

基于改进粒子群算法的地空导弹使用保障设备优化配置*

齐建军, 郭波, 张涛, 雷洪涛

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:地空导弹使用保障过程复杂,很难有效地对使用保障设备进行优化配置。结合地空导弹使用保障需求以及其使用保障作业流程的特点,构建地空导弹使用保障设备优化配置模型。该模型属于典型的NP难问题,基于此提出以改进的粒子群优化方法对模型进行求解。新的粒子群优化方法中,将粒子线性移动改进为非线性移动方式,有效提高粒子的全局搜索能力。粒子的编码方案首次采用位移向量表达方式,并提出一种新的粒子修复策略,有效地简化了模型的求解过程。给出算例并且设计了对比实验。实验结果表明本文方法能够解决地空导弹使用保障设备的优化配置问题,并且对于其他资源配置问题求解也具有的重要的参考意义。

关键词:地空导弹;使用保障;粒子群;粒子修复策略

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)01-0178-06

Configuring and optimizing the operational support equipment of the antimissile guided missile based on the improved PSO

QI Jianjun, GUO Bo, ZHANG Tao, LEI Hongtao

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: As the process of operational support on the antimissile guided missile is complicated, it is very hard to configure and optimize the operational support equipment. The model of configuring and optimizing the operational support equipment was created in this study, based on the requirement of the mission and the character of use support. The model is a NP-hard problem, so the improved particle swarm optimization (PSO) was adopted to solve the problem. In the algorithm proposed, the way of swarm moved was changed from liner mode to non-liner mode so that the algorithm is more efficient. The shift vector representation was first used to code the solution and a new heuristic algorithm to repair the swarm was designed, which makes it simpler to solve the model. Finally, an instance was given and the comparative experiments were designed. The results show that the method proposed can solve the problem of configuring and optimizing the operational support equipment of the antimissile guided missile. Furthermore, it is valuable to solve the other problem of optimizing the resource.

Key words: antimissile guided missile; operational support; PSO (Particle Swarm Optimization); swarm repairmen policy

地空导弹属于复杂的高技术武器装备,对保障系统的依赖性强。为保证防空任务的有效完成,每个地空导弹基本作战单元都需要配备庞大的保障系统来完成保障工作。保障系统需要完成的工作有两大类:维修保障和使用保障。前者是为了修复或预防故障发生而进行的保障工作,而后者是为了保证装备正确动用以能充分发挥规定作战性能所进行的一系列技术与管理活动^[1]。与维修保障工作相比,使用保障工作与装备的作战使命、使用方式、部署以及使用环境等关系更加密切。目前,针对使用保障工作所开展的研究主要针对通用的保障活动分析方法^[1-3]、费用的预

测^[4-5]、保障设备的配置^[6-7]以及消耗性资源的数量预测^[8]等几个方面展开。实际中,装备由于作战样式以及作战任务需求存在差异,这导致使用保障设备的优化配置模型具有较大差异。现有的研究并不能有效指导工程设计人员对保障设备的配套方案进行定制。

在地空导弹工程研制末期,作战任务需求明确,地空导弹使用保障设备相关的数据基本明确,需要确定基本作战单元的使用保障设备协调配套方案。由于基本作战单元的使用保障作业数量较多,作业流程复杂并且涉及种类繁多的使用保障设备,因此制定使用保障设备协调配套方案的过

* 收稿日期:2013-05-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71201170)

作者简介:齐建军(1983—),男,河北承德人,博士研究生,E-mail:hustqjj@126.com;

郭波(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:guobo@nudt.edu.cn

程十分复杂。现有研究中,能够支持这项工作完成的成果非常有限,与之最相近的是 RACP (Resource Availability Cost Problem) 问题。RACP 问题与本文所研究问题都是研究如何在有限时间内完成数量众多的工作,并且通过对工作进行合理调度使得资源配置成本最少。RACP 问题对于本文所研究问题具有重要的参考意义,但是求解过程复杂,现有文献解决 RACP 问题大多将其转化为若干 RCPSP (Resource-Constrained Scheduling Problem) 问题^[9-14],即先确定一个资源配置方案,计算在该方案下所有工作的最短完成时间,如果满足要求则减少资源,一直到资源不能减少为止。这种解决方法的不足在于求解过程的复杂度高、计算量大。

本文基于典型的地空导弹基本作战单元作战任务想定,对基本作战单元的使用保障设备优化配置问题进行了描述,在此基础上构建了使用保障设备协调配套模型。首次采用位移向量的表达方式对作业编码,并提出一种新的粒子修复策略,直接对资源的优化配置模型进行求解并且简化问题的求解过程,实现地空导弹基本作战单元使用保障资源的优化配置,这些成果对于 RACP 问题求解也具有重要的参考意义。

1 保障设备优化配置模型

1.1 问题描述

基本作战单元是指部队建制中可以独立执行作战或者训练任务的最小作战实体,包括人员、保障对象和保障系统^[15]。地空导弹基本作战单元以营为单位,包含若干数量的主战装备、保障设备、人员。无论是主战装备还是保障设备,其最终的目的均在于完成作战任务。

地空导弹在作战中属于防卫型武器,其作战任务和敌方的空袭过程密切相关。以美伊战争中的空袭为例,其主要实行多波次的空袭,多波次的攻击可以有效地袭扰和阻滞对方的作战行动^[16]。对于地空导弹基本作战单元的保障系统而言,作战任务的需求为:在两个空袭波次有限的时间内完成所有主战装备的使用保障工作,即完成所有发射制导车的装弹工作。装弹工作是一个复杂的过程,涉及保障作业之间的时序逻辑关系,还涉及多种使用保障设备。如表 1 所示,表中设备编号(及需求量)一列中,括号外的汉字为设备编号,括号内的数字为对应编号设备的需求数量。基本作战单元的装弹工作是所有发射制导车装弹作业的汇总,其涉及资源的竞争以及复杂的时序逻辑

关系,而不是简单的流水作业问题。

表 1 装弹作业流程

Tab. 1 The process of loading the missile

作业编号	作业时间	设备编号 (及需求量)	紧前作业
1	4	—(4)、二(8)	
2	5	二(2)、三(1)、四(1)	1
3	8	五(1)、六(1)	1
4	7	二(2)、三(1)、四(1)、 五(1)、六(1)	2,3
5	8	五(1)、六(1)	4
6	3	五(1)、六(1)	5
7	4	五(1)、六(1)	6

由于每种保障设备具有较高的购置成本,因此对基本作战单元进行使用保障设备的配置就是在完成作战任务的前提下最小化使用保障设备的购置成本。

1.2 优化建模

假定等待进行使用保障工作的主战装备数量为 J_M ,每个主战装备的使用保障工作共计包含 J_N 项使用保障作业,则基本作战单元需要完成的保障作业总数为 $J = J_N \times J_M$ 。因此可以构建一个的 $J \times J$ 矩阵来描述全部保障作业之间的优先约束关联模型。

$$G_{J,J} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

g_{ih} 为矩阵 $G_{J,J}$ 中的一个元素,当 g_{ih} 的值为 1 时表示作业 h 是作业 i 的紧前作业,反之则 g_{ih} 的值为 0。

设作业 $i(i = 1, 2, \dots, J)$ 的完成需要第 k 种使用保障资源(可更新资源)数量为 r_{ik} ,任务持续时间为 d_i ,任务开始时间为 s_k ,第 k 种使用保障资源的数量为 a_k ,单价为 c_k ,敌方两个攻击波次之间的间隔时间为 T 。对基本作战单元的使用保障设备优化配置可建立如下的数学模型:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f &= \sum_{j=1}^{j=J} c_j a_j \\ \text{Subject to : } & \begin{cases} s_i + d_i \leq s_j \\ s_0 = 0 \\ s_{J+1} \leq T \\ \sum_{j \in s_i} r_{jk} \leq a_k \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中,作业 i 是作业 j 的紧前作业, s_i 表示在时间 $t(t = 0, 1, \dots, T)$ 内正在进行作业的集合。

基本作战单元使用保障资源优化配置模型虽然是线性规划模型,与 RACP 问题相同,都属于典型的 $N - P$ 难问题,如果采用精确的数学方法解决,其计算量极为庞大,就目前的计算机水平而言难以实现,元启发式算法是当前解决 RACP 问题一个最重要的方法。

2 改进的粒子群优化算法

2.1 粒子群算法的改进

粒子群优化方法最早提出于 1995 年^[17],其粒子的位置和速度的更新公式为:

$$\begin{cases} V_{i,j}(t+1) = \omega V_{i,j}(t) + c_1 r_1 (L_{i,j}(t) - V_{i,j}(t)) \\ \quad + c_2 r_2 (G_{i,j}(t) - V_{i,j}(t)) \\ X_{i,j}(t+1) = X_{i,j}(t) + V_{i,j}(t+1) \end{cases} \quad (3)$$

其中, ω 表示惯性常数, c_1 和 c_2 称为学习因子, r_1 和 r_2 是均匀分布在 $(0, 1)$ 上的相互独立的随机数^[18]。

粒子运动的模型是线性模型,那么在 N 维的向量空间中必须要有 N 个线性不相关的向量才能保证向量空间中的最优解一定能用已知的向量表示出来。如果初始解随机生成,那么必须要有足够数量的粒子数目才能在一定的概率上保证最优解一定能够通过现有的粒子对应的矢向量表示出来。这个问题等效于:在 N 维向量空间中,随机生成 $M(M > N)$ 个向量,要求 M 个向量中存在 N 个线性不相关向量的概率大于 P ,求 M 的最小值。参照应用随机模型中泊松过程的性质及应用^[19], M 的值可以用如下的计算公式得到:

$$M \geq -N \times \ln(1 - P^{1/N}) \quad (4)$$

当 N 维的向量空间较大时,如取 $N = 84$, $P = 0.9$,则 $M \geq 758.35$,如此多的粒子数会导致非常低下的运算效率,因此本文中采用如下的速度和位移更新公式:

$$\begin{cases} V_{i,j}(t+1) = \omega V_{i,j}(t) + c_1 r'_j (L_{i,j}(t) - V_{i,j}(t)) \\ \quad + c_2 r''_j \cdot (G_{i,j}(t) - V_{i,j}(t)) \\ X_{i,j}(t+1) = X_{i,j}(t) + V_{i,j}(t+1) \end{cases} \quad (5)$$

上式中, r'_j 和 $r''_j(j = 1, 2, \dots, N)$ 是均匀分布在 $(0, 1)$ 上的相互独立的随机数。这种速度和位移的更新公式最大的好处在于改变了粒子运动的线性规则,可以使得初始解数量较少时,粒子也能按照这种运动规则达到最优位置。

2.2 改进的位移向量编码及解码方案

位移向量表达方式中,粒子的位置向量为每一个作业分配一个非负整数。在解码过程中,每一个作业的所有紧前作业结束时间的最大值加上其对应的位移值就是相应的作业调度方案^[20-21]。这种编码方法的优点在于:(1)避免资源数量变化对调度方案产生影响;(2)兼顾作业之间的时序逻辑关系;(3)避免将 RACP 问题转化为 RCPSP 问题,简化求解过程。这种方法的不足在于采用整数编码应用于粒子群算法中会带来很大不便,因此本文采用改进的位移向量表达方式。

令 $S = [s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_j]$ 表示一个作业调度方案, s_i 表示作业 i 的开始时间,并且作业 i 的最早开始时间为 ES_i ,最迟开始时间为 LS_i ,作业 i 的延迟时间为 TD_i ,则:

$$\begin{aligned} TD_i &= s_i - \max\{s_h + d_h \mid h \in B_i\} \\ 0 &\leq TD_i \leq LS_i - ES_i \end{aligned} \quad (6)$$

如果令 X_i 为作业 i 对应的编码,并且参照如下公式计算:

$$X_i = \frac{TD_i}{LS_i - ES_i + 1} \quad (7)$$

则由上可知, X_i 是一个大于等于 0 小于 1 的小数。令 $X = [X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_j]$ 表示一个作业调度对应的编码,将其作为粒子的位置向量在应用粒子群优化方法时能够有效控制粒子的位置,使优化过程更加有效率。

在解码时,利用公式

$$TD_i = \lfloor X_i \times (LS_i - ES_i) \rfloor \quad (8)$$

其中, TD_i 是小于等于 $TD_i \times (LS_i - ES_i)$ 的最大整数,在此基础上可以计算出每个作业的开始时间以及结束时间,并确定每种使用保障资源的数量。第 k 种使用保障资源的计算公式为:

$$a_k = \max\left\{\sum_{i \in s_i} r_{ik}\right\} \quad (9)$$

2.3 初始解的生成

初始解的生成对于最优解的求解过程十分重要,很多研究人员都采用启发式算法来生成初始解。现有的 RCPSP 和 RACP 初始解生成方案中^[9-14, 17-18],大多依据资源的限制启发式随机生成调度方案,然后确定初始解。该方法很难适用于位移向量的编码方案。因此,本文采用如下方法生成初始解:

步骤 1:计算所有保障作业中最迟开始时间和最早开始时间差值最小的时间长度 t_{\min} ;

$$t_{\min} = \min\{LS_i - ES_i \mid (i = 1, 2, 3, \dots, J)\} \quad (10)$$

步骤2:求解整个保障作业流程中涉及作业数目最多的一条链路,作业数目为 n_{\min} ;

步骤3:生成(0,1)的随机数 Y_i 对应于作业 i ,并且按照如下公式将其转换为作业 i 对应的位移向量编码 X_i ;

$$X_i = \frac{Y_i t_{\min}}{(LS_i - ES_i) n_{\min}} \quad (11)$$

采取这种方式生成初始解可以保证所有初始解均为可行解。证明过程如下:

假定按照本文中初始解生成方法生成的一个初始解为非可行解,则必然存在一个作业 i 满足 $s_i > LS_i$,其对应的编码值为 X_i ,必然存在一条链路(链路由作业 i_1, i_2, \dots, i_h, i 按照前后时序串联)使得从作业 0 到作业 i 满足 $s_i = s_{i_h} + d_{i_h} + TD_i$ (作业 i_h 为作业 i 的紧前作业),这条链路的长度为 $n_i = h + 1$ 。则:

$$\begin{aligned} s_i &= \sum_{k=1}^h (d_{i_k} + TD_{i_k}) + TD_i \\ &\leq ES_{i_j} + \sum_{k=1}^h TD_{i_k} + TD_i \\ &= ES_i + (h + 1) \times \left[\frac{Y_i t_{\min}}{n_{\min}} \right] \end{aligned}$$

由 n_{\min}, Y_i 的定义可知:

$$s_i \leq ES_i + \left[Y_i t_{\min} \right] < ES_i + t_{\min} = LS_i$$

与假设矛盾,故可知,按照本文方法生成的初始解均为可行解。

2.4 粒子的修复策略

粒子寻找最优解的过程中,必然会有一些粒子无法满足保证作业的时间约束条件,即解码后对应的开始时间 $S_i > LS_i$,对于这种情况可按照如下的模式进行修复:

步骤1:不考虑保障任务的时间限制,按照粒子位置计算每项作业的开始时间 $[b_1, b_2, \dots, b_n]$ 以及结束时间 $[e_1, e_2, \dots, e_n]$ 。

步骤2:遍历所有作业,对于任意两个具有保障资源竞争关系的作业 Z'_i 和 Z_i ,如果 Z'_i 的开始时间大于 Z_i 的结束时间则将 Z_i 视为 Z'_i 的紧前作业。

步骤3:依照新的作业关系有向图,计算每个作业的最早开始时间并将最早开始时间作为作业的开始时间,生成新的调度方案,并采用新的编码替换原有粒子。

步骤4:检验新的调度方案能否满足时间限制,如果满足则粒子修复过程结束。如果不能满足时间限制,则进入步骤5。

步骤5:则将所有 $S_i > LS_i$ 的作业开始时间设

置为 $S_i = LS_i$,以此形成新的编码并且替换原有的粒子。

粒子的位置决定其对应的作业计划,而其对应的速度会影响到寻找最优解的效果,如果粒子的速度过快或者过慢都会对最终的优化结果产生较大的影响,因此要保证粒子有一个较为合理的移动速度,修复公式如下:

$$\begin{cases} v(j) = V_{\max}(j), & \text{if } v(j) > V_{\max}(j) \\ v(j) = V_{\min}(j), & \text{if } v(j) < V_{\min}(j) \end{cases} \quad (12)$$

3 应用示例

某型地空导弹营配置 12 辆发射制导车,最典型的作战想定为在两个波次间歇共计有 2h 的补充时间^[10],在 2h 内必须完成所有发射制导车的装弹工作。装弹流程以及保障设备需求如表 1 所示,保障设备一到六的单价分别为 4,2,1,10,30,20 万元。粒子群优化算法程序中的算法参数设置为:学习因子 $c_1 = c_2 = 2$,惯性权重 $\omega = 2$ 。基本作战单元中保障作业数量的总数为 $J = J_N \times J_M = 84$,即粒子所在的空间维度是 $N = 84$ 。

按照本文中改进的粒子群优化方法,初始设定 20 粒子,迭代 50 000 代,循环 100 次寻找最优解,最终确定各种使用保障设备分别为:设备一数量 4,设备二数量 12,设备三数量 2,设备四数量 2,设备五数量 4,设备六数量 4,总成本为 263 万元。在 100 次寻优的过程中,有 10 次寻找到这个解,该使用保障设备的配置已经接近每种使用保障设备配置的下限,是一个非常优良的解。

为验证本文算法的有效性,将传统的粒子群优化算法和本文中提出的改进粒子群算法进行综合比较,设计两组对比实验。

实验一将本文算法和传统的粒子群优化算法进行比较,实验设置三个使用原始粒子群优化算法的对照组,粒子数分别为 20、50、200,分别迭代次数为 10 000、4000、1000。这样设置可以保证每个实验组的运算总量相同,即花费计算时间相同。在每个实验组完成 400 个粒子的计算量时进行一次最优解的采样,将采样结果记录。将实验重复进行十次,对所有采样点取均值,绘制对比图像,如图 1 所示,纵轴为目标函数,横轴为采样点编号。

由图 1 可知,采用原始的粒子群优化算法时目标函数受到粒子数目的影响较大,主要表现为:如果粒子数目过少时,虽然收敛速度较快,但是会导致寻优的效果较差,很难保证寻找到最优解(20 粒子和 50 粒子);如果粒子数目较多,虽然可

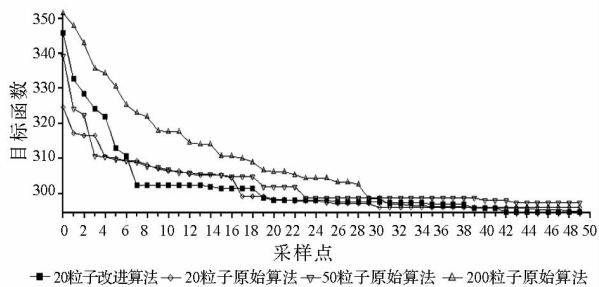


图 1 本文算法与粒子群算法的比较

Fig. 1 Comparison between the algorithm in this paper and PSO

以寻找到较好的解,但是收敛的速度很慢(200 粒子)。改进的粒子群优化算法能够较好地地将收敛速度和寻优进行折衷,既能保证收敛的速度,又能保证较好的优化结果。从最终的优化结果来看,改进算法的优化结果也略好与标准粒子群算法。

实验二设置的两个对照组均采用本文算法,设置粒子数分别为 50,200,分别迭代 4000、1000 次,和实验一采用相同的采样方式以及循环次数。实验结果如图 2 所示。

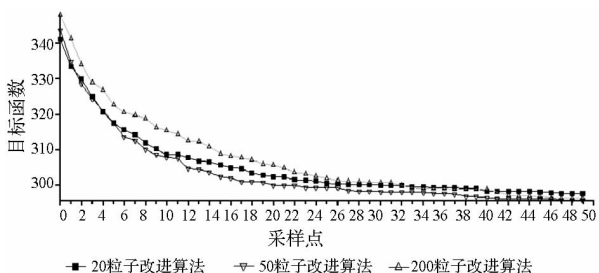


图 2 本文算法不同粒子数的比较

Fig. 2 Comparison among the algorithm in this paper with different number of swarms

实验中,优化结果的变化曲线收敛效果明显,并且收敛的速度没有受到粒子数变化的影响。以上说明,本文算法克服了标准粒子群算法中对粒子数目的限制,有能力在粒子数目较少的情况下取得良好的优化结果。

实验一和实验二的实验结果表明:(1)改进的粒子群算法在一定程度上略优于标准粒子群算法;(2)改变粒子线性运动规则,使得在粒子数目较少的情况下也能保证实验取得良好的优化结果;(3)改进算法既能保证收敛速度,又能保证良好的优化结果。

4 结论

本文构建了地空导弹基本作战单元的使用保障设备协调优化模型,并提出改进的粒子群优化算法用于对保障设备协调配套问题进行优化。文

中设计了新的编码方式以及粒子修复策略,并且克服了标准算法中优化结果受到粒子数影响较大的不足,既保证了优化结果,又兼顾收敛速度。实验表明,本文提出的方法能够较好地解决地空导弹基本作战单元使用保障设备协调优化配套问题,具有较强的工程意义。此外,本文的算法以及编码方式可以进一步拓展,用于解决 RACP 问题。该方法与传统方法相比,更加地简单快捷,具有十分重要的理论研究价值。

参考文献 (References)

- [1] 何成铭,孔繁柯,任双英. 关于装备使用保障问题的探讨[J]. 装甲兵工程学院学报,2001,15(3):11-16.
HE Chengming, KONG Fanke, REN Shuangying. Discussion of problems about weaponry operational support[J]. Journal of Armored Force Engineering Institute, 2001,15(3):11-16. (in Chinese)
- [2] 于永利,康锐. 装备综合保障基础理论及技术的若干问题[J]. 装甲兵工程学院学报,2010,24(6):1-8.
YU Yongli, KANG Rui. Problems about basic theory and technology of equipment intergrated support[J]. Journal of Armored Force Engineering Institute, 2010,24(6):1-8. (in Chinese)
- [3] 郭霖瀚,康锐,康晓明. 装备群保障规模预测方法研究[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(5):1262-1266.
GUO Linhan, KANG Rui, KANG Xiaoming. Equipments support footprint forecast method research[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009,31(5):1262-1266. (in Chinese)
- [4] 陆凯,李为吉,宋笔锋. 一种无人战斗机系统使用保障费用分析方法[J]. 火力指挥与控制,2003,28(6):30-34.
LU Kai, LI Weiji, SONG Bifeng. A method for estimating operation and support cost of uninhabited combat air vehicles[J]. Fire Control & Command Control, 2003,28(6):30-34. (in Chinese)
- [5] 郭继周,宋贵宝,彭绍雄. 装备使用保障费用灰色建模分析[J]. 系统工程与电子技术,2004,24(1):62-67.
GUO Jizhou, SONG Guibao, PENG Shaoxing. Analysis for operational and support cost of equipment using grey model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004,24(1):62-7. (in Chinese)
- [6] 文佳,康锐,刘瑞,贾治宇. 基于保障活动流程的保障设备需求量计算模型[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(9):1903-1907.
WEN Jia, KANG Rui, LIU Rui, et al. Quantitative forecast model of support equipment based on support activity flow[J]. Systems Engineering and Electronics. 2010,32(9):1903-1907. (in Chinese)
- [7] 刘瑞,康锐,张倩英,等. 装备研制阶段保障设备配置效率预测模型[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(5):1040-1044.
LIU Rui, KANG Rui, ZHANG Zhenying, et al. Prediction model for allocation efficiency of support equipment in products developing phase[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011,33(5):1040-1045. (in Chinese)
- [8] 李琛,王红卫,李良春. 一种面向弹药保障的消耗预测方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2003,31(7):33

- 37.

- LI Chen, WANG Hongwei, LI Liangchun. Armor supplying oriented consumption forecast [J]. Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2003, 31(7): 33 - 37. (in Chinese)
- [9] Mohring R F. Minimizing costs of resource requirements in project networks subject to a fixed completion time [J]. Operations Research, 1984, 32(1): 89 - 120.
- [10] Drexel A, Kimms A. Optimization guided lower and upper bounds for the resource investment problem [J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(3): 340 - 351.
- [11] Yamashita D S, Armentano V A, Laguna M. Scatter search for Project scheduling with resource availability cost [J]. Special issue on scatter search. European Journal of Operational Research, 2006, 69(2): 623 - 637.
- [12] Shadrokh S, Kianfar F. A genetic algorithm for resource investment project scheduling problem, tardiness permitted with penalty [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(1): 86 - 101.
- [13] Ranjbar M, Kianfar F, Shadrokh S. Solving the resource availability cost problem in project scheduling by path relinking and genetic algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 196(2): 879 - 888.
- [14] Rodrigues S B, Yamashita D S. An exact algorithm for minimizing resource availability cost in project scheduling [J]. European Journal of Operation Research, 2010, 206(3): 562 - 568.
- [15] 郭继周. 作战单元维修保障资源优化配置建模研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- GUO Jizhou. Study on resource optimization allocation modeling of maintenance support for combat unit [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [16] 董岳, 于永利, 张柳, 等. 多波次火力进攻战斗中作战单元使用任务规划 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1178 - 1182.
- DONG Yue, YU Yongli, ZHANG Liu, et al. Combat unit usage mission scheduling for multiple waves fire attack [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(8): 1178 - 1182. (in Chinese)
- [17] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, 1995: 1942 - 1948.
- [18] Chen R M. Particle swarm optimization with justification and designed mechanisms for resource-constrained project scheduling problem [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6): 7102 - 7111.
- [19] Ross S M. Introduction to probability models [M]. 9th Edition. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007: 239 - 241.
- [20] Lambrechts O, Demeulemeester E. A tabu search procedure for developing robust predictive project schedules [J]. International Journal of Production Economics, 2008, 111(2): 493 - 508.
- [21] Sampson S E. Local Search Techniques for the generalized resource constrained project scheduling problem [J]. Naval Research Logistics, 1993, 40(5): 665 - 675.