

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.015

## 基于延迟时间模型的民机部件维修优化方法

柏文华 左洪福 吕德峰 袁 锴

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

**摘要:**民机视情维修理念推动了维修向高效、经济的方向发展。本文阐述了民机视情维修的概念;研究了延迟时间模型建模原理和建模过程,提出了以维修间隔为约束、以费用率为目标的维修优化模型。针对当前中国确定民机部件维修间隔主要凭借经验的现状,进行仿真分析,并提出通过仿真机体面板的故障数据,将延迟时间模型应用于机体面板的检查与更换等维修决策中。模型以费用最低为目标、维修间隔为约束,优化了维修决策。仿真分析同时研究了不同参数条件下的最优维修间隔的变化情况。研究结果表明该方法提高了部件维修决策的合理性。

**关键词:**民用飞机;延迟时间模型;维修优化;决策;仿真

**中图分类号:**E237 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)06-0890-07

## Maintenance Optimization Method of Civil Aircraft Based on Delay Time Mode

*Bai Wenhua, Zuo Hongfu, Lü Defeng, Yuan Kai*

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Condition based maintenance (CBM) promotes the civil aircraft maintenance towards efficient and economical direction. The concept concerning CBM of broad prospects is elaborated. A CBM decision-making model namely delay time model is introduced, meanwhile, the theory and the modeling process are also researched. Presently, the inspection interval of civil aircraft's structural component is determined mainly through experience. The delay time model is applied to the decision-making of inspection and replacement of fuselage panel with simulated failure data. The maintenance decision-making is optimized with the lowest cost under the constraint of maintenance interval. Furthermore, the variation of the optimal interval with different parameters is simulated. The research results verify that the method greatly increases the rationality of maintenance decision-making of components.

**Key words:** civil aircraft; delay time mode; maintenance optimization; decision-making; simulation

当前随着视情维修理论的迅速发展,追求民机维修高效率,低费用是必然趋势。Moubray<sup>[1-2]</sup>是这样定义视情维修的:通过评估状态来检查是否发生了潜在故障,根据检查结果选择维修工作防止功能故障发生,或者是避免功能故障发生导致的后

果。在民用飞机运营过程中,越来越先进的维修方法应用于民机维修,各种维修方法各有利弊。文献[3]针对发动机性能同时进行了视情维修决策模型研究,有些方法针对维修经济性进行了研究<sup>[4]</sup>,有些方法针对备用系统功能检测模型进行了研究<sup>[5]</sup>。

**基金项目:**国家自然科学基金与中国民航联合基金(60939003)重点项目资助;国家自然科学基金(61079013)项目资助。

**收稿日期:**2015-08-10;**修订日期:**2015-09-23

**通信作者:**左洪福,男,教授,博士生导师,E-mail:aerodiag@nuaa.edu.cn。

文献[6]针对民机结构基于有限时间的不完备检测进行了研究。文献[7,8]对适用于民机发动机维修优化方案模型进行了研究。本文详细阐述了基于延迟时间的概念,提出了基于延迟时间模型的民机部件维修优化。

## 1 维修决策优化建模策略

在民用飞机运行过程中,如果潜在故障可检测点到功能故障发生点的间隔比较稳定,就可以运用延迟时间模型对民机部件的维修进行建模和维修优化决策<sup>[9]</sup>。在部件的寿命周期之内出现的故障时间是一个随机变量,相对应的检查间隔是相等的或者不相等的<sup>[10]</sup>。具体的检测策略如下:

(1)第一次的检测在部件工作到  $T_0 = kT$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) 时进行,  $T$  为检测周期;

(2)在检查/功能检查时若发生潜在故障,则尽可能地短时间排除,以免在后续工作中发生功能故障,部件从工作到发生潜在故障到被修复的过程称为检测更新过程;

(3)在部件工作中,只要出现功能故障就必须马上进行维修,对应的过程为故障更新;

(4)检查/功能检查时,部件未发生故障可以维持正常工作,则不进行维修干预。

## 2 延迟时间的概念

飞机结构中发生裂纹的部件可以用延迟时间的概念描述其裂纹故障发展过程<sup>[9]</sup>。在检查中可以发现部件的潜在故障的起始点  $u$ , 由潜在故障起始点发展功能故障的这段时间为延迟时间  $h$  (见图1)。

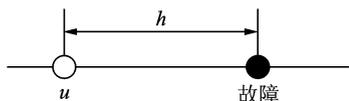


图1 延迟时间图示

Fig. 1 Illustrate of delay time mode

在  $(u, u+h)$  这段时间内检查就能发现部件的潜在故障,在发展成功能故障前可以通过维修手段恢复正常状态。延迟时间模型的建立必须掌握潜在功能故障发生时间以及延迟时间的规律。如果确定潜在故障发生的模型,也就是潜在故障发生的概率  $g(u)$  和延迟时间分布  $f(h)$ , 就找到了检查频

率和设备故障次数之间的关系,也就得到了部件的延迟时间模型。通过分析可知建立延迟时间模型的关键在于得到潜在故障发生时间  $U$  的分布  $f(u)$  和潜在故障的延迟时间  $H$  的分布  $f(h)$ , 可以通过对  $U$  和  $H$  用统计学方法进行参数估计,得到它们之间关系。

## 3 基于延迟时间概念的部件维修决策建模

这里将复杂系统视为一个部件,部件潜在故障可以发生在任意时间点。从部件开始运行状态时刻开始,到潜在故障发生的时间间隔为  $u$ , 分布密度函数为  $g(u)$ , 其累计概率函数为  $G(u)$ 。而功能故障发生时间的累计概率  $P(t)$ , 是  $g(u)$  和  $f(h)$  的卷积。

$$P(t) = \int_0^t g(u)F(t-u)du \quad (1)$$

部件的可靠度为

$$R(t) = 1 - P(t) \quad (2)$$

部件发生功能故障之后更换或维修的效果是使设备恢复如新,这样部件的故障-检查-更换的过程可以作为更新过程来建模。

假设  $N(t)$  是部件在时间区间  $(0, t]$  内发生故障的次数,部件被修复如新,则两次维修间的时间  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$  是独立同分布的,即过程  $\{N(t), t \geq 0\}$  属于更新过程。

假设部件在区间  $(0, t]$  内发生故障次数的期望为  $E[N(t)]$ , 则

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[N(t)]}{t} = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (3)$$

如果更新过程  $\{N(t), t \geq 0\}$  产生了故障间隔时间  $T_1, T_2, \dots, T_i, \dots$ , 称为部件的更新寿命,  $\text{Re}_1, \text{Re}_2, \dots, \text{Re}_i, \dots$  为第  $i$  个更新寿命  $T_i$  中的报酬,例如维修费用、停机时间等。由以上分析得到若干  $(T_i, \text{Re}_i)$  应该是独立同分布的。设区间  $(0, t]$  内总报酬为  $\text{Re}(t)$ , 则

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\text{Re}(t)}{t} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} E(\text{Re}_i)}{\sum_{i=1}^{\infty} E(T_i)} \quad (4)$$

由式(4),以费用最低为优化目标,即以一个更新周期内的期望费用最低为优化目标。根据对部件检查维修过程的描述,建立以费用最低为优化目标的维修决策模型。

### 3.1 完备检测费用决策模型

完备检测是指只要发生了可检测的潜在故障,在最近的一次定期检查中就一定可以被维修人员检测到。现建立完备检测下的维修决策模型。

(1) 在区间  $(t_{i-1}, t_i)$  发生功能故障

潜在故障的发生时间点  $u$  总会落在某个检查间隔内,不失一般性,设检查间隔为  $(t_{i-1}, t_i)$ ,若潜在故障发展为功能故障经过的时间  $h$  小于或等于  $t_i - u$ ,则在任一次检查间隔  $(t_{i-1}, t_i)$  内出现功能故障,如图 2 所示。

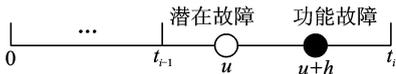


图 2 功能故障更新示意图

Fig. 2 Illustrate of renewal function fault

其概率为

$$P_F(t_{i-1}, t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(u)F(t_i - u)du \quad (5)$$

式中:  $F(t_i - u)$  为部件在  $u$  点发生潜在故障后,在  $(0, t_i - u)$  内发生功能故障的累计概率。

部件的寿命周期为  $u + h$ , 部件的停机时间为  $(i - 1)d_I + d_F$ , 部件费用, 包括检查费用  $c_I$  和直接维修费用以及故障引起的其他损失  $c_F$ , 为  $(i - 1) \times c_I + c_F$ 。

(2) 在时间区间  $(t_{i-1}, t_i)$  内只发生潜在故障

假设检查是完善的, 只要发生潜在故障, 在发展成功能故障前进行的检查中一定可以发现潜在故障, 同时对应的维修及时展开, 则该事件称为检测更新。事件的发生过程如图 3 所示。



图 3 检测更新示意图

Fig. 3 Illustrate of renewal inspection

对应概率为

$$P_{IR}(t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(u)[1 - F(t_i - u)]du \quad (6)$$

潜在故障在任一检查间隔  $(t_{i-1}, t_i)$  内, 部件的整体维修费用包括检查费用  $c_I$  和预防性维修费用  $c_P$ , 即  $ic_I + c_P$ 。

将(1)和(2)综合得到潜在故障发生在任一间隔  $(t_{i-1}, t_i)$  内时部件的期望寿命周期内的费用为

$$E[C(t_{i-1}, t_i)] = [(i - 1)c_I + c_F]P_F(t_{i-1}, t_i) + (ic_I + c_R)P_{IR}(t_i) \quad (7)$$

其寿命周期期望为

$$E(T(t_{i-1}, t_i)) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \int_0^{t_i - u} (u + h)g(u)f(h)dhdu + t_iP_{IR}(t_i) \quad (8)$$

将所有检查间隔内的期望值相加, 就可以得到部件在一个更新周期内的期望费用和期望寿命。

期望费用

$$E[C(\Delta)] = \sum_{i=1}^{\infty} E[C(t_{i-1}, t_i)] = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ [(i - 1)c_I + c_F]P_F(t_{i-1}, t_i) + (ic_I + c_R)P_{IR}(t_i) \right\} \quad (9)$$

期望寿命

$$E[T(\Delta)] = \sum_{i=1}^{\infty} E[T(t_{i-1}, t_i)] = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \int_{t_{i-1}}^{t_i} \int_0^{t_i - u} (u + h)g(u)f(h)dhdu + t_iP_{IR}(t_i) \right\} \quad (10)$$

式中:  $\Delta = t_i - t_{i-1}$ , 为检查周期。

则单位时间内费用

$$C_{avg}(\Delta) = \frac{E[C(\Delta)]}{E[T(\Delta)]} \quad (11)$$

### 3.2 不完备检测的费用决策模型

不完备检测是指潜在故障以一定的概率被检测, 设检出概率  $b(0 < b < 1)$  代表这种不完备检测的程度。建模如下。

不完备检测是指部件在区间  $(t_{i-1}, t_i)$  内发生的潜在故障不一定会在时刻  $t_i$  被检测出, 而是在  $t_i$  或  $t_i$  之后的某次检查中被检测出, 如图 4 所示。

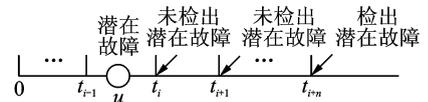


图 4 不完备检测条件下检测更新图

Fig. 4 Illustrate of renewal imperfect inspection

潜在故障发生在  $(t_{i-1}, t_i)$  内的概率

$$P_u(t_{i-1}, t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(u)du \quad (12)$$

在  $t_i$  或  $t_i$  之后的时刻发生检测更新的概率依次为

$$\begin{aligned}
 P_h(t_i) &= b \left( 1 - \int_0^{t_i-u} f(h) dh \right) \\
 P_h(t_{i+1}) &= (1-b)b \left( 1 - \int_0^{t_{i+1}-u} f(h) dh \right) \\
 &\vdots \\
 P_h(t_{i+n}) &= (1-b)^n b \left( 1 - \int_0^{t_{i+n}-u} f(h) dh \right)
 \end{aligned} \tag{13}$$

式中  $n \geq 0$ 。

由式(12)和式(13)可得潜在故障发生在  $(t_{i-1}, t_i)$  内且以预防性更换为终点的概率为

$$\begin{aligned}
 P_{IR}(t_{i-1}, t_i) &= P_u(t_{i-1}, t_i) \sum_{n=0}^{\infty} P_h(t_{i+n}) = \\
 &\sum_{n=0}^{\infty} (1-b)^n b \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(u) \bar{F}(t_{i+n}-u) du \tag{14}
 \end{aligned}$$

式中

$$\bar{F}(t_{i+n}-u) = 1 - \int_0^{t_{i+n}-u} f(h) dh \tag{15}$$

为潜在故障发生后在  $(0, t_{i+n})$  不发生功能故障的概率。

对  $P_{IR}(t_{i-1}, t_i)$  累加可得一个更新周期以检测更新为终点的概率

$$\begin{aligned}
 P(\Delta) &= \sum_{i=1}^{\infty} P_{IR}(t_{i-1}, t_i) = \\
 &\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ (1-b)^n b \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(u) \bar{F}(t_{i+n}-u) du \right] \tag{16}
 \end{aligned}$$

潜在故障发生之前的平均检查次数为

$$S(\Delta) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{G}(t_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \left[ 1 - \int_0^{t_i} g(u) du \right] \tag{17}$$

平均检查次数为

$$I(\Delta) = S(\Delta) + 1/bP(\Delta) \tag{18}$$

部件平均更新周期长度为

$$E(T(\Delta)) = K + N(\Delta) \tag{19}$$

式中  $K$  为平均潜在故障发生时间。

$$\begin{aligned}
 N(\Delta) &= \\
 &\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ (1-b)^n b \int_{t_{i-1}}^{t_i} \int_0^{t_{i+n}-u} g(u) \bar{F}(s) ds du \right] \tag{20}
 \end{aligned}$$

平均更新周期内的期望费用为

$$E[C(\Delta)] = c_I I(\Delta) + c_P P(\Delta) + c_R [1 - P(\Delta)] \tag{21}$$

单位时间内费用

$$C_{avg}(\Delta) = \frac{E[C(\Delta)]}{E[T(\Delta)]} \tag{22}$$

### 4 仿真分析

用仿真模拟结构裂纹扩展故障情况,用仿真数据结果展示延迟时间模型的有效性。

仿真是一条裂纹在机体面板中间位置扩展的过程,面板的起始裂纹长度为  $a_i$ ,其载荷循环的幅值恒定。文中假设疲劳载荷为机舱增压,环向应力幅值在最大值  $\sigma$  和最小值 0 之间变化。一个疲劳载荷循环等于一个飞行循环。裂纹扩展服从 Paris 方程

$$\frac{da}{dN} = D(\Delta K)^{m_0} \tag{23}$$

式中:  $a$  为裂纹长度;  $N$  为载荷循环;  $da/dN$  为裂纹扩展速率;  $\Delta K$  为应力强度因子幅;  $D$  与  $m_0$  为面板材料固有参数。

有如下公式

$$D = \exp(-3.2m_0 - 12.47) \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta K &= \sigma \sqrt{\pi a} \\
 \sigma &= \frac{pr}{t} \tag{25}
 \end{aligned}$$

式中:  $p$  为压差;  $r$  为机体半径;  $t$  为面板厚度。

裂纹从初始长度  $a_i$  扩展到裂纹长度  $a_N$ , 所经历的循环疲劳载荷数  $N$  可以通过式(23)得到

$$\begin{aligned}
 N &= \int_{a_i}^{a_N} \frac{1}{D(\Delta K)^{m_0}} da = \\
 &\frac{a_N^{1-m_0/2} - a_i^{1-m_0/2}}{D[1 - (m_0/2)](\sigma\sqrt{\pi})^{m_0}} \tag{26}
 \end{aligned}$$

给定基本仿真参数数据之后可以仿真出潜在故障发生时间  $N_P$  和功能故障发生时间  $N_F$ , 潜在故障发生时间和延迟时间分布可以由统计方法确定。

仿真过程如图 5 所示, 仿真材料为铝合金 7075-T6, 其参数如表 1 所示。

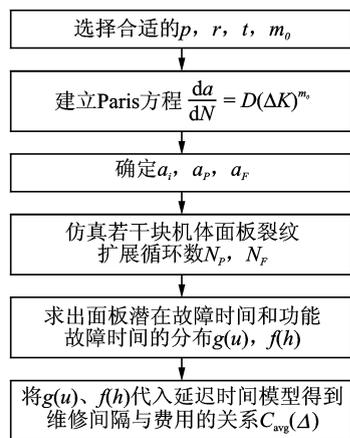


图 5 基于裂纹扩展仿真的维修间隔优化

Fig. 5 Maintenance optimization of crack propagation simulation

表1 7075-T6 材料裂纹参数

Tab. 1 Parameters of crack of 7075-T6 material

参数	单位	类型	数值
初始裂纹长度 $a_i$	mm	定量	0.2
压差 $p$	MPa	随机变量	对数正态分布, 均值 0.06, 标准差 0.003
机体半径 $r$	m	定量	3.25
机体面板厚度 $t$	mm	定量	2.48
Paris 方程参数 $D$	$\text{m}^{1-m_0/2} (\text{MPa})^{-m_0}$	随机变量	$\exp(-3.2m_0 - 12.47)$
Paris 方程参数 $m_0$	量纲一	随机变量	均匀分布, 参数 [3, 4.3]
潜在故障裂纹长度 $a_P$	mm	定量	0.5
功能故障裂纹长度 $a_F$	mm	定量	2.5

应用 Matlab 仿真 100 块面板由完好状态到功能故障状态的裂纹扩展过程。部分仿真数据如表 2 所示。

表2 裂纹扩展仿真数据(部分)

Tab. 2 Simulation data of crack propagation (part)

序号	$p$	$m_0$	$D$	$\sigma$	$N_P$	$N_F$
1	0.065	63.882	9.3996	7e-10	86.010	5 15 557 23 870
2	0.062	33.258	5.2535	7e-10	81.684	5 53 164 92 920
3	0.061	13.002	5.3000	0e-10	80.190	8 60 202 112 009
4	0.059	23.075	2.4888	8e-10	77.655	1 74 935 136 863
5	0.060	63.803	7.3837	1e-10	79.428	1 23 678 36 874
6	0.062	93.422	9.3856	9e-10	82.474	4 29 062 48 936
7	0.063	13.563	2.8470	0e-10	82.698	3 34 223 55 919
8	0.062	73.609	7.1324	8e-10	82.180	8 72 048 116 594
9	0.058	43.535	5.6888	1e-11	76.556	7 230 914 379 499
10	0.063	73.080	7.2442	5e-10	83.520	8 60 753 110 827
11	0.060	33.793	1.2463	0e-10	79.038	3 37 936 59 198
12	0.055	03.369	1.8295	2e-11	72.755	3 216 744 369 348
13	0.062	03.450	2.3434	9e-10	81.274	2 33 462 56 008
14	0.059	03.497	1.9709	9e-10	78.278	9 63 696 105 534
15	0.055	03.481	5.2198	4e-10	73.267	7 72 901 121 198
16	0.059	04.034	3.3611	2e-10	78.096	1 21 966 32 800
17	0.062	03.665	9.4347	6e-10	81.965	8 21 045 33 669
18	0.059	03.344	3.3326	6e-10	77.816	3 43 954 75 322
19	0.060	03.703	5.2269	9e-10	79.803	5 42 993 68 271

仿真的裂纹扩展长度从 0.2 mm 到 0.5 mm 的过程如图 6 所示。从图 6 可以看出不同机体面板的裂纹达到 0.5 mm 时经历循环数不同, 而 0.5 mm 到 2.5 mm 扩展加速。不同面板的裂纹由 0.2 mm 扩展到 2.5 mm 的时间是随机的。裂纹扩展规律符合威布尔分布, 从仿真数据中得到各面板在裂纹达到 0.5 mm 时经历的飞行循环数, 以此求得潜在故障发生时间的数学分布。

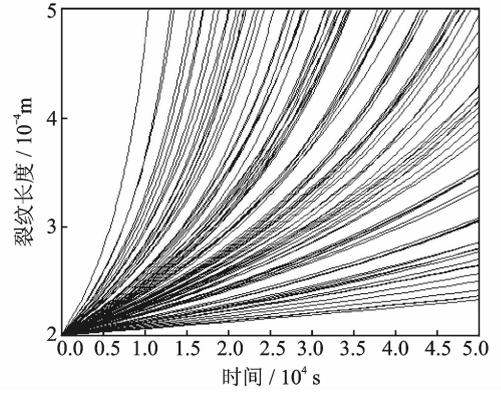


图6 面板的仿真裂纹扩展数据

Fig. 6 Data of crack propagation simulation to fuselage panel

$$g(u) =$$

$$\frac{1.928\ 03}{61\ 908.6} \left( \frac{u}{61\ 908.6} \right)^{0.928\ 03} \exp \left( - \left( \frac{u}{61\ 908.6} \right)^{1.928\ 03} \right) \quad (27)$$

平均潜在故障发生时间  $K$  为 54 911.3 载荷循环。裂纹从 0.5 mm 扩展到 2.5 mm 的潜在故障延迟时间分布如下

$$f(h) =$$

$$\frac{1.662\ 47}{43\ 619.2} \left( \frac{h}{43\ 619.2} \right)^{0.662\ 47} \exp \left( - \left( \frac{h}{43\ 619.2} \right)^{1.662\ 47} \right) \quad (28)$$

平均潜在故障延迟时间  $\bar{h}$  为 38 981.9 载荷循环。假设首检间隔和重检间隔相等, 而根据 Moubray 的经验, 检查间隔为

$$T_M = \bar{h} / 2 \approx 19\ 500 \quad (29)$$

仿真维修间隔的优化范围设为 3 000~38 900 载荷循环, 仿真增量为 100 载荷循环。

(1) 在检出概率  $b$  不同, 检查和维修的费用固定的条件下优化如下。

设  $c_I = 300$  元,  $c_P = 3\ 000$  元,  $c_F = 15\ 000$  元。潜在故障检出概率  $b$  分别设为 1, 0.9 和 0.8。

在 Matlab 仿真环境下  $C_{\text{avg}}(\Delta)$  如图 7 所示。图中: 粗“\*”线为  $b=0.8$  时的维修费用率, 虚线为  $b=0.9$  时的维修费用率, 细直线表示  $b=1$  时的维修费用率。

不同故障检出率下的最低维修费用率及对应检查间隔如表 3 所示。

通过传统可靠性方法确定的检查间隔在检出率分别为 1, 0.9 和 0.8 时的费用为 0.078 8, 0.083 1 和 0.088 5 元/载荷循环。较基于延迟时间模型的

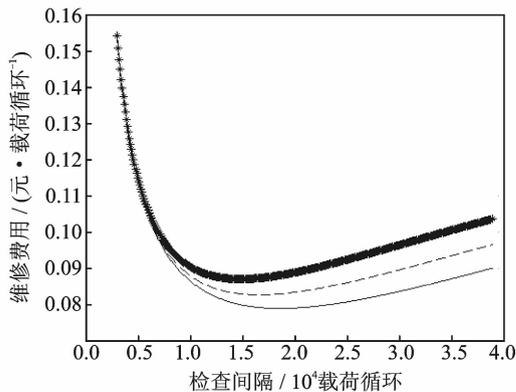


图 7 不同检出率下维修费用

Fig. 7 Maintenance cost in deferent detection rates

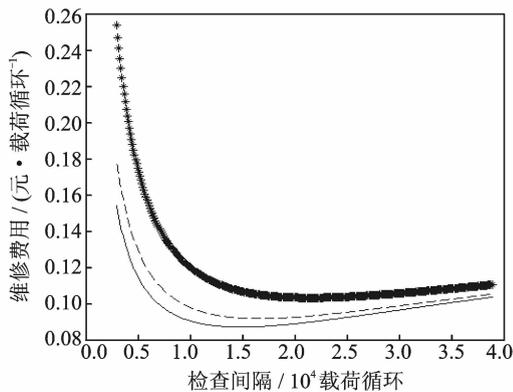


图 8 不同潜在故障检查费用下的维修费用

Fig. 8 Maintenance cost in deferent incipient fault detection cost

表 3 不同潜在故障检出率下的优化结果

Tab. 3 Optimization result in deferent incipient fault detection cost

潜在故障检出率	最低单位时间维修费用/ (元·载荷循环 <sup>-1</sup> )	最优检查间隔/ 载荷循环
$b=1$	0.078 8	17 800
$b=0.9$	0.082 5	16 300
$b=0.8$	0.087 0	13 900

费用率分别高 0%, 0.7% 和 1.7%, 所以随着故障检出概率的降低, 基于延迟时间模型的维修优化模型可以降低维修费用。

(2)  $c_F$  对  $c_P$  的倍数比例相同,  $c_P$  对  $c_I$  的倍数比例不同。

条件 1:  $c_I = c_P/10 = 300$  元,  $c_F = 5c_P = 15 000$  元。

条件 2:  $c_I = c_P/8 = 375$  元,  $c_F = 5c_P = 15 000$  元。

条件 3:  $c_I = c_P/5 = 600$  元,  $c_F = 5c_P = 15 000$  元。

对比如图 8 所示。图 8 中, 粗“\*”线表示  $c_I = c_P/5 = 600$  元时的单位时间维修费用; 细虚线表示  $c_I = c_P/8 = 375$  元时的单位时间维修费用; 细直线表示  $c_I = c_P/10 = 300$  元的单位时间维修费用。

不同潜在故障检查费用下最低单位时间维修费用及对应的最优间隔如表 4 所示。

传统方法确定的检查间隔在  $c_I$  分别设为 300, 375 和 600 元时的维修费用为 0.088 5, 0.092 2, 0.103 3 元/载荷循环。相对于延迟时间模型, 对应的最优检查间隔的费用分别高 1.7%, 0.6%,

表 4 不同潜在故障检查费用下的优化结果

Tab. 4 Optimization result in deferent incipient fault detection cost

潜在故障 检查费用/元	最低单位时间 维修费用/ (元·载荷循环 <sup>-1</sup> )	最优检查 间隔/ 载荷循环
$c_I = c_P/10 = 300$	0.087 0	13 900
$c_I = c_P/8 = 375$	0.091 6	16 000
$c_I = c_P/5 = 600$	0.103 1	20 400

0.2%, 可见经过延迟时间模型优化的维修决策可以降低维修费用。当潜在故障维修费用相对于其检查费用增大, 单位时间维修费用增大, 最优检查间隔减小。

## 5 结束语

当前, 视情维修决策理论广泛应用于民用飞机维修优化过程中。本文提出的基于时间延迟模型的维修决策方法, 应用于仿真的民航结构件一机体面板维修优化决策中, 通过该算例证明了延迟时间模型的工程应用价值, 为视情维修优化决策方法研究提供了一个有效途径。

## 参考文献:

[1] Moubray J. 以可靠性为中心的维修[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.  
Moubray J. Reliability centered maintenance [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1995.

[2] 杨绪, 张萍, 赵红华, 等. 视情维修理论综述及其在航空发动机维修管理中的应用[J]. 江苏航空, 2006 (1): 18-20.

- Yang Xu, Zhang Ping, Zhao Honghua, et al. Review on the theory of visual maintenance and its application in the maintenance and management of aviation engine [J]. *Jiangsu Aviation*, 2006(1): 18-20.
- [3] 张海军. 民航发动机性能评估方法与视情维修决策模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- Zhang Haijun. Study on the performance evaluation method of civil aviation engine and the decision model of maintenance decision [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [4] 蔡景, 左洪福, 王华伟. 基于经济相关性的复杂系统维修优化模型研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(5): 835-838.
- Cai Jing, Zuo Hongfu, Wang Huawei. Study on optimal model of complex systems with economic dependency [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(5): 835-838.
- [5] 吕德峰, 左洪福, 蔡景. 基于功能检测的备用系统维修优化研究[J]. *航空学报*, 2009, 30(4): 660-665.
- Lv Defeng, Zuo Hongfu, Cai Jing. A Study on optimal maintenance of standby system's function inspection [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(4): 660-665.
- [6] Cai Jing, Zuo Hongfu, Zhu Lei. Delay-time model based on imperfect inspection of aircraft structure with infinite time span [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 29(2): 159-163.
- [7] 蔡景, 左洪福, 王华伟. 基于成本的民用航空发动机维修方案优化研究[J]. *机械科学与技术*, 2007, 26(2): 167-171.
- Cai Jing, Zuo Hongfu, Wang Huawei. Optimization of maintenance plan for civil aviation engine based on cost. [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2007, 26(2): 167-171.
- [8] 左洪福, 张海军, 戎翔. 基于比例风险模型的航空发动机视情维修决策[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(4): 716-721.
- Zuo Hongfu, Zhang Haijun, Rong Xiang. Maintenance decision of aviation engine based on proportional hazard model [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(4): 716-721.
- [9] 赵建民. 两阶段功能检查模型研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(12): 49-51.
- Zhao Jianmin. Research on the two phase function check model [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(12): 49-51.
- [10] 吕文元. 时间延迟维修理论在制定设备维修计划中的应用[J]. *中国设备工程*, 2006, 10(9): 19-23.
- Lv Wenyuan. Application of time delay maintenance theory in the development of equipment maintenance plan [J]. *China Plant Engineering*, 2006, 10(9): 19-23.