

基于跨点频响的柴油机关重部件早期 故障检测技术研究

作者：潘宏侠，高家宝，赵璐，李磊磊，韩慧苗

单位：中北大学 兵器系统辨识与诊断技术研究所

联系方式：13903514842，18734138826

选题背景

车船柴油机系统是提供车船动力的复杂热机电动力装置，因其工作环境恶劣、工作载荷复杂多变，更要求具有持续运行的能力。柴油机系统的任何一个零部件出现微弱缺陷或故障，都会影响其战技性能的发挥，严重时可能导致系统无法运行，丧失车船作战能力。

在机械设备设计制造中螺栓连接是组合结构最为常用的连接方式之一，其因具有加工相对简单、装配连接相对方便、结构可靠性高、承载能力较强等一系列优点，被广泛应用于动力机械、航空航天、船舶、石油化工、土木等各种工程领域中。螺栓连接做为柴油机关重部件组合结构最常见的结构连接形式，在机械运动中起着传递运动和载荷以及提供密封的作用。



必要性分析

车船动力系统是高密度的复杂热机结构系统，工作负荷重，环境恶劣，运动部件载荷变化频繁，影响运动部件动作过程的随机因素、模糊因素多，由于振动、冲击、摩擦磨损及弹性元件动态变形等的影响，造成主要部件机构动作的准确性、及时性不够，从而使结（机）构运动形态一致性差，转速波动和冲击振动使构件疲劳损伤、产生裂纹故障，严重时导致构件断裂、系统不能正常运行。所以基于多跨点频响特性、振动、声学等的在线检测与故障分析研究，对实现车船柴油机关重部件的故障快速准确识别，提高系统运行可靠性，以及对整个动力系统可靠性技术研究都有十分重要的意义。

柴油机各部分零部件装配通常采用螺栓连接结构，由于柴油机温度高及压力大，容易造成螺栓连接面泄漏，必然会降低发动机工作效率，甚至造成事故。因此，对柴油机关重部件螺栓连接结构早期故障检测技术研究具有重要意义。



研究目的

本项目针对车船动力柴油机系统缺乏现场快速实时健康状态监测系统，无法提前预警故障的问题，开展柴油机早期故障预示技术研究，研发实时监测诊断和便携式早期快速缺陷定量识别系统，形成柴油机关重部件固有特性的图谱数据库，开发车船用柴油机高效可靠性与质量一致性验证技术集成应用平台，提高柴油机运行可靠性的验证效率。

本项目可重点解决：1) 柴油机关重部件批量生产中装配质量一致性的高效验证问题；2) 柴油机在试车试验中的早期微小损伤和密封渗漏缺陷的及时发现和排除问题；3) 柴油机关重部件试验（运行）前后的快速性能检验与缺陷早期定量识别问题；4) 装机后关重组件状态一致性的快速精细检验与安全可靠性能高效验证问题；5) 售后维护修理中的缺陷快速发现与定位定量维修指导。



跨点频响的柴油机关重部件早期故障监测技术

基于跨点频响的柴油机关重部件早期故障监测技术研究是以复杂车船柴油机系统为背景，解决柴油机系统在研制与使用中出现的零部件损伤、连接松动、密封泄漏等典型质量问题，运用非线性动力学仿真技术和现代信号检测处理新技术，在装配调试、运行维护和检修服务过程中实时获取柴油机系统关重零部件装配质量和运行损伤的声振等信息，运用认知科学、信息处理和人工智能研究领域近年来的最新研究成果，将跨点频响、微弱故障特征提取、静动态（停机检修和在线运行）多场信息融合应用于车船柴油机系统关重零部件的早期微弱故障预测中；通过研究多维、多源、异构的柴油机系统关重零部件早期微弱故障预测信息的形式化描述与数字化表示，构建早期故障图谱样本数据库，设计开发出便携式车船柴油机系统典型部件早期微弱故障预测装置，实现生产现场和运行中柴油机系统关重零部件的微弱故障快速检测，解决早期微弱故障预测问题。

跨点频响试验设计

跨点频响的原理

复杂柴油机系统的频响特性是系统所固有的，不依赖于外界的激励特性这一基本原理，当试运行的柴油机系统出现任何微小缺陷或故障时，其频响特性参数将发生或多或少的变化，不论是在静止或试运行状态，不管环境噪声干扰多大，总会在响应信号中表现出来，尽管表现的信息不够显著，但用微弱特征提取和盲源分离技术总能将其提取出来，定性定量化，特别是与CFR振动响应点信息进行融合。

跨点频响包容主要故障信息的原则：初选各跨点频响函数（CFR）的激励和响应测试点，其特征是要求冲击激励传感器和振动响应传感器设置在复杂柴油机上那些构件易有故障的部位的两端（如结构连接环节）；由于激励和响应测点跨越了容易出故障的部位，可以感受到各构件的主要早期损伤、裂纹、松动、泄漏故障，使得CFR曲线中含有各故障产生的信息。

跨点频响试验设计

频响函数

对于一个系统而言，频响特性是结构采用各种不同的输入（激励）方式获取结构系统的输出（响应），输入信号与输出信号在频域的比值就被定义为系统的频响函数（简称频响）。

对于一个多自由度系统，当结构有阻尼受迫振动时，其动力学方程为：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

其中， $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 均为 $n \times n$ 阶矩阵， $[M]$ 是质量矩阵， $[C]$ 是阻尼矩阵， $[K]$ 是刚度矩阵。 $\{F(t)\}$ 是载荷向量， $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 和 $\{x\}$ 分别是加速度、速度和位移向量。

对上式作傅里叶变换得：

$$H(\omega) = (-\omega^2 M + j\omega C + K)^{-1} \quad (2)$$

上式表示结构在无损状态下的频响函数矩阵。一般而言，损伤结构与刚度的密切性比较大，因此式(2)中的 $[C]$ 可忽略不计。而结构损伤不会改变结构质量特性，忽略结构损伤前后质量变化，则结构损伤前的频响函数可表示为：

$$H(\omega) = (-\omega^2 M + K)^{-1} \quad (3)$$

结构损伤后的频响函数可表示为：

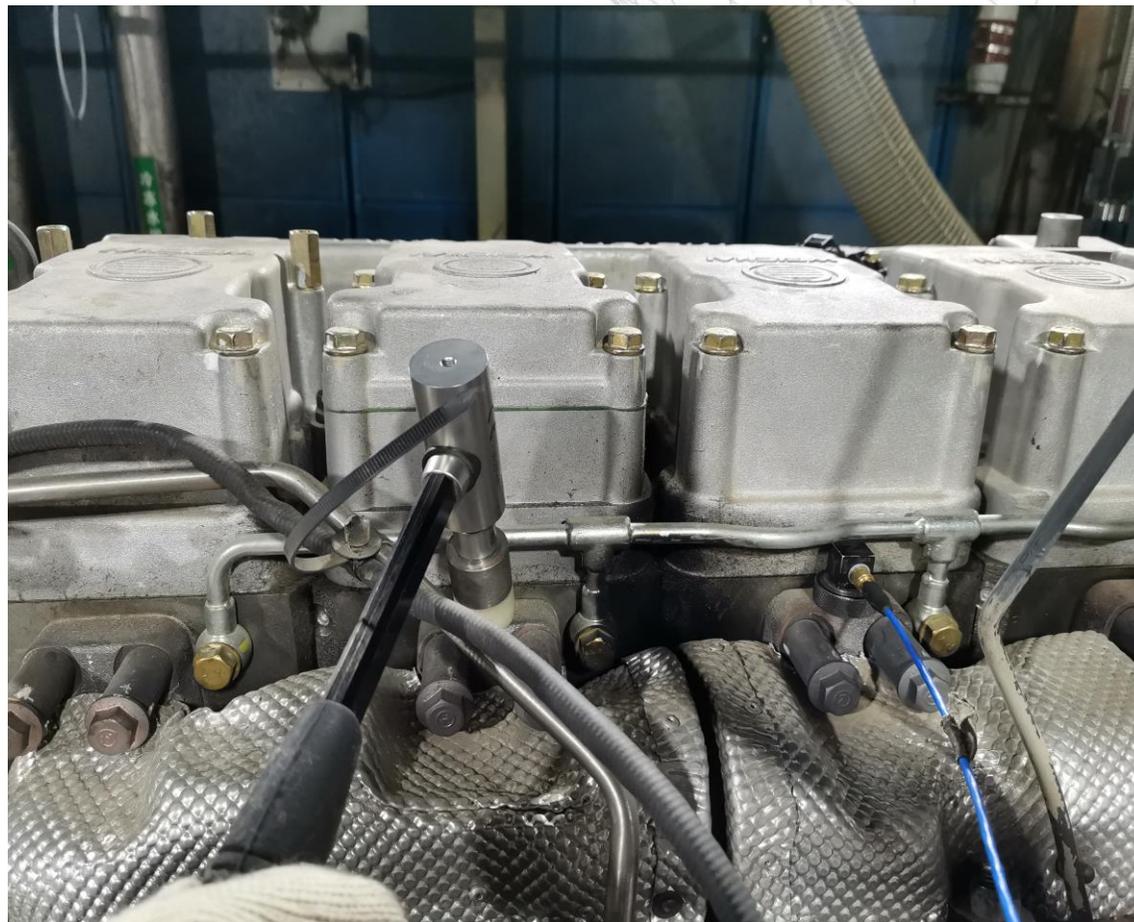
$$H'(\omega) = (-\omega^2 M + K - \Delta K)^{-1} \quad (4)$$

跨点频响试验设计

现场试验

本次实验以潍柴动力的6缸柴油机为实验对象，分别对涡轮增压器和水泵的螺栓连接进行跨点频响实验。实验系统包括：ICP三向加速度传感器、力锤、DASP信号采集以及分析系统以及进行信号处理的上位机。

实验分别在柴油机涡轮增压器处将连接螺栓B调至三个不同松紧程度和在水泵处将连接螺栓A调至10N*m、20N*m、35N*m三个不同力矩进行跨点频响实验，通过DASP采集系统获取其结构连接部位的螺栓不同松紧情况下的跨点频响实验数据，再由MATLAB得到频响曲线和特征参数。



跨点频响试验设计

测点布置

实验激励点响应点

实验	激励点	响应点
涡轮增压器	9	7
水泵	1	2

在水泵部分，分别设置3个测点，如图3所示。分别以1点为激励点、2点为响应点进行实验。由于实验空间较大，设置水泵端盖连接螺栓A的力矩为 $10\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $20\text{N}\cdot\text{m}$ 和 $35\text{N}\cdot\text{m}$ 分别进行跨点频响实验，具体测点如图1所示。

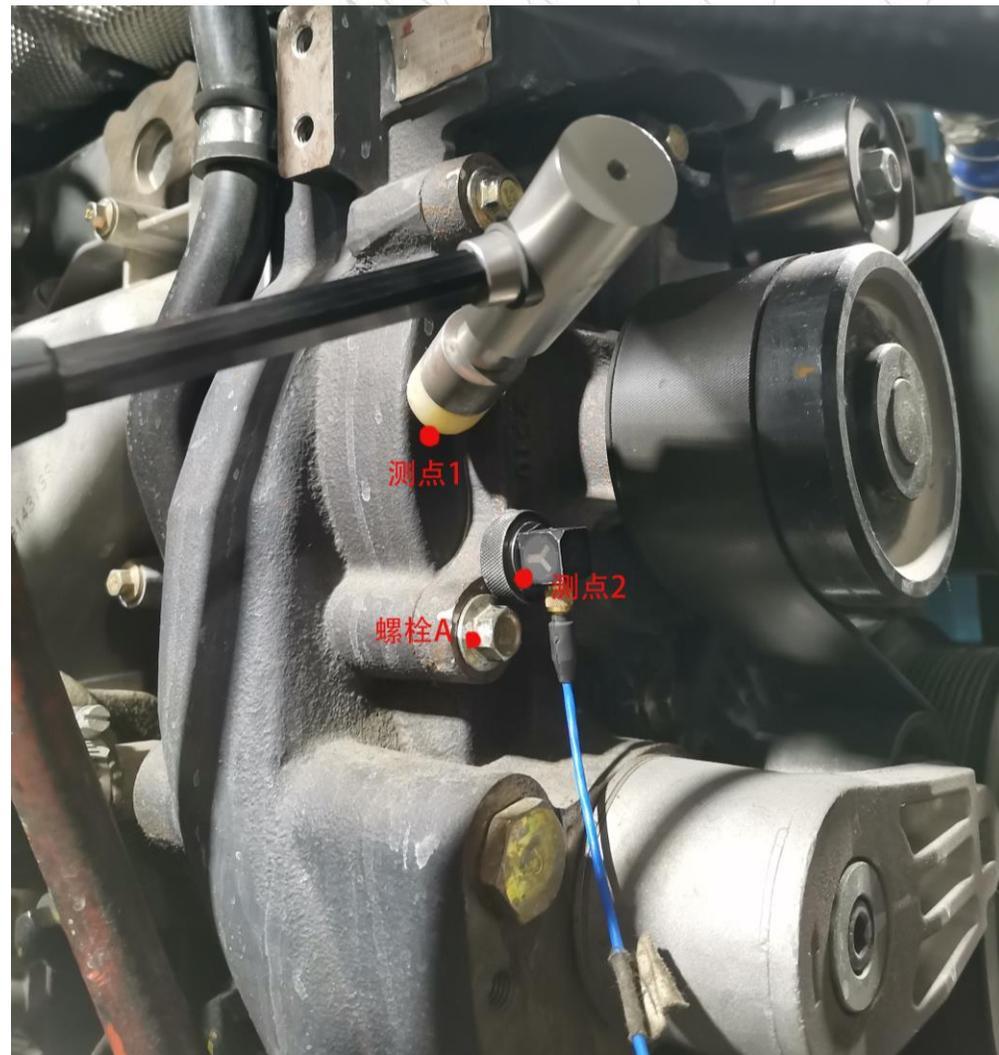


图1·水泵测点布置示意图

跨点频响试验设计

测点布置

在涡轮增压器部分，在涡轮端设置测点7，汽轮端设置测点9，并且在汽轮与涡轮连接螺栓B部分设置故障，以测点9为激励点、测点7为响应点，将连接螺栓分别设置螺栓B3个不同力矩进行跨点频响振动实验，由于实验空间有限，无法使用数字式力矩扳手给出具体的实验力矩，故设置略松、较松、松3个状态，具体测点如图2所示。

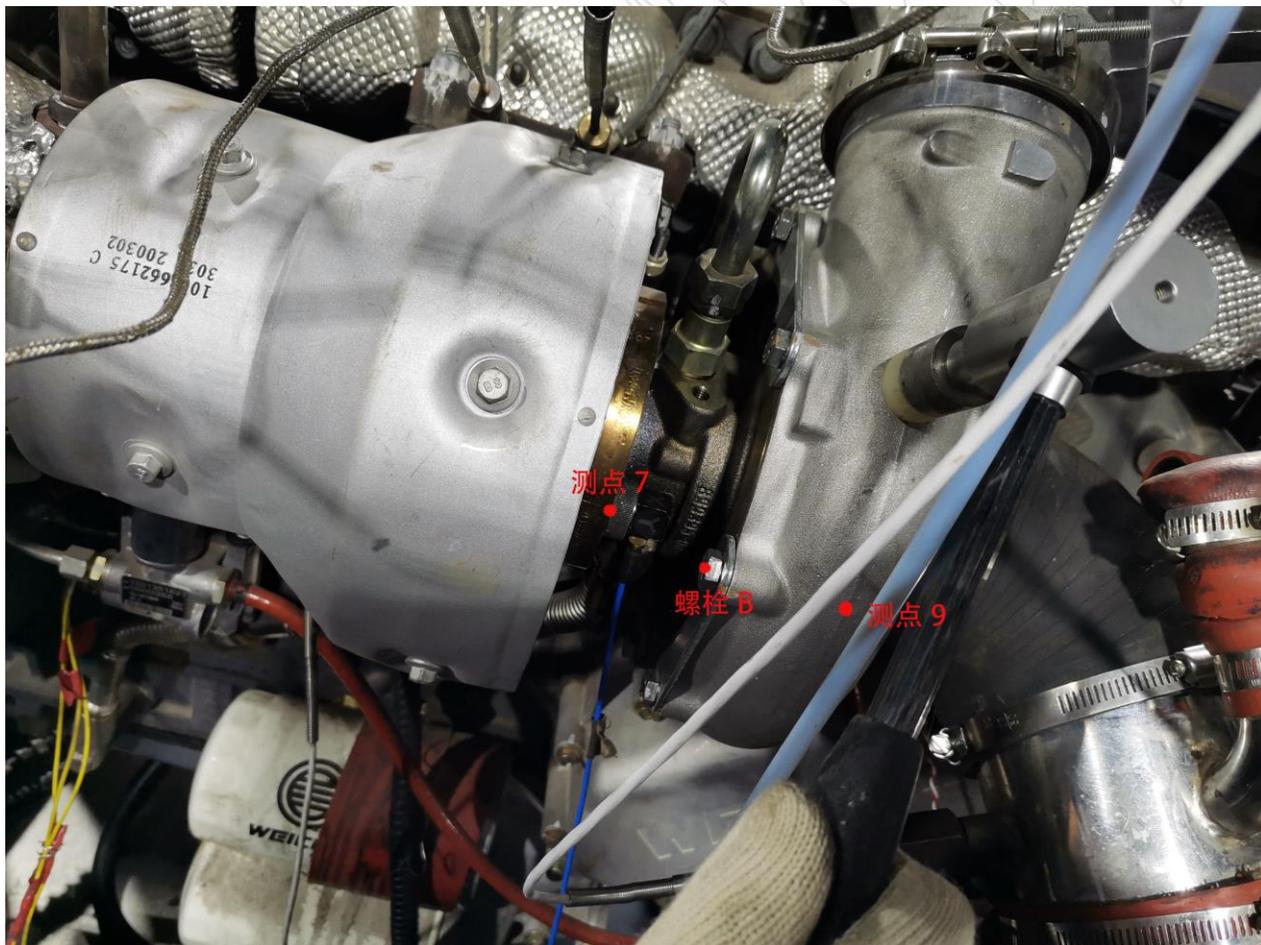
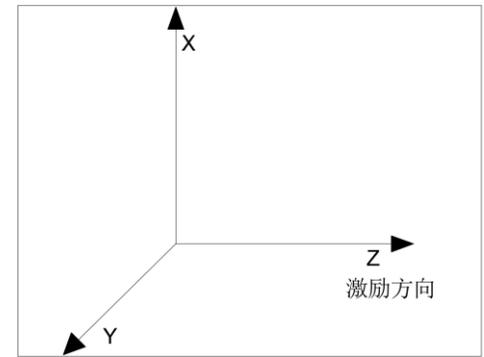
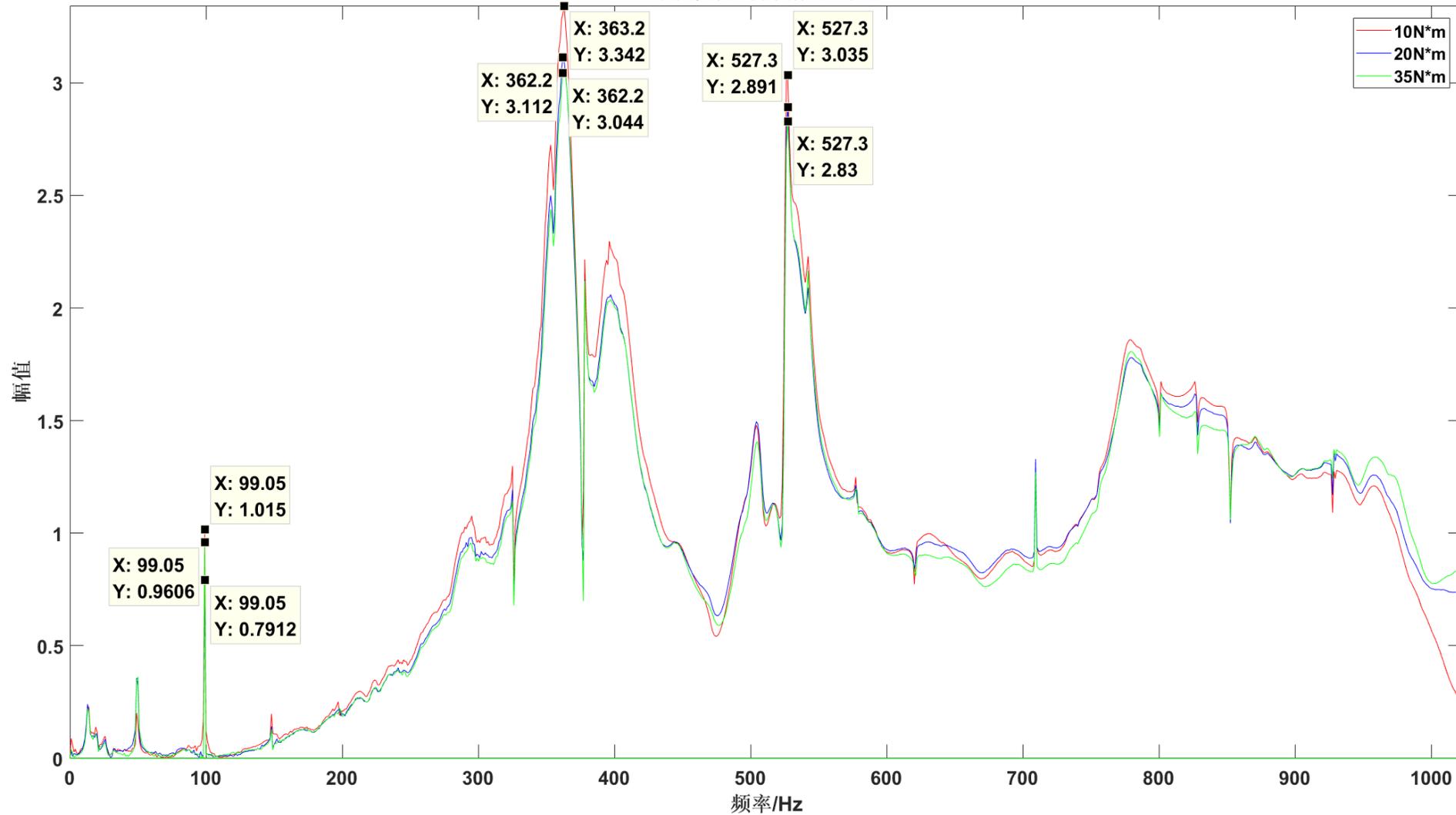


图2 涡轮增压器测点布置示意图

数据处理

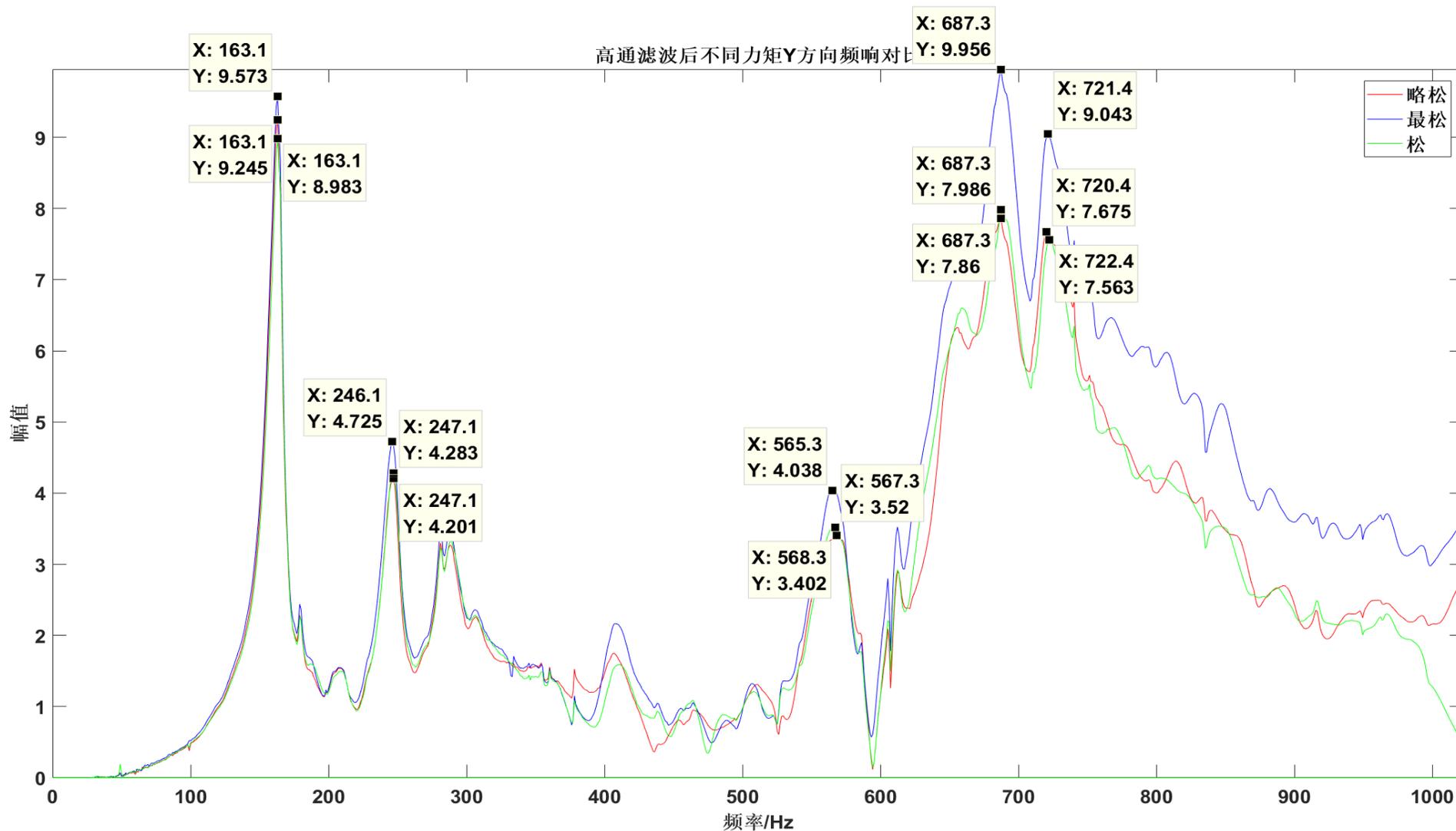
不同力矩Z方向频响对比



传感器方向示意图

图3 水泵1点激励2点响应三种力矩频响曲线对比图

数据处理



为了避免单一信号的随机性，造成实验结果误差，因此对三次同种工况的响应信号进行算术平均，最终求得不同工况下各响应点频响函数。

图4 涡轮增压器9点激励7点响应螺栓B三种松紧状态频响曲线对比图

数据处理

表1 水泵连接螺栓不同力矩下Z方向各频率的幅值

频率 (Hz)	99.05	362.2	503.2	526.3	827.4
10N*m	0.6007	4.967	1.907	4.453	3.48
20N*m	1.041	4.627	1.658	3.681	2.279
35N*m	0.6906	4.871	1.835	4.18	3.22

表2 涡轮增压器连接螺栓不同状态下Y方向各频率的幅值

频率 (Hz)	163.1	247.1	566.3	687.3
略松	9.245	4.201	3.402	7.86
松	8.983	4.283	3.52	7.986
最松	9.573	4.725	4.038	9.956

由于频响特性是结构系统的固有特性，与系统本身有关，与激励响应等外界因素无关，根据频响曲线对比图可以看出，当水泵螺栓的预紧力大小发生变化时各频率对应的峰值出现明显变化。因此可以证明：利用跨点频响进行柴油机关重零部件早期微弱故障预测具有可行性。

相干函数是由相关函数发展而来的，它是将时域中两个时间序列的相关性转换为频域中二者的相关性，从而可以直观的得出两个序列在各个频段范围内的相关程度。在时域中，两个平稳随机时间序列 $x(t)$ 、 $y(t)$ ，其相关程度用相关函数定义为：

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt$$

称 $R_{xy}(\tau)$ 为互相关函数。通过式 (5-2) 将时域中的互相关函数转化为频域中的互功率谱密度：

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\tau\omega} d\tau$$

相干函数用来表征两个时间序列信号在频域内的相关性大小，其表达式为：

$$C_{xy}^2(\omega) = \frac{|G_{xy}(\omega)|^2}{G_{xx}(\omega)G_{yy}(\omega)}$$

式中： $R_{xy}(\tau)$ 是时间序列 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的互相关函数； $S_{xy}(\omega)$ 是时间序列 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的互功率谱密度； $G_{xy}(\omega)$ 是时间序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互功率谱函数； $G_{xx}(\omega)$ 是时间序列 $x(t)$ 的自功率谱； $G_{yy}(\omega)$ 是时间序列 $y(t)$ 的自功率谱。

数据处理

相干修正

若 $C_{xy}^2(\omega)=1$ 则可认为两个信号在此频段上完全相关，即 $y(t)$ 完全是由 $x(t)$ 引起的， $C_{xy}^2(\omega)=0$ 则认为两个两个信号在此频段上相互独立；若 $C_{xy}^2(\omega)$ 在 0 与 1 之间，说明 $y(t)$ 不仅仅与 $x(t)$ 有关，还与其他信号有关，通常测试过程中的噪声对二者之间的相干性影响较大。利用相干性，可以有效的对信号进行相干修正，进行降噪处理。

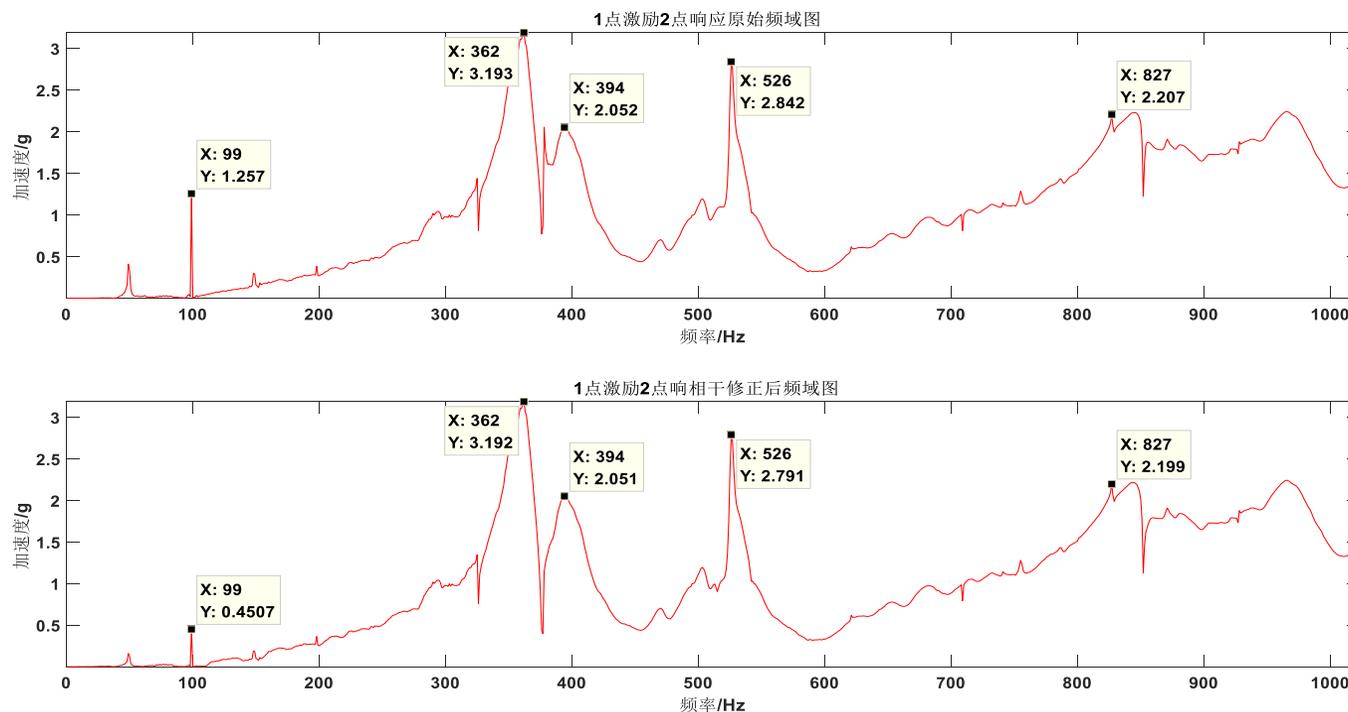


图5 螺栓A处Z方向相干修正后频响曲线

数据处理

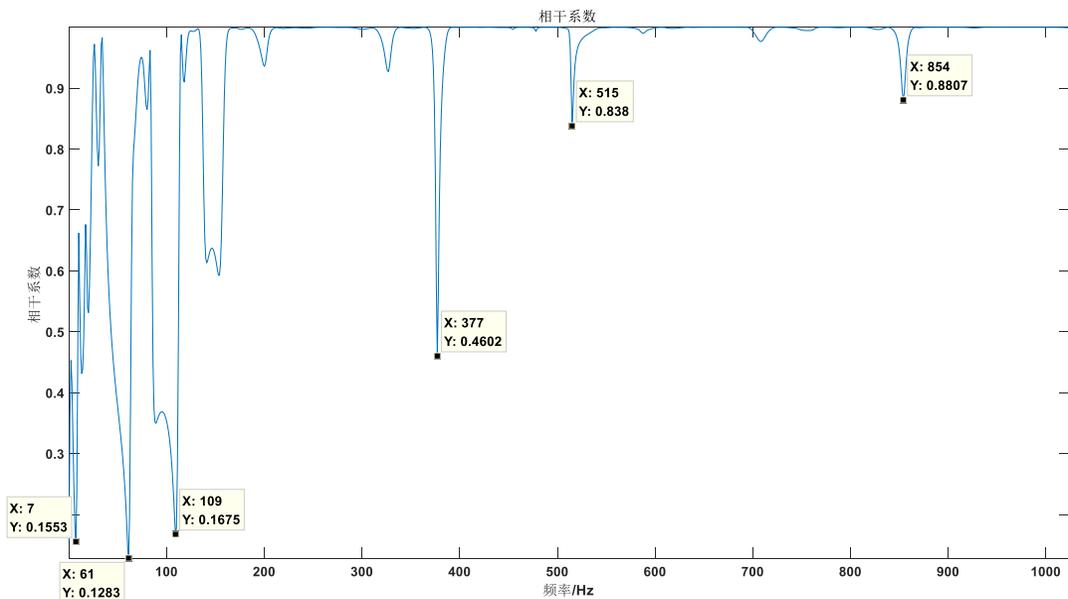


图6 水泵连接螺栓A的相干系数

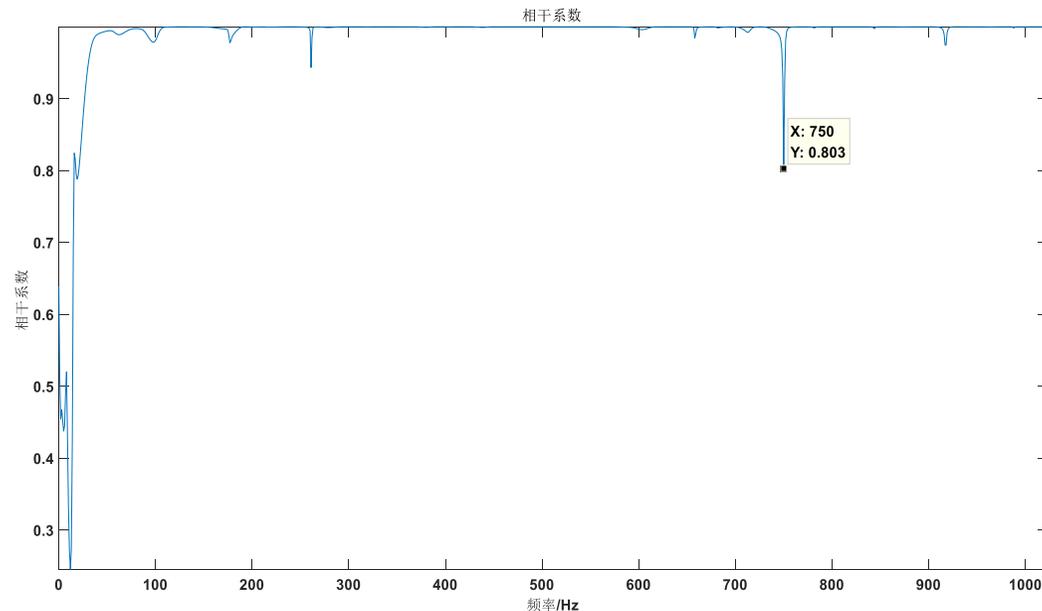


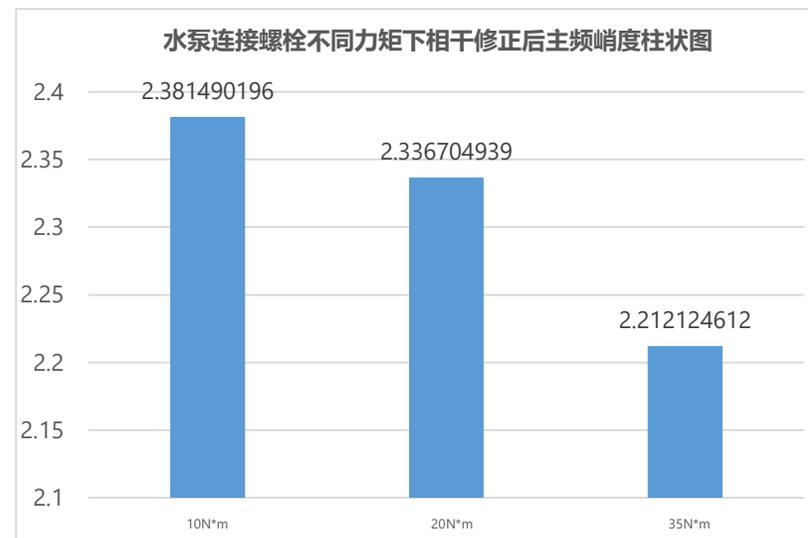
图7 涡轮增压器连接螺栓B的相干系数

由图6、7可以看出在低频段由于实验噪声较大相干性较差，水泵连接螺栓A实验在200Hz以后的频段相干性较好，涡轮增压器连接螺栓B实验在50Hz以后的频段内相干性较好。由图可知，在主要频段内，激励信号与响应信号的相干系数接近于1，可认为二者在此频段内的相干性良好。为了减少外界噪声对响应信号的干扰，通过响应信号频域中幅值乘对应的相干系数来进行相干修正。

数据处理

表3 水泵连接螺栓不同力矩下相干修正后主频峭度

力矩	主频峭度
10N*m	2.38149019573496
20N*m	2.33670493894718
35N*m	2.21212461171191



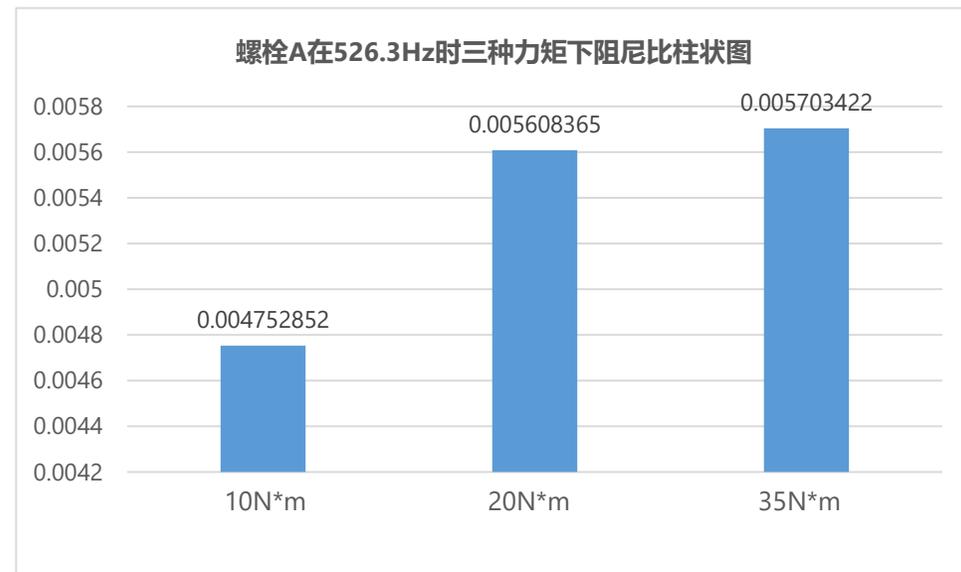
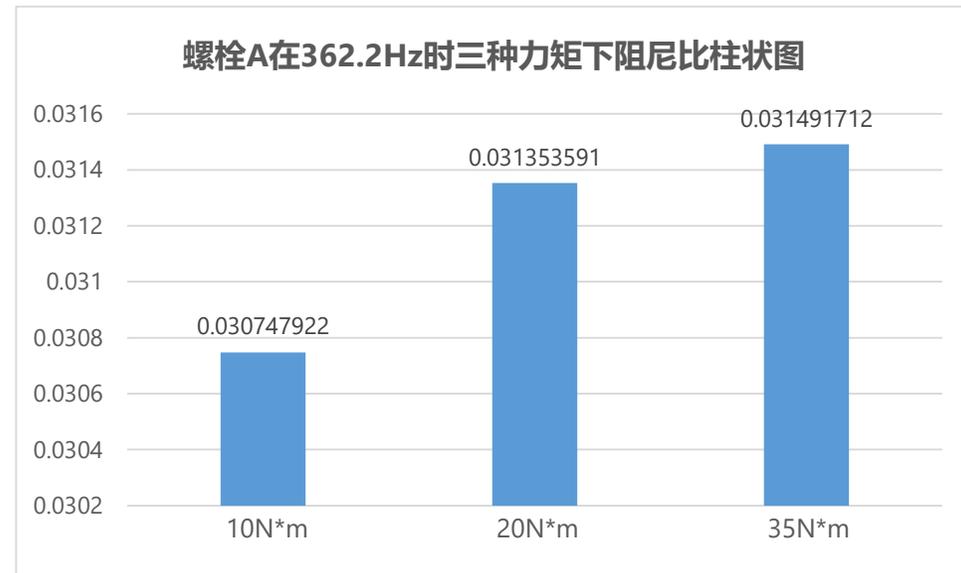
峭度K是反映随机变量分布特征的数值统计量，峭度可用来很好地表征信号的冲击性，但其值的大小对随机冲击等因素比较敏感。因此提取主频的峭度进行比较，并且由表3可以看出随着螺栓松动，主频峭度在增大。

数据处理

表4 水泵连接螺栓A不同力矩下相干修正后Z方向各频率的阻尼比

频率 (Hz)	362.2	526.3
10N*m	0.030747922	0.004752851711
20N*m	0.031353591	0.005608365019
35N*m	0.031491712	0.005703422053

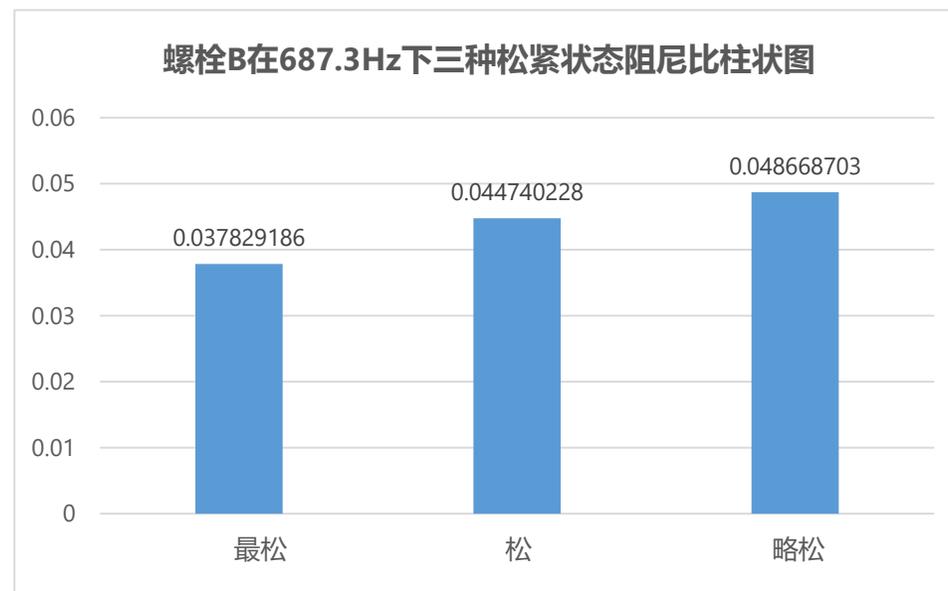
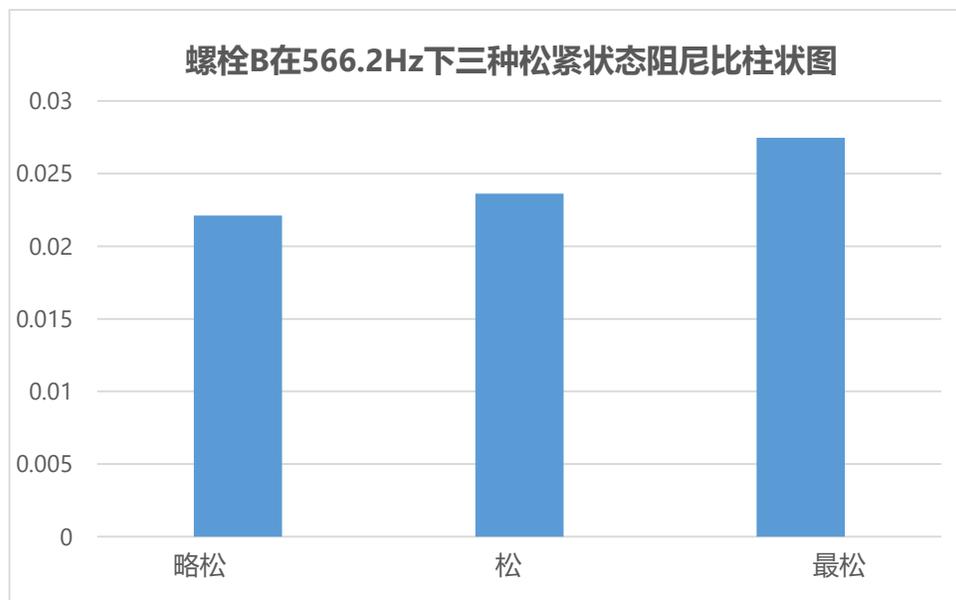
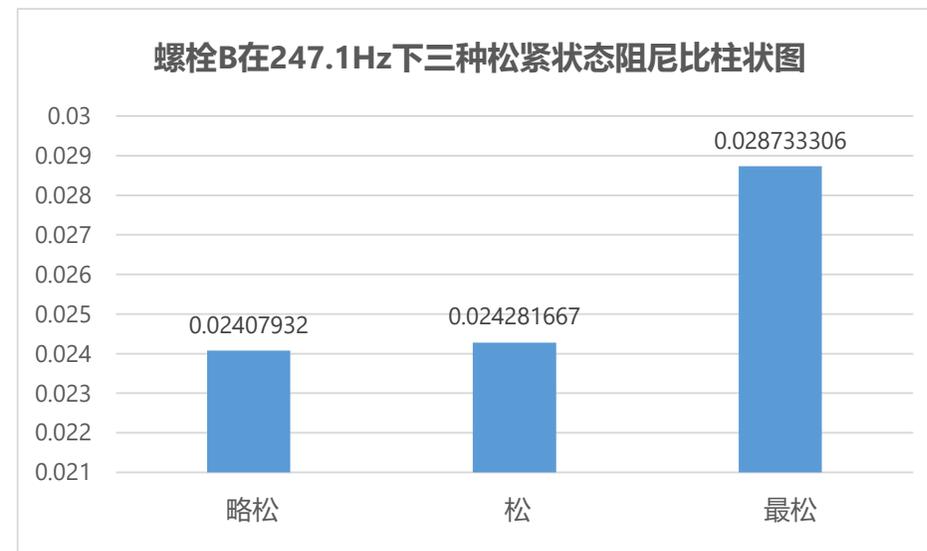
结构阻尼是描述振动系统在振动时能量损耗的总称。机械结构的阻尼大部分来源于结合面，有些情况下接连阻尼可能占到结构总阻尼的90%以上。阻尼越小，意味着结构振动越强烈，加速度越大。阻尼比是实际阻尼系数和临界阻尼系数的比值，阻尼比用于表示结构在受激振作用后振动的衰减程度。



数据处理

表5 涡轮增压器连接螺栓不同状态下Y方向各频率下阻尼比

频率 (Hz)	247.1	566.2	687.3
略松	0.02407932	0.022112152	0.048668703
松	0.024281667	0.023615779	0.044740228
最松	0.028733306	0.027458944	0.037829186



主要结论



1.在经过相干修正后的数据计算并提取阻尼比，根据频响对比图和相干系数图所示，在主要频段内，激励信号和响应信号的相干系数接近于1，可以认为两者在此频段内的相干性良好，由实验结果显示相干修正可以有效的对柴油机跨点频响信号进行降噪。

2.当螺栓连接发生松动时，阻尼比发生了明显变化，且在主要频段随着力矩的减小，阻尼比增大，证明当螺栓连接发生松动时基于跨点频响的发动机螺栓连接质量检测的方法是有效的。

3.当螺栓预紧力降低时系统峰值的频率会随之出现微弱波动，但是其变化量占整体的变化量过低，且其并未出现明显变化，与螺栓力矩对系统阻尼比的影响相比极其微弱。所以峰值频率与阻尼比相比较来说，阻尼比更容易做为螺栓装配质量检测参数。

主要结论



4.峭度K是反映随机变量分布特征的数值统计量，在故障诊断领域，有研究表明，峭度可以用来很好的表征信号的冲击性。根据本次实验得到的结果所示，随着螺栓拧紧力矩的减小，主频峭度在不断增大，并且变化较为明显。随着螺栓连接质量变差，即预紧力越小，振动信号中大幅值的概率密度增大，信号幅值的分布偏离正态分布，正态曲线出现偏斜或分散，峭度值也随之增大。峭度指标的绝对值越大，说明发动机螺栓连接质量越差，螺栓连接越松，将发生的故障也越严重。

5.当螺栓出现松动的时候，即随着螺栓拧紧力矩的减小，系统阻尼对于螺栓拧紧力矩的变化更为敏感。根据主要频率下阻尼比的柱状图得出，螺栓拧紧力矩越小，即螺栓越松动，系统阻尼比的变化情况就越显著。

基于跨点频响的柴油机关重部件早期故障检测技术研究的特色之处是：基于多学科的交叉与融合，充分挖掘结构频响特性的潜力，形成集微弱特征提取、静动多场信息融合、模式识别功能于一体的跨点频响法新思想与新方法，在跨点频响分析框架内解决柴油机系统损伤等典型早期故障微弱特征提取、模式识别等关键技术难点问题，实现柴油机系统损伤等典型早期故障预测。从本质上来说，有别于传统的基于信号处理的和基于模型的故障诊断方法。



基于DASP的便携式数据采集系统

- **主要创新之处如下：**

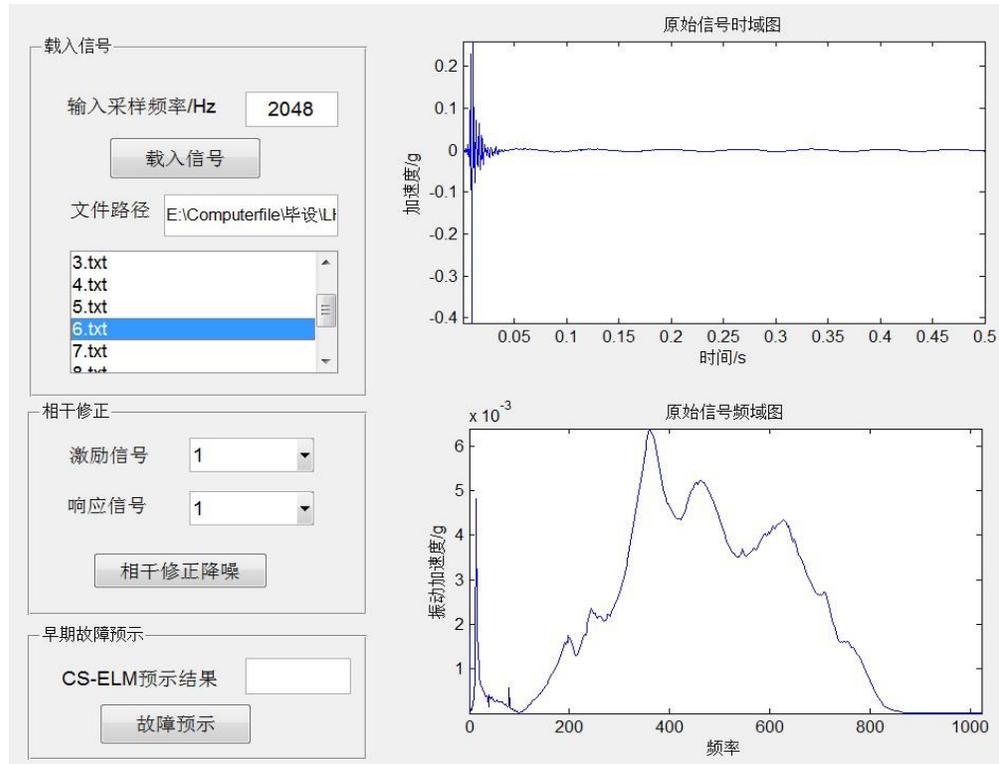
- (1) 提出集微弱故障特征提取、静动多场信息融合、故障模式识别等功能于一体的跨点频响法新思想，形成一套对重型柴油机系统关重部件损伤等典型早期故障诊断的新理论和新方法。
- (2) 首次将跨点频响技术与早期微弱故障特征提取技术结合用于车船柴油机系统关重部件损伤等典型早期故障快速检测领域。
- (3) 通过对车船柴油机系统生产与运行时的多种响应信号的分析，研究关重部件的损伤等典型早期故障特征，并最终应用于柴油机系统关重部件装配质量的在线故障诊断在国内外都是首次尝试。
- 本项目创新性提出的针对柴油机系统关重部件损伤等典型故障进行快速检测的跨点频响技术不但在车船装备的柴油机系统的生产和运行中可有很好的应用，而且对各种高精密度的复杂装备都有很好的应用前景。由于可有效解决早期微弱故障的特征提取与识别问题，并充分利用静动多场信息进行融合诊断，因而对卫星、飞行器、航空发动机、舰船核动力等复杂装备的装配质量和运行可靠性提高都有很高的应用价值，前景十分广阔。

频响特性故障预示软件

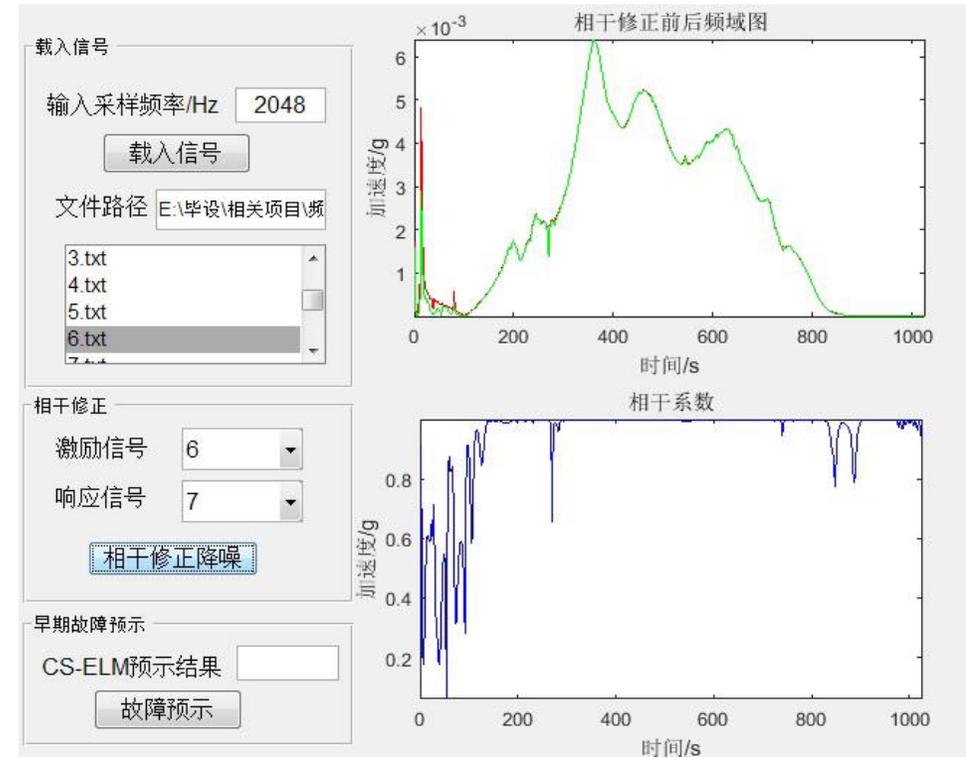
通过对频响试验采集的振动加速度信号进行相干修正降噪，提取峰值、峰值频率、冲击特征组成特征向量，并运用基于布谷鸟搜索算法优化的极限学习机模型对其进行早期故障预示。就频响信号的分析 and 处理方法，进行了MATLAB GUI界面设计和程序编写，开发了频响特性早期故障预示软件。

此软件目前主要包含七个功能：用户登录、载入信号、查看信号的时域图和频域图、选择激励信号和响应信号进行相干修正降噪、频响特性曲线的特征提取、不同工况的频响曲线对比、早期故障预示。

频响特性故障预示软件

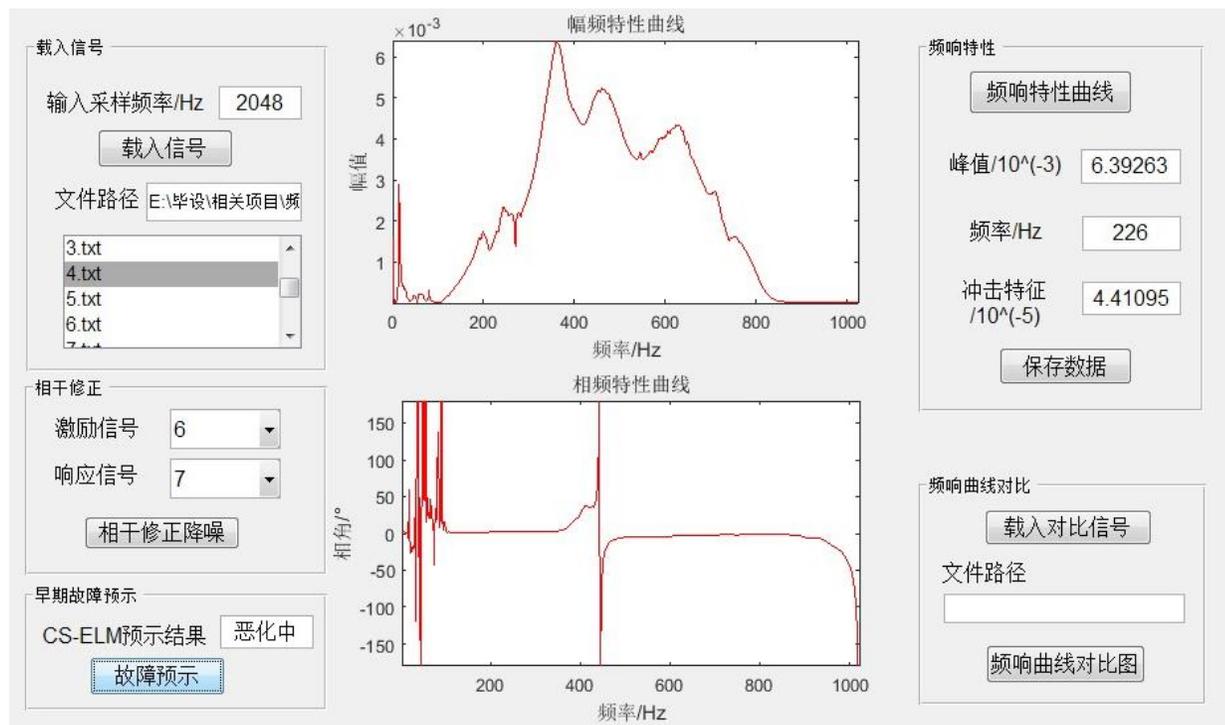


原始信号的时域图和频域图显示界面

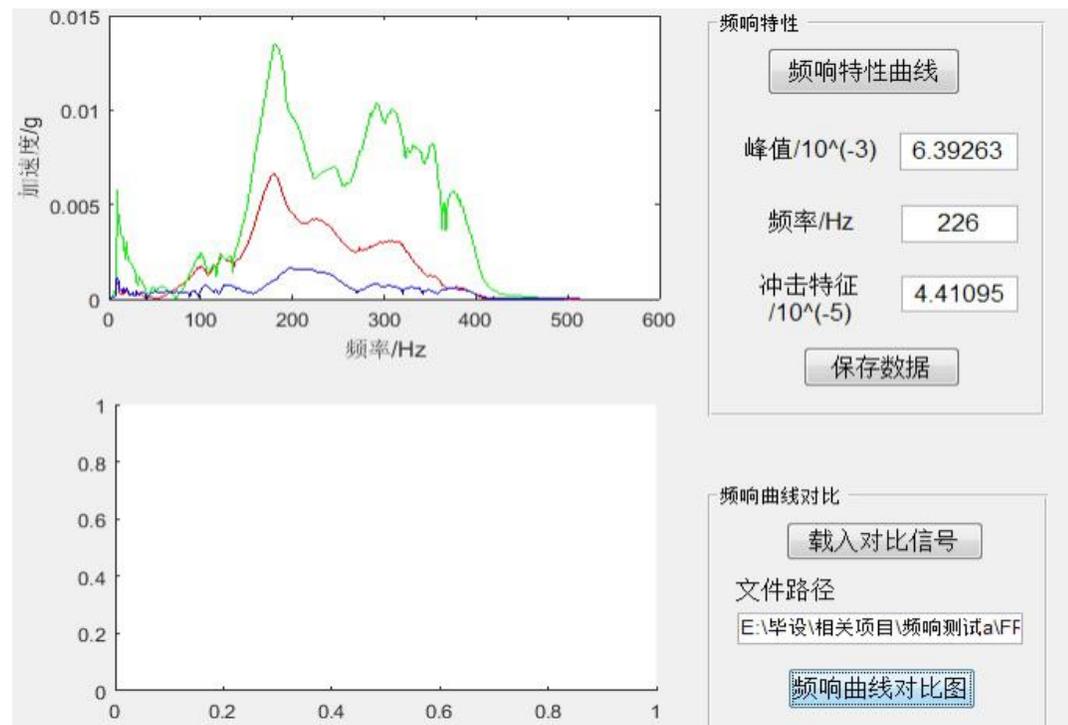


相干修正降噪界面

频响特性故障预示软件



频响特性曲线的特征提取和早期故障预示界面



频响曲线对比图界面

The background features a complex, abstract pattern of thin, light gray lines that intersect to form a grid-like structure. This grid is overlaid with numerous small, colorful dots in shades of orange, yellow, green, blue, and purple. The overall effect is a dynamic and interconnected network. In the top-left corner, there is a single, larger orange circle.

谢谢观看
THANK YOU FOR WATCHING