

# 以成功概率最大为目标的装备维修策略研究

肖雨, 韩小孩, 孙晋聪, 张剑波

(中国人民解放军66325部队, 北京 102205)

**摘要:**提出了一种以任务成功概率最大为目标的装备维修决策方法。在此基础上建立了任务前维修时间、任务总体费用以及备件数量3个约束条件下以任务成功概率最大为目标的装备维修决策模型,并举例对该方法的可行性进行了验证。

**关键词:**任务成功性;维修性;维修决策

**本文引用格式:**肖雨,韩小孩,孙晋聪,等.以成功概率最大为目标的装备维修策略研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(11):133-138.

**Citation format:**XIAO Yu, HAN Xiaohai, SUN Jinchong, et al. Research on Strategy of Equipment Maintenance with Objective of Maximum Dependability of Success[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(11): 133-138.

**中图分类号:**E92;TJ81

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-2304(2019)11-0133-06

## Research on Strategy of Equipment Maintenance with Objective of Maximum Dependability of Success

XIAO Yu, HAN Xiaohai, SUN Jinchong, ZHANG Jianbo

(The No. 66325<sup>th</sup>Troop of PLA, Beijing 102205, China)

**Abstract:** A method of equipment maintenance decision with the objective of maximum dependability of mission success was proposed. On this basis, the decision-making model for the equipment maintenance with the objective of maximum dependability of mission success was established under the three constraints of pre-mission maintenance time, total task cost and the quantity of spare parts, and an example was given to verify the feasibility of the proposed method.

**Key words:** dependability; maintainability; maintenance decision

传统的装备维修策略,无论是事后维修、定时维修还是基于状态的维修,都是从保障装备战备完好性的角度出发,安排维修工作,以减少故障和故障的损失。然而,装备任务开始时质量完好,并不一定能保证任务期间不发生故障,不一定能保证任务完成。因此,有必要从保障任务完成的角度出发,研究装备基于任务的维修决策。目前,基于任务的维修决策方面的研究已取得一些成果。文献[1]研究了不完全可修系统的任务成功性评估方法;如文献[2]以总体维修费用为约束研究了串并联加工系统的选择性维修方法;文献[3]中以维修保障资源为约束,以任务可靠度最大为目标,研究了考虑拼修活动在内的多种维修活动的维修任务选择方

法;文献[4]中研究了维修保障资源、任务前维修时间双重约束下,以任务可靠度最大为目标的维修任务选择方法;文献[5]中研究了不完全维修条件下的冷贮备可修系统任务前维修方案优选方法;文献[6]中研究了不完全维修方式下的多状态系统维修任务选择方法;文献[7]中以任务可靠性为最大为目标研究了部件寿命服从Weibull分布的装备维修策略优选方法;文献[8]中研究了维修保障资源约束下,以任务可靠度最大为目标的舰船装备选择性维修策略;文献[9]中在给定时间约束下,研究了以任务可靠度最大为目标的修复性维修工作选择方法。尽管这些研究都是以任务为依托进行维修决策,但是只能从任务可靠度的角度出发制定装

**收稿日期:**2019-08-21; **修回日期:**2019-09-03

**基金项目:**军内科研项目

**作者简介:**肖雨(1976—),男,硕士,工程师,主要从事装备维修保障和理论研究。

备任务前维修方案,并未考虑任务中维修对任务成功概率的影响。尽管文献[10]中考虑了任务中维修队任务成功概率的影响,但是仅仅考虑单个部件,未从装备系统角度进行决策分析。

任务可靠度可认为是装备在特定任务剖面内完成规定功能的能力(任务可靠性)的一种度量。它可认为是装备在任务期间故障规律的一种体现。任务成功概率主要指装备在任务开始时处于可用状态的情况下,在规定的任务剖面中的任一(随机)时刻,能够使用且能完成规定功能的概率。

对于任务中不可维修的装备,其任务成功概率等于任务可靠度。现有研究多基于该情形展开。对于任务中允许维修的装备,其任务成功概率可认为是任务可靠性与任务维修性的综合体现,任务中的维修工作是影响任务成功概率的重要因素。此外,由于任务中的维修工作需要消耗一定的备件且需花费相应的费用,这必将影响装备任务前预防性维修时的可用费用及备件数量,从而影响任务前预防性维修的有效实施。现有研究并未对这些问题进行探讨。

本研究主要针对任务中可修装备,综合考虑任务前以及任务中的维修工作与任务成功概率之间的关系,研究以任务成功概率最大为目标的装备维修决策方法。在任务前维修时间、任务总体费用以及备件数量三方面约束下,以任务成功概率最大为目标,制定最佳的任务前预防性维修方案。

## 1 装备任务成功概率计算方法

在计算任务成功概率时要充分考虑装备的任务可靠性和任务维修性。任务可靠性通常用任务可靠度表示,任务维修性则用任务维修度表示。计算时,可将装备分为任务期间不可修部分和可修部分分别进行研究。对于不可修部分只需分析其任务可靠度;对于可修部分则需综合分析任务可靠度与任务维修度。

装备任务成功概率仅与任务功能单元相关,与非任务功能单元无关。因此,在计算任务成功概率时只需分析任务功能单元的影响即可。同理,以任务成功概率最大为目标进行维修决策时,仅考虑任务功能单元的维修工作。

在任务过程中,若某几个单元同时发生故障时方可影响任务(任务成功或失败),则认为这几个单元之间在功能上存在“并联关系”。将存在“并联关系”的多个单元视作一个整体,为保障任务的时效性,在任务过程中该整体发生故障(极端情况为各单元均故障)后仅对维修时间消耗最小的单元进行维修。由于篇幅有限,本研究不对“并联关系”进行过多讨论。将存在“并联关系”的单元视作整体后,装备可认为是一个纯串联系统。

假设某任务中装备共有  $n$  个可影响任务的功能单元(存在并联关系的多个单元视作一个整体,为一个功能单元)记作  $a_1, a_2, \dots, a_n$ 。其中前  $r$  个功能单元为任务中不可修单元,其余为可修单元。任务中允许的最大维修时间为  $T$ 。令各功能单元的任务可靠度为  $R_1, R_2, \dots, R_n$ ,可修单元维修时间

概率密度函数为  $m_{r+1}(t), m_{r+2}(t), \dots, m_n(t)$ 。则不可修部分任务成功概率  $P_N$  为

$$P_N = \prod_{i=1}^r R_i \quad (1)$$

可修部分任务可靠度为

$$R_M = \prod_{i=r+1}^n R_i \quad (2)$$

将可修部分整体记作  $E$ ,可知  $E$  发生故障的概率等于  $a_{r+1}, a_{r+2}, \dots, a_n$  中至少有一个发生故障的概率。令  $n-r$  个可修单元的每一种故障组合(各组合事件之间互斥)为  $E$  的一个故障事件,则  $E$  共有  $2^{n-r}-1$  个可能的故障事件,其中第  $i$  个故障事件记作  $E_i$ 。例如,假设故障事件  $E_i$  为:第  $r+j$  个与第  $r+k$  个功能单元发生故障,其余可修单元不发生故障。则  $E_i$  发生的概率为

$$P(E_i) = (1 - R_{r+j})(1 - R_{r+k}) \prod_{s \neq j, k} R_{r+s}, s = 1, 2, \dots, n-r$$

故障事件  $E_i$  发生后在  $T$  内被排除的概率为:  $M(E_i) = P(T_{r+j} + T_{r+k} \leq T)$ 。其中  $T_{r+j}, T_{r+k}$  分别代表第  $r+j$  个与第  $r+k$  个功能单元发生故障后维修所需时间。

根据卷积计算公式可知

$$M(E_i) = \int_0^{T+\infty} \int_{-\infty}^T m_{r+j}(t) m_{r+k}(u-t) dt du \quad (3)$$

可计算可修部分  $E$  的任务维修度为

$$M(E) = \frac{\sum_{i=1}^{2^{n-r}-1} P(E_i) M(E_i)}{\sum_{i=1}^{2^{n-r}-1} P(E_i)} \quad (4)$$

进而计算可修部分任务成功概率  $P_Y$  为

$$P_Y = R_M + (1 - R_M)M(E) \quad (5)$$

最终得装备任务成功概率  $P_S$  为

$$P_S = P_N \times P_Y \quad (6)$$

## 2 以成功概率最大为目标的装备维修决策模型

根据任务确定决策目标是基于任务的维修决策的基本前提。通常情况下,如果装备需完成重要任务或者任务失败后果较为严重,应以任务成功概率最大为目标进行决策。而对于一般任务,在任务成功概率满足要求的前提下,可适当考虑以任务总体费用最小为目标进行决策。两种决策目标下的维修决策的本质是一致的。都是根据决策约束条件,制定满足决策目标的最佳维修方案。因此本文仅研究以任务成功概率最大为目标的维修决策方法。

考虑到装备任务的时效性要求,参与任务的各功能单元在任务中发生故障后,通常选择维修时间最短的维修方式进行维修,可根据各功能单元采用不同维修方式时的维修时间长短进行决策,此处不加赘述。

在给定任务前预防性维修时间、任务总体费用、备件数量三方面约束条件下,以任务成功概率最大为目标的维修决策基本过程如图1所示。

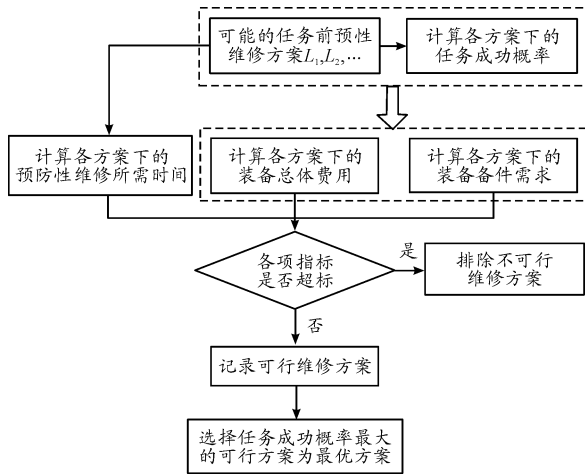


图1 以成功概率最大为目标的维修决策基本过程框图

图1中,可能的任务前预防性维修方案是指各任务功能单元依据各自技况,在任务前采取的预防性维修工作的一个有机组合。决策的核心内容为:计算各种维修方案下装备任务成功概率;计算装备任务前预防性维修时间,任务总体费用以及备件需求。其中,任务成功概率计算问题上文已详细讨论,在此不加赘述。下面主要讨论装备预防性维修时间、任务总体费用以及备件需求三方面内容的计算方法。

### 1) 装备任务前预防性维修时间计算方法

根据第1节中假设条件,令各功能单元的预防性维修时间消耗为 $t_{p,i}$ , $i=1,2,\dots,n$ ;任务前采用“不完全维修”策略进行预防性维修时的时间消耗为 $t_i^1$ ;采用“修复如新”策略时为 $t_i^2$ 。

为便于表述,现引入两个函数 $X(a_i)$ 、 $Y(a_i)$ 。当 $a_i$ 采用“不完全维修”策略进行任务前预防性维修时 $X(a_i)=1$ ,否则 $X(a_i)=0$ ;当 $a_i$ 采用“修复如新”策略进行任务前预防性维修时 $Y(a_i)=1$ ,否则 $Y(a_i)=0$ 。因此, $t_{p,i}$ 可转变为 $t_{p,i}=t_i^1 \times X(a_i) + t_i^2 \times Y(a_i)$ 。可知,装备任务前预防性维修总时间为

$$T_p = \sum_{i=1}^n [t_i^1 \times X(a_i) + t_i^2 \times Y(a_i)] \quad (7)$$

考虑到功能单元的维修时间通常为服从某一分布的随机变量, $T_p$ 可理解为服从特定分布的随机变量,其分布规律可通过相关功能单元维修时间概率密度函数的卷积计算获取。

### 2) 装备任务总体费用计算方法

装备任务总体费用包括装备的使用费用、任务失败时的损失以及装备的任务总体维修费用三部分。其中,装备的使用费用和任务失败时的损失通常不受上述维修工作的影响,可根据实际任务要求确定,分别记作 $C_U$ 、 $C_S$ ;任务总体维修费用记作 $C_M$ 。则装备的任务总体费用为

$$C = C_M + (1 - P_S)C_S + C_U \quad (8)$$

令各功能单元在任务前采用“不完全维修”策略进行预防性维修时的费用为 $c_1^1, c_2^1, \dots, c_n^1$ ;采用“修复如新”策略时

的费用为 $c_1^2, c_2^2, \dots, c_n^2$ 。可知,装备任务前的预防性维修费用 $C_1$ 为

$$C_1 = \sum_{i=1}^n [c_i^1 \times X(a_i) + c_i^2 \times Y(a_i)] \quad (9)$$

令各任务中可修单元在任务中进行维修时的费用分别为 $c_{m(r+1)}, c_{m(r+1)}, \dots, c_{m_n}$ 。当任务失败时,尽管装备可能在任务中进行了一些维修工作并产生了相应维修费用,但是由于考虑到装备的任务失败概率通常不会太大,且这些费用远小于装备损失,因此可忽略不计。当任务成功时,若装备任务中可修部分未发生故障,则不进行维修;若发生故障,则无论可修部分在任务中发生哪种故障事件都将被排除。因此,装备在任务中产生的维修费用为

$$C_2 = P_S \sum_{j=1}^{n-r} (1 - R_{r+j}) c_{m(r+j)} \quad (10)$$

可见,装备任务中的维修费用很大程度上取决于装备的任务成功概率和功能单元任务可靠度。二者与装备的任务前预防性维修工作存在密切关系。因此,装备任务中的维修费用在一定程度上受限于装备所采取的任务前预防性维修策略。

可知,装备的任务总体维修费用为

$$C_M = \sum_{i=1}^n [c_i^1 \times X(a_i) + c_i^2 \times Y(a_i)] + P_S \sum_{j=1}^{n-r} (1 - R_{r+j}) c_{m(r+j)} \quad (11)$$

将上述计算结果代入式(8)可得装备的任务总体费用。

### 3) 装备备件需求计算方法

假设装备共有 $m$ 种备件,每类备件的数量分别为 $n_1, n_2, \dots, n_m$ 。令任意的第 $i$ 个功能单元进行任务前预防性维修时所需第 $j$ 类备件的数量为 $N_{i,j}^1$ ;同上,令“不完全维修”时的备件需求为 $N_{i,j}^{1,1}$ ;“修复如新”时的备件需求为 $N_{i,j}^{1,2}$ 。则, $N_{i,j}^1$ 可转变为 $N_{i,j}^1 = N_{i,j}^{1,1} \times X(a_i) + N_{i,j}^{1,2} \times Y(a_i)$ 。可知,装备任务前预防性维修所需第 $j$ 类备件的数量为

$$N^1 = \sum_{i=1}^n [N_{i,j}^{1,1} \times X(a_i) + N_{i,j}^{1,2} \times Y(a_i)] \quad (12)$$

令可修部分 $E$ 各功能单元在任务中进行维修时,所需第 $j$ 类备件的数量分别为 $N_{r+1,3}^j, N_{r+2,3}^j, \dots, N_{n,3}^j$ 。与任务中维修费用计算原理相同,当任务失败时,对各类备件的消耗量可忽略不计;当任务成功时,在任务中可修部分发生故障后均被修复。可计算任务中维修所需第 $j$ 类备件的平均数量为

$$N^2 = P_S \sum_{i=1}^{n-r} (1 - R_{r+i}) N_{r+i,3}^j \quad (13)$$

与式(1)中原理相同,装备任务中维修工作的备件需求同样受限于装备所采取的任务前预防性维修策略。

对 $N^1$ 、 $N^2$ 求和可知,装备所需消耗的第 $j$ 类备件的总数为

$$N^j = \sum_{i=1}^n [N_{i,j}^{1,1} \times X(a_i) + N_{i,j}^{1,2} \times Y(a_i)] + P_S \sum_{i=1}^{n-r} (1 - R_{r+i}) N_{r+i,3}^j \quad (14)$$

为保证  $N^i$  为整数,对计算结果向上取整。同理,可求得装备对各类备件的需求为:  $N^1, N^2, \dots, N^m$ 。

假设,执行某任务时装备任务前最大允许维修时间为  $T_{\max}$ ,可承受的最大任务总体费用为  $C^*$ 。则基于任务的维修决策问题可转换为如下优化问题。

$$\max P_s \quad (15)$$

$$\text{s. t. } P(T_p \leq T_{\max}) \geq \gamma \quad (16)$$

$$C \leq C^* \quad (17)$$

$$N^1 \leq n_1, N^2 \leq n_2, \dots, N^m \leq n_m \quad (18)$$

其中,  $\gamma$  是 0 到 1 之间的一个常数,可根据实际任务情形设定。

目标表达式(15)表示装备任务成功概率取最大值。

约束表达式(16)表示装备任务前预防性维修工作能在任务前允许维修时间内完成的概率不小于  $\gamma$ 。

约束表达式(17)表示装备任务总体费用不超过可承受的最大任务总体费用  $C^*$ 。

约束表达式(18)表示在相应维修方案下,装备对各类备件的需求均不超过各类备件的可用量。

### 3 以任务成功概率最大为目标的维修决策模型求解

分析上述维修决策模型可知,决策问题的实质是多个参数的组合优化问题,可用现代优化算法求解。考虑到各功能单元维修策略的离散性特点,本文主要借鉴离散粒子群优化算法对维修方案进行寻优。离散粒子群优化算法简单、易行,便于依据决策模型构建优化模型。

由于篇幅有限,此处仅对最佳维修方案的计算步骤进行说明,至于计算中用到的粒子群构建及求解过程请参阅文献[11]。

结合本文研究内容,依据粒子更新基本规则,现给出如下计算步骤:

**步骤 1:** 初始群参数设定。① 对任务剖面进行分析,确定任务前最大允许维修时间  $T_{\max}$  以及参数  $\gamma$  的数值;② 确定

可用的备件数目  $n_1, n_2, \dots, n_m$ ;③ 根据规则构建粒子群,确定粒子群的数量参数、惯性权重、加速常数以及最大更新次数。

**步骤 2:** 随机选取一定数量可能的维修方案,构造初始粒子群,并在此基础上设定各粒子初始更新速度。

**步骤 3:** 根据式(16)~式(18)约束条件,判断各粒子所对应维修方案是否可行。若可行,则利用式(6)计算任务成功概率,当作该粒子的适应度;若不可行,则适应度为 0。根据各粒子适应度数值,计算粒子群中各粒子的当前最佳位置以及群最佳位置。

**步骤 4:** 根据文献[11]中更新规则对粒子群进行一次更新,此后重复步骤 3,更新各粒子当前最佳位置和群最佳位置,并对粒子群更新速度进行一次更新。

**步骤 5:** 重复步骤 4 直到更新次数达到最大更新次数为止。提取此时的群最佳位置,得最优的维修方案。

### 4 示例分析

已知某任务,要求某装备持续工作状态时间为 10 h;任务中最大允许维修时间  $T=3$  h;任务前最大允许维修时间为  $T_{\max}=5$  h,  $\gamma=0.85$ ;装备可承受的任务总体费用为 4 万;与任务相关的备件共有 5 类( $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$ ),可用数量均为 4。现以任务成功概率最大为目标对装备实施维修决策,选择最佳的预防性维修方案。

分析装备结构以及任务特点可知,参与执行任务的功能单元共有 7 个,分别为:  $a_1, a_2, \dots, a_7$ 。其中  $a_1 \sim a_4$  在任务中不可修,  $a_5 \sim a_7$  在任务中可修。在日常维修工作中,  $a_1, a_2, a_7$  采用“修复如旧”策略;  $a_3 \sim a_5$  采用“修复如新”策略;  $a_6$  采用“不完全维修”策略。根据文中方法,可分别计算各功能单元实施各类任务前预防性维修工作后的任务可靠度,并记录预防性维修费用(万元)以及维修时间分布(min)如表 1 所示。各功能单元实施相应维修工作时,对备件的需求如表 2 所示。

表 1 任务前预防性维修后功能单元任务可靠度及维修费用与维修时间

维修策略	$a_1$			$a_2$			$a_3$				
	$R_m$	费用	时间	$R_m$	费用	时间	$R_m$	费用	时间		
不完全维修	0.97	0.45	$N(138, 4.6)$	0.96	0.35	$\ln t \sim (4.87, 0.1)$	—	—	—		
修复如新	0.99	0.8	$\text{Exp}(45)$	0.98	0.72	$\text{Exp}(55)$	0.98	0.3	$\text{Exp}(45)$		
不维修	0.96	0	0	0.92	0	0	0.84	0	0		
$a_4$			$a_5$			$a_6$			$a_7$		
$R_m$	费用	时间	$R_m$	费用	时间	$R_m$	费用	时间	$R_m$	费用	时间
—	—	—	—	—	—	0.93	0.28	$\ln t \sim (4.9, 0.09)$	0.94	0.47	$N(126, 4.3)$
0.99	0.55	$\text{Exp}(50)$	0.96	0.33	$\text{Exp}(53)$	0.98	1.2	$\text{Exp}(73)$	0.99	0.71	$\text{Exp}(91)$
0.95	0	0	0.91	0	0	0.88	0	0	0.90	0	0

表2 功能单元维修保障资源需求量

维修策略	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
不完全维修	$D_1:1, D_4:2$	$D_2:1, D_3:1, D_5:1$	—	—	—	$D_1:1, D_5:2$	$D_2:1, D_3:2$
修复如新	$D_1:2, D_4:2$	$D_2:1, D_3:2, D_5:2$	$D_4:2, D_5:1$	$D_1:3, D_3:2$	$D_2:3, D_4:2$	$D_1:2, D_5:3$	$D_2:1, D_3:3$
任务中维修	—	—	—	—	$D_2:1, D_4:1$	$D_5:2$	$D_3:2$

功能单元  $a_5 \sim a_7$  在任务中的维修费用分别为:0.33 万、0.2 万、0.3 万;任务失败造成的损失为:10 万;装备的使用费用为 0.4 万。

根据历史维修数据统计分析可知,  $a_5$  的维修时间 (min) 服从均值为 30.9, 方差为 5.5 的正态分布;  $a_6$  的维修时间 (min) 服从均值为 45 的指数分布;  $a_7$  的维修时间服从对数均值为 4.8, 对方差为 0.1 的对数正态分布。可计算 3 个单元维修时间概率密度函数  $m_5(t)$ 、 $m_6(t)$ 、 $m_7(t)$ 。

将  $a_5$ 、 $a_6$ 、 $a_7$  看作一个整体  $E$ 。可知,  $E$  共有 7 类故障事件, 分别为:  $E_1$  ( $a_5$  发生故障,  $a_6$ 、 $a_7$  不发生故障)、 $E_2$  ( $a_6$  发生故障,  $a_5$ 、 $a_7$  不发生故障)、 $E_3$  ( $a_7$  发生故障,  $a_5$ 、 $a_6$  不发生故障)、 $E_4$  ( $a_5$ 、 $a_6$  发生故障,  $a_7$  不发生故障)、 $E_5$  ( $a_5$ 、 $a_7$  发生故障,  $a_6$  不发生故障)、 $E_6$  ( $a_6$ 、 $a_7$  发生故障,  $a_5$  不发生故障) 和  $E_7$  ( $a_5$ 、 $a_6$ 、 $a_7$  均发生故障)。根据维修时间概率密度函数  $m_5(t)$ 、 $m_6(t)$ 、 $m_7(t)$ , 利用式(3)可计算在规定时间内  $T$  内各事件被排除的概率为:  $M(E_1) \approx 1$ ;  $M(E_2) \approx 0.9817$ ;  $M(E_3) \approx 1$ ;  $M(E_4) \approx 0.9631$ ;  $M(E_5) \approx 0.9671$ ;  $M(E_6) \approx 0.7153$ ;  $M(E_7) \approx 0.4319$ 。

### 1) 维修决策需求分析

当不进行任务前预防性维修时, 利用第 1 节中方法, 可计算各故障事件的发生概率为:  $P(E_1) = 0.0713$ ;  $P(E_2) = 0.0983$ ;  $P(E_3) = 0.0801$ ;  $P(E_4) = 0.0097$ ;  $P(E_5) = 0.0079$ ;  $P(E_6) = 0.0109$ ;  $P(E_7) = 0.0011$ 。进而利用式(4)~式(6)计算得装备的任务成功概率  $P_S = 0.7005$ 。在此基础上, 利用式(8)计算装备的任务总体费用为 3.42 万。由于该维修方案下装备的任务成功概率过小, 应进行任务前预防性维修。

当进行最大预防性维修, 即所有功能单元均“修复如新”时, 经计算可知任务前不可能在允许时间内完成维修工作。因此, 该维修方案不可取, 需重新制定维修方案。

### 2) 根据决策目标制定最优维修方案

利用文献[11]中方法构建粒子群。将每个维修方案当作每个粒子, 利用离散粒子群优化算法进行寻优。令  $\omega = 0.5$ , 加速常数  $c_1 = c_2 = 1.49445$ , 最大更新次数  $W = 100$ , 数量参数  $q = 10$ 。计算可得维修方案寻优过程如图 2 所示。

最终得最佳的维修方案为:  $a_1$ 、 $a_5$ 、 $a_6$ 、 $a_7$  不进行维修;  $a_2$  “不完全维修”;  $a_3$ 、 $a_4$  “修复如新”。该方案下的装备任务总体费用为 2.7884 万,  $P(T_p \leq T_{\max}) = 0.8673 > 0.85$ , 对各类备件的需求分别为(3, 2, 4, 3, 3), 均满足约束条件要求。此时, 装备的任务成功概率为  $P_S = 0.8886$ 。

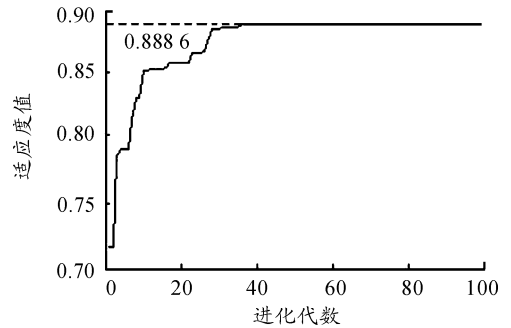


图2 维修方案寻优过程曲线

### 3) 案例对比分析

以该案例相关约束条件为基础, 利用传统方法从装备任务可靠度角度出发对装备进行维修决策, 进而对比分析文中方法与传统方法之间的差异。

将上述例子中, 以任务成功概率最大为目标的维修决策模型中的目标函数换为装备的任务可靠度, 利用离散粒子群优化算法优化得最优维修方案为:  $a_1$ 、 $a_5$ 、 $a_6$ 、 $a_7$  不进行任务前预防性维修;  $a_2 \sim a_4$  以“修复如新”策略进行任务前预防性维修。该方案下, 若不考虑任务中维修时, 各类备件的需求分别为(3, 1, 4, 2, 3)。此时,  $a_5$ 、 $a_6$  仍为任务中可修功能单元; 结合表 2 中数据可知,  $a_7$  在任务中维修需用到第 3 类备件  $D_3$ , 而在该维修方案下  $D_3$  在任务中的可用量为 0, 因此  $a_7$  在任务中不能进行维修。从而, 计算装备任务总体费用为 3.775 万,  $P(T_p \leq T_{\max}) = 0.9382 > 0.85$ , 对各类备件的需求分别为(3, 2, 4, 3, 4), 均满足约束条件要求。装备的任务成功概率为  $P_S = 0.8159$ 。该方法计算结果与本文方法计算结果如表 3 所示。

表3 不同决策方法计算结果

	传统维修决策方法	本文维修决策方法
任务成功概率	0.8159	0.8886
任务总体费用	3.775 万元	2.7884 万元
备件需求量	$D_1:3, D_2:2, D_3:4,$ $D_4:3, D_5:4$	$D_1:3, D_2:2, D_3:4,$ $D_4:3, D_5:3$

由表 3 对比分析可知, 采用本文决策方法所得维修方案, 不仅任务总体费用、备件需求量均少于传统维修决策所得维修方案, 而且可以达到更高的任务成功概率。较之传统方法, 本文方法可得到更佳的维修方案。

## 5 结论

给定任务前维修时间、任务总体费用以及备件数量三方面约束,以任务成功概率最大为目标制定了最佳的任务前预防性维修方案。充分考虑了任务前及任务中维修工作对装备任务成功概率的影响,在实践任务中验证效果很好,为真实任务环境下的维修决策提供了思路。

## 参考文献:

- [1] 周亮,李庆民,李华. 基于任务可用度的不完全可修系统任务成功性评估模型[J]. 海军工程大学学报,2016, 28(2):82-84.
- [2] 朱海平,郭磊,刘繁茂,等. 生产批量约束下的串并联系统选择性维修方法[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(2):419-424.
- [3] 吕学志,于永利,张柳,等. 考虑拼修与多种维修活动的维修任务选择模型[J]. 兵工学报,2012,33(3):361-366.
- [4] 吕学志,曲长征. 考虑维修时间不确定性的维修任务选择模型[J]. 火力与指挥控制,2012,37(10):160-164.
- [5] 贾积身,刘思峰,党耀国. 冷贮备可修系统的维修更换模

型[J]. 南京航空航天大学学报,2007,39(4):544-549.

- [6] LIU Yu, HUANG Hongzhong. Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(2):356-366.
- [7] CASSADY C R, JR W P M, POHL E A. Selective maintenance for support equipment involving multiple maintenance actions [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 129(2):252-258.
- [8] SCHNEIDER K, CASSADY C R. Fleet performance under selective maintenance[C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). [S. l.]:[s. n.], 2004:571-576.
- [9] LISA M M, RICHARD C C, CHASE R, et al. Selective maintenance decision-making over extended planning horizons [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58(3):462-469.
- [10] 王铁宁,杨帆,吴龙涛. 基于任务的装甲装备器材需求预测[J]. 火力与指挥控制,2018,43(7):71-75.
- [11] 韩小孩. 基于任务成功性的装备维修决策方法研究[D]. 北京:装甲兵工程学院,2016:77-78.

(责任编辑 唐定国)

(上接第91页)

- [9] HE Zhitao, LIU Chao, YAN Haihua. Software testing evolution process model and growth of software testing quality [J]. Science China (Information Sciences), 2015, 58(3):196-201.
- [10] MAHA K, FIRAS K, GIORGIO D N, et al. Computing Reliability: On the Differences between Software Testing and Software Fault Injection Techniques [J]. Microprocessors and Microsystems, 2017.
- [11] 孙婷,芦英明,陈中伟. 软件系统性能测试方法及流程规

划[J]. 自动化与仪器仪表,2018(1):166-169.

- [12] 刘军,唐齐新,袁俊,等. 基于CAN总线的SCR系统仿真平台的开发[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2017, 31(3):20-26.
- [13] TAKUYA N, TAKETOSHI M, KOHICHI Y. Case studies of defect localization based on software-based fault diagnosis in comparison with PEMS/OBIRCH analysis [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(6/7).

(责任编辑 杨继森)