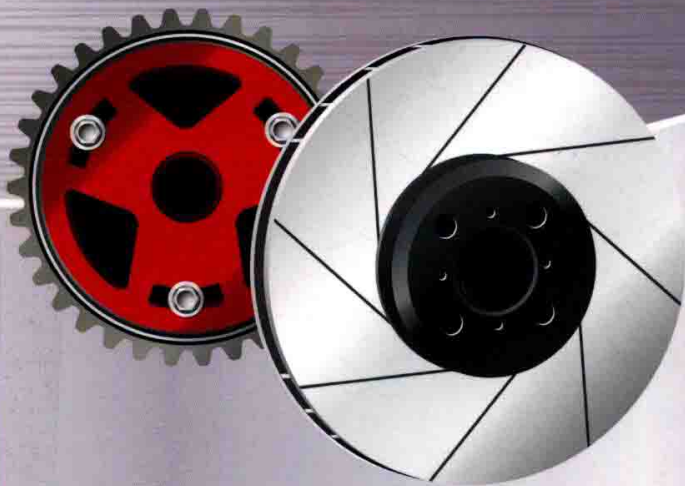


转子-橡胶轴承系统 非线性动力学特性研究

花纯利 饶柱石 著



非
线
性
振
动



科学出版社

转子-橡胶轴承系统非线性 动力学特性研究

花纯利 饶柱石 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

目前,转子-橡胶轴承系统在运转过程中常常会发生异常振动噪声,这不仅会影响系统运转的稳定性,而且振动噪声还可能通过基座传递给船体并向外发声,严重影响水下航行器的安全性、隐蔽性及生存能力。因此,本书深入地研究转子与橡胶轴承之间碰摩引起的复杂非线性动力学行为,研究摩擦系数、阻尼比、非线性刚度系数、刚度系数和偏心率等系统参数对转子-橡胶轴承系统动态响应特性的影响,确定系统中各种响应特性与系统参数之间的关系,发现在低速条件下系统会出现异常振动现象,给出衰减系数、扭转阻尼比以及偏心率等系统参数对系统自激振动等动力学行为的影响,并通过试验验证了理论分析结果和规律。本书对提高转子-橡胶轴承系统的工作效率、稳定性和可靠性具有重要的学术和应用价值。

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

图书在版编目(CIP)数据

转子-橡胶轴承系统非线性动力学特性研究/花纯利,饶柱石著. —北京:科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-054892-4

I. ①转… II. ①花… ②饶… III. ①转子-轴承系统-非线性振动-动力学-研究 IV. ①TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 255975 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳/责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 伟/封面设计: 许 瑞

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2017 年 11 月第一次印刷 印张: 10

字数: 200 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

船舶轴系、深井泵轴系、航空发动机及各种电动机等旋转机械被广泛地用于诸多工业生产部门中,旋转机械的异常振动严重威胁着机械系统的稳定运转,甚至可能引起重大灾难性事故。随着科学技术的不断发展和进步,对机械系统的性能要求越来越高,一些机械设备由非线性特性和摩擦力等因素引起的故障逐渐引起人们的关注。

当前,旋转机械系统在运转过程中常常会发生异常振动噪声,严重影响水下航行器的安全性、隐蔽性及生存能力。因此,本书研究了旋转轴系与橡胶轴承之间碰摩引起的复杂非线性动力学行为,确定系统中各种响应特性与系统参数之间的关系,并探求系统产生丰富响应的原因,对提高转子-橡胶轴承系统的工作效率、稳定性和可靠性具有重要的学术和应用价值。

全书共 7 章。绪论从理论分析与工程应用的角度出发,阐述了本书研究的背景和意义,分析了橡胶轴承研究、转子系统动力学研究和转子系统弯扭耦合振动特性研究方面的国内外发展现状和发展趋势,总结了目前研究中有待解决的问题,并确立了本书的研究内容。第 1 章以经典的 Jeffcott 转子系统为研究对象,分析了系统参数阻尼比和偏心率对转子系统振动响应特性随旋转速度演化规律的影响,得到了不同振动响应演化方式在阻尼比和偏心率参数平面上的分布,并给出了各转子系统响应特性随旋转速度的演化规律。第 2、3 章以橡胶轴承支承的转子系统为研究对象,将橡胶轴承简化为非线性弹性支承,基于现代非线性动力学和分岔理论进行分析和研究,并确定周期无碰摩响应、同频全周碰摩响应及其稳定边界,发现了系统具有丰富的动力学现象,如周期运动、倍周期运动、准周期运动、分岔以及跳跃等现象,分析了摩擦系数、阻尼比、非线性刚度系数、刚度系数和偏心率等系统参数对转子系统动态响应的影响,得出在各系统参数空间上不同响应区域的范围,指出在一些参数范围内系统会发生跳跃现象。第 4 章应用 Lagrange 方程建立了转子系统弯扭耦合非线性动力学方程,且考虑了系统的不平衡、摩擦力的速度依赖性以及橡胶轴承支承非线性等因素,应用数值分析方法求解出系统的数值解,并分析转子系统参数对系统动态响应特性的影响规律。第 5 章根据转子-橡胶轴承系统的物理模型,采用 Lagrange 方程推导出不平衡力激励下转子-橡胶轴承系统弯扭耦合动力学微分方程组,应用数值方法分析了在摩擦力作用下转子-橡胶轴承系统的弯扭耦合非线性动力学特性。最终通过对三维谱图、时域曲线图、幅频图、轴心轨迹和相图的分析,得到了摩擦力作用下转子-橡胶轴承系统中蕴含的各种复杂

非线性动力学行为,并分析转子-橡胶轴承系统参数对系统动态响应特性的影响规律。第6章对转子-橡胶轴承系统弯扭耦合非线性振动进行试验研究,揭示了低转速下系统异常自激振动现象以及径向外载荷对系统形成自激振动的影响,验证理论分析结果。

本书主要内容是花纯利博士在上海交通大学做科研期间完成,与他的博士生导师饶柱石教授合作撰写的,部分研究工作得到了上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室华宏星教授、张志谊研究员、塔娜高级工程师和静波高级工程师等同行专家的大力帮助。作者的一些同事和朋友也先后给予作者许多建议和支持,包括中国矿业大学科学技术研究院院长朱真才教授、机电工程学院曹国华教授、刘后广副教授和卢昊讲师等。此外,本书得到国家自然科学基金青年科学基金项目(51505476)、中国矿业大学学科前沿科学研究专项面上项目(2015XKMS021)和江苏高校优势学科建设工程资助项目等的大力支持和资助。

受作者水平和经验所限,书中难免有不足之处,欢迎读者批评指教。

作 者

2017年7月

符 号 表

F_n	接触法向力
k_r	转子和轴承接触刚度系数
r_u	轴承径向变形量
r	转子半径
E_1	转子材料的弹性模量
E_2	轴承材料的弹性模量
ν_1	转子材料的泊松比
ν_2	轴承材料的泊松比
δ	转子和轴承之间的间隙量
α	转子和轴承接触非线性刚度系数
F_τ	摩擦力
μ	摩擦系数
v_{rel}	相对滑动速度
ρ	(1) 密度 (2) 转子的偏心率, 且 $\rho = e/\delta$
e	偏心距
μ_0	静摩擦系数
μ_1	库仑摩擦系数
λ	衰减系数
u	转子的形心位移
k	转子的刚度系数
c	转子的阻尼系数
m	转子的质量

φ	转子和轴承的接触角度
Θ	Heaviside 函数
x, y	分别为转子轴心 X 、 Y 方向的位移
$\dot{X}, \dot{Y}$	分别为转子轴心 $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ 方向的速度
X, Y	无量纲位移, 且 $X = \frac{x}{\delta}, Y = \frac{y}{\delta}$
$\dot{X}, \dot{Y}$	无量纲速度, 且 $\dot{X} = \frac{dX}{d\tau}, \dot{Y} = \frac{dY}{d\tau}$
τ	无量纲时间, $\tau = \omega_0 t$
ω	转子的旋转角速度
ω_0	转子的固有角频率, 且 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k_r}{m}}$
Ω	无量纲频率比, 且 $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$
Ω_1, Ω_u	参数方程实数根
v	(1) 速度 (2) 间隙-径向位移比, 且 $v = \frac{u}{\delta}$
ξ	转子的无量纲阻尼比
β	转子无量纲刚度系数
g	(1) 无量纲非线性刚度系数 (2) 重力加速度
A	转子的振动幅值
R	转子无量纲半径, 且 $R = \frac{r}{\delta}$
Λ	无量纲衰减系数
J	转子的转动惯量
k_t	转子扭转刚度系数
c_t	转子扭转阻尼系数
ξ_t	转子扭转阻尼比
m_1	轴承的质量
J_1	轴承的转动惯量
k_1	轴承刚度系数

c_1	轴承阻尼系数
ξ_1	轴承阻尼比
k_{1t}	轴承扭转刚度系数
c_{1t}	轴承扭转阻尼系数
ξ_{1t}	轴承扭转阻尼比
u_r	转子和轴承间相对位移
$x_1、y_1$	分别为轴承形心 $x、y$ 方向的位移
$\theta、\theta_1$	分别为转子和轴承扭转方向的位移
$\dot{x}_1、\dot{y}_1$	分别为轴承形心 $x、y$ 方向的速度
$\dot{\theta}、\dot{\theta}_1$	分别为转子和轴承扭转方向的速度
ϕ	转子转过的角度
J'	转子过质心的转动惯量
T	系统的总动能
T_t	转子转动动能
T_G	转子平动动能
T_{1t}	轴承转动动能
T_{1G}	轴承平动动能
$x_c、y_c$	分别为转子质心 $x、y$ 方向的坐标
U	系统的势能
M	外力矩
$F_x、F_y$	分别为 $x、y$ 方向的外激励力

目 录

前言	
符号表	
绪论	1
0.1 转子-橡胶轴承系统研究背景和意义	1
0.2 橡胶轴承研究现状概述	3
0.3 转子系统动力学研究现状分析	5
0.3.1 转子系统研究概述	5
0.3.2 转子系统碰摩响应特性研究现状	6
0.3.3 碰摩法向力模型	7
0.3.4 碰摩切向力模型	8
0.3.5 碰摩系统的非线性动力学现象	10
0.4 转子系统弯扭耦合振动特性研究现状	12
0.5 转子-橡胶轴承系统研究内容	14
第 1 章 转子系统动力学特性演化规律研究	16
1.1 转子系统的模型与运动控制方程	16
1.1.1 转子系统动力学模型的建立	16
1.1.2 无碰摩运动条件	18
1.1.3 碰摩运动条件	20
1.2 周期解的稳定性分析	21
1.3 转子系统动力学特性分析	24
1.4 结论	29
第 2 章 橡胶轴承支承下转子系统碰摩响应动力学特性研究	30
2.1 转子系统的模型与运动控制方程	31
2.1.1 转子系统模型	31
2.1.2 转子系统控制方程	32
2.1.3 转子系统稳态解	33
2.2 周期解的稳定性分析	34
2.3 系统参数对转子响应的影响	38
2.3.1 摩擦系数的影响	39
2.3.2 阻尼比的影响	42

2.3.3	非线性刚度系数的影响	43
2.3.4	刚度系数的影响	44
2.3.5	偏心率的影响	45
2.4	本章小结	46
第 3 章	非线性摩擦力作用下转子系统振动特性研究	48
3.1	转子系统的模型与运动控制方程	49
3.1.1	碰摩力	49
3.1.2	转子系统控制方程模型	50
3.2	转子系统碰摩响应的数值分析	51
3.2.1	转子旋转速度的影响	52
3.2.2	衰减系数的影响	57
3.2.3	刚度系数的影响	58
3.2.4	非线性刚度系数的影响	60
3.2.5	偏心率的影响	61
3.3	本章小结	63
第 4 章	摩擦力作用下转子系统弯扭耦合振动特性研究	65
4.1	模型与运动方程的建立	66
4.1.1	转子系统动力学模型	66
4.1.2	摩擦力模型	68
4.1.3	碰摩力和力矩	68
4.2	转子系统弯曲振动和扭转振动特性分析	69
4.2.1	转子弯曲振动特性分析	70
4.2.2	转子扭转振动特性分析	72
4.3	转子系统弯扭耦合振动特性主要影响因素	73
4.3.1	偏心距的影响	74
4.3.2	横向阻尼比的影响	76
4.3.3	衰减系数的影响	77
4.3.4	扭转阻尼比的影响	79
4.3.5	转子半径的影响	81
4.4	本章小结	82
第 5 章	摩擦力作用下转子-橡胶轴承系统弯扭耦合振动研究	84
5.1	转子-橡胶轴承系统力学参数计算	85
5.1.1	转子力学参数计算	86
5.1.2	橡胶轴承力学参数计算	86
5.2	模型与运动方程的建立	87

5.2.1	转子-橡胶轴承系统动力学模型	87
5.2.2	摩擦力模型	89
5.2.3	碰摩力和力矩	89
5.3	数值仿真计算及分析	91
5.3.1	转子振动特性分析	91
5.3.2	橡胶轴承振动特性分析	97
5.4	转子-橡胶轴承系统弯扭耦合振动特性主要影响因素	102
5.4.1	橡胶轴承扭转阻尼比的影响	102
5.4.2	静摩擦系数的影响	104
5.4.3	转子质量的影响	106
5.4.4	径向外载荷的影响	107
5.5	本章小结	110
第 6 章	转子-橡胶轴承系统试验研究	112
6.1	试验目的和内容	112
6.2	试验装置和仪器	113
6.2.1	试验台的组成和试验流程	113
6.2.2	测量系统	114
6.3	试验结果和分析	117
6.4	径向外载荷对系统响应特性的影响	123
6.5	本章小结	131
参考文献		133
索引		143
后记		145

绪 论

从理论分析与工程应用的角度出发,阐述了本书研究的背景和意义,分析了橡胶轴承研究、转子系统动力学研究和转子系统弯扭耦合振动特性研究方面的国内外发展现状和发展趋势,总结了目前研究中有待解决的问题。

0.1 转子-橡胶轴承系统研究背景和意义

经过几百年的发展,现代潜艇具有很强的隐蔽性和机动性。目前,世界上主要的大国都在致力于发展潜艇,使其成为一种重要的战略威慑力量。潜艇在水下航行的时候,声呐设备才有能力探测到它,而且声呐设备还会受到有效作用距离的限制,因此,潜艇生存的主要优势是其隐蔽性。潜艇得天独厚的隐蔽性也极大地促进了反潜技术的不断发展和进步,各种反潜武器、反潜平台和反潜侦查系统相继出现并不断地发展进步。这使得潜艇面临极大的作战和生存威胁,因此,非常有必要改善潜艇的隐蔽性,从而提高潜艇的生存能力。

潜艇是一个非常复杂的噪声源,其自身的噪声辐射是破坏其隐蔽性和生存能力的主要因素。这也是这些年来各国致力于发展减振降噪技术、隐身技术、AIP 技术等来降低潜艇噪声的主要原因。如图 0-1 所示,潜艇艏部的噪声主要有三大来源:螺旋桨噪声、水动力噪声和机械噪声。轴系振动是机械噪声的主要来源之一,推进轴系是潜艇推进系统的重要组成部分,推进轴系不仅传递主电机的扭矩和螺旋桨的推力,而且承受各种激励力的作用,如轴系的不平衡力、轴承径向力以及摩擦激励力等。轴系的振动将会直接辐射噪声或是间接激励艇体结构产生振动而对外辐射噪声。因此降低潜艇艏部激励引起的轴系振动是我国现阶段提高潜艇隐身性能的紧迫任务。

潜艇轴系的艏部由水润滑橡胶轴承支承,橡胶轴承被置于艏管和托管内。橡胶轴承承受轴系和螺旋桨的重力载荷。当轴系低速重载运行或是停机和启动时,恶劣的润滑状态会导致轴颈与轴承摩擦副之间产生异常振动噪声,甚至发出可以听到的啸叫声,严重影响水下航行器的安全性、隐蔽性及生存能力^[1-3]。潜艇轴系的异常振动可能是由于橡胶轴承和转子之间摩擦作用诱导自激振动引起的。因此,以转子-橡胶轴承系统为研究对象,研究轴系的非线性振动及其稳定性以及摩擦力作用下轴系和转子-橡胶轴承系统弯扭耦合振动机理,给出振动特性演化规律、系统参

数对系统响应特性影响的规律,这将有助于揭示轴系异常振动噪声产生的原因,为提高水下航行器的稳定性和隐蔽性提供理论基础。

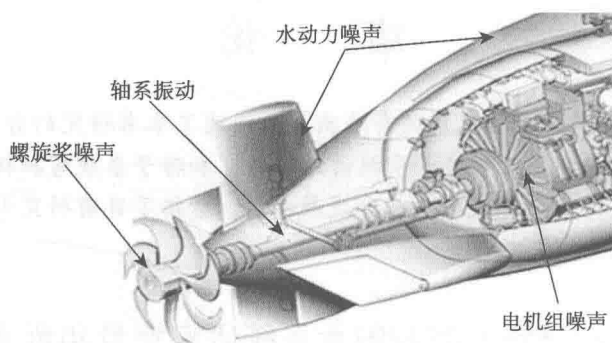


图 0-1 潜艇艏部主要噪声源

橡胶轴承具有摩擦系数小、耐磨、抑振、对安装和冲击不敏感等优点,因此国内外船舶和深井泵等设备中大量使用了橡胶轴承。随着各类舰船向高速化和大型化等方向发展,人们开始对船舶艏轴承运行的可靠性、承载能力和摩擦性能等提出更高的要求。作为舰船推进轴系中重要组成部分,橡胶轴承的性能将直接影响舰船航行时的舒适性、安全性以及隐蔽性。在第二次世界大战的海战中,橡胶轴承被应用于潜水艇上并取得了很好的战果,这使得橡胶轴承的优越性得到广泛认同^[4,5]。但是其缺点也非常突出,如:承载能力较小,设计比压常常小于油润滑轴承等^[6]。在有些工况下,如:低速运转、启动或是停机时,转子-橡胶轴承系统会出现异常的振动噪声,这种不足对于水下的航行器来说是很致命的。由于各种探测技术的不断发展进步,橡胶轴承这种缺点将会变得更加突出。因此,国内外许多学者对转子-橡胶轴承系统中异常振动、噪声产生的机理进行了大量理论和试验分析及研究^[7-12],认为转子和橡胶轴承之间的非线性摩擦力引起扭转方向发生自激振动是系统异常振动、噪声产生的根本原因。因此,研究摩擦力作用下转子-橡胶轴承弯扭耦合系统表现出的复杂非线性动力学特性,对转子-橡胶轴承系统的故障诊断及优化设计都具有十分重要的意义。

到目前为止,对转子-橡胶轴承系统摩擦诱导振动、噪声的研究,多集中于橡胶轴承摩擦机理、承载机理和润滑机理的一般性试验研究,而对其动力学特性,尤其是在振动特性、非线性动力学特性以及弯扭耦合响应特性方面的研究却很少,而这些方面对转子-橡胶轴承系统实际应用中的可靠性和安全性等方面是非常重要的。虽然相关方面的研究有很大难度,但是很有必要去进一步研究。在对转子系统的振动特性分析研究中,首先涉及的问题就是动力学理论建模。由于橡胶材料是一种超弹性材料,其非线性特征将对系统的动态特性产生较大的影响。转子和橡胶轴承之

间摩擦力取决于多方面的因素,不仅取决于接触面的润滑状况、材料特性,而且还取决于相对运动速度和正压力等,这些因素都会影响转子-橡胶轴承系统的振动特性,但是这些方面的研究报告却很少。

以往,弯曲振动和扭转振动通常被人们认为是相互独立、互不相关的两种运动形式。但是,有些资料的研究结果指出,实际上轴系的弯曲振动和扭转振动之间存在着相互耦合的可能^[13]。在文献[14]中,明确提出转子系统的弯曲振动和扭转振动之间存在相互耦合关系,且转子系统的弯曲振动、扭转振动以及耦合振动的共同作用往往才是事故发生的根本原因。若要给转子系统的故障诊断提供充足的信息,需要对系统的弯曲振动和扭转振动进行耦合分析。准确地了解转子系统的动力学特性,从而更深入地进行转子系统结构参数的分析和设计,这就需要对转子系统的弯扭耦合非线性动力学特性进行细致研究。

因此,加强对转子-橡胶轴承系统动力学的理论和试验研究是一个迫切的课题,本书将以转子-橡胶轴承系统为研究对象,进行系统的非线性动力学建模、转子摩擦振动特性、系统稳定性以及弯扭耦合振动特性等方面的探讨和分析研究工作。

0.2 橡胶轴承研究现状概述

早在第二次世界大战期间,潜艇艏部会出现异常振动噪声的问题就已经被美国军方发现。潜艇艏部的异常振动噪声会引起潜艇向外辐射噪声,从而使潜艇的生存能力受到严重威胁。为了解决此问题,美国军方用水润滑橡胶轴承全面取代潜艇上的油润滑巴氏合金轴承,并取得很好的效果。这是由于橡胶轴承具有很好的减振性能,所以艏轴的振动有效减小,艏轴的工作环境和振动噪声的辐射等也都得到很好的改善,舰艇被声呐等设备发现的可能性减小,从而使得舰艇的生存能力得到提高。橡胶轴承以水作为润滑介质,并具有优良的杂质包容性,除此之外还有摩擦系数小等优点,因此,橡胶轴承越来越多地被应用于舰船和泵等设备上。橡胶轴承的结构设计及其材料选用等方面的研究,长期受到美国军方支持。在大量的理论分析和试验研究基础上,他们在橡胶轴承许多关键技术上取得重大进步,且在1963年针对舰用水润滑轴承修定出军用标准 MIL-B-17 901 A(SH)。我国在水润滑橡胶轴承方面也做了大量工作和研究,并在2008年制定了《船用整体式橡胶轴承》(CB/T 769—2008)。

橡胶轴承结构主要有两种形式:板条式结构和整体式结构。直径较大的橡胶轴承常采用板条式结构,板条式水润滑橡胶轴承的橡胶层被硫化在攻有螺孔的金属条上,板条通过埋头螺丝固定于背衬上,这种结构形式便于更换维修。对于一般橡胶轴承常采用整体式结构^[15],整体式水润滑橡胶轴承便于加工,其橡胶层的内表面开有纵向水槽便于润滑。本书主要以整体式橡胶轴承为对象进行研究,带有八个

纵向水槽, 背衬材料为黄铜, 橡胶层材料为丁腈橡胶, 其结构如图 0-2 所示。

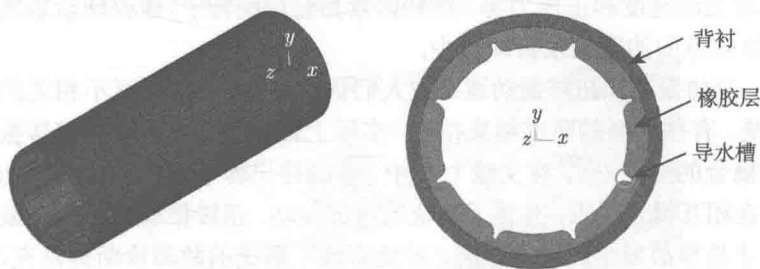


图 0-2 橡胶轴承结构示意图

随着水润滑橡胶轴承应用的逐渐推广, 越来越多的学者开始关注其发展, 并对其设计参数和使用性能等方面展开研究。橡胶轴承的弹流润滑机理^[16]、橡胶层材料选用^[17,18]及其摩擦力学性能^[19-21]等方面一直受到国内外学者的长期关注, 但是关于橡胶轴承在实际应用中产生异常振动噪声的原因却很少被提及。在工程实际应用中, 转子-橡胶轴承系统在低速重载、启动或是停机等特殊工况下, 系统时常会出现异常的振动噪声, 这种振动噪声也常被称为“鸣音”, 可被人耳听到, 使得舰船的隐蔽性受到严重影响。隐蔽性对于水下舰船来说是非常重要的, 往往关系到其安全性和存在的价值。

到目前为止, 关于舰轴-橡胶轴承系统的异常振动鸣音问题, 还不能在设计阶段对其进行有效且准确的预估。因此, 有必要对系统的异常振动鸣音产生机理进行研究, 实现振动鸣音能够在橡胶轴承的设计开发阶段进行预估, 并能提出有效的措施来避免此类问题的出现。这对于提高产品竞争力、减小水下航行器的噪声辐射以及增强国防军备能力都具有非常重要的价值和意义。很多研究是关于振动鸣音产生的机理的, 且大多集中于制动噪声、车床摩擦振动等方面, 并提出了自锁-滑动机理、摩擦特性理论和统一理论^[22]。也有一些针对转子-橡胶轴承系统中异常振动噪声的试验研究, 但关于其异常高频振动噪声产生的机理以及相关影响因素的研究却很少。由于轴颈和橡胶轴承间的摩擦系数是相对滑动速度的函数, 所以转子-橡胶轴承系统在运转时就有可能出现黏-滑 (stick-slip) 运动, 这时常被认为是引起转子-橡胶轴承系统产生异常振动噪声的根本原因。近十几年来, 基于不同的摩擦力学模型, 国内外许多学者开始研究多自由度系统的稳定性, 并希望能解释橡胶轴承产生异常振动噪声的机理。通过试验分析和研究, Bhushan^[7]认为异常振动鸣音是橡胶轴承表面上黏-滑运动引起的一种振动噪声现象, 并明确表述, 橡胶轴承的颤振是和橡胶轴承结构及其材料均有关联的高频率振动, 颤振的频率与系统的固有频率相关。

依据 Krauter^[23]的试验分析结果, Simpson 等^[8]建立了一个橡胶轴承非线性

动力学模型,该模型有两个自由度,摩擦力是随着速度和时间不断变化的,通过数值计算得出系统的非线性动力学响应特性,经分析认为摩擦系数随速度和时间变化导致系统不稳定是异常振动鸣音产生的原因。经过试验分析,姚世卫等^[9]认为在重载荷或是高水温的工况下,由于橡胶轴承和旋转轴系之间相互作用,系统将会产生摩擦振动并发出尖叫声。由于静摩擦系数总是大于其动摩擦系数,当转子和橡胶轴承以较低的滑动速度相对运动时,黏着与滑动会交替出现,从而产生自激振动。通过试验分析研究,刘正林课题组^[1,10,24]认为工作过程中,橡胶轴承与轴颈的直接接触面积和摩擦因数与速度之间的函数关系是决定橡胶轴承鸣音是否出现的主要因素,这与 Krauter 的结论基本一致。

0.3 转子系统动力学研究现状分析

0.3.1 转子系统研究概述

关于转子系统弯曲振动方面的研究,早在 1869 年 Rankine 就已经发表了相关的文章,临界转速的概念就是由他在题为 *On the centrifugal force of rotating shaft* 的论文中被首次提出,并指出在一阶临界转速之上,转子系统是无法正常进行运转的^[25]。这一错误的论断持续影响差不多半个世纪,使得工程界一直认为超临界转速工作的转子系统是不可能设计出的。直至 1919 年,在研究了两端刚性支承的单盘转子系统基础上,英国转子动力学方面专家 Jeffcott 教授得出在超临界转速区上转子系统是可以正常工作的结论,这在转子动力学领域引起了一次巨大变革^[26]。这一结论大大提高了旋转机械的功率和使用范围,许多超临界转速工作的推进轴系、涡轮机和泵等系统对工业发展起到巨大推进作用。但是,随之而来的重大事故使人们认识到,转子系统在超临界转速达到某一转速后,时常会出现强烈的振动甚至会造成系统的失稳。1924 年,Newkirk^[27]在题为 *Shaft whipping* 的文章中首次指出这种不稳定现象是由于油膜轴承引起自激振动并导致转子系统的破坏,从此人们意识到系统的稳定性分析在转子动力学分析中的重要性。Newkirk 和 Lund 是研究转子动力学领域的里程碑人物,并发表了关于油膜轴承稳定性分析方面的两篇代表性文章^[28,29]。随着现代工业的进步,旋转机械的应用越来越广泛且转子越来越柔、功率越来越大、间隙越来越小,这些均是转子动力学研究领域的一系列难题,但也是促进转子动力学发展的动力源泉。

早期关于旋转机械的研究都是建立在线性理论基础上的,但是从本质上来讲,旋转机械动力学是非线性问题。此外,在分析转子系统动力学特性时,Noah 等^[30]指出了考虑非线性因素的必要性以及线性分析理论的局限性。转子系统的碰摩、具有非线性支承的转子系统、转子系统某些部件松动以及裂纹转子系统振动等均带

有明显非线性特征的问题日益突出。因此,关于转子系统的非线性动力学特性分析和研究受到越来越多学者的关注^[31-38]。随着科学技术的进步,人们逐渐意识到在很多情况下,特别是系统处于故障状态时,线性理论难以很好定性和定量地去解释工程中遇到的一些复杂现象和问题,这就迫切需要引入非线性动力学理论。

由于系统固有的非线性因素存在,如部件间的间隙和碰摩、滑动轴承的油膜力、材料本身的非线性物理特性、滚动轴承中的间隙和恢复力、裂纹、大变形和大位移等,系统的非线性动态行为在旋转机械中非常常见。Myers^[39]和 Hollis 等^[40]对一个具有两自由度的转子系统进行分析研究,并给出了系统在失稳点附近的分岔行为。Gardner 等^[41]用多尺度法分析了转子系统失稳后的弱非线性特性,并给出了平衡点失稳后的超临界分岔和次临界分岔现象。结合时域图、相图、轴心轨迹图、幅频图以及 Poincaré 映射,Adams 等^[42]研究了由可倾瓦轴承和圆柱轴承支承的转子系统,揭示了系统中蕴含丰富的非线性动力学现象,并指出了转子系统的动态响应进入和离开混沌的途径。丁千等^[43]用数值积分方法研究了在不平衡力及非线性油膜力作用下,弹性转子-轴承系统的稳定性以及油膜失稳时的动态特性,推导出受冲击载荷作用下的转子系统动力学方程,并给出了冲击载荷对转子系统稳定性的影响。Zhao 等^[44]用数值方法研究了不平衡力作用下转子系统的动态响应特性,分析了油膜阻尼器支承对系统响应特性的影响,并揭示了同频涡动、次谐波振动、拟周期振动、幅值突跳、分岔以及混沌等非线性动力学现象。Jiang 等^[45]对具有交叉刚度两自由度的转子-轴承系统进行研究,分析得出系统出现碰摩、同频全周碰摩、准周期运动和反向涡动失稳运动的参数空间,并讨论了系统参数对系统稳定性的影响。黄文振^[46]研究了多跨滑动轴承支承的转子系统稳定性,揭示了短轴承支承转子系统的稳定性以及分岔与混沌动力学行为。Zhang 等^[47,48]对转子系统进行了数值仿真分析,给出了系统的非线性动力学响应特性,揭示了系统的响应随着旋转速度的变化呈现出复杂的动力学现象,出现了周期、倍周期、准周期等丰富的运动形式,这些均是由系统具有很强的非线性引起的。

如果对转子系统进行动态分析时依然采用线性简化方法,将不可避免地过滤掉很多重要的非线性振动特性,这将必然引起分析结果与系统的真实动力学行为之间产生差距,进而影响机械系统故障诊断和预测水平的提高以及转子系统的结构设计分析。

0.3.2 转子系统碰摩响应特性研究现状

转子系统被广泛地应用于工程实际当中,为了提高转子系统的机械效率,转子与轴承之间的间隙被设计得越来越小,但是这将使转子系统发生碰摩的可能性提高。有些碰摩现象随着转子-轴承间磨损量增加,碰摩逐渐消失,对转子系统的运转安全性影响不大;但有些情况则不然,转子与轴承之间发生碰摩将导致转子系统