

文章编号:1674-8190(2018)03-441-06

基于状态维修的预防性维修策略优化模型研究

陈浩,周正,颀征

(中国船舶工业系统工程研究院 第五研究所,北京 100094)

摘要: 基于状态的维修着眼于系统的具体运行状况,对被监测装备的真实状态进行评估,克服了维修的盲目性,可有效减少由于维修不足而引起的意外故障和由于维修过剩带来的资源浪费。提出一种基于状态的多部件系统非周期预防性维修计划的优化方法,引入“机会维修阈值”概念,优化不同维修方式转移概率的表达式,将多个维修作业按照机会维修阈值进行归并,运用马尔可夫决策过程理论,给出不同维修方式转移概率的表达式和目标函数,并进行算例分析。结果表明:提出的优化模型减少了预防性维修活动,节约了维修工时和经费,可为系统预防性维修策略决策提供参考。

关键词: 基于状态维修;预防性维修;维修策略优化;优化模型

中图分类号: V267+.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.03.021

Optimal Preventive Maintenance Tactics Model Based on Condition-based Maintenance

Chen Hao, Zhou Zheng, Xie Zheng

(Department 5, CSSC Systems Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: Condition-based maintenance(CBM) is based on specific system operation condition to evaluate the real status of monitored equipment. CBM overcome the blindness of maintenance, and is able to effectively reduce accidental failures caused by insufficient maintenance and waste of resources by the excess of maintenance. A multi-unit system non-periodic preventive maintenance plan optimization method is proposed, which is based on the condition. The concept of “opportunity maintenance threshold” is introduced, and the expression of different maintenance mode transition probability is optimized. Multiple maintenance works are combined in accordance with the opportunity maintenance threshold. The expression of different maintenance mode transition probability and the objective function on the basis of Markov Decision Process Theory are proposed. Through the example analysis, the proposed optimization model can reduce the preventive maintenance activities, save maintenance time and funds, and provide reference for system preventive maintenance strategy decision.

Key words: condition-based maintenance; preventive maintenance; maintenance tactics optimization; optimal model

0 引言

随着高新技术的发展及其在军事领域的广泛应用,武器装备越来越复杂,维修保障任务也越来越繁重^[1]。与美欧等军事强国相比,我国海军特种

起降飞机系统在维修理念、技术和管理上相对落后,处于传统、经验型阶段,信息化水平较低^[2]。未来第四代飞机系统部、组件数量大,种类多,维修检测设备少,因此维修装备、备(配)件、人员分工等维修资源的科学化管理与合理化统筹成为海军特种起降飞机系统维修保障工作中的瓶颈^[3]。基于状态的维修(Condition-Based Maintenance,简称CBM)为解决上述问题提供了可能。采用CBM对

收稿日期:2018-05-22; 修回日期:2018-07-09

通信作者:颀征,314371963@qq.com

飞机系统的运行状况进行在线或离线的监测,通过对所测状态参数值的分析决定装备的维修需求,是实现飞机系统维修的重要基础和支撑条件^[4]。

国外广泛采用人工神经网络、Petri 网和 Agent 等仿真技术,功能强大、精度较高,但依赖于大量数据,不适合于小样本问题^[5]。针对预防性维修状态的优化研究工作在不同的领域内开展。叶培钊^[6]将“不完全维修”的概念引入基于状态维修策略优化的数学模型中,更准确地描述了实际情况;魏永合等^[7]把故障预测技术引入到预防性维修实践中,建立了系统可用度最大和预防周期内单位时间总维修成本最小的预防性维修优化模型;王正元等^[8]建立了基于状态的预防性维修策略优化模型及其求解方法;王辉等^[9]采用遗传算法在满足系统可靠性的前提下以最小化维修成本为目标优化预防性维修计划,提出了预防性维修问题数学模型。目前国内装备的维修性数据记录粒度过大,限制了定量分析的开展,视情维修策略主要为控制限规则,即对系统进行连续或间断(周期或非周期)的监测,如果发现系统劣化水平或劣化状态达到某一状态阈值,则对系统进行预防维修(PM),称为预防维修状态阈值。

由于飞机不同系统的预防维修状态阈值不同,需要频繁对其部件进行预防性维修,造成飞机长时间停飞。本文提出一种基于状态的多部件系统非周期预防性维修计划的优化方法,通过引入“机会维修阈值”,优化不同维修方式转移概率的表达式,将多个维修作业按照机会维修阈值进行归并;运用马尔可夫决策过程理论,给出基于状态可靠性的维修模式决策优化模型,并通过算例验证优化模型的有效性。

1 基于状态维修优化模型

1.1 模型假设和内容分析

设飞机某系统 S 在有限时间区间 $[0, T_M]$ 内进行 PM 活动。将时间区间 $[0, T_M]$ 等分为 n 个时间段,每段长度为 ΔT ,则 $\Delta T = T/n = t_q - t_{q-1}$, ($q = 1, 2, \dots, n$)。为了构建 $[0, T_M]$ 内以可靠性为中心

的多部件 PM 优化策略,给出以下想定:

(1) 系统 S 的 M 个可修理子系统在初始时刻 0 的状态已知, M 个子系统的故障分布相互独立,且服从威布尔分布。

(2) 在部件达到其最低可靠度时,对该部件进行替换或修理;在未达到其最低可靠度时,对部件出现的故障进行小修。在 ΔT 内,当对某一部件进行替换或修理时,可对其他未达到其最低可靠度的部件进行保养,从而同时完成多个部件的 PM 作业。

(3) 为了减少 PM 造成的停机损失,部件 i 在 T_1 时刻的 PM 触发部件 j ($j \neq i$) 在时间段 $(t_q, \alpha \Delta T + t_q]$ ($\alpha \in N$) 内的机会 PM 作业。

PM 工作分为三种典型类型:更换(PM₁)、修理(PM₂)和保养(PM₃)。PM₁ 是直接用一个全新的部件替换原来的旧部件,通常更换是为了防止发生更严重的破损。PM₂ 一般包括保养、修理或更换部件中的一些小机构(例如弹簧、密封圈和轴承)等。除改善外部运行环境,PM₂ 还直接修复了部件内部的一些损耗。PM₃ 只是对部件的外部运行环境进行改善,可使部件在更好的环境下运行。PM₃ 工作包括润滑、调节、清洗、除尘等。用 $X(i, T_q)$ 来表示部件 i 在 T_q 时刻的维修方式,PM₁、PM₂、PM₃ 和不进行 PM 时的取值分别为 1、2、3 和 0。

用 $sg(i, T_q)$ 来标记 T_q 内部件 i 是否需要 PM₁ 或者 PM₂,用 $V(T_q)$ 来标记 T_q 内是否需要 PM₁ 或 PM₂ 的部件总数,用 $op(i, T_q)$ 来表示 T_q 内是否需要部件 i 进行机会 PM₁ 或 PM₂,并设 α 为机会维修阈值,它们用公式表示分别为

$$sg(i, T_q) = \begin{cases} 1 & R(i, T_q) < R_{\min}(i) \\ 0 & R(i, T_q) \geq R_{\min}(i) \end{cases} \quad (1)$$

$$V(T_q) = \sum_{i=1}^M sg(i, T_q) \quad (2)$$

$$op(i, T_q) = \begin{cases} 1 & R(i, T_{q+\alpha'+1}) < R_{\min}(i) \\ 0 & R(i, T_{q+\alpha'+1}) \geq R_{\min}(i) \end{cases} \quad \alpha' \leq \alpha \quad (3)$$

飞机系统 S 在 $[0, T_M]$ 内的 PM 过程如图 1 所示。

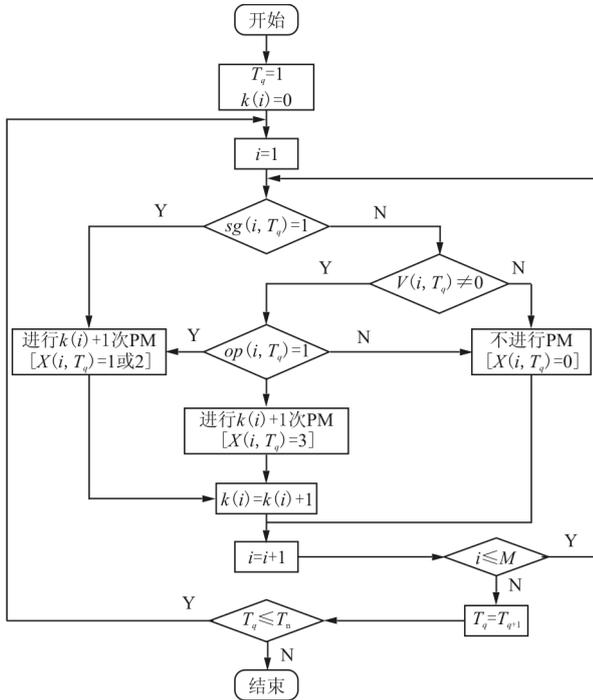


图 1 $[0, T_M]$ 内的 PM 过程
Fig. 1 Process of PM in $[0, T_M]$

1.2 不同维修模式下可靠度建模

经过预防性维修 PM 后系统的可靠性改善情况分为两部分:一是经过修理或更换,使原系统中的失效零件得以修复;二是经过三种 PM 方式中的任意一种,使未失效的零部件性能得以改善。在 PM 之后,部件在时刻的可靠度为

$$R(i, t) = R_s[i, k(i)]R_{p_{-i, k(i)}}(t) \quad (4)$$

式中: $R_s[i, k(i)]$ 为部件 i 经过 $k(i)$ 次 PM,失效零部件修复后的初始可靠度; $R_{p_{-i, k(i)}}(t)$ 为部件 i 在第 $k(i)$ 次 PM 后,未失效零部件的可靠度。

若在时间段 T_s ,部件 i 进行了第 $k(i)$ 次 PM, $t_x[i, k(i)] = T_s, R_s[i, k(i)] = R(i, t_{s+})$ 。若在时间段 T_z ,部件 i 进行了第 $k(i) + 1$ 次 PM,即 $t_x[i, k(i) + 1] = T_z$ 。 ΔT 相对于 T 很小,在 ΔT 的可靠度的变化很小, $R_f[i, k(i)] \approx R(i, t_{z-})$,其中 $R_f[i, k(i)]$ 为部件 i 在第 $k + 1$ 次 PM 前的终了可靠度。根据第 $k(i)$ 次 PM 的不同类型,将部件 i 经过第 $k(i)$ 次 PM 后的可靠度变化情况分为三类($t \in (t_s, t_z]$):

(1) 更换。经过替换后,从时刻 t_s 开始,部件 i 成为全新的部件。

$$R_s[i, k(i)] = 1, R_{p_{-i, k(i)}}(t) = \exp\left\{-\left[\frac{t-t_s}{\eta(i)}\right]^{\beta(i)}\right\} \quad (5)$$

式中: $\beta(i)$ 为部件 i 威布尔分布的形状参数, $\eta(i)$ 为部件 i 威布尔分布的幅度参数。

(2) 修理。部件 i 经过修理后,从时刻 t_s 开始,失效零部件得到修复,未失效的零部件性能得到改善。

$$\begin{cases} R_s[i, k(i)] = R_f[i, k(i) - 1] + \theta_1 \{R_s[i, k(i) - 1] - R_f[i, k(i) - 1]\} \\ R_{p_{-i, k(i)}}(t) = \exp\left\{-\left[\frac{t-t_s}{\theta_2 \eta(i)}\right]^{\beta(i)}\right\} \end{cases} \quad (6)$$

(3) 保养。部件 i 经过保养后,从时刻 t_s 开始,未失效的零部件性能得到了改善,改善情况同修理。

$$\begin{cases} R_s[i, k(i)] = R_f[i, k(i) - 1] \\ R_{p_{-i, k(i)}}(t) = \exp\left\{-\left[\frac{t-t_s}{\theta_2 \eta(i)}\right]^{\beta(i)}\right\} \end{cases} \quad (7)$$

由此,当部件服从威布尔分布时,部件 i 在 $t \in (t_s, t_z]$ 的可靠度为

$$R(i, t) = R_s[i, k(i)] = \exp\left\{-\left[\frac{t-t_s}{\theta \eta(i)}\right]^{\beta(i)}\right\} \quad (8)$$

式中:当 $X(i, T_s)$ 为 1 时, $\theta = 1$;当 $X(i, T_s)$ 为 2 或 3 时, $\theta = \theta_2$ 。

$\beta = 3, \eta = 70, d, \theta_1 = \theta_2 = 0.5$ 时经过不同维修方式后可靠性的变化趋势,如图 2 所示。

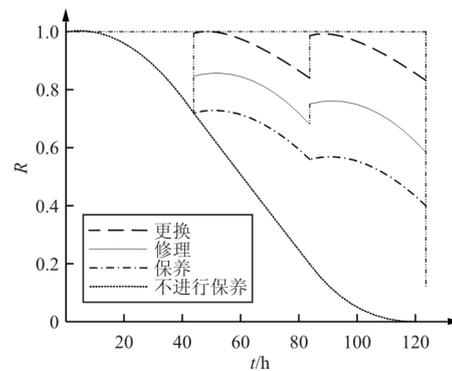


图 2 不同维修方式下可靠性的变化情况
Fig. 2 Reliabilities' change with different modes

根据可靠度与故障率之间的关系,故障率函数可以表示为

$$\lambda(i, t) = -\frac{1}{R(i, t)} \frac{dR(i, t)}{dt} \quad (9)$$

由式(8)~式(9)可得,进行第 $k(i)$ 次 PM 后部件 i 的故障率为

$$\lambda_{k(i)}(i, t) = \frac{\beta(i)}{\theta \eta(i)} \left[\frac{t-t_s}{\theta \eta(i)}\right]^{\beta(i)-1} \quad (10)$$

1.3 维修模式的确定及优化模型的建立

设飞机 S 在 $[0, T_M]$ 内的 PM 是一个马尔可夫决策过程。若在 T_s 部件 i 进行了第 $k(i)$ 次 PM, 设 $X(i, T_s) = A (A=1, 2, 3)$, 则在时间段 $T_{q+s} (q=1, 2, \dots)$, $X(i, T_s) = B (B=0, 1, 2, 3)$ 的转移概率为 $P\{X(i, T_{q+s}) = B | X(i, T_s) = A\}$ 。转移概率的大小由采取该种 PM 方式到下次其可靠度到达

$$C_B[i, k(i) + 1] = \begin{cases} C_0[i, k(i)], X(i, T_s) = 0 \\ C_1[i, k(i)], X(i, T_s) = 1 \\ C_2[i, k(i)], X(i, T_s) = 2 \\ C_3[i, k(i)], X(i, T_s) = 3 \end{cases} = \begin{cases} \rho_4(i) N_{0,i}[k(i) + 1] / t_{R_{\min}} - t_{q+s} \\ D_1(i, T_{q+s}) + \rho_4(i) N_{1,i}[k(i) + 1] / t_{R_{\min}} - t_{q+s} \\ D_2(i, T_{q+s}) + \rho_4(i) N_{2,i}[k(i) + 1] / t_{R_{\min}} - t_{q+s} \\ D_3(i, T_{q+s}) + \rho_4(i) N_{3,i}[k(i) + 1] / t_{R_{\min}} - t_{q+s} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\rho_4(i)$ 为部件 i 进行故障维修的平均作业时间; $t_{R_{\min}}$ 为部件 i 在时间段内进行预防性维修到下次其可靠度到达 $R_{\min}(i)$ 的时间:

$$t_{R_{\min}} = \theta \times \left[\exp\left(\frac{1}{\beta(i)} \log\left(-\log\left(\frac{R_{\min}(i)}{R_s(i, k(i) + 1)}\right)\right)\right) \eta + \frac{1}{\theta} t_{q+s} \right] \quad (13)$$

$N_{\varphi,i}[k(i) + 1]$ 为部件 i 在 $(t_{q+s}, t_{R_{\min}}]$ 时间段内发生故障的次数:

$$N_{\varphi,i}[k(i) + 1] = \int_{t_{q,s}}^{R_{\min}} \lambda_{\varphi, k(i)+1}(i, t) dt (\varphi = 0, 1, 2, 3) \quad (14)$$

$$P\{X(i, T_{q+s}) = 1 | X(i, T_s) = A\} = \frac{1/C_1[i, k(i) + 1]}{1/C_1[i, k(i) + 1] + 1/C_2[i, k(i) + 1]} \quad (16)$$

$$P\{X(i, T_{q+s}) = 2 | X(i, T_s) = A\} = \frac{1/C_2[i, k(i) + 1]}{1/C_1[i, k(i) + 1] + 1/C_2[i, k(i) + 1]} \quad (17)$$

② 当 $sg(i, T_{q+s}) = 0$ 或 $op(i, T_{q+s}) = 0$ 时, 对部件 i 进行 PM_3 或不进行预防性维修:

$$P\{X(i, T_{q+s}) = 3 | X(i, T_s) = A\} = \frac{1/C_3[i, k(i) + 1]}{1/C_0[i, k(i) + 1] + 1/C_3[i, k(i) + 1]} \quad (18)$$

$$P\{X(i, T_{q+s}) = 0 | X(i, T_s) = A\} = \frac{1/C_0[i, k(i) + 1]}{1/C_0[i, k(i) + 1] + 1/C_3[i, k(i) + 1]} \quad (19)$$

(2) 当 $V(T_{q+s}) = 0$, 不进行任何预防性维修:

$$P\{X(i, T_{q+s}) = 0 | X(i, T_s) = A\} = 1 \quad (20)$$

$R_{\min}(i)$ 时, 期间单位时间的平均维修耗时确定。

(1) 当 $V(T_{q+s}) \geq 1$, 令 $C_B[i, k(i) + 1]$ 为采取 B 类维修后, $(t_{q+s}, t_{R_{\min}}]$ 区间单位时间的平均维修耗时:

$$C_B[i, k(i) + 1] = \frac{B \text{ 类预防性维修时间} + \text{故障维修时间}}{t_{R_{\min}} - t_{q+s}} \quad (11)$$

$B=0, 1, 2, 3$ 时, 分别有

$$D_c(i, T_{q+s}) = \begin{cases} \rho_B(i) - \sum_{j=1}^{i-1} D_c(j, T_{q+s}), \rho_B(i) - \sum_{j=1}^{i-1} D_c(j, T_{q+s}) > 0 \\ 0, \rho_B(i) - \sum_{j=1}^{i-1} D_c(j, T_{q+s}) \leq 0 \text{ 或 } B = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$D_c(i, T_{q+s})$ 为时间段 T_{q+s} 内, 且设 $\rho_B(i)$ 为部件 i 进行 B 类 PM 的平均作业时间, 则由于部件 i 进行 PM 所引起海军特种起降飞机 S 的停机时间:

$$D_c(i, T_{q+s}) =$$

$$\begin{cases} \rho_B(i) - \sum_{j=1}^{i-1} D_c(j, T_{q+s}), \rho_B(i) - \sum_{j=1}^{i-1} D_c(j, T_{q+s}) > 0 \\ 0, \rho_B(i) - \sum_{j=1}^{i-1} D_c(j, T_{q+s}) \leq 0 \text{ 或 } B = 0 \end{cases} \quad (15)$$

① 当 $sg(i, T_{q+s}) = 1$ 或 $op(i, T_{q+s}) = 1$ 时, 对部件 i 进行 PM_1 或 PM_2 类预防性维修:

通过上述分析, 可得出基于状态可靠性的维修模式决策优化模型:

$$\begin{cases} \min \text{cost} = \sum_{q=1}^n \sum_{i=1}^M D_c(i, T_q) + \sum_{i=1}^M \rho_4(i) \left[\sum_{k=0}^{k(i)-1} \int_{t_x(i, k)}^{t_x(i, k+1)} \lambda_k(i, t) dt + \int_{t_x(i, K(i))}^T \lambda_{K(i)}(i, t) dt \right] \\ \text{s. t.} \quad \forall i, t, \exists R(i, t) \geq R_{\min}(i) \\ \left[\sum_{i=1}^M X(i, T_{q_1}) \right] \left[\sum_{i=1}^M X(i, T_{q_2}) \right] \equiv 0 \\ 0 < |t_{q_2} - t_{q_1}| < \alpha \Delta T \quad i=1, 2, \dots, M; t_q = 1, 2, \dots, n; t \in [0, T] \end{cases} \quad (21)$$

目标函数中第一项为预防性维修导致的停机总时间,第二项为故障导致的维修总时间。

2 算例与分析

由于目前缺乏海军特种起降飞机各分系统的精确可靠性数据,为了验证所抽象的数学模型,将民机的历史数据作为想定的参数进行算例分析,模型可支持参数的变更。假设飞机实施基于状态维修包括六个部件,且从全新状态开始运行;运行的时间范围为 $[0, 480 \text{ h}]$,考虑到波次飞行时间限制,设置维修检测时间为两个波次飞行时间,当采用 1+30 甲板周期时,每波次海军特种起降飞机飞行时间为 3 h,则 $\Delta T=3 \text{ h}, \theta_1=\theta_2=0.8$,机会预防性维修阈值 $\alpha=9 \text{ h}$,其他参数如表 1 所示。

表 1 部件的想定参数

Table 1 Inlet condition for the components

部件号	$\eta(i)/i$	$\beta(i)$	$\rho_1(i)$	$\rho_2(i)$	$\rho_3(i)$	$\rho_4(i)$	$R_{\min}(i)$
1	54	1.8	0.2	0.4	0.1	0.3	0.70
2	100	2.5	0.4	0.6	0.3	0.4	0.75
3	108	3.2	0.3	0.5	0.2	0.8	0.80
4	105	3.1	0.1	0.3	0.1	0.6	0.60
5	20	2.0	0.4	0.6	0.3	0.9	0.60
6	70	1.5	0.5	0.9	0.4	0.2	0.80

将以上参数带入通过 MATLAB 编程实现的优化模型,得到部件集合在运行期间内的 PM 策略的优化结果,如表 2 所示。优化模型对节约维修时间,提升飞机可用度有明显作用,而且模型的仿真次数越多,其优化精度也越高。从仿真结果得出优化后总维修时间为 53.4 h。

表 2 仿真结果

Table 2 Results of emulator

仿真次数	总维修时间/h
50	134.3
1 000	67.6
10 000	53.4

优化的预防性维修计划如表 3 所示。在第 42 h 时,需要对部件 3、4 和 5 进行保养,对部件 6 进行修理,对部件 1 进行替换,对部件 2 则不需要任何预防性维修。六个部件的可靠性变化如图 2 所示。从表 3 和图 2 可以看出:部件 2 进行替换的次

数最多,部件 1 进行修理的次数最多,而部件 5 在运行期间没有进行过替换和修理,主要通过保养来降低部件故障率,保障部件可靠度。

表 3 优化的 PM 计划

Table 3 Optimized plan for PM

时期(h)	优化的 PM 计划					
	1	2	3	4	5	6
24	2	1	3	3	3	0
42	1	0	3	3	3	2
54	0	1	3	3	3	3
66	2	0	3	3	3	0
84	2	1	3	0	3	2
99	2	0	3	3	3	0
111	2	1	3	3	3	1
123	2	0	3	0	3	0
132	1	2	3	3	3	3
153	0	1	3	0	3	2
156	2	0	3	0	3	0
174	2	1	3	2	0	2
189	2	0	3	0	3	3
201	1	1	0	0	3	3
216	0	0	1	1	3	2
225	2	1	3	0	3	1
243	2	3	3	0	3	0
258	2	2	3	0	3	2
270	1	1	3	3	3	0
291	0	0	0	0	0	2
294	2	1	3	0	3	0
312	2	0	3	1	3	1
324	0	1	3	3	3	0
327	2	0	3	3	3	3
339	2	3	3	0	3	3
351	1	1	3	0	3	3
375	2	1	3	1	3	1
393	1	3	3	0	3	0
411	0	1	1	0	3	2
417	2	0	0	0	3	0
435	1	1	0	2	0	1
459	2	1	3	3	3	0
477	2	3	3	3	3	1

3 结 论

本文提出了海军特种起降飞机多部件系统非周期预防性维修计划的一种优化模型,该模型中的

基于状态的预防性维修分为更换、修理和保养,突发故障用小修处理,将多个维修作业按照机会维修阈值进行归并,减少了维修停机损失。运用马尔可夫决策过程理论,给出了不同维修方式转移概率的表达式,解决了预防性维修策略的组合优化问题,减少了预防性维修活动和停飞时间,节约了维修工时和经费。

参考文献

- [1] 郑东良. 航空维修管理[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
Zheng Dongliang. Aviation maintenance management[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 段学刚. 航空电子装备维修概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
Duan Xuegang. Introduction to the maintenance of avionics equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 吕川. 维修性设计分析与验证[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
Lü Chuan. Analysis and verification of maintainability design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [4] 张宝珍. 国外新一代战斗机综合保障工程实践[M]. 北京:航空工业出版社, 2014.
Zhang Baozhen. Practice of comprehensive support engineering for a new generation of fighter aircraft in foreign countries[M]. Beijing: Aeronautical Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [5] 于永利, 张柳. 装备作战单元维修保障能力评估方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2015.
Yu Yongli, Zhang Liu. Evaluation method of equipment combat unit maintenance support capability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [6] 叶培钊. 不完全维修前提下基于状态维修策略最优化模型研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
Ye Peifan. Research on condition-based maintenance policy optimization under imperfect maintenance[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [7] 魏永合, 刘雪丽, 牛保国. 基于故障预测的预防性维修策略优化模型[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, 7(7): 91-94, 99.
Wei Yonghe, Liu Xueli, Niu Baoguo. Preventive maintenance strategy optimization model based on fault prediction [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015, 7(7): 91-94, 99. (in Chinese)
- [8] 王正元, 陈智雄, 曹继平, 等. 基于状态的单部件维修策略优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(1): 45-49.
Wang Zhengyuan, Chen Zhixiong, Cao Jiping, et al. Optimal solution to condition-based maintenance strategy of single parts[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(1): 45-49. (in Chinese)
- [9] 王辉, 范秀敏, 严隽琪. 考虑机会维修的等风险预防性维修策略优化[J]. 机械设计与研究, 2003, 19(3): 51-55.
Wang Hui, Fan Xiumin, Yan Juanqi. Optimization of equally cumulative-hazard preventive maintenance strategy considering opportunity maintenance [J]. Machine Design and Research, 2003, 19(3): 51-55. (in Chinese)

作者简介:

陈浩(1976—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器综合保障、航空装备维修、保障信息系统设计与仿真等。

周正(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:航空电子、装备可靠性工程。

颜征(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器结构、装备可靠性工程。

(编辑:赵毓梅)