

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.06.015

## 民机 PHM 预测维修模式在空调系统的应用

孙见忠<sup>1</sup>, 解志峰<sup>2</sup>, 闫洪胜<sup>1</sup>, 左洪福<sup>1</sup>, 王容辉<sup>3</sup>, 钱 昆<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 2. 中国飞行试验研究院总体所, 西安 710089;  
3. 厦门航空有限公司机务工程部, 厦门 361000)

**摘要:** 针对故障预测与健康管理(Prognostic and health management, PHM)技术在民机维修工程中的应用问题, 探讨了基于 PHM 的预测维修模式设计, 提出了考虑 PHM 的初始维修任务分析流程以及基于 PHM 的预测维修模式实施方法。以 B737NG 空调系统为例开展验证研究, 建立了基于数据驱动的空调系统 PHM 模型, 设计了空调系统 PHM 维修模式, 并基于历史运行数据开展了计划维修模式与预测维修模式下维修成本对比分析。研究结果表明: 基于 PHM 的维修模式不仅可以取消部分定期检查工作, 还可以通过提前监测减少非计划的维修事件, 进而降低民机系统全寿命周期维修成本。成本效益分析表明: 相比传统计划维修, PHM 维修可降低 40% 以上的成本, 进一步推广应用到整机其他系统将带来更大的经济效益和安全效益。

**关键词:** 计划维修; 预测维修; 飞机健康监测; 空调系统; 故障预测与健康管理

**中图分类号:** V231.25      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2021)06-0952-13

## Application of PHM Predictive Maintenance on Aircraft Air Conditioning System

SUN Jianzhong<sup>1</sup>, XIE Zhifeng<sup>2</sup>, YAN Hongsheng<sup>1</sup>, ZUO Hongfu<sup>1</sup>,  
WANG Ronghui<sup>3</sup>, QIANG Kun<sup>3</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;  
2. Institute of System, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China;  
3. Maintenance Engineering Department, Xiamen Airlines, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** Aiming at the application of prognostic and health management (PHM) technology in civil aircraft maintenance engineering, this paper discusses the design of predictive maintenance mode based on PHM, and puts forward the analysis process of initial maintenance task considering PHM and the implementation method of predictive maintenance mode based on PHM. Taking B737NG air conditioning system as an example, the validation research is carried out, the PHM model of air conditioning system based on data drive is established, the PHM maintenance mode of air conditioning system is designed, and the maintenance cost under planned maintenance mode and predicted maintenance mode is compared and analyzed based on historical operation data. The results show that the maintenance mode based on PHM can both cancel some regular inspections, and reduce unplanned maintenance events through early monitoring, so as to reduce the life-cycle maintenance cost of civil aircraft system. Cost benefit analysis shows that compared with traditional planned maintenance, PHM maintenance can reduce the cost by more than 40%. Further popularization and application to other systems of the whole machine will bring greater economic and safety benefits.

**Key words:** scheduled maintenance; predictive maintenance; aircraft health monitoring; air conditioning system; prognostics health management

收稿日期: 2020-09-18; 修订日期: 2021-01-30

通信作者: 孙见忠, 男, 副教授, E-mail: sunjianzhong@nuaa.edu.cn。

引用格式: 孙见忠, 解志峰, 闫洪胜, 等. 民机 PHM 预测维修模式在空调系统的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 952-964. SUN Jianzhong, XIE Zhifeng, YAN Hongsheng, et al. Application of PHM predictive maintenance on aircraft air conditioning system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 952-964.

民机维修理论从定时翻修发展到以可靠性为中心的维修、先进的视情维修以及预测维修。目前,在役的民机型号主要以可靠性维修为主,部分机载系统,如航空发动机逐渐实现了视情维修模式<sup>[1]</sup>。现有民机计划维修模式以MSG-3框架下制定的维修大纲为基础,综合型号审定维修要求项目、适航限制项目以及适航指令和服务通告等形成

维修计划文件,在此基础上考虑用户的飞机实际运行状况、维修能力等最终形成客户化的维修方案,确保飞机投入运营后的持续适航(图 1)。从1967 MSG思想首次用于民机计划维修任务的制定,半个世纪的实践证明了这一方法的有效性,其获得了各国适航当局的认可,已成为行业内一种实质上的标准模式和规范<sup>[2]</sup>。

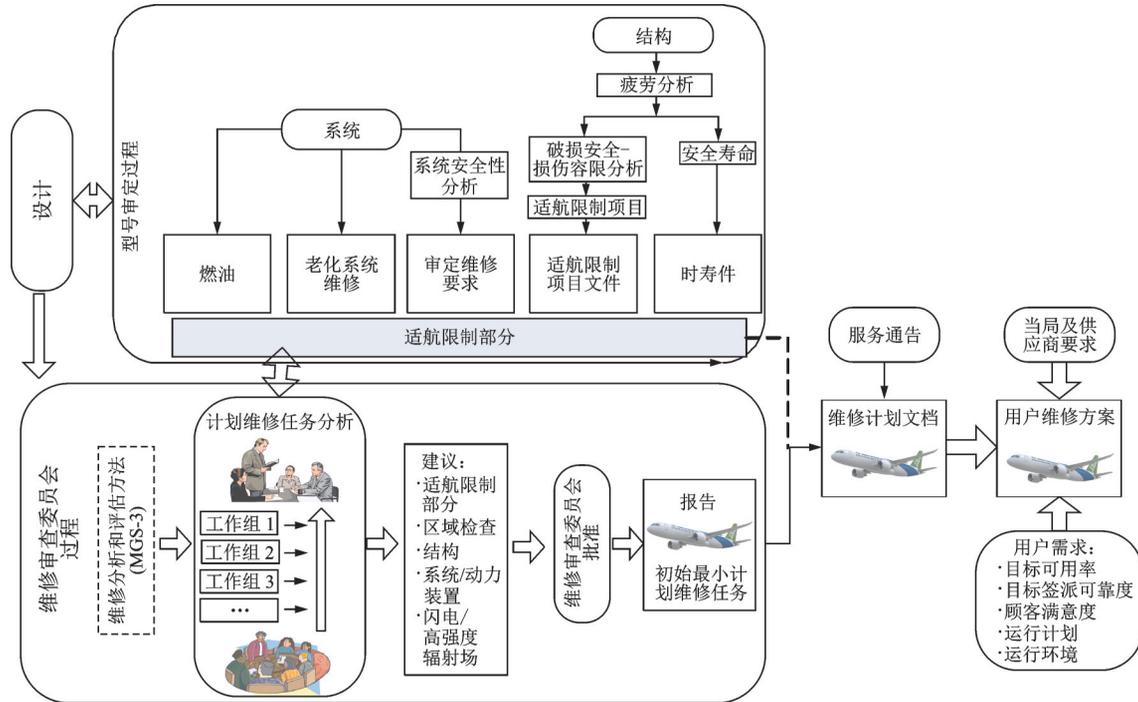


图1 现代民机计划维修模式

Fig.1 Scheduled maintenance mode of modern civil aircraft

现代民机测试技术的发展,特别是系统/结构健康监测技术的发展和成熟,丰富了现有的持续适航概念和方法体系,在确保飞机满足持续适航要求的前提下,飞机由经验化的基于时间的计划维修向更加高效的基于系统/结构实际健康状态的维修转变。飞机健康监测技术的引进将对目前的民机维修模式带来一定的变化,一些传统的依靠人工实施的定时检查任务将可能被自动化的健康监测取代,还有相当一部分计划维修任务将被取消,取而代之的是视情维修或故障预测与健康管理的(Prognostic and health management, PHM)维修,从而减少停机时间和检查的人工成本,有效地降低飞机的维护成本<sup>[3-6]</sup>。随着健康管理技术的发展及其在新一代民机上的应用,未来的民机PHM预测维修模式下,预期总的维修保障成本将大幅度降低,一是计划维修任务的减少,二是非计划维修任务的减少,通过PHM技术提前预判故障,从而将部分非计划任务转换成PHM预测维修。

民机PHM技术虽然在降低维修成本及提高飞机利用率等方面潜力无限,但完全取代现有的计

划维修模式,其在自身技术、适航法规与标准体系方面仍面临不少挑战<sup>[3,7]</sup>,特别是如何与现行的民机计划维修模式的有效融合。在确保飞机满足持续适航要求的前提下,PHM技术的采用促使飞机由定时的计划维修向更加高效的视情/预测维修转变,如何融合吸收这些新的技术方法,制定更加有效的飞机维修任务,成为各国适航当局和世界主流飞机制造商所面临的重要问题。因此,在计划维修框架下引进PHM技术,考虑在部分条件成熟的机载系统和结构上采用PHM技术,研究计划维修模式与PHM维修模式融合,成为当前民机PHM维修模式实践的一条现实途径<sup>[4,8-9]</sup>。

### 1 民机PHM维修任务分析

针对民机结构计划维修任务分析,国际维修政策委员会(International Maintenance Review Board Policy Board, IMRBPB)提出IP92和IP105文件建议修订MSG-3结构维修任务分析逻辑<sup>[10-11]</sup>,增加基于结构健康监测(Structural health monitoring, SHM)的结构维修任务,按照固定的时间计划评估

结构健康状态或持续的监控结构并在必要的时间触发维护人员实施维修活动。SHM技术的应用丰富和改变了目前的基于MSG-3的结构维修任务分析方法。虽然IP92和IP105为MSG-3计划维修模式下融合SHM技术提供了顶层指导,但缺乏对SHM任务的适用性评估及具体实施准则和可参考的成功商业案例<sup>[5]</sup>。2013年,美国汽车工程师学会颁布了ARP 6461,提供了将SHM纳入飞机维修方案的一般指导信息,以及符合现行航空法规和飞机结构设计与维修惯例的验证和适航性要求和建议,作为原始设备制造商以及参与商业航空SHM解决方案开发和认证的监管机构和其他利益相关者的共同参考<sup>[12]</sup>。文献[13]总结了在役飞机引入SHM的挑战和效益,并建议在现有计划维修模式下将SHM逐步引入航空业。文献[14]基于SHM提出了CBM-Skip策略,以借助机载SHM系统跳过不必要的定期结构维护,并认为该策略比传统定期维护可节省大量成本。文献[15]将SHM与传统的结构维修计划相结合,对F-15特定的损伤容限结构进行了SHM成本效益分析,认为将多个结构问题包含到更大系统中的系统方法可能更具有成本效益。文献[4]介绍了Delta航空在B737飞机现有结构维修方案中融合SHM技术所做的努力,在当前计划维修模式下通过对特定结构细节的“热点”定期监控(Scheduled SHM, S-SHM),是从计划维护模式过渡到完全基于状态的预测维护方案(Automated SHM, A-SHM)所需的第一步。巴西宇航工业的观点类似,为避免与传统计划维护实践矛盾或违背当前适航法规与标准体系的大多数问题,在民机结构维修方案中先从S-SHM应用开始更容易取得突破<sup>[16]</sup>。文献[5]提出了一种基于风险与成本分析的融合SHM技术的飞机结构检查任务规划方法,以解决新型SHM技术融入现有民机计划维修模式中的问题。它可以在不改变现有的飞机计划定检维修模式的情况下,有效融合基于S-SHM的新型结构检查策略到现有的结构维修计划中,可以在权衡结构失效风险和寿命周期维护成本的基础上确定最优的结构检查间隔和修理阈值。

针对考虑PHM技术的民机系统维修任务分析,2018年IMRBPB发布IP180文件<sup>[17]</sup>。IP180参考了行业的相关标准规范,如SAE ARP6803、ARP5120及ARP6255等,提出了融入PHM的MSG-3系统/动力装置维修任务分析逻辑,即在传统MSG-3分析流程结束后得到的传统维修任务基础上,开展PHM任务逻辑分析,定义为维修任务第3层分析。经过PHM维修任务分析后,可能得

到的候选任务类型包括两类:PHM在功能上部分地等效传统维修任务,或者PHM在功能上完全地等效传统维修任务,即可以解决由传统任务覆盖的全部失效原因。IP180从MSG-3逻辑和流程角度考虑融入PHM,在初始维修大纲制定时完成PHM任务分析,即考虑融入PHM技术后的维修任务是作为传统任务的补充或完全取代。文献[18]提出了基于PHM的维修模式的概念,运用蒙特卡洛仿真方法建立了传统维修模式和基于PHM维修模式的维修成本模型,综合评价了PHM模式下的经济效益。文献[19]考虑到PHM技术可以提前获得组件的剩余使用寿命(Remaining useful life, RUL)的估计值,结合系统架构信息和对象系统所有组件的RUL估计提出了系统级维修计划决策支持方法,以最大限度降低了安全约束下的部件更换成本。但是,IP180没有考虑PHM任务如何在飞机维修管理中具体应用与验证,即缺少PHM维修模式在航空公司维修管理中的落地实践方法。本文以民机空调系统为例,首先建立了基于数据驱动的空调系统PHM模型,并设计了空调系统PHM维修模式,最后探讨了PHM如何在民机维修工程实践中的应用问题。

## 2 民机空调系统PHM维修模式

民机空调系统气动、机械部件多,系统复杂度高,加之国内大气环境(杨柳絮、灰尘及雾霾等问题),导致国内航线运营的民机空调系统问题更加突出。空调系统中故障发生最多的是冷却系统(图2),约占总故障的60%,而在空调冷却系统中最为突出的是散热器污染堵塞及空气循环机性能下降等故障,他们是影响飞机运行安全、可靠与经济性的主要因素。因此,空调系统也是民机PHM预测维修模式研究与应用的重点<sup>[20-21]</sup>。

Najjar等提出了一种基于模型和数据驱动的环控系统热交换器健康评估和故障诊断方法,并取得了良好的效果<sup>[22-23]</sup>。Zhang等提出了一种基于递归神经网络的飞机空调系统工作状态预测方法,并利用从波音737NG飞机上采集的数据验证了该方法<sup>[24]</sup>。Sun等利用多元状态估计技术对空调系统散热器的健康状况进行检测,结果表明该方法能监测到明显的退化趋势<sup>[25]</sup>。杜林颖运用仿真数据搭建基于BP神经网络的热交换器的健康监测模型,实现了对热交换器的性能监测<sup>[26]</sup>。美国联合技术与康涅狄格大学合作研究了空调系统关键部件热交换器的故障模式、机理和影响,基于小波变换的信号处理方法对热交换器进行故障诊断,并提

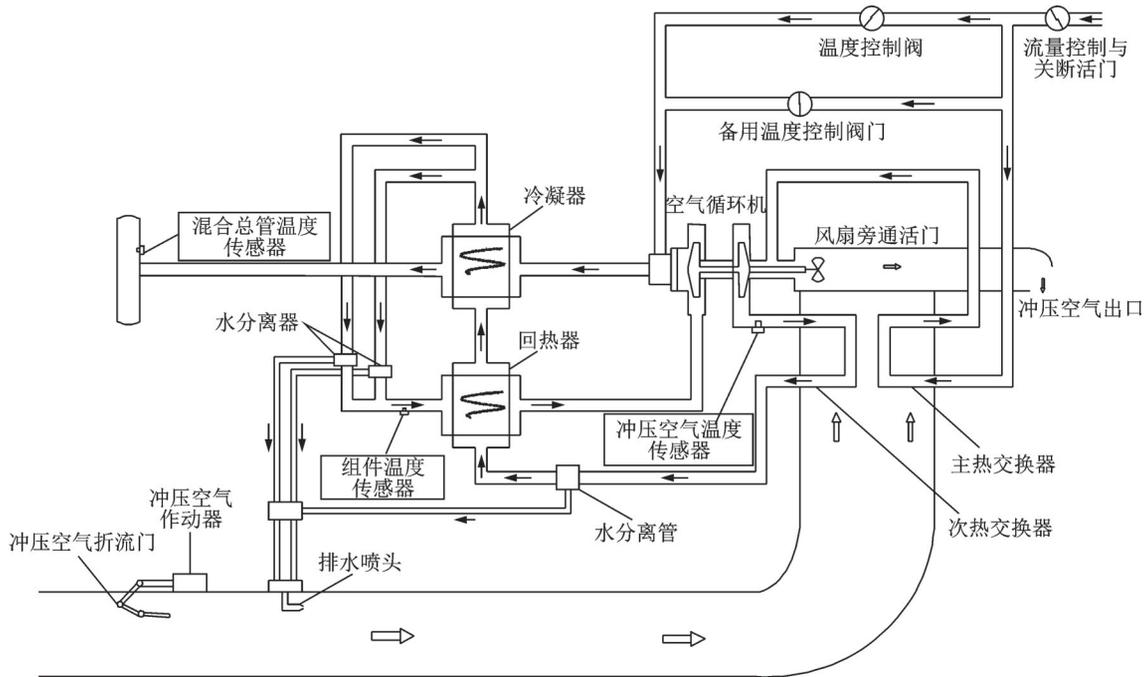


图 2 B737-800 空调冷却系统循环制冷原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of circulating refrigeration principle of B737-800 air conditioning cooling system

出了系统级故障隔离技术<sup>[27]</sup>。总体来说,目前国内关于民机空调系统 PHM 的研究主要集中在基于数据驱动、仿真建模以及知识驱动的健康评估

与故障诊断方法的研究(图 3),以仿真数据验证为主,而基于健康评估的维修模式、维修决策等相关研究较少。

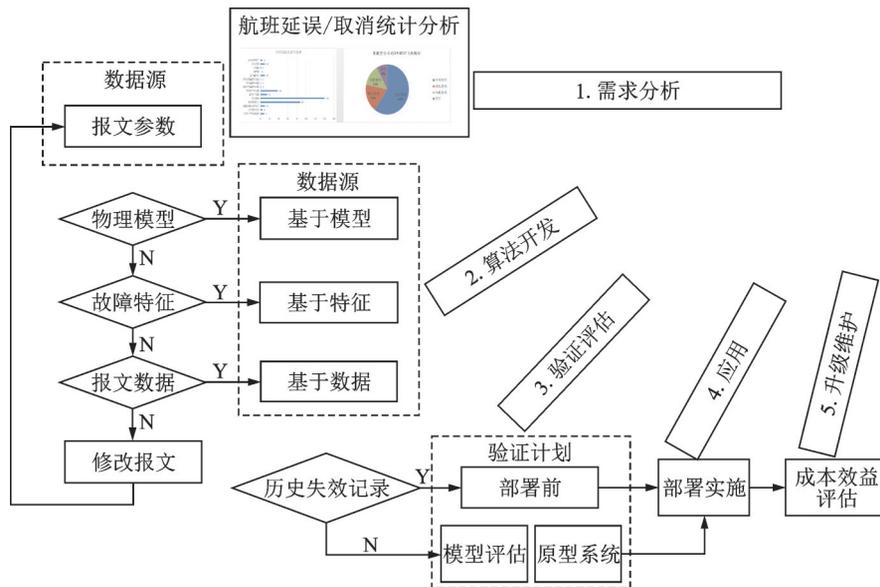


图 3 民机系统 PHM 模型开发与验证评估流程

Fig.3 Civil aircraft system PHM model development and verification evaluation process

### 2.1 空调系统 PHM 模型开发

#### 2.1.1 需求分析与数据源

考虑 PHM 维修模式实施的成本效益,通过分析机队可靠性数据,选择对航班延误或取消率有较高影响的系统或部件,或者拆换率较高的航线可更换件(Line replaceable unit, LRU)部件以及备件成本较高的大型 LRU 部件等,同时具备实施 PHM 数据条件的系统和部件作为 PHM 维修模式的应用

对象。B737NG 飞机空调系统故障高发,对航班延误或取消率有较高影响,同时 B737NG 飞机状态监控系统采集的数据包括空调系统各类温度、压力及活门开关量等监测数据,以及影响空调系统工况上下游系统和外界环境参数,如发动机  $N_1$  和  $N_2$  转速、引气温度/压力、飞行高度、速度及大气温度等。空调系统机载监测数据可以反映飞机飞行期间空调系统整体及各组件的工作状态,为空调系统状态监

测、故障分析及维修决策等提供了数据基础。但飞行过程中空调系统受自身构型变化、外界环境以及故障等因素的影响,其原始状态参数变化较大(图4),难以直接反应空调系统的工作状况以及健康状态,需要建立相应的PHM模型与算法。

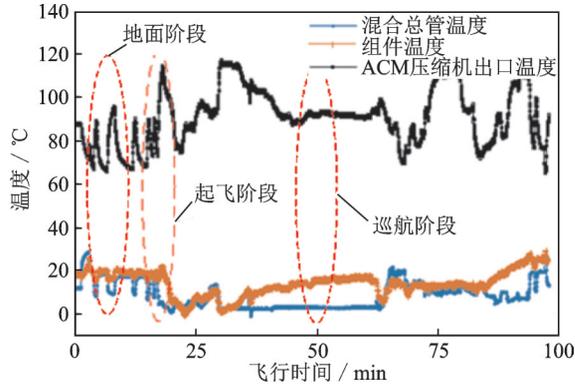


图4 典型航班过程空调系统状态参数变化趋势

Fig.4 Change trend of air conditioning system state parameters in typical flight process

### 2.1.2 PHM模型与算法开发

民机系统PHM模型包括基于系统解析模型及基于系统故障特征值以及数据驱动模型,特别是针对在役民机型号,用户掌握的设计信息有限,建立系统解析模型比较困难,同时因为民机机载系统的安全性和高可靠性的特点,系统故障或失效样本较少,建立基于故障特征值的模型同样比较困难,因此基于数据驱动的方法是现役民机系统PHM模型开发的重要途径。根据飞机在实际运行中采集的各种监测参数构建的系统基线模型能够更为准确地反应系统的运行特征,这种基于数据驱动建模的方法,比如多元状态估计<sup>[28-29]</sup>、随机森林<sup>[30]</sup>和深度学习<sup>[31]</sup>等方法在民机系统健康监测领域得到广泛应用。

按照MSET建模步骤,首先建立空调系统热交换器观测向量<sup>[23]</sup>,即

$$X = [SAT, TAT, N_2, MFDT, RAMT]^T$$

式中: SAT、TAT、 $N_2$ 、MFDT、RAMT 分别为外界大气静温、总温、发动机高压转子转速、空调混合总管温度及冲压空气温度。

选择历史健康数据构建训练矩阵。在历史健康数据的选择上,选择飞机空调系统在健康状态下的正常数据构建非参数化的训练矩阵有

$$D = \begin{bmatrix} SAT^1 & SAT^2 & \dots & SAT^{400} \\ TAT^1 & TAT^2 & \dots & TAT^{400} \\ N_2^1 & N_2^2 & \dots & N_2^{400} \\ MFDT^1 & MFDT^2 & \dots & MFDT^{400} \\ RAMT^1 & RAMT^2 & \dots & RAMT^{400} \end{bmatrix}$$

因为训练矩阵中5个变量的量纲各不相同,不

同参数绝对值相差很大,为了保证非线性运算符能够准确衡量不同向量之间的距离,需要对参数进行标准化处理。训练矩阵构建后对各路传感器信号进行标准化处理

$$x_i(t_j) = (x_i(t_j) - \mu_i) / \sigma_i \quad (1)$$

式中:  $x_i(t_j)$  为第  $i$  个参数序列在  $t_j$  时刻的取值;  $\mu_i$  和  $\sigma_i$  分别为第  $i$  个参数序列的均值和标准差。

$$\begin{cases} \mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^M x_i(t_j) \\ \sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^M (x_i(t_j) - \mu_i)^2 / (n - 1)} \end{cases} \quad (2)$$

训练矩阵  $D$  可以被认为是空调系统在健康运行状态下所采集数据建立的热交换器基线模型,模型定义了正常运行状态下压缩机出口温度参数所对应的范围。因此,在热交换器健康状况下当新到一组监测参数时,用基线模型所求出的该温度偏差值应该在0附近波动,当热交换器出现性能退化或者突然故障,则用基线模型求出的该温度偏差值会偏离基线,当偏差值超过了预先设置的故障预警值则触发维修活动。

### 2.1.3 PHM算法评估与验证

工程实践中需要对PHM模型进行性能评估,包括故障监测算法虚警率漏警率以及故障预测模型的预测精度、预测窗口及不确定性区间等。通过外场故障样本或实验室故障注入试验数据,开展模型算法评估验证。

文献[23]选择6架B737NG飞机1年的外场数据来验证所建基线模型的准确性。图5所示为编号为A的飞机利用MSET基线模型计算的反应空调性能退化的特征参数,即RAMT的偏差值。基于某航空公司提供的6架B737NG飞机1年的监测

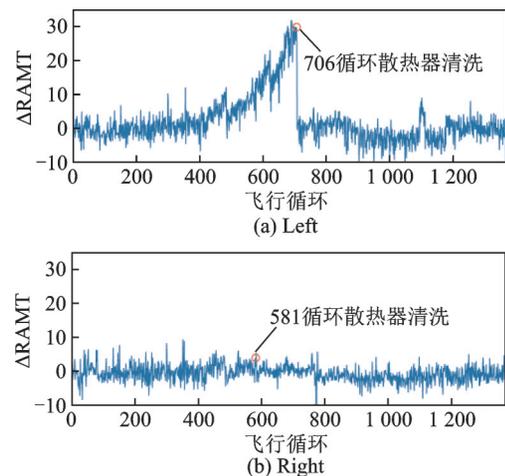


图5 飞机A左右空调系统压缩机出口温度偏差值序列

Fig.5 Sequence of temperature deviation values of compressor outlets of left and right air conditioning systems of airplane A

数据对该基线模型进行了验证,根据偏差值序列的变化情况适当安排维修时间,避免非计划的维修,实现热交换器的视情维修<sup>[23]</sup>。基于初步验证效果,某航空公司进一步推广应用于整个机队的空调系统健康监控,实现了整个机队空调性能在线监控,有效避免了因散热器故障导致的不正常事件及非计划拆换维修等,产生了明显的安全效益和经济效益。

### 2.2 空调系统 PHM 维修模式

在基于 MSG-3 的计划维修模式下,针对空调系统热交换器有 3 项计划维修工作,如表 1 所示。其中热交换器计划拆换工作是飞机制造商推荐的维修工作计划文件(Maintenance planning document, MPD)要求,其维修间隔是 2 000 飞行循环(Flight cycle, FC),主要工作是拆换装机时间即将

达到 2 000 FC 的热交换器,然后开展离位深度清洁和渗透测试等工作。另外,航空公司工程部门针对空调系统故障高发导致的非计划维修事件问题,在现有 MPD 计划维修任务基础上,额外增加两项计划维修工作,即热交换器的在翼清洁与管道温度定期检查。在翼清洁工作主要是通过通过在翼的冲洗热交换器冲压空气端以恢复其性能,2 个月进行一次在翼清洁;空调分配管温度检测工作是航空公司测试左右空调组件输出的稳定性,保障舱室有合适温度输入,该项工作只是检测表征空调组件性能,不能对部件性能恢复有所提高。此外,由于空调系统会发生超温及组件跳开等突发故障,航线维修人员要根据不正常事件的影响情况判定是进行在翼清洁还是拆换送修,因此导致非计划维修事件的发生具有一定的随机性,如图 6 所示。

表 1 空调系统热交换器计划维修任务

Table 1 Scheduled maintenance tasks for heat exchanger of air conditioning system

维修任务描述	任务来源	工作间隔	维修工时	成本
热交换器拆换	MPD 要求	2 000FC	14 人工时	拆换费+送修费
热交换器在翼清洁	工程计划	2 个月	4 人工时	人工费
管道温度检查	工程计划	14 天	1.5 人工时	人工费+辅助动力装置成本和耗油

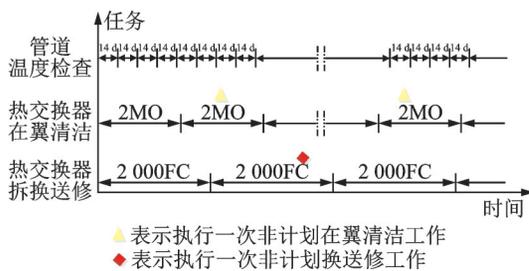


图 6 传统计划维修模式下空调系统相关维护工作

Fig.6 Related maintenance work of air conditioning system under traditional scheduled maintenance mode

民机空调系统健康监测技术的应用将优化空调维修任务,一些传统的依靠人工实施的定时检查任务将可能被自动化的健康监测技术取代,相应的计划维修任务将被取消还,另有一部分计划维修工作,比如性能恢复及定期更换报废等将依据健康评估和预测转换成视情维修或预测维修任务。

根据 PHM 维修任务分析逻辑,将表 1 中“空调系统热交换器计划维修任务”作为 PHM 候选任务进行分析。针对“管道温度测试”(判定流程见图 7),问题 1“PHM 是否有能力检测到需要润滑或勤务的工作”的回答是“No”,因为空调系统的热交换器不需要润滑和勤务工作;问题 2“PHM 是否有能力检测到退化”的回答是“Yes”,根据本文 2.1 节开

发的空调系统 PHM 模型提取的特征参数可有效反映空调系统热交换器性能退化;第 3 个问题“PHM 是否有能力在影响飞机运行前,为纠正影响正常使用的退化状态工作提供足够的准备时间”的回答为“Yes”,可以通过设定不同的超限阈值来调整维修准备时间;问题 4“PHM 程序或工作是否有效”的回答为“Yes”,通过 2.1 节的 PHM 模型外场验证可以证明 PHM 工作是有效的;问题 5“PHM 是否完全满足传统任务的目的”的回答是“Yes”,传统的定期管道温度检测目的是为了评估热交换器性能状态并决定是否需要额外的性能恢复工作,而利用 2.1 节提出的 PHM 模型评估热交换器性能,完全可以满足传统维修任务,即定期管道温度检测的目的。因此,本案例中选择“Yes”,并确定选择 PHM 替代传统的“管道温度检测”任务;最后管道温度监测任务来源于航空公司工程技术部门,而不是来源于 MPD,因此可以直接由工程技术部门决策是否采纳。

针对“热交换器在翼清洁”的 PHM 维修任务分析与“管道温度检查”流程类似,但在“PHM 是否完全满足传统任务的目的”这一问题上有所区别,传统的维修任务是一项定期的性能恢复任务,而针对空调热交换器的 PHM 任务仅能够实现热交换器性能评估,但无法实现热交换器性能恢复,不能

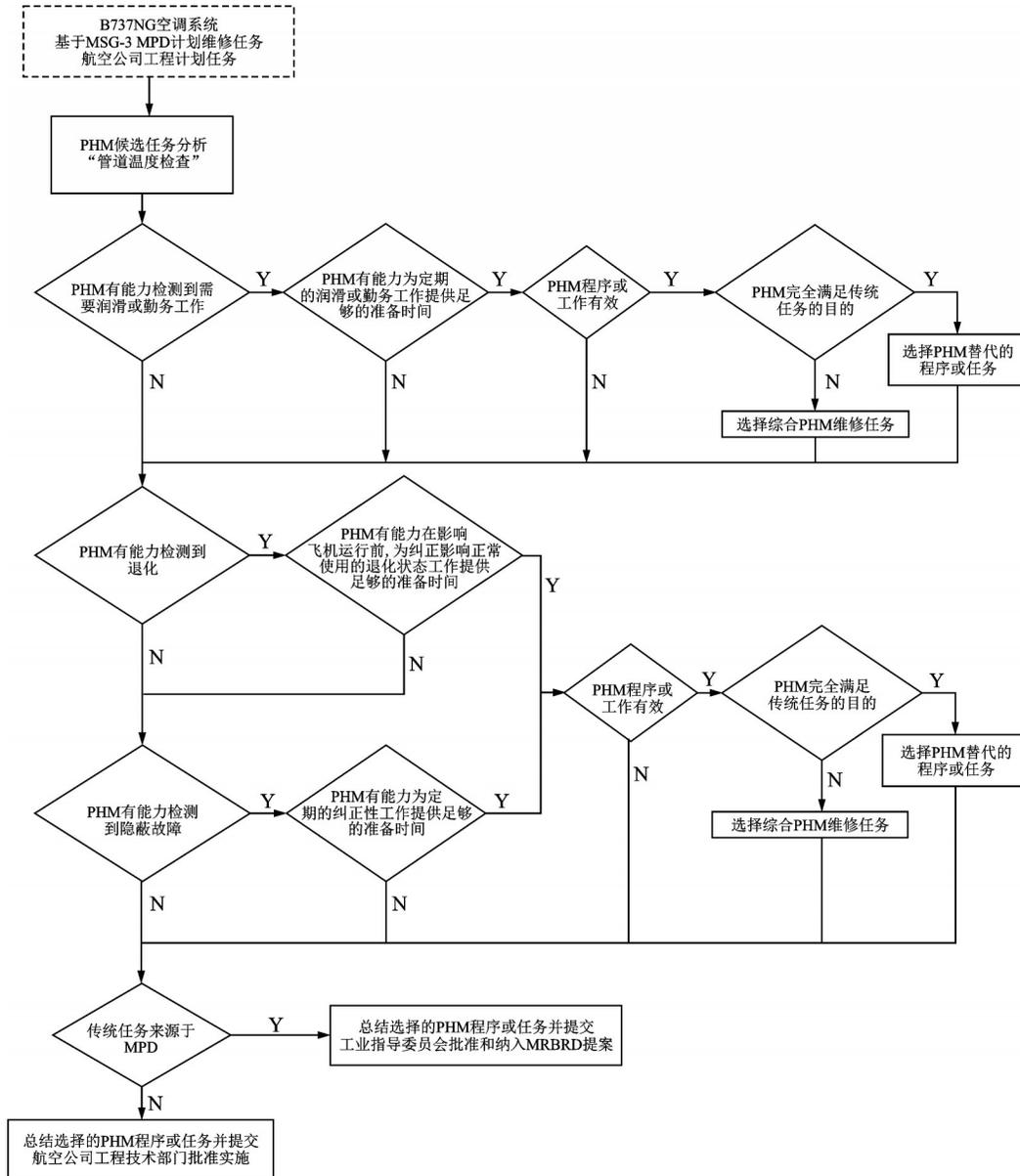


图7 PHM维修任务分析逻辑流程在空调热交换器上的应用(“管道温度检查”)

Fig.7 Application of PHM maintenance task analysis logic flow to air-conditioning heat exchanger (“Pipe temperature check”)

完全取代传统的“在翼清洁”任务,因此该分析流程里选择“综合 PHM 的维修任务”,即结合 PHM 实施热交换器的视情维修。

针对“热交换器定期拆换”的 PHM 维修任务分析与“热交换器在翼清洁”流程类似,传统的维修任务是通过定期拆换热交换器进行离位检查和维修进而恢复性能,而针对空调热交换器的 PHM 任务仅能够实现热交换器性能评估,但无法实现热交换器的性能恢复,不能完全取代传统的“定期拆换”任务,因此该分析流程里选择“综合 PHM 的维修任务”,即结合 PHM 实施热交换器的视情维修,由定期拆换转换为基于 PHM 的视情拆换或预测拆换。因为传统的“热交换器定期拆换”任务来源于 MPD,需要提交工业指导委员会讨论并由局方正

式批准才能实施。

因此,可以借助空调系统 PHM 取消部分的定期检查任务(管道温度检查),并将定期在翼清洁任务及定期拆换任务转变为视情维修任务。特别是“管道温度检查”及“定期在翼清洁任务”两项计划维修任务来源于航空公司工程技术部门,经由工程技术部门评估批准后即可实施,而“定期拆换任务”来源于局方批准的 MPD,因此首先需要提交工业指导委员会评估并提交局方批准后方可实施。

空调系统基于 PHM 的维修模式如图 8 可知,实施基于 PHM 监控的维修模式可以取消定时管道温度检查工作,取消计划周期为 14 d 的管道温度测试工作可以减少 1.5 工时/次。此外,传统的在翼清洁工作改为动态的基于热交换器性能评估的

视情清洁工作,平均可节省4个维修工时。原有的2000飞行循环的计划送修工作,需要获得工业指导委员会和局方批准才可以实施,因此现行维修模式下此项维修任务正常进行,但通过监控可以发现性能严重退化的热交换器从而提前开展拆换送修工作,避免非计划拆换工作。

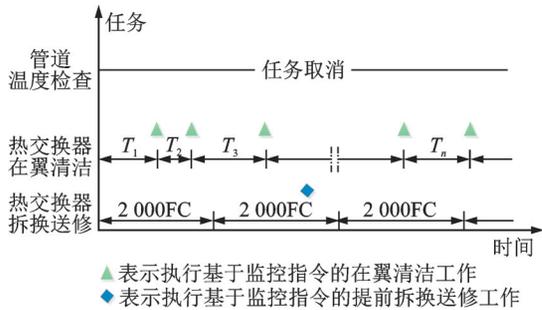


图8 空调系统基于PHM的维修模式

Fig.8 PHM-based maintenance mode of air conditioning system

### 3 空调系统PHM维修模式成本分析

#### 3.1 计划维修模式成本分析

在传统的计划维修模式下,空调热交换器维修成本包含管道温度测试平均费用 $C_T$ 、热交换器在翼清洁平均费用 $C_P$ 、定期拆换送修平均费用 $C_F$ (拆换+送修费用)及平均延误费用 $C_D$ (含有延误费用和航班取消费用)。根据某航空公司统计数据,某机型环控系统热交换器故障导致的非计划停机事件和航班延误事件每年平均2起左右,由2016—2019年发生故障数据拟合出其故障发生率为Beta分布

$$f(x) = 37 + 106 \frac{1}{\text{Beta}(1.36, 0.79)} x^{0.36} (1-x)^{-0.21} \quad (3)$$

假设在仿真周期内空调分配管道温度测试维护工作执行 $m$ 次(其中打包测试占90%,单独测试10%),计划的热交换器在翼清洁预防维修 $n$ 次,定期送修更换 $k$ 次,整个机队空调热交换器性能退化导致的不正常事件 $g$ 起,机队规模为 $N$ 架飞机。在计划维修模式下维修成本仿真认为,只要出现不正常事件就要开展非计划航线维修,根据故障情况实施在翼清洁或者拆换送修。维修历史统计表明,热交换器故障引起的非计划维修中需要采用提前拆换工作的占比21%,而其余的79%则可以通过在翼清洁工作恢复性能。考虑延误影响,由维修历史统计,空调系统引起的不正常事件4%会引起延误,平均延误2h。在计划维修模式下B737NG空调系统热交换器维修成本为

$$M_o = m \times C_T + (n + 79\% \times g/N) \times C_P + (k + 21\% \times g/N) \times C_F + g/N \times 4\% \times C_D \quad (4)$$

利用离散事件仿真软件Arena<sup>[32]</sup>进行计划维修模式下空调系统热交换器的维修事件建模仿真,模型结构如图9所示,模型符号注释见表2。

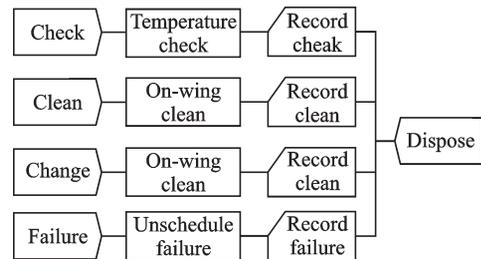


图9 空调系统热交换器计划维修事件仿真模型

Fig.9 Simulation model of scheduled maintenance event for heat exchanger of air conditioning system

表2 热交换器计划维修事件仿真模块

Table 2 Simulation module of heat exchanger scheduled maintenance event

模块	含义	仿真模型参数设定	备注
Check	检查事件的发生	Constant (14 d)	14 d做1次定期检查
Clean	定期清洁事件的发生	Constant (60 d)	60 d做1次定期清洁
Change	拆换事件的发生	Constant (334 d)	2000飞行循环换算为334 d
Failure	故障的发生	37 + 106Beta(1.36,0.79)	故障率服从Beta分布
Temperature check	空调分配管温度测试过程	Constant(1.5 h)	空调分配管温度测试1次用时1.5 h
Online clean	在翼清洁过程	Constant(4 h)	清洁1次用时4 h
Heat exchanger change	热交换器的拆换过程	Constant(14 h)	热交换器拆换1次用时14 h
Unschedule failure	非计划事件的维修过程	TRIA(10,14,16)	非计划事件的维修时间服从三角分布
Record check	记录检查事件的发生次数	Count 1	每发生1次计数1次
Record clean	记录定期清洁次数	Count 1	每发生1次计数1次
Record change	记录拆换次数	Count 1	每发生1次计数1次
Record failure	记录非计划故障发生次数	Count 1	每发生1次计数1次

根据某航空公司的运营情况对环控系统热交换器的维修成本项目进行估算,其中在翼清洁费用为800元/次。空调分配管道打包测试是指航后测试空调分配管温度时,需要在地面开启辅助动力装置,在此期间同步开展其他检查工作。单独测试是只为分配管温度测试而在地面开启辅助动力装置,成本包括:检查成本、燃油成本及辅助动力装置可用寿命损耗折算成本。同时分配管温度测试工作需要在地面启动辅助动力装置,燃油消耗大概为100 kg/h,而启动辅助动力装置的寿命折损消耗约为4 000元/时。结合工程实际,该测试工作经常和其他工作打包在地面辅助动力装置启动期间开展,通过工程经验假设分配管温度测试工作分为组合测试和单独测试,比例为9:1,组合测试1次为1 020元,单独测试1次为7 500元。定期送修成本包括单次拆换成本和单次送修成本,目前航空公司采用包修方式,而包修总价应该与送修次数相关,本文按平均单次送修费用30 000元。飞机延误成本涉及较多,空调系统热交换器引起的延误很少,可能发生在航前维修不及时导致的延误,折算为延误时间2 h(每小时延误成本5 000元=燃油成本+辅助动力装置寿命消耗+其他),单次延误成本约为1万元。

对模型设定仿真时长为10年,机队规模设置为90架,仿真次数10 000次,得到如图10所示的仿真结果,即管道定期温度检测事件的次数 $m=261$ ,热交换器在翼定期清洁的发生次数 $n=61$ ,热交换器拆换的发生次数 $k=11$ ,非计划故障发生次数 $g=36$ 。注意: $k$ 、 $m$ 、 $n$ 均表征单架飞机次数,而 $g$ 是根据整个机队运行情况的仿真结果。由计划维修成本式(4)可知,单架飞机运行10年的情况下,针对空调系统的热交换器总维修成本在82万元左右。

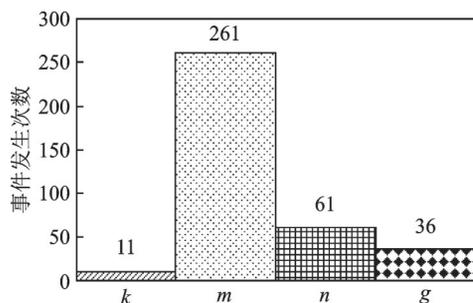


图10 计划维修模式下热交换器维修事件仿真

Fig.10 Simulation of heat exchanger maintenance event in scheduled maintenance mode

### 3.2 PHM维修模式成本分析

实施基于PHM的维修,由于PHM算法自身漏警或虚警问题,不可避免地会出现潜在故障发生

却没有检查到系统故障,产生了漏警而最终导致非计划维修事件;或者无故障发生,但PHM检测系统产生虚警,需要在非计划时间检查确认虚警。本文2.1节提出的方法在整个机队推广应用后,基于外场数据和工程师经验判断,空调系统PHM算法漏警率 $MAR < 8\%$ ,虚警率 $FAR < 5\%$ 。因此,空调热系统PHM维修成本包括:在翼清洁预防维修平均费用 $C_P$ 、定期送修平均费用 $C_F$ (拆换+送修费用) $C_P < C_F$ 、平均延误费用 $C_D$ (含有延误费用和航班取消费用),虚警引起的检查平均费用 $C_{IF}$ 及空调系统PHM开发成本 $C_{PR}$ 。假设在仿真周期内基于PHM监控的在翼清洁预防维修 $n'$ 次,定期送修更换 $k'$ 次,虚警事件 $i$ 次,漏警事件 $j$ 次,可提前拆换避免的不正常事件有 $r$ 次,注意事件是针对整个机队的仿真。建立仿真模型时根据历史数据统计,由于空调系统引起的不正常事件4%会引起延误,平均延误2 h。在PHM维修模式下空调系统热交换器维修成本为

$$M_P = (79\% \times (r + j) / N + n') \times C_P + (k' + 21\% \times (r + j) / N) \times C_F + i \times C_{IF} + j \times 4\% \times C_D + C_{PR} \quad (5)$$

假设PHM维修模式下,不正常事件导致飞机延误费用10 000元/次;虚警事件是需要进行系统检测的费用为3 000元/次;PHM系统改装费包括单机硬件改装费用及配置维护系统和人员培训费用,该费用是一次性的成本,根据工程经验估算为5万元。

利用离散事件仿真软件Arena进行空调系统PHM维修模式仿真,模型结构如图11所示,模型符号注释见表3。

设定仿真时长为10年,仿真次数10 000次,得到如图12所示仿真结果,代入式得到PHM维修模式下热交换器维修成本约为43万元。

### 3.3 两维修模式下的成本效益对比分析

图13(a, b)分别为5、10、15、20年的情况下计划维修和PHM维修模式下的各类维修事件发生次数对比。在传统维修模式下,需要定期(每14 d)对空调分配管温度进行测试检查,而PHM维修模式下则取消了此类检查,图13中PHM模式下的检查测试事件是指在PHM监测下针对出现的虚警事件的系统检查,检查的耗时和成本比传统计划维修模式下的人工管道温度检查要相对较高,但由于开发的PHM算法虚警率较低,仿真结果显示虚警事件次数极少。对在翼清洁事件来说,传统计划维修模式是每2个月做1次定期清洁,实施PHM后仿真结果显示的发生次数上与传统计划维修差别

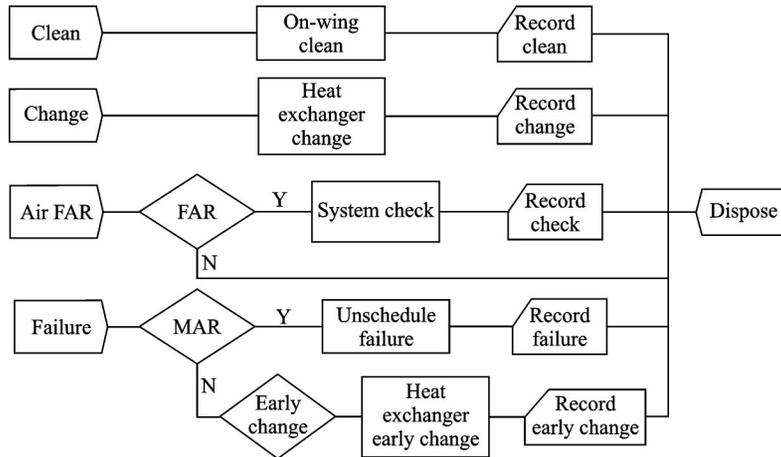


图 11 空调系统 PHM 维修模式下维修事件仿真模型

Fig.11 Simulation model of maintenance events in PHM maintenance mode of air conditioning system

表 3 空调系统 PHM 维修模式仿真模块

Table 3 Simulation module of air conditioning system in PHM maintenance mode

模块	含义	仿真模型参数设定	备注
Clean	基于 PHM 状态监控的清洁事件的发生	NORM(60,6)	清洁事件的发生服从正太分布
Air FAR	虚警事件的发生	1.5+	虚警事件的发生服从威布尔分布
FAR	虚警事件的判别	WEIB(180, 42.9)	虚警率
System check	虚警事件引起的检测过程	5%	系统检测 1 次用时 3 h
MAR	漏警事件的判别	Constant(3 h)	漏警率
Early change	提前拆换事件的判别	8%	能够提前拆换的概率
Heat exchanger early change	热交换器的提前拆换过程	21%	热交换器拆换一次用时 14 h
Record check	记录检查事件的发生次数	Constant(14 h)	每发生 1 次计数 1 次
Record early change	记录提前拆换次数	Count 1	每发生 1 次计数 1 次

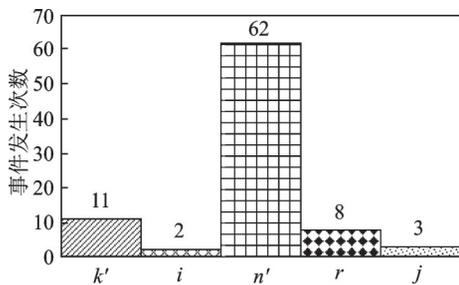


图 12 PHM 维修模式仿真 10 年的结果

Fig.12 10 years of simulation results of PHM maintenance mode

不大,这主要是在本文了假设热交换器性能退化周期为均值为 2 个月,偏差为 10% 的正态分布。因此,其基于 PHM 的热交换器视情维修的平均周期在 2 个月左右,所以两种维修模式下在翼清洁次数差别不大。目前,航空公司基本采取每 2 个月做 1 次定期在翼清洁,无法获取热交换器无维修时间大于 2 个月的数据样本,因此本文研究里相对保守一点,热交换器性能退化周期为均值为 2 个月。后续实施视情维修后,可重新收集数据进而更新热交换器性能退

化周期的分布。即便如此,实施 PHM 维修模式表现出两个主要优势:一是维修间隔是通过基于系统健康评估的结果,避免了热交换器的过度清洁;二是可以通过对清洁后的健康状态进行持续的监测,能够保证清洁质量。对比两种维修模式下的拆换事件可以发现,PHM 维修模式下的拆换送修次数要比较多,主要是因为 PHM 维修模式下的拆换送修次数是定期拆换事件和 PHM 识别出的可提前拆换送修的事件之和,通过提前拆换送修可以避免大量的不正常事件的发生。目前“热交换器 2 000 飞行循环拆换送修”任务来源于 MPD,更改为 PHM 维修模式需要局方批准,因此在本文仿真里并没有把这项任务完全转换为 PHM 维修,未来这项任务实施 PHM 维修后将大大减少热交换器拆换送修次数,进一步降低维修成本。PHM 维修模式下的不正常事件的产生主要来自于漏警产生,但算法的漏警率控制在可接受的范围内,所以不正常事件的产生也是极少数的,而在传统计划维修模式下的不正常事件较多,也会造成很多航班延误成本的支出。

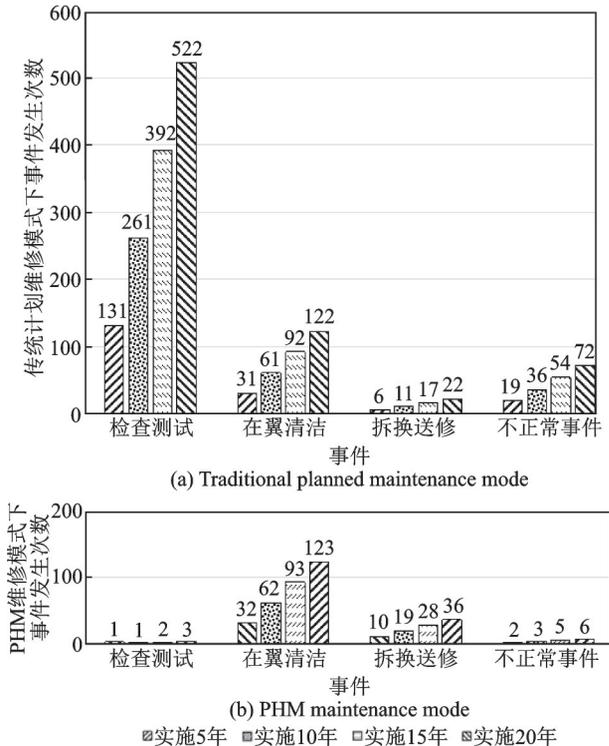


图13 不同实施周期内下的各类事件仿真数量对比

Fig.13 Comparison of simulation numbers of various events in different implementation cycles

根据仿真结果和成本评估模型,分别计算空调系统PHM维修模式实施5、10、15、20年周期内,计划维修和基于PHM监控维修的总成本,如表4所示。由表4可以看出,对于1架飞机的空调系统维护而言,PHM维修模式实施5年可以节约40%左右的维修成本节省,实施10年成本节省约为48%,实施15年成本节省49%,实施20年成本节省51%。数据表明,实施PHM维修模式具有明显的经济效益,可以大幅度节约维修成本,而实施周期越长,综合经济效益越大,这是因为实施PHM维修之前需要改装设计等初始费用,仿真评估中设置为单机PHM改装设计费用为50 000元。以空调系统PHM维修模式实施周期为10年计,单架飞机可节省维修成本40万左右,某航空公司150余架飞机的机队可节省维修成本在6 000万元左右,即每年可以为航空公司节约600万元维修成本。

表4 不同实施周期内维修成本评估结果

Table 4 Maintenance cost assessment results in different implementation cycles

实施周期/年	计划维修成本/元	PHM维修成本/元	节约成本/元	百分比/%
5	427 974	256 893	171 081	40
10	824 281	432 187	392 093	48
15	1 252 255	638 281	613 974	49
20	1 648 643	816 046	832 597	51

## 4 结 论

民机维修理论的发展与民机新技术的采用、特别是飞机机载维护系统、健康监测技术的发展密切相关。飞机健康监测技术的引进将改变目前的飞机计划维修模式,极大地减少停机时间和检查的人工成本,有效地降低飞机的运营维护成本。近几年航空PHM技术得到长足发展,部分技术具备较高的成熟度,但如何在民机维修工程实践中应用这些技术,真正实现PHM预测维修模式仍面临不少挑战。特别是与现行的民机计划维修模式的有效融合,在确保飞机满足持续适航要求的前提下,在民机初始维修任务制定中如何融合PHM技术以及基于PHM的新维修模式的探讨,制定更加经济有效的民机全寿命维修任务,成为各国适航当局和世界主要民机制造商所面临的重要课题。

本文研究了基于PHM的民机预测维修模式,提出了在现有计划维修模式下,有效融合PHM维修任务的方法,并探讨了针对不同类型维修任务的分析流程,以B737NG空调系统为例,借助离散事件仿真验证了基于PHM的预测维修模式的经济效益。基于PHM的维修模式不仅可以减少部分定期检查工作,延长拆换清洁时间间隔,还可以通过提前监测来减少非计划的维修事件。对比传统的计划维修模式,基于PHM的预测维修模式极大地节约了成本。进一步推广应用到整机其他系统、甚至结构将带来更大的经济效益,而实施PHM维修模式还将减少航班不正常事件,带来显著的安全效益以及综合效益。

随着飞机健康管理技术的发展,基于健康管理的飞机维护理念成为未来民机维护的必然趋势,国际主流厂商如波音和空客都计划在新型号或现有型号的改进中使用该方法以降低维护成本,提高机型竞争力。虽然局方和工业方都对相关技术和标准规范开展了深入的研究,但目前国内外局方对这一技术均没有适用的法规与指导文件,对各环节的主要评定和符合性方法缺少实质性的指导,成为目前民机PHM维修模式落地所面临的主要困境,也是需要局方、工业方和学术界共同努力的方向。

### 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.  
 [2] Air Transport Association of America. MSG-3: Operator/manufacturer scheduled maintenance develop-

- ment; ATA MSG 3 VOL. 1: 2018.1 [S]. USA, Washington: Air Transport Association, 2018.
- [3] WENK L. Guidance update on using SHM for continued airworthiness of aero structures[C]//Proceedings of the Fifth European Workshop on Structural Health Monitoring 2010. [S.l.]: DEStech Publications, 2010.
- [4] PIOTROWSKI D, ROACH D, MELTON A, et al. System reliability for verification and implementation [C]//Proceedings of Structural Health Monitoring 2015. [S.l.]: DEStech Publications, 2015.
- [5] SUN Jianzhong, CHEN Dan, LI Chaoyi, et al. Integration of scheduled structural health monitoring with airline maintenance program based on risk analysis[J]. Journal of Risk and Reliability, 2018, 232 (1) : 92-104.
- [6] SMITH M, SULCS P F, WALTHALL R, et al. Design and implementation of aircraft system health management (ASHM) utilizing existing data feeds [C]//Proceedings of SAE 2015 AeroTech Congress & Exhibition. [S.l.]: SAE, 2015.
- [7] RAJAMANI R. New guidelines for implementation of structural health monitoring in aerospace applications [C]//Proceedings of Condition-Based Maintenance in Aviation: the History, the Business and the Technology. [S.l.]: SAE, 2019.
- [8] SANTOS L G D. Embraer perspective on the challenges for the introduction of scheduled SHM (S-SHM) applications into commercial aviation maintenance programs [J]. Key Engineering Materials, 2013, 558: 323-330.
- [9] BAPTISTA M, SANKARARAMAN S, MEDEIROS I P, et al. Forecasting fault events for predictive maintenance using data-driven techniques and ARMA modeling [J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 115: 41-53.
- [10] International Maintenance Review Board Policy Board. IP 092: Definition of structural health monitoring (SHM) addition to MSG-3 [EB/OL]. (2009-04-01)[2020-07-18]. <https://www.easa.europa.eu/document-library/imrbpb-issue-papers/ip-092>.
- [11] International Maintenance Review Board Policy Board. IP 105: Further definition of structural health monitoring (SHM) addition to MSG-3 [EB/OL]. (2009-10-01)[2020-07-18]. <https://www.easa.europa.eu/document-library/imrbpb-issue-papers/ip-105>.
- [12] SAE. Determination of costs and benefits from implementing an engine health management system: ARP4176A—2013 [S]. Warrendale, USA: SAE Standards & Publications, 2013.
- [13] SPECKMANN H, DANIEL J. Structural health monitoring for airliners, from research to user requirements, a European view[C]//Proceedings of CANE-US Conference on Micro-Nano Technologies. [S.l.]: AIAA, 2004.
- [14] PATTABHIRAMAN S, GOGU C, KIM H, et al. Skipping unnecessary structural airframe maintenance using an on-board structural health monitoring system [J]. Journal of Risk and Reliability, 2012, 226 (5) : 549-560.
- [15] FITZWATER L M, DAVIS C, TORNG T, et al. Cost/benefit analysis for integration of non-deterministic analysis and in-situ monitoring for structural integrity [C]//Proceedings of the 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Denver Colorado: [s.n.], 2011.
- [16] MALERE J, SANTOS L. Challenges for costs and benefits evaluation of IVHM systems [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2013, 6(2): 484-491.
- [17] International Maintenance Review Board Policy Board. IP 180: Aircraft health monitoring (AHM) integration in MSG-3[EB/OL]. (2018-04-27)[2020-07-18]. <https://www.easa.europa.eu/download/imrbpb/IP%20180%20-%2020AHM%20integration%20in%20MSG-3.pdf>.
- [18] YAN Hongsheng, ZUO Hongfu, SUN Jianzhong, et al. Cost effectiveness evaluation model for civil aircraft maintenance based on prognostics and health management [C]//Proceedings of 2017 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics and Control. Shanghai: [s.n.], 2017.
- [19] RODRIGUES L, GOMES, JOÃO P, et al. Use of PHM information and system architecture for optimized aircraft maintenance planning [J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(4): 1197-1207.
- [20] 李超役.民用飞机空调系统健康评估与故障诊断方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.  
LI Chaoyi. The research of health assessment and fault diagnosis method of civil aircraft air conditioning system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [21] 刘翠.基于PHM的民机环控系统维修优化研究[D].南京:南京航空航天大学,2020.  
LIU Cui. The research on maintenance optimization of environmental control system for civil aircraft based on PHM [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [22] NAJJAR N, HARE J, D'ORLANDO P, et al. Heat exchanger fouling diagnosis for an aircraft air-conditioning system [J]. SAE Technical Papers, 2013. DOI:

- 10.4271/2013-01-2250.
- [23] NAJJAR N, SANKAVARAM C, HARE J, et al. Health assessment of liquid cooling system in aircrafts: Data visualization, reduction, clustering and classification [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2012, 5(1): 119-127.
- [24] ZHANG Yuxuan, LI Yuanxiang, WEI Xian, et al. A recurrent neural network based method for predicting the state of aircraft air conditioning system [C]//Proceedings of 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence.[S.l.]: IEEE, 2017.
- [25] SUN Jianzhong, LI Chaoyi, LIU Cui, et al. A data-driven health indicator extraction method for aircraft air conditioning system health monitoring [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(2): 409-416.
- [26] 杜林颖. 飞机热交换器性能监测与分析方法研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- DU Linying. Research on performance monitoring and analysis method of aircraft heat exchanger [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019.
- [27] SILVA A, NAJJAR N, GUPTA S, et al. Wavelet-based fouling diagnosis of the heat exchanger in the aircraft environmental control system [C]//Proceedings of SAE 2015 AeroTech Congress & Exhibition. [S.l.]: SAE, 2015.
- [28] SUN Jianzhong, WANG Fangyuan, NING Shungang. Aircraft air conditioning system health state estimation and prediction for predictive maintenance [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 947-955.
- [29] 左洪福, 孙见忠, 梁坤. 基于基线模型和贝叶斯因子的系统故障早期预警方法: CN102880170A [P]. 2013-01-16.
- ZUO Hongfu, SUN Jianzhong, LIANG Kun. System fault early warning method based on baseline model and bayes factor: CN102880170A [P]. 2013-01-16.
- [30] WANG Fangyuan, SUN Jianzhong, LIU Xinchao, et al. Aircraft auxiliary power unit performance assessment and remaining useful life evaluation for predictive maintenance [J]. Journal of Power and Energy, 2020, 234(6): 804-816.
- [31] LIU Cui, SUN Jianzhong, LIU He, et al. Complex engineered system health indexes extraction using low frequency raw time-series data based on deep learning methods [J]. Measurement, 2020, 161: 107890.
- [32] KELTON W D, SADOWSKI R P, STURROCK D T. 仿真使用 Arena 软件 [M]. 3 版. 周泓, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.

(编辑: 孙静)