

# 柴油机振动信号分析与故障诊断研究

◎ 吴定海 张培林 任国全 傅建平 著

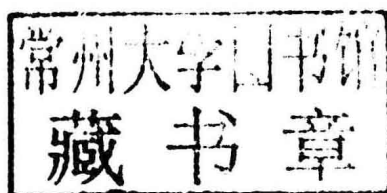


国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 柴油机振动信号分析 与故障诊断研究

吴定海 张培林 任国全 傅建平 著



国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书以大功率柴油发动机为研究对象,针对机械状态监测过程中面临的先验知识缺乏、故障样本稀缺和故障模式不完备等问题,深入研究了柴油机振动异常检测方法。本书将双树复小波变换和单类支持向量机理论运用于柴油机故障信号处理、特征参数提取和智能分类,在此基础上,研究了异常检测多目标优化思想和增量学习方法,丰富了机械故障诊断内容,为柴油机状态监测与诊断提供了一条有效的技术途径。

本书可供信号处理、机械工程等专业研究生以及从事动态测试研究的科研人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

柴油机振动信号分析与故障诊断研究 / 吴定海等著.

—北京:国防工业出版社,2012.12

ISBN 978-7-118-08416-0

I. ①柴... II. ①吴... III. ①柴油机-信号分析-研究②柴油机-故障诊断-研究 IV. ①TK42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 262066 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 13½ 字数 210 千字

2012 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

随着现代工业的不断发展,机械设备动态监测与故障诊断技术越来越得到重视,形成了一门既有理论、又有实际应用背景的完整的交叉性学科。由于动力机械复杂化程度不断提高,影响因素和环节也越来越多,表现出来的行为也随之复杂多变,如何从带故障的动力机械设备的复杂状态行为中提取故障特征,及时准确地找出故障源,避免重大事故的发生,是一个亟待解决的问题。柴油机是一种典型的动力机械,它既有旋转运动,又有往复运动。柴油机振源既有转动件的不平衡惯性作用力,又有往复运动件的惯性运动力;既有由于运动间的间隙造成的碰撞,也有阀与阀座间工作时的相互碰撞;有弹簧造成的冲击力,更有燃烧所产生的爆发冲击力。由于振源多,运动部件多,工作复杂,因此,对柴油机运行状态进行动态监测和故障诊断技术的研究就显得极其重要。

所谓的动态故障诊断技术就是利用现有的信息化成果,在设备运行过程中测取运行状态信息,通过对所测信号的处理和分析,结合诊断对象的历史状况,定量或定性分析柴油机整体或其零部件实时技术状态,并预知有关异常、故障和预测其未来技术状态,从而确定必要对策的技术。

振动是机械设备在运转过程中必然产生的现象,振动信号包含了丰富的设备运行状态的信息,设备工作性能的变化可以通过振动表现出来,而振动信号的采集和分析不影响机械设备的正常运转。相比油液分析、声学分析等检测方法,振动信息具有容易获取、诊断范围广、不容易受到外界干扰等优点,便于实现在线不解体状态监测和故障诊断。柴油机作为一种典型

## IV

的往复式机械,在其运行过程中表现出既具有与工作循环有关的周期性特性,又具有非平稳时变和冲击特性,是一种非常复杂的具有周期特征的非平稳时变信号。国内外的许多专家学者对其进行了深入的研究和探讨,但是离工程实际应用的需求还有一定的差距。柴油机的监测和故障诊断一直是机械故障诊断领域研究的一个热点和难点问题。

由于柴油机结构和各种激励相互作用的复杂性,使得人们难以从原理上进行建模来研究外在所测信号与柴油机内在故障之间的对应关系。最为直接的办法就是对所测试信号的样本分布规律进行分析,对历史样本数据进行建模,再将该模型应用于柴油机在线检测。正是基于这个出发点,许多学者进行了有益的探索,取得了一定的成效,但是这种方法常常会遇到故障样本数据难以获取和捕捉等难题,由于异常样本数据采集代价过高,不可能为了获取大量的故障样本数据而人为破坏机器,造成了正常类样本多而故障样本少,即存在样本数据严重的不平衡问题。另外,柴油机运行过程出现的故障也并不仅仅是简单形式的单一故障,也常常伴随未知故障类型和复合故障的发生,直接判别其故障类型显然难以实现。柴油机故障数据样本的缺乏和故障状态的多样性,是制约提高故障诊断精度的根本原因。

鉴于以上大功率柴油机在线检测的现状,结合容易获取的大量正常工况的振动信号,开展柴油机异常检测方法研究,及时地发现和判别柴油机运行状态是否异常,往往比直接判别是属于哪种故障类型更具有现实意义。

为实现对大功率柴油机运行状态进行有效监测和故障报警,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,结合科研实践,以柴油机为研究对象,以测试技术、信号处理、小波分析、粒子群优化算法和支持向量机等为理论基础,围绕柴油机在线异常检测的目的,研究了大功率柴油机振动信号产生机理及数学模型、振动信号的降噪、多角度特征提取、异常检测模型的优化和训练更新等问题,构建了一套完整的柴油机动态异常检测的方法,大大提高了异常检测的精度和效率,为柴油机状态监测提供了一条新的、完整的、有效的技术途径。

本书共分8章。第1章介绍了柴油机的各种状态监测和故障检测技术,分析了各种方法的优缺点,综述了近年来基于小波分析的柴油机特征提取和基于支持向量机的异常检测方法研究现状。第2章在简要介绍了小波分析理论的基础上,研究了双树复小波变换的基本原理,研究了双树复小波变换中半采样延迟和冲击衰减形貌的 Hilbert 变换对滤波器设计,分析了双

树复小波变换的特性和小波降噪方法。第3章分析了大功率柴油机整循环同步采样和振动信号的特性,基于双树复小波变换的基本理论,提出了一种基于双树复小波包变换的自适应分块阈值降噪方法,滤除了柴油机振动信号中背景噪声的干扰,保留有用信息,从而有利于早期故障特征提取。第4章结合双树复小波包分解与重构,从时域统计特征参数和多分辨率 Hilbert 包络熵、频域归一化能量特征、时频域奇异谱分析多个角度构建较完备的特征参数体系,在时频域特征提取方面,提出了一种基于双树复小波包变换的离散时频奇异值特征提取方法。第5章在介绍支持向量机理论的基础上,研究了现有单类支持向量机模型,分析了其模型存在的局限性,综述了其研究现状和发展趋势。第6章建立了最优间隔超球分类器异常检测模型,并针对特征空间存在混叠的情况,提出了一种基于 Bayes 超球分类器决策超球面的确定方法,引入了多核映射的原理,提出了一种多核超球支持向量分类器,并将以上模型应用于柴油机的在线异常检测。第7章针对异常检测的特征选择和模型参数优化问题,分析了粒子群优化算法存在的不足,提出了一种自适应混叠变异双粒子群优化算法,采用非支配排序的方法对异常检测的特征选择和模型参数进行同步优化,同时最小化特征参数维数和最大化分类正确率,提高柴油机在线异常检测的速度和精度。第8章针对模型在线增量学习问题,分析了新增样本加入时对支持向量集的影响,给出了异常检测模型的更新法则,研究了一种增量式 SMO 在线快速训练算法,最后,通过组合多个超球分类器,建立了在线动态多故障识别模型,实现柴油机故障类型的有效识别。

本书是作者长期从事本领域科学研究的结晶,在撰写过程中,得到了张英堂教授和北方发动机研究所张稀林研究员的无私帮助和指导,齐小慧教授、王长龙教授对本书提出了许多宝贵意见,在此向他们表示诚挚的谢意。书中所引用的实例都是近年来作者科研成果的体现。鉴于作者知识水平有限,书中难免存在不足之处,殷切希望读者指正!

作 者

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 柴油机故障诊断概述 .....             | 1  |
| 1.1 故障诊断发展历程 .....                | 1  |
| 1.2 柴油机故障分类 .....                 | 4  |
| 1.3 柴油机诊断常用信息 .....               | 5  |
| 1.4 柴油机动态故障检测技术 .....             | 6  |
| 1.4.1 状态参数法 .....                 | 7  |
| 1.4.2 油液分析法 .....                 | 8  |
| 1.4.3 声学检测法 .....                 | 9  |
| 1.4.4 振动检测法 .....                 | 12 |
| 1.4.5 多源信息融合诊断法 .....             | 14 |
| 1.5 柴油机振动信号处理与特征提取方法 .....        | 15 |
| 1.5.1 基于小波分析的柴油机信号处理与特征提取方法 ..... | 16 |
| 1.5.2 双树复小波变换及其在机械信号处理中的应用 .....  | 17 |
| 1.6 基于支持向量机的柴油机异常检测 .....         | 19 |
| 1.6.1 单类支持向量机的研究与应用 .....         | 21 |
| 1.6.2 单类支持向量机在机械异常检测中的应用 .....    | 21 |
| 第 2 章 双树复小波分析 .....               | 24 |
| 2.1 小波分析理论基础 .....                | 25 |
| 2.1.1 从傅里叶分析到小波变换 .....           | 25 |
| 2.1.2 多分辨率分析与 Mallat 算法 .....     | 26 |

|              |                                 |           |
|--------------|---------------------------------|-----------|
| 2.1.3        | 小波包变换的定义 .....                  | 29        |
| 2.1.4        | 小波包变换的 Mallat 算法 .....          | 30        |
| 2.2          | 双树复小波变换 .....                   | 30        |
| 2.2.1        | 传统离散小波变换的平移变动性 .....            | 30        |
| 2.2.2        | 双树复小波包变换 .....                  | 31        |
| 2.2.3        | 双树复小波包 Hilbert 变换对滤波器设计 .....   | 32        |
| 2.2.4        | 双树复小波包快速 Mallat 算法 .....        | 39        |
| 2.3          | 基于小波变换的基本降噪方法分析对比 .....         | 41        |
| 2.3.1        | 基于模极大值重构的小波降噪方法 .....           | 42        |
| 2.3.2        | 基于信号尺度间相关性的空域相关降噪方法 .....       | 43        |
| 2.3.3        | 基于小波变换解相关特性的小波阈值降噪方法 .....      | 45        |
| 2.4          | 本章小结 .....                      | 46        |
| <b>第 3 章</b> | <b>柴油机振动分析与双树复小波包降噪研究 .....</b> | <b>48</b> |
| 3.1          | 柴油机振动信号采集方法 .....               | 49        |
| 3.1.1        | 等角度域采样原理分析 .....                | 49        |
| 3.1.2        | 柴油机整循环同步采样的实现 .....             | 51        |
| 3.1.3        | 柴油机试验工况 .....                   | 53        |
| 3.2          | 柴油机振动信号特性分析 .....               | 54        |
| 3.2.1        | 缸盖系统振动动力学模型 .....               | 54        |
| 3.2.2        | 柴油机振动信号特性分析 .....               | 56        |
| 3.3          | 双树复小波包仿真信号分析 .....              | 63        |
| 3.3.1        | 阶梯信号的平移不变性测试 .....              | 63        |
| 3.3.2        | 小波包分解频率混叠测试 .....               | 64        |
| 3.4          | 双树复小波包自适应邻域分块阈值降噪方法 .....       | 68        |
| 3.4.1        | 分块阈值降噪 .....                    | 68        |
| 3.4.2        | 自适应分块阈值降噪方法 .....               | 70        |
| 3.4.3        | 计算机仿真信号分析 .....                 | 72        |
| 3.5          | 柴油机缸盖振动信号降噪实例 .....             | 77        |
| 3.6          | 本章小结 .....                      | 80        |
| <b>第 4 章</b> | <b>基于双树复小波包的柴油机故障特征提取 .....</b> | <b>81</b> |
| 4.1          | 基于双树复小波包的时域特征提取 .....           | 82        |

|              |                                    |            |
|--------------|------------------------------------|------------|
| 4.1.1        | 振动信号的统计特征参数 .....                  | 82         |
| 4.1.2        | 多分辨率 Hilbert 包络熵 .....             | 84         |
| 4.2          | 基于双树复小波包的频域特征提取 .....              | 88         |
| 4.2.1        | 归一化相对能量特征 .....                    | 88         |
| 4.2.2        | 基于互熵的相对能量特征评价指标 .....              | 89         |
| 4.2.3        | 实测信号分析 .....                       | 89         |
| 4.3          | 基于双树复小波包的时频域特征提取 .....             | 91         |
| 4.3.1        | 双树复小波包时频分布 .....                   | 92         |
| 4.3.2        | 奇异值分解和奇异谱分析 .....                  | 94         |
| 4.3.3        | 实测信号分析 .....                       | 95         |
| 4.4          | 基于双树复小波包变换的特征参数集提取过程 .....         | 102        |
| 4.5          | 本章小结 .....                         | 102        |
| <b>第 5 章</b> | <b>单类支持向量机 .....</b>               | <b>104</b> |
| 5.1          | 支持向量机理论 .....                      | 105        |
| 5.1.1        | 分类超平面 .....                        | 105        |
| 5.1.2        | 支持向量机 .....                        | 106        |
| 5.2          | 单类支持向量机模型 .....                    | 111        |
| 5.2.1        | One-Class SVM 模型 .....             | 111        |
| 5.2.2        | 支持向量描述模型 .....                     | 113        |
| 5.2.3        | 参数设置与优化分析 .....                    | 115        |
| 5.3          | 单类支持向量机模型理论分析 .....                | 117        |
| 5.3.1        | 两种单类支持向量机模型的区别和联系 .....            | 117        |
| 5.3.2        | 模型局限性分析 .....                      | 118        |
| 5.3.3        | 模型性能评价指标 .....                     | 119        |
| 5.4          | 单类支持向量机研究进展 .....                  | 120        |
| 5.5          | 本章小结 .....                         | 123        |
| <b>第 6 章</b> | <b>基于单类支持向量机的柴油机异常检测模型研究 .....</b> | <b>124</b> |
| 6.1          | 最大间隔超球分类器异常检测模型 .....              | 125        |
| 6.1.1        | 最优分类超平面思想 .....                    | 125        |
| 6.1.2        | 最大间隔超球分类器异常检测模型的建立 .....           | 127        |
| 6.1.3        | 模型参数分析 .....                       | 130        |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 6.1.4 | 实例分析与应用 .....              | 134 |
| 6.2   | 基于贝叶斯的三层阈值异常检测模型 .....     | 137 |
| 6.2.1 | 特征空间与混叠域 .....             | 137 |
| 6.2.2 | 基于贝叶斯的三层阈值分界面 .....        | 138 |
| 6.2.3 | 实测信号分析 .....               | 140 |
| 6.3   | 基于多核映射的支持向量异常检测模型 .....    | 142 |
| 6.3.1 | 多核空间描述 .....               | 143 |
| 6.3.2 | 多核支持向量描述模型 .....           | 144 |
| 6.3.3 | 柴油机实测信号应用 .....            | 147 |
| 6.4   | 本章小结 .....                 | 148 |
| 第7章   | 基于粒子群的异常检测模型多目标优化研究 .....  | 150 |
| 7.1   | 粒子群优化算法 .....              | 151 |
| 7.1.1 | 粒子群优化算法基本原理 .....          | 151 |
| 7.1.2 | 粒子群优化算法控制参数分析 .....        | 153 |
| 7.1.3 | 标准微粒群算法的局限性 .....          | 154 |
| 7.2   | 自适应混沌双粒子群优化 .....          | 156 |
| 7.2.1 | 双种群协同进化 .....              | 156 |
| 7.2.2 | 混沌变异全局搜索种群 .....           | 156 |
| 7.2.3 | 自适应邻域局部搜索种群 .....          | 158 |
| 7.2.4 | 仿真对比测试 .....               | 159 |
| 7.3   | 基于粒子群的柴油机异常检测多目标优化 .....   | 163 |
| 7.3.1 | 非支配排序微粒群多目标优化 .....        | 163 |
| 7.3.2 | 数据分析与验证 .....              | 167 |
| 7.4   | 本章小结 .....                 | 171 |
| 第8章   | 柴油机异常检测动态更新与故障类型识别 .....   | 172 |
| 8.1   | 柴油机异常检测模型的动态更新 .....       | 173 |
| 8.1.1 | 异常检测模型增量学习与 KKT 条件 .....   | 173 |
| 8.1.2 | 新增样本对支持向量集的影响分析 .....      | 176 |
| 8.1.3 | 异常检测模型更新法则 .....           | 178 |
| 8.1.4 | 异常检测模型增量式 SMO 快速训练算法 ..... | 180 |
| 8.1.5 | 柴油机在线检测性能分析 .....          | 184 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 8.2 柴油机在线检测动态多故障类型识别方法 .....  | 186 |
| 8.2.1 动态多故障识别模型的建立 .....      | 186 |
| 8.2.2 测试样本点与各超球体的位置关系分析 ..... | 188 |
| 8.2.3 柴油机多故障诊断应用 .....        | 191 |
| 8.3 本章小结 .....                | 194 |
| 参考文献 .....                    | 195 |

# 1

## 第 1 章

# 柴油机故障诊断概述

### 1.1 故障诊断发展历程

20 世纪六七十年代,数字电路、计算机辅助测试以及数字信号分析处理技术的发展推动了机械设备在线检测与故障诊断的发展。20 世纪七八十年代,许多发达国家开始研究机械设备的状态监测与故障诊断技术。

机械状态监测和故障诊断技术是利用机械设备在运行中或相对静止条件下测取的状态信息,通过对所测信号的处理和分析,并结合诊断对象的历史状况,来定量识别机械设备及其零部件的实时技术状态,并预知有关异常、故障和预测其未来技术状态,从而确定必要对策的技术,其本质上就是一个状态识别过程。机械状态监测和故障诊断技术是综合性很强的技术,它涉及力学、数学、计算机软硬件、传感器与检测技术、信号分析与处理、模式识别等多个领域。

美国是开展机械状态监测和故障诊断技术研究最早的国家。美国 1961 年开始执行阿波罗计划后出现了一系列设备故障,1967 年在美国国家

航空航天局(NASA)倡导下,由美国海军研究室(ONR)主持成立了美国机械故障预防小组(Machinery Fault Prevention Group, MFPG),积极从事故障诊断技术的研究与开发。英国在 20 世纪 60 年代末 70 年代初,以 R. A. Collacott 博士为首的英国机械健康监测中心(Mechanical Health Monitoring Center, MHMC)开始诊断技术的研发工作,在摩擦磨损、汽车、内燃机监测和诊断方面具有领先优势。

在线故障诊断系统的最终实现是设备状态监测和故障诊断技术的集中体现,开发实用的在线故障诊断系统是设备状态监测和故障诊断技术应用于生产实践的必然要求。机械设备的监测研究逐步系统化,并把实验室的研究成果逐步推广到工程应用中去,经历了人工离线、在线单机集中式、在线分布式到远程在线分布式的发展过程。

### 1. 人工离线监测与诊断方式

工程技术人员或经验丰富的设备维护人员利用常规检测仪器或者较复杂的分析仪器对设备的运行工况进行人工巡检,没有分析解释功能,系统对状态的判断依赖于人为经验判断。这种监测方式只能对设备作一些简易的诊断。

### 2. 单机集中式在线监测与诊断系统

单机集中式在线监测系统面向的监测对象单一,信息处理和交换仅限于单机系统内部,由 1 台计算机完成数据的采集、信号处理、特征提取和故障识别。其目的是对装备系统进行实时监视和自动诊断,并提供维护意见。该监测系统主要用于重要的主体设备。缺点是系统所能监测的测点数目有限,巡检周期长,系统的功能受到诸多限制。

### 3. 分布式在线监测与诊断系统

分布式在线监测针对解决的实际问题是:大型复杂系统中存在着多个元素,各个元素之间存在着一定的联系,一个元素的工作故障会对其他元素和整个系统造成影响,通过分布式监测系统对每个元素进行监测,能够综合考虑它们之间的协调,实现对系统的实时维护。研究人员基于网络通信技术实现分布式监测诊断模式,通过现场总线或工业局域网将各个设备互连起来,每个设备处有一个智能处理节点,负责对相应设备的监测诊断。可见分布式监测诊断系统是通过一组分散的、耦合的节点诊断系统来共同完成复杂系统的故障诊断。

这种分布式监测系统的优点是具有并行处理的能力,提高了监测诊断

效率并能够满足实时性诊断的要求。同时,分布式的结构也减少了资源的浪费,是一种开放系统,具有良好的可扩展性。但是这种模式一般存在局域网中,不能向装备制造商寻求远程监测诊断服务和外地专家的诊断协助,系统的诊断能力受到了一定的限制。

#### 4. 远程分布式在线监测与诊断系统

网络通信技术的发展使得复杂装备系统的远程监测诊断成为可能。自1997年1月,斯坦福大学和麻省理工学院联合主办了首届基于互联网的工业远程诊断研讨会后,国内外许多企业、研究机构 and 高校都开展了相关的工作,特点是将远程故障诊断技术与网络通信技术相结合,实现了数据共享,具有信息传递快捷和交互性强等特点,以信息的流动代替人员的流动,实现对远程装备的诊断维护,并逐渐形成了一种新的检测诊断模式,即远程监测诊断模式。

移动装备远程故障诊断系统方面,丹麦的B&K公司开发的COMPASS系统通过卫星通信对设备进行监测和远程诊断。美国国家航空航天局科学家利用远程故障诊断技术成功修复了远在火星的“勇气号”探测器,其构建的基于无线通信的F-22快速集成综合保障系统、空军新一代飞机维护方式、飞机相关战斗损伤修理的“飞机—基地—战地抢修车”远程保障模式等引起了航空业界广泛关注,相关应用系统的研究正扩展到国际空间站及民用飞机。2005年8月,美国北得克萨斯州立大学的Krishna Kavi教授提出用一种数据实时传输系统取代黑匣子,通过卫星实时地把机上获得的数据发送至地面指挥监控中心,进行实时处理和结果反馈,旨在建立起实时在线的民用飞机远程故障诊断系统。

我国在故障诊断领域起步较晚,国内许多高校开展了远程故障诊断技术的研究,也取得了丰硕的研究成果。

大连理工大学的陈波博士研究了分布式远程故障诊断专家系统的结构体系和故障诊断智能代理Agent技术的特点、组成、通信及协作等;四川大学的周新志博士提出了“智能传感器+现场以太网+Internet网”分布式远程监测系统模型和网络化智能前端监测系统的体系结构;重庆大学的伍奎博士研究了汽轮发电机组网络化、智能化在线监测诊断系统,探索了一条多参数复杂系统监测诊断的有效途径。东南大学的詹宏宏等构建了一种机群远程监测与故障诊断系统,通过利用传感技术、无线数据传输、网络技术和故障诊断技术等,实现了机群中各分散单机的远程监测与故障诊断,实现当

前机群实时评估,实现了数据的集中管理和机群信息的交换与共享。

远程故障诊断模式向着网络化、分布式和开放式的方向发展,这种发展趋势使得在线监测与故障诊断系统功能的扩展更加灵活,性能不断提高,使用更加简便。

从技术发展的角度,故障诊断技术发展经历了专家感知、仪器测量、计算机分析与处理三个阶段后,随着相关学科技术的发展特别是计算机网络技术的发展,已进入一个全新的发展阶段,研究重点从系统平台的研究开发到系统平台与诊断方法研究的并重;技术手段由振动参数的监测扩大到油液、扭矩、功率,甚至能量损耗的监测;服务对象由旋转机械扩展到柴油机、工程施工机械以及复杂军用装备;时空范围由当地监测诊断扩大到异地实时诊断,即远程故障诊断。

从任务需求的角度,随着技术的发展,维修体制从事后维修、计划维修,发展到预知维修。事后维修造成装备损坏严重、停车时间长、维修成本高;计划维修的检修周期小于最短故障周期,可以保证不会出现装备严重损坏的故障,但造成所谓“过剩维修”,直接导致维修资源浪费;而预知维修以状态监测为基础,定期或连续地对装备进行监测,并根据监测和诊断的结果,确定装备“状态”,综合各方情况做出维修方案,因此可以减少意外停车,控制过剩维修,避免不必要拆卸对装备的损坏,延长装备使用寿命,使综合成本最低。

故障诊断技术经过 40 多年的研究与发展,已应用于飞机自动驾驶、人造卫星、航天飞机、核反应堆、汽轮发电机组、大型电网系统、石油化工过程和装备、飞机和船舶柴油机、汽车、冶金装备、矿山装备、机床、军用装备等领域,产生了巨大的经济与军事效益。

## 1.2 柴油机故障分类

目前柴油机故障的分类方法较多。根据柴油机子系统的不同,柴油机故障可分为启动系统故障、燃油系统故障、进排气系统故障、燃烧系统故障、润滑系统故障和冷却系统故障。另外,柴油机故障也分成零部件故障与工作过程故障。零部件故障有气门故障(气门间隙异常、气门漏气)、连杆组件故障(连杆铜套磨损、连杆轴瓦磨损、拉缸等),工作过程故障是功能性的,它所反映的是某些系统、部件的功能恶化,但不能指出故障的细节。如汽缸漏气,它既可能是由于气门漏气引起的,也可能是由于活塞环磨损引起

的。另外,还可以根据故障的重要程度将柴油机故障分为重要故障(曲轴断裂、飞车等)和次要故障(气门间隙轻微变化)、常见故障(燃油系统故障)和非常见故障(曲轴故障)。因此,对柴油机故障的准确、合理分类是建立高效实用诊断系统的前提和依据。

以 12150L 型柴油机为例,了解其常见的故障模式是进行在线异常检测的基础和前提。表 1-1 为 12150L 柴油机停机 410 次故障记录的分类统计,根据表 1-1 所列的故障率对大功率柴油机的常见故障划分为可靠性故障和功能性故障。可靠性故障主要是针对烧瓦、拉缸等典型致命性故障,该类故障如果不及及时发现和修复,对柴油机的工作可靠性、使用寿命将带来严重后果。功能性故障主要是由于工作时序的变化所引发的柴油机功率下降,例如气门间隙的变化、供油提前角的变化、喷油压力的变化等。由故障统计可知燃油系统、配气机构和活塞组件是柴油机最主要的,也是最容易出现故障的部件,而振动信号可以最为直接也最为灵敏地反映故障发生时柴油机运行状态的变化。

表 1-1 12150L 型柴油机各项故障率分类统计

| 故障分类     | 故障率/% | 故障分类    | 故障率/% |
|----------|-------|---------|-------|
| 喷油器及供油系统 | 27.0  | 齿轮与驱动机构 | 1.9   |
| 漏水、漏油    | 17.0  | 调速器齿轮   | 1.9   |
| 燃油泄漏     | 3.5   | 气门与气门座  | 11.9  |
| 漏 气      | 3.2   | 轴 承     | 9.0   |
| 其他破坏与破裂  | 2.5   | 活塞组件    | 8.6   |
| 其他故障     | 2.5   | 漏油与润滑系统 | 5.2   |
| 机 座      | 0.9   | 曲 轴     | 0.2   |

### 1.3 柴油机诊断常用信息

目前,在柴油机工作过程中,反映设备运行状态的信息很多,就当前故障诊断中所用的信息来说,可以归纳为以下几类。

#### 1. 机器振动信息

任何机器运行都会产生振动,机器表面的振动信号携带着大量的运行状态信息,机器出现异常或发生故障往往会引起机器表面振动信号明

显的变化。如果这种变化能被检测出来,则可间接地给出机器工作状态的诊断。由于振动信号测量方便,处理分析方法较多,因而该信息被广为使用。

## 2. 机器声学信号

机器声学信号是由于在机器工作中的不平衡运动使机器发生振动所产生的。虽然机器响声与机器振动密切相关,但机器响声所含的振动频率及信号特征不同于机器振动信号,而且两者的处理方法也不同。机器噪声给出了反映机器行为的另一种信息。异响诊断就是在此基础上发展起来的一种新的故障诊断技术。

## 3. 机器运行中的过程量和过程参数

机器工作介质、润滑油、冷却油、冷却水的温度、压力、流量,机器输入、输出的功率、转速、扭矩等过程量和过程参数均可提供有关机器运行状态的信息,在许多情况下,这些信息对机器状态变化的反映往往更明显、更可靠。例如:柴油机在活塞环磨损或损坏的情况下会发生严重的气体泄漏,这时排气压力就会明显下降。机器运转不平稳时会出现转速的明显波动等,因而通过机器过程量和过程参数的变化情况可分析诊断机器的工作状态。

## 4. 油样、烟色等机器残留物、排放物的信息

这些信息往往能够反映机器某一部位或某一过程出现的异常行为。通过润滑油样分析、排烟烟度分析可得出柴油机零部件的磨损状态、工作介质的燃烧状况等其他手段难以获得的信息。

上面几种信息是根据机器状态信息的物理特征来划分的,这只是对诊断中可用机器信息的一个很粗略的分类,这些信息从不同侧面、不同程度和不同层次反映了机器运行情况的好坏,如果能够充分加以利用,则可以提高设备诊断的准确性。

# 1.4 柴油机动态故障检测技术

柴油机的动态故障诊断经过了几十年的研究和发展,国内外的研究按检测手段和获取信息的方法分为状态参数检测法、振动检测法、油液检测法和声学检测法以及多源信息融合诊断法等,下面对这几种检测分析方法的应用和发展分别加以阐述。