

· 协同探测应用技术 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.013

多机协同对抗雷达组网的干扰资源分配研究

陈思南

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036)

摘要:在现代信息化战场上,相对于传统的雷达各自独立探测和制导的作战方式,多雷达组网探测预警的发展趋势日益明显,雷达组网后对突防飞机的安全造成了巨大威胁。远距支援干扰飞机在掩护突防编队作战过程中,为了发挥有限干扰资源的最大效能以保证突防飞机的安全,通过对多机协同干扰对抗雷达组网作战模式的分析,以突防飞机生存概率作为目标函数,建立约束条件下的干扰资源分配模型。重点分析了突防全过程的干扰掩护情况,利用遗传算法解决了最优资源分配方案求解的问题。仿真结果表明,突防飞机在支援干扰飞机协同掩护下的生存概率为96.72%。分配结果满足突防作战的要求,合理的分配干扰资源对充分发挥远距支援干扰飞机的协同作战能力作用显著。

关键词:协同干扰;雷达组网;资源分配;干扰效果;遗传算法

中图分类号:TN972 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2024)09-0098-05

引用格式:陈思南. 多机协同对抗雷达组网的干扰资源分配研究[J]. 现代雷达, 2024, 46(9): 98-102.

CHEN Sinan. A study on resource allocation in multi-aircraft cooperative jamming for netted radar[J]. Modern Radar, 2024, 46(9): 98-102.

A Study on Resource Allocation in Multi-aircraft Cooperative Jamming for Netted Radar

CHEN Sinan

(The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: In the modern information battlefields, compared with the traditional combat mode where radars make independent detection and guidance, the multi-radar networking for detection and early warning has an increasingly more obvious development trend. The radar networking poses a huge threat to the safety of penetrating aircraft. In the process of covering and penetrating formation operations by long-range support jamming aircraft, the survival probability of the penetrating aircraft is used as the objective function to establish the jamming resource allocation model under constraints through analyzing the operation mode of multi-aircraft cooperative jamming to netted radar, so as to ensure the safety of penetrating aircraft with the maximum effectiveness of limited jamming resources. The jamming cover in the whole process of penetration is analyzed emphatically, and the problem of optimal resource allocation scheme is solved by genetic algorithm. The simulation results show that the survival probability of penetrating aircraft is 96.72% under the cooperative cover of support jamming aircraft. The allocation results meet the requirements of penetration operations, and the reasonable allocation of jamming resources plays a significant role in giving full play to the cooperative engagement capability of long-range support jamming aircraft.

key words: cooperative jamming; netted radar; resource allocation; jamming effectiveness; genetic algorithm

0 引言

近年来,随着组网通信技术和信息融合处理技术的迅猛发展,雷达组网系统对突防编队的威胁性越来越大^[1-2]。为了保护我方突防飞机的安全并完成既定的突防作战任务,需要运用多架远距支援干扰飞机协同作战对抗多雷达组网预警探测系统。在现代电子战的战场上,需要对有限的干扰资源合理地分配,以达到协同干扰效能的最大化,从而完成对突防飞机的有效掩护,干扰资源分配这一问题也是各国学者研究的重点和热点^[3]。

针对多雷达目标的干扰资源分配问题,文献[4]从干扰机压制概率和雷达的反干扰概率为出发点,提出了多干扰装备对抗多雷达目标的分配模型,通过遗传算法制定出最优分配方案;文献[5]从多机协同噪声干扰的角度建立了多目标的干扰资源分配模型,以最大发现概率为目标函数,解决了伴随式协同干扰的资源分配问题;文献[6]通过对干扰频段覆盖率的分析,运用人工鱼群算法解决了协同空战的干扰资源分配问题。然而干扰资源分配只考虑静态下的对抗是不充分的,突防作战是一个动态的过程,飞机的位置会随着时间的推移而变化,干扰机的干扰效果也会随之变化,从而会影响最终的突防任务。

针对上述问题,本文以多架远距支援干扰机协同作战对抗多雷达组网为作战场景,基于突防飞机的生存概率,构建突防全过程背景下的干扰资源分配模型。通过遗传算法验证求解分配最优解,验证了模型的有效性。

1 协同干扰作战场景

敌方多雷达之间通过组网通信的方式相互共享探测目标信息,我方多架远距支援干扰机在后方巡航飞行,对敌方雷达组网系统实施协同干扰^[7],掩护我方突防飞机向前突防作战,典型作战场如图1所示。

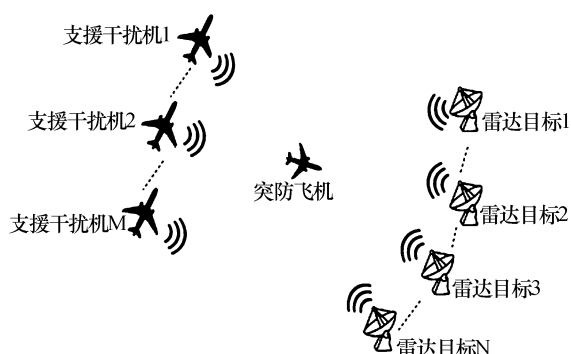


图1 协同干扰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cooperative jamming

(1) 敌方单部雷达进行目标探测之后,再通过内部网络将目标信息统一传输到融合中心进行目标融合处理^[8],融合中心根据设定的融合规则对目标信息处理后,形成雷达组网系统的探测情报。

(2) 我方通过事先的侦察已知敌方雷达目标信息。每架远距支援干扰飞机都携带有一定数量的干扰资源,多架支援干扰飞机之间通过干扰资源的统一分配,合理利用已有资源协同干扰敌方雷达组网。

(3) 突防飞机按照既定路线向敌方阵地发起进攻,在支援干扰飞机的掩护下,可以在较长的一段时间内不被敌方雷达组网系统发现。

整个突防过程中,远距离支援干扰飞机持续干扰,突防飞机在持续掩护下安全到达作战阵位,对敌方雷达目标实施打击摧毁,从而完成突防作战任务。

2 干扰资源分配模型

2.1 干扰资源模型

假设我方有 M 架远距离支援干扰机掩护突防飞机,对抗由 N 个雷达目标组成的雷达组网系统,每架干扰机最大可干扰敌方雷达目标的数量为 l 。为了降低模型的复杂度,将每架干扰机分解为 l 个干扰资源,

即共有 M' 个干扰资源。

$$M' = M \times l \quad (1)$$

单个干扰资源掩护突防飞机,对抗单部雷达的干扰效果用矩阵 U 表示^[9]。

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1N} \\ u_{21} & & \ddots & \\ & & & \ddots \\ u_{M'1} & & & u_{M'N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: u_{ij} 表示第 i' 个干扰资源对抗第 j 个雷达目标的干扰效能。

支援干扰机的干扰资源分配方案用矩阵 S 表示。

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1N} \\ s_{21} & & \ddots & \\ & & & \ddots \\ s_{M'1} & & & s_{M'N} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: s_{ij} 表示第 i' 个干扰资源对第 j 个雷达目标实施干扰的情况^[10]。 $s_{ij} = 1$ 表示第 i' 个干扰资源被分配用于干扰第 j 个雷达目标; $s_{ij} = 0$ 表示不干扰。

2.2 干扰效果模型

现代雷达都具有很强的抗干扰能力,采用旁瓣对消和旁瓣匿影等措施可以有效地对抗来自旁瓣的干扰。所以只有当干扰机和突防飞机位于雷达同一波束内才能取得良好的干扰效果,如图2所示。 θ 表示雷达波束宽度, $A_{ij}(t)$ 表示 t 时刻第 i' 个干扰资源与突防飞机相对于第 j 个雷达目标的角度。

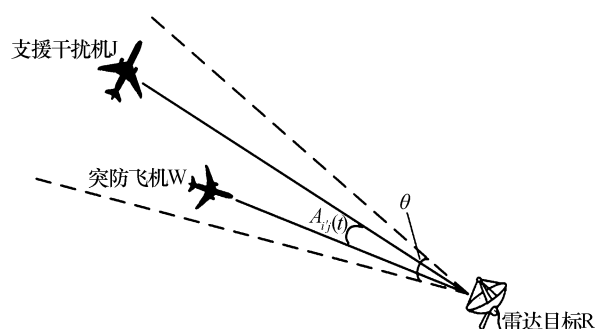


图2 干扰效果示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interference effect

战前根据作战任务部署干扰机和突防飞机起止时刻的坐标位置,假设飞机匀速直线运动,则可以推算出任意时刻飞机的位置,从而推算干扰机和突防飞机相对于雷达目标的夹角。

$$A_{ij}(t) = \arccos \left\{ \frac{[x_{J_i}(t) - x_{R_j}][x_w(t) - x_{R_j}] + [y_{J_i}(t) - y_{R_j}][y_w(t) - y_{R_j}]}{\sqrt{[x_{J_i}(t) - x_{R_j}]^2 + [y_{J_i}(t) - y_{R_j}]^2} \sqrt{[x_w(t) - x_{R_j}]^2 + [y_w(t) - y_{R_j}]^2}} \right\} \quad (4)$$

式中: $[x_{j_{i'}}(t), y_{j_{i'}}(t)]$ 表示 t 时刻第 i' 个干扰资源的坐标位置; $[x_w(t), y_w(t)]$ 表示 t 时刻突防飞机的坐标位置; (x_{R_j}, y_{R_j}) 表示第 j 个雷达目标的坐标位置。

突防过程中干扰效果量化表示如下

$$u_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & A_{ij}(t) \leq \theta \\ 0 & A_{ij}(t) > \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_{ij}(t) = 1$ 表示 t 时刻第 i' 个干扰资源可以有效掩护突防飞机, 使其不被第 j 个雷达目标发现; $u_{ij}(t) = 0$ 则表示掩护干扰无效。

2.3 雷达组网模型

根据干扰资源分配结果和干扰资源对雷达目标的干扰效果, 可以得到单部雷达探测突防飞机的探测结果。

$$p_j(t) = \prod_{i'=1}^{M'} [1 - s_{ij'} u'_{ij'}(t)] \quad (6)$$

可见, $p_j(t) \in \{0, 1\}$, 其中 $p_j(t) = 1$ 表示在 t 时刻第 j 个雷达可以成功地探测到突防飞机; $p_j(t) = 0$ 则表示探测失败。

雷达组网系统中每部雷达对突防飞机的探测都是相互独立的。为了在降低虚警率的同时, 提高探测概率, 融合中心收到各雷达的探测结果后, 通常会对所有雷达的探测结果遵循秩 K 判决准则进行融合处理^[11]。即当不小于 K 个雷达探测到目标时, 雷达组网系统则判决存在真实目标; 当小于 K 个雷达探测到目标时, 则会判决为虚假目标。

$$D(t) = \begin{cases} 1 & \sum_{j=1}^N p_j(t) \geq K \\ 0 & \sum_{j=1}^N p_j(t) < K \end{cases} \quad (7)$$

2.4 目标函数和约束条件

干扰机的协同支援干扰就是为了保证突防飞机在突防过程中的安全, 所以用突防飞机的生存概率作为干扰资源分配的目标函数。突防飞机的生存概率定义为在整个突防过程中, 没有被敌方雷达组网系统发现的时间占总突防时间的比值。

$$F = 1 - \frac{\sum_{t=t_0}^{t_e} D(t)}{t_e - t_0 + 1} \quad (8)$$

式中: t_0 和 t_e 分别表示突防作战过程的起始时刻和终止时刻。

考虑到作战过程中干扰资源的局限性、利用率以及协同干扰效果等诸多因素, 设置干扰资源分配模型的约束条件如下

$$\sum_{j=1}^N s_{ij} \leq 1 \quad (i' = 1, 2, \dots, M') \quad (9)$$

$$\sum_{i'=(i-1)l+1}^{il} s_{ij} \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

$$s_{ij} \in \{0, 1\} \quad (11)$$

式(9)表示每个干扰资源最多只能对一个雷达目标实施干扰; 式(10)表示同一个雷达目标不会分配给同一个支援干扰机多次, 以免损失干扰机的干扰效能; 式(11)表示每个雷达目标对每个干资源只有分配和不分配两种情况^[12]。

3 遗传算法

遗传算法借鉴了自然界中生物进化的规律, 将遗传学中的交叉和变异等操作作用于不同的染色体, 从而生成新的个体。再根据适者生存的原则, 保留环境适应能力强的个体, 并不断地繁衍进化, 经过一定的进化代数, 最终得到全局最优或者近似全局最优^[13-15], 算法流程如图3所示。

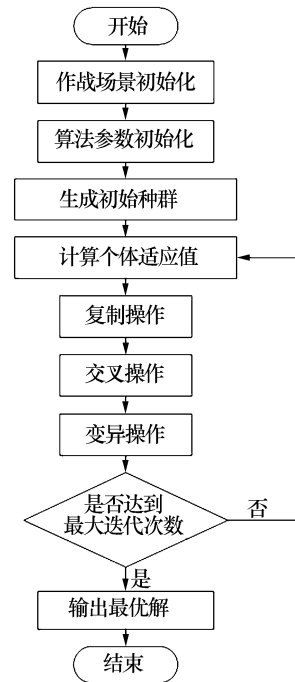


图3 遗传算法流程图
Fig. 3 Flow chart of genetic algorithm

遗传编码方式选择十进制编码, 每个染色体的长度为所有干扰机的干扰资源总和, 每个基因的数值表示分配给该干扰资源的雷达目标编号。

以突防飞机的生存概率作为算法的适应值函数。对于不满足约束条件的个体施加惩罚措施, 即直接将该个体的适应值判为0。

在种群的初始化过程中为了避免生成适应度为0的个体, 影响算法的收敛效率。先对每个干扰机内部

的干扰资源进行目标分配,再将所有干扰资源的分配结果组合成一个染色体,并且每个干扰资源都分配有雷达目标,从而满足式(9)~式(11)的约束条件。

遗传算法中的复制操作可以将适应值较大的染色体遗传给下一代,本文采用轮盘赌的选择方式;交叉操作可以产生新的个体,同时子代也保留了父代的优秀基因,本文的交叉操作采用的是随机的单点交叉;变异操作可以增加生物多样性,更有利于全局最优的搜索,本文采用随机变异的方式。

4 实例验证

4.1 作战场景想定

以3架远距离支援干扰机掩护1个突防编队为例,每架干扰机最多可以干扰4个雷达目标;雷达组网系统由9部雷达组成,秩序为3,每部雷达的波束宽度为 15° ,如图4所示。

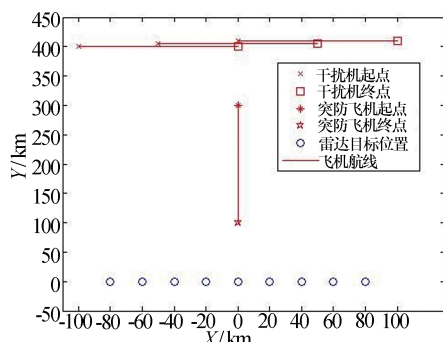


图4 仿真作战场景示意图

Fig. 4 Schematic diagram of simulated operational scenarios

3架干扰机的初始坐标分别为 $(-100, 400)$ 、 $(-50, 405)$ 、 $(0, 410)$,以约 167 m/s 的速度沿正东方向飞行,终止时刻坐标分别为 $(0, 400)$ 、 $(50, 405)$ 、 $(100, 410)$ 。突防飞机的初始时刻坐标为 $(0, 300)$,以约 333 m/s 的速度沿正南方向突防,终止时刻的坐标为 $(0, 100)$ 。9个雷达目标的坐标分别为 $(-80, 0)$ 、 $(-60, 0)$ 、 $(-40, 0)$ 、 $(-20, 0)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(20, 0)$ 、 $(40, 0)$ 、 $(60, 0)$ 、 $(80, 0)$ 。

整个突防过程总计用时 10 min ,因为短时间内飞机位置的变化对于干扰效果影响不大,同时考虑到算法的时效性,所以每 10 s 选取一个时刻计算干扰效果,考虑到初始时刻和终止时刻参与计算,共有61个时刻点。

遗传算法的种群规模设置为100,最大进化代数设置为100,交叉概率设置为80%,变异概率设置为5%。

4.2 仿真分析

代入相关实验参数进行计算机仿真,得到干扰目标分配结果见表1,即第1个干扰机负责干扰第1、4、6、7个雷达目标;第2个干扰机负责干扰第2、7、8、9个雷达目标;第3个干扰机负责干扰第1、3、5、9个雷

达目标。

表1 干扰资源分配结果

Tab. 1 Interference resource allocation result

干扰机编号	1	2	3
雷达目标编号	1. 4. 6. 7	2. 7. 8. 9	1. 3. 5. 9

雷达组网系统在突防全过程被干扰情况如图5所示,雷达组网系统在较长一段时间内都无法识别突防飞机,整个突防过程中突防飞机的生存概率为96.72%。

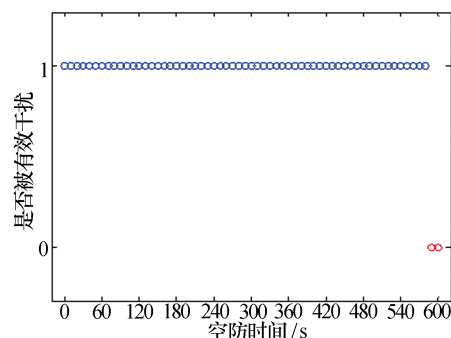


图5 雷达组网被干扰情况

Fig. 5 Radar networking after interference

在该作战场景下分别对协同模式和非协同模式进行了100次蒙特卡洛仿真,两种作战模式下的突防飞机生存率如图6所示。

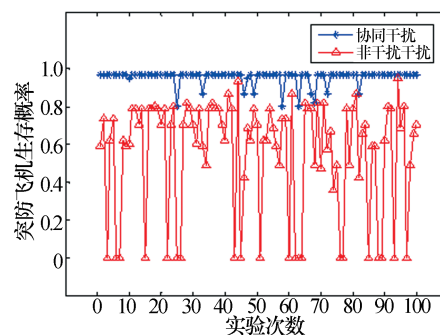


图6 两种作战模式对比

Fig. 6 Comparison of two operational modes

仿真结果表明采用协同干扰作战模式,得到最大适应值为0.9672,最小适应值为0.8033,平均适应值为0.9546,搜索到全局最优解的概率为88%,搜索到全局最优解或者次优解的概率为90%,最优解平均进化代数为15.4。采用非协同作战模式,即每架干扰机随机选择雷达目标实施干扰,得到最大适应值为0.9672,最小适应值为0,平均适应值为0.5584。

从中可以看出,基于突防动态过程的干扰资源分配模型,可以大幅提升干扰机之间的协同效能,对突防飞机的掩护效果显著。

5 结束语

针对现代电子战中对抗雷达组网系统,支援干扰飞机协同掩护突防飞机进攻作战的干扰资源分配问

题,本文提出了一种基于突防过程的协同干扰效果和雷达组网融合处理准则的干扰资源分配模型,并根据突防飞机的生存概率和干扰资源的有限性建立了目标函数和约束条件。采用遗传算法求解到干扰资源的最优分配方案,保证了整个突防过程中协同干扰的效果和突防飞机的安全,模型和算法的有效性得到了验证。但是如何有效地对抗具备目标点迹融合功能的复杂雷达组网系统,还有待于更加深入地研究。

参考文献 (References)

- [1] WANG C G, WANG Z F, XU X, et al. A balanced sensor scheduling for multitarget localization in a distributed multiple-input multiple-output radar network [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2021, 17(7): 1-14.
- [2] 姚辉伟, 李 坤, 崔新风, 等. 信号级协同多雷达组网搜索资源分配方法[J]. 现代雷达, 2023, 45(8): 20-28.
YAO Huiwei, LI Kun, CUI Xinfeng, et al. Search resource allocation method for signal-level cooperative radar networking[J]. Modern Radar, 2023, 45(8): 20-28.
- [3] LIU F, WANG Y W, CHEN J B, et al. Research on jamming resource allocation technology based on improved GAP-SO algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1738(1): 1-9.
- [4] 梁广东, 卢广山, 陈东锋, 等. 干扰目标优化分配模型和算法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(10): 60-64.
LIANG Guangdong, LU Guangshan, CHEN Dongfeng, et al. Study of optimal allocation model of interference target and arithmetic[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(10): 60-64.
- [5] 潘昱豪, 高玉良, 张 路, 等. 多机协同噪声干扰资源分配优化技术研究[J]. 空军预警学院学报, 2017, 31(5): 346-350.
PAN Yuhao, GAO Yuliang, ZHANG Lu, et al. Resource allocation optimization techniques for multi-jammer cooperative noise jamming[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2017, 31(5): 346-350.
- [6] 陈 琳, 薛 青, 张俊峰, 等. 基于频段覆盖率的协同空战干扰资源分配研究[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(1): 164-168.
CHEN Lin, XUE Qing, ZHANG Junfeng, et al. Jamming resources allocation in cooperative air combat based on frequency coverage [J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(1): 164-168.
- [7] 陈雅雯, 曾丽芳, 夏伟杰, 等. 突防任务中组网雷达干扰资源分配研究[J]. 现代雷达, 2015, 37(6): 6-9.
CHEN Yawen, ZENG Lifang, XIA Weijie, et al. A study on optimum allocation for jamming resource against netted radar based on penetrating process [J]. Modern Radar, 2015, 37(6): 6-9.
- [8] ZHANG K, JIANG B, SHI P. Fast fault estimation and accommodation for dynamical systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2009, 3(2): 189-199.
- [9] 肖 海, 刘新学, 舒健生, 等. 多在轨服务飞行器目标分配问题研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(1): 90-93.
XIAO Hai, LIU Xinxue, SHU Jiansheng, et al. Research on target allocation for multiple on-orbit service vehicles[J]. Computer Simulation, 2017, 34(1): 90-93.
- [10] 吴 娜, 车 蕾. 基于改进 DDE 算法的协同干扰资源分配[J]. 电光与控制, 2018, 25(2): 107-110.
WU Na, CHE Lei. Cooperative jamming resources allocation based on the improved DDE algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(2): 107-110.
- [11] 胡阳光, 肖明清, 孔庆春, 等. 空射诱饵干扰资源动态优化分配方法[J]. 计算机仿真, 2017, 34(2): 39-42.
HU Yangguang, XIAO Mingqing, KONG Qingchun, et al. A method of optimizing allocation the jamming resources of miniature air-launched decoy [J]. Computer Simulation, 2017, 34(2): 39-42.
- [12] 张迎新, 徐元子, 郭 栋, 等. 基于进化多目标优化的对地打击武器-目标分配[J]. 电光与控制, 2021, 28(9): 34-38.
ZHANG Yingxin, XU Yuanzi, GUO Dong, et al. WTA of ground target attacking based on evolutionary multi-objective optimization[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(9): 34-38.
- [13] 王浩宇, 刘宏立, 马子骥, 等. 基于整体编码遗传算法的探地雷达全波形反演[J]. 微波学报, 2022, 38(4): 76-81.
WANG Haoyu, LIU Hongli, MA Ziji, et al. GPR full waveform inversion based on overall coding genetic algorithm[J]. Journal of Microwaves, 2022, 38(4): 76-81.
- [14] 周振凯, 刘 兵, 李 健, 等. 基于遗传算法的散热器翅片优化设计[J]. 电子机械工程, 2019, 35(5): 29-33.
ZHOU Zhenkai, LIU Bing, LI Jian, et al. Optimization design of heat sink fins based on genetic algorithm[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2019, 35(5): 29-33.
- [15] ESFAHANI M A, KARBASIAN H R, KIM K C. Multi-objective optimization of the kinematic parameters of fish-like swimming using a genetic algorithm method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(2): 333-344.

作者简介:

陈思南 男,1992 年生,硕士,工程师,研究方向为协同电子战。