

MINHANG FEIJI

HANGDIAN SHEBEI GUZHANG JIANCE YU ZHENDUAN

民航飞机航电设备 故障检测与诊断

张德银 包勇 钱伟 王有跃 编著



西南交通大学出版社

民航飞机航电设备故障 检测与诊断

张德银 包 勇 钱 伟 王有跃 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

民航飞机航电设备故障检测与诊断 / 张德银等编著.

—成都: 西南交通大学出版社, 2017.5

ISBN 978-7-5643-5444-2

I. ①民… II. ①张… III. ①民用飞机—航空电气设备—故障检测②民用飞机—航空电气设备—故障诊断
IV. ①V242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 095427 号

民航飞机航电设备故障检测与诊断

张德银 包 勇

钱 伟 王有跃

/ 编著

责任编辑 / 宋彦博

助理编辑 / 梁志敏

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 15 字数 372 千

版次 2017 年 5 月第 1 版

印次 2017 年 5 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5444-2

定价 48.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

《民航飞机航电设备故障检测与诊断》

编委会

主 任 张德银

副主任 包 勇 钱 伟 王有跃

编 委 罗 英 黄选红 许将军 刘建华

邱 斌 李首庆 罗文田 高 峰

刘佳嘉 张 熙 谢 军 王 悠

何志祥 孟 超

前 言 / Prefaces

《民航飞机航电设备故障检测与诊断》是一部涉及民用航空器电子电气设备故障检测与故障诊断维修的技术专著，也可作为民航高等院校民用航空器维修理论与技术、航空工程专业的研究生、本科生教材。本书在民航机务维修标准线路施工、飞机维修手册查询、传统的航空电子电气设备故障人工检测方法和常规维修技术基础之上，深入研究了在航空电子电气设备故障检测与故障诊断中如何运用专家系统、神经网络方法、模糊系统方法、遗传算法、多传感器信息融合等人工智能方法与技术，旨在解决大型航电设备自动化测试与故障诊断等涉及深度故障检测、快速故障定位与复杂航电设备维修的技术问题。

本书第1章介绍了故障诊断基本概念、航电设备故障分布规律、故障检测基本任务和基本方法、航电设备故障测试设备工具和航电设备维修基本程序；第2章介绍了航电设备中插接件、开关、电阻器、电感器、电容器、二极管、三极管、变压器、集成块、陀螺等电子电气元器件故障检测与维修问题；第3章描述了组合逻辑与时序逻辑数字电路故障测试代码生成方法和基本检测技术；第4章研究了模拟电路故障字典诊断法和结合退火算法、模糊技术的故障字典诊断方法；第5章说明了电气线路故障诊断的机务手册查询方法和从现象到本质的故障倒推法，以及电气导线短路、断路故障的脉冲反射诊断法；第6章分析了故障树定性与定量分析方法，并对磁电机和镉镍蓄电池进行了严格故障树分析；第7章介绍了故障诊断专家系统方法，并以某飞机电气系统查询专家系统为例进行了说明；第8章研究了神经网络基本概念，重点介绍了BP神经网络算法及其改进算法和径向基神经网络在航电设备故障诊断中的应用；第9章介绍了模糊技术和信息融合技术在航电设备故障诊断中的应用；第10章研究了复杂航电设备的自动化测试方法和测试标准问题，以飞行管理计算机和集成数字电路板卡为故障诊断目标说明自动化测试系统构建、测试流程、故障诊断标准和故障诊断实例；第11章介绍了机载甚高频通信导航系统故障诊断与设备维修方法；第12章介绍了新型多扫描机载气象雷达的功能、原理、结构、基本参数、BITE、雷达自动化测试需求、测试流程和测试标准判定，以及空管用地面气象雷达的结构、基本参数、故障诊断与维修实例。

本书编写团队由资深机务维修专业教授和一线机务维修工程师组成，分工如下：第1章由张德银、黄选红、王有跃、钱伟、李首庆编写；第2章由罗英、王有跃、张德银、李首庆编写；第3章由罗英、罗文田、王有跃、刘佳嘉编写；第4章由张德银、黄选红、钱伟、李首庆、许将军编写；第5章由许将军、王悠、谢军、孟超编写；第6章由张德银、钱伟、包勇、高峰、王有跃编写；第7章由包勇、张德银、黄选红编写；第8章由张德银、包勇、钱伟编写；第9章由张德银、钱伟、包勇、张熙编写；第10章由包勇、张德银、钱伟、邱斌、何志祥编写；第11章由张德银、钱伟、黄选红、王有跃、刘佳嘉编写；第12章由张德银、王有跃、黄选红、钱伟、包勇、刘建华、刘佳嘉编写。本书由彭卫东教授担任主审。梁威鹏、邓位、袁也、杨凡鑫、代运鹏、刘国绅、崔浩、于梁、尹高磊、谢继峰等参与了资料整理、文字编辑和绘图工作。

需要特别说明的是，鉴于航空领域的特殊性，为便于读者将书中知识与实际工作相联系，书中的单位均采用习惯用法，未全部转换成SI单位。同时，书中电路图也尽量保持与民航机务维修手册中一致，未严格按照国家标准绘制。

限于时间和水平，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2017年3月

目 录 / Contents

- 1 航电设备故障诊断与维修基础 001
 - 1.1 航电设备概述 001
 - 1.2 故障的基本概念 002
 - 1.3 故障基本特性与模式分布 004
 - 1.4 故障诊断的基本任务及故障分类 006
 - 1.5 故障诊断的基本方法 007
 - 1.6 航电设备维修要求与仪器工具 010
 - 1.7 航电设备维修基本程序 012
 - 1.8 本章小结 015
 - 参考文献 015
- 2 电子元器件的故障诊断与维修 018
 - 2.1 插接件检测与维修 018
 - 2.2 开关识别与检测 021
 - 2.3 电阻识别与检测 022
 - 2.4 电容识别与检测 025
 - 2.5 电感器和变压器的识别与检测 026
 - 2.6 二极管识别与检测 027
 - 2.7 三极管识别与检测 028
 - 2.8 集成电路模块识别与检测 029
 - 2.9 陀螺的检测与排故 031
 - 2.10 本章小结 034
 - 参考文献 034
- 3 数字电路故障诊断方法 035
 - 3.1 数字电路故障诊断概述 035
 - 3.2 组合逻辑数字电路故障诊断基本方法 036
 - 3.3 时序逻辑数字电路故障诊断基本方法 040
 - 3.4 集成数字电路芯片故障诊断基本方法 044

3.5	数字电路桥接故障检测方法	048
3.6	本章小结	051
	参考文献	051
4	模拟电路故障诊断方法	052
4.1	模拟电路故障诊断方法概述	052
4.2	直流模拟电路故障字典法	054
4.3	可诊断容差的模拟电路故障字典法	061
4.4	模拟电路故障诊断模拟退火算法	065
4.5	模拟电路故障诊断模糊字典法	069
4.6	本章小结	073
	参考文献	073
5	机载电气线路故障检测与诊断	075
5.1	机载电气线路故障现象	075
5.2	机载电气线路常规检查方法	076
5.3	机载电气线路故障检测倒推法	077
5.4	机载电缆故障定位脉冲反射法	080
5.5	本章小结	082
	参考文献	083
6	故障树诊断方法	084
6.1	故障树概述	084
6.2	故障树定性分析与定量分析	086
6.3	基于故障树的机载镉镍蓄电池故障检测	092
6.4	基于故障树的航空磁电机故障检测	097
6.5	本章小结	107
	参考文献	107
7	专家系统诊断方法	108
7.1	专家系统基础	108
7.2	专家系统的知识获取与知识表示	111
7.3	专家系统的推理方式与控制策略	115
7.4	基于 CLIPS 的飞机电气系统专家系统案例	116
7.5	本章小结	119
	参考文献	120
8	故障诊断的神经网络方法	121
8.1	神经网络基础	121
8.2	BP 神经网络算法及其改进算法	125
8.3	BP 神经网络在模拟电路故障诊断中的应用	129

8.4	径向基神经网络在自动驾驶仪故障诊断中的应用	132
8.5	本章小结	138
	参考文献	138
9	模糊诊断方法	139
9.1	模糊理论概述	139
9.2	基于模糊理论的机载气象雷达故障诊断	146
9.3	基于模糊信息融合的运算放大器电路故障诊断	148
9.4	模糊神经网络在电路故障诊断中的应用	150
9.5	本章小结	154
	参考文献	154
10	航电设备故障自动化测试	155
10.1	自动化测试概述	155
10.2	FMC 自动化测试实例	158
10.3	航空数字电路板自动化测试实例	171
10.4	本章小结	176
	参考文献	176
11	甚高频通信导航设备故障诊断实践	177
11.1	甚高频通信导航收发机系统结构	177
11.2	甚高频通信导航收发机系统工作原理	178
11.3	甚高频通信导航收发机常见故障分析	186
11.4	本章小结	195
	参考文献	196
12	气象雷达故障诊断与维修实践	197
12.1	气象雷达概述	197
12.2	气象雷达 BIT	200
12.3	气象雷达故障空地传输与监控	205
12.4	气象雷达故障的自动化测试	208
12.5	空管气象雷达故障检测与诊断	216
12.6	本章小结	228
	参考文献	228

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:

① 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; ② 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；③提高气象雷达的探测能力和预警能力；④采用 TCAS 对空监视和预测可能发生的碰撞；⑤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；⑥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：

① 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）。

② 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）。

③ 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）。

④ 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。当某一层次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简单的一一对应关系，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。

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

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。

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

正态故障率函数 $\lambda(t)$ 可用式 (1.12) 表示。

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

正态可靠度函数 $R(t)$ 可用式 (1.13) 表示。

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

(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。

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

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。

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

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