



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



航空器检测 与诊断技术导论

陈 果 编著

中国民航出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



航空器检测 与诊断技术导论

陈 果 编著

中国民航出版社

图书在版编目 (CIP)数据

航空器检测与诊断技术导论/陈果编著. —北京: 中国民航出版社, 2007. 10
ISBN 978-7-80110-817-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 137409 号

责任编辑: 邢璐

航空器检测与诊断技术导论

陈 果 编著

出版	中国民航出版社 (010) 64290477
社址	北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
排版	中国民航出版社照排室
印刷	北京亿隆达印刷厂
发行	中国民航出版社 新华书店
开本	787 × 1092 1/16
印张	26. 75
字数	602 千字
版本	2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

书号	ISBN 978-7-80110-817-3
定价	55. 00 元

(如有印装错误, 本社负责调换)

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，全面介绍了航空器的常用检测与诊断方法。全书力求突出航空和民航特色，内容做到全面详实，强调理论并突出应用。

在理论方面，本书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。在检测和诊断技术方面，本教材几乎涵盖了航空器检测与诊断的所有方法，包括航空发动机的状态诊断、趋势图诊断、指印图诊断、转子系统的振动诊断、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。

本书既可以作为航空器维修专业高年级学生的专业教材，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。

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。目前国内关于“状态监测与故障诊断”的教材虽然很多，但是长期以来，针对航空、民航专业的全面阐述航空器检测与诊断技术的教材却十分缺乏。已有的少量教材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，全面介绍航空器的常用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、民航特色

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状态诊断、趋势图诊断、指印图诊断、孔探检测以及飞机渗漏检测等这些具有鲜明航空、民航特色的内容。

2. 内容全面、详实

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，本书几乎涵盖了航空器检测与诊断的所有方法，包括航空发动机的状态诊断、趋势图诊断、指印图诊断、转子系统的振动诊断、磨损状态诊断、孔探检测、无损探伤、渗漏检测技术。同时，介绍现代航空器的先进 MSG-3 维修思想以及航空公司的可靠性管理方案和流程，最终形成航空器的检测与诊断技术的完善理论体系和框架。

3. 强调理论，突出应用

要培养高层次的航空器维修人才，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。

本书可以作为航空器维修专业高年级学生的专业教材，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。由于作者水平有限和编写时间仓促，书中必然存在许多不足或错误之处，恳请读者谅解。

“它山之石可以攻玉”，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，在此对其作者谨表示衷心的感谢。

同时还要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。感谢作者博士后期间的合作导师、南京航空航天大学民航学院左洪福教授，是他带我进入了这个领域并开始了相关的科研和教学工作；感谢南京航空航天大学民航学院黄圣国教授对本书的审阅工作；感谢候佑平同学在航空器渗漏检测一章中所做的编写和校对工作；感谢周伽、文振华、汤洋、李飞敏、邓堰、于明月、张强、沈如防等同学对本书的文字录入、编排及校对工作。

最后，感谢南京航空航天大学民航学院教材基金的资助！

陈 果

2006 年 12 月于南京

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 航空器检测与诊断技术的意义	(1)
第二节 航空器维修理论的发展及维修制度的变革	(3)
第三节 航空发动机状态监测与故障诊断技术	(6)
第四节 航空器结构检查与修理技术	(12)
第二章 故障信号分析与处理	(18)
第一节 信号的概念及分类	(18)
第二节 信号的时域分析	(19)
第三节 信号的频域分析	(24)
第四节 数字信号分析与处理	(35)
第五节 数字图像分析与处理	(50)
第三章 故障识别理论及方法	(74)
第一节 贝叶斯分类法	(74)
第二节 距离函数分类法	(78)
第三节 模糊诊断法	(80)
第四节 灰色理论诊断法	(84)
第五节 神经网络诊断法	(88)
第六节 支持向量机诊断法	(94)
第七节 时间序列预测法	(108)
第八节 专家系统诊断法	(120)
第四章 航空发动机状态诊断	(126)
第一节 航空发动机状态诊断的基本原理	(126)
第二节 航空发动机状态诊断的基本概念	(127)
第三节 故障方程	(129)
第四节 故障方程求解的数学基础	(140)
第五节 故障方程的求解	(146)
第六节 应用实例	(152)

第五章 航空发动机振动监测与诊断	(154)
第一节 航空发动机振动监测与诊断系统的组成	(154)
第二节 航空发动机的主要激振源	(160)
第三节 航空发动机转子系统常见故障机理分析	(162)
第四节 齿轮常见故障与诊断	(191)
第五节 滚动轴承的故障机理与诊断技术	(211)
第六节 航空发动机故障诊断实例	(225)
第六章 航空发动机磨损状态监测与诊断	(235)
第一节 概述	(235)
第二节 油样分析方法的分类及其应用范围	(235)
第三节 磁性塞子检测法	(238)
第四节 油样光谱分析法	(241)
第五节 油样铁谱分析法	(245)
第六节 油样分析诊断案例	(255)
第七章 航空发动机趋势分析法	(272)
第一节 民用航空发动机趋势图分析技术	(272)
第二节 航空发动机性能趋势的非线性时间序列预测	(276)
第八章 航空发动机指印图分析法	(284)
第一节 概述	(284)
第二节 指印图	(284)
第三节 指印图分析	(285)
第四节 故障诊断实例	(286)
第九章 航空发动机的孔探检测技术	(294)
第一节 内窥技术及其发展历程	(294)
第二节 内窥技术在发动机探伤中的应用	(296)
第三节 新型内窥技术设备及其原理	(299)
第四节 内窥技术发展趋势	(300)
第五节 基于 Internet 航空发动机内部损伤远程评估专家系统	(302)
第十章 航空器结构检查的无损检测技术	(317)
第一节 航空维修无损检测技术的作用及意义	(317)
第二节 超声波检测法	(319)
第三节 涡流检测法	(331)

第四节	磁粉检测法	(336)
第五节	射线检测法	(341)
第六节	渗透检测法	(348)
第七节	无损检测新技术	(351)
第十一章	民用航空器渗漏检测技术	(376)
第一节	航空器渗漏检测的意义	(376)
第二节	渗漏检测方法	(376)
第三节	飞机结构油箱渗漏检测	(385)
第四节	飞机油箱渗漏检测应用	(387)
第十二章	民用航空器维修思想与可靠性管理	(397)
第一节	现代民用航空器的 MSG-3 维修思想	(397)
第二节	现代民用航空器可靠性管理	(407)

第一章 绪 论

第一节 航空器检测与诊断技术的意义

自第二次世界大战后，世界各国的民用航空事业取得了令人瞩目的发展。特别是进入 20 世纪 80 年代，民用航空事业更是突飞猛进。在半个多世纪的发展过程中，飞行安全始终是民航领域的主题。

据国际民航组织的统计（如表 1-1），1988—1993 年的 6 年间，世界定期和不定期航空运输共发生 279 起飞行事故，死亡 6646 人。平均每年发生 46.5 起飞行事故，死亡 1108 人。1994 年全球空难死亡 1385 人，比 1993 年的死亡人数增加 25%，航空事故率呈逐年上升，形式非常严峻。这些事故不但造成了重大的人员伤亡，而且也造成了巨大的经济损失和社会影响。飞机发生事故或全损失事故一般有人、机械和环境等诸多方面的原因（如表 1-2）。国际民航组织的调查表明，由于单一主要原因发生的事故约占 28%，有两个主要原因的占 54%，多个主要原因的占 18%。

在机械因素方面，虽然现代飞机设计技术和可靠性已日臻完善，机械因素导致的飞行事故仍占很高的比例。以飞行安全情况最糟的 1992 年为例，在全损事故的 26 起中，人为因素占 36%，机械因素占 27%，环境因素占 20%；在重大损伤事故的 28 起中，人为因素占 47%，机械因素占 33%，环境因素占 20%；在严重事故的 16 起中，人为因素占 14%，机械因素占 42%，环境因素占 44%。

表 1-1 1988—1993 年世界民航飞行事故统计

年份	1988		1989		1990		1991		1992		1993	
事故情况	次	死亡 (人)	次	死亡 (人)	次	死亡 (人)	次	死亡 (人)	次	死亡 (人)	次	死亡 (人)
定期客运航班	15	633	12	644	9	283	9	434	9	929	10	487
不定期客运航班	4	84	7	418	3	28	3	295	3	90	3	266
地区、通勤航班	16	218	20	321	13	242	19	315	19	281	20	173
非客运航班	19	72	12	47	10	58	18	133	13	91	13	84
合计	54	1007	51	1450	35	611	49	1177	44	1391	46	1010

表 1-2 1988—1993 年世界民航飞行事故按原因分类统计 (次)

原因 \ 年份	1988	1989	1990	1991	1992	1993
机组责任或操作失误	31	34	12	10	12	31
空管责任	0	2	1	2	0	1
天气	21	7	8	10	14	16
发动机失效、失火	5	6	7	7	5	6
飞机结构和系统故障	1	5	3	7	7	3
可控飞行撞地	11	15	8	8	5	11
人为破坏	2	2	0	1	1	—
劫持	3	1	1	2	0	0
击落	2	1	1	2	6	0

根据中国民航 2002、2003 年度航空安全报告, 2002—2003 年间飞行事故按类型统计见表 1-3 所示, 按原因统计见表 1-4 所示。从表 1-3 可以看出, 与航空器机械故障相关的飞行事故(发动机空中停车、系统失效、襟翼失效、起落架轮子以外部位触地)在 2002 年的 116 起中有 37 起, 在 2003 年的 100 起中有 33 起。从表 1-4 可以看出, 由航空器机械和机务故障原因引起的飞行事故在 2002 年的 116 起中有 46 起, 在 2003 年的 100 起中有 39 起。

表 1-3 2002—2003 年中国民航飞行事故按类型分类统计 (次)

类型 \ 年份	2002	2003
偏出跑道、冲出跑道、场外接地	6	7
迷航、偏航、飞错航线	0	4
发动机空中停车	27	23
危险接地	0	2
空中撞障碍物	0	5
地面撞障碍物	2	1
雷击	1	1
鸟击	36	23
起落架轮子以外部位触地	1	4
小于 1/2 间隔	8	4
襟翼失效	1	1
系统失效	8	5
外来物击伤飞机、发动机	3	2
其他	23	18
合计	116	100

表 1-4 2002—2003 年中国民航飞行事故按原因分类统计

(次)

原因 \ 年份	2002	2003
机组	22	26
机械、机务	46	39
航管	5	1
民航航务管理	1	3
地面保证	4	3
天气或意外	37	27
其他	1	1
合计	116	100

从大量的统计资料可以看出,因机械故障原因造成事故的比例一般在 25% ~ 30% 左右。由此可见,(准确、快速、有效地诊断出飞机发动机的机械故障对于降低飞机空难事故的发生率及提高民航运输的经济效益有着极其重大的意义。)

(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营安全性的前提下,最大程度地降低维修成本以提高航空器运营经济性的一门学科。)由此可见,随着航空器技术装备的日益复杂和机队的扩大,(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。)

第二节 航空器维修理论的发展及维修制度的变革

一、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，这种制度运用于 20 世纪 50 年代以前的航空维修业。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的结构复杂性的提高和安全性的要求增加，逐渐被淘汰了，目前仅仅用于对安全性影响较小的部件维修上。

二、航空器定时维修制度

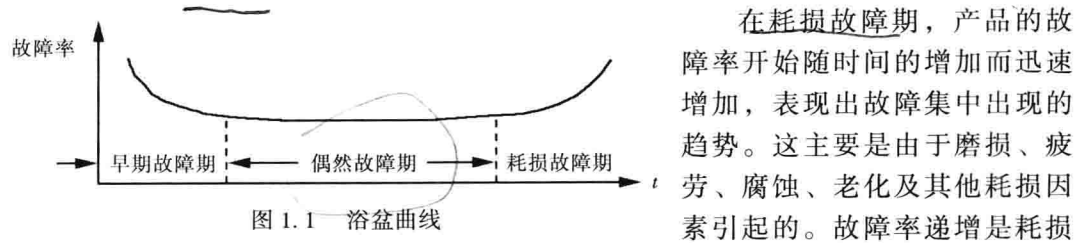
航空器的定时维修就是要求航空器在运行一定时间后,无论损坏与否,均要进行检查和维修。它的理论基础就是著名的浴盆曲线规律。浴盆曲线反映了故障率随时间的变化关系。

图 1.1 为经典的浴盆曲线, 从曲线上可以看出三个区域: 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。

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，故障的原因一般是由于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。显然对于偶然故障，通过定期拆修或更换的办法是不能防止的。



故障率递增是耗损故障期的特点。对于耗损故障，预防更换是起作用的。

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。发现了航空机件的故障曲线有六种基本形式。如图 1.2 所示，其中 6%（见 a 和 b 项）有明显的耗损特性，真正符合浴盆曲线的情况只占 4%（见 a 项），另有 5%（见 c 项）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%（见 d、e、f 项）的机件是没有耗损期的。

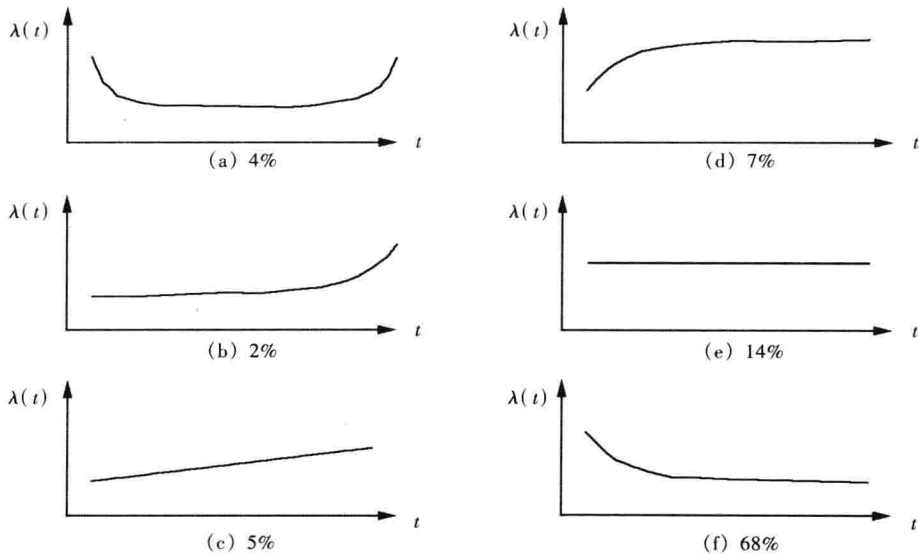


图 1.2 航空装备故障率曲线

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。

三、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。这是当代维修理论的基本观点,也是著名的 MSG-3 维修思想的精髓。MSG (Maintenance Steering Group) 是维修指导小组英文名称的缩写。1968 年,美国各航空公司代表从可靠性方案管理经验出发,合作编写了一本名为《维修研究和方案拟定》的 MSG-1 手册。此文件在 1970 年修改为可用于拟定一切新型运输飞机维修大纲的 MSG-2 文件。1978 年美国联合航空公司维修分析主任诺兰和希普两人发表了《以可靠性为中心的维修》及有关文章,对 MSG-2 提出了改进和补充意见,并提出了一个新的逻辑决策图,简称为 RCM (Reliability Centered Maintenance) 图,其分析方法为 RCM 法。1979 年美国联邦航空局、英国民航局、美国和欧洲的飞机、发动机制造商、各航空公司再次成立工作组,针对 MSG-2 的缺点,并参考了诺兰等人提出的 RCM 逻辑决断图和 RCM 决断法,制订了第三个以可靠性为中心的《MSG-3 维修大纲制订文件》。美国航空运输协会 (ATA) 于 1980 年 10 月颁布维修大纲文件 MSG-3。之后于 1988 年进行了第一次修订,颁布了 MSG-3 (R1); 1993 年进行了第二次修订,颁布了 MSG-2 (R2)。每次修订,均使 MSG 思想不断发展和完善。

MSG-3 的要点是:以对飞机重要功能产品可靠性特性进行分析,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。一般只有其故障会有安全性、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) 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、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。

MSG-3 的目的是提出一种方法来制订航空器管理当局、使用单位和制造厂家都能接受的初始预定维修大纲。这个维修大纲的目的是保持装备的固有安全性和可靠性,并确定飞机或发动机寿命期内的初始维修要求;同时依据航空器审定运行能力的要求,确定所有预定维修工作的间隔。一个有效的维修大纲,它只预定那些满足上述目的所必需的工作,对于只增加维修费用而不相应提高可靠性的维修工作,都不予以预定。

四、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，也叫做“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，同时也能延长机器设备的寿命。视情维修是以状态监控为核心的，它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。

第三节 航空发动机状态监测与故障诊断技术

一、航空发动机状态监测与故障诊断研究对象

发动机故障诊断的研究对象是完全组装好的，正在工作的或准备工作的发动机（有时也包括压气机、涡轮等单独的部件）。诊断过程中应当不对发动机进行分解，而所采取的所有诊断方法和手段应当是无损的。

航空发动机的故障指发动机的一种不合格的状态，它的发生会影响发动机的正常工作或降低发动机的性能指标。发动机故障包括以下几方面：

- (1) 发动机机械零件或构件的损坏；
- (2) 发动机系统或设备丧失规定的功能；
- (3) 发动机实际性能的衰退超过规定值。

航空发动机故障诊断的任务在于揭示发动机的故障，即确定故障的部位、故障严重程度、故障原因和预测故障的发生和发展过程。发动机故障诊断的任务可以在不同深度上解决。

(1) 简易诊断：通过对发动机关键参数的监测，依据参数是否超标，回答发动机是否出现故障，它是进行精密诊断的前提和基础；

(2) 精密诊断：在发现发动机的监测参数超标的情况下，对监测的参数进行分析和诊断，进行以下三方面的诊断：

故障定位：揭示出故障发生的部位，并将故障隔离到发动机的单元体或某个附件；

故障定性：指出故障的严重程度，为发动机的维修决策提供依据；

故障定因：指出是何种原因导致了该故障，从而为发动机的维修和设计改进提供依据。

(3) 趋势预测：航空发动机的关键参数在一定程度上反映了系统的变化状态，当

系统出现故障时,必然要通过关键参数体现出来,通过对已知数据进行趋势分析和时间序列分析,建立发动机时序模型,从而对未来的值进行预测,对于提前预知航空发动机的状态并有效地作出维修措施避免发生重大事故具有十分重要的意义。

二、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由信号分析与处理、模式识别、故障方程法及预测技术等。

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,从而形成诊断向量,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 and 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映射关系,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向量机模式识别等。

3. 故障方程法

故障方程法是航空发动机故障诊断所特有的方法,它是根据被诊断系统的故障方程进行故障辨识。所谓故障方程是指系统的可测性能(响应)的变化与引起这些变化的系统内部状态参数(故障因子)的变化之间的关系式。故障方程法的基本思想是根据故障方程的所测量的值去确定出值。状态量(故障因子)的类别代表了故障部件的部位,数值大小(绝对值)代表了故障的严重程度。即,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,从而形成了基于线性模型的小偏差故障方程法,由于该方法要求测量参数的数量大于或等于故障种类数,因此众多学者对该方法进行了改进,并取得了许多研究成果和实际工程应用价值。

4. 预测技术

预测是从过去和现在已知的情况出发，利用一定的方法或技术去探索或模拟未知的、未出现的或复杂的中间过程推断出未来的结果，为决策提供依据。反映航空发动机性能的、振动的和磨损的关键数据在时间轴上形成了一个时间序列，它蕴含了发动机系统的重要状态信息，对时间序列进行建模，是实现发动机状态趋势预测的有效手段。常用的时间序列分析方法有 ARMA 法、ARIMA 法、灰色理论法、人工神经网络方法和支持向量机方法等。

三、航空发动机状态监测与故障诊断系统

(一) 航空发动机状态监测系统

航空发动机监控系统（Engine Monitoring System：EMS）是由安装在飞机、发动机上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成的系统。

表 1-5 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
M 数			√	√	√	
高度和进口压力	√	√	√		√	√
进口总温			√	√	√	√
发动机燃气温度(EGT)	√		√	√	√	
油门杆角度	√	√	√		√	
高压转子转速(N2)		√	√	√	√	
低压转子转速(N1)			√	√	√	
燃油流量(FF)			√	√	√	
发动机压比(ERP)		√	√			
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		√				√