

文章编号: 1674-8190(2022)05-148-08

民用飞机襟翼下沉铰链机构维护成本分析研究

冯成慧¹, 王乾平¹, 刘育斌¹, 唐家强², 刘佳奇²

(1. 航空工业第一飞机设计研究院 结构设计研究所, 西安 710089)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 民用飞机襟翼下沉铰链机构是一种被广泛采用的收放运动机构,其维护成本对运营经济性影响较大。针对民用飞机襟翼下沉铰链机构维护成本预计与实际运营差距较大的问题,基于MSG-3(Maintenance Steering Group 3)分析法提出一种维护成本预计方法。以损伤容限分析结果为参考数据,通过MSG-3分析得到襟翼下沉铰链机构的检查方法、门槛值和检查间隔;根据维护任务的性质和来源,建立直接维护成本预计模型,对襟翼下沉铰链机构维护成本进行预计;以具体机型的襟翼下沉铰链机构为例,验证维护成本预计方法的可行性和有效性。结果表明:本文提出的维护成本预计方法能够较为全面地预计机体结构维护成本,相对其他方法更贴近实际运营。

关键词: 民用飞机;襟翼;下沉铰链;MSG-3;维护成本

中图分类号: V267

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.16

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Analysis and Research on Maintenance Cost of Civil Aircraft Flap Sinking Hinge Mechanism

FENG Chenghui¹, WANG Qianping¹, LIU Yubin¹, TANG Jiaqiang², LIU Jiaqi²

(1. Structure Design Department, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The flap sinking hinge mechanism of civil aircraft is a widely used retractable motion mechanism, and its maintenance cost has a great impact on operating economy. In view of the large gap between the maintenance cost of the flap sinking hinge mechanism of civil aircraft and the actual operation value, a maintenance cost estimation method is proposed based on the MSG-3 (Maintenance Steering Group 3) analysis method. The damage tolerance analysis results are used as reference data, the inspection method, threshold value and inspection interval of the flap sinking hinge mechanism are obtained through MSG-3 analysis. According to the nature and source of maintenance tasks, a direct maintenance cost prediction model is established to predict the maintenance cost of flap sinking hinge mechanism. The feasibility and effectiveness of the maintenance cost estimation method is verified by taking the flap sinking hinge mechanism of a specific model as an example. The results show that the proposed maintenance cost prediction method can comprehensively estimate the maintenance cost of aircraft structure, and is closer to actual operation than other methods.

Key words: civil aircraft; flap; sinking hinge; MSG-3; maintenance cost

收稿日期: 2021-10-13; 修回日期: 2021-12-13

通信作者: 冯成慧, fch24@163.com

引用格式: 冯成慧, 王乾平, 刘育斌, 等. 民用飞机襟翼下沉铰链机构维护成本分析研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 148-155.

FENG Chenghui, WANG Qianping, LIU Yubin, et al. Analysis and research on maintenance cost of civil aircraft flap sinking hinge mechanism[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 148-155. (in Chinese)

0 引言

民用飞机襟翼下沉铰链机构由支臂双耳、摇臂单耳和销轴等结构组成,可实现襟翼的运动偏转功能,并担负襟翼表面气动载荷传递到机体结构的任务^[1]。依据CCAR-25-R4,该机构属于民用飞机主要结构件(Principal Structural Element,简称PSE),在维护结构中铰链机构也属于重要维护项目(Structure Significant Item,简称SSI)^[2]。通常,直接维护成本(DMC)在飞机直接运营成本所占比例达10%~20%^[3-4],这部分成本可控裕度较大,具有很大的压缩空间^[5]。因此研究DMC的构成要素和预计方法对成本的分析与控制具有重要意义^[6-7]。

近年来,国内外研究者围绕飞机维护成本的预计开展了大量研究,提出了许多成本预计方法和模型。C. Sriram等^[8]提出了维修计划的决策公式和解决问题的启发式方法,通过合理安排飞机维修计划,最大限度地减少维护成本并将飞机重新分配到航段期间产生的成本,可用于中型航空公司降低维护成本;M. Fioriti等^[9]提出了一种民用飞机维护费用的估算方法,针对每个飞机部件的维护成本影响因素存在差异的情况,通过对子系统级别的维修成本进行评估,来量化每个飞机部件对总维修成本的有效影响,实现更精确的维护成本预计,其预计结果与国际航空运输协会提供的参考值具有良好的一致性;M. Lee等^[10]采用AEA(Association of European Airlines)方法对客机的营运成本进行了系统分析,对维护成本等要素进行了评估,同时以香港国际机场为背景,考虑了多个实际的飞行情景,确定了成本效益最佳的机型;J. Long等^[11]提出了一种基于无维护运行期理念以可靠性为中心的维护策略优化方法,可在满足预定可靠性要求的情况下实现维护成本最小化,并通过一个基于在线可更换单元的实例,验证了所提出的维护策略优化方法;Cai J等^[12]根据MSG-3分析法,考虑门槛值和重复间隔提出了一种成本预测方法,用于优化检查等级、门槛值和重复检查间隔,同时通过该方法建立了飞机结构的最佳检查模型,在满足预定可靠性要求的情况下

实现了维护成本最小化;吴静敏等^[13]针对DMC的预计方法精度较低、存在需要大量专家知识的问题,提出了一种基于案例推理(Case-based Reasoning,简称CBR)的DMC估计方法,并通过案例验证了该方法预计精度比其他方法提高了10%以上;Wang H W等^[14]基于模糊支持向量机提出了一种预计方法,实现了民用飞机设计阶段动态矩阵的定量预测,同时阐述了所提DMC预计方法的分析与建模过程,并将提出的DMC预测模型应用于新研制的飞机进行验证;刘余等^[15]基于DMC预计模型提出了结构修理恢复成本的计算方法,同时通过前中机身蒙皮壁板非计划维修的案例验证所提方法的有效性。然而,现有的DMC预计方法多是针对整机或者飞机系统部件在服役期内的维护成本进行预计,对飞机机体结构的维护成本预计方法的研究并不充分。同时,现有的DMC预计方法通常没有考虑非计划维护任务所产生的维护成本,实际上这部分费用在飞机实际运营过程中是不能忽略的。

针对以上问题,根据民用飞机襟翼下沉铰链机构的设计特点,本文以损伤容限分析结果为基础数据,基于MSG-3分析法提出一种民用飞机下沉铰链机构维护成本预计方法。该方法通过制定MSG-3分析的等级对照标准,量化各项评定指标的模糊性,建立非计划维护的DMC模型,预计对应任务所产生的维护成本;通过具体机型襟翼下沉铰链机构的维护成本对所提方法的可行性和有效性进行验证。

1 维护成本分析方法

1.1 基于量化指标的MSG-3分析法

MSG-3分析法是在工程实践中常用的方法,是针对维护工作的分析逻辑法,其分析结果是系统/分系统指定具体的维护任务^[16-17]。对于飞机机体结构,MSG-3中的结构逻辑分析法能做到更直接地评定结构的恶化程度,该分析法根据结构项目及持续性适航的重要性将结构分为SSI和一般结构项目^[18]。根据MSG-3结构逻辑分析,SSI结构维护任务的来源包括环境退化(Environment-

tal Deterioration, 简称 ED)、偶然损伤 (Accidental Damage, 简称 AD)、腐蚀预防和控制 (Corrosion Prevention and Control Program, 简称 CPCP)。此外, 针对损伤容限项目由损伤容限分析 (Damage Tolerance Analysis, 简称 DTA) 对结构进行疲劳损伤 (Fatigue Damage, 简称 FD) 分析, 确定具体的维护任务。

确定 ED 和 AD 的检查等级及检查间隔需要根据维护任务的驱动因素, 评估环境退化率 (Environmental Deterioration Rating, 简称 EDR) 和偶然损伤率 (Accidental Damage Rating, 简称 ADR), 同时通过 ED 分析考虑 CPCP 的任务需求^[18]。EDR 包含恶劣环境暴露等级、材料的防护等级、腐蚀的敏感度等级和可检度等级的综合评估; ADR 包含偶然损伤可能性等级、对损伤扩展的敏感等级、剩余强度等级和可见性等级的综合评估。在制定维护任务的过程中, 针对上述评估项目会受到设计构型、裂纹可检度和环境等因素模糊性干扰的问题, 为保证分析过程的系统化和一致性, 本文通过制定相应的评估等级标准来量化各因素对维护任务的影响。具体的量化标准如表 1 所示, EDR 和 ADR 等于各项评定等级之和, 各项评定等级取值均为 0/1/2。

表 1 评定等级对照标准
Table 1 Comparison standard of rating

评定项目	对照标准			
	0	1	2	
EDR	可检度等级	差	中等	好
	对腐蚀的敏感度	高	中等	低
	防护等级	低	中等	高
	恶劣环境等级	高	中等	低
ADR	偶然损伤可能性等级	高	中等	低
	对损伤扩展的敏感等级	高	中等	低
	剩余强度等级	低	中等	高
	可见性等级	差	中等	好

此外, FD 是在交变载荷的作用下产生裂纹并持续扩展的结果, 同时也受到飞机使用时间的影响^[19], 因此确定 FD 的维护任务需要基于裂纹扩展试验的结果进行分析, 并满足 CCAR25 部对于疲劳和损伤容限评估的要求。可见, 根据 MSG-3 进行 FD 分析与结构的 DTA 是一个统一的过程, 可

按照 MSG-3 的分析逻辑和流程, 结合 DTA 的结果, 制订关于 FD 的维护任务和要求。

民用飞机襟翼下沉铰链机构属于 SSI 项目, 结构性能的退化具有时间延迟的特征, 属于损伤容限项目, 其逻辑分析决断过程如图 1 所示。

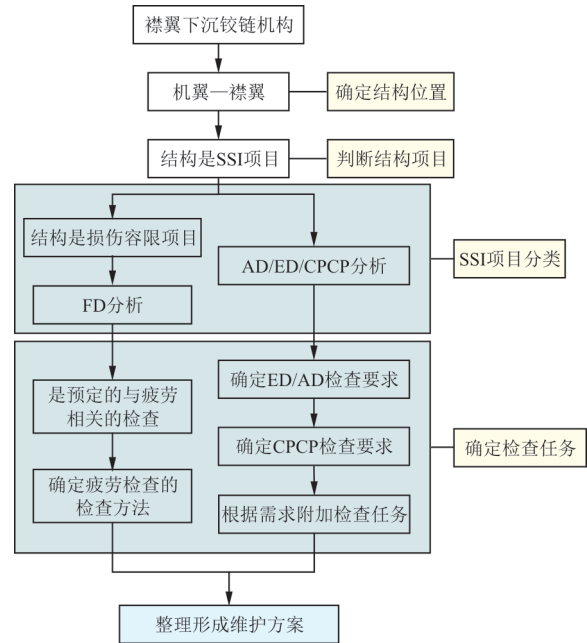


图 1 MSG-3 分析逻辑决断图

Fig. 1 Logic decision diagram of MSG-3 analysis

1.2 基于 MSG-3 的 DMC 预计模型

分析 MSG-3 中维护任务的来源和性质发现, ED 和 FD 分析所确定的维护任务是周期性的, 而 AD 是离散性事件, 经 AD 分析所确定的维护任务检查时间并不固定, 因此需要建立适用于计划维护和非计划维护的 DMC 预计模型^[20]。相对传统的预计方法, 基于 MSG-3 的 DMC 预计模型避免了只考虑计划维护产生的费用导致与实际运营偏差较大的问题, 通过建立适用性不同的 DMC 预计模型, 考虑了飞机结构检查产生的全部费用。

(1) 计划维修

机体结构的计划维修任务一般来源于 FD 和 ED, 其门槛值、检查间隔决定了在飞机服役期内的检查频次, 检查方法决定了人工成本和材料费用。基于飞机结构计划维护 DMC 的构成要素和影响因素, 建立结构计划维护项目的 DMC 预计模型:

$$P_{\text{DMC(SM)}} = FQ(H + M) \quad (1)$$

式中: F 为频次矩阵; Q 为数量矩阵; H 为人工成本矩阵; M 为材料成本矩阵。

式(1)中的各矩阵由下列公式求解:

$$F = \begin{bmatrix} N_{Mtc,i} \\ L_i \end{bmatrix}_{1 \times n} \quad (2)$$

$$Q = [N_{Item,i}]_{n \times n} \quad (3)$$

$$H = [R(T_{Access,i} + T_{Mtc,i})]_{n \times 1} \quad (4)$$

$$M = [C_{Mat,i}]_{n \times 1} \quad (5)$$

式中: i 为任务序号; n 为任务数量; $N_{Mtc,i}$ 为每个任务在服役期间的任务次数; L_i 为每个任务对应结构的寿命周期; $N_{Item,i}$ 为每个任务涉及的项目在飞机上的安装数量; R 为人工工时费率; $T_{Access,i}$ 为每个任务的接近时间; $T_{Mtc,i}$ 为维修时间; $C_{Mat,i}$ 为材料成本。

(2) 非计划维修

相对于计划维护任务,非计划维护任务呈现出明显的离散性,缺少固定的门槛值和检查间隔,导致非计划维护成本难以预计。分析非计划维护的触发条件发现,只有出现偶然事件时,才会执行非计划维护任务。同时,在不同机体部位出现偶然事件,所执行的非计划维护任务是不同的,例如:当发动机发生鸟击时,并不需要执行检查雷达罩的维护任务。因此,可以通过大数据统计偶然事件的发生概率以及偶然事件对不同机体结构的影响程度,计算在服役期内的维护频次,从而实现非计划维护成本的预计。

为解决飞机结构非计划维护成本预计困难的问题,在计划维护模型的基础上引入概率系数矩阵,改进维护频次的计算方法,用以衡量在飞机服役期内每飞行小时的平均非计划维护频次。以此建立非计划维护项目的 DMC 预计模型:

$$P_{DMC(USM)} = KFQ(H + M) \quad (6)$$

式中: K 为概率系数矩阵; F 为频次矩阵; Q 为数量矩阵; H 为人工成本矩阵; M 为材料成本矩阵。

式(6)中的各矩阵由下列公式求解:

$$K = [q_i]_{1 \times n} \quad (7)$$

$$F = [P_i U_i]_{n \times n} \quad (8)$$

式中: q_i 为偶然事件对所研究对象的影响程度; P_i 为每个偶然事件的发生概率; U_i 为飞机在服役期间飞行循环与飞行小时的比值。

1.3 DMC 预计模型的数据流

基于 MSG-3 的计划维护 DMC 预计模型的数

据传递过程如图 2 所示,非计划维护 DMC 预计模型的数据传递过程如图 3 所示。

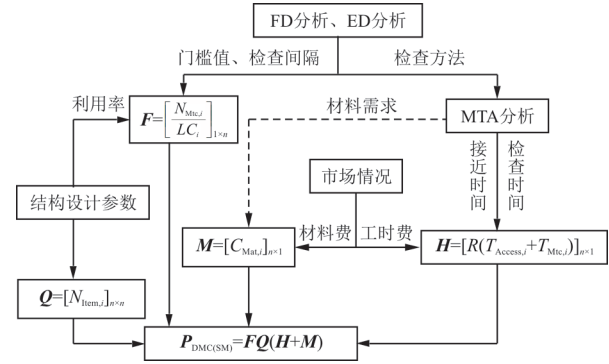


图 2 计划维护 DMC 预计模型数据流

Fig. 2 Data flow of scheduled maintenance DMC model

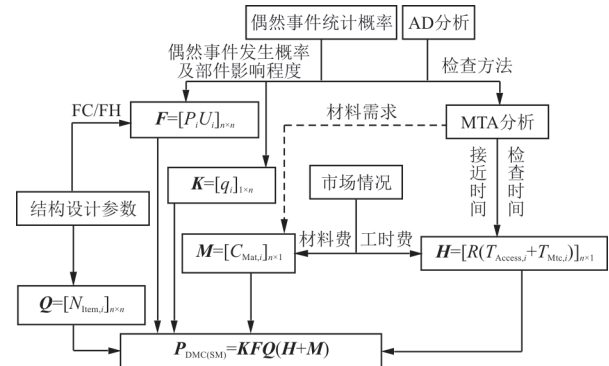


图 3 非计划维护 DMC 预计模型数据流

Fig. 3 Data flow of unscheduled maintenance DMC model

计划维护 DMC 预计模型的主要输入为 MSG-3 中的 FD 分析和 ED 分析、结构设计参数。该模型通过门槛值、检查间隔和飞机利用率计算在服役期内的维护频次,并根据检查方法开展维护任务分析 (Maintenance Task Analysis, 简称 MTA), 计算当前市场情况下产生的材料费(可没有)和工时费;根据各输入参数,采用式(1)计算计划维护的 DMC。

相对计划维护,非计划维护 DMC 预计模型输入较多,主要为偶然事件统计概率、AD 分析和结构设计参数。其中,概率系数矩阵直接由偶然事件对部件的影响程度确定,在服役期内的维护频次根据偶然事件的发生概率和飞行循环与飞行小时的比值进行计算,其余参数计算过程与计划维护一致。

2 襟翼下沉铰链机构维护成本分析流程

本文预计方法包括损伤容限分析、MSG-3 分

析和维护成本预计 3 个部分,如图 4 所示。首先,根据结构几何参数和材料属性进行 DTA,为后续分析提供裂纹扩展数据和检查维护要求。然后,基于 DTA 提供的裂纹扩展寿命和裂纹扩展路径开展 MSG-3 分析,通过疲劳损伤分析、环境退化分析和偶然损伤分析制定满足 DTA 阈值要求和检查间隔要求的维护方案,同时由 MTA 报告将阈值、检查间隔和维护时间等数据输入到 DMC 预计模型。最后,考虑在市场情况下的人工成本和材料费用,根据维护任务的不同应用 DMC 预计模型实现机构的维护成本预计。

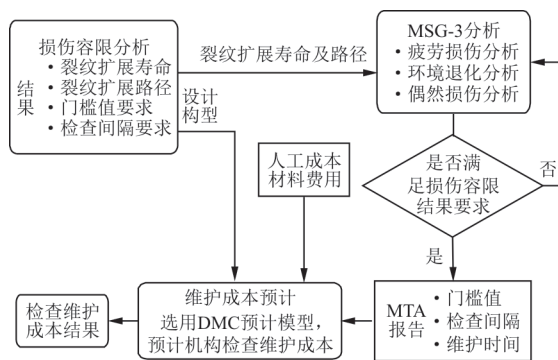
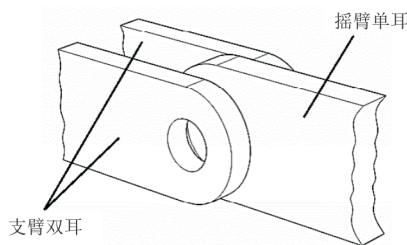


图 4 襟翼下沉铰链机构维护成本分析流程

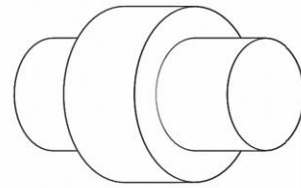
Fig. 4 Maintenance cost analysis process of flap sinking hinge mechanism

3 案例分析

根据损伤容限分析结果,通过具体机型襟翼下沉铰链机构在服役期内的维护成本预计,验证所提方法的可行性和有效性。具体机型的襟翼下沉铰链机构如图 5 所示,由支臂双耳、摇臂单耳和销轴结构组成。当前下沉铰链的轴承一般选用自润滑轴承,本文不对其维护成本进行讨论。摇臂单耳结构为铝合金,耳片材料采用 7050-T7451;支臂双耳结构为钛合金,耳片材料采用 Ti-6Al-4V;销轴结构采用 PH13-8Mo。



(a) 耳片结构



(b) 销轴结构

图 5 襟翼下沉铰链机构

Fig. 5 Flap sinking hinge mechanism

3.1 损伤容限结果

基于襟翼下沉铰链机构的结构参数和材料属性,通过 Abaqus 联合 Franc3D 的损伤容限仿真分析^[21],得到襟翼下沉铰链机构各结构的裂纹扩展寿命,如图 6 所示,其中 FC 为飞行循环数。

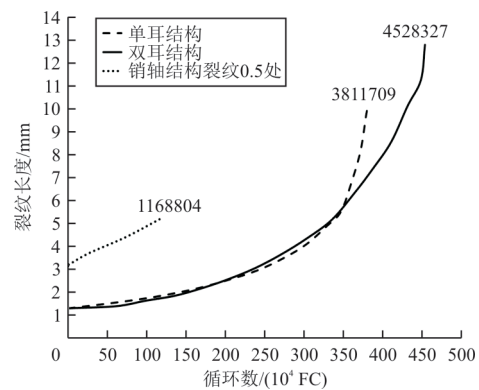


图 6 各结构的裂纹扩展寿命

Fig. 6 Crack growth life of each structure

支臂双耳裂纹扩展寿命为 3 811 709 FC,摇臂单耳裂纹扩展寿命为 4 528 327 FC,销轴结构裂纹扩展寿命为 1 168 804 FC。为保证机体结构安全,在满足结构安全系数为 2 的情况下,确定各结构检查的阈值和检查间隔要求,如表 2 所示。

表 2 阈值和检查间隔要求
Table 2 Threshold and interval requirements

结构	裂纹扩展寿命/FC	阈值/FC	检查间隔/FC
支臂双耳	3 811 709	1 817 296	48 363
摇臂单耳	4 528 327	1 974 650	183 198
销轴	1 168 804	128 852	303 700

3.2 襟翼下沉铰链机构的 MSG-3 分析

表 2 中给出了阈值和检查间隔的安全限制

边界,经MSG-3分析确定的门槛值和检查间隔都不能超过该限制。根据1.2节阐述的MSG-3分析法,确定襟翼下沉铰链机构FD、ED和AD的维护任务具体要求。

基于各结构的裂纹扩展寿命,结合该机型的C检4 800 FC、D检24 000 FC,确定FD检查的门槛值为D检,检查间隔为3C检(14 400 FC)^[22]。裂纹扩展路径如图7所示。

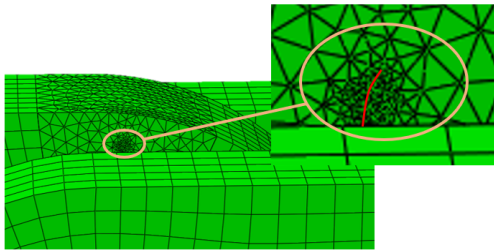


图7 裂纹扩展路径
Fig. 7 Crack growth path

从图7可以看出:裂纹(在图7中用红色进行标注)会被结构遮挡导致无法直接通过目视观察到。为确保裂纹在规定的剩余强度范围内可被检出,所有结构均采用特别详细检查(Special Detailed Inspection,简称SDI),即离位的渗透检查法。

分析襟翼下沉铰链机构的工作环境和所在位置发现,该机构位于机翼后缘部位,属于偶然事件频发区域,受腐蚀、环境的影响很小,因此襟翼下沉铰链机构只需要在发生偶然事件时进行AD检查,忽略ED造成的影响。根据MSG-3进行ADR评估,确定各结构的检查任务,具体分析过程如表3所示,其中GVI(General Visual Inspection)为一般目视检查,DET(Detail Inspection)为详细目视检查,从表3可以看出:支臂双耳和摇臂单耳ADR为6,可见性较好,采用GVI进行结构检查;而销轴结构被耳片结构遮挡导致GVI不适用,采用DET进行结构检查。然而,AD的随机性和概率性导致检查的周期和频次并不固定,使得维护成本也难以精确预计。为解决该问题,本文提出非计划维护任务的DMC预计模型,通过建立偶然事件与检查频次之间的联系,衡量在飞机服役期内的检查频次。非计划维护任务的DMC预计模型的数据输入如表4所示,其中,偶然事件发生次数和发生概率来自2015年《中国民用航空安全信息统计分

析报告》^[23];影响程度按该偶然事件影响部位统计结果给出,例如鸟击的影响程度来自2015年《鸟击航空器信息分析报告》^[24]。

表3 MSG-3分析过程
Table 3 Analysis process of MSG-3

结构项目	区域	材料	防护	内部	外部	设计原则
支臂双耳	机翼一襟翼	Ti-6Al-4V	整流罩	—	检查	损伤容限
摇臂单耳	机翼一襟翼	7050-T7451	整流罩	—	检查	损伤容限
销轴	机翼一襟翼	PH13-8Mo	整流罩	—	检查	损伤容限

结构项目	偶然损伤可能性等级	对损伤扩展的敏感等级	剩余强度等级	可见性等级	ADR	检查任务
支臂双耳	1	1	2	2	6	GVI
摇臂单耳	1	1	2	2	6	GVI
销轴	1	1	2	1	5	DET

表4 偶然事件的发生概率和影响程度
Table 4 Occurrence probability and influence degree of accidental events

序号	偶然事件	发生次数	发生概率/(FC ⁻¹)	影响程度/%
1	鸟击	186	5.61×10 ⁻⁵	16
2	外来物击伤	67	2.02×10 ⁻⁵	19
3	雷击/电击	26	7.85×10 ⁻⁶	12
4	冰击	16	4.83×10 ⁻⁶	8
5	发动机停车	15	4.53×10 ⁻⁶	0
6	航空器撞障碍物	12	3.62×10 ⁻⁶	10
7	部件脱落/损坏	5	1.51×10 ⁻⁶	0
8	空中颠簸	5	1.51×10 ⁻⁶	6

3.3 DMC 预计

根据上述对襟翼下沉铰链机构维护任务的分析,整理汇总得到MTA报告,如表5所示,其中,接近时间和检查时间参考相关机型AMM(Aircraft Maintenance Manual)的操作程序和工程实践确定。同时,考虑到不同的检查任务间有着重复的接近时间,对能够同时接近的检查任务进行整合,以符合工程实际。

表5 结构检查任务汇总表
Table 5 Summary of structural inspection tasks

序号	任务名称	任务类型	任务对象	门槛值/FC	任务间隔/FC	接近时间/h	检查时间/h
1	疲劳损伤检查	SDI	铰链机构	24 000	14 400	1	0.6
2	偶然损伤检查	GVI	支臂双耳	—	—	1	0.4
		GVI	摇臂单耳				
		DET	销轴结构				

基于表5给出的详细信息,襟翼下沉铰链机构的DMC按照式(1)~式(8),结合飞机的设计参数进行计算。DMC预计结果汇总如表6所示,在本案例中,只计算一个襟翼下沉铰链机构的维护成本。根据国内市场惯例,取SDI人工工时费率为80美元/小时,材料费取20美元;GVI和DET的费率为60美元/小时,原位维修不消耗材料。

飞机设计参数:

(1) 在服役期间,飞机的年利用率为3 000飞行小时/年;

(2) 飞行循环和飞行小时比为1:1;

(3) 飞机设计生命周期为60 000 FC。

表6 维护成本预计结果汇总
Table 6 Summary of maintenance cost prediction

序号	任务名称	任务类型	预计值(美元/飞行小时)
1	铰链机构的FD检查	SDI	0.007 4
2	铰链机构的AD检查	GVI/DET	0.001 2

从表6可以看出:AD检查的维护成本费用已经占到了总费用的14.21%。显然,在实际运营过程中,不能忽略AD检查产生的维护成本。

采用本文所建立的基于MSG-3的DMC模型进行预计,得到的预计结果对比如图8所示。预计结果与文献[25]中提出的改进Liebeck模型以及实际值进行对比,从图8可以看出:采用本文所提方法的模型预计准确度提高了24.69%,证明该方法更加贴近运营实际。

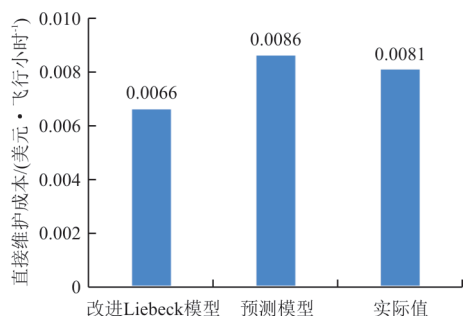


图8 预计结果对比

Fig. 8 Comparison of prediction results

4 结论

(1) 针对民用飞机襟翼下沉铰链机构维护成本预计与实际运营差距较大的情况,本文基于MSG-3分析法提出了一种针对飞机结构维护成本的预计方法,相对其他方法更加方便快捷、更加贴近运营实际。

(2) 在实际运营过程中,非计划维护成本在DMC中占据一定比例,尤其是对于机翼、尾翼和雷达罩等结构,非计划维护成本甚至成为DMC的主要部分。因此,能否忽略非计划维护成本需要分析离散性损伤源的发生概率及其对研究对象的影响程度。

(3) 针对非计划维护成本被忽略的情况,本文制定了ADR和EDR等级评定的量化标准,引入概率系数矩阵并改进了频次矩阵的计算方法,实现了计划维护成本和非计划维护成本的客户化预计。

(4) 本文提供了一种在缺少维护方案的情况下,以损伤容限分析结果为基础,应用MSG-3分析法为维护成本分析提供基础数据的思路。

参考文献

- [1] 严少波. 民用飞机铰链式襟翼运动机构运动误差分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(3): 33-34.
YAN Shaobo. Motion tolerance analysis for flap link-age architecture of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2011(3): 33-34. (in Chinese)
- [2] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011. (in Chinese)
- [3] 许敏, 党铁红, 叶叶沛, 等. 中国市场直接运营成本(DOC)计算方法研究与应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2010(4): 45-50.
XU Min, DANG Tiehong, YE Yepai, et al. The study and application of direct operating cost method for china civil transport market[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2010(4): 45-50. (in Chinese)
- [4] 刘彦波, 郑蓝, 贾宝惠. 民用飞机直接维修成本分配模型

- 研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 120-126.
LIU Yanbo, ZHENG Lan, JIANG Baohui. Research on allocation model of direct maintenance cost of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 120-126. (in Chinese)
- [5] 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(4): 95-98.
LIANG Jian, ZUO Hongfu. Evaluation of maintenance cost for commercial aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002(4): 95-98. (in Chinese)
- [6] FENG L, WANG H L, ZHOU T, et al. A real-time variable cost-based maintenance and inventory model from prognostic information [J]. International Journal of Advances in Computing Technology, 2013, 5(6): 532-541.
- [7] MOFOKENG T, MATIVENGA P T, MARNEWICK A. Analysis of aircraft maintenance processes and cost [J]. Procedia CIRP, 2020, 90: 467-472.
- [8] SRIRAM C, HAGHANI A. An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment [J]. Transportation Research Part A, 2003, 37(1): 29-48.
- [9] FIORITI M, VERCELLA V, VIOLA N. Cost-estimating model for aircraft maintenance [J]. Journal of Aircraft, 2018, 55(4): 1-12.
- [10] LEE M, LI L K B, SONG W B. Analysis of direct operating cost of wide-body passenger aircraft: a parametric study based on Hong Kong [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(5): 1222-1243.
- [11] LONG J, SHENOI R A, JIANG W. A reliability-centred maintenance strategy based on maintenance-free operating period philosophy and total lifetime operating cost analysis [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2009(6): 711-719.
- [12] CAI J, ZUO H F, XU Y M. Maintenance cost analysis under different inspection levels for aircraft structure [C] // Prognostics & System Health Management Conference. [S.l.]: IEEE, 2010: 1-5.
- [13] 吴静敏, 左洪福. 基于案例推理的直接维修成本预计方法 [J]. 航空学报, 2005, 26(2): 190-194.
WU Jingmin, ZUO Hongfu. New method for direct maintenance cost estimating by using CBR [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(2): 190-194. (in Chinese)
- [14] WANG H W, GAO J, WU H Q. Direct maintenance cost prediction of civil aircraft [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2014, 86(5): 404-416.
- [15] 刘余, 刘昕, 张继斌, 等. 民用飞机结构非计划直接维修成本预计研究 [J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 123-128, 138.
LIU Yu, LIU Xin, ZHANG Jibin, et al. Study on unscheduled direct maintenance cost of civil aircraft structure [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 123-128, 138. (in Chinese)
- [16] ATA. Operator/manufacturer scheduled maintenance developments: MAG-3[S]. US: ATA, 2011.
- [17] DAVE B. MSG-3: the maintenance enhancer [R]. US: Business & Commercial Aviation, 2000.
- [18] 王政. 应用MSG-3方法制定区域维修大纲研究 [J]. 科技视界, 2015(26): 100-101.
WANG Zheng. Research for MSG-3 method on zonal MRBR [J]. Science & Technology Vision, 2015(26): 100-101. (in Chinese)
- [19] FAR. Damage tolerance and fatigue evaluation of structure: AC-25.571-1D[S]. US: FAR, 2011.
- [20] 马小骏, 苏茂根, 王勇, 等. 民用飞机直接维修成本分析与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
MA Xiaojun, SU Maogen, WANG Yong, et al. Cost analysis and control of aircraft direct maintenance [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [21] 陈勃, 鲍蕊, 张建宇, 等. 飞机结构耐久性/损伤容限综合分析模型 [J]. 航空学报, 2004, 25(2): 133-136.
CHEN Bo, BAO Rui, ZHANG Jianyu, et al. Comprehensive analysis model of aircraft structure durability/damage tolerance [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2): 133-136. (in Chinese)
- [22] 冯蕴雯, 张家乐, 薛小锋, 等. 民用飞机铰链运动机构维修间隔制定研究 [J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 96-101.
FENG Yunwen, ZHANG Jiale, XUE Xiaofeng, et al. Research on maintenance interval development of hinge mechanism of civil aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 96-101. (in Chinese)
- [23] 中国民用航空局航空安全办公室. 中国民用航空安全信息统计分析报告 [R]. 北京: 中国民用航空局, 2015.
Aviation Safety Office of Civil Aviation Administration of China. China civil aviation safety information statistical analysis report [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2015. (in Chinese)
- [24] 中国民用航空局机场司. 鸟击航空器信息分析报告 [R]. 北京: 中国民用航空局, 2015.
Airport Department of Civil Aviation Administration of China. Bird strike aircraft information analysis report [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2015. (in Chinese)
- [25] 徐建新, 邢春辉. 飞机复合材料结构全寿命成本研究 [J]. 机械设计与制造, 2016(7): 41-44.
XU Jianxin, XING Chunhui. Study on life cycle cost of aircraft composite structures [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(7): 41-44. (in Chinese)

作者简介:

冯成慧(1982—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机结构设计。

王乾平(1967—),男,学士,研究员。主要研究方向:飞机结构设计。

刘育斌(1994—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构设计。

唐家强(1998—),男,硕士研究生。主要研究方向:民用飞机维修性工程。

刘佳奇(1993—),男,博士研究生。主要研究方向:可靠性维修性工程。

(编辑:丛艳娟)