



转子动力学研究进展

韩清凯¹ 马辉²

(1.大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024) (2.东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

摘要 本文简要回顾了转子动力学的发展历程,指出了转子动力学的研究对象,如以汽轮发电机、燃气轮机、离心/轴流压缩机和航空发动机等大型装备为代表的复杂转子系统;主要研究内容涉及转子系统动力学建模、临界转速和振动响应计算、柔性转子动平衡技术、支承转子的各类轴承动力学特性、转子系统动力稳定性、转子系统非线性动力学、转子系统振动故障及其诊断技术、转子系统振动控制和多场耦合激励下转子系统振动,如机电耦合振动等。未来的研究主要聚焦在转静子系统耦合振动,基于大数据的转子系统智能诊断和考虑新材料、新结构的转子系统振动控制技术等方面。

关键词 旋转机械, 转子动力学, 稳定性, 振动控制, 智能诊断

DOI: 10.6052/1672-6553-2018-075

引言

转子动力学是研究旋转机械转子及其部件和结构动力学特性的学科。转子动力学起源于十九世纪六十年代,目前已经成为机械动力学的重要分支。当代转子动力学的研究对象主要是以汽轮发电机组、燃气轮机、离心/轴流压缩机和航空发动机等重大装备为代表的复杂转子系统。转子系统的运动以涡动运动为典型形式。通常情况下,转子系统的振动问题一般比较突出,并且也十分复杂,不仅有转轴的弯曲振动和扭转振动,还包括叶轮的振动、叶轮上叶片的振动、机匣和基础振动,以及流体介质或轴承油膜等因素引起的涡动失稳等。目前转子动力学与振动研究主要涉及:1)转子系统动力学建模;2)临界转速和振动响应计算;3)柔性转子动平衡技术;4)支承转子的各类轴承动力学特性;5)转子系统动力稳定性;6)转子系统非线性动力学;7)转子系统振动故障及其诊断技术;8)转子系统振动控制;9)多场耦合激励下转子系统振动,如机电耦联振动等。

1 转子动力学的发展历程

转子动力学的研究已有百年历史。关于转子振动分析的最早记录是1869年英国物理学家 Rankine

发表的题为“论旋转轴的离心力”的论文,该论文得出了转子只能在一阶临界转速以下稳定运转的错误结论。Foppl(1895年)和 Jeffcott(1919年)指出了转子在超临界运转时会产生自动定心现象,因而转子可以稳定工作。随着转子超临界运转,Newkirk发现了油膜轴承导致自激振动失稳现象,从而确定了油膜轴承稳定性在转子动力学分析中的重要地位。在油膜轴承稳定性的研究方面,Newkirk、Lund、Child 和 Muszynska 等做出了突出贡献。在国内转子动力学研究领域,众多学者和工程技术人员开展了大量的研究工作,包括复杂转子系统动力学建模、转子系统非线性理论与失稳分析、转子系统碰摩等多种故障以及耦合故障的机理研究、转子系统振动故障诊断技术、轴承或齿轮系统动力学与振动故障诊断、转子系统动力学设计技术、以及转子系统振动控制理论与技术等,经过多年的辛勤努力,取得了大量的高水平成果。这些研究成果不仅极大地提升了我国在转子动力学领域的国际学术地位,而且对推动我国诸多工程领域的产品与技术的发展,发挥了至关重要的作用。

2 转子动力学未来发展

当前转子动力学的研究进入了新阶段。一方面,针对具有复杂结构的转子系统,特别是转子系

统与静子系统刚度接近、存在振动耦合的情况,转子和静子结构连接面多且形式复杂,考虑服役退化,以及整机动力学的研究,振动响应的高精度预估研究等,得到了人们的高度重视.另一方面,面向转子系统振动与故障机理与诊断研究,强调了大数据与智能预测方法研究,揭示故障表征的新模式,促进故障机理研究,开展基于大数据的转子系统智能诊断,也已成为目前研究的热点问题之一.转子系统振动控制技术也拓展应用到采用新材料、新结构和提高预测控制能力等方面,提高转子系统振动控制能力及其可靠性和准确度.

目前转子动力学在以下六个方面,已经取得了一些代表性成果:1)大型复杂转子系统的力学建模和分析手段,主要涉及连接件建模、大型复杂柔性转子系统、柔性转子系统-柔性基础系统、非同步旋转机械、特殊转子系统.2)考虑非线性的大型转子系统降维理论,主要涉及高维非线性动力学系统的降维方法和提高现有非线性动力学理论能够求解的维数.3)失稳机理分析和非线性分析,主要涉及油膜力、密封力、叶尖气隙力(Alford力)、转轴的刚度不对称、转轴材料的粘弹性和转轴的结构阻尼、转子和静子在间隙内的相互碰摩引起干摩擦力、充液转子等诱发的失稳和非线性振动.4)基于大数据

的转子-轴承系统智能故障诊断,主要涉及浅层稀疏网络特征提取方法,建立具有深层结构的深度学习网络,研究旋转机械装备健康状态的多标记体系,全面高效地描述大数据下旋转机械系统的故障信息,形成融合多物理信息源的深度学习模型.5)转子-轴承系统的非线性动力学设计,主要涉及多目标优化设计,不但要设计合理的稳定裕度,还要设计失稳转速使其对参数变化最不敏感,使稳定裕度对一定范围内的制造工艺偏差及运行条件变化最不敏感.6)转子-轴承系统的振动控制,如采用弹性支承加挤压油膜阻尼器的低刚度、高阻尼特性的“滚动轴承与减振元件一体化”结构.

3 专刊内容

本专刊所收录的论文来自于2018年5月在苏州召开的第13届全国转子动力学会议.它包括复杂转子-支承系统动力学特性与振动响应分析、齿轮转子系统和考虑螺栓连接结合面的转子系统动力学特性研究、滚动轴承动力学特性研究、以及转子系统动力学吸振器减振研究等.期望专刊的出版能对我国转子系统动力学与振动的研究以及相关学科的发展起到积极的促进作用.

THE RESEARCH PROGRESS OF ROTOR DYNAMICS

Han Qingkai^{1†} Ma Hui²

(1.School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2.School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract This paper briefly reviews the development history of rotor dynamics, and points out the research objects of rotor dynamics, such as complex rotor systems in turbogenerator, gas turbines, centrifugal/axial compressors and aero-engines, etc. The main research contents involve the dynamics modeling for rotor systems, critical speed and vibration response prediction, the dynamic balancing technology for flexible rotors, dynamic characteristics of bearing, rotor dynamic stability, nonlinear rotor dynamics, rotor fault diagnosis based vibration, vibration control and rotor vibration under multi-field coupling excitations, such as electromechanical coupling vibration. Future research mainly focuses on the coupling vibration of rotor-stator subsystem, intelligent diagnosis based on big data and vibration control technology considering new materials and structures, etc.

Key words rotational machinery, rotor dynamics, stability, vibration control, intelligent diagnosis