

文章编号:1674-8190(2019)03-407-06

民用飞机结构非计划直接维修成本预计研究

刘余¹, 刘昕², 张继斌¹, 刘成¹, 谭宏斌²

(1. 中航沈飞民用飞机有限责任公司 工程研发中心, 沈阳 110169)

(2. 中国商飞上海飞机客户服务有限公司 维修工程部, 上海 200241)

摘要: 民用飞机结构非计划直接维修成本在设计阶段难以预计。介绍 DMC 构成要素及影响因素, 建立 DMC 预计流程、预计模型及预计调整模型; 以前中机身上蒙皮壁板为例, 基于工程设计输入及统计报告, 计算来自 MSG-3, DTA, DSEA 的非计划维修任务 DMC 数值, 对比并分析金属及复合材料非计划 DMC 预计结果。结果表明: 该预计方法可行, 反映预计模型准确性, 金属结构环境退化及疲劳损伤是影响该结构 DMC 的主要因素, 复合材料的使用可显著降低飞机结构非计划 DMC。

关键词: 民用飞机; 直接维修成本; 预计模型; 环境退化; 疲劳损伤; 特殊事件; 非计划维修

中图分类号: V267+.31

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.03.016

Study on Unscheduled Direct Maintenance Cost of Civil Aircraft Structure

Liu Yu¹, Liu Xin², Zhang Jibin¹, Liu Cheng¹, Tan Hongbin²

(1. Engineering Research & Development Center, AVIC SAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Shenyang 110169, China)

(2. Maintenance Engineering Department, COMAC Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: To solve the problem of the unscheduled direct maintenance cost of civil aircraft structure is difficult to predict in the design phase. The elements and influence factors of DMC are introduced, and the prediction flow, model and adjustment model are established. Based on engineering design inputs and statistical reports, an example about a skin panel of forward-mid fuselage is presented. A series of DMC values of the maintenance tasks from MSG-3, DTA and DSEA analysis are computed, and the various DMC prediction results for metal and composite skin panel are compared and analyzed. The feasibility of the prediction method is verified, and the accuracy of the prediction model is reflected. It is shown that environment damage(ED) and fatigue damage(FD) are the main factors affecting the DMC of the metal structure, and the application of composite materials can significantly reduce the unscheduled DMC.

Key words: civil aircraft; DMC; prediction model; ED; FD; special event; unscheduled maintenance

0 引言

民用飞机直接维修成本(Direct Maintenance Cost, 简称 DMC)是衡量民用飞机经济性的重要指

标。直接维修成本是指在完成飞机或设备维修中直接花费的人工时和材料费用^[1]。吴静敏等^[2]针对整机 DMC 预计进行了研究, 王莹等^[3]给出了民用飞机 DMC 分析与控制方法, 徐建新等^[4]对全寿

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-10-15

通信作者: 刘余, yliu@h-vavtech.com

引用格式: 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): 407-412, 422.

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): 407-412, 422.

命周期复合材料成本展开研究。

对飞机的 DMC 进行预计,是为了验证与确定更好的先进维修策略,以在保证维修安全性的前提下降低维修成本。研究人员已经提出了许多种成本模型以便于对维修策略进行比较分析^[5-7]。这些成本分析和比较方法都有一个共同特点,就是维修策略与具体单元的费用相互独立,而两者间的联系没有充分考虑。例如,在飞机维修中,尽可能将机身结构维修任务与计划维修任务同时进行,并只在必要时进行非计划维修是有利的。而如果非计划维修的费用要远高于计划维修,那么维修计划制定者会更加倾向于在计划维修时尽量多进行对壁板的修理,以避免非计划维修。

从目前国内研究情况来看,针对结构非计划维修成本还没有专门的研究。为此,本文对民用飞机结构损伤源,DMC 构成要素及影响因素进行分析,基于飞机工程数据,结合典型飞机使用环境及利用率,提出结构非计划 DMC 预计模型,并就金属和非金属结构非计划 DMC 进行对比。

1 结构非计划 DMC 构成要素及影响因素

根据 S3000L 国际规范,维修任务的驱动因素有:故障、损伤、事件、时间/时限、软硬件使用^[8]。针对结构主要为损伤及特殊事件,其维修任务来源包括意外损伤(Accidental Damage,简称 AD)、环境退化(Environmental Deterioration,简称 ED)、腐蚀预防和控制(Corrosion Prevention and Control Program,简称 CPCP)、疲劳损伤(Fatigue Damage,简称 FD)、特殊事件等。由 MSG-3 结构分析方法确定 AD、ED 及 CPCP 相关任务,MSG-3 针对飞机设计、使用环境,给出 SSI(Significant Structure Item,简称 SSI)的 AD 和 ED 影响因素,并制定相应的计划维修检查阈值和间隔值,确保在间隔期内飞机安全^[9]。由损伤容限分析(Damage Tolerance Analysis,简称 DTA)对主要结构件(Principal Structural Element,简称 PSE)进行疲劳分析,给出检查间隔及任务类型。由损伤及特殊事件分析(Damage & Special Event Analysis,简称 DSEA)定义相对应的预防性检查任务。

AD 中雷击、鸟撞、冰雹、车辆碰撞等引发的较

大损伤属于特殊事件,不在 AD 中考虑,但 AD 会对 ED 产生影响,例如破坏表面涂层引起腐蚀。结构非计划类 DMC 预计不包括超手册修理内容。

从 DMC 概念出发,DMC 包括人工和材料花费,并且以美元每飞行小时(\$/FH)表示。结构非计划 DMC 构成要素与影响因素关系如表 1 所示。

表 1 结构非计划 DMC 构成要素及影响因素
Table 1 Elements and Influencing Factors of structure unscheduled DMC

构成要素	影响因素
任务频次	设计服役寿命、飞机年利用率、飞行小时循环比、平均航段时间
维修对象数量	部件装机数量
人力成本	飞机使用环境、损伤情况、人工时费率
材料成本	材料工艺水平、材料价格、损伤情况

2 方法及案例

2.1 预计流程及输入

结构非计划类 DMC 预计需要明确何种损伤源对何种结构造成何种损伤,每种损伤类型的典型尺寸及典型修理方法,在此基础上进行人工时和材料费用的预计。具体过程如图 1 所示。

民用飞机结构非计划类 DMC 需要以 MSG-3, DTA, DSEA 作为基础输入,以确定结构损伤源及损伤类型。针对典型损伤的典型修理方法引起的人工时及材料费用,可参考维修手册、工艺规范、市场价格等数据进行评估。

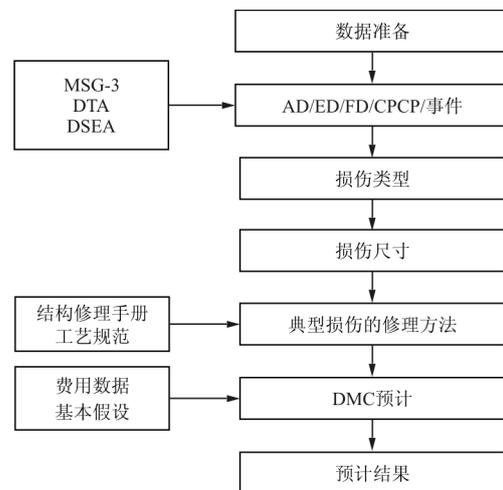


图 1 结构非计划类 DMC 预计过程

Fig. 1 Prediction flow of structure unscheduled DMC

2.2 预计模型

基于结构 DMC 构成要素及影响因素,建立结构非计划类 DMC 通用预计模型^[10]如下:

$$DMC_{\text{unsch}} = F \cdot Q \cdot (H + M) \quad (1)$$

式中: DMC_{nusch} 为 DMC 阵,表示每一类结构非计划类 DMC 预计结果; F 为频次阵,表示寿命周期内每一类任务的维修次数; Q 为数量阵,表示任务执行对象在单架飞机上的数量; H 为人工成本阵,表示每一类任务的人工成本; M 为材料成本阵,表示每一类任务的材料成本。

针对 SSI/PSE 非计划类 DMC 预计模型如下:

$$DMC_{S/P} = F \cdot Q \cdot (H + M) = \left[P_i \cdot \frac{N_{mic,i}}{LC_i} \right]_{1 \times n} \cdot [QPA]_{n \times n} \cdot \{ [LR \times T_{mic,i}]_{n \times 1} + [LR \times T_{mat,i}]_{n \times 1} \} \quad (2)$$

式中: $DMC_{S/P}$ 为结构非计划类 DMC 矩阵,

$$DMC_{DSEA} = \sum_{j=1}^m [F_j \cdot Q_j \cdot (H_j + M_j)] = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{P_j}{ALT} \times OPA \times [LR \times (T_{Access,j} + T_{Mic,j}) + C_{On_Mat,j}] \right\} \quad (3)$$

式中: DMC_{DSEA} 为特殊事件导致的非计划 DMC; $F_j = \frac{P_j}{ALT}$ 为频次,表示每个特殊事件作用到不同部件上的概率,设某特殊事件概率为 p ,单位为 1/飞行次数,对于可能影响的 m 个不同部件,每个部件受影响的比率为 q_j ,且满足 $\sum_{j=1}^m q_j = 1$,则 $P_j = p \times q_j$, ALT 为平均航段时间,计算可取轮挡时间,单位为飞行时间/飞行次数; $Q_j = QPA$ 为数量, QPA 为每个任务涉及项目在飞机上的安装数量,在本公式计算中都取为 1,即将相同部件视作独立项目; $H_j = LR \times (T_{Access,j} + T_{Mic,j})$ 为人工成本, LR 为人工时费率,单位为 \$/h, $T_{Access,j}$ 为各个部件的接近时间, $T_{Mic,j}$ 为各个部件的维修时间,单位为 h; $M_j = C_{On_Mat,j}$ 为材料成本, $M_j = C_{On_Mat,j}$ 为各个部件的原位维修成本,单位为 \$。

对于多个特殊事件的情况,发生后进行结构修复 DMC 预计模型如下:

$$DMC_{DSEA} = \text{tr}[F \cdot Q \cdot (H + M)] = \text{tr} \left[\frac{P_{ij}}{ALT_i} \right]_{n \times m} \cdot E_{m \times m} \cdot \{ [LR \times T_{mic,i}]_{m \times n} + [C_{mat,i}]_{m \times n} \} \quad (4)$$

式中: DMC_{DSEA} 为特殊事件导致的非计划 DMC;

SSI/PSE 的 DMC 预计结果; i 为非计划维修任务序列,用 1,2,3...表示; $F = \left[P_i \cdot \frac{N_{mic,i}}{LC_i} \right]_{1 \times n}$ 为频次阵,数值单位为 1/FH,衡量在设计寿命周期内每飞行小时的平均非计划修理频次,其中, P_i 是 SSI/PSE 在执行计划维修检查时,可能存在结构损伤的发生概率, $N_{mic,i}$ 为在设计寿命周期内的检查次数; LC_i 为设计服役寿命,单位为 FH; n 为任务数量; $Q = [QPA_i]_{n \times n}$ 为数量阵, QPA_i 是 SSI/PSE 在单架飞机上的安装数量; $H = [LR \times T_{mic,i}]_{n \times 1}$ 为人工成本阵, LR 为人工时费率,单位为 \$/h(美元/小时), $T_{mic,i}$ 为维修时间,单位为 h(小时); $M = [C_{mat,i}]_{n \times 1}$ 为材料成本阵; $C_{mat,i}$ 为维修材料成本,单位为 \$(美元)。

针对单个特殊事件,发生后进行结构修复 DMC 预计模型如下:

$\text{tr}(\cdot)$ 为矩阵的迹运算,表示方阵的主对角元素之和; i 为特殊事件序列,用 1,2,3...表示; j 为受特殊事件影响的结构序列,用 1,2,3,...,m 表示; $F = \left[\frac{P_{ij}}{ALT_i} \right]_{n \times m}$ 为频次阵, P_{ij} 为每个特殊事件作用到不同结构部位上的概率,设某特殊事件的概率为 p_i ,单位 1/飞行次数,作用到不同部件或结构部位,每个部件或结构部位受影响的比率为 q_{ij} ,且满足 $\sum_{i,j=1}^m q_{ij} = 1$,则 $P_{ij} = p_i \times q_{ij}$, ALT_i 为平均航段时间; $Q = E_{m \times m}$ 为单位阵,起到协调作用;

为进行结构非计划 DMC 的汇总,应分别计算 MSG-3,DTA,DSEA 相关 DMC,累加得到结构非计划 DMC。

2.3 预计案例

2.3.1 基本假设

基于典型飞机设计数据,结合地区经济水平为基础,参考 IATA 提供的 2013 年 23 家航空公司飞机运行状态统计结果^[11],假设如下:

- (1) 以每年 1381 飞行循环为基准;
- (2) 飞行循环(FC)与飞行小时(FH)比为

FC : FH=1 : 2.46 ;

(3) 飞机设计寿命周期为 30 年 ;

(4) 人工时费率为 60 \$ /FH, 即 60 美元每飞行小时。

2.3.2 输入

某机型前中机身 MSG-3, DTA 金属结构非计划类 DMC 输入数据如表 2 所示, DSEA 输入数据如表 3 所示。

表 2 MSG-3, DTA 结构非计划类 DMC 预计输入

Table 2 Prediction inputs of structure unscheduled DMC from MSG-3 and DTA

任务源	部 位	门槛值/年	间隔/年	典型损伤	损伤尺寸	修理方法	发生概率 Pi	人工时/小时	材料费用/美元
MSG-3	SSI:前中机身上蒙皮壁板,外部	12	8	AD(冰雹):涂层破坏、凹坑、刻痕	表面涂层破坏引起腐蚀	打磨、喷漆	0.102 283	5	8 000
		12	8	AD(维修操作)	局部表面漆层破坏引起腐蚀	打磨、喷漆	1.000 000	5	8 000
		12	8	AD(除冰操作)	局部表面涂层破坏引起腐蚀	打磨、喷漆	0.030 685	5	8 000
		12	8	ED:点蚀	局部腐蚀部位	打磨、喷漆	1.000 000	5	8 000
		12	8	CPCP:按需涂抹腐蚀抑制剂	局部腐蚀	清洁、防腐处理	1.000 000	7	6 000
DTA	PSE:前中机身上蒙皮壁板	36000FC 或 12 年	24000FC 或 8 年	FD:疲劳裂纹	局部修理	结构加强修理	1.000 000	6	10 000
		以先到为准 以先到为准							

注:1. 冰雹频次应根据具体航段按机场实际降雹情况统计,这里取降雹频次为每年 4 天(全国每年 2~7 天),检查间隔按照(12+8+8)/3 年计算,发生概率为 0.102;除冰操作(包括除霜)按照北方气象条件,每年 120 天需进行除冰作业,人为差错按照 1%,12 年累计发生概率为 0.03 次;假设每次检查均按需涂抹腐蚀抑制剂,频次为 1;疲劳裂纹保守认为一定存在初始缺陷,故疲劳裂纹发生概率为 1。
2. 维修人工时按照文献[12]附录 D 方法评估,结合工程判断给出最终的人工时,材料费用按照损伤大小、材料价格,工程估算给出(材料价格包括检测费用、工具及设备费用、耗材费用),数据仅供参考。

表 3 DSEA 相关结构非计划类 DMC 输入

Table 3 Prediction inputs of structure unscheduled DMC from DSEA

序号	特殊事件	特殊事件发生次数	特殊事件发生概率 (1/飞行次数)	影响比率	暴露时间/飞行小时	人工时/小时	材料费用/美元
1	鸟击	71	4.843E-05	0.5%	0.54	8	15 000
2	外来物击伤	36	2.456E-05	1%	0.05	8	15 000
3	发动机停车	6	4.093E-06	0	—	—	—
4	雷击	9	6.139E-06	10%	0.5	8	15 000
5	可控飞行撞地/空中撞障碍物	1	6.821E-07	0	—	—	—
6	车辆与航空器碰撞	9	6.139E-06	12%	1	10	20 000
7	航空器与设备设施碰撞	1	6.821E-07	2%	1	10	20 000
8	擦尾/擦发动机/擦翼尖/擦机腹	1	6.821E-07	0	—	—	—

注:1. 特殊事件发生次数来自文献[15],按照 2013 年上半年运输类飞机 146.6 万架次计算特殊事件发生概率为 4.843E-05;
2. 影响比率按该特殊事件影响部位统计结果给出,例如文献[16]鸟击撞击部位统计结果显示机身占 4.55%,无损伤占 90.01%,故采用工程估计可确定前中机身的损伤影响比率约为 0.5%,数据缺失部分按照工程判断给出;
3. 暴露时间按照特殊事件发生飞行阶段工程评估给出,例如平均航段时间为 2.46 飞行小时,鸟击集中发生在起飞、爬升、下降、进近、降落阶段,共计 0.54 飞行小时;
4. 人工时及材料费用按照占比比较大的损伤来预估,如文献[16]中鸟击造成航空器损伤统计数据,无损伤占 90.01%,中等损伤占 6.43%,严重损伤占 0.03%,轻度损伤占 3.52%,工程上可按照中等损伤来进行人工时和费用估计,材料费用包括检测费用、工具及设备费用、耗材费用;
5. 车辆与航空器碰撞及航空器与设备设施碰撞,考虑每次飞行前后在地面勤务、除冰操作、装卸货物等时间总和。

针对表 2,按照文献[13]损伤尺寸(腐蚀深度)服从威布尔分布,参考文献[14],依据工程判断建立服役时间腐蚀深度累计分布规律,如图 2 所示,按照 95%概率下,在 8a 和 12a(1a 表示服役 1 年)下腐蚀深度均介于 1.84~2.76 mm,由于该上壁板采用腐蚀抑制剂且排水路径较好,故腐蚀深度按 2 mm 估算,可采用打磨后补漆维修。疲劳裂纹扩展尺寸由 DTA 分析确定,不会产生超手册修理。

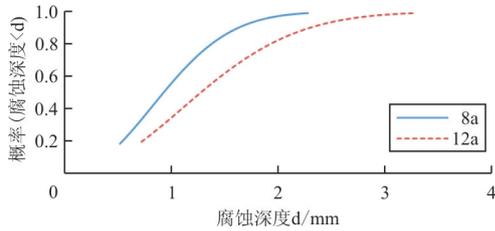


图 2 服役时间腐蚀深度累积分布规律

Fig. 2 Cumulative distribution function of corrosion depth

2.3.3 预计结果

前中机身上蒙皮壁板 DMC 按照公式 2,公式 4 进行计算。DMC 预计结果汇总如表 4 所示。

从预计结果可见,金属结构前中机身上壁板 AD,ED,FD 导致 DMC 花费较高(占比 93%)。特殊事件发生虽然每次维修费用高,由于发生概率较低,分摊到整个使用周期内维修费用占比 7%左右,表明提高金属材料的抗腐蚀及抗疲劳性能,是降低 DMC 的有效途径。

表 4 金属前中机身结构非计划类 DMC 预计结果

Table 4 Prediction results of metal structure unscheduled DMC of forward-mid fuselage

任务源	损伤源	DMC/ (\$ · FH ⁻¹)	DMC 汇总/ (\$ · FH ⁻¹)
MSG-3	AD:冰雹	0.024 989	0.433 290
	AD:维修操作	0.244 315	
	AD:除冰操作	0.007 497	
	ED:点蚀	0.244 315	
	CPCP:腐蚀	0.188 976	
DTA	FD:疲劳裂纹	0.304 952	0.304 952
DSEA	鸟击	0.006 942	0.079 423
	外来物击伤	0.038 019	
	雷击	0.019 006	
	车辆与航空器碰撞	0.015 176	
	航空器与设备设施碰撞	0.000 281	
合计			1.094 466

2.3.4 对比分析

若采用碳纤维复合材料机身,由于复合材料抗冲击、耐腐蚀、抗疲劳等特性可显著降低损伤程度,但相对金属结构单次维修工时及材料费用较高,故应将两者 DMC 进行对比。

经过 MSG-3 分析可知,复合材料上壁板受到 AD 损伤源为冰雹、雷击(在 DSEA 中考虑)、维修操作、除冰操作,受到 ED 损伤源为湿热环境,无 CPCP 任务、FD 初始裂纹无扩展。飞机计划维修首检及重复检查间隔为 12 年(全寿命周期维修 2 次),利用率与金属飞机一致,维修操作引起的 AD 参考维修统计数据取值,湿热环境占整个运行周期的一半计算,冰雹发生概率不变,维修工时及费用按工程估算,预计结果如表 5 所示。

表 5 前中机身复材结构非计划类 DMC 预计结果

Table 5 Prediction results of composite structure unscheduled DMC of forward-mid fuselage

任务源	损伤源	DMC/ (\$ · FH ⁻¹)	DMC 汇总/ (\$ · FH ⁻¹)
MSG-3	AD(冰雹);凹坑	0.006 090	0.302 597
	AD(维修操作)	0.046 312	
	AD(除冰操作)	0.001 827	
	ED(湿热)	0.302 597	
	CPCP:腐蚀	—	
DTA	FD:疲劳裂纹(无扩展)	0.106 360	0.106 360
DSEA	鸟击	0.009 238	0.333 142
	外来物击伤	0.252 968	
	雷击	0.050 585	
	车辆与航空器碰撞	0.018 947	
	航空器与设备设施碰撞	0.001 403	
合计			0.796 328

通过碳纤维复合材料机身与金属机身相比(如图 3 所示),AD 花费显著增加,ED,FD 花费显著降低,上壁板整体 DMC 花费降低 29.8%。可见复合材料的引入可显著降低维修费用。按照文献[4]计算公式 9,公式系数与文献[17]中碳纤维复合材料一致,人工时费率按照每小时 60 美元计算,可得该结构单次修复性维修花费为 4 619 美元,按照文献[4]公式 6 计算全寿命周期维修次数为 18 次,该结构非计划 DMC 为 0.815 73 \$/FH,本方法预计 AD,ED,FD 导致的 DMC 为 0.796 33 \$/FH,偏差为 2.44%,两者比较吻合。

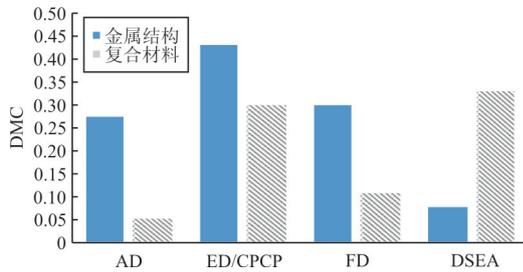


图 3 复合材料与金属结构非计划 DMC 对比

Fig. 3 Comparison of unscheduled DMC for metal and composite structures

3 DMC 预计的影响因素

在产品研制阶段,DMC 预计工作是基于飞机在典型环境和利用率的基础上进行的,但在飞机投入运营后,由于运营环境、飞机使用情况、区域气候环境等方面差异,使 DMC 实际值与研制阶段预计值存在偏差,为解决该模型无法实现客户化 DMC 预计的问题,故在模型基础上引入调整系数,优化后的 DMC 预计模型见公式 4。

$$DMC_{\text{unsch}} = F \cdot Q \cdot K(H + M) \quad (4)$$

式中: K 为调整矩阵,可用公式 5 表示:

$$K = K_O \cdot K_E \cdot K_P \quad (5)$$

式中: K_O 为使用影响矩阵,表示飞机使用情况; K_E 为环境影响矩阵,表示飞机运行环境恶劣程度; K_P 为产品设计属性影响矩阵,表示飞机在设计的先进性。

主航空制造企业可以在产品设计阶段,以相似机型 DMC 数据为基准,根据客户运行需求,充分考虑产品运行环境及使用情况,确定合适的调整系数,得到客户化的 DMC 目标及分配值,并依此为依据约束供应商,提高产品的固有维修性和经济性水平。

4 结 论

(1) 建立了结构非计划 DMC 预计流程、预计模型及 DMC 调整模型,引入调整系数矩阵,实现了 DMC 预计客户化。采用本文建立模型对该结构 DMC 进行预计,预计结果与文献[4]方法对比,偏差为 2.44%,表明本预计模型具有一定的准确性。

(2) 金属结构 AD,ED 及 FD 是影响 DMC 的主要因素,提高金属材料抗腐蚀及抗疲劳性能可显

著降低 DMC。

(3) 复合材料引入可降低该结构非计划 DMC 29%,表明复合材料的引入可大幅降低结构 DMC。

参考文献

- [1] 左洪福,蔡景,吴昊,等. 航空维修工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 324-325.
Zuo Hongfu, Cai Jing, Wu Hao, et al. Aviation maintenance engineering[M]. Beijing: China Science Publishing, 2011: 324-325. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 王莹,王勇,徐志锋,等. 民用飞机直接维修成本分析与控制技术[J]. 航空维修与工程, 2014(4): 103-106.
Wang Ying, Wang Yong, Xu Zhifeng, et al. The analysis and control of civil aircraft direct maintenance cost [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2014(4): 103-106. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] Curcuru G, Galante G, Lombardo A. A predictive maintenance policy with imperfect monitoring[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95(9): 989-97.
- [6] Van Horenbeek A, Pintelon L. A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 120: 39-50.
- [7] Nguyen K A, Do P, Grall A. Multi-level predictive maintenance for multi-component systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 144: 83-94.
- [8] ASD. S3000L International procedure specification for logistics support analysis(LSA)[S]. Europe: ASD, 2014.
- [9] Air Transport Association of America. ATA MSG-3 Operator/manufacturer scheduled maintenance development[S]. USA: ATA, 2009.
- [10] 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. Civil aircraft direct maintenance cost analysis and control[M]. Beijing: China Science Publishing, 2017. (in Chinese)
- [11] IAT Association. Airline maintenance cost executive commentary[R]. An Exclusive Benchmark Analysis(FY2014 data) by IATA's Maintenance Cost Task Force; IATA, 2015.
- [12] Department of Defense. MIL-HDBK-470 A Designing and

参考文献

- [1] 朱珊. 引信安全状态恢复功能分析及其实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
Zhu Shan. Analysis and implementation of the restoration function of fuze safety status[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] 马宝华. 网络技术时代的引信[J]. 探测与控制学报, 2006, 28(6): 1-6.
Ma Baohua. Fuze in networked technology era[J]. Journal of Detection & Control, 2006, 28(6): 1-6. (in Chinese)
- [3] 唐玉娟, 王灵. 逆压电驱动的运动可逆式引信隔爆机构[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(3): 56-60.
Tang Yujuan, Wang Jiong. A reversible fuze interrupter mechanism based on piezoelectric actuator[J]. Journal of Detection & Control, 2013, 35(3): 56-60. (in Chinese)
- [4] 杜侠, 张树云, 梁震. 基于电磁拔销器引信安全状态可恢复研究[J]. 河北农机, 2016(3): 42-43.
Du Xia, Zhang Shuyun, Liang Zhen. A study of safety state restoration function based on electromagnetic actuator[J]. Hebei Farm Machinery, 2016(3): 42-43. (in Chinese)
- [5] 王宇勇, 陈兴球, 韩召. 电磁拔销器在某引信中的应用[J]. 水雷战与舰船防护, 2012, 20(4): 60-62.
Wang Yuyong, Chen Xingqiu, Han Zhao. Application of electromagnetic safety instruments (solenoids) in fuze[J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2012, 20(4): 60-62. (in Chinese)
- [6] 雷涛. 混合激励电磁执行器及其控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
Lei Tao. Research on mixed-excitation electromagnetic actuator and its control system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [7] Nitu S, Nitu C, Tuluca G, et al. Electromagnetic actuator with magnetic stored energy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 181(1/3): 153-158.
- [8] 张连俞, 石勇, 高明春, 等. 电磁执行器动态性能分析与研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(5): 858-861.
Zhang Lianyu, Shi Yong, Gao Mingchun, et al. Analysis and research on the dynamic performance of electromagnetic actuator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(5): 858-861. (in Chinese)
- [9] Hermans R M, Mircea L, Kolmanovsky I V, et al. Horizon-1 predictive control of automotive electromagnetic actuators[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1652-1665.
- 作者简介:**
王海龙(1981—),男,硕士,副研究员。主要研究方向:引信及物理能源技术。
姚文(1968—),女,大专,高级工程师。主要研究方向:引信及物理能源技术。
- (编辑:丛艳娟)
-
- (上接第 412 页)
- developing maintainable products and systems[S]. USA: Department of Defense, 2007.
- [13] 陈跃良, 吕国志, 段成美. 服役条件下飞机结构腐蚀损伤概率模型研究[J]. 航空学报, 2002, 23(3): 249-251.
Chen Yueliang, Lü Guozhi, Duan Chengmei. A probability model for the corrosion damage of aircraft structure in service environment[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2002, 23(3): 249-251. (in Chinese)
- [14] Crow L. Reliability analysis for complex, repairable systems[M]. UN: Reliability and Biometry, SIAM Proschan, Serfling, RJ, 1974: 379-410.
- [15] 中国民用航空局航空安全办公室/中国民航科学技术研究院. 2013 年上半年中国民航不安全事件统计分析报告[R]. 北京: 中国民用航空局航空安全办公室/中国民航科学技术研究院, 2013: 1-82.
Aviation Safety Office of the China Civil Aviation Administration/China Academy of Civil Aviation Science and Technology. A statistical analysis of unsafe incidents of civil aviation of China in the first half of 2013[R]. Beijing: Aviation Safety Office of the China Civil Aviation Administration/China Academy of Civil Aviation Science and Technology, 2013: 1-82. (in Chinese)
- [16] 中国民航科学技术研究院. 2013 年度中国民航鸟击航空器信息分析报告[R]. 北京: 中国民航科学技术研究院, 2014: 1-45.
China Academy of Civil Aviation Science and Technology. An analysis report of civil aviation bird strike aircraft information of China in 2013[R]. Beijing: China Academy of Civil Aviation Science and Technology, 2014: 1-45. (in Chinese)
- [17] Raj Raman, John C Graser, Obaid Younossi. The effect of advanced materials on airframe operating and support costs[J]. Air Force, 2003(19): 39.
- 作者简介:**
刘余(1984—),男,硕士,工程师。主要研究方向:维修工程。
刘昕(1980—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:维修工程。
张继斌(1973—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:飞机总体设计。
刘成(1988—),男,学士。主要研究方向:维修工程。
谭宏斌(1979—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:可靠性管理和维修成本分析。
- (编辑:沈惺)