

面向 21 世纪的中国振动工程研究

中国科协第 30 次“青年科学家论坛”

报告文集

胡海岩 靳征谟 主编

航空工业出版社

面向 21 世纪的中国振动工程研究

中国科协第 30 次“青年科学家论坛”报告文集

胡海岩 靳征谟 主编

航空工业出版社

1999

内 容 提 要

本书是1998年6月中国科协主办的“青年科学家论坛”第30次活动——面向21世纪的中国振动工程研究的会议文集,汇集了国内一批优秀青年学者对振动工程研究最新进展的综述和对发展趋势的评论,内容涉及机械与运载工具的振动、结构振动与控制、动态测试与机械故障诊断等。从本书可以看到,振动工程是一门新兴的交叉学科,其内涵是在机械产品或工程结构的设计、研制、使用各阶段积极地消除或控制有害的振动与噪声,或主动利用振动为人类造福。振动分析、试验、控制、设计、诊断与排故的一体化发展构成了当前振动工程研究的中心内容。

本书为从事振动工程研究的高校教师、研究生、工程技术人员提供了该学科研究动态和发展趋势的信息,也可供航空、航天、船舶、机械、结构等领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

面向21世纪的中国振动工程研究:中国科协第30次“青年科学家论坛”报告文集/胡海岩,靳征谟主编. —北京:航空工业出版社,1999.1

ISBN 7-80134-437-5

I. 面… II. ①胡… ②靳… III. 工程力学-振动理论-学术会议-中国-文集 IV. TB123

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第00020号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

南京航空航天大学飞达印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

1999年1月第1版

1999年1月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:11

字数:262千字

印数:1—500

定价:30.00元

前 言

振动工程基于力学、声学、机械工程学、结构工程学,同时溶入了动态测试、信号分析与处理、自动控制、计算机等新技术,是一门新兴的交叉学科。振动工程的内涵是在产品设计、研制、使用各阶段积极地消除或控制有害的振动与噪声,或主动利用振动为人类造福。振动分析、试验、控制、设计、诊断与排故的一体化发展构成了当前振动工程研究的中心内容。

我国对工程中振动问题的研究始于 20 世纪 50 年代,80 年代起进入了一个高潮。80 年代中期,胡海昌院士等首先提出了振动工程的概念。在以他为首的一批专家和学者的倡议下,中国振动工程学会正式成立。十余年来,逐渐形成了一支近万人的研究队伍,取得了一系列推动科技进步和具有重大经济效益的成果。

近年来,一批立足国内、投身振动工程研究的青年学者在各自的研究领域取得了可喜的成就,成长为新一代学术带头人。由于优秀青年学者工作繁重,忙于各自领域的研究,彼此间缺乏了解,没有形成跨部门、跨地区的联合攻关。1997 年 4 月,在中国振动工程学会第三届第二次常务理事会议期间,南京航空航天大学胡海岩教授、中国空间技术研究院马兴瑞教授、西北工业大学孟光教授就我国振动工程研究的青年队伍建设和协作攻关等问题进行了讨论,认为很有必要组织一次优秀青年学者间的学术论坛,并申请纳入中国科学技术协会主办的“青年科学家论坛”系列。

1998 年 6 月 17—19 日,该论坛作为中国科学技术协会主办的“青年科学家论坛”第 30 次活动在北京举行,论坛主题为“面向 21 世纪的中国振动工程研究”。来自国内高校和研究所的 21 位青年学者参加了论坛。著名科学家王大珩院士、中国科学技术协会学会部副部长、“青年科学家论坛”秘书长周济、国家自然科学基金委员会力学学科、机械学科的同志出席了会议。王大珩院士就基础研究与工程研究的关系、科学研究题目的提炼等作了重要讲话。中国振动工程学会理事长黄文虎院士为论坛发来贺信,并向青年学者们提出了殷切的期望。

论坛由胡海岩教授、马兴瑞教授、孟光教授担任执行主席。参加论坛的 21 位青年学者来自我国航空、航天、机械、土木工程等领域,长期从事振动工程研究和教育,其中多人是国家级有突出贡献的中青年专家、国家杰出青年基金获得者,是我国振动工程青年研究队伍的优秀代表。论坛以机械与运载工具的振动,结构振动与控制,动态测试与故障诊断,振动工程理论与应用的发展方向,加强高校、研究所的合作,联合提出振动问题攻关建议及组织实施等专题进行了两天的学术交流和热烈的讨论。论坛期间,与会青年学者应邀参观了中国运载火箭技术研究院的中华航天博物馆及强度与环境研究所,同部分青年科技人员进行了学术讨论。

经过交流与讨论,青年学者们在如下几方面取得共识:

1. 随着我国经济建设的发展,今后五至十年内将有大量复杂的工程振动问题需要解决,其中许多既有科学价值又有实际意义,是今后的研究重点。例如:在先进机械与运载工具的发展中,机器人、并联机床、大型旋转机械、汽车主动底盘、高速列车、人造卫星等复杂系统的动力学与控制、运行中的故障诊断等问题;在结构工程中,高层结构、桥梁、海洋平台的振动分析与控制、损伤监测和评定等问题。

2. 在解决这些振动工程问题的过程中,应深入研究问题的机理,勇于涉足非线性系统、时变系统、变结构系统、多介质耦合等难题,积极采用新工具,发展新方法,充分注意振动工程学科与其他学科的结合和相互渗透。我国在振动工程领域已取得不少成果,部分理论研究成果具有很高的学术水平。今后应特别注重新理论、新方法的应用,以及新技术与现有技术的集成。

3. 振动工程研究在我国已有几十年历史,但处于重大工程项目一线的研究院、所在技术储备方面不足。高校教师和研究院、所的工程师应打破传统的封闭,采用客座研究等灵活的合作方式,保持经常性的密切联系,共同分析、研讨、解决工程实践中出现的振动、冲击与噪声问题,并从中提炼出具有前瞻性的研究方向。青年学者们建议,有关部门可否允许高校的优秀青年学者在航空、航天等研究院、所兼职,投身于国防型号任务的全过程。

4. 青年学者是 21 世纪初我国振动工程研究的主力,其中一批优秀青年学者已陆续走上学术带头人和科研管理的领导岗位。优秀青年学者不仅要关心自己学术梯队的建设和国际合作,还应积极开展相互合作,从共享信息、交换研究生和博士后开始做起,逐步发展到联合申报国家的重点乃至重大研究项目,联合撰写系列性的振动工程专著、制作振动工程教学录像带或光盘。

在国家自然科学基金委员会的支持下,我们将这次论坛期间交流的 21 篇论文汇集成册。这些论文从不同侧面反映了我国振动工程研究的最新成果和当前振动工程研究的发展趋势,对于今后一个时期内我国振动工程的研究和学科发展颇具参考价值。

值此机会,我们由衷感谢中国科学技术协会、中国振动工程学会、航空工业出版社对这次论坛及文集出版工作的支持。感谢孙平凡编审为本书的编辑、出版付出的辛勤劳动。

胡海岩 靳征谟
1998 年 7 月

对青年科学家论坛的祝贺与希望

黄文虎

中国工程院院士、中国振动工程学会理事长

由我会胡海岩教授等三位常务理事发起、经中国科协批准并主办的青年科学家论坛——“面向 21 世纪的中国振动工程研究”今天开幕了！这是我国振动工程界青年学术带头人的一次前瞻性学术盛会，对推动我国振动工程学科的发展具有十分重要的意义。为此，我谨代表中国振动工程学会对论坛的开幕表示热烈的祝贺，对与会的青年学者表示亲切的问候！

此次论坛的目的在于组织振动工程领域的优秀青年学者探讨振动工程理论及应用的发展前景；推动该领域产学研的联合，组织合作和攻关，更好地为经济建设服务；并共商组织学术梯队、加速高层次后备人才培养的大计。我们衷心希望会议开得圆满成功，取得出色的成绩！

时值世纪之交，千年之交。即将来临的 21 世纪将是充满竞争和机遇的时代，在世界范围内，充满着经济的竞争、科技的竞争、人才的竞争。没有大批高素质的科技人才，就没有强大的科技实力，“科教兴国”的战略就会落空，也不可能有祖国的社会主义现代化。为此，我们对青年科技工作者，特别是高层次的青年学者寄以厚望。

首先，我们殷切希望青年学者要确立正确的人生观和价值观，把个人的前途同祖国的命运紧密地联系在一起，发扬“献身、创新、求实、创作”的精神，为全面实现“科教兴国”的伟大战略，为使我国在 21 世纪屹立于世界先进民族之林贡献自己的毕生才智和精力。

其次，要树立实事求是、崇尚科学的优良学风。当前，科技、学术领域存在相当严重的急功近利、弄虚作假、走后门、拉关系等不正之风和精神污染。在此情况下，希望大家保持清醒的头脑，坚持一身正气，使自己成为新一代品质高尚的学者。

第三，要坚持理论联系实际的原则，坚持实践第一的观点，使自己的科研、教学、设计活动密切结合工程技术实际，坚决贯彻“科学技术必须面向经济建设”的方针，乐于为国家和地方的经济建设服务，立志在伟大的社会实践中建功立业！

第四，要敢于争先，勇攀高峰。振动工程是一门交叉学科，既有坚实的理论基础，又有强烈的工程实践属性。在知识经济条件下，知识、智力已成为强大的生产力要素，知识上的差距会引起国与国之间竞争力的差距，也就导致国力的差距。因此，我们在科技研究上要解放思想，敢于争先，努力赶超这一领域的世界先进水平，勇攀振动科学技术的新高峰！

以上是作为一个老科技工作者的希望，也是我本人的自勉。让我们迎着新世纪的曙光，共创我国科学技术的新辉煌！

预祝论坛圆满成功！

对青年科学家论坛的祝贺与希望

黄文虎

中国工程院院士、中国振动工程学会理事长

由我会胡海岩教授等三位常务理事发起、经中国科协批准并主办的青年科学家论坛——“面向 21 世纪的中国振动工程研究”今天开幕了！这是我国振动工程界青年学术带头人的一次前瞻性学术盛会，对推动我国振动工程学科的发展具有十分重要的意义。为此，我谨代表中国振动工程学会对论坛的开幕表示热烈的祝贺，对与会的青年学者表示亲切的问候！

此次论坛的目的在于组织振动工程领域的优秀青年学者探讨振动工程理论及应用的发展前景；推动该领域产学研的联合，组织合作和攻关，更好地为经济建设服务；并共商组织学术梯队、加速高层次后备人才培养的大计。我们衷心希望会议开得圆满成功，取得出色的成绩！

时值世纪之交，千年之交。即将来临的 21 世纪将是充满竞争和机遇的时代，在世界范围内，充满着经济的竞争、科技的竞争、人才的竞争。没有大批高素质的科技人才，就没有强大的科技实力，“科教兴国”的战略就会落空，也不可能有祖国的社会主义现代化。为此，我们对青年科技工作者，特别是高层次的青年学者寄以厚望。

首先，我们殷切希望青年学者要确立正确的人生观和价值观，把个人的前途同祖国的命运紧密地联系在一起，发扬“献身、创新、求实、创作”的精神，为全面实现“科教兴国”的伟大战略，为使我国在 21 世纪屹立在世界先进民族之林贡献自己的毕生才智和精力。

其次，要树立实事求是、崇尚科学的优良学风。当前，科技、学术领域存在相当严重的急功近利、弄虚作假、走后门、拉关系等不正之风和精神污染。在此情况下，希望大家保持清醒的头脑，坚持一身正气，使自己成为新一代品质高尚的学者。

第三，要坚持理论联系实际的原则，坚持实践第一的观点，使自己的科研、教学、设计活动紧密结合工程技术实际，坚决贯彻“科学技术必须面向经济建设”的方针，乐于为国家和地方的经济建设服务，立志在伟大的社会实践中建功立业！

第四，要敢于争先，勇攀高峰。振动工程是一门交叉学科，既有坚实的理论基础，又有强烈的工程实践属性。在知识经济条件下，知识、智力已成为强大的生产力要素，知识上的差距会引起国与国之间竞争力的差距，也就导致国力的差距。因此，我们在科技研究上要解放思想，敢于争先，努力赶超这一领域的世界先进水平，勇攀振动科学技术的新高峰！

以上是作为一个老科技工作者的希望，也是我本人的自勉。让我们迎着新世纪的曙光，共创我国科学技术的新辉煌！

预祝论坛圆满成功！

中国科协“青年科学家论坛”第 30 次活动代表名单

姓 名	性别	学位	职 称	单 位
1. 胡海岩	男	博士	教 授	南京航空航天大学
2. 马兴瑞	男	博士	教 授	中国空间技术研究院
3. 孟 光	男	博士	教 授	西北工业大学
4. 黄 田	男	博士	教 授	天津大学
5. 于德介	男	博士	教 授	湖南大学
6. 翟婉明	男	博士	教 授	西南交通大学
7. 谢建华	男	博士	教 授	西南交通大学
8. 顾 明	男	博士	教 授	同济大学
9. 欧进萍	男	博士	教 授	哈尔滨建筑大学
10. 田 静	男	博士	研究员	中国科学院声学研究所
11. 熊冶平	女	博士	教 授	山东工业大学
12. 曾 攀	男	博士	教 授	清华大学
13. 邢誉峰	男	博士	教 授	北京航空航天大学
14. 杨翊仁	男	博士	教 授	西南交通大学
15. 陈 进	男	硕士	教 授	上海交通大学
16. 史铁林	男	博士	教 授	华中理工大学
17. 左洪福	男	博士	教 授	南京航空航天大学
18. 耿遵敏	男	博士	教 授	山东工业大学
19. 丁 康	男	硕士	教 授	重庆大学
20. 夏益霖	男	硕士	高 工	中国运载火箭技术研究院
21. 张 方	男	博士	博士后	南京理工大学

中国科协“青年科学家论坛”第 30 次活动代表名单

姓名	性别	学位	职称	单 位
1. 胡海岩	男	博士	教 授	南京航空航天大学
2. 马兴瑞	男	博士	教 授	中国空间技术研究院
3. 孟 光	男	博士	教 授	西北工业大学
4. 黄 田	男	博士	教 授	天津大学
5. 于德介	男	博士	教 授	湖南大学
6. 翟婉明	男	博士	教 授	西南交通大学
7. 谢建华	男	博士	教 授	西南交通大学
8. 顾 明	男	博士	教 授	同济大学
9. 欧进萍	男	博士	教 授	哈尔滨建筑大学
10. 田 静	男	博士	研究员	中国科学院声学研究所
11. 熊冶平	女	博士	教 授	山东工业大学
12. 曾 攀	男	博士	教 授	清华大学
13. 邢誉峰	男	博士	教 授	北京航空航天大学
14. 杨翊仁	男	博士	教 授	西南交通大学
15. 陈 进	男	硕士	教 授	上海交通大学
16. 史铁林	男	博士	教 授	华中理工大学
17. 左洪福	男	博士	教 授	南京航空航天大学
18. 耿遵敏	男	博士	教 授	山东工业大学
19. 丁 康	男	硕士	教 授	重庆大学
20. 夏益霖	男	硕士	高 工	中国运载火箭技术研究院
21. 张 方	男	博士	博士后	南京理工大学

目 录

胡海岩:先进机械系统的若干动力学与控制问题	(1)
马兴瑞:大型复杂卫星的几个动力学问题	(10)
孟 光 姚国治 鲁宏权:电流变技术用于振动控制的实验研究	(16)
黄 田 汪劲松:并联机床设计基础理论的研究进展	(25)
于德介:弹性连杆机构灵敏度分析方法与应用	(39)
翟婉明:高速列车与轨道结构的耦合振动	(45)
谢建华 罗冠炜:碰撞振动系统的分叉与混沌研究	(52)
顾 明:大跨斜拉桥拉索的风(雨)激振及抑制方法	(59)
欧进萍 吴 斌:土木工程结构耗能减振的研究与应用	(66)
田 静:结构振动有源控制的研究及应用	(72)
熊冶平:柔性耦合系统的振动功率流及主、被动控制研究	(79)
曾 攀:复杂结构动力学分析的高精度单元建模	(91)
邢誉峰:有限长 Timoshenko 梁的波动特性.....	(97)
杨翊仁 张继业:不可压缩粘性流中板状结构振动流体的附加质量和阻尼 ..	(104)
陈 进:机械故障诊断中关于特征提取的若干研究前沿	(110)
史铁林:Internet 与现代故障诊断	(124)
左洪福:从现代维修看故障诊断技术	(130)
耿遵敏:往复机械振声特性分析与动态诊断研究	(138)
丁 康:频谱校正理论的发展和應用	(147)
夏益霖:振动环境工程的发展和應用	(154)
张 方 朱德懋 张福祥:动载荷识别的时间有限元理论及其工程应用	(160)

先进机械系统的若干动力学与控制问题*

胡海岩

(南京航空航天大学振动工程研究所 南京,210016)

摘要 先进机械系统普遍具有主动控制环节和各种非线性因素,由此导致了一系列复杂的动力学行为。本文讨论了这类系统动力学建模、分析与控制中的若干问题,侧重于部件间的非线性相互作用、控制器和作动器引入的非线性和时滞问题等。在评述研究进展的同时,指出了一些值得研究的问题。

关键词: 机械系统;非线性振动;控制;时滞;碰撞

引言

在人们心目中,先进机械系统是以灵巧机械手(爪)、步行机器人、并联机床、可移动光学仪器平台、磁悬浮导轨、高速列车、汽车主动底盘等为代表的智能化机电产品,它们反映了当代机械工业的科学技术水平。

从力学的角度看,先进机械系统具有材料新颖、结构轻巧、机动性强、智能化高等一系列特点,产生了材料非线性、几何非线性、控制中的非线性与时滞等复杂的动力学问题。这些问题曾经影响了先进机械系统的实现或依然阻碍着其发展,从而引起力学家的普遍重视。1996年,国际理论与应用力学联合会(IUTAM)在荷兰 Eindhoven 工业大学召开了主题为“先进机械系统的动力学与控制”的研讨会,吸引了机械动力学与控制方面的一批国际著名专家。与会专家将“先进机械系统”定位于:由非线性动力学模型描述的机械系统,特别是受控机械系统。这一方面说明先进机械系统的动力学与控制的复杂性,另一方面鼓励系统设计师巧妙运用非线性现象,致力于构思更加先进的机械系统。

本文将对先进机械系统动力学与控制的一些最新研究进展,特别是笔者所从事研究和关心的问题作一回顾,指出值得研究的若干问题。

1 动力学建模

机械系统的动力学研究需要建立在简洁、可靠的模型基础上。由于实际问题的复杂性,系统的模型往往要由理论与实验相结合来确定。

* 国家杰出青年科学基金资助项目(编号:59625511)

1.1 理论建模

目前,分析机械零、部件动力学问题的有限元方法和商品化软件已相当完善,而处理含运动部件的机械系统的多体动力学方法和软件相对落后许多。其中,多刚体系统动力学的建模方法和软件正日趋成熟,但在国内工业界尚不够普及。许多学者已将研究重点转向多柔体系统和刚柔混合多体系统的动力学与仿真,国家自然科学基金委员会已将其列为 1998 年的重点资助项目。

在描述机器人步行、机械手抓取与释放、航天器对接、多体输运等过程中,多体力学模型的拓扑结构或自由度会由于部件相接触而变化,这样的力学系统被称作变拓扑结构系统。对于变拓扑结构的多刚体系统,接触碰撞可视为单侧约束,运动约束条件和力约束条件恰好互补。例如:两刚体的接触点相粘合时,相对切向速度为零,但摩擦力与约束力之差非零;而接触点滑移时,相对切向速度非零,但摩擦力与约束力之差为零。由此可判断任意时刻系统的某一单侧约束是否起作用,然后将起作用的约束力作为 Lagrange 乘子引入多刚体系统的动力学方程。研究变拓扑结构多刚体系统的基础是合理简化接触/碰撞问题。虽然接触力学和冲击动力学提供了若干模型,但研究多个部件的接触/碰撞,特别是多次接触/碰撞时,这些模型过于复杂。因此,多数研究者采用基于实验结果的唯象模型。例如,Glocker 和 Pfeifer 采用 Newton 对心正碰撞模型和 Coulomb 干摩擦模型研究了多刚体系统在平面内的接触/碰撞问题,导出的互补约束条件是约束力的线性代数方程,可方便地求解。他们用该方法计算了冲击钻、飞机着陆等问题的响应^[1]。

近年来,对变拓扑结构多刚体系统的研究已深入到三维接触、计入摩擦的碰撞等问题。例如:Glocker 和 Pfeiffer 研究了多刚体系统的二维摩擦碰撞^[2]。他们将碰撞压缩阶段刚体的切向动量分为两部分:一部分来自 Poisson 碰撞模型,碰撞后可恢复;另一部分来自 Coulomb 干摩擦,碰撞后不可恢复。相应的互补约束条件仍是约束力的线性方程。该方法可推广到三维碰撞,但互补约束条件不再是约束力的线性方程。因为在三维接触/碰撞问题中,摩擦发生在两刚体接触点的公切面内,方向未知,远比二维接触复杂。Wölse 和 Pfeiffer 研究了无冲击的多刚体多点三维接触问题,将描述法向、切向约束的变分关系投影到约束反力、摩擦力所满足的正规锥上,得到了可求解的非线性微分/代数方程^[3]。

目前,该领域的研究很活跃。例如:德国一批著名力学家正在 DFG 资助下进行合作研究,内容涉及接触力学、多体接触/碰撞的程式建模、复杂接触/碰撞过程的动力学仿真等。他们已成功地对机器人步行、多指机械手持物体在掌中旋转等复杂动力学过程进行仿真,还对多达 70~80 个刚体的 CVT 链传动、物料碰撞输运等动力学过程进行了仿真。

1.2 实验建模

实验建模旨在确定系统中一些难以由理论分析得到的复杂因素,如系统阻尼、磁悬浮轴承刚度、约束和支撑处的间隙、摩擦等。作者在文献[4]中评述了对间隙、摩擦等非线性因素进行实验建模的进展,本文侧重于作动器的实验建模问题。

液压作动器具有低频特性好、推力大等优点,广泛应用于车辆主动悬架、可移动式光学仪器平台、建筑结构抗震控制等。液压作动器的一个特点是:从接收到控制信号到产生指定的推力有一时间上的滞后。在早期研究中,这一时滞通常忽略不计。但随着控制速度的提

高,时滞已成为影响控制系统稳定性和性能的重要因素。为说明计入时滞后系统的建模问题,考察一具有未知位移反馈时滞 τ_1 和速度反馈时滞 τ_2 的 n 自由度线性系统

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) + Ux(t - \tau_1) + V\dot{x}(t - \tau_2), \quad x \in R^n \quad (1)$$

系统的频响函数为

$$H(\omega) = [K - \omega^2 M + j\omega C - (e^{-j\omega\tau_1} U + j\omega e^{-j\omega\tau_2} V)]^{-1} \quad (2)$$

如果由实验数据和式(1)或式(2)直接识别未知的 $M, C, K, U, V, \tau_1, \tau_2$,将遇到性能很差的非线性优化问题。鉴于实际问题中的时滞并不很长,可考虑用多项式逼近式(2)中的指数函数,获得扩阶的频响函数,再用正交多项式拟合方法识别参数。

绝大多数作动器含有一定的非线性因素。为了动力学分析的方便,人们总是尽可能地采用线性化模型。例如,对于采用比例阀的气动或液压作动器,在工作点附近进行线性化。但对于采用开关阀的气动或液压作动器,线性化就不合理了。当前,越来越多的研究在作动器建模阶段计入干摩擦、饱和等本质非线性因素^[5,6]。

近年来,基于各种新型功能材料的作动器不断出现。继压电材料之后,形状记忆合金、电流变体、磁流变体已成为制造作动器的材料。以磁流变体为例,它的表观粘度可通过能耗甚微的外界磁场在数毫秒内大幅度调节,由液态变为半固态。此外,它具有很好的温度适应性,化学和物理稳定性也优于电流变体。不久前,美国 Lord 公司已研制成采用磁流变体的主动控制阻尼器,显示出非常好的应用前景。然而,这些新型功能材料的本构关系比较复杂,均具有强非线性或迟滞。仍以磁流变体为例,其流体阻力在低流速时呈迟滞,高流速时则呈双线性,很难用简单的数学关系来逼近。最近,Spencer 等在 Bouc-Wen 迟滞模型基础上引入两个内变量,构造了一种含 14 个待定参数的微分方程模型,可很好拟合各种实验数据^[7]。但该模型过于复杂,很难用于后继的动力学解析分析。目前,基于神经网络的建模也在研究之中。从工程角度看,尚需对各种模型用于动力学仿真和控制设计的效果进行评价,在精度和效率之间进行折衷。

2 动力学分析

先进机械系统的动力学分析相当普遍地涉及到非线性动力学问题。其中,多个部件间的非线性相互作用、作动器的动特性等日益引起人们关注。

2.1 两部件碰撞振动

两部件在外激励下的碰撞振动是最简单的变拓扑结构系统动力学问题。已有研究侧重于单自由度振子与刚性约束面或自由刚体的碰撞振动,对于齿轮传动、压力成型机与工件的相互作用等动力学问题,则必须研究两个单自由度振子,甚至两个弹性体间的碰撞振动。

最近,金栋平和胡海岩采用这两类模型对两部件碰撞振动进行了分析。在对第一类模型的研究中,采用 Newton 碰撞模型。首先,给出了系统在简谐激励下周期运动的精确解和稳定性分析^[8];然后,通过数值计算讨论了系统参数对周期运动及混沌运动的影响^[9]。在对第二类模型的研究中,以两根梁作为弹性体,选用基频振型对梁进行模态缩聚,用多项式逼近 Hertz 接触模型描述的碰撞力。首先研究了系统的自由碰撞问题,发现了碰撞振动的非线性模态具有非相似性^[10];然后研究了系统在简谐激励下的周期运动,发现:系统满足 1:1 内

共振条件时,两梁作同向振动;远离该条件时,作剧烈的反向碰撞振动^[11]。

模态缩聚是简化两部件碰撞振动分析所必需的,也是分析中的主要误差源。因此,作者及其助手们正在研究计入高阶模态后的两部件碰撞振动问题,试图寻求模态截断的准则^[12]。

2.2 刚-柔部件的相互作用

复杂机械系统中常常有许多刚度差异很大的部件。例如,汽车轮胎刚度远远高于悬架系统隔振弹簧的刚度。在初始研究阶段,通常将相对刚硬的部件完全刚化,以求理论分析简洁,数值分析不出现刚性微分方程。到了深入研究阶段,则要分析刚化的合理性及误差。

一种直观的做法是采用摄动法由刚化系统的动力学来推测原系统的动力学。值得注意的是:在被刚化的部件中,惯性力作为小量被略去,故这是最高阶导数含有小量的奇异摄动问题。Bajaj 等采用奇异摄动和不变流形理论研究了一个简谐激励下两部件系统刚化的合理性问题,该系统含有一个刚硬的线性振子和一个柔软的非线性振子^[13]。他们发现,存在一个由柔软非线性振子的受迫振动所确定的、慢时变的三维不变流形,原系统的运动可拓扑等价地投影到该流形上。这表明,对线性振子的刚化处理不会影响原系统的动力学定性行为。

2.3 控制系统时滞引起的失稳

尽管多数控制系统中的时滞很短,但由式(2)可见,短时滞对受控系统的高频特性会有显著影响。在一定条件下,它将使受控系统频响函数具有正实部的极点,产生失稳。研究表明,时滞在车辆主动悬挂、高耸结构主动拉索等振动控制系统中的作用是不容忽视的,在具有人机交互环节的大系统稳定性中更占有重要地位。

考察系统(1)的自由振动 $x(t) = ae^{\lambda t}$,它满足特征方程

$$D(\lambda, \tau)\mathbf{a} \equiv [\lambda^2\mathbf{M} + \lambda\mathbf{C} + \mathbf{K} - (e^{-\lambda\tau_1}\mathbf{U} + \lambda e^{-\lambda\tau_2}\mathbf{V})]\mathbf{a} = 0 \quad (3)$$

该超越方程组具有无限多个特征值,系统渐近稳定等价于所有特征值皆有负实部。由于无法求解超越方程组的全部特征值,数学界提出了多种方法直接判断特征值的实部。这些方法的计算工作量很大,不适于分析受控机械系统的稳定性^[14]。

最近,胡海岩和王在华分析了 $n = 1$ 时系统(1)的稳定性问题,给出了任意时滞下系统渐近稳定的一种代数判据,对于给定的时滞,讨论了使系统渐近稳定的反馈增益取值区域^[15]。王左华和胡海岩还利用 Pade 多项式逼近式(3)中的指数函数,将超越方程转化为扩阶的高次代数方程,进而讨论了系统的稳定性和关于参数扰动的鲁棒稳定性^[16]。

当 $n > 1$ 时,一般难以得到系统(1)渐近稳定的解析条件。作者证明:对于充分短的时滞,特征方程(3)只有 $2n$ 个位于无时滞系统特征值附近的特征值^[17]。因此,若无时滞系统渐近稳定,可以跟踪具有最大实部的特征值随时滞增加的变化来确定时滞系统的稳定性。记无时滞系统的第 r 个特征值和规一化特征向量分别为 λ_r 和 \mathbf{a}_r ,时滞反馈系统相应的特征值和特征向量为 $\tilde{\lambda}_r = \lambda_r + \Delta\lambda_r$ 和 $\tilde{\mathbf{a}}_r = \mathbf{a}_r + \Delta\mathbf{a}_r$,则有

$$\Delta\lambda_r \approx \frac{\mathbf{p}_r^* [\lambda_r^2\mathbf{M} + \lambda_r\mathbf{C} + \mathbf{K} - (e^{-\lambda_r\tau_1}\mathbf{U} + \lambda_r e^{-\lambda_r\tau_2}\mathbf{V})]\mathbf{p}_r}{\mathbf{p}_r^* [2\lambda_r^2\mathbf{M} + \mathbf{C} + \tau_1 e^{-\lambda_r\tau_1}\mathbf{U} + (\lambda_r\tau_2 - 1)e^{-\lambda_r\tau_2}\mathbf{V}]\mathbf{p}_r}, \quad \tilde{\mathbf{a}}_r = \Delta\lambda_r\mathbf{p}_r \quad (4)$$

其中向量 p_r 是下述线性代数方程组的解

$$D(\lambda_r, \tau)p_r = -[2\lambda_r M + C + \tau_1 e^{-\lambda_r \tau_1} U + (\lambda_r \tau_2 - 1)e^{-\lambda_r \tau_2} V]a_r \quad (5)$$

如果时滞反馈系统是线性时变的或具有非线性因素,其动力学将非常复杂。现有研究集中在慢时变系统和非线性自治系统平衡解的稳定性、Hopf 分叉分析。例如:王在华和胡海岩采用冻结法研究了慢时变线性时滞系统的稳定性^[18]。Moiola 和 Chen 研究了一个具有线性时滞前馈和非线性时滞反馈的控制系统的 Hopf 分叉,采用谐波平衡法分析了分叉后的自激周期振动^[19]。胡海岩和吴志强针对四轮转向汽车,计入司机行为时滞和轮胎非线性,建立了一个 5 维非线性自治时滞系统,讨论了转向过程中的 Hopf 分叉^[20]。

由于振动控制系统多是受外激励的非自治系统,需关心其受迫振动问题。为此,作者用多尺度法研究了含时滞弱反馈的 Duffing 系统受迫振动问题^[21]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) + 2\zeta\dot{x}(t) + x(t) + \mu x^3(t) = 2ux(t - \tau) + 2v\dot{x}(t - \tau) + f\sin\lambda t \\ x(t) = x_0(t), \quad t \in [t_0 - \tau, t_0], \quad t_0 > 0, \quad \tau > 0 \end{cases} \quad (6)$$

以主共振为例,系统具有无时滞系统主共振的基本特点,但系统阻尼比和频率失调量变为

$$\bar{\zeta} = \zeta + u\sin\tau - v\cos\tau, \quad \bar{\sigma} = \sigma + u\cos\tau + v\sin\tau \quad (7)$$

显然,时滞 τ 可以使 $\bar{\zeta}$ 极大而减小主共振;也可使 $\bar{\zeta}$ 极小而增加主共振,甚至使主共振失稳。文中指出:从减振及增稳角度看,反馈增益的最佳搭配是位移正反馈而速度负反馈。该方法还可用于分析亚谐、超谐及组合共振。

由于时滞系统有无限维解空间,研究其局部和全局动力学特性非常困难。即使对于方程(6)这样最简单的系统,目前尚难以用胞映射一类的数值方法研究其吸引子和吸引域。

3 动力学控制

机械系统的动力学控制是目前的热门研究领域,其中机器人、车辆主动悬架、机敏结构的控制研究成果尤为丰富,每一专题都已有许多专著和综述。本文侧重讨论几种有应用前景的动力学控制技术。

3.1 控制分叉

现用一转子动力学问题来说明控制分叉的思路。考察由常微分方程组描述的转子动力学问题

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{u}(t), \omega, p), \quad \mathbf{u} \in R^{2n} \quad (8)$$

其中 $\omega \geq 0$ 是转速, $p \in R^1$ 是可主动调节的系统参数。设转子自 $\mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, \omega = 0, p = p_0$ 启动,随后 ω 缓慢增加、 p 保持不变,直到额定转速 $\omega = \omega_s$ 时 $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_s(t)$ 。如果转子设计不周,有可能存在一个转速区 $[\omega_1, \omega_2]$ 与区间 $[0, \omega_s]$ 相交,转速达到 ω_1 和 ω_2 时分别发生 Hopf 分叉和逆 Hopf 分叉,形成危险的自激振动。这时,转子只能工作在 $0 \leq \omega < \omega_1$ 。

控制这类分叉的基本思想是:在转子启动过程中实时调节控制参数 p ,使转子在转速接近 ω_1 和 ω_2 时 $p \neq p_0$,破坏分叉条件;而当转速达到 ω_s 时仍保持为 $p = p_0$,使转子具有所期望的动力学行为。Czolczynski 等研究了用该方法控制一个具有空气轴承的刚性转子的 Hopf 分叉^[22]。他们在轴瓦与支座间加入一可实时调节间隙的压缩空气环,由此改变转子的支撑刚度。经过大量计算,确定了节流孔径对转子发生分叉的影响,然后在启动过程中实时控制

节流孔径,使转子非常安全地通过了危险转速区 $[\omega_1, \omega_2]$ 。

这种控制思想可推广到许多机械系统的动力学过程控制。使用中的主要困难是:要通过大量数值计算事先深入了解非线性系统的瞬态过程。

3.2 控制混沌

近年来,控制混沌是非线性科学与工程相结合的一个研究热点,力学界也日益重视这一研究领域。对于机械系统来说,以下几方面的研究颇具实际意义:(1)用最低代价消除系统的有害混沌运动;(2)在振动机械中实现具有足够鲁棒性的混沌运动;(3)将混沌运动稳定到指定的周期运动上;(4)利用混沌运动实现系统状态快速转迁。

对于前两个问题,一般可通过动力学设计或小修改获得满意结果。对于后两个问题,则宜采用主动控制技术。综述[23]发表以来,虽有浩瀚的文献报道各种新的控制混沌方法,但主要是对已有方法的改进,例如文[24,25]。对于目前需求迫切的高维系统混沌运动控制,仍缺少稳健的控制方法。根据我们的实践,采用连续反馈控制和多参数反馈控制可改进对高维系统的控制效果。其中多参数反馈控制可采用线性化 Poincarè 映射的广义逆确定参数调节量,这也是 OGY 方法的一种变体。

3.3 周期运动的镇定

实践中,人们期望机械系统所产生的周期运动未必有足够的稳定性裕度,甚至是不稳定的。这时,需要对周期运动进行镇定。线性时不变系统的周期运动镇定问题归结为系统极点配置,已比较成熟。近期研究侧重于非线性系统不稳定周期运动的镇定。例如:Krodkiewski和 Faragher 用时滞一个运动周期的状态反馈来镇定单自由度非线性系统,取得了成功^[26]。Heertjes 等先对具有单侧约束梁进行有限元建模,选择具有小振幅、但不稳定的 $1/2$ 亚谐碰撞振动为目标,然后用 SCTC 控制策略完成了镇定^[27]。

对照控制混沌运动的 OGY 方法可发现,周期运动的镇定是 OGY 方法中的一个环节。因此,在 OGY 方法的众多推广中,许多方法可以用于周期运动的镇定。例如,作者在文[24]中提出的自适应方法及算例就是解决周期运动的镇定问题。

3.4 自适应动力吸振器

为使动力吸振器有跟踪外激励频率变化的自适应性,早就有人研究如何主动调节动力吸振器的质量或弹性元件刚度。近年来,又有多种新控制策略被引入动力吸振技术。例如:

(1)Oueini 和 Nayfeh 设计了一种具有平方非线性的控制器及压电作动器,作为动力吸振器安装在悬臂梁上,使组合系统满足 $1:2$ 内共振条件。当悬臂梁受到简谐激励后,其响应立即进入饱和状态,外激励能量均转移到吸振器上^[28]。

(2)Olgac 提出一种带有位移时滞反馈的动力吸振器^[29]。这时,吸振器对应的特征值问题具有无限多个根,通过实时调节反馈增益和时滞,可使有最小实部的特征根为纯虚根(即固有频率),实现对外激励频率的跟踪。

(3)作者提出在动力吸振器中引入带间隙的辅助弹性元件,通过调节间隙改变弹性元件的等效刚度,使动力吸振器能大范围跟踪外激励频率的变化^[30]。

从工程角度看,这些新策略还均未成熟。例如:策略(1)要求组合系统满足内共振条件,

策略(2)本质上是用位移反馈补偿所需的吸振器刚度和阻尼,这都限制了外激励频率的变化范围;策略(3)的间隙调节方案尚处于实现中。

4 结束语

进入 90 年代以来,先进机械系统的设计和研制中出现了许多复杂的非线性动力学与控制问题,向力学家提出了新的挑战。本文不求全面,侧重讨论了作者所关心的部件间相互非线性作用、控制器和作动器引起的非线性与时滞、非线性控制策略等问题。这些问题均未彻底解决,而且进一步的研究具有相当的理论难度。

从更高层次上看,先进机械系统中的机、电、磁等子系统必然相互作用,系统的动力学与控制也必然相互耦合。目前,在这一层次上的研究大多是用经典方法分析一些线性子系统的耦合,自顶向下的设计也主要限于线性问题,部分研究中采用描述函数等工具刻画非线性环节的基波行为,能利用非线性动力学近代方法的设计尚很少。目前,这些问题正引起人们注意^[31,32]。针对先进机械系统在线性、控制器、作动器方面的特点发展大系统理论、系统综合设计、自顶向下设计方法及软件将是今后的重要任务。

从另一角度看,复杂非线性系统的传统动力学控制技术受到精确建模困难、控制理论欠缺等困扰,短期内很难有革命性的突破。因此,人们对基于人工智能的建模与控制技术寄予很高期望。近年来,不少研究已证实:采用神经网络建模,运用模糊逻辑、基因算法等进行最优控制特别适用于具有强非线性和不确定因素的复杂系统动力学问题^[33-35]。

可以说,智能控制是“摸着石头过河”解决复杂系统动力学控制的有效途径。只有具备了对动力学现象的透彻认识,才能产生像 OGY 控制混沌策略这样的技术飞跃。因此,对于先进机械系统的动力学,需要在传统控制及智能控制两方面同时探索,取长补短。

参 考 文 献

- 1 Glocker Ch, Pfeiffer F. Dynamical systems with unilateral contacts. *Nonlinear Dynamics*, 1992; 3(4): 245 - 259
- 2 Glocker Ch, Pfeiffer F. Multiple impacts with friction in rigid multibody systems. *Nonlinear Dynamics*, 1995; 7(4): 471 - 497
- 3 Wölse M, Pfeiffer F. Dynamics of multibody systems containing dependent unilateral constraints with friction. *Journal of Vibration and Control*, 1996; 2 (1): 161 - 192
- 4 胡海岩. 分段光滑机械系统动力学的进展. *振动工程学报*, 1995; 8(4): 331 - 341
- 5 Caracciolo R, et al. Accurate modeling of a controlled pneumatic actuator with experimental validation. In: van Campen D H. *Interaction between Dynamics and Control in Advanced Mechanical Systems*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997; 59 - 66
- 6 Darby A P, Pellegrino S. Active alignment control of a payload using nonlinear, long stroke actuators. *ibid*, 91 - 100
- 7 Spencer B F, et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997; 123(3): 230 - 238
- 8 Jin Dongping, Hu Haiyan. Periodic vibro-impacts and their stability of a dual component system. *Acta Mechanica Sinica*, 1997; 13(4): 366 - 376