

火力单元部署优化问题的现状与进展

丁舒忻, 陈晨[†], 辛斌, 陈杰

(北京理工大学 自动化学院, 北京 100081; 复杂系统智能控制与决策国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 随着信息技术在军事领域中的运用, 以网络中心战为理论的信息化战争变得更加具有优势. 火力单元部署是网络化战争中的一个重要研究内容, 涉及如何充分利用有限的资源来最大化部署火力单元的防御能力. 它是一种多约束非线性优化问题. 本文对网络化火控系统中火力单元部署优化问题及其研究方法的进展进行了综述. 首先介绍了火力单元部署优化问题的基本研究现状. 其次从部署空间、约束条件、目标函数3个方面总结了火力单元部署的数学模型, 并讨论了求解火力单元部署问题的优化方法, 包括编码、约束处理、多目标处理和求解算法的研究现状. 最后阐述了火力单元部署优化中的重点以及发展趋势.

关键词: 网络化火控系统; 火力单元; 部署; 数学模型; 优化

中图分类号: TP27, TJ768.4 **文献标识码:** A

Status and progress in deployment optimization of firepower units

DING Shu-xin, CHEN Chen[†], XIN Bin, CHEN Jie

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
State Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, Beijing 100081, China)

Abstract: With the application of information technology to the military field, the advantages of information-based military operations based on network-centric warfare theory become more obvious. The deployment of firepower units is a key issue in networked military operations, which involves how to substantially apply the limited resources to maximize the defending abilities of the firepower units. It is one of the non-linear optimization issues with multiple constraints. The deployment optimization of firepower units (DOFU) and their approaches in networked fire control system (NFCS) are reviewed in this paper. Firstly, the fundamental research status of DOFU is reviewed. Secondly, the mathematical model of the deployment of firepower unit is summarized based on three aspects including deployment space, constraints and objective function. Besides, research progress of DOFU methods, which consist of encoding, constraints-handling, multi-objective-handling and the algorithm, is discussed. Finally, the conclusions of the key issues and the development trend of DOFU are elaborated.

Key words: networked fire control system; firepower units; deployment; mathematical models; optimization

1 引言(Introduction)

计算机技术、通讯技术和网络技术等新兴技术的迅猛发展, 使得传统的战争形态、军事思想和军队建设发生了重要而深远的变化. 传统的作战指挥决策手段因其自动化程度低, 已经不能适应战场大规模动态对抗过程. 网络化火控系统^[1]将一定地域内的火控系统通过计算机网络连接起来, 使得分布在广阔区域内各种分散的探测系统、指挥系统和武器系统集成为一个统一、高效的作战体系, 实现了战场态势和武器共享, 缩短了决策时间, 提高了指挥速度.

节点部署优化问题是网络化火控系统中的一个重要研究内容, 网络化火控系统传感器和火力单元通过网络化的协作方式来提高网络化火控系统的作战能力. 图1描述了典型的网络化火控系统协同作战结构. 这种系统基于网络中心战^[2]的作战理论, 实现传感器和综合火控系统组网^[3], 从而大大提高了系统对来袭目标的防御能力.

本文讨论的是网络化火控系统火力单元部署优化研究, 为了使火力单元更加有效的完成作战任务, 合理有效的火力单元部署方案在网络化火控系统中

收稿日期: 2014-11-16; 录用日期: 2015-11-30.

[†]通信作者. E-mail: xiaofan@bit.edu.cn; Tel.: +86 10-68912464.

国家自然科学基金项目(61203181, 61304215), 北京市优秀博士学位论文指导教师科技项目(20131000704), 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(61321002), 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20131101120033)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61203181, 61304215), Beijing Outstanding Ph.D. Program Mentor (20131000704), Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (61321002) and Doctoral Program Foundation of Institutions of Higher Education of China (20131101120033).

显得尤为关键. 近些年来许多学者在火力单元部署建模、部署优化方法等方面开展研究. 本文首先介绍了火力单元部署的一些基本问题, 然后给出了火力单元部署模型建模的研究情况, 总结了目前针对部署优化方法的研究进展, 最后给出了火力单元部署优化问题的难点和将来研究工作的展望.

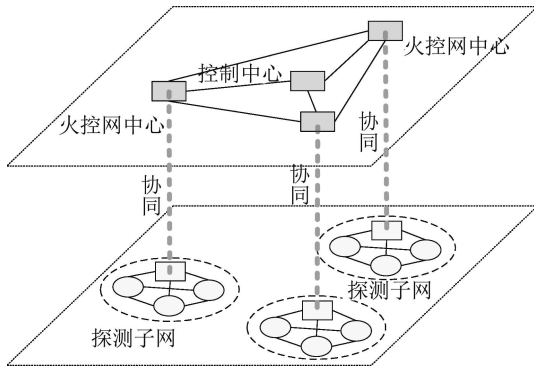


图1 网络化火控系统协同作战结构

Fig. 1 Cooperative combat structure of networked fire control system

2 火力单元部署基本问题(Fundamental issues on the deployment of firepower units)

研究火力单元部署问题, 首先需要明确火力单元部署问题的研究内容. 大部分火力单元部署研究都是考虑在防空作战背景下的, 本文主要针对野战防空问题, 通过部署好的火力资源对来袭导弹、作战飞机^[4]等目标实施拦截.

火力单元指的是火力系统及其相应的火控系统^[5], 其中火力系统指武器终端单元, 负责击毁来袭目标; 火控系统主要负责为武器终端系统提供精确的目标信息(或射击诸元信息). 在网络化火控系统中, 探测单元通过网络进行信息交互, 传递到火控网中心, 为火控网中火力单元提供地理环境信息、预警信息等. 火控网中心基于探测目标信息, 控制网络中的火力单元实施火力毁伤. 目前针对传感器组网, 特别是无线传感器网络节点部署的研究已逐步形成理论体系^[6-17], 主要研究在满足连通性和能耗要求下如何最大化传感器覆盖能力, 而火力单元的部署是基于武器终端单元的特性和作战任务需求进行部署的问题.

在复杂的战场环境下, 火力单元的部署受诸多因素影响和制约, 传统的部署方法往往采用一定的经验准则, 并不能很好的描述战场情况和防御效能, 得到的结果并不理想. 网络化火控系统的火力单元部署问题, 主要研究了基于作战环境、节点数量、安全射界等约束条件下, 如何确定节点的位置和数量, 以获得火力整体防御效果最优的问题. 相对于传统的经验部署, 提供了一个合理有效的部署方案.

对于火力单元部署问题, 部分研究^[4, 18-25]仅考虑在不同的区域、防线或者保护要地的火力单元的数量

部署, 并不考虑具体位置对部署结果的影响. 该问题实质上是针对不同区域部署火力的分配问题, 即将不同个数的火力单元分配给不同特性的防御区域. 分配问题在近几年都被学者广泛讨论. 比如武器目标分配(weapon target assignment, WTA)问题^[26-29], 但是该问题考虑的是在火力单元部署结束之后, 防御方的武器在火力交战过程中针对来袭目标的分配问题. 而火力单元部署还有一部分研究^[5, 30-40]考虑了火力单元在战场区域中具体位置对部署结果的影响, 这种研究更具有部署问题的特色, 是研究的重点内容.

从部署的火力单元种类而言, 在野战防空系统中, 常常部署多种火力单元. 文献[22]中研究了地空导弹和高炮分队混编, 实现弹炮优势互补, 充分发挥弹炮结合的整体作战效能. 文献[4]中研究了防空导弹武器系统混编问题, 基于主战兵器 and 辅助兵器, 考虑了补充空域混编、加强火力混编和自卫掩护3种混编形式. 防空只靠单一部署某种防空武器不能完成防空要求^[41], 只有结合多种防空资源协同作战, 合理利用不同武器资源能力, 才是未来的研究趋势.

从是否考虑时间因素而言, 火力单元部署问题可以分为静态部署问题和动态部署问题. 近年来对于火力单元部署问题的研究主要考虑的是防空交战之前, 属于静态部署问题, 通过离线的前期部署方案对可能的来袭目标进行防御, 没有考虑时间的影响, 不要求求解实时性. 然而在真正战场情况下, 随着防空火力交战, 部署的资源状态, 战场态势情况会变化. 原有的部署阵型防御能力下降, 不能很好的应对未来出现的不同的来袭情况. 在野战防空作战情况下, 部署的火力单元大多具有很强的机动性. 决策者可以在现有部署的基础上进行调整, 以便应对未来的防空作战. 动态火力单元部署问题即将成为火力单元部署问题中的一个研究热点.

3 火力单元部署模型研究进展(Research progress on the deployment modeling of firepower units)

为求解火力单元部署优化问题, 需要利用数学建模的方法对研究的本质内容进行提取. 在火力单元部署优化问题的建模过程中分别涉及到: 部署空间、约束条件、目标函数. 下面将分别对建模中所涉及问题的研究情况进行阐述.

3.1 部署空间(Deployment space)

部署空间作为火力单元部署的区域, 依据备选位置和阵地形式, 部署空间的分类如图2所示.

3.1.1 备选位置(Candidate locations)

为了获得部署备选位置点, 目前研究将部署区域分为离散区域和连续区域. 离散区域指的是将部署区域通过网格进行分割, 形成有限数量网格点, 网格交叉点作为可部署位置, 并可以作为评价火力覆盖效果

的采样点. 对于网格化的防区, 分割的网格大小应根据防区部署需求合理设置. 网格越密集, 可部署位置越多, 计算量会增加, 同时也提高了解的质量. 针对离散区域部署问题, 离散化的方法有很多种, 基本是以正方形、环形或扇形作为网格化方式, 如图3所示.

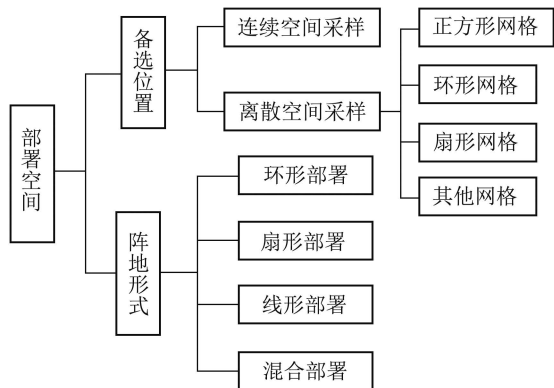
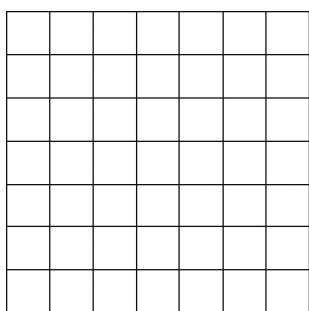
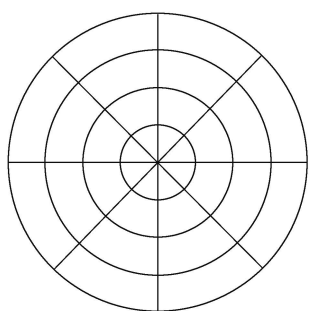


图 2 部署空间分类

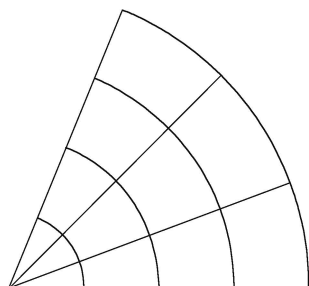
Fig. 2 Classification of the deployment space



(a) 正方形网格



(b) 环形网格



(c) 扇形网格

图 3 网格离散化方式

Fig. 3 Grid discretization method

笔者在文献[5]中针对正方形防区, 未考虑保护要地, 而是考虑对整个防区提供火力覆盖, 采用正方形网格的方式对防区进行均匀离散化处理. 文献[25, 40]中采用了环形的网格作为部署区域, 文献[30, 42]采用了扇形的网格作为部署区域, 它们都在极坐标系下进行划分, 考虑原点位置为被保护要地, 使用等极角的射线和等长的极径对区域分割. 显然, 靠近被保护要地的网格更密集, 备选的部署位置更多, 符合实际的部署要求. 这种非均匀离散化处理方法可以有效减少不必要的搜索空间, 使搜索更有效率. 此外, 在正方形、环形、扇形网格之外, 还有一些其他离散方式, 例如三角形区域和正六边形区域, 这些网格划分方式并未出现在火力单元部署中, 而是在无线传感器网络覆盖问题^[43]中.

但是, 由于搜索空间离散化, 不可避免的会造成部分部署信息缺失, 需设置合理的离散化精度. 而在连续区域中, 火力节点可以部署在区域中的任意位置, 保证了最优解一定在搜索空间中. 然而, 连续空间下的搜索是均匀的, 没有非均匀离散化后的区域搜索效率高, 对此笔者在文献[32–33]中针对连续区域搜索问题, 通过虚拟力法来产生可行解, 考虑了部署节点之间、部署节点与被保护区还有和部署边界的作用力之和, 提高了搜索效率.

3.1.2 阵地形式(Field form)

阵地形式指的是火力单元在部署空间呈现的形式. 对于部署的火力阵地形式, 一般可分为4种: 环形部署、扇形部署、线形部署^[44]和混合部署.

环形部署将火力部署围绕要地成环状, 构成单环、双环和多环部署, 保证了对各个可能的来袭方向的火力覆盖. 其优点在于加强了主要方向, 又具备全方位防空能力, 因此防空可靠性和抗击效率较高. 但在同样条件下所需阵地和兵力个数较多. 文献[25, 40]中环形部署位置通过网格来描述. 虽然文献[32–33]中考虑的是连续区域的搜索空间, 但由于部署考虑了全部方向作为来袭目标方向, 所以最终部署结果呈现为类似环形部署形式.

扇形部署是在主要作战方向上, 将火力部署成扇形. 这主要是在阵地个数不足, 地形限制不能形成环形部署而使用. 优点在于节省了火力个数, 但可靠性不高, 如果敌方改变进攻方向, 则部署容易失效.

线形部署是将火力沿着要地形成一条部署防线, 有较大的拦截正面宽度, 但是火力纵深小, 适用于敌人来袭方向多, 正面宽的情况.

这3种阵地形式都比较典型, 但是实际部署场景比较复杂, 仅通过一种阵地形式并不能很好的应对复杂的实际作战环境, 应当根据实际的地形条件选取环形部署、扇形部署和线形部署中的两种或3种形式相结

合,形成混合部署形式,一些文献又将其称为集团部署^[45].

3.1.3 多防线部署(Multi-line deployment)

在实际火力部署情形中,只靠一种类型防空武器很难对敌方来袭目标有效拦截,因此可部署多种火力资源类型,考虑多道防线下的部署问题^[19,23,46],每个导弹防线部署不同种类数量的导弹兵器.文献[40,42,47]中分别针对环形和扇形部署的阵地形式,考虑了近程、中程和远程防空阵地防线,防线根据来袭或者突防目标特性的不同,部署不同类型数量的火力资源.然而,由于不同防线上的防空武器杀伤区域范围不同.为此,文献[48]讨论了中远程防空武器杀伤区域在低空存在盲区,在扇形防空阵地研究了低空补盲部署问题.所以,当部署情况复杂,备选部署资源种类较多,区域较大时,基于离散空间采样的备选位置部署会降低一定部署精度而不能很好的保证整个防空区域火力覆盖.而通过连续空间采样下的部署由于搜索区域没有限制,可以避免这个情况,但搜索效率低.这是部署问题的难点,需符合实际部署需求选择合适的部署空间.

3.2 约束条件(Constraints)

火力单元部署问题是一种约束优化问题,约束条件限制了解的范围,保证规划结果合理有效.在实际部署问题中,可行解受部署空间限制,需要准确的地理信息并对这些信息进行分析,来确定可部署区域和非可部署区域.例如湖泊、洼地、森林或坡度过大、地势过低的位置都不适合部署节点.对非可部署区域(尤其是不规则的非可部署区域)进行数学描述往往比较困难,在可行解的生成过程中会就此类约束进行针对性的处理.在部署空间约束之外,主要考虑火力的条件、特性以及火力部署的需求.

火力资源数量是部署时首要考虑的条件.文献[19]以不同防区下可部署导弹兵器系统数量作为约束条件.由于真实作战情形中部署的火力往往造价昂贵,文献[49]在给定火力资源数量的情况下,还考虑了部署成本,并作为约束条件.文献[30]考虑了重要防御方向的火力覆盖要求约束.文献[42,50]中考虑了部署武器部署的间距大于约束条件,减少同一防区内武器间的电磁干扰情况,保证武器系统正常运行.文献[51]中提出并分析了影响防空火力单元距被掩护对象的距离和火力单元间配置距离的因素,给出了相同和不同的火力单元下掩护能力与保护目标距离的关系.文献[52]中不仅考虑了火力单元之间距离约束,还考虑了战役方向、敌最可能的攻击方向的方向性约束等.这些约束都是静态部署情况下常见的约束条件.

在动态部署情况下,作战区域会随着作战火力单元与来袭目标交战而发生变化,原有的可部署位置发

生改变.因此,部署空间也要相应做出调整,用于动态部署中重新构建部署配置,约束条件的参数也往往发生改变.文献[33]就考虑了部署火力单元数量在作战中损毁而减少的情况,相应的重部署问题也需要按更新状态后的约束来求解.

3.3 目标函数(Objective function)

火力单元是部署问题中的被研究对象,需要针对其防御能力进行研究.其难点在于如何描述火力在不同位置下的效果.所以,可以通过目标函数来评价火力单元部署效果,指导火力单元部署方案.火力单元部署中有很多不同类型的部署问题,涉及到不同的优化目标.

火力覆盖密度和火力纵深可以直观体现火力部署防御能力.其中,火力覆盖密度指的是火力覆盖重叠的强度,火力纵深指的是火力区域的防御深度.然而,针对部署问题,需要考虑多方面的因素,才能选取合适的方法评价部署的优劣.对此,可以通过考虑我方形势和敌方形势来分析.这里我方形势指的是我方部署问题中涉及到的防御目标和火力资源情况,需要分析部署保护的目標和描述火力的毁伤能力.敌方形势指的是火力部署抵御的来袭目标的情况,包括来袭目标的方向、强度.通过这两个方面的分析,才能选取合适的方法评价火力单元部署的效果.

对于部署保护的目標情况,通常考虑两种类型的部署问题,即区域防空和要地防空.

3.3.1 区域防空(Area air defense)

区域防空指的是将需要保护的目標为整个防区,火力对整个防区提供保护作用^[18].对于这种问题,需要保护的目標众多而火力有限.因此,需要选取重要的多个采样点作为保护目標来评价部署能力.文献[18]提出了“点、面”结合的方式,在整个防区中精选出保卫目標,对整个防区进行防御.针对防空区域保护目標采样点选取问题,还可采用类似于备选位置中的网格离散化方法,采用正方形^[5]、环形^[25]或扇形来对区域划分,获得均匀或者非均匀分布的采样点用于计算.采样点的数量,分布的均匀程度对防区的保护能力的计算复杂度影响很大.文献[18,20]针对区域防空问题,还考虑了将不同保卫目標要地的重要程度用于计算防空抗击效果,最大化保护要地能力为部署目標.这些对多个要地保护的问题实质上是一种覆盖问题,因此,这种问题适合用火力覆盖密度而不适合用火力纵深来评价.

针对覆盖部署问题,国外学者有过很多研究,以集合覆盖问题(set covering problem, SCP)问题或者最大覆盖选址问题(maximal covering location problem, MCLP)问题为背景^[53],建立为0-1规划问题. SCP问题考虑在一定覆盖条件下覆盖资源成本最小的问题;

MCLP问题指的是在有限资源下对给定目标节点实现最大化覆盖效果. 文献[54]基于集合覆盖模型, 分别建立了最小数量的火力射程和火力掩护角度覆盖模型. 文献[25]中考虑了不同类型的军舰任务群组扇形阵地分区部署问题, 在给定环形部署区域下的资源分配问题, 以对防区最大化覆盖为评价函数. 这是典型的MCLP问题. 这些覆盖问题考虑对整个防空区域中的保护目标来实现覆盖效果, 往往会出现多重覆盖的情况. 针对重复覆盖情况, 有如下处理方法:

- 将不同来源的覆盖信号能力累加, 即协同覆盖问题^[55](cooperative covering problem).
- 覆盖概率(毁伤概率), 多次覆盖考虑计算联合概率^[53], 即最大期望覆盖选址问题(maximum expected coverage location problem, MECLP).

文献[25]考虑的就是协同覆盖问题. 然而通过引入联合概率来计算多重覆盖的情况更符合火力强度的实际情况, 并在许多文献中被采用^[5, 18, 20, 32-33]. 火力单元与探测单元在覆盖问题中都是通过计算评价点的相应概率来对部署单元能力进行评价. 火力单元计算的是毁伤概率, 与火控系统精度、射击精度^[56]、目标易损性^[57]等信息有关; 探测单元计算的是探测概率, 与雷达探测距离方程、虚警率、雷达所需信噪比等信息有关^[58]. 针对某一评价点, 如果在多个火力单元(探测单元)的射击范围(探测范围)之内, 都可以通过如下公式求联合概率:

$$P = 1 - \prod_{t=1}^n (1 - p_t), \quad (1)$$

其中: p_t 为第 t 个火力单元毁伤概率或者探测单元探测概率, n 为评价点被火力单元或者探测单元覆盖次数, P 为联合概率, 表示针对某个评价点 n 个火力单元毁伤概率或者 n 个探测单元探测概率.

在火力覆盖问题中, 往往不考虑目标来袭的情况. 因此, 需要对整个防空区域采样, 作为多个保护目标处理. 但是, 这种覆盖的评价方法只能反映出部署的覆盖能力, 不能直观的体现出部署在真实作战中的效果. 因此, 文献[25]中还通过3个不同的作战想定, 考虑了不同方向数量的导弹来袭情况, 对部署结果进行评价. 给出了具有鲁棒性的部署方案, 即部署结果在多种作战想定中综合最优. 同时, 针对这个缺陷, 文献[39]在要地防空问题中, 考虑了多种可能的来袭目标真实航迹, 并将其离散化作为部署效果的评价点, 用于MECLP问题.

当考虑了目标来袭情况时, 文献[35]考虑了多种因素来计算火力对防区的掩护能力, 包括: 火力单元的作战效能, 火力单元相对要地方向、距离对掩护能力的贡献等, 并考虑保护要地的重要程度计算掩护价值. 文献[32, 59]通过排队论方法描述来袭目标情况. 在部署火力在多层防线的情况下, 防线中来袭目标视

为随机服务系统, 进入防区的目标流视为Poisson流. 通过计算每层防线的杀伤概率, 敌方突防概率, 从而计算防线的射击效能. 以最大化火力单元的防御能力为评价指标. 这种通过排队论的方法, 没有考虑对整个防区采样, 避免了由于区域采样评价带来的计算难度.

3.3.2 要地防空(Point air defense)

要地防空指的是存在某个要地作为防空部署保护对象, 火力单元对保护要地提供一定火力覆盖密度和火力纵深的部署阵型. 对于这种问题, 只考虑对要地覆盖并不可行, 会造成火力覆盖密度过大而难以保证火力纵深. 要地防空部署阵型通常是环形或者扇形, 可保证一定的火力纵深.

文献[48]以信息熵的表达形式, 构建了基于方位角在杀伤区域飞行距离有关的函数. 当信息熵取最大值时, 不同方向入侵目标飞行距离之差最小. 保证了防空火力在各个方向均匀的防护能力. 文献[30]在保证重要方向火力覆盖要求的情况下, 以每个可能的敌方来袭方向火力覆盖能力综合最大为目标, 并考虑了交战距离系数. 而对交战距离系数的计算需考虑采样点的选取. 因此, 通过计算单一方向目标经过火力射击范围时被攻击的次数和位置来确定采样点, 并得到整个防空网对各个方向来袭目标的毁歼概率作为最大化目标, 或者得到突防概率^[32-33]作为最小化目标. 同样, 也可以通过排队论方法^[19, 40, 42, 48], 描述来袭目标进入防线的过程而得到突防概率.

3.3.3 其他优化目标类型 (Other types of optimization objective)

除了以上几种方式外, 目标函数还有存在其他情况, 包括多个优化目标和动态部署优化目标的情况. 部署存在优化目标不唯一的情况, 同时考虑多个优化目标, 比如防空阵地覆盖能力、防空武器部署密集程度^[42]、防御成本^[23-24]等等. 多个目标处理起来比较复杂, 需要通过一定方法对多个目标进行处理.

当环境动态改变时, 原有的节点部署结果效能可能一定程度削弱, 所以还需要考虑针对动态部署的优化目标. 针对这一问题, 在传感器重部署研究方面对此有较多研究, 文献[14]针对三维空间传感器在随机部署之后的重部署研究, 考虑了网络覆盖率, 重部署移动能耗, 重连特性3种优化指标. 文献[22, 60-61]中考虑了机动部署问题, 根据防空作战需要, 将系统中不同作战单元形成作战小分队, 在广阔战场上实施“动态部署”频繁机动, 勤变阵地. 对于这种机动部署, 需要在尽可能短时间内完成机动, 同时新的部署形成的部署效能有一定要求, 所以相对位置变化越小越好.

根据前面分析的火力单元部署模型, 可以得到火

火力单元部署的流程图,如图4所示。

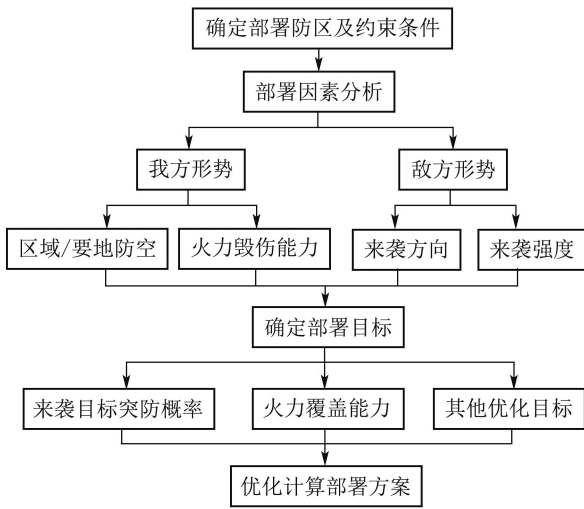


图4 火力单元部署优化流程图
Fig. 4 Flow chart of DOFU

火力单元部署问题作为典型约束优化问题,其数学模型表达如下:

$$\max [f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x)], \quad (2)$$

$$\text{s.t. } E(x) = 0 (k = 1, 2, \dots, m), \quad (3)$$

$$g(x) \geq 0, \quad (4)$$

其中: $f(x)$ 为火力单元部署涉及到的不同优化指标, $E(x)$ 为火力单元部署空间约束, $g(x)$ 为火力单元部署涉及到的其他约束条件, x 表示火力单元部署决策变量,通常以向量形式 $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$. 当部署空间通过区域划分,将整个部署区域离散化后,得到了不同的部署阵地 $p = [p_1, p_2, \dots, p_m]$,此时 x_i 为第 i 个火力单元分配到的第 j 个部署的阵地 p_j . 考虑连续区域优化时, x_i 为第 i 个火力单元部署坐标。

表1总结了一些火力单元部署优化优化目标及约束条件,它们经常出现在文献中。

表1 一些典型的火力单元部署优化目标函数及约束条件

Table 1 Some typical objectives and constraints for DOFU

优化目标	来袭目标突防概率	$\min y(\mathbf{X} t) = \sum_{k=1}^w \sum_{j=1}^m p_j^k(t), p_j^k(t) = \frac{\sum_{s=0}^{\theta-e} p_s^k(\theta_s t)}{\theta}$ 指的是第 k 个敌方目标指向第 j 个保护要地的平均突防概率(具体细节可参考文献[33]), θ 为来袭目标的角度范围, e 为测量角度间隔。
	火力覆盖能力	$\max F = \sum_{j=1}^r w_j [1 - \prod_{i=1}^m (1 - e_{ij})^{x_{ij}}]$, 式中: w_j 代表第 j 个要地的重要系数, e_{ij} 和 x_{ij} 分别代表第 i 种武器对第 j 个目标成功保卫的概率和保卫数量 ^[20] 。
	火力均匀分布	$\max f_{\text{cover}} = - \sum_{i=1}^{na} d_{\text{cross}i} \log_2 d_{\text{cross}i}$, 式中 $d_{\text{cross}i}$ 为以方位角 i 入侵目标杀伤区内飞行距离 ^[42,48] 。
约束条件	地理环境	$E(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{已经部署了固定火力单元,} \\ 0, & \text{适合部署火力单元,} \\ -1, & \text{不适合部署火力单元,} \end{cases}$ 式中 x_i 为第 i 个火力单元部署位置 ^[32] 。
	火力数量	$\sum_{i=1} X_i \leq P$, 式中: $X_i = 0, 1$ 为整数; P 为火力限制数量 ^[39] 。
	安全射击距离	$\ \mathbf{x}_i - \mathbf{s}_j\ \geq d_j, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$, \mathbf{s}_j 是保护目标位置, \mathbf{x}_i 为火力单元位置, d_j 是火力单元和保护目标最小安全距离 ^[32] 。
	电磁干扰	$d_{\min} - d_{ij} \leq 0$, 式中: d_{\min} 为防空武器部署最小间距, d_{ij} 为任意两部防空武器部署间距。

4 火力单元部署方法研究进展(Research progress on the deployment method of firepower units)

随着科学技术的发展,防空体系水平不断进步,简单的人工部署方式已经难以实现理想的防御效果. 国内外研究学者对于部署问题,根据各自学科背景进行研究,提出了很多火力单元部署方法. 针对火力单元部署问题,部署位置的求解涉及到了解的编码、约束处理、多目标优化处理和求解算法。

4.1 编码(Encoding)

为了描述火力单元部署位置,需要对其进行编

码,作为模型的变量. 而位置的表示和部署空间有关,连续空间和离散空间下的位置编码有很大不同。

在离散空间下,可以通过备选位置网格点是否可部署某种火力单元来编码. 当备选位置 n 个,火力种类 r 时,向量维数 $n \times r$. 这种编码方式又称为 0-1 编码. 一些文献通过遗传算法^[18,52]来求解离散火力单元部署问题. 还有部分文献建立了线性目标函数的整数规划问题,通过分支定界^[25,49]求解. 由于对部署空间离散化,精度影响无法避免. 在连续空间下,可以直接通过以火力单元位置坐标作为编码方式,不会降低解的精度. 这种编码方式常见于

粒子群算法^[19]、虚拟力算法^[32]中。

4.2 约束处理(Constraints handling)

约束条件对求解难度影响很大,为了提高求解效率,需要对约束条件进行相应处理。针对不同的约束条件,采用的约束处理方法也不同。如果约束较强,则将约束表示在可行解的生成中,直接产生满足约束的解。在约束弱的情况下,则可将约束条件转化评价指标处理。文献[5,62]将约束条件转化为罚函数形式在目标函数中,将约束优化问题转化为无约束优化问题。然而,在罚函数选取方法上往往研究中不能统一,不合适的罚函数会严重影响搜索效率,尤其是约束条件多的情况^[33]。对此,文献[32-33]中利用人工势场算法处理地理约束条件和火力覆盖约束条件,从而生成满足约束的解,同时考虑到火力单元安全射界、落弹毁伤等约束,设置了火力单元与被保护对象的最小安全距离。这种方法可以将多个不同约束条件一并处理,并通过不同的虚拟力参数优化,获得满意的部署解。

4.3 多目标处理(Multi-objective handling)

目前针对多目标优化下的火力单元部署问题,主要将多目标优化问题转化为单目标优化问题,或者求出Pareto解集,进行多指标评价。涉及到的方法^[63]如下:

1) 约束法。

约束法仅按照决策者偏好选择某一个优化目标,其余优化目标则转换为约束条件。这种方法仅需要完成单次优化问题求解。

2) 分层序列法。

分层序列法将多个目标排序,按照重要性顺序依次按单目标优化方式求解。文献[14]针对三维空间传感器在随机部署之后的重部署研究,考虑了网络覆盖率、重部署移动能耗、重连特性3种优化指标,采用了虚拟力的优化算法,其中重连通性作为约束条件,算法基于评价指标优先级求解,先优化最大覆盖率,再降低能耗。采用了约束法和分层序列法解多目标优化问题。这种方法解需要完成多次优化问题求解。

3) 加权系数法。

加权系数法将多个目标通过给定合适的权重系数,线性加权得到单个优化目标。文献[52]考虑了单位之间距离约束、作战方向性约束和交通道路条件数据3类目标函数,通过加权的方式将多个指标综合。

4) 其他。

在考虑转化为单目标优化问题之外,越来越多研究采用多目标算法求解,考虑了Pareto最优。这种

多目标问题的解不唯一,而是一个最优解集合,称为Pareto最优解集^[24]。该集合中解与集合外中任何解相比,至少存在一个目标函数比集合外的解好,而其他目标函数不劣于集合外的解。多个约束条件往往会出现互相冲突的情况,最常见的就是火力数量和成本或者火力密度和纵深的权衡问题。对此,文献[23-24]针对防御能效和防御成本两个优化目标,并未采用归一化的评价方法,避免了过于主观的权重赋值。文献[42]中考虑了防空阵地覆盖能力,防空武器部署密集程度和部署地点评分和部署约束条件的多目标优化问题。

在得出不同种部署方案后,一些文献通过层次分析法^[21-22,37,41,60]、TOPSIS法^[64]来对其进行评价。文献[41]针对弹炮结合目标防空,选取主攻方向角、有效杀伤重叠区等9个评估准则,基于专家经验和层次分析法给出评估方法。文献[64]针对地面防空兵混编集群战斗部署问题,考虑了对空预警探测能力、对空拦截打击能力、指挥控制能力和电子对抗能力,用熵权法确定了各项指标权重,并通过TOPSIS法完成多指标评价。文献[65]针对不确定空情下的区域防空部署方案优选的多目标决策问题,给出了一种基于风险决策的部署方案优选方法,该方法可根据决策者对待风险的不同态度选择出合适的部署方案,且具有模型简单、计算方便的优点,非常适合于需要快速进行决策的场合。

4.4 求解算法(Algorithm)

针对求解算法,常见的有精确算法,比如枚举法^[19]、分支定界法^[25]等。随着计算机技术的发展,出现了一些随机算法,如遗传算法^[18,20]、粒子群算法^[5]、模拟退火^[36]等模拟自然过程的算法,它们称为智能算法。

4.4.1 精确算法(Exact algorithm)

精确算法作为确定性算法,求解速度快、精确,得到的解具有可重复性。文献[25]中针对环形区域军舰部署问题,建立了线性的MCLP模型,采用了分支定界算法,将原问题中多种类型部署单元分解为两个单一类型部署单元的子问题来求解上下界,并设计了多种分支策略。文献[49]考虑了MECLP模型,目标函数为毁伤概率的非线性函数,通过松弛处理,将非线性的目标函数作为约束条件,而目标函数松弛为线性,通过分支定界求解。文献[39]通过设定最大覆盖次数,将MECLP模型非线性目标函数中的联合概率分解成线性求和形式,利用LINGO软件直接求解。

这些研究考虑的火力单元和备选阵地的数量较

小,但是随着问题规模变大,会出现组合爆炸,部署优化问题随其搜索空间、部署节点个数增大而难以计算。

4.4.2 随机算法(Stochastic algorithm)

随机算法(非确定性算法)在求解过程中引入了随机变量,搜索存在不确定性,因此与精确算法相比,既不能保证最优,又不能保证每次求得的解相同。智能优化算法是一种随机算法,大部分基于种群之间的作用得到了具有一定优势的解,计算量受求解空间影响相对较小。对于不同的优化条件,部署决策者可以给出合适的优化参数,得到满意合理的部署方案。

近年来智能算法广泛运用在各类优化问题中,这些算法很多基于自然界中的现象得到。算法思想简单,适合各类优化问题。对于火力单元部署中采用过的智能优化算法如下:

1) 模拟退火算法。

模拟退火算法基于物理中固体物质退火和优化问题相类比提出。考虑物体温度降低,分子最终达到最低能态,满足Boltzmann概率分布,算法得到了最优解。文献[31, 34, 36]针对区域防空问题,改进了模拟退火算法,对于Boltzmann函数,采用能量指标相对变化量取代绝对变化量,在一定样本内得到相对变化量的期望得到更加合理的Boltzmann函数参数。模拟退火算法过程中降温时间和收敛速度有关系:时间太长,算法性能较好而收敛速度太慢;降温时间太短则无法获得全局最优解。

2) 遗传算法。

遗传算法模拟生物进化论的自然选择和遗传学中生物进化过程用于优化求解,编码的方式对求解问题规模,计算效率有直接影响。文献[20]针对多要地防空部署问题,通过要地等级比例来初始化遗传算法种群,重要保护地区搜索子空间更大,部署火力的节点更多。这种预处理方式初始种群更优。文献[38]针对区域防空问题,采用并行基因组合型遗传算法求解,并行策略通过采用单向环子种群拓扑,每隔一代选取种群中较优和较差的个体交替,初始子种群根据领域知识要求结合随机选取产生,引入了翻转算子以增强基因多样性,考虑了自适应的交叉和变异概率。该方法克服了基因编码不唯一和基因重码现象,在求解速度、求解质量方面有很好的效果。

3) 粒子群算法。

粒子群优化(partical swarm optimization, PSO)算法是近些年发展起来的优化算法。算法基本思想

是根据群体中个体最优和群体最优作用引导优化方向。对于节点部署问题,粒子群优化算法相比于其他算法有很多优势: PSO算法思路简单,易于实现,调整参数较小,有鲁棒性、收敛性较好等特点。笔者在文献[5]中针对区域防空火力部署问题,通过正方形网格对区域离散化,将PSO算法运用在火力单元部署研究中。但是,PSO算法由于参数选取问题,容易出现早熟现象,需要根据各自问题对算法进行改进。笔者在文献[9]中针对连续区域传感器部署问题,将一个随机游走(正态分布)项引入PSO算法中的速度更新方程中,避免了粒子早熟现象,同时提高了算法收敛速度和全局优化能力,运用在传感器部署研究中。

4) 人工势场(虚拟力)算法。

人工势场算法又称为虚拟力算法,考虑了节点之间的互相作用力来实现部署。其作用力根据节点之间距离与有引力和斥力两种,通过选取合适的虚拟力参数,节点在虚拟力的作用下逐渐稳定收敛,得到部署结果。笔者在文献[32]针对连续区域要地防空部署问题,提出基于人工势场算法生成部署解,考虑了火力单元和环境(保护目标和地理条件)对火力单元位置产生引斥力的方式生成部署解,并利用遗传算法对不同部署条件下人工势场参数进行优化。保证了防区内节点之间距离合适,避免了出现盲区。通过优化虚拟力算法参数,很好的处理了部署火力密度和部署火力纵深之间的权衡问题。

虚拟力算法和PSO混合算法,在连续区域传感器部署中有很多研究^[6-7, 10-11]。文献[6]不仅考虑了PSO与虚拟力算法结合,还考虑了协同进化,提出了一种改进的协同进化粒子群优化算法,将 n 维解空间向量分解为独自进化的一维空间,最后评价适应度时将分解后的子空间组合为原空间。这种算法虽然很好的解决了早熟问题,但是协同算法需要很大的计算量。文献[11]基于协同虚拟力粒子群算法,引入了等级制度概念。通过拓扑结构作为改进方式,提出了分布式算法和集中式算法,得到同类和异类等级制度两种部署算法,其中同类等级制度虚拟力粒子群算法表现出很好的可扩展性,全局收敛性,并收敛较快。

5) 文化基因算法。

文化基因(Memetic)算法是一种基于全局搜索和个体搜索的混合算法,该算法实质上是一种框架,选取不同的搜索策略可以得到独特的算法。这种机制为混合算法改进研究提供了很好的思路。笔者在文献[30]中针对扇形阵地要地防空部署问题,采

用Memetic算法,考虑遗传算法作为全局搜索算法,邻域搜索作为局部搜索算法.文献[40]中针对环形阵地要地防空部署问题,考虑遗传算法作为全局搜索算法,爬山算法作为局部搜索算法.文献[62]针对舰艇编队防空问题,考虑了粒子群算法作为全局算法,模拟退火作为局部搜索算法.这种混合搜索机制,可以有针对性的对优化问题选取合适的全局搜索和局部搜索算法,对搜索效率有很好的提升.

笔者在文献[33]中考虑了多阶段连续区域要地防空火力单元动态部署问题,在最小化突防概率情况下,基于人工势场算法生成可行解,并通过Memetic算法对不同阶段势场函数参数进行调整.这里考虑的动态环境优化问题的解是一个决策序列,由不同阶段的环境条件下,基于不同的节点个数、位置、保护能力以及地理环境信息影响的解按时间阶段顺序组合而成.决策序列元素对应某个时刻的环境状态.该决策序列求解过程可分解成多个不同环境参数下的静态火力部署优化问题.

4.4.3 多目标优化算法(Multi-objective optimization algorithm)

对于多个指标的多目标优化问题,文献[23–24]针对防御成本和突防概率两个优化目标,采用非支配排序遗传算法II(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II),提出了虚拟适应度概念,优化结果在目标空间分布均匀,鲁棒性强.文献[42]针对要地防空扇形部署优化问题,考虑了多个优化目标.常用多目标优化算法中强度帕累托进化算法(strength pareto evolutionary algorithm, SPEA2)和NSGA-II算法在优化目标个数较多时解质量并不好.文中提出了分组优化(group divided dimensional reduction, GDDR)算法,考虑2到3个优化函数为一组,将多个优化函数分解成若干组,再采用SPEA2算法求解.

表2列举了文献常见的火力单元部署问题求解算法.

表 2 常见火力单元部署问题求解算法

Table 2 Typical algorithms for the deployment of firepower units

问题类型	算法	文献
区域防空火力部署问题	遗传算法	[18,20]
多道防线导弹部署问题	遗传算法	[19]
多层防御系统混合多目标部署优化问题	NSGA-II	[23–24]
海军舰艇任务群组分区部署问题	分支定界	[25]
要地防空火力部署问题	基于遗传算法的Memetic算法	[30]
防空作战布局优化问题	模拟退火算法	[31,34]
要地防空火力部署问题	虚拟力算法	[32]
网络化火控系统要地防空动态火力部署问题	基于遗传算法的Memetic算法和虚拟力算法结合	[33]
区域防空部署问题	启发式方法	[35]
防空导弹体系优化部署问题	模拟退火算法	[36]
防空武器部署优化问题	并行基因组合型遗传算法	[38]
武器雷达联合要地防空部署问题	LINGO软件	[39]
区域防空火力部署问题	粒子群算法	[5]
要地防空环形部署问题	基于遗传算法的Memetic算法	[40]
高维多目标多约束要地防空扇形优化部署问题	改进SPEA2的GDDR算法	[42]
战役后勤基地(兵站)单位优化配置问题	遗传算法	[52]
舰艇编队防空兵力配置问题	基于粒子群算法的Memetic算法	[62]
最大覆盖问题	分支定界算法	[49]
要地防空阵地网低空补盲部署问题	基于遗传算法的Memetic算法	[48]

以上研究说明随机算法在火力单元部署中广泛使用,对于求解火力部署问题有着很大的优势,许多研究通过使用改进的或者混合智能算法来对火力单元部署问题进行求解.另外,当前火力部署研究主要基于静态的部署问题,动态火力部署问题研究较少.

5 结论(Conclusions)

本文通过分析近些年火力单元部署研究的特点问题,从建模方面,逐步分析了不同部署空间、不同约束条件以及不同优化目标下的火力单元部署建模研究情况;从部署方法方面,分析了编码、约束处理、多目标优化处理和求解算法4个方面的研究现

状. 综上所述, 以下问题将成为火力单元部署中的研究重点和发展方向:

1) 多目标优化下的火力单元部署问题.

现有火力单元部署的多目标优化方法采用的处理方法包括约束法、加权法、分层序列法或求Pareto解集并通过层次分析法等多个指标评价, 而没有考虑交互式的处理方法. 交互式方法中决策者和分析者在求解中实现交互过程, 按照决策者的偏好来获得满意解, 在多目标决策问题中运用广泛^[63]. 部署方案决策者根据作战情况建立并调整决策偏好, 是火力单元多目标部署问题的趋势方向.

2) 不确定性条件下的火力单元部署问题.

在火力单元部署问题建模中, 涉及到火力单元数量、状态、杀伤概率、来袭目标的进攻状态等因素存在不确定性^[66]. 现有研究考虑的参数都是固定的, 分析的结果有一定特殊性. 同时, 动态部署问题中火力交战过程导致的战场态势变化同样带来不确定性. 考虑不确定性因素时, 不同的条件下最优的部署方案有很大的局限性, 需要设计一种带有鲁棒性的部署方法. 该方法提供的部署方案对于实际战场中各种复杂的情况都有很好的部署效果. 同时, 针对动态模型, 可以采用动态优化算法求解: 比如在改进PSO算法中, 考虑种群多样性^[67], 采用多粒子策略等, 提高对动态环境的适应性. 因此, 如何对不确定性建模以及相应的部署优化方法也有待进一步研究.

3) 算法实时性问题.

静态部署问题中的部署决策实时性不做要求, 主要是动态部署问题存在算法实时性要求. 在作战过程中, 火力对抗导致部署条件发生改变, 需要进行重部署. 耗费大量时间得到新的部署方案显得意义不大, 必须在有限时间内获得一个满意解, 存在部署方法精度和速度的权衡问题. 因此, 算法实时性是动态火力单元部署考虑的重要问题, 有待进一步研究.

4) 火力单元部署与其他相关研究问题.

现阶段研究对火力单元部署涉及到的其他研究问题较少, 还有一些与部署相关的问题值得研究, 它们包括:

- 武器采购问题和火力单元部署的关系.

武器采购问题^[68], 涉及到了科研实验、生产采购、维护保养和退役报废等武器资源的从产生到消亡的生命周期, 从而对采购成本、费用估计^[69]. 通过合理分配采购时所需资源, 来实现最佳收益的问题. 装备采购的库存量限制了火力单元部署速率,

从而影响了武器装备规模的形成和战斗力的生成. 武器采购和火力单元部署之间的关系值得研究.

- 武器目标分配和火力单元部署的关系.

火力单元部署是武器目标分配问题的基础, 部署的位置决定了火力分配给来袭目标的数量, 制约了火力分配算法的效能. 因此, 整个防空作战过程需考虑火力对抗前的部署问题以及武器目标分配问题, 这两个问题之间的联系值得深入研究.

- 网络化作战模式与火力单元部署的关系.

随着网络化作战模式的兴起, 战争形式由平台中心战向网络中心战转变^[70]. 网络中心战的网络通过探测网和火控网结合起来, 对于网络化火控系统, 探测单元为火力单元提供了部署环境信息. 针对整个网络化火控系统探测网和火控网的部署问题值得研究^[71]. 根据战场环境以及作战态势的变化, 网络化火控系统探测单元获取的信息与火力单元进行共享与交互, 为火力单元部署提供重要信息, 如地理信息系统、预警系统空情信息等. 在探测网络层, 美军还建立了全球信息栅格系统, 提高了系统的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视与侦查(C4ISR)能力^[72], 这为火力单元部署提供了有利条件, 从而增加发现来袭目标的概率, 体现了网络化火控组网的优势.

5) 全息沙盘系统在火力单元部署的应用.

随着信息技术的飞速发展, 全息技术逐渐运用在火力控制、指挥控制及火力单元部署等作战问题中. 通过智能交互式的全息沙盘系统, 战场决策者可以获得战场综合态势、火力单元部署信息, 相应作战态势可以实时显示, 并实现作战模拟以及作战推演等功能. 随着作战态势的改变, 战场决策者可以调整作战方案, 改变火力单元部署策略. 因此, 全息沙盘系统可以作为火力单元部署研究的交互平台, 辅助作战验证.

总之, 火力单元部署优化问题作为网络化火控系统的一个关键问题, 需要对本文讨论的问题以及可能的新问题进行深入研究.

参考文献(References):

- [1] 陈晨, 陈杰, 张娟. 网络化控制系统及其在火控系统中的应用研究 [C] //第26届中国控制会议论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007: 561 - 564.
(CHEN Chen, CHEN Jie, ZHANG Juan. Networked control system and its application in fire control system [C] //Proceedings of the 26th Chinese Control Conference. Beijing: Beihang University Press, 2007: 561 - 564.)
- [2] 龚秀成, 蒋晓原, 陈华. 网络中心战体系中的指挥控制 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(3): 1 - 4.
(GONG Xiucheng, JIANG Xiaoyuan, CHEN Hua. Command and

- control in the network-centric warfare [J]. *Fire Control & Command Control*, 2010, 35(3): 1–4.)
- [3] GRANT C J. CEC: Sensor netting with integrated fire control [J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 2002, 23(2,3): 149–161.
- [4] 王亚军, 李孝军, 高山. 防空导弹武器系统混合编组及计算 [J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(1): 32–34.
(WANG Yajun, LI Xiaojun, GAO Shan. Hybrid marshal calculating method of the SAM weapon system [J]. *Command Control & Simulation*, 2008, 30(1): 32–34.)
- [5] 陈晨, 陈杰, 张娟, 等. 基于PSO的区域防空优化部署方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版) [J]. 2007, 38(Suppl.1): 584–588.
(CHEN Chen, CHEN Jie, ZHANG Juan, et al. Deployment optimization for area air defense based on PSO [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2007, 38(Suppl.1): 584–588.)
- [6] WANG X, WANG S, MA J J. An improved co-evolutionary particle swarm optimization for wireless sensor networks with dynamic deployment [J]. *Sensors*, 2007, 7(3): 354–370.
- [7] MAHFOUDH S, MINET P, LAOUIITI A. Overview of deployment and redeployment algorithms for mobile wireless sensor networks [J]. *Procedia Computer Science*, 2012, 10(4): 946–951.
- [8] 刘丽萍, 王智, 孙优贤. 无线传感器网络部署及其覆盖问题研究 [J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1752–1757.
(LIU Liping, WANG Zhi, SUN Youxian, Survey on coverage in wireless sensor networks deployment [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(9): 1752–1757.)
- [9] DING S, CHEN C, CHEN J, et al. An improved particle swarm optimization deployment for wireless sensor networks [J]. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2014, 18(2): 107–112.
- [10] WANG X, WANG S, BI D. Virtual force-directed particle swarm optimization for dynamic deployment in wireless sensor networks [C] // *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Theoretical and Methodological Issues. Proceedings of Third International Conference on Intelligent Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 292–303.
- [11] WANG X, WANG S. Hierarchical deployment optimization for wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(7): 1028–1041.
- [12] KULKARNI R V, VENAYAGAMOORTHY G K. Particle swarm optimization in wireless-sensor networks: a brief survey [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2011, 41(2): 262–267.
- [13] LUO C, CHEN O. Mobile sensor node deployment and asynchronous power management for wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(5): 2377–2385.
- [14] 刘惠, 柴志杰, 杜军朝, 等. 基于组合虚拟力的传感器网络三维空间重部署算法研究 [J]. 自动化学报, 2011, 37(6): 713–723.
(LIU Hui, CHAI Zhijie, DU Junzhao, et al. Sensor redeployment algorithm based on combined virtual forces in three dimensional space [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(6): 713–723.)
- [15] 时银水, 郭栋. 基于SAGA的区域防空雷达组网优化部署 [J]. 微机计算机信息, 2007, 23(30): 131–133.
(SHI Yinshui, GUO Dong. Radar netting optimization of regional air defense based on SAGA [J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(30): 131–133.)
- [16] 王中杰, 李侠, 周启明, 等. 多约束条件的雷达组网系统部署决策问题 [J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 133–136.
(WANG Zhongjie, LI Xia, ZHOU Qiming, et al. Study on decision-making problems in multi-constrained deploying a radar network system [J]. *Fire Control and Command Control*, 2008, 33(12): 133–136.)
- [17] LIAN X Y, ZHANG J, CHEN C, et al. Three-dimensional deployment optimization of sensor network based on improved particle swarm optimization algorithm [C] // *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Beijing: IEEE, 2012: 4395–4400.
- [18] 刘铭, 李为民, 王颖龙, 等. 基于遗传算法的区域防空部署优化研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(2): 191–193.
(LIU Ming, LI Weimin, WANG Yinglong, et al. Optimization of the regional air defense disposition based on genetic algorithms [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(2): 191–193.)
- [19] 高尚. 多道防线导弹优化部署 [J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(2): 126–129.
(GAO Shang. Optimum deployment model for multi-lines of missile defence [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2002, 34(2): 121–129.)
- [20] 冯卉, 刘付显, 毛红保. 基于遗传算法的防空部署优化方法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006, 7(4): 32–35.
(FENG Hui, LIU Fuxian, MAO Hongbao. Genetic algorithms applied to air defense optimization disposition [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2006, 7(4): 32–35.)
- [21] 赵德辉, 许金余, 陈定胜, 等. 野战防空阵地总体布局方案模糊综合评价 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002, 3(6): 42–45.
(ZHAO Dehui, XU Jinyu, CHEN Dingsheng, et al. Fuzzy overall evaluation for total position of field Air defense bastion [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2002, 3(6): 42–45.)
- [22] 曹毅, 李宏, 朱雪平. 弹炮混编防空群机动部署方案优选与评估 [J]. 现代防御技术, 2004, 32(3): 4–7.
(CAO Yi, LI Hong, ZHU Xueping. Opti-select and assessments of the lines of flexible deployment of hybrid anti-aircraft group of missile and artillery [J]. *Modern Defense Technology*, 2004, 32(3): 4–7.)
- [23] 吴家明, 乔士东, 黄金才. 基于NSGA-II的防空部署优化方法 [J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(3): 57–61.
(WU Jiaming, QIAO Shidong, HUANG Jincai. Optimization of air defense disposition based on NSGA-II [J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 36(3): 57–61.)
- [24] 吴家明. 地面防空武器系统混合部署方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
(WU Jiaming. *Research on the hybrid disposition of ground air defense weapon system* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.)
- [25] KARASAKAL O, KANDILLER L, ÖZDEMIREL N E. A branch and bound algorithm for sector allocation of a naval task group [J]. *Naval Research Logistics*, 2011, 58(7): 655–669.
- [26] 刘传波, 邱志明, 吴玲, 等. 动态武器目标分配问题的研究现状与展望 [J]. 光电与控制, 2010, 17(11): 43–48.
(LIU Chuanbo, QIU Zhiming, WU Ling, et al. Review on current status and prospect of researches on dynamic weapon target assignment [J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(11): 43–48.)
- [27] 蔡怀平, 刘靖旭, 陈英武, 等. 动态武器目标分配问题的马尔可夫性 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(3): 124–127.
(CAI Huaiping, LIU Jingxu, CHEN Yingwu, et al. On the markov characteristic of dynamic weapon target assignment problem [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(3): 124–127.)
- [28] 蔡怀平, 陈英武, 邢立宁, 等. SVNTS算法的动态武器目标分配问题研究 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(31): 7–10, 22.
(CAI Huaiping, CHEN Yingwu, XING Lining, et al. Research on dynamic weapon target assignment problem based on SVNTS algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(31): 7–10, 22.)
- [29] XIN B, CHEN J, PENG Z, et al. An efficient rule-based constructive heuristic to solve dynamic weapon-target assignment problem [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2011, 41(3): 598–606.

- [30] 陈杰, 陈晨, 张娟, 等. 基于Memetic算法的要地防空优化部署方法 [J]. 自动化学报, 2010, 36(2): 242 – 248.
(CHEN Jie, CHEN Chen, ZHANG Juan, et al. Deployment optimization for point air defense based on memetic algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(2): 236 – 242.)
- [31] 韩松臣, 石德平. 基于模拟退火算法的防空作战布局优化 [J]. 航空学报, 1999, 20(5): 478 – 480.
(HAN Songchen, SHI Deping. Optimization for air-defense combat configuration via simulated annealing algorithm [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1999, 20(5): 478 – 480.)
- [32] CHEN C, CHEN J, ZHANG C M. Deployment optimization for air defense base on artificial potential field [C] // *Proceedings of the 8th Asian Control Conference*. Kaohsiung: IEEE, 2011: 812 – 816.
- [33] CHEN C, CHEN J, XIN B. Hybrid optimization of dynamic deployment for networked fire control system [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2013, 24(6): 954 – 961.
- [34] HAN S C, WANG X G. Optimization for combat configuration of air-defense weapon systems [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2000, 17(1): 48 – 52.
- [35] 邢清华, 刘付显. 区域防空部署优化系统建模 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(5): 712 – 715.
(XING Qinghua, LIU Fuxian. Modeling on area air defense optimization deployment system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(5): 712 – 715.)
- [36] 闫明亮, 刘法明, 王凯, 等. 基于模拟退火算法的防空导弹体系优化部署研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(4): 49 – 52.
(YAN Mingliang, LIU Faming, WANG Kai, et al. Research on optimal deployment of air-defense missile system based on SA [J]. *Command Control & Simulation*, 2006, 28(4): 49 – 52.)
- [37] 刘健. 地面防空作战部署方案优选与改进方法 [J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(2): 97 – 99.
(LIU Jian. Optimum selection and improvement of disposition schemes for ground air-defence operation [J]. *Fire Control and Command Control*, 2005, 30(2): 97 – 99.)
- [38] 耿振余, 毕义明. 并行基因组合型遗传算法求解防空部署优化问题研究 [J]. 现代防御技术, 2007, 35(3): 21 – 24, 41.
(GENG Zhenyu, BI Yiming. Study on optimization of air defence deployment based on parallel gene combination genetic algorithm [J]. *Modern Defence Technology*, 2007, 35(3): 21 – 24, 41.)
- [39] TANER GÜÇLÜ T, MARAS H, GENCER C, et al. A decision support system for locating weapon and radar positions in stationary point air defence [J]. *Information Systems Frontiers*, 2012, 14(2): 423 – 444.
- [40] LIU L J, LI X M, LIU R, et al. Mathematic model of key-point anti-air position ring-deployment and optimization [C] // *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology*. Changchun: IEEE, 2012: 166 – 171.
- [41] 刘文涛, 单兆春, 李红涛, 等. 弹炮结合目标防空部署方案优化评估 [J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(10): 58 – 61.
(LIU Wentao, SHAN Zhaochun, LI Hongtao, et al. Optimized evaluation of the disposition of the missile-gun combined air defence [J]. *Fire Control and Command Control*, 2006, 31(10): 58 – 61.)
- [42] 刘立佳, 李相民, 颜骥. 基于高维多目标多约束分组优化的要地防空扇形优化部署 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(12): 2513 – 2520.
(LIU Lijia, LI Xiangmin, YAN Ji. Key-point air defense fan-shaped deployment with large-dimensional multi-objective multi-constraint group divided optimization [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(12): 2513 – 2520.)
- [43] 宋燕妮. 基于正六边形网格的覆盖问题的研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
(SONG Yanni. *Analysis of coverage problem based on grid of hexagon* [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.)
- [44] 许金余, 赵德辉, 宋洪斌. 防空阵地网的理论及应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
(XU Jinyu, ZHAO Dehui, SONG Hongbin. *Theory and Application of Air Defense Bastion Nets* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.)
- [45] 刘蕊, 李相民, 刘立佳. 海军要地防空阵地优化配置分析 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32(8): 1 – 2.
(LIU Rui, LI Xiangmin, LIU Lijia. Analysis on the optimization of position disposition in naval point air defense [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2012, 32(8): 1 – 2.)
- [46] 宁伟华, 李海龙, 席吉虎. 防空武器多层混合部署优化研究 [J]. 光电与控制, 2006, 13(5): 47 – 49.
(NING Weihua, LI Hailong, XI Jihu. Optimizing multilayer mixed disposition of air-defense weapons [J]. *Electronics Optics & Control*, 2006, 13(5): 47 – 49.)
- [47] 刘立佳, 李相民, 李亮. 多防线要地防空体系目标拦截能力评估 [J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(5): 486 – 490.
(LIU Lijia, LI Xiangmin, LI Liang. Capability evaluation of multi-line essential air defense system target intercept [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2014, 29(5): 486 – 490.)
- [48] 李相民, 刘立佳, 朱绍强, 等. 要地防空阵地网低空补盲部署模型及优化 [J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 74 – 77.
(LI Xiangmin, LIU Lijia, ZHU Shaoqiang, et al. Gap filling deployment optimization for low altitude blind space of anti air networks [J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39(8): 74 – 77.)
- [49] YOUNGHO L, HANIF D. S, IKHYUN K, et al. A new reformulation approach for the generalized partial covering problem [J]. *Naval Research Logistics*, 2006, 53(2): 170 – 179.
- [50] 赵建印, 刘芳. 海上编队双舰防空队形部署优化研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31(6): 865 – 869.
(ZHAO Jianyin, LIU Fang. Optimization of two warships formation for air defense [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(6): 865 – 869.)
- [51] 王洁, 娄寿春, 王颖龙, 等. 防空导弹混合部署火力单元间配置距离的量化 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(2): 263 – 265.
(WANG Jie, LOU Shouchun, WANG Yinglong, et al. Quantitative analysis of deployment distance between fire units based on the composite disposition of the air defense missiles [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(2): 263 – 265.)
- [52] 陈杨, 赵兴录, 蔡维黎, 等. 战役后勤基地(兵站)单位优化配置遗传算法设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(3): 43 – 46.
(CHEN Yang, ZHAO Xinglu, CAI Weili, et al. Design of unit allocation's optimal genetic algorithms of campaign logistics' base (army service station) [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, 23(3): 43 – 46.)
- [53] REZE Z F, NASRIN A, NOOSHIN H, et al. Covering problems in facility location: a review [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 62(1): 368 – 407.
- [54] 韩云君, 王锦华, 廖晓璟. 基于集合覆盖模型的末端防空系统部署优化 [C] // 第32届中国控制会议. 西安: 上海系统科学出版社, 2013: 8461 – 8464.
(HAN Yunjun, WANG Jinhua, LIAO Xiaojing. Optimization of disposition for terminal air defense system based on set-covering model [C] // *Proceedings of the 32th Chinese Control Conference*. Xi'an: IEEE, 2013: 8461 – 8464.)
- [55] BERMAN O, DREZNER Z, KRASS D. Cooperative cover location problems: the planar case [J]. *IIE Transactions*, 2009, 42(3): 232 – 246.
- [56] 彭峰生, 廖振强. 弹炮结合防空武器系统毁伤概率分析与仿真 [J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(3): 62 – 64.
(PENG Fengsheng, LIAO Zhenqiang. Kill probability analysis and simulation of integrated missile and anti-aircraft gun weapon system [J]. *Fire Control and Command Control*, 2007, 32(3): 62 – 64.)

- [57] 杨勇, 吕席卷. 防空火箭弹对无人机毁伤概率评估模型 [J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(6): 87 – 90.
(YANG yong, LÜ Xijuan. Damage probability assessment model of air defense rocket for UAV [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(6): 87 – 90.)
- [58] 郭正新, 江晶. 一种不同距离的雷达监测概率计算模型 [J]. 空军雷达学院报, 2003, 17(4): 7 – 9.
(GUO Zhengxin, JIANG Jing. Computation model of radar detection probability with various distance [J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2003, 17(4): 7 – 9.)
- [59] 曹泽阳, 高虹霓, 王颖龙. 区域防空部署射击效能评估模型 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(3): 299 – 301, 378.
(CAO Zeyang, GAO Hongni, WANG Yinglong. Fire effectiveness evaluation model for area air defence disposition [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(3): 299 – 301, 378.)
- [60] 谢玮炜, 王巨海. 防空兵侦察力量机动部署方案优选与评估 [J]. 指挥控制与仿真, 2008, 29(6): 79 – 81.
(XIE Weiwei, WANG Juhai. Opti-selection and assessment of schemes of maneuver deployment of anti-aircraft reconnaissance force [J]. *Command Control & Simulation*, 2008, 29(6): 79 – 81.)
- [61] 文伟军, 黄继海, 周全, 等. 防空兵群火力单位机动部署的Hopfield神经网络模型研究 [J]. 电光与控制, 2006, 13(3): 94 – 96.
(WEN Weijun, HUANG Jihai, ZHOU Quan, et al. Hopfield neural network model for flexible deployment of air-defense group fire unit [J]. *Electronics, Optics & Control*, 2006, 13(3): 94 – 96.)
- [62] 李大鹏, 谭乐祖, 杨明军, 等. 基于Memetic算法的舰艇编队防空兵力配置 [J]. 电光与控制, 2012, 19(11): 39 – 42.
(LI Dapeng, TAN Lezu, YANG Mingjun, et al. Air defense deployment of naval fleet based on memetic algorithm [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(11): 39 – 42.)
- [63] 田志刚. 智能多目标优化理论及工程应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
(TIAN Zhigang. *Intelligent multiobjective optimization theory and its application* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.)
- [64] 杨建文, 吴连华, 潘晓军. 熵权TOPSIS法的地面防空兵混编集群战斗部署方案优选 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(12): 184 – 187.
(YANG Jianwen, WU Lianhua, PAN Xiaojun. Based on entropy weight method to the mix-cluster of anti-aircraft ground army TOPSIS combat deployment scheme optimization [J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(12): 184 – 187.)
- [65] 阳林, 刘付显, 张搏, 等. 基于风险决策的区域防空部署方案优选方法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(6): 34 – 37.
(YANG Lin, LIU Fuxian, ZHANG Bo, et al. Optimum of disposition schemes for area air-defense operation based on risk decision [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2013, 14(6): 34 – 37.)
- [66] 陈杰, 方浩, 辛斌, 等. 数字化陆用武器系统中的建模、优化与控制 [J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 943 – 962.
(CHEN Jie, FANG Hao, XIN Bin, et al. Modeling, optimization and control in ground-based digital weapon systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(7): 943 – 962.)
- [67] 王洪峰, 汪定伟, 黄敏, 等. 动态环境中的Memetic算法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(8): 1060 – 1068.
(WANG Hongfeng, WANG Dingwei, HUANG Min, et al. Memetic algorithms in dynamic environments [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(8): 1060 – 1068.)
- [68] 陈亮, 任旭. 装备采购与部署的系统动力学模型 [J]. 军械工程学院学报, 2003, 15(2): 28 – 32.
(CHEN Liang, REN Xu. System dynamics model of equipment stock and dispose [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2003, 15(2): 28 – 32.)
- [69] 刘铭, 陈杨, 陈永革. BP网络在防空导弹采购费用研究中的应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(2): 63 – 65.
(LIU Ming, CHEN Yang, CHEN Yongge. BP network's application in the study of the cost of air defence missile ordering [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(2): 63 – 65.)
- [70] 陈晨, 陈杰, 张娟, 等. 网络化防空火控系统体系结构研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(9): 1253 – 1258.
(CHEN Chen, CHEN Jie, ZHANG Juan, et al. Research on architecture of networked air defense fire control system [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9): 1253 – 1258.)
- [71] 杨晨光, 陈杰, 涂序彦. 基于方向概率和改进蜂群算法的地面防空武器组网系统优化布阵 [J]. 兵工学报, 2008, 29(2): 221 – 226.
(YANG Chenguang, CHEN Jie, TU Xuyan. Optimization of ground anti-aircraft weapon system networks based on direction probability and algorithm of improved marriage in honey bee optimization [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(2): 221 – 226.)
- [72] 周丰, 李敏勇. 网络中心战的体系结构特征 [J]. 舰船电子工程, 2004, 139(1): 25 – 27.
(ZHOU Feng, LI Minyong. Structure characteristic of network centric warfare [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2004, 139(1): 25 – 27.)

作者简介:

丁舒忻 (1991–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为进化算法,
E-mail: 20080115@bit.edu.cn;

陈晨 (1982–), 女, 副教授, 目前研究方向为多指标优化与多目标决策、分布式仿真, E-mail: xiaofan@bit.edu.cn;

辛斌 (1982–), 男, 副教授, 目前研究方向为智能优化与智能控制, E-mail: brucebin@bit.edu.cn;

陈杰 (1965–), 男, 教授, 目前研究方向为复杂系统的多指标优化与控制, E-mail: chenjie@bit.edu.cn.