

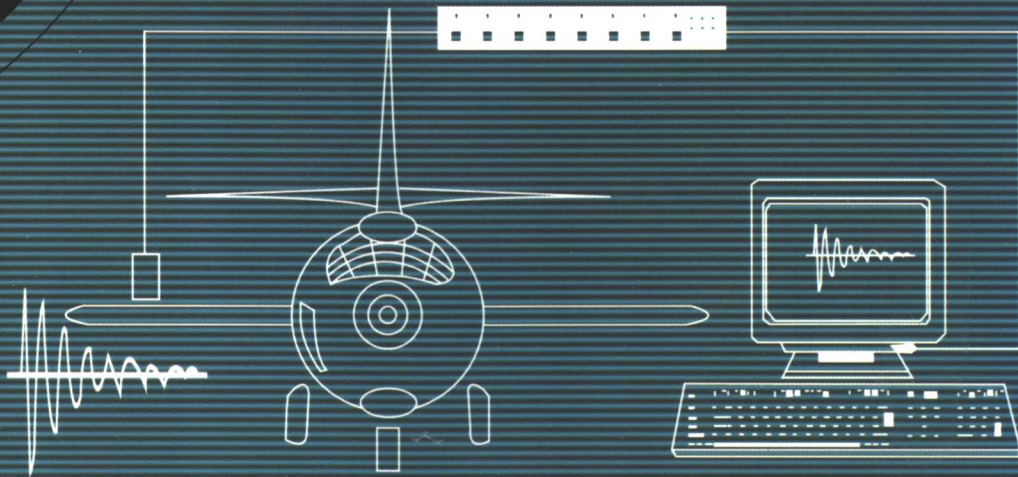
力学



机械振动基础

●胡海岩 主编

国防科工委「十五」规划教材



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

TH113.1
42



国防科工委“十五”规划教材·力学

机械振动基础

胡海岩 主编

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书是为航空宇航科学与技术、机械工程、力学、动力工程和交通运输工程等专业的本科生编写的基础课教材。

全书共分6章,包括单自由度系统的振动、多自由度系统的振动、无限自由度系统的振动、振动分析的近似方法和数值方法、非线性振动以及振动实验。附录介绍了如何使用数值分析软件平台 MATLAB 计算振动问题。

本书结构严谨,内容丰富,强调分析、计算与实验相结合,借鉴了国际著名大学的机械振动教学计划,融入了作者多年的教学和研究成果,反映了工程振动领域的新进展。

图书在版编目(CIP)数据

机械振动基础/胡海岩主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.7

ISBN 7-81077-635-5

I. 机… II. 胡… III. 机械振动 IV. TH113.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 022595 号

机械振动基础

胡海岩 主编

责任编辑 刘晓明

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16

印张:13.5 字数:302 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷

印数:3 000 册

ISBN 7-81077-635-5 定价:19.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探

索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影 响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业



走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

机械振动是设计和研制飞机、直升机和导弹等飞行器时必须妥善解决的重要工程问题。因此,自20世纪70年代起,南京航空航天大学振动工程研究所为航空类专业本科生开设了“飞行器结构振动”、“机械振动基础”等课程,并在张阿舟教授、朱德懋教授带领下编写了《飞行器振动基础》和《振动基础》两本教材。90年代后期,又由胡海岩教授等编写了《机械振动与冲击》,以适应学科发展和教学改革的需要。上述教材曾作为航空工业高等院校的通用教材在多所大学使用,取得了较好的效果。

2002年,根据国防科工委重点教材建设计划的要求,我们提出了《机械振动基础》教材的编写计划,被列为国防科工委“十五”规划教材。本教材是在胡海岩教授等编写的《机械振动与冲击》一书基础上,根据近年来教学实践的反馈,通过精选传统内容、补充现代内容和降低理论难度等措施编写而成。编写中,除了着重对经典内容作简明、严谨的阐述外,还吸取了近期中外文献中的研究成果,力求反映本学科的新发展。

本书共分6章。前4章是线性振动分析的基本内容,依次介绍了单自由度系统、多自由度系统、无限自由度系统振动的概念和分析方法以及近似分析方法,可作为40学时课程的教材。第5章介绍了非线性振动的基本概念和分析方法。第6章介绍了振动实验方法,可作为16学时扩充内容的教材。为了使读者从繁琐的振动计算中解放出来,并通过数字仿真来对机械振动理论加深理解,书末附录中扼要介绍了如何使用商品化的数值分析软件平台MATLAB计算振动问题。每章末附有一定数量的习题,以便于读者巩固正文内容,拓宽其应用范围和工程背景。

本书由胡海岩教授主编,参加编写的有金栋平教授、陈怀海教授、陈国平教授和孙久厚研究员。国防科工委重点教材建设计划办公室聘请相关学科的专家认真审阅了全书,并提出许多宝贵的意见,作者在此致以诚挚的谢意。

编 者

2004年10月

目 录

绪 论

0.1 振动系统及其模型	1
0.2 振动问题的分类	3
0.3 研究工程振动问题的途径	4
0.4 本书的内容体系	6

第 1 章 单自由度系统的振动

1.1 单自由度系统振动方程	7
1.2 无阻尼单自由度系统的自由振动	8
1.2.1 特征解	8
1.2.2 初始扰动引起的自由振动	9
1.2.3 简谐振动及其特征	9
1.2.4 弹簧与阻尼器的串联与并联	12
1.3 等效单自由度系统	13
1.4 有阻尼单自由度系统的自由振动	16
1.5 简谐力激励下的受迫振动	20
1.5.1 简谐力激励下受迫振动的解	20
1.5.2 稳态振动响应	21
1.6 基础简谐激励下的受迫振动	27
1.6.1 振动方程	27
1.6.2 稳态振动响应	28
1.7 振动的隔离	30
1.7.1 第一类隔振	30
1.7.2 第二类隔振	31
1.8 等效线性粘性阻尼	32
1.8.1 阻尼的等效	32
1.8.2 几种阻尼的等效实例	33
1.9 周期激励下的振动分析	34
1.9.1 周期函数的 Fourier 级数展开	34
1.9.2 周期激励下的受迫振动	36
1.10 瞬态激励下的振动分析	37
1.10.1 δ 函数及其性质	38
1.10.2 单位脉冲响应函数与杜哈梅积分	40



1.10.3	Fourier 变换法	41
1.10.4	Laplace 变换法	43
	习 题	44
第 2 章 多自由度系统的振动		
2.1	多自由度系统的振动方程	47
2.2	建立系统微分方程的方法	50
2.2.1	影响系数和能量	50
2.2.2	刚度矩阵法	52
2.2.3	柔度矩阵法	54
2.2.4	Lagrange 方程	56
2.3	无阻尼系统的自由振动	58
2.3.1	二自由度系统的固有振动	58
2.3.2	二自由度系统的自由振动	61
2.3.3	二自由度系统的运动耦合与解耦	63
2.3.4	多自由度系统的固有振动	64
2.3.5	运动解耦	68
2.3.6	多自由度系统的自由振动	69
2.4	无阻尼系统的受迫振动	71
2.4.1	频域分析	71
2.4.2	时域分析	74
2.5	比例阻尼系统的振动	76
2.5.1	多自由度系统的阻尼	76
2.5.2	自由振动	77
2.5.3	受迫振动	79
2.6	一般粘性阻尼系统的振动	81
2.6.1	自由振动	81
2.6.2	受迫振动	84
	习 题	85
第 3 章 无限自由度系统的振动		
3.1	弹性杆的纵向振动	91
3.1.1	振动微分方程	91
3.1.2	固有振型的正交性	97
3.2	弹性轴的扭转振动	98
3.3	弹性梁的弯曲振动	100
3.3.1	弯曲振动微分方程	101
3.3.2	固有振型的正交性	106
3.3.3	振型叠加法计算梁的振动响应	108



3.4 梁振动的特殊问题	110
3.4.1 轴向力作用下梁的横向振动	110
3.4.2 Timoshenko 梁的固有振动	112
3.4.3 梁的弯曲-扭转振动	114
3.5 阻尼系统的振动	116
3.5.1 含粘性阻尼的弹性杆纵向振动	117
3.5.2 含材料阻尼的弹性梁受迫振动	117
3.6 薄板的振动	118
习 题	121
第 4 章 振动分析的近似方法和数值方法	
4.1 振动系统的能量原理	123
4.2 固有振动的近似解与数值解	124
4.2.1 Dunkerley 法	124
4.2.2 Rayleigh 法	126
4.2.3 Ritz 法	128
4.2.4 迭代法	131
4.2.5 其他数值方法	134
4.3 有限元法	134
4.3.1 杆振动的有限元分析	135
4.3.2 Bernoulli - Euler 梁振动的有限元分析	137
4.4 动响应的数值解	139
4.4.1 线性加速度法	139
4.4.2 Wilson - θ 法	141
4.4.3 Newmark 法	143
4.4.4 Runge - Kutta 法	145
习 题	146
第 5 章 非线性振动	
5.1 非线性系统的概念与分类	147
5.1.1 保守系统	147
5.1.2 非保守系统	149
5.2 自治系统振动的定性分析	151
5.2.1 基本概念	151
5.2.2 二维系统平衡点的性质	152
5.2.3 二维保守系统的全局特性	155
5.2.4 二维非保守系统的分析	158
5.2.5 高维系统平衡点的稳定性	160
5.3 自治系统振动的定量分析	161



5.3.1 Lindstedt - Poincaré 摄动法	161
5.3.2 多尺度法	163
5.4 非自治系统的受迫振动	164
5.4.1 主共振	164
5.4.2 次共振	168
5.4.3 组合共振	169
5.5 非线性振动的其他现象	171
习 题	174
第 6 章 振动实验	
6.1 振动信号采集	177
6.1.1 信号采集	177
6.1.2 采样定理	180
6.1.3 快速 Fourier 变换	181
6.1.4 频谱泄漏	182
6.2 频响函数测量	183
6.3 模态参数识别	185
6.4 试验实例	187
习 题	191
附 录	
附录 A 用 MATLAB 求解振动问题	192
A.1 多自由度系统的固有振动计算	193
A.2 一般粘性阻尼系统的自由振动计算	194
A.3 系统瞬态响应的数值积分	195
附录 B Fourier 变换性质及其常用变换对	197
附录 C Laplace 变换性质及其常用变换对	198
参考文献	

绪 论

机械或结构系统在其平衡位置附近的往复运动称为振动。早在远古时期,人们就注意到这种物理现象,制作出利用振动发声的各种乐器。

公元前 6 世纪,古希腊学者 Pythagoras 通过实验归纳了弦振动发出的声音与弦长、张力之间的关系,这是对振动规律的最初探索。17 世纪 30 年代,现代物理学的奠基人 Galileo 发现了单摆小幅度运动的等时性,采用自由落体公式计算出摆动周期。17 世纪中叶,荷兰物理学家 Huygens 制作出第一座摆钟,对钟摆的大幅度运动进行了研究,并撰写成专著《摆钟》,这是采用物理方法研究振动问题的开端。17 世纪后半叶诞生的 Newton 动力学和微积分为研究振动问题提供了有力的工具,Euler, Bernoulli 等著名物理学家致力于研究多质点-弹簧系统、弹性杆和弹性梁的振动问题,奠定了线性振动理论的基础。

19 世纪后期,人们在制造动力机械、建造桥梁等工程实践中遇到大量灾害性振动问题及由此产生的噪声、疲劳问题,吸引众多的力学家和工程师致力于工程振动问题的研究,发展了近似分析方法和实验方法。自 20 世纪 20 年代起,振动逐渐成为机械工程师、结构工程师必须了解的知识,成为高等工程教育的重要内容之一。

0.1 振动系统及其模型

当飞机、舰船和车辆等运载工具行驶时,任何一名乘客都会感受到振动。为了分析这类振动问题,可以把具体的运载工具作为一个系统。飞机受到的气动力、舰船受到的波浪和车辆受到的路面不平激励等是施加在系统上的输入,它们具有与时间相关的特征,通常称作动载荷。乘客感受到的振动则是系统的输出,常称作动响应。类似地,可以将燃汽轮机、机床、洗衣机、电视塔和桥梁等视为系统,考察它们在动载荷作用下的动响应。

对振动问题的分析一般从建立研究对象的模型开始。首先略去一些次要因素,将对象抽象为力学系统;然后分析各部分的力学特性及它们之间的组合关系,应用力学原理建立描述系统运动的数学模型,一般是微分方程(组)。建立模型是进行振动分析的关键一步,它决定了振动分析的正确性和精确性,以及振动分析的可行性和繁简程度。一个振动问题的复杂程度首先取决于需要多少独立坐标才能完备描述所关心的力学系统的运动。通常,将描述系统模型的独立坐标数目称作系统的自由度^[1]。考察图 0.1.1(a)中挂有发动机的飞机机翼在随机

[1] 严格的定义应是:系统不含非完整约束时,完备描述其运动的独立坐标数目为系统的自由度。现有振动理论书籍均不涉及含非完整约束的系统,本书后不赘述。



身的动坐标系中的振动。如果发动机很重,机翼质量相比之下可忽略不计,即视机翼为无惯性的弹性梁,而发动机为集中质量,仅用发动机质心的铅垂位移 v 就可描述系统运动,得到图 0.1.1(b)所示的单自由度系统;若要计入机翼质量,则系统自由度取决于对机翼质量分布的简化,图 0.1.1(c)是将机翼质量集中到端部得到的二自由度系统,用梁端铅垂位移 u 和发动机质心铅垂位移 v 描述系统运动;若对机翼质量不作简化,则图 0.1.1(a)中距翼根 x 处的机翼铅垂位移可记作 $u(x)$, x 连续变化表明机翼具有无限多自由度。如果要对发动机具体部位的振动进行分析,则要将发动机作为具有分布惯性的变形体来进行处理。这也是一个具有无限自由度的系统。

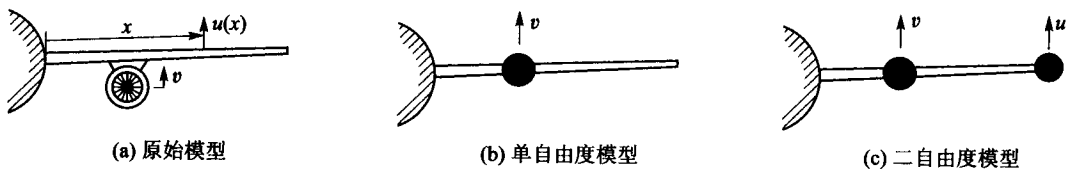


图 0.1.1 悬挂有发动机的飞机机翼模型

对于以弹性结构为主的飞行器、舰船和车辆等运载工具,其模型的自由度数取决于对结构惯性分布的假设。在这类产品的初步设计阶段,通常用自由度比较少的粗糙模型;进入详细设计阶段,再使用自由度比较多的精细模型。例如,美国 NASA 在研制 Apollo Saturn V 飞船时采用了复杂程度逐步增加的多种模型(见图 0.1.2)。针对图 0.1.2(a)所示的飞船,在初步设

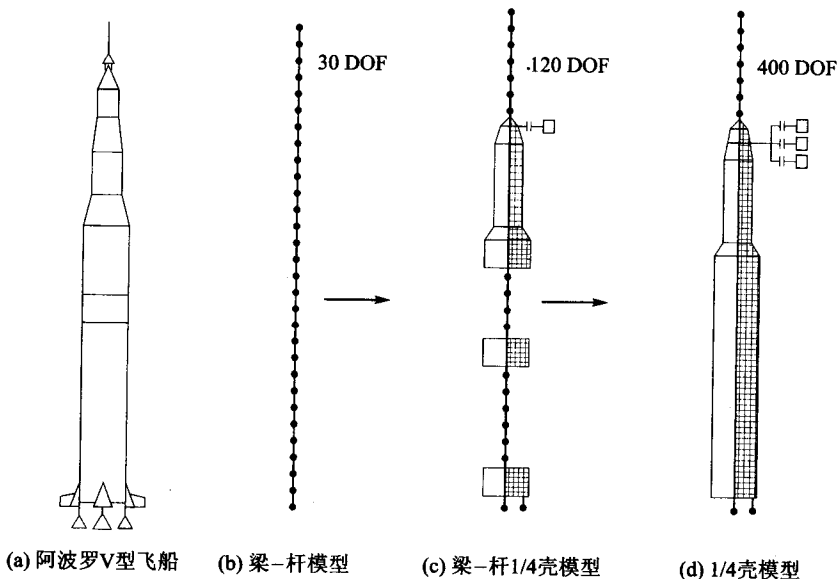


图 0.1.2 Apollo Saturn V 飞船和复杂程度递增的动力学模型



计阶段,仅考虑垂直于飞船轴线的振动,对应的简化模型如图 0.1.2(b)所示,仅包含在无惯性梁上的 30 个集中质量,总共 30 个横向运动自由度;在中间设计阶段,采用图 0.1.2(c)所示的 1/4 圆柱壳和圆锥壳来模拟飞船某些重要舱段,模型自由度增加到 120 个;在详细设计阶段,对大部分舱段采用图 0.1.2(d)所示的 1/4 圆柱壳和圆锥壳,模型自由度增加到 400 个。对于具体工程问题,初步设计模型可用于规划全尺寸振动试验,而详细设计模型可精确描述飞行中各传感器安装部位的振动,为飞船姿态控制提供可靠的信息。

0.2 振动问题的分类

在分析具体振动问题之前,明确问题的类别无疑很重要。振动问题的分类依赖于分类的出发点,先从系统论的角度来看振动问题。一个振动系统包括了三个方面:输入、输出和系统模型(或系统特性)。输入就是动载荷,可以是力、力矩等,也可以是运动量或称为**振动环境**。输出就是响应,包括系统的位移、速度、加速度或内力、应力、应变等。从输入、输出与系统特性三者的关系来说,可以将所研究的振动问题归纳为三大类。

第一类:已知系统模型和外载荷,求系统响应,称为**响应计算或正问题**。这是研究最为成熟的问题,也是本书前 4 章要介绍的内容。对于比较简单的系统,本书将介绍一些解析方法或近似解析方法求解其响应。对于复杂系统,目前已发展了许多有效的数值方法来进行计算,例如计算一般结构振动的有限元方法、计算复杂结构的子结构方法和计算轴系振动的传递矩阵法等。限于学时,本书只能对部分方法作一简介。求解振动正问题并不是振动工程师的最终目的,更重要的是如何使振动系统的响应满足需求,即实现**振动控制**。书中将结合具体的力学系统介绍若干成熟的振动控制方法。对振动控制感兴趣的读者,可参考[1,2]。

第二类:已知输入和输出,求系统特性,称为**系统识别或参数识别**,又称为**第一类逆问题**。表达系统特性的方式是多种多样的,例如系统的质量、刚度和阻尼,系统的频响函数、脉冲响应函数等都可以反映系统特性。它们彼此在理论上等效,但各有其优点,特别是频响函数等可用测量的方法得到。问题是如何从实测数据中精确地估计出所需要的描述系统特性的参数。如果需要的是频率、阻尼和振型等模态参数,则称为**模态参数识别**。这方面的研究目前日趋成熟,有许多商品化软件可供使用。例如,南京航空航天大学振动工程研究所曾在 20 世纪 80 年代研制过多种振动测试系统和商品化软件,成功地解决了多种飞机、导弹、车辆和桥梁的系统模态参数识别问题。如果需要系统在物理坐标下的质量、刚度和阻尼,则称为**物理参数识别**。求解系统识别问题的目的之一是检验用分析方法所建立的系统模型是否正确和精确,能否用于今后的振动计算。与系统识别、特别是物理参数识别相关的一个问题是**系统动态设计**,即根据输入和输出设计系统特性,乃至系统的质量、刚度及其分布。这一反问题的解一般不惟一,目前多借助数值优化方法来解决。本书第 6 章扼要介绍了系统识别中的一些基本方法,更深入的内容可参考[3]。



第三类:已知系统特性和响应求载荷,称为**载荷识别**,又称为**第二类逆问题**。确定系统在实际工况下的振源及其数学描述是振动工程中最棘手的问题,一般需要具体问题具体处理。例如:人们一直研究如何从实测的机身响应计算出直升机桨毂作用到机身的三个力和三个力矩,并取得了不少成果。要使这一类问题取得精确的结果,必须与第一类逆问题紧密结合起来,也就是系统特性应该建立在可靠的基础上。对于飞行器而言,全机地面振动试验是确定飞行时载荷的基础。作为振动基础教材,本书未能涉及这方面的内容。对载荷识别感兴趣的读者可参考[4]。

0.3 研究工程振动问题的途径

当今,飞行器、船舶、车辆等运载工具和汽轮机、机器人等机电产品都需要在短期内不断更新换代,以适应市场经济下的产品竞争和人们对可靠性、舒适性、经济性等不断增长的要求。由于结构日趋轻柔,机械日趋高速,环境日趋复杂,振动及由此产生的噪声、疲劳等问题制约了许多产品的性能指标,猛烈地冲击着传统的产品设计思想。过去,人们在设计机械或结构时,通常只考虑静载荷和静特性,在产品试制出来后再作动载荷校核或作振动特性测试。若不符合要求,再采用局部补救措施。这种不完善设计通常埋下了日后事故的隐患。例如,运载火箭的星-箭耦合振动曾造成发射失败,汽轮发电机组转子振动曾引起各种断裂事故,大型复杂装备因振动而自行损坏或报废造成了巨大的经济损失和恶劣的社会影响。此外,有些机电产品虽不因振动问题而发生事故,但过高的噪声严重破坏环境,缺乏市场竞争力。

新的设计思想是在市场经济推动下萌芽、生长和发展起来的,要求在产品的设计、制造、使用和维护各阶段都全面考虑其静、动态特性,以满足高技术指标的要求。其中,振动问题的处理是新设计路线的重要内容,对运载工具、机电产品的研制成败往往起决定性作用。新的设计路线通常称为**振动工程设计路线**。图 0.3.1 体现了这一设计路线的产品研制过程,其中标注“分析”和“试验”的两部分将是本书的主要内容。

振动工程设计路线在航空飞行器的设计和研制中具有重要作用。例如,飞机的颤振现象是在飞行中出现严重事故后才逐渐被认识的。人们先是采用被动补救办法来避免这种现象再度发生,后来逐步发展到采用抑制颤振的方法。这一从被动到主动的设计思想转变,经历了相当长的技术年代。另一例子是振动和噪声问题都很突出的直升机。20 世纪 60 年代以前采用的是静态设计,结果有效载荷小,振动和噪声水平很高。70 年代采用半动态设计,在设计、制造、地面测试、试飞、修改和定型等阶段局部地考虑振动与动不稳定性问题。80 年代起,随着大量采用新材料、新结构以及各种振动控制措施,直升机设计步入了一个新阶段。旋翼系统的参数设计考虑了最佳飞行性能允许的振动水平和富裕的动稳定性。一旦原型机制造出来,相应的试验研究方法、修改和再设计的计算程序跟着研制出来,随时可以修改原型机,大大缩短了换代研制周期。为了适应军方使用要求,随时可更新旋翼系统,而不需要再进行总体动力特

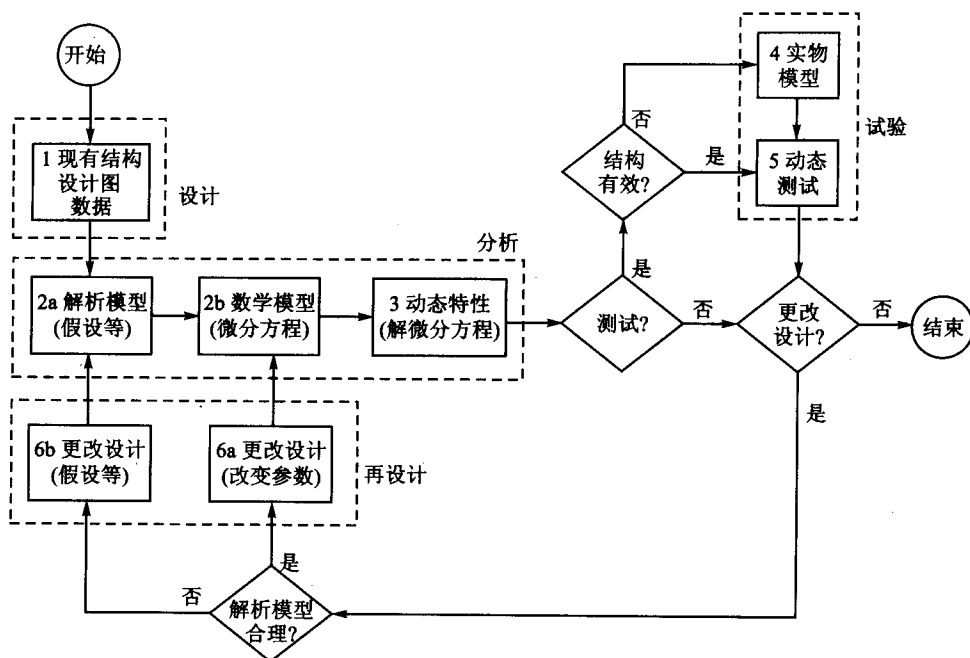


图 0.3.1 产品研制中的振动问题处理

性的耗时计算。旋翼-机体动力耦合分析以及它们的参数匹配技术相继问世,出现了旋翼与机身耦合动力分析和试验程序系统。

从远古时期起,人们就注意到可以利用振动制作乐器。随着对振动现象认识的深入和普及,利用振动已逐渐成为一个新的工程分支。目前,已有上百种利用振动的机械和一系列应用振动为人类造福的新技术。例如,早期研制出的振动夯土机、振动筛、振动给料机和振动输送机等已广泛应用于各工程领域。近期,又出现了振动破碎机、振动钻、振动流化床、超声波振动切削机床、超声波电机和微机电系统等。利用振动缩短机械零部件的时效处理周期,进行油井加固、提高石油产量等技术也正引起重视。此外,还利用振动信号进行旋转和往复机械的故障诊断,进行桥梁、桩基等结构的破损检测。

因此,作为从事飞行器、机械产品研制的设计师或使用维护的工程师应掌握坚实的振动理论。此外,振动工程的思想能得以实现或局部得以实现,还得到了计算机、动态测试和自动控制等新技术的推动。所以,还应学习这些更为广泛的知识,才能称得上新时代的设计师和工程师。