

编号 ××××××××



南京航空航天大学

本科毕业设计（论文）

题 目

航空发动机附件机匣振动信号故障
特征提取方法研究

学生姓名	胡辰杰
学 号	071951024
学 院	通用航空与飞行学院
专 业	交通运输（民航维修工程）
班 级	0719901
指导教师	陈果教授

二〇二三年六月

南京航空航天大学

本科毕业设计（论文）诚信承诺书

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文）是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，本设计（论文）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

作者签名：_____

日 期： 20__年__月__日

南京航空航天大学

毕业设计（论文）使用授权书

本人完全了解南京航空航天大学有关收集、保留和使用本人所送交的毕业设计（论文）的规定，即：本科生在校攻读学位期间毕业设计（论文）工作的知识产权单位属南京航空航天大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交毕业设计（论文）的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅，可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编论文。保密的论文在解密后适用本声明。

论文涉密情况：

不保密

保密，保密期（起讫日期：_____）

作者签名：_____

导师签名：_____

日 期： 20__年__月__日

日 期： 20__年__月__日

摘 要

附件机匣是航空发动机动力传输的重要部件，其结构复杂，服役环境恶劣，极易产生齿轮和轴承故障，引发飞行安全事故。因此，对航空发动机附件机匣开展齿轮和滚动轴承故障诊断具有重要意义。

航空发动机附件机匣结构复杂，其振动信号成分复杂，包含齿轮、轴承、及噪声干扰信号。本文针对强背景噪声条件下航空发动机附件机匣故障诊断的问题，对附件机匣内齿轮和轴承的运行机理进行研究，构建仿真故障信号模型，提出一种利用多种信号处理方法进行协同诊断的新方法，该方法首先利用离散随机分离将齿轮信号和轴承信号分离出来；然后，通过最小熵解卷积将分离后的齿轮信号和轴承信号进行处理，消除路径影响，得到降噪增强的故障信号；最后使用变分模态分解找寻最优共振频带对信号进行分解，并进行包络解调和谱分析得到分解信号的包络谱，从包络谱中提取故障特征。论文通过仿真信号、公开数据集和真实航空发动机附件机匣试验数据进行了方法验证，结果表明：本文所提出的集成多种信号分析方法的协同诊断技术能够实现齿轮和轴承故障的有效诊断，为实际的航空发动机附件机匣齿轮和轴承故障提供了新的方法和思路。

关键词：航空发动机附件机匣，齿轮故障，滚动轴承故障，信号分析，协同诊断

ABSTRACT

The accessory gearbox is an important component of aero-engine power transmission, and its complex structure and harsh service environment make it very easy to generate gear and bearing failures, which can cause flight safety accidents. Therefore, it is of great significance to carry out gear and rolling bearing fault diagnosis for aero-engine accessory gearboxes.

The structure of aero-engine accessory gearbox is complex, and its vibration signal components are complicated, including gears, bearings, and noise interference signals. This paper addresses the problem of aero-engine accessory gearbox fault diagnosis under strong background noise conditions, researches the operation mechanism of gears and bearings in the accessory gearbox, constructs a simulation fault signal model, and proposes a new method for collaborative diagnosis using multiple signal processing methods, which firstly separates gear signals and bearing signals using discrete random separation; then, deconvolutes the separated Then, the separated gear signal and bearing signal are processed by minimum entropy deconvolution to eliminate the path influence and obtain the noise-reduced and enhanced fault signal; finally, the signal is decomposed using variable modal decomposition to find the optimal resonance band, and the envelope spectrum of the decomposed signal is obtained by envelope demodulation and spectral analysis, and the fault characteristics are extracted from the envelope spectrum. The paper validates the method by simulating signals, public data sets and real aero-engine accessory gearbox test data, and the results show that the proposed collaborative diagnosis technique integrating multiple signal analysis methods can achieve effective diagnosis of gear and bearing faults, providing a new method and idea for actual aero-engine accessory gearbox gear and bearing faults.

KEY WORDS: Aero-engine Accessory Gearbox, Gear Failure, Collaborative Diagnosis, Rolling Bearing Failure, Signal Analysis

目录

第一章绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 齿轮故障特征提取及故障诊断	2
1.2.2 滚动轴承故障特征提取及故障诊断	3
1.2.3 齿轮和滚动轴承耦合故障诊断	3
1.3 问题提出	4
1.4 论文主要工作	4
第二章齿轮和滚动轴承故障信号特征及仿真	6
2.1 齿轮故障信号特征及仿真	6
2.1.1 齿轮的基本结构	6
2.1.2 齿轮故障种类	6
2.1.3 齿轮的故障机理及特征频率	7
2.1.4 齿轮局部故障仿真模型	8
2.2 滚动轴承故障信号特征及仿真	10
2.2.1 滚动轴承的基本结构	10
2.2.2 滚动轴承故障种类	11
2.2.3 滚动轴承故障机理及特征频率	12
2.2.4 滚动轴承故障信号仿真模型	13
2.3 齿轮和轴承耦合故障信号特征及仿真	20
2.3.1 齿轮箱齿轮及轴承结构特征	20
2.3.2 齿轮局部故障与轴承外圈故障的耦合故障仿真	20
2.3.3 齿轮局部故障与轴承内圈故障的耦合故障仿真	21
2.3.4 齿轮局部故障与轴承滚动体故障的耦合故障仿真	22
2.4 本章小结	23
第三章齿轮箱复杂信号分析方法	25
3.1 一种用于齿轮和滚动轴承耦合故障诊断的协同诊断方法	25
3.2 关键技术	25
3.2.1 随机离散分离 DRS 方法	25
3.2.2 最小熵解卷积 MED 方法	27
3.2.3 变分模态分解 VMD 方法	28
3.2.4 包络解调分析方法	29
3.3 基于仿真数据的方法验证	30
3.3.1 齿轮局部故障和轴承外圈的耦合仿真故障信号协同诊断	30
3.3.2 齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合故障仿真信号协同诊断	32
3.3.3 齿轮局部故障和轴承滚动体故障的耦合故障仿真信号协同诊断	34
3.4 本章小结	35
第四章齿轮和轴承故障特征提取方法的试验验证	36
4.1 基于齿轮和轴承公开数据集的方法验证	36
4.1.1 基于 UNSW 全寿命齿轮数据集的验证	36
4.1.2 基于美国西储大学的滚动轴承数据集的验证	38
4.2 基于真实航空发动机附件机匣滚动轴承故障试验数据的方法验证	44
4.3 本章小结	48
第五章总结与展望	49

5.1 研究总结.....	49
5.2 研究展望.....	49
参考文献.....	50
致谢.....	52

第一章绪论

1.1 研究目的和意义

航空发动机附件机匣作为航空器传动系统的重要组成部分，而传动系统中最重要部件是轴承和齿轮，是飞机和发动机附件装置的动力源泉。在复杂的工作条件下，导致两者的故障率最高。因此对于附件机匣的故障诊断主要是齿轮和轴承的故障诊断。航空发动机的传动系统已经被普遍认为是发展发动机技术的瓶颈之一，一旦传动系统出现故障后，将直接影响航空发动机的正常运行，发生灾难性的后果。统计表明，2005-2013 年我空军某型新机列装后累计发生数十起主轴承损伤和传动系统故障，由此导致多次空中停车和数起二等重大飞行事故或飞机迫降，直接经济损失数十亿元^[1]。例如某型国产发动机因主轴承剥落导致的飞机事故，如图 1.1 所示；某型发动机中央齿轮箱齿轮断裂导致的空中停车事故征候，如图 1.2 所示。

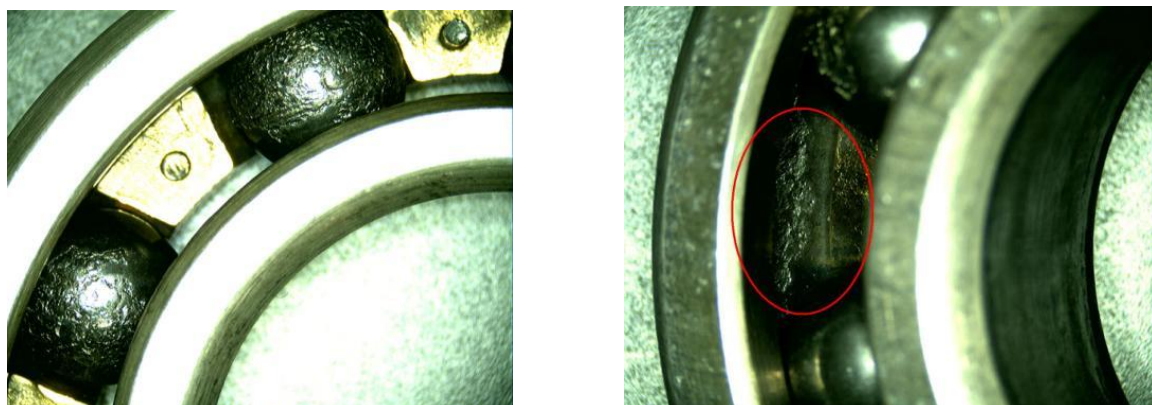


图 1.1 某发动机主轴承剥落

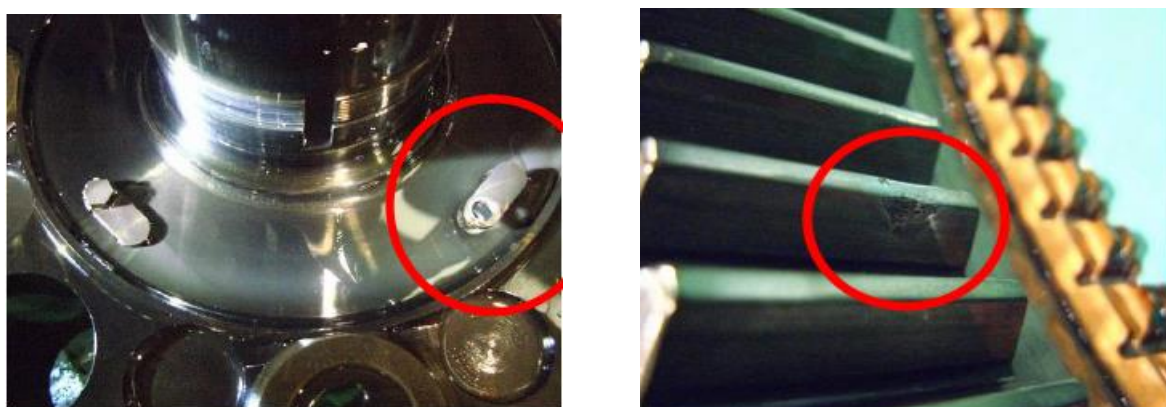


图 1.2 齿轮箱齿轮断裂

因此，针对航空发动机附件机匣运行状态开展故障诊断研究，对于保证航空发动机正常运行和飞行安全具有重要意义，可实现：（1）提高传动系统安全。通过对传动系统关键

部件进行监测和诊断,能够及时发现早期故障和故障先兆,及时处理,增加飞机的安全性;

(2)时刻检测系统运行状况。采用健康管理系统可以根据监测数据来诊断传动系统的运行状况,减少维护检查,延长定检周期;(3)提高传动系统可靠性。通过健康监测和故障诊断,减少无故障部件的检查,延长检查周期,从而减少维护成本费用。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 齿轮故障特征提取及故障诊断

故障特征提取是故障诊断的重点,齿轮基于信号处理的故障特征提取方法一般常用的有时域、频域和解调分析等。时域分析方法可以通过振动信号直接观察到齿轮振动状态,不同的故障对应着不同的时域波形。例如点蚀故障会在时域波形中出现幅值调制现象;齿面断齿会在时域波形中出现明显的周期性冲击。频域分析方法可以分析信号幅值随频率的变化,针对齿轮主要有功率谱、倒谱等方法。在实际齿轮系统中同时存在复杂的幅值调制和频率调制,频谱上出现不同程度的调制边带。大量的理论和实践表明,调制边频带的分析会影响齿轮故障诊断。对此,解调分析方法主要是对齿轮啮合信号解调从而获取到调幅和调相信号,再对其频谱分析来确定齿轮故障。

上个世纪初,就有专家学者对齿轮箱的振动和噪声进行研究,中叶时期,便研究出齿轮的振动和噪声是判断齿轮好坏的标准之一。国外研究方面,H.Optiz^[2]发表了关于齿轮振动与噪声机理的研究曲线,阐明了齿轮传动误差及齿轮精度的函数。B.Randall^[3]等进行了许多研究,在齿轮故障诊断方法有不少成果。Mcdonald^[4]为克服最小熵解卷积(MED)的缺点,提出最大相关峭度解卷积(MCKD)技术,以最大相关峭度代替最大峭度作为评价指标,通过不断迭代实现解卷积,进而突出信号中被淹没的连续脉冲序列,有效提取齿轮故障信息。Mcdonald^[5]针对MCKD需不断迭代找寻最好而非最优滤波器的不足,提出了多点优化最小熵解卷积调整(MOMEDA)技术,可显著提高运算效率,有效地提取出齿轮切屑故障。国内研究方面,韩捷^[6]等研究了齿轮故障机理,给出了齿轮故障的频域特征。陈立爱^[7]等提出利用主成分分析法降维,基于麻雀搜索算法优化概率神经网络特征参数的齿轮故障诊断模型。有效地对齿轮故障进行特征提取,实现了对齿轮故障的有效识别。寿海飞^[8]等基于小波分析,提出一种适合齿轮故障提取的方法。准确地对齿轮信号进行频带分解和降噪分析,有效地从微弱信号中提取出齿轮的故障特征。

1.2.2 滚动轴承故障特征提取及故障诊断

故障特征提取是处理振动信号的核心流程，有效地从振动信号中提取出轴承的故障特征，对于故障分析，乃至航空发动机的运行安全都具有重要意义。基于信号处理方法的故障特征提取主要在时域、频域和时频域中进行。时域分析方法主要通过计算滚动轴承振动信号各种时域指标来确定是否发生故障，例如峰值、方差、峭度等。但由于滚动轴承运行环境复杂，干扰信号会影响时域指标的计算结果，没有办法找到轴承故障的位置或类型。频域分析方法主要是通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号，而在频域中可以反应出轴承振动信号的周期性和频率性。但由于噪声等干扰信号的影响，傅里叶变换也不能反应出信号的故障特征。时频域分析方法能够从轴承振动信号中的频谱中表示出随时间变化的频率成分。其主要包括了短时傅里叶变换、小波变换、变分模态分解等经典方法能有效地提取滚动轴承振动信号故障特征，为轴承故障诊断奠定了基础。

滚动轴承产生的故障会导致动力机械设备失效。早在上世纪五十年代，就有学者开始研究滚动轴承的故障诊断，以便可以根据轴承的工作特性来指导后续维修工作，达到提高设备运行可靠性的目的。国外研究方面，Sawalhi^[9]等首次证明了最小熵解卷积检测滚动轴承故障的有效性，并且在提升脉冲分量方面有着良好的效果。Lu^[10]等提出了一种基于频域多点峭度(FDMK)的故障诊断方法，大大降低了噪声和与轴转速相关谐波分量的负干扰。Ming^[11]使用 VMD 检测多级离心泵滚动轴承的不同位置缺陷信号，结果表明 VMD 能够有效提取滚动轴承故障共振频带。国内研究方面，项伟^[12]等提出了参数自适应 CYCBD 的滚动轴承复合故障特征提取方法。不仅在强噪声下具有更出色的轴承故障特征提取能力，而且能够适用于变转速的情况，展现出了更好的噪声容忍力和滤波性能。何勇^[13]等提出以峭度指标和包络熵为综合目标函数的变分模态分解（VMD）参数优化方法，并改进了诊断流程实现了无需指定参数优化范围的自适应参数优化算法。可以更有效地实现从噪声中提取出轴承故障特征。林桐^[14]等基于 MED、小波变换和自相关分析，提出了一种滚动轴承表面损伤故障的协同诊断方法。能够有效地消除滚动轴承信号传递路径与复杂背景噪声的影响。

1.2.3 齿轮和滚动轴承耦合故障诊断

在齿轮箱的复合故障中，即齿轮和轴承同时存在故障，传统的故障诊断技术很难实现对复合故障的特征提取以及故障诊断。在齿轮箱的复合故障中，轴承的振动对比齿轮振动更微弱，所以轴承的故障特征很容易被齿轮的故障特征淹没。为此，实现齿轮振动和轴承振动相互分离，再进一步对齿轮信号和轴承信号特征提取，可以更有效地实现对齿轮和轴承复合故障诊断。

在国外研究方面,针对齿轮信号和轴承信号的分离,Randall^[15]等提出基于自参考自适应噪声消除技术(SANC)移除齿轮信号的干扰,可以有效地提供对轴承的故障监测效率。之后,Antoni^[16]等提出了一种在频域上的自参考自适应噪声消除方法技术,即离散随机分离技术(DRS)实现了分离齿轮箱中的齿轮信号和轴承信号。Randall^[17]将 SANC 和 DRS 方法进行比较,证明 DRS 在分离齿轮和轴承信号方面更有效、更稳定。Randall^[18]等人提出倒频谱编辑技术(CEP)分离齿轮信号和轴承信号,并比较了 CEP 和 DRS 存在的差异。国内研究方面,齿轮和轴承耦合信号的研究起步较晚,但也由不少专家学者提出了齿轮箱复合故障特征提取方法。潘楠^[19]等人提出基于频域盲解卷积的声学诊断方法实现了齿轮箱中复合故障特征提取。代士超^[20]等人提出基于同步平均和倒频谱编辑的齿轮箱滚动轴承故障分离诊断方法,实现削弱齿轮成分来突出信号中的滚动轴承故障特征。王志坚^[21]等人提出基于最大相关峭度反褶积的复合故障特征提取方法,成功地提取出了齿轮和轴承的故障特征。

1.3 问题提出

(1)直接针对实际的航空发动机附件机匣故障特征提取的研究较少,国内外文献鲜有报道;

(2)航空发动机附件机匣包含了大量错综复杂的传动链,其包含故障信息的振动信号受传递路径影响很大,干扰成分众多,因此,大多数单一的诊断方法很难有效地解决附件机匣故障特征提取问题。

(2)针对含齿轮和轴承耦合故障的齿轮箱复杂信号特征提取研究较少,由于齿轮箱中齿轮啮合振动强于轴承振动,所以轴承的故障特征信息会淹没在齿轮的故障特征信息中而难以提取。

1.4 论文主要工作

针对目前国内外相关文献的研究不足,本文将从以下几方面进行深入研究。

1) 建立齿轮箱齿轮和轴承的耦合故障信号模型

根据齿轮和滚动轴承的故障机理,建立齿轮局故障和滚动轴承外圈、内圈、滚动体的耦合故障模型,为深入研究齿轮和轴承耦合故障诊断方法提供了仿真数据;

2) 提出齿轮和轴承的耦合故障特征提取的协同诊断新方法

针对单一信号分析方法难于实现附件机匣齿轮和轴承的耦合故障诊断问题,提出一种集成频带分解、降噪、包络分析等多种信号分析方法的协同诊断方法,利用多种方法的各自优势来实现故障的协同诊断以期提高故障诊断精度。

3) 方法验证

为了验证所提新方法的有效性，本文首先基于齿轮和轴承的耦合故障仿真信号、国际上公开的齿轮和滚动轴承数据集对新方法进行验证，然后，基于某真实航空发动机附件机匣滚动轴承预置故障试验数据进行方法验证，以表明本文方法对实际发动机附件机匣滚动轴承故障诊断的有效性。

第二章齿轮和滚动轴承故障信号特征及仿真

2.1 齿轮故障信号特征及仿真

2.1.1 齿轮的基本结构

齿轮是一种常见的机械零件，是齿轮箱重要的部件之一，可以相互啮合轮齿传递运动和动力，在机械传动上应用很多。齿轮的基本结构如图 2.1。

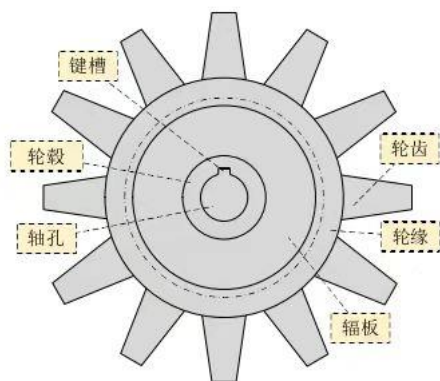


图 2.1 齿轮的基本结构

1) 轮毂：齿轮轮毂是齿轮的主体部分，通常由圆盘状或圆柱状的轮毂组成。轮毂的外径为齿轮的分度圆直径，内孔则是用于连接轴的，轴孔通常是一个圆孔或者一个齿芯孔。

2) 轮齿：轮齿是齿轮的关键部分，它们位于齿轮轮毂上，用于传递扭矩和转动。齿轮齿通常呈现齿形，齿形有直齿和斜齿两种类型，其形状和参数受齿轮的模数、压力角等因素的影响。

3) 轴孔：安装齿轮传动轴的部分。

4) 键槽：在齿轮轴上开设的一个槽，用于安装键来防止齿轮在轴上滑动或旋转不准。

5) 轮缘：指齿轮圆周上与齿相接触的部分，它是齿轮传动中最重要的部分之一。

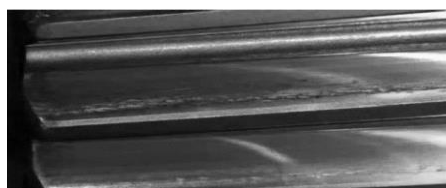
6) 辐板：是轮缘和轮毂相接的部分。

2.1.2 齿轮故障种类

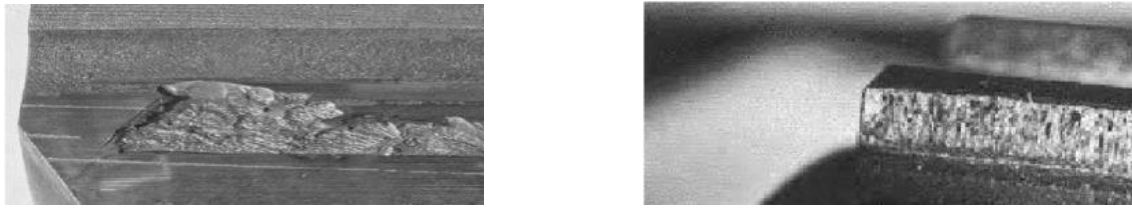
齿轮在运行过程中，齿轮发生故障是不可避免的，常见的齿轮故障种类包括以下几个方面如图 2.2 所示。



(a) 齿轮断齿



(b) 齿面点蚀



(c) 齿面剥落

(d) 齿面磨损

图 2.2 齿轮常见的故障种类

1) 齿轮断齿：齿轮齿面出现断裂或者缺失。当齿轮传动系统的负荷超过其额定值时，会导致齿轮齿面受到过大的载荷，又或齿轮在长期使用过程中，由于反复载荷的作用，会导致齿面疲劳开裂，最终形成断齿故障。

2) 齿面点蚀：在齿轮齿面出现局部点状蚀痕。齿轮传动中，润滑油的质量和使用寿命直接影响齿轮的寿命。如果润滑油不合格或使用不当，会导致齿轮齿面摩擦系数升高，从而引起齿面点蚀。或者在恶劣的工作环境中，如高温、高湿、酸碱等环境中，齿轮齿面容易发生腐蚀和氧化，导致齿面点蚀故障。

3) 齿面剥落：当点蚀的凹坑尺寸增大连成片状，齿面会出现局部剥落或者剥离的现象。

4) 齿面磨损：在运行过程中，齿轮接触的部位传递力矩和长期磨擦，就一定会会有磨损的现象出现。齿轮传动中的润滑条件很重要，如果润滑不良或者润滑油质量不好，会导致齿轮齿面磨损加剧。

2.1.3 齿轮的故障机理及特征频率

(1) 齿轮在工作时，轮齿在不断啮合和分离，而啮合分离的过程中会有激振力产生。这种力引起的噪声瞬态自由振动就是固有频率，齿轮固有频率表示为：

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2-2)$$

其中， K 为齿轮副的平均刚度， M 是齿轮副的等效质量。

(2) 不论齿轮是否发生故障，工作中的齿轮一直存在啮合频率。当发生故障时，啮合频率为载体呈现出故障信号，齿轮啮合频率公式：

$$f_m = \frac{n}{60} z \quad (2-3)$$

其中， z 为齿轮数量， n 为轴转速。

(3) 齿轮和轴的转频 f_r ：

$$f_r = \frac{n}{60} \quad (2-4)$$

其中， n 为齿轮轴转速。

齿轮无故障运行时，振动信号的频率特征可看成啮合频率及其谐波成分，振动信号表示为：

$$x(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(2\pi n f_m t + \varphi_n) \quad (2-5)$$

式中， A_n 表示第 n 次谐波的幅值； f_m 表示啮合频率； φ_n 表示第 n 次谐波的初始相位。

当齿轮发生局部故障时，振动信号会发生变化，一般齿轮的振动信号表示^[22]为：

$$y(t) = \sum_{i=1}^I A_i \left[1 + \sum_{j=1}^J B_j \cos(2\pi j f_n t + a_j) \right] \cos \left[2\pi f_z t + \sum_{k=1}^K C_k \sin(2\pi k f_n t + \beta_k) \right] \quad (2-6)$$

式中， $y_j = \sum_{j=1}^J B_j \cos(2\pi j f_n t + a_j)$ 为幅值调制函数， $y_k = \sum_{k=1}^K C_k \sin(2\pi k f_n t + \beta_k)$ 为相位调制函数，

f_n 是故障齿轮所在轴的转频， a_j 是第 j 阶幅值调制的相位， β_k 是第 k 阶频率调制函数的相位， J 、 K 分别是调幅和调频的最大阶次， A_i 是第 i 阶啮合频率信号的幅值系数， B_j 是第 j 阶调幅信号的幅值系数， C_k 是第 k 次调频信号的幅值系数， I 是啮合频率的最大阶次，当 $y_j=0$ 时，式(2-6)是调频函数；当 $y_k=0$ 时，式(2-6)是调幅信号。

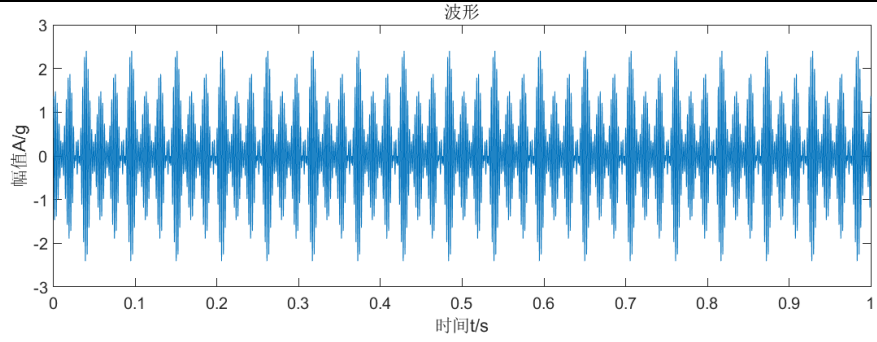
齿轮不正常工作时，齿轮的啮合频率和高次谐波成分的幅值也会受到影响。当转速不定时，齿面所受的载荷会发生变化，导致产生的冲击增大。荷载的周期性波动导致振动的振幅发生周期性变化，即出行幅值调制现象。周期性波动的扭矩使振动的频率随转速发生周期性变化，称之为频率调制现象。由于齿轮啮合存在调制现象，在频谱中，啮合频率和谐波频率附件会存在边频成分。边频成分反映了很多齿轮故障信息，其间距也反映了故障发生的位置。

2.1.4 齿轮局部故障仿真模型

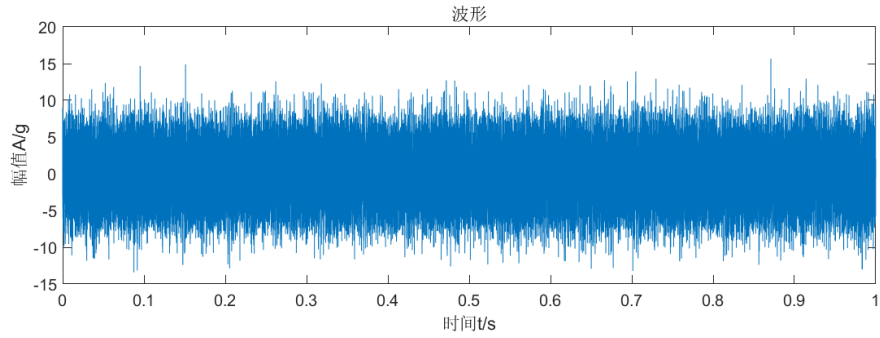
齿轮间的啮合激振会产生齿轮振动，所以振动信号包含了齿轮啮合时的频率信号和谐波信号，通常表示为啮合频率的调制及其旋转频率和倍数的乘积。当出现齿轮局部损伤时，波形就有调制信息。构造包含噪声的齿轮故障仿真信号模型 $x(t)$ ：

$$\begin{cases} x_1(t) = (1 + \sin(30\pi))(\cos(750\pi) + \sin(30\pi)) \\ x_2(t) = (1 + \sin(24\pi))(\cos(200\pi) + \sin(20\pi)) \\ x(t) = x_1(t) + x_2(t) + n(t) \end{cases} \quad (2-7)$$

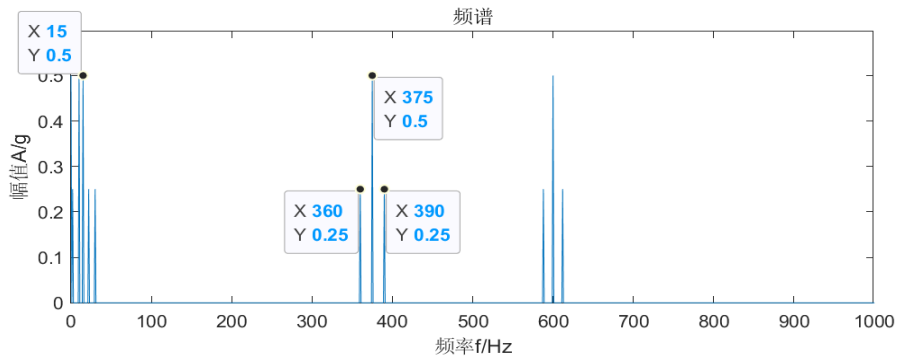
式中 $x_1(t)$ 是齿轮箱故障信号，其中 f_r 是故障齿轮所在轴转频(15Hz)， f_m 是啮合频率(375Hz)； $x_2(t)$ 是一个调幅调频的干扰信号。其中 $n(t)$ 为信噪比为-15dB的高斯白噪声。采样频率 12800Hz，持续时间 1s。图 2.3 齿轮的仿真信号波形、频谱和直接包络谱所示。



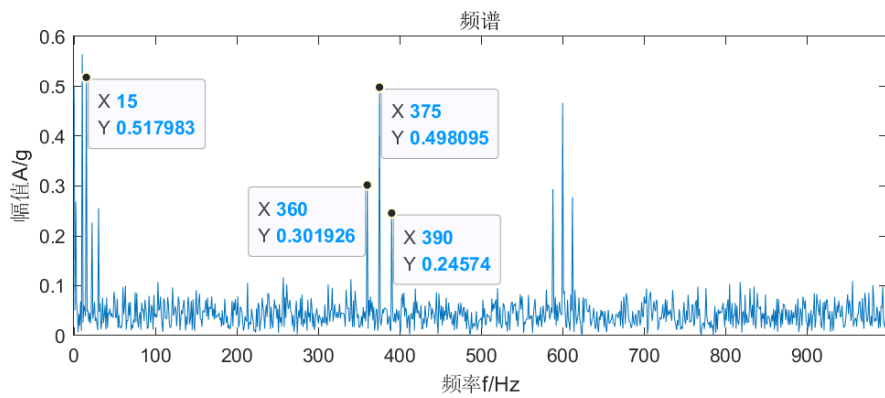
(a) 齿轮局部故障仿真信号时域波形



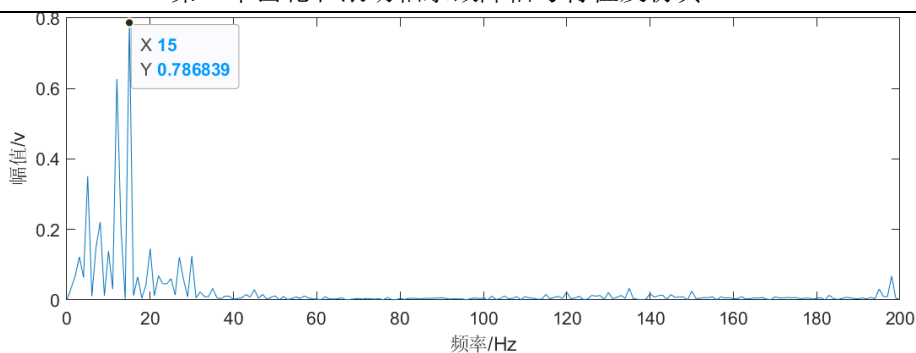
(b) 含噪声的齿轮局部故障仿真信号时域波形



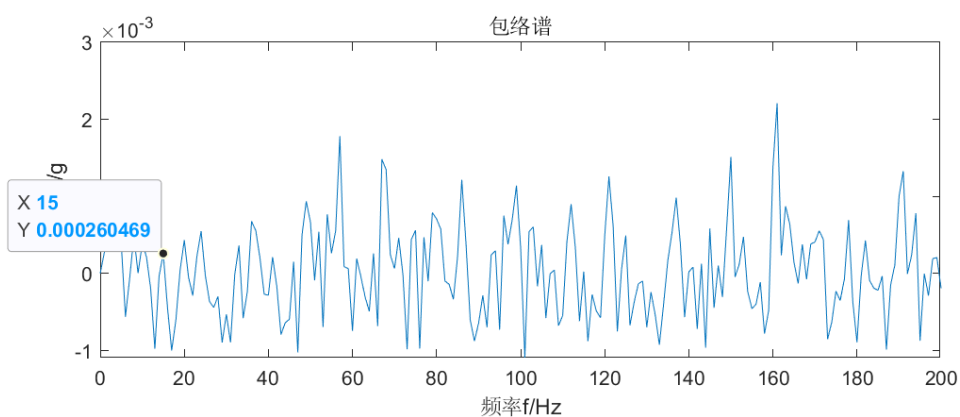
(c) 齿轮局部故障仿真信号频谱



(d) 含噪声齿轮局部故障仿真信号频谱



(e) 齿轮局部故障仿真信号包络谱



(f) 含噪声齿轮局部故障仿真信号包络谱

图 2.3 齿轮局部故障仿真信号谱分析

从图 2.3 中看出齿轮局部故障仿真信号的频谱主要是啮合频率 $f_m(375\text{Hz})$ 及倍频以及其与 $f_f(15\text{Hz})$ 调制形成的边频带；同时通过希尔伯特变换并做谱分析得到包络谱，利用转频代替啮合频率和边频作为故障特征频率来判断齿轮故障，可以在包络谱中看到调制频率 $f_f(15\text{Hz})$ 及其倍频；由于大量的干扰噪声，含噪声的齿轮局部故障仿真信号包络谱中的故障频率处的谱线并不明显。

2.2 滚动轴承故障信号特征及仿真

2.2.1 滚动轴承的基本结构

滚动轴承是一种常见的机械零件，用于支撑旋转轴和承受轴向负载。滚动轴承的基本结构如图 2.4 所示。



图 2.4 滚动轴承的结构图

(1) 内圈：通常安装在轴上，与轴紧密配合，同时通过滚动体与外圈一起支撑轴承。

(2) 外圈：通常安装在轴承座或者支撑机械部件壳体，主要防止轴承在工作中移动或者旋转。

(3) 滚动体：是滚动轴承的核心元件，由于它的存在，相对运动表面间才有滚动摩擦。

(4) 保持架：用于支撑滚动体并使其保持一定的间隔和相对位置，同时防止滚动体脱离轴承的主要部件。

2.2.2 滚动轴承故障种类

滚动轴承是一种常用的机械传动装置，由内圈、外圈和滚动体组成，用于支撑和传递旋转运动。常见的滚动轴承的故障种类包括疲劳损伤、磨损损伤、腐蚀损伤、划伤、点蚀、塑性变形等，如图 2.5 所示。

(1) 疲劳损伤：长期重复受力会导致滚动体和轴承环的疲劳损伤，表现为滚动体和轴承环表面的疲劳裂纹和磨损。这种故障通常由于过载、振动和润滑不良等原因引起。

(2) 过度磨损损伤：滚动轴承在运行过程中由于接触力和摩擦力作用会导致表面磨损，表现为滚动体和轴承环表面的磨损和凹坑等。这种故障通常由于润滑不良、灰尘等污染物质和不适当的安装等原因引起。

(3) 锈蚀损伤：滚动轴承的内部和外部表面可能由于锈蚀而受损，这种故障通常由于在高湿度和高温度环境中、或者在存在腐蚀性液体和气体的环境中工作时发生。

(4) 划伤：由于使用不当、润滑不良、杂质或异物进入轴承等会导致在轴承表面形成划痕或凹痕。破坏轴承表面的光滑度和尺寸精度，从而影响轴承的摩擦和转动性能。

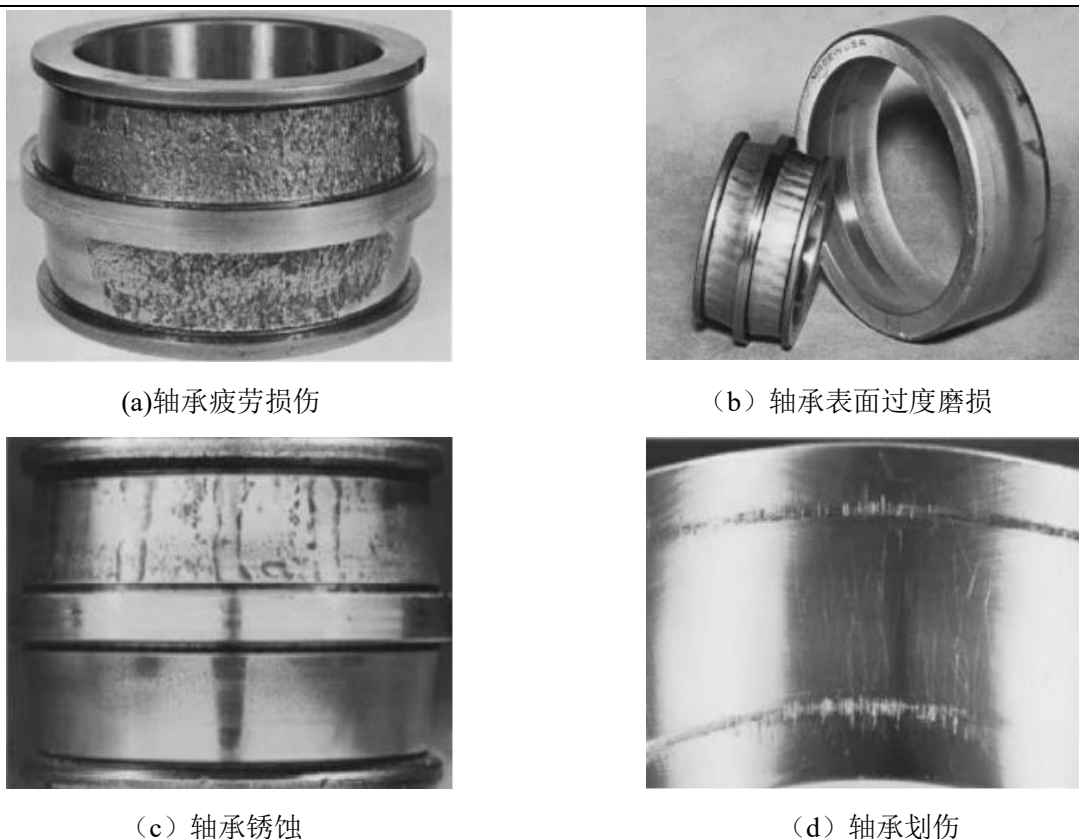


图 2.5 轴承常见的故障种类

2.2.3 滚动轴承故障机理及特征频率

滚动轴承的故障特征频率是发生故障之后，轴承振动信号在频域上出现的明显峰值频率，它与轴承内径、外径、滚动体直径和滚动体数量等参数有关。滚动轴承的结构和几何参数如图 2.6 所示^[14]，图中参数如下：假设轴承外圈固定，内圈随轴旋转的旋转频率为 f_r ，滚动体的直径 d ，数量为 Z ，轴承节径 D ，接触角 α ，内径 $D_1 = 2r_1$ ，外径 $D_2 = 2r_2$ 。

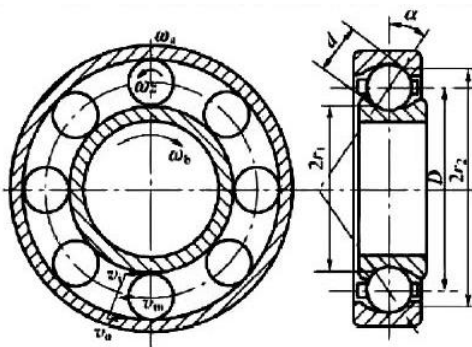


图 2.6 滚动轴承的结构和参数示意图

(1) 外圈的故障特征频率：

$$f_o = \frac{Z}{2} \left[1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right] f_r \quad (2-6)$$

(2) 内圈的故障特征频率：

$$f_i = \frac{Z}{2} \left[1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right] f_r \quad (2-7)$$

(3) 滚动体的故障特征频率:

$$f_b = \frac{D}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right] f_r \quad (2-8)$$

2.2.4 滚动轴承故障信号仿真模型

故障特征信号是由于轴承内部的故障引起的振动信号，包含了与故障类型和程度相关的信息。而噪声信号则是由于环境、传感器等因素引起的信号干扰，包含了与故障无关的信息。因此将滚动轴承故障信号可以看作是两个信号的叠加^[14]。

$$S(t) = S_f(t) + S_n(t) \quad (2-9)$$

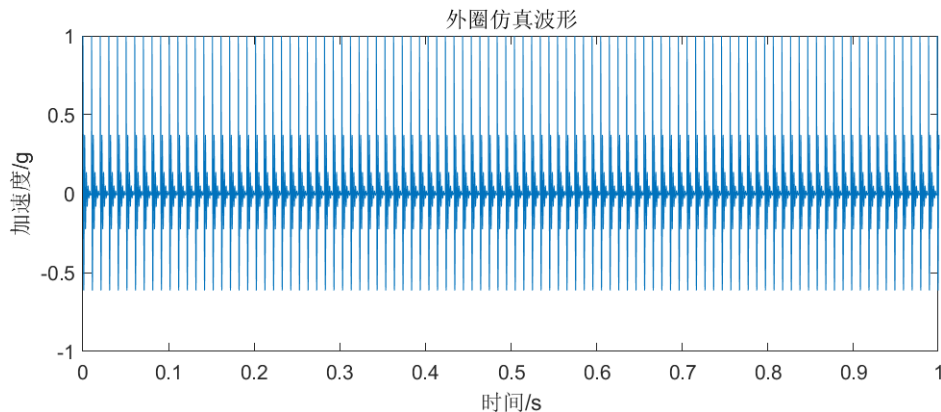
其中， $S_f(t)$ 是滚动轴承的冲击信号， $S_n(t)$ 是噪声信号， $S(t)$ 则表示采集到的轴承信号。

(1) 外圈故障信号

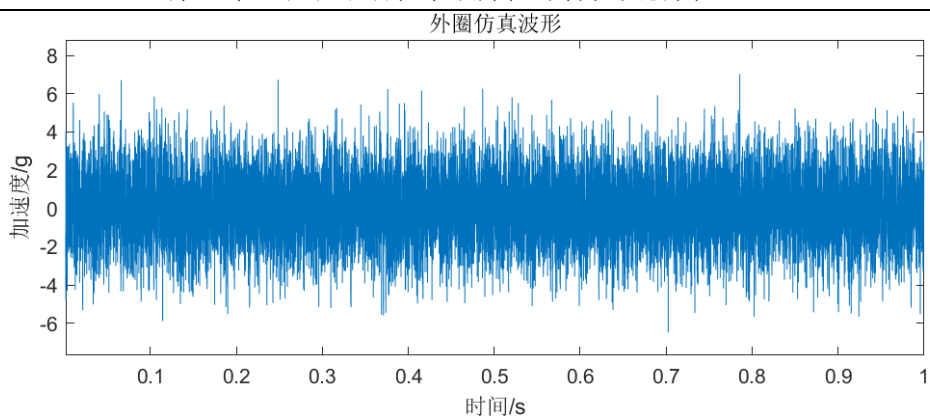
$$S_f(t) = \sum_{i=0}^N \left[c \cdot \exp(-2\pi\zeta f_n(t - \frac{i}{f_o})) \sin(\pi f_n \sqrt{1-\zeta^2}(t - \frac{i}{f_o})) \right] \quad (2-10)$$

式中 c 是归一化系数； ζ 是阻尼系数，反映了冲击衰减快慢； f_n 是轴承共振的固有频率， f_i 是滚动轴承内圈的故障特征频率。

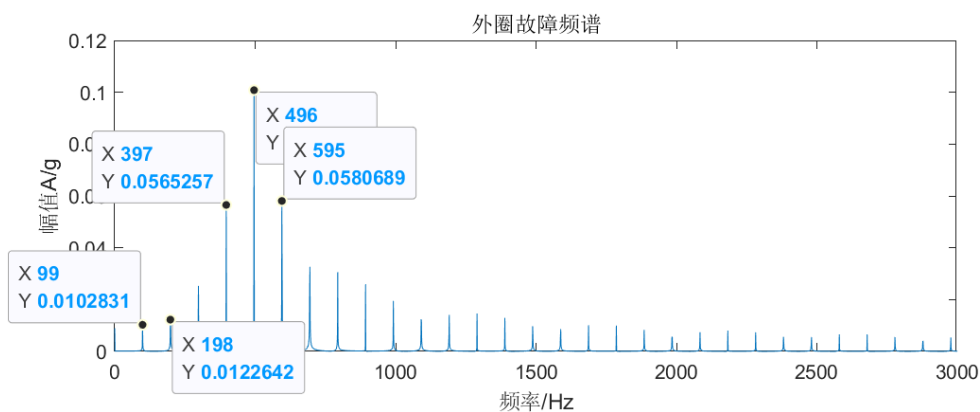
令阻尼系数 $\zeta=0.15$ ，轴承共振的固有频率 $f_n=500\text{Hz}$ ，转速频率 $f_r=18\text{Hz}$ ，外圈的故障特征频率 $f_o=99\text{Hz}$ ，采样频率 $f_s=12800\text{Hz}$ ，持续时间为 1s，可以得到图 2.7(a)所示外圈故障冲击信号，对应的频谱和包络谱分别于图 2.7(c)和 2.7(e)；产生一组信噪比-5dB 的高斯白噪声，和冲击信号叠加得到的含噪声的外圈故障仿真信号波形如图 2.7(b)所示，对应的频谱和包络谱分别于图 2.7 (d) 和 2.7(f)。



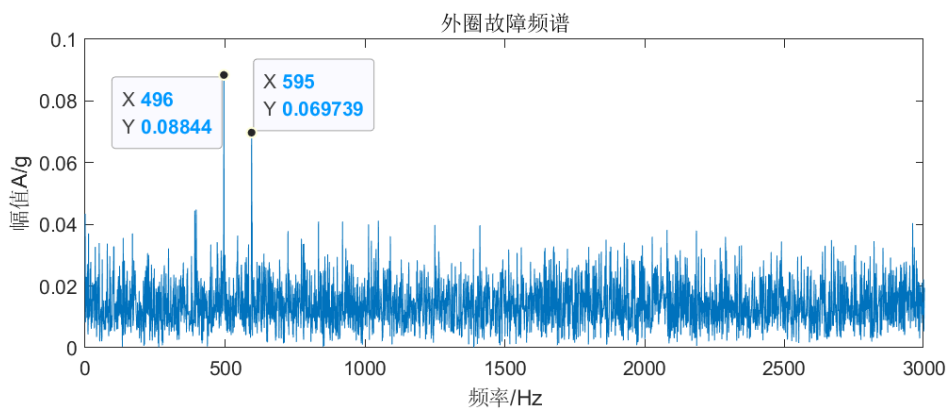
(a)故障冲击信号时域波形



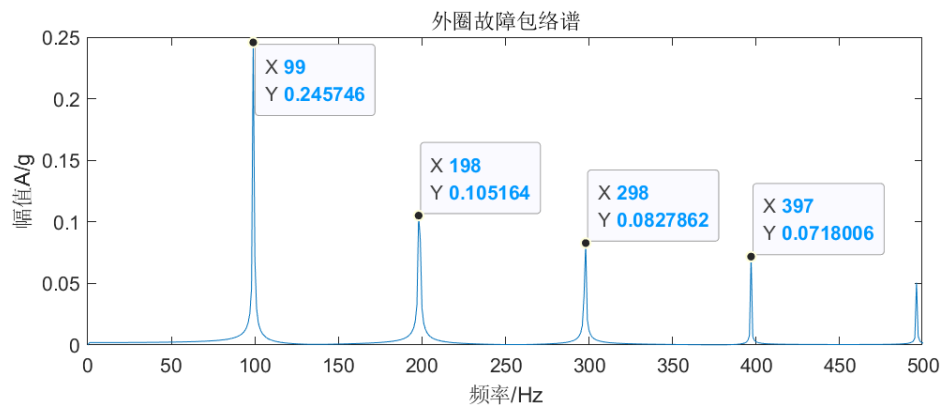
(b)含噪声故障信号时域波形



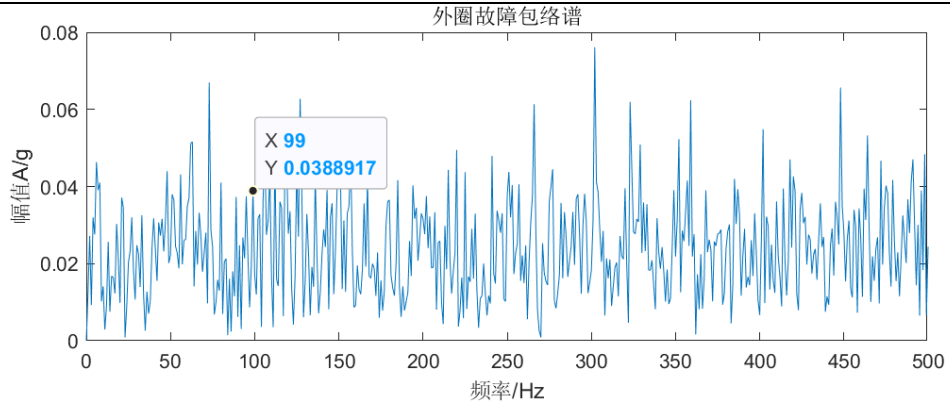
(c)故障冲击信号频谱



(d)含噪声故障信号频谱



(e)故障冲击信号包络谱



(f)含噪声故障信号包络谱

图 2.7 外圈故障冲击仿真信号

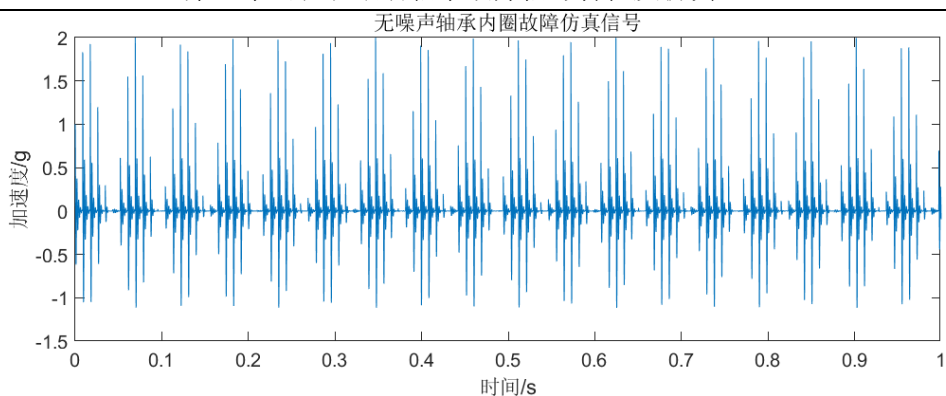
从图 2.7 中看出理想的外圈故障冲击信号波形中，每个冲击信号的最大幅值是一样的。在频谱图中看到轴承共振的固有频率 $f_n = 500\text{Hz}$ 旁边存在共振峰 495Hz ，每个谱线的间隔数值均为外圈的故障特征频率 99Hz 。其包络谱中，能看出峰值最大的是故障特征频率 99Hz 及其倍频。当轴承外圈冲击信号加入噪声后，含噪声的故障信号中看到噪声淹没了冲击成分，频谱图中也能看到轴承共振的固有频率 $f_n = 500\text{Hz}$ 旁边存在共振峰，但不容易识别出故障特征频率 99Hz ，包络谱中受到了噪声干扰，不太容易找出故障特征频率的谱峰及其倍频。

(2) 内圈故障信号

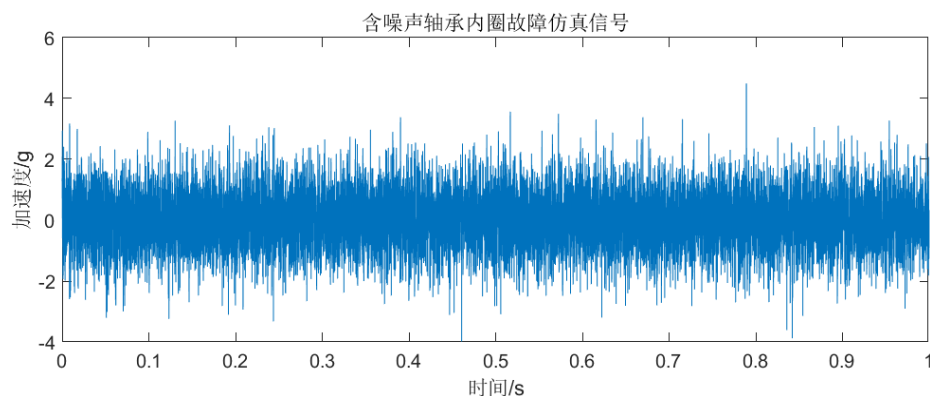
$$S_f(t) = (2 + \cos(2\pi f_r t)) \sum_{i=0}^N \left[c \cdot \exp(-2\pi \zeta f_n (t - \frac{i}{f_i})) \sin(\pi f_n \sqrt{1 - \zeta^2} (t - \frac{i}{f_i})) \right] \quad (2-11)$$

式中 c 是归一化系数； ζ 是阻尼系数，反映了冲击衰减快慢； f_n 是轴承共振的固有频率， f_i 是滚动轴承内圈的故障特征频率。

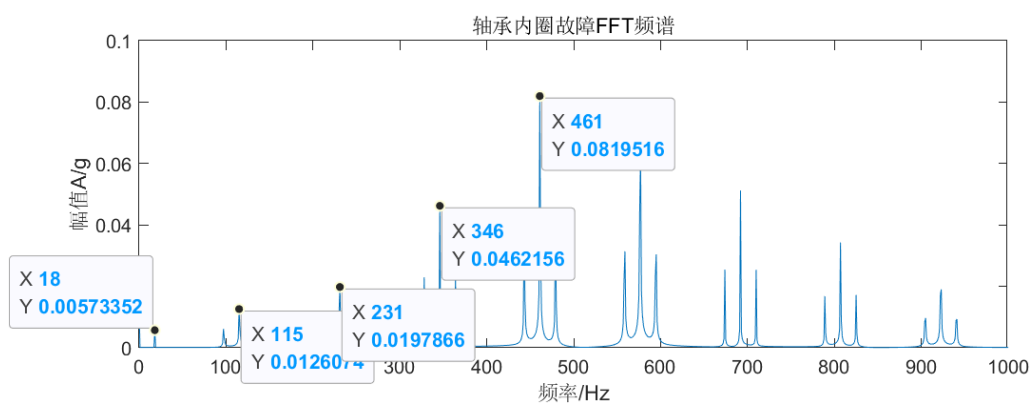
令阻尼系数 $\zeta = 0.15$ ，轴承共振的固有频率 $f_n = 500\text{Hz}$ ，转速频率 $f_r = 18\text{Hz}$ ，内圈的故障特征频率 $f_i = 115\text{Hz}$ ，采样频率 $f_s = 12800\text{Hz}$ ，持续时间为 1s ，可以得到图 2.8(a)所示外圈故障冲击信号，对应的频谱和包络谱分别于图 2.8(c)和 2.8(e)；产生一组信噪比 -5dB 的高斯白噪声，和冲击信号叠加得到的含噪声的外圈故障仿真信号波形如图 2.8(b)所示，对应的频谱和包络谱分别于图 2.8(d)和 2.8(f)。



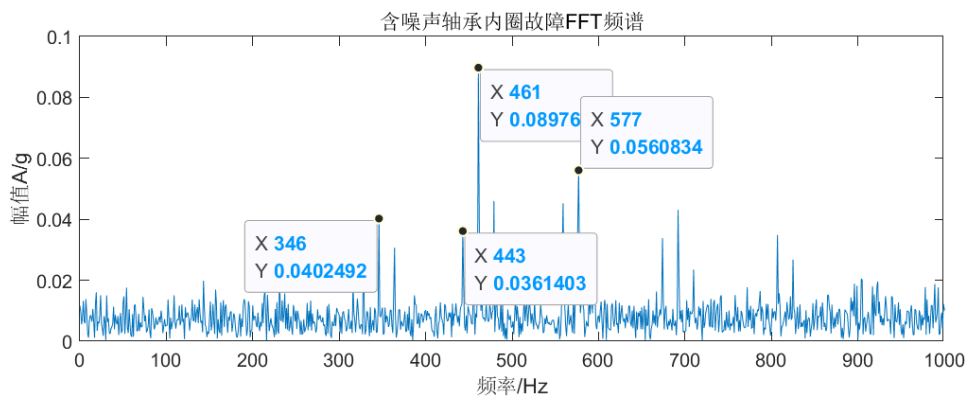
(a)轴承内圈仿真信号



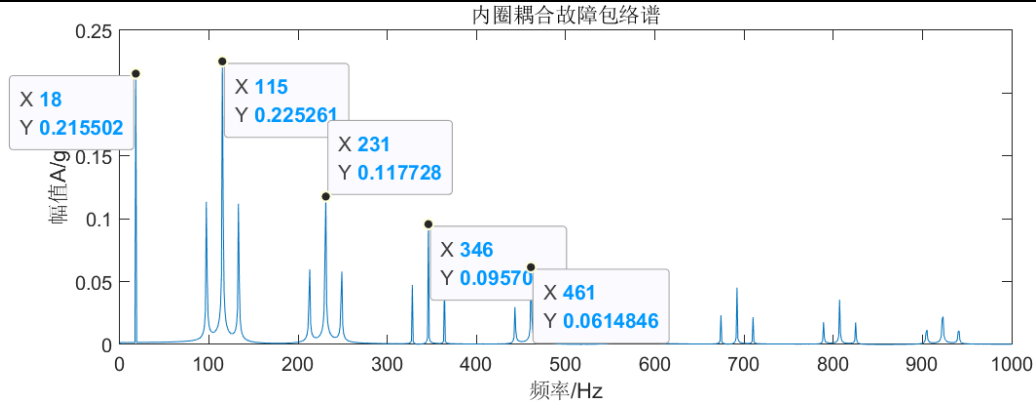
(b)含噪声轴承内圈仿真信号



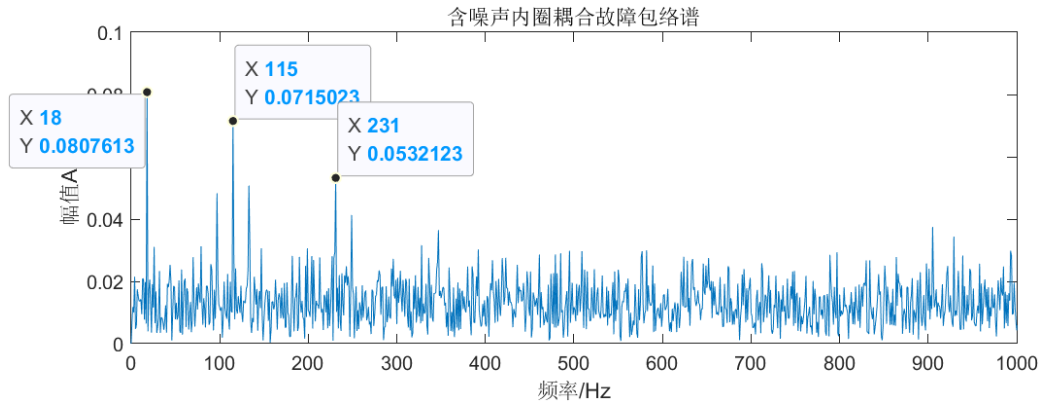
(c)轴承内圈仿真信号频谱



(d)含噪声轴承内圈仿真信号频谱



(e)轴承内圈仿真信号包络谱



(f)含噪声轴承内圈仿真信号包络谱

图 2.8 内圈故障冲击仿真信号

理想内圈故障冲击信号的时域波形中，单次冲击的间隔为 $1/f_i$ ，其频谱上可以看到在共振频率 $f_n(500\text{Hz})$ 附件存在共振峰，在低频处也能辨别出故障特征频率 $f_i(115\text{Hz})$ 及其倍频，在谱峰两侧还存在以 f_r 为间隔的调制谱线；包络谱能清晰地看到转速频率 $f_r(18\text{Hz})$ 、故障特征频率 $f_i(115\text{Hz})$ 及其倍频，其中内圈故障特征频率的谱峰最大。加入噪声后，时域波形的冲击成分几乎被噪声淹没，频谱中可以看到共振频率 $f_n(500\text{Hz})$ 附件存在共振峰，由于存在噪声，不容易看到低频处的故障特征频率 f_i 及其倍频；包络谱虽能看到故障特征频率 f_i ，但谱峰不突出。

(3) 滚动体故障信号

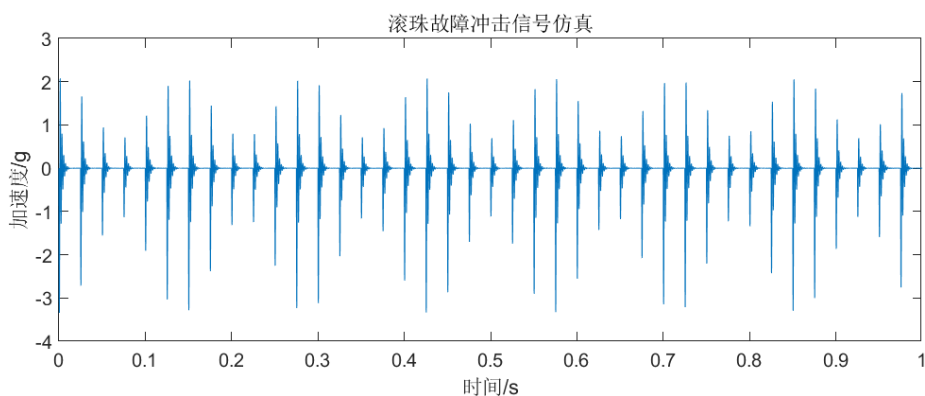
$$S_f(t) = A_1(2 + \cos(2\pi f_c t)) \sum_{i=0}^N g_i(t) + A_2(2 + \cos(2\pi f_c t)) \sum_{i=0}^N g_i(t - \frac{i}{2f_b}) \quad (2-12)$$

$$g_i = c \cdot \exp(-2\pi \xi f_n(t - \frac{i}{f_b})) \sin(-2\pi f_n \sqrt{1 - \xi^2}(t - \frac{i}{f_b})) \quad (2-13)$$

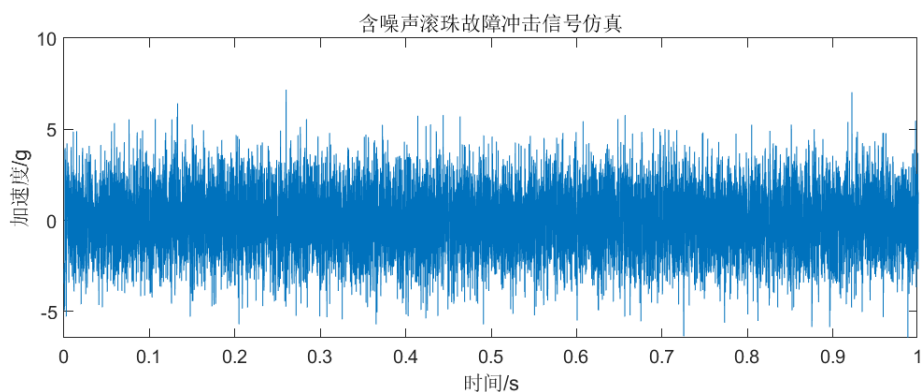
式中 c 是归一化系数； ζ 是阻尼系数，反映了冲击衰减快慢； f_n 是轴承共振的固有频率， f_b 是滚动轴承滚动体的故障特征频率； f_c 是保持架频率； $g(t)$ 是冲击信号，当零件表面经过损伤点的时候，就会产生冲击。

令阻尼系数 $\zeta = 0.15$ ，轴承共振的固有频率 $f_n = 500\text{Hz}$ ，转速频率 $f_r = 18\text{Hz}$ ，滚动体的故障特征频率 $f_b = 40\text{Hz}$ ，保持架频率 $f_c = 7\text{Hz}$ ； $A_1 = 1, A_2 = 2$ 分别表示了滚动体缺陷与外滚道、内滚道接触产生冲击幅值的大小；采样频率 $f_s = 12800\text{Hz}$ ，持续时间为 1s ，可以得到图 2.9

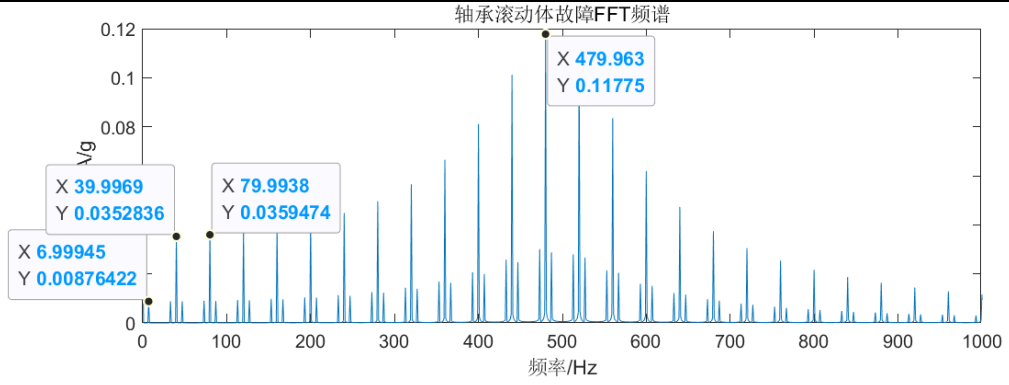
(a) 所示外圈故障冲击信号，对应的频谱和包络谱分别于图 2.9 (c) 和 2.9 (e)；产生一组信噪比 -5dB 的高斯白噪声，和冲击信号叠加得到的含噪声的外圈故障仿真信号波形如图 2.9 (b) 所示，对应的频谱和包络谱分别于图 2.9 (d) 和 2.9 (f)。



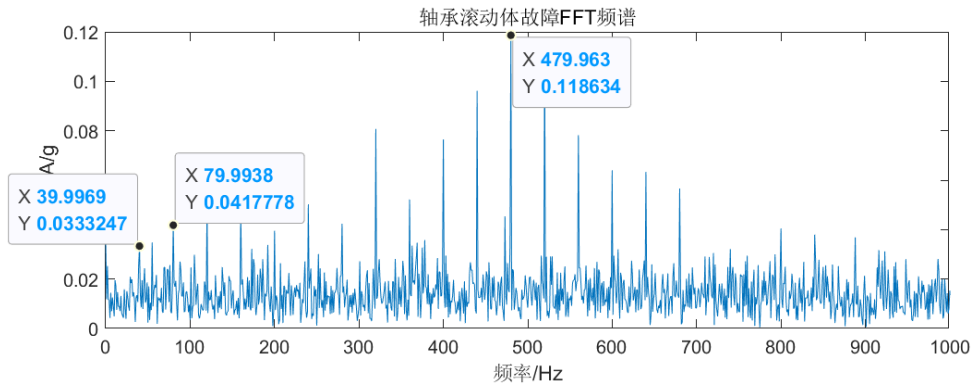
(a) 滚动体故障冲击信号时域波形



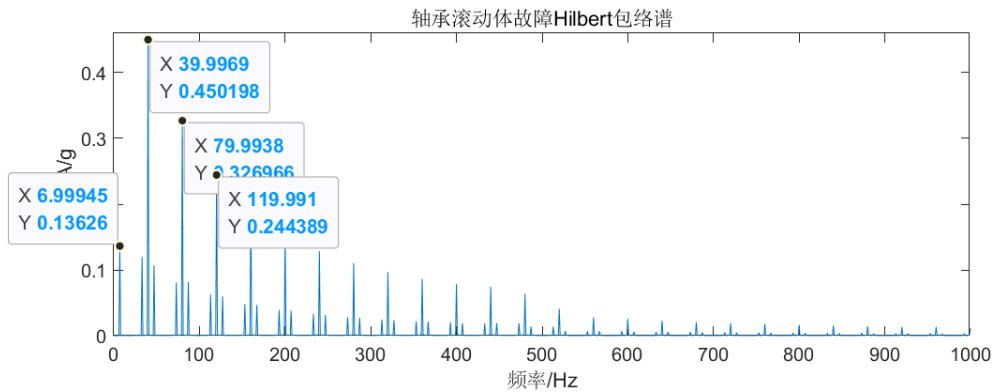
(b) 含噪声滚动体故障信号时域波形



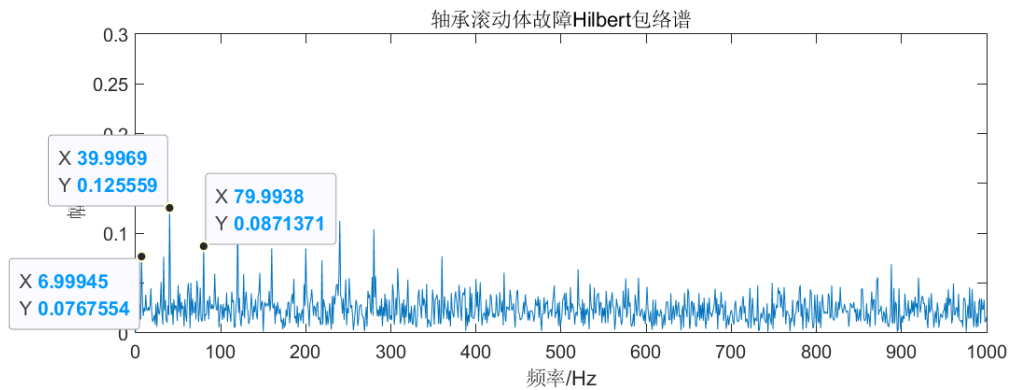
(c)滚动体故障冲击信号频谱



(d)含噪声滚动体故障信号频谱



(e)滚动体故障冲击信号包络谱



(f)含噪声滚动体故障信号包络谱

图 2.9 滚动体故障冲击仿真信号

在频谱中能看到共振频率 $f_n(500\text{Hz})$ 附件存在共振峰，在低频处能看到滚动体故障特征频率 $f_b(40\text{Hz})$ 及其倍频，谱峰两侧存在以保持架旋转频率 $f_c(7\text{Hz})$ 为间隔的调制谱线；包络谱中能清晰地看到保持架旋转频率 f_c 、故障特征频率 f_b 及其倍频和调制，其中， f_b 的谱线最大。加入噪声后，频谱依旧能看到共振频率附件存在共振峰，但难以看到低频处故障特征频率 f_b 及其倍频；包络谱中虽然存在故障特征频率的谱峰，但不明显。

2.3 齿轮和轴承耦合故障信号特征及仿真

2.3.1 齿轮箱齿轮及轴承结构特征

齿轮箱是对机械设备转速进行调节的关键载体，也是进行动力传递的主要设备。在齿轮箱的组成结构中主要包含了齿轮和轴承。在齿轮箱的复合故障中，轴承的振动对比齿轮振动更微弱，所以轴承的故障特征很容易被齿轮的故障特征淹没。

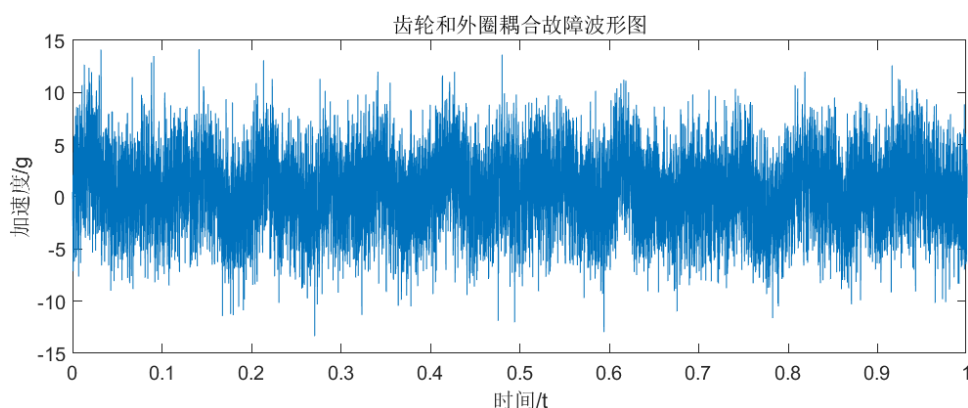
2.3.2 齿轮局部故障与轴承外圈故障的耦合故障仿真

将式(2-5)齿轮故障仿真信号和式(2-10)轴承外圈的故障仿真信号进行叠加，并加上信噪比为-5dB 的噪声，其中齿轮的啮合频率为 375Hz，转频为 15Hz。得到齿轮局部故障与轴承外圈故障的耦合故障仿真信号模型如公式(2-14)所示。

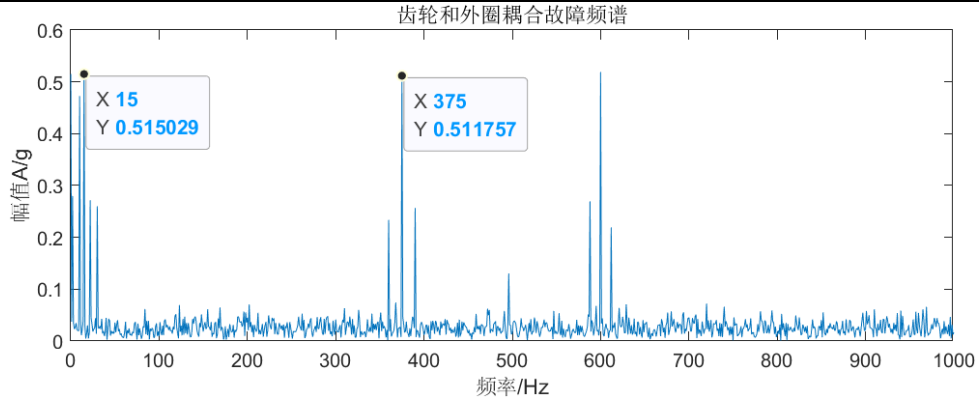
$$S_f(t) = \sum_{i=0}^N \left[c \cdot \exp(-2\pi\zeta f_n(t - \frac{i}{f_f})) \sin(\pi f_n \sqrt{1-\zeta^2}(t - \frac{i}{f_f})) \right] \quad (2-10)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^l A_i \left[1 + \sum_{j=1}^J B_j \cos(2\pi j f_n t + a_j) \right] \cos \left[2\pi f_z t + \sum_{k=1}^K C_k \sin(2\pi k f_n t + \beta_k) \right] \quad (2-5)$$

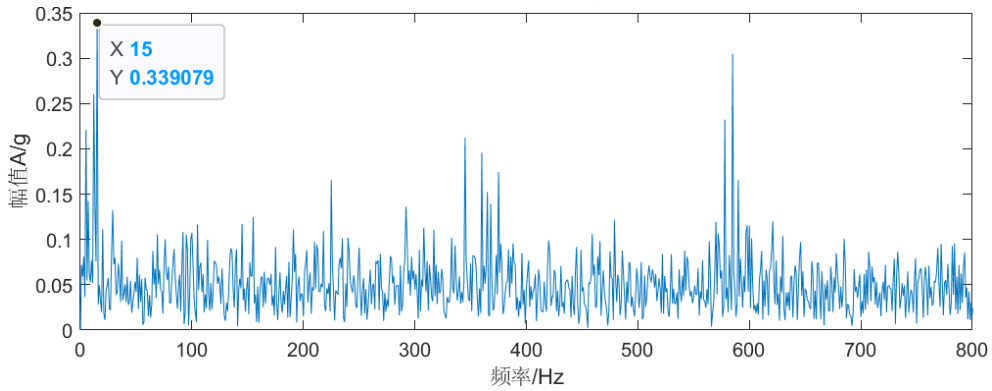
$$H(t) = S_f(t) + y(t) + n(t) \quad (2-14)$$



(a) 齿轮局部故障和轴承外圈故障的耦合信号时域波形



(b) 齿轮局部故障和轴承外圈故障的耦合信号频谱



(c) 齿轮局部故障和轴承外圈故障的耦合信号包络谱

图 2.8 齿轮局部故障和轴承外圈故障的耦合信号波形、频谱和包络谱

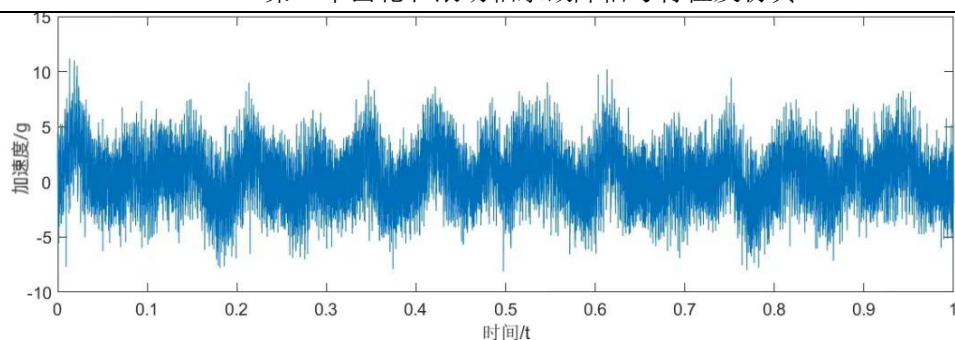
2.3.3 齿轮局部故障与轴承内圈故障的耦合故障仿真

将式(2-5)齿轮故障仿真信号和式(2-11)轴承内圈的故障仿真信号进行叠加,并加上信噪比为-5dB 的噪声,得到齿轮局部故障与轴承内圈故障的耦合故障仿真信号模型如公式(2-15)所示,图 2.9 为齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合故障仿真信号、频谱和包络谱。

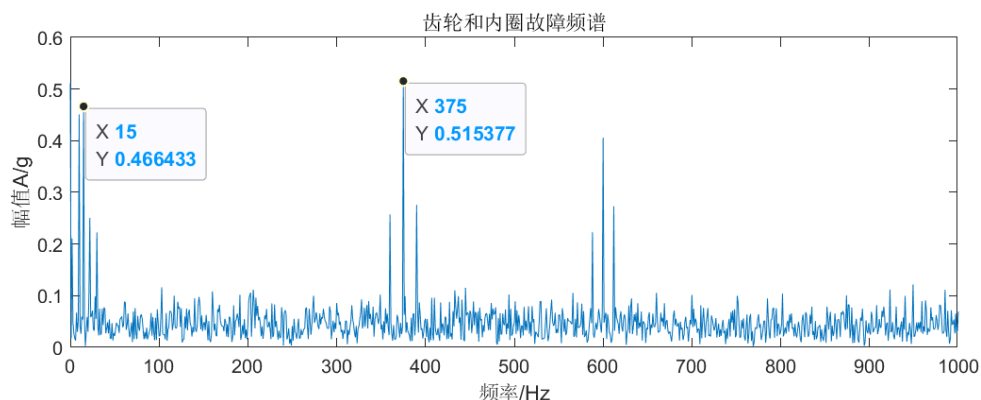
$$S_f(t) = (2 + \cos(2\pi f_r t)) \sum_{i=0}^N \left[c \cdot \exp(-2\pi \zeta f_n (t - \frac{i}{f_f})) \sin(\pi f_n \sqrt{1 - \zeta^2} (t - \frac{i}{f_f})) \right] \quad (2-11)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^l A_i \left[1 + \sum_{j=1}^J B_j \cos(2\pi j f_n t + a_j) \right] \cos \left[2\pi f_z t + \sum_{k=1}^K C_k \sin(2\pi k f_n t + \beta_k) \right] \quad (2-5)$$

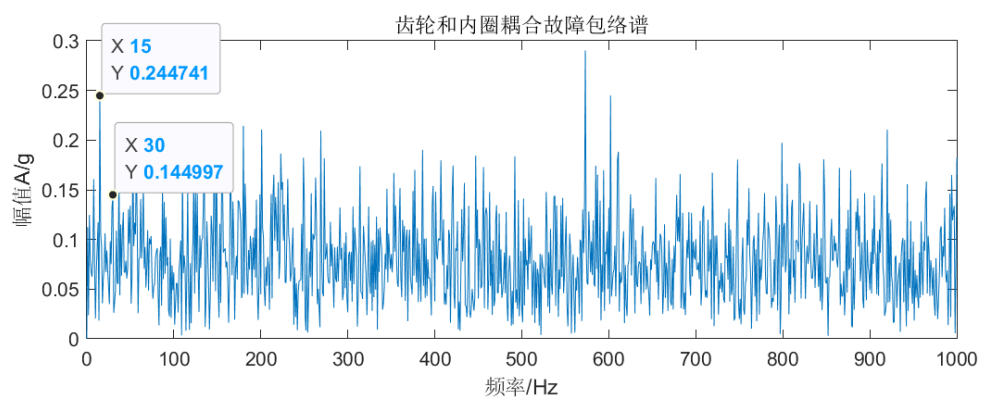
$$G(t) = S_f(t) + y(t) + n(t) \quad (2-15)$$



(a) 齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合信号时域波形



(b) 齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合信号频谱



(c) 齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合信号包络谱

图 2.9 齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合信号时域波形、频谱和包络谱

2.3.4 齿轮局部故障与轴承滚动体故障的耦合故障仿真

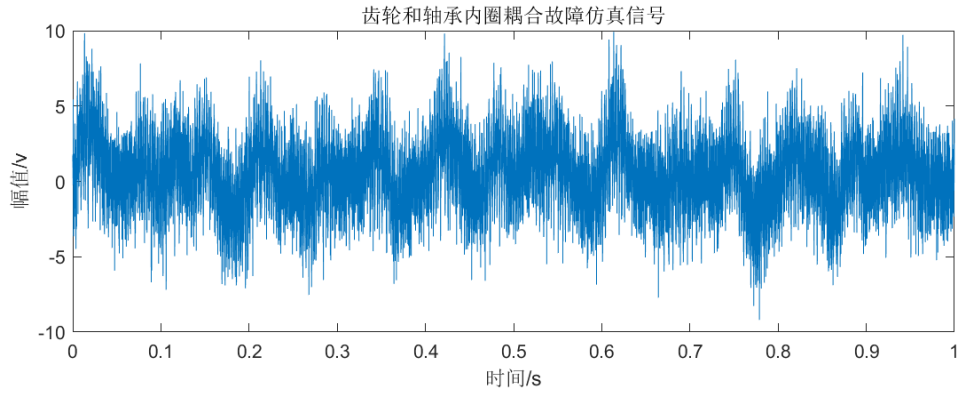
将式(2-5)齿轮故障仿真信号和式(2-11)轴承滚动体的故障仿真信号进行叠加,并加上信噪比为-5dB 的噪声,得到齿轮局部故障与轴承滚动体故障的耦合故障仿真信号模型如公式(2-16)所示。

$$g_i = c \cdot \exp(-2\pi\xi f_n(t - \frac{i}{f_f})) \sin(-2\pi f_n \sqrt{1-\xi^2}(t - \frac{i}{f_f})) \quad (2-13)$$

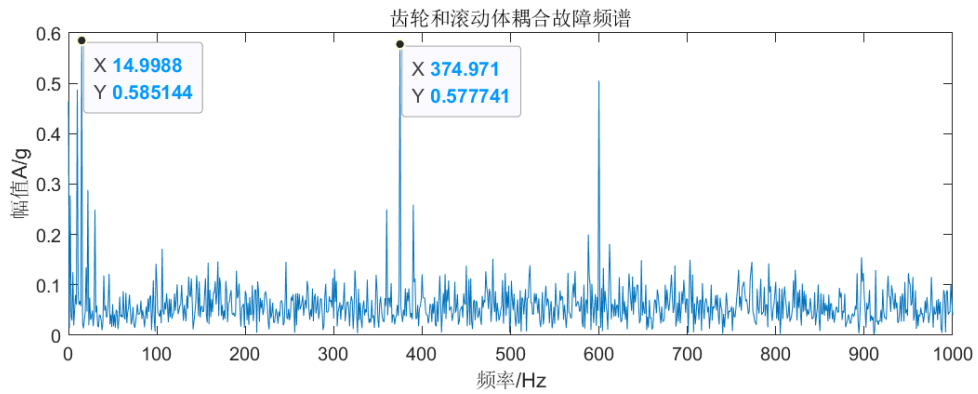
$$S_f(t) = A_1(2 + \cos(2\pi f_c t)) \sum_{i=0}^N g_i(t) + A_2(2 + \cos(2\pi f_c t)) \sum_{i=0}^N g_i(t - \frac{i}{2f_b}) \quad (2-12)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^l A_i \left[1 + \sum_{j=1}^J B_j \cos(2\pi j f_n t + a_j) \right] \cos \left[2\pi f_z t + \sum_{k=1}^K C_k \sin(2\pi k f_n t + \beta_k) \right] \quad (2-5)$$

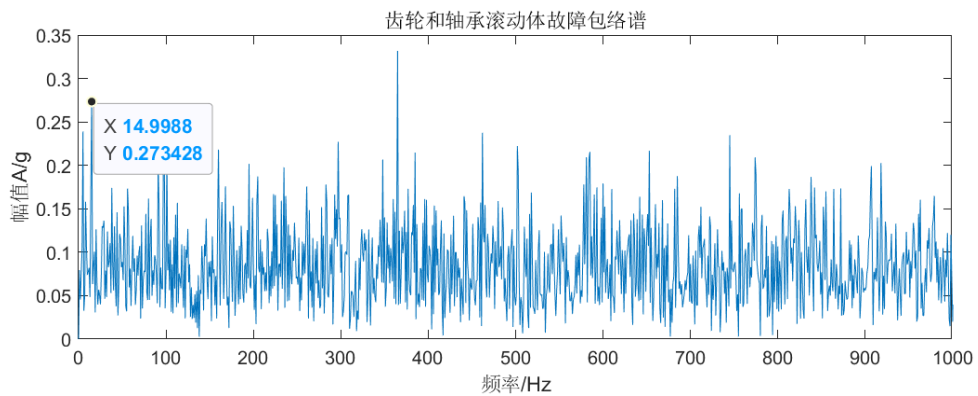
$$P(t) = S_f(t) + y(t) + n(t) \quad (2-16)$$



(a) 齿轮局部故障和轴承滚动体故障的耦合信号时域波形



(b) 齿轮局部故障和轴承滚动体故障的耦合信号频谱



(c) 齿轮局部故障和轴承滚动体故障的耦合信号包络谱

图 2.10 齿轮局部故障和轴承滚动体故障的耦合信号波形、频谱和包络谱

2.4 本章小结

本章介绍了齿轮和轴承的基本构造，以及齿轮和轴承经常发生的故障种类，分析了故障产生的原因；最后构建了齿轮、轴承和齿轮局部故障与轴承故障的耦合的故障信号模型，

并进行了齿轮和轴承的故障特征分析。为齿轮和轴承的振动故障诊断奠定了基础。

第三章 齿轮箱复杂信号分析方法

3.1 一种用于齿轮和滚动轴承耦合故障诊断的协同诊断方法

针对单一方法对齿轮箱齿轮和滚动轴承耦合故障难于诊断的问题，本文提出了一种用于齿轮和滚动轴承耦合故障诊断的协同诊断方法。该方法的基本思想是集成频带分解、降噪、包络分析、频谱分析等多种方法的优势进行协同诊断，方法流程如图 3.1 所示。

首先，通过离散随机解耦合，从被测信号中分离出齿轮信号和轴承信号的分离；然后，通过最小熵解卷积对分离后的信号进行逆滤波处理，得到去噪增强的故障信号；之后分别对齿轮和轴承信号使用变分模态分解，选择齿轮和轴承故障信号的最优频带，最后通过包络谱特征来提取发动机附件机匣振动信号的故障特征，从而实现故障诊断。

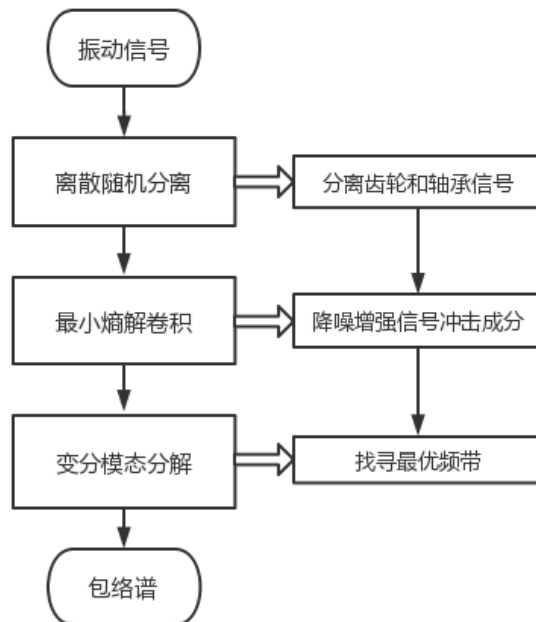


图 3.1 附件机匣振动信号故障协同诊断方法流程

3.2 关键技术

3.2.1 随机离散分离 DRS 方法

离散随机分离（Discrete Random Separation, DRS）^[16]通过获取主振动与延迟振动序列之间的频率响应函数，然后对其进行逆傅里叶变换，构建一个自适应噪声消除滤波器，在本文中是用于信号分离的方法，将信号分解成多个子带，并对每个子带进行独立处理，从而实现信号的分离。其原理简介如下：

设原始振动序列是 $x(n)$ ，将 $x(n)$ 在第 k 个周期处利用长度为 L 的窗函数 $w_L(n)$ 进行加窗截取获得主振动序列 $x_k(n)$ ，可以用下面的公式表达：

$$x_k(n) = x(n + kT)w_L(n), n = 0, \dots, N-1 \quad (3-1)$$

相同的，延迟振动序列 $x_k^d(n)$ 是 $w_L(n)$ 在第 k 个周期和时间延迟因子 τ 处截断的振动序列：

$$\begin{aligned} x_k^d(n) &= x(n + kT - L - \tau)w_L(n), \\ n &= 0, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (3-2)$$

其中主振动序列 $x_k(n)$ 和延迟振动序列 $x_k^d(n)$ 的构造方式如图 3.1 所示。

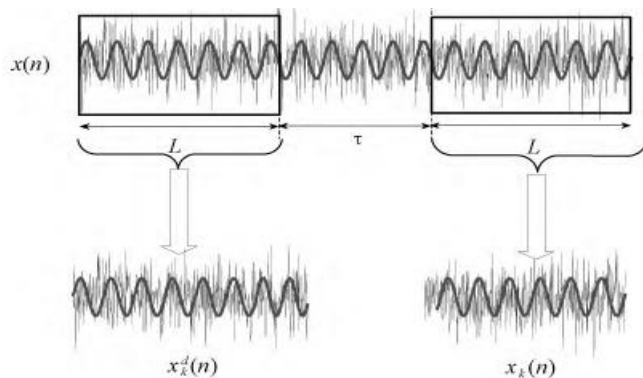


图 3.2 构造短时振动序列

DRS 的最重要部分是设计滤波器，它的目的是让延迟振动序列能够精准预测到主振动序列中的确定性成分。在构造 $x_k^d(n)$ 和 $x_k(n)$ 的时候， $x(n)$ 中的确定性成分在经过加窗截取之后仍然能够被精确预测到。

DRS 原始信号和延迟信号之间的频率响应函数 FRF 是使用类似于模态分析中公式得到的，式子如下：

$$H(f) = \frac{S_{x_k^d x_k}(f)}{S_{x_k^d x_k^d}(f)} = \frac{S_{P_k^d P_k}(f)}{S_{P_k^d P_k}(f) + S_{r_k^d r_k^d}(f)} \quad (3-3)$$

式子中， S_{UU} 和 S_{VV} 是自功率谱， S_{UV} 指 U,V 两个振动序列的互功率谱， $P_k(n)$ 和 $r_k(n)$ 分别是确定性部分和不确定性部分。对 $x_k(n)$ 和 $x_k^d(n)$ 进行离散傅里叶变换，分别得到 $X_{k,M}(f)$ 和 $X_{k,M}^d(f)$ 。K 个短时序列的 FRF 为：

$$\hat{H}(f) = \frac{\sum_{k=1}^K X_{k,M}^d(f) X_{k,M}(f)^*}{\sum_{k=1}^K X_{k,M}^d(f) X_{k,M}^d(f)^*} \quad (3-4)$$

式中 K 为振动序列，*是求共轭。将式子进行逆傅里叶变换获得长度为 M 的自参考自适应滤波器，滤波器的有效长度和频率分辨率取决于短序列的长度。在原始振动信号中应用这个滤波器可以分离出周期信号和随机信号。

3.2.2 最小熵解卷积 MED 方法

最小熵解卷积（Minimum Entropy Deconvolution, MED）^[23]的目的是在降低噪声的同时提取故障脉冲，因此即使在高噪声下也能产生清晰的检测结果。主要是设计一个大小为 L 的最优滤波器，使得逆滤波器后得到的输出信号近似于输入信号，即：

$$y(j) = \sum_{l=1}^L g(l)z(j-l) \quad (3-5)$$

本文实现最小熵解卷积的方法是目标函数法，最优滤波器的式子^[14]如下：

$$O_k(g(l)) = \frac{\sum_{j=1}^N y^k(j)}{\left[\sum_{j=1}^N y^2(j) \right]^{\frac{k}{2}}} \quad (3-6)$$

式中， k 取 4， N 是数据长度。根据最小熵准则， $O_k(\bullet)$ 的最大值对应的逆滤波 $g(l)$ 的最优值，得：

$$\frac{\partial O_k(g(l))}{\partial g(l)} = 0 \quad (3-7)$$

对（3-5）式求导得：

$$\frac{\partial y(j)}{\partial g(l)} = z(j-l) \quad (3-8)$$

把（3-6）和（3-8）带入（3-7）得：

$$\left[\frac{\sum_{j=1}^N y^2(j)}{\sum_{j=1}^N y^k(j)} \right] \sum_{j=1}^N y^{k-1}(j)z(j-l) = \sum_{p=1}^L g(p) \sum_{j=1}^N z(j-l)z(j-p) \quad (3-9)$$

根据 (3-9) 可以推导出矩阵式子:

$$b = Ac \quad (3-10)$$

$$\begin{cases} b_l = \alpha \sum_{j=1}^N y^{k-1}(j)z(j-1) \\ \partial = \frac{\sum_{j=1}^N y^2(j)}{\sum_{j=1}^N y^k(j)} \end{cases} \quad (3-11)$$

其中, b , c 都是 L 维列向量, A 是 $L \times L$ 自相矩阵。

MED 得具体实现流程可总结为:

- (1) 设置迭代次数上限, 终止阈值 T ;
- (2) 计算矩阵 A , 令 $c^0 = (0, 1, 0, \dots, 0)^T$;
- (3) 根据式子 (3-5), 代入信号 $z(i)$ 和 $c^{(m)}$ 计算出 $y^{(m)}$, m 是迭代次数;
- (4) 根据 (3-11) 计算 $b^{(m+1)}$, 再式 (3-10) 迭代出 $c^{(m+1)}$;
- (5) 根据式子 (3-6) 算出 $O_k(c^{(m)})$ 和 $O_k(c^{(m+1)})$, 计算迭代误差;
- (6) 若 $m < m_{\max}$ 且 $E < T$, 就进入步骤 (3) 继续循环, 否则, 输出最终参数 $c^{(end)}$;
- (7) 带入 $c^{(end)}$ 和 $z(i)$, 根基式子 (3-5) 计算出 $y(j)$ 。

3.2.3 变分模态分解 VMD 方法

变分模态分解 (Variational mode decomposition, VMD)^[24]将信号分解成多个振动模态 (Intrinsic mode function, IMF), 可以很好地抑制混叠现象的发生。

频带宽度受限的本征模态函数 (Band-Limited Intrinsic Mode Function, BIMF)^[25]表示为:

$$u_k = A_k(t) \cos[\phi_k(t)] \quad (3-12)$$

式中, $u_k(t)$ 是调幅调频信号, $A_k(t)$ 是信号的瞬时幅值, $\phi_k'(t)$ 是 $\phi_k(t)$ 的导数, 也是信号的瞬时频率。其中 $A_k(t)$ 和 $\phi_k'(t)$ 的变化都比较慢。

VMD 算法将信号从时域转化为频域, 结合约束条件, 在非递归的基础下得到最优的 IMF。因为在迭代过程中, IMF 的频带宽度和中心频率会一直变化, 所以信号会分解成不同频率范围的 IMF。

VMD 的变分约束模型：

$$\min_{\{u_k\}, \{w_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi} \right) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (3-13)$$

式中， $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ 是所有 BIMF 的集合， $\{w_k\} = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ 是频率集合。

若改变为非约束变分问题，建立拉格朗日函数，公式如下：

$$L(\{u_k\}, \{w_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi} \right) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (3-14)$$

式中， α 是频带宽度的数值， $\lambda(t)$ 是拉格朗日乘子。

VMD 算法实现流程如下：

- (1) 初始设置 $u_k^1(t)$ 、 $w_k^1(t)$ 和 λ^1 ；
- (2) 迭代循环 $n=n+1$ ，通过式 (3-15) 优化 $u_k(t)$ 和 $w_k(t)$ ；

$$\begin{cases} \hat{u}_k^{n+1}(w) = \frac{f(w) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(w) + \frac{\hat{\lambda}(w)}{2}}{1 + 2\alpha(w - w_k)^2} \\ w_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty w |\hat{u}(w)|^2 dw}{\int_0^\infty |\hat{u}(w)|^2 dw} \end{cases} \quad (3-15)$$

- (3) 用 $\hat{\lambda}^{n+1}(w) = \hat{\lambda}^n(w) + \tau(f(w) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(w))$ 来优化 λ ；

- (4) 重复步骤 (2)、(3)，直到满足条件，输出 $u_k(t)$ 。

3.2.4 包络解调分析方法

包络解调分析方法包括包络检波和频谱分析两部分，主要通过分析包络信号来得到故障特征。其目的解调高频处与故障有关的调制信号，有效地将从调幅信号中分离出故障信号。

通常先把原始信号转化为解析信号，再对解析信号进行处理，对于原始信号 $x_I(t)$ ，其希尔伯特变换^[26]为：

$$H\{x_I(t)\} = \hat{x}_1(t) = x_I(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3-16)$$

式中， $\hat{x}_1(t)$ 是 $x_I(t)$ 的希尔伯特变换。

希尔伯特反变换公式为：

$$x_1(t) = -\hat{x}_1(t) * \frac{1}{\pi} = -\frac{1}{\pi} \int \frac{\hat{x}(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3-17)$$

式中*是卷积， τ 是平移参数。

解析信号 $x_I(t)$ 公式：

$$z(t) = x_1(t) + j\hat{x}_1(t) = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (3-18)$$

$$A(t) = \sqrt{x_1^2(t) + \hat{x}_1^2(t)} \quad (3-19)$$

$$\phi(t) = \arctan \left[\frac{\hat{x}_1(t)}{x_1(t)} \right] \quad (3-20)$$

时域信号可以通过希尔伯特变换为时域解析信号，而解析信号的实部是信号本身，其幅值是信号的包络。希尔伯特变换的包络解调原理如图 3.3 所示^[27]。

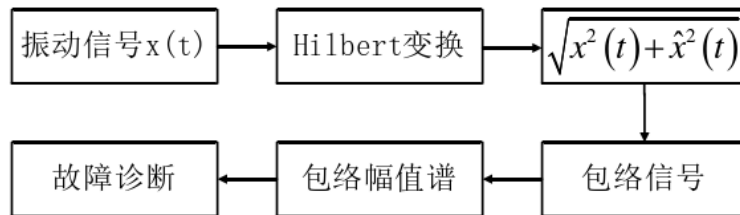


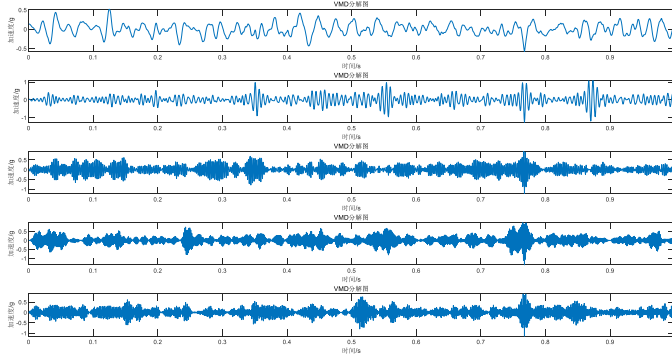
图 3.3 希尔伯特变换的包络解调原理

3.3 基于仿真数据的方法验证

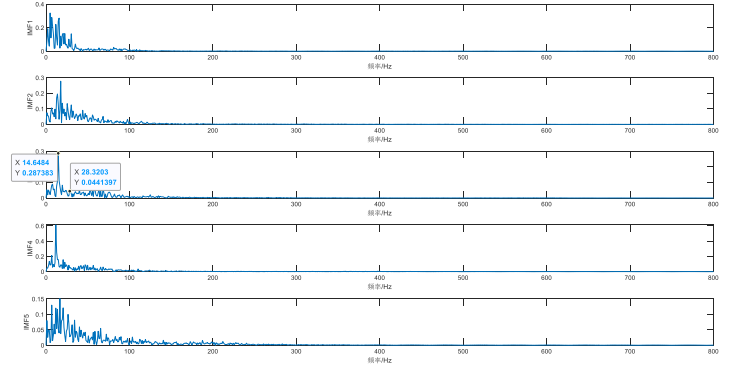
为验证所提协同诊断方法的有效性和可靠性，将轴承和齿轮的仿真信号进行协同诊断和谱分析。首先通过 DRS 分离出齿轮和轴承信号，然后将分离出的齿轮信号和轴承信号分别进行 MED 滤波处理，再通过 VMD 找寻各自的最优频带，并做谱分析，将直接包络谱和协同诊断包络谱的结果进行对比。

3.3.1 齿轮局部故障和轴承外圈的耦合仿真故障信号协同诊断

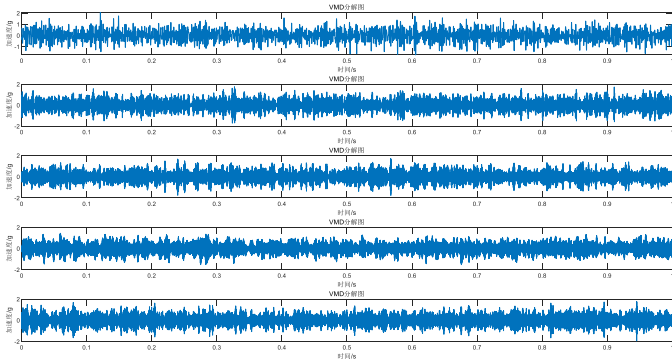
对小节 2.3.2 的齿轮局部故障和轴承外圈故障的耦合故障仿真信号进行协同诊断，如图 3.3 为齿轮和轴承外圈的耦合信号协同诊断后齿轮信号和轴承外圈信号的 5 个分量的时域波形和包络谱。图 3.4 为直接包络谱和协同诊断包络谱的结果对比。



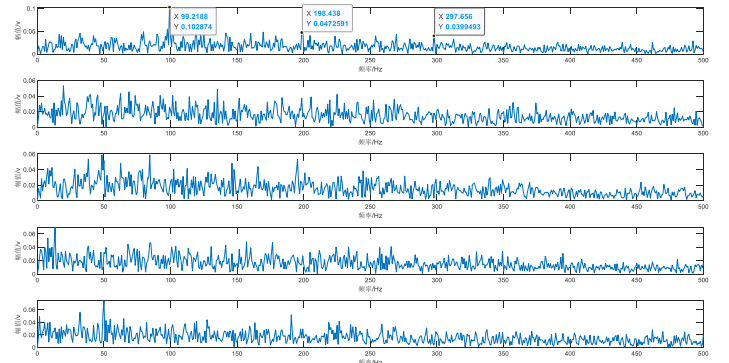
(a) 齿轮信号的 5 个 IMF 时域波形



(b) 齿轮信号的 5 个 IMF 包络谱

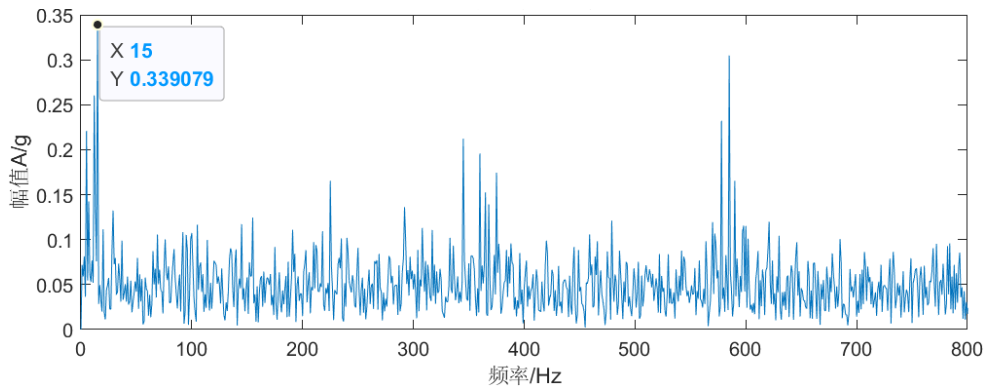


(c) 轴承外圈信号的 5 个 IMF 时域波形

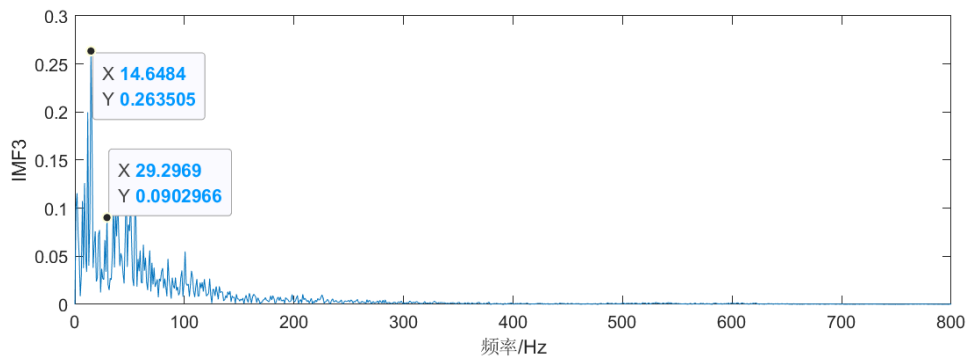


(d) 轴承外圈信号的 5 个 IMF 包络谱

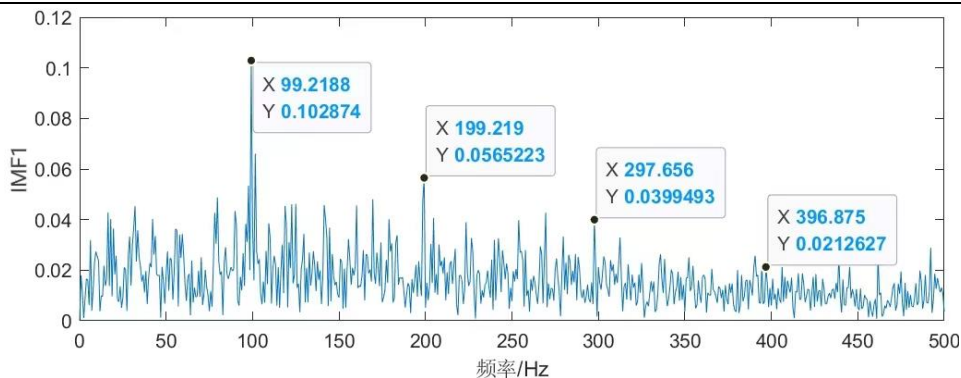
图 3.3 耦合信号协同诊断后齿轮信号和轴承外圈信号的 5 个分量时域波形和包络谱



(a) 齿轮和轴承外圈耦合仿真故障信号直接包络谱



(b) 齿轮仿真故障信号协同诊断包络谱（第 3 分量）



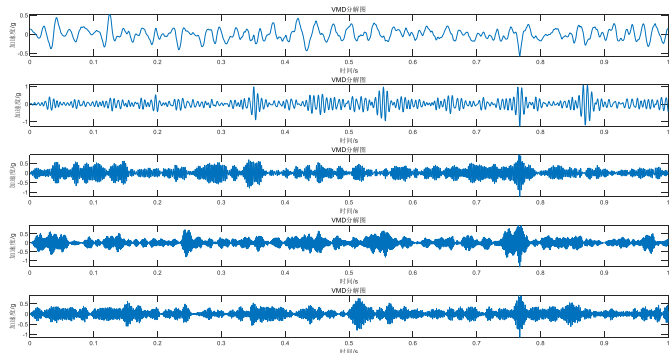
(c)轴承外圈仿真故障信号协同诊断包络谱 (第 1 分量)

图 3.4 分离出的齿轮仿真信号和轴承外圈仿真故障结果对比

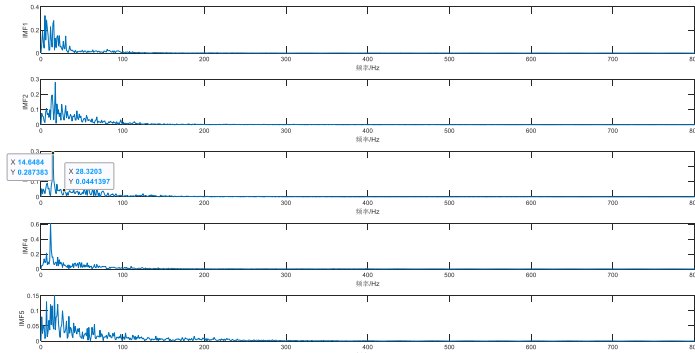
图 3.4 中，齿轮局部故障和轴承外圈故障的耦合故障直接包络谱中只能看到齿轮故障特征频率 15Hz，在齿轮箱的耦合故障中，轴承的振动对比齿轮振动更微弱，所以轴承的故障特征很容易被齿轮的故障特征淹没。协同诊断包络谱提取出的齿轮的故障特征频率 (15Hz) 和轴承外圈的故障特征频率 (99Hz) 及其倍频都很明显、清晰。充分验证了所提协同诊断法在耦合故障信号中提取故障特征方面的优越性。

3.3.2 齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合故障仿真信号协同诊断

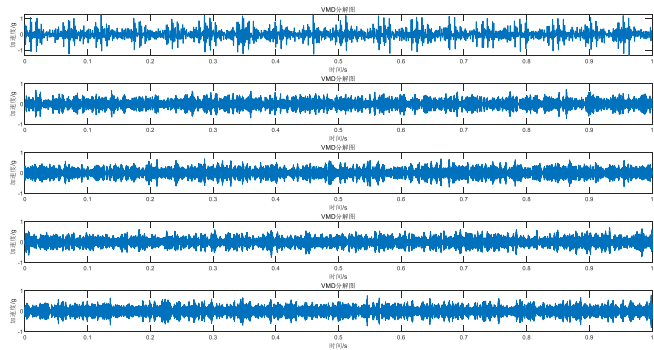
对小节 2.3.3 的齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合故障仿真信号进行协同诊断，如图 3.5 为齿轮和轴承内圈的耦合信号协同诊断后齿轮信号和轴承内圈信号的 5 个分量的时域波形和包络谱。图 3.6 为直接包络谱和协同诊断包络谱的结果对比。



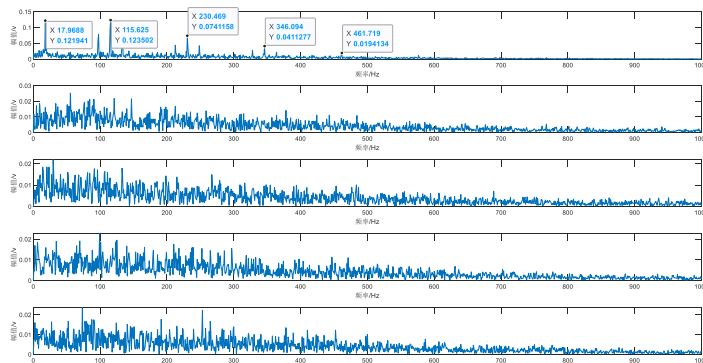
(a)齿轮信号的 5 个 IMF 时域波形



(b)齿轮信号的 5 个 IMF 包络谱

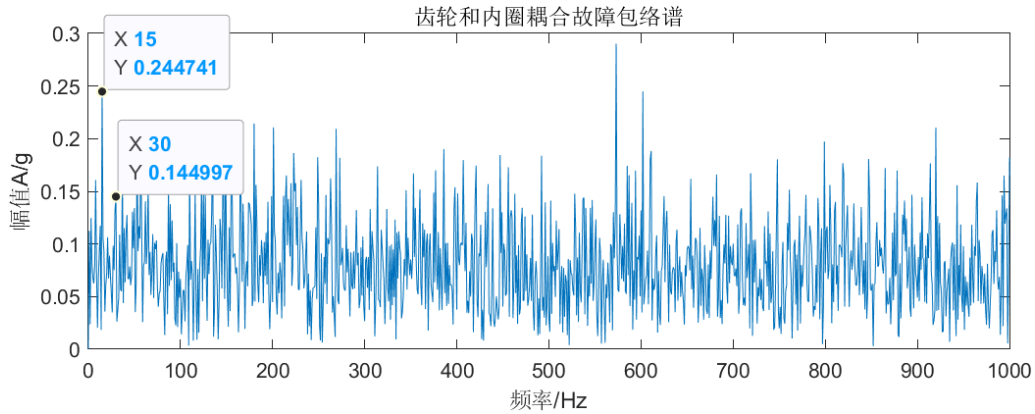


(a)轴承内圈信号的 5 个 IMF 波形

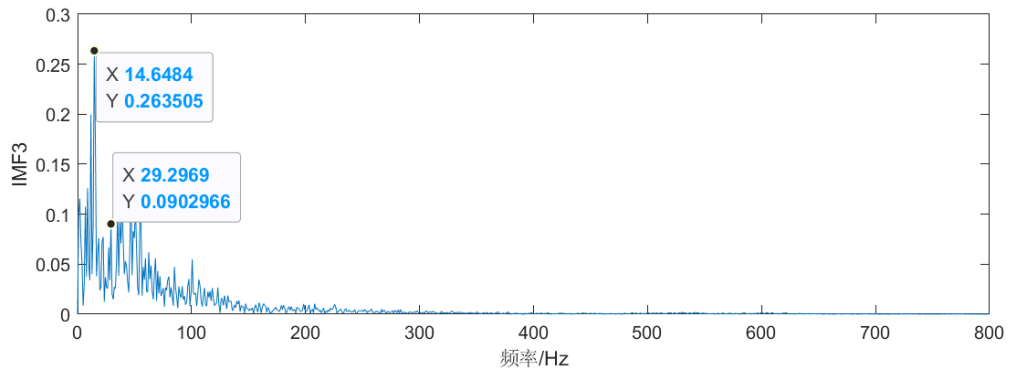


(b)轴承内圈信号的 5 个 IMF 包络谱

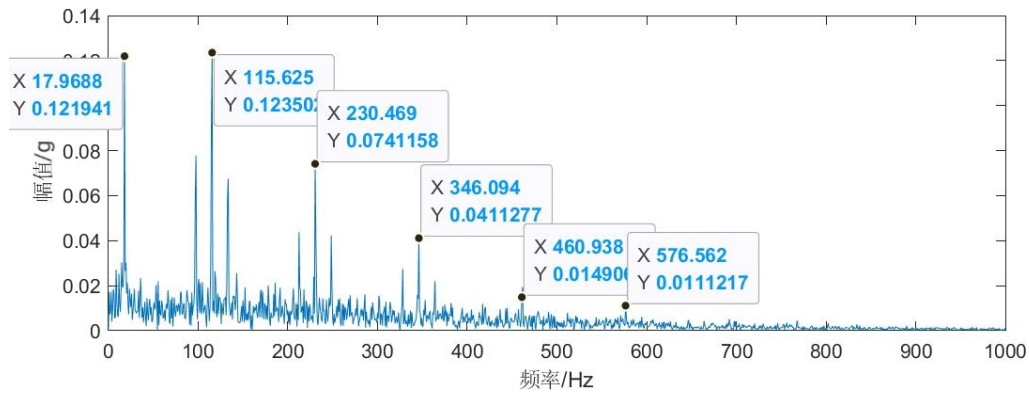
图 3.5 耦合信号协同诊断结果



(a) 齿轮和轴承内圈耦合故障仿真信号直接包络谱



(b) 齿轮仿真故障信号协同诊断包络谱（第 3 分量）



(c) 轴承内圈仿真故障信号协同诊断包络谱（第 1 分量）

图 3.6 分离出的齿轮仿真信号和轴承内圈仿真故障结果对比

图 3.6 齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合故障直接包络谱中只能看到齿轮故障特征频率 15Hz。在齿轮箱的耦合故障中，轴承的振动对比齿轮振动更微弱，所以轴承的故障特征很容易被齿轮的故障特征淹没。协同诊断包络谱提取出的齿轮的故障特征频率(15Hz)、轴承的转频(18Hz)和内圈的故障特征频率(115Hz)及其倍频都很明显、清晰。充分验证了所提协同诊断法在齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合故障信号中提取故障特征方面的优越性。

3.3.3 齿轮局部故障和轴承滚动体故障的耦合故障仿真信号协同诊断

对小节 2.3.4 的齿轮局部故障和轴承滚动体故障的耦合故障仿真信号进行协同诊断，如图 3.7 为齿轮和轴承滚动体的耦合信号协同诊断后齿轮信号和轴承滚动体信号的 5 个分量的时域波形和包络谱。图 3.8 为直接包络谱和协同诊断包络谱的结果对比。

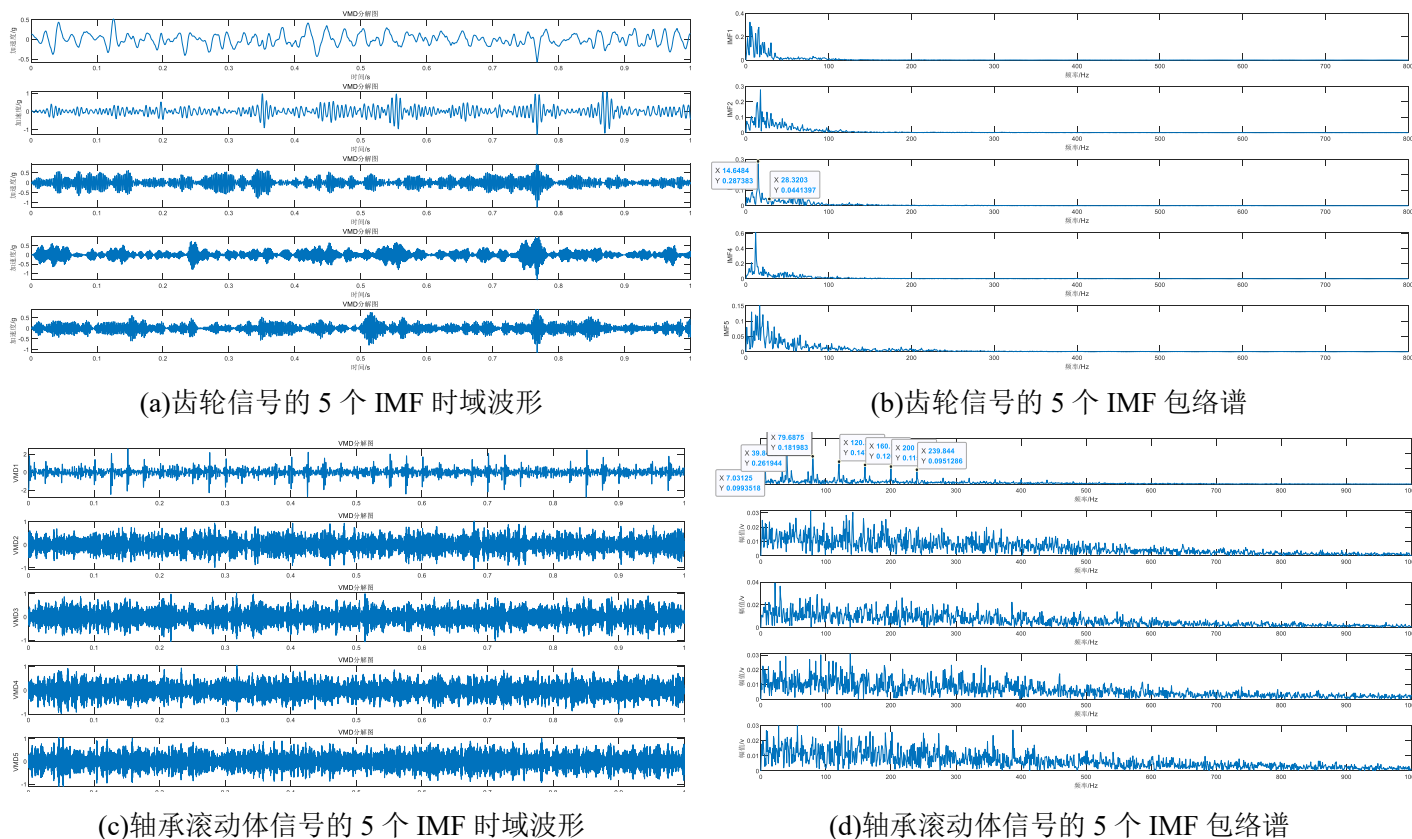
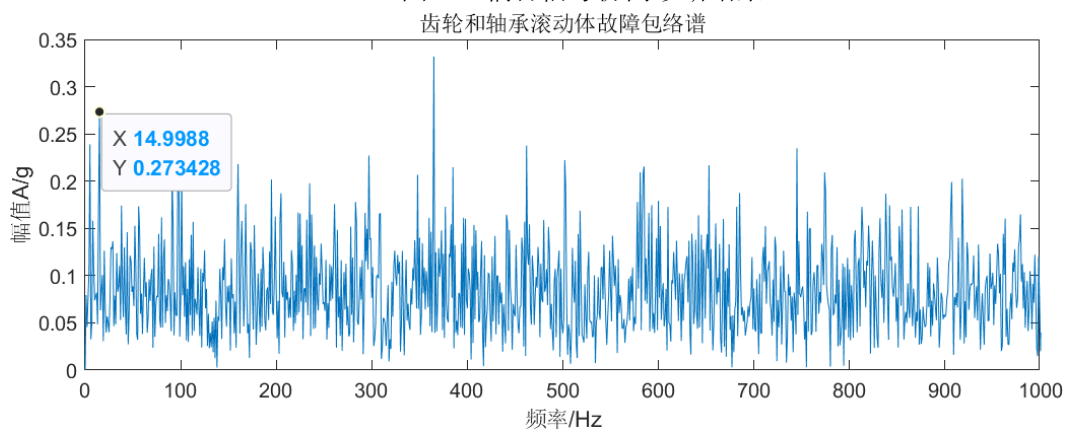
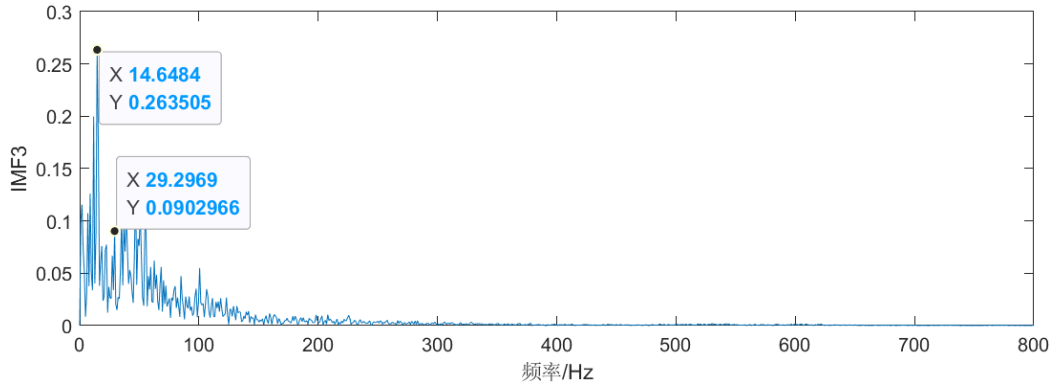
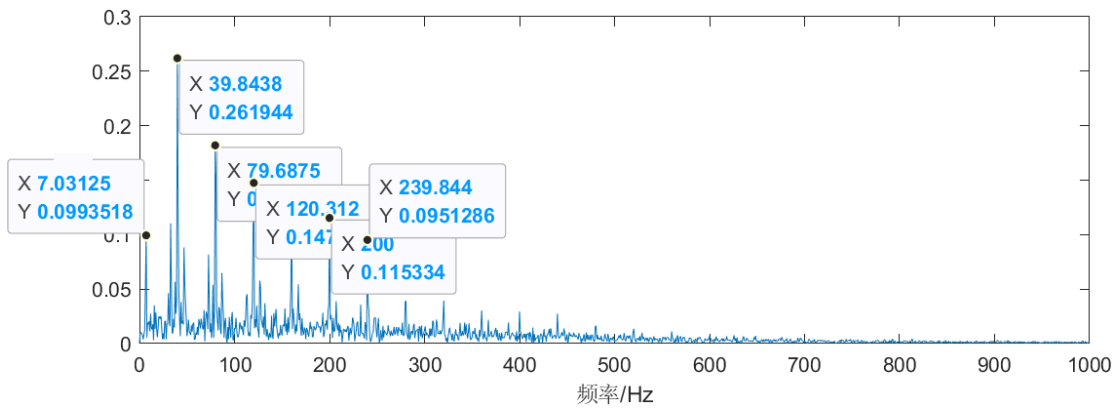


图 3.7 耦合信号协同诊断结果





(b) 齿轮仿真故障信号协同诊断包络谱（第 3 分量）



(c) 轴承滚动体仿真故障信号协同诊断包络谱（第 1 分量）

图 3.8 分离出的齿轮仿真信号和轴承内圈仿真故障结果对比

图 3.8 齿轮局部故障和轴承滚动体故障的耦合故障直接包络谱中只能看到齿轮故障特征频率 15Hz。在齿轮箱的耦合故障中，轴承的振动对比齿轮振动更微弱，所以轴承的故障特征很容易被齿轮的故障特征淹没。协同诊断包络谱提取出的齿轮的故障特征频率(15Hz)、轴承保持架的频率(7Hz)和滚动体的故障特征频率(40Hz)及其倍频都很明显、清晰。充分验证了所提协同诊断法在齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合故障信号中提取故障特征方面的优越性。

3.4 本章小结

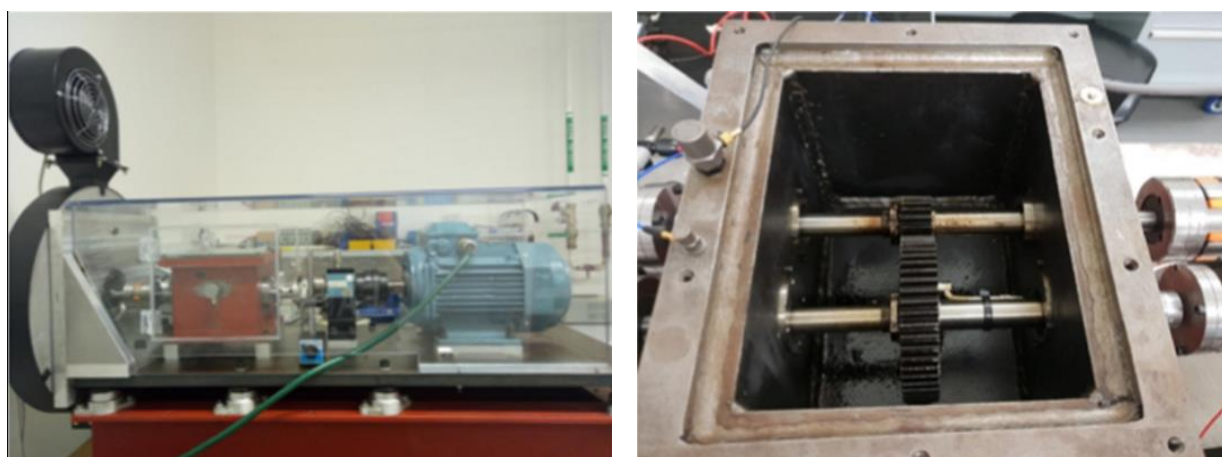
本章主要针对齿轮箱微弱故障信号的故障诊断技术进行了研究，提出了一种微弱故障的协同诊断方法。首先，介绍了离散随机分离、最小熵解卷积、变分模态分解、包络解调的基本原理，并基于齿轮和轴承的耦合故障仿真数据对协同诊断方法的效果进行了分析，结果表明：协同诊断法更有效地消除传递路径和复杂噪声的影响，在提取齿轮箱复合故障特征方面具有优越性。

第四章齿轮和轴承故障特征提取方法的试验验证

4.1 基于齿轮和轴承公开数据集的方法验证

4.1.1 基于 UNSW 全寿命齿轮数据集的验证

本文用到的是基于 UNSW 全寿命齿轮数据集^[28]。齿轮的故障测试是在新南威尔士大学的单级正齿轮变速箱试验台上进行的，实验台包括齿轮箱、扭矩计、电动机、编码器和制动器等实验设备。如图 4.1 齿轮箱试验台所示。

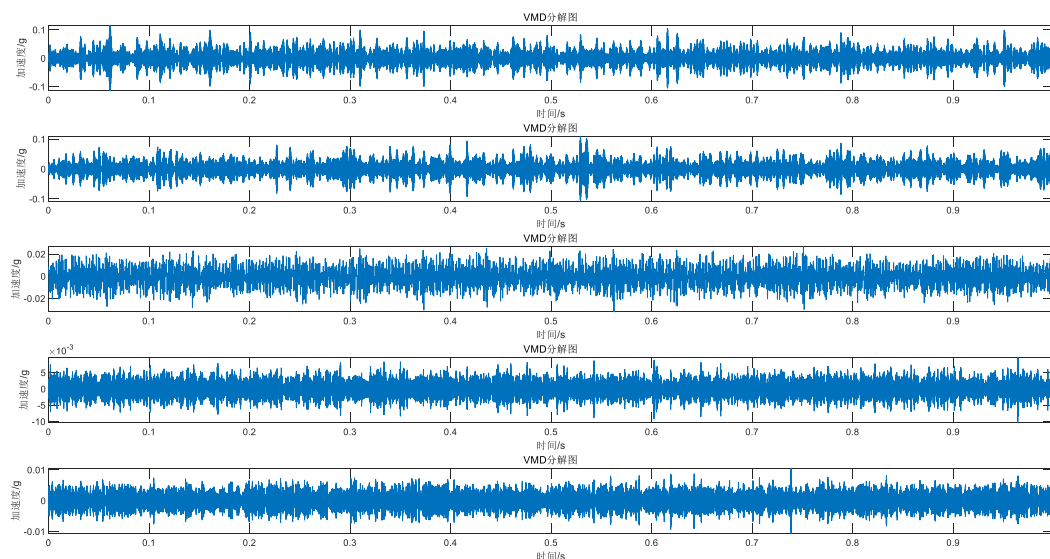


(a) 齿轮箱装置图

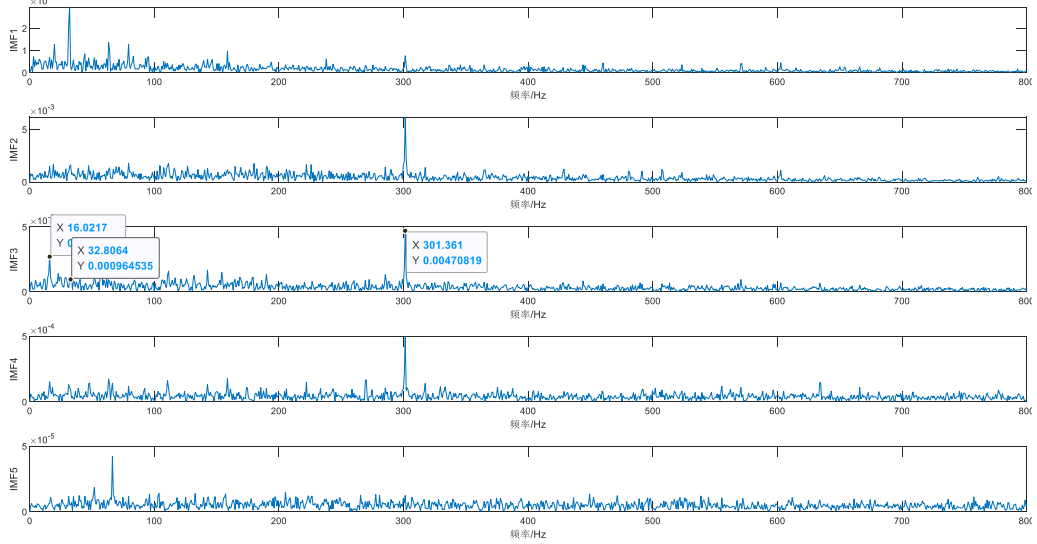
(b) 齿轮箱的细节

图 4.1 齿轮箱试验台

试验设置采样频率 f_s 为 100kHz, 输入轴转速 r_{in} 为 951r/min, 即齿轮的转频 f_r 为 16Hz, 啮合频率 f_m 为 301Hz。基于 DRS、MED、VMD 三种信号处理方法, 将它们协同对齿轮的故障信号进行处理分析。最终得到一个降噪增强, 消除了路径影响并且是最优频带的齿轮故障信号。如图 4.2 为齿轮协同诊断后 5 个分量的时域波形和包络谱。



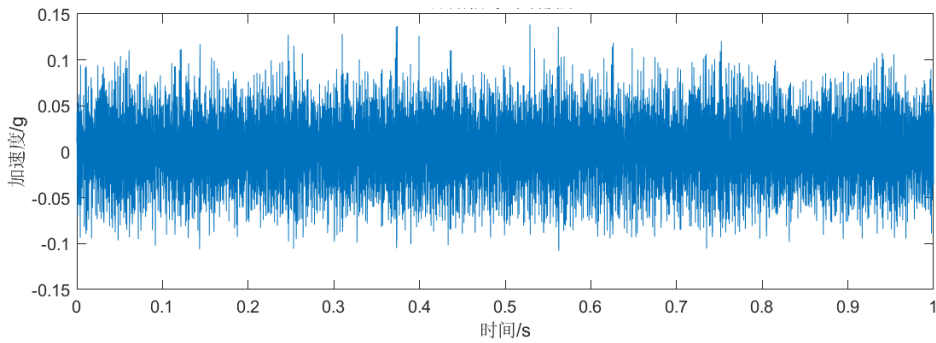
(a) 齿轮实测信号的 5 个 IMF 时域波形



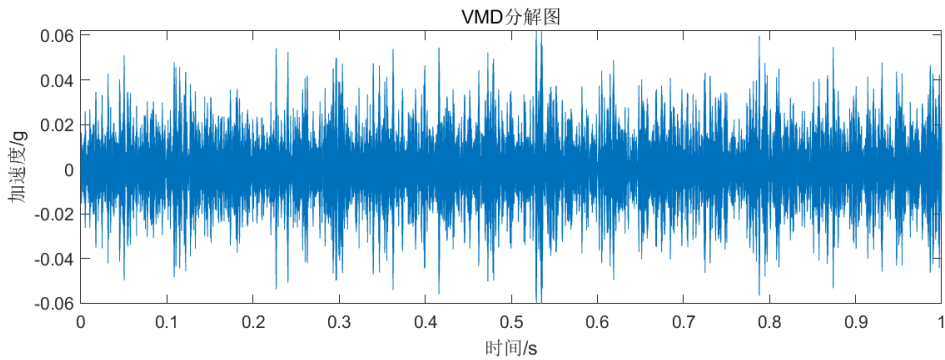
(b) 齿轮实测信号的 5 个 IMF 包络谱

图 4.2 齿轮协同诊断后 5 个分量的时域波形和包络谱

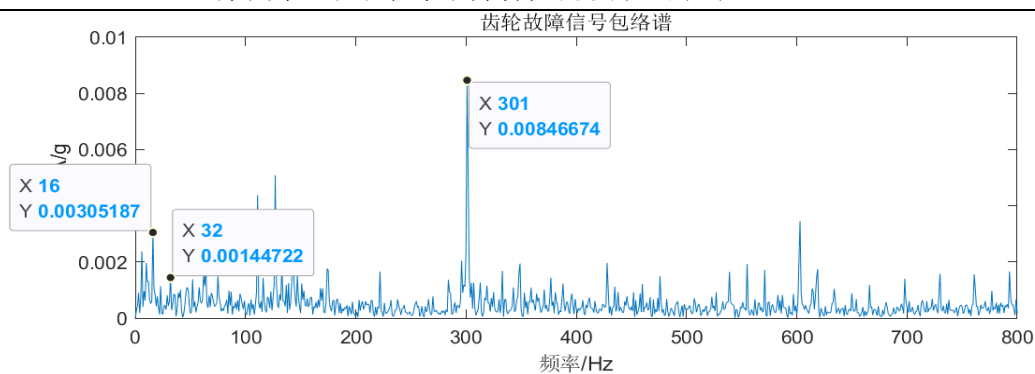
由图 4.2 看出 IMF3 包络谱分量中故障特征频率被提取，故选取第 3 分量进行对比验证，如图 4.3 齿轮实测信号结果对比所示。



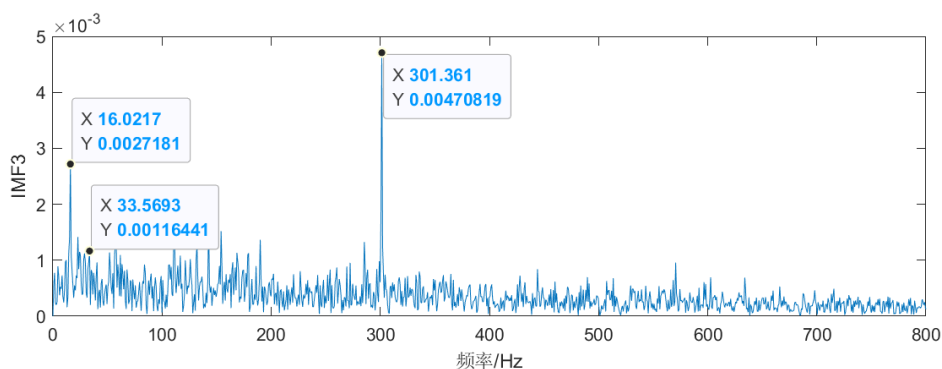
(a) 齿轮实测信号时域波形



(b) 协同诊断后的时域波形（第 3 分量）



(c) 齿轮实测信号直接包络谱



(d) 齿轮实测信号协调诊断包络谱 (第3分量)

图 4.3 齿轮实测信号故障结果对比

从图 4.3 可以看出, 尽管在直接包络谱和协同诊断包络谱中均能发现故障齿轮的特征频率 16Hz、以及齿轮啮合频率 301Hz 对应的谱峰, 但相对而言, 直接包络谱包含的干扰频率较多, 协同诊断法得到的包络谱谱线更为清晰。

4.1.2 基于美国西储大学的滚动轴承数据集的验证

本文选用了美国西储大学轴承数据中心公开数据集。实验台包括电动机、译码器、功率测试计和电子控制器等实验设备。在不同的轴承型号和不同的条件下, 测得的振动信号。实验设备如图 4.3 所示。

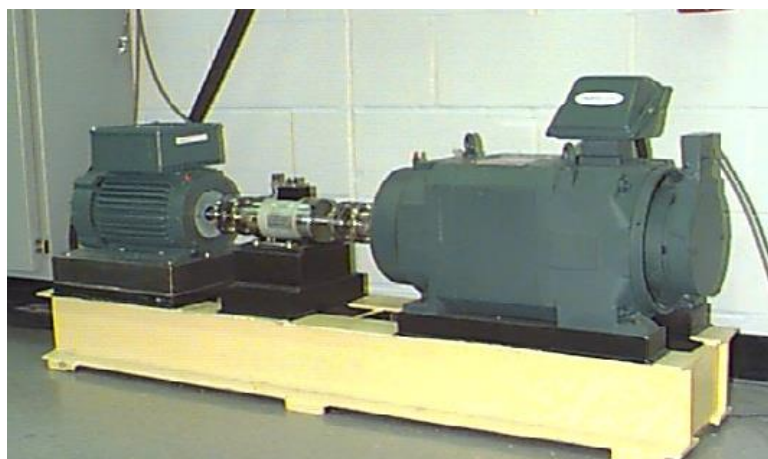


图 4.3 滚动轴承实验台

表 1 轴承几何尺寸（单位 mm）

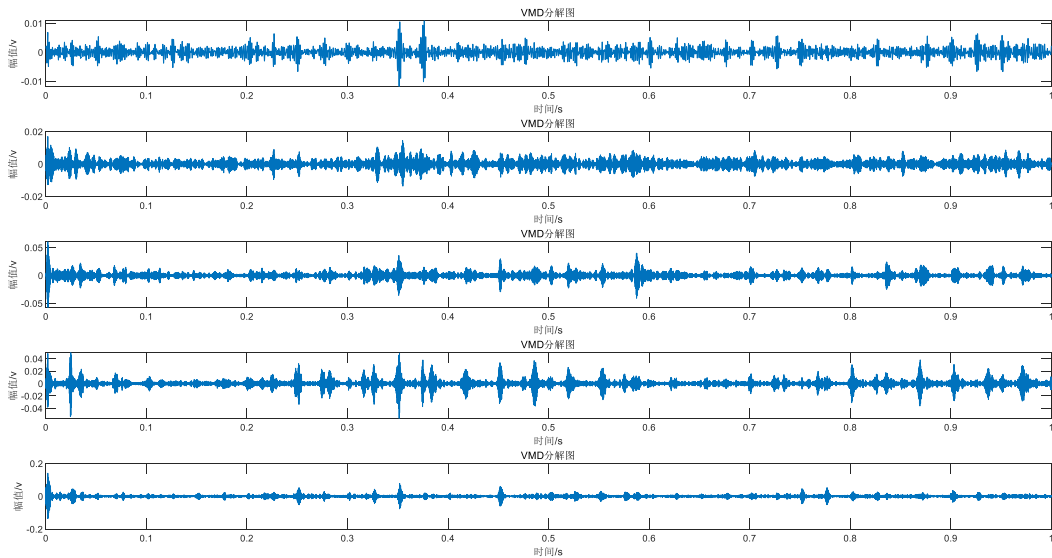
型号	内圈直径	外圈直径	厚度	滚动体直径	节径
6203	17.0002	39.9999	11.9990	6.7462	28.4988
6205	25.0012	51.9989	0.5906	15.0012	39.0398

表 2 轴承各部件的故障频率倍数

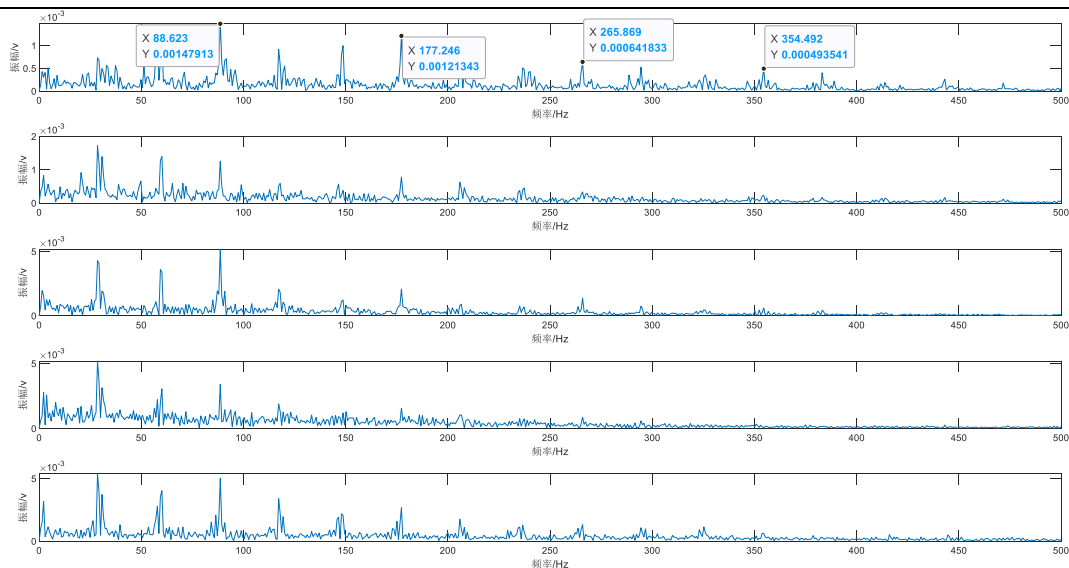
型号	内圈	外圈	保持架	滚动体
6203	4.9469	3.0530	0.3817	3.9874
6205	5.4152	3.5848	0.39828	4.7135

设信号的采样频率是 12kHz，在电动机的风扇段和驱动端各放置一个加速器传感器。两端的轴承型号是 6203 和 6205。实验采用电火花加工来制造损伤，主要模拟轴承的故障。

本文研究选用轴承型号为 6203，滚珠数 Z 为 8，再根据轴承的几何尺寸以及对应的各部件故障频率倍数，由公式(2-6)、(2-7)、(2-8)得轴承外圈、内圈和滚动体的故障频率分别是 88Hz, 144Hz 和 239Hz。主要将轴承内外圈、滚动体的实测信号分别通过 DRS 进行信号分离，在将分离后的随机信号输入到 MED，对信号进行滤波处理，最后把降噪增强后的信号输入到 VMD 中找寻最优频带，进行包络谱。图 4.4、图 4.6、图 4.8 是对经过 DRS 和 MED 处理后的信号进行 VMD 分解，得到的 IMF 分量的时域波形和包络谱。图 4.5、图 4.7、图 4.9 分别为 6203 轴承外圈、内圈和滚动体的实测信号直接包络谱和协同诊断包络谱的对比。



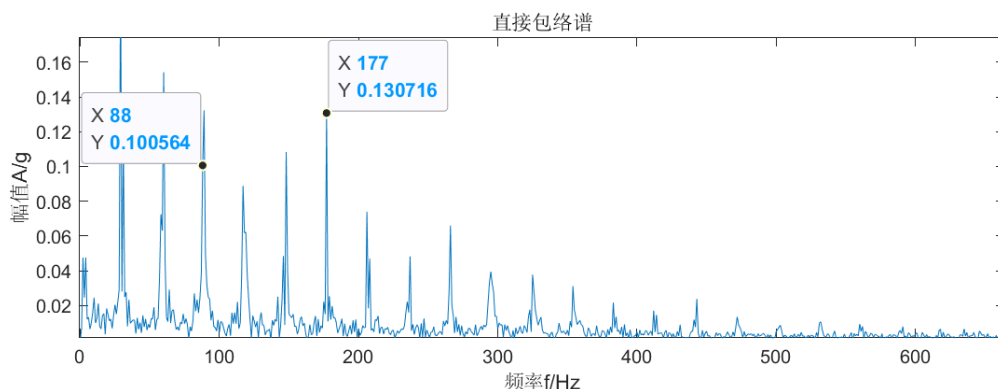
(a)外圈 5 个 IMF 时域波形



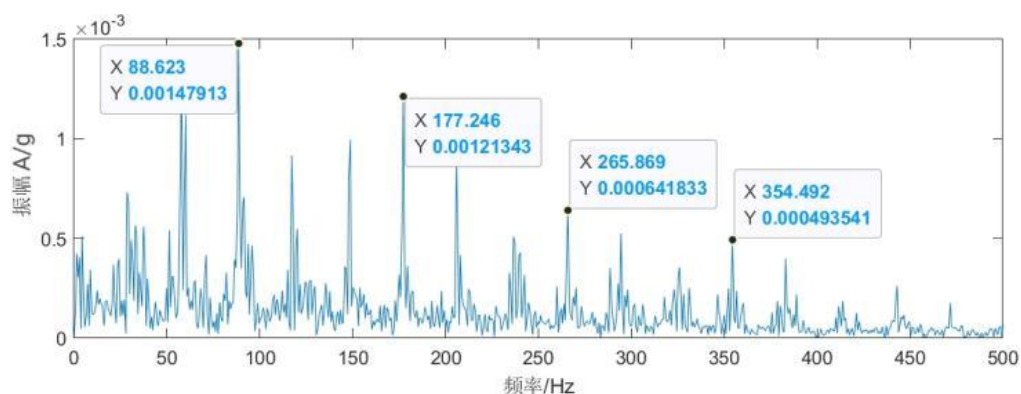
(b)外圈 5 个 IMF 包络谱

图 4.4 外圈 5 个分量的时域波形和包络谱

由图 4.4(a) 和图 4.4(b)中看出第 1 分量中可以清晰地看出轴承外圈故障频率 $F_1(88\text{Hz})$ 及其倍频 $2F_1, 3F_1$ 。表明外圈故障频率较好识别，协同诊断方法优势不明显。

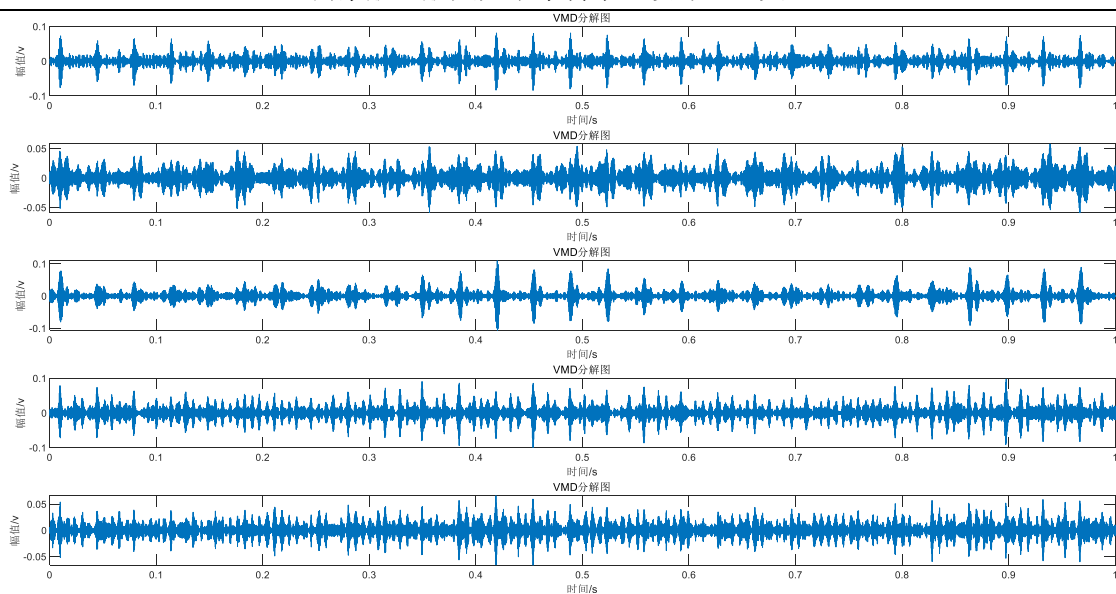


(a)轴承外圈实测信号的直接包络谱

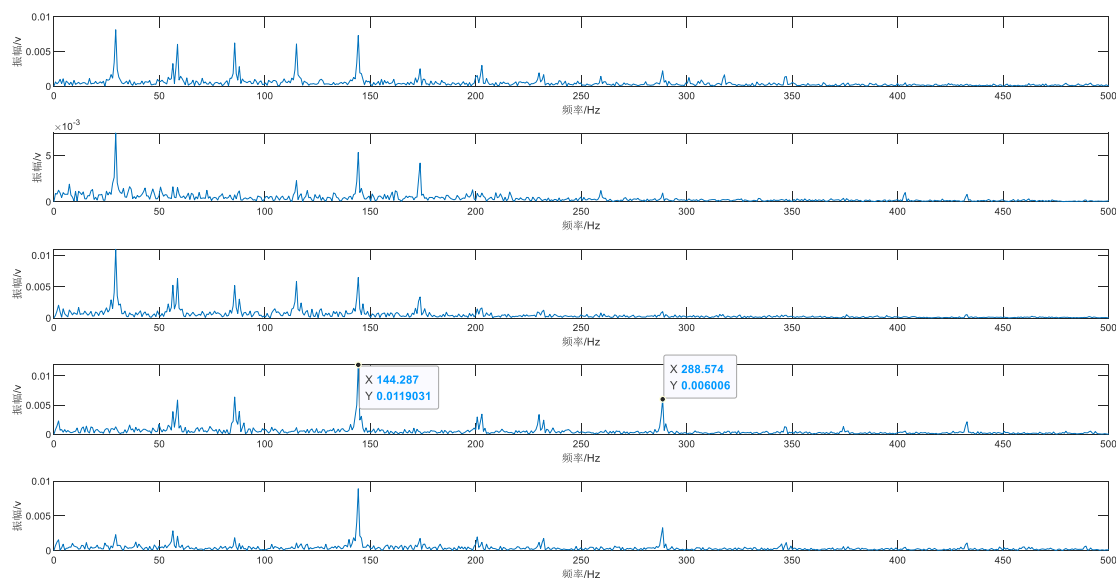


(b)协同诊断包络谱（第 1 分量）

图 4.5 6203 轴承外圈结果对比



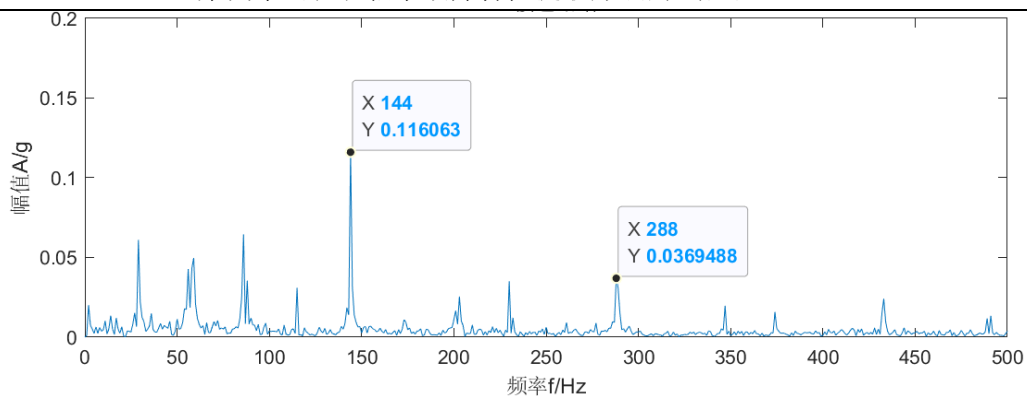
(a)内圈 5 个 IMF 时域波形



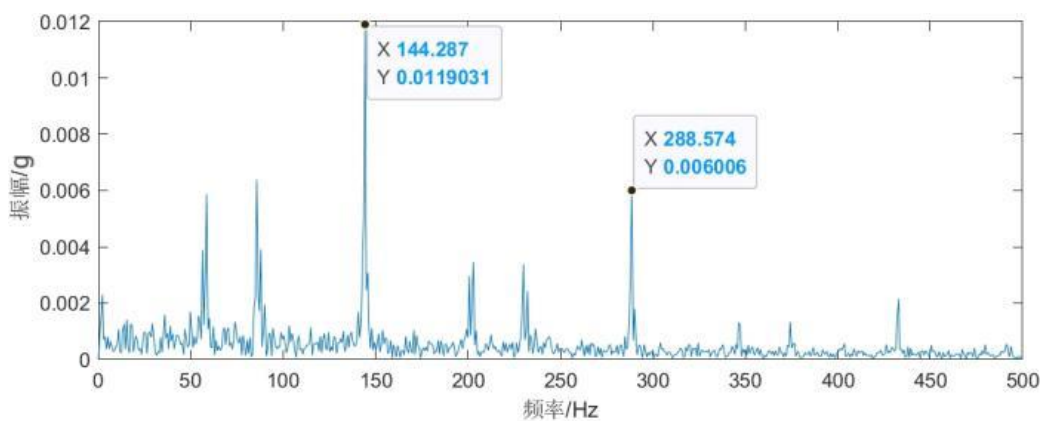
(b)内圈 5 个 IMF 包络谱

图 4.6 内圈 5 个分量的时域波形和包络谱

由图 4.6 (a) 和图 4.6(b)中看出第 4 分量中可以清晰地看出轴承内圈故障频率 $F_2(144\text{Hz})$ 及其倍频。但是协同诊断更为清晰，表明协同诊断方法对于难于诊断的内圈故障更为有效，充分表明了协同诊断方法的有效性及其优势。

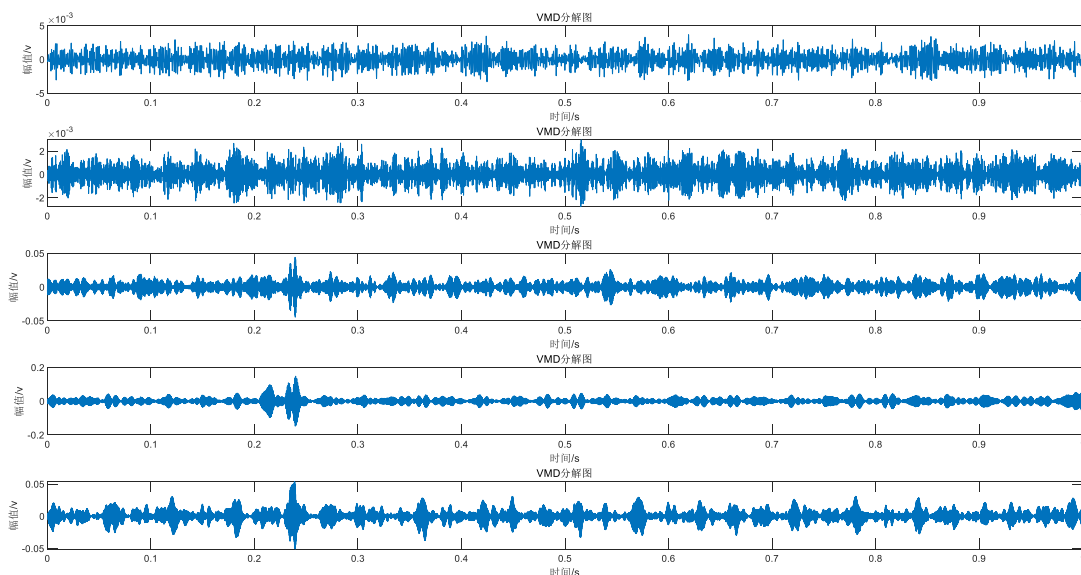


(a)轴承内圈实测信号直接包络谱

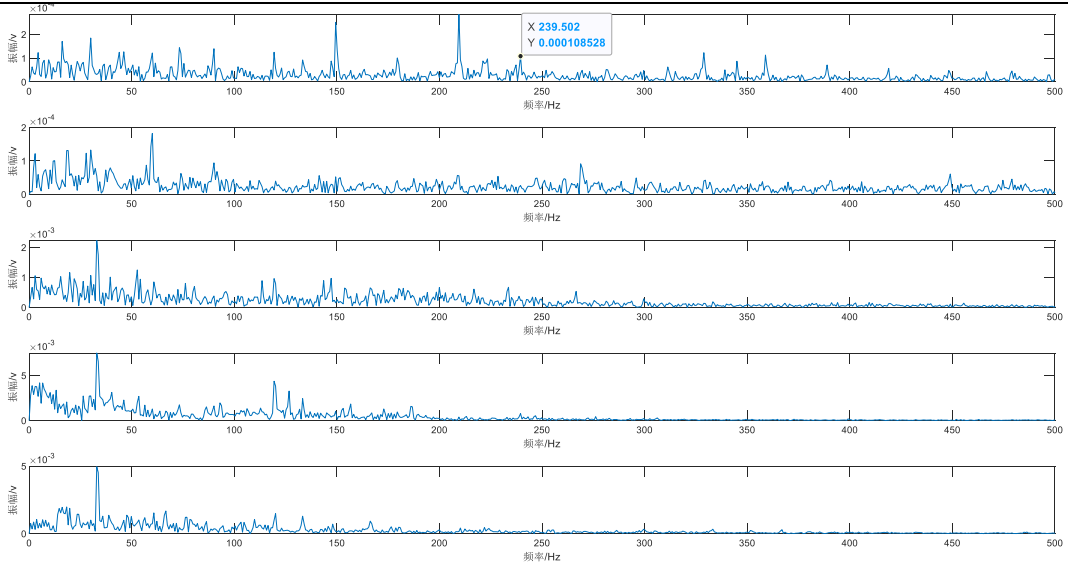


(b)协同诊断包络谱（第4分量）

图 4.7 6203 轴承内圈结果对比



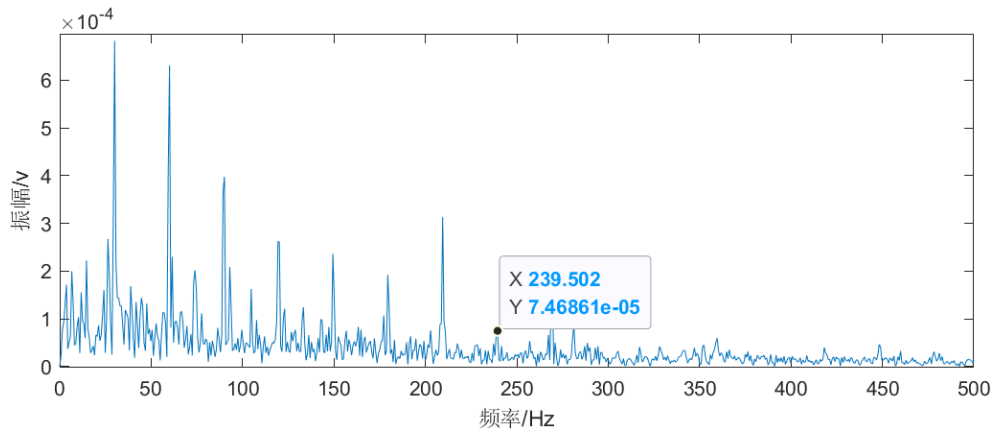
(a)滚动体 5 个 IMF 时域波形



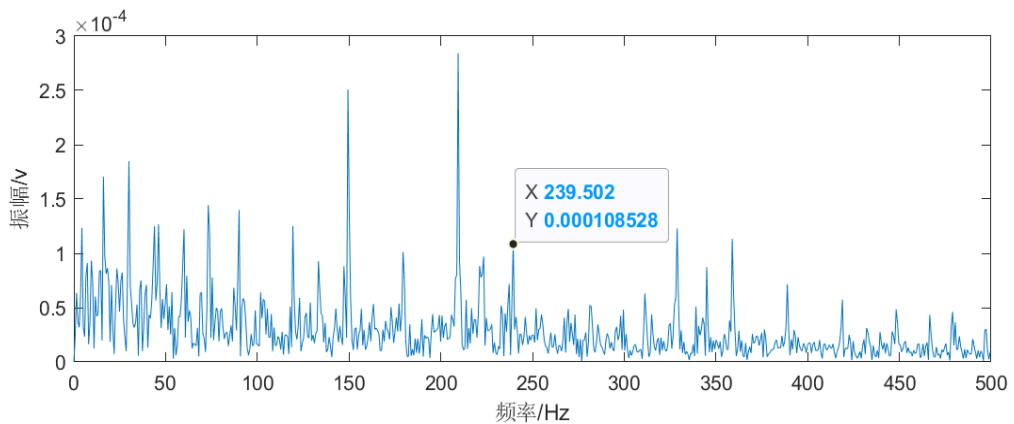
(b)滚动体 5 个 IMF 包络谱

图 4.8 滚动体 5 个分量的时域波形和包络谱

由图 4.9(b)中看出第 1 分量中可以清晰地看到轴承滚动体的故障特征频率，而图 4.9(a)中基本发现不了该故障频率 $F_3(239\text{Hz})$ ，表明协同诊断方法对于难于诊断的滚动体故障更具优势，充分表明了本文协同诊断方法的有效性。



(a)轴承滚动体实测信号直接包络谱



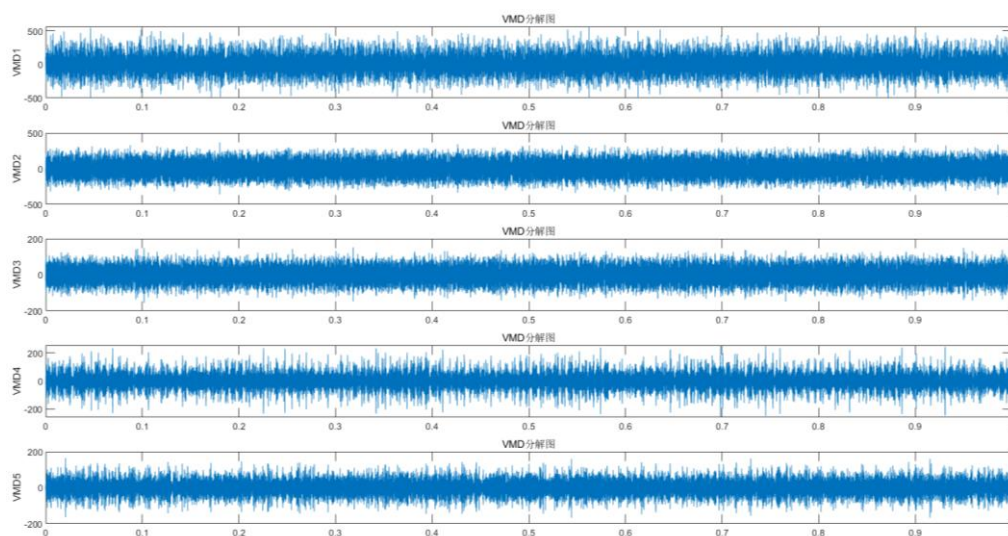
(b)协同诊断包络谱（第 1 分量）

图 4.9 6203 轴承滚动体结果对比

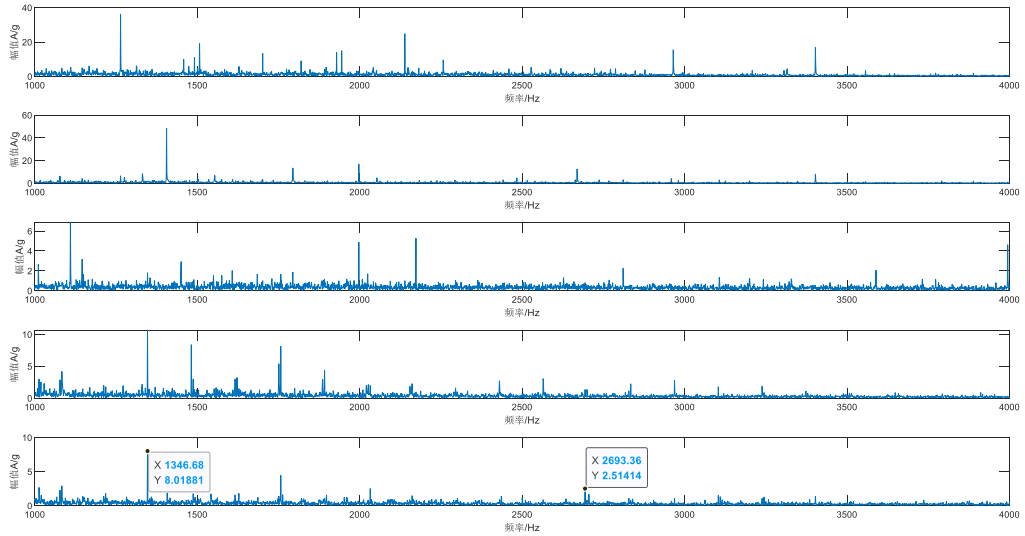
对于滚动轴承的外圈故障(图 4.5)直接包络谱和协同诊断包络谱中的故障特征频率对应的谱峰都很明显,但相对而言,协同诊断法得到的包络谱谱线更少,更为清晰。对应内圈故障(图 4.7),直接包络谱在对应的故障特征频率处能看到相应的谱峰,但由于信噪比较低,谱峰不是很明显,相比之下,协同诊断方法能得到更清晰的谱特征。对于滚动体故障(图 4.9),由于滚动体每自转一圈损伤点就会与轴承外滚道和内滚道各接触一次,因此诊断时更关注滚动体自转频率的 2 倍频。对于滚动体故障而言,直接包络谱上与之对应的谱峰几乎被噪声淹没,但协调诊断方法终稿相应的谱峰仍很明显。综上,在滚动轴承的故障诊断上,所提到的协同诊断法相对比直接包络谱能获得更清晰的谱特征,验证了本文提到的协同诊断方法的有效性和可靠性。

4.2 基于真实航空发动机附件机匣滚动轴承故障试验数据的方法验证

采用航空发动机附件机匣真实的滚动轴承故障试验数据来验证本文提到协同诊断方法的有效性和优越性。以下是发附机匣数据的说明:采样频率为 12.8kHz,轴承的节径 $D=65\text{mm}$;滚动体的直径 $D_b=11.906\text{mm}$,滚动体个数 $Z=10$,转频 $f_r=328\text{Hz}$,由轴承的故障特征频率公式算出外圈的故障特征频率 $F_1=1340\text{Hz}$,选用附件机匣滚动轴承外圈的真实数据来进行分析,并与协同诊断方法进行对比验证,如图 4.10、4.12、4.14 是对经过 DRS 和 MED 处理后的信号进行 VMD 分解,得到的 IMF 分量的时域波形和包络谱,主要针对如何选择最优频带。如图 4.11、4.13、4.15 分别对应真实附件机匣轴承外圈、内圈和滚动体的信号直接包络谱以及协同诊断包络谱的结果对比。



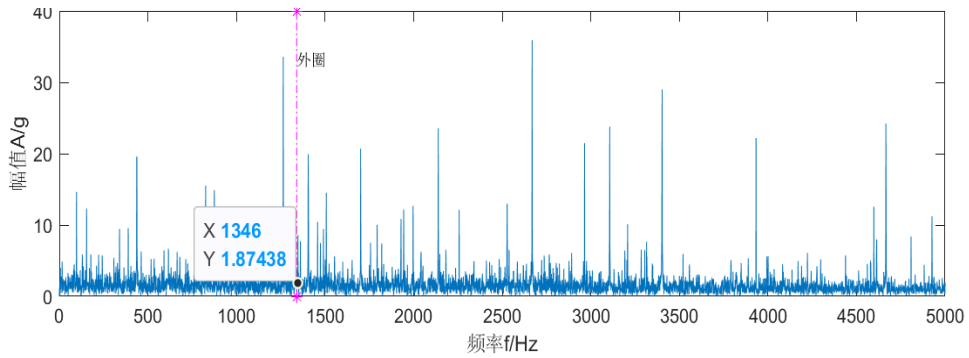
(a)真实附件机匣轴承外圈经协同诊断后分解出 5 个分量时域波形



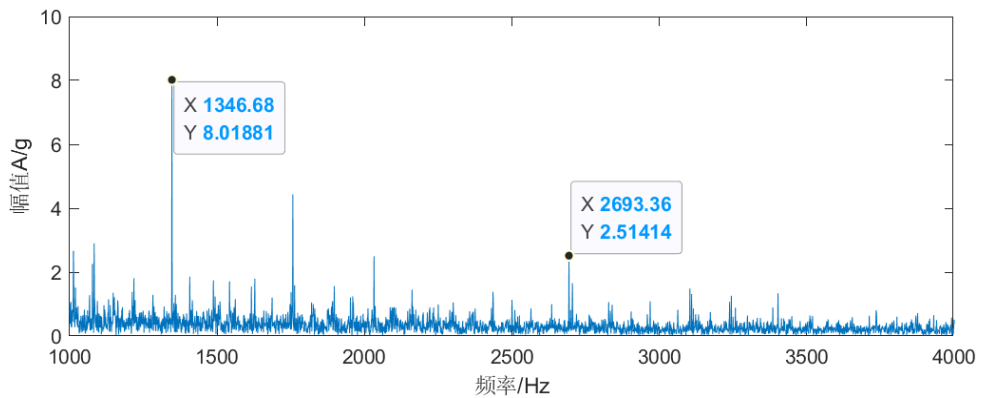
(b)真实附件机匣轴承外圈经协同诊断后分解出 5 个分量的包络谱

图 4.10 真实附件机匣轴承外圈协同诊断后分解出 5 个分量的时域波形和包络谱

由图 4.10(b)中看出第 5 分量中可以清晰地看出轴承外圈故障频率 $F_1(1346\text{Hz})$ 及其倍频 $2F_1$ 。

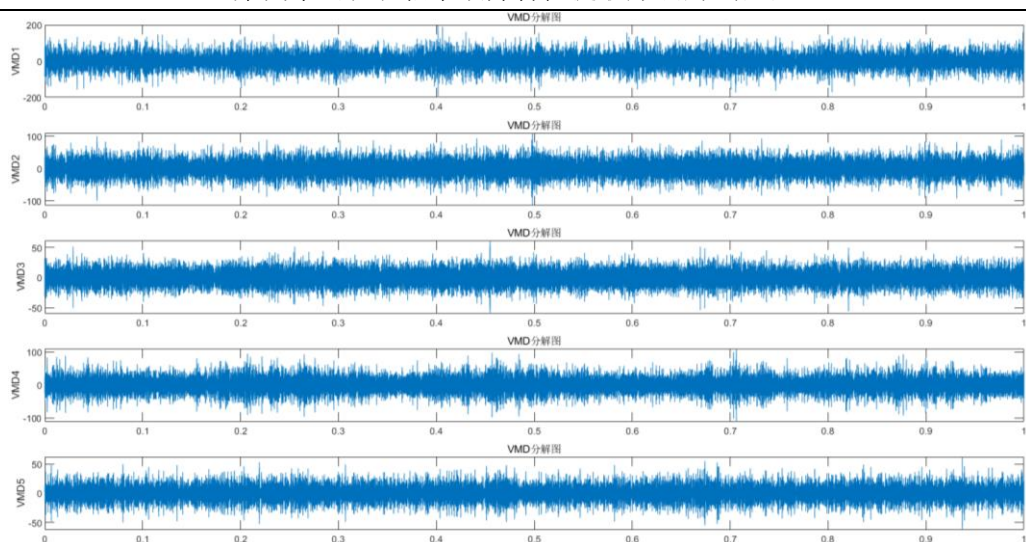


(a)附件机匣轴承外圈故障信号的直接包络谱

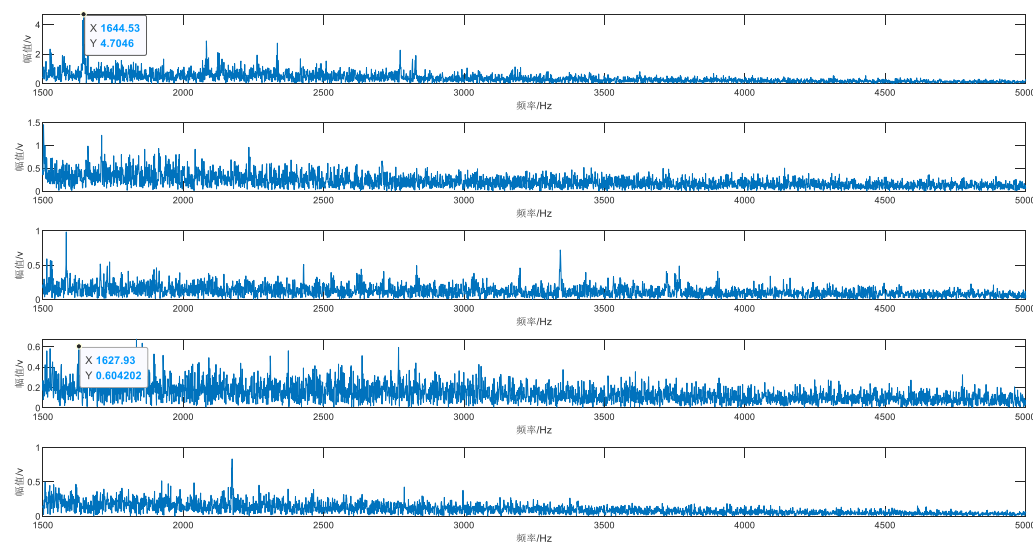


(b)协同诊断包络谱（第 5 分量）

图 4.11 真实附件机匣轴承外圈的结果对比



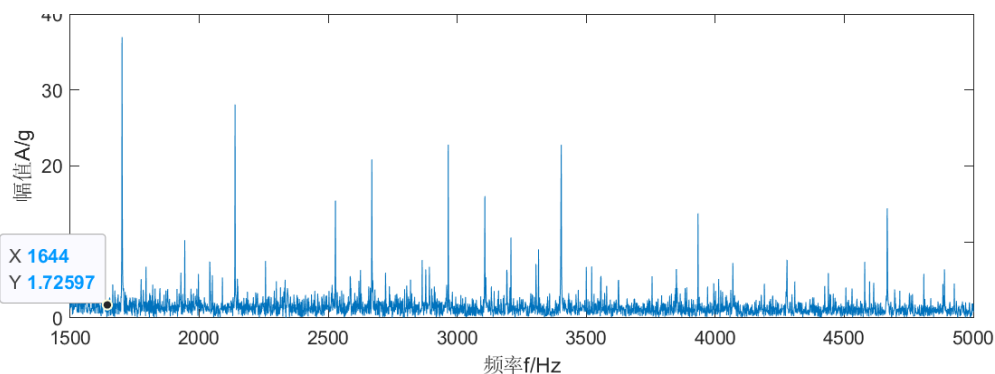
(a)真实附件机匣轴承内圈经协同诊断后分解出 5 个分量时域波形



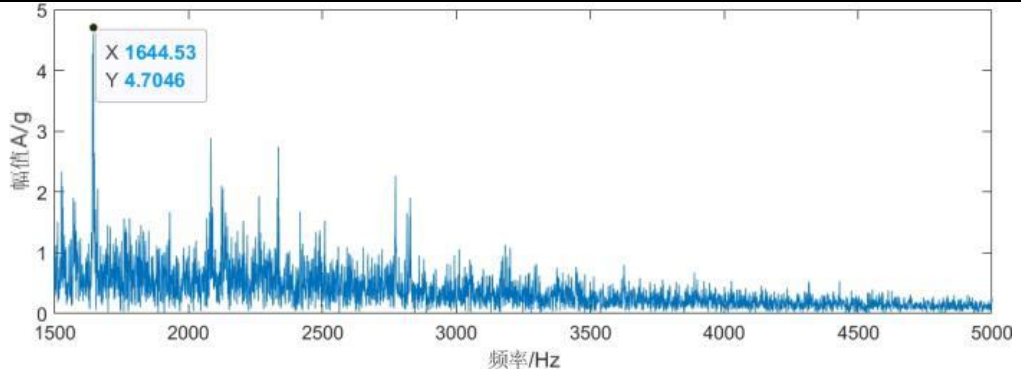
(b)真实附件机匣轴承内圈经协同诊断后分解出 5 个分量的包络谱

图 4.12 真实附件机匣轴承内圈协同诊断后分解出 5 个分量的时域波形和包络谱
从图 4.12(b)中看出第 1 分量中可以清晰地看出真实附件机匣轴承内圈故障频率

$$F_2(1644\text{Hz})。$$

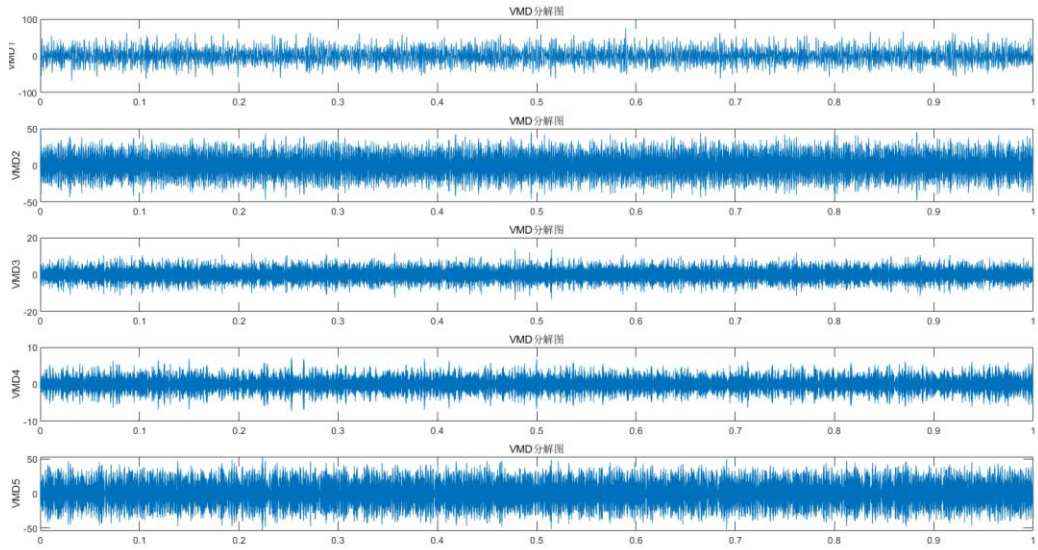


(a)附件机匣轴承内圈故障信号的直接包络谱

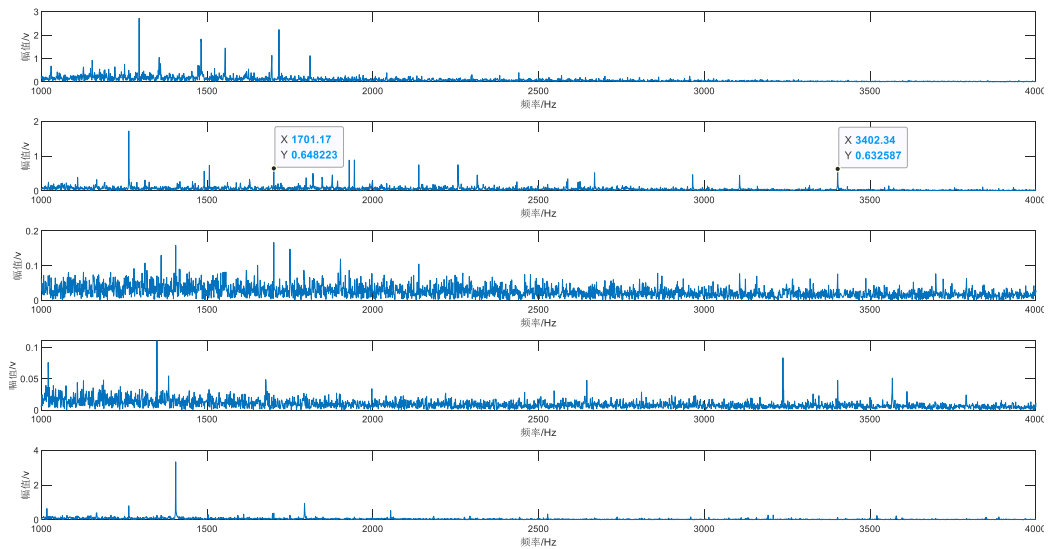


(b)协同诊断包络谱（第 1 分量）

图 4.13 真实附件机匣轴承内圈的结果对比



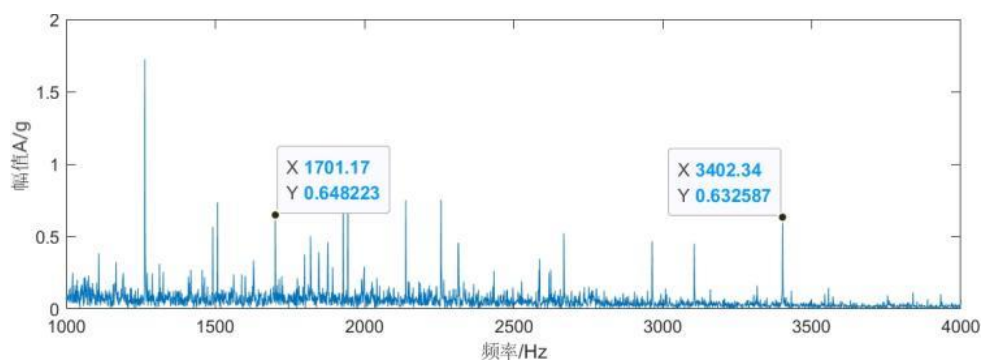
(a)真实附件机匣滚动体经协同诊断后分解出 5 个分量时域波形



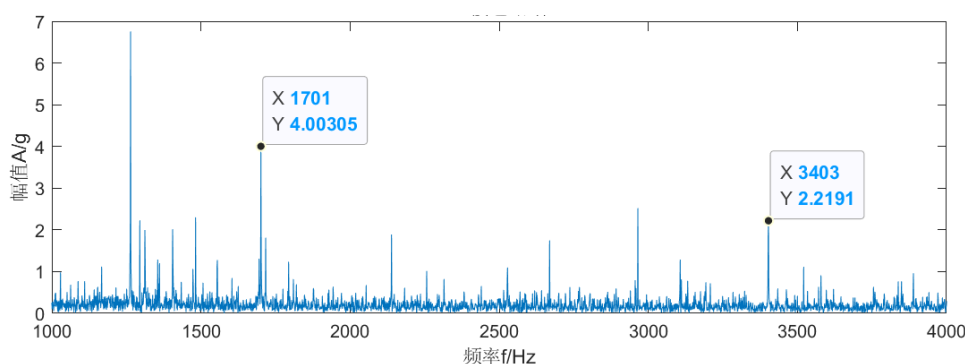
(b)真实附件机匣滚动体经协同诊断后分解出 5 个分量的包络谱

图 4.14 真实附件机匣轴承滚动体协同诊断后分解出 5 个分量的时域波形和包络谱

从图 4.14(b)中看出第 2 分量中可以清晰地看出真实附件机匣轴承滚动体故障频率 $F_3(3402\text{Hz})$ 。



(a)附件机匣轴承滚动体故障信号的直接包络谱



(b)协同诊断包络谱（第 2 分量）

图 4.15 真实附件机匣轴承滚动体的结果对比

对于真实附件机匣轴承外圈故障（图 4.11）直接包络谱中外圈的故障特征频率对应的谱峰几乎被噪声淹没，很难分辨出故障特征频率的峰值；但协同诊断方法包络谱中，能较为明显地看到与故障特征数值接近的谱峰（1346Hz）及其倍频。对于附件机匣轴承内圈故障（图 4.13），由于存在噪声，直接包络谱中不能直接找到对应的故障频率（1644Hz），而相对于协同诊断下能得到清晰的谱特征。对于附件机匣轴承滚动体故障（图 4.15），直接包络谱和协同诊断包络谱对应的故障频率谱峰都较明显，但协调诊断方法中相应的谱线少，谱峰更清晰。综上，通过附件机匣轴承真实数据的结果对比，验证了本文提到的协同诊断方法的有效性和可靠性。

4.3 本章小结

本章主要基于国际上公开的齿轮和滚动轴承数据集对新方法进行验证，然后基于某真实航空发动机附件机匣滚动轴承预置故障试验数据进行方法验证，结果表明：协同诊断方法对发动机附件机匣故障诊断具有有效性。

第五章总结与展望

5.1 研究总结

针对发动机附件机匣故障诊断难题，提出一种集成多种信号处理方法的协同故障诊断技术，来进行齿轮和轴承的故障特征的准确提取。主要研究结论如下：

（1）研究了航空发动机附件机匣的运行机理，结构特性，故障模型和实例，建立了齿轮和滚动轴承单一故障和耦合故障信号模型。

（2）提出了一种航空发动机附件机匣振动信号的多方法协同诊断技术。该方法将离散随机分离、最小熵解卷积和变分模态分解相结合，提出一种集成多信号处理方法的协同故障诊断技术；

（3）利用仿真数据和试验数据对新方法进行了验证，结果充分表明了该方法的有效性。

5.2 研究展望

（1）在实际中，航空发动机附件机匣内部存在大量的传动链，有较多的齿轮和轴承，且运行环境差，导致齿轮和轴承的耦合信号非常复杂；而在本文构建仿真模型需要进一步改进。

（2）在协同诊断方法中，最小熵解卷积本身是一个滤波器算法，其中可以进行很多改进。在研究过程中，最小熵解卷积在处理数据时，由于滤波长度设置不正确，会导致不能满足故障诊断要求。因此，优化 MED 算法，让 MED 依据提供的判据自动寻找最优滤波器长度，减小误差和提高效率。

（3）需要对方法进一步进行工程验证，建立真实航空发动机附件机匣试验器，通过预置不同的齿轮和滚动轴承故障模式对本文方法进行全面的验证和分析。

参考文献

- [1] 尉询楷,冯悦,杨立,等. 航空发动机中介主轴承故障预测研究[C]. //2014年航空安全与装备维修技术学术研讨会论文集. 2014:469-478.
- [2] Opitz H.. Noise of Gears[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences (1934-1990),1968,263(1142).
- [3] Randall R. B.. A New Method of Modeling Gear Faults[J]. Journal of Mechanical Design,1982,104(2).
- [4] MCDONALD G L, ZHAO Q, ZUO M J. Maximum correlated kurtosis deconvolution and application on gear tooth chip fault detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33(1):237-255.
- [5] MCDONALD G L, ZHAO Q. Multipoint optimal minimum entropy deconvolution and convolution fix:application to vibration fault detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82:461-477.
- [6] 韩捷,张琳娜. 齿轮故障的振动频谱机理研究[J]. 机械传动,1997(02):22-25+46.DOI:10.16578/j.issn.1004.2539.1997.02.006.
- [7] 陈立爱,俞宏艳,汪佳奇等.基于 PCA-SSA-PNN 的齿轮故障诊断[J].长沙大学学报,2023,37(02):18-27.
- [8] 寿海飞,曹志锡,楼建勇. 基于小波变换的齿轮振动信号降噪分析[J]. 机械设计与制造,2007,No.200(10):125-126.
- [9] SAWALHI N,RANDALL R B ,ENDO H. The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearings using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis[J].Mechanical Systems and Signal Processing, 2007.21 (6) : 2616-2633
- [10] Lu Yixiang,Song Zhihong,Gao Qingwei,Zhu De,Sun Dong. Bearing fault diagnosis based on multi-band filtering[J]. IET Science, Measurement & Technology,2021,16(2).
- [11] Zhang M, Jiang Z, Feng K . Research on variational mode decomposition in rolling bearings fault diagnosis of the multistage centrifugal pump[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 93(460):460-493.
- [12] 项伟,刘淑杰,李宏坤,曹顺心,吕帅,杨晨.参数自适应 CYCBD 的滚动轴承复合故障特征提取[J/OL].航空动力学报:1-9[2023-02-18].DOI:10.13224/j.cnki.jasp.20220716.
- [13] 何勇,王红,谷穗.一种基于遗传算法的 VMD 参数优化轴承故障诊断新方法[J].振动与冲击,2021,40(06):184-189.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2021.06.025.
- [14] 林桐,陈果,滕春禹,王云,欧阳文理,肖圣迪.基于机匣振动信号的滚动轴承故障协同诊断技术[J].航空动力学报,2018,33(10):2376-2384.DOI:10.13224/ j.cnki.jasp.2018.10.009.
- [15] Ho D, Randall R B. Optimization of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signal. Mechanical Systems & Signal Processing, 2000, 14(5):763-788.
- [16] J. Antoni,R.B. Randall. Unsupervised noise cancellation for vibration signals: part II—a novel frequency-domain algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2004,18(1).
- [17] Randall R B Sawalhi N Coats M. A comparison of methods for separation of deterministic and random signals[J]. International Journal of Condition Monitoring,2011,1(1).
- [18] P. Borghesani,P. Pennacchi,R.B. Randall,N. Sawalhi,R. Ricci. Application of cepstrum pre-whitening for the diagnosis of bearing faults under variable speed conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2013,36(2).
- [19] 潘楠,伍星,迟毅林等.基于频域盲解卷积的齿轮箱复合故障声学诊断[J].振动与冲击,2013,32(07):146-150.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2013.07.019.
- [20] 代士超,郭瑜,伍星.基于同步平均与倒频谱编辑的齿轮箱滚动轴承故障特征量提取[J].振动与冲击,2015,34(21):205-209.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2015.21.036.
- [21] 王志坚,寇彦飞,王俊元等.基于最大相关峭度反褶积的齿轮箱复合故障特征提取[J].噪声与振动控制,2017,37(03):173-176.

- [22] 毛一帆. 基于稀疏表示的齿轮箱故障特征提取方法研究 [D]. 东南大学,2021.DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2021.003236.
- [23] WIGGINS R A. Minimum entropy deconvolution[J]. *Geoexploration*, 1978, 16(1/2):21-35.
- [24] Variational Mode Decomposition.[J]. Konstantin Dragomiretskiy;Dominique Zosso.IEEE Trans. Signal Processing,2014(3)
- [25] 刘鑫. 本征模态函数分解中的边界问题及信号的预测方法研究[D].中国海洋大学,2012.
- [26] Z.K. Peng,Peter W. Tse,F.L. Chu. An improved Hilbert–Huang transform and its application in vibration signal analysis[J]. *Journal of Sound and Vibration*,2004,286(1).
- [27] 郝富贵. 基于包络解调的冶金设备滚动轴承故障诊断应用研究 [D]. 内蒙古科技大学,2020.DOI:10.27724/d.cnki.gnmkg.2020.000001.
- [28] Zhan Yie Chin, Pietro Borghesani, Yuanning Mao, Wade A. Smith, Robert B. Randall, Use of transmission error for a quantitative estimation of root-crack severity in gears, *Mech. Syst. Signal Process.* 171 (2022) 108957.

致 谢

始于 2019 金秋，终于 2023 盛夏。行文至此，意味着四年本科大学生活即将“杀青”。

感谢父母，陪伴了我每个成长时刻；感谢导师陈果教授，悉心指导我的毕设论文，给予了专业上宝贵的意见；感谢师兄盛嘉玖，指导和帮助我学习毕设专业知识；感谢 901 班的兄弟们，相遇在彼此的青春时代；最后感谢顾惠玲同学，陪伴是最长情的告白。

只道谢，不道别。