



南京航空航天大学本科毕业生设计

叶片裂纹的振动在线监测

汇报人：荀雨航

专业：交通运输（民航维修工程）

指导老师：陈果

南京航空航天大学智能诊断与专家系统研究室



汇报内容

1

背景与意义

2

内容与方案

3

叶片有限元建模与仿真

4

叶片疲劳测试

5

总结与展望

研究背景与意义：研究背景

叶片裂纹是导致叶片振动的主要原因之一。裂纹在叶片中的存在会改变叶片的振动特性和结构刚度，进而导致振动频率的变化、叶尖位移的增加以及应力的集中等问题。如果不及时发现和处理裂纹问题，将会对航空发动机的性能和安全产生严重的影响。

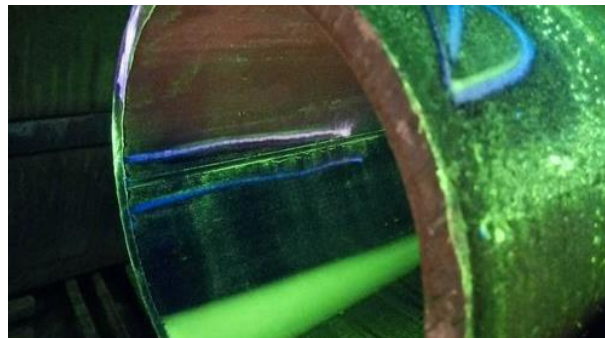
- 2014年，我国南航CZ3739航班飞机引擎空中着火，事后调查显示压气机风扇的叶片有断裂。据推测，有可能是叶片断掉后进入发动机内，损伤发动机进气流场，导致后者发生“畸变”，进而形成“喘振”。
- 2016年8月27日，西南航空的波音737-700型客机在执飞新奥尔良飞奥兰多的航班时，同样发生发动机的风扇叶片非包容性故障，所幸此次事故中客机安全降落，并无更为严重事故发生。
- 2018年4月17日，一架波音737在执飞西南航空1380号航班时，左侧发动机在巡航阶段失效，发动机13号风扇叶片因金属疲劳，导致脱落，进气道和部分整流罩脱落。发动机内的碎片飞出后击碎飞机舷窗，导致一名乘客遇难。

研究背景与意义：国内外研究现状

目前裂纹扩展辨识方法：目视检测、超声波检测、渗透检测、红外检测、磁粉检测、涡流检测等方法。



图：超声波探伤仪



图：磁粉检测法



图：红外检测

叶片的工作状况十分复杂，难以对其进行预测；如果不能及时发现并采取相应的措施，将会带来巨大的损失。针对航空航天等大型装备，为了保证其结构安全和降低经济损失，迫切需要研究一种在线的疲劳损伤识别方法。

研究背景与意义：国内外研究现状

- 1. 基于应变的裂纹扩展监测方法
- 2. 基于传感特性改变的裂纹扩展监测方法
- 3. 基于振动的裂纹扩展监测方法
- 4. 基于机电阻抗的裂纹扩展监测方法

研究背景与意义：问题提出

- 目前，利用多振动参数检测裂纹萌生与扩展的试验研究工作比较少，本文将采用有限元分析法分析裂纹对叶片的动力学参数和模态参数的影响，然后搭建疲劳振动试验设备，在线监测叶片裂纹的萌生与扩展。



汇报内容

1

背景与意义

2

内容与方案

3

叶片有限元建模与仿真

4

叶片疲劳测试

5

总结与展望

研究内容与方案:

仿真研究

含裂纹叶片振动理论分析

叶片结构振动简介

含裂纹叶片振动建模与分析

无裂纹叶片仿真

无裂纹叶片建模

不同尺寸叶片模态分析

不同尺寸叶片谐响应分析

结果对比及分析

含裂纹叶片仿真

含裂纹叶片建模

不同尺寸裂纹叶片模态分析

不同尺寸裂纹叶片谐响应分析

结果对比及分析

技术支持 理论支持

叶片疲劳试验

设计试验内容与试验方案

扫频实验

共振实验

确定试验参数

试验前准备

叶片夹具设计

搭建试验设备

试验

试验数据收集

试验数据处理

试验结果分析

试验验证 裂纹监测



汇报内容

1

背景与意义

2

内容与方案

3

叶片有限元建模与仿真

4

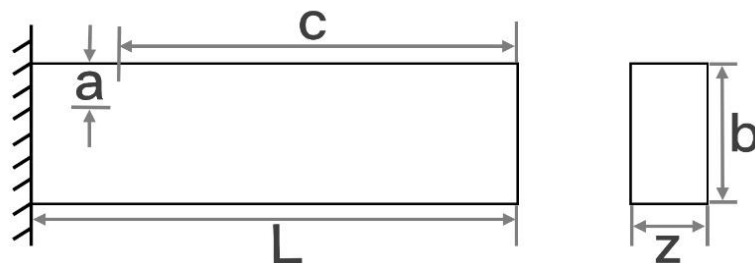
叶片疲劳测试

5

总结与展望

叶片有限元建模与仿真：理论模型

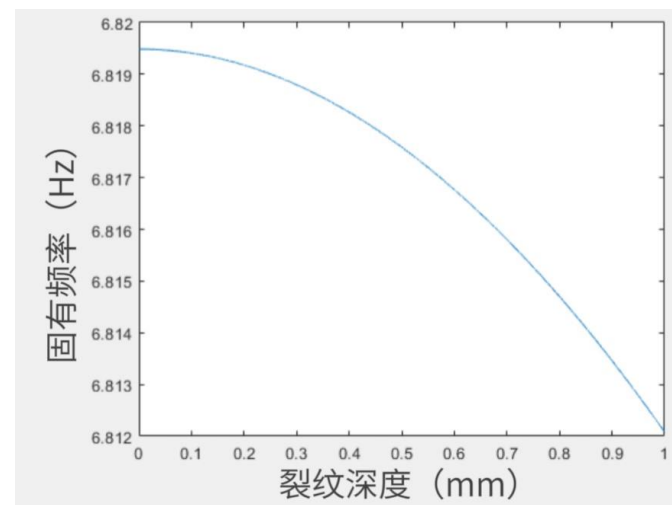
裂纹叶片可简化为如图所示的矩形悬臂梁。其中, a 为裂纹长度, b 为叶片厚度, z 为叶片宽度, L 为叶片长度, c 为裂纹距叶尖的距离



含裂纹叶片理论简化模型

$$\omega = \sqrt{\frac{72\pi^5 c^2 z^2 (1-\nu^2) \left(19.60 \frac{a^{10}}{b^8} - 40.69 \frac{a^9}{b^7} + 47.04 \frac{a^8}{b^6} - 32.99 \frac{a^7}{b^5} + 20.30 \frac{a^6}{b^4} - 9.98 \frac{a^5}{b^3} + 4.60 \frac{a^4}{b^2} - 1.05 \frac{a^3}{b} + 0.63 a^2 \right) + 384L^3 b^3}{\pi^4 E b^3 z^2 \cdot 0.228\rho}}$$

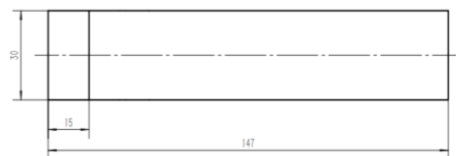
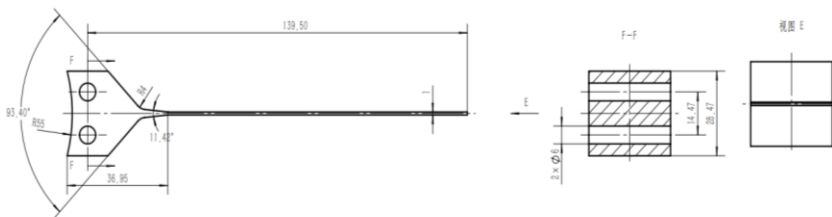
固有频率公式



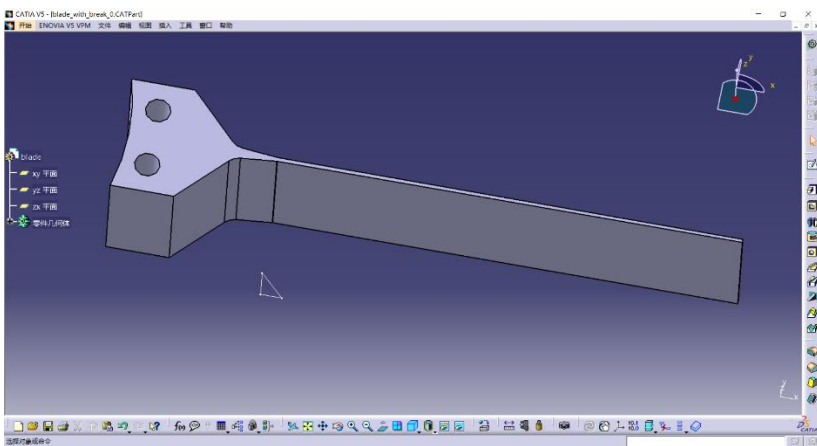
固有频率与叶片深度a关系图

叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片几何模型

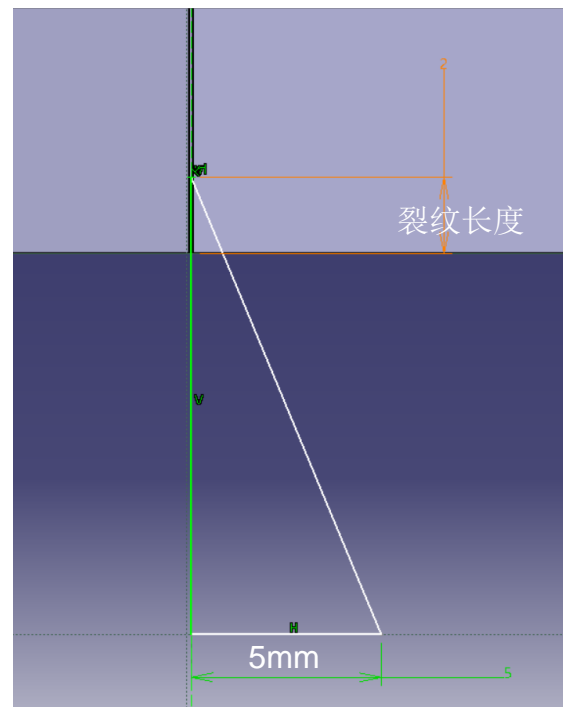
设计叶片并利用CATIA软件进行建模



CAD图



3D图



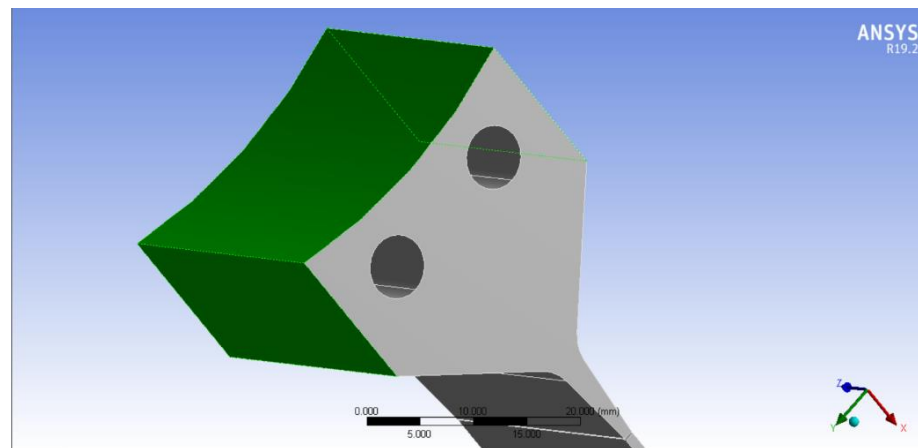
裂纹示意图

叶片有限元建模与仿真：参数与约束

为了可以进一步定量研究裂纹长度对叶片的影响，我们将通过模态与谐响应分析更深入研究叶片振动特性，应力分布与裂纹长度的关系。

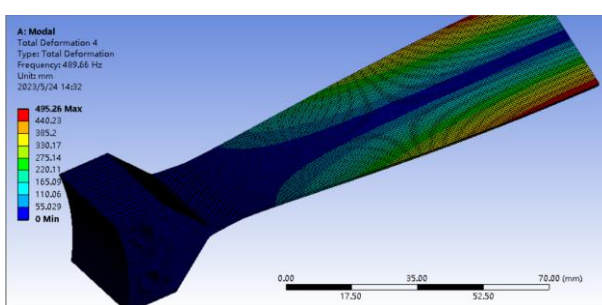
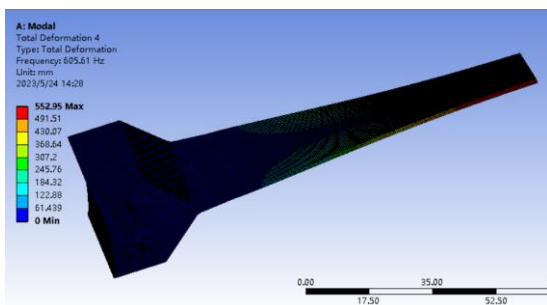
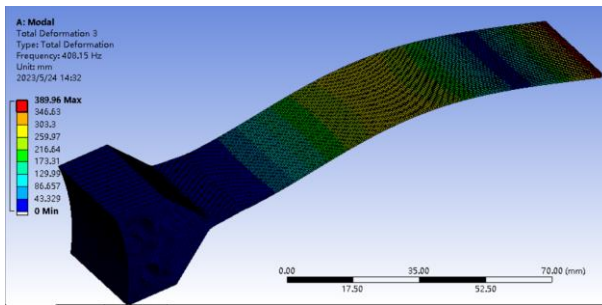
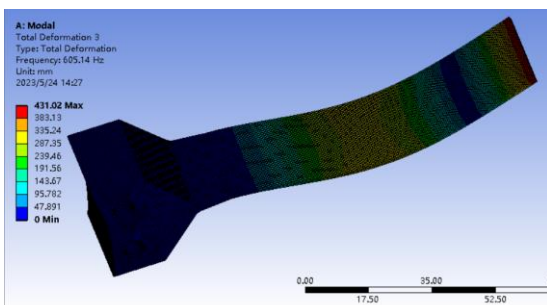
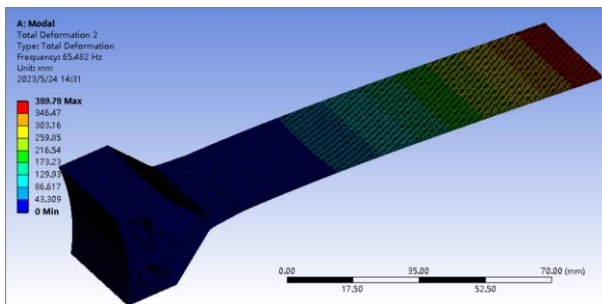
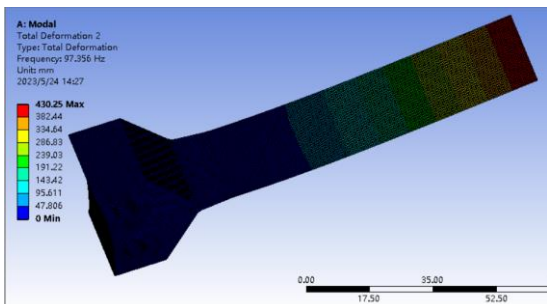
| 参数名称 | 数值 |
|-----------------|-------------|
| 弹性模量 (Pa) | $2.1e^{11}$ |
| 泊松比 | 0.3 |
| 密度 (kg/m^3) | 7850 |

叶片参数



叶片约束

叶片有限元建模与仿真：无裂纹叶片模态分析

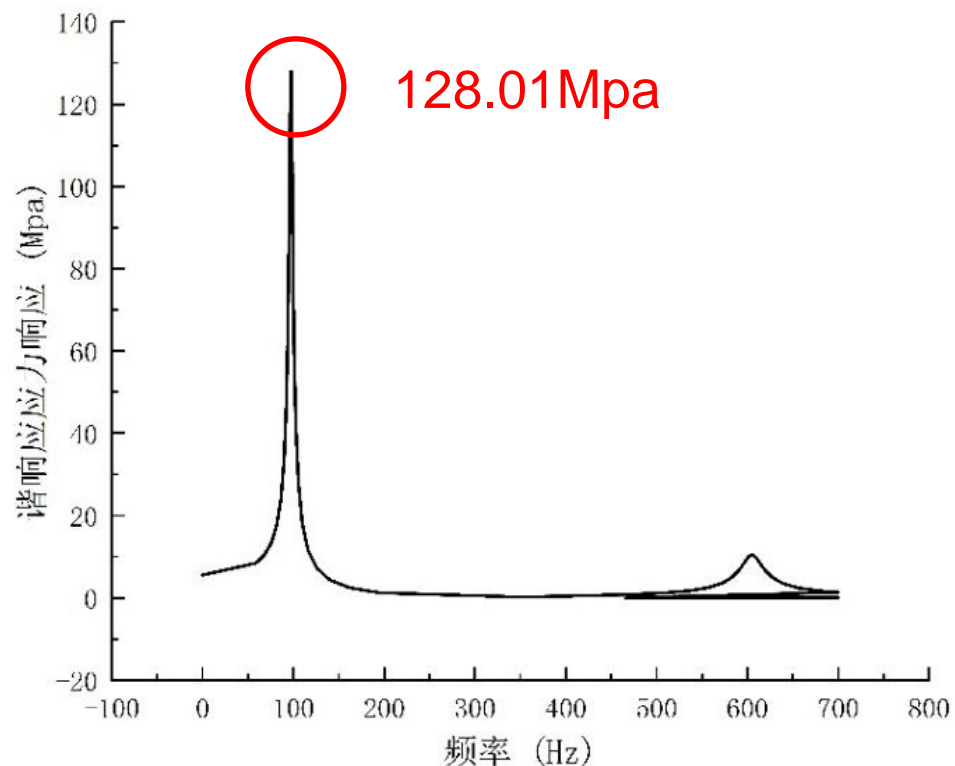


长度100mm

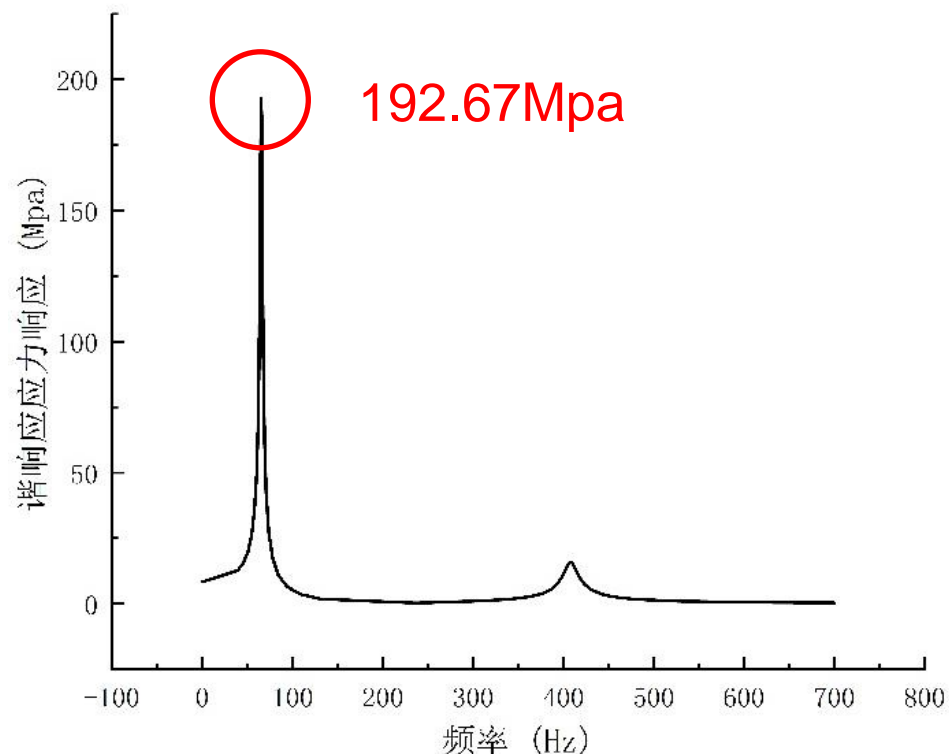
长度120mm

| | 100mm | 120mm |
|---------|--------|--------|
| 一阶 (Hz) | 97.356 | 65.482 |
| 二阶 (Hz) | 605.14 | 408.15 |
| 三阶 (Hz) | 605.61 | 489.66 |

叶片有限元建模与仿真：无裂纹叶片谐响应分析

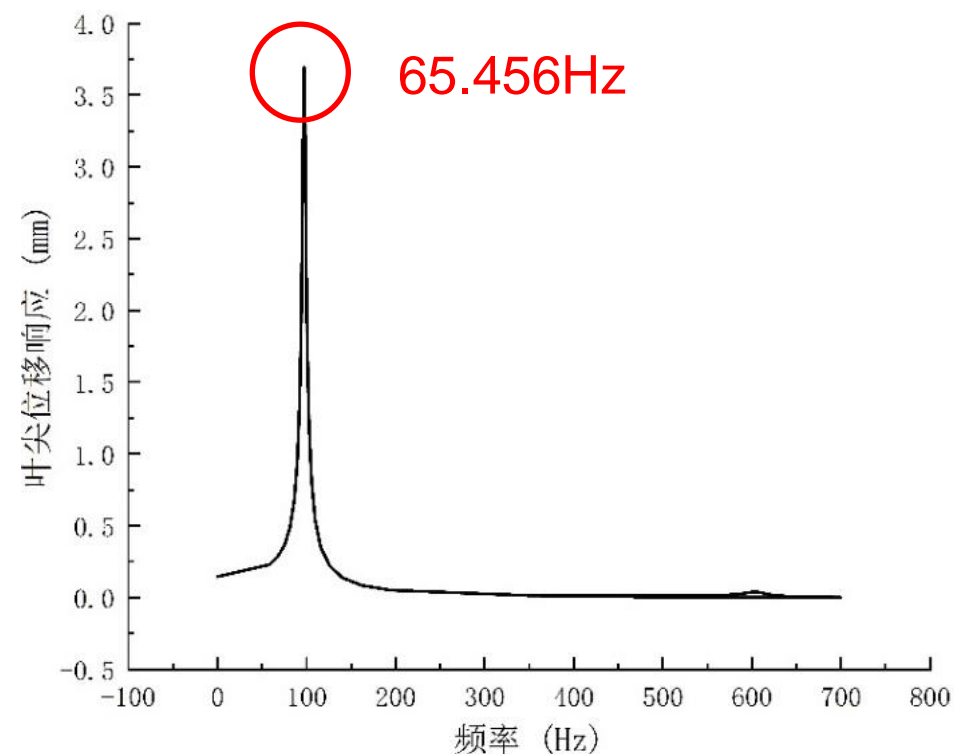


长度100mm

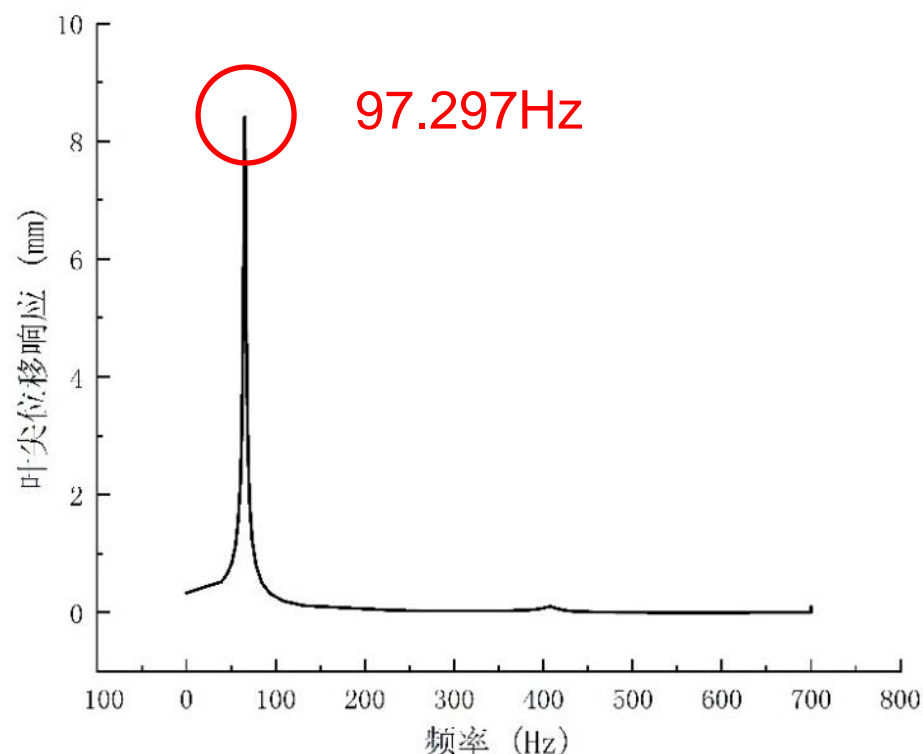


长度120mm

叶片有限元建模与仿真：无裂纹叶片谐响应分析

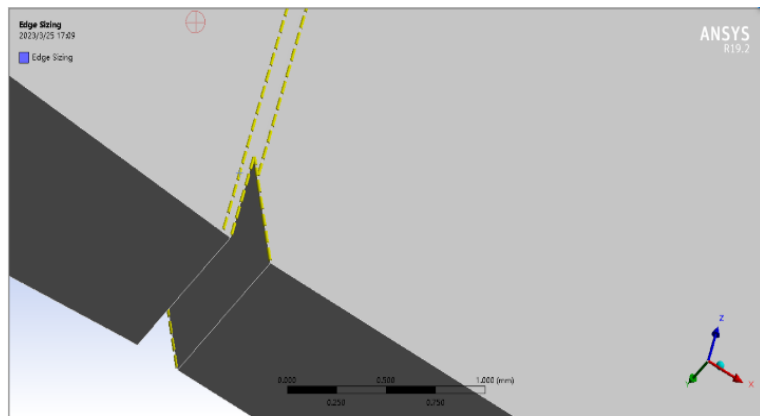
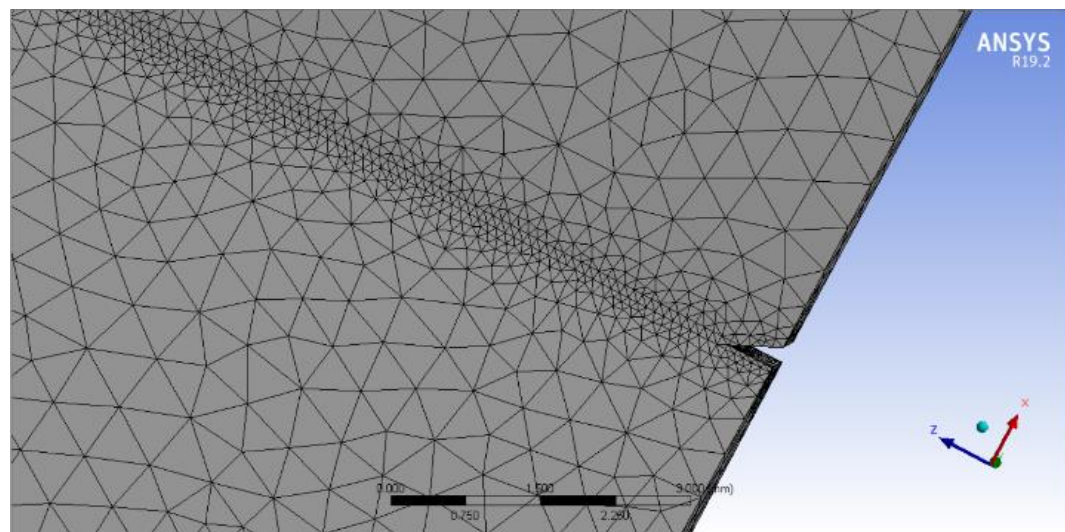
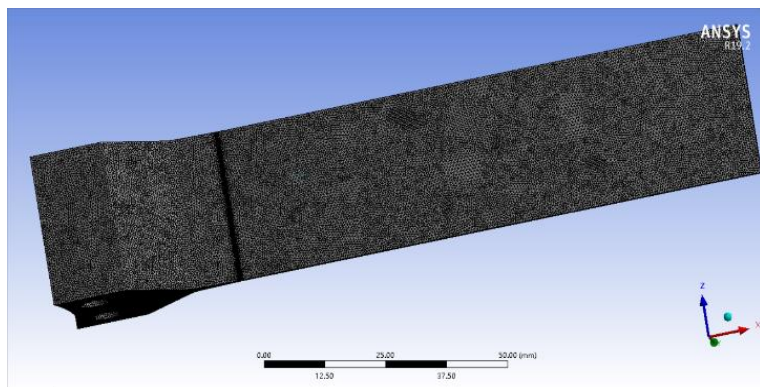


长度100mm



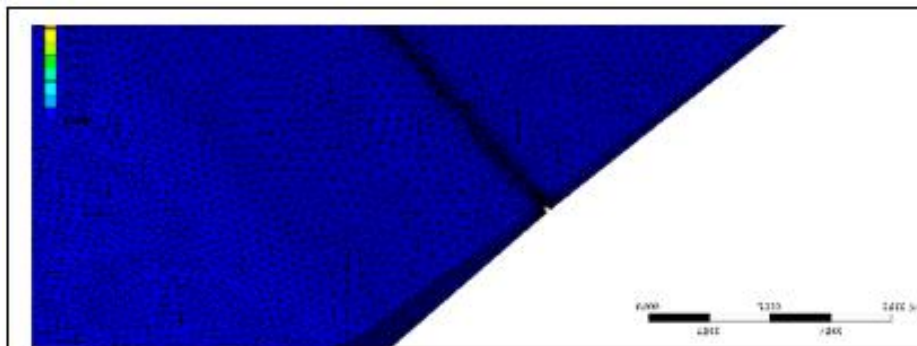
长度120mm

叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片网格化

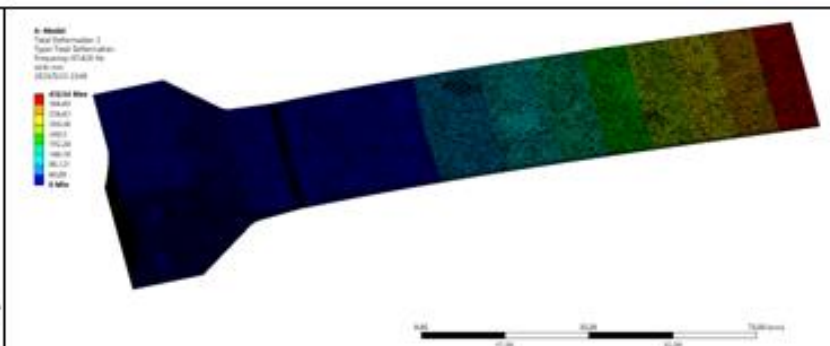


叶片裂纹处作为应力变化最大区域，将对该区域的网格进行一定程度的细化，增加节点数目。

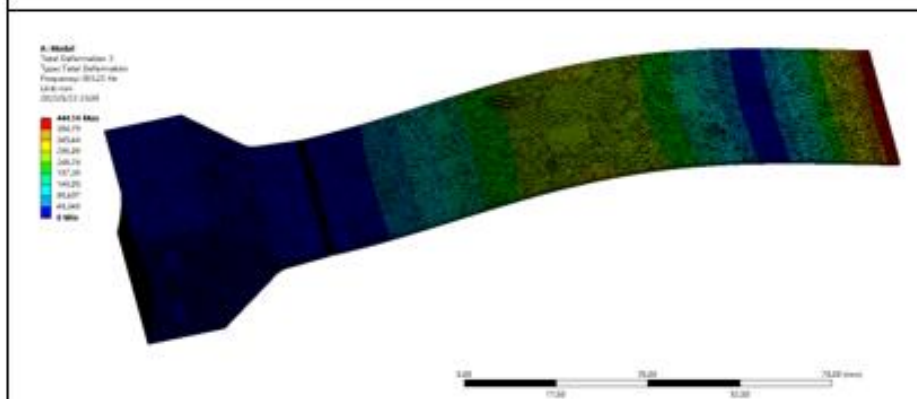
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片模态分析



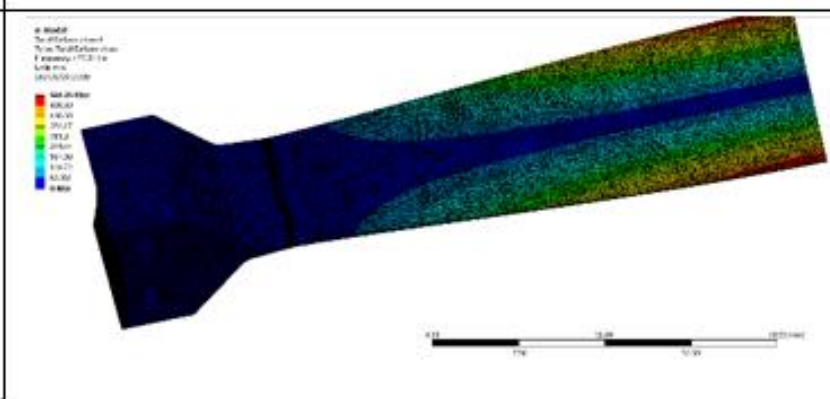
裂纹长度 0.5mm



一阶模态: 67.482Hz

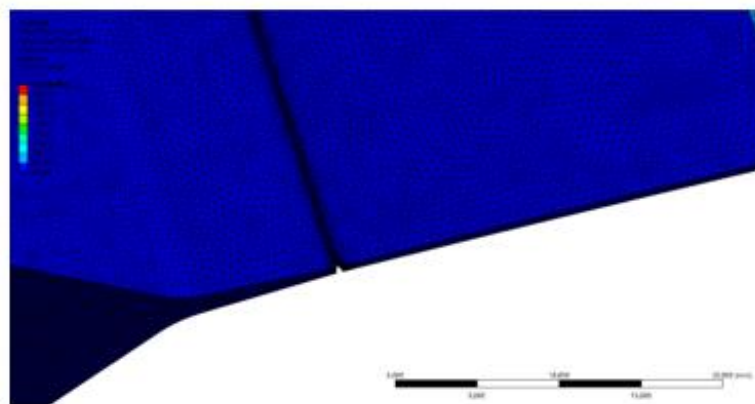


二阶模态: 383.23Hz

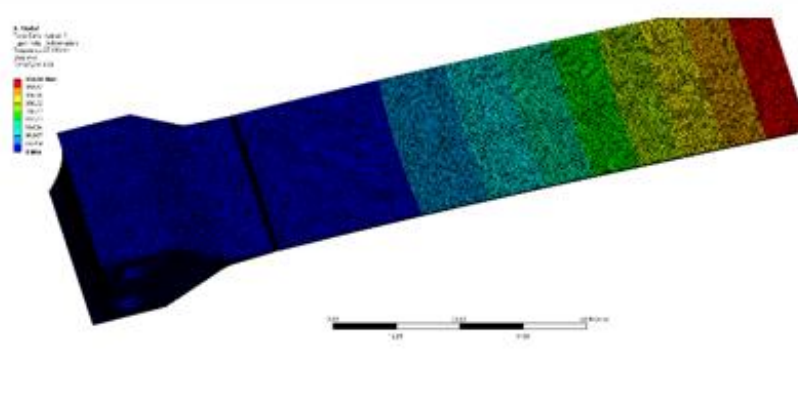


三阶模态: 477.01Hz

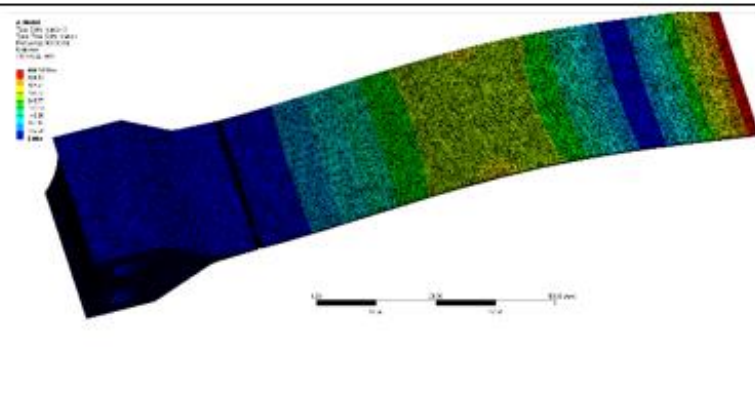
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片模态分析



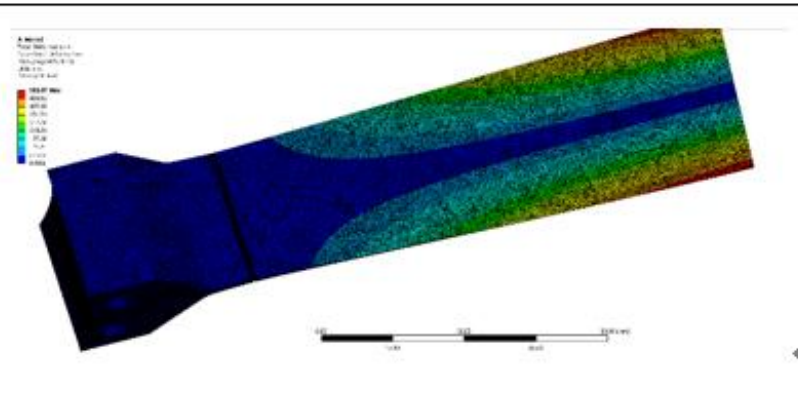
裂纹长度 1.0mm



一阶模态: 67.393Hz

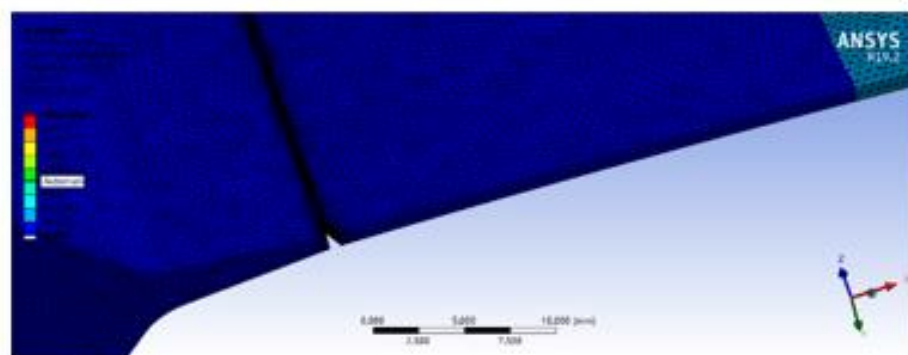


二阶模态: 383.02Hz

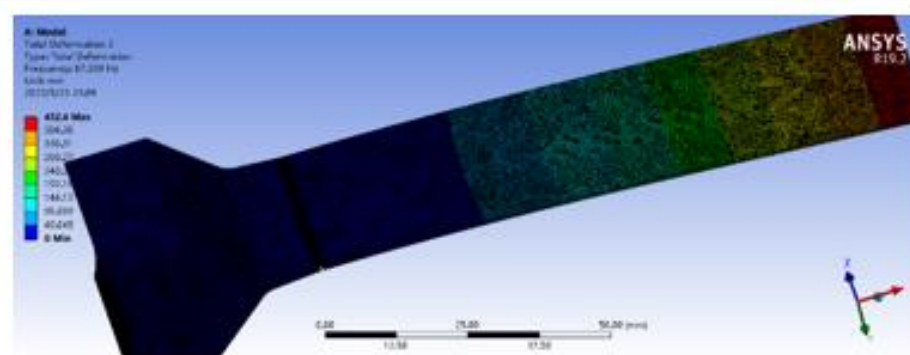


三阶模态: 476.76Hz

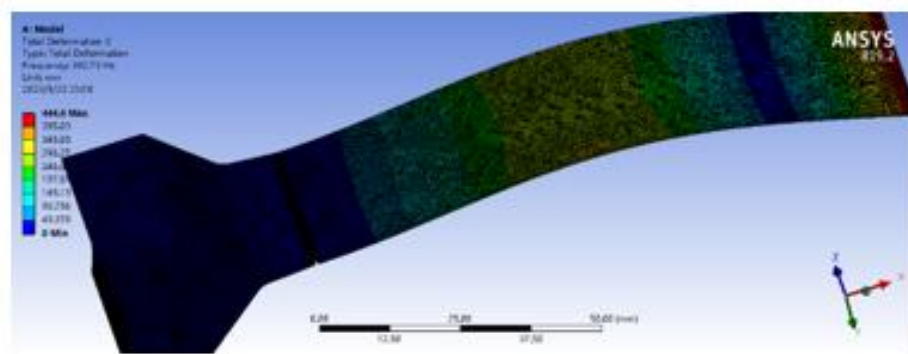
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片模态分析



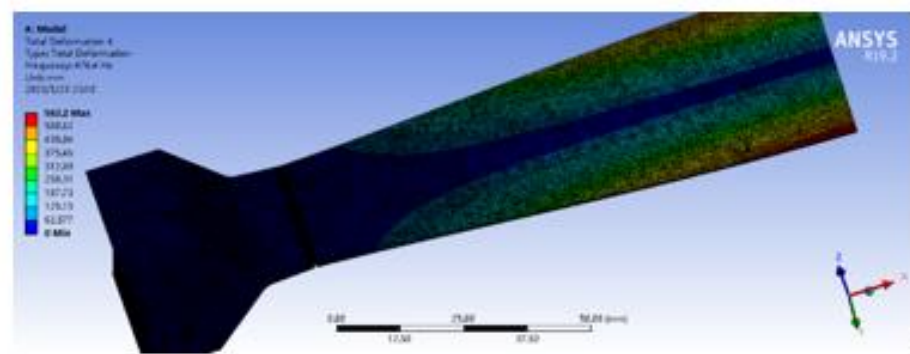
裂纹长度 1.5mm



一阶模态: 67.339Hz

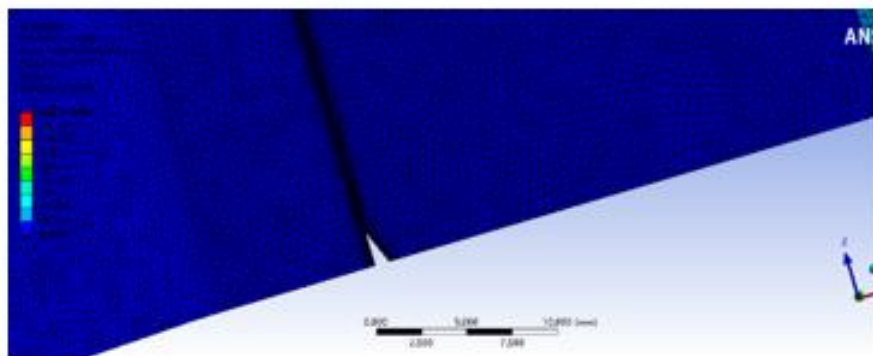


二阶模态: 382.73Hz

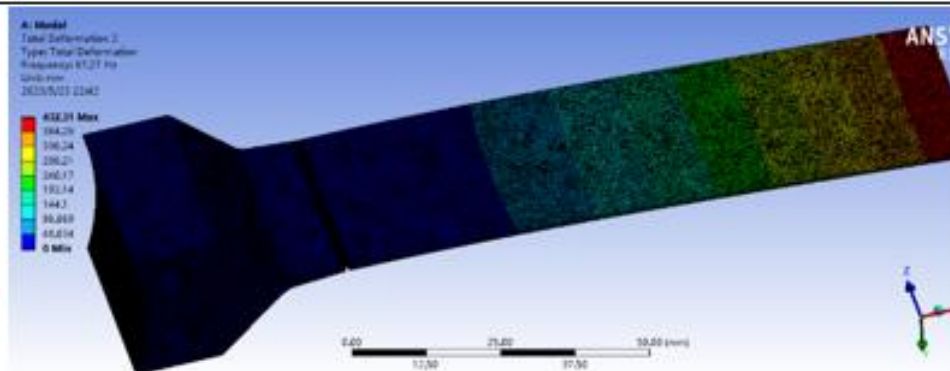


三阶模态: 476.4Hz

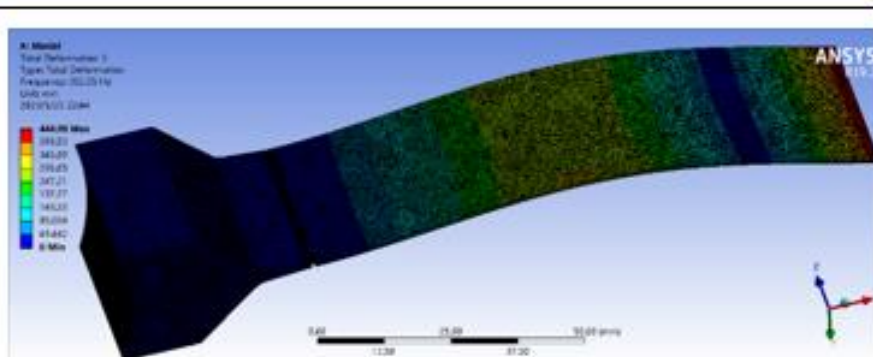
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片模态分析



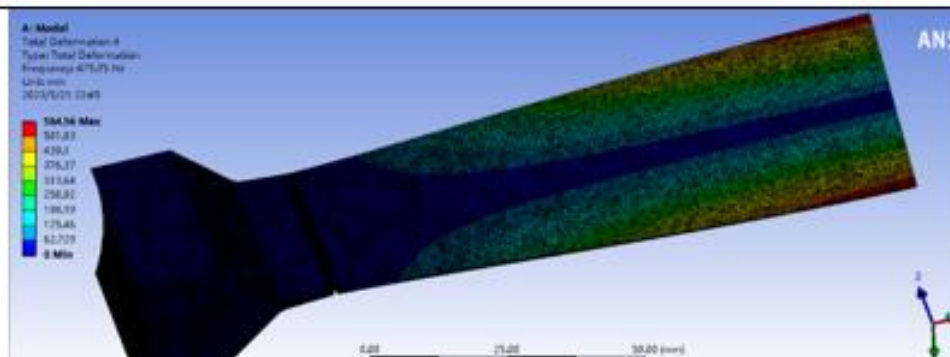
裂纹长度 2.0mm ↻



一阶模态: 67.27Hz ↻

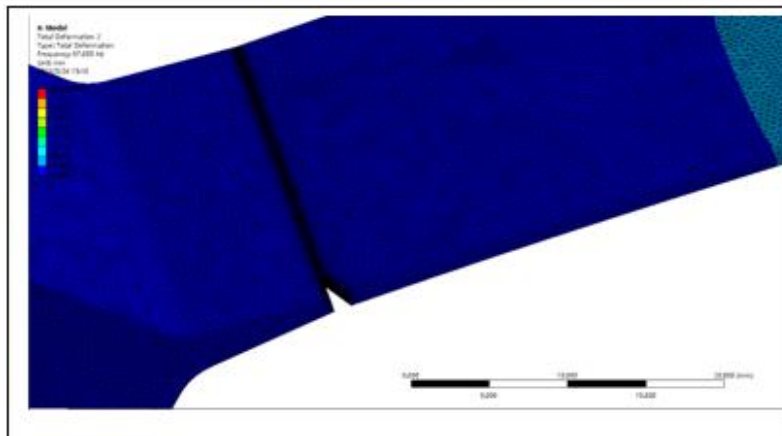


二阶模态: 382.35Hz ↻

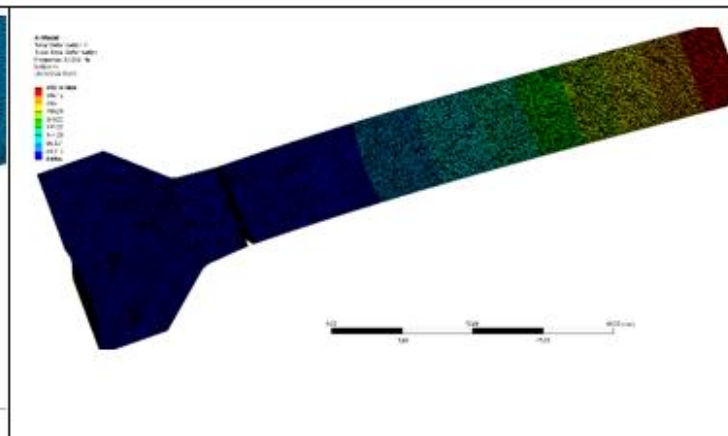


三阶模态: 475.95Hz ↻

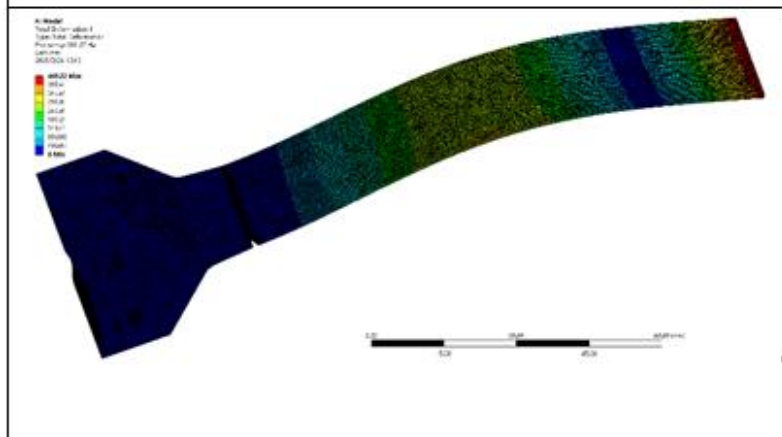
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片模态分析



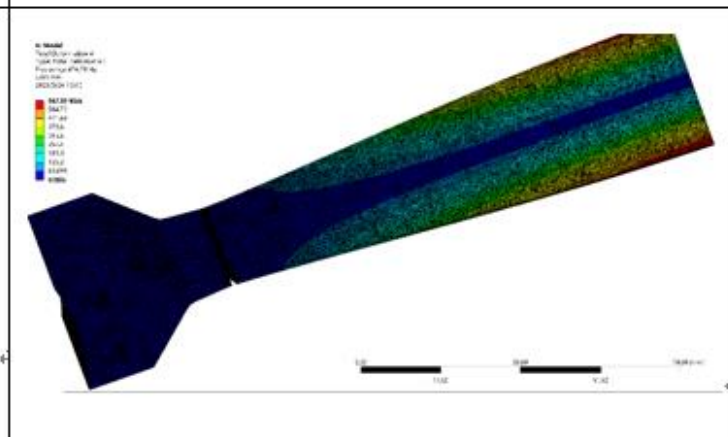
裂纹长度 3.0mm



一阶模态: 67.085Hz

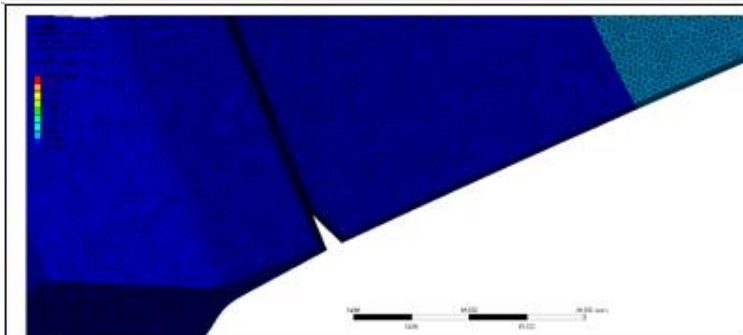


二阶模态: 381.37Hz

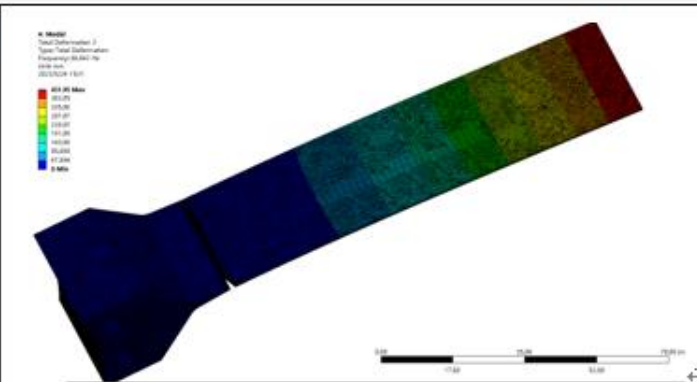


三阶模态: 474.78Hz

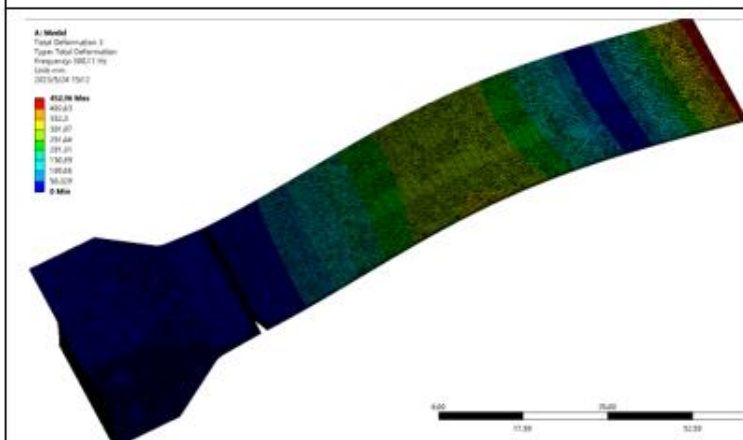
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片模态分析



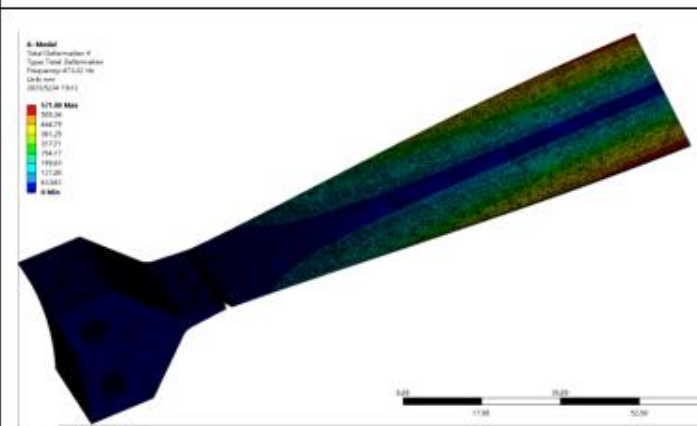
裂纹长度 4.0mm



一阶模态 66.842: Hz



二阶模态: 380.11Hz

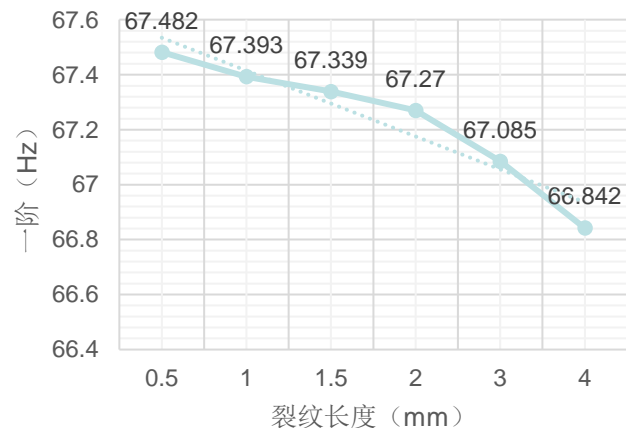


三阶模态: 473.32Hz

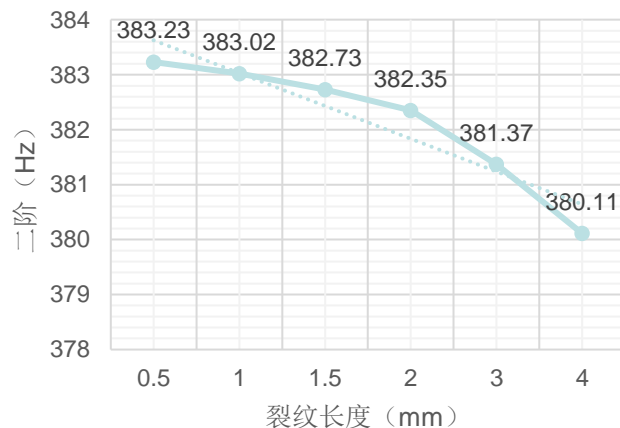
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片模态分析

| 裂纹长度 (mm) | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 一阶 (Hz) | 67.482 | 67.393 | 67.339 | 67.27 | 67.085 | 66.842 |
| 二阶 (Hz) | 383.23 | 383.02 | 382.73 | 382.35 | 381.37 | 380.11 |
| 三阶 (Hz) | 477.01 | 476.76 | 476.4 | 475.95 | 474.78 | 473.32 |

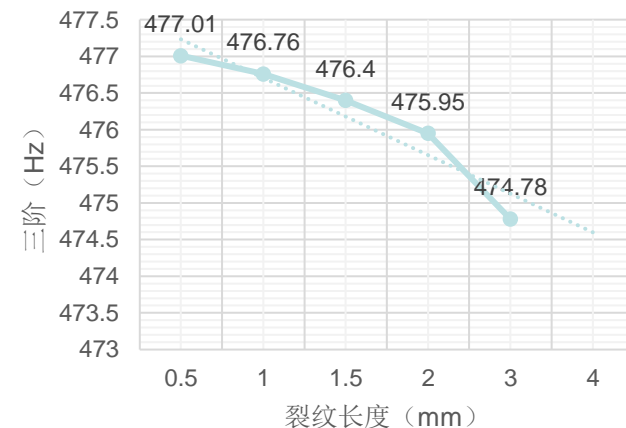
一阶



二阶

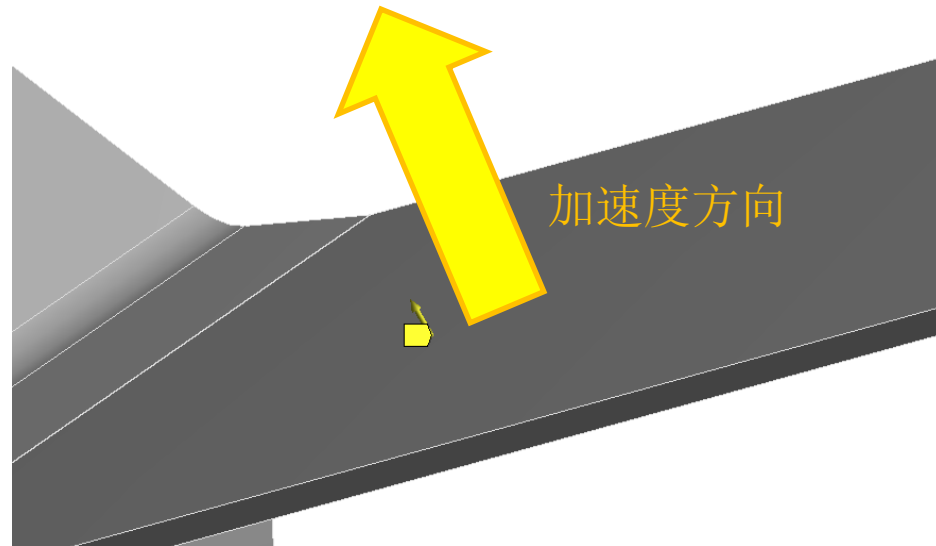


三阶



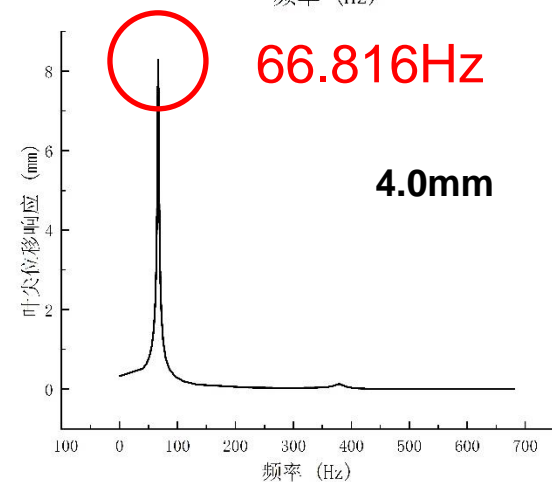
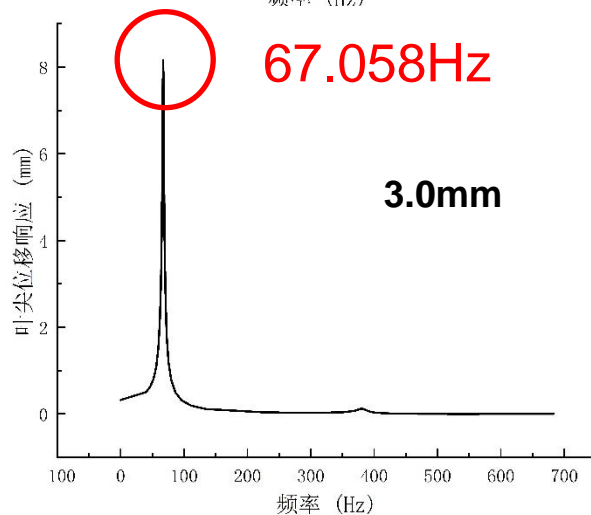
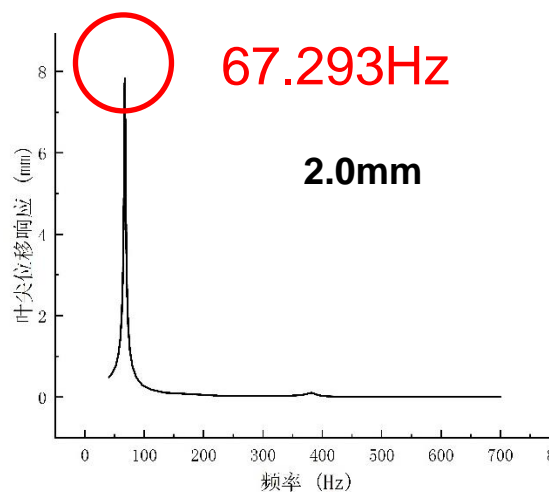
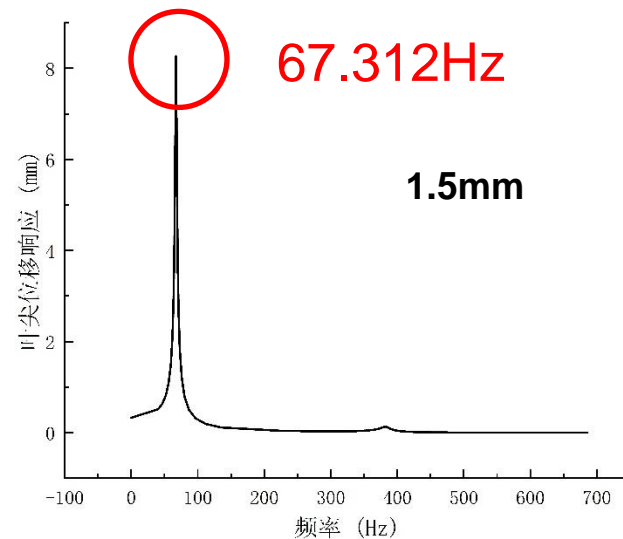
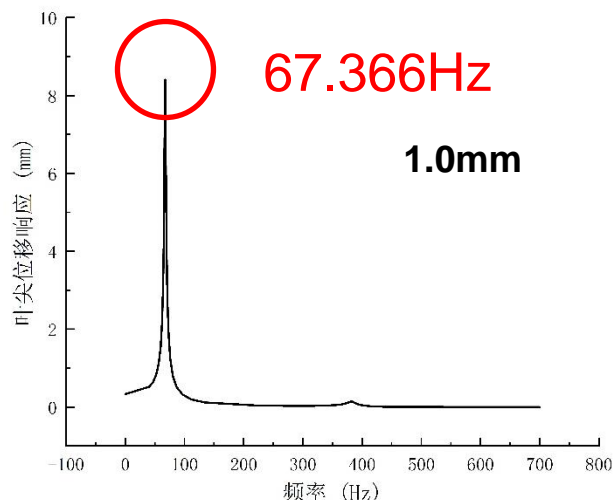
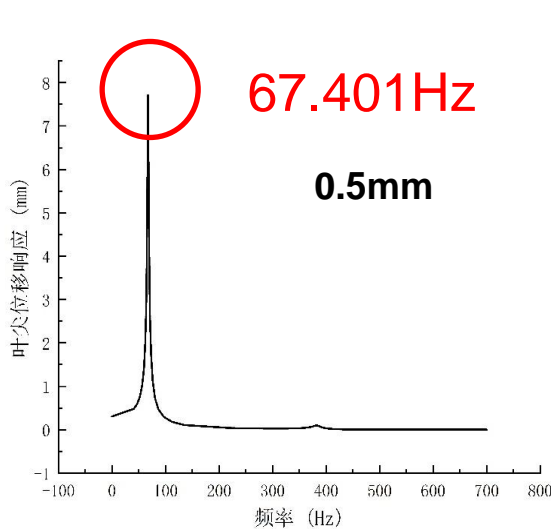
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片谐响应分析

通过施加外部激励 $4g$ ，进行谐响应分析。在平行叶片方向上观察叶片谐响应应力分布。在垂直叶片方向上观察叶尖位移响应。

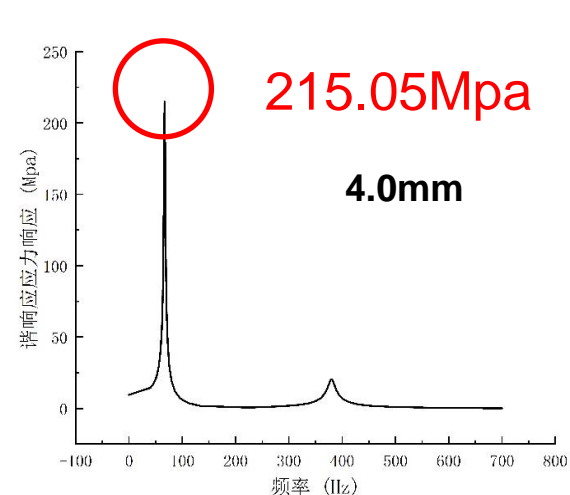
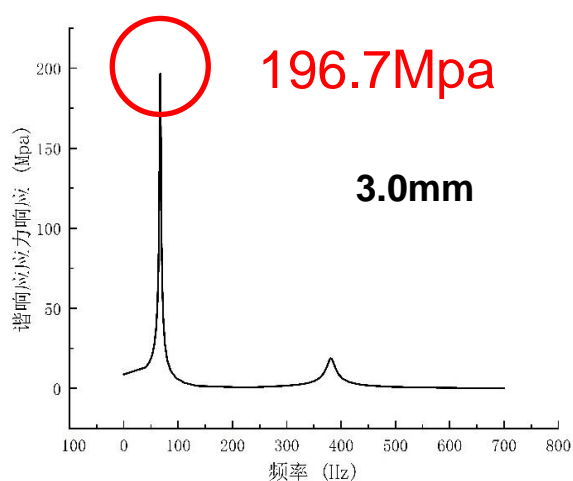
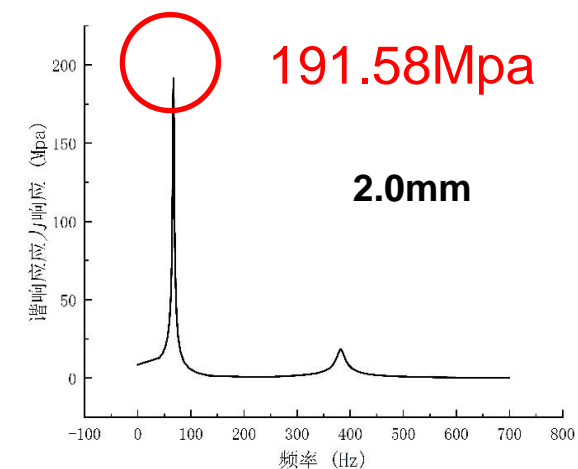
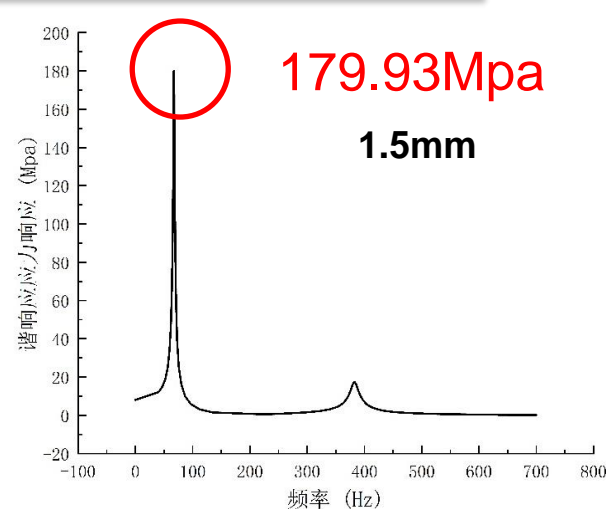
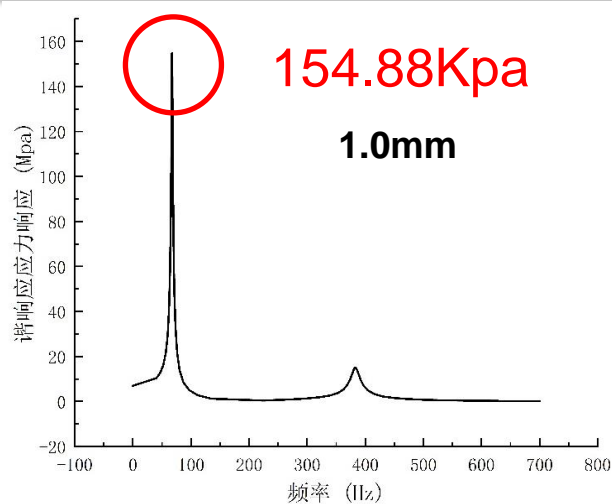
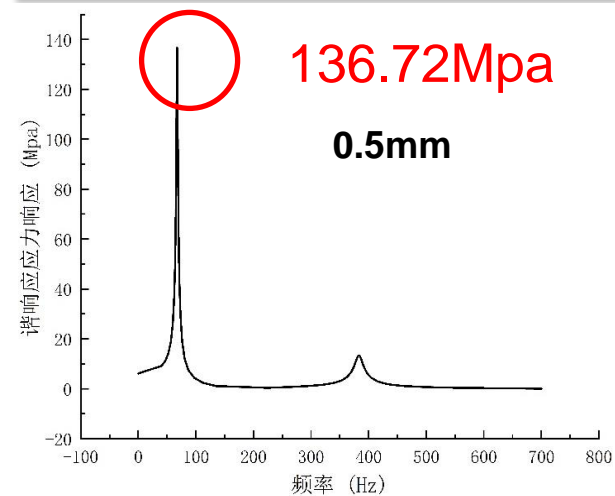


在谐响应分析中，可以观察叶片在不同激励条件下的振幅、相位和应力分布等。通过分析结果，可以评估叶片的共振频率及幅值。

叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片谐响应分析



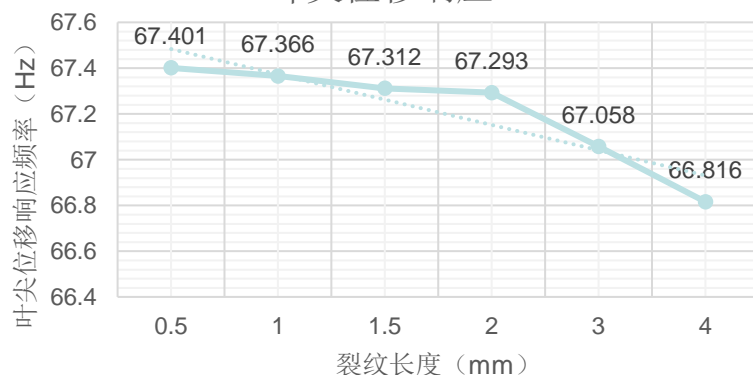
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片谐响应分析



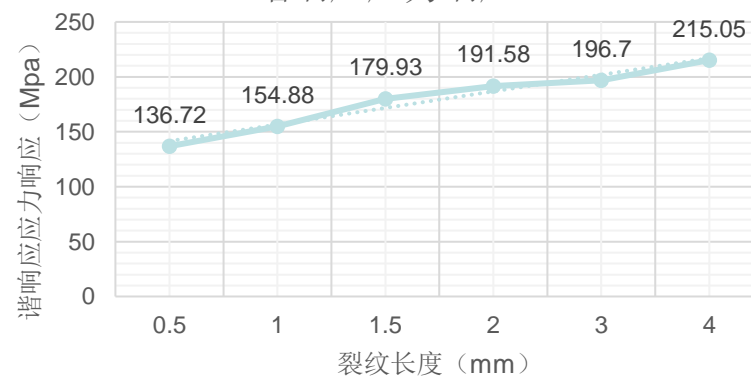
叶片有限元建模与仿真：含裂纹叶片谐响应分析

| 裂纹长度 (mm) | 0.5mm | 1.0mm | 1.5mm | 2.0mm | 3.0mm | 4.0mm |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 叶尖位移响应频率 (Hz) | 67.401 | 67.366 | 67.312 | 67.293 | 67.058 | 66.816 |
| 谐响应应力响应 (Mpa) | 136.72 | 154.88 | 179.93 | 191.58 | 196.7 | 215.05 |

叶尖位移响应



谐响应应力响应



随着叶片裂纹的长度增大，其影响越大，加速度响应最大值所对应的频率逐渐减小，而应力则逐渐增大。



汇报内容

1

背景与意义

2

内容与方案

3

扭振测试方法及试验

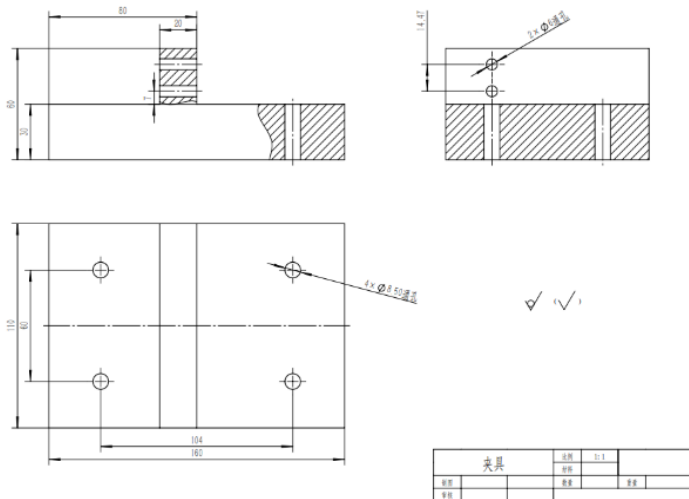
4

叶片疲劳试验

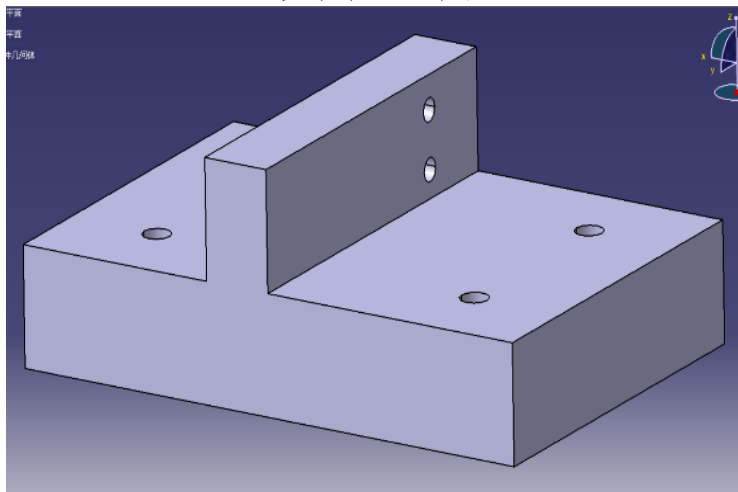
5

总结与展望

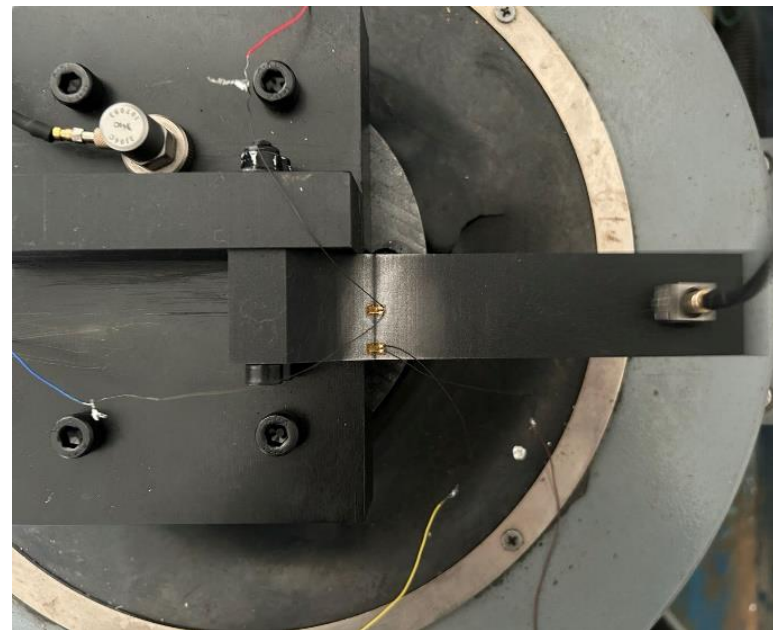
叶片疲劳试验：夹具设计



夹具CAD图



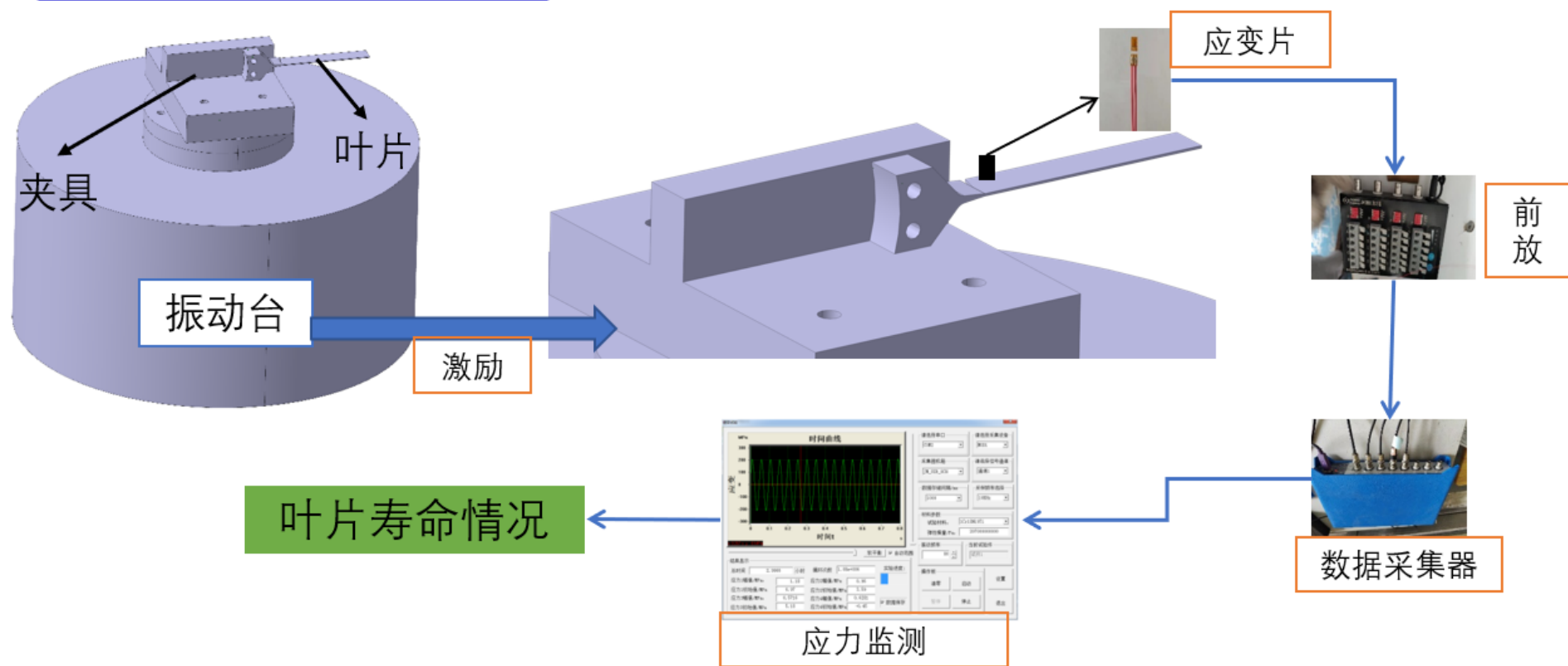
夹具3D图



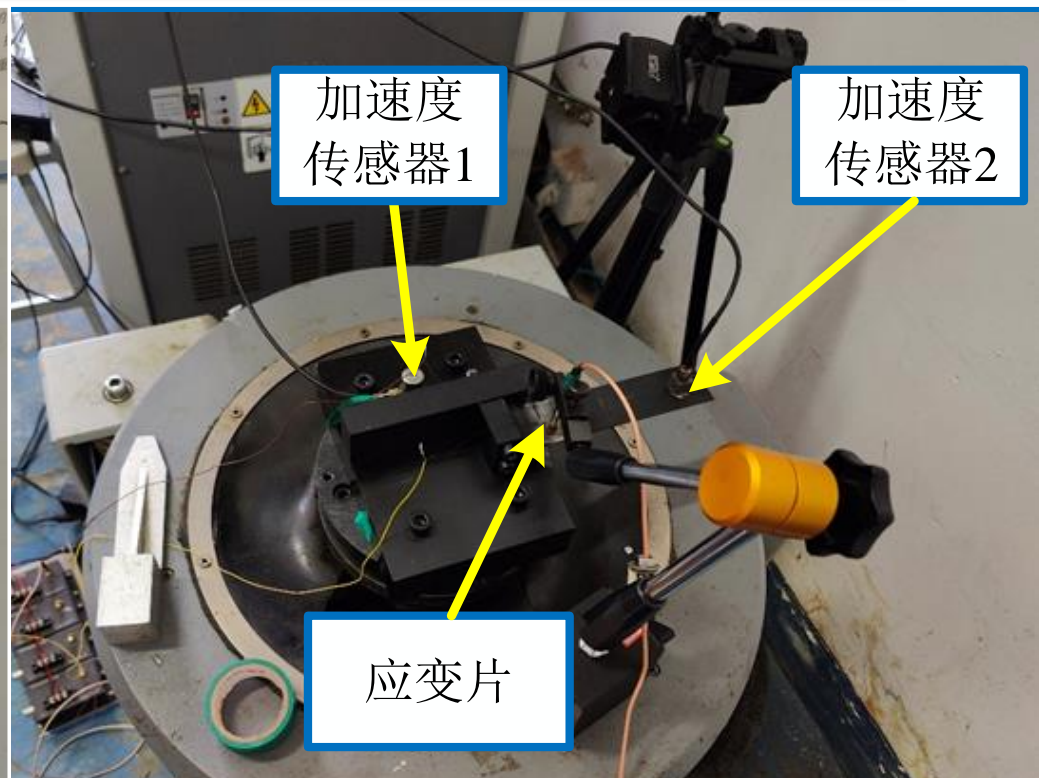
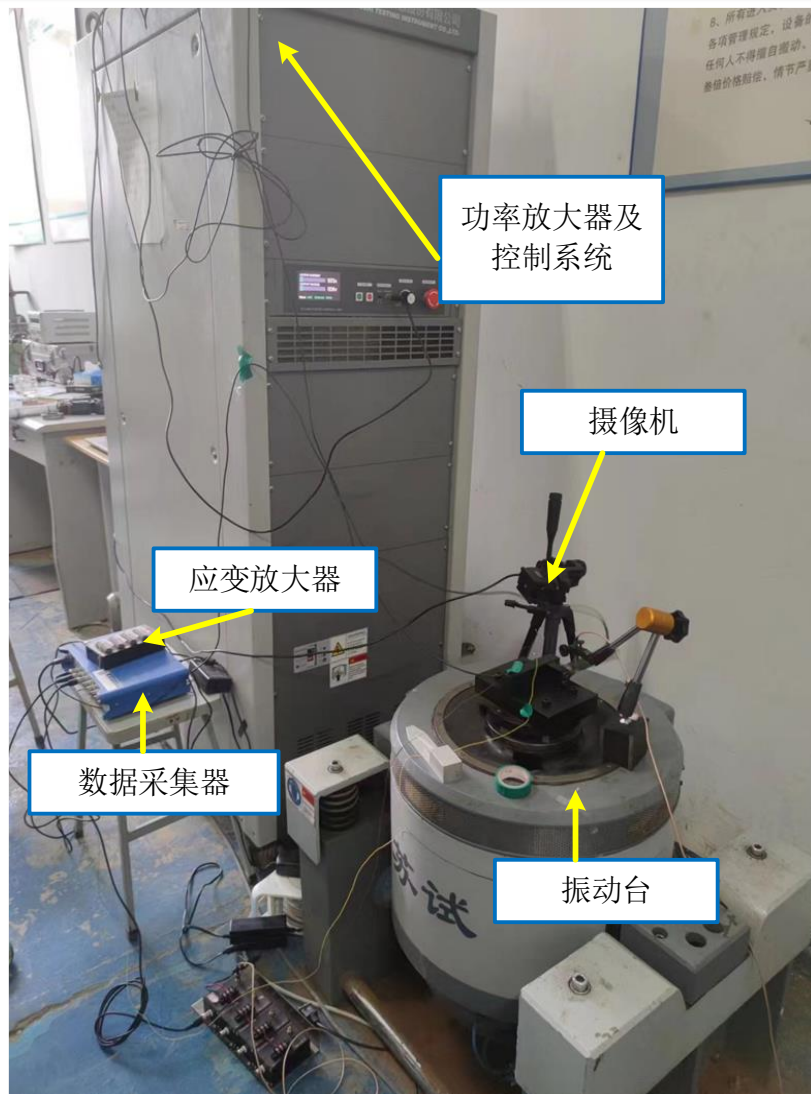
叶片疲劳试验:

叶片裂纹振动台试验方案

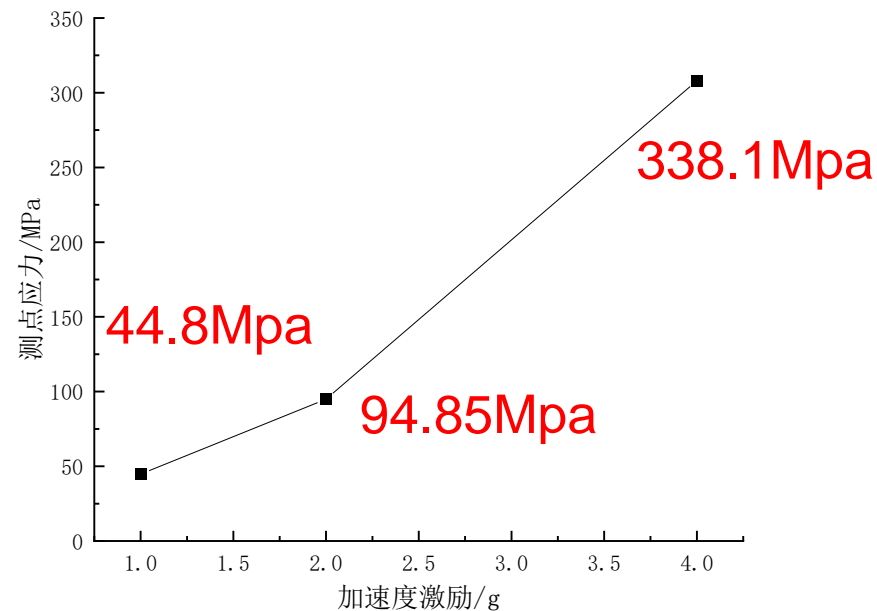
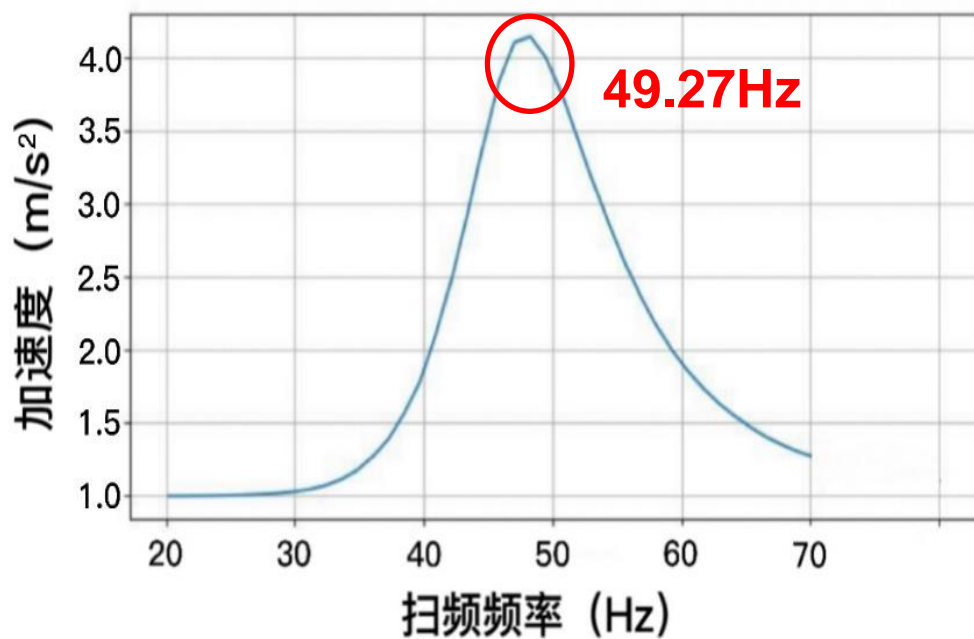
含裂纹叶片的疲劳寿命试验



叶片疲劳试验：试验设备搭建

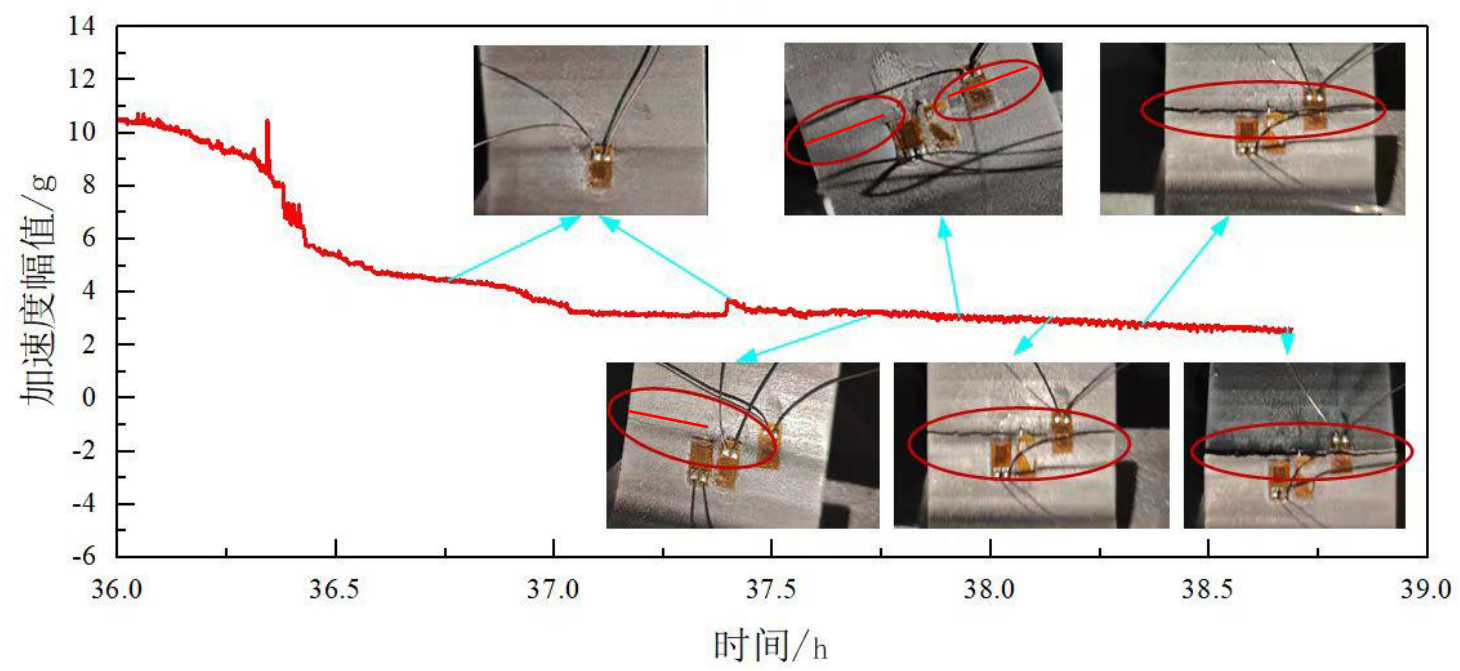
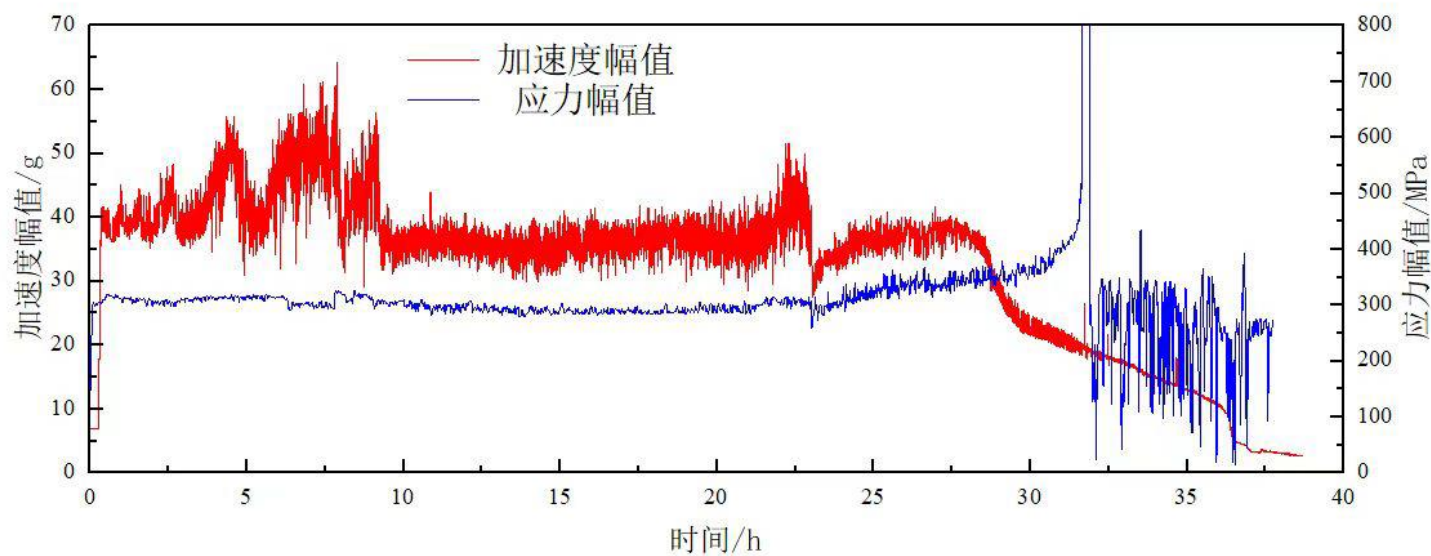


叶片疲劳试验:



通过扫频实验确定共振频率为49.27Hz

通过预实验确定施加4g载荷





汇报内容

1

背景与意义

2

内容与方案

3

叶片有限元建模与仿真

4

叶片疲劳测试

5

总结与展望

总结与展望：

总结：

- 1.无裂纹叶片的振动有限元模型：通过建模和仿真分析，可以准确预测叶片的振动特点，固有频率和应力分布，叶尖位移响应，对叶片提供重要参考。
- 2.含裂纹叶片的振动有限元模型模拟叶片裂纹影响，裂纹尺寸越大，叶片的叶尖位移将逐渐下降，叶尖位移所对应的频率也会下降，同时叶片裂纹附近应力将增大。
- 3.采集了叶片振动数据，并进行了信号处理和分析揭示叶片裂纹的萌生和扩展情况，振动频率的变化以及叶尖振动位移和应力的变化。试验结果不仅验证了有限元仿真的准确性，同时也可以通过在线振动监测的实时数据识别裂纹的产生与发展

总结与展望：

展望：

1. 旋转叶片的在线测试：未来的研究可以进一步探索旋转叶片的在线测试技术，例如采用传感器和监测系统对叶片振动进行实时监测和数据采集。这将有助于更地了解叶片的振动特性和裂纹的演化过程。
2. 非接触式监测技术：研究人员可以进一步研究和发展非接触式监测技术，实现对叶片裂纹的在线检测和监测。这将提供更便捷和高效的手段，帮助实时监测叶片的状态和裂纹的演化。

结束!

感谢各位老师批评指正

T H A N K S