



普通高等教育创新型人才培养规划教材



航空器检测与诊断

技术导论 (第3版)

陈果 王海飞 潘文平 编著
方光武 陈家运 陈虎



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



配有课件

内 容 简 介

本书建立了航空器检测与诊断技术的完整理论体系和框架,全面介绍航空器常用的检测与诊断方法,力求突出航空特色,做到内容全面翔实,重视理论并突出应用。在理论方面,对在航空器检测与诊断技术中所涉及的信号分析、图像处理、模式识别、人工智能等传统的和先进的理论知识进行了较为详细的阐述。在检测与诊断技术方面,覆盖航空器检测与诊断的许多重要方法,包括航空发动机的整机系统振动诊断、磨损状态诊断、孔探检测、无损探伤、渗漏检测技术;同时列举了详细的航空器检测与诊断案例,使理论充分联系实际。

本书可作为航空器维修专业本科高年级学生的专业教材,也可作为该专业或相关专业的研究生和技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空器检测与诊断技术导论 / 陈果等编著. -- 3 版
. -- 北京 : 北京航空航天大学出版社, 2022. 5

ISBN 978-7-5124-3779-1

I. ①航… II. ①陈… III. ①航空器—检测②航空器—故障诊断 IV. ①V267

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 065955 号

版权所有,侵权必究。

航空器检测与诊断技术导论(第3版)

陈 果 王海飞 潘文平 编著
方光武 陈家运 陈 虎

策划编辑 董 瑞 责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:18.25 字数:479 千字

2022 年 8 月第 3 版 2022 年 8 月第 1 次印刷 印数:1 000 册

ISBN 978-7-5124-3779-1 定价:59.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

航空器检测与诊断技术,对于保障航空器的安全性、可靠性和经济性具有重要意义,是飞机发动机故障预测和健康管理的重要研究内容。本书力图全面介绍航空器常用的各种检测与诊断技术和方法。本书的主要特色表现在:

1. 突出航空特色。

在振动、磨损诊断方面,吸收同类教材的优点,但在应用部分突出航空特色,增加航空发动机相应的故障诊断实例。在无损检测技术方面,紧密结合航空器的无损探伤实例和应用特色进行阐述,同时借鉴了同类教材的相关理论部分。本书的最大特色是增加了航空发动机的孔探检测以及飞机渗漏检测等具有鲜明航空特色的内容。

2. 内容力求全面、翔实。

为了起到“抛砖引玉”的作用,为学生今后的工作和进一步学习奠定基础,本书介绍了许多航空器检测与诊断的重要方法,包括航空发动机的整机振动故障诊断、磨损状态诊断、孔探检测、航空器结构的无损探伤、渗漏检测技术等,最终形成航空器检测与诊断技术的完善理论体系和框架。

3. 重视理论,突出应用。

要培养高层次的航空器检测与诊断技术人才,需要具备坚实的理论基础。本书重视理论,对在航空器检测与诊断技术中所涉及的信号分析、图像处理、模式识别、人工智能等传统的和先进的理论知识均进行了较为详细的阐述。同时,航空器检测与诊断又是应用性极强的技术,因此本书列举了详细的航空器检测与诊断案例,使理论充分联系实际。

本书为第3版。2007年,在普通高等教育“十一五”国家级规划教材基金的资助下,第1版在中国民航出版社出版;2012年,通过近五年的本科教学实践,并结合实际科研工作,对第1版做了许多重大修改,第2版在航空工业出版社出版。通过不断的教学和科研实践,发现书中的很多知识亟待更新,于是2022年在南京航空航天大学“十四五”规划(重点)教材资助项目的支持下,作者对第2版进行了修订,修订内容如下:

① 在绪论中,进一步描述了航空器检测与诊断技术同故障预测和健康管理的关系,并增加了一些实际的航空器检测与诊断系统实例介绍;

② 在信号分析和处理部分,增加了一些更为实用的工程方法,同时,增加了更多的实际算例,以便于理解;

③ 在航空发动机转子系统故障诊断中,结合最新的故障仿真的研究结果,增加了对各种故障特征更为全面的描述;

④ 在油液分析诊断中,增加了最新科研成果——多功能磨粒分析系统 MIDCS 的介绍和描述;

⑤ 在发动机孔探检测中,结合最新科研成果,增加了对航空发动机内部损伤智能诊断专

家系统 AIIJES 的介绍和描述。

本书可作为航空器维修专业本科高年级学生的专业教材,也可作为该专业或相关专业的研究生和技术人员的参考书。

由于作者水平有限和编写时间仓促,书中难免存在许多不足或错误之处,恳请读者谅解。

“他山之石,可以攻玉”,为了形成本书的整体知识体系,参考了许多同类书籍中的相关部分,在此谨向其作者表示衷心的感谢。

同时,感谢南京航空航天大学“十四五”规划(重点)教材资助项目的支持,感谢在本书编写过程中支持、关心和帮助过作者的所有老师、朋友以及作者的研究生们。

陈 果

2021年9月于南京

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 航空器检测与诊断技术的意义	1
1.2 航空器维修理论的发展及维修制度的变革	2
1.2.1 航空器事后维修制度	2
1.2.2 航空器定时维修制度	2
1.2.3 航空器视情维修制度	4
1.3 航空发动机状态监测与故障诊断技术	4
1.3.1 航空发动机状态监测与故障诊断基本理论	4
1.3.2 航空发动机状态监测与故障诊断系统	5
1.3.3 航空发动机常用的状态监测与故障诊断技术	6
1.3.4 航空发动机检测与诊断技术应用——罗·罗公司 T900 系列发动机的 EHMS	8
1.4 航空器结构检查与修理技术	9
1.4.1 航空器结构检查与维修目标	9
1.4.2 航空器设计服役目标与经济使用寿命	10
1.4.3 航空器结构检查技术	11
1.4.4 飞机结构检测技术应用——美国 F-35 飞机 PHM 系统	12
复习题	15
参考文献	15
第 2 章 故障信号分析与处理	16
2.1 信号概念与分类	16
2.1.1 信号的概念	16
2.1.2 信号的分类	16
2.2 信号的时域分析	17
2.2.1 幅值域	17
2.2.2 时差域	19
2.2.3 平稳随机过程	20
2.2.4 各态历经随机过程	21
2.2.5 信号时域分析诊断实例	23
2.3 信号的频域分析	30
2.3.1 冲激函数与卷积	30
2.3.2 傅里叶级数	33
2.3.3 傅里叶变换	34

2.4	数字信号分析与处理	43
2.4.1	数字信号处理系统	43
2.4.2	数字信号处理优点	44
2.4.3	数字信号处理的发展历史	45
2.4.4	离散傅里叶变换	45
2.4.5	快速傅里叶变换	51
2.4.6	基于快速傅里叶变换的各种运算公式	53
2.4.7	实例分析	55
2.5	数字图像分析与处理	57
2.5.1	数字图像的基本概念	57
2.5.2	图像预处理	58
2.5.3	图像边沿检测	59
2.5.4	图像分割	61
2.5.5	图像目标特征提取与参数计算	68
	复习题	76
	参考文献	77
第3章	故障识别理论及方法	78
3.1	贝叶斯分类法	78
3.1.1	条件概率	78
3.1.2	全概率公式	78
3.1.3	最小错误率的贝叶斯决策规则	78
3.2	距离函数分类法	80
3.2.1	空间距离(几何距离)函数	80
3.2.2	k -近邻算法	81
3.2.3	在故障诊断中应用距离函数时应注意的问题	82
3.3	模糊诊断法	83
3.3.1	隶属函数	83
3.3.2	模糊矢量	85
3.3.3	模糊关系	86
3.4	灰色理论诊断法	86
3.4.1	灰色预测法	86
3.4.2	灰色关联度分析	89
3.5	神经网络诊断法	89
3.5.1	人工神经网络的拓扑结构及学习规则	90
3.5.2	多层前向神经网络模型及BP算法	93
3.6	专家系统诊断法	96
3.6.1	专家系统简介	96
3.6.2	规则专家系统诊断原理	97

3.7 基于案例的诊断方法	99
3.7.1 案例推理原理	99
3.7.2 案例推理的发展历程	99
3.7.3 案例推理的特点	100
3.7.4 基于案例的专家系统的架构	101
3.7.5 基于案例推理的关键技术	101
复习题	104
参考文献	104
第4章 航空发动机振动监测与诊断	106
4.1 概 述	106
4.2 航空发动机整机振动测试技术	106
4.3 航空发动机振动评定标准	107
4.3.1 制定振动量限制标准的目的	107
4.3.2 振动感受参数、显示参数和限制参数	108
4.3.3 制定振动量限制标准的原则	109
4.3.4 航空发动机整机振动限制标准	109
4.4 转子系统振动与分类	112
4.4.1 概 述	112
4.4.2 转子系统、转子振动和转子故障之间的关系	112
4.4.3 转子振动和转子系统分类	113
4.5 转子系统振动故障诊断常用方法	113
4.5.1 时间波形法	113
4.5.2 频谱分析法	114
4.5.3 轴心轨迹法	116
4.5.4 转速跟踪法	117
4.6 航空发动机转子系统振动故障分析	119
4.6.1 航空燃气涡轮发动机的结构和工作特点	119
4.6.2 航空燃气涡轮发动机发展上的变化和要求	120
4.6.3 发动机故障的类型	120
4.6.4 排故方法分析	121
4.6.5 转子系统振动故障机理及特征分析	121
4.6.6 转子振动和强度故障一览表	138
4.7 齿轮常见故障与诊断	141
4.7.1 齿轮故障的常见形式与原因	142
4.7.2 齿轮的振动机理	143
4.7.3 齿轮故障诊断常用信号分析处理方法	149
4.7.4 齿轮常见故障信号特征与精密诊断	152
4.8 滚动轴承的故障机理与诊断技术	156

4.8.1	概 述	156
4.8.2	滚动轴承故障的不同发展阶段及其频率特征	157
4.8.3	滚动轴承故障的主要形式及其原因	158
4.8.4	滚动轴承的振动机理与信号特征	160
4.8.5	正常轴承的振动信号特征	162
4.8.6	故障轴承振动信号特点	162
4.8.7	滚动轴承的精密诊断方法	166
4.9	航空发动机故障诊断实例	167
4.9.1	AI1-24 飞机发动机振动的故障诊断	168
4.9.2	某型无人飞行器用小型发动机整机振动故障分析	170
	复习题	178
	参考文献	178
第 5 章 航空发动机磨损状态监测与诊断		179
5.1	概 述	179
5.2	油样理化分析	179
5.2.1	油液理化性能变化原因及其影响	180
5.2.2	理化分析仪器	181
5.3	油样磨屑分析	184
5.3.1	磁性塞子检测法	185
5.3.2	污染分析法	188
5.3.3	油样光谱分析法	191
5.3.4	油样铁谱分析法	194
5.3.5	多功能油液磨粒智能检测与诊断系统	202
5.4	航空发动机滑油监控专家系统 EOMES1.0	211
5.4.1	知识库	211
5.4.2	专家诊断	212
	复习题	213
	参考文献	214
第 6 章 航空发动机的孔探检测技术		215
6.1	内窥技术及其发展历程	215
6.2	内窥技术在发动机探伤中的应用	217
6.2.1	航空发动机多发故障分析	217
6.2.2	内窥技术在航空发动机维护中的应用现状	218
6.2.3	损伤评估的传统方法	219
6.3	基于图像分析的航空发动机孔探监测专家系统	220
6.3.1	叶片损伤的测量	220
6.3.2	航空发动机叶片损伤维修决策知识规则	220

6.3.3	基于案例的航空发动机维修决策诊断	223
6.3.4	基于孔探图像分析的航空发动机故障诊断专家系统开发	224
6.4	航空发动机孔探检测技术发展趋势	226
	复习题	226
	参考文献	226
第7章	航空器结构检查的无损检测技术	228
7.1	航空维修无损检测技术的作用及意义	228
7.1.1	老旧飞机的无损检测	228
7.1.2	新机新材料的无损检测	228
7.1.3	无损检测在飞机日历寿命研究中的作用	229
7.1.4	无损检测在飞机疲劳裂纹扩展监测中的作用	229
7.1.5	航空器无损检测技术	229
7.2	超声波检测法	230
7.2.1	概 述	230
7.2.2	超声波的传播速度与声阻抗	232
7.2.3	超声波垂直入射到平界面上的反射和透射	233
7.2.4	超声波倾斜入射到平界面上的反射和折射	235
7.2.5	超声波探伤方法	236
7.2.6	超声检测在航空维修中的应用	238
7.3	涡流检测法	241
7.3.1	概 述	241
7.3.2	涡流检测原理	242
7.3.3	涡流检测的特点	242
7.3.4	涡流检测在航空维修中的应用	243
7.4	磁粉检测法	246
7.4.1	概 述	246
7.4.2	磁粉检测的基本原理	246
7.4.3	磁粉检测的特点	247
7.4.4	磁粉检测在航空维修中的应用	247
7.5	射线检测法	250
7.5.1	概 述	250
7.5.2	射线检测的基本原理	251
7.5.3	射线检测的特点	251
7.5.4	射线检测的适用性	251
7.5.5	射线检测在航空维修中的应用	252
7.6	渗透检测	256
7.6.1	概 述	256
7.6.2	渗透检测的原理	256

7.6.3	渗透检测的特点及适用范围	256
7.6.4	渗透检测在航空维修中的应用	257
	复习题	259
	参考文献	259
第8章	航空器渗漏检测技术	260
8.1	航空器渗漏检测的意义	260
8.2	渗漏检测方法	260
8.2.1	气泡法	260
8.2.2	卤素检漏法	261
8.2.3	氦质谱检漏法	262
8.3	飞机结构油箱渗漏检测	269
8.3.1	民用航空器结构油箱渗漏等级	269
8.3.2	民用航空器结构油箱检漏	270
8.4	飞机油箱渗漏检测应用	272
8.4.1	B737-300 飞机整体油箱渗漏检测	272
8.4.2	广州飞机维修工程有限公司 GAMECO 飞机燃油渗漏检测技术的应用研究	275
	复习题	280
	参考文献	280