



基于跨点频响和静动信息融合的 柴油机关键部件故障诊断研究

Study on fault diagnosis of key components of Diesel Engine
based on Cross-point Frequency Response and static and
dynamic Information Fusion

作者(Author): 潘宏侠, 韩慧苗, 高家宝

(Pan Hongxia, Han Huimiao, Gao Jiabao)

单位(Units): 中北大学 兵器系统辨识与诊断技术研究所

(Ordnance System Identification and Diagnostic
Technology Institute, North University of China)

联系方式(Connection): 13903514842



目录 / CONTENTS



一. 研究背景与对象

Research background and object



二. 静动态特征提取

Static and dynamic feature extraction



三. 静动信息融合方法研究

Research on static and dynamic information fusion



四. 基于优化支持向量机的分类识别

Classification and recognition based on optimized SVM



五. 结论与展望

Conclusion and prospect

一. 研究背景与对象

Research background and object



研究背景与对象/Research background and object



中北大学
NORTH UNIVERSITY OF CHINA



现如今柴油机系统结构日趋复杂，故障机理分析愈加困难，传统的故障诊断模式耗时长且准确定位性差。目前柴油机振动信号分析中仍存在大量亟待解决的问题，因此需要对柴油机系统的故障诊断进行更为深入的研究。

项目来源/project source

内燃机可靠性国家重点实验室开放课题 “**基于跨点频响分析和静动信息融合的柴油机关键部件早期故障诊断研究**”

Research on Early Fault Diagnosis of Key Diesel Engine Components Based on Cross-point Frequency Response Analysis and Static and Dynamic Information Fusion



研究背景与对象/Research background and object

柴油机的常见故障

故障类型	出现概率
供油设备故障	27.3%
漏水	17.0%
阀座、阀门故障	11.5%
滚动轴承部件损坏	7.4%
活塞故障	6.6%
漏油、润滑故障	5.5%
变速箱齿轮故障	3.8%
破坏和破裂	2.4%
涡轮增压器故障	4.9%
齿轮故障与驱动装置故障	3.8%
其他故障	9.7%

选油泵、水泵作为试验对象：

Oil pump and water pump are selected as test objects

- ① 燃油、冷却系统故障发生率较高，油泵和水泵等在柴油机系统中发挥着重要作用；
- ② 在试验操作中具有故障工况易模拟、信号易采集且危险系数相对较低等特点。



研究背景与对象/Research background and object



本次试验以潍柴动力的WP13H350E62型柴油机为研究对象，在内燃机可靠性国家重点实验室进行。

The test was conducted in the State Key Laboratory of Internal Combustion Engine Reliability by Weichai Power's WP13H350E62 diesel engine.



油泵跨点频响实验



进气管跨点频响实验



水泵跨点频响实验



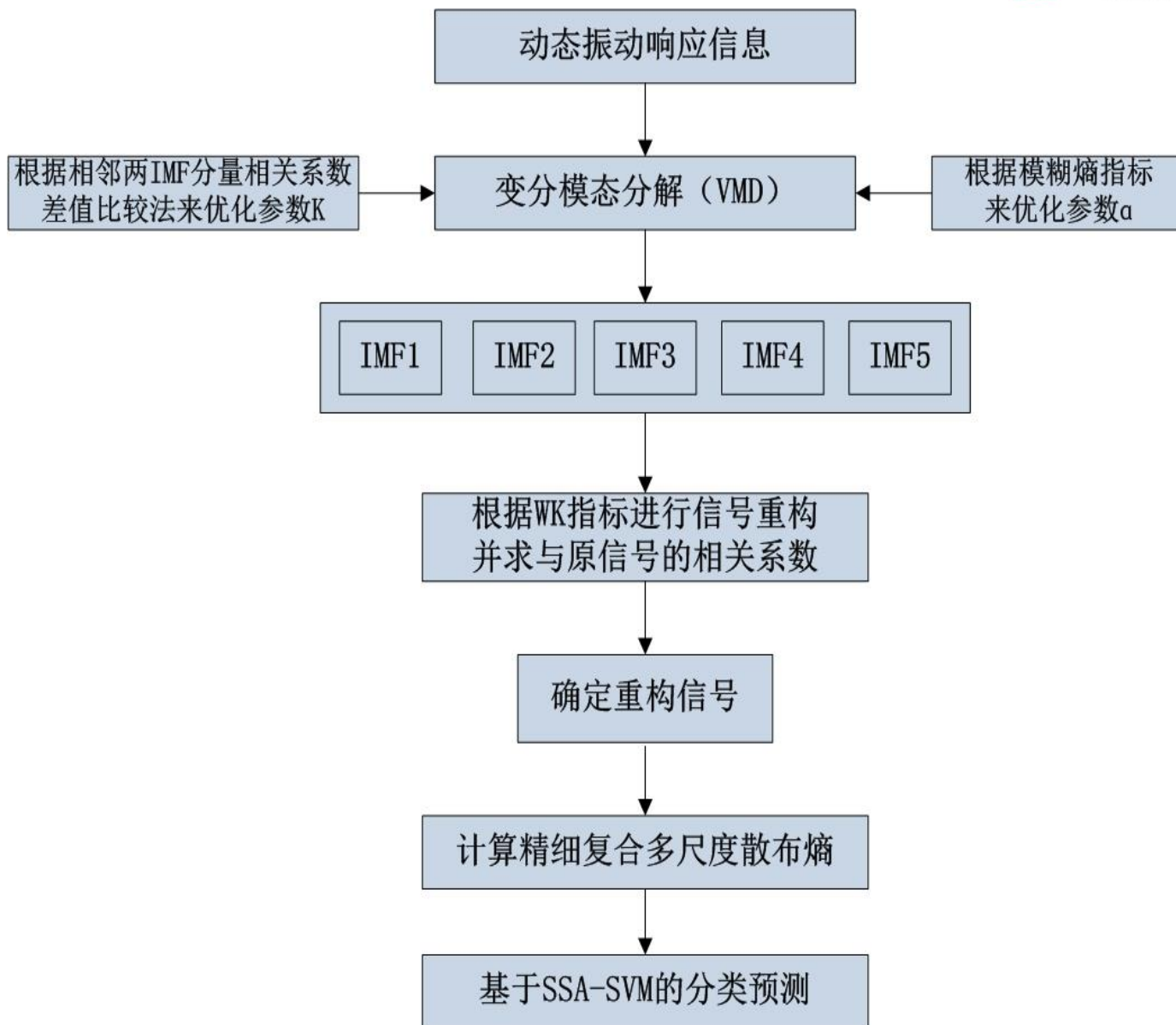
实验数据采集系统

二. 静动态特征提取

Static and dynamic feature extraction



动态特征提取方案



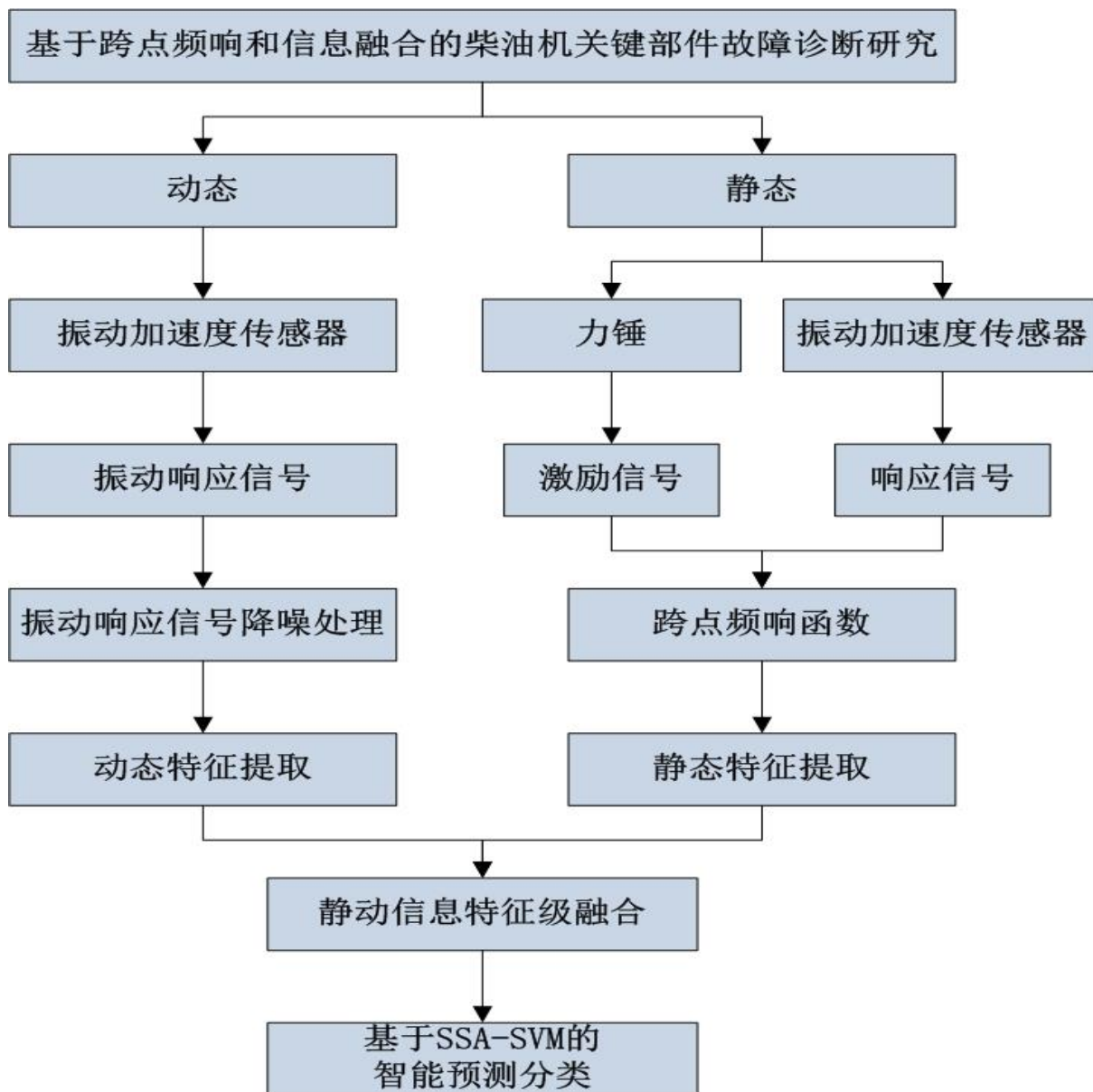


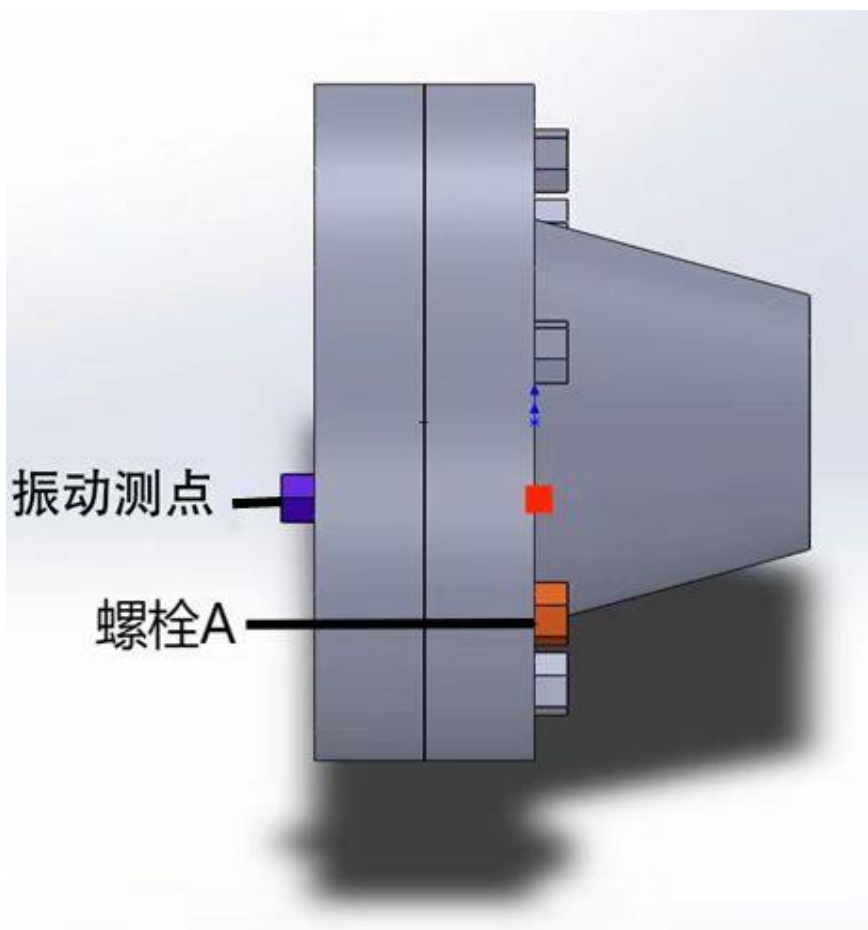
总体研究思路/General research idea



中北大学
NORTH UNIVERSITY OF CHINA

总体研究思路





动态试验的简易图

动态	工况	柴油机转速	1200r/min
		正常	35N·m
		轻微故障	25N·m
		严重故障	15N·m

若螺栓连接松动，在较长时间的柴油机开机测试中螺栓连接明显失效。如果长期在本情况下运行，会导致其他螺栓受载荷情况恶化，甚至出现油泵漏油等故障。



动态特征提取/Dynamic feature extraction



中北大学
NORTH UNIVERSITY OF CHINA

优化VMD算法中的模态分解个数K

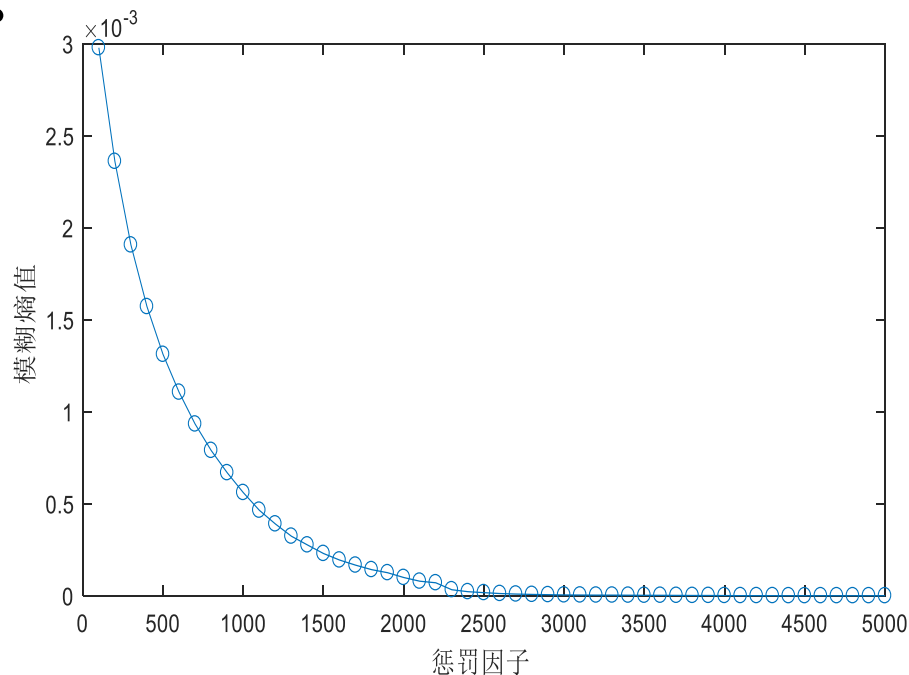
IMF分解 个数K	IMF分量与原始信号的相关系数 ρ					
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6
2	0.8416	0.4715				
3	0.8433	0.4601	0.6008			
4	0.8312	0.2072	0.5587	0.2994		
5	0.8305	0.5731	0.4063	0.2808	0.1708	
6	0.8273	0.3889	0.4302	0.3394	0.1694	0.1399

IMF分解 个数K	两相邻IMF分量间的相关系数差 δ				
	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
2	0.3701				
3	0.3832	0.1407			
4	0.6240	0.3515	0.2593		
5	0.2574	0.1668	0.1255	0.1100	
6	0.4384	0.1013	0.0908	0.1700	0.0295

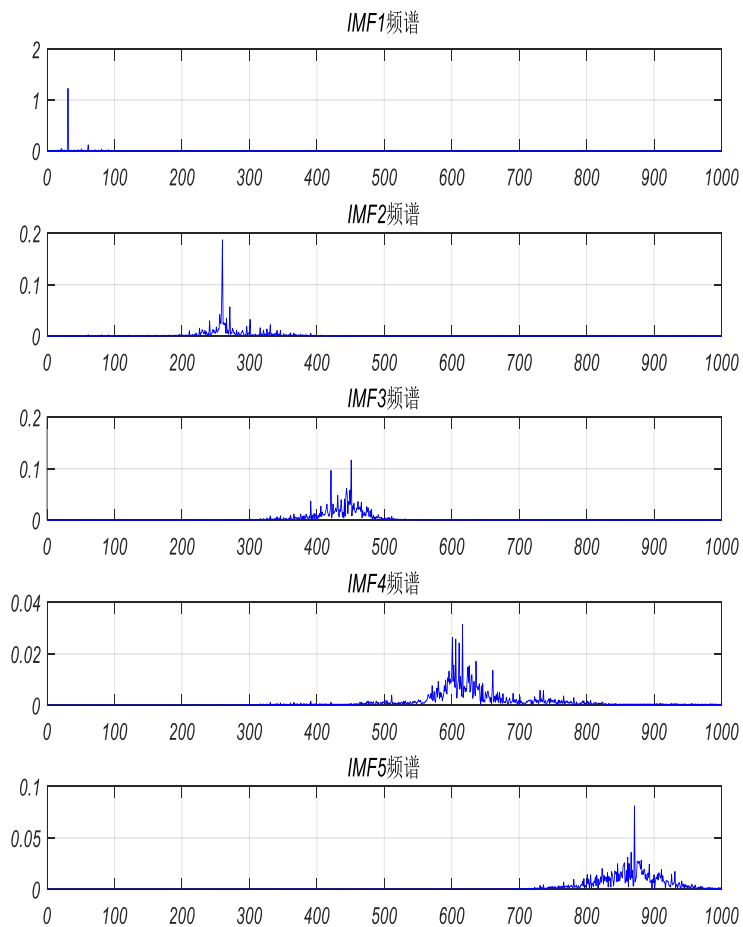


优化VMD算法中的惩罚因子 α

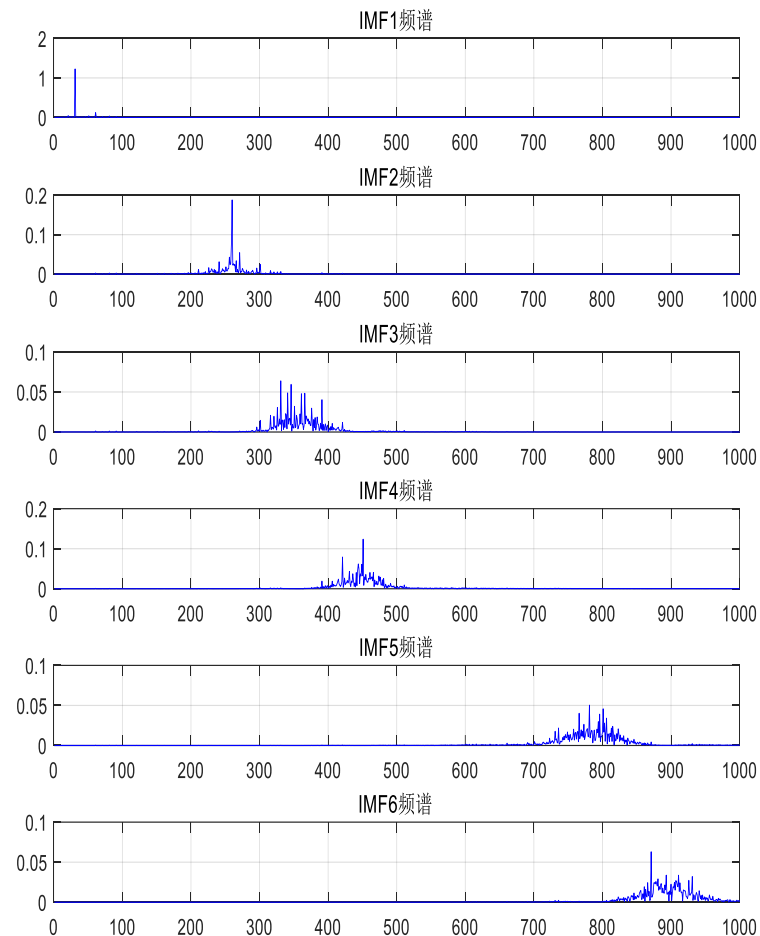
惩罚因子 α 控制着VMD分解所得IMF分量的带宽和收敛速度，也是保证约束条件的关键参数。模糊熵代表着信号的复杂度，出现故障时冲击信号增强，信号的复杂性下降，则模糊熵最小时对应的 α 即最优值。



K=5时柴油机重构信号的模糊熵值



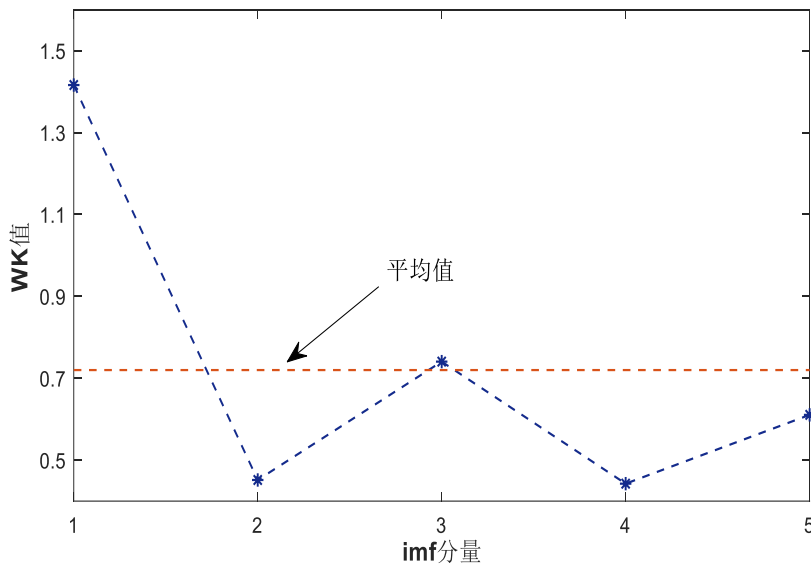
K=5, $\alpha=2300$ 时VMD分解的各IMF分量频谱图



K=6, $\alpha=2000$ 时VMD分解的各IMF分量频谱图



信号重构时，常用到相关系数和峭度指标，但峭度指标仅考虑了信号的分布密度，相关系数指标容易被无关信号干扰，因此本研究选用了加权峭度指标。



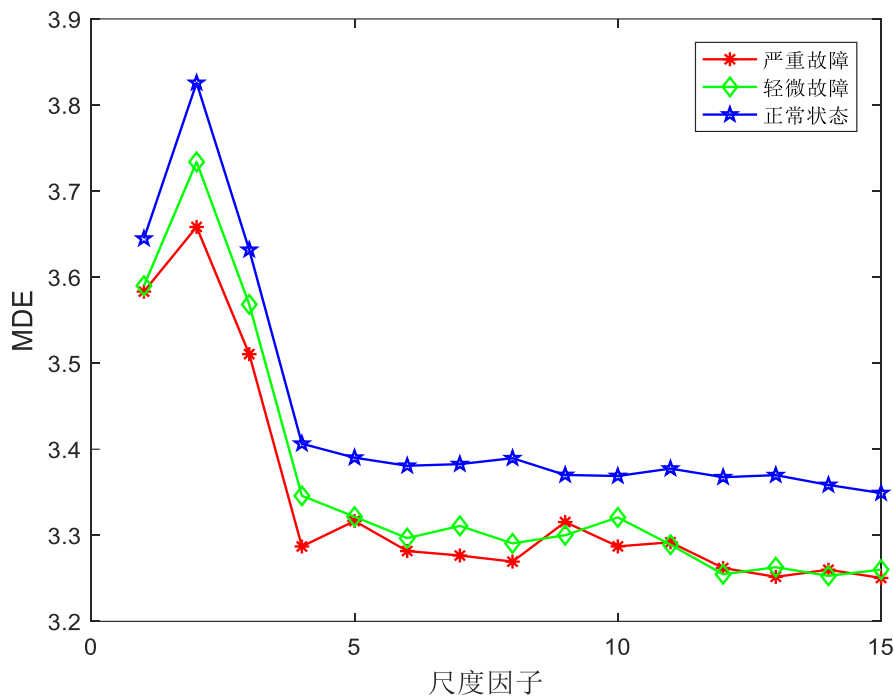
VMD分解后各IMF分量的WK值

EEMD和VMD分解重构信号对比

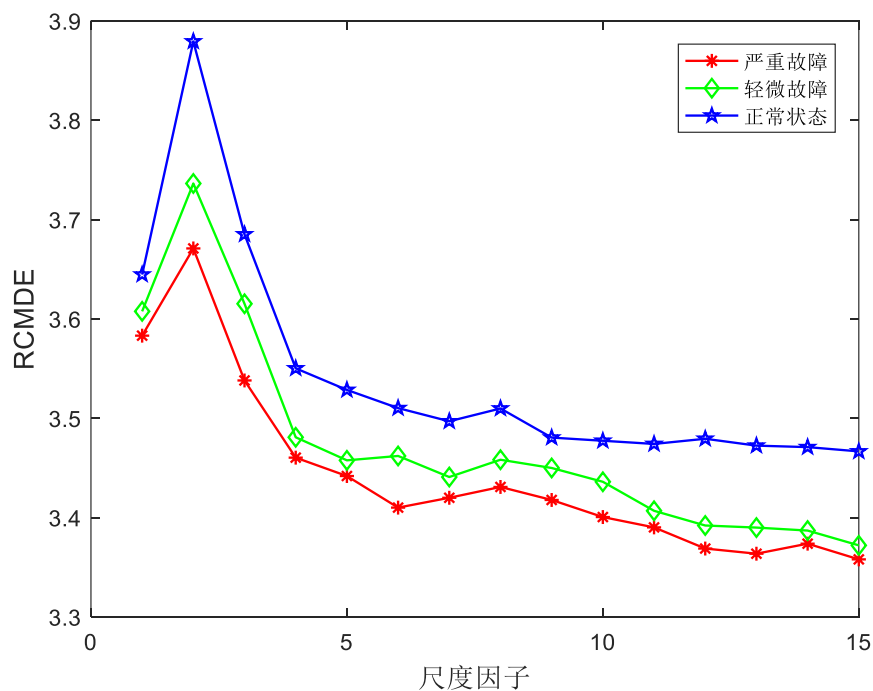
指标	EEMD	VMD
相关系数	8.9347	10.4583
加权峭度 (WK)	10.6682	12.0864



散布熵是信息熵的一种，多尺度散布熵（MDE）可从多个时间尺度反应信号的复杂度，精细复合多尺度散布熵（RCMDE）弥补了MDE在时间序列不够长时随着尺度因子增大容易丢失信息的缺陷。



MDE熵值曲线



RCMDE熵值曲线

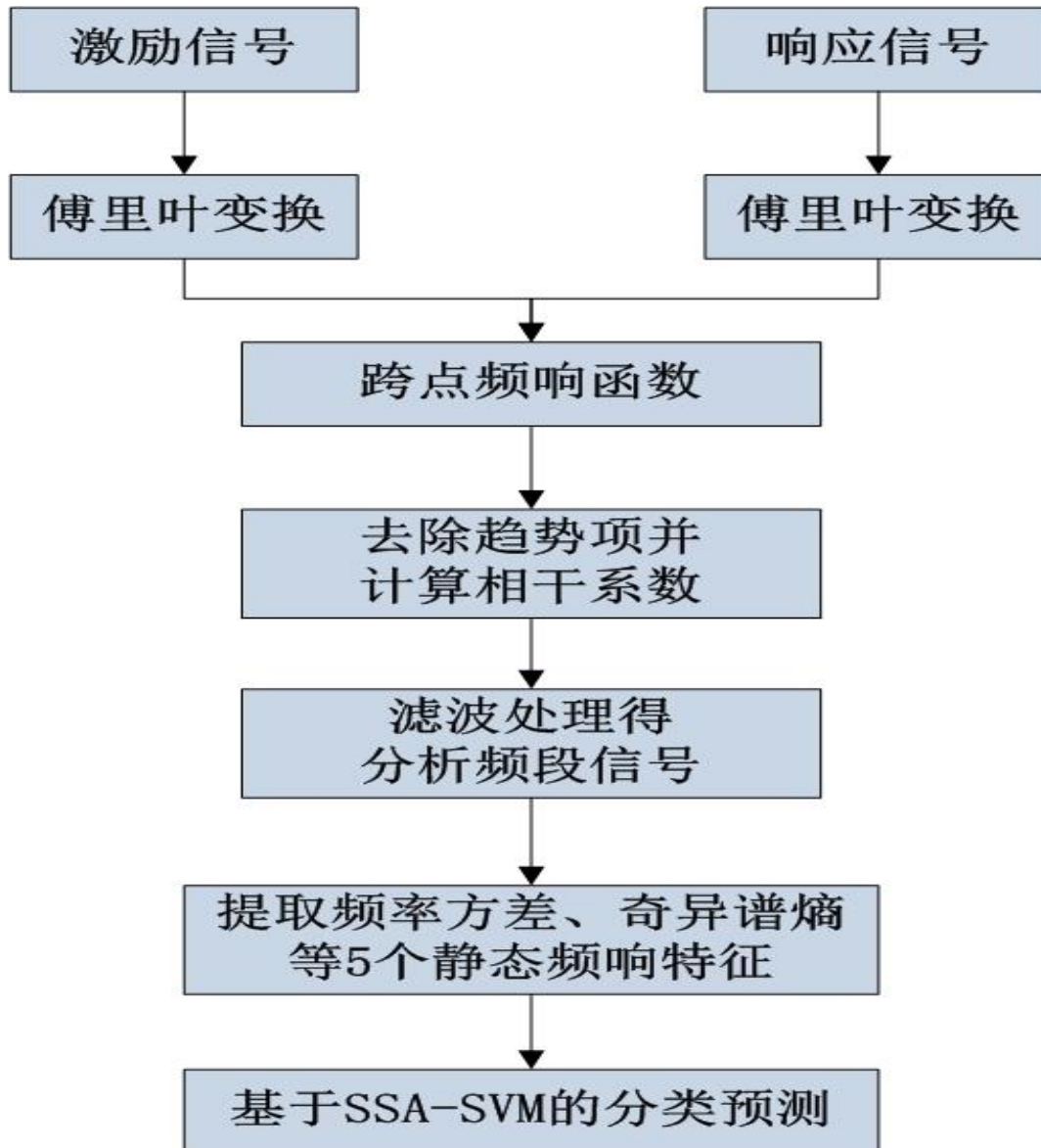


静态特征提取/Static feature extraction



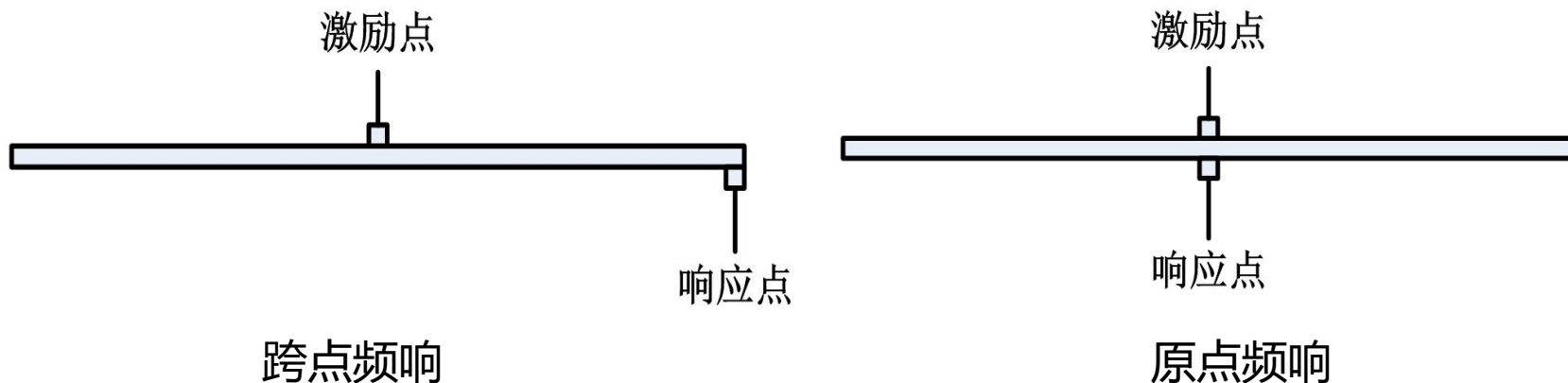
中北大学
NORTH UNIVERSITY OF CHINA

静态
特征
提取
方案





跨点频响相比较原点频响可以反映激励点与响应点之间的传递特性。

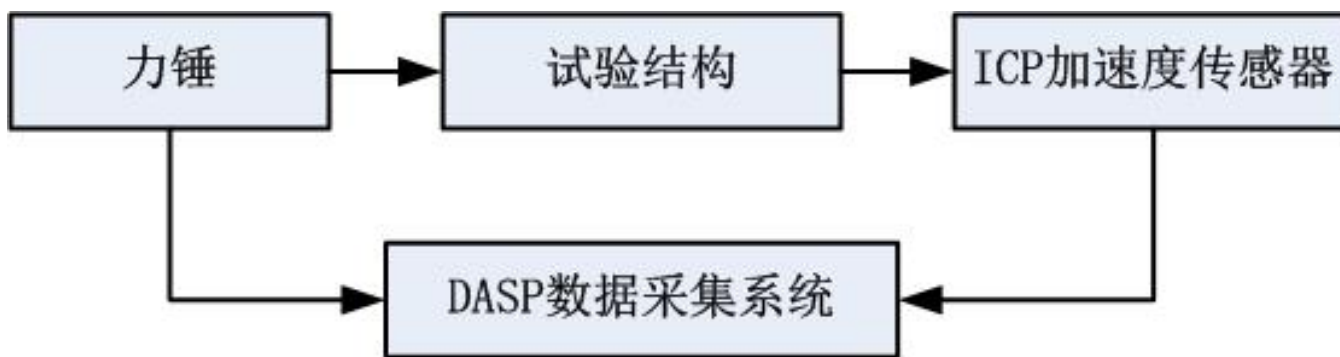


跨点频响函数可以量化动力学系统属性，通过采集获得输入和输出的时域信号，再通过快速傅里叶变换（FFT）将信号转换为频域信号的比值，从而以数字方式量化系统特性，得到测试系统对给定频率下的稳态输入和输出之间的关系。

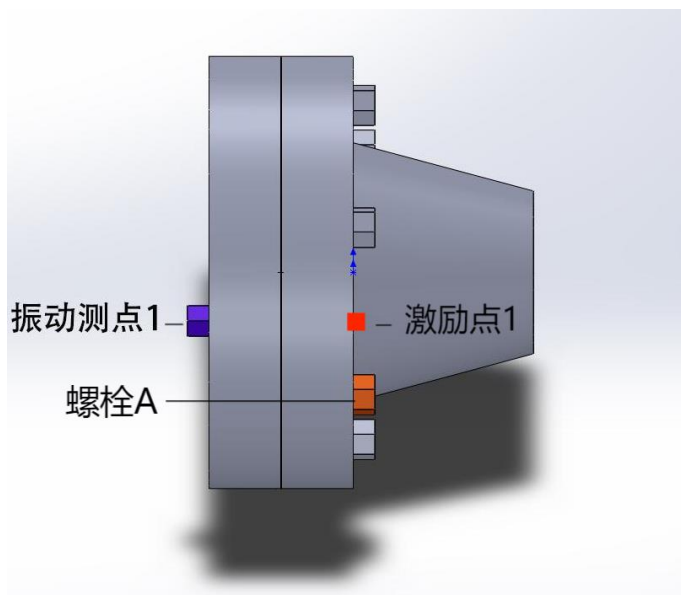
$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots}$$



静态特征提取/Static feature extraction



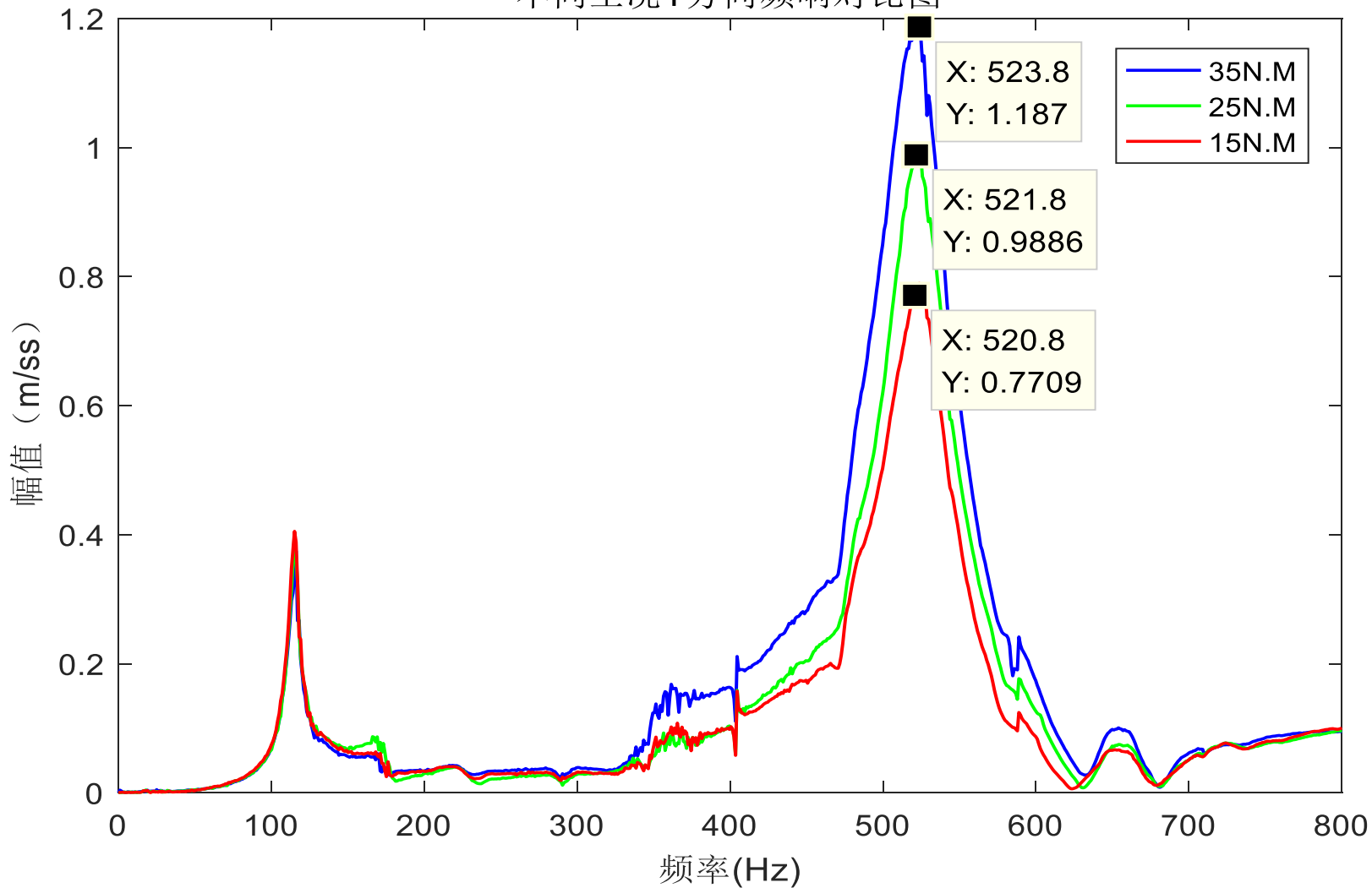
跨点频响测试系统的组成框图



静态	激励点	激励点1	
	响应点	振动测点1	
	工况	正常	35N·m
		轻微故障	25N·m
		严重故障	15N·m



不同工况Y方向频响对比图



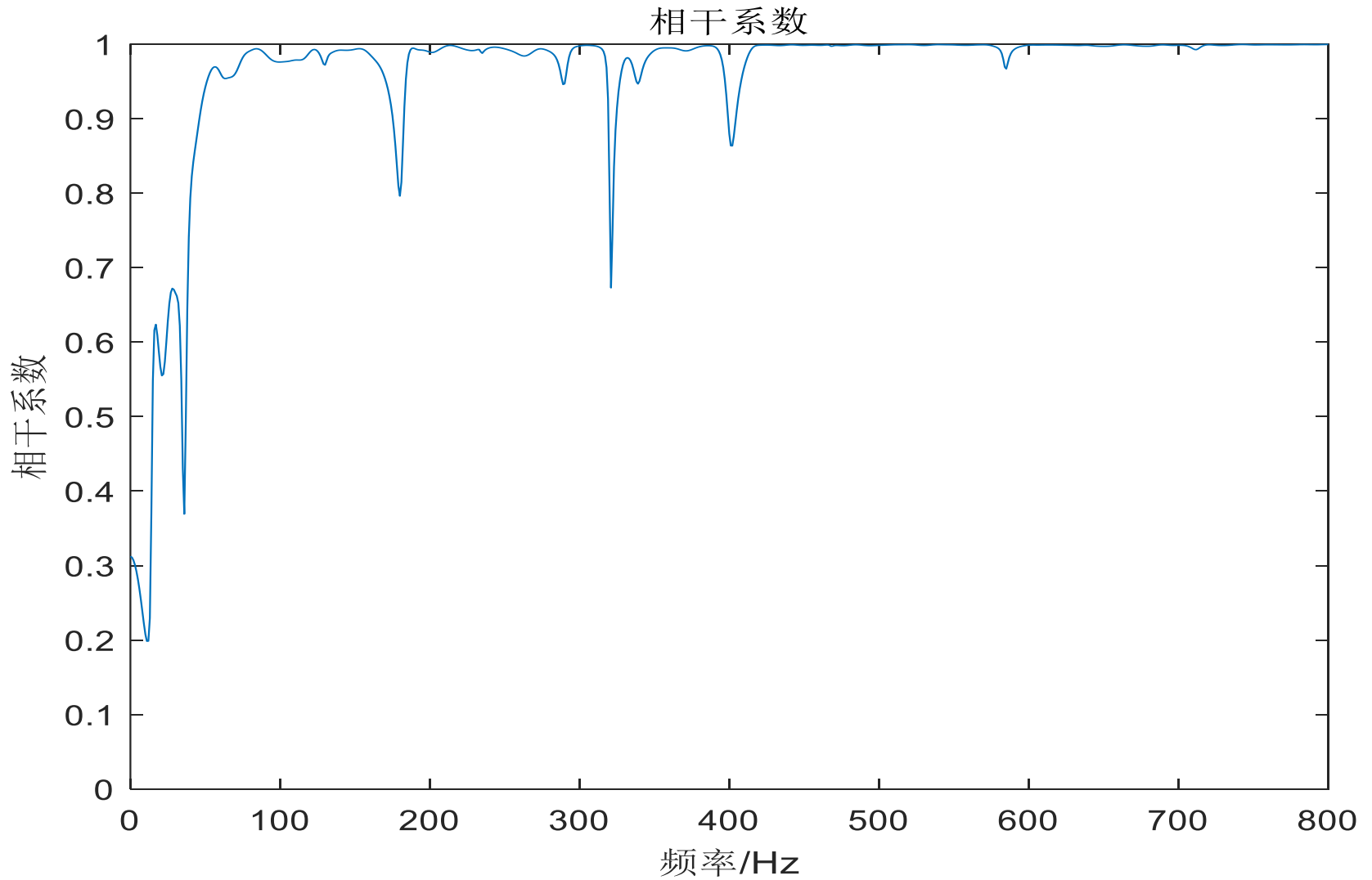
不同工况频响曲线对比图



静态特征提取/Static feature extraction



中北大学
NORTH UNIVERSITY OF CHINA



激励信号和响应信号的相干系数



静态特征提取/Static feature extraction



针对研究对象特点，提取了均方根频率、频率方差、峭度、峰值因子和奇异谱熵五个特征作为静态跨点频响试验信号的特征参数。

静态信息的部分特征

工况	均方根频率	频率方差	峭度	峰值因子	奇异谱熵
15N·m	521.0167	125500.0	121.4910	23.8667	4.57064
	557.4418	102149.5	125.6823	26.9351	4.54324
	579.0789	96497.03	170.9845	31.6843	4.76101
25N·m	597.6848	99139.05	128.9332	28.0558	4.50072
	641.4359	82206.63	129.1554	29.9113	4.75899
	625.9247	108463.4	187.0174	33.5342	4.59565
35N·m	621.7494	92131.87	175.6367	34.4473	4.79091
	661.6939	78353.29	190.5199	36.8296	5.00153
	652.5655	85307.05	189.0068	36.0971	4.76451

连接松紧对频响阻尼特性的影响

Influence of connection tightness on frequency response damping characteristics

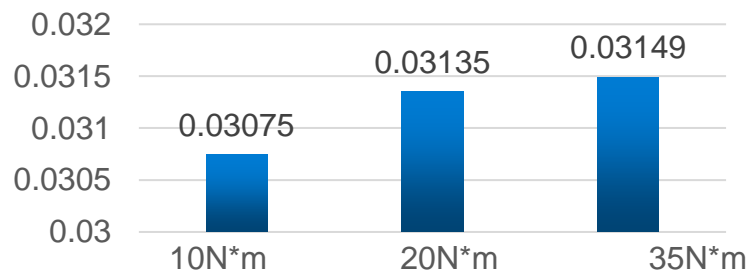
水泵连接螺栓不同力矩下Z方向各频率的阻尼比

频率 (Hz)	362.2	526.3
10N*m	0.03075	0.004753
20N*m	0.03135	0.005608
35N*m	0.03149	0.005703

结构阻尼是描述振动系统在振动时能量损耗的总称。组合连接结构的阻尼主要来源于结合面，阻尼比常用于表示结构在受激振作用后振动的衰减程度。

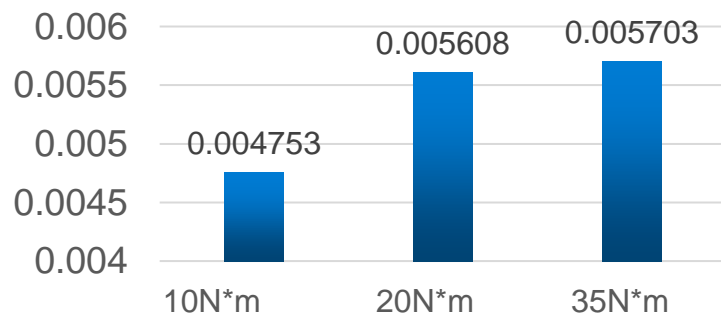
螺栓在362.2Hz时三种力矩下阻尼比

柱状图



螺栓在526.3Hz时三种力矩下阻尼比

柱状图

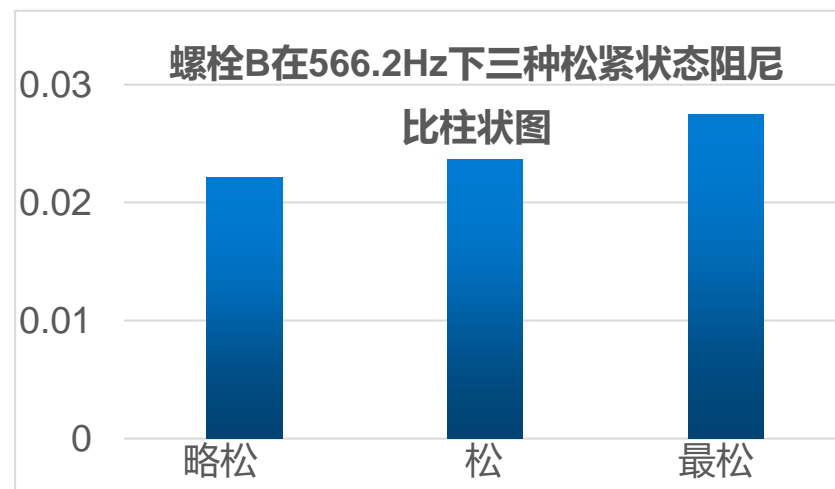
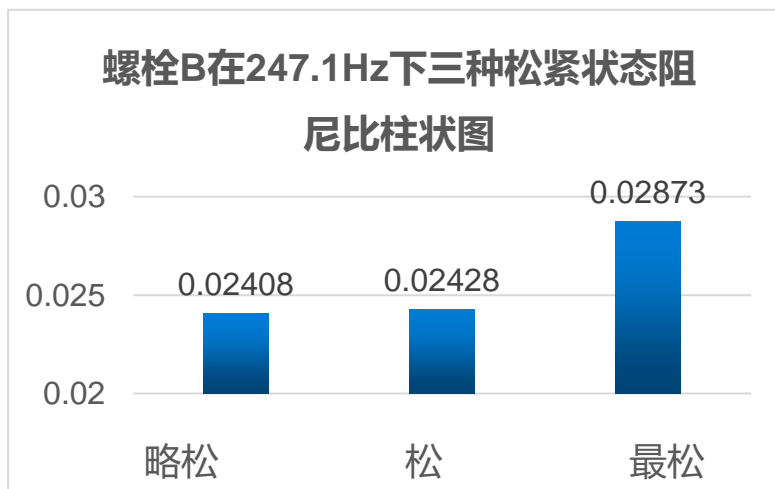


连接松紧对频响阻尼特性的影响

Influence of connection tightness on frequency response damping characteristics

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
略松	0.02408	0.02211
松	0.02428	0.02362
最松	0.02873	0.02746

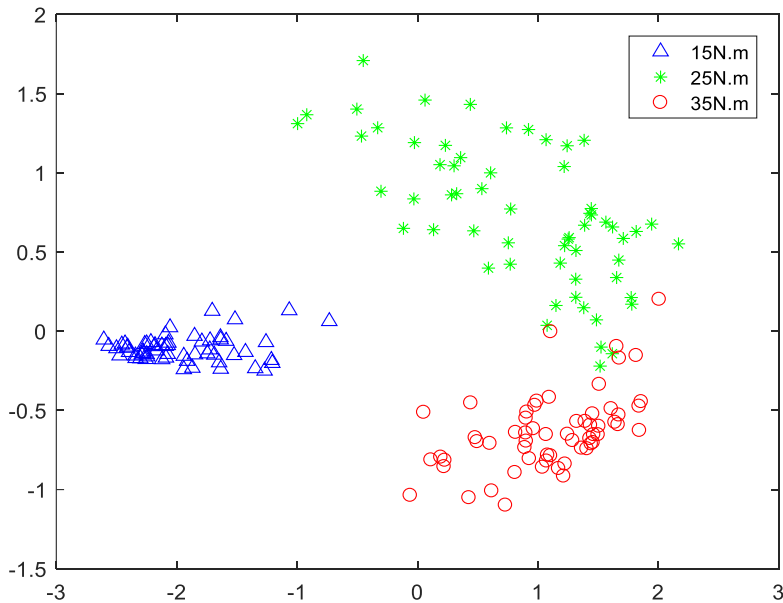


三. 静动信息融合方法研究

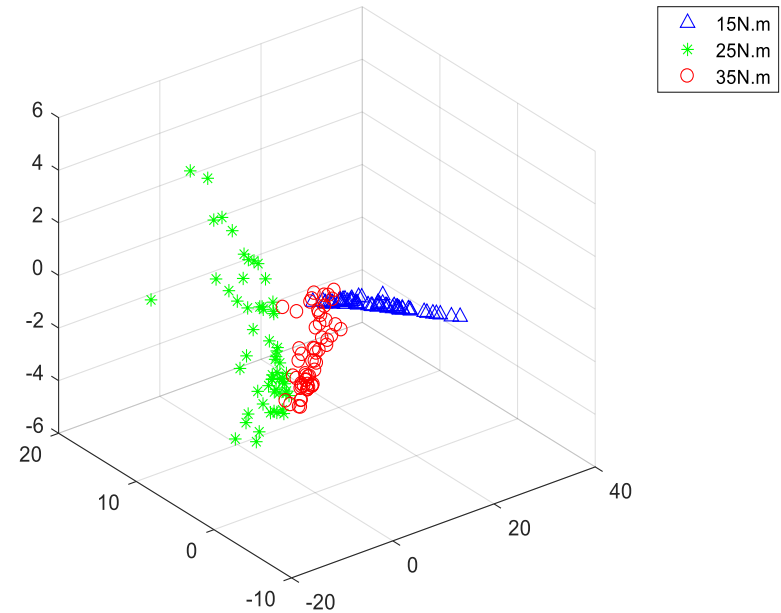
Research on static and dynamic information fusion



提取的特征维度过高时会增加处理难度，因此选择特征级信息融合进行降维处理。本研究分别采用线性降维方法--主成分分析法（PCA），非线性降维方法--等距离映射法(ISOMAP)和核熵成分分析法(KECA)进行对比分析。



PCA降维结果



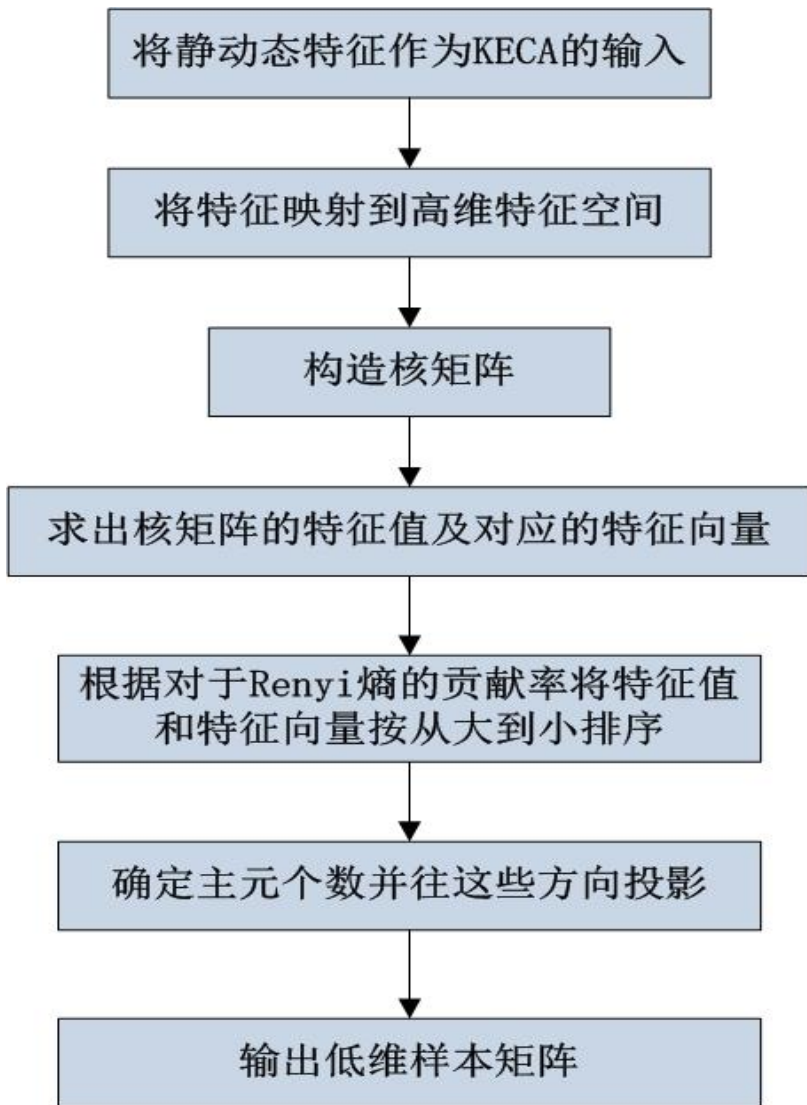
ISOMAP降维结果



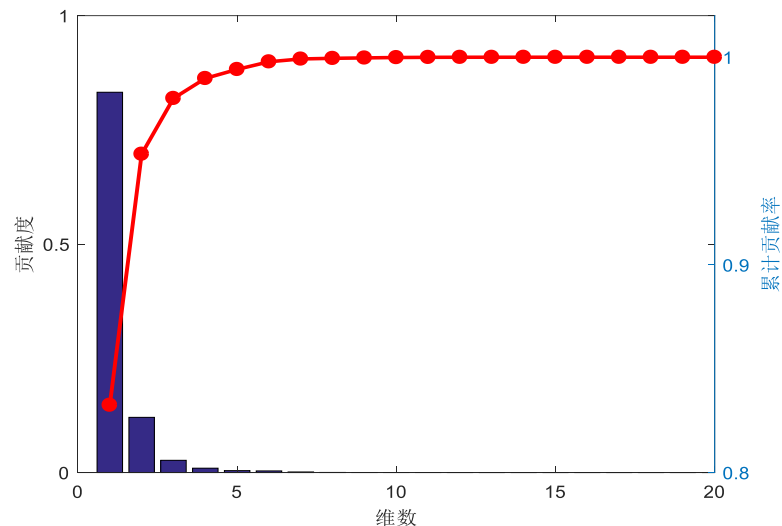
静动信息融合方法研究/Research on static and dynamic information fusion



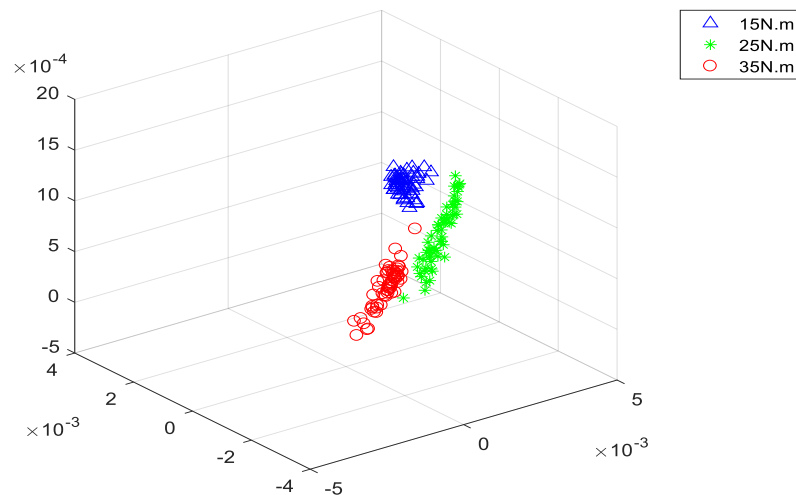
中北大学
NORTH UNIVERSITY OF CHINA



KECA降维算法流程图



KECA各主元特征分布图



KECA降维结果

四. 基于优化支持向量机的分类识别

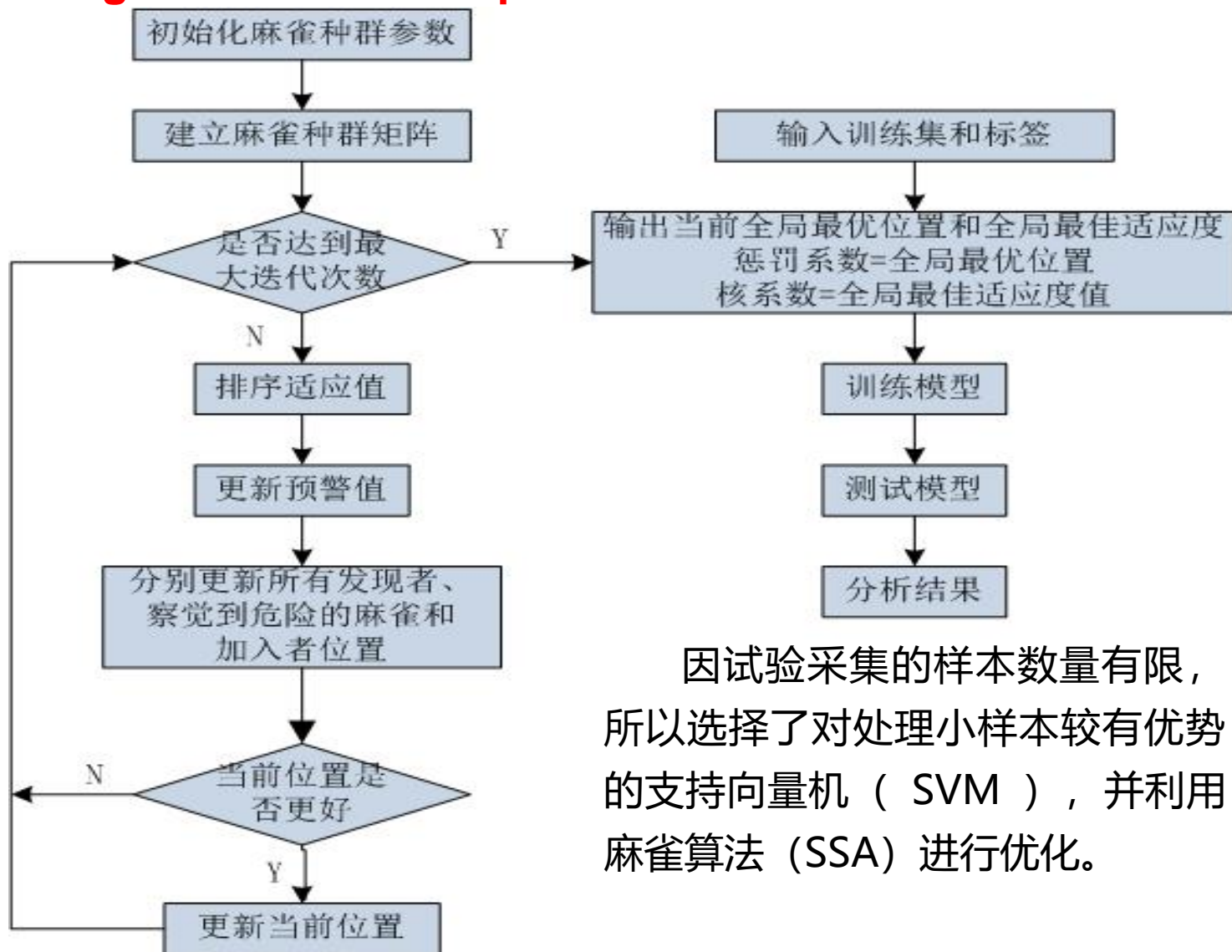
Classification and recognition based on optimized SVM



基于优化SVM的分类识别/Classification and recognition based on optimized SVM



中北大学
NORTH UNIVERSITY OF CHINA



因试验采集的样本数量有限，所以选择了对处理小样本较有优势的支持向量机（SVM），并利用麻雀算法（SSA）进行优化。

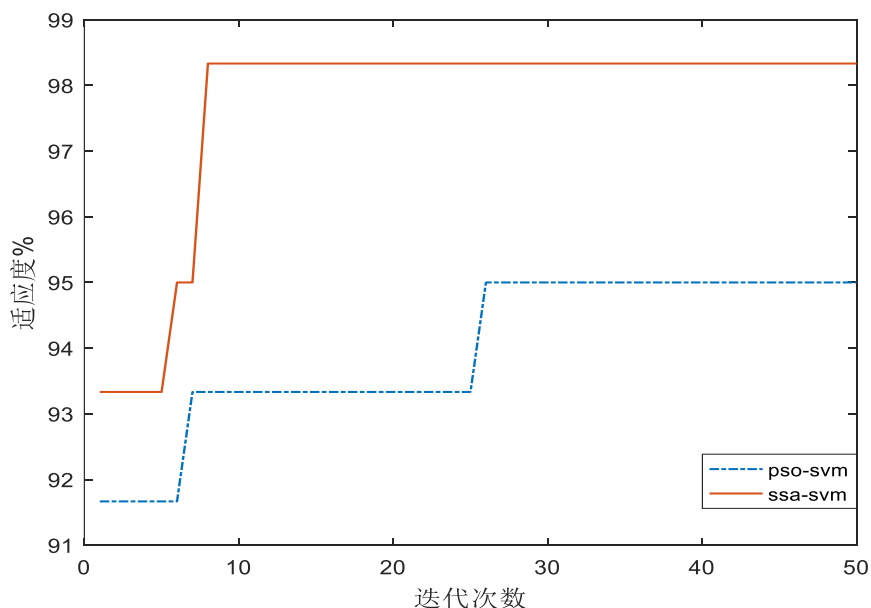
SSA优化的SVM算法流程图



基于优化SVM的分类识别/Classification and recognition based on optimized SVM



与粒子群（PSO）优化的SVM寻优曲线对比，可以看出SSA-SVM仅需8次就可完成迭代，PSO-SVM不仅迭代次数多而且速度慢、准确率也不高。



优化算法性能对比曲线

寻优结果对比

算法模型	PSO-SVM	SSA-SVM
惩罚参数c	44.7727	1.5227
核参数g	9.6136	13.8676
迭代时间/s	4.619706	0.91483

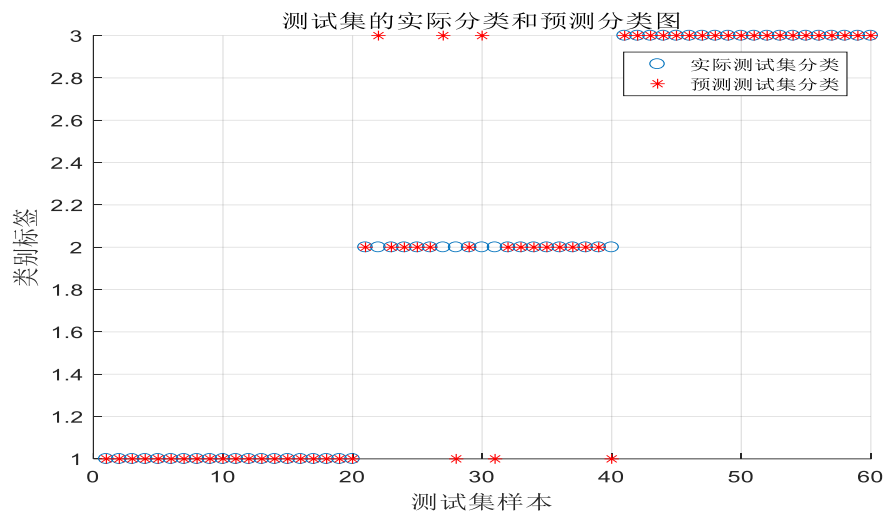


基于优化SVM的分类识别/Classification and recognition based on optimized SVM

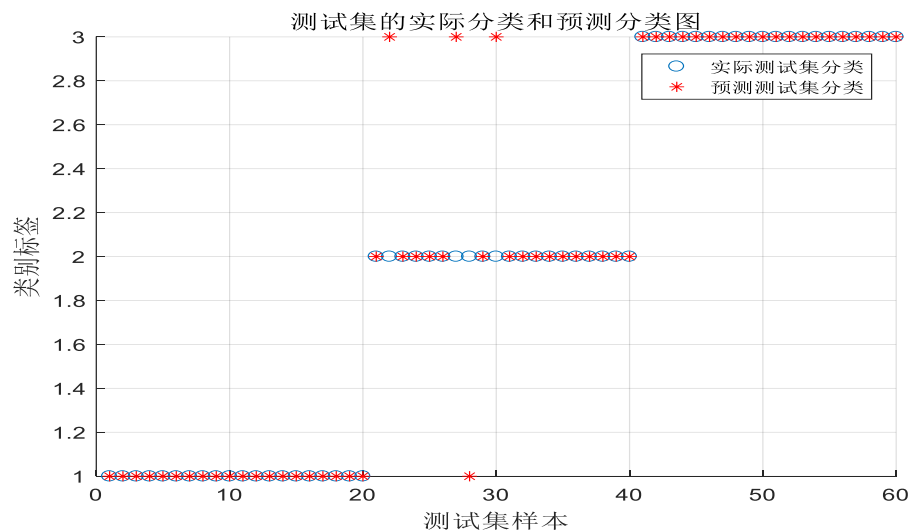


中北大学
NORTH UNIVERSITY OF CHINA

动态信息分类结果



动态信息的PSO-SVM分类结果90%



动态信息的SSA-SVM分类结果93.33%

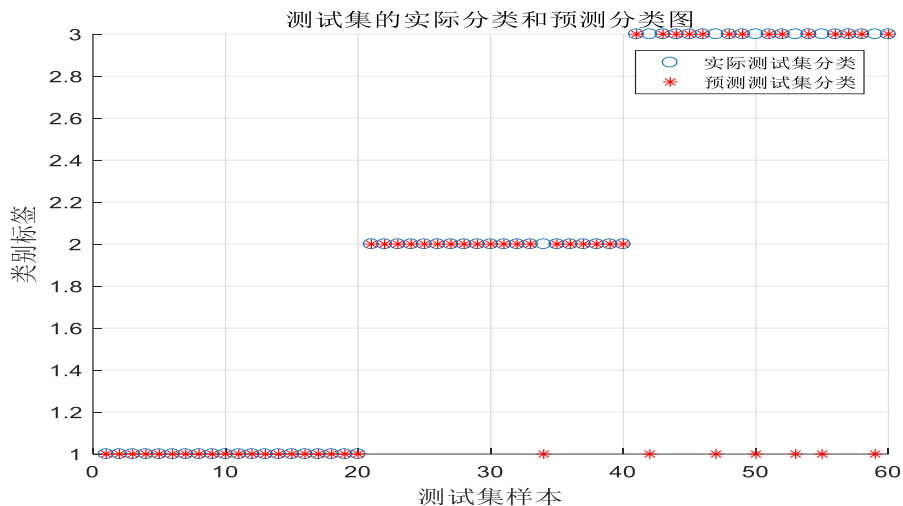


基于优化SVM的分类识别/Classification and recognition based on optimized SVM

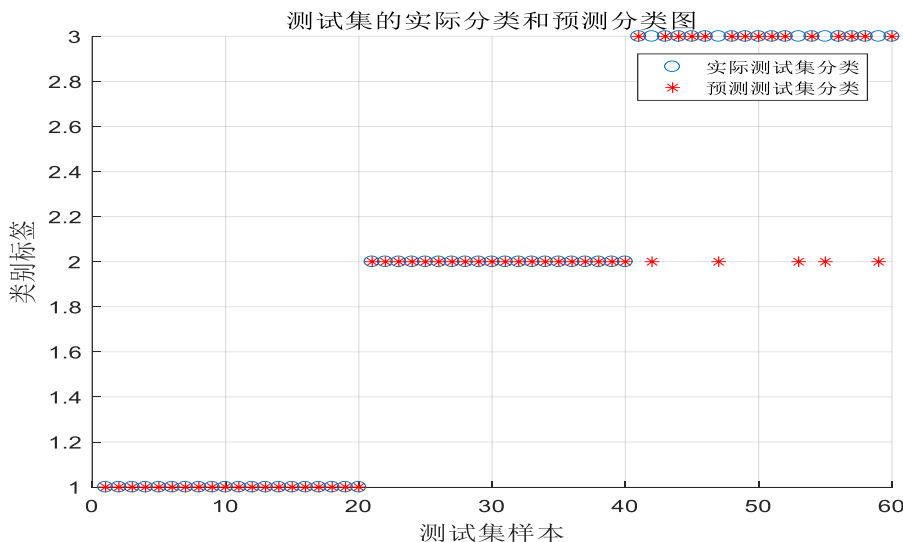


中北大学
NORTH UNIVERSITY OF CHINA

静态信息分类结果



静态信息的PSO-SVM分类结果88.33%



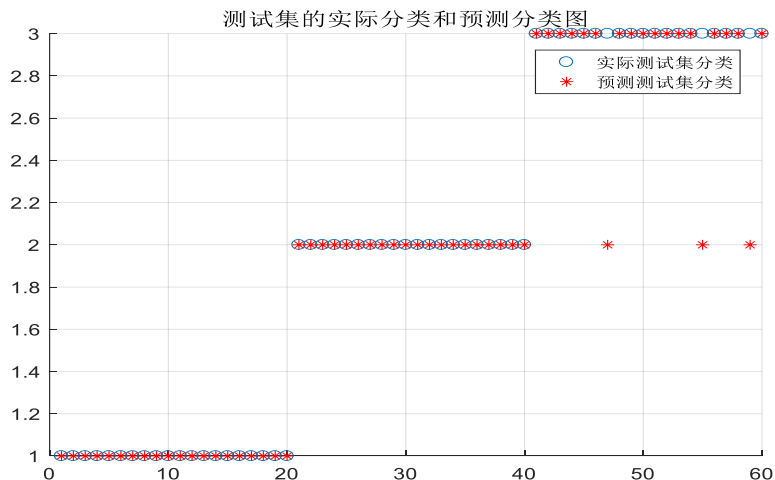
静态信息的SSA-SVM分类结果91.67%



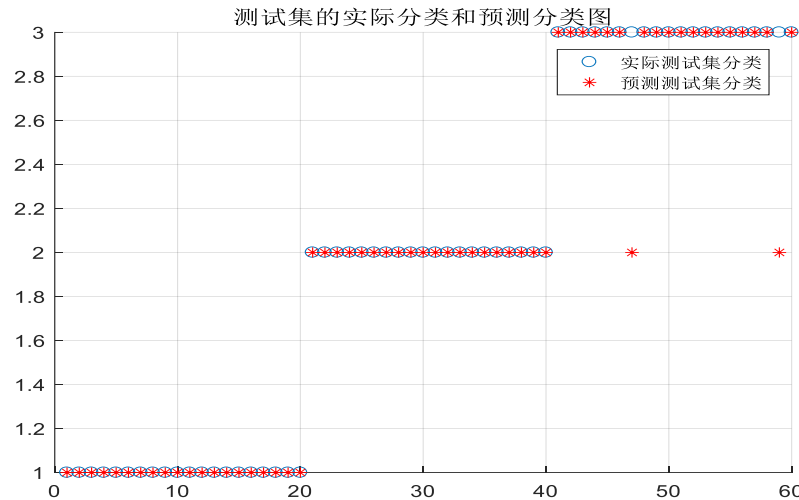
基于优化SVM的分类识别/Classification and recognition based on optimized SVM



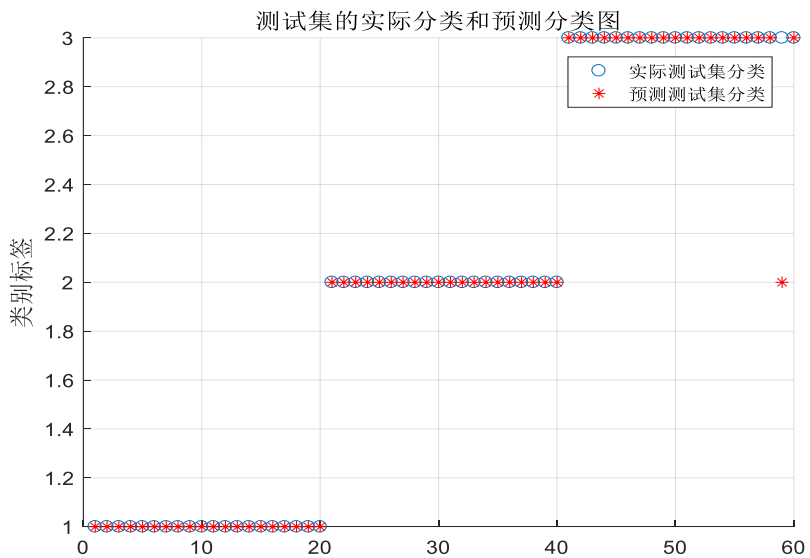
静动信息融合后分类结果



PCA降维后分类结果



ISOMAP降维后分类结果



KECA降维后分类结果

故障分类结果对比

分类方法	动态信息	静态信息	PCA降维后	ISOMAP降维后	KECA降维后
PSO-SVM	90%	88.33	90%	91.67%	95%
SSA-SVM	93.33%	91.67%	95%	96.67%	98.33%

PCA(主成分分析)降维

ISOMAP(等距特征映射)降维

KECA(核熵成分分析)特征降维

五. 结论与展望

Conclusion and prospect



结论/Conclusion

01

SSA-SVM与PSO-SVM相比较可以看出，SSA-SVM可以对本研究的各种工况进行分类且得到较高的识别率，而且计算时耗较少，效率高。

02

由静动信息融合后的故障分类结果可知，静动信息融合后的分类识别率相较于动态、静态的分类识别率更高，说明静动信息融合能够有效提高故障识别率。

03

根据对静态跨点频响信息的研究可知，跨点频响方法可以对柴油机结构疲劳损伤、连接松动、密封渗漏故障进行有效的识别，是一种有效的结构质量分类识别方法。



展望/Prospect

01

由于实验条件所限，对于柴油机非平稳运行过程中的研究还有大量空白，如条件允许可尝试对其多种运作状态信号进行研究。

02

当柴油机部件内部出现多故障耦合的情况下，利用跨点频响是否可以和单一故障一样进行故障类型识别还需进一步实验研究。

03

跨点频响信号中的主要参数是频率、幅值和阻尼特性，人们在不同领域对频率和幅值给予了较多的关注，然而阻尼参数恰与构件残余应力和疲劳损伤关系密切，潜在的应用前景正在展现。

THANKS!

欢迎批评指正!