

民用飞机维修中的科学问题



郭润夏

中国民航大学, 天津 300300

摘要: 本文凝练并给出了民用飞机维修的价值追求,包括飞机设计与制造的安全性、机载系统的能观性与能控性、维修经济性以及维修流程的可操作性与可推广性。梳理并总结了现行维修体系的实现路径,包括初始适航、维修技术体系、维修成本控制以及维修技术和管理的普适性。对比分析了预防性维修和预测性维修的主要特征,指明未来的民用飞机维修将以预测性维修模式为核心特征。详细讨论了民用飞机维修面临的6个方面的需求和对策以及对科学问题的思考。

关键词: 民用飞机维修; 维修思想; 预测性维修; 科学问题

中图分类号: V37

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.07.001

在民用飞机维修从预防性维修模式跃升到预测性维修模式的技术背景下探讨其中蕴含的科学问题是一项系统性的工作。在探讨和分析的过程中,首先要明确民用飞机维修的价值追求,它决定了科学问题的提出或者科学研究的主要方向;其次是要对民用飞机维修技术现状做出准确判断,找到技术进步的“基准线”,它决定了科学研究的现实起点;最后要搞清面向未来的预测性维修模式的具体需求并从中提取出关键科学问题,它决定了科学研究的具体内容和采用的主要方法或手段。

1 民用飞机维修的价值追求

无论是目前的预防性维修模式还是未来的预测性维修模式,二者的价值追求是一致的,可以概括为以下4个方面。

1.1 飞机设计与制造的安全性

一架飞机在交付给航空公司进行商业运营之前,其安全性、可靠性及可维修性的设计和实现水平对后续的维修保障行为具有重大影响,因此,飞机设计与制造的安全性可以看作维修价值追求的逻辑起点。从最顶层的安全性设计理念来考察,自代表性机型波音707开始,到波音737NG,再到波音787、空客A350和中国C919等,在安全性设计理念方面,大概经历了完整性设计、冗余设计、失效安全设计和系统安全设计等4个阶段。完整性设计突出强调的是飞

机功能层面的完整性。所谓冗余设计指的是为了保障飞行器本体运行的高度安全,对关键的机载系统(如惯性导航系统(IRS)、自动飞行控制系统(AFCS)等)采取多套备份、互相冗余的设计,使飞机具备故障之后的工作能力。失效安全设计指的是机载系统、部件发生部分失效或功能降级之后,依靠剩余的能力仍然能够在可以接受的安全性水平线之上运行一定的时间,以便完成应急处置的程序。系统安全设计则是引入了系统工程的理念,把飞机整体的安全性指标体系逐层分解,直至分解到某个具体部件,从而为飞机部件级的设计、制造提出量化的可靠性指标。

从适航规章的角度考察,民航是一个极其注重规章、规范的行业,其适航规章的演进大致经历了事故经验总结推动规章完善、技术理论研究驱动规章完善、系统安全理论发展引领规章变革三个阶段。事故经验总结推动规章完善指的是规章完善的主要动力来自发生事故之后的经验总结。技术理论研究驱动规章完善是随着飞机设计制造技术水平的提升、相关学科理论研究的进步,以及飞机运营经验的积累,加深了我们对飞机本体的认知程度,从而驱动规章的完善,此时的规章是系统性与经验性并存的。系统安全理论发展引领规章变革,指的是把系统安全的理念和分析方法全面引入飞机设计过程中,将规章中定性描述式的要求转变为定量式表达,如发生灾难性事故的概率不得超过 10^{-9} /飞行小时。

从适航管理的角度考察,我国管理模式大致经历了苏

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(62173331); 天津市科技计划项目(23JCYBJC00060)

引用格式: Guo Runxia. Scientific issues in civil aircraft maintenance[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(07): 1-13. 郭润夏. 民用飞机维修中的科学问题[J]. 航空科学技术, 2024, 35(07): 1-13.

联模式、规章“跟随者”和规章“参与者”三个阶段,并将最终成为规章“制定者”。苏联模式下的适航管理由空军领导,以行政管理为主,主要是实施型号定型审查。随着全面引进欧美飞机、装备,我国同步引入了欧美系的适航规章及标准,参考美国联邦航空条例(FAR)等建立起自己的适航规章体系,开展了MA60等多种型号的合格审定,并与美国签署有限双边协议,成为规章“跟随者”。随着国产大飞机战略的提出和中国航空制造业水平的快速提升,我国与美国签署了全面双边协议,并开展C919飞机等型号的合格审定,成为规章“参与者”。面向未来,随着C929型号的推进和ARJ21、C919等型号的迭代升级,我国将成为适航规章的重要“制定者”。

总的来看,通过规范化的设计和制造,赋予并实现了飞机本体的高度安全性。

1.2 机载系统的能观性与能控性

机载系统能观、能控是民用飞机维修价值追求的技术前提。机载系统的能观性指的是能全面感知机载系统的健康状态,此时的维修行为是高效的,否则将会导致维修不足或者维修过度。机载系统的能控性指的是能准确评估维修体系和维修行为的有效性,即维修行为必须能够有效地保持系统和部件固有的安全性和可靠性水平。当然,机载系统的能观能控是一种理想状态,而在技术发展的某一个阶段,这种目标不一定能够完全做到。在不能完全做到对机载系统的能观能控时,所采取的最典型的一种做法就是MSG-2维修思想。MSG-2是基于预防性思想的维修,它是面向过程的^[1]。由于无法准确、全面感知机载系统/结构的运行数据并精确刻画系统/结构的性能衰退规律,所以采用MSG-2制定出来的维修大纲,对飞机每类组件(系统、部件或结构)采用由“从下往上”的分析方法,采用定时(HT)、视情(OC)和状态监控(CM)三种方式来完成计划性维修。这里的“从下往上”指的是遵循部件、系统、区域、整机的顺序进行分析。视情检查(OC)是通过定期检查和测试来确定部件或系统的工作状况,其目的是在部件失效前拆下部件,因此需要保证部件在下次检查前工作正常,其检查间隔是基于使用经验来确定的。而监控项目(CM)允许故障发生,状态监控部件不要求计划性地翻修或维修任务,需要通过分析部件的拆换和故障数据来确定适当的维修计划。

1.3 维修经济性

维修经济性即维修成本控制,是航空公司、航空维修企业(MRO)永恒的追求。

在此提供几个维修成本控制的典型示例。第一个例子

是MSG-3维修思想下的飞机定检。飞机定检时,要对各项任务进行分类,以便于制订维修计划和组织维修生产。利用“聚类”的手段把维修间隔相近的维修任务打包合并,通过一次停场完成维修包内的全部任务,避免了重复打开口盖、拆装盖板等操作,实际上是减少了维修任务的总量,提升了维修经济性。例如,空客320s飞机的A检间隔是750FH/100DAY/500FC(典型值),C检间隔是6000FH/20MO/4500FC(典型值)。第二个例子是维修任务组合优化。如波音777,其维修方案规定了系统C检和结构C检两种不同的间隔,其中,系统C检间隔为7500FH;结构C检间隔为4000FC或750DAY(先到为准)。在维修实践中,系统检和结构检的维修间隔差距不大,可以整合在一起执行,从而节省飞机的累计停场时间。第三个例子是维修间隔的优化,分为延长维修间隔和缩短维修间隔两种类型。某型飞机的维修方案一直要求在航前执行燃油箱放沉淀工作。在半年时间内对该机型6架次进行油箱放沉淀抽样工作,没有发现一架飞机的油样含有水分,结合飞机自身的设计特点,将燃油箱放沉淀工作的间隔延长至三天,并且获得适航当局的批准,大大节约了维修成本。在缩短维修间隔方面,某型飞机曾出现电子设备冷却系统故障,最低设备清单(MEL)规定该系统故障为不可放行项目。而冷却风扇的MTBF只有800FH,送修费用为1500~2000美元。由于冷却风扇的可靠性太低,为保证航班正常,必须增加风扇的库存数量,这样会导致航材库存成本大幅提高,而根据可靠性数据,缩短其维修间隔就会使这个维修项目得到优化,更加经济。

1.4 维修流程的可操作性与可推广性

从可操作性和可推广性的角度考察,民用飞机维修是跨地域、跨种族、跨文化的全球性的技术行为。

图1展示了完整的民用飞机维修流程。飞机制造商联合管理当局、设备供应商和航空公司成立工业指导委员会(ISC),ISC基于MSG-3维修思想编制飞机的初始维修大纲,以维修审查委员会报告(MRBR)的形式发布,并报管理当局批准。飞机制造商在拿到MRBR之后,会添加一部分制造商经验和关注事项,形成维修计划文件(MPD),MPD随同飞机一并交付给航空公司,航空公司在MPD基础上,再添加自身和所在国管理当局关注的维修项目,形成航空公司维修方案(OMP),以OMP为基本遵循,结合各种维修(排故)手册,编制出维修工卡(Job Card)。航线维修、定检维修和附件维修的操作都是在工卡的具体指导下实施的。如果在维修过程中发现飞机有维修性设计方面的缺陷或者需要改进的地方,可以提出问题报告(Task Report),结

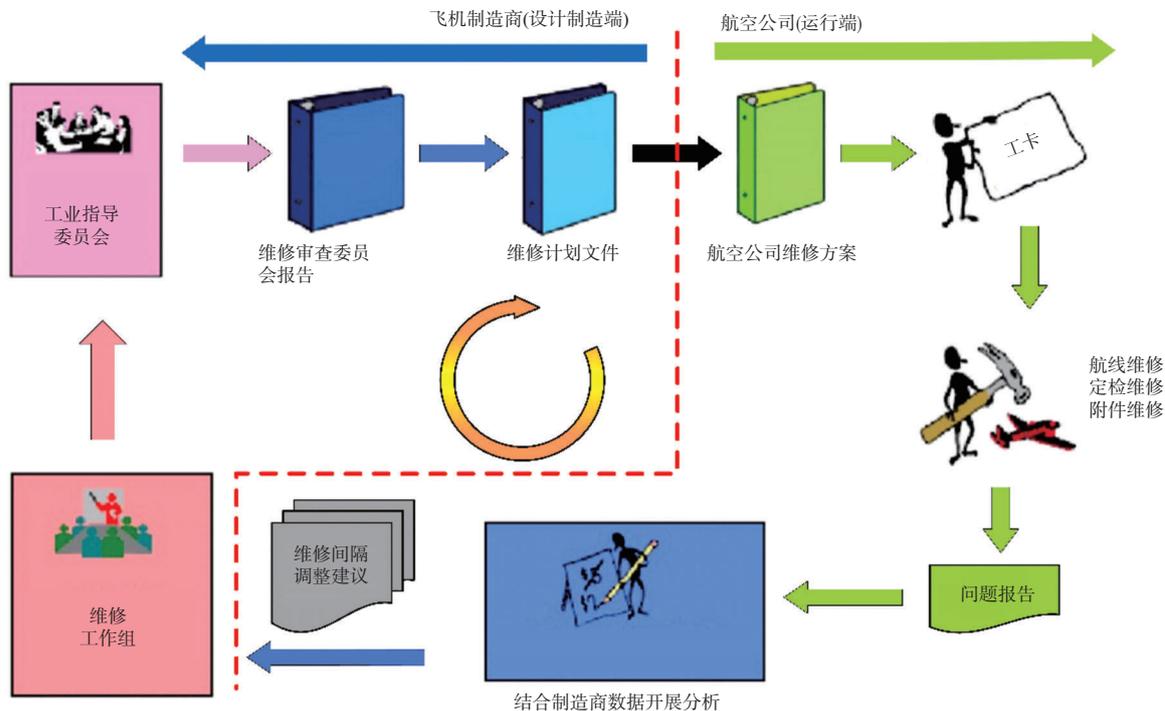


图1 民用飞机维修流程

Fig.1 Civil aircraft maintenance process

合飞机制造商提供的数据开展分析,提出维修间隔、维修任务的增删等方面的调整建议,并交由工业指导委员会(ISC)下设的各个维修工作组(MWG),MWG汇总收集调整建议并经ISC评审通过之后,就可以对飞机的维修大纲做出改进和完善。这就是完整的民用飞机维修技术流或者信息流。从这个角度可以清晰地看出,民用飞机维修是一项贯穿飞机设计制造和运行全链条的技术行为,这套流程最重要的意义是成功实现了飞机制造活动和飞机维修活动之间的隔离,即飞机制造商不承担飞机维修任务,而把飞机维修任务交由航空公司或MRO来负责,这是与军用飞机维修活动的重大区别。

2 现行维修体系的实现路径

基于对飞机设计与制造的安全性、机载系统的能观性与能控性、维修经济性以及维修流程的可操作性与可推广性的价值追求,现行的维修体系涉及维修技术和维修工程管理,已经给出了系统性的解决方案,保障了飞机运营过程中的高度安全性和经济性。现行维修体系的主要观测点可以概括为以下4个方面。

2.1 初始试航暨飞机本体安全

初始适航侧重对飞机设计、制造环节的管理和控制。

在飞机交付使用前,适航部门依据各类适航标准和规范,对飞机的设计和制造所进行的型号合格审定和生产许可审定,主要涉及型号合格证(TC)、生产许可证(PC)和适航证。TC^[2]用于证明民用航空产品(飞机,发动机和螺旋桨)符合相应适航当局的适航规章以及环境保护要求。取得TC的民用航空产品意味着认可其设计已经符合相应的适航标准,是飞机投入生产和使用的前提条件。PC^[3]用于表明允许按照经过批准的设计和经过批准的质量系统生产民用航空产品(飞机、发动机和螺旋桨)。PC是对航空产品生产的批准。适航证^[4]用于表明该飞机符合经过批准的设计并且处于安全可用的状态。

在设计制造阶段,与飞机本体安全相关的过程主要包括安全性/可靠性计划、飞机级功能危害评估(FHA)、系统级FHA、初步系统安全性分析(PSSA)、系统安全性分析(SSA)、系统安全性需求传递、供应商活动、共因分析(CCA)、特殊风险分析、区域安全性分析、人为因素分析、首飞活动、飞机安全性综合、运行可靠性等。

飞机的安全性设计是初始适航管理的核心要点之一。目前,民用飞机对安全性要求有明确的适航标准,如发生灾难性事故的概率要求为 $\leq 10^{-9}$ /飞行小时。

2.2 维修技术体系

图2展示了目前民用飞机维修技术体系的基本脉络,从维修思想到维修大纲,到维修方案,到生产任务,到生产控制,最后到技术工艺和装备,整个维修技术体系呈现一个从“慢变”到“快变”的过程。目前的维修思想是MSG-3。基于MSG-3所编制的维修大纲和维修方案是面向任务的维修文件;具体到维修任务实施及其生产控制,目前所依靠的支持系统主要是半人工和半信息化的形式;而核心的维修技术、工艺和装备,目前还主要掌控在欧美原厂设备制造商(OEM)手中。

这里简单回顾一下维修思想。自从有了飞机维修实践活动之后,人们就在不断地探索新的维修思想。从“预防性维修为主”的MSG-1、MSG-2维修思想发展到目前“以可靠性为中心”的MSG-3维修思想。MSG-3建立在可靠性数据分析基础上,通过收集数据(能观)、分析数据,找出数据发展变化趋势,以判断系统、部件的可靠性水平,从而采取有针对性的维修工作,以保持系统和部件固有的安全性和可靠性水平(能控)。MSG-3是面向任务的维修,以预先规定的维修任务,预防飞机在使用过程中发生故障^[5]。基于MSG-3的维修大纲包括系统/动力装置(包括部件、附件和辅助动力装置)、飞机结构、区域检查和闪电/高强度辐射

场4个部分。对飞机的每部分采用由“从上往下”的分析方法,通过预设的维修任务(润滑/勤务,检查/功能测试,恢复,报废等)来完成计划性维修。所谓“自上而下”指的是整机、区域、系统、部件。维修技术体系还涉及一份重要的文件是维修可靠性控制方案(MRCP)。初始MRCP须报民航局批准,包括可靠性控制原理、可靠性控制系统、数据收集系统、数据显示和报告系统、性能标准系统、数据分析系统、纠正措施系统、维修方案的更改、可靠性方案文件的修订等。而与MRCP相对应的可靠性控制体系是一个闭环控制系统,主要包括数据收集、数据分析、性能标准、纠正措施、数据显示和报告、维修间隔的调整和方式改变等子系统。

总的来看,目前的维修技术体系体现了体系化、系统性的思想。在飞机的设计与制造阶段,就开始融入“可维修性设计”的内容,从而产生了最低设备清单(MEL)。允许飞机带故障放行,减少对航班运行的影响,显著提高了飞机可利用率。目前维修技术体系的主要缺陷是侧重“故障后”的隔离和修理,缺少预测性、缺少空地协同和新技术的运用,“就故障谈维修”。

2.3 维修成本控制

从维修成本控制的角度考察,如图3所示,首先要保证维修任务精确下达,也就是在最合理的时机下达维修任务,

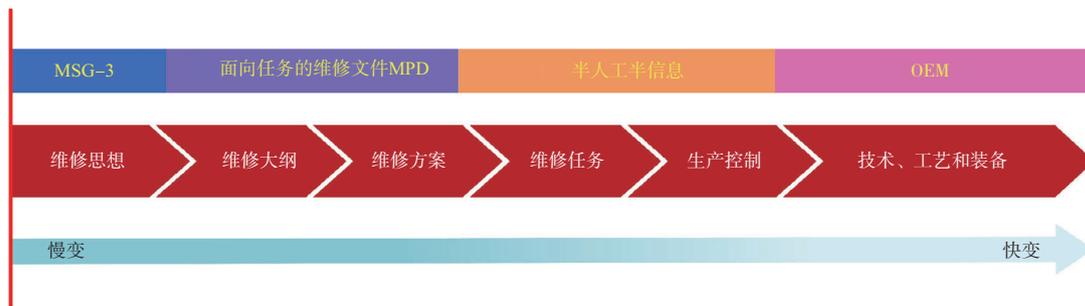


图2 目前的维修技术体系
Fig.2 Current maintenance technology system

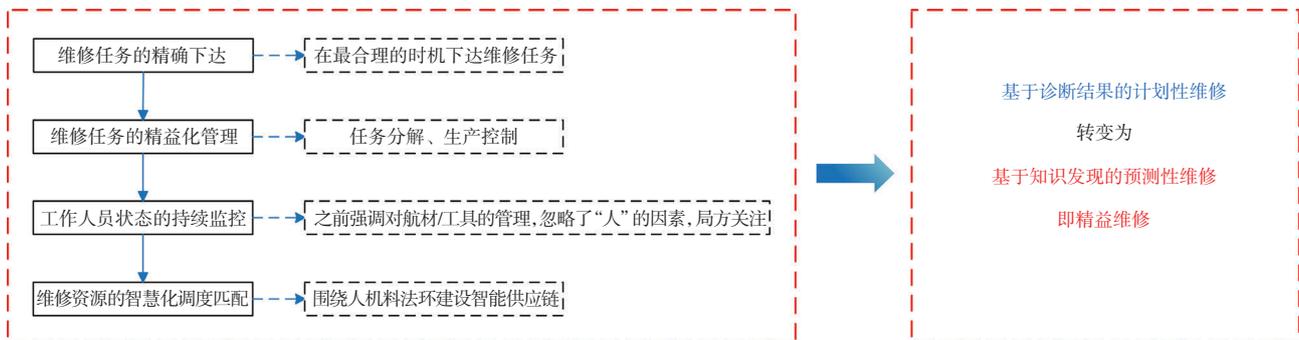


图3 精益维修实施过程
Fig.3 Lean maintenance implementation process

充分利用维修间隔；其次是维修过程的精益化管理，主要是维修任务分解和生产控制的平台化、数字化。再次是对工作人员的状态进行持续监控，这里的监控包括生理状态和心理状态两个方面。我们之前一直强调的是对航材和工具的管理，而忽略了人的因素。近期，民航局对工作人员的生理状态，尤其是工作负荷非常关注；最后是维修资源的智慧化调度和分配，指的是围绕人、机、料、法、环来建设智能供应链，也就是说，在实现维修任务精确下达、维修过程精细化管理、工作人员状态持续监控和维修资源的智慧化调度之后，我们的维修模式将从目前“基于诊断结果的计划性维修”转变为“基于知识发现的预测性维修”，即精益维修。这里的精益维修指的是面向全工作流程，在最恰当的时间由最能胜任的维修人员按照最优的维修方案实施操作，并取得最佳的经济效益。其观测点有：(1)全工作流程：从生产计划、生产支援和生产现场全方位着手进行改善，通盘考虑；(2)维修时机：对飞机系统、机构、部件的性能衰退过程进行全面、精准感知；(3)维修人员：关注生理、心理和工作环境对维修人员工作状态的影响；(4)维修方案：指的是广义的技术方案，涵盖从维修方案的制定，到生产计划控制，再到维修资源组织调度等方面的工程管理方法。

2.4 维修技术和管理的普适性

长期以来，中国民航通过规范的维修方案（一致性好）和严格的按卡施工（操作性强）来保证民用飞机运营阶段的高度安全，这在本质上体现了维修技术和管理的普适性。初始维修大纲是按照全球统一的技术思想编写的，这在客观上为不同的航空公司提供了一致的技术遵循和指引，最大程度地避免了由于技术路线上的差异所导致的不安全事件。而“按工卡、手册施工”一直是中国民用飞机维修系统所严格要求的，它从具体施工的角度保证了维修行为的普

适性，最大程度地避免了维修操作的随意性和经验主义。据不完全统计，国内全行业使用飞机的平均日利用率在10h左右（旺季，2023年数据）。

另外，维修技术能力和工程管理水平是民用飞机维修系统公认的两条主要支柱。中国民航通过严格的资质授权（基础执照+机型签署）来确保整支维修人员队伍的技术能力达到/保持在一个基本的水准。民航局和航空公司联动，通过科学、高效的维修工程管理方法（实际上是航空公司个性化的，不同航空公司都具体提出了与自身适配的维修工程管理方法）来提高维修系统的持续安全能力、运行保障能力和运行可靠水平。

3 预测性维修

最近十多年以来，预测性维修的概念逐渐兴起并成为学术界和航空工业界的研究热点。目前的预防性维修有两个最基本的特征（或者说是缺陷），即“计划性的预防”和“非计划性的排故”。根据预先制定的维修方案实施维护操作，最大程度地预防飞机在运营过程中发生故障；一旦飞机出现了故障，则要进行故障隔离并在维护手册的指导下开展排故操作。与之相对应的、真正意义上的预测性维修则不需要预设维修任务，它是建立在对机载系统/结构性能衰退规律精确刻画基础上的，此时的维护操作只在需要的时候（最恰当的时机）介入，从而使飞机维修的效益达到最优。当然，预测性维修的实现必须依赖于飞机性能的提升和强大的地面技术支持。

3.1 预防性维修和预测性维修的对比

对于预防性维修，如图4所示，其技术限制是无法准确、全面感知机载系统/结构的运行数据，无法精确刻画系统/结构的性能衰退规律；从而在维修行为上的表征是以预先规定

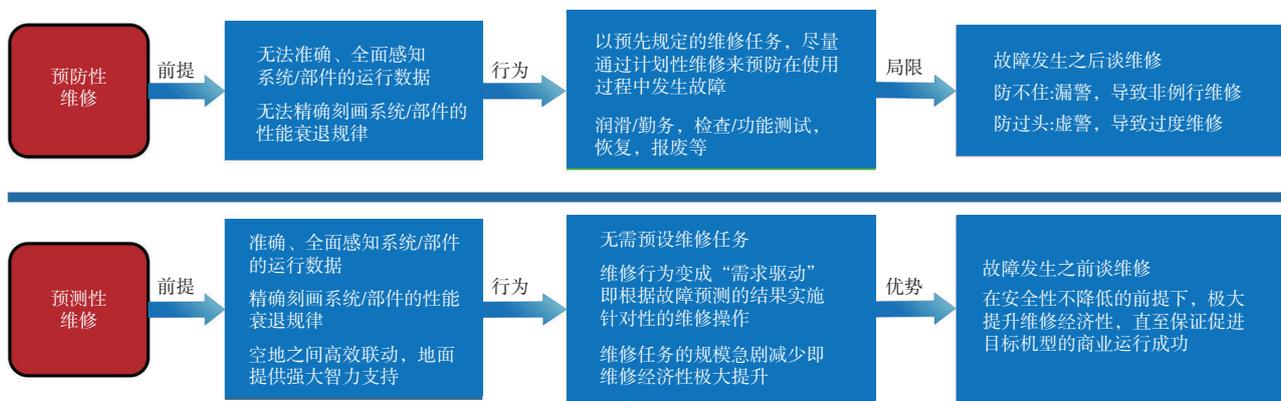


图4 预防性维修和预测性维修对比分析

Fig.4 Comparative analysis of preventive maintenance and predictive maintenance

的维修任务(润滑/勤务、检查/功能测试、恢复、报废等),尽可能地通过计划性维修来预防飞机在使用过程中发生故障;其局限性是“故障发生之后谈维修”,存在“防过头”即虚警,导致过度维修或“防不住”即漏警,导致非例行排故的现象。

尽管仍然存在局限性,但是预防性维修的提出及其实践已经做出了三个重大科学贡献:(1)提出了维修逻辑决断的方法论或者说决断模型(从MSG-2开始);(2)在民用飞机维修工作中引入了“系统论”的深刻思想(紧盯部件的维修模式过渡到从系统向部件方向逐层分解的维修模式,从MSG-3开始);(3)实质引入了“聚类优化”思想,把整个维修大纲分为4个部分,给维修操作的生产组织和管理带来极大便利。

对于预测性维修,如图4所示,其技术前提是准确、全面感知机载系统/结构的运行数据,精确刻画系统/结构的性能衰退规律以及空地之间高效联动,地面提供强大智力支持;从而在维修行为上的表征是无需预设维修任务,维修行为变成“需求驱动”即根据故障预测的结果实施有针对性的维修操作,此时,维修任务的规模将会急剧减少,维修经济性大大提升;其优势是故障发生之前谈维修,在安全性不降低的前提下,极大提升维修经济性直至推动目标机型的商业成功。

对于预测性维修,有三个需要解决的重大科学问题:(1)在引入系统/结构的故障/剩余寿命预测结果之后,维修逻辑决断模型的配套更新及其评估验证;(2)系统/结构的

故障/剩余寿命预测结果的准确性;(3)与预测性维修模式相契合的新型的维修资源优化调度模式。

如图5所示,从目前预防性维修模式跃升到预测性维修模式是维修技术体系迭代进步的核心标志,将会在维修思想、维修大纲(方案)、维修任务及其生产控制、维修技术、工艺和装备等方面发生实质性变化,而面向未来的民用飞机维修将以预测性维修模式为核心特征。

3.2 预测性维修模式对应飞机性能提升

从可维修性的角度来考察,这里的飞机性能指的是机载系统运行数据的采集、处理和故障隔离能力。表1展示了机载维护系统(OMS)的演进历程。从第一代机械/模拟系统进化到现在的第4代模块化系统。

对于整机规模的故障诊断,目前主要是基于ARINC624协议来设计OMS或维护功能模块(OMF),如图6所示。对于部件的内置自测试(BITE)监控数据,依次完成故障抑制/特殊事件自检、连锁反应去除、故障合并与隔离、维护信息关联和存储等步骤,最终给出维护信息,主要包括发生故障的根源部件和排故所需要的维修手册。故障隔离信息可以显示在驾驶舱仪表盘上,也可以通过空地数据下传,还可以通过机载打印机打印出来或者利用便携性维护终端(PMAT)读取。

目前,整机规模的故障诊断模型在故障隔离的准确性方

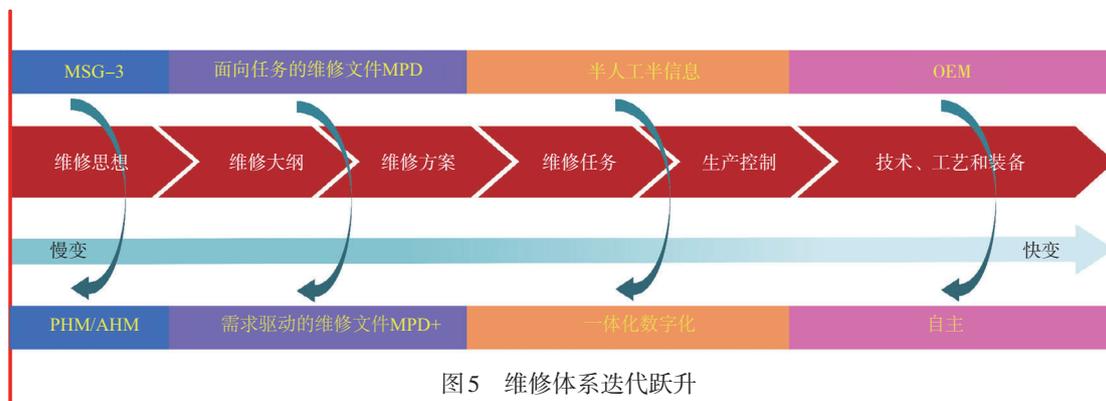


Fig.5 Maintenance system iteration and leap

表1 OMS的演进历程

Table 1 The evolution of OMS

	机械设备	机载维护特点	代表机型
第一代	机械/模拟系统	采用“push-to-test”方法检测。通过灯的红绿提示故障状态	波音727/737传统型,麦道80
第二代	数字系统	采用内置自测试(BITE)设备,利用前面板显示器显示故障信息	波音757/767/737NG, 麦道90,空客320
第三代	联合式系统	采用中央维护计算技术集中处理各系统/设备的故障信息	波音747-400,麦道11
第四代	模块化系统	采用综合的中央维护计算技术和数据链技术集中处理、传输各系统/设备的故障和状态信息	波音777/787,空客350

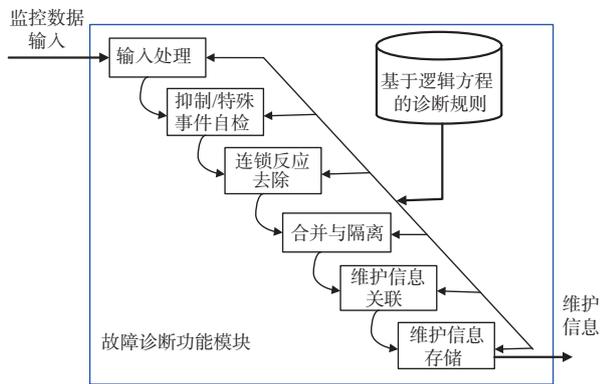


图6 OMS故障隔离程序
Fig.6 OMS fault isolation procedure

面能够满足要求,但一个明显的缺陷是不具备预测能力。面向未来,具备预测能力的OMS或OMF将利用尽可能少的传感器采集系统数据;借助各种智能推理算法评估系统自身的健康状态,在故障发生之前实施预测;结合可利用的资源信息提供一系列的维修保障措施,实现对飞机的视情维修。

3.3 预测性维修模式必须依赖地面支持

将飞行管理、运控和签派等多源数据进行深度融合和知识挖掘,这些运算全部都集中在机载端运行是不现实的,必须依赖地面服务器强大的存储和算力支持。依赖地面支持,构建一套能够贯穿故障诊断与剩余寿命(RUL)预测、远程技术支援、机队级规模维修工程管理等业务的数字化维修系统,助力民用飞机维修领域数字化转段升级。

另外,还有两个与预测性维修相伴相随的技术,第一个是维修数据挖掘和知识发现,第二个是数字孪生。对于维修数据挖掘和知识发现,在大数据背景下,数据本身就是对诸多故障的再现与反射,使用机器学习技术窥探问题的细节与本质,形成“飞行大数据+机器学习+机务维修”的策略。例如,目前很多航空公司正在实施的飞机过载实时监控、飞机空调/APU运行状态监控和飞机轮胎偏磨大数据分析等工作。对于数字孪生,通过资料调研发现,美国国家航空航天局(NASA)和西门子已经开发出了航空发动机和飞机起落架的数字孪生体^[6-7],但在航空电机、机载通信导航系统、飞机主承力结构件等方面尚未见到相关典型应用案例。数字孪生技术需要进一步解决的主要问题是建立动态多维多时空尺度高保真模型,实现对机载系统/结构实体的精准映射,跨协议/跨接口/跨系统的实时双向数据交互,保证孪生模型与机载系统/结构实体性能衰退规律的一致性/真实性。

如图7所示,预测性维修模式将在机载端、空地传输和地面端等三个地方发生显著的变革。在机载端,将在目前的诊断推理程序、异常推理(捕获)程序基础上,增加预兆推

理程序,用于实现对机载高价值部件的故障或RUL预测。在空地传输方面,将会从目前飞机通信寻址与报告系统(ACARS)的字符传输系统升级为高通量大带宽的卫星传输数据链或空地(ATG)链路,更快速、更丰富地传输飞机健康状态数据。在地面端,将会基于预测性维修模式编写新的飞机维修大纲(方案)和维修手册文件,引入完备的维修规划和生产控制信息支持系统,并采用更多的智能化维修工具。

4 民用飞机维修面临的需求、对策和科学思考

结合航空公司和MRO在维修实践中主要关注的痛点问题,本节从维修方案的评估及优化,维修资源配置、组织与调度,维修工程管理,维修施工管理,预测性维修技术及其应用和先进航空结构修理与改装6个方面逐一探讨民用飞机维修面临的技术需求、可采取的对策以及背后的科学问题。

4.1 维修方案的评估及优化

维修方案是保证民用飞机持续安全运行的重要基础,其核心内容就是维修任务和维修间隔,这是一切维修工作的源头。因此维修方案的持续评估及优化成为航空公司的重要任务。在维修实践中,主要从以下4个方面进行优化。

(1)建立维修间隔优化模型集合。目标是在维修任务实施的时刻,维修任务包中所包含的各项维修任务,按照FH/FC/FD统一折算后的方差达到最小,即 $\min(\sigma)$,实现批量维修时效的最大化,尽量降低对维修间隔的浪费。另外,该模型最好是以每一架飞机为分辨率的,即面向单架飞机的维修间隔优化模型。

(2)建立维修任务组合优化方法集合。目标是在在保证满足维修审查委员会(MRB)最低维修要求的前提下,充分考虑航线结构、地理位置、维修经验,在可靠性分析的基础上,对维修项目、维修方式等进行科学分析和合理权衡,寻求彼此间的最佳组合,使飞机的维修成本最低、飞机停场的损失最小。如均衡和拆分300FH以上A检。目前空客A320系列维修方案规定750FH(典型值)进行一次A检工作,加上其他非例行工作和一些工程指令,工作内容较多,此时若将A检工作包均衡和拆分为两次进行,均衡后的A检执行间隔为375FH或50DAY或250FC(先到为准),就可以避免飞机停厂维修。

(3)建立维修任务决策模型集合。目标是合理界定单次维修任务的规模和资源需求,并与航空公司或MRO所能提供的维修能力达到最佳契合。

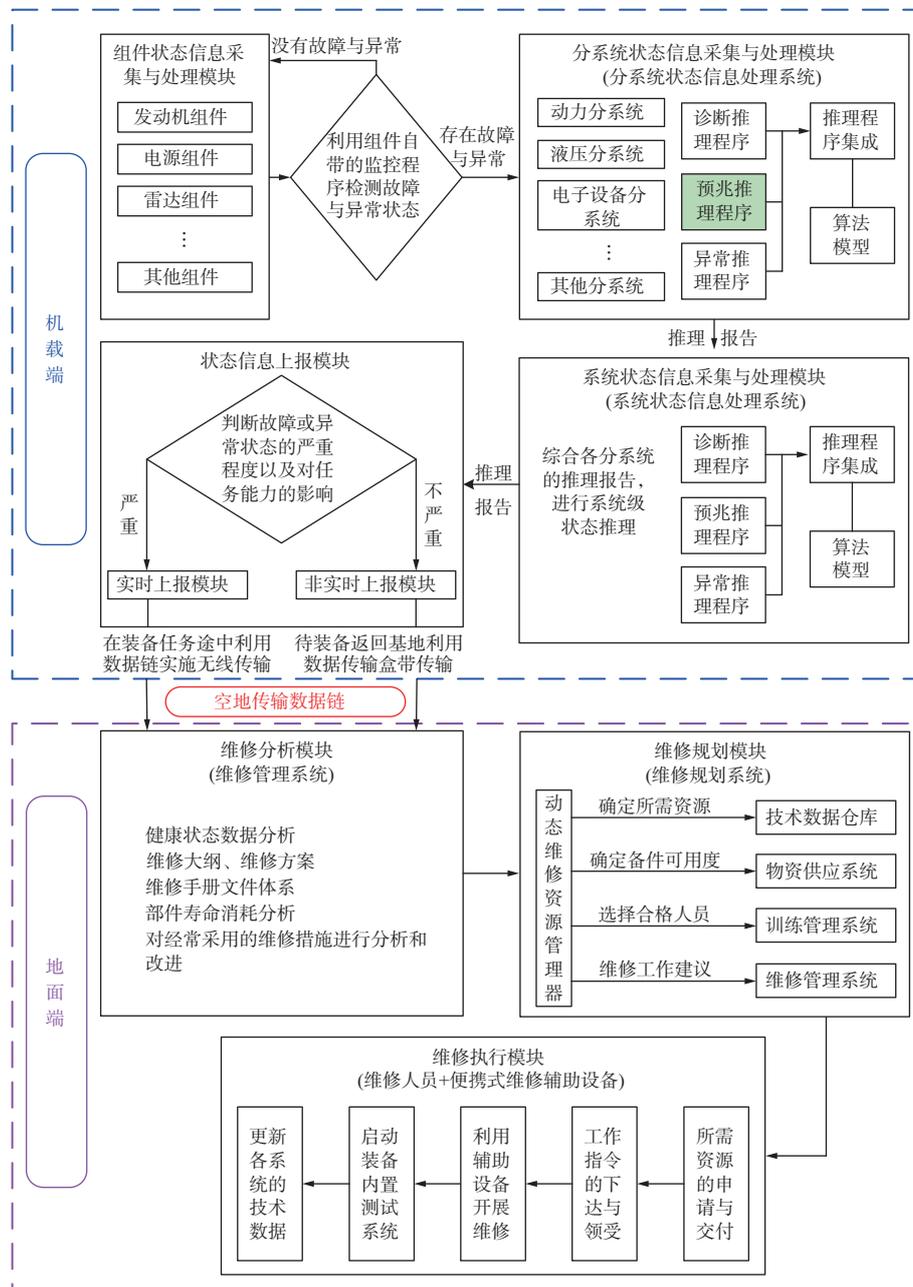


图7 预测性维修技术框架
Fig.7 Predictive maintenance technology framework

(4)建立维修级别分析模型集合。目标是确定机载系统/部件的最佳修理级别或报废决策,即合理界定某个部件是否需要更换、修理或报废,在哪里进行更换、修理或报废,以提升维修的经济性。

4.2 维修资源配置、组织与调度

维修资源配置、组织与调度一直是航空公司或MRO的一个工作重心,也是一个工作难点,其对于企业的运营成本有较大的影响。随着机队规模和航班数量的增长,问题的

复杂性和难度也有很大的增加。

在维修实践中,主要是设计出维修资源的优化配置算法。目标是以维修任务为研究对象,研究其所涉及的人、机、料、法、环等各类资源的优化配置,建立智能优化理论模型,进而构建面向定检或大修等所有维修任务的、所有资源的、全局优化配置方法,最终形成合理的维修资源优化配置方案。

如维修机位动态精准调度算法^[8]。维修机位资源是宝

贵的生产要素,航空公司对提高维修机位利用率有着迫切需求。中国民航大学团队以提高机位利用率目标,研究维修机位动态精准调度和飞机移动路径规划方法,实现维修机位自动化调度,提高机位综合利用率,并在广州飞机维修工程有限公司(GAMECO)进行了实际应用。解决了复杂维修场景下维修任务与机位的非线性动态优化匹配、复杂维修场景下待修飞机移动路径的实时计算两个方面的关键问题。

上述讨论的维修方案评估及优化和维修资源配置、组织与调度,这两类工程需求在本质上都属于“多因素评估与决策问题”,即首先要分析出多因素、多约束条件之间的相关性(相关性分析);然后确定决策变量(主成分变量);进而设计出优化的目标函数(体现价值追求);最后是决策模型求解并根据解的质量或适用性对决策模型实施迭代完善。解决多因素评估与决策问题时,主要涉及组合规划和强化学习两类技术。

(1) 组合规划

组合规划模型是建立在约束条件上的单目标或多目标优化,这一类的精确模型通常以最小化飞机停放时间、最小化FH/FC/FD方差等作为优化目标,旨在从多个角度对资源利用效率实现更优的规划调度,从不同维度考察,可分为线性规划模型与非线性规划模型,整数规划模型与混合整数规划模型等,并基于实际业务运行规则对模型求解加以约束。

$$\begin{aligned} \max \quad & \min(z) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq (=|\geq) b_i, & i = 1, 2, \dots, m \\ x_j \geq 0, & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

如式(1)所示,一个经典的线性规划模型由决策变量 x_j 、目标函数 $\max(z)$ 和约束条件三个要素组成。这三个要素相互作用,共同描述了组合优化问题的特征和局限性,目标是找到最佳决策变量 x_j 的取值,使目标函数 $\max(z)$ 在满足约束条件的情况下取得最优值。

组合规划算法的优势属于精确建模方法,可得到全局最优解;后续的模型求解算法很成熟,已有商用的求解器,如Grubi求解器、杉数求解器等。缺陷是在组合规划模型中,由于约束条件通常都会做一定程度的简化,这将不可避免地引起模型失真,进而使得后续模型求解的结果不适用;另外,当优化调度问题规模扩大时,精确方法将产生巨大的计算量,很难拓展到超大规模优化问题的求解。

(2) 强化学习

由于强化学习的“动作选择”与优化调度即“在离散决策空间内进行决策变量的最优选择”具有天然相似的特征,并且深度强化学习“离线训练、在线决策”的特性使得优化调度问题的在线实时求解成为了可能,因此利用深度强化学习算法求解传统的优化调度问题是一个很好的选择。

如图8所示,强化学习由智能体和环境两部分组成,旨在让智能体通过与环境的交互学习,最大化预期累积奖励 $\sum R_t$ 。智能体在环境中获取状态 S_t ,利用该状态输出动作 A_t ,环境根据智能体采取的动作 A_t ,输出下一状态 S_{t+1} 以及奖励 R_{t+1} 。交互过程持续进行,使智能体通过经验不断调整策略,以获得更优的行为方式来实现既定的任务目标。

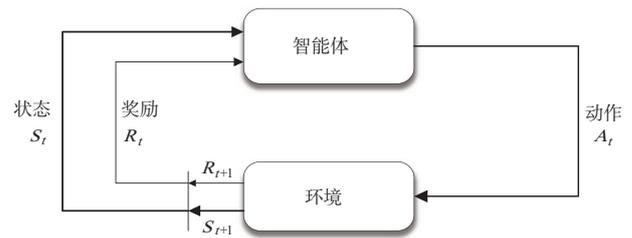


图8 强化学习框架

Fig.8 Reinforcement learning framework

强化学习算法的优势是较之组合规划模型,求解速度更快、泛化能力更强,适用于超大规模的多因素评估与决策,尤其是与深度学习网络(DLN)相结合之后,能够迸发出令人激动的效果。缺陷是该技术正处于快速发展进程中,尚缺乏统一的标准技术框架;求解算法的设计具有极强的理论性和个性化,开发者需要机器学习的专业知识。

4.3 维修工程管理

如何克服在维修实践中由于机型、地区和人员不同而造成的不确定性;如何通过科学客观的管理方法来提高民用飞机维修系统的持续安全能力、运行保障能力、运行可靠水平和解决问题能力,仍然是维修工程管理迫切需要解决的问题。在维修实践中,主要开展了以下两个方面的工作。

(1) 建立具备坚实理论支撑的维修工程管理理论。目标是维修工程管理理论要有完整的内容表述,简洁的理论模型,明确的理论精髓和清晰的执行标准以及实现路径,即有优秀的普适性、可推广性。

(2) 建立科学的维修工程管理综合评估体系。目标是多源数据的采集和一致性处理(评估动态感知数据的有效性);指标的设计(评估输出结果的表征能力);方法的选取(评估输出结果的合理性和可用性);结果的使用(评估整个体系的自我持续完善能力),评估框架如图9所示。

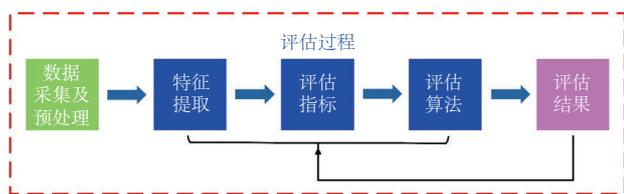


图9 维修工程管理评估框架

Fig.9 Maintenance engineering management evaluation framework

如飞机维修管理 APS 理论^[9]。从 2014 年开始,中国民航大学科研团队与南方航空深度合作,提出了 APS 理论。APS 理论是在完成维修任务所需生产准备(A)、施工程序(P)和工作标准(S)的运行背景下,以人员、工具和技术相关运行特征为约束,对维修安全实施源头管理和过程控制的维修工程管理理论。

维修工程管理本质上属于博弈论与纳什均衡问题。博弈是在一定条件和一定规则下,参与方从各自可供选择的策略中进行选择并加以实施,从中各自取得相应结果或收益的过程。博弈论研究竞争中决策主体(参与方或博弈方)为争取其最大利益而采取有关决策的数学方法。所谓纳什均衡指的是参与人的这样一种策略组合,在该策略组合上,任何参与人单独改变策略都不会得到好处。换句话说,如果在一个策略组合上,当所有其他人都不改变策略时,没有人会改变自己的策略,则该策略组合就是一个纳什均衡。纳什均衡得出的一个关键结论是:“从利己的目的出发,结果既不利己也不利他。”

根据博弈论基本原理,民用飞机维修工程管理中的博弈基本假设(框架)^[10]:参与人:督察(局方)、干部(负责管理员工安全生产工作)、员工。行动:督察行为集合 $A = \{\text{认真检查,不认真检查}\}$;干部行为集合 $B = \{\text{认真管理,不认真管理}\}$;员工行为集合 $C = \{\text{认真工作,不认真工作}\}$ 。信息:博弈三方相互了解可能采取的行动,并知晓对方的收益水平,但是在一次的行动中对方会选择何种具体的行动并不清楚。支付:因偷懒给个人带来的工作轻松的收益记作 Q ,因进行安全检查造成的人情损失(干部和督察)和因努力工作带来的精力付出(员工)记作 R ,因出了不安全事件或被上级发现安全违规被追责处分的记作 C 。均衡:根据各种博弈情况,构建支付矩阵,并寻找所有参与人最优战略的组合,即求解博弈模型。结果:对博弈模型的纳什均衡解进行分析,得到安全管理对策。

纳什均衡博弈用于维修工程管理的主要观点:只有建立督察、干部和员工的工作责任与不安全结果事件相关联

的追责机制,督察、干部才会以结果事件为导向,认真履行监察和检查职责,员工的最优选择是认真按照程序标准执行工作,各层级人员参与安全管理工作的效能才能得到充分发挥。基于各方利益博弈闭环安全体系,无论采取何种具体的管理方法,各层级参与人员无人可以游离于体系之外,暴露系数均有所增加,就会形成一种纳什均衡,这种安全管理的均衡会使各参与人都融入安全检查中,安全行为被互相牵制和互相约束,各参与人的最优策略选择实现上下同欲,个体的行为目标与集体安全目标一致。

4.4 维修施工管理

如何规范维修操作行为,做到按标准施工;如何减少维修差错;如何提高劳动生产率;如何提升维修质量;如何持续增强一线人员的技术能力,培养卓越的飞机维修人员是维修施工管理需要关注的问题,也是航空公司和 MRO 管理者们关注的重要问题。

在维修实践中,主要是开展闭环管道式施工管理。目标是针对具体维修项目(任务),首先明确施工标准(对输出侧的评估);然后厘清完成该维修项目(任务)所需人员、航材、工具和工作环境的清晰的边界,重点是评估所受到的约束条件(对施工全过程的评估);最后随着维修施工的进程进行动态调节。

“闭环管理”概念是由 Singh 等^[11]于 2008 年首次提出的,它注重实现良性循环,依据一个目标而实施全面控制。闭环管道式管理是通过系统的输出值与目标值之间的对比得出差距,针对该差距对事物进行调节与控制,使输出值不断地向目标值靠拢,最终达到理想状态。“闭环管道”也被称为反馈控制系统,目前在维修施工管理中到广泛应用。在维修信息化过程中,维修信息闭环管理起着举足轻重的作用。它是将各环节的输出与预先设定的输出基准进行匹配校对,以此判断各环节执行的准确性,最终实现维修操作的过程化管理和周密化管理。

4.5 预测性维修技术及其应用

预测性维修技术目前面临两个突出的问题:(1)得到故障/剩余寿命的预测结果之后(假定预测结果是可信的),如何指导相应的维修施工(通过维修手册文件),即如何把预测结果合乎规范地应用到维修实践中;(2)针对机载系统/结构,尤其是高价值系统/结构,故障/剩余寿命预测结果的准确性能否满足要求以及如何验证。

在维修实践中,目前遵循的是 IP180 协议^[12]。IP180 协议推荐了针对现有 MPD(基于 MSG-3 编写)的替代程序,允许通过对故障/剩余寿命的预测替代现有维修方案。当

机载AHM系统可以预测到故障并且能够提供足够的时间裕度进行排故时,在经过ISC指导委员会批准后可将AHM排故方式加入MRBR中,作为MPD项目的替代方案。IP180协议的出台触发了三大方面的问题。

4.5.1 标准与规范问题

IP180协议实质上框定了一种从MSG-3到MSG-4(本文暂定)的过渡态。从目前形势判断,该过渡态(即MSG-3融合AHM)会长期存在,直到MSG-4分析方法完全确定下来。过渡态阶段需要解决的主要问题是:(1)机载AHM系统的设计规范(统一设计标准,包括系统的标准构成、驻留位置和推荐的实现形式等)+机载AHM系统能力的定位(业务功能的边界)+综合性能评定验证方法(AHM系统可靠性、准确性的测定);(2)地面配套分析/监测等系统的实现方案;(3)过渡态结束后,主要是制定整机规模的AHM维修逻辑决断方法或决断模型,并基于该方法模型编制基于AHM思想的飞机维修大纲,以及维修计划的定量组构(非固定维修间隔组合优化方法+维修任务组合优化方法)等,这都需要完成充分的理论分析、测试验证和运行评估。

以上都是确保预测性维修模式能够取得成功的重大课题。

4.5.2 故障/剩余寿命预测的技术问题

准确可信的故障/剩余寿命预测结果是后续调度维修资源,提高飞机整体完好性、减少地面停场维修概率,提升机队/航空公司安全水平和运营效益的技术性前提,也是未来民用飞机维修性设计的核心技术要素。故障/剩余寿命预测技术关注的主要问题是:(1)故障/剩余寿命预测的精确性问题:准确感知机载系统/结构的运行状态;提取刻画其性能衰退和演化的关键数据和特征;进而建立预测模型,对其故障/剩余寿命进行长周期精确预测。(2)典型机载系统/结构的数字孪生体:构建动态多维多时空尺度高保真模型,实现对机载系统/结构实体的精准映射;跨协议/跨接口/跨系统的实时双向数据交互,保证孪生模型与机载部件/系统实体性能衰退规律的一致性/真实性。

4.5.3 数学工具问题

开发预测性维修技术主要涉及三种数学工具。(1)深度学习:摆脱解析建模的束缚,搭建深度神经网络,挖掘可用数据中隐含的性能状态信息,监测和评估系统的动态变化趋势,对机载系统/结构当前和未来的健康状态进行预测和管理。(2)概率论和数理统计,尤其是贝叶斯理论框架:从机器学习的角度,我们无法从全局获知事件(A)发生的概率,但是如果能够确认一些事情发生,如事件(B),那么就可以更

新事件(A)发生的概率,从而逼近真实值,这实质上就是一个贝叶斯条件概率问题。(3)预训练大语言模型:随着ChatGPT4的火爆,“大语言模型”进入了人们的视野,但是大语言模型的作用域绝不仅仅停留在自然语言处理(NLP),它同样可以应用于预测性维修领域。

预训练大语言模型的优势^[13]:不需要机器学习专业知识,因为大型语言模型已经预训练完成,开发者无需对机器学习的专业知识有深入理解,只需要知道如何调用模型API,即可使用模型生成相应的输出;不需要训练样本,在许多情况下,只需要向模型提供合适的提示(prompt),模型就能生成相应的输出,而无需大量的训练样本;不需要训练模型,模型已经在大规模数据集上进行了预训练,开发者无需再次训练模型。使用预训练大语言模型时,主要关注个性化设计,开发者主要工作变为设计有效的专业问题,使模型能够理解并生成合适的输出。同时,传统机器学习开发过程存在缺点:开发者需要机器学习专业知识,需要理解不同的机器学习算法,知道如何选择合适的算法,如何设置参数,以及如何解决可能出现的问题;需要收集和准备大量的训练样本,以便训练模型,这通常需要消耗大量的时间和计算资源;需要密切关注最小化损失函数并设计和优化损失函数,以便模型在训练过程中尽可能地减小损失,提高模型的性能。简单来说,使用预训练大型语言模型(LLM)开发的主要优势在于其简化了开发过程,降低了开发的难度和门槛,而传统的机器学习开发则需要更多的专业知识和资源投入。

4.6 先进航空结构修理与改装

在先进航空结构修理方面,复合材料结构的整体成型技术以及损伤的局部性和多发性,对维修技术提出了挑战,虽然长期被作为重点问题研究,但仍然是障碍性问题之一。先进航空结构修理与改装是多学科交叉、理论与工程融合的难点问题。另外,随着国产民机的服役,国内维修企业客改货业务遇到重大发展机遇,需要深入参与改装方案设计、工装研发、改装包开发、适航取证以及工程施工,这也成为国内维修企业发展的最重要方向和利润增长点。

在维修实践中,针对民用飞机复合材料结构修理问题,国内的航空公司和MRO充分借鉴欧美先进结构修理技术经验,在复合材料结构修理方案精细分析方法、修理方案设计与优化方法、计算机辅助工具及结构改装工艺精细优化等三个方面取得了显著成果^[14]。其中涉及的主要问题是:

(1)飞机结构修理方案辅助快速设计与分析

建立结构修理方案辅助快速设计与分析方法,快速制

定超手册结构修理方案,使飞机结构修理变得更经济高效。随着民用飞机设计水平的不断提高和计算机辅助技术的迅速发展,轻量化三维数字模型已应用于飞机系统的运营支持,积累了大量的有效工程经验。因此,将轻量化三维数字模型推广应用于飞机结构修理方案辅助快速设计与分析,建立修理方案辅助快速设计与分析方法和软件工具,能有效降低由结构修理问题引起的运营成本,具体包括民用飞机结构修理快速设计的轻量化模型、基于轻量化模型的典型结构损伤评估方法、基于轻量化模型的结构修理方案辅助快速设计方法、民用飞机结构修理方案快速分析方法等。

(2) 结构健康管理的数据驱动动力学分析

攻克民用飞机结构健康管理中的多科学交叉问题,必须充分利用现有历史数据和实时在线数据,从材料和结构两个尺度、数据和力学分析两个方面同时着手,采用数据驱动的多尺度力学方法对结构的局部和整体健康状态进行评估^[15]。需要突破的重点科学问题包括:结构健康监测系统与结构集成分析、设计、优化、验证的理论基础;数据驱动计算力学方法对损伤进行准确的自动化评估;利用结构历史本构、损伤数据、在线实时状态数据联合驱动动力学分析;数据驱动时空多级多尺度力学的结构寿命预测理论等。

5 结束语

本文给出了民用飞机维修4个方面的价值追求,这是开展民用飞机维修研究的背景;从4个方面总结了现行维修体系的实现路径,这是民用飞机维修的技术现状;对比分析了预防性维修和预测性维修的特征,指出了民用飞机维修未来的发展趋势;详细讨论了民用飞机维修面临的6个方面的需求和对策,并给出了针对科学问题的思考结果。

民用飞机维修是人才、资金和技术密集型产业,是航空公司安全运行的保障、成本控制的要害和技术积累的重要基地。伴随国产大飞机投入运营,民用飞机维修产业进入新的战略发展机遇期。愿更多科研和产业力量投身研究民用飞机运行支持与综合保障,引领民用飞机维修领域的技术变革。

AST

参考文献

[1] 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)

- [2] AP-21-AA-2011-03-R4 航空器型号合格审定程序[S].中国民用航空局,2011.
AP-21-AA-2011-03-R4 Aircraft model qualification approval procedure[S]. Civil Aviation Administration of China, 2011.(in Chinese)
- [3] AP-21-AA-2023-31R2 生产批准和监督程序[S].中国民用航空局,2023.
AP-21-AA-2023-31R2 Production approval and supervision procedures[S]. Civil Aviation Administration of China,2023.(in Chinese)
- [4] AP-21-AA-2008-05R2 民用航空器及其相关产品适航审定程序生产批准和监督程序[S].中国民用航空局,2008.
AP-21-AA-2008-05R2 Airworthiness certification procedures, production approval and supervision procedures for civil aircraft and related products[S]. Civil Aviation Administration of China, 2008.(in Chinese)
- [5] 蒋庆喜.民机L/HIRF防护部件计划维修任务制定标准研究[J].航空标准化与质量,2022(3):1-4.
Jiang Qingxi. Research on standards for planned maintenance tasks of L/HIRF protective components in civil aircraft[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2022(3):1-4.(in Chinese)
- [6] Torzoni M, Tezzele M, Mariani S, et al. A digital twin framework for civil engineering structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2023, 418: 116584.
- [7] 郭丞皓,于劲松,宋悦,等.基于数字孪生的飞机起落架健康管理技术[J].航空学报,2023,44(11):180-198.
Guo Chenghao, Yu Jinsong, Song Yue, et al. Application of digital twin-based aircraft landing gear health management technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(11):180-198.(in Chinese)
- [8] 彭远,郭润夏,申策.维修机位动态精准调度和飞机安全移动路径规划系统开发和应用[J].航空维修工程,2022(2):41-44.
Peng Yuan, Guo Runxia, Shen Ce. Construction of dynamic and accurate scheduling for maintenance stand and aircraft safety planning system[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022 (2): 41-44.(in Chinese)
- [9] 郭润夏,王坤.飞机维修APS理论[M].2版.北京:航空工业

- 出版社, 2020.
- Guo Runxia, Wang Kun. Aircraft maintenance APS theory[M]. 2nd edition. Beijing: Aviation Industry Press, 2020.(in Chinese)
- [10] 薛满合. 民航飞机维修单位安全阿米巴管理模式的研究和应用[D].北京: 首都经济贸易大学, 2021.
- Xue Manhe. Research and application of safety amoeba management mode in MRO[D]. Beijing: Capital University of Economics and Trade, 2021.(in Chinese)
- [11] Singh V P, Ganguly K K. A supporting framework for estimating trade-off between cost and availability at equipment level: development and application in the aircraft MRO industry [J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2020, DOI:10.1108/JQME-01-2020-005.
- [12] IP180 Aircraft health monitoring (AHM) integration in MSG-3 [S]. IMRBPB, 2018.
- [13] Myers D, Mohawesh R, Chellaboina V I, et al. Foundation and large language models: fundamentals, challenges, opportunities, and social impacts[J]. Cluster Computing: the Journal of Networks Software Tools and Applications, 2024, 27(1): 1-26.
- [14] 李顶河, 曹江涛, 郭巧荣. 基于逐层理论的复合材料层合结构分层损伤扩展研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(6): 90-102.
- Li Dinghe, Cao Jiangtao, Guo Qiaorong. Research on delamination damage progressive growth of composite laminated structures based on layerwise theory[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022,33(6): 90-102.(in Chinese)
- [15] 孙侠生, 肖迎春, 白生宝, 等. 民用飞机复合材料结构健康监测技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7): 53-63.
- Sun Xiasheng, Xiao Yingchun, Bai Shengbao, et al. Research on structural health monitoring technology of civil aircraft composites[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020,31(7): 53-63.(in Chinese)
- [13] Myers D, Mohawesh R, Chellaboina V I, et al. Foundation and

Scientific Issues in Civil Aircraft Maintenance

Guo Runxia

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: The value pursuit of civil aircraft maintenance is condensed and presented, including the safety in aircraft design and manufacturing, the observability and controllability of onboard systems, maintenance economy, and the operability and generalizability of maintenance processes. This paper have sorted out and summarized the implementation path of the current civil aircraft maintenance system, including initial airworthiness, maintenance technology system, maintenance cost control, and universality of maintenance technology and management. A comparative analysis was conducted on the main characteristics of preventive maintenance and predictive maintenance, indicating that predictive maintenance mode will be the core feature of future civil aircraft maintenance. Detailed discussion was conducted on the six aspects of the needs and strategies faced by civil aircraft maintenance, as well as considerations on scientific issues.

Key Words: civil aircraft maintenance; maintenance philosophy; predictive maintenance; scientific issues

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

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(62173331); Tianjin Science and Technology Plan Project(23JCY-BJC00060)