



# 航空发动机 监控技术



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 航空发动机监控技术

陈卫 程礼 李全通 高星伟 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机监控技术 / 陈卫等编著. —北京: 国防工业出版社, 2011. 2

ISBN 978-7-118-07138-2

I. ①航... II. ①陈... III. ①航空发动机 - 监视控制 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 206688 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 850 × 1168 1/32 印张 8 $\frac{3}{4}$  字数 228 千字

2011 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 前 言

航空发动机是整个飞机的动力来源(包括为飞机提供推力、电力、液压、气源等能源),其稳定可靠地工作是飞机完成预定任务、保证飞行安全的基本保障。尽管发动机设计技术、制造技术和可靠性技术日臻完善,但由于发动机原因而导致的飞行事故,特别是重、特大等级事故,一直占较大的比例。例如,F100 发动机是当今世界上生产、使用较多的先进航空发动机,就是这样享誉世界的优秀发动机,美军从 1998 年 11 月至 1999 年 7 月的 9 个月中,由于 F100 发动机故障导致的 F-16 飞机坠机事件就有 8 起,平均每 34 天一起。因此,利用监控设备对航空发动机的状况进行监控是确保飞机飞行安全基本的技术手段,同时也是进行装备日常保障最重要的工作之一。

多年来的实践证明,发动机监控不仅对保证飞行安全、提高可靠性、维修性、保障性、经济性具有重要的作用,而且对发动机全寿命费用的管理影响巨大。

航空发动机监控技术是随着航空发动机结构、工艺、材料、电子技术、传感器技术等科学技术的发展而发展起来的一门综合性技术,其根本目的是检测并解释发动机的有关工作参数,从而保障发动机的安全、稳定和可靠地运行,并指导维修工作。目前,发动机监控技术主要从以下几个方面对发动机的状态进行分析:①整机监控,主要是通过对发动机状态(性能)参数的测量、记录、分析,确定发动机整机或各单元体的状况和寿命消耗情况;②转子系统监控,主要是通过对发动机轴承、惯性运转时间等的监控,确定发动机转子系统(包括转动系统)的状况;③关键零部件监控,主

要是通过无损检测技术手段,确定发动机关键零部件的物理状况;  
④发动机健康监控(或评估),主要是应用现代监测和诊断技术,判别发动机结构的工作能力和状况。其中健康监控目前已经成为第四代及其以后飞机或发动机使用研究的重点。

航空发动机监控技术是一门实践性很强的技术。由于发动机故障往往要经历一个逐步发展的过程才能最终发生,加之结构、重量、费用、操纵等条件的限制,在对发动机进行监控时不可能也没有必要把全部监控设备永久地装备在飞机上,因此将监控设备分为机载和地面两大类,在监控方式上各有侧重。从功能上讲,机载设备主要用于监控,主要功能包括:①实时判断故障的出现,自动采取措施避免故障的出现或减少故障的损失;②实时向机组以灯光、文字或声音等形式告警,提示机组及时采取措施避免故障的出现或减少故障的损失;③发出指令对发动机系统进行自检;④记录必需的各种数据(包括故障数据)供地面进行分析,用于故障判断和装备管理。而地面监控设备是机载监控设备功能的补充和延伸,主要侧重于检测,其主要功能包括:①通过对发动机各种工作参数检测,以分析、预测发动机的技术状态;②对发动机零部件进行无损检测;③对各种油液进行采样、分析等。

航空发动机是技术高度密集、可靠性要求极高的机电一体化装备,它与一般机械设备采用的监控技术具有很大的区别,最大的区别是故障的灾难性和不可恢复性,所以研究难度很大。尽管在机械设备状态监控技术领域已经出版了不少优秀图书,但到目前为止,国内还未见比较系统介绍航空发动机监控技术的专著,这种理论严重滞后于装备发展的局面在一定程度上制约了航空装备技术水平和作战效能的进一步提升。

本书由陈卫副教授担任主编,负责本书的统稿工作,并编写了第2章和第5章,参加编写工作的还有程礼教授(第1章、第3章)、李全通教授(第6章、第7章及附录)、高星伟讲师(第4章)、中国人民解放军空军5702厂左明广高级工程师(5.4节)。西北工业大学吕文林教授和空军工程大学工程学院陈东林教授分别对

本书进行审查,并提出了许多宝贵意见,硕士研究生崔晋海、张海威同志在出版过程中也做了大量的工作,王旺元同志负责本书的出版工作。

在本书编写过程中,得到了空军装备研究院航空所和总体所、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、中国航空工业集团公司 606 所和 608 所、西安航空发动机集团公司及驻厂军事代表室、黎明航空发动机集团公司及驻厂军事代表室、中国人民解放军 5702 厂、5713 厂、5719 厂等单位的大力支持。另外,在本书组稿过程中,参考了相关单位与个人的部分资料、书籍和文章,在此谨表示诚挚的敬意和衷心的感谢。

由于编著者的水平有限,所以错误在所难免,恳请读者批评指正,以便进一步改进。

编者

2010 年 5 月

# 目 录

<b>第1章 概论</b> .....	1
1.1 发动机监控的基本概念 .....	2
1.2 状态监控与故障诊断理论的基本内容 .....	11
1.3 状态监控与故障诊断技术对维修方式、使用管理 的影响 .....	20
1.4 发动机监控的效益和能力 .....	24
<b>第2章 发动机参数监控技术</b> .....	29
2.1 概述 .....	29
2.2 参数监控方式 .....	32
2.3 参数快速处理技术 .....	40
2.4 参数趋势分析技术 .....	43
2.5 应用实例 .....	51
<b>第3章 发动机整机振动监控技术</b> .....	59
3.1 概述 .....	59
3.2 发动机振动的特点与激振源 .....	60
3.3 发动机振动监控原理 .....	69
3.4 发动机振动信号分析 .....	76
3.5 应用实例 .....	90
<b>第4章 滑油系统油液监控技术</b> .....	94
4.1 概述 .....	94
4.2 滑油油样监控方法 .....	99
4.3 应用实例 .....	129

<b>第 5 章 发动机转子系统监控技术</b> .....	137
5.1 概述 .....	137
5.2 轴承监控技术 .....	139
5.3 转子系统其它监控方法 .....	155
5.4 应用实例 .....	161
<b>第 6 章 无损检测技术</b> .....	165
6.1 概述 .....	165
6.2 孔探仪检测技术 .....	175
6.3 涡流检测技术 .....	184
6.4 超声检测技术 .....	191
6.5 无损检测新技术 .....	212
<b>第 7 章 航空发动机寿命管理与监控技术</b> .....	219
7.1 概述 .....	219
7.2 发动机的使用管理 .....	225
7.3 发动机零部件寿命消耗 .....	237
7.4 寿命损耗的统计计数方法 .....	248
7.5 应用实例 .....	252
<b>附录 A 渗透检测</b> .....	259
<b>附录 B 磁粉检测</b> .....	261
<b>附录 C 电位检测</b> .....	265
<b>参考文献</b> .....	271



# 第1章 概 论

各学科互相渗透、互相交叉、互相促进是现代科学技术发展的重要趋势。第二次世界大战以后,特别是20世纪60年代以来,随着以计算机为代表的现代电子技术的迅猛发展,已有数千年历史的医学诊断的基本思想被应用到工程学科中来,形成了设备的状态监控和故障诊断学(Condition Monitoring and Fault Diagnosis, CM&FD)这一大有作为的新兴学科,而近30年又是这门学科发展的黄金时期。

根据设备的具体特点一般可将设备分为机械设备和电气(或电子)设备两类,在状态监控的具体实施方法上两类设备存在较大的差别。本书主要讨论机械设备的状态监控,具体地讲就是航空燃气涡轮发动机的监控。事实上现代航空发动机(以下简称发动机)已经不是一个单纯的机械设备,而是一个以机械装置为主,兼有大量用于控制测量电子装置的机电一体化设备。发动机监控在设备监控和诊断学科中是发展最早、应用最广泛、非常具有典型意义的一个分支。由于故障诊断理论通常与状态监控理论相互衔接,本章也简单地介绍了故障诊断方面的基础知识。

发动机的监控研究围绕两条主线展开,一条主线是监控的理论和方法,即从状态参数、振动、转子、滑油系统、寿命损耗和无损检测等方面分别论述这些理论在航空发动机上的应用;另一条主线是围绕发动机的结构展开,即研究压气机、燃烧室、涡轮、燃油系统、滑油系统、控制系统等结构具体所采用的监控方法,这条主线的针对性比较强,适于进一步学习。本书将围绕第一条主线展开,这样有利于保持监控理论和方法的相对完整。

目前,军用舰船和装甲车辆的动力装置也开始向燃气涡轮发动机发展,船用和车用的燃气涡轮发动机通常都是从航空燃气涡轮发动机改型发展的,在结构上相当于涡轮轴发动机,而它们的工作远比航空发动机简单,因此,本书的理论和方法也可直接应用于这些领域。

## 1.1 发动机监控的基本概念

### 1.1.1 研究对象

本书的研究对象是航空燃气涡轮发动机,限制条件是完全组装好的、准备工作的,或正在工作的,或刚刚完成工作的发动机(有时也包括像风扇、压气机、涡轮等独立的单元体)。而整个研究过程(基本上)不对其进行分解,并且所有使用、测量和检查方法均是无损的。这些检测和分析工作主要在飞行过程中或一、二级维修中进行,也可以在发动机的专门工作中进行。

在发动机的设计、生产和翻修过程中也大量采用与监控技术相同或相似的技术手段,但研究对象的状况与以上的约束条件有很大的区别,因此方法的适用性和最终的结果也会有所差异。

### 1.1.2 发动机的状态和故障

#### 1. 状态

状态就是发动机的技术状况,通常将发动机的技术状况分为正常状态、异常状态和故障状态。

当发动机、发动机附件或工作系统(以设计目的表征的)功能指标或物理指标均处在规定的范围之内时称为正常状态,这时发动机可以完成规定的任务。一般认为处在正常状态的发动机没有缺陷或者虽有缺陷但在允许的限度之内(实际上某些缺陷几乎是不可避免的,例如燃烧室内火焰筒的局部裂纹)。异常状态通常是一个相对的状态,这时发动机、发动机附件或工作系统的功能指

标或物理指标相对其规定数值发生了偏差,但仍未超出规定的范围,如发动机推力下降、振动量增加等,此时发动机尚可以完成规定的任务。

异常状态一般是发动机由于某种缺陷已有一定的发展或出现了某种缺陷,此时发动机尽管可以完成一定的任务,但其功能指标与规定指标有着较大的偏差。

当发动机、发动机附件或工作系统的(以设计目的表征的)功能指标或物理指标低于(或高于)规定的最低(或最高)限制值时称为故障状态,这时发动机将无法完成规定的任务。故障往往是由于某种缺陷不断扩大,从异常状态进一步发展而形成的,但故障并不意味着失效。

发动机的状态是由其内在品质和外在环境条件共同决定的。由于内在品质或(和)外在环境的变化,必然导致发动机状态的变化。如果允许发动机一直使用下去的话,那么发动机随着使用时间的增加,必然会出现从正常状态经历异常状态而后发展为故障状态的状态演变过程。但是根据现行的发动机管理机制,实际上大量的航空发动机并未发展成异常状态或故障状态就进行了预防性维修或已经退役。

由于理论和技术的限制,以及状态划分本身的模糊性,对发动机状态的认识可能存在着主观和客观上的差别,这种差别从理论上讲是无法完全消除的,因此,就存在着发生各种等级事故的可能性和必然性(主观认为发动机处在正常状态,而客观上发动机已经处在故障状态,仍然继续使用发动机),同时也存在着大量的过度维修现象(主观认为发动机处在或将处于故障或异常状态,而客观上发动机尚处在正常状态而进行的发动机维修、大修甚至更换)。从某种意义上讲监控的工作就是要尽可能地减小这种差别。

## 2. 状态量(状态参数)

能够表征并区分发动机技术状况的各种连续的或离散的可测量参数均可称为状态量或状态参数(一般在基本理论中称为状态

量;在实施技术、装备中称为状态参数),通常这些参数中既包括了发动机的各种工作参数(如发动机转速、排气温度、振动等),也包括了专门的监控参数(如发动机转子跳动量、轴承噪声值、惯性运转时间等)。即使对于同一种型号的发动机,由于个体的差异和使用环境、使用方法的差异,状态量随着发动机的使用将形成一个连续或离散的随机(时间)过程,利用测量、记录设备(仪器)得到的这个随机过程的图形称为机械图像。在状态监控与故障诊断工作中将所有状态量的集合称为状态向量。在实际应用中由于使用的监控和诊断方法的不同,通常只选择状态向量的一个特定的子集。

### 3. 故障

一般意义上,故障的范畴可以包括如下的内容。

- (1)引起装备立即丧失其功能的破坏性事件。
- (2)与降低装备性能相关联的性能上的事件。
- (3)即使装备当时正在正常工作,而操作者误操作或蓄意、或者环境条件恶化使装备偏离正常状态的事件。

任何特定的系统的故障对“正常工作”或“完成任务”的影响程度都与装备的功能有关。例如,因滑油泵的故障(如流量下降)而出现的告警对汽车发动机和航空发动机有很大的差别,在单发动机的飞机和多发动机的飞机上也有很大的差别。

下面列举了部分比较明确的航空发动机故障。

- (1)由于发动机的原因,迫使发动机不得不停车或减小油门致使发动机推力下降超过正常要求值的10%。
- (2)由于发动机有故障迹象而造成发动机停车,除判定是人为错觉的情况之外,即使在停车后并不能证明发动机发生故障仍作为故障。

(3)由于发动机附件故障,不能保持油门杆位置所要求的推力,推力损失等于或大于该位置最小推力的10%。

(4)如果故障通过更换附件已经排除,即使更换下来的附件在试验器上不能证明有故障仍作为故障。

(5) 直接由于发动机的原因,在 15min 内不能把发动机启动起来。

(6) 由于滑油消耗量超过规定或滑油分析结果异常而导致发动机需要修理或更换。

(7) 由于振动超过允许极限而导致发动机的修理或更换。

(8) 装配部位和管路接头处的漏液量超过规定。

(9) 利用规定的检查设备和检查方法发现直接由于发动机的原因造成的发动机零件超过规定容限的损伤。

#### 4. 故障的分类

按故障的形式可分为结构型故障(如裂纹、磨损、腐蚀、不平衡、不对中等)与参数型故障(如失速喘振、共振、超温等);按故障的危险程度可分为危险性的与非危险性的;按故障的发展速度可分为渐发性的(能通过早期试验或测试来预测的故障)与突发性的(无法靠早期试验或测试来预测的故障);按故障的影响程度可分为局部性的(导致某些功能的丧失,但不会引起所需功能的全部丧失)与全局性的(完全丧失所需功能);按故障的持续时间可分为临时性的与持续性的;按故障的原因可分为先天性的、劣化性的与滥用性的;从故障预防的角度可分为随机的故障与可预测的故障;从故障征兆的特点可分为征兆可观测的与不可观测的;在可靠性研究中可分为早期性、偶发性及随机性故障。

很显然,人们特别注意的故障是危险性、突发性、全局性和持续性的故障,因为它们往往造成灾难性的损失,比较难于防范。

#### 1.1.3 发动机状态参数的录取

在使用条件下选择发动机技术诊断方法和设备主要取决于状态参数录取的适用性,仅靠其本身的结构和辅助设备即可保证在不分解的情况下,能够获得客观评定发动机技术状态必须而可靠的信息。

## 1. 状态参数的特点

专门的试车和在外场使用实践证明,根据发动机结构的复杂程度,在不分解的条件下,用测量和分析 20 个~100 个参数的方法就能够客观地评定批生产的发动机。通过处理这么多的参数就能够保证监控发动机的工作能力、功能正确性和确定其诊断深度达到发动机部件(单元体的)完好性。但在调整发动机的条件下,以及在必须评定其诊断深度达到单个零部件的发动机技术状态时,则需要测量和分析 200 个~1000 个参数,此时,参数的处理方法将十分复杂。

现代批生产和试验用的发动机在台架试车情况下,所用测量系统的容量和精度可以满足监控方法的要求。在飞机上测量的发动机参数的数量比台架试车时要少,精度也相对低一些。近年来,随着发动机电调系统、飞机综合航电系统和飞机参数记录系统的发展,为从飞行中的飞机上获取有关发动机状态信息提供了十分便利的条件。因此,监控所需信息的获取,一般来说,并不需要或者只需要不多的专用补充设备。

在监控理论中使用的状态参数包括了两大类参数:一类是发动机的各种工作参数,即与完成发动机的设计功能相联系的机械或气动热力参数,如转子转速、涡轮前(或后)燃气温度、燃油消耗率等,工作参数还可以根据其特点分为基本参数、辅助参数和故障参数等,这类参数通常都需要换算后才能使用,所携带的故障信息往往是隐含的;另一类是专门的监控参数,这些参数主要是保证设计功能的完成,如振动、滑油状态检验参数、涡流探伤参数等,这类参数的针对性很强,所携带的故障信息是直接具体的,通常可以直接使用。也有的参数兼有两类参数的特点,如喘振参数,这些参数一般属于工作参数中的故障参数。根据参数的特点,有些参数是需要也可以连续测量、监控;有些参数只要在规定的的时间和情况下测量、监控即可;有些参数在发现异常时需要立刻进行由人工或自动系统做出反应,有些参数则只进行事后处理分析。

根据参数的类型和测量技术的状况,不同的参数有不同的测

量精度要求。通常基本参数和监控参数的测量精度要求最高。在使用条件下,由个别部件或附件完成各种功能所确定的辅助参数的测量精度要求相对低一些,因为这类参数用于诊断深度达到发动机的部件或附件即可。在按用途使用发动机的条件下,事故参数的测量精度具有重要的意义,因为事故参数若超过允许的极限范围就可能导致发动机损坏。

## 2. 状态参数测量的时机

发动机状态参数中的工作参数和部分监控参数的测量必须在发动机工作时进行,测量工作既可以在飞行中,也可以在地面试车中完成。从飞行中录取数据具有以下优点:

(1)飞行中发动机的许多工作条件和工作状态是无法在地面试车中模拟的,如高空小速度飞行的大换算转速和小进气压力,低空大速度飞行的进气高压和高温,大涵道比涡轮风扇发动机低压涡轮的高空工作状态,以及飞机机动飞行时的进气流场等。

(2)在飞行中发现的某些现象,在发动机的地面试车时常常不能完全复现,例如滑油消耗量大的故障、在一定飞行状态下的强烈振动、某些喘振现象、燃烧过程的异常等。

(3)飞行中参数的测量不需要额外消耗时间、燃料和发动机的使用寿命,而这些情况在地面试车录取诊断信息时是不可避免的。

根据上述理由,总是希望直接在飞行中收集尽可能完整的发动机诊断信息,当然这并不排除利用地面试车。在工厂的发动机试车中,系统地、有组织地直接在试车过程中录取被测参数,实际上仍是获取诊断信息的重要渠道。

另外,还有部分监控参数的测量是在发动机不工作的情况下完成的,测量工作可以结合在飞行前、后检查,以及发动机的定期工作中进行。

## 3. 状态参数的测量手段

发动机主要部件可能采用的参数测量手段如图 1-1 所示。

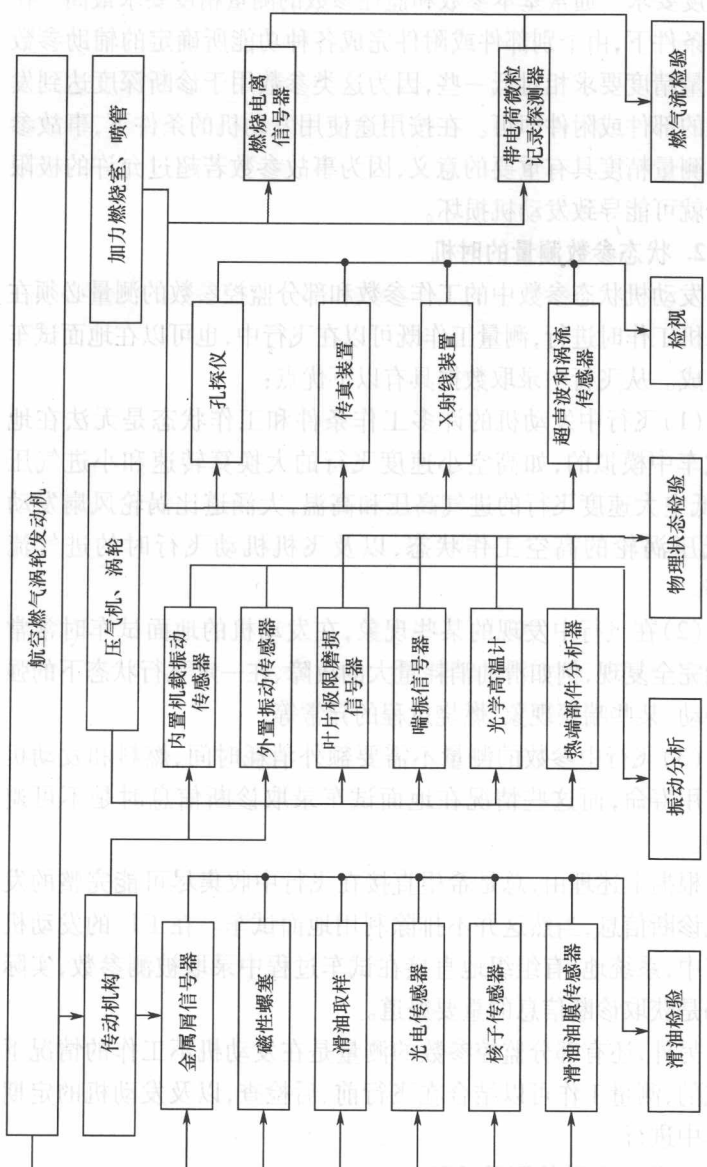


图 1-1 燃气涡轮发动机主要部件可采用的状态参数测量手段



无论在飞行中还是在地面录取被测参数,既可以用手工方法,也可以用专门的自动测量记录系统。随着自动系统的成本、质量和尺寸的下降,新一代飞机均采用了飞行参数记录系统来自动测量和记录状态数据,记录系统具有能够连续地录取信息(包括发动机的不稳定工作状态)、同时测量多个参数数值,以及测量记录精度高、稳定可靠等一系列优点。某型飞机在飞行中同时记录了60多个连续的模拟参数和59个开关参数,在正常状态下的记录频率为1次/s~8次/s,而故障状态下增加到2次/s~16次/s,记录最后3h时间的参数。

#### 1.1.4 监控和故障诊断的任务

监控和故障诊断是一项工作的两个层次,因此其任务也是各有侧重,如图1-2所示。

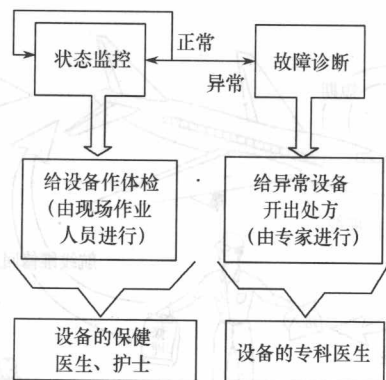


图1-2 监控与故障诊断的任务

监控的任务是采用各种测量、分析和判别方法,结合发动机的历史状况和运行条件,弄清发动机所处的客观状态,以便最合理地确定发动机的使用和修理,包括确定、预测可能的故障,这项工作由地勤和空勤人员来完成。故障诊断的任务则是需要进一步确定故障的性质、程度、类别、部位、原因,说明故障发展的趋势及影响等,为预报、控制、调整、维修、改进提供依据,这项工作通常由专门