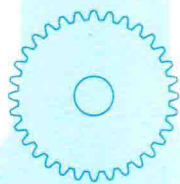


# 基于核主元 模糊聚类的旋转机械故障 诊断技术研究

JIYU HEZHUYUAN  
MOHU JULEI DE XUANZHUAN JIXIE GUZHANG  
ZHENDUAN JISHU YANJIU

李怀俊◎著



华南理工大学出版社

# 基于核主元 模糊聚类的旋转机械故障 诊断技术研究

JIYU HEZHUYUAN  
MOHU JULEI DE XUANZHUAN JIXIE GUZHANG  
ZHENDUAN JISHU YANJIU

李怀俊◎著

## 图书在版编目 ( C I P ) 数据

基于核主元模糊聚类的旋转机械故障诊断技术研究 /  
李怀俊著. —成都: 西南交通大学出版社, 2016.7  
ISBN 978-7-5643-4781-9

I. ①基… II. ①李… III. ①机械设备—故障诊断  
IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 154643 号

---

## 基于核主元模糊聚类的旋转机械故障诊断技术研究

李怀俊 著

责任编辑 李 伟  
特邀编辑 张芬红  
封面设计 墨创文化

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)  
发行部电话 028-87600564 028-87600533  
邮政编码 610031  
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

---

印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成 品 尺 寸	170 mm × 230 mm
印 张	11.25
字 数	202 千
版 次	2016 年 7 月第 1 版
印 次	2016 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-4781-9
定 价	48.00 元

---

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 前 言

随着现代工业及科学技术的迅速发展,生产设备日趋大型化、集成化、高速化和智能化,机械设备在生产中的地位越来越重要,对设备的管理也提出了更高的要求,能否保证设备的正常运行,直接关系到一个行业的发展前景。齿轮箱、轴承等这种典型的用于机械连接和动力传递的装置,是旋转机械中的关键零部件,在载运工具、航空、企业装备、冶金机械等现代工业设备中得到了广泛应用。由于此类装置的传递功率不断增加,导致其常在高速重载的条件下连续运转,工作环境十分恶劣,很容易受到损害而出现故障,关键部件的失效给生产和社会造成的损失越来越明显。因此,开展现代旋转机械故障诊断技术的研究,可以有效保障安全生产,进一步提升设备运行监管水平,促进企业经济效益最大化。

开展创新性的机械故障诊断技术研究,对于提升设备的安全稳定运行品质具有重要意义。本书基于能量视角,以论证齿轮传动系统振动与输入能量之间的相关性为基础,挖掘潜藏于能量信号之中的故障模式规律,在研究有效的能量信号非线性处理、特征提取以及故障模式模糊识别等方法的过程中,建立一种新型的面向齿轮传动系统等旋转机械的故障诊断方法。

本书第1章绪论部分,综述了现有旋转机械故障诊断技术的主要方法、研究现状及发展趋势,并分析了当前研究中存在的不足。第2章对齿轮传动系统的振动机理进行了研究,开展了对静态传递误差变量的理论分析,并建立了静态传递误差与扭矩的关系模型,同时采用频域相干分析方法对输入能量(功率)和振动信号的相干性做了详细的实验分析,提出了应用齿轮传动系统的输入功率信号,即单位时间内轴系扭力所产生的能量,对系统的内部故障状态(振动强度)进行评价与诊断的思想。第3章建立了用于端点效应抑制的 PSO-ARMA 预测模型。首先提出并研究了基于粒子熵值判别的参数自适应变异粒子群算法,然后运用到 ARMA 预测模型的参数优化估计中,最后应用该模型进行了 HHT 变换中的端点效应抑制仿真,可有效降低谱线能量泄漏。第4章开展了能量信号 HHT 分析实验研究,提出了齿轮传动系统能量信号的故障特征向量库建立方法。第5章首先研究了齿轮传动系统的故障数据模糊聚类方法,提出了主元信息熵的概念,并建立了将其和 FKM 算法相结合形成新的故障数据模糊聚类方法——KEFKM 模型;同时提出了基于

模糊关联熵的故障模式模糊识别方法，在处理故障样本模式识别方面具有良好表现。第 6 章围绕齿轮传动系统能量信号监测与故障诊断系统的设计展开了研究。

本书所涉及的研究成果得到了众多科研机构和相关学者的支持。特别感谢广东省高校优秀青年教师培养项目“基于 WSN 的机械设备在线监测与诊断技术研究”（Yq2013178）和广东省自然科学基金项目“基于能量耗损的柴油机故障诊断理论与方法的研究”（S2011010002118）的支持；同时感谢华南理工大学谢小鹏教授、冯伟博士后、卢小辉博士给予本书研究工作的大力支持。

由于作者理论水平有限以及研究工作的局限性，特别是多源机械故障诊断理论本身仍处于不断发展之中，书中难免存在一些不足之处，恳请广大读者斧正。

作 者

2016 年 3 月于广州

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 研究意义 .....	1
1.2 齿轮传动系统故障诊断研究现状 .....	2
1.3 本书结构 .....	7
第 2 章 齿轮箱振动信号与输入能量的相关性研究 .....	11
2.1 引 言 .....	11
2.2 齿轮传动系统能量监测实验台设计 .....	11
2.3 齿轮箱振动机理 .....	14
2.4 静态传递误差变量的理论分析 .....	18
2.5 齿轮传动功率流分析 .....	20
2.6 基于相干分析的能量与振动关系识别 .....	23
2.7 本章小结 .....	36
第 3 章 基于改进 HHT 的能量信号处理方法研究 .....	38
3.1 引 言 .....	38
3.2 HHT 变换 .....	39
3.3 HHT 的算法过程 .....	40
3.4 端点效应的影响与分析 .....	43
3.5 用于端点效应抑制的 PSO-ARMA 预测模型 .....	49
3.6 预测验证实验 .....	62
3.7 基于 PSO-ARMA 预测模型的端点效应抑制仿真 .....	65
3.8 本章小结 .....	73
第 4 章 齿轮传动系统故障特征提取方法研究 .....	75
4.1 引 言 .....	75
4.2 常用的特征分析方法 .....	76
4.3 能量信号的小波降噪处理 .....	83
4.4 能量信号 HHT 变换分析及特征参数提取 .....	87

4.5 本章小结 .....	106
第 5 章 齿轮传动系统故障模糊识别方法研究 .....	107
5.1 引言 .....	107
5.2 核主元分析方法 (KPCA) .....	108
5.3 齿轮故障模式模糊识别方法 .....	112
5.4 故障模糊识别方法验证 .....	121
5.5 齿轮故障模糊识别实验研究 .....	124
5.6 本章小结 .....	147
第 6 章 能量信号监测与故障诊断系统研究 .....	149
6.1 引言 .....	149
6.2 齿轮传动系统能量信号监测与故障诊断系统功能 .....	149
6.3 系统开发 .....	150
6.4 基于 WSN 的齿轮传动监测装置设计 .....	156
6.5 本章小结 .....	160
第 7 章 结论 .....	161
7.1 研究总结 .....	161
7.2 研究展望 .....	163
参考文献 .....	165



# 第1章 绪论

## 1.1 研究意义

随着现代生产力的提升,机械设备的结构日趋复杂,功能日趋完善,自动化程度也不断提升。由于诸多因素的影响,设备会产生突发或渐变性的故障,严重时可能会导致功能失效,形成灾难性的事故。如2003年,国内某钢铁企业的初轧装置因一齿轮箱主输出轴轴承故障,导致直接经济损失达1500万元以上<sup>[1]</sup>;2008年,我国华能伊敏煤电公司600 MW机组发生转子裂纹事故;2009年,波音737及空客330先后失事等,究其事故原因,大多是由于机械设备零部件的疲劳损伤、振动加剧或人员操作失误而导致。为保证设备稳定、高效运行,采取必要的监测手段和故障诊断技术,对机械设备的各种异常状态做出评判,进而对设备的安全运行给予必要的指导显得尤为重要。

齿轮箱、轴承等这种典型的用于机械连接和动力传递的装置,是旋转机械中的关键零部件,在载运工具、航空、企业装备、冶金机械等现代工业设备中得到了广泛应用。信息技术的飞速发展提高了传统旋转机械运行的安全性和可靠性。如随着我国高速铁路技术的发展,列车速度从原有的100 km/h提升到350 km/h,高速列车传动齿轮箱作为传动的关键零部件,不仅要求质量轻、体积小、传动精度高,对其安全运行的可靠性更提出了极高的要求。因此,开展现代旋转机械故障诊断技术的研究,可以有效保障安全生产,进一步提升设备运行监管水平,促进企业经济效益最大化。有资料显示,日本自1990年起在重点行业逐步运用故障诊断技术后,事故率减少约75%,维修费用降低25%~50%;英国对其近2000个工厂的调查研究表明,企业推广设备诊断技术后每年可节约维修费用约3亿英镑(1英镑≈9.23元人民币)<sup>[2]</sup>。近二十多年来,国内科研单位围绕设备状态监测与故障诊断开展理论与应用技术研究,目前已积累了一些成功的经验,取得





了大量富有创新的科研成果和技术专利，并在厂矿等实际场合得到初步推广应用。

不断拓展新的信息技术，开展具有创新性的齿轮传动等旋转设备监测和故障诊断技术研究，对于确保其安全工况，降低事故的发生率，具有重大意义，同时也是对设备状态监测及故障诊断理论的丰富与发展。另外，从故障诊断技术角度来分析研究意义。随着现代机械系统的复杂程度不断提高，故障越来越呈现出复杂性、不确定性、多故障并发性、微弱性和相关性等特征，诊断系统的最大价值应是能够从复杂多变的海量高维观测数据中，去除虚假或非关键的信息成分，准确高效地挖掘出数据的内部特征，并且进行针对性的计算，达到特征提取和故障诊断的目的。因此，进行创新性的故障诊断技术研究，以提高故障诊断效率势在必行。因为机械设备摩擦副的磨损与振动都具有消耗系统能量的特点，输入能量信号实时反映了系统能量传递、耗损的变化过程，也必然能更真实地反映出机械设备的故障状态。

本书提出将能量信号（齿轮系输入功率）作为故障诊断研究的数据处理对象来开展研究，与振动、油液等监测技术相比，具有装置简便、干扰量小、测量准确、易于现场应用等特点。该方法不仅具有较高的理论创新价值，而且具有广泛的工程应用前景。

## 1.2 齿轮传动系统故障诊断研究现状

齿轮传动系统作为一种传递动力和匹配转速的机械装置，由于其工作环境一般较差，加之若有设计不当、制造不精、装配不良、维护不善或超疲劳运行等因素时，都可能引起齿轮、轴承等零部件故障。长期以来，针对齿轮传动系统故障诊断技术研究主要有三方面：故障机理分析、信号特征提取、故障识别与预测。随着信息技术的飞速发展，以及测量装置和信号分析仪器性能的快速提升，故障分析理论的研究也不断得到拓展，软硬件条件的不断融合和互补使得故障诊断技术研究日渐迈入新的高度。综合国内外的研究热点，针对齿轮传动系统的故障诊断方法主要有振动分析、油液分析、声信号分析等方法。当然，信号采集技术的不断完善也促使各种监测信息不断融合，不断形成了多源数据相互融合的故障诊断方法。



## 1.2.1 振动分析故障诊断

齿轮传动系统故障诊断中的振动分析方法的研究起步较早,近年来随着现代传感技术和信息处理技术的不断提升,更展现出广阔的应用空间。目前,这方面的研究重点主要体现在故障机理分析、信号降噪与处理、特征参数提取、智能故障诊断等方面。

故障机理研究主要涉及齿轮动力学方面的内容,丁康教授<sup>[3-4]</sup>先后研究了齿轮点蚀、齿形误差、齿轮均匀磨损、箱体共振、断齿、轴不平衡、轴向窜动等十余种典型故障的振动特性。崔玉杰<sup>[5]</sup>总结了某水磨机减速器在齿形误差、箱体共振、断齿、轴严重不平衡、轴承疲劳剥落和点蚀6种典型故障时的振动特征。Pandya、Aslantas等<sup>[6-7]</sup>分别基于弹性力学理论分析了齿轮齿根裂纹、齿面点蚀故障的产生过程,并利用有限元方法分析运行中故障产生的影响。Fajdiga<sup>[8]</sup>采用有限元建模分析与实验数据分析相结合的方法,对因接触导致的机械体表面点蚀问题进行了分析,提出了此类故障的产生机理,结论可用于齿轮、轴承的点蚀故障研究。Ding和Kahraman<sup>[9]</sup>对齿轮副的磨损进行了研究,建立了准静态磨损模型,并从频域、时-频联合域对正常齿轮与故障齿轮的动力学响应进行了对比分析。褚福磊等<sup>[10]</sup>对旋转机械中常见的动静件碰摩、部件松动、转轴裂纹等故障的转子系统的非线性动力学行为进行了理论与实验研究,在旋转机械常见故障的诊断与定位等方面取得了一定成就。这方面研究的共性是:针对故障机理,一方面围绕传动系统故障时的激励、刚度、载荷、形状等因素的变化问题展开理论分析,进而可以严谨地对不同故障给出合理的理论解释,同时也通过实验方法,基于实测数据或软件模型仿真,研究故障的发生发展、外在表现及影响分析。

在信号降噪方法研究方面,小波分析具有良好的时频局部特征和突出的降噪能力,是信号分析中应用较广的一种降噪方法,在故障诊断领域也表现不俗,Baydar、段晨东、Jiang等都详细研究了小波分析的具体算法及其在故障数据降噪中的应用<sup>[11-13]</sup>。同时针对小波包分解存在频率折叠、频带重叠以及频带错位等缺陷,学者们先后提出了采用没有下抽样环节小波包即冗余小波包用于机械故障诊断等方法<sup>[14-15]</sup>。近年来,诸如局域波分解、EMD分解、数学形态滤波和神经网络等新策略也开始在这方面推广应用,效果良好<sup>[16-17]</sup>。

在特征参数提取方面,研究视野逐渐从早期的直接测量一些简单的时域振动参数,过渡到振动频域分析方法,这主要是因为信号处理技术特别是FFT技术的有效性。早期研究以James I、Taylor和Bridal的工作为代表<sup>[18-20]</sup>。文



文献[21]研究了采用最小方差倒谱方法对滚动轴承的微弱故障进行辨识。文献[22]基于阶次跟踪技术实现振动信号重采样,在转速变化很小时仍可用包络分析获得较准确的特征数据,并用于齿轮轴系变工况故障诊断。Combet<sup>[23]</sup>提出了一种基于时域同步平均的包络谱解调技术,用于齿轮箱变工况下特征谐波的提取,取得了不错的诊断效果。近10年来,许多新的振动参数得到挖掘和应用,随着时频分析(Time-frequency Analysis)<sup>[24]</sup>、小波分析(Wavelet Analysis)<sup>[25]</sup>、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)<sup>[26]</sup>、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)<sup>[27]</sup>等现代信号分析方法的不断涌现,分析手段也得以丰富,非平稳信号分析效果日趋提升。清华大学的褚福磊教授、英国的W. J. Staszewski、上海交通大学的陈进教授等在齿轮箱等旋转机械故障诊断领域研究了时频分析技术<sup>[28-30]</sup>。北京科技大学的徐金梧教授等<sup>[31]</sup>采用经验模态分解和数学分形维数进行滚动轴承故障诊断。Yan等<sup>[32]</sup>提出了一种新的时频分析方法:频率切片小波变换(FSWT),通过引入频率切片函数使传统的Fourier变换可以实现时频分析的功能,能灵活地实现信号的滤波与分割。文献[33]使用时频域局部开周期窗的方法,针对旋转设备振动信号的故障特征频率进行周期内相关运算获得故障信息,可有效排除噪声干扰。王凤利<sup>[34]</sup>围绕转子系统不同工况的时频特征提出了基于关联维数的局域波故障诊断方法。Parey<sup>[35]</sup>等应用基于EMD的统计方法实现了局部缺陷齿轮的早期故障特征检测。Loutridis<sup>[36]</sup>应用瞬时能量密度特征对齿轮故障特征进行了提取,结果表明EMD提取瞬时能量密度的性能要优于WT和WV分布方法。文献[37]应用HHT方法分析了齿轮故障振动信号,计算时频域能量熵作为故障特征来实现诊断。

同时,对于结构和工况均比较复杂的齿轮传动故障诊断问题,单一方法也难以准确获取到故障特征,而是需要多种方法交叉使用、相互影响,才可能形成有效的诊断分析结果,这主要是因为以上这些信号分析方法的自身特点原因限定其适用范围。因此,基于流形学习(Manifold Learning, ML)、核主元分析(Kernel Principal Component Analysis, KPCA)等思想的非线性特征信息融合与提取方法也逐渐应用于机械设备故障诊断中<sup>[38-39]</sup>。栗茂林等<sup>[40]</sup>在轴承早期故障诊断中提出并应用了一种局部空切算法,实验效果较好。张妮等<sup>[41]</sup>研究了一种动态等距离映射流形学习算法,通过选择自适应学习近邻点参数,可维持数据样本的结构流形。文献[42]中利用邻域正交的方法实现了高维特征向量的降维进而提取特征,简化了旋转设备的故障模式识别流程。Viet<sup>[43]</sup>将核主成分分析与主成分法进行了比较,并研究了其在轴承故障诊断中的运用,结果表明KPCA在提取故障信号的非线性特征方面表现良好。魏



秀业<sup>[44]</sup>提出应用粒子群优化算法对核主成分参数进行选取。Ding<sup>[45]</sup>通过构造递归 KPCA 公式,实现了自适应核主成分分析。

在智能故障诊断方法研究方面,成果丰富,表现出将各种信号分析与专家系统、智能决策、粗糙集理论、神经网络、信息融合技术等有机结合的技术特点,进而形成多技术组合的智能诊断方法<sup>[46-48]</sup>。故障模式的识别一般通过故障分类器进行分类,分类器有贝叶斯最优核判别、线性判别、聚类判别、支持向量机等策略。屈梁生<sup>[49]</sup>首创了机械故障诊断全息谱技术,全面集成机器振动的幅、频、相信息,不同于传统分析方法,在全面利用及分析诊断信息中得到准确的故障状态。高金吉<sup>[50]</sup>从设备故障自我监测与预知维修角度出发,创新性提出了装备系统故障自感知与自愈原理,用来指导研究装备自愈原理及工程应用,为具有自诊断功能的新型智能装备的研制提供了技术依据。何正嘉等<sup>[51]</sup>长期致力于小波变换用于故障诊断方面的研究,提出了基于小波有限元的机械裂纹定量诊断方法,在大型回转机械系统早期故障智能检测方面取得了重要研究成果。有学者在提取故障特征时采用了小波分析,并分别基于神经网络模型和模糊函数判定规则进行齿轮早期故障识别,有些则分别用神经网络和 SVM 技术对齿轮和轴承的故障诊断的性能进行比较<sup>[52]</sup>。文献[53]在诊断齿轮故障时首先利用 EMD 分解出本征模态函数,辨识出故障特征,并使用 SVM 作为分类器完成分类。文献[54]则提出了计算 EMD 的各阶分量的能量熵与奇异熵,并把遗传算法与 SVM 相结合为分类器开展齿轮故障识别与诊断。文献[55]运用 EMD 和免疫参数自适应 SVM,在小样本数据集情况下对滚动轴承进行了故障诊断。文献[56]提出了一种基于多尺度模糊熵和支持向量机的滚动轴承故障诊断方法。文献[57]研究了基于神经网络的故障提取方法,并提取转子故障规则。文献[58]研究了粗糙集与 SVM 的特征提取方法,将数据属性值通过 SOM 网络实现离散化,再利用粗糙集公式约简,实现了设备故障诊断。

## 1.2.2 油液分析故障诊断

油液分析技术是通过分析被监测齿轮系统在用润滑油时的性能变化和携带的磨粒,获得机器动力传递系统的有关润滑及磨损状态信息,进而评价齿轮系统的工况、预测故障,并对故障成因及类型做出判定的技术。目前,齿轮传动系统油液故障诊断研究主要集中在油液磨损规律研究、油液参数提取、油液故障诊断方法以及油液和振动信息融合诊断技术等领域。



油液与振动信息融合方面,2005年,Peng等<sup>[59]</sup>以伴有污染颗粒的润滑油为对象开展齿轮故障诊断研究,并给出了故障振动信号与磨粒的相互数值关系,结果表明它们在磨损故障机理方面具有一致的共通性。2006年,Ebersbach等<sup>[60]</sup>采用振动与磨粒信息融合方法针对过载情况下的直齿圆柱齿轮箱体进行了故障机理研究,并对多种故障中两者之间的关系做了概述分析。在其他旋转设备故障诊断中也有相似研究,如2007年,Maru等<sup>[61]</sup>针对球型轴承的振动和磨损信息耦合关系从受污染润滑油的影响角度出发,分析了高频段振动信号峰峰及均方值的变化与摩擦界面磨损颗粒参数之间的联系。曹一波<sup>[62]</sup>利用DS证据理论,将油液分析和振动分析方法相融合对齿轮磨损故障诊断技术进行了研究。高经纬等<sup>[63]</sup>通过建立齿轮磨损故障融合诊断数学模型的策略将振动和油液分析相结合,并通过试验验证了模型的正确性。冯伟等<sup>[64]</sup>建立了齿轮摩擦学系统能量耗损监测模型,通过试验研究了齿轮磨损颗粒与振动之间的相关性,并对齿轮磨损与振动的相关性模型进行了分析。

磨损检测方法虽然可通过分析润滑油中所含微量金属粉末颗粒的组成、大小及多少来判断齿轮箱设备的磨损状态,但油液中的磨损颗粒很难在线提取,离线分析又对系统的正常运行造成干扰,这也是影响诊断精度和效率的一个重要缺陷。同时,油液分析对仪器的精密度要求严格,取样过程较繁杂。文献[65]针对滚动轴承监测其润滑脂温度以及振动信号,形成了多状态监测系统。实验数据表明当出现早期弱故障时,润滑脂温度变化不敏感,当发生分布性故障时温度才明显升高,这说明了润滑油液状态在反映弱故障信号时的不足。同时,铁谱分析和红外光谱分析技术由于需要配置精密的测量仪器,对监测环境要求也较高,用于在线监测难度较大。

### 1.2.3 能量分析故障诊断

目前,国内外针对机械设备的故障诊断研究大多以分析各种振动信号为出发点,但振动传感器都要黏附在设备表面才能获取到信号,由于安装不便或现场环境恶劣,使得振动分析,技术的应用受到了不少限制。同时,对于齿轮箱内部的传动故障,又只能通过拾取外围的振动信号进行分析,信号传递路径复杂,导致信噪比低,而且失真严重;另一方面,在汽轮机、高速列车变速箱及高速发动机等鲁棒性较弱的设备中,早期微弱故障都可能会带来严重后果,而这些故障信号又容易淹没在周围相对能量较大的低频噪声中,从而无法有效进行故障辨识。据统计,磨损与振动分析技术各自只能实现



30%~50%的设备故障检测率。对于某些高温、高腐蚀等恶劣环境下的设备, 布设信号线也比较困难。同时, 随着无线测试技术的发展, 针对机械设备的瞬时输入功率、扭矩、转速等能量信号要素的测量方式越来越简便, 因此, 发展基于设备输入能量信号分析的故障诊断技术是可行而且非常必要的。

针对齿轮等旋转机械的能量耗损研究方面, 华南理工大学黄平教授等<sup>[66]</sup>的研究表明在摩擦界面的原子因位置等因素导致其具有的能量未均匀分布, 能量在传递过程中会不可逆耗散, 这也是旋转机械能部分转为无效热能的过程。Wang 等<sup>[67]</sup>研究了能量边界法, 并从微观角度展开振动的响应分析。Diab 等<sup>[68]</sup>通过建立齿轮非线性动力学模型来计算齿轮的损失功率。元文果等<sup>[69]</sup>以功率流作为评价手段, 运用子结构导纳法研究了齿轮箱结构振动能量的传递特性。张秀芳等<sup>[70]</sup>推导了通过滚动轴承传递到箱体振动功率流的模态解, 对振动能量通过滚动轴承传递的特性及影响因素进行研究分析。这些研究只涉及设备能量传递的动力学角度理论分析, 都没有延伸到基于数值分析的机械设备故障诊断范畴。冯伟等<sup>[71]</sup>围绕齿轮摩擦学系统能量耗损监测问题, 研究了能量耗损与磨损振动之间的相关性。2011年, 华南理工大学谢小鹏教授<sup>[72]</sup>提出了能量耗损故障诊断理论, 并选取发动机的瞬时油耗率作为特征参数之一, 通过对比振动与油液监测数据, 验证了柴油机活塞磨损故障诊断中能量耗损分析的有效性。肖海兵等<sup>[73]</sup>通过获取摩擦学系统的振动、磨损各类能量耗损信息, 建立特征库并进行了故障诊断研究, 但由于仍将传统的振动、磨损数据打包一并分析, 并非真正意义上的能量信号分析。

目前, 基于旋转机械能量视野的研究主要集中在设备磨损及振动中的能量耗损理论方面的探索, 针对输入能量的设备多种信息的相关性方面研究也较少, 自2009年以来国内基于功率信号开展故障诊断的研究论文仅十余篇, 均为电动机故障诊断范畴, 如文献[74]提出了用小波包分解单相瞬时功率(IPD)的方法对感应电动机转子断条等故障展开诊断; 文献[75]用瞬时功率进行频谱分析, 开展电动机轴承的故障诊断。而至于采用非线性信号分析方法, 开展基于能量信号分析视角的齿轮传动等旋转机械故障诊断技术研究, 国内外还没有相关文献见刊。

### 1.3 本书结构

本书将理论分析与现场试验相结合开展研究, 首先设计带有能量信号监



测装置的齿轮传动试验台，并基于系统故障发生发展中的输入能量数值变化分析开展试验。通过获取试验台架自身的输入能量信号以及振动特征信息，围绕振动与输入能量之间的相关性进行研究，并运用非线性方法对反映能量实时变化的功率信息进行特征提取和后续处理后建立故障诊断模糊识别规则，形成一套基于能量信号获取、高维数据处理和故障模糊判别方法的机械设备智能故障诊断方法与理论体系。

本书内容结构如图 1-1 所示。具体内容如下：

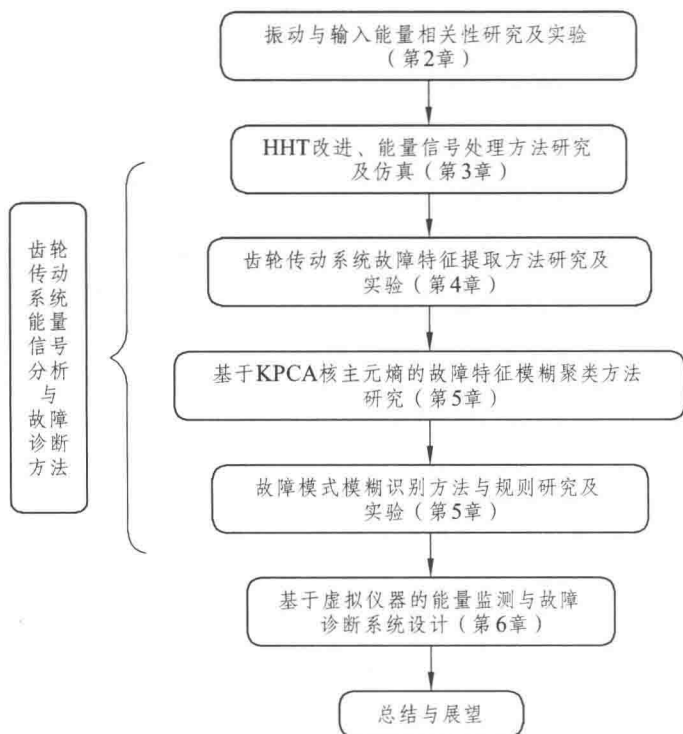


图 1-1 全书结构示意图

第 1 章绪论部分，综述了现有旋转机械故障诊断技术的主要方法及研究现状，叙述了课题的研究背景，并分析了当前研究中存在的不足，从而指出本书的研究目标和主要研究内容。

第 2 章对齿轮传动系统的振动机理进行了研究，实现了对静态传递误差变量的理论分析，并建立了静态传递误差与扭矩的关系模型，指出系统振动的激励源自齿轮副的时变等效刚度和时变附加载荷。同时，采用频域相干分析方法对输入能量（功率）和振动信号的相干性做了详细实验分析，指出对



于齿轮箱这一复杂的非线性动力系统，其输入功率与振动信号之间存在较强的耦合关系。最后提出了应用齿轮传动系统的输入功率信号，即单位时间内轴系扭力所产生的能量，对系统的内部故障状态（振动强度）进行评价与诊断的思想，为后续研究建立理论基础。

第3章针对HHT方法在处理非线性非平稳信号中存在的端点效应、频谱泄漏等缺陷，对常规HHT方法中的端点效应现象进行了详细分析，研究了基于自回归移动平均（ARMA）模型的波形预测延拓方法，建立了用于端点效应抑制的PSO-ARMA预测模型。建模时首先提出并研究了基于粒子熵值判别的参数自适应变异粒子群算法——EPPSO算法；然后将EPPSO算法运用到ARMA预测模型的参数优化估计中，依据矩估计法得到的初值在参数的解空间内，通过全局搜索，最终得到ARMA模型的最佳参数；最后应用该模型进行了HHT变换中的端点效应抑制仿真，结果显示这种方法能较好地抑制端点效应误差，EMD分解后各IMF分量的波形完整度较高，有效降低了谱线能量泄漏，为后续章节中准确地提取出齿轮系统输入能量信号的频域特征提供了技术支撑。

第4章首先分析了针对能量信号的小波降噪技术，同时开展了能量信号HHT分析实验研究。在第3章的理论基础之上，分别针对正常齿轮和齿轮断齿两种状态下的能量信号进行经验模态分解，并对两种状态下的振动和能量信号的Hilbert谱及边际谱进行对比分析，验证了改进的HHT方法有效抑制了端点失真，保证了分解过程的时频特性，可以在一定时间尺度内获得非平稳信号的局部能量分布特征，进而可以通过Hilbert谱以及边际谱对齿轮的不同典型工作状态进行区别。最后研究了齿轮传动系统能量信号的故障特征向量库建立方法，构建了包含前6阶IMF的归一化能量、偏度、峰度、标准差和近似熵等多维特征参数在内的故障特征向量，为第5章开展故障特征参数降维提取方法的研究做前瞻性研究。

第5章首先研究了齿轮传动系统的故障数据模糊聚类方法，指出由于故障原因与征兆的映射关系呈现不确定性及闭环非线性，基于模糊聚类方法的模式识别是辨识系统故障的有效方法，同时提出了主元信息熵的概念，并建立了将其和FKM算法相结合形成新的故障数据模糊聚类方法——KEFKM模型。模型基于KPCA数据降维方法以减少运算量，按照数据子集中数据趋同所反映出的信息熵最大化特点，运用核密度估计和最大熵原理，先对第一核主元能量数据聚类以获取最佳分类数和初始聚类中心，再执行聚类，显著提高了故障数据的聚类效果。随之研究了针对待检样本的故障模糊识别问题，提出了基于模糊关联熵的故障模式模糊识别方法。通过对比分析了最大贴近





度和模糊关联熵方法之间的差异，指出模糊关联熵可以基于数据整体来衡量待识别对象的数据分布特点，对判断两个模糊子集的相似程度具有显著作用。最后应用 KEFKM 故障识别规则开展了实验研究，证明该方法可以保证样本聚类后形成类间、类内分布均合理的分布空间，基于模糊关联熵的故障模式模糊识别方法在处理故障样本模式识别方面具有良好表现。

第 6 章围绕齿轮传动系统能量信号监测与故障诊断系统的设计展开了研究，分析了系统的基本结构及信息获取、处理等环节的实现过程，初步开发了故障诊断系统，系统基于虚拟仪器技术，通过内嵌 Matlab 实现能量信号分析、故障模式模糊识别等步骤，最终实现故障状态实时监测。同时，研究了无线传感网络技术在齿轮传动监测中的应用，设计了基于 WSN 的状态监测节点，通过优化 Zigbee 协议栈，实现了节点自组网络，可面向齿轮监测实现安全、便捷的远程数据采集。

最后是总结部分，对本书的主要研究工作进行汇总，并提炼出创新点，最后就后续进一步研究方向进行了展望。