

# 用粒子群算法优化装备初始备件量

刘少伟<sup>1</sup>, 金荣<sup>2</sup>, 张琳<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 空军驻西安地区军事代表室, 陕西 西安 710068)

**摘要:**装备初始备件需求量优化问题是一个比较复杂的非线性整数混合规划问题,为了尽可能降低备件购置费用,提高装备可靠度,将新颖的粒子群算法构造成可以解决装备初始备件需求量问题的优化算法,通过粒子间的相互作用,发现复杂搜索空间中的最优区域,得到装备初始备件的最优配置。算例结果表明了粒子群算法解决该问题的有效性。

**关键词:**初始备件;装备可靠度;粒子群算法

**中图分类号:** TJ762.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)01-0046-04

备件需求量是指在一定时间内,为保证装备中某一单元的可靠度而进行维修更换所需要的备件数量。装备初始备件保障是维修保障资源中不可缺少的组成部分,文献[1]分别给出了模拟退火算法、遗传算法以及蚁群算法对该问题的解决方法,文献[2]使用原准比例法和直接搜索法进行导弹武器系统备件分配,文献[3]提出了军用武器装备配件采购决策的模糊规划模型,文献[4]提出了备件需求量计算的修正泊松分布模型,这些方法和模型在解决装备备件保障问题中的效果各有优劣。粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)<sup>[5]</sup>没有遗传算法用的交叉(crossover)以及变异(mutation)操作,而是粒子(潜在的解)在解空间追随最优的粒子进行搜索<sup>[6]</sup>,目前已广泛应用于函数优化、神经网络训练和模糊控制<sup>[7-9]</sup>等领域。本文在对影响装备初始备件需求量相关因素分析的基础上,提出了一种基于粒子群算法的装备初始备件优化方法,取得了较理想的效果。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 基本假设

为了简化问题的讨论和模型的建立,做如下假设:①备件寿命具有相同的分布和分布参数;②装备中任一部件失效都将导致系统无法工作;③系统为冷储备系统,即系统由工作单元和储备单元组成,当工作单元工作时,储备单元储备;当工作单元失效,储备单元顶替,直到所有单元都失效;④系统出现故障,更换备件占用时间不予考虑;⑤装备部件有恒定的失效率;⑥订购备件的单价不随时间浮动。

### 1.2 数学模型

已知装备的一组零部件有  $n$  种,这些部件的寿命服从指数分布,各部件的故障相互独立,在达到要求的装备可靠度的条件下以最低备件费用进行备件配置,即

$$\min C = \sum_{i=1}^n C_i S_i; \quad \text{s. t.} \quad R(S) > R_0 \quad (1)$$

式中:  $C_i$  表示第  $i$  种备件的费用;  $S_i$  表示第  $i$  种部件的备件数;  $R_0$  表示装备最低要求达到的可靠度;  $R(S)$  表示装备可靠度,其计算式为

$$R(S) = \prod_{i=1}^n R_i(S_i) \quad ; \quad R_i(S_i) = \sum_{j=0}^{S_i} \frac{(\lambda'_i)^j}{j!} \exp(-\lambda'_i) \quad (2)$$

收稿日期:2006-10-31

作者简介:刘少伟(1979-),男,山西五寨人,博士生,主要从事军事装备综合保障研究. E-mail: Lsw3721@163.com

式中:  $R_i$  表示第  $i$  种部件有  $S_i$  个备件的可靠度;  $\lambda'_i$  表示第  $i$  种部件的失效期望值, 可以表示为

$$\lambda'_i = \lambda_i \prod_{x=1}^k N_{ix} T_{ix} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_i$  表示第  $i$  种部件的故障率;  $N_{ix}$  表示第  $i$  种部件在周转期内累积工作  $T_{ix}$  小时的机用数。对于初始备件保障, 周转期内累积工作时间用初始保障期内装备累计工作时数或备件更新周期内累积工作时数表示。

## 2 基于粒子群算法的初始备件优化方法

### 2.1 粒子群算法的基本原理

在 PSO 系统中, 每个备选解被称为一个“粒子”, 多个粒子合作选优, 每个粒子根据它自身的“经验”和相邻粒子群的最佳“经验”在问题空间中向更好的位置飞行, 搜索最优解。

假设在  $n$  维搜索空间中有  $m$  个粒子, 第  $i$  个粒子位置为  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T$ , 速度为  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})^T$ 。它的个体极值为  $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})^T$ , 相应的适应值为个体最优解  $p_{besti}$ , 整个粒子群的最优极值为  $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})^T$ , 相应的适应值为全局最优解  $g_{best}$ 。按追随当前最优粒子的原理, 粒子  $i$  按照下式改变位置和速度:

$$\begin{aligned} v_{ik}(t+1) &= \omega v_{ik}(t) + c_1 r_1 (p_{ik}(t) - x_{ik}(t)) + c_2 r_2 (p_{gk}(t) - x_{ik}(t)) \\ x_{ik}(t+1) &= x_{ik}(t) + v_{ik}(t+1) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数;  $c_1, c_2$  为加速度系数, 是非负常数;  $\omega$  为惯性权重;  $x_{ik} \in [x_{\min k}, x_{\max k}]$ ,  $v_{ik} \in [-v_{\max k}, v_{\max k}]$ 。

在粒子群算法中, 惯性权重  $\omega$  使粒子保持运动惯性, 使其有扩展搜索空间的趋势, 有能力探索新的区域, 如果  $\omega = 0$ , 速度本身没有记忆性, 只取决于粒子当前位置和其历史最好位置  $p_{best}$  和  $g_{best}$ 。加速度系数  $c_1, c_2$  用于调整粒子的自身经验与社会经验在其运动中所起的作用, 如果  $c_1 = 0$ , 则粒子没有认知能力, 在粒子的相互作用下, 不仅能到达新的搜索空间, 但也容易陷入局部极值点; 如果  $c_2 = 0$ , 粒子间没有社会信息共享, 其算法变成一个多起点的随机搜索; 如果  $c_1 = c_2 = 0$ , 粒子将一直以当前的速度飞行, 直到到达边界, 通常  $c_1, c_2$  的范围在  $0 - 4$  之间。粒子个数根据问题的规模而定, 一般取  $10 - 40$ 。

### 2.2 适应度函数的构造

初始备件的优化要求购置费用最小, 必须满足装备可靠度的要求, 因此这是一个有约束条件的优化问题, 可以把原约束方程作为罚函数项加入到适应度函数中, 变成无约束的优化问题, 适应度函数构造如下:

$$\min \text{fitness} = \sum_{i=1}^n C_i S_i + \eta \left| \min \left\{ 0, \prod_{i=1}^n \sum_{j=0}^{S_i} \frac{(\lambda'_i)^j}{j!} \exp(-\lambda'_i) - R_0 \right\} \right| \quad (5)$$

式中:  $\eta$  为惩罚因子, 是一个充分大的正数, 实际计算中惩罚因子  $\eta$  的取值太小起不到惩罚作用, 太大则由于误差的影响会导致错误。在武器装备中, 有  $S_i$  个备件的部件可靠度  $\sum_{j=0}^{S_i} \frac{(\lambda'_i)^j}{j!} \exp(-\lambda'_i)$  的取值在  $[0, 1]$  之间, 那么  $\prod_{i=1}^n \sum_{j=0}^{S_i} \frac{(\lambda'_i)^j}{j!} \exp(-\lambda'_i) - R_0$  的取值在  $[-R_0, 1 - R_0]$  之间, 因此要尽量保证  $\eta R_0$  与粗略估计的装备购置费用在一个数量级。

### 2.3 粒子位置和速度的更新方式

装备初始备件的优化最终要得到备件的数量, 是由正整数表示的, 而基本粒子群算法描述的更新方式是针对连续数值的优化, 因此对式(4)粒子  $i$  位置和速度更新方式做如下修改:

$$\begin{aligned} v_{ik}(t+1) &= \omega v_{ik}(t) + c_1 r_1 (p_{ik}(t) - x_{ik}(t)) + c_2 r_2 (p_{gk}(t) - x_{ik}(t)) \\ x_{ik}(t+1) &= \text{round}(x_{ik}(t) + v_{ik}(t+1)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $\text{round}(\cdot)$  表示舍入取整, 以保证粒子位置  $x$  为整数。

## 3 算法流程

Step1: 在搜索空间的整数范围内随机初始化粒子群, 一个粒子代表装备的一个备件数组, 粒子的位置代

表备件数。第  $i$  个粒子的位置为  $x_{ik}$ , 速度为  $v_{ik}$ ,  $1 \leq i \leq m$ ,  $1 \leq k \leq n$ ,  $m$  为粒子种群大小 ( $m$  个备件数组),  $n$  为搜索空间的维数 (装备的  $n$  个部件)。迭代次数  $N = 1$ 。

Step2: 利用粒子的位置向量  $x$  根据式 (5) 计算各粒子的适应度值  $fitness_i$ 。

Step3: 用每个粒子的当前适应度  $fitness_i$  与当前自身最好适应度  $g_{besti}$  作比较, 如果  $fitness_i$  比  $g_{besti}$  小, 用  $fitness_i$  取代  $p_{besti}$ , 用  $x_i$  取代个体极值  $p_i$ , 得到当前本备件数组的最优备件配置量。

Step4: 用每个粒子的当前适应度  $fitness_i$  与粒子群最好适应度  $g_{best}$  作比较, 如果  $fitness_i$  比  $g_{best}$  小, 用  $x_i$  取代最优  $p_g$ , 得到当前所有备件数组的最优备件配置量。

Step5: 根据式 (6) 进行每个粒子位置  $x_i$  和速度  $v_i$  的更新, 对于粒子位置  $x_{ik} \geq x_{max}$  时,  $x_{ik} = x_{max}$ , 当  $x_{ik} < 1$  时,  $x_{ik} = 1$ ; 对于粒子速度  $v_{ik} \geq v_{max}$  时,  $v_{ik} = v_{max}$ , 当  $v_{ik} \leq -v_{max}$  时,  $v_{ik} = -v_{max}$ 。

Step6:  $N = N + 1$ , 如果满足终止条件, 终止算法; 否则, 返回 Step2。

### 4 算例分析

某型雷达上有 4 种类型的电子真空器件组成一昂贵关键件组。每种电子真空器件的单价、失效率、周转期内的预计累计工作时数和机用数见表 1<sup>[10]</sup>。

表 1 电子真空器件备件参数  
Tab. 1 Spare part parameter of electronic vacuum device

型号	单价/元	失效率/(1·h <sup>-1</sup> )	周转期内预计累积工作	
			332 h 的机用数 $N_{11}$	2 160 h 的机用数 $N_{12}$
1	2 400	1/2 500	4	4
2	10 250	1/4 000	2	5
3	11 580	1/800	4	0
4	7 500	1/6 000	2	0

电子真空器件的寿命服从指数分布, 各电子真空器件的故障是相互独立的, 在存放期内无失效。要求在以最低的备件组费用满足备件组的装备可靠度  $R_0 \geq 0.93$  的条件下, 进行组内备件的最优配置。

在本算例中, 为了简化问题, 单个备件费用用备件单价表示, 忽略了订购费、存储费及劳动力费用。利用  $\lambda'_i = \lambda_i \sum_{x=1}^k N_{ix} T_{ix}$  计算得到周转期内各管型的失效期望值:  $\lambda'_1 = 4.0$ ,  $\lambda'_2 = 2.9$ ,  $\lambda'_3 = 1.7$ ,  $\lambda'_4 = 0.11$ 。

利用粒子群算法解决该问题时, 单个部件的备件数取值为 1-20 的正整数, 粒子速度向量最大值  $v_{max}$  设定为 1, 即  $v \in [-1, 1]$ 。经过试验, 惯性权重  $\omega$  取值为 1.05, 加速度系数  $c_1, c_2$  取 2, 惩罚因子  $\eta$  取值为 800 000, PSO 群体规模取 20, 最大迭代次数取 120, 计算过程如图 1 所示, 解随进化代数的变化情况如图 2 所示。

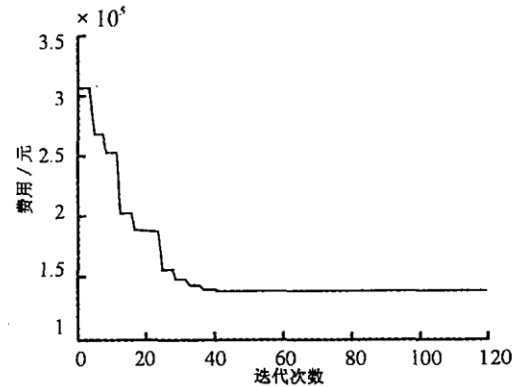


图 1 粒子群算法费用值迭代过程  
Fig. 1 The iteration course of cost value in PSD

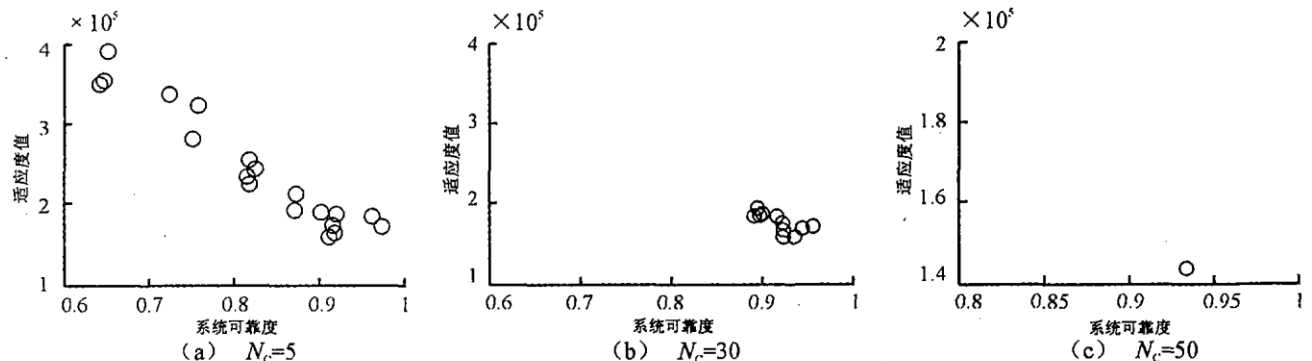


图 2 粒子群优化算法的解随进化代数的变化情况  
Fig. 2 The relationship between solutions and iterations in PSO

粒子群算法在 50 步左右找到最优解,即适应度函数值 fitness 为 139 320,粒子群的最优极值  $p_g = (10, 6, 4, 1)^T$ ,装备可靠度为 0.934 557。因此可以得出所需备件数为: $S_1 = 10, S_2 = 6, S_3 = 4, S_4 = 1$ ,与文献[8]系统可靠度大于 0.9 时得出的结论完全吻合。

## 5 结束语

本文建立了装备可靠度约束下的初始备件需求量模型,并构造了与该模型相适应的粒子群算法。通过对某型雷达电子真空器件初始备件量的优化计算,证明粒子群算法省去了传统最优化方法中初值的选取过程,参数更容易控制,为装备初始备件优化决策提供了一种有效的途径。

### 参考文献:

- [ 1 ] 高尚,杨静宇,吴小俊. 可靠性优化的蚁群算法[J]. 计算机应用与软件,2004,21(12):94-96.  
GAO Shang, YANG Jingyu, WU Xiaojun. Ant Colony Algorithm for Optimization of System Reliability[J]. Computer Application and Software, 2004, 21(12): 94-96. (in Chinese)
- [ 2 ] 刘永生,高翔,严聪. 导弹武器系统可靠性分配方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2002,3(1):33-35.  
LIU Yongsheng, GAO Xiang, YAN Cong. Method for Reliability Distribution in MWS[J]. Journal of Air Force Engineer University: Natural Science Edition, 2002, 3(1): 33-35. (in Chinese)
- [ 3 ] 金秀满. 军用武器装备及配件采购决策模糊规划模型研究[J]. 中国管理科学,2000,8(SI):684-689.  
JIN Xiuman. Studies of Fuzzy Planning Model on the Purchases of Military Weapons Equipment and Fitting[J]. Chinese Journal of Management Science, 2000, 8(SI): 684-689. (in Chinese)
- [ 4 ] 赵宇,伏洪勇,张坚. 航空电子设备备件需求量分析[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(3):1-3.  
ZHAO Yu, FU Hongyong, ZHANG Jian. Demand Analysis of the Spare Part of Avionic Devices[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(3): 1-3. (in Chinese)
- [ 5 ] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[J]. Proc IEEE Int Conf on Neural Networks Perth, 1995:1942-1948.
- [ 6 ] Eberhart R, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm theory: Proc 6th Int Symposium on Micro Machine and Human Science[C]. Nagoya: [s. n.], 1995. 39-43.
- [ 7 ] 韩璞,王学厚,李剑波. 粒子群优化的模糊控制器设计[J]. 动力工程,2005,25(5):663-667.  
HAN Pu, WANG Xuehou, LI Jianbo. Design of a Fuzzy Controller Based on Particle Swarm Optimization[J]. Power Engineering, 2005, 25(5): 663-667. (in Chinese)
- [ 8 ] Eberhart R, Kennedy J. A new Optimizer Using Particle Swarm Theory[C]. Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995. 39-43.
- [ 9 ] Eberhart R, Shi Y. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources[C]. //Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2001: 81-86.
- [ 10 ] 刘拥辉,花兴来. 一种装备备件优化方法[J]. 空军雷达学院学报,2003,7(4):48-50.  
LIU Yonghui, HUA Xinglai. Optimization of Equipment Spare Parts Allocation[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2003, 7(4): 48-50. (in Chinese)

(编辑:田新华)

## The Optimization of Initial Spare Parts Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

LIU Shao-wei<sup>1</sup>, JIN Rong<sup>2</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Air Force Military Representative Office of PLA in Xi'an District, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** The optimization on demand of initial spare part in equipment is a complicated nonlinear mixed integral programming problem, and it is a key factor affecting the cost and efficiency of weapon system. In order to reduce the cost and improve the reliability of equipment, a new particle swarm optimization (PSO) method, which can be used to find optimal regions of complex search spaces through the interaction of individuals in a population of particles, is constructed to solve this optimization problem and the best scheme is achieved. The test shows that this optimization method is scientific and valid for this problem.

**Key words:** initial spare part; reliability of equipment; particle swarm optimization