

# 飞机电气系统故障诊断技术新进展\*

## Advance in Fault Diagnosis for Aircraft Electrical System

西北工业大学航空学院 张宏涛 王仲生

**[摘要]** 分析了飞机电气系统的组成及特点;探讨了飞机电气系统故障检测与诊断的方法,对控制电气系统的故障、提高设备工作可靠性具有一定的指导意义;讨论了飞机电气系统故障诊断的最新研究成果及研究热点:基于信号处理的小波变换分析、智能方法下的神经网络和模糊逻辑控制及综合应用技术,并探讨了飞机电气系统故障诊断技术的发展趋势。

**关键词:** 飞机电气系统 故障诊断 小波变换

**[ABSTRACT]** Aircraft electrical system plays an important role in the aircraft, and is the main factors affecting flight safety. The aircraft electrical system composition and characteristics are analyzed, the aircraft electrical system fault detection and diagnosis methods are discussed, which has a certain guiding significance to control electrical system failures and improve equipment working reliability. The latest research results and hot spots of aircraft electrical system fault diagnosis are discussed: the wavelet transforms analysis which based on signal processing, intelligence methods of neural network and fuzzy logic control and comprehensive application technology. Meanwhile, the development tendency of aircraft electrical system fault diagnosis technology is probed.

**Keywords:** Aircraft electrical system Fault diagnosis Wavelet transform

飞机在运行途中机外电气系统会受到剧烈的空气环境作用和外来物体干扰,机内也会受到电、热、机械、电网电压、负载性质、安装环境、产品质量等各种因素的作用。恶劣的环境和超技术范围的运行使飞机性能逐渐劣化,最终导致飞机电气故障产生。飞机飞行操纵、发动机控制、航空电子、电动机械、生命保障、武器操纵、照明与信号、防冰加温和旅客生活服务等系统<sup>[1]</sup>都要依靠飞机电气系统。电气系统一旦发生故障,即使是停止工作的时间极短,也会造成局部或大区域的停电,从而造成巨大的损失。随着电气系统在飞机上广泛的应用,

电气系统所占比重也越来越大,能否保证其正常发挥效能已成为影响航空安全的主要因素。因此,研究飞机电气系统故障诊断技术具有十分重要的意义。

### 1 飞机电气系统的组成与特点

#### 1.1 组成

飞机电气系统包括供电系统和用电设备两大部分,如图1所示。供电系统包括飞机电源系统和飞机配电系统,前者用于产生和调节电能;后者用以分配和管理电能<sup>[2]</sup>。用电设备包括飞机飞行操纵、发动机控制、航空电子、电动机械、生命保障、武器操纵、照明与信号、防冰加温和旅客生活服务等系统。

飞机供电系统的作用是可靠地向用电设备,尤其是与安全飞行直接有关的重要用电设备提供符合要求的电能。

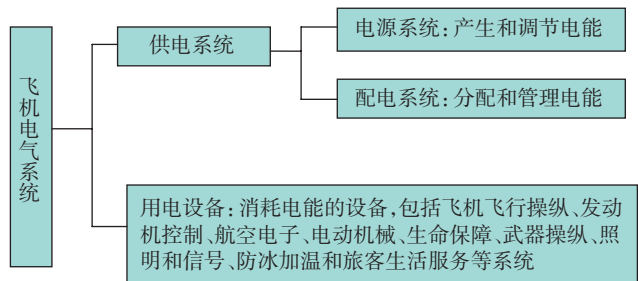


图1 飞机电气系统组成框图

Fig.1 Diagram of aircraft electrical system composition

#### 1.2 特点

##### 1.2.1 电源系统特点

飞机电源系统是飞机供电系统的一部分,是飞机上电能产生、调节、控制和电能变换部分的总称,通常由主电源、二次电源、辅助电源、应急电源及外部电源等构成,通常所说的飞机电源类型指的是主电源类型<sup>[3]</sup>。图2为一个典型四通道交流电源系统示意图<sup>[4]</sup>,整个电源系统采用四通道布局:1、2通道的发电机安装在飞机左侧的2台发动机上;3、4通道的发电机安装在飞机右侧的2台发动机上。每个通道由组合传动发电机(IDG)、发电机控制装置(GCU)、主接触器、互感器、发电机控制开关等组成。

\* 国家自然科学基金(51075330)资助。

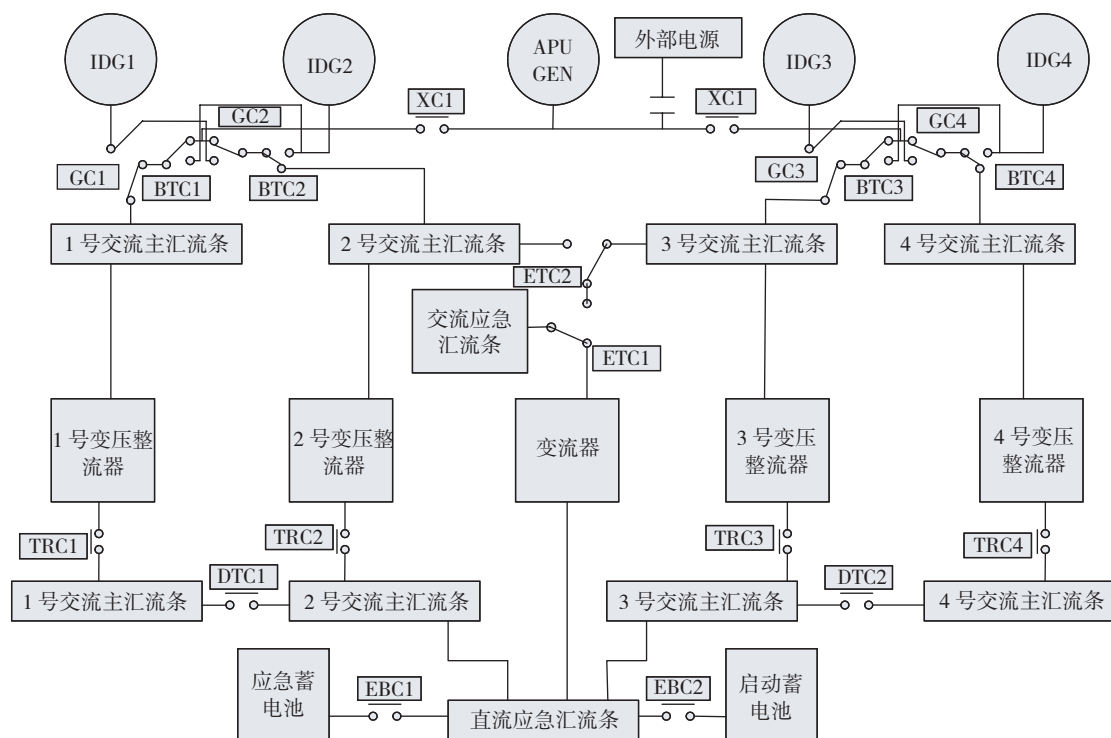


图2 飞机电源系统原理简化图  
Fig.2 Diagram of aircraft power system

备之一。飞机在飞行过程当中,电气系统一旦发生故障,后果将不堪设想。

某型飞机电气设备故障包括:发动机启动电气控制系统故障、发动机综合电子调节控制系统故障、进气道自动调节控制系统故障、飞机操纵电气控制系统故障、飞机燃油电气控制系统故障、飞机环境控制系统故障、飞机照明和灯光信号系统故障、机载检测报告警告系统故障<sup>[7]</sup>。

### 1.2.2 配电系统特点

飞机配电系统是飞机发电机与地面或应急电源的电能进行转换、传输、分配与控制保护的系统。它由馈电电缆、汇流条、配电板以及配电器件等组成。配电系统保证对飞机各部分可靠地输配电能,管理各类电气负载并保护用电设备<sup>[5]</sup>。

不同用电设备的重要性及其在飞行中各个阶段的作用也不尽相同,在巡航、战斗、起飞、着陆等各阶段可实行不同的负载管理方案。出现故障时,管理方式更应改变。在飞行中,需要综合考虑各种因素以决定怎样切换负载,或转换为应急供电等,来确保对重要设备可靠供电。负载管理方式分为人工管理和自动管理两种,前者由空勤人员判断操作,后者由计算机按预先设计好的管理方案自动进行。负载自动管理可以使电网经常处于最佳状态。

### 1.2.3 用电设备特点

用电设备是从供电系统接受电功率的单个装置或者整套装置,根据机上安装时要求的线路电压降(调压点与用电设备功率输入端之间电压差)不同,分为A、B、C共3类<sup>[6]</sup>。

## 2 飞机电气系统故障检测与诊断的方法

### 2.1 飞机电气系统的主要故障

飞机电气系统是保障飞机正常运行的最主要的设

### 2.2 传统飞机电气系统故障诊断方法

飞机电气系统运行受很多因素影响,机外如大气压力、大气温度、恶劣天气、外来飞行物等;机内如电网电压、负载性质、安装环境、产品质量等,恶劣的环境和超技术范围的运行。这些都是导致故障产生的主要原因。飞机上庞杂的电气系统征兆参数逐渐恶化,并失去原有的性能。有效及时地通过各种检测技术和信号分析理论分离不正常状态信息,并诊断出故障隐患是实现可靠运行、减少维修率、提高生产效率的重要措施。传统飞机电气系统故障检测与诊断主要有以下几种方法:

#### (1) 感观诊断法<sup>[8]</sup>。

电气系统发生故障多表现为发热异常、冒烟、产生火花、机械设备工况突变等。这些现象通过专家的眼观、耳听、手摸或鼻嗅,就可直观地发现故障所在部位。

#### (2) 检测试验装置测量法。

常用的检测方法有绝缘试验、带电温度计、接地试验、超声波检测、X射线检测及新型漏电流表检测等<sup>[9]</sup>。目前,用于电机设备故障诊断的方法有离线诊断和在线诊断,而在故障发生后进行的离线诊断占有相当大的比例,这给正常的生产工作,带来极大的影响和损失。而在线诊断具有良好的实时性,对于及时发现早期的故障隐患是非常有利的。

感官诊断虽然投资少,但如果故障达到一定程度,可靠性差。试验装置检测所需检测的设备有多种,然而

对于某一个监视系统,由于考虑到投资和系统的复杂性等原因,在实际中难以实现。因此电气设备故障诊断的另一个重点是如何在便于获取的信号(如电流、电压等)中提取足够可靠的信息来综合判断出潜在的故障。由于常见故障的传统诊断方式既需要庞杂的检测设备,又大多为离线诊断,且需要较多的专业知识,因而这些方法已不适用于中、小型电机设备的在线检测<sup>[10]</sup>。因此,所需检测设备少,诊断快速、有效的新颖诊断理论和方法对于推电机设备故障诊断技术的应用是至关重要的。

(3)综合诊断方法。

近年来在电气系统检测中,多种方法已得到应用并且不断发展,但仍然存在许多问题,如测试设备功能单一、自动化程度低、效率低等。随着机械设备的不断发展,其结构越来越复杂,高新技术含量不断增加,单纯依赖于某一种诊断方法已不能满足测试的实际需要。故障诊断中的误报、漏报已成为难于解决的问题。为了提高电气系统故障检测与诊断的水平,就必须将各种方法相互融合,以取长补短,使故障诊断与检测更为准确和有效。基于计算机测控系统的电气系统综合诊断应运而生。其中计算机测控系统是通过软硬件自动控制诊断,并对发电机的激磁电流、输出电压、电流、转速等信号进行采集,通过串行总线上报给主控计算机,然后作相应计算、处理和数据融合,从而进行更为准确可靠地故障定位、故障分析和故障诊断,最后显示出诊断结果。

2.3 现代飞机电气系统故障诊断方法

故障诊断技术发展至今,已经提出了大量的方法,目前主要有:基于解析模型的方法、基于信号处理的方法、基于知识的方法<sup>[11-13]</sup>。

基于解析模型的方法发展最早,此方法需要建立诊断对象的比较精确的数学模型,它又可分为参数估计法、状态估计法和等价空间法等。基于信号处理的方法回避了抽取对象数学模型的难点,直接利用信号模型,适用于线性、非线性系统。其中的热点是基于小波分析技术的故障诊断方法。基于信号处理的方法大致可分为:盲源分离法、小波变换法、HHT法、时变自回归法等。

基于知识的方法也不需要系统的定量数学模型,它引入了诊断对象的许多信息,可以充分利用专家诊断知识等,是一种很有前途的方法。基于知识的方法大致可分为:神经网络法、模糊逻辑法、专家系统、统计模式识别法、遗传算法、模糊神经网络识别、自适应理论。

2.3.1 基于小波变换的故障诊断法

(1)小波变换。

小波变换既是时间尺度分析,又是时间-频率分析,它具有多分辨率的特点,且在时频两域具有表征信

号局部特征的能力,被誉为分析信号的显微镜。由于良好的视频局部化特征,小波分析可准确呈现动态信号的特征,在动态信号的分析上显示出明显的优势,适于电机设备在线故障诊断。

根据文献[14],信号的连续小波变换定义为:

$$WT_x(a, t) = \frac{1}{a} \int x(\tau) \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau, \quad (1)$$

简记为:

$$WT_a x(t) = x(t) * \varphi_a(t), \quad (2)$$

其中,\*为卷积,a为尺度因子, $\varphi_a(t) = \frac{1}{a} \varphi\left(\frac{t}{a}\right)$ 是基小波在尺度上的伸缩,并且:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dx = 0. \quad (3)$$

利用小波变换的奇异点(如过零点、极值点)在多尺度下的综合表现来检测信号的局部突变点,从而进行故障诊断。基于小波变换的电气设备故障诊断利用小波变换可以提供信号在时、频域的局部描述,从而对非平稳信号进行分析,成功地将小波变换应用于变压器的故障诊断中。

(2)基于小波变换的飞机电气系统故障诊断。

文献[15]采用离散小波变换构成的滤波器,将叠加噪声后的干扰信号的频谱分成有用频率部分和干扰部分,达到有效抑制噪声的目的,并将此结论用于飞机电磁兼容的测试中。文献[16]通过对定子电流预处理,并进行二次小波变换,有效地提取了电机定子绕组的故障特征,并明显区分出由于外部负载突变和外部电源不对称而引起的定子电流的变化。诊断结果几乎不受负载变化影响,实现了有效可靠的电机在线故障诊断。文献[17]利用小波变换的故障诊断法对同步电机单相短路故障做出了准确的诊断。

2.3.2 基于知识的方法进行故障诊断

(1)基于神经网络的方法。

神经网络技术以分布的方式存储信息,利用网络的拓扑结构和劝止分布实现非线性映射,并利用全局并行处理实现从输入空间到输出空间的非线性信息变换。在神经网络的故障诊断系统中,可从输入数据(代表故障症状)直接推出输出数据(代表故障原因)<sup>[18]</sup>。文献[19]提出了一种由混沌神经元构成的神经网络,它应用混沌神经网络的非线性动力学特性,将样本集记忆在确定的混沌吸引子上,实现了神经网络的动态记忆。混沌吸引子吸引域的存在构成了神经网络的容错性。飞机电气系统结构复杂,状态参数众多,故障特征类型选取应典型全面。文献[20]使用动量因子技术的神经网络BP算

法使网络在修正其权值时,不仅考虑误差在梯度上的作用,而且考虑在误差曲面上变化趋势的影响,其作用如同一个低通滤波器。该方法具有较强的学习、泛化和适应能力,能够有效地改善神经网络结构,提高故障诊断的精度和速度,同时降低网络陷入局部极小值的可能性,从而在应用故障诊断专家系统判读故障时更为准确、有效。文献[21]将BP神经网络算法用于多电飞机整个电气系统的故障诊断,并取得了很好的效果。

#### (2) 基于模糊逻辑的方法。

模糊集合、模糊运算、模糊逻辑系统对模糊信息具有强大处理能力,故障诊断机理非常适合用模糊规则来描述,使模糊逻辑的方法成为故障诊断的一种有力工具<sup>[22]</sup>。关于模糊逻辑更详细的故障诊断机理和方法可参阅文献[23]。

#### 2.3.3 基于知识与信号处理的故障诊断法的综合运用

##### (1) 基于小波网络的方法。

小波网络是一种连续的非线性映射,相当于以小波母函数作为节点激活函数的神经网络,其物理意义为近似的小波反变换,参数可通过学习方法得到。它结合了小波分析与神经网络的特点。文献[24]将小波网络用于航空发动机状态监控,用WNN进行系统辨识,在同样的精度要求下,其响应时间远远优于ANN。文献[25]在小波网络理论的基础上构造了飞控系统的模型,并且通过仿真验证了用小波网络进行飞控系统故障诊断具有泛化性强、收敛较快、诊断较准确等优点。该法较BP网络诊断法有更好的故障识别性能、更强的鲁棒性,而且网络收敛速度快,结构参数具有自适应调节能力。但该法在训练样本的确定、网络结构参数初始化等方面仍需进一步深入研究。

(2) 小波变换与基于模糊理论智能诊断的综合运用。

文献[26]通过对某飞机电源系统整流装置进行频谱分析,选择故障敏感频率点并且基于小波变换定义频带能量特征向量,设计出了基于模糊推理产生规则的专家系统,使小波变换与基于模糊理论从理论向实际应用的转化提供了可能性。文献[27]提出与文献[26]不同的故障诊断方法:以多传感信息的集成诊断技术来提高故障诊断的可靠性,选用定子电流、负序电压作为检测信号,通过对这两个信号的小波分析、模量极大值的求取,再进一步进行模糊逻辑推理,最终准确地诊断出故障所在。运用多种方法综合进行故障诊断的理论和方法还可参阅文献[28]。

##### (3) 基于虚拟仪器与网络在线诊断的综合运用。

NI公司是世界上极具影响的虚拟仪器制造厂商,其产品很大一部分用于测试、诊断领域。文献[29]将虚

拟仪器技术的思想和设计方法引入航空逆变电源输出特性的测量中。结果表明,该测试仪测量精度高、操作方便、具有良好的性价比。文献[30]采用虚拟仪器技术、计算机测控技术及变频调速技术实现了对飞机交、直流电源系统的离位闭环性能的自动测试及其各部件性能的自动测试与校验。采用Lab Windows /CVI作为系统软件的开发平台,增强了系统软件的可维护性及可扩展性。综合测试系统已应用于飞机电源系统的维修保障工作中,实际应用效果良好。文献[31]将LabVIEW用于多电飞机电源网络化故障诊断中,并基于此采用远程可视化多电源网络诊断。近年来随着计算机技术的突飞猛进,与此相关的电气测试技术也在发生着深刻的变化。可视化、网络化、虚拟化必将成为故障诊断的新方向。

## 3 结论

飞机电气系统故障诊断的准确、及时对保证飞行安全平稳,避免人员、财产的巨大损失具有重要意义。故障检测与诊断技术作为一门交叉性科学,从20世纪60年代起发展至今,已在传统的方法上得到飞速发展,新的理论及现代故障诊断方法不断涌现。小波变换、神经网络、模糊系统、模式识别、自适应理论等都在故障检测领域得到成功应用。由于飞机电气系统故障征兆与故障特征间复杂的非线性特性,使故障诊断及识别较为复杂,仅仅靠一种理论、一种方法无法实现在复杂环境下准确、及时地进行电气系统的故障诊断。随着现代故障诊断理论、方法的不断发展与成熟,为更有效地实现电气系统故障诊断,多种方法的综合运用成为必然。其中基于小波分析基础上的综合应用,极大地提高了飞机电气系统的诊断预测能力,将成为一大热点。其次基于虚拟仪器与网络在线故障诊断是未来飞机电气系统故障诊断发展的新趋势。

## 参考文献

- [1] 陈晓斌. 电气测试原理与方法. 西安:西北工业大学出版社,2007.
- [2] Moir I, Seabridge A. 飞机系统:机械、电气和航空电子分系统综合.3版.北京:航空工业出版社,2011.
- [3] 朱新宇,王有隆,胡焱. 民航飞机电气仪表及通信系统.成都:西南交通大学出版社,2006.
- [4] 高世利. 大型飞机供电系统处理机的设计[D].西安:西北工业大学,2006.

本文共有参考文献31篇,因篇幅有限,未能全部列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 亦非)