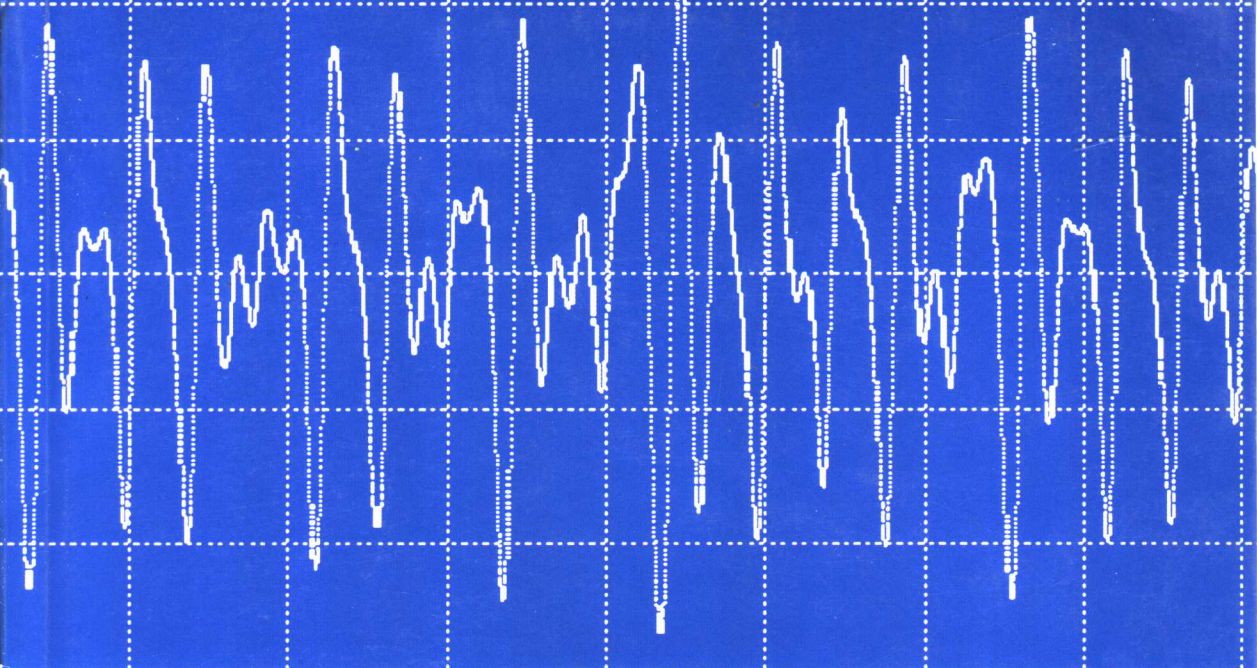
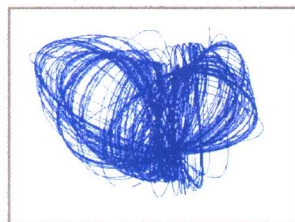
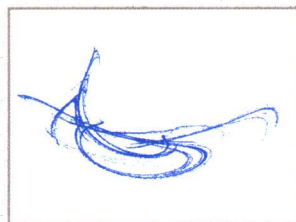
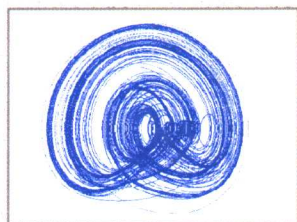




故障旋转机械非线性动力学的理论与试验

闻邦椿 武新华 丁 千 韩清凯 等 著



 科学出版社
www.sciencep.com

故障旋转机械非线性动力学的理论与试验

闻邦椿 武新华 丁 千 韩清凯 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在完成国家自然科学基金重大项目“大型旋转机械非线性动力学问题”(19990510)的基础上完成的系列专著中的一部。

本书着重研究故障旋转机械的非线性动力学理论,并讨论围绕这些故障所进行的大量试验。书中研究单一故障和耦合故障旋转机械的非线性动力学理论、故障发生与发展的慢变与突变过程的理论和某些故障的可靠性理论;讨论抑制旋转机械振动若干有效的方法。还介绍旋转机械模型试验与现场试验的大量结果。

本书可供大专院校教师、研究生和高年级学生阅读,还可供从事旋转机械科学研究、设计制造及使用的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

故障旋转机械非线性动力学的理论与试验/闻邦椿等著. 北京:科学出版社, 2004

ISBN 7-03-013565-2

I. 故… II. 闻… III. ①旋转机构-故障-非线性力学:动力学-理论②旋转机构-故障-非线性力学:动力学-试验 IV. TH21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 052256 号

责任编辑:马长芳 董 斌 / 责任校对:刘小梅

责任印制:安春生 / 封面设计:黄华斌

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2004年8月第一次印刷 印张:21 1/4

印数:1—2 500 字数:415 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

国家自然科学基金重大项目
“大型旋转机械非线性动力学问题”
(19990510)

专著编写委员会

主 任：陈予恕

副主任：黄文虎 闻邦椿

成 员：(以姓氏笔画为序)

朱 均 陈予恕 武际可

闻邦椿 黄文虎

前 言

旋转机械是工业部门中应用最为广泛的一类机械设备,例如汽轮机、压缩机、风机、轧机、机床、各种工程机械以及其他许多重要机械设备都属于这一类。这类设备常常由于出现各种不同的故障而影响其正常和有效的运转,在严重的情况下,甚至会因故障而引发严重的毁机事故,从而导致重大的经济损失。因此,近十多年来,世界各国对机械设备故障的机理和诊断技术的研究,给予了充分重视,诊断技术得到了长足发展。采用诊断技术对于保证机械设备安全可靠运行,进而提高企业的经济效益,具有十分重要的意义。十多年来,国内外的科技工作者曾致力于故障诊断方法、技术与诊断设备的研究,取得了许多重要的研究成果,提出了灰色诊断、模糊诊断、神经网络诊断、小波诊断等诊断方法,并在此基础上研制出多种诊断设备,应用于工程实际,取得了重大的经济效益和社会效益,这是故障诊断领域的重大成就。但鉴于所研制的诊断技术和诊断设备多数是以经验积累或数据库为基础,其准确性和精度尚不十分理想,主要是由于有关转子系统故障发生的机理难以被充分揭示。由于转子系统所出现的故障多数属于非线性的范畴,对它的研究还存在一定难度。例如,转子系统的亚谐振是如何发生的?转子系统的失稳是怎样形成的?转子系统故障的发生与发展是如何演化的?因故障而引发的严重毁机事故的突发状态应如何具体地描述?多重故障转子系统的非线性动力学模型应如何建立?故障转子系统的分岔与混沌行为在什么条件下才能发生?上述一系列问题到目前仍然只停留在有限范围内进行解释,难以具体、准确和全面地给予回答。

为了从理论上对故障产生的机理作出更具体的解释,进而使诊断技术向更高层次的方向发展,近几年来,国内外的科技工作者以较大的注意力转向对故障机理及其非线性动力学特性的研究,并已发表了不少论文。但是,这些研究中的试验结果较少,主要原因是,由于试验研究工作具有相当的难度,即使有了一些试验结果,对其分析的准确性也存在一定的困难。

在我国,对转子系统故障机理方面也进行了大量的研究工作,诸如转子系统裂纹及其稳定性的研究,转子系统油膜震荡的研究,转子系统碰摩的研究,转子系统基座松动的研究,转子系统分岔与混沌行为的研究,转子系统故障慢变过程及突变的研究等。但是通过试验来验证理论研究的结果还不十分充分,因此,应该更多地通过试验来验证理论结果。目前国内外还开始转向对多(或孪生)故障转子系统的动力学特性和故障机理的研究。

从20世纪80年代中期开始,本书作者就开始对故障诊断技术进行研究,提出了灰色诊断的方法,并利用模糊诊断的理论与方法和神经网络的理论与方法对转子系统各种故障进行了监测和诊断,并在此基础上,研制了多种故障诊断设备。

近四年来,结合国家自然科学基金重大项目“大型旋转机械非线性动力学问题”开展了这一方面的研究工作,在转子系统故障机理的研究方面,进行了诸如转子系统油膜震荡的研究、转子系统裂纹的研究、裂纹转子稳定性的研究、转子系统碰摩的研究、转子系统基座松动的研究、转子系统分岔与混沌行为的研究、转子系统孪生或多重故障的研究、带有故障的转子系统慢变过程的研究、带有故障的转子系统的突变的研究等,并发表了大量论文。

本书力求理论与实际的密切结合,从非线性动力学理论新近发展的几个研究热点和方向,如亚谐振动、自激振动及其稳定性、分岔与混沌、慢变与突变等,来研究旋转机械故障的非线性动力学特性,并揭示这些故障发生的机理。此外,还提出了抑制振动的若干具体方法和措施,这对抑制大型旋转机械故障的发生,进而防止重大事故的发生具有实际意义。

本书是由东北大学、哈尔滨工业大学和天津大学等多个单位的教授共同完成的,参加编写的有闻邦椿、武新华、刘树英、柳洪义、张义民、丁千、韩清凯和赵春雨等同志,博士研究生李振平、袁惠群、杨积东、罗跃纲、徐培民、张新江、荆建平、刘长利、姚红良,硕士研究生陈亚东、张义凤等为本课题的研究工作提供了许多有用的资料,书中部分研究结果是由他们得出的;在整理书稿时,还得到博士研究生姚红良、李鹤、陈宏、张晓伟、宋雪萍、李小彭和于涛等的帮助;在编写过程中,黄文虎院士、陈予恕教授和夏松波教授等也为本书编写提出了许多宝贵意见,本书的有些成果是在他们的直接指导下完成的。天津电业局及天津军粮城发电厂为本书提供了许多实际资料,在此向他们表示衷心的感谢。

本书的研究工作是在国家自然科学基金重大项目“大型旋转机械非线性动力学问题”(19990510)的资助下完成的,它的出版又得到中国科学院科学出版基金的资助,在此特向他们致以深切的谢意。

由于时间匆促及编写水平所限,本书定有不妥之处,甚至会有错误,望读者给予批评指正。

作 者

2004年3月22日

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 旋转机械故障的有害影响及研究的意义	1
1.2 故障转子系统非线性动力学问题的研究方法	3
1.3 故障转子系统非线性动力学中的分岔与混沌的研究方法	5
1.4 国内外有关转子系统非线性动力学的研究概况	7
1.5 本书研究的主要内容.....	14
参考文献	15
第 2 章 单一故障转子系统的非线性动力学理论	24
2.1 研究的意义.....	24
2.2 裂纹转子系统的非线性动力学行为.....	25
2.3 支座松动转子系统非线性动力学行为.....	44
2.4 碰摩转子系统的非线性动力学理论.....	54
2.5 非线性连续转子系统油膜震荡分析.....	87
参考文献.....	101
第 3 章 耦合故障转子系统的非线性动力学理论	103
3.1 研究的意义	103
3.2 考虑油膜力作用的碰摩转子系统的动力学行为	103
3.3 含碰摩与裂纹的转子系统的非线性动力学行为	112
3.4 含松动与碰摩的转子-轴承系统的非线性动力学行为	124
3.5 含松动与裂纹的转子系统的非线性动力学行为	135
3.6 耦合故障转子-轴承系统周期运动的稳定性及分岔	145
参考文献.....	149
第 4 章 转子系统故障发生和发展的慢变过程及突变	151
4.1 研究故障发生和发展过程慢变与突变的意义	151
4.2 机械系统慢变故障与突变故障概述	151
4.3 故障转子系统的慢变过程与分段慢变过程的非线性动力学	157
4.4 多故障转子系统的多参数慢变的非线性动力学	173
4.5 转子系统故障发展过程的突变	177
参考文献.....	187
第 5 章 故障转子系统可靠性设计的若干理论问题	189
5.1 研究故障转子系统可靠性的意义及其主要内容	189
5.2 故障转子系统的灵敏度分析	191
5.3 故障转子系统的随机响应分析	192

5.4	故障转子系统的随机可靠性分析	195
5.5	故障转子系统可靠性灵敏度分析	196
5.6	故障转子系统可靠性分析的数值算例	198
	参考文献	207
第6章	故障转子系统若干故障的模型试验	210
6.1	模型试验的必要性及试验研究的主要内容	210
6.2	转子系统油膜失稳故障的模型试验	211
6.3	转子系统裂纹故障的模型试验	223
6.4	碰摩转子系统的模型试验的结果及其分析	232
6.5	基座松动转子系统的模型试验及其分析	246
6.6	转子系统耦合故障的模型试验	251
6.7	两跨转子试验台的非线性动力学模型试验	256
6.8	大型四跨转子非线性动力学试验台的模型试验	262
	参考文献	267
第7章	旋转机械的现场测试及故障诊治	270
7.1	旋转机械故障现场测试的意义及一般方法	270
7.2	旋转机械起机现场试验的结果及分析	272
7.3	旋转机械停机现场试验的结果及分析	282
7.4	旋转机械现场试验故障分析与综合治理	288
	参考文献	304
第8章	抑制旋转机械振动的若干方法和技术	306
8.1	抑制旋转机械振动的一般技术与方法及其意义	306
8.2	改变轴承油膜刚度和阻尼等抑制振动的技术	307
8.3	采用反向气流抑制系统振动的技术	309
8.4	利用电流变技术抑制转子振动	312
8.5	改变轴承支承刚度减小系统振动的技术	326
8.6	改变支承标高及位置抑制振动的技术	328
	参考文献	328

第1章 概 论

1.1 旋转机械故障的有害影响及研究的意义

旋转机械是工业部门中应用最为广泛的一类机械设备,例如汽轮机、压缩机、风机、轧机、机床等诸多机械都属于这一类。转子-轴承系统作为旋转机械的核心部件,在电力、能源、交通、石油化工以及国防等领域中发挥着无可替代的作用。旋转机械常常由于出现各种不同形式的故障而影响其正常工作,有时甚至会发生由某种故障引发的严重的机毁人亡事故,并造成重大的经济损失。

随着科学技术的发展,旋转机械正在向高速、重载和自动化方向发展,对旋转机械在速度、容量、效率和安全可靠性等方面提出了越来越高的要求。国内外的许多科技工作者曾致力于故障诊断方法、技术与诊断设备的研究,取得了许多重要的研究成果,诊断技术得到了长足的发展,在此基础上已研制出多种诊断设备,并应用于工程实际,从中取得了重大的经济效益和社会效益。但目前所研究的诊断技术和设备绝大多数是以经验积累或数据库为基础,转子系统故障发生的机理还未被充分揭示,因而其准确性和精度尚未达到理想的地步。为了从理论上对故障产生的机理做出更具体的解释,进而使诊断技术向更高层次的方向发展,最近几年,国内外的科技工作者以较大的注意力转向对故障机理,即故障转子系统动力学特性的研究^[1~213],其中参考文献[43,70~72,74~76,93,95~98,130~213]是本课题组成员得到的研究成果。

旋转机械的故障的种类繁多,形式各异。最常见的故障有以下多种:

- (1) 油膜震荡;
- (2) 转轴裂纹;
- (3) 基座松动;
- (4) 碰摩;
- (5) 气流激振;
- (6) 不对中;
- (7) 转轴热弯曲。

除了单一故障之外,还出现各种类型的耦合故障,如裂纹与基座松动、基座松动与碰摩、碰摩与裂纹、裂纹与油膜震荡等。

转子系统出现故障时,常常伴有强烈的振动。转子振动有转轴的扭转振动、弯曲振动和圆盘振动等多种多样的形式。传统的转子动力学研究一般采用线性振动

理论与方法,在处理不少实际问题的过程中,合理的线性化能显著地减少分析和计算的工作量,降低理论上和技术上的难度,且其所得结果与对真实系统的测试基本相符,因而基于线性系统理论的转子动力学得到了充分的发展和广泛的应用。基于线性振动理论的转子动力学理论已经比较成熟,在工程中已得到了成功的应用。

然而,随着机械运转速度的日益提高和新型材料、新型结构的出现,线性理论在解决转子系统的动力学问题上的不足逐渐显露出来。在旋转机械中,转子-轴承系统存在着油膜力、密封力、气流激振力等许多强非线性的激励源,这会导致转子系统存在许多非线性问题,而且在转子系统发生故障,比如转子系统发生碰摩、裂纹、基础松动等故障,以及上述故障组合而成的耦合故障时,非线性问题就会更加突出。对于单自由度非线性系统可能产生多解、跳跃、亚谐共振和超谐共振、拟周期解、周期解分岔和动态分岔以及混沌运动等,多自由度非线性系统除上述现象外,还会发生内共振、组合共振、模态耦合等复杂的动力学行为。由于上述因素不可避免地存在,准确描述转子-轴承系统动力学行为的微分方程式是非线性的,用传统的转子动力学理论研究轴承油膜所采用的 8 个线性化刚度和阻尼特性系数的油膜力模型已不能满足现代各种工程设计问题的需要。在许多情况下,用线性化方法研究非线性问题,不仅会有量的误差,而且还会产生质的错误。由于在设计时未能考虑一些有重要影响的非线性因素,不少大型旋转机械在运转中曾发生严重的事故,比如在 20 世纪 70 至 90 年代,世界各国的若干大型发电机组就因为转子激烈振动而发生了机毁人亡的惨剧。大量的事实已经证明,线性振动理论不能很好地或全部地解决转子系统的动力学问题,为了更好地研究转子系统复杂的动力学行为,必须采用非线性理论和方法。对含有大量强非线性因素的转子-轴承系统来说,使用非线性动力学分析方法,不但可以避免由于参数线性化而将自由振动和强迫振动强行分割进行求解所出现的局限性,而且能将受迫振动和各种自激振动因素统一于力学模型中,使之更加符合工程实际。

目前,国内外科技工作者采用非线性理论和方法对转子系统机理进行了大量的研究工作,诸如转子系统裂纹故障的分岔与混沌行为及裂纹故障转子稳定性的研究,转子系统油膜震荡的研究,转子系统碰摩的研究,转子系统基础松动的研究,转子系统分岔与混沌行为及其稳定性的研究,转子系统故障慢变过程及突变的研究等,取得了一系列重要的研究成果,为转子系统故障的预测和诊断提供了较为充分的理论依据。

但目前对多重(或耦合)故障转子系统的动力学和故障机理研究还比较少,而工程实际当中转子系统的耦合故障又是很普遍的,比如裂纹转子系统在一定情况下会产生转静子碰摩,油膜震荡转子系统在某些干扰下也会产生碰摩故障等。耦合故障转子的动力学行为较单一故障转子更加复杂,并且存在许多独特的动力学特性。由于多重故障转子的耦合特性,用单一故障转子诊断方法去诊断多故障转子必

将发生错误。现在,多故障转子故障诊断的理论依据还很不充分,为解决多故障转子的诊断方法问题,用非线性理论研究多故障转子系统的非线性动力学问题和故障机理已是一项十分迫切的工作,因此,近几年国家自然科学基金委员会设立了“大型旋转机械非线性动力学问题”及“多故障转子系统的非线性动力学特性”等多个自然科学基金项目。

为了满足工程实际需要,本书将应用现代非线性动力学理论和转子动力学理论对含有松动、裂纹和碰摩等的单一故障和耦合故障转子系统的动力学行为及其故障机理及特征进行深入研究,为该类故障转子-轴承系统的诊断和预防提供理论参考。

1.2 故障转子系统非线性动力学问题的研究方法

非线性系统振动问题一般从两个方面进行研究:定量方法和定性方法^[5~19]。定量方法是研究如何求出方程的精确解或近似解,主要包括微分方程解的具体表达形式、数量和大小等内容。定性方法是研究方程解的存在性、唯一性及周期解的稳定性等。定量方法主要研究微分方程解的形式等问题。研究的方法有解析方法、数值方法、图解方法和实验方法等。牛顿-莱布尼兹于17世纪创立了微积分,到20世纪50年代计算机问世之前,常微分方程初值问题主要是靠解析方法进行求解。计算机的快速发展和普及促进了数值计算方法的发展。在非线性问题的研究当中解析方法只能对少数特殊的2个或3个自由度以下的强非线性系统求精确解时才有效,对多数非线性的单自由度或多自由度系统只能求出其近似解。应用较多的近似分析方法有谐波平衡法、多尺度法和平均法等,多尺度法适用于求解弱非线性转子系统的稳态响应和非稳态响应,而谐波平衡法可用于求解强非线性和弱非线性转子系统的稳态周期解。研究具有确定性的弱非线性动力系统周期解的经典方法有:摄动法(小参数法),平均法(KB法)、渐近法(KBM法)、多尺度法等;研究单自由度强非线性动力系统的渐近解的方法有:广义平均法、区域平均法、椭圆函数法、时间变换法、参数展开法、频闪法、增量谐波平衡法等;研究多自由度系统的方法有:改进的平均法、多频摄动法,以及多种方法的综合运用等。

近似解法中解的表述是显式的,便于分析参数的影响,对于转子系统的动力学设计和故障诊断是十分有利的。但是近似解法难以获得高精度的解,而且不适宜分析多自由度转子系统,以及难以分析非解析函数型非线性问题,数值解法克服了近似解法的上述缺点。

数值计算方法目前已广泛用于非线性振动系统的研究,是一种求解非线性方程的有效方法。对由微分方程控制的动力系统,求解其稳态解的数值方法主要有参数延拓法、增量谐波平衡法以及延拓法与打靶法、谐波平衡法等复合算法。求自

治系统的平衡点可以归结为一个非线性代数方程组的求解问题,在非奇异点可以用牛顿迭代法求解。为了提高计算效率,人们先后提出了许多求解非线性系统周期解的方法。将稳态周期解求解问题转化为常微分方程两点边值问题求解的思想由来已久,1957年 Urabc 就给出了一种计算步骤^[20]。凌复华于1981年较为全面地发展和论述了打靶法,并将打靶法用于求解分段线性非线性系统^[21~23]。对周期非自治系统,打靶法不仅可以计算出稳定周期解,还能得到系统的不稳定周期解。对自治系统将周期看作未知量,对打靶法稍进行改进即可按非自治系统一样的方法求解^[24]。打靶法的数值稳定性与待求周期解对初始条件的敏感性有关,多级打靶法^[25]可以提高其数值稳定性,文献[26]提出了一种求解非线性转子-轴承系统周期响应的计算方法,它将计算非线性转子-轴承系统瞬态响应的分块 Newmark 方法与打靶法相结合,充分利用了分块 Newmark 方法速度快的优点和 Jacobi 矩阵求解时每步不用迭代的特点,所以计算效率高,并用 Floquet 理论判定解的稳定性。关于延拓法,于1983年 Kubicek 和 Marek 出版了一本专著^[27],若先用延拓法求得周期解的一个近似,再用打靶法提高精度,则形成打靶延拓法,文献[28~35]详细讨论了打靶法和延拓法的理论基础及实际应用。

增量谐波平衡法、椭圆谐波平衡法^[36~38]和谐波平衡立方法^[38]等数值算法都基于谐波平衡法,增量谐波平衡法是其中最重要的一种^[39,40]。幅值谐波平衡法建立了响应幅值与激励频率之间的关系,已被证明等价于谐波平衡 Newton-Raphson 方法。对高次谐波,幅值谱增量平衡法会出现数值不稳定。

实验分析方法在非线性动力系统研究中起着非常重要的作用。实验研究方法不但可以检验理论模型和所求解的正确性,而且还能为其他求解方法提供实践依据和求解思路。一切非线性问题,既可依赖于实验研究进行求解,又必须用实验去验证理论分析的结果,将理论与实验密切结合是非线性研究取得发展的重要一环。但实验方法需要一定的仪器和设备,仅在某些必要的条件下才可行。随着计算机硬件技术和软件工程的发展,在一定条件下和范围内可由计算机仿真代替部分实验工作。

非线性动力系统中普遍存在多吸引子共存现象,即在参数空间同一点有多个稳定的稳态解,每个吸引子在相空间都有各自的吸引域,而且这些吸引域还可能具有分维边界,导致系统的长期行为对初始条件非常敏感。多吸引子共存现象的研究属于系统全局形态分析的范畴。系统中存在多吸引子共存现象时,当系统受到瞬态冲击等外在激励时会使稳态运动状态发生改变,响应从一个稳态解过渡到另一个稳态解。传统的单初始点算法对非线性系统中的一些非线性现象很难从机理上做出正确的解释。多初始点分岔分析法能够发现非线性系统在相空间中更多可能的运动,以便于研究非线性系统的一些运动规律。

1.3 故障转子系统非线性动力学中的 分岔与混沌的研究方法

分岔问题起源于人们对天体力学、流体力学和非线性振动中一些失稳现象的探讨,经过百余年的发展,现在已经成为非线性科学研究的重要内容和十分活跃的前沿课题。描述转子系统动力学问题的微分方程具有非线性特性,在一定条件下必然发生分岔现象。分岔有各种各样的定义^[11,13~16,19,41],比较严格的定义见文献[42]。分岔问题的研究方法可分为理论方法和数值方法两大类,其中理论方法又可分为定性方法和定量方法。

分岔问题大致分为如下几个方面:

- (1) 分岔集的确定,即确定分岔的必要条件与充分条件,这是分岔研究的基本内容;
- (2) 分岔定性性态的研究,即研究分岔出现时系统拓扑结构随参数变化的情况,这是分岔研究的重要内容;
- (3) 分岔解的计算,即系统平衡点和极限环的计算;
- (4) 各种不同分岔的相互作用,以及分岔与动力系统的其他现象(如混沌等)的联系。

于19世纪末,Poincare 首先从几何和拓扑观点对天体力学问题进行了定性研究,提出了Poincare 截面、Poincare 映射、旋转数和不动点数重要概念,奠定了非线性动力学系统理论研究和定性分析的理论基础一点映射理论,创立了摄动法。他的工作和思想给经典力学指出了全新的方向,对非线性科学大发展有着深远的影响。与此同时,Lyapunov 奠定了运动稳定性的理论基础,并给出了严格的稳定性定义,创立了判定稳定性的直接法。在20世纪20~30年代,前苏联的Andronov和他的学生们用定性方法严格证实了早年由Poincare 提出的被称为Hopf 分岔的存在性^[43]。

近年来,分岔理论取得了很大进展,提出了多种研究方法,定量方法有奇异性方法、P-B 规范形方法、后继函数法、Lyapunov 方法、次谐 Melnikov 函数法等。定量方法主要有基于摄动法的平均法、多尺度法、WKB 法、幂级数方法、内谐波平衡法等。

有关分岔理论与方法的工程应用研究也发展很快。袁小阳^[44]用Poincare 映射方法计算了多圆盘-滑动轴承系统的拟周期解,分析了发电机转子在不平衡外激励和轴承自激联合作用下的拟周期运动特性;陈予恕^[45,46]用 Galerkin 法和 Floquet 理论通过数值计算,分析了刚性 Jeffcott 转子的分岔行为;Bucciarelli 和陈予恕等^[47,48]采用非线性内阻模型研究了在非线性内阻力的作用下,单圆盘不平衡转子

自激振动失稳机理,应用奇异性和分岔理论分析了转子周期响应的分岔模式。分岔不仅揭示了系统的不同运动状态之间的联系和转化,而且与混沌运动密切相关,是研究混沌产生的机理和条件的重要途径。

混沌学是从 20 世纪 60 年代初逐渐发展起来的,已经成为目前非线性科学的研究热点之一,被认为是继量子力学、相对论和基因工程以后 20 世纪的又一重大发现。混沌运动是一种由确定性系统产生对于初始条件极为敏感而具有内禀随机性和长期不可预测性的往复非周期运动。物理系统从能量观点可以分为保守系统和耗散系统,保守系统又可分为可积的与不可积的,不可积的系统意味着混沌运动。混沌运动是非线性动力系统中的普遍现象。分析非线性转子系统,不可避免地需要研究其混沌运动。研究混沌运动的方法可分为解析方法和数值方法两大类,解析方法需要大量复杂高深的数学工具往往难以应用于工程问题,因此工程上一般较多应用数值方法。一般描述混沌的数值方法主要有如下 9 种:混沌运动的时间历程波形图、混沌运动的相轨线图、Poincare 映射和 Poincare 截面、分岔图、功率谱法、Lyapunov 指数法、分数维数、胞映射方法、测度熵或柯尔莫哥罗夫(Kolmogorov)熵。功率谱可以很好地区分周期、准周期和混沌的时间演化。由于功率谱缺乏关于相位的信息,所以它不能提供混沌运动的更详细的信息,要进一步研究混沌运动需要借助于其他方法。

Lyapunov 指数是描述相空间相邻轨道发散程度的量,对于一个 n 维系统沿基向量 e_i 有 n 个 Lyapunov 指数 $\sigma_i (i=1, 2, \dots, n)$,通常将它们由大到小排列: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n$,并把 σ_1 称为最大 Lyapunov 指数。在实际应用中,一般用 σ_1 来判断系统的运动状态: $\sigma_1 > 0$ 时,系统响应为混沌运动; $\sigma_1 = 0$ 时,系统响应为周期运动($\sigma_2 < 0$)或准周期运动($\sigma_2 = 0$); $\sigma_1 < 0$ 为平衡点。

通向混沌的道路有倍周期分岔、阵发性分岔、由拟周期通向混沌和 KAM 环面破裂几种方法。倍周期分岔通向混沌是指系统周期解在一定条件下会产生倍周期分岔,这种分岔可以无限继续下去,直至周期演化为无限大时出现混沌;阵发性分岔是指在分岔图上系统的周期解随着参数的逐渐变化,在参数达到某一值时系统响应不经过一系列的分岔,而是突然变为非周期的混沌运动,这种非线性变化的一个特点是分岔过程具有明显的跳变现象。KAM 环面破裂通向混沌是指近可积 Halmiton 系统的轨线分布在 KAM 环面上,一个套在另一个外面,两个环面之间充满混沌区,它在法向平面上的截线称为 KAM 曲线。可积 Halmiton 系统的相平面被鞍点连续分割,相空间中各部分的运动互不相混,在不可积小摄动情况下,双曲鞍点附近发生变化,鞍点连线破裂并在鞍点附近产生剧烈震荡,引起混沌运动。

1.4 国内外有关转子系统非线性动力学的研究概况

1.4.1 具有非线性油膜力的转子系统研究

在一定假设条件下,油膜力可近似表达为轴颈微小位移和速度的线性函数,此时转子系统的动力学控制方程是线性的,其响应求解和稳定性分析可按线性系统分析方法进行。随着机械运转速度的提高,新型材料和结构的出现,系统的非线性增强,简化的线性函数描述油膜力,不仅导致定量上的误差,甚至无法定性地阐述实践中观察到的转子系统动力学行为,所以许多情况下需要用非线性油膜力。

轴承油膜力有长轴承油膜力、短轴承油膜力和有限长轴承油膜力3种,目前广泛使用的是长轴承油膜力和短轴承油膜力。Gardner 等用多尺度法分析了长轴承和短轴承近似下转子系统线性失稳后的弱非线性运动,研究了平衡点失稳后的次临界和超临界分岔^[49]。Russo 研究了湍流对同频涡动稳定性的影响^[50]。Adams 和 Abu-Mahfouz 用数值积分方法结合 FFT 变换、轴心轨迹分析和 Poincare 映射,研究了圆柱轴承和可倾瓦轴承支撑的转子系统丰富的非线性动力学行为,着力于揭示进入和离开混沌的路径^[51]。张卫和朱均用 Lyapunov 函数讨论了滑动轴承的稳定裕度^[52]。袁小阳和朱均基于打靶法和 Floquet 理论,提出了转子系统周期振动求解及其稳定性分析的数值方法,讨论了圆柱轴承刚性转子系统中不平衡量对稳定性的影响^[53]。张正松和沐华平提出油膜失稳涡动极限环特性的 Hopf 分岔分析法^[54]。黄文振对多跨滑动轴承转子系统的稳定性进行了试验研究,证实了短轴承转子系统的稳定性、分岔与混沌行为^[55]。陈予恕采用短轴承假设,考虑了湍流影响,用中心流型定理和平均法分析了临界平衡点附近的 1/2 次谐共振特性;用快速 Galerkin 法求周期解,用 Floquet 理论分析其稳定性并确定分岔集^[56]。Zhao 等研究了油膜阻尼器支撑的转子系统不平衡响应,揭示了同频涡动、幅值突跳、拟周期振动、次谐波振动、混沌等非线性动力现象以及极限点分岔、拟周期分岔、倍周期分岔、次谐波分岔等分岔行为^[57,58]。

1.4.2 裂纹转子运动分析

裂纹故障是旋转机械的常见故障之一,裂纹主要是由于转子材料本身缺陷或长时间的服役而产生,裂纹的存在使转轴刚度周期性变化,从而转子系统产生了低频激振现象。

1. 裂纹刚度模型

为了识别早期裂纹的位置和大小,裂纹转子的振动特性研究引起了广泛的关注,众多研究者提出了各不相同的裂纹模型,但至今也没有一个公认的力学模型。

裂纹开闭规律描述的是转轴转角对裂纹轴动态刚度表现的影响规律,是裂纹力学模型中的重要组成部分,大体有重力决定的开闭模型和表面应力决定的开闭模型两大类,目前应用较多的裂纹模型有方波模型和余弦模型。Mayes 认为具有良好连续性的余弦函数能更好地描述裂纹的开闭规律^[59],而文献[60]认为裂纹开闭在瞬间完成,裂纹开闭规律应用阶跃函数表示。高建民^[61]提出一种将方波模型和余弦模型统一起来、能描述裂纹开闭及其过渡过程的综合模型。Nelson^[62]用变分法建立了一个比较完善的裂纹轴单元的有限元模型,用裂纹所在位置的瞬时曲率决定裂纹的开闭规律,为多自由度的裂纹转子系统动力学分析奠定了基础。Davis 等^[63]在对真实转子的实验中用测量旋转轴应变的方法第一次证实了裂纹在重力作用下的开闭效应,还证明了裂纹的开闭规律与裂纹深度之间存在一定的关系。裂纹轴刚度的计算最简单的方法是直接应用切去裂纹深度的弓形部分的轴段的刚度来等效裂纹的影响。

开裂纹模型是指当转子作同步运动时,转轴裂纹的开闭形状变化很小,此时将裂纹视作常开的。开闭裂纹是认为裂纹的开闭和轴刚度的变化可用一阶跃函数来表示,即裂纹在轴旋转一周时,张开闭合一次。薛璞采用开闭裂纹模型,结合有限元法和 Wilson- θ 分析了一个裂纹转子的次谐波和超谐波振动特性^[64]。朱晓梅和高建民针对理想和非理想能源,研究了裂纹转子加速通过主共振区和参数共振区的非稳态振动^[65]。Tsai 和 Wang^[66]分析了多裂纹转子的自由振动。裂纹会削弱转轴的刚度,从而引起转子的固有振动特性如临界转速和模态发生变化。但是,裂纹的信息难以通过固有特性来获取,主要是通过疲劳裂纹给系统引入的非线性因素来分析转子的非线性特性,进而通过分析各项谐波振动分量的峰值、相位和主共振附近的相位跳变、峰尖分裂等现象来寻求转子的裂纹信息。

2. 裂纹转子定常运动的研究

研究表明:转轴在出现裂纹后,系统响应中出现高次谐波分量,且当转轴转速为 $k\omega_c/n$ ($k=1,2;n=1,2,\dots$) 时, n/kx 分量达到最大值,即存在分数次共振现象。因此,大多数学者均认为可用 $2X$ 分量来检测裂纹。文献[67]通过对 Jeffcott 裂纹转子分析,得到:当转子以超临界转速运行时, $2X, 3X$ 分量很小,难以识别。但是另有学者认为,对于实际转子,当转速为第二阶固有频率的一半时, $2X$ 分量会出现较高峰值,并认为 $2X$ 分量可作为裂纹故障的一个重要特征而区别于其他故障^[68]。Sekhar 研究了含两个裂纹的裂纹轴运动特性,并分析了裂纹之间的相互耦合作用^[69]。

3. 裂纹转子过临界转速时系统的响应

Sekhar 对裂纹转子过临界转速的响应进行了研究,结果表明:当转子出现裂纹时,在临界转速附近振动增大;若裂纹较大,转子振动剧烈,并且没有一确定的临界转速,而是有一个振动剧烈的区域;当裂纹方向与偏心方向夹角为 0 或 π 时,比

夹角为 $\pi/2$ 时转子的振动剧烈。对于裂纹转子, 存在一个使非定常运动最小的静不平衡范围, 过大或过小的径向不平衡量将导致振幅增加, 这是裂纹特有的现象^[73]。

4. 裂纹转子的故障诊断

数十年来, 国内外学者在裂纹转子故障诊断方面作了很多工作^[74~76], 其中裂纹转子的动特性和裂纹征兆已成为各种裂纹转子诊断技术的基础, 被广泛应用于工程实际当中。

为了克服裂纹转子测试信号弱的特点, Imam 等建立了裂纹转子的有限元动力学模型, 用数值积分研究振动特性, 提出了一种能及早发现被噪声淹没高阶振动成分的频率图线技术, 建议在裂纹现场诊断中参考低速时发生 2 阶、3 阶、4 阶等超谐共振峰值, 用水平较高的 3 阶谐波峰值作为裂纹故障分析的主要指标, 并根据分析结论建立了一个基于微机的裂纹在线检测系统^[77]。郑钢铁利用定性分析、多尺度法和数值模拟三种方法对裂纹转子振动的特点进行了研究, 着重讨论了瞬态分量的构成及其特点, 研究结果表明瞬态振动分量是一个比较理想的, 可以用于裂纹早期特征的检测, 同时也证明了多尺度法是研究带有突变参数的参数激振系统的有效方法^[78]。也有人认为: 对于在线监测裂纹故障, 检测相位可能比测量幅值意义更大, 尤其对于柔性转子, 系统响应的高次谐波分量很小, 这时可以考虑测量相位的变化来监视和预报裂纹故障^[79]。Gasch 提出在特定的亚临界转速下利用转子的正、反进动来识别裂纹的方法, 由于不平衡量只影响 1 阶和 2 阶正反进动响应, 裂纹影响 1、2、3 阶正反进动响应, 因而监测转子运动的正反进动量可将转子不平衡量与裂纹故障区别开, 实现裂纹故障的唯一识别。Seibold 等研究了一种故障诊断算法, 能够根据现场信号推断裂纹的具体位置和具体深度^[80]。Darpe 分析了一个受简谐轴向激励的简单 Jeffcott 裂纹转子轴径向耦合振动问题, 指出可根据裂纹轴弯曲振动固有频率来诊断裂纹故障^[81]。Suh 等提出了用神经网络遗传算法诊断裂纹轴裂纹具体位置和深度^[82]。Kevin Murphy 研究了分别采用常开裂纹模型、常闭裂纹模型、呼吸裂纹模型时, 裂纹转子的振动特性和运动稳定性, 指出了随裂纹位置在轴上的变化, 系统的固有频率和振幅等随之发生变化^[83]。Bovsunovsky 和 Matveev 根据常闭裂纹模型研究了如何诊断裂纹的具体位置和大小^[84]。Chinchalkar 提出了根据裂纹转子前 3 阶固有频率来诊断系统的裂纹位置, 将裂纹简化为旋转弹簧, 作出了系统的刚度随裂纹位置不同的变化的曲线图, 曲线的交点反映了裂纹的位置^[85]。在裂纹故障诊断中可以用状态观测器来观测由裂纹开闭引起的扰动量来判断裂纹故障是否存在。

本书作者和他的研究生们对裂纹转子的动力学模型、动力学特性和诊断方法等方面所做的研究工作和结果在参考文献[67, 70~72, 74~75, 138, 166~168]中有较详细的叙述。