

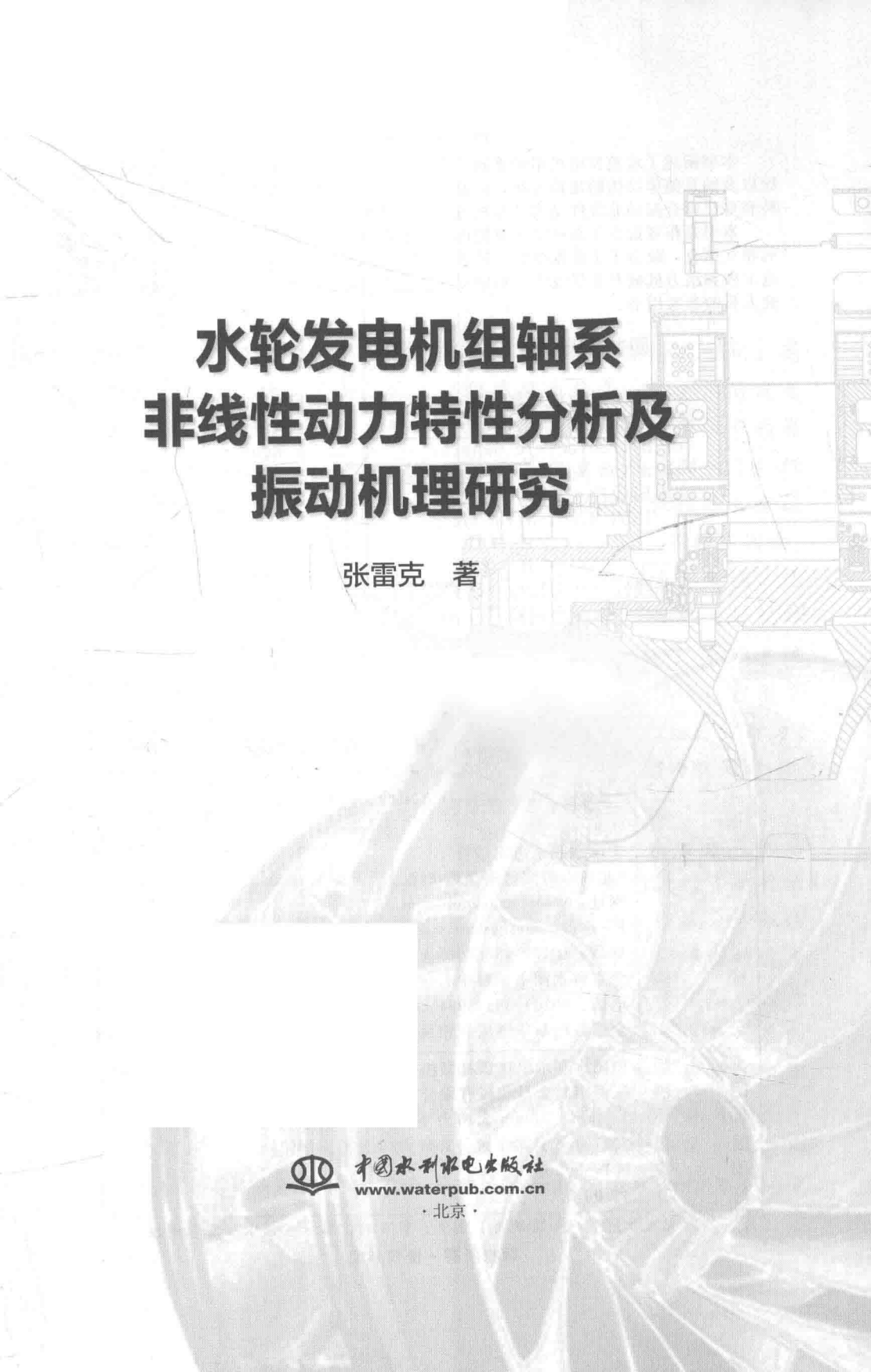
水轮发电机组轴系 非线性动力特性分析及 振动机理研究

张雷克 著

Nonlinear Dynamic Analysis of
Shaft System for Hydroelectric Generating Set and
Research on Vibration Mechanism



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



水轮发电机组轴系 非线性动力特性分析及 振动机理研究

张雷克 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书阐述了水轮发电机组轴系转子-轴承系统、转轮-密封系统、转子-转轮-密封系统以及轴系整体结构的建模方法,以及机组系统在水力、机械及电磁等激励下弯曲、扭转和弯扭耦合振动非线性动力学分析方法及振动机理研究。

本书是作者近5年来科学研究的成果积累及总结,侧重于理论分析与数值模拟手段的相互结合,致力于水轮发电机组轴系振动问题的建模与机理分析。本书可作为水利水电工程和水力机械专业研究生的辅助读物及参考书,也可作为从事旋转机械振动领域研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水轮发电机组轴系非线性动力特性分析及振动机理研究 = Nonlinear Dynamic Analysis of Shaft System for Hydroelectric Generating Set and Research on Vibration Mechanism / 张雷克著. — 北京:中国水利水电出版社, 2017.6

ISBN 978-7-5170-5522-8

I. ①水… II. ①张… III. ①水轮发电机—发电机组—非线性—动力特性—研究②水轮发电机—发电机组—机械振动—原理—研究 IV. ①TM312

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第139528号

书 名	水轮发电机组轴系非线性动力特性分析及振动机理研究 SHUILUN FADIAN JIZU ZHOUXI FEIXIANXING DONGLI TEXING FENXI JI ZHENDONG JILI YANJIU
作 者	张雷克 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9印张 172千字
版 次	2017年6月第1版 2017年6月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

QIANYAN

随着社会与经济的迅猛发展，水轮发电机组正朝着大型化、高速化和大功率方向持续迈进，集成化程度越来越高。随着水力发电在电力能源结构中的比例不断增加，其对电网稳定运行所带来的影响也逐渐加大。在水力、机械和电磁等外界因素的相互影响下，机组振动问题日益突出，个别甚为严重，极大地影响了机组的安全运行，降低了发电厂的经济效益，同时给所在电网带来了不稳定因素。而由此引发的非线性动力学现象更是广受工程界和学术界关注，已成为水电行业的热点研究之一。本书以水轮发电机组轴系为研究对象，考虑到振动问题在机组运行过程中的普遍性，对转子-轴承系统在不平衡磁拉力（Unbalanced Magnetic Pull，简称 UMP）作用下的动力特性、电磁力与密封力联合作用下系统的非线性动力学行为、水轮机转轮-密封系统的稳定性和由不平衡磁拉力引起的机组定子、转子碰摩动力学特性等进行了系统的分析。

全书共分 7 章。第 1 章介绍了水轮发电机组轴系振动研究的意义及研究现状，同时对非线性转子动力学的研究概况进行了简要阐述。第 2 章分别介绍了非线性动力系统的基本理论，常微分方程的数值求解方法，以及本书研究对象所涉及非线性外激励模型的建模方法。第 3 章重点讨论机组转子-转轮-密封系统在不平衡磁拉力与非线性密封力共同作用下的非线性动力学行为及失稳产生和发展的变化规律。第 4 章从转子轴心轨迹和频域两方面出发，分析了机组转子-轴承系统主要轴承参数，如轴承长径比和轴颈间隙在有无不平衡磁拉力情况下对系统横向振动特性的影响。第 5 章和第 6 章分别介绍了机组转子-轴承系统在不平衡磁拉力和碰摩力联合作用下的弯曲振动及弯扭耦合振动特性，并讨论了励磁电流变化对系统非线性

动力学行为的影响。第7章则在转子-转轮-密封系统动力特性分析的基础上,研究了水轮机转轮-密封系统在线性、非线性密封力作用下的稳定性及失稳临界转速。根据不同密封参数对失稳临界转速的影响规律,给出了系统减小、甚至避免自激振动的路线或措施,为机组转轮-密封系统的动态设计和稳定运行提供了参考。

水轮发电机组轴系振动涉及水力、机械、电磁及结构等诸多领域的交叉与结合,其系统在运行过程中呈现出复杂性、非线性、耦合性及随机性等特点。模型的准确建立及振动机理的透彻分析虽在不断完善与进步,但完成这一目标尚需时日,短期内难以实现。

由于作者研究水平有限,书中难免出现疏漏、不足与错误之处,恳请广大读者和同行批评指正。

作 者

2016年12月



目录

MULU

前言

1 绪论	1
1.1 水轮发电机组振动的工程背景及研究意义	1
1.2 非线性转子动力学研究概况	3
1.2.1 转子-轴承系统研究	4
1.2.2 密封系统研究	6
1.2.3 故障转子系统研究	7
1.3 水轮发电机组振动研究	9
1.3.1 临界转速	10
1.3.2 机械因素	10
1.3.3 电磁因素	11
1.3.4 水力因素	12
1.3.5 水-机-电耦合因素	13
1.3.6 机组-厂房耦联振动	14
1.4 本书主要研究内容	15
2 转子-轴承-密封系统数学模型及其分析方法	17
2.1 引言	17
2.2 转子非线性动力系统的一般数学表述	17
2.3 非线性动力系统的基本理论	18
2.3.1 非线性系统的特点	18
2.3.2 稳定性理论及分岔的基本概念	19
2.4 常微分方程的数值求解方法	21
2.5 非线性外激励数学模型	22
2.5.1 碰摩模型	22
2.5.2 非线性油膜力模型	22
2.5.3 密封力模型	25
2.5.4 不平衡磁拉力模型	28

2.6	非线性特征的分析方法	30
2.6.1	时域方法	30
2.6.2	频域方法	30
2.6.3	轴心轨迹	31
2.6.4	Poincaré 映射	31
2.6.5	分岔图	32
2.6.6	Lyapunov 指数	33
3	水轮发电机组主轴系统非线性动力特性分析	34
3.1	引言	34
3.2	机组轴系统动力学模型	35
3.3	机组轴系动力特性分析	37
3.3.1	转速对系统振动的影响	38
3.3.2	轴承刚度对系统振动的影响	38
3.3.3	密封间隙对系统振动的影响	60
3.4	结论	66
4	水轮发电机组转子-轴承系统在不平衡磁拉力作用下横向振动分析	68
4.1	引言	68
4.2	不平衡磁拉力计算方法	69
4.3	机组转子-轴承系统在不平衡磁拉力和油膜力作用下振动特性分析	71
4.3.1	水轮发电机组转子-轴承非线性系统	71
4.3.2	系统运动微分方程	71
4.3.3	数值仿真	72
4.4	结论	79
5	不平衡磁拉力作用下水轮发电机组碰摩转子系统弯曲振动分析	80
5.1	引言	80
5.2	水轮发电机组转子-轴承碰摩系统	81
5.3	数值模拟和分析	82
5.3.1	转子质量偏心的影响	82
5.3.2	励磁电流的影响	84
5.3.3	定子径向刚度的影响	90
5.4	结论	93
6	不平衡磁拉力作用下水轮发电机组碰摩转子系统弯扭耦合振动分析	94
6.1	引言	94

6.2	水轮发电机组碰摩转子弯扭耦合振动模型及其运动微分方程原理	94
6.2.1	电磁扭矩	95
6.2.2	碰摩摩擦力矩	96
6.2.3	系统运动微分方程	96
6.3	数值模拟和分析	97
6.3.1	励磁电流对系统弯振的影响	97
6.3.2	质量偏心对系统弯振的影响	102
6.3.3	励磁电流对系统扭振的影响	105
6.4	结论	106
7	水轮机转轮-密封系统非线性动力稳定性研究	107
7.1	引言	107
7.2	自激振动特征及机理描述	107
7.2.1	自激振动基本特征	107
7.2.2	水封结构介绍	108
7.2.3	水轮机自激振动机理分析	108
7.3	水轮机密封系统动力特性分析	110
7.3.1	公式推导变换	110
7.3.2	水轮机转轮-密封系统运动微分方程	113
7.3.3	稳定性分析	114
7.3.4	计算结果及分析讨论	115
7.4	结论	119
	参考文献	121

1 绪 论

1.1 水轮发电机组振动的工程背景及研究意义

能源是人类活动的物质基础。在某种意义上讲,人类社会的发展离不开优质能源的出现和先进能源技术的使用。在当今世界,能源的发展是全世界、全人类共同关心的问题,也是中国社会经济发展,实现全面建设小康社会所面对的重大问题。

自2004年起,中国便成为仅次于美国的世界第二大能源消费国,同时也是全球仅有的两个以煤炭为主要能源的国家(另一个为南非),至今煤在一次能源消费的比例仍超过60%。尽管中国煤炭资源丰富,但存在勘探程度较低、地理分布极不平衡、各地区煤炭品种和质量变化较大的特点,这使得电煤资源与运输之间的矛盾越来越突出,环境问题日趋严重。同时,煤炭是不可再生资源,不会取之不尽,终有枯竭的一天^[1]。

美国剑桥能源研究会主席 Daniel Yergin 曾在其著作《石油风云》中指出,能源是20世纪战争发生的主要导火索,交战双方的胜败与否也在某种程度上决定了对能源的占有程度^[2]。由此可见,中国若想在世界强国的舞台上占有一席之地,必须在能源的安全问题与结构调整上下足力气。

水电作为清洁与可再生能源,在电网中具有发电启停方便、运行操作灵活、运行成本低廉的特点,主要担任系统的调峰、调频任务,保证电网的安全运行的职责。美国、日本和欧洲等发达国家和地区都曾将其摆在优先发展的位置。中国地域广阔,长江、黄河、雅鲁藏布江等大江大河中蕴藏着非常丰富的水电资源。国家发展和改革委员会2005年发布的全国水力资源复查结果显示,中国大陆水电资源理论蕴藏量、技术可开发量和经济可开发量均居世界首位^[3]。截至2015年年底,中国水电装机容量已突破3.2亿kW,稳居世界第一位。三峡(26×700MW)、乌东德(10×740MW)、小湾(6×700MW)、拉西瓦(6×700MW)、龙滩(9×700MW)、溪洛渡(18×700MW)、向家坝(8×750MW)、锦屏(14×600MW)等水电站的开发建设,更是把中国水电建设推向了一个新的高峰。然而,目前中国水电开发程度低是一个不争的事实。53%——这个数字不仅远远落后于欧美发达国家,即使与巴西和印度这样的发展中国家相比,也不具备任何优势。但这从另一方面也说明中国的水电开



发潜力巨大^[4]。

自步入 21 世纪以来,中国已连续多年保持 GDP 增长率 8% 以上的水平。社会经济发展和人民生活水平的不断提高使得中国用电需求激增,夏季用电高峰时段因装机容量不足而被迫拉闸限电的情况时有发生。尽管随着大批火电机组的投入运行,以及核电、风电、潮汐发电等新能源的不断发展,用电紧张情况有所缓解,但调峰、调相的矛盾仍然突出。如采用常规机组进行电网调峰、调频,频繁的停启势必给电网安全稳定运行带来不利影响。水机组停启迅速,可在短时间内增减大量负荷,其运行灵活、迅捷的特点使之成为电网系统中调峰、调频以及承担事故备用最为理想的能源类型。

水力发电机组是水电厂的核心设备,是整个水利枢纽工程最终经济效益和社会效益的归宿。科学技术和社会经济的迅猛发展为中国机械加工和制造行业提供了良好的条件。目前,中国已具备自主设计生产单机容量 1000MW 的世界上最大水轮发电机组的能力。随着电站水头的增高,机组各部件在复杂工况运行过程中受到水力、机械、电气等各种激励源的作用往往会产生振动。振动是影响机组运行稳定性的一个重要指标,最为不利的振动为外界扰动频率与结构自振频率相重合时的共振,其所带来的巨大的振幅轻则损害机组结构,缩短设备的使用寿命,重则可能引发严重的机组毁坏事故,造成重大的经济损失。如位于俄罗斯西伯利亚地区哈卡斯共和国境内叶尼塞河上游的萨扬-舒申斯克水电站,其厂房内安装 10 台混流式水轮发电机组,单机容量 640MW,是俄罗斯装机最大也是目前世界第六大的巨型水电站。2009 年 8 月 17 日,2 号机组地区发出巨大声响,并见到水柱喷出,高压水从机房涌出,将水轮机发电机转子、机架冲毁,水电站墙体损毁,电站出力从 4100MW 骤降至 0MW,厂用电断电,厂房被淹。事故造成 75 人死亡,13 人失踪,约 100t 油料泄漏流入叶尼塞河,污染面积达到 100km²,受损电站修复至少需要 130 亿美元,事故造成了巨大的经济损失和广泛的社会负面影响^[5,6]。

和常规水电站相比,抽水蓄能电站更适合于承担系统调峰、填谷、调频、调相、事故备用以及黑启动等特殊任务,但其具有高水头、高转速、双向运行以及多采用地下厂房等特点,这使其振动问题更加突出。2008 年 10 月 10 日,世界最大抽水蓄能电站广东惠州抽水蓄能电站在试运行期间,由于长时间强烈的压力脉动诱发轴系振动导致发电机转子与定子发生摩擦碰撞的扫膛事故,机组发生爆炸,经济损失惨重^[7]。2009 年 10 月 16 日,山西西龙池抽水蓄能电站 1、2 号机组在双机甩负荷试验中同样发生了扫膛事故,两台机组严重损坏。2003 年 1 月,浙江天荒坪抽水蓄能电站 2 号机组在增负荷过程中发生转动部件抬起的事故,1 号机调试过程中则出现了水导轴承处大轴摆动严重超标的现象。



由此可见,水轮发电机组的振动不但对系统稳定性造成影响,严重时还会造成水电站灾难性的事故。因此,研究水轮发电机组振动的机理和规律是关系到机组乃至电站能否正常运行的核心问题。

水轮发电机组在运行过程中不可避免要产生振动。其振源主要由水力、机械和电磁三方面组成。对于机组振动的研究,由于受到理论和技術上的限制,早期多以某一部件的振动状况或考虑某一振源为主,这对理解和处理这些振源引起的振动是十分必要的。然而,机组的振动是诸多因素共同作用的结果,某些振源引起的机组部件和部位振动往往是相互耦合的。如轴系的不平衡响应引发发电机定子和转子间气隙不均,造成不平衡磁拉力加大,加剧机组轴系的振动幅值;导轴承间隙不当,大轴弓状回旋会使水轮机密封间隙偏斜,引发水力不平衡力等。因而将水轮发电机组作为一个耦合的动态系统来研究已成为一种趋势。但需要指出的是,整体建模虽然能够更加全面地反映机组运行过程中的振动特性,但工作量和难度也随之增加。为此,根据实际需要,对局部振动与整体振动进行区分,从而把研究对象聚焦在某一个或几个局部上仍然是十分必要的^[8]。

水轮发电机组的动力特性研究涉及面广,属于典型的交叉性学科研究,包括结构力学、电机学、流体力学、转子动力学和非线性动力学等诸多基础性及拓展性知识结构。既要考虑系统的整体性,又要重视各个因素之间的相互作用。我国大型和超大型水电站的陆续建设、投产对机组稳定性和厂房动力设计提出了更新、更高的要求。因此,研究水力发电机组在水力、电磁和机械等联合激励作用下的非线性动力学特性、凝练机组及其耦合系统在故障诊断中涉及的难点、热点问题,揭示多元故障模式下水力发电机组非线性动态响应机理、建立水机电复杂耦合系统故障诊断的理论与方法体系,为今后水电站机组及厂房的结构设计和实际运行提供技术参考,从而提高中国水电站设计建设运行水平,对防范电站灾难性事故将具有重大意义。

1.2 非线性转子动力学研究概况

水轮发电机组作为一种包括发电机转子和水轮机转轮的大型旋转机械,其振动问题属于转子动力学范畴。除水轮机水力振动的复杂性之外,轴系的振动有共通之处。

转子动力学主要研究转子-支承系统在旋转状态下的振动、平衡和稳定性问题。汽轮发电机组由于其工作转速较高、轴系振动事故的严重性突出等特点,过去是转子动力学的主要研究对象。与之相比,水轮发电机组的转速较低(一般低于系统一阶临界转速),属于刚性转子,油膜涡动或失稳、裂纹和碰摩



等现象极少发生。因此，其振动特性往往不受重视。

自 20 世纪中后期，随着委内瑞拉古里、俄罗斯萨扬-舒申斯克、巴西-巴拉圭伊泰普以及中国三峡等一大批巨型水电站的先后落成使用，机组的容量不断加大，转速不断提升。与之相反的是机组轴系结构刚度相对下降，抗外激励能力减小，导致振动问题越来越严重。因此，深入了解转子动力学的研究内容和计算分析方法、借鉴如汽轮发电机组等高速旋转机械的研究经验，并将其应用于水轮发电机组及其耦联系统的动力特性分析，对揭示故障下机组的运行规律和振动机理，保证机组的安全稳定运行具有重要的理论意义和工程应用价值。

英国学者 Jeffcott 教授是转子动力学研究领域的先驱者之一，其于 1919 年提出的经典 Jeffcott 转子模型至今仍被广泛应用于转子动力学的理论研究中。涡轮机、压缩机和泵的发展则对工业革命起到了很大作用，但人们在生产中发现工作在超临界转速状态下的旋转机械有时会出现强烈的振动导致失稳，甚至造成事故。

1924 年，Newkirk 指出因油膜轴承而产生的“自激”振动是致使转子失稳破坏的原因，从而唤醒了科学界对转子动力学新的认识，也确定了稳定性在转子动力学分析中的重要地位。之后，众多学者对油膜轴承的动力特性开展了大量研究，其中最具代表性的当属 Lund^[9,10]，他首次提出“转子-轴承动力学”这一概念，并给出了具有刚度和阻尼系数的可倾瓦滑动轴承油膜力的解析表达式，一般称为 8 参数模型。

20 世纪 70 年代以来，随着电子计算机技术的不断革新，电力、航空、能源、化工等行业的迅猛发展推动了转子动力学的研究。许多关于转子动力学的著作陆续问世，极大丰富了相关领域的思想，也使得相关研究上升到了一个前所未有的高度^[11-17]。

随着三峡工程的投入使用，中国在国家自然科学基金、“863 计划”“973 计划”和三峡关键技术研究项目中均列入了转子动力学的研究课题，投入了大量的人力、物力。经过国内相关科研院所的集中攻关研究，使中国在该领域的学术水平达到了国际前沿，同时也使中国转子动力学的研究进入了一个新的繁荣期。

1.2.1 转子-轴承系统研究

轴承是旋转机械的重要构件，也是转子动力学研究的重要内容之一。自 20 世纪 50 年代起，转子动力学的研究对象便从单一的转子本体过渡到转子-轴承系统了。轴承的类型众多，如滚针轴承、调心球轴承、深沟球轴承、调心滚子轴承、推力滚子轴承、直线轴承、带座轴承和组合轴承等。对于汽轮发电机组和



水轮发电机组, 导轴承和推力轴承是应用最为广泛的两种轴承类型, 其动力特性也受到了国内外学者的极大关注。

水轮发电机组多为立式布置, 导轴承起着限位、防止机组在运行时产生旋转摆动, 保持轴心稳定的作用。Newkirk 最早发现了因油膜引起的振动现象^[18]。随后, Lund 提出了具有里程碑意义的油膜力表达式^[9], 其中的油膜刚度和阻尼系数称为油膜动力特性系数。尽管表达式是线性的, 且系数之间缺乏明确的内在联系, 但至今仍被广泛应用。Muszynska 和 Bently 在此基础上通过试验提出的轴承动力特性模型较好地反映了实际旋转机械中出现的一些动力学现象^[16,19]。然而, 需要指出的是, 轴心在静平衡附近做小幅振动是 8 参数模型能够应用于系统运动特性分析的必要条件, 如果静平衡位置不存在, 经典的线性油膜力模型将不再适用^[20]。

由于实际机组运行时大都难以满足小扰动条件, 特别是水轮发电机组, 因为其多采用立式布置, 轴心运动轨迹不存在静态平衡点, 油膜力本质上是一种非线性力。对此, 国内外主要采用如下几种处理方式:

(1) 利用有限元或者有限差分直接求解雷诺方程^[21-25], 特点是精度高、计算速度慢。

(2) 根据油膜的自由边界条件, 得到短轴承和长轴承支撑假设条件下的解析表达式^[26-29], 与直接法相反, 该方法计算速度快, 但精度较低。

(3) 数据库以及数据库拟合方法^[30,31], 其计算精度和速度均令人满意, 但前期需要大量、各种情况下轴系动力特性系数的数据支撑。

除导轴承外, 推力轴承也是影响轴系运动特性的重要因素之一。国内外学者对推力轴承的动力特性开展了深入的研究。Mittwollen 等^[32]早在 1991 年便研究了可倾瓦和固定瓦推力轴承的动力特性系数及其对高速转子-轴承系统横向振动的影响, 同时指出了推力轴承对单质量转子系统的耦合作用。在此基础上, 众多学者^[33-36]通过理论研究及数值计算进一步分析了这种耦合作用。李忠等^[37]通过考虑可倾瓦推力轴承中油膜厚度及可倾瓦倾角对油膜楔形的影响, 推导出了 40 个油膜对镜板的作用力和油膜作用于可倾瓦的力矩线性和非线性动力学系数, 为后续研究推力轴承的稳定性和动力特性奠定了基础。

上述文献主要以汽轮发电机组为研究对象, 水轮发电机组的轴承荷载形式与动荷载形式与之相比有较大差别, 因此其相关结论无法完全照搬。推力轴承是承受整个水轮发电机组转动部分的重量及轴向水推力的关键部件, 对于推力轴承的动力特性, 国内外学者同样进行了大量的研究工作。

Huebner 以三维热弹流体理论为基础, 考虑了流体黏-温特性和温度沿厚度方向的变化, 采用有限元和有限差分法对推力轴承油膜润滑问题进行了研究^[38,39]。然而, 其设计计算是建立在等黏度和刚性轴瓦假设基础上的。随着



负荷和轴瓦尺寸的增大,油膜厚度和瓦面变形已成为不可忽视的因素。针对上述问题,为了更准确地进行动力润滑计算,马震岳、赵红梅等分别基于二维和三维润滑理论,考虑了油膜的黏-温特性和轴瓦的机械与热变形,联立求解油膜的压力场、温度场和轴瓦位移场。计算结果表明三维理论更符合实际情况,可以作为计算轴承油膜动力特性系数的基础^[40-43]。

陈贵清^[44]针对某大型水轮发电机组,通过计算推力轴承的油膜力刚度和油膜力矩刚度,定量分析了推力轴承对发电机转子轴系固有频率的影响。李景惠和李永海^[45]针对三峡水轮发电机组巨型推力轴承油槽结构,依据相似理论,在模拟试验台上进行了不同润滑介质的可视性研究。邱家俊和段文会^[46]通过求解油膜摄动压力方程组,得到了推力轴承油膜刚度和阻尼的解析表达式。在此基础上,使用三峡700MW机组的推力轴承参数,计算了该推力轴承的油膜刚度和阻尼。此外,诸多研究^[47-49]以实际机组为例,分别对推力轴承的安装、甩油处理以及材料的选择等问题进行了介绍和说明,为同类型机组推力轴承的设计、制造和运行提供了有益参考。

1.2.2 密封系统研究

密封的基本原理是用增加流体流动阻力的办法来达到减小流体泄漏的目的。对于密封力产生的原因,一般认为,密封力是由于转子在密封腔中偏置时,密封周向流体压力分布不均匀引起的^[50]。水轮机、汽轮机、压缩机等密封中的流体对轴系会有激励作用,其动力特性和表达方式与滑动轴承中的油膜力有许多相似之处。

1958年,Thomas首先提出了间隙激振的基本理论,并给出了经典的8参数间隙激振力的计算公式^[51]。但由于所采用模型以线性系统稳定性为基础,在描述密封系统涡动状态下的非线性特点时,有一定的局限性。随后,Alford在理论上取得了重要进展,同时提出了汽轮机间隙激振力的计算公式,但没有考虑密封周向速度的影响^[52]。Vance对Alford理论进行了深入研究,做出了阻塞流的假设^[53]。直到1988年,Muszynska和Bently提出了能够反映密封激振力的非线性模型,并在随后对其进行了改进^[54-56]。与传统的8参数模型相比,Muszynska介绍了平均流速比这一概念,可以表达出密封对转子运动所具有的惯性效应、阻尼效应及刚度效应。模型的物理意义明确,被广泛应用于转子-密封系统的动力特性研究中。国内方面,近年来浙江大学王乐勤教授团队^[57-60]在参考国外已有试验装置的基础上,针对其中所存在的不足,设计并搭建了国内首台环形密封流体力测试装置,实现了对主轴任意偏心及涡动比状态下的环形密封径向流体力的测试。相关研究定性、定量地分析了密封支撑作用及不同密封参数对转子-密封系统的影响,同时讨论了密封阻尼对系统稳定



性的影响,其研究内容不但填补了国内在此类试验装置上设计、研发的空白,同时使我国在该领域内的科研水平达到世界前列。

1.2.3 故障转子系统研究

除基础理论研究外,故障转子系统是转子动力学领域研究的另外一个重要分支,也是当今研究的热点。转子故障多以外激励形式在系统运动微分方程中出现,其表现出的非线性动力特征是主要研究对象。转子故障主要包括轴系不对中、转静件碰摩、转子裂纹、支撑部件松动以及因油膜、密封失稳等耦合因素引起的一系列故障等。

国内外诸多学者对此开展了大量研究,并取得了极为丰富的成果。相关著作的出现^[61,62]更是为本领域的研究提供了有益的参考。

不对中一般指机组各部分的轴线不在设计的同一直线上,类型大致包括:平行、倾角和平行倾角不对中。不对中故障轻则使机组摆度增大,影响油膜工作性能,重则使油膜破裂,出现烧瓦事故。由于不对中故障是旋转机械中仅次于不平衡的故障因素,多年来国内外学者对其进行了专门研究。已有研究^[63-65]较为详细地总结了不对中故障的机理特征、不对中联轴器的转子系统建模方法、不对中联轴器转子系统动力学特性的分析方法以及联轴器不对中对转子系统稳定性的影响。黄典贵^[66]通过理论分析和试验研究讨论了不平衡故障转子和不对中故障转子运转过程中的动力学关系,分别得到了这两种故障转子的扭转振动特征。Sekhar 和 Prabhu^[67]采用高维有限元法建立了转子-轴承系统的模型,并分析模拟了联轴器不对中对系统的影响。Bouaziz 等^[68]研究了非线性油膜支承下具有角度不对中故障转子系统的动力学行为。数值结果表明,角不对中的振幅随着相对偏心的增加而减小,随着偏角的增大而增大。Hussain 等^[69]研究了平行不对中对 Jeffcott 转子系统弯扭振动特性的影响。随后,研究者在此基础上利用 Lyapunov 直接求导法分析了联轴器角不对中对转子系统稳定性的影响。结果表明角不对中或者联轴器刚度的增加会扩大系统稳定性的范围^[70]。Sinha 等^[71]以双轴承-转子系统为研究对象,采用理论分析和试验相结合的方法,对联轴器不对中对系统稳定性影响进行了深入探索,发现了倾角不对中或者联轴器刚度的增加会导致系统稳定性范围的增加这一重要结论。

为了寻求旋转机械较高的效率,其转动部件与固定部件之间的间隙被设计得越来越小。当旋转机械转子与定子因某种原因发生接触时,碰摩故障便发生了。由于碰摩可能会造成烧瓦甚至机组毁坏的灾难性事故,且系统响应多以非线性形式,如拟周期、混沌、分岔等运动出现,自 20 世纪中后期开始,国内外众多学者便对此开展了大量研究。



Beatty^[72]提出了至今仍然被广泛应用的碰摩模型,并讨论了碰摩故障诊断的几个要点。Ehrich^[73]建立了单盘 Jeffcott 转子-轴承系统模型并研究了系统的混沌行为,这可能是第一篇关于转子系统亚谐振动现象的报道。Muszynska 和 Goldman^[74]进行了带有松动或碰摩故障转子-轴承系统的试验、理论和数值研究,同步和亚同步分频响应得以发现。Lin 等^[75]采用大量的数值模拟研究了碰摩系统的非线性行为。Chu 和 Zhang^[76]分析了碰摩转子系统的分岔和混沌运动,并发现了三条进入混沌的不同路径。随后,Chu 和 Lu^[77]通过试验观察到了丰富的周期和混沌振动。戴兴建等^[78]利用数值分析和试验方法研究了带有限位器的碰摩转子系统动力学行为。Feng 和 Zhang^[79]讨论了因初始扰动引起的碰摩系统振动响应特性。Qin 等^[80]基于传递矩阵法,对轴段直径变化的碰摩转子-轴承系统的非线性动力学特性进行了研究。Zhang 和 Meng^[81]从理论分析及数值模拟两方面对碰摩微转子系统的运动特性进行了描述。Shen 等^[82,83]主要分析了质量偏心对碰摩转子系统非线性运动特性的影响。Cao 等^[84]则通过数值模拟说明了分数阶阻尼对碰摩转子系统的重要影响。

除上述研究外,还有一部分研究关注于立式碰摩转子系统的非线性动力特性。An 等^[85]建立了碰摩转子在轴向推力作用下的模型。Gustavsson 等^[86]以某实际水轮发电机组为例,研究因水轮机转轮与出口环发生碰摩引起的非线性动力学现象。Huang 等^[87]则建立了水轮发电机组转子不对中-碰摩耦合故障的动力学模型和微分方程,并利用数值积分方法研究了该系统随不对中平行量变化的动力学行为。Zhang 等^[88]则构建了适用于水轮发电机组转子-轴承系统在不平衡磁力作用下横向振动的碰摩分析非线性动力学模型,研究了励磁电流变化对系统动态特性的影响。

裂纹主要是由于转子材料本身缺陷或长时间服役而产生的。裂纹故障是后果最为严重而却最难及时发现的转子系统故障,裂纹在扩展过程中若不能被及时检测出来,一旦失稳断裂将会造成重大损失。因此研究转轴裂纹故障机理,分析裂纹转子系统的动力特性是十分有意义的。

裂纹模型大体可归纳为开裂纹和开闭裂纹模型两类。前者认为裂纹是常开,后者则认为转轴裂纹在转子运转过程中是时开时闭的^[89]。Darpe 等^[90]研究了开闭、方波和余弦波 3 种不同裂纹 Jeffcott 转子的瞬态响应。随后, Darpe 等又分别分析了带有横向表面裂纹 Jeffcott 转子在轴向激励下的横向与纵向的耦合动力学响应,以及裂纹转子的横向、纵向、扭转的耦合振动机理,为裂纹故障的诊断提供了新的思路^[91]。Tsai 和 Wang^[92]则采用传递矩阵法对多裂纹转子系统的动力学行为进行了研究。郑吉兵和孟光^[93]用切比雪夫多项式方法,分析了颈轴承支承的裂纹转子的稳定性。Fu 等^[94]采用 Runge - Kutta 法和 Floquet 理论相结合的方法,对带有横向裂纹转子系统的稳定性进行了研究,并讨论了裂



纹深度、位置,转子位置、厚度以及转速对失稳区域的影响。Sekhar 等^[95]采用有限元法分析了横向裂纹转子-轴承系统的稳定性。结果表明随着裂纹深度增加,失稳转速显著下降;同黏滞阻尼相比,迟滞阻尼对失稳转速影响更为明显。此外,诸多研究^[96-100]还通过试验方法对带有横向裂纹、斜裂纹等转子系统进行了研究,并观察到了大量非线性现象,为理论分析提供了有力的依据。

转子支座松动是一种危害较大的故障。多因安装质量不高或长期振动引起。带有支座松动故障的转子系统经常由于系统的刚性变化并伴随的冲击效应产生非常复杂的运动现象^[101]。Ji 和 Zu^[102]采用多尺度法研究了一端带有支座松动的转子-轴承系统的自振和强迫振动响应。褚福磊等^[101,103]采用非线性数值分析方法,研究了一端带有支座松动故障转子系统的动力学行为及其稳定性。在此基础上,张靖和闻邦椿^[104,105]以两端具有支座松动故障的转子-轴承系统为研究对象,讨论了系统出现的复杂运动现象,并得到了系统的频率特性。研究表明,随着支座振动位移的不同,频谱将出现不同的频率成分。Ma 等^[106]采用有限元法建立了带有支座松动的转子-轴承系统模型,并分析了松动参数对系统动力学特性的影响。结果表明,随着支座位移的变化,系统将出现周期 2、周期 3、周期 4、周期 5、周期 6 等丰富的运动形式。此外,一些研究^[74,107-109]还对转子系统同时存在碰摩和支座松动故障的非线性动力学行为和系统稳定性进行了探讨,得到了许多有意义的结论。黄志伟等^[110]则通过建立水轮发电机组轴承松动-转子碰摩耦合故障模型,采用数值方法分析了机组轴系随转频比和转子质量偏心变化的非线性动态响应,并观察到了周期 1、周期 3 及复杂的拟周期运动。

从以上介绍可以看出,虽然在故障转子振动的非线性特性及稳定性方面国内外已开展了大量的研究并取得了许多重要成果。但到目前为止,其研究对象多针对于高速、卧式旋转机械,如汽轮机、航空发动机等,关于像水轮发电机组这样低速、立式结构的研究成果则相对有限。水轮发电机组属于立式机组的代表,同时也是水电站产生经济效益的核心所在,其转子系统振动故障的发生发展规律及其非线性动力特性表现形式与卧式机组有着明显的区别,因此,对其结构动力特性开展深入讨论具有重要的实际意义。

1.3 水轮发电机组振动研究

综上所述,水轮发电机组动力学问题属于转子动力学范畴,系统的临界转速、不平衡响应、瞬态响应是较为常见的研究内容。随着机组成容量的不断加大,转速越来越高,以往只有在汽轮机组、航空发动机等高速转子系统才会发生的非线性动力学行为,如拟周期、混沌、分岔等也逐渐成为水轮发电机组