

文章编号:1674-8190(2021)02-021-09

航空器预测性维修技术研发应用态势分析

孔旭¹, 于得水², 丁坤英³, 刘佩佩⁴

(1. 中国民航大学 科技处, 天津 300300)

(2. 中国民航大学 科技创新研究院, 天津 300300)

(3. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

(4. 中国民航大学 学报编辑部, 天津 300300)

摘要: 以航空器实时数据采集、传输和分析为基础的预测性维修技术已成为业界的发展趋势之一。本文从航空器维修的技术内涵和系统定位出发,以论文和专利数据为表征,提取预测性维修研究热点,系统梳理预测性维修技术的发展现状和趋势,分析人工智能、维修自动化、无人机、工业机器人、智能供应链等新一代信息技术在航空器预测性维修中的应用。在归纳预测性维修框架和关键技术的基础上,给出航空器预测性维修技术自主化策略建议。

关键词: 航空器;预测性维修;故障和健康管理;工业机器人;人工智能

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.02.03

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and Application Trends of Predictive Techniques in Aircraft Maintenance

KONG Xu¹, YU Deshui², DING Kunying³, LIU Peipei⁴

(1. Department of Science and Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(2. Science and Technology Innovation Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(3. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(4. Journal Editorial Office, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Predictive maintenance technique basing on real-time acquisition, transmission and analysis of aircraft data has been a trend in aviation industry. Starting from the technical connotation and systematic function of aircraft maintenance, combining with the research hotspots obtaining from journal articles and patents in this field, the developing status and tendency of predictive aircraft maintenance techniques are systematically described in this paper. Then the application of new generation of information techniques such as AI, automatic maintenance, autonomous drone, robot, and intelligent supply chain are sorted out. Finally, based on the generalization of technical framework and key techniques, several strategic suggestions for domestic development and localization of predictive aircraft maintenance techniques are proposed.

Key words: aircraft; predictive maintenance; prognostics and health management (PHM); industrial robot; artificial intelligence (AI)

收稿日期: 2020-08-24; **修回日期:** 2020-10-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122019009); 天津市教委科研项目(2019SK110); 天津市教委社会科学重大项目资助(2020JWZD09)

通信作者: 于得水, ds_yu@cauc.edu.cn

引用格式: 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)

0 引言

航空器维修是根据适航要求和航空器情况制定维修方案,并按照标准流程实施维修方案中规定的维护、修理或改装,同时监控维修质量和可靠性,确保航空器在运营过程中持续适航的系统工程^[1],属于典型的高技术服务业。保持航空器的可用性,确保航空器飞行安全,是航空器使用的前提和必要条件^[2]。

航空器维修是航空运输业的重要组成部分,有效保障和支援航空公司的运营,以较优的成本、较低的飞机延误率和较高的飞机可用率,使航空公司实现效益最大化^[3]。目前,国内航空公司的航空器维修费用在运营成本中占到 15% 左右,约为欧美国家的 2 倍,亟需降低维修成本,需要研发可替代航材 (Parts Manufacturer Approval, 简称 PMA),发展智能维修装备和先进维修技术。

维修技术发展方面,国内外研究人员分别从数据采集、数据处理、航空材料等角度对航空器维修现状进行了系统研究,结果表明,大数据、数字化、增材制造、表面防护、复合材料修理等已成为航空器预测性维修 (Predictive Maintenance, 简称 PM) 发展的关键技术^[1-2, 4-5]。

维修技术体系方面,航空器预测性维修主要包括两大方面:故障和健康管理 (Prognostics and Health Management, 简称 PHM)、剩余使用寿命预测 (Remaining Useful Life Prediction, 简称 RULP)。PHM 技术通过传感器技术采集航空器运行过程中的状态数据,再对比分析特征数据变化趋势,识别故障性质、程度、部位和产生原因,预见可能发生的故障;同时根据预测信息、可用资源和运行要求,对维修和保障活动进行智能决断^[6-11]。RULP 技术则利用深度神经网络 (DNN)、高斯过程回归 (GPR) 等算法,对系统运行数据和性能降级状态进行监控和跟踪,预测系统未来健康状况及使用寿命,从而为部附件换发提供准确的参考^[12-13]。

维修行业发展方面,国际大型航空器制造企业呈现出“制造业服务化趋势”^[14],以提供实时性、预见性的产业服务来实现差异化竞争优势。信息化时代,航空器的预测性装配和维修技术势不可当。为此,本文以产业应用为线索,梳理预测性维

修技术的研究热点、支撑技术、发展路线、典型企业及其应用案例,以期对中国航空制造企业缩短技术差距、突破技术壁垒提供技术参考。

1 预测性维修技术框架

复杂机械系统由动力、液压、控制、驱动、传动等核心模块构成,易出现过热失效、振动失效、泄露失效、断裂失效等失效模式。在分析失效模式、匹配失效模块及其部附件的基础上,预测性维修技术包括模块类型选择、系统信息收集和 PHM 处理,其工作流程与技术框架^[6-13]如图 1 所示。

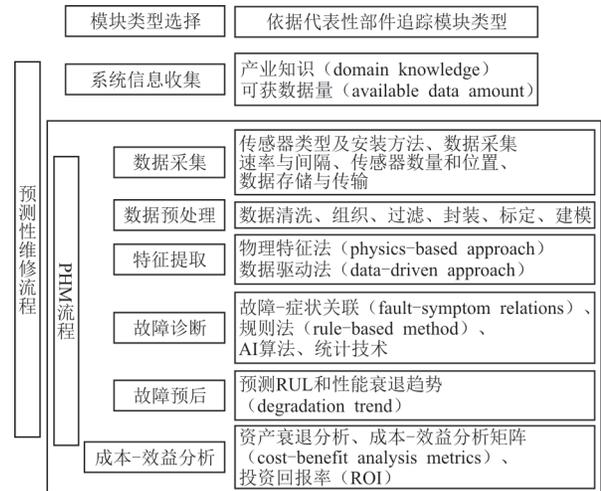


图 1 预测性维修工作流程与技术框架

Fig. 1 Work flow and technical scheme of predictive maintenance

故障特征提取、诊断和预后是航空器预测性维修的核心流程,其中所涉及到的关键技术如表 1 所示。

表 1 航空器故障特征提取、诊断和预后关键技术

Table 1 Key techniques of aircraft fault feature extraction, diagnosis and prognosis

子流程	关键技术
特征提取	气路分析 (GPA)、溶解气体含量 (DGC)、时域 (TD)、频域 (FD)、时频域 (TFD)、统计特征 (SF)
故障诊断	模糊干扰系统 (FIS)、Petri 网、神经网络 (ANNs)、支持向量机 (SVMs)、遗传算法 (GA)、经验模态分解 (EMD)、贝叶斯网 (BN)、模糊 c-means (FCM)、自组织图算法 (SOMA)
故障预后	粒子滤波算法 (PF)、卡尔曼滤波算法 (KF)、高斯过程回归 (GPR)、神经网络 (NN)、隐马尔可夫模型 (HMM)、递归最小二乘法 (RLS)

从表1可以看出:从数据采集(data acquisition)到成本-效益分析(cost-benefit analysis)再到下达维修决策,预测性维修实施的关键技术包括:产业背景知识(domain knowledge,亦称“know-how”)、传感器布局和效能、算法和算力。

以上关键技术整合,呈现出当今预测性维修的三个主要趋势,详述如下。

多源数据采集和分析。利用机器人、人工智能、高性能传感器等技术,全面采集航空器运行过程中的状态数据,充分解读数据信息并进行分类储存。分步实现维修数据(流程、人员、生产、质量、技术等)生成、发布和采集的自动化,减少人工环节的干预,降低各类数据的错误率。维修数据生成由人工向自动转变,由纸张向电子签署转变。建立维修数据的记录规则,通过格式化的电子签名系统、移动终端建设实现维修数据的生产自动化^[15-16]。

数字化综合平台。多源数据经过“数据中台”综合在一起,通过数据分析,形成更精准的维修排程模型,掌握维修进度,使得各维修支援部门按排程预报及任务分配有条不紊地执行;针对突发事件进行快速诊断及预案调配,及时触发各部门紧急支援及任务分配^[15]。集成消费者、生产者以及企业内部信息,在企业内部实现所有环节信息快速响应、无缝链接;集成企业合作伙伴信息,形成信息共享及无间合作,建立跨企业互信协同,实现维修产业链动态可视化联动管理。分散式信息融合、分布式信息融合、多速率交互式多模型融合等诸多数据融合方法被进一步研究,数学关联算法进一步发展。随着信息处理技术的发展,出现了神经网络、粒子群、量子小波变换、支持向量机等一系列新的信息融合方法,可有效解决模型预报、图像识别、故障诊断等复杂问题。

智慧维修决策。以规范行业标准为基础、规避生产风险为原则,结合大数据、物联网、人工智能等技术手段,按照部门间信息传递、业务进度和关键工序管控要求,兼顾使用体验和应用效率,逐步将维修生产经验或管理控制技巧,通过工序业务划分,归类判断,并通过数据挖掘等算法建立人工智能模型。进而实现系统自我排程、监管、预报、自动通知或处理、报警等功能,再通过实际生产进行反复验证,最终调试出符合产业管理特点

的智能维修模型,从传统的人工传递管理信息模式逐渐向智能化预测型智慧工业转变。

2 航空器预测性维修产业及研究趋势

2.1 产业趋势

航空器维修是一项综合数学分析、工程管理、加工制造等众多技术为一体的系统工程,任何一方面的发展水平都会影响维修的工程品质和成本,最终影响行业的竞争力。国外先进的OEM厂商、航空公司以及MRO在21世纪初都已经进入到数字化维修时代,利用飞行状态数据预测航空器的故障,协助制定相应的维修方案。2003年美国GE公司开始使用发动机预测和管理(EHM)系统,同期波音公司升级了飞机健康管理(AHM)系统、空客公司开发出AIRMAN系统。由于在航空器故障模型方面占有优势,OEM厂商在故障预测系统开发方面起步较早^[3]。这一时期的故障预测系统主要依靠飞行状态数据,输入来源比较单一,若要进行更为准确的预测,需要更为多源的数据尤其是维修数据的输入^[17]。

2012年,“大数据”概念被提出,OEM和MRO在大数据应用方面纷纷开展研究工作。为了输入更为多源的数据,数字化维修向平台化方向发展。2013年,GE公司推出了Predix平台,利用此平台管理飞行状态数据、运维数据、设计数据等;2015年欧洲最大的航空公司——法荷航推出了Prognos平台^[18];2017年,在巴黎航展上,波音公司展出了AnalytX平台,空客公司展出了Skywise平台^[4];同年,MRO德国汉莎技术公司推出了Aviatar平台。

进入到“大数据”时代以后,在运维数据方面的优势使得航空器运营商和MRO企业在数据平台方面的工作尤为出色,具有代表性的是德国汉莎公司的Aviatar平台^[19]。该平台自2017年开放至今,已融合了许多不同功能的程序,包括实时反映航空公司机队整体状况的Condition Monitoring、用于故障分析并查询维修历史的Fault Analytics、实时掌控机队中突发状况的Fleet Management、为航空公司选择最优MRO供应商的MRO Radar、用于故障预测的Predictor Plugins、航空公司之间共

享零备件的 PartsMate、自动创建 KPI 报告的 Reliability Management、便于航空公司与供应商进行交流的 Record Status、对零备件购买进行标准化管理的 Skeyos Marketplace、第一个在线工具租赁平台 ToolNOW、以及用于飞机短停管理的 AirGlance 等,拥有将近 1 000 架飞机的数据,大约 10 家客户及运营商正在使用这个平台。

这种新的综合化数字模式的建立改变了民用航空器的运维模式,使得运维企业针对航空器可以实施更为精准的预测性维修。数字化、平台化、智能化是航空器预测性维修的基础,航空器维修亟需进行“数字化维修”技术攻关^[20]。

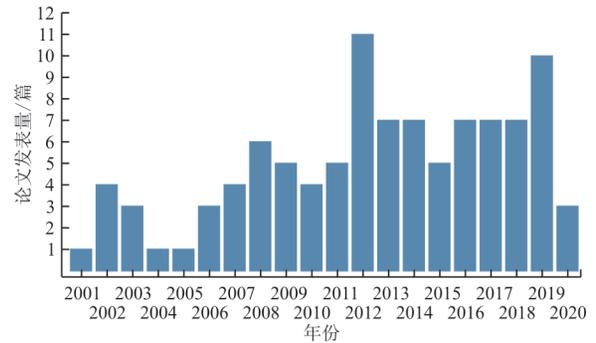
2.2 研究态势

2.2.1 文献计量

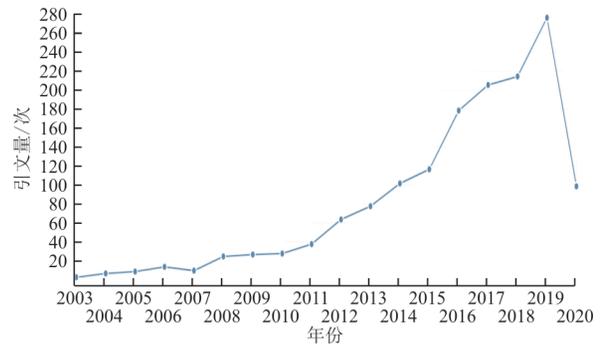
进入 21 世纪以来,关于航空器预测性维修的研究成果虽然总量偏少,但已逐渐得到学界和生产商的重视。以“predictive aircraft maintenance”为关键词,检索 Web of Science 数据库,得到相关论文 101 篇,总被引频次达到 1 480 次,篇均 14.65 次被引,逐年发表量和逐年引文数量如图 2 所示,可以看出:预测性维修平均每 6~7 年会出现一次小的论文发表高峰,而论文被引频次的逐年上升则表明预测性维修热度不减。

论文高频词统计如图 3 所示,可以看出:该领域的热门研究方向涵盖了多种相互交叉的学科,

包括工程、数学、计算机科学、经济学、材料科学、设备、自动控制系统、物理、机械、控制研究与管理科学、能源与燃油、机器人、远程通讯等,这些学科共同构成了预测性维修的理论基础。



(a) 逐年发表量



(b) 逐年引文量

图 2 “预测性维修”相关论文统计

Fig. 2 Published paper statistics on predictive maintenance

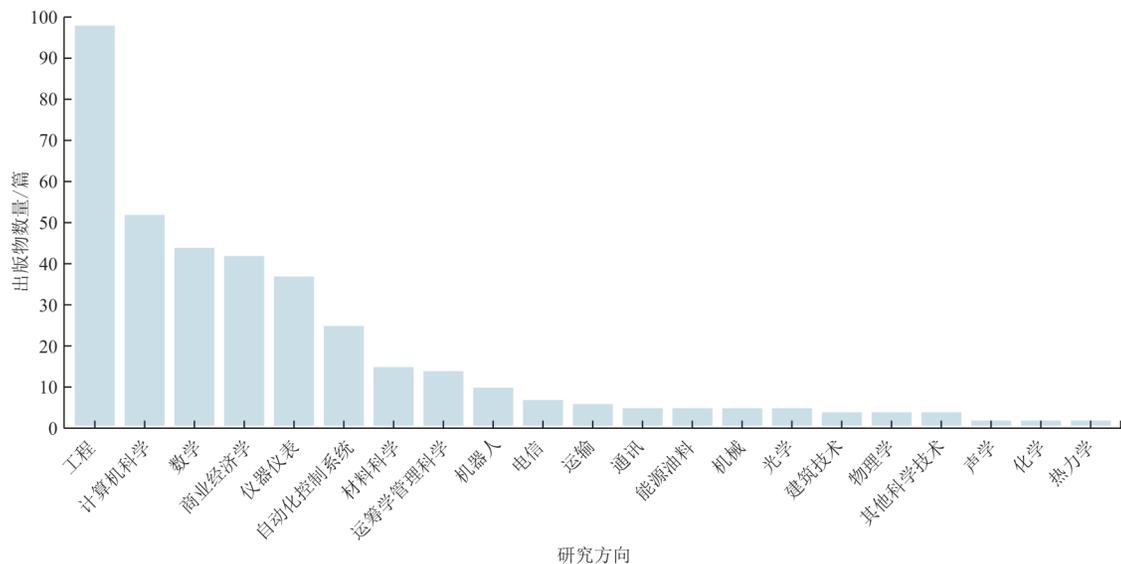


图 3 “预测性维修”研究热点

Fig. 3 Research focuses on predictive maintenance

2.2.2 专利分析

以中英文“航空器预测性维修”作为关键词检索国内外数据库,得到 12 069 项专利,主要分布在

计算、控制、通信、信号装置、节能减排等方面,专利技术领域及主要申请国如表 2 所示。

表 2 预测性维修专利技术领域及申请国

Table 2 Patent technical domain and applicant countries in the field of predictive maintenance

技术领域	含义	各国申请量/件										总计
		美国	中国	法国	德国	英国	日本	澳大利亚	加拿大	以色列	爱尔兰	
G06	计算;推算;计数	2 290	219	134	52	83	26	31	27	18	23	2 903
B64	飞行器;航空;宇宙航行	588	519	416	127	68	81	9	16	3	0	1 827
G01	测量;测试	1 150	252	162	49	50	29	12	23	10	13	1 750
G05	控制;调节	906	78	118	23	10	21	0	13	5	8	1 182
H04	电通信技术	932	119	0	22	9	17	26	7	19	10	1 161
G08	信号装置	373	263	50	20	8	0	24	0	6	5	749
G07	核算装置	331	0	40	0	0	0	0	4	3	3	381

对 2010~2019 年航空器预测性维修相关专利的技术主题进行聚类,排序前 10 的技术热点如图 4 所示,加标签表示该聚类包含“IncoPat”高价值专利。

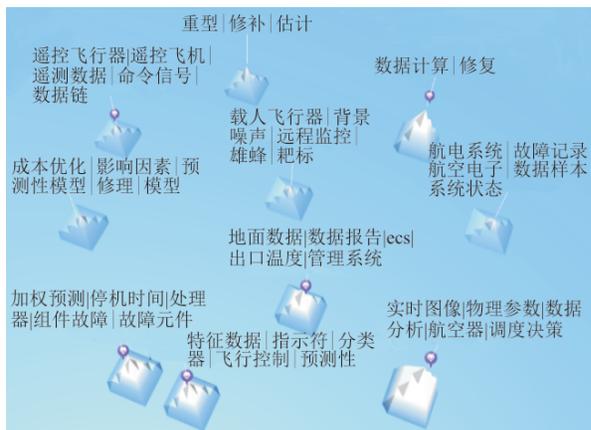
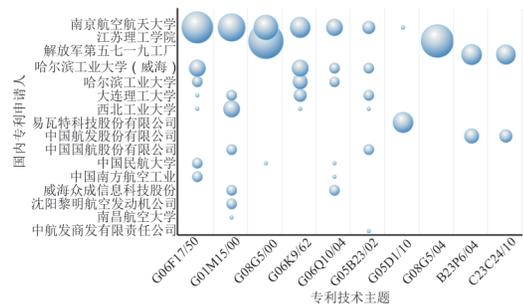


图 4 “航空器预测性维修”相关专利技术主题聚类
Fig. 4 Techniques cluster of relative patents in the field of aircraft predictive maintenance

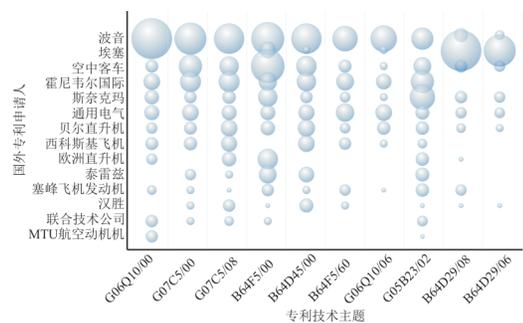
从图 4 可以看出:数据的远距离收集、报告和计算是近年来的研究热点,故障数据的实时记录和分析预测是未来的发展趋势,传感器等电子元器件的升级是主要技术基础,成本优化和调度决策是预测性维修技术研究的主要驱动力。

对该主题下的专利申请人及其技术主题进行

排序,如图 5 所示。为了方便比较,本文给出国内外排名前 10 的技术主题专利 IPC 小组号及含义,如表 3 所示。



(a) 国内主要专利申请人及技术主题



(b) 国外主要专利申请人及技术主题

图 5 “航空器预测性维修”国内外专利申请人及其技术热点
Fig. 5 Patent applicants and their technical focuses in the field of aircraft predictive maintenance in and abroad

表 3 “航空器预测性维修”国内外专利 TOP10 及 IPC 编号含义

Table 3 TOP Ten patents and their IPC number meaning in the field of ‘aircraft predictive maintenance’ in and abroad

TOP10	IPC 小组号	含义
国内	G06F17/50	计算机辅助设计
	G01M15/00	发动机测试
	G08G5/00	空中航行器的交通控制系统
	G06K9/62	应用电子设备进行识别的方法或装置
	G06Q10/04	预测或优化,例如线性规划、“旅行商问题”或“下料问题”
	G05B23/02	电检验式监视
	G05D1/10	位置或航道的三维同时控制
	G08G5/04	防撞系统
	B23P6/04	断裂金属部件或产品的修理
	C23C24/10	临时形成液相的金属覆层
国外	G06Q10/00	适用于行政、管理或预测目的的数据处理系统或方法
	G07C5/00	行程、速度等核算装置、发动机指示器
	G07C5/08	登记或指示驾驶、运行、空转或等候时间以外的性能数据
	B64F5/00	其他类目不包含的飞机设计、制造、装配、清洗、维修或修理
	B64D45/00	其他类目不包含的飞机指示装置或防护装置
	B64F5/60	其他类目不包含的飞机设计、制造、装配、清洗、维修或修理
	G06Q10/06	资源、工作流、人员或项目管理
	G05B23/02	控制系统或其部件的电检验或监视
	B64D29/08	用于动力装置的可拆卸检验板
	B64D29/06	短舱、整流装置或整流罩的附装

从图 4~图 5 和表 3 可以看出:计算机辅助下的数据监测和处理是目前航空器预测性维修的专利技术热点,其次分别为部附件优化、表面处理、流程优化;研发主题方面,国内呈现出高校为主、国企为辅、军民协同的景象,需进一步提高政产学研用的有效循环,促进成果落地转化;国外专利申请人以波音等“巨头”为主,各公司技术主题的分布呈现阶梯式、全覆盖的特点,形成了较为完善的产业链,产业生态的建设值得国内企业和管理部门重视。

3 预测性维修应用进展

3.1 可穿戴维修辅助设备

(1) 数据实时获取及多屏显示。可穿戴计算机便于航线维修人员携带,利用 APP 快速获取维修手册、飞机履历、维修记录等维修数据,在多个设备实时共享。

(2) 语音识别及数据对比技术。航线上的维修人员可以口头报告飞机轮胎胎压和其他状态信息,声控设备自动将这些数据与预设的参数值进行对比,并向维修人员反馈。机库中的维修人员也可口头报告部件的质量、状态和时寿,核查零部件的可用性,科学制定零部件订购和更换计划。

3.2 机器人辅助自动化维修

(1) 替代重复性工作。由机器人替代人工完成绕机检查、飞机外表面清洁等重复性工作,可在很大程度上避免疲劳状态导致的人为差错。在对大面积区域进行缺陷寻找时,也可以利用机器人进行无差别检查,并将检查数据及时传给附近的无损检测工程师进行甄别。

(2) 替代危险性工作。带吸盘的爬行机器人可爬行至目标区域,且不受暴雨、高温等天气影响。

(3) 大幅提高工作效率。由无损检测工程师对不同站位的机器人发出批量指令,不仅可以缩短工作周期、降低人工成本,而且能精确发现部件和结构的内部裂纹,使损伤容限设计下的航空材料不至于被提前更换。

(4) 辅助维修决策。在地面工程师的监视下,由自动飞行控制系统指挥无人机沿预设路线完成飞机外观检查,将飞行过程中自动拍摄的图片录入数据库,与 3D 电子模型对照,及时发现擦痕、凹痕和掉漆,提高损伤的可追踪性,进一步预防和减少损伤。

3.3 智能供应链技术

构建航材管理公共信息平台 and 支援系统、航材全生命周期质量认证及追溯系统、备件智能调度系统。加强智能化入库检验、分拣存储、装卸搬运、配送等自主装备的研发和推广应用,建设航材智能监控存储系统,提升航材运营管理水平 and 效率。采取智能供应链技术可以改善数据质量,实现单一可追溯的序列号记录,增强跨企业信任,降低互认成本,提高持续适航性等。

3.4 数字孪生技术与 PHM

航空器装配和维护技术水平对其工作性能的影响十分显著。在航空器装配初期,利用数字孪

生技术(Digital Twins,简称DT)建立物理世界和信息世界的匹配融合^[21],并在航空器运行过程中持续进行基线数据(Baseline Data)监控和收集,利用快速存取记录器(Quick Access Recorder,简称QAR)数据进行模型验证,从而实现对发动机剩余寿命(Remaining Useful Life,简称RUL)的预测^[22]。数字孪生和基线挖掘作为逆向工程技术的代表,对我国航空器预测性维修技术的自主可控具有重要意义,在突破OEM厂商技术壁垒的过程中发挥了重要作用。随着物联网(Internet of Things,简称IOT)及相关数据采集技术的普及程度逐步提高,故障预测和健康管理逐渐成为航空器预测性维修的集大成者,实现了数据采集与处理、状态监测与故障诊断、预见性维护、智能决策的完整流程,提高了协同保障效率,降低了维护费用,减少了停机时间。

3.5 AHM与APUs

如上所述,国际知名航空器制造企业在预测性维修方面均已开展多项研究和应用。波音公司(Boeing)在PHM的基础上,提出了AHM(Airplane Health Management),旨在通过预见性的维护数据分析(Predictive Maintenance Analytics)来提高航空器的实时性能^[23]。该系统目前已在多架现役飞机上使用,利用飞机实时数据来提供快速的性能评估决策,通过系统和部件预警降低计划外维护的概率,通过实时监控来优化飞行计划、提高燃油效率。

航空发动机制造巨头霍尼韦尔公司(Honeywell)的航空器数据网关技术(Aircraft Data Gateway),通过无线数据库和QAR数据,可将维修效率提高50%;该公司还开发了故障排除辅助动力单元(Troubleshooting Auxiliary Power Units,简称APUs)为客户提供预见性的航空器态势监控和诊断服务(Predictive Trend Monitoring and Diagnostics,简称PTM & D)^[24]。

4 预测性维修自主化发展策略

(1) 加快布局航空制造业互联机制。工业互联网是第四次工业革命的基石,工业、软件和通信技术的深度融合为行业发展带来了新的生命力。全面、合理部署智能设备,构建航空制造业的泛在

感知、智能决策、敏捷响应、全局协同、动态优化能力^[25]。通过工业互联,将航空器制造维修机理显性化、系统化、数字化,是预测性维修的基础。

(2) 促进信息服务标准化。数字孪生是推进工业互联网建设的前提,其基础是信息化建设,而信息服务标准化是信息迁移、信息同步的前提^[26]。在航空器运行初期即建立国际化、标准化的服务接口,确保运行信息的批量交换和跨企业互操作,从而实现更高效率的资源配置和维修决策。

(3) 加大智能制造人才培养力度。目前,熟悉航空器维修、掌握AI算法和程序开发技术的综合性相关人才匮乏,工业软件基础薄弱,制约了预测性技术在航空器维护维修中的开发和应用。应加大产学研协同,遴选相关院校的优秀师生,联合企业建立培优机制,同步加强师资力量和人才培养,为航空器预测性维修的全面部署积蓄力量。

5 结束语

2020年初,美国政府对GE公司向中国出售C919选型发动机实施干预,引发国内航空业对自主制造技术、自主运营技术的强烈呼吁。本文在梳理航空器制造、维护技术发展趋势的基础上,从航空制造业互联机制、信息服务标准化、智能制造人才培养三个角度,提出航空器预测性维修自主化发展策略,为行业发展提供决策参考,提高相关技术自主化程度。

预测性维修是航空器维护的国际趋势,相关配套技术的广泛普及将带来行业的全面革新。后续研究将从工业互联、智能制造、工业软件开发等方面,持续追踪国内外相关研究热点,重点关注国内外主要专利申请人和高水平论文所在科研单位,深入分析国内外技术差异,增加对重点研发国家和企业在研发投入、研发备忘录等方面的系统梳理,为我国航空器制造企业和科研院所提供更加精准的技术情报。

参考文献

- [1] PAUL S, DAVID J S, 蓝楠. 维修业各方积极推动数字化维修记录的发展[J]. 航空维修与工程, 2016(10): 18-19.
PAUL S, DAVID J S, LAN Nan. Why airlines, aftermarket struggle with digital record-keeping[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016(10): 18-19. (in Chinese)
- [2] 张弥. “大数据”时代数字化飞机维修展望[J]. 科技经济市场, 2016(5): 102.

- ZHANG Mi. Digitalized aircraft maintenance trend in 'big data' era [J]. *Science & Technology Economy Market*, 2016(5): 102. (in Chinese)
- [3] 郭发展, 邹赫, 刘志荣, 等. 中国民航维修业的现状与挑战 [J]. *航空工程进展*, 2015, 6(4): 495-501.
- GUO Fazhan, ZOU He, LIU Zhirong, et al. Current situation and challenges of the civil aviation maintenance industry in China [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2015, 6(4): 495-501. (in Chinese)
- [4] 张显镇, 刘北萍, 张丕宇. 预测性维修发展及应用浅析 [J]. *科技信息*, 2009(36): 650.
- ZHANG Xianzhen, LIU Beiping, ZHANG Piyu. Development and application analyses of predictive maintenance [J]. *Science & Technology Information*, 2009(36): 650. (in Chinese)
- [5] 张斌, 李琦. 预见性与预防性维修之比较 [J]. *冶金设备*, 2017(S2): 332-335.
- ZHANG Bin, LI Qi. Comparison of predictive and preventive maintenance [J]. *Metallurgical Equipment*, 2017(S2): 332-335. (in Chinese)
- [6] SHIN I, LEE J, LEE J Y, et al. A framework for prognostics and health management applications toward smart manufacturing systems [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018, 5: 535-554.
- [7] MICHAEL G P, MYEONGSU K. Prognostics and health management of electronics: fundamentals, machine learning, and the internet of things [M]. Piscataway, N J: Wiley-IEEE Press, 2018.
- [8] KONG C. Review on advanced health monitoring methods for aero gas turbines using model based methods and artificial intelligent methods [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2014, 15(2): 123-137.
- [9] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. Condition assessment for the performance degradation of bearing based on a combinatorial feature extraction method [J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 27: 159-166.
- [10] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. An adaptive method for health trend prediction of rotating bearings [J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 35: 117-123.
- [11] 靳国涛. 飞机电液伺服阀早期故障征兆诊断 [J]. *航空工程进展*, 2020, 11(4): 563-571.
- JIN Guotao. Early fault symptom diagnosis of aircraft electro-hydraulic servo valve [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(4): 563-571. (in Chinese)
- [12] HONG Sheng, ZHOU Zheng, LU Chen, et al. Bearing remaining life prediction using Gaussian process regression with composite kernel functions [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2015, 17(2): 695-704.
- [13] REN Lei, ZHAO Li, HONG Sheng, et al. Remaining useful life prediction for lithium-ion battery: a deep learning approach [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 50587-50598.
- [14] 孙耀吾, 贺石中. 高技术服务创新网络开放式集成模式及演化——研究综述与科学问题 [J]. *科学与科学技术管理*, 2013, 34(1): 48-55.
- SUN Yaowu, HE Shizhong. Open integrated mode of high-tech service innovation network and its evolution: a survey of the literature and view for further research [J]. *Science of Science and Management of S. & T.*, 2013, 34(1): 48-55. (in Chinese)
- [15] 李本威, 林学森, 杨欣毅, 等. 深度置信网络在发动机气路部件性能衰退故障诊断中的应用研究 [J]. *推进技术*, 2016, 37(11): 2173-2180.
- LI Benwei, LIN Xuesen, YANG Xinyi, et al. Research on application of deep belief networks on engine gas path component performance degradation defect diagnostics [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(11): 2173-2180. (in Chinese)
- [16] 顾祝平, 郑逢亮. 基于状态维修策略下的数据自动获取技术 [J]. *航空维修与工程*, 2012(3): 42-45.
- GU Zhuping, ZHENG Fengliang. Automatic data acquisition techniques under aircraft CBM strategy [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2012(3): 42-45. (in Chinese)
- [17] 陈华. 中国西南航空公司飞机维修工程系统项目实施方法 [D]. 成都: 电子科技大学, 2003.
- CHEN Hua. Aircraft maintenance engineering system project application of China southwest airlines [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- [18] ALEX D, 李璇. 先进复合材料的维修日益复杂 [J]. *航空维修与工程*, 2018(12): 17-19.
- ALEX D, LI Xuan. Cost of maintaining composites can offset performance gains [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2018(12): 17-19. (in Chinese)
- [19] 曹建. 民用飞机预测性维修实施方案研究 [J]. *科技展望*, 2015, 25(21): 65.
- CAO Jian. Application plan research on civil aircraft predictive maintenance [J]. *Technology Outlook*, 2015, 25(21): 65. (in Chinese)
- [20] 蓝楠. 突破创新 合作共赢——2015 中国航空维修峰会侧记 [J]. *航空维修与工程*, 2015(11): 16-19.
- LAN Nan. Wrap-up of MRO China 2015 [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2015(11): 16-19. (in Chinese)
- [21] 孙惠斌, 颜建兴, 魏小红, 等. 数字孪生驱动的航空发动机装配技术 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(7): 833-841.
- SUN Huibin, YAN Jianxing, WEI Xiaohong, et al. Digital twin-driven aero-engine assembly technology [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(7): 833-841. (in Chinese)
- [22] 曹惠玲, 崔科璐, 郭静. 非完美维修下民航发动机剩余寿命预测 [J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(12): 1969-1974.
- CAO Huiling, CUI Kelu, GUO Jing. Prediction on residual

- life of civil aviation engine under imperfect maintenance[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(12): 1969-1974. (in Chinese)
- [23] Boeing. Airplane health management (AHM) [EB/OL]. [2020-08-24]. <https://www.boeing.com/services/maintenance-engineering/airplane-health-management-ahm/>.
- [24] Honeywell. Extend the value [EB/OL]. [2020-08-24]. <https://aerospace.honeywell.com/en/learn/services/maintenance-and-service-plans>.
- [25] 工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构(版本 2.0) [R]. 北京: 工业互联网产业联盟, 2020.
Alliance of Industrial Internet. System architecture of industrial internet (Version 2.0) [R]. Beijing: Alliance of Industrial Internet, 2020. (in Chinese)
- [26] Industrial Internet Consortium. Digital twins for industrial

applications: definition, values, business, aspects, design, standards and use cases (Version 1.0) [R]. Milford, MA: Industrial Internet Consortium, 2020.

作者简介:

孔旭(1981—),男,硕士,助理研究员。主要研究方向:创新态势与科研管理。

于得水(1993—),男,硕士,研究实习员。主要研究方向:民航科技管理、应用统计与数据可视化。

丁坤英(1981—),男,博士,副教授。主要研究方向:航空器维护工艺开发与装备制造。

刘佩佩(1985—),女,硕士,编辑。主要研究方向:创新态势分析与科技期刊建设。

(编辑:马文静)

(上接第 20 页)

- [14] JU S, SHENOI R A, JIANG D, et al. Multi-parameter optimization of lightweight composite triangular truss structure based on response surface methodology [J]. Composite Structures, 2013, 97: 107-116.
- [15] 陈勇. 飞艇骨架结构拓扑优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
CHEN Yong. Topology optimization of skeleton structure of airship [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 南波. 半硬式平流层飞艇骨架精细化分析与轻量化设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
NAN Bo. Refined analysis and light-weight design of semi-rigid stratospheric airship frame structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [17] ZHU X, HE R, LU X, et al. A optimization technique for the composite strut using genetic Algorithms [J]. Materials and Design, 2015, 65: 482-488.
- [18] ARNSTEIN K, SHAW E L. Notes on recent structural research at goodyear-zeppelin corporation [C]// Aeronautical Sciences, Lighter-than-Air Symposium, Seventh Annual Meeting. [S.l.]: [s.n.], 1939: 975.

- [19] 周利霖. 大型飞艇龙骨缩比模型设计方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
ZHOU Lilin. Design method of scale model for large airship keel [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)

作者简介:

李亚智(1962—),男,博士,教授、博导。主要研究方向:复合材料结构力学、疲劳与断裂力学。

龙飞(1982—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机动力装置及环控设计。

孔卫宏(1985—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计。

何巍(1982—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计。

朱天阳(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构力学。

刘城(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构力学。

(编辑:马文静)