

从航空装备保障实践看预测性维修的问题和挑战

宋海方,汪时交,李帆,刘家林
(92925部队,长治 046000)

摘要: 预测性维修可以最少的工作、最小的成本提高装备完好性,是支撑未来作战概念的关键使能因素之一。本文从技术基础、组织实施和实践效果三个层次,论述了航空装备实施预测性维修面临的问题和挑战。首先,从数据、预测模型和信息系统等角度,分析了预测性维修在技术层面面临的困难;其次,从组织领导、专业人员的数量和技能、政策规定和传统习惯等方面,分析了预测性维修在组织实施中的问题;最后,结合预测性维修实例,论述航空装备实施预测性维修的实践效果和问题挑战。

关键词: 航空装备;预测性维修;作战保障;大数据;维修保障实践;问题和挑战

中图分类号: V37

文献标识码: A

Problems and challenges of implementation of predictive maintenance from the perspective of aviation equipment maintenance practices

SONG Haifang, WANG Shijiao, LI Fan, LIU Jialin
(92925 Unit of PLA, Changzhi 046000, China)

Abstract: Predictive maintenance (PdM) can improve the aviation equipment readiness in minimal cost, and PdM is also one key enabler to future concept of operation. Problems and challenges are analyzed from the perspective of technology basis, implementation, and effects in this paper. Firstly, the challenges of implementation of PdM in data, predictive model, and information system are summarized. Secondly, the problems in implementation of PdM are analyzed in the aspects of leaderships and organizations, professional skills, policies and organizational cultures. Finally, in comparison with the actual effects of PdM, the practical effect, problems and challenges of PdM are discussed.

Key words: aviation equipment; predictive maintenance; combat support; big data; maintenance and support practices; problems and challenges

收稿日期: 2024-03-25; 修回日期: 2024-06-01

基金项目: 海军航空大学青年基金项目

通信作者: 宋海方(1989—), 男, 博士, 工程师。E-mail: simlife261@qq.com

引用格式: 宋海方,汪时交,李帆,等. 从航空装备保障实践看预测性维修的问题和挑战[J]. 航空工程进展.

SONG Haifang, WANG Shijiao, LI Fan, et al. Problems and challenges of implementation of predictive maintenance from the perspective of aviation equipment maintenance practices[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

随着科学技术的进步和作战概念的发展,现代战争正从以网络与信息系统为标志的信息化战争形态,向着以算法与无人系统为标志的智能化战争形态迈进^[1]。以各类作战飞机为代表的航空装备是遂行空中作战任务的主要工具,维护和修理工作(以下简称“维修”工作)是保持和恢复航空装备战备状态的主要途径。为了使航空装备尽可能保持良好的战备状态,同时又尽量减少维修活动和费用,研究人员对维修策略进行了大量的研究。维修理念和方式也从最初的事后维修、预防性维修,向预测性维修转变^[2]。

预测性维修理论上可以最少的工作、最低的成本,最大化实现装备的可用性。相比事后维修和预防性维修,预测性维修可以更好地满足敏捷作战部署、快速机动保障和高强度作战要求,在信息化战争和智能化战争中具有广阔的应用前景^[3]。实施预测性维修是一项系统工程,本文从技术基础、组织实施和实践效果三个层次,论述预测性维修在航空装备维修保障中的问题和挑战。

1 技术方面的问题和挑战

目前,航空装备主要使用事后维修、预防性维修和预测性维修三种方式。

1) 事后维修(Breakdown Maintenance,简称BM)又称为修复性维修(Corrective Maintenance,简称CM),是装备出现故障之后进行的修理,该方式以装备是否完好或能用为依据,出现故障后通过维修或更换等方式,使其恢复良好状态。事后维修是典型的非计划维修,航空装备只有少数对飞行安全没有直接影响的部件适用这种事后维修的方式。

2) 预防性维修(Preventive Maintenance,简称PvM)又称为定时维修(Time-based Maintenance,简称TBM)或计划维修(Scheduled Maintenance,简称SM),该方法根据规定的使用时间、使用次数或日历间隔对装备进行检查、保养或更换部分零部件,从而预防设备损坏或出现故障。预防性维修是目前大多数航空装备采取的主流维修方式^[4]。根据维修间隔的不同,航空装备维修又分为A检、2A检和C检等具体形式。为了确保装备安全、可靠运行,预防性维修经常存在过度维修的现象,从

而造成维修资源的浪费和维修效率的低下,难以支持部队快速、机动部署和敏捷作战的需求。

3) 预测性维修(Predictive Maintenance,简称PdM),以装备健康状态为依据,在装备“即将”出现失效或故障前进行维修,从而尽可能减少不必要的维修,并尽可能使装备处于良好状态。与预防性维修相对固定的维修间隔不同,预测性维修的维修间隔一般不固定。预测性维修的关键就是要确定何时“即将”故障,并根据故障出现的时机前置修理用零部件和维修设备、人员,从而最大程度减少装备因维修而停止使用的时间,并减少装备因过度维修造成的资源浪费。

事后维修、预防性维修和预测性维修的主要区别如图1所示。

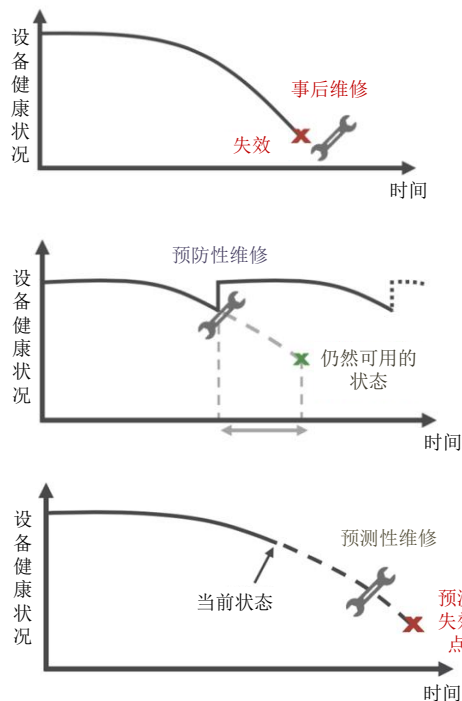


图1 三种维修方式的比较^[5]

Fig. 1 Comparison of three maintenance methods^[5]

飞机是复杂航空装备的代表。飞机的不同系统、部件和组件,应根据其故障频率和对飞行安全的影响,分别选择合适的维修模式和维修策略。例如,对于容易替换,或者容易受到天气、鸟撞、外来物或战斗损伤的部件,并且对飞行安全没有直接影响的部件,仍旧可以采用事后维修的方式;对于日常难以检查或替换的部件,或者对飞行安全至关重要的系统,如起落架、武器控制和弹射装置等,可以沿用当前的预防性维修模式;对于能够通

过监测数据和历史数据进行预测、根据预测结果可以预先安排维修资源的系统,如飞机结构件、发动机部附件、液压系统或飞行控制系统等,应该重点考虑采用预测性维修。换句话说,预测性维修虽然代表着维修方式的发展方向,但是并不意味着飞机的所有部件都要采用预测性维修。特别是对于一些老旧飞机,实施预测性维修需要加装若干传感器,这时候必须要在加装传感器和实施预测性维修可能带来的收益之间进行权衡。

与预测性维修密切相关的概念还有视情维修和预测与健康的管理技术。视情维修(Condition-based maintenance,简称CBM)又称为基于状态的维修,是以系统实际运行状态为依据的维修策略,通过对主要的(或有需要的)部位进行定期(或连续)的状态监测,当有证据表明系统需要进行维修时才实施维修活动^[6]。胡昌华^[7]认为预测性维修是一种广义的CBM;陆宁云等^[8]认为CBM向预测性维修转变的主要原因在于决策支持技术的进步。故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management,简称PHM)技术利用设备运行期间产生的各类数据,通过处理和分析,实现对设备健康状态监测、预测管理和维修策略支持,从而有限降低故障发生率和维修成本^[9];孔旭等^[10]认为预测性维修包括PHM和RUL预测两部分主要工作;刘东君^[11]、刘雨蒙等^[12]、袁焯等^[13]则认为“RUL预测是PHM的关键任务(技术)之一”。PHM比CBM更加强调“健康管理”。

实际上,无论是CBM、PHM还是预测性维修,其核心工作都包括剩余使用寿命(Remaining Useful Life,简称RUL)预测和最佳维修决策。剩余使用寿命预测方法包括基于模型的方法和基于数据的方法。CBM和PHM侧重使用装备本身的状态数据进行预测,而预测性维修还包括使用环境等“大数据”。最佳维修决策是以费用最小或可用度最大为代价函数,对整个维修活动和资源的优化决策。

本文重点论述预测性维修在技术层面面临的主要问题和挑战。

1.1 缺少标签数据和自动化工具

航空装备大数据是剩余使用寿命预测的基础。目前,民航部门已经有一些航空大数据分析平台,例如GE公司的Predix,波音公司的Ana-

lytX,空客公司的Skywise,普惠公司的Engine Wise,法荷航公司的Prognos^[14]。这些平台可以处理飞机发动机和机载设备运行时产生的数据,同时可以分析航空公司的运维数据,优化飞机维修过程,提高飞机运维效益。但是与民航飞机不同的是,军用飞机受机队规模、数据传输网络,以及平时和战时使用模式和节奏的区别,数据虽“大”,但价值密度更低。实施预测性维修需要实时监测和使用历史数据,这就限制了老旧飞机上实施预测性维修的范围。另一方面,实时监测数据的传输需要配套的保密网络,这对机动作战和前沿部署可能会构成挑战,并在战时会影响航空装备的正常使用。

以机器学习(Machine Learning,简称ML)为基础的基于数据的方法是当前复杂装备剩余寿命预测的主要方法^[15]。一般将机器学习方法分成3类:无监督方法、有监督方法和强化学习方法^[16]。与预测性维修密切相关的4种机器学习方法主要有聚类、分类、回归和异常检测方法。其中聚类方法是典型的无监督学习方法,后三者属于典型的有监督学习方法。这几类方法的基本含义如图2所示。

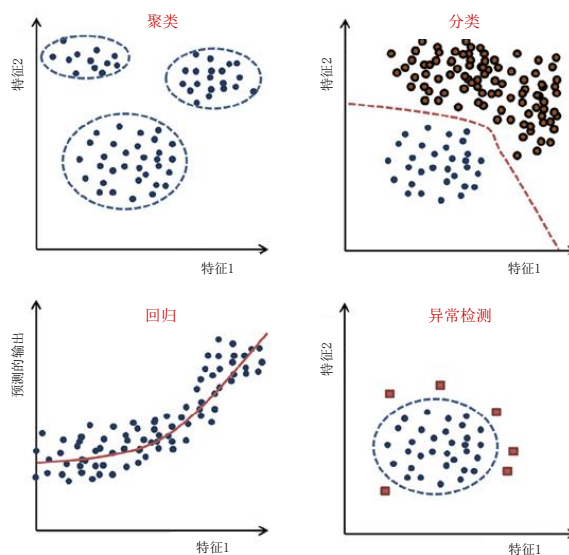


图2 预测性维修相关的机器学习方法^[16]

Fig. 2 Typical machine learning methods involved in predictive maintenance^[16]

目前,大部分航空装备预测性维修模型使用的是有监督的方法,包括分类、回归和异常检测。近几年受到广泛关注并在很多领域取得显著成果

的深度学习(Deep Learning, 简称DL)算法,使用的也是有监督的方法,只是相比传统的有监督方法,省略了特征工程,不需要人工提取数据中的特征^[17]。

预测性维修在数据层面的问题主要包括:

1) 标签数据的缺失。航空装备不缺数据,如飞参、总线、音视频和各类维修管理数据,每天都在大量地产生。但是航空装备数据集中严重缺少带标签的数据,这会严重限制有监督算法的应用。

2) 缺少数据自动化处理工具和手段。航空装备数据来源广泛、类型多样,需要对大量数据进行预处理和标签化操作,但是目前这类工作缺乏自动化处理工具和手段,依赖人工或使用电子表格的方式进行处理是不切实际的。

美国空军最近构建了首个人工智能驱动的数据系统,名为“基地和后勤分析数据环境”(Basing & Logistics Analytics Data Environment, 简称BLADE)^[18],该系统可以对后勤和保障数据进行自动收集、统计和上报,从而在节约大量人力物力的同时,显著提高数据的传输和处理效率。

1.2 难以将预测模型推广使用

目前,对预测性维修的研究主要针对特定设备或系统。吕克洪等^[19]总结了航空电子类设备的故障预测与健康管理工作研究动态,分析了当前复杂电子设备预测与健康管理工作面临的挑战;郭丞皓等^[20]以飞机起落架系统为例,基于数字孪生技术构建了新的起落架健康管理框架;艾凤明等^[21]对飞机供配电系统故障预测与健康管理的关键技术进行了总结,并对当前军用飞机供配电系统PHM技术发展所遇到的问题进行了讨论;杜晶等^[22]针对军用飞机发动机的涡轮叶片,提出了一种新的预测性维修方法;曲昌琦等^[23]对航空装备应用PHM的数据体系进行了研究。受当前机器学习技术的限制,针对特定场景和系统构建的预测模型一般难以在其他场景和设备上直接使用。同时,军用航空装备的预测性维修模型还受到以下限制:

1) 仿真数据的可信度的问题。目前预测模型和算法使用的大多是仿真数据,例如美国航空航

天局(National Aeronautics and Space Administration, 简称NASA)提供的商用模块化航空推进系统仿真数据集^[24]。没有真实数据作为支撑,预测模型和方法的有效性也是难以检验的。

2) 平时数据和战时数据差异的问题。Li^[25]和Zio等^[26]指出,当前使用的预测模型全部是建立在平时使用基础上的,该模型能否在战时适用,目前并没有合适的方法进行验证。

1.3 缺少信息系统的有力支撑

实施预测性维修需要采集机上设备的状态数据,受机上设备运算能力和使用历史数据的需要,一般需要将机上数据传送到地面进行处理。地面系统根据这些数据,对飞机的健康状态进行评估预测,然后维修人员根据预测结果对维修工作进行优化。维修保障信息系统是实施预测性维修的基本依托和主要途径,其作用发挥直接决定预测性维修的实际效果。美军和其盟友联合开发的F-35战斗机,被誉为PHM的“代表作”^[27]。下面以F-35的维修保障信息系统为例,论述预测性维修中信息技术的应用和信息系统的的问题。

实施预测性维修首先需要机上传感器和相关记录和处理设备。例如,在F-35A(常规起降型)和F-35B(短距和垂直起降型)上,就安装了10组应变传感器,在F-35C(舰载型)上安装了13组应变传感器(Strain Gauge),同时所有型号的F-35上安装了2组腐蚀传感器(Corrosion sensor)^[28]。这些传感器用于测量飞机结构应变和腐蚀数据,传感器的安装位置、数量和采样率(例如,应变传感器的采样率是320 Hz)也经过了相关论证、优化和测试。其次,由于飞机机载存储和计算资源有限,复杂的PHM算法无法在机上得到实时解。因此,一般采用“机上采样+地面处理”的形式实施预测性维修。

F-35战斗机的自主式后勤信息系统(Autonomic Logistics Information System, 简称ALIS),就是F-35飞机实施预测性维修的主要地面设备^[29-30]。ALIS和飞机发动机、飞机机身一起,组成F-35作战能力的三大基石。从F-35飞机到ALIS系统的的核心数据处理流程如图3所示。

图3 F-35机上数据到地面ALOU的处理流程^[28,31]Fig. 3 Flow of data from the F-35 to ALOU^[28,31]

ALIS系统包括如下部分:

1) 中队运行单元(Squadron Operating Unit, 简称SOU)。每个基地或中队部署有若干SOU(至少一台),这是ALIS在基层的关键节点。每套SOU配有两台服务器,分别用于存储和处理保密和非保密数据。

2) 中心进入点(Central Point of Entry, CPE)。CPE是ALIS的高级节点。每个军种或部署F-35的国家都有一个CPE节点,其中包括两台服务器,一台用作非保密数据的存储和处理,另一台用作保密数据的存储和处理。

3) 自动化后勤运行单元(Autonomic Logistics Operating Unit),这是全部F-35飞机数据的唯一中央节点。目前,该节点位于美国沃斯堡基地。

4) 便携式存储设备(Portable Memory Device, 简称PMD)及其读取设备(PMD Reader)。PMD及其读取设备将机上数据(如发动机数据、应变传感器和腐蚀传感器数据等)传递到地面SOU,也可以将SOU生成的任务规划数据上传到飞机。

5) 便携式维修助手(Portable Maintenance Aid, 简称PMA)。PMA可以供维修人员查阅技术资料,查看并核对维修计划和工作指令/卡片。

根据F-35的主承包商洛克希德·马丁公司此

前的宣传^[29],F-35可以在飞行过程中,将机上的设备健康报告代码(Health Reporting Code, 简称HRC),通过射频下行链路(RF Downlink)实时传送给地面,这样飞机一落地,地面人员就可以立即对飞机展开检查和修理。国内文献也多转述ALIS的这一功能进行报道^[32]。但是分析GAO的报告^[31],以及Hebden等的论述^[28],可以证实该功能到目前为止并没有在F-35飞机上得到应用。主要原因是数据安全性问题没有得到可靠地解决,而且“没有射频下行链路不影响飞机的预测诊断。飞机一旦落地,就可以通过便携式存储设备(PMD),将数据导入地面系统进行分析处理”^[28]。ALIS从3.5版本开始就不再计划进行大的升级更新,国防部计划以新的“作战数据集成网络”(Operational Data Integrated Network, 简称ODIN)来替代问题不断的ALIS^[31]。ODIN是否会加入实时传输功能目前还不得而知。

美军的其他飞机,如C-130“大力神”运输机,也是由飞机的主承包商洛克希德·马丁公司设置了专门的中央数据存储库,通过收集和集中处理全球20多个国家和地区使用C-130产生的数据^[33],将预测结果实时传输给使用单位,从而指导使用单位对飞机进行维修,提高保障效益。每架C-130飞机有600多个传感器,每个飞行小时都会产生72000行数据^[34],将同型号飞机的所有数据集中起来,可以更好地满足航空大数据对数据规模的要求。

美军的信息化建设一直走在世界军队的前列。F-35飞机是美军“史上耗资最大的武器系统”,美军为全部F-35飞机的全寿命周期成本预计超过1.6万亿美元^[35]。美军为F-35战机开发的自主后勤信息系统(ALIS)是实施预测性维修的主要依托。ALIS是一个复杂的“系统之系统”(System of Systems, 简称SoS),由主体系统、系统内的应用程序以及为F-35机队提供全球综合保障所需的基础网络设施等部分组成,具有任务规划、供应链管理、维修管理和预测管理等功能。但是ALIS从研发(F-35飞机项目启动一年后即开始启动ALIS项目)至今,暴露出了很多问题,这些问题已经成为影响F-35战备完好性的主要因素^[36]:

1) 数据丢失和显示、预测不准确。ALIS可以记录和跟踪飞机上有寿部件的剩余使用时间,但是美军在实际使用中发现,ALIS存在严重的记录

不准确甚至数据丢失的问题,有时候系统提示某架飞机某个部件存在问题,但是维修人员确信该部件没有问题,因此很多时候维修人员不得不忽略系统提示信息选择放飞。但是这种做法也容易给飞机带来安全问题。为了补充维修数据,维修人员有时不得不使用 Excel 表格手动记录跟踪维修数据,这就给维修人员带来严重的负担。

2) 系统难以部署。ALIS 为每个中队至少配备了一套中队运行单元(SOU),但是 SOU 的服务器体积庞大,即使分装到专门的转运箱内,整个系统也需要至少 2 个人才能搬运,且该系统在船上部署需要专门的房间和电源、环控设备,严重影响了系统在机动作战部署时的应用。

3) 需要更多的人员保障。装备维修保障人员的信息素养对于预测性维修工作同样非常重要。根据文献[31],美军基层官兵在使用 ALIS 系统时,对维修人员的系统使用培训不够,需要额外的承包商的雇员进行伴随保障。例如,美军报道的某个空军基地每天都需要 8 名承包商的雇员来保障 ALIS 的 SOU 服务器,这与预测性维修减少人员和资源消耗的初衷是严重背离的。

4) 部分应用不成熟。ALIS 试图用一套系统来满足几乎全部装备保障信息需求,于是该系统功能过多,其中任务规划和机外任务保障等应用不够成熟,甚至还出现系统奔溃、强制退出等问题。

5) 用户体验糟糕。良好的用户交互界面对于信息系统的顺利实施非常重要。但是 ALIS 的用户界面不够友好,维修人员往往需要耗费很多精力才能导航到预定的界面,系统的检索、过滤功能也不够完善,且存在登录过程缓慢、系统等待时间长等问题。

6) 训练管理系统无效。ALIS 具有维修训练管理功能,但是该功能由于没有反映部队实际的训练需求和作业环境,导致该功能很少在实际中应用。多数部队都采用额外的或者之前的训练管理系统,导致 ALIS 系统的训练管理功能名存实亡。

7) 对通信网络依赖严重。信息化设备的正常运行离不开通信网络。如图 3 所示,F-35 飞机的数据需要通过网络依次传递给 SOU、CPE 和 ALOU。为了验证 F-35 飞机能否在前沿基地或者简易机场等没有网络连接的情况下使用,美军曾经测试在不连接网络的情况下,单独使用 SOU 来

支持 F-35 飞机的运行。但是在无网络连接情况下 F-35 能够正常运行多长时间目前还无从知晓。

2 组织实施的问题和挑战

实施预测性维修是一项系统工程,除了要克服技术上的困难,还会受到组织领导、人员数量和专业素质,以及传统做法和观念等因素的影响^[37]。美军早在 2002 年就发布了预测性维修的临时政策,随后美国国防部(Department of Defense,简称 DOD)和各军种又陆续发布了多份预测性维修的指导文件,在装备保障中大力推动实施预测性维修^[38-39]。美军先后在多种型号的战斗机、运输机、轰炸机和直升机中实施预测性维修,并取得了一些成果。美军装备预测性维修的组织实施具有较好的代表性,下面将以美军为例,论述预测性维修在组织实施方面的主要矛盾和问题。

2.1 需要强有力的统一领导

目前,美军在国防部和各军种层面均指定了预测性维修的负责人,并建立了相对完善的领导机构,专门负责国防部和军种层面的预测性维修工作。

1) 在美国国防部层面。美国国防部负责采办和保障工作的副部长负责美军装备预测性维修政策制定并对装备预测性维修工作实施监督。2002 年,美国国防部制定了关于预测性维修的临时政策,指示各军种和国防部业务部门评估、开发和实施预测性维修技术,以减少计划外的维修,提高武器装备的可用性;2007 年,国防部又发布新指令,要求各军种部将预测性维修纳入维修政策,并在技术可行和有利的情况下,对现有武器装备实施预测性维修,同时要求各军种成立一个预测性维修工作的协调中心,用于协调军种内部的预测性维修计划和项目执行等工作。国防部领导预测性维修工作的人员如图 4 所示。

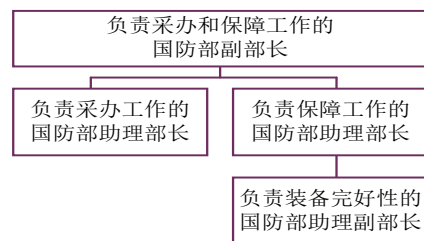


图 4 美国国防部领导预测性维修工作的人员^[40]

Fig. 4 U. S. DoD's leaders involved in PdM^[40]

2) 美国国防部各军种层面。在美国国防部的统一规划和监督下,美军各军种开始实施本军种内部的预测性维修工作。陆军部负责采办、后勤和技术工作的助理部长,领导负责保障的陆军助理副部长和负责后勤和维修部门的副参谋长,负责领导制定陆军的预测性维修战略,并定期组织召开会议,审议和报告预测性维修工作开展情况。陆军的预测性维修工作一般由项目办公室负责实施,但是项目办公室主要针对单一型号的武器装备,没有足够的权力来协调军种内部的其他资源。美国海军的预测性维修工作目前主要由负责研究、开发和采办工作的海军助理部长领导,海军助理部长通过项目执行办公室和空中、海上系统司令部领导海军的预测性维修工作。陆战队由负责设施和后勤的副司令、海军陆战队系统司令部和地面系统项目执行办公室领导陆战队的预测性维修工作。空军则是通过空军后勤部飞机维修部门和快速保障办公室领导空军的预测性维修工作。美国国防部各军种与预测性维修有关的领导人和领导机构如图5~图8所示。

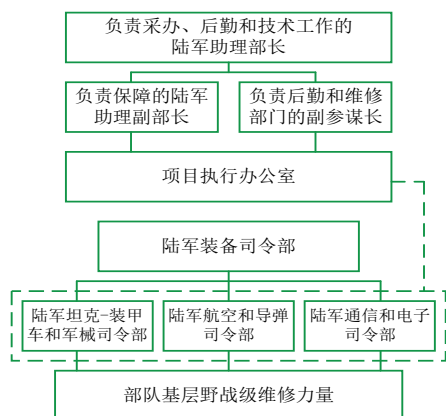


图5 美国陆军负责预测性维修的人员和机构^[41]
Fig. 5 U. S. Army's organizations involved in PdM^[41]

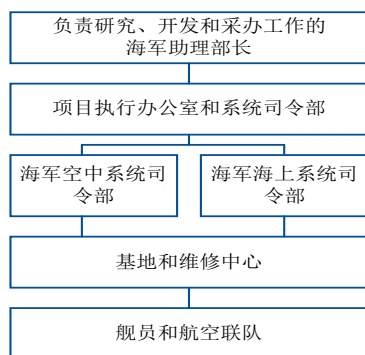


图6 美国海军负责预测性维修的人员和机构^[42]
Fig. 6 U. S. Navy's organizations involved in PdM^[42]

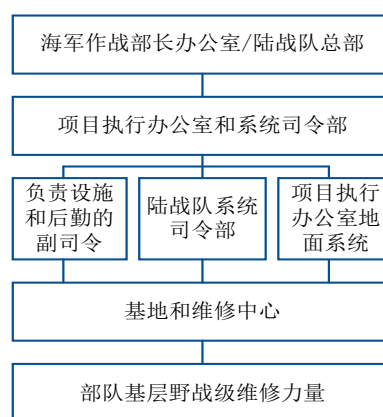


图7 美国陆战队负责预测性维修的人员和机构^[41]
Fig. 7 U. S. Marine Corp's organizations involved in PdM^[41]

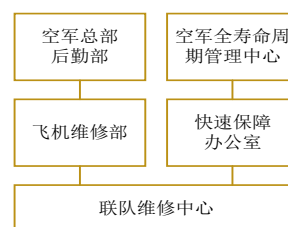


图8 美国空军负责预测性维修的人员和机构^[43]
Fig. 8 U. S. Air Force's organizations involved in PdM^[43]

统一领导和集中管理对于实施预测性维修十分重要,但是美军目前各军种负责预测性维修的领导人和机构权力不够,无法协调和调动整个军种内部的资源。例如,空军快速保障办公室可以采购部分预测性维修所需的资源,但是没有权力增加预测性维修所需的备件供应。

2.2 需要数量充足的专业人员

从长远来看,实施预测性维修可以减少计划外维修的数量,并且可以减少预防性维修的工作量。但是从短期看,实施预测性维修需要增加额外的培训,这可能进一步加重了当前维修人员的负担。包括美军在内的一些国家,当前比较缺乏具备经验的航空装备维修保障人员,更缺乏具备预测性维修知识的专业人员。这与我军当前航空装备保障面临的情况在一定程度上是相似的。

美军近几年使用“联合实况、虚拟和构造”(Joint Live, Virtual and Constructive,简称JLVC)仿技术,大力加强对包括维修人员在内的各类人员的培训^[44]。同时,为有效支撑“敏捷作战”概念,解决当前各类专业人员的不足,美军提出要加紧培养“多能空军人员”(Multi-Capable Airmen,简称MCA)^[45]。在维修人员培训中,美军一方面注重提

高维修人员的基本维修技能,并在维修培训课程中加入预测性维修的基础理论,从而深化维修人员、特别是基层维修管理人员对预测性维修的认识。另一方面,美军开始注重提高维修人员的信息素养,重点是提高部队维修人员对部署的信息系统的独立操作和维护保障能力,从而减少对供应商雇员的依赖。

2.3 需要解决与当前环境的冲突

预测性维修是一种全新的维修方式,在实施过程中势必会与传统的一些观念、做法和规定产生冲突。想要顺利实施预测性维修,就需要逐步解决这些冲突和问题。

1) 观念习惯上的冲突。目前,部队装备维修保障还是以预防性维修为主。将持续很多年的维修模式转向更加积极主动的预测性维修,不仅需要对现有的业务流程进行更改,还需要对包括装备采办、供应和维修政策等方面进行调整。如果预测性维修算法不准确,预测结果就会引起部队维修人员的怀疑;让维修人员转变思想,对尚未损坏的装备进行维修或者在没有直观证据的情况下让维修人员改变预防性维修的参数,也会使维修人员犹豫。近几年,以深度学习为代表的机器学习技术发展迅速,但是深度学习的“黑箱”问题更突出,预测结果的难以解释也会造成维修人员对预测结果的不信任。

2) 政策规定上的冲突。预测性维修从长期来看,会节约各类维修资源,但是预测性维修在短期内可能还会增加部分零部件的供应需求。要确保维修过程中备件的及时供应,就必须对零部件进行更加准确的预测,这就需要对当前的一些维修政策进行相应的调整^[46-47]。例如,美军通常要求维修人员在获得新的零部件前,要将替换下来的零部件进行上交,但是为了实施预测性维修,美国空军和海军在一些试点项目中尝试将一些尚未出现损坏(但是预测性维修结果提示这些部件即将失效)的部件上交,从而提前获得新的零部件。

3 预测性维修的实践效果

近几年,以美军为首的西方国家军队,加快了预测性维修的实施步伐。美国及其盟友装备的AH-64“阿帕奇”、UH-60“黑鹰”和CH-47“支奴干”等直升机安装了“健康与使用监控系统”(Health and Usage Monitoring System,简称HUMS)^[48],美国联合其他国家共同开发的F-35

战斗机、美国的C-130运输机、B-2轰炸机和RQ-4“全球鹰”无人机,以及欧洲的“阵风”战斗机、A-400M运输机等航空装备上,都添加了状态监测传感器,并通过机上或地面系统的数据处理,对部分设备或系统实现了剩余使用寿命预测^[49]。美军是预测性维修的先行者,在预测性维修上付出的努力最多,取得的成果也最多。美国国防部和各军种2002—2022年间实施的预测性维修主要事件如表1所示。

表1 美军实施预测性维修的主要事件
Tab.1 Predictive maintenance implementation events in U. S. Armed Forces

时间	预测性维修的主要事件
2002年	国防部发布了用于指导各军种实施预测性维修的临时性政策;洛克希德马丁公司快开始研发F-35的自主式后勤信息系统(ALIS),ALIS是F-35预测性维修的关键系统之一
2003年	无
2004年	无
2005年	无
2006年	美国陆军在AH-64“阿帕奇”直升机上开始应用预测性维修
2007年	美国国防部发布预测性维修的指导和标准指南
2008年	无
2009年	F-35飞机ALIS系统的初始版本开始部署
2010年	无
2011年	无
2012年	美国陆军开始在3种飞机上实施预测性维修,同时开始在轮式战车上实施预测性维修试点项目
2013年	美国海军发布关于舰船和潜艇的预测性维修指导文件
2014年	无
2015年	美国海军开始在H-1飞机上实施预测性维修;空军开始在B-1和C-5飞机上探索预测性维修的数据挖掘
2016年	无
2017年	美军开始部署ALIS 2.0.2版本,该系统将飞机发动机数据正式纳入ALIS功能范围
2018年	美国陆军发布预测性维修实施指令;空军为B-1和C-5飞机开始安装首个预测性维修报警器;美军开始部署ALIS 3.0版本,该版本能够跟踪预测F-35有寿命的剩余使用寿命
2019年	美国陆军建立了预测性维修初始作战能力标准;海军开始飞机的标准化预测性维修实施和分析
2020年	陆战队发布了预测性维修政策,开始预测性维修试点;海军建立了预测性维修实践航空社区
2021年	美国陆军开始为三种地面系统实施预测性维修;海军开始在F/A-18实施预测性维修的能力评估;空军发布预测性维修战略实施计划,并跟踪16种平台的预测性维修绩效
2022年	海军更新预测性维修指南,并确定需要更改的业务流程;美军开始对F-35更换问题不断的ALIS系统

从表1可以看出:美军最近几年加快了预测性维修的实施步伐。美军将预测性维修视为未来作战保障的关键使能因素之一。预测性维修要实现预期的效果(能够进行有效的实践验证),主要包括以下3个方面。

1) 部队能够根据预测性维修结果,更改装备的维修间隔和周期,从而减少维修工作量和计划外维修,同时提高装备的安全性。

2) 从部队装备完好情况和使用维护成本来看预测性维修的长期效果。预测性维修的长期目标,是要以尽可能低的成本、高的效率,达到装备完好性的要求。换句话说,装备完好性目标的达成,不能以成本的显著增加作为代价。同时需要明确,如果实施了预测性维修的某型装备维修保障成本下降,的确是因为预测性维修带来的(而不是由于对应的飞行时间减少等其他因素)。

3) 预测性维修要能够为新的作战概念提供更有力的支撑。技术的发展和战争形态的演变,共同推动着预测性维修在军用装备保障的发展和进步。如果预测性维修需要更多的人力物力和庞大复杂的信息系统,是不利于现代战争新的作战概念要求的。

虽然预测性维修近几年受到了更多的关注,在军方、学术界和工业部门的共同推动下,航空装备预测性维修取得一些进展,但是整体而言,预测性维修还处于试验和验证阶段,距离实现预期的目标和真正进入实用还有不小的差距。从当前的实践效果、特别是实施预测性维修最早、范围最广、成效最为显著的美军情况看,预测性维修的实际进展有限,美国政府审计总署(Government Accountability Office,简称GAO)就发布报告,指出美军实施预测性维修“没有达到其预期目的”^[40]。预测性维修在实践效果上未达预期主要表现在以下3个方面。

3.1 没有显著减少维修保障工作

根据美国各军种的反馈,各军种在实施预测性维修中取得的主要成果如下:一是预测性维修可以发现地面维修保障难以发现的故障,帮助避免飞行事故;二是减少计划外维修,降低维修保障成本。美国陆军曾经通过AH-64“阿帕奇”直升机的传感器提前发现了齿轮箱的故障,从而避免了

一起飞行事故;为CH-47“支奴干”直升机应用预测性维修技术以后,可以降低2400万美元的维修保障成本,节约6200多个小时的维修工时;UH-60“黑鹰”直升机通过预测性维修,在6年内节约了2.15亿美元的成本和5300多个维修工时。海军2016年开始在H-1直升机上应用预测性维修,部队可以提前识别和更换故障部件,从而避免了29次紧急着陆。此外,海军通过调整H-1主旋翼齿轮箱的维修间隔,估计可以在5年共计节约1亿美元的成本。空军实施预测性维修以后,在不到2年的时间内为8架C-5运输机消除了84h的计划外维修,从而节约了120万美元的成本;空军在B-1轰炸机维修中实施了“预测分析和决策助手”(Predictive Analytics and Decision Assistant,简称PAN-DA)的预测性维修^[50],空军预计10架B-1轰炸机的预测性维修可以减少51%的非计划维修工时,并在2年内节约了500万美元的成本。

预测性维修理论上可以通过更改装备维修间隔或周期,避免过度维修,从而减少维修工作。美国陆军先后在AH-64“阿帕奇”、UH-60“黑鹰”和CH-47“支奴干”直升机上应用了预测性维修技术,根据美国政府的审计报告,美军陆军目前没有一架飞机使用预测性维修来推迟预防性维修确定的更换零部件的周期和频率。换句话说,美国陆军的预测性维修仍旧处于试验状态,距离实用还有不小距离。美国海军和陆战队也在CH-53“海种马”、H-1直升机、F/A-18“大黄蜂”战斗机、E-2C“鹰眼”等飞机上实施了预测性维修,但是与陆军的情况相似,海军和陆战队的飞机也几乎没有使用预测性维修来推迟预防性维修确定的部件更换周期和频率。海军只根据预测性维修的结果调整了H-1主旋翼齿轮箱的维修间隔。美国空军于2016年开始、目前正在分阶段实施预测性维修^[51]。空军于2019年对KC-135“平流层”加油机的少数部件进行预测性维修,并在2021年的“全员参与”(All-In)计划中扩大了该飞机的预测性维修工作范围。2021年4月,空军发布了预测性维修战略实施计划,试图解决空军机队中任务执行率和飞机可用性下降的问题。美国空军于2021年4月成立了预测性维修体系集成管理委员会,为预测性维修提供支持和指导。与其他军种类似,美国空军同样没有根据预测性维修结果系统调整和更改预

防性维修的周期和频率。

3.2 没有明显改善装备完好情况

根据美国政府审计总署的调查,2011-2021年间,美军包括应用预测性维修技术在内的大多数作战飞机都没有实现其预定的完好性目标。

美军一般用可执行任务率(Mission Capable Rate,简称MCR)来衡量飞机的战备完好性。如果飞机可以执行其预定的全部功能,则认为飞机是完全可执行任务的(Full Mission Capable,简称FMC);如果飞机可以执行至少一项预定的任务,

就认为其是可执行任务的^[52]。例如,美军为F-35飞机设定的FMC目标是60%,MCR目标是75%。但是在2018-2019财年,美军F-35的FMC和MCR分别是31.6%和59.5%。经过努力,在2019-2020财年,美军F-35战机的上述两项指标分别提升到39%和69%,距离目标要求仍然存在差距^[36]。

美军将无法实现预定战备完好性目标的原因归结为老旧飞机、维修和供应保障三种类型。以美军实施预测性维修的几种飞机为例,这几种飞机战备目标不达标的原因如表2所示。

表2 典型飞机战备目标不达标的主要原因^{[40][52]}
Tab.2 Primary cause of unachievable readiness goal of typical aircraft ^{[40][52]}

飞机型号	老旧飞机			维修			供应保障			
	采办替换飞机延误	延寿	计划之外的部件替换和修理	访问技术数据	基地维修的延误	培训良好的维修人员的短缺	计划外的维修	制造来源的减少	零部件老化	零部件短缺和供应延误
KC-135		↔	↔	↔		↔	↔	↔	↔	↔
B-2	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
C-130H					↔	↔		↔	↔	
E-2D						↔	↔	↔	↔	↔
EA-18G		↔	↔	↔		↔	↔	↔	↔	↔
F/A-18E/F		↔	↔	↔		↔	↔	↔	↔	↔
F-35		↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔		↔
AH-64	↔		↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
CH-47					↔	↔		↔	↔	↔
UH-60						↔				↔

从表2可以看出:“计划之外的部件替换和修理”“培训良好的维修人员的短缺”“计划外的维修”“零部件的短缺和供应延误”等是造成装备战备状态不达标的主要原因。预测性维修从理论上可以减少计划外的维修和零部件替换工作,并且可以提前通知航材供应部门准备所需的零部件。也可以看出:美军的预测性维修实际没有达到预期的效果。美军飞机的使用保障成本曾一度出现下降,但是GAO认为美军飞机使用和保障成本的降低的主要原因是由于飞机数量的减少和飞行时间的降低,而不是采用预测性维修带来的收益^[52]。

3.3 没有有效支撑未来作战概念

任何维修保障概念、模式和方法,从根本上说

都要服务作战、并在作战实践中进行检验。预测性维修也不例外。如果预测性维修所需的信息系统不好用、不管用、不可靠,甚至严重依赖其他资源,就难以对新的作战概念提供有力支撑。随着技术的进步和战争形态的演变,航空装备预测性维修也在不断发展进步。预测性维修需要为新的作战概念提供有力支撑。

近几年,美军为了应对所谓的“大国竞争”,提出了“敏捷战斗部署”(Agile Combat Employment,简称ACE)等新型作战概念^[53]。美军先后演示了用4架F-22战斗机和1架C-17运输机组成的“4+1”作战单元,实现3天内在陌生机场临时部署;用2架F-35和和1架C-17运输机的“2+1”作战单元,以及用1架F/A-18和1架C-130的“1+1”作战单

元,在短时间内到达前沿机场并快速投入战斗^[54]。

F-35战斗机作为未来几年美军主要倚重的战斗机,与其配套的ALIS系统体积过于庞大,非常不利于敏捷作战部署和使用。2021年7月开始,美军开始用ODIN来代替ALIS,并在2022年1月完成了ODIN首批14套系统的安装部署^[55]。ODIN的硬件部分(称为ODIN Base Kit)质量在134-202磅之间,其中65磅是ODIN系统自身的重量,另外还有69磅的不间断电源和68磅的扩展电池的重量。ODIN和ALIS SOU服务器的硬件外观如图9所示。



图9 升级后的ODIN硬件与ALIS SOU服务器的对比

Fig. 9 Comparison of ALIS SOU server and ODIN base kit

相比SOU服务器,ODIN硬件体积和重量减少75%,成本也降低了30%,在用户界面和系统处理速度方面相比ALIS也大为改善。显然,ODIN系统更有利于机动作战和敏捷部署。据报道,ODIN采用了云系统(Cloud-based)架构^[56]。但是ODIN的更多技术细节还无法知晓。

4 结束语

预测性维修在航空装备保障中具有良好的应用前景。但是目前预测性维修整体上仍处于试验阶段,距离实现其预期的目的和效益还有不小的差距。预测性维修是支撑快速部署、敏捷机动和分布式作战的重要使能因素,应加强顶层设计和统一领导,在军兵种和联合后勤层面成立相应的机构,集中管理预测性维修的改革工作。

实施预测性维修是一项系统工程,不仅面临技术上的挑战,还受到组织文化、专业人员的数量和技术水平、传统和政策等方面因素的影响。实施预测性维修要加大对人员的培训力度,通过普及相关知识,让更多人认识和掌握预测性维修的本质和实践方法,从而为预测性维修打下坚实基础。

当前,实施预测性维修面临的重大技术问题,一是标签数据和海量数据自动化处理工具的缺失;二是作为预测性维修的主要载体,维修保障信息系统需要更好地发挥作用;三是要考虑在平时建立的预测模型能否在战时适用的问题,即考虑预测模型的迁移和泛化能力。

美军最早提出预测性维修的概念,在预测性维修上的努力和取得成果也最多,但是同样出现了各种困难和问题。我们要理性、客观地看待预测性维修的预期效果和可能的限制,通过在实践中不断反思,持续提高预测性维修的实施和推广效果。

参考文献

- [1] 林东. 现代战争形态的结构及演变趋势[EO/BL]. (2021-08-22). [2024-05-25]. https://news.gmw.cn/2021-08/22/content_35098481.htm.
LIN Dong. Structure and trend of modern war statues[EO/BL]. (2021-08-22). [2024-05-25]. https://news.gmw.cn/2021-08/22/content_35098481.htm. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] MILLS P J, LEFTWICH A, DREW J G, et al. Building agile combat support competencies to enable evolving adaptive basing concepts [R]. Santa Monica: RAND Corporation, 2020.
- [4] REN He, CHEN Xi, CHEN Yong. Reliability Based Aircraft Maintenance Optimization[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017.
- [5] FABIO A, MARIO C, LILIANA L, et al. Predictive maintenance in the automotive sector: a literature review [J]. Mathematical and Computational Applications, 2022, 27: 1-12
- [6] Headquarters of Department of Defense. Condition based

- maintenance plus: DoD guidebook [S]. Washington, D. C.: Headquarters of Department of Defense, 2008.
- [7] 胡昌华, 樊红东, 王兆强. 设备剩余寿命预测与最优维修决策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.
HU Changhua, FAN Jiangdong, WANG Zhaoqinag. Residual life prediction and optimal maintenance decision for a piece of equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021. (in Chinese)
- [8] 陆宁云, 陈闯, 姜斌, 等. 复杂系统维护策略最新研究进展: 从视情维护到预测性维护[J]. 自动化学报, 2021, 47(1): 1-17.
LU Ningyun, CHEN Chuang, JIANG Bin, et al. Latest progress on maintenance strategy of complex system: from condition-based maintenance to predictive maintenance [J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(1): 1-17. (in Chinese)
- [9] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理的核心技术[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1459-1472.
WANG Shaoping. Prognostics and health management key technology of aircraft airborne system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1459-1472. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 李东君, 王海瑞, 李东文, 等. 基于MIC特征提取与BO-CatBoost的航空发动机RUL预测[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(1): 31-38.
LI Dongjun, LI Ya, LI Dongwen, et al. A remaining useful life prediction of aero engines based on mic feature extraction and BOCatBoost [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(1): 31-38. (in Chinese)
- [12] 刘雨蒙, 郑旭, 田玲, 等. 基于时序推理的设备剩余使用寿命预测[J]. 自动化学报, 2024, 50(1): 76-88.
LIU Yumeng, ZHENG Xu, TIAN Ling, et al. Remaining useful life estimation of facilities based on reasoning over temporal graphs [J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(1): 76-88. (in Chinese)
- [13] 袁焱, 张永, 丁汉. 工业人工智能的关键技术及其在预测性维护中的应用现状[J]. 自动化学报, 2020, 46(10): 2013-2030.
YUAN Ye, ZHANG Yong, DING Han. Research on key technology of industrial artificial intelligence and its application in predictive maintenance [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(10): 2013-2030. (in Chinese)
- [14] 孔祥芬, 蔡峻青, 张利寒, 等. 大数据在航空系统的研究现状与发展趋势[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 022311.
KONG Xiangfen, CAI Junqing, ZHANG Lihan, et al. Research status and development trend of big data in aviation system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 022311. (in Chinese)
- [15] WEN Yuxin, RAHMAN F, HU Honglun, et al. Recent advances and trends of predictive maintenance from data-driven machine prognostics perspective [J]. Measurement, 2022, 187: 110276.
- [16] THEISSLER A, PÉREZ-VELÁZQUEZ J, Marcel K, et al. Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 215: 107864.
- [17] QI C. Introduction to deep learning [EO/BL] (2017-04-01) [2024-04-23]. https://graphics.stanford.edu/courses/cs468-17-spring/LectureSlides/L10%20-%20intro_to_deep_learning.pdf.
- [18] BRIAN E. USAF's big data approach to logistics and predictive maintenance [EO/BL]. (2022-04-13) [2024-12-15]. <https://aviationweek.com/mro/usafs-big-data-approach-logistics-predictive-maintenance>.
- [19] 吕克洪, 程先哲, 李华康, 等. 电子设备故障预测与健康管理技术发展新动态[J]. 航空学报, 2019, 40(11): 923285.
LYU Kehong, CHENG Xxianzhe, LI Huahang et al. New development of prognostic and health management technology for electronic equipment [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(11): 023285. (in Chinese)
- [20] 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): 227629.
GUO Chenghao, YU Jinsong, SONG Yyue, et al. Application of digital twin-based aircraft landing gear health management technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(11): 227629. (in Chinese)
- [21] 艾凤明, 梁兴壮, 董润, 等. 军用飞机供电系统故障预测与健康管理的核心技术[J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 86-95.
AI Fengming, LIANG Xingzhuang, DONG Run, et al. Key technologies of prognostic and health management of military aircraft power supply and distribution system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(2): 86-95. (in Chinese)
- [22] 杜晶, 杨玫, 张燕红. 改进的军用飞机涡轮叶片预测性维修方法[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(5): 125-129.
DU Jing, YANG Mei, ZHANG Yanhong. An improved predictive maintenance method of military aircraft turbine blade [J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(5): 125-129. (in Chinese)
- [23] 曲昌琦, 周锐, 杜宝, 等. 航空装备故障预测与健康管理的数据库研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(12): 61-67.

- QU Changqi, ZHOU Rui, DU Bao, et al. Research on PHM data system architecture for aviation equipment [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(12): 61-67. (in Chinese)
- [24] NASA. C-MAPSS aircraft engine simulator data [EB/OL]. [2024-03-25]. <https://data.nasa.gov/dataset/C-MAPSS-Aircraft-Engine-Simulator-Data/xaut-bemq>.
- [25] LI Angzhang, YUSUF A, ANTHONY J. Understanding the limits of artificial intelligence for warfighters, volume 3: predictive maintenance[R]. Santa Monica: RAND Corporation, 2024.
- [26] ZIO E. Prognostics and health management (PHM) : Where are we and where do we go in theory and practice[J]. *Reliable Engineering System Safety*. 2022, 218: 108119.
- [27] 张宝珍, 王萍. 飞机 PHM 技术发展近况及在 F-35 应用中遇到的问题及挑战[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(7): 18-26.
- ZHANG Baozhen, WANG Ping. Recent development of aircraft PHM technology and problems and challenges encountered in the application on F-35[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(7): 18-26. (in Chinese).
- [28] IAIN G H, ANTHONY M, CROWLEY W B. Overview of the F-35 structural prognostics and health management system[C]// 9th European Workshop on Structural Health Monitoring. Manchester, United Kingdom: IEEE, 2018: 1-8.
- [29] Lockheedmartin. Autonomic logistics information system (ALIS) : maintaining & sustaining critical F-35 lightning II systems [EO/BL]. [2024-03-15]. [https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/alis/CS00086-55%20\(ALIS%20Product%20Card\).pdf](https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/alis/CS00086-55%20(ALIS%20Product%20Card).pdf).
- [30] Lockheedmartin. F-35 lightning II: training, support equipment and sustainment for fifth generation aircraft[EO/BL]. [2024-03-02]. https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/f35-training/F-35-Lightning-II-PC-bifold-Blue_2015.pdf.
- [31] U. S. Government Accountability Office. F-35 sustainment: DOD needs to address key uncertainties as it re-designs the aircraft's logistics systems: GAO-20-665T [R]. Washington, D. C. : U. S. Government Accountability Office, 2020.
- [32] 辛昕, 谢川. F-35 飞机自主式保障系统缺陷及原因分析[J]. *飞航导弹*, 2020(8): 86-90.
- XIN Xin, XIE Chuan. Analysis of deficiencies and causes of F-35's autonomous support system [J]. *Feihang Daodan*, 2020(8): 86-90. (in Chinese)
- [33] 宋海方, 刘洁, 汪时交, 等. 深度学习在 C-130J 飞机预测性维修中的应用与启示[J]. *航空维修与工程*, 2022(4): 21-24.
- SONG Haifang, LIU Jie, WANG Shijiao, et al. Applications and suggestions of deep learning for C-130J's predictive maintenance [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2022(4): 21-24. (in Chinese)
- [34] 王美慧. 预测性维修技术的发展障碍[J]. *航空维修与工程*, 2020(6): 19-20.
- WANG Meihui. What's holding back predictive maintenance?[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2020(6): 19-20. (in Chinese)
- [35] U. S. Government Accountability Office. F-35 joint strike fighter: more actions needed to explain cost growth and support engine modernization decision: GAO-23-106047 [R]. U. S. Government Accountability Office: Washington, D. C. , 2023.
- [36] U. S. Government Accountability Office. F-35 sustainment: DOD faces several uncertainties and has not met key objectives: GAO-22-105995 [R]. U. S. Government Accountability Office: Washington, D. C. , 2022.
- [37] JOVANI D, RAFAEL K, JORGE L V B, et al. Predictive maintenance in the military domain: a systematic review of the literature [J]. *ACM Computing Surveys*, 2023, 55(13): 1-30.
- [38] Headquarters, Department of the Army. Army material maintenance policy [S]. Washington, D. C. : Headquarters, Department of the Army, 2019.
- [39] Air Force. Aircraft and equipment maintenance management: AFI 21-101 [S]. Washington, D. C. : Air Force, 2019.
- [40] U. S. Government Accountability Office. Military readiness: actions needed to further implement predictive maintenance on weapon systems: GAO-23-105556 [R]. U. S. Government Accountability Office, Washington, D. C. , 2022.
- [41] U. S. Government Accountability Office. Military depots: army and marine corps need to improve efforts to address challenges in measuring performance and planning maintenance work: GAO-20-401 [R]. U. S. Government Accountability Office: Washington, D. C. , 2020.
- [42] U. S. Government Accountability Office. Weapon system sustainment: navy ship usage has decreased as challenges and costs have increased: GAO-23-106440 [R]. Washington, D. C. : U. S. Government Accountability Office, 2023.
- [43] U. S. Government Accountability Office. Weapon system sustainment: aircraft mission capable rates generally did not meet goals and cost of sustaining selected weapon systems varied widely: GAO-21-101SP [R]. Washington, D. C. : U. S. Government Accountability Office, 2020.

- [44] TIMOTHY M, SIMS C S, MARK T, et al. Assessment of joint all domain command and control requirements and the use of live, virtual, and constructive capabilities for training [R]. Santa Monica: RAND Corporation, 2023.
- [45] SHAWN C, KELLER K M, MARK T, et al. The forces we need: building multi-capable airmen to enable agile combat employment [R]. Santa Monica: RAND Corporation, 2023.
- [46] U. S. Government Accountability Office. Information and communications technology: DOD needs to fully implement foundational practices to manage supply chain risks: GAO-23-105612 [R]. Washington, D. C. : U. S. Government Accountability Office, 2023.
- [47] HICKS K H. Securing defense-critical supply chains: an action plan developed in response to president biden's executive order 14017[R]. US: Department of Defense, 2022.
- [48] WANG Shibin, TONG Chaowei, TAO Zhiyu, et al. Helicopter health and usage monitoring system in China [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2022, 25 (2): 45-52.
- [49] SCOTT M J, VERHAGEN W J C, BIEBER M T, et al. A systematic literature review of predictive maintenance for defense fixed-wing aircraft sustainment and operations [J]. Sensors, 2022, 22: 7070.
- [50] BILLY M. Air Force selects AI-enabled predictive maintenance program as system of record[EO/BL]. (2023-05-10) [2023-12-08]. <https://defensescoop.com/2023/05/10/air-force-selects-ai-enabled-predictive-maintenance-program-as-system-of-record/>.
- [51] RACHEL S. USAF tripling data-driven maintenance efforts in 2020 [EO/BL]. (2020-05-26) [2024-03-08]. <https://www.airandspaceforces.com/usaf-tripling-data-driven-maintenance-efforts-in-2020/>.
- [52] U. S. Government Accountability Office. Weapon system sustainment: aircraft mission capable goals were generally not met and sustainment costs varied by aircraft: GAO-23-106217 [R]. Washington, D. C. : U. S. Government Accountability Office, 2022.
- [53] GREG H. Air force releases first doctrine note on agile combat employment [EO/BL]. (2021-12-14) [2024-03-10]. <https://www.airandspaceforces.com/air-force-first-doctrine-note-agile-combat-employment/>.
- [54] SCHANZ M V. Agile combat support [EO/BL]. (2015-06-01) [2024-03-10]. <https://www.airandspaceforces.com/PDF/MagazineArchive/Documents/2015/July%202015/0715agile.pdf>.
- [55] STEPHEN L. Pentagon completes first phase in replacing troubled F-35 logistics system [EO/BL]. (2022-02-01) [2024-02-17]. <https://www.defensenews.com/air/2022/01/31/pentagon-completes-first-phase-in-replacing-troubled-f-35-logistics-system/>.
- [56] JOHN H. Cloud architecture plan for F-35s gets revised [EB/OL]. [2023-03-30]. <https://www.airforce-technology.com/news/cloud-architecture-plan-for-f-35s-gets-revised/>.

(编辑:丛艳娟)