

故障转子系统的非线性 振动分析与诊断方法

韩清凯 于涛 著
王德友 曲涛



科学出版社
www.sciencep.com

非线性动力学丛书 12

故障转子系统的非线性 振动分析与诊断方法

韩清凯 于 涛 王德友 曲 涛 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍旋转机械转子系统的几种典型振动故障的产生机理、故障转子系统的非线性振动分析方法及其振动特征,以及相应的诊断方法. 主要内容包括转子系统的临界转速与不平衡响应的计算方法, 转子系统的碰摩、不对中、不对称支承、裂纹等典型故障的动力学建模方法, 振动响应仿真分析、试验分析等, 以及转子系统振动故障特征提取的时域、频域和时频域信号分析的有效方法, 最后还提出了故障转子系统的定量诊断方法. 另外, 书中附有必要的计算程序.

本书可供旋转机械、转子动力学、故障诊断等专业的研究生和教师阅读, 也可供相关专业的科技人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

故障转子系统的非线性振动分析与诊断方法/韩清凯等著. —北京:科学出版社, 2010

(非线性动力学丛书; 12)

ISBN 978-7-03-027202-7

I. 故… II. 韩 III. 转子-故障诊断-研究 IV. TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 065096 号

责任编辑: 赵彦超 / 责任校对: 朱光光

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 5 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2010 年 5 月第一次印刷 印张: 14 1/2

印数: 1—2 500 字数: 278 000

定价: 46.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《非线性动力学丛书》序

真实的动力系统几乎都含有各种各样的非线性因素, 诸如机械系统中的间隙、干摩擦, 结构系统中的材料弹塑性、构件大变形, 控制系统中的元器件饱和特性、变结构控制策略等. 实践中, 人们经常试图用线性模型来替代实际的非线性系统, 以求方便地获得其动力学行为的某种逼近. 然而, 被忽略的非线性因素常常会在分析和计算中引起无法接受的误差, 使得线性逼近成为一场徒劳. 特别对于系统的长时间历程动力学问题, 有时即使略去很微弱的非线性因素, 也会在分析和计算中出现本质性的错误.

因此, 人们很早就开始关注非线性系统的动力学问题. 早期研究可追溯到 1673 年 Huygens 对单摆大幅摆动非等时性的观察. 从 19 世纪末起, Poincaré, Lyapunov, Birkhoff, Andronov, Arnold 和 Smale 等数学家和力学家相继对非线性动力系统的理论进行了奠基性研究, Duffing, van der Pol, Lorenz, Ueda 等物理学家和工程师则在实验和数值模拟中获得了许多启示性发现. 他们的杰出贡献相辅相成, 形成了分岔、混沌、分形的理论框架, 使非线性动力学在 20 世纪 70 年代成为一门重要的前沿学科, 并促进了非线性科学的形成和发展.

近 20 年来, 非线性动力学在理论和应用两个方面均取得了很大进展. 这促使越来越多的学者基于非线性动力学观点来思考问题, 采用非线性动力学理论和方法, 对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性系统建立数学模型, 预测其长期的动力学行为, 揭示内在的规律性, 提出改善系统品质的控制策略. 一系列成功的实践使人们认识到: 许多过去无法解决的难题源于系统的非线性, 而解决难题的关键在于对问题所呈现的分岔、混沌、分形、孤立子等复杂非线性动力学现象具有正确的认识和理解.

近年来, 非线性动力学理论和方法正从低维向高维乃至无穷维发展. 伴随着计算机代数、数值模拟和图形技术的进步, 非线性动力学所处理的问题规模和难度不断提高, 已逐步接近一些实际系统. 在工程科学界, 以往研究人员对于非线性问题绕道而行的现象正在发生变化. 人们不仅力求深入分析非线性对系统动力学的影响, 使系统和产品的动态设计、加工、运行与控制满足日益提高的运行速度和精度需求, 而且开始探索利用分岔、混沌等非线性现象造福人类.

在这样的背景下, 有必要组织在工程科学、生命科学、社会科学等领域中从事

非线性动力学研究的学者撰写一套非线性动力学丛书，着重介绍近几年来非线性动力学理论和方法在上述领域的一些研究进展，特别是我国学者的研究成果，为从事非线性动力学理论及应用研究的人员，包括硕士研究生和博士研究生等，提供最新的理论、方法及应用范例。在科学出版社的大力支持下，我们组织了这套《非线性动力学丛书》。

本套丛书在选题和内容上有别于郝柏林先生主编的《非线性科学丛书》(上海教育出版社出版)，它更加侧重于对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性动力学问题进行建模、理论分析、计算和实验。与国外的同类丛书相比，它更具有整体的出版思想，每分册阐述一个主题，互不重复。丛书的选题主要来自我国学者在国家自然科学基金等资助下取得的研究成果，有些研究成果已被国内外学者广泛引用或应用于工程和社会实践，还有一些选题取自作者多年的教学成果。

希望作者、读者、丛书编委会和科学出版社共同努力，使这套丛书取得成功。

胡海岩

2001年8月

前 言

航空发动机、汽轮机、压缩机、风机、水泵等旋转机械,在国防、能源、电力、交通、机械和化工等领域中广泛应用并发挥着重要作用.长期以来,人们高度重视对旋转机械动力学问题的深入研究.转子系统是旋转机械的重要组成部分,旋转机械转子系统的动力学特性决定着旋转机械的工作性能和结构安全.以航空发动机为代表的复杂而重要的旋转机械,会有许多因素特别是故障因素造成强烈振动,转子系统产生故障时,往往会导致严重的振动问题,甚至导致机毁人亡的重大事故.因此,研究带故障的转子系统的动力学问题、故障转子系统的振动分析理论与方法、故障转子系统的诊断方法,不仅具有重要的学术价值,而且对国民经济以及国家安全都有着十分重要的现实意义.

人们在转子系统动力学、故障转子系统振动分析、转子系统故障诊断等方面开展了大量的卓有成效的研究工作,取得了许多重要的成果,并在工程实际中加以应用,带来了明显的经济和社会效益.但是,理论研究和工程实际都对现有转子系统动力学的理论和方法提出越来越高的要求.由于故障转子系统振动问题十分复杂,因而对故障转子系统非线性动力学行为、故障机理及非线性振动特征的理论与分析、振动故障的诊断方法等,仍然需要不断地进行深入研究.在典型旋转机械(如航空发动机)的某些典型故障(如碰摩、不对中、裂纹等)的故障机理与非线性振动分析方面,还存在着许多不为人所了解的规律.同时,对故障诊断的要求,也从定性向定量发展,不仅要求具有高度的诊断有效性,而且还要求足够准确地诊断出故障的类型、具体位置甚至严重程度.

作者在国家高技术研究发展计划(“863计划”)项目“航空发动机转子系统振动故障的定量诊断技术”(编号2007AA04Z418)、国家自然科学基金项目“发动机整机振动分析的多场耦合模型建立与典型工况仿真的研究”(编号50775028),以及教育部新世纪优秀人才支持计划等项目的支持下,以航空发动机转子系统的结构和工作特点为背景,在进行合理的力学简化基础上,结合模型试验,深入细致地研究了几种典型振动故障的转子系统非线性振动机理和非线性振动特征的分析问题.本书中,转子系统的振动故障主要包括不平衡、碰摩、不对中、不对称支承、转子裂纹等,在定性故障诊断方法的基础上,本书提出了基于模型的和基于非线性输出频率传递函数(NOFRF)的故障转子系统定量诊断方法.

本书共分为8章.第1章为绪论,介绍研究背景及目前国内外在故障转子系统动力学及其故障诊断方法领域的相关研究情况;第2章详细介绍转子系统临界转速

与不平衡动响应的计算方法;第 3~6 章分别针对转子系统的转静件碰摩、不对中、不对称支承、转子裂纹等典型故障,从故障机理、动力学建模、仿真和试验振动分析等方面进行阐述;第 7 章针对转子系统振动故障的定性诊断方法,介绍行之有效的振动特征提取的信号分析方法,包括时域和频域分析、小波分解和 Hilbert-Huang 变换等时频域分析;第 8 章提出转子系统振动故障的定量诊断方法,即基于模型的定量诊断方法、基于 NOFRF 的定量诊断方法,以及结合人工智能(主要是指人工神经网络)的定量识别方法。

本书由韩清凯教授、于涛博士、王德友研究员、曲涛高级工程师共同完成。孙伟、姚红良、张智伟、张帅、董霄、郭燕芳、赵雪彦等也参加了部分内容的撰写和整理,项目组其他成员也给予了大力支持。在撰写过程中还得到了许多同行专家的大力帮助。作者还特别对项目组学术带头人闻邦椿院士表示衷心感谢。由于水平有限,本书难免存在一些疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

韩清凯

2009 年 12 月

目 录

《非线性动力学丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.3 本书主要内容	12
第 2 章 转子系统的临界转速与不平衡响应	15
2.1 引言	15
2.2 转子系统动力学模型的建立	15
2.3 转子系统临界转速计算的 Riccati 传递矩阵法	18
2.4 转子系统临界转速计算的有限元法	20
2.5 两种临界转速计算方法的比较	22
2.6 转子系统的动响应分析	26
2.7 转子系统的瞬态动响应分析	31
2.8 本章小结	36
第 3 章 转子系统的碰摩故障	37
3.1 转子系统碰摩故障的基本原理	37
3.2 Jeffcott 转子系统的转静件碰摩	39
3.3 单跨双圆盘转子系统的定点碰摩	45
3.4 转子系统定点碰摩的周期运动稳定性	50
3.5 双跨转子系统的定点碰摩	53
3.6 转子系统定点碰摩的模型实验	60
3.7 本章小结	65
第 4 章 转子系统的不对中故障	67
4.1 不对中故障的机理及主要特征	67
4.2 不对中故障转子系统的动力学模型	68
4.3 单跨转子不对中的动力学模型	71
4.4 单跨转子不对中故障的仿真与试验	73
4.5 双跨转子不对中的动力学模型	81
4.6 双跨转子不对中故障的仿真分析	83
4.7 本章小结	87

第 5 章 转子系统的不对称支承故障	89
5.1 引言	89
5.2 具有不对称支承的转子系统动力学建模	90
5.3 具有不对称支承的转子系统振动仿真	92
5.4 不对称台板参振的转子系统的动力学建模	96
5.5 不对称台板参振的转子系统振动仿真	98
5.6 本章小结	103
第 6 章 转子系统的裂纹故障	104
6.1 引言	104
6.2 裂纹转子系统的有限元建模	105
6.3 裂纹对转子系统固有特性的影响分析	112
6.4 裂纹对转子系统动力学响应的影响分析	114
6.5 本章小结	122
第 7 章 转子系统振动故障的定性诊断方法	124
7.1 引言	125
7.2 振动信号的分析处理方法	128
7.3 转子系统振动故障的时频分析与定性诊断	141
7.4 本章小结	149
第 8 章 转子系统振动故障的定量诊断方法	150
8.1 转子系统不平衡量的辨识	150
8.2 基于模态扩展与谐波分解的转子碰摩故障的定量诊断	156
8.3 基于模态分析和 ANN 的转子系统裂纹故障的定量诊断	164
8.4 基于非线性输出频率响应函数的转子系统碰摩故障的定量诊断	172
8.5 本章小结	175
参考文献	176
附录 A 常用程序	189
A.1 传递矩阵法分析程序	189
A.2 碰摩转子系统计算仿真程序	194
A.3 稳定性分析程序	205
A.4 不对中转子系统仿真程序	210
A.5 转子系统不对中故障的振动信号小波包分解程序	210
A.6 HHT 变换用于分析碰摩转子振动信号的程序	212
A.7 基于 NOFRF 的碰摩转子定量诊断程序	217
附录 B 转子系统振动响应的数值积分方法	219
《非线性动力学丛书》已出版书目	221

第1章 绪 论

1.1 研究意义

旋转机械是工业部门中应用最为广泛的一类机械设备,如航空发动机、火箭发动机、汽轮机、压缩机、风机、水泵等,在航空航天、能源、电力、交通、石化等工业领域中发挥着重要作用。转子系统作为旋转机械的核心部件,其振动是不可避免的。转子系统的振动主要包括转轴的扭转振动、弯曲振动、圆盘振动、轴承振动、接管振动等。转子系统常常由于出现各种不同形式的振动故障而影响其正常工作,有时甚至会发生严重的机毁人亡事故,造成重大的经济损失^[1]。

随着科学技术的发展,对旋转机械的性能、效率、转速、容量和安全可靠性等多个方面都提出了越来越高的要求。当转子系统发生故障时,如碰摩、不对中、不对称支承、裂纹、松动等,以及由于油膜力、密封力、气流激振力等外激励作用,转子系统的振动问题就会变得十分复杂,因而对现有转子系统的动力学理论和方法提出了更高的要求。特别是对故障转子系统动力学行为及其故障机理和特征,需要进行深入的研究。目前,国内外科技工作者在故障转子动力学方面开展了大量的研究工作,对旋转机械转子系统振动故障的诊断方法的研究也取得了许多重要的成果,并应用于工程实际,创造了重大的经济效益和社会效益。

以飞机的“心脏”——航空发动机为例,它的工作状态直接影响到飞机运行的安全性、可靠性及飞机的作战性能。航空发动机结构复杂,如图 1.1 所示,高转速、高负荷(高应力)和高温的工作环境决定了航空发动机在使用过程中容易出现各种故障。而在这些故障中,由于振动原因所导致的故障占了相当大的比例^[2]。

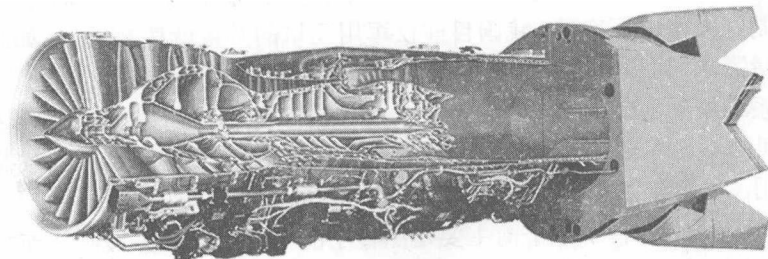


图 1.1 航空发动机的结构示意图

航空发动机产生振动的原因多种多样,故障类型十分复杂,总体上可分为性能

故障、结构强度故障和附件系统故障。从发动机部件的角度来看, 轮盘、叶片、轴、轴承等转子部件的故障都与振动有关。从我国航空发动机的故障统计中发现, 发动机性能故障约占总故障的 10%~20%; 结构强度故障约占总故障的 60%~70%, 其中多数结构强度故障的早期故障信息在其振动信息中都有所反映^[2]。

在航空涡轮喷气发动机结构中, 可以将主轴 (连接压气机与涡轮部件并传递涡轮功率给压气机), 以及各类盘、叶片等统称为航空发动机转子系统, 如图 1.2 所示。在新机研制、服役期间维护和大修的不同阶段, 由于设计、制造、装配, 特别是使服役劣化等原因, 决定了航空发动机转子系统的振动故障不可避免。航空发动机转子系统振动故障是指发动机的压气机/涡轮转子系统 (动件、支承及相关联的静件) 的振动超标或振动异常, 使得发动机偏离正常功能 (malfunction) 或者功能失效 (failure)。

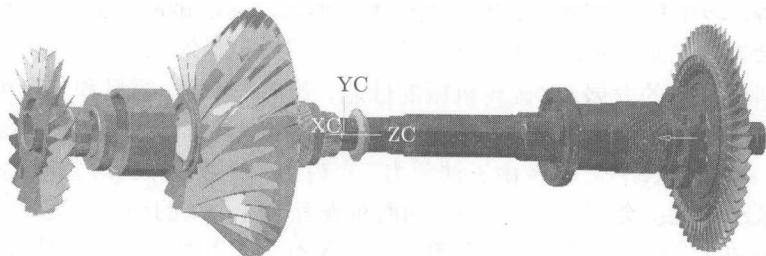


图 1.2 航空发动机转子系统的结构示意图

航空发动机转子系统振动故障会直接影响发动机功能精度、可靠性和持久性, 由振动故障所造成的恶性事故也屡见不鲜。根据有关资料介绍, F-16 歼击机发生过多起由于发动机振动故障造成的 A 级重大事故, Д30KY154 发动机发生过低压涡轮转子爆裂故障, JT8D 发动机发生过涡轮轴折断故障, RB21122B 发动机的风扇转子也发生过严重故障。在我国, 自主研发的发动机也经常发生振动故障事故, 研制过程因此延滞。飞行过程因振动导致空中停车甚至零部件损伤, 发动机整机振动超标也严重制约大修出厂率等。我国目前仅军用飞机的数量就达数千架, 如此庞大的发动机数量需求, 对振动故障的检测与维修必将是一项极其艰巨的任务。

转子系统振动故障的根源在于热不协调、热弯曲、连接件松动、变形不均、气动扰动、间隙不均等多种因素, 并受到流场源、噪声源、结构源和不同载荷激励源的共同作用。对于航空发动机转子系统, 其主要故障包括^[3]:

(1) 转子不平衡。转子不平衡主要是由转子的初始平衡状态被破坏而产生不平衡量导致, 这是较常见的发动机振动故障, 其直接表现为发动机整机振动过大。

(2) 碰摩。转子与机匣碰摩是航空发动机常见的故障之一, 双转子发动机内外转子的碰摩比较少见。转子碰摩会引起整机振动过大, 破坏发动机封严篦齿的结构,

影响发动机的效率;也可能使机匣发生较大的变形,或使发动机转子叶片产生裂纹甚至折断。

(3) 不对中。转子不对中通常是指相邻两转子的轴心线与轴承中心线的倾斜或偏移程度。转子不对中可以分为联轴器不对中和轴承不对中。旋转机械在安装和运转中因为多种原因而可能发生转子不对中,不对中状态下转子运动引起机器的振动、联轴器的偏转、轴承的摩擦损伤、油膜失稳和轴的挠曲变形等故障问题,对系统的稳定运行危害极大。

(4) 轴承及其支承故障。航空发动机支承结构中使用的多为滚珠轴承和滚针轴承,轴承磨损故障十分常见。轴承座及其支承结构存在不对称弹性特性,也会导致明显的振动。

(5) 裂纹。轮盘、叶片、轴的故障主要是由疲劳损伤引起裂纹,随着发动机的使用,裂纹发展导致部件强度减小,难以承受预定的载荷而发生断裂。这类故障通常会造成发动机致命损坏,危害极大。

(6) 气激振动。由于结构和运行的原因,在转子系统的通流部分存在着许多气流扰动的激振源,这些激振源都可能诱发气流激振,引起系统的自激振动,导致材料的疲劳破坏,最后发生断裂而引起严重事故。

从以上航空发动机典型转子系统故障分析中可以看出,航空发动机转子系统动力学的研究十分重要。航空发动机转子系统除作为典型旋转机械转子系统外,还具有不同于常规地面旋转机械的特点。它具有复杂的转子-支承结构形式,多是由两个或三个转速不同的内外同心套装的转子相互耦合而成,其中每个转子本身还可能包含球铰和弹性支承之类的结构。另外,它还不同于普遍采用的柔性转子系统,航空发动机转子系统普遍采用名义刚性转子(即准刚性转子)系统,即弹性支承下的刚性转子系统。基于这些原因,从一般转子系统的动力学理论入手,研究具有特定结构特点的故障转子系统(如航空发动机)的动力学行为及特征是正确进行转子系统振动故障分析与诊断的基础。

对于航空发动机这类型旋转机械,对其转子系统的故障监测与诊断一直是航空发动机领域研究的一项长期任务。从故障的信号采集、测定和分析,到确定故障的部位、原因、后果和修复,可以通过实测振动、应力、压力、温度等参数,结合现场经验和专家分析,从傅里叶(Fourier)变换、小波变换等故障信号分析与处理方法到神经网络、专家系统等诊断决策来实现。航空发动机振动测试示意图如图 1.3。

总之,如何从机理出发,减少转子系统振动故障的发生发展,提高设备可靠性;如何从诊断方法入手,提高转子系统故障诊断效率和精度,不仅是航空发动机领域亟待深入研究的问题,也是国民经济各行业旋转机械运行过程中迫切需要解决的重要课题。

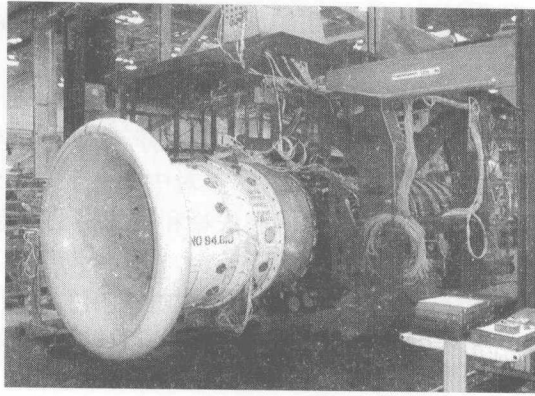


图 1.3 航空发动机振动测试示意图

1.2 国内外研究现状

1.2.1 转子动力学

转子动力学 (rotor dynamics) 是研究转子系统在旋转状态下的振动、平衡和稳定性问题, 尤其是研究接近或超过临界转速运转状态下转子的横向振动问题. 1869 年英国的 W.J.M. 兰金关于离心力的论文和 1889 年法国的 C.G.P.de 拉瓦尔关于挠性轴的试验是研究这一问题的先导. 转子动力学的研究内容主要有以下几个方面^[1]:

(1) 动平衡. 早期的旋转机械转速较低, 振动的起因主要是圆盘的偏心, 即重心不在转动轴线上, 因此用静平衡的办法使偏心距尽量小, 就可以基本消除转子的振动. 随着机器工作转速的提高以及圆盘厚度增加成为圆柱形或锥形, 静平衡的方法已经不能完全消除转子的振动, 而要用动平衡的方法. 平衡的理论根据是转轴的弯曲振动与圆盘质量及偏心距的大小有定量关系. 这种关系称为“不平衡质量的动力响应”.

(2) 临界转速. 有的旋转机械的转子虽然经过动平衡, 但当升速到某个转速时, 转轴会发生剧烈的振动. 发生剧烈振动时的转速称为“临界转速”. 对转子临界转速的研究和计算是转子动力学的重要内容之一. 临界转速同转子的弹性和质量分布等因素有关.

(3) 挠性转子系统. 常见的旋转机械的工作转速都小于转轴最低的临界转速. 转速低于最低临界转速的转子通常称为刚性转子. 为了提高机器的工作容量和效率, 转子系统向高速、细长的方向发展, 转子的的工作转速往往高于最低临界转速. 这样的转子称为挠性转子. 挠性转子系统是近来转子动力学的一个重要内容.

(4) 转子稳定性. 转子不平衡质量引起的振动属于强迫振动, 它的角频率和转动角速度相等. 对于高速转子, 除了不平衡质量引起的振动以外, 还有频率与转动角速度不相等的振动, 称为“涡动”. 转轴与圆盘配合面的摩擦、转轴的材料内阻、轴承油膜力或汽轮机叶轮的汽动力等都是产生涡动的因素. 在理论上, 转轴的这种涡动属于“自激振动”, 或称为“失稳运动”. 涡动可以使转轴发生疲劳破坏或在轴承内的润滑油不能形成油膜而烧坏等事故. 研究高速转子的稳定性以防止其失稳运动在近代转子动力学中占有重要的位置. 文献 [4] 和 [5] 分别研究了支承刚度非对称柔性悬臂转子及刚性转子系统的稳定性问题. 结果发现由于支承刚度的非对称使原来支承刚度对称的部分充液转子的一个不稳定区分裂为多个独立的不稳定区.

(5) 转子整体系统的研究. 航空发动机在运转时, 它们的支承结构、吊挂也可能发生振动. 这些支承和基础结构的弹性变形和内阻都会对转轴的临界转速、稳定性等有着不可忽视的影响. 把基础和转子系统作为一个整体来研究其振动特性越来越受到重视. 航空发动机转子系统具有复杂的转子-支承-基础结构形式, 在转子动力学研究时, 往往需要考虑支承和基础的振动耦合.

1.2.2 转子系统建模与参数辨识

进行转子系统的动力学分析, 离不开合理的动力学模型, 目前国际上广泛采用有限元法进行转子系统的建模. 采用有限元法可以方便地对复杂结构进行建模, 可以考虑转动惯量、陀螺力矩、轴向载荷、内外阻尼、剪切变形, 以及轴承、基础弹性等因素, 还可以考虑流固耦合、多场作用, 且具有足够的建模精度来分析较宽频率范围内的动特性和动响应, 不足之处在于模型参数数量较多^[6]. 在通常的航空发动机动力学理论和工程分析中, 大多是建立发动机转子系统的集中质量模型, 进行动力学特性的解析或数值分析. 集中质量模型做了很多简化, 偏重于定性分析^[7]. 传递矩阵法适合于分析具有复杂链式结构的转子系统的固有特性, 但用于故障动力学分析比较困难^[8].

文献 [9] 较早采用了有限元法进行转子系统动力学研究, 在文献 [10] 和 [11] 中均以有限元模型为基础. 文献 [12] 利用航空发动机整机有限元模型, 可以分析常规的转子动力学特性, 如临界转速、Campbell 图、不平衡响应, 还可以进一步分析零部件应力以及多工况和多场耦合作用. 文献 [13] 详细介绍了以有限元法为基础进行转子-轴承-支承系统建模及非线性响应分析的理论与方法, 并在汽轮发电机组轴系设计与故障诊断中加以应用. 文献 [14] 采用有限元分析了滚动轴承间隙、油轴承的油膜涡动、干摩擦等非线性故障. 文献 [15] 采用有限元模型, 陆续完成了模型转子试验系统的不平衡、不对中、裂纹等多种故障的仿真分析与定量诊断研究.

在国内, 大多采用集中质量模型和传递矩阵法进行转子动力学分析. 例如, 文献 [16] 将航空发动机简化为转子-支承-机匣系统的集中质量模型, 采用传递矩阵

法分析其固有频率和瞬态响应; 文献 [17] 利用数值积分研究了含不同故障的航空发动机转子系统的非线性响应. 在利用有限元法方面, 文献 [18] 应用有限元法分析了转子的振动故障, 文献 [19] 用铁木辛柯梁单元分析了含非线性油膜力的转子系统动态特性, 文献 [20] 用等参梁单元分析了转子系统的油膜震荡, 文献 [21] 用等参元研究了椭圆轴承转子系统的稳定性和分岔, 文献 [22] 进行了耦合动力响应分析, 文献 [23] 则提出了转子系统的离散元动力学建模方法.

为了对航空发动机的振动故障进行定量分析, 人们着力建立更加庞大而精细的 3D 有限元模型^[24]. 文献 [25] 介绍了发动机 3D 有限元建模的详细过程, 文献 [26] 利用 3D 有限元模型实现了航空发动机若干振动故障的精确诊断, 文献 [27] 则介绍了发动机结构系统有限元建模与性能仿真的结果. 同时, 国际上陆续开发了一些转子系统多工况振动分析和仿真的专用有限元软件, 许多通用结构有限元软件也加强了旋转机械振动故障的分析能力.

在转子系统模型的参数识别方面, 由于仿真结果对有限元模型质量的敏感性, 对于一些关键有限元模型参数的确定需要十分谨慎. 众所周知, 模型参数需要在试验测量的基础上加以辨识^[28~30]. 在很多情况下, 这些参数辨识试验需要大量的安装在实际机械设备上的振动传感器、激振器等装置. 对于转子系统不平衡响应的参数识别, 当前有两种主要不平衡法, 即模态平衡法和影响系数法. 模态平衡法要求必须准确知道转子临界转速及模态振型^[31,32]. 当关于基础的可靠有限元模型无法得到时, 使用这种方法是很困难的^[33]. 而影响系数法则要求准确地测量振动相位, 并且需要一些权重增益. 同时, 上面提到的两种方法都需要不止一次的升速降速过程. 为了提高辨识效率并简化过程, 人们研究了单次升降速技术, 用以对不平衡和基础参数进行辨识^[34,35]. 但所有这些方法都比较复杂, 并且需要转速计来测量转子角位.

1.2.3 碰摩故障

动静件碰摩是航空发动机转子系统常见的故障之一. 出现碰摩故障时, 转子的阻尼、刚度、弹性力等发生变化, 呈非线性. 引起碰摩的原因多种多样, 如不平衡、不对中、转轴裂纹、转轴弯曲、涉及装配不当, 以及转子与定子之间的相对运动, 等等. 许多学者针对转子碰摩开展研究. 文献 [36] 对单盘转子系统碰摩运动规律进行了理论分析, 得出了转子初次碰摩转速的解析表达式, 并对阻尼、偏心距和间隙对转子碰摩转速的影响进行了分析讨论. 文献 [37] 利用非线性理论通过建立转子系统碰摩的 Poincaré 映射, 将对非光滑碰摩系统的研究转化为对 Poincaré 映射的分析, 得到了转子系统在接近擦边运动时解随系统参数变化的分岔情形. 文献 [38] 通过 Poincaré 映射、轴心轨迹图、分岔图、功率谱图等研究了 Jeffcott 转子系统碰摩故障引起的系统周期运动、拟周期运动和混沌运动特性.

为了避免碰摩对转子系统的特性造成重大影响,碰摩故障的辨识与诊断就成为一个热门的研究课题^[39].文献[40]提出了一个基于负载的碰摩故障的识别方法,能够同时识别作用在碰摩转子系统中的多点外激励和内部分布力,该方法成功用于横向局部碰摩的诊断中.文献[41]提出了采用随机共振原理来检测微弱的特征信号的新方法,给出了检测模型并将其用于转子碰摩的早期检测中.

转子碰摩是一个非常复杂的非线性问题.目前在对转子碰摩进行各种数值仿真研究时,碰摩运动的描述主要有两种方法^[42]:第一种方法认为碰摩过程需要一段时间完成,碰摩时出现弹性变形和能量损耗,碰摩力的变化是连续但非光滑的,这种方法可由一个分段光滑的动力学方程描述;第二种方法认为碰摩过程是瞬时完成的,不考虑撞击过程的细节,而利用恢复系数去反映碰撞前后的速度变化和能耗,这种描述可表示成一个带有单侧刚性约束的动力学方程.文献[43]建立了单圆盘转子非线性碰摩振动模型,研究了转子的转速、转子偏心量、阻尼系数和转子定子的刚度比对碰摩振动特性的影响.文献[44]和[45]建立了考虑油膜力的碰摩转子的运动方程,研究了油膜力作用下的转子碰摩振动分叉现象、刚度比对转子系统碰摩力的影响及轴承参数对转子响应的影响.文献[46]建立了转子碰摩引起的弯扭耦合振动数学模型,并分析了碰摩对弯扭耦合振动的影响.文献[47]构造了具有碰摩故障的转子轴承系统动力学模型,对系统在运行过程中的非线性行为进行了数值仿真分析,并详细讨论了各转速下转子的混沌运动.

文献[48]用试验研究了单盘转子系统碰摩故障的非线性振动特征,文献[49]用试验方法系统研究了转子-机匣发生单点碰摩、双点碰摩、偏摩时的故障特征,分析了各种碰摩的时域、频域、轴心轨迹、相位、接触信号等不同特征.文献[50]通过试验研究了转子系统中动静件间尖锐碰摩时的振动特征规律.根据碰摩的发展历程,可把碰摩严重程度划分为4个阶段:刚开始触碰、早期尖锐型触碰、中期半尖锐型碰摩和晚期平钝型碰摩.文献[51]分析了转子与限位器发生局部和整圈碰摩时转子系统的非线性特征.

1.2.4 不对中故障

旋转机械在安装和运转中因为多种原因可能发生转子不对中,不对中状态下转子运动引起机器的振动、联轴器的偏转、轴承的摩擦损伤、油膜失稳和轴的挠曲变形等故障问题,对系统的稳定运行危害极大,不对中故障占转子系统故障的60%以上^[52].

转子不对中通常是指相邻两转子的轴心线与轴承中心线的倾斜或偏移程度.转子不对中可以分为联轴器不对中和轴承不对中,联轴器不对中又可分为平行不对中、偏角不对中和平行偏角不对中三种情况;轴承不对中包括偏角不对中和标高变化两种情况,其结果是在联轴器处产生附加弯矩.对于单跨转子系统,主要研究轴

承不对中;对于多跨转子系统,主要研究联轴器不对中。

轴系产生不对中有两种原因:

(1) 制造误差. 在联轴器加工过程中,由于工艺或测量等原因造成端面与轴心线不垂直或端面螺栓孔的圆心与轴颈不同心. 这种情况下在联轴器处会产生一个附加弯矩,但这个弯矩的大小和方向不随时间及运行条件的变化而变化,只相当于在联轴器处施加了一个不平衡力,其结果是在联轴器附近产生较大的一阶振动,通过加平衡块的方法容易消除。

(2) 安装误差及其他影响. 在排除了加工误差引起的不对中后,可以将不对中分为冷态不对中和热态不对中两种情况. 其中冷态不对中主要是指在室温下由于安装误差造成的对中不良;热态不对中指机组在运行过程中由于温度等因素造成的不对中,其主要原因有:基础受热不均;机组各部件的热膨胀变形和扭曲变形;机组热膨胀时由于滑动表面的摩擦力及导向键磨损引起轴承座倾斜和侧行;由于转子的挠性和重量分配不均匀,转子在安装之后产生原始弯曲,进而影响对中;地基下沉不均等。

目前转子系统多使用自位轴承,因此,轴承偏角不对中容易消除. 实际情况下更多的是轴承位置标高发生变化,使轴承载荷重新分配,从而影响整个轴系的稳定性. 轴承支撑标高的变化改变了轴系振动系统的参数,即改变了柔性转子的临界转速和振型. 按柔性转子平衡理论,如果原来平衡状态良好,平衡加重合理的转子,支撑标高的改变都不会使振动产生变化;如果残存不平衡数量大或平衡块加重方式不合理而使转子存在内力矩,则临界转速值和振型的改变就使原来残余小平平衡状态所起的作用发生变化,所以柔性转子平衡不良、支撑标高相对变化的影响最大。

对于多跨转子系统,综合各形式联轴器的结构特点和应用范围,国内外研究者对联轴器不对中的建模方法有三种^[53]:

(1) 基于联轴器的变形几何关系和受力分析. 根据各形式联轴器的结构和特点,分析其在不对中状态下的变形几何关系和受力情况,推导出不对中联轴器广义激振力与不对中量、转速等参数关系的表达式,在此基础上获得该激振力作用下系统的运动微分方程. 该方法的核心是推导不对中联轴器广义激振力的表达式,缺点是忽略了联轴器对其所在轴段刚度的影响。

(2) 基于等效轴段法. 用有限元法或集中质量法等把实际转子系统离散为含有若干轴段和圆盘单元构成的离散系统,求出离散系统的刚度矩阵和质量矩阵,将由联轴器连接后的整体系统看成一多跨的轴盘系统,将其中的联轴器用一等效的轴段来模化,同时分析求解联轴器的等效刚度,建立包含不对中联轴器的转子系统的运动微分方程. 该方法的核心是求出联轴器的等效刚度,并把联轴器等效成轴段或圆盘单元进行分析. 该分析方法的缺点是相当于给系统增加了一个约束. 文献^[54]推导了联轴器传递扭矩的表达式,并考虑联轴器的弯曲变形及其轴向刚度,把柔性联