

某型发动机亚热带岛礁气候下的可靠性分析与保障

李本威, 杨欣毅, 韦 祥

(海军航空大学 航空基础学院, 山东烟台 264001)

摘要:针对某型航空发动机及其备件驻岛礁保障数量决策困难问题,在分析发动机于亚热带气候条件下使用的可靠性基础上提出保障率概念,运用量子粒子群优化求解方法,在重点关注发动机备件重要性、可维修能力、故障程度等因素前提下,结合发动机2级维修保障体制,给出了发动机及其备件基地级保障和不同驻岛时间内的携行保障策略,为实现飞机驻岛礁的发动机常态化优化保障提供参考。

关键词: 可靠性; 岛礁; 备件保障; 航空发动机

中图分类号: V267

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.03.016

Reliability Analysis and Support of an Aeroengine under Subtropical Islands Climate

LI Ben-wei, YANG Xin-yi, WEI Xiang

(Aviation foundation college, Naval Aviation University, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: Aiming at the difficult problem of decision-making for optimal number of an aeroengine and its spare parts, the concept of support rate was proposed on the basis of analyzing the actual operation reliability of the engine under subtropical climate. By using quantum particle swarm optimization method, combined with two-stage engine maintenance and support mechanism, the base level support strategy of engine and its spare parts and the carrying support strategy in different station time are given, while considering the importance, maintainability, failure degree and other factors of engine spare parts. The research result provides reference for normalizing optimal support of aeroengine when stationed at islands and reefs.

Key words: reliability; islands; support of spare parts; aeroengine

0 引言

某型发动机是海军航空兵某战斗机的重要装备,长期在亚热带高温、高湿、高盐的恶劣使用环境下使用,发动机使用可靠性承受着较大的考验^[1-3]。为确保飞机具备完好的出勤能力,发动机备件的供应保障显得十分紧迫和重要^[4-7]。

本文结合多年的发动机故障统计情况,分析其亚热带气候条件下的可靠性,提出保障率概念,运用量子粒子群优化^[8-12]求解方法,研究发动机在不同的驻岛礁期间的备件供应保障问题,给出基地级保障和不同驻岛时间内发动机备件携行保障策略。

1 发动机使用可靠性分析

发动机使用可用度(完好率)取决于发动机的固有可用度、维修能力和备件保障能力^[13-14]。发动机固有可用度的计算式为

$$A_i = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + T_{CM}} \quad (1)$$

式中: $T_{BF} = K_2 \cdot K_e \cdot T_{FBF}$, 为平均故障间隔时间, T_{FBF} 为平均故障间隔飞行小时; K_2 为运行比(总工作时间与飞行时间的比值), 参考某型发动机近几年的空地使用时间统计情况, 发动机地面时间占比约为 20%, 取 1.2; K_e 为环境因子, 表明使用环境对发动机可靠性的影响程度; T_{CM} 为平均修复时间(不包括预防性维修、

收稿日期: 2017-09-11 基金项目: 山东省泰山学者专项经费支持

作者简介: 李本威(1962)男, 博士, 教授, 研究方向为航空发动机状态监控与故障诊断; E-mail: LBW103@sina.com。

引用格式: 李本威, 杨欣毅, 韦祥. 某型发动机亚热带岛礁气候下的可靠性分析与保障[J]. 航空发动机, 2018, 44(3): 91-96. LI Benwei, YANG Xinyi, WEI Xiang. Reliability analysis and support of an aeroengine under subtropical islands climate[J]. Aeroengine, 2018, 44(3): 91-96.

管理和保障延迟时间)。

环境因子 K_e 。可利用某型飞机设计定型的温和地域可靠性数据和亚热带地域使用的可靠性数据进行估计。某型飞机设计定型时平均故障间隔 3.02 h,外场级平均修复时间为 1.06 h,固有可用度评估为 0.75 (75%)。该型飞机装备部队多年,部队机务维护人员对其维护的熟练程度已与设计定型时工业部门的维护人员相当。近几年某型系列飞机的质量及维修情况统计见表 1。

表 1 某型系列飞机质量及维修情况统计

机型	完好率/%				故障率			影响完好率的主要因素
	20**	20**	20**	均值	20**	20**	20**	
飞机 1	86.72	75.4	57.49	73.2	0.2711	84	0.2222	故障多,发动机缺
飞机 2	59.01	60.72	55.4	58.2	0.2338	83	0.2330	故障多,发动机缺

从表中可见,某型飞机的使用完好率(使用可用度)低于设计定型时的可用度,其主要原因是在亚热带潮湿、炎热的气候条件下长期使用的环境对其可靠性造成了影响。根据以上考虑,计算得到某型系列机在亚热带使用的平均故障间隔时间为 2.9 h,平均故障间隔 4.05 h。可以估算出,亚热带气候相对内陆温和地域气候而言,对飞机产品应力寿命的环境影响因子 $K_e=0.8$ 。

统计发动机近 5 年的使用数据,外场暴露各类有效技术质量问题 140 项、1350 起。根据式(1)统计分析得到的发动机平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure, MTBF, TMBF)和空中停车(in-flight shut down, IFSD)可靠性指标见表 2。

表 2 发动机 MTBF 和 IFSD 随工作时间变化情况

年度	20**	20**	20**	20**	20**
MTBF	48.54	78.76	90.18	95.55	104.4
IFSD	13.07	2.68	2.27	1.85	2.01

从表中可见,某型发动机的 MTBF 指标呈不断增长趋势,但与设计成熟期可靠性指标(MTBF)不小于 150 h、空中停车率不大于 0.1 次/1000 飞行小时、发动机提前换发率不大于 0.5 次/1000 飞行小时的要求还存在一定差距。

在统计的发动机各类技术质量问题当中,主机故障主要集中在振动超标、进气机匣壳体裂纹、整流板裂纹和尾喷管作动筒漏油等方面;传动润滑系统

故障集中体现在滑油金属含量超标、磁力密封装置和皮碗漏油、滑油泵组调压活门卡滞等方面;控制系统故障集中体现在燃油增压泵漏油和传感器虚警等方面。为此,在短期内不能有效提高发动机或某些部附件固有设计可靠性的前提下,要确保飞机出勤率和发动机使用可用度(完好率),只能重点关注发动机主机和上述重点成品件的备件供应保障问题。

2 基于保障率的发动机供应保障模型建立与求解

某型发动机除主机外,还有 47 种成品件。为建立基于保障率的发动机供应保障模型,作如下假设:(1)最大程度确保飞机出勤率,不考虑飞机间的发动机串换件;(2)在岛礁基层级所有故障件只更换备件,不实施修理;(3)发动机备件缺货将使发动机不完好;(4)各发动机部件的故障与备件缺货的过程相互独立;(5)发动机的完好率与备件的储备量及储备策略相关;(6)故障的出现是随机的,暂不考虑发动机备件供应等待时间。

基于保障率的发动机供应保障模型是以飞机机群的发动机完好率为目标函数,以备件购置费用限制为约束条件,即:在备件购置费用约束条件下,寻求基地级最优备件库存或岛礁基层级最优携行保障策略,使得在此策略下机群保障的发动机完好率达到最大。供应保障模型的数学描述如下:

目标函数为

$$R = \text{MAX} \sum_{i=1}^N \rho(i) \cdot R(i) \quad (2)$$

式中: R 为机群的发动机完好保障率; $\rho(i)$ 为第 i 个器材备件的权重系数; $R(i)$ 为第 i 个器材备件的保障率。

约束函数为

$$C = \sum_{i=1}^N C(i) \cdot X(i) \leq C(0) \quad (3)$$

式中: $C(0)$ 为发动机备件购置总经费; $C(i)$ 为第 i 个备件的单价; $X(i)$ 为第 i 个备件的数量。

保障率定义为

$$R(i) = \frac{X(i)}{\lambda(i) \cdot N(i) \cdot T_k(i)} \quad (4)$$

式中: $N(i)$ 为部件的装机数; $\lambda(i)$ 为第 i 个备件的故障率; $T_k(i)$ 为部件的装机工作时间; $X(i)$ 为器材备件需求量。

海军发动机维修保障采用2级体制,即基层级保障和基地级保障。按照2级保障结构,模型中航空发动机备件保障配置表示为

$$X=(X^o, X^D)$$

式中: $X^o=(x_1^o, x_2^o, \dots, x_L^o)$, $X^D=(x_1^D, x_2^D, \dots, x_L^D)$ 分别为基层级和基地级的岛礁携行和库存配置; L 为备件种类数; X_l 为第 l 种备件的数量。假设 $C=(c_1, c_2, \dots, c_L)$, c_l 为第 l 种备件的单价, 2 级供应保障模型为

$$\begin{aligned} & \max R(X) \\ & \text{s.t. } \sum_{i=1}^N c_i(x_i^o + x_i^D) \leq C_0 \\ & x_i^o, x_i^D \in \{0, 1, 2, 3, \dots\} \end{aligned} \quad (5)$$

备件权重 $\rho(i)$ 是 1 种新的衡量部件在发动机中作用大小的概念, 从备件配装发动机的重要性、可维修能力、故障程度 3 个方面衡量。在备件配装发动机的重要性方面, 每个备件在发动机上的作用程度不同, 有些是发动机的关键部件, 属于寿命件, 影响飞行安全; 有些是发动机的重要部件, 属于视情监控部件, 影响飞行任务的执行; 有些属于一般部件, 不影响安全飞行和任务的执行。从备件配装发动机的重要性来看, 在 2 级维修供应保障体制中, 基地级库存保障不仅要考虑此类备件的故障更换, 而且应考虑到寿更换。从可维修能力角度来看, 把发动机备件分为可修件与不可修件, 由于可修件修复后可以重新装机使用, 相当于 1 个新的备件, 在备件优化中起到重要作用。在 2 级维修供应保障体制中, 根据前面的假设, 基地级库存保障可以认为可修复备件具有修复能力; 驻岛礁基层级备件发生故障主要以更换为主, 认为不具有修复能力。故障程度是根据部件在使用过程中发生故障的统计情况确定的, 同时依据统计情况对部件的故障程度进行等级划分。故障程度高的部件, 备件保障中关注权重系数会更大。故障程度的评估具有时间效应。

对机群进行完好发动机备件保障率优化, 关键是在满足约束条件(购置总经费不超过 $C(0)$ 的前提下)确定各备件需求量的最优组合 $\{X(1), X(2), \dots, X(N)\}_{\text{opt}}$, 从本质上看属于离散优化问题, 是 1 个典型的 N-P 问题。采用粒子群优化算法(QPSO)对机群的完好保障率进行优化求解^[15]。

粒子位置更新方程为

$$x_{ij}(t+1) = A_{ij}(t) \pm \alpha \cdot |C_j(t) - x_{ij}(t)| \ln(1/u) \quad (6)$$

粒子的状态用位置向量来描述。控制参数为收扩系数 α 。

利用量子粒子群进行机群完好保障率优化的核心是, 每个粒子即为各备件数量的组合 $\{X(1), X(2), \dots, X(N)\}_{\text{opt}}$, 由于约束条件是不等式, 并且是购置总经费不超限, 因此在迭代求解过程中增加判断条件, 删除种群中不满足约束条件的粒子, 并引入变异机制, 对其他粒子进行变异处理, 补充相同数量的粒子, 以维持种群的规模不变, 同时也有利于增加粒子的多样性, 提高算法的搜索效率。

基于量子粒子群的机群完好保障率优化的步骤如下:

(1) 初始化。根据指定数目生成初始种群 $p=\{X(1), X(2), \dots, X(\text{num})\}_{\text{opt}}$, 其中每个粒子 $X(i)$ 表示 1 种可能的备件数量组合。

(2) 判断所有粒子是否满足约束条件, 不满足则删除, 并变异生成相同数目的替代粒子。

(3) 按照机群的完好保障率计算粒子的适应度。

(4) 计算种群中粒子的个体极值和全局极值。

(5) 按照式(6)对粒子进行位置更新。

(6) 判断算法是否达到最大迭代次数, 若是则程序运行结束, 并输出相应结果, 否则转至步骤(2)。

3 发动机备件供应保障优化策略

据前面分析, 2 级备件保障模式下的备件权重系数 $\rho(i)$ 的取值不同。假定重要性、可维修能力、故障程度 3 个方面的权值分配见表 3。发动机每个可更换部件的故障程度, 按照统计周期内在用发动机的该成品件装机数量与该故障件数量之比来估计, 可分为高故障率、一般故障率、低故障率 3 个层次。故障率大于 0.1 为高故障率; 故障率处于 0.03~0.1 之间为一般故障率; 故障率小于 0.03 为低故障率。

每个部件的重要性、可维修能力、故障程度是不同的, 按照 3 项的权值分配再求和, 得出该部件的累计权重分数 $q(i)$; 然后对舰载机所有成品件的权重分数进行求和, 得出 1 个总权重分数 Q , $Q = \sum_{i=1}^m q(i)$ 。则

该部件的权重系数为 $\rho(i) = \frac{q(i)}{Q}$ 。

表 3 航材备件重要性、可维修能力、故障程度的权值分配			
保障级别及 备件累计权重	重要性	可维修能力	故障程度
基地级保障 权重 $q(t)$	关键件(影响安全寿命件)0.4	可修复件 0.2	高故障率 0.4
			一般故障率 0.2
			低故障率 0.1
			高故障率 0.6
	重要件 0.2	可修复件 0.2	一般故障率 0.3
			低故障率 0.15
			高故障率 0.7
			一般故障率 0.35
基层级保障 权重 $q(t)$	0.1	均认为不可修复 0	低故障率 0.18
			高故障率 0.9
			一般故障率 0.45
			低故障率 0.23
			无故障 0(使用时间短)

根据第 2 章的航空器材优化保障模型建立方法,统计 105 台发动机故障信息,给定某型发动机基本信息,见表 4。

表 4 某型发动机及成品件基本信息					
序号	名称	单发装机数量	重要性	是否需修理	故障次数
1	发动机主机	1	关键件	是	35
2	主燃油泵调节器	1	关键件	是	4
3	喷口加力调节器	1	关键件	是	6
4	综合电子调节器	1	关键件	是	10
5	燃油增压泵	1	关键件	是	13
6	加力燃油泵	1	关键件	是	1
...	...	...	...	...	...
45	总燃油滤	1	重要件	是	0
46	主燃油系统燃油滤	1	重要件	否	0
47	加力点火控制盒	1	重要件	是	0
48	防冰气动电磁阀	1	重要件	是	0

依据某型发动机及成品件基本信息表,按照 2 级保障体制构建的发动机及成品件权值系数见表 5、6。

某型发动机的可靠性分析按表 5 中的 48 个发动机主机及成品件组成串联系统进行,发动机整机故障率和各成品件故障率的关系可表示为

$$\lambda=\sum_{i=1}^{48}\lambda_i$$

式中:λ_i为发动机主机及成品件的故障率。

利用量子粒子群优化算法对发动机及成品件基地级库存保障数量或驻岛礁携行数量进行优化分析

表 5 基地级发动机及成品件库存保障的各种权系数						
序号	名称	重要性分数	可维修分数	故障程度分数	累计权重分数 q(t)	权重系数 ρ(t)
1	发动机主机	0.4	0.2	0.4	1	0.0316
2	主燃油泵调节器	0.4	0.2	0.2	0.8	0.0253
3	喷口加力调节器	0.4	0.2	0.2	0.8	0.0253
4	综合电子调节器	0.4	0.2	0.4	1	0.0316
5	燃油增压泵	0.4	0.2	0.4	1	0.0316
6	加力燃油泵	0.4	0.2	0.1	0.7	0.0221
...	...	...	...	...	...	...
45	总燃油滤	0.2	0.2	0.15	0.55	0.0174
46	主燃油系统燃油滤	0.2	0	0.15	0.35	0.0111
47	加力点火控制盒	0.2	0.2	0.15	0.55	0.0174
48	防冰气动电磁阀	0.2	0.2	0.15	0.55	0.0174

表 6 基层级发动机及成品件库存保障的各种权系数						
序号	名称	重要性分数	可维修分数	故障程度分数	累计权重分数 q(t)	权重系数 ρ(t)
1	发动机主机	0.1	0	0.9	1	0.06
2	主燃油泵调节器	0.1	0	0.45	0.55	0.033
3	喷口加力调节器	0.1	0	0.45	0.55	0.033
4	综合电子调节器	0.1	0	0.9	1	0.06
5	燃油增压泵	0.1	0	0.9	1	0.06
6	加力燃油泵	0.1	0	0.23	0.33	0.02
...	...	...	...	...	...	...
45	总燃油滤	0.1	0	0	0.1	0.006
46	主燃油系统燃油滤	0.1	0	0	0.1	0.006
47	加力点火控制盒	0.1	0	0	0.1	0.006
48	防冰气动电磁阀	0.1	0	0	0.1	0.006

计算。迭代次数设为 50,种群数量为 100,其中每个粒子 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_m\}$ 的第 i 个维度 x_i 表示第 i 个成品件的配置数量。粒子的每个维度下限设置为 0(即成品件数量可以为 0),而粒子的每个维度的上限依据每个成品件的平均无故障工作时间、成品件总工作时间设置,其关系式为

$$U_i=\frac{\alpha \cdot T_{total}}{T_{MBF}} \tag{7}$$

式中:α 为余度系数,取值为 1~1.5。

在迭代过程设置判断条件,当粒子对应的总价格超过允许范围则进行调整,使其重新满足限制条件。

最优粒子对应的目标函数随迭代次数变化曲线如图 1 所示。从图中可见,随着种群的进化,最优解对应的目标函数值被不断提高,最终目标函数值达到 47.9,而最优解的备件采购总价格是约束价格的 93.5%,没有超过约束条件,如图 2 所示。

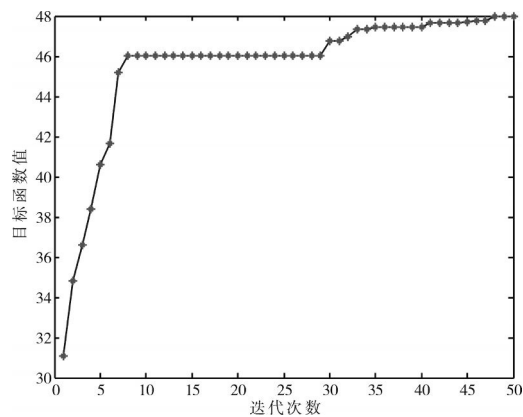


图 1 最优解的迭代进化过程

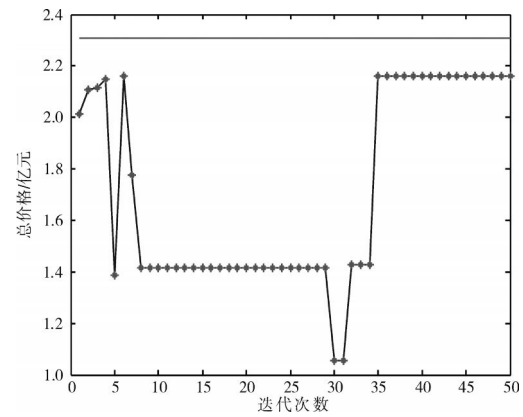


图 2 最优解的总价格变化过程

通过最优解的求解得到的发动机寿命期内基地级库存保障策略见表 7。

表 7 基地级发动机及成品件库存保障数量				
序号	名称	故障率 $\lambda(i)$	装机工作时间	库存数量
1	发动机主机	5.56×10^{-4}	500	5
2	主燃油泵调节器	2.78×10^{-4}	500	7
3	喷口加力调节器	2.78×10^{-4}	500	6
4	综合电子调节器	4.17×10^{-4}	500	10
5	燃油增压泵	4.17×10^{-4}	500	9
6	加力燃油泵	1.39×10^{-4}	500	3
...	...	...	...	...
45	总燃油滤	1.39×10^{-4}	500	3
46	主燃油系统燃油滤	1.39×10^{-4}	500	3
47	加力点火控制盒	1.39×10^{-4}	500	3
48	防冰气动电磁阀	1.39×10^{-4}	500	3

按照同样方法分别计算 24 架机驻岛礁 3、6 个月期间发动机备件的携行保障策略,见表 8。求解过程对应的最优解的迭代过程曲线分别如图 3、4 所示。图 3、4 分别表示 3、6 个月驻岛事件优化计算过程,种群最优解对应的目标函数(即保障率)随迭代次数的增

加均能有效地提高。

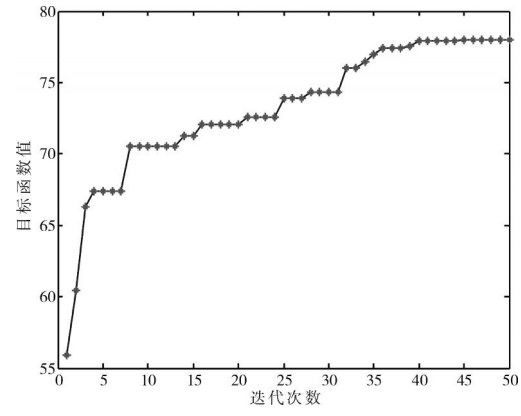


图 3 3 个月驻岛迭代进化过程

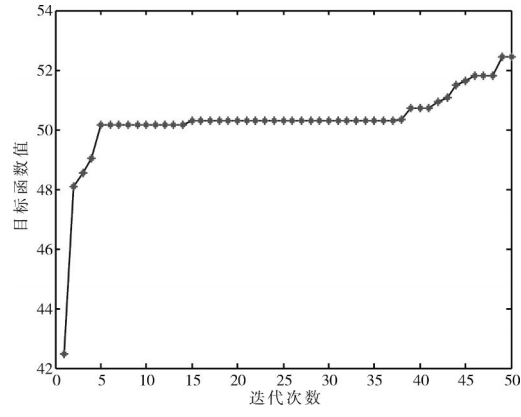


图 4 6 个月驻岛迭代进化过程

表 8 驻岛期间发动机及成品件携行保障策略						
序号	名称	故障率 $\lambda(i)$	驻岛 3 个月		驻岛 6 个月	
			工作时间	携行数量	工作时间	携行数量
1	发动机主机	5.56×10^{-4}	120	3	450	5
2	主燃油泵调节器	2.78×10^{-4}	120	3	450	7
3	喷口加力调节器	2.78×10^{-4}	120	3	450	7
4	综合电子调节器	4.17×10^{-4}	120	3	450	10
5	燃油增压泵	4.17×10^{-4}	120	3	450	10
6	加力燃油泵	1.39×10^{-4}	120	2	450	4
...	...	...	...	...	...	...
45	总燃油滤	1.39×10^{-4}	120	2	450	4
46	主燃油系统燃油滤	1.39×10^{-4}	120	0	450	4
47	加力点火控制盒	1.39×10^{-4}	120	0	450	4
48	防冰气动电磁阀	1.39×10^{-4}	120	1	450	4

4 结论

(1)引入环境因子,利用大量发动机使用数据,对亚热带气候条件下某型发动机可靠性进行评估。随着发动机及附件产品质量的不断改进,发动机可靠性指标 MTBF 可达到 104.4,但与成熟期的目标仍有较大

差距。在近期驻岛礁时间内,要确保发动机使用可用度(完好率),仍需重点关注发动机主机和成品件的供应保障问题。

(2)以飞机机群的发动机完好率为目标函数,以备件购置费用限制为约束条件,建立基于保障率的发动机供应保障模型。重点关注发动机备件重要性、可维修能力、故障程度等因素,基于先进的量子粒子群寻优求解方法,给出基地级库存和驻岛礁基层级的发动机备件供应策略。

参考文献:

- [1] 孔瑞莲. 航空发动机可靠性工程[M]. 北京:航空工业出版社, 1996: 4-5.
KONG Ruilian. Aeroengine reliability engineering[M]. Beijing: Aviation industry Press, 1996.(in Chinese)
- [2] 王大伟, 马艳红, 洪杰. 基于危害度航空发动机可靠性评估模型及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(8): 883-886.
WANG Dawei, MA Yanhong, HONG Jie. Reliability assessment model and application for aeroengine based on criticality method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34 (8): 883-886.(in Chinese)
- [3] 任淑红. 民航发动机性能可靠性评估与在翼寿命预测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
REN Shuhong. Research on methods of performance reliability assessments and life on wing prediction for civil aeroengine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.(in Chinese)
- [4] 孙闯, 何正嘉, 张周锁,等. 基于状态信息的航空发动机运行可靠性评估[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 30-37.
SUN Chuang, HE Zhengjia, ZHANG Zhousuo, et al. Operating reliability assessment for aeroengine based on condition monitoring information[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 30-37.(in Chinese)
- [5] 郭波, 陈童, 黄卓, 等. 航空发动机组合维修策略的备件需求规律[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(5): 769-777.
GUO Bo, CHEN Tong, HUNAG Zhuo, et al. Spare parts demand law of aviation engine with combination maintenance policy [J]. System Engineering Theory and Practice, 2010, 30(5): 769-777.(in Chinese)
- [6] 白芳, 左洪福, 任淑红, 等. 航空发动机拆换率平滑方法[J]. 航空动力学报, 2008, 23(10): 1821-1828.
BAI Fang, ZUO Hongfu, REN Shuhong, et al. Research on smoothing method for engine removal rate [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(10): 1821-1828.(in Chinese)
- [7] 白芳, 左洪福. 基于调度计划的航空发动机备份数量决策方法研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(1):92-97.
BAI Fang, ZUO Hongfu. A decision method for the quantity of spare aero-engines based on scheduling[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 23 (10): 1821-1828.(in Chinese)
- [8] 方伟, 孙俊, 谢振平,等. 量子粒子群优化算法的收敛性分析及控制参数研究[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 3686-3694.
FANG Wei, SUN Jun, XIE Zhenping, et al. Convergence analysis of quantum-behaved particle swarm optimization algorithm and study on its control parameter[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6): 3686-3694. (in Chinese)
- [9] 彭鹏菲, 于钱, 李启元. 基于优先排序与粒子群优化的装备保障任务规划方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(6):1082-1088.
PENG Pengfei, YU Qian, LI Qiyuan. A planning method of equipment support task based on priority ordering and particle swarm optimization algorithm [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37 (6): 1082-1088.(in Chinese)
- [10] 彭鹏菲, 于钱, 李启元. 基于改进粒子群优化的多目标装备保障任务规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(3): 562-568.
PENG Pengfei, YU Qian, LI Qiyuan. Method of multiobject equipment support task planning based on improved particle swarm optimization [J]. System Engineering and Electronics, 2017, 39 (3): 562-568.(in Chinese)
- [11] 张凯, 赵国荣, 姜静. 粒子群算法在武器装备保障资源优化中的应用[J]. 兵工自动化, 2010, 29(1): 1720-1723.
ZHANG Kai, ZHAO Guorong, JIANG Jing. Application of PSO in weapon equipment safeguard resource optimization [J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(1): 1720-1723.(in Chinese)
- [12] 倪现存, 左洪福, 刘明, 等. 基于免疫粒子群算法的民机备件库存配置优化方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2008, 27(12): 1660-1667.
NI Xiancun, ZUO Hongfu, LIU Ming, et al. A method for civil aircraft spare parts inventory allocation based on particle swarm optimization with immunity algorithms [J]. Mechanical science and technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(12): 1660-1667.(in Chinese)
- [13] 宋兆泓. 航空发动机可靠性与故障抑制工程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002:2-5.
SONG Zhaohong. Aeroengine reliability and fault suppression engineering [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Ppress, 2002.(in Chinese)
- [14] 陈卓, 薛庆增, 李冬,等. 航空发动机使用可靠性研究[J]. 航空发动机, 2010, 36(3): 10-15.
CHEN Zhuo, XUE Qingzeng, LI Dong, et al. Service reliability study on Aeroengine[J]. Aeroengine, 2010, 36(3): 10-15.(in Chinese)
- [15] 方伟, 孙俊, 须文波. 基于微分进化算子的量子粒子群优化算法及应用[J]. 系统仿真学报, 2008(24): 6740-6744.
FANG Wei, SUN Jun, XU Wenbo. Improved quantum-behaved particle swarm optimization algorithm based on differential evolution operator and its application [J]. Journal of System Simulation, 2008(24): 6740-6744.(in Chinese)

(编辑:刘 静)