

飞行机电作动系统故障诊断技术综述

杨珍书^{1,2}, 孙晓哲^{1,2}, 杨建忠^{1,2}, 毛奇³

(1. 中国民航大学 民航航空器适航审定技术重点实验室, 天津 300300;

2. 中国民航大学 适航学院, 天津 300300;

3. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 飞行机电作动系统故障诊断技术对提高航空器作动系统的可靠性、保证航空器安全运行具有非常重要的意义。基于故障诊断技术在飞行机电作动系统应用中遇到的问题和挑战, 首先介绍了飞行机电作动系统故障诊断技术的研究现状与意义。其次, 特别关注了新颖故障、闭环控制对故障诊断技术发展的限制, 以及故障诊断技术审定与验证的挑战。最后, 探讨了飞行机电作动系统故障诊断技术亟待解决的问题及可能的研究方向。

关键词: 飞行机电作动系统; 可靠性; 故障诊断; 故障检测; 适航审定

中图分类号: TP271+4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23119

A Review of Fault Diagnosis Technology of Flight Electromechanical Actuation System

YANG Zhenshu^{1,2}, SUN Xiaozhe^{1,2}, YANG Jianzhong^{1,2}, MAO Qi³

(1. *Key Laboratory of Airworthiness Certification Technology for Civil Aviation Aircraft, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*; 2. *School of Airworthiness, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*; 3. *School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: The fault diagnosis technology of the flight electromechanical actuation system is of great significance to improve the reliability of the aircraft actuation system and ensure the safe operation of the aircraft. Considering the problems and challenges encountered in the application of fault diagnosis technology in the flight electromechanical actuation system, the research status and developments of fault diagnosis technology in the flight electromechanical actuator system were firstly introduced. After that, special attention was paid to the limitations of novel faults and closed-loop control on the development of fault diagnosis technology, as well as the challenges of fault diagnosis technology validation and verification. Beyond that, the problems to be solved urgently and possible research directions of the fault diagnosis technology in the flight electromechanical actuation system were discussed as well in this work.

Key words: flight electromechanical actuation system; reliability; fault diagnosis; fault detecting; airworthiness certification

作为一类复杂的机电一体化系统, 飞行机电作动系统 (flight electromechanical actuation system, FLEA) 具有结构紧凑、便于安装、工作效率高、无污染等特点^[1], 且能够有效地减轻飞机重量, 提高运行效率, 降低维护成本。随着电传操纵系统在多电飞机中的作用日益凸显, 与其高度结合的 FLEA 逐渐成为功率电传作动系统的发展

方向^[2]。20 世纪 80 年代末到 90 年代初, FLEA 在航天领域的研究得到全面开展。1978 年美国航空制造公司研制出双余度 FLEA; 1981 年波音商用飞机公司与 Kollmorgen 公司合作开发了应用于方向舵作动系统的分体直线输出式 FLEA^[3]; C-141 运输机的左副翼和 C-130 高技术测试台的方向舵和升降舵均运用 FLEA^[4]; 格鲁门公司 F-14

基金项目: 中国民航大学民航航空器适航审定技术重点实验室 2020—2021 年度开放基金 (SH2020112704)

作者简介: 杨珍书 (1993—), 女, 硕士, 讲师, Email: zsyang@jtc.edu.cn

战斗机在方向舵运用FLEA。20世纪80年代,NASA研制了应用于航天飞机副翼的四余度FLEA^[5],到90年代末,FLEA深层次问题的研究和工程性实践得到全面展开。其中,F/A-18B舰载战斗机的左副翼^[6],U-2S亚音速高空侦察机的方向舵、升降舵以及副翼^[7],秃鹰无人机的副翼、襟翼、扰流片、方向舵和水平安定面等都进行了FLEA的验证与试飞。此外,FLEA已成功应用于波音787、A320等大型民用客机^[8]以及全球鹰、X-45^[9]等新型无人航空器。FLEA是功率电传作动系统的发展方向,是多电机作动系统的关键技术^[10]。但是,由于缺乏可靠的失效安全机制和冗余策略,FLEA中的单点故障难以得到消除;此外,FLEA的故障数据积累有限,其故障模式与影响通常基于工业经验与军方数据^[11-12];这些因素都限制了FLEA在民用航空器中的应用,也成为了FLEA在航空领域发展的最大挑战^[13]。因此,提高FLEA的可靠性、保证其满足适航规章的安全性需求,是未来FLEA研究和发展的关键点。

为了达到与机械作动系统同水平的高可靠性,国内外学者与制造商对FLEA开展了冗余备份技术的研究^[14-16]。但是这种方法亦带来了多种问题,例如作动系统的双通道设计会带来力纷争问题;备份增加了伺服机构硬件构成的复杂性;维护繁琐且成本增加,进而导致了系统的可靠性在一定程度上非增反降^[17]。通常,提高系统可靠性最好的方法是通过主动设计来规避故障,然而,当这些危害因素不可消除或有其它影响时,则应当采取其它安全策略^[18]。在众多可行的技术中,故障诊断技术的应用能够减少冗余设计,降低设计成本,并全面提高可靠性和维护性指标,对提高FLEA可靠性具有重要意义^[19]。然而,和其它应用于航空领域的新技术一样,故障诊断技术在实践应用之前,需要通过实验与分析来验证其应用于FLEA时具有优良的性能,并且能够高效、准确地对故障实施诊断与隔离;此外,还需要基于适航审定标准,证明故障诊断技术本身及其应用能够符合安全要求。

本文旨在通过总结与FLEA故障诊断技术相关的研究现状与现存问题,引发对于如何提高FLEA故障诊断技术的可靠性,来满足航空规章的安全需求这一关键问题的思考,为FLEA故障诊断技术未来的研究提供借鉴和参考。本文首先讨论并概述了目前FLEA故障诊断技术的研究

现状。接着,特别关注了故障诊断技术在FLEA应用中的问题和挑战。最后,指出了FLEA故障诊断技术面临的问题以及未来可能的研究方向。

1 FLEA故障诊断的研究现状

FLEA的高可靠性是飞行安全的重要保证。有效解决该问题的技术之一是故障诊断策略的设计,在方法阐述上,应用于FLEA的故障诊断技术可按照定量与定性的方法分类^[20],如图1所示。

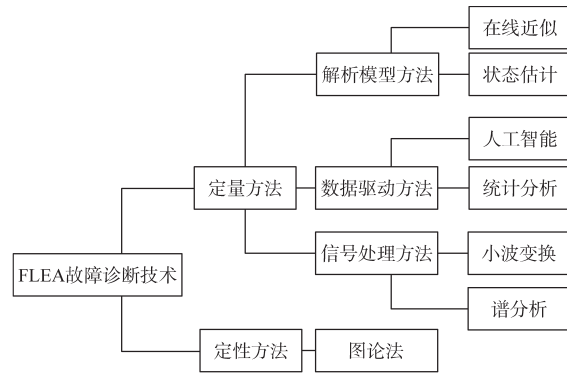


图1 FLEA故障诊断技术分类示意图

Fig.1 Schematic of FLEA fault diagnosis technology classification

基于解析模型的方法以状态估计法与在线近似法为主。其中,状态估计法的关注重点在于观测器或滤波器的选择,通过设计观测器或滤波器,重构FLEA控制系统的状态或参数,并基于此得到系统的观测输出,然后采用适当的方法和手段对观测输出中的干扰信息进行弱化,同时,解析出必要的故障信息,便于评估与分析残差序列,进而实现故障检测和诊断,并进行必要的隔离。目前,此类故障诊断方法已有众多较为成熟的理论,如卡尔曼滤波法^[21]、等价空间法^[22]、多模型匹配法^[23]等。Wang Y等人^[24]通过两个观测器递归计算系统状态和/或故障的估计以减小故障诊断的偏差。Xiong R等人^[25]通过递归最小二乘法和卡尔曼滤波器联合估计的方法获得估计的电源状态,以确定传感器故障发生时的残差及故障阈值。Liu Y等人^[26]基于在部分解耦干扰下具有积分测量的离散系统构造了一个扩充状态向量,并获得了一个未知输入观测器,该输入观测器将部分干扰解耦,并减弱了其余不可消除的干扰影响。但是FLEA为复杂的机电耦合非线性系统,常常伴随复合故障的发生,利用解析模型的方法进行故障诊断时,会面临如下问题:1)基于解析模型的方法主要针对线性系统或模型架构

与参数已知并确定的系统展开,面对FLEA此类复杂的非线性系统极易出现模型拟合不准确的情况,进而影响系统的观测输出和残差分析,造成故障漏报、误报;2)系统故障建模的差异会影响故障诊断的有效性,系统建模的精度会影响故障诊断的精度;3)对于状态估计方法,观测器残差和阈值的判断受到观测器增益矩阵与系统模型的影响,同样容易造成故障漏报、误报。

基于数据驱动的故障诊断方法包括基于人工智能^[27]、基于统计分析等方法。该方法能够通过多尺度地细化故障信号并分析细节特征,弱化负载输入及外界的干扰,在FLEA故障发生早期捕获信号的幅值、频率、相位等特性的变化,以弥补基于解析模型方法进行故障诊断的不足^[28]。Wang J等人^[29]通过对电机振动和定子电流信号进行多尺度分析,提出了一种基于深度学习的网络模型,该模型具有多分辨率多传感器融合的特征,该方法用于电机故障诊断时可通过网络训练实现自动学习并诊断故障特征。Wen L等人^[30]提出了一种基于LeNet-5的新型卷积神经网络故障诊断方法,该方法将信号转换为二维图像并提取图像的特征,基于此来消除干扰。通过积累实验数据,证明该故障诊断方法已经取得了明显的进步。

基于信号处理的故障诊断技术因其信号获取准确、诊断精度逐渐提高的优势,成为近年来FLEA故障诊断技术的研究热点,基于经验模式分解、基于小波变换、形态信号处理、谱分析等方法已在飞机控制系统的故障诊断中得到应用^[31-33]。但是,FLEA的作动离不开大量的内部电子元件,电子元件在早期发生异常时,能够反映故障征兆的信号幅值微弱,且故障在渐变的过程中具有间歇性^[34]。此类诊断机制应用于FLEA时,系统的故障信息不可避免的会被外界扰动、噪声信号掩盖,并且易受到信号滤波的弱化影响,进而导致诊断误判。此外,FLEA的故障类型和表征之间并不是简单的对应关系,常常伴随着复合故障的发生,对于复杂系统的运行,可以利用人工智能的方法,通过积累的数据不断训练学习型算法,在训练的过程中不断优化诊断策略,进而达到故障诊断的目的^[35]。例如基于神经网络系统^[36]的方法、基于模式识别^[37]的方法、基于专家系统^[38]的方法等。但是,学习型算法的精确性取决于故障样本及数据的累积量,FLEA作为应用

于航空领域的新型作动系统,尚不能获得大量的故障数据,因此并不适用。

基于定性经验的方法通常采用图论法,通过建立系统的逻辑推理模型进行诊断故障。常用的有故障树分析^[39]、符号有向图等分析手段和理论^[40]。基于定性经验的方法有助于故障的逻辑梳理和溯源,但不适用于故障的在线估计^[41]。

故障诊断技术作为提高FLEA可靠性的重要手段,是将FLEA应用于航空工业领域的研究热点。FLEA复杂的非线性特征、未知的外部干扰、系统内部噪声以及模型的不确定性等都会导致故障模型的拟合存在误差,影响残差解耦与阈值的选择。在设计故障诊断策略时,误报警率较高的问题仍然是其应用于FLEA的阻碍^[42]。因此,先进的故障诊断技术如何适用于机理复杂、非线性与未知干扰耦合的FLEA,如何适用于FLEA故障数据匮乏、故障征兆复杂等特点,仍然需要持续的探索。

2 新颖故障诊断技术面临的新问题

FLEA由作动器电子控制装置、驱动电机、离合器、减速齿轮箱、滚珠丝杠等组成,其结构如图2所示。

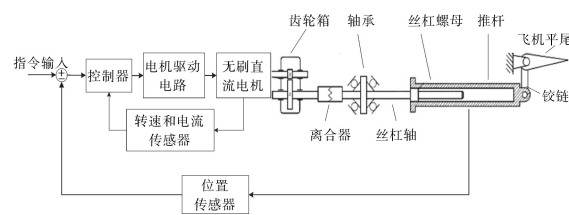


图2 FLEA结构图

Fig.2 Structure diagram of FLEA

FLEA作动机理复杂,故障模式多样。为了明确系统故障特征、便于开展故障诊断技术的优化,国内外学者以驱动电机、机械传动组件^[43-44]为主要研究对象,分析了电机绕组开路、匝间短路^[45]、开关组件开路^[46]、机械传动通道卡阻^[47]、轴承爆裂等故障机理,梳理出典型的故障模式如图3所示,建立了较为完善的故障模型^[48-49],并通过故障仿真与实验分析了故障的动态特性、提取故障特征。统计研究表明,FLEA主要的电气故障^[50]包括电机绕组开路、匝间短路、晶闸管断路及位置传感器故障,其中电机绕组故障占总故障率的38%^[51],霍尔元件、电子线路累计故障占比82%,卡阻故障是FLEA机械结构中典型的单点故障,限制了系统可靠性的提升^[52]。

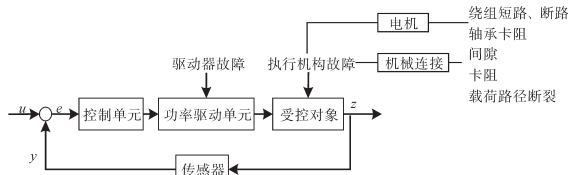


图3 FLEA典型故障模式

Fig.3 Typical failure mode of FLEA

常见的故障诊断技术主要基于图3中的故障模式展开,如基于解析模型法^[53]、信号处理方法^[54]以及混合方法等,这些研究成果基于故障诊断策略在保证系统可靠性的同时,提高了系统的运行效率^[55]。Silva和Saxena等人^[56]的研究实现了对开关磁阻电机驱动系统的故障诊断,首先确定了磁阻电机的结构、功率变换器的拓扑结构,在此基础上,设计了转子位置检测器、电流检测器和诊断策略,进而改善故障诊断性能。Shao J和Deng Z等人^[57]针对驱动电机位置传感器的故障,提出了一种新型故障诊断策略,该策略根据传感器信号和离散傅里叶变换对电机线电压进行测量分析,从而识别出传感器故障,计算量小且实现简单。Dong L和Jatskevich J等人^[58]针对电力驱动系统设计了基于信号分类及重建的故障诊断方案,能够有效地诊断电子控制元件、电机绕组等故障,进而提高了系统的可靠性。

随着故障分析的逐渐细化,尽管FLEA的故障模型不断被完善、故障诊断策略不断被提出,但是由于FLEA的应用时间短、故障数据十分匮乏,所以很难建立一个全面的专家系统来检测并诊断故障。除已得到广泛研究的机械和驱动电机故障外,FLEA中的传感器、作动器电子控制装置等电子器件相互耦合,带来的新颖故障模式尚未有明确的故障特征^[59],限制了故障诊断的性能。例如:传感器的噪声干扰会影响电流残差与阈值的比较,并削弱残差对系统不确定因素的鲁棒性,导致不正确的检测与诊断,从而引起虚警^[60];监控器因电磁干扰能够产生固态振荡、液态振荡的耦合信号,对故障类型的判别以及故障源的定位产生干扰^[61];指令乘性故障会导致在线计算信号突变的算法失效,削弱在线故障的诊断能力^[62]。此外,因多个系统变量或特征值偏离正常范围而形成的复合故障会使得故障诊断策略难以判定系统的异常是由一个还是由多个故障耦合作用所引起的^[63],这也为故障的隔离和定位带来了挑战。有研究表明,基于模型的故障检测与诊断会

带来系统物理架构中没有的新型故障模式。例如,模型拟合不准确、阈值取值不恰当会导致虚警^[64]、漏报^[65];故障信息计算单元、解耦观测器的引入可能改变系统矩阵、影响对残差的判断、产生态势感知错误^[66]。此外,电子元件会与电磁干扰相互影响,产生监控器振荡^[67]、指令与控制失效^[68]等故障,进而引发新的安全问题。

面对应用于FLEA的故障诊断技术,需要明确新颖故障和复合故障带来的挑战。因此,非常有必要从解析故障机理的角度出发,研究新颖故障模式的建模方法、明确必要的故障特征,以此来促进故障诊断技术的优化、提高诊断性能。例如,电信号的传输通常作为实现控制FLEA电机的必要手段,然而,电信号在传输的过程中极易受到外部干扰而产生新的故障模式,其中,非指令信号就是因传输电信号而产生的新的故障模式,使得FLEA成为舵面振荡失效的重要故障源。Balaban等人^[50,55,56]在调研了空客公司、利勃海尔宇航公司、汉莎技术公司的技术文件与内部资料后,列出了所有可能引起舵面振荡失效的非指令信号源,如图4所示,并基于非指令信号的特征,建立起液态故障与固态故障两种故障模型。这有利于FLEA新颖故障模式的机理分析与建模,并有助于优化FLEA的故障诊断精度。

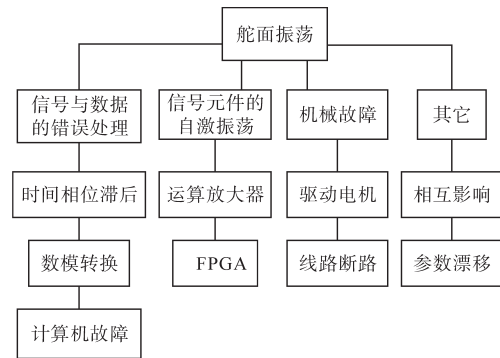


图4 舵面振荡的来源

Fig.4 Sources of control surface oscillation

3 闭环控制对故障诊断的影响分析

FLEA故障特征的提取及故障诊断技术的研究成果通常针对开环系统进行,但并未考虑反馈控制律对系统故障诊断性能的影响^[69]。闭环控制律的引入,特别是智能算法的引入,可能会改变系统的模型架构、运行特性以及变量之间的函数关系,这种变化使得系统的容错能力加强,在故障衍生的过程中,有可能改变故障的特性参数,

或者直接掩盖故障影响,导致设计的故障诊断策略在不同的智能算法中不再适用或失效。Bellini A 和 Filippetti F 等人^[70]通过仿真发现电机转矩电流的功率谱与控制器的增益相关,且频域特征会被控制信号掩盖,因此不同控制器的设计将影响电机的故障残差,使得闭环故障诊断效果因控制器的不同而具有较大差异。McNabb C A 和 Qin S J^[71]通过分析仿真数据认为闭环控制将会使得故障在系统内传播,特别是对于信号故障,故障影响会在闭环的反馈与传递过程中得到放大,进而导致多处信号发生异常,为故障的分离增加了难度。Ashari A E 和 Nikoukhah R 等人^[72]基于理论分析和仿真实验,验证了闭环控制器会影响故障的残差值,导致闭环控制下的故障诊断结果与开环系统的诊断结果相差较大。邢琰和吴宏鑫等人^[73]将开环系统中的故障诊断策略不适用于闭环系统的原因总结为:1)闭环控制器增强了系统的鲁棒性,使得系统本身具有一定的容错能力,导致部分故障,特别是早期故障影响被掩盖;2)由于反馈的作用,闭环控制结构使得实际故障信息能够在系统内部进行传递,进而表现出多处检测信号皆异常,最终导致故障诊断失效。

目前,针对 FLEA 闭环结构的故障诊断研究仍有待拓展,国内外学者所设计的闭环系统故障诊断策略主要应用于给定的控制器和已知的架构,按照特定的方法和指标对典型故障模型进行诊断。Aghili F^[74]将设计的神经网络状态观测器应用于非线性系统的故障诊断技术,能够根据非线性系统的实际输出和观测器测量的残差来检测并且确定故障,在实现实时故障诊断的同时进行控制器补偿,以保证系统的稳定性能。Xiao B 等人^[75]基于观测器的理论设计了应用于闭环作动系统的故障诊断策略,在对干扰具有鲁棒性的同时,能够实现对故障信息响应敏感,以达到准确隔离故障的目的。Li K 和 Luo H 等人^[76]利用跟踪滤波器的设计理论优化故障诊断策略,使得其在闭环系统中的抗干扰能力增强,同时能够更加精确且敏感地识别电机系统的故障并估计系统的动态特征。但是,闭环控制算法对故障诊断性能的影响问题是 FLEA 故障诊断技术发展必须面临的挑战,特别是对于 FLEA 此类复杂的非线性闭环系统,需要在控制律和残差无法完全解耦的情况下,探索 FLEA 的故障诊断技术。这对提高故障诊断的性能与适用度、减小闭环控制对故障诊

断的干扰与影响具有重要意义。

4 故障诊断技术的审定挑战

FLEA 中的噪声、外部干扰、非线性变量等不确定的变化量对残差、故障估计等诊断信息的影响巨大,这不仅为改进虚警率和漏报率的阈值选择带来了新的挑战,也为验证故障诊断策略在 FLEA 中应用的有效性带来了挑战。任何故障诊断技术在应用于航空器的 FLEA 之前都要经过适航审定与验证,以确保其在实际的航空应用中,能够满足设计期望的有效性,并达到航空规章对 FLEA 的安全要求。故障诊断技术的审定与验证是其理论设计与航空应用之间的桥梁。但是,在目前的研究中,关于故障诊断技术的审定与验证研究仍未得到重要关注,并且尚未建立起成熟的审定与验证方法。因此,故障诊断技术尚未在 FLEA 中形成广泛的工程应用^[77]。

如何制定相关的审定程序,来验证与评估故障诊断策略的阈值设定和推理模型,如何判定故障诊断策略是否符合航空器的安全性需求,是近年来的热点和难点问题^[78]。通常应用于算法审定与验证的方法是随机仿真^[79],此类方法需要获得系统的所有状态或者输出,因此需要采集足够多的仿真数据,通过巨大的数据量建立起系统的样本数据库,以确保对算法的验证不会出现偏差。但是此类方法不能够精确的拟合复杂的非线性系统,即使采用蒙特卡洛采样,仍然会丢失重要的参数与系统特征^[80]。国外研究人员尝试通过搭建通用的软硬件平台对故障诊断技术进行验证,并基于此为系统的故障诊断策略提供有效的验证和评估方法。NASA 已建造多个测试台以考虑包括电动混合作动系统在内的多种新技术的适航性和飞行安全风险,包括 X-57 Maxwell^[81]、混合动力电力综合系统测试台、Airvolt 和 NASA 电机测试台^[82]。欧洲航空研究和技术组织的合作项目开发了大型运输飞机模拟基准测试平台,以作为容错飞行控制系统综合评估的评估标准^[83]。欧洲第七框架计划支持的合作项目“可持续飞行指导和控制的高级故障诊断计划”致力于空客系列飞机故障检测及故障诊断方法的开发与验证,为了验证所设计的故障诊断方法的适用性,该项目基于空客系列飞机开发了空客舵面作动器工作台。此外,该工作台还能够在降级配置中验证设计的可靠性,工业验证活动包括鲁棒性能评估(即没

有误报)和检测性能评估(即误报率低和检测时间合适)^[84]。Sun L G等人^[85]基于波音747-200飞机建立了高精度非线性验证平台,通过对比正常、容错控制、方向舵失控三种状况下滚转速率、俯仰速率、偏航速率、实际空速等参数的变化,分析了先进的故障诊断策略与容错算法对飞机姿态变化的影响,并基于分析结果验证了诊断策略与容错算法的优越性。以上研究分别针对特定机型的故障诊断策略进行了验证,为航空相关领域、相关部门对FLEA故障诊断策略的审定提供了必要的意见与参考^[86]。

故障诊断技术在FLEA中的应用为其可靠性的验证与审定带来了新的挑战,包括判断残差、阈值选择的合理性、建立通用的实验验证平台并完善实验算法、建立通用且完善的审定与验证理论等。如果能够很好地解决这些挑战,就能够将系统安全性的既定原则应用于FLEA,以激励开发者和审定责任部门的信心。

5 结论

本文对FLEA故障诊断技术进行了较为全面的概述,并对相关的研究成果、面临的问题和挑战进行了探讨与分析。首先,FLEA故障诊断技术的优点在于:故障响应速度快、减少冗余设计的同时降低设计成本、提高系统的可靠性、促进系统在航空领域的应用。其次,通过机理分析,建立新颖故障的模型并明确故障特征,减小闭环控制对故障诊断效果的干扰与影响,是未来FLEA研究和发展的关键点。此外,FLEA故障诊断技术的验证与审定技术的研究仍处于探索阶段,缺乏一个系统性的研究成果。现尚存在以下几个问题亟待解决与完善:

1) 尽管FLEA故障诊断技术已在故障建模、阈值判断、残差解耦等方面取得了一定的成果和结论,然而,面对机理复杂、非线性与未知干扰耦合的FLEA,在不能对其进行精确建模的情况下,如何将残差完全解耦并进行精确的故障诊断,仍然需要深入研究。另外,面对FLEA故障数据匮乏、故障征兆复杂的弊端,探索新技术带来的新颖故障机理及其特征,降低故障诊断的漏报率和虚警率,都是对故障诊断进行优化所需要解决的重要问题。

2) 对于不同的控制器设计,已有的FLEA故障诊断策略通常无法保证诊断的残差信号与所

有的控制反馈之间都能够实现完全解耦,因此,闭环控制在一定程度上会影响故障诊断的效果。在对闭环系统进行故障诊断策略研究的过程中常存在以下问题:不同控制器的设计对故障诊断的影响尚不明确;控制量对故障诊断精度的影响难以定量分析;智能算法的引入通常会使得系统具有较强的鲁棒性和自抗扰能力,导致漏报率升高。此外,针对智能控制算法和较为复杂的闭环控制技术,如何合理地设计故障诊断策略,是提高FLEA可靠性、助力FLEA故障诊断研究从理论应用于工程的关键发展方向。

3) 如何验证故障诊断策略的有效性与可靠性,是保证FLEA故障诊断技术在民用航空器中大量应用的关键要点。开发高效的验证方法、搭建合理的验证平台是完成故障诊断策略有效性验证分析的重要保证。其次,基于验证方法与实验验证平台的开发,结合规章要求与符合性验证方法,可逐步形成FLEA故障诊断技术的审定策略。在此过程中,如何给出审定建议和审定技术的关注要点,不仅对保证FLEA的高可靠性及其工程应用有着重要的意义,而且能够为FLEA故障诊断技术的验证提供理论依据与标准。

参考文献

- [1] Fu J, Maré J C, Fu Y. Modelling and simulation of flight control electromechanical actuators with special focus on model architecting, multidisciplinary effects and power flows[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(1): 47-65.
- [2] Mare J C, Jian F U. Review on signal-by-wire and power-by-wire actuation for more electric aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(3): 857-870.
- [3] Emadi K, Ehsani M. Aircraft power systems: technology, state of the art, and future trends[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, 15(1): 28-32.
- [4] Alden R. C-141 and C-130 power-by-wire flight control systems[C]//Proceedings of the IEEE 1991 National Aerospace and Electronics Conference NAECON 1991, IEEE, 1991: 535-539.
- [5] Cowan J R, Weir R A. Design and test of electromechanical actuators for thrust vector control[C]//NASA Conference Publication. NASA, 1993: 349.
- [6] Jensen S C, Jenney G D, Dawson D. Flight test experience with an electromechanical actuator on the F-18 systems research aircraft[C]//19th Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. No. 00CH37126). IEEE: (2000-07-13)[2021-02-26]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/886914>.
- [7] Colgren R, Frye M. The design and integration of electrome-

- chanical actuators within the U-2S aircraft[C/OL]//Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit: (2012-08-22)[2021-02-26]. <https://doi.org/10.2514/6.1998-4406>.
- [8] Qiao G, Liu G, Shi Z, *et al.* A review of electromechanical actuators for more/all electric aircraft systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(22): 4128-4151.
- [9] Na W S, Baek J. Impedance-based non-destructive testing method combined with unmanned aerial vehicle for structural health monitoring of civil infrastructures[J]. Applied Sciences, 2017, 7(1): 15.
- [10] Jones R I. The more electric aircraft-assessing the benefits[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Aerospace Engineering, 2002, 216(5): 259-269.
- [11] 胡勤丰, 李豹, 陈晓梅, 等. 机电作动器动态性能的研究[J]. 战术导弹控制技术, 2012, 29(2): 20-25, 44.
Hu Qinfeng, Li Bao, Chen Xiaomei, *et al.* Research on dynamic performance of electromechanical actuator[J]. Tactical Missile Control Technology, 2012, 29(2): 20-25, 44.
- [12] Yu X, Jiang J. Hybrid fault-tolerant flight control system design against partial actuator failures[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 20(4): 871-886.
- [13] Hussain Y M, Burrow S, Henson L, *et al.* A review of techniques to mitigate jamming in electromechanical actuators for safety critical applications[J]. International Journal of Prognostics and Health Management, 2018, 9(3): 2153-2648.
- [14] Liu M, Zhou Y. The reliability prediction of an electro-mechanical actuator of aircraft with the hybrid redundant structure [C]//2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE, 2008: 1-5.
- [15] Garcia A, Cusido I, Rosero J A, *et al.* Reliable electro-mechanical actuators in aircraft[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2008, 23(8): 19-25.
- [16] Du X, Dixon R, Goodall R M, *et al.* Modeling and control of a high redundancy actuator[J]. Mechatronics, 2010, 20(1): 102-112.
- [17] Madonna V, Giangrande P, Gerada C, *et al.* Thermal analysis of fault-tolerant electrical machines for aerospace actuators[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 13(7): 843-852.
- [18] Bennett J W, Mecrow B C, Atkinson D J, *et al.* Safety-critical design of electromechanical actuation systems in commercial aircraft[J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(1): 37-47.
- [19] Márton L, Ossmann D. Energetic approach for control surface disconnection fault detection in hydraulic aircraft actuators[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(20): 1149-1154.
- [20] Chen H, Jiang B. A review of fault detection and diagnosis for the traction system in high-speed trains[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21(2): 450-465.
- [21] 王剑, 王新民, 谢蓉, 等. 基于 IMM-UKF 方法的机电作动器突发性故障诊断研究[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(2): 198-202.
- Wang Jian, Wang Xinmin, Xie Rong, *et al.* Research on sudden fault diagnosis of electromechanical actuator based on IMM-UKF method[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(2): 198-202.
- [22] 薛婷, 钟麦英, 李钢. 基于小波变换与等价空间的无人机作动器故障检测[J]. 控制理论与应用, 2016(33): 1193-1199.
Xue Ting, Zhong Maiying, Li Gang. UAV actuator fault detection based on wavelet transform and equivalent space[J]. Control Theory and Application, 2016(33): 1193-1199.
- [23] 陈淑梅, 余建波. 卷积神经网络多变量过程特征学习与故障诊断[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(7): 65-73.
Chen Shumei, Yu Jianbo. Convolutional neural network multivariate process feature learning and fault diagnosis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(7): 65-73.
- [24] Wang Y, Zhao D, Li Y, *et al.* Unbiased minimum variance fault and state estimation for linear discrete time-varying two-dimensional systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(10): 5463-5469.
- [25] Xiong R, Yu Q, Shen W, *et al.* A sensor fault diagnosis method for a lithium-ion battery pack in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9709-9718.
- [26] Liu Y, Wang Z, Zhou D. State estimation and fault reconstruction with integral measurements under partially decoupled disturbances[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(10): 1520-1526.
- [27] Liu R, Yang B, Zio E, *et al.* Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108: 33-47.
- [28] Chen H, Jiang B, Ding S X, *et al.* Data-driven fault diagnosis for traction systems in high-speed trains: a survey, challenges, and perspectives[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020.
- [29] Wang J, Fu P, Zhang L, *et al.* Multilevel information fusion for induction motor fault diagnosis[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(5): 2139-2150.
- [30] Wen L, Li X, Gao L, *et al.* A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(7): 5990-5998.
- [31] Arellano-Espitia F, Delgado-Prieto M, Martinez-Viol V, *et al.* Deep-learning-based methodology for fault diagnosis in electromechanical systems[J]. Sensors, 2020, 20(14): 3949.
- [32] Liu L, Wang Z, Yao X, *et al.* Echo state networks based data-driven adaptive fault tolerant control with its application to electromechanical system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(3): 1372-1382.
- [33] Wang J, Miao J, Wang J, *et al.* Fault diagnosis of electrohydraulic actuator based on multiple source signals: an experimental investigation[J]. Neurocomputing, 2020, 417: 224-238.
- [34] Lu S, Phung B T, Zhang D. A comprehensive review on DC arc faults and their diagnosis methods in photovoltaic systems

- [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 89: 88–98.
- [35] 张辉斌. 基于机器学习的机电系统部件级PHM技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
Zhang Huibin. Research on PHM technology of electromechanical system component level based on machine learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [36] Zhang J, Sun Y, Guo L, *et al.* A new bearing fault diagnosis method based on modified convolutional neural networks[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(2): 439–447.
- [37] Wang Z, Wang J, Wang Y. An intelligent diagnosis scheme based on generative adversarial learning deep neural networks and its application to planetary gearbox fault pattern recognition[J]. *Neurocomputing*, 2018, 310: 213–222.
- [38] Berredjem T, Benidir M. Bearing faults diagnosis using fuzzy expert system relying on an improved range overlaps and similarity method[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 108: 134–142.
- [39] Chen Y, Zhen Z, Yu H, *et al.* Application of fault tree analysis and fuzzy neural networks to fault diagnosis in the internet of things (IoT) for aquaculture[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 153.
- [40] Ma X, Li D. A hybrid fault diagnosis method based on fuzzy signed directed graph and neighborhood rough set[C]//2017 6th Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS), IEEE, 2017: 253–258.
- [41] 吴云凯. 微小故障诊断与预测技术及其在高速列车牵引控制系统中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
Wu Yunkai. Micro-fault diagnosis and prediction technology and its application in high-speed train traction control system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [42] Wang T, Dong J, Xie T, *et al.* A self-learning fault diagnosis strategy based on multi-model fusion[J]. *Information*, 2019, 10(3): 116.
- [43] Park B G, Kim T S, Ryu J S, *et al.* Fault tolerant strategies for BLDC motor drives under switch faults[C]// Industry Applications Conference, IEEE Xplore, 2006.
- [44] Kim S. Modeling and fault analysis of BLDC motor based servo actuators for manipulators[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2008.
- [45] Garcia A, Cusido J, Rosero J A, *et al.* Reliable electro-mechanical actuators in aircraft[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2008, 23(8): 19–25.
- [46] 邱献双. 先进的作动器技术研究[J]. *航空科学技术*, 2009(4): 6–8.
Qiu Xianshuang. Advanced actuator technology research[J]. *Aviation Science and Technology*, 2009(4): 6–8.
- [47] Dalla Vedova M D L, Germanò A, Berri P C, *et al.* Model-based fault detection and identification for prognostics of electromechanical actuators using genetic algorithms[J]. *Aerospace*, 2019, 6(9): 94.
- [48] Anas S R, Jaison H, Gopinath A, *et al.* Modeling and simulation analysis of a redundant electromechanical actuator based position servo system[C]//2011 International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology (ICCCET), IEEE, 2011: 358–363.
- [49] Dobra P, Dobra M, Moga D, *et al.* Model based fault detection for electrical drives with BLDC motor[C]// 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), IEEE, 2014.
- [50] Balaban E, Bansal P, Stoelting P, *et al.* A diagnostic approach for electro-mechanical actuators in aerospace systems[C]// IEEE Aerospace Conference, IEEE, 2010.
- [51] Ansari U, Alam S. Modeling and control of three phase BLDC motor using PID with genetic algorithm[C]//2011 UKSim 13th International Conference on Computer Modelling and Simulation, IEEE, 2011: 189–194.
- [52] Boglietti A, Cavagnino A, Tenconi A, *et al.* The safety critical electric machines and drives in the more electric aircraft: A survey[C]//2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IEEE, 2009: 2587–2594.
- [53] 贾庆贤, 张迎春, 管宇, 等. 基于解析模型的非线性系统故障诊断方法综述[J]. *信息与控制*, 2012(3): 356–364.
Jia Qingxian, Zhang Yingchun, Guan Yu, *et al.* Summary of fault diagnosis methods for nonlinear systems based on analytical models[J]. *Information and Control*, 2012(3): 356–364.
- [54] 吴军. 机械故障诊断的信号处理方法: 频域分析[J]. *工程技术(文摘版)·建筑*, 2016(9): 00265.
Wu Jun. Signal processing method for mechanical fault diagnosis: frequency domain analysis[J]. *Engineering Technology (Abstract Edition)·Architecture*, 2016(9): 00265.
- [55] Ismail M A A, Balaban E, Spangenberg H. Fault detection and classification for flight control electromechanical actuators[C]// 2016 IEEE Aerospace Conference, 2016: 1–10.
- [56] Da Silva J C, Saxena A, Balaban E, *et al.* A knowledge-based system approach for sensor fault modeling, detection and mitigation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(12): 10977–10989.
- [57] Shao J, Deng Z, Gu Y. Fault-tolerant control of position signals for switched reluctance motor drives[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(3): 2959–2966.
- [58] Dong L, Jatskevich J, Huang Y, *et al.* Fault diagnosis and signal reconstruction of hall sensors in brushless permanent magnet motor drives[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, 31(1): 118–131.
- [59] Prasad B B, Biju N, Panicker M R R, *et al.* Failure mode investigation and redundancy management of an electromechanical control actuator for launch vehicle application[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2020, 20(5): 1644–1660.
- [60] Gou B, Ge X, Wang S, *et al.* An open-switch fault diagnosis method for single-phase PWM rectifier using a model-based approach in high-speed railway electrical traction drive system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 31(5): 3816–3826.

- [61] Urbano S. Early and robust detection of oscillatory failure cases (OFC) in the flight control system: a data driven technique [C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.
- [62] Awadallah M A, Morcos M M. Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives——an overview[J]. IEEE Transactions on energy conversion, 2003, 18(2): 245–251.
- [63] 闫妍. 复杂动态系统的故障诊断与预报[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.
Yan Yan. Fault diagnosis and prediction of complex dynamic system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [64] Su J, Chen W H. Model-based fault diagnosis system verification using reachability analysis[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 49(4): 742–751.
- [65] Wu Y, Jiang B, Lu N. A descriptor system approach for estimation of incipient faults with application to high-speed railway traction devices[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(10): 2108–2118.
- [66] Goupil P, Marcos A. Advanced diagnosis for sustainable flight guidance and control: The European ADDSAFE project[R]. SAE technical paper, 2011.
- [67] Kügler M E, Rhein J, Holzappel F. Validation of decision logic of an autoland system for a UAV using model-based safety-assessment techniques[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2020, 11(1): 93–110.
- [68] Goupil P. Oscillatory failure case detection in the A380 electrical flight control system by analytical redundancy[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(9): 1110–1119.
- [69] 周东华, 刘洋, 何潇. 闭环系统故障诊断技术综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1933–1943.
Zhou Donghua, Liu Yang, He Xiao. Summary of closed-loop system fault diagnosis technology[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1933–1943.
- [70] Bellini A, Filippetti F, Franceschini G, *et al.* Closed-loop control impact on the diagnosis of induction motors faults[J]. IEEE transactions on Industry Applications, 2000, 36(5): 1318–1329.
- [71] McNabb C A, Qin S J. Fault diagnosis in the feedback-invariant subspace of closed-loop systems[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2005, 44(8): 2359–2368.
- [72] Ashari A E, Nikoukhah R, Campbell S L. Effects of feedback on active fault detection[J]. Automatica, 2012, 48(5): 866–872.
- [73] 邢琰, 吴宏鑫, 王晓磊, 等. 航天器故障诊断与容错控制技术综述[J]. 宇航学报, 2003, 24(3): 221–226.
Xing Yan, Wu Hongxin, Wang Xiaolei, *et al.* Review of spacecraft fault diagnosis and fault-tolerant control technology[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(3): 221–226.
- [74] Aghili F. Fault-tolerant torque control of BLDC motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 26(2): 355–363.
- [75] Xiao B, Cao L, Xu S, *et al.* Robust tracking control of robot manipulators with actuator faults and joint velocity measurement uncertainty[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(3): 1354–1365.
- [76] Li K, Luo H, Yang C, *et al.* Subspace-aided closed-loop system identification with application to DC motor system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(3): 2304–2313.
- [77] Su J, Chen W H. Model-based fault diagnosis system verification using reachability analysis[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 49(4): 742–751.
- [78] Deng Z, Guo Z, Zhang X. Non-probabilistic set-theoretic models for transient heat conduction of thermal protection systems with uncertain parameters[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 10–17.
- [79] Balaban E, Saxena A, Bansal P, *et al.* Modeling, detection, and disambiguation of sensor faults for aerospace applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(12): 1907–1917.
- [80] Varga A, Hansson A, Puyou G. Optimization based clearance of flight control laws[M]. Lecture Notes in Control and Information Science, 2012.
- [81] Deere K A, Viken S, Carter M B, *et al.* Computational component build-up for the x-57 maxwell distributed electric propulsion aircraft[C]//2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018: 1275.
- [82] Papatkakis K V, Sessions A M, Burkhardt P A, *et al.* A NASA approach to safety considerations for electric propulsion aircraft testbeds[C]//AIAA Propulsion and Energy Forum 2017 (Atlanta, GA). 2017.
- [83] Smaili H, Breeman J, Lombaerts T, *et al.* A simulation benchmark for integrated fault tolerant flight control evaluation[C]//AIAA modeling and simulation technologies conference and exhibit: (2006–08–24) [2021–02–26]. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2006-6471>.
- [84] Zolghadri A, Leberre H, Goupil P, *et al.* Parametric approach to fault detection in aircraft control surfaces[J]. Journal of Aircraft, 2016, 53(3): 846–855.
- [85] Sun L G, De Visser C C, Chu Q P, *et al.* Joint sensor based backstepping for fault-tolerant flight control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015, 38(1): 62–75.
- [86] Laflin C R. A systematic approach to development assurance and safety of unmanned aerial Systems[R]. SAE Technical Paper, 2020.

收稿日期:2021-02-26
修改稿日期:2021-04-16