

某型飞机维修备件储备量决策分析

王强¹, 白文科², 史超¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军装备部, 北京 100859)

摘要:结合某型飞机改型的实际情况,依据装备维修可靠性理论和维修决策理论对该型飞机维修备件的储备量进行了科学地分析,确定了该型飞机的维修备件储备量的计算模型和方法。

关键词:维修备件;储备量;决策分析

中图分类号:V271.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)04-0009-04

维修备件决策是确定装备使用和维修所需备件的数量和品种,并研究它们的筹措、储运、供应等问题的管理与技术活动^[1]。通过对某系列飞机资料统计的分析可知,在该种飞机的寿命周期中维修所需的备件费用约占整个维修费用的50%~60%。为保证该型飞机装备后在使用与维修中所需的备件能得到及时和充分的供应,而且尽量使备件的库存费用降至最低,有必要对其维修备件进行决策分析。

1 维修备件储备量决策

维修备件的储备量与飞机(或系统、部件)的可靠性和维修性有关^[2]。根据该机的使用经验,系统(或部件)的寿命分布和维修时间分布一般都服从指数分布,而且其主要维修备件类型有不可修复备件和可修复备件两种。因此,在该机备件储备量决策中,假设寿命分布和维修时间分布服从指数分布,主要按可修复和不可修复两种类型的维修备件进行决策^[3]。

1.1 不可修复备件的储备量

为了及时修复故障装备,换件修理是经常采用的既快速又较简便的方法。如果将飞机和备件加在一起看成是装备系统,换下的失效件不再修复,换件的时间和备件储备期间备件的故障率忽略不计,则飞机相当于一个冷储备系统。设飞机上某一系统的某个易损件失效,则装备失效,立即用备件更换,共有 n 个备件, n 个备件全部失效后系统失效(故障)。

假设该 $n+1$ 个易损件的寿命为随机变量 T_0, T_1, \dots, T_n 。其中, T_0 为飞机上在用的机件。该系统的总寿命 $T = T_0 + T_1 + \dots + T_n$ 。其任务可靠度为 $R_n(t) = P(T_0 + T_1 + \dots + T_n > t)$ 。由于随机变量是相互独立的,所以系统的寿命分布的密度函数 $f_n(t)$ 是 $n+1$ 个机件寿命分布的密度函数 $f_i(t)$ 的卷积积分,即

$$f_n(t) = f_0(t) * f_1(t) * \dots * f_n(t) \quad (1)$$

1.1.1 单个备件的情况

该机维修备件储备量决策中,机件寿命分布为指数分布。由式(1)可得单个备件时该系统的寿命分布密度函数为

$$f_n(t) = \int_0^t \lambda_0 e^{-\lambda_0(t-x)} \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} dx = \lambda_0 \lambda_1 \frac{e^{-\lambda_0 t} - e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1 - \lambda_0} \quad (2)$$

因而系统的可靠度和平均寿命分别为

$$R_s(t) = \int_0^\infty \lambda_0 \lambda_1 \frac{e^{-\lambda_0 x} - e^{-\lambda_1 x}}{\lambda_1 - \lambda_0} dx = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_0} e^{-\lambda_0 t} + \frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \quad (3)$$

$$\bar{T}_s = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{\lambda_1} \quad (4)$$

1.1.2 n 个备件的情况

当 n 个备件寿命分布都是故障率为 λ 的指数分布时,可用数学归纳法证明系统的可靠度与平均寿命分别为

$$R_s(t) = [1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^n}{n!}]e^{-\lambda t} = \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \tag{5}$$

$$\bar{T}_s = \frac{1+n}{\lambda} \tag{6}$$

1.1.3 飞机上需 L 个该元件同时工作情况

由于每个元件的可靠度是 $e^{-\lambda t}$, L 个元件同时工作时系统才工作,这样 L 个元件的系统可靠度为 $e^{-L\lambda t}$ 。若飞机上任一该元件失效,立即以备件更换,所以这时系统的可靠度仍为 $e^{-L\lambda t}$,直到 n 个备件用完。连同备件加在一起,飞机上该系统的可靠度和平均寿命分别为

$$R_s(t) = \sum_{k=0}^n \frac{(L\lambda t)^k}{k!} e^{-L\lambda t} \tag{7}$$

$$\bar{T}_s = \frac{1+n}{L\lambda} \tag{8}$$

1.1.4 备件储备量的确定

在确定该机不可修复备件储备数量时,主要是采用了式(7)和式(8)的两种方法。若以飞机(或分系统)可靠度为目标(一般由使用方和承制方共同确定可靠性目标值),确定备件储备量,可在给定装备系统可靠度后由式(7)反算出;若给定飞机执行任务时间(由使用方根据飞机使用经验确定),求备件最低储备量,可由式(8)计算。

1.2 可修复备件的储备量

飞机在工作过程中会出现一种情况就是:飞机上有一易损零部件,另有 n 个可修复备件备份。如果零部件在工作时故障率为 λ ,换下来后立即进行修复,并设故障备件只能一个个的依次修复,其修复率为 μ ,换件时间不计,备件储备期间故障率为 $0^{[4]}$ 。

1.2.1 首次出现缺备件的平均时间

对于上述有 n 个备件的系统,有 $n+1$ 个状态,用 $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$ 来表示。 S_0 表示工作的元件正常, n 个备件全部完好作冷储备旁待; S_1 表示 1 个备件在修,其余 $n-1$ 个备件完好旁待; S_2 表示 1 个备件在修,1 个备件待修,其余 $n-2$ 个备件完好旁待……; S_n 表示仅是工作元件正常工作,其余 n 个备件除一个在修外都处于待修状态。其状态转移图见图 1。

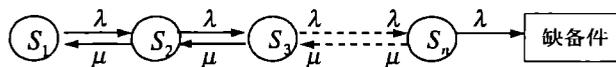


图 1 可修复备件系统状态转移图

处于 S_i 状态的系统可能因为故障而转移到 S_{i+1} 状态,也可能因为备件的修复而转移到 S_{i-1} 状态,其状态转移概率分别为 λ 和 μ 。系统处于状态 S_i 的停留时间的均值记为 T_i ,则系统出现缺备件事件前时间的均值 \bar{T} 为

$$\bar{T} = \sum_{i=0}^n T_i \tag{9}$$

显然,系统由状态 S_i 向 S_{i+1} 状态转移次数的均值应为 λT_i ;而向 S_{i-1} 状态转移次数的均值应为 μT_i 。对于 S_n 状态向缺备件事件转移一次即出现缺备件事件,故有

$$T_n = \frac{1}{\lambda} \tag{10}$$

尽管备件的修复率常大于故障率($\mu > \lambda$),即平均故障间隔时间常大于平均故障修复时间,但这只是随机事件的平均值,并不排除备件尚未修复时,新故障又发生的事件,因此会出现缺备件事件。此情况用状态转移来描述,即由状态 S_i 转移到状态 S_{i+1} 的次数比由状态 S_{i+1} 转移到状态 S_i 的次数多一次,即

$$\lambda T_i - \mu T_{i+1} = 1 \tag{11}$$

$$T_i = \frac{1}{\lambda} + \frac{\mu}{\lambda} T_{i+1} = T_n + K T_{i+1} \tag{12}$$

式中, $K = \frac{\mu}{\lambda}$ 为修复比。因此,可通过式(10)算出 T_n ,再通过式(12)依次计算出 $T_i (i = 0, 1, 2, n, \dots)$,最后由式(9)算出 \bar{T} 。

当 n 很多时,计算比较。在进行该机维修备件决策中,通过对以上各式的推导,得到系统首次出现缺备事件时间的平均值

$$\bar{T} = \sum_{i=0}^n T_i = \sum_{i=0}^n \left(\frac{K^{i+1} - 1}{K - 1} \right) T_n = \frac{T_n}{K - 1} \sum_{i=0}^{n+1} T_i (K_i - 1) = \frac{T_n}{K - 1} \left(\sum_{i=0}^{n+1} K^i - n - 2 \right) = \frac{T_n}{K - 1} \left[\frac{K^{n+2} - 1}{K - 1} - (n + 2) \right] \quad (13)$$

1.2.2 已知首次缺备事件时间确定备件最低储备量

根据式(13),已知 \bar{T} 可以反算出 n 。但此式的首次缺备事件时间是期望值,系统工作到此时间可靠度只有 36.7%。因此用式(13)确定的备件量是最低的备件储备量,即是装备执行一段时间的任务,不出现缺备事件的最低备件储备量。直接用式(13)求备件储备量,计算较困难。在该机的维修备件决策中,经过分析,分三种情况求解。

1) $K \approx 1$ 时。当 $K = 1$ 时,式(10)可写为 $T_i = (n - i + 1) T_n$,于是有

$$\bar{T} = \sum_{i=0}^n T_i = [1 + 2 + 3 + \dots + (n + 1)] T_n = \frac{1}{2} (n + 1) (n + 2) T_n \quad (14)$$

可见,在 $K = 1$ 时,每增加一个备份件,首次出现缺备事件时间的均值将增加一个 $(n + 2) T_n$ 值。已知 \bar{T} 求 n ,由式(14)可得一元二次方程 $n^2 + 3n - 2\lambda\bar{T} + 2 = 0$ 。得到一个正根为

$$n = \frac{-3 + \sqrt{9 + 8(\lambda\bar{T} - 1)}}{2} \quad (15)$$

在 $K \approx 1$ 时,可先令 $K = 1$,用上式求出 n 的第一个近似解 n_1 。然后根据此 n_1 值,利用式(13)求 n 的第二个近似值 n_2 ,即

$$\left. \begin{aligned} \bar{T} &= \frac{T_n}{K - 1} \left[\frac{K^{n_2 + 2} - 1}{K - 1} - (n_1 + 2) \right] \\ \lambda\bar{T}(K - 1)^2 &= K^{n_2 + 2} - (n_1 + 2)(K - 1)^{-1} \\ n_2 &= \frac{\lg[\lambda\bar{T}(K - 1)^2 + (n_1 + 2)(K - 1) + 1]}{\lg K} - 2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

如果算出的 n_2 与 n_1 值相差较小(小于 1),二者中较大的即是要求的备件量 n ;如果算出的 n_2 与 n_1 值相差甚大,可用 n_2 代替式(16)中的 n_1 ,进一步求第三近似解 n_3 ,直到 n_i 与 n_{i+1} 之差小于 1,取较大者作为所要求的 n 。

2) $K > 1$ 时。当 $K > 1.5$ 时,若 n 也较大则 $K^{n+2} \gg 1$,式(11)中的 $(n + 2)$ 项可以忽略,近似的写为

$$\left. \begin{aligned} \bar{T} &= \frac{T_n}{(K - 1)^2} (K^{n+2} - 1) \\ \lambda\bar{T}(K - 1)^2 &= K^{n+2} \\ n &= \frac{\lg[\lambda\bar{T}(K - 1)^2 + 1]}{\lg K} - 2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

用上式算出备件量 n 的第一次近似值 n_1 后,与 $K \approx 1$ 时的计算方法相同,再用式(16)求近似解 n_2, n_3, \dots 直到相邻近似解之差小于 1,取其中大者为所求的备件量 n 。

3) $K < 1$ 时。若 K 值较小, n 值较大,以致 $K^{n+1} \ll 1$ 。式(13)可近似写成

$$\bar{T} = \frac{T_n}{1 - K} \left(n + 2 + \frac{1}{K - 1} \right) \quad (18)$$

即每增加一个备件量,首次出现缺备事件时间将增加一个不大的值 $T_n / (1 - K)$ 。故此时应着重考虑提高备件修复率。由式(18)有

$$n = \left[\lambda\bar{T}(1 - K) + \frac{1}{1 - K} \right] - 2 \quad (19)$$

在 $K < 1$ 时,由式(19)先求出备件量第一近似解 n_1 ,以后的步骤与前面的一样,用 n_1 值代入式(16),逐次求近似解 n_2, n_3, \dots 直到相邻近似解之差小于 1,取其中大者为所求的备件量 n 。

1.2.3 以保证系统任务可靠度为目标,确定备件储备量

系统在执行重要任务时,要确保其任务可靠,以系统的任务可靠度为目标,确定备件的储备量,这里的系

统是飞机和备件的总体。在该机的维修备件储备量决策中,总是把系统的寿命分布看成是指数分布,那么系统首次出现缺备件事件的均值 \bar{T} 与系统任务可靠度 $P(t)$ 的关系

$$P(t) = e^{-t/\bar{T}} \quad (20)$$

式中 t 是系统执行任务的时间。若以保证系统在 t 时间内执行任务的可靠度为目标,计算备件储备量,可先由式(20)算出系统首次出现缺备件时间的均值,再按上面的方法求备件储备量。

2 结束语

通过以上方法,对该机的维修备件储备量进行了决策,在决策中,同时也注意到该机进口备件数量大、价格昂贵,要根据备件的价格考虑经费限额和备件量的可能性。通常,对于平时完成训练任务的备件要求,可多从经济性上考虑,尽量减少维修费用的开支,如取最少的备件量,降低系统可靠度要求;或者适当地增加采购周期,加快备件的周转利用,减少备件积压的费用。对于作战等重要任务,则充分考虑系统完成任务的可靠性。总之,该机的维修备件决策是一个复杂的多目标决策,需要综合权衡和综合分析。

参考文献:

- [1] 徐绪森. 装备维修决策技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1991.
- [2] 陈学楚. 维修基础理论[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [3] 梁海斌. 军械维修器材保障管理学[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [4] ROSS S M. Applied Probability Models with Optimization Application[M]. Holden - Day,1970.
- [5] PAUL R. Decision Sciences: An Integrative Perspective[M]. Cambridge University Press,1993.
- [6] WANG Q. Information Fusion in Supportability Assessment of Aeronautic Materiel[A]. The International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, Dalian China,2001.

(编辑:姚树峰)

The Decision - making Analysis of the Deposited Quantity of Maintenance Spare Parts on a Certain Type Aircraft

WANG Qiang¹, BAI Wen - ke², SHI Chao¹

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China; 2. Air Force Materiel Command, Beijing 100859, China)

Abstract: On the basis of the concrete modification of a certain type of aircraft, this paper presents a scientific analysis of the maintenance spare part reserve quantity of the aircraft according to the theory of equipment maintenance reliability and the maintenance decision - making theory, and determines the calculating models and method of the maintenance spare part reserve quantity.

Key words: maintenance spare part; reserve quantity; decision - making analysis