



天津中德应用技术大学  
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 本科生毕业设计

B737NG 飞机空调系统典型故障分析与排故流程方案研究  
Research on Typical Fault Analysis and Troubleshooting  
Process Scheme of B737NG Aircraft Air Conditioning System

姓 名 魏然

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 魏志民

职 称 讲师

完成时间 2022年6月3日



**天津中德应用技术大学**  
**Tianjin Sino-German University of Applied Sciences**

## **本科生毕业设计**

**B737NG 飞机空调系统典型故障分析与排故流程方案研究**  
**Research on Typical Fault Analysis and Troubleshooting**  
**Process Scheme of B737NG Aircraft Air Conditioning System**

姓 名 魏然

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 魏志民

职 称 讲师

完成时间 2022年6月3日

**天津中德应用技术大学**  
**本科生毕业设计（论文）选题申报表**

学 院	航空航天学院		申 报 人	姓 名	魏志民
专 业	飞行器制造工程			技术职务	中级
题目名称	B737NG 飞机空调系统典型故障分析与排故流程方案研究				
题目类型	自拟	题目来源	其他项目		
课题来源、背景及意义	<p>B737NG 系列机型已经成为我国民航主力干线机型，空调系统是机上至关重要的系统之一，直接影响到飞机乘坐体验和飞行安全。本课题，将 B737NG 飞机空调系统作为研究对象，通过对收集相关文献资料及航空公司机务人员提出的有关空调系统常见故障的统计，利用 FIM 手册分析，使用故障树分析法进行概率统计，为 B737NG 飞机空调系统排故工作提供有效参考。</p>				
任务及要求	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 查阅相关文献及手册，了解 B737NG 飞机空调系统结构及其工作原理；</li> <li>2. 学习相关的飞机故障诊断技术和排故方法；</li> <li>3. 确定航空维修工作中常见的空调系统典型故障案例；</li> <li>4. 利用 FIM 手册，对 B737NG 空调系统典型故障进行分析；</li> <li>5. 使用故障树分析法优化排故方案。</li> </ol>				
工作条件	电脑、FIM 手册、AMM 手册				
知识与能力要求	具备良好的逻辑思维和英语阅读能力，掌握现代飞机空调系统的有关知识，能够熟练使用 FIM 手册，并利用故障树分析法进行分析。				
系（教研室）审查意见：					
无					
负责人(签名)： <u>张健</u> 2021 年 11 月 28 日					



天津中德应用技术大学  
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 毕业设计（论文）任务书

题 目：B737NG 飞机空调系统典型故障分析  
与排故流程方案研究

学 院：航空航天大学

专 业：飞行器制造工程（专升本）

学生姓名：魏然

学 号：20414040207

起止日期：2021 年 12 月 3 日~2022 年 6 月 3 日

指导教师：魏志民

任务书下达日期：2021 年 12 月 3 日

# 毕业设计（论文）任务书

## 1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

随着我国国民经济高速发展，我国民用航空业也随之提升到了全新的高度，B737NG 系列机型已经成为我国民航主力干线机型之一。空调系统是机上至关重要的子系统，直接影响到飞机乘坐体验和飞行安全关键系统之一。因此，对于空调系统产生的典型故障进行案例分析，有利于提高机务维修质量和效率，达到降低维修成本和飞行事故率的目标。

本课题首先收集其空调系统的常见故障，再基于 B737NG 故障隔离手册和故障树故障诊断技术对故障原因进行识别，之后确定排除故障的具体方案。最终，达到提高机务维修工作效率，降低飞机运营成本的效果。

## 2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

### 研究内容 1

利用文献查阅法检索课题相关的技术资料 and 文献资源，掌握 B737NG 系列机型空调系统的结构组成和工作原理。

### 研究内容 2

利用文献查阅法检索课题相关的技术资料 and 文献资源，了解飞机故障诊断技术，掌握故障树分析法。

### 研究内容 3

通过航空公司、维修机构等运维单位的 B737NG 飞机故障记录，收集有关空调系统的常见故障。

### 研究内容 4

使用 B737NG 故障隔离手册和故障树故障诊断技术确定故障点，再明确排故流程。

### 研究内容 5

总结对 B737NG 空调系统典型故障排故过程的经验总结。

### 要求

掌握 B737NG 飞机空调系统结构及飞机故障诊断技术，熟练查阅使用 B737NG 故障隔离手册和飞机维护手册。

# 毕 业 设 计（论 文）任 务 书

3. 毕业设计（论文）课题成果（包括毕业设计论文、图表、实物样品等）：

毕业设计论文一篇

4. 推荐参考资料：

- [1] 徐晓. B737NG 空调系统原理及故障诊断方法的研究[D].西南交通大学,2019.
- [2] 韩书令,唐国俊.B737NG 空调系统功能原理及故障分析[J].科技创新导报,2017,14(27):12-14.
- [3] 郑长野.波音 737NG 飞机空调系统简述和故障浅析[J].科技资讯,2017,15(08):39+42.
- [4] 王舰.波音 737NG 飞机空调系统构型差异研究[J].机电信息,2015(27):45-46.
- [5] 李立群,吴颖建.波音 737NG 飞机空调系统健康检查及故障预测方法[J].航空维修与工程,2015(07):90-92.
- [6] 俞扬. 飞机空调系统故障诊断与案例分析[D].中国民航大学,2014.
- [7] 王真寅. 波音 737 飞机空调系统与故障排除方法研究[D].郑州大学,2015.
- [8] 胡启明.浅谈波音 737 飞机空调系统及常见故障剖析[J].河南科技,2013(03):118-119.
- [9] 李国峰.浅析波音 737NG 飞机液压油污染空调系统故障及其预防[J].航空维修与工程,2013(05):78-80.
- [10] 沈萍,李艳军. 扩展故障树在飞机空调系统排故中的应用[A]. 中国电子学会信息论分会、浙江省光纤通信技术重点研究实验室.2008 年中国高校通信类院系学术研讨会论文集（上册）[C].中国电子学会信息论分会、浙江省光纤通信技术重点研究实验室：中国通信学会青年工作委员会,2009:4.
- [11] Boeing.D633A101-GUN 737NG 飞机维修手册[s].1999-2006.
- [12] Boeing.D280A170 737NG 系统原理手册[s]. 1999-2006.
- [13] Boeing.D633A103-GUN 737NG 故障隔离手册[s].1999-2006.

所在专业审查意见：

同意

负责人： 张健

2021 年 12 月 3 日



天津中德应用技术大学  
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 本科生毕业设计（论文）开题报告

题目：B737NG 飞机空调系统典型故障分析与排故流程方案研究

学院：航空航天大学

专业：飞行器制造工程

学生姓名：魏然

学号：20414040207

起止日期：2021年12月3日-2022年6月3日

指导教师：魏志民

开题日期：2022年3月5日

## 一、开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

### 1. 课题研究背景和意义

自改革开放以来伴随着我国国民经济的迅猛发展，对于民用交通运输业的时效性有了全新的要求，使我国的民用航空业也迎来了新的春天。在“十四五”时期，为了响应党和国家由量变到质变的号召，且随着我国民航业运输量的增长和现有执飞机型的正常老化，若机务维修能力不能提高到新的水平，飞机面临的安全风险势必会越来越大，如何降低飞行事故率提高航司运营经济性成为我国民航业发展的首要目标。反观我国航司的机队构成，B737NG 系列机型已然成为了我国民航业主力干线机型之一，其中空调系统属于直接影响飞行安全和乘客乘坐体验重要的系统之一，所以针对对空调系统的故障排除也是机务维修工作的重要组成部分。

故障的概念是指某个设备或系统不能依照设计者给定的方式完成目标的一种状态，当飞机运行一段时间过后，其中一些元件就会产生磨损、氧化、腐蚀等现象，从而发生故障导致系统不能正常工作。故障树分析法（Fault Tree Analysis, 简称 FTA）是由美国贝尔（BELL）电报公司实验室的沃特森（Watson）和默恩斯（Mearns）等人于 1961-1962 年间率先提出的一种失效分析法，用于预测民兵型洲际弹道导弹的设计工作，成功预测了该型导弹在发射时的随机故障概率，并随着科技的进步与计算技术的应用美国波音公司研制推出了 FTA 的计算机应用程序，有效提高了系统分析效率[2]。目前，故障树分析法已经从航空航天、核工业、化工业等高危行业，逐步进入土木工程、机械、电子等领域，并且实现了广泛使用。本课题，将通过对空调系统故障的统计和飞机故障诊断技术的应用，达到提高机务维修工作质量、降低飞机运营成本的目的。

### 2. 课题相关国内外研究（应用）现状

为了提高飞机机组人员和乘客的安全及乘坐体验，全世界专家学者也在不断针对飞机空调系统的各种故障诊断的方法进行研究。

上世纪七十年代，随着国外对空调动态性能研究的深入，发现动态性不佳导致诸多故障问题；二十世纪九十年代，美国空军研究部门曾在军用标准中指出，空调系统在研发阶段必须使用 EASY 计算机仿真系统代替传统的静态分析模式，并对现有空调故障原因加以研究进行数学概率分析；由 University of Hamburg 的 C. Muller 和 D. Scholz 等人组成的团队，构建了飞机座舱环境控制系统功能组件模型库（FLECS），提出了以仿真模型为基础的环控系统故障诊断方法，也为空调系统研究提供了全新的思路；United Technologies 与 University of Connecticut 在 2015 年，针对飞机空调系统的热交换器的故障模式进行合作，该团队基于小波形变换的信号处理方法对其进行故障隔离诊断，并进行空调系统建模，对系统层面的故障定位和隔离进行研究。

进入本世纪以来，随着我国民航事业的发展，我国也逐步加强了有关飞机空调系统及其常见故障的研究。2004 年何慧珊、寿荣中等人通过计算机对空调控制系统进行动态性能

的相关研究；同年，何君、姚洪伟等人使用 matlab 中 simulink 工具，通过数学方法对空调系统组件构建仿真模型，从而对空调系统各部分的实际工况的动态过程进行分析，用于对空调系统故障的诊断；南京航空航天大学的李月冰于 2016 年，使用故障树分析法，为飞机空调系统故障进行分析归类。

总体来说，由于我国近年来科研人员及专家学者的不断探索和研究，我国对民航飞机乃至军机空调系统典型故障的认知已经有了显著的提高，通过对数学模型和计算机技术应用，业界逐步意识到故障不仅仅是一种状态的体现，也和识别方法息息相关，所以为了弥补领域空白仍需投入大量人力物力，来提高故障诊断技术的高度。

#### 参考文献

- [1] 龙江, 刘峰, 张忠波. 现代飞机结构与系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2016.
- [2] 李彦锋. 模糊故障树分析方法及其在复杂系统可靠性分析中的应用研究[D]. 电子科技大学, 2009.
- [3] 徐晓. B737NG 空调系统原理及故障诊断方法的研究[D]. 西南交通大学, 2019.
- [4] 韩书令, 唐国俊. B737NG 空调系统功能原理及故障分析[J]. 科技创新导报, 2017, 14(27):12-14.
- [5] 郑长野. 波音 737NG 飞机空调系统简述和故障浅析[J]. 科技资讯, 2017, 15(08):39+42.
- [6] 王舰. 波音 737NG 飞机空调系统构型差异研究[J]. 机电信息, 2015(27):45-46.
- [7] 李立群, 吴颖建. 波音 737NG 飞机空调系统健康检查及故障预测方法[J]. 航空维修与工程, 2015(07):90-92.
- [8] 俞扬. 飞机空调系统故障诊断与案例分析[D]. 中国民航大学, 2014.
- [9] 王真寅. 波音 737 飞机空调系统与故障排除方法研究[D]. 郑州大学, 2015.
- [10] 胡启明. 浅谈波音 737 飞机空调系统及常见故障剖析[J]. 河南科技, 2013(03):118-119.
- [11] 李国峰. 浅析波音 737NG 飞机液压油污染空调系统故障及其预防[J]. 航空维修与工程, 2013(05):78-80.
- [12] 沈萍, 李艳军. 扩展故障树在飞机空调系统排故中的应用[A]. 中国电子学会信息论分会、浙江省光纤通信技术重点研究实验室. 2008 年中国高校通信类院系学术研讨会论文集(上册)[C]. 中国电子学会信息论分会、浙江省光纤通信技术重点研究实验室: 中国通信学会青年工作委员会, 2009:4.
- [13] 李超役. 民用飞机空调系统健康评估与故障诊断方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2018.
- [14] Boeing.D633A101-GUN 737NG 飞机维修手册[s]. 1999-2006.
- [15] Boeing.D280A170 737NG 系统原理手册[s]. 1999-2006.
- [16] Boeing.D633A103-GUN 737NG 故障隔离手册[s]. 1999-2006

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021年12月3日-2022年1月2日	1. 制订研究方案	1. 形成切实可行研究方案，明确技术路线。
2022年1月3日-2022年1月18日	2. 查阅课题技术资料 and 文献资源，掌握 B737NG 系列机型空调系统的结构组成和工作原理，学会飞机故障诊断技术，掌握故障树分析法。	2. 掌握对 B737NG 空调系统的结构、工作原理，熟练使用故障树分析法。
2022年1月18日-2022年2月2日	3. 查询资料文献航空公司、维修机构等运维单位的 B737NG 飞机故障记录，收集有关空调系统的常见故障。	3. 完成对飞机空调系统典型故障的收集工作。
2022年2月3日-2022年3月27日	4. 使用 B737NG 故障隔离手册确定故障原因，使用故障树分析法进行故障分析，明确排故流程。	4. 完成对飞机空调系统典型故障的排故和分析。
2022年3月28日-2022年4月7日	5. 撰写论文。	5. 完成论文。
2022年4月8日-2022年6月3日	6. 论文查重和答辩	6. 查重和答辩通过。
完成课题的现有条件	B737NG 系统原理手册、B737NG 故障隔离手册、B737NG 飞机维修手册、B737 飞机故障记录、故障树故障分析模型。	
指导教师 意见	同意开题  指导教师： <u>魏志民</u> <u>2022</u> 年 <u>3</u> 月 <u>5</u> 日	
开题答辩 小组意见	同意开题  组 长： <u>姚冀涛</u> <u>2022</u> 年 <u>3</u> 月 <u>5</u> 日	

# 天津中德应用技术大学

## 本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：魏然

2022年6月3日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：魏志民

2022年6月3日

## 摘 要

民用飞机空调系统是保障飞机座舱环境稳定性的重要系统,其正常运转与否将直接影响飞机的飞行安全和乘客的飞行体验。在地面维护过程中,如发现空调系统存在故障,则必须进行停场维修,但由于空调系统的故障率相对较低,可参考的案例较少,因此所需排故时间往往较长,进而影响了飞机的签派可靠性。针对以上问题,本文选取我国保有量最大的 B737NG 飞机作为研究对象,通过对 B737NG 飞机空调系统的典型故障进行分析研究以提高签派可靠性。

本文阐述了对 B737NG 飞机空调系统典型故障进行研究分析的实际意义,简要介绍了针对飞机空调系统的国内外研究现状,并介绍了诸如:专家系统、神经网络、模糊模型及故障树分析法等在航空领域常见的故障诊断模型。通过与天津航空、江西航空及东方航空的飞机维修技术人员的多次线上线下交流,确定了航线上三个相对常见但难以确定原因的典型故障,针对故障现象进行了问题描述,利用 FIM 手册给出了相应的排故流程,之后基于故障树分析法绘制出了对应的树状分析图,再通过向各航空公司相关人员发放调研统计表的方式,对各底事件发生频次进行了定性分析。课题分析结果将对 B737NG 飞机空调系统的典型故障排除过程起到有益作用,同时对于探索如何提高飞机维修效率、降低维修成本的方法具有积极意义。

**关键词:** B737NG; 飞机空调系统; 典型故障; 故障树

## Abstract

The Aircraft Air Conditioning System of civil aircraft is an important system to ensure the environmental stability of the aircraft cabin. The operation of the Aircraft Air Conditioning System will directly affect the flight safety of the aircraft and the flight experience of passengers. During the ground maintenance, if the air-conditioning system is found to be faulty, suspension for maintenance will be necessary. Nevertheless, because the failure rate of the air-conditioning system is relatively low and cases for reference is rare, the troubleshooting time is often long, which in turn affects aircraft dispatch reliability. Targeting the above problems, this paper selects the B737NG aircraft with the largest inventory in China as the research object, and analyzes and researches the typical faults of the air conditioning system of the B737NG aircraft to improve the dispatch reliability.

In this paper, the practical significance of the research and analysis of the typical faults of the B737NG aircraft air conditioning system is well explained. We briefly introduced the research status of the aircraft air conditioning system at home and abroad, and introduce common fault diagnosis models in the aviation field, such as: expert system, neural network, fuzzy model and fault tree analysis method. Through multiple online and offline exchanges with aircraft maintenance technicians from Tianjin Airlines, Jiangxi Airlines and China Eastern Airlines, three typical faults that are relatively common but difficult to identify on the route are identified, and the problem is described for the fault phenomenon. The corresponding troubleshooting process is provided based on the FIM handbook. Next, the corresponding tree-like analysis diagram is drawn based on the fault tree analysis method. Then the frequency of occurrence of each bottom event is qualitatively analyzed by distributing survey statistics to relevant personnel of each airline. The results of the subject analysis will play a beneficial role in the typical troubleshooting process of the B737NG aircraft air conditioning system. In the mean time, it also has positive significance for exploring how to improve aircraft maintenance efficiency and reduce maintenance costs.

**Key words:** B737NG; Aircraft Air Conditioning System; Typical Fault; Fault Tree

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 选题背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 国外研究现状.....	1
1.2.2 国内研究现状.....	2
1.3 本文研究内容.....	2
第二章 飞机故障诊断技术.....	4
2.1 专家系统.....	4
2.2 模糊理论.....	5
2.3 神经网络.....	6
2.4 故障树.....	8
2.5 本章小结.....	10
第三章 B737NG 飞机空调系统典型故障分析.....	11
3.1 飞机空调系统简介.....	11
3.2 空调系统典型故障分析.....	12
3.2.1 机舱出现不明烟雾.....	12
3.2.2 左侧组件再现跳开灯（PACK）亮.....	16
3.2.3 机舱温度调节失效.....	18
3.3 本章小结.....	21
第四章 基于故障树分析法的排故流程方案分析.....	22
4.1 故障树分析软件.....	22
4.1.1 Talfata 软件.....	22
4.1.2 FreeFta 软件.....	22
4.2 故障树分析.....	23
4.2.1 机舱出现不明烟雾的故障树分析.....	23
4.2.2 左侧组件再现跳开灯（PACK）亮的故障树分析.....	25

4.2.3 机舱温度调节失效的故障树分析.....	26
4.3 本章小结.....	28
结论.....	29
参考文献.....	30
致谢.....	31

## 第一章 绪论

### 1.1 选题背景及意义

自改革开放以来,我国国民经济迅猛发展,对于民航时效性、经济性和安全性有了新的要求。1986年,全国第一架 B737-300 型飞机迎来了首航,随着时间的推移现如今 B737NG 系列机型已然成为了我国民航业的主力机型之一。但是,在这近三十年间飞行任务逐渐加重,长时间的飞行和先天设计缺陷导致 B737 飞机大小故障不断,一线机务人员则要花费大量精力进行故障隔离和排故的工作。

空调是环境控制系统的重要组成,其具有供氧、调节机舱压力和温度的作用,保证驾乘人员的安全性、舒适性和机载设备的正常运转。随着飞行高度和速度的提升,飞机的运行环境越来越复杂,飞机空调系统应运而生。在空调系统中出现的故障往往具有突发性,在夏季尤为频发,给航线维护工作带来巨大困难,同时也会对飞机放行可靠性造成严重影响。2005年8月,塞浦路斯的一架 B737 因空调系统故障导致客舱失压,最终在希腊坠毁,机上人员无一幸免;2008年7月,一架美联航的客机因客舱出现不明烟雾,机组人员放下氧气面罩,最终在被降机场安全降落,事后经调查该机电子老化短路引起的烟雾,经进入空调系统进入客舱;2014年,一架由新加坡航空执飞,从伦敦飞往阿塞拜疆的飞机发生客舱失压,导致多名常客出现中耳炎的症状。2018年7月,一架国航执行 CA106 航班的 B737 飞机,在飞行途中突发客舱失压,最终经过紧急下降高度后安全抵达大连机场;甚至于 2014年3月失联的马来西亚航空公司的 MH370 也一度被怀疑是因为客舱失压缺氧导致飞行员缺氧昏迷从而造成了悲剧。这些事故和灾难为人们敲响了警钟,让人们意识到飞机空调系统对于飞行的重要性,也更加注重针对空调系统性能的研究,加强了对空调系统的故障排除和分析。

近年来,为提高效率越来越多的专家学者引入故障诊断技术,对飞机各大系统的典型故障进行分析,根据故障原因进行排故流程的优化,使原本复杂繁琐的排故工作更加科学、高效。本文将通过对空调系统典型故障的收集和飞机故障诊断技术的应用,达到提高机务维修工作质量、降低飞机运营成本的目的。

### 1.2 国内外研究现状

#### 1.2.1 国外研究现状

在国外，随着对空调性能由静态到动态研究的深入，全球专家学者也在不断针对飞机空调系统的各种故障诊断方法进行研究。上世纪七十年代，国外专家学者开始进行飞机空调系统的动态性能方面的研究，通过对各式飞机空调系统进行空地实验，得出动态性会影响系统稳定性，不良的动态性能会导致诸多故障的发生。九十年代美国空军发布新版本军标，要求在对空调系统的研发过程中，要对空调系统故障使用故障诊断技术，并且使用电脑动态模拟分析逐步替代传统的静态分析<sup>[1]</sup>。Lester 与 Maxwell 在飞机空调控制系统的故障研究中心引入了专家系统的方法<sup>[2]</sup>。模糊理论也在空调控制系统故障的研究过程中被 Donald 使用<sup>[3]</sup>。由 University of Hamburg 的 C. Muller 和 D. Scholz 等人组成的团队，构建了飞机座舱环境控制系统功能组件模型库（FLECS），提出了以仿真模型为基础的环控系统故障诊断方法，也为空调系统研究提供了全新的思路<sup>[4]</sup>。

### 1.2.2 国内研究现状

我国关于飞机故障诊断技术的研究较晚，但进入本世纪以来，我国也逐步开始了有关飞机空调系统动态性能及其常见故障的研究。2004 年何慧珊、寿荣中等人通过计算机技术的应用对空调控制系统进行动态性能的相关研究<sup>[5]</sup>。同年，北京航空航天大学的何君、赵竟全和袁修干的研究，优化了模糊控制法在飞机环境控制系统的应用<sup>[6]</sup>。2011 年杜乔等人，利用神经网络对飞机环境控制系统故障建模，使得故障隔离效率大大提高<sup>[7]</sup>。吴旭铮进行了飞机虚拟维修仿真设计重用的研究，证明了利用设计重用提高仿真效率的可行性。2016 年李冰月在南京航空航天大学，用 FTA 诊断法对空调系统故障的类目进行划分<sup>[8]</sup>。2018 年，史素青同高路社等人使用 PID 算法建立了故障仿真模型，对飞机空调系统的工作原理及其常见故障进行了研究<sup>[9]</sup>。2019 年西南交通大学的徐晓对传统排故流程采用 FMECA 的方法进行分析，并设计了一套全新的一套飞机健康管理系统<sup>[9]</sup>。

### 1.3 本文研究内容

本文介绍了 B737NG 飞机空调系统的发展历程、结构以及典型故障的故障树分析结果进行讨论研究。在第一章中，简述了国内外针对飞机故障诊断技术的发展。第二章具体介绍了常用的故障诊断技术。第三章对飞机空调系统进行介绍，并通过同机务管理人员的沟通的方式及在网络上查询有关文献资料方法，收集 B737NG 座舱空调系统在运维一线过程中产生的典型故障进行整理，使用 B737NG 故障隔离手册指引确定故障点。在第四章中，利用故障树分析法建立故障树，对产生故障顶事件的各种中间

及基本事件进行定性分析。最后，整理上述研究内容，达到为运维单位缩短对空调系统的故障隔离时间、提高排故效率并通过概率计算的方式提前对系统进行保养检查起到降低故障率的作用。

## 第二章 飞机故障诊断技术

随着科学技术的进步，当代工业集成化水平也越来越高，功能的完善和部件的增多使得故障的种类与几率也大幅提高。与此同时伴随着计算机技术的发展，越来越多的故障诊断技术也应运而生，其目的就是为了预防和快速排除故障，节约时间减小经济损失。在飞机故障领域，常见的故障诊断技术有：专家系统、模糊理论、神经网络以及故障树分析法这四类。

### 2.1 专家系统

#### 1. 专家系统的概述

专家系统并不是一种单一的产品，而是一种将人类专家的知识 and 决策力融入计算机的一套人工智能理念，利用计算机的存储分析功能解决专业性强的复杂问题，节约了大量的人力、物力及财力<sup>[10]</sup>。

#### 2. 专家系统的工作原理

最基本的专家系统包含三个模块：人机接口、推理机和知识库。基本结构如图 2-1 所示。

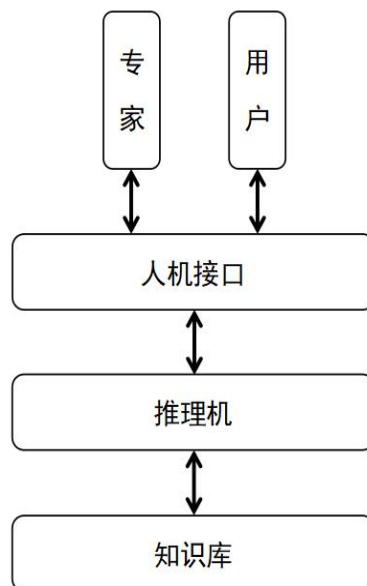


图 2-1 专家系统基本结构图

一般的专家系统包含：人机接口、推理机、解释机、知识获取机构、综合数据库和知识库等六个部分组成。一般结构如图 2-2 所示。

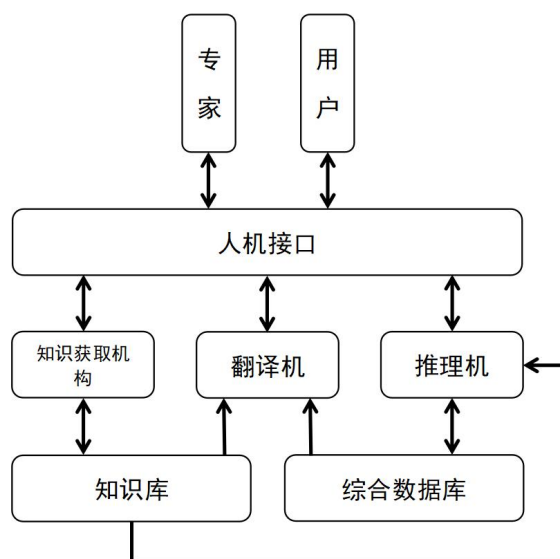


图 2-2 专家系统一般结构图

工作原理分为知识输入和知识输出两个路径：

(1) 知识输入：成熟的专家系统不仅限于接收专家授予的知识，也可以通过知识获取机构对知识库进行优化，具备一定的自主学习功能。

(2) 知识输出：当用户在人机接口提出问题时，系统将在知识库中进行检索并通过推理机反馈给用户。对于较为完善的系统，会将推理机的运算结果存储在数据库中经过翻译之后反馈给用户，使其更好理解。

### 3. 专家系统的特点

(1) 启发性：利用人类专家的经验积累对问题进行处置。

(2) 透明性：具有解释功能，可以更好地帮助用户理解。

(3) 灵活性：不同的专家系统都具有知识库与推理机相互独立的结构，故只需更换或融合新的知识库就可以使其在全新领域应用。

### 4. 专家系统的应用

由于具有庞大的知识库和独立的计算能力，该系统不仅在医疗、机械、工程等自然科学得到广泛应用，同时也在政治等社会科学领域得到推广<sup>[11]</sup>。

## 2.2 模糊理论

### 1. 模糊理论的概述

运用了连续隶属度函数，能够按照像人脑一样笼统的逻辑思维，对问题进行分析的模式叫模糊理论。

## 2. 模糊理论的工作原理

在模糊理论中最为重要的一环就是模糊控制（如图 2-3 所示），在发现问题时计算机经过模糊化、模糊推理、清晰化这四个步骤，模仿人脑思维对问题进行分析解答。

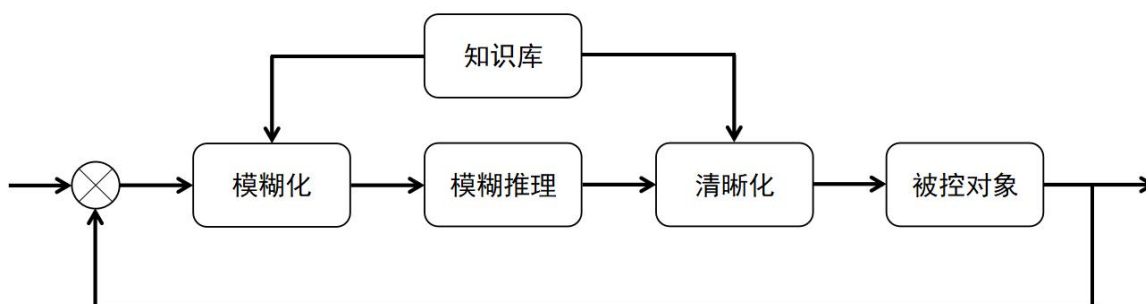


图 2-3 模糊控制基本结构图

## 3. 模糊理论的特点

优点：

- (1) 可以将复杂问题简单化，尤其适合于时变、非线性以及模型不完全的问题中。
- (2) 具有较强的适应性和较佳的容错性。
- (3) 用户和系统之间可以用自然语言进行交流。

缺点：

- (1) 模糊规则和隶属函数需要人的经验积累建设，导致对复杂系统的稳定性不佳。
- (2) 信息简单会导致控制精度降低、动态品质不良甚至系统失效。
- (3) 模糊理论的应用主要为模糊理论从型样识别、自动化控制、资讯处理等工程科技领域，逐渐应用于心理学、教育学等人文科学方面。

## 2.3 神经网络

### 1. 神经网络的概述

人工神经网络是一种仿生科学，通过对动物神经系统的研究开发出了一种可以进行现实拟合、预测、分类等功能的信息处理技术<sup>[12]</sup>。

### 2. 神经网络的工作原理

生物神经元由感受部、传导部、效应部三部分组成（如图 2-4 所示）。

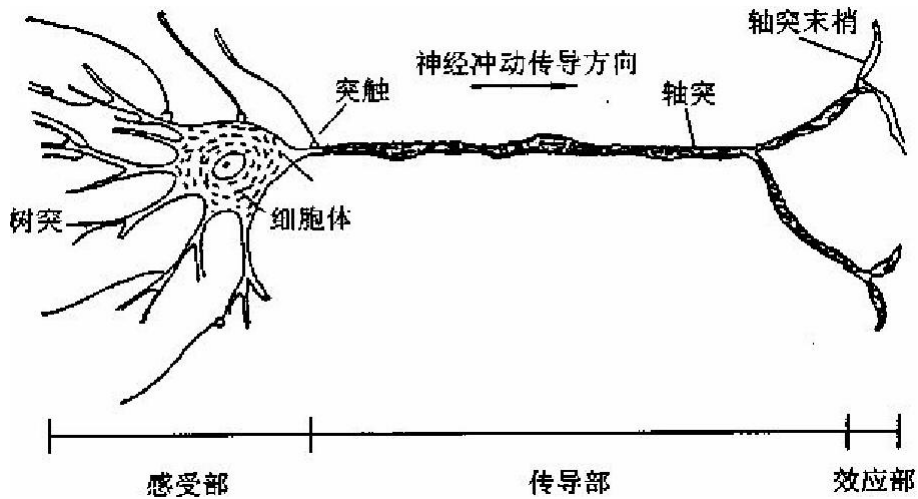


图 2-4 生物神经元

人工神经网络的形式与之相似分为：输入、隐含、输出三层（如图 2-5 所示）。

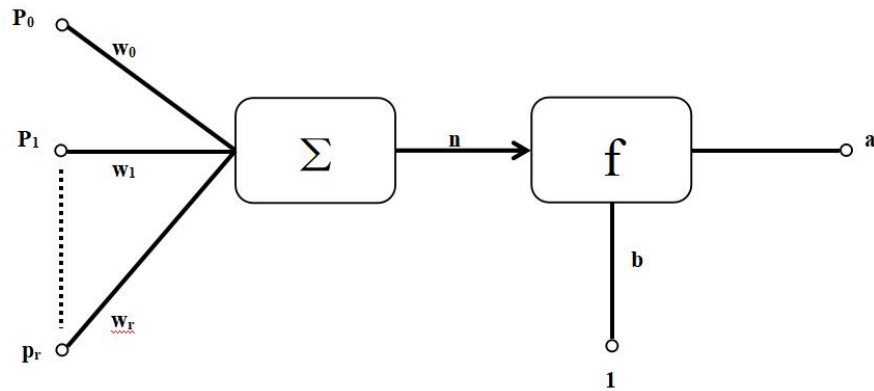


图 2-5 单层神经网络

### 3. 神经网络的特点

- (1) 自适应和学习性：当使用环境发生变化时，能够自行调节阈值、权值。
- (2) 鲁棒性与容错性：当存储使用分布法时，系统运算能力虽会降低，但不会发生太过严重的后果。
- (3) 计算的并行性及存储的分布性：由于神经网络是由无数个神经元共同搭建组成的，因此每个神经元彼此之间即可独立计算又可相互协同，使其处理效率大大提高。
- (4) 非线性：宏观来看，网络的知识都被储存在阈值和权值之中，由此一来就拥有了非线性问题的处理能力。

### 4. 神经网络的应用

由于上述的特点，使得神经网络可以完成电子、娱乐、金融、自动控制等多领域的应用。

## 2.4 故障树

### 1. 故障树的概述

故障树由美国贝尔实验室的沃森与默恩斯于 1962 率先提出，是一种将发现的故障作为出发点，将包括软件、硬件、环境、人为因素等在内的各种潜在条件作为分析要素而建立的树状失效分析模型<sup>[13][14]</sup>。

### 2. 故障树的工作原理

具体步骤：

(1) 确定顶事件，即故障事实。

(2) 针对顶事件收集相应的文献资料，确保知识全覆盖，避免因知识储备不足导致的分析错误。

(3) 依照基本的故障树概念和逻辑关系（如表 2-1）确定逻辑关系。

表 2-1 故障树定义列表

主分类	定义	子分类	定义
底事件	仅导致其他事件的原因事件，位于故障树底端，是不必再分解的事件。	基本事件	也称为底事件，是不必探究其发生原因的底事件，用圆形表示。
		未探明事件	暂时不必或无法探明其原因的底事件，用圆形表示。
结果事件	由其他事件组合导致的事件。	顶事件	位于故障树顶端，是全体事件共同作用的结果事件
		中间事件	介于顶事件和底事件之间，同时作为输入事件和输出事件。
与门	当输入事件都发生时，输出事件才发生的逻辑关系。		
或门	至少一个输入事件发生时，输出事件就发生。		

(4) 由上至下绘制故障树（如图 2-6）。

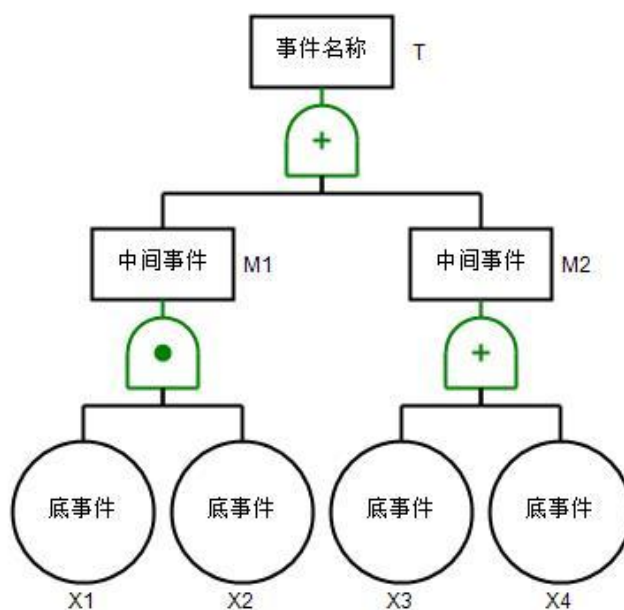


图 2-6 故障树的形式

(5) 根据故障树进行定性分析，对故障进行评估。

### 3. 故障树的特点

优点:

- (1) 事故与原因间的因果关系直观。
- (2) 可以进行定性分析排出优先级，也可以进行定量分析提供量化指标。
- (3) 使用门槛较低，使用方法容易掌握，兼顾了设计与维修等多层次人员的使用。

缺点:

- (1) 有局限性，只能进行事件分析，而不能对完整系统做出分析。
- (2) 在定量分析时，需要底事件的具体发生概率。
- (3) 对复杂事件建立的故障树过于庞大，不利于分析计算。

### 4. 故障树的应用

故障树分析法依靠失效分析和可靠度计算的优势，并伴随着计算机技术的发展和系统软硬件的日趋完善，使故障树分析法作为可靠性分析工具被大量运用于工程事件中，同时也可以为专家系统等人工智能系统提供理论分析基础。目前，故障树分析法主要用于宇航、化工、电子、交通运输、核工业、医药等领域，同时在软件工程和社会服务等行业鲜有成效。

## 2.5 本章小结

在本章中，介绍了专家系统、模糊理论、神经网络和故障树四种在飞机故障诊断中常用的故障诊断技术。通过对各种诊断技术的对比，故障树分析法的，与本课题的研究需求更加贴合，在后续的第四章中将选取故障树分析法作为故障分析的工具，利用其鲜明的逻辑性展示故障原因，对故障的诸多诱因进行分析。

### 第三章 B737NG 飞机空调系统典型故障分析

本章对 B737NG 飞机的空调系统进行简单介绍，之后针对在与航空公司机务维修人员探讨中得出的三个空调系统典型故障进行故障分析。

#### 3.1 飞机空调系统简介

飞机空调系统属于环境控制系统的主要组成部分，为了满足环控系统的需求，飞机空调系统具有保持机舱压力、循环飞机机舱空气、冷却引气气源、冷却控制空气流量、调节机舱温度以及上述功能的数据监测，由分配系统、增压、设备冷却、加热、冷却、温控等六个子系统组成（如图 3-1 所示）<sup>[15]</sup>。

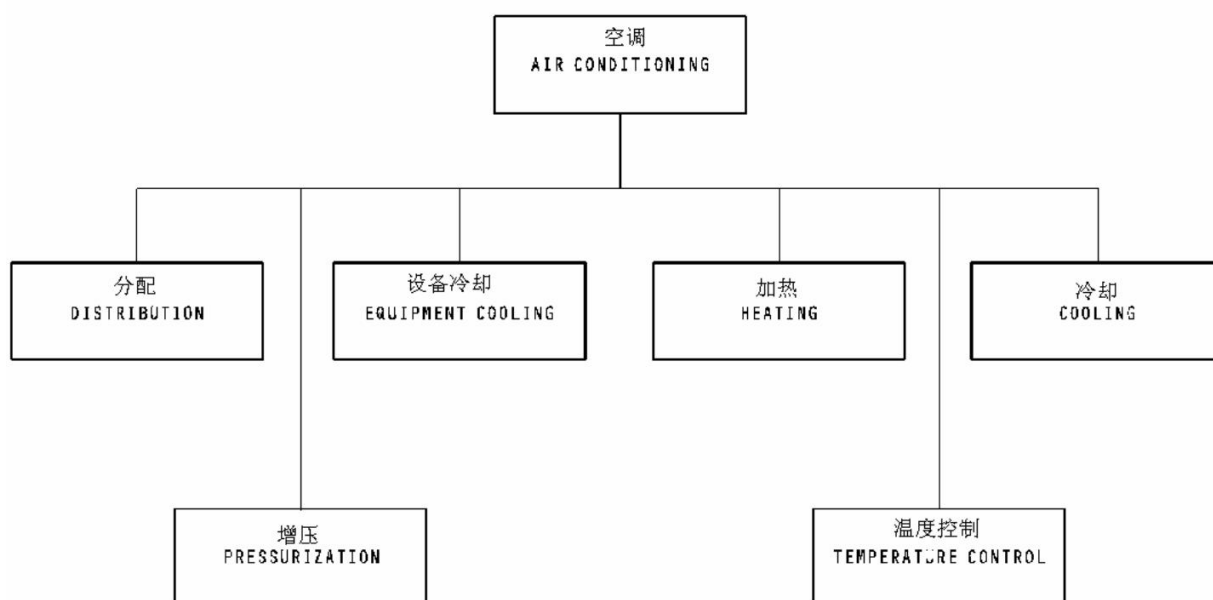


图 3-1 飞机空调系统的组成

飞机空调系统主要部件的位置分布（如图 3-2 所示）。其中分配系统主分配总管、再循环风扇、地面空气接头在分配舱，设备冷却系统部分部件在电子电气设备舱（EE 舱）；冷却系统的两个空调组件在空调舱内；温控系统分散在客舱分配管路、EE 舱和驾驶舱中；增压系统分布在驾驶舱、EE 舱和后货舱中。

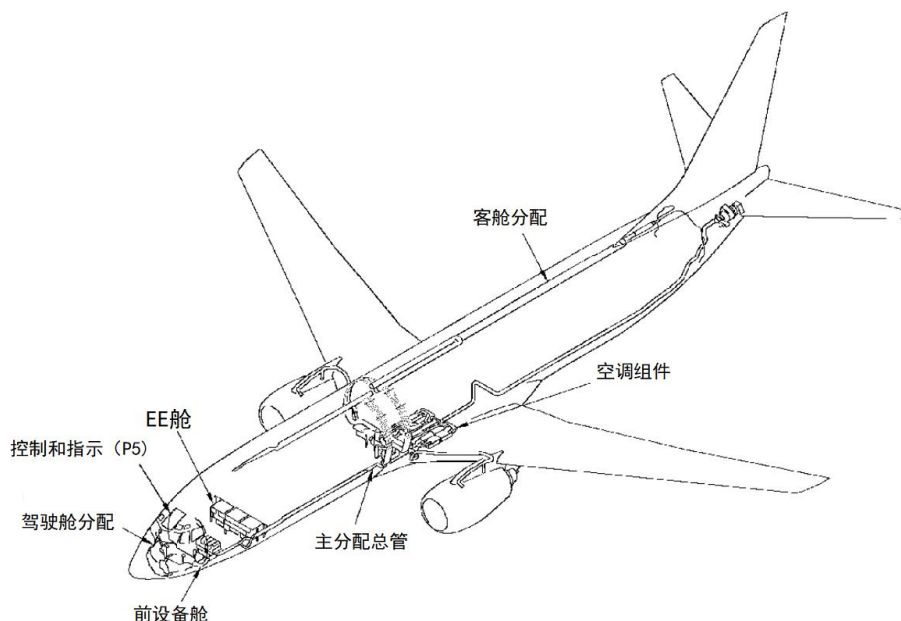


图 3-2 飞机空调系统部件位置

## 3.2 空调系统典型故障分析

本节将对机舱出现烟雾、机舱温度调节失效、左侧组件再现跳开灯（PACK）亮这三个空调系统典型故障进行排故分析。

### 3.2.1 机舱出现不明烟雾

1. 故障现象：驾驶舱或客舱出现烟雾且烟雾来源未知。

2. 故障排除：

（1）检查 APU 排除的气体是否存在滑油污染。

1) 打开编号为 315A 的 APU 整流罩门，使用油位观察工具确认 APU 滑油油位是否正常，油位低于 FULL 标识，需检查维护记录，看看油耗平均值是否有变化。注意：新进行过检修的 APU 耗油量应为每小时 0.008 夸脱（8cc），如果耗油量超过这个标准不一定表明 APU 存在问题，但如果耗油量迅速增加，那么 APU 就可能会出现问题。

2) 通过磁性油塞检查滑油中是否存在金属碎片，金属碎片会导致轴承和密封件损坏，如果密封件损坏会导致机油损失和启动系统污染，气动系统中的油污会引起烟雾。

3) 检查 APU 进气道及其外部区域是否有流体进入，如果有流体存在对其进行清除。

4) 按照以下步骤检查 APU：拆解并检查 APU 排气阀和 APU 上游排气管是否存在含水滑油；拆解并检查 APU 防喘控制阀和上游管路是否存在含水滑油；检查负载压缩机和动力段压缩机是否受损。

- 5) 使用地面供电车供电。
- 6) 按顺序打开 192CL、192CR 和 192DR 检修面板（如图 3-2）。
- 7) 将 SPL-2462 钝化剂和地面气源车供气软管用连接器连接。
- 8) 确保 P5 前顶板上的开关调整至指定位置，P5 面板位置如图 3-3 所示：

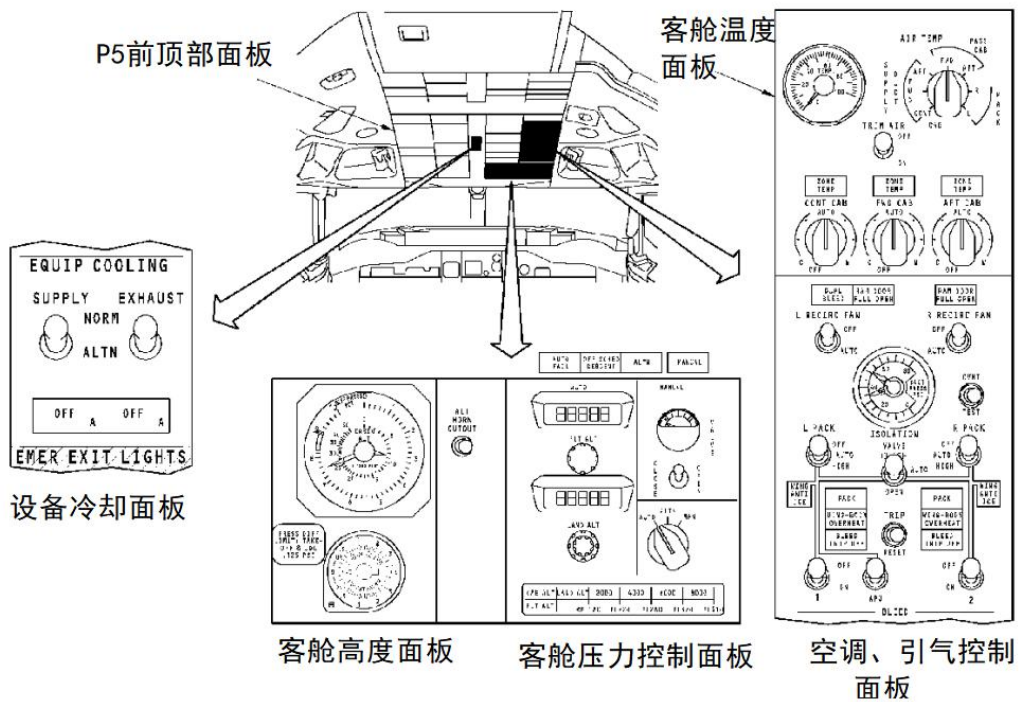


图 3-3 P5 前顶板示意图

- (A) 在 P5-10 空调面板上：
    - (a) L 和 R PACK 开关设置为 OFF。
    - (b) 再循环风扇开关设置为 OFF。
    - (c) L 和 R 再循环风扇设置为 OFF。
    - (d) 配平空气开关设置为 OFF。
  - (B) 在 P5-11 热防冰面板上：机翼、发动机 1 和 2、开关设置为 OFF。
- 9) 启动 APU 使其保持稳定工作，确保 P5-10 面板上隔离阀门为 OPEN、APU 排气开关为 ON。
  - 10) 待 APU 工作五分钟后，鼻嗅有无污染空气，观察排出气体是否存在烟雾。

11)如果有被污染的排气,则需要更换 APU 并对空调和气动系统执行油污祛除任务。若故障仍无改善,则针对性的将被污染的臭氧转换器、热交换器、冷凝器、再加热器更换;若是左侧冷却组件有烟雾,请更换驾驶室消音器。

12) 如果没有产生烟雾,则故障修复完成。

(2) 检查左发动机排气是否存在滑油污染。

1) 检查左发动机滑油量是否正常,如果油位接近或超过视镜顶部,则继续。位低于满位,则检查维护记录,查看平均耗油量是否有变化。

2) 利用控制显示组件查询传感器数据管理系统,检查是否有金属碎片。

3) 检查左发动机叶片是否存在鸟击的迹象或油渍。

4) 使用地面供电车供电。

5) 确保 P5 前顶板(如图 3-3)上的开关调整至指定位置:

(A) 在 P5-10 空调面板上:

(a) APU、发动机 1 和 2 开关设置为 OFF。

(b) 隔离阀门开关设置为 OFF。

(c) L 和 R PACK 组件开关设置为 OFF。

(d) 再循环风扇开关设置为 OFF。

(e) L 和 R 再循环风扇开关设置为 OFF。

(f) 配平空气开关设置为 OFF。

(B) 在 P5-11 热防冰面板上:将机翼发动机 1 和 2、防冰开关设置为 OFF。

6) 按顺序打开检修面板(如图 3-2)。

7) 将 SPL-2462 钝化剂和地面气源车供气软管用连接器连接。

8) 用 APU 启动左发动机,让发动机以地面速度怠速运转后,将 P5-10 空调面板上的 APU 排气开关设置为 OFF,隔离阀门开关设置为 OPEN。

9) 待发动机工作两分钟后,在确保遵守所有安全预防措施的前提下靠近发动机,检查左发动机是否存在滑油或燃油造成的烟雾。

10) 如果存在烟雾,执行油污清除任务,从空调和排气系统中清除油污,若故障仍无改善,则针对性的将被污染的臭氧转换器、热交换器、冷凝器、再加热器、驾驶室消音器更换。

- 11) 如果没有产生烟雾, 则故障修复完成。
- (3) 检查右发动机排气是否存在滑油污染, 具体排故流程同上。
- (4) 检查冷却组件是否存在滑油污染。
  - 1) 向气动系统提供压力, 再分别向左右冷却组件提供空气
  - 2) 将 P5-17 温度控制面板上的开关按下列顺序调节:
    - (A) 将驾驶舱和客舱的手动调节开关设置为为制暖。
    - (B) 将配平空气开关设置为 ON。
    - (C) 将驾驶舱、前客舱、后客舱温度调节器设置为全制暖。
  - 3) 让组件运行, 进入到驾驶舱和客舱, 用鼻嗅和目视的方法感受有无烟雾。如果感受到了被污染的空气, 则需要执行油污祛除任务。
  - 4) 若故障仍无改善, 则针对性的将被污染的臭氧转换器、热交换器、冷凝器、再加热器、驾驶室消音器更换。
  - 5) 如果没有产生烟雾, 则故障修复完成。
- (5) 检查液压油罐增压模块和充气阀歧管总成
  - 1) 确保 A 和 B 两个液压油罐已减压。
- 2) 启动 APU, 让 APU 保持稳定运行。
  - 3) 用左右两个冷却组件将空调空气供应至飞机。
  - 4) 对液压油罐加压。
  - 5) 在 APU 和冷却组件运转五分钟后, 关停冷却组件。
  - 6) 将 P5-10 空调面板上的 APU 排气开关设置为 OFF, 等待大约五分钟后, 再将其调回至 ON。
  - 7) 此时如果存在烟雾, 则是压油罐增压模块或充气阀歧管总成故障, 需要分别进行更换。
  - 8) 如果没有产生烟雾, 则故障修复完成。
- (6) 检查再循环风扇
  - 1) 将再循环空气过滤器拆下。
  - 2) 检查过滤器中的污染物情况, 必要时更换新的过滤器。

3) 再次对循环系统进行运行测试, 看看空气再循环风扇或者相关线路在运行时是否产生烟雾。

4) 如果产生烟雾, 则需要更换再循环风扇或修复适用的接线。

5) 如果没有产生烟雾, 则故障修复完成。

3. 可能导致故障发生的原因:

(1) APU 故障: 滑油中存在金属碎屑、负载压缩机、动力压缩机、排气阀、防喘振活门;

(2) 发动机故障: 滑油中存在金属碎屑、发动机叶片破损、叶片上存在油渍或除冰液;

(3) 冷却组件故障: 臭氧转换器、热交换器、冷凝器、再热器、消音器;

(4) 机舱电子设备故障: 厨房设备、娱乐系统、照明设备;

(5) 再循环风扇故障: 风扇叶片破损、线束故障;

(6) 液压油箱故障: 增加模块、充气阀歧管。

### 3.2.2 左侧组件再现跳开灯 (PACK) 亮

1. 故障描述: 机组经常反映飞机在空中巡航时 P5-10 空调组件灯亮, 且重置后再现组件灯亮故障。

2. 故障排除:

(1) 检查左侧组件冲压空气导管堵塞或外来剩余物。

1) 如果管道堵塞或存在外来剩余物, 请执行以下步骤:

(A) 清除堵塞或外来剩余物。

(B) 使左侧空调组件工作。

(C) 如果组件灯没有亮起, 那么故障纠正完成。

2) 如果管道不存在堵塞或外来剩余物, 则继续操作。

(2) 检查左侧冲压进气挡板是否收回。

1) 如果左侧冲压进气挡板未收回, 且轴承支撑组件卡住, 请执行以下步骤。

(A) 拆卸左侧凸轮进气口挡风板门轴总成。

(B) 拆卸并更换轴承支撑组件。

(D) 安装左侧凸轮进气口挡风板门轴总成。

- (E) 使左侧空调组件运转。
- (F) 如果 PACK 灯没有亮起，那么故障纠正完成，将该组件关停。
- 2) 如果左侧冲压进气挡板收回，则继续。
- (3) 对左侧 PACK 或 ZONE 组件的区域温度控制器 M1442 进行 BITE 测试。
  - 1) 如果测试结果显示有故障，则执行下列步骤。
    - (A) 对显示的维护信息执行纠正操作。
    - (B) 打开左侧空调组件。
    - (C) 如果 PACK 灯没有亮起，那么故障纠正完成，关停该组件。
  - 2) 如果测试结果没有显示故障，则继续。
- (4) 清洁左侧组件的热交换器。
  - 1) 打开左侧空调组件，使用逆流洗涤设备清洗集气室和扩散桶。
  - 2) 如果 PACK 灯没有亮起，则您纠正了故障，关停组件。
  - 3) 如果 PACK 灯再现亮，则继续。
- (5) 查找排气过热的报告（排气故障）。
  - 1) 如果存在排气故障，请执行以下操作。
    - (A) 执行故障隔离程序，FIM 36-10 TASK 801。
    - (B) 打开左侧空调组件。
    - (C) 如果 PACK 灯没有亮起，那么故障纠正完成，关停该组件。
  - 2) 如果没有排气故障，则继续。
- (6) 更换左侧组件压缩机排气过热开关，S2。
  - 1) 启动左侧空调组件。
  - 2) 如果 PACK 灯没有亮起，那么故障纠正完成，关停组件。
  - 3) 如果 PACK 灯再现亮，则继续。
- (7) 更换左侧机组涡轮机进口过热开关，S938。
  - 1) 启动左侧空调机组。
  - 2) 如果 PACK 灯没有亮起，那么故障纠正完成，关停机组。
  - 3) 如果 PACK 灯再现亮，则继续。
- (8) 更换左侧机组排气管道的过热开关，S934。

- 1) 启动左侧空调机组。
  - 2) 如果 PACK 灯没有亮起，那么故障纠正完成，关停机组。
  - 3) 如果 PACK 灯再现亮，则继续。
  - (9) 更换左侧机组空气循环器。
    - 1) 启动左侧空调机组。
    - 2) 如果 PACK 灯没有亮起，那么故障纠正完成关停机组，故障排除结束。
3. 可能导致故障的原因：
- (1) 冲压空气导管堵塞或外来剩余物；
  - (2) 左侧冲压进气挡风板未能收回；
  - (3) 温度控制系统故障；
  - (4) 左侧温度控制阀 V139；
  - (5) 热交换器脏污；
  - (6) 排气温度过热；
  - (7) 组件过热开关：
    - 1) 左侧压缩机排气过热开关，S2；
    - 2) 左侧涡轮进气口过热开关，S938；
    - 3) 左侧组件排气管过热开关，S934；
  - (8) 左侧空气循环机。

### 3.2.3 机舱温度调节失效

1. 故障描述：当飞机在地面或空中时，温度控制器全部设置为 FULL COLD 均不能充分制冷驾驶室或前后舱；或当配平空气开关设置为 ON 时，控制器无故障，一侧组件温度远高于另一侧的温度。上述两种情况都会显示该故障。

2. 故障排除：

- (1) 检查备用温度控制阀（STCV）。

注意：此检查将确保 STCV 工作，此检查还将隔离 ACM 涡轮转轴破裂的问题。

- 1) 对组件温控器（PTC）和区域温控器（ZTC）进行 BITE 测试。如果 BITE 测试显示故障，则纠正发现的所有问题并继续。

- 2) 按顺序打开 192CL 和 192CR 检修面板。

- 3) 打开 APU 并向飞机供气。
- 4) 在 P5-10 空调面板上, 将 L(R) 组件开关设置为 AUTO。
- 5) 在 P5-17 温控面板上, 将驾驶室、前舱、后舱温控器设置为 FULL COLD, 将空气配平设置为 ON。
- 6) 使组件运行直到温度稳定。
- 7) 检查 L (R) STCV, V140 (V142), 是否处于 CLOSED。L(R)STCV 处于完全关闭位置, 且 L (R) STCV 的下游管路变热, 则更换需要将其更换。如果 L (R) STCV 中的一个为 OPEN, 则继续。
- 8) 对 PTC 和 ZTC 系统进行 BITE 测试。
  - (A) 如果 BITE 测试显示故障, 则纠正发现的所有问题并继续。
  - (B) 如果 PTC 和 ZTC 上没有显示故障, 请确保连接到 L(R)STCV 的检测线束没有交叉连接。
    - (a) 在 P5-10 空调面板上, 将 L(R) 组件开关设置为 OFF。
    - (b) 在 ACM 涡轮出口处, 拆卸 L(R)STCV, V140 (V142) 的检测线束。

注意: 此检查确定 L(R)STCV 是否可用, 或 ACM 涡轮滚动破裂造成的 STCV 打开。

  - (c) 在 P5-10 空调面板上, 将 L(R) 组件开关设置为 AUTO。
  - (d) 检查 L(R)STCV 位置, 如果 L(R)STCV, V140 (V142) 仍保持 CLOSED, 则需要更换 ACM。如果 L(R)STCV 为 OPEN, 则断开其它的检测线束。如果 L(R)STCV 未关闭, 则更换 STCV, V140 (V142), 若 L(R)STCV 关闭, 再将感测线连接并继续。
- (2) 检查温度控制阀 (TCV) 。
  - 1) 在 P5-10 空调面板上, 将 L(R) 组件开关设置为 OFF。
  - 2) 检查 L(R)TCV 上的位置指示器, 以确保其处于完全关闭的位置。
    - (A) 如果 L(R)TCV 未处于 FULLY CLOSED, 则更换 L(R)TCV、V139 (V141) 。
    - (B) 如果 L(R)TCV、V139 (V141) 处于 FULLY CLOSED, 则断开 TCV 上的电气接头 D3862 (D3872) 。
  - 3) 在 P5-10 空调面板上, 将 L(R) 组件开关设置为 AUTO。
  - 4) 靠近 L(R)TCV 的下游管路感受, 如果管变热, 则请更换 L(R)TCV、V139 (V141)。如果管不热, 则重新连接电气接头 D3862 (D3872) 并继续。

5) 在 P5-10 空调面板上, 将 L(R) 组件开关设置为 OFF。

(3) 空气循环机 (ACM)

1) 如果 ACM 在地面上启动缓慢, 请执行以下步骤:

(A) 在 P5-10 空调面板上, 将排气 (BLEED) 1 和 2 开关设置到 OFF。

(B) 在 P5-17 温控面板上, 将触发空气调节开关设置为 OFF。

(C) 使用 APU 向气动系统供应压力, 启动空调组件, 将区域温控器调为 FULL COLD。

(D) 检查组件排气管出口的气流。

(a) 如果排气管出口有很少, 或没有气流, 请执行以下步骤:

a) 拆掉组件空气供应系统。

b) 拆掉 ACM 的混合腔下游管路, 确保 ACM 可以按照正常旋转方向转动, 如果不能正常转动, 则对涡轮轴上的螺母上施加最大 20 英寸磅 (2.3N\*m) 的扭矩, 若调整扭矩后仍然不能正常转动, 则更换 ACM。

(b) 如果气管出口的气流令人满意, 并且可以控制舱内的温度, 那么这是一个间歇性故障。

(c) 如果排气管出口处的气流令人满意, 但无法控制船舱内的温度, 则继续操作。

2) 为了确保 ACM 能够冷却每个机舱, 需要对 ACM 进行下列检查:

(A) 打开图 3-2 所示的检修门。

(B) 从 L(R)TCV 和 STCV 上断开这些电气接头:

(a) L(R)TCV, V139 (V141) 上的电气接头 D3862 (D3872)。

(b) L(R)STCV, V140 (V142) 上的电气接头 D3864 (D3874)。

(C) 用 APU 向气动系统供气。

(D) 在 P5-10 空调面板上, 将 L(R) 冷却组件开关设置为 HIGH。

(E) 将配平空气开关转到 ON。

(F) 使组件运行, 直到温度稳定。

(G) 在 P5-17 温控面板上, 将空气温度选择器设置为 PACK R, 记录温度指示仪中的数据; 再将空气温度选择器设置为 PACK L, 并记录温度指示仪中的数据。

(H) L(R) 组件温度应为 68° F (20° C) , 如果驾驶舱供应温度不是 41° F (5° C) , 则问题可能是换热器脏污导致的 ACM 性能不佳, 或 L(R) 组温度传感器, T471 (T474) 故障; 如果驾驶舱供应温度约为 41° F (5° C) , 则继续操作。

3) 对每个混合总管传感器进行电阻测试, 以确保电阻没有偏差。

(A) 查看每个混合空气集气管传感器的污损情况并清洁。

(B) 对混合空气集气管温度传感器进行测试, 若超出公差, 则更换混合空气集气管传感器。

(C) 对每个组件的温度传感器 T471 和 T474 进行电阻测试, 确保电阻没有偏差。如果组件温度传感器超出公差, 则更换组件温度传感器。

(4) 检查配平空气阀(TAV)系统

1) 在 P5-17 温控面板上, 将配平空气调节开关设置为 OFF。

2) 如果 AFT 进气口温度低于 68° F (20° C) , 请更换 TAV, V146。

(5) 检查热交换器, 集气室和扩散桶总成

注意: 该检查包括 PHE 和 SHE。这也适用于飞机不能在地面上制冷的情况。

1) 对主集气室和扩散桶总成中的风扇旁路止回阀进行检查。

(A) 打开图 3-2 所示的检修门, 检查 L (R) 组件主集气室和扩散桶组件中风扇的旁路止回阀, 确保风扇旁路止回阀门安装在主扩散桶底部, 门铰链没有损坏。如果风扇旁路止回阀门损坏或未安装在主扩散桶的底部, 则应更换它。

2) 检查热交换器的污损情况并清洁。

3. 可能导致故障发生的原因:

(1) L (R) 的备用温度控制阀 (STCV) , V140 (V142) ;

(2) L (R) 的节流活门 (TCV) , V139 (V141) ;

(3) 空气循环机 (ACM) ;

(4) 配平空气阀 (TAV) , V146;

(5) 主热交换器 (PHE) 、次热交换器 (SHE) 、集气室总成和扩散桶总成。

### 3.3 本章小结

本章对飞机空调系统的组成进行介绍, 通过与航空公司机务维修人员的沟通和故障隔离手册的研究, 对收集的三个典型故障进行分析并研究出对应的排故流程方案。



动排列、连续添加事件、批量设置基本事件概率、自定义事件颜色、一键输出图片等诸多便捷功能。FreeFta 使用界面如图 4-2 所示。

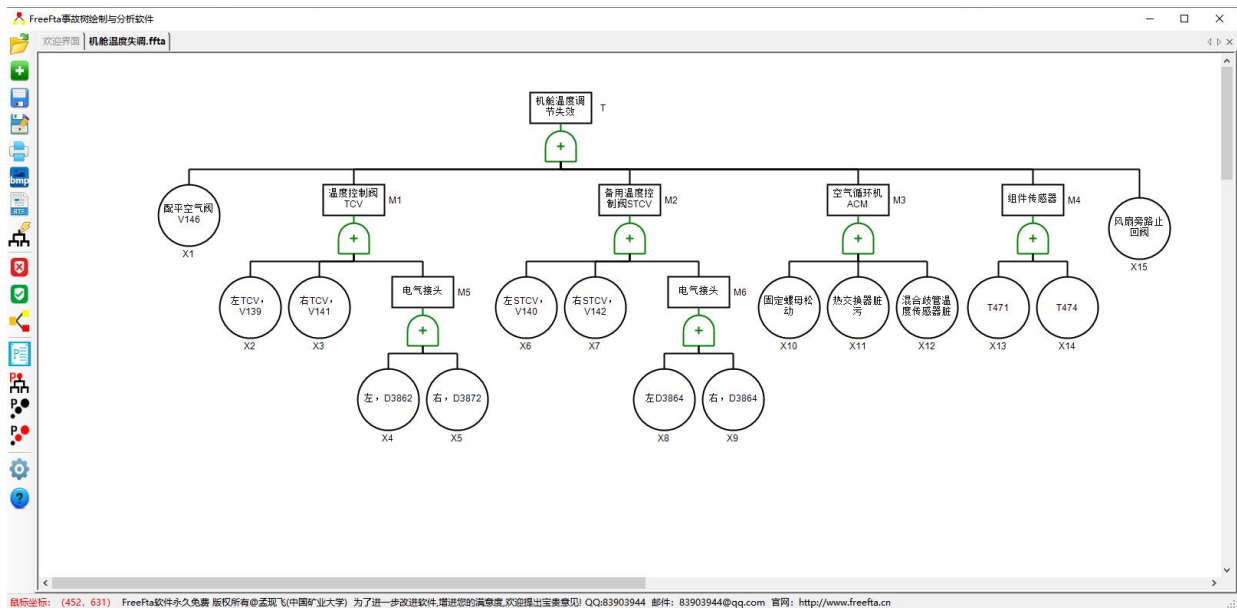


图 4-2 FreeFta 软件建模界面

## 4.2 故障树分析

### 4.2.1 机舱出现不明烟雾的故障树分析

根据 3.2.1 中的排故流程方案，利用故障树软件绘制出对应故障树如图 4-3 所示，将机舱出现烟雾作为顶事件，由上一章节的排故流程方案中可以看出，原因事件 M1、M2、M3、M4、M5、M6 其中任意一个事件发生就会导致顶事件的发生，所以将其用或门链接；X1、X2、X3、X4、X5 中有一个发生就会引起 M1 发生；X6、X7 中有一个发生就会引起 M2 发生，其中 X7 和 X8 中有一个发生就会引起 M7 发生；X9、X10、X11、X12、X13 中有一个发生就会引起 M3 发生；X14、X15、X16 中有一个发生就会引起 M3 发生；X17、X18 中有一个发生就会引起 M5 发生；X19、X20 中有一个发生就会引起 M6 发生。

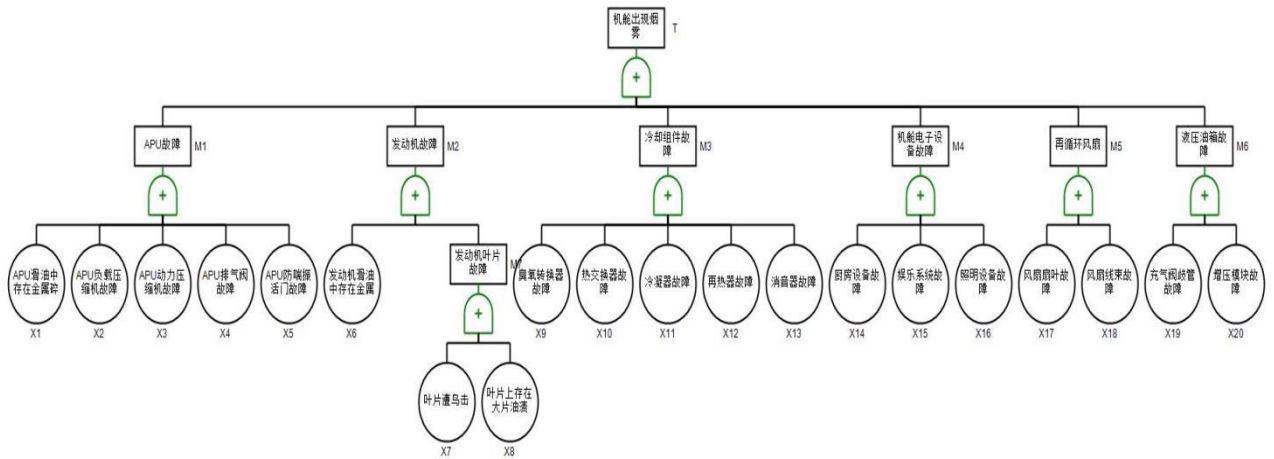


图 4-3 机舱出现不明烟雾的故障树

通过对航空公司机务维修人员发放统计表，以发生故障的等级的形式制出下表 4-1，由表可知应优先检查事件 X13、X18，其次检查 X2、X3、X4、X5、X8、X11、X14、X15、X16、X17、X19、X20，最后再对事件 X1、X6、X7、X9、X10、X12 进行检查。

表 4-1 机舱出现不明烟雾的定性分析

事件编号	最小割集	故障发生等级	故障发生导致的顶事件
X1	APU 滑油中存在金属碎屑	III	机舱内出现不明烟雾
X2	APU 负载压缩机	II	
X3	APU 动力段压缩机	II	
X4	APU 排气阀	II	
X5	APU 防喘振活门	II	
X6	发动机滑油中存在金属碎屑	III	
X7	发动机叶片遭鸟击	III	
X8	发动机叶片存在油渍	II	
X9	臭氧转换器	III	
X10	热交换器	III	
X11	冷凝器	II	
X12	再热器	III	
X13	消音器	III	

X14	厨房设备	II
X15	娱乐设备	II
X16	照明设备	II
X17	风扇扇叶	II
X18	风扇线束	I
X19	充气阀歧管	II
X20	增压模块	II

注：故障发生等级分为 I、II、III 三级，根据实际发生的频次由高到低分别表示经常发生、时而发生、很少发生。

#### 4.2.2 左侧组件再现跳开灯（PACK）亮的故障树分析

根据 3.2.2 中的排故流程方案，利用故障树软件绘制出对应故障树如图 4-4 所示，将左侧组件灯再现亮作为顶事件，由上一章节的排故流程方案中可以得出结论，原因事件 X1、X2、X3、X9、M1、M2 其中任意一个事件发生就会导致顶事件的发生，所以将其用或门链接；X4、X5 中有一个发生就会引起 M1 发生；X6、X7、X8 中有一个发生就会引起 M2 发生。

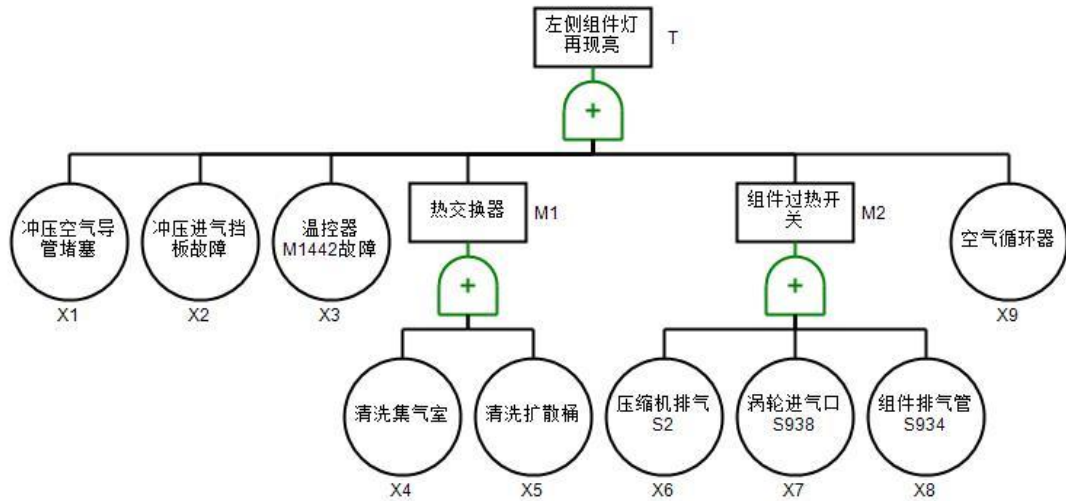


图 4-4 左侧组件再现跳开灯（PACK）亮的故障树

通过对航空公司机务维修人员发放统计表，以发生故障的等级的形式制出下表 4-2。由表可知应优先检查事件 X1、X3，其次检查 X4、X5、X9，最后再对事件 X2、X6、X7、X8 进行检查。

表 4-2 左侧组件灯再现亮故障的定性分析

事件编号	最小割集	故障发生等级	故障发生导致的顶事件
X1	冲压空气导管	I	左侧组件灯再现亮
X2	冲压进气挡板	III	
X3	温控器 M1442	I	
X4	集气室脏污	II	
X5	扩散桶脏污	II	
X6	压缩机排气 S2	III	
X7	涡轮进气口 S938	III	
X8	组件排气管 S934	III	
X9	空气循环器	II	

注：故障发生等级分为 I、II、III 三级，根据实际发生的频次由高到低分别表示经常发生、时而发生、很少发生。

#### 4.2.3 机舱温度调节失效的故障树分析

根据 3.2.3 中的排故流程方案，利用故障树软件绘制出对应故障树如图 4-5 所示，将机舱温度调节失效的故障作为顶事件，由上一章节的排故流程方案中可以得出结论，原因事件 X1、X15、M1、M2、M3、M4 其中任意一个事件发生就会导致顶事件的发生，所以将其用或门链接；X2、X3、M5 中有一个发生就会引起 M1 发生，其中 X4 和 X5 中有一个发生就会引起 M5 发生；X6、X7、M6 中有一个发生就会引起 M2 发生，其中 X8 和 X9 中有一个发生就会引起 M6 发生；X10X11X12 中有一个发生就会引起 M3 发生；X13、X14 中有一个发生就会引起 M4 发生。

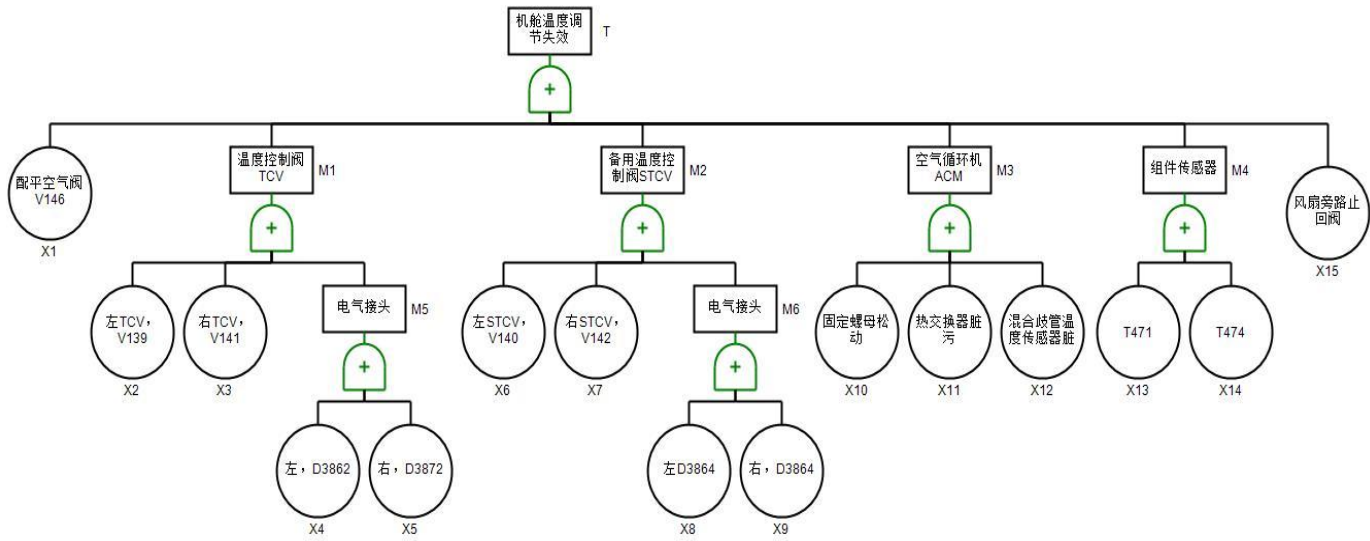


图 4-5 客舱空调温度调节失效的故障树

通过对航空公司机务维修人员发放统计表，以发生故障的等级的形式制出下表 4-2。由表可知应优先检查事件 X4、X5、X8、X9，其次检查 X1、X10、X13、X14，最后再对事件 X2、X3、X6、X7、X11、X12、X15 进行检查。

表 4-3 机舱温度调节失效故障的定性分析

事件编号	最小割集	故障发生等级	故障发生导致的顶事件
X1	配平空气阀 V146	II	机舱温度调节失效
X2	左 TCV, V139	III	
X3	右 TCV, V141	III	
X4	TCV 电气接头 D3862	I	
X5	TCV 电气接头 D3872	I	
X6	左 STCV, V140	III	
X7	右 STCV, V142	III	
X8	STCV 电气接头 D3864	I	
X9	STCV 电气接头 D3874	I	
X10	ACM 固定螺母	II	
X11	ACM 热交换器	III	
X12	混合歧管温度传感器	III	

X13	组件传感器 T471	II	
X14	组件传感器 T474	II	
X15	风扇旁路止回阀	III	

注：故障发生等级分为 I、II、III 三级，根据实际发生的频次由高到低分别表示经常发生、时而发生、很少发生。

### 4.3 本章小结

本章对三个在 B737NG 飞机上典型的空调系统故障，利用第三章中的排故流程方案和故障树软件绘制出了完整的故障树。然后通过调阅航空公司的维修数据、发放统计表的方式收集机务维修人员的排故经验，将引起故障发生的各种底事件，以故障发生等级的方式绘制成表，为机务维修人员提供了真实有效的参考价值，达到了缩短排故时间、提高维修效率的目的。

## 结论

### 总结

本文通过与航空公司机务维修人员共同调研总结出了三个在 B737NG 飞机空调系统的典型故障，对比了四种较为常见的飞机故障诊断技术，通过分别介绍、横向比较的方法，最终选取故障树分析法作为本次研究的故障诊断方法。根据航空公司提供的相关手册制定出了排故流程方案，再将排故流程中所有可能引起故障的原因作为底事件绘制故障树，最后通过机务维修人员的经验分享和查阅航空公司维修记录对各最小割集进行定性分析，形成了对排故流程的优化建议。

### 展望

由于存在信息壁垒，部分数据属于不对外公开的保密信息，导致本文不能将最小割集以清晰明确的概率进行定量分析，只能通过机务前辈的经验和基础的维修记录，以一种相对模糊的方式进行分析。对于更加严谨且准确的定量分析，我将在今后的机务工作中收集相关数据后，有量化数据加持的条件下进行研究，使排故流程安排的更加合理。

## 参考文献

- [1] Kwong W A , Passion K M , Yurkovich S.Fuzzy learning systems for aircraft control law reconfiguration[C]IEEE International Symposium on Intelligent Control .IEEE, 1994.
- [2] Vascak J, Kovacik P, Hirota K, et al.Performance-based adaptive fuzzy control of aircrafts[C].IEEE International Conference on Fuzzy Systems.2001.
- [3] Jun H E, Zhao J Q.Dynamic Simulation of the Aircraft Environmental Control System[J].Chinese Journal of Aeronautics, 2011,14 (3) : 129-133.
- [4] C Muller , D Scholz , T Giese.DYNAMIC SIMULATION OF INNOVATIVE AIRCRAFT AIRCONDITIONING.First CAES European Air and Space Conference, Berlin, 10-13 September 2007, 869-880.
- [5] 寿荣中, 何慧珊, 飞行器环境控制[M].北京航空航天大学出版社, 2004.
- [6] 何君,赵竞全,袁修干. 飞机环境控制系统的模糊控制研究[J]. 北京航空航天大学学报,2004,(12): 1151-1154.
- [7] 杜乔,韩强. 基于 RBF 神经网络的 A320 引气系统故障诊断研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2011,(02):65-67.
- [8] 李冰月. 基于 FMECA 和 FTA 的机载制冷系统故障分析[D].南京航空航天大学,2016.
- [9] 徐晓. B737NG 空调系统原理及故障诊断方法的研究[D].西南交通大学,2019.
- [10] 申浩. 波音 737NG 反推故障诊断专家系统研究[D].上海交通大学,2012.
- [11] 李士勇. 模糊控制[M].哈尔滨工业大学出版社, 2011.
- [12] 郝一川. 基于粗糙集与神经网络的飞机电子系统故障诊断方法研究[D].中国民航大学,2015.
- [13] 李冬. 故障树分析法在飞机排故中的应用[J]. 科学技术创新,2022,(08):169-172.
- [14] 訾超. 基于故障树的飞机故障诊断专家系统技术研究[D].郑州大学,2015.
- [15] 党皓,朱耀国. 温度传感器在飞机环境控制系统中的应用研究[J]. 航空科学技术,2017,28(06):79-82

## 致 谢

本篇论文在魏志民老师的悉心指导之下完成的，从论文的选题、论文框架的确定、资料的收集，再到技术交流平台的搭建以及最后定稿，导师付出了大量精力和时间，给予了我莫大的协助与教导，魏老师为人师表、学识广博，对治学的严谨态度无时无刻不在感染着我，不仅让我学到了专业知识，也为我建立了适合自己的职业规划。在此，我对魏志民老师半年来的悉心教诲表示崇高的敬意和感谢。

同时，感谢在本科学习期间各位老师的辛勤付出，正是他们的教导，让我得到了系统的专业知识。感谢天津航空、厦门航空及江西航空提供的技术交流和故障记录清单，感谢中原龙浩航空工程部余工的不吝赐教，非常感谢您们对研究过程中的鼎力相助。

最后，向百忙之中挤出时间对本文进行审阅的列位专家老师们致以衷心的感谢！