,从而减少UUV动车频率。其中, n 为预测长度,m 为控制长度, $1 < n,m \le n$;令控制加权系数 $\lambda(j)$ 为常数 $\lambda;y(k)$ 为实际输出的控制量;y(k+j) 为UUV 的未来输出控制量; $\Delta u(k+j) = 0, j = m, \dots, n, 表示 m 个节拍后控制量不再产生变化;<math>w(k)$ 为期望输出值,取:

$$w(k + j) = \alpha' y(k) + (1 - \alpha')y_d$$
 (17)
式中: α 为柔化系数; y_d 为 UUV 的期望状态, $\Diamond \varphi(j) = \gamma(j)/T_s^2$ 。 $\Diamond \gamma(j)$ 为定值 γ ,则性能指标函数中的抑制波动项可写为:

$$\sum_{k=1}^{m-1} \gamma [(y(k+j+1)-y(k+j))/T_s]^2$$
(18)

该项为 UUV 的加速度项。利用粒子群优化算法,求 解上述准则函数的最小值,得到优选的控制序列:

$$\Delta U = \left[\Delta u(k), \Delta u(k+1), \cdots, \Delta u(k+m-1) \right]^{\mathrm{T}}$$
(19)

为避免开环控制序列 ΔU 减弱控制的实时性,避免 环境及自身因素引起运动控制系统失控,故采用闭环控 制律,仅将得到的 m 个控制量中的第1个控制量付诸实 施,采用式(20)对 UUV 未来时刻输出进行预测。

$$\boldsymbol{Y}_{p} = \boldsymbol{a}\Delta u(k) + \boldsymbol{Y}_{p0} \tag{20}$$

式中: Y_p 、 Y_{p0} 分别表示在 t = kT 时刻, 有 $\Delta u(k)$ 及无 $\Delta u(k)$ 作用下的未来 p个时刻 UUV 控制系统预测的控 制输出; $\boldsymbol{a} = [a_1, a_2, \dots, a_p]^T$ 为在各采样时刻,单位阶跃响应的值。

由于 UUV 任务环境及本身因素,构成预测误差:

$$(k+1) = y(k+1) - \hat{y}(k+1)$$
(21)

由以式(21)对其他未来时刻的预测值进行加权修 正,可得:

$$\tilde{\boldsymbol{Y}}_{p} = \boldsymbol{Y}_{p} + he(k+1) \tag{22}$$

式中: \tilde{Y}_{p} 是在 t = (k + 1)T 时刻,经过预测误差校正后预 测的 t = (k + 1)T 时刻的控制输出量;h 为预测误差校正 矢量, $h = [h_{1}, h_{2}, \dots, h_{p}]^{T}, h_{1} = 1$ 。

将校正后的 Y, 作系统下一时刻的预测初值,令:

 $y_0(k+i) = \hat{y}(k+i+1) \ (i=1,2,\cdots,p-1) \ (23)$

可由式(23)对得出下一时刻的预测初值,在进行过 $\Delta u(k)$ 控制作用后,采集 k + 1时刻的控制输出信息,并 开始新一轮的预测、校正、优化,使得该 UUV 动态控位系 统成为了一个闭环的负反馈系统。

上述改进的广义预测控制是反复在线进行的操作, 适用于当 UUV 距离目标定位点较近时的动态控位及阵 型保持需求。

4 UUV 绿色动态控位方法仿真验证

4.1 UUV 绿色动态控位能力的评定准则

在对以上绿色动态控位方法进行验证时,主要从静态和动态两个方面进行评定。静态方面主要考虑控制作用的总时间,总时间将直接影响控制的总输出及机械损耗两部分;动态方面则主要考虑控制量的变化频率及变化幅度。

4.2 典型阵型下的 UUV 集群阵型保持能力验证仿真

由于阵型保持需要同时满足各 UUV 的阵位保持及 航向保持两个关键要素。设定本节仿真试验中各从 UUV 的刚性守位区半径为 30 m,柔性守位区半径为 20 m,海流流速为 1 m/s,各组仿真时间为 50 s。

首先验证 UUV 集群的一字形阵型保持能力。设定 各 UUV 的目标定位点为 X = [10,90,170,250,330], Y = [20,20,20,20,20], 目标航向为正北方向。海流流向为南偏西 45°。各 UUV 的初始位置为随机生成的柔性守位 $区内某一点, 初始航向角度为 <math>\psi = [30,90,150,210, 270]°, 仿真结果如图 8 和 9 所示。$

根据仿真结果,主 UUV 能够基本保持位置在目标定 位点附近1.1 m 以内,各从 UUV 能够保持自身位置在各 自的刚性守位区即目标定位区域内。且不同初始航向的 UUV 均能够较快地收敛至目标航向,并具备一段时间内 保持该目标航向的能力。则判定 UUV 集群具备了在海 流干扰下横一字形阵型保持的能力。



Fig.8 Simulated one line formation of UUV swarm



同理对三角形阵型保持能力进行仿真试验验证。设 各 UUV 目标定位点为 *X* = [10,95,180,265,350], *Y* = [20,70,120,70,20],目标航向 45°。海流流向南偏东 45°。各 UUV 初始航向角 ψ = [0,90,135,180,230]°,仿 真结果如图 10 和 11 所示。



Fig.10 Simulated triangular formation of UUV swarm

根据以上结果,各从 UUV 能够将自身位置始终保持 在刚性守位区以内,主 UUV 距离目标定位点的位置偏差 均方差为0.87 m。结合 UUV 集群三角形阵型位姿保持需 求分析,三角形阵型的开角为 α_{tri}=107.19°,α_{brd}=22.918°,



图 11 UUV 集群三角形阵型保持过程的航向变化曲线 Fig.11 Simulated heading change of triangular formation of UUV swarm

满足 α_{bnd}≤30°的要求。同时,各 UUV 具备精确控制航向 并保持目标航向的能力,判定该 UUV 集群具备三角形阵 型保持的能力。

同理对 UUV 集群的矩形阵型保持能力进行仿真验 证。各 UUV 的目标定位点为 *X* = [10,10,90,170,170], *Y* = [20,180,100,180,20],目标航向 180°。海流流向北 偏东 45°。初始航向 *ψ* = [45,90,135,225,270]°,仿真结 果如图 12 和 13 所示。



根据以上结果,主 UUV 能够保持在距离目标定位点 0.97 m 以内的区域,各从 UUV 由初始位置开始漂移或 控位,直至再次回到目标定位点,再开始对位置无控制。 各 UUV 在 10 s 左右,均已能够调整至目标航向,并在接 下来的控位过程中保持该航向不变。 综上,本文所提出的 UUV 绿色动态控位方法,具备 在各阵位点的位置及航向保持能力,能够满足 UUV 集群 在面向协同观探测任务时的阵型保持要求。

4.3 单 UUV 的绿色动态控位策略及方法试验仿真

对 UUV 集群中的单 UUV,首先验证本文提出的改进 广义预测控制的实时性及精确性,在此基础上,分别针对 UUV 初始位于柔性守位区内及刚性守位区外两种情况 进行绿色控位策略及方法的验证,并且在设计案例时考 虑了以上过程的衔接性,这 3 部分试验将覆盖策略中可 能出现的各种情况。

1) 对改进广义预测控制方法的验证

仿真试验时长 300 s,采样周期为 0.5 s。UUV 初始 航向为 0°,UUV 的目标定位点为(10,20)。设定海流为 1.5 m/s 的匀速定常流,流向为北偏西 45°,仿真结果如 图 14 和 15 所示。



图 14 改进广义预测控制的 UUV 实时精确控位轨迹 Fig.14 UUV trajectory of the improved generalized predictive control





在对 UUV 的位置及航向进行控制时,改进广义预测 控制 UUV 运动轨迹更加平滑且总体的路径更短,系统稳 定时间较改进的广义预测控制减少约 48 s。经计算得: 传统 PID 控制下的 UUV 北向、东向位置误差及航向均方 差为 2.556 m、1.506 m、3.359°;改进的广义预测控制下 分别为 1.174 m、1.093 m、2.587°。

综上,本文所提出的控制方法能够对 UUV 的航向及 位置进行实时精确控制,与传统的 PID 控制方法相比,虽 然快速性较差,但利于 UUV 平滑动车,即该方法以较低 的能耗达到预期要求的实时控制效果。

2) UUV 初始位于柔性守位区内的仿真验证

该组仿真主要验证 UUV 是否具备从 I 级区域飘出 并再从 II 级区域回到目标定位点的能力。设定仿真时间 为 200 s, UUV 起始位于柔性守位区内的目标定位点处, 初始航向为 20°,目标航向为 0°。设定 UUV 的刚性守位 区半径为 30 m,柔性守位区半径为 17 m,则 UUV 仿真结 果如图 16~18 所示。



图 16 UUV 初始位置位于柔性守位区的运动轨迹 Fig.16 Motion trajectory of UUV initially located in the flexible guarding area



Fig.17 Motion state and error of UUV initially located in the flexible guarding area





由仿真结果可知,在绿色控位策略下,UUV 北东位 置误差值先增大后快速收敛,航向误差则从初始状态快 速收敛并保持收敛,对应了策略中当 UUV 初始位于 I 级 区域时,仅控制其航向不控制位置,在海流作用下飘出 I 级区域后实时控位回到目标定位点的过程。而 PID 始终 对 UUV 的位置和航向进行控制,其位置误差均方差为 0.139 m 远小于绿色控位方法的 5.84 m。可认为本文方 法是通过牺牲部分控制精度来换取更低的能耗,使 UUV 并非总是处于频繁调整推进器推力并持续输出控制作用 的状态。

根据控制曲线,PID 控制下的 UUV 前向及横向推力 均值分别比本文的绿色控位方法多6.08、3.803 N。在航 向控制上,本文的控制方法相比 PID 整体精确度较低,但 控制曲线更加平滑柔和,超调量更小。

3) UUV 初始位于刚性守位区外的仿真验证

主要验证其是否能在基于粒子群的最优规划下,通 过加速、匀速、减速3个过程,回到刚性守位区以内,并根 据运动终点所在的区域,切换至相应的控制模式。设定 UUV 的初始位置为(-30,-51.96),目标定位点为 (0,0),目标航向为0°,仿真时间200 s,仿真结果如 图19~21所示。

根据轨迹图、误差曲线及运动控制曲线,在约 60 s 内,UUV 完成了加速、匀速、减速过程,该过程对应了全 局规划下的运动阶段。

该过程内,PID 控制下的 UUV 在初始时刻即对位置 及航向偏差进行了快速的响应,而绿色控位方法下 UUV 先按照粒子群寻优规划的时间及合力结果进行运动控 制,其北东位置误差快速收敛,UUV 航向调整至朝向目 标点后保持不变;当 UUV 结束规划任务后,判断其处于 I级区域内,则切换控制方案,开始不控位,只实时控向, 此时位置误差缓慢增大。直至 UUV 漂出柔性守位区,再 切换至相应的控位策略。



图 19 UUV 初始位置位于刚性守位区外的运动轨迹 Fig.19 Motion trajectory of UUV initially located in the rigid guarding area



图 20 UUV 初始刚性守位区外的运动状态及误差曲线 Fig.20 Motion state and error of UUV initially located in the rigid guarding area

PID 控制对 UUV 的作用体现在整个航行任务期间, 作用时间为 200 s,而绿色控位方法作用时间仅为 60 s 左 右。在两种控制方法均对 UUV 进行控制时,绿色控位方 法的控制量变化更加低频。因此当 UUV 初始位于刚性 守位区外时,UUV 可以根据本文的策略,以较低的能耗 完成控位任务。

综上所述, UUV 在本文所提出的绿色控位策略及方 法的作用下,能够到达相应的预期状态,并能够根据 UUV 当前状态完成控制模式之间的切换。



rigid guarding area

5 湖试验证

在完成了本文所提出算法的仿真实验验证后,于2019年9月在二龙湖开展了湖上验证试验。受限于试验场地及试验所需 UUV 数目,本文分别展开对3种典型 阵型下的 UUV 集群的阵型保持能力湖试试验与 UUV 的 绿色动态控位策略及方法湖上试验。

5.1 典型阵型下的 UUV 集群阵型保持能力湖试验证

本文在二龙湖的一近似矩形区域内(左上角:东经 127.625°、北纬45.77583°,右下角:东经127.6706°,北 纬45.76361°),选取5条负载完全相同的UUV构成 UUV集群,设定各UUV半径分别为5、10、30m,为验证 各UUV均具备绿色控位能力,在此设定主UUV也进行 绿色控位。设定UUV集群从某一初始位置编队航行至 目标定位区域,典型阵型下的UUV集群阵型保持能力湖 试结果如图22~24所示。图22中较长的轨迹线段即为 各UUV抵达目标定位 I级区域的轨迹,UUV到达目标 区域后,在绿色控位状态下保持120s后的运动状态。设 定横一字形UUV集群的群员间距为30m。













由湖试得到的 UUV 运动数据,当 UUV 集群抵达目标定位区域后,各 UUV 在绿色动态控位策略的控制下,保持自身位置在目标区域内,其位置误差均方差为1.5 m,且航向始终与目标航向一致,即认为满足 UUV 集群在面向协同观探测任务时的阵型保持要求。

5.2 UUV 的绿色动态控位策略及方法湖试验证

本文在二龙湖一近似矩形区域(左下角:东经 127.605 28°、北纬 45.7817°,右上角:东经 127.665°,北 纬 45.811 7°),选取 3 条负载完全相同的 UUV 构成 UUV 集群,在上述区域内进行 UUV 的绿色动态控位策略及方 法进行试验,湖上试验结果如图 25 和 26 所示。



Fig.25 Motion test trajectory of UUV initially located in the flexible guarding area



图 26 UUV 初始位置位于刚性守位区外的湖试运动轨迹 Fig.26 Motion test trajectory of UUV initially located in the rigid guarding area

3艘 UUV 分别以初始位置为柔性守位区、初始位置 为刚性守位区外进行湖上试验。根据湖上试验得到的 UUV 运动数据,UUV 在本文所提出的绿色控位策略及方 法的作用下,完成了从初始位置到目标点的协同观探测 任务,达到了相应的预期状态,与仿真结果相吻合。

6 结 论

本文针对 UUV 集群在动态控位过程中存在的噪声 扰动过大、推进器动车频繁的问题,提出了一种绿色动态 控位策略,并结合策略设计了基于粒子群优化及改进广 义预测控制的两种切换控制方案,通过仿真实验和湖上 试验验证了策略的可行性和控制器的有效性。通过仿真 对比和湖上试验,本文所提出的主从式 UUV 集群绿色动 态控位策略及方法能够在满足 UUV 集群协同观探测任 务需求的前提下,以更低的能耗完成动态控位任务。由 于本文对 UUV 动态控位过程的能耗计算仅进行了简化 计算,与实际能耗指标尚有偏差,且基于粒子群寻优设计 的全局最优规划方法,其实时性较弱,当环境干扰较大 时,本文方法的控制精度较低,在今后的研究中可以考虑 采取补偿或定时校对方法,对控制效果偏差及时进行 修正。

参考文献

 [1] 肖玉杰,邱志明,石章松.UUV 国内外研究现状及若干 关键问题综述[J].电光与控制,2014,21(2):46-49, 89.

XIAO Y J, QIU ZH M, SHI ZH S. On current research status of UUV and its critical technologies [J]. Electronics Optics and Control, 2014,21(2):46-49,89.

[2] ZHANG G, XU J, YAN Z, et al. Dynamic positioning

control of UUV in the presence of disturbances caused by working manipulators [J]. International Journal of Robotics and Automation, 2017, 32(6):590-605.

- [3] BREIVIK M, KVAAL S, ØSTBY P. From Eureka to K-Pos: Dynamic positioning as a highly successful and important marine control technology [J]. IFAC PapersOnLine, 2015, 48(16): 313-323.
- [4] 曹建春,李聪.推力分配优化算法在船舶动态控制中的应用研究[J].舰船科学技术,2017,39(6):43-45.
 CAO J CH, LI C. Research on the application of thrust allocation optimization algorithm in ship dynamic control[J]. Ship Science and Technology, 2017,39(6): 43-45.
- [5] 邓节军.基于动力分配的船舶能耗最优化算法研究[J].舰船科学技术,2018,40(22):19-21.
 DENG J J. Optimal algorithm for ship energy consumption based on dynamic distribution [J]. Ship Science and Technology, 2018,40(22):19-21.
- [6] 余婷婷.粒子群优化算法在船舶动力定位模拟器推力 系统中的应用[J].舰船科学技术,2018,40(4):58-60.
 YU T T. Application of particle swarm optimization (PSO) in the thrust system of ship dynamic positioning simulator [J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(4):58-60.
- [7] 刘贵杰,刘鹏,穆为磊,等.采用能耗最优改进蚁群算法的自治水下机器人路径优化[J].西安交通大学学报,2016,50(10):93-98.
 LIU G J, LIU P, MU W L, et al. A path optimization algorithm for AUV using an improved ant colony algorithm with optimal energy consumption [J]. Journal of Xi' an Jiaotong University,2016,50(10):93-98.
 [8] 郭兴海,计明军,刘双福.融合多目标与能耗控制的无
 - 8] 郭兴海, 计列华, 刘双福. 融合多日标与能托控制的无人仓库内 AGV 路径规划[J/OL]. 计算机集成制造系统:1-15[2020-06-14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20190315.0932.012. html.
 GUO X H, JI M J, LIU SH F. Multi-objective and energy consumption control in AGV routing planning in unmanned warehouse [J/OL]. Computer Integrated ManufacturingSystems: 1-15 [2020-06-14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20190315.0932.012. html.
- [9] SALA A, CARLO F D, BUGLIONI G, et al. Energy performance evaluation of fishing vessels by fuel mass flow measuring system [J]. Ocean Engineering, 2011, 38(5-6):804-809.
- [10] 刘乐,高海波,缪光辉,等.基于 PSO 优化模糊控制的 船舶能量管理策略研究[J].武汉理工大学学报,2017, 39(3):32-37.

LIU L, GAO H B, LIAO G H, et al. Study of marine energy management strategy based on fuzzy logic controller with particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017, 39(3):32-37.

- [11] XIA G, XUE J, JIAO J. Dynamic positioning control system with input time-delay using fuzzy approximation approach [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018,20(2):630-639.
- [12] DENG F, WANG L, JIAO D. Adaptive observer based backstepping controller design for dynamic ship positioning [J]. China Ocean Engineering, 2017, 31(5):645.
- [13] 张耕实.机械手作业扰动下 UUV 动态控位技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
 ZHANG G SH. Dynamic positioning technology for UUV disturbed by working manipulators [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2014.
- [14] MENG W, SHENG L H, QING M, et al. Intelligent control algorithm for ship dynamic positioning [J]. Nephron Clinical Practice, 2014, 24(4):479-497.
- [15] NGONGI W E, DU J, WANG R. Robust fuzzy controller design for dynamic positioning system of ships [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2015, 13 (5):1294-1305.
- [16] 范继伟. 基于混杂控制系统的八旋翼飞行器设计[D]. 吉林:东北电力大学,2018.

FAN J W. Design of eight rotor aircraft based on hybrid control system [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2018.

[17] ZHANG G, CAI Y, ZHANG W. Robust neural control for dynamic positioning ships with the optimum-seeking guidance[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016:1-10.

- [18] 张伦,张悦.基于广义预测控制的混杂系统控制[J].计 算机仿真,2017,34(8):138-141.
 ZHANG L, ZHANG Y. Hybrid system control based on generalized predictive control[J]. Computer Simulation, 2017,34(8):138-141.
- [19] LI W, SUN Y, CHEN H. et al. Model predictive controller design for ship dynamic positioning system based on state-space equations [J]. Mar Sci Technol, 2017, 22: 426.

作者简介



徐健,2002年、2004年和2008年于哈尔滨工程大学分别获得学士、硕士和博士学位,现为哈尔滨工程大学自动化学院教授,主要研究方向为UUV智能控制技术。 E-mail:xujian_bsa@hrbeu.edu.cn

Xu Jian received his B. Sc. degree, M. Sc.

degree and Ph. D. degree all from Harbin Engineering University in 2002, 2004 and 2008, respectively. He is currently a professor at Harbin Engineering University. His main research interests include intelligent control technology of UUV.



刘梦雄(通信作者),2018 年于哈尔滨 工程大学获得学士学位,现为哈尔滨工程大 学自动化学院硕士研究生,主要研究方向为 UUV 智能控制技术。

E-mail: liumengxiong@hrbeu.edu.cn

Liu Mengxiong (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Harbin Engineering University. His main research interests include intelligent control technology of UUV.