



南京航空航天大学

民航学院2021级博士毕业答辩



航空发动机叶片裂纹-机匣碰摩复合故障 整机振动分析与诊断

答辩人：沈响响

专 业：交通运输工程

导 师：陈 果 教授

目录

01

绪论

02

含叶片裂纹-碰摩复合故障整机建模方法

03

含复合故障的试验器整机动力学模型及验证

04

含复合故障的整机振动特性仿真与试验验证

05

裂纹-碰摩复合故障特征提取及诊断

06

总结与展望

第一章



绪论

▶ 背景与意义

▶ 研究现状

01 第一章——课题来源

➤ 地面燃机关键机械部件故障机理及诊断方法研究项目

项目来源：中国航空发动机集团产学研项目（HFZL2022CXY021）

➤ 燃机智能运维典型结构损伤模拟试验与故障监测技术

项目来源：中国航发燃气轮机有限公司项目

➤ 多截面转静件间隙测试对比验证试验项目

项目来源：国防科工局中国航发自主创新专项（ZZCX-2018-013）

➤ 校准试验器项目

项目来源：中国航发沈阳航空发动机研究所

➤ 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

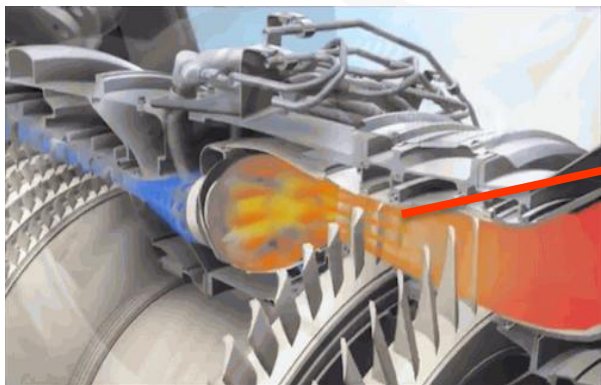
项目来源：国家自然科学基金面上项目（52272436）

➤ 机匣-多级叶盘转静结构试验系统

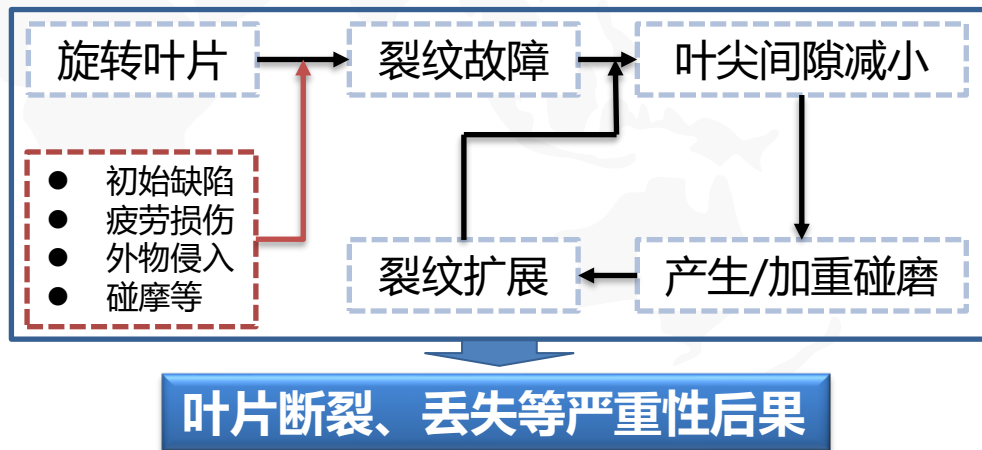
项目来源：太行国家实验室项目

01 第一章——背景及意义

- 在现代航空发动机结构设计中，叶片叶尖与机匣内壁之间的间隙是决定发动机效率和运行安全的关键因素，叶尖相对间隙每增加1%，压气机或涡轮机效率将降低0.8%~1.2%，耗油率增加约2%。
- 过小的叶尖间隙易诱发叶片-机匣碰摩，导致叶片裂纹萌生；裂纹扩展进一步缩减间隙，加剧持续性碰摩，而碰摩冲击又会加速裂纹扩展，二者形成“碰摩-裂纹”正反馈损伤链式反应。

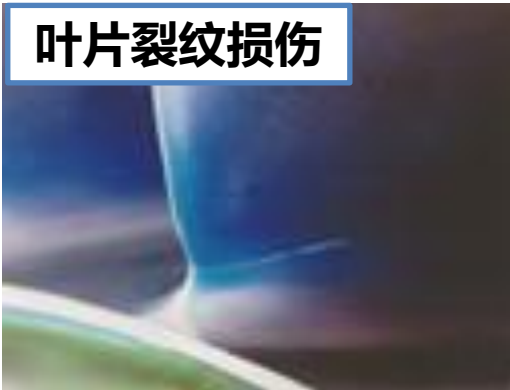


叶片-机匣间隙

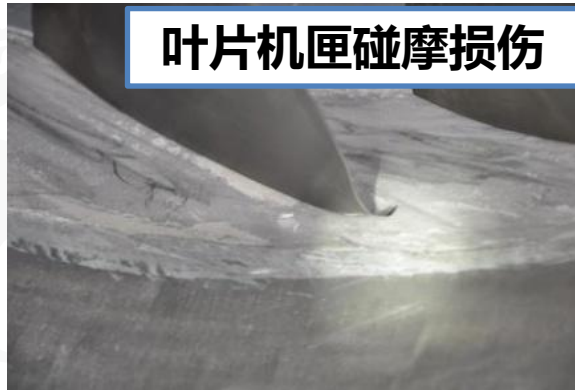


01 第一章——研究背景及意义

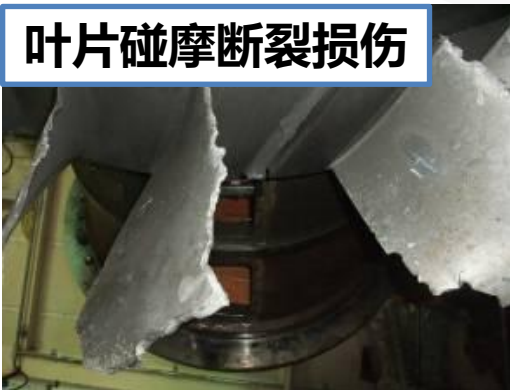
叶片裂纹损伤



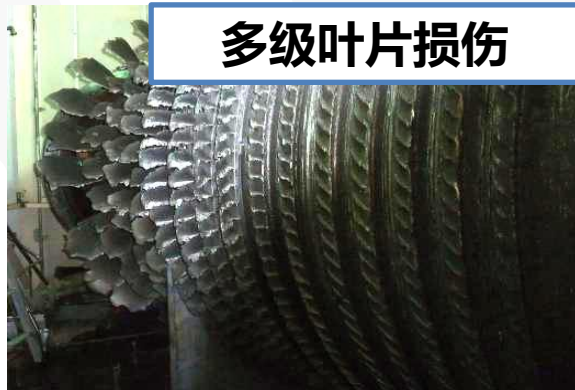
叶片机匣碰摩损伤



叶片碰摩断裂损伤

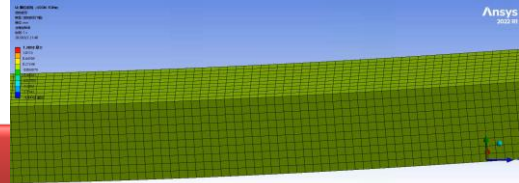


多级叶片损伤



值得注意的是，某型地面燃气涡轮发动机运行数据表明，其一级转子叶片从裂纹萌生至断裂存在逾百小时的演化窗口期，这为基于动力学特征的早期故障预警提供了可行性时间域。

深入研究叶片裂纹-碰摩耦合故障动力学机理，建立耦合动力学模型，提取故障特征，为耦合故障监测和诊断提供机理支撑。



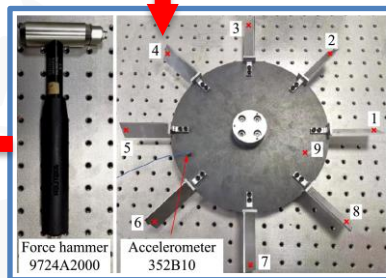
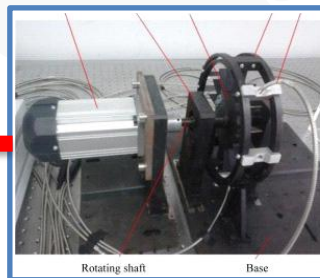
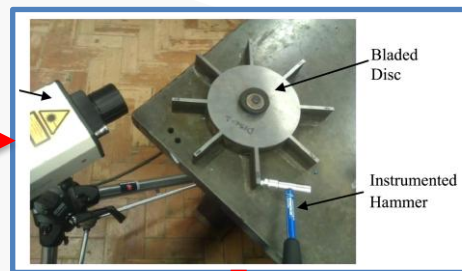
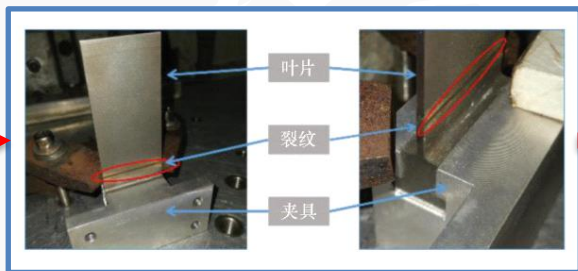
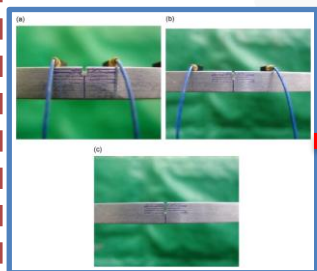
叶片裂纹动力学建模

模型类型	模型名称	核心原理	优点	缺点	文献
常开裂纹	局部柔度模型	将裂纹等效为一个无质量的集中旋转弹簧，引入附加柔度；通过修改刚度矩阵反映局部刚度损失	模型简洁，计算效率高；	仅适用于小裂纹；忽略裂纹几何细节；	[11] [12]
	应变能释放率模型	将裂纹引起的刚度弱化与模态应变能释放量关联，通过应力强度因子建立刚度修正公式	可建立裂纹参数与刚度损失的显式物理关系；适用于变截面结构	仅适用于规则贯穿裂纹；	[13]
	有限元模型	在裂纹区域精细离散几何，直接在网格中“切割”出裂纹模拟刚度损失	几何适应性强，可模拟任意裂纹形状；支持三维建模与应力场分析	计算成本高；不适合参数化研究或在线监测	[14]
呼吸裂纹	双线性刚度模型	有“全开”和“全闭”两种状态，刚度在两者间阶跃切换，由弯矩或位移符号触发	模型简单，计算成本低；	忽略开闭中间过渡过程；无法描述部分张开	[16]-[19]
	谐波函数模型	用余弦/正弦等光滑周期函数连续描述裂纹开度，替代阶跃切换	开闭过程光滑，避免数值不稳定性；	形式多为经验假设；缺乏真实应力场驱动机制；	[21]-[24]
	有限元接触模型	在裂纹面定义接触对，通过接触算法自动判断开闭状态	支持任意裂纹几何；显式模拟接触力与局部变形	计算成本极高；难用于反演识别或实时监测	[25]-[30]
	裂纹有限元模型	构建含裂纹的专用单元，通过呼吸函数或应力判据实现开闭，无需显式接触对	计算效率远高于有限元接触模型；	单元开发复杂，需自编程；呼吸判据简化	[31]-[33]
	基于应力的呼吸裂纹模型	依据裂纹截面合成应力符号判断开闭，结合局部柔度模型修正刚度	物理机制清晰，符合旋转叶片实际受力；支持可解释的损伤指标设计	主要聚焦横向弯曲振动；忽略三维局部变形；	[34]-[36]

叶片裂纹故障诊断指标

特征类型	研究对象	优点	缺点	文献
基于叶片固有属性	开裂纹 非旋转叶片	模型简单，计算效率高；适用于实验室级裂纹定性识别；	对微小裂纹不敏感；无法反映裂纹开闭动态行为；	[46]-[49]
	开裂纹 旋转叶片	考虑旋转效应；可用于整圈叶盘耦合分析；小波变换可实现裂纹定位；	忽略呼吸效应；频率变化在微裂纹阶段仍微弱；试验需在升/降速中捕捉共振，操作复杂；	[50]-[52]
	呼吸裂纹 非旋转叶片	引入呼吸模型；可观察到频率轻微下降；	未充分利用非线性特征；诊断仍依赖频率，灵敏度有限；	[53]-[54]
	呼吸裂纹 旋转叶片	结合旋转与呼吸效应；引入“变分因子”等新指标提升判据有效性；	频率/幅值变化仍为间接指标；对早期微裂纹检测能力不足；	[55]-[66]
基于非线性振动响应的	呼吸裂纹 非旋转叶片	对微小裂纹高度敏感（超/次谐波、阻尼、功率流等）；能反映裂纹开闭物理机制；多种信号处理手段（Hilbert、EMD、双谱等）可提取深层特征；部分方法支持裂纹定位；	信号易受噪声干扰；需精确激励控制；多数为实验室验证，工程适用性待验证；定量反演模型尚未成熟；	[68]-[79]
	呼吸裂纹 旋转叶片	融合旋转动力学与非线性效应；BTT结合信号处理可从欠采样数据挖掘非线性特征；	模型复杂，计算成本高；需复杂重构算法；多数方法依赖升/降速过程获取共振信息；	[80]-[90]
基于三维叶尖间隙	呼吸/开裂纹 旋转叶片	非接触测量，不影响叶片结构；反映三维空间形变信息维度高；对尾缘裂纹导致的局部刚度退化敏感；与现有叶尖间隙监测系统兼容；	测量精度要求极高；目前仅限有限元仿真验证，缺乏真实燃机试验支撑；难以区分裂纹与其他形变源（如热变形、积垢）；	[91][92]

叶片裂纹故障模拟试验器



简单结构

复杂结构

高保真但低可控/低可测

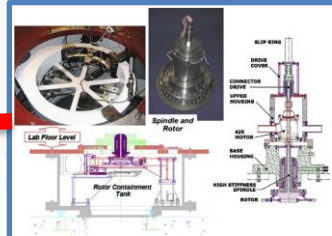
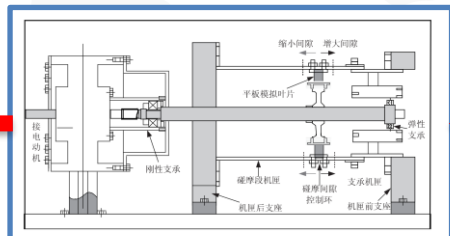
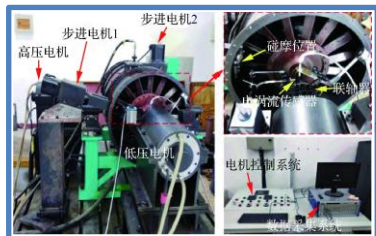
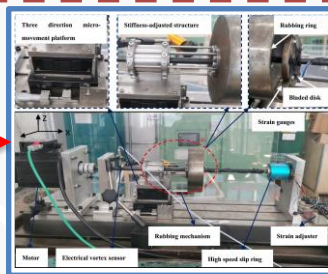
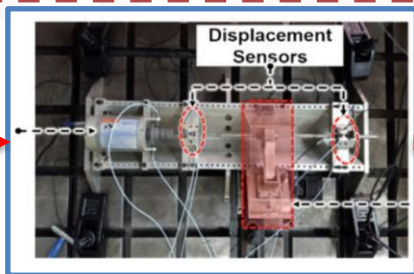
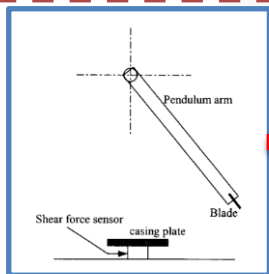
碰摩动力学建模

模型类型	具体类型	核心原理	优点	缺点	文献
不考虑 叶片形变	单点碰摩模型	碰摩视为瞬时、无持续接触的碰撞事件，碰摩力短时脉冲形式施加	自由度少，可解析或半解析求解；对微弱初始接触敏感	忽略摩擦、粘滑、持续接触等真实接触机制；实际碰摩多为有限时间接触，非理想脉冲	[94]
	局部碰摩模型	用线性或非线性弹簧-阻尼单元模拟局部接触区的法向恢复力与能量耗散，常结合库仑摩擦	计算效率高，适合系统级仿真；适用于多工况覆盖分；考虑了持续接触情况	接触区域理想化，缺乏物理真实性；假设接触发生在“点”或“固定弧段”，无法描述接触位置随涡动轨迹动态迁移	[95][96]
	全周碰摩模型	假设转子与定子全程接触，通过几何间隙约束强制同步运动，部分模型引入摩擦生热导致的热变形	能模拟高转速稳态碰摩：如多边形涡动、同步全周摩擦	强假设限制适用性：“全程接触”仅在特定转速区间成立	[97][98]
考虑 叶片形变	准静态能量法模型	基于最小势能原理，在给定接触位移下求解静态平衡构型，碰摩力由应变能导出	算成本低：无需时间积分，适合参数扫描；物理框架严谨：能量守恒自然满足	忽略惯性项，无法捕捉动态放大效应；不适用于瞬态过程：如起飞/停车中的加速度诱发剐蹭	[101]- [103]
	动态接触动力学模型	采用有限元离散叶片与机匣，通过罚函数法或拉格朗日乘子法处理接触，用显式积分求解瞬态响应	高保真度：可精确模拟复杂几何、材料非线性、涂层失效、局部塑性等；可捕捉局部瞬态振动形变	计算极其昂贵；数值敏感性高：罚函数法对罚因子敏感，拉格朗日乘子法导致鞍点问题难收敛	[104]- [106]

碰摩故障诊断指标

特征类别	具体响应特征	文献
时域特征	周期性冲击脉冲 (周期=1/转频)	[108] [110]
	波形上下不对称	[107]
	叶片碰摩后自由衰减振动 (以叶片低阶固有频率)	[112]
	高转速下振动与碰摩力不同步 (非线性滞后)	[115]
频域特征	多次碰摩后趋于极限环振荡	[114] [126]
	叶片通过频率在高频段显著突出	[108] [110] [118]
	叶片通过频率的高阶倍频随侵入深度增大而增强	[113] [118]
	低频段 $2\times$ 、 $3\times$ 转频分量显著增强 ($2\times > 1\times$)	[110] [116]
	高转速区奇数次谐波 ($3\times, 5\times \dots$) 突出	[118]
	双转子系统中出现高低压转频组合频率	[111]
时频特征与 变换域特征	超谐波、次谐波及模态组合频率	[121]
	倒频谱中出现 $1/fr, 2/fr$ 等频率成分 (fr 为转速频率)	[108] [110]
	自相关处理后周期性显著增强	[107]
局部结构 响应特征	叶盘行波振动及节径模态共振锁定	[120]
	碰摩瞬时叶尖应力最高, 应力波沿叶高向叶根传播	[112]
	榫头根部显著应力集中, 易诱发微动疲劳	[117]
	后倾/后掠叶片比前倾/前掠更稳定	[122] [123]
	封严涂层降低碰摩力与加速度幅值, 但对高频抑制有限	[113]

叶片机匣碰摩故障模拟试验器



简单结构

复杂结构

高保真但低可控/低可测

航空发动机整机动力学建模

方法	基本原理	优点	缺点	适用场景	文献
传递矩阵法	将转子系统离散为若干轴段单元, 通过状态向量递推建立整体动力方程; 适用于链式结构	编程相对简单; 计算规模小、速度快; 对硬件要求低; 特别适合长轴类转子系统; 易于处理多跨、多盘结构	难以准确考虑支承周围结构(如机匣、安装节)的柔性影响; 处理非链式结构困难; 高速旋转下易出现数值不稳定; 难以集成非线性接触/间隙等局部效应	初步设计阶段临界转速估算; 线性多转子系统稳态响应分析; 参数化研究与快速迭代	[135]- [145]
模态综合法	将系统划分为若干子结构, 分别进行模态缩减(保留低阶模态), 再通过界面协调条件集成为降阶整体模型	在保持较高精度的同时显著降低自由度; 可灵活组合不同建模方式; 适用于大型复杂系统(如含机匣、附件); 支持子结构并行建模与重用	子结构界面处理不当会引入显著误差; 模态截断可能丢失重要高频信息; 编程与接口实现复杂; 固定/自由界面选择影响精度与效率; 对强非线性系统适用性有限	含复杂静子结构的整机系统(如带机匣、附件); 需结合试验模态数据的混合建模; 大型系统降阶与子结构复用	[146]- [150]
有限元法	将连续体离散为有限个单元, 直接建立大规模质量-阻尼-刚度矩阵系统	何适应性强, 可精确模拟复杂结构(如锥形轴、法兰、叶片、机匣); 支持非线性、接触、热-力耦合等多物理场分析; 商用软件成熟(ANSYS、NASTRAN等); 可直接用于整机振动、碰摩、鸟撞等故障仿真	模型自由度高, 计算资源消耗大; 整机实体模型常因局部细节(小孔、圆角)导致模态混杂, 难以提取关心的全局振型; 直接求解非线性瞬态响应耗时; 对动刚度、轴承非线性等需额外建模	高保真整机动力学分析; 转-静子耦合振动、碰摩、不对中等非线性故障仿真; 临界转速精细计算、瞬态响应、鸟撞等显式动力学问题	[151]- [171]

问题一及解决方法

➤ 缺少叶片裂纹-机匣碰摩复合故障机理模型

- 现有研究局限于单一故障分析；
- 叶片裂纹与机匣碰摩复合故障动力学模型极少；
- 两种故障之间的耦合效应及相互作用机制不清；



叶片裂纹-
机匣碰摩
复合故障
动力学模型

问题二及解决方法

➤ 缺少含复合故障的航空发动机整机动力学模型

- 现有研究多基于简化模型，忽略了转子、机匣、支承系统的非线性及耦合效应等关键物理机制；
- 难以复现裂纹碰摩复合故障下的整机振动响应；



含复合故障
整机动力学
模型

问题三及解决方法

➤ 缺少可复现叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机级试验器

- 现有试验平台简化，缺失机匣、轴承支承及叶片盘轴连接等一个或几个关键特征；缺少整机级协同试验；
- 多局限于单一故障模拟，缺乏复合故障耦合研究；

含复合故障
保真可控
整机模拟
试验器

问题三及解决方法

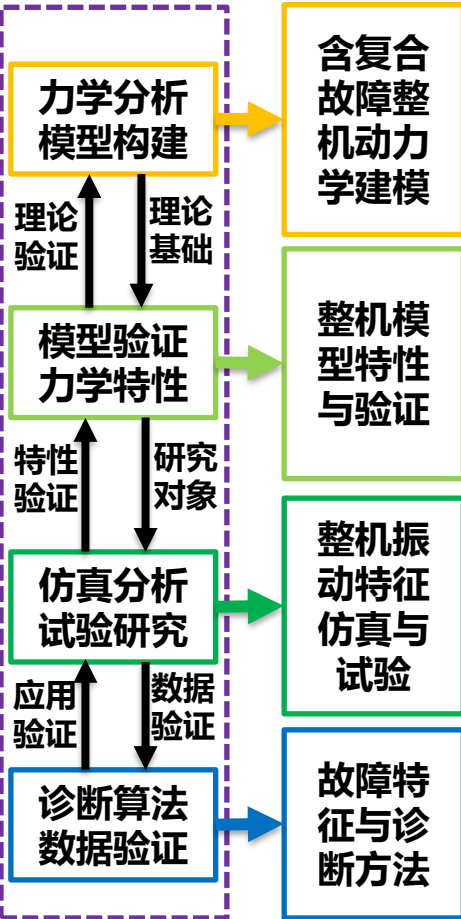
➤ 缺少非侵入式的叶片裂纹-机匣碰摩复合故障诊断方法

- 现有诊断技术脱离整机动力学背景，忽视故障传播与耦合机制；
- 多依赖侵入式测试（如贴片、开孔），需破坏结构完整性，实施难、成本高及安全隐患；

基于机匣振
动信号的
复合故障
诊断方法

01 第一章——论文内容及结构

航空
发动机
叶片
裂纹
机匣
碰摩
复合
故障
整机
振动
分析
与
诊断

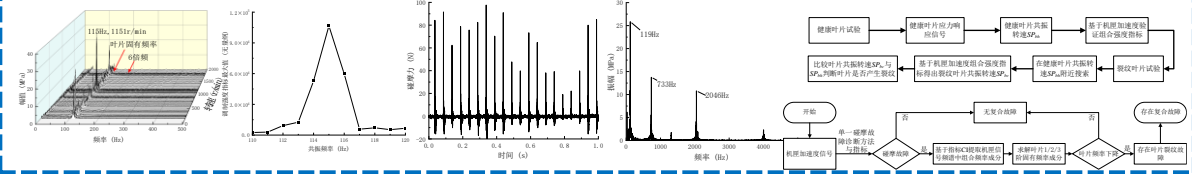
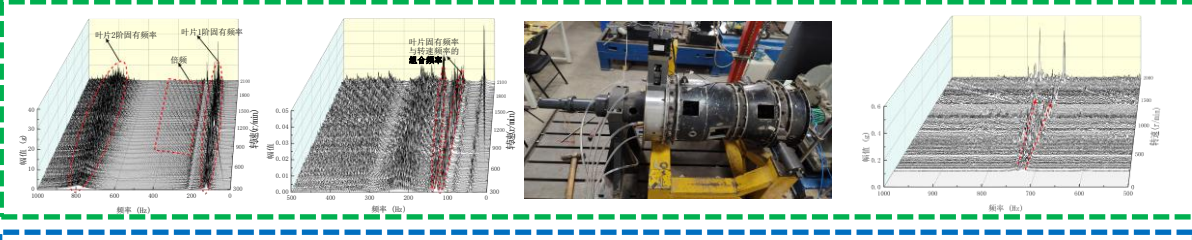
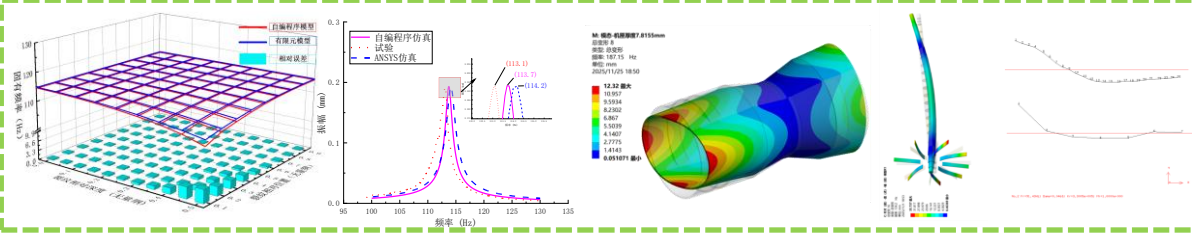
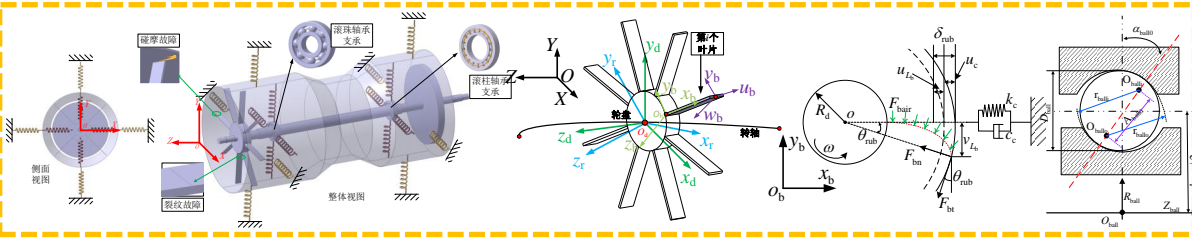


含复合故障整机动力学建模

整机模型特性与验证

整机振动特征仿真与试验

故障特征与诊断方法



第二章



含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的 整机动力学建模

▶ 裂纹故障建模

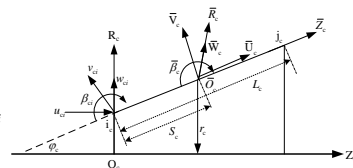
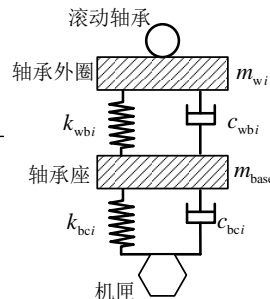
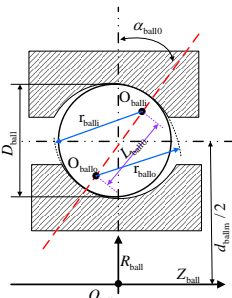
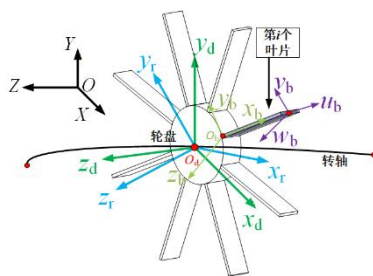
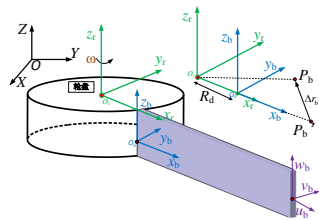
▶ 碰摩故障建模

▶ 整机动力学建模

02 第二章——含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机动力学建模

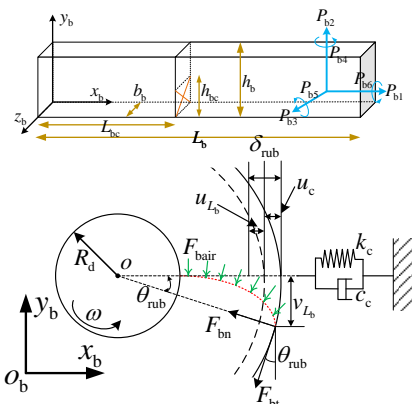
含叶片裂纹机匣碰摩复合故障的整机动力学建模

部件动力学建模



模型载体

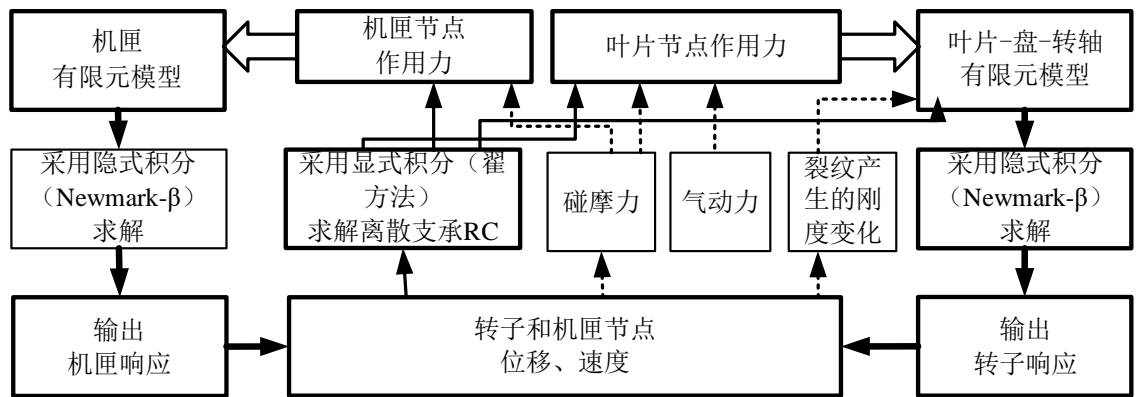
复合故障动力学建模



故障模型

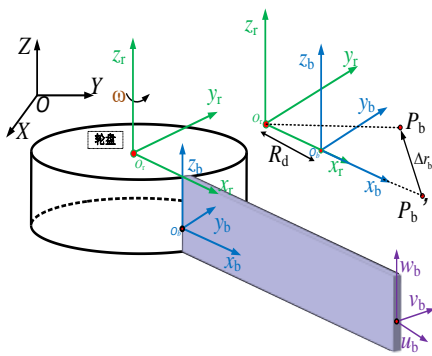
模型对象

整机数值仿真



单叶片动力学建模

模型简化/运动分析



受力分析与能量法推导

$$T_b = \frac{1}{2} \int \dot{\mathbf{r}}_{bP}^2 dm = \frac{1}{2} \int \dot{\mathbf{r}}_{bP}^T \cdot \dot{\mathbf{r}}_{bP} dm = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} \rho_b \iint_{A_b} \dot{\mathbf{r}}_{bP}^T \dot{\mathbf{r}}_{bP} dA dx$$

$$V_b = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} E_b I_b \left(\frac{\partial \varphi_b}{\partial x_b} \right)^2 dx_b + \frac{1}{2} \int_0^{L_b} E_b A_b \left(\frac{\partial u_b}{\partial x_b} \right)^2 dx_b$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^{L_b} \kappa_b A_b G_b \left(\frac{\partial v_b}{\partial x_b} - \varphi_b \right)^2 dx_b + \frac{1}{2} \int_0^{L_b} f_{bc}(x_b) \left(\frac{\partial v_b}{\partial x_b} \right)^2 dx_b$$

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T_b - V_b + W_{bnon}) dt = 0$$

独立变分/正则化坐标

$$u_b(x, t) = \sum_{i=1}^{N_{bmod}} \phi_{bi}(x) U_{bi}(t) \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi_{b1i}(x) = \frac{\sin(\alpha_i x)}{\alpha_i} \\ \phi_{b2i}(x) = \cosh(\lambda_i x) - \cos(\lambda_i x) \\ \quad + \xi_\lambda [\sinh(\lambda_i x) - \sin(\lambda_i x)] \end{array} \right.$$

$$v_b(x, t) = \sum_{i=1}^{N_{bmod}} \phi_{b2i}(x) V_{bi}(t)$$

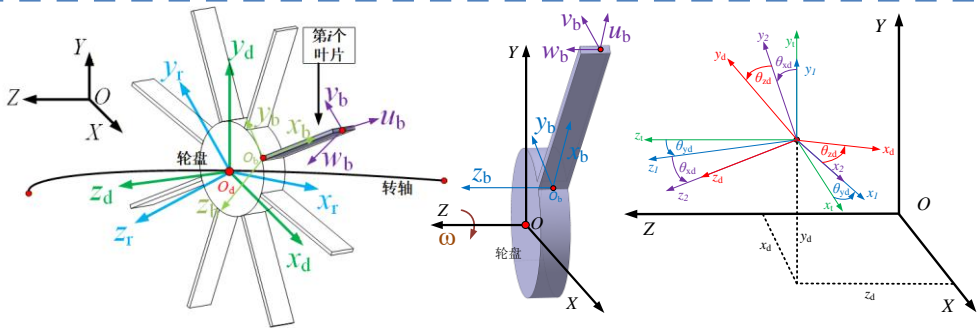
$$\varphi_b(x, t) = \sum_{i=1}^{N_{bmod}} \phi_{b3i}(x) \psi_{bi}(t) \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi_{b3i}(x) = \frac{\phi'_{b2i}(x)}{i\pi} \end{array} \right.$$

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{q}}_b + (\mathbf{G}_b + \mathbf{C}_b) \dot{\mathbf{q}}_b + (\mathbf{K}_{be} + \mathbf{K}_{bc} + \mathbf{K}_{bs} + \mathbf{K}_{bacc} + \mathbf{K}_{bF}) \mathbf{q}_b = \mathbf{F}_b$$

单叶片动力学方程

多叶片-盘-轴耦合动力学建模

模型简化及运动分析



多叶片-盘-轴能量法计算

$$T_{Tb} = \sum_{i=1}^{N_b} T_{ib} \quad V_{Tb} = \sum_{i=1}^{N_b} V_{ib} \quad T_s = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_s^T \mathbf{M}_s \dot{\mathbf{q}}_s \quad V_s = \frac{1}{2} \mathbf{q}_s^T \mathbf{K}_s \mathbf{q}_s$$

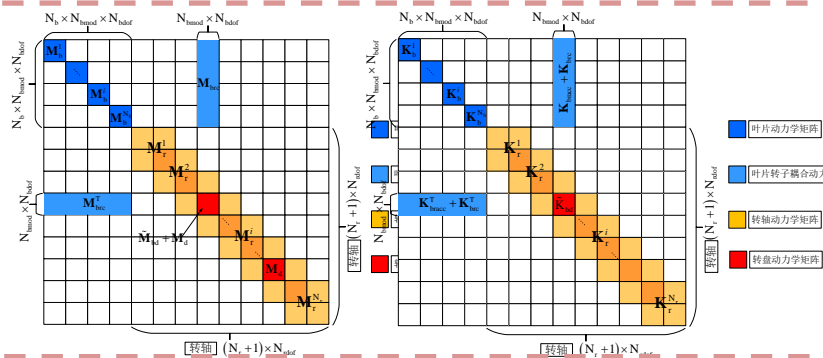
$$T_d = \frac{1}{2} J_p (\dot{\theta} + \dot{\theta}_{dz})^2 + \frac{1}{2} m_d (\dot{X}_c^2 + \dot{Y}_c^2 + \dot{Z}_c^2) - J_p (\dot{\theta} + \dot{\theta}_{dz}) \dot{\theta}_{dy} \theta_{dx} + \frac{1}{2} J_d (\dot{\theta}_{dx}^2 + \dot{\theta}_{dy}^2)$$

$$T_{total} = T_{Tb} + T_d + T_s \quad V_{total} = V_{Tb} + V_d + V_s$$

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T_{total} - V_{total}) dt = 0$$

多叶片-盘-轴耦合动力学方程

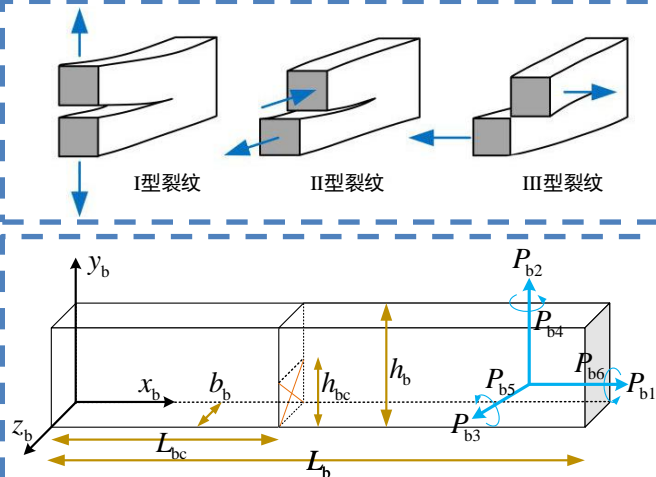
$$\mathbf{M}_{rs} \ddot{\mathbf{q}}_{rs} + (\mathbf{C}_{rs} + \mathbf{G}_{rs}) \dot{\mathbf{q}}_{rs} + \mathbf{K}_{rs} \mathbf{q}_{rs} = \mathbf{F}_{rs0}$$



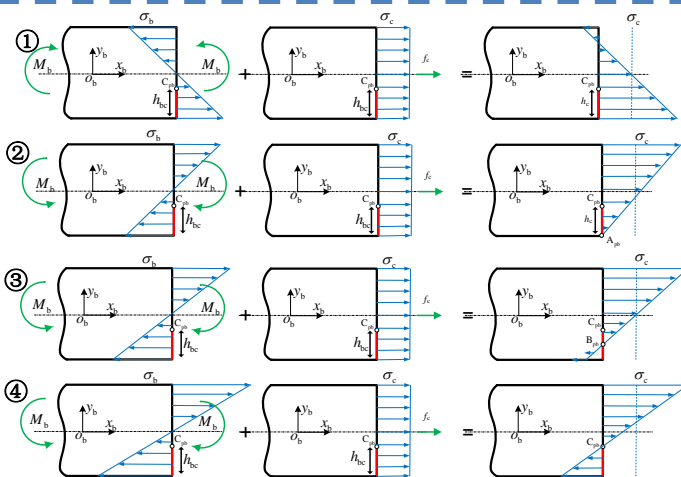
质量
刚度
阻尼
矩阵

叶片呼吸裂纹故障动力学建模

模型简化及机理分析



受力分析及裂纹闭合状态推导



能量法计算

$$\begin{aligned}
 U_{\text{crack}} &= 3(1-\mu_b^2)E_b I_b h_b \left(\frac{\partial^2 v_b}{\partial x_b^2} \right)^2 \Big|_{x=L_{bc}} Q_{22} \\
 &+ (1-\mu_b^2)E_b A_b h_b \left(\frac{\partial u_b}{\partial x_b} \right)^2 \Big|_{x=L_{bc}} Q_{11} \\
 &+ 12(1-\mu_b^2)E_b I_b \left(\frac{\partial u_b}{\partial x_b} \frac{\partial^2 v_b}{\partial x_b^2} \right) \Big|_{x=L_{bc}} Q_{12} \\
 &= \int_0^{L_b} 3(1-\mu_b^2)E_b I_b h_b \left(\frac{\partial^2 v_b}{\partial x_b^2} \right)^2 Q_{22} \delta(x_b - L_{bc}) dx_b \\
 &+ \int_0^{L_b} (1-\mu_b^2)E_b A_b h_b \left(\frac{\partial u_b}{\partial x_b} \right)^2 Q_{11} \delta(x_b - L_{bc}) dx_b \\
 &+ \int_0^{L_b} 12(1-\mu_b^2)E_b I_b \left(\frac{\partial u_b}{\partial x_b} \frac{\partial^2 v_b}{\partial x_b^2} \right) Q_{12} \delta(x_b - L_{bc}) dx_b
 \end{aligned}$$

$\tilde{\mathbf{K}}_{\text{bcarck}}$

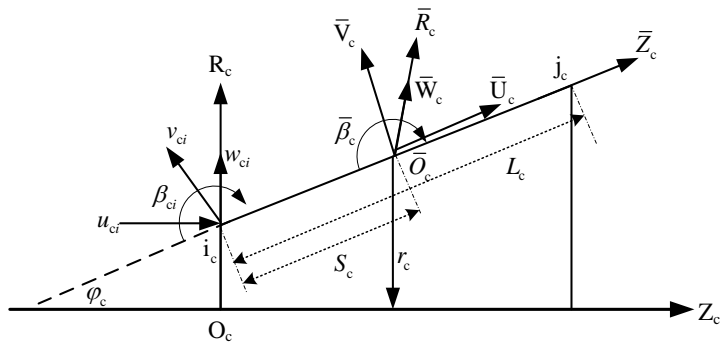
时变裂纹刚度矩阵

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{q}}_b + (\mathbf{G}_b + \mathbf{D}_b) \dot{\mathbf{q}}_b + (\mathbf{K}_{be} + \mathbf{K}_{bc} + \mathbf{K}_{bs} + \mathbf{K}_{bacc} + \mathbf{K}_{bF} + \tilde{\mathbf{K}}_{\text{bcarck}}) \mathbf{q}_b = \mathbf{F}_b$$

含裂纹故障叶片动力学方程

基于截锥壳单元的机匣动力学建模

截锥壳模型单元



质量及刚度矩阵推导

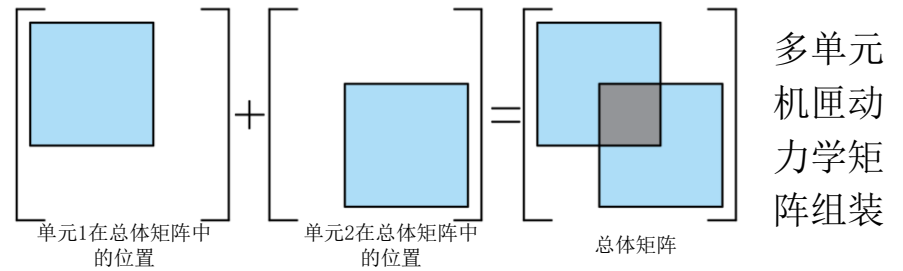
$$\begin{cases}
 \bar{u}_{ci} = \sum_{n=0}^{m_c} \bar{u}_{cin}(s) \cos n\theta & \text{轴向} \\
 \bar{v}_{ci} = \sum_{n=0}^{m_c} \bar{v}_{cin}(s) \sin n\theta & \text{切向} \\
 \bar{w}_{ci} = \sum_{n=0}^{m_c} \bar{w}_{cin}(s) \cos n\theta & \text{径向} \\
 \bar{\beta}_{ci} = \sum_{n=0}^{m_c} \bar{\beta}_{cin}(s) \cos n\theta & \text{转角}
 \end{cases}
 \quad ; \quad
 \mathbf{N}_{ci} = \begin{bmatrix} 1-\xi_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-\xi_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-3\xi_c^2+2\xi_c^3 & L_c(\xi_c-3\xi_c^2+\xi_c^3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N}_{cj} = \begin{bmatrix} \xi_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \xi_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\xi_c^2-2\xi_c^3 & L_c(-\xi_c^2+\xi_c^3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

机匣单元质量/刚度矩阵

$$\mathbf{M}_{cn}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{cii}^{(n)} & \mathbf{M}_{cij}^{(n)} \\ \mathbf{M}_{cji}^{(n)} & \mathbf{M}_{cjj}^{(n)} \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}_{cn}^e = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{in}^T \mathbf{D}_c \mathbf{B}_{in} & \mathbf{B}_{in}^T \mathbf{D}_c \mathbf{B}_{jn} \\ \mathbf{B}_{jn}^T \mathbf{D}_c \mathbf{B}_{in} & \mathbf{B}_{jn}^T \mathbf{D}_c \mathbf{B}_{jn} \end{bmatrix} d\theta d\xi_c$$

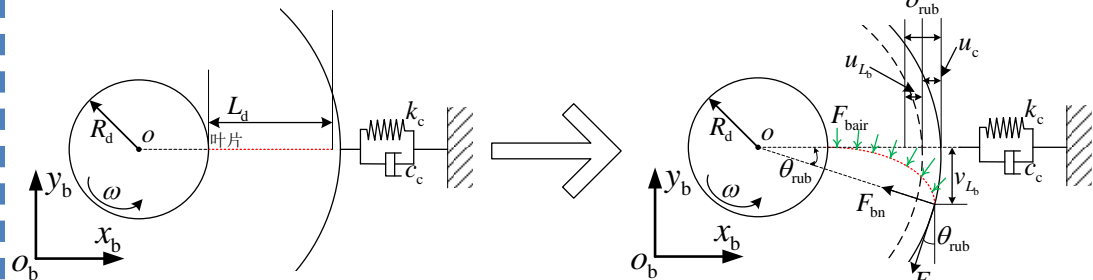
$$\mathbf{M}_{cn} \ddot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{C}_c \dot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{K}_{cn} \mathbf{q}_c = \mathbf{F}_{co}$$



多单元
机匣动
力学矩
阵组装

考虑气流激励下含裂纹叶片-机匣碰摩故障动力学建模

模型简化及接触机理分析



气流激励下裂纹叶片碰摩力推导

$$V_{bc} = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} \frac{1}{2} \rho_b A_b \omega^2 (L_b^2 + 2R_d L_b - 2R_d x - x^2) \left(\frac{\partial^2 v_b}{\partial x^2} \right)^2 dx$$

$$W_{bo} = \frac{1}{2} F_{bt} \cos \theta_{rub} v_{L_b} - \frac{1}{2} F_{bn} \sin \theta_{rub} v_{L_b} + \frac{1}{2} F_{bair} \int_0^{L_b} v_b(x) dx$$

$$V_{be} = \frac{1}{2} \int_0^{L_b} E_b I_b \left(\frac{\partial^2 v_b}{\partial x^2} \right)^2 dx$$

$$V_{bc} + V_{bc} = W_{bo}$$

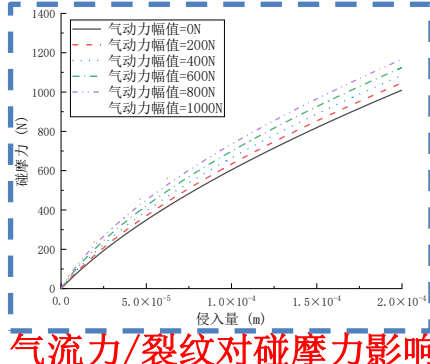
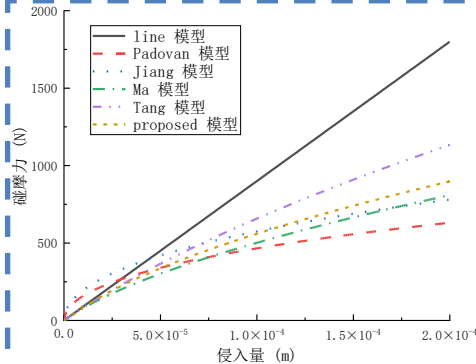
$$\delta_{rub} = \frac{3D_b^2 \left(\mu_f F_{bn} - \frac{3F_{bair} L_b}{8} \right)^2}{5L_b (\Gamma D_b + F_{bn} c_{st}^2)^2} + \frac{F_{bn}}{k_c}$$

$$10\delta_{rub} \Gamma c_{st}^2 - \frac{5\Gamma^2 D_b}{k_c} + \frac{9F_{bair} D_b \mu_f}{4}$$

碰摩力
表达式

$$F_{bn} = -D_b L_b \sqrt{\frac{\left(45\mu_f F_{bair} - \frac{100\Gamma^2}{k_c} \right) \Gamma D_b c_{st} \delta_{rub} + D_b^2 \left(\frac{9F_{bair} \mu_f}{4} - \frac{5\Gamma^2}{k_c} \right)^2 + \left(\frac{135F_{bair}^2 L_b c_{st}^2}{16} + \frac{60D_b^2 \mu_f^2 \Gamma^2}{L_b} \right) \delta_{rub}}{10L_b \delta_{rub} c_{st}^4 - 6D_b^2 \mu_f^2}}$$

不同碰
摩力模
型对比

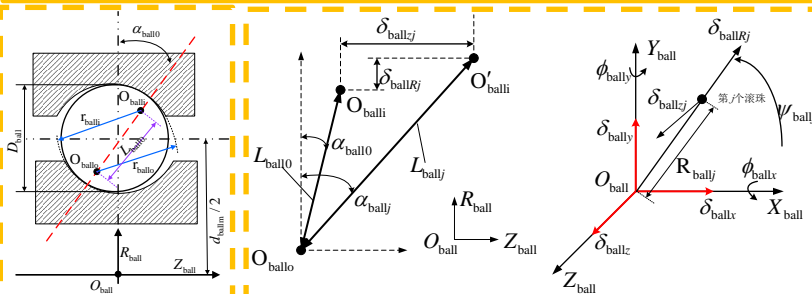


气流力/裂纹对碰摩力影响

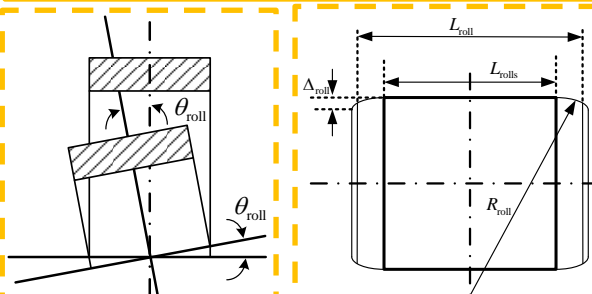
离散支承动力学建模

非线性5自由度滚动轴承模型-转子与机匣部件连接

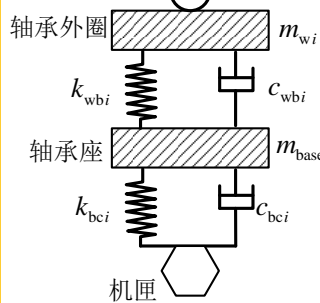
滚珠轴承模型



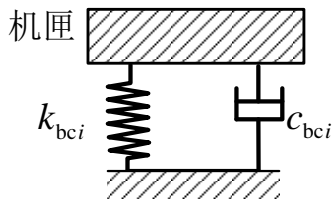
滚柱轴承模型



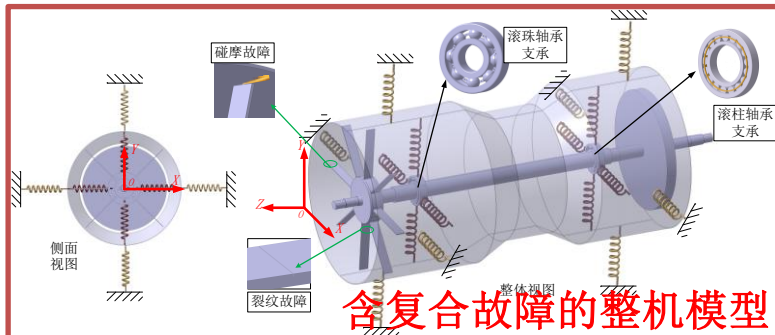
滚动轴承



线性 支承- 机匣 基础 连接



$$\begin{aligned}
 F_{cxi} &= -k_{cx}x_{ci} - c_{cx}\dot{x}_{ci}; \\
 F_{czi} &= -k_{cz}z_{ci} - c_{cz}\dot{z}_{ci}; \\
 F_{cyi} &= -k_{cy}y_{ci} - c_{cy}\dot{y}_{ci}; \\
 M_{cxi} &= -k_{cax}\theta_{cxi} - c_{cax}\dot{\theta}_{cxi}; \\
 M_{cyi} &= -k_{cay}\theta_{cyi} - c_{cay}\dot{\theta}_{cyi}; \\
 M_{czi} &= -k_{caz}\theta_{czi} - c_{caz}\dot{\theta}_{czi};
 \end{aligned}$$

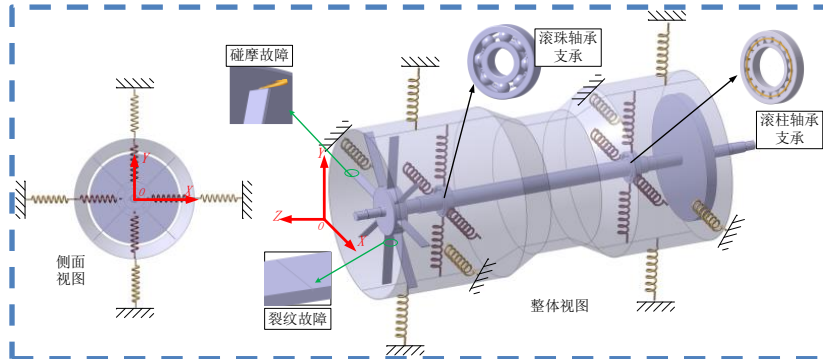


含复合故障的整机模型

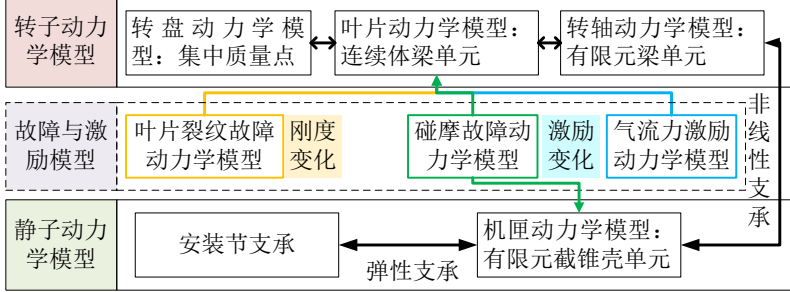
02 第二章——含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机动力学建模

显隐式结合的整机振动数值仿真方法

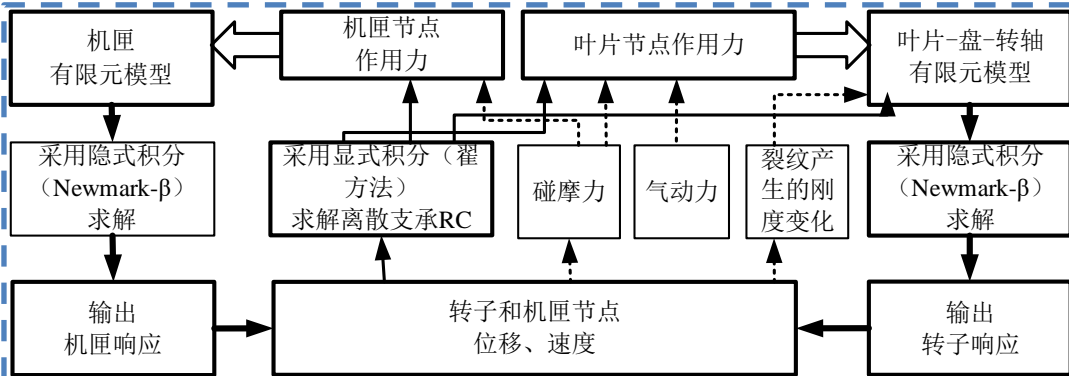
含复合故障的整机模型



含叶片裂纹机匣碰摩耦合故障航空发动机整机动力学模型逻辑图



整机振动数值仿真方法



本章小结

原理级

裂纹-碰摩复合故障模型

- 建立气流激励下含裂纹叶片与弹性机匣的碰摩耦合故障动力学模型；
- 时变裂纹基于叶片受力状态进行动态判断
- 叶片碰摩基于叶片-机匣间隙动态变化进行动态判断；

子系统级

多体耦合动力学模型

- 采用多类型单元混合动力学建模，构建“叶片-盘-轴-机匣”多体耦合模型；
- 针对航空发动机薄壁机匣，选用截锥壳单元法平衡计算效率与精度；

系统级

整机动力学模型

- 融合多源强非线性因素，基于显隐式结合的数值积分方法；
- 构建“多类型单元混合-显隐式结合”航空发动机整机仿真模型，兼顾模型计算速度与仿真精度

第三章



含叶片裂纹-机匣碰摩复故障的 整机模型动力学特性仿真及验证

▶ 单部件仿真

▶ 整机仿真

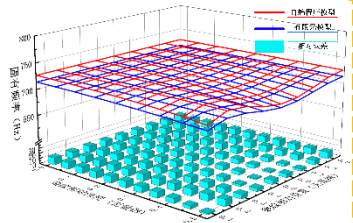
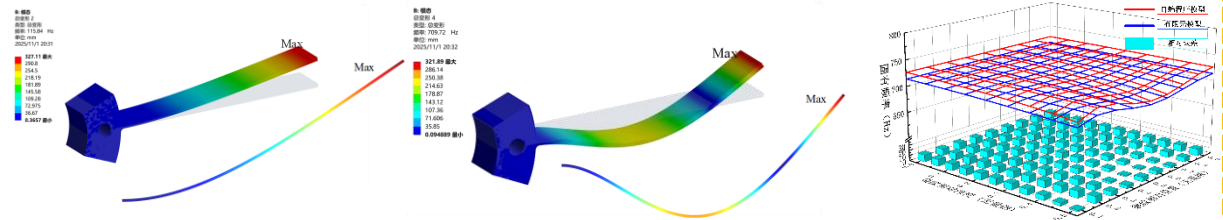
▶ 模态验证

03 第三章——含裂纹-碰摩复故障的整机模型动力学特性仿真及验证

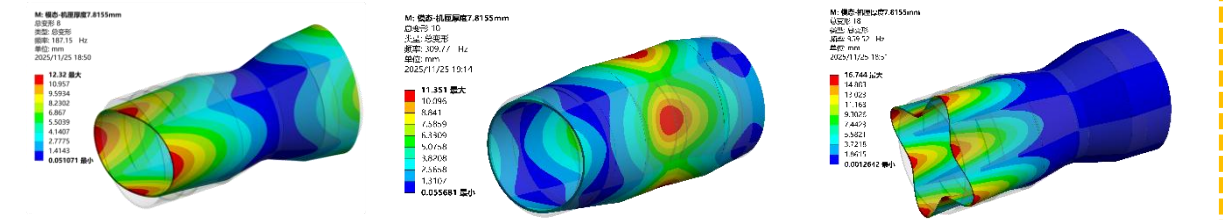
含叶片裂纹-碰摩复故障的整机模型动力学特性仿真及验证

部件级

含裂纹叶片动力学模型

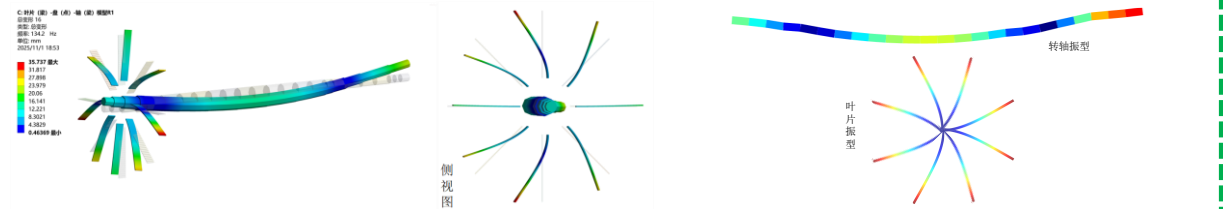


机匣动力学模型



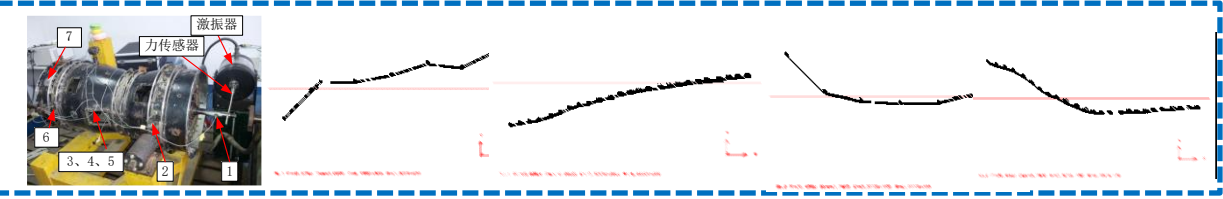
子系统级

叶片-盘-轴动力学模型



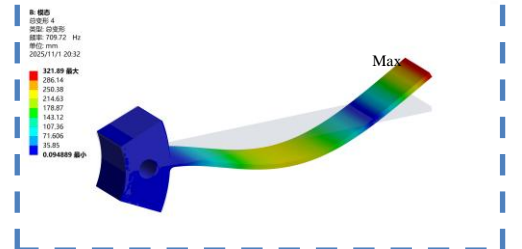
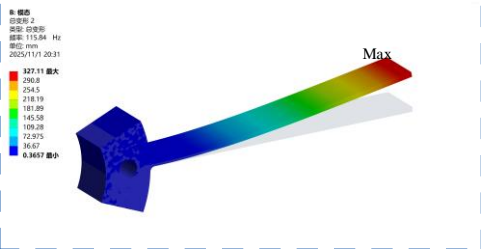
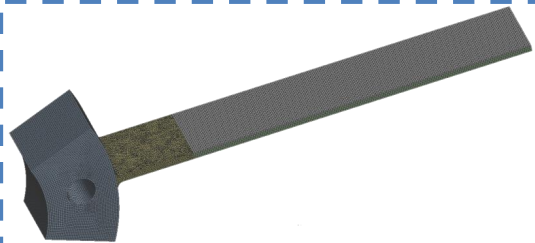
系统级

整机动力学模型

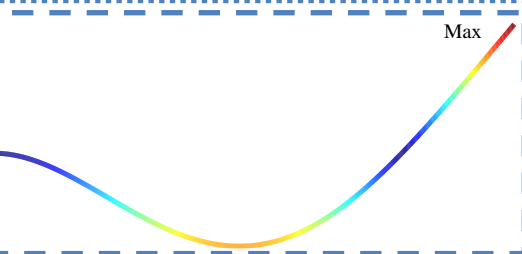
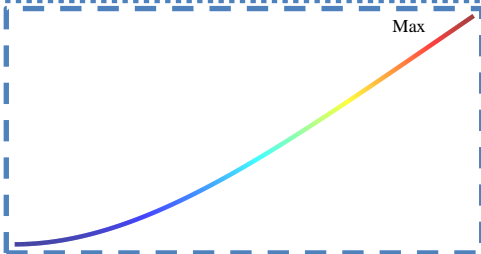
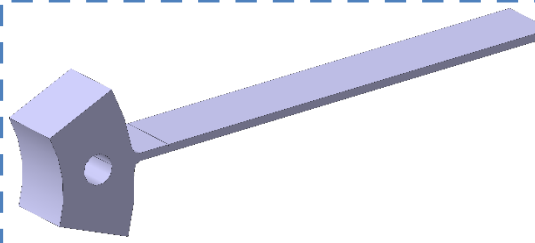


叶片动力学特性仿真与对比验证

实体有限元模型



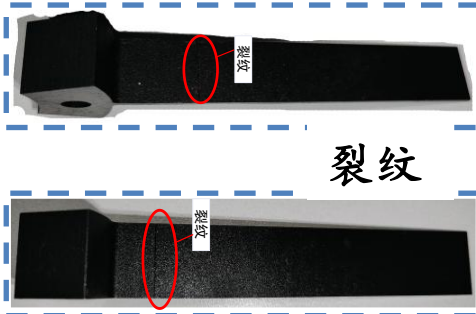
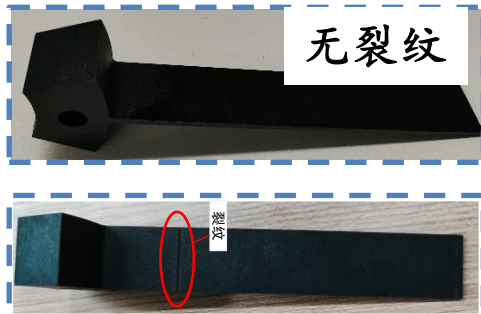
本文模型



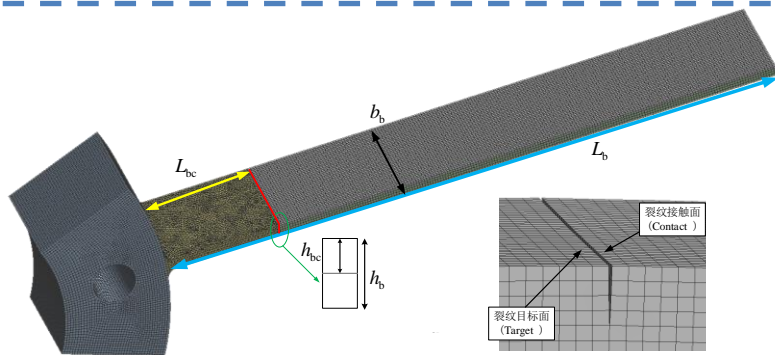
固有频率	ANSYS仿真结果	本文模型仿真结果	相对误差
1阶/Hz	115.84	115.54	0.26%
2阶/Hz	709.72	722.91	1.86%

含裂纹故障叶片动力学特性仿真与试验验证

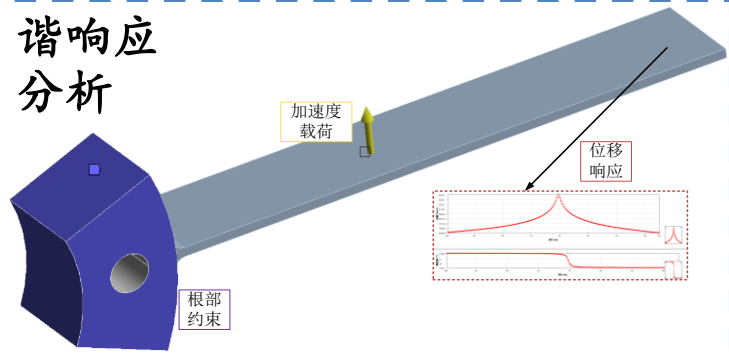
含
裂纹
故障
叶片
试验



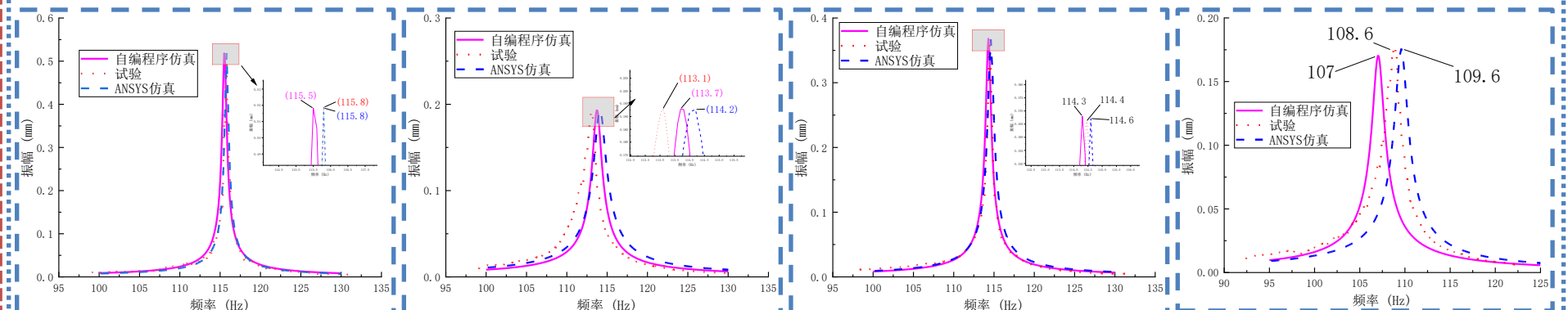
含
裂纹
故障
叶片
仿真



谐响应
分析



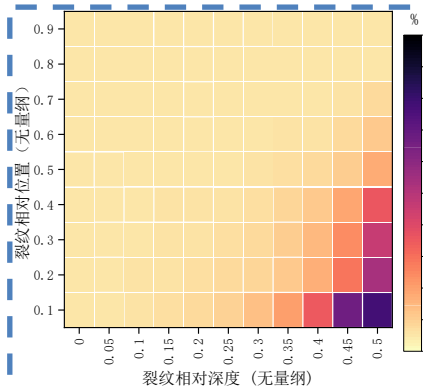
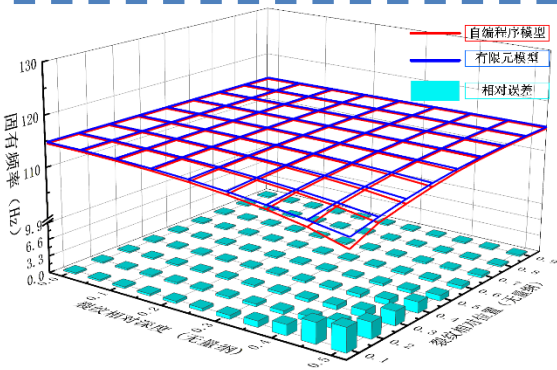
含裂纹故障叶片动力学特性仿真与试验验证



叶片	试验结果 固有频率	ANSYS仿真 固有频率	与试验 相对误差	本文模型仿真 固有频率	与试验 相对误差
健康叶片	115.8Hz	115.83Hz	0.03%	115.5Hz	0.3%
1号裂纹叶片	113.1Hz	114.17Hz	0.95%	113.7Hz	0.5%
2号裂纹叶片	114.3Hz	114.65Hz	0.31%	114.3Hz	0.0%
3号裂纹叶片	108.8Hz	109.71Hz	0.84%	107.1Hz	1.6%

含裂纹故障叶片动力学特性仿真与对比验证

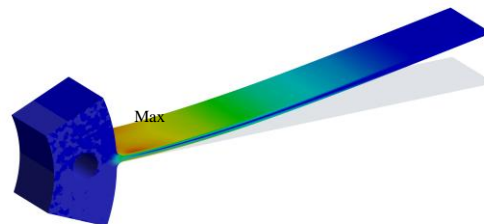
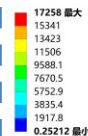
1 阶固有频率



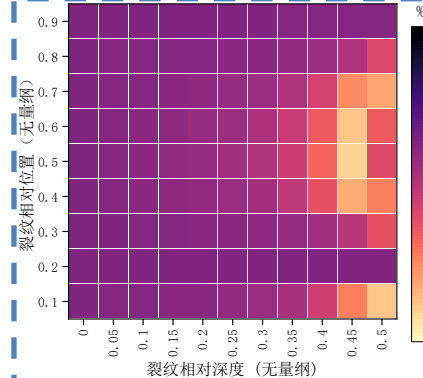
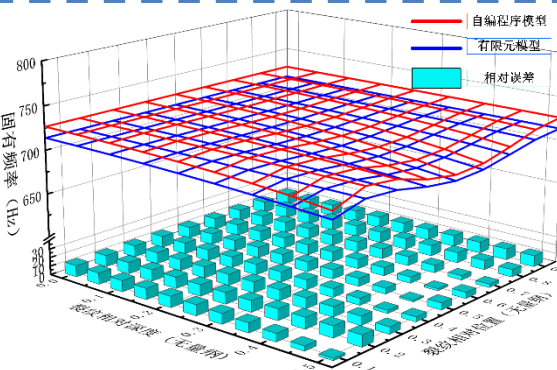
变化规律原因

1阶应力模态

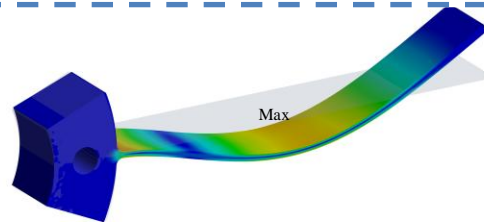
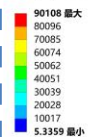
2025/11/1 20:33



2 阶固有频率



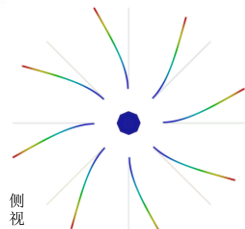
2阶应力模态



叶片-盘-轴模型动力学特性仿真与对比验证

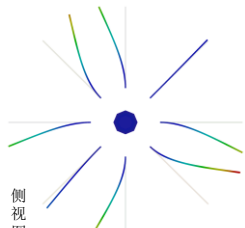
实体有限元模型

C:叶片 (固) - 盘 (固) - 轴 (固) 模型*1
总质量: 11
实际: 全空型
频率: 110.81 Hz
相位: mm
2025/11/1 18:52



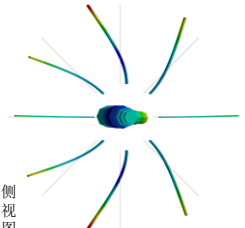
侧视图

C:叶片 (固) - 盘 (固) - 轴 (固) 模型*1
总质量: 10
实际: 全空型
频率: 115.13 Hz
相位: mm
2025/11/1 18:53

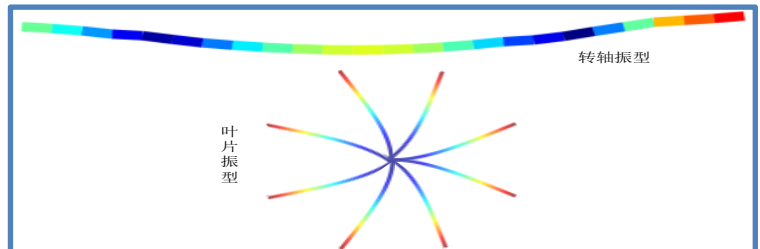
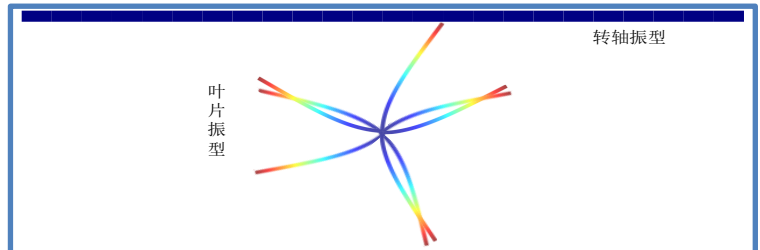
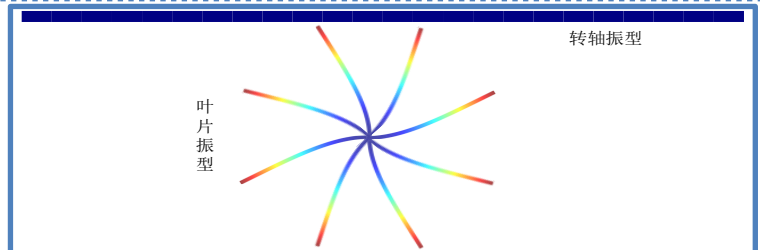


侧视图

C:叶片 (固) - 盘 (固) - 轴 (固) 模型*1
总质量: 16
实际: 全空型
频率: 134.2 Hz
相位: mm
2025/11/1 18:53



侧视图

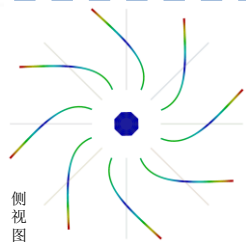


本文模型

叶片-盘-轴模型动力学特性仿真与对比验证

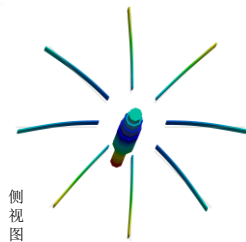
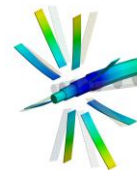
实体有限元模型

C:叶片 (圆) 盘 (圆) 轴 (圆) 模型*1
总质量: 18
刚度: 43.55
频率: 236.01 Hz
阻尼: 0.001
2025/1/17 18:54



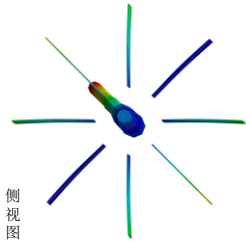
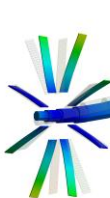
侧视图

C:叶片 (圆) 盘 (圆) 轴 (圆) 模型*1
总质量: 18
刚度: 43.55
频率: 304.35 Hz
阻尼: 0.001
2025/1/17 18:54

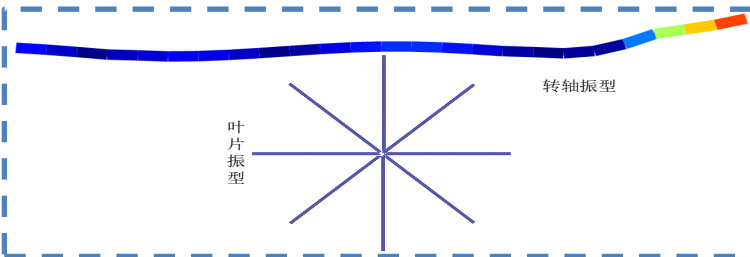
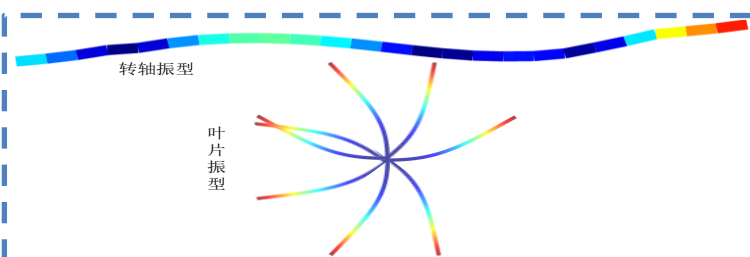
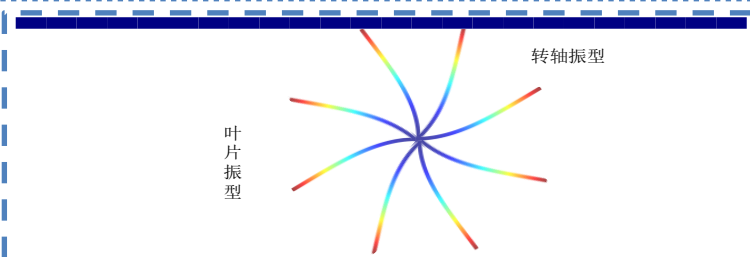


侧视图

C:叶片 (圆) 盘 (圆) 轴 (圆) 模型*1
总质量: 21
刚度: 43.55
频率: 598.69 Hz
阻尼: 0.001
2025/1/17 18:55



侧视图



本文模型

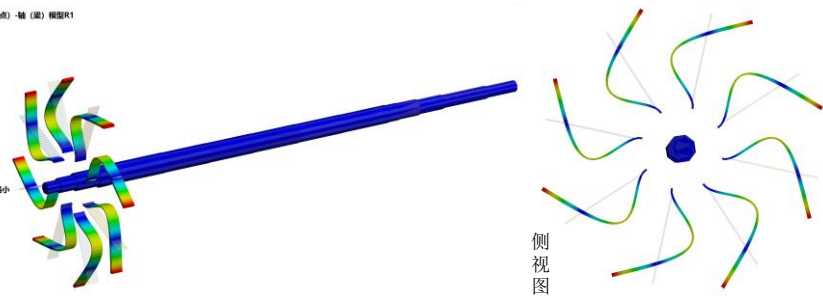
03 第三章——含裂纹-碰摩复故障的整机模型动力学特性仿真及验证

叶片-盘-轴模型动力学特性仿真与对比验证

实体有限元模型

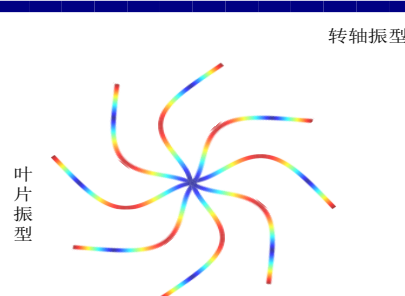
C: 叶片 (梁)-盘 (点)-轴 (梁) 模型R1
总阶数: 52
类型: 稳态
频率: 739.69 Hz
单位: mm
2025/11/1 20:10

114.06 最大
101.39
88.714
76.041
63.307
50.604
38.02
25.347
12.673
2.5673e-11 最小



侧视图

本文模型



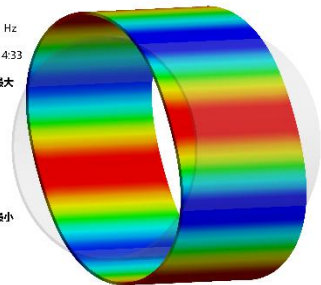
固有频率	1阶/Hz	2阶/Hz	3阶/Hz	4阶/Hz	5阶/Hz	6阶/Hz	7阶/Hz	8阶/Hz	9阶/Hz
ANSYS 仿真结果	110.31	115.13	134.20	236.01	304.35	598.69	659.65	720.57	739.69
本文模型 仿真结果	110.93	115.55	136.66	239.89	310.36	615.62	682.55	722.91	742.29
相对误差	0.56%	0.36%	1.83%	1.64%	1.97%	2.83%	3.47%	0.32%	1.85%

机匣模型动力学特性仿真与试验验证 (参考文献试验器尺寸)

实体有限元模型

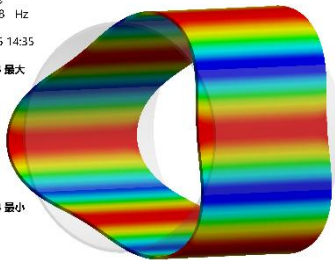
B: 模态
总变形 8
类型: 总变形
频率: 100.05 Hz
单位: mm
2025/11/25 14:33

9.9481 最大
9.3681
8.7882
8.2082
7.6282
7.0482
6.4683
5.8883
5.3083
4.7284 最小



B: 模态
总变形 12
类型: 总变形
频率: 282.78 Hz
单位: mm
2025/11/25 14:35

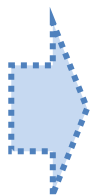
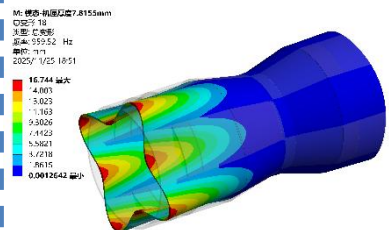
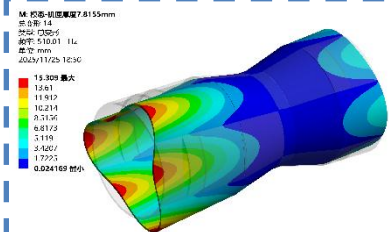
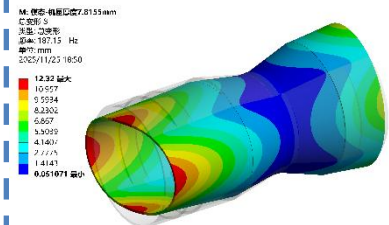
10.728 最大
9.8798
9.0316
8.1833
7.3351
6.4908
5.6386
4.7903
3.9421
3.0938 最小



阶数	环向半波数	参考文献 模态试验	ANSYS 模态仿真	与试验 相对误差	本文模型 模态仿真	与试验 相对误差
1	2	98.17 Hz	100.05 Hz	1.92%	98.99 Hz	0.84%
2	2	132.12 Hz	132.03 Hz	0.07%	131.62 Hz	0.38%
3	3	276.82 Hz	282.78 Hz	2.15%	279.98 Hz	1.14%
4	3	330.55 Hz	333.57 Hz	0.91%	305.02 Hz	7.72%
5	4	529.79 Hz	541.55 Hz	2.22%	536.85 Hz	1.33%
6	4	591.95 Hz	600.49 Hz	1.44%	566.60 Hz	4.28%
7	5	855.27 Hz	874.43 Hz	2.24%	868.21 Hz	1.51%
8	5	921.21 Hz	937.14 Hz	1.73%	900.22 Hz	2.28%
9	6	1254.86 Hz	1280.7 Hz	2.06%	1273.66 Hz	1.50%
10	6	1323.70 Hz	1345.1 Hz	1.62%	1306.81 Hz	1.28%

机匣模型动力学特性仿真与对比验证 (本文实际试验器尺寸)

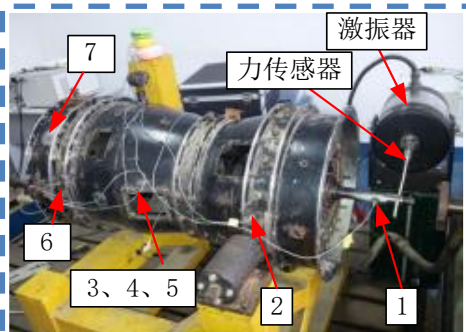
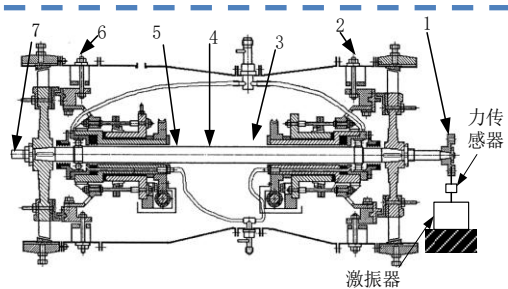
实体有限元模型



阶数	环向半波数	ANSYS 模态仿真/Hz	本文模型 模态仿真/Hz	相对误差
1	2	187.15	173.98	7.04%
2	2	309.77	322.95	4.25%
3	3	510.01	491.81	3.57%
4	3	553.19	496.70	10.21%
5	4	959.52	942.17	1.81%
6	4	987.49	947.45	4.05%
7	5	1536.80	1522.88	0.91%
8	5	1555.20	1528.07	1.74%
9	6	2242.10	2233.72	0.37%
10	6	2242.80	2238.43	0.19%

整机模型动力学特性仿真与试验验证

整机模态试验-正弦扫描法



模态	1阶	2阶	3阶
试验 模态振型			
本文模型 仿真 模态振型			
试验固有 频率/Hz	41.62	91.43	105.96
仿真固有 频率/Hz	43.02	88.44	108.38
相对误差	3.36%	3.27%	2.28%

本章小结

部件级

单叶片模型

- 裂纹会导致叶片固有频率出现下降；
- 仿真与健康叶片的1阶固有频率的相对误差在0.3%以内，含裂纹叶片的1阶固有频率的相对误差在1.6%以内；

机匣模型

- 自编程序仿真结果与ANSYS实体有限元模型仿真结果对比，前9阶固有频率的平均误差在3.5%以内。

子系统级

叶片-盘-轴模型

- 自编程序仿真结果与ANSYS实体有限元模型仿真结果对比，模型的前5阶固有频率相对误差在2%以内，前9阶固有频率相对误差在3.5%以内；

系统级

整机模型

- 整机模型自编程序仿真与整机试验器的试验对比，前3阶模态振型一致，且前3阶固有频率的相对误差在3.4%以内；

第四章



含复合故障的整机振动特性 仿真分析与试验研究

▶ 裂纹故障特性

▶ 碰摩故障特性

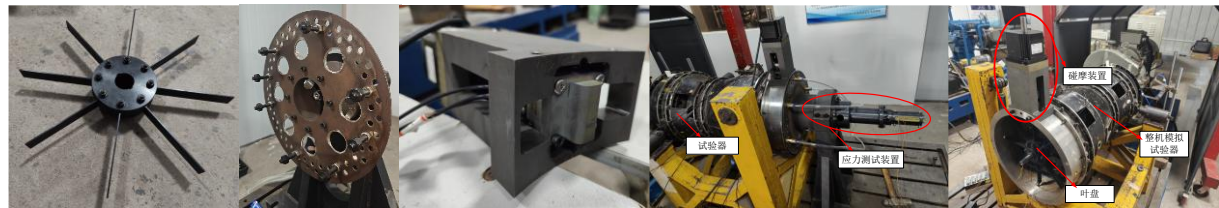
▶ 复合故障特性

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

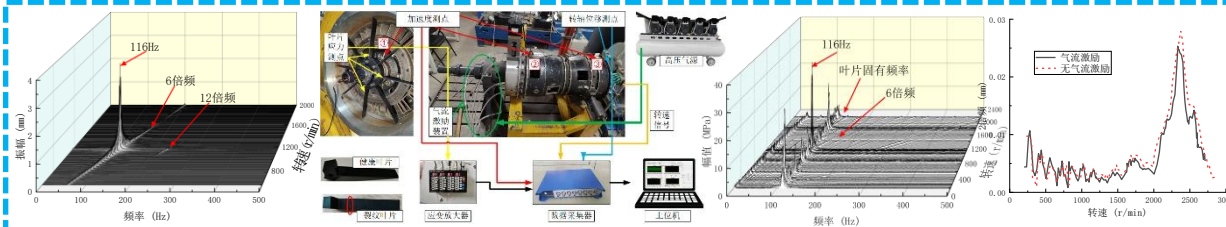
试验平台

试验器改造与设计



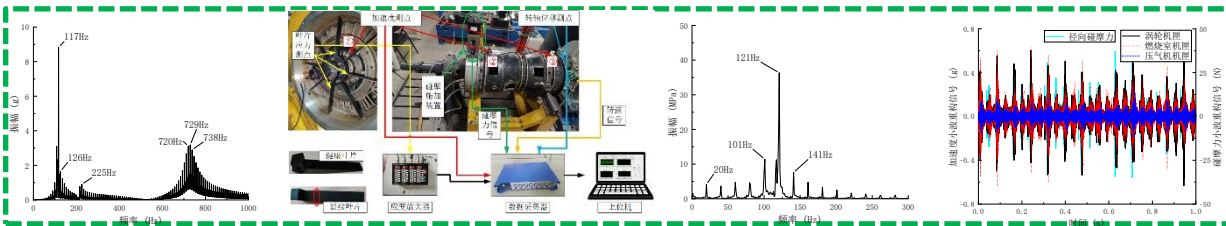
单裂纹故障

单裂纹故障整机仿真与试验



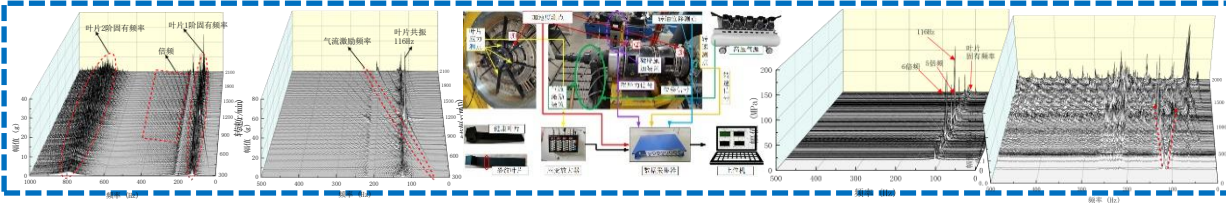
单碰摩故障

单碰摩故障整机仿真与试验



复合故障

复合故障整机仿真与试验



试验器平台构建

目标

核心部件：轴承、机匣、转轴、涡轮盘、压气机盘以及可组装的独立叶片；

核心功能：气流激励、旋转叶片应力测量、裂纹故障施加、碰摩故障施加与碰摩力测量；

试验器构成

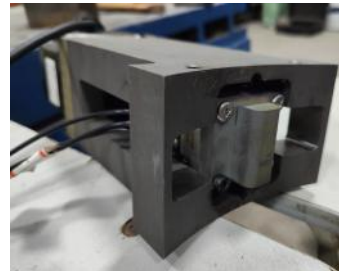
主体试验器



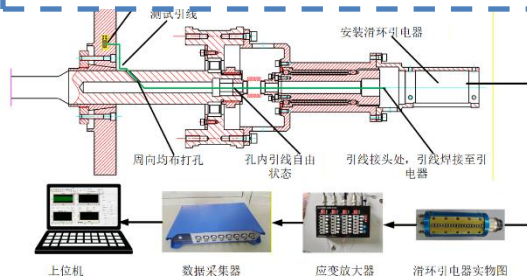
组装叶盘



碰摩施加与测量装置



旋转叶片应力测量装置

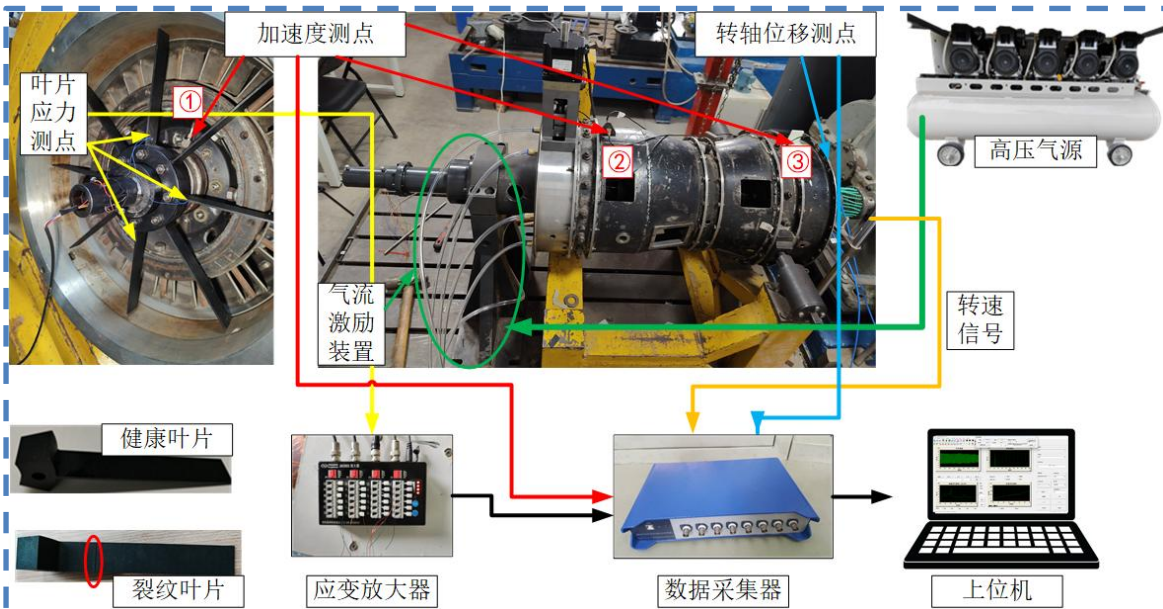


旋转叶片气流激励装置



含叶片裂纹故障的整机振动特性试验研究

试验测试系统



试验测试内容

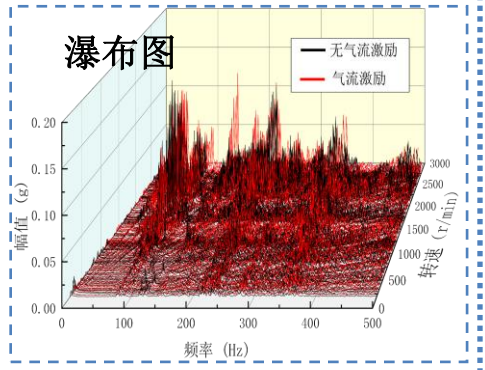
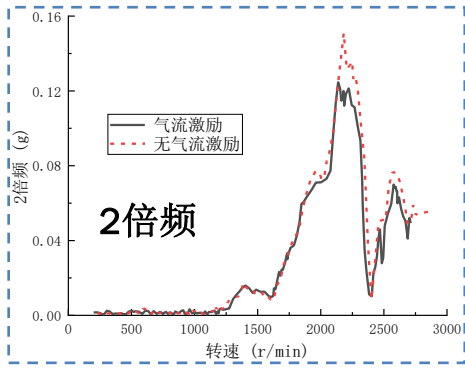
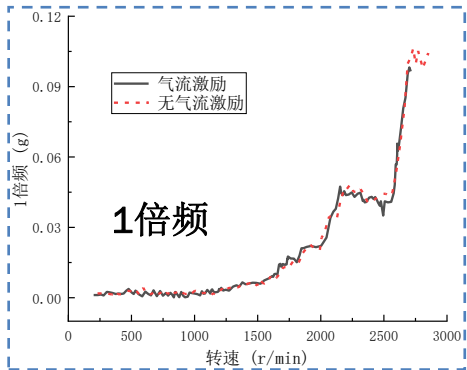
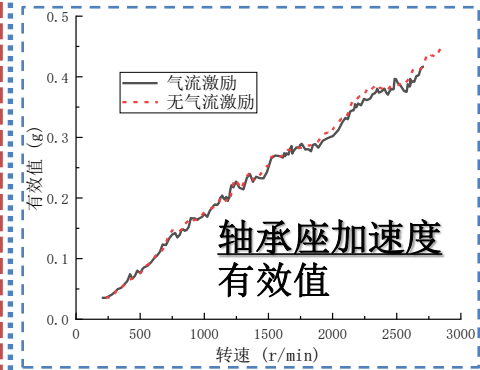
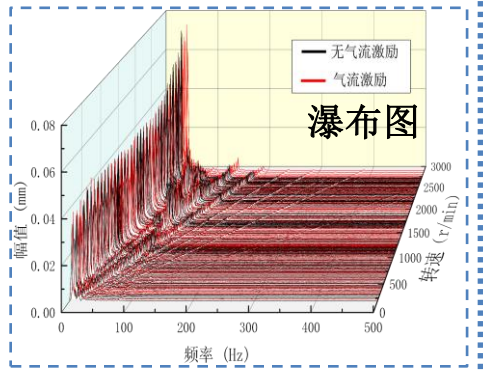
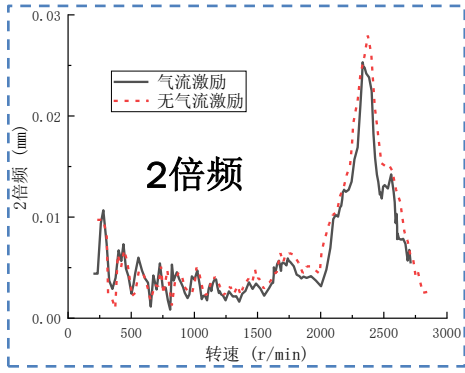
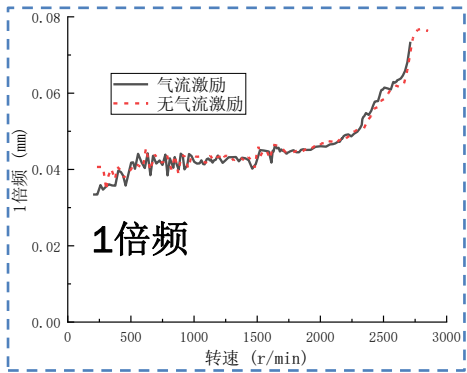
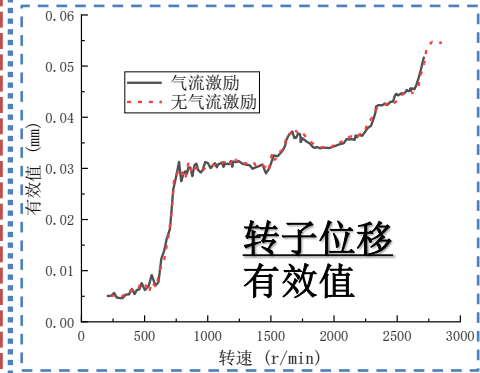
试验内容	叶片类型
有/无气流激励下变速试验	健康叶片
有/无气流激励下恒速试验	
气流激励下 升速试验	健康叶片
气流激励下 恒速试验	含裂纹叶片

传感器测点布置

①叶片应力；②轴承座加速度；③机匣加速度；④转轴位移；

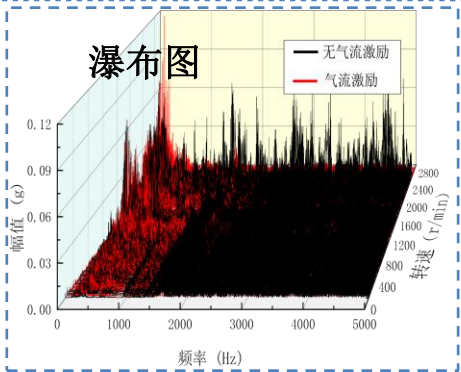
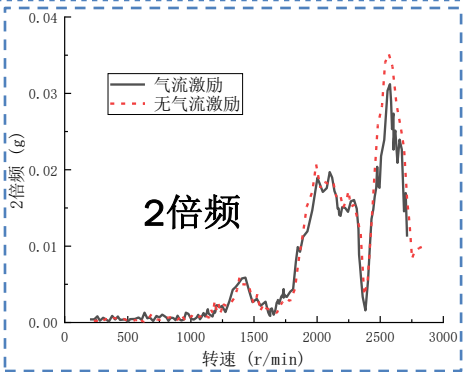
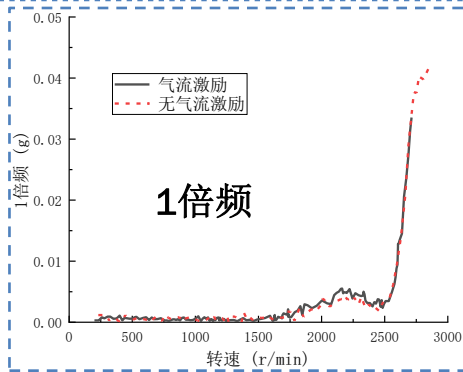
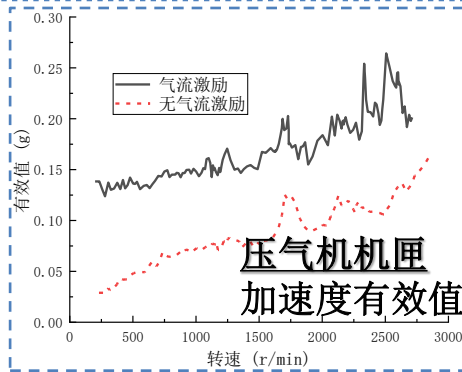
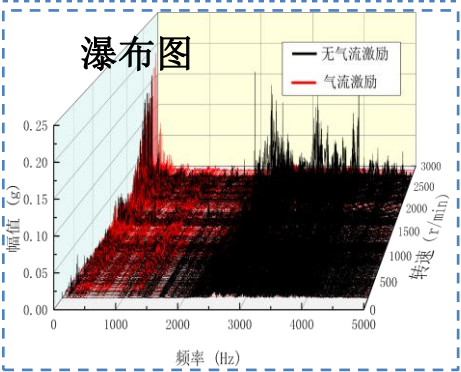
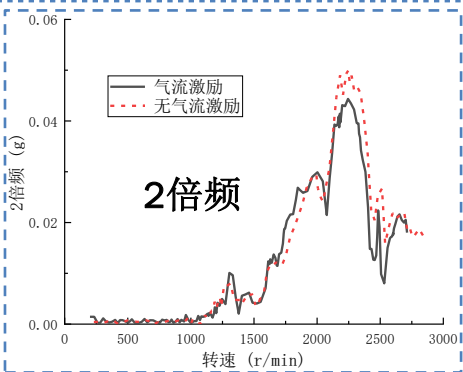
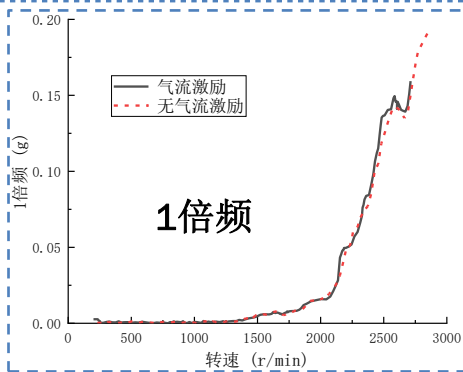
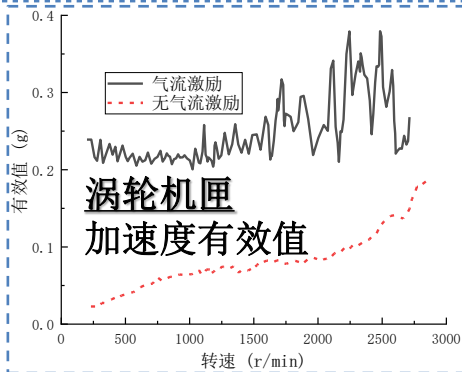
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含裂纹故障的整机试验-变速工况下有/无气流激励试验



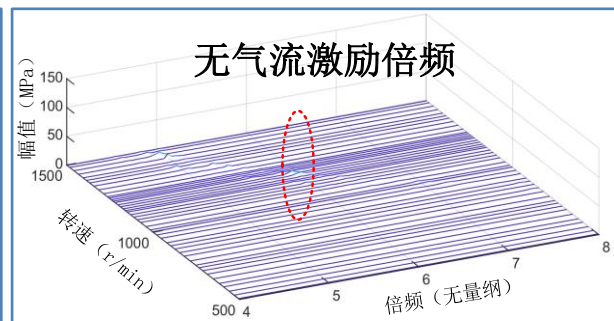
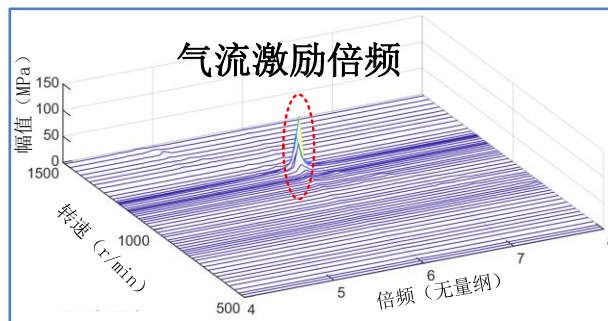
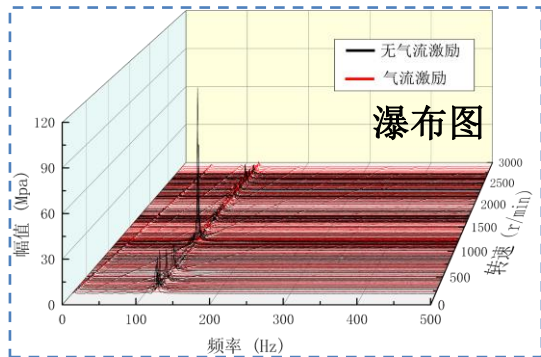
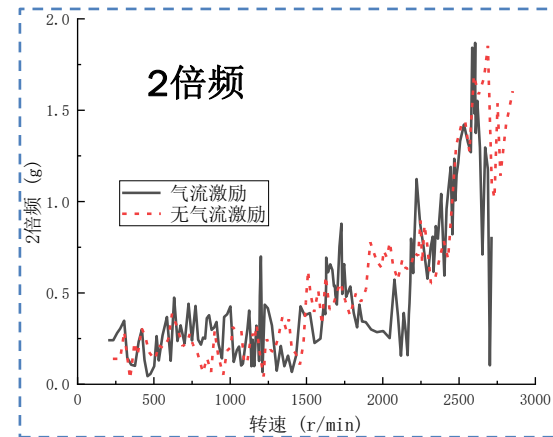
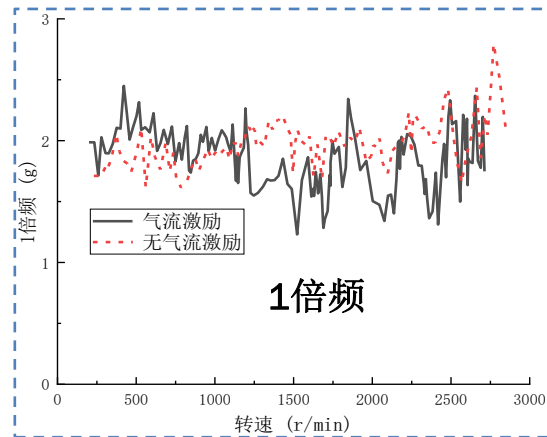
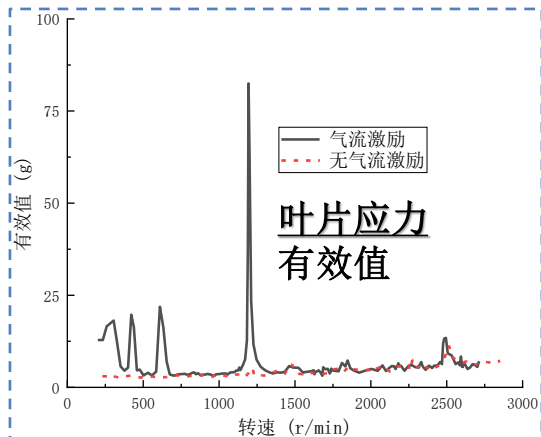
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含裂纹故障的整机试验-变速工况下有/无气流激励试验



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

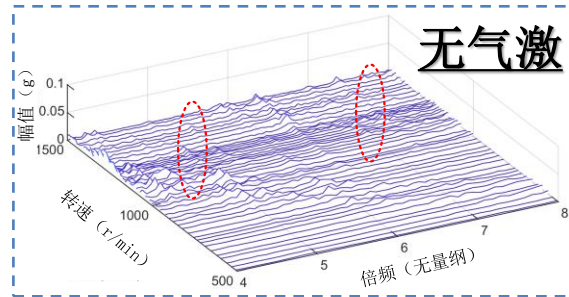
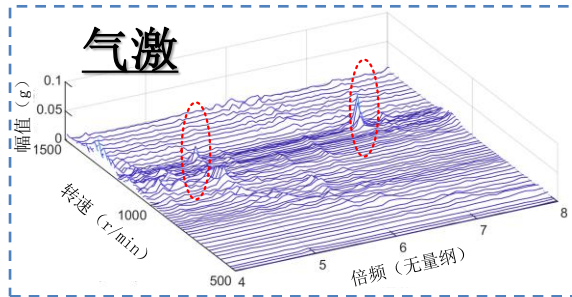
含裂纹故障的整机试验-变速工况下有/无气流激励试验



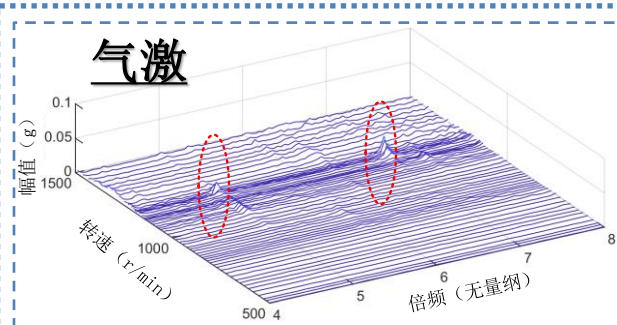
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含裂纹故障的整机试验-变速工况下有/无气流激励试验

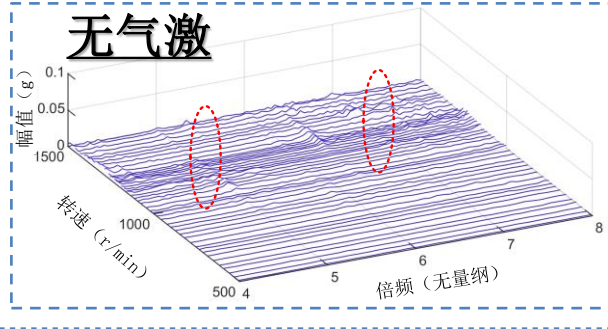
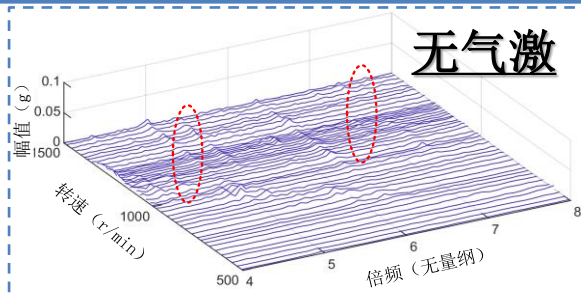
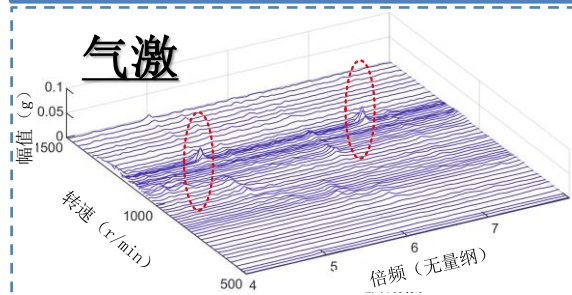
轴承座加速度响应



压气机机匣加速度响应



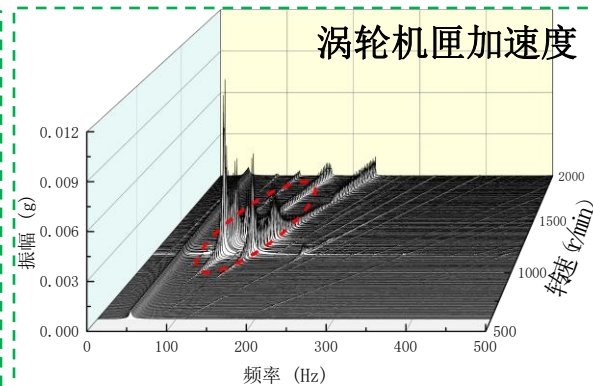
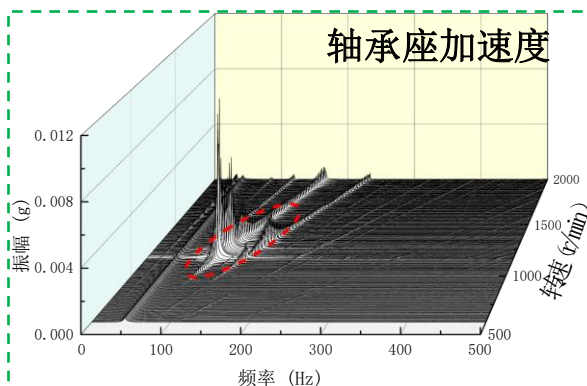
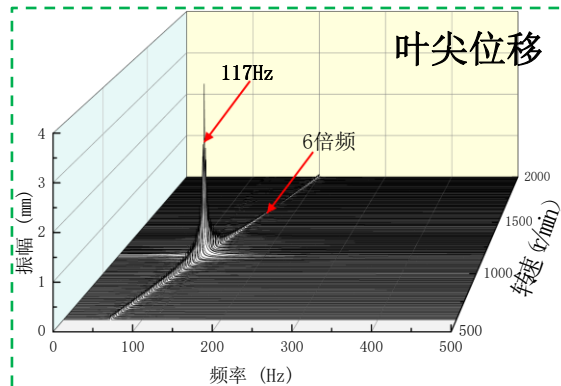
涡轮机匣加速度响应



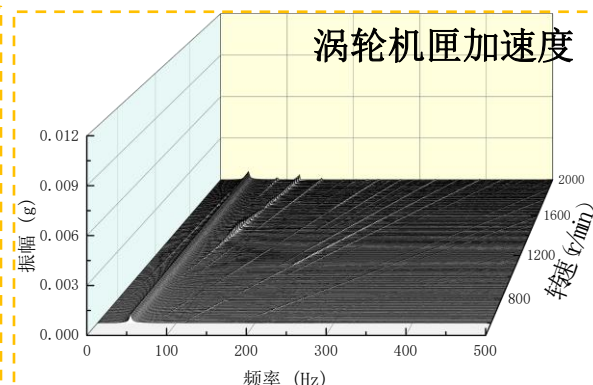
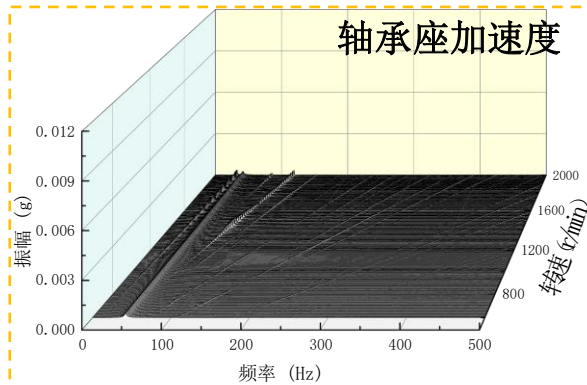
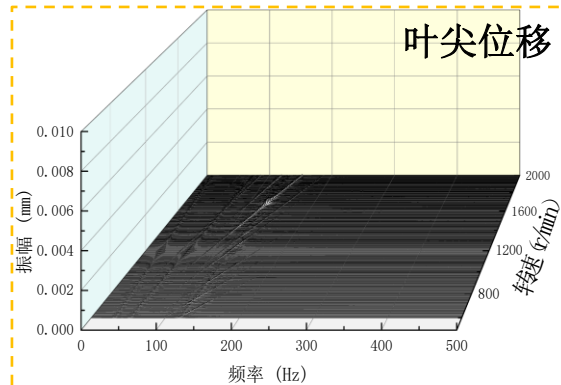
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含裂纹故障的整机试验-变速工况下有/无气流激励仿真

气流激励



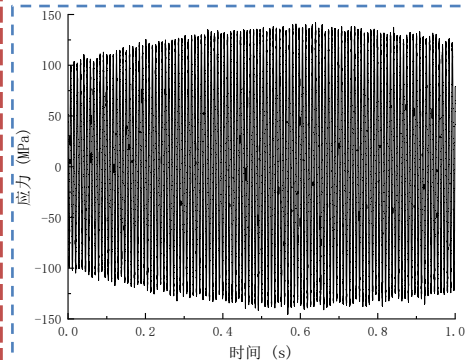
无气流激励



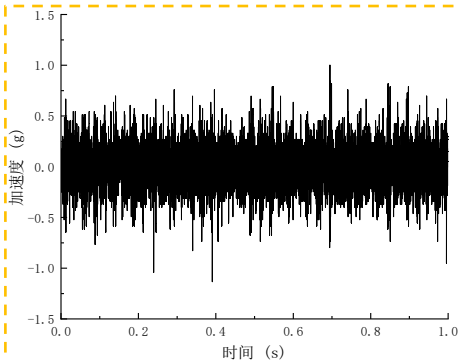
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含裂纹故障的整机试验-恒速工况下有/无气流激励试验-叶片共振

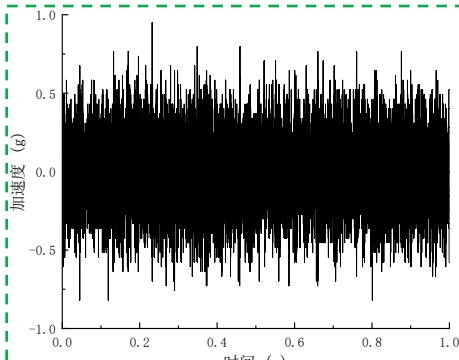
叶片应力



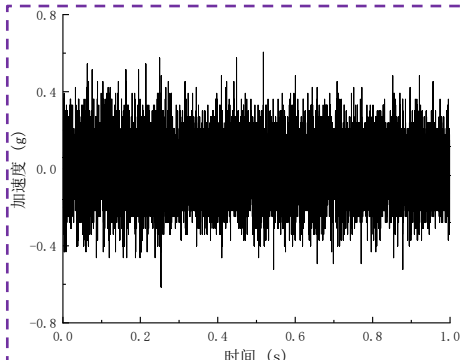
轴承座加速度



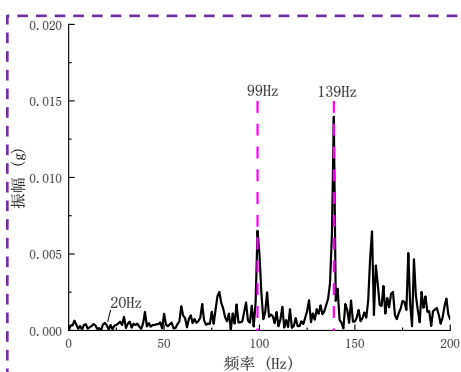
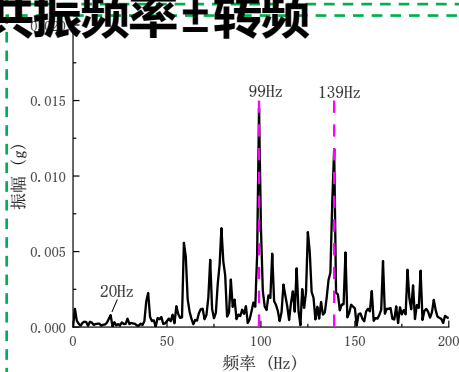
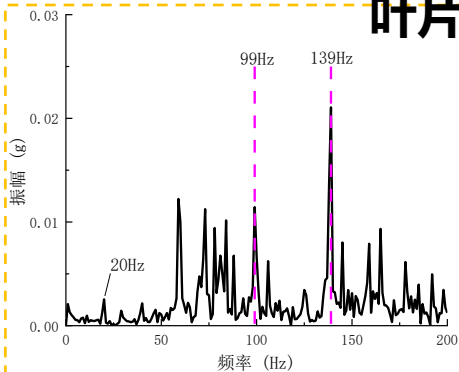
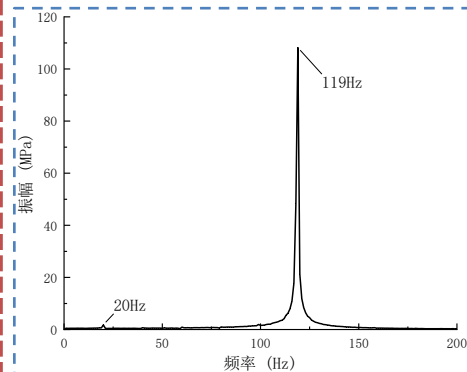
涡轮机匣加速度



压气机机匣加速度



叶片共振频率±转频



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

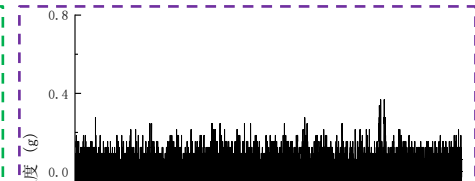
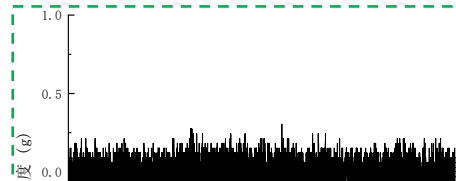
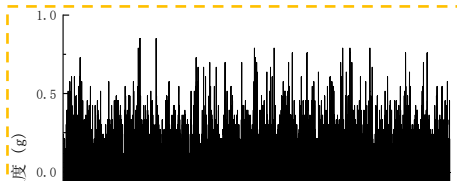
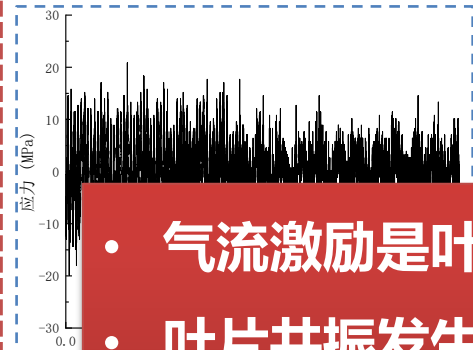
含裂纹故障的整机试验-恒速工况下有/无气流激励试验-叶片非共振

叶片应力

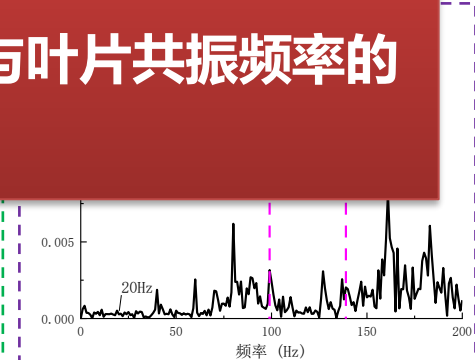
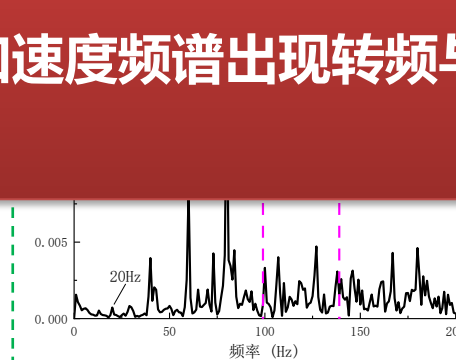
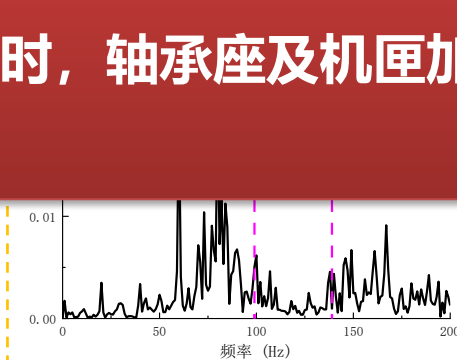
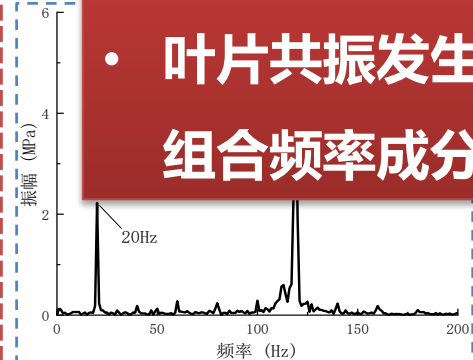
轴承座加速度

涡轮机匣加速度

压气机机匣加速度



- 气流激励是叶片进行共振状态的关键因素；
- 叶片共振发生时，叶片应力响应幅值剧增，呈现显著正弦波动特征；
- 叶片共振发生时，轴承座及机匣加速度频谱出现转频与叶片共振频率的组合频率成分

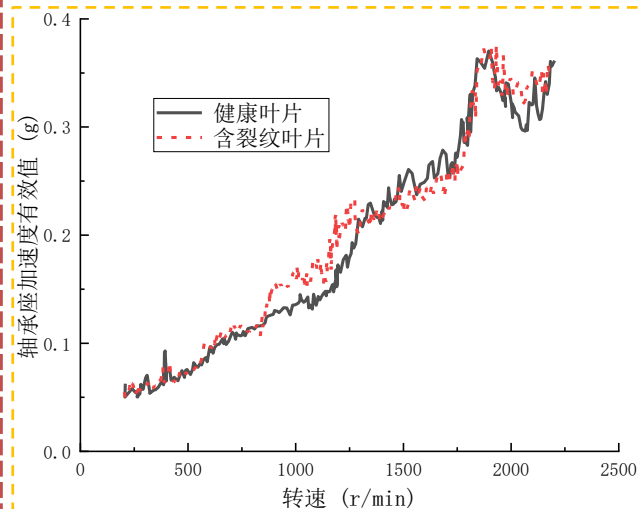


04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

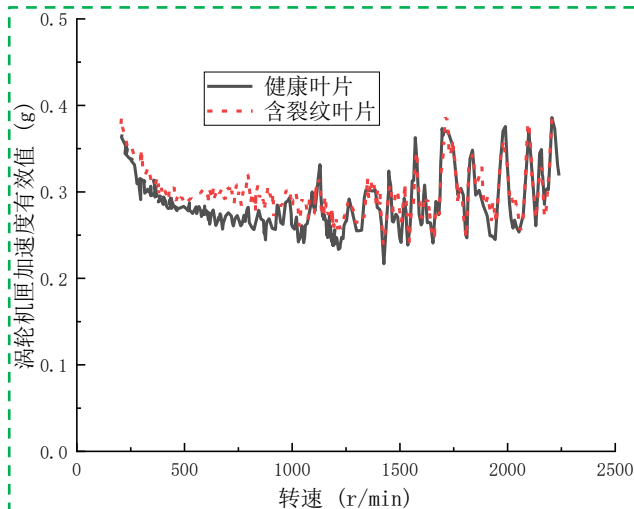
含裂纹故障的整机试验-变速工况气流激励试验-健康/裂纹叶片

变速气激健康/裂纹叶片对比试验

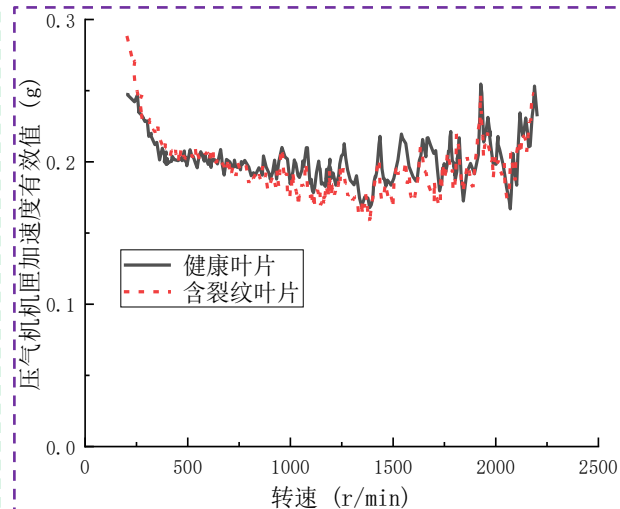
轴承座加速度有效值



涡轮机匣加速度有效值

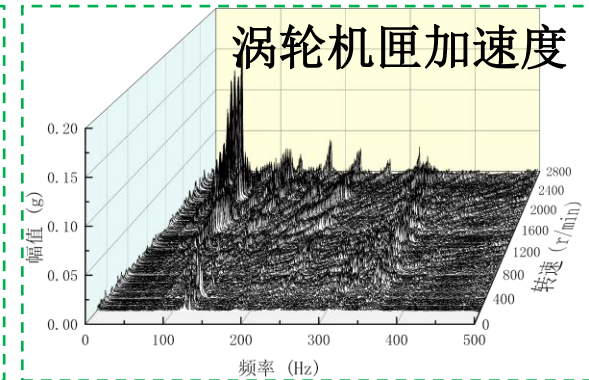
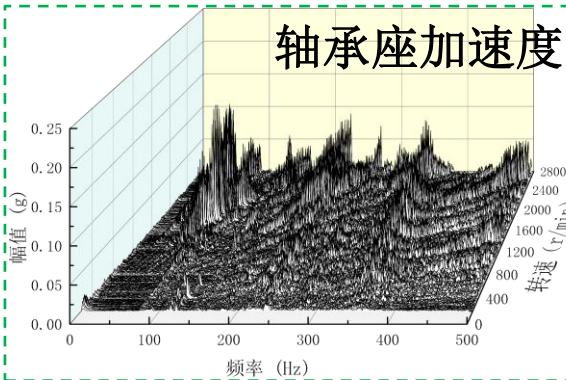
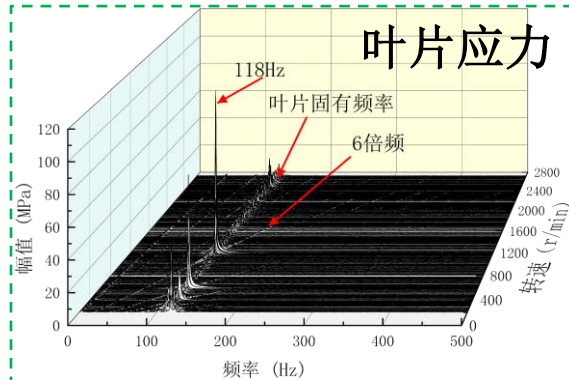


压气机机匣加速度有效值

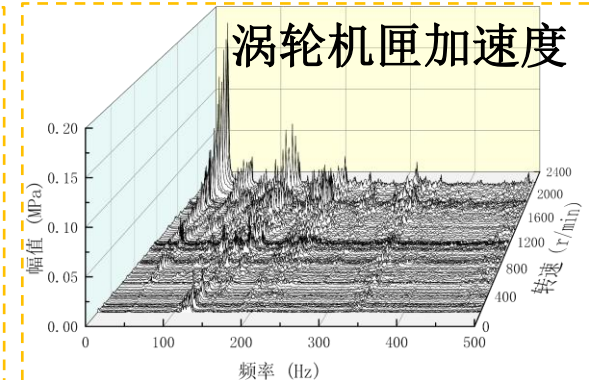
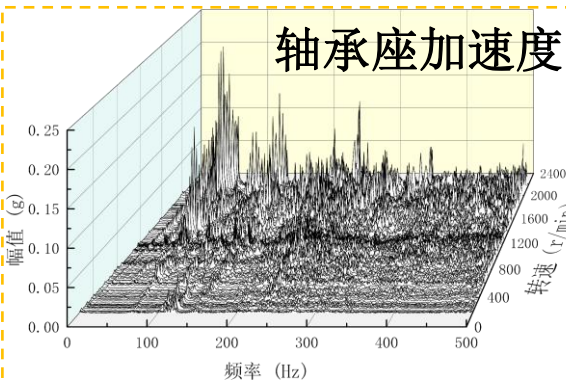
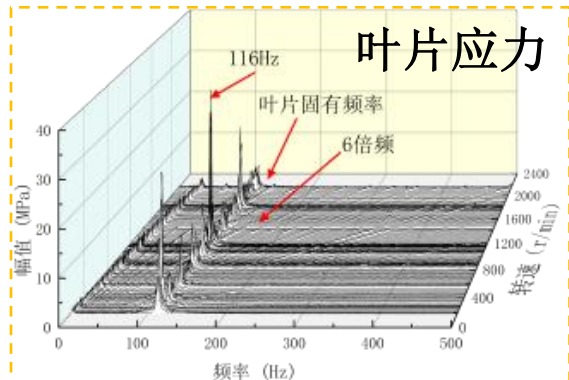


含裂纹故障的整机试验-变速工况气流激励试验-健康/裂纹叶片

健康叶片



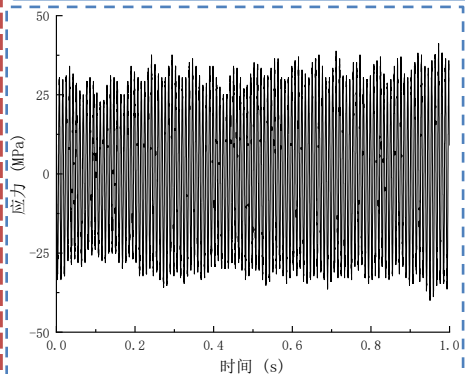
裂纹叶片



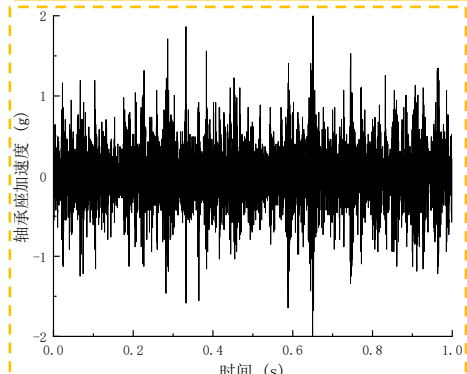
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含裂纹故障的整机试验-恒速工况气流激励试验-裂纹叶片共振

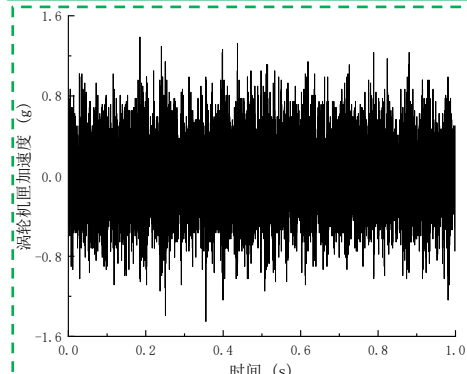
裂纹叶片应力



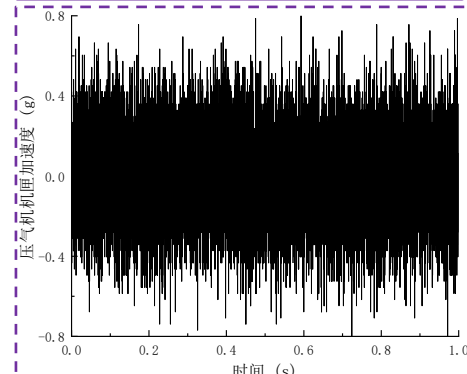
轴承座加速度



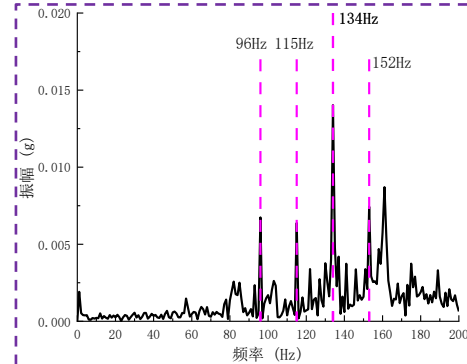
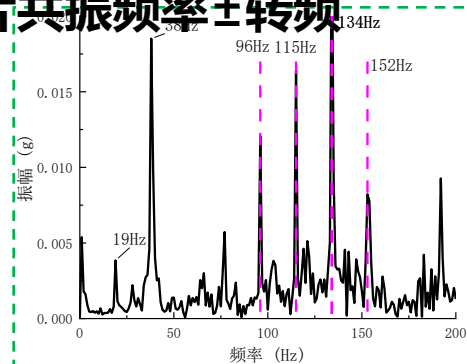
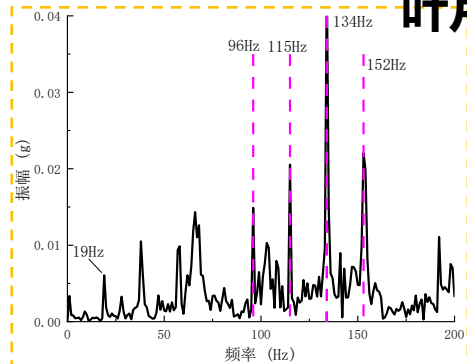
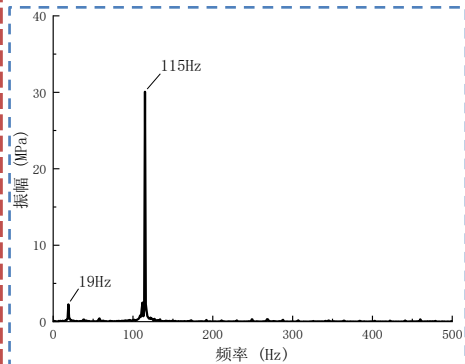
涡轮机匣加速度



压气机机匣加速度



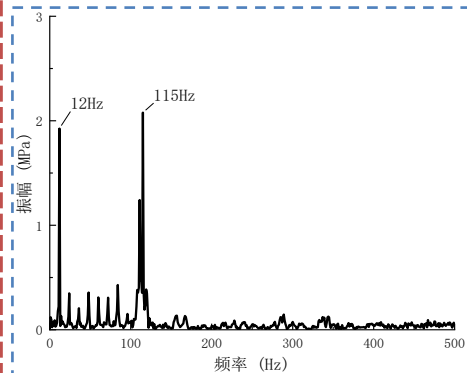
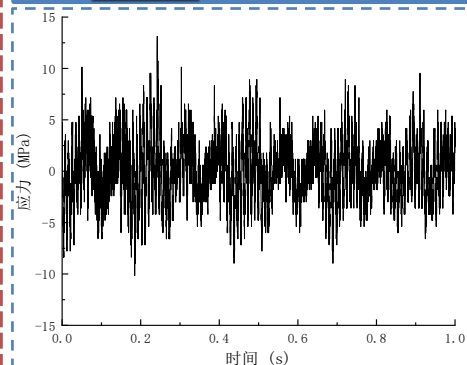
叶片共振频率±转频



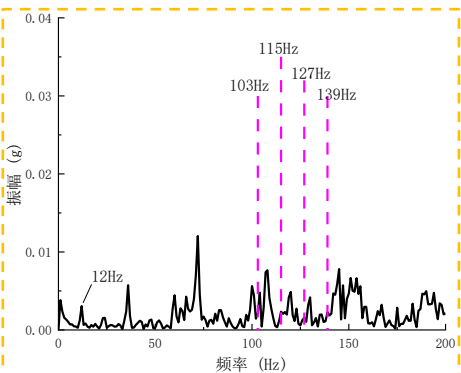
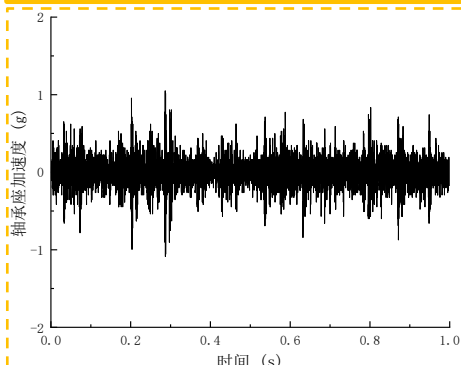
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含裂纹故障的整机试验-恒速工况气流激励试验-裂纹叶片非共振

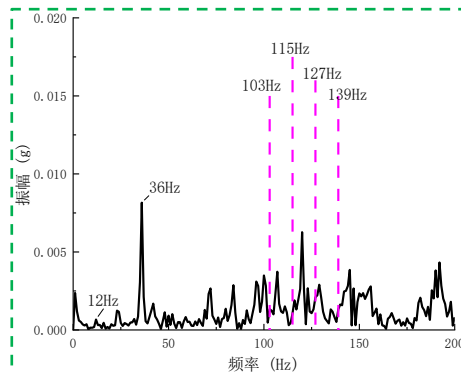
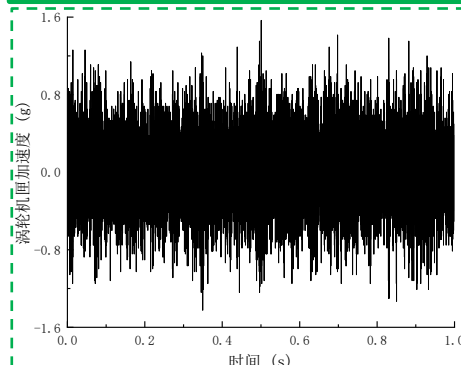
裂纹叶片应力



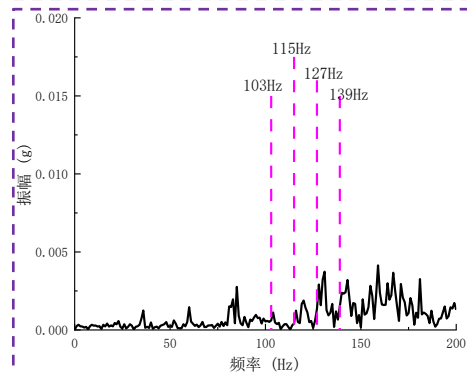
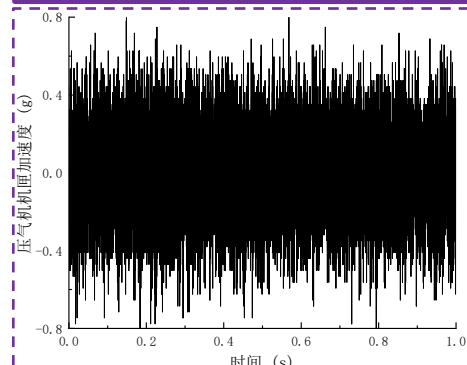
轴承座加速度



涡轮机匣加速度

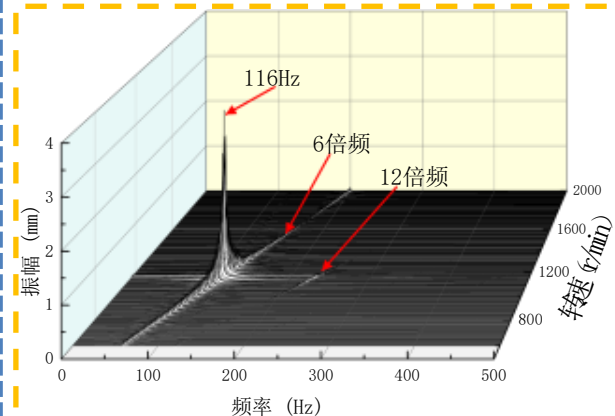


压气机机匣加速度

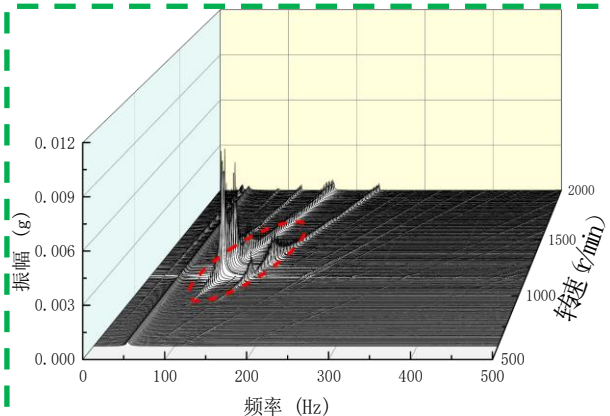


含裂纹故障的整机试验-变速工况下气流激励仿真-裂纹叶片

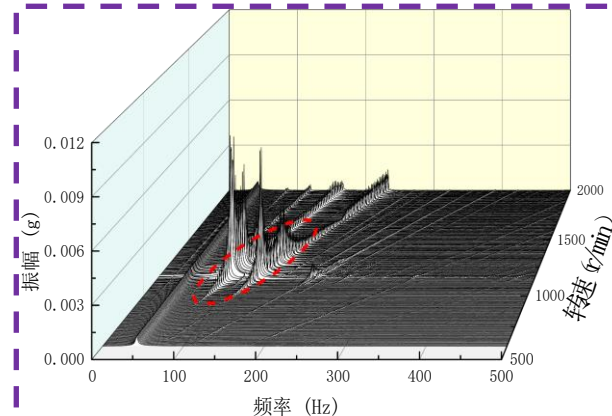
裂纹叶尖位移响应



轴承座加速度响应



涡轮机匣加速度响应



单裂纹故障整机仿真与试验研究结论：

响应特征：

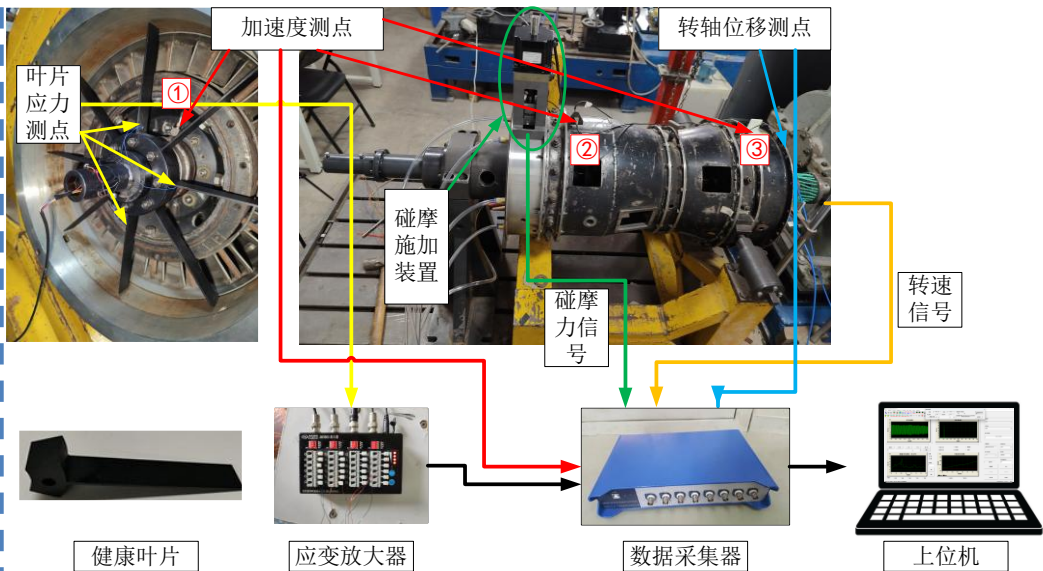
- 气流激励是叶片进行共振状态的关键因素；
- 叶片共振时，叶片应力响应幅值剧增，呈现显著正弦波动特征；
- 叶片共振时，轴承座及机匣加速度频谱出现转频与叶片共振频率的组合频率成分

裂纹故障影响规律：

- 含裂纹叶片的共振转速低于健康叶片；
- 叶片裂纹存在对轴承座及机匣的振动有效值无明显影响；
- 基于振动总量的监测方法难以直接识别裂纹故障，需依赖频率特征分析。

含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究

试验测试系统



试验测试内容

序号	试验内容
1	碰摩力测试试验 - 摩擦系数试验
2	恒速工况下健康叶片 - 机匣碰摩故障整机试验
3	恒速工况下含裂纹叶片 - 机匣碰摩故障整机试验
4	碰摩故障冲击信号传递试验

传感器测点

①叶片应力; ②轴承座加速度; ③机匣加速度; ④转轴位移; ⑤碰摩力

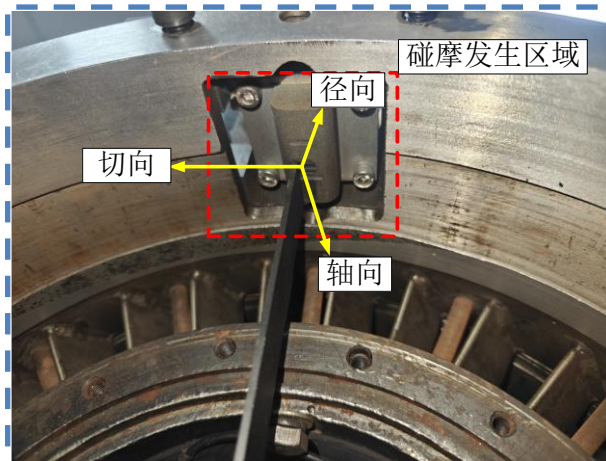
含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-碰摩预试验

碰摩试验器



涡轮端碰摩

碰摩方向示意图

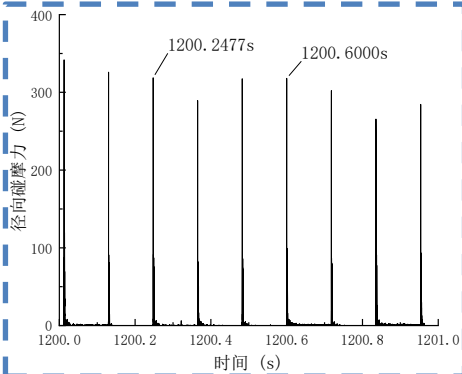
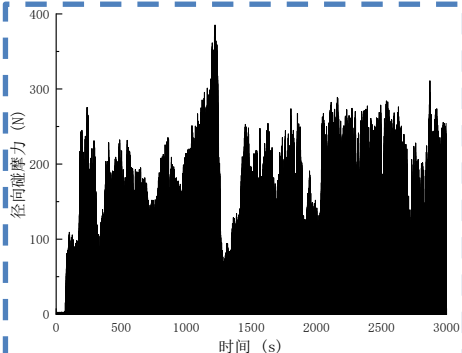


碰摩痕迹

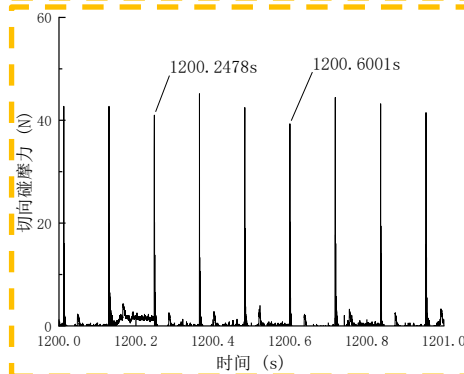
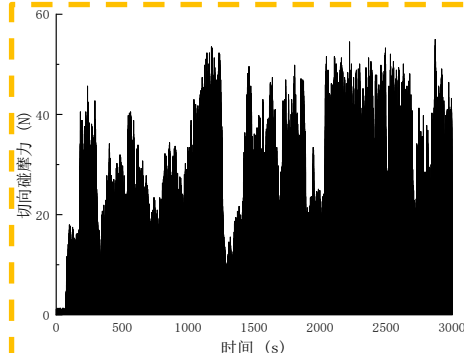


含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-碰摩预试验

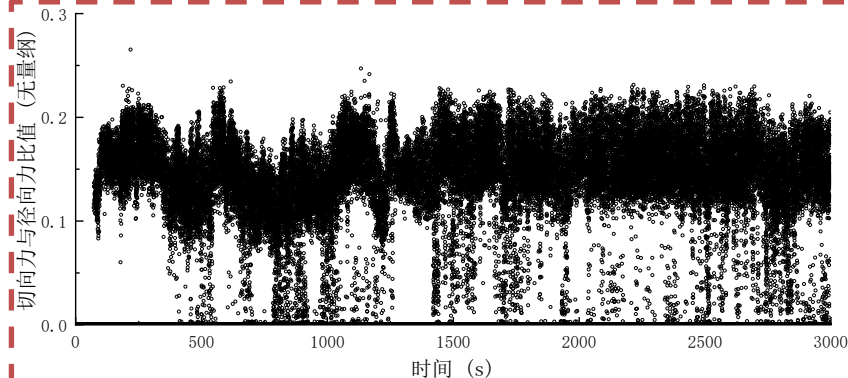
径向碰摩力



切向碰摩力

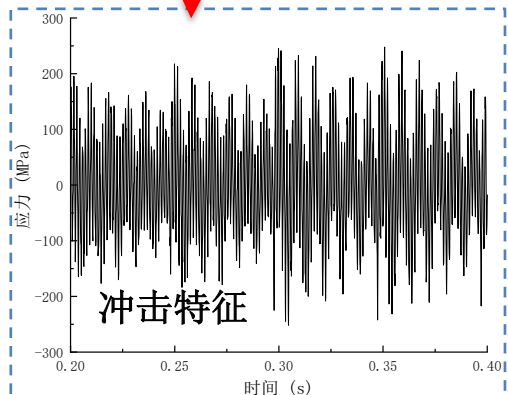
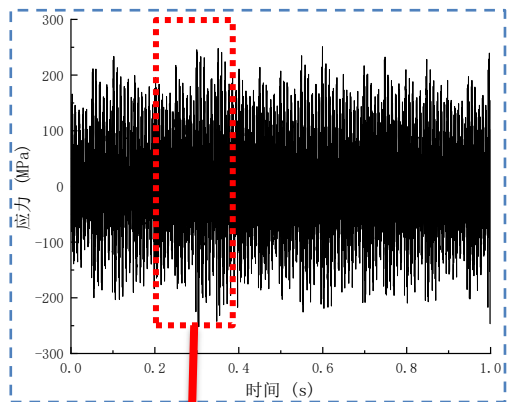


切向碰摩力与径向碰摩力比值 (摩擦系数) -0.15

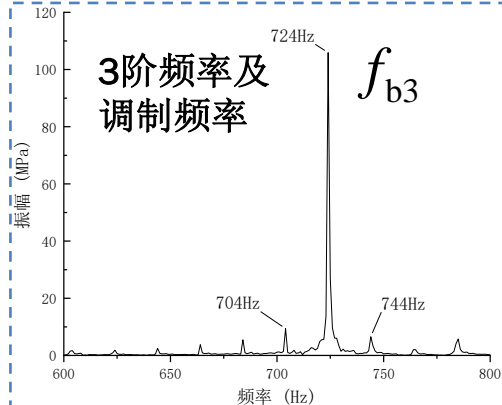
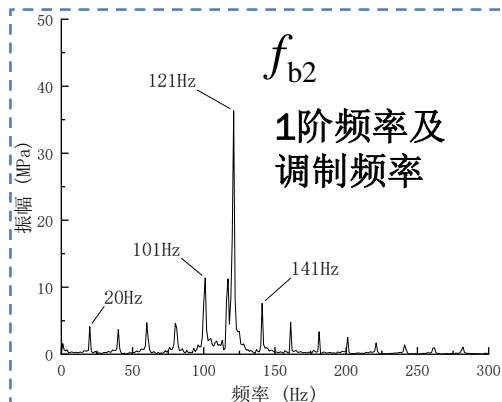
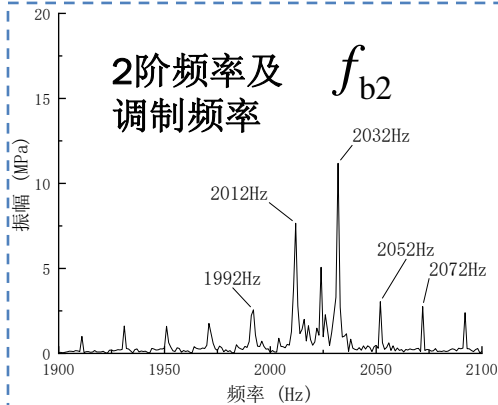
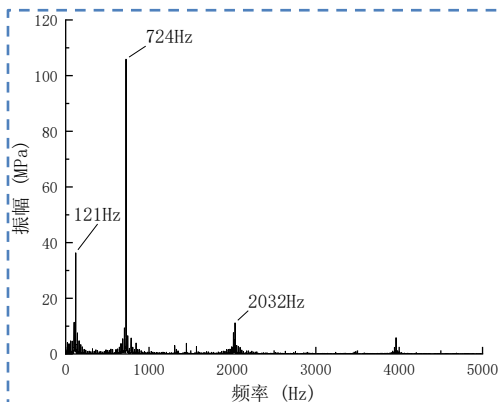


含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-健康叶片碰摩试验

健康叶片应力时域响应及细节图

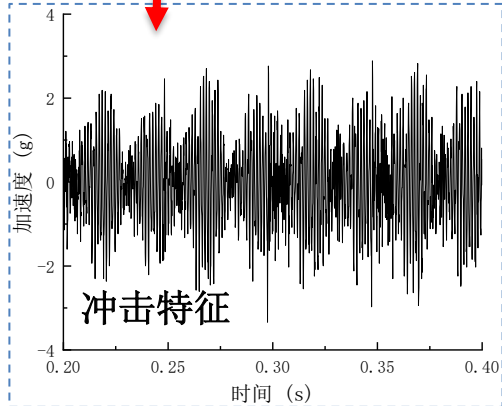
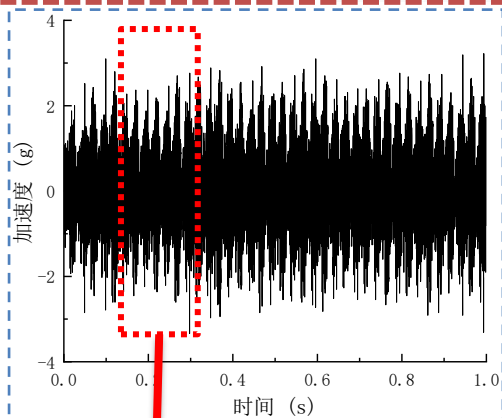


健康叶片应力频谱及细节图

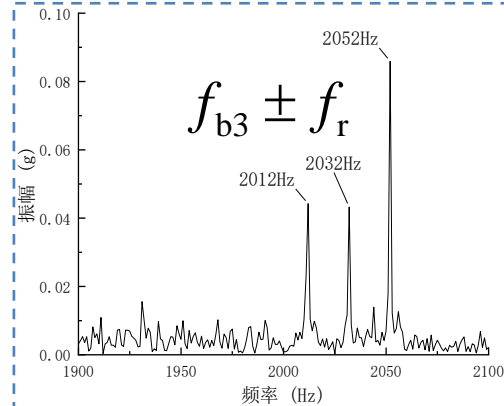
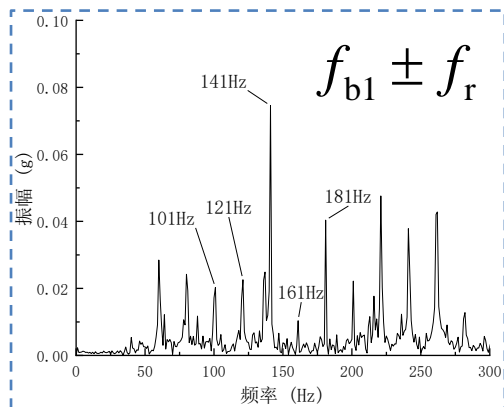
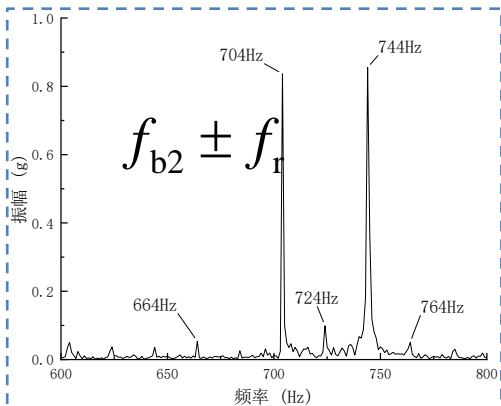
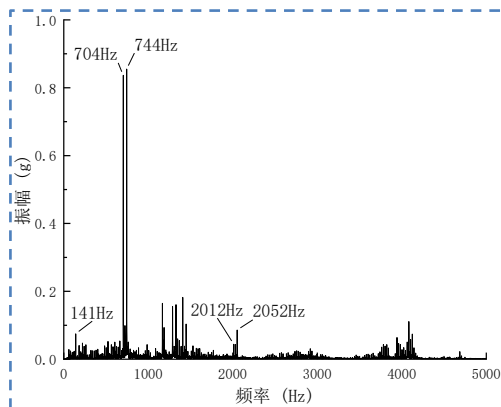


含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-健康叶片碰摩试验

轴承座加速度响应及细节图

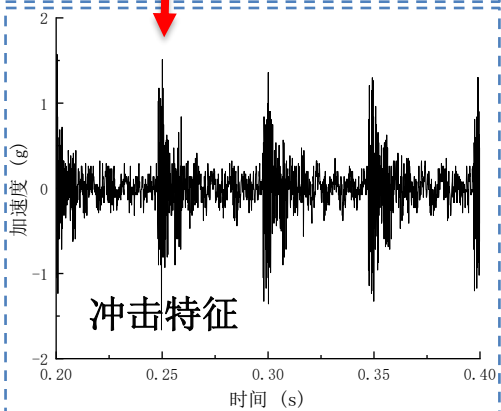
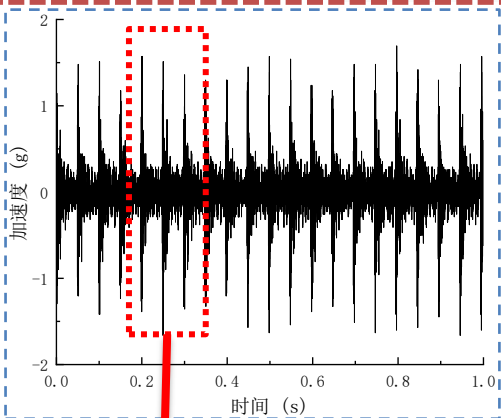


轴承座加速度频谱及细节图

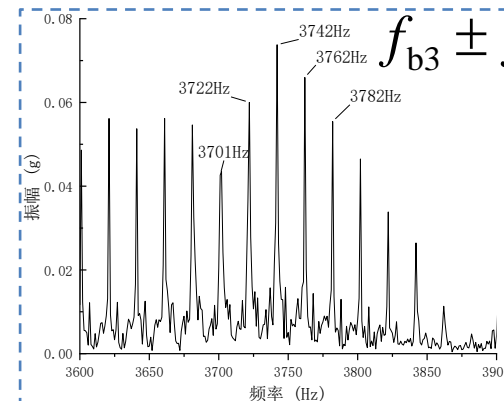
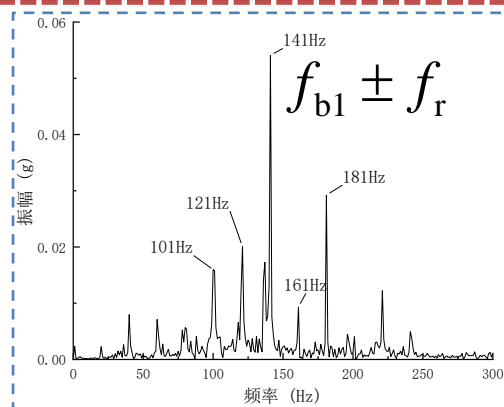
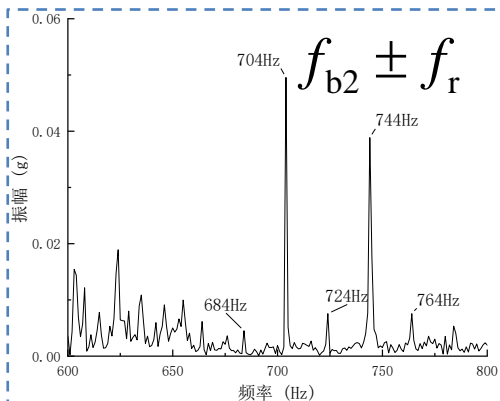
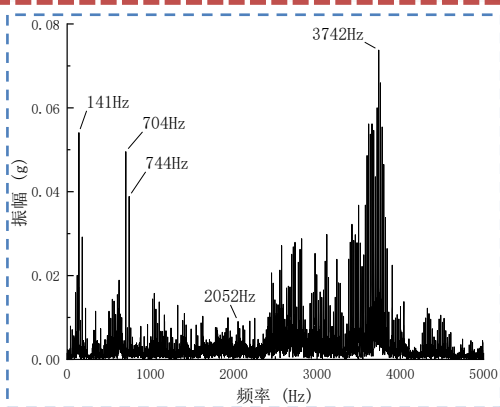


含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-健康叶片碰摩试验

涡轮机匣加速度响应及细节图



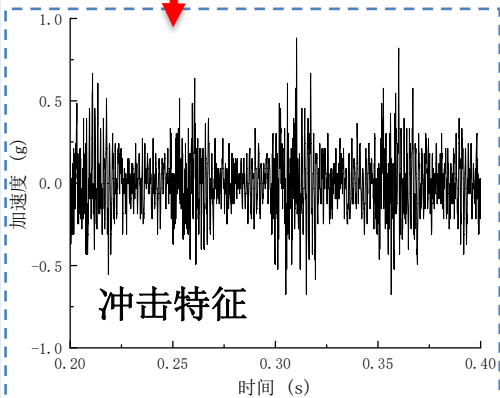
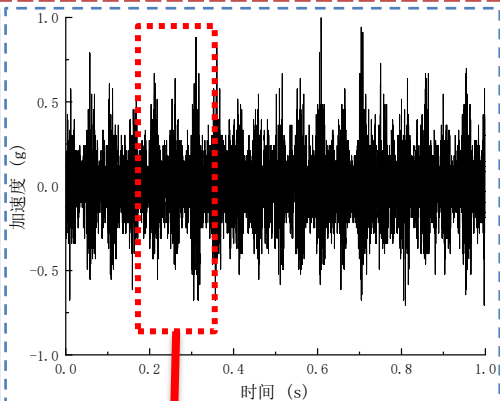
涡轮机匣加速度频谱及细节图



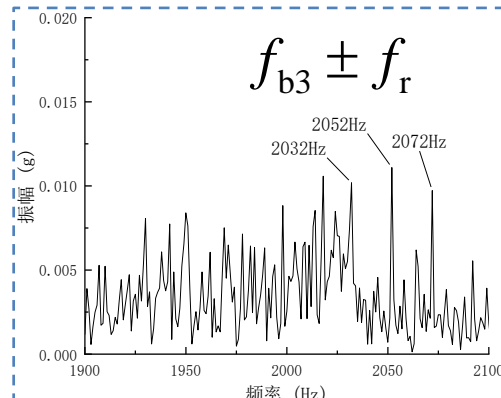
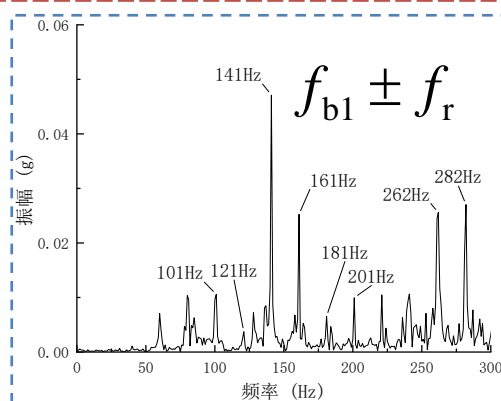
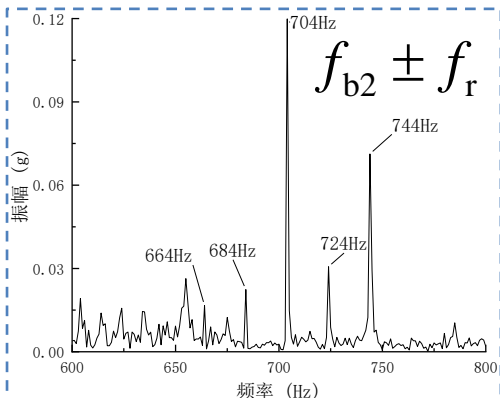
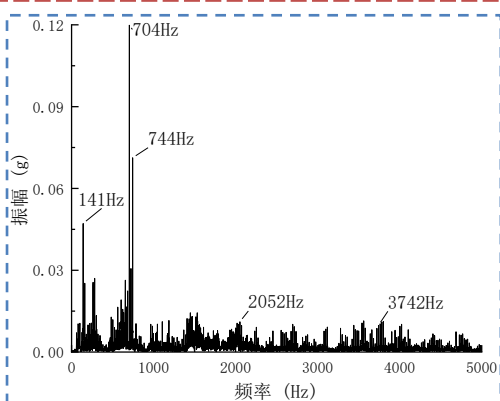
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-健康叶片碰摩试验

压气机机匣加速度响应及细节图

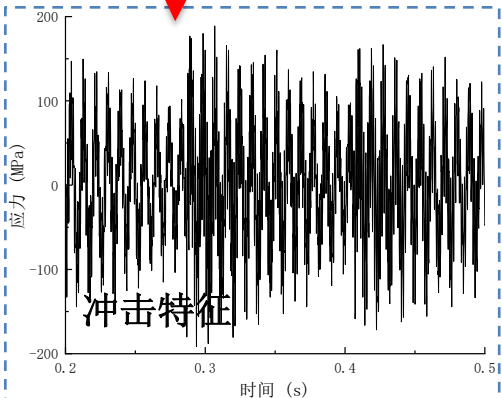
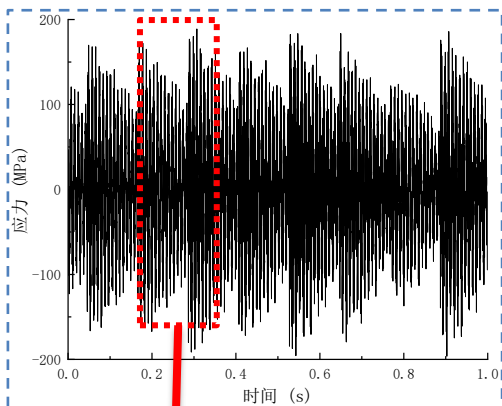


压气机机匣加速度频谱及细节图

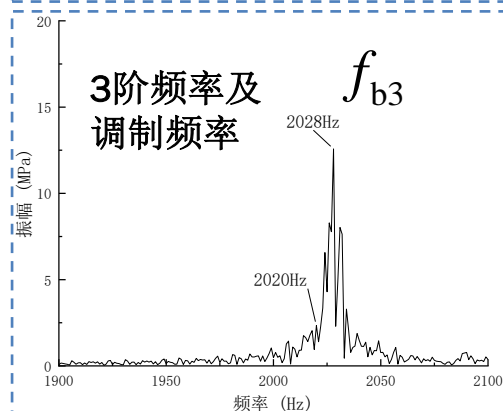
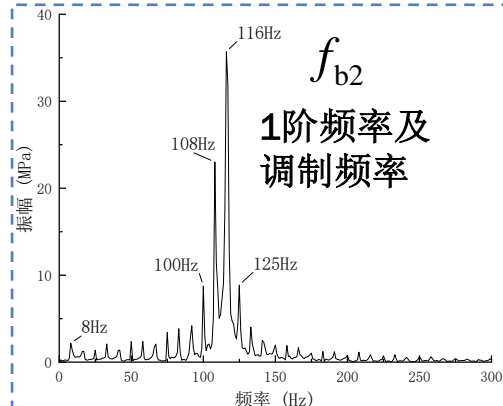
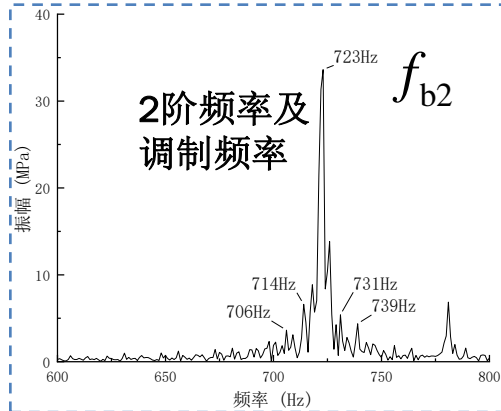
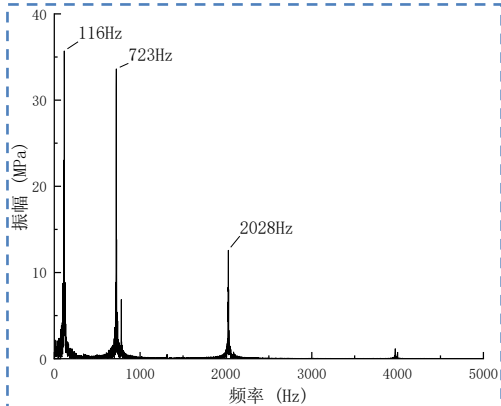


含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-裂纹叶片碰摩试验

裂纹
叶片应力时域响应及细节图

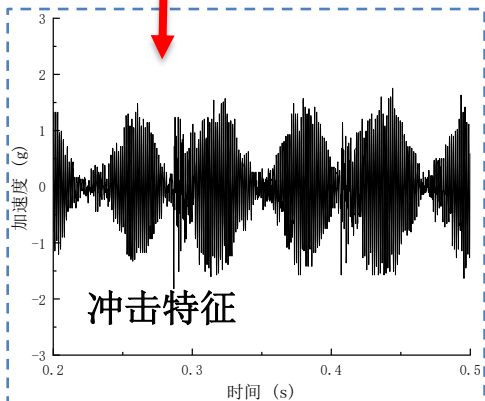
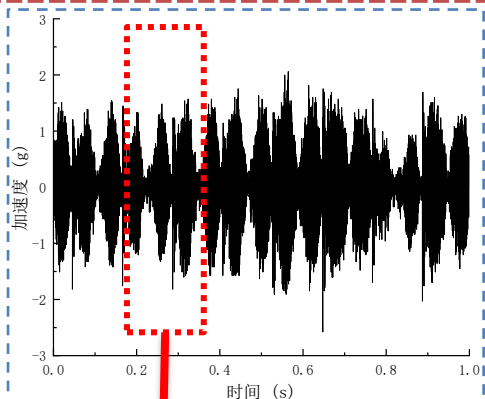


裂纹
叶片应力频谱及细节图

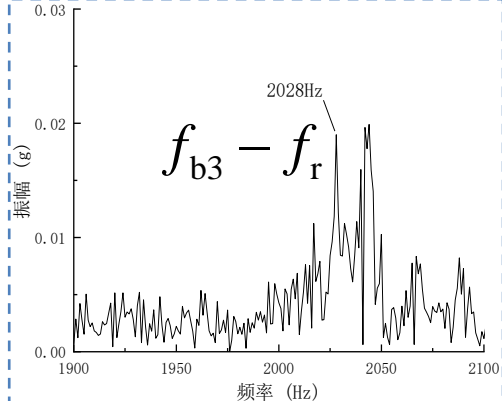
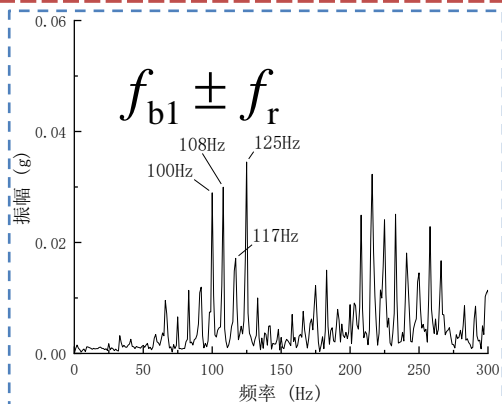
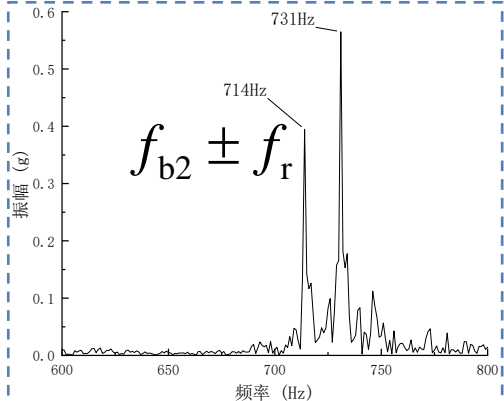
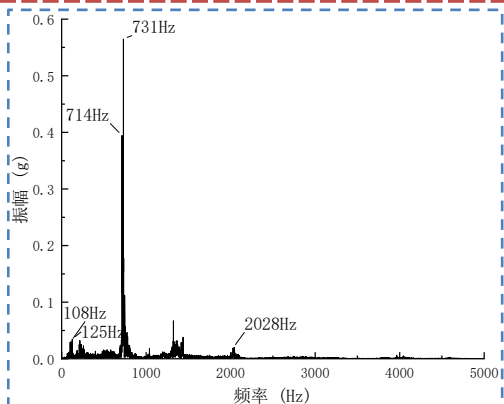


含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-裂纹叶片碰摩试验

轴承座加速度响应及细节图

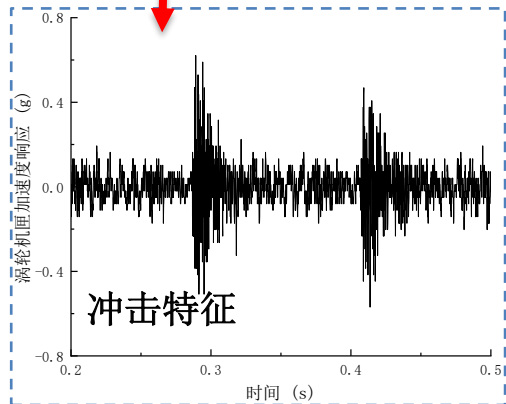
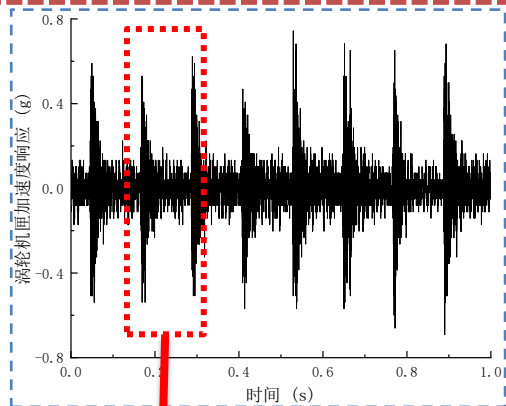


轴承座加速度频谱及细节图

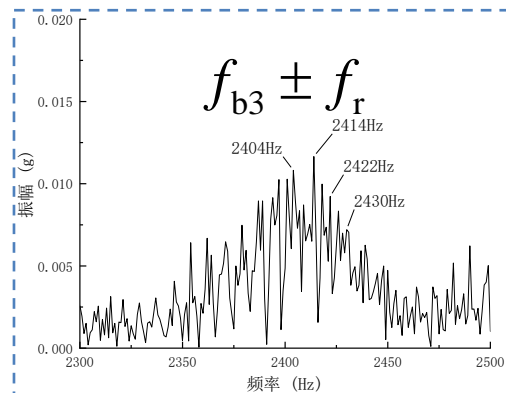
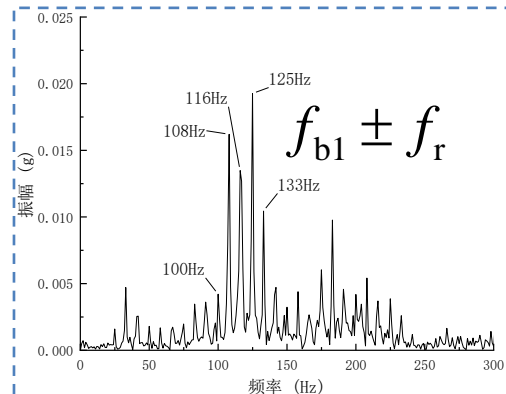
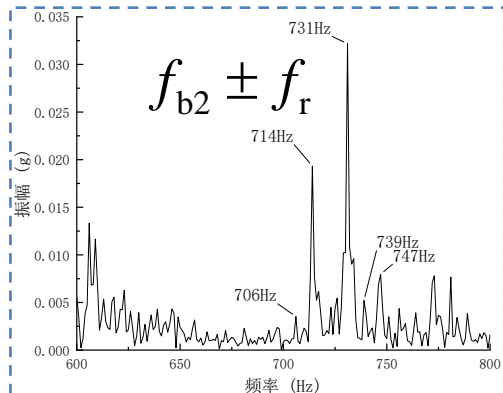
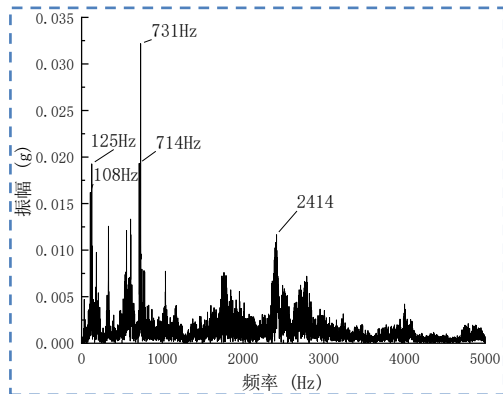


含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-裂纹叶片碰摩试验

涡轮机匣加速度响应及细节图

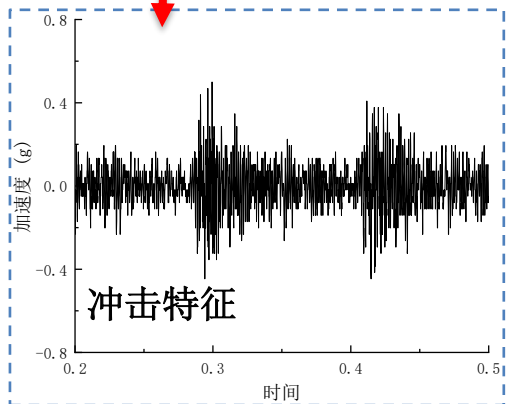
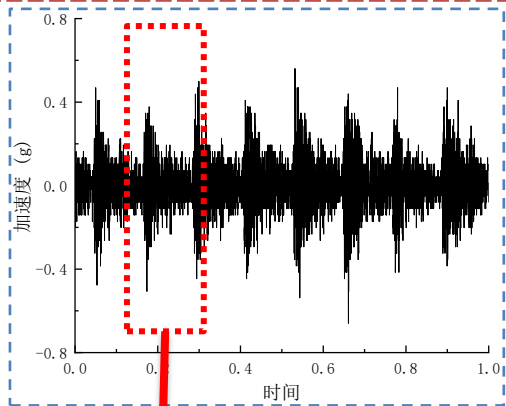


涡轮机匣加速度频谱及细节图

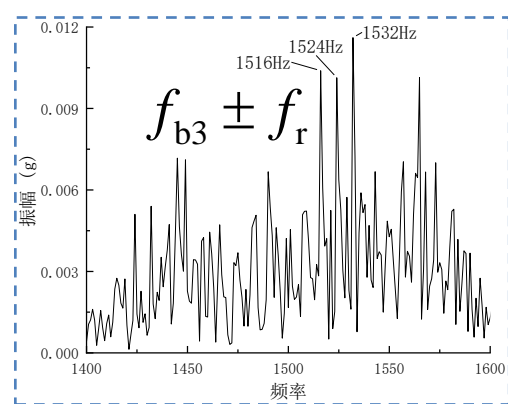
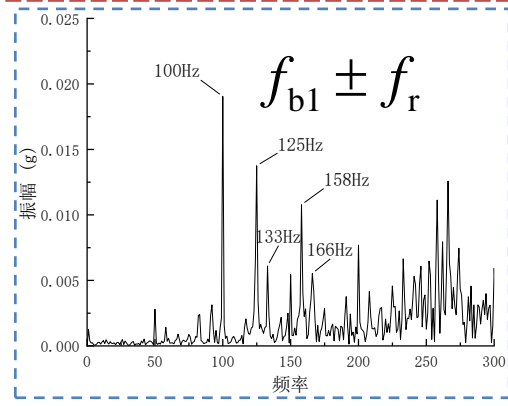
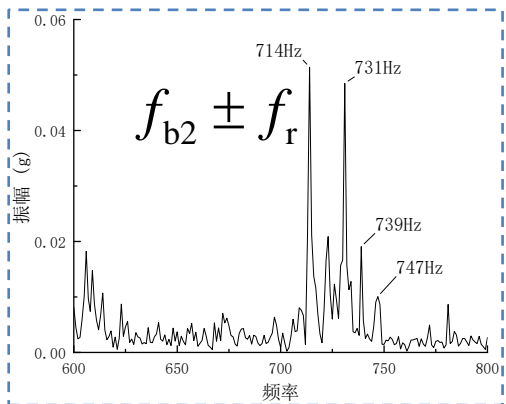
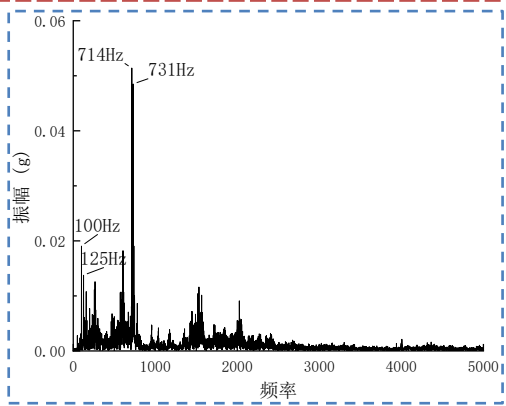


含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-裂纹叶片碰摩试验

压气机机匣加速度响应及细节图



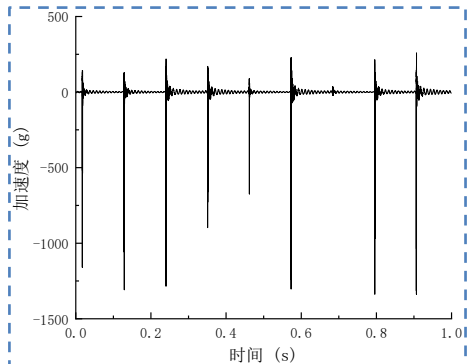
压气机机匣加速度频谱及细节图



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

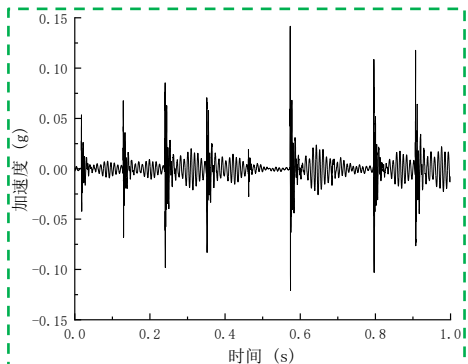
含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-健康叶片仿真

叶片加速度响应



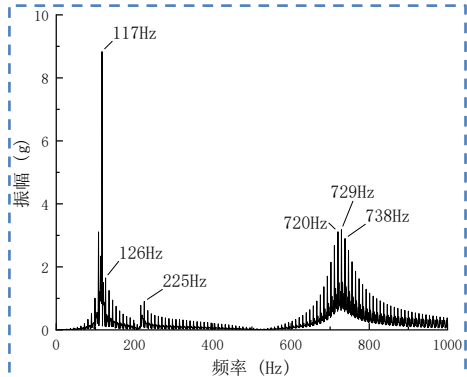
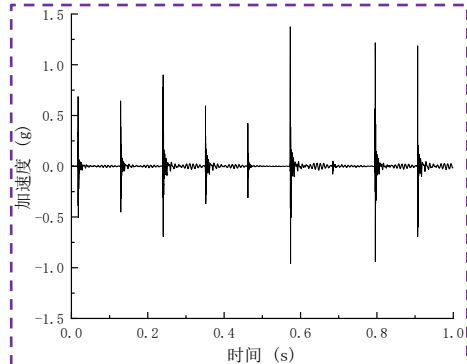
冲击特征

轴承座加速度响应



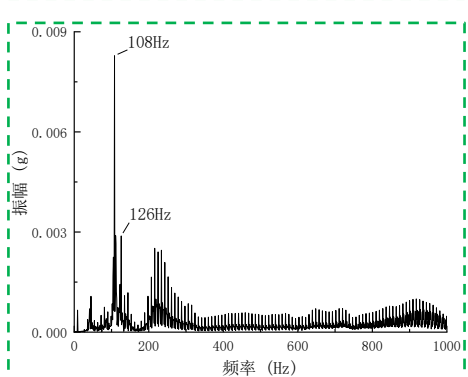
冲击特征

涡轮机匣加速度



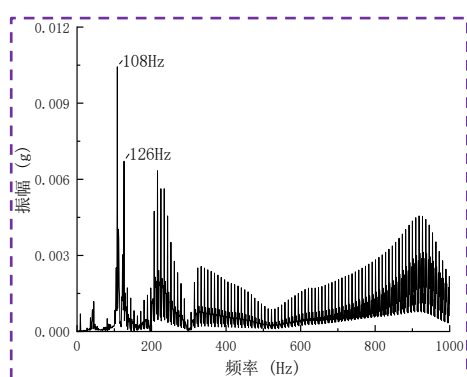
倍频现象

叶片固有频率



倍频现象

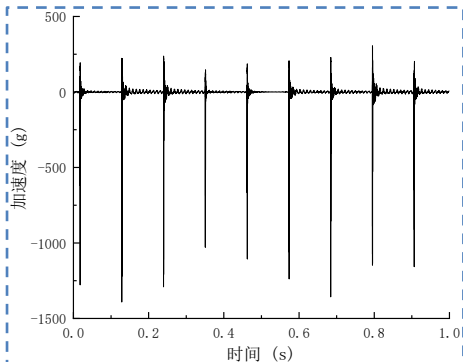
叶片固有频率组合频率



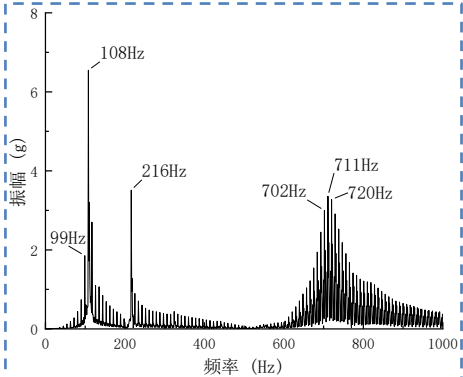
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-裂纹叶片仿真

叶片加速度响应



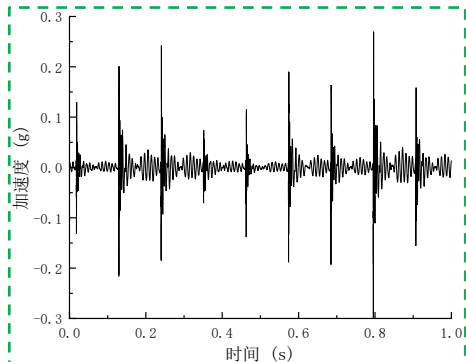
冲击特征



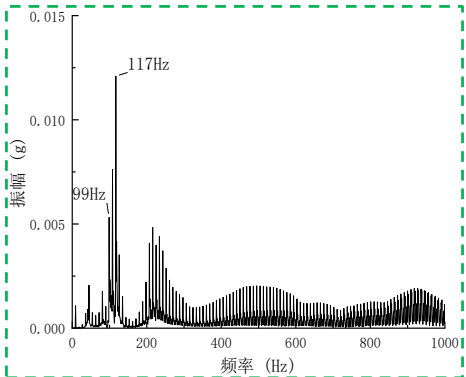
倍频现象

叶片固有频率

轴承座加速度响应



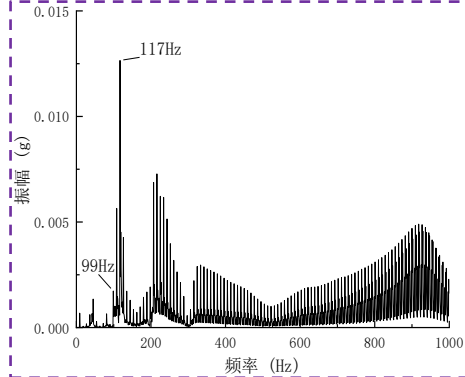
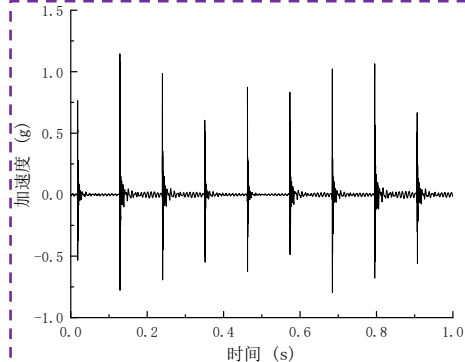
冲击特征



倍频现象

叶片固有频率组合频率

涡轮机匣加速度



叶片机匣碰摩故障整机仿真与试验研究结论：

➤ 时域响应特征：

- 叶片应力：呈现显著的冲击信号及随后的振荡衰减现象；
- 轴承座/机匣加速度：同样捕捉到由碰摩引发的周期性冲击脉冲；远离碰摩点的压气机机匣加速度响应特征要弱于靠近碰摩点的涡轮机匣加速度；

➤ 频域响应特征：

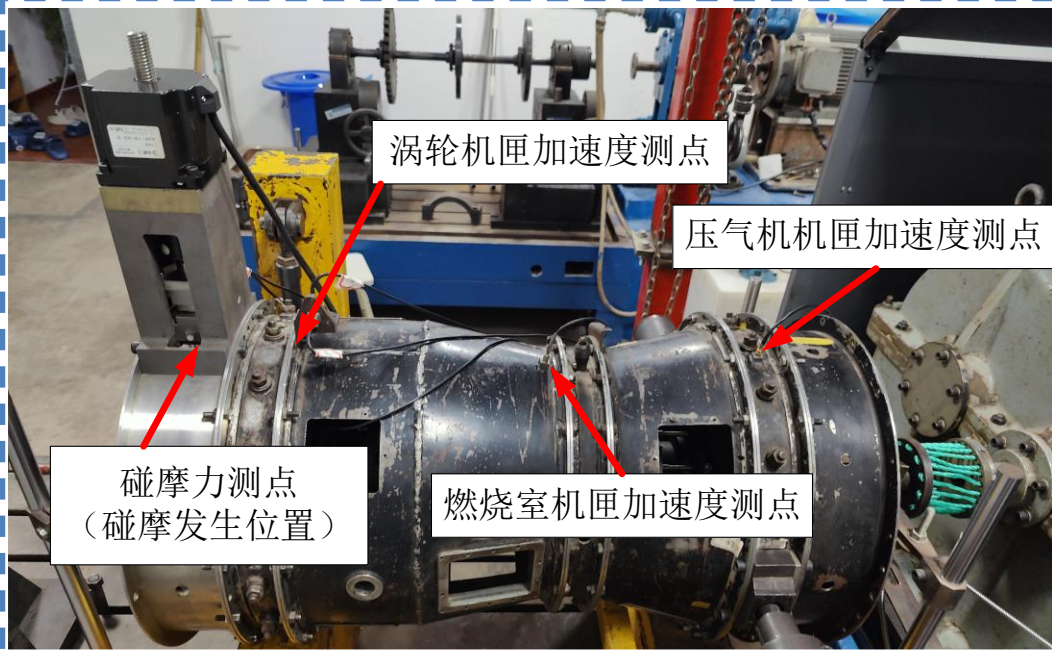
- 叶片频谱：出现多阶固有频率（1阶、2阶、3阶）及丰富的转速倍频成分。
- 轴承座/涡轮/压气机机匣：存在大量转速调制频率；在叶片固有频率附近出现幅值突增，表现为“转速频率 ± 叶片固有频率”的组合频率成分；

➤ 裂纹故障的影响：

- 含裂纹叶片的碰摩响应特征与健康叶片基本一致，裂纹仅导致叶片固有频率下降，未引入新的频谱成分或改变碰摩冲击形态。

含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-冲击信号传递试验

试验器布置



现象：涡轮机匣靠近碰摩发生点的加速度响应中，冲击信号强度明显高于远离碰摩发生点的压气机机匣加速度响应。



试验：针对冲击信号传递特性，本文开展了不同转速条件下的系列试验，重点分析了各测点冲击信号的到达时序特征

碰摩点

涡轮机匣

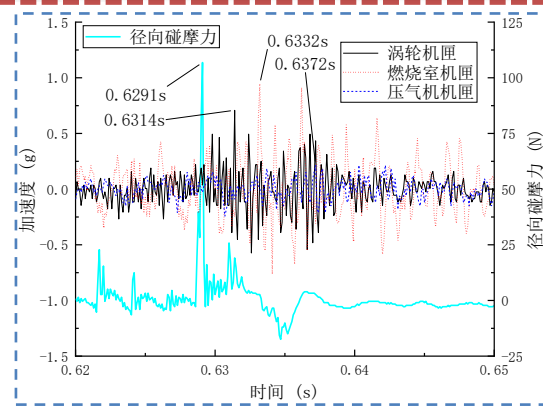
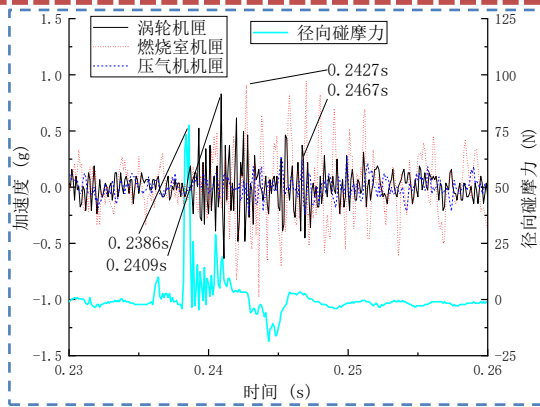
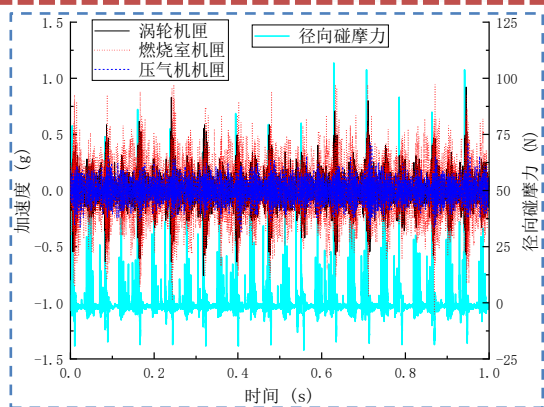
燃烧室机匣

压气机机匣

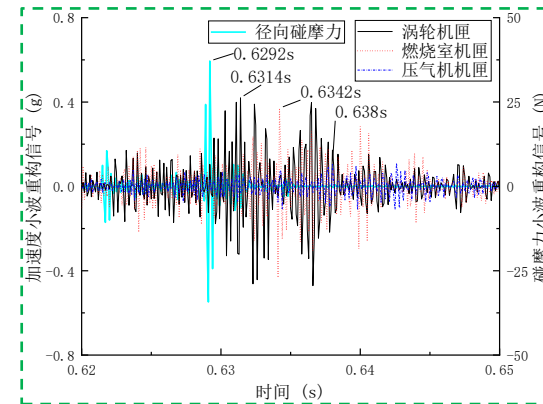
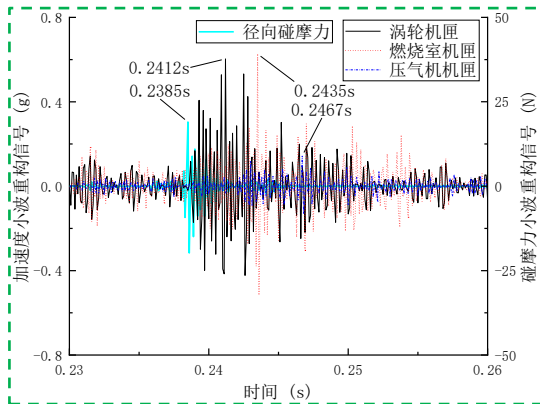
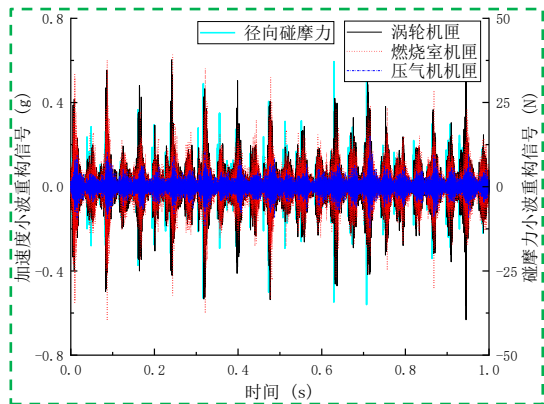
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-冲击信号传递试验-800rpm

原始信号



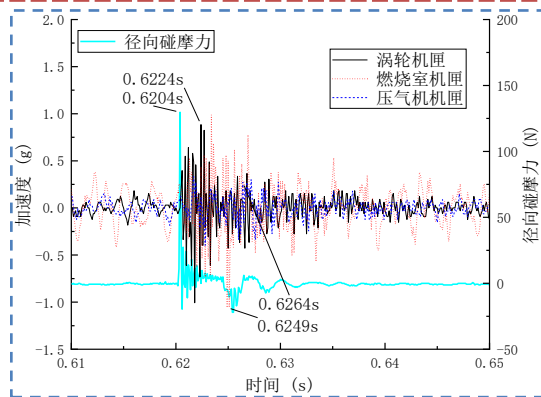
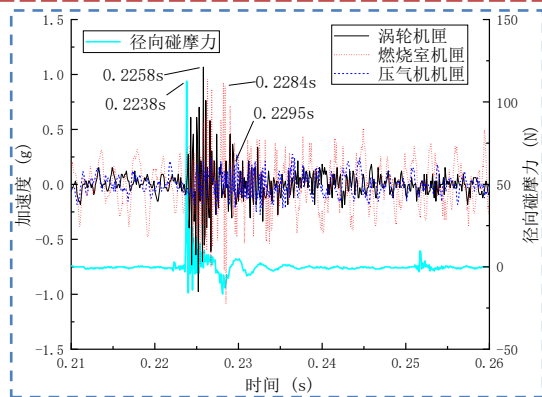
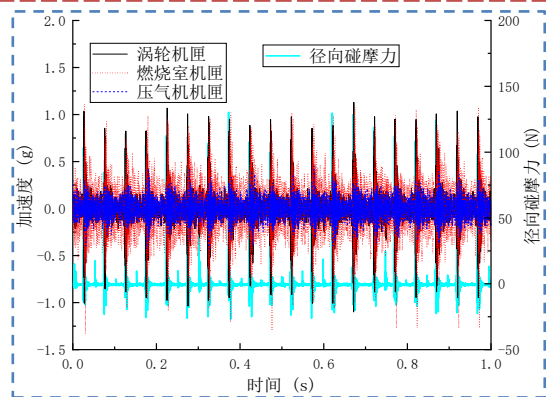
小波重构信号



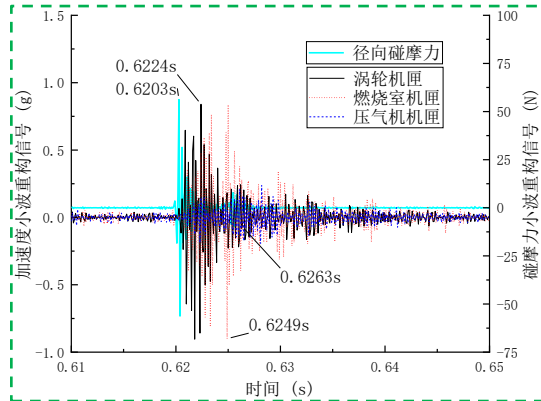
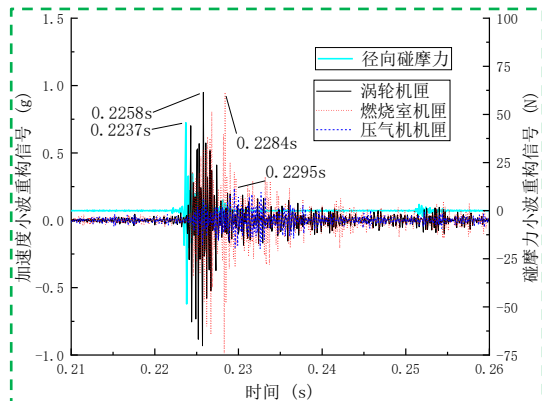
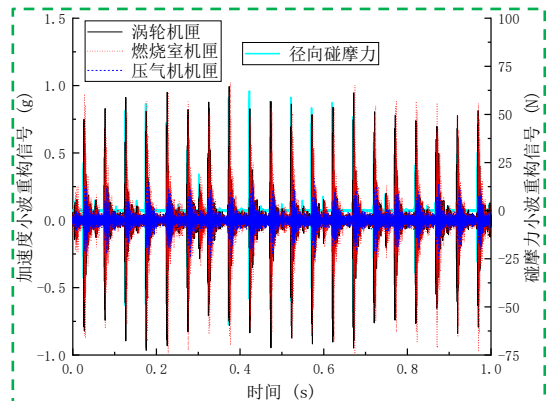
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-冲击信号传递试验-1200rpm

原始信号



小波重构信号



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片-机匣碰摩故障的整机振动特性试验研究-冲击信号传递试验

800r/min试验	时刻	碰摩力-涡轮机匣	涡轮-燃烧室机匣	燃烧室-压气机机匣
原始信号时刻差	0.2s	2.3ms	1.8ms	4.0ms
	0.6s	2.3ms	1.8ms	4.0ms
小波重构信号时刻差	0.2s	2.7ms	2.3ms	3.2ms
	0.6s	2.2ms	2.8ms	3.8ms
1200r/min试验	时刻	碰摩力-涡轮机匣	涡轮-燃烧室机匣	燃烧室-压气机机匣
原始信号时刻差	0.2s	2.0ms	2.7ms	1.3ms
	0.6s	2.0ms	2.5ms	1.5ms
小波重构信号时刻差	0.2s	2.1ms	2.5ms	1.2ms
	0.6s	2.1ms	2.5ms	1.4ms

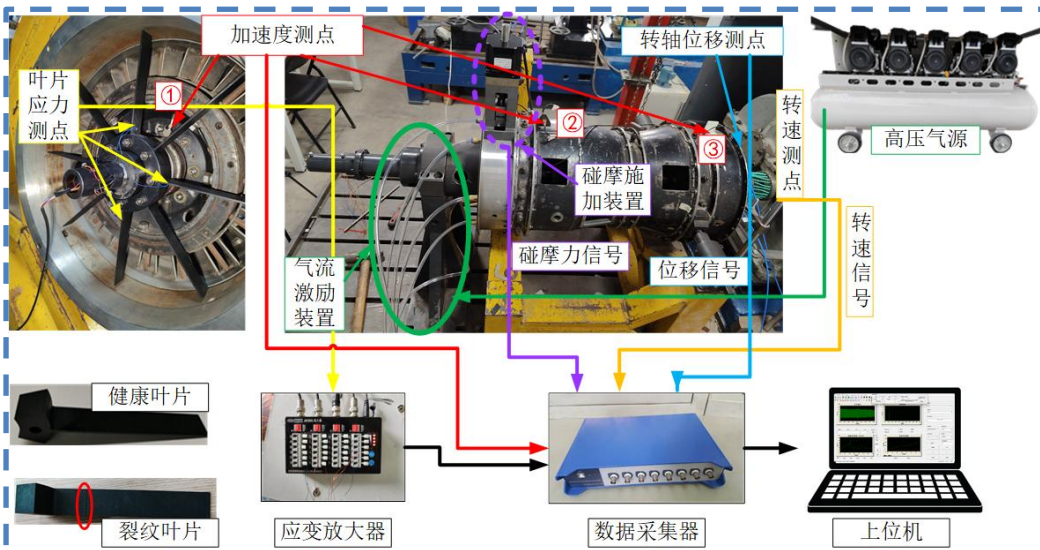
➤ 碰摩冲击的传播与衰减

- **传播时序:** 遵循 涡轮 →→ 燃烧室 →→ 压气机 由近到远的先后到达顺序。
- **衰减效应:** 远距离传输导致冲击特征显著弱化。
- **检测策略:** 远端测点必须结合信号处理算法以实现故障的有效诊断。

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究

试验测试系统



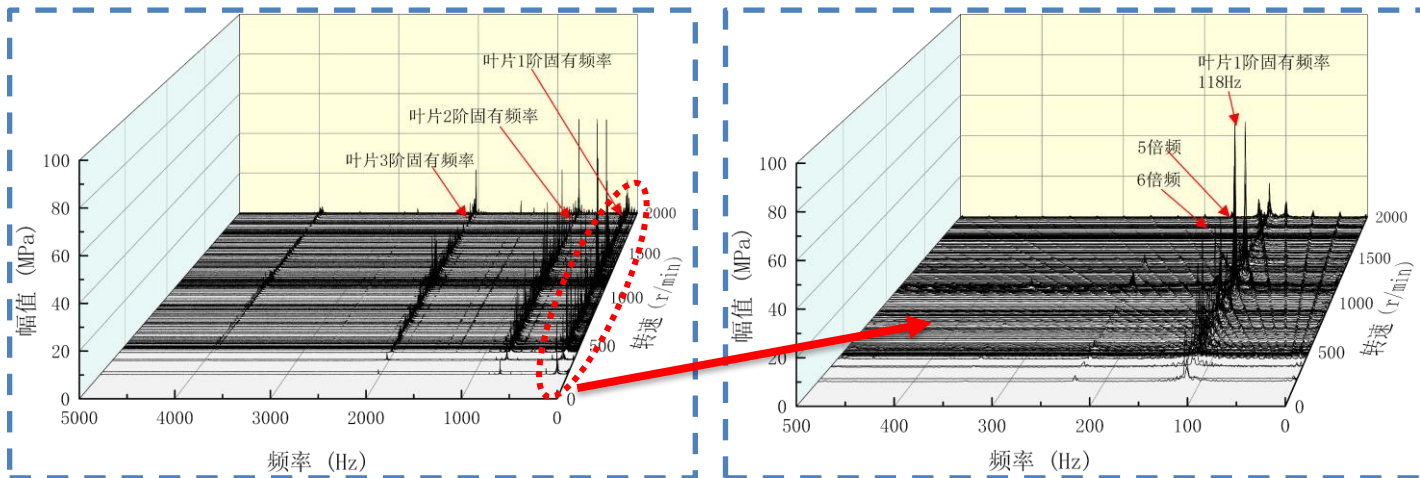
试验测试内容

序号	试验内容	
1	变速 工况气流激励 下叶片 - 机匣碰摩	健康叶片
2	整机试验	含裂纹叶片
3	恒速 工况气流激励 下叶片 - 机匣碰摩	健康叶片
4	故障整机试验	含裂纹叶片
5	碰摩载荷下叶片 裂纹 扩展演化试验	健康叶片

传感器测点

①叶片应力; ②轴承座加速度; ③机匣加速度; ④转轴位移; ⑤碰摩力

健康叶片应力频谱图及细节图



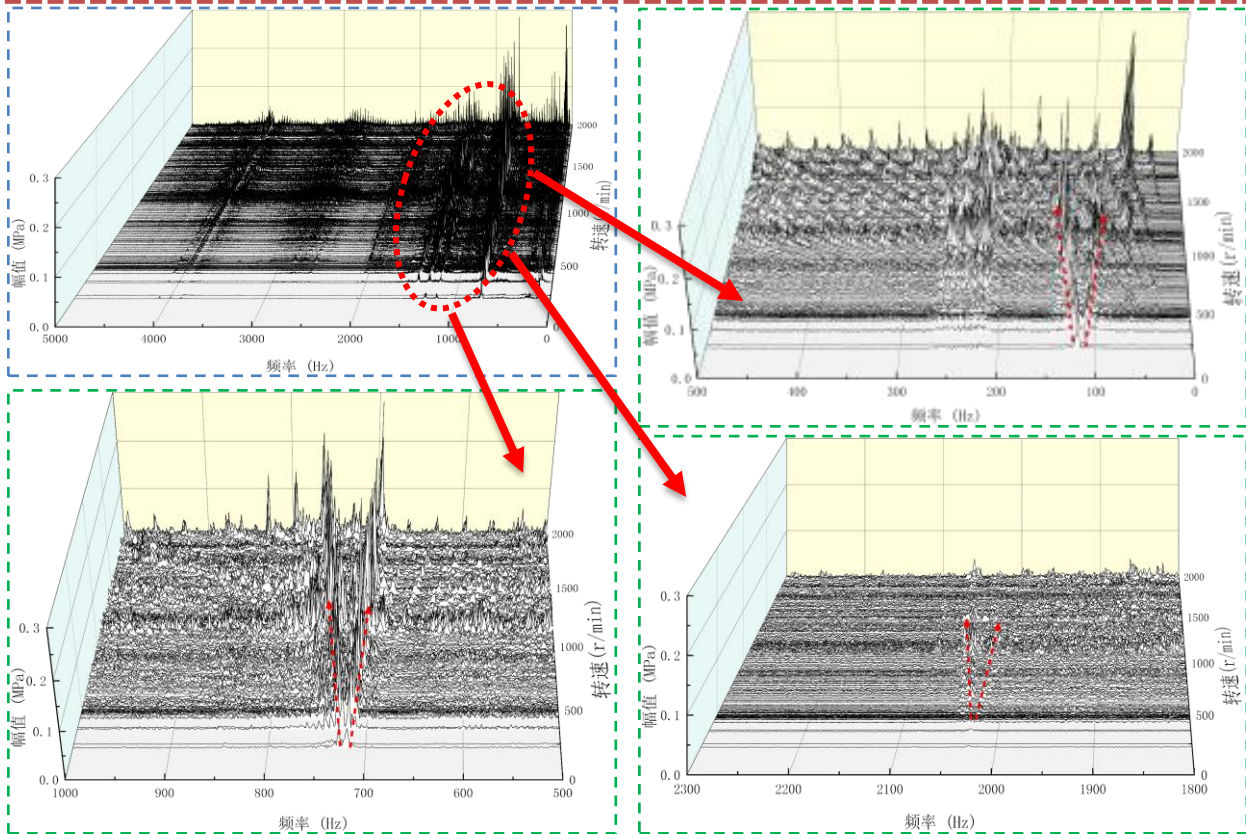
叶片1阶、2阶和3阶固有频率

转速倍频频率

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-变速健康叶片试验

轴承座加速度响应及细节图

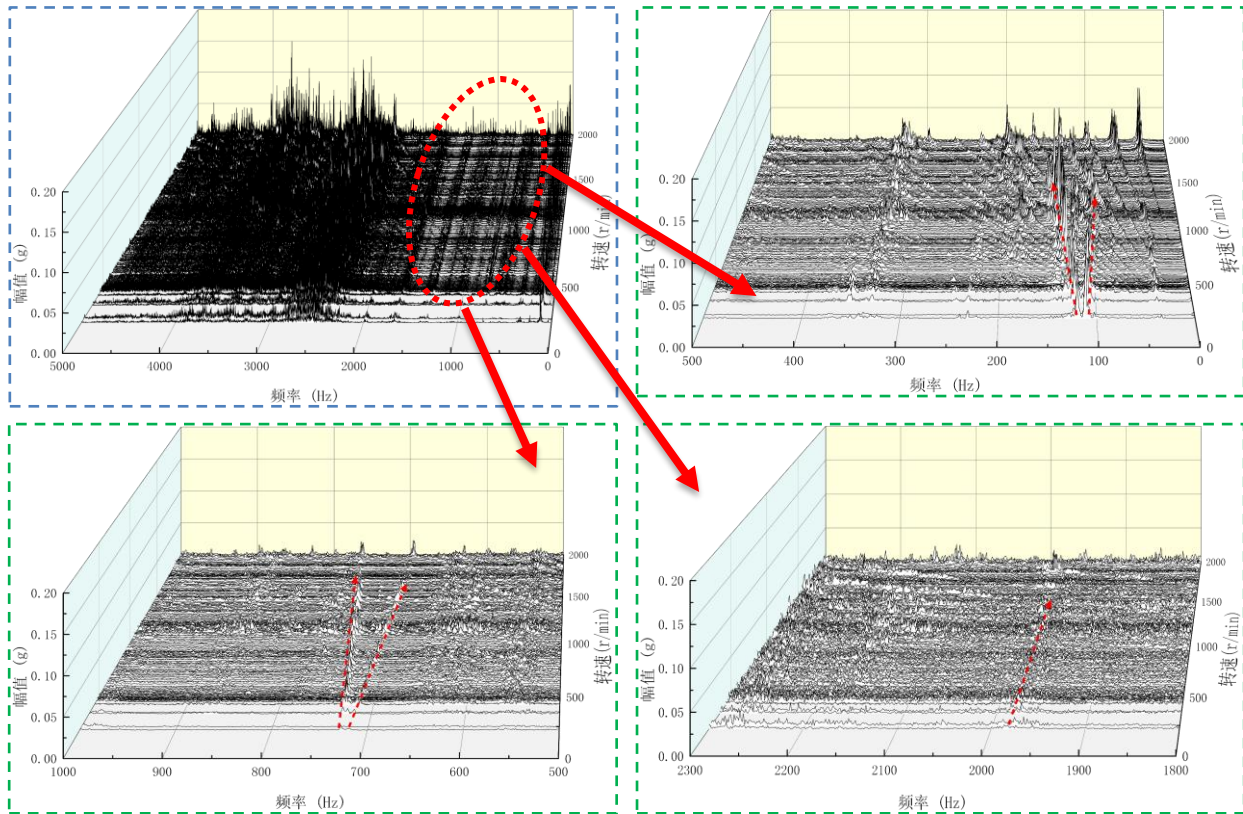


叶片1、2、3阶固有频率成分与转速频率的组合频率；

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-变速健康叶片试验

涡轮增压器加速度响应及细节图

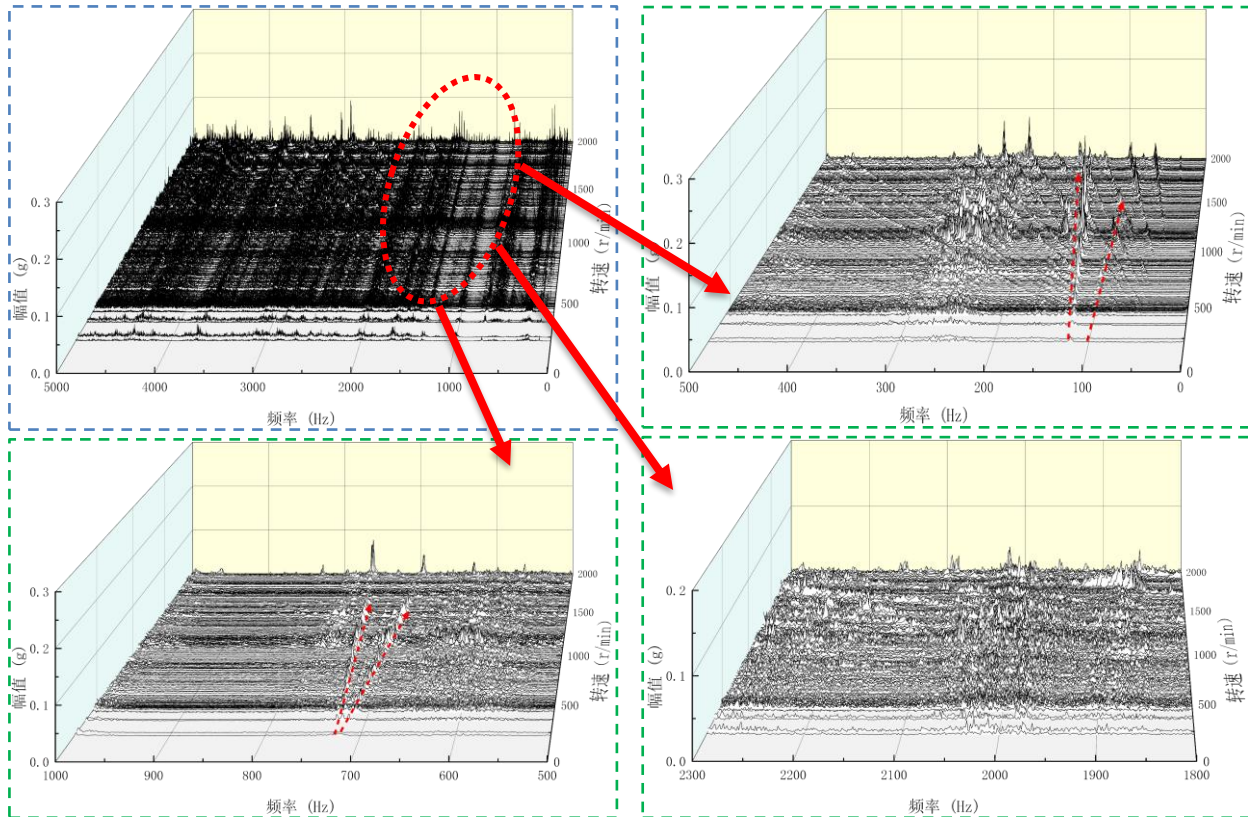


叶片1、2、3
固有频率成分
与转速频率的
组合频率；

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-变速健康叶片试验

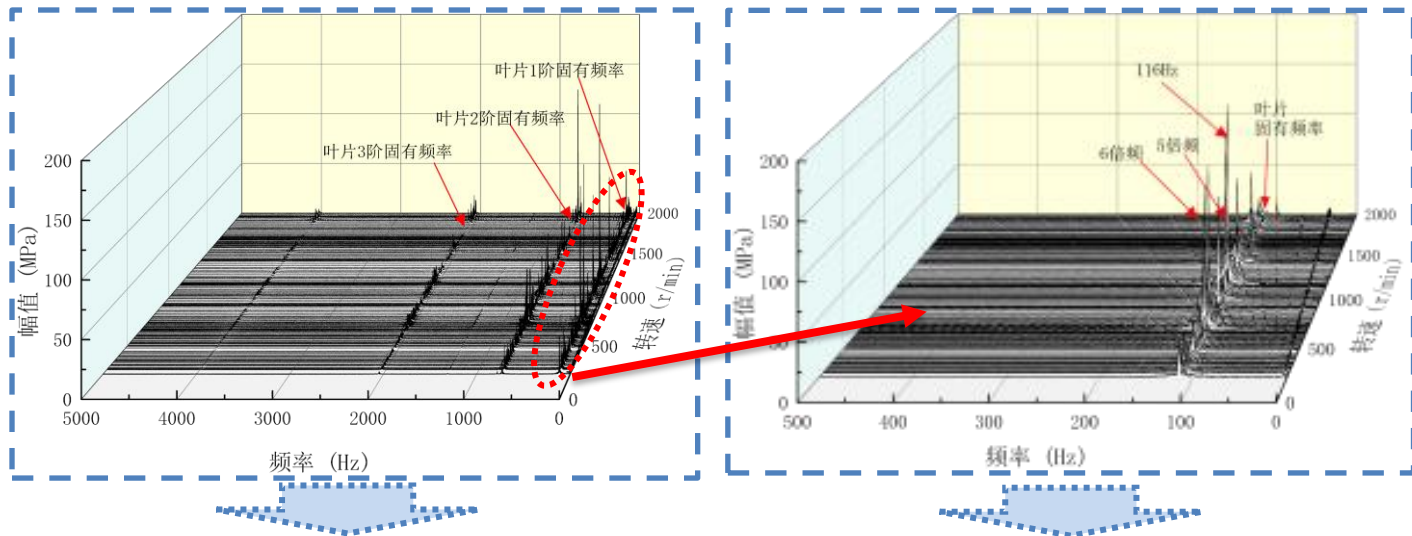
压气机匣加速度响应及细节图



叶片1、2、3阶固有频率成分与转速频率的组合频率；

叶片3阶组合频率成分特征较小。压气机机匣更远离碰摩点。

裂纹叶片应力频谱图及细节图



裂纹叶片
固有频率
低于健康
叶片

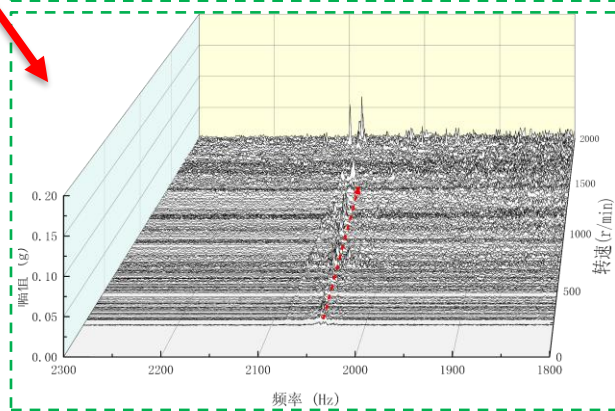
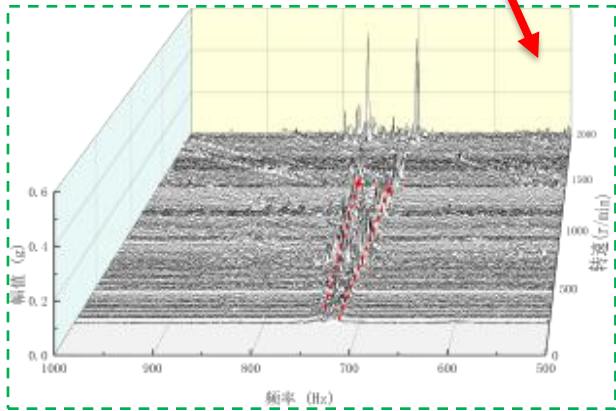
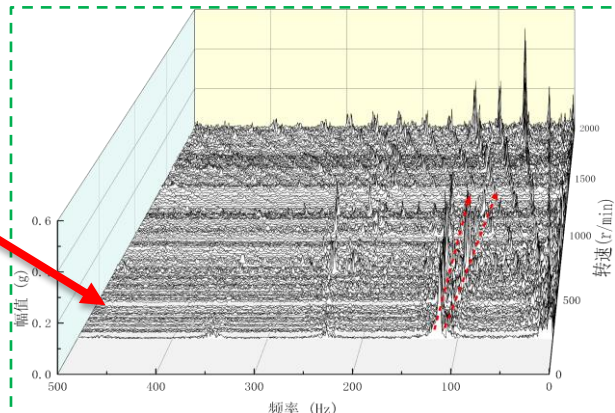
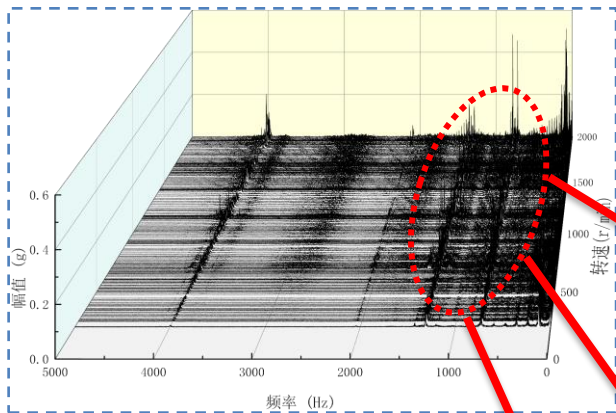
叶片1阶、2阶和3阶固有频率

转速倍频频率

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-变速裂纹叶片试验

轴承座加速度响应及细节图

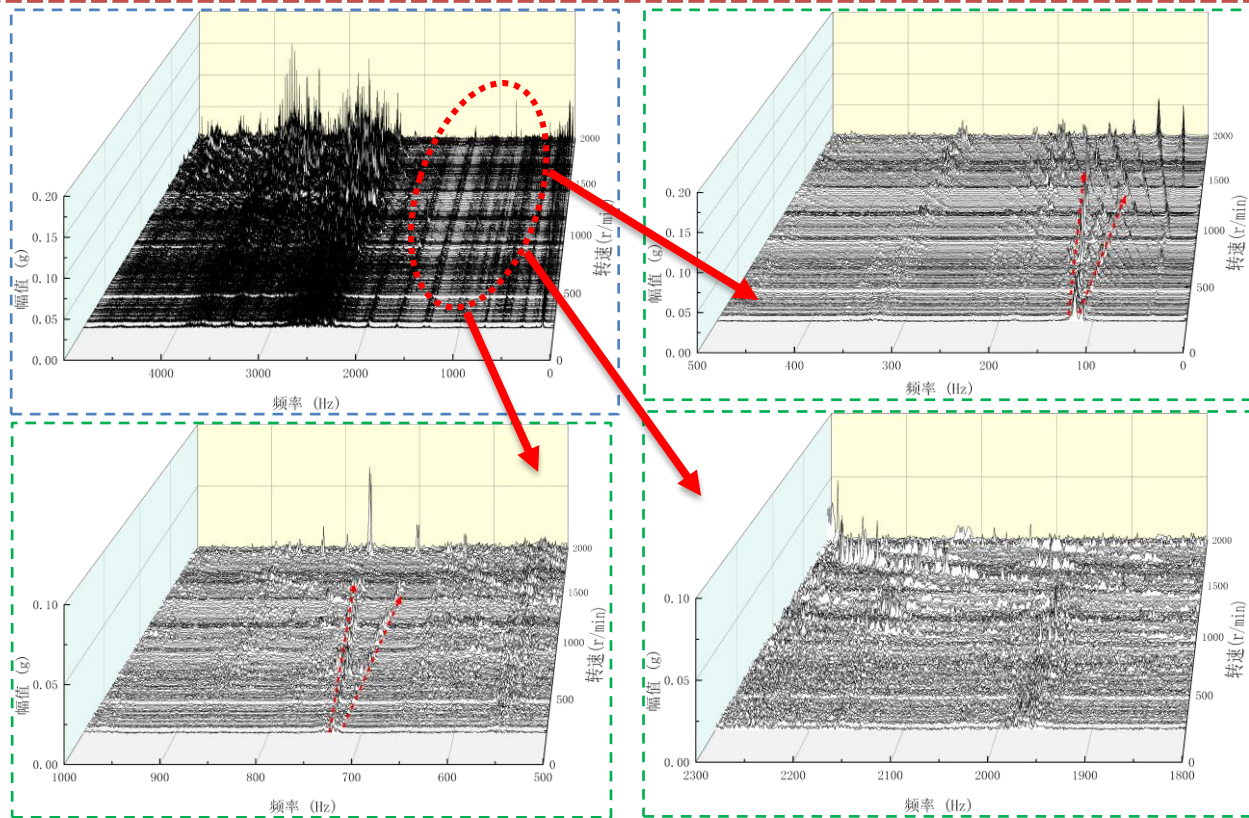


叶片1、2、3
阶固有频率
成分与转速
频率的组合
频率；

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-变速裂纹叶片试验

涡轮增压器加速度响应及细节图

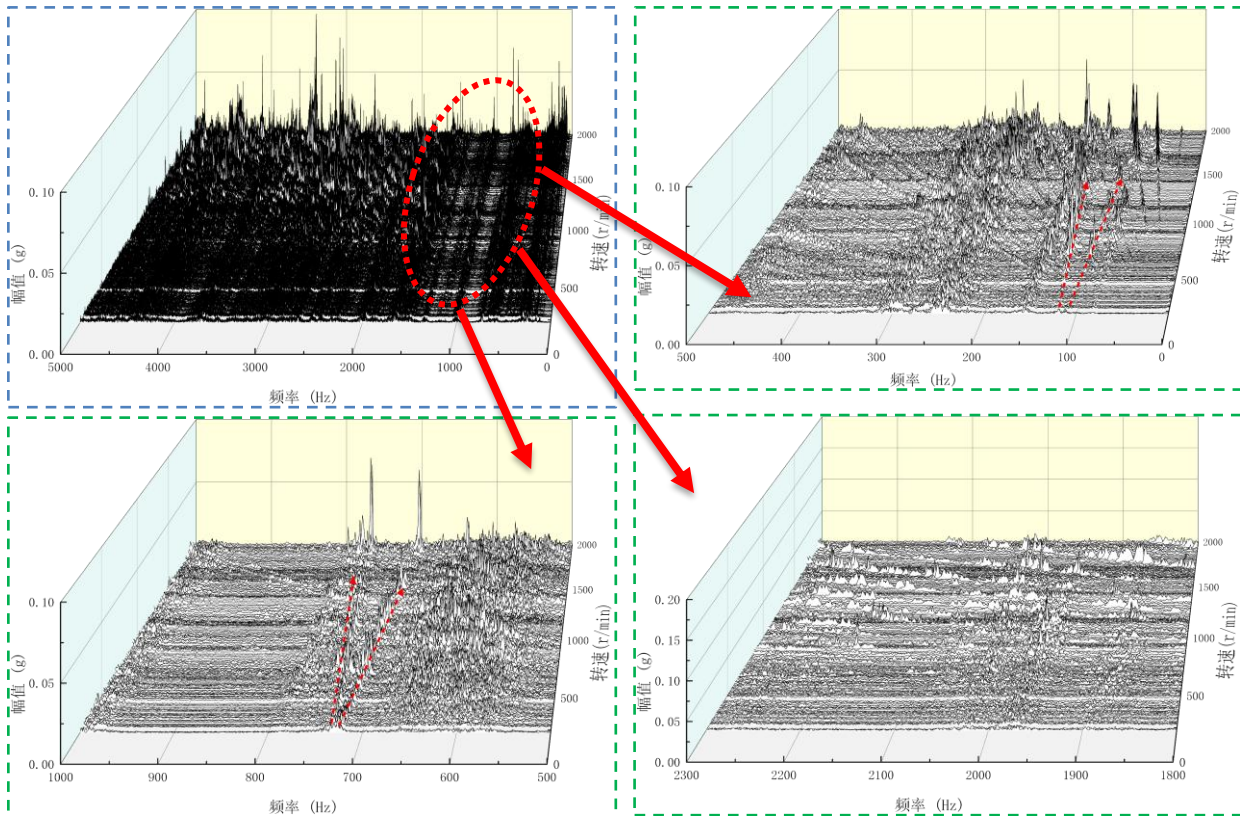


叶片1、2、3
阶固有频率
成分与转速
频率的组合
频率；

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-变速裂纹叶片试验

压气机匣加速度响应及细节图



叶片1、2、3阶固有频率成分与转速频率的组合频率；

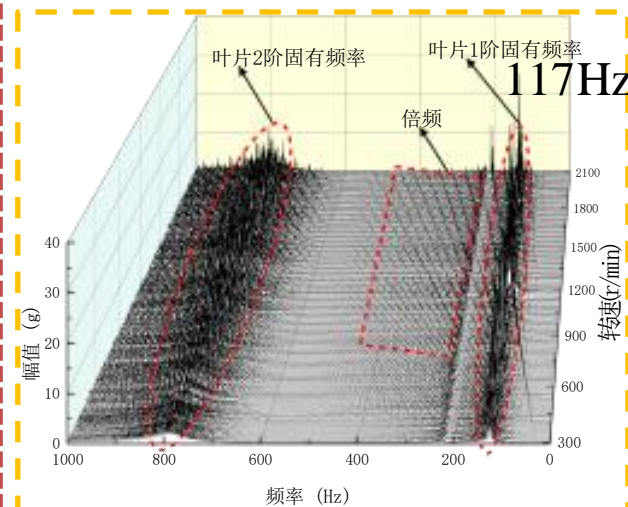
叶片3阶组合频率成分特征较小。压气机机匣远离碰摩点。

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

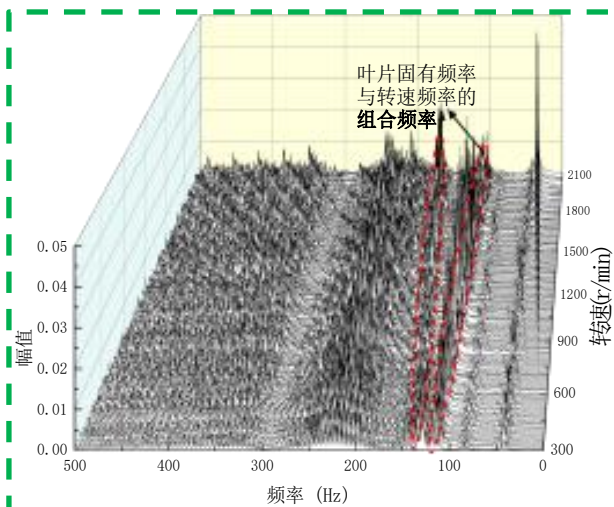
含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-变速健康叶片仿真

变速气激健康叶片碰摩仿真

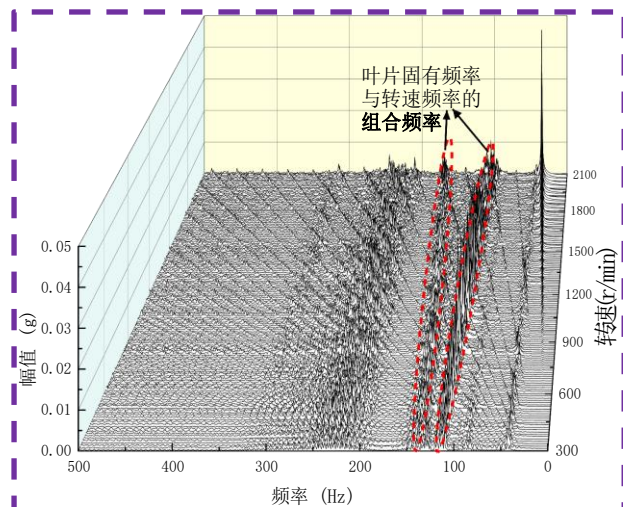
叶尖加速度响应



轴承座加速度响应



涡轮机匣加速度响应

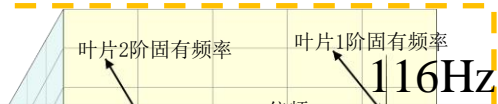


04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

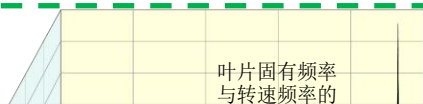
含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-变速裂纹叶片仿真

变速气激裂纹叶片碰摩仿真

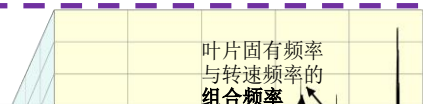
叶尖加速度响应



轴承座加速度响应



涡轮机匣加速度响应



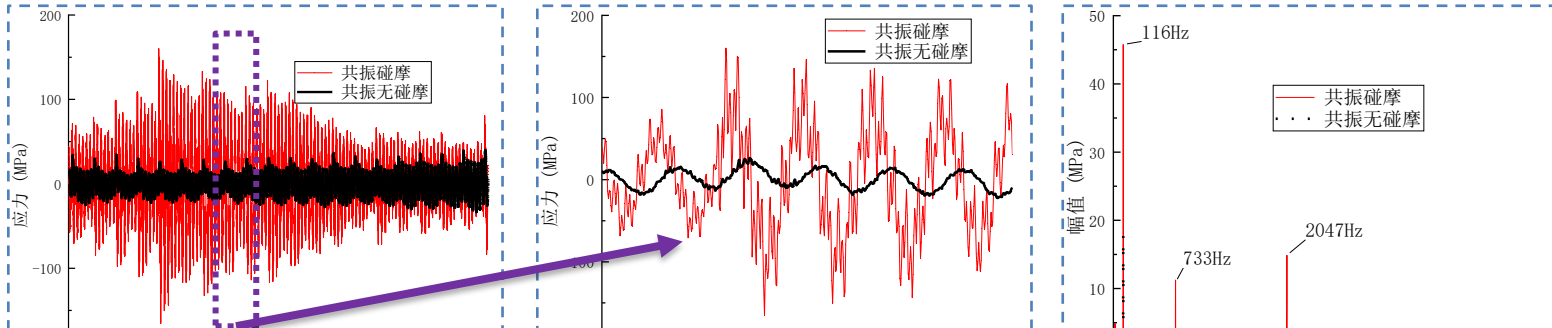
频域特征：叶片响应含有丰富的转速倍频及1-3阶固有频率。支承系统（轴承座/机匣）：出现大量转速倍频，并且存在“转速频率 ± 叶片固有频率（1-3阶）”的组合频率成分。

裂纹影响：含裂纹与健康叶片的耦合响应模式基本一致，裂纹仅导致叶片固有频率下降，未引入新的频谱成分或改变耦合机理。

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

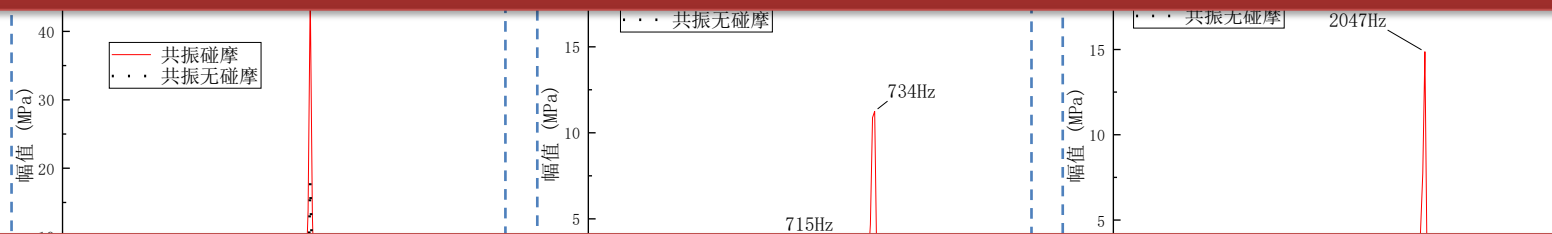
含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-恒速健康叶片试验

健康
叶片



时域上：叶片共振无碰摩时，叶片应力响应为正弦波形，叶片共振碰摩时，叶片应力响应为正弦波形叠加振荡下降；

响应及
频谱

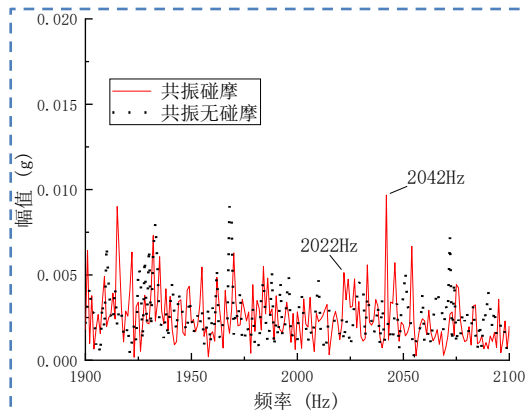
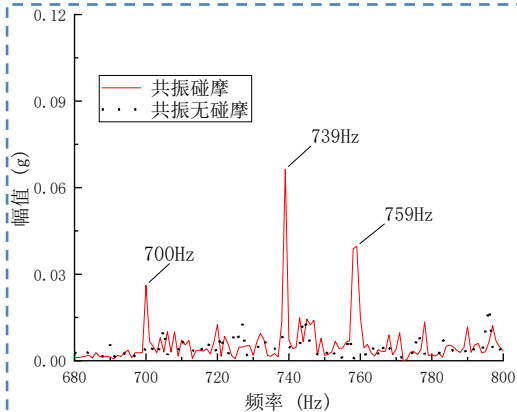
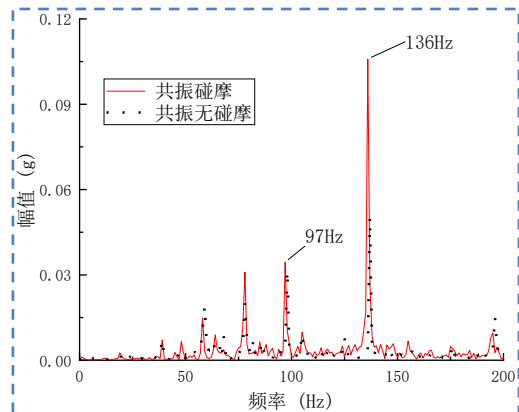
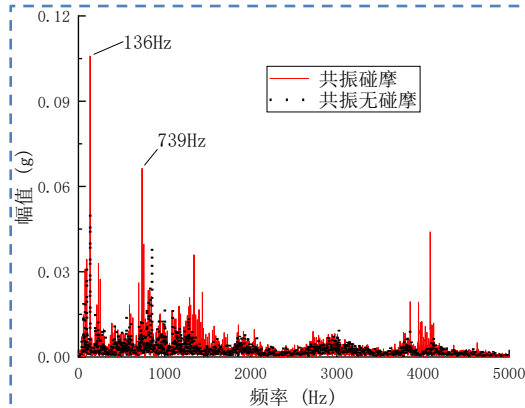
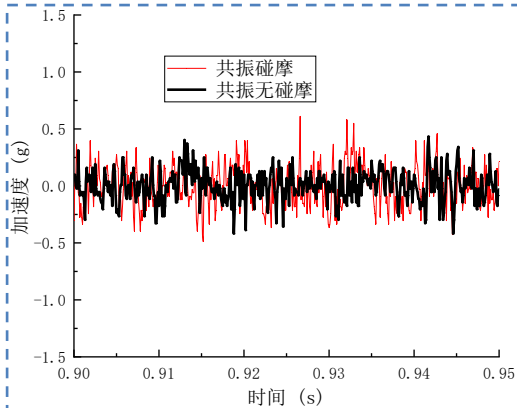
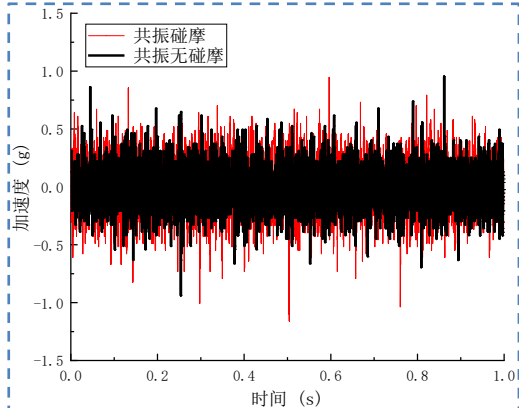


频域上：叶片共振无碰摩时，频谱主要是叶片共振频率（1阶），叶片共振碰摩时，频谱出现1/2/3阶固有频率成分，及大量转速倍频

04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-恒速健康叶片试验

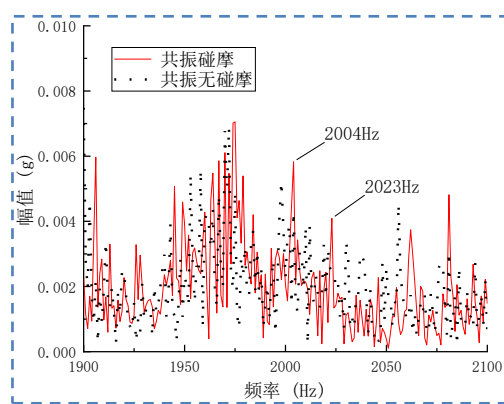
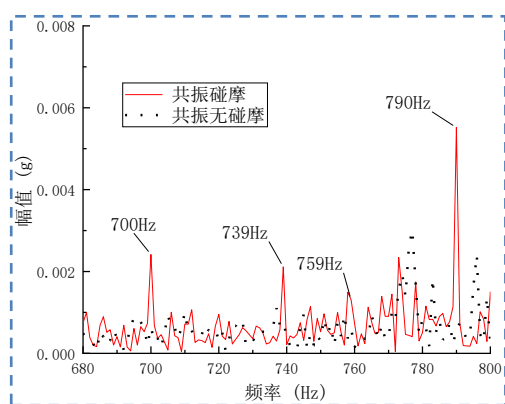
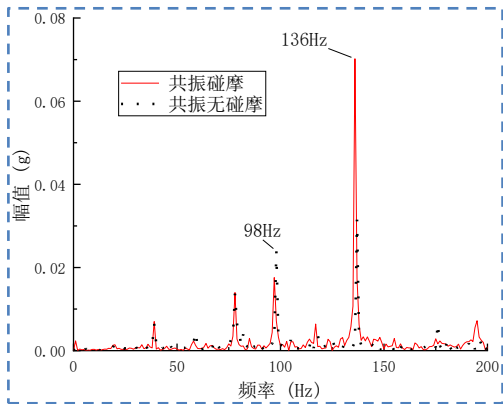
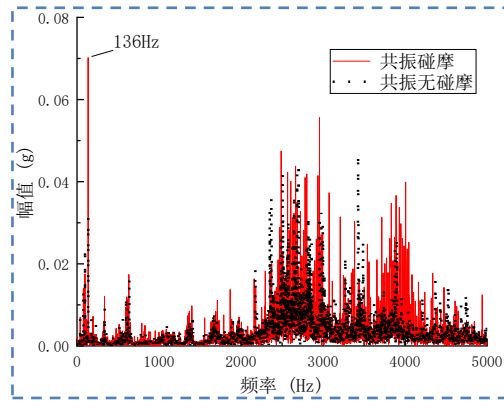
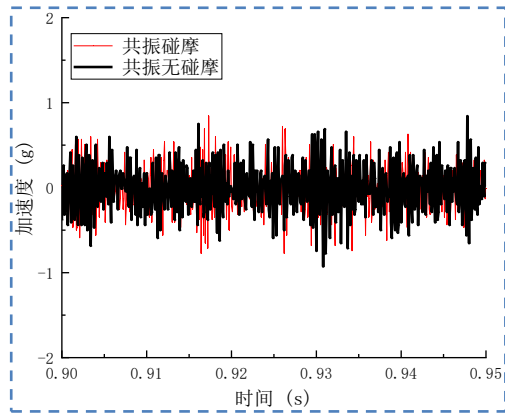
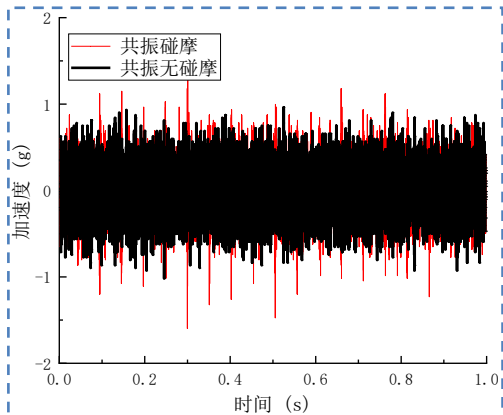
轴承座加速度响应及频谱



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-恒速健康叶片试验

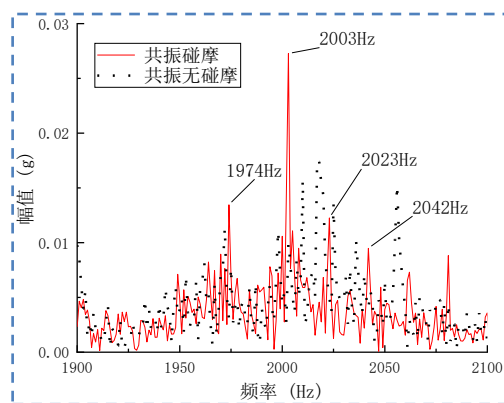
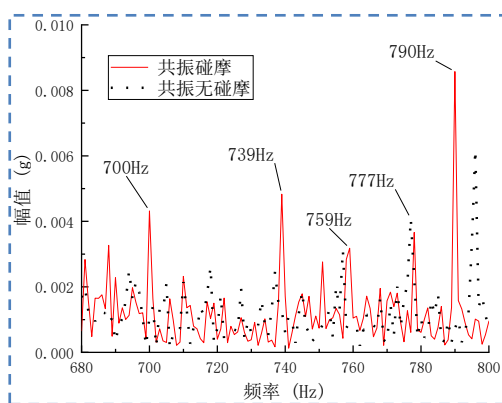
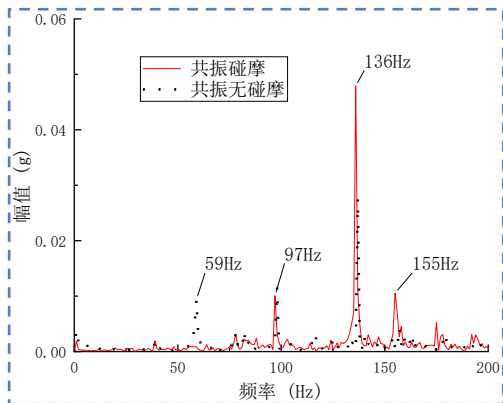
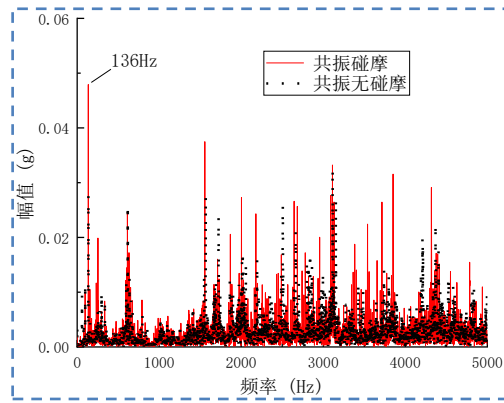
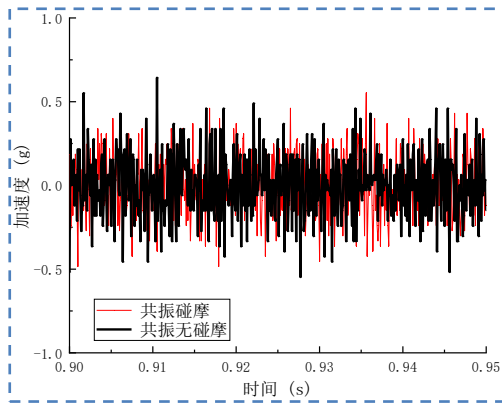
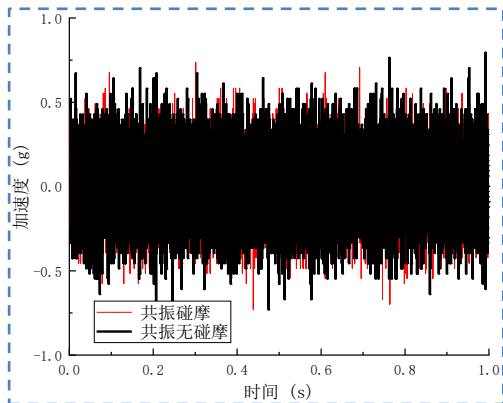
涡轮机匣加速度响应及频谱



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-恒速健康叶片试验

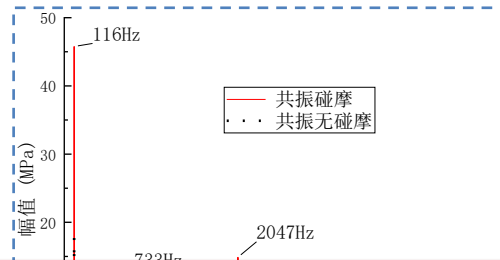
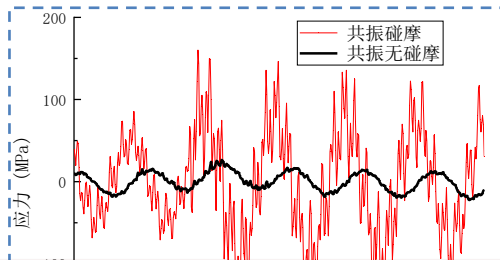
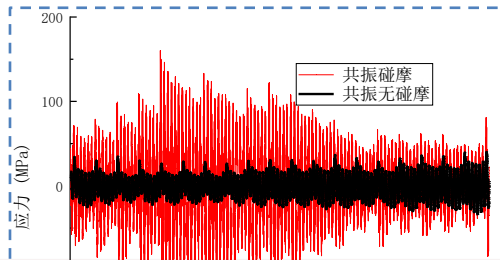
压气机机匣加速度响应及频谱



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-恒速裂纹叶片试验

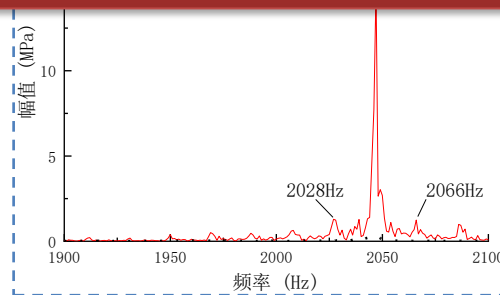
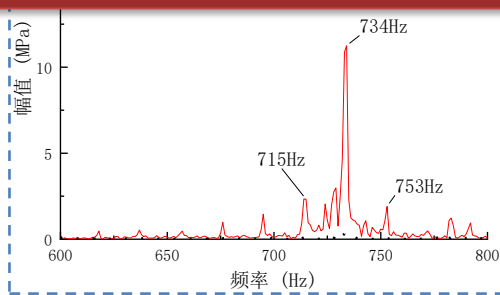
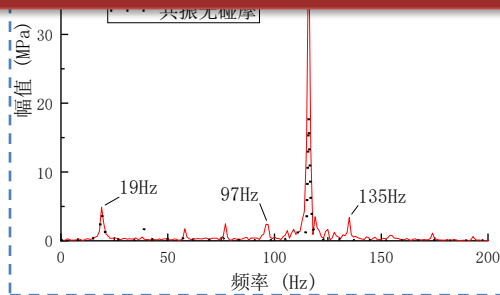
裂纹
叶



时域上：叶片共振无碰摩时，叶片应力响应为正弦波形，叶片共振碰摩时，叶片应力响应为正弦波形叠加振荡下降；

频域上：叶片共振无碰摩时，频谱主要是叶片共振频率（1阶），叶片共振碰摩时，频谱出现1/2/3阶固有频率成分，及大量转速倍频。（固有频率更低）

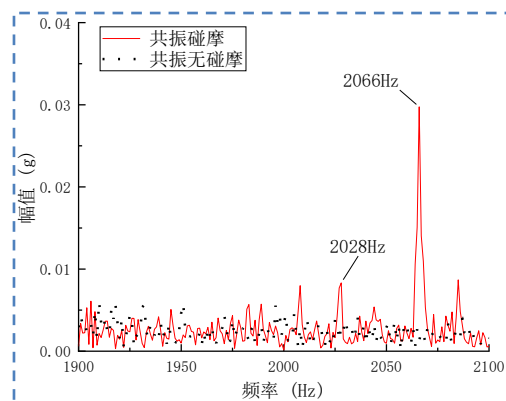
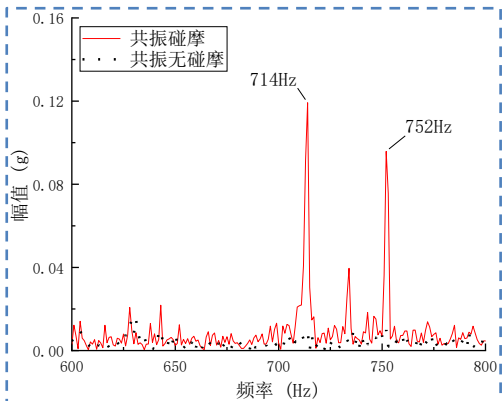
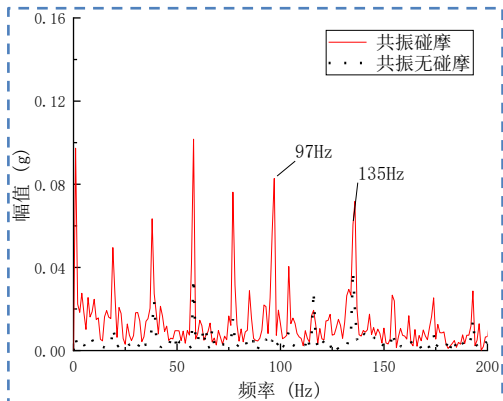
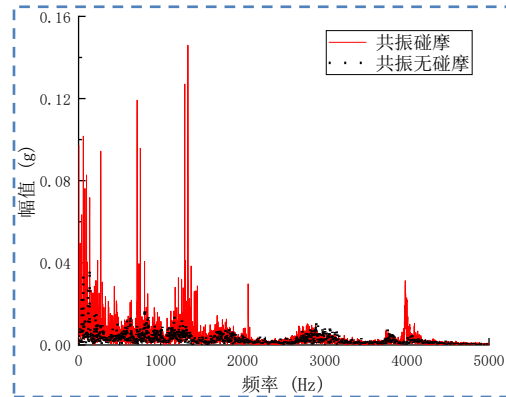
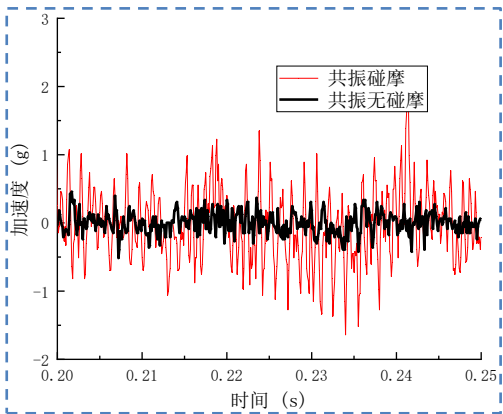
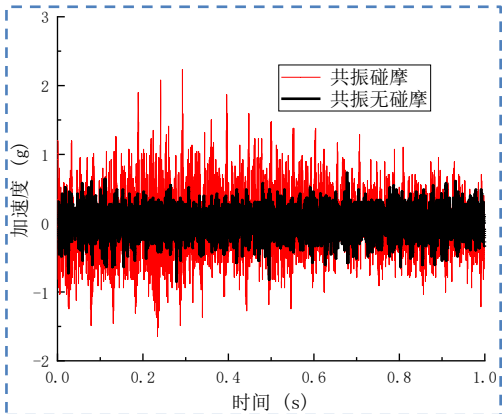
应
及
频
谱



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-恒速裂纹叶片试验

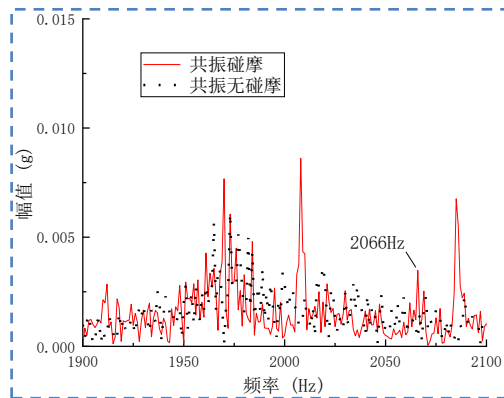
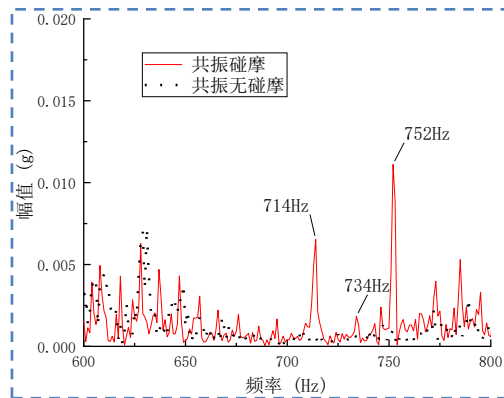
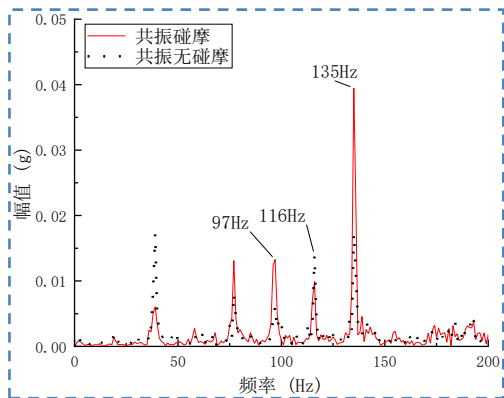
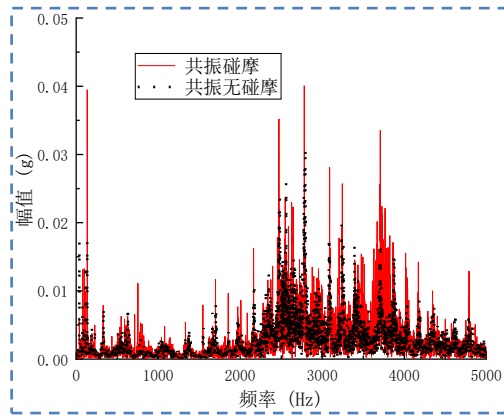
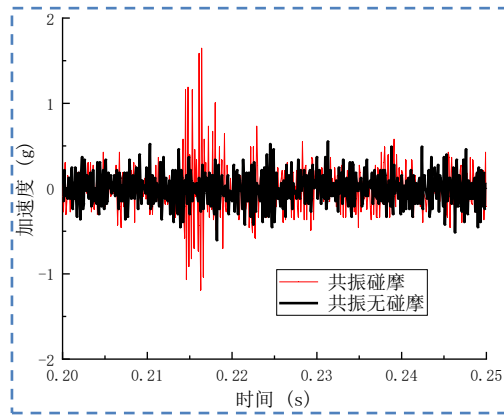
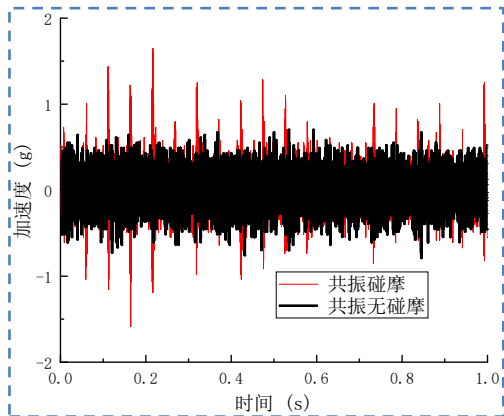
轴承座加速度响应及频谱



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-恒速裂纹叶片试验

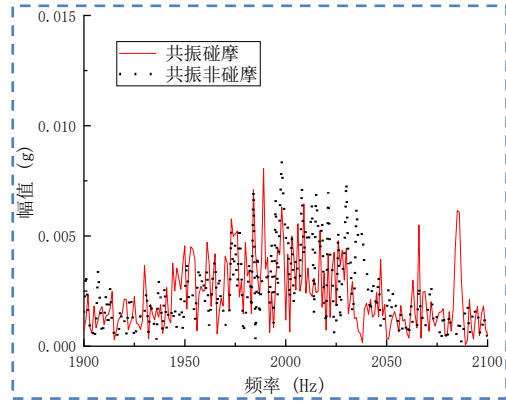
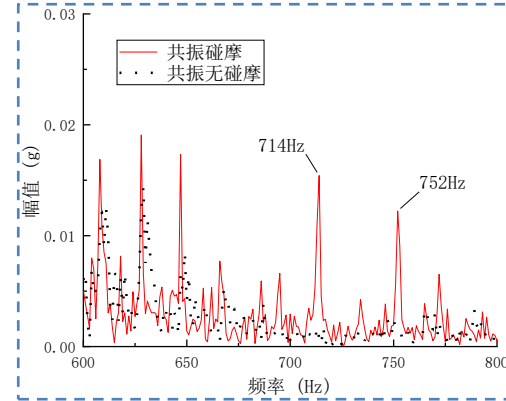
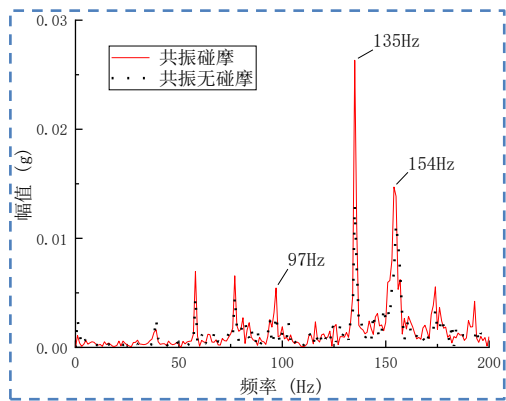
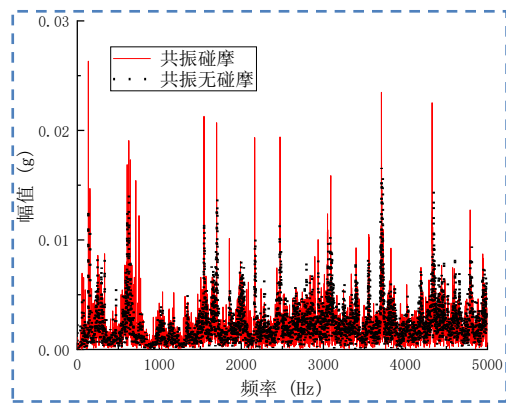
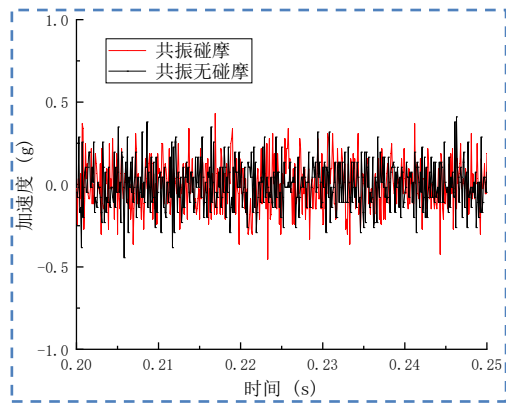
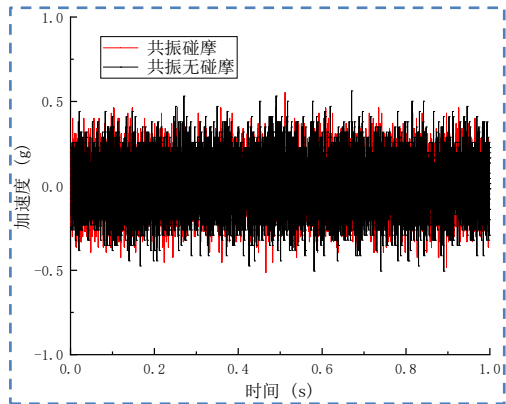
涵轮机匣加速度响应及频谱



04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-恒速裂纹叶片试验

压气机机匣加速度响应及频谱



含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究结论：

时域响应：呈现“正弦波（共振）+ 振荡衰减（碰摩）”的叠加形态；直观反映了气流周期性激励与碰摩冲击载荷的共存作用。

频域特征：叶片响应含有丰富的转速倍频及1-3阶固有频率。支承系统（轴承座/机匣）：出现大量转速倍频，并且存在“转速频率 ± 叶片固有频率（1-3阶）”的组合频率成分。

幅值差异：响应强度遵循 涡轮机匣 > 压气机机匣（距碰摩点越近，信号越强）。

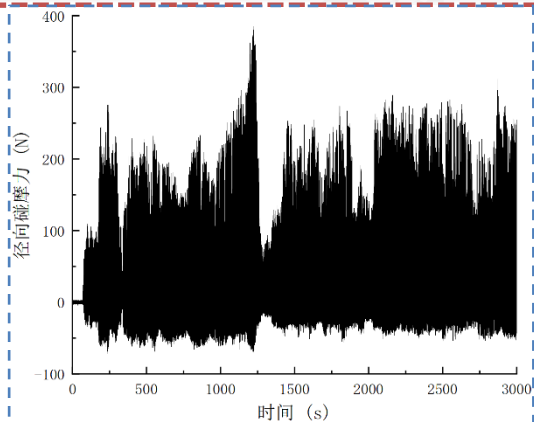
高阶模态衰减：叶片3阶固有频率相关的组合成分在远端（压气机）显著减弱，表明高阶模态能量在传递过程中耗散更快。

裂纹影响：含裂纹与健康叶片的耦合响应模式基本一致，裂纹仅导致叶片固有频率下降，未引入新的频谱成分或改变耦合机理。

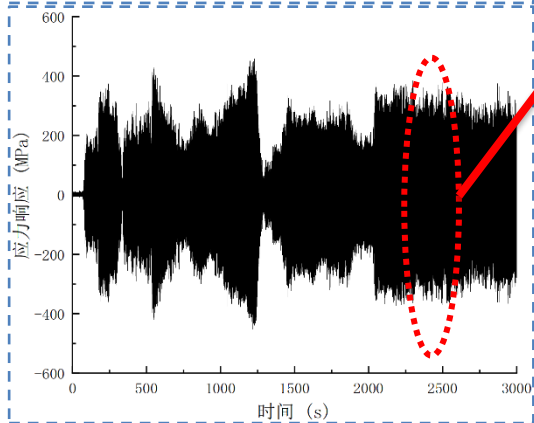
04 第四章——含复合故障的整机振动特性仿真分析与试验研究

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究-叶片裂纹演化试验

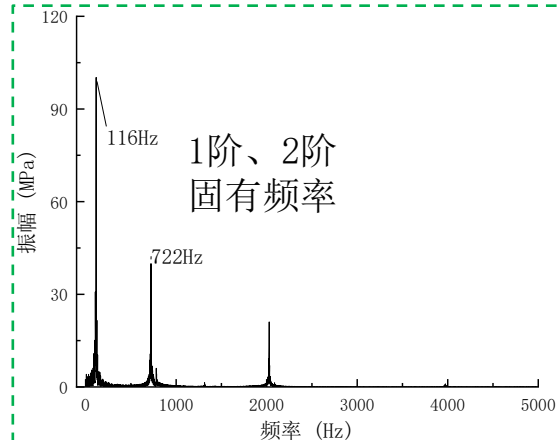
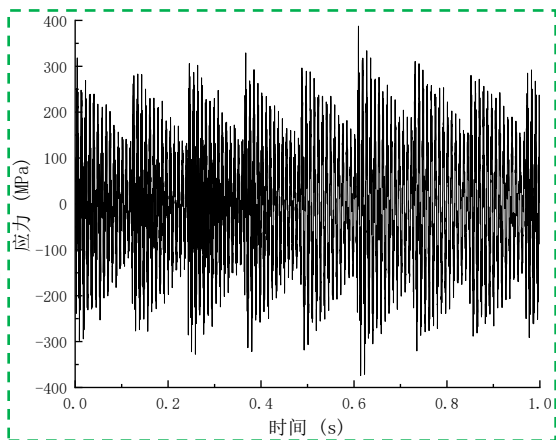
径向碰摩力



叶片应力响应

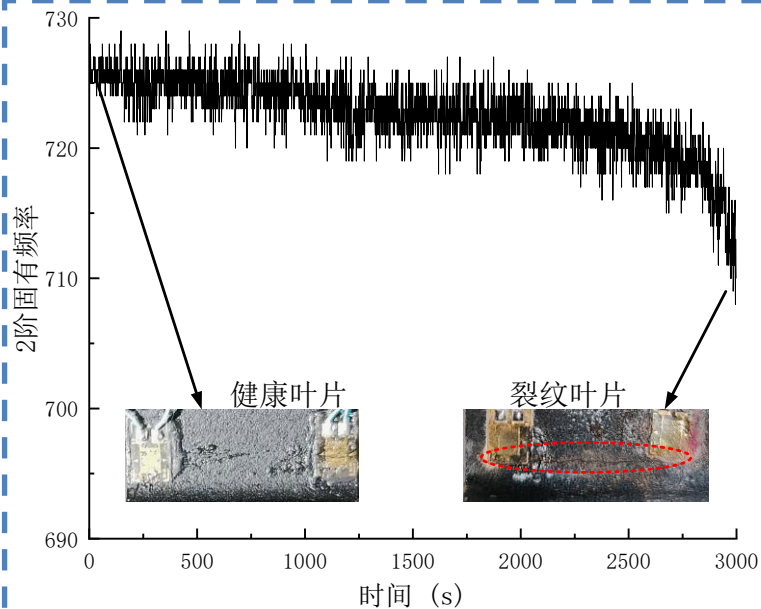
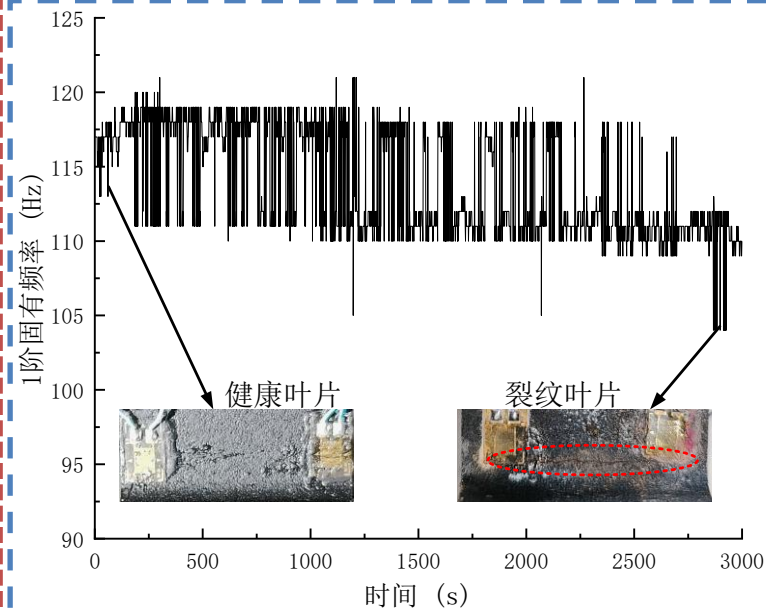


叶片应力响应及频谱 (1秒钟)



试验时间：
3000秒

持续碰摩载荷作用下的叶片1阶、2阶固有频率变化



现象: 碰摩冲击会诱发裂纹持续扩展。

方法: 利用固有频率下降趋势作为关键指标。

效果: 实现裂纹扩展过程的实时量化监控

含叶片裂纹-机匣碰摩复合故障的整机振动特性试验研究结论

- 针对**裂纹单一故障**的研究表明：**气流激励**是诱发叶片共振并将其特征有效传递至整机固定部件（如轴承座、机匣）的关键因素，其典型特征表现为在共振转速下出现转频与叶片共振频率的**组合频率**。然而，裂纹本身虽能引起**叶片固有频率的降低**（导致共振转速前移），但其对整机宏观振动响应（如加速度有效值和整体频谱形态）的影响相对微弱，在常规测点上难以形成强辨识度的独立特征。
- 针对**碰摩单一故障**的研究发现：碰摩作用会在局部产生强烈的**瞬态冲击**，并激发叶片的固有频率。这些特征能够有效传播至整机结构，在轴承座及机匣的振动信号中表现为显著的**冲击脉冲**、丰富的**转频高次谐波**以及转频与叶片各阶固有频率的**组合频率**成分。并且冲击信号的传递路径遵循从**碰摩发生点（涡轮机匣）向远处（燃烧室、压气机机匣）衰减**的规律。
- 针对**裂纹-碰摩复合故障**的研究表明，在复合故障状态下，整机振动响应呈现出两种单一故障特征的**叠加与交互**。具体而言，在气流激励引发叶片共振的同时施加碰摩载荷，系统响应不仅包含叶片共振特征，还会额外激发出由碰摩引起的叶片高阶模态组合频率及丰富的转频谐波。
- 无论是在单一碰摩还是复合故障工况下，裂纹的存在主要体现为导致**叶片所有相关固有频率（基频及高阶频率）的整体下降**，而并未产生新的、独立于碰摩或共振之外的独特振动特征。此外，通过持续施加碰摩载荷的裂纹扩展演化试验证实，叶片**固有频率**的持续下降可作为**在线监测裂纹动态扩展**的有效指标。

第五章



叶片裂纹-机匣碰摩复合故障 特征提取及故障诊断

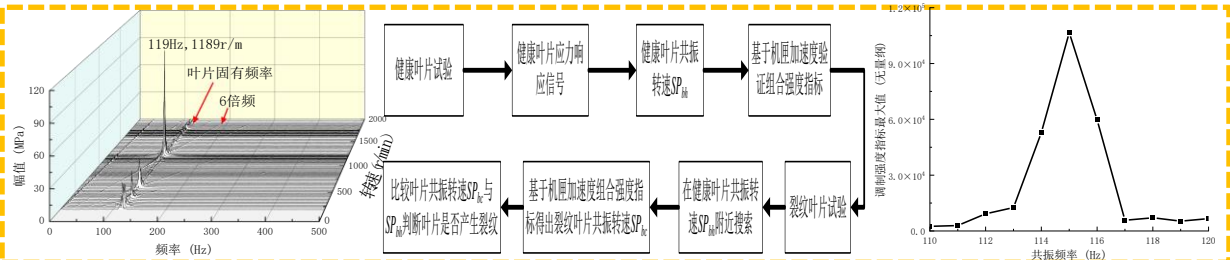
- ▶ 裂纹故障诊断
- ▶ 碰摩故障诊断
- ▶ 复合故障诊断

05 第五章——叶片裂纹-机匣碰摩复合故障特征提取及故障诊断

叶片裂纹-机匣碰摩复合故障特征提取及故障诊断

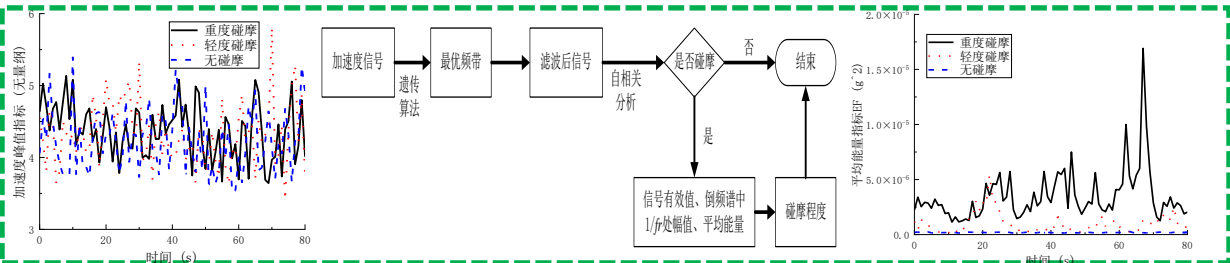
单裂纹故障

单裂纹故障特征提取与诊断



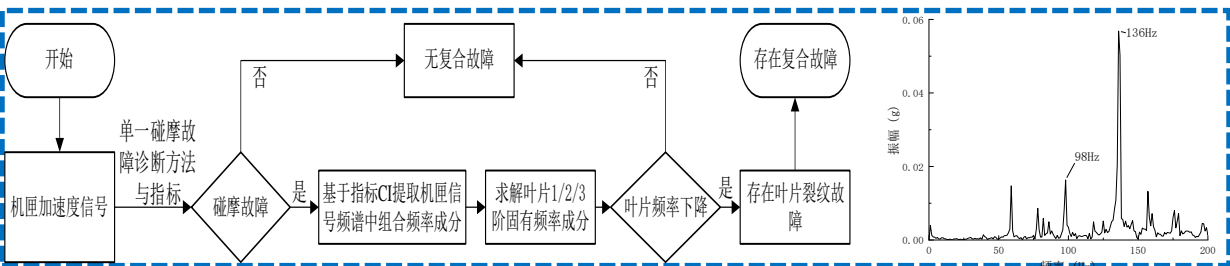
单碰摩故障

单碰摩故障特征提取与诊断

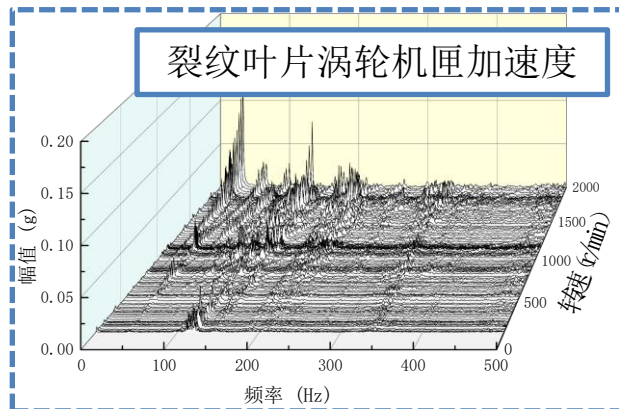
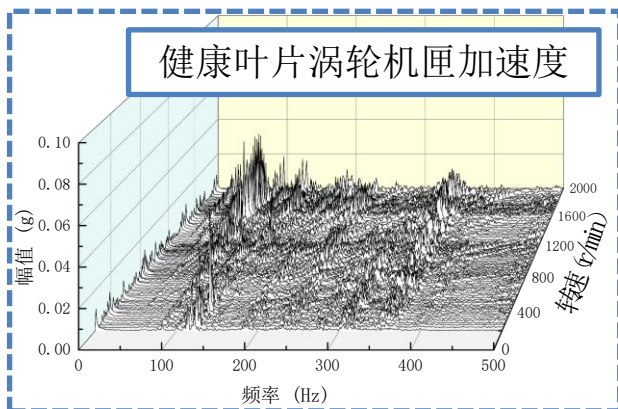
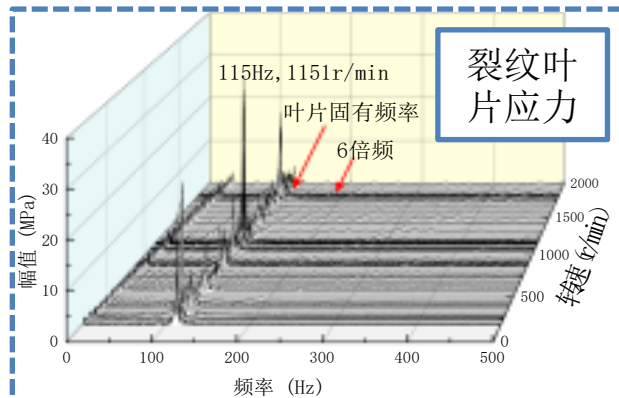
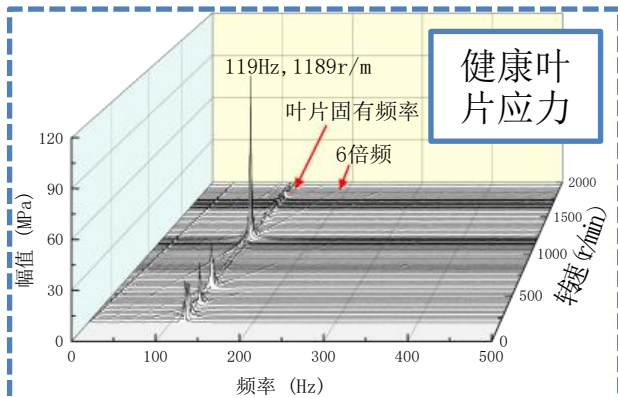


复合故障

复合故障特征提取与诊断



单叶片裂纹故障整机振动特征提取与故障诊断



问题

- 裂纹导致的频率变化很小，仅几赫兹，检测精度要求高；
- 叶片应变接触式测量方法操作繁琐；
- BTT检测需要机匣打孔



解决方法

- 基于机匣信号的转速域裂纹诊断方法

单叶片裂纹故障整机振动特征提取与故障诊断

核心
指标

无量纲组合频率强度指标CI

$$CI = \sum |A^2(f_b \pm Nf_r)| / A^2(f_r)$$

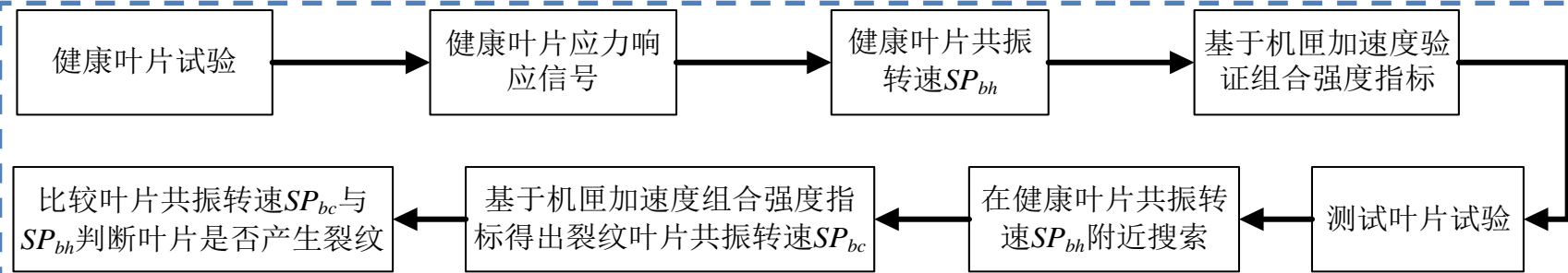
$A(fr)$ 为转速频率幅值

$A(fb \pm fr)$ 叶片共振频率与转速频率的组合频率幅值

核心原理

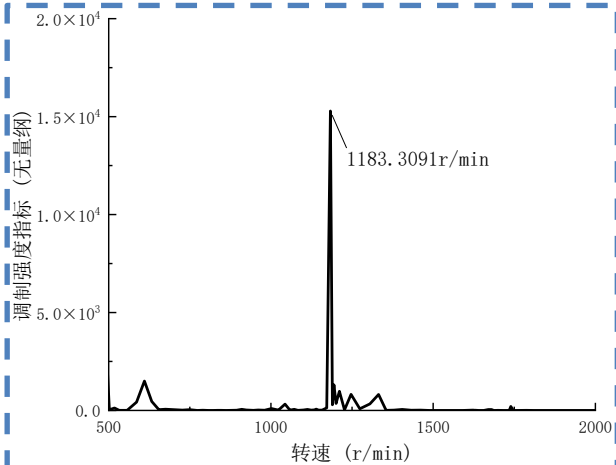
叶片共振时，机匣加速度频谱中组合频率增大；

诊断
方法
流程

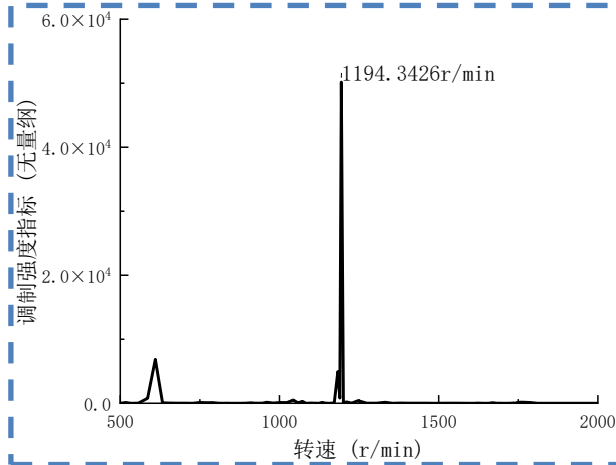


单叶片裂纹故障整机振动特征提取与故障诊断

健康叶片试验的涡轮机匣加速度响应组合强度指标



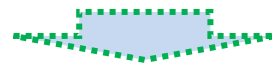
频率为 f_b+f_r 的组合强度指标



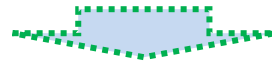
频率为 f_b-f_r 的组合强度指标

检测步骤

已知前提健康叶片共振频率为119Hz



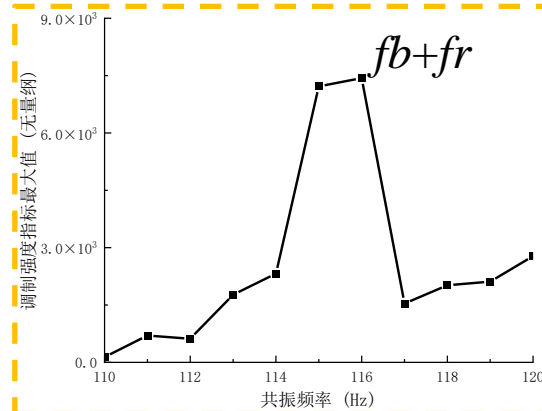
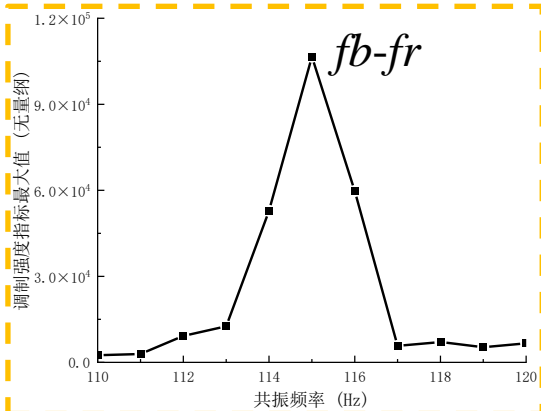
预设的频率搜索区间 (120Hz至110Hz)



逐点评估测试叶片对应的CI值

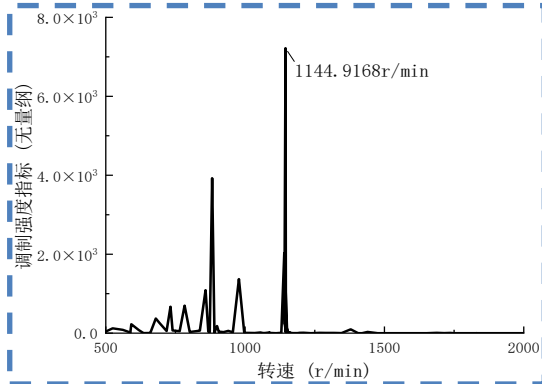
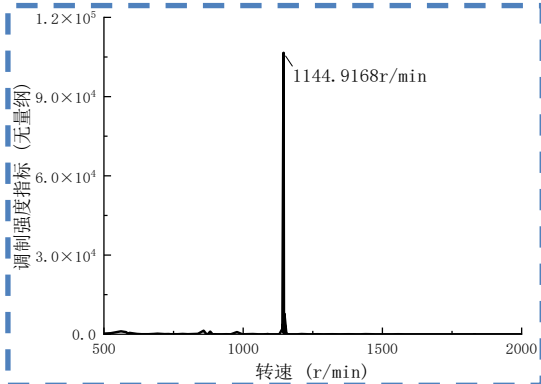
单叶片裂纹故障整机振动特征提取与故障诊断

组合
频率
强度
指标



测试叶片的共振频率为115Hz

组合
频率
强度
指标

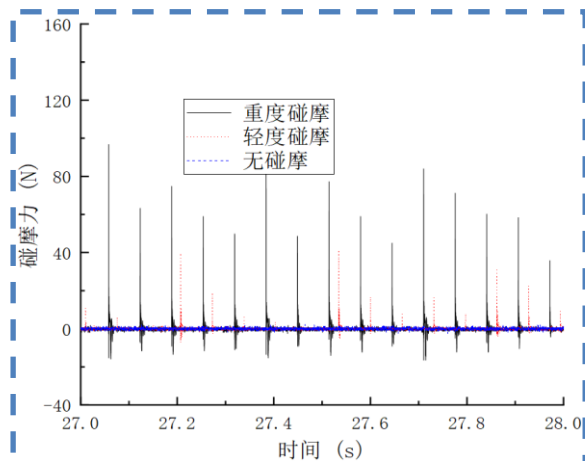


验证

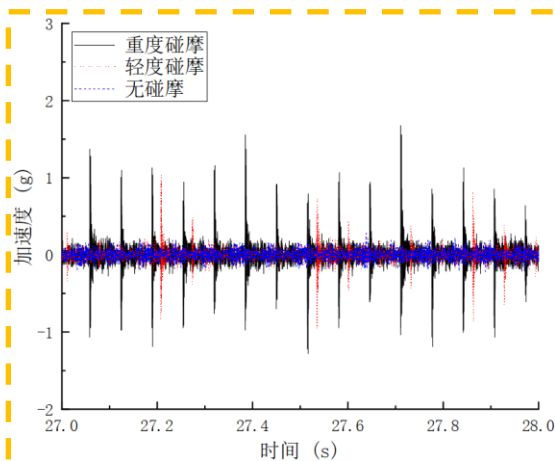
测试叶片含有
裂纹故障

单碰摩故障整机振动特征提取与故障诊断

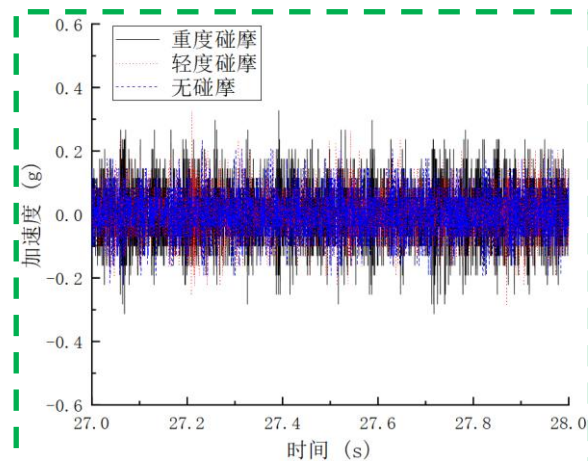
径向碰摩力



涡轮机匣加速度



压气机机匣加速度

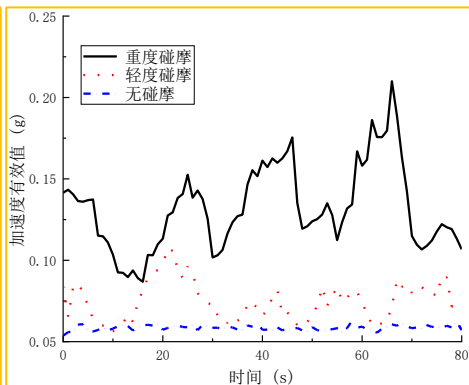


现象

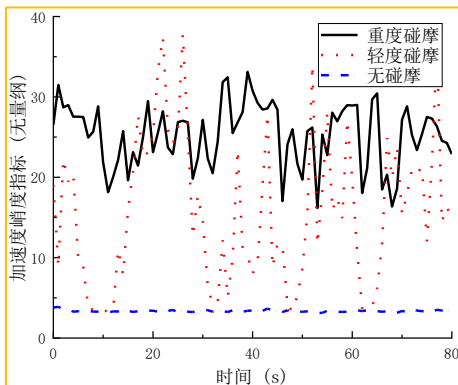
径向碰摩力可以表征碰摩严重程度；靠近碰摩点的涡轮机匣加速度冲击响应特征与碰摩程度强正相关；远离碰摩点压气机机匣则无正相关；

单碰摩故障整机振动特征提取与故障诊断

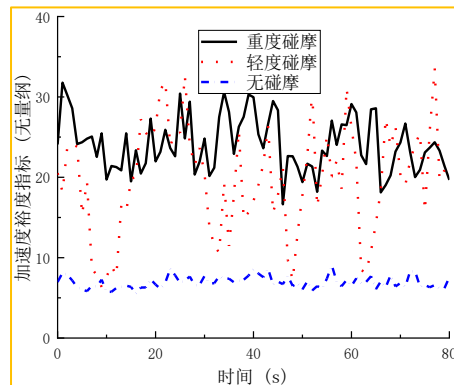
涡轮机匣



有效值

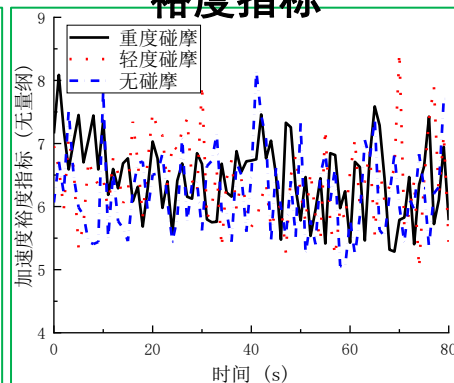
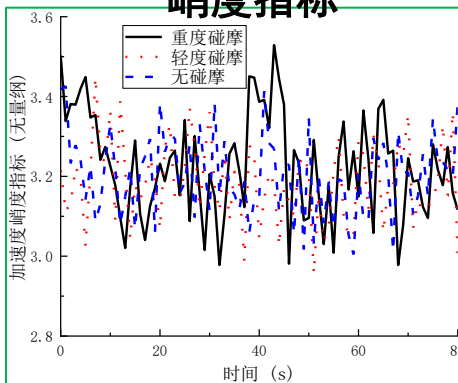
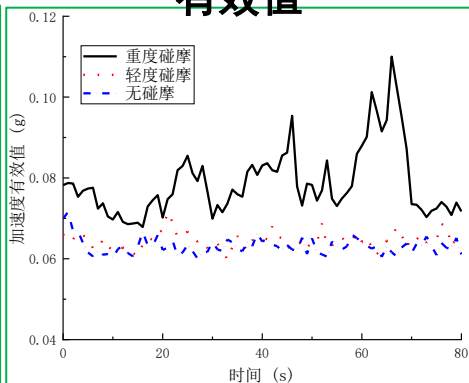


峭度指标



裕度指标

压气机机匣



问题

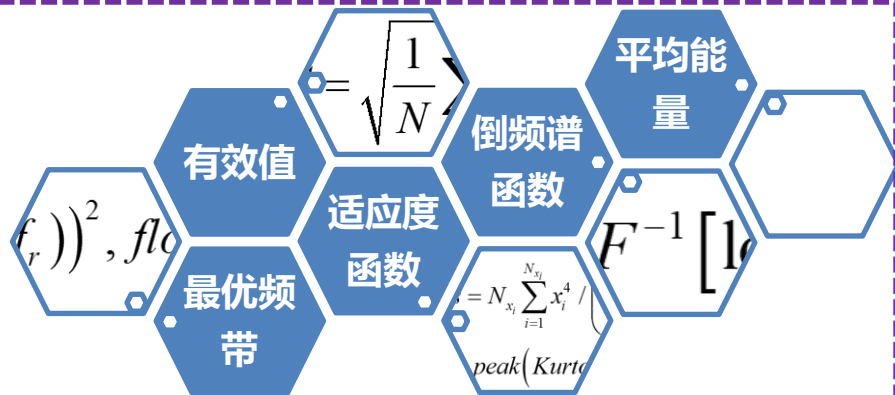
远离碰摩发生点的机匣加速度响应特征不明显;

方法

提出一种微弱机匣信号增强方法与新指标

单碰摩故障整机振动特征提取与故障诊断

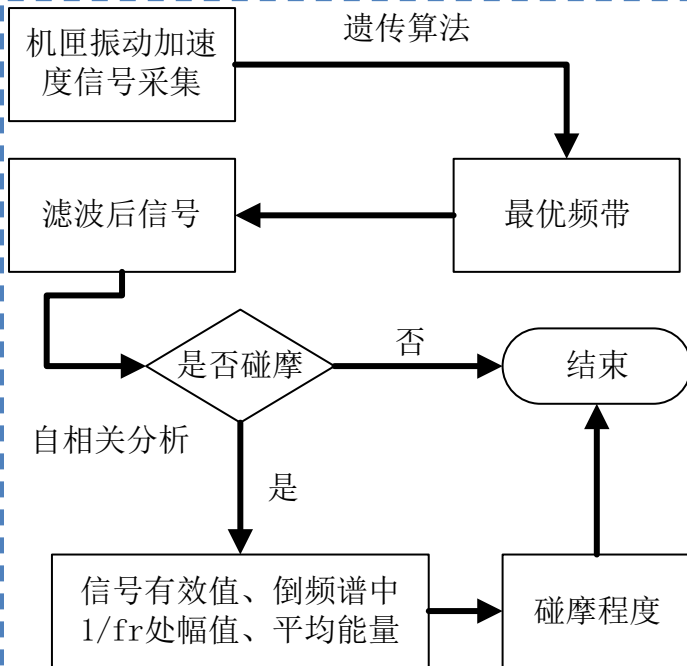
核心指标



核心原理

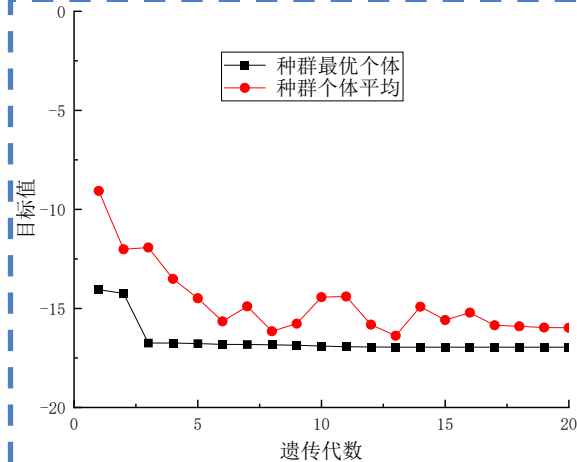
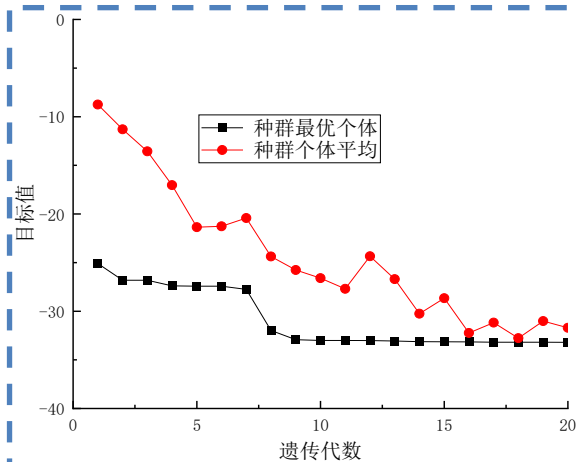
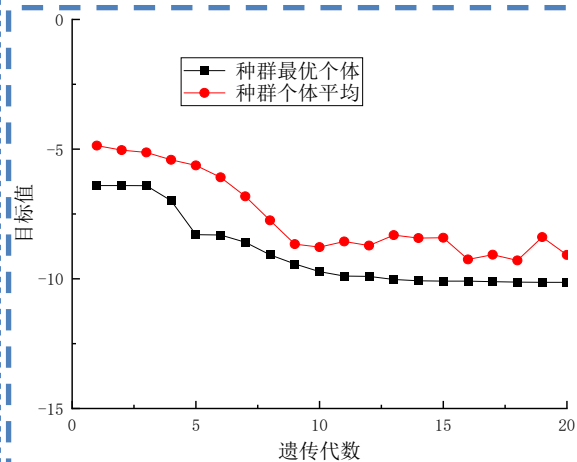
提取信号中碰摩特征较强的频段

基于机匣信号的碰摩故障诊断



单碰摩故障整机振动特征提取与故障诊断

基于遗传算法的最优频带选择（远端压气机机匣测点信号）



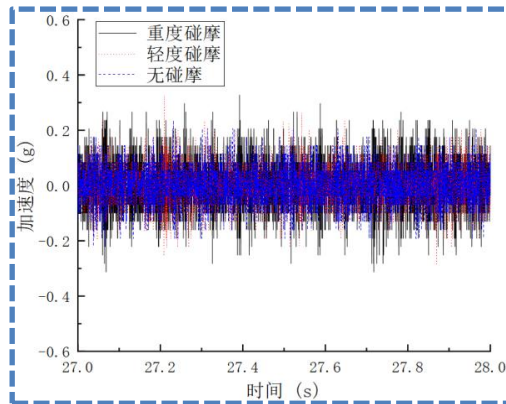
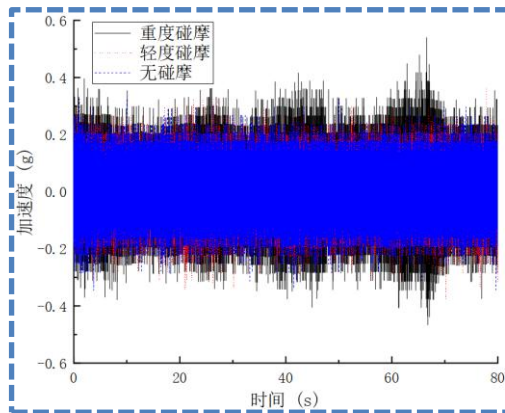
无碰摩：4133Hz-4782Hz

轻碰摩：3423Hz-3963Hz

重碰摩：3426Hz-3967Hz

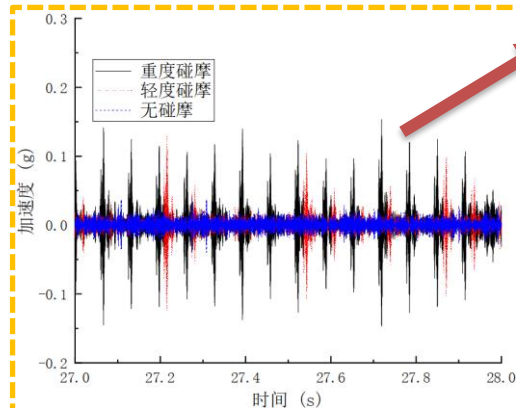
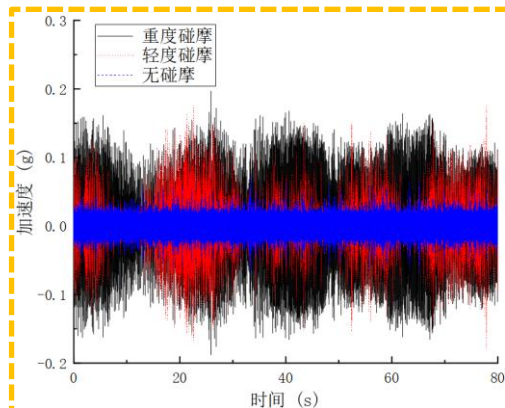
单碰摩故障整机振动特征提取与故障诊断

压气机机匣加速度原始信号



滤波

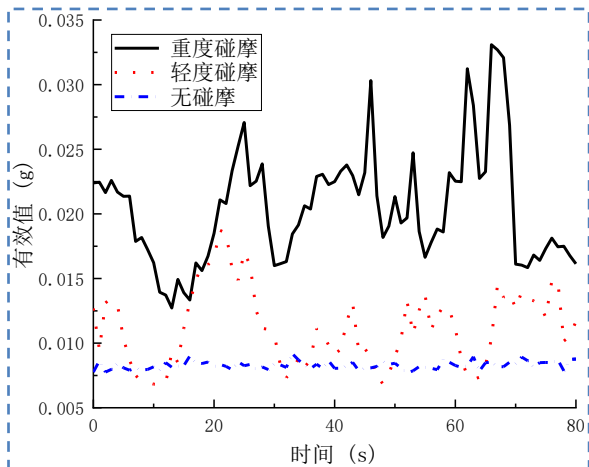
压气机机匣加速度滤波信号



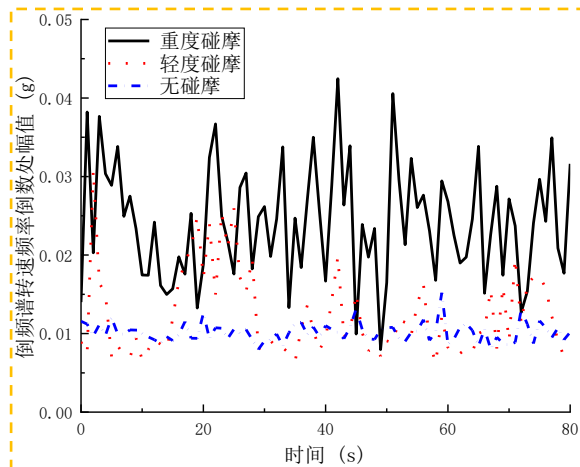
冲击特征

单碰摩故障整机振动特征提取与故障诊断

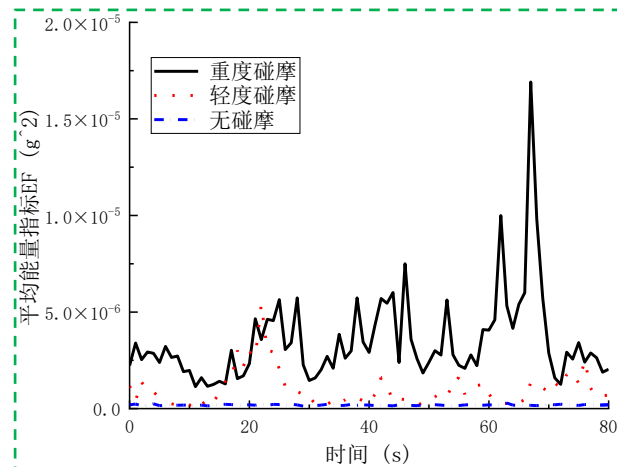
有效值



倒频谱幅值指标



平均能量指标



复合故障整机振动特征提取与故障诊断

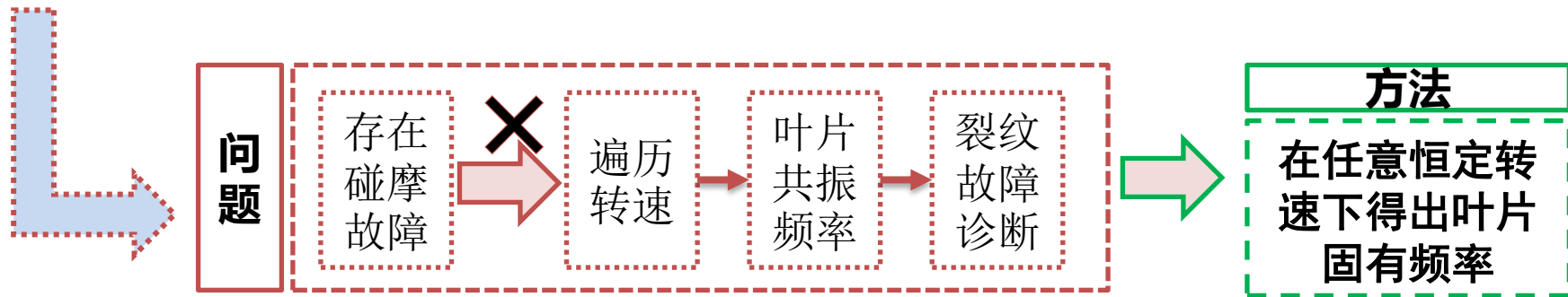
单故障诊断原理

碰摩故障

基于机匣加速度时域信号，提取中的冲击特征；特征微弱信号需要进行频带滤波，增强冲击特征。

裂纹故障

基于机匣加速度信号，利用组合频率提取出叶片的1阶固有频率；判断测试叶片的固有频率是否出现下降，从而判定其是否存在裂纹故障。



复合故障整机振动特征提取与故障诊断

复合故障诊断原理

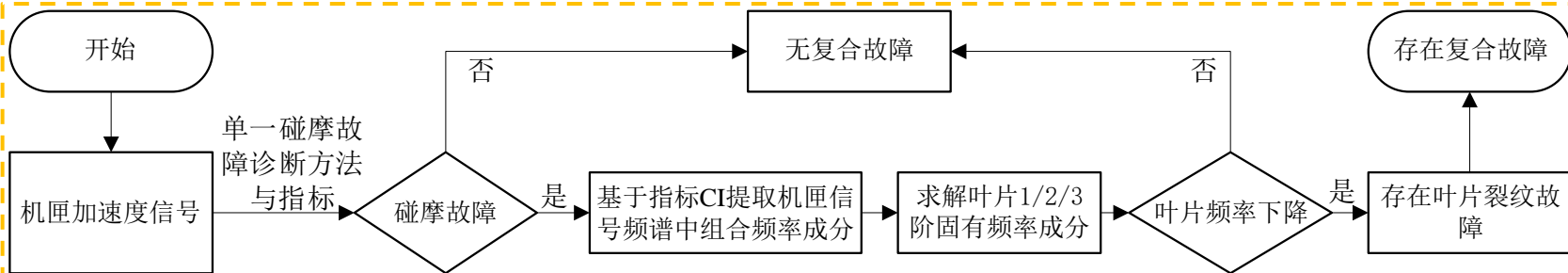
碰摩故障

基于机匣加速度时域信号，提取中的冲击特征；特征微弱信号需要进行频带滤波，增强冲击特征。

碰摩产生的瞬态冲击，会激发叶片的固有频率。在轴承座及机匣的振动信号中表现为转频与叶片各阶固有频率的组合频率成分。

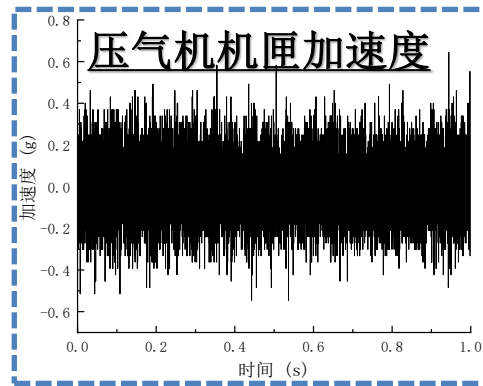
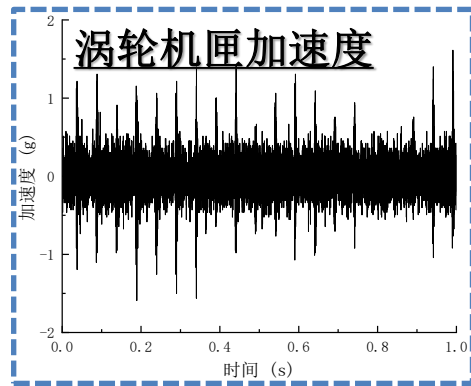
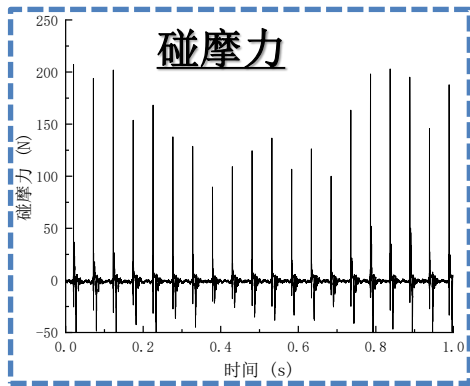
裂纹故障

复合故障诊断方法流程

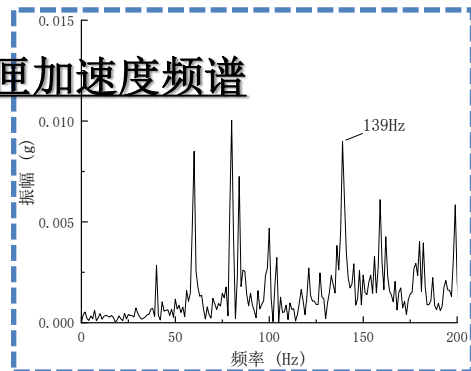
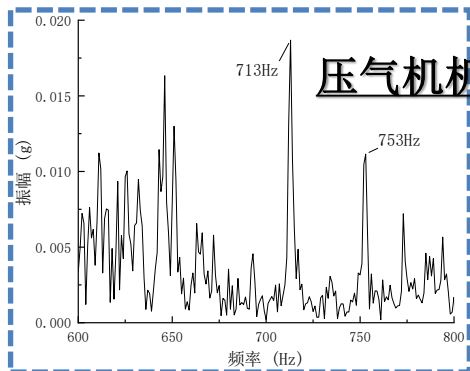


05 第五章——叶片裂纹-机匣碰摩复合故障特征提取及故障诊断

复合故障整机振动特征提取与故障诊断



试验数据



叶片1阶与2阶频率与转频的组合频率

叶片1阶频率117Hz, 2阶频率725Hz

参考健康叶片频率 (119Hz、733Hz)

存在裂纹故障 (复合故障)

叶片裂纹-机匣碰摩复合故障特征提取及故障诊断研究结论

- **裂纹故障诊断:** 针对裂纹导致的微弱频率偏移, 提出以组合频率强度指标 (CI) 为核心的共振转速反演方法, 无需应变片即可实现裂纹识别。
- **碰摩故障诊断:** 针对远端测点碰摩特征微弱问题, 提出遗传算法优化频带的信号增强策略, 结合平均能量指标、倒频谱特征, 提升轻度碰摩检出能力。
- **复合故障诊断:** 基于碰摩冲击宽频响应, 从机匣信号中提取叶片模态组合频率, 反演固有频率变化以判别裂纹。试验验证, 该方法可有效区分各类故障工况, 为航空发动机在线健康监测提供实用且创新的技术路径。

第六章



总结与展望

▶ 研究总结

▶ 未来展望

(1) 构建了叶片裂纹-机匣碰摩复合故障整机动力学模型与求解方法

突破传统单一故障建模或简化耦合的局限，将呼吸裂纹的时变刚度、动态叶尖间隙演化、非线性碰摩力与多体耦合结构深度统一，建立“多类型单元混合-显隐式结合”的仿真模型；基于能量守恒原理实现裂纹与碰摩的物理协同表征，明确了二者相互调制的双向作用机制。经整机试验模态与仿真数据多层次验证，模型实现对复合故障强非线性动力学行为的精准刻画，为整机级仿真提供核心算法支撑。

(2) 揭示了裂纹-碰摩复合故障下的整机振动特性与故障传递机理

依托自主研发的集成预制裂纹、主动可控碰摩及实时应力监测的试验平台，通过多工况仿真与试验对比，系统阐明了复合故障下振动传递路径与特征。量化揭示了裂纹主导频率偏移、碰摩主导瞬态冲击与谐波，以及二者复合下特征叠加与组合频率激发的特征规律，为早期故障识别提供了关键理论依据。

(3) 提出了基于机匣加速度信号的无侵入式复合故障诊断方法

针对工程中难以直接测量叶片状态的现实约束，提出“共振转速反演”与“遗传算法优化频带增强”相结合的特征提取策略，将微弱的裂纹频率偏移转化为显著的转速域偏移，并有效提升远端碰摩信号的信噪比。在此基础上，构建了“先判碰摩、再借碰摩激振反演裂纹”的分层诊断逻辑，实现了仅依靠机匣测点即可对复合故障类型与严重程度进行准确辨识与定量评估，兼具工程实用性与理论前瞻性。

(1) 叶片裂纹-机匣碰摩复合故障模型尚有提升空间

本文所构建的复合故障模型考虑了碰摩冲击对裂纹呼吸效应的影响，以及裂纹所引起的刚度退化对碰摩力的反作用。然而，尚未引入碰摩载荷作用下的裂纹扩展演化机制。未来可结合断裂力学理论与实际工况载荷谱，嵌入裂纹扩展模型，实现从“裂纹存在”到“裂纹演化”的动态闭环建模，从而更真实地反映复合故障的时变非线性特性。

(2) 叶片-转子连接结构的建模精度有待提高

当前整机动力学模型中，叶片与轮盘采用刚性连接假设，虽简化了计算且适用于初步分析，但与实际航空发动机中广泛采用的榫卯连接结构存在差异。该连接形式具有非线性接触、局部刚度弱化等复杂动力学行为。后续研究可引入精细化接触单元或子结构模态综合法，对榫连接界面进行高保真建模，以更准确捕捉其对整机振动与故障传递路径的影响。

(3) 复合故障诊断方法可进一步融合先进人工智能技术

本文提出的诊断策略主要基于信号处理与特征工程，依赖组合频率强度、共振转速偏移等物理可解释指标，在特定工况下具有良好有效性。然而，面对强噪声、多故障耦合及变工况等复杂场景，其泛化能力仍有限。未来可将现有方法与深度学习相结合，构建“物理机理引导+数据驱动”的混合智能诊断框架，实现更高鲁棒性、自动化程度和在线适应能力的复合故障识别。



南京航空航天大学



谢谢各位专家和同学！
敬请批评指正！