

文章编号: 1674-8190(2024)03-027-18

# 飞机电源系统故障诊断方法综述及发展趋势

赖思齐, 陈桂鹏, 颜佳佳, 卿新林

(厦门大学 航空航天学院, 厦门 361005)

**摘要:** 飞机电源系统是机上一切用电设备的电能来源, 其安全性与可靠性至关重要。在环保和高效发展需求的背景下, 现代航空工业正在推进以电能为核心的多电/全电飞机技术的研究和应用。电驱动装置和电力电子器件的广泛使用导致飞机电源系统结构的复杂化, 对飞机的可靠性、安全性、测试性和维修性提出了更高的要求, 研究飞机电源系统的故障诊断技术具有重要意义。本文首先介绍了飞机电源系统的组成结构和各自功能, 概述了飞机电源系统的发展历程, 对比分析国内外典型电源系统的特征, 总结了飞机电源系统中的主要故障模式、故障特点和失效原因, 并提出一种飞机电源健康管理系统的的设计架构, 然后综述了国内外基于模型和基于数据的故障诊断方法研究进展, 从准确度、数据需求量、适用性和实现难易程度等方面评述了各类诊断方法的特点, 最后指出了飞机电源系统故障诊断技术面临的挑战和发展趋势。

**关键词:** 电源系统; 电力电子; 多电飞机; 故障模式; 故障诊断

**中图分类号:** V267

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.03

## Review and development trend of fault diagnosis methods for aircraft power supply system

LAI Siqi, CHEN Guipeng, YAN Jiajia, QING Xinlin

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The aircraft power supply system is the power source of all electrical equipment on board, thus its safety and reliability are pretty important. Against the backdrop of environmental protection and high-efficiency development needs, research and application of more/all electric aircraft technology with electric power as the core is advanced. The widespread use of electric drive devices and power electronic devices has led to the complexity of aircraft power supply system structure, which puts forward higher requirements for aircraft reliability, safety, testability and maintainability, so that researches on fault diagnosis technology for aircraft power supply systems are of great significance. In this paper, firstly the composition structure and respective functions of aircraft power supply system are introduced. Secondly, the development process of aircraft power supply system is outlined. Thirdly, the characteristics of typical domestic and foreign power supply systems are compared. Fourthly, the main failure modes, fault characteristics and failure causes of aircraft power supply system are summarized, and a design architecture of aircraft power health management system is proposed. Fifthly, the research progress of fault diagnosis methods based on model and data are reviewed, then, the characteristics of various diagnostic methods are evaluated from aspects such as accuracy, data demand, applicability and implementation difficulty. Finally, the challenges and development trends of fault diagnosis technology for aircraft power supply system are pointed out.

**Key words:** power supply system; power electronics; more electric aircraft; failure modes; fault diagnosis

收稿日期: 2023-05-12; 修回日期: 2023-07-18

基金项目: 民机预研专项(2019SACSC-096WT)

通信作者: 卿新林(1967—), 男, 博士, 教授。E-mail: xinlinqing@xmu.edu.cn

引用格式: 赖思齐, 陈桂鹏, 颜佳佳, 等. 飞机电源系统故障诊断方法综述及发展趋势[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 27-44.

LAI Siqi, CHEN Guipeng, YAN Jiajia, et al. Review and development trend of fault diagnosis methods for aircraft power supply system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 27-44. (in Chinese)

## 0 引言

现代航空工业飞速发展,飞机使用数量、化石燃料消耗逐渐增加,导致废气排放不断增长,对环境造成严重的负面影响。据统计,飞机排放的二氧化碳已经占全球碳排放量的3%左右<sup>[1]</sup>。随着飞机制造工业高效能、低成本的发展需求,现代飞机机载系统正趋向于采用电能取代传统的液压能、气压能等传统的二次能源,即更多依靠燃料电池、超级电容、电动机来提供原动力<sup>[2]</sup>。与此同时,随着电力电子技术和电机驱动系统技术的发展,航空工业正在大力推进多电飞机、全电飞机技术的研发和应用,以有效减少碳排放量<sup>[3-4]</sup>。

飞机电源系统是为机体提供电能的产生、传输和变换的一种机载系统<sup>[5]</sup>,其按功能分为主电源、辅助电源、应急电源和二次电源4种结构。每种电源结构分别由错综复杂的子系统、部件经电气与机械连接而成,如二次电源系统中包含了航空静止变流器、直流变换器、变压整流器、电缆等部件,这些部件又可单独视为一个局部子系统。在飞机实际服役过程中,这些系统内的装置部件会由于长期恶劣的飞行环境而发生老化、腐蚀等,进而导致失效,甚至导致整个系统发生故障,对飞机电源系统的安全运行造成威胁。飞机上的控制、通信、仪表、照明和武器等设备都需要飞机电源系统供能。如果电源系统的任一部件发生故障,将给整个飞机的正常运行带来安全隐患,甚至造成巨大的经济或生命财产损失<sup>[6]</sup>。

技术先进、功能全面、品质优良的电力电子设备和电动装置的使用一方面提高了飞机电源系统性能<sup>[7]</sup>,另一方面也带来了电源系统结构的复杂化,导致其故障率增加,故障原因排查更加繁琐,给飞机电源系统的维修、测试和保障带来严峻挑战。为了提高飞机电源系统的维修性、测试性和保障性,降低飞机维护成本,保障飞机外场完好率和服役效能,亟需研究飞机电源的故障诊断技术。因此,分析飞机电源系统的失效模式和故障机理,寻求更加先进可靠的故障诊断技术,实现飞机电源系统的高效智能诊断,以适应日益综合化、自动

化、复杂化的电源系统所提出的更高的可靠性、安全性和维修性要求,正在引起航空工业研究人员的关注。

本文综述飞机电源系统故障诊断技术的主要研究进展,首先介绍飞机电源系统的组成结构、各自功能以及国内外典型飞机电源系统的发展历程;其次分析概括飞机电源系统的主要故障模式、故障原因和故障特点,并综合电源系统的监测需求和约束条件提出一种飞机电源健康管理系统的架构;然后重点论述飞机电源系统中基于模型和基于数据驱动的故障诊断方法,主要包括各类方法的实现原理、研究进展和技术特点;最后指出飞机电源系统故障诊断技术的发展趋势及其面临的挑战。

## 1 飞机电源系统的组成结构与功能

飞机电源系统经历了一百多年的复杂发展过程,其组成结构也随着飞机搭载技术的成熟和革新在不断变化。一个完整的飞机电源系统由主电源、二次电源、应急电源和辅助电源组成。主电源系统是飞机上动作装置、通讯导航、照明设施等所有用电设备的电能来源,通常指由航空发动机驱动的主发电机装置;二次电源是用于变换主电源的电压、电流和频率的电源装置,如变压整流器、静止变流器等,它将主电源电能变换为另一种形式的电能以满足不同用电设备的需要;应急电源是一个独立于主电源的电源系统,当主电源系统失效时由其向机上重要用电设备供电,如航空蓄电池等;中大型飞机上通常配备辅助电源系统,如辅助动力装置(Auxiliary Power Unit,简称APU)驱动的发电机、航空蓄电池等,它可在飞机服役过程中接替失效的主电源工作,也常用于地面检查。飞机电源系统的基本结构如图1所示,其中飞机左右两侧的发动机分别传动各自侧的主发电机,辅助动力装置驱动的发电机(APU.G)和航空蓄电池(Battery)则在飞机主电源失效或处于地面检查的时候代替主发电机工作,作为主电源的发电机输出的电能经各类电力电子器件的变换和分配成为二次电源,最后输送至飞机的各类交直流负载。

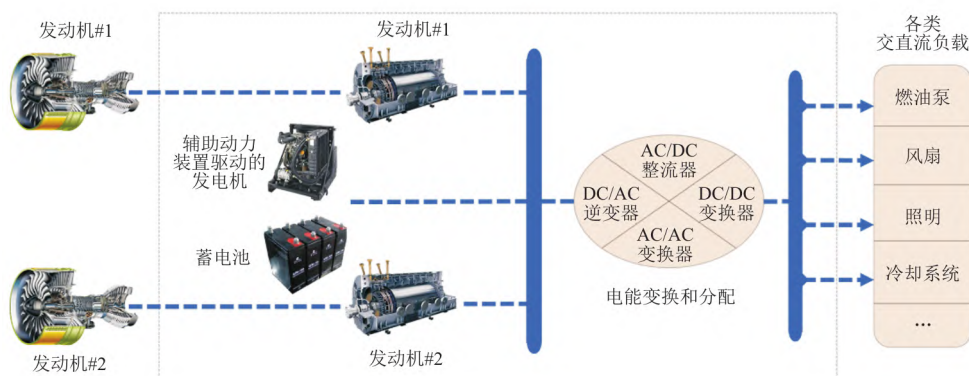


图1 飞机电源系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of aircraft power supply system

飞机电源系统的类型和结构因飞机类型、飞机用途及发动机种类而异。从飞机电源系统发展历程上看,飞机上先后使用过的电源系统有低压直流(LVDC)电源系统、恒速恒频(CSCF)交流电

源系统、变速恒频(VSVF)交流电源系统、变速变频(VSVF)交流电源系统和高压直流电源系统(HVDC)5种典型类型<sup>[8]</sup>,其发展沿革<sup>[9]</sup>如图2所示。

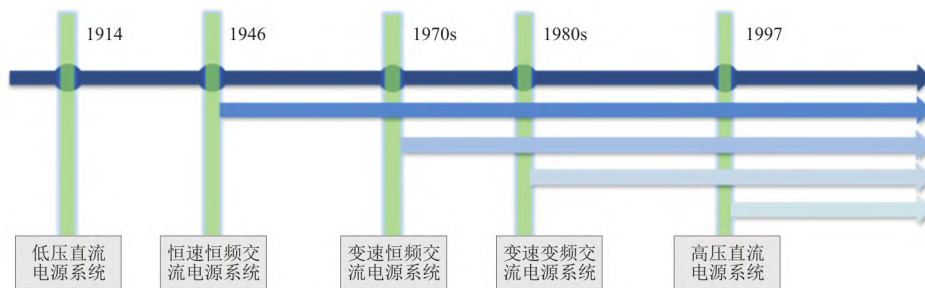


图2 飞机电源系统发展历程

Fig. 2 Development history of aircraft power supply system

其中低压直流电源系统作为航空业早期研发的电源系统,于1914年第一次投入使用并发展至今,其结构包括有刷直流发电机、电压调节器、保护装置等。由于航空发动机转速范围宽泛的特点,需要调压器与直流发电机配套工作,从而在事先检测发电机电压的基础上,通过调节励磁电流来维持电机电压值不变,一般工作电压为28 V。低压直流电源系统结构简单,但功率和可靠工作高度十分有限,寿命较短,一般在轻型直升机、无人飞机和教练机等机型上广泛使用;美国在1946年发明了机械式液压恒速传动装置(CSD),该装置能将航空发动机的变转速转换为定转速,从而使得其传动的交流发电机能发出400 Hz恒频交流电,恒速恒频交流电源因此问世,但精密的CSD存在制造困难和维护不便等缺点;1970年代变速恒频交流电源被发明并开始使用,它由发动机直接

传动产生变频交流电,然后通过变频器转换为恒频交流电,其电能质量和转换效率相比于CSCF有了较大提升,但由于其含有的功率器件数量较多,它的载荷能力和环境适应性都不如CSCF;1980年代变速变频交流电源系统开始广泛使用,其交流发电机经减速器由飞机发动机传动,发出的交流电为变频交流电,省去了恒速传动装置,但由于其频率变化大的特点,难以满足机载电子设备对供电品质的要求;1997年美国试飞的F-22是第一架搭载高压直流电源系统的飞机,得益于先进的电力电子技术和电机技术,高压直流电源简单可靠,电能质量和转换效率高,对机上非线性负载适应性强。国内外5类典型飞机电源系统的基本特征如表1所示,包括结构、参数差异和各自在实际应用时存在的优势劣势。

表1 国内外五类典型飞机电源系统特征  
Table 1 Characteristics of five typical aircraft power supply systems at home and abroad

电源系统类型	结构特征	主要参数	优缺点
低压直流(LVDC) <sup>[9-10]</sup>	需调压器	电压 28.5 V 频率 400 Hz 转速 6 500~12 000 r/min	结构简单、重量轻、寿命短、效率低、高空性能差
恒速恒频(CSCF) <sup>[3-4,10]</sup>	需 CSD	电压 120 V 频率 400 Hz	使用广泛,可靠性、维修性差
变速恒频(VSCF) <sup>[4,10]</sup>	由发动机经变频器传动	电压 120 V 频率 400 Hz	结构简单、维护方便、功率受限
变速变频(VSVF) <sup>[4,9-10]</sup>	不需 CSD,需减速器	电压 115/200 V 频率 360~800 Hz 转速 10 800~24 000 r/min (一对级) 21 600~48 000 r/min (两对级)	结构简单、重量轻、可靠性高,适用范围有限,对负载不利
高压直流(HVDC) <sup>[9-10]</sup>	由发电机和控制器构成,不需 CSD 和功率变换器	电压 270 V 频率 400 Hz	结构简单、功率密度高、重量轻、不间断供电

2 飞机电源系统的故障模式与特点

飞机电源系统发生故障可能由多种偏离正常范围的因素综合导致,如运行过程中长时间的超载过流工作,使得某些部件性能退化甚至直接失效;机械组件中元器件的松动、磨损和腐蚀,导致某些旋转装置功率输出异常;外部环境中雷击、静电和电磁干扰,可能导致一些精密运算单元发生错误及部分器件的击穿开路;配电环节中电能分

配不均,使得相应装置未能正常运转。

飞机电源系统的各个组成部件都可能发生故障,如主电源中的发电机、恒速传动装置和辅助动力装置的故障;输电线路中电缆、汇流条和功率均衡环节的故障;电能变换装置如逆变器、整流器和变换器的故障。故障模式有如欠电压、过电压、电压不稳定、欠频、过频等多种表现形式<sup>[11]</sup>。飞机电源系统中关键设备的多发性、典型性故障模式及相应的失效原因如表 2 所示。

表2 飞机电源系统典型故障模式和失效原因  
Table 2 Typical failure modes and causes of aircraft power supply system

故障位置	故障模式	失效原因
发电机 <sup>[12]</sup> (包括主发电机、辅助动力装置驱动的发电机)	过压 欠压 过频 欠频	GCU 过励磁,调压器故障 发电机机械故障,GCU 欠励磁,欠速 发动机超转 发动机降转、CSD 机械故障
发电机控制单元 <sup>[13]</sup>	CPU 故障 RAM 故障 数模转换故障 信号调理故障	内部金属层短路或电容耦合,运算出错 地址译码器故障、读写逻辑电路故障 信号超限、线间耦合 信号线固定开路、未跳变
恒速传动装置 <sup>[12]</sup>	欠速 过速 脱开	滑油量不足 滑油量过多 —
电能变换装置 <sup>[14-15]</sup>	功率管开路 功率管短路 交流测过流	长期超温、过流工作 高压击穿 滤波电感过温



飞机电源系统日益先进,结构日趋复杂。由于其采用大功率晶体管技术、先进控制方案和数字化技术,使得飞机电源系统成为一个具有时变性、层次性、耦合性和高冗余度等特点的复杂系统。此外,飞机电源系统在运行过程中涉及多种物理和化学参数的变化,如能量、介质、力、温度和磨损等。当飞机电源系统正常或异常时,这些信息参数的变化呈现出不同的规律,直接或间接地反映了系统的运行状态。飞机电源系统征兆和故障信息具有时变性和模糊性,加上服役环境带来的不规则干扰和噪声,造成了故障信息的不确定性。基于此,飞机电源系统发生故障是一个十分复杂的过程,具体体现在以下4个方面<sup>[6,16-17]</sup>:

#### 1) 层次性

飞机电源系统的结构和功能层次分为系统、子系统、部件等,因而其故障和征兆也具有一定的层次性,在飞机电源的故障诊断中可针对不同层次建立诊断模型和确定诊断策略。

#### 2) 传播性

可分为横向传播和纵向传播两种方式,横向传播指某一元件的故障引起层次内其他元件的功能失常。纵向传播指元件的故障相继引起层次外部件—子系统—系统的故障。

#### 3) 非线性

某一征兆可能对应若干故障,某一故障可能对应若干征兆,它们之间存在错综复杂的关系。故障和征兆之间的非线性对应关系是导致飞机电源系统诊断困难的一个主要原因。

#### 4) 延时性

故障从产生到传播有一定的时间过程。根据故障的传播时间和故障征兆由量变到质变的过程时间,可进行故障状态的预测和早期诊断。

以上是关于飞机电源系统故障诊断面临的一些复杂性问题,针对这些难点,需要利用先进的技术手段,监测能反映飞机电源故障隐患和趋向的各个重要状态参数,进一步通过数据分析判断故障部位、故障原因及故障的变化趋势,从而制定合理的检修方法和隔离措施。

### 3 飞机电源健康管理系统的架构

由于飞机电源系统故障模式的多样性,结合

故障发生的层次性和传播性等特点,有必要采用飞机电源健康管理系统对能反映飞机电源工作状态的重要参数进行实时监测,并利用搭载的推理模型和算法完成推理评估和决策判断,实时反映飞机电源系统的健康状态。结合飞机电源的故障模式和故障特点,飞机电源健康管理系统应有如下设计需求:

#### 1) 故障检测和诊断能力

飞机电源系统故障包括不同设备的多种故障模式,具有层次性和传播性的特点,因此飞机电源健康管理系统需要具备强大的故障检测和诊断能力,通过融合多种故障诊断方法的优点,能够快速准确地检测和诊断出不同层次、不同类型的故障,并能追踪故障的传播路径。

#### 2) 故障预测和早期警告

考虑到飞机电源系统故障的延时性,飞机电源健康管理系统应具备故障预测和早期警告的能力。通过分析故障征兆的变化趋势和故障传播的时间,系统能够提前发现潜在的故障,并及时采取措施避免进一步的失效和损失。

#### 3) 多源数据集成和处理

飞机电源系统的故障模式涉及多层次、多子系统和多部件,因此飞机电源健康管理系统应集成来自不同层次、子系统和部件的多个传感器与数据源信息,并具备数据融合和数据挖掘的能力,以及时提取有效的故障特征,为故障预测和诊断提供数据支持。

#### 4) 实时性和可靠性

飞机电源系统的故障需要及时响应和处理,因此飞机电源健康管理系统应能实时监测飞机电源的健康状态,在发现故障或异常时及时生成报警信号。此外,飞机电源健康管理系统还应具备冗余和容错功能,以保障其可靠性,防止单点故障对整个系统的影响。

与此同时,在飞机电源健康管理系统架构的设计过程中,应综合考虑健康管理技术应用时的多种约束和需求,并同时决策出系统的模块组成和各自功能。飞机电源健康管理系统架构的设计过程如图3所示。

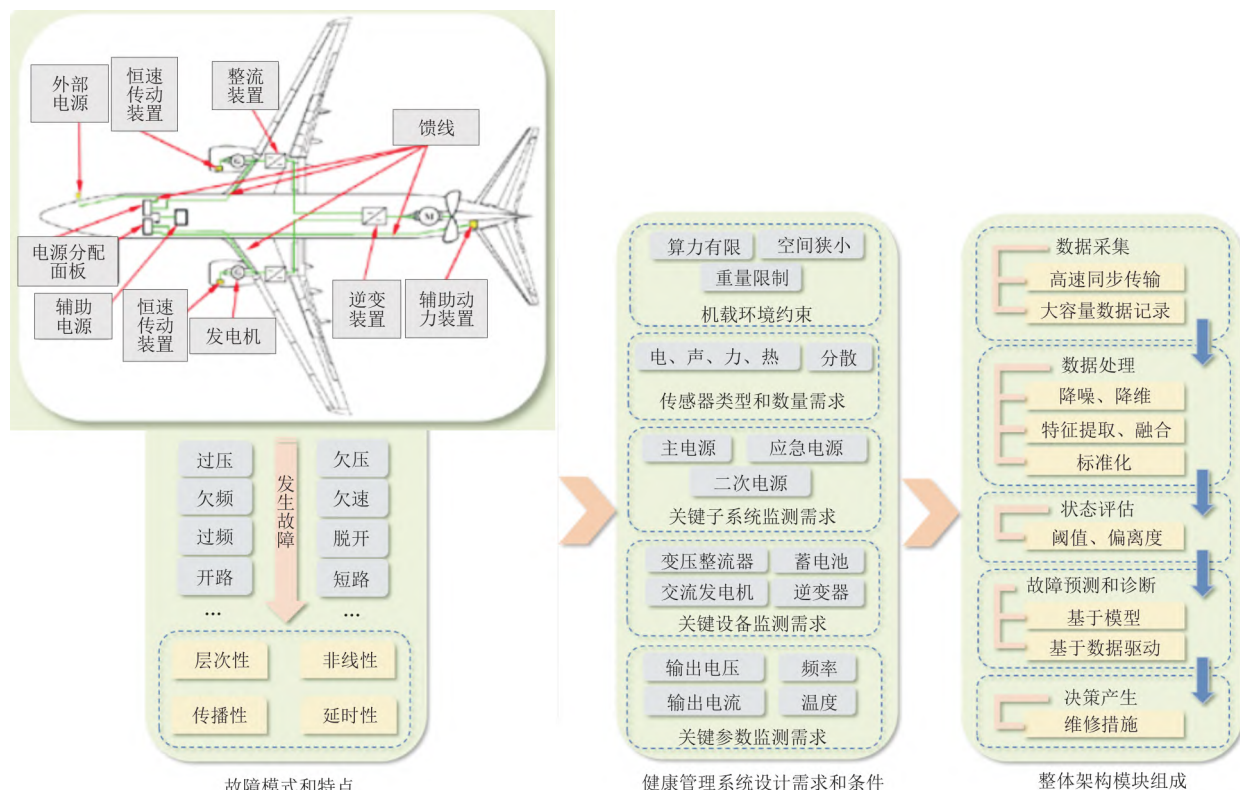


图3 飞机电源健康管理系统的架构设计过程

Fig. 3 Architecture design process of aircraft power health management system

#### 1) 机载环境约束

应综合考虑机载处理器算力有限、空间狭小、重量限制和成本要求等约束,合理设计健康管理系统的软硬件组成和功能。

#### 2) 传感器类型和数量需求

飞机电源系统在运行过程中涉及电、声、热和力学等物理特性的参数变化,需要大量多种类的先进传感器实现全方位检测;同时,飞机电源系统中电力设备数量众多且布局分散,对传感器布设和数据汇总带来较大的考验。

#### 3) 关键子系统监测需求

飞机电源系统故障发生时具有层次性和传播性,因此有必要监测次级子系统的健康状况。对于不同的电源系统类型,应考虑到个别次级子系统对飞机运行任务和飞行计划的关键程度进行重点监测。关键子系统一般包括主电源、二次电源、应急电源。

#### 4) 关键设备监测需求

飞机电源系统发生故障时,关键设备的输出状况往往能够直观反映系统的故障现象。可根据飞机电源系统的故障模式、影响和危害性分析(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, 简

称FMECA)或故障树分析(Fault Tree Analysis, 简称FTA)结果,从而进一步确定设备乃至系统的主要故障模式。因此有必要监测与系统运行状况紧密关联且可测量的关键设备如发电机、发电机控制单元、蓄电池、变压整流器和逆变器等。

#### 5) 关键参数监测需求

应监测飞机电源系统中与设备运行功能关系程度较高的性能参数和功能参数,这些参数能直接或间接表征设备的健康状态。如发电机的输出电压、电流和频率,逆变器的输出电压和电流,变压整流器的温度和频率等。

综合上述需权衡的约束条件和设计需求,飞机电源健康管理系统的架构应具有以下5个模块:数据采集、数据处理、状态评估、故障预测和诊断、决策产生。模块功能如下所述:

1) 数据采集:通过合理布置传感器的类型、数量和位置,利用先进传感技术和数据高速同步传输功能完成多元数据的汇总,同时采用大容量数据记录设备保存飞机电源运行中的历史数据。

2) 数据处理:对采集到的大量多维数据进行降维降噪处理,提取和融合重要特征,并统一标准化,便于为后续的功能模块提供便利的数据支持,

减轻机载处理器的运算负担。

3) 状态评估:将处理后的数据与正常值进行对比分析,如阈值比较、偏离度计算、似然度分析等,生成一套包含部件级和系统级的状态评估结果。

4) 故障预测和诊断:利用机载处理器中已有的推理模型和算法,并根据处理后的数据合理预测系统未来的健康状态或故障趋势,推理当前的故障类型和故障位置。

5) 决策产生:结合状态评估、故障预测和故障诊断的结果,制定合理的决策措施,如是否维修,更换部件或线上容错重构。

## 4 飞机电源系统故障诊断方法

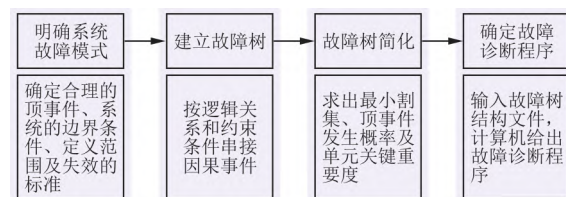
故障诊断技术是飞机电源健康管理系统中的重要功能,它利用电源管理装置对机内自检测(Built in Test,简称BIT)的结果,实时采集电源系统中的故障信息和状态信息,并通过各种诊断模型和推理算法来监测和管理飞机电源系统状态。该技术能够判断电源系统发生的故障类型,同时在电源子系统之间追踪引起失效的根本故障,从而实现对飞机电源系统故障的综合诊断<sup>[18-20]</sup>。从技术原理的角度,飞机电源系统故障诊断方法可分为两类:基于模型的方法、基于数据驱动的方法。基于模型的方法可进一步分为故障树法、故障传播图法、Petri网法和定性仿真法;基于数据驱动的方法可分为神经网络故障诊断方法、支持向量机故障诊断方法、专家系统故障诊断方法、模糊逻辑故障诊断方法、证据理论故障诊断方法和信号处理故障诊断方法。

### 4.1 基于模型的方法

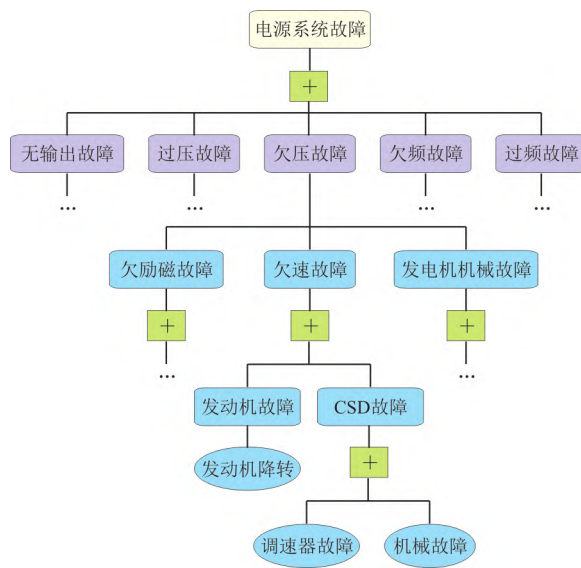
基于模型的诊断方法根据系统的结构、功能和行为等方面的特征对系统进行诊断推理,通常需要建立系统的结构、功能或行为模型。模型诊断法的理论体系是基于Narasimhan等<sup>[21]</sup>提出的基于第一定律的诊断理论。模型诊断法的原理是通过建立系统结构和行为的功能模型来预测系统行为,然后将预测值与系统实际观测值进行比较,通过逻辑推导得出引发故障的元件集合。模型诊断法的诊断过程可分为四个阶段:系统建模、冲突识别、诊断产生和诊断鉴别<sup>[12,22-23]</sup>。

#### 4.1.1 故障树法

故障树(Fault Tree,简称FT)是一种定性的因果模型,基于被诊断对象的结构和功能特征来描述其行为特征。在故障树模型中,顶事件代表系统中最不希望发生的事件,中间事件和底事件代表引发顶事件发生的可能事件。这些事件之间的关系通过逻辑门来表示,形成一种倒树状结构。它反映了故障模式与故障原因之间的全部逻辑关系。故障树法用于系统故障诊断的步骤和某电源系统故障树结构示意图如图4所示。



(a) 故障树诊断法步骤



(b) 某电源系统故障树<sup>[23]</sup>

图4 故障树诊断法和结构图

Fig. 4 Fault tree diagnosis and structure diagram

由于故障树分析是一种逻辑分析过程,利用故障树分析进行故障的推理和诊断,遵从了逻辑学演绎分析规则,体现了故障现象与故障原因之间的逻辑关系,因此附以合理的检测数据,便可根据飞机电源系统的运行情况,报告系统当前所处的状态及故障的航线可更换单元(Line Replaceable Unit,简称LRU),为维修人员提供清楚直观的故障关系图。早在2000年,朱新宇等<sup>[24]</sup>就提出了以故障树为基础的某型飞机电源系统故障诊断



方法,采用3个传感器和固定延时方式对频率和电压进行检测记录,并应用故障树分析法建立了该交流电源系统中发电机过压、欠频两个典型故障的FT模型,且以此为基础进行故障仿真和软件分析以实现故障识别和判断,可满足该系统对故障检测率、隔离率和虚警率等指标要求。黄政庭等<sup>[25]</sup>针对飞机电源故障检测中机内自检的高虚警率和地面检测的低效率等问题,提出了一种基于动态故障树(Dynamic Fault Tree,简称DFT)的恒速恒频电源系统故障诊断方法,它在传统静态故障树的基础上引入了新的动态门来描述系统的失效过程,并建立了一个具有机内自检、地面诊断和远程专家诊断三层结构的网络化故障诊断系统。李莉等<sup>[26]</sup>分析了机载电源系统中发电机控制器(GCU)的功能和结构特点,在故障树分析的基础上建立了GCU的故障字典,并提出了GCU故障识别的工作模型,故障树和故障字典综合的诊断方法可快速明确故障测点和故障定位,降低了诊断复杂性,为支持空地一体化的系统外场故障快速定位和隔离提供了数据保障。黄泽波等<sup>[27]</sup>考虑到电源系统故障诊断中不确定性问题和多故障问题,基于PCI测试平台设计了一个融合故障分析法和寻址技术的故障诊断系统,在故障树全面直观地分析出系统故障的基础上,通过下位机的地址线对故障编码,从而实现利用上位机寻址程序分析故障情况,能够保证诊断过程定位准确、判断高效,一定程度上提高了飞机电源系统的维修性和测试性。

故障树法以其强大的逻辑性、全面性和通用性在飞机电源系统等复杂对象的故障诊断领域中得以广泛应用,但前期需要获取系统的大量先验信息如各个子系统和部件故障模式、层次间的约束关系及关键度等,这些繁琐的信息收集和梳理过程极大地增加了建立故障树的难度与工作量,且容易导致错漏。目前缺乏获取复杂系统完整故障树信息的通用计算机程序,同时大型复杂系统的故障树占用计算机内存单元和机时较多,需进一步研究故障树简化的问题。

#### 4.1.2 故障传播图法

故障传播图是一种由节点和有向边组成的定向图,节点代表系统中的各个元件和相应的故障模式,有向边表示元件之间的故障传播关系。不

同的系统结构和工作模式下,故障传播模型会有所不同,因此可用邻接矩阵的方式来表示故障传播模型,以实现模型匹配和模式匹配。借助故障传播图模型对被诊断对象进行逐级解析,以直观准确地理清故障传播机制和故障产生原因<sup>[22,28]</sup>。基于故障传播图的故障诊断方法分为两步,首先绘制有向图,进行结构分层和矩阵转换;然后进行故障定位,包括故障节点的筛选、产生和排序<sup>[29]</sup>。

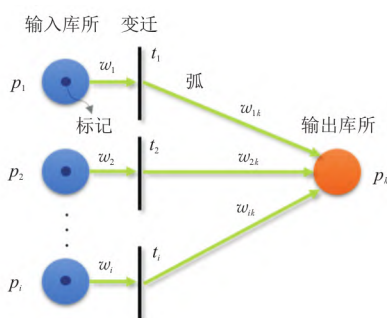
和麟等<sup>[22]</sup>研究了某型民用飞机电源系统的故障传播模型图,在对系统告警与现场查验两部分数据进行征兆提取的基础上,采用Warshall算法对故障传播模型的邻接矩阵进行求解得到故障传播路径,推导出极小冲突集并产生候选诊断,最后利用贝叶斯理论得到候选诊断的后验概率,以此来决策电源系统组件的故障检修方案,该故障诊断方法能快速准确的定位电源系统故障,大幅减少故障检修时间。

故障传播图能简单直观地表示系统的结构和行为等深层知识,它以规范化的有向图模型作为诊断基础,并进一步描述为计算机擅长处理的矩阵形式,方便计算机快速得到诊断解。但对于飞机电源系统等大型复杂系统,其组成要素和约束关系的复杂性导致其故障传播图难以表示,使得故障传播图法在飞机电源系统故障诊断的应用受到了限制。

#### 4.1.3 Petri网

Petri网是一种用网状结构建立系统定性模型的方法,它关注系统的结构特征和动态行为,描述事件之间的联系(如顺序、并发等)。在故障诊断领域,Petri网能清晰表达系统内各元件的逻辑关联,描述和分析故障的产生和传播过程,实现知识表示和诊断推理。此外,Petri网也能建立系统的行为模型,进而采用基于模型的故障诊断思路产生诊断。Petri网模型主要由变迁(Transition)、库所(Place)和有向弧(Arc)三个元素组成,如图5所示。变迁描述导致系统状态改变的事件,如诱发故障产生的原因;库所描述系统的局部状态,如故障征兆、故障现象等;有向弧是变迁和库所的中间元素,用于表示系统状态如故障状态变化的趋向。这三个元素是Petri网模型的基本组成部分,它们通过组合和连接形成了有向图,描述了系统的动态行为。



图5 Petri网结构示意图<sup>[30]</sup>Fig. 5 Structure diagram of Petri net<sup>[30]</sup>

王修岩等<sup>[31]</sup>建立了一个飞机交流发电机故障Petri网诊断模型,并结合其关联矩阵和状态方程进行故障推理,可有效提高诊断速度,但它无法针对故障现象反向推理出故障原因;何新贵<sup>[32]</sup>将传统Petri网与模糊理论结合,提出了模糊Petri网的建模方法;Xu P等<sup>[30]</sup>以飞机主电源中的无刷交流发电机为诊断对象,提出了基于模糊Petri网的飞机发电机故障诊断模型,可有效分析推理发电机常见故障的传播过程与原因。在此基础上,杨大光等<sup>[33]</sup>则考虑到故障Petri网和模糊Petri网在诊断过程中无法双向推理等局限性,将故障Petri网和模糊Petri网的属性结合,建立了模糊故障Petri网来构建专家系统的知识库、产生式规则和推理算法,可从正向推理故障原因,反向验证推理的准确度。并以实际某型飞机变速恒频交流电源系统为例,实现了“励磁电流过大”这一故障现象的精确诊断。

得益于Petri网具有并发、不确定和异步等特性以及完善的知识表示与推理机制,Petri网能很明晰的表示系统故障发生时系统状态和行为的變化,可有效处理飞机电源系统故障的诊断推理问题。但传统Petri网的资源不可覆盖、不可复用,容易出现冲突、冲撞和死锁等问题,从而导致一个异常状态引发多个故障现象的情况。面对飞机电源这类复杂系统的故障诊断问题,有必要针对诊断对象的特性对传统Petri网进行适当改造,同时融合其他诊断方法以充分发挥各自优势,使它能够描述故障的演变和传播特性。

#### 4.1.4 定性仿真法

定性仿真(Qualitative Simulation,简称QSIM)理论是Kuipers<sup>[34]</sup>于1986年提出的基于定性微分方程的一种算法理论。它通过表征系统物理参数的定性变量以及变量之间的定性微分方程建立定

性模型,再运用仿真获得系统在各个状态下的定性行为描述。定性仿真故障诊断法采用基于故障模型的诊断策略,利用QSIM对故障模型进行仿真,将得到的系统预测行为与观测到的故障行为相比较,若不一致则表明系统发生故障,此时可依据建立该模型时的先验知识诊断出故障原因和故障类型,这一过程可概括为假设—建模—仿真—匹配循环。基于定性仿真实验的故障诊断方法步骤如图6所示。

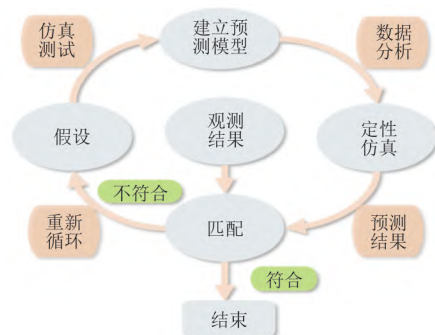


图6 基于定性仿真的故障诊断法步骤

Fig. 6 Steps of fault diagnosis based on qualitative simulation

王自强等<sup>[12]</sup>在分析了某型飞机电源系统结构、功能、行为和故障模式的基础上,用RODON平台建立了一个飞机电源程序化定性仿真模型,通过模拟负载故障产生系统原件的FMEA数据,从而自动解算出诊断结果;Skliros等<sup>[35]</sup>通过分析波音手册中辅助动力装置(APU)组件的常见故障与失效模式,在Simulink中建立了波音747飞机APU故障定性仿真模型,说明系统的输出性能与组件参数、运行状态、标准转速等的对应关系,能在输入某种故障后得到APU组件失效的条件范围,在APU单故障和多故障下该仿真模型都能为诊断产生阶段提供准确的数据参考。

基于定性仿真的故障诊断方法充分发挥了QSIM基于深层知识建模和推理的能力。它可以在较少的先验知识的情况下,对故障深层次的原因进行挖掘,通过建立模型和对比分析得到故障诊断结果。但基于QSIM的故障诊断也存在较多局限性,一是QSIM只能对系统已发生的历史故障信息进行检测分析,无法诊断未知的故障;二是定性仿真忽略了系统中的定量数据,无法对诊断模型进行量化评估,使得其在需要精确度量诊断决策的应用中受限;三是定性仿真诊断的方向性和引导性

容易导致大量的数据组合,造成“组合爆炸”问题,从而增加故障诊断的复杂度和工作量<sup>[36]</sup>。

## 4.2 基于数据驱动的方法

近年来随着机器学习和信息处理等技术的发展,基于数据驱动的方法逐渐成为故障诊断领域的研究热门和发展方向。与基于模型的诊断方法相比,基于数据驱动的故障诊断方法不依赖系统的精确数学模型,而从系统运行中产生的大量正常和故障数据出发,或者利用少量数据样本来训练分类器并对系统故障进行分类,又或者通过降维提取高维数据中的有效特征用于故障诊断<sup>[37]</sup>。数据驱动的方法具有处理复杂多模式即进行联想、预测和记忆的能力,它可以通过权值和结构的不断更新来适应系统故障的新情况,解决了传统故障诊断通用性和自适应性差的缺点,因此它非常适合于各种复杂非线性系统的故障诊断。将基于数据驱动的方法用于飞机电源系统的故障诊断可为维护机载设备、保障安全运行提供实用高效的技术手段,极大减少故障诊断的时间,提高故障诊断的效率。

### 4.2.1 基于神经网络

神经网络(Neural Networks,简称NN)具备良好的学习和泛化能力,它不需要预先了解系统输入输出之间的具体逻辑关系,在复杂系统故障诊断领域得到了广泛的应用。基于神经网络的故障诊断方法利用神经网络对预处理后的故障特征样本库进行训练,在训练过程中调整网络自身的阈值和权重,建立故障特征和故障模式之间的映射关系。将故障特征输入训练好的神经网络模型,便可输出对应的故障类型,从而实现故障诊断。神经网络的通用结构如图7所示。

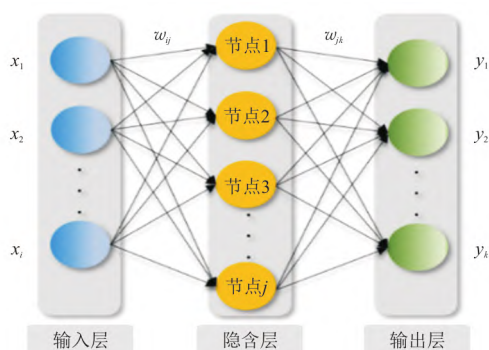


图7 神经网络通用结构<sup>[38]</sup>

Fig. 7 General structure of neural network<sup>[38]</sup>

程建兴等<sup>[39]</sup>提出了一种基于Elan神经网络的飞机电源系统欠压故障诊断方法,该诊断网络模型的隐含层中增加了一个承接层作延时算子,直接反映电源系统动态过程的特征,改善了网络适应时变特性的能力,并考虑到欠压故障的关联性,验证了欠压保护阈值;Zhang Z L等<sup>[20]</sup>针对飞机电源系统机内自检(BIT)虚警率高的问题,提出了一种融合遗传算法和BP神经网络的多电飞机电源系统故障诊断方法,它将遗传算法优化的权值和阈值作为BP神经网络的初始权值和阈值来对网络进行训练,直到得到期望值,可有效降低虚警率,提高BIT故障诊断能力;Cheng B Y等<sup>[40]</sup>以飞机电源中的组合驱动发电机(IDG)为对象,通过获取IDG仿真模型7个关键测点的模拟数据实现了基于长短期记忆(LSTM)网络的故障诊断;Liu Q等<sup>[41]</sup>提出了一种基于FPGA和神经网络的多电飞机电源系统故障诊断架构,它包括了TensorFlow的离线模块和FPGA的实时监控模块,分别负责LSTM的网络模型建立和电源系统的实时评估,可在保证诊断精度的前提下实现比CPU更高的诊断速度;Chen S W等<sup>[42]</sup>针对飞机二次电源中的变压整流器单元(TRU),设计了一个离散时间序列卷积神经网络(DTCNN)的TRU模型,并考虑到训练不同类型TRU网络的困难,提出了基于迁移学习的故障诊断方法,即从一个TRU类别数据集上训练的网络所得知识转移到其他TRU类别的网络,有效提高了TRU故障诊断效率和二次电源性能。

神经网络具有训练后的网络模型诊断迅速、泛化性和鲁棒性强等优点,现已广泛应用于飞机电源系统故障诊断领域。神经网络诊断方法需要大量的故障样本,但飞机电源系统难以获得足量的实际运行数据;神经网络对未知故障的处理能力有限,面对特定规律外的新型故障时将无法进行正确的诊断决策;此外神经网络对飞机电源这类复杂系统的映射关系的拟合能力较差,需要综合考虑其他诊断方法的特点进行优势互补。这些局限性都制约着神经网络在飞机电源系统故障诊断领域的发展。

### 4.2.2 基于支持向量机

支持向量机(Support Vector Machine,简称SVM)是基于统计学理论发展的一种针对有限样本的机器学习算法,具有学习速度快,受数据维数





电源系统故障诊断专家系统;夏远飞<sup>[48]</sup>采用正向、逆向两种推理逻辑,基于LabVIEW开发了机载电源故障检测和诊断的专家系统,适合机载电源管理智能化的故障诊断需求,不受被监测系统的影响,但该系统数据监测点较少,知识库获取尚不完备;杨海涛等<sup>[50]</sup>针对某型飞机电源系统典型故障建立了故障树,用产生式规则表示法将故障树知识转换为规则化的专家系统知识,进一步采用正向、逆向和混合推理结合的逻辑构建推理机,提高了飞机电源系统健康管理的智能化水平;张秦岭等<sup>[47]</sup>针对飞机电源的非精确推理问题,基于以PXI总线和虚拟仪器技术为核心的测试系统平台,设计了适用大型无人机电源系统及典型配电结构的故障诊断专家系统,其推理机中应用了正向推理和置信度因子相结合的方式,有效提高了无人机机载电源系统的维修性和可靠性。

专家系统在飞机电源故障诊断领域的应用较为广泛,且随着计算机技术的发展而逐渐趋于完善,但其局限性也十分明显:标准统一性差,知识库构建困难,对于规则较多的复杂系统,存在规则冲突与推理漏洞等问题。这些都在一定程度上限制了专家系统在飞机电源系统故障诊断技术上的研究与应用。

#### 4.2.4 基于模糊逻辑

基于模糊逻辑(Fuzzy Logic,简称FL)的故障诊断旨在模拟人脑方式来实行模糊综合判断,解决传统方法难以应对的规则型模糊信息问题。模糊逻辑理论根据集合论中的隶属函数和模糊关系矩阵建立故障与征兆之间的不确定关系,能够表达界限不清晰的定性知识与经验。在复杂系统的故障诊断领域内,许多研究对象的故障状态是模糊的,采用模糊数学的理论可以有效分析此类故障状况。

Jiang X T<sup>[51]</sup>提出了一种基于三角模糊数(Triangular Fuzzy Number)和灰色关联分析的民用飞机电源系统故障诊断方法。该方法核心思路是将历史故障数据纳入关联度计算,并在整个计算过程中保持模糊特征。即算出各方案与理想方案之间的整体模糊关联度,从而得到最优故障排除方案。同时,为了解决专家系统的模糊表达问题,将语言变量转化为三角模糊数以保持模糊特征,使结果表达准确。

基于模糊逻辑的故障诊断方法计算简单、应

用方便、结论明确直观,具有语言表达能力。它不依赖模型中的复杂关系,也无需精确的诊断模型,能从定性的角度处理不完备的信息。但是,模糊逻辑推理不具有学习能力,难以识别神经网络类型的模式;隶属函数和模糊规则的构造缺少充分可靠的依据,依赖于专家经验,具有一定的主观因素;同时,模糊逻辑的诊断精度易受选取特征的影响,因此一般结合其他诊断方法来弥补不足。

#### 4.2.5 基于证据理论

证据理论<sup>[52]</sup>由Dempster于1967年提出,他的学生Shafer将其进一步完善和推广。D-S证据理论是一种不确定推理方法,满足比贝叶斯概率理论更弱的先验数据条件,在处理不确定、多属性信息和证据收集方面具有显著优势,因此在大型复杂系统的故障诊断领域得以广泛研究和应用。D-S证据理论基于事件发生后的结果(证据),推断出事件发生的原因(假设),并用故障征兆来反映这些故障原因的相关信息。通过对多个证据进行特征融合,逐步缩小其假设范围,进而筛选出精确的诊断结果<sup>[53-56]</sup>。D-S证据理论的融合诊断方法如图10所示。

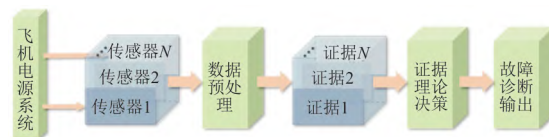


图10 证据理论诊断示意图<sup>[53]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of evidence theory<sup>[53]</sup>

D-S证据理论通过使用信度函数来表示概率的大小,在多个传感器监测被诊断对象的过程中,根据D-S组合规则进行信息融合,得到融合后症状所属故障的信度函数,最后经过证据理论决策规则诊断出故障类型<sup>[57]</sup>。程建兴等<sup>[55]</sup>在分析得到飞机直流电源系统故障基本概率赋值表的基础上,将多种故障报警信息经证据理论决策,并结合基本概率赋值结果,提出了一个准确区分过压和欠流两种故障的方法;吴英<sup>[56]</sup>考虑到D-S证据理论难以处理高度冲突的数据等问题,研究了一种引入历史数据、校正因子并将主观数据和客观数据相结合的民用飞机电源系统故障诊断新方法,对高度冲突的数据融合过程具有很好的识别效果和更快的收敛速度;Jiang X T<sup>[58]</sup>提出了一种基于灰色关联分析和D-S证据相结合的民用飞机电源系统故障诊断方法,将信度作为权重,对相应的权

重进行平均后用传统的 D-S 组合规则将新的权重组合起来,与传统 D-S 证据理论相比能更高效准确地识别故障源。

证据理论利用了多个传感器的互补和冗余信息,在不同层次上获取系统更全面、更准确的状态信息,从而提高了系统状态监测结果的稳定性和可靠性。但是,它要求证据必须是相互独立的,且证据合成规则缺乏坚实的理论支持,其有效性和合理性存在争议。如何有效利用这些信息,以提高故障诊断的准确性并减少虚报和漏报,仍需进一步研究。

4.2.6 基于信号处理

基于信号处理的故障诊断方法利用时域、频域或时频域三种信号模型来分析诊断对象的可测信号,通过信号处理方法如相关性函数、频谱分析、小波变换等,提取诸如方差、幅值、频率等特征信号,当系统的这些特征信号变化超出阈值时,即判定系统发生故障,根据异常的信号来判别故障的性质和发生的部位。

Jing T 等<sup>[59]</sup>采用短时傅里叶变换(STFT)对组合驱动发电机(IDG)仿真结果的异常基带电压信号、异常谐波电压信号和由两种不同故障引起

的异常电压信号进行分析,通过检测飞机 IDG 电压信号的时域和频域幅度来进行故障诊断。但 STFT 的时频域窗口固定不能根据信号的频率来改变,导致其分析信号不全面,诊断容易出现缺漏;Kiran 等<sup>[60]</sup>针对飞机二次电源的变压整流器(TRU),采用希尔伯特变换(HHT)导出健康指数参数(HIP),并用快速傅里叶变换(FFT)和小波变换提取特征来对 TRU 内的部件进行故障定位,但其没有考虑到 HHT 导致的模态混叠问题。基于信号处理的故障诊断关注系统的可测信号和特征提取方法,避免了大型系统复杂困难的建模过程,在飞机电源系统故障诊断领域中得到了一定应用,但该方法缺少了系统模型的支撑,忽视了系统内部深层知识的逻辑分析以及子系统间的关联性和约束性。系统内部参数一旦发生变化,诊断规则可能不再适用,容易出现误诊断、漏诊断等问题。

4.3 方法比较和面临的挑战

整合对比上述诊断方法的准确度、数据需求量、实现难易程度、适用性和优缺点,结果如表 3 所示。

表 3 飞机电源系统故障诊断方法比较  
Table 3 Comparison of fault diagnosis methods for aircraft power supply system

故障诊断方法	准确度	数据需求 量	适用性	优点	缺点	
基于模型	故障树 <sup>[61]</sup>	中等	少	适用于分析系统内的故障逻辑关系	直观,逻辑性强	实现困难,易错漏
	故障传播图 <sup>[62]</sup>	中等	少	适用于快速诊断故障传播路径	简单直观,诊断快速	实现困难,表示不全面
	Petri网 <sup>[63]</sup>	中等	少	适用于并行和连锁的故障模式	简单明晰	易冲突,易误诊断
	定性仿真 <sup>[64]</sup>	中等	少	适用于定性验证故障模型	实现容易	不能检测未知故障
基于数据驱动	神经网络 <sup>[65]</sup>	中等	多	适用于大规模数据集和复杂系统的诊断	诊断快,实现容易	数据需求多,鲁棒性一般
	支持向量机 <sup>[66]</sup>	高	少	适用于小样本、非线性及高维的故障模式	诊断快,鲁棒性强	难以解决多分类问题
	专家系统 <sup>[67]</sup>	中等	中等	适用于知识规则完备的系统的诊断	诊断快,可解释性强	知识库构建难,标准统一性差
	模糊逻辑 <sup>[68]</sup>	中等	中等	适用于诊断不确定性和模糊性的故障模式	实现容易,数据需求少	可解释性差
	D-S证据理论 <sup>[69]</sup>	高	中等	适用于诊断不确定性和多属性的故障模式	实现容易,准度高	计算量大
	信号处理 <sup>[70]</sup>	中等	中等	适用于可测信号特征复杂的系统的诊断	实用性强,灵敏度高	易误诊断、易错漏

飞机电源系统故障诊断方法的选择取决于具体的故障模式、数据可用性以及应用场景,不同方法各有优缺点,需要根据实际情况综合考虑。这些飞机电源系统故障诊断技术要应用到实际系统中,仍然面临许多问题需要解决,主要体现以下 3 个方面:

- 1) 如何掌握飞机电源运行中的故障规律。飞机电源系统是一个内部运行机理复杂、系统参数动态变化且外部环境复杂多变的非线性系统,运行中的故障发展规律难以用建立故障数学模型的方式来分析。
- 2) 如何对飞机电源的状态进行全面精确检

测。在地面,由于飞机电源系统不处于运行状态,只能通过人工使用各种仪表测量各个元器件的参数和指标来检测,这种方法效率低,而且由于人为和环境因素的影响,结果不一定准确。在机内自检,只能监测几个重要的数据指标来判断飞机电源的状态,不能进行状态的全面检测。如何发展全面精确的飞机电源状态检测技术,滤除人为和环境因素对检测结果的影响,是未来需解决的主要问题。

3) 如何建立故障和征兆之间的准确关系。飞机电源系统由多个部件、子系统组成,每个部件都有多个故障模式。不同的故障模式可能导致相似的征兆,从而使得建立故障和征兆之间的准确关系变得非常复杂。如何理清故障和征兆之间的对应关系,需要发展创新性的检测思路和解决策略。

## 5 飞机电源系统故障诊断发展趋势

结合国内外飞机电源系统故障诊断的研究现状和全寿命周期健康管理的需求,飞机电源系统故障诊断的主要发展趋势可概括为以下5点:

### 1) 基于定性和定量的综合诊断方法

飞机电源系统是一个高度耦合的复杂系统,选择故障诊断方法的主要因素是系统先验信息。考虑到飞机电源系统运行成本高,实际航行的故障数据少且获取困难。在定量数据缺乏的情况下,定性的故障诊断方法是首要选择。使用定性方法便于建立诊断模型,但提供的诊断结果简单粗糙,且可能发生组合爆炸问题。如果在定性模型的基础上引入定量信息,结合定性知识和定量数据,采用定性和定量的综合故障诊断方法,可有效改善故障诊断策略,获得更加精确的故障诊断结果。由于基于定性和定量的综合故障诊断拥有广泛的实际需要和应用价值,是飞机电源系统故障诊断技术中富有前景的发展方向。

### 2) 飞机电源系统数据融合诊断方法

通过数据融合和大数据分析挖掘隐含的知识实现飞机电源故障或失效的高可靠性诊断是当前的研究热点。多源数据融合是指在飞机电源系统故障诊断过程中将多种信息源综合分析,以提高故障诊断的准确性和效率。这些信息源主要有以下3个渠道,一是表征电源系统工作状态的多种传感器数据,包括各个关键设备的电流、电压、频率、温度和压力等;二是记录电源系统运行趋势和历

史故障等信息的历史航行数据;三是通过仪表盘等提供的机组反馈数据,以声音、图像、文字等形式及时告警电源系统的异常现象。将多种传感器、多个渠道获取的信息进行数据融合,产生比单一信息源更精确、更完全、更可靠的估计和判断,有助于更精确地对故障进行隔离、诊断,甚至预测故障。从而构建飞机电源部件级和系统级的健康评估指标,提高飞机电源故障诊断的准确性。

### 3) 多层次故障诊断和容错

飞机电源是一个多层次、高冗余的非线性系统,其故障与征兆往往不存在一一对应关系,且故障容易跨层次传播。因此有必要研究飞机电源系统多层次的故障诊断策略,通过合理划分系统层次,针对性地给出每个层次的故障诊断方法,从而逐层识别和隔离故障,缩小故障检测范围,提高故障诊断的效率和准确性;或设计一个适用于多层次的故障容错拓扑,实现故障后冗余拓扑的在线重构,提高飞机电源系统运行的安全性和可靠性。

### 4) 飞机电源系统动态实时监测

现在航空电源和绝大多数的机载设备是在地面进行全面的保养和维护,采用专用地面测试设备和测试软件来检测机载电源系统的参数。这种传统的诊断方法只能离线解决事先记录的故障问题,没有自组织、自学习功能。如前文所述,飞机电源系统故障诊断领域已发展了基于模型和基于数据的两大类诊断技术,未来的趋势是整合上述方法,将飞机电源系统的状态信息从前端的传感器信号到后端的决策执行过程综合为一个整体系统来管理,发展一体化的飞机电源全寿命周期健康管理技术。首先利用先进传感器获得实时信号,并通过搭载的微处理器对监测的飞机电源动态数据做出即时反应,进而定位故障所处位置,给出针对故障的决策建议,最终实现故障检测、诊断、预测以及决策执行的自动化与智能化。

### 5) 基于无历史数据的健康管理技术

基于无历史数据的健康管理技术旨在解决飞机电源系统由于保密性和数据获取困难等原因而缺乏真实历史数据的问题。这种方法利用系统运行前期积累数据,并结合虚拟模型进行故障预测和健康管理,减少了对真实历史数据的依赖性。通过收集飞机电源系统中各个关键设备正常运行时的数据信息,并结合虚拟模型对系统工作原理、性能特征和相互作用进行模拟和研究,从而预测潜在故障并监测飞机电源系统的健康状态。这种



基于无历史数据的健康管理技术可极大提高机载电源健康管理系统的准确性,为飞机电源系统提供更可靠的运行保障。

## 6 结束语

本文从基于模型和基于数据两方面分别综述了飞机电源系统故障诊断技术的研究进展。由于飞机电源系统具有高冗余、强耦合和非线性等特点,且系统参数存在不确定性和时变性,再加上难以预料的不规则扰动与噪声,如今领域内尚未建立精确完整且包含所有内部约束条件的定量模型。因此故障诊断领域中常用的定量方法如状态估计法、参数估计法和观测器法难以在复杂的飞机电源系统中得到应用并取得成效。而基于定性模型的方法如故障树、故障传播图、Petri网和定性仿真不依赖精确的定量化数学模型,便于用定性的知识表示方法进行诊断和决策,一定程度上能满足飞机电源系统故障诊断的需要。基于数据驱动的飞机电源故障诊断方法是未来有望得到实际应用的关键技术。通过融合强大的计算机技术、先进传感技术和通讯技术,可以实现飞机电源系统的实时监测和故障诊断,进而发展一体化的飞机电源系统健康管理技术。但面对飞机电源系统故障机理复杂、监测指标匮乏和数据支撑有限等挑战,飞机电源系统故障诊断方法得到工程应用还有很多难题需要突破和解决。

## 参考文献

- [1] CANO T C, CASTRO I, RODRÍGUEZ A, et al. Future of electrical aircraft energy power systems: an architecture review[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1915-1929.
- [2] 齐扬, 李伟林, 吴宇, 等. 航空推进电源系统研究综述[J]. 电源学报, 2022, 20(5): 51-59.  
QI Yang, LI Weilin, WU Yu, et al. Review of research on power systems for aerospace propulsion[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(5): 51-59. (in Chinese)
- [3] SCHEFER H, FAUTH L, KOPP T H, et al. Discussion on electric power supply systems for all electric aircraft[J]. IEEE Access, 2020, 8: 84188-84216.
- [4] ARABUL A Y, KURT E, KESKIN A F, et al. Perspectives and development of electrical systems in more electric aircraft[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2021, 103: 5519842.
- [5] 朱洪翔, 董青, 张迪. 基于FPGA的机载交流电源参数测试系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1): 138-141.
- ZHU Hongxiang, DONG Qing, ZHANG Di. Design and implementation of airborne AC power parameter test system based on FPGA[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(1): 138-141. (in Chinese)
- [6] 黄根全. 航空电源故障特征提取与故障诊断研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.  
HUANG Genquan. Research on fault feature extraction and fault diagnosis of aviation power supply[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)
- [7] 聂同攀, 曾继炎, 程玉杰, 等. 面向飞机电源系统故障诊断的知识图谱构建技术及应用[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 40-56.  
NIE Tongpan, ZENG Jiyan, CHENG Yujie, et al. Knowledge graph construction technology and its application in aircraft power system fault diagnosis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(8): 40-56. (in Chinese)
- [8] 李永东, 章玄, 许烈. 多电机高压直流供电系统稳定性研究综述[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 2-11.  
LI Yongdong, ZHANG Xuan, XU Lie. A survey on stability analysis for HVDC power system in MEA[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 2-11. (in Chinese)
- [9] 万伟悦, 严仰光. 现代飞机电源系统及其发展[J]. 黑龙江科技信息, 2011(3): 47-48.  
WAN Weiyue, YAN Yangguang. Modern aero-power supply systems and its development[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(3): 47-48. (in Chinese)
- [10] 程国华. 大型民用飞机电源系统的现状与发展[J]. 民用飞机设计与研究, 2008, 75(4): 1-5.  
CHENG Guohua. Current situation and development of power supply system for large civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2008, 75(4): 1-5. (in Chinese)
- [11] 刘凯, 李德营. 现代战机电源系统信号模拟和故障诊断装置[C]// 2015年第二届中国航空科学技术大会. 北京: 中国航空学会, 2015: 3-11.  
LIU Kai, LI Deying. The signal simulation and fault diagnosis device of modern aircraft power system[C]// The Second China Aviation Science and Technology Conference in 2015. Beijing: CSAA, 2015: 3-11. (in Chinese)
- [12] 王自强, 江亮亮. 基于模型的故障诊断在飞机电源系统中的应用[J]. 飞机设计, 2014, 34(5): 20-24.  
WANG Ziqiang, JIANG Liangliang. Application of model-based fault diagnosis in aircraft electric power system[J]. Aircraft Design, 2014, 34(5): 20-24. (in Chinese)
- [13] 翁诚. 飞机GCU自测试功能研究及故障分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2012.  
WENG Cheng. Aircraft GCU build-in-test function research and fault analysis[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2012. (in Chinese)
- [14] 贺建军. 基于FPGA的飞机直流供电系统故障检测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
HE Jianjun. Research on fault detection of aircraft DC power supply system based on FPGA[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

- [15] 李运富. 飞机二次电源故障模式分析与故障特征提取[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.  
LI Yunfu. Analysis of aircraft secondary power failure mode and fault feature extraction[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [16] 付阶辉. 基于 Petri 网的故障诊断方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.  
FU Jiehui. Research on fault diagnosis methods based on petri net[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- [17] 张元峰, 郝世勇, 于春风. 飞机电源系统状态监测与故障诊断技术研究[J]. 设备管理与维修, 2017(6): 27-29.  
ZHANG Yuanfeng, HAO Shiyong, YU Chunfeng. Research on condition monitoring and fault diagnosis technology of aircraft power system[J]. Plant Maintenance Engineering, 2017(6): 27-29. (in Chinese)
- [18] 董鹏辉, 沈婷, 徐黎, 等. 基于机载电源管理装置电源系统故障诊断技术研究[C]// 2018(第七届)民用飞机航电国际论坛. 上海: 中国航空学会, 2018: 77-80.  
DONG Penghui, SHEN Ting, XU Li, et al. Fault diagnosis technology research of power supply system based on airborne power management installation[C]// 2018(7th) Civil Aircraft Avionics International Forum. Shanghai: CSAA, 2018: 77-80. (in Chinese)
- [19] 龙欣欣. 飞机电源系统 BIT 技术的发展及其应用[J]. 科技创新与应用, 2014(29): 117.  
LONG Xinxin. Development and application of BIT technology in aircraft power system[J]. Technology Innovation and Application, 2014(29): 117. (in Chinese)
- [20] ZHANG Z L, SHI X J, LYU J P, et al. Research on BIT false alarm suppression technology of airborne power system based on genetic BP neural network[C]// 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Kunming, China: IEEE, 2021: 3752-3757.
- [21] NARASIMHAN S, BISWAS G. Model-based diagnosis of hybrid systems[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A-Systems and Humans, 2007, 37(3): 348-361.
- [22] 和麟, 王彦松, 张慧敏, 等. 故障传播模型的飞机电源系统故障诊断研究[J]. 机械与电子, 2012(9): 7-11.  
HE Lin, WANG Yansong, ZHANG Huimin, et al. Research of aircraft power supply system diagnosis based on fault propagation graph[J]. Machinery & Electronics, 2012(9): 7-11. (in Chinese)
- [23] 薄海涛, 白振兴. 基于故障树和神经网络的飞机电源系统故障诊断[J]. 自动化与仪表, 2005, 20(4): 65-67.  
BO Haitao, BAI Zhenxing. Fault diagnosis of aircraft electric power system based on fault tree and neural network[J]. Automation & Instrumentation, 2005, 20(4): 65-67. (in Chinese)
- [24] 朱新宇, 沈颂华. 基于故障树的某型飞机电源 BIT 分析[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2000, 17(1): 8-11.  
ZHU Xinyu, SHEN Songhua. An analysis of some aircraft electrical power system BIT based on fault tree[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2000, 17(1): 8-11. (in Chinese)
- [25] 黄政庭, 王仲生. 基于 DFT 的飞机电源网络化故障诊断方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(24): 233-235, 238.  
HUANG Zhengting, WANG Zhongsheng. Networked fault diagnosis method of aircraft power supply based on dynamic fault tree[J]. Computer Engineering, 2011, 37(24): 233-235, 238. (in Chinese)
- [26] 李莉, 于沛, 吴志川, 等. 故障字典技术在机载电源系统故障诊断中的应用[J]. 光电与控制, 2015, 22(11): 72-75.  
LI Li, YU Pei, WU Zhichuan, et al. Application of fault dictionary technology in fault diagnosis of airborne power supply system[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(11): 72-75. (in Chinese)
- [27] 黄泽波, 李占峰, 熊亮, 等. 基于故障树分析法与寻址技术的航空电源系统故障诊断系统[J]. 兵工自动化, 2018, 37(10): 51-56.  
HUANG Zebo, LI Zhanfeng, XIONG Liang, et al. Fault diagnosis system of aviation power system based on fault tree analysis and addressing technology[J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37(10): 51-56. (in Chinese)
- [28] 陈侃, 李昌禧. 故障传播有向图的故障定位研究[J]. 自动化仪表, 2011, 32(4): 14-17.  
CHEN Kan, LI Changxi. Research on the fault localization based on directional graphic of fault propagation[J]. Process Automation Instrumentation, 2011, 32(4): 14-17. (in Chinese)
- [29] 吴玉彬, 张合新, 吕永佳. 故障传播有向图在地面电源故障诊断的应用[J]. 现代防御技术, 2012, 40(1): 154-159.  
WU Yubin, ZHANG Hexin, LYU Yongjia. Application of fault propagation digraph for ground power fault diagnosis[J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(1): 154-159. (in Chinese)
- [30] XU P, MA Q S. The fault diagnosis of aircraft generator using fuzzy Petri nets[C]// 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China: IEEE, 2010: 1-4.
- [31] 王修岩, 薛斌斌, 李宗帅. 基于 Petri 网的飞机交流发电机故障诊断系统研究[J]. 中国民航大学学报, 2012, 30(1): 23-25.  
WANG Xiuyan, XUE Binbin, LI Zongshuai. Research on fault diagnosis expert system of aircraft AC generator based on fault Petri net[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2012, 30(1): 23-25. (in Chinese)
- [32] 何新贵. 模糊 Petri 网[J]. 计算机学报, 1994, 17(12): 946-950.  
HE Xingui. Fuzzy Petri nets[J]. Chinese Journal of Computers, 1994, 17(12): 946-950. (in Chinese)
- [33] 杨大光, 常波. 模糊故障 Petri 网在飞机电源系统故障诊断中研究[J]. 装备制造技术, 2016(11): 18-22.  
YANG Daguang, CHANG Bo. Research method of fault diagnosis based on fuzzy fault Petri net for aircraft electrical

- power system [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(11): 18-22. (in Chinese)
- [34] KUIPERS B J. Reasoning with qualitative models[J]. Artificial Intelligence, 1993, 59(1/2): 125-132.
- [35] SKLIROS C, ALI F, JENNIONS I. Fault simulations and diagnostics for a Boeing 747 auxiliary power unit[J]. Expert Systems With Applications, 2021, 184: 115504.
- [36] 邓蕾蕾, 张献. 基于定性仿真理论的故障检测与诊断[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(5): 79-83.  
DENG Leilei, ZHANG Xian. Fault detection and diagnosis based on qualitative simulation[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2012, 17(5): 79-83. (in Chinese)
- [37] 赵文浩, 阎威武. 基于数据驱动的故障诊断研究[J]. 微计算机信息, 2010, 26(28): 104-106.  
ZHAO Wenhao, YAN Weiwu. Research on fault diagnosis based on data-driven[J]. Control & Automation, 2010, 26(28): 104-106. (in Chinese)
- [38] LIU F C, HUO W J, HAN Y, et al. Study on network security based on PCA and BP neural network under green communication[J]. IEEE Access, 2020, 8: 53733-53749.
- [39] 程建兴, 史仪凯. 基于Elman神经网络的飞机电源系统欠压故障诊断研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(8): 90-92, 96.  
CHENG Jianxing, SHI Yikai. Under-voltage fault diagnosis of aircraft power supply system based on Elman neural network[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(8): 90-92, 96. (in Chinese)
- [40] CHENG B Y, SHI S, HUANG K, et al. Fault diagnosis of aircraft power system based on long short-term memory network[C]// 2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Xi'an: IEEE, 2021: 1438-1442.
- [41] LIU Q, LIANG T, HUANG Z, et al. Real-time FPGA-based hardware neural network for fault detection and isolation in more electric aircraft[J]. IEEE Access, 2019, 7: 159831-159841.
- [42] CHEN S W, GE H J, LI H, et al. Hierarchical deep convolution neural networks based on transfer learning for transformer rectifier unit fault diagnosis[J]. Measurement, 2021, 167: 108257.
- [43] 贾临生, 姜鹏, 刘星. 非线性支持向量机在航空电源系统故障预测中的应用[J]. 飞机设计, 2015, 35(6): 46-49, 53.  
JIA Linsheng, JIANG Peng, LIU Xing. Failure prediction about air power system based on the theory of non-linear SVM[J]. Aircraft Design, 2015, 35(6): 46-49, 53. (in Chinese)
- [44] MU J J. Research on fault diagnosis of electrical system of medium transport aircraft based on machine learning algorithm[C]// 2021 IEEE 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICIS-CAE). Dalian: IEEE, 2021: 436-440.
- [45] 姜舟. 飞机电源故障诊断专家系统的应用研究[J]. 科技风, 2015(10): 130.  
JIANG Zhou. Application research of expert system for aircraft power fault diagnosis [J]. Technology Wind, 2015(10): 130. (in Chinese)
- [46] 刘鑫, 顾焕涛. 基于专家系统的多电民用飞机电源系统故障诊断研究[C]// 飞机机电系统理论与实践——第二届民用飞机机电系统国际论坛论文集. 南京: 中国航空学会, 2015: 10-13.  
LIU Xin, GU Huantao. The research of fault diagnosis of power system of civil more electric plane based on expert system[C]// Theory and Practice of Aircraft Electromechanical Systems—The Second International Forum on Civil Aircraft Electromechanical Systems. Nanjing: CSAA, 2015: 10-13. (in Chinese)
- [47] 张秦岭, 郭宏, 姜旭. 大型无人机电源系统故障诊断专家系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(8): 1026-1030.  
ZHANG Qinling, GUO Hong, JIANG Xu. Fault diagnosis expert system for electric power system of large-scale UAVs [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(8): 1026-1030. (in Chinese)
- [48] 夏远飞. 基于LabVIEW的飞机电源故障诊断专家系统[J]. 信息化研究, 2012, 38(4): 41-44.  
XIA Yuanfei. Expert system for fault diagnosis of aircraft power supply system based on LabVIEW [J]. Informatization Research, 2012, 38(4): 41-44. (in Chinese)
- [49] 庄绪岩, 徐亚军, 勇包. 飞机电源系统故障诊断专家系统研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(15): 117-120.  
ZHUANG Xuyan, XU Yajun, YONG Bao. Study on fault diagnosis expert system for aircraft power supply system[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(15): 117-120. (in Chinese)
- [50] 杨海涛, 于克杰, 曹俊彬. 某型飞机电源故障诊断专家系统设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(4): 204-207.  
YANG Haitao, YU Kejie, CAO Junbin. Designing fault diagnosis expert system for electrical power of certain type aircraft and its application[J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(4): 204-207. (in Chinese)
- [51] JIANG X T. Fault diagnosis of civil aircraft electrical power system based on triangular fuzzy number and grey relational analysis[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2258: 012070.
- [52] 尚跃庭, 陈海松, 印祝宸, 等. 基于证据理论的装备损伤定位方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(10): 1786-1789, 1802.  
SHANG Yueting, CHEN Haisong, YIN Zhuchen, et al. Engineering equipment damage localization method based on evidence theory [J]. Computer and Digital Engineering, 2015, 43(10): 1786-1789, 1802. (in Chinese)
- [53] 郎国伟, 周东方, 胡涛, 等. 基于D-S证据理论的故障诊断方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(3):



- 465-468.
- LANG Guowei, ZHOU Dongfang, HU Tao, et al. Fault diagnosis method based on the D-S evidence theory [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(3): 465-468. (in Chinese)
- [54] 屈志宏, 杨传道, 李方. 基于 D-S 证据理论信息融合的故障诊断方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(4): 107-110.
- QU Zhihong, YANG Chuandao, LI Fang. Fault diagnosis method based on D-S evidence theory information fusion [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2008(4): 107-110. (in Chinese)
- [55] 程建兴, 史仪凯. 基于多传感器数据融合的飞机电源系统故障诊断[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(8): 184-187.
- CHENG Jianxing, SHI Yikai. Aircraft power system fault diagnosis based on multi-sensor data fusion[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(8): 184-187. (in Chinese)
- [56] 吴英. 基于证据理论的民机电源系统故障诊断方法[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(8): 5-10.
- WU Ying. Fault diagnosis of civil aircraft electrical power system based on evidence theory[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(8): 5-10. (in Chinese)
- [57] 李伟, 梁玉英, 朱赛. 基于神经网络和证据理论的信息融合在故障诊断中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(11): 2888-2890, 2893.
- LI Wei, LIANG Yuying, ZHU Sai. Fault diagnosis based on neural network and evidence theory information fusion [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(11): 2888-2890, 2893. (in Chinese)
- [58] JIANG X T. A novel conflicting evidence combination method for fault diagnosis of civil aircraft electrical system [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2252: 012064.
- [59] JING T, YANG C Y, YANG Y W, et al. Simulation and fault detection for aircraft IDG system [J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 2533-2537.
- [60] KIRAN P V R, RAJEEV A, BALASUBRAMANIAN N, et al. A novel data fusion method for incipient fault detection in TRU of aircraft electrical system[C]// ISSS International Conference on Smart Materials, Structures and Systems. Bangalore: NAL, 2014: 558.
- [61] 崔铁军, 李莎莎. 空间故障树与空间故障网络理论综述[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 399-405.
- CUI Tiejun, LI Shasha. Revision of the space fault tree and the space fault network system[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(2): 399-405. (in Chinese)
- [62] 薛蛟. 基于故障传播模型的航电系统安全性分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2021.
- XUE Jiao. Safety analysis of avionics system based on fault propagation model [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021. (in Chinese)
- [63] 方欢, 方贤文, 王丽丽. Petri 网在可靠性分析中的研究综述[J]. 计算机科学, 2014, 41(7): 40-44.
- FANG Huan, FANG Xianwen, WANG Lili. Review of reliability analysis based on Petri nets [J]. Computer Science, 2014, 41(7): 40-44. (in Chinese)
- [64] 刘广峰. 定性仿真理论研究及其应用[J]. 福建电脑, 2008(3): 1-2.
- LIU Guangfeng. Research and application of qualitative simulation theory [J]. Fujian Computer, 2008(3): 1-2. (in Chinese)
- [65] 张宏涛, 王仲生. 飞机电气系统故障诊断技术新进展[J]. 航空制造技术, 2012(20): 66-69.
- ZHANG Hongtao, WANG Zhongsheng. Advance in fault diagnosis for aircraft electrical system [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(20): 66-69. (in Chinese)
- [66] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 1-10.
- DING Shifei, QI Bingjuan, TAN Hongyan. An overview on theory and algorithm of support vector machines [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 1-10. (in Chinese)
- [67] 杜江, 任滢. 故障智能诊断专家系统模型研究[J]. 光电技术应用, 2009, 24(4): 73-76.
- DU Jiang, REN Ying. An expert systems model of malfunction intelligent diagnose [J]. Electro-Optic Technology Application, 2009, 24(4): 73-76. (in Chinese)
- [68] 崔韦达, 李泽滔. 基于定量知识数据驱动故障诊断方法的研究综述[J]. 新型工业化, 2018, 8(9): 69-72, 81.
- CUI Weida, LI Zetao. Research on fault diagnosis method based on quantitative knowledge data driven [J]. The Journal of New Industrialization, 2018, 8(9): 69-72, 81. (in Chinese)
- [69] 刘帅彤, 李晓军, 周志杰, 等. 证据理论在模式分类中的应用综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(3): 247-258.
- LIU Shuitong, LI Xiaojun, ZHOU Zhijie, et al. Review on the application of evidence theory in pattern classification [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(3): 247-258. (in Chinese)
- [70] 张妮, 车立志, 吴小进. 基于数据驱动的故障诊断技术研究现状及展望[J]. 计算机科学, 2017, 44(s1): 37-42.
- ZHANG Ni, CHE Lizhi, WU Xiaojin. Present situation and prospect of data-driven based fault diagnosis technique [J]. Computer Science, 2017, 44(s1): 37-42. (in Chinese)

(编辑: 马文静)