

旋转机械 非线性动力学 设计基础理论与方法

黄文虎 夏松波 焦映厚

刘占生 陈照波 胡 超

石田辛男 等著



科学出版社

www.sciencep.com

旋转机械非线性动力学 设计基础理论与方法

黄文虎 夏松波 焦映厚
刘占生 陈照波 胡超 石田辛男 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地论述了大型旋转机械非线性动力学设计的基础理论与方法。在扼要介绍有关非线性动力学的基础知识和现代非线性动力学的基本理论和方法,以及高维非线性系统的降维问题,并详细分析和研究了油膜力和气流激振力等非线性力模型的基础上,重点阐述了大型旋转机械非线性动力学特性的计算和分析方法、非线性转子系统的稳定性问题及其分析和计算方法,并结合国产机组的实例阐述了大型旋转机械非线性动力学设计的基本理论与方法,介绍了旋转机械非线性故障的现场分析与处理,以及转子失稳后的疲劳强度分析等问题。本书重视现代非线性动力学理论在生产实际中的应用,为大型旋转机械设计提供非线性动力学设计计算方法及计算数据和结果。

本书可供从事旋转机械研究、制造及现场运行等方面的科技人员阅读和参考,同时可供高等学校教师、研究生和高年级学生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

旋转机械非线性动力学设计基础理论与方法/黄文虎等著. —北京:科学出版社, 2006. 12

ISBN 978-7-03-017567-0

I. 旋… II. 黄… III. 旋转机构-非线性力学: 动力学-机械设计
IV. TH210.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 073180 号

责任编辑: 吕 虹 鄢德平/责任校对: 朱光光

责任印制: 安春生/封面设计: 王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

排版制作: 科学出版社编务公司
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 12 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2006 年 12 月第一次印刷 印张: 313/4

印数: 1—2 000 字数: 603 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

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)研究的基础上编写的一部专著,重点研究大型旋转机械非线性动力学设计基础理论与方法。

大型旋转机械的传统设计方法,一般都是建立在线性模型假设的基础上。在通常的机组容量和运行参数下,这样的处理一般能满足工程实际的需要。但是,随着机组容量的增大和参数的提高,机组非线性因素的影响越来越显著,在某些条件下,起主要的影响。实际情况是,有的大型汽轮发电机组,在设计时轴系是稳定的,但在实际运行中却出现失稳现象,究其原因一般与非线性因素有关。20世纪80年代,机组中的非线性问题已引起重视。如何将非线性动力学的理论与方法引入到实际大型旋转机械的设计中,这是人们普遍关心的问题。国内外对这个问题虽已开展大量研究,发表了大量的有关机组非线性研究方面的文章,但迄今尚未有一部将现代非线性动力学理论与实际机组设计相结合的专著问世。如何将现代非线性动力学理论应用到实际机组的设计中去,是设计人员 and 研究人员关心的问题。将有关大型旋转机械非线性动力学设计的基础理论与方法,以及近年来已取得的研究成果进行归纳和整理,系统地介绍给读者,推动这方面研究工作的发展,提高我国大型旋转机械非线性动力学设计的水平,是本书撰写的主要宗旨。

为便于读者阅读,本书概括性地对现代非线性动力学的基本理论和计算方法作了介绍。本书对于高维非线性系统的降维给予了足够的重视,并将其应用于我国当前的主力汽轮发电机组的分析中。实际上,由于非线性问题的复杂性,实际工程机组高维模型的理论求解和分析十分困难。迄今为止,国内外的研究工作一般仅限于对简化的低维非线性模型的求解与分析,而在文献中还很少见到对实际工程机组的高维非线性模型的求解和分析。高维非线性系统的数值计算工作量也很大,因而对高维非线性系统的合理降维是求解高维非线性系统问题的一条重要途径。

在内容安排方面,本书作了如下考虑:首先,考虑到在机组轴系的设计中,临界转速、不平衡响应、稳定性是三个主要的设计内容,其中尤其是稳定性对机组安全运行有关键的影响,而且线性方法不足以完全揭露问题的本质,需要用非线性动力学方法来进行研究,因此,本书把主要篇幅放在用非线性动力学理论和方法对机组的动力学问题进行分析与研究上。考虑到用非线性理论判定机组稳定性的工程方法和准则目前尚未完全成熟,本书也对其研究情况、探索内容和发展

方向作了介绍和论述,以便在今后实践中不断完善。其次,本书努力反映当今研究的最新成果,例如,将我国著名数学家吴文俊先生提出的数学机械化方法应用于实际机组转子系统的非线性动力学分析,取得了有意义的结果,为非线性转子动力学的研究提供一条新的途径。再次,本书对一些研究中的问题尽可能给予较全面的介绍,例如,大型旋转机械主要非线性因素的滑动轴承的油膜力模型,目前文献中类型繁多,本书综合各种方法并进行了比较研究,为实际应用提供了有参考价值的计算结果。另外,对若干与实际工程相关的内容,如转轴的扭转振动、非对称转子的振动、考虑非线性油膜力时转子的应力、寿命等问题,本书也对其作了一定的介绍。本书重视当前发展中的重大方向性问题,例如,目前超临界和超超临界机组在我国已开始投运,是我国大容量火电机组今后发展的方向,伴随而来的汽流激振问题就十分突出。本书在这方面综合了国内外研究成果,给予了较详细的阐述。

在本书的编写中,我国大型发电装备的制造厂家——哈尔滨汽轮机有限责任公司为本书提供了国产机组的大量数据和有关资料,使理论研究能更好地与实际相结合,使本书既有先进性又有实用性。

日本著名非线性动力学专家,名古屋大学石田辛男教授参加了本书部分章节的编写,将他多年来有关滚动轴承非线性振动和转轴的扭振和减振方面的研究成果融入本书,刘军博士对有关章节进行了翻译、校对。在此,对石田辛男教授和刘军博士对本书的支持表示感谢。

西安热工研究院张学延高级工程师,提供了多年来从事有关汽流激振方面的研究成果和在电厂现场处理的大量故障实例,丰富了本书的内容。在此,对西安热工研究院和张学延高级工程师表示感谢。山东电力科学研究院周广顺教授也为本书提供了丰富的现场机组故障处理的宝贵资料,在此,也表示感谢。

哈尔滨工业大学能源学院于达仁教授、鲍文教授为本书提供了他们在机组-电网扭振方面的最新研究成果,在此一并表示感谢。

本书编写分工:前言,由夏松波、黄文虎编写;第1章概论,由黄文虎、焦映厚编写;第2章非线性动力学问题的求解方法,由胡超、黄文虎、刘丽坤编写;第3章旋转机械非线性动力学分析的数学机械化方法,由王立国、胡超、黄文虎编写;第4章滑动轴承非线性油膜力模型及其特性分析,由焦映厚、夏松波编写;第5章汽轮发电机组的汽流激振及其稳定性,由张学延、刘占生、叶建槐编写;第6章滚动轴承诱发的非线性振动,由石田辛男编写,刘军翻译;第7章旋转机械转轴的扭转振动,由石田辛男、陈照波编写,刘军翻译;第8章非对称转子的振动,由刘占生、黄森林编写;第9章旋转机械转子-轴承系统的稳定性分析,由陈照波、夏松波、郑惠萍、焦映厚编写;第10章旋转机械的非线性动力学设计,由焦映厚、崔颖、黄文虎、石广田、陈照波编写;第11章旋转机械非线性故障的

现场分析,由刘占生、迟威、张学延编写;第12章转子系统失稳后的疲劳强度分析,由荆建平、夏松波编写。本书由焦映厚进行了全书的统稿、编辑和校对工作。

在编写本书过程中,哈尔滨汽轮机有限责任公司梁秀珍副总工程师、顾卫东工程师和杨晓辉工程师对实际机组的计算提供了有价值的建议和计算资料。

东北大学闻邦椿院士、天津大学陈予恕院士、电力自动化研究院薛禹胜院士为本书的编写提供了有价值的资料。西安交通大学朱均教授、虞烈教授,上海复旦大学张文教授、郑铁生教授和上海大学张直明教授在本书编写过程中给予了很多帮助和支持,在此一并向他们表示谢意。

本书成稿后,特请西安交通大学朱均教授和复旦大学张文教授担任本书的主审,两位教授分别认真审阅了全书各章书稿,提出了许多重要和有价值的意见,在此对两位教授表示特别的感谢。

本书的研究工作是在国家自然科学基金委员会重大项目(19990510)资助下完成的,同时也得到黑龙江省自然科学基金重点项目(ZJG03-1)的资助。本书出版工作得到了中国科学院科学出版基金的资助,特在此致谢。

因编写时间匆促和水平所限,书中难免有不当之处,恳请读者给以指正。

作 者

2005年12月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 概述	1
1.1.1 旋转机械非线性动力学研究的重要性	1
1.1.2 旋转机械的非线性动力学现象	2
1.2 转子系统非线性动力学研究方法及国内外发展概况	4
1.2.1 转子系统非线性动力学研究的一般方法	4
1.2.2 求解非线性转子动力学问题的数值积分方法	7
1.2.3 非线性油膜力模型	8
1.2.4 动压密封力	9
1.2.5 几个与实际工程相关的问题	9
1.2.6 大型转子-轴承系统高维非线性动力学问题的求解方法	12
1.3 转子系统非线性动力学设计及稳定性	15
1.3.1 转子系统非线性动力学行为的机理研究和实验研究	15
1.3.2 高速转子-轴承系统的非线性动力学设计	17
1.3.3 转子系统非线性稳定性分析方法	19
1.4 非线性转子动力学研究中存在的问题及展望	20
参考文献	22
第 2 章 非线性动力学问题的求解方法	26
2.1 概述	26
2.2 非线性振动的近似解析方法	29
2.2.1 非线性振动的特点	29
2.2.2 谐波平衡法	30
2.2.3 摄动法	31
2.2.4 平均法	33
2.2.5 多尺度法	35
2.2.6 渐近法	37
2.2.7 Hurwitz 定理	41
2.3 非线性转子系统动力学的数值求解方法	41
2.3.1 非线性系统动力学的数值求解	41

2.3.2	非线性动力方程的解法	42
2.3.3	中心差分法	42
2.3.4	Newmark 法	44
2.3.5	Wilson- θ 法	45
2.3.6	精细积分方法	46
2.3.7	利用打靶法求解周期激励系统的周期解	49
2.3.8	周期解的延拓——伪弧长算法	50
2.4	非线性动力学问题的求解方法	52
2.4.1	动力系统的基本理论	52
2.4.2	相平面上奇点的性质	53
2.4.3	中心流形与惯性流形	54
2.4.4	分岔的基本概念	57
2.4.5	Poincaré-Birkhoff 范式	59
2.4.6	Lie 变换群方法	60
2.5	高维非线性系统的建模和降维求解方法	60
2.5.1	在工业技术中的作用和应用前景及意义	61
2.5.2	近似力学建模	62
2.5.3	高维系统约化的精确方法和近似方法	64
2.5.4	主相互作用模式降维方法	73
2.5.5	约化摄动方法	76
2.5.6	特征列方法简介	77
	参考文献	77
第 3 章	旋转机械非线性动力学分析的数学机械化方法	79
3.1	概述	79
3.2	机械化数学——吴消去法的理论基础	80
3.2.1	吴消去法的数学基础	80
3.2.2	多项式的约化	81
3.2.3	吴消去法中的拟除思想	82
3.2.4	吴消去法中的特征列	83
3.3	转子系统运动特性的数学机械化分析	85
3.3.1	单盘转子系统模型的涡动分析	86
3.3.2	双圆盘转子系统模型的涡动分析	92
3.4	油膜力引起的转子半速涡动的数学机械化分析	95
3.4.1	基于短轴承模型油膜力引起的转子涡动	95
3.4.2	基于长轴承模型油膜力引起的转子涡动	103

3.5 时间有限元与机械化数学联合求解	104
3.5.1 时间有限元法	104
3.5.2 时间有限元法联合吴消去法求解转子系统的动力学问题	108
3.6 谐波平衡法联合吴消去法分析转子系统的碰摩	115
3.6.1 谐波平衡法在转子-轴承系统中的应用	115
3.6.2 转子系统中碰摩问题的机械化数学分析	116
3.7 200MW 汽轮发电机组低压缸转子轴段的机械化数学分析思想	119
3.7.1 节点处非线性油膜力模型的选取	120
3.7.2 应用改进的机械化数学方法——微分控制算法分析实际转子系统	121
3.8 本章小结	123
参考文献	125
第 4 章 滑动轴承非线性油膜力模型及其特性分析	127
4.1 概述	127
4.2 Reynolds 方程及其求解	128
4.2.1 广义 Reynolds 方程	128
4.2.2 Reynolds 方程无量纲形式	130
4.2.3 圆轴承压力分布	132
4.3 滑动轴承的各种油膜力模型	134
4.3.1 传统的八参数线性化油膜力模型	134
4.3.2 无限长圆轴承非线性油膜力 Hori 模型	135
4.3.3 无限短圆轴承的非线性油膜力模型	137
4.3.4 无量纲短轴承非稳态油膜力模型	138
4.3.5 变分法非线性油膜力模型	139
4.3.6 Capone 圆轴承非线性油膜力模型	142
4.3.7 滑动轴承非线性油膜力的数据库方法	143
4.3.8 基于 Poincaré 变换的滑动轴承非线性油膜力数据库方法及拟合表达式	148
4.4 几种非线性油膜力模型的分析 and 比较	156
4.4.1 不同圆轴承非线性油膜力模型与有限差分法的分析和比较	156
4.4.2 不同椭圆轴承的非线性油膜力模型与有限差分法的分析和比较	158
4.5 计算实例	159
4.5.1 Jeffcott 刚性转子-轴承系统动力学模型	159
4.5.2 刚性转子-圆轴承系统非线性动力学特性分析	160
4.5.3 刚性转子-椭圆轴承系统非线性动力学特性分析	180
4.6 本章小结	191
参考文献	193

第 5 章 汽轮发电机组的汽流激振及其稳定性	195
5.1 概述	195
5.1.1 转子系统汽流激振概述	195
5.1.2 国内外轴系汽流激振和稳定性的研究概述	196
5.2 密封动力特性模型	199
5.2.1 Thomas-Alford 模型	199
5.2.2 Black-Childs 模型	199
5.2.3 Muszynska 模型	201
5.2.4 其他模型	202
5.2.5 各种密封模型分析比较	202
5.2.6 迷宫两控制体模型	203
5.2.7 Muszynska 模型系数修正	208
5.3 叶顶径向间隙沿周向不均引起的激振力模型	209
5.3.1 无围带叶片计算模型	210
5.3.2 有围带叶片计算模型	210
5.4 调节级不对称开启产生的径向力	214
5.4.1 转子径向力	214
5.4.2 径向力垂直方向分量表达式	215
5.4.3 实际机组调门部分开启时垂直力计算	216
5.5 超临界汽轮发电机组轴系的稳定性	216
5.5.1 考虑密封时轴系的稳定性	216
5.5.2 叶顶间隙激励对弹性支承的 Jeffcott 转子运动稳定性的影响	223
5.5.3 蒸汽激振力对汽轮机转子运动稳定性的影响	224
5.5.4 算例	225
5.5.5 超临界机组轴系稳定性设计准则的建议	228
参考文献	228
第 6 章 滚动轴承诱发的非线性振动	231
6.1 前言	231
6.2 滚动轴承的组成	231
6.3 球轴承支承的转子线性振动	232
6.3.1 滚珠大小不均引起的强迫振动	232
6.3.2 滚珠通过转子下方时引起的强迫振动	235
6.4 弱非线性情况下, 球轴承间隙引起的非线性振动	236
6.4.1 非线性弹簧特性	236
6.4.2 典型的非线性共振现象	237

6.4.3 其他非线性现象	242
6.5 强非线性情况下, 挤压油膜阻尼器引起的非线性振动	244
6.5.1 挤压油膜阻尼器的组成与非线性弹簧特性	244
6.5.2 典型的非线性振动	245
6.6 非线性振动系统的解析法	246
6.6.1 4 自由度线性转子系统的运动方程	247
6.6.2 2 自由度线性转子径向振动系统	250
6.6.3 2 自由度转子倾斜振动系统	253
6.6.4 准坐标系的变换	255
6.6.5 谐波共振的分析与实验结果	257
6.6.6 次谐波振动的分析与实验结果	264
参考文献	267
第 7 章 旋转机械转轴的扭转振动	269
7.1 前言	269
7.2 汽轮发电机组轴系扭振的建模与求解	270
7.2.1 汽轮发电机组分布参数模态降阶模型	270
7.2.2 分布参数模态降阶模型力矩输入的处理	273
7.2.3 分布参数模态降阶模型的建立步骤	277
7.3 分布参数模态降阶模型在 300MW 汽轮发电机组中的应用	278
7.3.1 机组的原始数据	278
7.3.2 分布参数模态降阶模型的建立	279
7.3.3 甩负荷仿真	281
7.4 汽轮机调节系统与轴系扭振的相互作用	284
7.4.1 调节系统不灵敏对扭振稳定性的影响	285
7.4.2 快关气门控制与扭振的相互作用	288
7.5 发动机曲轴扭转振动的原因及振动模式	295
7.5.1 发动机曲轴扭转振动的原因	296
7.5.2 固有值与振动模式	297
7.6 各种阻尼器与动阻尼器	299
7.6.1 各种阻尼器	299
7.6.2 单摆式动阻尼器的非线性振动分析	302
参考文献	311
第 8 章 非对称转子系统的振动	312
8.1 概述	312
8.2 非对称转子-轴承系统动力特性	312

8.2.1	非对称转子-轴承系统的基本运动方程	312
8.2.2	构造非对称转子-轴承系统的传递矩阵	316
8.2.3	非对称转子-轴承系统的 Riccati 传递矩阵法	324
8.3	非对称转子-轴承-支承系统的非线性动力特性	326
8.4	实际非对称转子-轴承系统非线性动力特性分析	332
8.4.1	电机转子-轴承系统运动微分方程的降维	332
8.4.2	降维计算的结果及对比	338
8.4.3	参数对电机转子-轴承系统动力特性的影响	340
8.5	结论	346
	参考文献	347
第 9 章	旋转机械转子-轴承系统的稳定性分析	348
9.1	概述	348
9.2	稳定性基本理论	350
9.2.1	运动稳定性的基本概念	350
9.2.2	运动稳定性的判别方法	356
9.2.3	Floquet 理论	361
9.3	转子-轴承系统的运动稳定性分析	365
9.3.1	线性转子-轴承系统的稳定性分析	365
9.3.2	非线性转子-轴承系统的运动稳定性及分岔	370
9.4	基于轨迹的非线性转子-轴承系统稳定性量化分析	377
9.4.1	概述	377
9.4.2	R^1 观察空间转子系统的运动特征	378
9.4.3	轨线稳定裕度	383
9.4.4	分岔点预测	385
9.4.5	应用实例	386
	参考文献	388
第 10 章	旋转机械的非线性动力学设计	390
10.1	概述	390
10.1.1	轴系非线性动力学设计的方法及特点	390
10.1.2	轴系非线性动力学设计的需求及内容	391
10.2	大型汽轮发电机组轴系线性动力学设计	392
10.2.1	汽轮发电机组轴系线性动力学设计	392
10.2.2	200MW 汽轮发电机组轴系动力学线性分析	394
10.3	大型机组轴系非线性动力学设计方法	400
10.3.1	概述	400

10.3.2 转子-轴承系统非线性动力学设计基本内容	400
10.3.3 转子-轴承系统非线性动力学设计框图	403
10.4 200MW 机组非线性动力学特性的计算与分析	404
10.4.1 概述	404
10.4.2 低压转子-圆轴承系统油膜涡动和油膜振荡现象的特征与规律	405
10.4.3 低压转子-圆轴承系统的降维计算方法及其验证	409
10.4.4 低压转子-椭圆轴承系统振动稳定性随参数变化的规律	412
10.4.5 200MW 汽轮发电机组转子-轴承系统非线性动力学特性的计算与分析	417
10.4.6 转子失稳转速随转子-圆轴承参数变化的规律	421
10.4.7 用 ADINA 程序分析 200MW 机组轴系非线性动力学特性	423
10.5 600MW 机组非线性动力学特性的计算与分析	428
10.5.1 概述	428
10.5.2 600MW 汽轮发电机组低压转子-轴承系统计算模型	428
10.5.3 600MW 汽轮发电机组低压段转子-轴承系统数值积分求解	429
10.5.4 圆轴承支承的转子振动稳定性随参数变化的规律	431
参考文献	434
第 11 章 旋转机械非线性故障的现场分析	436
11.1 概述	436
11.2 油膜涡动和油膜振荡故障的机理和现场实验研究	437
11.2.1 油膜振荡的机理与特征	437
11.2.2 油膜振荡性质	440
11.2.3 消除油膜振荡的措施	441
11.2.4 油膜振荡故障的诊断与处理实例	441
11.3 动静碰摩的机理和现场实验研究	445
11.3.1 故障简介	445
11.3.2 动静碰摩的机理	445
11.3.3 动静碰摩的诊断方法	447
11.3.4 机组碰摩故障的实例	448
11.3.5 综合诊断及处理意见	451
11.4 裂纹转子振动的机理和现场实验研究	452
11.4.1 故障简介	452
11.4.2 裂纹转子振动的机理研究	453
11.4.3 裂纹转子故障的诊断方法	455
11.4.4 裂纹转子的现场试验研究	456
11.4.5 振动处理	459

11.4.6 综合诊断方法及处理意见	460
11.5 汽流激振的机理和现场实验研究	461
11.5.1 故障简介	461
11.5.2 机组汽流激振产生原因及特征分析	461
11.5.3 机组汽流激振的实例	462
11.5.4 超临界机组汽流激振的防范措施	463
11.5.5 结论	467
参考文献	468
第 12 章 转子系统失稳后的疲劳强度分析	469
12.1 概述	469
12.2 非线性连续转子-轴承系统油膜振荡分析	469
12.2.1 非线性转子-轴承系统动力学模型	469
12.2.2 求解方法的比较和选取	470
12.2.3 转子系统非线性动力学行为分析	470
12.3 转子油膜失稳后的疲劳寿命分析	473
12.3.1 材料疲劳分析的损伤力学方法	473
12.3.2 损伤力学发展概况	474
12.3.3 非线性损伤力学理论	474
12.3.4 含损伤结构定解问题的求解方法	485
12.4 油膜振荡下转子疲劳寿命分析	486
12.4.1 有限元模型的建立	486
12.4.2 疲劳载荷的确定	486
12.4.3 疲劳损伤分析	488
12.5 本章小结	490
参考文献	491

第 1 章 概 论

1.1 概 述

1.1.1 旋转机械非线性动力学研究的重要性

随着我国经济的高速发展,电力需求将急剧猛增。为了节约资源和保护环境,提高电力生产行业的效率已显得越来越重要。汽轮发电机组是电力大系统中的原动机和能源生产环节,实现其安全稳定运行是提高效率的前提。近代汽轮发电机组的容量和运行参数不断提高,转子向大跨度、柔性、重载方向发展,超临界以至超超临界的 600MW 以上的大型机组将成为我国的主力发电机组,机组的安全问题日益受到关注。

机组轴系稳定性问题历来是机组设计、制造、运行中的一个突出问题。机组轴系失稳将导致灾难性毁机事故。日本、美国等均曾发生重大毁机事故。我国早期的主力 200MW 机组中,曾有相当数量的机组在运行中出现低频分量的油膜涡动,成为电厂的隐忧,因为在一定条件下它可能发展为严重的油膜振荡。我国自 1972 年朝阳电厂机组投运并发生油膜振荡以来,已发生了若干起重大恶性断轴毁机事故,其中有若干起是由于轴系失稳所致。机组发生失稳事故的主要原因是汽轮发电机组中存在着油膜力、密封力、不均匀蒸汽间隙力等强非线性激励源,其中非线性油膜力和汽流激励力是最主要的非线性激励源,导致转子-轴承系统在一定条件下成为自激振动系统,这种机组存在一定的机制,在一定条件下使外界能量输入机组,导致机组发生激烈的振动,引发严重的事故。

对于旋转机械系统中各种异常振动和灾难性事故,过去的研究大多采用基于线性的转子动力学理论。例如,传统转子动力学对转子-轴承系统稳定性问题的研究,一般采用 8 个线性化的刚度与阻尼特性系数的线性油膜力模型。对于大型旋转机械中存在的油膜力、密封力、不均匀蒸汽间隙力等严重的非线性激励源,基于线性理论的设计往往不能精确反映机组的运行规律,按线性设计应为安全的机组在工作转速下可能提前发生油膜振荡导致事故,也可能设计偏于安全而造成浪费。数学模型的不够完善以致系统中存在的多种由非线性因素引起的复杂动力学行为迄今尚没有彻底搞清,对大型机组轴系稳定性的非线性动力学设计尚缺乏有效的方法,不能满足现代工程设计的需要,迫切需要建立转子-轴承系统的非线性动力学理论,提出转子-轴承系统的非线性动力学设计方法,深入揭示机组的运行规律,研究旋转机械中存在的各种实际问题,因此对轴系稳定性的非线性动力学

设计方法的研究是当前一个紧迫的课题。这对提高旋转机械运行的稳定性、安全性、可靠性具有重要的现实意义和实际工程背景^[1~4]。

随着非线性动力学理论的发展,非线性转子动力学理论和方法受到了关注,大量的研究成果使转子动力学面貌一新。近年来,现代非线性动力学理论的研究已经取得了很大进展,用现代非线性动力学理论的研究成果解决转子-轴承系统中存在的非线性动力学等问题已提上日程。旋转机械的设计期待着非线性动力学提供坚实的理论基础。然而另一方面,由于非线性动力学问题的复杂性,现有的非线性动力学理论和方法大多只适用于求解用解析式函数表示的低维非线性系统,而对大型旋转机械这样的高维复杂系统,其模型往往难以完全用解析函数表示,现有的理论和方法往往难以奏效。因此研究高维复杂大型转子系统的求解方法就显得十分迫切。必须取得突破才能更有效地控制甚至利用机组的各种非线性动力学行为,提高旋转机械设计和运行的稳定性、安全性、可靠性。

针对目前关于大型旋转机械动力学问题的研究现状,随着机组容量的增大和参数的提高,机组非线性因素的影响越来越显著,在某些条件下,这些因素将起到主要的作用。机组中的非线性问题已引起重视。如何将现代非线性动力学理论应用到实际机组的设计中去,是具有重要现实意义的问题。本书的宗旨是将有关大型旋转机械非线性动力学设计的基础理论与方法,以及近年来已取得的研究成果进行归纳和整理,系统地介绍给读者,并借此推动这方面研究工作的发展,提高我国大型旋转机械非线性动力学设计的水平。

1.1.2 旋转机械的非线性动力学现象

旋转机械中的非线性问题已日益为人们所重视。这是因为在旋转机械中存在着大量的非线性现象,这些非线性现象无法用经典的线性理论来解释和分析。以往很多非线性动力学问题,为了求解方便,大都用线性的方法来进行简化处理,一般也能取得一定效果,但在有的情况下就不能奏效。例如,国内曾发生的 200MW 机组断轴事故,用线性理论来解释往往不足以说明问题。国外多起大机组断轴事故等重大情况也是如此。下面对旋转机械中的非线性动力学现象进行概括性的介绍。

1. 微小间隙如轴承、汽封和叶顶间隙等约束的流体力

这些力都具有明显的非线性特征。目前,国内外学者已建立了各种适合于非线性动力学分析的油膜力表达式,如三函数表达式、数据库方法、解析表达式等。这些非线性油膜力的表达式均可用来对转子-轴承系统进行非线性动力学分析。

2. 油膜涡动和油膜振荡

油膜涡动是在应用滑动轴承的大型旋转机械中,由于非线性油膜激振力的作用而发生的一种自激振动,其涡动频率基本维持在转速的一半,故称之为油膜半速涡动,在频谱图上表现为接近 $1/2$ 的工频频谱。在转子-轴承系统一定的几何参数和运行条件下,当转子转速达到一定值时,机组振动振幅会突然变大,由油膜涡动转变为油膜振荡,严重时将危及机组的安全。

3. 机组动静部件的摩擦故障

碰摩故障是机组最常见的一种故障,其原因主要是由于转子不平衡过大、转子不对中或热膨胀不均匀等引起。转子和静子的摩擦能引起磨损和发热效应。在这种不稳定运动中,接触面上有很大的法向力和摩擦力,导致转子发生反向涡动并不断发展,有可能导致严重事故。要分析转子碰摩时的动力学特征需应用非线性动力学方法来求解。从频谱图上可以看出,发生碰摩时的频谱图为宽频带的枞树形。

4. 旋转部件或基座松动

旋转机械系统中部件的长期振动或安装质量不符合要求都会导致松动现象产生。有松动故障的旋转机械工作时会使系统刚度发生周期性变化。当转子系统存在基础松动故障时,由于间隙等复杂非线性刚度和阻尼因素的存在,在频谱图上会出现一定宽谱特性,有二倍和三倍频等高频成分,特别会出现频谱成分较混乱的低频分量。

5. 裂纹转子

裂纹故障也是旋转机械常见的故障,裂纹的存在使转轴刚度发生周期性变化。目前裂纹开闭的模型有多种,但尚无一个公认的力学模型。研究表明:转轴在出现裂纹后,系统响应中会出现高次谐波 $2\times$ 、 $3\times$ 分量。据此,可以作为判断裂纹故障的参考依据,虽然,目前对裂纹转子的研究也较深入,但在现场要判断转子的裂纹故障,还是相当困难。

6. 汽流激振

对于大容量高参数的机组,尤其是超临界和超超临界机组,汽流引起的汽流激振是十分常见的,引起汽流激振的蒸汽激振力,一般来自三个方面,即叶顶间隙激振力、密封流体力和作用在转子上的静态蒸汽力,该静态蒸汽力受高压缸进汽方式的影响。在国外,发展超临界和超超临界机组初期,均发生严重的汽流激