

无人机故障预测与健康管理研究现状及发展

罗晓亮, 涂 龙, 王浩旭, 王晓晶, 胡振峰, 喻凡坤, 梁秀兵

(军事科学院国防科技创新研究院 前沿交叉技术研究中心, 北京 100071)

摘要: 随着无人机武器装备复杂性、综合化、智能化程度不断提高, 由此带来的故障多发性、致命性、随机性、交联性导致系统可靠性与安全性问题日趋突出, 因此无人机的维修保障问题成为一大军事难点; 为了满足智能化战争对无人机快捷、精准、持续保障的要求, 故障预测与健康管理技术应运而生, 成为了英美俄等军事强国的研究热点; 文章介绍了国内外无人机 PHM 技术的发展现状, 以及无人机 PHM 体系构架, 从数据采集和传感器技术、数据预处理和数据挖掘技术、数据通信技术、多传感器数据融合技术、健康评估和故障预测技术、智能推理与决策支持技术等六个方面详细分析了无人机 PHM 关键技术, 最后结合现阶段无人机 PHM 技术的不足, 展望了无人机 PHM 技术的发展趋势。

关键词: 故障预测与健康管理; 无人机; 人工智能

Research on Status and Development Trend of Prognostics and Health Management for Military Unmanned Aerial Vehicles

Luo Xiaoliang, Tu Long, Wang Haoxu, Wang Xiaojing, Hu Zhenfeng, Yu Fankun, Liang Xiubing

(Advanced Interdisciplinary Technology Research Center, National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China)

Abstract: The rapid development in the complexity, comprehensiveness, and intelligence of military unmanned aerial vehicle (UAV) has induced multiple, fatal, random, cross-linked faults, which raises concerns over its system reliability and safety. Therefore, the maintenance and support of military UAVs has become a difficulty. To meet the requirements for fast, accurate, and continuous support for UAVs in the modern intelligent warfare, prognostics and health management (PHM) technology emerges and becomes the research focus of major military powers such as Britain, the United States, and Russia. The paper introduces the domestic and foreign development status of UAV PHM technology, as well as the UAV PHM system architecture. The key technologies of UAV PHM are analyzed from six different aspects, including data acquisition and sensor technology, data preprocessing and data mining technology, data communication technology, multi-sensor data fusion technology, health assessment and fault prediction technology, and intelligent reasoning and decision support technology. In addition, the deficiencies of present UAV PHM technology and its future prospects are discussed.

Keywords: prognostics and health management; unmanned aerial vehicle; artificial intelligence

0 引言

智能化与无人化是面向未来智能化战争武器装备的发展趋势。由于无人机具有空战的隐蔽性和作战效率, 有效降低了危险区域作战人员伤亡的风险, 在当前信息化和智能化战争中发挥的作用也日渐凸显。无人机是集光机电控制于一体的大型复杂系统, 造价和保障费用高昂, 重复使用飞行频次高, 要求具有状态监测、故障诊断和预测等安全保障能力, 进一步实现系统的自主修复和长期高可靠运行, 因而对故障预测与健康管理 (PHM) 技术需求极为迫切^[1]。无人机的使用维修费用占从制造到退役全生命周期总费用的 70% 以上, 基于复杂系统鲁棒性、可靠性、安全性及经济性考虑, PHM 对无人机的全寿命周期使用及维护保障起到至关重要的作用, 因而得到越来越多的重视和应

用。目前, 美国、英国、以色列等国军方已将 PHM 技术广泛应用于各型无人机^[2-4]。

PHM 技术是通过先进传感器采集的数据信息, 结合相关算法和模型来诊断系统故障, 借助推理模型来预测系统及关键部位的健康状态, 实现基于设备状态 (历史、当前和未来状态) 的智能维护, 达到系统视情维修的目的, 以取代传统基于事件的事后维修或基于时间的定期维修^[5]。并且 PHM 技术能够在准确的时间对无人机准确的部位进行精准的维修保障, 提高无人机保障自主性和系统安全性, 降低使用与维护费用^[6]。作为提高无人机系统可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性的一项关键技术, 无人机 PHM 技术受到各国军方的广泛关注, 是无人机自主维修保障领域的重要技术发展趋势。

收稿日期: 2020-05-21; 修回日期: 2020-07-06。

作者简介: 罗晓亮 (1986-), 男, 福建龙岩人, 博士, 助理研究员, 主要从事故障预测与健康管理的方向研究。

通讯作者: 梁秀兵 (1974-), 男, 山东烟台人, 博士, 研究员, 主要从事智能制造与再制造工程领域方向的研究。

引用格式: 罗晓亮, 涂 龙, 王浩旭, 等. 无人机故障预测与健康管理研究现状及发展[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 1-5.

1 无人机 PHM 技术国内外发展现状

随着智能化战争的逐步来临,无人机在战场上的应用也越来越广泛,国内外关于无人机故障预测与健康管理的研 究也 逐渐兴起。无人机属于高度智能化的复杂装备,由于平台无人且工作在恶劣对抗环境下,无人机故障预测与健康管理的 技术难度远高于传统装备。也正因为如此,无人机相比传统武器装备更需要高性能的故障预测与健康管 理技术为战斗力提供持久保障。从近五年的国内外公开发表的文献来看,关于无人机故障预测与健康管理的学术研 究尚处于早期阶段,美英等西方国家在无人机 PHM 技术 研究走在前列,我国相关科研机构保持了有力的跟进态势。从具体研究内容上来看,无人机 PHM 技术的研究内容主要 体现在电力系统及剩余寿命、任务规划的监测以及系统设计 三个方面。

在无人机电力系统及剩余寿命的 PHM 研究方面,美国 智利大学电机工程系的 G. Sierra 研究组对小型旋翼电动无 人机的电池健康管理进行了研究。该研究组设计的旋翼无 人机电池管理系统可准确估算充电状态,通过使用基于模 型的预测架构来预测小型多转子锂聚合物电池的放电终止 时间,并且该架构可在低成本硬件中高效地实现,为无人 机实现目标任务提供有力保障^[7]。斯特拉斯克莱德大学能 源与环境研究所 Rory Telford 研究组,对基于隐马尔可夫 模型的无人机电网故障分类与诊断系统进行了研究。结果 表明:该系统具有故障的自主检测和分类,以及评估各种 电力系统故障严重性的能力,可以实现故障的精确分类, 并且具有较高的诊断精度,有助于和改善电力系统健康管 理和控制^[8]。美国宇航局艾姆斯研究中心的 Shankar San- kararaman 研究组针对无人机电荷变化特性,提出了一种用 于表征和量化无人机起飞过程中功率需求计算方法。无人 机的飞行能力由电池中的电荷量来驱动,基于无人机的电 源和充电需求,设计了无人机电源系统。通过飞行测试获 得的信息被转换为多维稀疏数据,并且提出了一种基于多 维稀疏数据表征电池电量变化的新方法,能够预测未来的 充电需求,进而计算电池的放电终止时间,最终计算出电 源系统的剩余使用寿命^[9]。

在无人机任务规划的 PHM 研究方面,哈尔滨工业大 学刘大同教授研究组研究了基于飞行模式识别的无人机飞 行数据估计与预测混合方法,可快速准确的实现无人机飞 行状态跟踪。针对建立复杂系统的精确物理模型的困难性, 以及飞行数据中含有非线性、不确定性和噪声等问题,提 出了一种基于飞行模式识别的无迹卡尔曼滤波混合方法。 该方法结合了两 种思想:1) 利用飞行模式识别机制将无人 机飞行数据划分为不同的段,提高了估计和预测模型的适 应性;2) 根据不同的飞行模式,从飞行数据中学习高斯过 程递推模型,并将其作为各无迹卡尔曼滤波器(UKF)的 状态转移方程,以实现更高的估计精度和不确定性表示。 基于实际无人机飞行数据的实验,成功验证了该框架的有 效性^[10-11]。巴西国家空间研究院的 Rafael Santos 等学者研

究了基于 PHM 的多无人机任务分配问题。无人机集群的剩 余使用寿命通过基于概率密度函数的故障树分析计算得出, 并且概率密度函数与各无人机关键部件的时间和故障概率 有关,通过使用后退地平线任务分配算法实现了基于无人 机健康状况(主要是剩余使用寿命)的任务分配,可以避免 计划外中断影响无人机任务的执行^[12]。

在无人机 PHM 系统设计方面,空军工程大学的冯国强 研究组利用生物学中的自平衡理论进行无人机容错控制与 故障诊断系统设计,通过设计“平衡点”确定无人机的安 全状态,将容错控制与故障诊断应用于故障预测和健康管 理^[13]。中国电子科技集团公司第五十四研究所的雷耀麟等 人设计了基于遥测数据及智能解译的无人机故障预测与健 康管理系统,且利用模拟故障样本对故障预测算法进行了 仿真实验,表明无人机故障预测系统具有良好的故障检测 能力^[14]。空军工程大学的余代锐等人设计了一种基于无线 传感器网络的故障预测与健康管理系统,提出传感器节点 连通和覆盖模型,实现了无人机机载传感器无尺度拓扑网 络构建成本的最小化^[15]。陆军工程大学的苏续军等人提出 利用 BP 神经网络预测无人机系统故障的方法,给出了 BP 神经网络的建模和计算方法,计算表明该方法可用于无人 机故障预测^[16]。

2 无人机 PHM 体系框架

无人系统的传感器从各部件、各设备和各系统采集的 数据信息经数据处理后,状态监测层通过比较提取的特征 值与阈值的大小,来判断故障与否,对发生故障的部件进 行故障诊断,追寻故障原因及位置,而状态良好的部件依 据失效机理预测其剩余寿命,最后 PHM 系统根据无人系 统的健康状态和任务需求提供决策信息^[6]。由于无人系统 零部件多、设备复杂且耦合、数据采集量大等因素,体系 构架用传统的分布式会导致各分系统数据信息难以集成, 而集中式构架对于海量数据的处理会出现迟缓,无法完成 实时反馈;因此无人系统 PHM 体系构架采用分布式和集 中式相结合的方式。图 1 是无人机 PHM 系统拓扑结构,按 照系统层级,无人机 PHM 系统分为系统层、分系统层、 设备层和关键部件层。由图可知,底下三层采用分布式 体系构架,关键部件层和设备层收集并形成各自的状态数 据,将各自的状态信息上传给对应的上一层;分系统层对 传来的数据进行分析、融合等处理,完成各分系统的健康 状态评估,并将诊断、预测等结果集中上传到系统层。PHM 中的系统层采用集中式体系构架,主要获取各分系统层 的健康状态及其变化信息,结合历史数据库和专家知识对 无人机的非正常状态进行故障诊断、健康评估、故障预测 等,实现自主决策,达到辅助维修人员的目的。

3 无人机 PHM 技术的关键技术研究

按照功能划分,无人机 PHM 技术主要包含两方面:故 障预测和健康管 理。故障预测即预先诊断和测算无人系 统或部件的工作状态与正常值的偏差程度,进而推断其剩 余寿命;健康管理即根据诊断预测结果,使用故障模型和

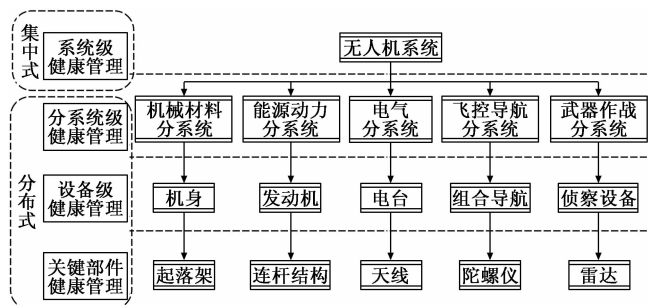


图 1 无人机 PHM 系统拓扑结构

维修资源对维修保障做出适当决策, 包括故障建模、状态监测、数据处理、综合诊断、健康管理、维修决策等。如图 2 所示: 具体包括数据采集和传感器技术、数据通信技术、数据预处理技术、数据融合技术、状态监控和故障预测技术等。

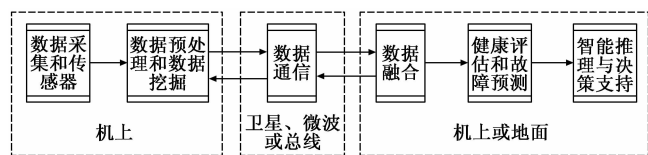


图 2 无人机 PHM 系统关键技术结构框图

3.1 数据采集和传感器技术

数据采集需要依靠先进的传感器技术^[17], 而传感器获得的状态参数是无人机 PHM 系统的数据基础, 因此数据采集和传感器技术将直接影响 PHM 系统的整体效能, 因此数据采集和传感器技术将直接影响 PHM 系统的整体效果。无人机 PHM 系统要求传感器具有体积小、重量轻, 能和其它传感器联网优化, 可适应恶劣的工作条件和环境, 能屏蔽电磁干扰等特点。目前传感器技术有两大研究方向: 1) 单个传感器的技术革新; 2) 多传感器之间的网络布局。传感器在极端环境下的数据监测一直是一大难点, 中国航发动力所李军等^[18]提出航空发动机载荷、转速和温度数据的获取依赖于滑油金属屑末检测传感器、滑油成分监测传感器; Ari Novis^[19]等分析了美国联合攻击战斗机 (joint strike fighter, JSF) 发动机气路颗粒荷电信息的监测问题, 提出 IDMS (吸入物监测系统) 和 EDMS (发动机损失监测系统) 能进行实时监控; Sanjay Garg^[20]等总结了各类传感器在发动机 PHM 管理中的重要作用; 由此可见, 特殊部件的数据监测需要传感器性能的技术革新。另外, 大量传感器协同采集无人机系统的数据, 可实现数据信息精确获取, 工业和信息化部电子第五研究所攻克了大规模传感器网络测试关键技术, 提高了数据监测的精度^[21]。

3.2 数据预处理和数据挖掘技术

由于传感器自身性能、所处的工作环境等因素, 传感器采集的数据会受到噪声等干扰, 得到的数据具有随机性、模糊性以及不确定性, 因此需要对采集的原始数据进行数据的预处理和挖掘提取, 数据预处理主要包括: 数据清洗、数据集成、数据变换。1) 数据清洗 (Data Cleaning) 通过

修补、剔除大量数据中不完整或者不合理的数据, 来提高数据质量。传感器采集的海量数据一般存在数据缺失, 由于无人机 PHM 系统的复杂性, 数据模型难以建立, 通常使用基于数据驱动的数据补充法, 王林^[22]分析了民用飞机缺失数据, 提出数据补充准则, 通过数据实验证明多重补充法可以较好的保持数据之间的关系。无人机 PHM 系统故障和传感器的异常都会导致异常数据的产生, 朱倩雯^[23]等采用的基于四分位算法, 对不同类型、不同数量异常数据的剔除效果显著。对于含有噪声的数据进行分箱法、高斯滤波法和回归法处理。2) 数据集成 (Data Integration) 是将多来源、多格式、不同特性的数据通过一定的特征规则有机集中起来。现阶段, 无人机全寿命周期数据存储分散, (计算机、文本资料等), 缺乏统一的数据管理模式^[24]。传统的数据仓库或者数据联合方法不能满足数据实时处理的需求, 因此数据集成技术朝着具有搜索引擎功能的方向发展, 如知识图谱、云存储等。3) 数据变换 (Data Transformation) 的目的是找到数据的特征, 在保证数据质量的前提下, 改变数据维度来减少有效变量。主要转换方法: 数据规范化处理, 缩放数据特征, 使原始数据尽量映射到较小的特定区域; 规范化处理, 如最大-最小规范化和零-一规范化等。

数据挖掘是从海量的、模糊的、随机的数据中提取隐含的、具有潜在应用价值信息的过程。无人机 PHM 数据挖掘常用方法有分类、回归和聚类, 基于预处理的海量数据, 挖掘其隐藏信息, 并利用可视化技术展示挖掘出的相关知识, 满足无人机 PHM 数据的需求。1) 分类算法, 是一种有监督学习算法, 利用分类器将有标签的数据分类, 将未知属性的数据映射到已存在的数据类别中; 常见的有 SVM、LR、KNN 和决策树等。洪翠^[25]等利用改进的多分类 SVM 方法, 有效识别了配电网故障类型。2) 回归算法, 通过函数描述数据间的映射关系, 来预测输入变量和输出变量之间的关系; 代表性的有线性回归、多元回归和岭回归 (Ridge Regression)。张鹏飞^[26]等基于某城市配电网的故障报修数据, 采用多元回归获得了变量和故障量关系, 实现了配电网故障数量较高精度的短期预测。3) 聚类算法, 将没有标签的数据, 根据相似度把数据自动归类, 是典型的无监督学习算法; K-means、C 均值等算法应用广泛。孙鹤旭^[27]等提出一种基于并行化的改进模糊 C-均值聚类的风电机组发电机故障诊断方法, 可以精确判别发电机的故障模式。

3.3 数据通信技术

传感器采集的大量数据经过数据预处理和数据挖掘后, 需要正确、通畅、安全地传输到 PHM 系统的其他部分, 如采集导航、姿态等数据信息都需要串口与机载单片机进行通信, 从而实现整个系统的一体化、网络化和信息化。目前无人系统数据间的传输方式主要有两种: 有线数据传输和无线数据传输。有线数据传输大多用于机载系统或者设备之间的数据传输和资源共享, 在信号的稳定性和传输速率上有着天然的优势。有线数据传输中采用了总线技术,

在军民飞机有着广泛的应用,如 F-16、F117、幻影 2000、空中客车 A340 等普遍采用了总线技术。无线数据传输系统由一系列分布式传感器(微处理器、无线传输器、数据采集电路等)组件构成,常用于机载系统与外界的数据传输,主要通过中继卫星、微波、蓝牙、WIFI 等方式,中继卫星可以覆盖地球大部分区域,不受回传距离限制,但数据传输速率低;微波可以较长距离数据传输,灵活便捷,但容易收到外界电磁、地形环境等因素干扰;蓝牙的数据传输范围极小,但成本低且体积小;WIFI 的数据传输范围比蓝牙稍大,只适用于超视距飞行小型无人机,但 WIFI 的通信频段没有限制,有着广泛的应用。

3.4 多传感器数据融合技术

在无人机 PHM 系统中,多传感器数据融合技术是指将单一或者多传感器采集的数据、环境信息、历史数据和维修记录等通过各种智能算法融合到一起,获得对被测环境或对象更加精确的定位,得到优化的综合评价结果。多传感器数据融合技术主要用来提高飞机状态监控、故障预测和健康管理准确性,即通过协作或竞争的过程来获得更准确的推论结果。按照所处理数据的层级,多传感器数据融合技术可分为 3 个层次^[28]: 1) 底层融合,将传感器采集的各种数据进行融合以进行信号识别和特征提取; 2) 中层融合,将提取的特征信息进一步融合以获得故障诊断方面的信息; 3) 顶层融合,将基于经验的故障库和故障模型同故障信息进行融合,顶层融合会依据相关准则,让不同的属性故障信息拥有各自的可信度,得到整体一致的决策,实现系统级的预测推理和维修决策。韩晓微^[29]等提出了基于邻域搜索的 BP 网络数据融合算法,解决了多旋翼无人机使用单姿态传感器存在的精确度低、噪声大、稳定性较差的问题;金星^[30]等提出的对海目标航迹数据融合算法,让具有侦察探测与目标指示功能的对海无人机,形成了统一的战场态势信息及高精度的目标指示信息。与传统数据处理方法相比,多传感器数据融合技术考虑问题更全面,得到的结果更可靠。PHM 领域常用的多传感器数据融合技术有人工神经网络、模糊逻辑推理和贝叶斯推理等。

3.5 健康评估和故障预测技术

健康评估和故障预测技术是一种数据推理过程,利用状态监测数据,在已有经验、案例和模型的推理算法基础上,将飞机状态、故障状况、维修能力等相关信息实时传至维修保障系统,结合设备的结构特性和运行信息及历次维修记录,对故障进行诊断、分析和预报,评估部件或系统的剩余使用寿命,确定故障的类别、部位、程度和原因,预测其未来的健康状态。利用先进的健康评估和故障预测技术,不仅可以发现早期的故障,还可以有效指导故障发生前的维修决策,避免恶性事故的发生,从根本上解决设备定期维修中的维修不足和过剩维修的问题。目前在 PHM 系统中广泛应用的故障预测技术主要有三种: 1) 基于模型(失效物理模型和数学模型)的故障预测技术,通过失效物理参数来评估关键零部件的损伤程度,建立物理模型或随机过程建模,用来评估部件剩余寿命。邓聚龙教授提出的

灰色模型是常见的故障预测模型之一。2) 基于知识的故障预测技术,最典型的是专家系统,它具有丰富的知识和经验,能指导现实问题进行判断和决策;但是专家系统知识库中的知识和经验需要人类专家完成,无人机 PHM 系统数据知识不断更新和变化,难以形成完备的知识。3) 基于数据驱动的故障预测技术,传感器采集的大量数据作为历史数据可以预测无人机短期状态,常见的有人工神经网络、时间序列、回归预测等。无人机 PHM 系统的物理数学模型复杂,产生的数据具有海量性、随机性和模糊性,难以形成完备的知识体系,而基于数据的故障预测技术不需要无人机的先验知识,以传感器采集的数据为基础,借助数据挖掘算法提取隐含的数据信息进行预测操作,因此基于数据的故障预测技术逐渐成为一种主流且实用的故障预测方法。

3.6 智能推理与决策支持技术

智能推理与决策支持技术是实现无人机 PHM 系统最后的“管理”,即在健康评估和故障预测的基础上,自动生成一系列维修保障决策来实现无人机的视情维修。为此,需要形成无人机各系统/各设备间的状态监测系统、健康评估和故障预测系统、健康管理系统和各级知识库等的联动,构建无人机 PHM 系统的维修保障决策支持系统,实现维修决策的自动生成、维修资源的统一调配以及各相关单位的协同保障等,从而极大地提高保障的效率和精确度。建立决策支持系统的主要技术有知识图谱,智能预测,自适应任务规划等,知识图谱技术能够将无人机传感器采集的半结构化和非结构化数据抽取成结构化知识,集成并存储结构化知识形成知识库;根据在线或者离线的监测数据和历史知识库的偏差程度,智能预测技术能对系统/设备做出健康评估并预测剩余寿命;最后根据无人机自身损伤程度和任务需求统一调配相关指令,实现无人机的自适应任务规划。

4 无人机 PHM 技术发展趋势

无人作战系统的快速发展对其维修保障技术提出越来越高的要求,世界各国都将 PHM 技术作为无人机维修保障的研究热点。吸收和借鉴国外的先进经验,研究无人机 PHM 关键技术可为我国面向智能化时代无人化武器装备的研制提供坚实支撑。PHM 系统作为未来无人机的重要系统,结合人工智能和无人系统等战略前沿技术的发展,将来有望在以下四个方向取得重要进展。

1) 先进传感器技术:随着高强度、耐高温等性能材料的出现,无人机的传感器朝着微型化、智能化、集成化、高精度、低能耗,高可靠性等方面发展,先进传感器技术的进步使采集的数据更加真实,能为无人机 PHM 系统提供更可靠的数据。

2) 数据分析方法:人工智能(artificial intelligence, AI)于 1956 年被首次提出,在波浪式前进过程中,直到计算能力、海量数据以及核心算法的出现,AI 在 21 世纪取得突破性进展,基于无人机 PHM 海量数据,高效合适的数据分析方法能极大提升数据质量。

3) 标准化和开放性接口技术: 标准化和开放性接口技术是提高无人机 PHM 技术的通用性, 缩短研制周期, 降低使用和维护费用的有效途径。无人机 PHM 系统未来会采用标准化设计和开放的接口标准, 如 PHM 系统各模块之间的接口, 部件级 PHM 与系统级 PHM 之间的接口等, 可以提高系统兼容性和互操作性, 从而能随着技术进步而不断实现技术更新。

4) 故障预测技术: 故障预测是 PHM 技术与传统维修手段的重要区别, 是无人机 PHM 技术的核心。机械或者机电设备能实现故障预测, 但电子系统的失效机理不同于前者, 目前只能实现故障检测和隔离, 无人机系统中存在大量关键的电子系统, 为完善和促进无人机 PHM 技术的发展, 应加强研究电子系统的失效机理和剩余寿命。

5 结束语

本文从电力系统及剩余寿命、任务规划的监测和系统设计三个方面介绍了国内外无人机 PHM 技术, 并总结了无人机 PHM 体系构架, 重点分析了无人机 PHM 的关键技术: 数据采集和传感器技术、数据预处理和数据挖掘技术、数据通信技术、多传感器数据融合技术、健康评估和故障预测技术、智能推理与决策支持技术, 最后展望了目前无人机 PHM 技术的发展趋势。

参考文献:

[1] 年夫顺. 关于故障预测与健康管理的几点认识 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (8): 1-14.

[2] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理的现状及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2008 (5): 591-594.

[3] 孙博, 康锐, 谢劲松. 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述 [J]. 系统工程与电子技术, 2007 (10): 1762-1767.

[4] 吕琛, 马剑, 王自力. PHM 技术国内外发展情况综述 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 1-4.

[5] 张宝珍, 曾天翔. 先进的故障预测与状态管理技术 [J]. 测控技术, 2003 (11): 4-6.

[6] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理的综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24 (1): 1-9.

[7] Sierra G, Orchard M, Goebel K, et al. Battery health management for small-size rotary-wing electric unmanned aerial vehicles: An efficient approach for constrained computing platforms [J]. Reliability Engineering & System Safety. 2019, 182: 166-178.

[8] Telford Rory, Galloway Stuart. Fault classification and diagnostic system for unmanned aerial vehicle electrical networks based on hidden Markov models [J]. IET Electrical Systems in Transportation. 2015, 5 (3): 103-111.

[9] Sankararaman Shankar, Goebel Kai. Towards Characterizing the Variability in the Loading Demands of an Unmanned Aerial Vehicle [A]. 17th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference [C]. 2015.

[10] Wang Benkuan, Liu Datong, Wang Wenjuan, et al. A hybrid approach for UAV flight data estimation and prediction based on flight mode recognition [J]. Microelectronics Reliability. 2018, 84: 253-262.

[11] Wang Benkuan, Xu Yaqing, Liu Datong, et al. An approach of UAV flight state estimation and prediction based on telemetry data [A]. Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin) [C]. 2017: 1-7.

[12] Paixao De Medeiros Ivo, Ramos Rodrigues Leonardo, Santos Rafael, et al. PHM-based Multi-UAV task assignment [A]. 2019 IEEE International Systems Conference Proceedings [C]. 2014: 42-49.

[13] 冯国强, 赵晓林, 高关根, 等. 无人机系统自平衡容错控制与故障诊断 [J]. 计算机测量与控制. 2018, 26 (7): 21-25.

[14] 雷耀麟, 刘厦, 胡炎, 等. 无人机故障预测系统研究 [J]. 无线电工程. 2019, 49 (10): 866-870.

[15] 余代锐, 史越, 杨俊超. 基于无线传感器网络的无人机 PHM 原型系统 [J]. 火箭与制导学报, 2015, 35 (5): 175-180.

[16] 苏续军, 吕学志. BP 神经网络模型在无人机系统故障预测中的应用分析 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36 (9): 70-75.

[17] Engelman Matt, Judkins Justin, Vohnout Sonia, et al. Miniature MEMS-based Data Recorder for Prognostics and Health Management (PHM) [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2010: 1-8.

[18] 李军, 杨旭. 航空发动机健康管理系统的功能架构 [J]. 航空动力, 2019 (1): 71-74.

[19] Novis A, Powrie H. PHM Sensor Implementation in the Real World—a Status Report [A]. 2006 IEEE Aerospace Conference [C]. Big Sky, MT, USA, 2006: 1-9.

[20] Sanjay Garg, Hunter G, Ten-Huei Guo, et al. Sensor Needs for Control and Health Management of Intelligent Aircraft Engines [R]. NASA/TM-2004-213202, 2004: 1-15.

[21] 中计. 我国突破大规模无线传感器网络测试关键技术 [J]. 军民两用技术与产品, 2016 (7): 25.

[22] 王林. 民用飞机可靠性数据筛选与补充方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[23] 朱倩雯, 叶林, 赵永宁, 等. 风电场输出功率异常数据识别与重构方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015 (3): 38-45.

[24] 景博, 徐光跃, 黄以锋, 等. 军用飞机 PHM 技术进展分析及问题研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (2): 161-169.

[25] 洪翠, 付宇泽, 郭谋发, 等. 改进多分类支持向量机的配电网故障识别方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33 (1): 7-15.

[26] 张鹏飞, 瞿海妮, 肖其师, 等. 基于气象因素和时间序列分析的配电网故障数量预测 [J]. 陕西电力, 2016, 44 (1): 68-72.

[27] 孙鹤旭, 孙泽贤, 张靖轩. 基于并行模糊 C-均值聚类的风电机组发电机故障诊断研究 [J]. 太阳能学报, 2020, 41 (3): 8-14.

[28] 黄漫国, 樊尚春, 郑德智, 等. 多传感器数据融合技术研究进展 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29 (3): 5-8.

[29] 韩晓微, 岳高峰, 崔建江, 等. 四旋翼无人机陀螺阵列数据融合算法 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40 (8): 213-221.

[30] 金星, 刘坤. 对海无人机数据融合技术研究 [J]. 电光与控制, 2017, 24 (6): 79-82.