




南京航空航天大学

通用航空与飞行学院



一种融合EMD和EWT的滚动轴承故障信号分析方法及应用

 答辩人：马一杰 (SZ2320001)

 专 业：交通运输

 导 师：陈果 教授

汇报内容

01 绪论

02 滚动轴承剥落故障的振动故障信号仿真

03 融合EMD和EWT的信号处理新方法

04 基于滚动轴承故障模拟试验器的试验验证

05 真实航空发动机主轴承试验验证

06 总结与展望

➤ **复杂服役环境下主轴承典型故障宏观动力学研究**

项目来源： 国家科技重大专项

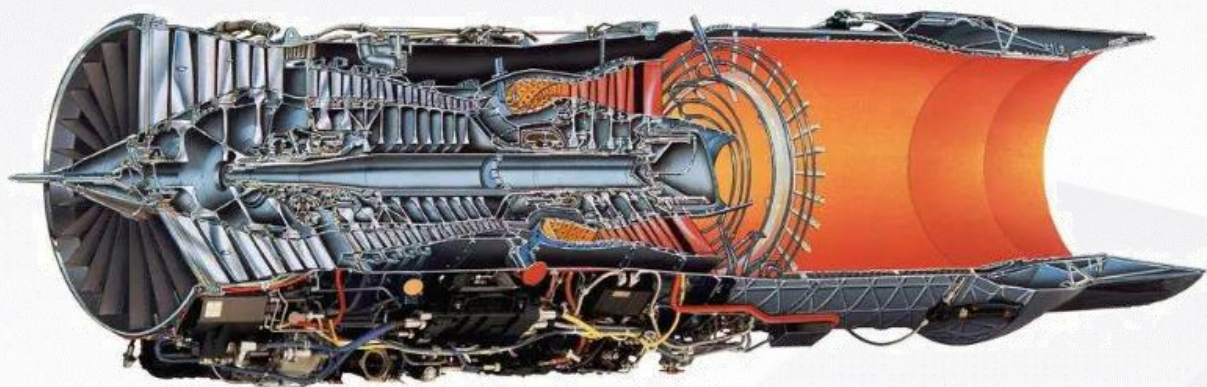
➤ **基于深度异常检测和元学习的航空发动机主轴承早期故障预警与演化诊断**

项目来源： 国家自然科学基金面上项目

➤ **发动机转子系统的整机耦合动力学模型技术研究**

项目来源： 海军课题

- 滚动轴承是航空发动机关键支撑部件，工作在高速、高温环境，同时还要承受强烈的时变冲击载荷，因此**极易产生故障**，其运行状态直接影响发动机可靠性及使用寿命，因此，**对其故障进行诊断尤为重要**。



- 然而，由于滚动轴承深埋在航空发动机内部，其故障振动信号呈现出明显的**非平稳性、多分量混叠以及强背景噪声**的特征，传统的信号处理方法面临极大的挑战。因此，**如何对滚动轴承早期故障进行精确诊断以及特征提取**，成为当前故障诊断重要研究的方向。

- 某型国产发动机因主轴承剥落累计发生10余起空中停车事故征候。
- 目前主轴承早期故障诊断研究**通常未充分考虑自适应处理**对主轴承早期故障诊断的影响，这些自适应处理方法会进一步**提升故障诊断的准确度以及普适性**。
- 由于航空发动机主轴承位于发动机内部，受高速、重载、高温的环境的影响，早期故障频率极容易被干扰频率所淹没，如何准确地提取故障特征频成为一大技术难点。



滚动轴承外圈剥落

➔ 主轴承的寿命和可靠性不高是制约我国发展航空发动机的瓶颈问题之一。

➔ 准确地对主轴承早期故障进行故障特征提取，对于提升主轴承可靠性和预防主轴承损坏具有重要的工程价值。

轴承内滚道磨损



滚动轴承故障信号分析和特征提取方法研究现状

目前主流的故障信号分析以及特征提取方法主要分为两种，时域分析以及频域分析，两种方法从两种不同的角度对信号成分进行分析。

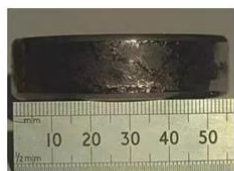
- 时域信号分析通常对信号的12个基本时域特征进行主成分分析，最终进行故障诊断。在此基础上Wang等提出了一种基于**递归定量分析 (RQA)** -**贝叶斯-支持向量机 (SVM)** 的滚动轴承故障诊断技术。
- 频域信号分析是指对时域信息进行**解调和精细频谱分析**。陈永会等人通过**希尔伯特变换**对时域信号进行分析从而提取出故障特征频率。郑近德等人通过引入**广义经验模态分解 (GEMD)** 和**改进的直接正交解调 (IDQ)** 对信号进行分解。张亿雄等人利用**小波包分析**对时域信号进行分解并进行滚动轴承故障诊断。



剥落



断裂



腐蚀



磨损

- 张沛朋, 郭飞燕. 基于PCA-SVM的滚动轴承故障诊断研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, (11): 88-90. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2015.11.025.
- Wang B, Qiu W, Hu X, et al. A rolling bearing fault diagnosis technique based on recurrence quantification analysis and Bayesian optimization SVM [J]. Applied Soft Computing, 2024, 156: 111506.
- Yong-hui, CHEN et al. "Research of Rolling Bearings Fault Diagnosis", Noise and Vibration Control (2011): 137-140+145.
- Jinde, ZHENG, and CHENG Junsheng. "Improved Hilbert-Huang Transform and Its Applications to Rolling Bearing Fault Diagnosis", Jixie Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Mechanical Engineering 51.1 (2015): 138-138.
- Yi-xiong, ZHANG et al. "Rolling Element Bearing Fault Diagnosis Using Wavelet Packets", Coal Mine Machinery (2009): 246-248.

基于EMD的滚动轴承故障信号分析研究现状

经验模态分解 (EMD) 是一种典型故障诊断方法，在滚动轴承故障诊断领域有着广泛的应用，**经验模态分解**不依赖于基函数，分解过程可以根据信号本身的局部信号特征来完成**自适应分解**，雷亚国等人系统地介绍了EMD算法，并将其应用在诸多领域。

➤ 于德介等人通过**经验模态分解**将原始调制信号分解为多个IMF，然后定义包含主要故障信息的IMF包络谱中不同故障特征频率的振幅比作为特征振幅比，从而进行**故障诊断**。Zhou等人提出了一种**EMD、峭度以及希尔伯特解调相结合**的故障诊断方法。Wu等人提出了一种**EMD、希尔伯特包络谱分析以及BP神经网络相结合**的故障诊断办法。吕勇等人提出了一种基于**多变量经验模态分解**的滚动轴承故障特征提取新方法。Huang等人提出一种**基于经验模态分解和卷积循环神经网络的故障诊断的方法**

- Lei, Yaguo et al. "A Review on Empirical Mode Decomposition in Fault Diagnosis of Rotating Machinery", Mechanical systems and signal processing 35.1 (2013): 108-126.
- Wu, Zhaohua, and Norden E. Huang. "Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise-Assisted Data Analysis Method", Advances in Data Science and Adaptive Analysis 1.1 (2009): 1-41.
- ZHOU H, JIA M. Analysis of Rolling Bearing Fault Diagnosis Based on EMD and Kurtosis Hilbert Envelope Demodulation [Z](2014-01-01).
- Lv Y, Yuan R, Song G. Multivariate empirical mode decomposition and its application to fault diagnosis of rolling Bearing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 81: 219-234.
- Huang M, Huang T, Zhao Y, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on empirical mode decomposition and convolutional recurrent neural network [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1043(4): 042015.

基于EMD的滚动轴承故障信号分析研究现状

然而EMD算法自身存在一定的缺陷，在**非平稳、非线性**的信号中，由于端点处的数据较少，插值和局部拟合的结果会受到边界效应的影响，导致**分解结果偏离现实的信号结构**；并且在EMD分解后，某些**IMF分量**可能包含来自**不同频率成分**的信息，导致**分解结果不准确**。将上述缺陷总结成两点即**端点效应**以及**模态混叠**。因此，如何克服EMD算法自身缺陷成为了研究重点。

➤ Yeh等人通过提出一种新算法CEEMD算法增加了正负白噪声，有效地解决了经验模态分解模式混叠的问题。N.Rehman等人提出了一种用于多变量信号时间频率分析的多变量经验模态分解（Multivariate EMD）方法，解决了传统EMD在多变量信号处理中的局限性。胡爱军等人提出了一种基于集合经验模态分解（EEMD）和峰度准则的包络解调方法，用于滚动轴承的精确故障诊断，有效抑制了EMD的模态混叠现象。

➤ 司莉等人提出了一种改进的经验模态分解方法，通过镜像扩展和余弦窗函数处理信号端点，有效解决了传统方法中的端点效应问题。Meng等人提出了一种自适应波形匹配延拓的算法来抑制经验模态分解的端点效应，并结合信息熵、峭度值和希尔伯特-黄变换用于轴承的故障诊断。

- Yeh, Jia-Rong et al. "Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition: a Novel Noise Enhanced Data Analysis Method.", Advances in Data Science and Adaptive Analysis 2.2 (2010): 135-156.
- Rehman, N., and D. P. Mandic. "Multivariate Empirical Mode Decomposition", Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 466.2117 (2010): 1291-1302.
- Li, SI et al. "Improved method for empirical mode decomposition", Computer Engineering and Applications 38.14 (2014): 1199-1202.
- [29] Meng S, Kang J, Chi K, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on improved EMD algorithm [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 892(1): 012069.

基于EWT的滚动轴承故障信号分析研究现状

经验小波变换 (Empirical Wavelet Transform, EWT) 是一种**自适应时频分析**的方法, 与传统小波变换相比, **不再依赖于提前预定的母小波函数**, 其根本思想在于根据信号的实际频谱特性**自适应地构建小波滤波器组**, 从而实现信号分解, 进而进行故障诊断。但是EWT算法由于对噪声极为敏感, 在真实发动机运行过程中无法有效提取特征频率成分, 因此如何改进EWT算法使其能够自适应地提取故障特征成为了研究重点。

➤ Xu等人提出了一种新颖的频谱分割方法来改善EWT在边界划分方面的缺点。Zheng等人通过开发一种新的分割方法, 提出了一种**改进的经验小波变换 (IEWT) 方法**。同时, 将IEWT与EMD和EWT进行比较, 以验证IEWT在分解精度方面的优越性。Li等人提出了一种将**改进的自适应无参数经验小波变换 (IAPEWT) 和自适应稀疏编码收缩去噪 (ASCSD) 算法**相结合的滚动轴承故障诊断方法。盛嘉玖等人针对经验小波变换 (EWT) 在滚动轴承故障信号**最优频带提取中存在的问题**, 提出一种**基于提取能量包络趋势线以自适应划分频带的改进EWT方法**, 并应用于滚动轴承故障诊断。

- Xu Y, Deng Y, Zhao J, et al. A Novel Rolling Bearing Fault Diagnosis Method Based on Empirical Wavelet Transform and Spectral Trend [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 2891–2904.
- Zheng J, Huang S, Pan H, et al. An Improved Empirical Wavelet Transform and Refined Composite Multiscale Dispersion Entropy-Based Fault Diagnosis Method for Rolling Bearing [J]. IEEE Access, 2020, 8: 168732–168742.
- [34] Li J, Wang H, Wang X, et al. Rolling bearing fault diagnosis based on improved adaptive parameterless empirical wavelet transform and sparse Denoising [J]. Measurement, 2020, 152: 107392.
- [33] 盛嘉玖, 陈果, 康玉祥, 等. 一种用于滚动轴承故障诊断的改进EWT方法[J]. 航空动力学报, 2024, 39(09): 371-383. DOI:10.13224/j.cnki.jasp.20220677.

问题提出

1.航空发动机环境复杂，调参难度极大

目前由于航空发动机主轴承位于发动机内部，受高速、重载、高温的环境的影响，早期故障频率极容易被干扰频率所淹没，无法准确地提取故障特征频率。主流算法依赖参数设定，难度系数极高。

2.EMD、EWT算法存在缺陷

EMD算法受到端点效应及模态混叠的影响，无法准确识别出故障特征频率；EWT算法受噪声影响极大，在背景噪声大的真实发动机环境下无法准确识别故障特征频率。

3.非平稳、非线性复杂工况

目前关于滚动轴承故障诊断的研究并没有考虑真实航空发动机振动数据的非平稳、非线性、干扰大的工况。

研究内容

引入EMD、EWT算法

EMD、EWT两种算法都能够自适应地提取故障特征频率，无需复杂的调参手段，具有较强的普适性。

将EMD算法与EWT算法相融合

对于一组振动数据，先进行EMD预处理，再对IMF分量进行EWT二次处理，既克服了EMD端点效应及模态混叠的影响又解决了EWT算法受噪声影响分解失败的问题。

基于真实航空发动机主轴承振动数据

基于真实航空发动机主轴承振动数据，分析得出分解结果并与预制主轴承故障状态相比对，验证算法的有效性与普适性。

汇报内容

01 绪论

02 滚动轴承剥落故障的振动故障信号仿真

03 融合EMD和EWT的信号处理新方法

04 基于滚动轴承故障模拟试验器的试验验证

05 真实航空发动机主轴承试验验证

06 总结与展望

滚动轴承故障特征频率计算

外圈故障特征频率: $f_o = \frac{Zf_r}{2} (1 - \frac{d}{D} \cos\alpha)$

内圈故障特征频率: $f_i = \frac{Zf_r}{2} (1 + \frac{d}{D} \cos\alpha)$

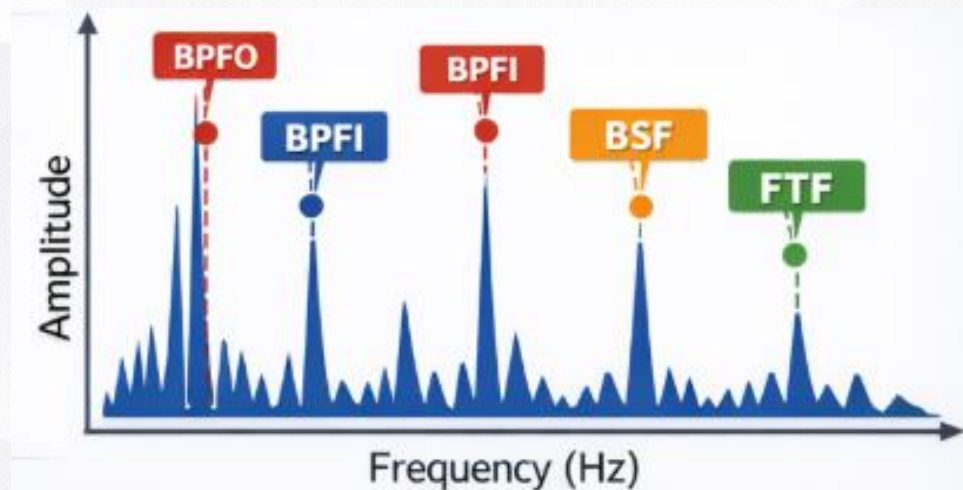
滚动体故障特征频率: $f_c = \frac{f_r}{2} (1 - \frac{d}{D} \cos\alpha)$

保持架故障特征频率: $f_b = \frac{f_r D}{2d} (1 - (\frac{d}{D} \cos\alpha)^2)$



表 2.1·滚动轴承典型结构轴承参量表

名称	符号	含义
内径	$2r_1$	内圈平均直径
外径	$2r_2$	外圈平均直径
节径	D	滚动体球心所在圆的平均直径
滚动体直径	d	滚动体平均直径
接触角	α	滚动体受力方向与内外圈垂直线的夹角
滚动体个数	Z	滚动体的个数



故障特征频率频谱示意图

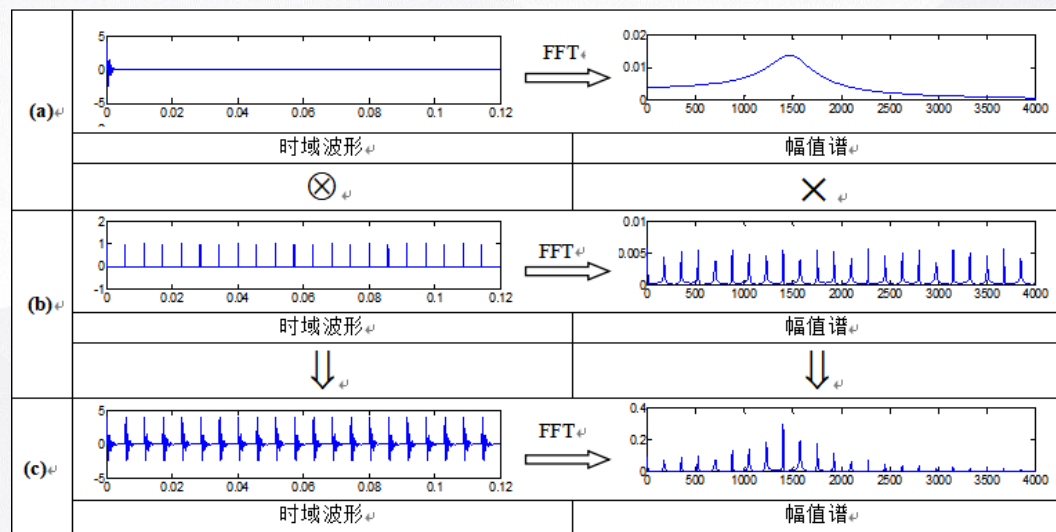
滚动轴承剥落故障振动信号仿真分析

对于滚动轴承故障信号仿真问题，由于真实的仿真信号包含多种不确定的干扰频率及固有频率，因此简单将故障仿真信号理解为故障特征信号的基础上叠加噪声信号即故障冲击信号和噪声信号的叠加。其中噪声信号利用高斯白噪声进行模拟：

$$S_{noise}(t) \sim N(\mu, \sigma^2)$$

故障冲击信号的幅值呈指数发生衰减，可以定义单次冲击信号：

$$g_i(t) = \begin{cases} c \cdot \exp\left(-2\pi\xi f_n \left(t - \frac{i}{f_{fault}}\right)\right) \sin\left(-2\pi f_n \sqrt{1-\xi^2} \left(t - \frac{i}{f_{fault}}\right)\right) & t \geq \frac{i}{f_{fault}}, i \in N \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$



左图 (a) 是首次冲击的时域波形和频谱；左图 (b) 是周期单位脉冲函数的时域波形和频谱；左图 (c) 是根据傅里叶变换时域卷积定理得到的仿真故障冲击信号的时域波形以及频谱。

滚动轴承外圈、内圈、滚动体故障信号仿真

根据故障位置的不同，相应的故障特征信号也会随之改变，其中：

外圈故障特征信号

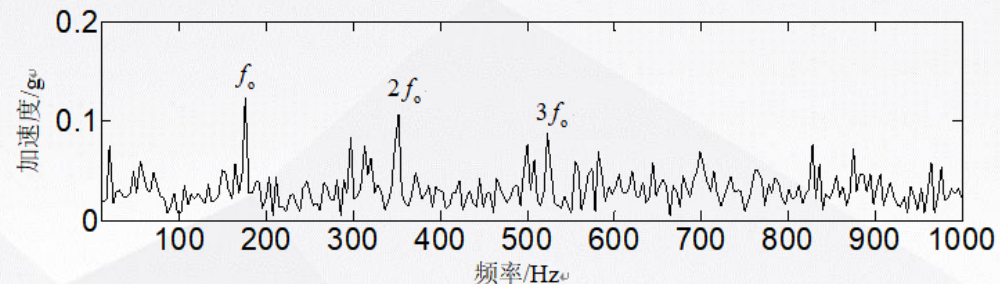
$$S_{fault}(t) = \sum_{i=0}^N g_i(t)$$

内圈故障特征信号

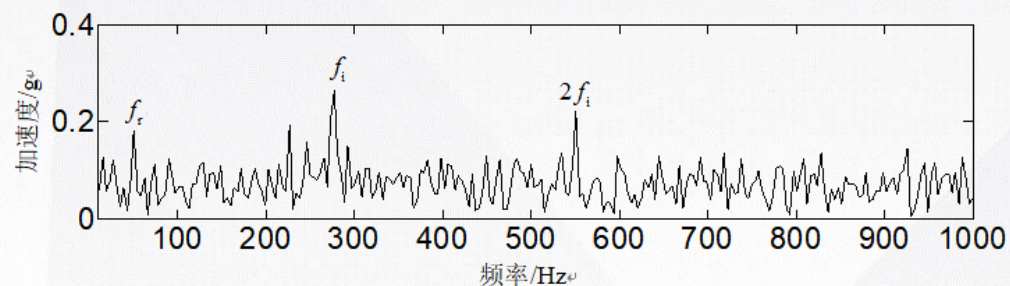
$$S_{fault} = (2 + \cos(2\pi f_r t)) \sum_{i=0}^N g_i(t)$$

滚动体故障特征信号

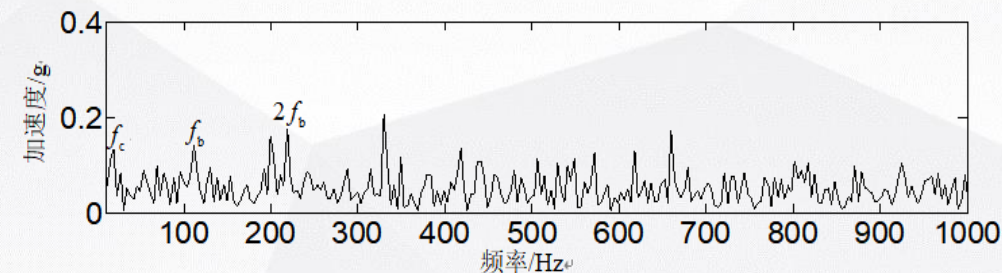
$$S_{fault} = A_1(2 + \cos(2\pi f_c t)) \sum_{i=0}^N g_i(t) + A_2(2 + \cos(2\pi f_c t)) \sum_{i=0}^N g_i\left(t - \frac{t}{\lambda f_b}\right)$$



外圈故障信号包络谱图



内圈故障信号包络谱图



滚动体故障信号包络谱图

通过观察包络谱图，在包络谱图中噪声成分得到了初步的抑制，能够有效提取低频成分中的故障特征频率

小结

本章的主要内容有：

- 1) 推导了滚动轴承外圈、内圈、滚动体故障的特征频率公式。
- 2) 对滚动轴承的外圈、内圈和滚动体故障信号进行了仿真。
- 3) 引入了包络谱的概念，解决了频谱中低频范围内故障特征频率难以识别的问题。

汇报内容

01 绪论

02 滚动轴承剥落故障的振动故障信号仿真

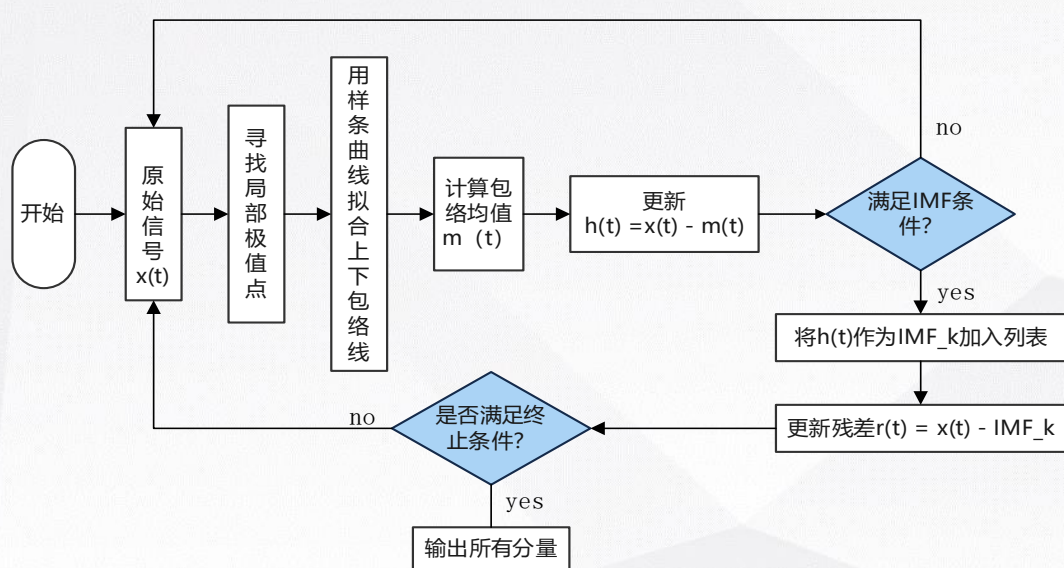
03 融合EMD和EWT的信号处理新方法

04 基于滚动轴承故障模拟试验器的试验验证

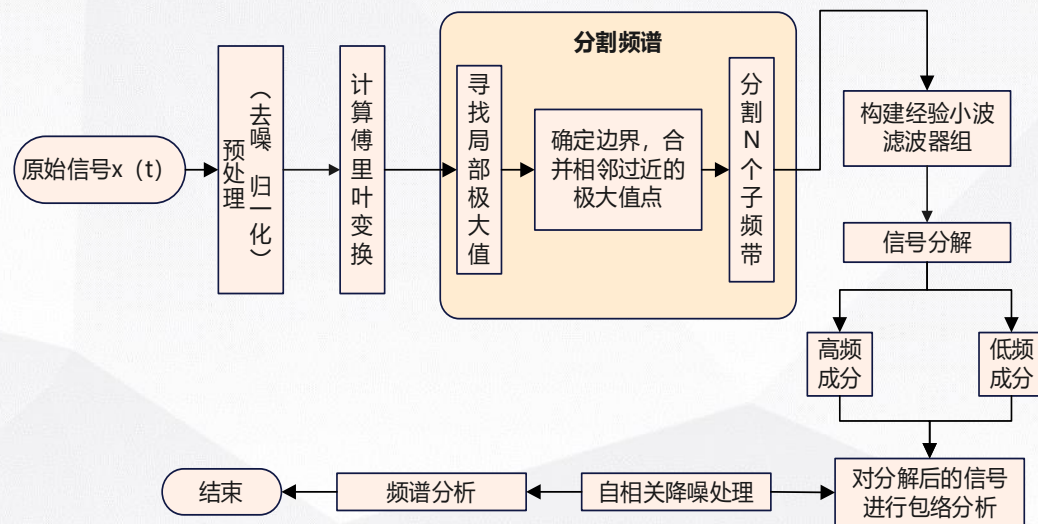
05 真实航空发动机主轴承试验验证

06 总结与展望

方法流程



+



融合算法理论原理分析

EMD算法缺陷

容易产生端点效应

容易发生模态混叠

EWT算法优势

具有成熟的边界延拓策略

具有优良的频率分辨能力

EWT算法缺陷

受噪声影响大，影响频谱分割

对短时非平稳特征信号响应有限

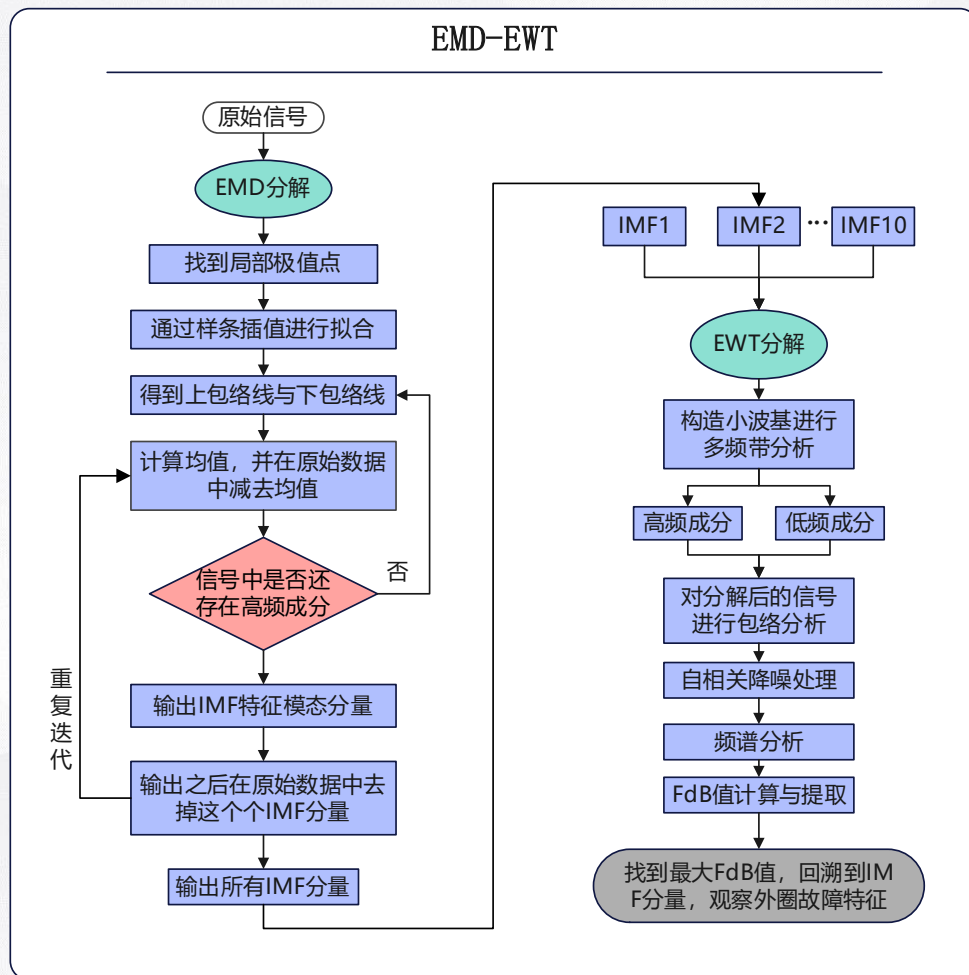
EMD算法优势

通过迭代，能够将噪声与信号特征分离

能够将短时非平稳冲击信号的能量集中

融合算法流程

将上述EMD和EWT算法相融合，对原始信号先进行EMD算法处理，得到若干个IMF分量，以此作为时域信号输入EWT算法中，用EWT算法对各个IMF分量进行经验小波变换，最终得到高、中、低频成分，之后进行第二章所描述的包络分析。



对信号进行包络分析、自相关降噪的处理后进行频谱分析，最终得到一系列经过融合算法处理后的包含故障信息的包络谱图，在包络谱图中寻找相应的故障特征频率成分，并进行FdB值的计算。

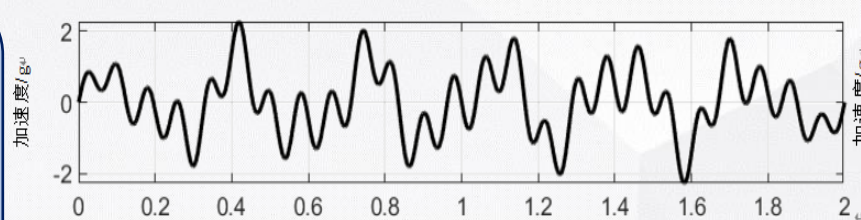
融合算法理论仿真验证

为了验证融合算法理论，本章设计了一个**多尺度叠加、非平稳的信号**用来模拟真实采集环境下采集的信号，采样频率为1000Hz，时间尺度为2s，表达式如下：

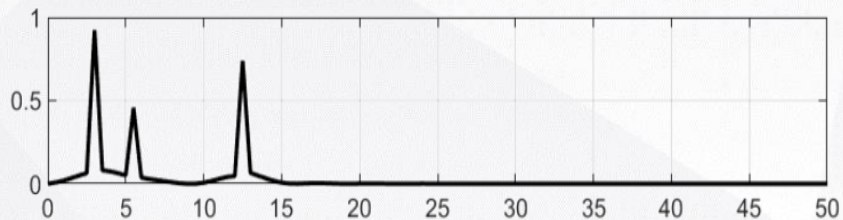
$$x(t) = \sin(6\pi t) + 0.5 \sin(11\pi t) + 0.8 \sin(25\pi t)$$

同时在仿真信号中引入幅值渐变衰减，衰减系数为0.5

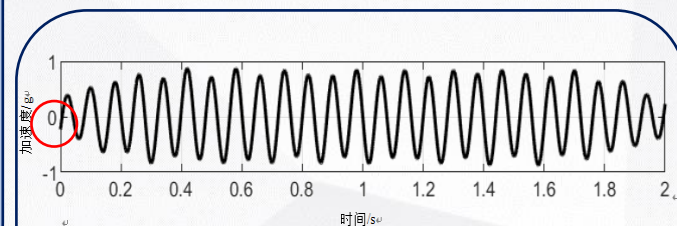
如右图所示，在EMD分解结果中，**端点处发生了偏移**，并且**波形被严重干扰**，发生严重的畸变，在经过EWT算法二次处理之后，端点效应得到了明显的改善，**波形的对称性、稳定性更强**，**相位的偏移也得到了显著优化**



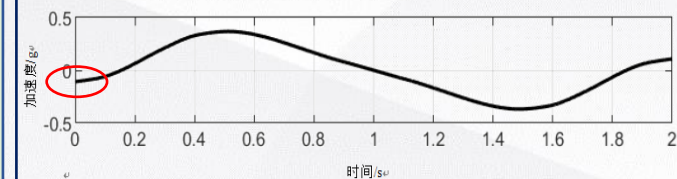
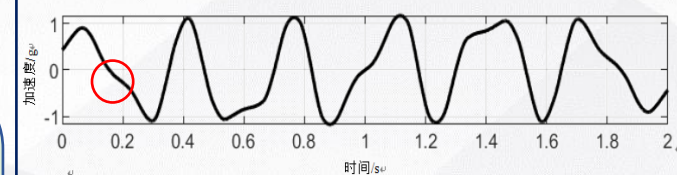
仿真信号时域波形



仿真信号频谱

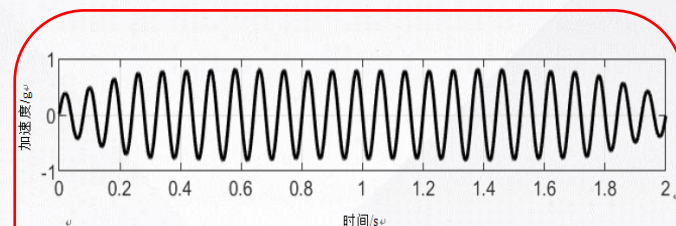


存在端点效应



EMD分解时域波形图

端点效应得到了明显改善



融合算法分解后时域波形图

不存在端点效应

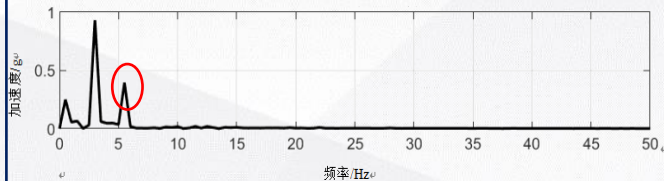
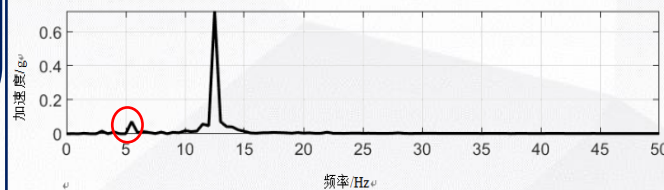
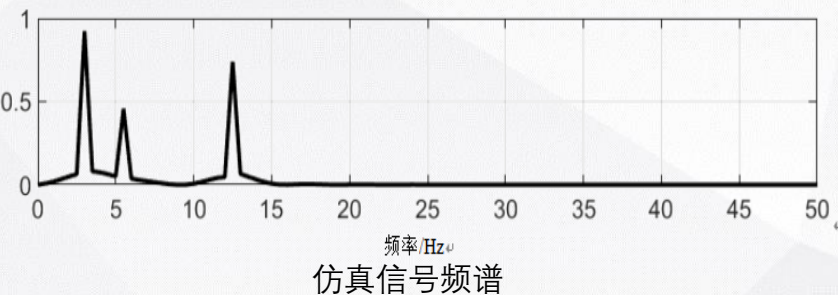
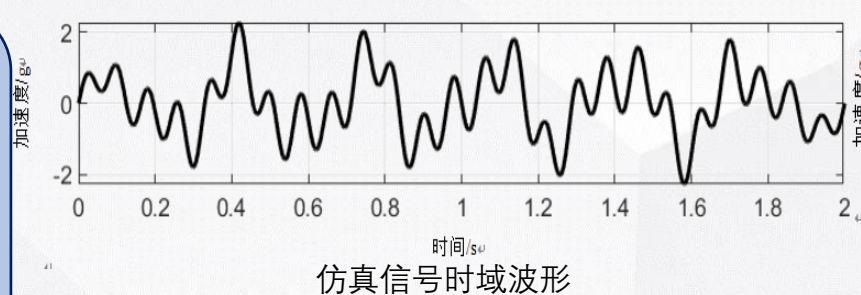
融合算法理论仿真验证

为了验证融合算法理论，本章设计了一个**多尺度叠加、非平稳的信号**用来模拟真实采集环境下采集的信号，采样频率为1000Hz，时间尺度为2s，表达式如下：

$$x(t) = \sin(6\pi t) + 0.5 \sin(11\pi t) + 0.8 \sin(25\pi t)$$

同时在仿真信号中引入幅值渐变衰减，衰减系数为0.5

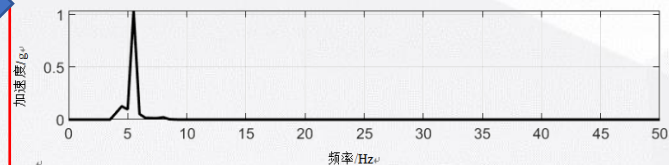
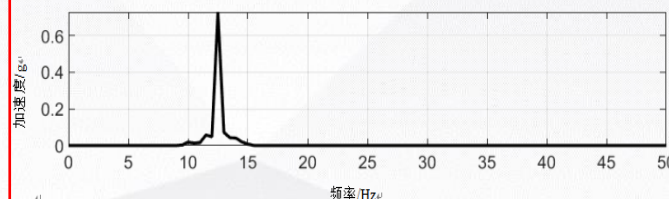
如右图所示，在EMD分解结果中，存在着明显的**模态混叠**，在两个分量中都包含了其他的频率成分，而在经过EWT二次处理之后，模态混叠得到了**明显的改善**，不同的**频率成分正确的出现在了各自的分量中**。



EMD分解频谱图

存在模态混叠

模态混叠得到了明显改善



融合算法分解后频谱图

不存在模态混叠

滚动轴承无量纲指标的建立

建立目的
及意义

为了更好的对比各个算法对于故障特征频率的提取**精准度**，将包络谱中的特征频率成分**数据化**，设计了一种**滚动轴承无量纲指标FdB**，FdB的值越高代表**特征频率越明显**，算法的**精准度越高**。

建立方法
及过程

通过第二章的计算得到特征频率范围

根据特征频率范围在包络谱中锁定特征频率

计算10Hz至2倍特征频率之间的包络谱幅值均值

用特征频率所在幅值除以包络谱幅值均值得到FdB

比较各个分量的FdB,选取最大值进行输出

公式推演

$$S_{di} = \max[W_i(f_{o1} + i\Delta f)], i \in [0, m], l = 1, 2, 3, 4$$

$$W_i(f) = \begin{cases} 0, & |f - 9f_N| < 0.05f_N \\ W_i(f), & \text{others} \end{cases}$$

$$S_{al} = \frac{1}{N_e} \sum_{i=0}^{N_e-1} W_i(f_i)$$

$$S_{oi} = \frac{S_{di}}{S_{al}}, l = 1, 2, 3, 4$$

$$S_o = \max_{l=1}^4 [S_{oi}]$$

$$F_{dB} = 20 \log_{10}(S_o)$$

小结

本章主要内容如下：

- 1) 介绍了EMD算法和EWT的**基本原理、融合机制理论及实现流程**。
- 2) 构造了模拟振动数据的**仿真信号**，进行EMD分解与EMD-EWT融合分解比较。
- 3) 建立了滚动轴承故障**无量纲指标**，解释了计算流程及物理意义，为后续试验提供**量化指标**。

汇报内容

01 绪论

02 滚动轴承剥落故障的振动故障信号仿真

03 融合EMD和EWT的信号处理新方法

04 基于滚动轴承故障模拟试验器的试验验证

05 真实航空发动机主轴承试验验证

06 总结与展望

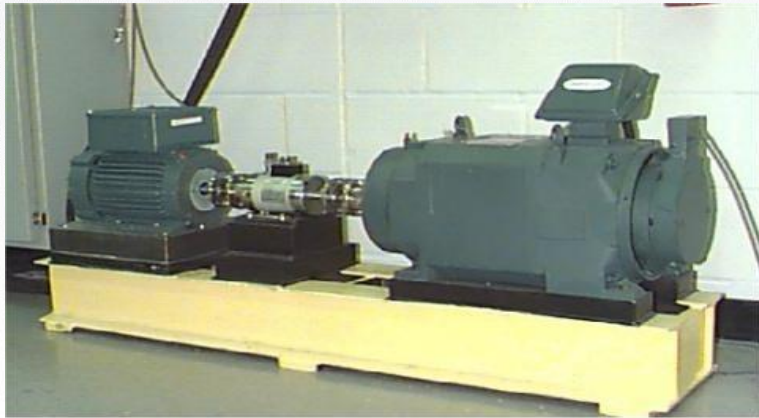
滚动轴承外圈、内圈、滚动体故障试验验证

本章在前述算法原理以及仿真验证的基础上，进一步对**真实工况下的数据集**进行实验验证与对比分析。

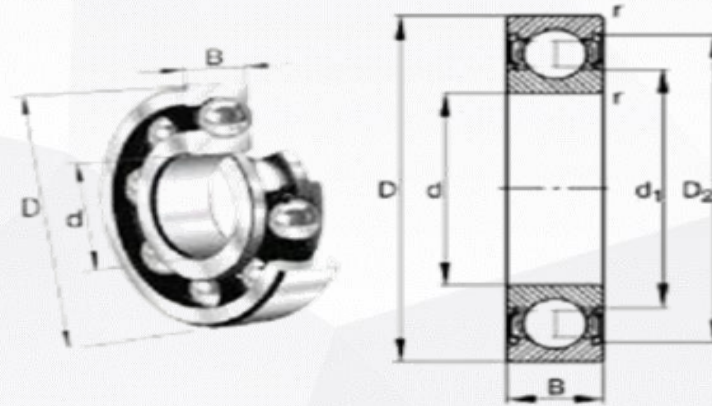
- 1) 实际采集的滚动轴承故障信号受**转速、信号传递路径和背景噪声**影响，呈现**非平稳性和故障特征不明显**。
- 2) 选取了**西储大学**公开的故障数据集和**自建转子 - 滚动轴承试验器**数据进行处理分析。
- 3) 验证了算法在**复杂工况和带机匣传递**条件下的处理能力。
- 4) 根据试验结果进行**统计分析**，给出了**故障判定的阈值**。

滚动轴承外圈、内圈、滚动体故障试验验证

- 凯斯西储大学试验器由一个1.5kW的电动机、一个扭矩传感器、一个功率测试机、一个电子控制器组成。分别采集了基座振动数据、电机驱动端振动数据以及电机风扇振动数据三组数据，本文以基座振动数据为目标数据分别对外圈故障、内圈故障、滚动体故障的数据进行分析处理。



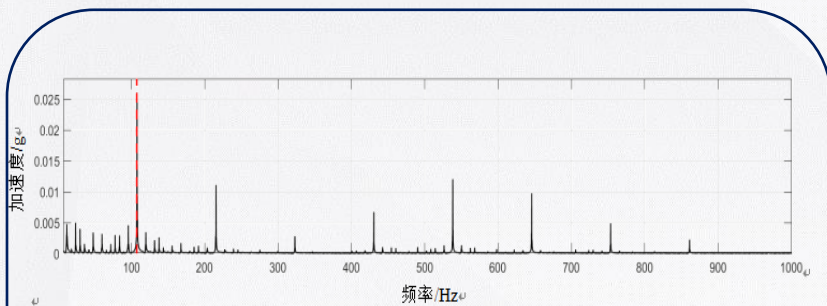
试验器实物图



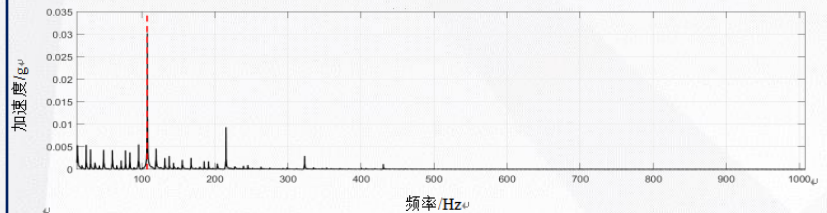
深沟球轴承基本结构

凯斯西储大学数据试验验证

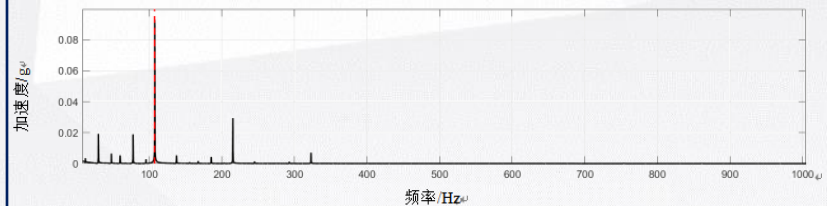
为了系统的分析比较各个算法的分解结果，挑选**每种故障模式下、不同转速下**的数据进行比较，并计算**全部数据**的FdB进行**趋势分析**。



EMD算法分解最大FdB所在分量

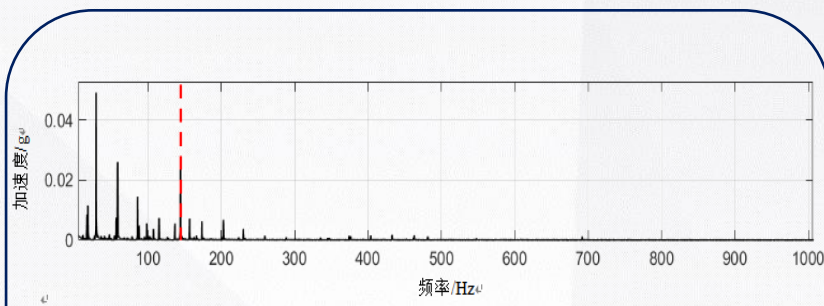


EWT算法分解最大FdB所在分量

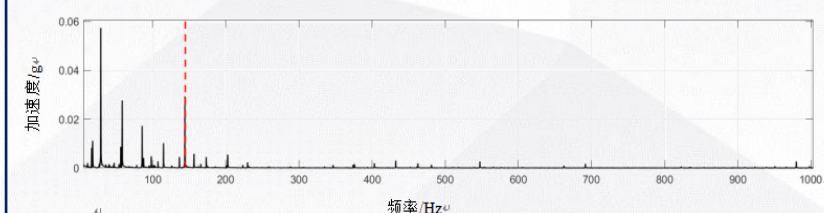


融合算法分解最大FdB所在分量

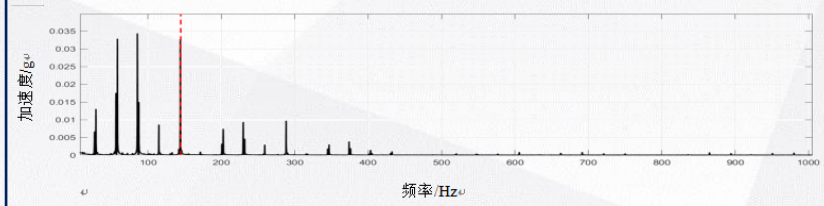
滚动轴承外圈故障结果分析



EMD算法分解最大FdB所在分量

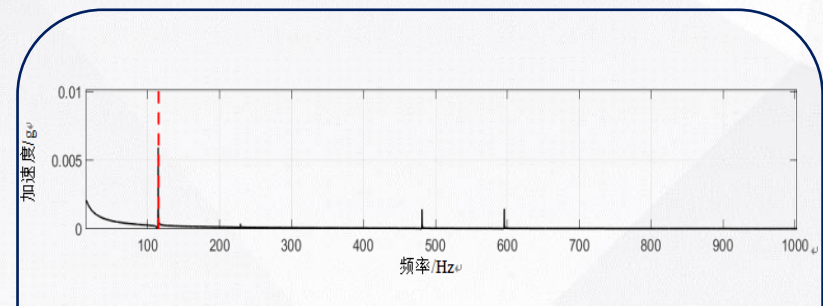


EWT算法分解最大FdB所在分量

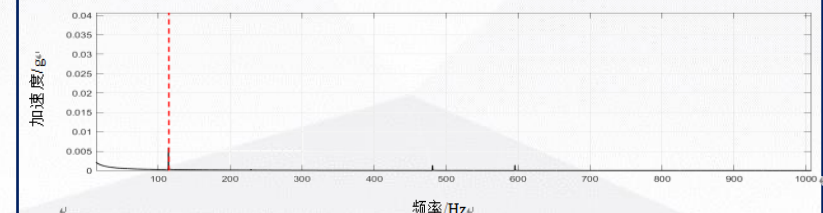


融合算法分解最大FdB所在分量

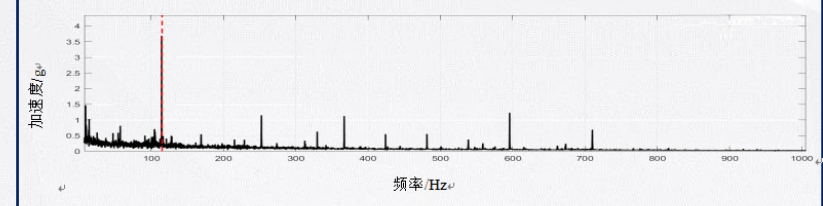
滚动轴承内圈故障结果分析



EMD算法分解最大FdB所在分量



EWT算法分解最大FdB所在分量



融合算法分解最大FdB所在分量

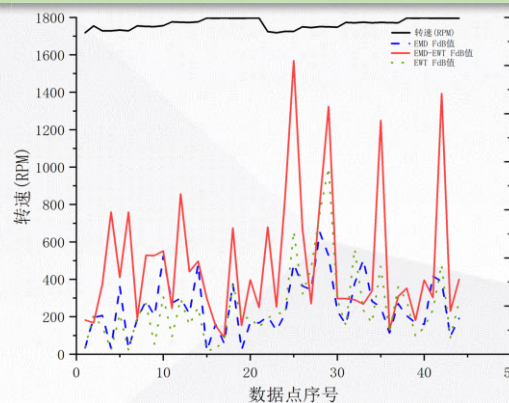
滚动轴承滚动体故障结果分析

凯斯西储大学数据试验验证

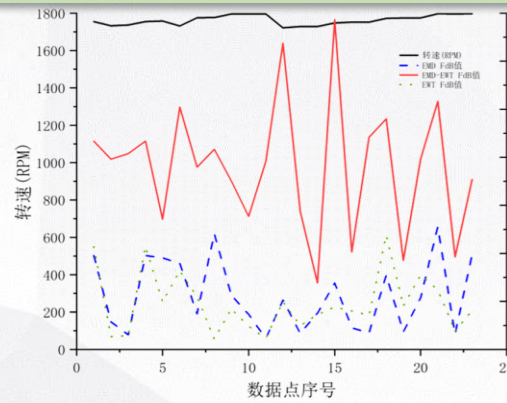
为了对分解后的包络谱进行量化数值比较，计算了FdB，通过比较FdB的大小，可以清晰地看出，融合算法相较于单一的EMD算法和EWT算法FdB值更高，对故障特征频率地响应更加敏感。并且对整体数据进行了FdB的趋势分析。

FdB统计汇总

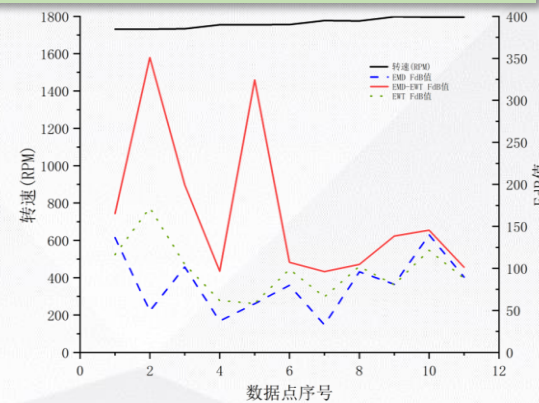
算法\故障类型	外圈故障	内圈故障	滚动体故障
EMD	305	375	28
EWT	376	366	66
EMD-EWT	1093	415	166



外圈故障整体FdB趋势分析



内圈故障整体FdB趋势分析



滚动体故障整体FdB趋势分析

小结

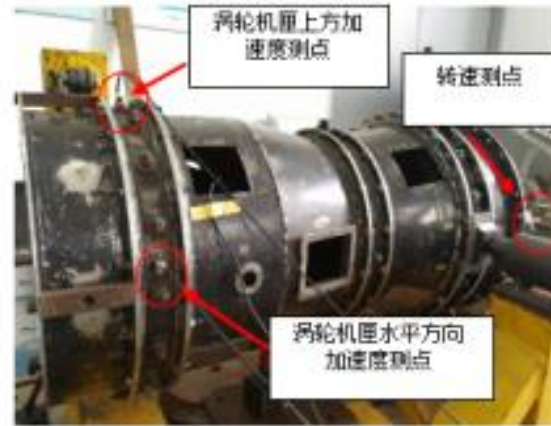
传统EMD算法虽然能够将复杂的非平稳信号进行多尺度分解，分解成不同的特征模态分量IMF，但是受到固有的模态混叠、端点效应等缺陷的影响，其在特征提取方面仍然有着很大的限制；EWT算法极易受到噪声影响导致产生过分解，无法对振动信号进行完全的分解，在特征提取和降噪等方面也有着很大的限制。EMD-EWT算法通过在EMD分解的基础上引入经验小波变换，实现了对IMF分量的二次精细化处理，克服了EMD算法固有的模态混叠、端点效应等缺陷也消除了EWT算法极易受到噪声等因素的影响产生过分解的缺陷。

带机匣航空发动机转子试验器数据试验验证

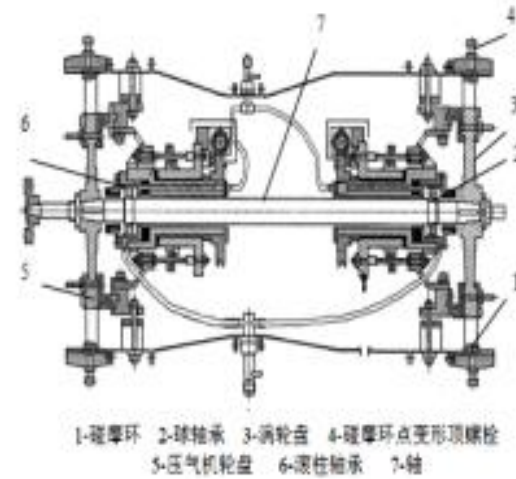
凯斯西储大学振动数据虽然处理结果明显，但是其背景噪声、干扰频率较低，无法真正模拟真实发动机环境下的振动数据，因此，自行搭建了带机匣航空发动机转子试验器平台，既模拟了真实发动机**复杂的信号传递路径**，也模拟了**复杂的环境条件**。



实物图（内部）



实物图（外部）



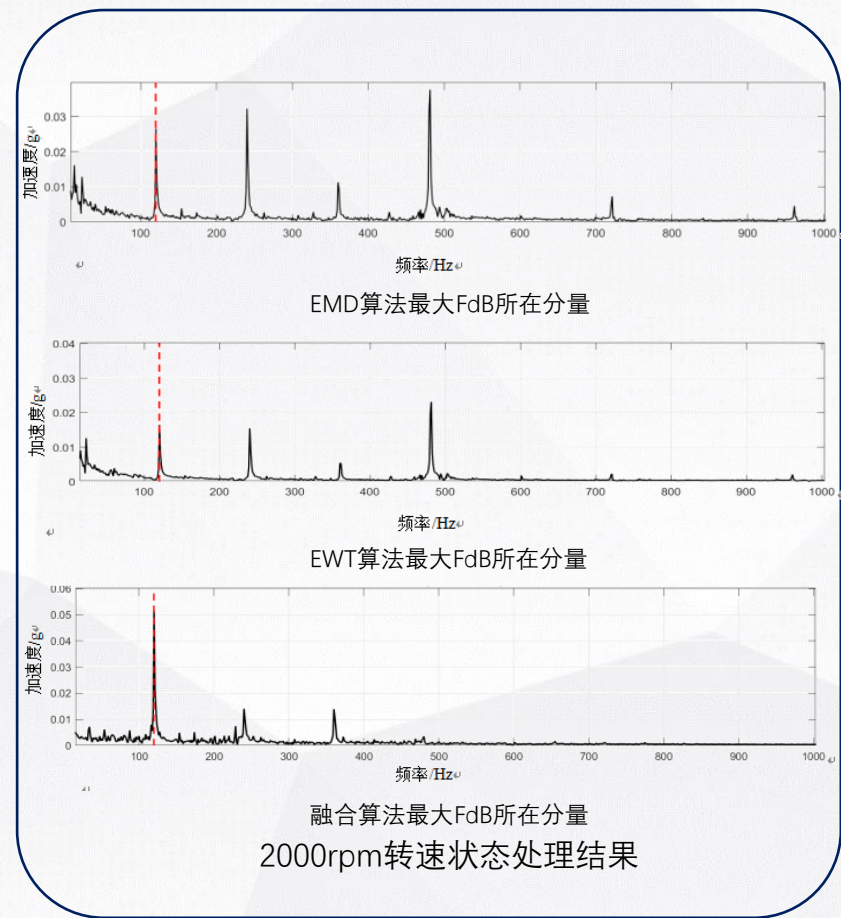
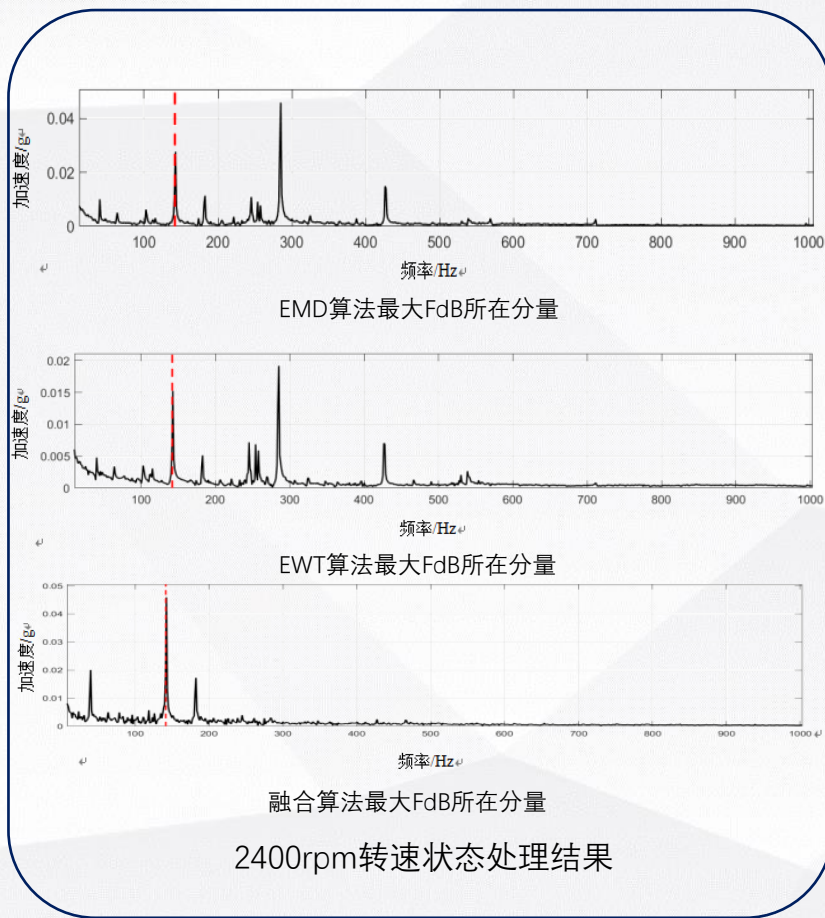
结构剖面图



被试外圈故障轴承

在此试验器平台中进行了**外圈故障轴承**试验以及**正常状态无故障**轴承试验，分别采集了**1800rpm、2000rpm、2400rpm**三种不同转速状态下的振动数据进行分析比较。

带机匣航空发动机转子试验器数据试验验证



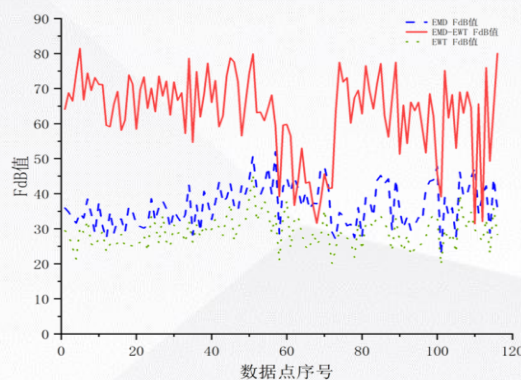
在随机挑选的两组试验数据中可以明显地发现单独地EMD、EWT算法无法准确地捕捉故障特征信号，受干扰频率及噪声的影响极大，但是融合算法很好地克服了这些缺陷。

带机匣航空发动机转子试验器数据试验验证

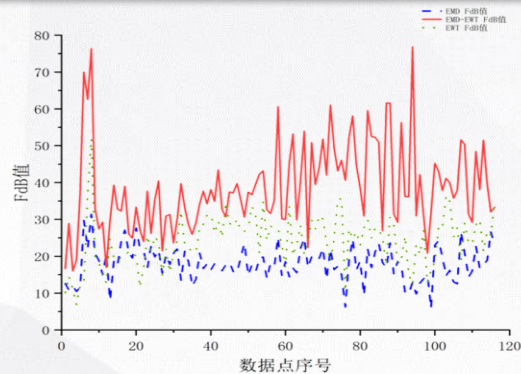
为了对分解后的包络谱进行量化数值比较，计算了FdB，通过比较FdB的大小，可以清晰地看出，**融合算法**相较于单一的EMD算法和EWT算法**FdB值更高**，对**故障特征频率地响应更加敏感**。并且对**整体数据进行了FdB的趋势分析**。

FdB统计汇总

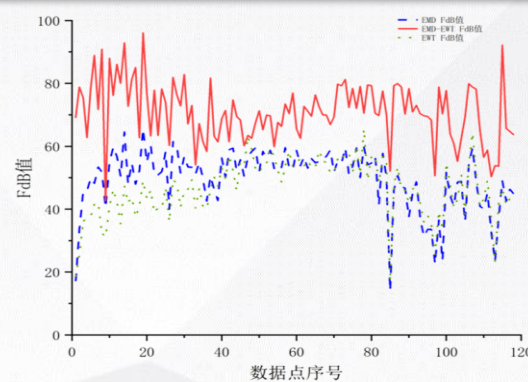
算法\速度状态	2400rpm	2000rpm
EMD	36	32
EWT	29	30
EMD-EWT	64	66



外圈故障2400rpm整体FdB趋势分析



外圈故障2000rpm整体FdB趋势分析



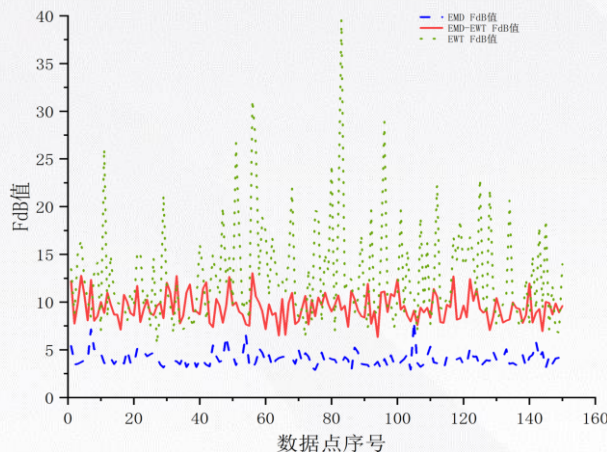
外圈故障1800rpm整体FdB趋势分析

小结

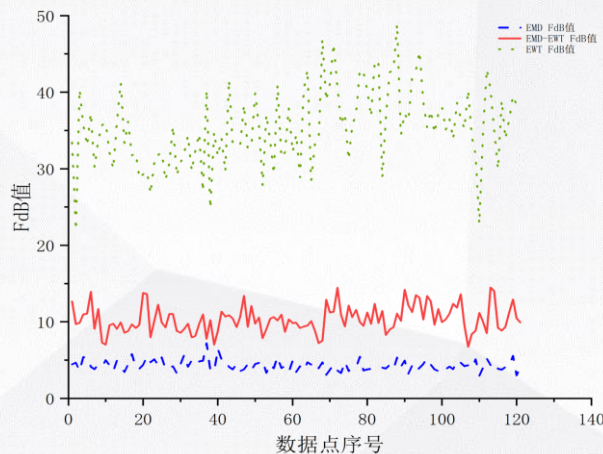
在自行搭建的带机匣试验器平台中，整体FdB远小于凯斯西储大学振动数据，这是因为**传递路径变得复杂**，**整体环境影响更大**，这样更能**还原真实发动机环境**，为下面**阈值的设定提供了基础**。在外圈故障实验数据分析中，融合算法对于单独EMD、EWT算法**改善效果显著**，能够更精确地找到故障。

带机匣航空发动机转子试验器数据试验验证

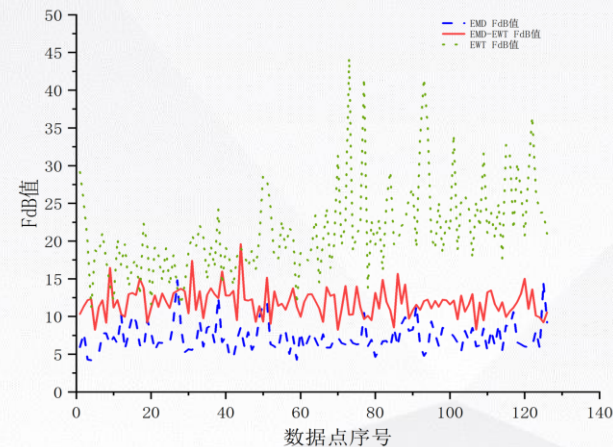
为了进一步建立**稳健的故障判定标准**，需要对**无故障条件下的振动信号**进行分析。无故障条件下的振动信号有着**能量分布稳定、特征成分少、谱线结果简单**的特点，其特征模式与故障状态存在本质上的差异，通过对正常数据进行分析，可以为后续**实际整机发动机设定故障阈值**，以此来**判断整机发动机的故障状态**。



2400rpm转速状态下整体值变化趋势



2000rpm转速状态下整体值变化趋势



1800rpm转速状态下整体值变化趋势

小结

在不同转速下，EMD算法和融合算法的值曲线均较低，表明正常工况下滚动轴承振动信号**无明显冲击成分**，**能量分布平稳**。EMD结果稳定在**5-15**之间，EMD-EWT融合算法稳定在**10-15**之间，没有突增。相比之下，EWT算法**出现较大突增**，表明**单独EWT算法不适用于整机环境下的信号分析**。

阈值判定

本文选取均值为 $\pm 3\sigma$ 的**正态统计模型**对特征阈值进行界定，结合**统计分析的方法**确定区分故障和正常的FdB阈值为15

小结

本章主要围绕滚动轴承故障模拟试验器的实验验证展开，以振动数据为基础，从算法的准确性、无量纲特征量变化趋势以及阈值界定的方法进行系统分析

- 1) 本章以滚动轴承故障模拟试验器的实验验证为基础，分析了算法准确性、无量纲特征量趋势和阈值界定方法。
- 2) 验证了EMD-EWT融合算法在模拟实际工况下的微弱故障诊断和特征提取优势。
- 3) 从通用数据库和实际工程信号两方面验证了融合算法在滚动轴承早期故障诊断中的显著优势。
- 4) 证明了融合算法在噪声抑制、特征增强和频率提取方面远优于单独EMD和EWT算法。
- 5) 基于振动数据设定了阈值并建立了可靠判定标准，为后续整机试验中的故障分析提供了基础。

汇报内容

01 绪论

02 滚动轴承剥落故障的振动故障信号仿真

03 融合EMD和EWT的信号处理新方法

04 基于滚动轴承故障模拟试验器的试验验证

05 **真实航空发动机主轴承试验验证**

06 总结与展望

为了进一步验证EMD-EWT融合算法在**实际工程环境中的适用性**，有必要利用真实发动机主轴承故障试验进行验证。在**真实的整机试验与试验器中由于环境极为复杂**，EWT算法极易产生**过分解而导致分解失败**，故在本章中不再使用EWT算法对振动数据进行处理。本章基于**B2X56型航空发动机主轴承故障数据、B2X3型航空发动机正常轴承以及真实航空发动机A602试验器故障数据**，对前文提出的方法展开工程验证。

故障主轴承整机试验验证

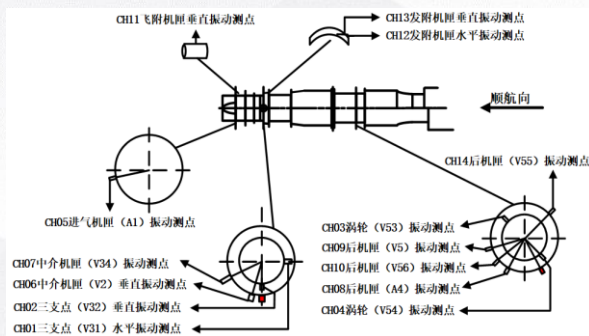
整机验证试验试车按照振动状态录取试车程序、剥落扩展试车程序与应急返航试车程序开展。计划试验**150小时**；在剥落扩展试验前，以及**每工作 $25\pm 5h$** ，按照规定的程序进行振动状态录取试车。共采集**22675组数据**，其中经过挑选，剔除转速突变、发动机故障等失败数据后共有**近20000组数据**，本文仅选取其中**一天完整试车数据**进行分析。



三支点主轴承剥落实物图



振动数据采集界面

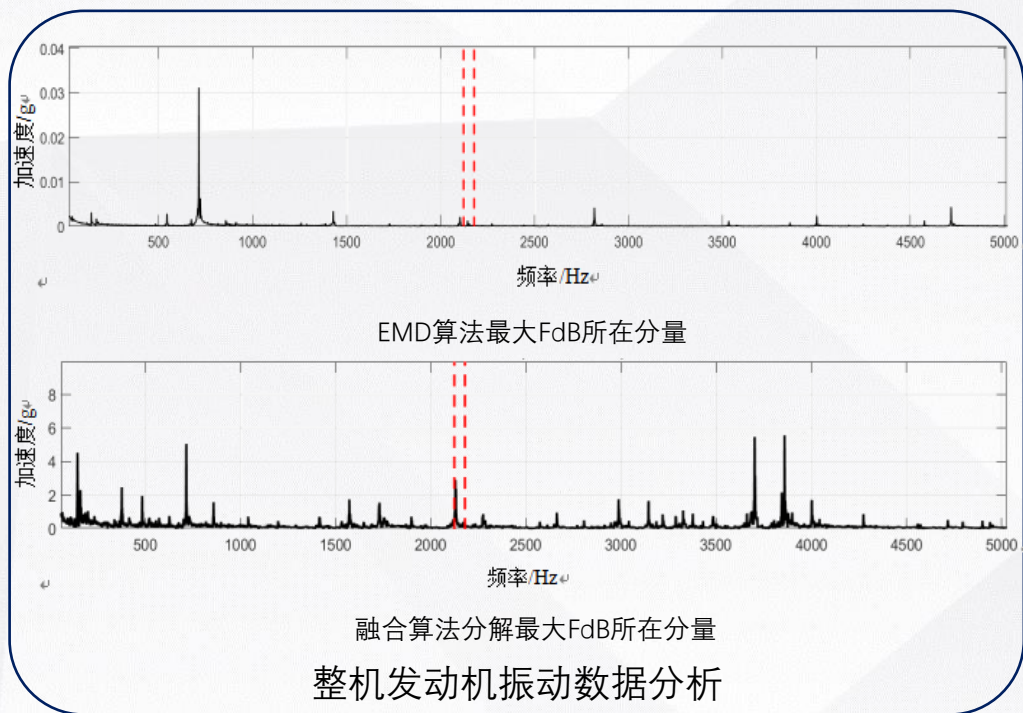


传感器布置示意图



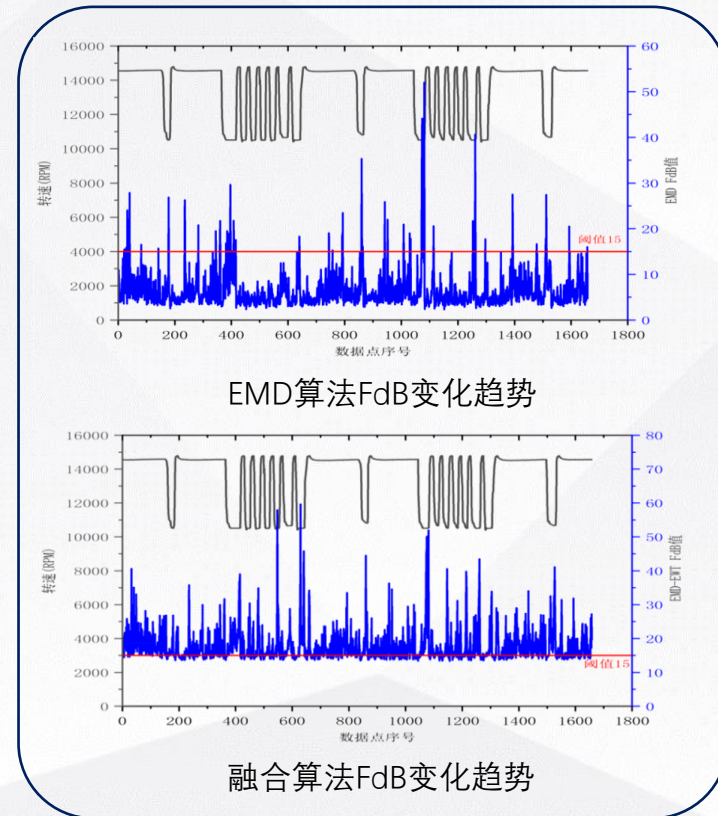
东华8302型数据采集器实物图

故障主轴承整机试验验证



FdB计算比较

EMD	10.08
融合算法	23.16

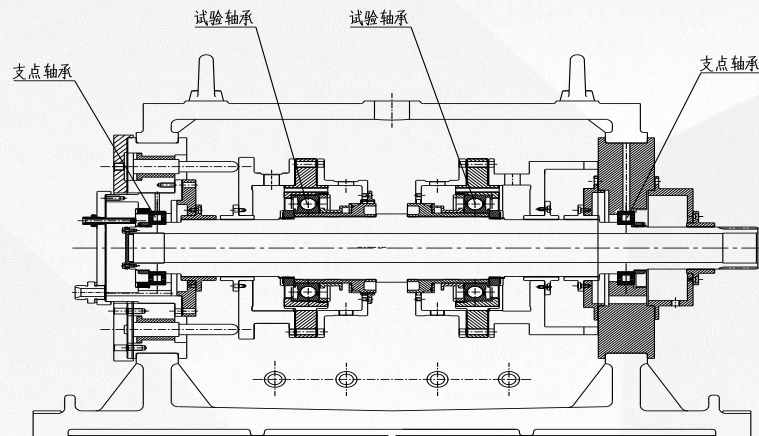


在EMD算法中FdB最大值仅为10.08，没有超过既定阈值，而融合算法为23.16，明显超过既定阈值，说明融合算法在真实发动机环境中能够准确的识别故障。

经过统计EMD算法计算得的值超过设定阈值15的数据仅占比3%，融合算法计算得的值超过设定阈值15的数据占比87%，在试验关注的高转速状态下即转速比在98.5%以上的数据中，传统EMD算法报警率为55%，而融合算法的报警率为90%。

故障主轴承试验器试验验证

A602轴承试验器共进行为期**42天**的试验验证，从**极轻微故障轴承**进行试验，最终剥落故障状态如图所示。本文选取**早期轻微故障数据**进行试验验证，从而验证融合算法是否能够对早期微弱故障进行**准确识别与预警**。



A602轴承试验器主体结构图



主轴承疲劳剥落故障

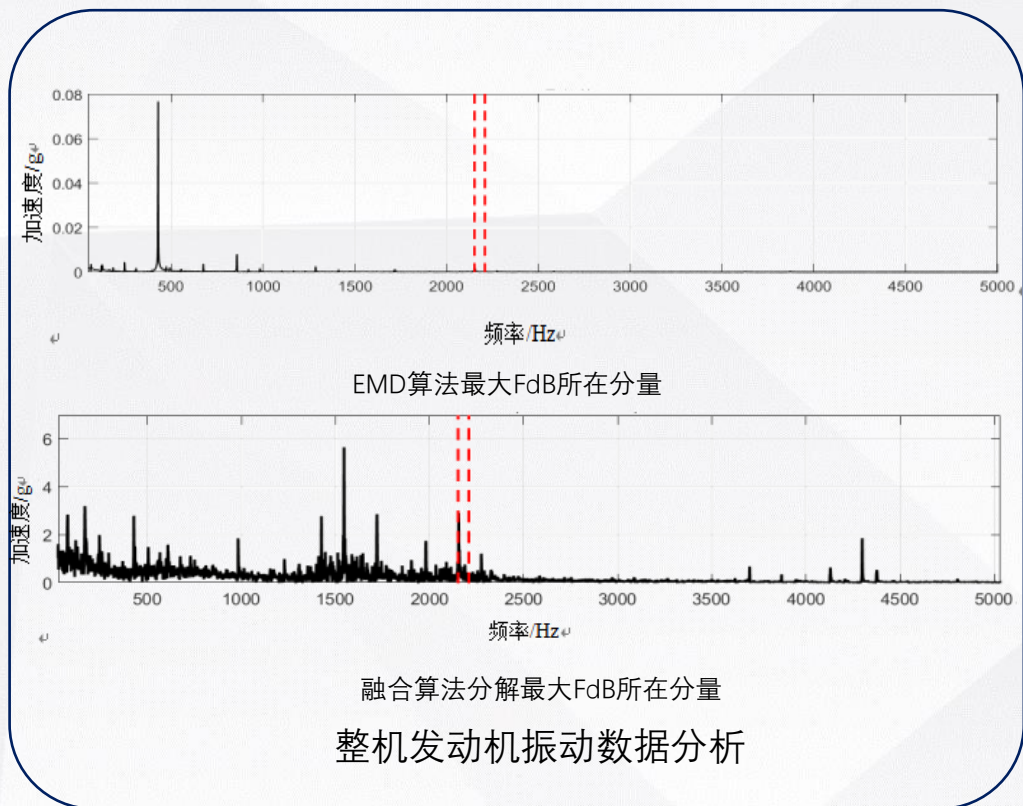
参数	A602 指标
电主轴功率	50kW
转速	1000~20000rpm
轴向载荷	0~70000N
径向载荷	0~60000N
供油压力	0~0.6MPa
试验供油	0~30L/min
试验回油	100L/min
设备供油	0~20L/min
设备回油	60L/min
供油温度	0~200℃
试验轴承外径	380mm

试验器性能指标



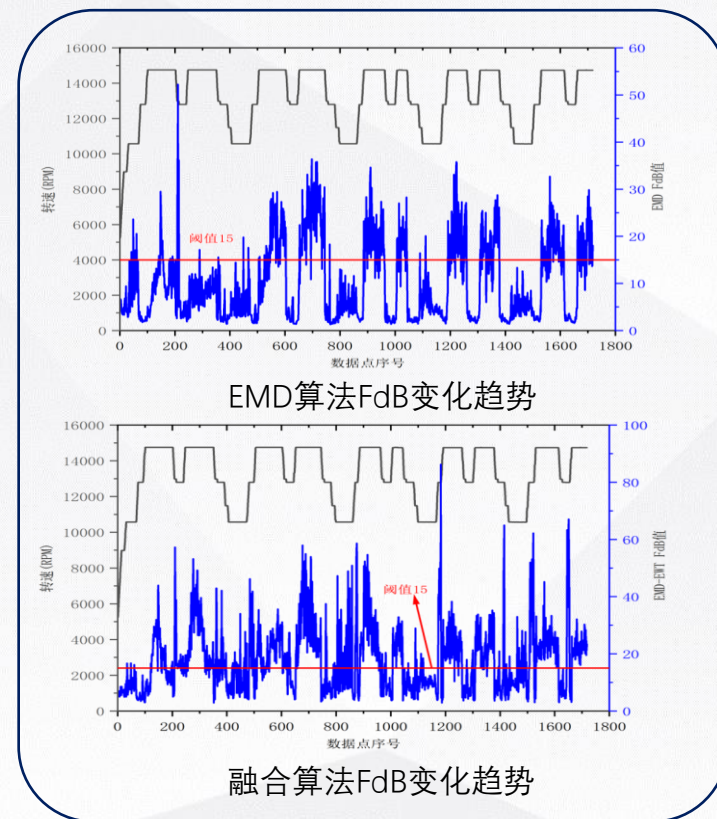
扬州晶明硬件系统

故障主轴承试验器试验验证



FdB计算比较

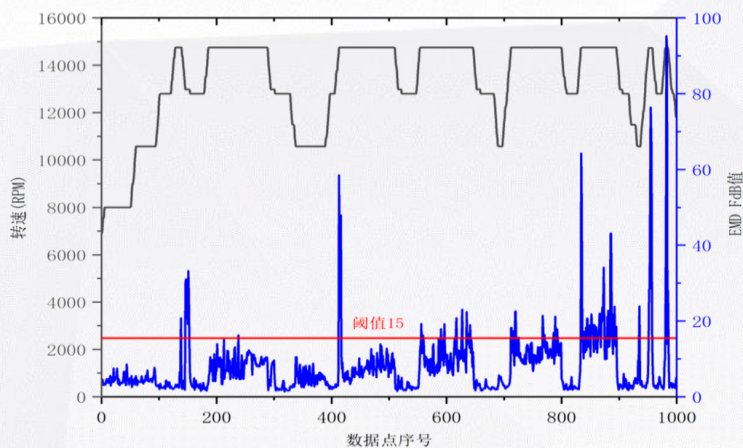
EMD	9.35
融合算法	29.60



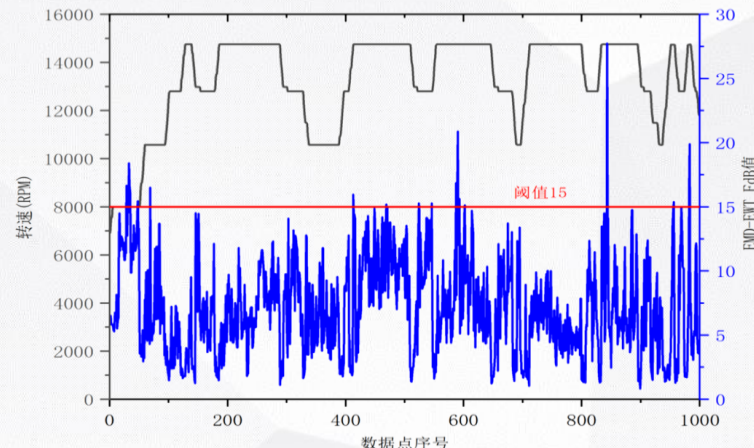
在EMD算法中FdB最大值仅为9.35，**没有超过既定阈值**，而融合算法为29.60，**明显超过既定阈值**，说明融合算法在真实发动机环境中**能够准确的识别故障**。

经过统计**EMD算法**计算得的值超过设定阈值15的数据仅**占比23%**，**融合算法**计算得的值超过设定阈值15的数据**占比70%**，在试验关注的高转速状态下即**转速比在98.5%以上的数据中**，传统EMD算法报警率为**54%**，而融合算法的报警率为**90%**。

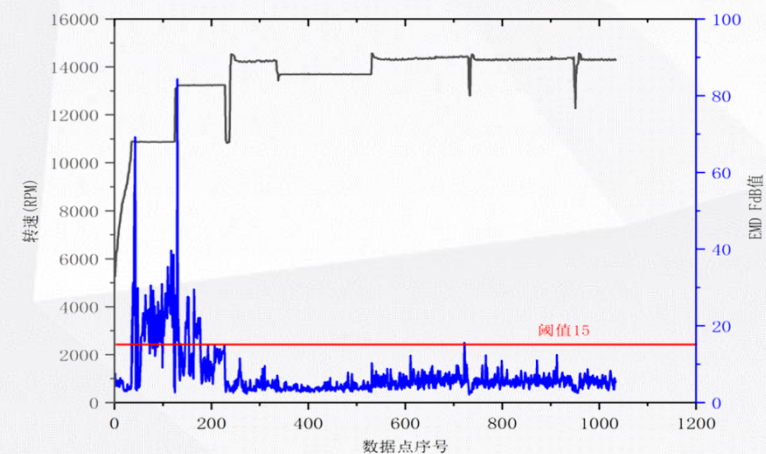
正常主轴承试验器试验验证及主轴承 整机航空发动机试车试验验证



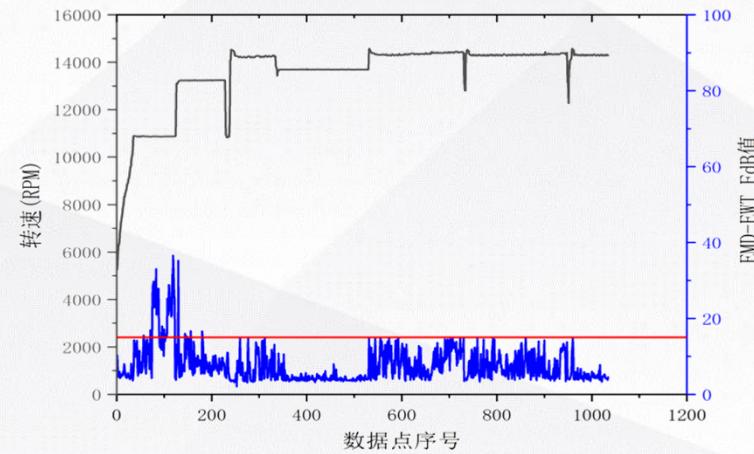
试验器EMD分解整体FdB值变化趋势图



试验器融合算法分解整体FdB值变化趋势图



整机EMD分解整体FdB值变化趋势图



整机融合算法分解整体FdB值变化趋势图

- 1) 在正常主轴承试验器验证中，EMD算法的虚警率为10%，融合算法虚警率不到1%。
- 2) 在高速转动状态下（转速占比超过98.5%），EMD算法虚警率为15%，融合算法为2%。
- 3) 在主轴承整机航空发动机试车试验中，EMD算法虚警率为11%，融合算法虚警率为4%。
- 4) 高速转动状态下（转速占比超过98.5%），两者虚警率均控制在1%以下。

算法计算时间及实时性分析

在航空发动机状态监测与故障诊断系统中，算法不仅需要具有较高的诊断准确率，同时还需要**满足一定的计算效率**要求。由于航空发动机在实际运行过程中会持续产生大量振动监测数据，若算法计算时间过长，将会影响故障诊断系统的**实时性和工程应用价值**。因此，有必要对本文提出的EMD-EWT融合算法的**计算效率进行分析**，并评估其在工程应用中的实时性能。

算法 μ	平均计算时间 μ
EMD μ	0.82s μ
EWT μ	0.34s μ
<u>EMD-EWTμ</u>	1.05s μ

算法平均计算时间

融合算法相较于EMD和EWT算法平均用时仅高出0.1-0.5秒，结果基本相当，能够满足工程实际应用

小结

- 1) 本章验证了EMD-EWT融合算法在真实航空发动机**整机与试验器主轴承**故障特征提取及诊断中的**准确性和适用性**。
- 2) 结合整机试验与试验器试验，比较分析了**故障与正常数据**，评估了算法在**复杂工况下的诊断性能**。
- 3) 比较了**三种算法的计算时间**。
- 4) 结果表明，EMD-EWT融合算法能有效克服传统EMD方法的**模态混叠和特征弱化问题**，提供更高的**准确性、稳定性和可靠性**。
- 5) 为航空发动机关键滚动轴承的状态监测与健康管提供了具有**工程应用前景的技术手段**。

汇报内容

01 绪论

02 滚动轴承剥落故障的振动故障信号仿真

03 融合EMD和EWT的信号处理新方法

04 基于滚动轴承故障模拟试验器的试验验证

05 真实航空发动机主轴承试验验证

06 总结与展望

全文工作总结

- (1) 构建了滚动轴承故障机理以及特征频率的理论基础，开展典型故障仿真分析。
- (2) 提出了 EMD-EWT 融合分解思路，强化复杂背景下的弱特征提取能力。
- (3) 构建了基于包络谱的无量纲故障指标，并给出了相应的阈值确定方法。
- (4) 在公开数据集以及自行搭建的带机匣试验器平台上验证算法的有效性，证明融合算法的优势。
- (5) 对真实航空发动机主轴承进行试验验证，证明算法的工程适用性。

创新点总结

- (1) 提出了一种面向极低信噪比复杂工程振动信号的 EMD-EWT 分层融合信号处理方法。
- (2) 构建了一种基于 EMD-EWT 分解结果的滚动轴承故障无量纲特征指标及判定方法。
- (3) 在多层级实验平台上系统验证了所提方法并在真实航空发动机环境下的有效性。

未来工作展望


- (1) 开展在线实时性研究，推动算法工程落地。
- (2) 融合数据的驱动方法，实现从故障监测到寿命预测的延伸。



南京航空航天大学



谢谢各位专家和同学！
敬请批评指正！

 答辩人：马一杰 (SZ2320001)

 专 业：交通运输

 导 师：陈果 教授