

编号 ××××××××



南京航空航天大学

本科毕业设计（论文）

题目

航空发动机附件机匣故障动力学仿真及特征提取

学生姓名	杨健
学号	071951221
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	陈果教授

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：所提交的毕业设计（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：

杨伟

日期：2024年6月4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：

杨伟

导师签名：

江

日期：2024年6月4日

日期：2024年6月4日

摘 要

附件机匣是航空发动机动力传输的重要部件，其结构复杂，服役环境恶劣，极易产生齿轮和轴承故障，引发飞行安全事故。因此，对航空发动机附件机匣开展齿轮和滚动轴承故障诊断具有重要意义。航空发动机附件机匣的振动信号成分复杂，包含齿轮、轴承、及噪声干扰信号。本文针对强背景噪声条件下航空发动机附件机匣故障诊断的问题，对附件机匣内齿轮和轴承的运行机理进行研究，主要工作内容如下：

（1）建立了一种基于 ANSYS LS-DYNA 的动力学仿真模型，该方法利用 CATIA 画出含故障的齿轮和滚动轴承模型；

（2）将轴承和齿轮模型导入 ANSYS 中，进行材料参数设置、网格的划分、边界条件的设置，设置完成后运行得到结果并进行验证，分析故障模型和正常模型的差异性；

（3）论文通过仿真信号、公开数据集和真实航空发动机附件机匣试验数据进行了方法验证，可有效提取出滚动轴承外圈故障特征。

结果表明：本文所提出的三维实体有限元建模方法及故障特征分析能够实现齿轮和轴承故障的有效诊断，为实际的航空发动机附件机匣齿轮和轴承故障诊断提供了新的方法和思路。

关键词：航空发动机机匣、齿轮故障、滚动轴承故障、ANSYS 有限元建模、信号分析

ABSTRACT

The accessory casing is an important part of the power transmission of aero engines, which has a complex structure and a harsh service environment, which is very easy to cause gear and bearing failures and cause flight safety accidents. Therefore, it is of great significance to carry out fault diagnosis of gears and rolling bearings for aero engine accessory casings. The vibration signal composition of the aero engine attachment casing is complex, including gears, bearings, and noise interference signals. In this paper, aiming at the problem of fault diagnosis of the accessory casing of aero engine under the condition of strong background noise, the operation mechanism of the gears and bearings in the accessory casing is studied, and the main work contents are as follows:

- (1) A dynamic simulation model based on ANSYS LS-DYNA is proposed, which uses CATIA to draw models of faulty gears and rolling bearings;
- (2) Import the bearing and gear models into ANSYS, set the material parameters, divide the mesh, and set the boundary conditions, and run the results and verify them after the setting is completed;
- (3) The method was verified by simulated signals, public datasets and test data of real aeroengine accessory casings.

The results show that the three-dimensional solid finite element modeling method and fault characteristic analysis proposed in this paper can realize the effective diagnosis of gear and bearing faults, and provide a new method and idea for the actual fault diagnosis of aero engine accessory casing gears and bearings.

Keywords: Aero Engine Casing, Gear Failure, Rolling Bearing Failure, ANSYS Finite Element Modeling, Signal Analysis

目 录

第一章 绪论	- 1 -
1.1 项目研究的背景及意义	- 1 -
1.2 国内外研究现状	- 2 -
1.2.1 航空发动机附件机匣故障诊断研究现状	- 2 -
1.2.2 齿轮故障动力学模型研究现状	- 3 -
1.2.3 滚动轴承故障动力学模型研究现状	- 4 -
1.3 问题提出	- 7 -
1.4 论文的主要工作	- 7 -
第二章 建立齿轮和滚动轴承模型	- 9 -
2.1 齿轮的故障类型和建模	- 9 -
2.1.1 齿轮的结构	- 9 -
2.1.2 齿轮故障种类	- 10 -
2.1.3 运用 CATIA 建立齿轮模型	- 10 -
2.2 滚动轴承的故障类型和建模	- 13 -
2.2.1 滚动轴承的基本结构	- 13 -
2.2.2 滚动轴承的故障种类	- 13 -
2.2.3 运用 CATIA 建立滚动轴承模型	- 14 -
2.3 本章小结	- 15 -
第三章 齿轮和轴承显示动力学分析	- 16 -
3.1 ANSYS LS-DYNA 显示动力学简介	- 16 -
3.2 有限元模型的分析	- 17 -
3.2.1 建立故障的齿轮有限元模型	- 17 -
3.2.2 建立故障的滚动轴承有限元模型	- 17 -
3.3 材料参数的确定	- 19 -
3.3.1 齿轮参数的确定	- 19 -
3.3.2 滚动轴承参数的确定	- 19 -
3.4 有限元网格划分	- 19 -
3.4.1 齿轮的有限元网格划分	- 19 -
3.4.2 滚动轴承的有限元网格划分	- 20 -
3.5 边界条件设置	- 21 -
3.5.1 齿轮的边界条件设置	- 21 -
3.5.2 滚动轴承的边界条件设置	- 21 -
3.6 齿轮和滚动轴承的显示动力学仿真结果	- 22 -
3.6.1 齿轮的显示动力学仿真结果	- 22 -
3.6.2 滚动轴承显示动力学仿真结果	- 23 -
3.7 本章小结	- 24 -
第四章 附件机匣故障信号特征分析	- 25 -
4.1 信号处理分析关键技术	- 25 -
4.1.1 随机离散分离 DRS 的方法	- 25 -
4.1.2 小波变换	- 27 -
4.1.3 包络解调的分析方法	- 28 -
4.1.4 自相关分析	- 29 -
4.2 基于实验数据的算法验证	- 29 -

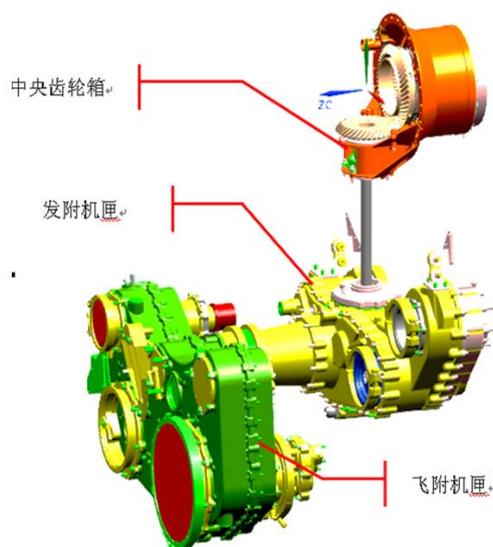
4.3 本章小结	- 31 -
第五章 总结与展望.....	- 33 -
5.1 研究总结	- 33 -
5.2 研究展望	- 33 -
参考文献.....	- 34 -
致谢.....	- 35 -

第一章 绪论

1.1 项目研究的背景及意义

附件机匣是一种齿轮箱式传动装置，作用是通过多组齿轮与轴承构成的传动链保证不同转速的部件互相匹配和高效传递功率，通常被置于发动机冷端的下部或侧下部。主要为发动机起动系统、滑油系统、燃油控制系统和飞机电力系统提供动力传输。

该系统由中央传动装置、发动机附件机匣和飞机附件机匣组成。中央传动装置由从发动机轴上提取功率的主动锥齿轮、从动锥齿轮、传动轴及其支承结构组成，是发动机转子承力路线的关键环节。发动机附件机匣是安装在发动机上的一个附件盒，其作用是固定和集成发动机上的各种配件，如燃油喷嘴、发电机、驱动轮和压气机等。飞机附件机匣是安装在飞机上的一个附件盒，其作用是固定和维护飞机上的各种配件，如电气、仪表、控制面和通风系统等。如图 1.1 为附件机匣结构图。



1.1 附件机匣结构图

作为飞机传动系统中不可或缺的核心组件，附件机匣对发动机的工作状态发挥着举足轻重的作用。鉴于其重要性，对航空发动机附件机匣实施可靠且高效的故障监测显得尤为重要。此举不仅有助于提升我国航空发动机的整体性能水平，还能为未来的技术发展提供有力的指导与启示。目前，航空发动机传动系统已经被公认为制约发动机技术发展的关键技术之一，也是国内外军用航空发动机故障率高发的系统。由于结构和技术方面的限制，传动系统

现有技术无法提供冗余设计，因此传动系统出现故障的后果往往是灾难性的。根据数据统计显示，自 2005 年至 2013 年，我空军某型号新型飞机在列装之后，遭遇了多达数十起的传动系统故障。这些故障不仅导致了数次空中停车的紧急状况，还引发了数起二等重大飞行事故以及飞机迫降事件。这一系列问题直接带来了高达数十亿元的经济损失，给空军的正常运作和国家的财产安全带来了严重威胁。如图 1.2 和 1.3 为发动机故障图。



图 1.2 发动机主轴承剥落



图 1.3 齿轮箱齿轮断裂

因此，针对航空发动机附件机匣开展运行机理和故障诊断研究，具有重大工程实际意义，可实现：

(1) 提高传动系统安全。通过对传动系统关键部件进行监测和诊断，能够及时发现早期故障和故障先兆，及时处理，增加飞机的安全性。

(2) 采用健康管理系统可以根据监测数据来诊断传动系统的运行状况，减少维护检查，延长定检周期。

(3) 提高传动系统可靠性。通过健康监测和故障诊断，减少无故障部件的检查，延长检查周期，从而减少维护费用。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 航空发动机附件机匣故障诊断研究现状

国外研究方面，Rodolfo^[1] below 针对喷气发动机齿轮箱驱动组件的轴承进行分析，提出滚动体上整体变形和异物痕迹导致轴承过载失效。Rao A.R.和 B.K. Dutta 在他们的研究中^[2]明确地证实了机匣振动的复杂性，其中包含着关于叶片通过频率的重要信息。这一发现为我们提供了一个全新的视角，即可以通过分析机匣的振动信号，来间接地获取叶片的通过频率。这一发现对于航空发动机的故障诊断、性能监测以及优化设计等方面都具有非常重要的意义。

在国内研究方面，郭梅等学者^[3]针对航空发动机附件机匣的结构设计方法进行了深入的

研究。他们详细分析了附件机匣内部的关键部件，如内壳体、齿轮和轴承等，揭示了这些部件在结构设计和功能实现上的特点。这一研究不仅加深了我们对于航空发动机附件机匣的理解，也为后续的改进和优化提供了重要的理论依据。通过郭梅等人的研究，我们可以更加深入地了解附件机匣内部的复杂结构和工作机制，从而更加精准地把握其振动特性和性能表现。同时，这一研究也为后续的故障诊断和性能监测提供了重要的参考，有助于提升航空发动机的可靠性和稳定性。总结各部件长期使用中出现的故障和问题，提出工程应用优化使用建议。王海霞^[4]等针对典型的发动机附件机匣振动超限情况，分析 PULSE 振动分析仪采集的振动信号，确定了附件机匣振动超限的主要原因是固有频率共振。

研究航空发动机附件机匣运行机理，构建动力学仿真模型进行齿轮和轴承故障动力学仿真，探讨附件机匣故障信号特征提取与状态监测方法，为航空发动机附件机匣运行健康管理提供重要技术手段。

1.2.2 齿轮故障动力学模型研究现状

针对动力学有限元分析这一复杂且关键的领域，国内外学者展开了深入的研究。他们致力于通过建立精确且可靠的齿轮或轴承的有限元模型，以探究不同参数条件下这些关键传动部件的动态特性。有限元模型是动力学分析中不可或缺的工具，它能够模拟齿轮或轴承在实际工作环境中的受力情况、形变特征以及振动响应等。通过构建这样的模型，学者们可以更加深入地了解齿轮或轴承在运转过程中的动态行为，从而为其优化设计、提高性能提供有力支持。在分析过程中，学者们会考虑多种参数对齿轮或轴承动态特性的影响。这些参数包括但不限于转速、载荷、润滑条件、材料属性以及结构特点等。通过改变这些参数的值，并观察和分析有限元模型在不同参数组合下的输出结果，学者们可以系统地研究这些参数对齿轮或轴承动态特性的影响规律。通过对这些数据的分析，学者们不仅能够揭示齿轮或轴承在不同条件下的动态行为特点，还能为传动系统的性能优化和故障诊断提供有益的参考。这些研究成果对于提升机械传动系统的可靠性、降低故障率以及提高整体性能具有重要意义。

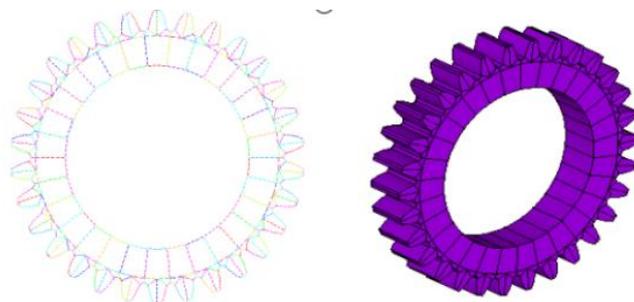


图 1.4 齿轮模型图

林腾蛟等学者^[5]充分考虑到轴的弯曲变形、轴承支撑刚度以及轮齿啮合过程中的受力变形等因素，借助先进的有限元软件 LS-DYNA 对双曲面齿轮传动系统进行了深入的计算分析。在这一过程中，他们将轴承的支反力作为振动激励加载到齿轮箱上，进一步运用零阶方法优化了齿轮箱体的参数，最终实现了性能的最优化。另一方面，童宝宏和刘颖^[6]利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件，探究了不同轴颈倾斜角对滚动轴承动态特性的影响。他们通过对比分析接触应力和变形等关键参数的变化情况，深入揭示了倾斜角对轴承动态特性的具体影响机制。而在 2014 年，Sarabjeet Singh 等人^[7]采用显式动力学有限元软件 LS-DYNA，针对带有故障的外圈轴承，构建了动态非线性二维有限元模型。由于故障的存在，该模型的接触力和噪声频率表现出异常特征。通过实验分析，他们发现当旋转至外圈故障处时，会产生明显的冲击力，这种冲击力进而会导致轴承体振动信号发生突变，为故障检测和诊断提供了重要的参考依据。对于齿轮传动的研究，忽略动力学分析是不够全面的。早在 2010 年，YiminShao 等人^[8]便采用显式动力学方法深入研究了斜齿轮的特性。他们重点关注了齿轮变位系数以及螺旋角变化对瞬态啮合性能的影响，并成功解析了主动轮和从动轮变位系数大小对有效应力值和转动角加速度值的影响，同时也探讨了螺旋角变化所带来的效应。通过仿真分析，他们证实了显式动力学方法在齿轮啮合性能研究中的重要意义，为齿轮设计与制造成本的降低做出了贡献。然而，值得注意的是，YiminShao 等人并未进一步分析具有故障特性齿轮对旋转啮合特性的影响。实际上，显式动力学方法具有模拟齿轮故障从产生到发展，直至严重状态的全过程的能力，并且能够模拟不同转速和加载条件下的各种运行状况。若能将动力学分析应用于故障齿轮的啮合特性研究，不仅能为后续实验方案提供坚实的理论指导，还能有效缩短试验周期，避免不必要的麻烦。因此，将动力学分析纳入齿轮传动的全面研究中，对于提升齿轮传动的性能和可靠性具有重要意义。图 1.5 为齿轮裂纹图。

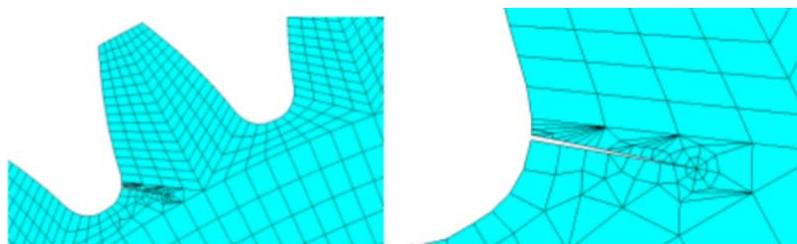


图 1.5 齿轮裂纹图

1.2.3 滚动轴承故障动力学模型研究现状

尽管我国在轴承动力学分析及高速轴承计算机辅助分析方面的研究起步较晚，但洛阳轴

承研究所、沈阳航空发动机研究所及国内多所高校等研究机构已对此给予了充分的关注与重视。经过半个多世纪的坚持不懈的发展与努力，我国现已成功构建出一套相对健全且完善的生产与技术体系。然而，目前我国在滚动轴承动力学仿真分析^[9-11]方面仍处在初步探索阶段，滚动轴承设计水平相较于国外还存在显著差距。但值得欣慰的是，众多学者正积极投身于轴承动力学的研究中，我国在轴承仿真技术领域也取得了一系列令人瞩目的成果。

洛阳轴承研究所的李媛媛及其团队，成功地构建了一个油润滑球轴承的拟动力学分析模型。此外，他们还运用 VB 语言精心开发了一套专用的分析程序。这套程序的主要功能在于精确计算轴承的变形量、刚度以及使用寿命等关键参数，为轴承的性能评估和优化设计提供了有力的工具支持。唐云冰对滚动轴承的载荷分布问题进行了深入的研究。他成功构建了相应的分析模型，并巧妙地结合了有限元法和拟动力学法，对高速滚动轴承的载荷分布进行了全面且精细的研究，进一步丰富了滚动轴承的设计理论与应用实践。唐云冰在研究中，还基于赫兹理论及滚动轴承的运动学关系，深入探讨了滚动轴承系统所呈现出的非线性振动问题，为进一步提高轴承系统的稳定性与可靠性提供了有力的理论支持。丁长安在球轴承的研究领域取得了显著的成果。他深入探讨了球轴承的拟动力学模型，并对其工作特性进行了全面分析。此外，他还对套圈控制理论进行了系统研究，并深入研究了载荷分布特性，为球轴承的设计和优化提供了重要的理论依据。然而，值得注意的是，由于拟动力学方法在滚动轴承的研究中往往局限于有限的自由度，无法充分揭示滚动体与套圈滚道接触的动态演变过程，其计算所得的结果往往难以全面真实地反映滚动轴承在实际复杂工作环境下的实际表现。

随着 ANSYS/LS-DYNA 仿真软件的持续发展与优化，其仿真过程的简化及结果的高可靠性使得利用该软件对滚动轴承进行显式动力学仿真逐步成为了一种主流的仿真手段。这种仿真方法不仅能够深入探究轴承零件之间的运动学关系，还能准确反映载荷分布的实际情况，为滚动轴承的性能分析与优化设计提供了强有力的支持^[12]。

在国外滚动轴承力学模型很早就被开始研究。在早期阶段，人们主要依据简化的力学原理以及理想的运动状态来深入分析和明确轴承所承受的载荷以及其运动条件。然而，伴随着技术的飞速发展和理论体系的日益完善，滚动轴承的分析方法也历经了一场由静力学向动力学的深刻蜕变。这一演变历程大致可划分为四个标志性阶段：初始的静力学分析、后续的拟静力学探讨、进一步的拟动力学研究，以及最终的动力学分析阶段。其中，在静力学^[13]领

域，Lundberg 和 Palmgren 两位学者做出了杰出的贡献。他们构建了一套理论，旨在预测滚动轴承在法向载荷作用下接触点处的压力分布情况。然而，这种基于静力学的分析方法存在一定的局限性，因为它未能全面考量轴承在实际工作过程中所受到的摩擦力、惯性力以及润滑等复杂因素的综合影响。为了弥补这些不足，随后出现了拟静力学分析方法，旨在改进和完善对滚动轴承的分析。其中，Jones A B^[14-15]是这一领域的代表人物。他提出了著名的“沟道控制”理论，该理论基于一个假设，即滚动体在轴承套圈滚道中仅发生纯粹的滚动运动，而忽略了在滚道内的滑动和可能的不对称性。这种分析方法有效地结合了赫兹接触理论与轴承套圈控制理论，并充分考虑了钢球在运动过程中所产生的离心力和陀螺力矩，从而提供了一种更加全面且深入的分析视角。然而，尽管拟静力学方法在一定程度上提高了分析的准确性，但它仍未充分考虑润滑剂的作用，因此无法准确预测轴承内部的滑动现象。总的来说，国外对滚动轴承力学模型的研究经历了从简单到复杂、从理想到实际的过程。随着技术的不断进步和理论的深入发展，我们有望在未来更加准确地预测和优化滚动轴承的性能。

随后，Harris T A^[16-18]在 Jones AB 的“沟道控制”理论基础上进行了进一步的拓展，他在模型中增加了对润滑油影响的考量，这标志着滚动轴承的研究步入了第三个阶段——拟动力学阶段。不久之后，Poplawski J V^[19]在 1972 年对 Harris T A 的方法进行了改进，使得考虑的因素更加全面和细致。

在此之后，Waters C T、Gupta PK 等人又针对滚动轴承的动力学分析发表了一系列文章^[20-21]，他们新的动力学方法分析中弥补了之前一些理论的不足，更加深入地考虑了轴承速度变化以及惯性力对轴承性能的影响。这些深入探索不仅显著促进了滚动轴承动力学分析理论的不断演进与完善，更在实质上为滚动轴承在实际工程应用中的精确设计和可靠运行提供了坚实的理论支撑和科学的指导。图 1.6 为滚动轴承故障设置图。

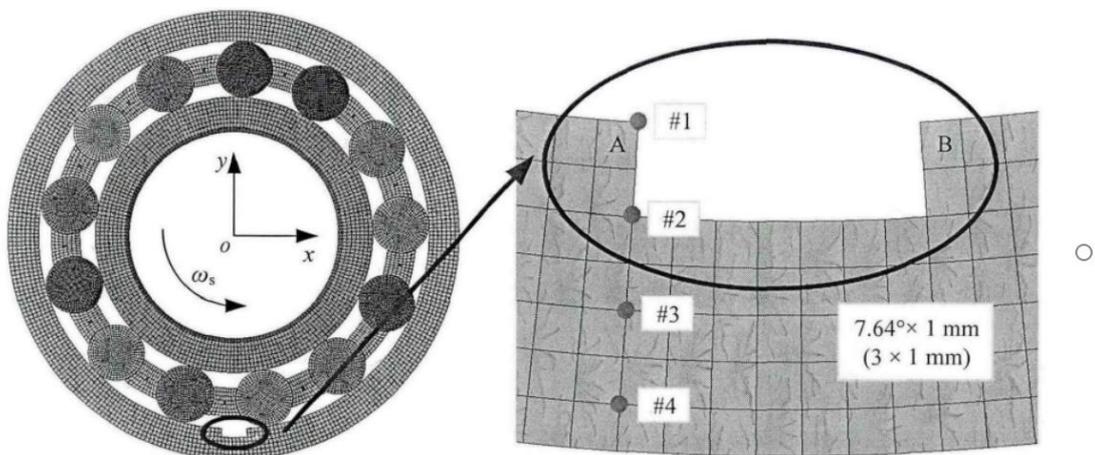


图 1.6 滚动轴承故障设置图

1.3 问题提出

（1）直接针对实际的航空发动机附件机匣故障特征提取的研究较少，国内外文献鲜有报道；

（2）航空发动机附件机匣包含了大量错综复杂的传动链，其包含故障信息的振动信号受传递路径影响很大，干扰成分众多，因此，大多数单一的诊断方法很难有效地解决附件机匣故障特征提取问题。

（3）针对含齿轮和轴承耦合故障的齿轮箱复杂信号特征提取研究较少，由于齿轮箱中齿轮啮合振动强于轴承振动，所以轴承的故障特征信息会淹没在齿轮的故障特征信息中而难以提取。

1.4 论文的主要工作

针对目前国内外相关文献的研究不足，本文将从以下几方面进行深入研究：

（1）建立含故障的齿轮三维实体有限元模型及故障特征分析；

用 CATIA 建立齿轮故障模型后导入 ANSYS 中，网格划分、设置参数和设置条件后运行仿真得到结果并进行验证，分析故障模型和正常模型的差异性。

（2）建立含故障的滚动轴承三维实体有限元模型及故障特征分析

用 CATIA 建立滚动轴承故障模型后导入 ANSYS 中，网格划分、设置参数和设置条件后运行仿真结果并进行验证，分析故障模型和正常模型的差异性。

（3）方法验证

为了验证所提新方法的有效性，本文首先基于齿轮和轴承的耦合故障仿真信号、国际上公开的齿轮和滚动轴承数据集对新方法进行验证，然后，基于某真实航空发动机附件机匣滚动轴承预置故障试验数据进行方法验证，以表明本文方法对实际发动机附件机匣滚动轴承故障诊断的有效性，图 1.7 为本文的结构框架。

航空发动机附件机匣故障动力学仿真及特征提取

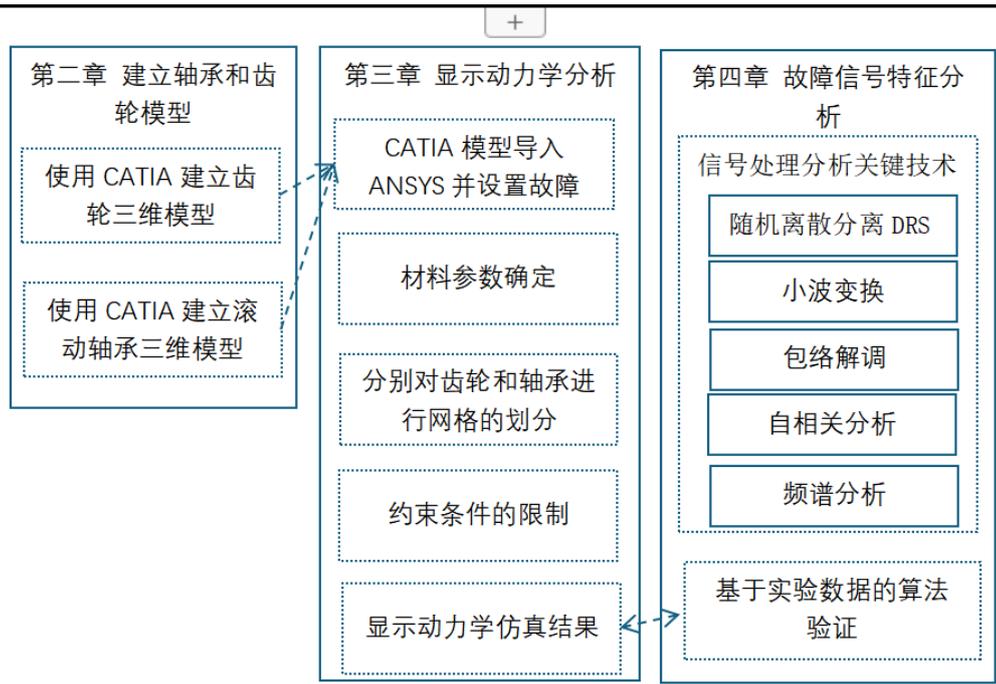


图 1.7 论文结构框架

第二章 建立齿轮和滚动轴承模型

通过熟练运用 CATIA 软件，我们精心绘制出了精确的齿轮和滚动轴承的模型。这一步骤不仅体现了我们对于细节的严格把控，更彰显了我们在三维建模技术方面的专业素养。在绘制过程中，我们充分考虑了齿轮的齿形、齿数、模数等关键参数，以及滚动轴承的内外圈尺寸、滚动体排列方式等细节，确保了模型的准确性和可靠性。而这一系列精确的模型，正是我们后续建立 ANSYS 显示动力学有限元建模的基础。

2.1 齿轮的故障类型和建模

2.1.1 齿轮的结构

齿轮是一种常见的机械零件，是齿轮箱重要的部件之一，可以相互啮合轮齿传递运动和动力，在机械传动上应用很多。齿轮的基本结构如图 2.1。

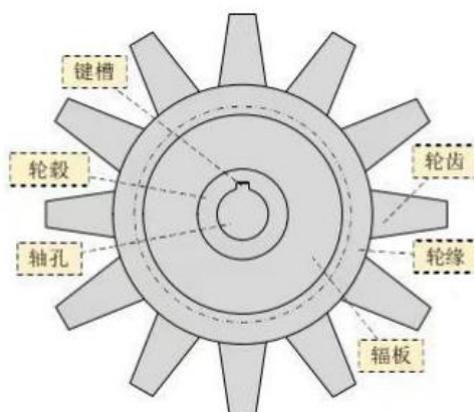


图 2.1 齿轮结构图

- (1) 轮毂：齿轮轮毂是齿轮的主体部分，通常由圆盘状或圆柱状的轮毂组成。轮毂的外径为齿轮的分度圆直径，内孔则是用于连接轴的，轴孔通常是一个圆孔或者一个齿芯孔。
- (2) 轮齿：轮齿是齿轮的关键部分，它们位于齿轮轮毂上，用于传递扭矩和转动。齿轮齿通常呈现齿形，齿形有直齿和斜齿两种类型，其形状和参数受齿轮的模数、压力角等因素的影响。
- (3) 轴孔：安装齿轮传动轴的部分。

- (4) 键槽：在齿轮轴上开设的一个槽，用于安装键来防止齿轮在轴上滑动或旋转不准。
- (5) 轮缘：指齿轮圆周上与齿相接触的部分，它是齿轮传动中最重要的部分之一。
- (6) 辐板：是轮缘和轮毂相接的部分。

2.1.2 齿轮故障种类

齿轮在运行过程中，齿轮发生故障是不可避免的，常见的齿轮故障种类包括以下几个方面如图 2.2 所示。

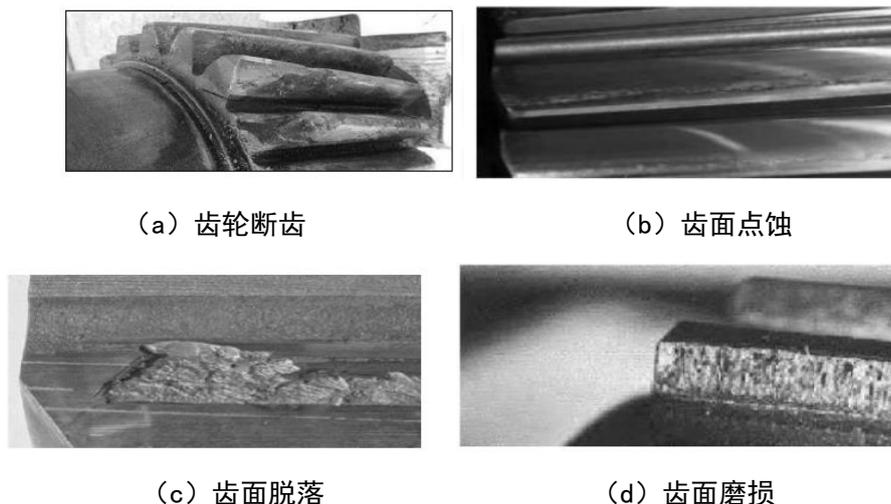


图 2.2 齿轮故障种类

(1) 齿轮断齿：齿轮齿面出现断裂或者缺失。当齿轮传动系统的负荷超过其额定值时，会导致齿轮齿面受到过大的载荷，又或齿轮在长期使用过程中，由于反复载荷的作用，会导致齿面疲劳开裂，最终形成断齿故障。

(2) 齿面点蚀：在齿轮齿面出现局部点状蚀痕。齿轮传动中，润滑油的质量和和使用状况直接影响齿轮的寿命。如果润滑油不合格或使用不当，会导致齿轮齿面摩擦系数升高，从而引起齿面点蚀。或者在恶劣的工作环境中，如高温、高湿、酸碱等环境中，齿轮齿面容易发生腐蚀和氧化，导致齿面点蚀故障。

(3) 齿面剥落：当点蚀的凹坑尺寸增大连成片状，齿面会出现局部剥落或者剥离的现象。

(4) 齿面磨损：在运行过程中，齿轮接触的部位传递力矩和长期磨擦，就一定会有磨损的现象出现。

2.1.3 运用 CATIA 建立齿轮模型

CATIA 作为一款功能强大的 CAD/CAM/CAE 一体化软件，广泛应用于各种产品设计、制造和分析领域。在机械设计中，齿轮作为重要的传动元件，其绘制精度和效率对于整个设

计流程至关重要。下面将详细介绍如何使用 CATIA 绘图软件进行参数化绘制齿轮模型。

（1）准备工作

确保已经安装了 CATIA 软件。准备好齿轮的相关参数，如模数、齿数、压力角等，以便在绘制过程中进行设定。

（2）设定参数

设置好如图 2.3 的一系列参数。

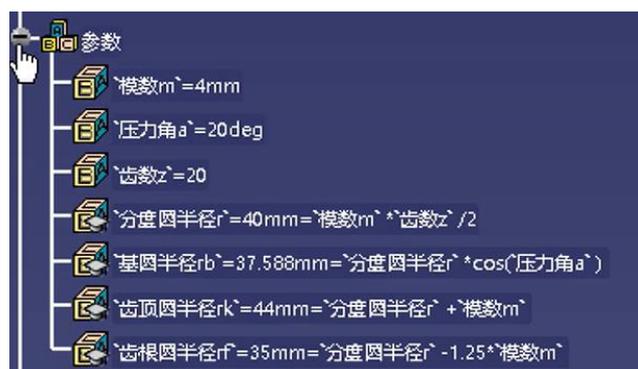
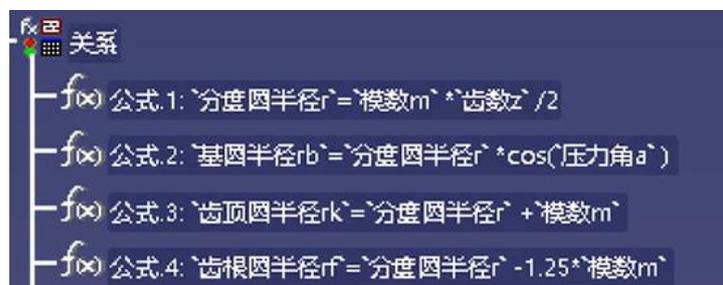


图 2.3 齿轮绘制的参数设置

（3）定义渐开线的方程

设置好以下的一些列渐开线方程，如 2.4。



2.4 齿轮绘制的渐开线方程

（4）绘制三个基准圆

绘制出三个同心的圆形，作为后续画图的基准圆，如图 2.5 所示。

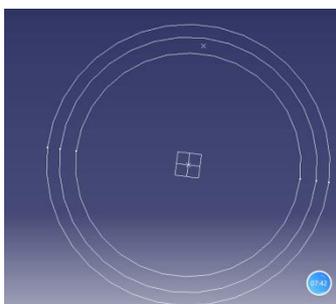


图 2.5 齿轮绘制的三个基准圆

(5) 绘制渐开线图形

在三个基准圆的基础上，根据渐开线方程绘制一个齿的轮廓外形，如图 2.6。

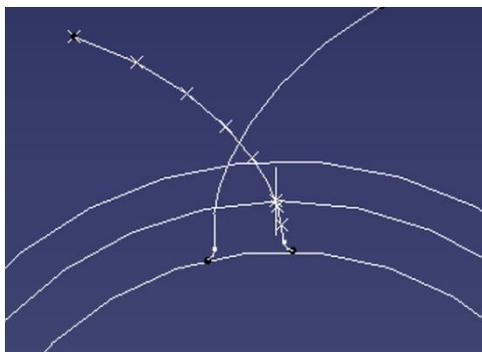


图 2.6 绘制齿轮的渐开线图形

(6) 用圆形矩阵得到所有齿

剪裁掉多余的线段，用圆形矩阵得到多个齿，如图 2.7。

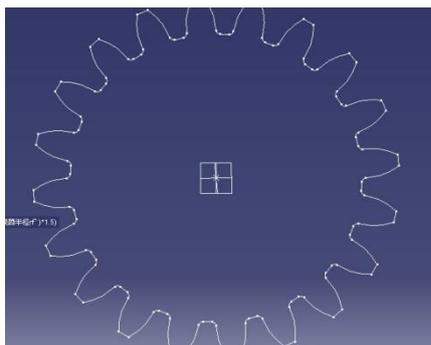


图 2.7 齿轮的平面图。

(7) 拉伸得到齿轮模型

将齿轮的平面图拉伸得到一个三维的齿轮模型，如图 2.8 所示。

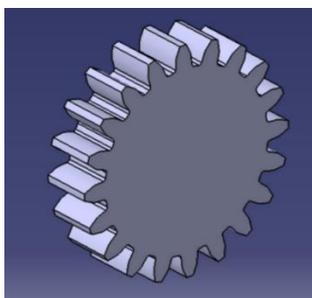


图 2.8 CATIA 绘制的齿轮模型

2.2 滚动轴承的故障类型和建模

2.2.1 滚动轴承的基本结构

滚动轴承是一种常见的机械零件，用于支撑旋转轴和承受轴向负载。滚动轴承的基本结构如图 2.4 所示。

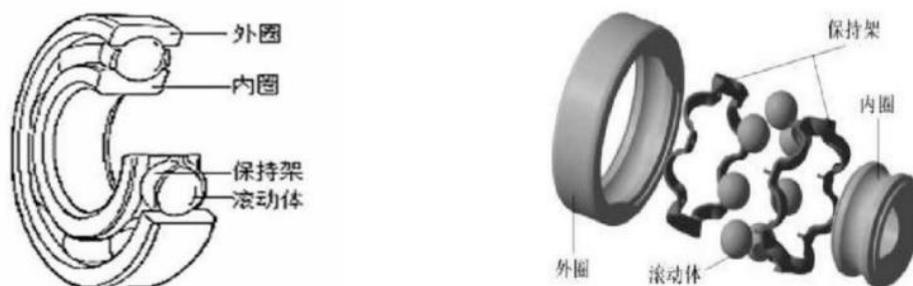


图 2.4 滚动轴承结构图

(1) 内圈：通常安装在轴上，与轴紧密配合，同时通过滚动体与外圈一起支撑轴承。

(2) 外圈：通常安装在轴承座或者支撑机械部件壳体，主要防止轴承在工作中移动或者旋转。

(3) 滚动体：滚动轴承的核心组件当属滚动体，正因其存在，相对运动表面间得以实现滚动摩擦，进而确保轴承的正常运作与高效性能。

(4) 保持架：用于支撑滚动体并使其保持一定的间隔和相对位置，同时防止滚动体脱离轴承的主要部件。

2.2.2 滚动轴承的故障种类

滚动轴承是一种常用的机械传动装置，由内圈、外圈和滚动体组成，用于支撑和传递旋转运动。常见的滚动轴承的故障种类包括疲劳损伤、磨损损伤、腐蚀损伤、划伤、点蚀、塑性变形等。

(1) 疲劳损伤：长期重复受力会导致滚动体和轴承环的疲劳损伤，表现为滚动体和轴承环表面的疲劳裂纹和磨损。这种故障通常由于过载、振动和润滑不良等原因引起。

(2) 过度磨损损伤：滚动轴承在运行过程中由于接触力和摩擦力作用会导致表面磨损，表现为滚动体和轴承环表面的磨损和凹坑等。这种故障通常由于润滑不良、灰尘等污染物质和不适当的安装等原因引起。

(3) 锈蚀损伤：滚动轴承的内部和外部表面可能由于锈蚀而受损，这种故障通常由于

在高湿度和高温度环境中、或者在存在腐蚀性液体和气体的环境中工作时发生。

(4) 划伤：由于使用不当、润滑不良、杂质或异物进入轴承等会导致在轴承表面形成划痕或凹痕。破坏轴承表面的光滑度和尺寸精度，从而影响轴承的摩擦和转动性能。故障轴承如 2.5 图所示。



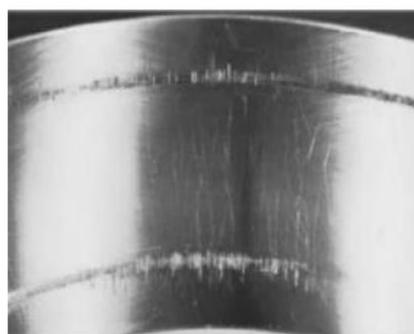
(a) 轴承的疲劳损伤



(b) 轴承表面的过度磨损



(c) 轴承的锈蚀



(d) 轴承的划伤

图 2.5 轴承的故障类型

2.2.3 运用 CATIA 建立滚动轴承模型

首先，打开 CATIA 软件并进入零部件设计模块。在此模块中，我们可以进行各种零部件的精确设计。选择 XY 平面作为工作平面，开始绘制轴承的内圈。内圈通常由两个同心圆构成，需要根据实际轴承的尺寸确定其直径。完成同心圆的绘制后，使用拉伸实体的功能，将内圈的高度设置为所需的 20mm。

接下来，退出内圈的绘制，并切换到 YZ 平面进行草图绘制。在 YZ 平面上，我们可以绘制滚动轴承的其他关键部件，如滚珠和固定环。滚珠的绘制需要确保其与内圈的配合精度，以实现轴承的顺畅运转。固定环的绘制则需要注意其尺寸和位置，以确保滚珠的固定和稳定。

完成滚珠和固定环的绘制后，我们需要进行轴承外圈的创建。外圈是滚动轴承的重要组成部分，其尺寸和形状需要根据实际需要进行精确设计。在外圈的绘制过程中，需要特别注

意其与内圈、滚珠和固定环之间的配合关系，确保整个轴承结构的稳定性和可靠性。

最后，完成轴承所有部件的绘制后，我们需要对整个模型进行细致的检查和调整。这包括检查各部件之间的配合关系、模型的尺寸精度和整体结构的稳定性等。最后得到滚动轴承如 2.6 图。

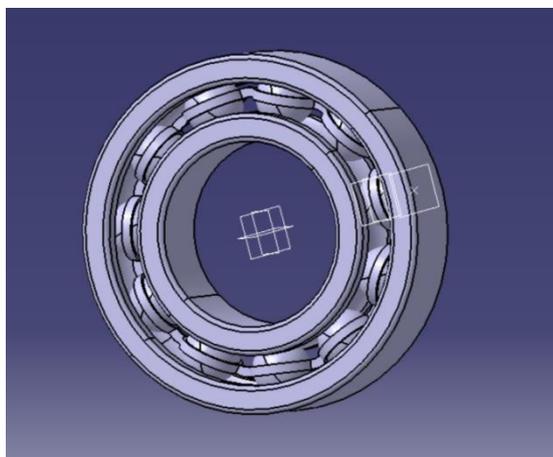


图 2.6 CATIA 绘制的滚动轴承模型

2.3 本章小结

本章介绍了齿轮和轴承的基本构造，以及齿轮和轴承经常发生的故障种类，分析了故障产生的原因；最后构建了齿轮和滚动轴承的三维模型，为下一步有限元分析打下了基础。

第三章 齿轮和轴承显示动力学分析

在成功导入 CATIA 三维模型后，紧接着对齿轮和滚动轴承进行了细致的故障点设置。这一步骤至关重要；紧接着，我们为这些模型设置了精确的材料参数。这些参数包括弹性模量、泊松比、密度等；随后，我们进行了网格划分。这是一个复杂且精细的过程，需要考虑到模型的几何特征、分析需求以及计算资源等多个因素。边界条件的设置也是有限元分析中的一个关键环节。我们根据齿轮和滚动轴承在实际运行中的约束情况和受力情况，合理设置了位移约束、载荷施加等边界条件，以模拟真实的工程环境。

在完成以上所有设置后，我们运行了 ANSYS 软件进行了显示动力学分析。分析过程中，软件会根据我们设置的参数和边界条件，计算出齿轮和滚动轴承在模拟故障点下的动力学响应和应力分布等结果。

3.1 ANSYS LS-DYNA 显示动力学简介

1976 年，美国著名工程师 Jone Hallquist 成功研发出 DYNA 程序，这一程序因其卓越的性能和广泛的适用性迅速获得业界的广泛认可和应用。DYNA 程序的诞生为后续的现实求解程序奠定了坚实的基础，开启了动力学仿真分析的新篇章。

十年后，即 1988 年，J.O. Hallquist 创建了 LSTC 公司，并推出了 LS-DYNA 程序系列。这一程序系列以其精确、高效的分析能力，迅速成为动力学分析领域的翘楚。随后，在 1997 年，LS-DYNA 程序进一步升级，发展成为一个综合软件包，整合了 LS-DYNA 与 LS-TOPAZ 的二维和三维分析功能，使得 LS-DYNA 软件在功能方面更加全面，能够满足更多复杂场景下的动力学分析需求。

随着技术的不断进步和市场需求的日益增长，LSTC 公司继续与业界领先企业 ANSYS 展开深度合作。他们共同开发出了 ANSYS/LS-DYNA 软件，这一软件进一步提升了 LS-DYNA 的分析能力，使其在动力学仿真领域具备了更强的竞争力。此外，ANSYS/LS-DYNA 的后处理软件也具备操作便捷的特点，用户可以轻松调用 LS-DYNA 的结果文件 D3PLOT，从而快速分析计算结果。

通过 LS-POST 这一便捷的后处理工具，用户不仅能够快速获取计算结果，还能直观地展示软件的仿真效果。这使得 LS-DYNA 软件在动力学仿真领域的应用更加广泛，为用户提供了更加准确、高效的仿真分析体验。

3.2 有限元模型的分析

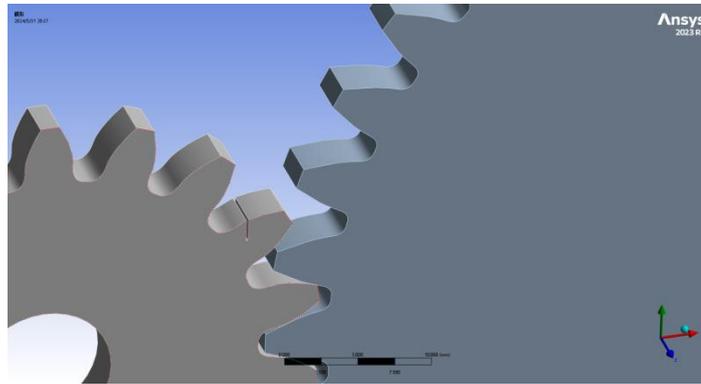
3.2.1 建立故障的齿轮有限元模型

将 CATIA 软件中建立的齿轮模型导入到 ANSYS 中，再将模型进行测量得到如图表 3.1 所示结果。

表 3.1 齿轮参数表

	齿数 N	齿厚 d/mm
大齿轮	40	3
小齿轮	18	3

在小齿轮上设置一条 0.2mm 的裂缝，如图 3.2



3.2 故障齿轮的几何模型

3.2.2 建立故障的滚动轴承有限元模型

以深沟球轴承 6203 为例，其结构尺寸如表 3.1 所示

表 3.3 6203 轴承参数

内径	外径	轴承宽	球径	钢球数
d/mm	D/mm	B/mm	r/mm	z
17	40	12	3.37	8

在滚动轴承运动特性的仿真过程中，我们采取了一系列的基本设定来精准地模拟其运动状态。具体设定如下：

(1) 鉴于轴承的倒角和边棱对其内部应力分布的影响微乎其微，我们决定在构建实体

模型时忽略这些细微特征，从而简化模型结构，提高仿真效率。

(2) 在模拟过程中，我们并未将轴向间隙和油膜效应纳入考虑范围。这一选择是为了更加聚焦于滚动轴承本身的运动特性，避免其他因素对仿真结果造成干扰。

(3) 考虑到滚动轴承在实际运行中塑性变形极小，我们假定轴承滚动体和外圈材料均表现为线性弹性，以简化材料性质的分析。同时，为了大幅减少计算机的计算负担，我们进一步将内圈和保持架设定为刚性体。滚动轴承通常由外圈、内圈和保持架三大部分组成，我们根据这些部件的几何关系构建了精确的几何模型。

在一般的工作条件下，轴承外圈往往固定安装在轴承座或箱体中，因此我们在仿真过程中将其设定为固定状态。轴承内圈的滚道与滚动体紧密配合，同时其内径与轴颈相配合，共同实现了轴向力的传递和速度的传递。滚动体作为内外圈之间的连接纽带，其建模过程基于轴承的几何学关系，特别是滚道与钢球之间的接触关系，我们在建模时进行了精确的处理，以确保仿真结果的准确性。

通过这些基本设定的引入，我们能够更加精确地模拟滚动轴承的运动特性，为后续的仿真分析和优化设计提供有力支持。轴承的内外圈通过滚动体接触，基于轴承的几何学关系，其滚道和钢球的建模关系如下：

$$f = \frac{r}{D_w} \quad (3-1)$$

滚动体，作为轴承中的核心组件，承载着至关重要的角色。轴承在特定工作状态下所承受的载荷分布以及应力状态等关键因素，均与滚动体紧密相连，密不可分。滚动体的性能直接影响到轴承的整体工作表现。

而保持架则发挥着将滚动体紧密连接并维持其稳定间隔的关键作用。不仅如此，保持架还负责引导滚动体的运动，有效减少摩擦，进而提升润滑效率，确保轴承能够更加顺畅地运转。可以说，保持架的存在是轴承工作稳定性和耐用性的重要保障。

在完整的滚动轴承模型上的外滚道加上一个 0.2mm 的裂纹，如图 3.2。



图 3.4 故障滚动轴承的几何模型

3.3 材料参数的确定

3.3.1 齿轮参数的确定

在 ANSYS/LS-DYNA 中，对所建齿轮模型进行了材料设定。因为齿轮的简单性，在设置材料时就用了正常金属部件的结构钢，其材料参数如表 3.3 中所示。

表 3.5 齿轮材料参数表

密度	各向同性热导率	比热恒压
kgm^{-3}	$\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$	$\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$
7850	60.5	434

3.3.2 滚动轴承参数的确定

在 ANSYS/LS-DYNA 软件中，对 6203 深沟轴承进行了材料设定。滚动体采用 GCr15 轴承钢，确保仿真性能与实际相符。保持架材料选用冷轧钢板，具备良好刚性与稳定性。考虑弹性形变，采用各向同性线性弹性材料模型，简化模拟过程，准确反映轴承力学行为。综上，精心设置材料属性可提升 6203 轴承仿真准确性。相关参数如 3.3 图表：

表 3.6 材料参数表

部件名称	密度 $\rho / (\text{kg} / \text{mm}^3)$	弹性模量 E / Gpa	泊松比 μ
内外圈	7.83×10^{-6}	206	0.3
滚动体	7.83×10^{-6}	206	0.3
保持架	7.83×10^{-6}	196	0.24

3.4 有限元网格划分

3.4.1 齿轮的有限元网格划分

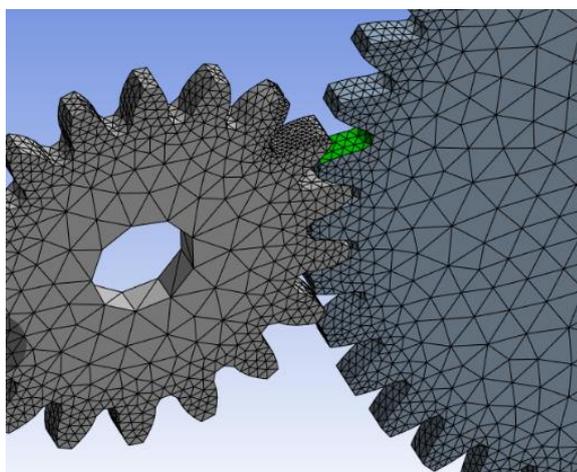
模型的网格划分密度对有限元计算结果的精度具有显著影响，因此在进行求解之前，对网格密度的测试至关重要。初始阶段，我们采用特定的网格密度进行计算，随后使用两倍于此密度的网格再次进行计算。若两次计算结果存在明显差异，则表明需要进一步优化网格划分；若两次结果差异不大，则可认定该网格密度是合适的，并可予以采用。

值得注意的是，单个积分点的实体单元容易产生零能模式。在积分过程中，某些位移模态由于缺乏对应变能的抵抗力，可能导致计算无法进行。这种情况下，结果图会呈现出类似

沙漏的外形，此类结果是无效的，必须尽量避免或减小。为了提升计算的有效性和准确性，我们需要合理设置积分点的数量与分布，确保模型的稳定性和可靠性。通过以下几种方法去减少：

- (1) 采用全积分单元。
- (2) 网格尽量均与细化
- (3) 采用节点组元受载

将上述三种方法相结合后，设置为 1mm 的网格，在齿轮裂纹处设置为 0.5mm 的网格，到如 3.7 图的网格划分。



3.7 故障齿轮的网格划分

3.4.2 滚动轴承的有限元网格划分

适用于上文所讲的有限元网格划分的方法，将滚动轴承的内外滚道和滚动体设置为 0.35mm 的网格，保持架为自动设置，得到如下图 3.8。

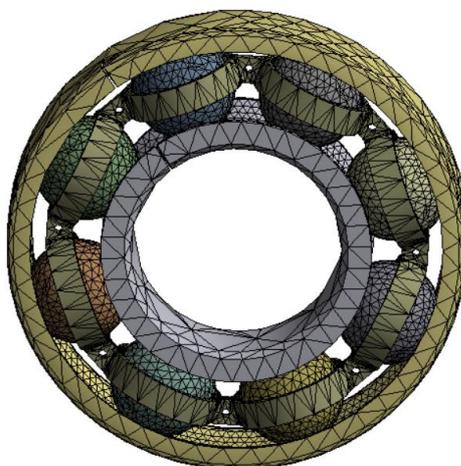


图 3.8 故障滚动轴承的网格划分

3.5 边界条件设置

3.5.1 齿轮的边界条件设置

在齿轮运动时，需要设置小齿轮为主转轮，大齿轮为从动轮。给定小齿轮转动 200° ，大齿轮相应的转动 87.5° ，会正好经过故障点，以便得到相应的仿真结果。

3.5.2 滚动轴承的边界条件设置

在滚动轴承运动时，外圈端面和内圈都受不同的约束条件，根据滚动轴承的工作条件，采用下面的约束条件：

(1) 为了模拟轴承装配的真实情况，我们必须对内圈与外圈的所有结点，在左右两侧实施轴向自由度的约束。这样的操作将有助于我们更准确地模拟轴承在实际装配过程中的力学行为。

(2) 为了模拟轴承座对轴承性能的影响，我们需要在仿真中对外圈上的所有节点在 x 、 y 、 z 三条轴线上的自由度进行约束。这样，我们可以更加贴近实际地分析轴承在装配和运行过程中，轴承座对其工作状态的影响。在滚动轴承中，存在三种接触形式：单面接触、点到面接触、面到面接触。

在单面接触中，程序会自动判断出接触面；点到面的接触模式则需要定义目标和接触面；面到面接触只发生在一个物体表面和另一个物体表面发生穿透时，也是最常用的一种接触类型。

在建立接触时，把内外圈定义为目标体，滚珠为接触体，鉴于所接触的区域在事前无法准确估计，我们需借助三维自动的面到面接触类型来进行处理。这种接触类型能够自动适应不同的接触区域，从而提高模拟的准确性和可靠性，确保我们能够更真实地模拟实际情况下的接触行为。并且设置其静摩擦系数 f_s 和动摩擦系数 f_D 如 3.9 表^[22-25]。

图 3.9 摩擦系数表

	内圈外表面	外圈内表面	保持架孔
滚动体	$f_s = 0.1$	$f_s = 0.1$	$f_s = 0.002$
滚动体	$f_D = 0.05$	$f_D = 0.05$	$f_D = 0.001$

3.6 齿轮和滚动轴承的显示动力学仿真结果

3.6.1 齿轮的显示动力学仿真结果

在齿轮的工作过程中，为了有效控制并呈现模拟结果，我们还将对输出结果的参数进行设置。具体来说，选择 ANSYS 和 LS-DYNA 作为输出结果的类型，以确保分析结果能够适用于 ANSYS 的 RST 文件格式。通过这样的设置，我们可以更加准确、高效地研究轴承在径向载荷和转速作用下的性能表现。图 3.10 为齿轮等效应力图。

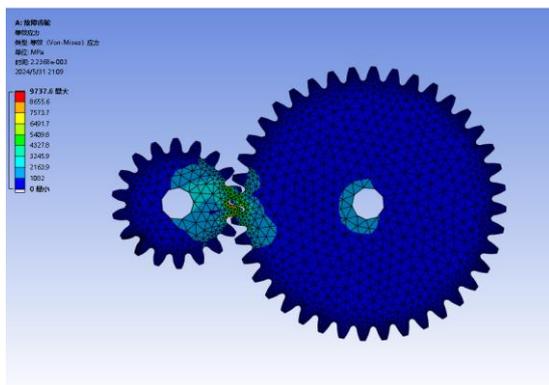


图 3.10 齿轮的等效应力图

图 3.11 为齿轮的探针信号图，可以看到在 0.0025s 时可以看到明显的振动加速度峰值，这可以说明使用 ANSYS/LS-DYNA 软件可以得到故障信号显示。

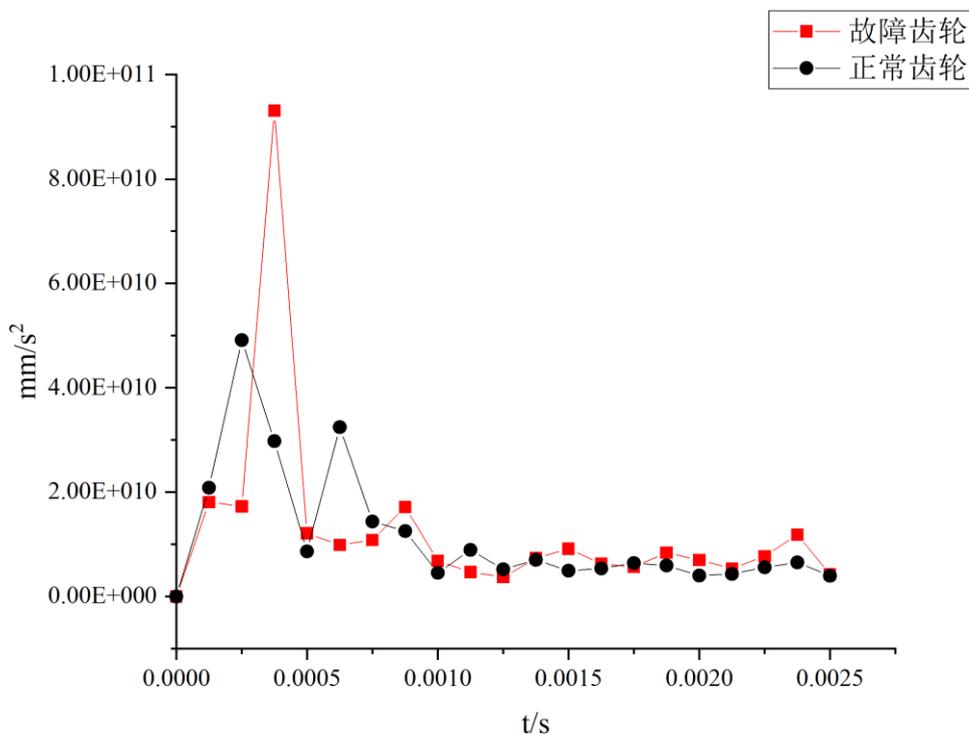


图 3.11 齿轮的探针信号图

3.6.2 滚动轴承显示动力学仿真结果

在轴承的工作过程中，同样为了有效控制并呈现模拟结果，我们还将对输出结果的参数进行设置。具体来说，选择 ANSYS 和 LS-DYNA 作为输出结果的类型，以确保分析结果能够适用于 ANSYS 的 RST 文件格式。通过这样的设置，我们可以更加准确、高效地研究轴承在径向载荷和转速作用下的性能表现。如图 3.12、3.13、3.14，为轴承等效力图。

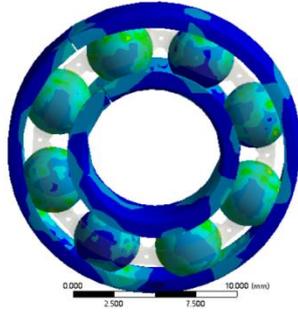


图 3.12 轴承的等效力图

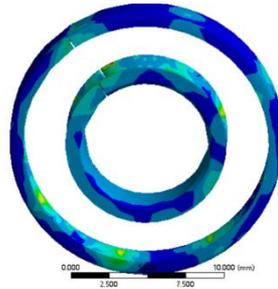


图 3.13 内外滚道等效力图

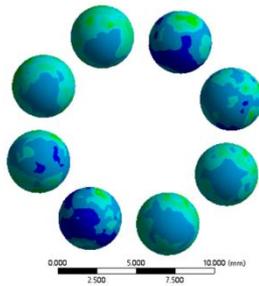


图 3.14 滚珠等效力图

外圈的加速度探针结果如图 3.15 所示。两次谱峰之间的时间间隔 T ，

$$T = \frac{1}{f} \quad (3-2)$$

f 的计算公式如下：

$$f = \frac{abs(N2)}{60} \times \left(Z \times 0.5 \times \left(1 - \frac{Db}{D} \right) \times COS(al) \right) \quad (3-3)$$

其中 Db 为滚动体直径， D 为轴承节径， Z 为滚动体个数， al 为接触角，带入具体数据计算出 $f=125\text{ Hz}$ ，所以周期 $T=0.008\text{ s}$ 。这与轴承所设置的转速 2700 rpm 所对应的时间及频率的倒数近乎相同，所以可以认为利用 ANSYS 显示动力学仿真所获取故障信号是正确的。

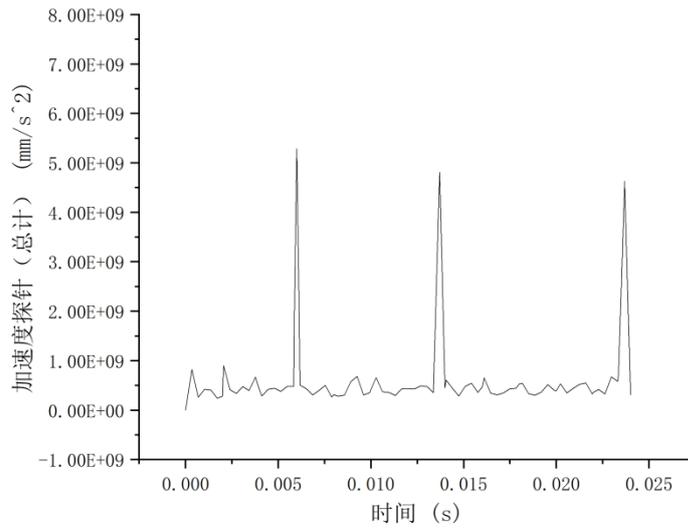


图 3.15 滚动轴承探针信号图

3.7 本章小结

经过一系列严谨的验证，我们确信：基于 ANSYS/LS-DYNA 的深沟球轴承动力学仿真方法，不仅高效，而且极具可操作性。此方法具备精准模拟深沟球轴承在实际工况下载荷分布及复杂几何运动学特性的能力，与实际情况表现出高度吻合。基于此，我们完全可以信赖 ANSYS/LS-DYNA 软件来开展深沟球轴承的多体接触动力学特性仿真分析，确保分析结果的可靠性与有效性。

第四章 附件机匣故障信号特征分析

将现有的实验数据的原始信号通过相关的信号处理技术进行处理，是提取准确的故障信号频谱的关键步骤。通过 DRS（离散随机分离）解耦合，从被测信号中分离出齿轮信号和轴承型号；接着运用小波变换将一个信号分解为一系列小波函数的叠加；再通过包络解调对高频处的调制信号进行解调；然后通过自相关分析识别信号中的周期性成分、趋势变化以及随机噪声等特性；最后通过包络谱特征来实现发动机附件机匣振动信号的故障诊断。

4.1 信号处理分析关键技术

随着现代科学技术的迅猛发展，信号处理分析技术已成为许多领域不可或缺的关键手段。无论是通信领域的信号传输、图像处理领域的细节增强，还是机械故障诊断中的异常检测，信号处理分析技术都发挥着至关重要的作用。其中，小波变换、包络解调、自相关分析以及频谱分析等技术方法更是被誉为信号处理的四大金刚，它们在处理复杂多变的信号时展现出强大的能力。

经过图 4.1 的步骤对信号进行分析。

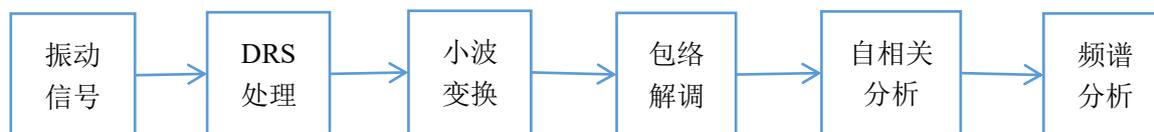


图 4.1 故障特征分析流程图

4.1.1 随机离散分离 DRS 的方法

离散随机分离（Discrete Random Separation, DRS）^[28]在信号处理领域，为了有效地提取并区分各种复杂的信号成分，我们通常依赖于一些精细的技术和方法。其中，获取主振动与延迟振动序列之间的频率响应函数是一个关键步骤。这一步骤不仅有助于我们深入理解信号的特性，还能为后续的信号处理提供有力支持。频率响应函数的获取是通过一系列精密的测量和分析来实现的。一旦我们得到了这个函数，就可以进一步对其进行逆傅里叶变换。逆傅里叶变换是一种强大的数学工具，它能够将频域的信息转换回时域，从而让我们能够在时间维度上更直观地观察和分析信号。接下来，基于逆傅里叶变换的结果，我们可以构建一个自适应噪声消除滤波器。这种滤波器具有高度的灵活性和适应性，能够根据信号的特性自动调整其滤波参数，从而有效地消除噪声干扰，提升信号的质量。我们利用这种自适应噪声消除滤波器作为信号分离的主要方法。具体而言，我们将原始信号分解成多个子带，每个子带对

应一个特定的频率范围。通过对每个子带进行独立处理，我们可以更加精确地控制和处理每个子带中的信号成分。通过这种方式，我们能够实现信号的有效分离。这不仅有助于我们提取出感兴趣的信号成分，还能进一步分析和理解信号的内在结构和特性。因此，本文所提出的方法在信号处理领域具有重要的应用价值和潜力。其原理如下：

设原始震动序列 $x(n)$ ，将 $x(n)$ 在第 k 个周期处利用长度为 L 的窗函数 $w_L(n)$ 进行加窗截取获得主震动序列 $x_k(n)$ ，可以用以下公式表达：

$$x_k(n) = x(n + kT - L - \tau)w_N(n) \quad (4-12)$$

相同的，延迟震动序列 $x_k^d(n)$ 是 $w_N(N)$ 在第 k 个周期和时间延迟因子 τ 处截断的震动序列：

$$x_k^d(n) = x(n + kT - L - \tau)w_N(n) \quad (4-13)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1$$

其中的主动序列和延迟序列的构造方式如图。

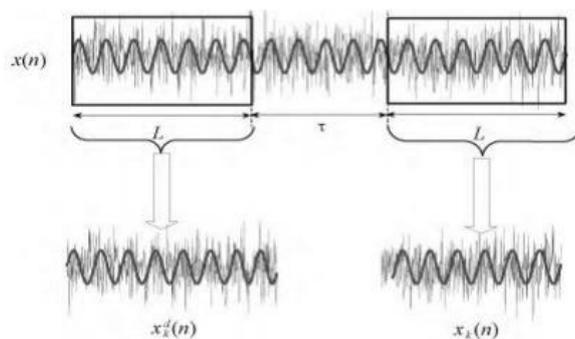


图 4.2 构造短时震动序列

最为核心且至关重要的环节无疑是滤波器的设计。滤波器，作为 DRS 中的关键组成部分，肩负着独特的使命和角色。其核心目的在于让延迟振动序列能够精确地预测到主振动序列中蕴含的确定性成分，从而实现系统性能的优化与提升。

这一目标的达成并非易事，它需要滤波器具备高度的精确性和灵敏度。滤波器需要精心设计和调整，以便能够准确识别并提取出主振动序列中的确定性成分。同时，它还需要对延迟振动序列进行精准的处理，以便能够基于这些信息做出准确的预测。在实现这一目标的过程中，滤波器的设计需要考虑多种因素。首先，它需要考虑到信号的频率特性和相位关系，以便能够在不同频率和相位下都保持良好的预测性能。其次，滤波器还需要具备足够的稳定性和鲁棒性，以应对实际应用中可能出现的各种复杂情况和噪声干扰。为了达成这些目标，滤波器的设计通常涉及复杂的数学和物理原理，需要利用先进的算法和技术来实现。设计师

们会通过信号进行频谱分析、时域分析等多种手段，来深入理解信号的特性和规律，从而设计出更加精准和有效的滤波器。

总之，滤波器的设计是 DRS 中最为关键和重要的部分之一。它直接关系到系统能否精准预测主振动序列中的确定性成分，从而影响到整个系统的性能和稳定性。

4.1.2 小波变换

小波变换作为一种新颖的信号时频分析方法，其理论基础坚实且应用广泛。它在继承了短时傅立叶变换的局部化思想的基础上，进一步推动了其发展，并且显著地解决了传统方法中窗口大小无法随频率变化而灵活调整的问题，从而极大地提升了分析的准确性和适应性。小波变换的核心思想在于，我们运用伸缩和平移等多种运算技巧，对信号进行深度和多尺度的细致分析。伸缩操作允许我们灵活调整信号的时间或频率尺度，从而深入挖掘其在不同尺度下的独特特征。而平移操作则确保我们能够遍历信号的每个角落，不错过任何一个重要的局部信息。通过这种精细化的多尺度分析，我们能够更加准确地把握信号的内在规律和特性，为后续的信号处理和应用提供有力的支撑和指导。这种分析方式使得小波变换能够在不同频率段内，根据信号特性自动调整分析窗口的大小，从而实现对信号高频和低频成分的有效分离与提取。

具体而言，小波变换将一个信号分解为一系列小波函数的叠加，这些小波函数具有不同的尺度和平移参数。通过调整这些参数，可以灵活地在不同时间和频 x 号中快速变化的部分；而低频时，则能够实现频率的细分，即对信号中的缓慢变化成分进行精细的刻画。

多尺度的小波变换分析可以由 Mallat 算法^[26]得到。 $x(t)$ ，得到的离散序列 $x(n)$ ， $n=1,2,\dots,N$ ，离散信号 $x(n)$ 经过尺度 $1,2,\dots,J$ 的分解，可最终分解为 d_1, d_2, \dots, d_J 和 c_J 。假设在尺度 $j=0$ 时有 $c_0(n)=x(n)$ ，所以 $x(t)$ 的离散二进小波变换可以确定如下：

$$\begin{cases} c_{j+1}(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k-2n)c_j(k) \\ d_{j+1}(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k-2n)c_j(k) \end{cases} \quad (4-1)$$

其中， $h(k)$ 与 $g(k)$ 是共轭滤波器系数，可由小波母波函数 $\Psi(x)$ 确定。

尺度函数由两尺关系确定：

$$\phi(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)\phi(2x-k) \quad (4-2)$$

其中

$$h(k) = \left\langle \frac{1}{\sqrt{2}} \phi\left(\frac{x}{2}\right), \phi(x-k) \right\rangle \quad (4-3)$$

相应的，小波函数

$$\psi(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k)\phi(2x-k) \quad (4-4)$$

其中

$$g(k) = (-1)^k h(1-k) \quad (4-5)$$

此外，小波变换还具有其他一些优势，例如多分辨率分析能力和去噪性能。多分辨率分析得小波变换能够在不同尺度上观察信号的特征，从而更全面地了解信号的性质。而去噪使性能则使得小波变换能够在处理含有噪声的信号时，有效地去除噪声干扰，提高信号的质量。

4.1.3 包络解调的分析方法

包络解调的分析方法包括包络检波和频谱分析两个部分，通过包络信号来得到故障特征。其目的是对高频处的调制信号进行解调，特别是针对与故障相关的部分，从而有效地从调幅信号中提取出故障信号，实现信号的准确分离。

通常把原始信号转化为解析信号，在对解析信号进行处理，对于原始信号 $x_1(t)$ ，希尔伯特变换^[27]为：

$$H\{x_1(t)\} = \hat{x}_1(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (4-6)$$

式中， $\hat{x}_1(t)$ 是 $x_1(t)$ 的希尔伯特变换。

希尔伯特反变换公式为：

$$x_1(t) = -\hat{x}_1(t) * \frac{1}{\pi t} = -\frac{1}{\pi} \int \frac{\hat{x}(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (4-7)$$

式中*是卷积， τ 是平移参数。

解析信号 $x_1(t)$ 公式：

$$z(t) = x_1(t) + j\hat{x}_1(t) = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (4-8)$$

$$A(t) = \sqrt{x_1^2(t) + \hat{x}_1^2(t)} \quad (4-9)$$

$$\phi(t) = \arctan \left[\frac{\hat{x}_1(t)}{x_1(t)} \right] \quad (4-10)$$

时域信号可以通过希尔伯特变换为时域解析信号，而解析信号的实部是信号本身，其幅值是信号的包络。希尔伯特变换的包络解调原理如图 4.3。

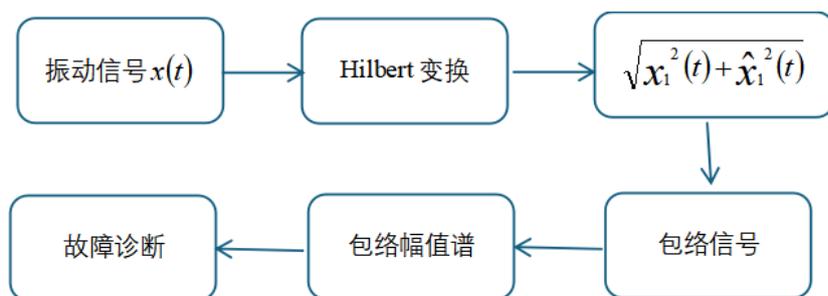


图 4.3 包络解调原理图

4.1.4 自相关分析

自相关分析是一种信号处理技术，广泛应用于信号特征的提取和识别。这种分析方法的核心在于研究信号与其自身在不同时间点的相关性，通过计算信号在不同时间延迟下的自相关函数，来揭示信号内在的统计特性。自相关分析可以采用多种方式进行，如图示法、表格法以及时间序列分析法等，这些方法使得自相关分析更加直观和易于理解。通过自相关分析，研究人员能够方便地识别信号中的周期性成分、趋势变化以及随机噪声等特性，从而更深入地理解信号的结构和特性。在信号处理、信号预测以及模式识别等领域，自相关分析都发挥着不可或缺的作用，为研究者提供了强大的工具来挖掘信号中的有用信息。

自相关可表达信号自身在不同时刻的相关性^[27]。设 τ 为时间延迟，自相关函数 $R(\tau)$ 可以表示为：

$$R(\tau) = \int x(t)x(t+\tau)dt \quad (4-11)$$

4.2 基于实验数据的算法验证

下面是发动机附件机匣数据的说明和分析：采样频率是 12800 z，轴承节径 $D=65\text{mm}$ ；滚动体的直径 $D_b=11.096\text{mm}$ ，滚动体个数 $Z=10$ ，转频 $f_r=328\text{Hz}$ ，再由轴承的故障频率公式得到故障频率 $F_1=1340\text{Hz}$ ，使用附件机匣滚动轴承的外圈的真实数据进行分析，并与真实

的航空发动机附件机匣滚动轴承故障信号对比验证。

真实航空发动机附件机匣数据在信号分析程序中进行解析先是得到如图 4.3 的 DRS 处理信号图和其频谱图。

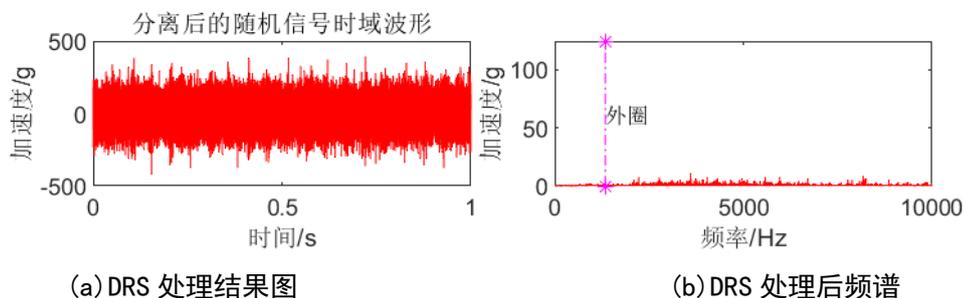
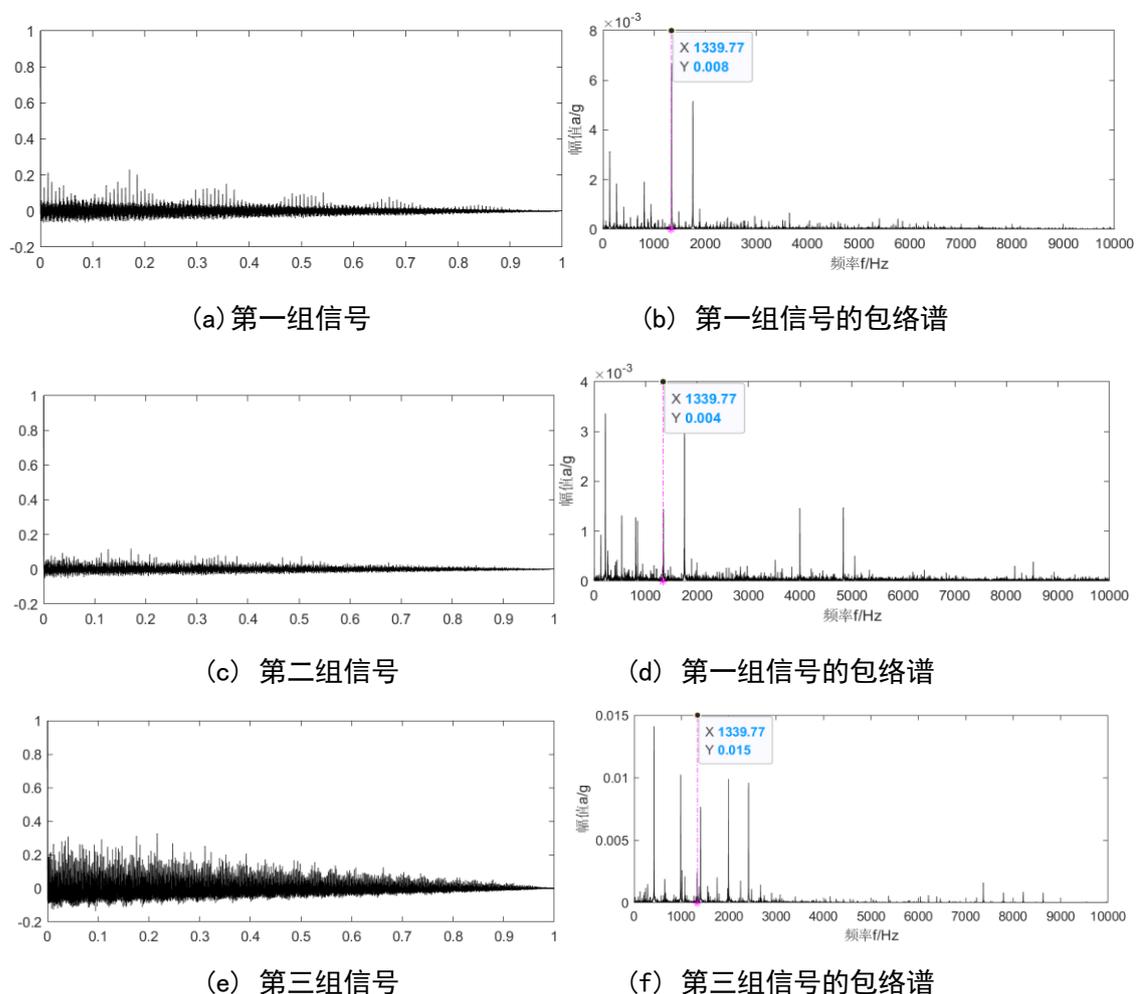
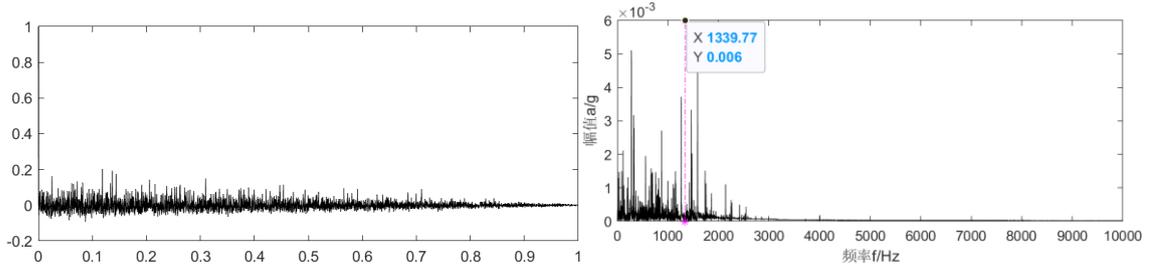


图 4.4 原始信号图和其频谱图

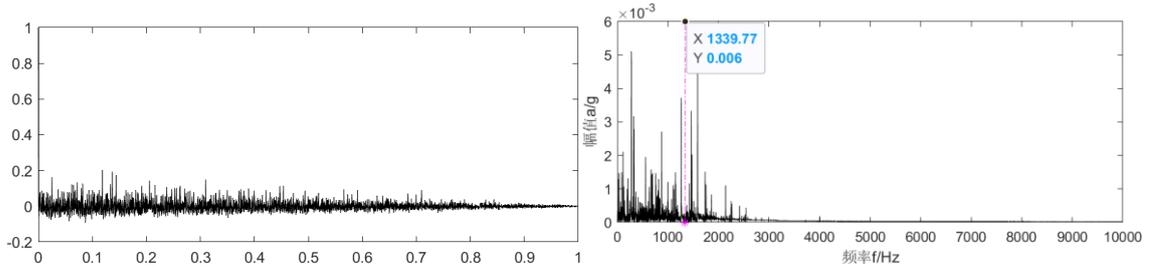
在经过如图 4.4 所示的信号处理分析过后得到如图 4.5 这六组信号和对应的频谱图。





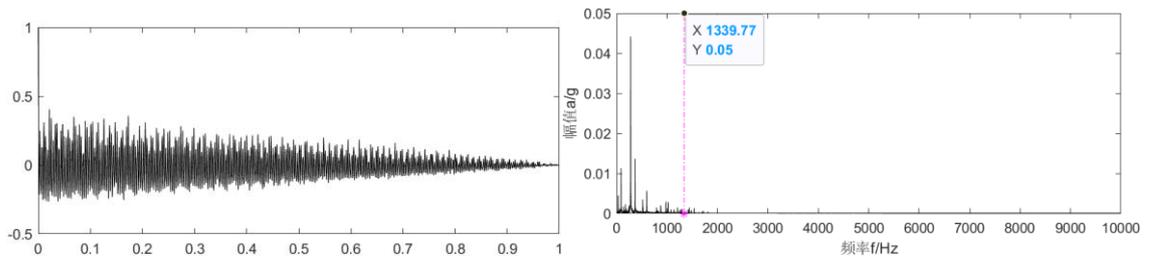
(g) 第四组信号

(h) 第四组信号的包络谱



(i) 第五组信号

(j) 第五组信号的包络谱



(k) 第六组信号

(l) 第六组信号的包络谱

4.5 六组信号及对应的包络谱

对应的内圈故障，包络谱在对应的故障特征频率处能看到相应的谱峰，所以使用相关的信号处理手段是可以验证故障信号的。

4.3 本章小结

在本章中，我们致力于对新提出的方法进行全面的验证。首先，我们充分利用了国际上公开可得的齿轮和滚动轴承数据集，这些数据集不仅包含了丰富的实际运行数据，还涵盖了各种可能的工作环境和故障模式。通过对这些数据的深入分析，我们能够检验新方法在多种复杂情况下的表现，确保其在实际应用中能够准确、可靠地识别齿轮和滚动轴承的故障状态。

通过对这些真实试验数据的处理和分析，我们可以更加直观地了解此信号处理分析在实际应用中的表现。这不仅能够验证新方法的准确性和可靠性，还能够为后续的改进和优化提

供宝贵的参考依据。

第五章 总结与展望

5.1 研究总结

针对发动机附件机匣故障诊断的难题，提出一种基于 ANSYS/LS-DYNA 仿真软件的有限元分析对实际发动机附件机匣滚动轴承故障诊断的有效性。主要结论如下：

（1）研究了航空发动机附件机匣的运行机理，结构特性，故障模型和实例，利用了 CATIA 建立了齿轮和滚动轴承的三维模型。

（2）将齿轮和滚动轴承的三维模型导入 ANSYS 软件后，设定参数、划分网格、设置限定条件后运行得到分析结果并进行验证，分析故障模型和正常模型的差异性。

（3）利用真实实验数据对有限元分析方法进行了验证，结果能够充分表明该方法的可行性和有效性。

5.2 研究展望

在未来研究中，我们可以进一步拓展仿真技术的应用范围，提高仿真精度和效率。同时，对于机匣故障特征的提取，我们可以探索更为先进和有效的算法和技术，以提高故障检测的准确性和可靠性。此外，随着大数据和人工智能技术的快速发展，我们也可以考虑将这些技术应用于航空发动机附件机匣的故障诊断和预测中，进一步提高发动机的可靠性和安全性。

综上所述，航空发动机附件机匣故障动力学仿真及特征提取是一个充满挑战和机遇的研究领域，相信在未来会有更多的突破和创新

参考文献

- [1] Rodolfo Villa, Scot Roswurm. Failure Analysis of a Jet Engine Gearbox Drive Gearshaft Ball Bearing[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2013, 13(3).
- [2] Forbes G L, Randall R B. Gas Turbine Casing Response to Blade Vibrations: Analytical and Experimental results[C]. AIAC-13, Sixth DSTO International Conference on Health & Usage Monitoring, 2009.
- [3] 郭梅, 陈聪慧, 胡兴海等. 航空发动机附件机匣结构设计方法研究[J]. 机械传动, 2017, 41(03):211-216. DOI:10.16578/j. issn.1004.2539.2017.03.041.
- [4] 王海霞, 袁惠群, 冯鑫. 发动机附件机匣振动分析与故障排除方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(S1):206-209+232. DOI:10.16450/j. cnki. issn. 1004-6801. 2013. s1. 035.
- [5] 林腾蛟, 李应超, 杨妍妮. 准双曲面齿轮箱响应分析及动力优化[J]. 振动与冲击, 2011, 3(30): 145-170.
- [6] 童宝宏, 刘颖. 轴颈倾斜时滚柱轴承动态接触特性的有限元分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 42-47.
- [7] Sarabjeet Singh, U we G. Köpke, CarlQ. Howard. Analyses of contact forces and vibration response for a defective rolling element bearing using an explicit dynamics finite element model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(21): 5356-5377.
- [8] Stanislav Pehan, Trevor K Hellen and Jose Flaker. Numerical methods for determining stress intensity factors vs crack depth in gear tooth roots[J]. International Journal of Fatigue, 1997, 19(10): 677-685.
- [9] 黄乾贵, 邓四二, 腾弘飞. 滚动轴承系统仿真技术的现状及发展[J]. 轴承, 2002,(04):34-38.
- [10] 汪久根, 王庆九, 章维明, 滚动轴承动力学研究[J]. 轴承. 2007,(03):40-45.
- [11] 吴云鹏, 张文平, 孙立红, 滚动轴承力学模型的研究及其发展趋势[J]. 轴承, 2004,(07):44-46
- [12] 李鸿飞. 含损伤的滚动轴承动力学建模及故障特征分析[D].东北大学,2020.DOI:10.27007/d.cnki.gdbeu.2020.000397.
- [13] PalmgrenR. Ball and Roller Bearing Engineering(3rdedition)[M]. Burbank. philadelphia, 1959.
- [14] Jonesa B. Ball motion and sliding friction in ball bearings[J]. Trans ASME, Journal of Basic Engineering, 1959, 81:1-4.
- [15] Jones A B. The mathematical theory of rolling element bearings in mechanical design an system handbook[J]. McGraw Hill, 1963.
- [16] Harris T A. An analytical method to predict skidding in high speed roller bearings[J]Trans. ASME, 1966,9(3): 17-24.
- [17] Harris T A. An analytical method to predict skidding in thrust-loaded ball bearings[J]. Trans. ASME, 1971,93(1): 17-25.
- [18] Harris TA. Rolling Bearing Analysis(M). Third Edition. John Wiley & Sons, Inc, 199110, Poplawski J V. Slip and cage forces in a high-speed roller bearing[J]. J. of L ub. Tech.1972, 94:143-152.
- [19] Walters C T. The Dynamics of Ball Bearings[J]. Trans ASME, Journal of lubrication Technology. 1971,93:1-10.
- [20] Gupta P K. Dynamics of Rolling- element Bearings Em Dash 3- Ball Bearing Analysis Journal of Lubrication Technology, Transactions ASME, 1979, 101(3):312-318.
- [21] Gupta P K. Dynamics of Rolling- element Bearings Em Dash 3- Ball Bearing Analysis Journal of Lubrication Technology, Transactions ASME, 1979,101(3):312-318.
- [22] 林腾蛟, 荣崎, 李润方等. 深沟球轴承运转过程动态性有限元分析[J]. 机械设计振动与冲击, 2009, 28(1):118-122.
- [23] 万长森. 滚动轴承的分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [24] 冈本纯三, 黄志强. 球轴承的设计计算[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [25] 王红军, 李济顺 马伟, 李兴林. 滚动轴承测试技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [26] Mallat S G. A theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation [J]. IEEE Trans on PAM I, 1989, 11(7):674-693
- [27] Z. K. Peng, Peter W. Tse,F.L. Chu. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004,286(1).
- [28] J. Antoni, R. B. Randall. Unsupervised noise cancellation for vibration signals: part II—a novel frequency-domain algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024,18(1)

致谢

始于 2019 金秋，终于 2024 六月盛夏。行文至此，也意味着我的大学生涯结束了。感谢父母，感谢妻儿；感谢在背后支持我的所有亲朋好友；我由衷的感谢我的导师陈果教授，悉心指导我的毕业论文，能够给我提出宝贵的意见；感谢我的好师兄盛嘉玖，指导帮助我去学习有关我毕设的专业知识；感谢 902 班的所有老师同学，互相帮助，一同成长！

虽以后相伴的日子少了，但心永远相连，祝我们都前程似锦，报效祖国！