



基于分布式遗传算法和改进人工势场法的 导弹反探测航迹规划

傅嘉晨¹ 付润定² 张 亚¹

(¹东南大学自动化学院, 南京 210096)

(²南京深克智能科技有限责任公司, 南京 210007)

摘要: 基于兵棋推演仿真软件构建用以测试导弹制导与反探测能力的设定场景,并参考人工势场法在路径规划领域的应用,设计导弹反探测航迹规划方法以躲避探测侦察.为了高效搜索人工势场法的最优参数,基于 Kubernetes 在多服务器上搭建分布式框架,实现分布式遗传算法,在并行数目为 100 的实验中,理论加速比在 98.41~99.46 之间,实验加速比平均为 96.95.将基于分布式遗传算法和人工势场法的导弹反探测航迹规划方法应用于各种不同探测策略下的导弹制导场景.实验结果显示,改进的人工势场法比传统的人工势场法的平均得分提高 11.9%,遗传算法的进化次数平均减少 2.73 轮.该分布式框架可用于任意容器化的并行仿真任务中.

关键词: 分布式框架;遗传算法;人工势场法;反探测;航迹规划

中图分类号: TP275 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2023)04-0709-09

Anti-reconnaissance path planning technique of missile based on distributed genetic algorithm and improved artificial potential field method

Fu Jiachen¹ Fu Runding² Zhang Ya¹

(¹ School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(² Nanjing Shenke Intelligent Technology Co., Ltd., Nanjing 210007, China)

Abstract: An imaginary scenario is constructed based on military chess simulation software to test the guidance and anti-detection capabilities of missiles. An anti-detection path planning method is proposed to avoid detection and reconnaissance based on the application of artificial potential field method. In order to efficiently search for the optimal parameters of the artificial potential field method, a distributed framework based on Kubernetes is developed on multiple servers to implement a distributed genetic algorithm. In experiments with a parallel number of 100, the theoretical acceleration ratio ranged from 98.41 to 99.46, and the experimental acceleration ratio was 96.95 on average. The missile anti-detection trajectory planning method based on the distributed genetic algorithm and artificial potential field method is applied to missile guidance scenarios under various detection strategies. The experimental results show that the improved artificial potential field method improves the average score by 11.9% over the traditional artificial potential field method, and the number of evolutionary rounds of the genetic algorithm is reduced by 2.73 on average. The distributed framework can be used in any containerized parallel simulation task.

Key words: distributed framework; genetic algorithm; artificial potential field method; anti-reconnaissance; path planning

面对各国新颖的反导战术与设备,要想继续发挥导弹的优势,必须开发新方案以提高导弹的制导

和反探测能力.在制导方面,导弹通常结合 GPS (global positioning system)、雷达、影像或激光信息

收稿日期: 2022-11-08. 作者简介: 傅嘉晨(1998—),男,硕士生;张亚(联系人),女,博士,教授,博士生导师, yazhang@seu.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021ZD0112700)、“十四五”装备预研专用技术资助项目(315057205).

引用本文: 傅嘉晨,付润定,张亚.基于分布式遗传算法和改进人工势场法的导弹反探测航迹规划[J].东南大学学报(自然科学版),2023,53(4):709-717. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2023.04.018.

确定目标位置,然后通过程序控制^[1]、重力补偿和准比例引导率^[2]等方法改善弹道特性,精确打击目标.在反探测方面,主要手段为采用降低导弹的雷达、射频等信号^[3],或者使用弹载干扰机干扰红方探测^[4].另有一种反探测手段是充分利用导弹的机动能力.传统的弹道导弹一般按照预定的弹道飞行,需要预先确定一条安全且能完成目标的飞行轨迹^[5],无法满足实时躲避探测的需求.而机动能力更强的巡航导弹则具备实时躲避探测的能力,文献[6]中便提出了巡航导弹自主避障的技术.

采用人工势场法^[7](artificial potential filed method)能够完成导弹打击目标和避免探测的任务.但传统的人工势场法也存在局部最小和目标不可达问题,随着动态场景的增多,传统的静态方法已不再适用.为了解决上述问题,文献[8]提出了一种基于分层人工势场和碰撞锥的动态避碰算法,文献[9]根据周围障碍物的相对运动状态和无人机自身性能自适应缩放安全距离.文献[10]通过修改重力场方向和影响范围、增加虚拟目标和评估函数来解决局部最小问题.

人工势场法中的参数选择至关重要.若使用人工来选择参数,则工作量巨大;若使用暴力搜索,则速度很慢.可以结合粒子群算法^[11]、蚁群算法^[12]、遗传算法等方法来优化人工势场法参数,且因为上述算法的可并行性,用分布式框架可加快参数寻优的速度.其中,遗传算法主要由以下几个部分组成:编码方案^[13]、交叉^[14]、变异^[15]和选择^[16].其随机性和全局搜索能力较强,且技术成熟,应用广泛.

然而,若是遗传算法每次进化所需时间很长,则串行仿真的耗时巨大.而遗传算法具备并行性,只需要设计若干并行核^[17],每个核运行一些相关的遗传算法有效算子,便可以很好地实现遗传算法平行运行.调研发现,无论是相关的工作^[17-21]还是现有的遗传算法工具包,均是在具备多核中央处理器(CPU)或图形处理器(GPU)的单计算机上使用多线程或多进程完成并行化的,容易受到单机资源的约束.为了充分利用多机的计算资源,一个有效手段便是将多台服务器整合为一个集群,并在其上构建分布式遗传算法框架.

本文研究了如何在保证导弹命中目标的前提下避免对方的探测.在多服务器上部署分布式框架,实现分布式遗传算法,进而提出基于分布式遗传算法的人工势场法,极大加快获取最优参数的速度.在此基础上提出基于改进人工势场法的导弹反探测航迹规划方法,使用遗传算法在每一次进化中

在线完成参数寻优,然后在仿真任务中使用人工势场法完成航迹规划.最后构建蓝方导弹打击和红方多单位探测的仿真场景,测试验证了反探测航迹规划方法的有效性.

1 问题描述

战场由红方和蓝方两方组成,红方是探测方,蓝方是导弹发射方.蓝方导弹发射后的最终目标是击中红方单位,但是红方单位本身可能具备侦察探测能力,或是在目标单位附近设置了探测单位,一旦探测到导弹便可采取拦截措施.因此,导弹在飞往目标的过程中,应该避免被探测到,或者减少被探测到的时间以及被探测到的时间尽可能晚,这将大大减少被拦截的风险.但是导弹也不能因为反探测而完全忽略攻击目标的任务,在接近目标后应该降低对反探测的重视程度,尽快击中目标.如何在击中红方单位的前提下提高导弹的反探测能力就是本文研究的问题.

实际战场的环境是多变的,由红方的防守阵型、装备性能、巡航策略等决定,但仍可以抽象出一般模型.首先是目标单位,无论战场情况如何变化,一枚导弹的目标只有一个红方单位,该单位的位置也是导弹飞行的目标位置.其次是探测单位,其探测范围通常是以自身为圆心、半径固定的圆,且圆可以重叠形成不规则图形.另外,红方的机动单位除了探测范围外,还具备速度这一信息.最后是蓝方的导弹,因为导弹的大小远小于目标单位和探测单位,可以抽象为一个质点.因此,导弹制导与反探测问题可以抽象为一个质点搜索一条路径规避可动障碍物并前往目标位置的问题,如图1所示.特别地,本文仅考虑二维平面的情况,暂未拓展至三维空间,即假设导弹在一定距离内不改变高度.

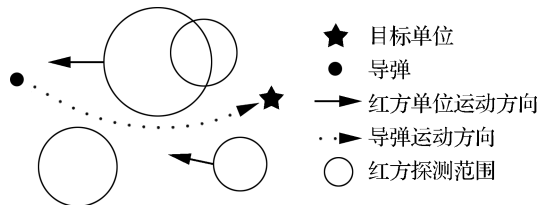


图1 导弹制导与反探测问题的抽象模型

这一抽象问题与路径规划问题十分类似,因此本文将选用人工势场法处理这一问题,并基于兵棋推演仿真软件构建该问题的设定场景,完成仿真测试.

2 算法设计

2.1 分布式框架构建

该分布式框架基于 Kubernetes 开发,在多服务器上部署并行仿真容器,并使用分布式异步消息任务队列 Celery 指派任务和传递仿真结果. 总体框图见图 2.

主节点负责部署容器和运行遗传算法. 在主节点中的 Kubernetes 调度器将根据不同服务器(子

节点)的可用资源,在其上分配不同数量的最小运行单元 Pod,同时运行着遗传算法主程序. 加入遗传算法的目的是加快搜索人工势场法最优参数的速度,因此遗传算法种群中的个体各自代表一组参数,并将下达使用该组参数完成仿真的任务,这一任务消息将发送给 Celery 模块的消息队列. 在通过 Celery 的结果队列得到全部个体的仿真结果后,遗传算法可以完成一代更新.

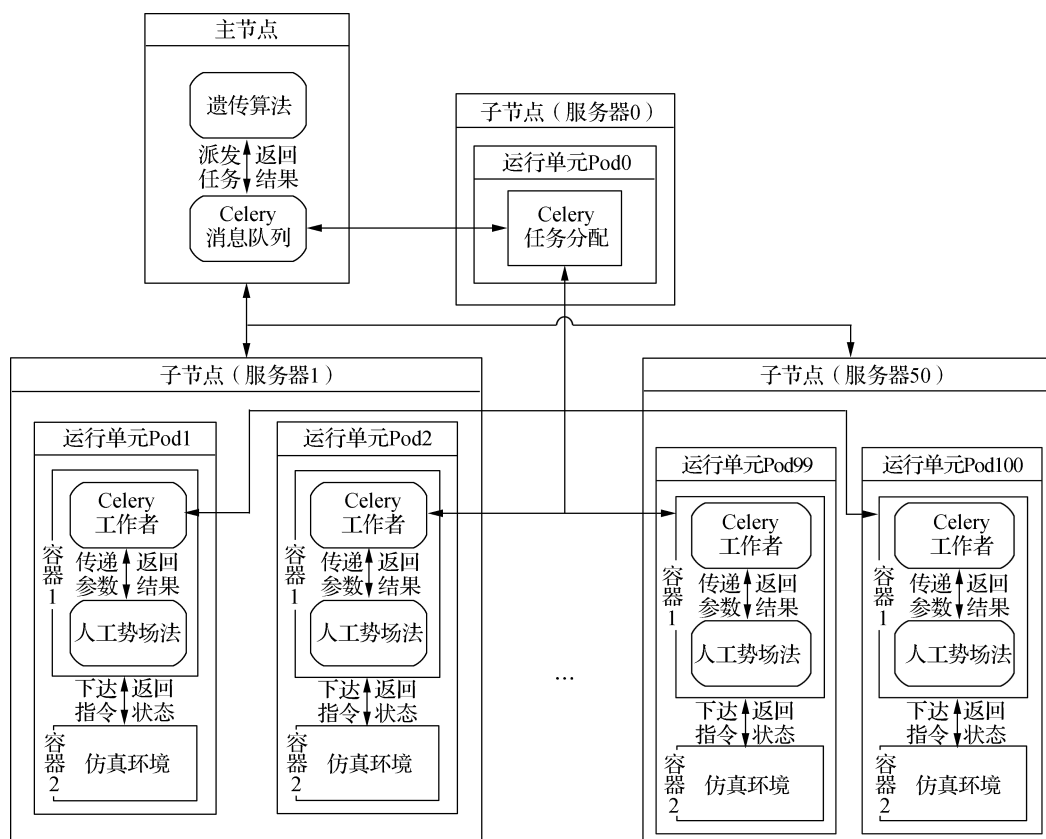


图2 分布式框架总体框图

在框架中设置 100 个运行在不同服务器上并行完成仿真任务的运行单元 Pod. 在每个 Pod 中运行了 2 个容器:容器 1 中包含了 Celery 工作者和人工势场法 2 个模块,Celery 工作者将自己从任务消息队列中取得的参数传递给人工势场,人工势场模块将与容器 2 完成交互;容器 2 中运行着测试导弹性能的仿真环境,容器 1 下达指令告诉容器 2 下一步如何执行,而容器 2 将执行后的新状态返回给容器 1. Celery 工作者最终将会把仿真的结果放入结果队列中. 需要注意的是,图中省略了大量结构相似的服务器框图与部分结构相同的 Pod 的细节框图.

Celery 任务分配容器负责在主节点和并行子节点之间完成信息传递,该容器运行在服务器 0 的

Pod0 中,而同样结构的 Pod 只运行一个. Celery 是一个分布式的异步任务消息队列,主节点将会把包含不同参数组的仿真任务消息放入消息队列中,而并行的 Celery 工作者将会从消息队列中领取任务完成仿真,只有所有任务都被领取且仿真结果都被放回 Celery 的结果队列时,主节点才能一次性得到所有任务的仿真结果.

2.2 改进的人工势场函数

人工势场是由障碍物的斥力场和目标位置的引力场共同作用形成的虚拟势场,导弹将沿着势函数下降的方向前进,在规避探测的过程中飞往目标位置.

在传统的引力函数^[4]中,当导弹远离目标时,会产生一个非常大的初始吸引力. 为了避免这种现

象,在构造引力势场时,将二次势场与锥型势场结合起来.在导弹离目标较远时使用锥型势场,较近时使用二次的抛物线势场.分段的势场函数如下:

$$U_{\text{att}}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\xi(\rho_t(q))^2 & \rho_t(q) \leq d_t \\ d_t\xi\rho_t(q) - \frac{1}{2}\xi d_t^2 & \rho_t(q) > d_t \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\rho_t(q) = \|q - q_t\|$ 为导弹当前位置 q 到目标位置 q_t 的距离; d_t 为从圆锥形势场变为抛物线势场时所对应的距离; ξ 为引力系数; d_t 和 ξ 为待搜索的参数.

分段引力函数修改为

$$F_{\text{att}}(q) = \begin{cases} -\xi(q - q_t) & \rho_t(q) \leq d_t \\ -d_t\xi \frac{q - q_t}{\rho_t} & \rho_t(q) > d_t \end{cases} \quad (2)$$

另一方面是斥力势场的设计,斥力场应该使导弹远离红方的探测范围,并且当导弹离探测范围较远时,探测单位对导弹运动的影响很小或是没有影响.传统的斥力函数^[4]设计中,在探测单位的探测距离 d_o 内,斥力势场仅与 $\left(\frac{1}{\rho_o(q)} - \frac{1}{d_o}\right)^2$ 成正比相关,其中 $\rho_o(q) = \|q - q_o\|$ 为导弹当前位置 q 到探测单位探测范围的最小距离, q_o 为探测单位探测范围距离导弹的最近点.但这样的函数设计存在一定问题,当导弹接近目标后,目标对导弹的引力将持续下降,若是在目标附近存在探测单位,由此产生的斥力很有可能大于引力,导致导弹无法命中目标.这个问题可以通过改进斥力函数的设计来解决.在 $\left(\frac{1}{\rho_o(q)} - \frac{1}{d_o}\right)^2$ 的基础上乘以和导弹与目标距离成正相关的分量 $(\rho_t(q))^\alpha$,使得在导弹与探测单位距离一定的情况下,随着导弹与目标的距离减小,受到的斥力也减小,而减小的程度可以由距离分量次数 α 决定, α 也是待搜索的参数.改进的斥力场函数为

$$U_{\text{req}}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho_o(q)} - \frac{1}{d_o}\right)^2(\rho_t(q))^\alpha & \rho_o(q) \leq d_o \\ 0 & \rho_o(q) > d_o \end{cases} \quad (3)$$

式中,探测斥力系数 η 为待搜索的参数.

相应的斥力函数为

<http://journal.seu.edu.cn>

$$F_{\text{req}}(q) = \begin{cases} \eta(\rho_t(q))^\alpha \left(\frac{1}{\rho_o(q)} - \frac{1}{d_o}\right) \frac{q - q_o}{(\rho_o(q))^3} - \\ \eta(\rho_t(q))^\alpha \left(\frac{1}{\rho_o(q)} - \frac{1}{d_o}\right)^2 (q - q_t) & \rho_o(q) \leq d_o \\ 0 & \rho_o(q) > d_o \end{cases} \quad (4)$$

除了目标的引力和红方探测单位的斥力以外,还要避免导弹飞出作战场地导致仿真结束,因此需要给场景边界设置斥力.导弹将受到经线在东西方向的斥力和纬线在南北方向的斥力,例如导弹靠近东侧的经线时,东西 2 条经线的合力指向西方.边界产生的斥力公式为

$$F_{\text{bd}}(q) = \mu \frac{q - q_b}{\rho_b^3(q)} \quad (5)$$

式中, $\rho_b(q) = \|q - q_b\|$ 为导弹当前位置 q 到探测单位经线或纬线的垂直距离; q_b 为导弹位置在经线或纬线上的垂直投影点; μ 为边界斥力系数.因为当引力系数、探测斥力系数和边界斥力系数的比例关系不变时,人工势场法的性能保持不变,所以不需要搜索边界斥力系数 μ , 设置固定值 $\mu = 1$.

最后,将引力和斥力矢量相加得到导弹受到的合力.对导弹下达的指令参数是合力方向与导弹当前方向之间的角度差,导弹根据指令参数将会顺时针或逆时针旋转对应角度.为了限制导弹的转向能力,导弹在每个决策步中设置了最大转向角 $\pm 45^\circ$.

在实践与后续实验中,均存在移动的探测单位,需要分析其对航迹规划的影响.人工势场法使用局部动态航迹规划方法,本文使用的势场函数也仅依赖于当前状态信息,在每个时间切片上均可将环境视为静态的,因此动态障碍物不会影响该方法的使用.若使用整体航迹规划方法,则动态探测单位使得需要躲避的探测范围实时移动,无法在最初规划整个路径.另一方面,由于动态探测单位的存在,人工势场法不易陷入局部最小值.考察连续的 2 个状态步,导弹在当前状态陷入局部最小处,动态探测单位在下一个状态移动到新的位置并改变探测区域,影响势场分布,使得导弹所处位置变为非局部最小,导弹将飞往其他位置.因此,本文并未在人工势场算法中特别处理这一情况,而是认为随着遗传算法的进化,人工势场法陷入死循环的几率会逐步减小.

2.3 分布式遗传算法

为了搜索最优的人工势场法参数,可以使用蚁群算法、粒子群算法、遗传算法.其中,蚁群算法的参数设置较为复杂,背离了降低调参需求的初衷;

粒子群算法收敛快但容易收敛至局部最优解;而遗传算法随机性较大,全局搜索能力较强,且应用广泛,技术成熟,因此本文将选择遗传算法。

在遗传算法的流程中耗时最大的部分为使用仿真环境完成测试得到个体适应度,因此对遗传算法的改进主要在于将计算个体适应度的部分放在2.1节介绍的多服务器分布式框架中并行完成,在编码方式和算子选择上采用了当下成熟有效的方案。

算法流程如下:①根据种群规模、决策变量维度和上下界产生20个初始种群,采用实整数完成编码。②开始循环,利用分布式框架仿真10次的平均得分作为种群中每个个体的适应度,采用锦标赛选择算子完成选择,采用两点交叉算子完成交叉,采用Breeder GA算法突变算子完成变异,得到新的人工势场法参数组。③不断循环上述流程直至种群平均得分的提升量小于停止迭代阈值,此时得到的参数组即为最优参数组。在最终的反探测任务中,人工势场法使用该组参数完成航迹规划,不再需要遗传算法的参与。整个过程是在线参数寻优同时规划航迹的。

3 实验分析

3.1 仿真环境介绍

本文使用的仿真环境基于兵棋推演仿真软件构建,用以测试导弹制导与反探测能力。

战场被设置在东经 $106^{\circ} \sim 121^{\circ}$ 、北纬 $12^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的范围内,红蓝双方在此区域内完成博弈对抗,如图3所示。其中,红方为防守方,主要任务为部署不可动单位、指挥机动单位探测蓝方发出的导弹,可用单位包括:6个不可动的雷达,探测范围为全向 92.6 km ;4艘不可动的侦察舰,探测范围为全向 44.5 km ;4架航速最高 640 km/h 的预警机,探测范围为全向 168.5 km 。蓝方为进攻方,主要任务为控制导弹攻击红方的指挥所,同时规避红方的探测,可用单位为1枚巡航导弹,飞行速度最高 849.6 km/h 。

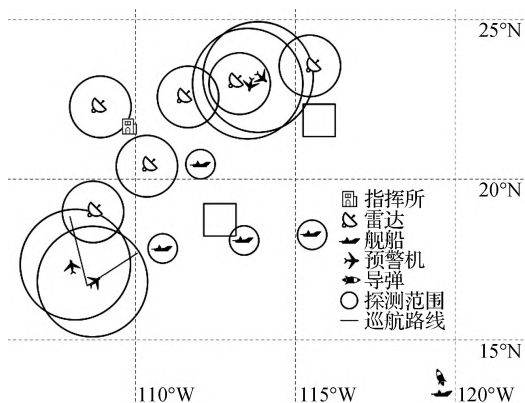


图3 作战区域图形化界面

仿真的结束条件为蓝方导弹击中红方指挥所,或是蓝方导弹飞出作战区域,或是仿真步数超过45。在仿真结束后,为了充分体现蓝方导弹的制导和反探测能力,制导能力使用是否击中指挥所来评估,反探测能力使用首点探测距离、连续探测时间、多单位连续探测时间这3个指标来评估。其中,制导能力和反探测能力各占3分,而反探测能力中的3项指标各占1分。无论导弹是否具备反探测能力,最终目标都是击中红方指挥所,所以制导能力的得分不受反探测指标影响,只要击中目标则蓝方得3分,未击中则得0分。另外的3个指标从多维度评估了导弹的反探测能力,因为导弹越早被探测到、被探测到的时间越长、被越多的单位探测到,则越有可能被击毁。综上,探测得分 s 的计算公式为

$$s = \frac{1\ 057.05 - d_f}{1\ 057.05} + \frac{1\ 000 - t_c}{1\ 000} + \frac{500 - t_m}{500} \quad (6)$$

式中, d_f 为首点探测距离; t_c 为连续探测时间; t_m 为多单位连续探测时间。在作战区域范围内距红方指挥所的最远距离为 $1\ 057.05 \text{ km}$,用该数据归一化首点探测距离;导弹被单个单位连续探测 $1\ 000 \text{ s}$ 或是被多单位连续探测 500 s 则存在很高的被击落风险,因此用上述数据对连续探测时间和多单位连续探测时间进行归一化。

为了精简指令,仅重新编写与该场景有关的指令接口。雷达、侦察舰、预警机均具有部署指令,在仿真开始时将单位部署在设定的点位。预警机具有移动指令,在指令队列中加入多个点位,预警机将依次飞向队列中的点位。导弹具有转向指令,向左或向右旋转固定的角度,最大转向 $\pm 45^{\circ}$ 。

将上述仿真环境封装在docker镜像内,便于在多服务器上启动容器完成仿真。

3.2 探测策略设计

为了充分验证本文算法对不同探测策略的适应能力,为红方设计了从静态到动态、从简单到复杂的3种探测策略:

1) 将雷达、侦察舰部署在初始点位,预警机停留在机场。

2) 将雷达、侦察舰部署在初始点位。因为区域北侧陆地面积较大,可部署的地面雷达较多,形成了较大的探测区域,所以将4架预警机两两编组分别派往东南侧与南侧巡航,弥补探测盲点。图3中直线与方形路径为预警机巡航路线,探测范围基本覆盖探测盲点。

3) 将雷达、侦察舰部署在初始点位,预警机在与策略2相同的位置巡航,在探测到蓝方导弹后,

<http://journal.seu.edu.cn>

预警机跟随导弹移动. 预警机根据蓝方导弹之前三步的速度矢量, 计算平均速度矢量以预测导弹下一步的运动轨迹, 并将导弹移动后的位置作为预警机的移动目标.

3.3 并行性能分析

在 Kubernetes 中, 对 CPU 的计量单位是毫核, 例如作为主节点的服务器 CPU 可用资源是 6 338 毫核, 而启动一个运行单元 Pod 所需的 CPU 资源约为 220 毫核, 这意味着在该服务器上最多并行完成 28 个仿真任务. 这正是目前常见的单机多核并行方法的缺陷, 容易受到单机计算资源的约束. 而在建立多服务器分布式框架之后, 主节点将会根据各服务器的可用资源在其上调配不同数量的 Pod, 突破单机的资源瓶颈.

另一方面, 加速比是评价并行架构性能的主要参数. 首先计算理论加速比, 由于每次仿真所需的时间随着红方探测策略和蓝方参数的不同而变化, 变化范围在 20 ~ 60 s 之间. 而除去计算个体适应度的时间外, 遗传算法完成一次进化所需的时间平均为 0.65 s. 当计算个体适应度时仿真 10 次, 种群规模为 20 时, 需要完成 200 个能并行执行的仿真任务, 所以在运行单元数为 100 的分布式框架中, 每个 Pod 顺序执行 2 次仿真, 则并行完成一次进化的时间最少为 $2 \times 20 + 0.65 = 40.65$ s, 最多为 $2 \times 60 + 0.65 = 120.65$ s, 而串行完成一次进化的时间最少为 $200 \times 20 + 0.65 = 4\,000.65$ s, 最多为 $200 \times 60 + 0.65 = 12\,000.65$ s, 理论加速比在 98.41 ~ 99.46 之间.

然后进行实验验证, 由于顺序执行 200 次仿真任务需要时间过长, 仅测试顺序执行的遗传算法的前 3 次进化所需时间, 分别为 11 372.84、10 467.12 和 9 851.93 s. 测试 60 组并行实验, 前 3 次进化的平均所需时间分别为 117.22、109.53 和 100.25 s, 则加速比分别为 97.02、95.56 和 98.27. 由于需要完成所有并行仿真任务后才能进化, 所以并行执行时间由仿真时间最长的任务决定, 实验加速比略低于理论加速比.

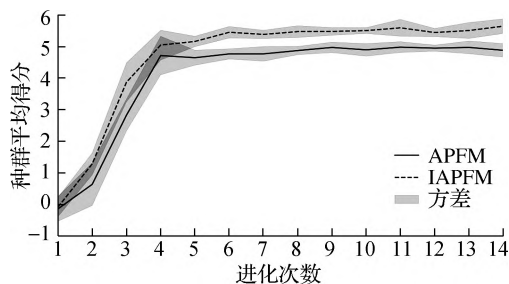
在本文的应用场景中, 完成一次进化所需的时间主要花在计算个体适应度上, 因此当使用 100 个 Pod 即并行数为 100 时, 理论与实验加速比均可以接近 100, 这也证明了将计算个体适度的部分交由分布式框架计算最为合理, 其余部分的时间开销可以忽略不计.

3.4 人工势场法性能分析

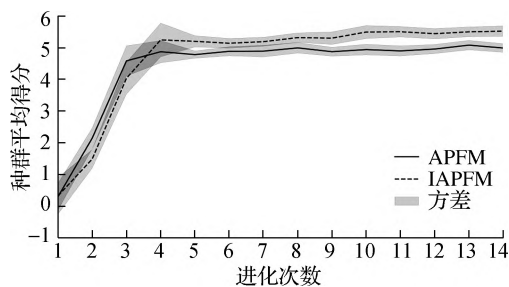
蓝方用传统的人工势场法 (artificial potential

filed method, APFM)、改进的人工势场法 (improved artificial potential filed method, IAPFM) 分别与 3.2 节中介绍的红方的 3 种策略对抗. 使用分布式遗传算法搜索面对不同红方策略时的最优势场参数, APFM 需要搜索的参数为引力系数 ξ 、引力函数分段点 d_i 、探测斥力系数 η 、探测单位斥力的影响范围 d_o . IAPFM 需要搜索的参数除以上 4 项外, 还包括距离分量次数 α . 因为 3 种系数 ξ 、 η 、 μ 的比例关系保持不变则不影响人工势场法性能, 所以将边界斥力系数 μ 固定为 1.

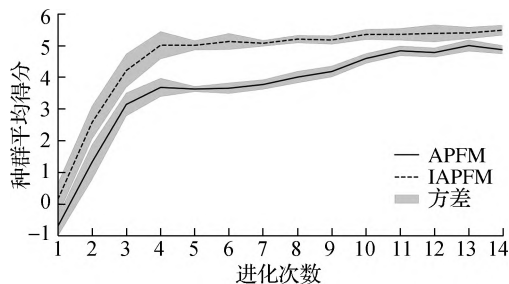
图 4 为遗传算法进化过程中的种群平均得分, 实线、虚线为 2 种不同人工势场法对抗 3 种不同探测策略共 6 种情况分别测试 10 次的均值. 由于遗传算法在平均得分的提升值小于设定的阈值时会停止进化, 使得即使在同一组实验中停止时的进化次数也不同, 难以同时展示, 因此图中统一截取了前 14 次的进化情况, 不同实验的平均进化次数记录在表 1 中. 2 种人工势场法的种群平均得分不断



(a) 策略 1



(b) 策略 2



(c) 策略 3

图 4 不同人工势场法面对不同探测策略在 10 次进化过程中的平均得分

提高,且使用 IAPFM 的种群平均得分在面对不同的探测策略时均优于 APFM。此外,遗传算法传统的优化任务多为静态的,即确定一组参数则目标值同样是确定的,而本文的任务即使用同样的参数完成多次仿真,得分也可能不同。图4中的曲线均是单调递增的,证明了遗传算法在得分存在一定方差的任务中仍能保证种群的整体表现是提升的。

表1 不同人工势场法面对不同探测策略的平均进化次数

策略编号	APFM	IAPFM
1	18.3	15.5
2	17.5	15.2
3	17.8	14.7

得到2种人工势场法对3种红方策略的最优参数后,在分布式框架上各仿真10次,得到平均得分,记录在表2中。使用最优参数的人工势场法在面对3种红方策略时均能取得较高得分,一部分是击中目标得到的3分,另一部分的反探测得分也接近满分,说明导弹首次被探测到的时间较晚,且被探测的持续时间较短。在红方使用策略1的静态环境中,导弹将会沿着探测单位的探测盲区飞行,最终击中目标。而在红方使用策略2的动态环境中,移动的预警机持续改变斥力场的形状,导弹在此情况下仍能很好地完成任务,仅略低于策略1的得分。最后,即使面对红方的策略3,即红方的预警机持续跟踪探测到的导弹,得分也仅仅是略低于面对红方策略1、2的得分。这是因为导弹在飞行过程中尽可能不被探测到,在首次探测时间较晚的情况下,预警机没有充足的时间跟踪导弹。另一方面,在该应用场景下,IAPFM比APFM的平均得分高11.9%,而遗传算法完成进化所需的轮数平均减少2.73轮。

表2 使用最优参数的人工势场法的平均得分

策略编号	APFM	IAPFM
1	5.06	5.65
2	5.03	5.60
3	4.96	5.59

取出遗传算法进化过程不同时期的参数组,代入人工势场法测试,可以发现确实存在人工势场法常见的死循环问题,尤其是在面对策略2时。面对策略1,由于红方的探测范围未能做到全覆盖,留出了空隙,蓝方导弹陷入局部最小的情况较少。面对策略2时,由于红方的动态探测单位做往返运动,在某些情况下,蓝方导弹也会做往返运动而陷入死循环,使得仿真超时,不过这一情况随着遗传算法的进化而改善,平均得分也不断上升,符合2.2节的分析。面对策略3时,由于红方探测单位跟踪

蓝方导弹,使得势场不断改变,未观察到导弹陷入局部最小的情况。

为了充分展示导弹的攻击目标与反探测能力,以下将具体展示2种典型场景。首先是攻击目标的能力,图5为先后2个时间步的状态。在靠近目标后,目标对导弹的引力将会逐渐减小,若是斥力的系数或者作用范围过大,将会影响导弹飞向目标的轨迹,而图5(a)中的导弹直接飞向目标,没有受到斥力的影响,证明最优参数的选取较为合适。其次是反探测的能力,图6为间隔一个时间步的状态。图6(a)中的导弹正在飞向西北方预警机的探测范围,因为受到该预警机的斥力,在2个时间步后的图6(b)中导弹紧急转向,这一过程证明了导弹具备穿过2个探测单位间狭小盲点的能力。

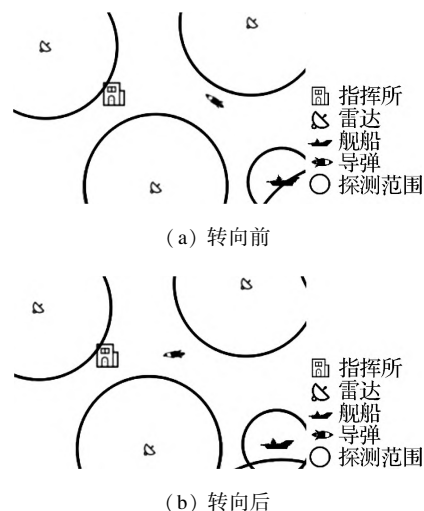


图5 导弹飞往目标的示意图

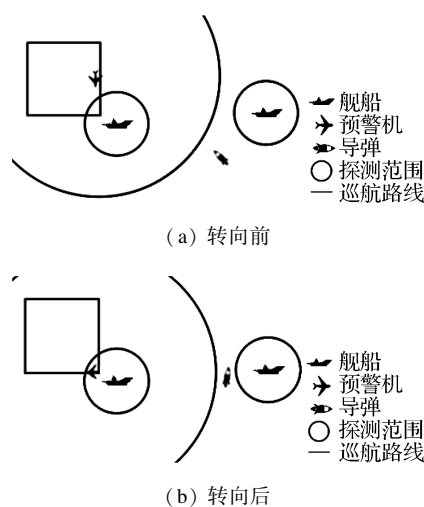


图6 导弹规避探测的示意图

值得注意的是,蓝方的2种人工势场法面对3种红方策略均得不到满分,也即导弹仍有被探测到的情况。在使用态势软件复盘仿真过程时发现,导

弹被探测到主要是因为仿真的步长间隔较长. 例如导弹前一步的决策在当时看来没有问题, 但由于较长的仿真间隔时间, 在当前决策步导弹才发现已经飞入了红方的探测范围, 这时斥力又会使得导弹做出远离该单位的决策. 在图 6 的典型场景中不难发现导弹是具备提前转向的能力的, 可以认为在仿真间隔较小的情况下, 导弹的反探测表现还能进一步提升. 但是较小的仿真间隔又会降低仿真速度, 在权衡之下, 认为目前的得分已经具备较高水平, 红方不具有充足的时间击落蓝方导弹.

4 结论

1) 本文基于 Kubernetes 在多服务器上搭建分布式框架, 实现分布式遗传算法, 突破单机计算资源有限的瓶颈, 大大加快了遗传算法的进化速度, 在并行数目为 100 的实验中, 理论加速比在 98.41~99.46 之间, 实验加速比平均为 96.95.

2) 改进传统人工势场法的斥力函数设计, 并在基于兵棋推演仿真软件构建的导弹制导与反探测场景中, 用分布式遗传算法分别搜索 2 种人工势场法的最优参数, 面向不同的探测策略开展实验测试. IAPFM 比 APFM 的平均得分高 11.9%, 遗传算法的进化次数可以平均减少 2.73 轮. 此外, 实验还表明了分布式遗传算法即使面对得分存在一定方差的任务也能保证种群总体性能提升.

3) 该分布式框架具备广阔的适用范围, 例如若是使用其他需要调整参数的路径规划方法处理导弹制导与反探测问题, 均能用遗传算法并行搜索最优参数. 该框架甚至可以拓展至任意容器化的仿真任务, 只要将在运行单元中运行的当前容器改为其他仿真任务的容器即可, 仿真任务仍然可以并行执行.

参考文献 (References)

- [1] 马子杰, 谢拥军. 体系作战下巡航导弹的动态隐身[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(9): 2826-2831. DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2022.09.16.
- [2] Ma Z J, Xie Y J. Dynamic stealth of cruise missile in system combat[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(9): 2826-2831. DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2022.09.16. (in Chinese)
- [3] 陈黎, 段鹏飞, 袁成. 隐身空空导弹发展现状及关键技术研究[J]. 航空兵器, 2022, 29(1): 14-21. DOI: 10.12132/ISSN.1673-5048.2021.0221.
- [4] Chen L, Duan P F, Yuan C. Research on development status and key technologies of stealth air-to-air missiles[J]. *Aero Weaponry*, 2022, 29(1): 14-21. DOI: 10.12132/ISSN.1673-5048.2021.0221. (in Chinese)
- [5] 张杰, 张新华, 陈栋. 基于宽带扫频式的弹载通信干扰机干扰类别的综合评判[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(5): 886-890, 919. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9722.2021.05.005.
- [6] Zhang J, Zhang X H, Chen D. Comprehensive judgement of interference types of missile-borne communication jammers based on broadband sweep frequency[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2021, 49(5): 886-890, 919. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9722.2021.05.005. (in Chinese)
- [7] 宋博文, 王茂才, 戴光明, 等. 基于空间覆盖分析的导弹飞行规划系统[J]. 现代防御技术, 2020, 48(2): 15-21, 39. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2020.02.003.
- [8] Song B W, Wang M C, Dai G M, et al. Missile flight planning system based on spatial coverage analysis[J]. *Modern Defence Technology*, 2020, 48(2): 15-21, 39. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2020.02.003. (in Chinese)
- [9] 范世鹏, 祁琪, 路坤锋, 等. 基于改进人工势场法的巡航导弹自主避障技术[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(8): 828-834. DOI: 10.15918/j.tb1001-0645.2018.08.010.
- [10] Fan S P, Qi Q, Lu K F, et al. Autonomous collision avoidance technique of cruise missiles based on modified artificial potential method[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(8): 828-834. DOI: 10.15918/j.tb1001-0645.2018.08.010. (in Chinese)
- [11] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[C]//*Proceedings of 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St. Louis, MO, USA, 1985: 500-505. DOI: 10.1109/ROBOT.1985.1087247.
- [12] Xu X L, Pan W, Huang Y B, et al. Dynamic collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles via layered artificial potential field with collision cone[J]. *Journal of Navigation*, 2020, 73(6): 1306-1325. DOI: 10.1017/s0373463320000284.
- [13] Du Y S, Zhang X J, Nie Z L. A real-time collision avoidance strategy in dynamic airspace based on dynamic artificial potential field algorithm[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 169469-169479. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2953946.
- [14] Yang W L, Wu P, Zhou X Q, et al. Improved artificial potential field and dynamic window method for amphibious robot fish path planning[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5): 2114. DOI: 10.3390/app11052114.

- [11] 孙骞, 高岭, 刘涛, 等. 基于熵模型的粒子群优化算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1088 – 1093. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2019.06.010.
Sun Q, Gao L, Liu T, et al. Particle swarm optimization algorithm based on entropy model[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(6): 1088 – 1093. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2019.06.010. (in Chinese)
- [12] Yan Z P, Jiang L Y, Wu D. A path planning algorithm based on artificial potential field method and ant colony algorithm[C]//2021 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. Takamatsu, Japan, 2021: 1454 – 1459. DOI: 10.1109/ICMA52036.2021.9512799.
- [13] Fox B R, McMahon M B. Genetic operators for sequencing problems[J]. *Foundations of Genetic Algorithms*, 1991, 1: 284 – 300. DOI: 10.1016/b978-0-08-050684-5.50021-5.
- [14] Soon G K, Guan T T, On C K, et al. A comparison on the performance of crossover techniques in video game [C]//2013 *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*. Penang, Malaysia, 2013: 493 – 498. DOI: 10.1109/ICCSC.2013.6720015.
- [15] 吕昱呈, 莫愿斌. 融入变异交叉的改进天牛须算法求解 TSP 及工程应用[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(12): 3662 – 3666. DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2021.05.0162.
Lü Y C, Mo Y B. Improved beetle antennae search algorithm with mutation crossover in TSP and engineering application[J]. *Application Research of Computers*, 2021, 38(12): 3662 – 3666. DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2021.05.0162. (in Chinese)
- [16] 苏春, 李乐. 基于隐半马尔科夫退化模型的非等周期预防性维修优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(2): 342 – 349. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2021.02.022.
Su C, Li L. Optimization of non-equal periodic preventive maintenance based on hidden semi-Markov degradation model[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(2): 342 – 349. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2021.02.022. (in Chinese)
- [17] Abbasi M, Rafiee M, Khosravi M R, et al. An efficient parallel genetic algorithm solution for vehicle routing problem in cloud implementation of the intelligent transportation systems[J]. *Journal of Cloud Computing*, 2020, 9(1): 1 – 14. DOI: 10.1186/s13677-020-0157-4.
- [18] Chitty D M. A partially asynchronous global parallel genetic algorithm[C]//*Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. Lille, France, 2021: 1771 – 1778. DOI: 10.1145/3449726.3463190.
- [19] 邓敏, 伍志高, 姚志强, 等. 带精英集并行遗传算法的无人机干扰资源调度[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(6): 2158 – 2165. DOI: 10.11999/JEIT210349.
Deng M, Wu Z G, Yao Z Q, et al. Unmanned aerial vehicle jamming resource scheduling based on parallel genetic algorithm with elite set[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(6): 2158 – 2165. DOI: 10.11999/JEIT210349. (in Chinese)
- [20] 张源, 陶翼飞, 王加冕. 基于并行融合机制的改进遗传算法求解 HFSP 调度问题[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(6): 252 – 257. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2022.06.037.
Zhang Y, Tao Y F, Wang J M. An improved genetic algorithm for HFPS scheduling problem based on parallel fusion mechanism[J]. *Computer Applications and Software*, 2022, 39(6): 252 – 257. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2022.06.037. (in Chinese)
- [21] Luo J, Fujimura S, El Baz D, et al. GPU based parallel genetic algorithm for solving an energy efficient dynamic flexible flow shop scheduling problem[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2019, 133: 244 – 257. DOI: 10.1016/j.jpdc.2018.07.022.