

3-15-2024

Construction of Surrogate Model Driven by Model and Data

Jing An

Joint Logistics College, National Defense University, Beijing 100858, China; Graduate School, National Defense University, Beijing 100091, China; Joint Operations College, National Defense University, Beijing 100091, China, anj21_2000@sina.com

Guangya Si

Joint Operations College, National Defense University, Beijing 100091, China, sgy863@sina.com

Miaoting Zeng

Joint Logistics College, National Defense University, Beijing 100858, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Construction of Surrogate Model Driven by Model and Data

Abstract

Abstract: By taking the three-dimensional projection action in a certain combat style as the research object, a surrogate model construction method driven by model and data is proposed to support the operational action research, so as to solve the problem that the calculation factors are too much during simulated deduction; the calculation resource cost is too large, and the calculation accuracy of the general analytical model is insufficient. Firstly, an analytical model group of three-dimensional projections with coefficients to be optimized is constructed based on military theory, including weapons and equipment, forces, etc. In addition, the composition and parameter setting of the above-mentioned analytical model group are realized by the self-developed "visualization platform of surrogate model". The simulation system is used to implement deduction and collect high-credibility simulation data. Finally, by taking high-credibility simulation data as samples, the multi-objective genetic optimization algorithm NSGA-II is used to optimize the coefficients to be determined in the analytical model, and then a surrogate model of three-dimensional projection that considers both the calculation accuracy and speed is obtained. The experimental results show that the maximum relative error of operational loss of the constructed surrogate model of three-dimensional projection is less than 6.5%, and the calculation speed is 150 times faster than that of high-credibility simulation deduction.

Keywords

three-dimensional projection, simulation deduction, analytical model, surrogate model, multiobjective optimization algorithm, interpretability

Recommended Citation

An Jing, Si Guangya, Zeng Miaoting. Construction of Surrogate Model Driven by Model and Data[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 756-769.

模型与数据混合驱动的代理模型构建方法研究

安靖^{1,2,3}, 司光亚^{3*}, 曾妙婷¹

(1. 国防大学 联合勤务学院, 北京 100858; 2. 国防大学 研究生院, 北京 100091; 3. 国防大学 联合作战学院, 北京 100091)

摘要: 以某作战样式下的立体投送行动为研究对象, 针对模拟仿真推演计算因子过多、计算资源开销过大、普通解析模型计算精度不足等问题, 提出了一种模型与数据混合驱动的代理模型构建方法, 支撑作战行动的研究。基于军事理论构建了包含武器装备、作战力量等在内的含待优化系数的立体投送解析模型组, 并依托自主研发的“代理模型可视化平台”, 实现前述解析模型组的复合和参数设置; 通过模拟仿真系统实施推演, 采集高可信度仿真数据; 以高可信度仿真数据为样本, 采用多目标遗传优化算法NSGA-II对解析模型中的待定关键系数进行优化, 获得能够兼顾计算精度和计算速度的立体投送代理模型。经对比实验结果表明, 构建的立体投送代理模型计算结果与高可信度仿真推演相比, 战损最大相对误差不超过6.5%, 而计算速度提升了150倍。

关键词: 立体投送; 仿真推演; 解析模型; 代理模型; 多目标优化算法; 可解释性

中图分类号: TP 391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)03-0756-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1263

引用格式: 安靖, 司光亚, 曾妙婷. 模型与数据混合驱动的代理模型构建方法研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(3): 756-769.

Reference format: An Jing, Si Guangya, Zeng Miaoting. Construction of Surrogate Model Driven by Model and Data[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 756-769.

Construction of Surrogate Model Driven by Model and Data

An Jing^{1,2,3}, Si Guangya^{3*}, Zeng Miaoting¹

(1. Joint Logistics College, National Defense University, Beijing 100858, China; 2. Graduate School, National Defense University, Beijing 100091, China; 3. Joint Operations College, National Defense University, Beijing 100091, China)

Abstract: By taking the three-dimensional projection action in a certain combat style as the research object, a surrogate model construction method driven by model and data is proposed to support the operational action research, so as to solve the problem that the calculation factors are too much during simulated deduction; the calculation resource cost is too large, and the calculation accuracy of the general analytical model is insufficient. Firstly, an analytical model group of three-dimensional projections with coefficients to be optimized is constructed based on military theory, including weapons and equipment, forces, etc. In addition, the composition and parameter setting of the above-mentioned analytical model group are realized by the self-developed "visualization platform of surrogate model". The simulation system is used to implement deduction and collect high-credibility simulation data. Finally, by taking high-credibility simulation data as samples, the multi-objective genetic optimization algorithm NSGA-II is used to optimize the coefficients to be determined in the analytical model, and then a surrogate model of three-dimensional projection that considers both the calculation accuracy and speed is obtained. The

收稿日期: 2022-10-21 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 全军军事类研究生资助课题(JY2020B031)

第一作者: 安靖(1981-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为军事运筹学、战争设计系统工程。E-mail: anj21_2000@sina.com

通讯作者: 司光亚(1967-), 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为战争模拟系统、军事运筹学。E-mail: sgy863@sina.com

experimental results show that the maximum relative error of operational loss of the constructed surrogate model of three-dimensional projection is less than 6.5%, and the calculation speed is 150 times faster than that of high-credibility simulation deduction.

Keywords: three-dimensional projection; simulation deduction; analytical model; surrogate model; multi-objective optimization algorithm; interpretability

0 引言

多军种海空协同, 立体投送的作战方式正成为未来联合岛屿进攻作战的主要行动之一, 由于这一作战行动中包含海陆空天电网等多军种协同, 同时涉及一些新型装备平台, 因此存在交互性、非线性、不确定性、整体涌现性、自发秩序性等复杂系统特征。对于复杂系统, 理论分析不易获得定量研究结果, 因此国内外多都采用基于模拟系统的仿真实验方法开展研究^[1-3]。

由于模拟仿真实验所需计算因子过多, 导致其计算量大且计算时间长, 这意味着仿真实验方法更善于实现正向推演, 即从已知初始态势和作战策略推演作战结果, 很难利用其进行反向的优化和探索, 即以结果最优为目标寻找合适的作战行动策略。

为了解决模拟仿真实验在寻优过程中计算量过大和计算时间过长的问题, 近年来一种十分有效的优化方法——基于代理模型(surrogate model, SM)的优化方法逐渐发展起来^[4]。代理模型也称为“近似模型”(approximation model), 是对样本空间进行数学抽样后, 建立起的一种近似数学模型。该模型解算过程的计算量小, 且计算精度与高可信度仿真模型(如模拟仿真系统)相差不大。

构建代理模型的方法有很多, 例如多项式响应面(PRSM), Kriging 模型, 径向基函数(RBF), 人工神经网络(ANN), 支持向量机(SVR), 多变量插值和回归(MIR)等^[5-6]。尽管此类方法已经在各领域内得到了普遍的应用, 但仍然存在一些问题:

(1) 所建立的代理模型是完全基于数据驱动的, 无法反映输入和输出变量之间内在的因果联系, 所获代理模型的可解释性较差。

(2) 当待优化的输入变量较多时($n>10$)时, 想要建立一个能覆盖整个设计空间的准确代理模型所需要的样本点较多, 首先需要耗费大量的时间去获得样本点数据集, 导致效率较低。否则, 样本点不足会导致代理模型精度快速下降, 进而导致优化效果不佳。

(3) 代理模型在建立时忽略了高可信度模型中的部分信息, 因此有时候代理模型获得的优化结果仅为局部最优, 不能收敛至全局最优。

结合本文重点考虑的立体投送作战行动, 其中涉及的变量总数显然是较多的($n\gg 10$), 因此直接利用数据驱动建立代理模型所需要的样本点较多, 也是较低效的方法, 且所获模型的可解释性较差。为此, 本文提出了一种结合基于传统军事理论的解析模型和少量高可信度仿真模型数据的立体投送代理模型构建方法, 即模型和数据混合驱动的方法。该方法融合模型驱动和数据驱动两种常见的建模方法, 在假定原模拟过程的精确处理未知的情况下, 根据选择的输入-输出行为数据, 建立粗略模型, 再通过数据的不断拟合修正, 实现从低精度的解析模型向可信度较高代理模型的逐步过渡, 最终得出较为准确的代理模型。

该方法的主要步骤如下:

步骤 1: 采用军事理论对立体投送行动的各类武器平台、作战力量进行解析建模, 然后将其组合成复合解析模型, 该解析模型忽略掉了一些不重要的因素, 计算量小, 速度快, 可解释性好, 但部分关键参数还未完全确定, 需要结合高可信度仿真模型的计算结果进行修正。

步骤 2: 依托模拟仿真系统展开推演, 生成分布广泛但总数量较少的高可信度数据集。

步骤3: 采用多目标优化算法NSGA-II^[7-8](快速非支配排序遗传算法)和高可信度数据集对解析模型中待定的关键参数进行优化, 令最终代理模型的计算结果与高可信度数据集之间的总误差最小, 获得能够兼顾计算精度和计算速度的代理模型。

当代理模型建立完成后, 则可以利用代理模型计算速度快的优势, 进一步开展与反演算法、强化学习等领域的结合, 用于智能作战策略的寻找和训练, 大幅度提高上述方法的效率。

1 基于军事理论的解析模型构建

1.1 作战行动构想

立体投送作战行动的概念图如图1所示。

作战行动中, 红方的作战目的是尽快利用火力压制蓝方, 并综合利用平面、空中、超越等多种投送方式将兵力投送至蓝方陆地。整个过程中追求战损尽可能小, 投送成功率尽可能高, 同时上陆兵力能够在一定时间内完成固守任务。

红蓝兵力可大致分为作战平台、支援平台以

及投送平台三大类。作战平台主要负责直接毁伤对方有生力量, 包括战斗机、武装直升机、歼轰机、轰炸机、护卫舰、驱逐舰、巡航导弹、远程火力、防空导弹阵地等空海装备平台, 还包括步兵、自行火炮、坦克、机动防空阵地等陆地机动部队, 陆地机动部队是红方投送平台的主要载荷, 也是蓝方初始的陆上作战单位。支援平台包括电子侦察机、预警机、电子战干扰机、扫雷舰和工兵舰等。投送平台是红方特有的作战平台, 包括多种可以执行登陆作战的装备平台, 如运输直升机、两栖登陆舰、气垫登陆艇、固定翼运输机等, 可以用于投送上陆兵力。

1.2 作战平台(设施)解析模型

首先针对行动中的作战平台, 如战斗机、战舰、装甲车辆等进行解析建模。涉及以下5类作战平台模型。

1.2.1 作战飞机

本作战构想中, 作战飞机主要包括固定翼战斗机、固定翼轰炸机、武装直升机等。作战任务主要包括: 飞行、巡逻、攻击、防御等。

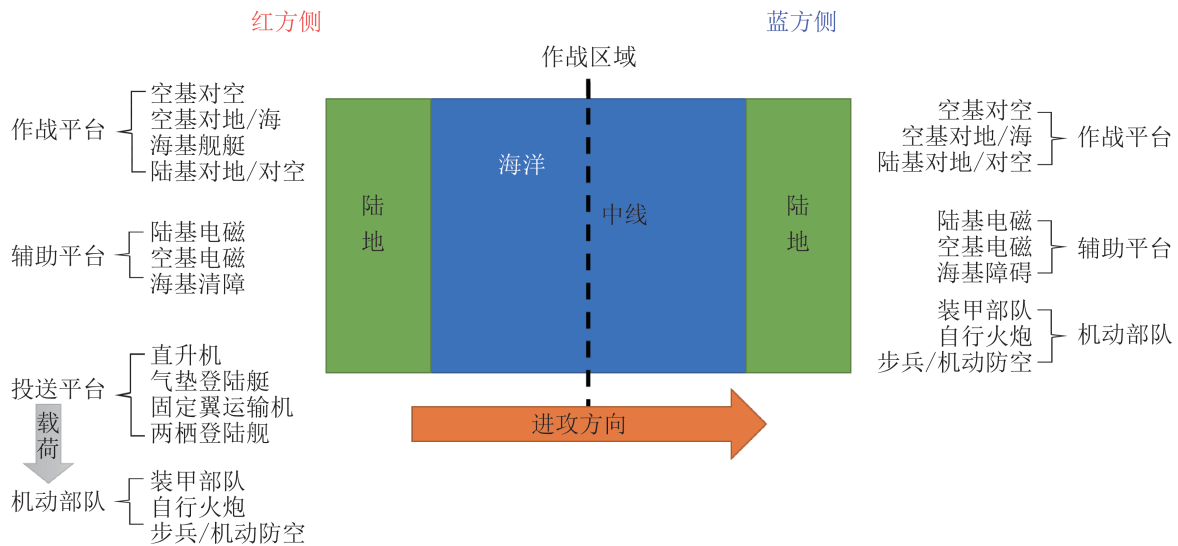


图1 立体投送作战行动概念图

Fig. 1 Concept map of three-dimensional projection action

(1) 飞行模型

假设飞机按照直线进行飞行。设起飞坐标为 (x_1, y_1) , 目标坐标为 (x_2, y_2) , 飞行速度为 v , 则在飞机尚未抵达目标坐标前任意时刻 t 的坐标为

$$\begin{cases} x_t = v_t \times \cos(\arctan(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1})) + x_1 \\ y_t = v_t \times \sin(\arctan(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1})) + y_1 \end{cases} \quad (1)$$

根据实际计算需要, 对时间项进行离散处理, 设时间步为 Δt , 则第 n 个时间步时飞机的坐标为

$$\begin{cases} x = v \times \Delta t \times n \times \cos(\arctan(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1})) + x_1 \\ y = v \times \Delta t \times n \times \sin(\arctan(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1})) + y_1 \end{cases} \quad (2)$$

(2) 巡逻模型

当飞机抵达目标坐标后, 如无攻击行动, 则在预设区域内执行巡逻行动。

设预设的区域范围为 r , 则在以目标坐标 (x_2, y_2) 为圆心, r 为半径的圆内随机生成一个目标点, 令飞机向该目标点运动。当抵达该目标点后, 则再次随机生成一个目标点, 令飞机持续在目标点附近的圆内运动。

(3) 攻击模型

攻击能力: 假设不考虑飞机的机炮等非常规武器, 只考虑对空和对地(舰)两类导弹。对空导弹的主要属性包括最大射程 R_m , 载弹量 N_m 和基础命中率 P_m 。对地(舰)导弹则在以上3种属性的基础上, 增加伤害值属性 H_m 。

攻击策略: 在每一个时间步内, 在自身携带所有导弹的最大射程范围内搜索, 如果发现可供射击的目标, 则瞄准距离自身最近的蓝方目标发射导弹1枚。可以同时发射对空和对地导弹, 但不会同时发射2枚同类型导弹。

命中判定: 假设不计导弹自身的飞行时间, 即在一个时间步内, 发射导弹同时就开始执行命中判定。

(4) 防御模型

本实例中, 飞机的主要威胁来自蓝方飞机的

对空导弹以及陆(海)基防空导弹。

飞机实体不设生命值, 假设只要被击中就会坠毁, 飞机存在一个闪避概率 P_d 。一枚对空导弹命中目标飞机的概率为

$$P_{m_p} = P_m \times (1 - P_d) \quad (3)$$

在每一个时间步内, 先执行攻击判定, 再执行生存判定, 即飞机有可能在一个时间步内发射了导弹, 同时也被击毁。

(5) 滞空条件模型

由于本实例中, 要探索中继平台的运用, 因此, 飞机的滞空时间将受到燃油限制, 即使不被击毁也不能无限滞空。

设当前速度的耗油率为 f_p , 初始携带的燃油量为 F_p , 在第 n 个时间步内的燃油储量为

$$F_{p_n} = F_p - n \times \Delta t \times f_p \quad (4)$$

在每一个时间步内计算飞机当前位置与最近本方机场位置的距离, 设为 L 。如果此时的燃油储量 F_{p_n} 小于按照当前速度 v 飞回机场所需燃油量的1.2倍, 则执行返航操作, 飞机开始向距离最近的机场返航, 具体表示为

$$F_{p_n} \leq 1.2 \times \frac{L}{v} \times f_p \quad (5)$$

此外, 当所有导弹耗尽后, 即使燃油尚有剩余, 飞机也会执行返航命令。所有飞机均不考虑转场、重新挂弹、空中加油等操作, 飞机的作战任务均视为一次性任务。

1.2.2 水面作战舰艇

本实例中, 水面作战舰艇主要包括导弹驱逐舰、护卫舰、两栖攻击舰等, 执行对岸压制和对空防御两大作战任务。

(1) 航行模型

航行轨迹为直线运动, 在到达目标区域后即停止运动, 不执行巡逻任务, 各时间步的坐标公式同作战飞机。

(2) 进攻模型

针对对岸压制和对空防御两大作战任务, 假设只考虑舰炮和防空导弹两类武器。其中, 舰炮

的属性除了 R_m 、 P_m ，还包括伤害值属性 H_m ，并假设弹药数量无限制；防空导弹的属性包括 R_m 、 P_m 和 N_m 。

(3) 防御模型

除了 P_d 以外，增加生命值属性 L_{va} ，如果命中判定为被击中，则在总生命值属性上减去 H_m ，当 L_{va} 减少到小于等于0时，该水面舰艇被消灭。

(4) 攻击策略

在每一个时间步内，在自身携带所有武器的最大射程范围内搜索，如果发现可供射击的目标，则瞄准距离自身最近的 n_{ship} 个蓝方目标发射弹药。 n_{ship} 为正整数，表示水面舰艇可以在一个时间步内同时对多个目标发起攻击。

(5) 反导机制

对于护卫舰，还需建立反导机制模型。当位处护卫舰防空导弹射程范围内的任意友方水面平台，在遭蓝方舰导弹攻击时，触发反导任务。设反导几率为 P_a ，完成一次拦截任务消耗防空导弹1枚，并占用 n_{ship} 中的1次发射次数，则一枚对舰导弹命中目标的概率为

$$P_{m_ship} = P_m \times (1 - P_d) \times (1 - P_a) \quad (6)$$

1.2.3 地面防空/对舰阵地

地面防空和对舰阵地是蓝方独有，主要包括防空导弹阵地、巡航导弹阵地。

(1) 防御模型

如果命中判定为被击中，则从 L_{va} 中减去 H_m ，当 L_{va} 减少到小于等于0时，该阵地被消灭。

(2) 攻击模型

依赖对空、对舰导弹执行攻击任务。其中，对空导弹不存在伤害值属性；对舰导弹存在 H_m ，另，两者均存在 N_m 。

(3) 攻击策略

在每一个时间步内，在自身的最大射程范围内搜索，若发现可供射击的目标，则瞄准距离自身最近的蓝方目标发射导弹1枚，不可同时发射2枚及以上的导弹。

1.3 投送平台解析模型

本实例中，投送平台主要包括两栖登陆舰、气垫艇、运输直升机、固定翼运输机、中继平台等。

1.3.1 两栖登陆舰

(1) 航行模型

假设两栖登陆舰执行直线运动，在到达目标区域后即停止运动，不执行巡逻，各时间步的坐标公式同作战飞机，且目标区域需受地理条件制约。

(2) 防御模型

两栖登陆舰无攻击能力，防御要考虑 P_d 和 L_{va} 两个属性。

(3) 卸载模型

由于本实例的作战行动始于装载完毕，因此，忽略舰船的装卸模型，只考虑舰船的卸载模型，重点关注卸载时间。

假设两栖登陆舰搭载 M 个兵力单元，当两栖登陆舰抵达指定近岸海域，以匀速 v_{un} 执行卸载任务，则在 $t_h = v_{un} \times M$ 时后完成该 M 个兵力单元的卸载。

t_h 时后， M 个兵力单元将根据其所处地理环境条件，以相应的泅渡速度或陆上速度向目标区域机动，兵力单元模型参见投送兵力模型。

舰船的投送任务均视为一次性任务，不考虑返航、多次往返等；也不受燃油限制，一旦抵达目标区域完成卸载后即保持静止。

1.3.2 气垫艇

气垫船与两栖登陆舰的航行、防御、卸载模型均相似，但与两栖登陆舰相比，气垫船的目标区域不受地理条件制约。

1.3.3 运输直升机

(1) 航行模型

运输直升机航行模型中增加飞行高度属性 A_f ，该属性将对 v 、 f_p 和 P_d 产生影响。

(2) 防御模型

无攻击模型, 防御模型同作战飞机。

(3) 空机降模型

空机降模型可参考卸载模型。假设搭载 M 个兵力单元, 当运输直升机抵达指定目标空域时, 以匀速 V_m 执行空机降任务, 则在 $t_h = V_m \times M$ 时后完成该 M 个兵力单元的空机降, 即 t_h 时后, M 个兵力单元向其目标机动, 模型参见投送兵力模型。

(4) 燃油补给模型

当完成空机降任务, 或燃油余量小于设置阈值时, 运输直升机将返回距离最近的陆地机场、海上机场或中继平台进行燃油补给。

1.3.4 固定翼运输机

(1) 航行模型

同作战飞机。

(2) 防御模型

同作战飞机。

(3) 空降模型

固定翼运输机的空降模型同运输直升机模型。但需要考虑固定翼飞机存在空投半径属性 R_{air} , 经空投的 M 个兵力单元的地面坐标将随机分布在目标点半径为 R_{air} 的圆内, 且兵力单元需集结后再展开机动。

(4) 装卸载模型

大型固定翼运输机可装载 m 台轮式车辆; 人员采取人随车装的方式进行装载。单车装卸载时间为 $n \text{ min}$ 。

1.3.5 中继平台

中继平台作为运输直升机的海上起降平台, 假设行动过程中保持静止, 且有足够机位。防御模型可参照两栖登陆艇防御模型, 重点考虑其生命值。

1.4 投送兵力解析模型

1.4.1 重装部队

(1) 机动模型

机动模型与前述模型相同。对于两栖装甲部

队, 还要考虑2种不同的机动速度: 泅渡速度 v_s 和陆上速度 v_l 。

(2) 进攻模型

主要依赖炮弹和机枪两种武器, 均只能对地(对舰), 不能对空。机枪仅能攻击轻快兵力, 炮弹仅能攻击地面和水面装甲目标。机枪和炮弹都具有 R_m 和 P_m 两个属性, 除此之外, 炮弹还具有 H_m 和 N_m 两个属性。

(3) 防御模型

除了 P_d 以外, 增加 L_{va} , 如果命中判定为被击中, 则在总生命值属性上减去命中炮弹的 H_m , 当总生命值减少到小于等于0时, 该装甲单位被消灭。

(4) 攻击策略

同样为每一个时间步内, 在自身携带所有武器的最大射程范围内搜索, 若发现可供射击的目标, 则瞄准距离自身最近的蓝方单位发射弹药。炮弹在一个时间步内仅能攻击一次, 而机枪则可以在一个时间步内攻击 n_{gun} 次, n_{gun} 是一个正整数。这意味着装甲单位在一个时间步内最多击毁蓝方装甲单位1个, 但是可以击毙步兵数个。

(5) 后勤补给条件

所有装甲部队均不受燃油和弹药量的限制, 一旦投入战场就会一直活动到被击毁为止。

1.4.2 轻快兵力

(1) 机动模型

与重装部队模型相同, 还需考虑陆上机动速度 v_l 。

(2) 进攻模型

轻快兵力的作战武器包括机枪、反坦克火箭筒、便携式防空导弹等。机枪仅能攻击步兵单位, 反坦克火箭筒仅能攻击地面装甲目标, 便携式防空导弹仅能攻击空中目标。其中, 机枪和防空导弹的属性与其他武器平台一致, 反坦克火箭筒则类似于炮弹, 存在 H_m 。防空导弹和反坦克火箭筒均有 N_m 。

(3) 防御模型

假设只受到蓝方装甲平台和步兵机枪的威胁,

不考虑武装直升机、炮弹、火箭弹等威胁，且不设置生命值属性，击中即消灭。

(4) 攻击策略

与重装部队相似，在每一个时间步内，在自身携带所有武器的最大射程范围内搜索，若发现可供射击的目标，则瞄准距离自身最近的蓝方单位发射弹药。反坦克火箭筒和防空导弹在一个时间步内仅能攻击一次，而机枪则可以在一个时间步内攻击 n_{gun} 次。

1.5 支援平台解析模型

辅助平台主要包括陆基电磁平台、空基电磁平台、海基扫雷破障平台三类。其中，陆基电磁平台主要为固定雷达站，空基电磁平台包括电子侦察机、预警机、电子战干扰机等，海基扫雷破障平台主要为扫雷舰和工兵舰。由于本想定的边界条件中，已将电磁权的获取、扫雷破障的程度做了一定假设。因此，此类平台的建模，重点考虑对作战影响较大的预警机。预警机不仅为战场双方提供完整的战场态势信息，在本实例中，更能够影响各型对空导弹的命中率。

设对空导弹的基础命中率为 P ，预警机对导弹命中率的加成为 n_{ew} ，其值为位于 $[0,1]$ 区间内的连续值，0 表示无加成，1 表示加成至 100%。经过该加成修正后的导弹命中率为

$$P' = P + (1 - P) \times n_{\text{ew}} \quad (7)$$

由于预警机具有较强的生存能力，被直接击落的可能性较小，因此不考虑预警机被直接击落的情况。但是假设一旦蓝方机场处出现红方作战单元，即判定蓝方预警机丧失能力，蓝方所有对空导弹命中率加成 $n_{\text{ew}}=0$ 。

1.6 复合解析模型

依托自主研发的“代理模型可视化平台”，实现前述解析模型的复合和参数设置。该平台采用 Python 语言编写，基于 matplotlib 库实现即时可视

化和动画，基于 PyQt 实现操作界面可视化，参数优化算法通过调用 Python 的 pymoo 多目标优化库实现，后续还将增加与强化学习框架的交互接口，可以令代理模型发挥其计算效率高的优势，通过与强化学习方法进行“策略-奖励”的交互，进而寻找潜在的最优作战策略。平台基本架构和参数设置界面如图 2、3 所示。

“代理模型可视化平台”包括红方参数设置界面、蓝方参数设置界面和全局参数设置界面，在红蓝双方的参数设置界面内可以为每种装备平台设置基础属性，如图 3 中所示的 J-10C 飞机，全局参数设置包括计算步长和总推演时间。这些参数可以手动输入，也可以直接使用软件的默认值。当参数调整完毕，点击开始推演，各参战单位即开始按照各自的解析模型开始行动并交互。所有单位在每一个时间步内依序执行“移动→搜索→发射武器→命中判定→伤害判定→完成状态更新”的流程，并在各单位完成状态更新之后，在主显示界面上更新战场态势图。

2 基于高可信度仿真推演数据集的代理模型优化算法

2.1 高可信度仿真推演数据集的采集

依托模拟仿真系统 CMO(command: modern operations) 实施仿真推演并采集高可信度仿真数据集。由于模拟仿真系统采用机理模型，能够考虑更多战场环境和武器装备的细节，而且能充分考虑红蓝双方博弈对抗，其推演时间步也更短，因此与解析模型相比具有更高的可信度，其计算结果可以视为高可信度数据。

基准想定按照 1.1 节作战行动构想进行设计，仿真软件中的装备数据库尽可能贴近实战装备，对于具体性能指标保密的武器参数，参考外军类似装备的公开数据予以了修正，令整个数据库即不涉密，又能有一定的精度保证。

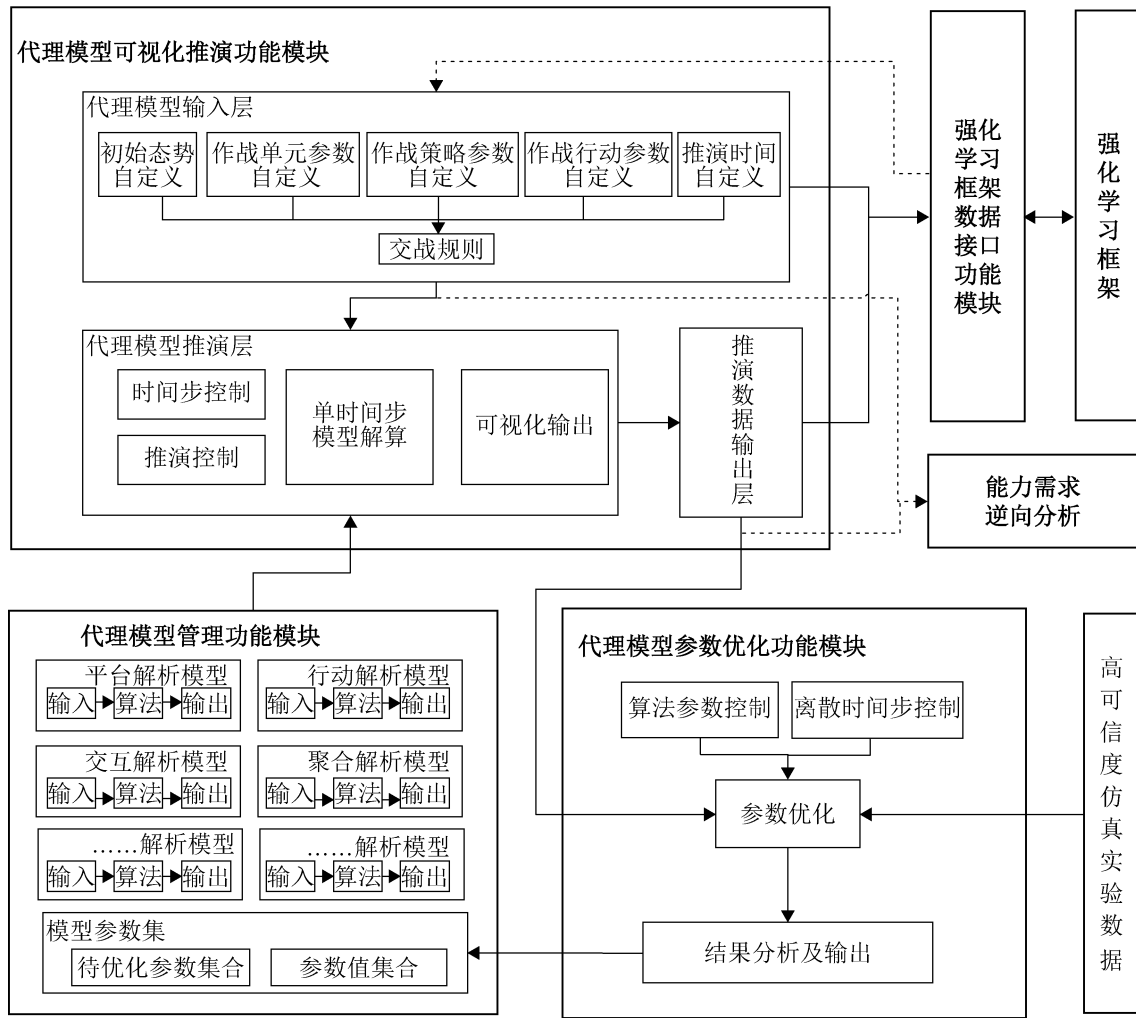


图2 代理模型可视化平台系统组成

Fig. 2 Composition of visual platform system of surrogate model

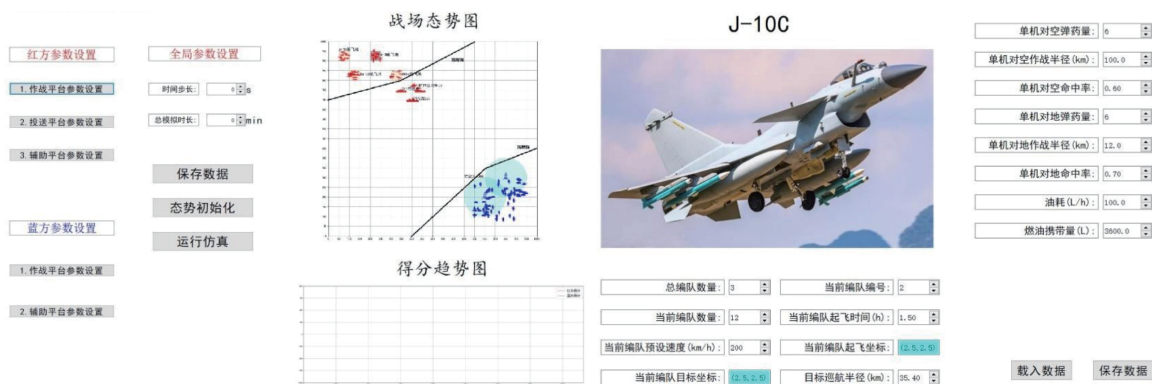


图3 平台参数设置界面

Fig. 3 Parameter setting interface

采用人不在回路的推演模式, 仿真实体按照预设好的作战条令和想定运行脚本实施推演, 采集包

括战损和战斗消耗的实验结果, 用于后续定量分析。

先前的研究已经在合理推测和敏感性分析的基础上，确定了多组关键变量及其取值范围^[9]，但是这些关键变量仍然较多，如果利用模拟仿真系统遍历整个变量空间，其所需要的计算量仍然非常庞大。为了令总的样本不至于过大，同时要尽量保障抽样的均匀性，因此采用拉丁超立方抽样法进行抽样，选择了50个实验点，即50组想定。对上述50组想定进行仿真，每隔1 min记录红蓝双方的累计战损值。由于存在概率性因素，因此每种想定运行25次推演，以25次推演结果的平均值作为样本数据，最终获得了50个带时间戳的样本数据。

2.2 复合解析模型中的待优化参数选定和设置

为了确保代理模型的计算精度，首先需要代理模型中的关键参数进行优化，令其计算结果与高可信度原模型的计算结果尽可能相似。

以某型战机为例，作为一款多功能战机，兼顾对空和对地能力。在代理模型中它的大部分参数都可以与模拟仿真系统中保持一致，比如编队总数、每队数量、起飞时间、起飞坐标、目标坐标、对空导弹数量、对地导弹数量、飞行速度、燃油携带量、油耗等。

但是代理模型中无法模拟模拟仿真系统中的天气影响、导弹飞行时间、导弹在不同距离发射时对命中率的影响、空中近距离机炮格斗、低空突防时地形的影响等，这些因素在代理模型全部归于对地/对空导弹的 P_m 、 P_d 、对地导弹的 H_m 属性上。

依次对解析模型进行分析，总共获得待定参数76个，部分数据如表1所示。

2.3 基于NSGA-II算法的模型参数优化

2.3.1 模型参数优化目标

优化目标是调整选定的参数，令代理模型的仿真结果与高可信度模拟仿真系统的仿真结果尽可能一致^[10]。

表1 代理模型的待优化参数

Table 1 Parameters of surrogate model to be optimized		
平台名称	待定参数	参数序号
某型运输直升机	对地导弹基础命中率	5~7
	基础闪避率	
	对地导弹伤害值	
某型两栖登陆舰	舰炮伤害值	8~12
	舰炮基础命中率	
	对空导弹基础命中率	
	生命值	
	基础闪避率	
∴		
总计		76

为了定量分析的一致性，首先需要给出一致性的数学定义。在完整的仿真时间 T 上进行离散处理，初始时间为 T_0 ，结束时刻为 T_n ，记录每个时刻上红方和蓝方的损失单位，如图4所示。

以 k 时刻为例，此时代理模型算出的红方损失单位数量记为向量 $L_{r,s,k}$ ，其中包含红方各编队的损失情况。用原模拟仿真系统计算得到的红方损失单位数量记为 $L_{r,o,k}$ ，定义两种推演方法在 k 时刻的误差为

$$Err_{r,k} = \sum_{i=1}^x \alpha_i \times (L_{r,o,k,i} - L_{r,s,k,i})^2 \quad (8)$$

式中： x 为红方编队总数； α_i 为人工系数，用来表示该型平台的重要程度，例如对于两栖登陆舰，由于其绝对数量较少且比较重要，该值可以取得较大，为50；而对于步兵单位，绝对数量较多且相对不那么重要，则该值可以取得较小，为0.1。由于人工系数表征的是各种装备平台的相对重要程度，绝对值并不重要，只要各系数之间的比例不变，就不会对后续计算产生影响。

类似的，定义 k 时刻蓝方损失的误差为

$$Err_{b,k} = \sum_{i=1}^x \alpha_i \times (L_{b,o,k,i} - L_{b,s,k,i})^2 \quad (9)$$

优化的目标是令式(8)、(9)两个误差在整个推演过程中的积分总误差最小。平均到每个时间步上的积分总误差为

$$Err_r = \sum_{k=1}^n Err_{r,k} / n \quad (10)$$

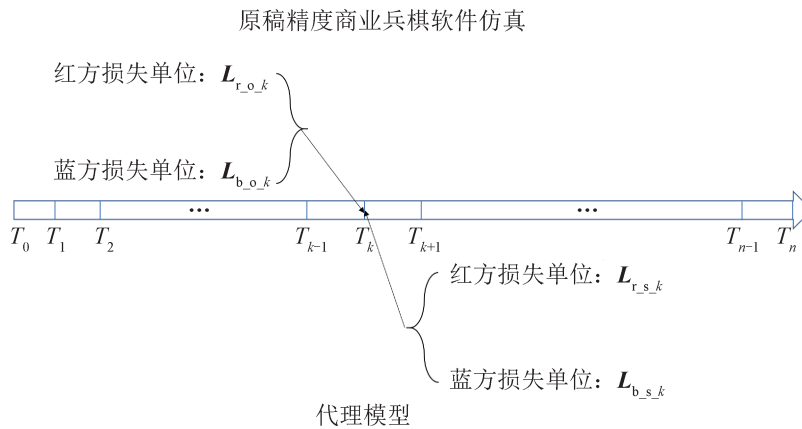


图 4 两种仿真推演时序一致性定义示意图

Fig. 4 Timing consistency definitions of two kinds of simulation deduction

$$Err_b = \sum_{k=1}^n Err_{b_k} / n \quad (11)$$

为了避免出现单一条件下过拟合情况。这种优化不是一次性的，而是在多个不同工况的算例上重复进行的，最终优化的目标是令多个算例上的 Err_r 的总和以及 Err_b 的总和均达到最小。

显然地，这里涉及到了同时优化两个目标，因此需要采用多目标优化算法对其进行计算。

2.3.2 多目标优化问题描述及求解算法选择

(1) 多目标优化问题描述

本文将带约束的多目标优化问题 MOO(mult object optimization)描述如下：

$$\begin{aligned} \min_x F(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] \\ \text{s.t.} \quad & g_i(x) \geq 0, \quad i \in [1, M] \\ & h_j(x) = 0, \quad j \in [1, Q] \end{aligned} \quad (12)$$

令 D 为上述问题的可行域，即

$$D = \{x | g_i(x) \geq 0, i \in [1, M], h_j(x) = 0, j \in [1, Q]\} \quad (13)$$

对于多目标优化问题通常不存在能令多个目标同时达到最小值的解，优化时只需要找出有效解即可^[11]，其定义为

$$f_k(x) \leq f_k(x^*), \text{ and } \exists i, f_i(x) \leq f_i(x^*), i \in [1, K] \quad (14)$$

有效解又称为帕累托(Pareto)最优解，其定义如下：

如果 x^* 是 Pareto 最优解，则不可能在可行域内找到另外一个解，能够令其他目标值不恶化的

同时，提升至少一个目标，比原 $f(x^*)$ 更好。这种情况称为无法进行 Pareto 改进。所有可能的 Pareto 最优解组成了 Pareto 前沿。

(2) 求解算法选择的依据

当存在多个 Pareto 最优解时，如果没有更多的输入信息，则认为所有的 Pareto 最优解都同等重要，很难在 Pareto 前沿中选择出哪个解更可取。对于本文代理模型的参数优化，需要在 Pareto 前沿中找出一组最合理满意的参数取值。

因此，本文选择求解算法的关键依据，或者说求解算法要达成的核心目标包括：①求解算法需要保证可靠的收敛性，确保找到一组尽可能接近 Pareto 最优域的解；②求解算法需要保证充足的分布性，包括多样性和均匀性，即要求求得尽可能均匀分布的 Pareto 最优解集，然后根据不同的问题分析要求和求解意愿，从中选择最满意的参数结果。

2.3.3 NSGA-II 算法

多目标优化理论和求解算法的研究起步较早，存在多种可行的多目标优化算法，且各有所长。其中，多目标遗传进化算法是目前较为常用的算法，其核心是参考模拟生物种群适者生存、优胜劣汰的遗传机制，通过选择、交叉、变异等算子迭代更新符合适应度要求的种群。应用于多目标优化问题时，能够协调各个目标函数之间的关系，

找出使得各个目标函数都尽可能达到最优函数值的最优解集。在众多的多目标遗传进化算法中，带精英策略的非支配排序遗传算法(elitist non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II)是影响最大、应用范围最广的一种^[12]，其基本流程如图5所示。

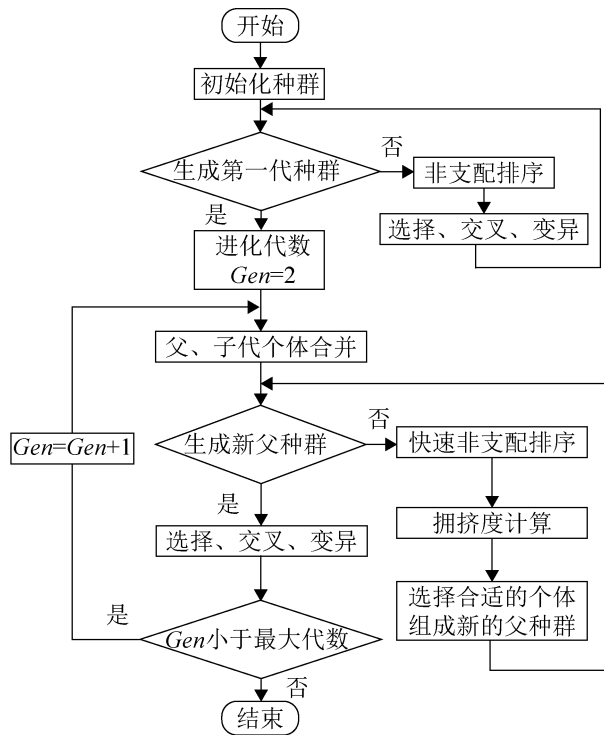


图5 NSGA-II算法的基本流程

Fig. 5 Basic flow of NSGA-II algorithm

3 优化过程和结果分析

3.1 优化算法的参数设置

使用随机函数生成初始种群，每一条染色体为一个系数向量，设置NSGA-II算法参数如表2所示。想定的总仿真时长为6h，分别构建不同离散时间步 $n=6, 12, 24, 36, 48, 60$ 的目标函数，考察时间步长对代理模型精度的影响，调用优化算法，完成参数优化。

优化的目标函数是代理模型计算结果与高可信度仿真模型的误差。输出为优化完成的一组Pareto前沿系数。优化算法在计算的过程需要不

断的计算目标函数，其中代理模型的计算结果是实时计算获得的，仿真模型的计算结果则是之前获得的带时间戳的样本数据集。

表2 优化算法参数

Table 2 Optimization algorithm parameters

序号	参数	值
1	仿真时间序列 T/h	6
2	离散时间步 n	6, 12, 24, 36, 48, 60
3	初始种群规模	200
4	最大进化代数	1 000
5	交叉概率	0.9
6	变异概率	0.03

3.2 优化结果的分析

优化得到Pareto前沿解集如图6所示，由于 $n \geq 36$ 以后获得的Pareto前沿已经相差较小，因此选择 $n=36$ 的Pareto最优解集作为后续优化的基准。

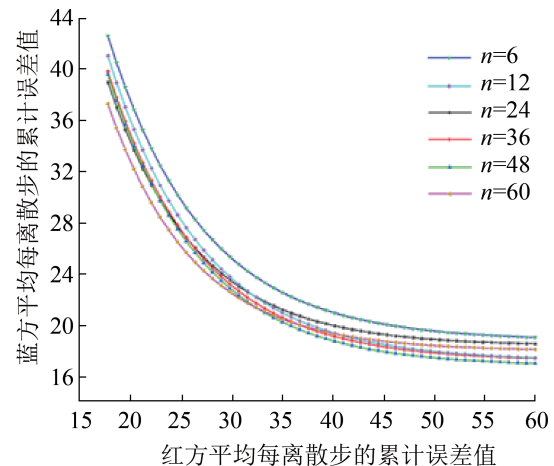
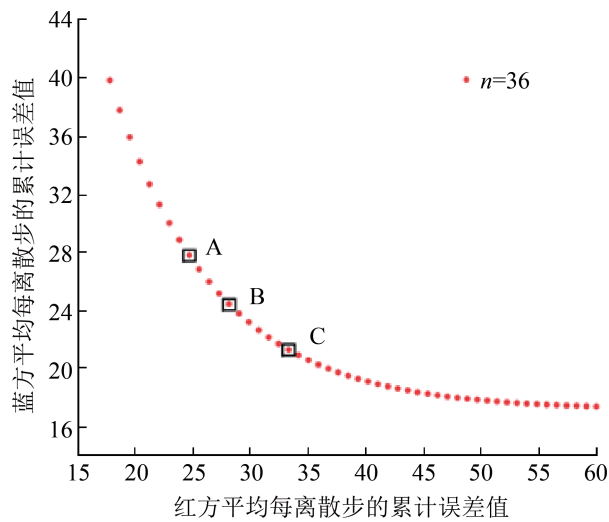


图6 Pareto最优解集

Fig. 6 Optimal solution set of Pareto

在 $n=36$ 的Pareto前沿上选择A、B、C3个有代表性的点，如图7所示。可以看出，通过NSGA-II算法获得的Pareto前沿解集分布较为均匀，具有充足的分布性。其中，前沿左侧的A点倾向于减少红方误差，前沿右侧的C点倾向于减少蓝方误差，居于中间的B点兼顾红蓝双方误差。

图7 $n=36$ 的 Pareto 前沿解集上的选点Fig. 7 Point selection in Pareto front solution set when $n=36$

在3组待定系数条件下进行基准想定的推演, 代理模型和仿真实验数据集在每个时间步上获得的战损情况如图8所示(图中结果数据取自25次结果的平均值)。

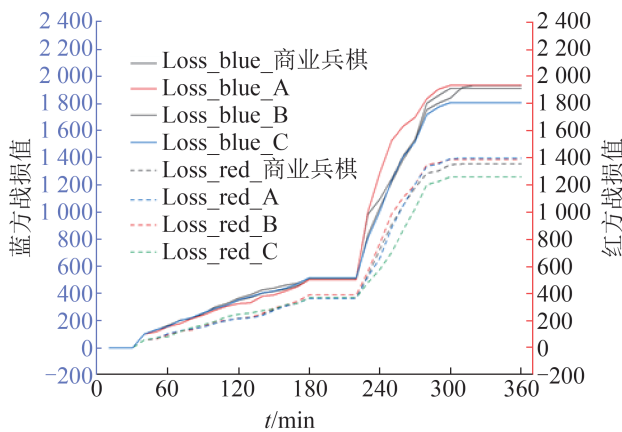


图8 推演结果对比图

Fig. 8 Contrast of deduction results

从图8可以看出, A组系数对红方战损的吻合度的比较好, C组系数对蓝方系数吻合较好, B组系数相对能够兼顾两方战损。B组系数驱动的代理模型在任意一个时间步上的战损最大相对误差不超过6.5%, 因此最终选定为代理模型的最终系数。

3.3 代理模型的评估

对优化得到的代理模型^[13]进行评估。主要包括计算精度和计算效率两方面, 图8中已经在基准想定中对比了代理模型与仿真实验的推演结果。现在进一步对50组实验想定进行对比, 结果表明在50组实验想定的任意一个时间步上, 代理模型与仿真实验算出的战损最大相对误差都不超过9.2%, 大部分时间步上都在5%以下。

对于计算效率的评估方面, 选取单线程运行和并行运行两种方式, 分别对代理模型和CMO模拟系统进行计算效率对比。

首先, 对单线程计算效率进行对比, 实验采用CPU为Intel(R)_Xeon E5-2650v4@2.20 GHz, 内存64 G, 时间步长10 min, 仿真想定时长6 h。评估环境及对比结果如表3所示。

表3 单线程计算效率对比

Table 3 Comparison of single-thread calculation efficiency

模型	推演时间
代理模型	12 s
CMO	30 min(模拟速度=max)

再对并行运行进行对比实验。实验环境如下: 代理模型: 在多个CPU上部署实现并行计算; CMO程序: 利用虚拟机部署实现并行计算。

分别在并行数量为5、10、15、20、25、30的条件下同时运行基准想定, 对比两种方法的加速比。

加速比代表并行计算比传统的串行执行速度提高的倍数, 计算公式为

$$\text{加速比} = \frac{\text{单处理器运行时间}}{\text{多核并行计算所耗时间}} \quad (15)$$

例如, 单处理器依次计算30组代理模型, 大约需要 $12 \times 30 = 360$ s, 而如果采用30个进程同时计算, 则只需要12 s左右, 因此其在30个算例时的加速比大约为 $360/12 = 30$ 左右。而开启30个虚拟机同时运行CMO程序, 则需要63 min左右才能完成计算, 因此其加速比只有15左右。

具体的对比结果如图9所示。

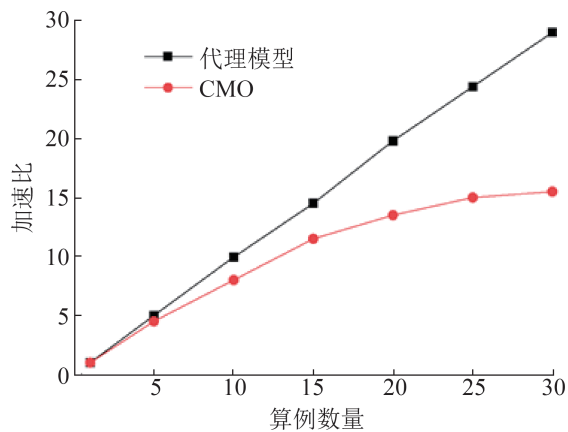


图9 加速比对比

Fig. 9 Comparison of speedup ratio

综合两个实验结果，单个代理模型的计算效率提升为原仿真模型的150倍，计算精度损失很小。而在并行计算方面，其提升效果更加明显，代理模型由于算法简单，几乎可以实现线性的加速比，而CMO在并行计算时，其并行效率随着并行算例的增加而快速下降。这一结果表明，代理模型对于作战方案寻优、作战策略智能寻优等军事应用意义重大。

4 结论

本文以某作战样式下的立体投送行动为研究对象，基于军事理论构建了含待定系数组的可解释代理模型，同时使用通用性较好的模拟仿真系统生成了少量高可信度数据集。在此基础上，采用NSGA-II多目标优化算法对待定系数进行了优化，最终获得了能兼顾想定中红蓝双方战损的待定系数组。通过优化结果的对比分析表明，由该待定系数组驱动的代理模型计算结果与原仿真数据集的计算结果误差较小，同时能够大幅度的提高计算速度。并且具有机理清晰，可解释性强，代码接口完全自主可控等优点。

该领域目前仍处于探索阶段，后续针对下列问题可展开进一步研究：

(1) 目前构建的代理模型仅能用于某一具体作战场景中，其泛用性尚未得到证实。

(2) 为了简化计算过程，即使是模拟仿真系统中所设计的想定，其动作空间、状态空间也经过了一定程度的简化，仍不能完全反应真实战场的复杂度。

(3) 如何利用所获代理模型与反演算法、强化学习、智能优化等领域做进一步结合，提升上述方法的效率和精度。

参考文献：

- [1] 杨镜宇, 司光亚, 胡晓峰. 信息化战争体系对抗探索性仿真分析方法研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1469-1472, 1496.
Yang Jingyu, Si Guangya, Hu Xiaofeng. Study on Simulation-based Exploratory Analysis Method of Information Warfare System of System (SoS) Encounter [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(6): 1469-1472, 1496.
- [2] Hunt K. A New Paradigm for Developing and Maintaining Scenarios for Distributed Simulation Systems[C]//1999 Fall Simulation Interoperability Workshop Papers. [S.l.]: [s.n.], 1999: 99S-SIW-179.
- [3] Johnson T H. Mission Space Model Development, Reuse and the Conceptual Models of the Mission Space Toolset [C]//In Proceedings of the 1998 Spring Simulation Interoperability Workshop. [S. l.]: [s. n.], 1998: 98S-SIW-155.
- [4] Slawomir Koziel, Leifur Leifsson. Surrogate-based Modeling and Optimization: Applications in Engineering [M]. New York, NY: Springer New York, 2013.
- [5] Krige D G. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1951, 52(6): 119-139.
- [6] 韩忠华. Kriging模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3197-3225.
Han Zhonghua. Kriging Surrogate Model and Its Application to Design Optimization: A Review of Recent Progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3197-3225.
- [7] Schulman J, Wolski F, Dhariwal P, et al. Proximal Policy Optimization Algorithms[EB/OL]. (2017-08-28) [2022-09-20]. <https://arxiv.org/abs/1707.06347>.
- [8] Mnih V, Adrià Puigdomènech Badia, Mirza M, et al. Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learning[C]//Proceedings of the 33rd International Conference on International Conference on Machine

- Learning. Cambridge: JMLR, 2016: 1928-1937.
- [9] 安靖, 司光亚, 张雷. 基于深度强化学习的立体投送策略优化方法研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(1): 39-49.
An Jing, Si Guangya, Zhang Lei. Research on the Strategy Optimization Method of Multi-dimension Projection Based on Deep Reinforcement Learning[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 39-49.
- [10] 蔡文杰. 基于替代模型的飞行器稳健设计软件研究与开发[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
Cai Wenjie. Research and Development of Robust Design Software for Aircraft Based on Alternative Model [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [11] 李记超. 离散伴随和数据驱动的气动优化设计方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
Li Jichao. Aerodynamic Shape Optimization Methods with Discrete Adjoint and Data-driven Techniques[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [12] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [13] 韩忠华, 许晨舟, 乔建领, 等. 基于代理模型的高效全局气动优化设计方法研究进展[J]. 航空学报, 2020, 41(5): 25-65.
Han Zhonghua, Xu Chenzhou, Qiao Jianling, et al. Recent Progress of Efficient Global Aerodynamic Shape Optimization Using Surrogate-based Approach[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(5): 25-65.