

1999 年上海大学博士学位论文 9

多平行轴齿轮—轴承—转子系统 耦合振动的有限元分析

作者: 余光伟

专业: 机械设计及理论

导师: 张直明



32.41

上海大学出版社

1999 年上海大学博士学位论文

多平行轴齿轮-轴承-转子系统 耦合振动的有限元分析

作 者: 余光伟
专 业: 机械设计及理论
导 师: 张直明



上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (1999)

**Analysis of Coupling Vibration of Multi-stage
Gear-Bearing-Rotor Systems with
Finite Element Method**

Candidate: Yu Guangwei

Major: Mechanic Design and Theory

Supervisor: Prof. Zhang Zhiming

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：（工作单位，职称）

邹慧君（上海交通大学，教授）

委员：

刘 谨 **张国贤**

洪钟瑜 **邱勤三**

导师：

张直明

评阅人名单:

虞烈	西安交通大学	710049	教授
沈允文	西北工业大学	710072	教授
李柱国	上海交通大学	200030	教授

评议人名单:

邹慧君	上海交通大学	200030	教授
丘大谋	西安交通大学	710049	教授
洪钟瑜	上海理工大学	200093	研究员
吴益敏	上海大学	200072	教授
易子夏	上海大学	200072	研究员

答辩委员会对论文的评语

余光伟的博士论文以具有工程实际背景的 DH 型离心压缩机的齿轮-轴承-转子系统为研究对象,研究此类转子系统的动力学问题,该项研究在理论上和工程实际上都非常重要。

作者运用 ANSYS 平台,建立了一套齿轮-轴承-转子系统多维耦合动力学问题的有限元分析和计算方法,提出了根据系统中零部件的不同特点选取单元类型的方法,分析了在啮合转动过程中多维耦合的振动特性,研究在不同支承(滚动轴承和滑动轴承)条件下,啮合刚度、转速、轴承间隙比和宽径比等参数对系统动态性能的影响,并进行部分实验验证。得到一些对该齿轮转子系统的动态设计具有参考价值的结论和数据,能较精确地反映出在多维耦合情况下的复杂振动模态和耦合时的振动特征,具有较高的学术水平和应用价值。

论文表明,作者具有扎实的理论基础和深入的专门知识,具备较强的独立从事科研工作的能力。论文条理清楚,层次分明。在答辩过程中能正确回答问题。

答辩委员会表决结果

经全体答辩委员无记名投票表决，全票通过，一致同意通过余光伟同志的博士论文答辩，并建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席：**邹慧君**

1999年6月24日

摘 要

本文主要研究多平行轴齿轮-轴承-转子系统的动力学行为及其应用。全文共分以下几个部分:

(1) 研究齿轮-轴承-转子系统有限元分析模型的建立、动力方程及其求解。在这一部分中,将齿轮-轴承-转子系统划分成不同的有限元单元类型,分析了不同单元类型的特点、选取和创建;推导了有限元动力方程;给出了根据有限元动力方程求解齿轮-轴承-转子系统振动模态和强迫振动响应的方法。

(2) 创建两平行轴齿轮-轴承-转子系统有限元三维实体计算模型。利用该计算模型分析了直齿轮转子系统和斜齿轮转子系统动力学行为的不同点和相同点,模拟出了两个齿轮-轴承-转子系统的动态振动过程,计算结果表明:在该结构参数下,齿轮螺旋角对耦合新频率有较大影响,在计算中必须考虑斜齿轮螺旋角对耦合齿轮转子系统动力学行为的影响;还利用该模型分析了参考文献[19]中的算例,不仅得出了与其相近的计算结果,还模拟出了各阶模态的动态振动过程。

(3) 以一个实际的 DH 型压缩机组中的转子系统为例,创建了其三维实体计算模型,计算了其在刚性支承下的振动模态,模拟了各阶模态的动态仿真过程,对耦合和非耦合情况下的振动模态进行了比较和分析,计算结果表明:通过齿轮副耦合而产生的系统耦合新频率的振型比较复杂。

(4) 设计和制造了耦合振动测试实验台,利用精密的测试仪器对实验台的振动模态进行实际测试和分析,建立了实验台的

有限元计算模型并进行计算, 计算结果和实测值具有较好的一致性。

(5) 理论的工程应用。以实际 DH 型压缩机组的一对齿轮 - 轴承 - 转子系统为例, 建立了由实体单元和线形单元组成的混合有限元计算模型, 减少了计算模型所需的节点数, 提高了计算速度。利用该计算模型分析了耦合及不平衡分布对系统振动响应的影响, 得出如下结论: 经过动平衡的单个齿轮转子系统, 在耦合的情况下, 也会产生不平衡响应, 因此, 在设计时应考虑耦合情况下整个系统的不平衡响应。建立了由创建的轴承支承单元(包括滚动轴承和滑动轴承)、齿轮副耦合单元、梁单元和集中质量单元组成的有限元计算模型, 研究了啮合刚度、转速、轴承的宽径比和间隙比对系统动力学行为的影响, 得出如下结论: 通过适当增大齿轮的法面模数、螺旋角和齿宽与全齿高的比, 可以改善齿轮转子系统的动力学特性; 在本文算例中, 对于可倾瓦轴承, 适当提高宽径比、适当减小间隙比可以提高临界转速, 改善系统稳定性; 对于圆轴承, 随着间隙比的提高, 可以提高系统的临界转速并有改善系统稳定性的趋势, 而提高圆轴承的宽径比使临界转速降低并有使系统稳定性变差的趋势。分析了一个实际的 DH 机组的齿轮转子系统, 对其在空载和工作情况下的动力学特性进行了分析。

(6) 建立了可以计入推力轴承影响的齿轮转子系统有限元计算模型, 并给出了一个使用该模型的算例。

关键词 传递矩阵法, 耦合振动, 有限元法, DH 型离心压缩机,
齿轮 - 轴承 - 转子系统

Abstract

This dissertation mainly deals with the dynamic behaviors of the multi-stage gear-rotor-bearing system and its application. The whole thesis consists of the following parts:

(1) The first is on the study of the modeling of the multi-stage gear-rotor-bearing system using FEM (Finite Element Method), the establishment and solution of kinetic equations. In this part, the multi-stage gear-rotor-bearing system is divided into different element types, the functions and uses of the elements are given; the kinetic equations are derived; the vibration modes and harmonic response of the system are also solved.

(2) The second is on the modeling of a two-stage gear-rotor-bearing system by using three-dimensional solid elements. Based on the model, the dynamics of a spur-gear and helical-gear system is analyzed, the vibrations of the modes of the systems are also simulated. The result shows that the helical angle must be considered in the calculation. Using this model, the example in Kahraman's paper is analyzed and calculated, and the vibrations of the modes are also simulated.

(3) The third is on the modeling of a real rotor system in type DH of turbine compressor unit by using three-dimensional solid elements. Based on the model, the modes of the system are gained, and the vibrations of the modes are simulated. By comparing the modes of the single shaft system with the coupling system, it is

found that the vibrations of new modes are more complex.

(4) The forth is on the experiment. The coupling vibration table is designed and manufactured. The frequencies of the table are measured by using precise instruments. The modes are calculated by FEM. The experimental and theoretical results are in good agreement.

(5) The fifth is on the engineering application. The model of a two-stage gear-rotor-bearing system is given by using solid elements and linear elements. This model can reduce the number of the nodes, and save the calculating time. The harmonic response of the system is calculated by this model. It is found that the amplitude of unbalance response of the system is larger than that of the single shaft system. When the system is designed, the harmonic response of the whole system must be considered. In this part, the model of a system is given by using matrix elements, beam elements and mass elements. The behaviors of the rotor system with different contact stiffness, rotating speed, the ratio of B/D and clearance rate are studied. It is found that the performance of the system can be improved by properly increasing the gear modulus, helix angle and gear-width/gear-height. The performance of the system can also be improved by properly modifying the ratio of B/D and clearance rate of the bearings.

(6) The last is on the modeling of the system supported by thrust bearings and journal bearings, and an example of its application is given.

Key words transfer matrix method, coupling vibration,
finite element method, turbine compressor,
multi-stage geared rotor-bearing system

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 有限元法的发展历史	2
1.3 轮齿动力学、齿轮动力学与转子动力学的研究进展	4
1.4 齿轮-轴承-转子系统动力学研究的历史和现状	5
1.5 课题来源、研究的意义和目的以及工业背景	13
1.6 本文所作工作及章节安排	15
第二章 齿轮-轴承-转子系统有限元分析模型及动力 方程的推导和求解	19
2.1 概 述	19
2.2 单元分析	20
2.3 有限元动力方程的推导	36
2.4 振动固有值的计算	38
2.5 系统强迫振动响应的计算	42
第三章 两平行轴齿轮-轴承-转子系统耦合振动 分析与计算	44
3.1 概 述	44
3.2 刚性支承下直齿轮系统振动性能分析	44

3.3 刚性支承下斜齿轮系统振动性能分析	50
3.4 算例比较	54
第四章 多平行轴齿轮-轴承-转子系统耦合振动	
实例分析	60
4.1 概 述	60
4.2 离心压缩机组的结构参数	60
4.3 计算模型和网格划分	62
4.4 计算结果与分析	63
第五章 实验与分析	68
5.1 概 述	68
5.2 实验设备及实验条件	68
5.3 实验测试数据与计算数据	69
第六章 滑动轴承支承下齿轮转子系统耦合振动分析	74
6.1 概 述	74
6.2 齿轮转子系统的结构参数和计算模型	74
6.3 系统刚支情况下的模态和响应分析	76
6.4 系统工作情况下的模态和响应分析	79
第七章 啮合刚度、转速、轴承间隙比和宽径比对振动	
特性的影响	83
7.1 概 述	83
7.2 啮合刚度对滚动轴承支承系统振动特性的影响	
.....	83

7.3 滚动轴承支承刚度对系统振动特性的影响	86
7.4 啮合刚度对滑动轴承支承系统振动特性的影响	88
7.5 斜齿轮副啮合刚度的计算	92
7.6 转速对滑动轴承支承系统振动特性的影响	94
7.7 轴承的间隙比对齿轮转子系统振动特性的影响	97
7.8 轴承宽径比对齿轮转子系统振动特性的影响	100
7.9 本章小结	104
第八章 推力轴承对齿轮转子系统振动特性的影响	106
8.1 概 述	106
8.2 推力轴承的运动方程	106
8.3 算 例	109
第九章 工程应用实例	110
9.1 概述	110
9.2 机组的结构和参数	110
9.3 机组的计算模型	113
9.4 计算结果和分析	115
第十章 全文总结	117
参考文献	121
致 谢	127

第一章 绪 论

1.1 引 言

旋转机器都有旋转部件即转子。像汽轮机、发电机、气体压缩机等都是现代工业中常用的典型的旋转机器，都以转子作为工作的主体。机器运转时，转子系统常常发生振动。振动的害处是产生噪声、减低机器的工作效率，严重的振动还会使元件断裂，甚至造成事故。因此，必须对其振动情况进行研究。

以前，人们对齿轮动力学和转子动力学的研究是分别进行的。随着齿轮动力学和转子动力学的进展，近年来齿轮转子动力学的研究越来越多，形成了一门新的学科——齿轮-轴承-转子系统动力学。而多平行轴系统的压缩机，其核心部分——多平行轴齿轮转子系统是转子-轴承系统研究中最为复杂的一类，是现代齿轮-轴承-转子系统动力学的主要研究对象。

对于单轴的转子系统，不存在耦合问题。而对于通过齿轮副连接的多平行轴转子系统，各转子之间的运动相互耦合、相互作用。其动力学特性和非耦合的单轴系统不同，且直齿轮和斜齿轮的齿轮副结构不同，因而它们对系统的耦合作用效果也不同。

过去，研究转子系统的动特性主要采用集总质量模型，用传递矩阵法进行计算。随着有限元理论的发展和有限元应用软件的开发使用，利用有限元法计算和分析系统的动特性显示出

一定的优越性. 考虑各种因素的有限元模型是一个比较精确的模型. 和传递矩阵法相比, 有限元法计算结果精度较高, 而且可以避免传递矩阵法中可能出现的数值不稳定现象^[1].

1.2 有限元法的发展历史

有限元法是最近几十年发展起来的一种有效的通用计算方法, 它既包括有数学理论, 又包括有程序设计技巧. 这种方法首先在固体力学范畴, 而后在工程技术各个领域得到了广泛的应用. 众所周知, 从数学角度来看, 一个工程问题可以用一个偏微分方程来描述, 但却很难求得其精确的解析解. 50 年代开始, 随着电子计算机的应用, 有限元法作为一种数值分析工具, 借助于高速电子计算机的配合, 使得以前这类难以处理的工程技术问题都可能获得一个近似的数值解. 现在, 有限元法已被公认是一种有效的数值计算方法, 并被广泛应用于各类工程技术领域. 在机械设计中, 从齿轮、轴、轴承等通用简单零、部件到机床、汽车、飞机等复杂构件的应力和变形分析, 采用有限元法计算, 都可以获得一个足够精确的近似解来满足工程上的要求.

50 年代, 有限元法首先用于飞机设计中. 1960 年 R.W.Clough 首次提出“有限元”这个名词, 有限元法作为一种数值分析方法正式出现于工程技术领域.

有限元法的第一个黄金时期开始于 60 年代初, 当时, 将一个连续体离散化为有限个单元组合体的这种有限元的概念开始在工程界流行, G.N.White 和 K.O.Friedrichs 采用了规则的三角形单元, 从变分原理出发来求解微分方程式. 1963 年 J.F.Besseling 等人认识到有限元法是里兹法的另一种形式, 并且证实了它是处理弹性连续介质问题的一种通用方法, 此后有限元法的地位