



南京航空航天大学



机匣包容下转子弹性线测试方法与试验验证

 答辩人：陈智超 (SX2220001)

 专 业：交通运输工程

 导 师：陈果 教授

汇报内容

01 绪论

02

带机匣的盘鼓式转子试验器设计及振动特性仿真

03

基于叶尖间隙数据的转子弹性线重构方法

04

机匣包容下转子弹性线测试试验

05

总结与展望

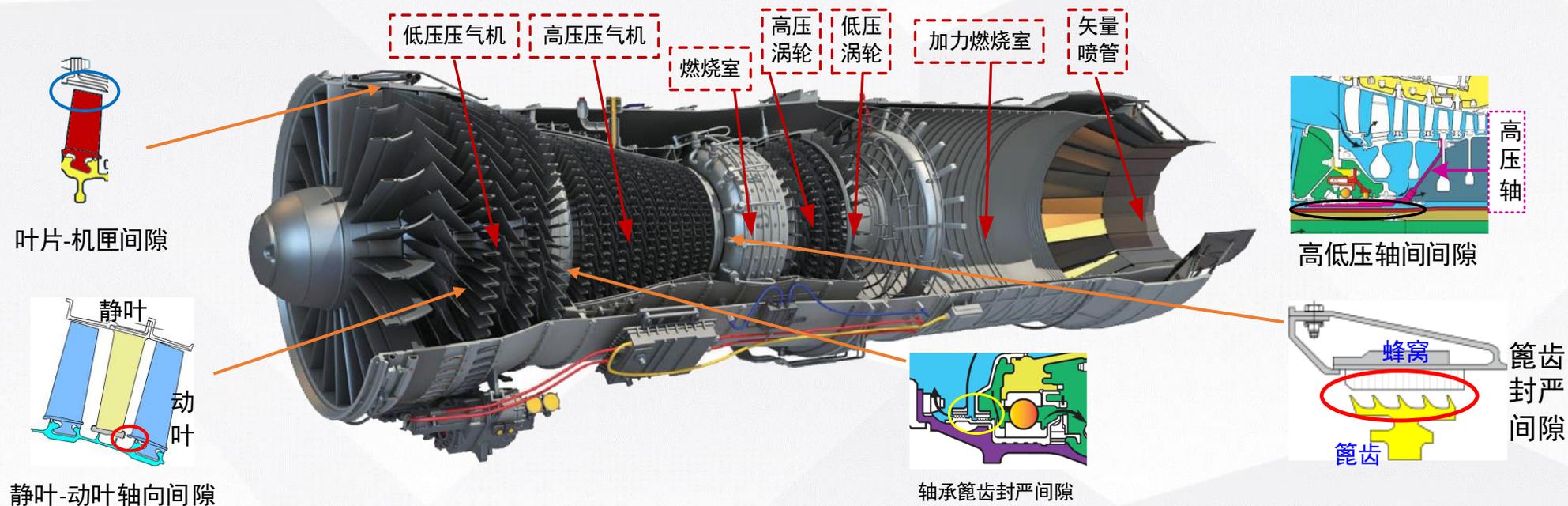
➤ **中国航发沈阳发动机研究所项目：**

校准试验器研制，2023.5-2024.12

➤ **中国航发燃气轮机有限公司项目**

燃机智能运维典型结构损伤模拟试验与故障检测技术，2022.1-2025.12

- 航空发动机转静结构间隙主要包括叶尖间隙、轴向间隙、篦齿封严间隙等，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%。



- 航空发动机是一种高度复杂的机械系统，其工作环境涉及极端的热力变化和动态条件。转静结构之间的动态间隙，作为**整机振动响应**行为的直观表现，直接反映了发动机的**性能和安全性**。

➤ 在发动机研制和使用过程中，大量统计数据表明，由于转子系统的叶片裂纹、主轴承损伤、转子不平衡、支点不对中、转静不同心、转子不同心、转子弯曲等故障激励下产生机械振动引起的事故占发动机故障的70%~80%

在发生重大故障前通常会出现振动超标或者振动异常等预警信号，叶盘作为转子系统的核心工作部件，在各种典型故障下其振动参数变化最为显著，是最能反应转子系统运行状态的核心部件。

叶尖间隙信号中蕴含了丰富的转子状态信息，从这些信号中准确提取出转子振动位移信号，并进一步重构出涡动轨迹和转子弹性线，则可以更为直接地获取转子系统的工作状态。

XX型号叶片机匣碰摩故障



试验器叶片机匣碰摩故障

XX型号主轴承磨损故障



试验器转轴碰摩故障

XX型号叶片裂纹故障



AGT-110燃机压气机叶片碰摩故障

太行发动机高压压气机叶片断裂故障

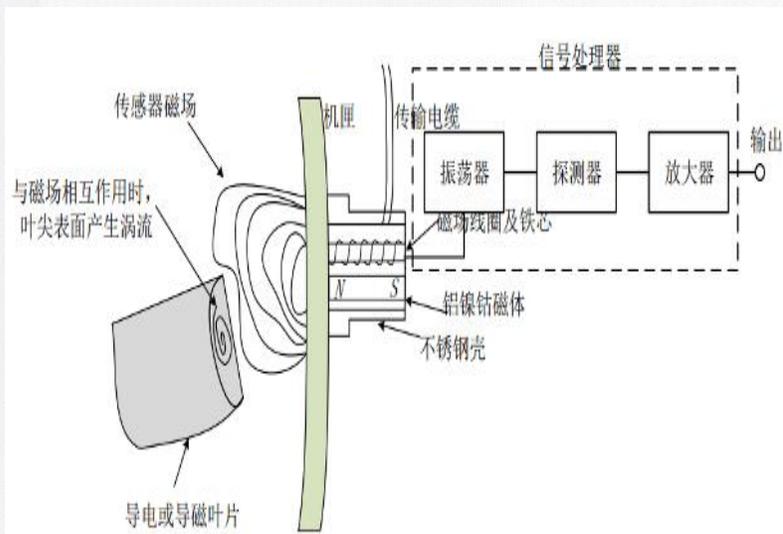


RR遑达700风扇叶片断裂故障



叶尖间隙信号测试方法

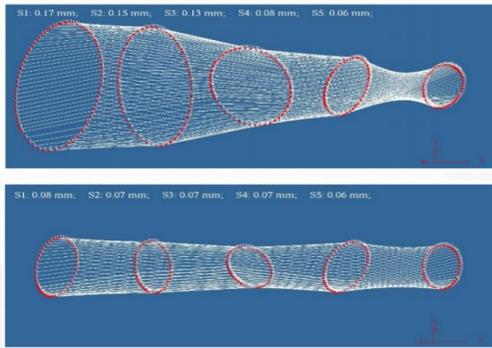
- 放电探针法：耐高温；不受叶片端面形貌影响，但是只能测量**所有叶片最小间隙值**，且只能测量金属叶片。
- 电涡流法：抗污染颗粒、油污、水汽；可隔**机匣**测量，但探头尺寸大。
- 电容法：耐温、耐压和抗燃气腐蚀，但**测量参数易随环境漂移**、需要校准。
- 微波法：耐温、耐压和抗燃气腐蚀，但发展还不成熟，**尚不具备真实航空发动机试验能力**。
- 光强法：探头尺寸小、结构简单、成本低廉、可实时测量，但**环境适应性较差**、需要校准。



- Yu B, Zhang T, Ke H, et al. Research on the tip clearance measuring method based on AC discharge[J]. IEEE Access, 2020, 8: 60355-60363.
- Tomassini R, Rossi G, Brouckaert J F. On the development of a magnetoresistive sensor for blade tip timing and blade tip clearance measurement systems[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(10): 102505.
- 段发阶, 牛广越, 周琦等. 航空发动机叶尖间隙在线测量技术研究综述[J]. 航空学报, 2022, 43(09): 82-108.
- Zhang J, Duan F, Niu G, et al. A blade tip timing method based on a microwave sensor[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1097.
- Zhang X, Xiong Y, Xie S, et al. Optical-fiber- based dynamic measurement system for 3D tip clearance of rotating blades[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 32075- 32095.

转子故障可视化诊断技术

- **轴心轨迹诊断方法**是一种可视化的转子故障诊断方法，在旋转机械的故障诊断中，转子的轴心轨迹可以直接的反映出旋转机械的运行状态，特定的轴心轨迹图形通常与特定的转子故障信息相对应。
- 屈梁生院士提出的**全息谱诊断方法**是真正意义上的转子系统可视化诊断方法，全息谱能够反映转子弯曲和扭转振动的形式，特别适用于旋转机械故障征兆的提取。
- 陈果、李成刚等人基于三维全息谱思想，提出了一种旋转机械转静间隙场的测试系统及测试方法，首次提出了**转子弹性线**概念。



- Chen G Y, Krzyzak A. Wavelet-based 3D Data Cube Denoising Using Three Scales of Dependency[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2024: 1-11.
- Matsumoto F, Ohtsu H. Consideration of Integrated Low-Frequency Low-Pass Notch Filter Employing CCII Based Capacitance Multipliers[J]. IEICE, 2024, 107(1): 114-118.
- 屈梁生. 机械故障的全息诊断原理[M]. 科学出版社, 2007.
- 胡彦红, 张雷, 林建中等. 基于全息谱的转子系统故障诊断分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12): 164-166+209-210.
- 陈果, 屈美娇, 李成刚, 等. 一种旋转机械转静间隙场的测试系统及测试方法[P]. ZL 2016 1 0902073.9.
- 沈响响, 陈果, 胡伟, 等. 基于叶尖间隙测量的航空发动机转子振动预测[J]. 航空动力学报, 2022, 37(12): 2840-2850.

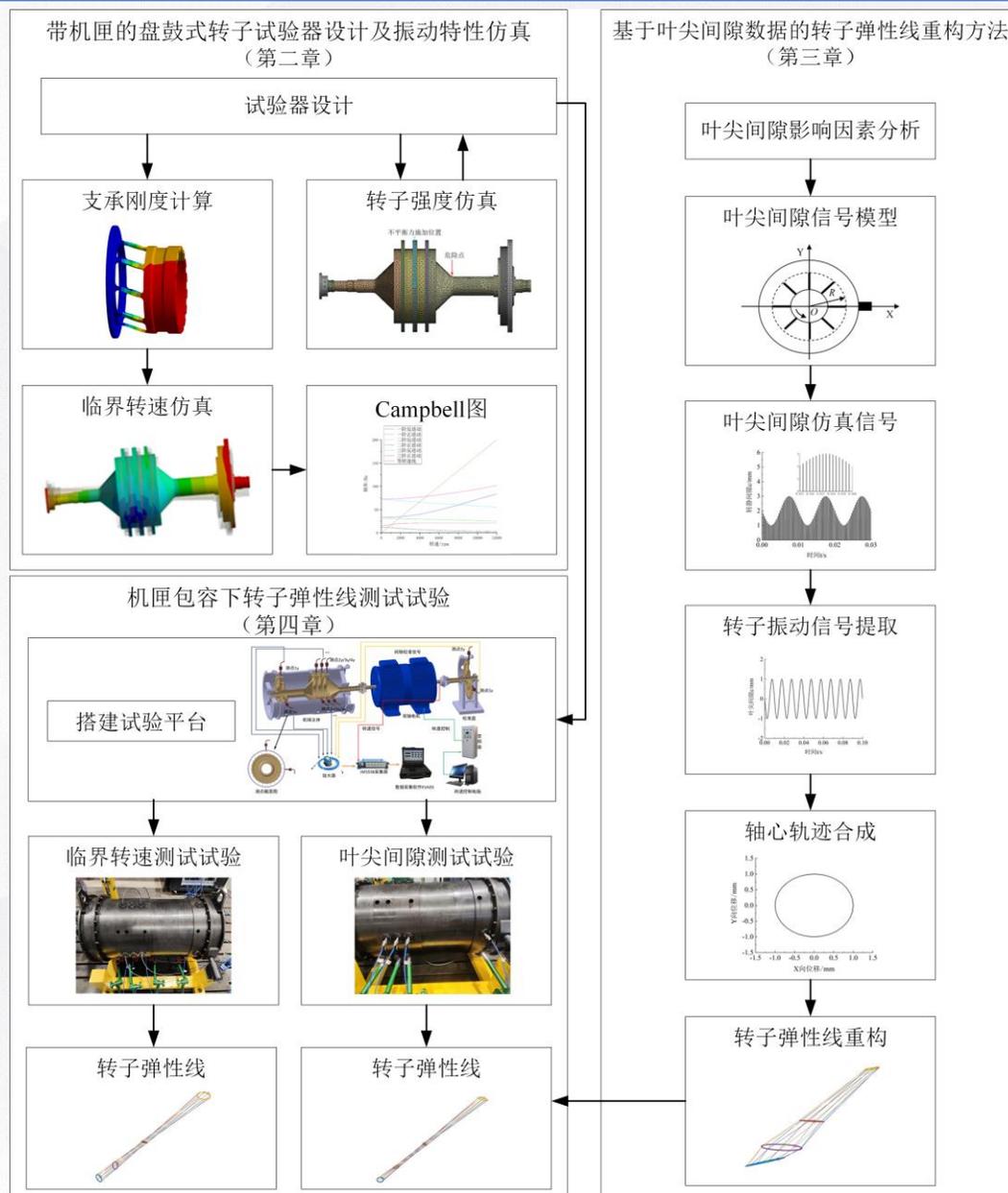
现有研究不足：

- 现有的研究获取转子的振动弹性线大多是通过**测量转轴振动**来获取的，而通过测量**转轴的振动信号**来直接获取转子轴心轨迹的方法在航空发动机的真实工况下难以应用。



研究目标：

- 在转轴和叶盘上安装传感器测量转轴的振动，用**振动数据合成转子的轴心轨迹**，并重构转子弹性线。
- 测量叶尖间隙数据，从**叶尖间隙数据提取转子的轴心轨迹**，并进一步通过多截面的轴心轨迹重构出转子弹性线。



汇报内容

01 绪论

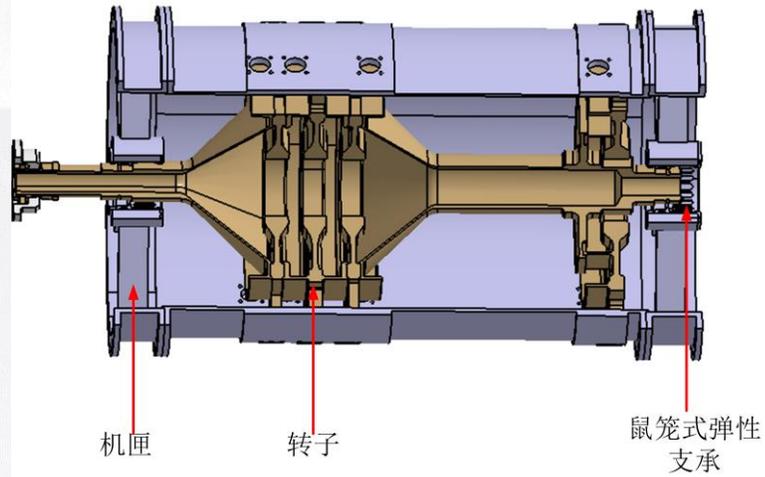
02 带机匣的盘鼓式转子试验器设计及振动特性仿真

03 基于叶尖间隙数据的转子弹性线重构方法

04 机匣包容下转子弹性线测试试验

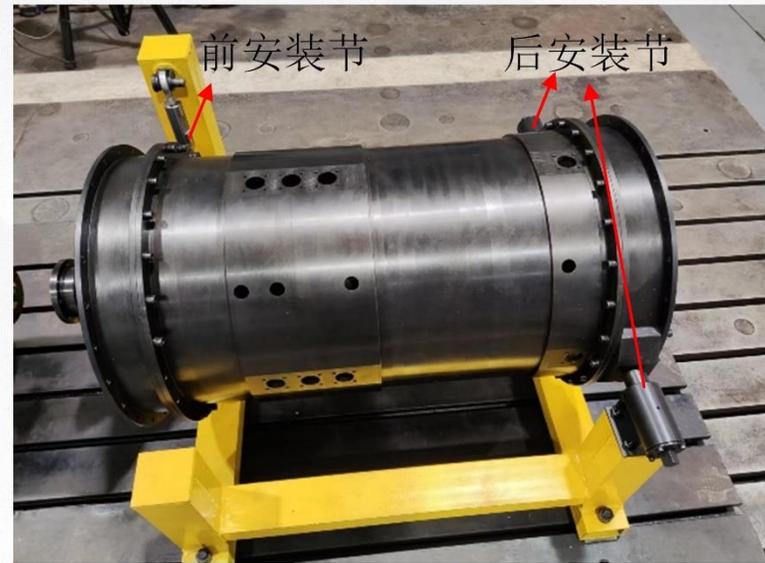
05 总结与展望

总体设计方案



带机匣的盘鼓式转子试验器
整体结构图

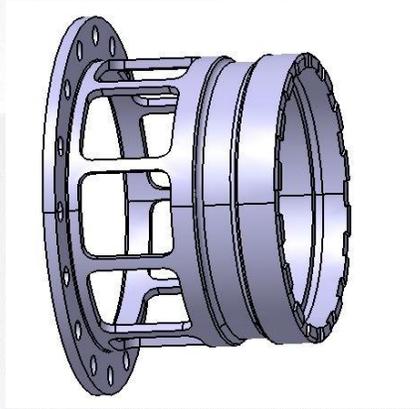
试验器采用1-0-1支承布局，压气机被简化为三级叶盘，涡轮则简化为单级叶盘，所有叶片均简化为直板叶片。



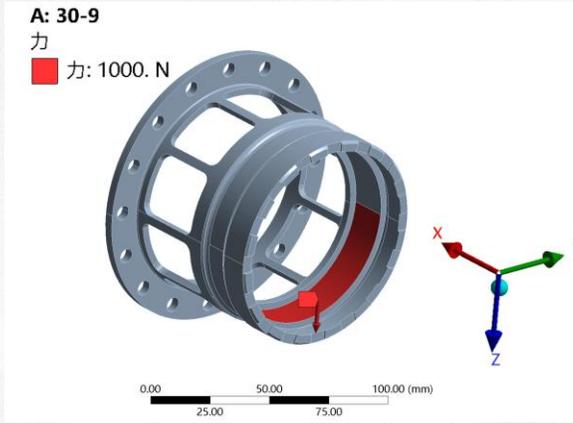
带机匣的盘鼓式转子试验器
实物图

试验器的机匣呈环状几何形状，机匣包裹着叶片，每个盘截面周向均匀分布有四个测试孔，互成90度角并正对叶片，用于测量叶尖间隙；相邻截面上45度方向设有另一组四个互成90度角的测试孔，用于监测叶盘振动情况。

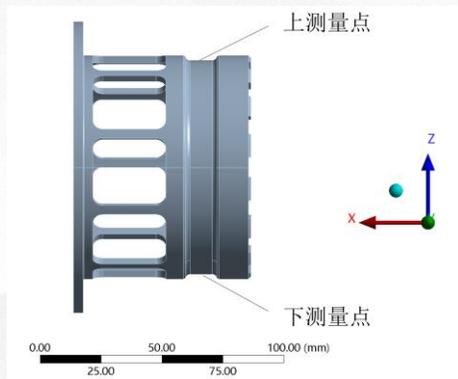
弹性支承设计及刚度仿真



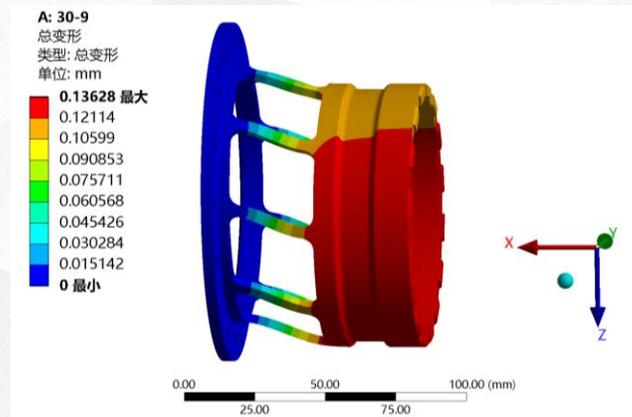
弹性支承三维模型



仿真设置



测点设置



仿真结果

根据理论公式

$$K = E \frac{nbh(b^2 + h^2)}{2L^3}$$

计算得出的支承刚度为 $K = 1.05 \times 10^7$ N/m

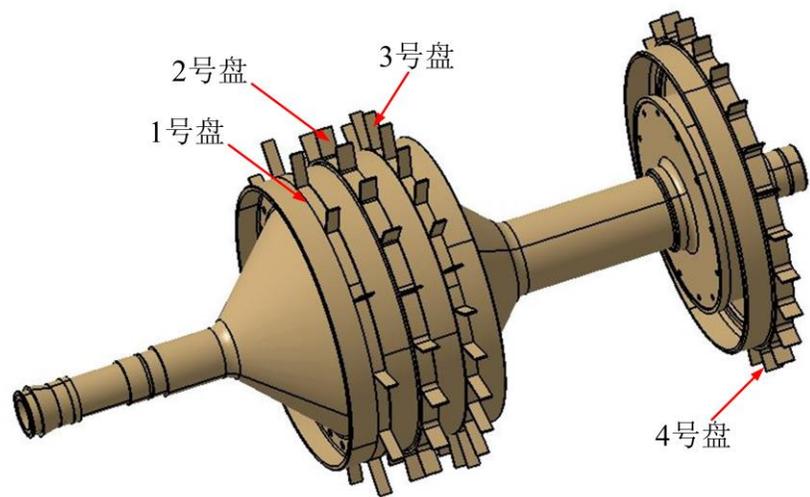
有限元仿真计算的支承刚度为

$$K = 8.03 \times 10^6$$
 N/m

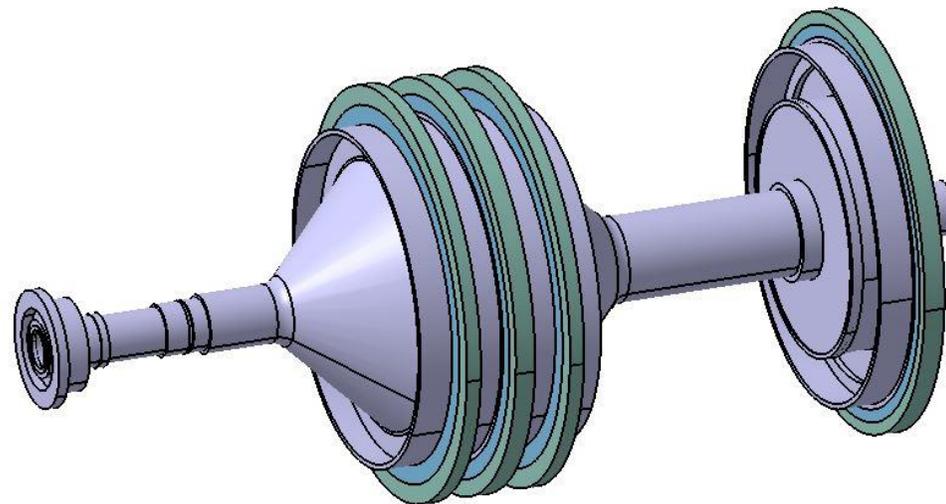
经验公式法在计算过程中仅考虑了笼条的变形，实际鼠笼的笼条前后还有长短不一的金属环和鼠笼法兰面固定连接部位的变形没有进行考虑。这些额外的结构变形在经验公式中并未被计入，导致计算结果偏高。

转子系统建模

数量众多的转子叶片，其局部振动对转子模态分布的影响较小，为了提高计算效率，采用等效圆环法将叶片用两个质量均匀的圆环替代，圆环保持叶片原有的质量和转动惯量一致。

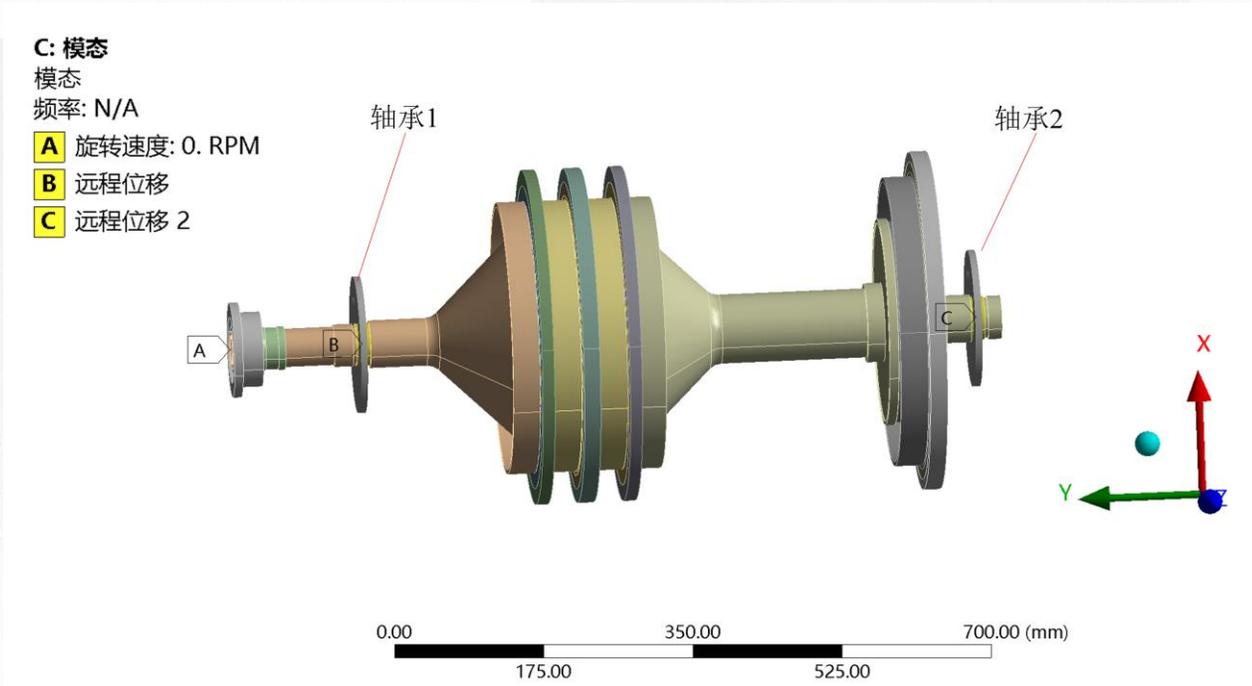


转子系统三维模型

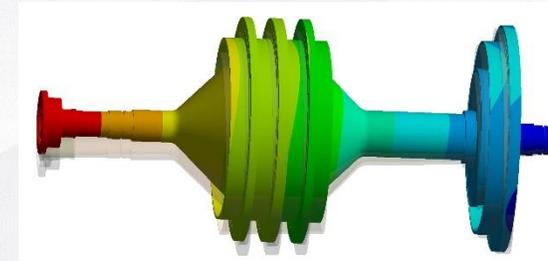


转子系统简化后三维模型

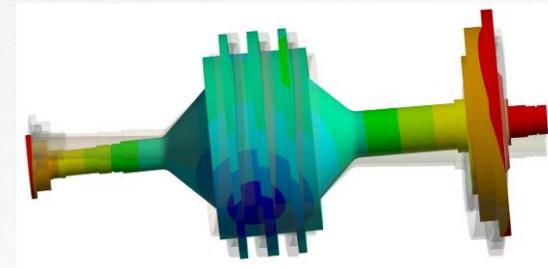
转子临界转速仿真



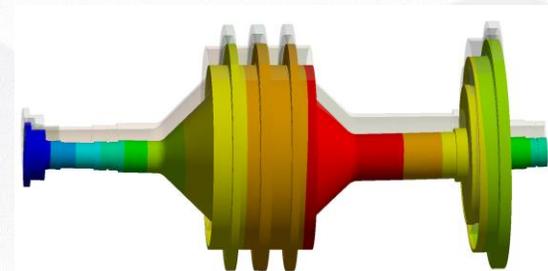
边界条件设置



一阶振型

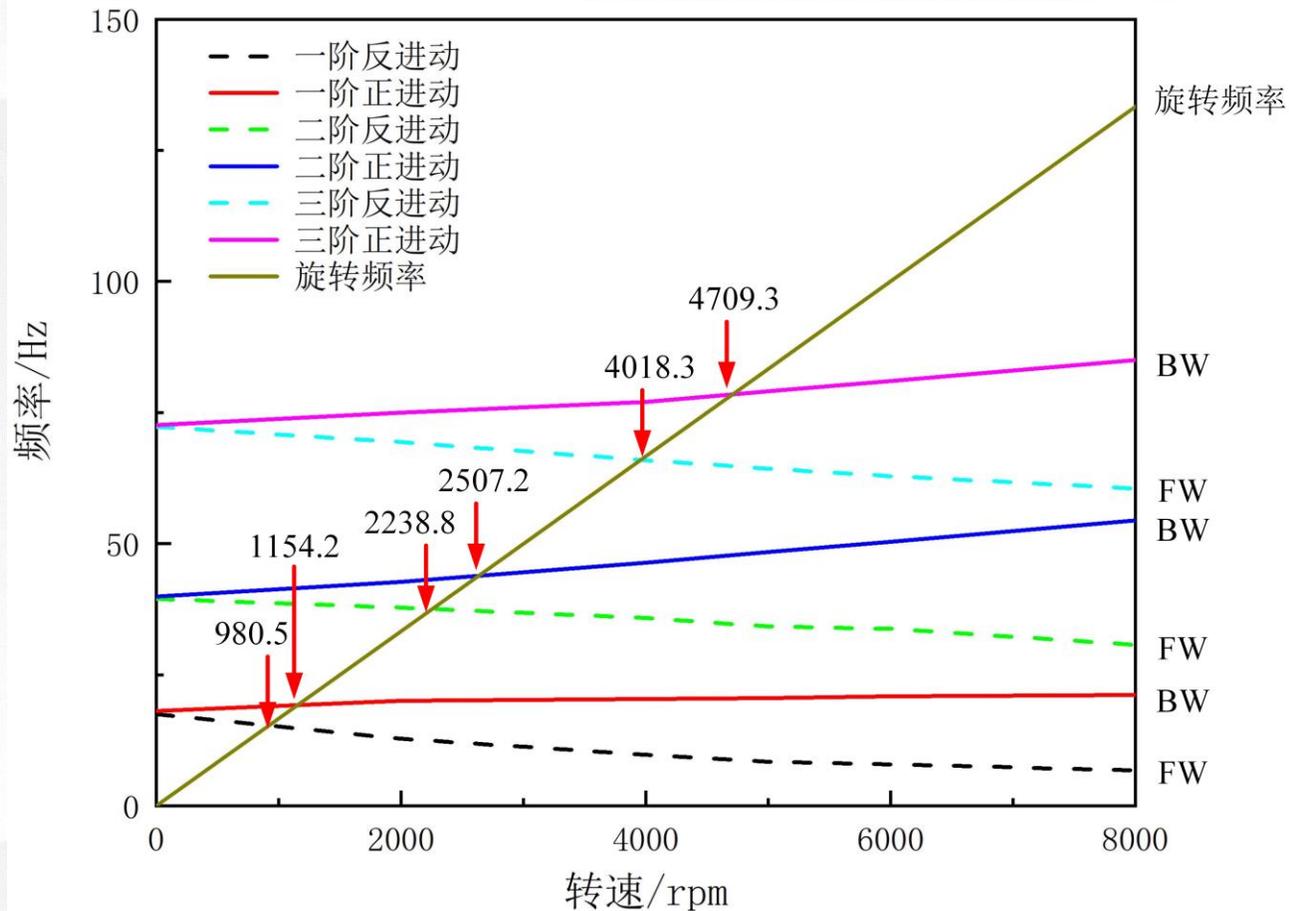


二阶振型



三阶振型

转子临界转速仿真

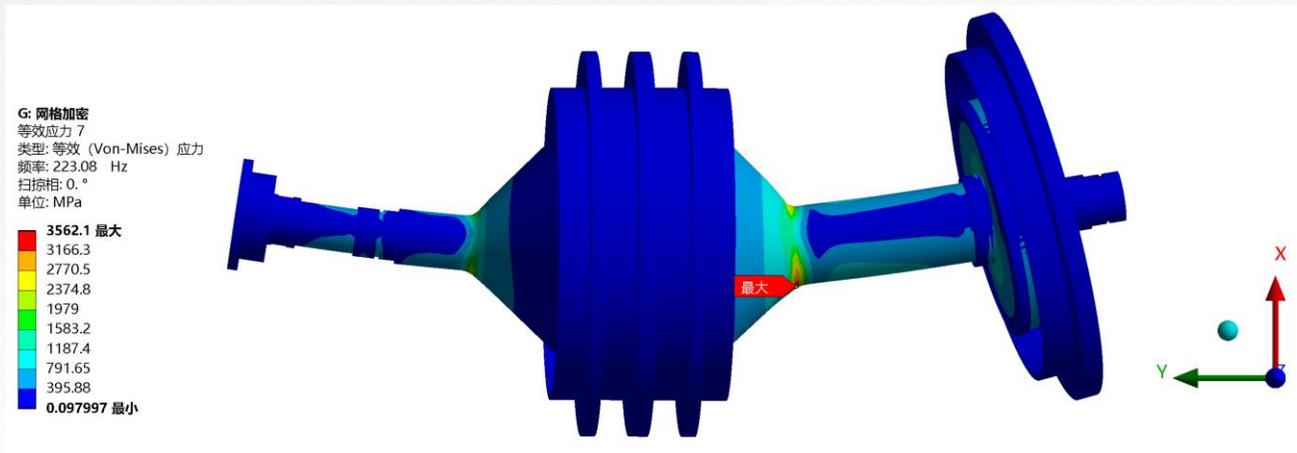


转子系统Campbell图

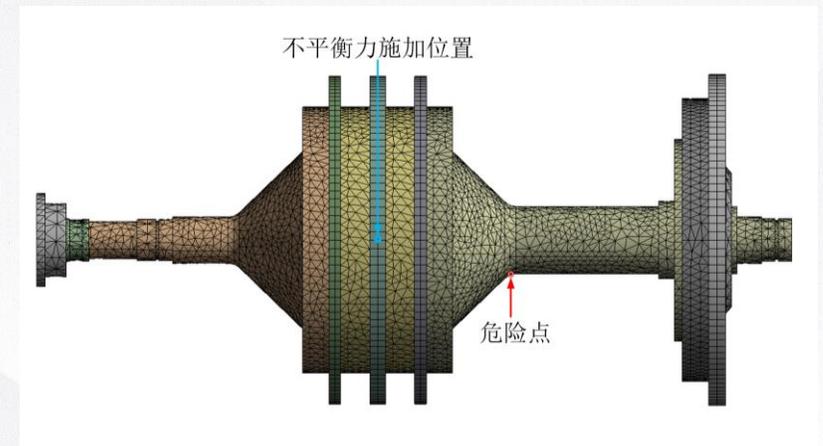
阶次	进动方向	临界转速 /rpm
1	反进动	980.5
	正进动	1154.2
2	反进动	2238.8
	正进动	2507.2
3	反进动	4013.8
	正进动	4709.3

转子轴系强度仿真

通过经验法得出转子的平衡品质，计算转子的许用不平衡量，进行不平衡响应仿真，转子的不平衡力施加在2号盘的盘心处，危险点如图所示。

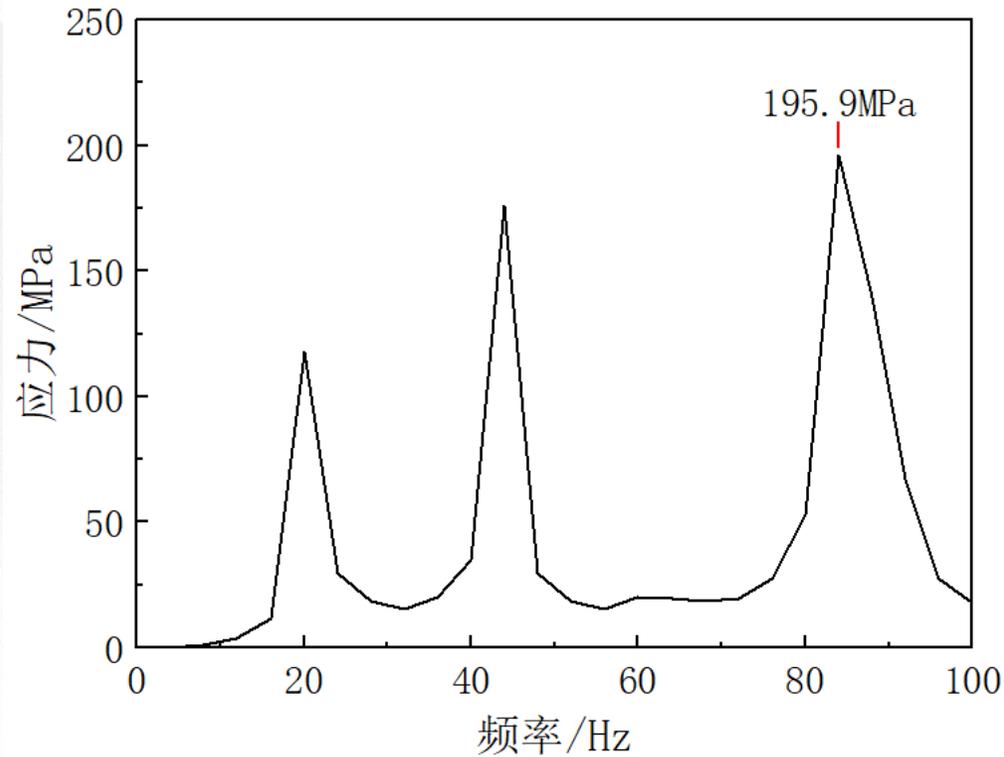


转子一弯模态应力示意图



不平衡量施加位置及响应点计算位置

转子轴系强度仿真



转子一弯模态应力示意图

在转速范围内，最大等效应力为
195.9MPa，轴的材料为40CrNiMoA，屈
服强度为835MPa

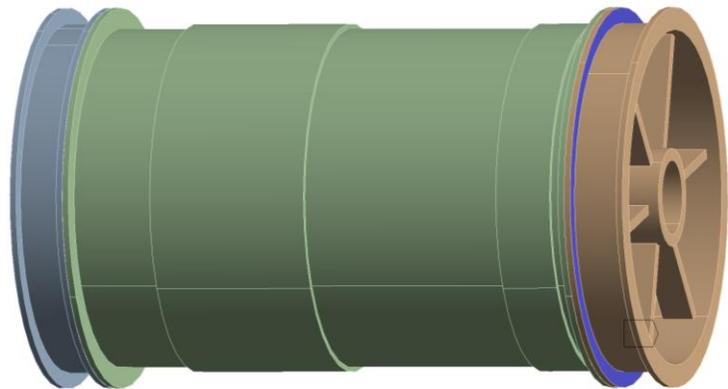
按照公式

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \quad [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}$$

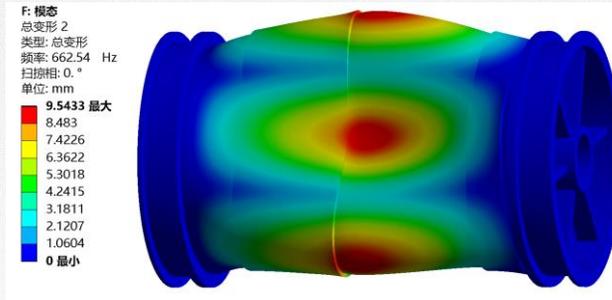
安全系数取2，则许用应力为417.5MPa，
可以验证盘轴系统的强度符合设计要求。

机匣模态仿真

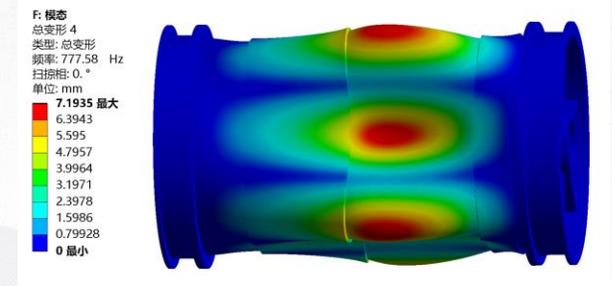
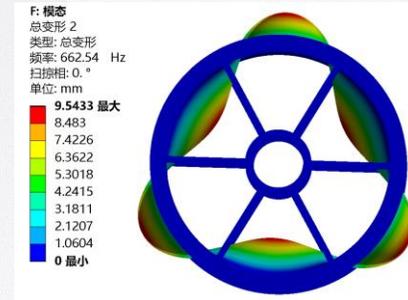
三段机匣均视为绑定接触，固定机匣两端进行模态分析，机匣模态振型如图，前三阶模态频率都远大于转子的工作转速。



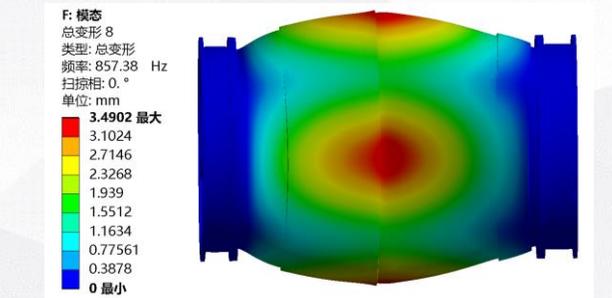
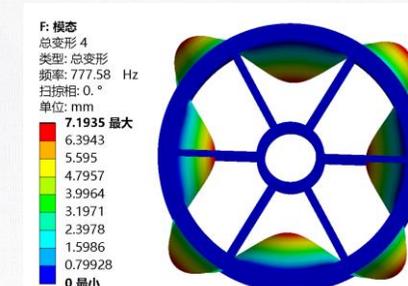
边界条件设置



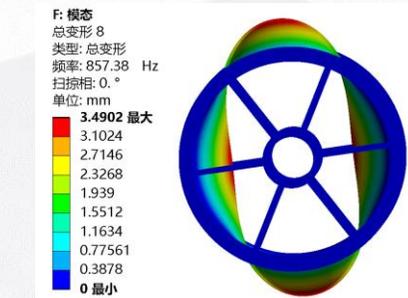
一阶振型 (662.54Hz)



二阶振型 (777.58Hz)

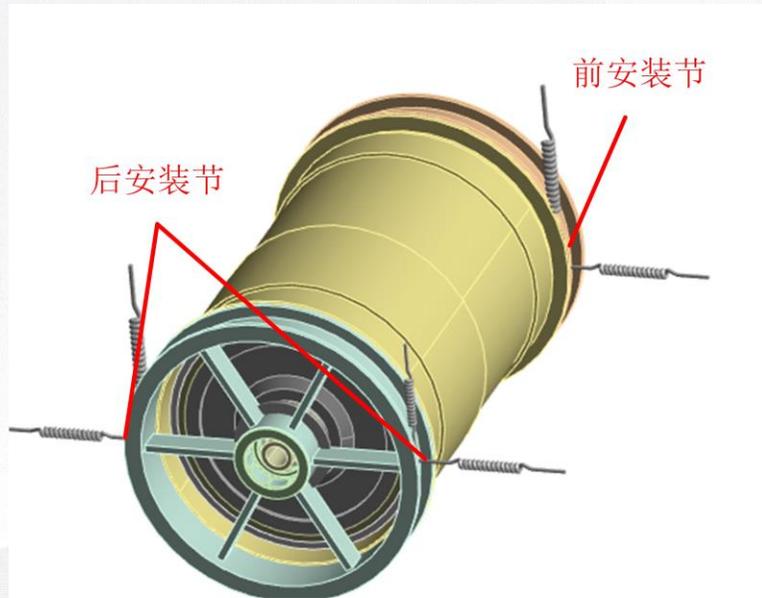


三阶振型 (857.38Hz)



整机临界转速仿真

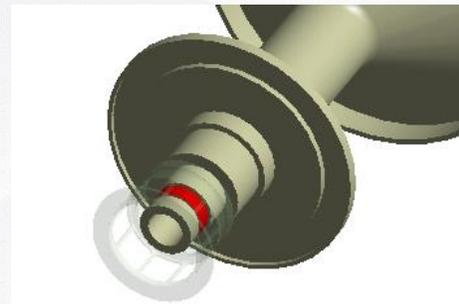
每个安装节均用两个垂直和水平方向的弹簧进行模拟，转子与弹性支承之间采用轴承单元连接，轴承的刚度为 $10^8\text{N}\cdot\text{m}$ 。



安装节模拟

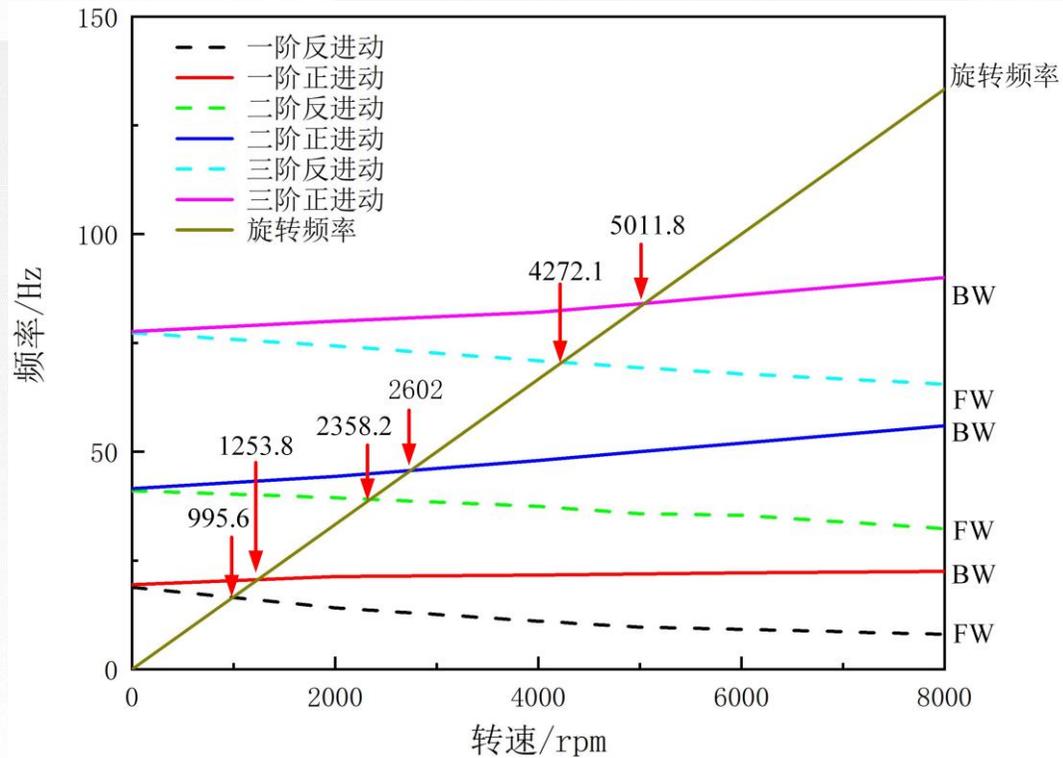


1号轴承

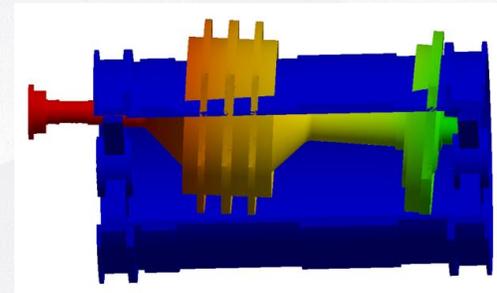


2号轴承

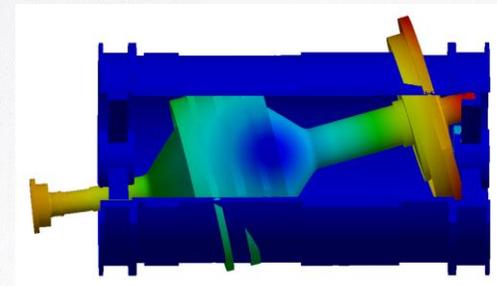
整机临界转速仿真



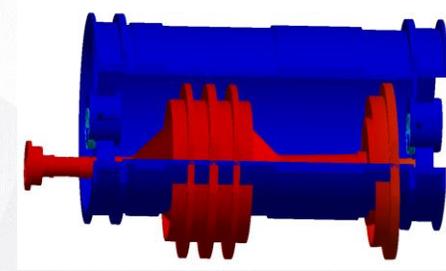
整机Campbell图



一阶振型



二阶振型



三阶振型

小结

- 介绍了带机匣的盘鼓式转子试验器的整体设计方案。
- 分别建立了弹性支承、转子、机匣有限元模型，仿真计算了弹性支承的刚度、转子的前三阶临界转速、转子在不平衡力作用下的转子振动以及机匣的前三阶模态。
- 建立了系统的整机有限元模型，仿真计算了前三阶临界转速和振型，计算得到前三阶临界转速，即1253.8rpm、2602rpm、5011.8rpm，其中，前两阶振型为转子俯仰振型，第三阶振型为转子平动振型，机匣没有振型。

汇报内容

01 绪论

02 带机匣的盘鼓式转子试验器设计及振动特性仿真

03 基于叶尖间隙数据的转子弹性线重构方法

04 机匣包容下转子弹性线测试试验

05 总结与展望

叶尖间隙影响因素

$$d(t) = r_{\text{case}} - (r_0 + u_{r1}) - (l_0 + u_{b1} + u_{b2}) - a$$

式中, r_{case} 为机匣内径; r_0 为转子盘的初始内径; u_{r1} 为转子在离心力作用下的径向位移变化;

l_0 为叶片的初始长度; u_{b1} 为叶片在离心力作用下的径向位移; u_{b2} 为叶片振动幅值; a 为转子振动幅值。

叶片变形

$$u_{b1} = \frac{m}{A} \left[\frac{l(0.5l + r_0)\omega^2}{E} \right]$$

转盘变形

$$u_{r1} = \frac{\rho_r \omega^2 r_0^3}{4E} (1 - \mu)$$

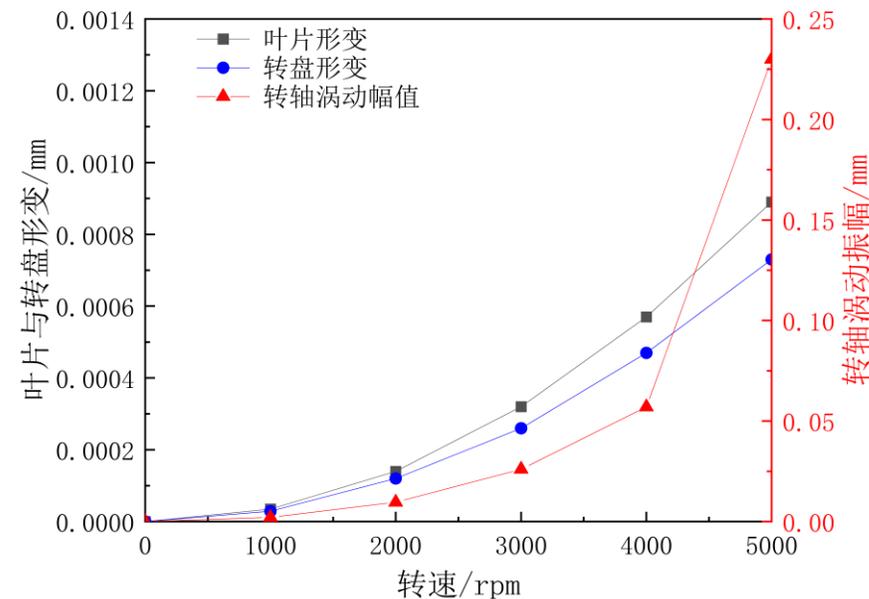
转轴振动变形

通过施加不平衡量进行有限元仿真得到

叶尖间隙影响因素

表中不同转速下的叶片和转盘的形变大小由公式计算得到，转轴涡动振幅通过有限元仿真得到。对比发现在各个转速下对叶尖间隙影响最大的是转轴振动幅值，超过其他两个因素约2个数量级。

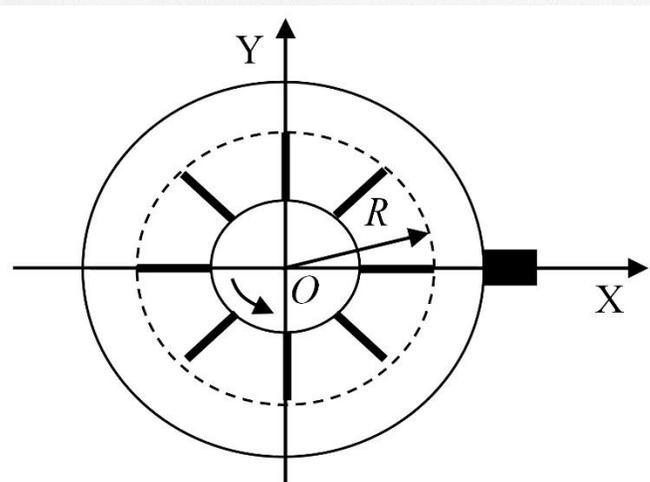
形变位置	转速/rpm				
	1000	2000	3000	4000	5000
叶片/mm	3.5×10^{-5}	1.4×10^{-4}	3.2×10^{-4}	5.7×10^{-4}	8.9×10^{-4}
转盘/mm	2.9×10^{-5}	1.2×10^{-4}	2.6×10^{-4}	4.7×10^{-4}	7.3×10^{-4}



不同因素对叶尖间隙的影响

叶尖间隙信号仿真分析

叶片掠过传感器时产生信号输出，其他时刻无信号输出，设置四种不同的仿真方案进行叶尖间隙信号仿真分析。

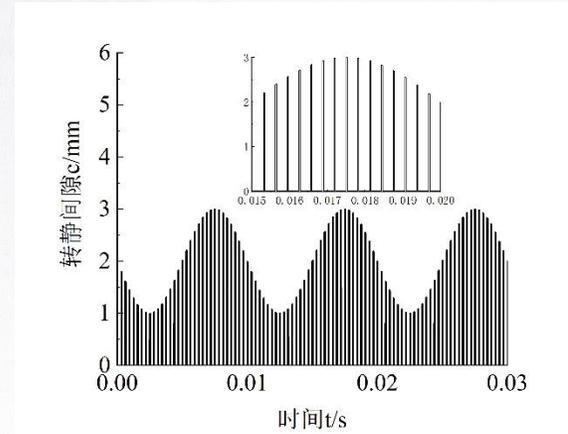


叶尖间隙信号模型

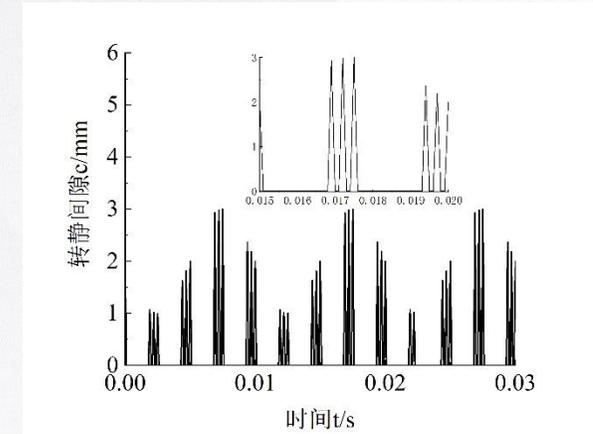
仿真方案	转速 /rpm	叶片数	叶片厚度 /mm	叶尖旋转半径/mm	初始间隙 /mm	涡动位移 /mm	采样频率 /kHz
方案1	6000	32	5	250	2	1	100
方案2	6000	32	5	250	2	1	10
方案3	6000	32	1	250	2	1	100
方案4	6000	32	1	250	2	1	200

叶尖间隙信号仿真分析

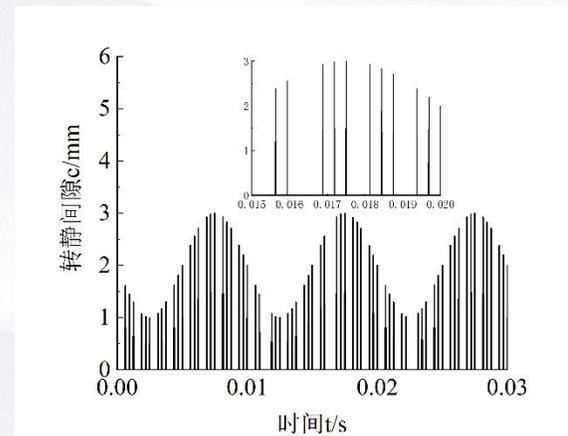
按照上述条件进行叶尖间隙信号仿真，可以发现叶片数量、厚度、转速等因素会对叶尖间隙的采样频率有不同的要求，采样率不足时会出现严重的失真现象。



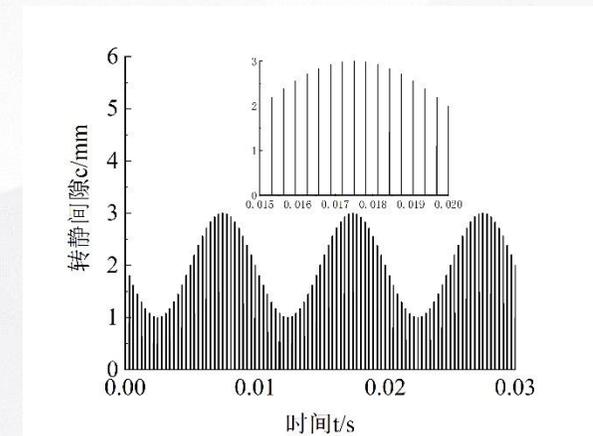
方案1



方案2



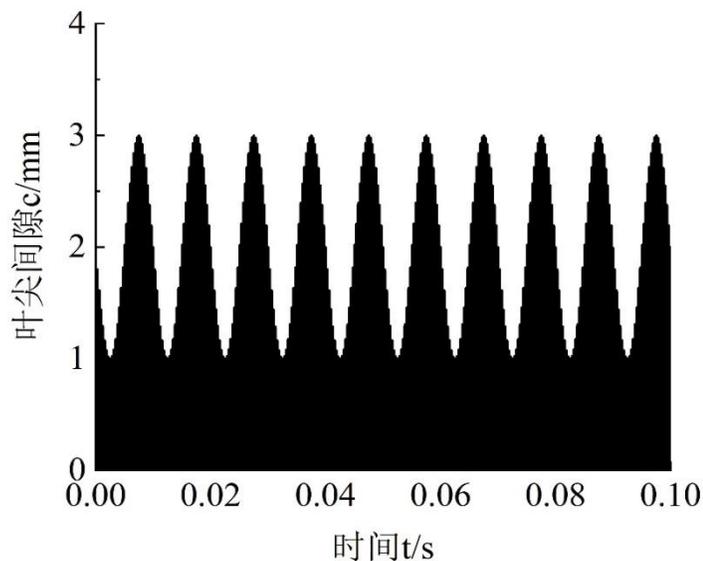
方案3



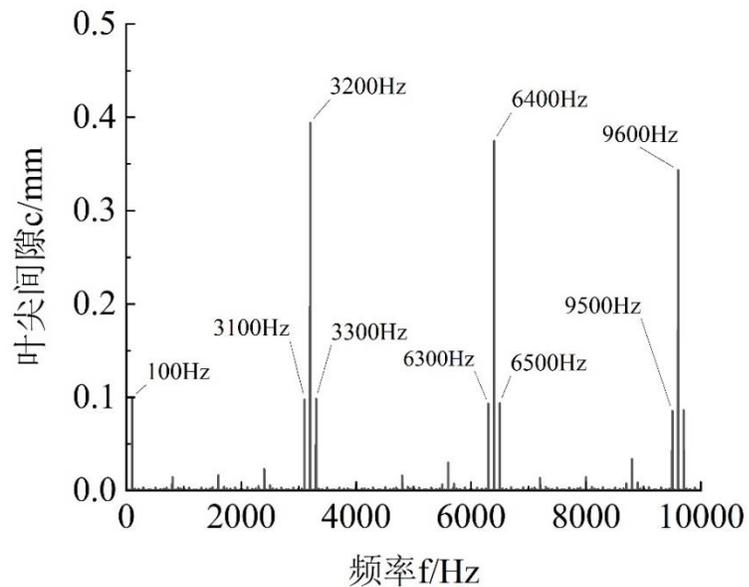
方案4

叶尖间隙信号仿真分析

对方案1的仿真信号进行频谱分析，从时域波形上看，叶尖间隙信号被转子同步涡动信号调制，但是表现出来的是上端调制，不存在下端调制的情况，这一点与通常的调制信号有较大区别；从频谱上看，表现出叶片通过频率及其整数倍频分量，同时，在叶片通过频率及其整数倍频两侧存在以转速频率为间隔的调制边频。

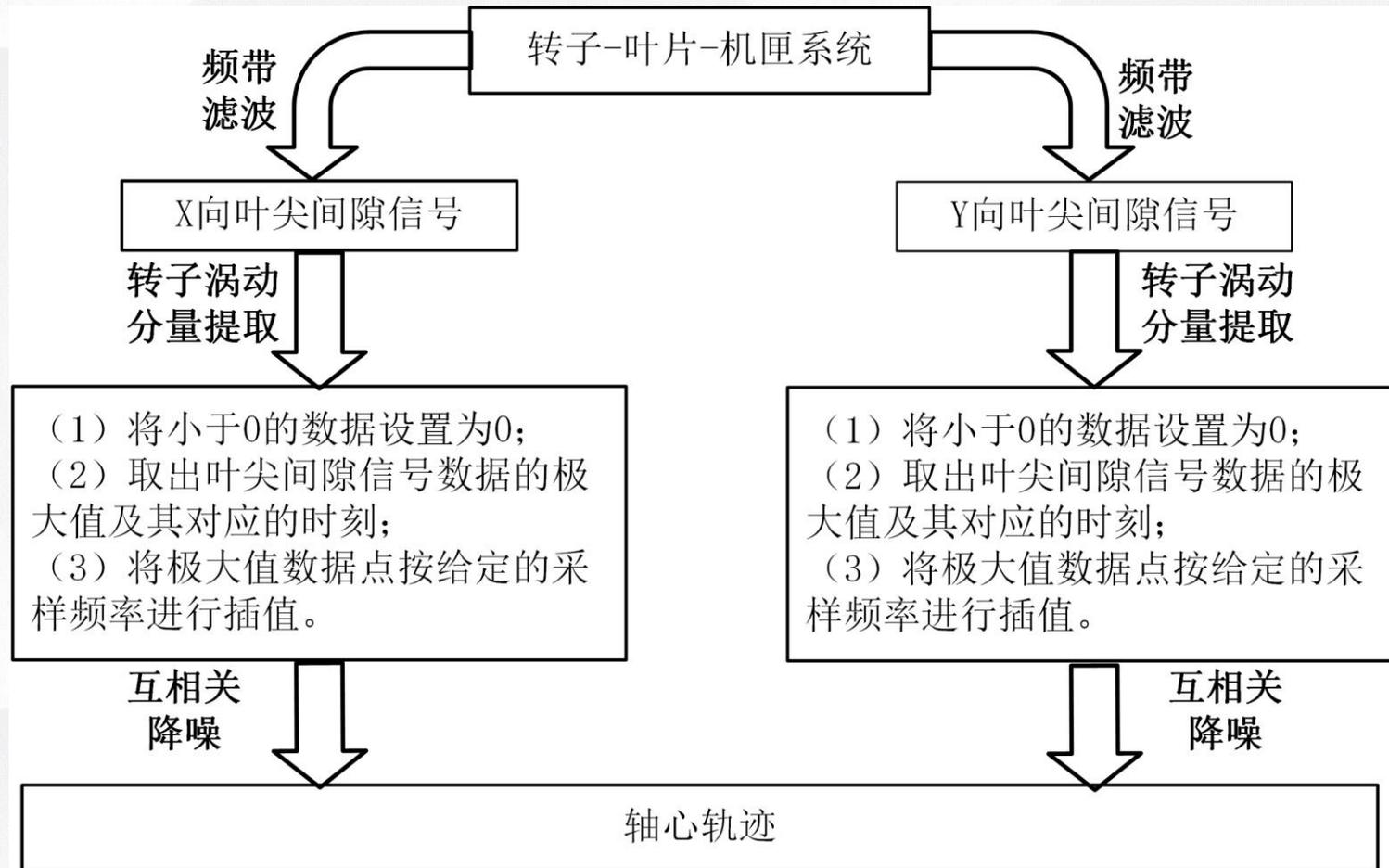


时域波形

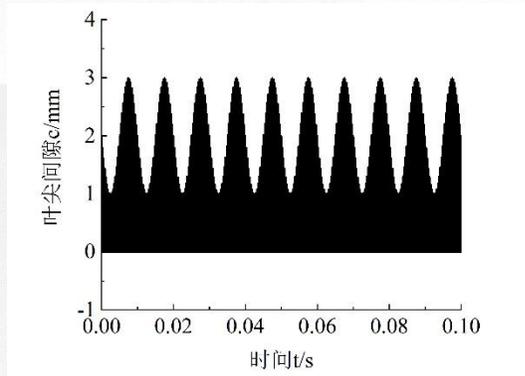


频谱

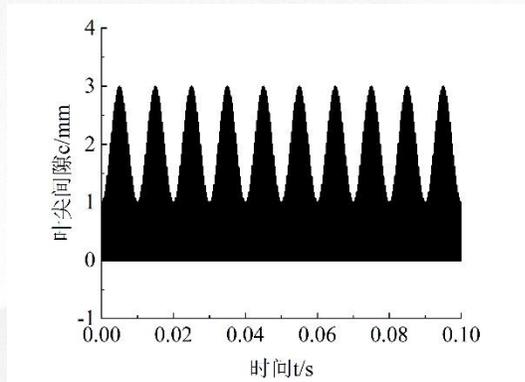
叶尖间隙信号提取轴心轨迹



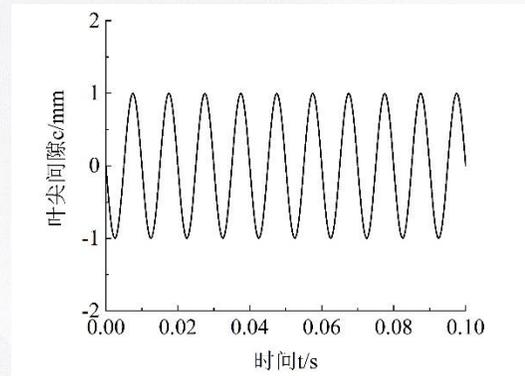
叶尖间隙信号提取轴心轨迹



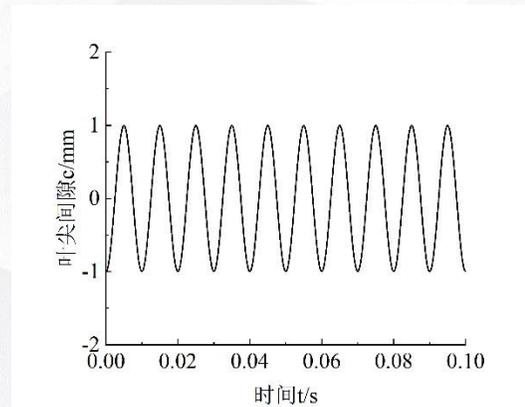
X向叶尖间隙信号



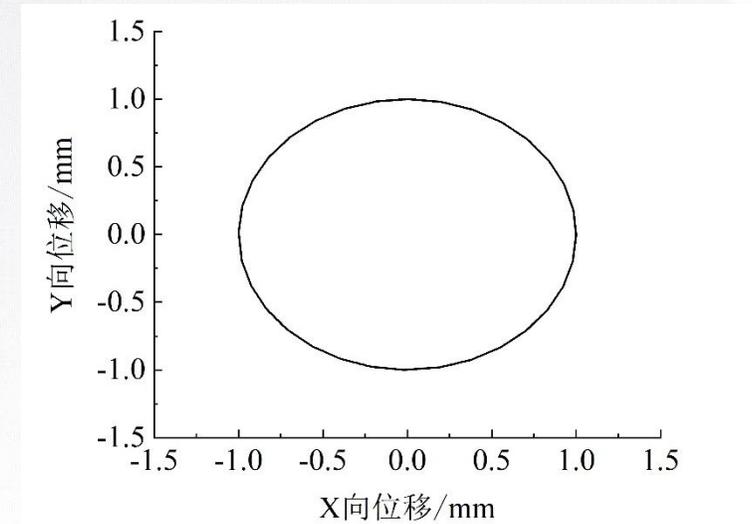
Y向叶尖间隙信号



X向转子涡动信号

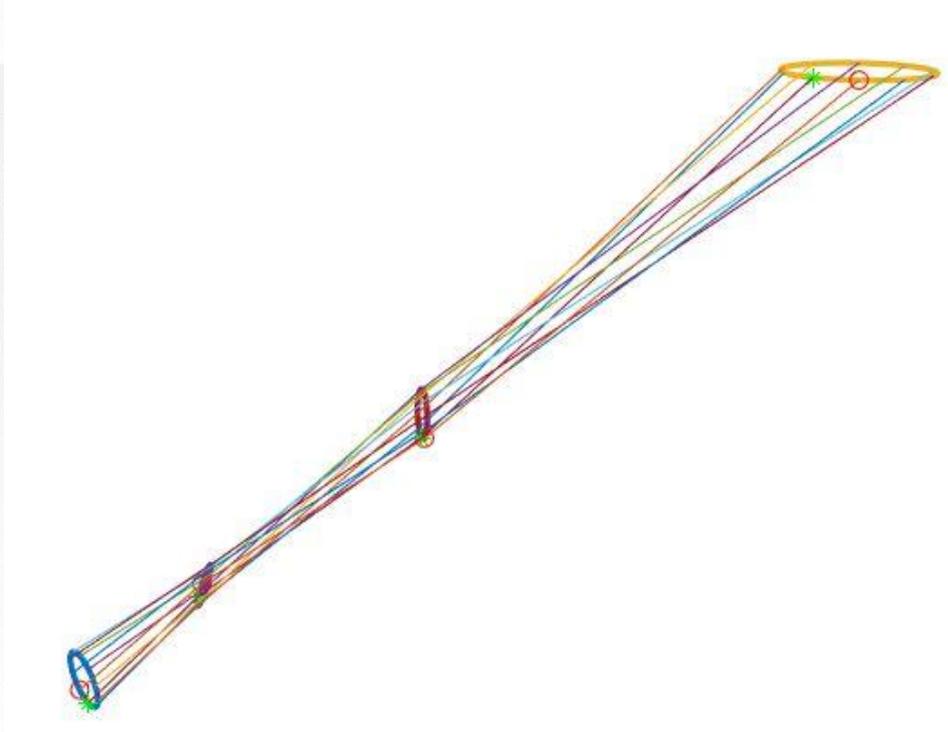


Y向转子涡动信号



转子轴心轨迹

基于多截面轴心轨迹的转子弹性线重构



转子弹性线示例

将转频椭圆、转频椭圆上的初相点和连接各个转频椭圆的作成线，作成线连接时需要按照顺序将每个截面的采样点连接起来，转频椭圆的旋向由转频椭圆上的标志确定，每个椭圆上的“o”表示转频椭圆的初相点，后续点则由“*”表示，在转频椭圆上的相对位置表明了转频椭圆的进动方向

小结

- 分析叶尖间隙的影响因素，分析了叶片变形、转盘变形和转轴涡动对叶尖间隙的影响，发现转轴涡动是叶尖间隙的主要影响因素。
- 建立了转子同步涡动下的叶尖间隙数学模型，分析了叶尖间隙信号的特征，并研究了叶尖间隙信号的采样条件。
- 对叶尖间隙仿真信号，先用希尔伯特-黄滤波提取其中的低频信号，再用提取上包络的方法得到转子涡动信号，最后用互相关方法进行降噪，得到光滑的转子涡动信号，进而合成转子的轴心轨迹。
- 利用各截面的轴心轨迹进行了转子弹性线的重构方法研究。

汇报内容

01 绪论

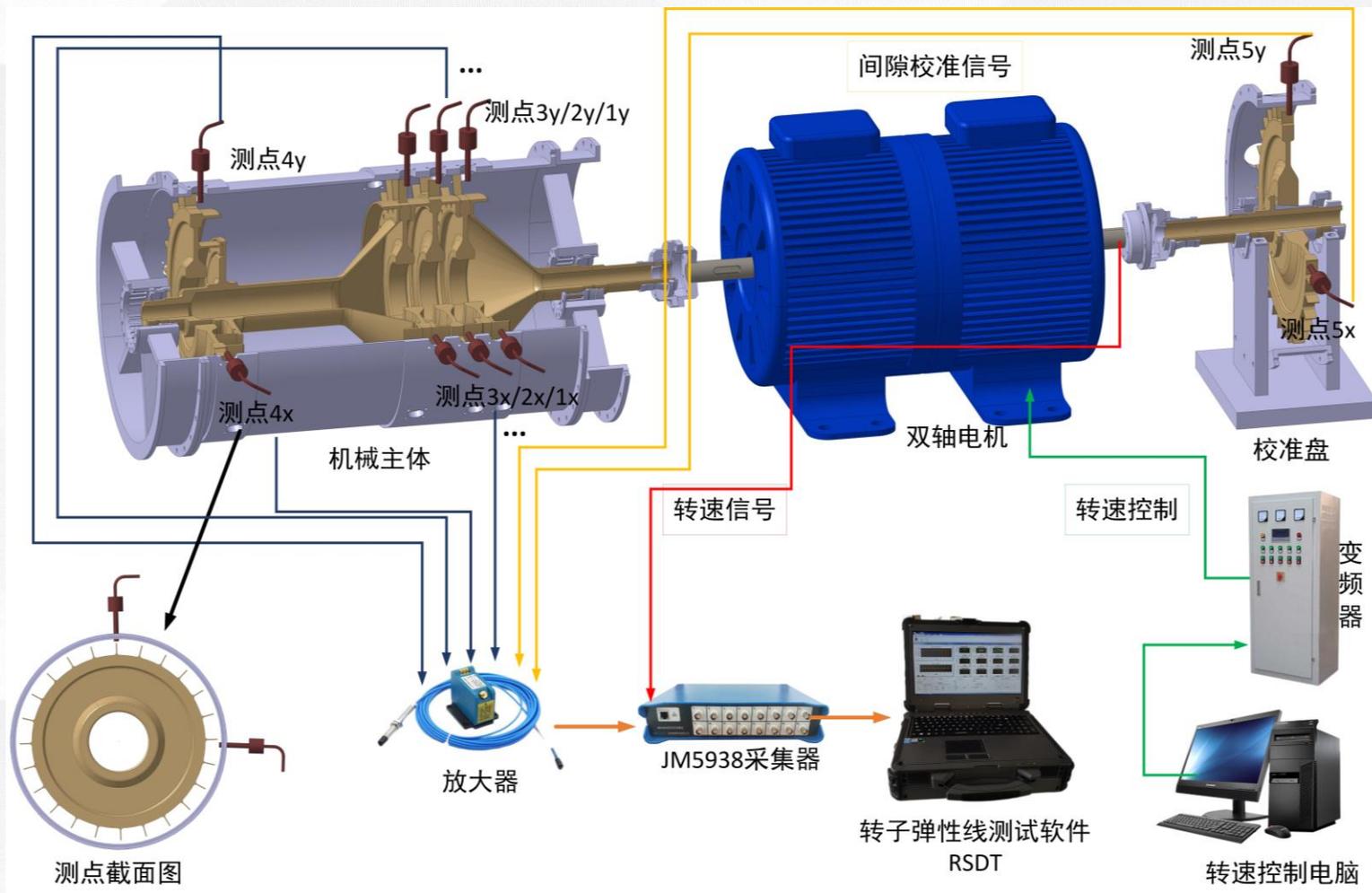
02 带机匣的盘鼓式转子试验器设计及振动特性仿真

03 基于叶尖间隙数据的转子弹性线重构方法

04 机匣包容下转子弹性线测试试验

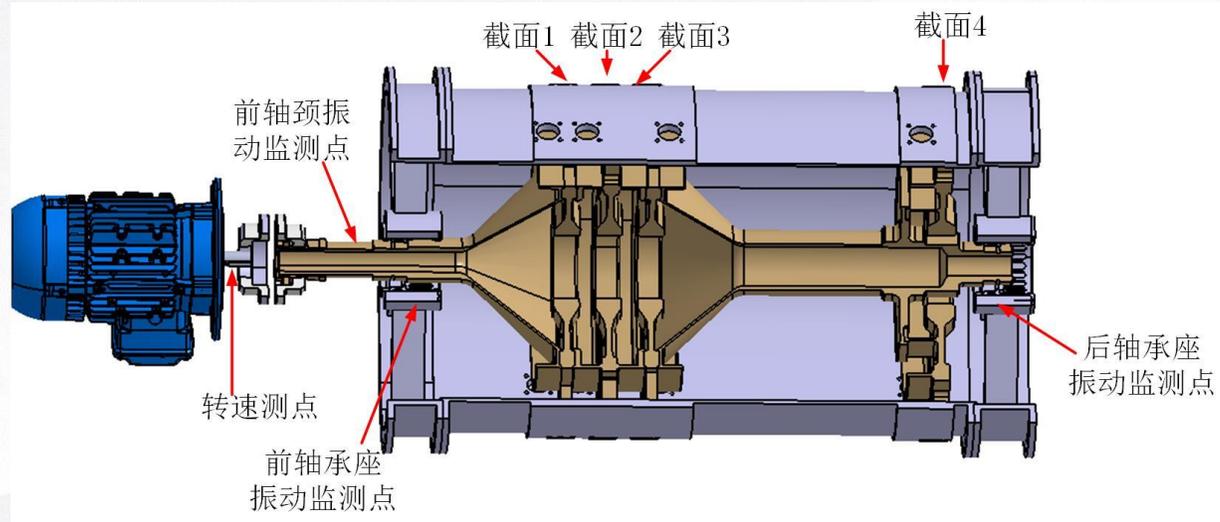
05 总结与展望

叶尖间隙测量试验平台

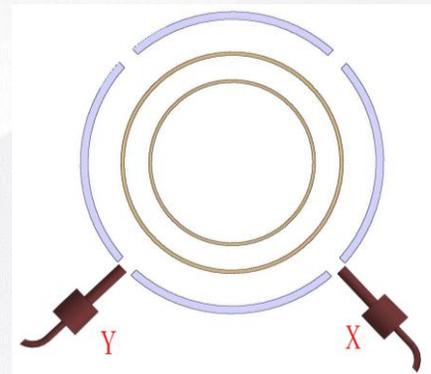


临界转速测量试验

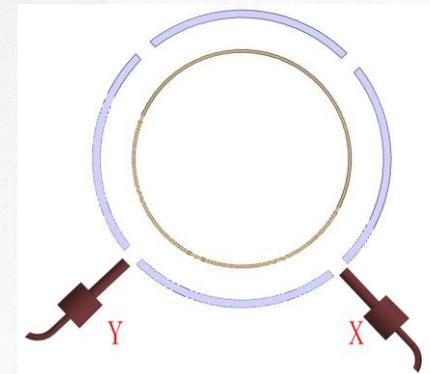
试验从500rpm-6000rpm均匀升速，同步采集四个截面8个测点的振动数据。



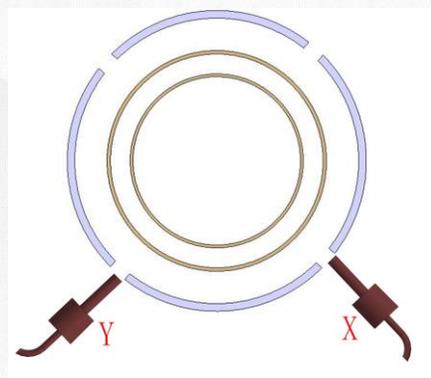
总体测点布置示意图



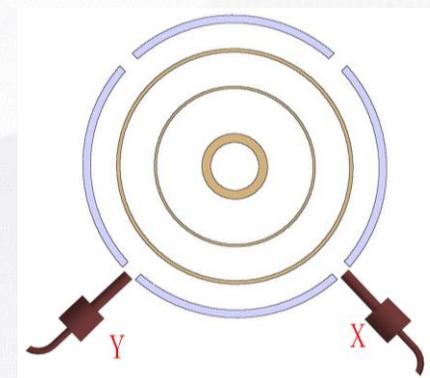
截面1测点剖视图



截面2测点剖视图



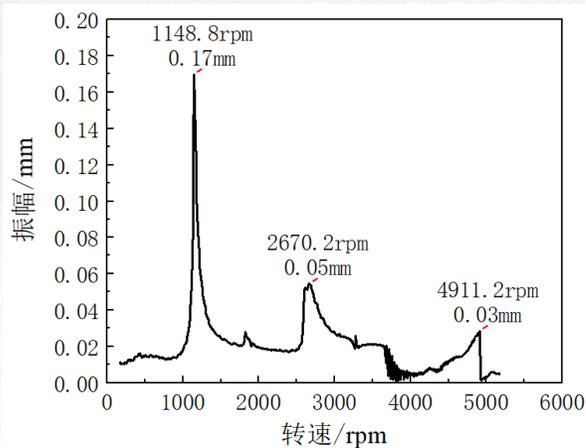
截面3测点剖视图



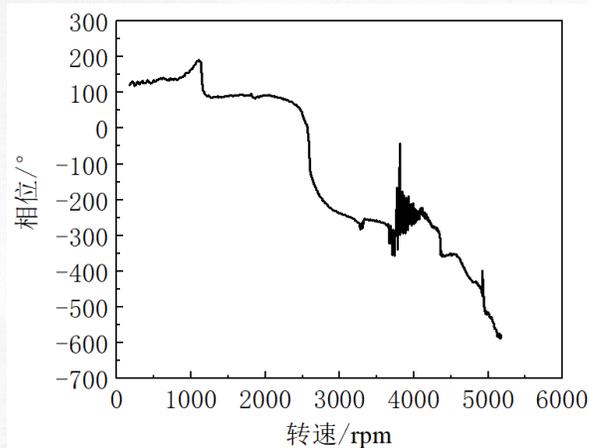
截面4测点剖视图

临界转速测量结果

观察测点2Y的bode图发现转子的前三阶临界转速为1148.8rpm、2670.2rpm、4911.2rpm，综合分析所有测点的bode图得到的临界转速如表所示。



转速-振幅曲线

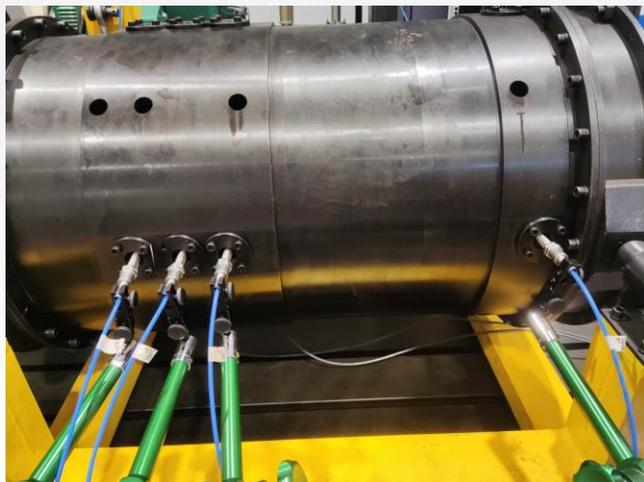


转速-相位曲线

临界转速阶次	整机仿真计算结果/rpm	试验测试结果/rpm	误差 (%)
1	1253.8	1150	9.02
2	2602	2600	0.07
3	5011.8	4900	2.28

叶尖间隙测试试验

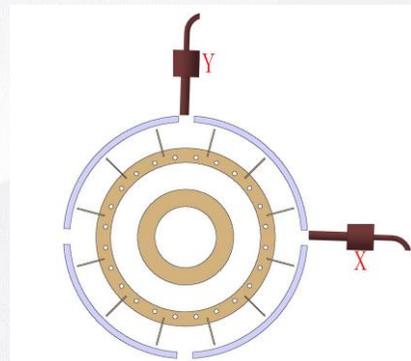
试验在分别在500rpm、1150rpm、2000rpm、2600rpm和3200rpm五个转速下进行了叶尖间隙测试试验，测取了四个截面的叶尖间隙数据。



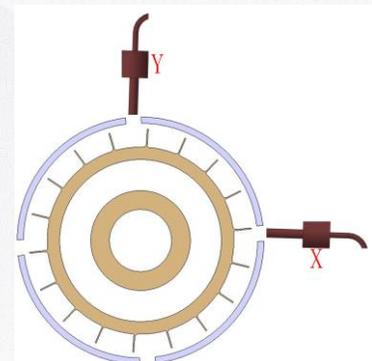
X方向叶尖间隙测点



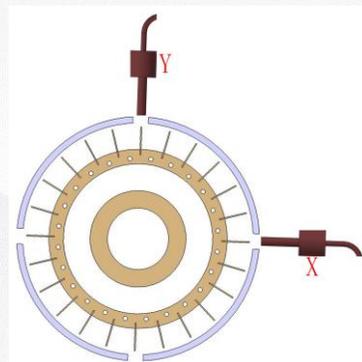
Y方向叶尖间隙测点



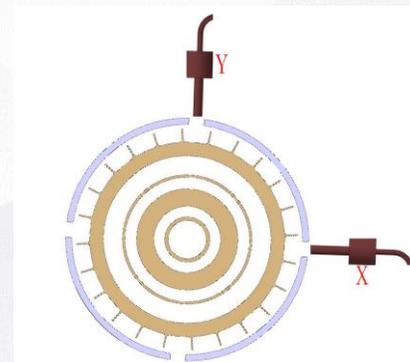
截面1测点剖视图



截面2测点剖视图



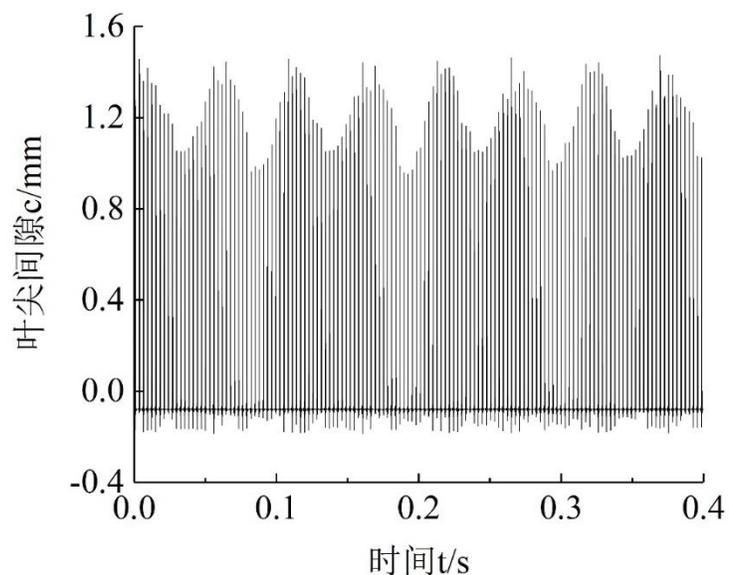
截面3测点剖视图



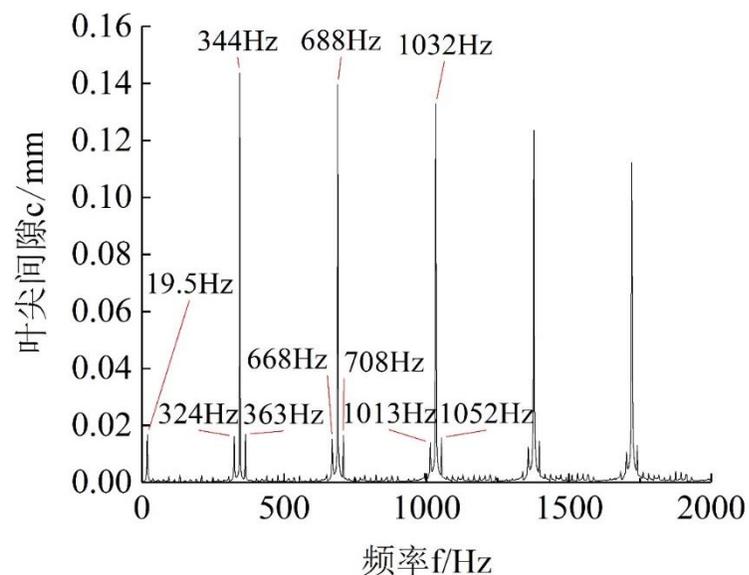
截面4测点剖视图

叶尖间隙试验信号

在转速为1150r/min下，设定采样频率为20kHz，提取0.4s数据进行分析。将原始信号去均值后得到的信号为叶尖间隙试验信号时域波形，符合仿真信号特征。对信号进行频谱分析，可以看出在叶片通过频率附近，出现了调制频率，且调制频率等于转速频率，这证实了仿真模型的有效性。



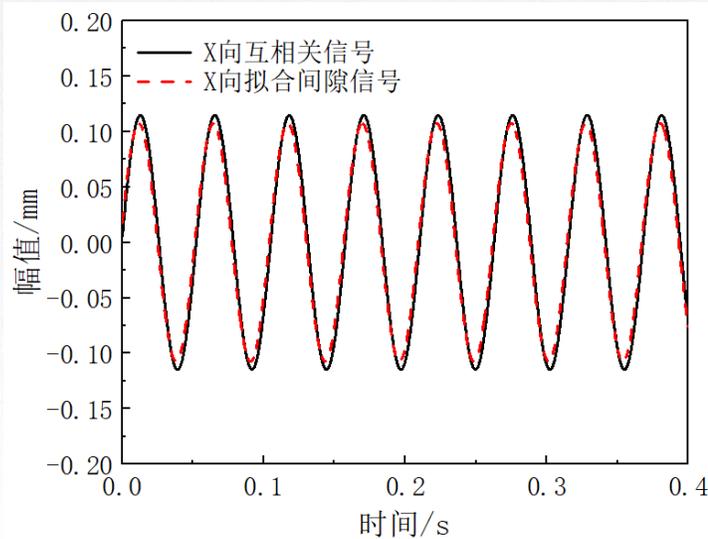
叶尖间隙试验信号时域波形



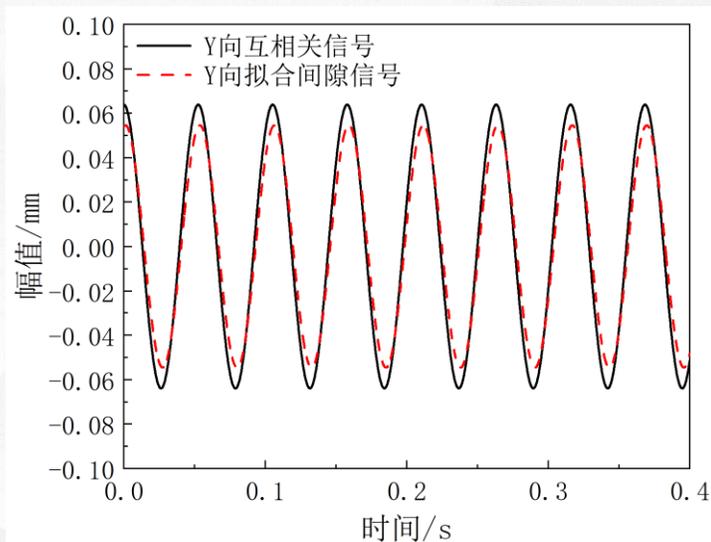
叶尖间隙试验信号频谱

叶尖间隙信号提取轴心轨迹

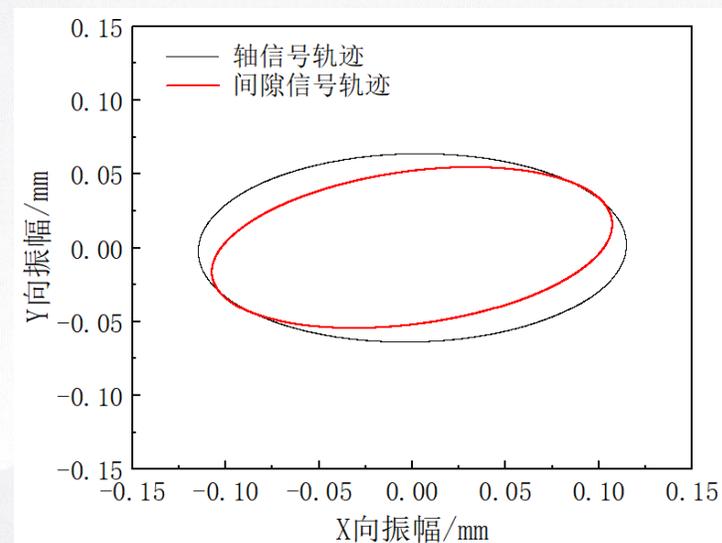
将转速为1150rpm下测得的转子振动信号经过互相关降噪后的信号与叶尖间隙信号中提取的转子振动信号进行对比，两者呈现出了较好的吻合度，且合成的轴心轨迹也相似。



X向轴振信号与间隙信号对比



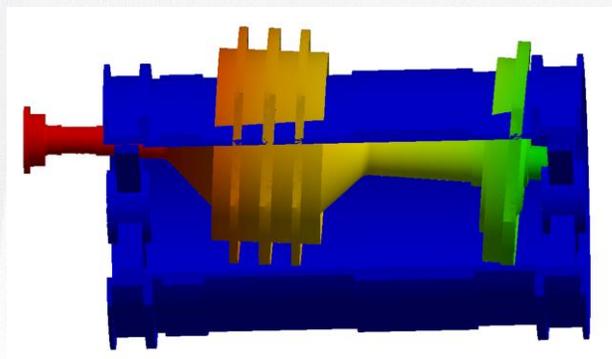
Y向轴振信号与间隙信号对比



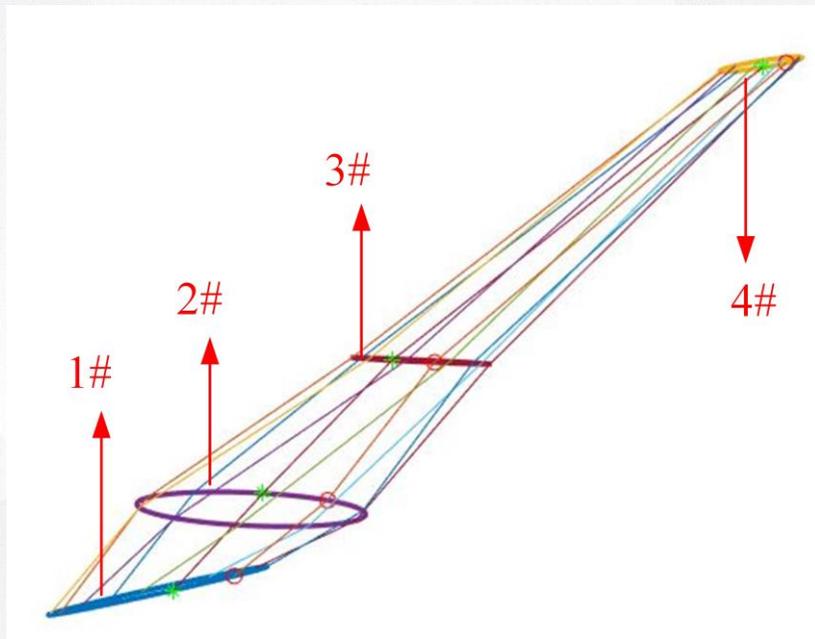
轴心轨迹测试结果

转子弹性线重构

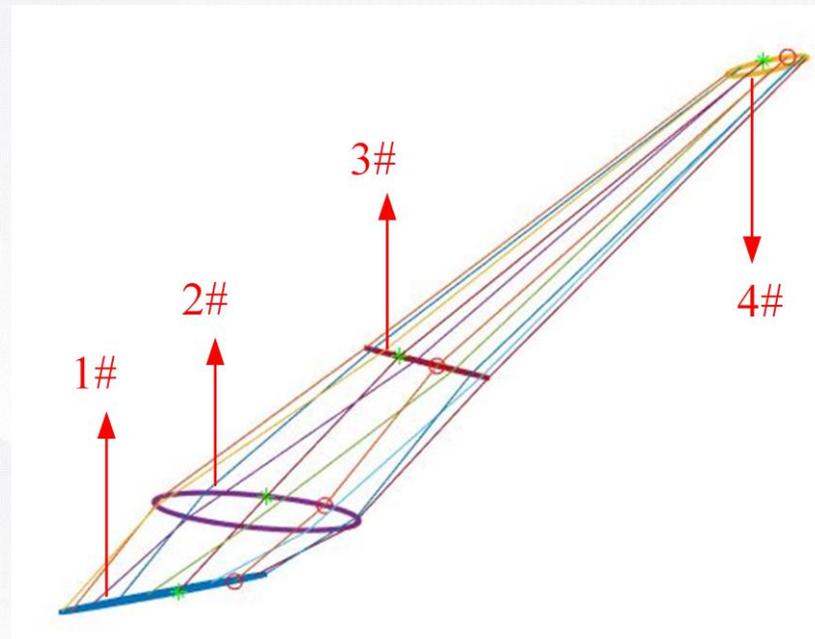
1150rpm下转子振动信号重构出的转子弹性线与叶尖间隙信号重构出的转子弹性线对比可以发现各截面的进动方向一致，振动大小相近，因此通过叶尖间隙信号重构转子弹性线是有效的。



模态振型



轴振信号重构出的转子弹性线



叶尖间隙信号重构出的转子弹性线

小结

- 搭建试验平台，在全转速范围内测量了转子振动信号，并对四个测试截面的八个测点振动数据进行了Bode图分析，成功确定了转子的前三阶临界转速。实验测得的临界转速结果与仿真结果高度一致。
- 进行了叶尖间隙测量试验，分别在500、1150、2000、2600和3200rpm五个不同转速下采集了叶尖间隙数据。针对这些数据，进行了轴心轨迹提取和转子弹性线重构工作，并将结果与转轴振动信号合成的轴心轨迹与重构的转子弹性线进行了对比。
- 对比发现，基于叶尖间隙数据重构的转子弹性线与基于转轴振动信号重构的结果基本一致，且与仿真模型得到的振型相符。

汇报内容

01 绪论

02 带机匣的盘鼓式转子试验器设计及振动特性仿真

03 基于叶尖间隙数据的转子弹性线重构方法

04 机匣包容下转子弹性线测试试验

05 总结与展望

全文工作总结

➤ (1) 设计了一个带机匣的盘鼓式转子试验器

基于核心机的基本结构设计了带机匣的盘鼓式转子试验器，对试验器进行了转子强度、弹支刚度、机匣模态和临界转速等有限元仿真，确保了试验器能在6000rpm内安全通过三阶临界转速，使其达到了预定的设计目标。

➤ (2) 提出了基于叶尖间隙数据重构转子弹性线的方法

建立了叶尖间隙信号的数学模型，在此基础上，分析了叶尖间隙信号与转子涡动信号的耦合模式。采用希尔伯特-黄变换滤掉高频信号，再提取上包络的方法从叶尖间隙信号中提取转子涡动合成转子轴心轨迹，进而利用多个截面的轴心轨迹重构转子弹性线。

➤ (3) 搭建试验平台，进行试验验证

进行了临界转速测试试验，对比了临界转速仿真结果和振型，验证了有限元模型的有效性。进行了叶尖间隙测试试验，基于实测数据采用本文所提出的方法重构出转子弹性线，并与转子振动信号进行对比分析。对比后发现，两者得到的转子弹性线基本一致，证实了利用叶尖间隙信号重构转子弹性线方法的可行性，可为后续转子故障诊断奠定基础。

未来工作展望

- (1) 本文目前建立的整机试验器的整机动力学模型虽然在一定程度上能够模拟和分析系统的振动特性，但在模型构建过程中**忽略了某些细节和潜在的非线性因素**。模型中未考虑倒角和螺纹孔，也未纳入可能由轴承和螺栓结构等引发的连接非线性因素。如何将这些因素纳入整机动力学模型，以实现^对整机振动的准确分析，需要进一步深入研究。
- (2) 本文建立的叶尖间隙数学模型是**基于试验器条件**建立的，忽略了温度、压力等因素对叶尖间隙带来的影响。此外，**模型理想化**，没有考虑叶片安装、加工公差等不可控因素带来的叶尖间隙变化。因此，目前尚不能直接用于发动机叶尖间隙数据分析。后续还要进一步研究和改进，以考虑实际工作环境中的各种影响因素，从而提高模型的准确性和适用性。
- (3) 由于试验条件限制，本文的叶尖间隙测试试验未测量更高转速下的叶尖间隙数据。以后可以考虑在高转速甚至整机上^{进行}试验。



南京航空航天大学



谢谢各位专家和同学！
敬请批评指正！

 答辩人：陈智超 (SX2220001)

 专 业：交通运输工程

 导 师：陈果 教授