

文章编号:1674-8190(2022)06-080-08

预防性维修任务可执行区间权衡确定方法研究

林聪, 蒋庆喜, 苏嗣哲, 马恬然

(中国航空综合技术研究所 装备服务产品部, 北京 100028)

摘要: 直接维修成本(DMC)是航空器制造商向运营人进行经济性担保的一项主要参数,是运营阶段监控维修成本的参考比较基准。提出一种兼顾考虑DMC担保值和计划维修要求所列维修间隔的预防性维修任务可执行区间权衡确定方法,分析该方法的数据采集需求,介绍其使用流程,对度量预防性维修任务经济性的指标参数进行定义,进而给出维修任务可执行区间的确定方法。结果表明:该方法能够从经济可承受性的角度确定出每一项预防性维修任务的可执行区间,为航空器运营人整合实施维修任务提供参考,达到控制优化维修成本的目的。

关键词: 直接维修成本;维修任务间隔;维修任务可执行区间;计划维修要求

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.06.08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Approach for Determining the Workslope of the Preventive Maintenance Tasks by Considering Direct Maintenance Cost

LIN Cong, JIANG Qingxi, SU Sizhe, MA Tianran

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

Abstract: The direct maintenance costs (DMC) is the primary economic index that the aircraft manufacture guarantees to the operator. DMC is regarded as a reference baseline for monitoring and controlling the maintenance expenses during the operating phase of aircraft. In this paper, by considering the guaranteed DMC value and the obligated maintenance interval listed in schedule maintenance requirements, an approach to determine the workslope of a preventive maintenance task is put forward. The data items and process for employing the method are introduced. The economic index of a preventive maintenance task is defined and the principle for obtaining the workslope is addressed. The workslope is the interval within which the maintenance expense is regraded as acceptable. To control and optimize the maintenance expense, the aircraft operator can plan to repackage multiple maintenance tasks, if the workslope of them overlaps each other.

Key words: direct maintenance cost; maintenance task interval; maintenance task workslope; schedule maintenance requirement

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2022-04-01

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: 林聪, 蒋庆喜, 苏嗣哲, 等. 预防性维修任务可执行区间权衡确定方法研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 80-87.

LIN Cong, JIANG Qingxi, SU Sizhe, et al. Approach for determining the workslope of the preventive maintenance tasks by considering direct maintenance cost[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 80-87. (in Chinese)

0 引言

预防性维修任务是为保证产品安全、可靠运行而制定的计划类维修任务,其基本思想是在产品发生故障前通过执行一些成本较低的维修任务,以使产品的可靠性水平保持在可接受水平,进而降低修复故障所产生的成本。通常,用户只要按照每一条预防性维修任务所规定的维修间隔来开展维修工作即可。以民用航空领域为例,计划维修要求(SMR)是制定飞机维修方案的依据,其中列出了飞机上所有维修对象所需开展的预防性维修任务及维修间隔^[1]。航空公司在运营飞机的过程中必须严格遵守SMR中所规定的各项任务的维修间隔,不能延迟执行维修任务。

但是,在实际应用中,当用户制定维修方案时总是希望能够在一次维修活动中尽量多地执行预防性维修任务,从而减少停机维修的时间,提高使用效率。此时,就需要从经济可承受的角度来确定每项预防性维修任务的可执行区间(即一项维修任务可以被执行的时间窗口),进而对多个可执行区间存在重合部分的维修任务进行组合打包,并确定任务包的最佳执行时刻,从而达到减少维修频次的目的。那么如何确定每一项维修任务的可执行区间呢?鉴于航空公司的目标是“安全/可靠运营”,这就决定了需要从成本权衡的角度来分析此问题^[2]。

航空公司运营成本可以分成五大部分^[3]:燃油成本、持有成本、航线/机场/导航成本、飞行员/机组工资成本、维修成本。其中,前四类成本主要由民航业基准水平所决定,只有维修成本可以通过调整维修方案来实现优化控制^[4]。而民用航空领域的维修成本可进一步分为:直接维修成本(Direct Maintenance Cost,简称DMC)和间接维修成本(Indirect Maintenance Cost,简称IMC)^[5]。其中,DMC的范畴主要指“由维修活动直接产生的成本项(如人工成本、航材成本、耗材成本等)”,航空公司可以通过统计来对此类成本进行跟踪;而IMC的范畴主要指“在组织和实施维修活动的过程中产生的管理性成本”,航空公司通常根据自身的维修管理水平将DMC乘以折算系数对此类成本进行跟踪^[6]。因此,可以将DMC作为衡量维修任务经济性的指标,为确定预防性维修任务的可执行区间提供比较基准。目前,波音、空客等国外主要航空器制造商已开始将DMC纳入型号研制

的指标要求^[7],对航空器的主要系统/分系统/主要设备都确定了DMC指标值,并将其作为运营阶段维修成本的担保值提交给航空器运营商。

“基于直接维修成本(DMC)的维修方案优化”的基本原理是:通过与运营商建立信息反馈机制,实时监控航空器的维修成本参数,从而及时向运营商发送维修方案调整建议^[8]。要实现上述过程,应至少明确四项内容:①需监控哪些DMC相关的参数,②经济性权衡模型如何表征,③维修任务可执行区间如何确定,④多个维修任务之间如何组合打包。

针对上述四项研究内容,国内外开展了一些研究工作。例如,蔡景等^[9]针对多部件系统固定维修费用高的特点,提出将故障维修与预防性维修有机结合起来,分摊系统的固定维修费用,达到节约维修拆装成本的目的,并将该方法命名为机会维修策略;M. Shafiee等^[10]提出基于服役时间的最优成组优化策略;卢婷婷等^[11]提出了一种针对航空公司实际情况的航线维修任务组合分配方案的制定方法,根据维修任务固有属性及维修任务所需技术要素等因素,对维修任务进行分组打包,并以维修任务包为基本元素,结合用户维修能力与机队使用情况,建立面向用户的航线维修任务分配模型;C. Nzukam^[12]提出一种机会维修计划,在保证设备可靠性及可用性的基础上,寻找最佳维护时机,以进行维修成本的优化;魏启东^[13]对民用飞机系统预防性维修任务的组合优化问题进行研究,构建了机会预防维修模型,该模型旨在可用度最大化与单位时间费用率最小化,且既可以针对单目标又可以针对多目标;赵洪山等^[14]在风电场的组合维修策略研究中,在各部件故障率服从威布尔分布的基础上,确定各部件的最优预防性维修周期,进而确定各部件后续预防性维修的实施时刻;林聪等^[15]提出了一种基于服役数据的飞机预防性维修任务间隔优化方法,可为调整SMR中规定的任务间隔提供支撑;南雁飞等^[16]通过调研国际上主流的预防性维修任务优化标准,基于S4000P中的服役期维修优化(ISMO)分析流程并结合军用飞机特点,提出了一种军用飞机预防性维修任务优化流程;冯蕴雯等^[17]基于S4000P建立了一种民用飞机预防性维修分析框架,为推进民用飞机预防性维修计划制定与优化进程提供了有力支持。

综上所述,现有研究重点聚焦于:①寻找维修

任务的单点最优执行时刻,②基于维修任务步骤相关性将多项维修任务进行组合打包,③SMR规定的维修任务间隔调整方法及流程等方面。但不足之处在于:①单点最优执行时刻难以在维修方案编制中落实,②不同任务间隔存在差异,统一编排后存在某些任务执行频繁而导致维修成本增加,③SMR中的维修间隔优化主体是制造商,无法支撑用户开展维修优化。鉴于此,本文以DMC担保值为约束,提出一种兼顾考虑SMR中规定的任务间隔的预防性维修任务可执行区间权衡确定方法,以期支撑用户多任务组合打包工作奠定基础。

1 维修任务可执行区间应用需求

对于复杂系统来说,部件数量的增加导致预防性维修任务规模成几何倍数增加。但是,由于不同任务所要预防的故障模式的影响程度不同,维修任务间隔的设置也存在较大差异,导致用户在使用过程中需要频繁停机执行相关维修任务,从而影响装备的可用性。在此背景下,SAE JA 6097规范^[18]指出,通过权衡某一故障模式所产生的预防性维修任务成本和修复性维修任务成本,可以获得不同时刻执行该任务所产生的费效指数(单位:成本/飞行小时,本文用 ¥/fh 表示),进而确定出该任务最优执行时刻。但是对于单点最优维修时刻很难在实际应用中捕捉得到,并且也不利于实现多任务组合打包应用需求。因此,规范指出应在维修任务费效分析的基础上并在经济可承受性指标的约束下,对维修任务的可执行区间(workscope)进行确定,如图1所示。本文在解读该规范的基础上,提出可执行区间的确定方法。

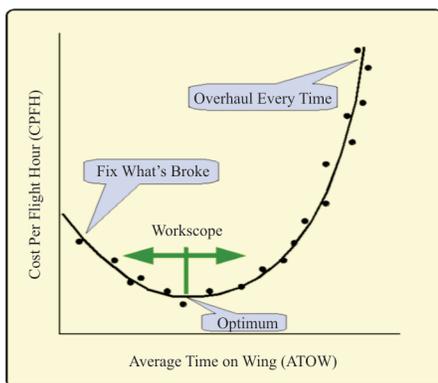


图1 SAE JA 6097给出的可执行区间示意图^[18]

Fig. 1 Schematic diagram of work scope presented by SAE JA 6097^[18]

2 数据需求及来源分析

本文提出的维修任务可执行区间权衡确定方法需要对故障模式失效率、故障模式间隔时间、预防性维修任务成本、修复性维修任务成本以及DMC担保值等数据进行获取。

故障模式可以从航空器制造商处获取,它是制造商在开展以可靠性为中心的维修分析(RCMA)、制定预防性维修任务的输入。航空器运营人应对照故障模式,记录各个产品的故障间隔时间。

当故障数据累积到一定数量后,可基于统计分析工具获得故障模式发生的概率密度函数。进而可通过公式(3)获得该故障模式的失效率函数和故障模式发生的平均间隔时间。

预防性维修任务与故障模式的关系通常是“一对一”的,这是因为在开展RCMA分析时针对一项故障模式确定由哪些预防性维修任务(润滑/保养、操作检查、报废更换等)是适用的,并从其中选择一项最有效的。但是,本文所提出的方法仅适用于满足“修复如新”假设的预防性维修任务。因此,需要基于工程经验判断SMR中哪些预防性维修任务适用于该前提假设。

对于预防性维修任务成本数据,运营人应主要记录:人工成本、航材成本、耗材成本,这是为了与DMC担保值保持相同的比较基线。同理,修复故障的成本也应记录相同的成本范畴。

预防性维修任务间隔数据可以从SMR中获取。需要注意的是,SMR给出的间隔表示执行该任务最长的间隔时间,但运营人可以基于维修经验并结合航空器运行计划提前执行该任务。

预防性维修任务的执行时刻记录的是运营人实际执行某一预防性维修任务的时刻,它是一个随机变量,取值不同会使预防性维修任务的经济性指标参数“单位运行时间内维修成本的期望值”产生波动,该值与DMC担保值的单位均为“ ¥/fh ”,可作为衡量DMC担保值是否超标的度量参数。当“单位运行时间内维修成本的期望值”未超过DMC担保值时,可获得该预防性维修任务的可执行区间。DMC担保值的分配结果可由最高约定层级分解至故障模式,例如,主制造商可能仅给出某系统的DMC担保值,此时就需要根据该系统中部件故障率占比、部件故障模式占比来确定

某一部件某种故障模式的DMC担保值。

3 维修任务经济性度量参数定义

为了最终能够与DMC担保值(单位:¥/fh)进行比较,必须以相同量纲定义一个能够表征当前维修任务间隔下,维修任务经济性的度量参数。可以用飞机在“长期使用中的单位飞行时间内维修成本的期望值” $E[\tau_{T_i}]$ 来度量维修任务的经济性。其中, τ_{T_i} 表示执行预防性维修任务 T_i 的时刻。由于假设维修任务能够将故障修复如新,由更新定理^[7]可知,任意相邻两次维修任务之间的运行时间间隔(记为一个周期)所服从的概率分布相互独立且分布类型相同。故可以将“长期使用中的单位飞行时间内维修成本的期望值”简化为“一个周期内单位运行时间的维修成本期望值”:

$$E[\tau_{T_i}] = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} [0, t] \text{内的总维修成本}}{t} = \frac{\text{一个周期内的维修成本期望值}}{\text{一个周期时长的期望值}} \quad (1)$$

在式(1)中,一个周期内的维修成本期望值包含两部分:执行预防性维修任务 T_i 所产生的维修成本期望值 $c_{T_i} \cdot R_i(\tau_{T_i})$,以及修复故障模式 i 发生所产生的维修成本期望值 $d_i \cdot F_i(\tau_{T_i})$ 。其中, $R_i(\tau_{T_i})$ 表示在 τ_{T_i} 时刻故障模式 i 尚未发生时需执行预防性维修任务 T_i 的概率; $F_i(\tau_{T_i})$ 表示故障模式 i 在 τ_{T_i} 时刻之前发生需对其进行修复的概率; $F_i(\tau_{T_i}) + R_i(\tau_{T_i}) = 1$ 。

类似地,一个周期时长的期望值也包括两部分:执行预防性维修任务 T_i 条件下的飞机平均运行时间 $\tau_{T_i} \cdot L\{X \geq \tau_{T_i}\}$,以及故障模式 i 发生条件下的飞机平均运行时间 $X \cdot L\{X < \tau_{T_i}\}$,其中 X 表示飞机运行时间。因此,式(1)可写作:

$$E[\tau_{T_i}] = \frac{c_{T_i} \cdot R_i(\tau_{T_i}) + d_i \cdot F_i(\tau_{T_i})}{\int_{\tau_{T_i}}^{\infty} \tau_{T_i} \cdot dF_i(t) + \int_0^{\tau_{T_i}} t \cdot dF_i(t)} = \frac{c_{T_i} \cdot R_i(\tau_{T_i}) + d_i \cdot F_i(\tau_{T_i})}{\tau_{T_i} - \int_0^{\tau_{T_i}} F_i(t) dt} = \frac{c_{T_i} \cdot R_i(\tau_{T_i}) + d_i \cdot F_i(\tau_{T_i})}{\int_0^{\tau_{T_i}} R_i(t) dt} \quad (2)$$

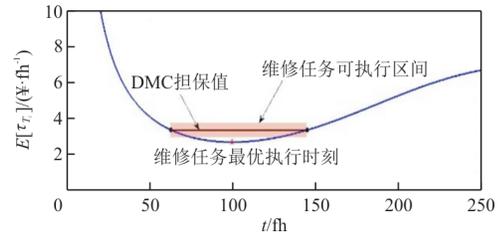
当满足 $E[\tau_{T_i}] < \delta_i$ 时,表明在 τ_{T_i} 时刻执行预防性维修任务 T_i 能够满足DMC担保值。因此,需要找到使 $\min_{0 < \tau_{T_i} < \infty} E[\tau_{T_i}]$ 取得最小值的 $\tau_{T_i}^*$ 。当忽略 $\tau_{T_i} \leq I_{T_i}$ 约束条件时,式(2)存在唯一最优解 $\tau_{T_i}^*$ 的充要条件是:① $d_i > c_{T_i}$,② $r_i(t)$ 为严格单调递增函数,③ $r_i(\infty) > d_i/\lambda_i(d_i - c_{T_i})$ 。其中,

$$\begin{cases} r_i(t) = \frac{f_i(t)}{R_i(t)} \\ \lambda_i = \int_0^{\infty} R_i(t) dt \end{cases} \quad (3)$$

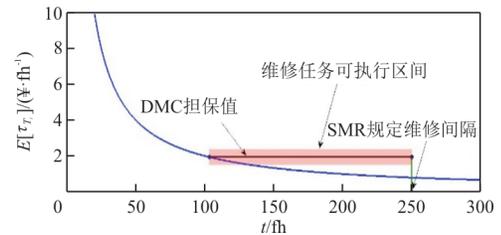
通过对公式(2)进行求导数并令其右端分子为零,则 $\tau_{T_i}^*$ 可由式(4)反解求得^[15]。

$$r_i(\tau_{T_i}^*) \int_0^{\tau_{T_i}^*} R_i(t) dt - F_i(\tau_{T_i}^*) = \frac{c_{T_i}}{d_i - c_{T_i}} \quad (4)$$

单位运行时间内的维修成本的最小期望值 $E[\tau_{T_i}^*] = (d_i - c_{T_i}) \cdot r_i(\tau_{T_i}^*)$,如图2(a)所示;当条件③不满足时,则 $\tau_{T_i}^* = \infty$,且 $E[\infty] = d_i/\lambda_i$,如图2(b)所示。



(a) 满足 $r_i(\infty) > d_i/\lambda_i(d_i - c_{T_i})$ 时



(b) 不满足 $r_i(\infty) > d_i/\lambda_i(d_i - c_{T_i})$ 时

图2 单位时间维修成本期望值函数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of $E[\tau_{T_i}]$

4 维修任务可执行区间确定

在理想情况下,航空运营人可按照成本权衡得到的维修成本期望值最小的间隔 $\tau_{T_i}^*$ 开展相应的维修任务。但是,上述权衡结果的可信度受故障的概率分布、维修任务成本以及修复/停机成本等

信息的准确性影响。此外,如果按单点权衡结果安排维修工作的话,则会产生碎片化维修任务,不利于航空运营人安排飞行计划。因此,运营人希望得到的是每项维修任务的可执行区间,在此区间内产生的维修成本对运营人来说都是可接受的。进而运营人可以根据多个维修任务可执行区间的统筹安排一个维修任务包。

确定预防性维修任务的可执行区间需要兼顾考虑两方面的权衡要素:第一权衡要素是预防性维修任务最优执行时刻 $\tau_{T_i}^*$ 与 SMR 给出的维修任务的最大维修间隔 I_{T_i} 的相对位置;第二权衡要素是直接维修成本担保值 δ_i 和单位运行时间的维修成本期望值 $E[I_{T_i}]$ 的大小关系。

因此,基于直接维修成本 DMC 担保值 δ_i ,结合 $\tau_{T_i} \leq I_{T_i}$ 约束条件,可以得到维修任务 T_i 的可执行区间 L_{T_i} 共有六种情况:

- ① 若同时满足 $\tau_{T_i}^* \leq I_{T_i}$ 和 $\delta_i < E[I_{T_i}]$, 则预防性维修任务 T_i 的可执行区间为 $L_{T_i} = [\tau_{T_i,l}, \tau_{T_i,u}]$, 如图 3(a) 所示。
- ② 若只满足 $\tau_{T_i}^* \leq I_{T_i}$, 则预防性维修任务 T_i 的可执行区间为 $L_{T_i} = [\tau_{T_i,l}, I_{T_i}]$, 如图 3(b) 所示。
- ③ 若只满足 $\delta_i < E[I_{T_i}]$, 则预防性维修任务 T_i 的可执行区间为 $L_{T_i} = I_{T_i}$, 如图 3(c) 所示。
- ④ 若既不满足 $\tau_{T_i}^* \leq I_{T_i}$ 也不满足 $\delta_i < E[I_{T_i}]$, 则预防性维修任务 T_i 的可执行区间为 $L_{T_i} = [\tau_{T_i,l}, I_{T_i}]$, 如图 3(d) 所示。
- ⑤ 若 $\tau_{T_i}^* = I_{T_i}$, 且不满足 $\delta_i < E[I_{T_i}]$, 则预防性维修任务 T_i 的可执行区间为 $L_{T_i} = [\tau_{T_i,l}, I_{T_i}]$, 如图 3(e) 所示。
- ⑥ 若 $\tau_{T_i}^* = I_{T_i}$, 且满足 $\delta_i < E[I_{T_i}]$ 则预防性维修任务 T_i 的可执行区间为 $L_{T_i} = I_{T_i}$, 如图 3(f) 所示。同时也说明该预防性维修任务产生的维修成本较高,后续 SMR 优化工作中应考虑对该任务的有效性进行重新分析。

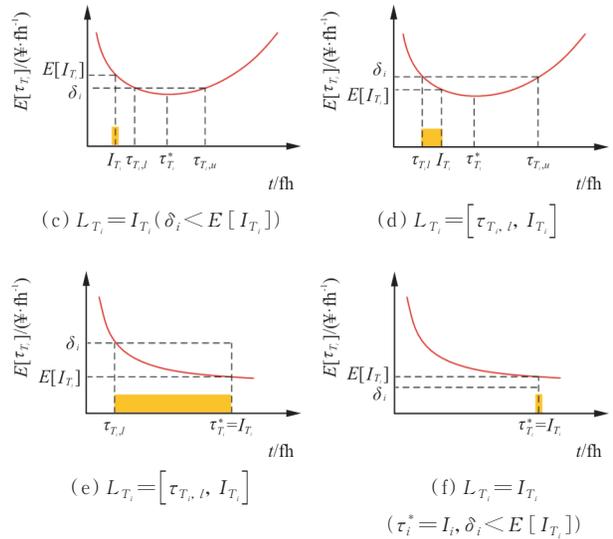
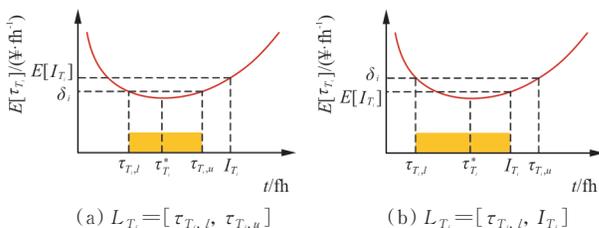


图 3 预防性维修任务 T_i 可执行区间权衡确定
 Fig. 3 Determine the work scope for maintenance task T_i

5 应用案例

本节首先用一个数值算例来解释上文中所提出的预防性维修任务可执行区间确定方法的使用流程,而后应用该方法对某型发动机风扇润滑任务的执行区间进行分析。

5.1 数值算例

本文所提方法的使用流程如图 4 所示。

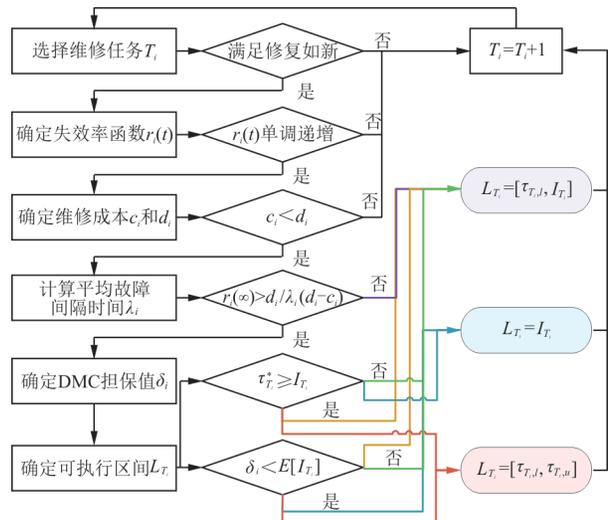


图 4 本文所提方法的使用流程
 Fig. 4 The process for employing the proposed method

首先,针对某一故障模式确定其对应的预防性维修任务能否使故障“修复如新”。若不能,则

不再对此维修任务开展进一步分析。

其次, 利用故障数据确定故障的拟合求解失效率函数, 并判断其是否为单调递增函数。若不是, 则不再对此维修任务开展进一步分析。

然后, 统计预防性维修成本和修复性维修成本数据, 并比较预防性维修成本是否小于修复性维修成本。若不是, 则不再对此维修任务开展进一步分析。

最后, 当上述判断结果均为“是”时, 则按照本文所给出的方法来确定该预防性维修任务的可执行区间(注: 图 4 中最后两个判断条件需同时进行)。

本文预防性维修任务 T_i 及其对应的故障模式 i 的数据如表 1 所示。为了简化叙述, 假设各故障模式的概率分布均服从威布尔分布, 并已完成拟合分析。

其中, $f_1(t) \sim W(4, 100; t)$ 表示故障模式 (1) 的概率分布服从“形状参数为 $\alpha = 4$, 尺度参数为 $\beta = 100$ 的威布尔分布”, 即:

$$f_1(t) = \alpha\beta(\beta t)^{\alpha-1}e^{-(\beta t)^\alpha} \quad (5)$$

表 1 维修任务 T_i 及其对应故障模式 i 的相关信息
Table 1 Information of maintenance task T_i and its corresponding failure mode i

| T_i | c_{T_i} | d_i | $f_i(t)$ | λ_i | δ_i | I_{T_i} |
|-------|-----------|--------|-----------------|-------------|------------|-----------|
| 1 | 80 | 140 | $W(4, 100; t)$ | 0.009 1 | 1.411 5 | 75 |
| 2 | 300 | 5 000 | $W(10, 300; t)$ | 0.003 2 | 1.836 3 | 115 |
| 3 | 50 | 200 | $W(2, 200; t)$ | 0.004 4 | 0.976 7 | 170 |
| 4 | 600 | 8 000 | $W(8, 200; t)$ | 0.004 7 | 6.142 5 | 210 |
| 5 | 75 | 150 | $W(3, 100; t)$ | 0.008 9 | 1.589 1 | 265 |
| 6 | 1 200 | 10 000 | $W(6, 150; t)$ | 0.006 2 | 17.771 5 | 275 |
| 7 | 150 | 400 | $W(5, 300; t)$ | 0.003 1 | 1.058 6 | 290 |

由公式 (3) 可得失效率函数 $r_i(t)$ 和 λ_i 为

$$\begin{cases} r_i(t) = \alpha\beta(\beta t)^{\alpha-1} \\ \lambda_i = \Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right) / \beta \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。关于其他 $f_i(t)$ 的解释类似, 此处不再赘述。

此外, 给出每一个故障模式 DMC 担保值的分配结果 δ_i 和 SMR 中所规定的每项维修任务的维修间隔 I_{T_i} , 如表 2 所示。

表 2 基于 DMC 的预防性维修任务可执行区间权衡确定结果
Table 2 Results of work scope of a maintenance task based on DMC constrains

| T_i | $r_i(t \rightarrow \infty)$ | $d_i/\lambda_i(d_i - c_{T_i})$ | $\tau_{T_i}^+/\text{fh}$ | $E[I_{T_i}]/(\text{¥} \cdot \text{fh}^{-1})$ | 是否 $\tau_{T_i}^+ \leq I_{T_i}$ | 是否 $\delta_i < E[I_{T_i}]$ | 所属情况 | L_{T_i} |
|-------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|--|--------------------------------|----------------------------|------|------------|
| 1 | ∞ | 256.5 | 82 | 1.357 7 | 否 | 否 | ④ | [66, 75] |
| 2 | ∞ | 332.5 | 183 | 2.611 4 | 否 | 是 | ③ | 115 |
| 3 | ∞ | 303.1 | 118 | 0.887 9 | 是 | 否 | ② | [73, 170] |
| 4 | ∞ | 230.1 | 115 | 14.908 9 | 是 | 是 | ① | [103, 124] |
| 5 | ∞ | 224.7 | 81 | 1.679 8 | 是 | 是 | ① | [58, 121] |
| 6 | ∞ | 183.3 | 82 | 71.860 8 | 是 | 是 | ① | [75, 90] |
| 7 | ∞ | 516.1 | 205 | 1.135 0 | 是 | 是 | ① | [149, 271] |

基于以上数据, 利用图 1 给出的成本分析流程, 可获得每一项维修任务 T_i 的可执行区间, 如表 2 所示。其中, 对于 T_1 、 T_2 、 T_3 来说, 其可执行区间 L_{T_i} 的上限为 SMR 中规定的维修间隔, 即 $L_{T_i}^+ = I_{T_i}$; 对于 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_7 来说, 由于同时满足两个条件, 其可执行区间的上下界可令公式 (2) 满足 $E[\tau_{T_i,l}] = E[\tau_{T_i,u}] = \delta_i$ 条件, 反解求得。

通过以上算例可以看出, 在获得了相关参数的情况下, 本方法能够针对每一项预防性维修任务及其所对应的故障模式, 给出该任务的可执行区间, 为进一步辅助航空器运营人组合打包维修任务提供输入。例如, 维修任务 T_3 和 T_4 、 T_5 的可

执行区间分别存在交集, 因此在制定维修方案时, 可以进一步从工程实施的角度考虑 T_3 和 T_4 、 T_5 之间的相关性(如, 工序具有顺序关系、维修对象位于相同区域、维修间隔相近等)来确定任务打包方式。

5.2 案例分析

以文献 [19] 给出的某型飞机发动机风扇润滑任务为例来分析该任务的间隔调整策略。文献 [19] 指出: ① 润滑任务所对应故障模式(风扇高振动)的概率分布服从威布尔分布 $f(t) \sim W(2.9, 1882^{-1}; t)$, 即 $\alpha = 2.9$ 且 $\beta = 1882^{-1}$, ②

SMR 规定的一个润滑周期为 3 000 飞行循环 (FC), 但航空公司按此间隔执行后发生高振动事件较多。因此, 从控制故障发生概率的角度建议将该润滑任务的执行时刻调整为 2 000 FC^[19]。

为了利用本文所提方法, 需要获取预防性维修任务的成本 c 和修复性维修成本 d , 同时还要给出直接维修成本 (DMC) 约束值 δ 。鉴于本文使用 DMC 作为经济性约束条件, 因此统计预防性/修复性维修成本时仅考虑相关任务所需的耗材成本及人工成本。经调研, 当开展预防性润滑任务时, 维修人员拆装风扇叶片后需利用二硫化钼润滑脂对风扇叶片根部、填充块、以及风扇盘榫槽等位置进行重新润滑, 使发动机恢复初始振动构型, 令 $c = 2\,400$; 而当发生高振动事件需要开展修复性维修时, 维修人员拆装风扇叶片后需先对不平衡相位和相幅进行配平处理, 再对风扇重新进行润滑, 因此产生了额外的维修工时, 令 $d = 3\,600$ 。由于缺少风扇叶片的 DMC 担保值信息, 无法直接获得经济性约束值 δ , 但为了获得维修任务可执行区间, 本文将由公式 (2) 求得的每飞行循环平均维修成本最小值 $E[\tau^*]$ 乘以一个上浮系数 μ 作为经济性约束值, 即 $\delta = (1 + \mu) \cdot E[\tau^*]$ 。

该发动机风扇叶片润滑任务可执行区间的权衡确定结果如图 5 所示, 可以看出: 从维修成本权衡的角度, 该任务的最优执行时刻 $\tau^* = 2\,005$ FC, 对应的每飞行循环平均维修成本 $E[\tau^*] = 2.087$ ¥/FC。此时令 $\mu = 1\%$, 表示每飞行循环的维修成本上浮不超过 1% 是可以接受的, 从而得到经济性约束值 $\delta = 2.108$ (如图 5 虚线所示)。最终得到该润滑任务的可执行区间为 $L_T = [1\,722, 2\,448]$, 表明从维修成本的角度来看, 该润滑任务可在此飞行循环范围内择机开展, 为进一步开展多任务组合打包提供输入。

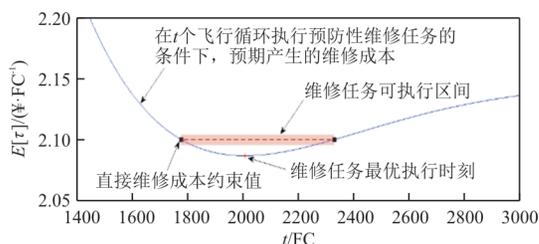


图 5 某型发动机润滑任务可执行区间权衡结果
Fig. 5 The result for determining the work scope of the lubrication task for a type of engine

本文所提方法的局限性在于只适用于 MSG-3 分析产生的 FEC-7 类 (影响经济) 的任务。因为对于影响安全/影响使用的任务, 一旦发生故障后除了会产生维修成本, 还会产生赔付、延误等成本项目, 已超出本文所提方法的使用范围, 可作为后续研究方向。

6 结 论

本文提出了一种基于直接维修成本的预防性维修任务可执行区间权衡确定方法, 在兼顾考虑了 SMR 中规定的任务间隔和 DMC 担保值的前提下求解出预防性维修任务的可执行区间。该方法可为实施修任务组合打包提供支撑, 并为航空公司整合维修任务提供了参考, 进而达到控制及优化维修成本的效果。

参考文献

- [1] 韩丽. 民机持续适航文件及计划维修要求研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(7): 5.
HAN Li. Research on the continued airworthiness and schedule maintenance requirements for civil transport aircraft[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(7): 5. (in Chinese)
- [2] 彭本红, 吴桂平. 航空公司运营管理[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
PENG Benhong, WU Guiping. Airplanes operations management [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 王真, 陈效. 航空公司运营成本探析[J]. 中国商论, 2017(16): 83-84.
WANG Zhen, CHEN Xiao. Analysis of airline operating cost[J]. China Business & Trade, 2017(16): 83-84. (in Chinese)
- [4] 梁剑, 左洪福. 民用飞机维修成本评估[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 95-98.
LIANG Jian, ZUO Hongfu. Evaluation of maintenance cost for commercial aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 95-98. (in Chinese)
- [5] 邵磊, 陈志伟, 朱晓樱. 航空维修直接成本分析[J]. 数字化用户, 2014, 20(10): 97-98.
SHAO Lei, CHEN Zhiwei, ZHU Xiaoying. Direct cost analysis of aviation maintenance[J]. Digital User, 2014, 20(10): 97-98. (in Chinese)
- [6] 卢昕. 航空公司维修成本分析与控制[J]. 科技创新导报, 2015(26): 2.
LU Xin. Airline maintenance cost analysis and control[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015(26): 2. (in Chinese)

- [7] 刘春红, 王华伟. 大型客机直接维修成本分析研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 1083-1088.
LIU Chunhong, WANG Huawei. Direct maintenance cost analysis of large passenger aircraft[J]. Mechanical Science and Technology, 2010, 29(8): 1083-1088. (in Chinese)
- [8] WANG Huawei, GAO Jun, WU Haiqiao. Direct maintenance cost prediction of civil aircraft[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(5): 406-414.
- [9] 蔡景, 左洪福, 王华伟. 多部件系统的预防性维修优化模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007(2): 133-138.
CAI Jing, ZUO Hongfu, WANG Huawei. A study on preventive maintenance optimization model for multi-unit system[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2007(2): 133-138. (in Chinese)
- [10] SHAFIEE M, FINKELSTEIN M. An optimal age-based group maintenance policy for multi-unit degrading systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 134: 230-238.
- [11] 卢婷婷, 左洪福, 孙见忠, 等. 客户化的航线维修任务组合分配模型[J]. 飞机设计, 2017, 37(1): 50-54.
LU Tingting, ZUO Hongfu, SUN Jianzhong, et al. Research on the combination and distribution model of line maintenance tasks[J]. Aircraft Design, 2017, 37(1): 50-54. (in Chinese)
- [12] NZUKAM C. Opportunistic maintenance scheduling with stochastic opportunities duration in a predictive maintenance strategy[J]. IFAC Papers on Line, 2018, 51(11): 453-458.
- [13] 魏启东. 基于机会维修的民机预防维修任务组合优化[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
WEI Qidong. Combination optimization of preventive maintenance task for civil aircraft based on opportunistic maintenance [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [14] 赵洪山, 李自立, 刘宏杨, 等. 风电场的组合维修策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 189-196.
ZHAO Hongshan, LI Zili, LIU Hongyang, et al. Research on combination maintenance strategy of wind farms[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(2): 189-196. (in Chinese)
- [15] 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.
LIN Cong, JIANG Qingxi, ZHOU Yang. Schedule maintenance task interval optimization method based on in-service data[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 572-576. (in Chinese)
- [16] 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.
NAN Yanfei, 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)
- [17] 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)
- [18] SAE. Using a system reliability model to optimize maintenance costs: a best practices guide: SAE JA 6097 [S]. USA: SAE, 2001.
- [19] 徐贵强, 吴小松. 基于威布尔分布的CFM56-5B发动机风扇润滑间隔调整方法[J]. 航空维修与工程, 2022(1): 97-100.
XU Guiqiang, WU Xiaosong. Adjustment method of fan lubrication interval of CFM56-5B engine based on Weibull distribution[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022(1): 97-100. (in Chinese)

作者简介:

林 聪(1986—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:可靠性评估,维修工程分析。

蒋庆喜(1985—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:维修工程分析。

苏嗣哲(1995—),男,硕士,助理工程师。主要研究方向:综合保障。

马恬然(1993—),女,硕士,工程师。主要研究方向:综合保障。

(编辑:马文静)