

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-08

# 飞机预防性维修任务间隔优化模型与方法研究

南雁飞<sup>1</sup>, 张金涛<sup>2</sup>, 林聪<sup>1</sup>, 靳勇<sup>1</sup>, 吕琦<sup>3</sup>

(1. 中国航空综合技术研究所 装备服务产品部, 北京 100028)

(2. 武警部队装备部 军代局五室, 北京 100161)

(3. 北京卫星制造厂有限公司 复材产品制造中心, 北京 100094)

**摘要:** 飞机维护规程中规定了飞机部队级维护涉及的所有预防性维修任务, 在飞机服役初期, 维修任务的制定通常偏保守, 随着飞机使用和维护经验的积累, 维修任务间隔优化的需求越来越明显。以服役数据为分析对象, 以系统可靠性为衡量标准, 构建预防性维修任务间隔优化分析方法, 形成可实现的数学模型; 以某维修任务为案例, 对其服役数据进行分析, 并给出维修间隔优化的建议。结果表明: 该方法和模型正确可行, 可作为军用飞机维修任务间隔优化分析的参考。

**关键词:** 间隔优化; 服役数据; 维护规程; 预防性维修; 军用飞机

中图分类号: V37

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research of Preventive Maintenance Task Interval Optimization Model and Method of Aircraft

NAN Yanfei<sup>1</sup>, ZHANG Jintao<sup>2</sup>, LIN Cong<sup>1</sup>, JIN Yong<sup>1</sup>, LYU Qi<sup>3</sup>

(1. Department of Equipment Services, China Aero-polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

(2. Fifth Office of Military Representative Bureau, Armed Police Equipment Department, Beijing 100161, China)

(3. Composite Product Manufacturing Center, Beijing Satellite Manufacturing Factory Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** Aircraft maintenance order specifies all preventive maintenance tasks involved in aircraft basic level maintenance. During the beginning of aircrafts' service, the maintenance tasks are intended to be conservative. With the accumulation of aircraft use and maintenance experience, the demand for optimization of maintenance task interval is becoming more and more obvious. Taking the service data as the analysis object and the system reliability as the measurement standard, this paper constructs the optimization analysis method of preventive maintenance task interval and forms a realizable mathematical model. Taking a maintenance task as an example, this paper analyzes its service data, and gives suggestions on maintenance interval optimization. The example has proved the feasibility of the mathematical method and model which can be used as a reference for military aircraft maintenance task interval optimization analysis.

**Key words:** interval optimization; in-service data; maintenance technical order; preventive maintenance; military aircraft

收稿日期: 2022-07-04; 修回日期: 2022-11-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(72131002)

通信作者: 林聪, linc002@avic.com

引用格式: 南雁飞, 张金涛, 林聪, 等. 飞机预防性维修任务间隔优化模型与方法研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(X): 1-8.

NAN Yanfei, ZHANG Jintao, LIN Cong, et al. Research of Preventive Maintenance Task Interval Optimization Model and Method of Aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(X): 1-8. (in Chinese)

## 0 引言

安全飞行是军用飞机的基本要求,在战训强度越来越大的环境下保持飞行安全水平不仅要求飞机各系统和部件的可靠性应足够高,对飞机的维修保障工作也提出了更高的要求。军用飞机的维修保障主要依据飞机维护规程来执行,飞机维护规程中规定了飞机的日常机务准备工作(含飞行前检查、再次飞行前检查、飞行后检查)、周期性工作和定期检修等预防性维修任务的工作内容、维修间隔、技术要求和操作程序。维修任务是勤务、检查、测试、更换和报废等各类维修工作的统称,因此维修任务的维修间隔也指检查和测试的间隔,本文统一表述为维修间隔。维护规程是依据飞机维修大纲、飞机技术资料 and 机载设备技术资料等技术文件,结合试飞数据以及相似型号的实际维护经验编写的,是直接用于维护飞机的实施文件,要求机务人员在使用和维护过程中必须严格遵守操作程序,以保障飞机的战备完好性。

维护规程中维修任务的确定主要依据 RCM 分析方法,航空领域使用最广泛的 RCM 规范为 MSG-3 和 S4000P。MSG-3 以可靠性为维修中心的思想采取“自上而下”的故障结果分析逻辑方法进行维修任务的确定,以保持系统固有的可靠性水平<sup>[1]</sup>。S4000P 的分析逻辑与 MSG-3 相似,但在细节上有所差异(如故障影响分类),而且 S4000P 规范应用范围更加广泛,涉及航空、舰船、装甲车、导弹、武器系统等多个领域<sup>[2]</sup>。通常情况下,装备在积累了充足的服役数据后,会通过数据分析的手段探索维修任务优化的潜力,提高飞机的维修保障效能,使维修工作更加科学有效、安全可靠<sup>[3]</sup>。因此,为实现预防性维修任务的动态调整,S4000P 还提供了在役维修任务优化的分析流程,用于指导用户开展服役数据的分析,以优化当前维修任务,保持维修任务的适用性和有效性。在维修任务优化方面,国内外开展了一些研究。李军亮等<sup>[4]</sup>梳理了基于可用度的可修装备预防性维修间隔优化的现状;蔡景等<sup>[5]</sup>基于成组维修策略提出了民用飞机成组维修方案的优化模型,以优化维修任务间隔和维修费用;周伽等<sup>[6]</sup>建立了基于维修成本的飞机附件预防性维修间隔的优化模型;王瑞琦等<sup>[7]</sup>构建了基于可靠性约束的大规模系统全生命周期成本优化模型;R. Assis 等<sup>[8]</sup>采用威布尔模型来描

述因磨损而失效的关键部件的最佳检测时间;林聪等<sup>[9]</sup>提出了以维修任务检查出故障的概率为度量指标的维修间隔优化方法;陈浩等<sup>[10]</sup>提出一种基于状态的多部件非周期预防性维修计划的优化方法。上述研究从不同角度通过定量分析得到维修任务或维修间隔的优化建议。虽然 S4000P 等标准给出了维修任务优化的流程和需考虑的因素,国内外研究人员针对以可靠性为中心的维修理论也积累了一定的研究成果,并提出了一些优化的理论方法,但这些方法在操作性和适用范围上还存在一定的局限性。

本文针对实际数据在不同数据分布假设下进行拟合优度检验后确定最佳数据分布类型,然后以可靠度为度量指标,并考虑用户工作实际,给出最佳维修间隔。

## 1 飞机维护规程的优化需求

飞机维护规程在初始版本制定时,由于缺少充足的服役数据,预防性维修任务的制定普遍倾向于保守,而且维护规程交付部队后,维护规程很少有大规模的修订,因此当前维护规程中同时存在过维修和欠维修两种情况。虽然过维修由于维修间隔较短,能够有效降低设备出现故障的几率,但频繁的预防性维修活动大大减少了飞机的使用时间,降低了飞机使用可用度,而且也增加了飞机维修费用;而欠维修由于设备维修间隔太长,预防工作没做到位,导致设备故障率过高。飞机维护规程的这两种情况都对飞机的完好率水平造成了负面影响,造成这种现状的原因主要有以下三点:

### (1) 飞机维护规程缺少动态优化机制

军用飞机交付时的维护规程严格意义上只能作为初始状态投入使用(即使某些装备经过了未正式交付前的小批量试用),军用飞机交付后,随着使用和维护经验的积累,维修任务的优化潜力越来越明显,如果依然按照原维护规程实施维修,无疑会造成维修资源的巨大浪费。但实际上,由于缺少对维护规程的动态优化机制,飞机维护规程在交付后相当长的时间内都未得到有效的调整。另一方面,飞机维护规程由研制单位设计人员制定,而设计人员往往缺乏维护经验,容易导致提出的维修要求出现偏差,部队技术人员拥有丰富的维护经验,可以为维修任务的优化提供宝贵建议,但无权对维护规程作出修改,双方的协作机

制尚未建立,以至维修任务的调整比较困难,维修任务优化建议难以落实。

### (2) 缺少有效的维修任务优化方法和流程

在军用飞机服役过程中累积了足够的服役数据后,应通过科学的数据分析为维修任务的优化提供理论依据,再结合维修技术人员的工程分析确认,将优化后的维修任务在部分军用飞机中开展试用,验证优化后规程的可行性,多轮迭代后,升版维护规程中的相关内容,在型号中全面施行。目前虽然 GJB 1378 引进了先进的以可靠性为中心的维修思想,给出了军用飞机制定维修任务时的要求、方法和程序,但缺少军用飞机服役期间维修任务的优化分析的流程和方法,国内虽然有部分学者在该领域进行了一些研究,但都不成体系,未形成标准或操作性强的指南,无法系统性的为军用飞机的维修任务优化提供流程和方法,目前研制单位确定维修任务内容和间隔期时仍然只能依靠相似型号研制经验,并且很长一段时期内维修任务的调整幅度有限。

### (3) 同类产品的经验数据未得到充分利用

很多新型号都是在老型号的基础上做了某些改装升级后产生的,有很大一部分产品是继承原型号的,因此新型号在制定维修任务时可充分借鉴原型号中相关产品的服役数据。而实际工作中,新型号维修任务的制定很少考虑相关产品的服役数据,其间隔框架与老型号差异很小,同类产品的经验数据未得到充分利用。

总体来说,由于缺少维护规程持续优化的机制和方法,军用飞机维护规程在交付后修订深度有限。但随着服役时间的累积和服役数据的积累,飞机的可靠性水平逐渐趋于平稳,有必要开展预防性维修任务的评估与分析,在保证飞机安全性和可靠性的前提下优化维修任务,使维护规程更加科学合理、飞机更加安全可靠,其中维修间隔的调整是最主要、最有效的优化措施。本文从系统可靠度的角度出发,研究维修任务间隔优化模型,使飞机维护规程中维修任务间隔的设置更加科学合理,进一步提高飞机的可靠度和可用度。

## 2 维修间隔优化数学模型

在飞机投入使用一定时间之后,积累了大量的服役数据,其中包括定期检修的数据和故障数据,这些数据梳理后可作为维修间隔优化调整的

最直接最有力的输入和依据。本文提出的方法是针对系统或部件的服役数据,用平均秩次法得到经验分布函数,然后用最小二乘法拟合出最优的数据分布曲线,并推导出相关参数随使用时间的变化规律,进而得到可靠度与调整维修间隔的关联关系,结合型号可靠度要求,即可得到最优的维修间隔。在维修任务优化决策过程中,以系统或部件的可靠度为约束条件,优化建议必须以达到预期的可靠度为前提;以该系统或部件的故障影响为决策变量,针对不同级别的影响匹配对应的可靠度水平;本文假设待优化的维修任务的维修内容和检查范围无需调整,优化目标是通过定量分析得到最优的维修间隔,使维修人员以最小的维修投入确保系统或部件达到可接受的可靠度水平。

### 2.1 数据采集模型—随机截尾试验

服役数据的收集类似于截尾试验的数据收集,截尾试验分为定数截尾试验、定时截尾试验和随机截尾试验。其中,随机截尾试验是指产品进行可靠性试验时,部分产品做到了寿终,而一些产品由于种种原因中途撤离了试验,未做到寿终或试验终止,也就是说随机截尾试验数据中包括了一些产品的故障时间和另一些产品的无故障工作时间,即删除样品的撤离时间(删失数据)<sup>[11-12]</sup>。由于飞机服役过程中遇到部件更换的情形较复杂,因此随机截尾试验最适合描述服役数据的收集和记录。服役数据分为两部分,一部分是部件的故障数据,相当于随机截尾试验中产品的故障时间;另一部分是尚未故障的部件的使用数据,相当于随机截尾试验中的删失数据。

### 2.2 经验分布函数—平均秩次法

对于一组数据,为确定其近似的数据分布函数表达式,应首先定义该组数据对应的经验分布函数。对于完全寿命试验的样本数据,可按其故障时间的大小排列成一组顺序统计量,其中每一个产品的失效时间(或寿命值)都有一个顺序号,此顺序称为秩次<sup>[13]</sup>。而对于随机截尾试验的样本数据,试验过程中终止的产品,不能确定其失效的具体时间,但能够给出其所有可能的秩次,并求出平均秩次,最后将平均秩次代入近似中位秩公式,即可求出其经验分布函数<sup>[14]</sup>。



统计学家给出了一个计算平均秩的增量公式:

$$\Delta A_k = \frac{n+1-A_{k-1}}{n-i+2} \quad (1)$$

$$A_k = A_{k-1} + \Delta A_k = A_{k-1} + \frac{n+1-A_{k-1}}{n-i+2} \quad (2)$$

式中:  $A_k$  为失效产品的平均秩次, 下标  $k$  代表其顺序号;  $i$  为顺序号为  $k$  的失效产品在所有产品排列时的顺序号<sup>[15]</sup>。

将平均秩次代入近似中位秩公式

$$F_n(t_j) = \frac{j-0.3}{n+0.4} \quad (3)$$

则得到随机截尾试验的样本数据的经验分布函数为

$$F_n(t_k) = \frac{A_k-0.3}{n+0.4} \quad (4)$$

### 2.3 数据分布模型

在航空领域, 常用的故障分布模型有指数分布、正态分布、对数正态分布以及威布尔分布, 不同的分布适用于描述不同产品特征。其中, 指数分布主要适用于复杂设备; 正态分布适用于结构的疲劳和腐蚀; 对数正态分布适用于金属疲劳寿命分析等; 威布尔分布主要适用于机电件<sup>[16]</sup>。

在这四种数据分布中, 威布尔分布在可靠性领域有着重要广泛的应用, 其分布函数如式(5)所示:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

其有三个参数, 形状参数  $\beta$  影响分布的概率密度函数形状, 通过调整其形状参数的值可以得到不同的分布; 尺度参数  $\eta$  影响分布函数的均值和广度, 即离散度。威布尔分布中形状参数对失效率和可靠度的影响较为复杂, 其关系如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

表 1 不同形状参数的影响

Table 1 Influence of different shape parameters

形状参数	失效率性质	特点
$0 < \beta < 1$	失效率下降	使用早期失效率高, 之后失效率降低
$\beta = 1$	失效率不变	指数分布
$1 < \beta < 2$	失效率增加	失效率曲线呈凹函数特性
$\beta = 2$	失效率增加	失效率曲线为直线
$\beta > 2$	失效率增加	失效率曲线呈凸函数特性, 形状参数位于区间[3-4]时, 近似正态分布特性

另外, 由于威布尔分布与其他分布关系比较密切, 且不同的形状参数的取值可表征不同产品的特性, 因此它对各种类型寿命数据的适应能力较强, 其应用也较广泛。

### 2.4 数据拟合方法—最小二乘法

对产品的服役数据进行统计后, 需针对数据特点为其匹配合适的数据分布模型, 并对分布模型的表达式中各参数进行估计。在众多估计方法中, 最小二乘法精确度高, 且适用范围较广, 适用于指数分布、正态分布、对数正态分布、威布尔分布等多种分布, 同时最小二乘法的实现便于计算机编程求解, 因此本文选用最小二乘法对数据分布的参数进行估计。

设在  $x$ - $y$  坐标系中, 自变量  $x$  与变量  $y$  对应的  $n$  个数据的观测值为  $\{x_i, y_i\} (i=1, 2, \dots, n)$ , 要求匹配出一条直线(即回归直线)

$$y = a + bx \quad (6)$$

使得该直线与各点  $\{x_i, y_i\}$  的偏差平方和最小, 这就是最小二乘估计法的基本思想。其中,  $a$  和  $b$  为回归系数。回归直线与观测值的垂直偏差记为

$$\delta_i = y_i - (a + bx_i) \quad (7)$$

令  $E$  代表垂直偏差平方和, 则

$$E = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (8)$$

用最小二乘法尝试对数据按 3.3 节中不同数据分布模型进行拟合, 通过对比相关系数的大小, 选择最优的数据分布类型。各数据分布类型构建的线性方程式和估计结果关系如表 2 所示。

最小二乘法的实现借助数学工具 Matlab 软件, 以服役数据为输入, 通过 Matlab 拟合, 得到最优的数据分布模型及其参数, 进而推导出可靠度函数和失效率函数随时间的变化规律, 在可靠度可接受的范围内确定最佳维修间隔。一般地, 对于影响装备安全的系统或部件, 其可靠度应高于 0.9; 影响任务执行的系统或部件, 其可靠度应高于 0.8; 影响经济性指标的系统或部件, 其可靠度应高于 0.7。

由此, 对应上述拟合方法得到的可靠度曲线, 结合军用飞机整体维修间隔框架的设置, 考虑维修对象故障影响程度, 即可找到最适合该维修对象的维修间隔, 即达到维修间隔优化的目的。另

外需要提到的是,维修间隔的优化有两种模式,一种是在原维修间隔框架不变的情况下分析各项维修任务间隔是否有优化的需求和潜力(即本文所研究的范畴),另一种是先确定一个预计的优化后的维修间隔框架,再对所有维修任务进行分析,为其赋予合适的维修间隔。

表2 不同数据分布类型构建的线性方程  
Table 2 Linear equation constructed by different data distribution types

分布类型	线性方程式	回归直线方程	估计结果
指数分布	$y_i = \ln \left[ \frac{x_i = t_i}{1 - F_n(t_i)} \right]$	$y = b_1 x$	$\hat{\lambda} = b_1$
正态分布	$\begin{cases} x_i = Z_i = \Phi^{-1}[F_n(t_i)] \\ y_i = t_i \end{cases}$	$y = a_2 + b_2 x$	$\begin{cases} \hat{\mu} = a_2 \\ \hat{\sigma} = b_2 \end{cases}$
对数正态分布	$\begin{cases} x_i = Z_i = \Phi^{-1}[F_n(t_i)] \\ y_i = \ln t_i \end{cases}$	$y = a_3 + b_3 x$	$\begin{cases} \hat{\mu} = a_3 \\ \hat{\sigma} = b_3 \end{cases}$
威布尔分布	$y_i = \ln \left[ \ln \left[ \frac{x_i = \ln t_i}{1 - F_n(t_i)} \right] \right]$	$y = a_4 + b_4 x$	$\begin{cases} \hat{\beta} = b_4 \\ \hat{\eta} = \exp \left( -\frac{a_4}{b_4} \right) \end{cases}$

### 3 应用案例

通过对某机队连续数年的服役数据进行梳理和统计,得到防冰系统中压力调节关断活门的故障数据10个(该处数据非真实数据,但数量级与真实数据相当):1 178.84, 332.57, 492.74, 868.74, 697.68, 1 117.16, 552.95, 887.08, 938.74, 222.07; 删失数据21个:1 669.16, 1 599.38, 1 661.31, 467.54, 1 349.28, 1 560.05, 608.40, 841.41, 327.85, 488.70, 1 407.47, 1 461.62, 957.97, 197.67, 970.36, 602.82, 681.44, 702.44, 321.21, 564.17, 300.25。

运用上文的方法对压力调节关断活门的数据进行拟合分析,最终给出最优维修间隔建议。

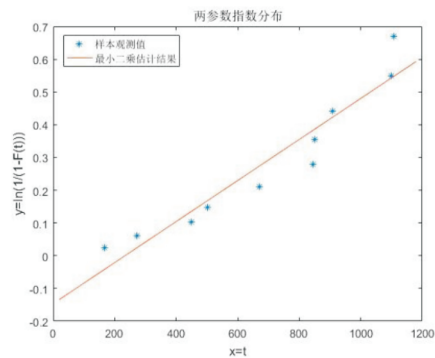
对故障数据和删失数据合并排序得到:197.67, 222.07, 300.25, 321.21, 327.85, 332.57, 467.54, 488.70, 492.74, 552.95, 564.17, 602.82, 608.40, 681.44, 697.68, 702.44, 841.41, 868.74, 887.08, 938.74, 957.97, 970.36, 1 117.16, 1 178.84, 1 349.28, 1 407.47, 1 461.62, 1 560.05, 1 599.38, 1 661.31, 1 669.16。故障数据在总序列中的顺序号分别为2、6、9、10、15、18、19、20、23、

24,用3.2中平均秩次法可计算得出故障数据对应的平均秩次和经验分布函数值如表3所示。

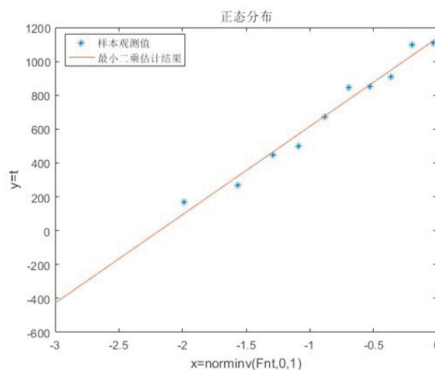
表3 各故障数据的平均秩次  
Table 3 Average Rank of Fault Data

顺序号	故障时间	平均秩次 Ak	Fn(tk)
1	222.07	1.032	0.023 3
2	332.57	2.179	0.059 8
3	492.74	3.422	0.099 4
4	552.95	4.664	0.139
5	697.68	6.183	0.187
6	868.74	7.904	0.242
7	887.08	9.625	0.297
8	938.74	11.346	0.352
9	1 117.16	13.412	0.418
10	1 178.84	15.477	0.483

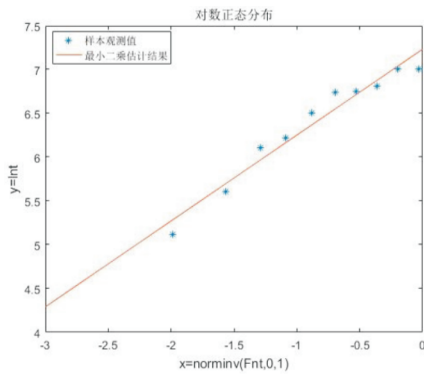
分别以指数分布、正态分布、对数正态分布以及威布尔分布为目标分布模型,用最小二乘法对压力调节关断活门的服役数据进行数据分布的参数估计,其拟合效果如图1所示。



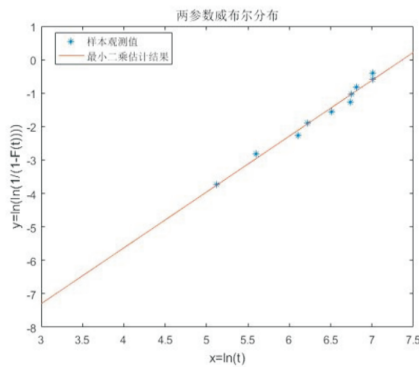
(a) 两参数指数分布



(b) 正态分布



(c) 对数正态分布



(d) 两参数威布尔分布

图1 各分布类型拟合结果

Fig. 1 Fitting Results of Various Distribution Types

各分布模型拟合的参数估计结果如表4所示。

表4 不同分布模型的参数估计结果

Table 4 Parameter estimation results of different distribution models

相关参数	相关系数	特征参数	
两参数指数分布	0.965 2	失效率 $\lambda=6.345e-4$	位置参数 $\gamma=285.5$
正态分布	0.989 6	均值 $\mu=1177.4$	标准差 $\sigma=517.6$
对数正态分布	0.986 6	(对数)均值 $\mu=7.2292$	(对数)标准差 $\sigma=0.8688$
两参数威布尔分布	0.995 3	形状参数 $\beta=1.9135$	尺度参数 $\eta=1534.8$

当显著水平  $\alpha=0.01$ 、样本量为10时,相关系数临界值为  $r_c=0.7079$ ,以上四种分布模型拟合结果的相关系数均大于0.7079,因此这四种分布用最小二乘法拟合的效果都显著,且以两参数威布尔为分布模型拟合的相关系数最大,于是用两参数威布尔分布作为压力调节关断活门的寿命分布

类型更为合适,其分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{1534.8}\right)^{1.9135}\right] \quad (9)$$

其可靠度函数为

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{1534.8}\right)^{1.9135}\right] \quad (10)$$

其失效率函数为

$$\lambda(t) = 0.001247 \times \left(\frac{t}{1534.8}\right)^{1.9135} \quad (11)$$

压力调节关断活门的可靠度随时间的变化规律如图2所示。

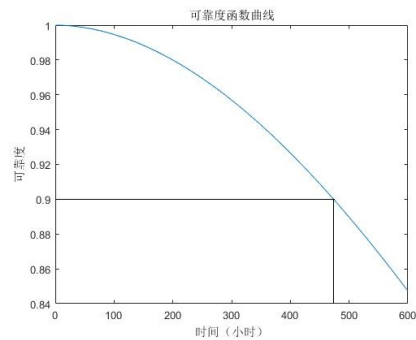


图2 可靠度随时间变化规律

Fig. 2 Variation of Reliability with Time

如果压力调节关断活门出现故障,将影响飞机的除冰系统正常工作,可能使高空低温中的飞机机翼前缘附着薄冰,飞机的翼型将发生改变,进而对升力产生影响,威胁飞机安全,因此要求压力调节关断活门的可靠度应高于0.9(此处借鉴民航对安全性相关维修任务的可靠度要求,实际工作中可按用户要求调整,调整后将对不同优化建议),由可靠度曲线得出,其对应的理论最大维修间隔为473飞行小时。

至此,基于实际服役数据,依据第二节中提出的模型,首先通过平均秩次法得到了各故障数据的秩次,然后分别作出不同数据分布类型的假设,估计其对应参数。对比相关系数后,得到两参数威布尔分布为最优分布。进而绘出其可靠度函数曲线,依照可接受的可靠度水平,得到对应的理论维修间隔,验证了该模型的可行性。

实际维护过程中,若所有维修任务均以理论维修间隔实施维修需要较高的控制成本,也不利

于维修任务的打包管理,因此应结合飞机维护规程的间隔框架,将与理论值最为接近的间隔(如400飞行小时或450飞行小时)作为维修间隔优化的建议。

## 4 结 论

本文以维修任务对应的飞机服役数据为分析对象,将随机截尾试验、平均秩次法和最小二乘估计方法有机的结合,构建了预防性维修任务间隔优化分析的数学模型,并将其应用在装备的服役数据(主要包括故障数据和持续运行数据)上,对数据进行分析和评估,给出了维修间隔优化调整的建议,验证了模型的可行性,因此在积累了充足的服役数据后,该模型可通过数据分析给出相对准确的维修间隔,能够为改变军用飞机各项维修任务多年未能有效优化调整的现状提供有效支撑。但同时应认识到,该模型仅针对单项维修任务给出最佳建议维修间隔,若要使飞机维护规程整体达到最优状态,还应综合考虑以下因素:

(1) 优化后的维修任务是否符合用户的维修保障模式;

(2) 在保持可靠度不降低的前提下,最佳维修间隔应保证维修成本(尤其是人力成本和时间成本)的投入在最优区间;

(3) 维护规程的优化建议应基于不同用户飞机的利用率给出对应的建议。

### 参考文献

- [1] 冯蕴雯, 陈俊宇, 马小骏, 等. 民用飞机预防性维修及S4000P标准剖析研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 15-26.  
FENG Yunwen, CHEN Junyu, MA Xiaojun, et al. Preventive maintenance of civil aircraft and analysis of S4000P standard [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 15-26. (in Chinese)
- [2] 王南松, 王凌. S4000P规范下装备预防性维修分析方法的研究[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 162-168.  
WANG Nansong, WANG Ling. Study on equipment preventive maintenance analysis method based on S4000P [J]. Computer measurement and control, 2020, 28(2): 162-168. (in Chinese)
- [3] 南雁飞, 蒋庆喜, 林聪. 基于S4000P的军用飞机预防性维修任务优化研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 577-584.  
Yanfei NAN, JIANG Qingxi, LIN Cong. Research of preventive maintenance task optimization of military aircraft based on S4000P [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 577-584. (in Chinese)
- [4] 李军亮, 陈跃良, 张勇, 等. 基于可用度的预防性维修间隔优化综述[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(6): 1611-1624.  
LI Junliang, CHEN Yueliang, ZHANG Yong, et al. A review of optimization on preventive maintenance interval based on availability [J]. System Engineering Theory and Practice, 2021, 41(6): 1611-1624. (in Chinese)
- [5] 蔡景, 左洪福, 刘明, 等. 复杂系统成组维修策略优化模型研究[J]. 应用科学学报, 2006(5): 533-537.  
CAI Jing, ZUO Hongfu, LIU Ming, et al. Optimal group preventive maintenance model for complex systems [J]. Journal of Applied Science, 2006(5): 533-537. (in Chinese)
- [6] 周伽, 陆中. 飞机附件的维修间隔决策[J]. 航空维修与工程, 2015(1): 66-67.  
ZHOU Jia, LU Zhong. Determination of maintenance interval for aircraft components [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015(1): 66-67. (in Chinese)
- [7] 王瑞琦, 陈光宇, 梁娜, 等. 全寿命周期下退化的大规模系统预防性维修策略优化[J/OL]. 控制与决策: 1-9 [2022-04-24].  
WANG Ruiqi, CHEN Guangyu, LIANG Na, et al. Preventive maintenance optimization for deteriorating large-scale systems in life-cycle perspective [J/OL]. Control and decision-making: 1-9 [2022-04-24]. (in Chinese)
- [8] ASSIS R, MARQUES P C. A dynamic methodology for setting up inspection time intervals in conditional preventive maintenance [J]. Appl. Sci., 2021, 11: 8715.
- [9] 林聪, 蒋庆喜, 周扬. 基于服役数据的飞机计划维修任务间隔优化方法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 572-576, 584.  
LIN Cong, JIANG Qingxi, ZHOU Yang. Optimization method of aircraft planned maintenance task interval based on service data [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 572-576, 584. (in Chinese)
- [10] 陈浩, 周正, 颀征. 基于状态维修的预防性维修策略优化模型研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 441-446.  
CHEN Hao, ZHOU Zheng, XIE Zheng. Optimal preventive maintenance tactics model based on condition-based maintenance [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 441-446. (in Chinese)
- [11] 王德明. 航空发动机外场可靠性信息及可靠性研究[D].

- 长春: 吉林大学, 2005.
- WANG Deming. Reliability data in field and reliability design of aeroengine[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [12] 王星博, 贾明明, 于光辉, 等. 一种外场不完整故障数据的处理方法[J]. 航空计算技术, 2011, 41(6): 80-83, 87.
- WANG Xingbo, JIA Mingming, YU Guanghui, et al. A method to process incomplete failure data in the field[J]. Aeronautical Computing Technology, 2011, 41(6): 80-83, 87. (in Chinese)
- [13] 胡良谋, 曹克强, 熊申辉, 等. 前轮转弯减摆助力器故障分布的三参数威布尔分布模型[J]. 液压与气动, 2016(9): 71-75.
- HU Liangmou, CAO Keqiang, XIONG Shenhui, et al. Three parameter Weibull distribution model of fault distribution for front-wheel swerve shimmy damper hydraulic booster[J]. Hydraulic and pneumatic, 2016(9): 71-75. (in Chinese)
- [14] 方华元, 胡昌华, 黄莹, 等. 提高可靠性数据分析精度的一种有效方法[J]. 电光与控制, 2006(1): 78-80.
- FANG Huayuan, HU Changhua, CHEN Wei. An effective method for improving precision of reliability data analysis [J]. Electro Optics and Control, 2006(1): 78-80. (in Chinese)
- [15] 熊申辉, 胡良谋, 胡飞, 等. 随机截尾数据下的液压泵故障分布的两参数威布尔分布模型[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4): 109-112.
- XIONG Shenhui, HU Liang-mou, HU Fei, et al. Two parameter Weibull distribution model of fault distribution for hydraulic pump based on random censored data[J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2016(4): 109-112. (in Chinese)
- [16] 许力. 基于可靠性数据的飞机系统维修决策研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- XU Li. Study on maintenance decision of aircraft systems based on reliability data[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016. (in Chinese)

#### 作者简介:

**南雁飞**(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:维修工程分析。

**张金涛**(1980—),男,学士,工程师。主要研究方向:通用质量特性。

**林聪**(1986—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:体系效能评估。

**靳勇**(1984—),男,学士,工程师。主要研究方向:保障资源规划。

**吕琦**(1980—),男,学士,技师。主要研究方向:航天器结构制造。

(编辑:马文静)