

机载设备视情维修及其决策建模分析^{*}

吴明辉¹ 阮永贵² 韩海舰¹

(1. 海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001; 2 中国人民解放军 92074 部队 宁波 315000)

摘要: 针对传统维修方式因“维修不足”或“维修过度”而不可避免地造成安全风险和投入浪费等问题。首先,介绍了视情维修产生的背景及视情维修的实施依据,并分析了视情维修的特点;然后,为方便机载设备视情维修决策建模,明确了视情维修决策的内容及目标;最后,从机载设备劣化模型的角度,研究并分析了比例危险模型、冲击模型、延迟时间模型及随机过程模型等常用的视情维修决策建模方法。研究对视情维修方式在机载设备中的应用具有一定的理论价值。

关键词: 视情维修;视情维修决策;机载设备

中图分类号: TN207 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.99

Analysis of on condition maintenance and decision modeling for airborne equipment

Wu Minghui¹ Ruan Yonggui² Han Haijian¹

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. PLA Units; 92704, Ningbo 315000, China)

Abstract: Because of “inadequate maintenance” or “excessive maintenance”, traditional maintenance mode inevitably cause problems, such as security risk and wasteful investment; Firstly, introduced the background and implementation basis of on condition maintenance, and analyzed the characteristic of on condition maintenance. Then, to facilitate on condition maintenance modeling for airborne equipment, defined the content and objectives of on condition maintenance decision. At last, from the perspective of airborne equipment’s deterioration model, researched and analyzed the common methods of on condition maintenance decision modeling, such as proportional hazards model, shock model, delay time model, stochastic process model and so on. The research has a certain theoretical value for on condition maintenance mode in application to airborne equipment.

Keywords: on condition maintenance; on condition maintenance decision; airborne equipment

1 引言

维修是对设备进行维护和修理的简称,维护是为确保设备能够完成期功能所作的一切工作,而修理是为恢复设备期望功能所进行的所有活动。也可以说维修就是为保持设备处于完好工作状态所进行的一切工作。

随着机载设备作用与地位的日益突出,对其任务可靠性提出了更高的要求;同时,因其技术复杂程度高,对其进行维修维护需要更高的技术及经济投入。传统维修方式因“维修不足”或“维修过度”不可避免的造成安全风险和投入浪费^[1],可用性与经济性的矛

盾日益突出,已不能适应机载设备的维修需求。

在对视情维修产生的背景、实施依据及特点进行分析的基础上,研究了机载设备视情维修决策的内容、目标,并从机载设备劣化模型的角度来对视情决策建模方法进行分类、比较和综述,对机载设备视情维修的实现具有一定的理论及应用价值。

2 视情维修概述

2.1 视情维修产生的背景

从时间历程上来看,设备的维修主要经历了基于“事件”的事后维修、基于“时间”的计划维修及基于“状

收稿日期:2014-11

^{*} 基金项目:武器装备预研基金支持(9140A250708JB1402)项目

态”的视情维修3个发展阶段。从事后维修到计划维修,再到当前的视情维修是发展的必然。图1从技术

支撑、维修依据及维修期望的角度给出了设备维修方式的发展历程。

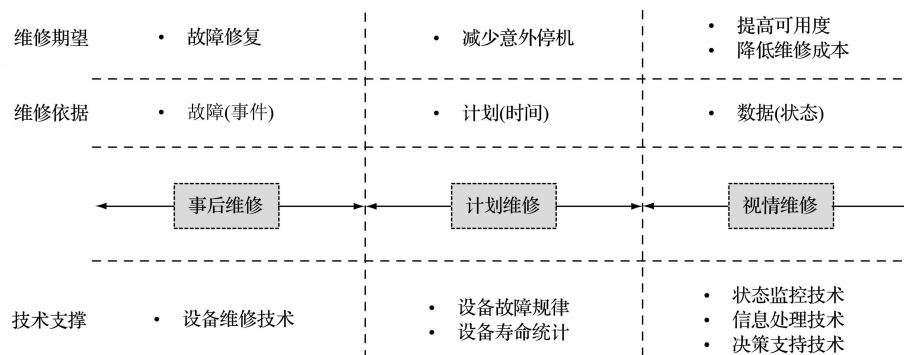


图1 设备维修方式发展历程

早期,设备比较简单,技术复杂程度低,维修也相对容易,维修只是作为使用的一种辅助手段,不会在设备正常运行过程中采取主动的维修措施,只有在设备出现故障或异常,不能正常运行的情况下,才会实施修理并进行故障排除,采用的是一种“不坏不修,坏了才修”的被动排故维修观念,即事后维修方式。其以事件(故障)为依据,较为被动,不可避免的造成意外停机,打乱正常运行使用计划,经常需要进行抢修,由于修理准备时间有限,修理不彻底、效果不理想;另外,还会因一些较为关键部件的小故障造成整个系统不能正常工作,有的故障还会危及系统、环境及人身安全,具有较大的风险性。

随着设备自动化程度及复杂程度不断提高,因设备意外停机所造成的损失也不断增大,为了降低事后维修的损失和风险,逐渐产生了以“预防为主”的维修观念,通过制定设备维修方案,确定维修时机和内容,在设备运行过程中主动采取维修活动,以预防意外停机发生的几率及故障造成的危害,采取的是一种“防患未然,提前计划”的主动维修观念,即计划性维修方式(或称定期维修方式)。计划性维修以时间为依据,可以有计划、有准备地进行维修活动,能够一定程度上避免设备的意外停机及故障危害。但是,计划性维修根据的是一批设备的故障统计规律和使用经验来确定维修周期的,只依据设备的工作时间,而没有考虑当前设备实际的运行状态及设备退化过程的随机性,缺乏针对性,维修过早(过频),容易使系统零部件过多的更换、修理,造成人力、物力的极大浪费,频繁的拆卸会造成额外的人为损害,降低设备的使用寿命;另一方面,如果维修不及时,又会使设备“带病工作”,引起其他连锁故障,甚至使系统瘫痪,造成严重后果。因此,如图2所示,采用计划维修会不可避免地因“维修不足”或“维修过剩”导致潜在风险或额外维修等问题。

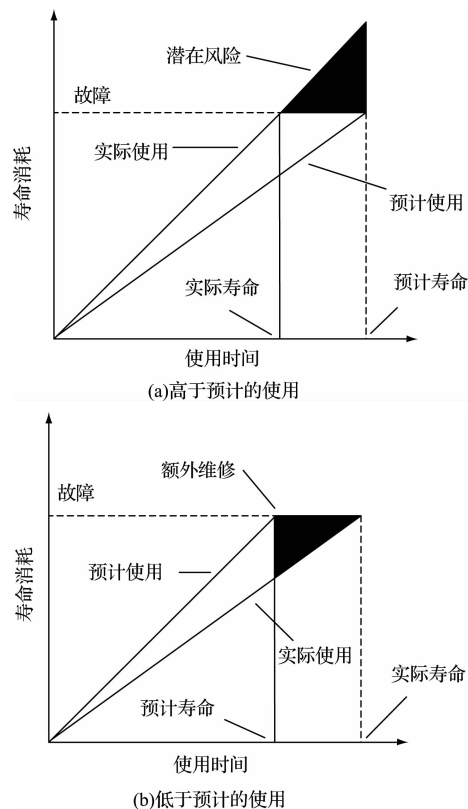


图2 计划性维修的不足

一方面,机载设备在信息化、智能化水平不断提高和性能不断提升的同时,却因技术复杂性使得维修成本与运行可靠性之间的矛盾日益突出;另一方面,以传感器技术为代表状态监测技术和以计算机为中心的信息处理技术得到了快速的发展,为设备的状态监控及运行状态的实时处理评估提供了可能。在维修需求牵引及先进技术的推动下,产生了一种通过监控设备的运行状况,再根据实际情况及时作出处理的维修方式,即视情维修方式。

2.2 视情维修的实施依据

视情维修是一种能够适应当前机载设备保障需求的

新的维修方式,其根本目的是在正确的时间对正确的部件进行正确的维修。美国航空界最早提出了视情维修的概念^[2],目前视情维修已成为美军 F-35 联合攻击机项目中实现预测与健康管理^[3]及提高设备任务可用性和经济可承受性的关键一环。

视情维修的实施是以检测到的设备的状态信息为依据,这种维修策略的前提假设是故障不会瞬间发生,它应有一个退化的过程。并以此定义了设备退化过程中的两种故障状态——功能故障和潜在故障。

1)功能故障(Functional failure)指设备已丧失某种规定功能的状态,即传统意义上的功能失效。

2)潜在故障(Potential failure)是指设备临近功能故障且可通过一定征兆辨别的状态。

设备从潜在故障到功能故障的之间的间隔称为 $P-F$ (potential failure-functional failure)间隔,如图3所示,“P”点表示系统性能已经恶化,并发展到可识别的程度。“F”点表示潜在故障已变成功能故障,系统状态已发生质变,失去了功能。视情维修的关键任务是在 $P-F$ 间隔内探测到故障征兆并实施有效的预防性维修。

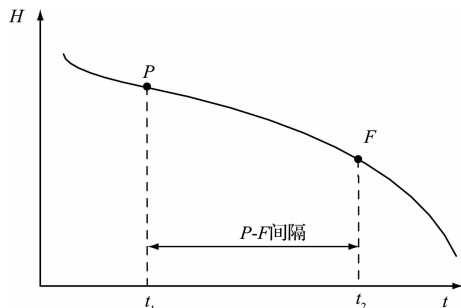


图3 设备 $P-F$ 间隔

2.3 视情维修的特点

与事后维修及计划维修相比,视情维修具有以下几个明显的优点:

1)具有更强的维修针对性。视情维修依据的是设备真实状态,而不是提前的计划,通过设备的实际来安排“何时修”,“修哪里”和“怎么修”,因此具有更强的针对性。

2)具有更好的计划合理性。视情维修也需要安排计划(维修决策),但其计划的安排是依据设备的实际情况,在设备临近故障前进行维修,既能保证避免故障的发生,又能充分利用设备的有效寿命,有效克服了因“维修不足”或“维修过剩”导致的潜在风险或额外维修等问题。

3)具有更强的管理灵活性。通过视情维修的决策可以综合考虑备品备件、维修资源等各方面的因素,更加灵活地开展各项维修管理工作。

由此可见,视情维修是以状态监控数据及数据处理为依据,通过制定合理的维修决策,达到提高设备可用度及经济效益的目标。因此,视情维修决策是视情维修中至关重要的一环。

3 机载设备视情维修决策分析

视情维修决策是实现视情维修的核心技术,其目的是依据设备的实际状态,在设备临近故障前进行维修,既能保证避免故障的发生,又能充分利用设备的有效寿命。

3.1 机载设备视情维修决策的内容

在现有维修体制下,机载设备视情维修决策内容主要包括维修项目决策和状态监测时间的决策^[4]。

1)维修项目决策

即确定最佳的维修项目,经常采用的维修项目包括:

- ①不采取任何维修措施,继续监测;
- ②预防性维修;
- ③修复性维修。

不同的维修项目,代表了不同的维修级别和维修投入。在以往的维修实践中,为减少意外停机时间,往往一发现故障征兆或运行异常,立即进行维修更换,这不但会使得设备的有效寿命不能充分利用,而且会造成大量的人力和经济上的浪费。因此,根据设备的实际状态进行维修项目决策,从而使维修活动合理有效地进行,对于提高设备可用度,降低维修成本都是非常重要的。

2)状态监测时间的决策

在维修项目决策选择“不采取任何维修措施,继续监测”后,需要决策下一次的监测时间,即进行状态监测时间 T_i 的决策。如果 T_i 较短,通过频繁的状态监测可降低故障漏判概率,但不可避免的增加监测费用,降低设备的可用时间;而 T_i 较长,则会有故障漏判的发生。另外为获取初始信息,还要对首检时间 T_1 进行决策。

设备的退化过程可通过潜在故障阈值 P_1 和功能故障阈值 I 划分成3种状态:可接受状态、潜在故障状态及功能故障状态;设备的退化状态同视情维修决策内容的对应关系如图4所示。

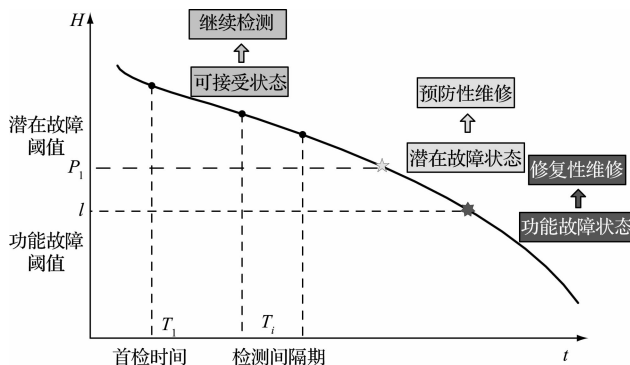


图4 设备退化状态同视情维修决策内容的对应关系

3.2 机载设备视情维修决策的目标

要进行设备的视情维修决策,还需要明确决策目标,根据设备不同应用场合,常用维修决策目标主要包括:

1)安全性目标,常用于某些对设备运行安全性要求较高,故障发生后风险较大的场合。其主要维修目标之一就是

是要尽量避免故障的发生,将风险降到最低,确保相关人员、设备及环境的安全;

2)可用性目标,适用于长时间连续工作设备的视情维修决策建模,可用性用于衡量设备可用时间在总时间中所占的比重,衡量指标有单位时间内总的停机时间期望值最小、系统的可用度期望值最大等;

3)经济性目标,是对维修及维修后果费用的一种衡量,是最常见的视情维修决策目标,其常用指标为单位时间维修费用期望值最小,总的维修费用最小等;

4)任务性目标,是对设备短时任务执行能力要求较高的场合,其主要指标为任务可靠性。

在其他应用场合下,还包括附加效益目标、失效概率目标等。

3.3 机载设备视情维修决策的特点

通过视情维修决策的内容及目标分析可以发现,视情维修决策是一个具有如下特点的决策建模及优化问题:

1)视情维修决策是一个多决策变量的决策建模问题,视情维修决策的决策变量包括维修项目决策和状态监测间隔期决策等;

2)视情维修决策是一个多约束条件的决策建模及优化问题,视情维修决策通常需要对决策变量进行约束,是一个多约束条件的建模及优化问题;

3)视情维修决策是一个多目标的决策建模及优化问题,视情维修决策的目标包括设备的可用度、维修费用率等。

4 机载设备视情维修决策建模分析

视情维修决策建模依据不同的角度有不同的分类方法,例如依据决策目标来分类,常用的视情维修决策方法有最小成本现值法、面向风险分析的方法、可靠度限定法以及面向任务的方法等;从建模决策变量的特点来分又可分为确定性模型、基于概率统计理论的模型和基于随机过程理论的模型等。

从机载设备劣化模型的角度来对视情决策建模方法进行分类分析,最常用的视情维修决策模型有:比例危险模型、冲击模型、延迟时间模型、随机过程模型等。

4.1 比例危险模型

比例危险模型(proportional hazards model, PHM)是由Cox在1972年提出的一个基于数理统计理论的经验模型,因此,又称为Cox模型。该模型能够较好的刻画系统寿命周期与相关协变量的内在联系,并可确定各协变量对系统风险的影响程度,在可靠性及维修等领域得到广泛应用。

PHM在视情维修决策领域应用的一大优势是能够将设备的故障率(设备状态)同其寿命和状态参数监测有效的联系起来,在给定优化目标函数后,可以获得视情维修的预防性维修阈值。因此,国内外相关研究人员对基于PHM模型的视情维修决策开展了大量理论及工程应用研究。加拿大多伦多大学的Jardine教授及其团队开展了大量基于PHM模型的视情维修工程应用研究,结合Markov模型及

费用等优化目标开发了视情决策软件包EXAKT,并广泛应用在了机械和运输等领域;左洪福等人^[5]利用Weibull比例风险回归的建模方法,采用最小维修成本、最大可用度策略研究了航空发动机最优维修决策阈值。

PHM是建立在可靠性理论及数理统计理论的基础上,多用于研究一批设备共性的问题,对独立运行的单台设备的视情维修决策问题缺乏有效的手段。

4.2 冲击模型

冲击模型(shock model, SM)是可靠性理论工程中的一种典型的模型,以物理损伤机制为背景,研究遭受冲击设备的寿命、可靠性及失效等性质,在飞行器起落架、制动系统、电网系统中得到广泛应用。按照冲击对设备所造成的影响进行分类的话,冲击模型又可分为4种类型^[6]:

1)累计损伤增加模型,即每次冲击都会对设备造成损伤,而且损伤是累计的,当累计量超过给定的阈值,设备发生故障;

2)累计投入增加模型,即每次冲击都会造成成本投入的增加;

3)故障率增加模型,即每次冲击都会增加设备的故障率,直到不能接受的故障率;

4) δ 冲击模型,当两次冲击间隔时间小于给定的阈值 δ 时,设备直接发生故障,而间隔大于 δ 时,冲击不会对设备造成影响。可见,冲击模型具有很强的应用针对性。

在视情维修领域,冲击模型多用于解决累计冲击损伤条件下的维修决策问题。LI Wenjian等人^[7]以维修费用为优化目标,以检修间隔时间及维修项目为决策变量,研究当设备的累积冲击损害超过给定阈值的视情维修问题;而LAI Mintasi等人^[8]研究了设备受2种不同冲击模型(一种会提高故障率;另一种则直接导致故障)下的视情维修决策问题。

基于冲击模型的方法从设备的失效机理出发,比较贴合实际,但针对性过强,多用于对设备的失效机理有较清晰认识的情况下。

4.3 延迟时间模型

延迟时间模型(delay time model, DTM)是由A. H. Christer在1973年提出并经过多年完善丰富的一种维修检测模型。延迟时间模型将故障分成2个阶段:初始缺陷时间 U 和故障延迟时间 H ,如果在 U 时刻对产品进行检测,缺陷就可以被发现,如果缺陷不被发现,那么在经过延迟时间 H ,缺陷就会导致故障,其示意图如图5所示。

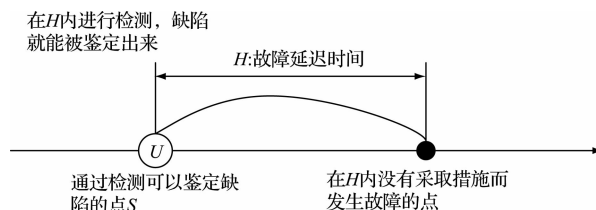


图5 延迟时间模型

延迟时间模型应用于视情维修决策时,为功能检测问题提供了一个可行的基础。早期的研究中,Christer 等假设初始时间服从均匀分布,并与故障时间相互独立,这种假设使得更新周期内的故障风险、单位时间内的维护费用及停工损失等均为检测间隔期的函数;后来,针对不同的应用对象,对初始时间和延迟时间的分布类型进行了大量的研究工作,改进的延迟时间模型考虑了非理想检测且初始时间与延迟时间服从任意分布的情况,大大增强了延迟时间模型的实用性。严骏等人^[9]针对设备检测周期问题,基于延迟时间理论,建立了区分设备初始点检间隔期与重复点检间隔期的设备 2 阶段点检周期模型。

时间延迟模型同设备故障 P-F 间隔模型有着一定的相似性,能够较好的反映设备的退化过程,具有良好的应用前景,但其模型缺乏有效数学分析基础,通常需要同其他模型配合使用。

4.4 控制限策略的随机过程模型

控制限策略即通过对设备进行定期或不定期的检测,获得设备的劣化水平或健康状态水平,并与给定的预防维修阈值比较,进而制定维修策略,采取相应维修措施。采用控制限策略的根本是要建立设备退化过程的模型,然后结合设备的实际运行状态和维修工作内容建立视情维修决策模型,最后利用维修目标进行模型优化。由于设备退化过程存在着随机性,利用随机过程理论进行视情维修决策是一种可行的途径。常用于视情维修过程建模的随机过程包括:Markov 过程、Gamma 过程、Wiener 过程等。赵飞^[10]结合发动机监测信息和故障信息,采用隐马尔可夫模型对发动机随机劣化过程进行建模,以长期运行过程中单位时间内维修成本最低为目标,开展了视情维修决策研究;谷玉波等人^[11]通过研究产品故障发生的机理,建立了基于 Gamma 退化过程的状态空间模型,运用 EM-PF 参数估计方法对模型中的参数进行求解,建立了以费用最小为目标的维修决策模型,确定了最优的维修更换时间并实现维修决策的优化。

基于控制限策略的随机过程的建模方法仅需利用数据驱动的方式就能比较接近实际地刻画设备的退化过程,不要求对设备的故障机理有较多的先验知识,而且具有较好的数学解释和分析能力^[12]。因此,控制限策略的随机过程模型可应用在具有缓变退化过程设备的视情维修决策建模中。

5 结 论

设备的使用与发展促进了维修认识的深化,推动着维修理论变革和维修技术的发展。视情维修是现阶段较为先进的维修理念和方式,可有效解决“维修不足”和“维修过剩”等传统维修方式所存在的问题,在提高设备可用度的同时,降低设备的维修费用。

从视情维修产生的相关背景出发,在明确机载设备视

情维修决策的内容及目标的基础上,从机载设备劣化模型的角度,对比例危险模型、冲击模型、延迟时间模型、随机过程模型等常用的视情决策建模方法进行了分类分析,为不同的机载设备根据具体实际,选择合适的视情维修决策建模方法提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 张龙,黄文艺,熊国良,等. 基于 TESPAP 与 GMM 的滚动轴承性能退化评估[J]. 仪器仪表学报,2014,35(8):1772-1779.
- [2] 陈光福. 国外军事电子装备维护保障测试技术综述[J]. 国外电子测量技术,2007,26(2):1-5.
- [3] 于功敬,熊毅,房红征. 健康管理技术综述及卫星应用设想[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(3):227-232.
- [4] 周成刚,毛亮,张煜昕. 基于 MEMS 传感器的船载天线振动监测系统研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(5):59-62.
- [5] 左洪福,张海军,戎翔. 基于比例风险模型的航空发动机视情维修决策[J]. 航空动力学报,2006,21(4):716-721.
- [6] 李玲,成国庆,唐应辉. 带预防性维修的冲击模型最优检测更换策略[J]. 山东大学学报:理学版,2011,46(9):122-126.
- [7] LI W J, HOANG P. An inspection-maintenance model for systems with multiple competing processes[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(1):318-327.
- [8] LAI M, SHIH W, TANG K. Economic discrete replacement policy subject to increasing failure rate shock model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 27(11):1242-1247.
- [9] 严骏,李永贵,凌海风,等. 基于延迟时间理论的设备点检周期模型[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2010,11(5):557-560.
- [10] 赵飞. 民航发动机预知维修决策研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011:557-560.
- [11] 谷玉波,贾云献,张英波. 基于 Gamma 退化过程的剩余寿命预测及维修决策优化模型研究[J]. 轴承,2013(4):44-49.
- [12] 彭宇,刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述[J]. 仪器仪表学报,2014,35(3):481-495.

作 者 简 介

吴明辉,1981 年出生,军事学博士,讲师,主要研究方向为航空装备保障、航空反潜技术等。
E-mail:minghuiwu6@sina.com