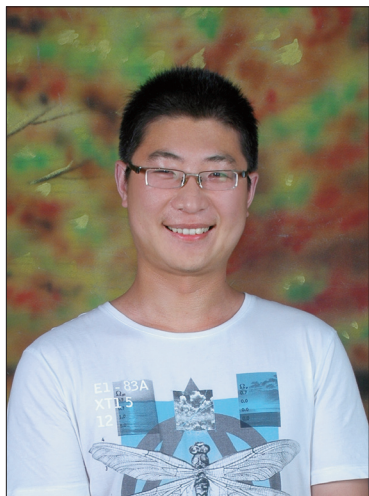


PHM 体系中的航空器维修 决策理论研究*

Study on Aircraft Maintenance Decision Theory in PHM System

南京航空航天大学 刘鹏鹏 左洪福 孙见忠



刘鹏鹏

博士研究生,主要研究方向为航空发动机状态监测与故障诊断、故障预测、系统测试性、维修决策与优化等,参与多项国家自然科学基金以及3项大型客机类横向、纵向课题研究,主持省级科技创新基金1项,发表论文20余篇,其中9篇被EI收录。

航空器在运行过程中会产生很多非计划维修任务,据统计,航空器

PHM体系要求航空器维修决策策略从由事后维修或定时维修转变为视情维修。实际应用中,维修决策系统需要依赖于众多相关的故障信息,需要PHM体系完成对机载信息的监控、存储、传送以及故障的预测与诊断。PHM体系不是为了直接消除故障,而是为了了解和预计故障何时将发生,或在出现未料到的故障时,维修决策系统将快速确定触发维修工作。

的非计划维修工作量高达整个维修量的40%。非计划维修会产生大量的维修成本,并会降低航空器的安全性。这是因为非计划维修工作具有突发性特点,无法事先安排好维修工作计划,而且经常要求在短时间内完成,不仅工作强度大,而且航材订购费用高,甚至引起飞机缺件停场,增加维修成本^[1]。在航空器运行过程中必须降低非计划维修的数量,正是在这一背景下,国内外开展了对航空器开展预测与健康管理(Prognosis Health Management, PHM)的研究,研究范畴包括信息测试、状态监测、诊断、预测和维修决策等方面,其主要

的研究目的就是根据获取的航空器故障信息来降低维修任务中的非计划维修比重,尽力将非计划维修转变为计划维修。

在航空器维护维修方面,目前主要采用以定期维护和事后维修为主的方式,采用多、勤、细来预防系统故障。随着状态监测技术的发展出现了视情维修理论,能够根据航空器的故障信息,临时安排相应的维修任务,解决了部分非计划维修问题,但是各视情维修决策系统没有对维修大纲的制定产生反馈,在实际开展维修活动工作中,往往无章可循,具有很大的维修工作随意性,缺乏必要的

* 国家自然科学基金与中国民航联合资助基金重点项目(60939003)、江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXLX12_0164)资助。

规定,具有很大的决策风险。

根据 PHM 体系及其组成,需重点研究维修决策方面的问题,在视情维修策略的基础上提出了维修决策系统与维修大纲调整的相关联的策略,使得视情维修的开展方法、维修工作计划的安排及调整都在维修大纲的规定和控制下。结合智能诊断、预测分析,综合历史维护经验,则能及时有效地掌握飞机的健康状况,及时发现和报告飞机潜在故障趋势及已经发生的故障,安排维修计划。尽力使得非计划维修能够被提前制订维修方案,减少非例行工作量所占比例,从而提高维修的效率,减少飞机运行和维护的费用,同时提高飞机的利用率和飞行安全性,实现对飞机全系统进行健康管理^[2-4]。本文从 PHM 体系结构组成划分、维修决策在 PHM 体系中的功能等角度出发,开展维修决策理论在 PHM 体系中的应用框架,PHM 体系对维修决策的功能需求研究、PHM 体系中维修决策理论的研究核心、若干维修决策理论等研究。

航空器 PHM 体系

PHM 体系是一种建立在先进传

感器、信息处理技术、各种有效的智能模型基础上的具有故障检测、诊断、预测、决策功能的综合管理系统,其目标就是保证航空器能够完成持续适航的要求^[5-6]。PHM 体系对于收集航空器状态信息提出了新的要求,为了满足这些要求,必须开发出能够提供与系统属性相关信息的先进的传感器;从先进传感器采集的信息中可以获取可供 PHM 体系中集成的各种算法和智能模型使用的信号特征以及关联信息;PHM 体系中采用推理机制来实现系统诊断设计,具有很强的故障检测和隔离的能力,根据选择的系统或零部件关键参数的实测数据来预测剩余寿命;这些分析结果可以用来判断整机、系统和零部件的状态是否安全,管理飞机技术状态(更新飞机的状态纪录),根据现有的维修计划,进行调整或重新编制维修工作项目。PHM 体系结构基本组成如图 1 所示。

PHM 体系结构是从零部件级到整个系统级、整机综合考虑,主要功能包括:(1)状态监测;(2)故障诊断;(3)故障预测(4)剩余寿命预测;(5)关键零部件状态持续跟踪;(6)系统

级性能衰退趋势跟踪;(7)维修决策与资源整合管理^[6]。

PHM 体系中维修决策

PHM 体系所具有的强大功能需要落实在维修决策上,最终体现在所制定的维修工作是否合理中。航空器 PHM 体系可以通过状态监测、故障诊断、故障预测、剩余寿命预测和异常状态推理程序来确定飞机可能出现的故障及未来发展趋势,并生成状态报告。评估系统和部件的健康状态,分析和预测是否会出现潜在的故障。PHM 体系中的维修决策的功能体现在合理地安排维护维修工作,最终实现计划性的视情维修,避免耗时长、成本高的维修延误,有计划地解决维修问题,降低其维修和运营成本^[7]。

PHM 体系中维修决策的输入信息主要包括三大类:一是故障诊断专家系统得到的故障诊断结论或者是机务人员的检查报告、机组人员报告;二是航空器系统或零部件健康状况趋势分析以及预测系统分析得到的系统潜在故障信息和剩余寿命;三是历史维修记录信息。

维修决策系统在获取这些信息后,依据维修大纲的规定,结合最低设备清单/构型缺损清单(Minimum Equipment List / Configuration Deviation List, MEL/CDL)、航班计划、定期维修计划、可用航材情况等维修支持资料,进行综合考虑,做出是否安排维护维修工作、何时进行维修、何地等进行维修等决定。PHM 实现了由传统的基于传感器的诊断转向基于智能系统的预测,最终实现准确的时间对准确的部位采取准确的维修活动,它极大地促进了视情维修策略取代事后维修和预防性维修的进程。

PHM 体系中的维修决策理论

1 维修决策的意义

PHM 体系要求航空器维修决策策略从由事后维修或定时维修转变

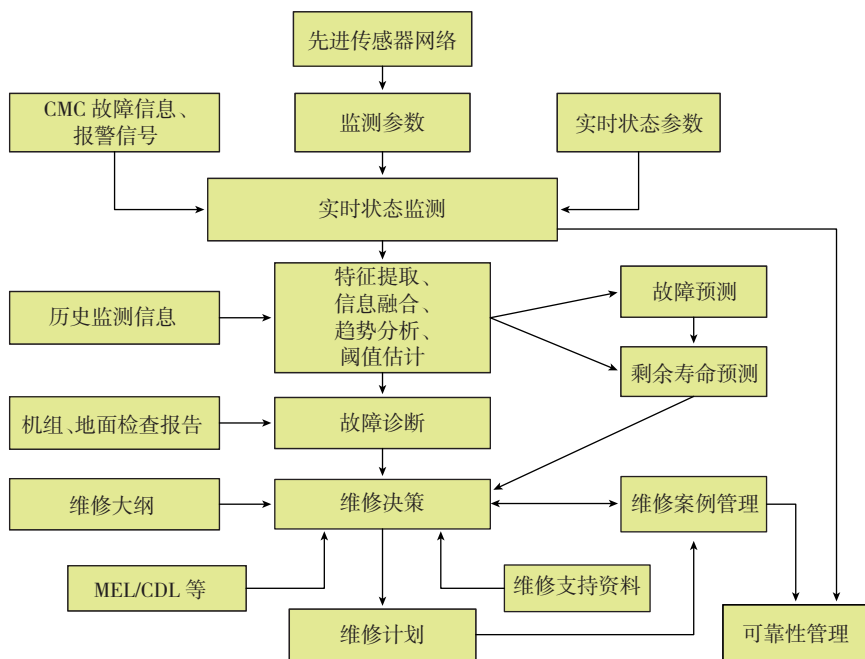


图1 PHM体系结构基本组成

为视情维修。实际应用中,维修决策系统需要依赖于众多相关的故障信息,需要 PHM 体系完成对机载信息的监控、存储、传送以及故障的预测与诊断。PHM 体系不是为了直接消除故障,而是为了了解和预计故障何时将发生,或在出现未料到的故障时,维修决策系统将快速确定触发维修工作。PHM 体系下的维修决策活动具有以下优点^[8]:

(1) 提高飞机安全性,能够及时合理地处理故障。

(2) 提高航空器利用率。根据任务安排以及航空器零部件、系统故障诊断,故障预测,寿命预测结果等综合考虑维修活动。

(3) 降低使用寿命周期费用。根据将故障准确隔离到单个 LRU 或 SRU 的故障信息,确定合理的维修地点、方式等可以缩短修理时间,减少维修成本。

(4) 通过减少备件、保障设备、维修人力等保障资源的需求,合理确定维修支持资料,降低维修保障费用。

(5) 减少计划外维修次数,将一些非计划维修工作变为计划维修工作。

2 PHM 体系中维修决策理论的研究核心

定时维修是一种简单方便的维修决策策略,如果所有的维修工作都包含在计划维修中来,那么维修工作的效率及费用等将会大大降低。视情维修的目的不是取消定时维修策略(计划维修),而是尽力减少非计划维修,通过收集航空器状态、故障信息、预测结论来实现动态维修计划的制定,使其更加符合实际的维修需要,这是 PHM 体系中维修决策理论的核心。

在 PHM 体系中,新型维修决策理论需从如下 5 个方面开展研究^[9]:

(1) 关于维修任务形式描述的研究;

(2) 确定 PHM 体系中决策模型的输入信息种类、形式;

(3) 综合维修决策模型研究;

(4) 层次性维修决策研究;

(5) 维修决策模型的应用验证。

在航空器研制过程中需要制定维修大纲,维修大纲需要满足航空器的维修要求,包括对航空器维修任务的规划设计(包括工作方式及等级),需要详细确定其维修时间、维修等级、程度等内容,这些内容应属于维修决策的研究范畴。在制定维修大纲时就需要考虑 PHM 体系中收集到的各种信息,研究综合利用这些信息的方法使得维修大纲的改变有章可循,建立依据零部件或系统状态信息的维修大纲部分内容动态调整的机制。

目前,国内外关于设备维修决策的研究有很多,但是大多依靠经验确定维修范围和各零部件的修理等级或是检查间隔,制定的维修工作任务存在偏离航空器实际维修需要的现象。

为了解决这些问题,需根据设备的日常点检记录、状态监测和诊断信息,运用数据分析方法,综合专家知识,分析设备的衰退或劣化程度,故障隐患的发展趋向,确定维修类别、部位及时间,在故障发生前有计划地进行适当的维修,PHM 体系中的新型维修决策理论区别于视情维修之处在于通过建立维修大纲的动态改变机制,在

PHM 体系获取信息支持下将非计划维修转变为计划维修(也就是降低了航空器发生非计划维修的可能),而视情维修只是根据监测信息决定采取的维修活动,并不能从根本上解决非计划维修带来的问题,只是解决了出现非计划维修任务后的底层工作响应。这是 PHM 体系中新型维修决策理论与视情维修理论的区别,但是二者存在着很大的共同之处。

PHM 体系中的维修决策理论的实现途径

1 维修决策理论的组成

维修决策理论采用多维策略下的维修任务决策与维修资源支持,需要形成一系列理论方法、标准、技术和体系,如用马尔可夫决策模型等方法结合机会维修建模方法,来决策多部件的维修程度和维修范围。这些使用阶段的维修任务决策支持方法,不仅可以根椐实际状态来决策维修任务的种类、工作的间隔等,也有助于改进初始的维修方案,从而实现维修任务的闭环控制。PHM 体系中维修决策理论的实现框架如图 2 所示。

目前,大多数维修决策的研究都集中在维修时机、机会维修、成组维修、维修排故等方面,以达到提高安全性、延长使用寿命、节约维修成本的目的。维修决策研究在工程实

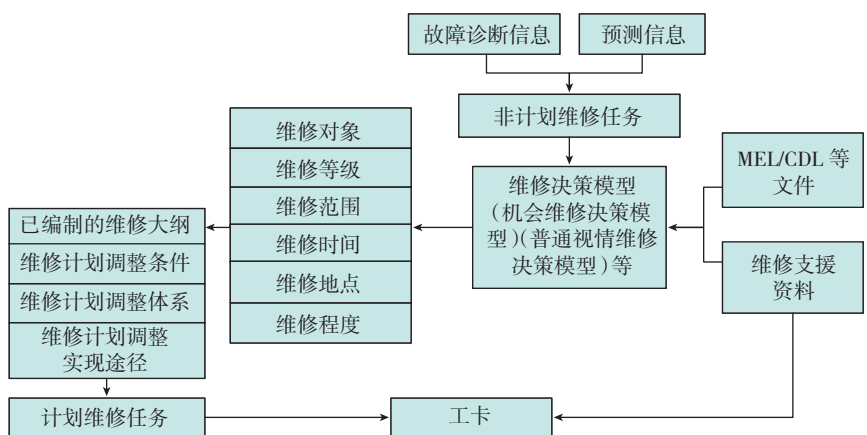


图2 PHM体系中维修决策理论的实现框架

践普遍采用的以可靠性为中心的维修(RCM)或美国航空运输协会维修指导小组(MSG)整体上还只是停留在框架式、流程和经验决断的水平上;理论上建立和发展的各类名目繁多的模型却只能处理单部件和简单系统,无法解决航空器这类复杂的工程大系统的全系统全寿命维修优化问题;可靠性和以可靠性为基础的预定维修理论(RCM)以及以状态监测为基础的视情维修理论(CBM)还不能在理论和方法上进行统一。目前可用的方法与模型较少,更难建立普适模型。因此,从航空器维修工程需求出发,PHM体系中的维修决策理论的研究具有重大的理论意义和实际应用需求。

2 若干维修决策理论

2.1 多智体协同维修决策技术研究

由于航空器各部件之间结构和功能上的关联性和复杂性,采用单一模型或方法难以实现航空器全系统维修范围和修理级别的确定。采用分布式建模的方法,可降低建模的复杂性,基于模型或知识推理,确定航空器维修范围。多智体协同维修决策系统利用推理机制(基于模型或知识)和特定的领域知识,通过推理产生结论。最后综合各方法决策结果的输出,形成最终结论。

2.2 定时更换策略下的维修间隔确定及延寿决策

目前,大部分关键部件采用定时更换的策略,这是维修大纲中计划维修的制定依据。定时维修在传统的维修决策中具有重要意义,存在着两方面的原因,一是由于结构和使用环境等限制,无法进行有效监测;二是出于安全因素考虑需要严格遵守适航的限制。在全寿命周期内,随着机型的成熟、使用和维修数据的积累,对于使用定时更换策略的部件,可以结合设计、使用环境和维修环节的相关数据,在符合适航管理限制的前提下适当延长维修间隔,进行延寿决

策,实现安全性和经济性的有机结合;另外从设计研发的角度来看,对延寿展开研究对于定时更换部件的定寿也具有指导意义。

从定时维修角度出发,研究基于定时维修的可靠性预计与分配方法研究,在产品实际设计与制造过程

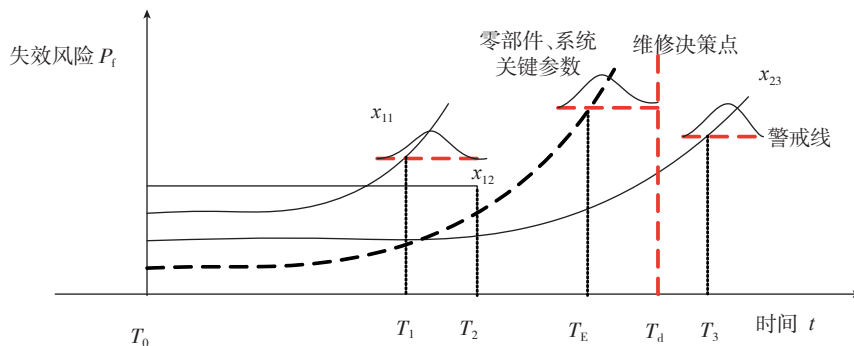


图3 组合维修决策模型与优化方法

中,综合权衡安全性和经济性,综合评估基于使用环境与设计的维修间隔,并将相关信息反馈到产品设计环节。例如,研究基于使用环境的小样本使用可靠性评估与寿命预测方法研究,在评估使用环境基础上,以性能衰退为先验信息,结合使用、检测、送修等信息,估计参数,计算剩余寿命。研究航空器零部件、系统延寿策略的可靠性预测和风险控制策略研究,建立航空器零部件、系统延寿模型的效用函数,进行不同延寿策略的风险评估及策略选择。

2.3 组合维修决策模型与优化方法

PHM体系中维修决策理论需要解决传统维修决策中存在的复杂性,体现在以下三方面:(1)定时维修和视情维修同时存在,在维修决策中如何协调2种维修策略,将非计划维修变为计划维修;(2)零部件、系统的维修决策需要的信息复杂多变;(3)多零部件、系统之间的相互作用,增加了维修决策分析的复杂性。

维修方案 $S(\dots, x_{ij}, \dots)$ 的制定影响下次维修时间 T ,反过来维修时间 T 的预期影响本次维修方案的制

定,2个决策变量之间互相影响,相互制约。其中, x_{ij} 代表第 i 系统第 j 个零部件。如果下次维修时间预期选在 T_E ,即由零部件、系统性能衰退而决定的维修任务,为避免在本次与下次的维修工作之间出现因部件 x_{11} 和限寿件 x_{12} 的失效引发的非计划

维修任务,则本次维修方案中必须维修部件 x_{11} 、 x_{12} ,同时造成维修总成本 E_E 升高;如果下次维修工作选在 T_3 ,即由于零部件 x_{23} 功能衰退而导致产生维修任务,同样处于安全风险的考虑,则本次维修方案中必须维修部件 x_{11} 、 x_{12} ,选择不同的维修工作,组合维修决策模型与优化方法示意图如图3所示。

结束语

文中分析了航空器PHM体系的组成结构,总结了PHM体系的主要功能。针对PHM体系中对于维修决策理论的新需求,重点开展了PHM体系中的航空器维修决策理论的相关研究,指出了维修决策理论的研究核心,分析了PHM体系中的维修决策理论的组成结构,并研究了包括多智体协同维修决策技术研究、定时更换策略下的维修间隔确定及延寿决策、组合维修决策模型与优化方法等若干新型维修决策理论。

本文共有参考文献9篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 夏宛 三丰)