

# 考虑维修能力的战时备件资源配置方法研究

王正元, 曹继平, 朱昱, 朱亚红  
(西安高技术研究所, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 研究战时备件资源配置问题对赢得战争胜利具有重要意义。综合考虑武器装备的毁损情况、故障装备修复能力和作战任务的时限要求,建立了考虑维修能力的战时备件资源配置优化模型,并提出了模型的求解方法,实现了备件资源的优化配置。研究发现:影响战时备件资源配置的因素主要有武器装备自身的可靠性、遭受打击造成损毁、作战任务的时限性和对故障装备的维修能力。实验结果表明:采用该方法可以有效降低备件资源的供应量,一定条件下确保作战任务在给定的时间窗口内完成。

**关键词:** 运筹学; 模型; 备件; 资源配置; 优化

**中图分类号:** TJ762.13

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-1093(2014)05-0719-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.05.021

## An Optimization Model of Wartime Spare Parts Resource Allocation on Consideration of Maintainability

WANG Zheng-yuan, CAO Ji-ping, ZHU Yu, ZHU Ya-hong  
(Xi'an High Technology Institute, Xi'an 710025, Shaanxi, China)

**Abstract:** Research on spare parts resource allocation in wartime has an important significance to win a war. An optimization model of wartime spare parts allocation is built up, in which weapon damage, fault equipment repair capacity and mission time are taken into comprehensive consideration. The solution of the model is put forward, and the optimal allocation of spare parts resources is achieved. It is found that the influence factors of wartime spare parts resource allocation are mainly reliability of weapons and equipment, suffered damage, combat task timeliness and repair capacity of fault equipment. The experimental results show that the method proposed here can effectively reduce the supply of spare part resources, and can ensure the operational task to be completed in a given time window under the certain conditions.

**Key words:** operations research; model; spare part; resource allocation; optimization

## 0 引言

未来战场上装备维修保障工作是一项非常复杂的工作,具备保障空间范围广、保障任务重、保障时间短但时效性强等特点。一般情况下,在固定地域作战的时间较短。这些特点对装备维修保障提出了

新的要求,主要表现为维修保障需求随时间、作战地域变化呈现动态变化的特性,保障实时性要求高、保障度要求高。为了适应这种形势,装备维修资源配置需要综合考虑维修人员配备情况、维修任务情况以及作战任务进展情况。一般情况下,时间在供应链中的作用越来越突出<sup>[1]</sup>,而且备件供应通常需要

考虑多种准则<sup>[2]</sup>,文献[3]从全寿命周期费用最小出发研究了考虑故障维修的备件供应问题,文献[4]则研究了对生产系统故障的动态响应产生的影响,文献[5-7]研究了不同因素对备件采购策略的影响进行了研究,这些研究工作对战时备件配置具有一定参考价值。文献[8-9]考虑了面向任务的维修资源优化配置问题,但没有考虑维修力量、维修权限等因素。文献[10]以减少故障停机时间为目标研究了备件和修理设备的影响,建立了维修资源的配置数量与故障停机率的定量模型,这与战场实际装备维修保障工作有较大差异,且不涉及作战任务、维修保障任务。文献[11]中考虑不同维修要求、维修对象维修状态的不确定性,研究了服务资源配置问题,提出了最小化服务成本的服务资源配置模型,而战时装备维修保障工作更加注重维修时间。

作战过程中,备件配置的目的是满足故障武器装备战时抢修需求,受备件仓库、作战任务、故障武器装备的数量和维修力量等因素制约。结合战时装备维修保障中资源配制问题的特点,本文提出了一种综合考虑作战装备、作战任务阶段对装备保障需求、维修保障机构、备件仓库、作战环境交通状况、作战时间要求等因素,以满足后续作战任务对武器装备的需求、维修保障资源配置数量最小化为目标的优化模型,并提出了模型的求解方法。通过例题研究作战中装备毁损后维修保障情况,采用本文方法实现了战时备件资源的实时配置,并且满足作战任务对武器装备使用的时限性要求,配置资源达到了最小化,说明本文方法是一种行之有效的方法。

## 1 战时备件资源配置影响因素分析

战时装备维修保障备件资源配置数量受多个因素的影响,包括作战装备情况、作战任务对武器装备的功能需求情况、维修保障机构情况、备件仓库情况和作战环境交通状况等。

### 1.1 作战装备对备件资源需求的影响

战时作战装备对备件需求的影响主要体现在三个方面:作战装备自身状况越差,发生故障的概率越大,所需备件越多;一般而言,投入使用装备类型越多,需要携带的备件品种越多;投入使用的作战装备越多,发生故障的装备总量越多,所需备件越多。

### 1.2 作战任务对备件资源需求的影响

作战任务对备件资源需求的影响可从作战对象、作战时间、作战阶段等方面考虑。作战对象对我威胁程度越大、杀伤能力越强,则维修任务越大,所

需备件越多;作战时间越长,通常维修任务越重,所需备件资源越多;作战阶段不同,作战装备的功能需求不同,因而所需备件资源也会有所不同。

### 1.3 维修保障机构对备件资源需求的影响

维修机构分为基地级、中继级和基层级。维修机构级别不同,维修权限不同,承担的维修任务不同,所需备件资源的种类、数量都会有一定差异。基层级维修机构只能承担部分小修任务,中继级维修机构承担小修、中修任务,而基地级维修机构负责小修、中修和大修任务。由于维修任务存在差异性,不同级别维修机构所需的备件资源种类与数量都有一定差异。此外,不同级别维修机构在不同时间段采用换件维修还是修复性维修也会有一定差异,直接导致不同维修机构的备件需求种类、数量存在差异。

### 1.4 备件仓库对备件资源需求的影响

备件仓库的级别、部署位置、库存情况都有一定差异,这些差异对备件维修资源需求的影响主要表现为战时备件仓库与维修机构距离远近不同,不同备件在维修保障任务中发挥的作用以及对应维修时间不同。考虑到作战任务的时效性,配置备件时需要综合考虑备件种类、数量、来源仓库和维修使用时间。

### 1.5 作战环境交通状况对备件需求的影响

作战环境交通状况对备件需求种类、数量有一定影响。这种影响主要表现为交通状况影响备件运输时间,包括路况、路程长短等影响因素。考虑到作战任务时间限制,必须合理选择备件类型、备件来源,尽量降低维修保障工作对作战任务的影响。

## 2 战时装备维修保障资源配置优化模型

由于战时备件资源配制问题的复杂性,备件资源配制需要考虑多个方面的因素。假设给定作战过程中一个作战单元拟使用的武器装备*i*的数量 $N_i$ ,每台装备可能发生故障的部件 $P_{ij}$ 、部件的数量 $s_{ij}$ 以及单一部件维修方式和所需维修时间 $t_{ij}$ ,每个作战单元配备维修力量每小时可完成维修工作量 $T_a$ ,武器装备在作战过程中在阶段*k*使用情况 $u_k$ 、时限要求 $[S_k, E_k]$ 及装备部署情况 $L_i$ ,备件仓库级别 $R_h$ 以及部署位置 $W_h$ ( $h = 1, 2, \dots, H$ ),平时应用损耗 $r_{ij}$ 、战争损毁情况 $d_{ij}$ 等。

单纯考虑装备损耗情况时,依据战时应用损耗 $r_{ij}$ 和战争损毁造成的消耗量 $d_{ij}$ 可以确定备件需求量 $A_{ij}$ :

$$A_{ij} = r_{ij} + d_{ij}. \quad (1)$$

由于作战使用过程中武器装备故障后,首先由伴随保障分队对装备进行抢修,而抢修活动又有时间限制,即

$$t_e(W_k) = t_r(W_k) + t_w(W_k) + t_s(W_k) \in [S_k, E_k], \quad (2)$$

式中: $t_s(W_k)$ 、 $t_r(W_k)$ 、 $t_w(W_k)$ 与 $t_e(W_k)$ 分别表示武器装备在第 $k$ 阶段实际开始投入使用的时刻、维修占用时间、使用时间和最迟使用结束时刻; $W_k$ 表示第 $k$ 阶段维修资源来源(备件库)位置。显然,装备战争损毁情况可能发生在作战过程的任何一个阶段。根据作战装备在不同作战阶段的使用要求,为了尽快满足作战需要,伴随保障分队首先针对当前阶段作战任务所需的武器装备进行抢修,时间足够的情况下继续维修后续作战过程中需要使用的武器装备,已经过去的作战阶段作战任务所需部件故障后安排战斗结束后修理。此外,维修力量还面临不能完成全部维修保障任务的问题,这时也不需要伴随保障分队携带全部故障装备维修所需的备件。因此,按照(1)式并不能确定伴随保障分队需要配置的备件。一个伴随保障分队在第 $k$ 作战阶段消耗的备件数量 $f_{ij}^k$ (恢复第 $k$ 阶段作战任务所需功能)满足

$$\sum_{i=1}^n \sum_j f_{ij}^k t_{ij} \leq (E_k - t_w(W_k) - t_s(W_k)) T_a, \quad (3)$$

依据(3)式,可知第1阶段装备故障后,修理故障装备对应的作战任务需求所在阶段为 $1, 2, \dots, k$ 。设 $V_{lk}$ 表示第 $l$ 阶段作战任务所需部件故障后在第 $k$ 阶段维修投入的时间,则 $l > k$ 时 $V_{lk} = 0, l \leq k$ 时 $V_{lk} \geq 0$ ,并且

$$\sum_{l=1}^k V_{lk} T_a \leq \sum_{i=1}^n \sum_j f_{ij}^k t_{ij}. \quad (4)$$

若对前 $k$ 阶段(4)式取等号,则第 $k$ 阶段作战任务可执行;否则,需要整体更换某些故障装备,而整体更换件来源于特定仓库。假设作战过程中武器装备最多遭受一次打击造成毁损,遭受打击的概率为 $p_a$ 。假设阶段 $k$ 作战武器装备受到打击的概率为 $p_k$ ,与暴露时间有关。战时装备维修保障资源配置模型如下:

1) 伴随保障分队 $g$ 维修保障资源配置量 $B_{ij}^g$ 为

$$B_{ij}^g = \begin{cases} A_{ij}, & \sum_{l=1}^k V_{lk} T_a = \sum_{i=1}^n \sum_j f_{ij}^k t_{ij}, \\ 0, & \sum_{l=1}^k V_{lk} T_a < \sum_{i=1}^n \sum_j f_{ij}^k t_{ij}. \end{cases} \quad (5)$$

2) 战时维修中心给一个作战单元 $g$ 所需维修保障资源配置量 $C_{ij}^g$ 为

$$C_{ij}^g = \begin{cases} 0, & \sum_{l=1}^k V_{lk} T_a = \sum_{i=1}^n \sum_j f_{ij}^k t_{ij}; \\ A_{ij}, & \sum_{l=1}^k V_{lk} T_a < \sum_{i=1}^n \sum_j f_{ij}^k t_{ij}. \end{cases} \quad (6)$$

战时维修保障中心维修保障资源配置量为各作战单元所需维修保障资源配置量总和。(5)式表明:伴随保障分队在作战任务阶段不能完成维修任务时,将不携带故障装备维修所需相关备件,只携带在一定时间内可完成维修任务所需的备件。而(6)式表明:战时维修中心将重点修复故障装备,即伴随保障分队在规定时间内不能完成维修任务的故障装备,需要配置相应的备件。携带备件资源种类、数量将取决于可能的故障以及装备维修所需的时间。

综合考虑战时装备维修的各种因素,战时维修保障资源配置优化模型为

$$\begin{cases} \min \{ \max \{ S_A, S_B, S_C \} \}, \\ \min \sum_g (B_{ij}^g + C_{ij}^g), \\ \text{s. t. 资源尽可能满足作战任务要求,} \\ 1 \leq i \leq n, \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S_A$ 表示成套武器装备 $A1 \sim A7$ 的套数; $S_B$ 表示成套武器装备 $B1 \sim B5$ 的套数; $S_C$ 表示成套武器装备 $C1 \sim C7$ 的套数。

模型求解步骤如下:

1) 输入作战任务情况,包括作战地段、作战阶段和时限要求;输入作战单元数量、每个作战单元使用武器装备以及每台武器装备可能故障部件及其数量,输入可以整体更换的装备组合,输入伴随保障分队维修能力(每小时可完成维修任务量),输入武器装备仓库位置以及道路网拓扑结构。

2) 计算每一个作战单元作战任务各阶段的时间裕度。

3) 计算作战任务各阶段使用的武器装备故障后所需的维修时间以及伴随保障分队维修这些故障装备所需的维修时间。

4) 判断一个作战单元的各阶段作战任务的时间裕度是否满足该阶段所需全部武器装备故障后所需维修时间需求。若自某一阶段后所有阶段都满足需求,则携带自该阶段起后续各阶段作战任务使用的武器装备故障维修所需全部备件;否则,只选择携带特定时间内可完成维修任务对应的部分备件。

5) 根据各个作战单元配属的伴随保障分队可完成维修任务的具体情况,调整携带备件资源,使得

补充成套武器装备的总数量相对均衡且数量最少。

### 3 算例分析

例 1:某部实施作战行动中,共派出 5 个作战单元。每个作战单元使用装备  $A1 \sim A7, B1 \sim B5, C1 \sim C7$ ,这些装备分别安装平台  $A, B, C$  上。作战共分 4 个阶段,每个单元每个阶段作战区域以及仓库中心( $D$ )、战时维修中心位置( $O_1, O_2$ )如图 1 所示,图中⑬表示第 1 个作战单元第 3 阶段作战任务终止地点,边的权值表示相邻两个节点之间的距离(单位:km)。装备可能故障以及维修信息如表 1 所示,各阶段作战时间要求如表 2 所示。

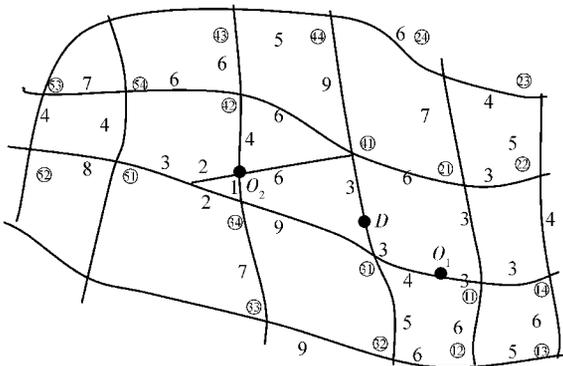


图 1 作战阶段点、仓库及维修中心位置图

Fig. 1 Position of combat phase point, warehouse and maintenance center

如果某一作战单元的武器装备组合  $A1 \sim A7$  故障、组合  $B1 \sim B5$  故障或者组合  $C1 \sim C7$  故障后,可以整体更换。更换所需时间为供货仓库到作战阵地的机动时间,机动速度为 90 km/h。伴随保障分队每小时可完成 900 min 维修任务量。

假设作战单元 1, 2, ..., 5 分别在作战阶段 4, 2, 1, 3, 2 受到打击,确定各伴随保障分队、战时维修中心所需配置备件资源数量。

按照第 2 节的方法,不妨假设作战过程中,各作战阶段都是尽可能早地开始执行作战任务,武器装备故障后等待修复。修复后不再发生故障,可后续完成后续各阶段作战任务。计算可得各作战单元完成作战任务的时间裕度及该作战单元故障装备全部由伴随保障分队维修所需时间,如表 3 所示。

从表 3 可以看出,作战单元 1 在各作战阶段的时间裕度满足全部故障装备维修任务需求,因此作战单元 1 的伴随保障分队应携带全部故障维修所需备件;而作战单元 2、作战单元 3、作战单元 4 的时间裕度不满足全部故障装备维修任务需求,配备的伴

表 1 装备可能故障部件数及单一部件故障维修时间

Tab. 1 Possible number of failure parts and repair time of single part min

装备代号	作战阶段	故障部 件代号	数量, 故障部 件时间	故障部 件代号	数量, 故障部 件时间	故障部 件代号	数量, 故障部 件时间
A1	1	P11	(6,5)	P12	(5,6)	P13	(8,3)
A2	2	P21	(9,4)	P22	(8,7)	P23	(3,5)
A3	1	P31	(5,6)	P32	(6,5)		
A4	3	P41	(4,3)	P42	(9,4)	P43	(8,2)
A5	4	P51	(6,7)	P52	(5,8)	P53	(9,4)
A6	1	P61	(9,8)	P62	(8,3)	P63	(9,3)
A7	3	P71	(10,6)	P72	(7,6)		
B1	2	P81	(5,5)	P82	(6,2)	P83	(2,5)
B2	3	P91	(8,4)	P92	(8,3)	P93	(9,4)
B3	1	Pa1	(3,3)	Pa2	(3,5)	Pa3	(5,6)
B4	4	Pb1	(8,5)	Pb2	(9,4)		
B5	3	Pc1	(9,7)	Pc2	(5,6)	Pc3	(3,3)
C1	3	Pd1	(7,6)	Pd2	(4,8)	Pd3	(6,5)
C2	2	Pe1	(6,8)	Pe2	(9,7)	Pe3	(8,8)
C3	4	Pf1	(3,9)	Pf2	(6,5)	Pf3	(7,4)
C4	1	Pg1	(7,8)	Pg2	(7,3)		
C5	1	Ph1	(9,5)	Ph2	(8,6)		
C6	3	Pi1	(2,6)	Pi2	(3,8)	Pi3	(8,4)
C7	2	Pj1	(8,5)	Pj2	(6,6)	Pj3	(6,3)

表 2 各单元作战时限要求信息

Tab. 2 Operation time limits to each unit

时间	阶段	单元 1	单元 2	单元 3	单元 4	单元 5
任务所需 时间/min	1	24	30	20	20	24
	2	30	25	30	35	30
	3	50	40	50	35	50
	4	40	30	35	50	35
最早开始 时刻	1	8:00	7:50	7:30	8:20	8:50
	2	9:00	8:50	8:35	9:10	9:30
	3	9:50	10:05	9:30	10:10	10:05
	4	11:15	11:10	10:55	11:00	11:10
最迟结束 时刻	1	9:00	9:00	8:30	9:30	9:40
	2	10:00	10:10	9:30	10:20	10:10
	3	11:20	11:10	11:00	11:05	11:20
	4	12:25	12:05	11:55	12:20	12:00

随保障分队分别携带作战阶段 4、作战阶段 3 和 4、作战阶段 4 故障装备维修所需的备件,作战单元 5

表 3 各阶段作战任务时间裕度与故障装备对应维修工作量

Tab.3 Mission time margin and fault equipment maintenance workload in different stages min

时间	作战阶段			
	1	2	3	4
维修时间	32.7	28.2	35.5	18.6
作战单元 1 时间裕度	36	30	40	30
作战单元 2 时间裕度	40	55	25	25
作战单元 3 时间裕度	40	25	40	25
作战单元 4 时间裕度	50	35	20	30
作战单元 5 时间裕度	26	10	25	15

配备的伴随保障分队不需要携带备件。当作战单元 3 在作战第 1 或第 2 阶段遭受打击,作战单元 2、作战单元 4 在作战第 1、第 2 或第 3 阶段遭受打击,作战单元 5 在任何一个作战阶段遭受打击,都需要从特定仓库发送成套武器装备。由此看出,5 个作战单元遭受打击后,需要配送成套武器装备 4 套(每套含 A1 ~ A7、B1 ~ B5、C1 ~ C7)。表 4 给出了从仓库运输成套武器装备到作战区域的最短距离及所需时间。

表 4 装备仓库到作战单元的距离(单位:km)、时间(单位:min)

Tab.4 The distance and time from warehouse to combat units

作战单元	作战阶段			
	1	2	3	4
2	(O <sub>1</sub> ,6,4)	(O <sub>1</sub> ,9,6)	(O <sub>1</sub> ,14,9.3)	(O <sub>1</sub> ,15.5,10.3)
3	(O <sub>1</sub> ,4,2.7)	(O <sub>1</sub> ,9,6)	(* ,13,8.7)	(O <sub>2</sub> ,8,8.7)
4	(O <sub>2</sub> ,6,4)	(O <sub>2</sub> ,8,5.3)	(O <sub>2</sub> ,10,6.7)	(O <sub>2</sub> ,15,10)
5	(O <sub>2</sub> ,5,3.3)	(O <sub>2</sub> ,13,8.7)	(O <sub>2</sub> ,16.5,11)	(O <sub>2</sub> ,16,10.7)

注:\*表示 O<sub>1</sub> 或者 O<sub>2</sub>,由作战单元到 O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub> 距离的大小决定。

比较表 3、表 4 可知,不同作战阶段内各个作战单元的武器装备受到打击毁损后,都能够在规定时限要求内完成故障武器装备的成套补充。这种可行性由供应仓库与作战单元的距离、武器装备投送速度决定。

为了充分发挥伴随保障分队的作用,让他们在武器装备受到打击后修复部分装备,减少配送成套武器装备数量。经计算,各作战单元的伴随保障分队携带备件资源如表 5 所示,伴随保障分队没有完成的维修任务(含成套后撤的故障装备)由维修中心负责维修。

表 5 伴随保障分队携带备件资源情况

Tab.5 Spare parts resources carried with support teams

作战单元	维修 A1 ~ A7	维修 B1 ~ B5	维修 C1 ~ C7
	所需备件资源	所需备件资源	所需备件资源
1	全部携带	全部携带	全部携带
2	全部携带	全部携带	C3 所需
3	A4、A5、A7 所需	全部携带	全部携带
4	A5 所需	B4 所需	全部携带
5	全部携带	不携带	不携带

这时,如果作战单元 1 ~ 5 在作战过程中受到打击,除了伴随保障分队携带的备件资源,不需要另外为作战单元 1 提供成套武器装备;需要为作战单元 5 提供成套装备 B1 ~ B5、C1 ~ C7;若在作战第 1、第 2 或第 3 阶段受到打击,需要为作战单元 2 提供成套装备 C1 ~ C7,为作战单元 4 提供成套装备 A1 ~ A7、B1 ~ B5;若在作战第 1 或第 2 阶段受到打击,为作战单元 3 提供成套装备 A1 ~ A7。显然,5 个作战单元遭受打击后,最多只需要配送成套武器装备 2 套(每套含 A1 ~ A7、B1 ~ B5、C1 ~ C7)。相对而言,有效地减少了需要准备的备用武器装备套数,而且也充分发挥了伴随保障分队的作用。遭受打击后的待修复故障装备撤收运送到维修中心,所需维修备件资源总量为修复这些装备的备件综合。由此可以看出:成套补充的武器装备总量越少,需要配置给维修中心和伴随保障分队的备件资源总量就越少。

从上例的求解过程可以看出:

1) 战时维修保障资源配置优化模型求解过程简单。计算各作战单元在各作战阶段的时间裕度、各阶段武器装备故障后维修任务需要的维修时间,比较二者的大小,就可以确定维修任务由作战单元所属的伴随保障分队还是战时维修中心负责维修,而作战任务所需武器装备采取直接配送成套装备方式供应(若供应成套装备也不满足作战任务要求,则需优化中心仓库位置<sup>[12]</sup>)。

2) 为了减少配置备件总量,需要尽可能地减少战时维修中心和伴随保障分队配备备件资源重叠的部分。例 1 求解过程中,把每个作战单元在一个作战阶段的全部维修任务按照所属装备分开,伴随保障分队在有限的时间内不能完成一个作战任务阶段的全部维修任务时只安排部分维修任务(可按照作战任务时限要求完成),其余部分维修工作由战时维修中心负责维修。这样,全部故障装备维修所需的备件要么配置给伴随保障分队,要么配置给战时

维修中心,没有重叠配置备件,总和为常量,达到了配备备件资源总和最小的目的。

3) 确定维修任务是否由伴随保障分队负责后,作战任务某一阶段的维修任务全部由伴随保障分队负责时不需要配送相应的武器装备,从而确定了这种情况下配送成套武器装备的种类、数量。

4) 战时维修保障资源配置优化模型为多目标优化模型,可以转化为成套武器装备配送量最小化的单目标模型。维修保障分队和战时维修中心所需维修备件资源总和达到最小(常量)的情况下,战时维修保障资源配置优化模型就转化为成套武器装备配送量优化模型。

5) 对于成套武器装备配送量最小化的单目标模型,调节故障装备维修任务分配方案,即通过比较各阶段故障装备 A、B、C 上部件维修时间与作战任务时间裕度的大小,把不同伴随保障分队不能全部修复的故障装备相互错开,就可以实现成套武器装备配送量最小化。

从上述分析可知,战时维修保障资源配置优化模型求解的计算量较少,故障部件总数为  $n$  时,计算量为  $O(n)$ 。

## 4 结论

战时备件资源配置问题较为复杂,本文重点从维修能力的角度提出了一种备件资源配置的优化方法。这种资源配置方法突出了战时维修任务的特点,尽可能不影响作战任务的正常进行,而且完成作战任务过程中有效降低了资源消耗。研究结果表明:影响战时备件资源配置的因素主要有武器装备自身的可靠性、遭受打击造成损毁、作战任务的时限要求和对故障装备的维修能力;采用本文方法有效地降低了备件资源的供应量,一定条件下可确保作战任务在给定的时间窗口内完成。由于作战过程是一个持续进行的过程,装备故障、毁损的发生也具有一定的随机性,将结合毁损过程进一步深入研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Jina J. Getting value time in the supply chain [R/OL]. Britain: the University of Warwick, 1996[2013-04-06]. <http://www.littonralis.info/iom/assets/19960501a.pdf>.
- [2] Bacchetti A, Plebanil F, Saccanil N, et al. Spare parts classification and inventory management: a case study. Salford Business School working paper series [R]. Britain: University of Salford, 2013: 1-36.
- [3] Smit M. Life cycle cost optimization [D]. Netherland: University of Twente, 2009.
- [4] Kamath V, Motlagh F G, Hebbar S, et al. System dynamics based perspective to reliability centered maintenance [C]//Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society. New York: International System Dynamics Society, 2012: 1-17.
- [5] Bickel R W. Improving Air Force purchasing and supply management of spare parts [D]. US: RAND Graduate School, 2003.
- [6] Lindqvist M, Lundin J. Spare part logistics and optimization for wind turbines: methods for cost-effective supply and storage [EB/OL]. (2010-04-21) [2013-04-21]. <http://uu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:311304>.
- [7] Cheng Y H, Yang A S, Tsao H L. Study on rolling stock maintenance strategy and spares parts management [EB/OL]. (2006-11-20) [2013-05-05]. <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/696.pdf>.
- [8] 张涛, 郭波, 谭跃进. 面向任务的维修资源配置决策支持系统研究 [J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 716-720.  
ZHANG Tao, GUO Bo, TAN Yue-jin. Research on a mission oriented maintenance resources deployment decision support system [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 716-720. (in Chinese)
- [9] 李晓宇, 王新阁, 方子立. 面向任务的装备维修保障资源优化配置 [J]. 国防科技, 2011(3): 48-52.  
LI Xiao-yu, WANG Xin-ge, FANG Zi-li. A survey on optimization of mission oriented equipment maintenance support resource allocation [J]. National Defence Science & Technology, 2011(3): 48-52. (in Chinese)
- [10] 贾治宇, 王立超, 王乃超, 等. 基于停机时间的复杂系统维修资源配置模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2211-2216.  
JIA Zhi-yu, WANG Li-chao, WANG Nai-chao, et al. Maintenance resources configuration model for complex system based on downtime [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16(10): 2211-2216. (in Chinese)
- [11] 马书刚, 杨建华, 王小平. 不确定环境下服务资源配制优化 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(16): 41-49.  
MA Shu-gang, YANG Jian-hua, WANG Xiao-ping. Optimal service resource allocation under uncertainty [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(16): 41-49. (in Chinese)
- [12] 王正元, 曹继平, 朱亚红, 等. 可移动备件仓库设置优化方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2352-2355.  
WANG Zheng-yuan, CAO Ji-ping, ZHU Ya-hong, et al. Optimization model on removable spare parts warehouse deployment [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(11): 2352-2355. (in Chinese)