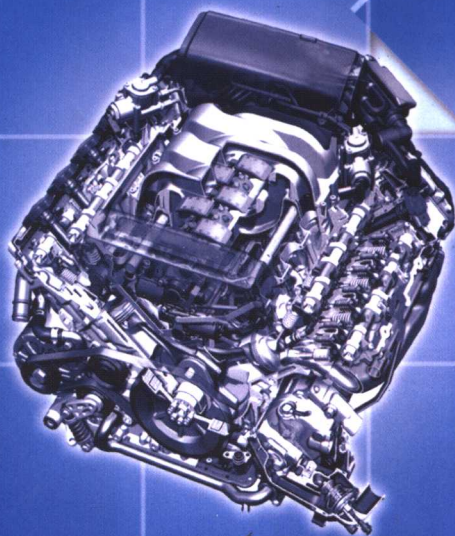


# 发动机 现代诊断技术

成曙 张振仁 著



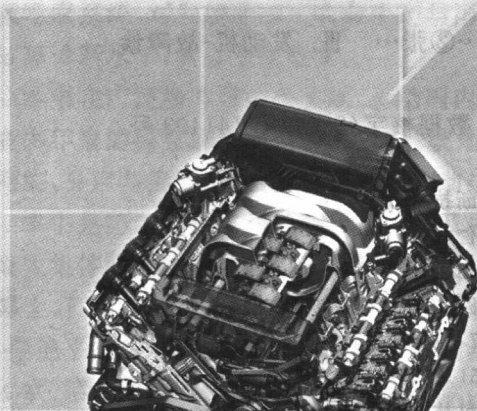
西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

TK05  
2

要點容內

# 发动机 现代诊断技术

成曙 张振仁 著



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

· 西 安 ·

## 内容提要

本书是编者多年来从事发动机状态监测与故障诊断技术研究工作的总结。在简要分析发动机的故障和原因的基础上,提出了发动机状态监测与故障诊断方法,系统地介绍了遗传算法、小波分析、神经网络、分形与混沌、信息融合等基本理论;重点阐述了基于遗传算法的气缸压力识别,基于神经网络的气阀机构故障诊断,分形维数在发动机故障诊断中的应用,基于信息融合技术的发动机故障诊断等;并附有诊断实例。

本书可作为高校相关专业研究生、高年级本科生的教材和教学参考书,也可供内燃机、机械、石油、化工、冶金、电力、船舶等行业中从事设备故障诊断的研究人员和工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

发动机现代诊断技术/成曙,张振仁著. —西安:西安交通大学出版社,2006.12  
ISBN 978-7-5605-2328-6

I. 发… II. ①成…②张… III. 发动机-故障诊断 IV. TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 141403 号

书 名:发动机现代诊断技术  
著 者:成 曙 张振仁  
出版发行:西安交通大学出版社  
地 址:西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)  
电 话:(029)82668357 82667874(发行部)  
(029)82668315 82669096(总编办)  
印 刷:陕西江源印刷科技有限公司  
字 数:255 千字  
开 本:727 mm×960 mm 1/16  
印 张:14  
版 次:2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷  
印 数:000 1~3 000  
书 号:ISBN 978-7-5605-2328-6/TK·100  
定 价:25.00 元

---

版权所有 侵权必究

# 前 言

近年来,机械故障诊断技术在国内外都得到了前所未有的发展,尤其是对于旋转机械,在其故障机理、诊断方法方面已取得了突破性的进展。发动机属于机械设备,有着机械设备故障诊断的共性。但它既有旋转运动,又有往复运动。发动机振源有转动件的不平衡惯性运行力,往复运动件的惯性运动力,运动件间的间隙造成的碰撞与摩擦;也有阀与阀座间的相互碰撞,弹簧造成的冲击力;更有燃烧所产生的爆发冲击力。由于发动机振动源多,运动部件多,工作复杂,因而其故障形式也是多种多样,故障及其产生的原因往往是模糊不清的,每种故障都可能是多种因素综合作用的结果。因此,发动机监测与故障诊断一直是机械故障诊断研究的一个难点,还有许多方面值得深入探讨和研究。开展发动机故障诊断技术研究,建立发动机故障诊断专家系统,对发展我国工农业生产与国防建设、提高我国动力机械设备的故障诊断水平,具有重要意义。

本书在广泛参考国内外文献、总结国内外最新研究成果的基础上,结合编者多年来的研究成果和科研实践,系统地介绍了遗传算法、小波分析、神经网络、分形与混沌、信息融合技术在发动机故障诊断中的应用。

本书是第二炮兵工程学院状态监测及故障诊断研究室全体老师及历届研究生集体研究的成果。由成曙副教授、张振仁教授主编,参加编写的有夏勇博士、商斌梁博士、孙红辉博士、蔡艳平硕士等。其中,第1章由成曙编写,蔡艳平参与编写了第2章,商斌梁参与编写了第3章,夏勇参与编写了第4章、第6章,孙红辉参与编写了第5章,全书由成曙、张振仁统稿。书中部分章节的编写参照了有关文献,在此一并致以衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006年5月于西安

# 目 录

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 第1章 绪论 .....                  | (1)  |
| 1.1 发动机故障诊断的意义 .....          | (2)  |
| 1.2 发动机的故障及原因 .....           | (3)  |
| 1.3 发动机状态监测与诊断方法 .....        | (4)  |
| 1.4 传感器信号处理 .....             | (8)  |
| 1.4.1 实验信号采集系统 .....          | (8)  |
| 1.4.2 特征信号提取方法 .....          | (11) |
| 1.5 发动机故障诊断方法综述 .....         | (14) |
| 1.5.1 基于振动信号的诊断方法 .....       | (14) |
| 1.5.2 基于遗传算法的诊断方法 .....       | (16) |
| 1.5.3 基于小波分析的特征提取与诊断方法 .....  | (17) |
| 1.5.4 基于分形及混沌的诊断方法 .....      | (18) |
| 1.5.5 神经网络在发动机监测诊断中的应用 .....  | (19) |
| 1.5.6 信息融合概述 .....            | (20) |
| 第2章 神经网络基础理论研究 .....          | (23) |
| 2.1 神经网络的定义 .....             | (24) |
| 2.2 神经网络基本原理 .....            | (25) |
| 2.2.1 人工神经元模型 .....           | (25) |
| 2.2.2 神经网络的拓扑结构 .....         | (27) |
| 2.2.3 神经网络的学习 .....           | (28) |
| 2.2.4 典型结构的神经网络模型 .....       | (30) |
| 2.3 故障诊断模型与算法设计 .....         | (31) |
| 2.3.1 基于神经网络的故障诊断模型建模技术 ..... | (31) |
| 2.3.2 BP神经网络 .....            | (32) |
| 2.3.3 径向基函数神经网络 .....         | (39) |
| 2.3.4 ART网络 .....             | (43) |
| 第3章 基于遗传算法的监测与诊断研究 .....      | (45) |
| 3.1 遗传算法的基本理论 .....           | (46) |
| 3.2 遗传算法的性能分析及改进算法 .....      | (51) |

|       |                       |       |
|-------|-----------------------|-------|
| 3.2.1 | 遗传算法的群体多样性分析          | (52)  |
| 3.2.2 | 遗传算法的统计特性             | (64)  |
| 3.2.3 | 基于信息熵的自适应遗传算法         | (72)  |
| 3.3   | 基于遗传算法与神经网络的气缸压力识别研究  | (76)  |
| 3.3.1 | 气缸压力识别基本原理            | (77)  |
| 3.3.2 | 不同工况下的气缸压力识别          | (80)  |
| 3.3.3 | 利用缸盖表面振动信号识别气缸压力的误差分析 | (85)  |
| 3.4   | 遗传编程在最佳诊断表达式中的应用      | (94)  |
| 3.4.1 | 遗传编程                  | (95)  |
| 3.4.2 | 遗传编程实例                | (100) |

#### 第4章 小波分析在发动机信号处理中的应用 (102)

|       |                             |       |
|-------|-----------------------------|-------|
| 4.1   | 小波分析的基本理论                   | (103) |
| 4.1.1 | 短时傅里叶变换                     | (104) |
| 4.1.2 | 小波变换的定义                     | (105) |
| 4.1.3 | 小波变换的特点                     | (107) |
| 4.1.4 | 二进小波变换                      | (109) |
| 4.1.5 | 小波包及小波包分解                   | (110) |
| 4.1.6 | 小波包变换基本原理                   | (111) |
| 4.1.7 | 小波包改进算法                     | (112) |
| 4.2   | 发动机振动信号特性研究                 | (113) |
| 4.2.1 | 实验工况                        | (113) |
| 4.2.2 | 缸盖激励源特性和振动响应信号特性研究          | (115) |
| 4.3   | 小波分析与神经网络在发动机故障诊断中的应用研究     | (117) |
| 4.3.1 | 缸盖振动信号的二进小波变换               | (117) |
| 4.3.2 | 能量百分比                       | (119) |
| 4.3.3 | 基于BP网络的气阀机构故障诊断             | (120) |
| 4.3.4 | ART网络在气阀机构故障诊断中的应用          | (122) |
| 4.4   | 基于小波包分解和模糊C均值聚类的柴油机气阀机构故障诊断 | (123) |
| 4.4.1 | 实验工况                        | (123) |
| 4.4.2 | 小波包分解及诊断特征量的提取              | (124) |
| 4.4.3 | 模糊C均值聚类                     | (125) |



|                                         |              |
|-----------------------------------------|--------------|
| 4.4.4 小波包分解和模糊 C 均值聚类的气阀机构故障诊断的应用 ..... | (126)        |
| <b>第 5 章 基于信息融合的发动机故障诊断 .....</b>       | <b>(130)</b> |
| 5.1 信息融合技术的基本理论 .....                   | (131)        |
| 5.1.1 信息融合技术的基本原理 .....                 | (131)        |
| 5.1.2 信息融合的级别 .....                     | (132)        |
| 5.2 信息融合模型 .....                        | (132)        |
| 5.2.1 信息融合系统的功能模型 .....                 | (133)        |
| 5.2.2 信息融合的层次结构模型 .....                 | (134)        |
| 5.2.3 信息融合的数学模型方法 .....                 | (136)        |
| 5.3 故障诊断中引入信息融合的意义 .....                | (137)        |
| 5.4 基于模糊聚类信息融合的发动机故障诊断 .....            | (138)        |
| 5.4.1 模糊聚类基本原理 .....                    | (139)        |
| 5.4.2 基于模糊聚类信息融合的发动机故障诊断 .....          | (146)        |
| 5.5 基于神经网络信息融合的发动机故障诊断 .....            | (150)        |
| 5.5.1 神经网络信息融合的诊断原理及优势 .....            | (150)        |
| 5.5.2 发动机燃油供给系统诊断实例分析 .....             | (151)        |
| 5.6 基于 D-S 证据理论的信息融合发动机故障诊断 .....       | (155)        |
| 5.6.1 D-S 证据理论的基本概念 .....               | (155)        |
| 5.6.2 D-S 证据理论推理信息融合决策的基本过程 .....       | (161)        |
| 5.6.3 基于神经网络与 D-S 证据理论的信息融合故障诊断 .....   | (162)        |
| <b>第 6 章 分形及混沌在发动机诊断中的应用 .....</b>      | <b>(170)</b> |
| 6.1 发动机振动信号的混沌特性研究 .....                | (171)        |
| 6.1.1 发动机振动信号的 Lyapunov 指数 .....        | (171)        |
| 6.1.2 发动机振动信号混沌特性分析 .....               | (173)        |
| 6.2 发动机振动信号复杂度的定性描述 .....               | (175)        |
| 6.2.1 伪相图 .....                         | (175)        |
| 6.2.2 吸引子图 .....                        | (176)        |
| 6.2.3 递归图 .....                         | (177)        |
| 6.3 发动机振动信号复杂度的定量描述 .....               | (179)        |
| 6.4 分形维数在发动机故障诊断中的应用 .....              | (183)        |

|            |                                 |       |
|------------|---------------------------------|-------|
| 6.4.1      | 分形概论 .....                      | (183) |
| 6.4.2      | 相空间重构与分形维数 .....                | (184) |
| 6.4.3      | 嵌入维数 $m$ 及时延常数 $\tau$ 的选取 ..... | (185) |
| 6.4.4      | 基于关联维数的气阀机构故障诊断 .....           | (186) |
| 6.4.5      | 多重分形 .....                      | (188) |
| 6.4.6      | 基于多重分形的发动机故障诊断实例与分析 .....       | (189) |
| 6.5        | 基于关联积分的诊断方法 .....               | (193) |
| 6.5.1      | 问题的提出 .....                     | (193) |
| 6.5.2      | 关联积分 .....                      | (194) |
| 6.5.3      | 特征参数的选取 .....                   | (196) |
| 6.5.4      | 诊断实例 .....                      | (196) |
| 6.6        | 关联距离熵 .....                     | (200) |
| 6.6.1      | 关联距离熵的提出 .....                  | (200) |
| 6.6.2      | 基于关联距离熵的故障诊断方法 .....            | (201) |
| 6.7        | 坐标分布熵 .....                     | (202) |
| 6.7.1      | 问题的提出 .....                     | (202) |
| 6.7.2      | 诊断实例 .....                      | (203) |
| 参考文献 ..... |                                 | (208) |



# 第 1 章

---

## 绪 论

- 1.1 发动机故障诊断的意义
- 1.2 发动机的故障及原因
- 1.3 发动机状态监测与诊断方法
- 1.4 传感器信号处理
- 1.5 发动机故障诊断方法综述

## 1.1 发动机故障诊断的意义

发动机是一种常见的往复式动力机械,广泛应用于工程机械、舰船、铁路机车、汽车和发电机组之中,在工农业生产和军事装备中发挥着非常重要的作用,其运行状态好坏将直接影响到整个动力系统的安全性和可靠性。但由于发动机结构复杂,工作条件非常恶劣,发生故障的可能性较大。因此,对发动机进行监测与诊断是十分必要的。

长期以来,由于人们无法预知事故的发生,不得不采取两种对策对设备进行维修:一是故障维修,即当设备损坏后再进行维修;二是定期维修,即按照预定的时间间隔或检修周期进行维修。故障维修是在事故发生后进行的,往往已经造成设备的灾难性损坏,既不安全,又延长了检修时间,而且还伴随着不可估量的经济损失。定期维修的根本出发点是把维修时间安排在事故发生之前,具有较大的盲目性:第一,即使尽量缩短维修周期仍然无法科学地预见早期损坏的环节,不能从根本上防止突然事故的发生;第二,定期解体大修,实际上只是维修已损坏的部件,对绝大多数完好环节来说是过剩维修;第三,定期维修不能作有针对性的维修,重新装配后其良好程度缺乏科学的评价标准;第四,有些故障特别是装配造成的故障在解体中根本无法发现,而维修中的装配不当和频繁装拆对整个设备的精度和性能都有可能带来不利影响,从而导致潜在的故障仍然存在,失去维修意义。因此,合理的维修制度应该是预知的、有针对性的,这就是近年来发展起来的预测维修。

预测维修也称视情维修,是对测试结果进行分析处理后,证明有必要时才安排检修的一种维修方法。它不规定检修周期,但需要定期或连续地对设备进行状态监测与故障诊断,并根据其结果,查明设备有无故障并对故障进行预测,在必要时再安排维修。这种方法根据其投入和产出效果,一般应用于流程工业和关键设备上。它能在设备失效前监测和诊断出存在的故障,并利用预测技术,较准确地计算出继续运行的可靠时间,从而减少备件消耗和维修工作量,也防止了因不必要的检修而出现的人为故障,使得维修费用最少。

预测维修的实质是将定期维修改为连续的状态监测和故障诊断,其基础是状态监测和故障诊断技术。现代设备的状态监测和故障诊断技术是随着现代系统工程、信息论、控制论、电子技术、计算机技术、通讯技术和传感器技术的发展而发展起来的,是多学科交叉与渗透而产生的一门新兴综合性高技术,其研究内容涉及故障机理、传感器与测量、数据采集、数字信号处理、模式识别、数据库、人工智能、计算机软硬件和通信等技术领域。

与其它设备的监测诊断一样,发动机的监测诊断通常也包括三个基本环节:一

是信息采集,关键是正确选用和安装传感器;二是信息处理,即对采集的数据进行分析和特征提取;三是信息决策,即根据特征参数并利用各种经验知识,对设备状态予以识别、判断和预报。因此,发动机监测诊断过程可以看作一个信息处理过程。

在上述信息处理过程中,必须具备另外两方面的技术知识:一是关于发动机及零部件故障或失效机理方面的知识;二是关于发动机结构、原理、运动学和动力学,以及设计、制造、安装、运行和维修等方面的知识。作为一种热机转换机械,发动机的构造非常复杂,其工作原理涉及机械、电子、力学、热学、物理和化学等领域的知识,这就决定了发动机监测诊断的困难性,一些在旋转机械监测诊断中的有效方法如振动分析法等,在发动机监测诊断中还难以获得广泛应用。

开展发动机故障诊断技术研究,不仅能够帮助我们发现故障,防止事故发生,同时能够带来潜在的巨大的经济效益和社会效益,具体表现在:①可以保障生产的安全性,减少或避免恶性事故的发生而造成的重大经济损失或人员伤亡。②帮助维修人员早期发现异常,尽快查明故障原因,从而实现有计划、有针对性的按状态维修,即视情维修。③提高设备使用的合理性、运行的经济性,充分挖掘设备的潜力,有效提高设备的生产运行效率。④为产品的性能评估、优化设计提供可靠的依据。⑤利用设备监测与故障诊断技术,有可能对设备进行预测,实现设备的在线监测,保证其安全可靠的运行。

## 1.2 发动机的故障及原因

发动机是一个结构复杂、运动部件多、多种干扰激励源的系统,通常包括起动系统、燃油供给系统、进排气系统、润滑系统、冷却系统等子系统,有的发动机还包括增压子系统和电子控制子系统,这些子系统在运行过程中都有可能发生故障,对它们进行监测诊断必须首先对其故障现象和类型有所了解。表1.1列出了某油田工业用发动机停机故障410次记录中各种故障率的分类统计<sup>[1]</sup>。显然,燃油系统、气门机构及活塞组件是发动机最主要也是最容易出故障的部件和系统。

发动机故障的原因有多种:零部件的逐渐磨损、疲劳、腐蚀等引起的故障;设计结构不合理、强度、刚度不够、某些设计技术条件要求过低引起的故障;制造不当引起的故障;操作、维护不当引起的故障;维修不当引起的故障;零件间配合精度被破坏而引起的故障;调整不当引起的故障等。其中较多的是由于零件磨损、老化、调整不当等引起的故障。

表 1.1 发动机各类故障率的分类统计

| 故障分类    | 故障率(%) | 故障分类    | 故障率(%) |
|---------|--------|---------|--------|
| 喷油及供油系统 | 27.0   | 齿轮与驱动机构 | 3.9    |
| 漏水      | 17.0   | 调速器齿轮   | 3.9    |
| 气门与气门座  | 11.9   | 轴承      | 7.0    |
| 燃油泄漏    | 3.5    | 活塞组件    | 6.6    |
| 漏气      | 3.2    | 漏油及润滑系统 | 5.2    |
| 其它破坏与破裂 | 2.5    | 涡轮增压系统  | 4.4    |
| 机座      | 0.9    | 其它故障    | 2.8    |
| 曲轴      | 0.2    |         |        |

### 1.3 发动机状态监测与诊断方法

故障诊断技术是在 20 世纪 60 年代初期,为发展高性能飞机和保证航空航天系统的可靠性与安全性而发展起来的,以后逐步推广到动力设备、核能设备、船舶发动机、冶金设备、石油化工设备、矿山机械设备和一些大型成套设备中。70 年代以来,特别是近十几年,随着计算机科学技术、数字信号处理、模式识别、神经网络、人工智能以及主元分析、遗传算法、小波变换、定性推理、自适应理论等现代理论与技术的迅猛发展,使得无损检测、超声波测量、非接触性测量、振动分析技术、谱分析技术、油液分析技术及其设备得到了极大的发展,故障诊断技术以复杂系统和设备为研究对象,以高新技术为依托,广泛涉及各种工程技术系统设备及领域,已形成一门既有理论又有方法,且工程应用性很强的跨学科、综合性的应用技术。据有关文献记载,应用故障诊断技术后,事故发生率可降低 75%,维修与保障费用可减少 25%~50%。据美国国家统计局统计:1980 年美国用于设备的检修费用为 2460 亿美元,而采用故障诊断技术后,费用节省了 1/3,约 750 亿美元。英国国有化企业采用故障诊断技术后,每年检修费从 35 亿英镑锐减到 20 亿英镑<sup>[1]~[6]</sup>。

故障诊断从广义上讲包括状态监测和故障诊断两部分;从狭义上讲,就是指故障诊断本身。所谓状态监测,就是经常或定期地对设备进行监测诊断,并将分析结果与以往的统计资料进行对比,以准确掌握其性能状态。所谓故障诊断,就是在状态监测所获得信息的基础上对设备可能要发生或已发生的故障进行预报分析和判断,确定故障的性质、类别、部位、程度和原因,指出故障发生、发展趋势及其后果,提出控制故障继续发展和消除故障的对策及措施并加以实施,最终使设备恢复到

正常状态<sup>[6]</sup>。目前,故障诊断技术随着科学技术的进步,在理论、方法、应用技术和基本手段方面已经取得了突破性的进展。

目前,发动机故障诊断与状态监测主要有以下几种方法<sup>[7]</sup>:

(1)直观检查法:直观检查法是指检查人员通过柴油机及其零部件的外观色泽和表面状态来进行故障分析和诊断。对于机体部件,可借助于各种光学仪器(如工业内窥镜等)进行直观检查。这种方法简单、实用,但要求检查人员具有丰富的经验才能做出正确的判断,同时对柴油机内部部件要专门加工,留有用于观测检查的通道或窗口,因而有一定的局限性。

(2)热工参数监测法:热工参数监测法是柴油机最常用的监测方法之一。这种监测方法是从柴油机热工参数的变化中,找出柴油机的潜在故障。热工参数监测内容也比较多,一般可分为以下几个子监测系统:①柴油机温度的监测,如排气温度等;②柴油机热量传递状况监测,如冷却水、润滑油的进出口温度等;③各缸爆发压力平衡的监测;④燃油喷射系统的监测;⑤增压系统的监测;⑥进排气系统的监测;⑦润滑系统的监测;⑧冷却系统的监测等。

每个子系统内均包含很多个零部件,只要其中一个零部件失效,都将对柴油机性能产生明显的影响。为此必须监测大量的参数,一台大型柴油机的监测参数将多至百余个,它们与故障之间的关系较为复杂和模糊,测量的数据必须经过一定的处理才能进一步进行诊断。运用热工参数诊断的主要优点是:外界干扰少、信息质量好、诊断范围广和可用性强等。主要问题为:特征参数与故障之间关系较为复杂、模糊,一种故障会影响多个参数,一个性能参数又同时表征不同的故障,其敏感程度和影响形式各不相同,给实际应用带来困难;此外,传感器数量和种类多,工作环境恶劣,成本高且不易维护。

(3)润滑油液分析:可以诊断各运动部件的磨损状况及润滑油本身的状态,可确定发动机润滑油的最佳换油期,防止机油老化,改善磨合,并可对总体磨损状况进行评估。存在的问题是:只能反映总体而无法识别个体的状态,难以确定具体的磨损部位,维修不便;油液样品的采集、试样的制备、监测数据的获取及判断结论的形式等各环节都需要专业人员,诊断结果往往受操作人员主观人为因素的影响;设备昂贵,在线监测技术还不成熟。

(4)振声诊断法:振动信号主要有三种类型:一是机身整体振动,主要受不平衡惯性力和支承特性影响,一般表现为低频振动;二是表面局部振动,主要由内部零部件撞击和燃爆压力引起,一般表现为高频冲击振动;三是轴系扭转振动,主要受耦合力矩和受功机械影响,一般表现为有规律的低频谐振。利用振动信号可以实现发动机故障诊断,各种振动信号及对应的发动机故障分布如表 1.2 如示。

表 1.2 发动机振动信号及其监测诊断内容

| 振 动 信 号    | 监 测 诊 断 内 容                |
|------------|----------------------------|
| 缸盖表面振动     | 缸内工作过程,气门间隙异常,气门漏气,气门弹簧断裂等 |
| 缸盖螺栓振动     | 活塞头与气门相碰                   |
| 机身侧面振动     | 活塞销、活塞缸套磨损                 |
| 机座下部振动     | 滑动主轴承磨损                    |
| 燃油泵体上部振动   | 燃油泵零部件磨损                   |
| 喷油器上部振动    | 喷油正时不准                     |
| 凸轮轴扭转振动    | 燃油系统工作稳定性                  |
| 排气管横向振动    | 排气门漏气                      |
| 机座上、下表面振动  | 减速弹簧失效,平衡重脱落               |
| 涡轮增压器支承振动  | 增压器喘振                      |
| 增压器涡轮转子振动  | 涡轮叶片擦碰、断裂                  |
| 增压器压气机转子振动 | 压气机叶片擦碰、断裂                 |
| 曲轴轴系扭转振动   | 各缸工作过程,连杆和连杆螺栓松动,曲轴断裂等     |

利用振动信号进行故障诊断具有速度快、精度高、范围广、信号易于测取、易于实现早期预报和在线监测等优点,特别适用于发动机主要运动部件的诊断。但发动机是一种往复机械,激励力复杂且数量多,传递特性和多变的边界条件及工况,使得振声诊断还未得到广泛应用,存在的主要困难有<sup>[8]</sup>:①振动激励源多,频率分布广,而且相互干扰;②包含于机体内部的运动部件数量多、形状复杂且配合紧密,在工作条件下难以接近;③振动激励力的传递路径多,传递特性复杂;④当发动机的运动部件出现不同程度的机械性故障时,难以从表面振动信号中检测出相应激励力的变化;⑤邻缸对本缸以及本缸中各运动部件的相互干扰不易区分或剔除;⑥敏感测点的选择及其判据的确定比较困难。

上述难点的解决,不仅在理论上还要作进一步的研究,而且需要作大量的实验研究和经验积累。

(5)瞬时转速信号法<sup>[9]~[11]</sup>:测量方法简单,不需要改变发动机结构,具有价格低廉和工程实用性强等优点,主要用于发动机失火故障的诊断<sup>[12]~[19]</sup>,也可用于扭矩计算<sup>[20],[21]</sup>、各缸工作不均匀性诊断<sup>[22]</sup>和相关部件的诊断<sup>[23]</sup>。瞬时转速波形诊

断法的不足在于:一是诊断结果受瞬时转速测量精度影响,在低转速工况下的诊断效果好,随转速升高则效果变差;二是提取的某些特征参数为有量纲量,给诊断阈值的确定带来困难且不利于推广;三是很多特征参数不能同时对故障进行识别和定位;四是某些特征参数对同一故障的敏感程度差别较大。文献<sup>[24]</sup>指出扭矩与曲轴角速度之间的关系为非线性关系,而且相当复杂,一般采用线性化的方法对其进行简化,而这就忽略了发动机本身存在的非线性因素,从而影响了分析问题的精度与准确度。而扭矩估计法适用于各种工况,但建模过程很复杂,计算量大,而且涉及发动机结构参数,不利于在线监测及实时诊断。

根据发动机的实际使用情况以及发展现状,当前应用于发动机的故障诊断方法主要有基于模型和非模型的故障诊断方法,除此以外还有利用发动机的输出频率、相位、相关性以及直接测量被测物的输出与标准量相比较的一些传统方法,当然基于输入输出和信号处理、状态估计、状态参数估计、故障树、案例分析等一些故障诊断方法也在当前发动机的故障诊断中有所应用。

目前,虽然故障诊断技术已发展得比较成熟,由最初的单因素、单机检测诊断向多因素、多机联合检测的综合分析和故障诊断专家系统的方向发展,一些新的硬件、软件不断应运而生,诊断方法也从感官判断发展到充分利用各种自动测试技术、监控技术、信息处理技术和图像分析技术,取得了相当数量的理论成果和实质性进展。近年来,故障诊断技术已在现代发动机的合理应用、安全运行、事故分析、质量及性能评估、技术决策和视情维修中得到了广泛应用。

但是从当前故障诊断技术在发动机中的应用现状来看,存在不少问题。从故障诊断方法来看,在基于模型的故障诊断方法中,当发动机发生故障时,不仅可能引起模型参数的变化,而且可能引起模型结构的变化。另外,这种变化是模型参数变化还是模型结构变化,还是二者兼有,具有很大的不确定性。这些目前都尚未解决。在基于非模型的故障诊断方法中需要对发动机设备建立庞大的知识库,而知识库的建立本身就是一件费时而困难的工作,且易出现“组合爆炸”和“冲突消解”。另外,基于非模型的故障诊断方法存在解决问题的能力有限,深浅知识的结合能力不强,缺少有效的自学习和自适应机制,容错能力不高,对一些不确定的知识处理能力较差等缺点。利用频率、相位和相关性的方法只能对故障范围作粗略的判断,大多数情况下不能直接定位故障。

除此之外,故障与征兆之间不存在简单的一一对应关系,即一种故障可能对应多种征兆,而一种征兆也可能对应多种故障。同时,现有的诊断方法都是以系统和设备在工作过程中出现的外部特征为基础的,故障特征的提取主要是基于状态响应、时域响应或频域响应分析,由于外部干扰因素多,具有很强的不确定性,这些特征可能重叠、减弱甚至消失,从而很难获得准确的特征信息。



以上这些都为故障诊断技术在发动机中的应用增加了难度,给发动机的故障诊断研究提出了新的课题和挑战。因此,研究和应用非线性故障诊断技术已势在必行。

## 1.4 传感器信号处理

设备故障诊断的内容包括状态检测、分析诊断和故障预测三个方面。其具体实施过程可以归纳为四个方面,即信号采集、信号处理、状态识别和诊断决策<sup>[2]</sup>,其实施流程图如图 1.1 所示,本节主要对传感器信号处理和故障决策方法进行简述。

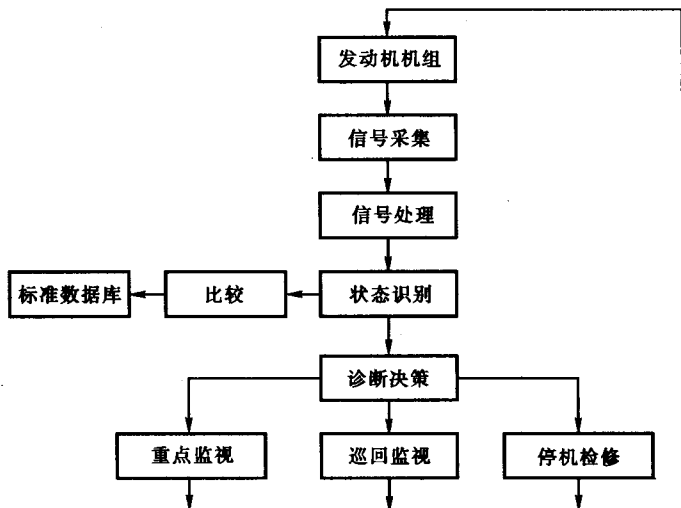


图 1.1 故障诊断实施流程图

### 1.4.1 实验信号采集系统

设备在运行过程中必然会有力、热、振动及能量等各种量的变化,由此会产生各种不同的信号。根据不同的诊断需要,选择能表征设备工作状态的不同信号,如振动、压力、温度等是十分必要的。这些信号一般是用不同的传感器来采集的。

#### 1. 实验仪器组成

实验仪器本体主要由计算机、数据采集卡及预处理电路、操作按键等组成。传感器则包括外卡油压传感器、ICP 振动传感器、电压传感器、电流传感器;传感器示意图见图 1.2、图 1.3 和图 1.4 所示。

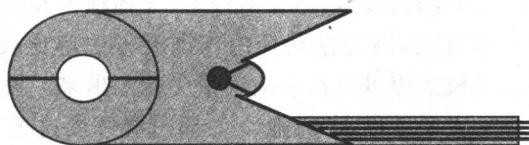


图 1.2 电压、电流传感器结构示意图

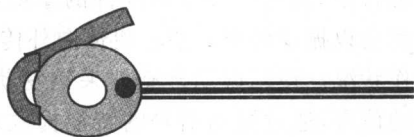


图 1.3 AVL 油压外卡传感器结构示意图

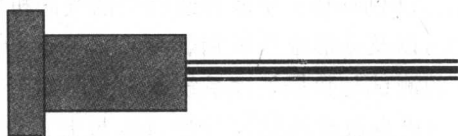


图 1.4 ICP 振动传感器结构示意图

## 2. 系统测试方法

(1) 启动系统测试。是在电瓶连续拖动发动机(发动机不发火)4 秒的过程中, 使用电压、电流传感器, 测量启动电压、电流的变化波形, 并计算出电压、电流参数在开始、中间、结束时刻的值, 根据数值和变化趋势判断电瓶的充电程度及容量; 此外, 依据电流波形的局部变化推断出各缸的压缩波形, 并判断各缸的压缩均匀性。

(2) 供油系统测试。利用外卡油压传感器, 检测该缸高压油路供油压力的脉动情况, 其波形可反映该缸的供油情况; 通过各缸供油波形的对比, 可判断各缸供油均匀性。此外, 外卡油压传感器还可提供发动机的动态转速信号, 并判断发动机转速的平稳性。

(3) 充电系统测试。使用电压、电流、外卡油压传感器测量不同转速(每百转)条件下, 充电电压、电流的具体数值和变化趋势, 判断充电系统工作是否正常。

(4) 动力性能测试。用 ICP 振动传感器测量发动机缸体、缸盖等特定部位的振动信号, 并运用各种信号分析方法对信号进行分析。通过对特定工况条件下, 发动机振动信号特征来分析发动机状态和动力性能。

## 3. 振动信号采集分析方法

在机械设备的状态监测和故障诊断技术中有多种方法可使用。例如振动监测