

发动机结构振动与 故障诊断理论技术

徐玉秀 杨文平◎著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

发动机结构振动与 故障诊断理论技术

徐玉秀 杨文平 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书从发动机系统动力学分析、复杂系统故障诊断的基点出发,探讨复杂机械系统动力学分析及故障诊断的理论、技术方法,并应用于工程实例。全书分上、中、下三部分,共 23 章,包括发动机结构的动力学建模、故障诊断方法和风力发电机组的故障分析,以及实际工程应用。

本书的出版由天津市自然科学基金项目“基于混沌理论的复杂旋转机械故障诊断技术研究”、“基于风力机组振动特性的叶片损伤检测与诊断”和天津工业大学研究生课程优秀教材建设资助项目“复杂机械系统振动与故障诊断”资助。书中内容主要来源于上述课题的研究成果,同时也参考了国内外相关学科领域有关的研究成果和专著。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

发动机结构振动与故障诊断理论技术 / 徐玉秀, 杨文平著. —北京: 电子工业出版社, 2015.7

ISBN 978-7-121-26535-8

I. ①发… II. ①徐… ②杨… III. ①发动机—结构振动 ②发动机—故障诊断 IV. ①TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 149008 号

责任编辑: 徐 静 齐 岳 特约编辑: 刘 双

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 18.5 字数: 414 千字

版 次: 2015 年 7 月第 1 版

印 次: 2015 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 65.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言



结构动力学分析与设备故障诊断技术是一项正在不断发展和完善的新技术，在现代化大生产中，它在保障生产正常进行，防止发生突发事件，节约维修费用等方面发挥着非常重要的作用。随着信号处理技术的不断完善，设备故障诊断技术得到了较快的发展，新的时频分析方法不断涌现，增加了对振动信号分析的准确性，奠定了对机械设备实施故障诊断的坚实基础。

车用发动机正朝着降低油耗、提高可靠性和耐久性、减排、降噪、减小摩擦和机械损失、适度增压，同时整体振动和噪声辐射维持在较低水平的趋势发展，对发动机结构设计方法和摩擦学设计方法都是很大的挑战。目前内燃机振动诊断在方法上仍停留在“设置故障→采集样本→整理分析→提取特征→形成方法”的以归纳经验知识为主的低级阶段，远远不能满足实际需要，亟待完善和提高发动机故障诊断技术机理的研究。开展多领域仿真研究，有利于提高机械故障诊断技术的理论水平，有利于形成完整的理论研究方法体系，有利于相关工程故障诊断的组织实施。

风力发电机组由于运行环境的恶劣，易受复杂变载荷作用，导致风力发电机组整机的振动情况复杂而多变，对所产生的故障的诊断还难有系统的准确性和有效性，对风电机组状态监测和故障诊断技术研究还需要不断探索与完善。

随着科学技术的发展，对于更复杂的机械设备，出现更复杂的故障将会进一步推动故障诊断的新理论、新技术方法的出现。本书对此做了一些探索性的研究。

本书内容主要来源于天津市自然科学基金项目“基于混沌理论的复杂旋转机械故障诊断技术研究”和“基于风力机组振动特性的叶片损伤检测与诊断”的研究成果，同时也参考了国内外相关学科领域有关的研究成果和专著。本书从发动机系统动力学分析、复杂系统故障诊断的基点出发，探讨复杂机械系统动力学分析及故障诊断的理论、技术方法，并应用于工程实例。本书的出版得到了天津工业大学研究生课程优秀教材建设资助项目“复杂机械系统振动与故障诊断”的资助。

全书分上、中、下三部分，共 23 章，包括发动机结构的动力学建模、故障诊断

方法和风力发电机组的故障分析,以及实际工程应用。第1章和第2章综述内燃机结构振动与仿真分析以及发动机故障诊断的问题;第3章介绍直列六缸发动机曲柄滑块机构的动力学分析;第4章介绍发动机一维气体流动热力学计算方法;第5章介绍活塞二阶运动计算方法;第6章研究柴油机机体有限元建模与模型验证分析;第7章阐述活塞组横向冲击下机体表面振动分析与验证;第8章介绍发动机结构振动及其振动传递路径分析;第9章对发动机表面振动信号特性进行分析;第10章研究发动机振动烈度的频域估计方法;第11章叙述基于瞬时转速的发动机故障特征提取;第12章研究配气系统振动的时域与频域特征分析;第13章介绍用小波分析发动机振动的分析方法;第14章介绍匹配追踪法的发动机多故障综合诊断分析;第15章介绍发动机多故障综合诊断方法;第16章研究风力发电机组齿轮箱故障诊断问题;第17章介绍风电机组传动系统故障特征及诊断方法;第18章介绍大型风电机组传动系统故障诊断实例分析;第19章介绍基于LabVIEW的风电机组传动链故障诊断系统设计与开发;第20章介绍风力机叶片振动信号的获取及特性分析;第21章介绍风力机叶片故障特征量的提取及故障分析;第22章介绍基于支持向量机的叶片故障模式识别;第23章介绍旋转与往复式机械故障诊断系统的建立。

本书是笔者与合作者杨文平教授对所承担的天津市自然科学基金项目的研究成果经过认真筛选、取舍后而成稿的。天津工业大学研究生赵先进、吕艳春、严俊、马新华和英国曼彻斯特大学机械航空土木专业研究生杨帆在课题研究过程中做出了重要贡献。此外,天津职业技术师范大学机械工程学院的蔡玉俊教授在课题研究过程给予了无私的帮助。

本书试图为机械故障诊断领域的研究者、工程技术人员及相关专业的研究生提供参考。本书以应用为目的,阐述了结构动力学分析、故障诊断技术在机械故障诊断中应用的几个方面,但由于在该领域研究的时间还很短,许多问题尚需进一步探讨,加之作者水平所限,疏漏和不当甚至错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

徐玉秀

2015.4.1

目 录



上 部

第 1 章 内燃机结构振动与仿真分析简介	3
1.1 引言	3
1.2 内燃机结构振动与活塞动力学研究概况	3
1.2.1 内燃机结构振动分析研究概况	4
1.2.2 内燃机结构振动反问题简述	4
1.2.3 内燃机活塞动力学研究概况	5
1.3 重要意义与主要内容	7
1.3.1 重要意义	7
1.3.2 主要内容	7
1.3.3 仿真模型系统的确认与验证	8
第 2 章 发动机故障振动问题的技术路线分析	9
2.1 引言	9
2.2 发动机故障诊断基本问题	9
2.3 解决问题的技术路线	11
第 3 章 直列六缸发动机曲柄滑块机构动力学	13
3.1 引言	13
3.2 曲柄滑块机构理论模型	14

3.2.1	曲柄滑块机构运动分析·····	14
3.2.2	曲柄滑块机构作用力分析·····	16
3.2.3	发动机曲柄滑块机构动力学方程·····	16
3.2.4	轴承摩擦力矩特性·····	17
3.2.5	外载荷特性·····	18
3.2.6	活塞组作用力·····	18
3.2.7	工质作用力·····	19
3.3	计算模型·····	19
3.3.1	算法设计·····	19
3.3.2	算法实施·····	20
3.4	数据参数·····	20
3.5	模型验证·····	21
3.5.1	运动副作用力特征的定性检查·····	21
3.5.2	稳态瞬时转速波动检验·····	22
第 4 章	发动机一维气体流动热力学计算·····	24
4.1	引言·····	24
4.2	理论模型·····	24
4.2.1	系统基本方程·····	25
4.2.2	缸内传热模型·····	27
4.2.3	燃烧放热模型·····	28
4.2.4	气阀流量特性·····	29
4.2.5	变工况燃烧模型参数计算·····	30
4.2.6	涡轮增压系统匹配计算·····	30
4.3	计算模型·····	31
4.3.1	算法设计·····	31
4.3.2	稳定工况获取·····	32
4.3.3	稳定工况热力学系统求解结果·····	32
4.4	数据参数·····	33
4.5	模型验证·····	34
4.5.1	外特性验证·····	34
4.5.2	对仿真柴油机效率的定性考察·····	34

第 5 章 活塞二阶运动计算	36
5.1 引言	36
5.2 理论模型	36
5.2.1 考虑惯性的光滑型面下活塞二阶运动方程	39
5.2.2 活塞二阶运动求解意义	43
5.3 算法模型	43
5.3.1 求解过程	44
5.3.2 压力分布求解	44
5.3.3 动力学方程求解迭代格式改进	47
5.4 几何数据参数有效估计	49
5.4.1 几何及质量参数	49
5.4.2 活塞裙部型线	49
5.4.3 数值求解活塞二阶运动的有关参数	50
5.5 模型确认与验证	50
5.5.1 模型验证	50
5.5.2 模型确认	51
第 6 章 柴油机机体有限元建模与模型验证	53
6.1 引言	53
6.2 机体有限元建模	54
6.2.1 单元和单元属性	54
6.2.2 子结构划分与结合面连接方式	54
6.2.3 有限元建模和结构简化的处理	55
6.2.4 支撑约束处理	55
6.2.5 模型动力响应求解方法	56
6.2.6 模型的检查和验证	56
6.3 柴油机机体锤击试验布置与实施	57
6.4 模态参数时域辨识	58
6.4.1 ERA 法概述	58
6.4.2 算法实现	60
6.4.3 模态参数辨识结果评估	60
6.4.4 柴油机频带阻尼分布估计	61
6.5 EMA 与 FEM 结果比较	61

第 7 章 活塞组横向冲击下机体表面振动分析与验证	63
7.1 引言	63
7.2 理论模型	64
7.2.1 基本假定	64
7.2.2 机体结构动力学分析模型	65
7.3 计算模型	67
7.3.1 载荷组划分	67
7.3.2 工作情况下的阻尼估计	69
7.3.3 稳态工况热力学参数获取	70
7.3.4 求解过程	71
7.4 仿真模型确认与验证	71
7.4.1 与实际测试信号在频域上的比较	71
7.4.2 与实际测试信号在时域上的比较	72
7.4.3 对实测波形特征点性质的确认	73
7.5 不同工况与参数下活塞横向冲击引起表面瞬态响应特性研究	74
7.5.1 冲击特性随转速的变化	74
7.5.2 不同转速时活塞对缸套主副推力侧作用力最大增量的变化	75
参考文献	77

中 部

第 8 章 发动机结构振动及其振动传递路径分析	83
8.1 引言	83
8.2 直列六缸发动机表面振动分析	83
8.3 直列六缸发动机振动的激振源及其特性分析	84
8.3.1 燃烧激振源	85
8.3.2 活塞侧向敲击激振	85
8.3.3 气门撞击激振	86
8.4 柴油机振动传递路径分析	86
第 9 章 发动机表面振动信号特性分析	88
9.1 引言	88
9.2 柴油机表面振动信号的采集	88

9.2.1 发动机测试实例	89
9.2.2 传感器及测试仪的选取	89
9.2.3 振动测点位置	89
9.2.4 采样频率的确定	90
9.3 发动机几种常见故障的描述	91
9.3.1 燃烧冲击	91
9.3.2 活塞侧向敲击	91
9.3.3 进、排气门间隙异常	91
9.4 发动机表面振动信号特性	92
9.4.1 时域、频域特性	92
9.4.2 循环波动特性	92
9.4.3 非平稳时变特性	92
第 10 章 发动机振动烈度的频域估计方法	93
10.1 建立振动烈度频域估计表达式	93
10.2 对振动数据的要求	95
10.3 基本公式的数值验证	95
10.4 振动烈度算法设计	97
10.5 方法的验证	98
第 11 章 基于瞬时转速的发动机故障特征提取	100
11.1 发动机瞬时转速原理	100
11.2 发动机瞬时转速特征量提取	100
11.3 瞬时转速信号的数据处理与实验结果分析	101
11.3.1 瞬时转速脉冲信号的测试分析	102
11.3.2 瞬时转速谐波信号的测试分析	105
第 12 章 配气系统振动的时域与频域分析	111
12.1 发动机配气系统振动信号采集	111
12.2 发动机振动信号时域分析	112
12.2.1 峰峰值法的振动信号特征提取	112
12.2.2 信号多测点信息融合诊断分析	114
12.2.3 实例测试分析	115

12.3	发动机振动信号频域分析	117
12.3.1	基于 STFT 的发动机振动信号特征提取	117
12.3.2	STFT 功率谱能量的振动信号分析	120
12.3.3	实测信号分析	122
12.3.4	时域冲击特征识别	130
12.3.5	冲击特征参数提取	131
第 13 章	基于小波分析的发动机振动分析	133
13.1	傅里叶分析与小波分析	133
13.1.1	Fourier 分析	133
13.1.2	小波分析原理简介	134
13.1.3	二进小波和二进小波变换	135
13.2	小波多分辨率分析	136
13.2.1	正交小波	136
13.2.2	正交多分辨分析	136
13.2.3	Doubechies 紧支小波	137
13.3	正交小波包分析	138
13.3.1	小波变换与时-频分析	138
13.3.2	正交小波包	139
13.3.3	小波包算法	139
13.3.4	利用小波包进行信号的消噪处理	140
13.3.5	利用小波包分析进行信号特征提取	143
13.4	Laplace 基波相关性的特征参数提取	145
13.4.1	Laplace 小波及其特性	145
13.4.2	基于 Laplace 小波提取进、排气门落座冲击响应特征参数	146
第 14 章	匹配追踪法的发动机多故障综合诊断	152
14.1	匹配追踪法的故障特征提取	152
14.1.1	信号的展开与内积	152
14.1.2	匹配追踪信号展开	153
14.1.3	匹配追踪时频表示与分布	155
14.1.4	匹配追踪法的故障实例分析	156
14.2	匹配追踪法的多故障综合诊断	160

14.2.1 多故障综合诊断的统一算法	161
14.2.2 信号最优化匹配追踪分解算法	161
14.3 多故障实例分析	162
14.3.1 多缸进气门间隙故障	162
14.3.2 多缸排气门间隙故障	164
14.3.3 多缸进气门、排气门间隙故障的诊断	165
14.3.4 燃烧冲击及活塞敲缸冲击故障诊断	167
第 15 章 发动机多故障综合诊断方法	169
15.1 马氏距离方法对冲击类型的识别	169
15.1.1 马氏距离的定义	169
15.1.2 多类马氏距离判别	169
15.1.3 实例分析	170
15.2 BP 神经网络在发动机配气系统故障诊断中的应用	172
15.2.1 神经元模型	173
15.2.2 三层神经网络的基本结构	173
15.2.3 故障诊断的神经网络设计	174
15.2.4 神经网络分类识别	176
参考文献	183

下 部

第 16 章 风力发电机组齿轮箱故障诊断	187
16.1 风力发电机组状态监测及故障诊断国内外发展现状	187
16.2 大型风电机组传动系统及典型故障概述	188
16.2.1 大型风力发电机组基本结构	188
16.2.2 大型风力发电机组传动系统	189
16.2.3 大型风电机组传动系统典型故障	191
第 17 章 风电机组传动系统故障特征及诊断方法	195
17.1 转子故障机理与特征	195
17.1.1 转子不平衡	195
17.1.2 转子弯曲	196
17.1.3 转子支承部件松动	197

17.1.4	碰摩故障	200
17.1.5	转子不对中	201
17.2	滚动轴承故障机理与特征	203
17.2.1	滚动轴承典型结构	203
17.2.2	滚动轴承特征频率	204
17.2.3	轴承的固有振动频率	204
17.2.4	滚动轴承运行故障特征	205
17.3	齿轮故障机理与特征	208
17.3.1	齿轮的简化振动模型	208
17.3.2	齿轮振动的啮合频率调制现象	209
17.3.3	齿轮故障振动特征	210
17.4	故障特征提取方法	212
17.4.1	倒频谱	212
17.4.2	细化谱分析	214
17.4.3	解调谱	215
第 18 章	大型风电机组传动系统故障诊断分析	217
18.1	风电机组测点说明	217
18.2	电机转子故障分析	218
18.3	齿轮故障分析	221
18.4	轴承故障分析	230
第 19 章	基于 LabVIEW 的风电机组传动链故障诊断系统设计与开发	237
19.1	LabVIEW 简介	237
19.2	数据分析与故障诊断系统的设计开发	238
19.2.1	数据读取回放模块	238
19.2.2	转子信号分析模块	239
19.2.3	齿轮信号分析模块	240
19.3	数据分析和故障诊断系统分析实例	240
第 20 章	风力机叶片振动信号的获取及特性分析	244
20.1	基于机组振动的叶片振动信号获取	244
20.1.1	风力机叶片模态试验	244
20.1.2	风力机模态试验结果	247

20.1.3 测点位置的选择	252
20.1.4 风力机叶片故障设置	253
20.1.5 风力机叶片振动信号测试	253
20.2 风力机叶片振动信号特性分析	254
20.2.1 叶片常见故障	254
20.2.2 叶片不同故障状态下信号的振动特性	254
第 21 章 风力机叶片故障特征量的提取及故障分析	259
21.1 风力机叶片故障特征量提取	259
21.1.1 振动信号能量变化率计算	259
21.1.2 特征值的提取方法	260
21.1.3 特征值的提取过程	260
21.2 风力机叶片故障的分析	261
第 22 章 基于支持向量机的叶片故障模式识别	265
22.1 支持向量机 (SVM) 分类学习算法原理简介	265
22.1.1 支持向量机分类 (SVC) 算法	265
22.1.2 支持向量机 (SVM) 的核函数	268
22.2 支持向量机 (SVM) 数据前处理	269
22.2.1 数据归一化	269
22.2.2 数据降维	269
22.2.3 参数寻优	269
22.3 基于支持向量机的叶片故障诊断	270
第 23 章 旋转与往复机械故障诊断系统	273
23.1 系统结构	273
23.2 诊断系统的安装要求、软件特点和实现过程	274
23.3 系统实现	275
23.4 系统应用结果	276
参考文献	278

上 部

第 1 章

内燃机结构振动与仿真分析简介



1.1 引言

车用柴油机的发展趋势^[1]：降低油耗；提高可靠性和耐久性；减排；降噪；减小摩擦和机械损失；适度增压。这意味着零部件和结构必须要能够承受更大的机械负荷和热负荷，并且保持相互之间好的匹配或润滑状态，同时整体振动和噪声辐射维持在较低水平。这对现有的柴油机机械、结构设计方法和摩擦学设计方法都是很大的挑战。众所周知，现有设计方法是最近 30 多年来在改进柴油机的实践中逐渐形成的，是在广泛地考虑本领域内各种重要因素基础上进行的优化设计，以至于在各自领域内已经比较系统。所以，应对挑战的策略，一方面是应用新技术，特别是新材料、新工艺、有效的控制技术（振动主动控制、摩擦学主动控制如主动流体动力润滑），另一方面就是推进各领域设计方法的融合，实现更高层次的优化设计。本书上部限于讨论后一方面。

目前，柴油机（或内燃机）的多领域整体优化已经在世界范围内引起学术界和产业界的重视，并且许多国家已在大力研究。从技术科学和仿真科学的发展来看，要取得关键性的突破还需要一段时间。不过，可能较早取得突破的就是动力学、结构动力学和摩擦学的综合优化设计。这三个领域的结合本身就有重大意义，也将为整体优化设计的最终实现打下坚实的基础。

1.2 内燃机结构振动与活塞动力学的研究概况

内燃机的结构振动^[2]，是具有弹性的系统构件在燃烧气体力和惯性力作用下产生的机