

遗传算法协同优化改进理论与应用研究

刘义庆, 屠义强, 卢厚清

中国人民解放军陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年4月12日; 录用日期: 2025年7月28日; 发布日期: 2025年8月6日

摘要

随着复杂系统建模与仿真技术的快速发展, 协同优化算法在军事指挥、智能制造等领域的应用需求持续增长。本文系统梳理了改进遗传算法在协同的方法论演进与技术突破, 重点分析其在多目标动态优化、混合智能架构、自适应参数调节等方面的创新实践。通过典型应用案例的对比研究, 揭示算法改进路径与工程实现的内在关联, 并探讨数字孪生、边缘计算等新兴技术带来的发展机遇。最后提出算法收敛理论体系构建、超大规模协同优化等未来研究方向。

关键词

遗传算法, 协同优化, 复杂系统, 多目标动态优化, 自适应参数调控

Theoretical Improvements and Applications Research of Genetic Algorithms in Collaborative Optimization

Yiqing Liu, Yiqiang Tu, Houqing Lu

College of Combat Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu

Received: Apr. 12th, 2025; accepted: Jul. 28th, 2025; published: Aug. 6th, 2025

Abstract

With the rapid development of complex system modeling and simulation technologies, the application demands for collaborative optimization algorithms in fields such as military command and intelligent manufacturing continue to grow. This paper systematically reviews the methodological evolution and technical breakthroughs of improved genetic algorithms (GAs) in collaborative optimization, focusing on innovative practices in multi-objective dynamic optimization, hybrid intelligent architectures, and adaptive parameter adjustment. Through comparative studies of typical

application cases, the intrinsic connections between algorithm improvement paths and engineering implementations are revealed, while development opportunities brought by emerging technologies such as digital twin and edge computing are explored. Finally, future research directions including the construction of algorithm convergence theoretical systems and ultra-large-scale collaborative optimization are proposed.

Keywords

Genetic Algorithm, Collaborative Optimization, Complex Systems, Multi-Objective Dynamic Optimization, Adaptive Parameter Adjustment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在复杂系统优化领域,遗传算法(Genetic Algorithm, GA)凭借其仿生学启发的分布式搜索机制,成为解决多目标、高维度决策问题的核心工具。然而,传统遗传算法在军事指挥、智能制造等领域的应用中,逐渐暴露出静态参数导致的早熟收敛、单目标优化范式的局限性以及离散编码对连续变量处理的精度损失等关键瓶颈。例如,在多无人机协同任务分配场景中,传统方法的解空间搜索效率较改进策略低 1.7 倍 [1],而在岛礁防空部署这类连续变量优化问题中,二进制编码引入的量化误差可达 13.6% [2]。这些缺陷本质上反映了算法原生机制与复杂系统动态适应性需求的不匹配,亟需通过协同策略重构算法框架以突破理论与应用边界。

针对上述技术瓶颈,国内外研究已形成多维度改进路径,其探索成果可置于协同优化理论框架下进行系统性解析。在算法架构创新领域,宋遐淦等学者构建的模拟退火-区间灰数融合模型[3],本质上是将热力学熵增原理与灰色系统理论引入进化计算,通过温度参数调控解空间能量分布,在协同空战目标分配中有效抑制局部最优陷阱。然而该模型对多武器平台协同的动力学约束(如火力通道容量、弹药消耗均衡性)缺乏形式化描述,暴露了复杂系统约束建模的理论短板。在约束处理技术领域,喻世轶等提出的非支配排序-拥挤度优化策略,实则是帕累托最优理论在武器目标分配中的工程化实现,通过多目标解集的密度估计平衡搜索效率与解质量,但面对高维变量引发的组合爆炸问题,其理论支撑仍依赖传统凸优化假设,难以应对非线性约束下的“维数灾难”[4]。在跨领域应用拓展方面,孙雨辉等在冷链物流中的局部搜索嵌入策略[5],体现了贪心算法与进化计算的启发式协同,但工业场景中设备异构性、任务实时性等复杂约束条件下的协同优化策略仍需进一步完善。上述改进路径虽取得局部突破,但共性缺陷凸显:其一,分布式架构与多模态策略的协同缺乏系统化理论框架,现有方案多采用经验驱动的模块叠加方式,尚未建立“种群交互-参数耦合-环境反馈”的跨层次协同机制;其二,复杂约束下的优化效能受限于传统遗传算子的线性操作特性,难以有效处理非线性、时变约束的协同优化问题,亟需引入深度学习等非线性映射工具重构优化范式。

本文聚焦于协同策略驱动下的遗传算法范式革新,系统梳理了改进方法论与典型应用。研究首先剖析了传统遗传算法在静态参数、单目标适配和编码机制上的核心局限,进而揭示了协同优化理论的赋能机制。在此基础上,从混合智能架构创新、自适应参数调控、多目标优化重构三个维度出发,整合量子计算、群体智能与深度学习等前沿技术,构建了多层次的改进框架。研究旨在构建兼具理论深度与工程

实用性的理论框架，为高维非线性系统优化提供支撑，推动遗传算法在动态不确定环境中的深度应用。

2. 传统遗传算法的局限性

传统遗传算法在协同应用中的局限性主要源于其基于生物进化理论的简化模型假设，具体表现在以下三方面：

2.1. 静态参数机制导致早熟收敛问题

经典遗传算法(John H. Holland, 1975)采用固定交叉概率(0.6~0.9)与变异概率(0.001~0.01)的参数体系，这种静态设定难以平衡种群多样性维持与收敛速度的动态矛盾。根据 Goldberg (1989)的收敛性理论[6]，固定参数会导致种群在进化早期因快速同质化陷入局部最优，当交叉算子持续强化优势基因聚集效应，变异算子的随机扰动却无法有效补充新基因时，约 68%的协同优化问题会出现早熟收敛。以机器人动态路径规划场景为例，采用静态参数的算法在复杂障碍物环境中，迭代 30 代后适应度停滞案例占比达 65%，路径规划失败率较自适应参数策略升高 41%，暴露了固定参数在动态约束下的鲁棒性缺陷[7]。其核心矛盾在于，固定交叉概率可能过早淘汰尚未显优的潜在优质解，而固定变异概率既无法满足高维解空间的探索需求，也难以在环境约束突变时通过参数调整维持种群多样性，导致算法陷入“早熟-停滞”循环。

2.2. 单目标优化导向多指标冲突困境

传统遗传算法依赖标量适应度函数的设计范式，这导致其在处理协同系统的多目标优化问题时存在固有缺陷。其核心局限在于标量函数采用加权求和的简化方法处理互斥指标，难以完整描绘帕累托前沿(即多目标优化中无法通过改进单一目标而不损害其他目标的最优解集集合)的解集分布，从而导致算法在搜索过程中无法保持多目标动态平衡。以智能电网调度场景为例，76%的资源分配任务需要同时优化供电可靠性(提升 30%)、能耗成本(降低 25%)、碳排放强度(减少 18%)等冲突目标[8]，而单目标函数的加权处理常导致综合效能损失达 17.3%。这种“优化悖论”表现为，过度侧重供电可靠性可能引发能耗成本激增，单纯降低碳排放又可能牺牲供电稳定性，单一指标的提升常以系统性效能下降为代价。例如在交通信号优化中，仅优化车辆通行速度会导致路口排队长度增加 22%，暴露了单目标导向在多维度约束下的决策短板[9]。该范式的本质矛盾在于无法适配复杂系统的多指标协同需求，亟需向支持帕累托最优解集搜索的多目标优化框架演进。

2.3. 离散编码模式连续变量处理局限

约翰·霍兰德(John H. Holland)提出的二进制编码方案在处理物流调度、航路规划等连续决策问题时存在结构性缺陷。其核心局限在于，通过离散化映射将连续变量转化为有限长度基因序列的过程中，不可避免地引入量化误差。以仓库选址问题为例，在仓库选址问题中通过离散编码导致运输路径延长 22.4%，反映编码机制与连续决策的不匹配的问题[10]，更深层的矛盾在于二进制编码的“离散重组”特性难以捕捉连续变量间的非线性耦合关系。在无人机三维航路规划场景中，离散编码无法精细调整高度、速度、航向等连续参数的协同优化，编码精度不足时易错失最优解，编码长度增加则导致计算复杂度呈指数级上升，形成解空间搜索的“粒度陷阱”[11]。这种结构性缺陷源于离散编码范式与连续决策问题的数学结构不兼容。因此，亟需采用支持连续变量直接操作的实数编码或浮点编码框架，以突破离散化导致的优化精度与计算效率瓶颈。

3. 协同优化特性

协同优化机理通过系统架构层、优化机制层、鲁棒性控制层的分层耦合，形成“分布式协作-参数

协同 - 动态适应”的三级协同架构，鉴于传统遗传算法的局限性，引入协同优化特性显得尤为重要。

3.1. 系统架构层：分布式种群的自组织协同

遗传算法以“种群”为基本进化单元，天然契合复杂系统的分布式决策需求。每个个体染色体作为解空间的独立探索单元，通过适应度函数实现“目标导向”的自组织协作，无需全局信息即可通过局部竞争与合作，涌现出去中心化的群体智能。这种分布式架构与多智能体系统(MAS)的自主决策范式深度同构。个体通过适应度评估动态调整搜索方向，种群通过基因流动实现解空间的全局覆盖。例如，在无人机协同搜索中，每个无人机的航路方案对应染色体编码，种群通过适应度竞争淘汰低效路径，保留并重组优质策略，最终生成覆盖全局最优解的分布式决策集合[12]。该层次核心理论价值在于通过“分而治之”的种群分布式存在，将高维复杂问题拆解为个体层面的局部优化任务，依托群体自组织实现全局解的渐进逼近，避免了集中式控制的单点失效风险。

3.2. 优化机制层：基因操作驱动多维参数耦合优化

遗传算法通过选择、交叉、变异三大算子构建解空间的协同搜索框架，其中交叉算子是实现多维度参数耦合优化的核心机制。交叉操作模拟协同系统的信息交互过程，将不同个体的优势基因进行跨维度融合，生成兼具父代特征的子代个体，这种结构化重组不仅扩大了搜索范围，更通过解空间的动态变换突破单一个体的认知局限。选择算子通过适应度筛选优质个体，为交叉操作提供高价值基因素材；交叉算子则通过基因重组创造新的潜在优质解，反哺选择过程，形成“择优 - 重组”闭环。在武器目标分配问题中基于遗传算法框架改进的蛙跳算法引入非支配排序与拥挤度因子，对毁伤效能与资源消耗等冲突目标进行基因重组，生成分布更均匀的帕累托前沿解集，解的均匀性提升 19.8%，有效平衡搜索效率与解质量[4]。而在雷达组网优化布站中，龚文浩等提出的改进遗传算法通过退火精英保留策略，动态平衡全局搜索与局部开发能力，在处理多雷达协同的电磁干扰与资源冲突问题时，使空间探测能力提升 20.5%，较传统方法有效降低了布站方案的资源冲突率[13]。

3.3. 鲁棒性控制层：动态调节维持种群多样性

变异与选择算子的协同作用通过动态调节策略维持种群多样性，是应对复杂环境约束的核心机制。为应对这一挑战，当前研究通过动态调节策略维持种群多样性，典型方法如基于香农熵的自适应调节策略当熵值低于阈值时自动提升变异概率，使动态威胁环境下的种群多样性维持水平较固定参数策略提高 32%，显著抑制早熟收敛[14]。理论上，该机制遵循耗散结构理论，通过熵流注入抵消系统有序化趋势，在电力系统无功优化中将电压失稳风险降低 63%，并使帕累托前沿解集的分布均匀性指标(SPREAD)提升 29%，文献[15]通过高斯滤波预处理数据，结合混沌自适应遗传算法提升 RFID 定位精度至 0.128 米误差，验证了动态调节对多目标冲突的协同优化能力。

上述三层架构通过信息交互形成有机整体，系统架构层提供分布式搜索的物理载体，优化机制层实现多目标冲突的协同平衡，鲁棒性控制层保障动态环境下的搜索精度。三者共同推动遗传算法从单一工具向具备复杂系统认知能力的智能决策体系演进。

4. 改进遗传算法的协同优化方法

针对传统遗传算法在静态参数、单目标范式及离散编码的理论局限，通过混合智能架构创新、自适应参数调控、多目标优化重构三个维度构建了系统化的改进方法论，推动遗传算法从单一仿生启发式方法向智能优化理论体系演进。

4.1. 混合智能算法融合

混合智能算法在复杂协同优化问题求解中通过多模态策略融合展现出突破性优势，其架构为基于全局与局部搜索互补的纵向融合与多算法并行优化的横向协同。纵向融合策略中，模拟退火机制与遗传算法深度耦合，突破传统算法早熟瓶颈，如徐超研究组在空战攻防决策中通过温度参数自适应调节构建动态平衡机制，将收敛速度提升了 64% [16]；夏维等在武器目标分配研究中引入退火增强算子，使火力分配方案适应度提升了 12.3% [17]。横向协同层面，群体智能与启发式算法创新组合推动解空间搜索范式升级，余维等提出的武器目标分配优化算法(WTAO-PGT)通过禁忌列表和自适应选择比例，将武器目标分配的收敛精度提升了 19.8% [18]；在多算法融合创新层面，柳始良等在通信对抗场景中改进鱼群算法，通过引入迁徙行为算子使干扰效率提升了 16.8% [19]。这种多层次的算法融合策略不仅突破了单一算法的性能瓶颈，更通过动态平衡全局探索与局部开发能力，为复杂战场环境下的协同优化问题提供了创新性解决方案。

4.2. 自适应参数调控机制

针对传统遗传算法参数固化导致的动态适应性不足问题，当前研究聚焦量子计算与机器学习两大技术路线，量子遗传算法(Quantum Genetic Algorithm, QGA)通过模糊逻辑控制器动态调节量子旋转角，基于种群多样性系数与进化代际差自适应切换全局/局部搜索模式，但经验阈值依赖导致动态鲁棒性受限，而无监督相位扰动策略虽降低人工干预需求，却使计算复杂度增加 23% [18]；另一方面，基于代理模型的协同进化架构通过双层适应度评估体系，仅对 30%精英个体精确计算，其余由网络预测，在 2000 维防空部署中单次迭代耗时压缩 83%，但受限于初始样本质量与帕累托最优解集分布性风险[20]。两类方法分别从算子优化与资源调度层面突破瓶颈，量子调节强化核心操作精度，代理模型提升计算效率。未来可深度融合二者优势，构建“环境感知-参数动态调节-计算资源加速”三维框架，实现超大规模协同优化的精度-效率平衡。

4.3. 多目标优化重构

在动态调节保障种群多样性的基础上，针对多目标冲突的本质特征，当前研究通过重构优化框架实现协同突破，主要以非支配排序(NSGA-II)与分解策略(MOEA/D)为代表的改进方法已形成系统性解决方案。在武器目标分配领域，文献[17]提出的多目标粒子群优化算法(MOPSO-II)通过变量随机分解策略与协同进化框架，显著扩展了毁伤效能与弹药消耗双目标的帕累托前沿，其收敛速度较 NSGA-II 提升 40% (500 维场景)。文献[21]基于 NSGA-II 非支配排序策略提高点火延迟和燃烧速度预测；在绿色物流调度领域，文献[22]融合遗传算法与蜉蝣算法的全局-局部协同优势，通过动态邻域交互机制将碳排放成本纳入优化体系，实验表明该算法在运输成本降低 16.8%、碳排放减少 23.4%的同时，解集超体积(HV)指标较传统多目标粒子群算法提升 28.6%。两类方法均通过协同架构平衡搜索效率与解集分布性，尤其在处理高维非线性约束时展现出强适应性，为复杂战场与工业场景的多目标优化提供了可验证的技术路径。

5. 未来发展趋势

当前研究仍面临动态不确定环境响应不足、超大规模计算效率瓶颈、异构算法协同机制不完善等共性挑战，其核心在于生物进化模型与复杂系统动态特性的理论适配难题。未来技术发展呈现以下特征：

5.1. 异构算法深度融合与认知进化

遗传算法正通过与人工智能技术的深度融合实现决策范式跃迁。以深度强化学习-遗传级联框架

(DRL-GACascade)为例,其通过多层认知架构实现战场态势的动态感知与优化决策,前端利用三维卷积时空网络实时解析电磁频谱与运动轨迹,中台结合自适应遗传算法进行解空间优化,后端通过联邦学习实现跨域知识共享与协同进化。在实战验证中有效提升复杂对抗场景下的决策效率与任务处理能力。未来,需进一步突破异构算法间的知识迁移瓶颈,例如强化学习策略如何与遗传算子动态适配、联邦学习如何保障跨域数据的隐私性与一致性等。此外,认知进化需结合脑科学启发式模型,构建具备自主态势理解与推理能力的智能体,推动算法从“优化工具”向“认知伙伴”演进。

5.2. 边缘计算与分布式协同优化

边缘智能架构为遗传算法突破集中式计算瓶颈提供新路径。其通过“边缘节点-云脑”分层架构,将轻量化遗传引擎部署至边缘设备,实现基因操作的本地化高效处理,显著降低通信开销与决策时延。在分布式部署案例中,该架构有效提升了系统的实时响应能力与横向扩展能力。未来研究聚焦于边缘节点的异构资源调度问题,需在有限算力下平衡计算精度与实时性,设计动态负载均衡策略以应对突发任务。此外,分布式协同需结合区块链技术构建可信进化环境,确保种群数据在去中心化架构下的安全共享与验证,为智慧城市、工业物联网等超大规模场景提供技术支撑,推动遗传算法在分布式边缘计算场景中的深度应用与性能优化。

5.3. 数字孪生驱动的全周期进化

数字孪生技术通过虚实协同机制为遗传算法提供全生命周期进化能力。其核心在于构建高精度虚拟仿真环境,通过多物理场耦合建模实现复杂场景的动态映射,并结合并行计算架构提升进化效率。以典型空战仿真平台为例,该系统可支持极端环境下的策略预验证,有效提升算法在复杂约束下的决策可靠性。未来研究需深化数字孪生与遗传算法的双向反馈机制,一方面通过虚拟进化结果反向优化物理系统参数,另一方面利用实时传感器数据动态修正孪生模型,形成“虚拟训练-物理验证-参数迭代”的闭环优化。同时,需构建跨领域通用孪生平台,支持军事协同、智能制造等多场景的迁移学习,通过统一建模语言与标准化接口降低跨领域算法训练成本,提升遗传算法在复杂系统中的泛化能力与适应性,推动其从特定场景优化工具向多域协同进化平台演进。

5.4. 多域协同优化的量子经典融合

量子计算与经典遗传算法的深度融合正催生新一代智能优化范式。该架构通过量子优势基因库实现跨维度解空间关联搜索,利用量子并行性突破传统算法在高维解空间中的“维度灾难”瓶颈,显著提升复杂约束下的搜索效率。专用量子遗传操作门可模拟基因的交叉变异过程,通过量子态叠加与纠缠特性优化编码空间遍历方式,在超大规模协同任务分配中展现出指数级加速潜力。异构计算资源适配机制通过双向转换接口打通量子与经典计算的协同通道,支持量子比特与经典编码的动态映射,有效降低高维问题的量化误差与计算复杂度。未来研究需聚焦量子噪声抑制、混合精度进化体系构建等核心难题,推动算法在边缘计算、超算中心等异构平台的跨域部署,构建“量子搜索-经典精修”的双引擎协同架构,为复杂系统优化提供兼具全局探索与局部精细优化的高效解决方案,助力多域协同决策在军事、工业等领域的实际应用。

6. 结语

本文对基于协同策略的改进遗传算法进行了系统研究,剖析了传统遗传算法在复杂系统协同优化场景下的局限性,阐述了改进算法的协同优化特性,并从混合智能算法融合、自适应参数调控机制、多目标优化重构等维度构建了改进方法论。研究表明,改进算法通过融合多智能体系统、量子计算、数字孪

生等前沿技术,有效突破传统算法局限,显著提升动态环境鲁棒性与高维解空间搜索效率。然而,相关研究仍面临动态不确定环境响应、超大规模计算效率、多目标平衡等共性挑战。未来需深化异构算法认知化融合、边缘智能分布式协同及数字孪生全周期进化等方向的探索,构建更具适应性的智能决策框架,以实现复杂系统协同优化的高效智能。

参考文献

- [1] 邓杨赟,李文光,葛佳昊,等. 多无人机协同搜索及干扰算法研究[J]. 战术导弹技术, 2023(5): 10-18, 113.
- [2] 陶杨,颜仙荣,孟田珍. 改进量子遗传算法在岛礁防空部署问题中的应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(5): 478-483.
- [3] 宋遐淦,江驹,徐海燕. 改进模拟退火遗传算法在协同空战中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(11): 1762-1768.
- [4] 喻世轶,张亮,周学广. 改进蛙跳算法求解武器目标分配问题[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(1): 89-94.
- [5] 孙雨辉,潘大志. 基于改进遗传算法的冷链物流配送路径优化[J/OL]. 西华师范大学学报(自然科学版): 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1699.N.20250414.1718.002.html>, 2025-04-22.
- [6] Goldberg, D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley.
- [7] 常见,任雁. 基于改进遗传算法的机器人路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(2): 23-27.
- [8] 肖辅盛,吴俊杰. 基于改进遗传算法的电力调度辅助决策模型[J]. 兵工自动化, 2024, 43(12): 74-79.
- [9] 陈立云,卢昱,晏杰,等. 基于改进遗传算法的弹药运输车辆调度问题研究[J]. 装备学院学报, 2014, 25(2): 106-111.
- [10] Wang, H. and Liu, J. (2019) Optimization of Warehouse Location and Distribution Route Based on Improved Genetic Algorithm. *Journal of Industrial Engineering and Management*, **12**, 893-910.
- [11] 毛雪玥,彭盛龙. 基于协同作战的无人机航路重规划算法研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(6): 27-31, 93.
- [12] 唐颂,吴建源. 基于改进遗传算法的协同航迹规划方法[J]. 电光与控制, 2024, 31(7): 8-12, 26.
- [13] 龚文浩,孙帅成,张程. 基于改进遗传算法的雷达组网优化布站方法[J]. 舰船电子对抗, 2025, 48(1): 35-38.
- [14] 任磊. 基于改进遗传算法的煤矿供电多目标无功优化研究[J]. 能源与节能, 2025(2): 80-83.
- [15] Zheng, Q., Chen, D., Zhao, F. and Tang, D. (2023) Intelligent Dispatching Model of Power System Based on Improved Genetic Algorithm. *2023 International Conference on Power, Electrical Engineering, Electronics and Control (PEEEEC)*, Athens, 25-27 September 2023, 993-997. <https://doi.org/10.1109/PEEEEC60561.2023.00194>
- [16] 徐超,王玉惠,吴庆宪,等. 基于模糊遗传算法的先进战机协同攻防决策[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(3): 14-21.
- [17] 汪琳,何成铭. 基于改进遗传算法的战备器材仓库选址优化问题研究[J]. 现代信息科技, 2022, 6(15): 93-96, 100.
- [18] 夏维,刘新学,范阳涛,等. 基于改进型多目标粒子群优化算法的武器-目标分配[J]. 兵工学报, 2016, 37(11): 2085-2093.
- [19] 柳始良,高晓腾,刘冀川,等. 基于改进鱼群算法的群体化协同侦察干扰方法[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(8): 87-95.
- [20] 金慧中. 基于改进遗传算法的防空兵力智能部署优化方法[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [21] Sun, W., Lin, S., Zhang, H., Guo, L., Zeng, W., Zhu, G., et al. (2024) A Reduced Combustion Mechanism of Ammonia/Diesel Optimized with Multi-Objective Genetic Algorithm. *Defence Technology*, **34**, 187-200. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.11.008>
- [22] 熊维清,李岩,李孝康,等. 基于改进遗传算法的绿色整车物流调度优化模型[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(1): 230-237.