

机械故障诊断学术专著

*Research on Failure Mechanism and
Diagnosis Method of Reciprocating Compressor*

往复压缩机故障机理与 诊断方法研究

肖顺根 唐友福 著



东北大学出版社
Northeastern University Press

往复压缩机故障机理与 诊断方法研究

ISBN 978-7-5517-2383-1



9 787551 723831 >

定价：75.00元

往复压缩机故障机理与 诊断方法研究

肖顺根 唐友福 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 肖顺根 唐友福 2019

图书在版编目 (CIP) 数据

往复压缩机故障机理与诊断方法研究 / 肖顺根, 唐友福著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2019. 12

ISBN 978-7-5517-2383-1

I. ①往… II. ①肖… ②唐… III. ①往复式压缩机—故障诊断—研究 IV. ①TH457.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 282414 号

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印刷者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印张: 19.5

字数: 414 千字

出版时间: 2019 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2019 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 汪彤彤

责任校对: 曲直

封面设计: 潘正一

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-2383-1

定价: 75.00 元

前言

本专著是为了揭示往复压缩机装备间隙碰磨故障机理和阐明基于广义局部频率的往复压缩机故障特征提取方法而编写的。本专著分为上下篇：上篇阐述了往复压缩机间隙碰磨故障机理内容，下篇阐述了基于广义局部频率的故障诊断方法内容。

由于传动机构隐藏于机体内部，间隙碰磨故障信息以何种机理传递至机体尚不清晰，至今也未找到有效的方法来揭示机体响应信号所隐含的碰磨机制。因此，在本专著的上篇中，深入研究了传动机构间隙碰磨的动力学特性，弄清了间隙对传动机构动力学特性的影响机制，揭示了间隙碰磨诱发机体振动的动力学演变规律，为往复压缩机动力学和故障诊断研究提供了理论基础。在本专著的上篇中，主要开展了以下五个方面研究：

- ① 针对旋转铰间隙和滑动铰偏心间隙耦合的传动机构动力学问题，探索了两类间隙对传动机构动力学特性的影响规律。
- ② 在考虑活塞杆的弹性变形，且忽略十字头在偏心滑动间隙内的微转动自由度的基础上，提出了半弓式单形态碰磨动力学问题。
- ③ 在考虑活塞杆的弹性变形，以及十字头在偏心滑动间隙中存在多种运动形态的基础上，提出了半弓式多形态碰磨动力学问题。
- ④ 以十字头、刚性活塞杆和活塞的三联体构件为研究对象，提出了跷跷板式耦合碰磨动力学问题。
- ⑤ 通过考虑柔性活塞杆的演变形状，在跷跷板式耦合碰磨形态的基础上，提出了S式耦合碰磨动力学问题。

上述研究揭示了传动机构间隙碰磨的动力学响应规律，挖掘了通过碰磨形态和碰磨接触力的演变信息来表征振动响应规律的深层次机制，为往复压缩机间隙碰磨振动特征提取提供了理论依据，为工程应用提供了指导思路。

振动信号的特征提取一直是往复机械设备状态监测及故障诊断领域的研究前沿，特别是大型复杂装备系统早期故障、微弱故障及多源复合故障的非线性非平稳信号特征提取问题存在着很大的困难，已成为该领域最具挑战性的研究热点。基于对频率内涵本质的重新考察和认识，本专著的下篇提出了广义局部频率新概念，深入开展了适于非线性非平稳信号故障特征提取方法研究，并被成功地应用于往复压缩机组多源冲击振动故障特征的提取。在本专著的下篇中，主要开展了如下五个方面研究工作：

① 提出了广义局部频率新概念及其定义,通过构造广义局部频率的频域和时频域表达方法,使其在兼容全局频率和瞬时频率优势的同时,克服了全局频率概念只对周期信号才具有物理意义而无法描述频率及幅值随时间变化的非周期信号特征的缺陷,弥补了瞬时频率只对窄带信号才能给出合理物理解释而损失众多大尺度频率信息的不足。

② 提出了基于自适应波形分解的广义局部频率时频分析方法,实现了多分量非平稳信号的广义局部频率时频特征提取,摆脱了现有时频分析方法依赖先验知识将信号按照基函数展开思想的束缚,具有良好的自适应性。

③ 提出了基于广义局部频率的频域分析方法,以 Duffing 系统为对象,揭示了系统演化过程中的频域分岔现象,克服了功率谱分析时产生的虚假频率信息,有效地表征了不同系统状态下非线性时间序列频域结构特点及分布规律。

④ 应用 Lempel-Ziv 复杂度方法,定量分析了广义局部频率时频特征的复杂性,揭示出的信号时频结构相对于时域结构更加简洁,物理意义更加明确,更能够准确地辨识各信号特征类型。

⑤ 针对往复压缩机组多源冲击振动信号故障特征难以提取的问题,以典型气阀故障为主要对象,重点开展基于自适应波形分解的广义局部频率频域与时频域特征提取方法研究,揭示不同故障类型振动信号的频率分布及结构规律,通过与 HHT 时频分析结果进行对比,进一步验证所提方法的有效性和准确性。

本专著分为上下两篇,共 11 章,由肖顺根和唐友福撰著。撰著工作安排为:宁德师范学院肖顺根撰著第 1~6 章、第 10 章(字数 310 千字),东北石油大学唐友福撰著第 7~9 章、第 11 章(字数 100 千字)。

上海大学刘树林教授审阅了本专著,并提出了许多宝贵的意见和建议,为本专著质量的提高给予了很大帮助;国家自然科学基金“往复压缩机十字头滑变侧向力传递故障信息机理及诱发机体振动机制”(51575331)、“新能源汽车电机驱动系统的设计与智能制造协同创新中心”(2017Z01),福建省新能源汽车电机行业技术开发基地等项目给予了本专著经费支持;东北大学出版社的编审人员亦为本专著的出版花费了大量心血,我们在此一并致以衷心的感谢。

限于我们的水平和时间,本专著中难免存有漏误或者不当之处,敬请机械故障诊断界学者不吝指正。

著者

2019年9月30日

目 录

上篇 往复压缩机传动机构间隙碰磨机理研究

第 1 章 绪论	3
1.1 研究背景与意义	3
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 往复压缩机间隙碰磨研究现状	6
1.2.2 旋转铰间隙碰磨研究现状	7
1.2.3 滑动铰间隙碰磨研究现状	12
1.2.4 间隙碰磨系统非线性研究现状	13
1.2.5 非线性时间序列分析的研究概况及发展趋势	14
1.2.6 非平稳信号处理方法的研究概况及发展趋势	17
1.2.7 频率特征提取方法的研究及应用概况	25
1.3 本专著主要研究思路	26
第 2 章 含两类间隙的传动机构动力学特性分析	29
2.1 引言	29
2.2 含两类间隙的传动机构动力学模型	29
2.2.1 名词术语定义	29
2.2.2 时变载荷模型等效	31
2.2.3 运动学方程的建立	32
2.2.4 动力学方程的建立	39
2.3 数值仿真与动力学响应分析	41
2.3.1 旋转铰间隙的响应规律	41
2.3.2 偏心滑动间隙的影响规律	44
2.3.3 曲轴转速的影响规律	46

2.4	非线性特性评价	49
2.5	本章小结	54
第3章 半弓式单形态碰磨的影响机制		55
3.1	引言	55
3.2	半弓式单形态碰磨问题的提出	55
3.2.1	问题描述	55
3.2.2	十字头跳跃与柔性活塞杆的关系	57
3.2.3	滑变碰磨接触力模型	60
3.2.4	半弓式单形态碰磨动力学方程	64
3.3	不同参数对半弓式单形态碰磨的影响机制	67
3.3.1	影响碰磨的参数	67
3.3.2	偏心滑动间隙的影响	69
3.3.3	柔性活塞杆上提力的影响	75
3.3.4	时变载荷的影响	80
3.4	半弓式单形态碰磨的稳定性	85
3.5	本章小结	90
第4章 半弓式多形态碰磨动力学演变规律研究		92
4.1	引言	92
4.2	半弓式多形态碰磨问题的提出	92
4.2.1	问题描述	92
4.2.2	含偏心间隙的滑动关节多形态碰磨模型	94
4.2.3	半弓式多形态碰磨动力学方程	99
4.3	多形态碰磨动力学特性评价	100
4.3.1	不同偏心滑动间隙的动力学行为	101
4.3.2	时变载荷对碰磨形态的演变规律	104
4.3.3	活塞杆刚度的影响	107
4.4	动力学的非线性分析	110
4.5	本章小结	113
第5章 跷跷板式耦合碰磨动力学规律探索		115
5.1	引言	115
5.2	跷跷板式耦合碰磨问题的提出	115
5.2.1	问题描述	115

5.2.2	跷跷板式耦合碰磨形态	117
5.2.3	跷跷板式耦合碰磨接触力模型	123
5.2.4	跷跷板式耦合碰磨动力学方程	126
5.3	跷跷板式耦合碰磨动力学特性分析	131
5.3.1	研究设想验证	132
5.3.2	耦合碰磨动力学演变规律	133
5.3.3	不同偏心滑动间隙量的碰磨响应机制	137
5.4	跷跷板式耦合碰磨动力学系统稳定性分析	141
5.5	本章小结	146
第 6 章 S 式耦合碰磨机理研究		148
6.1	引言	148
6.2	S 式耦合碰磨问题的提出	148
6.2.1	问题描述	148
6.2.2	S 式耦合碰磨形态	150
6.2.3	S 式耦合碰磨接触力模型	157
6.2.4	非线性耦合碰磨动力学方程	161
6.3	数值仿真与结果分析	164
6.3.1	耦合碰磨形态规律分析	164
6.3.2	不同偏心滑动间隙对耦合碰磨形态的影响规律	169
6.4	混沌现象辨识	173
6.5	本章小结	177
下篇 基于广义局部频率的往复压缩机故障特征提取方法研究		
第 7 章 广义局部频率的基本原理及算法研究		181
7.1	引言	181
7.2	全局频率定义及其局限性分析	182
7.2.1	全局频率定义	182
7.2.2	全局频率局限性分析	183
7.3	瞬时频率定义及其局限性分析	185
7.3.1	瞬时频率定义	185
7.3.2	瞬时频率局限性分析	187
7.4	广义局部频率定义及其适用性分析	190

7.4.1	广义局部频率定义	190
7.4.2	广义局部频率的频域和时频域构造方法	192
7.4.3	广义局部频率适用性分析	194
7.5	本章小结	197
第8章 非平稳信号的广义局部频率时频域分析		199
8.1	引言	199
8.2	时频分析技术及其特性研究	200
8.2.1	线性时频分析	200
8.2.2	双线性时频分析	202
8.2.3	参数化时频分析	203
8.2.4	自适应分解时频分析	204
8.3	广义局部频率时频分析方法研究	210
8.3.1	AWD 分解原理及算法	210
8.3.2	基于 AWD 分解的广义局部频率时频分析	211
8.4	基于 AWD 分解与互信息法融合的降噪方法研究	216
8.4.1	互信息法	216
8.4.2	基于 AWD 和互信息的融合降噪方法	217
8.5	本章小结	218
第9章 非线性时间序列的广义局部频率频域分析		220
9.1	引言	220
9.2	Duffing 系统混沌状态辨识方法研究	221
9.2.1	Duffing 系统混沌状态的理论判据	221
9.2.2	Duffing 系统混沌状态判别的数值判据	222
9.3	Duffing 系统非线性时间序列的广义局部频率频域分析	225
9.3.1	基于功率谱的频域特征提取	225
9.3.2	基于广义局部频率的频域特征提取	227
9.4	混沌时间序列的频率分布及结构特性研究	229
9.4.1	频率调制特性	229
9.4.2	频率调制的相似性	231
9.5	本章小结	232
第10章 广义局部频率时频特征的复杂测度分析		234
10.1	引言	234

10.2 基于 Lempel-Ziv 复杂测度的复杂信号非线性检测	235
10.2.1 LZC 原理及算法	235
10.2.2 非线性时间序列的 LZC 特性	237
10.2.3 不同信噪比下时间序列的 LZC 特性	238
10.3 广义局部频率时频特征复杂测度分析	239
10.3.1 非平稳信号的广义局部频率时频特征 LZC 分析	240
10.3.2 不同信噪比下广义局部频率时频特征的 LZC 分析	242
10.4 应用实例分析	243
10.4.1 滚动轴承振动信号时域 LZC 分析	245
10.4.2 滚动轴承振动信号广义局部频率时频特征 LZC 分析	248
10.5 本章小结	250
第 11 章 广义局部频率分析方法在往复压缩机组故障特征提取中的 应用	252
11.1 引言	252
11.2 往复压缩机典型故障振动信号特性分析	253
11.2.1 典型机械故障及其原因分析	253
11.2.2 振动信号特性分析	254
11.2.3 典型故障振动信号测试实验研究	256
11.3 基于广义局部频率的气阀振动信号故障特征提取	257
11.3.1 基于 AWD 分解的时域特征提取	258
11.3.2 基于广义局部频率的频域特征提取	260
11.3.3 基于广义局部频率的时频特征提取	263
11.4 广义局部频率时频故障特征 LZC 分析	265
11.4.1 降噪预处理分析	265
11.4.2 气阀振动信号的时域 LZC 分析	266
11.4.3 气阀振动信号的广义局部频率时频特征 LZC 分析	268
11.5 本章小结	269
参考文献	271

上篇

往复压缩机传动机构间隙碰磨机理研究

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

往复压缩机是一种典型的往复机械系统,包含多个转动副和移动副关节。在实际工程中,运动副间隙不可避免,主要原因有三个方面:第一,为了实现旋转铰和滑动铰运动,设计中特预留了规则的装配间隙;第二,运动副各个关节零部件的设计和制造中存在难以避免的精度误差;第三,运动副自身磨损引起的非规则间隙。显然,不论何种间隙,均会对往复压缩机传动机构的动力学特性造成不良的影响,主要表现为:① 过大间隙导致往复压缩机十字头和活塞的实际运动轨迹与期望运动轨迹之间产生偏差,进而降低往复压缩机工作性能和运动精度,甚至导致往复压缩机失效。② 由于间隙存在,往复压缩机连杆的大头瓦和小头瓦两个旋转铰(如图 1.1 所示)、十字头与滑道以及活塞与气缸之间的两个滑动铰(如图 1.2 所示)都易产生碰磨。碰磨接触力使往复压缩机产生剧烈的振动,将引起多种故障隐患,进而降低往复压缩机的寿命和可靠性。③ 间隙产生的碰磨接触力将进一步增大间隙,导致碰磨更为剧烈,并步入恶性循环。此外,碰磨产生的碎屑易造成其他零部件的损伤、润滑失效等。过大间隙碰磨故障甚至产生活塞拉缸现象,可能导致整套设备乃至整条生产线不正常运行,其结果轻则造成巨大的经济损失,重则可能导致灾难性的人员伤亡并造成严重的社会影响。

作为通用机械,往复压缩机被广泛地应用于石化、钢铁、冶金及汽车等行业,但与旋转机械碰磨故障诊断技术相比,往复机械碰磨故障诊断技术发展严重滞后,其中往复压缩机碰磨故障机理研究滞后尤为凸显,究其原因,主要概括为以下三个方面:① 在每个工作循环周期内,往复压缩机气缸载荷均经历压缩、排气、膨胀和吸气四个阶段,交变工作载荷和运动部件耦合的双重变化造成碰磨机理更复杂。尽管旋转机械的转子碰磨动力学理论比较完善,但很难直接用于往复机械碰磨故障动力学中。② 往复压缩机曲轴、连杆、十字头、活塞杆和活塞等重要部件构成的传动机构都隐藏在机体内部,造成这类传动机构的间隙过大故障信息不易获取,很难搞清此类碰磨故障振动信息传递至机体的途径,导致提取振动特征缺乏机理依据。③ 往复机械故障诊断技术起步较晚,从事研究的科研工作者少,而往复压缩机的碰磨机理又是难点之一,导致往复压缩机碰磨机理探索

进展缓慢。

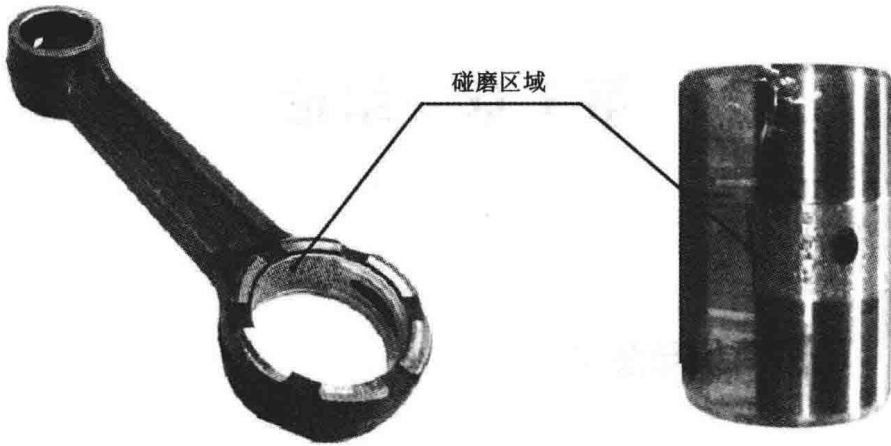
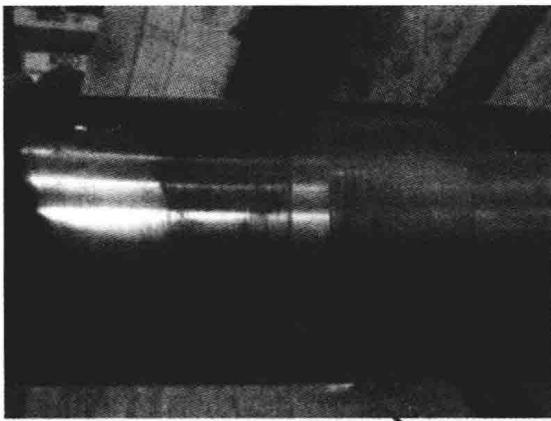
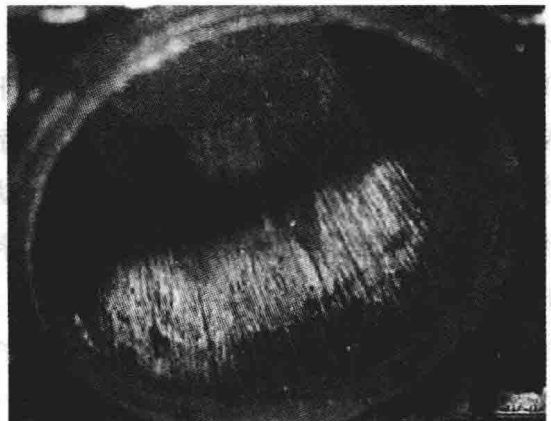


图 1.1 旋转铰碰磨损伤构件



十字头磨损

(a) 十字头磨损示意图



缸体内壁磨损

(b) 缸体内壁磨损示意图

图 1.2 滑动铰碰磨损伤构件

在机械系统中,有关间隙碰磨的研究逐渐受到广大学者的关注,历经半个世纪的发展,包括平面旋转铰间隙碰磨、空间旋转铰间隙碰磨、球面关节间隙碰磨和滑动铰间隙碰磨等理论和方法都取得了丰富成果。但是,上述研究成果考虑的间隙多为规则间隙,且没有考虑时变重载荷对间隙动力学特性的影响。此外,在滑动铰间隙碰磨的研究成果中,未发现学者探索两个及以上滑动铰相互耦合的间隙碰磨研究。然而,这些忽略因素在往复压缩机传动机构系统中都需要考虑,具体表现为:① 十字头是往复压缩机的一个核心部件,当曲轴顺时针转动时,在连杆交变载荷和自身重力作用下,十字头与滑道下侧易产生磨损,进而使滑道下侧间隙增大。显然,此时的移动副关节间隙具有偏心特征,属于非规则间隙。② 作用于活塞上的气缸压力是一种经历压缩、吸气、排气和膨胀四个不同阶段的时变重载荷,其影响因素不可忽略。③ 往复压缩机十字头、活塞杆和活塞是

一个三联体构件,当十字头发生偏心间隙碰磨后,将诱发活塞在正常间隙情况下产生与十字头的相互耦合碰磨。显然,这类跷跷板式的耦合碰磨形态不同于常规往复机械系统的碰磨。考虑这些因素必将会丰富现有机构学间隙碰磨的研究成果,同时也会为往复压缩机碰磨故障机理的揭示提供新思路。

除了故障机理研究外,机械设备状态监测及故障诊断技术也引起世界各国的重视,日益成为研究的热点问题。机械设备状态监测及故障诊断技术是一门融合机械学、电子学、力学、信息学、计算机技术及人工智能等技术的综合性交叉学科。状态监测及故障诊断的核心步骤主要分为三步:信号采集、特征提取和模式识别。其中,信号特征提取是设备故障诊断的一个关键环节,直接关系到故障诊断的准确性与可靠性。这就使得机械设备状态监测及故障诊断技术与信号处理技术的结合更加紧密,两者相辅相成,共同推进彼此的发展。以经典信号处理技术为基础的传统状态监测及故障诊断方法(如时域统计分析、快速 Fourier 变换分析、相关相干分析、时序模型分析及全息谱分析等),大多假设被分析信号具有线性、平稳及高斯等特征,分别仅从时域或频域给出统计平均结果,不能同时兼顾信号在时域和频域的局部细节特征和整体全貌特征。但是,工程实际中的机械设备运行状态往往是动态变化的,特别是在设备故障突发期间,机械系统的驱动力、阻尼力及弹性力等动力学参数呈现非线性变化,反映在动态信号上具有非平稳性。实践证明,在许多场合下,基于经典信号处理技术的传统状态监测及故障诊断方法,已不能很好地满足工程应用的要求。因此,发展以非线性非平稳信号处理技术为基础的现代机械设备状态监测及故障诊断技术,已经成为理论研究和生产实际应用的迫切需求。

时频分析技术作为处理非线性非平稳信号的重要手段,长期以来,由于受全局频率概念(即谐波周期的倒数)及 Fourier 变换的制约,其研究主要集中在提取谐波成分上,而旋转机械的典型故障又与振动信号的谐波频率成分具有很大的关联度,使得时频分析技术在旋转机械的典型故障诊断过程中发挥着非常有效的作用。但是,随着故障诊断领域向着旋转机械早期故障、复合故障及往复机械故障的延伸,振动信号表现出较强的非平稳、非线性及非高斯等复杂特性。以短时 Fourier 变换、Wigner-Ville 分布、小波变换、经验模态分解及局部均值分解等为基础的时频分析方法,通过对复杂信号进行基函数分解或自适应分解,时频分布变得非常复杂,不仅无法进行有效的降噪处理,而且时频分析结果中频带与机械设备振动特性之间缺乏映射关系,许多频率成分的物理意义不明确,虚假频率成分多,难以提取出足以识别故障的有用特征信息。此外,时频分析技术所依赖的瞬时频率概念也存在一定的局限性。目前普遍使用的是针对窄带解析信号给出的定义(即瞬时相位的导数),认为窄带信号在每个瞬时只存在一种频率成分,损失了众多大尺度的频率信息,而且物理意义也缺乏清晰性,对众多非线性非平稳信号不能进行瞬时频率计算。

综上所述,由于大型往复压缩机具有高速重载特性,连杆两端的大小头瓦、十字头

与滑道之间以及活塞与缸体内壁之间不可避免地会产生间隙。间隙的存在会加剧往复压缩机连杆大头瓦和小头瓦的碰撞,诱导十字头、活塞与滑道之间的冲击与振动,严重影响往复压缩机的工作性能和寿命周期。间隙碰磨动力学特性是往复压缩机领域亟须解决的关键问题之一,更是未来往复压缩机间隙碰磨故障特征信息提取的理论依据。本专著上篇将深入系统地研究往复压缩机传动机构间隙碰磨的动力学特性,准确预测含间隙传动机构的动力学行为,有利于搞清间隙对传动机构动力学特性的影响机制,便于揭示间隙碰磨诱导机体振动的动力学演变规律,也是对往复压缩机进行振动故障诊断的重要科学依据。因此,往复压缩机传动机构间隙碰磨的研究成果具有重要的理论价值和工程应用前景,同时将丰富机构动力学和故障诊断学理论。

大型往复压缩机主要故障特征体现出明显的非线性非平稳等复杂特性,基于全局频率和瞬时频率概念的时频分析方法无法有效解决故障特征提取难题,需要用新的思维方式使问题得到解决。为了能够从复杂的非线性非平稳信号中有效提取往复压缩机设备状态及故障特征信息,有必要对全局频率及瞬时频率的概念进行延拓,从复杂信号的特点出发,提出更具广义性的频率概念,对复杂信号赋予新的频率内涵,使其能够揭示非线性非平稳信号的本质特征。本专著下篇将针对往复压缩机早期故障、复合故障及往复机械故障诊断过程中复杂信号特征提取的难题,开展基于广义局部频率的非线性非平稳信号特征提取方法及应用研究。同时,该项研究对信号时频分析理论也具有重要的科学意义,在具有非线性非平稳信号特征的其他工程领域也具有广泛的应用前景。

1.2 国内外研究现状

针对往复压缩机间隙碰磨机理研究,迄今为止,国内外研究往复压缩机传动机构间隙碰磨成果有限,但机构理论的间隙碰磨研究成果具有很好的借鉴性,因此综述了机构理论的旋转铰间隙和滑动铰间隙碰磨的国内外研究现状。此外,在间隙碰磨动力学特性研究中,非线性行为是本专著研究中的重点内容之一,故对间隙碰磨系统的非线性研究现状也进行了阐述。

针对往复压缩机故障特征提取方法研究,将从非线性时间序列分析、非平稳信号处理方法和频率特征提取方法三个方面阐述国内外研究现状。

1.2.1 往复压缩机间隙碰磨研究现状

往复压缩机传动机构的碰磨故障是降低往复压缩机可靠性的主要根源之一,受到了国内外学者的广泛关注。早在1996年,周雷等学者就开展了滑块式压缩机曲柄销和滑块副两处间隙碰磨实验,证实了实测的磨损分布曲线和理论曲线的变化趋势基本吻合,