

柴油发动机 故障诊断技术

张玲玲 曾锐利 编著



Fault Diagnosis
Techniques on Diesel Engine



国防工业出版社
National Defense Industry Press

柴油发动机故障 诊断技术

张玲玲 曾锐利 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书采用理论方法与应用实例相结合的方式,系统地介绍了柴油机信号采集技术、Hilbert-Huang 变换、高阶统计量、阶比分析、图像处理技术等信号处理方法、模糊集、粗糙集、信息融合及专家系统理论与技术在柴油机故障诊断中的运用,大量新技术、新方法的应用,为柴油发动机常见故障的诊断提供了新思路、新途径。

本书内容新颖,实用性强,适合作为高等院校车辆工程、载运工具运用工程等学科专业的研究生、本科生的教材或参考书,也可供汽车工程师、汽车检测人员、汽车使用和维修人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

柴油发动机故障诊断技术/张玲玲,曾锐利编著.

—北京:国防工业出版社,2015.12

ISBN 978-7-118-10597-1

I. ①柴… II. ①张…②曾… III. ①汽车—柴油机—故障诊断 IV. ①U472.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 296798 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 20 字数 360 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 75.00 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

现代电子技术、信号处理技术、图像处理技术、模式识别和信息融合技术不断发展,如何将这些新理论和新技术应用于柴油发动机故障诊断是一个现实问题。本书是军事交通学院肖云魁教授带领的团队,通过开展“野战车辆智能诊断仪”“汽车机械故障诊断与寿命预测系统”“汽车电器与电子控制系统故障诊断装置”等课题的研究工作,在柴油发动机故障诊断方面取得大量研究成果的总结。

本书共分 11 章,第 1 章为绪论,简要地介绍了柴油发动机故障诊断技术的现状和发展趋势。第 2 章为传感器与柴油机数据采集技术,简要介绍了传感器的相关知识,构建了柴油发动机非稳态信号采集系统,为下一步进行信号处理分析和模式识别奠定基础。第 3 章~第 6 章为最新的信号处理方法在柴油机故障诊断中的应用,可以有效提取出故障特征,其中第 3 章为 Hilbert-Huang 变换与柴油机故障诊断,将 EMD-AR 谱、EEMD-SVD 变换方法应用于柴油机的特征提取;第 4 章为基于循环平稳理论的柴油机故障诊断,对柴油机振动信号进行了二阶循环平稳性分析、高阶循环平稳性分析;第 5 章为基于阶比跟踪算法的柴油机故障诊断技术,将基于整工作循环阶比跟踪谱、阶比双谱和基于瞬时频率估计的无转速计方法应用于柴油机特征提取;第 6 章为图像处理技术与柴油机故障诊断,重点介绍了对称极坐标方法和灰度共生矩阵图像处理方法及在柴油机故障中的应用。第 7 章~第 9 章为模式识别方法在柴油机故障诊断中的应用,其中第 7 章为粗糙集数据挖掘算法与柴油机故障诊断;第 8 章为模糊诊断技术与柴油机故障诊断;第 9 章为基于信息融合技术的柴油机故障诊断。第 10 章为高压共轨电控系统故障诊断与维修,主要介绍了电控系统故障检测程序和方法、汽车自诊断系统及故障码与数据流分析相关理论。第 11 章为基于 MAS 的车辆故障诊断专家系统,简要介绍了 Multi-Agent 技术与专家系统、基于 MAS 的车辆故障诊断专家系统的体系结构、车辆故障诊断知识表达与专家系统知识库设计,集成了基于 MAS 的军用车辆故障诊断专家系统。

本书由张玲玲博士、曾锐利博士主编,沈虹讲师、肖静助教为副主编,肖云魁教授主审,在编写过程中,张海峰工程师编写了第 1 章,赵慧敏博士、沈虹讲

师编写了第2章,李志勇博士编写了第3章,夏天博士编写了第4章,程利军博士编写了第5章,张玲玲博士编写了第6章,王国威硕士编写了第7章,常春硕士、梅检民博士编写了第8章,任金成硕士编写了第9章,曾锐利博士编写了第10章,李会梁硕士、肖静助教编写了第11章。杨万成高级工程师、江红辉讲师、杨青乐硕士、丁献雷工程师参与了部分章节撰写、软件调试、资料收集与整理、图形处理等工作。

由于时间仓促,加上水平有限,书中定有不少错误,恳请广大读者批评指正,以便今后修改完善。

作者

2015年8月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 柴油发动机故障诊断技术研究的意义	1
1.2 柴油机常见的故障及故障诊断研究的内容	2
1.2.1 柴油机故障分类和常见的故障	2
1.2.2 柴油机故障诊断研究的内容	2
1.3 柴油机故障诊断技术的现状和发展	3
1.3.1 柴油机状态信号的检测方法	4
1.3.2 柴油机信号处理和故障特征提取方法	5
1.3.3 柴油机故障模式识别技术	6
1.3.4 柴油机故障诊断技术的发展趋势	8
第2章 传感器与柴油机数据采集技术	9
2.1 传感器的组成与分类	9
2.1.1 传感器的组成	9
2.1.2 传感器的分类	10
2.2 车载传感技术	10
2.2.1 位置传感器	10
2.2.2 速度与加速度传感器	14
2.2.3 温度传感器	16
2.2.4 压力传感器	17
2.2.5 其他传感器	19
2.3 图像传感技术	22
2.3.1 CCD 图像传感器	23
2.3.2 CMOS 图像传感器	25
2.3.3 图像传感器的应用	26
2.4 智能传感技术	28
2.4.1 智能传感器概述	28

2.4.2	智能传感器的应用	31
2.5	数据采集技术	33
2.5.1	数据采集系统的结构和功能	33
2.5.2	采样定理与 A/D 转换	34
2.5.3	数据采集常用电路	50
2.5.4	采集数据的预处理	56
2.5.5	数据采集系统设计的一般步骤	59
2.6	发动机非稳态振动信号采集系统	60
2.6.1	传感器与测试部位的确定	60
2.6.2	触发转速和采样频率的选择	61
2.6.3	调理电路设计	62
2.6.4	非稳态信号采集的重复性设计	63
2.6.5	非稳态振动信号测量与分析	64
2.7	本章小结	68
第3章	Hilbert – Huang 变换与柴油机故障诊断	70
3.1	Hilbert – Huang 变换的基本原理	70
3.1.1	本征模态函数(IMF)	70
3.1.2	经验模态分解方法	70
3.1.3	Hilbert 谱与 Hilbert 边际谱	71
3.1.4	EEMD 分解原理	72
3.2	基于 EMD – AR 谱的柴油机故障特征提取	73
3.2.1	EMD – AR 谱方法的提出	73
3.2.2	连杆轴承振动信号的 EMD – AR 谱分析	74
3.3	基于 EEMD – SVD 变换的柴油机故障特征提取	77
3.3.1	奇异值分解原理	77
3.3.2	基于 EEMD 和 SVD 的柴油机振动信号分析算法	77
3.3.3	基于 EEMD 和 SVD 的柴油机连杆轴承振动信号分析	78
3.4	本章小结	82
第4章	基于循环平稳理论的柴油机故障诊断	83
4.1	循环平稳理论及其应用	83
4.1.1	循环平稳理论	83
4.1.2	循环平稳理论的应用	83
4.2	柴油发动机振动信号的二阶循环平稳性分析	84

4.2.1	循环自相关函数及循环谱密度函数	84
4.2.2	基于经验模式分解(EMD)方法的消除循环谱中 交叉项的研究	90
4.2.3	柴油发动机振动信号的二阶循环平稳性分析	94
4.3	柴油发动机振动信号的高阶循环平稳性分析	102
4.3.1	高阶统计量理论	102
4.3.2	高阶循环统计量理论	104
4.3.3	柴油发动机振动信号的高阶循环平稳性分析	107
4.4	本章小结	116
第5章	基于阶比跟踪算法的柴油机故障诊断技术	117
5.1	阶比跟踪算法的基本理论	117
5.1.1	阶比跟踪技术的研究动态	117
5.1.2	模拟阶比跟踪技术	117
5.1.3	计算阶比跟踪技术	119
5.1.4	无转速计阶比跟踪技术	124
5.1.5	阶比提取技术	129
5.2	基于整工作循环阶比跟踪谱和 FCM 的柴油机故障诊断	134
5.2.1	整工作循环阶比跟踪谱方法	134
5.2.2	转速信号的处理	134
5.2.3	FCM 算法及择近原则	135
5.2.4	应用实例	137
5.3	基于阶比双谱的柴油机故障特征提取	140
5.3.1	基于非参数法的双谱估计	140
5.3.2	阶比双谱定义及仿真算例	141
5.3.3	应用实例	143
5.4	基于瞬时频率估计的无转速计振动信号阶比跟踪研究	147
5.4.1	波动变速状态(变加速)无转速计的阶比分析仿真研究	147
5.4.2	基于瞬时频率估计的无转速计阶比跟踪算法研究	150
5.5	本章小结	153
第6章	图像处理技术与柴油机故障诊断	154
6.1	基于对称极坐标方法柴油机振动信号特征提取	154
6.1.1	基于对称极坐标图像的生成方法	154
6.1.2	基于对称极坐标方法振动信号特征提取	158

6.2 基于灰度共生矩阵方法的柴油机振动信号特征提取	165
6.2.1 灰度图像纹理特征提取方法	165
6.2.2 振动信号灰度图像生成与特征提取	167
6.3 本章小结	170
第7章 粗糙集数据挖掘算法与柴油机故障诊断	171
7.1 数据挖掘的过程模型与数据挖掘的基本方法	171
7.1.1 数据挖掘的过程模型与挖掘步骤	171
7.1.2 数据挖掘的数据库类型	172
7.1.3 常用数据挖掘方法	173
7.2 基于粗糙集理论的数据挖掘算法	175
7.2.1 决策系统与不可分辨关系	176
7.2.2 粗糙集的下近似、上近似、边界区和近似精度	176
7.2.3 属性约简	177
7.2.4 粗糙集的特点	180
7.3 基于可变精度粗糙集理论的数据挖掘技术	180
7.4 基于粗糙集理论的数据挖掘举例	181
7.4.1 信号处理与产生决策表	182
7.4.2 属性对决策近似精度的计算	184
7.4.3 属性约简	185
7.4.4 决策规则产生	187
7.4.5 根据变精度粗糙集模型	188
7.5 本章小结	189
第8章 模糊诊断技术与柴油机故障诊断	190
8.1 模糊诊断基本原理及应用	190
8.1.1 汽车故障诊断中的模糊性	190
8.1.2 模糊诊断原理	191
8.1.3 隶属函数的确定	192
8.1.4 模糊诊断矩阵的构造	197
8.1.5 模糊诊断方法	198
8.1.6 柴油机故障模糊诊断举例	202
8.2 模糊规则与模糊推理系统及应用	204
8.2.1 模糊规则与模糊推理	204
8.2.2 模糊推理系统	205

8.3 模糊神经网络及应用	207
8.3.1 神经网络与模糊推理系统的关系	207
8.3.2 神经网络—模糊推理系统融合机理	208
8.3.3 模糊神经网络	209
8.3.4 基于集成模糊神经网络的柴油机故障诊断	213
8.4 本章小结	219
第9章 基于信息融合技术的柴油机故障诊断	220
9.1 信息融合概述	220
9.1.1 信息融合的定义	220
9.1.2 信息融合的数学依据	220
9.1.3 信息融合的级别	222
9.2 D-S 证据理论基本原理	224
9.2.1 基本概念	224
9.2.2 合成和决策规则	225
9.2.3 SVDD 与证据理论的结合	225
9.3 基于 SVDD 和 D-S 理论的柴油机故障诊断实例	226
9.3.1 两级信息融合的柴油机故障诊断模型	226
9.3.2 基于两级信息融合技术的曲轴轴承故障诊断	227
9.4 本章小结	230
第10章 高压共轨电控系统故障诊断与维修	231
10.1 电控系统故障检测程序和方法	231
10.1.1 故障诊断的基本原则	231
10.1.2 电控发动机故障诊断的基本方法	233
10.1.3 电控发动机故障诊断的基本流程	234
10.1.4 故障征兆的模拟方法	235
10.1.5 基本检查	236
10.2 汽车自诊断系统	237
10.2.1 自诊断原理与故障码	238
10.2.2 自诊断故障信息显示	238
10.2.3 第二代随车诊断系统(OBD-Ⅱ)	238
10.2.4 备用系统	241
10.3 故障码与数据流分析	242
10.3.1 故障码分析	242

10.3.2 数据流分析	249
10.4 维修常用工具和仪表	258
10.4.1 诊断跨接线	258
10.4.2 测试灯	259
10.4.3 测试针	261
10.4.4 万用表	261
10.4.5 诊断仪	267
10.5 本章小结	271
第 11 章 基于 MAS 的车辆故障诊断专家系统	272
11.1 Multi-Agent 技术与专家系统	272
11.1.1 Agent、MAS 的定义	272
11.1.2 专家系统的基本概念与设计原理	272
11.1.3 Multi-Agent 技术与专家系统	274
11.2 基于 MAS 的车辆故障诊断专家系统的体系结构	275
11.2.1 Multi-Agent 技术	275
11.2.2 基于 MAS 的军用车辆故障诊断专家系统体系结构	277
11.2.3 各 Agent 模块功能介绍	278
11.3 车辆故障诊断知识表达与专家系统知识库设计	280
11.3.1 汽车故障诊断知识的表示	280
11.3.2 知识库的建立与维护	285
11.4 推理机和解释系统的分析与设计	289
11.4.1 推理方式	289
11.4.2 基于案例的推理	289
11.4.3 基于规则的推理	291
11.4.4 基于神经网络的推理	292
11.4.5 解释系统的分析与设计	292
11.5 基于 MAS 的车辆故障诊断专家系统集成与应用举例	293
11.5.1 基于 MAS 的军用车辆故障诊断专家系统集成	293
11.5.2 基于 MAS 的车辆故障诊断专家系统应用举例	296
11.6 本章小结	302
参考文献	303

第1章 绪 论

1.1 柴油发动机故障诊断技术研究的意义

柴油机作为车辆的核心总成,广泛应用于公路运输、石油矿场、固定发电、铁路牵引、工程机械及船舶等领域,数量多、价格高。然而,其结构复杂、组成零部件多,如柴油机由五大系统(进气、供油、点火、冷却、润滑)和两大机构(配气机构、曲轴连杆机构)构成,而每个系统或总成都是由众多的零部件组成的;工作条件恶劣,包括进、压、功、排4个过程并涉及热力学、摩擦学、动力学、化学等领域,因此,发生故障的可能性较大。

开展柴油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,减少或避免因事故而造成的重大经济损失和人身伤害。特别是对于诸如发电厂、船舶等中大型机组,一般多是在高速、重载下运转,机组运行时的能量很大,一旦发生故障就可能造成严重破坏,甚至使整个机组报废。

(2) 能够帮助维修人员早期发现设备的异常症状,以便尽快查明故障原因,预测故障的影响,从而有计划、有针对性地按状态维修,即视情维修。这样可以在全局上延长检修周期,缩短检修时间,从而有效提高设备的运行,从总体上降低维修费用。

(3) 推动柴油机故障诊断技术的发展。快速判断故障状态、准确定位故障部位,是目前柴油机机械故障监测和诊断亟须解决的问题。通过运用现代电子技术、信号处理技术、图像处理技术、模式识别和信息融合等技术,实现对发动机常见机械故障的不解体诊断,可以降低柴油机的故障率,节省大量维修时间和维修工作量,明显地提高维修效率。通过对柴油机故障诊断技术的研究,可以对故障诊断技术的发展起到极大的推动作用。

1.2 柴油机常见的故障及故障诊断研究的内容

1.2.1 柴油机故障分类和常见的故障

柴油机结构复杂,工作环境恶劣,故障率较高,故障种类多。归纳起来,柴油机有如下几类故障:柴油机机械异响故障、燃油供给系统故障、电控系统故障、润滑系统故障、冷却系统故障及附件故障等,其中,柴油机机械异响是最常见的故障之一,当产生机械故障时,容易引起机件损坏,重则损坏发动机。常见的柴油机机械异响故障有如下几种:

(1) 曲轴轴承异响。由于曲轴轴承与轴颈的配合间隙过大,或固定螺栓松动,或轴承损坏等造成的曲轴轴承与轴颈相互撞击而出现的异响,振动最明显部位在气缸下部轴承座处。

(2) 连杆轴承异响。由于连杆轴承与连杆轴颈的配合间隙过大,或连杆螺栓松动,或轴承损坏等造成的连杆轴承与轴颈相互撞击而出现的异响,振动明显部位在气缸体下部。

(3) 活塞敲缸异响。由于活塞与气缸壁的配合间隙过大或连杆弯曲、扭曲所造成的活塞敲击气缸壁而出现的异响。

(4) 活塞销异响。由于活塞销与活塞销座孔,或活塞销与连杆小头销座孔的配合间隙过大所造成的活塞销敲击活塞销座孔而出现的异响。

(5) 气缸漏气响。由于发动机在做功行程中的部分高压气体从活塞环与气缸壁之间窜入曲轴箱冲击油底壳而发出的声响。

(6) 气门脚异响。由于气门脚间隙过大所造成的异响。

(7) 气门挺杆异响。由于气门挺杆与导管、气门杆与导管磨损松旷所造成的异响。

(8) 发动机附件异响。由于发动机附件不正常的技术状态引起机件互相撞击而产生的异响。

1.2.2 柴油机故障诊断研究的内容

故障诊断技术本质上就是一种给机器“看病”的技术。这其中包含“状态检测”和“故障诊断”两层意思。日本的丰田利夫将诊断分为简易诊断和精密诊断两种。状态检测即为简易诊断,是对机器健康状况的“初级诊断”,通过测取机器的某些特征参数,将测定值与规定的正常值进行比较,以判别机器工作是否正常。而故障诊断是要对机器产生故障的种类、原因、部位、严重程度等一一作

出判断,是对机器健康状况的“精密诊断”。

柴油机故障诊断的内容,体现在故障诊断的整个过程中,包括故障机理的研究、状态信息的采集、信号处理和故障特征提取、故障的诊断以及信息的存储与管理等内容。

基于机械故障的动力学机理研究的故障诊断技术,主要根据机械设备的力学特性,建立相应的动力学模型,从故障对系统动力学参数的影响来分析故障特性。状态信号是机械设备异常或故障信息的载体,选用一定的检测方法和检测系统采集最能表征诊断对象状态的信号,是故障诊断技术实施过程中不可缺少的环节。能够真实、充分地采集到足够数量的、客观反映诊断对象状况的状态信号,是故障诊断的基础。对于柴油机故障来说,特征提取是非常困难的也是非常关键的,采用适用于柴油机信号特点的理论和方法是确保提取内燃机故障信号特征的首要条件,现代信号理论及方法为柴油机故障信号的特征提取提供了有效的手段。柴油机故障诊断技术是以机器学习为基础的一门综合性技术,它的实质是内燃机运行状态的模式识别问题,因此,与信息科学、系统科学、人工智能、计算机技术相结合,将会推动诊断技术的发展。

总之,故障诊断技术是一门多学科的综合技术,在它所涉及的每一领域,都在取得日新月异的成果。故障诊断技术的全面发展与普及,必将使我国动力机械设备的运行、管理和维护达到一个新的水平。

1.3 柴油机故障诊断技术的现状和发展

由于柴油机各系统结构形式不同,其故障将引起不同的物理量发生变化,因此,柴油机状态监测与故障诊断方法有多种,主要有热力参数分析法、磨粒监测分析法、噪声分析法、瞬时转速法和振动分析法等。

在上述方法中,由于振动信号采集方便,不需要解体发动机,诊断速度快,能够实现在线测试,且由于传感器技术、信号特征提取技术、模式识别技术的快速发展,使故障诊断准确率大幅提高,因此振动分析法已经成为目前研究最多的一种诊断技术。

国外采用振动分析法进行故障诊断始于20世纪70年代后期,并逐步应用于航空发动机和机车柴油机。美国麻省理工学院1985年研制的“柴油机工作状态评价仪”,使用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)技术,分析振动与缸压信号,以时域特征形式给出柴油机的故障信息。美国通用电气公司运输部以此系统为核心,采用各类传感器测量柴油机振动、曲轴箱压力、转速、水温、润滑油温及油压等参数,形成了机车柴油机故障诊断专家系统。Barell. L 等

研究了内燃机缸盖的振动和声学测试方法,研究表明:缸盖振动信号与缸内状态有直接的对应关系,测量缸盖振动信号,可用于表征发动机的运行状态。美国福特汽车公司的 Samimy. B 利用时频分析技术对内燃机敲缸故障进行了诊断,Zoubir A. M. 等研究了柴油机敲缸问题的振动传感器测点优化配置,指出敲缸故障监测取决于选择检测信号的特征频率以及测点位置,O. Grodin 等通过缸盖振动信号来估计和控制发动机缸体内燃烧关键参数。

国内学者采用振动分析对柴油机故障诊断的研究始于 20 世纪 80 年代。武汉交通科技大学的周轶尘教授带领课题组做了大量基础性的研究工作,通过试验获得了发动机常见故障的振动信号,并进行了时域、频域特性分析,揭示了缸盖系统的激励和传递特性及几种典型磨损故障的模式识别方法,研制了 DCM-Ⅱ柴油智能诊断仪,实现了柴油机活塞-缸套磨损和气阀漏气等故障的不解体诊断;海军工程大学的黄映云、郭文勇等从机体振动等信号中提取出了可对缸套-活塞副磨损在线监测的信息;华中理工大学的杨叔子院士、西安交通大学的屈梁生院士和其他学者对柴油机振动信号产生的机理、传递特性以及振动分析在柴油机故障诊断中的应用进行了大量研究工作,取得了一批有价值的研究成果。

1.3.1 柴油机状态信号的检测方法

状态信号的检测是故障诊断的基础。因此,测试技术的每一次发展和进步,都直接对故障诊断的发展起推动作用。在柴油机故障诊断中主要使用的测试及诊断方法有:

(1) 振动测试及诊断应用。振动测试主要测量的参数为加速度、速度和位移。所用的传感器主要有电涡流传感器、磁电式传感器及压电式传感器等。

(2) 压力测试。通过进、排气系统的压力可判断缸内工作情况及缸的密封状况。测量燃油的流动压力可诊断燃油系统的状况。测量润滑油压力可直接反映出润滑系统密封性的好坏,特别是曲柄连杆轴承的密封程度。

(3) 转速测试。有两种主要方法:转速波动诊断法和无负载测功法。

柴油机曲轴的瞬时转速波动信号能反映机器的工作状态,通过对瞬时转速波动信号的分析可以得到机器运行状态和相关故障的丰富信息。正常工况下,各缸的动力性能基本一致,柴油机运转平稳,各缸瞬时转速波动虽有差异,但总在一个不大的范围内,并呈现某种规律性。但当某个气缸工作不正常时,动力的一致性遭到破坏,柴油机运转平稳性变差,转速波动信号会产生严重变形,据此可以判断其缸内工作过程的好坏。转速波动诊断法可对缸内工作情况进行判别,如对缸内熄火进行识别等。

(4) 光谱、铁谱测试。在机械故障诊断中,检测润滑油中铁的含量可间接

判定金属部件的磨损。在柴油机状态监测中,润滑油的铁谱及光谱分析是可行而有效的方法。铁谱和光谱在其监测功能上有各自的优势和不足,这是因为柴油机运动件含有多种材料的摩擦副,而每一对摩擦副又会出现各种不同的磨损状态。产生于不同摩擦副在不同的磨损状态下的磨粒,是以不溶的颗粒形式存在于润滑油中的。光谱可以准确地测定润滑油中磨损元素的含量,但不能了解其存在的形状,而且其监测灵敏度又受到磨粒本身粒度的影响,因此,无法判断磨损的类型;铁谱可以直观地了解磨粒的形状、大小和成分等重要的磨损信息,但对有色金属就不具有与铁系磨粒相同的灵敏度,而且分辨能力不如光谱分析仪。所以,联合采用铁谱及光谱技术,可以获得取长补短的效果。

(5) 声发射测试。声发射可用于在线测量发动机的连杆轴承故障,也可以通过测量柴油机燃烧压力的振荡共振频率来诊断燃油系统故障。

(6) 激光测试技术。基于激光照射在运动物体上散射的相干光和多普勒频移原理,已研制开发出检测和诊断故障的装置。其中,有用于诊断柴油机喷嘴孔口压降、旋转零件和曲轴扭振的激光测量仪。

(7) 声级测试。通过测试柴油机在运行中的噪声,可以识别噪声源,并对缸内的燃烧状况和配气机构故障进行诊断。

(8) 场测试。激光多普勒测试技术可用于柴油机燃烧场的测试分析。英国 OMETRON 公司已推出采用激光方法的全场振动测试分析仪器和采用红外线远距离扫描技术的全场应力测试系统,可以分析工作设备的整体振动或应力分布。

1.3.2 柴油机信号处理和故障特征提取方法

初始信号与故障征兆之间往往不存在直接的对应关系,故障信息通常混杂在大量背景噪声中。故障特征提取就是将初始信号进行维数压缩、形式变换、去除干扰、保留和增强有用信号、精化故障特征信息的过程。因此,信号模式的转换与特征的提取是分析故障的关键步骤和前提。这一技术领域近年来也取得了极大的进展。信号处理和故障特征提取的方式分为以下几种:

(1) 函数分析法。这种方法利用信号与特征之间的定量函数关系,通过数学分析的方法,直接得出特征量。最为典型的方法就是状态空间分析法。例如,在诊断机械结构是否完好时,首先建立结构的振动方程,进行结构模态分析,测取的信号作为状态方程的输出,再根据状态方程确定机械结构当前的特征参数。

(2) 调和分析法。自从 1965 年快速傅里叶变换(FFT)问世以来,调和分析在众多的应用领域获得了迅速发展,已经成为信息处理中最重要、最基本的技术。目前几乎所有的动态分析仪都是以此为核心进行信号处理的。所有以 FFT 为基础派生出来的分析方法均获得了极大的发展,例如周期图分析法、快

速卷积与反卷积、相关分析、相干分析、自谱、互谱、细化谱、倒频谱、传递函数、谱趋势分析和矢量监测图等。改进 FFT(AFFT)算法的提出,大大减少了传统 FFT 中泄漏和栅栏效应引起的误差,从而使基于相位信息的故障诊断成为可能。在此基础上,提出了全息谱方法、提纯轴心轨迹法以及轴心轨迹复杂度分析法等一系列新方法。此外,相位分析技术也包括希尔伯特(Hilbert)变换的应用,用于对信号的调制进行包络分析、相位解调和瞬时频率的计算等。

应用于非平稳的时变信号或非线性信号的分析方法研究也有很大进展,尤其是信号的时频展开。其中,获得广泛应用的有 Gabor 提出的窗口傅里叶变换和 Wigner 提出的 Wigner 分布。这些方法对于刻画信号在瞬时的频谱结构有良好的效果,同时经过修正后重建的信号可以更有效地表征信号的特征。

调和与分析在理论和应用领域的最新进展是小波分析。20 世纪 80 年代后期,在信号时频局部化特性的研究基础上,建立了小波理论。这一理论不仅成为数学上调和分析理论的重大进展,而且迅速在诸多领域中获得了广泛的应用。目前,这一技术的发展方兴未艾,在机械设备故障诊断中的应用已取得重要成果。

(3) 参数模型法。这一方法是根据被测系统的特性建立起参数模型,再利用所获得的信号计算出模型的特征参数,根据参数模型可以对系统进行动态分析以及进行趋势预测与控制。目前,获得广泛应用的参数模型法之一就是时序模型的诊断方法。这是一种对信号进行统计学意义上的处理与分析的数学方法。它依据时间序列信号,建立差分方程形式的数学模型,这种模型是对被测系统的时域描述,反映了系统的运行状态。另一类参数模型是现代控制论中的系统辨识差分方程。当系统的输入可知时,这种差分方程可以提供比时序模型更完备的信息。近年来,这一类方法仍在不断完善,出现了诸如基于最大熵准则、最小均方准则、最大似然准则和最小交叉准则等的大量算法。参数模型法的特点是几乎能将蕴含在采样数据中的全部信息凝聚在少数的几个模型参数之中,因而能对系统作出精练而有效的数学表示。它的主要优点是计算信号的统计特性时没有对采样数据的加窗影响,因而不存在频谱的泄漏,频率定位准确。

1.3.3 柴油机故障模式识别技术

柴油机的故障诊断,归根到底就是故障状态的模式识别,即根据提取出的柴油机的特征信息,判明柴油机的技术状况,确定故障部位及原因。故障模式识别方法的一些成果已经成功应用于柴油机的故障诊断中。当前的研究热点主要集中于神经网络、专家系统、粗糙集、模糊理论和支持向量机等几个方面理论与方法的应用。