

机械装备非线性动力学与 控制的关键技术

陈予恕 黄文虎 高金吉 刘仁怀 闻邦椿 曹登庆 等编著

机械装备非线性动力学 与控制的关键技术

陈予恕 黄文虎 高金吉 等编著
刘仁怀 闻邦椿 曹登庆



机械工业出版社

序

装备制造业是我国国民经济发展重要的支柱性产业，是事关国家经济安全及综合国力的战略性产业。我国装备制造业经过改革开放以后近三十年的建设，特别是进入 21 世纪后，我国装备制造业有了突飞猛进的发展。产业技术水平不断提高，某些方面达到了国际先进水平；产品在数量快速增长的同时，质量也有相应的提高。但与装备制造业强国相比，我国制造业还存在较大的差距。

我国装备制造业技术创新能力还十分薄弱，有自主知识产权的产品少，依附于国外企业的组装产品比重大，很多产品的品牌、关键技术和销售渠道掌握在跨国公司手里，知识产权矛盾越来越突出。而且，随着我国装备制造业的快速发展和技术进步，一些工业发达国家对我国的戒心不断增强，发达国家为了保持自身的竞争力和国际领先地位，他们对我国在高技术领域实行了各种各样的禁运和封锁手段。

目前，我们国家十分重视装备制造业发展。装备制造业是技术创新的主要载体和平台，是建设创新型国家的重要组成部分。因此，如何按照科学发展观的要求，使装备制造业的发展在已取得成绩的基础上逐步消除存在的问题，实现可持续发展是摆在我国科技工作者面前紧迫而尖锐的任务。

中国工程院咨询项目《提高我国机械装备产品品质的若干关键共性技术调查研究》（简称“咨询项目”，下同）是中国工程院机械与运载工程学部于 2007 年启动的一个咨询项目，前后历时四年。期间参加咨询研究工作的先后有陈予恕院士、黄文虎院士、刘仁怀院士、高金吉院士、闻邦椿院士以及许多相关专家学者。咨询项目组分八个分组，分别调查了机械装备领域的七个行业中存在的一些关键共性技术问题。七个行业分别是：高速轨道交通机械、大型旋转机械、航空发动机、大型风力机、高超声速飞行器和储液罐及航天飞行器。并到相关的生产企业和研究所进行了调研。主要调研的单位有：上海成套设备研究院、上海汽轮机厂、杭州汽轮机厂、沈阳 606 研究所、沈阳黎明机械厂、哈尔滨汽轮机厂、哈尔滨电机厂、东安发动机有限公司、航天五院五零一部、石家庄军械工程学院、装甲兵工程学院、北方车辆研究所、航天第三研究院、哈尔滨飞机工业集团有限公司、哈尔滨轴承集团公司、航天第七研究院、

机械科学研究院、铁道科学研究院等近二十个企业和科研院所。调查结果形成了一个总报告和七个分报告。其中,总报告由哈尔滨工业大学陈予恕、曹登庆撰写;分报告《铁道车辆动力学与控制调研报告》由石家庄铁道大学杨绍普撰写;分报告《大型旋转机械动力学的研究现状及发展趋势》由哈尔滨工业大学陈照波、焦映厚撰写;分报告《航空发动机的动力学与故障诊断》由天津大学丁千撰写;分报告《大型风电装备设计及运行中的动力学与控制》由清华大学褚福磊撰写;分报告《高超声速与变形机翼技术综述》由北京工业大学张伟、杨晓东撰写;分报告《储液罐动力学与控制》由北京理工大学岳宝增撰写;分报告《太阳帆飞行器轨道控制研究》由清华大学龚胜平、李俊峰、宝音贺西撰写。

调查过程中,得到相关单位以及各领域的许多专家学者的鼎力支持,所有参加调查的同志在这四年当中都进行了艰难但是卓有成效的合作,没有这些支持与合作,就不可能有这本书。所以,这里首先要对大家所给予的支持与合作表示衷心的感谢。

机械装备产品中存在的关键共性技术包含的内容非常广泛,咨询项目从一开始就将重点集中在机械装备的非线性动力学故障及其机理的研究上,同时也关注非线性动力学理论的发展及其在机械装备领域的应用,以及非线性动力学与控制技术对提高机械装备产品的精度、稳定性、耐用性、安全性、可靠性、延长工作寿命等性能指标和提高我国机械装备产品品质和国际品牌竞争力所起到的关键作用。

调查显示,非线性动力学故障广泛存在于机械装备产品中。现代机械装备系统中存在各种非线性因素,如:来自系统的物理的(材料的非线性本构关系)、几何的(弹性变形几何关系产生的非线性)、结构的(间隙、塔形弹性元件等)、耗散的(结构阻尼、干摩擦以及高速流体阻尼等)、运动的(惯性的、冲击的、机构中变传动比运动引起的质量、刚度的周期性变化),以及耦合的(机电、流固、声与结构)等各种力学因素引起的非线性。

非线性因素为系统带来了一系列线性系统所没有的动力学现象,在单自由度系统中这些现象包括:多解、跳跃、极限环、亚谐共振和超谐共振、概周期解、周期解分岔和动态分岔,以及混沌运动等。在多自由度系统中,除上述现象外,还有内共振、组合共振、模态相互作用(能量在模态之间的转移)以及这些特殊条件下的复杂动力学行为。这些现象都是由非线性系统解的失稳而导致的,如果对这种失稳不加以有效的控制,就可能导致系统故障的出现。

非线性动力学与控制技术的发展与成熟为机械装备中广泛存在的非线性动力系统的研究,如预测其长期的动力学行为,揭示其内在的规律性,提出改善

机械装备系统的品质及控制策略,提高机械装备的稳定性和安全性等提供了强有力的理论保证。目前,我国学者已经开展了动力学系统的动态失稳机理研究,并在设计阶段对其动力学参数进行控制(非线性动力学设计),从而对运行阶段即将发生的动力学故障进行预测和控制,最终达到对动力学故障在弄清机理的基础上进行治理。

发展新的分析方法、揭示新的现象及其产生机理一直是非线性动力学理论研究的主题。随着非线性科学理论的发展和现代工程实际的迫切需要,目前非线性动力学已经发展出了一系列描述分岔、突变、分形和混沌的新理论和新方法,并且还在迅速发展,新的理论和方法还会不断产生。

近年来,我国科技工作者在非线性动力学与控制的基础理论和工程应用两个方面都做了大量的工作,并取得了许多重要成果,缩小了与国外先进水平的差距。但是,与发达国家相比,我国在非线性动力学与控制领域还存在很多不足。

根据项目组院士专家的建议,决定将此次调查结果汇集成册出版,献给关心和支持非线性动力学与控制技术的发展及其在机械装备领域研究应用的朋友们。希望能为有关部门及各界人士了解和认识非线性动力学与控制技术提供帮助,并为有关部门的政策决策提供参考。同时,也希望通过该书能吸引到更多的年轻科学家参与到非线性动力学与控制技术的领域中,为非线性动力学与控制技术的发展作出贡献。

陈予恕

2011年1月26日

目 录

序

第一部分 总报告 1

第 1 章 前言 2

1.1 国外装备制造业的发展趋势 3

1.2 我国装备制造业的现状 4

第 2 章 机械装备中存在的若干 非线性动力学问题 7

2.1 高速轨道交通中的非线性 动力学问题 7

2.2 大型旋转机械中的非线性 动力学问题 9

2.3 航空发动机中的非线性 动力学问题 14

2.4 大型风力机中的非线性 动力学问题 17

2.5 高超声速飞行器中的非线性 动力学问题 20

2.6 储液罐中的非线性动力学问题 24

2.7 航天飞行器中的非线性 动力学问题 28

第 3 章 机械装备中的非线性动力学 与控制技术的现状与分析 31

3.1 主要成就与贡献 31

3.2 存在的问题与发展方向 33

3.3 提高我国机械装备中非线性动力学 与控制技术的建议与措施 38

第二部分 分报告 41

第 1 章 铁道车辆动力学与控制 调研报告 42

1.1 铁道车辆系统的动力学 42

1.1.1 轨道模型 42

1.1.2 车体模型 43

1.1.3 整车模型 44

1.1.4 小结与展望 45

1.2 轮轨接触问题 45

1.2.1 轮轨接触方程的建立 45

1.2.2 蠕滑问题 46

1.2.3 磨耗问题研究 47

1.2.4 轮轨接触对车辆性能的影响 48

1.2.5 实验验证 48

1.2.6 小结和展望 49

1.3 悬挂系统控制 50

1.3.1 二系悬挂系统 50

1.3.2 倾摆系统 52

1.3.3 一系悬挂系统 53

1.3.4 小节与展望 54

1.4 发展趋势 55

参考文献 56

第 2 章 大型旋转机械动力学的研究 现状及发展趋势 65

2.1 概述 65

2.2 非线性转子动力学研究方法及 国内外发展概况 66

2.2.1 非线性转子动力学研究的 一般方法 66

2.2.2 非线性油膜力模型^[32-35] 69

2.2.3 动压密封力 69

2.2.4 求解非线性转子动力学问题的 数值积分方法 70

2.2.5 滚动轴承、扭转振动、非对称 转子及油膜失稳后的疲劳强度 分析 71

2.2.6 大型转子—轴承系统高维非线性 动力学问题的降维求解 73

2.3 转子系统非线性动力学设计及

稳定性	76	3.4 结论	109
2.3.1 转子系统非线性动力学行为的 机理研究和实验研究	76	参考文献	109
2.3.2 高速转子—轴承系统的非线性 动力学设计	78	第4章 大型风电装备设计及运行中的 动力学与控制	114
2.3.3 轴系非线性稳定性 分析方法	80	4.1 风电产业与我国的能源安全 息息相关	114
2.4 非线性转子动力学研究中存在的 问题及展望	81	4.1.1 发展风电产业符合国家的 中长期规划	114
2.5 国内外燃气轮机研究现状及 发展趋势	83	4.1.2 风电装备国产化面临的问题和 挑战	116
2.5.1 国外燃气轮机的研究现状和 发展趋势	83	4.1.3 科学意义与主要挑战	120
2.5.2 国内燃气轮机的研究现状和 发展趋势	85	4.1.4 对国民经济的作用	123
2.5.3 燃气轮机的发展目标及 其重点	88	4.2 国内外风电装备的研究现状和 发展趋势	123
参考文献	91	4.2.1 大型风力机传动系统的动力学 理论	123
第3章 航空发动机的动力学 与故障诊断	97	4.2.2 复杂环境中风电装备的失效机理 与故障诊断方法	125
3.1 航空发动机转子的动力学 失稳研究	98	4.2.3 复杂工况下机械系统的可靠性 增长策略	126
3.1.1 密封流体激振	98	4.2.4 风力机组的振动控制与消噪 技术	127
3.1.2 挤压油膜阻尼器的稳定性	100	4.3 大型风电装备设计及运行中的关键 科学问题	129
3.2 航空发动机转子结构机械故障 动力学研究	100	4.3.1 复杂载荷作用下大型风力机的 动力学行为与设计原理	129
3.2.1 转静碰摩故障	100	4.3.2 复杂环境中风电装备的状态 演化与失效机理	130
3.2.2 热弯曲故障	101	4.3.3 复杂工况条件下机械系统的 可靠性增长策略	130
3.2.3 叶片振动	102	4.3.4 叶片及传动系统的振动控制	131
3.2.4 松动故障	102	4.4 需要解决的主要突破点	133
3.2.5 疲劳裂纹	102	参考文献	134
3.2.6 双转子结构故障	103	第5章 高超声速与变形机翼技术 综述	138
3.2.7 滚动轴承故障	103	5.1 近空间飞行器对高超声速和变翼 技术的需求	138
3.2.8 机动飞行的影响及整机振动	104	5.2 高超声速技术发展及现状	139
3.3 航空发动机的故障诊断	105	5.2.1 高超声速定义及特性	139
3.3.1 故障诊断研究现状	105		
3.3.2 基于非线性动力学的故障 诊断原理	107		
3.3.3 故障中的信号降噪方法	108		

5.2.2 高超声速技术应用的发展	142	6.4.2 船载储液罐系统动力学研究	208
5.2.3 高超声速再入飞行的飞行力学问题	145	6.4.3 充液航天器固—液—控耦合动力学研究	209
5.2.4 高超声速推进技术	147	6.5 未来研究方向展望	211
5.2.5 高超声速技术的实验实施	151	参考文献	212
5.2.6 高超声速关键基础理论	154	第7章 太阳帆飞行器轨道控制研究	220
5.3 变形机翼	158	7.1 引言	220
5.3.1 变形机翼的仿生思想及应用背景	158	7.2 太阳帆飞行器局部最优控制	222
5.3.2 变形机翼发展史	162	7.2.1 局部最优控制在星际转移轨道中的应用	223
5.3.3 近代几种典型可变形飞机介绍	169	7.2.2 局部最优控制在逃逸行星引力场中的应用	226
5.3.4 变形机翼关键技术	180	7.3 星际时间最优轨道转移	226
5.4 高超声速和变翼技术的展望	182	7.3.1 时间最优控制理论	227
参考文献	182	7.3.2 求解方法	230
第6章 储液罐动力学与控制	186	7.3.3 算例	232
6.1 引言	186	7.4 不变流形轨道转移	237
6.2 储液罐类液体晃动动力学	186	7.4.1 地球到人工拉格朗日点的不变流形转移	243
6.2.1 储液罐类液体晃动研究的解析方法	187	7.4.2 人工拉格朗日点之间的不变流形转移	252
6.2.2 储液罐类液体大幅晃动研究的数值方法	203	7.4.3 平衡点与周期轨道之间的转移	255
6.3 液体晃动等效力学模型研究	205	参考文献	260
6.4 储液罐多体系统动力学与控制研究	206		
6.4.1 车载储液罐系统动力学研究	206		

第 一 部 分

总 报 告

第 1 章 前 言

自然界和社会中普遍存在的非线性现象具有无限的复杂性，还存在着尚未被认知的广阔领域。非线性现象广泛存在于装备制造、能源工业、交通运输、建筑业以及航空航天等工程技术领域中。长期以来，数学家、物理学家、力学家和工程师为解决这些领域中的非线性问题，在基础理论和工程应用方面做了大量的工作，逐渐从提出到发展成了一门新兴的学科——非线性动力学与控制。

非线性科学是研究各不同学科领域中的非线性现象这一共性问题的一门国际前沿学科，它是在以非线性为特征的各门分支学科的基础上逐步发展起来的综合性学科。严格的非线性动力学的基础理论研究开始于 19 世纪后期，由两位数学大师 Poincare 和 Lyapunov 以他们在定性理论与运动稳定性两个方面取得的开拓性成就而奠定了理论基础。然而，由于非线性问题本身所具有的复杂性，直到 20 世纪 50 年代，数学家、物理学家和力学家仍主要关注那些经过严格挑选的问题，即寻找系统的稳态解，包括平衡态（不动点）、各种周期解或吸引子。自 20 世纪 60 年代以来，在耗散系统中发现了洛伦兹（Lorenz）吸引子、埃农（Henon）吸引子；在保守系统中发现 KAM 定理和阿诺德（Arnold）扩散，这些发展标志着非线性动力学开始进入一个全新的历史时期。混沌的发现是非线性动力学的伟大成就，不仅对非线性动力学本身起了很大的推动作用，也导致在 20 世纪 70 年代前后耗散结构论、协同学、突变论、混沌动力学、分形及超循环等理论的创立，促进了数学理论、数值方法和计算机应用，以及相关的各应用学科的蓬勃发展。这些非线性理论被誉为 20 世纪继量子理论和相对论两项重大发现后的第三次科学革命。

随着非线性科学理论的发展和现代工程实际的迫切需要，一系列描述非线性动力系统分岔、突变、分形和混沌的新理论和新方法相继提出，并且还在迅速发展中，新的理论和方法还将不断产生。

我国中长期科技发展规划提出：要把我国建成创新型国家，以加快推进我国的社会主义现代化建设。并将掌握和研发装备制造业中的核心技术列为我国今后很长一段时间科学技术发展的重中之重。可以预见，装备制造业核心技术的掌握和研发将在我国创新型国家的建设进程中占有重要的地位。科学技术的发展应以国家的重大需求为引领，非线性动力学与控制学科的发展亦应面向国家重大战略需求，服务于重要装备的先进制造与设计。

现代机械装备系统中存在各种非线性因素，如：来自系统的物理的（材料的非线性本构关系）、几何的（弹性变形几何关系产生的非线性）、结构的（间隙、塔形弹性元件等）、耗散的（结构阻尼、干摩擦以及高速流体阻尼等）、运动的

(惯性的、冲击的、机构中变传动比运动引起的质量、刚度的周期性变化), 以及耦合的(机电、流固、声与结构)等各种力学因素引起的非线性。

非线性因素为系统带来了线性系统所没有的一系列动力学现象, 在单自由度系统中这些现象包括: 多解、跳跃、极限环、亚谐共振和超谐共振、概周期解、周期解分岔和动态分岔, 以及混沌运动等。在多自由度系统中, 除上述现象外, 还有内共振、组合共振、模态相互作用(能量在模态之间的转移)以及这些特殊条件下的复杂动力学行为。这些现象都是由非线性系统解的失稳而导致的, 如果对这种失稳不加以有效的控制, 就可能导致系统故障的出现。发展新的分析方法、揭示新的现象及其产生机理一直是非线性动力学理论的研究主题, 解决工程动力学疑难问题、探索基于非线性动力学的设计方法, 也是我国科学工作者应该高度重视的问题。因此, 研究各类动力学系统动态失稳的机理, 从而在设计阶段就对其动力学参数进行控制(非线性动力学设计), 对运行阶段即将发生的动力学故障进行预测和控制, 在弄清故障机理的基础上进行有效治理是具有实际应用背景和重要意义的课题。

1.1 国外装备制造业的发展趋势

装备制造业位居工业的核心地位, 担负着为国民经济发展和国防建设提供技术装备的重任, 是工业化国家的主导产业。即使在信息社会中, 装备制造业的基础战略产业地位仍然不会动摇。进入 21 世纪以来, 发达国家更是把装备制造业置于优先发展的重要地位, 其发展水平和创新能力直接影响其他产业的竞争力, 决定着一个国家现代化的进程。

装备制造业的技术开发呈现出高度复杂化和高投资化趋势, 很多技术研发靠一个企业已经难以进行, 需要多家企业和科研机构协同研发。世界级跨国公司通过建立国际技术联盟、到海外设立研发中心、并购外国企业、吸引世界级高端科技人才等方式, 在全球范围内开展协同作业, 将自主创新定位为企业发展的引擎。现今, 跨国公司兼并重组的目的不仅仅是追求垄断利润, 而且更重要的是分摊技术创新成本, 加大对装备制造业的研发投入, 从而掌握决定市场份额的关键因素——核心技术。

增强高新技术在装备制造业发展中的影响力和渗透力。在主要工业发达国家, 信息技术、自动化技术、数控加工技术、机器人技术、电力电子技术、新材料技术、新型生物机械技术以及环保装备技术等高新技术成果, 已经广泛地应用于装备制造业。工业发达国家在大批量生产技术十分成熟、计算机集成制造的共性基础技术和关键技术充分发达的基础上, 正在加速朝着以计算机控制为主导, 以定制化、智能化、柔性化和集成化为特征的自动化生产的方向发展。

装备制造业强国, 无一例外地都很重视科学技术水平的提升, 以控制高端、高

附加值技术装备的设计与制造。美国的装备制造业致力于生产技术的高起点,不断加强科技含量高的中、高端产品的竞争力。日本、德国、英国等持续推进行业整体素质的提高,重视用高技术优化提升传统装备制造业,大力发展高端、高附加值技术装备的自主知识产权,保持其产业优势。

不断提升系统设计、成套制造的能力,是国外装备制造业的重要发展方向。由于工程承包公司掌握着关键流程工艺技术,在设备选用上有决定权,因此促进这类公司持续快速健康发展,有利于装备制造技术水平的提高。工程承包产业是实现研究与设计结合、工艺与装备结合、制造与使用结合、生产与应用结合的纽带,在技术的商品化、产业化和产业结构升级中起着极大的作用。国外大型装备制造企业,如美国通用电气、德国西门子、日本三菱重工等,都具有工程总承包能力。加快发展具有总体设计、系统集成、成套生产、配套服务等“一揽子”功能的大型装备制造企业,是占领国际竞争制高点的关键环节。因此,产业集群成为培育产业竞争力的重要基础性环节。20世纪90年代以来,全球装备制造业的集群化趋势不断发展。英国北部的汽车、金属加工等制造业集群,美国硅谷和128公路的电子业群、德国索林根的刀具业群、斯图加特的机床业群等,已经成为地区经济发展的重要支柱。

1.2 我国装备制造业的现状

装备制造业是我国国民经济发展重要的支柱性产业,是事关国家经济安全及综合国力的战略性产业。我国装备制造业经过改革开放以后近三十年的建设,特别是近几年的发展,已取得了辉煌的成就。如石油、化工、电力、冶金、矿山等一大批先进实用的国产装备在国民经济建设和国防建设中发挥了重要作用,其主要装备的技术水平已接近或达到同类产品的国际先进水平。但与装备制造业强国相比,我国制造业还存在很大的差距。

事实上,我国全社会固定资产投资中大部分依赖进口,光纤制造设备、集成电路芯片制造设备、数控机床、纺织机械、胶印设备等,绝大部分被进口产品挤占,我国装备制造业产品每年的外贸逆差高达数百亿美元。装备制造业技术创新能力十分薄弱,有自主知识产权的产品少,依附于国外企业的组装产品比重大,有自主知识产权的产品工业增加值率仅为2.6%,这一数字远低于美国的49%、日本的38%和德国的48.5%。目前,我国装备制造业的主要技术50%以上来自国外。在行业主导产品中,发电设备的50%、汽车工业的70%、基础机械的60%、农业机械的30%来自引进,很多产品的品牌、关键技术和销售渠道掌握在跨国公司手里,知识产权矛盾越来越突出。而且随着我国装备制造业的快速发展和技术进步,一些工业发达国家对我国的戒心不断增强,为了保持他们自身的竞争力和国际领先地位,他们对我国在高新技术领域实行了各种各样的禁运和封锁手段。

对装备制造业自主创新的重视,更主要的是源于对当前我国装备制造业自主创新能力薄弱现状的认识。这种薄弱现象主要表现在以下几个方面:

一是政府对设备进口和技术引进尚没有形成有效的管理和协调机制。一些企业只重视设备进口而忽视技术引进,或重视技术引进而忽视消化吸收,重复引进现象严重。

二是作为主力军的国有企业自主创新动力不足。宁愿低水平复制制造能力,不愿通过自主创新提高效益;宁愿引进和跟踪模仿,不愿下苦功消化吸收再创新和原始创新。据统计,我国两万多家大中型企业中有研发机构的仅占25%。

三是研发资金投入不足。发达国家装备制造业企业研发投入通常占销售收入的4%~10%,而我国的企业达不到1%;引进技术费用与消化吸收费用之比,我国为1:0.36,而工业发达国家通常是1:3。

目前,国家十分重视装备制造业的发展。十六届三中、五中全会以来,国家相继提出大力振兴装备制造业,并出台了《国务院关于印发实施〈国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)〉若干配套政策的通知》和《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》。2010年,工业和信息化部部长李毅中在全国工业和信息化工作会议上表示,我国将加快培育发展先进制造业,力争形成一批自主技术和标准,加快推动产业化,促进结构优化升级。这都显示了装备制造业的发展已受到党中央、国务院的高度重视。

2007年,经中国工程院批准,由陈予恕院士主持,黄文虎院士、闻邦椿院士、高金吉院士、刘仁怀院士及各领域的各位专家参与的“提高我国机械装备产品品质的若干关键共性技术调查研究”项目被列为中国工程院咨询项目。此项目的研究目的是:以非线性动力学与控制技术为中心,了解机械装备在各工程应用领域中存在的故障问题,并为解决问题提供技术指导。

从2007年至今,对于机械装备的动力学、振动控制、设计技术、故障诊断、健康管理及智能维修决策技术方面的相关内容,课题组在查阅大量文献资料的同时,到相关的生产企业和研究所进行了调研。主要调研的单位有:上海成套设备研究院、上海汽轮机厂、杭州汽轮机厂、沈阳606研究所、沈阳黎明机械厂、哈尔滨汽轮机厂、哈尔滨电机厂、东安发动机有限公司、航天五院五零一部、石家庄军械工程学院、装甲兵工程学院、北方车辆研究所、航天第三研究院、哈尔滨飞机工业集团有限公司、哈尔滨轴承集团公司、航天第七研究院、机械科学研究院、铁道科学研究院等近二十个企业和科研院所。

在调查研究中,工程部门反映出来的主要技术问题有:

- 1) 工业汽轮机的气流振荡机理及其防治技术。
- 2) 汽轮发电机组与电网运行的关系,特别是近年研究和实践的串联补偿线路与机组间产生的次同步谐振的影响问题。
- 3) 大功率燃气轮机设计技术引进的消化吸收和再创新。

4) 微型燃气轮机发电机组的设计难题, 包括空气轴承等技术以及大型镁铝合金铸造技术。

5) 滚动轴承的减振降噪。

6) 四瓦块可倾瓦支撑轴承力学性能实验研究。

7) 西屋公司生产的 60 万千瓦轴系动力学计算分析软件包的升级换代。

8) 特种车辆变速器的故障诊断与预测。

9) 直升机叶片颤振与控制。

10) 直升机冲击落地时驾驶员座椅隔振技术。

11) 气动颤振和热颤振问题。

12) 飞行器连接结构对结构动态性能的影响。

13) 飞行器故障诊断与预测等。

以上列举的是我们调查研究中重点关注的一些问题。这些问题都是由系统中的非线性因素引起的, 如燃气轮机中存在的次同步谐振是由非线性系统的组合共振引起的, 而流固耦合条件下的气流激振及颤振失稳则是非线性系统的霍普分岔引起的, 等等。它们严重地影响到相关企业产品质量的提高和技术创新。因此, 开展非线性动力学与控制技术的研究对于预测机械装备系统的长期动力学行为, 揭示机械装备系统的内在规律性, 改善机械装备系统的品质及控制策略, 提高机械装备的稳定性和安全性, 具有重要的理论和应用价值。进而, 还可提升我国装备制造业的自主创新能力, 改善我国机械装备的产品品质, 增强我国的综合国力, 为构建创新型社会贡献自己的力量。

第2章 机械装备中存在的若干非线性动力学问题

从这次对高速轨道交通机械、大型旋转机械、航空发动机、大型风力机、高超声速飞行器、储液罐及航天飞行器等领域的调查结果可知,非线性动力学问题广泛存在于各种机械产品当中。机械产品中的非线性动力学问题经常导致严重的机械故障,而且这类故障通常发生突然,难以预测。因此,非线性动力学问题的研究以及非线性动力学的理论与方法在动力学设计及故障诊断中的应用关系到机械装备运行的稳定性、安全性,对国民经济及国防建设将产生重大影响。

2.1 高速轨道交通中的非线性动力学问题

交通运输直接和安全、土地利用、能源利用、环境影响、生态的发展以及人们的生活有着密切的联系,还要考虑到可持续发展问题。在20世纪60年代前,过度发展汽车工业和航空运输业导致世界发达国家石油危机、环境污染、生态失衡等严重社会问题。

根据中国统计年鉴,2001年我国交通运输消耗石油5692.9万t,占全国石油消耗量的24%,根据国务院发展研究中心预测,如不采取有效措施,到2020年我国交通运输的石油消耗量达2.56亿t。巨大的能源消耗,将使已经被污染的生活环境变得更糟,导致昂贵的经济成本和环境治理成本,也可能对我们的生活环境和生存条件构成严重的威胁。

由于高速轨道交通具有节能省时、公害少等环境方面的优点,越来越为世界各国所重视。目前,世界轨道交通正向着客运高速化、货运快捷重载化、城际交通公交化的方向发展。如今德国、日本、法国、意大利、西班牙、瑞典等西方发达国家的高速铁路时速正在向300km/h推进,我国的高速列车技术也正在实现着跨越式发展。此外,随着磁悬浮技术的日趋成熟,高速磁悬浮列车也将成为世界各国未来轨道交通的发展方向。下面分别讨论高速铁路和磁悬浮列车中存在的非线性动力学问题。

1. 高速铁路中的非线性动力学问题

随着运行速度的提高,传统的铁路技术面临着高速度的巨大挑战。高速铁路列车系统是一个非线性的复杂空间耦合系统,其中包括轮轨接触几何关系非线性、轮轨蠕滑特性非线性以及间隙、摩擦副、油压减振器、橡胶弹簧、空气弹簧等诸多悬挂非线性元件。非线性特性的增强为铁路列车系统动力学特性的研究提出了许多新

的课题。对车辆系统的非线性动力学分析表明,系统中存在分岔、对称破缺和混沌等典型的非线性现象。下面介绍高速铁路中的一些非线性动力学问题。

随着铁路客货运量的增大和列车速度的提高,轮轨滚动接触疲劳破坏变得越来越严重,尤其是高速重载线路,情况十分严重。我国现在每年因更换和维修破坏轮轨,大约花费八十多亿人民币。它不仅大大增加了铁路的运营成本,而且直接危害行车的安全。

轮轨接触问题一般分为纯几何接触问题(即轮在轨上做纯滚动)和动力作用问题(即蠕滑问题)。几何接触是将轮和轨假设为刚体,接触点的速度可由纯几何轮轨关系得出,由于考虑了轮轨的特殊形状,这种几何约束为非线性的约束函数,即轮对的横移、摇头、侧滚以及接触角等之间存在非线性的约束关系。

轮轨接触对车辆的动力学性态起着重要的作用,特别是对车辆的曲线通过性能与蛇形运动起着决定性的作用。在小半径和大位移条件下,轮轨接触几何参数和弹性滑动力都是非线性的。因此,要真实地模拟曲线通过,必须考虑轮轨间的非线性因素。车辆的蛇形运动是非线性车辆系统失稳后出现的一种特殊的运动。此时,轮对两根钢轨间横向大幅度地往复摆动,这不仅使得车辆系统的振动加剧,甚至导致脱轨事故。对高速列车来说,问题就更加严重。此外,悬挂系统中的干摩擦、滞后非线性等非线性因素使蛇形运动变得更复杂。

非线性动力学的分析表明,列车的蛇形运动是由于系统霍普分岔出现的极限环运动,而霍普分岔通常可分为超临界霍普分岔和亚临界霍普分岔。对于超临界霍普分岔,列车速度低于霍普分岔速度时,列车是稳定的,高于霍普分岔速度时,随速度的增加极限环的幅值增大;而对于亚临界霍普分岔,列车却有可能在低于霍普分岔速度的时候产生较大幅值的极限环运动,这将严重危害列车的稳定运行。此时,还应确定发生极限环的速度。对于只能确定列车霍普分岔速度的线性分析方法,显然已经不能满足现代高速列车的非线性动力学设计。此外,随着车辆速度的进一步提高,车辆系统的极限环振动有可能出现进一步的分岔,如分岔出倍周期解、概周期解,最终导致混沌运动。混沌运动的出现使系统的动态行为失去可预测性,不仅影响车辆系统的运行平稳性,而且可能会导致脱轨的危险。因此,有必要用非线性动力学理论研究列车的轮轨接触问题,为高速列车的稳定运行提供理论保障。

此外,空气动力学问题也是高速车辆系统的另一个重要问题。研究表明,车速达 160km/h 时,空气阻力大约为列车总阻力的 50% , 200km/h 时大约为 $70\% \sim 75\%$, 300km/h 时约为 $80\% \sim 90\%$ 。此外,高速运行条件下,空气动力学所带来的问题已经不光是阻力问题,还有气动扰动问题,也就是流固耦合振动问题。特别是在会车、横风和隧道通过等特殊工况下,情况更加严重。气流不仅会导致列车运动姿态的变化,影响乘坐舒适性,关键还会影响到列车运行的安全性。列车运行速度提高所带来的空气动力学问题,也将成为列车运行速度提高的制约因素。

2. 磁悬浮列车中的非线性动力学问题

20 世纪 70 年代之后, 电磁悬浮技术逐渐成熟, 成为人们关注的热门交通技术。到目前为止, 磁悬浮列车相继出现了 PMS、EMS、EDS 和高温超导磁悬浮模式。其中, EMS 和 EDS 最具代表性。由于磁悬浮列车具有无轮轨接触、速度高、噪声小、能耗少、维持费用低、安全舒适等一系列优点, 使磁悬浮列车成为各国争先发展的一种运输工具。

磁悬浮列车仍属于地面有轨交通, 因此和其他地面车辆动力学一样, 磁悬浮车辆系统动力学主要包括动力稳定性、运行平稳性和动态曲线通过三大问题。但是, 相对于轮轨铁路车辆—轨道系统而言, 磁悬浮列车以非接触的电磁力实现车辆的支承和导向, 磁悬浮线路大量采用了高架桥梁, 因此也出现了大量的动力学新问题, 如磁/轨关系特征及磁悬浮系统悬浮稳定性、横向稳定性、车桥耦合作用、曲线通过以及对应上述问题的动力学评价指标和标准的建立, 等等。

目前颇受关注的是车轨耦合振动问题。由于轨道的弹性, 轨道系统与控制系统之间存在的非线性因素及其耦合作用, 如果磁悬浮导向系统设计性能略差, 那么振动现象就会随即产生。目前, 除了增加轨道质量、提高轨道刚度, 降低振动发生可能性这一途径以外, 各国均没有提出能够完全抑制车轨耦合振动的成熟技术, 对振动机理也没有提出合理的解释。当前, 有部分学者用分岔理论研究了车轨耦合振动系统, 并给出了振动可能出现的一些原因和条件, 但对于其他同样有效的非线性动力学分析方法, 例如摄动方法、多尺度法、谐波平衡法等, 则很少涉及。这说明磁悬浮车轨耦合系统非线性振动力学特性的研究尚属起步阶段。因此, 有必要用非线性动力学理论去研究车轨耦合系统的非线性动力学特性, 为认识车轨耦合振动问题的本质, 及深入研究振动的成因以及抑制方法, 提供理论基础。最终为我国磁悬浮技术的发展作出贡献。

此外, 磁悬浮列车的横向动力学问题也与铁路列车有所不同。磁悬浮列车虽然不会像轮轨列车那样出现横向蛇行失稳运动, 但也存在横向稳定性问题, 只不过没有轮轨列车那样显得十分突出。因为已有的研究表明, 不论何种悬浮方式的磁悬浮列车, 在正常工况下它在横向上是一个自稳定系统, 只是在恶劣的工作条件下如轨道严重变形、小半径曲线通过、强烈的横向风时才会出现横向失稳。

2.2 大型旋转机械中的非线性动力学问题

大型旋转机械是工业生产的关键性核心装备, 广泛应用于电力、航空、机械、化工、纺织、能源等领域。旋转机械常常由于出现各种不同形式的故障而影响正常工作, 有时甚至会发生由某种故障引发的严重的毁机事故, 从而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、轻型化和自动化方向发展, 对旋转机械在速度、容量、效率和安全可靠性等提出了越来越高的要求。这一