



国防科技图书出版基金

现代计算气动弹性力学

Modern Computational Aeroelasticity

徐敏 安效民 康伟 李广宁 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

现代计算气动弹性力学

Modern Computational Aeroelasticity

徐 敏 安效民 康 伟 李广宁 等著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

现代计算气动弹性力学 / 徐敏等著. —北京: 国防工业出版社, 2016. 11

ISBN 978 - 7 - 118 - 10921 - 4

I. ①现... II. ①徐... III. ①航空器 - 空气弹性动力学 - 研究 IV. ①V215. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 269548 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 插页 6 印张 16¼ 字数 300 千字

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

随着飞行器速度的不断提高和飞行器结构质量及刚度的不断减小,飞行器气动弹性和载荷问题在飞行器设计中越来越突出。特别是近年来,我国航空航天事业的蓬勃发展,极大地推动了我国飞行器气动弹性力学及其有关问题的研究和发展,也对飞行器气动弹性力学的研究提出了很多新的课题和要求。

目前,国内外计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)/计算结构动力学(Computational Structure Dynamics, CSD)耦合计算技术成为分析非线性气动弹性力学特性的主要手段,并在工程设计中逐步得到应用。在 CFD/CSD 耦合计算技术的基础上,人们在不断扩展研究,如结构优化设计、气动优化设计、控制系统优化设计等。

本书的目的是介绍最新的非线性气动弹性和载荷分析的理论方法与计算,阐释非线性气动弹性数值模拟所需的关键技术和 CFD/CSD 耦合求解的基本原理。

本书内容分 7 章介绍:

第 1 章(徐敏执笔)介绍非线性气动弹性分析方法及问题。

第 2 章(徐敏、李广宁执笔)主要介绍非定常流场 CFD 求解技术。

第 3 章(安效民、康伟执笔)主要介绍几何非线性结构响应求解技术。

第 4 章(安效民、徐敏执笔)介绍 CFD/CSD 耦合插值与动网格技术。

第 5 章(安效民、徐敏执笔)介绍耦合系统求解技术。

第 6 章(徐敏、康伟执笔)主要介绍非线性气动弹性系统降阶技术。

第 7 章(徐敏、谢亮执笔)介绍基于 CFD/CSD 耦合计算软件的设计及其应用。

书中算例计算及软件界面设计参与者有:姚伟刚博士、蔡天星博士、窦怡彬博士、张子健博士、谢亮博士、陈浩博士、陈涛博士、张斌博士、谢丹博士、王雅彬硕士等。

全书由徐敏教授统稿及校对。

本书内容主要来自作者本人、学科组和博士研究生们多年的研究成果。本书的部分研究工作得到了国家自然科学基金项目的资助,包括面上项目、青年基

金项目和《空天飞行器的若干重大基础问题》重大研究计划项目(批准号分别为:11402212,11202165,10272090,90405002,90816008)。

在本书的写作过程中得到了陈士橹院士、于本水院士的大力支持和帮助。本书大量参考了国内外文献资料,在此,对原作者深表谢意。

本书能顺利出版,得益于国防科技图书出版基金的支持和资助,以及牛旭东编辑的帮助,在此表示感谢。

最后,希望本书能成为从事该领域的研究人员、工程师和研究生的参考书,对非线性气动弹性计算技术的发展起到推动作用。

由于作者水平有限,书中的缺点和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

著者

2016年3月

第1章 绪论

1.1	气动弹性力学发展历史	2
1.2	计算气动弹性力学方法	3
1.3	计算气动弹性应用软件	5
1.4	CFD/CSD 耦合求解气动弹性问题的关键技术	7
1.4.1	流体域和固体域的非线性特征模拟	7
1.4.2	动网格运动策略	7
1.4.3	流体和结构界面的连续及相容性条件	8
1.4.4	流体和结构耦合的计算效率	8

第2章 非定常流场 CFD 求解技术

2.1	引言	9
2.2	积分形式的 N-S 方程	9
2.3	有限体积法	11
2.4	空间离散格式	12
2.4.1	中心差分格式	13
2.4.2	通量矢量分裂 FVS - Van Leer 格式	15
2.4.3	通量差分分裂 FDS - Roe 格式	16
2.4.4	对流迎风分裂 AUSM 格式	17
2.5	通量限制器和 MUSCL 插值	20
2.6	时间推进格式	22
2.6.1	显式格式	23
2.6.2	隐式格式	24
2.6.3	二阶时间精度隐式时间推进格式	26

2.7	湍流模型	28
2.7.1	Baldwin - Lomax 代数模型	28
2.7.2	Spalart - Allmaras 方程模型	29
2.7.3	K - ω SST 两方程模型	30
2.7.4	DES 方法	31
2.8	几何守恒律	33
2.9	CFD 计算实例	33
2.9.1	RAE2822 二维翼型 CFD 计算算例	33
2.9.2	NASA CRM 机翼/机身/平尾组合体 CFD 计算算例	34
2.9.3	DLR - F6 带短舱挂架的跨声速宽体运输类飞机 CFD 计算算例	36
2.9.4	AGARD CT - 5 非定常计算算例	39

第 3 章 几何非线性结构响应求解技术

3.1	引言	42
3.2	变形和运动	43
3.2.1	变量及坐标系定义	43
3.2.2	应变度量	47
3.2.3	应力度量	49
3.2.4	拉格朗日守恒方程	50
3.3	变分原理	52
3.3.1	弹性理论经典变分原理	52
3.3.2	弹性理论广义变分原理	55
3.4	实体壳多变量单元	59
3.4.1	三场 Fraeijs de Veubeke - Hu - Washizu (FHW) 变分原理	59
3.4.2	非线性有限元离散	59
3.4.3	求解算法流程	60
3.4.4	算例分析	61
3.5	基于 CR 理论的梁壳单元几何非线性的有限元建模	63
3.5.1	二维梁单元切线刚度矩阵推导	64
3.5.2	基于 CR 法的三维壳单元切线刚度矩阵推导	67
3.6	非线性有限元方程组求解方法	70

3.6.1	结构静力分析的非线性求解技术	71
3.6.2	结构动力分析的非线性求解技术	73
3.6.3	算例分析	80

第4章 CFD/CSD 耦合插值与动网格技术

4.1	引言	84
4.2	常用插值方法	86
4.2.1	无限平板样条法(IPS)	86
4.2.2	有限平板样条法(FPS)	88
4.2.3	多重二次曲面的双调和法(MQ)	88
4.2.4	薄板样条法(TPS)	88
4.2.5	反函数同变量转换法(IIM)	89
4.2.6	非均匀 B 样条方法(NUBS)	89
4.2.7	载荷参数空间插值方法	89
4.3	耦合接口设计	89
4.3.1	基于 CVT 方法的界面映射技术	90
4.3.2	基于 BEM 方法的界面映射技术	96
4.3.3	算例分析	99
4.4	动网格技术	105
4.4.1	几何插值动网格算法	106
4.4.2	TFI 方法	107
4.4.3	RBF 方法	109
4.4.4	保形动网格方法	113
4.4.5	动网格算例分析	115

第5章 耦合系统求解技术

5.1	引言	122
5.2	CFD/CSD 耦合常用算法精度分析	123
5.2.1	常用耦合方法简介	123
5.2.2	基于能量传递的精度分析	126
5.3	CFD/CSD 高精度耦合格式设计	131
5.3.1	改进耦合格式的设计	131

5.3.2	改进耦合格式的精度分析	133
5.4	CFD/CSD 耦合格式算例分析	135
5.4.1	ISOGAI 机翼剖面气动弹性算例	135
5.4.2	AGARD 445.6 机翼气动弹性响应分析	137

第 6 章 非线性气动弹性系统降阶技术

6.1	引言	141
6.2	基于 Volterra 级数的非定常气动力降阶模型	141
6.2.1	多小波和多分辨分析	142
6.2.2	分段二次正交多小波构造	142
6.2.3	边界自适应尺度函数和小波	149
6.2.4	正交多小波多分辨分析	150
6.2.5	Volterra 核近似	153
6.2.6	自适应 QR 分解递推最小二乘算法	157
6.2.7	算例分析	159
6.3	基于状态空间的非定常气动力降阶模型	163
6.3.1	脉冲/ERA 方法	163
6.3.2	SCI/ERA 方法	164
6.3.3	算例分析	167
6.4	基于 POD 方法的气动弹性系统降阶模型	168
6.4.1	POD 基快照求解方法	169
6.4.2	基于 POD 方法的气动弹性系统降阶	170
6.5	基于 BPOD 方法的气动弹性系统降阶	173
6.5.1	平衡截断降阶理论	173
6.5.2	变换矩阵的构造	174
6.5.3	POD 快照与 Gramian 矩阵的联系	174
6.5.4	算例分析	175
6.6	基于 POD - Galerkin 映射的非线性气动力降阶模型	179
6.6.1	流场控制方程修改	180
6.6.2	网格速度定义	180
6.6.3	POD - Galerkin 映射	181
6.6.4	校正方法	182

6.6.5 算例分析	183
------------------	-----

第7章 基于 CFD/CSD 耦合计算软件的设计及其应用

7.1 引言	187
7.2 计算气动弹性软件简介	187
7.2.1 软件功能简介	187
7.2.2 软件总体设计方案	188
7.2.3 软件系统总体框架	191
7.2.4 数据使用者及其子类	193
7.3 软件应用流程简介	195
7.3.1 前处理软件	195
7.3.2 求解器界面	200
7.3.3 数据显示与处理	200
7.4 基于 CFD/CSD 耦合的气动弹性软件应用	202
7.4.1 大展弦比机翼静气动弹性分析	202
7.4.2 超声速气动舵面颤振分析	207
7.4.3 气动弹性动载荷分析	211
7.4.4 动态扰动对气动弹性的影响	218
7.4.5 复杂外形飞行器气动弹性分析	223
参考文献	233

气动弹性力学是研究气动力、弹性力以及惯性力相互作用的一门学科。弹性结构在气动载荷作用下会发生变形,而弹性结构的变形反过来又会影响气动载荷的大小和分布。气流和结构的这种相互作用,在不同条件下会产生各种各样的气动弹性现象,在不断的相互作用下,这种现象可能达到一种平衡状态,也可能趋于发散而导致结构破坏。气动弹性力学根据研究对象不同主要分为两大分支,即建筑结构气动弹性力学和飞行器气动弹性力学,前者主要研究诸如高层建筑、桥梁等建筑物的气动弹性问题,后者主要研究诸如飞机、导弹等飞行器的气动弹性问题,本书仅讨论后者。

气动弹性力学主要分两个领域:静气动弹性和动气动弹性。静气动弹性主要研究受定常气动力作用下的飞行器结构变形和结构静不稳定,以及结构变形后的气动力分布、气动导数、控制面效率的改变特性。动气动弹性主要研究结构动稳定性问题,包括非定常气动力与结构相互干扰下的颤振特性、结构响应以及瞬态气动载荷、瞬态惯性力和瞬态结构内部应力特性。

一般飞行器还将承受一定范围的静载荷和动载荷。它们来自飞行机动载荷、着陆机动载荷以及飞行中遭遇的阵风和湍流载荷。这些载荷与主要载荷的综合一般作为飞行器结构临界载荷,直接影响飞行器结构设计。确定这些载荷应考虑气动载荷、弹性载荷和惯性载荷响应。因此,气动弹性和载荷有着很紧密的联系。

当飞行器作为自动控制对象时,保证飞行器有效飞行的自动控制和稳定系统必然与弹性振动、变形发生耦合。一方面,现代大型飞行器的普遍特征之一就是具有较低的结构固有频率,往往处于控制系统的正常工作频率带宽之内,控制力可能激励弹性自由度的运动;另一方面,反馈稳定系统受到弹性变形的干扰,观测元件不仅检测飞行器受干扰后的运动参数变化,同时也将结构变形作为附加的反馈信号引入回路中,因此,就产生了气动伺服弹性力学。

传统的气动弹性分析研究方法主要在频域内进行,它包含了较多线性化假设,较难处理跨声速、大迎角等气动力非线性问题。计算流体力学(CFD)以及计

算结构动力学(CSD)技术的发展,为实现 CFD/CSD 耦合技术的气动弹性系统的时域仿真奠定了基础。直接在时域内进行气动弹性的数值分析,可以得到结构的瞬态响应、结构内外载荷的瞬态变化规律和稳定性特性。特别是在跨声速区,这种数值仿真能很好地从物理本质去分析激波与激波干扰、激波与涡干扰、涡与涡干扰及激波与边界层干扰现象对气动弹性特性的影响。CFD/CSD 耦合作为流固耦合这门交叉学科的求解技术,对研究和解决众多工业领域中面临的复杂力学问题不仅具有重要的学术意义,而且具有广阔的工程应用前景和价值。但是,直接 CFD/CSD 耦合仿真导致计算规模庞大,计算资源耗费大,工程气动弹性设计周期长。因此,有必要建立高精度、高保真的低阶非定常气动力模型。

飞行器的气动弹性问题还将影响飞行器的飞行性能和乘坐舒适性,严重时还会造成飞行器结构破坏,威胁乘员生命安全。随着飞行器速度的不断提高和飞行器结构质量及刚度的不断减小,飞行器气动弹性问题在飞行器设计中也越来越突出。特别是近年来,随着我国航空航天事业的蓬勃发展,飞行器设计中的气动弹性问题得到了前所未有的重视,极大地推动了我国飞行器气动弹性力学的研究和发展,也对飞行器气动弹性力学的研究提出了更多新的课题和要求。

1.1 气动弹性力学发展历史

气动弹性问题在航空技术的发展初期就已经出现了,并随着航空工业的发展不断涌现出各种不同的气动弹性问题。最早的一次由气动弹性问题引发的事故发生在 1903 年 12 月 8 日,即在莱特(Wright)兄弟有动力载人飞机首次成功飞行的前九天,兰利(Langley)教授驾驶“空中旅行者”号单翼飞机做有动力飞行试验时,发生了机翼断裂并骤然坠落事故,其中气动弹性效应起着决定性的作用。当时,G. Brewer 就以某种方式说明了机翼断裂是一种典型的气动弹性静力学中的扭转发散问题。

不久,又出现了由于机身与尾翼的扭转刚度不够而引发的尾翼颤振问题。1916 年一架英国的 Handley Page 双引擎轰炸机发生剧烈的尾翼颤振而坠毁;一年后,在 DH-9 飞机上又发生了类似的尾翼颤振事故,促使 F. W. 兰切斯特等进行了第一次有目的气动弹性颤振研究。

1927 年,英国的一架双引擎大展弦比飞机在飞行速度增加时,副翼效率随之降低而变为零,继而变为反向作用而发生事故。这种控制能力丧失并且反向作用的现象,就是现在气动弹性力学所说的副翼反效现象。

第二次世界大战爆发后,航空工业迅猛发展,飞机的飞行速度提高到跨声速范围,由此提出了许多新的、富有挑战性的气动弹性问题。1944 年,当 NACA

(美国国家航空航天局)飞行员驾驶新型 P-80 飞机做高速飞行试验时,发生了一种剧烈的副翼振动,该振动是由副翼偏转与机翼上激波的弦向运动耦合引起的一种单自由度颤振,这种现象称为“副翼翁鸣”。

1947 年,由 Charles Yeager 驾驶的 X-1 验证机首次实现了超声速飞行,同时超声速颤振问题也开始得到重视,这时又出现了一种新形式的颤振——壁板颤振。

1946 年,英国学者 Collar 绘制出了表明气动弹性力学所涉及的各个学科间相互联系的“气动弹性力三角形”,形象地描述了气动弹性系统中各种力之间的联系,从而区分了各学科的研究范畴,使气动弹性问题有了明确的分类,如图 1.1 所示。Collar 三角形的三个顶点分别代表气动力(A)、弹性力(E)和惯性力(I)。把三角形任意两个顶点联系起来,都可形成一个重要的学科。由弹性力和惯性力的相互作用构成了“振动力学”;由气动力和惯性力的相互作用构成了“飞行力学”;以气动力和弹性力的相互作用为研究对象构成了气动弹性静力学;以气动力、弹性力和惯性力三者的耦合作用为研究对象就构成了气动弹性动力学。

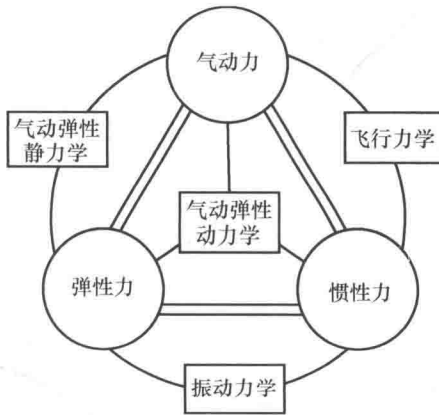


图 1.1 Collar 气动弹性力三角形

1.2 计算气动弹性力学方法

飞行器气动弹性力学属于多学科交叉的耦合学科,其研究的问题同时涉及流体力学、结构力学以及控制理论等多个学科的难点,因此飞行器气动弹性问题一直以来都是飞行器设计工作者必须面对的重要研究课题。

传统的气动弹性数值研究主要在频域内进行,它的基本思想是:发生颤振的翼面做简谐振动,这样就只需要计算频域内的气动力。在气动弹性稳定性分析

中,大部分只需考察小振幅振动情况,因此频域分析在这样的线性结构和线性化气动力模型的使用范围内是可行的。在亚声速和超声速范围且结构小变形的情况下,由于流场的非线性较弱,可以选用一些经典的小扰动线性理论来求解非定常气动力,例如泰奥多森(Theodorsen)理论、细长体理论、偶极子格网法(DLM)以及活塞理论等。这些理论建立起来的非定常气动力模型都较为简单,计算方便、快速。市场上也形成了一些商用软件,其中应用最广泛的是 MSC. NASTRAN 的 FlightLoads 模块,该模块可以基于频域方法求解飞行器静气弹和颤振问题,其非定常气动力模型是基于线性理论的偶极子格网法,无法处理飞行器真实外形和跨声速气动力非线性等问题。

气动弹性的频域分析法包含了较多线性化假设,气动模型是以小迎角的势流理论为基础的,较难处理跨声速、大迎角等气动力非线性问题。另外,频域方法不能实现气动弹性问题的静动态一体化分析,一般仅能提供机翼临界信息,不能准确计算机翼的亚、超临界响应问题。

20 世纪 90 年代中后期以来,由于计算流体动力学(CFD)和计算结构动力学(CSD)的发展,特别是 CFD 中基于欧拉方程、雷诺平均纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程的数值模拟,计算结构力学中有限元计算方法的日益成熟,为飞行器气动弹性问题,特别是关键的跨声速、结构大变形等非线性气动弹性问题的研究提供了条件。国外也陆续发表了基于计算流体动力学和计算结构动力学耦合对飞行器进行时域动弹性研究的文献,其基本思路是:通过 CFD 求解器直接计算弹性体在任意时刻做任意运动的非定常气动载荷,在时域内推进结构运动方程,给出弹性结构详细的时间响应历程。采用 CFD/CSD 耦合方法求解气动弹性问题具有显著的优势:

(1) 计算精度高。气动弹性分析中计算精度要求最高的非定常气动力由 CFD 程序求解,计算精度明显高于工程算法,且可以求解复杂外形飞行器及跨声速、高超声速等复杂流动问题。

(2) 信息量丰富。时域分析的特点使得计算过程中可以输出任意时刻飞行器上受到的各种载荷和结构响应,可以更好地分析各种气动弹性现象发生的机理。

(3) 可扩展性强。通过模块化编程可以将不同层次的 CFD 和 CSD 求解技术耦合求解,从而方便地利用两个学科的最新技术;同时,可以耦合其他学科进行多学科耦合的综合力学环境分析。

CFD/CSD 耦合的发展是建立在计算流体动力学和计算结构动力学的基础之上的。这两个学科的发展和演变如图 1.2 所示。非定常流场计算,经历了查表法、小扰动速度势法、跨声速小扰动非线性速度势法、线性化速度势法、完全