密级：

国防特色学科基础研究专项支持计划

**项目建议书**

**项目名称：作战体系最优资源配置：整数规划理论与算法**

**项目类型：朗月计划**

**起止时间：2022年 — 2024年**

**经费概算：60 万元**

**项目负责人：陈伟坤**

**联系电话：18811782482**

**所在学院： 数学与统计学院**

**填报日期： 2022年 6 月 9 日**

**北京理工大学制**

**填 写 说 明**

1．编制样式与格式

（1）A4纸双面打印。

（2）封面四号宋体（不加粗），正文小四号宋体，单倍行间距（表格除外）。

（3）封面普通打印、装订，勿加封皮。

（4）文档页码应连续、底端居中，并将正文首页作为起始页码1。

（5）篇幅不够，可添加同版式附页。

2．封面

（1）“密级”按国家有关规定标明。

（2）“起止时间”按年填写，如2022年—2024年，“—”为中长划线；项目周期为2-3年

（3）“项目负责人”为符合计划相关要求的项目第一申请人，项目负责人应只有一名。

3．电子文档命名格式“项目类型\_项目名称\_密级\_版本日期”

4．学院行文报学校科学技术研究院。

8．版本修改日期：2022年6月9日。

国防特色学科基础研究专项支持计划

诚信承诺书

我学院已仔细阅读国防特色学科基础研究专项支持计划相关管理办法，理解项目执行及绩效考核相关要求，现郑重承诺：

项目材料真实、可靠，所申报的项目未列入国家、军队或学校其他科研计划，申报渠道唯一。对因申报内容失实或违反有关规定所造成的后果，我学院愿承担相关责任。

项目负责人：（签字）

所在学院：（盖章）

**目 录**

[一、立项的必要性 2](#_Toc103252144)

[二、研究目标与技术指标 6](#_Toc103252145)

[三、主要研究内容 10](#_Toc103252146)

[四、研究队伍情况 12](#_Toc103252147)

[五、预期成果及其应用前景 14](#_Toc103252148)

[六、研究周期及进度安排 15](#_Toc103252149)

[七、经费概算 16](#_Toc103252150)

[八、主要研究人员 17](#_Toc103252151)

[九、学院意见 18](#_Toc103252152)

[十、评审专家意见 18](#_Toc103252153)

[十一、专家名单 19](#_Toc103252154)

[十二、学校意见 20](#_Toc103252155)

|  |
| --- |
| **一、立项的必要性**   1. **立项的目的和意义**   现代战争强度大，空袭和防空兵器种类多，如无人机、战术歼击机、强击机、轰炸机、各种直升机、各种巡航导弹、各型战役-战术导弹、远程雷达探测系统、各型FKFD系统等。为帮助指挥员管理如此种类繁多、数量庞大的兵器并及时根据战场形势作出最优决策，需要充分利用现代科学技术如运筹优化的理论与方法、网络技术和云计算技术、智能技术等，将目前已有的各种武器系统形成一个整体，力求整个作战体系在任何形势或环境条件下，都能及时有效地杀伤各种类型的目标，完成作战目标。从后勤武器弹药储备、小尺寸齐射火箭、巡航导弹到战略轰炸机，力求根据战场形势及时重构，优化资源配置，使整个体系作战效能实时地达到全局最优。运筹优化旨在给定相关条件限制下（如杀伤网络中执行任务上限、武器攻击中目标权重约束、弹药后勤供应中服务水平限制等），分配相关资源并选取某种执行方案使目标达到全局最优（如最小化任务的费用、最小化战损总消耗、最小化弹药的总供应量等）。它是使整个作战体系效能达到实时全局最优的关键技术之一。在作战体系中，资源配置通常带有离散的属性（如是否从给定的一个点到另一个点执行某种任务、是否使用某类武器打击某个目标、执行方案是否满足某个场景等），因而，我们面临的运筹优化问题通常带有整数变量，也就是整数规划问题。事实上，上述杀伤网络问题、武器目标分配问题、弹药后勤供应问题等都可建模为整数规划问题。快速有效地求解这些整数规划问题，得到问题的全局最优解，能为指挥员在兵器系统种类和数量庞大、突击时间短、对抗强度大的复杂战场形势下及时做出最优决策提供技术支持，增强我国的国防实力。然而，在理论上，整数规划具有NP困难性，这也给算法设计和分析带来了极大的挑战。**本项目旨在充分利用作战体系中的整数规划问题的特殊结构，分析问题的数学理论性质并设计快速有效的求解算法，得到问题的全局最优解，为根据战况及时动态调整并使整个作战体系效能达到实时全局最优提供保障，为指挥员及时有效判明战场形势并做出最优决策提供技术支持。**   1. **国内外现状分析**   整数规划在经济、供应链、制造、航空以及国防等领域有广泛的应用[1-4]。根据美国在线求解优化问题的网站NEOS发布的数据，2016年，共有1,040,764个优化问题提交到该网站求解，其中整数规划问题多达696,160个，由此可见整数规划应用之广泛。整数规划的研究可以追溯到“线性规划之父”Dantzig教授等对旅行商问题的研究工作[4]。1954年，他们建立了旅行商问题的整数规划模型，通过人工计算的方式奇迹般地求解了49个城市的旅行商问题，在当时引起了巨大轰动。从那之后，整数规划在理论、算法以及应用领域得到了蓬勃发展。申请人和合作者在整数规划理论、算法和应用方面也取得了一些进展[5-9]。  在作战体系中，整数规划也有广泛应用。例如，美国空军学院院长Armacost等[10]建立了美国空军空中机动网络排程的整数规划模型，极小化系统中断带来的损失。美国工程院院士Nemhauser等[11]考虑了美军在欧洲的最佳驻军位置问题，他们建立了整数规划模型极小化年度开销，并使用整数规划求解器求解。前运筹学和管理学研究协会理事长Hoffman[12]考虑了军事通信中的多频道分配问题。他们提出了结合整数规划和约束优化的求解算法，得到了问题的近似最优解。前以色列运筹学学会理事长Kress等[13]考虑了弹药后勤供应问题。他们建立了满足后勤服务水平的整数规划模型，证明了该问题是NP-难的并设计有效算法求解。印度马德拉斯理工学院Narendran教授等[14]研究了从起点到终点的军事车队运输问题，他们设计启发式算法求解问题，得到了近似最优解。  国内的学者关于整数规划在作战体系的应用也有一些重要的研究成果。空军工程大学端木京顺教授等[15]对军事物流配送改革中配送中心选址问题进行了研究,在成本最小的基础上，构建了一个整数规划模型,并设计了基于粒子群优化的智能算法求解。国防科技大学研究生院院长沈林成教授等[16]在深入分析多无人作战飞机任务分配问题特点的基础上，提出了求解无人作战飞机多协同任务分配整数规划模型，并设计了基于进化的算法求解该模型。中国人民解放军军事运筹学学会会员王献锋教授等[17]考虑了反导防御系统中的二级分配问题（即确定应由哪一个火力单元对进攻火力实施拦截）建立了目标分配的整数规划模型，使总体作战效能最大。中国航天科工集团有限公司第三研究院田鸿堂研究员等[18]考虑了基于“OODA”环（观察、判断、决策、行动）的分布式协同作战武器编配问题，建立了整数规划模型，设计基于蒙特卡洛方法求解，给出装备在执行侦察任务和侦察与打击一体化任务时最优分配方案。  综述所述，虽然目前对作战体系中的整数规划问题有不少研究，但主要还是采用一些智能优化启发式方法（特别是国内学者的研究），如遗传算法（Genetic Algorithm）、模拟退火算法（Simulated Annealing）、蚁群算法（Ant Colony）、粒子群算法（Particle Swarm Optimization）等，这些方法虽然对一些较大规模的问题取得了较好的计算结果，但在理论上并不能保证解的质量，也不能达到系统对计算结果有效性的要求；对于如何采用精确的方法求解，并在相对比较短的时间内给出最优方案，使实时地达到整个体系作战效能全局最优这一问题尚未见到系统的研究。**本项目将立足于作战体系中整数规划问题（包括杀伤网络问题、武器目标分配问题、弹药后勤供应问题）的精确求解算法研究，根据问题的特殊结构，分析问题的数学理论性质并设计高效的精确算法（如分支定界方法、割平面方法、预处理方法等），给出全局最优解，为指挥员在兵器系统种类和数量庞大、突击时间短、对抗强度大的复杂战场形势下及时做出最优决策提供技术支持。**  [1] Pochet Y. and Wolsey L.A. Production Planning by Mixed Integer Programming. New York: Springer, 2006.  [2] Mazumdar S. and Marco P. Power efficient server consolidation for cloud data center. Future Generation Computer Systems, 2017, (70): 4-16.  [3] Yaman H. Formulations and valid inequalities for the heterogeneous vehicle routing problem. Mathematical Programming, 2006, 106 (2): 365-390.  [4] Dantzig G., Fulkerson R., and Johnson S. Solution of a large-scale traveling salesman problem. Journal of the Operations Research Society of America, 1954, 2 (4): 393-410.  [5] Chen W.-K., Chen L., Yang M.-M., and Dai Y.-H. Generalized coefficient strengthening cuts for mixed integer programming. Journal of Global Optimization, 2018, 70(1): 289-306.  [6] Chen L., Chen W.-K., Yang M.-M., and Dai Y.-H. An exact separation algorithm for unsplittable flow capacitated network design arc-set polyhedron. Journal of Global Optimization, 2021, 81: 659-689.  [7] Chen W.-K. and Dai Y.-H. On the complexity of sequentially lifting cover inequalities for the knapsack polytope. Science China Mathematics, 2021, 64 (1): 211-220.  [8] Chen W.-K., Liu Y.-F., De Domenico A, Luo Z.-Q., and Dai Y.-H. Optimal network slicing for service-oriented networks with flexible routing and guaranteed E2E Latency, IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18 (4): 4337-4352.  [9] Zhao P.-F., Li Q.-N, Chen W.-K., and Liu Y.-F. An efficient sparse quadratic programming relaxation based algorithm for large-scale MIMO detection, SIAM Journal on Optimization, 2021, 31(2): 1519-1545.  [10] Koepke C. G., Armacost A. P., Barnhart C., Kolitz S. E. An integer programming approach to support the US Air Force's air mobility network. Computers & Operations Research, 2008, 35(6): 1771-1788.  [11] Loerch A. G., Boland N., Johnson E. L., and Nemhauser G. L. Finding an optimal stationing policy for the US army in Europe After the force drawdown. Military Operations Research, 1996, 2(4): 39–51.  [12] Nicholas P. J. and Hoffman K. L. Optimal channel assignment for military MANET using integer optimization and constraint programming. In Proceedings of IEEE Military Communications (MILCOM) Conference, 2016: 1114-1120.  [13] Kress M., Penn M., and Polukarov M. The minmax multidimensional knapsack problem with application to a chance-constrained problem. Naval Research Logistics , 2007, 54(6): 656-666.  [14] Ram Kumar P. N. and Narendran T. T. Integer programming formulation for convoy movement problem. International Journal of Intelligent Defence Support Systems, 2008, 1(3): 177-188.  [15] 王青, 端木京顺, 许磊. 基于粒子群优化的军事物流配送中心选址. 计算机工程与设计, 2009 (15): 3597-3599.  [16] 叶媛媛, 闵春平, 朱华勇, 沈林成. 基于整数规划的多UCAV任务分配问题研究. 信息与控制, 2005, 34(5): 548-552.  [17] 王献锋, 刘健, 聂成. 反导防御系统作战单元指挥决策模型研究. 军事运筹与系统工程, 2002 (4): 35-38.  [18] 陈清霖, 田鸿堂, 王鹏, 冷淑香, 肖作林. 基于“OODA”环的分布式协同作战武器编配方案. 兵工学报, 2021, 42(8): 1780-1788.   1. **应用需求场景（国防领域）**   本项目旨在研究作战体系中整数规划问题的数学理论及高效求解算法，相关的应用场景包括杀伤网络问题、武器目标分配问题以及弹药后勤供应问题。 |
| **二、研究目标与技术指标**  **（一）研究目标**  本项目旨研究作战体系中的整数规划问题，主要研究杀伤网络问题、武器目标分配问题以及弹药后勤供应问题的特殊问题结构及数学理论性质，设计高效的定制化精确算法，提供问题的全局最优解。   1. **杀伤网络问题**   杀伤系统蕴含一个多层的复杂网络，包含侦察网、通信网、指控网和打击网等。在不同类型网络之间还有复杂的组织结构。需要对侦察网络、通信网络、指挥网络以及打击网络分别建立网络结构。  （1）侦察网络。在侦察网络中，我方有若干侦察节点，如预警机、雷达等。敌方有若干作战节点。这两类节点是侦察网络的节点。我方侦察节点能够锁定对方位置就构成了网络中的单向边，由敌方节点指向我方侦察节点。  （2）通信网络。在通信网络中，我方有若干具有通信能力的节点，这些节点之间具有相互发送和接受信息的功能，于是构成了通信网络。一般来说，通信网络中的边是双向的，信息能够进行交互。  （3）指控网络。在指控网络中，我方作战节点具有某些层级关系，有些指挥控制是单向，有些是双向的，这将由指挥节点的属性决定。  （4）打击网络。在打击网络中，包含我方进攻的节点和敌方作战节点。我方能够对抵挡节点实施打击任务，则构成了我方进攻节点指向敌方作战节点的一条边。    在以上四种独立网络的基础上，在不同网络之间还有节点与节点之间的联系。通常是由侦察、通信、指控、打击的之间的关系耦合。假设杀伤网是图 , 其中所有的节点集合为 , 边集为 。当需要同时执行多个打击任务时，那么对于每个任务 ，从敌方节点出发，经过侦察节点、若干通信节点、指挥节点再到打击节点，回到敌方节点需要有一条路径，能够完整执行该任务，这就是杀伤网中的杀伤链。假设这些任务的执行节点有任务数量的上限。在每条边上进行交互时，会有一定的费用。对某一个任务 ，将侦察的敌方节点和打击的敌方节点视为不同的节点，则侦察的敌方节点 有 ，打击的敌方节点 有 。我们引入0-1变量 来表示任务是否选择边，于是得到如下的网络流数学模型:  目标是最小化任务的费用，在资源的使用尽可能少的情况下，保证任务的完成。第一个约束是流量平衡约束，要求进出的流量保持平衡。第二个约束指每条边至多只能被一项任务选中。第三条约束是指每个节点被指派的任务需在其可接受范围内。   1. **武器目标分配问题**       武器目标分配问题主要关注从常规机制的预警系统中预测到的敌方飞机或导弹飞向我方城市或军事目标时，根据飞来的时间、速度、距离、高度等数据，预测评估出可能会给我方造成的损坏程度等风险，预测若采用各种拦截决策时对敌方飞机或导弹的拦截效率和拦截后的的损伤估计。根据预测的结果，为拦截任务指派模型提供数据，并利用预测的战损以及不同策略的拦截效果建立数学模型，给出最小化战损总消耗的分配方案。其数学模型如下：  其中 代表第 种策略被运用与第种任务， 表示该情况下预期的战损评估。目标函数最小化战损总消耗，第一个约束要求用在任务 的策略的权重不超过给定阈值，第二个约束要求每个策略最多用在一种任务上。   1. **弹药后勤供应问题**         现代化军事武器十分丰富，一个军队一般有多种武器，每种武器的弹药消耗来源于指定的仓库。弹药后勤供应问题旨在决策每种弹药的供应量，满足一定的后勤服务水平（由满足所有需求的概率来衡量）并使供应总量最小化。令 表示需求点，的随机需求向量，满足，其中。令 表示分配给需求点的供应量，其整数规划模型如下：    其中，0-1变量 表示该场景 是否被满足，目标函数最小化弹药的总供应量，约束条件保证未满足需求的场景概率之和不超过操作上设定的阈值（为给定的置信水平）。   1. **技术指标**   1. 针对杀伤网络问题，设计高效的全局算法最小化任务的费用，通过数值模拟对方案的时间效率进行评估，达到分钟级效果。  2. 针对武器目标分配问题，提供高效的全局优化算法，得到最小化消耗的分配方案，计算时间达到秒级效果。  3. 针对弹药后勤供应问题，提供高效的全局优化算法，使供应总量最小化下并满足一定的后勤服务水平，计算时间达到分钟级效果。 |
| **三、主要研究内容**  1. **研究内容**   本项目旨在研究作战体系中的整数规划问题（包括杀伤网络问题、武器目标分配问题、弹药后勤供应问题），分析问题的数学理论性质并设计精确求解算法，研究内容包括：  （1）**针对杀伤网络问题，设计定制化的预处理方法，减小问题规模，提升问题的求解效率。**  （a）研究问题的特性以及承载网络的特性，提出定制化的预处理方法，减小问题规模。  （b）通过大量数值实验反复论证，验证预处理方法的有效性。  （2）**针对武器目标分配问题，推导定制化的割平面算法，改善模型质量，加快问题求解速度。**  （a）针对问题的特性，推导强有效的0-1背包割平面算法。  （b）通过大量的数值实验，分析割平面算法与整数规划求解器各个模块的耦 合作用，反复进行参数调优，确定割平面算法在每个分支定界节点的执行频率；在某一分支定界节点产生的割平面应用到其他节点的标准；在每个节点添加割平面的数量等参数，使得割平面算法的计算效率最大化。  **（3）针对弹药后勤供应问题，提出定制化的分支策略，减小分支定界搜索树规模，加快问题求解速度。**  （a） 根据问题分支过程中不同子问题的关系，提出强有效的分支策略，割掉不同子问题之间的可行域相交部分，减少搜索树的规模，提升问题的求解效率。  （b）通过大量数值实验反复论证，验证新的分支策略的有效性。  （4）**将以上提出算法应用于整数规划CMIP等求解器，使用不同的参数进行调优，验证算法在数值上的有效性。**   1. **关键技术**   本项目主要用到求解整数规划的割平面技术、分支定界技术、预处理技术等。  （1）**提出定制化的预处理技术，减少问题规模。**  杀伤网络问题对应的变量为一个整数变量，只可取值0或1，且构成的约束具有网络性，因此针对这一特殊问题结构，可对模型进行具体的分析，设计这一类特殊问题的预处理方法，降低问题规模，加速问题求解。  （2）**推导强有效的割平面技术改善整数规划模型质量。**  割平面方法作为求解整数规划最有效的方法之一。Dantzig等最早使用割平面算法求解旅行商问题。此后，Gomory使用割平面算法求解一般的整数规划问题。 割平面方法通过整数可行域和松弛可行域进行对比，通过加入新的约束作为割平面缩小这两类区域之间的差距，割除当前松弛解。  （3）**提出新型分支策略，割除不同子问题的可行域的相交部分。**  分支定界策略作为求解整数规划的通用框架，被广泛用于整数规划求解器。分支定界方法的基本思想是将整数规划对应的整数约束先忽视，得到线性规划松弛问题，求得其松弛解，对其中的分数变量进行分支，割除当前松弛解，直到最优解不含分数变量为止。不同子问题可行域要求不相交，保证不会浪费额外的计算时间。   1. **创新点**   本项目旨在研究作战体系中的整数规划问题，研究内容具有前沿性、交叉性、针对性以及挑战性等特点。  （1）前沿性：本项目拟研究的作战体系中的整数规划问题是国内外最前沿的研究问题和热点问题。  （2）交叉性：本项目属于问题驱动的应用数学研究，研究优化与国防的交叉领域，在加强基础研究的同时，又促进了学科之间的交叉融合，把优化理论研究与国防中的应用相结合是本项目的重要特色之一。  （3）针对性：根据问题的特殊结构构造特殊的优化算法是本项目的第三个特色，这样能够充分的把问题的特殊结构在算法设计和分析中得以体现和利用。  （4）挑战性：本项目拟研究的问题是非常有挑战性的，定制化预处理方法的设计、割平面算法的推导以及新型分支策略的设计都是非常有挑战性的数学问题。 |