

基于大数据的民用飞机未来运营模式探索

Research on the Future Mode of Aircraft Operation Based on Big Data

肖刚¹ 陈曦^{1*} 李正强² / XIAO Gang¹ CHEN Xi¹ LI Zhengqiang²

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 中国商飞上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute of COMAC, Shanghai 201210, China)

(本文受国家重点基础研究发展规划项目973计划(2014CB744903)、国家自然科学基金(61673270)、上海浦江人才计划(16PJD028)、上海市青年扬帆计划项目(16YF1404900)资助)

摘要: 大数据作为一种新兴的IT实现方式,在深刻影响IT业变革的同时,也为航空业带来了新的发展机遇。飞机运行过程中产生的海量运营数据最能体现民机的大数据基因,基于大数据的飞机运营支援将会是其在航空产业施展拳脚的主要战场之一。本文首先通过对航空大数据的梳理与分析,获得运营数据的种类、结构、数据流程以及相关特点。然后结合航空公司的具体业务需求,针对飞机典型复杂系统,分别以健康监测中的故障诊断、性能退化预测以及维修辅助决策几大关键技术作为大数据应用的切入点介绍技术研究路线,利用数据挖掘、机器学习等方法识别运营数据在系统不同健康状态下的特征表达,准确预测系统退化趋势,设置风险预警模型以提前预知潜在故障,最后从工程应用角度探讨这些关键技术的大数据实现平台以及基于大数据的运营业务流程。

关键词: 大数据; 民用飞机; 健康监测; 运营模式

中图分类号: V37 文献标识码: A

Abstract: As an emerging IT implementation, big data exerts a profound influence on the IT industry revolution. Meanwhile, it brings challenges to the development of aviation industry. The huge amount of data generated from aircraft operation is the best representation of the big data gene of aviation. The aircraft operational support based on big data would be one of the main fields of its ambitious applications. This paper firstly teases out the data category, data structure, data flow as well as data property through the analysis on the operational big data. Considering the specific requirements from airlines, three key techniques including fault diagnosis, degradation prediction for some typical complex systems and maintenance decision-making are investigated as big data applications. Advanced data mining and machine learning methods will be used for feature expression of the operational data under different system health conditions as well as early warning models of some deterioration systems with potential faults. Lastly, the big data system and the operational workflow based on big data are discussed from the perspective of engineering application.

Key words: big data; civil aircraft; health monitoring; operation mode

0 引言

飞机的运营支援活动主要围绕维修策略而展开。当前,主要采取计划维修与事后维修相结合的方式。所谓计划维修,是按照预设的时间间隔进行不同程度的保养以及检查活动,如果发现异

常或者故障,则开展修理工作,可以理解为初级的视情维修;事后维修则是针对一些非主要故障,是发生故障收到告警后进行修理,事后维修往往具有突发性和随机性,更易造成飞机的次生故障以及大量航班延误^[1]。近年,已有公司利用各类运营监控数据为飞机提供远程诊断的解决方

案。例如,当客机在万米高空飞行时,传感器监测到发动机排气温度等实时运行数据通过卫星传回地面,由工程师判断其运行状态是否正常,并及时提醒航空公司可能出现的故障和相应措施。这类传感器有很多,诸如测量温度、压力、电压等,且过去很少被保留和研究^[2]。不过,这种故障诊断和维修的方式是仍一种被动模式,直某一项参数突破警戒值或出现明显故障时,才会被工程团队和航空公司发现。尽管这些小问题并不会直接导致安全事故,但显然,该远程诊断并不能完全满足航空公司的业务需求,仅对海量数据进行了有限的开发利用。航空从业人员一直在思考:如何提前预测飞机运行中可能出现的故障并进行干预;如何减少非计划的停场时间;如何使得所有机器所有系统处在最佳的运行状态?

随着信息技术和无处不在的传感器所收集的大数据的快速发展,航空公司和制造商已拥有大量的运营数据,这些数据为实现新一代运营模式提供了可能^[3]。不同于传统的被动模式,新一代运营模式是基于海量航空运营数据,以飞机健康监控技术为推手的主动和定量分析模式。通过对系统运行性能的实时、全面监控,可以准确掌握系统的健康状态。通过先进的数据挖掘算法与人工智能技术,可以准确预测潜在故障以及性能退化趋势,从而设置合理的风险预警模型,提前调度好人员和备件航材,开展预测性故障干预。当发生偶然故障时,挖掘海量运营数据中的相关历史信息,有助于缩短排故周期,有效减少飞机停场时间。同时,基于状态的适度维修还可以保证系统始终运行在最佳状态,提高飞行安全性^[4-5]。

航空公司对提高飞机签派率一直有着强烈的愿望,基于大数据的健康监控下的新型运营模式可以帮助航空公司及时甚至实时掌握机队中每一架飞机的状态,从而达到提高飞机的运行和维护效率、降低维修费用、提高经济收益、减少和避免重大事故发生的目的^[4]。因此,无论是从经济角度还是社会效应角度,以飞机健康监控为突破口,渗入大数据技术,探究新型主动式和视情的未来飞机运营模式都是必要且重要的。

2 飞机运营大数据

民用飞机运营数据种类繁多,包括结构化的飞行数据,如快速存储记录仪(QAR)数据、飞机通讯寻址与报告系统(ACARS)报文数据;非结构化的各类事件参数及维修记录等,运营过程中的空地数据传输及各类数据示例如图1。

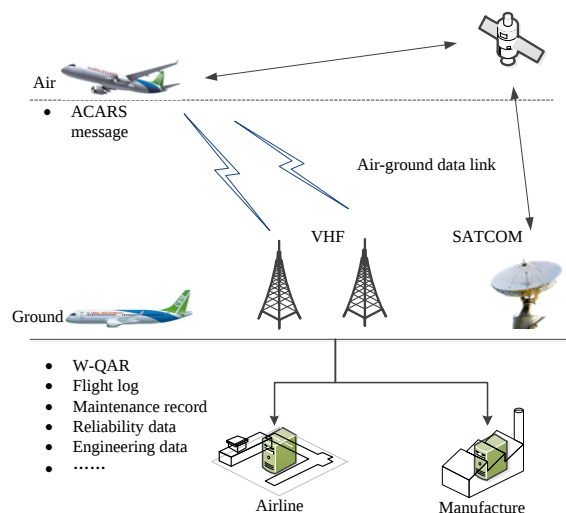


图1 民用飞机运营数据示例

运营数据主要由以下六处来源构成,包括:

(1) ACARS报文数据; (2) QAR数据; (3) 维修记录数据; (4) 工程管理数据; (5) 发动机性能数据; (6) 可靠性管理数据。

(1) ACARS报文是指在飞机在空中通过飞机通讯寻址与报告系统(ACARS)实时传输到地面的报文数据。其特点则在于及时性,可以在飞机飞行过程中以接近实时的方式通过甚高频空地数据链发送至地面,地面接收到报文后必须经过译码获取信息,但是受制于空地数据链带宽,记录并传输的数据量远远小于QAR,除了必要的位置、油耗等信息,往往包含飞机主要系统经过一轮参数特征提取后的离散数值并且可以根据实际需求进行客户化配置。

(2) QAR即快速存取记录器,是飞机记录系统的一部分,用于记录飞行数据以进行日常应用。QAR原始忠实地连续记录整个飞行阶段的飞行数据,包括飞机的高度、速度、加速度、俯仰、倾斜、航向等飞行参数,飞机发动机及主要部件的性能参数,以及温度、气压、风速等机舱内外的环境参数。QAR数据的最大特点是海量、高密度、全过程,完整记录了飞机在整个航段运

行过程中表征各系统设备工作状态的成百上千个参数的变化数据,一个飞行航段的QAR数据译码后往往可以达到上百兆。受到空地带宽的限制,主要通过航后有线或者无线传输至地面数据库,使用时需要用专业译码工具译码。其高密度、全过程的特点适用于对系统设备运行性能的评估与故障诊断。

(3) 不同于QAR数据和ACARS报文,维修记录不是单一的数据值,而是包含多种属性的类,图片、PDF、重复性故障数据、重大疑难故障数据等数据组成,还有LMR/NRC、保留故障/未完成NRC、保留工作项目。一条维修记录描述了一次故障从发现到恢复的所有信息,比如何种故障模式、有哪些故障表征、故障发生时间、采用何种方式维修等等,多条相关联的维修记录可以用于对故障模式、故障发生频率等的分析统计。由于维修记录需要包含的信息较多,往往为非结构化数据,需要人工的筛选整理才能有效利用。

(4) 工程管理数据工程管理数据收集三类:评估使用但尚未执行的AD/CAD;评估适合但尚未执行的SB/SL,适用但尚未执行的EO。

(5) 发动机性能数据主要包括反应发动机运行状况的各类性能参数以及大修时间记录,其中,发动机排气温度EGT是反映发动机健康状况的重要参考指标,往往随着发动机工况的下降而逐渐减少。对航空公司而言,EGT是发动机换发的重要参考依据。

(6) 运行可靠性数据是指能够反映运营机队可靠性状况的原始数据,主要包括飞机使用数据、动力装置使用数据、故障记录、部件拆换记录以及修理记录等,这些数据通过某些特定的计算公式进行统计分析,得出一些概率值或指标值,能够直观的反应机队可靠性状况。

3 基于运营大数据的民机健康监控

梳理出各类运营数据后,主要探究如何充分利用前三类运营数据进行飞机复杂系统快速故障诊断、性能退化预测以及基于飞机健康监控的辅助维修决策,为飞机全寿命周期的健康状态提供量化评价和有效管理,为实现飞机运营由被动式向未来主动式转变提供技术支持。

3.1 基于设计知识和运营监控信息的故障快速

诊断

民机复杂系统失效机理和故障模式错综复杂,难以用传统物理或数学模型准确描述。目前我国飞机的故障诊断水平仍处于低级阶段,诊断方法主要基于BITE与人工检查相结合,飞机的维修在很大程度上根据经验进行排故,其流程为从故障信息的描述记录中提出主要信息,由经验判断故障类型,然后再依据经验使用排故方法。维修效率低下,刹车系统是故障多发系统,经常由于无法及时维修等机务原因而造成飞机航班延误。

故障诊断可以分为基于模型的方法、基于数据处理的方法和基于知识的方法。对于复杂系统,难以建立精确的物理模型,本研究中,拟将系统设计知识与运营过程中的各类数据结合起来,提供基于数据驱动与深层知识相结合的快速故障诊断解决方案如图2。

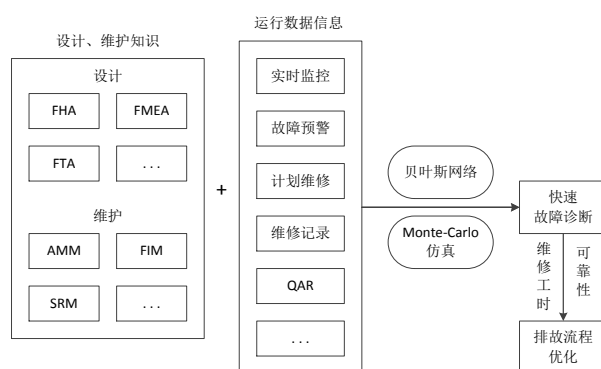


图2 故障快速诊断研究技术路线

贝叶斯网络是一种以网络结构表示变量间依赖关系的概率图模型,提供了一种简洁有效的因果关系表达和推理方法。贝叶斯网络可以提供一种可视化图解模型,是目前不确定性知识表达和推理领域最有效的理论模型之一,适用于不确定性和概率性的知识表达和推理。复杂系统因果关联往往呈现非确定映射关系,使得故障症状与故障原因以及对应具体零部件之间的映射表现为随机性和不确定性,使用贝叶斯网络可以较好解决这类复杂不确定关系^[6]。

第一步充分梳理典型系统不同层级的故障模式、因果关系以及在飞行过程中实时监控的系统状态参数,利用设计和维护知识构建层次的多态

贝叶斯诊断网络;

第二步获取贝叶斯网络各父子节点的条件概率作为先验知识进行初步统计推断,进行潜在故障排序;根据收集的运行数据,统计新的分布特征作为后验概率更新原推断,建立实现更准确快速的故障诊断。

第三步对刹车系统贝叶斯诊断网络进行敏感性分析以及先验和后验情况下的系统可靠性评估,调研航空公司历史维修记录,收集整理系统各组部件完成故障诊断的平均维修工时以及相应排查流程。研究如何综合考虑故障诊断结果(组部件故障可能性先后顺序)、系统可靠性和各组部件维修工时,使用多目标粒子群算法优化诊断排查流程。

3.2 基于多参数融合的性能退化预测

故障预测技术是比故障诊断更高级的维修保养形式,以当前使用状态为起点,结合对象的特性、参数、环境条件及历史数据,对未来进行预测判断,可以极大提高系统的安全性。传统基于可靠性的方法着眼于预测总体的故障分布规律,缺乏对系统实时状态的评估,显得较为刚性。对于大型民机系统,机理复杂,难以通过单一指标表征其健康状态,加之系统运行过程中各种不确定性因素,难以准确预测退化发展。该研究拟在充分利用运营大数据基础上建立多参数融合模型实现故障在线预测与性能评估,技术路线如图3:

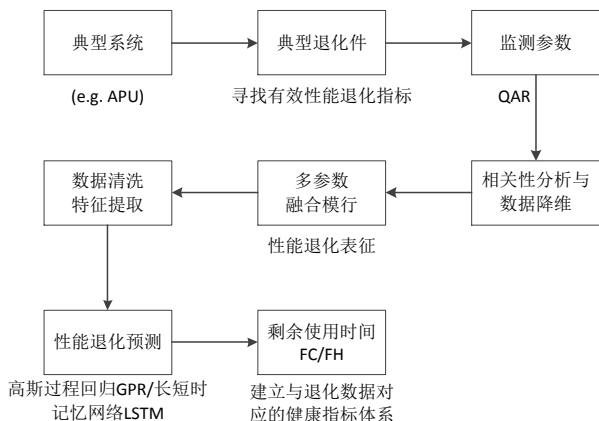


图3 性能退化预测研究技术路线

选择民机典型系统,如APU系统,目前主要

通过APU的EGT对性能进行监测,虽然EGT可以反映APU性能,但是EGT的测量本身具有随机性,而且由于导致APU性能衰退的原因很多,仅仅依据EGT难以判断导致性能衰退的原因,因此,需要通过对APU历史故障案例中故障模式的梳理找出有明显性能退化的部件以及其退化指标。如不能直接监测,则需要通过分析系统监测参数,包括速度、温度、压力、时间等,找出影响系统性能退化的若干关键影响参数,进行相关性分析并利用合适的降维方法建立多参数融合模型来表征其性能退化^[7],如图4所示:

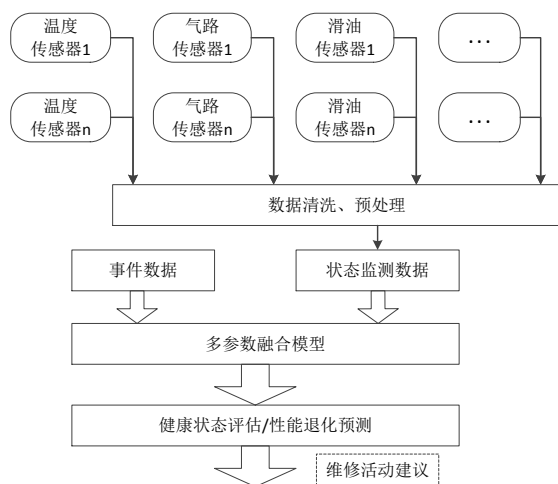


图4 基于多参数融合的性能退化预测

对相应参数的QAR或者ACARS等运行数据进行清洗和特征提取,可以采用传统时间序列预测、机器学习中的高斯过程回归GPR,以及深度学习等方法处理历史数据,进行退化预测并对比预测效果。最后建立与性能退化对应的健康指标体系,从语义角度评估性能退化,预测到次级健康状态的时间,为维修决策提供建议支持。

3.3 基于实时健康监控的维修决策支持

基于状态监测的在线维护是近来逐渐兴起的研究课题,有助于推动传统运营模式由被动向主动转型,具有重要的工程实用意义和经济价值。随着对民机飞行安全意识的进一步提高,飞机实时监控、故障诊断和预测技术不断发展,必然对维修方式的变革产生深远影响。维修决策支持技术是指充分利用故障诊断和预测技术产生的信息来指导维修策略和维修活动的制定。大型民机系统结构复杂,故障诊断和设备维护困难,传统的

“事后维修”和“计划维修”难以满足需求。如何将基于运营大数据的飞机健康监控与现行的计划、非计划维修融合，建立基于大数据驱动的全寿命健康管理，提供基于飞机健康状态的维修决策支持技术是运营模式由被动向主动转变过程中的一大难点，图5提出了一种将基于运营大数据的飞机健康监控与维修策略结合的技术思路。

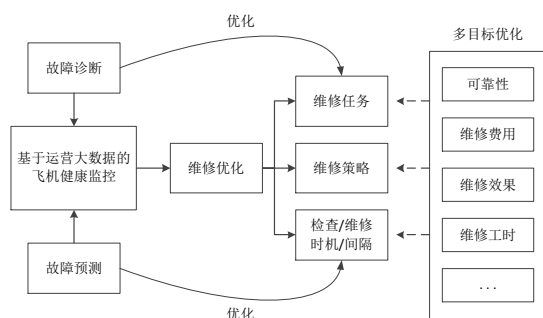


图5 基于实时健康监控的维修决策支持技术路线

故障诊断和预测的本质是为维修活动的择优提供依据。该部分可从定性和定量两个方面展开研究。首先，参照最新的国际民机维修指南，对健康监测任务引入传统计划维修作适应性分析，设计考虑健康监测的民机系统维修任务分析流程以及不同维修任务的子流程，定性分析基于实时健康监控的维修策略优势，为MSG-3系统部分融入健康监测任务提供参考。

在定量研究阶段，主要考虑对不同维修子流程的多目标优化，例如：维修费用最少（经济型模型），可靠度最高，维修工时最少（系统可用度最大）等。利用前期快速故障诊断的结果，研究快速排故方案，以维修工时最低为优化目标，优化排故的维修操作流程；利用前期故障预测结果，系统性能的当前状态可以得到有效评估，进而可以建立在线维护规划模型，以系统安全性和经济性为双重优化目标，统筹优化计划维修任务、航线非计划维修任务以及可能的健康监测任务，评估采用不同维修活动的安全风险和经济风险，实现基于系统实时状态的精准预知和精益维修，建立基于实时健康监控的自主维修保障决策支持方法。

4 大数据分析系统与运营业务流程

4.1 大数据分析系统

为实现以上基于数据驱动的健康监控关键技术，需要搭建性能优良的运营大数据分析系统。其数据处理的主要流程包括：

1) 采集/存储

大数据的采集是指利用多个数据库来接受来自传输节点传输的数据，并且可以通过这些数据库来进行简单的查询以及处理工作。比如利用传统的关系型数据库来存储结构化的数据，除此之外，还用利用非关系型的数据库来存储那些非结构化的数据。

2) 导入/预处理

在大数据的导入过程中，存在着的挑战是面对各种不同数据源（web、app或者传感器形式）以及不同种类的元数据（报文、文档、日志、数据库等），民机运营大数据平台可利用大数据的flume模块采集传输日志、文档类的数据存储分布在分布式存储Hbase中、并使用sqoop模块对关系型数据采集导入到非类型数据库中；对于导入数据库的各类需进行数据清洗以满足使用要求。

3) 统计/分析

民机运营大数据平台的统计与分析主要是利用分布式数据库，或者分布式计算集群来对存储于其内的海量数据进行分析 and 分类汇总等，以满足大多数常用的分析需求。

4) 数据挖掘/智能识别

民机运营大数据平台的数据挖掘与机器学习是在现有数据上面进行基于各种算法的计算，从而起到预测（Predict）的效果，以实现一些高级别数据分析的需求。典型算法有用于无监督的聚类算法、有监督的支持向量机、神经网络等算法、以及可以进行自主特征提取的深度学习算法，以提供智能辅助决策，实现预测性维修与调度。

4.2 运营业务流程

对于该大数据分析系统，最重要的是来自各类数据源的相关分析处理以及业务流程上各角色协同。基于新系统的业务流程将大大改变以往运营活动的时效性，精度和人为干预的特点，同时为航空公司和各系统服务商提供运营建议和产品品质跟踪，打造健康运营的生态链，如图6所示。

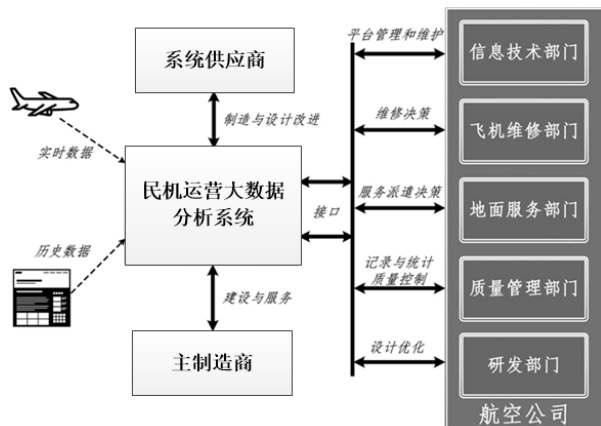


图6 基于大数据的运营业务流程

1) 在飞机的飞行过程中,实时捕获的机载系统和发动机数据被传输到制造商的大数据分析平台;

2) 通过大数据分析系统,结合历史信息,利用数据库与各类分析模型,对数据进行挖掘与分析;

3) 飞机维修部门和地面服务部门根据系统结果判断飞机是否需要维修活动,如果需要,则会与协同航材部门制定预防性的维修计划与备件管理计划并告知签派人员、调度人员;

4) 签派人员和调度人员根据系统飞机状态制定签派计划,保障机队安全可靠、合理经济的运行;

5) 质量管理相关人员通过系统记录和统计故障信息,为航线运行提供更为可靠及时的决策,同时也作为研发部门工程优化的重要依据;

6) 系统供应商通过该系统开放的功能和接口,可以获取关键部件的健康状态和更换情况等信息,改进研发进程。

5 结 论

1) 梳理了民机运营大数据的各类数据源和数据特点。

2) 分别从故障诊断、故障预测与维修决策三个方面探索了基于运营大数据的民机健康监控的关键技术路线。

3) 从工程应用角度阐述了民机运营大数据系统数据处理流程以及基于大数据的运营业务流程。

4) 提出了未来可能的民机运营模式是基于

运营大数据、以飞机健康监控技术为推手的主动模式。

参考文献:

- [1]刘鹏鹏,左洪福,孙见忠. PHM 体系中的航空器维修决策理论研究[J]. 航空制造技术, 2012, 416(20): 46-49.
- [2]大数据如何让飞机更“聪明”[EB/OL]. http://www.comac.cc/xwzx/gzdt/201612/06/t20161206_4601747.shtml. (2016-12-05) [2017-08-16].
- [3]Pratt & Whitney's 'Big Data' Projects Advancing Analytics Efforts in Aftermarket [EB/OL]. <http://www.utc.com/News/PW/Pages/Pratt-Whitneys-Big-Data-Projects-Advancing-Analytics-Efforts-in-Aftermarket.aspx>. (2015-06-05) [2017-08-16].
- [4]徐庆宏,任和,马小骏. 民用飞机实时监控与健康管理工作[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016: 1-3.
- [5]丛登志. 大数据技术在飞机维修中的应用[J]. 航空维修与工程, 2015(11): 82-84.
- [6]XI CHEN, HE REN, YONGQUAN SUN, CEES BIL. Synchronizing Design Knowledge and Real-Time Monitoring Information for Aircraft Complex System Diagnosis[C]//AIAA Modelling and Simulation Technologies Conference. Washington DC: 2016.
- [7]XI CHEN, ZHI LYU, HE REN, YONG CHEN. APU Feature Integration Based on Multi-Variant Flight Data Analysis[C]// IEEE International Conference on Prognostics and Health Management. Ottawa: 2016.

作者简介:

肖刚 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 航电综合与仿真测试, 航空产业经济。

Tel: 021-34206192

E-mail: xiaogang@sjtu.edu.cn

陈曦 男, 博士, 高级工程师。本文通讯作者, 主要研究方向: 故障预测与健康管理工作。

Tel: 021-20875861

E-mail: aero.x.chen@gmail.com

李正强 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 航电综合与仿真测试。

Tel: 021-3122 5555

E-mail: lizhengqiang@comac.cc