

国家自然科学基金资助，基金编号60772149、61071203

飞机黑匣子 舱音分析与安全诊断

程道来 仪垂杰 姚红宇 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

[国家自然科学基金资助, 基金编号 60772149、61071203]

飞机黑匣子舱音分析与安全诊断

程道来 仪垂杰 姚红宇 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了飞机黑匣子、舱音记录器、舱音信息及其辨听分析。系统探讨了舱音降噪。基于小波变换等理论,从时域、时—频和时间—尺度等提出舱音特征提取和分析方法。结合飞行事故征候、原因和飞机故障特点,提出利用故障树、信息融合、产生式规则等原理,研究用舱音信号对飞机故障分析、识别与安全诊断。

本书可供飞行事故调查与分析人员阅读,也适合航空安全管理、调度、维修人员,以及大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞机黑匣子舱音分析与安全诊断/程道来,仪垂杰,姚红宇主编. —北京:国防工业出版社,2013.9

ISBN 978-7-118-09094-9

I. ①飞... II. ①程... ②仪... ③姚... III. ①飞行记录器 IV. ①V241.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 219357 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 7 字数 188 千字

2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

飞机自诞生一百多年来,已经成为最安全、最便捷的交通工具。随着科学技术快速发展,世界航空安全不断提高,但飞机事故时有发生,每次总是触目惊心。飞机一旦发生坠毁事故,需按国际惯例成立专门的事故调查委员会,由相关权威机构专业人员共同收集不同的飞行参数信息、掌握事故征候,全面展开事件调查、事故原因分析,对故障进行诊断,形成事故调查报告,给出客观、公正的结论,采取有效解决措施,以减少或避免类似事故重复发生。

航空安全情况主要通过飞机飞行时的 7 种不同飞参信息来体现,即视频信息、震动图形、全球定位信息、空中管制信息、雷达信息、飞行数据信息和舱音声信息。然而,空难发生后,大部分飞参信息随着飞机解体会丢失或不全,而飞行事故调查时所需的“人证”和“物证”很大部分来自于飞机“黑匣子”,其中舱音记录器记录的舱音(声信息)含着丰富的飞机飞行或事故声信息,为还原、重构飞行事故过程,调查飞行事故原因提供“有声”证据,在航空安全事故调查中起着不可替代的作用。

本书以典型舱音样本为对象,重点提出舱音分析识别、特征提取的多种方法,提出舱音安全诊断方法。全书共 11 章。第一章和第二章系统介绍飞机黑匣子、舱音记录器、舱音信息及其辨听分析。第三章提出舱音降噪主要方法及其应用。第四章从时域角度分析舱音及背景声特征,依据线性预测原理重构并预测降噪后舱音。第五章基于小波变换对舱音进行多尺度线性时频分析,增添分析、获取舱音特征新方法。第六章提出了基于二次时频分布的舱音非线性时频分析。

第七章基于信号独立分量分布原则,对舱音进行多速率时频分析与模拟。第八章介绍了飞行事故、事故征候、事故原因、飞机故障诊断特点和方法,提出了舱音在飞行事故调查分析与故障诊断中不可替代的作用。第九章介绍了基于条件规则及故障树的对舱音分析识别和安全诊断。第十章提出基于信息融合技术的故障分析识别、安全诊断及应用。第十一章介绍了产生式规则及其表示形式,提出了基于产生式规则的舱音信号分析与诊断。

本书由程道来、仪垂杰和姚红宇共同编著。参加本书内容研究和编写的还有中国民航科学技术研究院(原中国民航总局航空安全技术中心)、青岛理工大学、上海应用技术学院等单位的杨琳、钟民主、肖宪波、刘志红、高志斌、纪林章、万寿鹏、王小群、钱惠国、董智广、张小良等,对他们表示衷心的感谢。同时对书中引用文献作者表示诚挚谢意。

由于编者水平有限,本书不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 8 月

目 录

第一章 飞机黑匣子与舱音记录器	1
一、航空事故与航空安全	1
二、飞机黑匣子	5
三、舱音记录系统	14
四、本章小结	20
第二章 舱音信息及其辨听分析	21
一、舱音信息	21
二、舱音信息的辨听分析	24
三、舱音辨听分析的应用	30
四、本章小结	37
第三章 舱音降噪	38
一、舱音采样降噪	38
二、舱音小波降噪	40
三、基于小波变换的模极大值舱音降噪及其应用	42
四、小波阈值降噪	52
五、基于 ICA 的盲源分离方法的舱音降噪	59
六、本章小结	67

第四章 舱音时域分析、线性预测与重构	68
一、信号分析	68
二、舱音的时域处理	69
三、舱音的时域特征获取与分析	72
四、舱音的相关分析	79
五、基于线性预测的舱音分析与重构	81
六、本章小结	88
第五章 基于小波变换的舱音多尺度线性时频分析	89
一、线性时频分析	89
二、傅里叶变换、短时傅里叶变换和小波变换	91
三、多尺度小波分析	98
四、基于小波变换的舱音多尺度线性时频分析	101
五、本章小结	109
第六章 舱音非线性时频分析	110
一、信号的二次非线性时频的能量化表示	110
二、Wigner - Ville 二次非线性时频分布	112
三、舱音背景声的二次时频分布分析及特征	117
四、本章小结	122
第七章 多速率时频分析及舱音模拟	124
一、多速率时频分析	124
二、非平稳信号的多速率时频分析原理	125
三、非平稳信号多速率时频分析法实施步骤	136
四、多速率时频分析方法仿真研究	138
五、实验室研究	140

六、本章小结	149
第八章 基于舱音信息的飞行事故调查与诊断	150
一、飞行事故及事故征候	150
二、飞行事故的影响	152
三、飞行事故调查	154
四、飞行事故调查遵循的基本原则	159
五、飞机故障诊断	159
六、本章小结	169
第九章 基于条件规则及故障树的舱音分析诊断	170
一、舱音辨听及其时频分析	170
二、基于条件规则的故障树分析诊断	172
三、基于条件规则的故障树分析诊断在舱音分析诊断中 的应用	174
四、本章小结	178
第十章 信息融合及其在飞机舱音诊断中的应用	179
一、信息融合	179
二、基于信息融合的故障诊断	183
三、信息融合技术在飞机及航空发动机故障诊断中 应用	187
四、基于舱音信息融合的飞机故障诊断	191
五、本章小结	195
第十一章 基于产生式规则特征融合的舱音分析诊断	197
一、产生式系统	197
二、产生式规则的表示	202

三、基于产生式规则的舱音信号分析、识别与诊断	204
四、本章小结	211
专业术语缩写表	212
参考文献	213

第一章 飞机黑匣子与舱音记录器

一、航空事故与航空安全

1. 航空事故

一百多年前飞机的诞生彻底改变了人类的生活,我们的世界因此变成了“地球村”。民用航空经过一百多年的发展,已经成为最安全、便捷、快速的交通工具。且随着科学技术大发展,世界航空安全也不断提高,但飞机事故每年都时有发生。全世界每年死于空难的约 1000 人,死于道路交通事故的达 70 万人每年,从这个意义讲,乘飞机也许是较安全的交通方式。然而一旦发生飞机失事,幸存者却寥寥无几。2009 年最严重的空难发生于 6 月 1 日,一架法国航空公司的空中客车 A-330 客机在距巴西海岸东北方向 1000km 左右的大西洋上空坠毁,

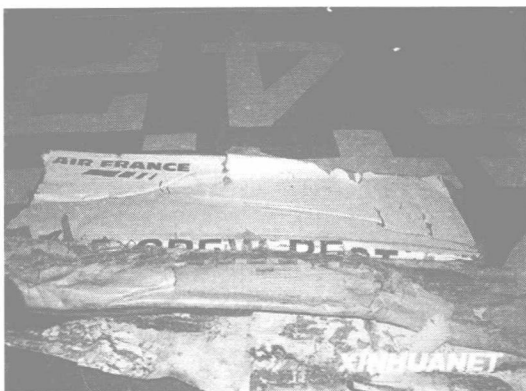


图 1-1 2009 年 6 月 1 日法航 A-330 客机残骸

造成 228 人丧生,事故原因至今不明(图 1-1)。飞机起飞后的 6min 和着陆的 7min 内,最容易发生意外事故,国际上称为“可怕的 13min”,如 2012 年 6 月 3 日一场严重的空难事故,尼日利亚一架客机当天在拉各斯机场附近坠毁,机上 153 人全部遇难,并造成地面至少 40 人死亡。航空安全仍然是民航业的核心问题之一。

2. 航空安全

航空事故发生率低,说明航空安全性高。伴随着全球经济的稳定发展,航空事业得到持续的发展。统计数据预测:未来全球的航空运输量将以年 5% 以上的增长率递增。民航事业的发展使得航空安全更加引起高度重视,尽管民用航空事故发生的概率小,但具有突发性、高死亡率等特点。航空事故一旦发生,不仅对乘客、管理部门、飞机制造商和航空公司,而且对社会都会产生极大的影响,因此,飞机飞行安全,以及进一步利用飞机黑匣子记录的飞参信息,特别是利用飞机黑匣子中的舱音记录器舱音信息加强对飞行状态进行监测、对飞行事故原因进行分析诊断具有十分重要的安全性、经济性、社会性和紧迫性,主要体现在:

1) 空难事故仍然时有发生,航空安全需常敲警钟

据日内瓦空难档案局公布的统计数据和国际权威期刊《国际航空》显示:近年来,全球几乎每两天就有一架飞机失事,空难事故时有发生并且死亡人数居高不下。2012 年发生的空难事故有:4 月 2 日,一架隶属于俄罗斯优梯航空公司的 ATR-72 型客机从西伯利亚城市秋明起飞不久后坠毁,机上乘客加机组人员共 43 人,其中 31 人不幸遇难,另外 12 人伤情严重;4 月 6 日,美国海军一架 F/A-18D 型战斗机 6 日在弗吉尼亚州坠毁,撞上地面民宅,引起大火。

2) 空中运营成本继续增加,航空安全愈显重要

从每台飞机的生产制造成本来看:若按波音公司提供的平均每架飞机价值约 9000 万美金计算,出现一次空难事故,飞机直接损失就是 9000 万美金,还不包括飞机驾驶员的损失和对机组乘客的巨大赔偿。

从每台飞机的年维修费用来看:一架飞机每年的航空维修费用约为飞机价值的3%。早在2004年,国内共有1052架飞机,其总维修费用就高达284000万美元,如果利用CVR和FDR提供的信息进行预防和事后维修可减少维修的飞机数量为200架的话,则可节约维修费54000万美元,而每台CVR的市场价格仅约为1万美元。

3) 大型民航机场增、扩、改的需要

中国民航业正处在空前大发展时期,大型民航机场增、扩、改建,以及各种业务的加速提升成为必然。数据显示:2010年国内可运行机场达175个;“十一五”期间,民航运输飞行累计达2036万h,976万架次,分别比“十五”增加95%、81%;民航旅客运输量超过10亿人,年均增长速度14.1%;在全球航空运输业和国内综合交通运输体系中,继续保持最快增长速度。“十一五”期间,全行业在全球民航业中增长最快、效益最好。2010年,全行业实现利润总额437亿元,其中航空公司实现利润351亿元,占全球航空公司利润的60%。

2011年2月24日国新办新闻发布会披露:中国民航业将在“十二五”期间总共投资超过1万5千亿元人民币,其中新建机场45个,新增飞机1900多架,较“十一五”增幅达到50%。预计到“十二五”期末,旅客运输量将达到4.5亿人;运输机场的数量将达到220个以上。

4) 我国大型飞机发展规划的需要

“研制大型飞机是国家意志的体现”(温家宝2008年5月)。我国大型飞机项目已经列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》和《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》。《中国民用飞机市场预测年报(2002—2021)》:今后20年内,中国航空运输业将高于同期全球的平均发展速度,是全世界最有增长潜力的市场之一,中国民航今后20年需补充1762架客机。国务院发展研究中心“国产新支线客机发展战略”课题组预测:未来5年中国将出现支线客机采购的一次高峰;到2030年,中国支线航空客运量和客运周转量占全部航空运输的比重将分别达到19.3%和6.4%。

3. 航空事故原因剖析

空中运营成本继续增加,大型民航机场继续不断增、扩、改建,我国正在实施大型飞机发展战略,这都要求我们特别关注航空安全,特别是要从源头起,寻找航空事故原因。航空事故原因是多方面的,在行业中已有很多典型的案例及原因分析,但主要还是人为造成的。

1) 飞行航空事故多数由人为差错造成

据统计:航空事故中 70% 是人为因素引起的,具体讲 70% 的事故是和飞行员的错误相联系的。剩下的 30% 有设备故障、设计错误、制造错误、管制错误等,这些都和人为因素有关,追究下去的话,从某种意义上也可以说,事故 100% 与人为因素有关。

2) 飞行员素质是航空安全事故的关键原因

在特定的飞行中,驾驶员高超的驾驶技术和灵活的应变能力,可以应付很多由于意外而产生的飞行事故。例如,1989 年 7 月 16 日,美国联合航空公司一架大型客机飞行 1h 后,后部 2 号发动机爆炸,接着 3 条液压系统全部失灵,飞机处于失控状态,机长海恩斯和空中交通管制部门联系后,决定在苏城机场迫降。迫降时,飞机电力系统失灵,驾驶舱仪表失去显示,地面导航设备不能发挥作用,此时机长沉着地用自由下落方式放下起落架,最后,失去平衡操纵能力的飞机,在距离跑道仅几米的地方倾斜铲地。这是美国第 10 起最严重的空难事件,也是生还人数最多的一次,机上人员生存率为 63%。飞机失事能有这么高的生存率,首先归功于机长的优良素质,他临危不乱、英勇果断地发挥了高超的驾驶技术,在紧急情况下想方设法控制住飞机,使伤亡人员降至最少。相反,有太多的事故是由于驾驶员疏忽大意,忘记飞行程序或在紧急情况下手忙脚乱、判断失误、违规操作造成的。最常见的是飞机着陆时忘了放下起落架,一个油箱燃油用完之前忘记转换油箱电门,或者在飞机起飞前没有按规定检查飞机结构位置等。

二、飞机黑匣子

飞行事故发生后,飞机黑匣子(本书中“黑匣子”专指“飞机黑匣子”)在航空事故调查中起着不可替代的“见证人”作用,在此系统认识飞机黑匣子。

1. 飞机黑匣子发展过程

飞机机载记录系统主要是黑匣子,它是伴随着飞行事业的出现而诞生。“黑匣子”是一位墨尔本工程师在 1958 年发明的。早在 1908 年,美国发生了第一起军用飞机事故。此后,随着飞行事故不断发生,需要有一种追忆事故发生过程原因的仪器。第二次世界大战期间,飞行记录装备仪器在军用飞机上应用,后来又用到民航飞机上。

20 世纪 30 年代到 50 年代是民用航空飞行的告速增长期。50 年代末,FAA 声明强制安装第一台飞行数据记录器(FDR)。60 年代初,舱音记录器(CVR)被强制安装。20 世纪 60 年代问世的黑匣子只能记录 5 个参数,误差较大,接下来的 20 年内,记录参数的数量不断增加,记载时间明显增强。70 年代开始使用数字记录磁带,能记下 100 多种参数,保存最后 25h 的飞行数据。90 年代后出现了集成电路存储器,像计算机中的内存条那样,可记录 2h 的 CVR 声音和 25h 的 FDR 飞行数据,大大提高了空难分析的准确度。图 1-2 是机载记录系统的技术发展路线。

2. 飞机黑匣子主要生产厂商

全世界主导生产飞机 FDR/CVR 厂商众多,如美国 Honeywell 公司、Teledyne Controls 公司、L-3 通信公司、Universal Avionics 公司、Smiths Industries 公司;欧洲的 Penny & Giles 公司、SFIM 公司、Song 精密技术、美国航空航天公司及 Dukane Corp. 公司。

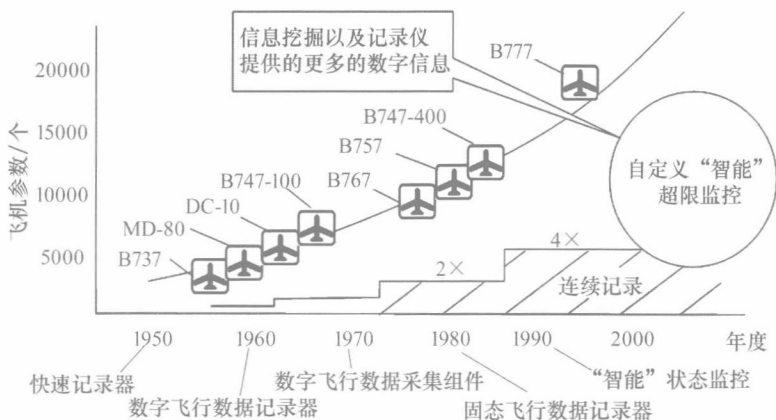


图 1-2 机载记录系统的技术发展路线图

1) Honeywell 公司

美国的 honeywell 公司(原 Allied Signal 公司)生产飞行记录器达 40 年之久,它继承于 Sundstrand Date Control 公司。1993 年,该公司生产出固态记录器,现在为商用飞机提供 ED-55 型固态飞行数据记录器(SSFDR)和 ED-56A 型数字座舱音频记录器(DCVR)。

2) Teledyne Controls 公司

Teledyne Controls 公司是数字飞行数据获取单元(Digital Flight Data Acquisition Units, DFDAUs)的主要供应商。该公司生产出无线地面数据链,能够使用英特网从机载 DFDAU 上传输信息到地面计算机进行数据分析。

3) L-3 通信公司

L-3 通信公司于 1997 年从 Loral 和 Lockheed Martin 公司划分出来成立,主要设计和生产航空记录器。

4) Universal Avionics 公司

位于亚利桑那州的通用航空公司生产一种名叫“第二代”固态 CVRs。CVR-303B 和 CVR-120 能够分别记录 30min 和 120min 舱音。

5) Penny & Giles 公司

该公司生产的多功能 FDR/CVR,质量低于 9 磅(4.1kg),但却能满足许多最新要求。Penny & Giles 公司的多功能记录器记录时间为 120min,飞行数据记录器将能记录超过 25h 的数据。

6) SFIM 公司

SFIM 工业公司生产了大量的带水下定位信标的飞行记录器和视频记录系统,同时也为商用飞机和小型飞机生产数据获取管理单元、数据接口单元、数据加载机及相关测试设备。该公司生产的迷你型 ESPAR2 适合小型飞机和直升机用,是一种防坠毁机载数据记录仪,融合数据转录和数据同步功能。记录飞行数据的时间超过 24h,记录声音数据的时间超过 1h。

7) Smiths Industries 公司

该公司的总部位于伦敦,办事机构坐落在美国密歇根州的急流域。该公司的生产线包括分离式 CVR 和 FDR、组合式 CVR/FDR(包含水上定位信标,仅重 7.2 磅)。记录器能记录 4 通道 120min 的声音,同时经过配置也可以记录飞行数据。

8) Sony 精密技术公司

Sony 精密技术公司(美国)生产的 SIR-1000 系列数据记录器能够提供宽带、多通道记录和数字显示。该公司生产 CD 分析机产品和 SIR-1000W 型高速、宽带数字数据记录器。

9) 美国航空航天公司

该公司生产 SCR500 系列的组合记录器、地面支持设备和为 BASE 固态记录器用的座舱控制板。

10) Dukane Corp 公司

位于美国伊利诺斯州的 Dukane Corp. 公司的 Seacom 分部专门设计和生产水下信标。该公司的 DK120 和 DK100 系列水下声学定位信标采用了低电压电池技术能够确保 6 年寿命。该信标设计能在水下 20000 英尺下正常工作。

3. 飞机黑匣子组成

飞机黑匣子由舱音记录器和飞行数据记录器组成(图1-3)。



图1-3 飞机黑匣子

黑匣子外壳坚实,为长方体,约等于四五块砖头垒在一起一般大,里面装有 FDR 和 CVR。飞机各机械部位和电子仪器仪表都装有传感器与之相连,能把飞机停止工作或失事坠毁前半小时的有关技术参数和驾驶舱内的声音记录在飞机黑匣子中,需要时把所记录的参数重新放出来,供飞行试验、事故分析之用。之所以称为“黑匣子”,是由于把 FDR 和 CVR 装进坚固的匣子中,保证设备在飞机出事故后不被破坏。由于现代电子技术飞速发展,“黑匣子”不仅安装、应用在飞机上,也应用在许多工业领域,因而出现了汽车数据黑匣子、SMT 耐高温温度跟踪仪(也叫炉窑黑匣子)等。

黑匣子一般由一到两个从发动机引擎获取能源的动力发生器驱