

1 航电设备故障诊断与维修基础

1.1 航电设备概述

1. 航电设备的发展历程

航电 (Avionics, Aviation Electronics) 设备, 是将电子电气技术用于飞机通信、导航、监视、信息处理、电气系统等设备与系统的总称。本书中所述航电设备还包括部分航空电气设备。

航电设备的历史久远。1903年, 莱特兄弟在自主研制的没有安装任何航电设备的飞机上完成了低速低空飞行试验。1910年, 加拿大飞行员麦柯迪利用“寇蒂斯”飞机所搭载的电台实现了无线电信号的收发。1920年, 第一个无线电罗盘(振幅式测向仪)开始服务于飞机导航。1928年, 短波无线电台在飞机上成功应用, 飞机开始实现语音通信。1933年, 飞机首次利用自动驾驶仪完成了单人环球飞行。1937年, 第一部米波雷达装备在飞机上, 用于对海面下潜艇进行搜索并协助领航着陆。1940年, 罗兰系统导航设备正式在飞机上装备使用。1946年, 甚高频全向信标机(VOR)成为美国的标准导航系统。1948年, 国际民航组织(ICAO)指定仪表着陆系统(ILS)为标准着陆系统。1950年, 自主式惯性导航系统在一架道格拉斯DC-3飞机上试用。1958年, 第一颗通信卫星“斯科尔”的成功发射标志着卫星通信进入了试验阶段。1960年, 阴极射线管(CRT)电子显示仪表在A-6A飞机上装备使用。1964年, “子午仪系统”卫星导航正式投入使用。1985年, 电子飞行仪表系统(EFIS-85)成功取得适航证。1990年, 在美国空军莱特实验室提出的“宝石台(Pave Pace)”计划中, “先进的综合”的概念被广泛认同。1995年, 首次在B777飞机上采用了有源液晶显示器(AMLCD)。2003—2016年, 中国北斗卫星导航系统正立足于区域导航并向着全球导航的目标迈进; 多电飞机(MEA)在B787上得到广泛实现; 第三代综合模块化航电(IMA)在A380、A350、B787上得到应用。

2. 对航电设备的要求

航电设备是飞机必不可少的组成部分, 对飞行安全起着十分重要的作用。民航飞机对航电设备在安全性、适航性、舒适性、环保性、经济性等方面都有严格要求。

(1) 安全性要求:

提高飞机健康管理能力, 能对飞机健康状况进行诊断和预测, 以便于缩短维修时间和提高飞机周转效率; 航电设备的故障将会影响继续安全飞行和着落, 其结果可能是一个难以挽回的损失, 所以飞行控制系统的失效率必须满足小于 $10^{-9}/\text{fh}$ (flight hour) 的可靠性要

求； 提高气象雷达的探测能力和预警能力； 采用 TCAS 对空监视和预测可能发生的碰撞； 采用 GPWS 在飞机起飞、复飞、着陆阶段对复杂地形进行近地警告； 提高网络安全防护能力，防止黑客入侵。

(2) 适航性要求：

航电设备需要满足诸多技术标准，比如：

航空无线电技术委员会 (RTCA) 技术标准：最低运行标准 (MOPS)、机载系统和设备软件认证考虑 (DO178B)、机载电子硬件设计保证指南 (DO254)、综合模块化航空电子系统开发指南和认证考虑 (DO297)、机载设备的环境条件和测试程序 (DO160F)。

航空无线电公司 (ARINC) 技术标准：飞机航空电子设备机箱、机壳、机架、冷却和连接器标准 (ARINC 404)，综合模块化航空电子设备封装和接口标准 (ARINC 650)，综合模块化航空电子系统设计指南规范 (ARINC 651)，模拟电路设备标准 (ARINC 500)，数字电路设备标准 (ARINC 700)。

美国汽车工程师协会 (SAE) 技术标准：高度集成或复杂飞机系统认证指南 (ARP 4754)、民用机载系统和设备安全评估过程的指导原则和方法 (ARP 4761)。

中国民航技术标准规定 (CTSO) 和中国民航局适航司颁发的中国民航技术标准规定批准书 (CTSOA)。

(3) 舒适性要求：先进舒适的电动座椅和机载电子娱乐系统等。

(4) 环保性要求：采用新能源技术减少飞机燃油碳排放，减少飞机对机场和航路的电磁辐射。

(5) 经济性要求：航电设备的成本目前占飞机总成本的 20% 左右，且随着航电设备复杂度的提高，设备成本正呈上升趋势，所以缩短航电设备研发周期，减少设备采购成本和软件更新费用是必须解决的难题。

1.2 故障的基本概念

故障 (Failure)，笼统地讲就是设备的工作状态出现异常，或性能参数偏离了正常范围，导致出现了不期望的状况。具体来讲，就是设备在规定的工作条件下，其一个或多个性能参数超限，即不能保持在规定的下、上限之内；或设备的结构、元器件、组件、子系统等出现破损、断裂、老化、腐蚀、烧焦、击穿等现象，使设备丧失了由工作环境和技术条件等决定的所必须具有的功能。

航电设备故障通过可靠性来描述。根据美军标 MIL-STD-785B《系统与设备研制的可靠性大纲》，可靠性可分为任务可靠性和基本可靠性。任务可靠性，指设备在规定条件下和规定时间内完成规定任务的能力，它只对会影响到任务完成的致命故障进行统计，说明设备执行任务成功的概率。基本可靠性，指在规定条件下，设备能持续无故障运行的时间和概率，它包含了全寿命单位时间内所出现的全部故障。由于航电设备故障的发生具有一定的偶然性和随机性，所以常用概率和随机变量对可靠性进行量化描述。在工程上，一般是采用可靠度、故障分布函数、故障密度函数、故障率、平均寿命和可靠寿命等指标来描述航电设备故障。

可靠度 (Reliability) 指航电设备在规定条件下和规定时间内持续无故障工作的概率, 记为 $R(t)$ 。 $R(t)$ 也表示持续无故障工作的设备占全部设备的百分数, 应满足式 (1.1)。

$$0 \leq R(t) \leq 1 \quad (1.1)$$

故障分布函数 (Failure Distribution Function), 指航电设备在规定条件下和规定时间内发生故障的概率, 记为 $F(t)$ 。 $F(t)$ 也被称为不可靠度或累积故障概率, 可用式 (1.2) 表示。

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (1.2)$$

由于航电设备故障或不故障是两个不相容的事件, 故存在 $R(t) + F(t) = 1$ 。航电设备的可靠度与不可靠度, 可以根据大量实验结果来确定: 如果 N 个设备中有 $n(t)$ 个设备在规定条件下和规定时间 t 内出现故障, 则可靠度和不可靠度可以分别用式 (1.3)、式 (1.4) 表示。

$$R(t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad (1.3)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (1.4)$$

故障密度函数 (Failure Density Function) $f(t)$ 是故障分布函数 (不可靠度) $F(t)$ 的导数。如果有 N 个受试设备, 在时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 内有 $\Delta N(t)$ 个设备故障, 则当 Δt 足够小而 N 足够大时, $f(t)$ 可用式 (1.5) 表示。

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \frac{\Delta N(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \quad (1.5)$$

航电设备的故障率 (Failure Rate), 又称为失效率, 可以从平均故障率和瞬时故障率两个方面来进行描述。平均故障率可以用设备故障总数与设备寿命单位总数之比 λ 来表示。寿命单位是航电设备最大可使用时间的度量单位, 用次、工作小时、月、年等来描述。而瞬时故障率是在时刻 t 正常工作着的航电设备到时刻 $t + \Delta t$ 内发生故障的条件概率, $\lambda(t)$ 记为

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{[N - N_f(t)]\Delta t} \quad (1.6)$$

式 (1.6) 中, N 为航电设备总数, $N_f(t)$ 为工作到 t 时刻已故障的设备数, Δn 为 t 时刻后的 Δt 时间内发生故障的设备数。瞬时故障率 $\lambda(t)$ 也可用式 (1.7) 计算。

$$\lambda(t) = f(t) \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.7)$$

对不可修复设备, 平均寿命就是指航电设备从投入使用到发生故障的正常工作时间的平均值, 记为平均失效前时间 (Mean Time To Failure, MTTF)。 $MTTF$ 是一个使用广泛的可靠性参数, 用式 (1.8) 表示。

$$MTTF \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1.8)$$

对可修复设备, 平均寿命是指设备相邻的两次故障之间的平均工作时间, 记为平均故障

间隔时间 (Mean Time Between Failure, MTBF), 用式 (1.9) 表示。

$$MTBF \approx \frac{1}{\sum_{i=1}^N n_i} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij} \quad (1.9)$$

式 (1.9) 中, N 为设备总数, n_i 为第 i 个设备的故障数, t_{ij} 为第 i 个设备从第 $j-1$ 次故障到第 j 次故障的时间间隔。一般来讲, $MTTF$ 和 $MTBF$ 所表达实际意义基本一致, 都统称为平均寿命。

1.3 故障基本特性与模式分布

1. 故障基本特性

若航电设备发生故障, 则至少会有一个参数或一项性能出现异常。故障诊断的目的就是要查清故障产生的原因, 找出故障发生的位置并评估出故障的影响, 以便维修人员及时进行测试与维修, 使航电设备恢复到正常工作状态。根据故障产生的原因不同, 航电设备故障的基本特性也不尽相同, 呈现如下几类特点:

(1) 故障的层次性 (Failure Levels)。由于航电设备的结构可分为元器件级、组件级、子系统级和系统级, 则其对应的故障, 也可分为元器件级故障、组件级故障、子系统级故障和系统级故障。层级不同, 故障特点也就不同。

(2) 故障的传播性 (Failure Propagation)。在一定条件下, 故障会沿一定方向传播。当某一层级元器件失效产生故障, 这一故障可能沿元器件 组件 子系统 系统进行纵向传播, 同时也可能在各元器件之间、各组件之间进行横向传播, 导致系统出现异常。

(3) 故障的相关性 (Failure Correlation)。同一故障现象可能是由完全不同的故障原因引起的, 同一故障原因也可能导致不同的故障现象, 所以故障原因与故障现象之间并非是一一对应关系, 而是具有复杂的相关性, 需要在排故中加以分析和区分。

(4) 故障的随机性 (Failure Randomness)。航电设备中某些电路的电压变化范围非常宽, 如从数字电路的几微伏特到点火电子线路的几万伏特。另外, 频率变化范围非常宽, 如从直流信号变化到卫星通信的 10^3 GHz; 故障电路电压或频率在非常宽的范围内随机变动, 具有很强的随机性, 给故障测试与诊断带来巨大的不确定性和随机性。

(5) 故障的模糊性 (Failure Fuzziness)。多数航电设备中的元器件参数存在“容差”。“容差”就是轻微的“故障”。“容差”的普遍存在, 导致实际故障的模糊性, 使故障定位变得困难。

(6) 故障的非线性 (Failure Non-linearity)。很多航电设备的电路规模非常大, 故障计算量以指数形式递增, 电路中普遍存在反馈回路和非线性电路, 使故障测试和计算非常复杂。

2. 故障模式分布

航电设备故障模式是指故障的表现形式。比较常见的故障表现形式有无法开机、无法关机、无输入、无输出、短路、开路、无法切换、显示错误、输出错误、指示错误、击穿、烧

焦、氧化、腐蚀、断裂、变形等。从大量的航电设备故障诊断与维修统计数据中可发现一些典型的故障模式，通过对这些典型的故障模式及其概率进行仔细分析，从中获取经验，可以提高故障诊断效率和维修效率。

航电设备常见故障模式分布主要有：正态分布、威布尔分布、指数分布等。下面简要介绍这三种故障模式分布。

(1) 正态分布 (Normal Distribution)。正态分布又称为高斯分布 (Gaussian Distribution)，主要用于因振动磨损，电子元器件腐蚀、老化、过热烧蚀而出现的航电设备故障统计中。设航电设备的寿命为 t ，则故障的正态密度函数 $f(t)$ 可用式 (1.10) 表示。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1.10)$$

式 (1.10) 中， σ 为故障时间标准偏差， μ 为故障时间的均值。此时，故障的正态累积分布函数 $F(t)$ 可用式 (1.11) 表示。

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^t \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (1.11)$$

正态故障率函数 $\lambda(t)$ 可用式 (1.12) 表示。

$$\lambda(t) = \frac{\exp[-(t-\mu)^2/(2\sigma^2)]}{\int_t^\infty \exp[-(t-\mu)^2/(2\sigma^2)] dt} \quad (1.12)$$

正态可靠度函数 $R(t)$ 可用式 (1.13) 表示。

$$R(t) = 1 - F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_t^\infty \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (1.13)$$

(2) 威布尔分布 (Weibull Distribution)。威布尔分布又称为最薄弱环节模型分布，它能充分反映出应力集中源对材料疲劳寿命的影响，被广泛应用于各种寿命试验的数据处理中。航电设备中继电器、断路器、插接件、开关、磁控管等元器件的故障均服从于威布尔分布。设航电设备的寿命为 t ， γ 为位置参数用于表征分布曲线的起始位置， t_0 为尺度参数用于表征坐标的尺度， m 为形状参数用于表征分布曲线形状，则航电设备威布尔分布故障密度函数 $f(t)$ 可用式 (1.14) 表示。

$$f(t) = \frac{m}{t_0} (t-\gamma)^{m-1} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^m}{t_0}\right] \quad (1.14)$$

此时，威布尔分布累积故障概率分布函数 $F(t)$ 可用式 (1.15) 表示。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\frac{(t-\mu)^m}{t_0}\right] \quad (1.15)$$

威布尔分布故障率函数 $\lambda(t)$ 可用式 (1.16) 表示。

$$\lambda(t) = m \frac{(t - \mu)^{m-1}}{t_0} \quad (1.16)$$

威布尔分布可靠度函数 $R(t)$ 可用式 (1.17) 表示。

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \frac{(t - \mu)^m}{t_0} \right] \quad (1.17)$$

(3) 指数分布 (Distribution)。指数分布是威布尔分布的一个特例, 当故障率函数 $\lambda(t)$ 为常数时就得到指数分布。在航空电子设备中, 电路的短路、开路、机械性损伤造成的设备故障都服从指数分布。指数分布无记忆性。指数分布故障概率密度函数 $f(t)$ 、故障概率分布函数 $F(t)$ 可分别用式 (1.18)、式 (1.19) 表示。

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (1.18)$$

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (1.19)$$

1.4 故障诊断的基本任务及故障分类

故障诊断 (Failure Diagnosis), 本质上是模式识别理论与技术在航电设备故障诊断领域的拓展, 即把航电设备的运行状态分为正常和异常两类。航电设备故障诊断技术主要包含故障检测、故障隔离、故障辨识三个方面。故障检测就是判断航电设备是否发生了故障以及故障发生的时刻。故障隔离就是在确定发生故障之后找出故障的位置和类型。故障辨识就是在分离出故障后确定出故障的大小以及预估故障的影响。近几十年来, 国内外学者对故障诊断技术开展了大量研究, 提出了众多可行的故障诊断方法。

1. 故障诊断的基本任务

航电设备故障诊断的基本任务主要体现在以下几个方面:

(1) 故障建模。根据先验信息、输入/输出关系和实测数据之间的关系, 建立故障的数学模型, 作为故障诊断的依据。然而这种数学建模方法仅对有明确的输入/输出解析关系的故障有效, 当有些故障的输入/输出数量关系不具有很明显的确定性时, 这种方法是失效的。

(2) 故障检测。对航电设备, 需要利用模拟万用表、数字万用表、兆欧表、脉冲电压表、视频毫伏表、双踪示波器、脉冲示波器、FFT 信号分析仪、频谱分析仪、功率测量仪、失真度测量仪、噪声测量仪、调制度测量仪、场强计等对设备进行检测, 观察可能故障设备或可能故障部件的技术参数是否偏离正常范围, 以判断航电设备是否故障。

(3) 故障隔离。对检测出故障的航电设备, 需要进一步对故障源进行定位分析, 判断故障位置是在元器件、组件、子系统、系统, 还是在它们之间。飞机维修有专门的故障隔离手册 (Fault Isolation Manual, FIM) 和飞机维护手册 (Airplane Maintenance Manual, AMM), 用于指导对航电设备的故障隔离与维修。

(4) 故障辨识。在隔离出故障后, 需利用各种技术手段确认故障大小、发生时刻及其时变特性。故障辨识可采用的方法很多, 包括基于解析的方法、基于知识的方法和基于信号处

理的方法等。故障辨识能力表现为对故障的识别能力，这种能力的强弱与被检测故障的物理特性、故障大小、噪声、干扰、故障建模误差以及设计的智能故障诊断算法有关。故障辨识越清楚，故障识别越明确，则对故障的定位准确性就越高。

(5) 故障评价。对检测出的故障特性进行判断，需要确认是固定故障还是暂态故障、恒定故障还是时变故障，如果是时变故障的话还需要找到时变规律；对故障的严重程度进行甄别，确认是一般性故障、严重性故障甚至是致命性故障；确认故障对整个飞机其他部分的影响，以及故障本身可能的发展趋势及对飞机安全可能造成的影响。针对不同故障情况和发展态势，采取相应的技术手段进行维修。可修复设备在修复后需要进行严格的测试，测试合格则可重新投入使用，如果测试不合格或确认故障不可修复，则采用换新件的方法，更换发生故障的航电设备部件。

2. 故障分类

设备故障分类有很多种分法。根据故障程度，故障可以分为暂态性故障和固定性故障。暂态性故障往往表现为一定条件下的功能性故障，多是由器件本身容限太小而引起的，当调整设备系统参数或某些运行参数后，设备又恢复正常工作，所以暂态性故障又被称为软故障。固定性故障表现为由于某些元器件或组件损坏而导致其不能正常工作的故障，需要检测出故障元器件或组件并进行更换才能排除此类故障。然而由于暂态故障具有随机性和偶发性，所以暂态故障的诊断比固定性故障更为困难。在数字电路中，固定性故障表现为设备永远固定在某一个数值上，如果信号固定在逻辑高电平上，则称为固定 1 故障（记为 s-a-1）；如果信号固定在逻辑低电平上，则称为固定 0 故障（记为 s-a-0）。根据固定性故障的数目，可以把固定性故障分为两大类：如果一个数字电路中有且只有一个固定性故障，则称之为单固定性故障；如果一个电路中有两个或两个以上的固定型故障，则称之为多固定型故障。统计显示，固定性故障占故障总数的 90% 以上，而通常情况下，又以单固定性故障居多。

根据故障发生的时间特性，故障可分为突变性故障、缓变性故障、间歇性故障。突变性故障是指突然出现，并且事先无法预知不可监测的故障。缓变性故障指元器件的性能参数随使用时间推移和环境的变化而缓慢变化所导致的故障。间歇性故障是指由于电子元器件老化、容差不足、搭铁接触不良、保险不够紧所引起的间歇出现的故障。多数间歇性故障最终会发展成为固定性故障。

1.5 故障诊断的基本方法

航电设备故障具有的诸多特性加大了故障检测与维修的难度，使得对航电设备进行故障诊断成为一项十分复杂和困难的工作。虽然航电设备故障诊断技术与电子技术几乎同时起步，可是故障诊断方面的发展明显滞后。在航电设备故障诊断技术发展初期，基本上是依靠一些测试仪表，依照跟踪信号逐点寻迹的思路，依赖人的逻辑判断确定设备的故障所在。这种沿用至今的传统诊断技术在很大程度上与维修人员的实践经验和专业水平相关，缺乏一套可靠的、科学的、成熟的办法来指导航电设备的故障诊断工作。随着电子工业的蓬勃发展，对故障诊断问题进行重新研究势在必行，我们必须站在坚实的理论基础上，将以往的经验进行汇

总整理，并结合先进的科学技术手段，系统地发展和完善一套严谨的现代化航电设备故障诊断方法，以实现航电设备故障诊断的自动检测、定位及故障预测。

航电设备故障诊断的方法可分为传统的人工诊断方法和近年发展起来的新型故障诊断方法。

传统人工检测方法包括：

(1) 敲击手压法。设备经常出现接触不良、固定不牢的情况，对此可采用敲击与手压法。所谓的“敲击”就是对可能的故障部位用小橡皮榔头或其他敲击物有目的地依次敲击或振动有关元件、接插件等，看看是否会引起出错或停机故障。所谓“手压”就是当故障出现时，在关上电源后用手压牢插件板或插头插座，重新开机后观察故障是否消除。

(2) 观察法。利用眼看、耳听、手摸的方式对电子设备进行观察。当某些电子设备或部件烧伤或烧毁时，用眼睛观察其元件或部件会看到变色、起泡、烧焦的斑点；用鼻子也可以闻到焦糊气味；如果发生了短路现象，用手可以感受到其温度的剧烈变化；部分元器件管脚虚焊或脱焊也可以用眼睛直接观察到。

(3) 排除法。排除法就是通过拔、插设备的一些插件板、器件来找到故障原因的方法。

(4) 替换法。在有足够的同型号元件备件的情况下，将一个好的备件与故障机上的同一位置同型号的元器件进行替换，看故障是否消除，逐个找出故障部件或元器件。

(5) 对比法。要求具有至少两台同型号的设备，且其中一台可正常运行。使用这种方法还必须配备必要的测试设备，如万用表、示波器等。按比较的性质分有：电流比较法、电压比较法、输出结果比较法、波形比较法、静态阻抗比较法等。

(6) 隔离法。故障隔离法不需要使用相同型号的设备或备件作比较，而且安全可靠。根据故障检测流程图，逐步缩小故障范围，再配合其他检测手段，一般会很快查到故障所在。传统的航电设备维修，有专门的故障隔离手册 (Fault Isolation Manual, FIM)，按手册中的故障检查步骤，逐步缩小故障范围，直至找到最后的故障点。另外，每个航电设备部件维修都有对应的部件维修手册，手册上明确给出了某些部件具体参数的典型值、最大值和最小值。在实际维修中，通过使用检测工具对这些参数进行测量并与手册参数值进行比对，可判断设备部件是否已出现故障。

航电设备故障诊断技术领域近年发展起来的新型故障诊断方法如图 1.1 所示。这些方法大致可分为基于知识的方法、基于解析模型的方法、基于信号处理的方法、基于离散事件的方法等。其中基于知识的方法包括基于症状的方法和基于定性模型的方法。而基于症状的方法将人工智能 (Artificial Intelligence) 理论和方法用于故障诊断，包括专家系统、模糊推理、神经网络和模式识别等方法。基于定性模型的方法包括定性观测、定性仿真和知识观测器方法。基于解析模型的方法包括参数估计、状态估计和等价空间方法。参数估计方法包括滤波器法和最小二乘法。状态估计方法包括观测器法和滤波器法。基于信号处理的方法包括 FFT 和小波变换法、谱分析法和相关分析法。

传统的模拟电路故障诊断有测前模拟诊断法和测后模拟诊断法，数字电路故障诊断与定位有穷举测试法、伪穷举测试法和测试码生成法。虽然模拟电路和数字电路故障诊断技术发展至今已经取得了不少进展，尤其在数字电路故障诊断方面已有较为成熟的理论和方法，但仍存在着诸多不足，特别是在复杂的非线性系统故障诊断方法的研究上还有所欠缺，有待更深入地探索。近年来开发的不同等级和各种类型的故障诊断装置，也仅能完成故障诊断工作

的基本需求，与实际需求相比还存在着相当大的距离。其主要的不足如下所述。

故障分辨率不高。现代的大多数故障诊断系统虽然能以很高的速度对被测对象自动地进行故障诊断，但是由于设备本身电路的非线性问题，并且检测点和施加的测试信号也受到了一些限制，在实际工作中严重影响了设备的可操控性和可测性。信息来源不充分。这可分为两方面：一是现有的诊断系统一般只考虑被测件的当前状态，而对历史状态及和做过的维修以及诊断系统本身的状态未做考虑；二是主要通过电信号对被测件进行测试，而很少使用如图像、温度、磁场信号等对被测件其他参数进行测试，因此有时给出的诊断结果以及提出的诊断方案并不准确。无推理机制，扩展性差。现有的故障诊断系统大部分都是针对典型故障而设计的，不具备推理学习的机制，可扩展性较差。

人工智能的诊断方法克服了对系统数学模型的过度依赖，它是根据人们长期的实践经验与大量的故障信息设计出来的，能够模拟人类专家完成对复杂系统的故障诊断工作，因此成为故障监测和隔离的有效办法，已在很多领域得到了应用。

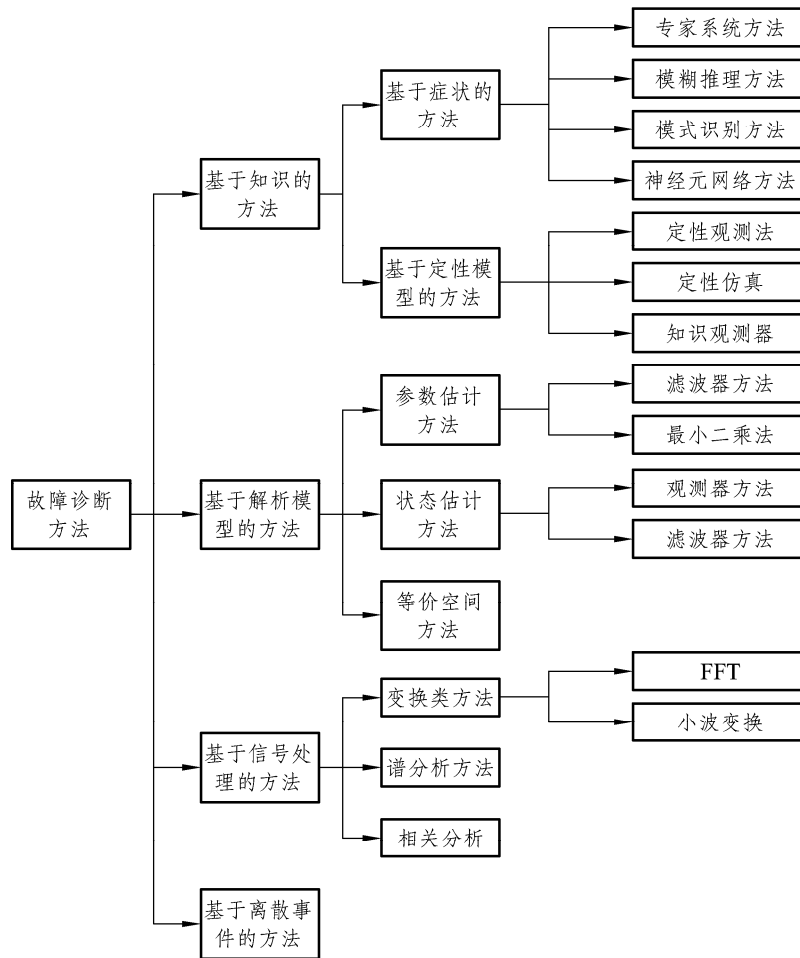


图 1.1 近年发展起来的新型故障诊断方法

(1) 专家系统故障诊断方法。专家系统是一种智能计算机程序，这种计算机程序运用知识与推理过程，用于求解那些需要人类专家才能解决的复杂问题。专家系统故障诊断的目的

在于利用领域专家的知识与经验为故障诊断工作服务。领域专家与资深工程师可通过人机接口对知识库进行操作。在系统诊断阶段，用户通过人机界面或者信息采集模块将征兆信息传送给推理机，推理机根据诊断过程的需要，通过人机界面或者信息采集模块收集征兆信息，然后检索知识库中的各条知识并进一步向用户索取新的征兆信息直至诊断结束，最终诊断结果与解释信息将通过人机接口返回给用户。

(2) 模糊故障诊断方法。这种方法是通过模仿人类思维的模糊综合来解决复杂困难问题从而判断设备状态。由于实际问题的复杂性，故障与征兆之间的并非是一一对应关系，很难用精确的数学模型来表示。由于这种模糊性的出现，单纯用“是否有故障”来表达很容易产生漏报和误诊。因此，一般将模糊方法与神经网络、小波分析、专家系统等技术方法结合起来使用。

(3) 故障树故障诊断方法。这是一种以将故障形成的原因类似于树枝状的形式逐级细化的分析方法，顶事件为最不希望发生的事件，可能导致顶事件发生的其他事件为中间事件和底事件，在分析中可采用最小割集算法和最小路集法等找出会导致顶事件发生的所有的故障模式，以及特征向量与故障向量故障原因之间的全部逻辑关系。

(4) 神经网络故障诊断方法。神经网络通过模仿人类大脑神经细胞结构和功能，具有与人脑相类似的记忆、学习、联想等能力。而神经网络在故障诊断中的研究主要集中在两个方面：一是单独使用神经网络方法对故障模式进行定性识别，找出故障模式；二是将神经网络方法与其他诊断方法相互结合形成复合式诊断方法来完成故障诊断工作。模式识别的神经网络故障诊断过程，主要包括学习训练与诊断匹配两个过程。其中每个过程都包括预处理和特征提取两部分。常用于故障诊断分类的神经网络、双向联想记忆网络、自适应共振理论和样条网络等。

(5) 信息融合故障诊断方法。信息融合是在计算机的基础上将多个传感器的采集信息综合，并加以自动分析和数据处理，以得到需要的处理结果。信息融合应用于故障诊断的目标是综合利用各种传感器采集得到的信息来提高故障诊断的准确率。以目前来说，信息融合在设备故障诊断中的应用还方兴未艾，其故障诊断方法主要有贝叶斯推理、D-S 证据推理及神经网络信息融合等。

1.6 航电设备维修要求与仪器工具

航电设备维修根据维修的深浅程度可分为外场维修和内场维修。外场维修包括航前、航后、短停以及部分可在停机坪进行的检修工作。内场维修包括改装、翻修、修理、校验等。外场维修中发现的故障，一般采用故障部件暂时隔离或直接用备件更换。内场维修将故障定位到内场可更换单元，再进行修理或处理，对维修后的设备再进行测试看是否合格，测试合格后方可重新投入使用。

航电设备的修理工作，指的是设备由故障或失调状态恢复到正常状态所采取的全部措施和活动。维修工作指的是对飞机部件所进行的任何检测、定期检修、排故、翻修、修理。重要改装(MDA)指在航空器部件制造厂家的设计规范之外，没有按照设备制造厂商的建议，也没有根据适航指令，而对设备的基本设计进行更改，可能导致其适航性因素产生较大变化

的改装。此外，对规定已批准的无线电通信和导航设备所进行的更改，如果会对设备的工作性能产生较大影响，也属于重要改装。所以无线电设备的校准及仪表的校验和修理都属于设备的重要修理。

航空器部件进行维修或改装必须遵守的准则：当使用航空器部件制造厂的现行有效的维修手册或持续适航文件中的方法、技术要求或实施准则之外的其他方法、实施准则时，应当获得中国民航局的批准，并且必须符合航空器持续适航文件中的适航性规定。使用的工具和设备必须能够保证维修和改装工作能按照可接受的工业准则完成；工作中应当优先使用制造厂推荐的专用设备，当使用制造厂的替代设备时，应当获得相关部门的等效批准。使用的合格航材要能保证航空器部件达到至少保持其初始状态或者适当的改装状态。当使用航材的替代品时，应当获得相关部门的等效批准。工作环境应当满足维修或者改装工作任务的要求。

航电设备维修需要通用的测试仪表和测量仪器，也需要与设备配套使用的专用测试台。在维修实践中，通常使用部件维护手册推荐的专用测试设备和工具进行维修。

航电设备测试维修所需仪器设备：

(1) 数字式万用表，常用来测量直流电压、直流电流、交流电压、电阻和晶体管等。

(2) 电压表，分为超高频电压表、视频毫伏表、脉冲电压表等，常用于各种电压测量。

(3) 兆欧表，用于测量电路的漏电程度以检查其电气绝缘程度。

(4) 电子示波器，包括通用示波器、双踪示波器、脉冲示波器等，用于观察电信号的频率、幅度、波形、周期，以及检测电路动态功能和电子设备的调幅度、频偏等。

(5) 信号源，包括高频信号源、音频信号源、扫频信号源、脉冲信号源、微波信号源等，为航电设备维修提供测试用信号源。

(6) 频谱分析仪，用于观察等幅波、调频波、脉冲调制信号的频谱。通过频谱可精确测量发射功率、发射脉冲宽度，可检查各种振荡器的质量。频谱分析仪还可作为高灵敏度的高频接收机。

(7) FFT 信号分析仪，即快速傅里叶频谱分析仪。

(8) 失真度测量仪，主要用于测量电子放大设备的频率失真、非线性谐波失真，以及检查相位失真的特征等，还可独立地作为平衡和不平衡式音频电压表。

(9) 调幅度测量仪，主要用于测量无线电发射机和其他调幅信号的调幅度，还可测量发射机的寄生调幅或交流声电平。

(10) 调制度测量仪，主要用于测量调频信号的调制系数和频偏。

(11) 噪声测量仪，用于测量接收机噪声系数。

(12) 各型功率计，主要用于测量各种发射机和信号源的平均功率、峰值功率或脉冲功率。

(13) 电子干扰/场强计，主要用于测量连续波、脉冲波干扰端电压和场强，配上传感器还可测量导线上的高频干扰电流以及通过电源线上的辐射干扰功率等。

航电设备维修中可能用到一些辅助设备，比如电阻箱、滑线变阻器、自耦调压变压器、恒温箱、电炉等设备。

航电设备维修所需工具包括电气装配工具、机械安装工具、仪表修理工具和量具等。电气装配工具包括常用的各型电烙铁、镊子、剥线钳、尖嘴钳、斜口钳等。机械安装工具用于打开机壳盖板和拆卸、装配各种旋钮、开关、电位器、表头、插座、变压器等，需要配备各种型号的十字螺丝刀、一字螺丝刀、套筒扳手、什锦锉、手电钻等。仪表修理工具包括仪表

螺丝刀、放大镜、镊子、轴芯夹具、长毛刷、千分尺等。

航电设备维修对工作环境的温度、湿度、振动、灰尘、电磁干扰和电源有严格要求。航电设备运送与维修需要远离振动源，并与机加工、喷漆、清洗等设施隔离。航电维修检测车间温度应控制在 20 ~ 24 °C，湿度应控制在 40% ~ 65%。高频航电设备维修需建立专用屏蔽室保证严格电磁屏蔽。航电设备维修用电源有严格要求：中频单相交流电源稳压范围是 112 ~ 118 V，中频三相电源最大偏差电压不超过 1 V，稳态平均频率必须稳定在 390 ~ 400 Hz 内，频率变化量不超过 ± 5 Hz，频率漂移不超过 15 Hz/min，交流供电功率不小于 1 500 W；另外还需要配备 26 V (36 V)、400 Hz 的单相交流电源，电压稳定范围为 (26 ± 0.26) V [(36 ± 0.36) V]，频率稳定要求与 115 V/400 Hz 交流电相同；直流电源为 28 V、双线制电源，电压需要稳定在 27 ~ 30 V，直流电压峰值脉动与平均电压偏差不得超过 2 V，供电容量不小于 1 500 W；220 V 单相制市电的电压稳定在 198 ~ 242 V，频率保持在 45 ~ 55 Hz。380 V、50 Hz 三相制采用市电供电时，必须配备 UPS 电源防止市电突然掉电。

航电设备维修应由具有合格维修执照的修理人员，使用合格的修理设备和仪器，在符合规定的修理场所进行，应按照现行有效的部件修理手册所规定的程序与步骤进行修理，并保证修理件与修理文件、履历本、工作单相符，且修理内容与修理文件一致。检查并正确标记设备面板上的修理标记。检验人员在完成全面检查后，应及时填写检验记录并签字，签注检验日期。

1.7 航电设备维修基本程序

航电设备维修是保证航电设备可靠运行的重要技术手段，维修基本程序和方法如下。

1. 修理前的准备

修理前应准备：修理项目许可证；现行有效的 CMM 和有效的维修服务通告；完好且经审定的修理工具与经过校准的测试仪器，接地完好的防静电工作台；适用并且数量够用的测试仪器与专业维修工具；具备符合资质规定的修理人员和检测人员；电压种类、电压值及频率适用的维修用电源；设备所需要的修理环境条件满足要求。

对维修手册和技术文件的使用是航电设备维修的基础。维修中涉及 OEM 厂家的技术手册主要有：部件维修手册 (Component Maintenance Manual, CMM)、翻修手册 (Overhaul Manual, OHM)、标准施工手册 (Standard Practice Manual, SPM)、服务通告 (Service Bulletin, SB) 和服务信函 (Service Information Letters, SL/SIL) 等。航空公司工程指令 (Engineering Order, EO) 是根据机队零部件的相关技术文件编写的作业指导文件，用于对零部件实施专项检查、改装更换与维修等非例行维修工作的指令。

在相关技术手册中三类提醒信息必须严格遵守：警告 (WARNING)：提醒维修人员必须严格遵守手册的方法和步骤以免伤及人员；警告 (CAUTION)：提醒维修人员必须严格遵守手册的方法和步骤以免损坏设备；注意 (NOTE)：提醒维修人员必须严格遵守手册的方法以提高工作效率。

维修中的工卡 (Job Card, JC) 是根据维修任务下发的工作依据文件，包含的内容有：工卡编号、工作项目名称、施工内容及程序、所需器材专用工具及设备、编写或修订日期、

待修件的件号、送修原因、客户信息、维修工作依据文件及版次、执行者签名或盖章、待修件序号、合同号、工时记录和完成时间，还根据有效受控的 CMM/OHM/SPM/SB/SL/EO 等技术文件列出了维修人员在维修工作中的须采用的方法和步骤，同时留出位置以便维修人员填写故障检测结果、所采取的维修措施、功能测试的结果以及更换件信息等。

2. 待修件的接收

接收待修件应注意：检查待修件包装及标记是否完好，检查防静电敏感部件（ESDS）的防静电包装袋及标记是否完好；检查待修件的外形是否完好；检查待修件上的标签与履历本填写情况是否正常；检查送修文件与工作单是否完整。

3. 航电设备修理的基本程序

航电设备修理的基本方法是观察故障现象、分析故障原因、压缩故障范围、确定维修方案、故障排除、检测与调试、组装、填写维修单据注明维修日期、运输。航电设备修理的基本程序是：设备检查，参数测试，故障隔离，设备分解，必要的调节与修理，清洁，组装，存储，填写维修工作单等环节。应特别注意待修件在手册中的适用范围和有效性等问题。

1) 维修手册查阅

维修开始，首先应该对部件维修手册（CMM）对应的说明与操作部分进行阅读，理解电子设备的工作方式和注意事项，了解待修设备元器件的失效模式、失效机理以及设备的故障机理，要尤其注意警告（WARNING）提示。

2) 预测试

设备的排故预测试，首先对设备进行参数测试，详细记录测试数据，通过初步分析找到维修大致范围和部附件，然后进行周密的故障隔离与故障分析，确定必要的修理措施，再对待修设备进行分解。

3) 分解

为了避免造成不必要的设备损坏，不应随便分解设备，分解之前应该认真阅读部件维修手册（CMM），并严格按照手册规定的程序、步骤和图解零件目录进行。分解之前，应切断所有电源和射频供给接头的连接。在对有静电敏感器件（ESDS）标记的部件或电路板进行分解之前，应切实遵守防静电措施，分解工作必须在防静电工作台上进行，并戴上腕带。在对电缆和电线束进行分解前应注意各导线的颜色，做好必要的标记。对组件外壳进行分解时，应先查阅 CMM 图解零件清单，然后选用适当的螺丝刀拆下固定组件外壳。接头的分解要注意选择正确的插钉拆除工具。通过用力按压每块电路板两侧的手柄可以迅速地沿滑轨取出电路板，完成电路板的分解。对于有些固定在壳体结构上的电路板，则需要把所有螺钉拆下后才能取出电路板。分解元器件时，要参考焊接与拆焊工艺并活用电烙铁，不仅可以焊接及拆焊电路板，也可以通过电烙铁加热的方式将卡住的小五金件取出。

4) 清洁

电路板和电子元器件有水、油、尘土、积碳和锈蚀时，以及各种转动部件（如环型变阻器和电位计）的润滑油脏污变质时都会影响电路板和电子元器件的正常工作，甚至造成损坏。所以，在完成对部件分解工作之后，必须对其进行清洁。其中，清洁剂的选择和清洗顺序应该按照手册要求进行。

5) 外部检查

对航电设备清洗之后,首先是目视检查,主要检查组件结构外观是否缺损、凹陷、变形;接头插钉是否偏离、断裂、锈蚀和碳化,检查前面板名称、序号、铭牌是否存在,粘贴是否牢固;检查底盘是否松动、安装固定件是否丢失、变形、凹陷,紧固件是否损坏;检查接头是否破损、绝缘部分是否有裂缝,接头是否有损伤或出现移位情况。面板开关、按钮的检查,主要看标识是否清楚,安装是否稳固有无滑动现象,按压开关和按钮时是否能听到明显的开关作动声响,按压过程是否存在卡阻现象。检查电路板是否有松动、损坏、腐蚀、断裂、烧坏和碳化痕迹;电路板和元器件焊料是否不足或用万用表检查线路连接是否正确;检查电容是否有壳体破损、漏液现象,检查有无进水、烧毁和破损的二极管或三极管。检查壳体和线圈是否损坏和碳化,检查变压器是否表面过热或有损坏。

6) 通电检查

外部检查完成后,进行通电检查。按照 CMM 中测试部分对航电设备部附件进行通电测试,初步判断部件是否有故障,对于测试步骤较多的设备可以依据经验只测试一些关键步骤。如果已经判断可能存在短路故障,则不建议进行通电测试检查,以免进一步损坏被测部件。

7) 修理

修理之前,应该先切断电源,对于静电敏感器件,必须按照防静电要求进行操作。对于电路板和电子元器件外壳变形和掉漆,可通过机械办法来矫正,可采用电焊来处理表面的裂纹,用砂纸和酒精清洗掉漆部分,用胶带盖住未掉漆部分,然后用阿罗丁浸泡铝件表面,之后再根据 CMM 中提供的材料重新上底漆与面漆。

更换航电设备部附件中断裂的导线与排线时,要选择与原导线相同级别、线径、颜色的导线,两端套上绝缘套,再用热熔胶将导线或排线固定住。如果出现接头外壳变形、螺丝滑牙或绝缘性能下降,则需要更换整个接头;如果只是接头中的某个插钉锈蚀,则只需更换插钉即可。

电路板故障的维修,所需更换的元器件参数必须符合图解零件目录(IPL)的要求,并严格遵守厂方提供的标准线路施工手册(SPM)进行操作。需要拆除电路板上的电子元器件时,应先去掉覆盖在周围的防潮漆,如果多层电路板插脚难以拆下,可对两边同时加热来清除焊盘孔中的焊锡。故障排除后,应重新给电路板两面和新更换的元器件周围补上防潮漆。更换大功率晶体管,应先焊下导线并拆下散热螺母和垫片,然后拆下晶体管和硬涂层绝缘体;给硬涂层绝缘体的每一面都加上导热硅脂,再重新装上绝缘体;安装上替换的新的功率晶体管,装上替换的绝缘垫片,重新装好拧紧散热螺母,用欧姆表检查金属安装片和安装了散热螺母的安装栓之间的开路电阻要大于 $10\text{ M}\Omega$,最后焊接外部导线。某些电路板为不可修理部件,必须更换整个电路板。

8) 测试

航电设备的测试分为分步测试、排故测试、循环测试和全功能测试等几类。维修预测试和放行前的测试,一般采用全功能测试;若只检查航电设备某部分功能,采用分步测试;当发现某部分测试不稳定或故障间歇性出现,则要针对某个或某几个测试步骤重复测试几次,做循环测试;如果在测试过程中需要提供排故指导,则做排故测试。故障排除后,为了确定故障是否成功排除,需要对维修部分进行循环测试,但在放行之前,只有再次通过全功能测试,才能放行。

9) 组装

在航电设备及其部件完成测试后,根据 CMM 中图解零件目录清单 (IPL) 找出所有部件,然后严格按照部件修理手册的要求进行组装。组装过程为分解的逆过程。组装时,要参考厂方提供标准线路施工手册 (SPM) 正确使用适当的工具执行组装。对标有静电敏感器件 (ESDS) 标记的部件或电路板组装时,需要切实遵守防静电措施,在防静电工作台上进行,防止造成不必要的损失。对电缆插头进行组装时,注意先清除异物,并防止插钉错位损坏插头。组装集成电路模块时,应该使用 CMM 中推荐的专用工具并检查电安装座内的剩余焊锡。组装后,要根据 CMM 要求完成机械固定或其他方式固定。

10) 封装存储

航电设备运输过程中要使用防尘罩;已经完成修理和检查的设备,应正确封装;对标有静电敏感器件 (ESDS) 标记的部件或电路板应该在电缆接头上加防静电盖,放置在专用的防静电容器或包装中运输,并要求贴有明显的防静电标签。运输时,需要在容器上要封好防潮的胶带后再搬运。待修件应该与已修件分开存放,并有明显标识,以防混淆。

11) 记录填写维修放行

维修人员在维修过程中,应该在工卡 (JC) 上准确、详细填写各项测试参数;更换元器件应记录所更换元器件的电路符号、规格、件号,另外,换下的元器件应作报废处理。维修工作应有完整的记录,至少应包括已填写完整的工卡、部件故障及隔离措施记录、换件记录及合格证件、执行的适航指令和服务通告清单、试验记录、维修放行证明等。

1.8 本章小结

本章对航电设备发展进行了简要概述,给出了航电设备故障的基本概念和定义,给出航电设备故障基本特性和故障模式及分布,陈述航电设备故障诊断的基本内容、任务及分类,描述航电设备故障诊断的基本方法及基本技术,最后给出了航电设备故障维修基本概念和维修行业遵守基本技术规范。

参考文献

- [1] 张黎娟. 民用航空器电子仪表设备维修技术与方法研究[J]. 电子质量, 2016(1):23-25.
- [2] 朱大奇. 电子设备故障诊断原理与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [3] 朱大奇. 航空电子设备故障诊断技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2002.
- [4] 朱万年. 航空电子综合系统自检测、重构与故障监控技术综述[J]. 航空电子技术, 1997(4): 42-47.
- [5] 吴向阳. 航空仪表综合测试台设计[D]. 电子科技大学, 2003.
- [6] 闫迎军. 综合模块化航空电子设备结构设计[D]. 西安电子科技大学, 2006.
- [7] 许小武. 航空电子 ATE 综合集成与信号链路衰减分析[D]. 南昌航空大学, 2015.
- [8] 庄绪岩. 飞机航电系统故障分析方法与故障诊断系统研究[D]. 中国民用航空飞行学院, 2015.

- [9] 吴季宁. 在航空维修测试中使用 ARINC429 数字信息传输的设计和实现[D]. 电子科技大学, 2005.
- [10] 王力鹏. 通用航空总线自动测试系统的设计和开发[D]. 华南理工大学, 2012.
- [11] 张宏. 航空电子设备维修方法探析[J]. 中国新通信, 2014 (11): 4-4.
- [12] 王越. 谈航空电子设备维修的静电防护措施[J]. 科学中国人, 2015 (5Z).
- [13] 陈文波. 航空电子测试设备维修保障方法探讨[EB/OL][J]. 科技创新导报, 2013 (15): 10-11.
- [14] 韩富宁. 飞机通信系统控制板测试台设计[D]. 吉林大学, 2015.
- [15] Frank P M. Analytical and qualitative model-based fault diagnosis-a survey and some new results[EB/OL][J]. European J. Of Control, 1996, 2(1): 6-28.
- [16] 朱大奇, 于盛林. 基于知识的故障诊断方法综述[J]. 安徽工业大学学报, 2002, 19(3): 197-204.
- [17] 虞和济, 陈长征, 张省. 基于神经网络的智能诊断[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [18] Pazani M. J. Failure-driven learning of fault diagnosis heuristics[EB/OL][J]. IEEE Trans. on system, Man and Cybenetics, 1998, 17(3): 380-384.
- [19] Gertler J. Diagnosing parametric faults: from parameter estimation to parity relations[C]. American Control Conference, Proceedings of the. IEEE, 1995, 3 : 1615-1620.
- [20] 朱新宇, 胡焱, 等. 民航飞机电气通信仪表系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2012.
- [21] 朱新宇, 胡焱, 等. 民航飞机电子电气系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2016.
- [22] 夏虹, 刘永阔, 谢春丽. 设备故障诊断技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010.
- [23] Frank P M, Ding X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems[J]. Journal of Process Control, 1997, 7(6): 403-424.
- [24] Sauter D, Hamelin F. Frequency-domain optimization for robust fault detection and isolation in dynamic systems[J]. 1999, 44(4): 878-882.
- [25] Frisk E, Nyberg M. A minimal polynomial basis solution to residual generation for fault diagnosis in linear systems[J]. Automatica, 2001, 37(9): 1417-1424.
- [26] Ding S X, Jeinsch T, Ding E L. An approach to analysis and design of observer and parity space relation based FDI systems[C]. Proc Ifac World Congress, 1999.
- [27] 徐超群, 闫国华. 航空维修管理[M], 北京: 中国民航出版社, 2012.
- [28] 韩建群, 石旭东. 基于 EMD 航空发电机定子绕组故障检测方法[J]. 国外电子测量技术, 2016 (10): 34-37 + 49.
- [29] 朱大奇, 于盛林. 基于故障树最小割集的故障诊断方法研究[J]. 数据采集与处理, 2002, 17 (3): 341-344.
- [30] Ashton S. A., Shields D. N.. Design of a robust fault detection observer for polynomial nonlinearities[C]. Proc of 14th IFAC World Congress. Beijing, 1999: 49-54.
- [31] Bakshi B R. Multiscale PCA with application to multivariate statistical process monitoring[J]. Aiche Journal, 1998, 44(7): 1596-1610.
- [32] Satish L. Short-time Fourier and wavelet transforms for fault detection in power transformers during impulse tests[J]. IEE Proceedings-Science Measurement and

Technology, 1998, 145(2): 77-84.

- [33] 左力. 基于 CPNN 的航空装备维修保障能力评估研究[J]. 电子设计工程, 2016, 24 (23): 7-9.
- [34] 金德琨, 敬忠良, 王国庆, 等. 民用飞机航空电子系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- [35] 朱大奇, 于盛林. 基于故障树分析及虚拟仪器的电子部件故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23 (1): 16-19.
- [36] 陈文波. 航空电子测试设备维修保障方法探讨[J]. 科技创新导报, 2013 (15): 10-11.
- [37] Mufti M, Vachtsevanos G. Automated fault detection and identification using a fuzzy-wavelet analysis technique[C]. Autotestcon '95. Systems Readiness: Test Technology for the Century. Conference Record. IEEE Xplore, 1995: 169-175.
- [38] 左洪福. 航空维修工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [39] Akhmetov D F, Dote Y, Ovaska S J. Fuzzy neural network with general parameter adaptation for modeling of nonlinear time-series[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2001, 12(1): 148-152.
- [40] 杭正嵩. 浅谈航空电子设备维修方法[J]. 企业文化 (下旬刊), 2016 (4) 4 : 216.
- [41] Tsukamoto Y, Terano T. Failure diagnosis by using fuzzy logic[C]. Proc. IEEE conference decision & control. New Orleans, 1987: 1390-1395.
- [42] 李帅. 对航空电子保障装备研制的几点建议[J]. 信息通信, 2016 (11): 291-292.
- [43] Buckley J J, Hayashi Y. Neural nets for fuzzy systems[J]. Fuzzy Sets & Systems, 1995, 71(3): 265-276.
- [44] Sorsa T, Koivo H N, Koivisto H. Neural networks in process fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1991, 21(4): 815-825.
- [45] 周鑫. 航空电子设备维修方法探析[J]. 中国科技信息, 2013, 19 : 115-116.
- [46] 周东华, 王桂增. 故障诊断技术综述[J]. 化工自动化及仪表, 1998 (1): 58-62.
- [47] 中国民用航空飞行标准司. 民用航空器维修人员维修经历记录[M]. 咨询通告 AC-66-07, 2016.
- [48] 中国民用航空总局. 民用航空材料、零部件和机载设备技术标准规定[M]. CCAR37, 1992.
- [49] 藏和发, 王金海, 等. 航空电子装备维修技能[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.
- [50] [英]伊恩·莫伊儿, 阿伦·西布里奇, 马尔科姆·朱克斯. 飞机航空电子系统[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2015.