

/编号 ××××××××



南京航空航天大学

# 本科毕业设计（论文）

题 目

基于转静间隙的轴心轨迹提取方法  
及实验验证

|      |              |
|------|--------------|
| 学生姓名 | 朱旭辉          |
| 学 号  | 071951224    |
| 学 院  | 通用航空与飞行学院    |
| 专 业  | 交通运输（民航维修工程） |
| 班 级  | 0720902      |
| 指导教师 | 陈果           |

二〇二四年六月



# 南京航空航天大学

## 本科毕业设计（论文）诚信承诺书

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文）是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，本设计（论文）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

作者签名：\_\_\_\_\_

日期： 2024 年 5 月 21 日

# 南京航空航天大学

## 毕业设计（论文）使用授权书

本人完全了解南京航空航天大学有关收集、保留和使用本人所送交的毕业设计（论文）的规定，即：本科生在校攻读学位期间毕业设计（论文）工作的知识产权单位属南京航空航天大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交毕业设计（论文）的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅，可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编论文。保密的论文在解密后适用本声明。

论文涉密情况：

不保密

保密，保密期（起讫日期：\_\_\_\_\_）

作者签名：\_\_\_\_\_

导师签名：\_\_\_\_\_

日期： 2024 年 5 月 21 日

日期： 2024 年 5 月 21 日



## 摘 要

航空发动机由于机匣的包容而无法直接通过测试转轴振动位移来获取转子的轴心轨迹，为了获取转子的轴心轨迹来监测转子运行状态，利用叶尖间隙测试作为间接监测手段，提出了一种从叶尖间隙信号中提取轴心轨迹的方法。本文具体的工作如下：

(1) 基于叶尖间隙测量，介绍了国内外对于转静间隙测试和轴心轨迹的提取方法。

(2) 介绍了叶尖间隙的变化机理和动态模型，探究了叶尖间隙变化的影响因素。

(3) 对叶片进行有限元仿真，从转速和和裂纹两个方面研究对叶片伸长量的影响，得到的仿真结果发现转速产生的离心力对叶片伸长影响较小，因此通过叶尖间隙信号提取出转子轴心轨迹的理论是可行的。

(4) 用电涡流传感器分别进行了转轴振动和叶尖间隙的测量，通过包络分析从叶尖间隙信号中提取出转子轴心轨迹并与电涡流传感器直接测得的轴心轨迹进行对比。通过对比两段轴心轨迹，精度达 90%以上，验证了本文所述方法的有效性。

研究表明，本方法可以通过叶尖间隙信号来监测转子振动状态。

**关键词：** 叶尖间隙；电涡流传感器；轴心轨迹；有限元仿真；包络分析

## ABSTRACT

The aero-engine is unable to obtain the axial trajectory of the rotor directly by testing the vibration displacement of the rotor shaft due to the inclusion of the magazine, in order to obtain the axial trajectory of the rotor to monitor the rotor operation status, a method of extracting the axial trajectory from the tip clearance signal is proposed by utilizing the tip clearance test as an indirect monitoring means. The specific work of this paper is as follows:

(1) Based on the measurement of the leaf tip clearance, the domestic and foreign methods for the testing of the rotational static clearance and the extraction of the axial trajectory are introduced.

(2) The change mechanism and dynamic model of the tip clearance are introduced, and the influencing factors of the change of the tip clearance are explored.

(3) Finite element simulation of the blade is carried out to study the influence on blade elongation from two aspects: rotational speed and crack, and the simulation results obtained find that the centrifugal force generated by rotational speed has less influence on blade elongation, and therefore it is theoretically feasible to extract the axial trajectory of the rotor through the signal of the tip clearance.

(4) Measurements of rotor shaft vibration and tip clearance were carried out by eddy current sensor, and the rotor axial trajectory was extracted from the tip clearance signal through envelope analysis and compared with the axial trajectory directly measured by eddy current sensor. The validity of the method described in this paper is verified by comparing the two shaft trajectories with an accuracy of more than 90%.

With this method, the rotor vibration state can be monitored with the leaf tip clearance signal.

**KEY WORDS:** Leaf tip clearance; Eddy current sensor; Axial trajectory; Finite element simulation; Envelope analysis

## 目录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 绪论                  | 1  |
| 1.1. 研究背景和意义            | 1  |
| 1.2. 国内外研究现状            | 1  |
| 1.2.1. 转静间隙测试方法         | 1  |
| 1.2.2. 轴心轨迹测试与分析方法      | 7  |
| 1.3. 论文组织结构             | 7  |
| 第二章 叶尖间隙变化理论分析          | 9  |
| 2.1. 叶尖间隙变化机理           | 9  |
| 2.2. 叶尖间隙变化的动态模型        | 10 |
| 2.3. 本章小结               | 10 |
| 第三章 叶片伸长有限元建模与仿真        | 11 |
| 3.1. 直板叶片的振动有限元模型       | 11 |
| 3.1.1. 无叶片裂纹直板叶片建模与仿真分析 | 11 |
| 3.1.2. 含叶片裂纹直板叶片建模与仿真分析 | 12 |
| 3.2. 弧形叶片的振动有限元模型       | 14 |
| 3.2.1. 无叶片裂纹弧形叶片建模与仿真分析 | 14 |
| 3.2.2. 含叶片裂纹弧形叶片建模与仿真分析 | 16 |
| 3.3. 本章小结               | 18 |
| 第四章 叶尖间隙测试试验与轴心轨迹提取     | 19 |
| 4.1. 试验设备介绍             | 19 |
| 4.2. 试验内容与试验方案          | 20 |
| 4.3. 试验数据处理及结果分析        | 21 |
| 4.3.1. 互相关分析方法介绍        | 21 |
| 4.3.2. 傅里叶变换方法介绍        | 22 |
| 4.3.3. 数据分析             | 22 |
| 4.4. 本章小结               | 25 |
| 第五章 结论与展望               | 26 |
| 5.1. 结论                 | 26 |
| 5.2. 展望                 | 26 |
| 参考文献                    | 27 |
| 致谢                      | 29 |





## 第一章 绪论

### 1.1. 研究背景和意义

叶尖间隙对航空发动机的正常运行至关重要。然而，由于旋转叶片尖端与发动机机匣内壁之间的叶尖间隙参数与发动机的效率、压比、燃油消耗率、稳定性等直接相关<sup>[1]</sup>，是提升发动机性能的关键<sup>[2]</sup>，因此实际航空发动机的叶尖间隙测试成为发动机的重要测试项目。过小的叶尖间隙可能导致叶片碰撞固定部件，增加摩擦和磨损，严重时会导致叶片断裂；而过大的叶尖间隙则会减少发动机的效率，增加燃油消耗，并可能引起噪音和振动。然而，现代航空发动机普遍采用弹性支承结构，转子、支承、机匣以及安装节在结构上构成了相互耦合的振动系统。在实际工作中，将出现复杂的耦合振动现象，由于机匣的包容，通常难于了解转子、支承、以及转静间隙的实际动态变化规律。因此往往不能对很多复杂的振动现象进行解释。仿真计算的准确性来源于模型建立的可靠性，而动力学仿真模型又需要实验进行修正和完善，目前所建立的仿真建模尚不能完全解释实际航空发动机转静间隙变化规律。由此可见，通过实验的方法，提取实际工作状态下的叶尖间隙轴心轨迹并实现测试结果的可视化，对于研究航空发动机工作状态下的内部结构振动状态具有极其重要的作用。

### 1.2. 国内外研究现状

#### 1.2.1. 转静间隙测试方法

转静间隙测试可以大致分为光学测量法和非光学测量法两大类。每种类别下都有多种具体的测量方法，适用于不同的工况和需要。非光学测量法则主要依赖电磁或声波的特性来进行间隙的测量，常见的方法包括：探针测量法、电容测量法、涡电流测量法、微波测量法和超声波测量法<sup>[3]</sup>。光学测量法主要利用光的反射、折射或者散射来确定叶尖与静态部件之间的距离。常见的方法包括：反射强度测量法、干涉强度测量法和激光测量法。每种方法都有其优缺点，通常在实际应用中，工程师会根据具体的工况、叶片材质、环境条件和所需精度来选择合适的测量技术。在高要求的应用场景，如航空发动机测试中，甚至会结合多种测量方法来确保数据的准确性和可靠性。每种方法都有其优缺点，通常在实际应用中，工程师会根据具体的工况、叶片材质、环境条件和所需精度来选择合适的测量技术。在高要求的应用场景，如航空发动机测试中，甚至会结合多种测

量方法来确保数据的准确性和可靠性。通过选择合适的监测方法，可以更准确、高效地获取叶片叶尖间隙的信息，为航空发动机的运行状态提供及时的监测和保障。

### (1) 涡电流测量法

涡流传感器是一种基于电磁感应原理的传感器，其工作原理是在传感器上施加一个时变磁场。当叶片经过传感器时，会产生一个涡流磁场，从而削弱主磁场，从而使得传感器检测到的磁场信号强度持续变化。传感器的检测原理如图 1-1 所示。美国的 HOOD<sup>[4]</sup>公司开发了两种符合不同环境温度要求的涡流探头。

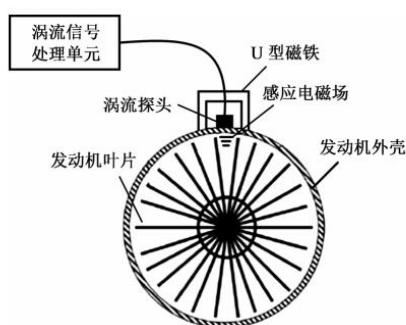


图 1-1 叶片电磁检测测量原理示意图

涡电流测量法的优点包括：非接触性质，使其在高速旋转或高温环境下非常适用，不受物理磨损的影响，能够提供连续的实时数据，这对于发动机性能的监控和维护是非常重要的。此外，这种方法的精确性和可靠性较高，特别是在对金属材料的测量上。然而，涡电流测量法也有其局限性。首先，它主要适用于导电材料，对于非金属或非导体材料则不太有效。其次，涡流传感器对环境中的电磁干扰较为敏感，强电磁干扰可能会影响测量的准确性。此外，极端的环境条件，如非常高的温度，可能会影响传感器的性能和寿命。

### (2) 电容测量法

电容测量法是一种在航空发动机和其他旋转机械中常用的非接触式测量技术，用于测定转子叶片与静止壳体之间的间隙。这种方法的核心原理是电容器的电容值会随着其两极板之间距离的变化而变化，利用这一特性来测量叶尖间隙。图 1-2 展示了电容传感器的结构示意图。

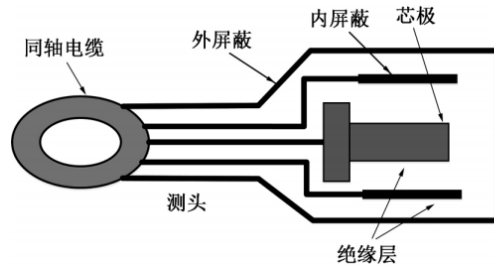


图 1-2 电容传感器结构示意图

电容式传感器在耐温性能方面具有显著优势。一些研究团队和公司也在电容式传感器的开发和应用方面取得了重要进展。比如，Fabian<sup>[5]</sup>等人开发了一种用于监测小型燃烧涡轮机气隙的电容式传感器。此外，Alexander 等<sup>[6]</sup>人还开发了一种用于叶尖测量的电容式传感器，可用于高温和电离等恶劣环境。这些创新推动了电容式传感器技术的进步，为涡轮机叶尖间隙监测提供了更加可靠和精确的解决方案。

此方法利用电容值随极板间距离变化的特性来测定间隙，具备非接触性质，从而避免了对叶片的物理磨损，适合于长期监控。它对微小距离变化极为敏感，能够提供高精度的测量结果，并实时获取数据，有助于及时调整维护策略。然而，电容测量法也存在局限性，包括对环境因素如温度和湿度的敏感性，可能需要额外的校准和补偿措施，此外主要适用于导电材料，对非导体或绝缘材料的测量效果较差。技术复杂性要求较高，需要精确的电子设备来测量和处理微小的电容变化。因此，尽管电容测量法在一些关键应用中非常有用，但需要注意其适用环境和限制，确保测量数据的准确性和可靠性。此方法利用电容值随极板间距离变化的特性来测定间隙，具备非接触性质，从而避免了对叶片的物理磨损，适合于长期监控。它对微小距离变化极为敏感，能够提供高精度的测量结果，并实时获取数据，有助于及时调整维护策略。然而，电容测量法也存在局限性，包括对环境因素如温度和湿度的敏感性，可能需要额外的校准和补偿措施，此外主要适用于导电材料，对非导体或绝缘材料的测量效果较差。技术复杂性要求较高，需要精确的电子设备来测量和处理微小的电容变化。因此，尽管电容测量法在一些关键应用中非常有用，但需要注意其适用环境和限制，确保测量数据的准确性和可靠性。

### (3) 反射强度测量法

典型的传感器探头通常由七根传感光纤组成，其结构如图 1-3 所示，将七根传感光纤均匀地分布在待测叶片的周围或对面的机壳上，使用合适的光源，通常为激光，因其光束稳定性和强度适合精密测量。光纤将光引导至测量点，反射光由相同的光纤或专用的接收光纤捕捉。光纤的末端需要特别处理，以优化光的发射和接收。这可能包括适当的切割和

抛光，以确保最大化反射光的捕获。通过比较不同时间的脉冲信号来分析叶片的叶尖间隙、振动位移等参数<sup>[7]</sup>。

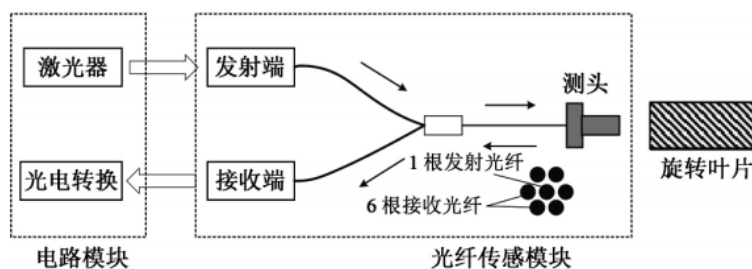


图 1-3 反射式光纤传感器示意图

Garcia 等<sup>[8]</sup>人提出了一种新的叶片间隙分析方法，使用两个探头测量叶片尖端反射的信号强度，并将两个探头输出电压的比值作为叶片间隙分析信号。中国电科集团<sup>[9]</sup>提出了一种利用光纤振动检测传感器动态监测所有旋转叶片振动幅度的新工艺。天津大学的一个研究小组<sup>[10]</sup>也提出了一种适用于非对称翼尖同步信号的校准方法，并采用自动增益控制方案，利用硬件电路稳定信号，提高翼尖探测测量的精度。

用反射强度测量法来测量叶尖间隙的优点在于其非接触性和高精度。这种方法利用激光或其他光源照射在叶片上，然后测量反射光的强度变化，从而确定叶尖与相邻结构之间的距离。由于无需接触叶片，因此可以避免可能的损坏或干扰，同时也能够实现较高的测量精度。然而，反射强度测量法也存在一些缺点。首先，该方法对环境光的影响较为敏感，需要在较为控制的环境条件下进行测量，以确保准确性。其次，受到表面状况和材料的影响，如叶片表面的反射特性可能会受到氧化、污染或磨损的影响，从而影响测量结果的准确性。最后，反射强度测量法可能需要相对复杂的仪器和数据处理技术，增加了实施的技术难度和成本。因此，在选择测量叶尖间隙的方法时，需要综合考虑其优点和缺点，并根据具体情况做出合适的选择。

#### (4) 干涉信号测量法

干涉信号测量法依赖于光波的干涉现象，即当两束或多束相干光波（通常来源于同一光源）在空间中相遇时，它们会相互作用形成干涉条纹。这些干涉条纹的形成和变化取决于光波路径长度的差异，通过分析这些条纹，可以非常精确地测定路径长度的变化，从而推导出叶片与静止部件之间的距离。图 1-4 共路径干涉仪原理示意图。

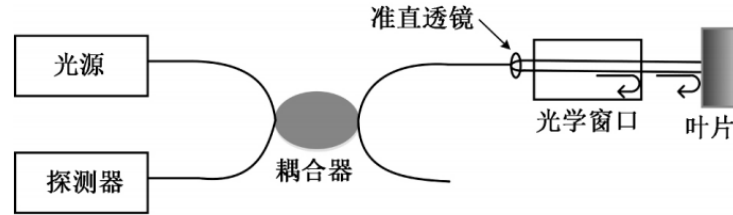


图 1-4 共路径干涉仪原理示意图

干涉信号检测型传感探头的结构如图 1-5 所示。这种传感器是一种高精度的传感设备，利用光学干涉原理来测量各种物理量，如温度、压力、位移、振动等。这类传感器通常基于光纤的特性，使用光波在光纤中传输和干涉的现象来进行精确测量。2017 年，西南科技公司<sup>[1]</sup>提出了一种基于干涉的测距技术——光频域反射叶尖间隙检测技术。

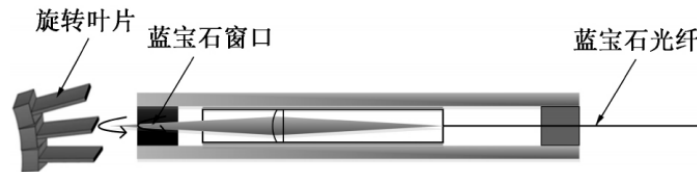


图 1-5 干涉式光纤传感器示意图

使用干涉信号测量法来测量叶尖间隙具有其独特的优点和挑战。这种方法利用干涉现象来测量叶尖与相邻结构之间的距离，通常通过激光干涉仪或其他干涉装置实现。其优点之一是高精度和灵敏度。由于干涉信号的变化可以精确地反映叶尖间隙的微小变化，因此能够实现较高的测量精度，特别是对于微小间隙的测量更为适用。此外，干涉信号测量法还具有非接触性和实时性的优势。无需接触叶片即可进行测量，避免了潜在的损坏或干扰，并且可以实时监测叶尖间隙的变化，有助于及时调整和维护设备。然而，使用干涉信号测量法也存在一些挑战。首先，对于复杂形状和表面特性的叶片，可能需要设计和调整相应的干涉装置，增加了实施的技术难度和成本。其次，干涉信号易受环境因素的影响，如振动、温度变化和气流等，可能会对测量结果产生干扰或误差。因此，在选择使用干涉信号测量法时，需要综合考虑其优势和限制，并根据具体情况进行合理的应用。

#### (5) 激光探针测量法

该方法涉及使用激光发射器发出高度集中的激光束，直接照射到转子叶片的尖端。激光从叶尖反射回来，被光电探测器捕捉。通过分析从激光发射到接收的时间（时间飞行法）或反射光的相位变化（相位测距法），可以精确计算出叶尖到探测器的距离，从而测量转

静间隙。Barroger 等<sup>[12]</sup>将激光探针叶尖间隙测量系统应用于 JT9D 和 F100/F410 系列发动机单个叶片和平均间隙的检测。

激光探针测量法用于测量转静间隙具有明显的优点，包括高精度和高分辨率，以及非接触性质，避免了对叶片造成物理损伤，并允许在运行状态下实时监测，从而对设备健康状况进行实时评估。然而，这种方法的缺点包括对环境条件敏感，如烟尘、温度波动和机械振动可能影响测量精度；此外，设备成本高，系统复杂度较大，需要专业知识进行安装和维护。这些因素可能限制了其在某些应用场景下的普及性。

#### (6) 膜片式光纤 F-P 声发射传感测量系统

目前，武汉理工大学童兴林研究小组<sup>[13]</sup>已开发出一种高温光纤 F-P 声发射系统，用于确定结构材料的状况。为监测发动机叶片，提出了膜式高温 F-P 声发射传感器，该传感器体积小、耐腐蚀，可安装在发动机舱内壁，接收叶片发出的声信号，结构图如图 1-6 所示。这种系统包括一个膜片，能够响应声波或机械振动。光纤传感器将激光导入到这个腔体中，并通过分析腔体中反射光的干涉图样来测量膜片的位移。该技术因其高灵敏度和能够在极端环境下运作的 ability（如高温或高压环境），而非常适合用于精确监测转子叶片与机壳之间的微小变化。这使得膜片式光纤 F-P 声发射传感系统成为监控关键旋转机械组件间隙的理想选择。



图 1-6 传感器结构示意图

膜片式光纤 F-P 声发射传感测量系统是一种用于测量叶尖间隙的先进技术，具有一系列优点和挑战。该系统最大的优点就是利用光纤传感器对声波的敏感性，能够实现对叶尖间隙微小变化的高精度测量，提供准确的监测数据，且光纤传感器无需直接接触叶片，避免了可能的损坏或干扰，保护了叶片的完整性，同时也减少了维护成本和风险。系统能够实时监测叶尖间隙的变化，及时发现异常情况并采取必要的调整措施，有助于提高设备的运行效率和可靠性。该技术可以适用于不同类型的旋转机械设备，包括涡轮机、压缩机和泵等，具有较强的通用性和适应性。然而，该系统受到环境因素的影响较大，如温度变化、振动和压力等，可能会对传感器的性能和测量结果产生干扰，需要采取相应的措施进行补偿或校准且安装和调试光纤传感器需要较高的技术水平和专业知

识，包括对系统原理、光学和声学等方面的深入了解。与传统的测量方法相比，膜片式光纤 F-P 声发射传感测量系统的成本较高，包括设备采购、安装和维护等方面的费用。

### 1.2.2. 轴心轨迹测试与分析方法

近年来，轴心轨迹的特征提取与分类识别成为转子系统故障诊断研究的一个重要方向。特征提取即将轴心轨迹图像的形状、大小等能表达转子故障信息的特征转化为数字向量表示，常用的方法包括矩特征提取、傅里叶描述子以及几何参数特征等。分类识别则通过将轴心轨迹特征向量与故障类型进行关联，并进行学习训练等，实现故障类型的识别。目前在轴心轨迹特征提取领域，常用的方法包括快速傅里叶变换（FFT）、小波变换、奇异值分解（SVD）、经验模态分解（EMD）<sup>[14]</sup>。袁倩等<sup>[15]</sup>人使用不变矩和傅里叶描述提取轴心轨迹特征，并利用 D-S 证据理论识别故障。许飞云<sup>[16]</sup>利用改进的 Zernike 矩确定轴心轨迹特征向量，并将其与神经网络分类器相结合，识别轴心轨迹形状。付波等<sup>[17]</sup>研究了轴心轨迹的仿射不变矩与神经网络相结合的故障诊断方法。刘刚等<sup>[18]</sup>人采用周期重采样和小波去噪相结合的方法对轴心轨迹进行清理，并以轴心轨迹的极半径序列为特征，利用 BP 神经网络对其进行识别。陈仁祥等<sup>[19]</sup>采用集成经验模态分解（EEMD）对轴心轨迹降噪后提纯，并与谐波窗和 EMD 进行对比。陈喜阳等<sup>[20]</sup>引入了 Hu 矩和仿射矩的组合矩作为特征向量，利用改进的粒子算法和 BP 神经网络相结合的方法识别水电机组的轴心轨迹。德国的 Karlsruhe 大学的 H.W. Han 教授和德国 Clausthal 工业大学 J.Holland 教授<sup>[21]</sup>分别提出的计算方法可以计算出轴颈中心在轴承中的不同时刻的平衡位置。经过大量的计算，最终可以得到随时间变化的近似轴心轨迹。但计算得到的轴心轨迹与实际的存在较大差异。章明明、茅大钧等<sup>[22]</sup>人提出一种基于 ICA-Transformer 神经网络的转子轴心轨迹图像识别模型，通过自适应小波阈值降噪法对转子不平衡、转子强不对中、弱不对中和转子碰磨故障工况下的轴心轨迹进行提纯，将得到的轴心轨迹图作为训练集训练 transformer 故障诊断模型，从而实现故障监测。沈响响、陈果等<sup>[23]</sup>人用 EMD 法结合互相关分析从叶尖间隙信号中提取转子轴心轨迹，最终结果与实验结果达到 90%以上的精度。

## 1.3. 论文组织结构

本论文的组织结构如下：

第一章 介绍了转静间隙研究的背景和意义，并列举了国内外对于转静间隙测试的各种方法。

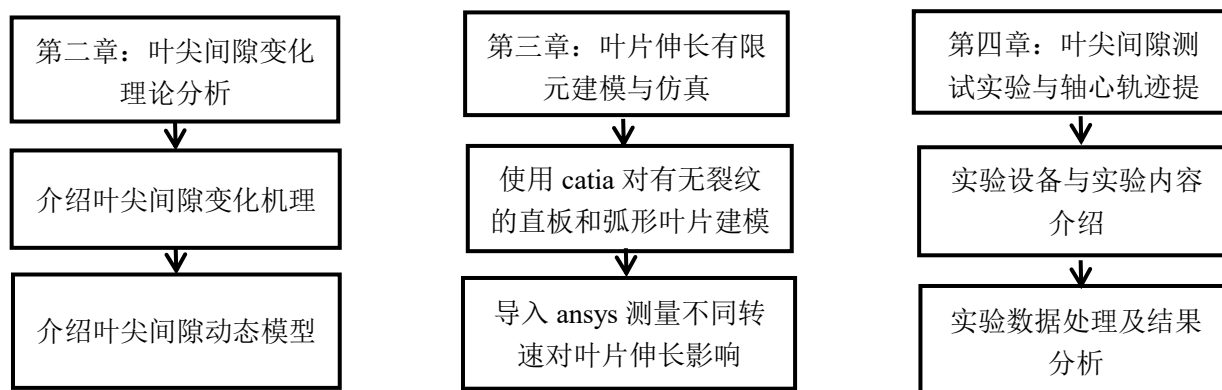
第二章 介绍了叶尖间隙的变化机理和动态模型。

第三章 使用 Ansys 对直板叶片和弧形叶片进行有限元仿真，研究转速和裂纹对叶片伸长量的影响。

第四章 使用电涡流传感器进行叶尖间隙测试实验并提取轴心轨迹，并与轴振信号进行对比，验证本文方法的有效性。

第五章 对本文所使用的方法进行总结，并对叶尖间隙测量技术的发展进行了展望。

基于转静间隙的轴心轨迹提取方法及实验验证





## 第二章 叶尖间隙变化理论分析

### 2.1. 叶尖间隙变化机理

叶尖间隙的变化主要由发动机的静态或动态部件在承受重负荷时的位移或变形引起。这些负荷分为两类：发动机负荷和飞行负荷。发动机负荷涉及离心力、热应力、内压和推力；飞行负荷则包括惯性力（即重力）、空气动力学力（环境压力）和陀螺负荷<sup>[24]</sup>。如图 2-1 所示，发动机负荷可能引起叶尖间隙的对称或非对称变化，而飞行负荷主要导致非对称变化。

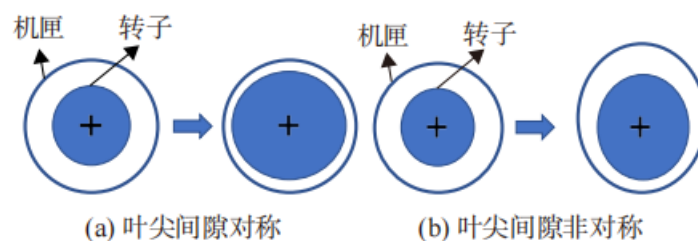


图 2-1 对称与非对称叶尖间隙变化示意图

**离心力的影响：**当旋转机械的叶片在高速旋转时，叶片上的每一个部分都会受到向外的离心力。这种力量会使叶片向外弯曲或伸展，从而增加叶尖和壳体之间的间隙。这种现象在高转速设备中尤为明显，因为离心力与转速的平方成正比增长。**叶片和壳体的形变：**由于机械负载和热应力的共同作用，叶片和壳体可能会发生形变。例如，叶片在受到不均匀负载或扭矩的影响下可能会弯曲，而壳体在受力后可能会出现轻微的变形或扭曲，这些都会导致叶尖间隙的变化。**轴向和径向载荷：**叶片在运行过程中不仅受到离心力的影响，还可能受到由于气流产生的轴向和径向载荷的影响。这些载荷会导致叶片在轴向或径向上发生移动，进一步影响叶尖间隙的大小。**振动的作用：**机械设备在运行过程中，各种原因可能引起叶片和壳体的振动。振动可以导致间隙短暂或持续的变化，特别是在叶片或壳体的共振频率附近操作时，振动的影响会更加显著。**材料的疲劳和长期形变：**长期运行中，叶片材料可能会因为疲劳或其他长期负载影响而发生微妙的形变。这种形变通常是渐进的，可能导致叶尖间隙的永久变化。

为了最小化叶尖间隙的不利影响，发动机设计师采用了多种策略，如采用高温耐受性更好的材料、改进冷却系统以更有效地控制部件温度，以及采用先进的制造技术来确保更精确的组件公差。此外，一些现代飞机发动机还使用了活性叶尖封闭系统，通过机

械或液压调节装置动态调整叶尖间隙，以适应不同的操作条件。这些措施有助于提高发动机的效率和可靠性，同时减少燃料消耗和排放。

## 2.2. 叶尖间隙变化的动态模型

叶尖间隙指的是涡轮或压缩机叶片尖端与其相对的壳体之间的间隙。这一间隙的控制对于优化发动机效率和输出功率非常关键。当发动机运转时，叶片会受到离心力的作用，导致它们向外延伸。这种向外的移动会增加叶尖与壳体的间隙，特别是在高转速下更为明显。本研究中使用的试验台是由外部电动机驱动的飞机发动机的简化模型。因此，只考虑了离心力对叶尖间隙的影响。叶尖间隙的总变化可以表示为以下式子：

$$d(t) = r_{\text{case}}(t) - r_{\text{rotor}}(t) - r_{\text{blade}}(t) - a(t) \quad (2-1)$$

(2-1) 式中  $d(t)$ ,  $r_{\text{case}}(t)$ ,  $r_{\text{rotor}}(t)$ ,  $r_{\text{blade}}(t)$ ,  $a(t)$  分别表示叶尖间隙、机匣内径、转子盘外径、叶片长度和转轴振动幅值随时间的变化。由式 (1) 可得叶尖间隙的变化：

$$d(t) = r_{\text{case}} - (r_0 + u_{r1}) - (l_0 + u_{b1} + u_{b2}) - a \quad (2-2)$$

(2-2) 式中  $r_{\text{case}}$  为机匣内半径， $r_0$  为转子盘初始半径， $u_{r1}$  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。

叶尖间隙的动态模型描述了在各种操作条件下，由于机械负载、热膨胀、离心力等因素，叶尖间隙如何随时间和条件变化。这种模型通常是数值模型，结合流体动力学、热力学、材料科学和结构力学的原理。首先需要定义叶片和壳体的初始形状和尺寸。由于本文只考虑离心力的影响，所以计算叶片由于高速旋转产生的离心拉伸。接着使用有限元分析模拟叶片和壳体在各种操作条件下的行为，分析在不同转速和裂纹下叶尖间隙的变化。这类模型对于高性能的航空发动机和大型风力涡轮机等关键应用尤为重要，可以预测和优化叶尖间隙，从而提高整体机械效率和耐久性。

## 2.3. 本章小结

本章首先研究了飞机叶尖间隙变化的原因，指出这些变化主要是由发动机固定或旋转部件在高负荷下的位移或变形引起的。接着，我们探讨了叶尖间隙变化的动态模型，并提供了相关的公式。这个讨论有助于深入理解飞机发动机在不同运行条件下叶尖间隙的变化机理，对于发动机的设计、维护和性能优化具有实际的指导意义。

### 第三章 叶片伸长有限元建模与仿真

由第二章可以知道，离心力导致的叶片伸长是叶尖间隙变化的主要原因之一，此外叶片裂纹的出现也会加剧叶尖间隙的变化。因此，本章从旋转速度和叶片裂纹两个方面进行有限元仿真来研究叶片伸长。

#### 3.1. 直板叶片的振动有限元模型

##### 3.1.1. 无叶片裂纹直板叶片建模与仿真分析

直板叶片的三维模型如图 3-1 所示，叶片的长度为 87mm，厚度为 1mm，将叶片三维模型导入 Ansys Workbench 中进行网格划分，网格单元为 SOLID186 单元，网格数量为 25420。材料的属性为结构钢。边界条件：将叶片根部采用固定支撑约束，给予叶片一个固定的旋转速度进行静力分析，最后提取叶片在径向的变形。

分别设置转速为 1000rpm—6000rpm，每 1000rpm 为一个台阶进行计算，计算结果如图 3-2 所示。提取每个转速下的叶片最大伸长量，得到图 3-3 所示，叶片随着离心力的增大，叶片伸长量也增大，且斜率也增大，即变化率也增大。

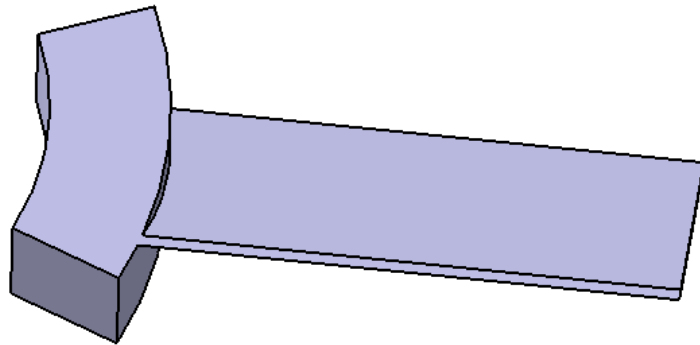
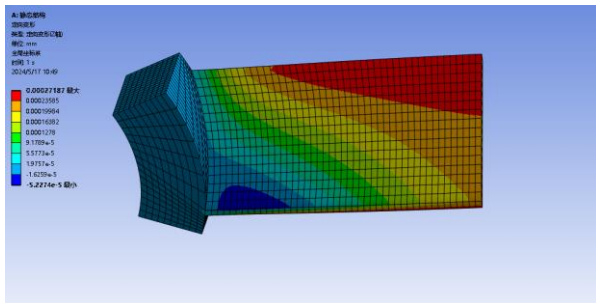
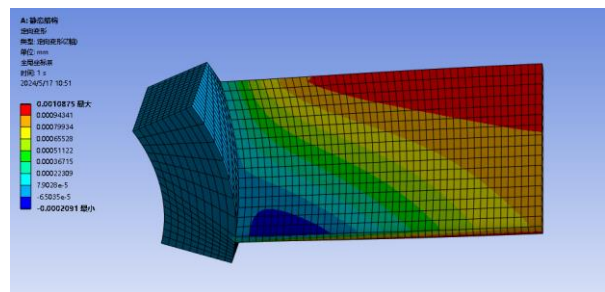


图 3-1 直板叶片三维模型



(a) 1000rpm



(b) 2000rpm

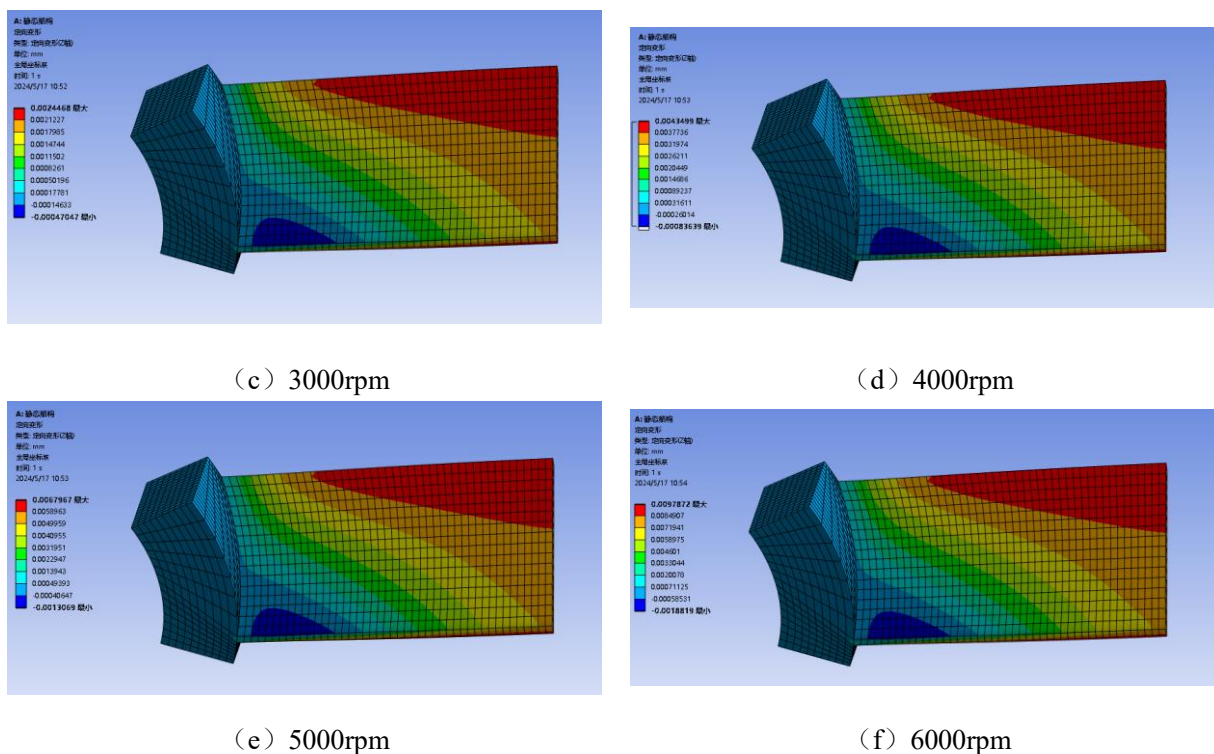


图 3-2 不同旋转速度激励下的叶片伸长

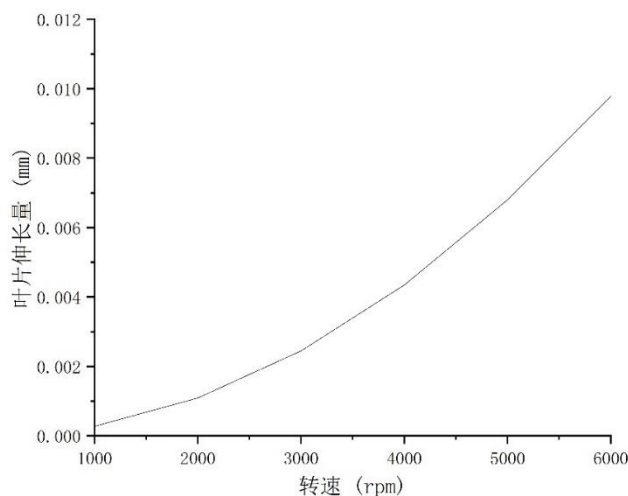


图 3-3 不同转速下的最大叶片伸长量

### 3.1.2. 含叶片裂纹直板叶片建模与仿真分析

直板叶片用 Design Model 对直板叶片进行切割，切割的裂纹深度为 1/4 叶片宽度，将模型导入 Ansys Workbench 中进行网格划分，网格单元为 SOLID186 单元，网格数量为 18793。材料的属性为结构钢。把切割部分采用无摩擦接触的方式来定义裂纹，如图 3-4 所示。边界条件：将叶片根部采用固定支撑约束，给予叶片一个固定的旋转速度进行静力分析，最后提取叶片在径向的变形。

分别设置转速为 1000rpm—6000rpm，每 1000rpm 为一个台阶进行计算，计算结果如图 3-5 所示。提取每个转速下的叶片最大伸长量，得到图 3-6 所示，叶片随着离心力的增大，叶片伸长量也增大，且斜率也增大，即变化率也增大。

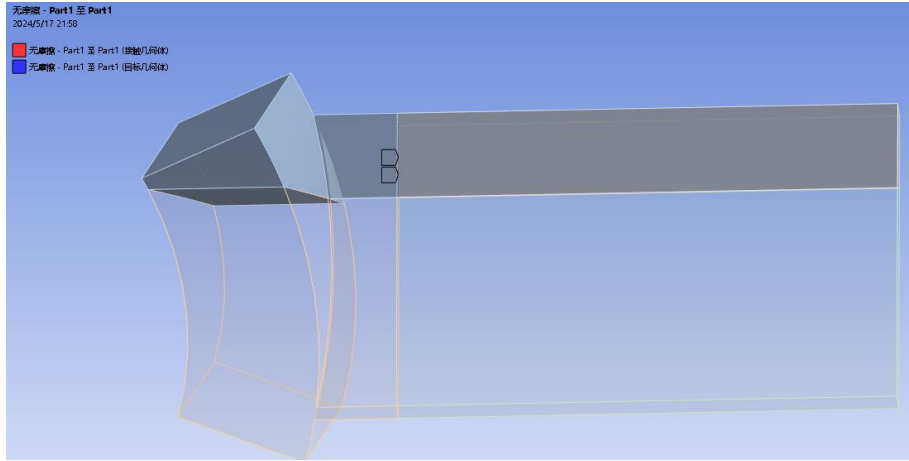


图 3-4 含裂纹直板叶片三维模型

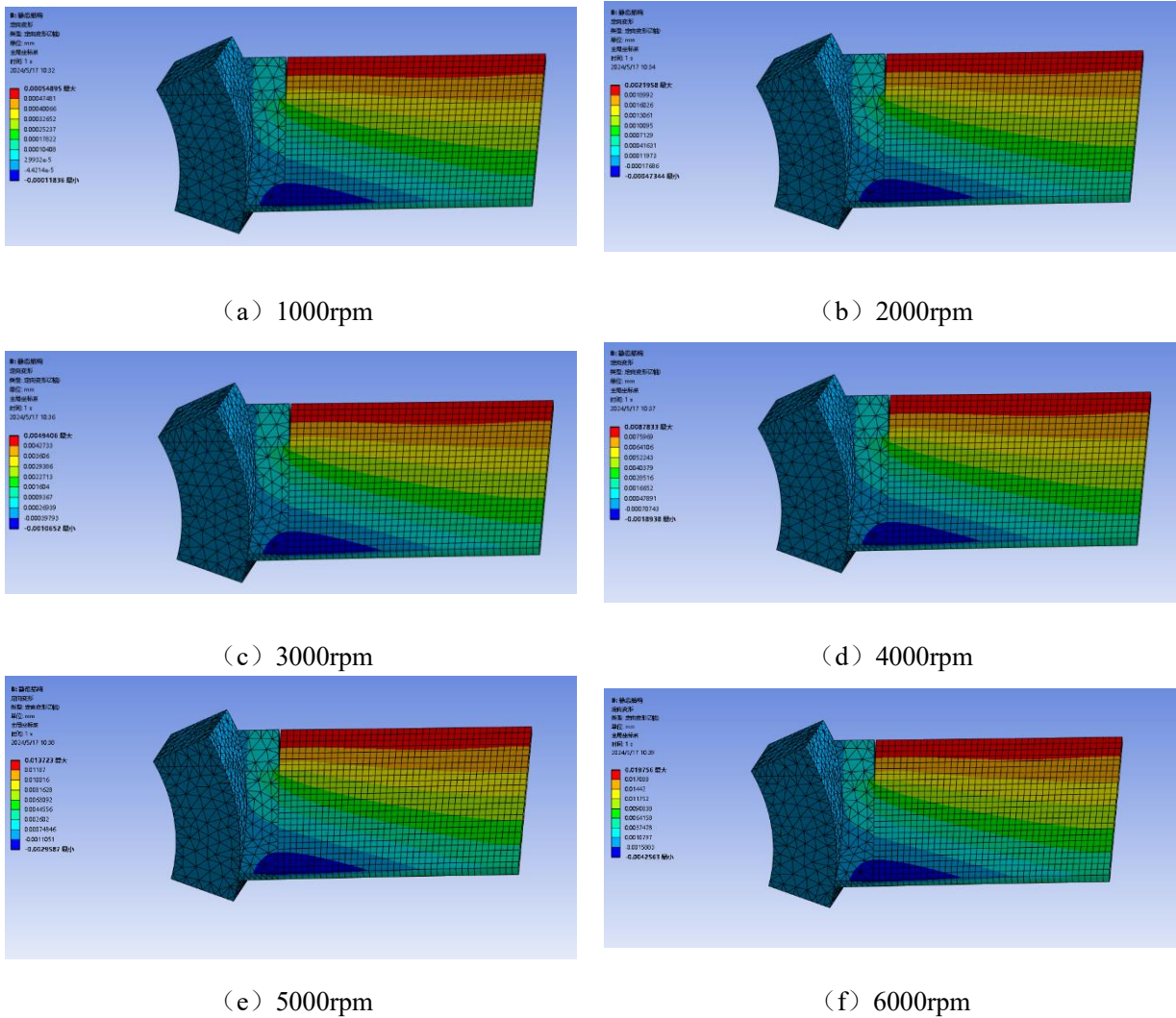


图 3-5 不同旋转速度激励下的叶片伸长

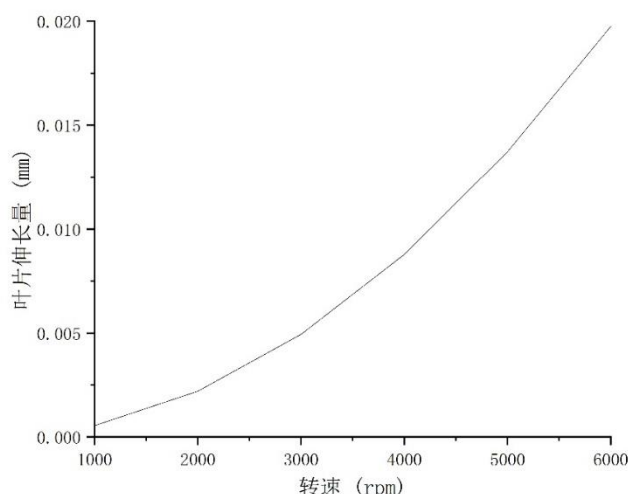


图 3-6 不同转速下的最大叶片伸长量

改变裂纹的深度，再做上述的有限元仿真，将无裂纹和不同裂纹深度的最大叶片伸长量进行对比，如图 3-7 所示，可以看出，叶片裂纹会显著加剧叶片的伸长。

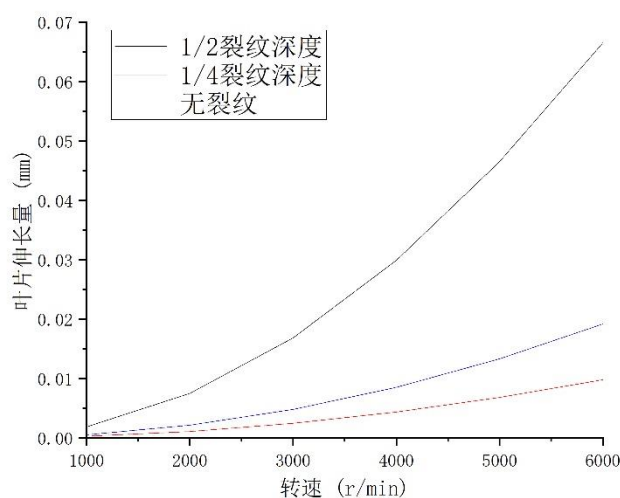


图 3-7 不同裂纹深度的叶片伸长情况

## 3.2. 弧形叶片的振动有限元模型

### 3.2.1. 无叶片裂纹弧形叶片建模与仿真分析

弧形叶片的三维模型如图 3-8 所示，叶片的长度为 120mm，厚度为 1mm，将叶片三维模型导入 Ansys Workbench 中进行网格划分，网格单元为 SOLID186 单元，网格数量为 40537。材料的属性为结构钢。边界条件：仿真将叶片根部采用固定支撑约束，给予叶片一个固定的旋转速度进行静力分析，最后提取叶片在径向的变形。

分别设置转速为 1000rpm—6000rpm，每 1000rpm 为一个台阶进行计算，计算结果如图 3-9 所示。提取每个转速下的叶片最大伸长量，得到图 3-10 所示，叶片随着离心力的增大，叶片伸长量也增大，且斜率也增大，即变化率也增大。

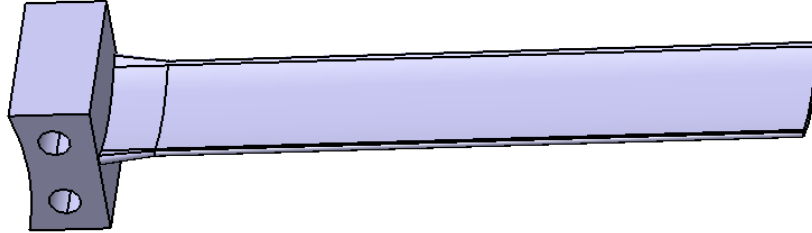


图 3-8 弧形叶片三维模型

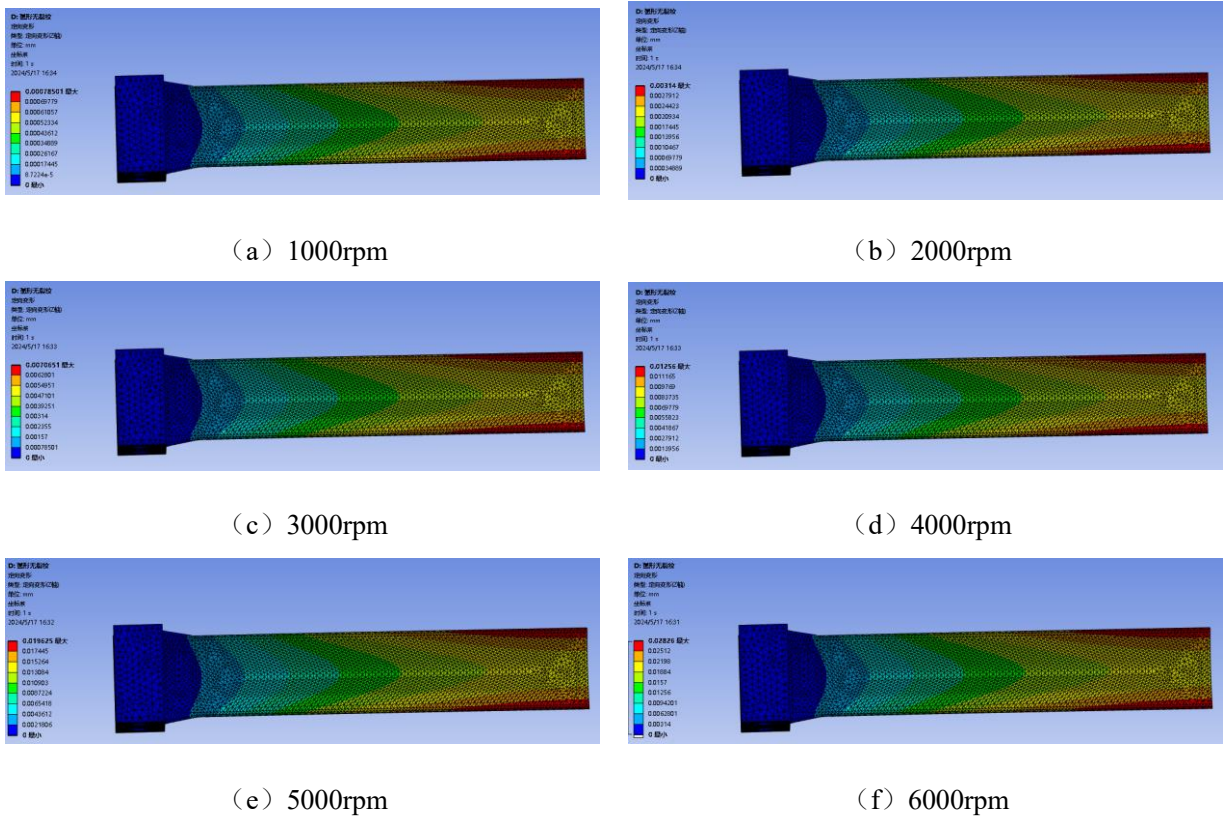


图 3-9 不同旋转速度激励下的叶片伸长

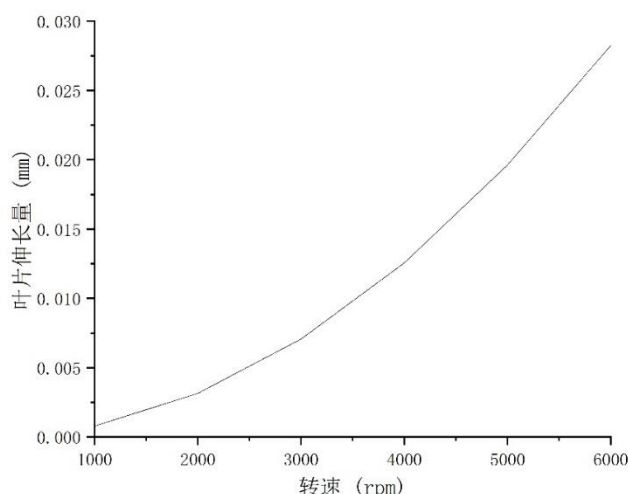


图 3-10 不同转速下的最大叶片伸长量

### 3.2.2 含叶片裂纹弧形叶片建模与仿真分析

弧形叶片难以在 Ansys Workbench 里直接切割出裂纹，因此在 Catia 中采用挖凹槽的方式来定义裂纹，裂纹的宽度为 0.5mm，深度为 2mm，如图 3-11 所示。将处理好的弧形叶片导入到 Ansys Workbench 中进行网格划分，网格单元为 SOLID186 单元，网格数量为 40800。材料的属性为结构钢。边界条件：叶片根部采用固定支撑约束，给予叶片一个固定的旋转速度进行静力分析，最后提取叶片在径向的变形。

分别设置转速为 1000rpm—6000rpm，每 1000rpm 为一个台阶进行计算，计算结果如图 3-12 所示。提取每个转速下的叶片最大伸长量，得到图 3-13 所示，叶片随着离心力的增大，叶片伸长量也增大，且斜率也增大，即变化率也增大。

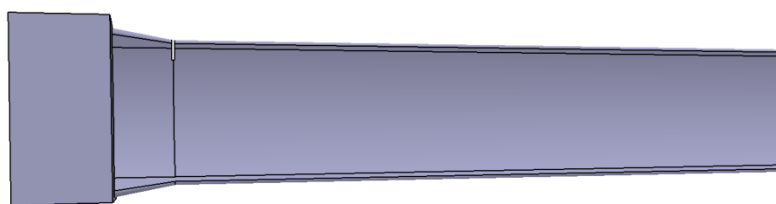
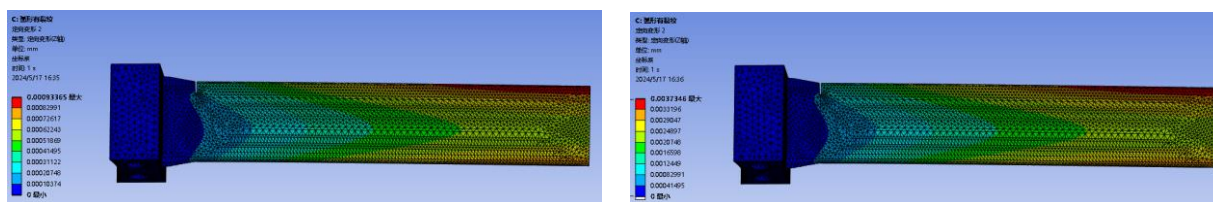


图 3-11 含裂纹弧形叶片三维模型



(a) 1000rpm

(b) 2000rpm



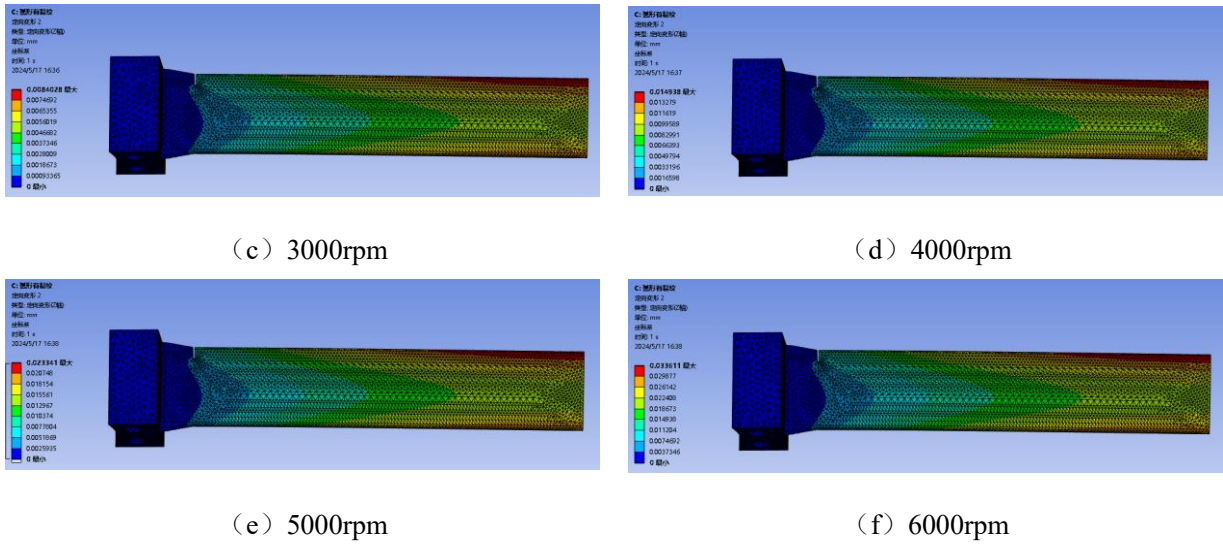


图 3-12 不同旋转速度激励下的叶片伸长

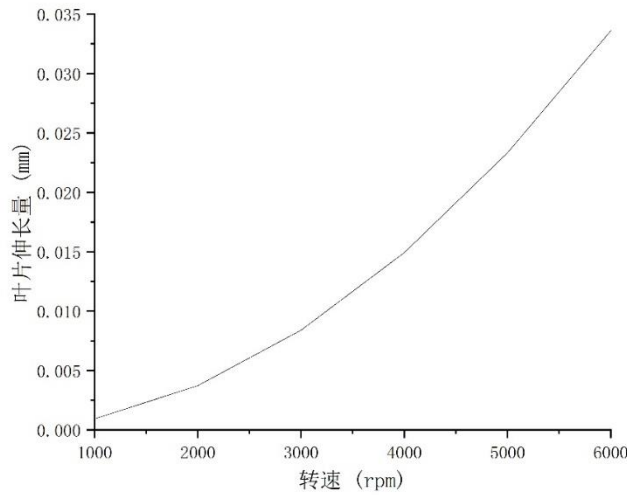


图 3-13 不同转速下的最大叶片伸长量

改变裂纹的深度，再做上述的有限元仿真，将无裂纹和不同裂纹深度的最大叶片伸长量进行对比，如图 3-14 所示，可以看出，叶片裂纹会显著加剧叶片的伸长。

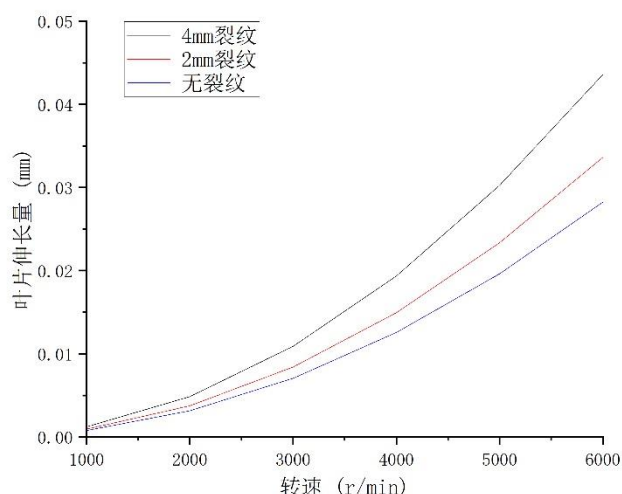


图 3-14 不同裂纹深度的叶片伸长情况

### 3.3. 本章小结

本章分别对直板和弧形叶片进行有限元仿真，考虑了旋转速度和裂纹的影响对叶片伸长带来的影响。无裂纹直板叶片转速由 1000rpm 提升至 6000rpm 时，叶片最大伸长量由 0.00027187mm 伸长至 0.0097872mm；有裂纹直板叶片转速由 1000rpm 提升至 6000rpm 时，叶片最大伸长量由 0.00054895mm 伸长至 0.019756mm；无裂纹弧形叶片转速由 1000rpm 提升至 6000rpm 时，叶片最大伸长量由 0.00078501mm 伸长至 0.02826mm；有裂纹弧形叶片转速由 1000rpm 提升至 6000rpm 时，叶片最大伸长量由 0.00093365mm 伸长至 0.033611mm。通过仿真可以发现叶片的伸长量很小，因此对叶尖间隙的变化影响也很小。

## 第四章 叶尖间隙测试试验与轴心轨迹提取

通过第三章的仿真可以发现，叶片伸长量比较小，因此认为叶尖间隙的变化主要由转轴振动引起，因此理论上可以通过叶尖间隙的变化来提取出转子的振动，进而提取出转子的轴心轨迹。本试验为了验证叶尖间隙提取轴心轨迹算法的有效性，测取叶尖间隙数据和转子振动数据。

### 4.1. 试验设备介绍

带机匣的转子模型试验器是一种用于航空发动机或涡轮机械研究的设备，主要用于模拟和研究转子和机匣之间的相互作用及其对整个系统性能的影响。这种试验器的主要目的是研究转子与机匣之间的相互作用，包括气动和机械方面的问题，如转子叶片与机匣之间的气动负荷、摩擦和磨损、振动和共振现象等。这些研究对于提高发动机的效率、减少故障率和延长使用寿命具有重要意义。本文采用的叶尖间隙测量试验器模型在外形上与实际的发动机核心机几乎完全相同，如图 4-1 所示。然而，为了方便实验操作和降低成本，该试验器模型的尺寸被缩小到了初始尺寸的三分之一。这种尺寸缩小的设计在保留关键几何特征和性能参数的同时，能够更高效地进行实验室研究和数据采集。试验器的内部结构采用 0-2-0 支架设计，多级压气机被简化为三级盘片结构，叶片被简化为平面设计，涡轮则简化为一级盘片结构。轴采用空心刚性轴设计，最大运行速度可达 6000 转每分钟。试验器通过坚固的刚性支架固定，安装在专门设计的试验平台上，以确保其在运行过程中保持稳定。前安装节位于涡轮静子机匣的左侧（从顺航向方向看），并通过铰链结构悬挂吊起试验器的头部。这种设计不仅提供了稳固的支撑，还允许一定的灵活性，以适应试验器在运行时的微小调整和振动。后安装节则位于压气机静子机匣的左右两侧，通过螺栓结构牢固地固定在支架上。这种双侧固定的方式进一步增强了试证的试验器的稳固性和可靠性，又为测量和调整提供了方便。



图 4-1 叶尖间隙测试试验器实物图

## 4.2. 试验内容与试验方案

传感器标定如图 4-2 所示，试验现场传感器布置如 4-3 所示。试验测试方案示意图如图 4-4 所示。信号采集与分析系统主要包括扬州晶明科技有限公司的 E003 电涡流传感器与 JM5936 数据采集器，采样频率最高可达 100K Hz。安装在机匣上的电涡流传感器通过电磁感应原理测量叶尖与传感器端面之间的距离，并将这一距离转换为相应的电压信号输出。该电压信号首先经过信号放大器放大，以增强信号的强度和抗干扰能力，然后通过信号采集器进行数据采集和数字化处理。处理后的信号被输入到计算机中，在计算机上利用本文所述的信号分析方法，对数据进行详细分析。通过这种方法，可以精确地获得转轴的振动位移信号，从而进一步绘制出该截面的轴心轨迹图。这一过程实现了从测量到数据处理和分析的完整闭环，为研究转子动态特性提供了可靠的数据支持和直观的可视化结果。在本次试验中，为了精确测量截面的叶尖间隙和该截面附近盘的间隙，在截面的关键位置安装了两个互成  $90^\circ$  的电涡流传感器。这些传感器通过电磁感应原理进行位移测量，能够提供精确的位移数据。试验前还进行了电涡流传感器的标定，标定试验将四只电涡流传感器固定在振动台上，用塞尺来统一安装的初始距离，利用振动台输出一个标准的位移，然后使用电涡流传感器进行测量。

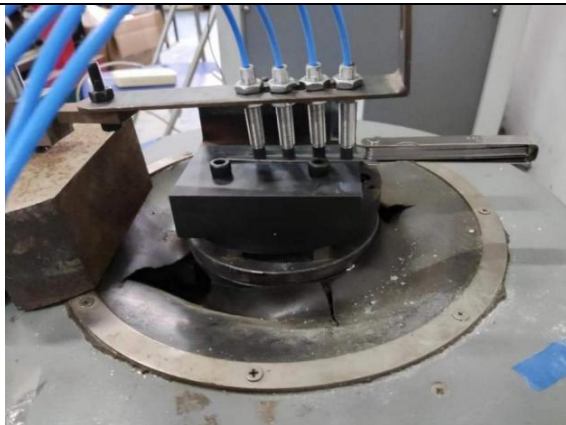


图 4-2 传感器标定图

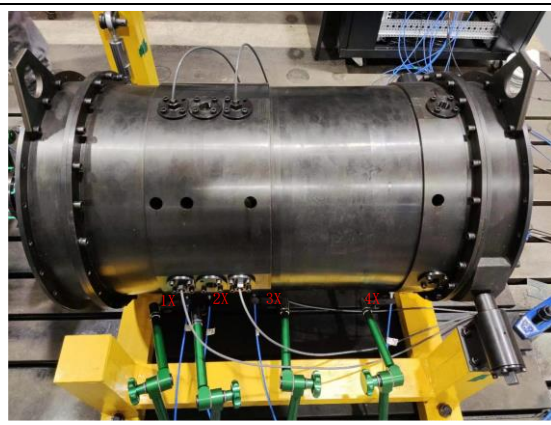


图 4-3 试验现场传感器布置

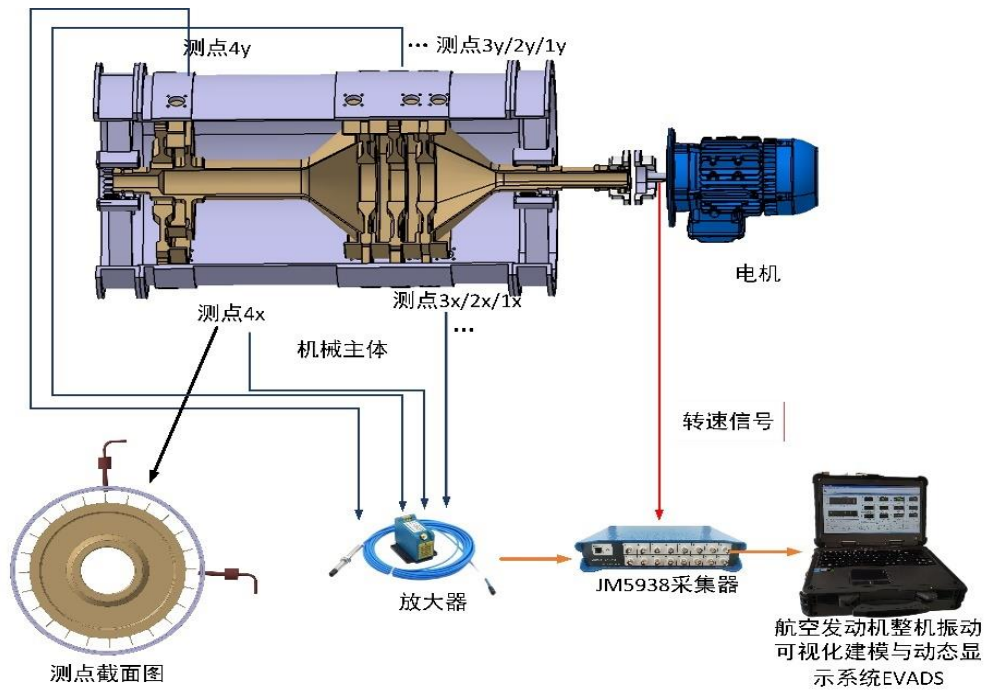


图 4-4 试验测试方案示意图

### 4.3. 试验数据处理及结果分析

#### 4.3.1. 互相关分析方法介绍

互相关法能在噪声背景下有效地提取有用信号。根据转子动力学知识，由转子不平衡量引起的响应是以旋转频率（基频）振动的谐波信号，然而，在实际转子系统振动测试中，所获取的振动信号往往还有其他干扰信号。因此，需要消除噪声干扰影响，准确获取在转子不平衡激励下的基频响应幅值和相位，而基于互相关分析的谐波信号提取技术是一种非常有效的方法，该方法只需要将基频信号和所测得的响应信号进行互相关处理即可实现。下面简单介绍该方法的原理。

设振动信号 $X(t)$ 为正弦信号与噪声信号的叠加，即

$$x(t) = A\sin(2\pi f_0 t + \phi) + n(t) \quad (4-1)$$

其中 $f_0$ 为正弦信号频率， $n(t)$ 为其他频率分量和噪声之和。将振动信号 $x(t)$ 与频率等于 $f_0$ 、初相位等于0的正弦信号和余弦信号分别做互相关，来提取基频信号的幅值及相位。设在 $[0, T]$ 范围内，正弦和余弦信号分别为：

$$\begin{cases} y(t) = \sin(2\pi f_0 t) \\ x(t) = \cos(2\pi f_0 t) \end{cases} \quad (4-2)$$

将正弦信号 $y(t)$ 、余弦信号 $z(t)$ 分别与振动信号 $x(t)$ 做互相关运算：

$$\begin{cases} R_{xy}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2\pi f_0 t + \phi) \square A \sin(2\pi f_0 t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2\pi f_0 t) \square n(t) dt \\ R_{xz}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2\pi f_0 t + \phi) \square A \sin(2\pi f_0 t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2\pi f_0 t) \square n(t) dt \end{cases} \quad (4-3)$$

在式(4-3)中, 第二个积分由于  $\sin(2\pi f_0 t)$  和  $\cos(2\pi f_0 t)$  与  $n(t)$  不同频率且不同相, 所以积分值均为 0。所以得:

$$\begin{cases} R_{xy}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2\pi f_0 t) \square A \sin(2\pi f_0 t + \phi) dt = \frac{A}{2} \cos \varphi \\ R_{xz}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2\pi f_0 t) \square A \sin(2\pi f_0 t + \phi) dt = \frac{A}{2} \sin \varphi \end{cases} \quad (4-4)$$

$$R_{xy}(0) = \int_0^T \sin(2\pi f_0 t) \square A \sin(2\pi f_0 t + \phi) dt = \frac{AT}{2} \cos \varphi \quad (4-5)$$

由式 (4-4) 与式 (4-5) 可求出幅值以及相位, 如式 (4-6) 与式 (4-7) 所示:

$$A = 2 \times \sqrt{R_{xy}^2(0) + R_{xz}^2(0)} \quad (4-6)$$

$$\phi = \arctg \frac{R_{xz}(0)}{R_{xy}(0)} \quad (4-7)$$

#### 4.3.2. 傅里叶变换方法介绍

傅里叶变换的目的是可将时域(即时间域)上的信号转变为频域(即频率域)上的信号, 随着域的不同, 对同一个事物的了解角度也就随之改变, 因此在时域中某些不好处理的地方, 在频域就可以较为简单的处理。

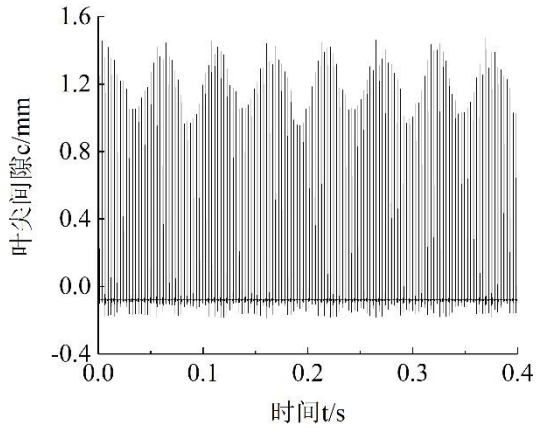
$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4-8)$$

其中  $\omega$  代表频率,  $t$  代表时间,  $e^{-i\omega t}$  为复变函数。傅里叶变换认为一个周期函数(信号)包含多个频率分量, 任意函数(信号)可通过多个周期函数(基函数)相加而合成。从物理角度理解傅里叶变换是以一组特殊的函数(三角函数)为正交基, 对原函数进行线性变换, 物理意义便是原函数在各组基函数的投影。

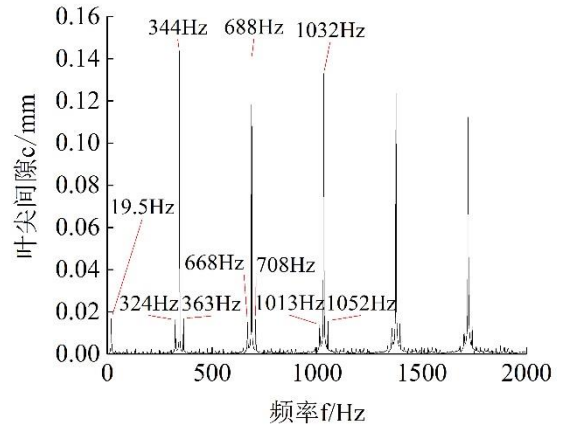
#### 4.3.3. 数据分析

在本次试验中, 设定试验器的转速为 1148 转每分钟 (r/min), 并将采样频率设定为 20 千赫兹 (kHz)。在这一条件下, 从测量数据中提取了 0.4 秒的数据进行分析。通过高频采样和短时间数据截取, 我们能够获得高分辨率和高精度的动态信息, 从而深入分析转子在特定转速下的性能和行为。将原始信号去均值处理后, 得到了如图 4-5 所示的信号。图 4-5 (a) 展示了叶尖间隙试验信号的时域波形。这表明, 经过去均值处理后的实际测量信

号准确地反映了叶尖间隙的动态变化。将所得的时域信号进行傅里叶变换，可得到如图 4-5 (b) 所示的信号频谱。从图 4-5 (b) 可以看出，在叶片通过频率附近，出现了明显的调制频率现象，且该调制频率与转速频率相等。对采集的 X 轴方向的叶尖间隙信号提取上包络后进行正弦重构得到信号及频谱如图 4-6 (a) 和图 4-6 (b) 所示。

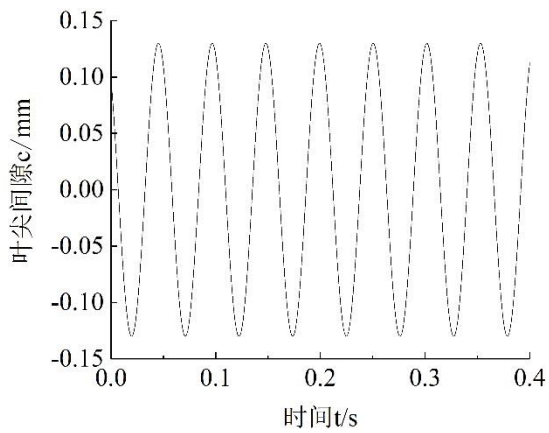


(a) 叶尖间隙试验信号时域波形

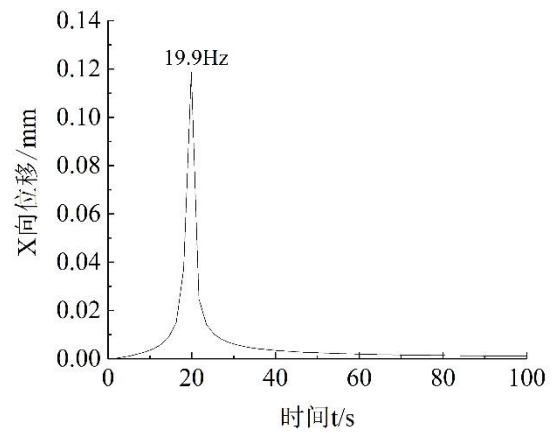


(b) 叶尖间隙试验信号频谱

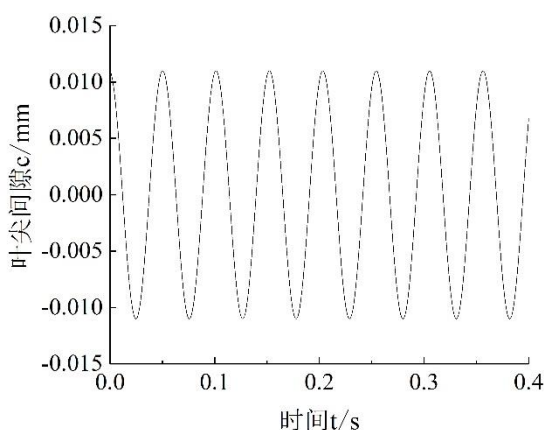
图 4-5 叶尖间隙试验信号



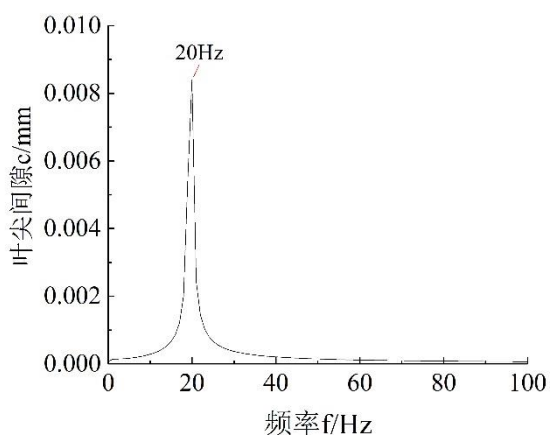
(a) 提取的 X 方向低频信号时域波形



(b) 提取的 X 方向低频信号频谱



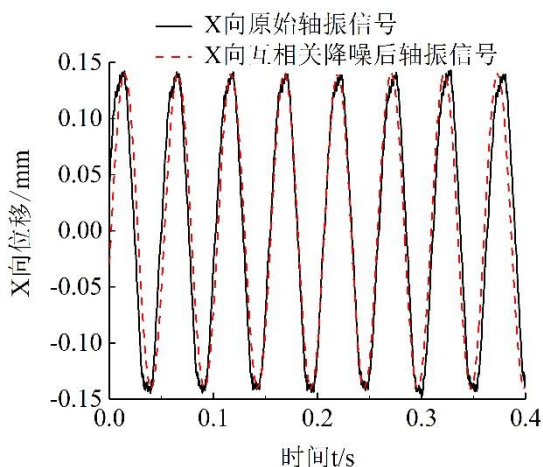
(c) 提取的 Y 方向低频信号时域波形



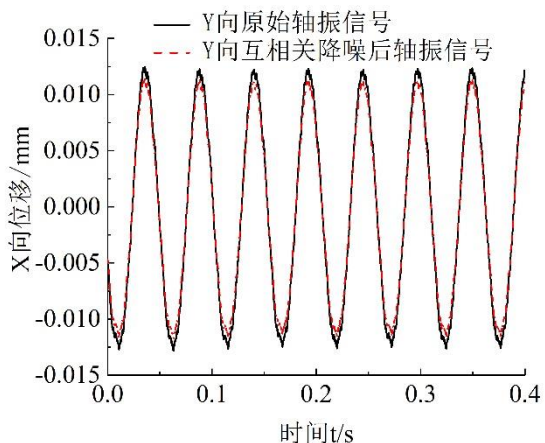
(d) 提取的 Y 方向低频信号频谱

图 4-6 叶尖间隙信号提取

按照上述方法，对 Y 轴方向测得的叶尖间隙数据做同样的处理，得到 Y 方向叶尖间隙拟合轴振信号及频谱如图 4-6 (c) 和图 4-6 (d) 所示。在对叶尖间隙测试截面临近的转子盘进行测量时，同样使用了两个相互垂直的电涡流传感器，以直接测量轴振信号。对于 X 方向测得的轴振信号，采用了与基频信号进行互相关分析的方法，以有效过滤掉轴振信号中的干扰信号。经过这一处理后，图 4-7 (a) 展示了处理后的轴振信号。对 Y 方向的轴振信号进行同样的处理后，得到了图 4-7 (b) 所示的 Y 方向轴振信号的互相关分析结果。通过这种处理，成功过滤掉了 Y 方向轴振信号中的干扰成分，提取出了纯净的振动信号。在完成上述对 X 方向和 Y 方向的叶尖间隙信号以及轴振信号的处理后，分别获得了对应的轴心轨迹。这些轨迹数据经过系统分析和对比，如图 4-8 所示。从图 4-8 中可以清晰地看出，通过叶尖间隙信号处理得到的轴心轨迹与通过直接测量轴振信号得到的轴心轨迹基本一致。



(a) X 方向原始轴振信号



(b) Y 方向互相关降噪后轴振信号

图 4-7 轴振信号互相关处理结果



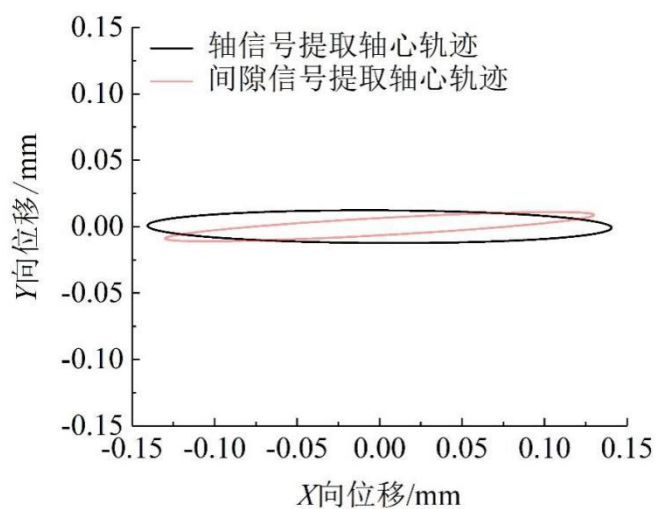


图 4-8 轴心轨迹提取结果对比

#### 4.4. 本章小结

本章基于一个配备机匣的转子试验器，利用电涡流传感器进行了详细的叶尖间隙测试实验，将基于叶尖间隙信号提取的轴心轨迹与直接利用电涡流传感器测量的轴振信号进行了对比分析。实验结果显示，基于叶尖间隙信号提取的轴心轨迹与直接测量得到的轴振信号非常接近，精度达到了 90% 以上。这一结果充分验证了本文所提出方法的正确性和有效性。

## 第五章 结论与展望

### 5.1. 结论

本文的研究方向基于叶尖间隙测量，首先介绍了转静间隙研究的背景和意义以及国内外对于转静间隙测试和轴心轨迹的提取方法。其次介绍了叶尖间隙的变化机理和动态模型，深入理解飞机发动机在不同运行条件下叶尖间隙的变化并详细描述了离心力对叶尖间隙的影响。接着对叶尖间隙进行有限元仿真，研究转速和裂纹对叶片伸长量的影响。发现在不同转速下叶片的伸长量很小，因此判断离心力对叶尖间隙的变化影响很小。随后用电涡流传感器进行了叶尖间隙的测量，将叶尖间隙信号中提取的轴心轨迹与电涡流传感器测得的轴振信号进行对比，精度达到了 90%以上验证本文所提出方法的正确性和有效性。

### 5.2. 展望

利用电涡流传感器提取航空发动机叶尖间隙的轴心轨迹在航空发动机健康监测和故障诊断方面具有重要意义。这种非接触测量技术具有高精度和实时监测的优点，适用于高速旋转的航空发动机，并能在恶劣环境下工作。然而，这种技术也面临一些挑战，如信号处理复杂、安装和校准难度高，以及受材料和温度变化的影响。未来的发展趋势包括智能化和自动化、多传感器融合、无线传感器网络、先进材料和传感器设计、实时大数据处理以及自校准和自适应技术。尽管存在挑战，但通过智能化、多传感器融合和新材料等新技术的应用，利用电涡流传感器提取航空发动机叶尖间隙的轴心轨迹方法的性能和应用范围将得到进一步提升，为航空发动机的安全性和可靠性提供更强有力的保障。这将为未来航空发动机的维护和运行带来显著的改进。

## 参考文献

- [1] 张帅, 张强波, 张霞妹. 基于方差分析的航空发动机风扇叶片外物撞击识别[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 187-198.
- [2] FENG Tong, ZHAO Xiaodong, JING Mingsui, et al. Experimental Study of rotor blades vibration and noise in multistage high pressure compressor and their relevance[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 870-878.
- [3] 毕超, 孙建华, 徐昌语等. 航空发动机叶尖间隙测量技术的研究与应用[CU]. 第七届中国航空学会青年科技论坛文, 2016, 122-130.
- [4] Kam C, Donald L. Turbo-machinery tip-timing comes of age[J]. Maintenance & Asset Management, 2009, 24(1): 34-40.
- [5] Fabian T, Prinz F. Capacitive blade tip clearance measurements for a micro gas turbine[C]. Proc of IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conf, 2009.
- [6] Alexander S. Techniques for blade tip clearance measurement with capacitive probes[J]. Measurement Science and Technol, 2000, 11: 865-869.
- [7] 张玉贵. 烟气轮叶片振动的非接触式在线监测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 1-40.
- [8] Garcia I, Beloki J, Zubia J, et al. An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig[J]. Sensors, 2013, 13(6): 7385-7398.
- [9] 张承, 周雷, 胡伟. 航空发动机用光纤叶片振动传感探头的研制[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(2): 217-220.
- [10] Duan F, Zhang J, Jiang J, et al. Method to improve the blade tip-timing accuracy of fiber bundle sensor under varying tip clearance[J]. Optical Engin, 2016, 55(1): 014106.
- [11] Jia Binghui, He Lei. An optical fiber measurements system for blade tip clearance of engine[J]. Inter. J. of Aerospace Engin, 2017(5): 1-9.
- [12] 张娜, 黄春峰. 航空发动机叶尖间隙测量技术[J]. 航空制造技术, 2010(13): 41-45.
- [13] 许欧阳, 童杏林. 航空发动机叶尖间隙测量技术研究进展[J]. 半导体光电, 2020, 41(06): 774-778.
- [14] 邵杰. 转子系统轴心轨迹特征提取与自动识别研究[D]. 太原理工大学, 2018.
- [15] 袁倩, 孙冬梅, 范文. 基于 D-S 证据理论的轴心轨迹自动识别方法[J]. 机床与液压, 2017, 45(7): 167-171.
- [16] 许云飞, 钟秉林, 黄仁. 轴心轨迹自动识别及其在旋机诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2): 141-145.
- [17] 付波, 周建中, 彭兵, 等. 基于仿射不变矩的轴心轨迹自动识别方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 119-122.
- [18] 刘刚, 李明, 乔宝明, 等. 故障转子系统轴心轨迹的自动识别研究[J]. 中国测试, 2014, 40(1): 110-114.
- [19] 陈仁祥, 汤宝平, 吕中亮. EEMD 滤波的转子轴心轨迹提纯方法[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(11): 15-20.
- [20] 陈喜阳, 闫海桥, 孙建平. 基于 PSO-BP 与组合矩的水电机组轴心轨迹识别[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(1): 108-114.
- [21] Huang D S. Detection and Characteristic Analysis for Mass Center Orbit of Bearing Cage[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(15): 1779-1784.
- [22] 章明明, 蒋欢春, 茅大钧等. Transformer 神经网络和轴心轨迹在燃机转子故障诊断中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(01): 110-115+153.

- [23] 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.
- [24] 高琨, 申秀丽, 薛园园, 等. 机动载荷对核心机叶尖间隙的影响初探[J]. 航空动力学报, 2018, 33(9): 2205-2218.

## 致 谢

在这篇毕业论文完成之际，我想向所有在我学术生涯中给予我支持和鼓励的人们致以最诚挚的感谢。

首先，我要衷心感谢我的导师陈果教授，您的悉心指导和无私支持是我完成毕业论文的关键。在您的指导下，我不仅学到了丰富的专业知识，更培养了扎实的研究方法和学术思维，受益良多。

感谢沈响响师兄和陈智超师兄在平日里的辅导，帮助我完成毕设并指导我撰写论文。

感谢全体老师和同学们为我提供了良好的学术环境和实验条件，让我能够充分发挥自己的潜力，进行深入的研究和探索。

我还要感谢我的父母和朋友们，感谢你们在我求学之路上给予我的理解、支持和鼓励。你们的陪伴和关怀是我前进的动力和勇气，让我能够坚持不懈地追求自己的梦想。

最后，我要感谢所有曾经帮助过我的老师、同学、同事和所有无名英雄们，你们的帮助和支持让我感受到了人间的温暖和善意。

在我即将踏上新的征程之际，我将继续努力学习和成长，不忘初心，砥砺前行。再次感谢大家的关心和支持，祝愿大家身体健康，工作顺利！