



南京航空航天大学本科毕业生设计

航空发动机附件机匣 振动信号故障特征提取方法研究

汇报人：胡辰杰

指导教师：陈果教授

专业：交通运输（民航维修工程）

南京航空航天大学



汇报内容

1

研究目的与意义

2

齿轮和滚动轴承故障信号特征提取

3

齿轮箱复杂信号分析方法

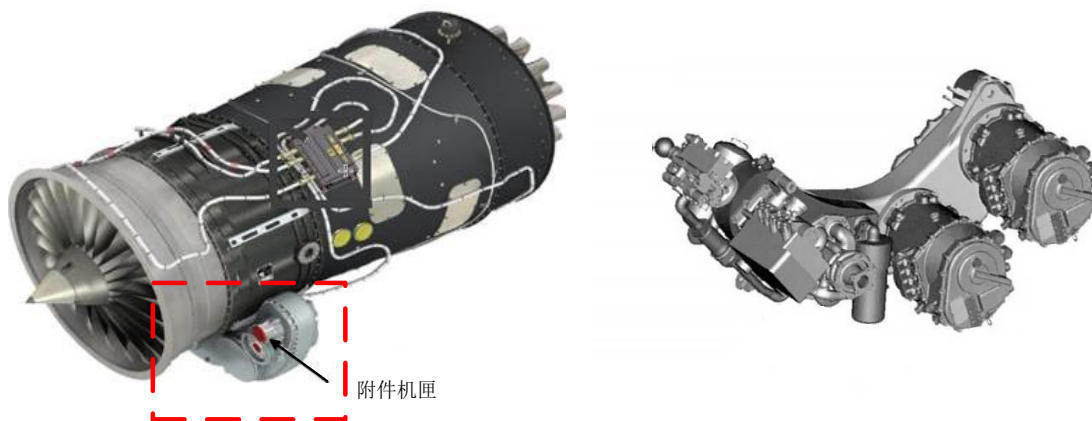
4

齿轮和轴承故障特征提取方法的
试验验证

5

总结与展望

1.航空发动机附件机匣介绍



航空发动机附件机匣

附件机匣是一种齿轮箱式传动装置，作用是通过多组齿轮与轴承构成的传动链保证不同转速的部件互相匹配和高效传递功率，通常被置于发动机冷端的下部或侧下部。主要为发动机起动系统、滑油系统、燃油控制系统和飞机电力系统等提供动力传输。

由于附件机匣传动链相互交织、工作环境恶劣、传递功率大、可靠性要求高，一旦齿轮或轴承出现故障，导致附件机匣传动功能失效，将直接影响飞行安全。因此，附件机匣的早期故障检测至关重要。

2. 传动系统故障案例

据统计，2005年至2013年间我空军某型新机列装后累计发生数十起传动系统故障，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。

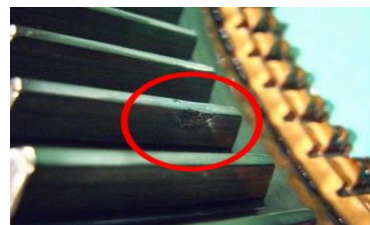
附件机匣故障诊断成为制约我国航空发动机技术发展、影响战斗力生成的重大技术“瓶颈”。

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。监测和诊断传动系统关键部件，能够及时发现早期故障和故障先兆，增加飞机的安全性；

（2）时刻检测系统运行状况。减少维护检查，延长定检周期；

（3）提高传动系统可靠性。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。



某型发动机中央齿轮箱齿轮断裂



某型发动机附件机匣轴承剥落导致发动机故障



汇报内容

1

研究目的与意义

2

齿轮和滚动轴承故障信号特征提取

3

齿轮箱复杂信号分析方法

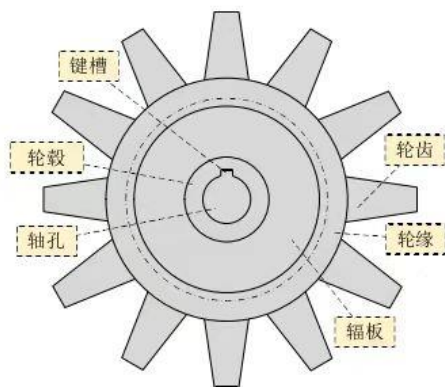
4

齿轮和轴承故障特征提取方法的
试验验证

5

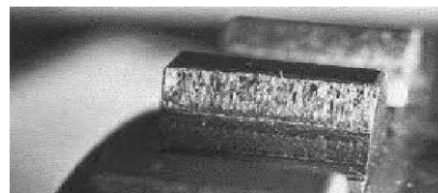
总结与展望

1. 齿轮故障信号特性及仿真

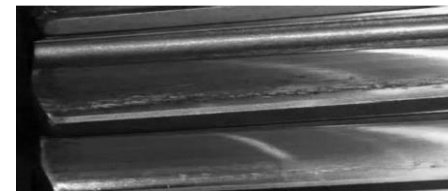


齿轮的基本结构

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动力，在机械传动上应用很多。



齿面磨损



齿面点蚀



齿面剥落

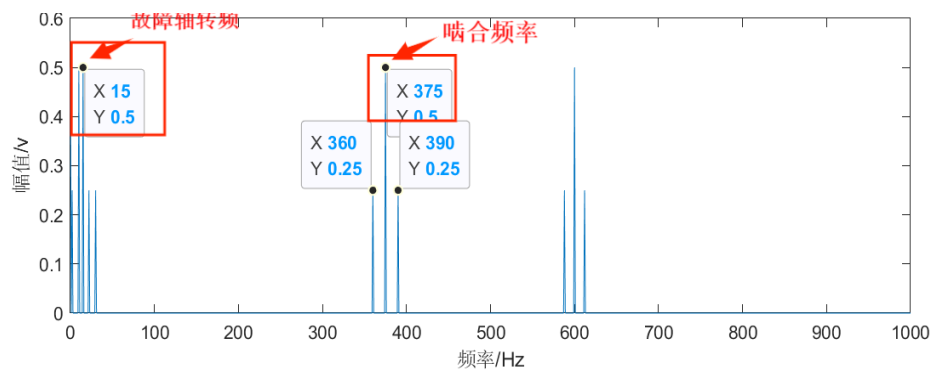


齿根断裂

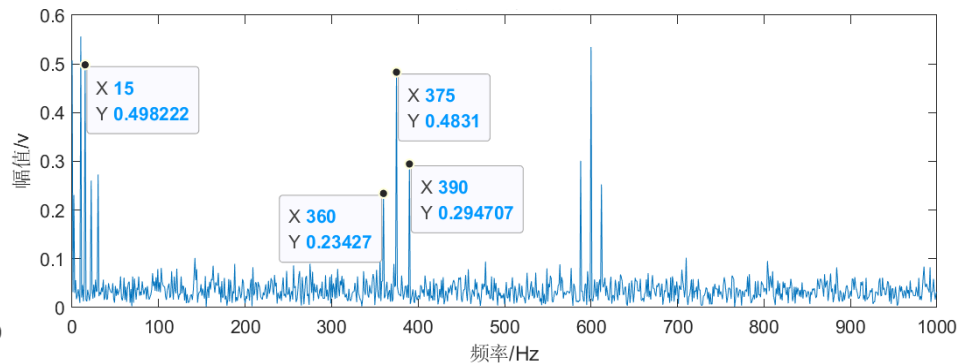
齿轮常见的故障类型分别有齿面磨损、齿面点蚀、齿面剥落和齿根断裂等。这些故障是一步步加重的，由于润滑等原因导致齿面表面上留有异物，使得齿轮在传动后引起磨损，引发几何形状的改变，如果不能及时诊断和处理，将会进一步导致齿轮疲劳磨损的加剧，最终造成齿轮折断，严重影响飞行安全。

1. 齿轮故障信号仿真模型

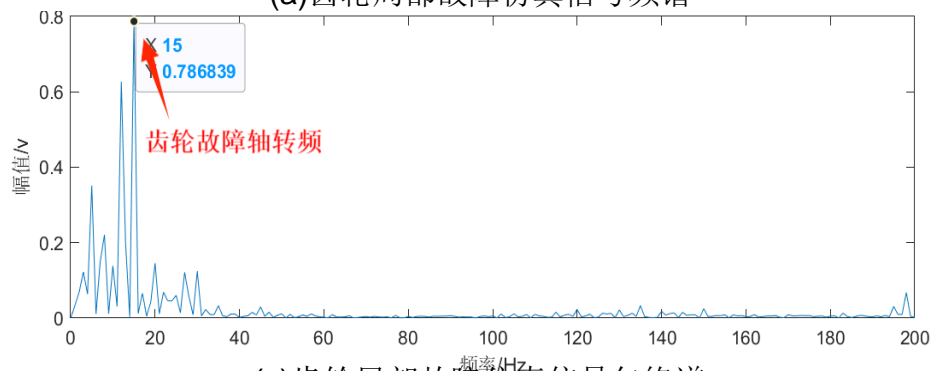
f_r 是故障齿轮所在轴转频(15Hz), f_m 是啮合频率(375Hz)。



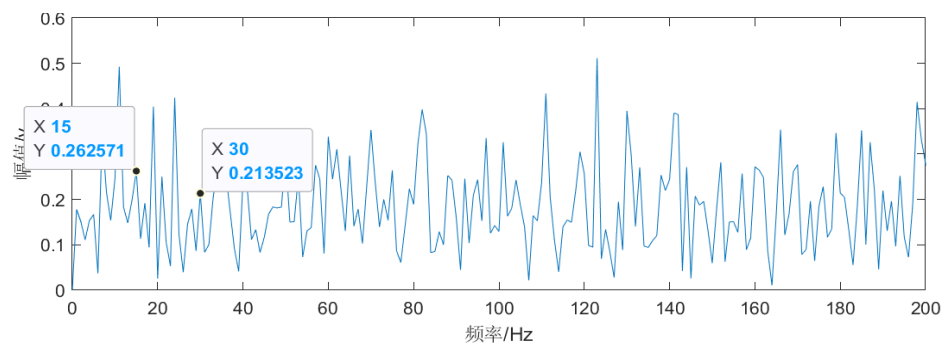
(a) 齿轮局部故障仿真信号频谱



(b) 含噪声齿轮局部故障仿真信号频谱



(c) 齿轮局部故障仿真信号包络谱



(d) 含噪声齿轮局部故障仿真信号包络谱

齿轮局部故障仿真信号的**频谱主要是啮合频率以及与故障轴转频调制形成的边频带**；在包络谱中看到故障轴转频 f_r (15Hz)；由于大量的干扰噪声，含噪声的仿真信号包络谱中故障频率处的谱线并不明显。

2.滚动轴承常见故障



滚动轴承的结构图



疲劳损伤



过度磨损



表面锈蚀



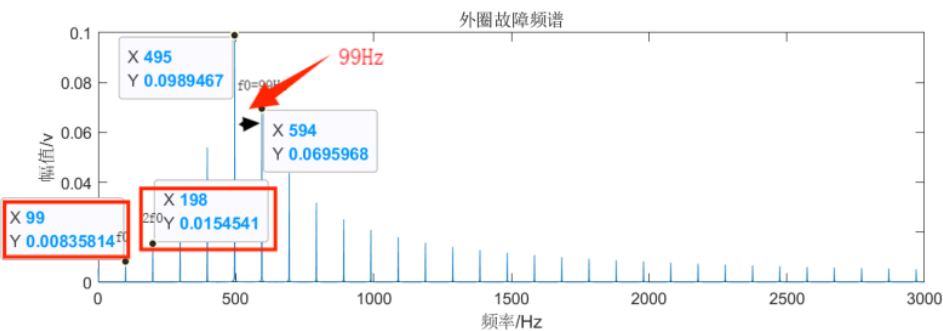
表面划伤

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。

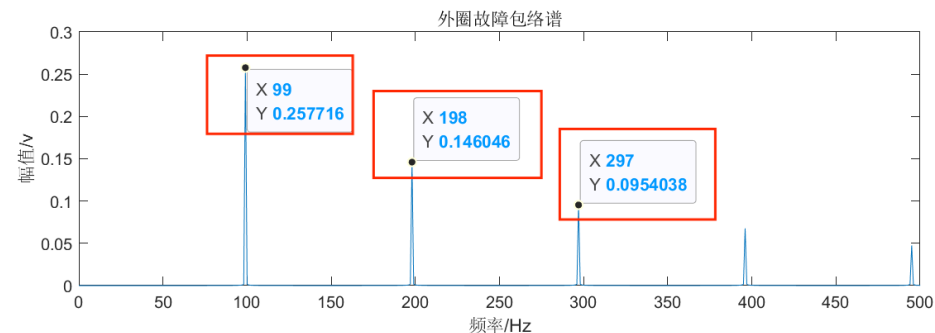
轴承常见的故障类型主要包括点蚀、划伤、腐蚀、塑性变形、疲劳损伤、过度磨损等。这些故障是一步步加重的，由于润滑等原因导致轴承表面上留有异物，使得轴承在传动后引起磨损，引发几何形状的改变，如果不能及时诊断和处理，将会进一步导致轴承疲劳磨损的加剧，最终造成轴承卡死，严重影响飞行安全。

2.滚动轴承故障信号仿真模型——外圈

轴承共振的固有频率 $f_n=500\text{Hz}$ ，外圈的故障特征频率 $f_o=99\text{Hz}$ 。

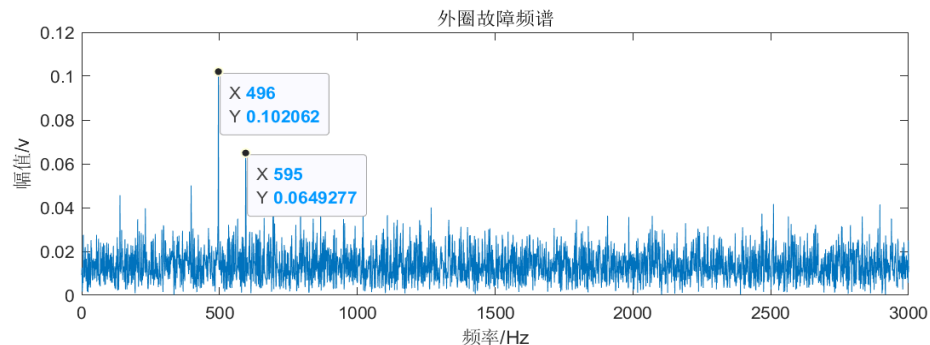


(a)故障冲击信号频谱

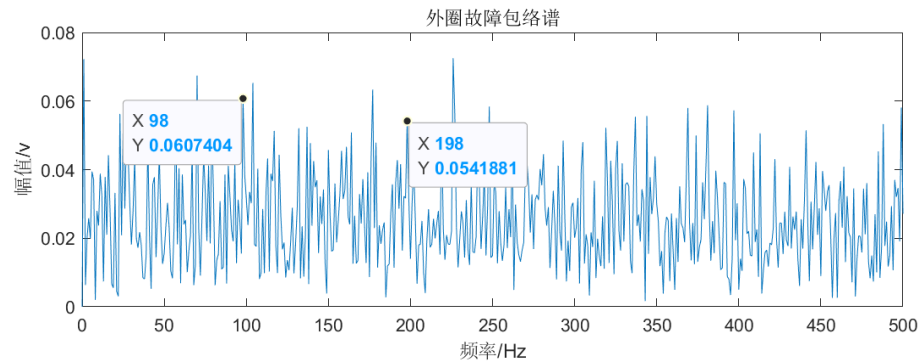


(b)故障冲击信号包络谱

理想的外圈故障冲击信号的频谱和包络谱中，都能清晰地辨认出外圈故障特征频率及其倍频。



(c)含噪声故障信号频谱

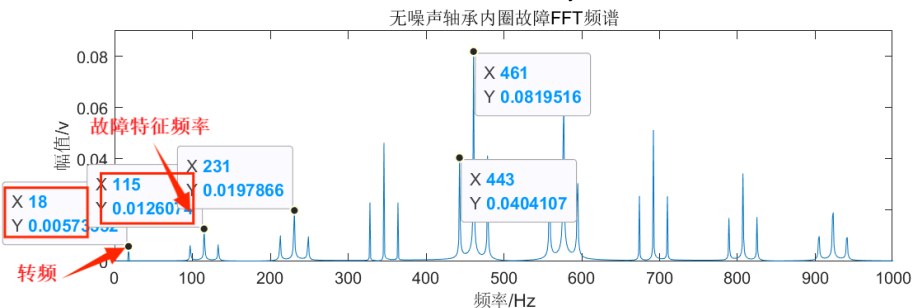


(d)含噪声故障信号包络谱

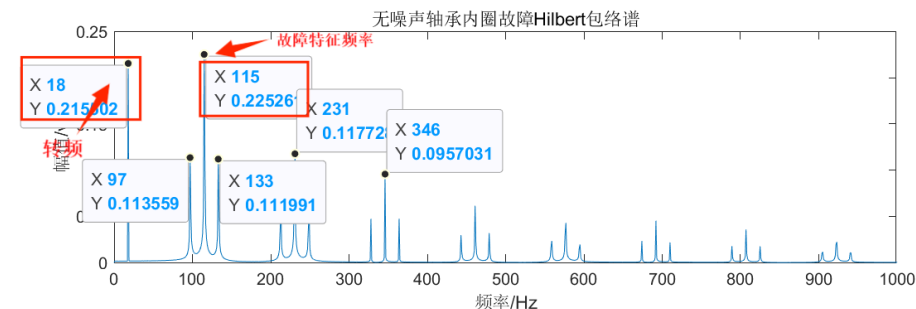
当轴承外圈冲击信号加入噪声后，其频谱由于受到了噪声干扰，难以辨别出外圈故障特征频率及其倍频。包络谱中虽然能看到故障特征频率，但是谱峰不是很突出。

2.滚动轴承故障信号仿真模型——内圈

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 $f_i=115\text{Hz}$ 。



(a)故障冲击信号频谱

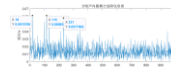


(b)故障冲击信号包络谱

理想的内圈故障冲击信号的频谱和包络谱中，都能清晰地辨认出转频和内圈故障特征频率及其倍频。



(c)含噪声故障信号频谱



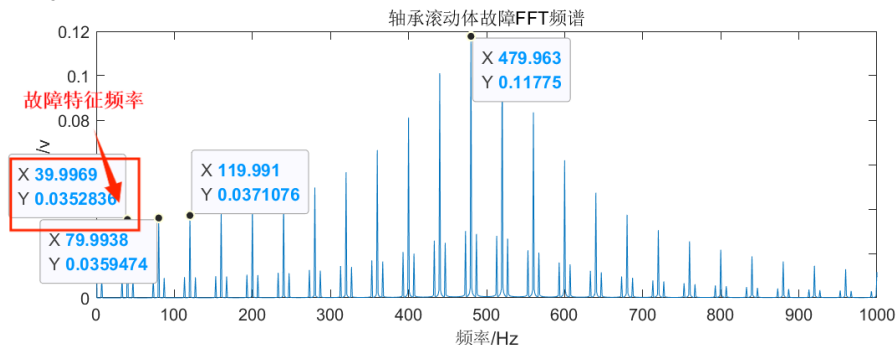
(d)含噪声故障信号包络谱

当轴承内圈冲击信号加入噪声后，其频谱由于受到了噪声干扰，难以辨别出故障特征频率及其倍频。包络谱中虽然能看到故障特征频率，但是谱峰不是很突出。

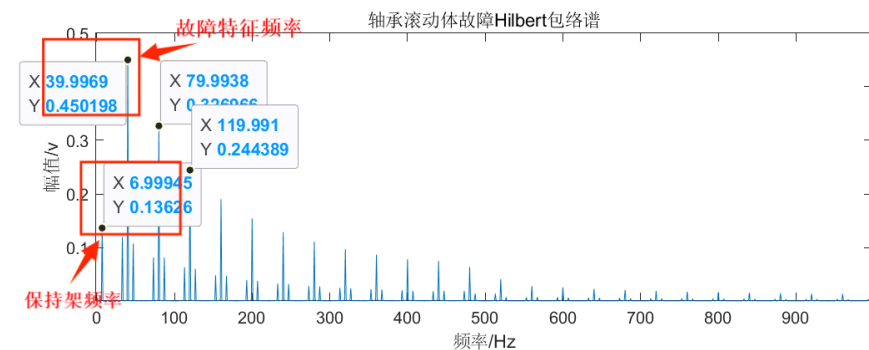
2.滚动轴承故障信号仿真模型——滚动体

滚动体的故障特征频率 $f_b=40\text{Hz}$ ，保持架频率

$f_c=7\text{Hz}$ 。

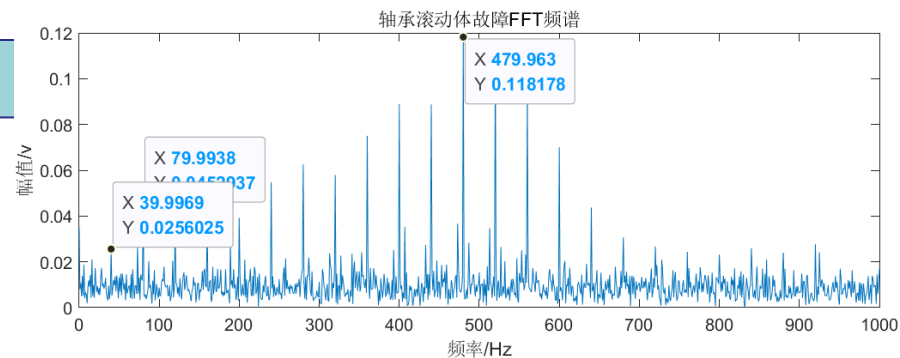


(a)故障冲击信号频谱

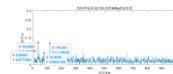


(b)故障冲击信号包络谱

同理，在频谱和包络谱中能清晰地看到保持架频率和滚动体故障特征频率及其倍频。



(c)含噪声故障信号频谱

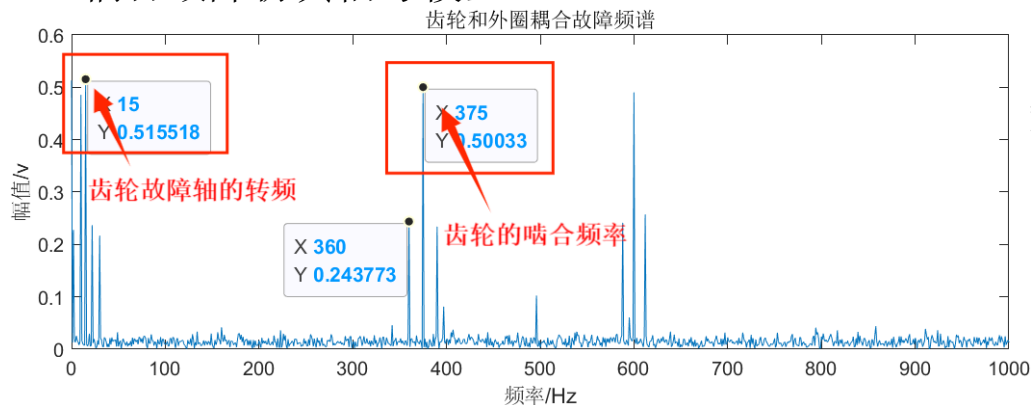


(d)含噪声故障信号包络谱

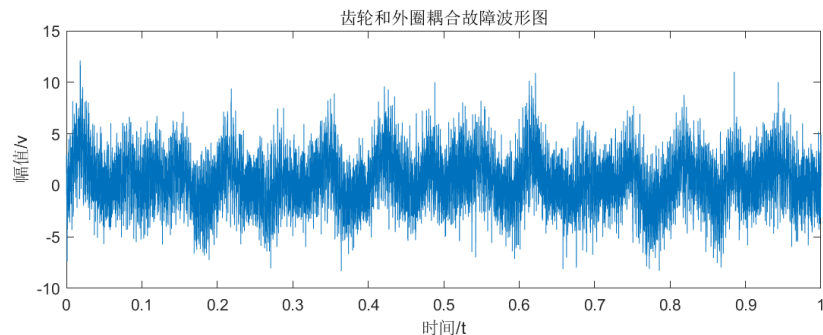
加入噪声后，频谱难以看到低频处故障特征频率 f_b 及其倍频；包络谱中故障特征频率的谱峰不明显。

2. 齿轮和轴承耦合故障信号特征及仿真——齿轮局部和轴承外圈的耦合故障

将式齿轮故障仿真信号和轴承外圈的故障仿真信号进行叠加，并加上噪声，其中齿轮的啮合频率为375Hz，故障轴转频为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。

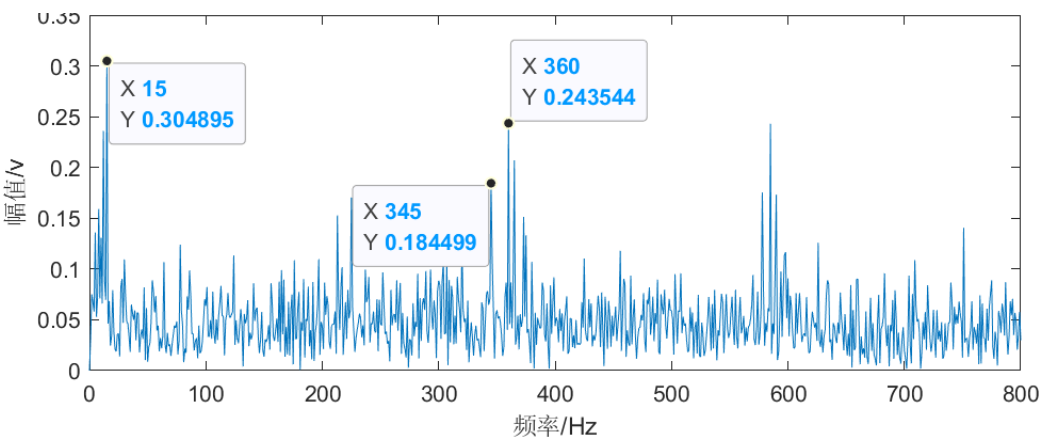


(a) 齿轮局部故障和轴承外圈耦合故障信号频谱



齿轮局部故障和轴承外圈耦合信号时域波形

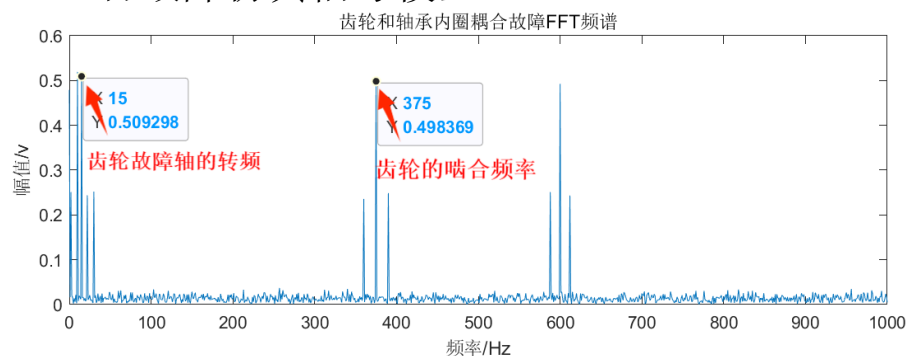
在齿轮箱的复合故障中，轴承的振动对比齿轮振动更微弱，所以轴承的故障特征被齿轮的故障特征淹没。



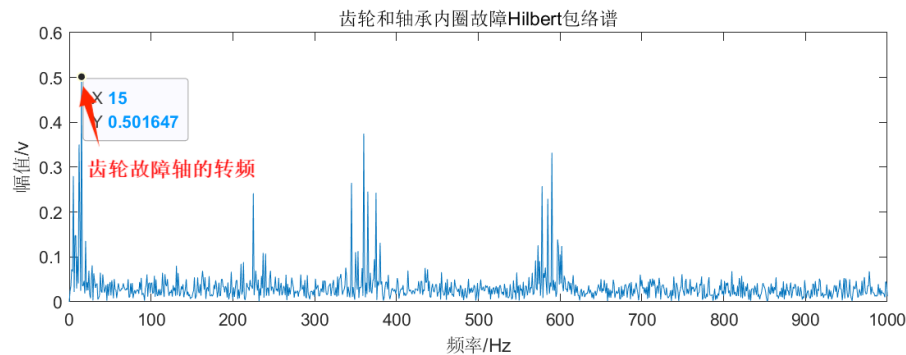
(b) 齿轮局部故障和轴承外圈耦合故障信号包络谱

2. 齿轮和轴承耦合故障信号特征及仿真——齿轮局部和轴承内圈的耦合故障

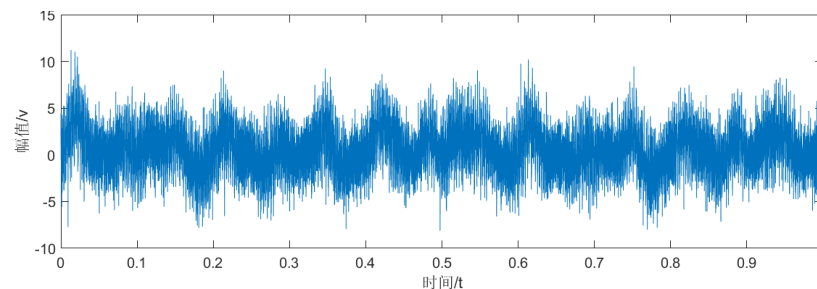
将式齿轮故障仿真信号和轴承内圈的故障仿真信号进行叠加，并加上噪声，其中齿轮的啮合频率为375Hz，转频为15Hz。得到齿轮局部故障与轴承内圈故障的耦合故障仿真信号模型。



(a) 齿轮局部故障和轴承内圈耦合故障的频谱



(b) 齿轮局部故障和轴承内圈耦合故障信号包络谱

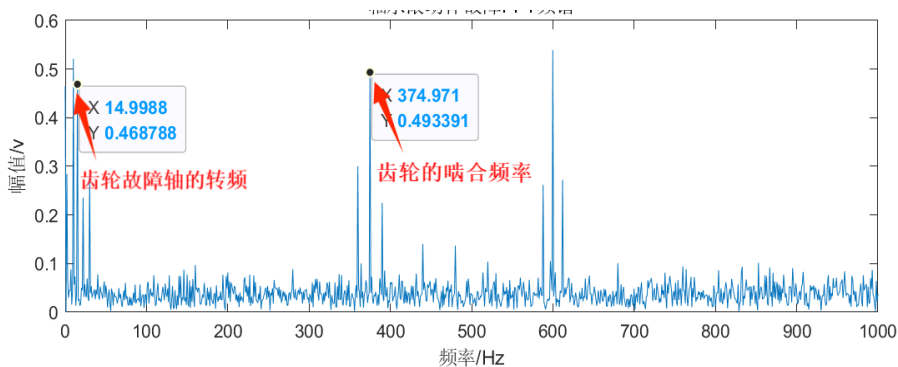


齿轮局部故障和轴承内圈耦合故障的时域波形

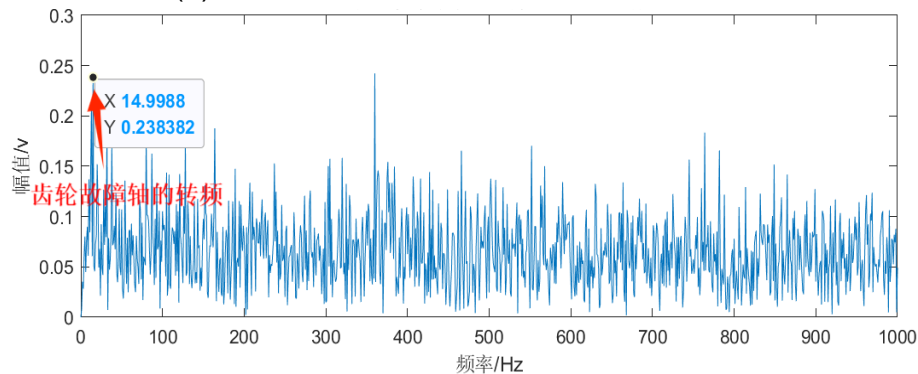
在齿轮箱的复合故障中，轴承的振动对比齿轮振动更微弱，所以轴承的故障特征被齿轮的故障特征淹没。

2. 齿轮和轴承耦合故障信号特征及仿真——齿轮局部和轴承滚动体的耦合故障

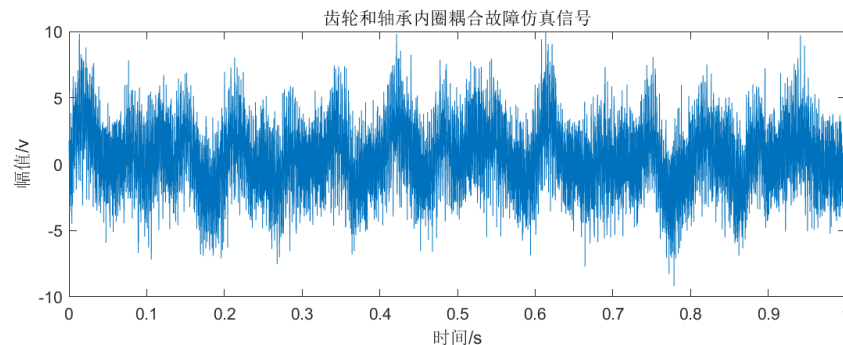
将式齿轮故障仿真信号和轴承滚动体的故障仿真信号进行叠加，并加上噪声，其中齿轮的啮合频率为375Hz，转频为15Hz。得到齿轮局部故障与轴承滚动体故障的耦合故障仿真信号模型。



(a) 齿轮局部故障和轴承滚动体耦合故障的频谱



(b) 齿轮局部故障和轴承滚动体耦合故障信号包络谱



齿轮局部故障和轴承滚动体耦合故障的时域波形

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被齿轮的故障特征淹没。



汇报内容

1

研究目的与意义

2

齿轮和滚动轴承故障信号特征提取

3

齿轮箱复杂信号分析方法

4

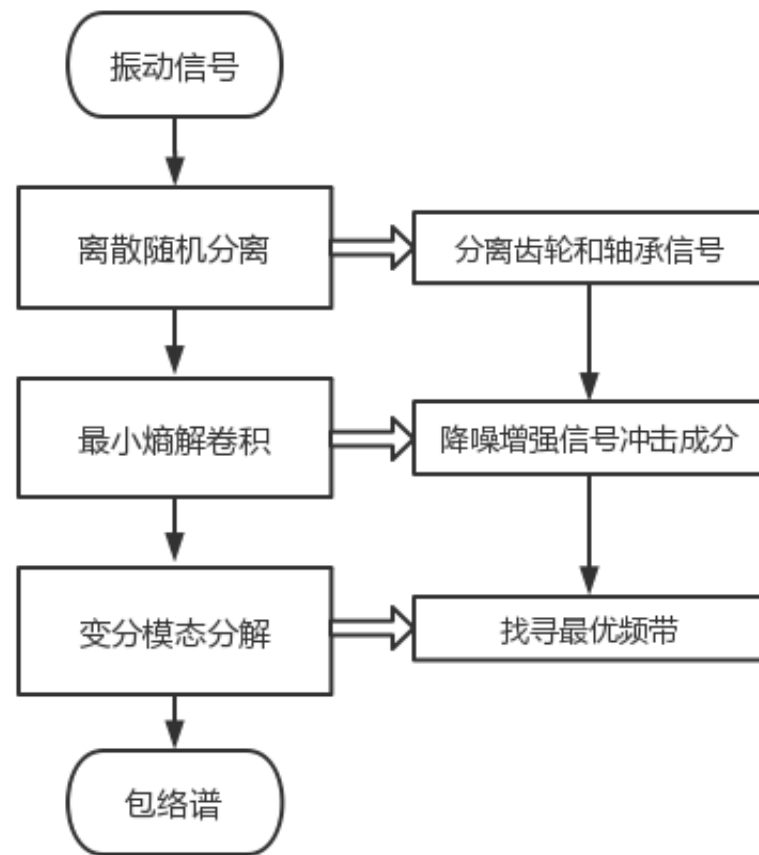
齿轮和轴承故障特征提取方法的
试验验证

5

总结与展望

1.方法流程

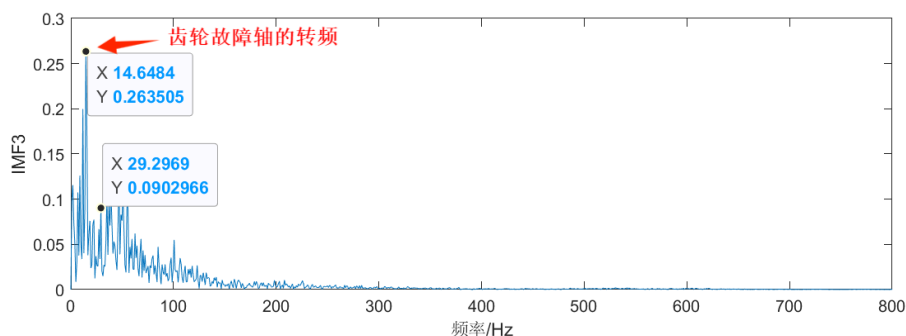
首先，通过**离散随机分离解耦合**，从被测信号中分离出齿轮信号和轴承信号；然后，通过**最小熵解卷积**对分离后的信号进行逆滤波处理，得到去噪增强的故障信号；之后分别对齿轮和轴承信号使用**变分模态分解**，选择齿轮和轴承故障信号的最优频带，最后通过包络谱特征来实现发动机附件机匣振动信号的故障诊断，并通过仿真信号，公开数据集和真实试验数据进行验证。



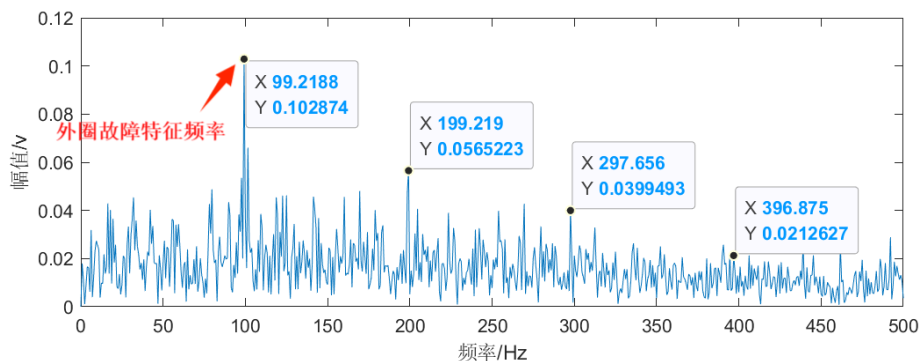
协同诊断方法流程图

2. 基于仿真数据方法验证——齿轮局部故障和轴承外圈的耦合故障仿真信号

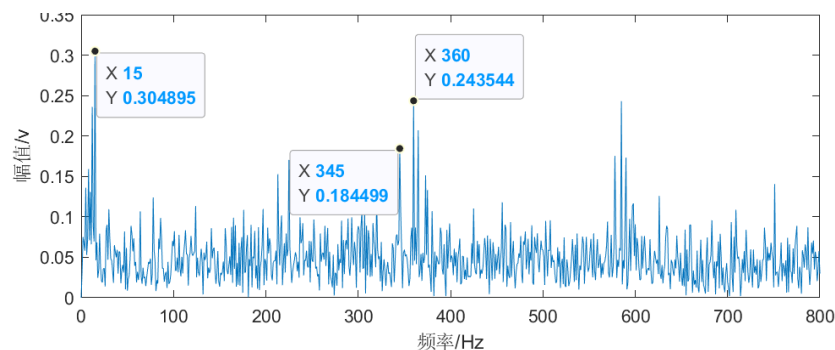
为验证所提协同诊断方法的有效性和可靠性，将轴承和齿轮的仿真信号进行协同诊断和谱分析。首先通过DRS分离出齿轮信号和轴承信号，然后将分离出的齿轮信号和轴承信号分别进行MED滤波处理，再通过VMD找寻各自的最优频带，并做谱分析。



齿轮仿真故障信号协同诊断包络谱



轴承外圈仿真故障信号协同诊断包络谱

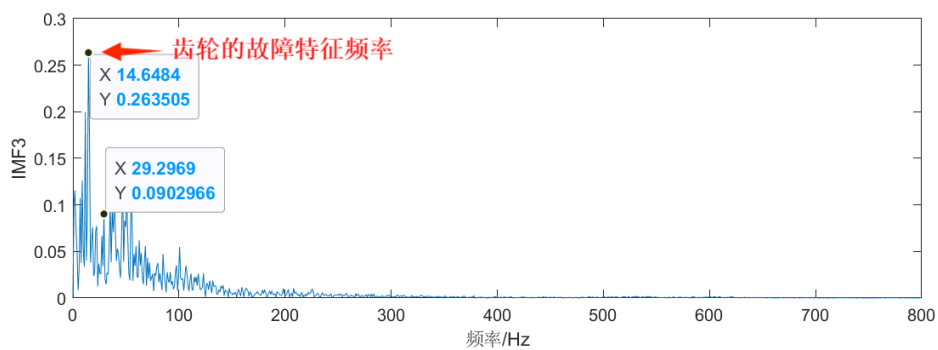


齿轮和轴承外圈的耦合故障信号包络谱

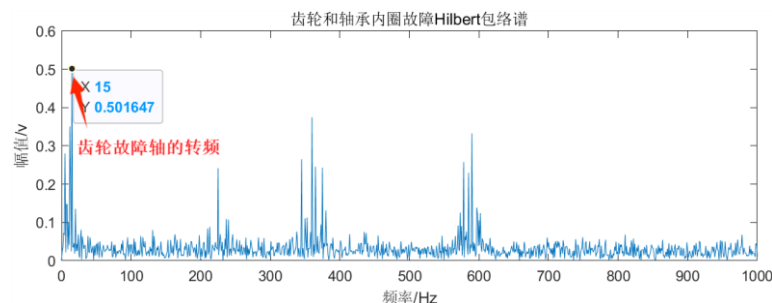
齿轮局部故障和轴承外圈故障的耦合故障的包络谱中只能看到齿轮故障特征频率。而协同诊断包络谱提取出了齿轮的故障特征和轴承外圈的故障特征，且故障特征频率的谱线都很明显、清晰。充分验证了所提协同诊断法在耦合故障信号中提取故障特征方面的优越性。

2. 基于仿真数据方法验证——齿轮局部故障和轴承内圈的耦合故障仿真信号

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。



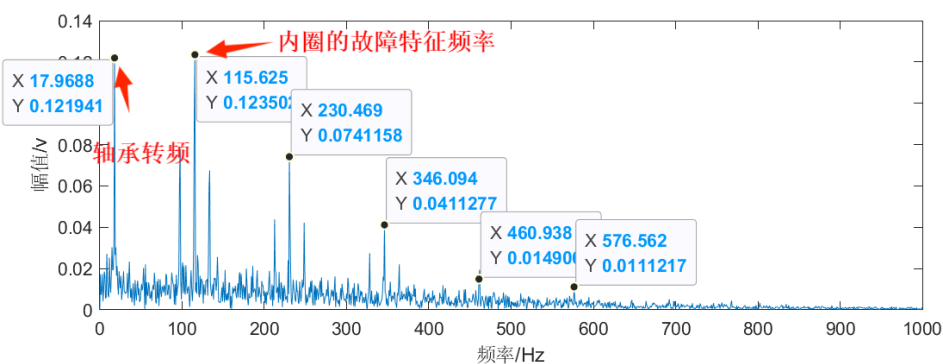
齿轮仿真故障信号协同诊断包络谱



齿轮和轴承外圈耦合仿真故障信号直接包络谱

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。

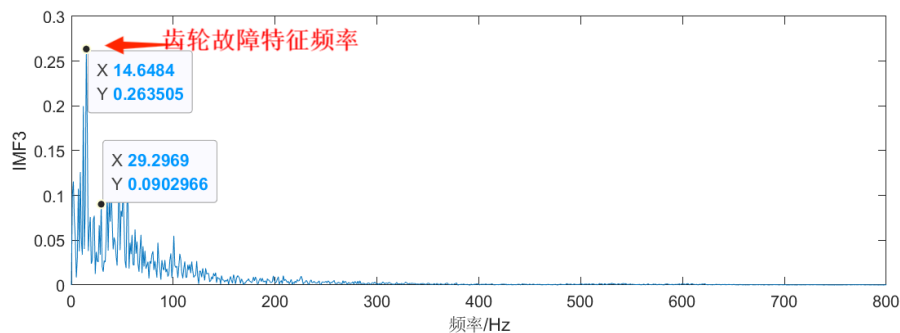
协同诊断包络谱提取出了齿轮的故障特征和轴承内圈的故障特征，且谱线明显、清晰。充分验证了所提协同诊断法在齿轮局部故障和轴承内圈故障的耦合故障信号中提取故障特征方面的优越性。



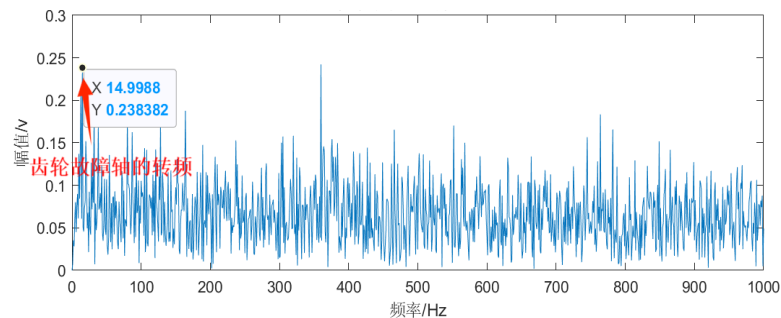
轴承内圈仿真故障信号协同诊断包络谱

2. 基于仿真数据方法验证——齿轮局部故障和轴承滚动体的耦合故障仿真信号

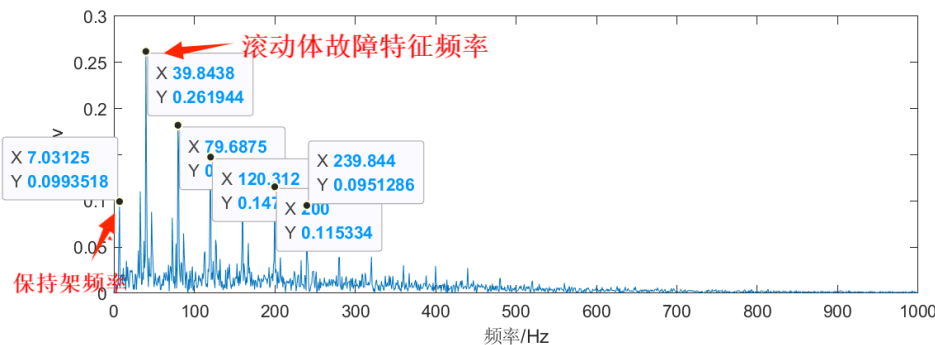
为验证所提协同诊断方法的有效性和可靠性，将轴承和齿轮的仿真信号进行协同诊断和谱分析。首先通过DRS分离出齿轮和轴承信号，然后将分离出的齿轮信号和轴承信号分别进行MED滤波处理，再通过VMD找寻各自的最优频带，并做谱分析，将直接包络谱和协同诊断包络谱的结果进行对比。



齿轮仿真故障信号协同诊断包络谱



齿轮和轴承外圈耦合仿真故障信号直接包络谱



轴承滚动体仿真故障信号协同诊断包络谱

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。协同诊断包络谱提取出了齿轮的故障特征、轴承滚动体的故障特征，其谱线都很明显、清晰。充分验证了所提协同诊断法在齿轮局部故障和轴承滚动体故障的耦合故障信号中提取故障特征方面的优越性。



汇报内容

1

研究目的与意义

2

齿轮和滚动轴承故障信号特征提取

3

齿轮箱复杂信号分析方法

4

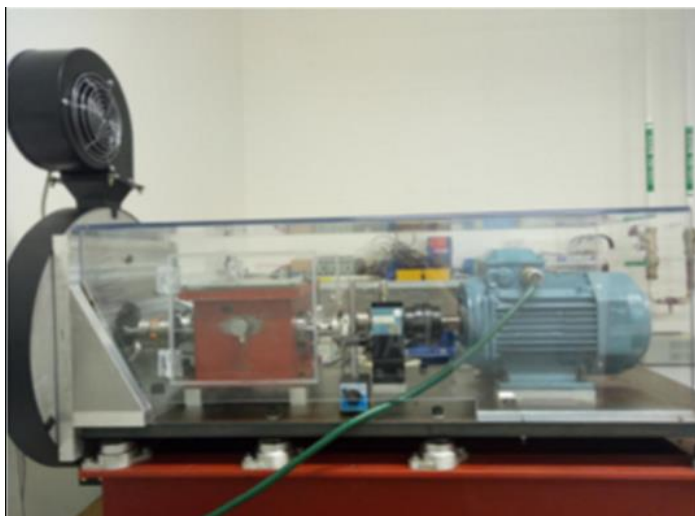
齿轮和轴承故障特征提取方法的
试验验证

5

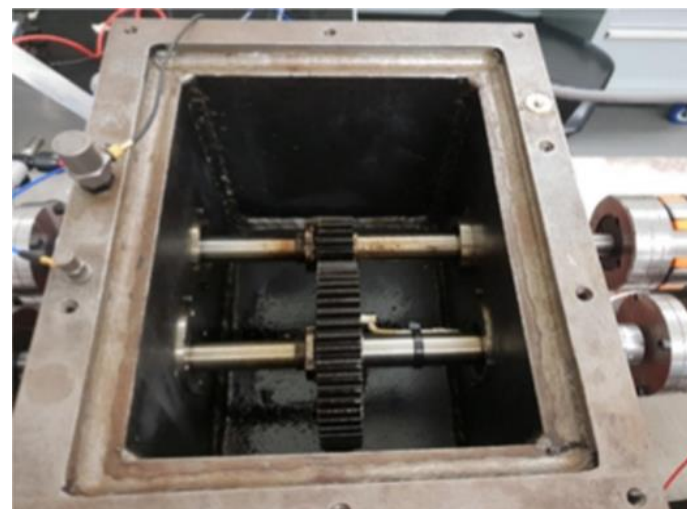
总结与展望

1. 基于UNSW全寿命齿轮数据集的验证

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。



齿轮箱装置图

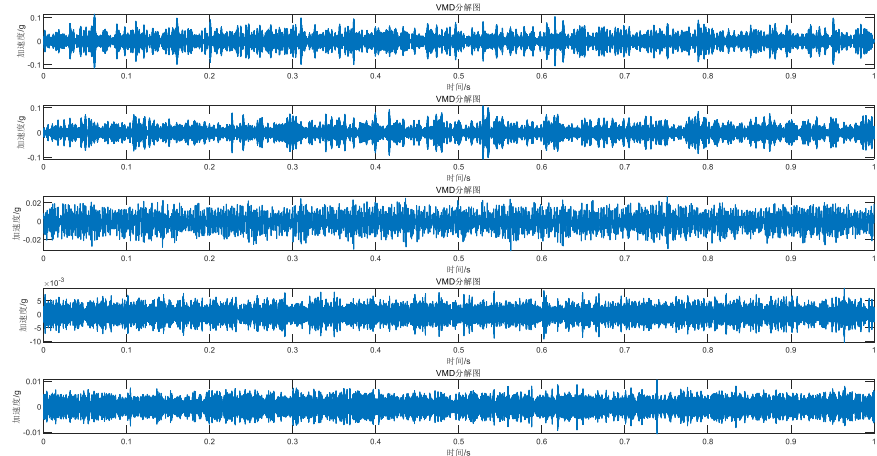


齿轮箱的细节

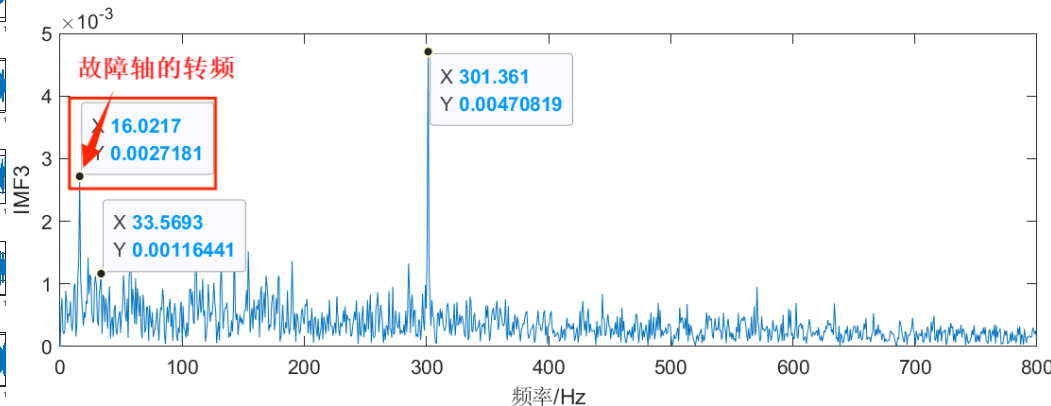
齿轮箱试验台

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。

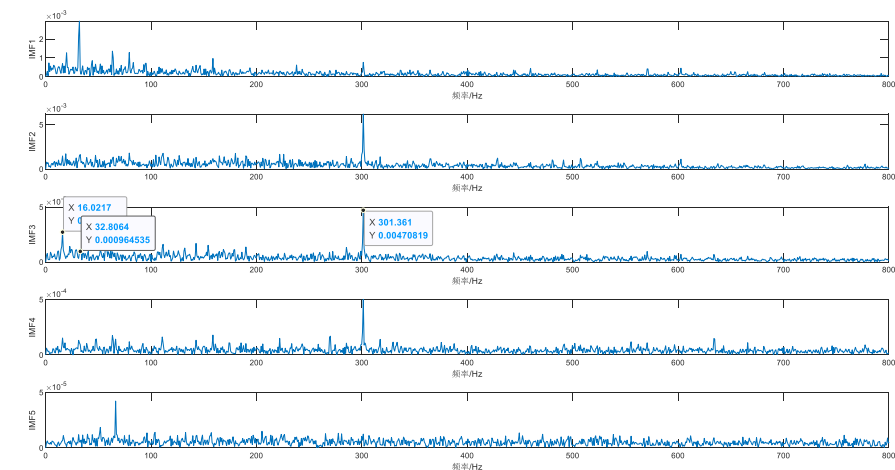
1. 基于UNSW全寿命齿轮数据集的验证



齿轮实测信号的5个IMF时域波形



齿轮实测信号协调诊断包络谱（第3分量）



齿轮实测信号的5个IMF包络谱

协同诊断法得到的包络谱中故障特征频率谱线清晰，突出。充分验证了所提协同诊断法在齿轮中提取故障特征方面的优越性。

2. 基于美国西储大学的滚动轴承数据集的验证

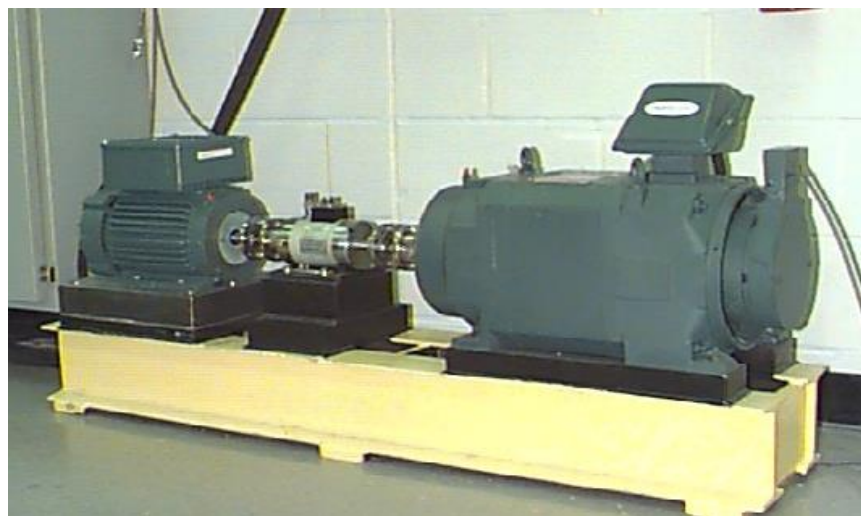
实验台包括电动机、译码器、功率测试计和电子控制器等实验设备。在不同的轴承型号和不同的条件下，测得的振动信号。

表1 轴承几何尺寸

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

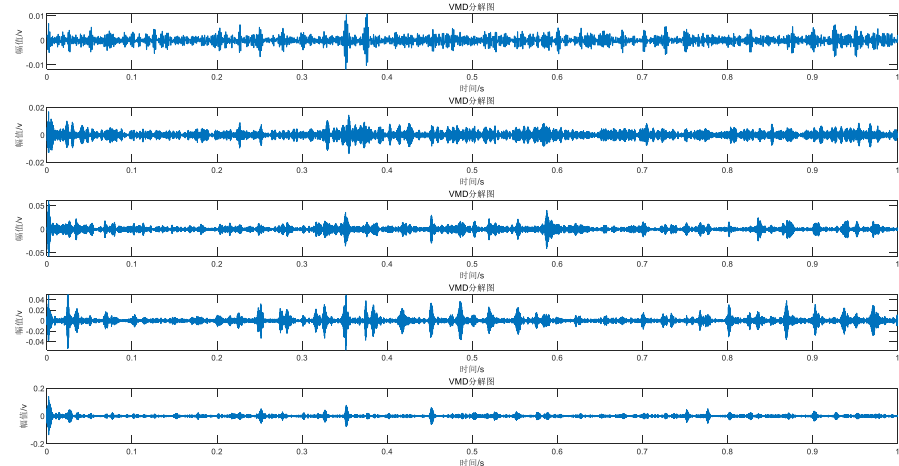
型号	内圈	外圈	保持架	滚动体
6203	4.9469	3.0530	0.3817	3.9874
6205	5.4152	3.5848	0.39828	4.7135



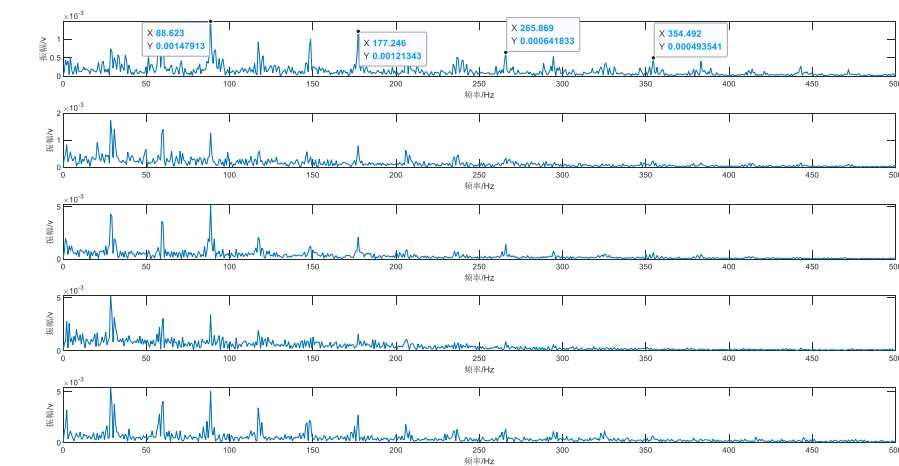
滚动轴承试验台

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。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求得轴承外圈、内圈和滚动体的故障频率分别是88Hz，144Hz和239Hz。

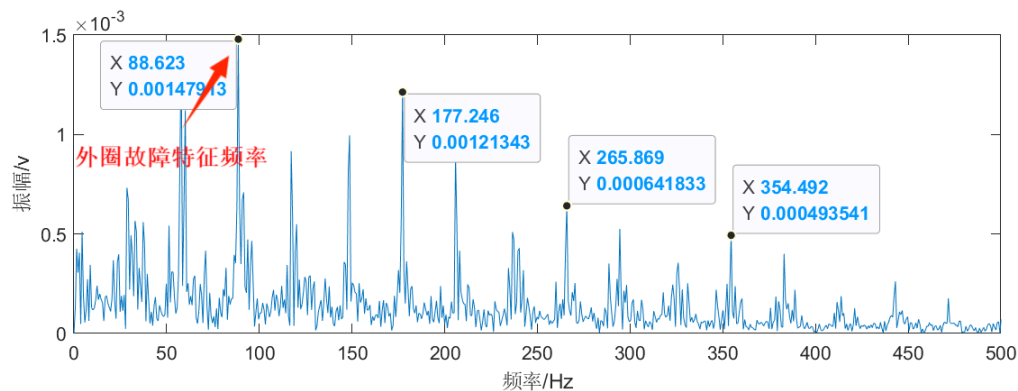
2. 基于美国西储大学的滚动轴承数据集的验证——轴承外圈



轴承外圈实测信号的5个IMF时域波形



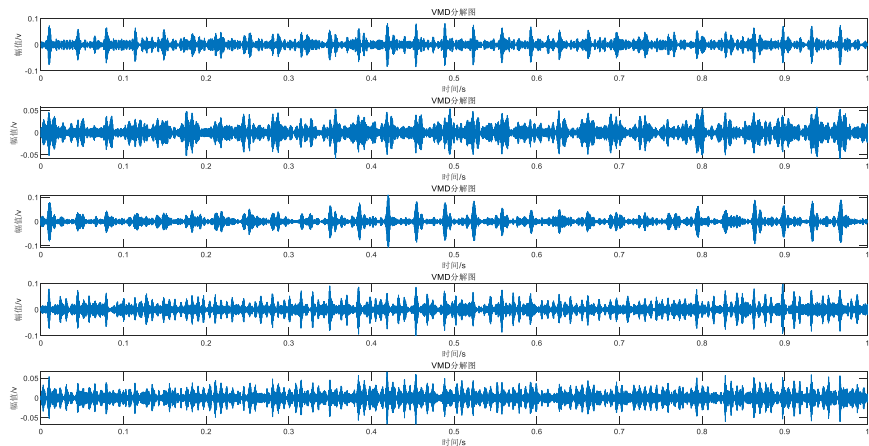
轴承外圈实测信号的5个IMF包络谱



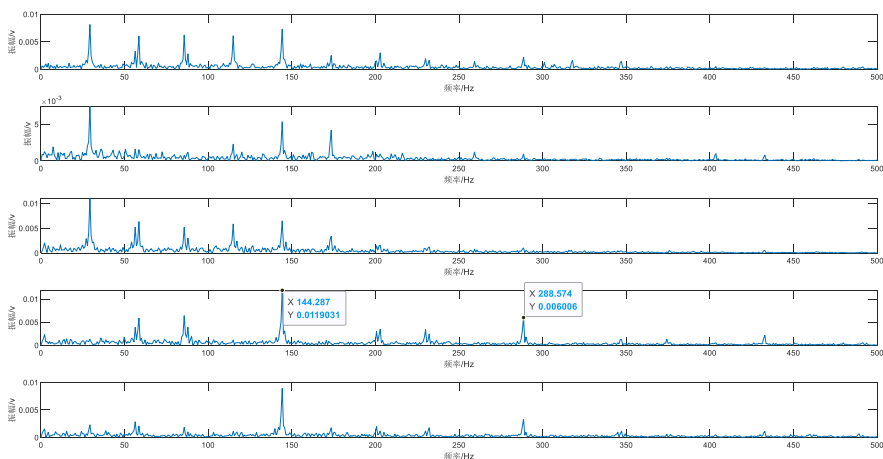
轴承外圈实测信号协同诊断包络谱（第1分量）

滚动轴承的外圈，协同诊断法得到的包络谱谱线更少，更为清晰。

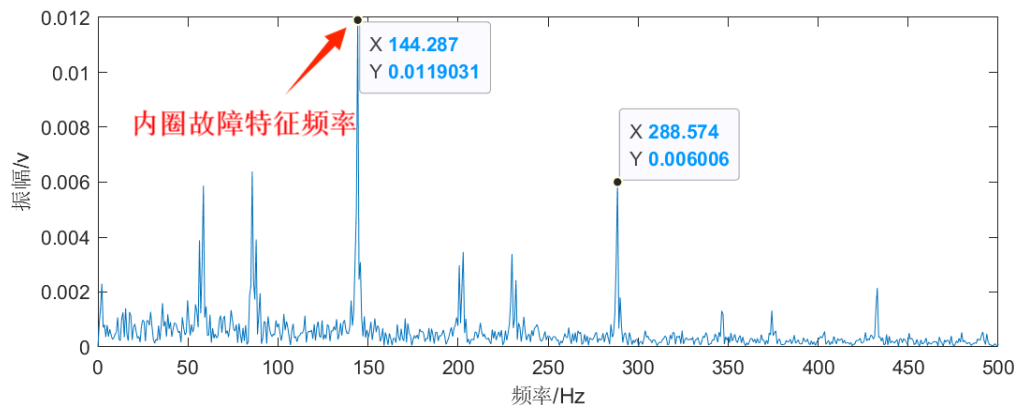
2. 基于美国西储大学的滚动轴承数据集的验证——轴承内圈



轴承内圈实测信号的5个IMF时域波形



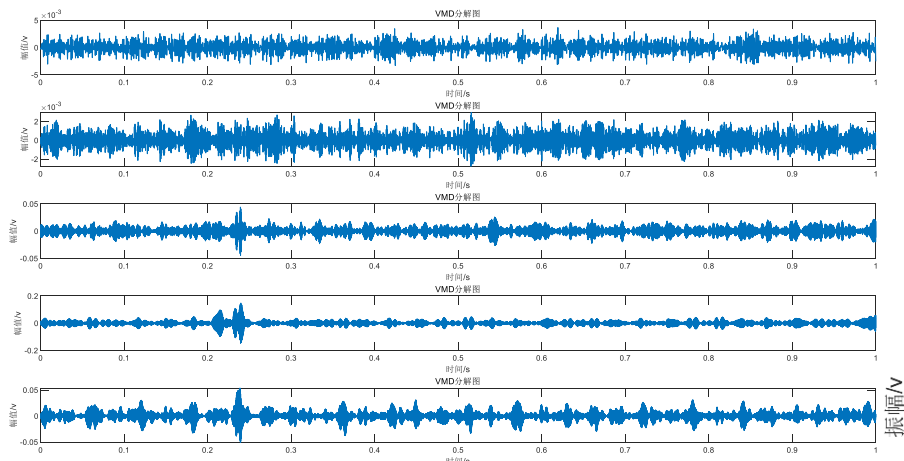
轴承内圈实测信号的5个IMF包络谱



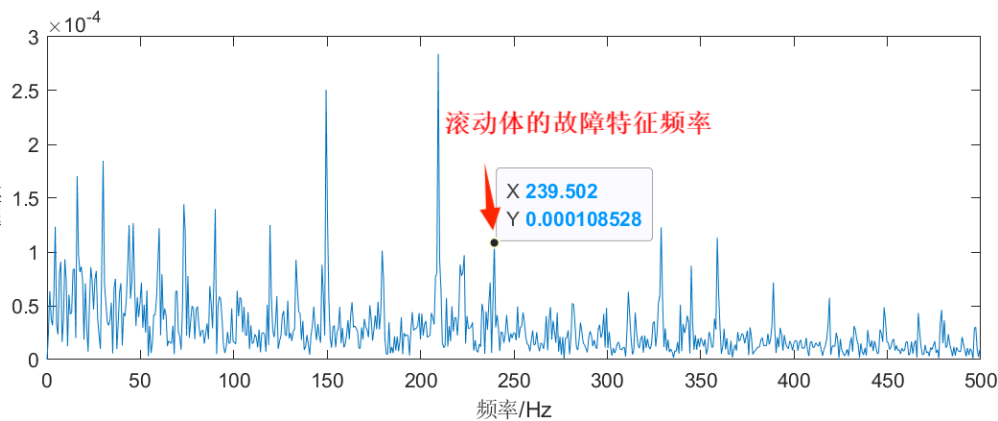
轴承内圈实测信号协同诊断包络谱（第4分量）

滚动轴承的内圈，协同诊断方法能得到更清晰的谱特征。

2. 基于美国西储大学的滚动轴承数据集的验证——轴承滚动体

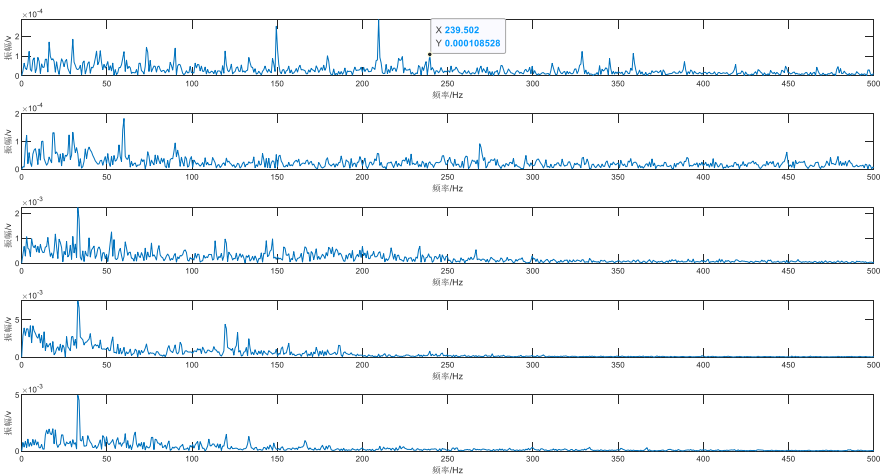


轴承滚动体实测信号的5个IMF时域波形



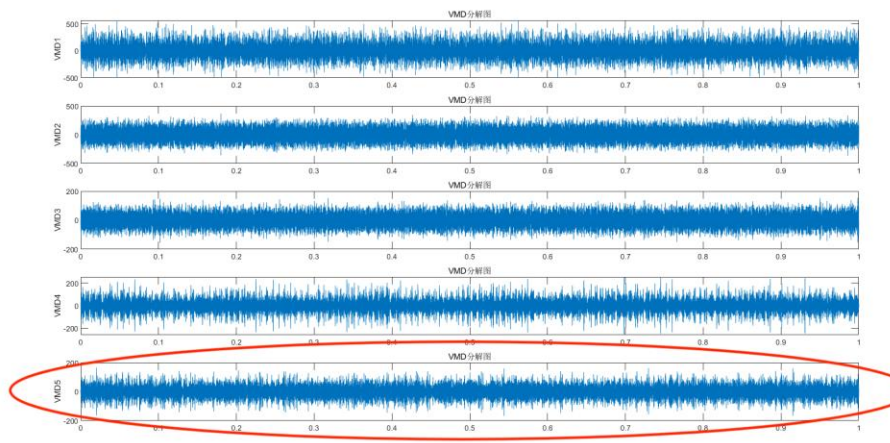
轴承滚动体实测信号协同诊断包络谱（第1分量）

对于滚动体故障而言，协调诊断方法包络谱中的故障特征频率相应的谱峰较明显。

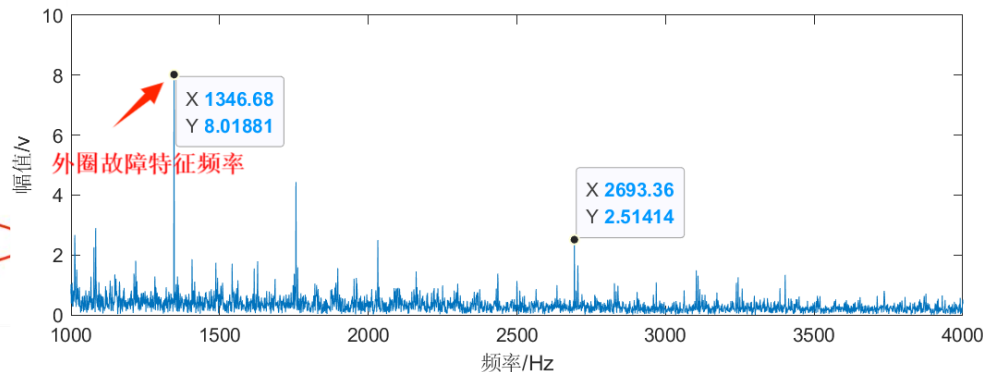


轴承滚动体实测信号的5个IMF包络谱

3. 基于真实附件机匣滚动轴承故障试验数据的方法验证——轴承外圈

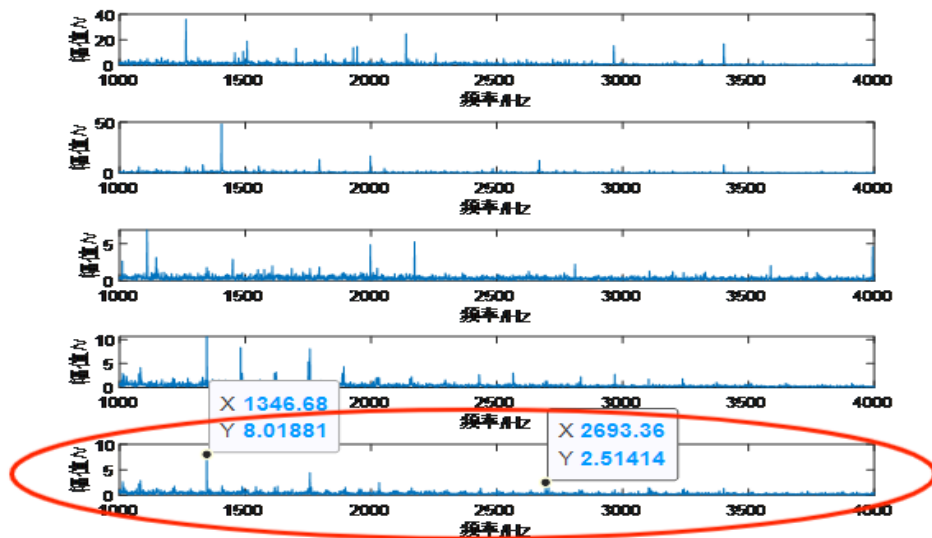


真实附件机匣轴承外圈协同诊断后的5个IMF时域波形



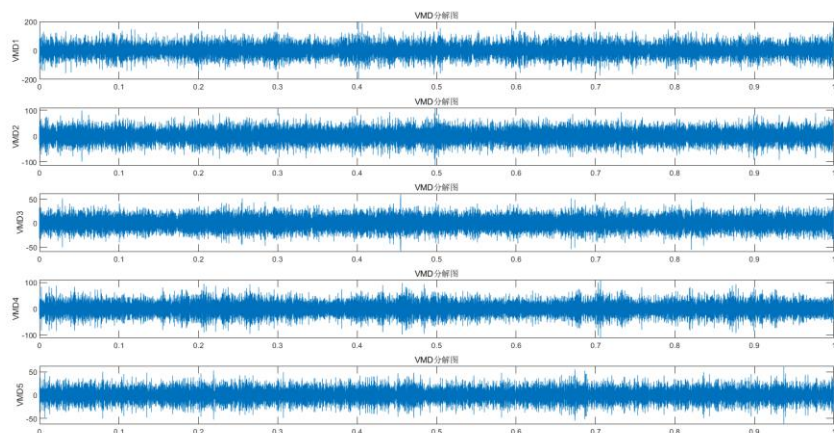
协同诊断包络谱（第5分量）

对于真实附件机匣轴承外圈故障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。

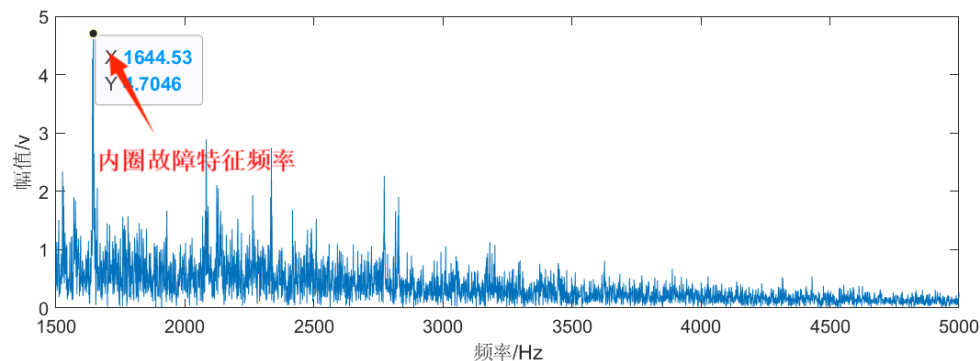


真实附件机匣轴承外圈经协同诊断后分解出5个分量的包络谱

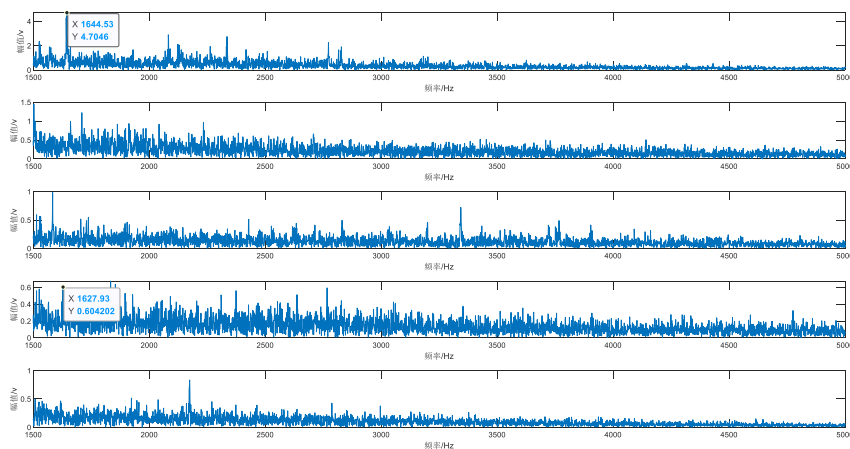
3. 基于真实附件机匣滚动轴承故障试验数据的方法验证——轴承内圈



真实附件机匣轴承内圈协同诊断后的5个IMF时域波形



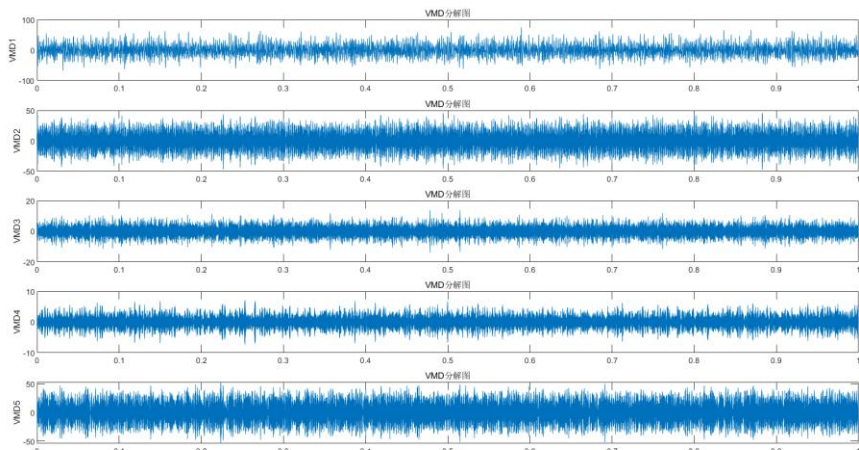
协同诊断包络谱（第1分量）



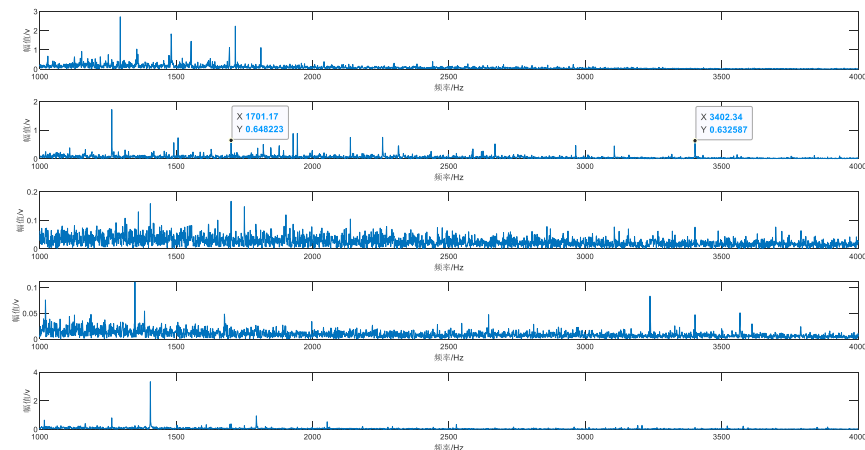
真实附件机匣轴承内圈经协同诊断后分解出5个IMF的包络谱

对于真实附件机匣轴承内圈故障，协同诊断下能找到对应的故障频率，得到清晰的谱特征。

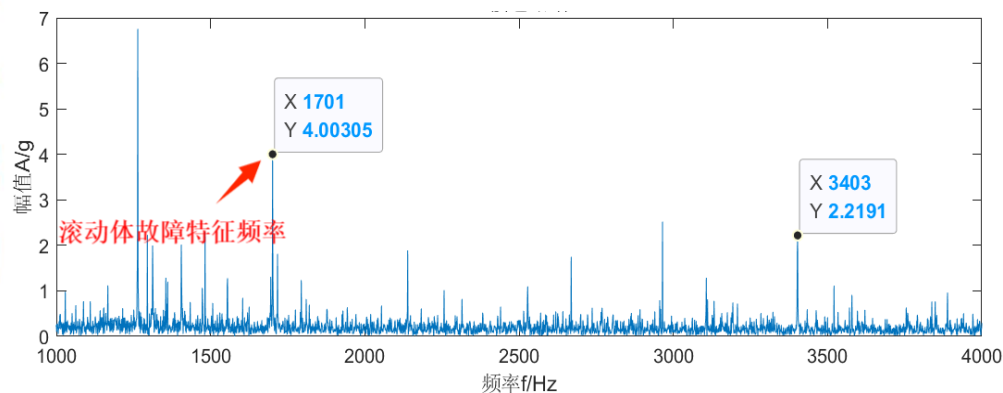
3. 基于真实附件机匣滚动轴承故障试验数据的方法验证——轴承滚动体



真实附件机匣轴承滚动体协同诊断后的5个IMF时域波形



真实附件机匣轴承滚动体经协同诊断后分解出5个IMF的包络谱



协同诊断包络谱（第2分量）

对于附件机匣轴承滚动体故障，协同诊断包络谱对应的故障频率相应的谱线少，谱峰更清晰。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。



汇报内容

1

研究目的与意义

2

齿轮和滚动轴承故障信号特征提取

3

齿轮箱复杂信号分析方法

4

齿轮和轴承故障特征提取方法的
试验验证

5

总结与展望

研究总结与展望

- 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。
- 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；
- 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。

- 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。
- 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。

结束!

感谢各位老师批评指正

T H A N K S