

文章编号: 1674-8190(2023)01-121-07

# 以可用度为目标的民用飞机不完全预防性 维修间隔优化

吴晓<sup>1</sup>, 王瀛<sup>2</sup>, 彭超峰<sup>1</sup>

(1. 上海飞机客户服务有限公司 维修工程部, 上海 200241)

(2. 北京飞机维修工程有限公司 工程部, 北京 100621)

**摘要:** 民用飞机制造商推荐的初始预防性维修间隔通常不考虑运营环境和维修能力的差异, 在满足飞机安全性要求的同时, 难以达到可用性的最优状态。基于不完全维修理论, 采用役龄回退因子修正部件的可靠性模型, 以反映维修工作对于部件性能的影响; 结合航空公司运行实际情况, 以部件可用度为目标函数, 可靠度阈值为约束条件, 提出不完全维修策略下的预防性维修间隔优化模型, 并以某型飞机的空气起动机航线故障数据进行实例验证。结果表明: 在满足可靠度阈值的约束条件下, 所建立的维修间隔优化模型得出的最优维修间隔与实际相符, 该模型合理可行。

**关键词:** 役龄回退因子; 不完全维修; 可用度; 可靠度; 威布尔分布

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.01.14

## Interval optimization of civil aircraft imperfect preventive maintenance based on availability

WU Xiao<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, PENG Chaofeng<sup>1</sup>

(1. Maintenance Engineering Department, Shanghai Aircraft Custom Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

(2. Engineering Department, Beijing Aircraft Maintenance Engineering Co., Ltd., Beijing 100621, China)

**Abstract:** The initial preventive maintenance interval recommended by civil aircraft manufacturers usually does not consider the operators' environment and maintenance capacity difference. It is difficult to achieve the optimal state of availability while meeting the requirements of aircraft safety. Based on the imperfect maintenance theory, the reliability model of components is modified by the service age fallback factor to reflect the impact of maintenance work on component performance. Combined with the airlines operation reality, taking component availability as the objective function and reliability threshold as the constraint condition, the preventive maintenance interval optimization model in imperfect maintenance strategy is established. An example is given to verify the air starter line fault data of an aircraft. The results show that the optimal maintenance interval obtained by the established maintenance interval optimization model is consistent with the actual situation, and the model is reasonable and feasible.

**Key words:** age fallback factor; imperfect maintenance; availability; reliability; Weibull distribution

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-05-16

通信作者: 吴晓, wuxiao0202@sina.com

引用格式: 吴晓, 王瀛, 彭超峰. 以可用度为目标的民用飞机不完全预防性维修间隔优化[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 121-127.

WU Xiao, WANG Ying, PENG Chaofeng. Interval optimization of civil aircraft imperfect preventive maintenance based on availability[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 121-127. (in Chinese)

## 0 引言

预防性维修是保证系统正常工作、降低系统故障率的有效方法<sup>[1]</sup>,主流民用飞机制造商发布的维修大纲多不具有“客户化”特性,是针对普遍用户的任务推荐,各航空公司因运营环境和维修能力的差异,采用统一的维修任务间隔可能导致“维修不足”和“过度修理”的问题<sup>[2]</sup>,给运行生产带来可用度降低、维修成本浪费的后果,甚至对运行安全性产生影响。因此,充分结合航线运行数据和航空公司的维修能力,制定客户化的维修计划,尤其是对维修周期的合理决策,能够有效提升航空公司的维修保障效率。

随着健康监测技术的逐渐发展成熟,人们针对维修任务的优化问题开展了研究。郭驰名等<sup>[3]</sup>针对 gamma 退化型系统建立了维修优化模型,采用检测规划函数对隐蔽故障类的维修任务间隔进行调整;孙荣荣等<sup>[4]</sup>、贾宝惠等<sup>[5-6]</sup>基于最小维修的假设,以维修费率最低为目标寻求维修间隔优化;张鹏等<sup>[7]</sup>、李景奎等<sup>[8]</sup>分别从不同角度建立民用飞机部件的可用度模型,探讨了差异维修水平下,维修间隔的优化方案。以上研究均是基于一个周期内的预防性维修工作能够达到“修旧如新”的完全维修进行的模型建立和优化。事实上,除了定期更换类的维修任务符合完全维修的定义,超过 80% 的预防性维修活动是通过检测识别故障的状态维修<sup>[9]</sup>,因此不完全维修(Imperfect Maintenance)更符合当前民用飞机的维护实际,即维修后系统状态不能恢复至全新。

Xu Jun 等<sup>[10]</sup>基于马尔可夫决策过程和不完全维修理论,以 copula 函数定义各部件之间的相关性,建立 K/N 系统广义视情维修最优模型;T. Tsai 等<sup>[11]</sup>在电力变压器的预防性维修间隔优化中,考虑了不完全维修对维修周期成本的影响;王谦等<sup>[12]</sup>采用修复因子表征新型工程车的不完全维修程度,建立维修决策模型;另有研究人员分别在铁路运输、风电、电力系统等领域利用不完全维修理论改进设备的维修模型,且多偏重于对经济性的优化,以维修费率、维修周期成本等作为主要优化目标,或寻求非等周期的最优维修方案以追求经济效益最大化<sup>[8,13-15]</sup>。在民用飞机维修领域,王颖等<sup>[16]</sup>在不完全维修的前提下,提出以可靠度区间

识别多任务机会成组的可能性,通过任务成组的方式减少停机时间以达到节约维修费用的目的;李耀华等<sup>[17]</sup>在维修优化模型中加入修复因子,建立不完全维修优化模型,以单位时间的维修成本作为优化的目标函数,研究了维修次数、周期和维修成本之间的关系,但没有考虑维修中可靠度和可用度的门槛要求。

本文基于不完全维修的事实,将役龄回退因子引入部件可靠性模型,结合航空公司对于预防性维修工作的实际需求,提出一种以可靠度为约束,以可用度最大作为优化目标的预防性维修间隔优化模型,以某航空公司 A320 机队的空气起动机为例,对提出的维修优化模型进行验证。

## 1 预防性维修任务间隔优化

预防性维修任务优化的框架结构如图 1 所示,其步骤可以简单概括为:(1) 通过对部件运行数据的分析,建立部件的寿命分布模型;(2) 根据系统/部件的运行特点和航空公司的实际情况选择优化目标;(3) 根据优化目标选定决策变量,如维修间隔、维修工作内容;(4) 建立维修目标的优化模型,选定合适的方法进行目标优化。

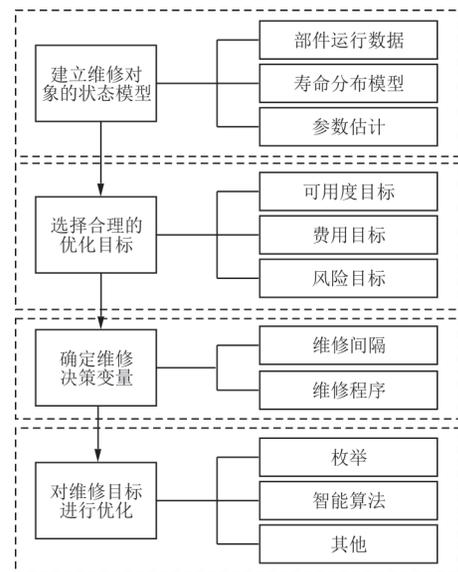


图 1 预防性维修任务优化的框架图

Fig. 1 Optimal preventive maintenance task frame

## 2 民用飞机部件的可靠性分布模型

### 2.1 威布尔分布及参数估计

威布尔分布能够拟合各种类型的寿命数据,

对于产品寿命“浴盆曲线”的三个失效期都有较强的适应力<sup>[18]</sup>。本文选择两参数威布尔分布用于描述部件的故障规律。

若随机变量  $t$  服从两参数威布尔分布,则其概率密度函数为

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

可靠度函数可表示为

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

失效率函数为

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中: $\beta$ 为形状参数; $\eta$ 为尺度参数。

威布尔分布参数估计方法通常可以分为图解法和解析法,解析法中的极大似然估计法以其对估计量的优良特性成为威布尔分布参数估计的重要方法。

假设已知一组观察值  $t_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 为了求解未知参数  $\beta, \eta$ , 构建参数的似然函数:

$$L(t; \beta, \eta) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (4)$$

对式(4)取对数并对各参数求偏导,整理后可得方程组:

$$\begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n t_i^\beta \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i \\ \eta^\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^\beta \end{cases} \quad (5)$$

求解方程组(5)即可获得  $\beta, \eta$  的估值。

据文献[19]所述,采用分位数法,可计算出  $1-\alpha$  置信水平下,  $\beta$  和  $\eta$  的置信上限和下限分别为

$$\begin{cases} \beta_v = \frac{\beta}{Z_{\alpha/2}} \\ \beta_L = \frac{\beta}{Z_{1-\alpha/2}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \eta_v = \eta e^{-\frac{V_{\alpha/2}}{\beta}} \\ \eta_L = \eta e^{-\frac{V_{1-\alpha/2}}{\beta}} \end{cases} \quad (7)$$

分位点  $Z_{\alpha/2}, Z_{1-\alpha/2}, V_{\alpha/2}$  和  $V_{1-\alpha/2}$  可从文献[19]附表12-1查表获得。

## 2.2 考虑役龄回退因子的可靠性模型

根据维修程度的不同,维修活动可分为<sup>[17,20]</sup>:

(1) 完全维修,即修旧如新,维修后部件性能回归到出厂状态;

(2) 最小维修,即修旧如旧,维修后部件的失效率相较维修前无改变;

(3) 不完全维修,部件维修后的性能在完全维修和最小维修之间。

在预防性维修领域的研究中,通常假设维修效果是完全的,一旦检测出缺陷或发生失效则进行更换,这样便于模型的推导和计算。而在实际情况中,维修活动的效果通常是不完全的<sup>[10]</sup>,即维修后系统状态不能恢复至全新。尤其是在视情维修 CBM (Condition-Based Maintenance) 的实施过程中,检修过程存在虚警和漏警情况,因此在建立维修模型时,将维修活动视为不完全维修更贴近实际情况。

本文的不完全维修模型构建基于以下假设:

- (1) 部件存在使用寿命;
- (2) 部件的预防性维修任务间隔为等间隔;
- (3) 如果预防性维修任务周期内发生故障,此时的维修为最小维修,不影响部件的失效率;
- (4) 一个预防性维修任务周期内最小维修发生的次数服从非齐次泊松过程。

为了描述部件在预防性维修前后的状态变化,引入役龄回退因子  $\alpha$ , 假设部件的定期预防维修任务间隔为  $T$ , 运行时间为  $t$ , 部件在经过一次不完全维修后性能得到改善,可靠性水平恢复到此次预防维修前  $t - \alpha T$  时的可靠度,可靠度  $R(t)$  的变化如图2所示。

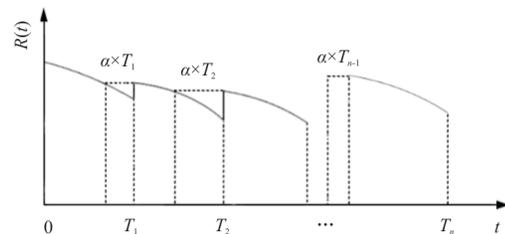


图2 不完全维修下的可靠度随时间变化  
Fig. 2 Reliability changes with time under imperfect maintenance

可推导每次预防性维修后的失效率为

$$\lambda_i(t) = \lambda \left( t - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j T \right) \quad (\alpha \in [0, 1]) \quad (8)$$

$$T_i^* = t - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j T \quad (9)$$

$T_i^*$  称为有效役龄, 不同于部件的实际服役年龄, 有效役龄表征部件在维修后的“等效寿命”, 能够更加直接地反映部件的可靠性水平。

将式(9)带入式(2)和式(3), 得到改进的部件可靠度函数和失效率函数:

$$R^*(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j T}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (10)$$

$$\lambda^*(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j T}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (11)$$

### 3 不完全维修间隔优化模型

左洪福等<sup>[21]</sup>将常用的优化目标选择方向总结为: ①可用度目标(最大); ②费用目标(最小); ③风险目标(控制在一定范围内)。

对于民用航空器运营人(航空公司)来说, 保障飞机处于给定的可靠性、安全性水平之上是适航当局对运营人的要求; 提高航班放行率, 即维持飞机较高的可用度, 会对航空公司的盈利带来较高的正向增益。因此, 本文以可用度最大作为维修间隔优化的目标, 选择部件的可靠度作为约束条件, 在保证可靠性水平的前提下, 提高可用性, 从而提高航空公司的经济效益。

可用度是可用性的概率度量, 指部件在任一时刻处于可使用状态而具有的定量属性。在可靠性研究领域, 可用度依据其使用环境的不同有多种度量方式, 其中的可达可用度将工作时间、修复性维修时间和预防性维修时间作为考量因素, 一般用于预防性维修方案的权衡, 因此, 本文选用可达可用度(下文写作可用度)作为度量目标。可用度  $A$  的计算公式为

$$A = \frac{T_o}{T_o + T_{CM} + T_{PM}} \quad (12)$$

式中:  $T_o$  为工作时间;  $T_{CM}$  为故障小修时间;  $T_{PM}$  为预防性维修时间。

$$T_o = T \times N \quad (13)$$

式中:  $N$  为部件在经济运行寿命中预防性维修的次数。

根据上文的假设, 在第  $i$  次预防性维修周期内, 部件发生故障的次数  $\Delta_i$ <sup>[22]</sup> 为

$$\Delta_i = \int_{(i-1)T}^{iT} \lambda_i^*(t) dt \quad (14)$$

$$T_{CM} = \sum_{i=1}^N \Delta_i t_{cm} \quad (15)$$

$$T_{PM} = (N-1)t_{pm} \quad (16)$$

式中:  $t_{cm}$  为单次最小维修时间;  $t_{pm}$  为单次预防性维修时间。

将式(13)~式(16)代入式(12), 整理得可用度  $A$ :

$$A = \frac{1}{(N-1)t_{pm} + \sum_{i=1}^N \int_{(i-1)T}^{iT} \lambda_i^*(t) dt \times t_{cm} + NT} \quad (17)$$

由此可以将预防性维修任务间隔优化模型建立如下:

$$\begin{cases} \max A(T) = \frac{1}{(N-1)t_{pm} + \sum_{i=1}^N \int_{(i-1)T}^{iT} \lambda_i^*(t) dt \times t_{cm} + NT} \\ \text{s.t. } R^*(t) \geq R \end{cases} \quad (18)$$

求最佳任务间隔  $T'$ , 使得在满足给定可靠度阈值  $R$  的前提下, 可用度最大。

### 4 实例

为验证本文建立的优化模型, 以某航空公司 A320 机队发动机空气起动机的实际运营数据为基础, 剔除极短小时数据和非故障原因拆换等因素, 统计部件的故障数据, 按照由小到大的顺序排列, 如表 1 所示。

表 1 空气起动机部件故障数据  
Table 1 Air starter failure data

序号	使用时间/fh	序号	使用时间/fh	序号	使用时间/fh
1	2 294.90	6	7 918.41	11	11 014.36
2	4 439.30	7	8 047.30	12	11 202.88
3	5 993.95	8	9 966.68	13	11 221.11
4	6 490.91	9	10 665.43	⋮	⋮
5	7 481.17	10	10 851.38	50	30 710.41

表 1 中故障数据的威布尔概率图如图 3 所示,可以看出:故障数据的概率近似分布在直线附近,可初步判断故障数据较好地服从威布尔分布。

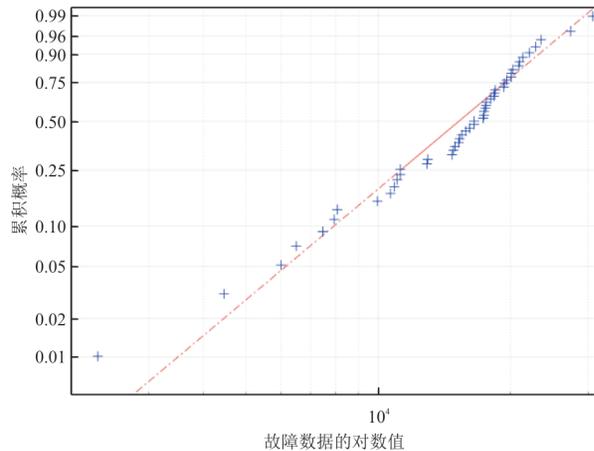


图 3 空气起动机故障数据威布尔概率  
Fig. 3 Air starter data Weibull probability

采用极大似然估计方法求解该部件寿命服从的威布尔分布参数的估值分别为: $\beta=3.543, \eta=18\ 042$ 。90%置信水平下参数的置信上下限分别为 $\beta_L=2.636, \beta_v=3.666; \eta_L=15\ 846, \eta_v=18\ 340$ 。

由于形状参数 $\beta > 1$ ,失效率随时间递增,部件具有早期损耗特性<sup>[23]</sup>,通过执行预防性维修工作,能够有效改善部件性能,延长部件的服役寿命。

根据MSG-3分析原则,该部件对应的功能失效影响为显性运行性影响,即失效影响类别为6类,借鉴波音787政策和程序手册(Policy and Procedures Handbook)<sup>[24]</sup>提供的方法,本例的约束条件部件可靠度阈值取0.8,同时设定役龄回退因子 $\alpha=0.9$ 。基于上述参数输入,该部件的可靠度函数和失效率函数为

$$R^*(t) = \exp \left\{ - \left[ \frac{t - 0.9 \times (N - 1) \times T}{18\ 042} \right]^{3.543} \right\} \quad (19)$$

$$\lambda^*(t) = \frac{3.543}{18\ 042} \times \left[ \frac{t - 0.9 \times (N - 1) \times T}{18\ 042} \right]^{2.543} \quad (20)$$

将输入参数和式(19)~式(20)代入式(18)的预防性维修任务间隔优化模型,使用MATLAB GA工具箱求最优解。由于工具箱要求适应度函数搜索最小化的目标函数,将优化模型的求可用度最大转换为求不可用度最小,结合航空公司安排定期任务的实际情况,增加求解约束,即维修间隔在1 000 fh以下时,递增求解间隔为50 fh;维修间隔在1 000 fh以上时,递增求解间隔为100 fh。根据仿真结果得出的预防性维修任务间隔与部件不可用度的对应关系如表2所示。

表 2 预防性维修任务间隔与不可用度( $\alpha=0.9$ )  
Table 2 Preventive maintenance task interval and the unavailability ( $\alpha=0.9$ )

维修次数	维修间隔/ ( $10^3$ fh)	不可用度/ $10^{-4}$	
		$t_{pm}=0.5$ 人工时, $t_{cm}=10$ 人工时	$t_{pm}=0.5$ 人工时, $t_{cm}=20$ 人工时
28	2.50	2.80	3.67
20	3.50	2.44	3.52
17	4.00	2.31	3.45
16	4.30	2.32	3.56
15	4.40	2.24	3.41
15	4.50	2.28	3.53
14	5.00	2.38	3.85
11	6.00	2.38	3.99
10	6.50	2.44	4.18
10	7.00	2.75	4.85

从表 2 可以看出:该部件的预防性维修任务间隔为 4 400 fh 时,对应的不可用度最小,此时部件的可用度为 0.86,满足约束条件。查询该航空公司维修方案可知,针对起动机的定期维修任务的项目间隔为 3 000 飞行循环,按照小时循环比 1.4~1.5 换算,优化模型的输出结果与实际情况相符。

维修任务间隔与不可用度的关系曲线如图 4 所示,可以看出:随着维修间隔的增大,不可用度在初期有较大的下降趋势,这说明过于频繁的预防性维修虽然能维持部件的高可靠性水平,但会导致部件的不可用度增加。当维修间隔进一步增大时,对应的不可用度继续下降并逐渐趋于平缓,在 4 400 fh 处出现最低值之后缓慢上升,此时制约航空公司选择维修间隔的主要因素是部件可靠性指标是否满足要求。

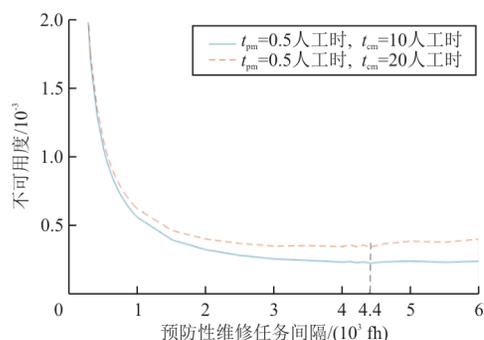


图 4 不可用度随维修任务间隔变化关系

Fig. 4 Unavailability following maintenance task interval

另一方面,在预防性维修时间  $t_{pm}$  相同的情况下,非计划的故障维修时间  $t_{cm}$  越大,对应的不可用度也随之增大,这说明航空公司应对非计划性故障、突发故障的排故能力越强,对于提高部件可用度越有助益。因此,在制定客户化的维修计划时,需要将航空公司应对非计划性故障的排故能力纳入考察因素。

## 5 结 论

(1) 本文运用民用飞机系统部件的故障数据建立部件可靠性数学模型,为了客观反映维修活动对部件性能的影响,采用役龄回退因子对模型进行修正,使其符合维修实际。

(2) 结合航空公司运行实际,在满足可靠度阈值的约束条件下,建立以可用度最大为优化目标的维修间隔优化模型,以空气起动机的航线故障

数据进行实例验证,得出最优维修间隔与实际相符,证明了优化模型的可行性。

(3) 在满足可靠性水平的前提下,详细分析维修间隔  $T$ 、预防性维修时间  $t_{pm}$  和故障维修时间  $t_{cm}$  对于不可用度的影响,对航空公司来说,选定最佳维修间隔需要将非计划性故障的排故能力作为考察因素之一。

## 参考文献

- [1] CHEN S, HOT E, MAO B, et al. A bi-objective maintenance scheduling for power feeding substations in electrified railways [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 44: 350-362.
- [2] 应舒琪. 基于可靠性数据的民机维修间隔优化方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.  
YING Shuqi. Research on optimization method of civil aircraft maintenance interval based on reliability data [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [3] 郭驰名, 郭波, 王文彬, 等. 非周期不完全检测下的维修优化 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(4): 176-181.  
GUO Chiming, GUO Bo, WANG Wenbin, et al. Maintenance optimization under non-periodic imperfect inspections [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(4): 176-181. (in Chinese)
- [4] 孙荣荣, 李家兴. 民用飞机隐蔽故障检查间隔决策方法研究 [J]. 滨州学院学报, 2020, 36(4): 21-26.  
SUN Rongrong, LI Jiaying. Research on decision-making method of concealed fault inspection interval of civil aircraft [J]. Journal of Binzhou University, 2020, 36(4): 21-26. (in Chinese)
- [5] 贾宝惠, 杨杭. 民机隐性功能系统预防性维修策略优化研究 [J]. 机械设计与制造, 2016(5): 257-260.  
JIA Baohui, YANG Hang. Research on the preventive maintenance policy optimization of civil aircraft hidden function system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(5): 257-260. (in Chinese)
- [6] 贾宝惠, 刘涛, 杨杭, 等. 民机隐蔽故障维修间隔优化方法研究 [J]. 航空制造技术, 2015(s1): 20.  
JIA Baohui, LIU Tao, YANG Hang, et al. Research on optimization method of maintenance interval for hidden faults of civil aircraft [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2015(s1): 20. (in Chinese)
- [7] 张鹏, 许力, 赵世伟. 飞机系统维修方式确定与维修间隔优化研究 [J]. 计算机仿真, 2016(1): 68-71.  
ZHANG Peng, XU Li, ZHAO Shiwei. Study on method for aircraft scheduled maintenance development and intervals optimization [J]. Computer Simulation, 2016(1): 68-71. (in Chinese)
- [8] 李景奎, 蔺瑞管, 段飞飞, 等. 民机系统部件维修间隔优化

- [J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(1): 90-94.  
LI Jingkui, LIN Ruiguan, DUAN Feifei, et al. Optimization of maintenance intervals for civil aircraft system components[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17(1): 90-94. (in Chinese)
- [9] 刘葛辉, 陈绍宽, 金华, 等. 基于延迟时间模型的不完全检修计划优化模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(7): 1298-1307.  
LIU Gehui, CHEN Shaokuan, JIN Hua, et al. Optimum imperfect inspection and maintenance scheduling model considering delay time theory[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(7): 1298-1307. (in Chinese)
- [10] XU Jun, LIAN Zhengling, LI Yanfu, et al. Generalized condition-based maintenance optimization for multi-component systems considering stochastic dependency and imperfect maintenance [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 211: 1-20.
- [11] TSAI T, LIU P, LIO Y L. Optimal maintenance time for imperfect maintenance actions on repairable product [J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60: 744-749.
- [12] 王谦, 程中华, 白永生, 等. 不完全预防性维修条件下保修决策模型研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(10): 166-169.  
WANG Qian, CHENG Zhonghua, BAI Yongsheng, et al. Research on warranty decision model under incomplete preventive maintenance conditions[J]. Journal of Ordnance and Equipment Engineering, 2019, 40(10): 166-169. (in Chinese)
- [13] 苏春, 周小荃. 基于有效年龄的风力机多部件维修优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 1100-1104.  
SU Chun, ZHOU Xiaoquan. Maintenance optimization for multi-component of wind turbine based on effective age[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(6): 1100-1104. (in Chinese)
- [14] 刘华新, 刘红艳, 罗学智, 等. 风电机组齿轮箱动态周期不完全维修优化[J]. 自动化仪表, 2020, 41(7): 41-44.  
LIU Huaxin, LIU Hongyan, LUO Xuezhi, et al. Optimization of dynamic cycle imperfect maintenance for gearbox of wind turbine[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(7): 41-44. (in Chinese)
- [15] 邓奥攀, 胡志坚, 胡美玉, 等. 同时计及设备老化与不完全维修的电力系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 69-74.  
DENG Aopan, HU Zhijian, HU Meiyu, et al. Power system reliability evaluation considering deterioration and imperfect maintenance of equipment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 69-74. (in Chinese)
- [16] 王颖, 余芳. 以可靠度为中心的通用飞机机会成组维修研究[J]. 机械工程与自动化, 2019(5): 47-49.  
WANG Ying, YU Fang. Reliability-centered general aircraft opportunity group maintenance research [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(5): 47-49. (in Chinese)
- [17] 李耀华, 刘泽. 基于改善因子的系统部件维修间隔优化方法[J]. 机械工程与自动化, 2016(4): 6-8.  
LI Yaohua, LIU Ze. Optimization method of system component maintenance interval based on improvement factor[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016(4): 6-8. (in Chinese)
- [18] 凌丹. 威布尔分布模型及其在机械可靠性中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.  
LING Dan. Research on Weibull distribution and its applications in mechanical reliability engineering [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [19] 戴树森, 费鹤良, 王玲玲, 等. 可靠性试验及其统计分析(下册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 7-9.  
DAI Shusen, FEI Heliang, WANG Lingling, et al. Reliability test and statistical analysis (Volume II) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983: 7-9. (in Chinese)
- [20] BARLOW R, HUNTER L. Optimum preventive maintenance policies[J]. Operational Research, 1960, 114: 90-100.
- [21] 左洪福, 蔡景, 王华伟. 维修决策理论与方法[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008: 10-14.  
ZUO Hongfu, CAI Jing, WANG Huawei. Maintenance decision theory and method [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008: 10-14. (in Chinese)
- [22] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 340-344.  
CAO Jinhua, CHENG Kan. Introduction to reliability mathematics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 340-344. (in Chinese)
- [23] 王森. 航空维修工程可靠性分析方法研究及应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.  
WANG Miao. Research and application of reliability analysis method for aviation maintenance engineering [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009. (in Chinese)
- [24] Boeing Company. B-787 scheduled maintenance requirements development policy and procedures handbook (PPH) [S]. USA: Boeing Company, 2006.

#### 作者简介:

吴晓(1988—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机维修工程分析。

王瀛(1976—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用航空器维修工程管理,修理/改装设计,适航审定方面的工程技术管理等。

彭超峰(1993—),男,学士,工程师。主要研究方向:民用飞机可靠性分析。

(编辑:马文静)