



中航工业航空航天教材出版专项

航空器检测与诊断 技术导论

陈果 李爱 编著



航空工业出版社



中航工业航空航天教材出版专项

航空器检测与诊断 技术导论

陈果 李爱 编著

航空工业出版社
北京

内 容 提 要

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,力求突出航空工业和民用航空特色,内容做到全面翔实,强调理论并突出应用。

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均进行了较为详细的阐述。在检测与诊断技术方面,本书涵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、无损探伤和渗漏检测技术等。同时本书安排了详细的航空器检测与诊断案例,使理论充分联系实际。

本书可以作为航空器维修专业高年级学生的专业教学教材,也可以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, 李爱编著. --
北京: 航空工业出版社, 2012. 9
ISBN 978 - 7 - 5165 - 0072 - 9
I. ①航… II. ①陈…②李… 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(2012)第 200094 号

航空器检测与诊断技术导论 Hangkongqi Jiance yu Zhenduan Jishu Daolun

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2012 年 9 月第 1 版

2012 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 15.75 字数: 381 千字

印数: 1—1500

定价: 35.00 元

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,也是交通运输工程学科中载运工具运用工程专业的重要研究内容。但是长期以来,全面阐述航空器检测与诊断技术的具有航空工业和民用航空特色的教材却十分缺乏。目前国内关于“状态监测与故障诊断”的教材虽然很多,但明显缺乏航空工业和民用航空特色,而关于航空器检测与诊断的书籍在内容上局限性较大,或限于状态诊断、或限于磨损诊断、或限于振动诊断、或限于无损检测、或限于维修理论,因此不能形成一个完整的体系和框架,无法使学生全面掌握和了解航空器检测与诊断的相关知识,故不适于作为本科教学的教材。

本书的目的是要建立航空器检测与诊断技术的整体体系和框架,全面介绍航空器常用的检测与诊断技术和方法。本书的主要特色表现在:

1. 突出航空工业、民用航空特色

在振动、磨损诊断方面,吸收同类教材的优点,但在应用部分强调航空工业和民用航空特色,增加航空发动机相应的故障诊断实例。对于无损检测技术方面,也紧密结合航空器的无损探伤实例和应用特色进行阐述,同时也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工业和民用航空特色的内容。

2. 内容全面、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,本书涵盖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。最终形成航空器的检测与诊断技术的完整理论体系和框架。

3. 强调理论,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。本书强调理论,对在航空器检测与诊断技术中所要涉及的信号分析、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,因此本书安排了详细的航空器检测与诊断案例,使理论充分联系实际。

本书由中国民航出版社于2007年出版了第1版,通过近五年的本科教学实践,并结合实际科研工作,本次对第1版做了许多重大修改,篇幅做了大幅度的删减。在理论方面,将第1版中较难的部分,如趋势预测、支持向量机、时序分析等内容删除,以突出更为基础、工程实用性更强的内容,如频谱分析等;在具体应用技术方面,由于发动机气路故障诊断已有专门的专著论述,故删除在第1版中涉及的气路故障诊断的内容,即第4章、第7章和第8章,重点放在航空发动机整机振动故障诊断和基于油样分析的磨损故障

诊断。其他检测和诊断技术基本保留，但是也做了适当增减。这样可在有限的教学时间内更加突出重点，有的放矢。

本书可以作为航空器维修专业高年级学生的专业教学教材，也可以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，编写时间仓促，书中必然存在许多不足或错误之处，恳请读者不吝指教，提出修改意见。

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

同时要感谢在本书编著过程中支持、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

2012年7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	(1)
1.3 航空发动机状态监测与故障诊断技术	(3)
1.4 航空器结构检测与修理技术	(7)
复习题.....	(10)
参考文献.....	(10)
第2章 故障信号分析与处理	(11)
2.1 信号的概念与分类	(11)
2.2 信号的时域分析	(12)
2.3 信号的频域分析	(18)
2.4 数字信号分析与处理	(31)
2.5 数字图像分析与处理	(43)
复习题.....	(63)
参考文献.....	(64)
第3章 故障识别理论及方法	(67)
3.1 贝叶斯分类法	(67)
3.2 距离函数分类法	(69)
3.3 模糊诊断法	(71)
3.4 灰色理论诊断法	(76)
3.5 神经网络诊断法	(79)
3.6 专家系统诊断法	(85)
3.7 基于案例的诊断方法	(88)
复习题.....	(94)
参考文献.....	(94)
第4章 航空发动机振动监测与诊断	(97)
4.1 引言	(97)
4.2 航空发动机整机振动测试技术	(97)
4.3 航空发动机振动评定标准	(98)
4.4 航空发动机的主要激振源	(103)
4.5 航空发动机转子系统常见故障机理分析	(105)

4.6 齿轮常见故障与诊断	(116)
4.7 滚动轴承的故障机理与诊断技术	(133)
4.8 航空发动机故障诊断实例	(142)
复习题	(145)
参考文献	(145)
第5章 航空发动机磨损状态监测与诊断	(146)
5.1 概述	(146)
5.2 油样理化分析	(146)
5.3 油样磨屑分析	(151)
5.4 油样分析诊断案例	(170)
复习题	(175)
参考文献	(175)
第6章 航空发动机的孔探检测技术	(177)
6.1 内窥技术及其发展历程	(177)
6.2 内窥技术在发动机探伤中的应用	(179)
6.3 新型内窥技术设备及其原理	(182)
6.4 内窥技术发展趋势	(184)
复习题	(186)
参考文献	(186)
第7章 航空器结构检查的无损检测技术	(188)
7.1 航空维修无损检测技术的作用及意义	(188)
7.2 超声波检测法	(190)
7.3 涡流检测法	(203)
7.4 磁粉检测法	(208)
7.5 射线检测法	(213)
7.6 渗透检测法	(218)
复习题	(221)
参考文献	(222)
第8章 航空器渗漏检测技术	(223)
8.1 航空器渗漏检测的意义	(223)
8.2 渗漏检测方法	(223)
8.3 飞机结构油箱渗漏检测	(232)
8.4 飞机油箱渗漏检测应用	(235)
复习题	(244)
参考文献	(244)

第1章 绪 论

1.1 航空器检测与诊断技术的意义

随着航空工业、民用航空（简称民航）的发展，以现代飞机为代表的高性能新型航空器被大量设计、制造和使用。由于高速、高温、高压和重载等因素，现代航空器出现了大量结构破坏、动力装置故障等问题。为了避免重大事故发生、提高航空器的运用效率，改进航空器设计，必须对航空器所出现的故障进行及时的检测和诊断，发现故障原因和部位，并进行适时维修。

航空器检测、诊断与维修是以飞机结构的检查与修理、发动机及辅助动力装置的状态监测与故障诊断为主要研究内容，以航空器视情维修决策为最终研究目的，从而在充分保障航空器运用安全性的前提下，最大程度地降低维修成本以提高航空器运用经济性的一门学科。由此可见，随着航空器技术装备的日益复杂和规模的扩大，航空器检测、诊断与维修将对航空器使用安全性、有效性和经济性，产生越来越大的影响。

航空器检测与诊断技术是伴随航空器维修理论的发展和维修制度的变革而发展的。

1.2 航空器维修理论的发展及维修制度的变革

1.2.1 航空器事后维修制度

事后维修就是在设备发生故障之后才进行检查和维修，这种制度运用于20世纪50年代以前的航空维修制度。这一时代的飞机制造者就是驾驶员，同时也是维修人员。它的特点是设备坏了才修，不坏不修。然而，这种维修制度随着航空器结构复杂性的提高和安全性的要求增加而逐渐被淘汰，目前仅仅用于对安全性影响较小的部件维修上。

1.2.2 航空器定时维修制度

航空器的定时维修就是要求航空器在运行一定时间后，无论损坏与否，均要进行检查和维修。它的理论基础就是著名的浴盆曲线规律。浴盆曲线反映了故障率随时间的变化关系。

图1-1为经典的浴盆曲线，从曲线上可以看出3个区域：早期故障期、偶然故障期及耗损故障期。

在早期故障期，由于制造中存在着零件缺陷和工艺不当，产品早期显示了较高的故障率。

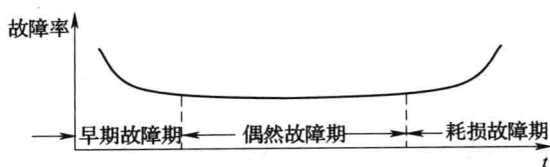


图 1-1 浴盆曲线

在偶然故障期，故障率较低且稳定，接近常数，即出现随机故障，故障一般是由使用维护不当或应力突然超过极限值、零件失效等随机因素造成的。显然通过定期拆修或更换的办法是不能防止偶然故障的。

在耗损故障期，产品的故障率开始随时间的增加而迅速增加，表现出故障集中出现的趋势。这主要是由于磨损、疲劳、腐蚀、老化及其他耗损因素引起的。故障率递增是耗损故障期的特点。对于耗损故障，预防更换是相对有效的手段。

然而，维修理论和维修实践的发展证明，浴盆曲线所揭示出来的故障规律，只适用于构造比较简单的产品，以及现代复杂设备中的一些简单机件，其适用范围十分有限。

20 世纪 60 年代，美国联合航空公司在维修改革的论证与研究曾经绘制了许多产品的故障率曲线。发现航空装备的故障率曲线有 6 种基本形式，如图 1-2 所示。其中 6%（图 1-2 (a) 和图 1-2 (b)）有明显的耗损特性，真正符合浴盆曲线的情况（图 1-2 (a)）只占 4%；另有 5%（图 1-2 (c)）没有明显的耗损期，但随工龄的增加，确有容易发生故障的趋势；而其余 89%（图 1-2 (d)、图 1-2 (e)、图 1-2 (f)）的装备是没有耗损期的。

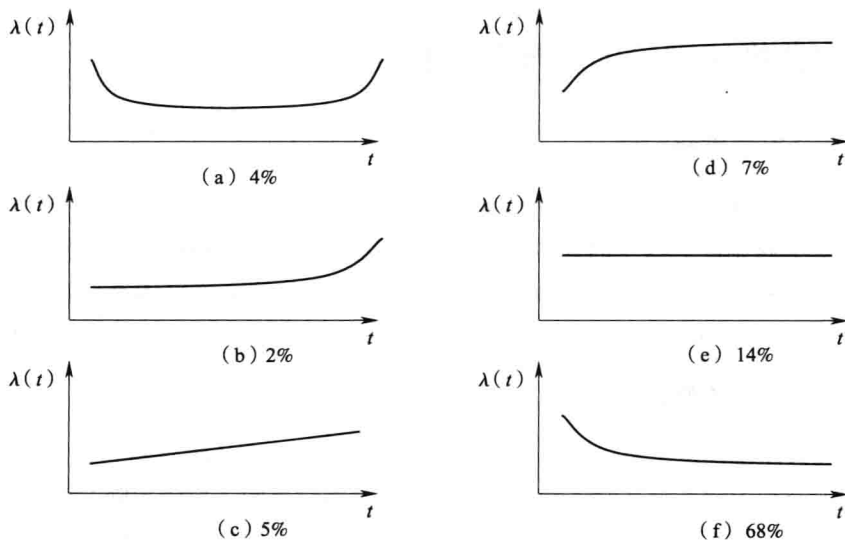


图 1-2 航空装备的故障率曲线

因此，复杂产品没有耗损期的这一重要规律的发现，推翻了浴盆曲线适用于一切情况的假设，也从根本上动摇了传统的全面定时维修的做法。

1.2.3 航空器以可靠性为中心的维修制度

对故障规律的分析,表明各种产品、各种故障模式的发生、发展和后果是不相同的,因而要采取相适应的维修对策,以使用最少的资源消耗,确保产品使用的安全性与可靠性,这是以可靠性为中心的维修理论的基本观点。即以故障模式和故障影响分析为基础,以维修的适应性、有效性和经济性为决策准则,确定是否进行预防性维修工作,并确定工作的内容、维修级别、时机的逻辑决断方法。其基本观点为:

①飞机的可靠性与安全性是由设计制造赋予的固有特性,有效的维修只能保持而不能提高它们。

②产品故障有不同的影响或后果,应采取不同的对策。故障后果是确定预防性维修工作的最重要依据。一般只有因其故障导致安全性、任务性和经济性等严重后果的重要产品,才需要考虑是否做预防性维修工作。对于采用冗余技术的产品来说,其安全性一般已不再与其可靠性相关了,因此可以从经济性上来权衡,是否需要做预防性维修工作。

③依产品的故障规律不同,应采用不同的方式控制工作时机。对于有耗损性故障规律的产品适宜定时拆修或更换,以预防功能故障或引起多重故障。对于无耗损性故障规律的产品,定时拆修或更换常常是有害无益的,适宜于通过检查、监控和视情进行维修。

④对产品采用不同的预防性维修工作类型,其消耗资源、费用和维修工作的难度、深度是不相同的,可加以排序。应根据不同产品的需要选择适用而有效的工作类型,从而在保证可靠性的前提下,节省资源与费用。

1.2.4 航空器的视情维修制度

视情维修就是根据对项目定期或连续的状态监测结果所实施的预防维修,又叫做“以状态为基础的预防维修”。这种制度着眼于航空器的具体技术状况。一反定期维修的常规而采取定期检测,对航空器运行情况的发展密切追踪监测,仅在必要时才进行修理。以状态为基础的预防维修的方式进行预防维修作业的间隔时间是不固定的,它是根据航空器的实际状况来确定的。设备状态监控技术的一项主要作用是提供有关机器设备现状的信息,以及状态变化率的信息。这些信息对于以状态为基础的预防维修的实施来说是极其重要的。采用了以状态为基础的预防维修制度,故障预测中的统计因素可以清除,从而延长机器设备的寿命。视情维修是以状态监控为核心的。视情维修根据航空器状态监控的结果确定维修间隔和维修内容。由此可见,状态监控和故障诊断为视情维修的实施提供了基本的保障,是视情维修的基础。

1.3 航空发动机状态监测与故障诊断技术

1.3.1 航空发动机状态监测与故障诊断基本理论

目前航空发动机状态监测与故障诊断已经逐步形成了既有系统的理论,又有具体的方法;既有现代检测方法,又有先进的分析技术;既有直接应用于工程实际,又有高技术密切相关的科学体系。该学科的基本理论主要有信号分析与处理和模式识别等。

(1) 信号分析与处理理论

发动机的状态信号分析可以从统计的观点出发,也可以从系统分析的观点出发,分别在时域、幅值域、延时域、频域及倒频域进行研究,得到信号的幅值特征、频率特征、相关性特征等,从而形成诊断矢量。发动机的状态信号分析是状态监测与故障诊断的有力工具。另外,作为二维信号的图像也可以包含丰富的故障信息,例如,铁谱图像包含了金属磨粒的尺寸和类型,通过对铁谱图像的分析和处理可以实现对发动机磨损故障的诊断;孔探图像反映了发动机压气机叶片、涡轮叶片及燃烧室等部件的损伤情况,运用图像分析和处理方法,可以计算出损伤的长度及面积等尺寸,从而为发动机的修理提供重要决策依据。

(2) 模式识别理论

故障诊断的本质就是按照一定的准则,根据实测的一组能反映系统工作状态的特征量,把系统划分为某一故障模式,因此,模式识别理论是故障诊断的重要理论。由于航空发动机是一个大型强非线性系统,故障征兆和故障原因之间并不是一一对应关系,它们之间存在复杂的一对多和多对一的关系,而且故障征兆和故障原因之间还存在许多随机的、模糊的不确定因素。这些问题就导致了航空发动机状态监测与故障诊断的复杂性,因此,将现代人工智能技术引入到航空发动机故障诊断能够有效地解决故障诊断中的不确定性问题。常见的模式识别理论包括:统计模式识别、模糊模式识别、句法模式识别、人工神经网络模式识别以及支持矢量机模式识别等。

1.3.2 航空发动机状态监测与故障诊断系统

航空发动机监控系统(engine monitoring system, EMS)是由安装在飞机、发动机以及地面基地上的各种类型的状态监控设备(包括硬件和软件)和技术保障、管理人员以一定的工作程序综合而成的系统。

表1-1显示了发动机监控系统的监控参数。航空发动机数据采集与处理系统如图1-3所示。

表1-1 发动机监控系统 EMS 的监控参数

参 数	功 能					
	热端	机械系统	性能	控制	跟踪	趋势
马赫数 (Ma)			√	√	√	
高度和进口压力	√	√	√		√	√
进口总温			√	√	√	√
发动机燃气温度 (EGT ^①)	√		√	√	√	
油门杆角度	√	√	√		√	
高压转子转速 (N_2)		√	√	√	√	
低压转子转速 (N_1)			√	√	√	
燃油流量 (FF ^②)			√	√	√	

① EGT = exhaust gas temperature。

② FF = fuel flow。

续表 1-1

参 数	功 能					
	热端	机械系统	性能	控制	跟踪	趋势
发动机压力比 (EPR ^①)		√	√			
中间级压气机压力		√	√	√		
压气机出口压力			√	√		
中间级压气机温度			√			
压气机出口温度			√			
振动		√				√
滑油消耗量		√				√
滑油温度		√				
滑油压力差		√				
滑油污染		√				√
排气喷口位置			√	√		
不连续		√	√		√	√
静子位置			√			√
用户引气			√			√

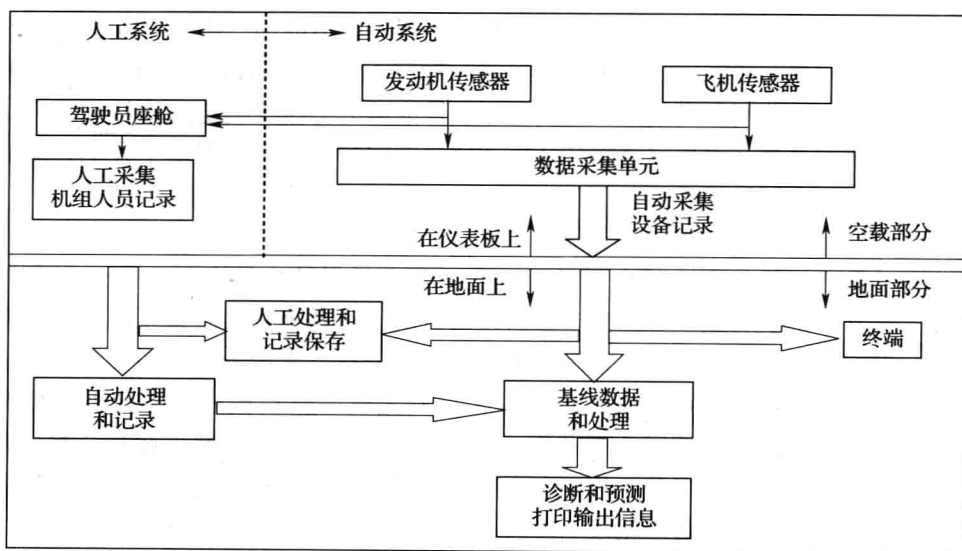


图 1-3 航空发动机数据采集与处理系统

发动机监控系统的目的是采集、记录和处理在飞行中和地面试验（检查）中的数据，用以辅助发动机的设计、管理、使用维修和后勤保障。数据的记录可以是人工的、计算机辅助的或自动的。发动机监控系统是发动机管理系统的重要组成部分，其核心是以一定的工作程序构成的发动机控制体系，需要建立在状态监控与故障诊断设备的发展基础上。

① EPR = engine pressure ratio。

1.3.3 航空发动机常用的状态监测与故障诊断技术

航空发动机常用的状态监测与故障诊断的主要手段和方法有：基于发动机气路性能参数的状态诊断、航空发动机的振动诊断、基于滑油分析的发动机磨损状态诊断，以及发动机内部气路部件的孔探检测技术等。

(1) 发动机状态诊断

其基本理论基础是发动机气路上的参数（温度和压力等）和发动机各气路部件的特性（效率、流通能力等）存在严格的非线性气动热力学关系，由于气路部件的机械故障如叶片侵蚀、封严磨损等是逐渐发展的，因此可以用小偏差方法对非线性方程组作线性处理，从而形成基于线性模型的小偏差故障方程法。气路诊断面临的主要困难是：①在大多数机型上测量参数个数少于未知量个数；②故障之间存在很强的相关性；③测量参数中的噪声与故障造成的测量参数偏差具有相同的数量级；④发动机具有很强的非线性和复杂性，且工况及工作环境变化大。状态诊断能够将发动机故障隔离到单元体。

(2) 发动机转子系统故障诊断

航空发动机基于振动分析的转子系统故障诊断，是典型的旋转机械状态监测与故障诊断问题，发动机转子系统的主要故障有：不平衡、初始弯曲、刚度非对称、不对中、旋转失速和喘振、转子与静子碰摩、转子裂纹、密封失稳、齿轮与滚动轴承故障等。转子系统的故障特点是多种故障具有一些相同征兆，多种原因可能造成同一故障。这加大了旋转机械转子系统状态监测和故障诊断的难度，目前，对转子系统故障诊断的研究主要集中在3个方面：①从理论上分析各类故障，尤其是非线性故障的特性并确定故障特征量；②利用先进的信号采集和处理技术提取故障特征；③建立专家知识库，研制基于人工智能的智能诊断系统，应用于实际转子系统。

(3) 发动机磨损状态诊断

航空发动机的磨损状态诊断主要是通过监测发动机滑油中的金属和非金属磨粒的含量、浓度、尺寸、形状和颜色等信息来诊断发动机的传动系统和具有相互运动的摩擦副的磨损性质、磨损类型和磨损部位。常用的方法是铁谱分析、光谱分析、污染分析、油品理化及能谱分析等。目前主要的研究方向为：①研制先进的仪器提高油样分析的精度和效率，特别是开发机载的在线油样分析设备；②收集基于油样分析的磨损诊断经验，建立知识库、样本库或案例库，开发基于规则和人工神经网络的智能诊断专家系统；③实现多种分析方法的融合诊断，提高诊断精度。

(4) 发动机孔探检测技术

航空发动机结构复杂，工作在高温、高速等恶劣条件下，而且经常需要变换工作状态，承受很大的交变载荷。因此，它的故障一直是威胁飞行安全的首要问题。因此，在使用过程中采取必要的监测手段，对其承受高负荷和处于腐蚀介质中的零部件进行定期与不定期探测、检验，及时发现各类损伤、缺陷是保障飞行安全的重要措施之一。由于航空发动机的关键部件如主气流通道部件、高压压气机、高低压涡轮的各级轮盘及叶片、燃油喷嘴、燃烧室等都是不易拆卸且检验可达性较差的零部件，采用孔探仪对这些部件的损伤进行窥探和分析是实现发动机无损探伤的重要手段。因此，孔探技术在各航空公司和飞机维

修企业得到了普遍采用和重视。

其他检测手段还有物理检测和燃气流检测等。图 1-4 为航空发动机主要部件及可以采用的诊断手段。

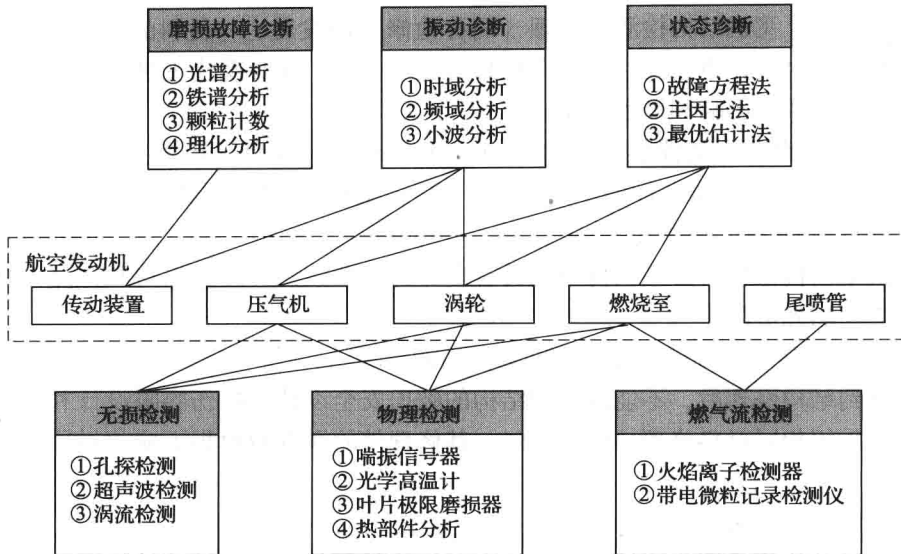


图 1-4 航空发动机主要部件与诊断手段的对应关系

通常，发动机故障诊断手段可以分为诊断技术和诊断算法。诊断技术是指采用物理方法（声、光、热、电等）直接或间接识别被诊断对象的结构参数（特别是微观的结构参数，包括裂纹、腐蚀、烧蚀、蠕变等）的诊断方法。例如，声诊断装置、孔探检测仪、超声波检测仪和涡流检测仪等均属于这一类诊断方法。诊断算法是根据发动机使用过程中的参数检测结果来考察被诊断发动机的状态，其研究内容是典型的故障识别问题，状态诊断、振动诊断和磨损诊断均属于此类方法。

1.4 航空器结构检测与修理技术

1.4.1 航空器结构检测与修理目标

飞机结构主要是指机翼、机身、翼身对接、翼身整流罩、尾翼、吊挂、起落架（包括前起落架、主起落架）等，是飞机在空中和地面承受各种载荷的构件，飞机结构的完整性对飞行安全起着极其重要的作用。

飞机结构按其设计原理的发展过程可分为安全寿命结构、破损安全结构和损伤容限结构；按保持结构完整性所起的作用可分为重要结构和次要结构。

为保证飞机结构的安全性，通常采用两种设计原则：即损伤容限设计和安全寿命设计。其中损伤容限设计原则是推荐优先采用的设计原则；而安全寿命设计原则仅限于高强度钢的起落架和发动机架等，因为这类材料的临界裂纹很短，不可能通过检查来保证

安全。

早期的飞机因其结构和系统相对简单，通常采用预防和修理相结合，且以预防为主的飞机维修指导思想，要求对飞机的每种设备都要进行定期翻修，这在一定程度上是与传统的飞机结构相适应的；对于现代喷气式运输机，则采用“定时”、“视情”、“监控”3种维修方式。此外，飞机结构检测和修理（简称检修）的发展也与材料的发展密切相关，由帆布和木材到铝合金，再到高性能复合材料的几次飞跃，都对现代飞机的结构检测和修理的发展起到了重要的影响和推动作用。

飞机中常见的损伤是偶然损伤（accidental damage, AD）、环境损伤（environmental damage, ED）和疲劳损伤（fatigue damage, FD）。结构件的检测与修理目标为：

（1）满足气动力光滑要求

在飞机结构检修中，必须保持飞机具有良好的气动性，应注意保持和恢复飞机的流线型和蒙皮表面的光滑度。

（2）满足静强度、刚度、疲劳强度等方面的要求

要注意到结构修理后，不能改变原结构的破损安全设计、损伤容限设计和耐久性设计的特性。当采用相同材料修理损伤构件时，其修理件的横截面积不应超过原构件横截面积的15%。

（3）满足防腐控制要求

飞机结构件均须采用防腐控制措施。由于结构件所处区域腐蚀环境不同，防腐等级不同，所采用的防腐方法也不同。应特别指出，当采用不同类型的合金材料修理损伤结构部位时，应采取有效的绝缘隔离措施，以防止电化学腐蚀。

（4）可检性、可达性要求

在满足上述条件下，应特别重视修理以后结构的可检性，尤其是重要承力构件修理时不应破坏原来结构的可检性。还应考虑检修路线、检修程序、检修空间和检修口等因素。

（5）密封性要求

对密封结构进行修理时，应满足原密封性要求。

1.4.2 航空器设计服役目标与经济使用寿命

设计服役目标（design service goal, DSG）是指飞机设计和（或）鉴定的一段时期（以飞行次数或小时计），在该时期内，飞机主结构不应当出现重大的开裂。

当由于疲劳、意外损伤和（或）环境作用引起了飞机结构的损伤，使得其正常功能不能通过可接受的经济修理方式予以保持的时候，所对应的使用时间即为经济使用寿命（economic repair life, ERL）（又称耐久性使用寿命）。具体地说，结构细节出现疲劳裂纹或其他损伤时允许通过经济修理保持其正常功能，直至经济修理已经无法实施时，结构达到其经济使用寿命。

结构经济使用寿命是其修理前经济寿命与各次修理后经济寿命的总和。修理后的经济寿命与所采用的修理工艺、部位和方法密切相关，同时结构的经济寿命取决于经济修理极限和对损伤度的要求，这一要求通常用“许用裂纹超出（百分）数和可靠度”描述。

1.4.3 航空器结构检测技术

(1) 无损检测技术

无损检测 (non - destructive testing, NDT) 技术是材料科学的分支, 是一类不改变和损害材料或工件状态及性能, 即可对材料成分或缺陷、工件结构缺陷、工件机械和力学性能等做出评定的检测方法。

无损检测技术的理论基础是材料的物理性质。通过分析材料在不同势场作用下的物理性质, 并测量材料性能的细微变化, 来说明产生变化的原因并评价其适用性。

无损检测技术始于 20 世纪 70 年代, 主要经历了无损指示 (non - destructive indication, NDI)、无损检测、无损评估 (non - destructive evaluation, NDE) 3 个阶段。各类无损检测方法多达 70 余种, 常用的有渗透检测、磁粉检测、涡流检测、射线检测、超声波检测等。近年来随着各种新技术的发展和应用, 出现了一些如激光全息无损检测、红外无损检测等无损检测的新方法, 使检测仪器得以改进, 检测水平大大提高。

无损检测技术主要应用在制造阶段检验、成品检验和在役检验。对航空公司而言, 无损检测技术主要用于检查在役航空器的零部件在运行中结构或状态的变化, 保证航空器安全、可靠的工作。

传统无损检测方法有: 渗透检测、磁粉检测、涡流检测、射线检测及超声波检测。无损检测新方法有声发射无损检测、红外无损检测、激光全息无损检测、声振无损检测, 以及微波无损检测。

(2) 航空器渗漏检测技术

民用航空器管路系统 (包括燃油系统、液压系统、氧气和供气系统等) 和结构油箱的密封性对飞行安全和能否正常营运起着重要作用。这些密封系统发生渗漏是航空器制造和使用过程中常见的故障, 若不能及时排除就会严重地威胁航空器的运行安全, 甚至会发生灾难性事故。检测和修理航空器系统的渗漏, 特别是飞机结构油箱渗漏, 工艺过程复杂, 技术难度较大, 长期以来是飞机修理工作的一大难题。

目前, 常规检漏方法包括皂泡法、渗透剂法、压强衰减法和卤素检漏法等, 但这些方法都存在着检测精度不高、试验重复性差等缺陷。氦质谱检漏技术是利用氦气作为示踪气体的高灵敏检漏方法, 其检测精度远远高于皂泡法等传统检漏方法, 具有灵敏度高、适用范围广等优点, 特别适用于对微小渗漏的精确检测, 是目前可以提供所需要的高灵敏度和高可靠性的检漏方法。该技术起源于 20 世纪 40 年代, 随后的数十年里在众多领域获得了广泛的应用。随着科学技术的发展, 氦质谱检漏技术得到不断的发展与完善, 已经发展成为一种成熟的检漏技术, 可以迅速、可靠地检测系统的渗漏, 并检验制造及修理的质量。

近年来, 氦质谱检漏方法在航空领域中的应用逐渐增多。在国外, 空中客车公司 (简称空客)、波音公司等大型航空制造公司已经率先将氦质谱检漏技术应用于油箱检修中, 实践证明: 该检漏方法安全、方便, 使油箱修补时间大大缩短, 不仅提高了油箱修补质量, 而且降低了飞机维修成本, 使运营的可靠性和经济性得以改善。在国内, 中航工业沈阳飞机工业 (集团) 有限责任公司 (简称沈飞)、中航工业成都飞机工业 (集团) 有限责任公司 (简称成飞) 对军机整体油箱采用氦质谱检漏技术进行了研究, 并已经探索出正压

检漏的企业标准。各民用飞机修理单位为了准确地检测到结构油箱的渗漏部位，采用了很多方法，特别是从1998年开始，南方航空公司和广州飞机维修工程有限公司（GAMECO）在维修实践过程中，提出了飞机燃油渗漏检测的新方法——氦气查漏法，采用氦质谱检测技术检测油箱渗漏，在结构油箱渗漏检测方面取得了巨大的成绩，积累了丰富的经验。实践证明：氦质谱检漏方法比传统的方法有效且准确得多，可以有效缩短飞机停场修理的时间，降低员工的劳动强度。由此可见，氦质谱检漏方法是以后航空器渗漏检测技术的发展方向。

复习题

- (1) 请简述航空器检测、诊断与维修技术的目的和意义。
- (2) 请简述航空器维修理论的发展历程。
- (3) 请简述航空发动机常用的检测与诊断技术。
- (4) 请简述航空器结构检测与修理目标。
- (5) 请简述常用的无损检测技术和渗漏检测技术。

参考文献

- [1] 范作民，孙春林，白杰. 航空发动机故障诊断导论 [M]. 北京：科学出版社，2004.
- [2] 王起鹏，刘德馨. 航空燃气涡轮发动机技术诊断 [M]. 北京：航空工业出版社，1990.
- [3] 孙金立. 无损检测及在航空维修中的应用 [M]. 北京：国防工业出版社，2004.
- [4] 左洪福. 发动机磨损状态监测与故障诊断技术 [M]. 北京：航空工业出版社，1996.
- [5] 常士基. 现代民用航空维修工程管理 [M]. 太原：山西科学技术出版社，2002.
- [6] 王再兴. 民用航空器外场维修 [M]. 北京：中国民航出版社，2000.