

民用飞机预测维修技术研究进展



孙见忠,左洪福,闫洪胜,朱昕昀,段司正
南京航空航天大学,江苏 南京 210016

摘要:民机维修理论伴随航空科技进步在不断往前发展,从定时翻修到以可靠性为中心的计划维修,以及先进的视情与预测维修理念。现代民机测试性的发展,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。本文总结了民用飞机预测维修技术的最新研究进展情况,从以传统计划维修模式为基础引出预测维修模式,包括结构/系统预测维修任务分析方法、预测维修方案优化、预测维修关键技术以及在民机领域的应用情况。

关键词:民机计划维修;预测维修;系统/结构健康监测;维修优化

中图分类号:V267

文献标识码:A

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2024.07.002

维修是为保持或恢复工程系统到其规定的技术状态所进行的全部活动。它是一个非常广泛的概念,涉及工程系统的各个组成部分,也贯穿于工程系统从设计到报废的全生命周期过程。航空维修主要研究航空器的维修,包括飞机机身、发动机及机载系统的维修。航空器维修的直接目的是持续保持其处在规定的技术状态下工作,即预防航空器及其组成系统的功能退化和故障及其产生的后果。而当其状态受到破坏(即发生故障或遭到损坏)后,使其恢复到规定状态。现代航空维修以最低的维修成本,尽可能地保持、恢复甚至延长其可靠性寿命,保证飞行安全,最大限度地提高其利用率。采取及时、合理的维修,航空器的使用可靠性和安全才有保障。

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,将影响目前的飞机维修任务分析和计划维修模式,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预测维修,减少停机定检时间和检查的人工成本,有效地降低

飞机的运营维护成本^[1]。随着健康管理技术的发展并在新一代民机上应用,未来的民机预测维修模式下,通过故障预测与健康(PHM)技术提前预判故障,从而将部分计划以及非计划维修任务转换成预测维修,预期总的维修保障成本将大幅度降低。

近几年航空 PHM 技术快速发展,部分技术具备较高的成熟度,民机 PHM 技术虽然在降低维修成本、提高飞机利用率等方面潜力无限,成为各国适航当局、飞机制造商、飞机用户,以及相关研究单位所关注的热点问题。但如何在民机维修工程实践中应用这些技术,真正实现 PHM 预测维修模式的效益,从自身技术角度、适航法规与标准体系角度仍面临不少挑战^[2-3]。技术层面上,由于飞机及其运行维护保障系统是一个非常复杂的体系,其中许多系统相互作用,系统的固有复杂性导致准确预测退化状态是一个挑战,实际运行中的飞机系统故障预测是一个挑战性难题。飞机系统及部件在各种条件和环境下运行,其退化规律和状态在很大程度上取决于运行环境和运行历史,而且受到其他系统的性能和状态的影响。通常预测模型在受控的实验室环境中表现良好,但实验室条件下无法真正模拟实际运行中的退化情况,因此在实际运行中故障预测表现不佳。采用预测性维修策略的一个重要的技术挑战,即是否具备能够解释实际复杂多变运行环境下的高质量的系统或部件故障

收稿日期:2024-01-05;退修日期:2024-04-17;录用日期:2024-05-15

基金项目:国家自然科学基金(U2233204);上海民用飞机健康监控工程技术研究中心开放课题(GCZX-2022-02)

引用格式:Sun Jianzhong, Zuo Hongfu, Yan Hongsheng, et al. Research progress in predictive maintenance technology of civil aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(07):14-31. 孙见忠,左洪福,闫洪胜,等.民用飞机预测维修技术研究进展[J].航空科学技术,2024,35(07):14-31.

预测能力。适航法规与标准体系层面上,考虑航空业的高安全性要求,任何新技术或方法的采用都必须得到验证,以保持或提高航空安全水平。在采用预测维修的情况下,需要验证预测维修策略和技术的采用不会增加失效的可能性,并且仍然符合适航监管机构的要求和可接受的符合性方法。目前,这一问题并没有得到有效解决,特别是对于数据驱动的预测维修方案,其预测模型的准确性、可靠性、可信性等问题有待解决。目前对于预测性维修技术的开发、测试和部署应用,缺乏行业标准方法、指导准则和法规,导致行业内各个参与方采用的验证方法不一致、对要求的解读不同以及安全评估的严格程度不同,最终影响了监管机构对预测性维修策略的批准。

本文总结了民用飞机预测维修技术的最新研究进展情况,从以传统计划维修模式为基础引出预测维修模式,重点梳理分析了结构/系统预测维修任务分析方法、预测维修关键技术以及在民用航空领域的应用进展情况,为民机预测维修技术的研究和应用提供参考。

1 民航计划维修模式

1.1 分析民机计划维修任务

民机维修理论从定时翻修发展到以可靠性为中心的计划维修,以及先进的视情维修和预测维修理念。目前,在役的民机型号主要以可靠性为中心的计划维修为主,部分机载系统,如航空发动机逐渐实现了视情维修模式^[4]。维修审查委员会报告(MRBR)通常称为维修大纲,是飞机计划维修要求的汇总文件,是保持航空器持续适航的基本文件,也是航空器承运人用于制订维修方案和工卡的主要依据。民用飞机维修大纲制定需要一套科学的分析流程。目前,国外主流的维修大纲分析标准包括ATA MSG-3《运营商/制造商计划维修制定文件》、ASDS400P《预防性维修制定与持续优化国际规范》、SAEJA1011《以可靠性为中心的维修过程评价准则》、MIL-STD-3034A《以可靠性为中心的维修过程》、NAVAIR00-25-403《海军航空装备以可靠性为中心的维修分析指南》等。其中,MSG-3标准中的分析方法因其兼顾安全、运行和经济性,得到国际民航普遍认可和广泛应用(见图1)。从1968年维修指导小组(MSG)方法首次应用于波音747制定维修大纲,MSG从最初的以预防为主的维修思想开始,经历了“用可靠性方法控制维修”、MSG-1、MSG-2、MSG-3。1994年,国际维修审查政策委员会(IMRPB)将MSG-3作为各国民航当局制定和批准运输类飞机维修审查委员会报告(MRBR)的统一分析工具,MSG-

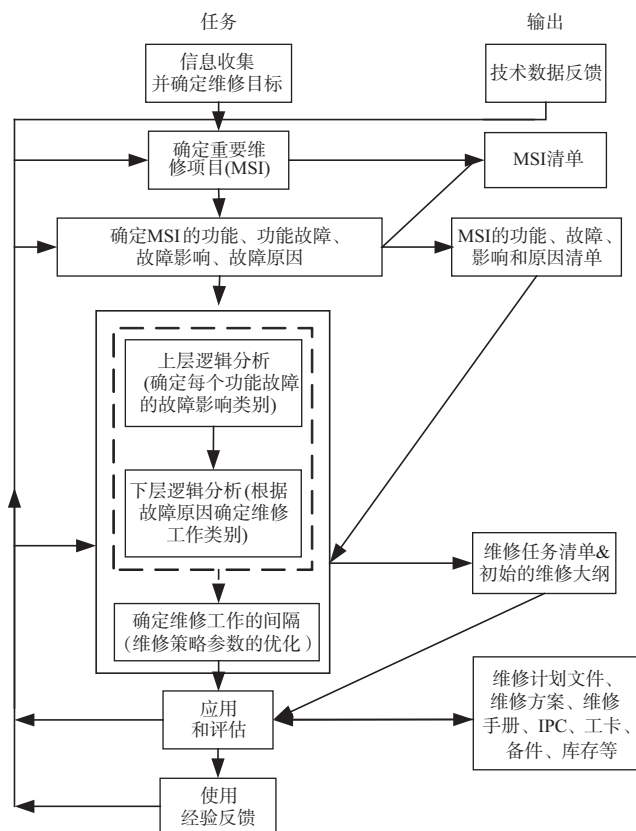


图1 民机MSG计划维修任务分析方法框架

Fig.1 Framework of the analysis method for the MSG maintenance task of civil aircraft

3在民用航空器制造行业内得到了普遍应用,并逐步从运输类飞机扩大到通勤类飞机和旋翼机^[5]。

MSG-3中计划维修分析包含确定系统、结构、区域、防闪电/辐射4个主要领域的计划维修任务和间隔,每个领域的分析方法都有各自不同的分析对象、逻辑图、步骤、流程以及分析报告样式,同时又具有一定的相互关联性,并最终产生计划维修要求中的维修任务和维修间隔^[5]。图2和图3所示分别为民机系统、结构、区域,以及防闪电/辐射计划维修任务的分析流程。

MSG思想是航空运输协会集体智慧的结晶,它是飞机设计制造方、使用维修方和管理当局共同研究的成果,也是各国管理当局共同认可和使用的的工作原理。MSG维修思想和利用可靠性方法控制维修原理相结合,最高的安全标准、满意的可靠性水平和良好的经济效益是MSG思想的核心,具体体现在以下几个方面:(1)在管理当局的参与下,航空公司和飞机设计制造方使用MSG方法制订的维修大纲,是一组能够真正保持航空器设计安全性和可靠性水平的工作或会有经济效益的工作。这个过程也是对飞机设计的重要

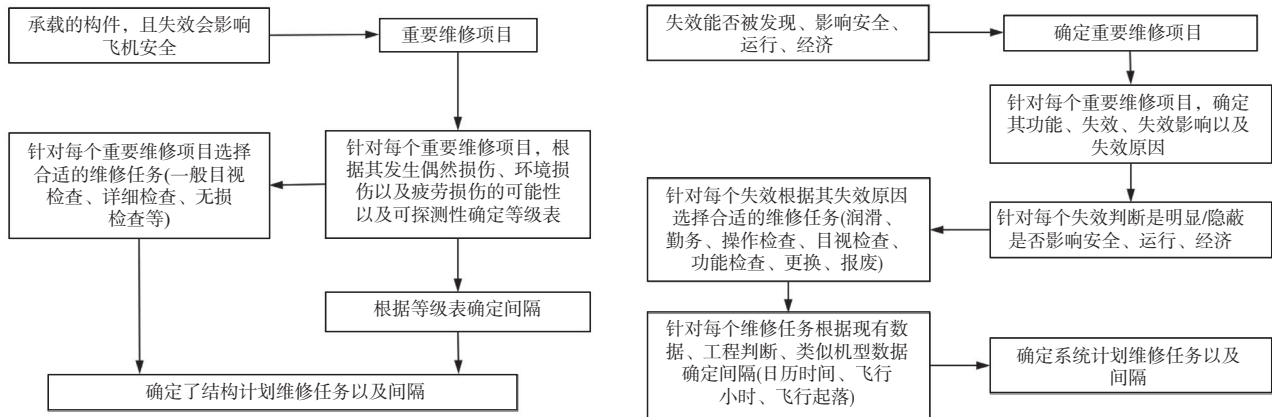


图2 民机系统与结构计划维修任务分析流程

Fig.2 Analysis process of planned maintenance tasks for civil aircraft systems and structures

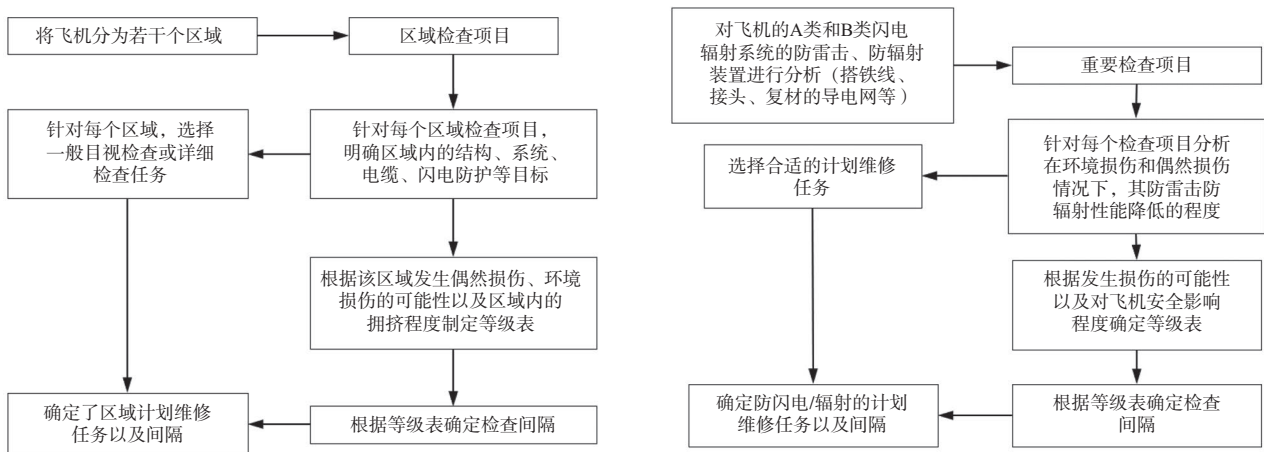


图3 民机区域与防闪电/辐射计划维修任务分析流程

Fig.3 Analysis process of regional and lightning/radiation protection plan maintenance tasks for civil aircraft

新评审。(2)通过采用新的设计思想和新的技术,不断提高飞机的安全性、可靠性和维修性,为MSG思想的发展提供了物质基础。这些新的思想和技术主要包括:损伤容限、冗余度和备用系统设计思想;防错、容错和系统安全性设计思想;电子计算机和数字技术;尽可能采用单元体或模块设计;中央维护计算机系统,并通过空地数据链实现地面实时监控、及时维修。(3)航空公司在维修大纲框架的基础上,补充运行环境、使用经验和管理当局要求,制订公司的维修方案;通过完成相应的预定维修工作和补充的非预定维修工作,应用可靠性方法,实施对飞机的有效维修和监控,不断调整维修工作要求,必要时完成改装,保持飞机的持续适航性。(4)航空器使用和维修中发现的故障和偏离,除本单位进行持续监控分析或可靠性分析外,还应按照管理当局和制造方要求及时报告;设计、使用和管理当局三方合作,共

同使航空器保持最高的安全水平、尽可能高的可靠性状况,争取好的经济效益。

1.2 制订民机计划维修方案

现代飞机计划维修模式以MSG-3/RCM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(见图4)。其中,维修计划文件也叫MPD,是航空器制造方为了帮助航空公司和用户尽快制订符合运行规章要求的维修方案而以维修大纲为框架编写的指导性维修技术文件,便于航空公司参照该文件更好地执行维修大纲即MRB报告和相关的规章制度。适航限制项目(ALI)是在型号审定过程中规定的某些结构项目(包括机体、发动机、螺旋桨)的使

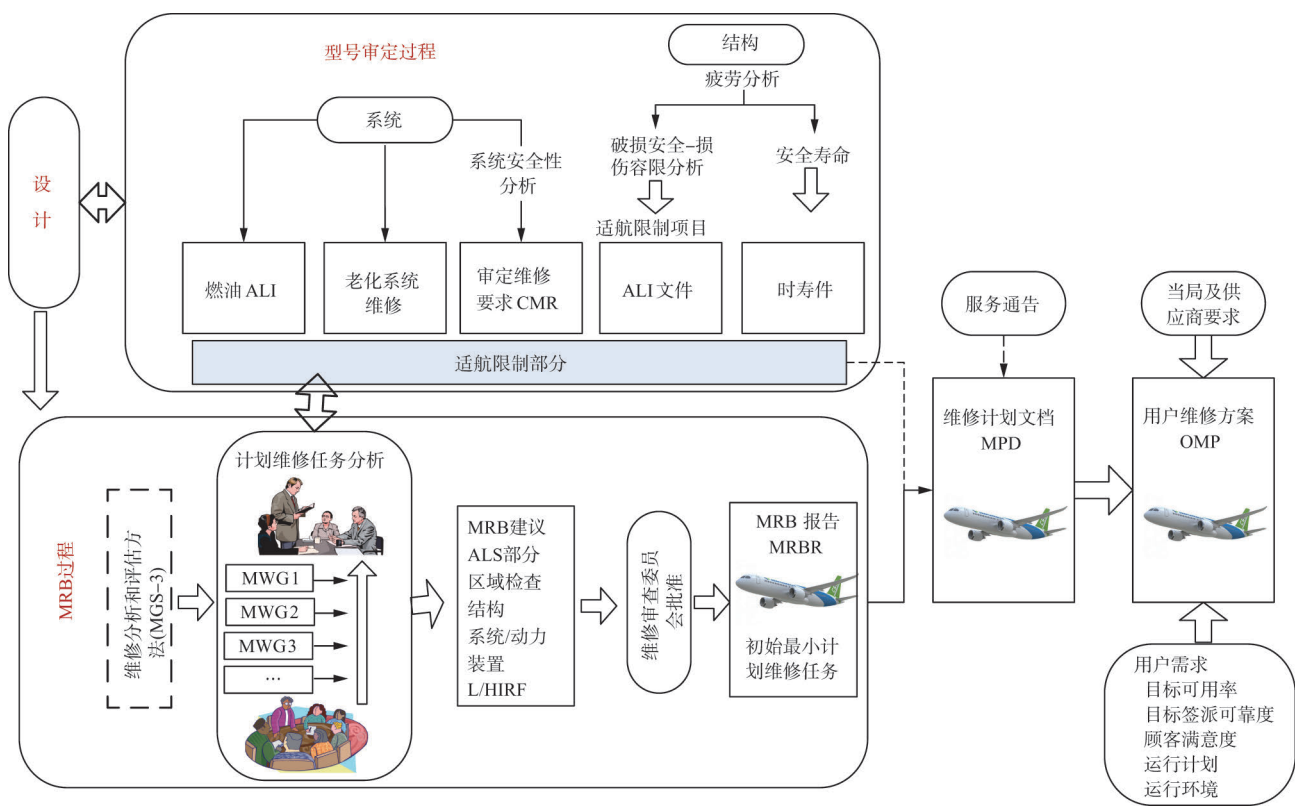


图4 现代民机计划维修模式
Fig.4 Schedule maintenance mode of modern civil aircraft

用限制。审定维修要求(CMR)是按照CCAR-25.1308,在航空器设计、审定期间,作为型号合格审定运行限制而要求的定期维护/检查任务。通过CMR确认危险或致命的失效状况,通过必要的修理或更换使航空器恢复到正常的适航状态。各民航当局的适航标准都将计划维修要求作为持续适航文件的重要内容,编制计划维修要求文件也是航空器制造厂家或者型号合格证持有人的责任。国际上行业的通用做法是将计划维修要求分为适航性限制和制造厂家建议两部分组成。适航性限制部分主要是为满足适航标准而确定的结构适航性限制项目、审定维修要求和时寿件等要求,由适航审定部门结合型号合格审定过程批准;制造厂家建议部分则一般由航空器评审组(AEG)负责评审,针对一些较大的航空器还成立专门的维修审查委员会(MRB),并以发布MRBR的方式予以批准或公布。航空公司用户维修方案,是航空公司根据制造厂编写的维修方案或者直接根据维修大纲、维修计划文件、客户化维修计划文件等,结合本航空公司的维修能力等实际情况而编写的适合本航空公司使用的维修方案,是航空器持续适航的基本要求,也是航空器运行的基本要求。维修方案是否科

学,不仅关系到飞机的安全与适航,而且直接影响到飞机维修的成本,只有结合航空公司自身的实际情况,通过可靠性数据采集分析和工程评估,科学动态地优化维修方案,才能真正实现以最低的维修费用保证飞机的持续适航^[6]。

现代飞机基本上形成了以预防性维修为基础的计划维修模式,已发展成为民航行业内一种成熟的维修模式。目前的计划维修模式下,飞机需要定期停场,执行计划维修任务,如C检、D检等。此外,还会因为故障等导致非计划停场维修。如以常见窄体客机为例,大概有2/3停场时间是执行计划维修,而非计划维修导致的停场时间占1/3左右。民机现有的计划维修模式在确保飞机持续适航安全方面的有效性得到验证,但在效率和成本方面还有较大的改进空间,同时存在有过修和欠维修的这一矛盾问题,一旦飞机运行中发生故障,需要根据故障指示来进行故障隔离,通常在飞机着陆后进行,后续的维修准备、航线可更换件(LRU)替换甚至飞机派遣问题被进一步推迟,就会导致维护成本较高和航班延误或取消的经济损失。故综合考虑飞机性能和技术的可行性并将其与经济性结合,也是发展推进维修模式

使其更加成熟的重要环节。此外,在制定初始维修大纲的过程中对于计划维修任务间隔(含门槛值和重复间隔)的选择,由于缺少必要的数据库,通常采取保守策略以保证飞机安全性。在航空器投入运行后,需要建立航空器机队使用数据的收集、处理、分析的完整的可靠性管理体系,对维修任务进行持续优化,定期评估并修订航空器的维修方案。

2 民机预测维修模式

2.1 民机健康管理及预测维修

飞机健康管理(AHM)的核心基础是利用先进的传感器技术集成,借助各种算法和智能模型,完成系统的状态监测、故障诊断/预测,然后依据诊断或预测信息(预先诊断部件或系统完成其功能的状态,包括确定部件的剩余寿命或正常工作的时间)、可用的资源、使用需求对维修活动做出适当的决策,避免“过修”和“失修”问题,提高系统的利用率,从而合理地权衡了使用、维修中安全和经济的矛盾,确保全寿命周期的成本最低。民机健康管理技术伴随着航空科技,特别是航电技术的进步而不断发展。以波音、空客为代表的系列化机型的发展,第一代的机械、模拟系统,以手动测试、告警灯、信号灯等方式提示故障,到20世纪80年代的数字航电系统,90年代以波音777为代表的模块化航电、中央维护系统,飞机机载健康管理技术得到长足发展,到2010年前后,以波音787飞机为代表,出现了机载维护系统(OMS)以及空地一体实时故障诊断与预测系统,新一代民机健康管理呈现出监控实时化、诊断智能化以及维修精细化的发展趋势^[7]。

民机维修理论的发展,离不开新技术的采用,特别是飞机机载维护系统、健康监测技术的发展。实质上主制造商(OEM)及用户改善飞机维修的需求,促进了飞机健康管理技术的发展,反之新技术的应用,也促进民机维修理论向前发展。现代民机测试性的发展,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。PHM预测维修模式是基于设备退化信息的维修,通过不断或者定期或连续地检测/探查设备退化指标来确定正确的时间执行必要的维护工作。预测性维修和传统维修策略相比可以减少民机非计划维护时间及航班延误,提高民机利用率。目前,在役的民机型号仍然主要以计划维修模式为主,部分机载系统(如航空发动机)逐渐实现了视情维修模式。

随着新一代飞机上逐步应用PHM技术,未来的飞机预测维修模式将会从两个方面降低维修保障成本:一是自动化的PHM监测能够减少很多计划维修任务,执行A/C/D定检任务的停机时间和维修成本进一步降低;二是PHM对系统状态的有效监测能够大幅度减少非计划维修任务,减少非计划维修导致的航班延误取消等间接成本。通过PHM技术提前预测故障,部分原本可能导致非计划维修的任务得以提前转换为PHM预测维修。这一发展趋势将进一步提高维修效率,使飞机运营更加经济高效。

民机计划维修要求包含系统、结构、区域、防闪电/辐射4个主要领域的计划维修任务和间隔,目前民机预测维修技术及应用相关研究以结构和系统为主,这两部分也是民机计划维修要求中的主要组成部分。下面将分别展开介绍民机结构、系统预测维修任务分析方法。

2.2 民机结构预测维修任务分析

2.2.1 考虑SHM的飞机结构维修任务分析

针对民机结构计划维修任务分析,2007年国际维修政策委员会(IMRBPB)提出IP92文件建议修订MSG-3结构维修任务分析逻辑^[8],增加基于结构健康监测(SHM)的结构维修任务。在2009年的修订中,提出了计划结构健康监测(S-SHM)的概念,即按照固定的时间计划去使用/运行/读取结构健康监测系统,并将S-SHM作为新的维修任务方式取代传统基于人工的定期结构检查。同年,IMRBPB发布了IP105文件^[9],提出了自动结构健康监测(A-SHM),即没有固定的时间计划去实施结构健康监测,而是持续地监控结构并在必要的时间触发维护人员实施维修活动。

在经MSG-3分析确定了所有重要结构件的初始计划维修任务后,通过对当前成熟SHM技术的可行性和适应性分析,选择合适的SHM系统以取代部分结构的定时维修任务。目前传统的MSG-3分析中,针对结构定时检查这一大类维修任务,只提供了一般目视检查(GVI)、详细目视检查(DET)以及特殊详细检查(SDI)三种检查方式,但引进成熟的SHM技术后,部分传统的结构检查任务可由SHM取而代之。

SHM按照运行模式不同可分为“计划的(定时的)”和“自动的(持续的)”两种模式。S-SHM按照固定的时间计划去使用/运行/读取结构健康监测系统;A-SHM没有固定的时间计划去实施结构健康监测,而是持续地监控结构并在必要的时间触发维护人员实施维修活动。结构健康监测系统按照监测参数的不同,可分为“损伤监测”和“使用监测”两种类型。结构损伤监测系统借助传感器直接监测结

结构的损伤状态;结构使用监测系统监测传感器不直接监测结构的损伤退化状态,而是监测结构使用相关的各种参数,如环境参数、载荷参数等,借此推断结构的损伤退化状态。

S-SHM 系统通过定期的检查结构状态,读取监测数据,通过内置的软件和算法判断结构性能是否出现下降,这与维修任务类型中的“功能检查”的定义一致,即通过定量的检查来判断部件或系统的一项或多项功能(性能)是否在特定的极限范围内。因此,结构健康监测的应用将丰富目前的结构计划维修任务的工作类型的选择范围,在传统的三种基本的检查/功能检查类中增加了 S-SHM 工作类型,

即 GVI、DET、SDI 和 S-SHM。显然, S-SHM 相对于其他传统的检查方法具有明显的优势,不需要对飞机结构进行拆解,缩短了飞机停场时间、减少了人力成本等。A-SHM 持续的监控结构并在必要的时间触发维修活动, A-SHM 监控的结构件完全转为视情维修,从 MSG-3 分析的角度 A-SHM 将不会产生任何计划维修任务,因此, A-SHM 的应用将可能取消一部分计划检查任务,从而大大降低结构的维护成本。

IMRBPB IP92/105 文件中,提出的考虑结构健康监测技术的结构维修任务分析逻辑决断程序如图 5 所示。

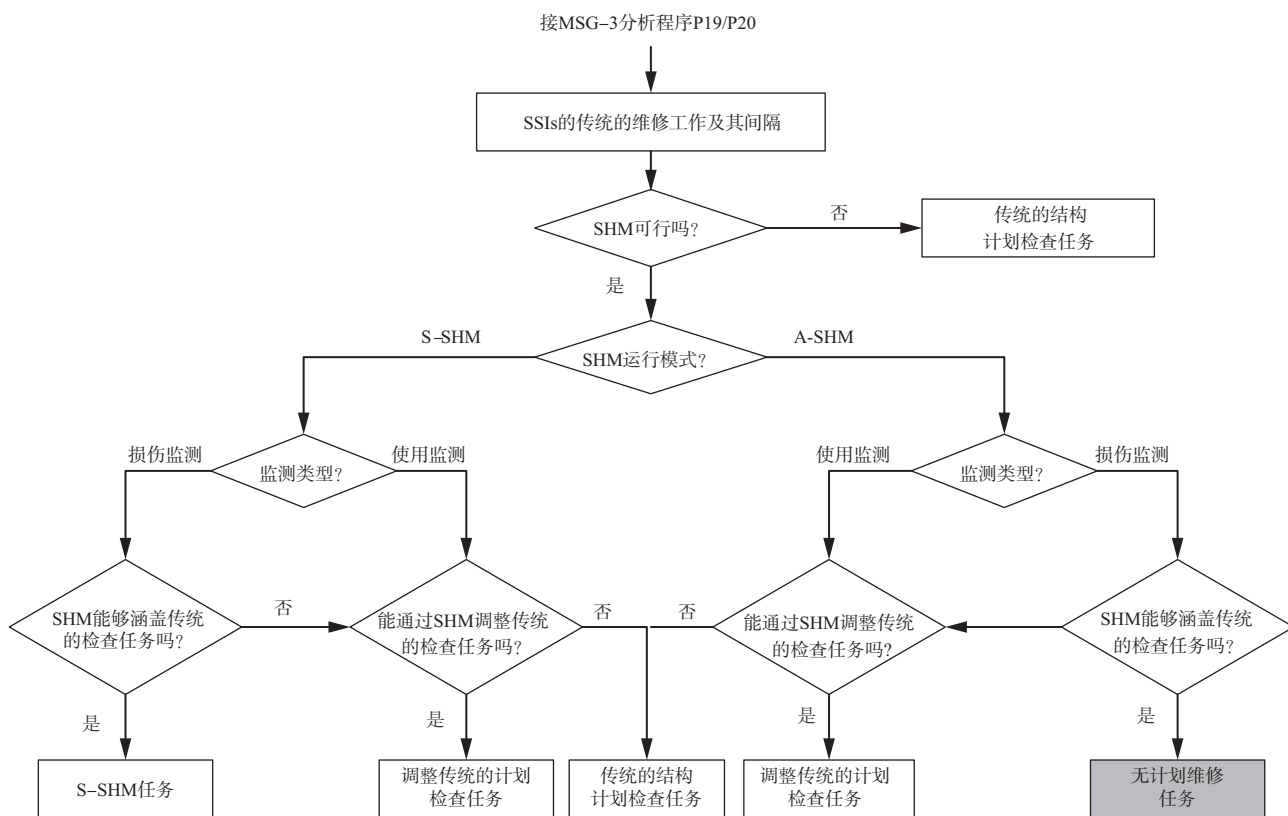


图5 考虑结构健康监测的结构维修任务分析逻辑决断图

Fig.5 Structural maintenance task analysis logic decision diagram considering structural health monitoring

2.2.2 考虑 SHM 的飞机结构维修方案优化

结构健康监测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。在经 MSG-3 分析确定了所有重要结构件的初始计划维修任务后,通过对当前成熟 SHM 技术的可行性和适应性进行分析,选择合适的 SHM 以取代部分结构的定时维修任务。虽然 IP92 和 IP105 为 MSG-3 计划维修模式下融合结构 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^[10]。2013 年,美国汽车工程师学会(SAE)颁布了 ARP6461,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与维修惯例的验证和适航性要求和建议,作为 OEM 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。Speckmann 等^[11]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。Pattabhiraman 等^[12]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。Fitzwater等^[13]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。Piotrowski等^[14]介绍了Delta航空在波音737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,是从计划维护模式过渡到完全基于状态的预测维护方案所需的第一步。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Scheduled SHM应用开始更容易取得突破^[15]。

对于给定的结构元件,其检查门槛值和重复检查间隔取决于所采用的检查方法,GVI、DET以及SDI检查方式都有不同的裂纹检测阈值。考虑S-SHM的结构维修模式与现有结构计划维修模式一致,不同之处在于考虑S-SHM的结构维修模式下,重要结构件的检查是通过在线SHM设备实现的,避免实施人工检查所需要的结构拆解、检查、安装等一系列的维修活动,因此检查成本将显著降低。因此,与传统的基于无损检测(NDE)的检查方法相比,SHM技术的引进可以施行更加频繁的自主检查,然而频繁的实施SHM检查带来一个新问题就是可能会导致虚警事件上升,引起不必要的停机检查活动,增加了额外的维修成本和运营成本。显然,不管采用传统的NDE检查方法还是新兴的SHM监测技术,最优的检查间隔和修理阈值的确定需建立在结构失效风险和维修成本权衡的基础上。孙见忠等^[10]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(见图6,其中,SFPOF为单次飞行失效概率,PCR为结构修理概率, $a_{res,depot}$ 为车间修理阈值, $a_{res,field}$ 为航线修阈值。)解决新型SHM技术融入现有民机计划维修模式中的问题,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。

2.3 民机系统预测维修任务分析

2.3.1 考虑PHM的飞机系统维修任务分析

针对考虑PHM技术的民机系统维修任务分析,2018年,IMRBPB发布IP180^[16],IP180参考了行业的相关标准规范,如SAE ARP6803、ARP5120、ARP6255等,提出了一个融入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(定义为维修任务第三层分析),逻辑流程如图7所示。

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:(1)PHM在功能上部分地等效传统维修任务,即可以解决由传统任务覆盖的部分失效原因,该类PHM候选任务定义为综合PHM维修任务。这是一个由PHM补充的传统任务,它可以改变范围、间隔或任务程序,如传统任务补充PHM后,由定期维修任务转换为视情维修任务。在这种情况下,PHM不能完全满足传统任务的目的,即并非所有失效原因都被PHM覆盖。(2)PHM在功能上完全等效传统维修任务,即可以解决由传统任务覆盖的全部失效原因,该类PHM候选任务定义为PHM替代任务。这是一个由PHM功能完全等效传统任务,它可以改变维修任务类型或程序,如传统的定期人工检查/功能检查任务,完全由PHM替代。

2.3.2 考虑PHM的飞机系统维修方案优化

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。闫洪胜等^[17]提出了基于PHM的维修模式的概念,运用蒙特卡罗仿真的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。Rodrigues等^[18]考虑到PHM技术可以提前获得组件的剩余使用寿命(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。孙见忠等^[19]以波音737NG空调系统为例,开展了民机系统预测维修应用验证研究,首先建立基于快速存取记录器(QAR)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来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,实施PHM预测维修比传统计划维修可降低成本40%以上。

在传统的MSG-3计划维修模式下,针对波音737NG空调系统热交换器有三项计划维修工作,见表1。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

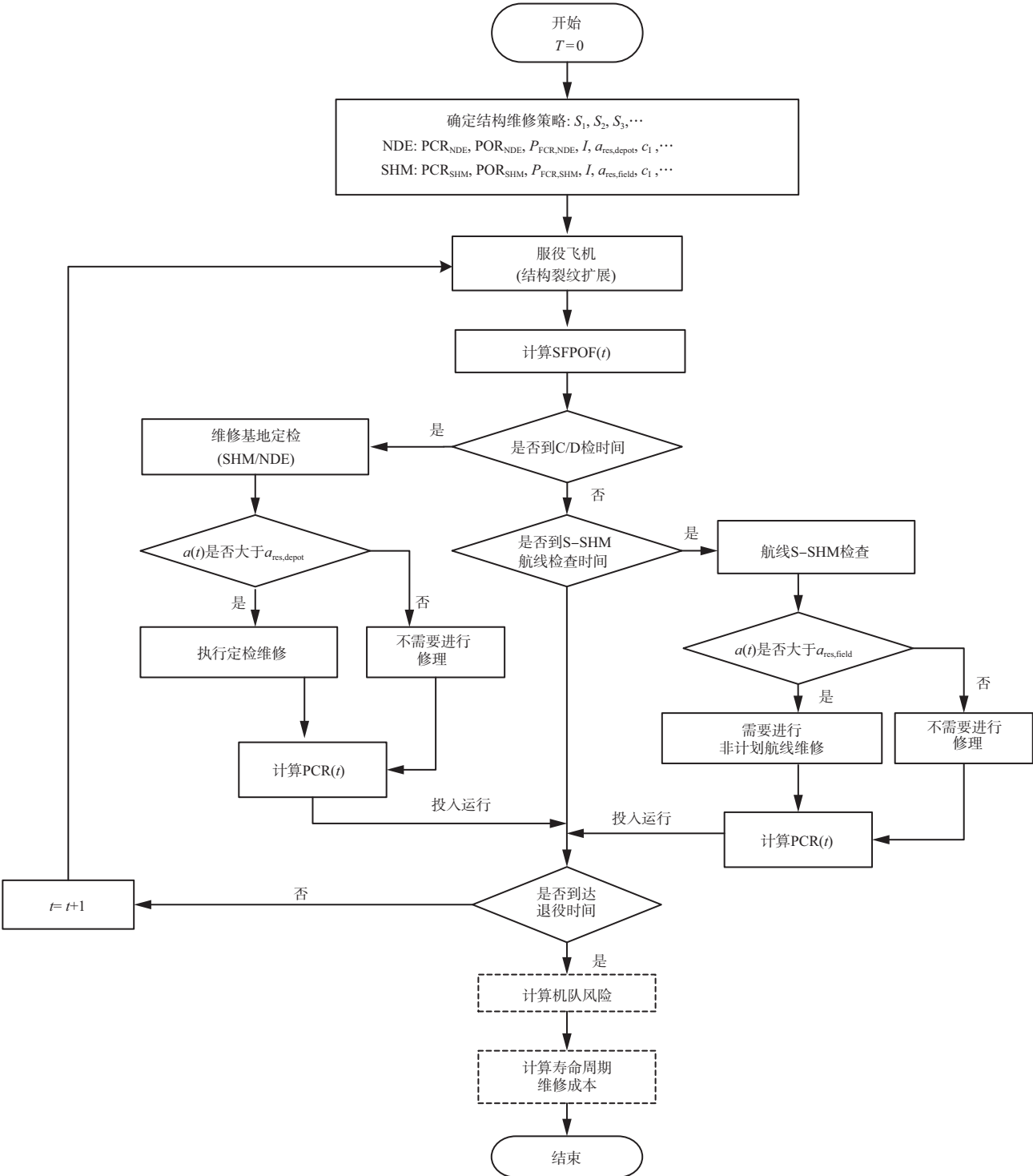


图6 基于风险与成本分析的结构检查方案优化流程^[10]

Fig.6 Structural maintenance strategy optimization diagram considering risk and maintenance cost^[10]

(MPD)要求,其维修间隔是2000飞行循环,主要工作是拆换装机时间(TSI)即将达到2000飞行循环的热交换器,然后通过开展离位深度清洁(主要是清洗热交换器冷热两端:冲压空气端和引气端)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翼的冲洗热交换器冲压空气

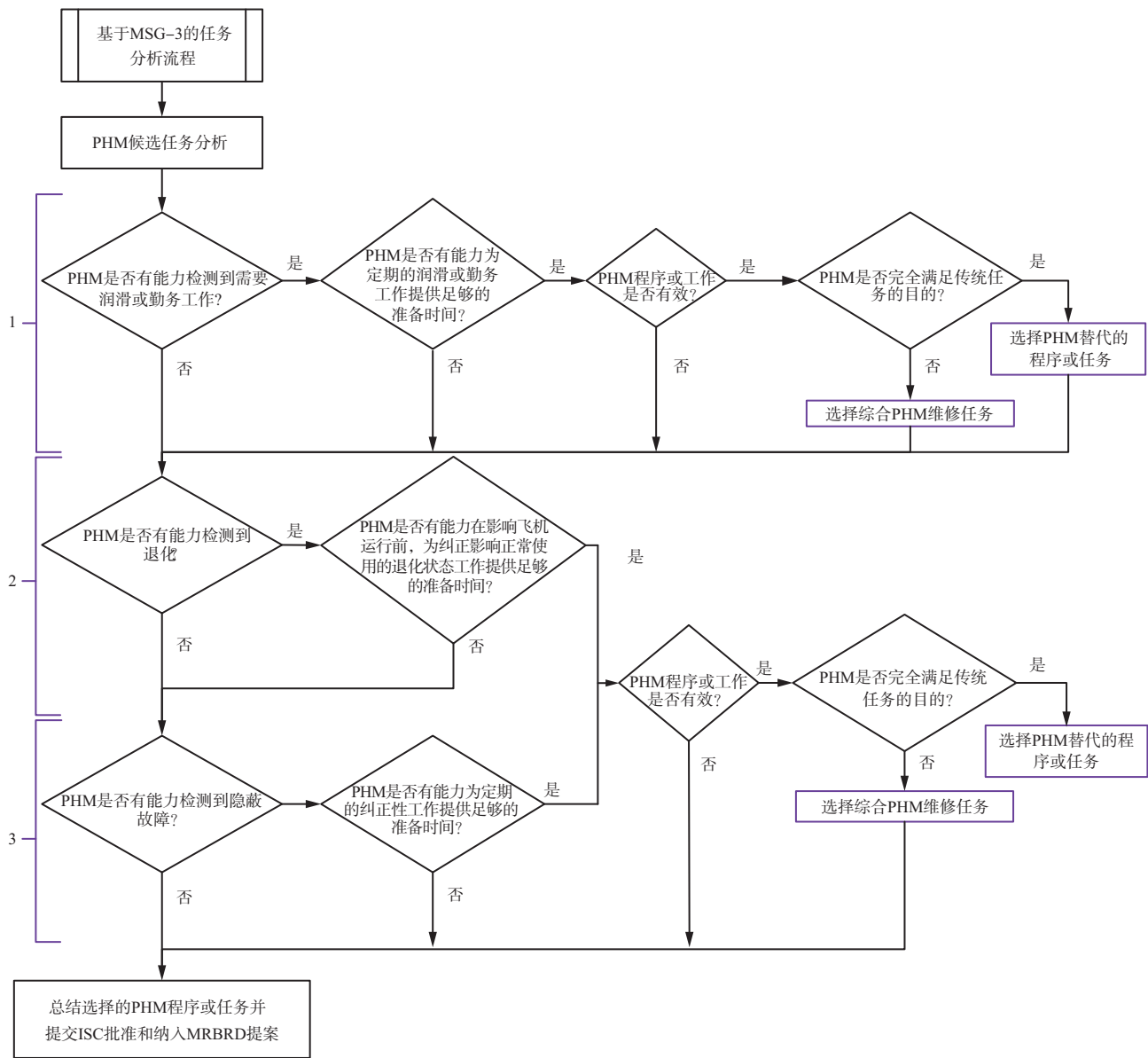


图7 考虑PHM的系统维修任务分析逻辑流程

Fig.7 Analysis logic process of system maintenance task considering PHM

端,以恢复其性能,两个月进行一次计划在翼清洁;空调分配管温度检测工作是航空公司为了测试左右空调系统混合输出的稳定性,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,对部件性能恢复不起作用。此外,空调系统超温、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,因此而导致非计划维修事件的发生,具有一定的随机性,如图8所示。

民机空调系统健康监测技术的引进对目前的空调维修任务制定和优化带来一定的变化,基于IP180逻辑,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),将定期在翼清洁任务、定期拆换任务转变为视情维修任务。空调系统基于PHM的维修模式如图9所示,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,取消一个传统的计划周期为14天的管道温度测试工作可

表1 空调系统热交换器计划维修任务

Table 1 Air conditioning system heat exchanger planned maintenance tasks

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	2000FC	14 人工时	拆换费+送修费
热交换器在翼清洁	工程计划	2 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+APU 成本耗

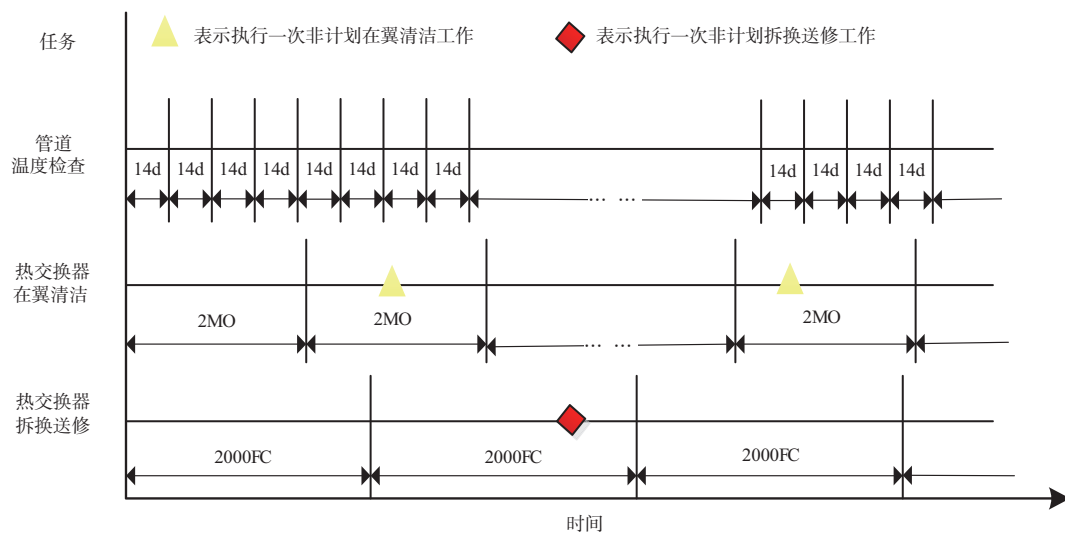


图8 传统计划维修模式下空调系统相关维护工作

Fig.8 Related maintenance work of air conditioning system under traditional scheduled maintenance mode

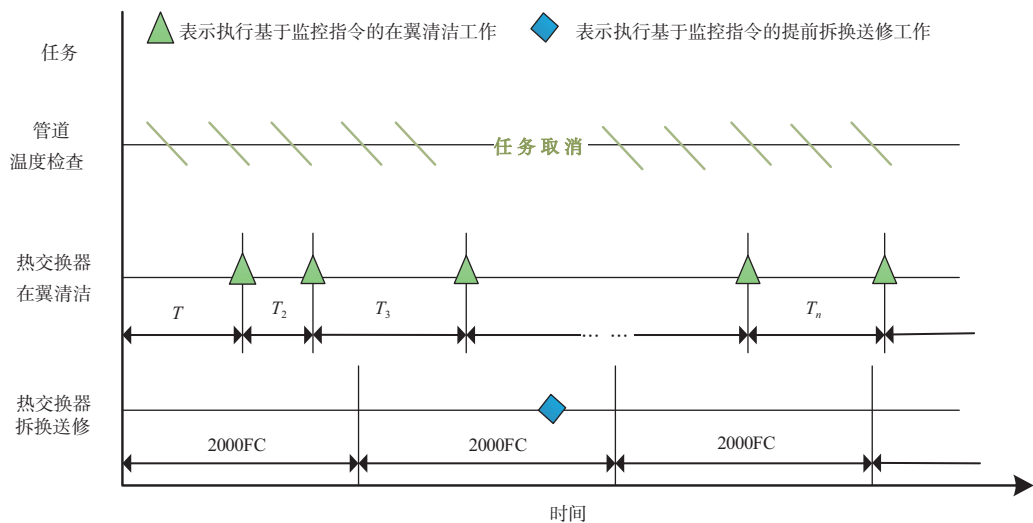


图9 空调系统基于PHM的预测维修模式^[19]

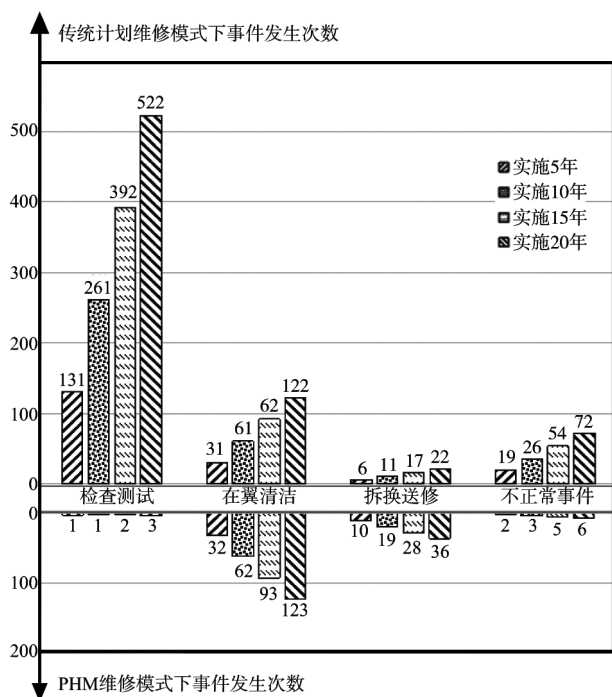
Fig.9 Air-conditioning system maintenance mode based on PHM^[19]

以减少1.5工时/次。另一方面,传统的在翼清洁工作改变为动态的基于热交换器性能评估的视情开展在翼清洁工作,平均维修时长为4工时。原有的2000FC的计划送修工作,需要获得厂家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热交换器性能严重退化,从而提前开展拆换送修工作,避免非计划拆换工作。

借助离散事件仿真开展两种维修模式的维修事件仿真,计划维修和PHM维修模式下的各类维修事件发生次数对比如图10所示。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不正常事件的发生。PHM维修模式下的不正常事件的产生主要来自漏警产生,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。

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年、10年、15年、20年周期内,计划维

图10 不同实施周期内的各类事件仿真数量^[19]Fig.10 Number of simulations of various events in different implementation cycles^[19]

修和基于PHM监控维修的总成本,见表2。结果表明,对于一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。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。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40万元左右,某航空公司150余架飞机的机队可节省维修成本在6000万元左右,即每年可以为航空公司节约6000万元维修成本。

表2 不同实施周期内维修成本评估结果

Table 2 Results of maintenance cost evaluation in different operation time

实施周期	计划维修成本	PHM维修成本	节约成本	百分比/%
5年	427974	256893	171081	40
10年	824281	432187	392093	48
15年	1252255	638281	613974	49
20年	1648643	816046	832597	51

3 预测维修关键技术

民机预测维修需要解决4个问题:为什么维修;需要维修什么;什么时候维修;怎么安排维修。为解决这些关键问题,预测性维修的关键技术包括PHM技术(由健康监

测技术、故障诊断技术和故障预测技术组成)和预测性维修决策技术,逻辑关系如图11所示。

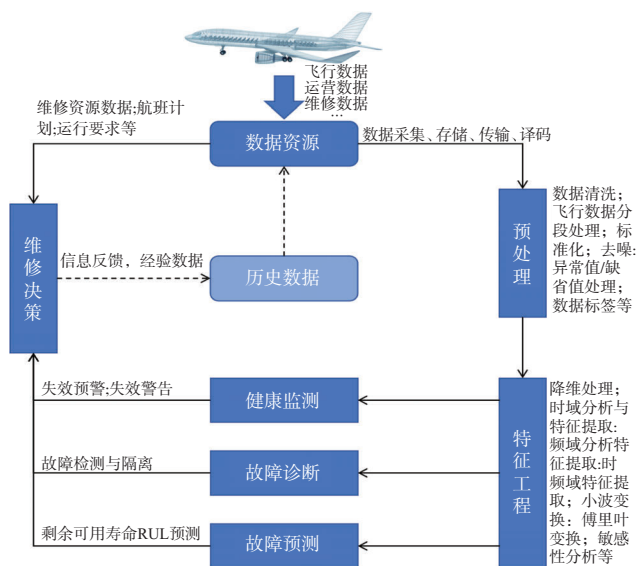


图11 民机预测性维修关键技术体系示意

Fig.11 Key technology for predictive maintenance of civil aircraft

3.1 健康监测技术

民机健康监测技术是开展预测性维修的前提,是表征飞机系统或关键部件性能状态和健康水平的重要手段,解决“为什么维修”的问题。民机构型复杂,涉及多个运行工况和使用环境,不同组成部分的性能指标或退化规律不同,难以实现整机级健康监测,一般都是开展系统或关键部件的健康监测。按民机监测对象分类,可以分为结构健康监测和系统健康监测。

民机结构健康监测是利用在民机结构中布设的先进传感器实现在线获取该区域结构健康状况相关信息(如裂纹、应力、应变等),结合数据处理技术和建模方法,提取表征结构健康状态的特征参数,实现结构状态完整性和可靠性评估。

民机系统健康监测是利用机载数据构建数据驱动监测模型,实现民机系统的健康状态评估,目前较多研究主要是针对具有退化趋势或明显健康特征的典型系统,如环控系统、液压系统、发动机系统等。数据驱动的民机系统健康监测方法可以分成基于统计分析、基于解析模型、基于机器学习和基于深度学习方法。基于统计分析方法是基于数理统计分析技术,通过挖掘大量的历史数据和分析多个过程变量的相关性,确定具有表征意义的特征量,以此实现具体系统的健康评估。基于解析模型方法是通过数学模型的期望输出值与实际测量值之间的残差信号一致性来反映监测对

象的健康评估状态。基于机器学习的方法是通过利用民机系统的历史运行数据来训练,如支持向量机(SVM)、神经网络(NN)、高斯过程(GP)等算法模型,然后基于训练好的模型进行健康状态评估,对于航空工程的多学科领域都有重要作用^[20]。随着大数据技术和人工智能算法的发展,在民机系统健康监测方面,更多的深度学习网络被建立并应用于健康监测,具有代表性的网络有自动编码器(AE)、长短期记忆网络(LSTM)、门控循环单元网络(GRU)、卷积神经网络(CNN)、深度信念网络(DBN)等。

3.2 故障诊断技术

民机故障诊断技术是开展预测性维修的基础,是确定维修对象的重要手段,解决“需要维修什么”的问题。经典的P-F曲线解释了机械设备性能退化的过程,即正常状态、健康退化状态和故障状态三个阶段,健康监测与评估主要应用于系统部件的退化过程,而故障诊断则是进行故障模式识别及原因分析。故障诊断方法可以分为定性分析和定量分析两大类。

基于定性分析的故障诊断方法是结合定性分析工具和行业专家知识经验,基于专家知识的方法根据最新的状态信息,对比过去和现在的连续状况,对分析对象的性质、特点、发展变化规律做出判断,并形成一种定性诊断的规则,包括基于规则的专家系统诊断方法、基于模糊的专家系统诊断方法和基于D-S证据理论诊断方法。

基于定量分析的故障诊断方法是利用各类传感器的监测数据和历史记录数据,经过数据处理、建模、分析后,实现系统的故障诊断,不需要精确的系统模型。这类方法又可分为基于统计分析故障诊断方法、基于信号处理故障诊断方法和基于机器学习故障诊断方法。统计分析方法是基于数理统计分析技术,通过挖掘大量的历史数据和分析多个过程变量的相关性,确定具有表征意义的特征量,并以此来进行故障诊断。Sun Ruiqian 等^[21]提出了在多元不确定性条件下提取特征并采用改进卡尔曼滤波器对航空发动机进行故障检测。信号处理方法就是对传感器采集的各种信号进行处理和分析,如振动信号、温度信号、声音信号等,提取与故障相关的时频域特征,并基于故障分类或识别方法进行诊断。类似于基于机器学习的健康监测方法,该类故障诊断方法也是利用大量的运行数据和历史故障样本数据来实现机器学习模型训练和参数优化,进而得到诊断精确度较好的模型实现故障诊断。随着大数据和人工智能的发展,基于深度学习的故障诊断方法也被广泛深入研究,该类方法可以视作基于机器学习的故障诊断方法的发展。

3.3 故障预测技术

民机故障预测技术是开展预测性维修的核心,又可以称为RUL预测,是预测维修对象故障发生时间和RUL的重要手段,解决“什么时候维修”的问题。故障预测对于安全运行和维修保障具有重要意义,很多方法和模型被提出并深入研究。归纳目前有关故障预测方法,可分为基于可靠性理论的方法、基于失效物理模型的方法、基于数据驱动的方法。

基于可靠性理论的故障预测传统方法,都是基于同类型部件、设备或系统的故障统计记录来拟合其寿命或失效分布,并以此来预测待测对象。目前已有许多成熟且被广泛使用的可靠性模型,如泊松分布(Poisson)、威布尔分布(Weibull)、指数分布(Exponential)、对数-正态分布(Log-Normal)等。其中,应用最广泛的就是威布尔分布,因其能适用包括“浴盆曲线”中的机械设备早期失效等多种情况。这类方法已得到方法应用,但存在技术缺陷,这类方法只提供了同类对象的整体性能评估与失效预测,缺乏个体故障信息,即无法给维修人员提供运行设备特定部件状况。

基于物理机理的故障预测方法需要对设备或系统的设计构造和运行原理十分清楚,以便于建立用于描述系统及失效的物理模型。这类模型通常解析数学模型表示,试图综合特定系统结构原理、部件缺陷产生公式和已有的监测数据,以此获得“知识充分”的故障预测输出。基于物理模型的故障预测结果是最精确的,因为模拟了整个设备系统的结构与功能原理。但是,对于大多数工业设备和系统而言,这类方法实用性不强,尤其是航空器系统故障预测领域。主要原因有:一是构造这样的物理模型极其困难,二是这样的物理模型主要是针对单一故障建模,在实际运行中失效原因可能是多重故障导致的。

基于数据驱动的故障预测方法不需要对象系统精确的物理模型和先验知识,以采集的数据为基础,通过挖掘采集到的数据中所内含的信息进行预测分析。这类方法避免了前两类方法的部分缺点,成为了一种较为实用的故障预测方法。随着大数据技术和人工智能的发展,基于数据驱动的故障预测技术发展迅猛,深度学习网络应用于预测模型。但是,该类方法也存在两方面难点:一是安全性要求比较高的复杂重要设备的故障数据获取比较困难;二是所获得的数据具有不确定性和不完整性。

上述健康监测、故障诊断与故障预测技术统称为健康管理技术,是工业和学术界热点研究领域。关于民机健康管理技术研究主要集中在数据驱动模型方法,根据建模训

练数据是否有标签可以分为有监督学习算法和无监督学习算法,不同类型的建模方式适用于不同的数据条件和建模目的。表3总结了近些年部分民机健康管理模型。

3.4 维修决策技术

民机预测维修决策技术是开展预测性维修的技术支持,是统筹计划维修、非计划维修、预测维修等多类型维修任务和规划维修资源的重要手段,解决“怎么安排维修”的问题。维修决策是指根据飞机的实际情况、运营需求和维修资源约束,选择合适的维修策略、维修任务、维修时机和维修场地完成维修工作,以最大限度地提高飞机的安全性和运营效率,解决“怎么安排维修”的问题。预测维修的前提是可以监测并表征系统的退化过程,这一过程有两种情况:离散型和连续型,也对应着不同的表征方式。根据维护对象的组成,可以分成单系统和组合多系统两种情况。因

此,预测性维修决策可以分为4类:单系统离散退化状态的预测性维修决策、单系统连续退化状态的预测性维修决策、多系统离散退化状态的预测性维修决策、多系统连续退化状态的预测性维修决策^[42]。Zhu Qiushi等^[43]提出复杂系统中单调随机退化的单部件的维修决策模型,假定在一个复杂系统中其他部件仍采用传统的定时维修策略,而选取的单调退化部件的工作性能要求设定警告限制,当监控结果接近控制基线时准备开展维修措施。葛恩顺等^[44]针对不完全维修情况下的单部件和整个退化系统开展维修决策研究,遵循实际工程中设备维修不可能“修复如新”且修复后退化速率会加快的原则,基于Gamma过程建立退化部件和整个系统的维修决策模型,以定期检测获取部件和系统状态,当劣化状态超过规定阈值时开展维修,并引入蒙特卡罗算法仿真验证模型可行性和有效性。Walter等^[45]根据系统

表3 民机健康监测模型总结
Table 3 Summary of civil aircraft health monitoring model

模型方法	特 征	优 点	局限性	参考文献
决策树 (DT)	DT通过分支选择来判别归属,在健康监测中即判别异常状态,是一种有监督学习算法	建模简单易理解,具有较好的解释性,对于数据预处理要求较低,并且结果可视化	系统先验知识可能会被过度拟合,导致陷入局部最优情况	[22-23]
随机森林 (RF)	RF通过独立地从原始数据集中采样构建多棵决策树,将它们的结果进行投票或平均,以产生最终的结果。RF是一种集成学习方法,属于有监督学习算法	增强型的决策树模型,具有较好的解释性,对于数据预处理要求较低,同时可以降低训练数据集中异常值或缺失值的影响	大量决策树使算法速度缓慢,模型输出响应时间长	[24-26]
支持向量机(SVM)	SVM基本模型是定义在特征空间上的间隔最大的线性分类器,通常用于解决二分类问题,是一种有监督学习算法	高精度,强鲁棒性,抗噪声,训练数据样本量越大效果越好	需要先验标签,不是适用于样本本不均衡或小样本问题。本质是二分类器,不适用于连续监测。需要较大的运算和存储内存	[27-30]
贝叶斯网络(BN)	BN又称作信念网络,是一种基于概率的图形模型,用于表达随机变量之间的因果关系,在完成各变量之间的依赖关系和条件概率分布训练后,可以使用贝叶斯网络进行推理和预测,是一种有监督学习算法	贝叶斯网络具有较好的解释性,网络参数可以优化调整以增强适应性,通过概率模型可以减少参数学习,同时BN模型结果输出可视化较好	系统学习未知结构的先验知识往往是非常复杂的,通过数学概率表达存在挑战性	[31-33]
神经网络 (NN)	神经网络模型类似脑细胞传递神经信号的方式,以神经元进行网络拓扑的数学模型。根据模型输出结果类型,该类模型训练可以是有监督学习方式,也可以是无监督学习方式	神经网络可以自动从数据中提取有用的特征,不需要人工进行特征工程,提高效率。神经网络还具有很强的适应性,同时能够很好地处理训练数据中的不确定性,如异常值、缺失值等	NN模型运算或推理过程是“黑盒”,解释性较差,并且需要大量的运算资源,容易陷入过拟合。	[34]
聚类(Clustering)	聚类是根据相似性度量将相似的数据对象聚集在一起,这个相似性度量通常基于数据对象之间的距离计算,是一种无监督学习算法	训练时间短,可解释性强	对样本数据质量要求较高,同时需要足够的先验知识	[35-36]
自组织映射(SOM)	SOM通过学习输入空间中的数据,生成一个低维、离散的映射,在新的特征空间内识别异常,属于一种无监督学习算法	具有较好的解释性,适用于高维复杂样本	初始权重对于训练学习过程影响很大,但初始权值合理值很难确定	[37-38]
深度学习 (DL)	深度学习是机器学习的重要分支,是一种多层次网络结构的复杂神经网络,区别于传统人工神经网络,DL中构建了多重隐藏层,可以实现对数据中的高级抽象进行建模,以确定更高级的定义,可以应用于监督、部分监督或无监督学习	深度学习输出结果精确度高于传统机器学习模型,具有较强的鲁棒性和自适应性,对于大量样本数据有很好的处理效率	解释性较差,需要大量的训练样本数据,模型结构复杂导致需要高配置的计算资源进行训练和学习	[39-41]

状态的 Bayesian 更新理论, 基于系统内所有部件的状态(正常工作、带有缺陷、失效)以及系统可靠性框图, 提出复杂系统的维修决策模型, 而该模型中假定部件的失效是随机且服从固定形状参数的威布尔分布。以上的研究主要集中于单一故障模式下设备或系统的退化与维修, 并且假定环境或维修操作等因素对模型没有影响, 因此研究存在明显的局限性。Liu Xiao 等^[46]研究多重故障模式相互作用下的设备视情维修建模方法, 针对退化系统多重故障相互作用相互影响建立序贯检测条件下多级控制限制的维修模型, 相比于单一故障模式而言这类模型适用性更强。

以上的研究主要集中于单一故障模式下设备或系统的退化与维修, 并且假定环境或维修操作等因素对模型没有影响, 因此研究存在明显的局限性。预测性维护(PdM)可以视为增强的基于状态的维修, 是基于预后的维护概念, 其必要前提条件是飞机中设计了先进的预测和健康管理系統。预测性维修是在基于状态维修(CBM)的基础上, 融合预测信息, 在故障预测时间之前完成修复性工作, 可以理解为增强的基于状态维修(CBM+)。在飞机现有的 PHM 水平和监测能力下, 不管是 PdM, 还是 CBM, 都不能完全取消周期性检查维修任务, 这类维修任务决策一般考虑如何调整优化计划维修方案, 使之能够兼容新的维修任务。

Hölzel 等^[47]模拟基于预后的 PdM 的维护概念, 提出了一种飞机全生命周期仿真中的维修任务打包与调度优化方法(AIIRMAP), 考虑基于预后的 PdM 对于全寿命周期的经济性影响, 与传统的例行检查(字母检)相比, 在必须进行相同数量的维护工作的情况下, 所提出的方法的维护成本更低。Deng Qichen 等^[48]为了将基于预测生成的任务安排到 AMP 中, 提出了一种用于飞机维修检查调度的超前近似动态规划方法, 该研究设计了一个动态规划框架, 采用混合前瞻调度策略, 即先在确定性准确预测的基础上为重型飞机维护制定最优决策, 然后根据随机预测来确定轻型飞机维护决策, 目的是尽量减少维护检查之间浪费的总使用间隔, 同时减少对额外维护插槽的需要, 以实现减少维护检查的次数、提升飞机的可用性。通过实际运行的飞机机队维修数据验证了所提出的方法在减少维护成本和增加收益方面的有效性。Tseremoglou 等^[49]认为在原本 CBM 策略下, 飞机维护检查规划(AMCS)问题中考虑系统的预测信息将使得整个调度问题变得十分复杂, 而且由于预测的不确定性, 这使得考虑预测信息的维修决策是一项具有挑战性的工作。对不确定性下的资源约束型调度优化问题研究, 混合整数线性规划(MILP)^[50]是一个很好的解决办法, 但致命的

缺点是问题复杂度随着所考虑的飞机机队规模和所考虑的任务数量呈指数级增长。人工智能的最新进展已经证明了深度强化学习(DRL)算法可以缓解这类优化问题中维度爆炸难题, DRL 可以实现维护计划的实时优化, 但容易陷入局部最优, 不能保证得到全局最优结果。Pater 等^[51]考虑将 RUL 预测方法整合到维修决策框架中, 提出了基于不完善 RUL 预测的飞机发动机的预测维护调度方法。该研究先构建了一种卷积神经网络模型来获取 RUL 预测结果, 预测值是随时间动态变化的, 再设计一个基于阈值预警的线性程序来安排飞机维护任务调度优化。使用 20 架飞机, 合计 40 台涡扇发动机的运行数据来验证所提方法的合理性, 经过基于报警机制的预测性维修框架, 发动机故障造成的维修成本仅占总成本的 7.4%, 表现出较好的优越性。

4 民机预测维修支持平台

随着民机预测维修规章制度的不断完善以及相关关键技术的发展, 民机 PdM 正在获得越来越多的应用, 国内外飞机主制造商、供应商、MRO 厂商、航空公司纷纷推出了集成化预测性维修应用软件平台和服务。这些平台通过实时监测和分析飞机数据, 提供了先进的维修预测和管理功能, 有助于提高航空器的可用性、减少维修成本, 并优化整体运营效率。

波音于 2017 年 6 月宣布启动 AnalytX 平台, 旨在帮助航空公司降低燃料成本, 执行预测性维护。在此之后 2022 年 9 月, 波音还推出了一种专门帮助航司进行预测维修和主动维护的新的基于云的数字解决方案 Insight Accelerator, 通过人工智能和机器学习帮助航空公司规划预测性维护, 并减少计划外维护, 从而快速准确地识别部件过早退化或故障的指标^[52-53]。空客自 2017 年 6 月推出预测维修平台 Skywise 以来, 已发展成为航空业领先的开放数据平台, 为超过一万架飞机提供预测维修服务^[54]。航空公司和 MRO 通常是预测性维护的最终用户, 他们通过与工业界合作或自主研发的形式来开展预测性维护工作。2017 年, 汉莎航空面向航司、MRO 等推出了“AVIATAR”平台, 在其各个模块中, 预测性健康分析应用程序是预测性维护的基础, 能够利用来自飞机、系统和部件的实时数据预测运行过程中的故障^[55]。国内航司用户也积极参与开发具有自主知识产权的民机预测维修平台, 南航在国内飞机健康系统研发中起步较早, 开发出了具有南航特色的飞机健康管理系统, 名为“南航远程诊断实时跟踪系统”, 2022 年系统正式更名为南航“天瞳”系统, 使用了最新的机务云平台技术, 具备 PC/移动双平台, 可对波音、空客、巴航工业、中国商飞四大

主流机型同时进行监控^[56]。国航突破了飞机故障诊断和性能预测的关键技术,搭建起以数据为核心的飞机状态预测与维修作业管理平台(APCM),实现了多源数据的集成和应用,包括实时故障管理、飞机系统性能预测、维修作业管理,具备基于飞机状态的维修方案制定与优化能力,为实现全寿命数字化维修提供了技术基础^[57]。

飞机预测维修平台都具有实时监测、数据管理、大数据分析和故障预测的特性,因为这些特性是实现预测维修的基本要素。对于飞机主制造商提供的平台,如波音的 Insight Accelerator、空客的 Skywise 平台,都通过提供内嵌的人工智能(AI)/机器学习(ML)特性,为其客户提供更加灵活的客户定制化定制能力。另外,能够提供专家经验也是大部分平台实现维修决策的重要支撑。对于飞机运营商或者 MRO 厂家来说,以维修业务为导向,他们所开发的平台(如 AVIATAR、APCM)基本具备维修管理的功能,以实现具体的维修计划调度与优化。从飞机主制造商和供应商的角度来说,他们的平台基本具备自定义报警功能,以满足不同客户的需求。

5 结束语

民机维修理论的发展,离不开民机新技术的采用,特别是飞机机载维护系统、健康监测技术的发展。飞机健康监测技术的引进将改变目前的飞机维修分析和计划维修模式,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 预测维修模式的效益仍面临不少挑战,包括技术层级以及适航法规与标准体系层面,需要监管机构、行业组织、工业界、学术界以及科研单位等相关利益方共同参与推动民机预测维修技术的发展及落地应用。

预测维修作为新一代民机先进的维修保障理念,国外民机制造商与局方密切配合,正在逐步开展预测维修的应用。国产民机研制进程中,考虑了机载健康管理技术和系统,在维修大纲制定阶段,正在研究验证基于 PHM 的预测维修任务优化,以充分发挥基于 PHM 的预测维修的优势,提高国产民机利用率、降低维修成本。

AST

参考文献

- [1] Smith M, Sulcs P F, Walthall R, et al. Design and implementation of Aircraft System Health Management (ASHM) utilizing existing data feeds[R]. SAE Technical Paper 2015-01-2587, 2015.
- [2] 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.
- [3] Foote P. New Guidelines for implementation of structural health monitoring in aerospace applications[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2013, 6(2): 525-533.
- [4] 左洪福,蔡景,吴昊,等.航空维修工程学[M].北京:科学出版社,2011.
Zuo Hongfu, Cai Jing, Wu Hao, et al. Aviation maintenance engineering[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [5] ATA MSG-3 Operator/Manufacturer scheduled maintenance development[S]. Air Transport Association (ATA) of America, 2009.
- [6] Pohya A A, Wicke K, Kilian T. Evolution/Optimization Guidelines IMRBPB Issue Paper 44 (Issue 3) [S]. EASA, 2011.
- [7] Przytula K W, Allen D, Vian J, et al. Health monitoring for commercial aircraft systems[C]. International Congress of the Aeronautical Sciences, 2008.
- [8] International Maintenance Review Board Policy Board. IP 92 Definition of Structural Health Monitoring (SHM)/Addition to MSG-3[S]. International Maintenance Review Board Policy Board, 2007.
- [9] International Maintenance Review Board Policy Board. IP 105 Further definition of Structural Health Monitoring (SHM)/Addition to MSG-3[S]. International Maintenance Review Board Policy Board, 2009.
- [10] Sun Jianzhong, Chen Dan, Yan Hongsheng, et al. Integration of scheduled structural health monitoring with airline maintenance program based on risk analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2018, 232(1): 92-104.
- [11] Speckmann H, Daniel J P. Structural health monitoring for airliner, from research to user requirements, a European view [C]. CANEUS 2004 Conference on Micro-Nano-Technologies Monterey, 2004.
- [12] 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.
- [13] Fitzwater L, Davis C, Tornig T, et al. Cost/Benefit analysis for integration of non-deterministic analysis and in-situ monitoring

- for structural integrity[C]. 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference Denver, 2011.
- [14] Piotrowski D, Roach D, Melton A, et al. Implementation of structural health monitoring (SHM) into an airline maintenance program[J]. *Structural Health Monitoring*, 2015, 232(1): 92-104.
- [15] Malere J, Santos L. Challenges for costs and benefits evaluation of IVHM systems[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2013, 6(2): 484-491.
- [16] International Maintenance Review Board Policy Board. IP 180 Aircraft Health Monitoring (AHM) integration in MSG-3[S]. International Maintenance Review Board Policy Board, 2010.
- [17] Yan Hongsheng, Zuo Hongfu, Sun Jianzhong, et al. Cost effectiveness evaluation model for civil aircraft maintenance based on Prognostics and Health Management[C]. 2017 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control, 2017.
- [18] Rodrigues L, Gomes J P P, 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.
- [19] 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 civil aircraft PHM predictive maintenance mode in air conditioning system[J]. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 53(6): 952-964.(in Chinese)
- [20] Le Clainche S, Ferrer E, Gibson S, et al. Improving aircraft performance using machine learning: A review[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 15: 108354.
- [21] Sun Ruiqian, Han Xiaobao, Chen Yingxue, et al. Hyperelliptic Kalman filter-based aeroengine sensor fault FDIA system under multi-source uncertainty[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 132: 108058.
- [22] Rao P S, Mohan S, Chindam V. AI based on-board diagnostic and prognostic health management system[C]. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2015.
- [23] Spina P R, Torella G, Venturini M. The use of expert systems for gas turbine diagnostics and maintenance[C]. *Asme Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2002.
- [24] Wang FangYuan, Sun JianZhong, Liu Xinchao, et al. Aircraft auxiliary power unit performance assessment and remaining useful life evaluation for predictive maintenance[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2019, 234(6): 804-816.
- [25] Tang Chen, Cui Yulian, Wu Chunzhi, et al. Application of lifting wavelet and random forest in compound fault diagnosis of gearbox[C]. *Young Scientists Forum 2017*, 2018.
- [26] Zhang Junfang, Luo Tingting, Peng Yukun, et al. Fault diagnosis method based on modified random forests[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(4): 777-785.
- [27] 韩华, 谷波, 任能. 基于主元分析与支持向量机的制冷系统故障诊断方法[J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(9): 1355-1363.
- Han Hua, Gu Bo, Ren Neng. Fault diagnosis method for refrigeration system based on principal component analysis and support vector machine[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(9): 1355-1363. (in Chinese)
- [28] Ordóñez C, Lasheras F S, Roca-Pardiñas J, et al. A hybrid ARIMA SVM model for the study of the remaining useful life of aircraft engines[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2019, 346: 184-191.
- [29] Li Ke, Zhang Yuelei, Li Zhixiong. Application research of Kalman filter and SVM applied to condition monitoring and fault diagnosis[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 121: 268-272.
- [30] Nieto P J G, García-Gonzalo E, Lasheras F S, et al. Hybrid PSO SVM-based method for forecasting of the remaining useful life for aircraft engines and evaluation of its reliability [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 138: 219-231.
- [31] Mack D L C, Biswas G, Koutsoukos X D, et al. Learning bayesian network structures to augment aircraft diagnostic reference models[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 14(1): 358-369.
- [32] Zaidan M A, Harrison R F, Mills A R, et al. Bayesian hierarchical models for aerospace gas turbine engine prognostics[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(1): 539-553.

- [33] 梁坤, 左洪福, 孙见忠, 等. 基于贝叶斯网络工况分类的民机引气系统异常检测[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(6): 76-85.
Liang Kun, Zuo Hongfu, Sun Jianzhong, et al. Abnormal detection of bleed air system for civil aircraft based on Bayesian network condition classification[J]. Astronautical Measurement Technology, 2014, 34(6): 76-85. (in Chinese)
- [34] 殷锴, 钟诗胜, 那媛, 等. 基于BP神经网络的航空发动机故障检测技术研究[J]. 航空发动机, 2017, 43(1):5.
Yin Kai, Zhong Shisheng, Na Yuan, et al. Research on aeroengine fault detection technology based on BP neural network [J]. Aeroengine, 2017, 43(1):5. (in Chinese)
- [35] 崔建国, 林泽力, 陈希成, 等. 飞机液压系统健康状态综合评估技术研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3):446-449.
Cui Jianguo, Lin Zeli, Chen Xicheng, et al. Research on comprehensive evaluation technology for aircraft hydraulic system health status[J]. Control Engineering, 2014, 21(3): 446-449. (in Chinese)
- [36] Soualhi A, Clerc G, Razik H. Detection and diagnosis of faults in induction motor using an improved artificial ant clustering technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(9): 4053-4062.
- [37] 田瑶瑶, 张惠娟, 杨忠, 等. 基于小波包和SOM神经网络的电作动器故障诊断[J]. 应用科技, 2018, 45(1):1-6.
Tian Yaoyao, Zhang Huijuan, Yang Zhong, et al. Fault diagnosis of electric actuators based on wavelet packet and SOM neural network[J]. Applied Science and Technology, 2018, 45(1):1-6. (in Chinese)
- [38] Prabakaran K, Kaushik S, Mouleeshwarappabu R, et al. Self-organizing map based fault detection and isolation scheme for pneumatic actuator[J]. ISSR Journal, 2014(3): 1361-1369.
- [39] Wang Xinqing, Huang Jie, Ren Guoting, et al. A hydraulic fault diagnosis method based on sliding-window spectrum feature and deep belief network[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(6): 4272-4284.
- [40] Chen Longting, Xu Guanghua, Zhang Sicong, et al. Health indicator construction of machinery based on end-to-end trainable convolution recurrent neural networks[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 54:1-11.
- [41] Ellefsen A L, Bjorlykhaug E, Aesoy V, et al. Remaining useful life predictions for turbofan engine degradation using semi-supervised deep architecture[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 182: 240-251.
- [42] Alaswad S, Xiang Yisha. A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 157: 54-63.
- [43] Zhu QiuShi, Peng Hao, Timmermans B, et al. A condition-based maintenance model for a single component in a system with scheduled and unscheduled downs[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 193: 365-380.
- [44] 葛恩顺, 李庆民, 黄傲林, 等. 不完全维修下的单部件系统视情维修及更换策略[J]. 系统工程与电子技术, 2012(12):2509-2513.
Ge Enshun, Li Qingmin, Huang Aolin, et al. Conditional maintenance and replacement strategies for single component systems under incomplete maintenance[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2012 (12): 2509-2513. (in Chinese)
- [45] Walter G, Flapper S D. Condition-based maintenance for complex systems based on current component status and Bayesian updating of component reliability[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 168: 227-239.
- [46] Liu Xiao, Li JingRui, Al-Khalifa K N, et al. Condition-based maintenance for continuously monitored degrading systems with multiple failure modes[J]. IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers), 2013,45(4): 422-435.
- [47] Hölzel N B, Schröder C, Schilling T, et al. A Maintenance Packaging and Scheduling Optimization Method for Future Aircraft[C]. Air Transport and Operations Symposium. DLR, 2012: 343-353.
- [48] Deng Qichen, Santos B E. A stochastic aircraft maintenance and crew scheduling problem with multiple check types and aircraft availability constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2022,299(2): 814-833.
- [49] Tseremoglou I, Van Kessel P J, Santos B F. A Comparative study of optimization models for condition-based maintenance scheduling of an aircraft fleet[J]. Aerospace, 2023, 10(2): 120.
- [50] van Kessel P J, Freeman F C, Santos B F. Airline maintenance task rescheduling in a disruptive environment [J]. European Journal of Operational Research, 2023, 308(2): 605-621.
- [51] De Pater I, Reijns A, Mitici M. Alarm-based predictive

- maintenance scheduling for aircraft engines with imperfect Remaining Useful Life prognostics[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2022, 221: 108341.
- [52] Boeing. Predictive maintenance: Insight accelerator/Boeing services [Z]. Boeing, 2023.
- [53] Boeing. Insight accelerator [Z]. Boeing, 2023.
- [54] Bernard W, Hoffmann A. SKYWISE-Big data platform as a foundation of airlines predictive and health monitoring[C]. PHM Society Asia-Pacific Conference, 2023.
- [55] Lufthansa-Technik. AVIATAR[Z]. Lufthansa- Technik, 2021.
- [56] 李欣. 南方航空飞机健康管理系统发展策略研究[J]. 航空维修与工程, 2022(9): 20-23.
- Li Xin. Research on the development strategy of china southern airlines' aircraft health management system [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022(9): 20-23. (in Chinese)
- [57] 李磊, 李明宇, 赵昶升, 等. 飞机健康管理系统告警等级调整方法研究[J]. 航空维修与工程, 2019(11): 50-53.
- Li Lei, Li Mingyu, Zhao Changsheng, et al. Research on the adjustment method of alarm levels in aircraft health management system [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019(11): 50-53. (in Chinese)

Research Progress in Predictive Maintenance Technology of Civil Aircraft

Sun Jianzhong, Zuo Hongfu, Yan Hongsheng, Zhu Xinyun, Duan Sizheng
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: The strategy of civil aircraft maintenance is constantly advancing with the progress of aviation technology, from time-based overhaul to reliability centered scheduled maintenance, as well as advanced condition based and predictive maintenance concepts. The development of modern civil aircraft testability, especially the development and application of system/structural health monitoring technology, has enriched the existing concept and methods of continuous airworthiness. While ensuring that the aircraft meets the requirements of continuous airworthiness, the aircraft has shifted from empirical time-based scheduled maintenance to more efficient maintenance based on the actual health status of the system/structure. This paper summarizes the latest research progress of predictive maintenance technology for civil aircraft, and introduces predictive maintenance mode based on traditional scheduled maintenance, including structural/system predictive maintenance task analysis methods, maintenance plan optimization, key technologies of predictive maintenance, and their applications in the field of civil aircraft.

Key Words: civil aircraft scheduled maintenance; predictive maintenance; system/structural health monitoring; maintenance optimization

Received: 2024-01-05 **Revised:** 2024-04-17; **Accepted:** 2024-05-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(U2233204); Fund of Shanghai Engineering Research Center of Civil Aircraft Health Monitoring (GCZX-2022-02)