

文章编号: 2095-2163(2019)05-0246-04

中图分类号: TP273

文献标志码: A

基于 PSO 的多舰艇编队指挥协同控制模型仿真

刘洋, 王蕾

(海军工程大学, 武汉 430033)

摘要: 为了提高多舰艇编队指挥协同控制能力, 提出基于粒子群(PSO)寻进化的多舰艇编队指挥协同控制模型, 采用多传感融合跟踪识别方法进行多舰艇编队指挥协同控制的大数据信息采样, 分析舰艇编队的火力分布指数, 采用 Lyapunov 指数谱预测方法进行多舰艇编队的攻击能力和覆盖能力预测, 构建多舰艇编队指挥协同控制的优化目标函数, 采用粒子群进化寻优方法进行多舰艇编队指挥协同控制过程最优化求解, 将多舰艇编队指挥协同控制问题转化为粒子群进化的全局优化问题, 结合参数优化调节和攻击阵位的自适应调节, 实现多舰艇编队指挥协同控制优化, 提高多舰艇编队的攻击能力和防御能力。仿真结果表明, 采用该方法进行多舰艇编队指挥协同控制的寻优能力较好, 收敛性较强, 控制输出的稳定性较好。

关键词: PSO; 多舰艇编队; 指挥; 协同控制

Simulation of multi-ship formation command and cooperative control model based on PSO

LIU Yang, WANG Lei

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

[Abstract] In order to improve the command and cooperative control ability of multi-warship formation, a multi-warship formation command collaborative control model based on particle swarm optimization and evolution is proposed. Big data information of multi-warship formation command and collaborative control is sampled by multi-sensor fusion tracking and recognition method, the firepower distribution index of warship formation is analyzed, and the attack ability and coverage ability of multi-warship formation are predicted by Lyapunov exponential spectrum prediction method. The optimal objective function of command and cooperative control of multi-warship formation is constructed, and the optimal solution of command and collaborative control process of multi-warship formation is carried out by using particle swarm evolutionary optimization method. The command and collaborative control problem of multi-warship formation is transformed into the global optimization problem of particle swarm evolution. Combined with parameter optimization adjustment and adaptive adjustment of attack position, the command and collaborative control optimization of multi-warship formation is realized. The attack ability and defense ability of multi-ship formation is improved. The simulation results show that the method has good optimization ability, strong convergence and good stability of control output.

[Key words] PSO; multi-ship formation; command; cooperative control

0 引言

随着高性能武器装备的列装, 海军作战舰艇的攻击性能越来越强大, 进行多舰艇编队作战成为未来海上作战的主要形式, 研究多舰艇编队指挥协同控制方法, 在提高水面舰艇的攻击和防御能力方面具有重要意义。对多舰艇编队指挥协同的控制建立在对攻击路径和攻击火力的自适应寻优控制基础上, 建立多舰艇编队指挥协同控制的目标参数模型, 采用自适应寻优控制方法, 构建多舰艇编队火力控制优化模型, 实现多舰艇编队火力自动控制和仿真分析, 提高多舰艇编的攻击能力^[1]。

传统方法中, 对多舰艇编队指挥协同控制方法

主要采用遗传算法和仿生算法, 建立多舰艇编队指挥协同控制的目标函数, 采用过程寻优和攻击节点的优化部署方法, 进行多舰艇编队指挥协同控制, 但上述方法进行多舰艇编队指挥协同控制的模糊度较大, 时滞较长, 不能有效满足多舰艇编队指挥协同控制和实时控制的特点^[2], 对此, 本文提出基于粒子群(Particle swarm optimization, PSO)寻进化的多舰艇编队指挥协同控制模型, 采用多传感融合跟踪识别方法进行多舰艇编队指挥协同控制的大数据信息采样, 分析舰艇编队的火力分布指数, 采用粒子群进化寻优方法进行多舰艇编队指挥协同控制过程最优化求解, 将多舰艇编队指挥协同控制问题转化为粒子群进化的全局优化问题, 实现参数优化求解, 最

作者简介: 刘洋(1983-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 舰艇作战指挥与火力控制工程。

收稿日期: 2019-07-08

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

后进行仿真实验分析,得出有效性结论。

1 被控对象模型和参数优化

1.1 多舰艇编队指挥协同控制对象模型

为了实现对多舰艇编队指挥协同控制优化设计,采用物联网和多传感器组网方法,进行多舰艇编队指挥协同控制的约束参数采集,采集的控制参数主要有舰艇的航速、阵位、火力点以及弹药发射量等参数,对舰艇的位姿参数采用传感器进行实时采集,采集的舰艇参数主要有速度、磁通量等信息,利用传感器融合跟踪识别方法进行误差补偿^[3],采用 Kalman 滤波融合方法进行参数融合,实现多舰艇编队的协同控制,总体实现流程如图 1 所示。

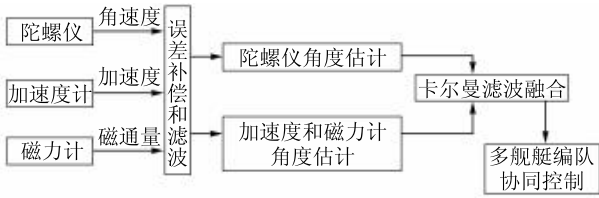


图1 多舰艇编队的协同控制总体实现框图

Fig. 1 Block diagram of cooperative control of multi-ship formation

考虑由 N 个传感器节点的构建的传感器网络进行舰艇编队的参数采样,设有 m 个舰艇编队攻击节点 $A_1, A_2 \dots, A_n$, 每个舰艇编队攻击路径分布点的负载分别表示为 $a_1, a_2 \dots, a_n$, 舰艇编队攻击路径规划的控制指令信息检测输出为:

$$\begin{cases} x_{i,t+1} = (x_{i,t} + x'_{i,t+1})/2, \\ y_{i,t+1} = (y_{i,t} + y'_{i,t+1})/2. \end{cases} \quad (1)$$

以节点的测度信息作为信息引导因素进行舰艇编队攻击路径的自适应规划,采用模糊神经网络控制技术进行海上舰艇编队攻击路径自动规划的寻优控制。在分布式协同调度模型下进行海上舰艇编队攻击路径规划分布式设计,构建自适应寻优控制模型^[4],将多舰艇编队中主战舰艇 X_{best} 位置定义为一个 i 维的粒子群初始位置点,采用循环移位方法,将初始位置替换为 $X_{ex-best}$ 的第 i 维值,构建多舰艇编队指挥协同控制的模糊线性动态系分布结构模型,表示为如下方程:

$$V_{id} = wV_{id} + c_1 rand() (p_{id} - x_{id}) + c_2 Rand() (p_{gd} - x_{id}), \quad (2)$$

$$x_{id} = x_{id} + V_{id}, \quad (3)$$

其中, w 为构建多舰艇编队指挥协同控制的惯性权重, c_1 和 c_2 分别表示舰艇编队的最优位置矢量构成结构:

舰艇编队的位置矢量: $X_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3} \dots, x_{i,D}\}$

舰艇编队的速度矢量: $V_i = \{v_{i,1}, v_{i,2}, v_{i,3} \dots, v_{i,D}\}$

攻击舰艇的个体最优位置矢量: $p_i = \{p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,D}\}$

通过上述分析,构建多舰艇编队指挥协同控制对象模型,结合参数优化寻优进行攻击阵列优化设计^[5]。

1.2 控制参数优化

采用多传感融合跟踪识别方法进行多舰艇编队指挥协同控制的大数据信息采样,分析舰艇编队的火力分布指数^[6],分析多舰艇编队的火力控制系统的线性化参数,本次研究中以 C_1, C_2 为学习因子, $rand()$ 为 $[0, 1]$ 均匀分布的随机函数,采用随机化阵列控制方法进行舰艇编队攻击的火力控制,得到自适应迭代更新公式如下:

$$ea = (W_\beta - W_\alpha) / sum(1:Iterations), \quad (4)$$

$$\omega = \omega - (Iterations - iter) \times ea, \quad (5)$$

其中 W_α, W_β 代表多舰艇编队指挥协同控制的惯性权重上下限。采用协同滤波融合控制方法,进行多舰艇编队指挥协同控制的误差修正,得到均方误差函数计算为:

$$E = \sum_{j=1}^q E_j / (q * k) \quad \text{where } E_j = \sum_k \varepsilon_k^2 = \sum_k (d_k - c_k)^2, \quad (6)$$

其中, q 是多舰艇编队指挥协同控制的样本数, ε_k 是 PSO 粒子进化的敏感系数, d_k 是多舰艇编队指挥协同控制滤波函数, c_k 是 PSO 输出层第 k 个节点的粒子跟踪轨迹。根据粒子进化过程中的变异特征,进行控制参数优化调节,得到优化调节模型为:

$$v_i = wv_{i-1} + c_1 rand_1() \cdot (pbest - x_{i-1}) + c_2 rand_2() \cdot (gbest - x_{i-1}), \quad (7)$$

$$x_i = x_{i-1} + v_i. \quad (8)$$

其中, v_i 是多舰艇编队指挥协同控制粒子群和个体速度; x_i 是粒子的适应度值; c_1 和 c_2 是变异常数,一般取 $c_1 = c_2 = 2$ 。

2 控制算法优化设计

2.1 粒子群寻优算法

在上述采用多传感融合跟踪识别方法进行多舰艇编队指挥协同控制的大数据信息采样并进行参数调节的基础上,进行舰艇编队的协同控制模型的优

化设计,本文提出了基于 PSO 的多舰艇编队指挥协同控制模型,分析舰艇编队的火力分布指数,采用 Lyapunov 指数谱预测方法进行多舰艇编队的攻击能力和覆盖能力预测^[7],在小扰动的前提下进行火力攻击参数估计,表示为对每个 X_i 求系统传递函数,为:

$$l_i(k) = (1 - \rho)l_i(k-1) + \gamma f(x_i(k)), \quad (9)$$

其中, f_i 是适应度函数,表示多舰艇编队的防御能力; $P_{ij}(k)$ 表示 k 时刻第 i 个粒子的转移概率,采用模糊相关性约束控制方法,进行多舰艇编队系统控制的路径寻优^[8],得到:

$$\min_Q \frac{1}{2} \| Q |_{\Omega} - P |_{\Omega} \|_F^2 + \mu \| Q \|_*, \quad (10)$$

火力控制的模糊约束参量 $u_i(k) \in R^{n \times 1}$ 是均值为零且方差为 $D_i(k)$ 的随机扰动项,求得控制误差系数 μ 的值,设 $\mu = (\sqrt{n_1} + \sqrt{n_2})\sqrt{\rho}\hat{\sigma}$, n_1 、 n_2 是自相关系数,考虑多舰艇编队指挥协同控制模型的非线性,得到火力控制节点个体之间的距离为:

$$\text{dist}(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{jk})^2 + (f(X_i) - f(X_j))^2}, \quad (11)$$

考虑全局优化问题 $\min\{f(x)\}$, 采用粒子群进化方法,得到变异适应度值为:

$$\text{MdistFg} = \sum_{i=1}^N \text{dist}(i, F_g) / N, \quad (12)$$

采用反演积分补偿方法^[9],得到多舰艇编队指挥协同控制的最优极值在 $k+1$ 时刻的位置为:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + s \left(\frac{x_j(k) - x_i(k)}{\|x_j(k) - x_i(k)\|} \right), \quad (13)$$

PSO 寻优的均方误差函数计算为:

$$E = \sum_{j=1}^q E_j / (q * k) \quad \text{where } E_j = \sum_k \varepsilon_k^2 = \sum_k (d_k - c_k)^2, \quad (14)$$

其中, q 是输入样本数, ε_k 是多传感融合跟踪的误差系数,考虑全局优化问题 $\min\{f(x)\}$, 得到舰艇编队的协同控制过程中的粒子更新公式如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^t), \\ x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1}. \end{cases} \quad (15)$$

在迭代搜索过程中,结合收敛性控制方法进行最优攻击阵位寻优,实现攻击阵列的自动演化和调度^[10]。

2.2 多舰艇编队指挥协同控制输出

结合参数优化调节和攻击阵位的自适应调节,实现多舰艇编队指挥协同控制优化,并计算各粒子权值:

$$\tilde{w}_k^i = \tilde{w}_{k-1}^i \frac{p(z_k / \tilde{x}_k^i) p(\tilde{x}_k^i / x_{k-1}^i)}{q(\tilde{x}_k^i / x_{k-1}^i)}, \quad (16)$$

构建 Lyapunov 函数进行多舰艇编队指挥协同控制的误差调节,构建最优学习函数,将多舰艇编队指挥协同控制问题转化为粒子群进化的全局优化问题,PSO 算法更新公式为:

$$\begin{cases} x_{id}^{t+1} = \omega x_{id}^t + c_1 r_1 (p_{ad} - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^t); \\ p_{ad} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{id}. \end{cases} \quad (17)$$

其中, p_{ad} 为多舰艇编队指挥协同控制中所有的个体最优位置,多舰艇编队指挥协同智慧的统计概率密度函数 $q(x_k^i / x_{k-1}^i)$,更新的粒子集 $\{\tilde{x}_k^i\}_{i=1}^N$ 。以此为输入权值,实现多舰艇编队指挥协同控制。

3 仿真实验与结果分析

为了测试本文方法在实现多舰艇编队指挥协同控制中的应用性能,进行仿真实验,实验采 Matlab 7 设计,设定多舰艇编队的舰艇数量为 15,粒子群寻优的种群规模设置为 20,自适应迭代次数为 120 次,多舰艇编队指挥协同控制的决策函数维度设置为 5,延迟误差为 0.34 ms,舰艇的位姿参数设定为:

$$\Phi_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 0.058 & 42 & 0.05 & 0.05 & 0.05 \\ 0 & 1.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.05 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\Gamma_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 0.753 & 7e-004 & 1.294 & 3e-003 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

系统指挥控制过程中的干扰矩阵为:

$$\Gamma_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.64 & 0.64 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.28 & -0.32 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.56 & 0.64 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

根据上述仿真环境和参数设定,进行多舰艇编

队指挥协同控制仿真,得到最优控制仿真输出如图2所示。

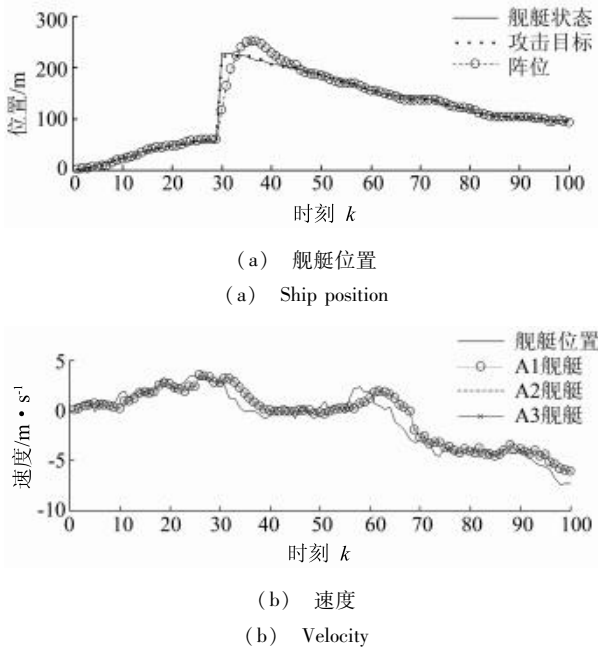


图2 多舰艇编队指挥协同控制仿真输出

Fig. 2 Simulation output of command and cooperative control of multi-ship formation

分析图2得知,采用本文方法能有效实现多舰艇编队指挥协同控制,对舰艇的攻击阵位、目标位置以及速度等参数的估计精度较高。采用不同方法测试控制函数的寻优性能,得到对比结果如图3所示。

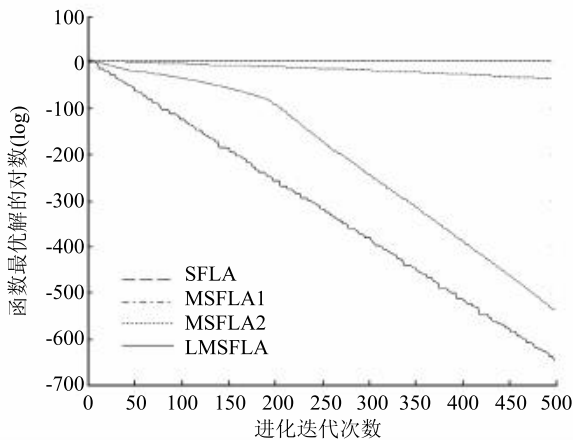


图3 寻优性能对比

Fig. 3 Optimization performance comparison

分析图3得知,采用本文方法进行多舰艇编队指挥协同控制的寻优能力较好,收敛性较强,控制输出的稳定性较好,具有很好的多舰艇编队指挥协同控制指挥调度能力。

4 结束语

研究多舰艇编队指挥协同控制方法,在提高水面舰艇的攻击和防御能力方面具有重要意义。本文提出基于粒子群寻优进化的多舰艇编队指挥协同控制模型,将编队指挥协同控制问题转化为粒子群进化的全局优化问题,结合参数优化调节和攻击阵位的自适应调节,实现多舰艇编队指挥协同控制优化,提高多舰艇编队的攻击能力和防御能力。研究得知,采用本文方法进行多舰艇编队指挥协同控制的调度性能较好,对舰艇的攻击阵位等参数的估计精度较高,寻优能力较强。

参考文献

- [1] 傅冰,肖玉杰. 跨平台火力兼容评估指标体系研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(5):110-114.
- [2] 刘振,徐学文,李静. 考虑协同制导的编队一体化防空问题分析与求解[J]. 指挥与控制学报,2018,4(3):213-219.
- [3] 葛立志. 基于全弹道控制分析的水下航行器攻击模型视景仿真[J]. 舰船电子工程,2015,35(3):137-141.
- [4] 傅冰,杨华东,肖玉杰. 舰艇编队跨平台武器射命中前火力兼容判断研究[J]. 海军工程大学学报,2018,30(6):69-73.
- [5] 傅冰,曹渊,肖玉杰. 跨平台非制导射命中末端火力兼容性判断研究[J]. 兵工学报,2019,40(2):377-383.
- [6] 代森强,贺鹏. 水面舰队防空配置问题研究[J]. 信息工程大学学报,2016,17(5):613-616.
- [7] 蔡芝明,金家善,陈砚桥. 舰艇编队备件携带方案的混合约束问题研究[J]. 海军工程大学学报,2016,28(5):80-85,111.
- [8] 蔡芝明,金家善,陈砚桥. 非稳态及多约束下多层次系统器材配置优化方法[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(1):36-46.
- [9] TONG Shaocheng, HUO Baoyu, LI Yongming. Observer-based adaptive decentralized fuzzy fault-tolerant control of nonlinear large-scale systems with actuator failures[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(1): 1-15.
- [10] HAN S I, LEE J M. Fuzzy echo state neural networks and funnel dynamic surface control for prescribed performance of a nonlinear dynamic system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 1099-1112.