

文章编号:1674-8190(2021)05-007-08

以预测性为中心的维修理论和维修方式发展研究

顾新¹,刘松岑²

(1.中国民用航空上海航空器适航审定中心,上海 200335)

(2.中国东方航空股份有限公司 机务工程部,上海 201105)

摘要:目前,预测性维修技术尚未在维修大纲领域广泛应用,但随着大数据理论和技术的发展,以预测性为中心的维修逐渐受到关注。本文梳理了维修理论和维修方式转变的发展历程,分析了预测性维修技术的发展条件;基于IP-180和MSG-3研究了以预测性维修为中心的维修项目建立方法,指出计划性维修项目转化为预测性维修项目是可行的;总结了当前飞机预测性维修项目建立存在的困难,并给出了适用于飞机预测性维修项目建立的建议和策略。

关键词:MSG-3;IP-180;维修大纲;计划性维修;预测性维修

中图分类号:V267

DOI:10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.05.02

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the Development of Predictive Centered Maintenance Theory and Maintenance Mode

GU Xin¹, LIU Songcen²

(1. Shanghai Aircraft Airworthiness Certification Center, CAAC, Shanghai 200335, China)

(2. Maintenance & Engineering Department, China Eastern Airlines Co., Ltd., Shanghai 201105, China)

Abstract: At present, predictive maintenance technology has not been widely used in the field of maintenance outline, but with the development of big data theory and technology, predictive centered maintenance has attracted more and more attention. The development process of maintenance theory and maintenance mode transformation are combed in this paper, and the development conditions of predictive maintenance technology are expounded. Based on IP-180 and MSG-3, the establishment method of maintenance project centered on predictive maintenance is studied, and it is pointed out that it is feasible to convert planned maintenance project into predictive maintenance project. The difficulties existing in the establishment of aircraft predictive maintenance projects are summarized, and the suggestions and strategies suitable for the establishment of aircraft predictive maintenance projects are given.

Key words: MSG-3; IP-180; maintenance program; planned maintenance; predictive maintenance

收稿日期:2021-06-28; 修回日期:2021-09-02

通信作者:刘松岑, slliu@ceair.com

引用格式:顾新,刘松岑.以预测性为中心的维修理论和维修方式发展研究[J].航空工程进展,2021,12(5):7-14.

GU Xin, LIU Songcen. Research on the development of predictive centered maintenance theory and maintenance mode[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 7-14. (in Chinese)

0 引言

适航规章规定航空运输营运人应依据维修大纲为其所运营的飞机编制维修方案,并按维修方案实施维修工作^[1]。预测性维修技术尚未在维修大纲领域得到普适性应用,通过对波音和空客公司飞机维修审查委员会报告的研究,包括 B737、B747、B757、B777、B787^[2-6] 和 A320、A330、A350^[7-9]等机型,发现各大飞机制造商也没有将预测性维修项目写入各自自主研发型号的维修大纲中。当前维修大纲仍基于 MSG-3^[10]进行编制,其目的是有效指导飞机进行计划性维修,在满足持续适航要求的前提下,保障飞机安全可靠经济运行。随着大数据理论和技术的发展,以预测性为中心的维修逐渐受到广泛关注。

维修大纲是航空公司例行维修工作的源头,航空公司主要的维修工作来自维修大纲中的项目。因此,维修大纲的制定对于合理安排飞机维修,保障维修工作顺利开展,以及保持飞机整体效能具有至关重要的作用。当前,计划性维修要求的制定依然将 MSG-3 作为重要依据,但是在实际运营过程中飞机面临着许多非计划性维修项目,甚至出现超手册问题。为了合理制定维修大纲,加之新技术、新理论的发展和计算机能力的提升,有必要探究以预测性为中心的维修理论和维修方式,实现预测性维修在维修大纲项目建立中的应用,使得尽可能多的非计划维修项目向计划性维修项目转变,切实达到飞机运行过程中维修工作的计划性安排,进而降低维修成本,提高日利用率,保障飞机安全可靠经济地运行。

本文基于相似项目的应用和标准,研究预测性维修技术发展所需具备的条件,以飞机系统为例,验证将一个计划性维修项目转化为预测性维修项目的方法和过程,进而明确以预测性为中心的维修理论和维修方式需要解决的问题,提出相关策略和建议,以期对预测性维修的深入研究与工程应用提供参考。

1 维修理论和维修方式发展历程

自飞机发明以来,维修实践活动就在不断的探索和发展之中,从“预防性维修为主”的维修到通过“面向过程、自下而上”分析确定维修方式的 MSG-1^[11]、MSG-2^[12],再到“以可靠性为中心”建立计划性维修项目的维修方式的 MSG-3,最后发

展到当前“以预测性为中心”的计划性维修理念,其维修理论和维修方式的发展历程如图 1 所示,可以看出:预测性维修的维修方式可以使维修项目单机化,对于营运人的使用特点和环境更有针对性,同时能提高所建立维修项目的适用性和有效性。

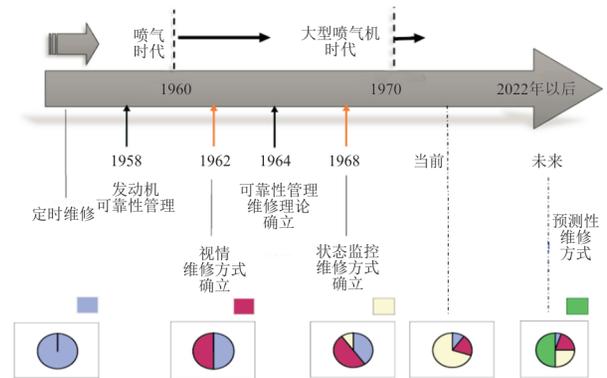


图1 维修理论和维修方式的发展历程
Fig. 1 Historical development process of maintenance theory and maintenance mode

实质上,维修理论和维修方式的发展可概括为:以预防性为中心的维修到以可靠性为中心的维修,再到以预测性为中心的维修。

预防性维修理念发展较早,其是通过产品的系统性检查、设备测试和更换以防止功能故障发生,使其保持在规定状态所进行的全部活动。预防性维修包括定期维修、状态维修和主动维修三种形式^[13-14];然而定期维修存在过度维修、维护效果差、不能保证故障率下降、使用率下降等问题;状态维修依赖于数据的准确性、对监测环境要求较高、阈值获取困难;主动维修只对部分可控因素有效,不能有效防止故障发生。

以可靠性为中心的维修最早可追溯到1968年美国空运协会维修指导小组起草的 MSG-1,后续在 MSG-1 的基础上又加以完善发布了 MSG-2,直到目前广泛应用于计划性维修项目的 MSG-3。关于以可靠性为中心的维修技术研究方面,国内外开展了大量研究,例如 J. Moubray^[15]探究了以可靠性为中心的维修理念在复杂装备机械上的应用;蒋庆喜等^[16]探究了以可靠性为中心的维修在航空装备中的应用;刘文彬等^[17]研究了以可靠性为中心的智能维修决策模型的实现途径;武禹陶等^[18]系统研究了近年来以可靠性为中心的维修在各个领域内的应用。尽管以可靠性为中心的维修已广

泛应用于工程领域的计划性维修项目建立,但是在民用航空领域,基于MSG-3制定的维修大纲在实际应用中仍然存在非计划维修项目,导致飞机正常营运受到影响。

关于以预测性为中心的维修方面,张逸俊^[19]探究了预测性维修对于航空维修作业的影响;冯蕴雯等^[20-22]对预测性维修进行了探究,并研究了基于预测模型的维修决策技术;江秀红等^[23]考虑维修重要度的影响对多态系统的预测性维修进行了分析;孔旭等^[24]对预测性维修技术研发应用态势进行了系统研究,指出了当前对预测性维修的关注点以及存在的局限性。此外,2018年4月国际维修审查委员会政策委员会(IMRBPB)发布了IP-180—Aircraft Health Monitoring (AHM) Integration in MSG-3^[25],为实现预测性维修大纲编制提供了指导性文件。

2 预测性维修技术发展的条件

基于25部取证的运输类飞机,目前还未制定关于预测性维修技术应用的适航和工业标准。然而,基于27部和29部取证的旋翼飞机已建立了相关标准,通过对旋翼飞机技术标准^[26-27],以及相似项目中应用,例如:发动机监控、飞机故障监控等的研究,总结出发展预测性维修所需要具备的技术条件如下:(1)机载数据记录和传输功能;(2)系统性能/衰减的测量能力;(3)数据处理、诊断和预测技术的应用。

2.1 机载数据记录和传输

现代飞机都已具备机载数据记录功能,如空客的飞行数据接口和管理组件(FDIMU)、波音的数字型飞行数据获取组件(DFDAU)/飞机信息管理系统(AMIS),以及通信寻址和报告系统(ACARS)。机载数据记录和传输技术应用已经非常成熟,如航空公司维修控制中心(MCC)将相关技术应用于运行中的故障监控^[28-29]。另外,空中局域网和互联网技术应用也已趋于成熟,为更多数据记录和传输提供平台。

因此,机载数据记录和传输技术的发展和應用可满足发展预测性维修的技术条件。

2.2 系统性能/衰减的测量

针对现有机型相关系统设计能提供参数数据

(参数与系统性能/衰减有关),并且参数可以被机载数据记录系统记录,则参数才可作为性能/衰减测量的候选参数;如有存在额外数据需求,则需要通过加装传感器来实现参数记录。

由于型号在设计阶段对于预测性维修没有提出要求,提供候选参数的系统/设备有限。此外,通过加装传感器对已取证机型扩展候选参数的系统/设备范围相对有限,因此系统性能/衰减的测量限制了将计划性维修项目转化为预测性维修项目的范围。

2.3 数据处理、诊断和预测

数据处理、诊断和预测相关技术和理论发展如表1所示,这些技术和理论为预测性维修提供了实现手段,而预测性维修的实现有三种方式:(1)基于数据驱动的方法^[30-32];(2)基于模型的方法^[33];(3)基于模型和数据驱动的融合方法^[34-35]。

表1 数据处理、诊断和预测相关技术和理论
Table 1 Technology and theory of data processing, diagnosis and prediction

阶段	相关技术和理论
数据处理	卡尔曼滤波(Kalman filtering)
	时序(time-frequency/time)
	频率矩阵(frequency moments)
	小波分析(wavelet analysis)
	自回归模型(autoregressive (AR) model)
	傅里叶分析(Fourier analysis)
	维格纳准概率分析(Wigner-Ville analysis)
	模糊逻辑(fuzzy logic)
	人工神经网络(artificial neural network)
	遗传算法(genetic algorithms)
诊断	统计模式识别(statistical pattern recognition)
	隐马尔可夫模型(hidden Markov model)
	支持向量机(support vector machine)
	决策树归纳算法(decision tree induction)
	逻辑回归(logistic regression)
预测	人工神经网络(artificial neural network)
	可靠性理论(reliability theory)
	统计分析,例如:回归分析(statistical analysis)
	时间序列数据分析(time series data analysis)
维修	基于案例推理(case based reasoning (CBR))
	更新理论(renewal theory)
	数学规划(math programming)
	模拟(simulation)
	MSG-3, IP-180—在MSG-3框架下,发展基于飞机健康监控(AHM)的计划性维修项目的指南(MSG-3, IP-180—Aircraft health monitoring (AHM) integration in MSG-3)

基于数据驱动的方法具有将高维数据转换为低维信息的能力,使用历史数据自动学习形成系统性能模型,这种方法依赖于系统运行数据质量和对系统设计的理解程度,适用于无法得到设计数据,但拥有丰富运行数据的营运人独立开发预测性维修。基于模型的方法需具备对系统设计的理解能力,它依赖于分析模型(例如一组代数或微分方程)来表示系统的性能,适用于掌握设计数据的飞机或系统设计持有人。基于模型和数据驱动的融合方法综合运行数据和系统设计理解两方面的优势,通过运行数据的数据驱动不断优化初始设计建立的模型,不仅能够建立针对营运人使用环境的预测性维修任务,还可以帮助设计方优化设计存在的问题。

关于数据处理、诊断和预测技术条件,现有设计体系、飞机设计阶段飞机或系统设计持有人没有考虑预测性维修的需求。

3 维修大纲预测性维修项目建立方法

3.1 预测性维修项目构建思路

传统的维修大纲计划性维修项目确定是依据MSG-3进行分析确定,而以预测性为中心的维修则是将预测性技术引入MSG-3实现维修大纲预测性维修项目建立。本文将IP-180引入MSG-3,实现考虑AHM的预测性维修项目建立原理,即在MSG-3逻辑图 Figure 2-2 两级逻辑决断的基础上,增加第三级AHM分析,确认AHM对系统功能失效原因的覆盖能力,通过AHM分析产生三类输出:

(1) 无法建立预测性维修项目。AHM能力不足以覆盖失效原因,保留MSG-3两级逻辑决断产生的维修项目。

(2) 能建立预测性维修替代项目。AHM能力完全覆盖失效原因,替代MSG-3两级逻辑决断产生的维修项目。

(3) 能建立预测性维修项目,但需与MSG-3项目并行使用。AHM能力部分覆盖失效原因,保留修订后的MSG-3两级逻辑决断产生的维修项目,修订包括:延长间隔、减少工作范围和根据AHM参数监控情况执行。

3.2 预测性维修项目确定分析

3.2.1 程序验证

以实际飞机系统为案例,选取系统功能原理相对简单的某机型饮用水系统水质处理功能维修

项目为例,验证将维修大纲中一个计划性维修项目转化为预测性维修项目的方法和整个过程。

(1) 系统描述

① 饮用水系统设计用来为地面和空中提供饮用水;

② 飞机饮用水系统具有机载水质处理功能,为水系统加水,以及飞行期间提供健康的饮用水。

(2) 水质处理功能描述

水质处理单元是一个柱形流入式、带紫外线传感器,并集成控制元件的紫外线发生器,提供紫外线水消毒功能。该功能提高了系统针对微生物污染的耐用性,可以延长水系统化学消毒的计划维修间隔,减轻维修负担。

(3) 水质处理单元组成

① 在加水和供水模式(正常操作)期间,通过紫外线灯辐射对饮用水消毒;

② 通过两个紫外线传感器监控紫外线强度值;

③ 通过加热和保温确保在-40℃工作;

④ 通过数据汇流条传输数据,向地面数据处理系统通报水质处理单元的状态(经过集成的微控制器)。

(4) 预测性维修项目转化的方法和过程

① 根据MSG-3逻辑图 Figure 2-2 两级逻辑决断,确认需要建立的计划维修项目,水系统水质处理功能计划性维修项目建立的分析过程和方法如图2所示,水系统水质处理功能计划性维修项目的生成结果如表2所示。

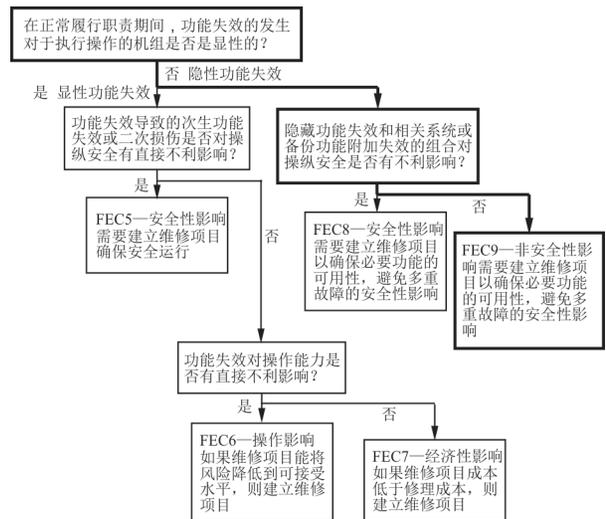


图2 水系统水质处理功能计划性维修项目建立的分析过程和方法

Fig. 2 Analysis process and method of water quality treatment function planned maintenance item establishment

表 2 水系统水质处理功能计划性维修项目的生成结果
 Table 2 Generation results of planned maintenance item for water quality treatment function of water system

失效功能	失效影响类别	失效原因	生成的计划性维修项目
水系统消毒功能的效果衰退。	FEC-9	水质处理单元内部紫外线灯罩污染造成辐射能力降低。	从飞机上拆下饮用水水质处理单元,送修理厂分解清洁紫外线灯罩,周期为每 4 000 飞行小时。

② 依据 IP-180 进行确定 AHM 后选项目分析 (第三级分析),如图 3 所示。

a. 2-3-9.1 AHM 是否有能力探测润滑/勤务需求?(否)

润滑/勤务不适用失效原因,没有需要提交的消耗材料。

b. 2-3-9.2 AHM 是否有能力探测衰退?(是)

如果要满足程序在该阶段的要求,系统必须满足数据传输和记录,以及系统性能/衰减测量的技术条件要求。

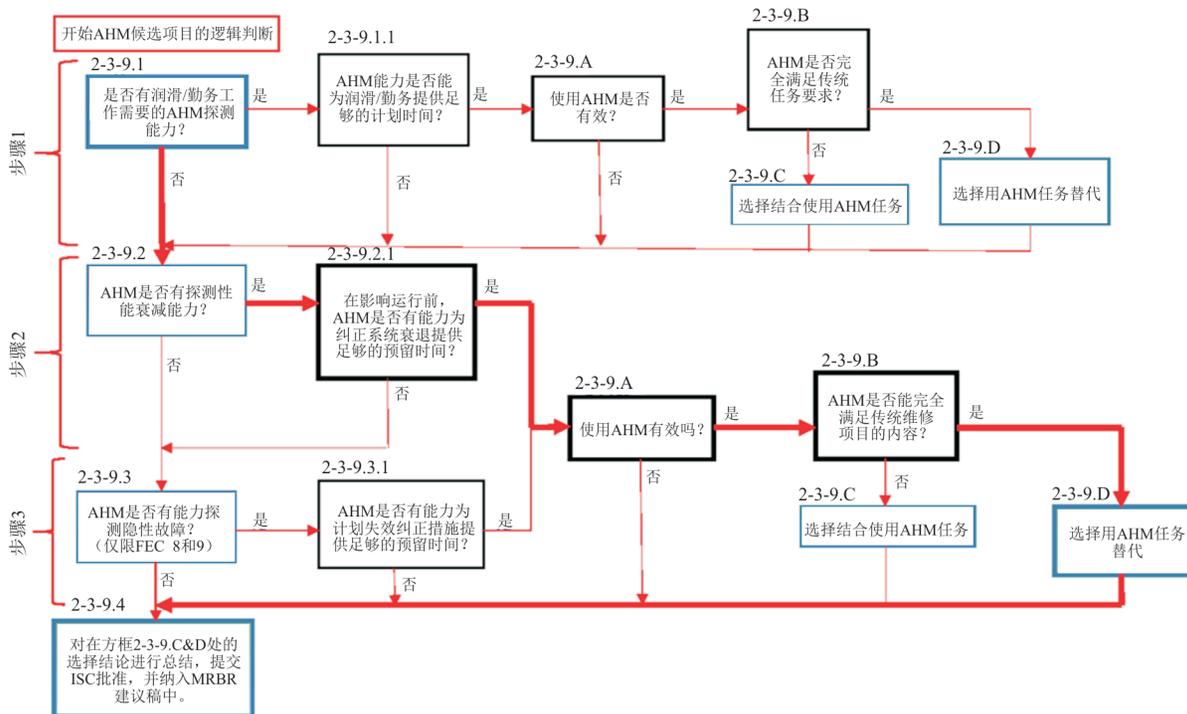


图 3 水系统水质处理功能预测性维修项目建立的分析过程和方法

Fig. 3 Analysis process and method of establishing predictive maintenance project for water quality treatment function of water system

饮用水水质处理单元包含两个紫外线灯和两个强度测量传感器。传感器每个航段记录一个值,记录紫外线强度值单位 W/m²。两个传感器在地面给飞机加水期间同时使用,飞行阶段一个传感器工作。传感器通过数据汇流条与计算机连接,CIDS通过 ACMS 向地面数据处理、诊断和预测系统传输数据。

c. 2-3-9.2.1 在影响运行前,AHM 是否有能力为纠正系统衰退提供足够的预留时间?(是)

收集大数据,建立水系统水质处理功能衰减模型如图 4 所示。水系统消毒功能退取决于紫外

线强度值。选择 40 W/m² 水系统消毒功能衰减的低限制值,如图 4 所示。传感器通过数据汇流条与计算机连接,CIDS 通过 ACMS 向地面数据处理、诊断和预测系统传输数据。在算法中考虑数据处理的影响因素,例如加水水质变化引起的数据跳变。建立的水系统消毒功能衰退曲线(图 4 中直线的斜率)显示衰退率较慢,营运人在完成数据处理、诊断和预测后,有足够时间采取纠正措施。

d. 2-3-9A 使用 AHM 是否有效?(是)

利用 AHM,能在功能失效前提示营运人。水系统水质处理功能性能变化如图 5 所示。

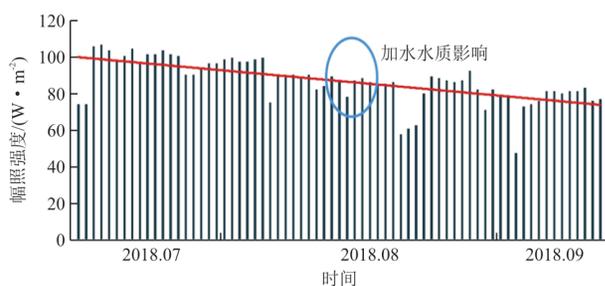


图 4 水系统水质处理功能衰减模型

Fig. 4 Attenuation model of water quality treatment function in water system



图 5 水系统水质处理功能性能变化

Fig. 5 Change of water quality treatment function of water system

通过数据驱动方法,结合基于模型的方法进行分析,满足数据处理、诊断和预测的技术条件要求,以符合程序在该阶段的要求。

e. 2-3-9B 是否有已选择的传统维修项目?(是)

MRBR 任务 381000-00M07-01 间隔为 4 000 fh。

任务描述:“清洁紫外线灯灯罩(送修车间执行)”。

f. 2-3-9C AHM 是否能完全满足传统维修目的内容?(是)

传统维修项目的目的是在水系统消毒功能的效果衰退前采取纠正措施(在送修车间执行清洁紫外线灯灯罩)。

AHM 也能满足该目的,通过监控紫外线强度值衰退到低限值 40 W/m^2 ,提示营运人水系统消毒功能效果衰退。

AHM 覆盖产生传统维修项目的所有失效原因。

基于 IP-180 程序与 MSG-3 建立了水系统消毒功能的预测性维修项目,在技术条件满足的情况下,验证了通过一定的技术方法可以将计划性维修项目转化为预测性维修项目。

3.2.2 预测性维修项目优势

针对饮用水水质处理单元紫外线灯罩的预测性维修项目取代了 MSG-3 理论体系下建立的计划性维修项目,其优势体现在如下三个方面:

(1) 完成该维修项目的时机更符合系统功能衰退的实际情况,相对传统定时维修的方式,在满足预防系统功能失效目标的同时,避免了不必要的维修次数,在提高经济性、降低维修工作等方面具有明显优势。

(2) 对传统维修项目进行的控制需要追踪维修项目的完成情况,涉及部件车间修理甚至还要追踪部件送修情况,建立基于预测性的维修项目后,则不需要追踪维修项目的完成情况和部件送修情况,大幅降低了维修项目控制的复杂性。

(3) 以预测性为中心的维修项目相对传统维修项目能够使营运人和主机厂直观地了解执行维修项目后的效果。相比于传统的维修项目,更容易、更方便积累数据,对维修项目进行优化改进。

4 存在问题及建议

在大数据时代发展推动下,基于 MSG-3 分析方法以可靠性为中心的维修思想和维修方式需要进一步丰富和发展,在相关技术基本满足建立预测性维修项目的要求,发展以预测性为中心的维修方式已迫在眉睫,但还存在以下问题:

(1) 受系统性能/衰减参数测量的限制,计划性维修转换为预测性维修的维修项目有限;

(2) 数据处理、诊断和预测技术受飞机或系统设计方数据限制,同时也限制了计划性维修项目可转为预测性维修项目的范围。

发展以预测性为中心的维修策略和建议可总结如下:

(1) 在设计体系中考虑预测性维修对于系统性能/衰减参数的需求,并为基于模型分析创造适用条件。对于未来发展机型,在飞机设计阶段,通过基于模型的方法,设置预测维修需要的参数,解决性能/衰减参数记录不足的问题。

(2) 取得型号验证投入运行后,主机厂家、营运人、供应商以及持续适航当局通过 ISC 和 MRB 等组织形式,以飞机设计阶段基于模型分析的结

论,建立基于预测性维修理念的初始维修大纲维修项目,并通过运行数据的不断积累,利用数据驱动的方法,不断优化预测性维修项目。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则: CCAR-121-R7[S]. 北京:中国民用航空局, 2021.
Civil Aviation Administration of China. Regulations for operation qualification certification of large aircraft public air transport carriers: CCAR-121-R7[S]. Beijing: CAAC, 2021. (in Chinese)
- [2] Boeing. Maintenance review board report Rev 021: 737-7/8/8200/9/10[R]. USA: Boeing Company, 2021.
- [3] Boeing. Maintenance review board report Rev 051: 777-200/300[R]. USA: Boeing Company, 2021.
- [4] Boeing. Maintenance review board report Rev 757 [R]. USA: Boeing Company, 2018.
- [5] Boeing. Maintenance review board report Rev 030: 747-400 [R]. USA: Boeing Company, 2020.
- [6] Boeing. Maintenance review board report Rev 070: 787 [R]. USA: Boeing Company, 2020.
- [7] Airbus. Maintenance review board report Rev 05: A350 [R]. Europe: Airbus Company, 2021.
- [8] Airbus. Maintenance review board report Rev 20: A330 [R]. Europe: Airbus Company, 2021.
- [9] Airbus. Maintenance review board report Rev 24: A320 [R]. Europe: Airbus Company, 2019.
- [10] Air Transport Association of America, Inc. Operator/manufacturer scheduled maintenance development: MSG-3[S]. USA: ATA, 2015.
- [11] Air Transport Association of America, Inc. Maintenance evaluation and program development: MSG-1[S]. USA: ATA, 1968.
- [12] Air Transport Association of America, Inc. Airline/manufacturer maintenance program planning document: MSG-2[S]. USA: ATA, 2019.
- [13] 陈林聪. 风电机组齿轮箱预防性维修与机会维修决策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
CHEN Lincong. Research on the decision of preventive maintenance and opportunity maintenance of gear box of wind turbine[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016. (in Chinese)
- [14] 罗青. 基于RCM的设备维修决策方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.
LUO Qing. Research on equipment maintenance decision-making methods and its application based on RCM[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2016. (in Chinese)
- [15] MOUBRAY J. Reliability-centered maintenance[M]. New York: Industrial Press Inc., 1997.
- [16] 蒋庆喜, 危虹, 张如意. 美国海军航空装备以可靠性为中心的维修标准浅析[J]. 航空标准化与质量, 2020(4): 50-52.
JIANG Qingxi, WEI Hong, ZHANG Ruyi. Analysis on reliability-centered maintenance standard of American Naval aviation equipment[J]. Aeronautic Standardization and Quality, 2020(4): 50-52. (in Chinese)
- [17] 刘文彬, 王庆锋, 高金吉, 等. 以可靠性为中心的智能维修决策模型[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(5): 672-677.
LIU Wenbin, WANG Qingfeng, GAO Jinji, et al. Reliability-centered intelligent maintenance decision-making model [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(5): 672-677. (in Chinese)
- [18] 武禹陶, 贾希胜, 温亮, 等. 以可靠性为中心的维修(RCM)发展与应用综述[J]. 军械工程学院学报, 2016, 28(4): 13-21.
WU Yutao, JIA Xisheng, WEN Liang, et al. A review of reliability centered maintenance (RCM): development and application [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2016, 28(4): 13-21. (in Chinese)
- [19] 张逸俊. 浅谈预测性维修对航空维修业的影响[J]. 航空维修与工程, 2021(2): 21-24.
ZHANG Yijun. The influence of predictive maintenance on MRO industry [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(2): 21-24. (in Chinese)
- [20] 冯蕴雯, 路成, 薛小锋, 等. S5000F介绍及在民用飞机运行可靠性分析反馈中的应用[J]. 航空工程进展, 2020, 11(2): 111-123.
FENG Yunwen, LU Cheng, XUE Xiaofeng, et al. Introduce of S5000F specification and its application in operational reliability analysis and feedback of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(2): 111-123. (in Chinese)
- [21] 马小骏, 冯蕴雯, 黄加阳. 民用飞机健康管理技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
MA Xiaojun, FENG Yunwen, HUANG Jiayang. Civil aircraft prognostic and health management technology [J]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [22] LIU K J, FENG Y W, XUE X F. Fault diagnosis of hydraulic retraction system based on multi-source signals feature fusion and health assessment for the actuator[J]. Jour-

- nal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2018, 34(6): 3635-3649.
- [23] 江秀红, 段富海, 胡爱玲. 基于维修重要度的多态系统预测性维修[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(4): 839-844.
- JIANG Xiuhong, DUAN Fuhai, HU Ailing. Predictive maintenance for multistate system based on maintenance importance[J]. System Engineering and Electronics, 2018, 40(4): 839-844. (in Chinese)
- [24] 孔旭, 于得水, 丁坤英, 等. 航空器预测性维修技术研发应用态势分析[J]. 航空工程进展, 2021, 12(2): 21-29.
- KONG Xu, YU Deshui, DING Kunying, et al. Research and application trends of predictive techniques in aircraft maintenance[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(2): 21-29. (in Chinese)
- [25] International Maintenance Review Board Policy Board (IM-RBPB). Aircraft health monitoring (AHM) integration in MSG-3 IP 180[S]. USA: ATA, 2018.
- [26] FAA. Airworthiness approval of rotorcraft health usage monitoring systems (HUMS): AC 27 MG 15[S]. USA: FAA, 2018.
- [27] FAA. Airworthiness approval of rotorcraft health usage monitoring systems (HUMS): AC 29 MG 15[S]. USA: FAA, 2018.
- [28] Boeing. Airplane health management (AHM) [EB/OL]. [2021-06-28]. <https://www.myboeingfleet.com/maintenance-engineering/airplane-health-management-ahm/>.
- [29] Airbus. Airman-web [EB/OL]. [2021-06-28]. <https://pr.asphsc.fr.ibm.com/airman/home.html>.
- [30] HONG S, ZHOU Z, ZIO E, et al. Condition assessment for the performance degradation of bearing based on a combinatorial feature extraction method[J]. Digital Signal Processing, 2014, 27: 159-166.
- [31] HONG S, ZHOU Z, ZIO E, et al. An adaptive method for health trend prediction of rotating bearings[J]. Digital Signal Processing, 2014, 35: 117-123.
- [32] XIA J, FENG Y W, LU C, et al. LSTM-based multi-layer self-attention method for remaining useful life estimation of mechanical systems [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 125: 105385.
- [33] 冯蕴雯, 潘维煌, 刘佳奇, 等. 基于机器学习的飞机动力装置运行可靠性[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 524732.
- FENG Yunwen, PAN Weihuang, LIU Jiaqi, et al. Operational reliability of aircraft power plant based on machine learning [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 524732. (in Chinese)
- [34] 刘佳奇, 冯蕴雯, 路成, 等. 基于智能神经网络的航空发动机运行安全分析[J]. 航空学报, 2021. doi: 10.7527/S1000-6893.2021.25375.
- LIU Jiaqi, FENG Yunwen, LU Cheng, et al. Safety analysis of aeroengine operation based on intelligent neural network [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021. doi: 10.7527/S1000-6893.2021.25375. (in Chinese)
- [35] LU C, FENG Y W, BU S Q, et al. Improved decomposed-coordinated kriging modeling strategy for dynamic probabilistic analysis of multicomponent structures [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2020, 69(2): 440-457.

作者简介:

顾新(1966—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:航空营运人运行管理、航空器维修与持续适航、维修人为因素与可维修性设计等。

刘松岑(1970—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:航空器维修与持续适航、维修工程技术管理、航空营运人运行管理等。

(编辑:马文静)