

民用飞机运行可靠性研究进展*

冯蕴雯, 刘佳奇, 潘维煌, 路 成

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

摘要:结合民用飞机运行可靠性研究的技术现状与发展趋势,根据现有的型号设计、研制和在役飞机的具体情况,阐述了民用飞机运行可靠性研究需求。通过梳理民用飞机运行可靠性理论研究进展及工程应用现状,从运行数据采集与处理、运行可靠性分析方法、运行可靠性预测反馈技术、运行可靠性的优化设计、优化维修任务、运行可靠性综合管理平台六个方面,详细阐述民用飞机运行可靠性研究现状及面临问题,展望了民用飞机运行可靠性研究未来发展方向。

关键词:民用飞机;运行支持;运行可靠性;数据处理

中图分类号:V219;TH122 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

文章编号:1001-2486(2023)04-066-28



听语音
与作者互动
聊科研

Research progress of operational reliability of civil aircraft

FENG Yunwen, LIU Jiaqi, PAN Weihuang, LU Cheng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the technical status and development trend of civil aircraft operation reliability research, the requirements of civil aircraft operation reliability research were expounded according to the current type design, development and actual situation of in-service aircraft. By reviewing the research progress and engineering application status of civil aircraft operational reliability theory, the research status and problems of civil aircraft operational reliability are elaborated from six aspects: operation data acquisition and processing, operational reliability analysis method, operational reliability prediction feedback technology, optimization design based on operational reliability, optimize maintenance tasks, and comprehensive management platform for operational reliability. The future development direction of operation reliability research of civil aircraft is prospected.

Keywords: civil aircraft; operation support; operational reliability; data processing

随着航空技术的发展,系统复杂程度越来越高,全球航空业对民用飞机可靠性提出了更高的要求,运行可靠性作为沟通维修工程分析和设计的桥梁,是飞机实现全寿命周期可靠性管理亟待突破的关键技术之一,是提升飞行器安全可靠稳定运行能力的有效手段^[1-4]。为了科学、合理地分析民用飞机的运行可靠性,完善民用飞机可靠性管理体系,国际民航组织(international civil aviation organization, ICAO)在安全管理体系(safety management system, SMS)中特别强调指出,危险识别应该是积极而具有前瞻性的,有必要积极查明尚未发生的危害^[5];联邦航空管理局(federal aviation administration, FAA)提出了安全性“监视/数据分析”过程^[6];欧洲航空航天与防务工业协会(aerospace and defense industries

association of Europe, ASD)和美国航空工业学会(aerospace industries association, AIA)制定了《在役数据反馈规范》^[7-8](international specification for in-service data feedback),通过运行数据采集处理和运行可靠性评估,使制造、运营、维修等相关方对飞机运行和维护性能进行透彻分析。全球各航空组织以期通过提高飞机运行可靠性来提高日利用率和降低运营成本。

可靠性工程在20世纪50年代成为一门学科,随着80至90年代方法论的广泛发展和实际应用,它被认为对系统分析十分重要^[9-10]。长期以来,可靠性工程面临三个基本任务的挑战:系统表示和建模、系统模型量化、不确定性建模和量化^[11]。对民用飞机而言,由于任务不同导致个体间运行条件与环境并不相同,系统或部件的损伤和劣化程度差

* 收稿日期:2023-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875465);工信部民机专项科研资助项目(MJ-2020-14)

作者简介:冯蕴雯(1968—),女,陕西西安人,教授,博士,博士生导师,E-mail:fengyunwen@nwpu.edu.cn;

刘佳奇(通信作者),男,河北承德人,博士研究生,E-mail:liujiaqi@nwpu.edu.cn

异很大,这就决定了针对单架民用飞机的某系统或部件开展可靠性分析是个性问题^[12-13],传统依赖大样本条件的基于概率统计的平均可靠性方法难以满足日益复杂的装备系统个体运行可靠性分析需求^[14-15]。针对这一新挑战,ZIO^[16]提出依据运行监测数据开展运行可靠性分析;何正嘉等^[17]对机械设备运行可靠性评估进行了总结和思考,提出了机械设备运行可靠性评估有待解决的问题;冯蕴雯等^[18-20]指出了经典可靠性评估方法在民用飞机复杂系统可靠性评估中的不足,将运行可靠性理论应用于民用飞机复杂系统的可靠性分析。

总的来说,采用经典可靠性方法开展民用飞机运行过程中可靠性分析所面临的挑战如下:

1)对于飞机具体系统或部件的运行过程中可靠性评估样本量小,且对于灾难性事故不具有概率重复性,收集大样本统计数据困难,在小样本特性下,失效分布参数估计的难度大;

2)基于有限状态假设^[21],而通常情况下飞机系统或部件退化状态是连续的并且具有很强的不确定性,系统或部件间存在耦合作用且失效分布规律不同^[12],可靠性数学模型难以获得失效前的可靠性变化规律;

3)对于任务中的飞机,其运行过程中的可靠性是关注焦点,可靠性分析对飞机运行过程中复杂状态、变工况缺乏考虑,因而难以有效应用于实时在线评估。

针对大量概率重复性样本依赖度高的问题,专家学者选用低概率依赖方法开展了改进可靠性分析方法研究。Padey^[22]针对小样本情况下以样本矩为约束条件的最大熵法存在的问题,提出了以概率加权矩为约束条件的最大熵法;Diamoutene等^[23]基于比例风险模型中的极值理论提出了针对小样本情况的基线风险函数,研究了环境因素对飞机性能建模的影响;余国林^[24]对小子样飞机系统可靠性评估技术进行探索性研究,分析了飞机总故障率的特点以及飞机部件的可靠性与使用时间的关系;冯静等^[25-26]提出基于Bayes-模糊逻辑算子的小子样可靠性信息融合方法,解决了复杂系统可靠性评估中小样本量导致的结果可信度不高问题;袁修开等^[27]结合以概率加权矩为约束条件的最大熵法和求解置信区间及置信带的Bootstrap方法,提出了一种估计小子样试验件母体分位函数置信区间的方法;姜朱楠等^[28]针对后缘襟翼位置传感器故障,提出了一种基于主元分析法的故障预测流程。上述研究在一定程度上缓解了小子样下民用飞机系统或部件可靠性分析的困难,但是未能完全脱离概率与数

理统计的范畴,并未从根本上解决小子样和单系统的可靠性评估难题。

针对有限状态假设下无法有效反映飞机系统或部件的连续退化过程问题,专家学者依据飞机系统或部件的性能退化数据,假设失效退化路径或失效分布开展可靠性评估。Gebrael等^[29-30]将失效数据拟合到Bernstein分布,使用其参数估计初始退化模型随机参数的先验分布;Ordóñez等^[31]将预测变量的时间序列分析方法与机器学习技术相结合,建立飞机发动机失效退化模型;邓爱民等^[32]针对高可靠性、长寿命产品提出了基于性能退化量分布和基于退化轨迹两种可靠性评估方法;孙闯等^[33]基于核主成分分析法建立了描述系统性能变化的状态子空间,以状态信息为输入数据实现了航空发动机的运行可靠性评估;李军亮等^[34]基于深度学习理论和模拟退化算法,构建了飞机关键部件状态参数预测模型;丁建立等^[35]提出一种基于改进模糊C均值的大型客机空调系统退化评估算法,在一定程度上解决了系统退化评估中的过拟合问题。然而,民用飞机运行环境、运行状态、所受载荷、人机交互等具有多样性和复杂性,模糊隶属度的确定不免受人为主观因素的影响。

针对运行过程中实时运行特性评估难题,国内外学者开展了动态可靠性评估研究。Dominguez-garcia等^[36]提出了一种用于容错系统的可靠性和动态性能分析的集成方法,基于对系统在组件故障发生后可以达到的不同配置的动态分析进行系统评估,以飞行控制系统为研究对象验证了方法的有效性;MITICI等^[37]提出了一种端到端的方法,通过从具有类似退化趋势的组件集群中学习,获得在线基于模型的飞机冷却系统剩余使用寿命预测。陈勇刚等^[38]应用物理-事理-人理思想和Delphi法,基于灰色聚类方法和多层前馈神经网络,结合机队设备可靠性的随机性和波动性,设计了航空公司机队设备可靠性非线性动力学评估模型;梁坤等^[39]以民机引气系统为研究对象,设计实现了基于快速存取记录器(quick access recorder, QAR)数据的民机引气系统健康监测方法,提出了引气系统故障检测算法;陈勇刚等^[40]在前人研究的基础上采用ATA100章节名称作为指标源,综合可变模糊识别方法和权重阶梯朴素贝叶斯分类器模型,构建了通用航空机队设备可靠性动态识别模型;张玉杰^[41]利用在线间接监测数据获取相应的在线间接健康因子,开展了健康状态在线估计方法研究。民用飞机系统或部件动态、实时可靠性理念的提出丰富了复杂系统可靠性评估的技术手段,是复杂系统

在线、实时健康监控背景下的一大突破。然而该研究方向处于起步阶段,在特征筛选、评价指标、模型建立等方面还有待进一步研究。

飞机系统及功能的高复杂性、强耦合性、不确定性等特点决定了其难以在设计阶段、制造阶段和试验阶段解决全部的系统可靠性问题^[42-47]。运行可靠性分析的目的是动态掌握系统或部件运行状态、保障运行安全和创造经济效益,现代飞机可靠性分析需要一种新的框架,将运行过程中具有动态相互依赖性的飞机系统、部件、环境、组织和人为因素进行综合处理。复杂系统运行过程中的可靠性分析方法已在能源系统^[48-49]、机械工程^[50-52]、城市设施^[53-54]、计算机系统^[55-57]、战略与防御^[58-60]等领域进行了大量理论研究,并获得了良好应用效果。

运行可靠性定义为:系统产生期望输出的实时能力。运行可靠性分析以系统可靠性模型为基础,基于运行过程实时采集的数据和历史数据,开展可靠性分析以保障系统可靠、安全运行,为应急处置、航材配置、预测性维修、优化运行控制等提供技术支撑。作为全寿命周期可靠性管理体系研究内容的一个重要部分,运行可靠性总体研究框架如图 1 所示。数据源为研制数据和使用数据,其中研制数据源于飞机设计和试飞阶段,使用数据源于试飞和运营阶段;通过运行数据采集与处理为运行可靠性分析提供输入;开展运行与设计可靠性关联性分析,结果可为民机可靠性改进研究提供支撑;开展基于运行可靠性的设计和维修优化,为改进设计和科学合理地制定维修任务提供指导;搭建基于运行数据的可靠性管理平台,覆盖主制造商、运营商、供应商等相关方的使用需求,最终达到提升民机安全性、提高日利用率、降低运营支持成本的目的。

1 运行数据采集与处理

飞机作为一个复杂系统,在服役过程中,安全性要求高、保障费用高,随着飞机运行可靠性研究的深入发展,飞机运行数据采集的重要价值逐渐凸显。合理有效的数据采集是开展运行可靠性分析的基础,是决策的依据^[61-63]。

对国产民机而言,运行数据采集是局方、制造商和运营商共同关心的问题^[64-65]。作为制造商,协助运营商开展飞机的运行数据采集工作,是客户服务的重要内容之一^[66]。开展运行数据采集的目的是为产品可靠性管理输入完整、及时、准确的产品性能、运行和维修数据,为后续运行可靠性分析、故障预测及维修决策工作开展提供支撑^[67-68]。总

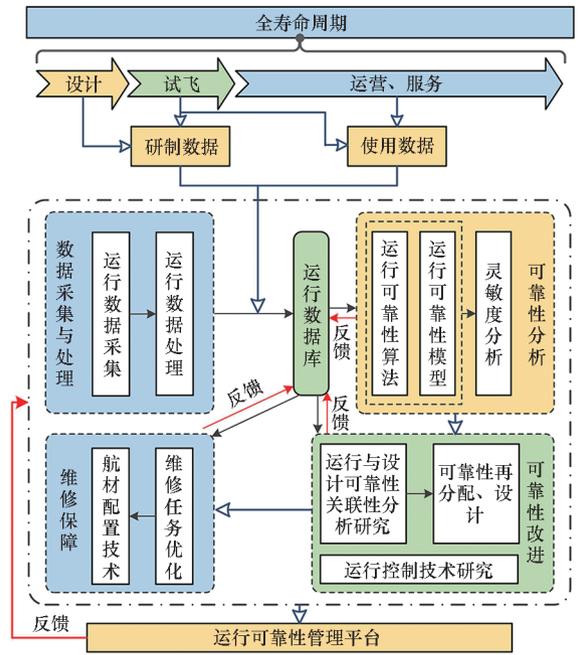


图 1 民用飞机运行可靠性总体研究框架

Fig. 1 Research framework of operational reliability of civil aircraft

的来说,通过有效的运行数据采集,能够实现多方的共赢。对国产民机制造商而言,应立足于本土化优势,通过系统、高质量的运行数据采集与分析,创造自身发展的有利空间,这是我国民机制造商进一步巩固、开拓、占有市场的重要基础。

1.1 数据采集

为了获得有效的运行数据,数据采集必须在一定的指导原则下进行,总结为以下三点:

1) 数据采集目标与运行可靠性分析的目标一致性原则。运行可靠性分析的目的为发现飞机、系统运行过程中可靠性和安全性较低项目,提前制定预防措施和纠正措施,为运营方提高飞机的运营水平提供信息基础^[69-70]。采集的数据必须能够满足运行可靠性分析的需求。

2) 数据采集的辨伪原则。由于系统环境存在高复杂性、动态时变性等特点,诸多环节都可能存在失真而增加“数据噪声”,为保证数据采集的质量,需要开展辨伪工作^[71]。

3) 数据采集日常化,重点数据专项化。时间连续性和数量累积性是民用飞机运行数据的两大特征^[72-73],需要针对常用数据开展常态化采集,针对重点数据开展专项采集,以实现常用数据的补充。

为了对民用飞机运行状态和可靠性状况进行持续的监视,须优先采集对产品可靠性、安全性影响大的特征^[74-75]。参照国外民用飞机工程应用现状^[76-80],结合国内运营商对制造商可靠性信息服务的需求,需采集的运行数据包括地面实时监

控数据和历史故障信息。

状态实时监测是运行可靠性研究的基础,通过监测航前、飞行、航后等各个阶段飞机级、系统级和部件级的状态信息,为运行可靠性研究提供足够的基础条件和数据^[78]。地面实时监控数据主要包括飞机级、系统级和勤务状态监控数据。其中,飞机级实时监控是指以单架飞机为对象,确定飞机在整个机队的日常运营和维护过程中需要关注的信息;系统级实时监控数据主要源于机载的飞机状态监控系统(aircraft condition monitoring system, ACMS),该系统通过内置的状态监控模型

对某个系统或某种异常事件进行监控,并在必要时采集相应参数通过飞机通信寻址和报告系统^[73](aircraft communication addressing and reporting system, ACARS)数据链下传至地面;勤务状态的实时监控是地面实时监控系统在部件故障实时监控功能基础上的功能拓展,主要利用ACARS数据链实时下传的勤务数据。

历史故障信息包含系统拆换记录、部件拆换记录、机组报告、运行不正常报告、飞机故障报告和使用困难报告等^[81]。

运行可靠性数据采集参数特征如表1所示。

表1 运行可靠性数据采集参数特征

Tab.1 Parameters characteristics of operation reliability data acquisition

数据种类	采集内容	信息分类	数据集	主要数据采集特征
地面实时监控数据	飞机级实时监控数据	基本运行状态信息	飞机基本信息	飞机型号、注册号、航空公司 IATA 和 ICAO 代码、MSN 号、具体型号、发动机序列号、APU 序列号及所有软硬件的件号/版本号
			航班基本信息	航班号、起飞/到达机场、飞机全重、飞机油量
			时间信息	UTC 时间、当地时间、预计到达时间、日期
			运营基本信息	飞行小时数、飞行循环数、发动机运行小时数、发动机循环数、APU 运行小时数、APU 运行循环数
	航行动态实时监控信息	滑出/起飞/着陆/滑入信息	滑出/起飞/着陆/开舱门时间、起飞/到达机场、当前剩余油量、预计到达时间	
		飞行位置信息	时间、经度、纬度、飞行高度、预计到达时间、风向、风速、总温、静温、马赫数、校正空速	
	系统级实时监控数据	发动机监控报文	正常启动报、起飞报、爬升报、稳态巡航报、性能报、非正常启动报、超限报、空中停车报、EGT/TGT 超差报等	
		APU 监控报文	APU 性能报、启动报、运行报、自动关车报等	
		其他系统报文	环控系统性能报、趋势预测报告、重着陆报、湍流报、发动机结冰报、机翼结冰报等	
	部件实时监控数据	勤务状态监控数据		驾驶舱/客舱氧气状态信息、液压系统的液压油量及压力、轮胎胎压及压差、发动机滑油信息、APU 滑油信息等
历史故障信息	系统拆换记录		故障类型、拆换类型、故障模式、故障描述、维修措施等	
	部件拆换记录		部件序列号、部件名称、部件装机数量、部件类型、拆换类型、拆换原因、使用时间等	
	飞机故障报告		发生地、故障类型、故障描述、维修措施、拆下件号、装上件号等	
	运行不正常报告		延误时间、换机次数、取消次数、返航次数、备降次数等	
	使用困难报告		发生时间、发生地点、发生阶段、涉及主要系统、故障现象、预防/紧急措施、故障件名称等	

1.2 数据处理

采集到的运行数据具有来源广、类型多等特点,直接开展数据整合会出现数据缺失、数据重复、无效数据录入^[82]等现象。数据处理的任务是为运行可靠性分析提供准确、有效的数据,保证输入数据质量满足运行可靠性分析的标准^[83]。数据处理的手段通常包括数据清洗、数据变换、数据规约等。

1.2.1 数据清洗

数据清洗是指对数据进行重新审查和校验的过程,目的在于删除重复信息、纠正存在的错误,并确保数据一致性,主要技术手段包括异常数据处理、缺失数据处理和重复数据处理。

异常数据是指在数据序列中,远离序列一般水平的数据,相较于数据集中其他数据,异常数据不符合数据集的一般规律。主流的异常数据检测技术包括基于统计、密度^[84]、距离^[85]、聚类^[86]的异常数据检测方法。运行数据采集过程中,由于受到自然或人为因素而不可避免地带有噪声。数据中的噪声是指数据集中某个属性数值的随机误差或方差,光滑噪声的方法主要有分箱方法、回归方法和聚类方法等^[87]。

缺失数据处理是数据清洗中的一个重要步骤。对于缺失数据,Litle 等^[88]定义了三种不同的数据缺失类型,即:完全随机缺失、随机缺失、非随机缺失。对于缺失数据的处理,大致可以分为以下三类:① 删除不完整数据元组^[89];② 忽略缺失数据^[90];③ 缺失值填充^[91]。

重复数据是指在数据中出现两次甚至多次的数据。民用飞机运行数据源于多系统、多部门,实际数据中可能存在数据输入错误、格式、拼写差异等问题,加之各部门系统命名不一致,对异种信息表示的多个数据源进行集成时,常导致不能正确识别出表示同一个实体的多条记录。数据的重复出现,使得该重复样本所占权重比其他数据大,导致后续运行可靠性分析的结果具有倾向性。对于数量可控的重复数据常采用比较算法剔除,对于复杂数据常按比例降低其权重,对数据的重新布局形成概率分布。

1.2.2 数据变换

开展运行可靠性分析时,由于算法对数据的格式、范围有自身特定的限制和要求,所以这就要求对这些格式不一样的数据集进行数据格式和范围的转换,使得所有数据的格式、范围统一化。数据转换主要包含:

1) 数据泛化:使用高层次的概念替换低层次

的概念。

2) 属性(或特征)构造:为了更好地描述某个系统或部件的状态,可构造新的属性,并添加到数据的属性集合中,用来帮助分析过程。

3) 数据聚集:将数据进行聚集,比如,可以聚集飞机运行的每日数据为月或年,以此更好地实现长期的数据分析。

4) 数据离散化:将连续的数值属性转换为离散的分类属性,以便直观反映某系统、部件的工作状态,例如将起落架、舱门的数据直接描述为 0、1 来分别代表关闭或打开状态。

5) 数据规范化:将每个属性数值按比例缩放,使之落入一个小的特定区间。常用手段包括最大-最小规范化、z-score 规范化和小数定标规范化。

1.2.3 数据规约

数据归约主要包括数据维度规约和数据样本规约。数据维度归约为通过对数据特征进行筛选或者使用空间变化降低数据属性数量;数据样本归约为通过在原始数据中寻找出一个具有代表性的子集或重构较小或较短的数据以及把数据离散化等方式减少数据量。

数据维度归约的核心是对特征进行选取或融合,获取能描述关键特征的那部分属性,目的是减少数据集中的冗余特征和不相关特征以提高后续运行可靠性分析的精度和质量。特征选择策略应满足计算代价小且能找到最佳或接近最佳的特征子集。为了满足以上条件,需权衡选择的特征集对于后续运行可靠性分析任务是否最佳。检验标准则是应用到该特征子集上的运行可靠性分析方法得出的结果应该与应用到整个特征集上的结果相同或相对更好。也可以依托专业领域知识来分配特征的权值,将重要属性赋予较高权值,次要属性赋予较小权值。特征选取主要分为线性选取方式和非线性选取方式两种。线性选取方式有因子分析^[92]和主成分分析^[93]等,非线性选取方式有局部线性嵌入^[94]、等距特征映射^[95]和其衍生方法^[96]等。

数据样本归约的核心是减少数据样本量或从数据集中选择较小的数据表示形式以及将连续数据转化为离散数值^[97]。

1.2.4 数据处理研究现状

围绕民用飞机运行数据处理方法,陈希成等^[98]提出了一种飞机舱温实测数据转换为综合环境应力的方法;侯亚丽等^[99]对航迹数据进行预处理和飞行状态识别,分别运用两种模型计算飞

机油耗;王奕惟等^[100]为提高发动机状态辨识准确率,基于数据处理技术采用全航段 QAR 数据开发卷积神经网络航空发动机状态辨识方法;Jo 等^[71]针对航空推进系统仿真数据开展数据清洗、数据规约后用于航空发动机剩余寿命分析;Huang 等^[101]在针对 QAR 数据开展数据处理的基础上,提出了一种估计滑流耗散率的方法;Kang 等^[102]为了应对运行数据集的高度异构性,提出了一种数据处理过程,包括数据清洗、差值和归一化步骤,采用梯度提升决策树模型选择相关参数作为特征,用于预测飞机地速和无线电高度;Bineid 等^[103]采用数据处理方法将延迟率、设计和性能数据融合用于客机调度可靠性预测;Pogačnik 等^[104]通过综合处理飞机类型、年龄、飞行小时、飞行周期、发动机类型和故障数据等开展基于历史数据和飞机参数的飞机故障预测研究。上述针对民用飞机数据处理技术的研究在理论方法方面提供了很好的方向性指导,但研究较为分散,还未形成统一的、通用性强的理论方法。

1.3 小结

数据采集和数据处理是整个框架的第一步,是开展运行可靠性分析的前提。面对具有来源广、类型多、格式不统一、时效性强、数据冗余、数据缺失、数据异常等特点的海量多源数据,传统的数据处理方法效果不佳,国内外研究者提出了一些解决方案,但数据处理方法种类繁多,选用的数据集也各不相同,导致精度和效率之间的平衡很难把握,适用于民用飞机运行数据特点的数据处理方法有待进一步研究和完善。

2 运行可靠性分析方法

针对飞机某具体系统或部件,国内外研究人员通过建立运行数据与可靠性间的映射模型,结合先进算法以实现运行可靠性分析,为解决传统可靠性分析方法缺少统计数据问题开辟了新的途径。

2.1 运行可靠性模型

作为运行可靠性下降的外在表现,运行监测数据能有效反映飞机运行动态内在特性。国内外研究人员通过建立已采集数据与飞机运行可靠性之间的映射模型,开展运行可靠性分析。

近年来,通过对国内外运行可靠性模型研究的跟踪调研,民用飞机运行可靠性模型研究可分为长时运行可靠性模型、近时运行可靠性模型和瞬时可靠性模型。其中,长时运行可靠性模型多

采用可靠性月报数据、维修数据等开展研究,时间跨度多为数月,如文献[105-107];近时运行可靠性模型研究多依据机载传感器收集转化后的 QAR 数据,多于航后立即开展分析工作,即分析当前架次的运行可靠性,如文献[18, 33, 108-111];瞬时可靠性模型研究主要依托 ACARS 数据开展分析,可依据空地数据链传输数据并于地面实时计算运行可靠性,如文献[112-115]。

国外方面,Shulman 等^[105]提出了一种运行可靠性模型,使用系统故障、维修和备件采集数据来计算系统运行可靠性;Jenab 等^[106]提出了一种基于流程图的方法计算飞机环境控制系统失效时间和失效概率,从模型中获得的数据可用于制定飞机环境控制系统的维护优化策略;Ulansky 等^[107]通过检查航线可更换单元出现永久性和间歇性故障的运行和维护过程,基于机载测试设备可自动检测到故障的假设,建立了可用于计算航线可更换单元运行可靠性和维护成本的数学模型;Saintis^[108]基于飞行任务过程特征,提出一种用于预测由多个元件构成的机载系统可靠性模型,将飞行任务过程拆分为一系列循环,每个循环包括飞行阶段和地面站阶段,实现在飞机的每个运行周期计算飞机系统的故障概率;Petcharin 等^[109]针对航空发动机可靠性随着使用时间增加而下降的问题,开展了运行可靠性和维护优化模型研究,以 CF6 发动机为例验证了所提模型在合理制定维修间隔方面具有良好效果;Lee 等^[110]基于代理模型、随机和动态着色 Petri 网提出了一个运行可靠性分析模型,以飞机起落架制动器为例验证了模型的可行性,结果表明,该模型具有一定的通用性,可用于评估其他飞机部件和策略维护的安全性和效率;Tiassou 等^[112]提出了考虑飞行任务和运行状态的运行可靠性模型,捕捉飞机与其任务相关的当前运行状态,以评估飞机完成任务的能力,模型的系统框架程序与需要更改的参数动态融合,可使模型更好地适应在线情况;Lee 等^[113]提出了一个运行状态监测模型,使用运行数据预测可能发生的飞行性能异常,用于性能异常检测从而保障系统安全性。

国内方面,冯蕴雯等^[18, 111]围绕飞机运行可靠性在特征提取、可靠性建模与评估、预测等方面开展了探索研究。如基于数据包络分析方法对工作状态特性与性能裕度进行非参数分析,采用人工神经网络、随机森林算法建立了运行可靠性分析模型;针对影响因素的高非线性 and 强耦合特性,提出了基于智能神经网络的运行可靠性分析模

型,综合考虑目标系统工作状态、相关系统工作状态、飞机飞行状态和外部条件四类因素对转子振动运行可靠性进行分析。何正嘉等^[33, 116]提出了利用运行状态信息评估航空发动机运行可靠性的模型,采用核主成分分析构建航空发动机工况子空间来描述航空发动机的性能变化。此外,为了准确有效地估计运行可靠性和预测未来的可靠性状态,提出了一种可靠性建模框架,将故障的先验分布与基于设备状态的振动信号特征提取相结合,用于主动健康管理和可靠性维护。文献[114 - 115]针对 ACARS 数据的优势,提出了一种以 ACARS 为分析数据的基于粒子群优化和长短期记忆神经网络优化支持向量机的危险识别与预测模型,以 APU 的 A13 报告作为分析数据验证了方法的有效性。

先进传感器技术、数据处理技术的发展,为民用飞机近时运行可靠性和瞬时运行可靠性研究提供了良好的技术支撑,并随着国产民机规模化投入运行,成为亟待突破的关键技术,具有较好的理论和工程意义。然而,值得注意的是,民用飞机近时运行可靠性较于瞬时运行可靠性输入数据参数更丰富,数据量更大,分析精度相对较高,但是由于数据传输技术限制,时效性低于瞬时可靠性。

2.2 运行可靠性分析算法

民用飞机运行数据具有类型多、数量大、时变、强耦合、非线性等特点,为提高运行可靠性分析的精度和计算效率,国内外研究人员在数据驱动、信号处理等技术的基础上开展了代理模型、机器学习等运行可靠性分析算法研究。

国外方面,Nieto 等^[117]将用于回归问题的支持向量机(support vector machines, SVM)与粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)技术相结合,提出了混合 PSO-SVM 算法。该算法的泛化能力比仅使用基于 SVM 的回归器有显著的提升,在应用于实验数据时获得了 0.903 4 的决定系数,证实算法具有良好的效果。Tissou 等^[118]针对系统级子模型中考虑有关飞机系统组件状态和故障分布变化的问题,提出了随机活动网络算法用于飞机运行可靠性分析,作为 Petri 网的扩展,实现了较好的效果。Brázdil 等^[119]针对无约束优化,提出了一种基于马尔可夫决策过程的简化的近似算法,给出了一个 2 维指数逼近算法,为复杂系统的可靠性评价提供了有效方案。

国内方面,郑友石^[75]针对寿命服从指数分布的民用飞机部件,分别采用了最优置信限法、最小二乘法和 Bayes 估计算法开展无故障数据的可靠

性参数评估,针对寿命服从 Weibull 分布的民用飞机部件,提出了改进最小二乘法开展无故障数据可靠性参数评估,通过实例证明了方法的有效性。Gao 等^[120]提出一种基于等距映射和非齐次布谷鸟搜索 - 最小二乘支持向量机(NoCuSaLSSVM)的滚动轴承运行可靠性分析方法。冯鹏飞等^[121]提出了一种分析不同时间的特征指数值及其概率密度函数的相关向量机算法。洪骥宇^[122]在复杂系统可靠性理论和运行可靠性理论的基础上,采用深度学习算法处理航空发动机状态参数与运行可靠性之间的时变、非线性问题。周媛^[123]基于数据驱动理论,深入研究了运行监测数据中的数据重构、状态监视、发动机退化模式识别问题。陈保家等^[43]提出了一种基于比例协变量模型和 Logistic 回归模型混合的可靠性评估算法,以提高少失效或零失效数据条件下运行可靠性评估精度和可信性。

随着机器学习理论和代理模型研究逐渐成熟,可靠性领域专家学者开展了神经网络^[124]、布谷鸟算法^[125]、支持向量机^[126]、Bayes^[75, 127]等算法及相关改进算法、组合算法应用于飞机运行可靠性分析,当前较为主流的算法为神经网络及其改进算法、支持向量机和 Bayes 算法,所述研究取得了初步成效。但是,目前相关算法研究存在解释性不强、通用性较差等问题,有待研究人员进一步加深研究,以便准确、高效地进行运行可靠性分析。

2.3 参数灵敏度分析反馈

灵敏度分析是研究系统的状态或输出对参数或周围条件变化的敏感程度的方法,用来提供各随机变量或参数之间重要性程度的对比^[128 - 129]。由于各种因素对运行可靠性的影响程度不同,进行可靠性参数灵敏度分析反馈研究,分析每个参数对运行可靠性影响程度,确定相关重要参数,可以为运行可靠性预测反馈技术提供输入参考。

国内外学者对灵敏度分析进行了大量研究,提出了大量新的灵敏度分析方法,其应用领域也越来越广。如 Valdebenito 等^[130]提出一种基于仿真的估计小失效概率的线抽样后处理方法;Lei 等^[131]提出了一种基于拉格朗日方法计算模态应变能值二阶灵敏度的方法;Li 等^[132]提出了一种计算延迟裕度对系统参数敏感度的方法;袁修开^[133]提出了改进的加权线性形式,采用加权线性回归求解近似超平面,获得了更稳健的可靠性灵敏度结果;Fu 等^[134]进行灵敏度分析时针对冗

余系统考虑了共因失效及修正系数;翟华伟等^[135]针对极限学习机及其改进算法计算复杂,自适应调整能力弱等问题,深入分析隐节点灵敏度计算方法,引入贡献度的相关思想,提出改进的灵敏度计算方法。在民机工程领域,高宗战等^[136]对飞机翼梁结构强度进行了可靠性灵敏度分析;张峰等^[137]对某型飞机起落架缓冲器参数进行可靠性灵敏度分析;Zhai等^[138]对高压涡轮叶尖径向游隙进行了多响应面模型的可靠性及灵敏度分析。

当前所发展的求解灵敏度指标的方法主要集中在针对静态结构、输入变量相互独立的灵敏度指标,而针对时变结构、动态系统以及考虑主观不确定情况下的灵敏度指标求解方法的研究相对薄弱。

3 运行可靠性预测反馈技术

结合运行数据,探究民用飞机运行可靠性预测反馈技术,具体技术途径可描述为:依据可靠性参数影响性分析结果确定相关重要参数,结合运行数据开展运行可靠性预测方法研究,建立运行可靠性预测模型实现产品未来某时刻可靠性及发展趋势的预测。最后将运行可靠性预测结果反馈,为后续研究提供参照。

通过对主流技术及应用的总结,学术界针对可靠性预测方法分类目前尚不统一,典型的分类方法如:“基于经验、基于趋势、基于模型”^[139]，“基于经验、基于模型、基于知识、基于数据”^[140]，“基于模型、数据驱动、混合方法”^[141]等。结合主流技术研究和工程技术应用,将运行可靠性预测方法划分为基于经验的方法^[142]、基于模型的方法^[143-144]和数据驱动方法^[145-146]三类。

基于经验的方法常用于系统物理失效模型建模困难且无法通过传感器获取系统状态和工作环境信息,通常情况下基于经验的预测方法复杂度较低,一般依据失效历史数据或系统设计时给出的同工况下使用维护建议。工程中常将故障和失效数据拟合为统计分布,如泊松分布、指数分布、Weibull分布、对数-正态分布等^[147]。然而,基于经验的方法仅提供了同类产品整体指标的预测评估,缺乏对个体故障或者运行状态的关注。对工程而言,运行支持与综合保障人员更关心当前和未来时间段内系统或设备的实际运行状况。

基于模型的方法是应用理论模型来描述系统的演化过程,这需要大量关于系统机制的先验知识,如机械动力学知识、设备结构特点和材料特性

等^[148-149]。物理失效模型可以是根据失效原理,比如腐蚀、疲劳裂纹和磨损等得到的函数或微分方程组,一般仅用于部件级失效和性能预测。建立物理失效模型需深入分析失效机理,综合考虑物理、化学、热力、气动等要素对部件的影响,其复杂的建模分析过程给该方法的使用和推广造成了一定的限制。另外,基于模型方法的质量取决于理论模型的精度,因此复杂机械系统的运行可靠性预测很难达到令人满意的结果。

基于数据驱动的方法是深度挖掘运行监测数据中可能隐含的表征性能状态的信息,探究系统动态变化趋势,对当前或未来的系统状态进行判断和预测。基于数据驱动的方法不需要精确建立被监测目标的解析模型,也不需要事先了解研究对象先验知识,使用简便并且模型通用性好,获得了较为广泛的研究^[150]。

鉴于基于数据驱动方法在民用飞机运行可靠性预测领域应用效果较好,本文将重点介绍。数据驱动的方法包括传统数值方法和机器学习方法。传统数值方法如线性回归和卡尔曼滤波方法等,机器学习方法则主要是采用支持向量机、人工神经网络、决策树等智能算法^[151]。人工神经网络是最为常用的算法之一,Uzun等^[152]提出了一种物理引导的神经网络框架估计油耗飞机的燃油消耗;Hashemi等^[153]依据美国联邦航空管理局提供的固定翼飞机轨迹公共数据集测试了长短期记忆神经网络(long short-term memory, LSTM)的回归精度和鲁棒性;El Mir等^[154]使用深度神经网络模型对飞机起落架系统进行了损坏评估和故障预测;Altay等^[155]应用神经网络和遗传算法根据飞机类型和年龄预测故障发生的时间;Kordestani等^[156]提出了一种基于分布式神经网络和递归Bayes算法的多功能扰流板系统混合故障预测方法。此外,支持向量机、相关向量机算法也受到研究人员广泛关注,如Atasoy等^[157]详细研究了运行过程中排气温度(exhaust gas temperature, EGT)与航空发动机巡航阶段特定的各种运行参数之间的关系,并基于SVM开展预测;Zhou等^[158]提出了一种基于SRA和SVM的能够智能识别飞机电气系统潜在危险的危险识别和预测系统;Li等^[159]提出了一种基于SVM的组合预测模型用于预测机载设备故障率。随着研究的深入,研究人员将基于时间序列分析^[160]、基于状态估计^[161]、基于随机过程^[162]等方法应用在运行可靠性预测、性能退化和寿命预测领域。基于数据驱动的预测模型构建过程相对简单,无须对烦琐复

杂的物理失效机理进行分析,只要描述数据的输入输出关系以及相应的过程参数即可。相较于基于物理失效模型,可以实现数据的自适应,从输入样本中发掘数据内在的隐含关系。但是,基于数据驱动的方法对数据的准确性和广泛性要求较高且噪声和不确定性增加了实现难度。

综上所述,在具体开展运行可靠性预测时各种预测方法各有优劣,在实际工程应用中,需根据具体的问题权衡选择。图 2 从预测方法工程应用的适用性、成本与准确性三个方面进行了对比。三种方法的综合比较如下:① 基于经验的预测方法不需要传感器和特定的物理失效模型,只需目标系统的失效历史数据开展可靠性建模分析,工程适用面最广。然而,由于缺乏目标系统的运行状态信息,故其预测精度较差;② 基于模型的预测方法开展运行可靠性预测准确性最高,但需掌握目标系统的材料特点、结构特点、受力情况、失效模式等信息导致建立物理失效模型难度较大;③ 基于数据驱动的预测方法主要使用历史数据结合传感器监测数据来分析性能退化趋势,以估计运行可靠性和预计失效时间等。相对而言,基于数据驱动的预测方法建模简单,预测精度较高,随着先进传感器技术、数据采集、数据挖掘、数据融合技术的发展,该方法的预测精度也不断提高,在民用飞机运行可靠性预测领域具有较好的应用前景。

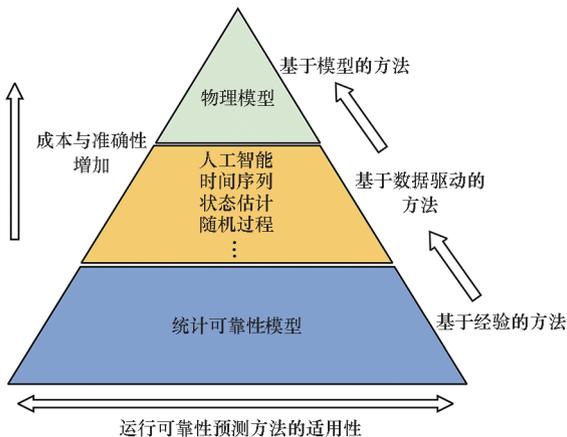


图 2 运行可靠性预测方法特点
Fig. 2 Characteristics of operational reliability prediction method

近年来,运行可靠性预测技术研究已经得到了国内外诸多学者和机构广泛关注。NASA 的卓越预测中心 (prognostics center of excellence, PCoE) 为预测技术在航空航天领域发展提供了良好的平台。国内在民用飞机运行可靠性预测方面

开展了一些工作,但研究较为分散,没有形成系统集成应用,尚未在民用飞机运行支持和维修保养工程领域有效落地。对于运行可靠性预测反馈技术而言,在新方法研究使用、不同算法融合集成^[163]、混合模型^[164]建立、预测精度和效率的提高以及不确定性管理等方面还有很大的发展空间,具体发展路线及面临的问题如图 3 所示。

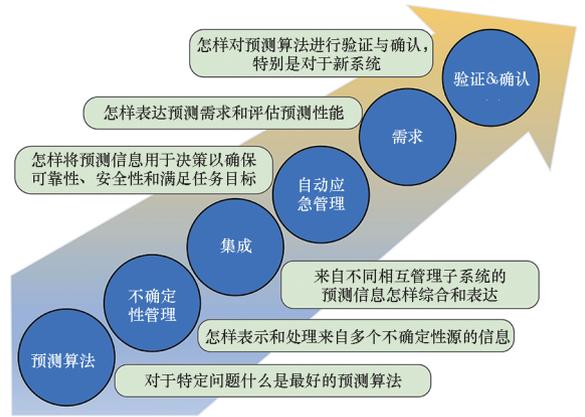


图 3 先进预测技术的发展路线

Fig. 3 Development route of advanced prediction technology

4 基于运行可靠性的优化设计

基于可靠性的设计优化主要是在满足给定的可靠性约束水平条件下搜索目标函数的最优解^[165]。目前针对基于可靠性的优化设计思路是在满足可靠性指标的情况下,对性能参数进行优化设计。秦强等^[166]教授提出了基于布谷鸟算法的舱门可靠性优化设计方法,并探究代理模型技术和优化算法在可靠性设计中的应用;陈志英等^[167]提出基于重要度的可靠性设计方法;Zhang 等^[168]探讨了 RSM 及 PSO 在优化设计方面的应用。随着优化设计理论和方法的蓬勃发展,逐渐由简单的性能参数优化设计发展为基于可靠性的多学科优化设计。

运行可靠性与设计关联性分析是连接运行可靠性与设计可靠性之间的纽带,通过探究运行与设计数据之间的关联性,研究运行与设计可靠性之间的关系。突破设计可靠性与运行可靠性关联机理研究技术瓶颈,形成飞机运行可靠性与设计可靠性关联分析方法是飞机运行可靠性研究亟待解决的问题之一^[169]。国内外研究人员开展了探索性研究,如李娟^[170]从制造过程中产品可靠性保证角度出发,基于制造过程中的大量数据,探究与制造系统可靠性关联模型;蔡忠义等^[171]针对加速退化试验的非线性退化数据,提出了基于

Wiener 过程的退化数据可靠性评估方法;龚星宇^[172]以起落架转弯机构为研究对象,基于仿真数据建立可靠性关联模型开展优化设计;Qiao 等^[173]通过关联分析将可靠性分析模型输出不确定性分配给模型输入中的不确定性;Liu 等^[174]提出了一种有效的解耦策略,通过将原始问题与两层嵌套关联分析,用于多目标可靠性优化设计;Wang 等^[175]通过可靠性关联分析,研究了时变和时不变凸混合变量下的非概率时变可靠性评估与设计。结合民用飞机运行可靠性研究的特点,运行可靠性与设计关联性分析研究技术路线如下:通过民用飞机的运行数据,针对运行阶段和研制阶段可靠性进行研究,探究运行与设计可靠性分析之间的关系,其具体技术途径可描述为:基于获取的运行数据(研制数据和使用数据),分别建立运行可靠性分析模型和设计可靠性分析模型。在建立模型的基础上,分析得到研究对象两个阶段的可靠性分析结果,比对两种分析结果,验证两种分析结果是否相符,如果两者结果相符,则确定可靠性分析关联模型及影响参数因素;如果两者结果存在较大差异,则需根据使用与研制数据之间的关系,运用模型修正技术实现设计阶段参数的选取,重新构建可靠性分析模型,直至两者分析结果满足要求为止。运行与设计可靠性分析关联分析技术途径如图4所示。

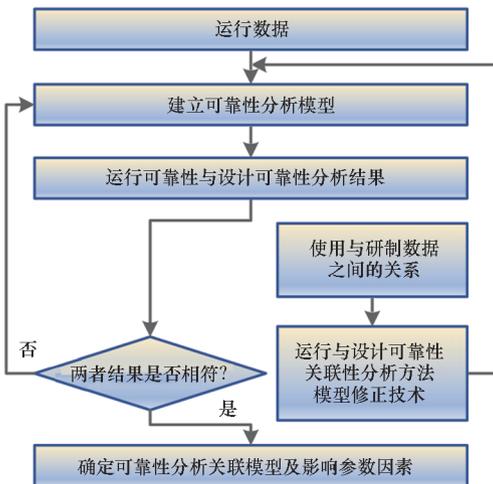


图4 运行与设计可靠性关联性分析技术途径

Fig.4 Technical approach of reliability correlation analysis between operation and design

基于运行可靠性的系统及部件优化设计是在运行可靠性分析的基础上开展可靠性再分配设计研究的,形成可行的可靠性指标再分配方案,提出可用于产品性能提升的优化设计技术,为产品持续、安全、可靠地运行提供有效建议和理论支持。

针对可靠性指标再分配理论,Falk 等^[176]考虑组件相互依赖性,在单位平方中找到函数的不动点,通过考虑串联、并联和桥接结构的网络验证了方法有效性;王华昕等^[177]采用了灰色关联生成权重函数,在评价指标体系构建中则采用了层次分析法,使算法进一步排除了人为因素的影响;Zhang 等^[178]针对冗余系统非线性可靠性分配问题,改进了人工蜂群算法,得到更为具体的最优部件强度和冗余策略;Modibbo 等^[179]也提出了用极大似然估计和一致最小方差无偏估计来预测系统可靠性函数的两种方法,通过比较设计一个成本最小的可靠性系统;Wu 等^[180]针对不准确信息和不同阶段环境而导致部件参数不确定的多阶段任务系统的可靠性分配问题,提出了一种基于轮盘赌选择方法和遗传算法的可靠性分配模型。总的来说,基于比例分配法^[181]、层次分析法^[177]、模糊理论^[182]、灰色关联度分析^[183]和专家打分等方法建立可靠性指标分配模型应用非常广泛,而实现可靠性指标的再分配则离不开运行数据的管理反馈,如维修数据、故障数据、运营数据、飞行数据、可靠性数据等一些信息作为再输入,进而对模型进行调整和重构。针对不满足运行可靠性要求的产品,提出开展基于运行数据的可靠性指标再分配反馈技术途径为:① 结合民用飞机数据库中的运行数据以及运行可靠性分析结果,评估产品(系统、子系统)可靠性指标分配的合理性;② 针对可靠性指标不合理的项目,依据组成特性结合相关规范标准开展可靠性指标再分配技术研究;③ 通过分析获取可靠性分配指标,并与设计要求进行对比,分析结果的合理性,如果不满足设计要求,则需重新进行可靠性指标再分配研究,直至满足要求为止;④ 反馈产品再分配研究获取的可靠性指标。基于运行数据的可靠性指标再分配反馈技术研究具体技术途径如图5所示。

在工程应用方面,波音公司运用可靠性分配方法对不理想的产品进行指标再分配研究,使其可靠性水平能够满足工程需求,并基于使用与研制数据,采用优化模型进行优化设计。如结合B747-400的运行数据和相关经验,对B787-8进行了优化设计,包括发动机结构优化、翼型设计等,有效地提高了飞机的性能和运行可靠性。波音公司依据运营数据分析、燃油仪表盘(fuel dash-board, FD)和新型卫星导航技术(new satellite-based navigation technology, NSNT)来降低运营成本及飞机延误率。空客公司与Palantir公司合作通过运行数据分析开展可靠性再分配、

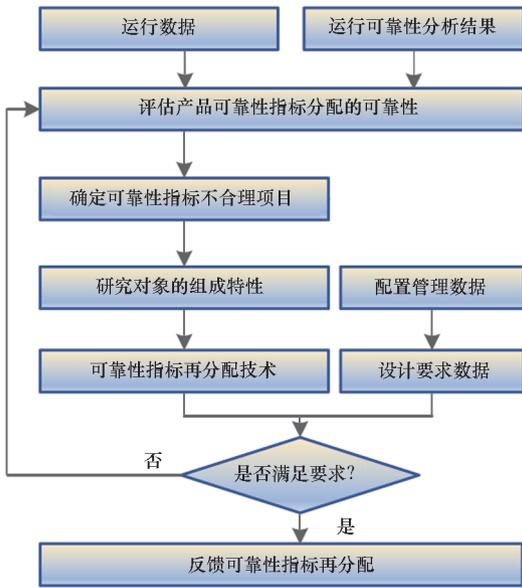


图 5 基于运行数据的可靠性指标再分配反馈技术途径
 Fig. 5 Reliability index redistribution feedback approach based on operation data

设计及运行控制技术研究,为飞机的改进、安全适航和持续适航奠定基础。此外,基于大量运行数据和丰富经验完成了 A320 到 A380 型号跨越,如 A330neo 型号在 A330XWB 基础上对机翼、系统进行改进设计;A380plus 型号在 A380 的运行数据基础上开展翼型的优化和飞行小翼的设计。

国内自主研发的机型较少,前期关注重点没有落在运行与设计可靠性关联性分析上,国内在运行与设计可靠性关联性方面研究较少。在可靠性分配研究方面,已有的机型如 C919、ARJ21-700、新舟 60/600 系列等主要关注指标有飞机级基本可靠性指标(平均故障间隔时间)、飞机级任务可靠性指标(签派可靠度)、飞机级重要系统或事件可靠性指标。目前国内的可靠性分配主要用于产品的研发阶段,没有进一步对后续可靠性再分配技术方案进行研究。此外,国产自主研发型号在运行过程中经常暴露出产品设计不合理的问题,如 ARJ21-700 舱门故障、新舟系列起落架系统等可靠性问题,国内民机制造商经常会接到运营商对产品改进的要求,而制造商应对策略通常是不计成本地为运营商替换故障件,无法有效实施产品改进措施,进而提升产品的性能。

总的来说,我国在运行可靠性优化设计方面的研究与国外相比仍然存在较大差距,主要包括:① 运行与设计可靠性关联性分析方法薄弱,无法合理运用收集的数据进行设计可靠性指导,进而减少运行与设计可靠性分析之间的差异;② 基于运

行可靠性的优化设计技术薄弱,致使产品改进方面进展迟缓,进而不能科学合理地完成产品的优化设计以及有效指导新机型设计;③ 基于运行可靠性优化设计是在完善的民机运行支持体系情况下实现的,国产民机的运行支持体系尚未完全建立。此外,对改进设计所需的数据种类、范围等了解不足导致开展运行可靠性优化设计时面临诸多困难。

5 优化维修任务

民用飞机维修经历了修复性维修、预防性维修、视情维修、增强型视情维修几个阶段,其失效率随着维修策略的改进逐渐下降^[184-185]。维修策略的演化及每种策略的特点如图 6 所示。其中,以运行可靠性分析结果作为输入的维修策略为增强型视情维修。如表 2 所示,维修策略主要分为两大类:被动式维修和主动式维修。被动式维修指修复性维修或事后维修,主动维修细分为预防性维修和预测性维修。预防性维修主要指的是定期维修,而预测性维修包括以系统状态为核心的视情维修和以可靠性为中心的增强型视情维修两种方式。

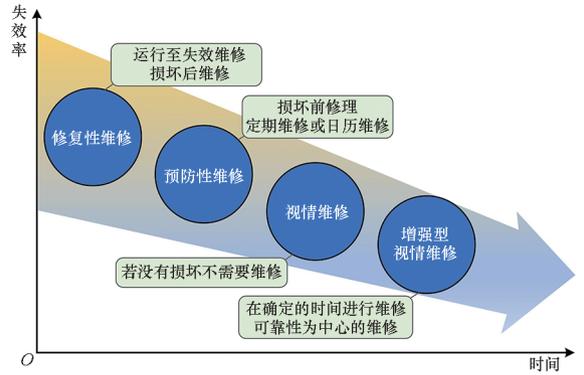


图 6 民用飞机维修策略演化发展
 Fig. 6 Development of civil aircraft maintenance strategy

目前大型工业设备的预防性维修决策大多数是基于以可靠性为中心的维修(reliability-centered maintenance, RCM)和 MSG-3(maintenance steering group)思想制定的^[186]。民用飞机使用基于 MSG-3 的维修理论已经取得了良好的效果,然而研制阶段缺少相关运营数据,制定的预防性维修任务一般偏向保守。美军在国防部指令中将增强视情维修(condition based maintenance plus, CBM+)定义为装备整个寿命周期内,通过适当的过程、技术和基于知识的能力应用和集成,获得指定的可用率、可靠性、运行和保障费用^[187]。与常规维修方式相比,CBM+在制定策略时考虑了系统运行状态中制造、使用保障过程等造成的差

表2 民用飞机维修策略分类

Tab.2 Classification of civil aircraft maintenance strategies

维修类别	被动式维修 (修复性维修)		主动式维修	
	预防性维修		预测性维修	
子类别	事后维修	定期维修	视情维修-诊断	增强视情维修
维修依据	坏了就修	固定时间间隔检查、修理和大修	根据系统状态维修	根据系统的可靠性预测维修
计划原因		通过定期大修或更换,预防发生严重失效后果	根据需求安排维修	维修需求投影为任务时间内的可靠性
计划方式		根据失效率预测部件有用寿命	连续采集状态监测数据	根据实际状况预报系统的剩余寿命
预测类型			机载和离机系统,近实时趋势分析	机载和离机系统,实时趋势分析

异,并尽可能在故障前进行维修。由于掌握了装备的技术状态,运用数据分析与决策技术预测装备的剩余寿命,进行精确维修,故能有效减少停机时间,节约维修费用,延长使用寿命,提高装备的完好率和可用率。我国航空公司的经营成本^[188]普遍偏高,特别是维修成本^[189]一直居高不下,如何降低维修成本,提高经济效益是航空公司亟待解决的问题。

随着试飞和运营阶段数据积累以及航线运营需求调整,若仍按交付初期的维修任务和间隔实施维修工作会占用额外的维修资源。此外,过于频繁的维修任务会增大飞机遭受人为差错损坏的风险。在累积充足的运营数据基础上,研究人员聚焦于使用数据分析技术探寻维修任务优化的方法,达到提高维修保障效能,增强维修任务科学性的目的。Regattieri等^[190]讨论了维修任务对经济性指标的影响,通过数学模型和仿真分析开展维修任务优化;Stadnicka等^[191]以缩短停场时间为目标构建维修任务优化数学模型,以真实维修任务为案例验证了方法的有效性;刘成等^[192]对S4000P在民用飞机维修大纲制定和优化方面的应用进行了研究,明确了应用该规范时的要点;蔡景等^[193]和贾宝惠等^[194]深入研究了维修任务间隔优化技术,提出了间隔优化的计算模型和理论方法;门江^[195]结合工作实践,以机队实际运行数据为背景,提出维修项目优化和管理方法,使航空公司的维修方案更加符合机队的实际使用和维护特点,为提高机队的运行效率、降低维修成本和提高航班准点率提供支撑。

在工程应用方面,波音公司较早地开展了维修任务优化研究,开发了一系列统计分析技术和共计算法用于运行数据分析,探究维修任务的

最佳时间间隔。在上述方法基础上,波音公司开发了包含可靠性模型和成本模型的基于统计分析的维修优化系统(statistical analysis system for maintenance optimization, SASMO),逻辑流程如图7所示。波音公司将SASMO系统应用于B737NG飞机飞行4 000 h维修任务进行分析,在保证安全性和可靠性的前提下,优化了飞机的维修工作量,取得了较好效果。

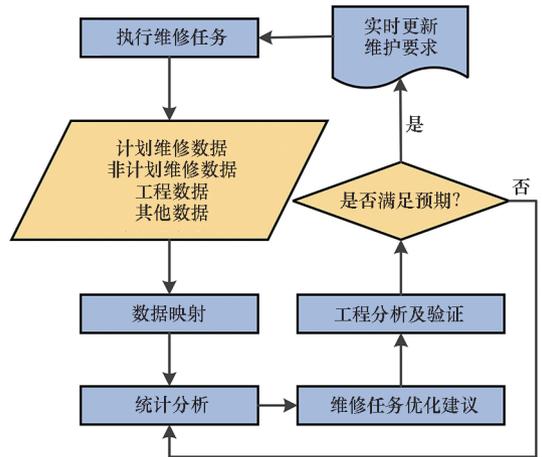


图7 SASMO 逻辑流程

Fig.7 SASMO logic process

综上所述,国内外学者和工程技术人员开展了大量探索性研究,初步形成了维修任务优化的技术和方法,但存在模型过度简化、参数考虑不全、优化效果不佳等问题需要研究人员去探讨和完善,具体为:①对系统连续状态或离散状态的随机退化建模存在假设不合理、获得的维修策略并非最优、利用运行可靠性预测信息指导维修技术路线不明晰;②维修决策优化时未充分考虑可靠性、安全性、经济性等各个指标之间的权衡,多目标的优化决策是未来研究的一个重点和难点;

③ 当前研究中常假设系统修复如新,没有将“不完美维修”考虑在模型当中。

6 运行可靠性综合管理平台

运行可靠性综合管理平台是制造商、运营商、维修商等利益攸关方信息交换的连接通道,是建立全寿命周期可靠性管理体系的重要部分,目的是提高民机运行可靠性、日利用率和签派可靠性,降低运营支持成本。

国外以波音公司和空客公司等为代表的飞机制造商较早开展了运行可靠性研究,其运行支持部门建立了贯穿于飞机设计、试飞、运营、服务阶段的可靠性管理体系,形成了基于大数据的运行可靠性管理平台,并在此基础上基本实现了全寿命周期可靠性管理^[196-199]。

在可靠性分析预测方面,波音公司运用先进的技术方法(如仿真、故障树、Markov、代理模型、机器学习等)对民用飞机运行可靠性分析及预测进行了研究,实现了运行可靠性分析结果实时反馈及可靠性发展趋势预测,开发了运行可靠性管理工具包括数据采集工具 ISDP (in-service data program)、可靠性分析及预测工具 FRST (fleet reliability solutions tool)、基于运行可靠性的维修任务优化工具 SASMO 与航材配置工具 OMP (optimized maintenance programs),并将其集成在 My Boeing Fleet 门户网站上。波音公司对于全球机队的可靠性统计结果,通过该网站以季报、年报的形式向用户发布。波音公司的可靠性系统功能架构如图 8 所示。

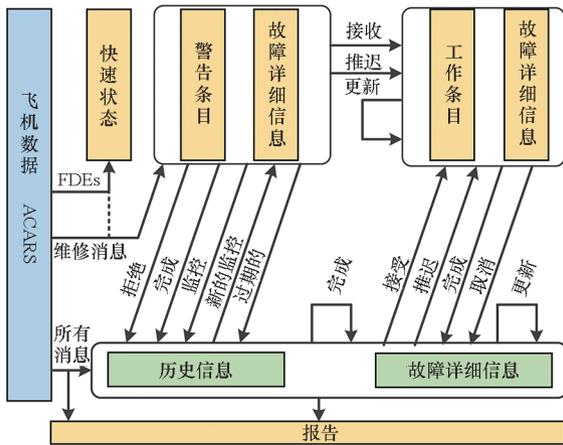


图 8 波音公司的可靠性系统功能架构^[198]

Fig. 8 Boeing reliability system functional architecture^[198]

其中,ISDP 于 1994 年开发,通过采集 B777 飞机运营过程中的数据分析其性能和维护需求,使得运营商和供应商与其他成员共享和使用机队

的运行数据;FRST 可以自动链接数据库,分析飞机的运行性能,发现潜在的可靠性问题,对飞机可靠性问题进行分析且与波音公司服务解决方案相关联,由制造商提出修正措施,并反馈给运营商、维修商和供应商,还可为维修间隔提供指导。波音公司针对可靠性分析数据不能及时反馈而开发的可靠性处理工具 FRST 已广泛应用于 B737、B747、B777、B787、MD-11、MD-80 和 MD-90 等;波音公司拥有专业的数学和计算技术团队,力求为全寿命周期运行可靠性管理提供技术支持,进而为解决产品优化、分布式协同设计、制订合理的维修计划、科学地配置航材等问题奠定基础。波音公司的机队可靠性服务帮助航空公司最大限度地提高了其在役可用性。

空中客车公司为了应对波音公司 E-enabling 战略和 GoldCare 全包服务,提出高度客户化的 AIR+ 服务解决方案。空客公司开发了用于数据收集和分析的航空大数据平台“智慧天空”(Skywise)和运营增强包 ISEP (in-service enhance package),用于可靠性监控、预测和设计的飞机运营信息在线系统 IDOLS (in service data online services),涵盖性能监控和运行控制模块的飞机维修分析软件 AIRMAN (aircraft maintenance analysis)^[200],用于维修任务优化和实时故障诊断的实时健康监控系统 AiRTHM (airbus real time health monitoring),以及结合外场数据监控飞机系统功能的 PRM (prognostics and risk management),并将以上工具集成在 Airbus 门户网站上。空客基于采集的数据进行运行可靠性分析及维修保障服务,为产品优化设计、运行控制、机队管理、运行维修成本分析等提供支撑。空客获取的运行数据集成在公共数字化平台 AirbusWorld,通过 Airbus 门户网站为全寿命周期可靠性管理提供数据支持,如图 9 所示。

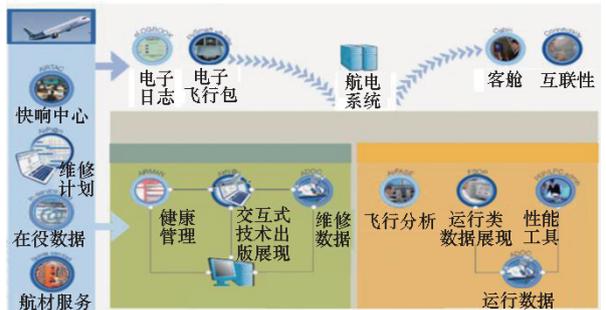


图 9 公共数字化平台 AirbusWorld

Fig. 9 Public digital platform AirbusWorld

其中,Skywise 是空客进行性能分析和供应保障服务的基础,在使用过程中可以使用预先构建

的工作流直观地与数据交互,提高运营效率、防止延迟和降低 AOG 风险;AIRMAN 服务于民机运行可靠性管理,该平台对采集的数据进行分析,可以实时反馈运行可靠性信息,同时为机队维修任务优化提供指导,进而提高飞机的运行可靠性、日利用率和签派可靠性,降低运营支持成本,其功能架构如图 10 所示;AiRTHM 是由空客维修革新小组开发的用于改进 A380 客户的运行可靠性和维护计划性并同时减少维护费用全新的方法,最初在空客飞行试飞部门使用,可以得到维修效率最优以及实时排故操作的建议,是空客全球服务解决方案的重要组成部分,用于最大化航空公司的运行效率。

经验逐步开发适用于国产民机的运行可靠性管理体系。其中,中国商飞上海客户服务有限公司和西飞民机作为牵引,探索了民机运行可靠性管理技术。中国商飞上海客户服务有限公司借鉴国外成熟机型的管理模式,从价值链的角度对全寿命周期管理进行了研究,搭建了全寿命周期可靠性管理平台 CIS 的整体框架。新舟系列是我国目前在全球 200 多条航线上每日运营的国产民机,为了满足客户需求,西飞民机近年来开始针对机队综合管理进行分析研究,主要针对运行性能监控建立了相应的管理工具。国内的飞机主制造商在飞机可靠性技术研究与应用还处于初步探索阶段,飞机性能监控与运行可靠性管理的理论与工程实践基础较为薄弱,相关工作尚处于起步阶段,尚未建立成熟的工程体系和方法。

开发符合工程实际的涵盖民机设计、试飞、运营、服务的全寿命周期国产民机可靠性管理平台,以实现产品全寿命周期可靠性电子集成综合化管理的需求十分迫切。我国在运行可靠性分析方面的研究工作与国外相比仍有较大差距,主要体现在如下几个方面:① 没有合理运用现有的数据采集技术对民机运行过程中的数据进行有效采集,并且采集数据内容和范围有限,没有完全将航空器制造厂家或供应商数据等信息纳入运行数据库中;② 在数据分析和处理技术上明显薄弱,不能对运行数据进行有效的处理和分析,无法合理利用收集的数据开展相关分析;③ 基于运行数据的可靠性分析和预测方法研究不足,导致不能够精确评估产品运行可靠性以及不能对可靠性发展趋势实现预测。

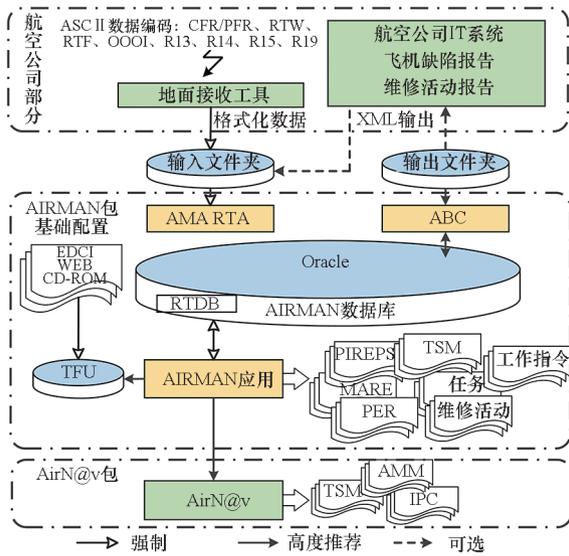


图 10 空客 AIRMAN 功能架构图^[198]

Fig. 10 Airbus AIRMAN functional architecture^[198]

罗尔斯·罗伊斯与微软公司合作,利用数据分析、预测工具和工程积淀进行深入剖析,有助于航空公司减少燃油消耗、提升航线效率,为客户提供更高效的发动机维护服务,使可用性保持在最高水平。

我国针对运行可靠性分析技术研究尚处在探索阶段。中国民航局发布 MD-FS-AEG006《航空器制造厂家运行支持体系建设规范》^[201]、CCAR 121 - R5《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》^[202]、AC - 121 - 54R1《可靠性方案》^[203]等文件明确要求建立全面的运行数据采集和处理流程,以了解航空器的使用情况,收集和处理的各用户的机型使用信息,并进行统计分析和组织相应的事件调查,以便在全寿命周期内对产品进行必要的持续改进。

随着航空事业的快速发展,国内利益攸关方逐渐开展了民机运行可靠性研究,借鉴国外成功

7 案例

民用飞机的刹车系统^[204-205]用于降低飞机在地面上的速度,并在起落架缩回到空中后立即停止主轮的旋转。某型飞机刹车系统由电控液压驱动,通常包括两个液压系统,即 1#液压系统和 2#液压系统。其中,1#液压系统用于为内部刹车蓄压器蓄压,并为内部车轮制动器提供压力,2#液压系统用于产生外部刹车蓄压器的压力,并为外部车轮制动提供压力,图 11 展示了刹车系统原理。

7.1 数据采集与处理

本研究以一架民用飞机为例,分析了刹车系统的运行可靠性。刹车系统的操作可靠性评估需要考虑四个因素:制动系统的运行状态、相关系统

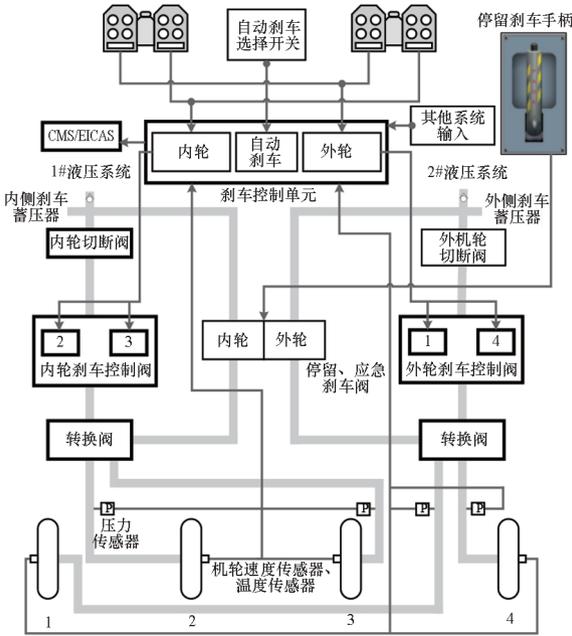


图 11 刹车系统原理

Fig. 11 Brake system topology

的运行状况、飞机的运行状况和环境条件。首先从数据库中提取了同一架飞机最近 14 个飞行任务的 QAR 数据作为分析数据。

7.1.1 异常数据处理

依据基于统计学的检测方法对数据集创建一个数学分布模型,将那些对整体数据分布模型拟合度小的数据定义为异常数据。本案例采用正态分布模型 $N(\mu, \sigma)$ 来表示,其中 μ 表示数据的平均值, σ 表示数据的方差,当样本的距离大于 3σ 时该样本数据为异常。

针对筛选得出的具有异常数据特征的 QAR 数据点开展平滑处理,具体平滑处理方式采用均值法。以含有异常数据值的部分 QAR 数据表 3 为例,按上述方法开展异常数据处理。

表 3 异常数据处理

Tab. 3 Abnormal data processing

3#机轮速度/Kn	4#机轮速度/Kn	3#机轮刹车温度/°C	4#机轮刹车温度/°C
109	18	36	29
131	128	36	30
127	201→126	36	29
124	123	36	30
121	121	36	30
119	116	36	30
115	113	36	10→30
110	109	36	30
⋮	⋮	⋮	⋮

注:“→”表示异常数据修改。

7.1.2 缺失值处理

缺失数据处理是数据清洗中的一个重要步骤。在民机运行数据采集过程中,由于各种数据集错综复杂,加之手动输入的失误操作、部分信息无法提供或者设备故障等,使得数据集中的内容残缺不完整。鉴于均值法有可能影响缺失数据与其他数据之间原本的相关性,建立回归方程的填补方式更为合理,该方法能尽可能地利用原数据集中的信息,确保数据填充的合理性。回归分析模型的一般形式为 $Y=f(x, \theta) + \varepsilon$,其中 f 为选择的回归函数, θ 为参数向量大小, ε 为一维随机误差变量,且满足独立同分布的假设。对于线性回归,建立的方程如下:

$$Y_i = \sum_{i=1}^m \theta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

采用最小二乘法来拟合曲线求出 θ 的值,使得误差平方和最小,即:

$$\min E(\theta) = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 = \sum [Y_i - f(x_i, \theta)]^2 \quad (2)$$

以截取的含有缺失值的部分 QAR 数据(见表 4)为例,并按上述方法开展缺失值处理。

表 4 缺失值处理

Tab. 4 Missing value processing

1#机轮刹车压力/kPa	2#机轮刹车压力/kPa	3#机轮刹车压力/kPa	左侧刹车踏板位置/%	
468.84	496.42	496.42	1	
468.84	524.00	455.05	1	
496.42	524.00	455.05	1	
468.84	524.00	455.05	1	
缺失→1	737.48	551.58	468.84	11
2	178.74	606.74	496.42	34
2	220.11	606.74	524.00	33
2	247.69	1 213.48	1 130.74	35
⋮	⋮	⋮	⋮	

注:刹车踏板位置满行程为 100%,表中数值表示刹车踏板行程的百分比。

7.1.3 数据集成与选择

结合起落架系统、外界环境影响(温度、湿度、风速、风向等)、飞行员操纵(刹车踏板位置)、时间因素及飞机姿态相关参数(俯仰、滚转等)、辅助制动装置(扰流板、反推)等影响因素,依据参数梳理原则,结合机轮刹车系统中获取的参数信息以及其他参数影响,初步筛选与机轮刹车温度差异过大故障相关的参数如表 5 所示。

表5 机轮刹车温度差异过大故障相关参数信息

Tab.5 Brake temperature difference fault related parameters

参数名称	备注
刹车压力(主左)	连续量
刹车压力(主右)	连续量
刹车位置(左)	连续量
刹车位置(右)	连续量
⋮	⋮
起落架左触地	离散量
横向加速度	连续量
垂直加速度	连续量

结合刹车温度差异过大故障特点和工程实际经验,对于重复监测、定值、布尔值的参数进行整合和删除。如:将三个触地时刻进行合并,取最后触地适合作为数据抓取的起点;将刹车踏板的多监测值进行合并;分别将左右4个扰流板角度取均值合并为“左扰流板角度”和“右扰流板角度”;取两侧发动机低压转子转速,删去高压转子转速;将反推作动位置的重复监测数据进行合并。

表7 QAR数据中刹车系统运行可靠性分析中使用的变量

Tab.7 Variables used in operational reliability analysis of braking system in QAR data

影响因素	特征	标签	描述
刹车系统运行状态	BRAKE_PRESSURE_1	P_1	1#机轮刹车压力/kPa
	BRAKE_PRESSURE_2	P_2	2#机轮刹车压力/kPa
	BRAKE_PRESSURE_3	P_3	3#机轮刹车压力/kPa
	BRAKE_PRESSURE_4	P_4	4#机轮刹车压力/kPa
	WHEEL_SPEED_1	S_1	1#机轮速度/Kn
	WHEEL_SPEED_2	S_2	2#机轮速度/Kn
	WHEEL_SPEED_3	S_3	3#机轮速度/Kn
	WHEEL_SPEED_4	S_4	4#机轮速度/Kn
相关系统运行状态	BRAKE_POS_LH	P_{bl}	左侧刹车踏板位置/%
	BRAKE_POS_RH	P_{br}	右侧刹车踏板位置/%
	ENG1_N1	N_{11}	1#发动机低压压气机转子转速/(r/min)
	ENG2_N1	N_{12}	2#发动机低压压气机转子转速/(r/min)
	TRAS_POS_L	P_{il}	左侧反推作动器位置/%
	TRAS_POS_R	P_{ir}	右侧反推作动器位置/%
	SPOILER_L	A_{sl}	左扰流板角度/(°)
	SPOILER_R	A_{sr}	右扰流板角度/(°)

7.1.4 数据变换

将状态数据转化为数值,例如将起落架收放、机轮触地数据直接描述为0、1来分别代表发生或未发生状态,如表6所示。

表6 机轮刹车温度差异过大故障相关参数信息

Tab.6 Brake temperature difference fault related parameters

起落架右触地	前起落架触地	2#机轮速度	3#机轮速度
AIR→0	AIR→0	129	109
GND→1	AIR→0	126	131
GND→1	GND→1	124	127
GND→1	GND→1	121	124
GND→1	GND→1	118	121
GND→1	GND→1	114	119
⋮	⋮	⋮	⋮

7.1.5 相关性分析

通过相关性分析,进一步降低维度,以提高分析的效率 and 精度。降维后确定的涉及刹车系统运行状态、相关系统运行状态、飞机运行状态和环境条件四类因素的23个具体特征如表7所示。

表 7(续)

影响因素	特征	标签	描述
飞机运行状态	ROLL ANGLE	A_r	滚转角/(°)
	MACH	Ma	马赫数
	LONG_ACC	A_{lon}	纵向加速度(g)
	LAT_ACC	A_{lat}	横向加速度(g)
	VRTG	A_{ver}	垂直加速度(g)
环境条件	WIND_DIR	D_w	风向/(°)
	WIND_SPD	S_w	风速/Kn

7.2 基于 QAR 数据的运行可靠性分析

民用飞机复杂系统运行中的实时动态可靠性分析涉及多维、强耦合、时变的数学分析问题,迫切需要高精度、高效率的可靠性评估和分析方法。针对上述问题,在数据驱动概念的背景下,提出了基于数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)的运行可靠性评价模型和用于运行可靠性分析的人工神经网络方法。该模型综合了目标系统的运行状态、相关系统的运行状况、飞机的运行状况和运行环境等因素,对复杂系统的运行可靠性进行综合

评估。由于篇幅限制,运行可靠性分析案例请参见文献[206-209],运行可靠性建模方法可参见文献[210-214],预测算法可参见文献[215-216],飞机系统综合灵敏度分析可参见文献[217]。

7.3 基于可靠性月报的运行可靠性分析

以主起落架系统机轮刹车温度差异过大为顶事件。其中,刹车装置作为一个 LRU 件,可直接由统计得到其真实的故障率,故不在本研究中刹车装置的子树进行展开,得到如图 12 所示的故障树模型。

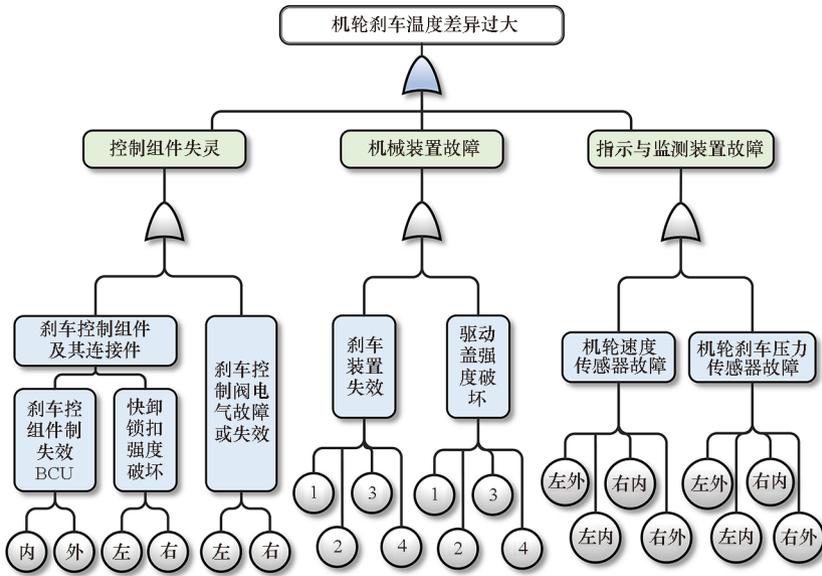


图 12 机轮刹车温度差异过大故障树模型

Fig. 12 Fault tree model with excessive wheel brake temperature difference

基于可靠性月报的系统部附件运行故障率计算公式为:

$$\begin{cases} T_U = \frac{F_H \times N_Z}{N_F} \\ T_F = T_U / 0.8 \\ \lambda = 1 / T_F \\ F_H = F_P \times n_N \end{cases} \quad (3)$$

其中: T_U 表示平均非计划拆换时间; T_F 为平均故障工作时间; F_H 表示产品飞行总时间; F_P 表示月平均飞行时间; n_N 为参与统计的月份数; N_Z 为装机数量; N_F 为非计划拆换次数; λ 表示故障率。将采集数据代入上述公式得到主起落架系统机轮刹车温度差异过大性能部附件故障数据及其运行故障率,如表 8 所示。

表8 附部件故障数据及其故障率
Tab.8 Component failure data and its failure rate

产品名称	N_F	F_p/h	T_U/h	T_r/h	λ_r	λ_a
刹车控制组件	7	88.13	11 769.00	14 711.0	6.80×10^{-5}	1.61×10^{-4}
刹车控制阀	34	169.23	10 970.00	13 712.0	7.29×10^{-5}	1.02×10^{-4}
刹车装置	3	129.90	30 136.80	37 671.0	2.65×10^{-5}	1.02×10^{-4}
驱动盖		98.10	108 696.00	135 870.0	7.36×10^{-6}	7.36×10^{-6}
机轮速度传感器	6	176.38	10 230.00	12 787.0	7.82×10^{-5}	4.11×10^{-5}
机轮刹车压力传感器	1	60.28	6 992.48	8 740.6	1.14×10^{-4}	8.03×10^{-5}

注: λ_r 表示运行故障率, λ_a 表示设计故障率。

或门故障树的结构函数为:

$$P_R = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

其中: P_R 表示系统故障率; $i = 1, 2, \dots, n$ 表示第*i*个组成系统的产品装机件; P_i 为第*i*个装机件的故障率。如图12所示,本案例中主起落架机轮刹车系统包含部组件22个,即 $n = 22$ 。由式(4)计算得到系统故障率为0.0 013 197。式(5)为系统运行可靠性与故障概率的关系,计算得到主起落架机轮刹车系统运行可靠度 $R_r = 0.9 987$ 。

$$R_r = 1 - P_R \quad (5)$$

7.4 基于运行可靠性的优化设计

如图13所示,基于运行数据的可靠性指标再分配技术途径如下^[218-219]:

1)运行参数影响性分析。通过层次分析法对体系进行分级,构建可靠性指标再分配权重系数评价模型,量化不同参数对运行可靠性的影响程度为权重系数。

2)运行参数比例重要度计算。通过比例分配计算各个子产品占整个系统的比例重要度。

3)可靠性指标再分配技术。结合比例重要度,通过评价权重系数对比例重要度进行加权结合,再通过系统的总指标进行分配,当整个系统满足可靠性指标要求时,反馈再分配结果,若不满足,则重新分配,直至满足要求为止。

7.5 维修任务优化

以某型民用飞机刹车系统典型计划维修任务为例,在整理其非计划拆换、例行检查数据以及维修任务的数据基础上,获取最近的维修部件失效分布函数。并以此失效函数为基础,在满足维修任务的适航可靠度要求的条件下,计算维修任务不同维修次数的维修间隔,实现维修任务的动态维修间隔的确定,具体流程如图14所示。

在进行刹车组件的运行可靠性分析后,收集

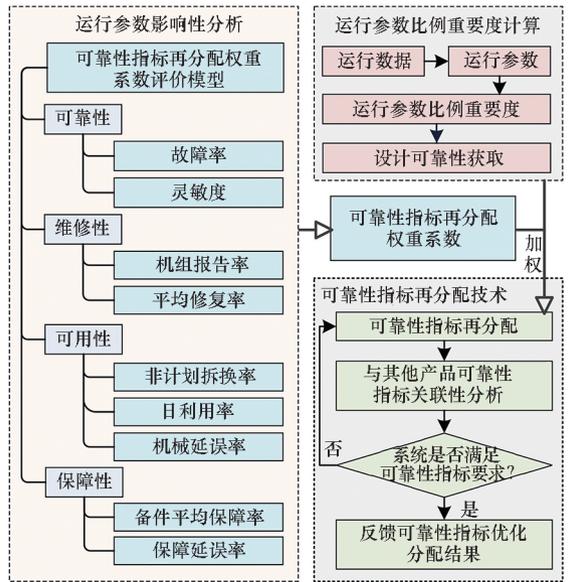


图13 基于运行数据的可靠性指标再分配技术途径
Fig.13 Redistribution approach of reliability indicators

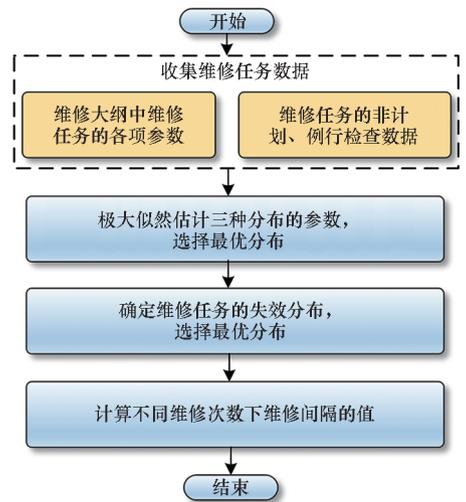


图14 维修任务优化流程
Fig.14 Maintenance task optimization process

刹车组件的维修大纲与运行检查数据,并采用最优分布拟合的方法进行维修间隔的优化。运行可靠性分析工作、维修大纲优化工作是保障飞机持

续安全运行的重要内容,具体案例可参考文献[220]。

7.6 民机可靠性与运行维护平台

本案例开发民用飞机运行可靠性综合管理平台,以期实现产品全寿命周期可靠性电子集成综合化管理,搭建 OEM、运营人、MRO 等利益攸关方信息交换的连接通道;建立适用于民用飞机运行数据库,搭建的运行可靠性综合管理平台可望覆盖利益攸关方的使用需求,为民用飞机全寿命周期可靠性管理服务。

1) 可靠性管理平台研制场景、需求和流程分析。先通过调研国内外相关可靠性管理平台所具有的功能和应用场景,汲取并借鉴可靠性平台研制经验,确定可靠性管理平台开发环境,搭建其场景界面、登录界面和功能界面;梳理可靠性管理平台的使用需求,形成可靠性管理平台需求,制定可靠性管理平台开发流程,为可靠性管理平台开发奠定基础,技术途径如图 15 所示。

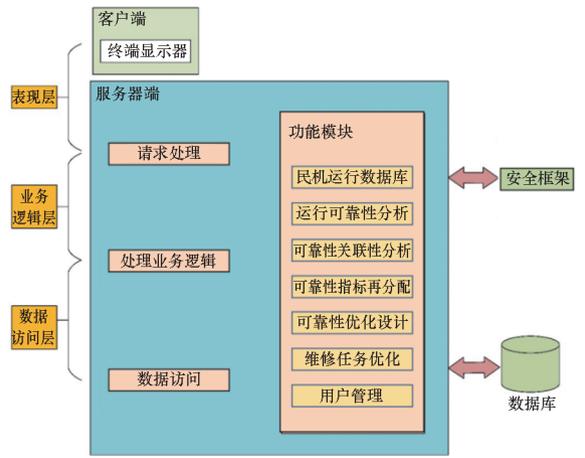


图 16 三层架构设计模式

Fig. 16 Three layer architecture design pattern

模块的基础上,将各个模块进行关联,实现模块之间的信息交换,最后,构建民用飞机运行可靠性综合管理平台^[221-222]。

8 结论

从数据采集技术、运行可靠性分析方法、运行可靠性预测反馈技术、基于运行可靠性的优化设计、维修任务优化、运行可靠性管理平台六个方面,详细阐述了飞机运行可靠性的理论研究和工程应用现状并指出不足之处。最后,通过某型民用飞机“机轮刹车温度差异过大”故障将涵盖六个方面内容的案例进行串联,形成一套完整的、覆盖文章内容的案例展示。

民用飞机运行可靠性评估的研究还有诸多问题有待解决,如:① 如何建立合理的设备运行状态与可靠性之间的关联映射模型,形成民用飞机子系统或部件的可靠性评价体系,科学表征部件或系统的运行可靠性;② 运行可靠性是时间的函数,如何针对非平稳运行的飞机子系统或部件进行运行可靠性评估;③ 亟须开展针对近时运行可靠性和瞬时运行可靠性模型的深入探究,形成科学的、解释性好、工程应用价值高的运行可靠性分析模型;④ 当前的运行可靠性分析算法多采用代理模型或机器学习算法,存在计算原理不明朗、可解释性差等问题,更好地结合知识、失效机理、系统交联关系的算法探究是当前存在的问题之一;⑤ 如何在运行可靠性评估的基础上开展一体化优化设计,解决多学科参数和大量循环嵌套迭代问题;⑥ 如何依据运行可靠性分析和预测结果改善维修保障,如维修任务优化、优化航材配置、改进运行控制等,建立运行可靠性反馈机制;⑦ 如何有效结合设计、制造、运营经验,建立主机厂、供

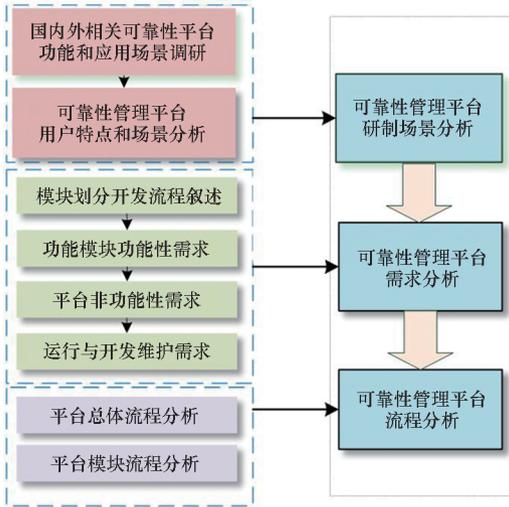


图 15 运行可靠性综合管理平台开发途径

Fig. 15 Development approach to comprehensive management platform for operational reliability

2) 可靠性平台架构研究。可靠性管理平台架构研究具体技术途径可描述为:结合可靠性管理平台需求,研究各功能模块之间的关联性关系,搭建涵盖“采、存、取、用”4 项性能的可靠性管理平台架构,为可靠性管理平台各功能模块开发提供指导。图 16 展示了三层架构模式。

3) 功能模块开发。结合可靠性管理平台的需求,分别开发输入模块、分析模块和输出模块。其中,输入模块为运行数据库,分析模块为运行可靠性分析模块、运行与设计可靠性关联性分析模块和可靠性指标再分配模块,输出模块为可靠性设计优化模块和维修任务优化模块。在开发各个

应商、运营人数据互通的适用国产民机的全寿命周期可靠性管理平台。

民用飞机现在已纳入运行支持数字网络,在日益完善的飞机数据采集技术背景下,丰富的运行数据与设计参数、维护保养数据相结合,可为飞机的运行可靠性分析提供充足的支持。要切实做好民用飞机运行可靠性评估并实现工程应用,还存在大量的技术难点需要研究人员进一步攻克。需要综合飞行器设计、可靠性工程、人工智能、故障诊断等多学科领域开展交叉研究,推进民用飞机运行可靠性分析的理论和技術发展,以期形成完善的飞机运行支持体系,实现飞机的设计、制造、试飞、运行全寿命周期活动的有效管理。

参考文献 (References)

- [1] FEI C W, LIU H T, LI S L, et al. Dynamic parametric modeling-based model updating strategy of aeroengine casings[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(12): 145-157.
- [2] TIAN J, AI Y T, FEI C W, et al. Dynamic modeling and simulation of inter-shaft bearings with localized defects excited by time-varying displacement[J]. Journal of Vibration and Control, 2019, 25(8): 1436-1446.
- [3] HAN L, CHEN C, GUO T Y, et al. Probability-based service safety life prediction approach of raw and treated turbine blades regarding combined cycle fatigue[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 110: 106513.
- [4] 冯蕴雯,路成,薛小锋,等. S5000F 介绍及在民用飞机运行可靠性分析反馈中的应用[J]. 航空工程进展, 2020, 11(2): 147-158, 166.
FENG Y W, LU C, XUE X F, et al. Introduction of S5000F specification and its application on operational reliability analysis and feedback of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(2): 147-158, 166. (in Chinese)
- [5] MÜLLER R, DRAX C. Operational risk management as an integrated part of safety management systems [M]// Management for Professionals. Cham: Springer International Publishing, 2014: 73-76.
- [6] Federal Aviation Administration. Monitor safety/analyze data: 8110.107A [S]. Washington, DC, USA: Aircraft Certification, 2012.
- [7] 凌云霞. ASD 及其航空航天标准[J]. 航空标准化与质量, 2009(6): 47-49.
LING Y X. ASD and its aerospace standards[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2009(6): 47-49. (in Chinese)
- [8] AeroSpace and Defence Industries Association of Europe, Aerospace Industries Association. AIA/ASD S5000F International specification for in-service data feedback [S]. Europe: ASD/AID, 2016.
- [9] 康锐. 确信可靠性理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 3-136.
KANG R. Belief reliability theory and methodology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 3-136. (in Chinese)
- [10] 康锐. 可靠性维修性保障性工程基础[M]. 北京: 国防工
业出版社, 2012: 269-313.
KANG R. Fundamentals of reliability & maintainability & supportability engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 269-313. (in Chinese)
- [11] TIASSOU K, KANOUN K, KAÂNICHE M, et al. Aircraft operational reliability—a model-based approach and a case study[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 120: 163-176.
- [12] YUYAMA A, KAJITANI Y, SHOJI G. Simulation of operational reliability of thermal power plants during a power crisis: are we underestimating power shortage risk? [J]. Applied Energy, 2018, 231: 901-913.
- [13] GAONKAR R S P, XIE M, NG K M, et al. Subjective operational reliability assessment of maritime transportation system [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(11): 13835-13846.
- [14] O'CONNOR P D T. Commentary: reliability-past, present, and future [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2000, 49(4): 335-341.
- [15] 黄洪钟. 对常规可靠性理论的批判性评述:兼论模糊可靠性理论的产生, 发展及应用前景[J]. 机械设计, 1994, 11(3): 1-5, 47, 51-60.
HUANG H Z. A critical review of conventional reliability theory: an introduction to fuzzy reliability theory, its development and application prospects[J]. Machine Design, 1994, 11(3): 1-5, 47, 51-60. (in Chinese)
- [16] ZIO E. Reliability engineering: old problems and new challenges [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 125-141.
- [17] 何正嘉,曹宏瑞,訾艳阳,等. 机械设备运行可靠性评估的发展与思考[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 171-186.
HE Z J, CAO H R, ZI Y Y, et al. Developments and thoughts on operational reliability assessment of mechanical equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 171-186. (in Chinese)
- [18] 冯蕴雯,潘维煌,刘佳奇,等. 基于机器学习的飞机动力装置运行可靠性[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 394-404.
FENG Y W, PAN W H, LIU J Q, et al. Operational reliability of aircraft power plant based on machine learning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 394-404. (in Chinese)
- [19] 刘佳奇,冯蕴雯,路成,等. 基于智能神经网络的航空发动机运行安全分析[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 136-147.
LIU J Q, FENG Y W, LU C, et al. Safety analysis of aero-engine operation based on intelligent neural network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 136-147. (in Chinese)
- [20] CHEN J Y, FENG Y W, TENG D, et al. Support vector machines-based pre-calculation error for structural reliability analysis [J/OL]. Engineering with Computers, 2023. [2023-03-17]. <https://doi.org/10.1007/s00366-023-01803-0>.
- [21] 吕震雷,宋述芳,李璐祎,等. 结构/机构可靠性设计基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019.
LYU Z Z, SONG S F, LI L Y, et al. Fundamentals of structure/mechanism reliability design [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2019. (in

- Chinese)
- [22] PANDEY M D. Direct estimation of quantile functions using the maximum entropy principle[J]. *Structural Safety*, 2000, 22(1): 61–79.
- [23] DIAMOUTENE A, NOUREDDINE F, KAMSU-FOGUEM B, et al. Reliability analysis with proportional hazard model in aeronautics [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2021, 22: 1222–1234.
- [24] 余国林. 小子样飞机系统使用可靠性评估方法研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
YU G L. Study and application of the evaluation technology on the small sample aircraft system operational reliability[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [25] 冯静, 周经伦. 基于 Bayes-模糊逻辑算子的小子样可靠性信息融合方法[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(9): 1633–1636.
FENG J, ZHOU J L. Small-sample reliability information fusion approach based on Bayes-fuzzy logistic operator[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(9): 1633–1636. (in Chinese)
- [26] 颜兆林, 冯静. 基于平均互信息熵的复杂系统可靠性评定方法[J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(1): 48–51.
YAN Z L, FENG J. Reliability assessment of complex system based on mean interactive entropy[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(1): 48–51. (in Chinese)
- [27] 袁修开, 吕震宙, 岳珠峰. 小样本下分位数函数的 Bootstrap 置信区间估计[J]. *航空学报*, 2012, 33(10): 1842–1849.
YUAN X K, LYU Z Z, YUE Z F. Bootstrap confidence interval of quantile function estimation for small samples[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(10): 1842–1849. (in Chinese)
- [28] 姜朱楠, 左洪福, 李利荣, 等. 后缘襟翼位置传感器故障预测方法研究[J]. *航空计算技术*, 2018, 48(2): 75–78.
JIANG Z N, ZUO H F, LI L R, et al. Research on fault prediction method of trailing edge flap position sensor failure[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2018, 48(2): 75–78. (in Chinese)
- [29] GEBRAEEL N, ELWANY A, PAN J. Residual life predictions in the absence of prior degradation knowledge[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2009, 58(1): 106–117.
- [30] GEBRAEEL N, PAN J. Prognostic degradation models for computing and updating residual life distributions in a time-varying environment [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, 57(4): 539–550.
- [31] ORDÓÑEZ C, LASHERAS F S, ROCA-PARDIÑAS J, et al. A hybrid ARIMA-SVM model for the study of the remaining useful life of aircraft engines [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2019, 346: 184–191.
- [32] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. *宇航学报*, 2006, 27(3): 546–552.
DENG A M, CHEN X, ZHANG C H, et al. Reliability assessment based on performance degradation data [J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(3): 546–552. (in Chinese)
- [33] 孙闯, 何正嘉, 张周锁, 等. 基于状态信息的航空发动机运行可靠性评估[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 30–37.
SUN C, HE Z J, ZHANG Z S, et al. Operating reliability assessment for aero-engine based on condition monitoring information [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 30–37. (in Chinese)
- [34] 李军亮, 滕克难, 夏非. 基于深度学习的军用飞机部件状态参数预测[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(6): 61–67, 85.
LI J L, TENG K N, XIA F. Military aircraft components state parameters prediction using the deep belief learning [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(6): 61–67, 85. (in Chinese)
- [35] 丁建立, 方正汉. 改进模糊 C 均值的客机空调系统退化评估算法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2021, 53(1): 142–149.
DING J L, FANG Z H. Degradation assessment for air conditioning system of passenger aircraft based on improved fuzzy C-means [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021, 53(1): 142–149. (in Chinese)
- [36] DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D, KASSAKIAN J G, SCHINDALL J E, et al. An integrated methodology for the dynamic performance and reliability evaluation of fault-tolerant systems [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, 93(11): 1628–1649.
- [37] MITICI M, DE PATER I. Online model-based remaining-useful-life prognostics for aircraft cooling units using time-warping degradation clustering [J]. *Aerospace*, 2021, 8(6): 168.
- [38] 陈勇刚, 罗晓利. 航空公司机队设备可靠性非线性动态评估模型[J]. *航空学报*, 2013, 34(1): 104–111.
CHEN Y G, LUO X L. Nonlinear dynamic assessment model of airline fleet equipment reliability [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(1): 104–111. (in Chinese)
- [39] 梁坤, 左洪福, 孙见忠, 等. 民航引气系统快速存取记录器数据健康监测方法[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(8): 191–197.
LIANG K, ZUO H F, SUN J Z, et al. QAR data health monitoring method of civil aircraft bleed air system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(8): 191–197. (in Chinese)
- [40] 陈勇刚, 熊升华, 贺强, 等. 通用航空机队设备可靠性动态识别模型[J]. *航空学报*, 2018, 39(3): 172–183.
CHEN Y G, XIONG S H, HE Q, et al. Dynamic recognition method for reliability of general aviation fleet equipment [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(3): 172–183. (in Chinese)
- [41] 张玉杰. 飞机机电系统部件健康状态在线估计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 26–125.
ZHANG Y J. Research on on-line estimation methods for the health state of aircraft electromechanical system components [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 26–125. (in Chinese)
- [42] LI J, CHANG L M, ZHAN Y, et al. Improvement of operational reliability with material properties for aircraft equipment [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 908: 22–25.
- [43] 陈保家, 邱光银, 肖文荣, 等. 航空发动机转子轴承运行可靠性评估方法[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(10): 41–48.
CHEN B J, QIU G Y, XIAO W R, et al. An evaluation

- method of operational reliability for aero-engine rotor bearings[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(10): 41–48. (in Chinese)
- [44] WU C L, CAVES R E. Towards the optimisation of the schedule reliability of aircraft rotations [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2002, 8(6): 419–426.
- [45] AHMADI A, SODERHOLM P. Assessment of operational consequences of aircraft failures: using event tree analysis[C]//*Proceedings of IEEE Aerospace Conference*, 2008: 1–14.
- [46] NAM T, MAVRIS D N. Multistage reliability-based design optimization and application to aircraft conceptual design[J]. *Journal of Aircraft*, 2018, 55(5): 2022–2036.
- [47] OGONOWSKI K, KOZUBA J. Possibility of processing parameters obtained from on-board flight data recorders for diagnostics and predicting reliable operation periods of important aircraft equipment[J]. *Scientific Journal of Silesian University of Technology Series Transport*, 2017, 95: 133–143.
- [48] DONG Z, LI B W, LI J Y, et al. Online reliability assessment of energy systems based on a high-order extended-state-observer with application to nuclear reactors [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 158: 112159.
- [49] LISNIANSKI A, ELMAKIAS D, LAREDO D, et al. A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 98(1): 1–6.
- [50] KESHTEGAR B, BAGHERI M, FEI C W, et al. Multi-extremum-modified response basis model for nonlinear response prediction of dynamic turbine blisk[J]. *Engineering with Computers*, 2022, 38(Suppl 2): 1243–1254.
- [51] WANG W, SHEN G, ZHANG Y M, et al. Dynamic reliability analysis of mechanical system with wear and vibration failure modes[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 163: 104385.
- [52] 高鹏, 谢里阳. 基于改进发生函数方法的多状态系统可靠性分析[J]. *航空学报*, 2010, 31(5): 934–939.
GAO P, XIE L Y. Reliability analysis of multi-state systems based on improved universal generating function [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(5): 934–939. (in Chinese)
- [53] WANG Z L, LIU K L, ZHU L Y, et al. Detecting the occurrence times and locations of multiple traffic crashes simultaneously with probe vehicle data [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 126: 103014.
- [54] SU S, CHANIOTAKIS E, NARAYANAN S, et al. Clustered tabu search optimization for reservation-based shared autonomous vehicles [J]. *Transportation Letters-the International Journal of Transportation Research*, 2022, 14(2): 124–128.
- [55] FINK O, ZIO E, WEIDMANN U. Predicting component reliability and level of degradation with complex-valued neural networks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 121: 198–206.
- [56] YAN L, ZHANG T, GAO Y, et al. Reliability analysis of station autonomous computer system based on fuzzy dynamic fault tree and Markov model[J]. *Engineering Reports*, 2021, 3(8): e12376.
- [57] AI H, FAN Y H, ZHANG J L, et al. Topology optimization of computer communication network based on improved genetic algorithm[J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2022, 31(1): 651–659.
- [58] ZHU S P, LIU Q, PENG W W, et al. Computational-experimental approaches for fatigue reliability assessment of turbine bladed disks[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 142/143: 502–517.
- [59] GUO Y Y, SUN Y C, LI L B, et al. Reliability assessment for multi-source data of mechanical parts of civil aircraft based on the model [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(7): 3205–3211.
- [60] LU C, FENG Y W, LIEM R P, et al. Improved Kriging with extremum response surface method for structural dynamic reliability and sensitivity analyses[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 76: 164–175.
- [61] ASMAYAWATI S, NIXON J. Modelling and supporting flight crew decision-making during aircraft engine malfunctions: developing design recommendations from cognitive work analysis[J]. *Applied Ergonomics*, 2020, 82: 102953.
- [62] LU Z, LIANG X H, ZUO M J, et al. Markov process based time limited dispatch analysis with constraints of both dispatch reliability and average safety levels [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 167: 84–94.
- [63] PIŁGAS M, RADON T, SZYMANSKI M, et al. Information system support for military aircraft operations SI SAMANTA as a tool to support logistic resource management[J]. *Journal of KONBiN*, 2020, 50(4): 269–286.
- [64] PANDIAN G, PECHT M, ZIO E, et al. Data-driven reliability analysis of Boeing 787 Dreamliner [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(7): 1969–1979.
- [65] LIN L, LUO B, ZHONG S S. Development and application of maintenance decision-making support system for aircraft fleet[J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 114: 192–207.
- [66] 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): 8–23.
KONG X F, CAI J Q, ZHANG L H, et al. Research status and development trend of big data in aviation system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(12): 8–23. (in Chinese)
- [67] 谢晓龙. 航空发动机性能评价与衰退预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 17–45.
XIE X L. Research on performance assessment and degradation prediction of aeroengine [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 17–45. (in Chinese)
- [68] 王旭辉. 飞机飞行安全实时监控关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 4–37.
WANG X H. Research on key technologies of real-time monitoring of aircraft flight safety [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008: 4–37. (in Chinese)
- [69] LI S J, YANG Y, YANG L, et al. Civil aircraft big data platform [C]//*Proceedings of IEEE 11th International Conference on Semantic Computing (ICSC)*, 2017: 328–333.
- [70] KASTURI E, DEVI S P, KIRAN S V, et al. Airline route profitability analysis and optimization using BIG DATA analytics on aviation data sets under heuristic techniques[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 87: 86–92.

- [71] XIA J, FENG Y W, LU C, et al. LSTM-based multi-layer self-attention method for remaining useful life estimation of mechanical systems[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 125: 105385.
- [72] 房冠成, 贾大鹏, 刘毅飞, 等. 基于飞行参数数据挖掘的军机健康评估技术[J]. *航空学报*, 2020, 41(6): 296-306.
FANG G C, JIA D P, LIU Y F, et al. Military airplane health assessment technique based on data mining of flight parameters[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(6): 296-306. (in Chinese)
- [73] 叶博嘉, 鲍序, 刘博, 等. 基于机器学习的航空器进近飞行时间预测[J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 359-370.
YE B J, BAO X, LIU B, et al. Machine learning for aircraft approach time prediction [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(10): 359-370. (in Chinese)
- [74] SUN J Z, LI C Y, LIU C, et al. A data-driven health indicator extraction method for aircraft air conditioning system health monitoring[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(2): 409-416.
- [75] 郑友石. 民用飞机无故障数据的可靠性分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
ZHENG Y S. Study on reliability analysis methods for zero-failure data of civil airplane[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [76] 张娟, 王艳艳. 起落架收放机构时变可靠度与时变全局可靠性灵敏度分析[J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(3): 358-363.
ZHANG J, WANG Y Y. Research on time-variant reliability and time-varying global reliability sensitivity of aircraft landing gear mechanism[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, 37(3): 358-363. (in Chinese)
- [77] JO I T, LEE S C, PARK J H, et al. A study on reliability evaluation and improvement process of aerospace electronic equipments using operational reliability-cost matrix [J]. *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 2014, 42(4): 633-646.
- [78] 蔡改改, 陈雪峰, 陈保家, 等. 利用设备响应状态信息的运行可靠性评估[J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(1): 108-113.
CAI G G, CHEN X F, CHEN B J, et al. Operating reliability assessment by equipment response condition information[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(1): 108-113. (in Chinese)
- [79] GLOWACKI P J, LOROCH L, BALICKI W. Operations reliability study of small aircraft powered by piston engines[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2018, 92(3): 285-295.
- [80] REN R, ZHU L, XI Q, et al. A design and research of digital operation support framework for civil aircrafts[C]// *Proceedings of International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*, 2017: 215-219.
- [81] 徐庆宏, 任和, 马小骏, 等. 民用飞机实时监控与健康管理技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018: 32-75.
XU Q H, REN H, MA X J, et al. Real-time monitoring and health management technology for civil aircraft [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2018: 32-75. (in Chinese)
- [82] 崇卫之. 数据预处理机制的研究与系统构建[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018: 10-35.
CHONG W Z. Research and system construction of data preprocessing mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018: 10-35. (in Chinese)
- [83] TANG P N, STEINBACH M, KUMAR V. Introduction to data mining [M]// *Intelligent Systems Reference Library*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 1-43.
- [84] DU H Z, ZHAO S J, ZHANG D Q, et al. Novel clustering-based approach for local outlier detection[C]// *Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2016: 802-811.
- [85] KNORR E M, NG R T, TUCAKOV V. Distance-based outliers: algorithms and applications[J]. *The VLDB Journal*, 2000, 8(3): 237-253.
- [86] RAMASWAMY S, RASTOGI R, SHIM K. Efficient algorithms for mining outliers from large data sets[J]. *ACM SIGMOD Record*, 2000, 29(2): 427-438.
- [87] 白凤伟. 数据预处理系统的几个关键技术研究 with 实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 7-49.
BAI F W. Research and implementation of some main techniques in data preprocessing system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 7-49. (in Chinese)
- [88] LITTLE R J A, RUBIN D B. Statistical analysis with missing data[M]. 2nd ed. Hoboken, N. J: Wiley, 2002.
- [89] TRIGUERO I, PERALTA D, BACARDIT J, et al. MRPR: a MapReduce solution for prototype reduction in big data classification[J]. *Neurocomputing*, 2015, 150: 331-345.
- [90] RAMONI M, SEBASTIANI S. Learning Bayesian networks from incomplete databases [J]. *Insurance: Mathematics and Economics*, 1997, 21(3): 249.
- [91] 冯宪凯, 黄树成. 基于 DBSCAN 的缺失值填充算法研究[J]. *计算机与数字工程*, 2020, 48(7): 1572-1575, 1686.
FENG X K, HUANG S C. Research on missing value filling algorithm based on DBSCAN [J]. *Computer and Digital Engineering*, 2020, 48(7): 1572-1575, 1686. (in Chinese)
- [92] DE WINTER J C F, DODOU D. Factor recovery by principal axis factoring and maximum likelihood factor analysis as a function of factor pattern and sample size [J]. *Journal of Applied Statistics*, 2012, 39(3/4): 695-710.
- [93] GROTH D, HARTMANN S, KLIE S, et al. Principal components analysis [M]// *Methods in Molecular Biology*. Totowa, NJ: Humana Press, 2012: 527-547.
- [94] ROWEIS S T, SAUL L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding[J]. *Science*, 2000, 290(5500): 2323-2326.
- [95] KOKIOPOULOU E, SAAD Y. Orthogonal neighborhood preserving projections: a projection-based dimensionality reduction technique [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(12): 2143-2156.
- [96] MICHALAK K, KWASNICKA H. Correlation based feature selection method [J]. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2010, 2(5): 319-332.
- [97] GARCIA S, DERRAC J, CANO J, et al. Prototype selection for nearest neighbor classification: taxonomy and empirical

- study [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(3): 417–435.
- [98] 陈希成, 刘东升. 飞机舱温实测数据处理方法研究[J]. *航空学报*, 2003, 24(2): 129–133.
CHEN X C, LIU D S. Research on field-testing data processing method of aircraft's environment temperature[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2003, 24(2): 129–133. (in Chinese)
- [99] 侯亚丽, 郝铭飞. 基于QAR数据的燃油估算模型对比研究[J]. *航空计算技术*, 2019, 49(1): 15–18, 23.
HOU Y L, HAO M F. Comparative study of fuel estimation model based on QAR data [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2019, 49(1): 15–18, 23. (in Chinese)
- [100] 王奕惟, 莫李平, 王奕首, 等. 基于全航段QAR数据和卷积神经网络的航空发动机状态辨识[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(7): 1556–1563.
WANG Y W, MO L P, WANG Y S, et al. Aero-engine status identification based on full-segment QAR data and convolutional neural network [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(7): 1556–1563. (in Chinese)
- [101] HUANG R S, SUN H B, WU C, et al. Estimating eddy dissipation rate with QAR flight big data [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(23): 5192.
- [102] KANG Z W, SHANG J X, FENG Y, et al. A deep sequence-to-sequence method for accurate long landing prediction based on flight data[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, 15(8): 1028–1042.
- [103] BINEID M, FIELDING J P. Development of a civil aircraft dispatch reliability prediction methodology [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2003, 75(6): 588–594.
- [104] POGAČNIK B, DUHOVNIK J, TAVČAR J. Aircraft fault forecasting at maintenance service on the basis of historic data and aircraft parameters [J]. *Eksplotacija i Niezawodnos-Maintenance and Reliability*, 2017, 19(4): 624–633.
- [105] SHULMAN H I, SMITH H L. Operational availability and reliability model [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1974, R-23(5): 290–294.
- [106] JENAB K, RASHIDI K. Operational reliability assessment of an aircraft environmental control system [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(2): 456–462.
- [107] ULANSKY V, RAZA A. Modelling of operational reliability and maintenance cost for avionics systems with permanent and intermittent failures [C]// *Proceeding of the 9th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability*, 2016.
- [108] SAINTIS L. Method for predicting the operational reliability of an aircraft system; US8688419B2[P]. 2014-04-01.
- [109] PETCHARIN C, REN H. CF6 engine operational reliability and maintenance optimization[J]. *Journal of Aircraft*, 2012, 49(2): 651–653.
- [110] LEE J, MITICI M. An integrated assessment of safety and efficiency of aircraft maintenance strategies using agent-based modelling and stochastic Petri nets [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 202: 107052.
- [111] LIU J Q, FENG Y W, LU C, et al. Vibration reliability analysis of aeroengine rotor based on intelligent neural network modeling framework[J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 1–11.
- [112] TIASSOU K, KANOUN K, Kaâniche M, et al. Online model adaptation for aircraft operational reliability assessment [C]// *Proceedings of 6th International Congress, Embedded Real Time Software and Systems (ERTS2 2012)*, 2012: 1–11.
- [113] LEE H, LI G Y, RAI A, et al. Real-time anomaly detection framework using a support vector regression for the safety monitoring of commercial aircraft[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, 44: 101071.
- [114] ZHOU D, ZHUANG X, ZUO H F, et al. Deep learning-based approach for civil aircraft hazard identification and prediction[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 103665–103683.
- [115] 王焯. 民机产品可靠性评估技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 39–100.
WANG Y. Research on technique of reliability assessments for civil aircraft products [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 39–100. (in Chinese)
- [116] DING F, HE Z J. Formalization of reliability model for assessment and prognosis using proactive monitoring mechanism [C]//*Proceedings of Prognostics and System Health Management Conference*, 2010: 1–6.
- [117] NIETO P J G, GARCÍA-GONZALO E, LASHERAS F S, et al. Hybrid PSO-SVM-based method for forecasting of the remaining useful life for aircraft engines and evaluation of its reliability [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 138: 219–231.
- [118] TIASSOU K, KANOUN K, KA M, et al. Modeling aircraft operational reliability [M]//*Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 157–170.
- [119] BRÁZDIL T, KORENČIAK L', KRČÁL J, et al. Optimizing performance of continuous-time stochastic systems using timeout synthesis [C]// *Proceedings of the 12th International Conference on Quantitative Evaluation of Systems*, 2015: 141–159.
- [120] GAO S Z, ZHANG S X, ZHANG Y M, et al. Operational reliability evaluation and prediction of rolling bearing based on isometric mapping and NoCuSa-LSSVM [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 201: 106968.
- [121] 冯鹏飞, 朱永生, 王培功, 等. 基于相关向量机模型的设备运行可靠性预测[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(12): 146–149.
FENG P F, ZHU Y S, WANG P G, et al. Operational reliability prediction of equipment based on relevance vector machine [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(12): 146–149. (in Chinese)
- [122] 洪骥宇. 基于深度学习的航空发动机可靠性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 21–55.
HONG J Y. Research on aero-engine reliability analysis based on deep learning [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 21–55. (in Chinese)
- [123] 周媛. 基于数据驱动的航空发动机状态监测关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 42–59.
ZHOU Y. Research on key techniques of data-driven condition monitoring for aeroengine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015: 42–59. (in Chinese)
- [124] KRONHEIM B S, KUCHERA M P, PROSPER H B, et al. Bayesian neural networks for fast SUSY predictions [J]. *Physics Letters B*, 2021, 813: 136041.
- [125] GANDOMI A H, YANG X S, ALAVI A H. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural

- optimization problems [J]. *Engineering with Computers*, 2013, 29(1): 17–35.
- [126] YOU L F, ZHANG J G, ZHOU S, et al. A novel mixed uncertainty support vector machine method for structural reliability analysis [J]. *Acta Mechanica*, 2021, 232(4): 1497–1513.
- [127] KABIR S, WALKER M, PAPADOPOULOS Y. Dynamic system safety analysis in HiP-HOPS with Petri nets and Bayesian networks[J]. *Safety Science*, 2018, 105: 55–70.
- [128] ZIENKIEWICZ O C, CAMPBELL J S. Shape optimization and sequential linear programming[J]. *Optimum Structural Design Theory and Applications*, 1973: 109–126.
- [129] RAMAKRISHNAN C V, FRANCAVILLA A. Structural shape optimization using penalty functions[J]. *Journal of Structural Mechanics*, 1974, 3(4): 403–422.
- [130] VALDEBENITO M A, JENSEN H A, HERNÁNDEZ H B, et al. Sensitivity estimation of failure probability applying line sampling [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 171: 99–111.
- [131] LEI S, LI L, TIAN W, et al. Direct method for second-order sensitivity analysis of modal strain energy [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 462: 114926.
- [132] LI C T, CAO Y L, DUAN C, et al. A feasible delay margin sensitivity analysis method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 2713–2716.
- [133] 袁修开. 结构可靠性与可靠性灵敏度分析的数值模拟方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 6–21.
YUAN X K. Research on digital simulation method of structural reliability and reliability sensitivity analysis [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007: 6–21. (in Chinese)
- [134] FU J M, LI H H, CHI Y J, et al. nSIL evaluation and sensitivity study of diverse redundant structure[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, 210: 107518.
- [135] 翟华伟, 崔立成, 张维石. 一种改进灵敏度分析的在线自适应极限学习机算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2019, 40(7): 1386–1390.
ZHAI H W, CUI L C, ZHANG W S. Novel online adaptive algorithm of extreme learning machine based on improved sensitivity analysis [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2019, 40(7): 1386–1390. (in Chinese)
- [136] 高宗战, 刘志群, 姜志峰, 等. 飞机翼梁结构强度可靠性灵敏度分析 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14): 194–198.
GAO Z Z, LIU Z Q, JIANG Z F, et al. Strength reliability and parameter sensitivity analysis for airfoil spar structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 194–198. (in Chinese)
- [137] 张峰, 杨旭锋, 刘永寿, 等. 飞机起落架缓冲器参数可靠性灵敏度分析 [J]. *振动工程学报*, 2015, 28(1): 67–72.
ZHANG F, YANG X F, LIU Y S, et al. Reliability parameter sensitivity analysis for aircraft landing gear shock absorber [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2015, 28(1): 67–72. (in Chinese)
- [138] ZHAI X, FEI C W, ZHAI Q G, et al. Reliability and sensitivity analyses of HPT blade-tip radial running clearance using multiply response surface model[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(11): 4368–4377.
- [139] BYINGTON C S, ROEMER M J, GALIE T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance military aircraft[C]//*Proceedings of IEEE Aerospace Conference*, 2002.
- [140] ZHANG L, LI X S, YU J S. A review of fault prognostics in condition based maintenance [C]//*Proceedings of 6th International Symposium on Instrumentation and Control Technology*, 2006.
- [141] LEE J, NI J, DJURDJANOVIC D, et al. Intelligent prognostics tools and e-maintenance [J]. *Computers in Industry*, 2006, 57(6): 476–489.
- [142] MULLER A, SUHNER M C, IUNG B. Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2008, 93(2): 234–253.
- [143] ZHAO Z Q, LIANG B, WANG S Q, et al. Remaining useful life prediction of aircraft engine based on degradation pattern learning[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 164: 74–83.
- [144] ZAIDAN M A, MILLS A R, HARRISON R F, et al. Gas turbine engine prognostics using Bayesian hierarchical models: a variational approach [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 70/71: 120–140.
- [145] CLAUSEN J B B, LI H Y. Big data driven order-up-to level model: application of machine learning [J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 139: 105641.
- [146] LIU L S, GUO Q, LIU D T, et al. Data-driven remaining useful life prediction considering sensor anomaly detection and data recovery[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 58336–58345.
- [147] 周俊. 数据驱动的航空发动机剩余使用寿命预测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 9–55.
ZHOU J. Research on data-driven prediction methods for remaining useful life of aero-engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 9–55. (in Chinese)
- [148] CORREIA J A F O, DE JESUS A M, FERNÁNDEZ-CANTELI A. A procedure to derive probabilistic fatigue crack propagation data [J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2012, 3(2): 158–183.
- [149] SANCHES R F, DE JESUS A M P, CORREIA J A F O, et al. A probabilistic fatigue approach for riveted joints using Monte Carlo simulation [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 110: 149–162.
- [150] SAHAR G, BAKAR K A, RAHIM S, et al. Recent advancement of data-driven models in wireless sensor networks: a survey [J]. *Technologies*, 2021, 9(4): 76.
- [151] ZHANG W T, YANG D, WANG H C. Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: a survey [J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(3): 2213–2227.
- [152] UZUN M, DEMIREZEN M U, INALHAN G. Physics guided deep learning for data-driven aircraft fuel consumption modeling [J]. *Aerospace*, 2021, 8(2): 44.
- [153] HASHEMI S M, BOTEZ R M, GRIGORIE T L. New reliability studies of data-driven aircraft trajectory prediction [J]. *Aerospace*, 2020, 7(10): 145.
- [154] EL MIR H, PERINPANAYAGAM S. Certification approach for physics informed machine learning and its application in landing gear life assessment [C]//*Proceedings of IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 2021: 1–6.

- [155] ALTAY A, OZKAN O, KAYAKUTLU G. Certification approach for physics informed machine learning and its application in landing prediction of aircraft failure times using artificial neural networks and genetic algorithms[J]. *Journal of Aircraft*, 2014, 51(1): 47–53.
- [156] KORDESTANI M, SAMADI M F, SAIF M. A new hybrid fault prognosis method for MFS systems based on distributed neural networks and recursive Bayesian algorithm[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(4): 5407–5416.
- [157] ATASOY V E, SUZER A E, EKICI S. A comparative analysis of exhaust gas temperature based on machine learning models for aviation applications [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022, 144(8): 082101.
- [158] ZHOU D, ZHUANG X, ZUO H F, et al. Hazard identification and prediction system for aircraft electrical system based on SRA and SVM [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2020, 234(4): 1014–1026.
- [159] LI W Q, HOU N, SUN X K. Method for predicting failure rate of airborne equipment based on optimal combination model[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 1–20.
- [160] KUMAR A, SRIVASTAVA A, GOEL N, et al. Exhaust gas temperature data prediction by autoregressive models [C]// *Proceedings of IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2015: 976–981.
- [161] LI L L, MA D J, LI Z G. Residual useful life estimation by a data-driven similarity-based approach [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2017, 33(2): 231–239.
- [162] 朱磊, 左洪福, 蔡景. 基于 Wiener 过程的民用航空发动机性能可靠性预测[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(5): 1006–1012.
- ZHU L, ZUO H F, CAI J. Performance reliability prediction for civil aviation aircraft engine based on Wiener process[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(5): 1006–1012. (in Chinese)
- [163] KONG Z M, CUI Y D, XIA Z, et al. Convolution and long short-term memory hybrid deep neural networks for remaining useful life prognostics [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19): 4156.
- [164] LIAO L X, KÖTTIG F. A hybrid framework combining data-driven and model-based methods for system remaining useful life prediction [J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 44: 191–199.
- [165] 唐椿春, 吕震宙, 吕媛波. 一种与样本信息合理匹配的可靠性模型[J]. *宇航学报*, 2010, 31(3): 895–901.
- TANG Z C, LYU Z Z, LYU Y B. A novel reliability model matching information involved in sample data[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 895–901. (in Chinese)
- [166] 秦强, 冯蕴雯, 薛小锋. 全局最优导向模糊布谷鸟搜索算法及应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(1): 94–100.
- QIN Q, FENG Y W, XUE X F. Global-best guided fuzzy cuckoo search algorithm and its application[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(1): 94–100. (in Chinese)
- [167] 陈志英, 刘宏蕾, 周平. 航空发动机套齿结构动态装配关系稳健性优化设计[J]. *推进技术*, 2018, 39(1): 160–168.
- CHEN Z Y, LIU H L, ZHOU P. Robustness optimization of dynamic assembly parameters for aero-engine spline structure[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(1): 160–168. (in Chinese)
- [168] ZHANG C Y, SONG L K, FEI C W, et al. Reliability-based design optimization for flexible mechanism with particle swarm optimization and advanced extremum response surface method[J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23(8): 2001–2007.
- [169] 郭钧. 整车制造企业生产过程质量控制及评价方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 9–53.
- GUO J. Study on production process quality control and evaluation in vehicle manufacturing enterprise [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 9–53. (in Chinese)
- [170] 李娟. 面向制造过程的质量与可靠性联合优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 15–30.
- LI J. Research on joint optimization of quality and reliability for manufacturing process [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 15–30. (in Chinese)
- [171] 蔡忠义, 陈云翔, 张净敏, 等. 非线性步进加速退化数据的可靠性评估方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(3): 576–582.
- CAI Z Y, CHEN Y X, ZHANG Z M, et al. Reliability assessment method of nonlinear step-stress accelerated degradation data [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(3): 576–582. (in Chinese)
- [172] 龚星宇. 考虑环境温度的起落架转弯机构可靠性分析与试验验证[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 22–45.
- GONG X Y. Research on reliability and test verification of landing gear steering mechanism considering environment temperature[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 22–45. (in Chinese)
- [173] QIAO L, HOMMA T. A new computational method of a moment-independent uncertainty importance measure [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(7): 1205–1211.
- [174] LIU X, FU Q, YE N H, et al. The multi-objective reliability-based design optimization for structure based on probability and ellipsoidal convex hybrid model[J]. *Structural Safety*, 2019, 77: 48–56.
- [175] WANG L, MA Y J, YANG Y W, et al. Structural design optimization based on hybrid time-variant reliability measure under non-probabilistic convex uncertainties [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 69: 330–354.
- [176] FALK J E, SINGPURWALLA N D, VLADIMIRSKY Y Y. Reliability allocation for networks and systems [J]. *SIAM Review*, 2006, 48(1): 43–65.
- [177] 王华昕, 徐晨, 邹龙, 等. 基于改进灰色聚类的配电网应急可靠性综合评估方法[J]. *电测与仪表*, 2017, 54(18): 22–29.
- WANG H X, XU C, ZOU L, et al. Research on comprehensive assessment method of emergency reliability evaluation of distribution network based on reformative grey clustering [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(18): 22–29. (in Chinese)
- [178] ZHANG J C, LI L, CHEN Z W. Strength-redundancy allocation problem using artificial bee colony algorithm for multi-state systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 209: 107494.

- [179] MODIBBO U M, ARSHAD M, ABDALGHANI O, et al. Optimization and estimation in system reliability allocation problem[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 212: 107620.
- [180] WU X Y, WU X Y, BALAKRISHNAN N. Reliability allocation model and algorithm for phased mission systems with uncertain component parameters based on importance measure[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 180: 266–276.
- [181] WANG C, ZHANG J. Construction of human-machine interface evaluation with multi-index weights allocation method[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering, 2015.
- [182] WU Y Y, SUN W L. Research on the reliability allocation method for a wind turbine generator system based on a fuzzy analytic hierarchy process considering multiple factors[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 64461–64467.
- [183] 刘英, 余武, 李岳, 等. 基于区间灰色系统理论的可靠性分配[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(11): 1521–1526.
LIU Y, YU W, LI Y, et al. Reliability allocation based on interval analysis and grey system theory [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(11): 1521–1526. (in Chinese)
- [184] PAPAKOSTAS N, PAPACHATZAKIS P, XANTHAKIS V, et al. An approach to operational aircraft maintenance planning[J]. *Decision Support Systems*, 2010, 48(4): 604–612.
- [185] PEREIRA D P, GOMES I L R, RUI M, et al. Planning of aircraft fleet maintenance teams [J]. *Aerospace*, 2021, 8(5): 140.
- [186] 武禹陶, 贾希胜, 温亮, 等. 以可靠性为中心的维修(RCM)发展与应用综述[J]. *军械工程学院学报*, 2016, 28(4): 13–21.
WU Y T, JIA X S, WEN L, et al. A review of reliability centered maintenance (RCM): development and application[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2016, 28(4): 13–21. (in Chinese)
- [187] ZACHOS M P, SCHOHL K E. Bridging design and implementation for a more practical condition-based maintenance plus (CBM) solution embedded vehicle diagnostics on the mini-vehicle computer system (VCS)[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2011, 14(4): 34–38.
- [188] 罗斌. 基于结构疲劳寿命预测的机队维修决策方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 4–21.
LUO B. Research on fleet maintenance decision-making based on structure fatigue life prediction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 4–21. (in Chinese)
- [189] 石敏. 我国低成本航空公司的运营模式探索: 以捷星香港有限公司为例 [D]. 上海: 上海外国语大学, 2014: 5–16.
SHI M. The exploration of Chinese low-cost carriers' operation mode; illustrated by the case of Jetstar Hongkong Co., Ltd. [D]. Shanghai: Shanghai International Studies University, 2014: 5–16. (in Chinese)
- [190] REGATTIERI A, GIAZZI A, GAMBERI M, et al. An innovative method to optimize the maintenance policies in an aircraft: general framework and case study[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2015, 44/45: 8–20.
- [191] STADNICKA D, ARKHIPOV D, BATAÏA O, et al. Skills management in the optimization of aircraft maintenance processes[J]. *IFAC-PapersOnline*, 2017, 50(1): 6912–6917.
- [192] 刘成, 王勇, 蒋庆喜, 等. 应用 S4000P 制订民用飞机区域检查任务方法探究 [J]. *航空维修与工程*, 2016, 299(5): 59–61.
LIU C, WANG Y, JIANG Q X, et al. Method research on application of S4000P to civil aircraft zonal inspection tasks formulation[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2016, 299(5): 59–61. (in Chinese)
- [193] 蔡景, 王华伟. 基于不完备检测的飞机结构维修优化方法 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(4): 481–485.
CAI J, WANG H W. Optimal maintenance of aircraft structure based on imperfect inspection [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(4): 481–485. (in Chinese)
- [194] 贾宝惠, 刘涛, 杨杭, 等. 民机隐蔽故障维修间隔优化方法研究[J]. *航空制造技术*, 2015, 484(增刊1): 20–23, 32.
JIA B H, LIU T, YANG H, et al. Study on maintenance interval optimization of hidden failure of civil aircraft [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 484(Suppl 1): 20–23, 32. (in Chinese)
- [195] 门江. 维修方案项目优化的可靠性分析方法[J]. *航空维修与工程*, 2016, 303(9): 65–66.
MEN J. Reliability analysis method of maintenance plan optimization [J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2016, 303(9): 65–66. (in Chinese)
- [196] JENNIONS I, ALI F. Assessment of heat exchanger degradation in a Boeing 737–800 environmental control system [J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications; Transactions of the ASME*, 2021, 13(6): 061015.
- [197] FERREIRO S, ARNAIZ A, SIERRA B, et al. A Bayesian network model integrated in a prognostics and health management system for aircraft line maintenance [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 225(8): 886–901.
- [198] 马小骏. 面向客户服务的民用飞机健康管理系统的若干问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
MA X J. Research on problems of civil aircraft health management system oriented to custom service [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [199] NERGÅRD V, HATLEVIK O E, MARTINUSSEN M, et al. An airman's personal attitude: pilots' point of view [J]. *Aviation*, 2011, 15(4): 101–111.
- [200] 顾铮. 空中客车公司数字化排故及维修管理软件 AIRMAN[J]. *航空维修与工程*, 2005(6): 39–41.
GU Z. Airbus digital trouble shooting and maintenance management software AIRMAN[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2005(6): 39–41. (in Chinese)
- [201] 中国民用航空局. 航空器制造厂家运行支持体系建设规范: MD-FS-AEG006[S]. 北京: 中国民用航空局, 2014.
Civil Aviation Administration of China. Standard for construction of operational support system of aircraft manufacturers: MD-FS-AEG006[S]. Beijing: CAAC, 2014. (in Chinese)

- [202] 中国民用航空局. 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则: CCAR-21-R5 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2017.
Civil Aviation Administration of China. Rules for operational qualification authentication of large aircraft public air transport carriers: CCAR-21-R5 [S]. Beijing: CAAC, 2017. (in Chinese)
- [203] 中国民用航空局飞行标准司. 可靠性方案: AC-121-54R1 [S]. 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2017.
Civil Aviation Administration of China. Reliability schemes: AC-121-54R1 [S]. Beijing: CAAC, 2017. (in Chinese)
- [204] DU C L, LI F B, YANG C H, et al. Multiphase-based optimal slip ratio tracking control of aircraft antiskid braking system via second-order sliding-mode approach [J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(2): 823–833.
- [205] 刘晓超, 焦宗夏, 尚耀星, 等. 飞机新原理电液自馈能刹车系统设计与优化 [J]. *航空学报*, 2021, 42(6): 64–74.
LIU X C, JIAO Z X, SHANG Y X, et al. Design and optimization of electro-hydraulic self-powered braking system [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(6): 64–74. (in Chinese)
- [206] PAN W H, FENG Y W, LIU J Q, et al. Operation reliability monitoring towards fault diagnosis of airplane hydraulic system using quick access recorder flight data [J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(5): 055111.
- [207] LU C, TENG D, CHEN J Y, et al. Adaptive vectorial surrogate modeling framework for multi-objective reliability estimation [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 234: 109148.
- [208] PAN W H, FENG Y W, LU C, et al. Analyzing the operation reliability of aeroengine using quick access recorder flight data [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 235: 109193.
- [209] LIU J Q, FENG Y W, TENG D, et al. Operational reliability evaluation and analysis framework of civil aircraft complex system based on intelligent extremum machine learning model [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 235: 109218.
- [210] FENG Y W, SONG Z C, LU C. Mechanical dispatch reliability prediction for civil aircraft considering operational parameters [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2023, 134(3): 1925–1942.
- [211] CHEN J Y, FENG Y W, TENG D, et al. Support vector machine-based similarity selection method for structural transient reliability analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 223: 108513.
- [212] TENG D, FENG Y W, CHEN J Y, et al. Structural dynamic reliability analysis: review and prospects [J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2022, 13(5): 753–783.
- [213] TENG D, FENG Y W, CHEN J Y. Intelligent moving extremum weighted surrogate modeling framework for dynamic reliability estimation of complex structures [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 138: 106364.
- [214] CHEN J Y, FENG Y W, TENG D, et al. Dimensionality reduction-based extremum surrogate modeling strategy for transient reliability analysis of complex structures [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 130: 105745.
- [215] XIA J, FENG Y W, LU C, et al. Degradation prediction and rolling predictive maintenance policy for multi-sensor systems based on two-dimensional self-attention [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 54: 101772.
- [216] XIA J, FENG Y W, TENG D, et al. Distance self-attention network method for remaining useful life estimation of aeroengine with parallel computing [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 225: 108636.
- [217] 冯蕴雯, 宋祉岑, 路成, 等. 基于FTA-AHP的飞机系统综合灵敏度评价分析 [J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(5): 971–977.
FENG Y W, SONG Z C, LU C, et al. Analysis of comprehensive sensitivity evaluation of aircraft system based on FTA-AHP [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(5): 971–977. (in Chinese)
- [218] FENG Y W, SONG Z C, LU C. The optimization of civil aircraft product option selection considering the economy response with an improved non-dominated sorting genetic algorithm [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(11): 5294.
- [219] 宋祉岑, 冯蕴雯, 陈俊宇. 基于运行数据的可靠性指标优化分配方法: CN115271156A [P]. 2022–11–01.
SONG Z C, FENG Y W, CHEN J Y. Optimization allocation method of reliability indicators based on operational data: CN115271156A [P]. 2022–11–01. (in Chinese)
- [220] 冯蕴雯, 潘维煌, 路成, 等. 基于运行数据的国产民机动态维修任务间隔优化 [J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(4): 1231–1238.
FENG Y W, PAN W H, LU C, et al. Optimization of dynamic maintenance task interval for domestic civil aircraft based on operation data [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(4): 1231–1238. (in Chinese)
- [221] 冯蕴雯, 陈俊宇, 路成, 等. S系列ILS规范数据模型在民用飞机客户服务体系中的应用 [J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(3): 576–585.
FENG Y W, CHEN J Y, LU C, et al. The application of S-series ILS specifications data model in civil aircraft customer service system [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(3): 576–585. (in Chinese)
- [222] 冯蕴雯, 严浩, 路成, 等. 多语言混合编程的民用飞机航材预测与配置平台 [J]. *航空工程进展*, 2021, 12(5): 123–130.
FENG Y W, YAN H, LU C, et al. Civil aircraft materials prediction and configuration platform of multi language hybrid programming [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2021, 12(5): 123–130. (in Chinese)