



国防科工委“十五”规划教材·力学

# 气动弹性设计基础

陈桂彬 邹丛青 杨超 编著

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

本书介绍了飞行器气动弹性设计的基本原理和基本方法,包括4个主要内容,即气动弹性静力问题、气动弹性动稳定性——颤振、气动伺服弹性稳定性分析以及气动弹性动力响应。除了阐述基本概念和基本理论外,书中还介绍了常用的工程处理方法;对近年来在气动弹性技术上的新进展,也作了简要的介绍。

本书为高等航空院校相关专业本科生和研究生的教学用书或参考书,也可供航空工业部门和其他工业部门结构设计人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

气动弹性设计基础/陈桂彬等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2004.10

ISBN 7-81077-516-2

I. 气… II. 陈… III. 气动弹性—设计  
IV. V211.47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 094202 号

## 气动弹性设计基础

陈桂彬 邹丛青 杨超 编著

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](mailto: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:15.75 字数:353千字

2004年10月第1版 2004年10月第1次印刷

印数:2000册

ISBN 7-81077-516-2 定价:22.00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 武博祯 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



# 前 言

本书是为航空高等院校编写的教材,旨在为飞行器设计或相关专业本科生提供一本基本理论与分析方法并重的教科书,以适应日趋重要并正在不断发展的气动弹性设计领域的需要。本书也可作为相关专业研究生的教材或参考书,并可供航空、航天、兵器、建筑及桥梁等工业部门的设计人员参考。

顾名思义,“气动弹性力学”作为力学学科是研究弹性物体在气流作用下的各种力学行为。而作为设计学科则不仅是揭示各种现象的机理,更为重要的是把它的基本原理应用到飞行器设计上,并作为一种设计的准则、规范和指导思想。所以,气动弹性设计已经成为飞行器设计中的重要内容。

本书介绍了气动弹性设计的两个重要组成部分,即气动弹性静力问题和气动弹性动力问题。

在静气动弹性部分,主要内容包括机翼扭转发散、载荷重新分布、操纵反效及操纵效率等静气动弹性现象。从二元翼段出发,介绍静气动弹性的基本概念、基本原理,并介绍了长直机翼静气动弹性的计算方法、近似方法以及矩阵分析方法,从而揭示静气动弹性问题在飞行器设计中的特点及影响因素。

在动气动弹性部分,涵盖了两个主要问题:一个是稳定性问题,另一个是动力响应问题。本书重点介绍了气动弹性稳定性问题,即颤振。对颤振的基本概念、发生的机理及其基本原理、求解方法和工程分析方法,都结合实际作了较为详尽的介绍。对动力响应问题,限于篇幅,仅作了一般性介绍,重点在飞机受到阵风时动力响应的基本概念和理论、非定常气动力特点以及工程处理方法等。抖振振动由于带有强迫振动的性质,所以也放在动力响应中一并介绍。为了弥补有些读者可能在气动力知识上的不足,本书还专门介绍了为进行颤振分析常用的非定常气动力计算方法。

由于伺服控制系统已经广泛地应用于飞行控制中,为了保证装有伺服飞行控制系统的飞行器在其飞行范围内不会发生气动伺服弹性不稳定



(也称伺服颤振)现象,必须进行气动伺服弹性稳定性分析。本书在上述颤振分析的基础上,也重点介绍了气动伺服弹性问题的基本概念和原理、气动伺服弹性基本方程和分析方法;通过实例完整地阐述了飞机和导弹的气动伺服弹性稳定性分析的全过程以及提高气动伺服弹性稳定性的措施。

围绕现代飞行器设计技术的发展,本书还介绍了气动弹性设计方法和技术的最新进展,这些技术上的进步,对飞行器设计极具影响。例如,气动弹性和气动伺服弹性的状态空间方法;主动柔性机翼工程的设计理念及其主动控制技术,包括颤振主动抑制及阵风减缓、气动伺服弹性鲁棒稳定性分析方法以及复合材料气动弹性剪裁的设计理念等。这些内容都展示出气动弹性设计在飞行器设计中的重要地位,也展示出气动弹性设计对提高飞行器性能的突出作用,使读者更全面地认识到气动弹性设计是先进飞行器设计的必备手段。

气动弹性设计最初是适应航空事业的需要而发展起来的,不言而喻,自然会受到航空科技院校有关专业研究生和本科生以及航空工业部门技术人员的关心。鉴于此,我们在编写中多取材于飞行器,而对于航空技术领域以外的气动弹性问题将不予讨论。为了控制学时和篇幅,本书侧重于介绍基本理论和工程处理方法,而略去了某些繁琐公式的推导过程。

本书在每章的最后附有思考题,供读者和教学作业使用。参考文献放在各章的后面,供读者查阅;但不要认为这些参考文献是全面的,因为在这方面的文献浩如烟海。本书中所列的文献资料都是作者认为有意义的。

本书共分 11 章,陈桂彬编写第 1,5~9 章,杨超编写第 2~4 章,邹丛青编写第 10,11 章。本书由陈桂彬主编。

作者特别感谢我系的朱斯岩老师,她在本书的全部编写过程中,参加了对全书内容安排的讨论,以她讲授本课程的实际体验,提出了宝贵的意见,并和宋晨一起绘制了书中的全部插图、表格以及进行文字录入工作,使本书得以顺利完成。

本书承西北工业大学赵令诚教授、南京航空航天大学卢叔全教授审阅,提出许多宝贵的意见,对此表示衷心感谢。作者也衷心感谢将对本书提出批评和建议的读者。

作者

2004 年 5 月



# 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,生产和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

# 目 录

## 第 1 章 绪 论

1.1 气动弹性问题的概述 .....	1
1.2 气动弹性力学发展的历史梗概 .....	2
1.3 气动弹性方框图 .....	3
1.4 气动弹性问题的分类 .....	5
1.4.1 气动弹性的力三角形 .....	5
1.4.2 热气动弹性的力四面体 .....	6
1.4.3 气动伺服弹性问题 .....	7
1.5 飞行器设计与气动弹性设计 .....	8
1.5.1 在飞机设计中的气动弹性设计 .....	8
1.5.2 气动弹性设计在飞机设计中的新进展 .....	11
思考题 .....	12
参考文献 .....	12

## 第 2 章 气动弹性静力问题的基本原理和解析方法

2.1 气动弹性静力问题的基本原理 .....	13
2.1.1 扭转发散 .....	14
2.1.2 载荷重新分布 .....	15
2.1.3 操纵效率与操纵反效 .....	17
2.1.4 非线性影响 .....	22
2.2 长直机翼的解析方法 .....	23
2.2.1 长直机翼的扭转发散 .....	23
2.2.2 长直机翼的载荷重新分布 .....	26
2.2.3 长直机翼的操纵反效及操纵效率 .....	29
思考题 .....	32
参考文献 .....	33

## 第 3 章 气动弹性静力问题的矩阵分析方法

3.1 气动力影响系数的矩阵表示 .....	34
3.1.1 马蹄涡系 .....	35
3.1.2 三元机翼的气动力影响系数矩阵 .....	36
3.1.3 气动力影响系数矩阵 $A$ 的近似求解方法 .....	38
3.2 气动弹性静力问题分析的基本方程 .....	41



3.2.1	大展弦比直机翼静气动弹性基本方程	41
3.2.2	大展弦比后掠机翼静气动弹性基本方程	43
3.2.3	一般翼面静气动弹性基本方程	44
3.3	机翼发散计算与分析	45
3.3.1	机翼发散基本方程	45
3.3.2	机翼发散计算方法	46
3.3.3	带有掠角的机翼发散的特点	50
3.3.4	提高发散动压的设计考虑	53
3.4	机翼载荷重新分布的计算与分析	54
3.4.1	载荷重新分布基本方程	54
3.4.2	载荷重新分布的两种计算情况	55
3.5	副翼操纵效率与反效	59
3.5.1	操纵反效基本方程	59
3.5.2	操纵效率计算方法	61
3.5.3	提高操纵效率的设计考虑	62
	思考题	63
	参考文献	63

## 第4章 非定常气动力计算方法

4.1	准定常气动力	64
4.1.1	格罗斯曼理论	64
4.1.2	细长体理论	68
4.1.3	气动力导数	69
4.1.4	活塞理论	70
4.2	非定常气动力	72
4.2.1	西奥道生理论	72
4.2.2	亚声速偶极子格网法简述	74
4.2.3	超声速偶极子格网法特点	76
	思考题	77
	参考文献	77

## 第5章 颤振的基本概念

5.1	颤振概述	78
5.2	颤振的物理本质	81
5.2.1	自激振动	81
5.2.2	机翼弯扭颤振现象	82
5.2.3	机翼-副翼颤振现象	85
5.3	简化的颤振理论	86
5.3.1	颤振方程的建立	86



5.3.2	频率重合理论	88
5.3.3	举 例	89
5.4	影响颤振速度的因素	91
	思考题	93
	参考文献	93
<b>第 6 章 颤振分析基础</b>		
6.1	应用准定常气动力理论的二元机翼颤振	94
6.2	应用非定常气动力理论的二元机翼颤振	99
6.3	颤振行列式的求解	101
6.3.1	西奥道生法	101
6.3.2	$V-g$ 法	103
6.3.3	$p-k$ 法	106
6.3.4	关于计及压缩性影响的颤振计算	108
6.4	二元机翼-副翼颤振	109
	思考题	112
	参考文献	112
<b>第 7 章 工程颤振分析和设计方法(一)</b>		
7.1	工程颤振分析的概述	113
7.2	大展弦比直机翼的运动方程	115
7.3	大展弦比直机翼的颤振计算——用准定常气动力理论	118
7.4	大展弦比直机翼的颤振计算——用非定常气动力理论	122
7.5	大展弦比后掠机翼颤振分析的特点	127
	思考题	130
	参考文献	130
<b>第 8 章 工程颤振分析和设计方法(二)</b>		
8.1	小展弦比机翼的颤振计算	131
8.1.1	小展弦比机翼的运动方程	131
8.1.2	用偶极子格网法的颤振计算	133
8.1.3	应用活塞理论的颤振计算	134
8.2	尾翼颤振分析的特点	136
8.2.1	常规的固定尾翼颤振分析	136
8.2.2	全动水平尾翼的颤振分析	137
8.2.3	T形尾翼的颤振分析	139
8.3	操纵面的颤振	139
8.4	操纵面颤振的防止	142
8.4.1	操纵面质量平衡	143
8.4.2	不可逆操纵	145



8.4.3	操纵面颤振设计概要	146
8.5	气动弹性设计的程序	146
8.5.1	气动弹性设计规范	147
8.5.2	气动弹性设计步骤	148
8.5.3	有关颤振分析中的试验介绍	150
	思考题	153
	参考文献	154
<b>第9章 气动弹性动力响应</b>		
9.1	动力响应概述	155
9.2	弹性飞机的扰动运动方程	156
9.3	飞机受到阵风的动力响应	160
9.3.1	刚硬机翼——应用准定常理论	160
9.3.2	刚硬机翼——应用非定常理论	162
9.3.3	弹性机翼——应用非定常理论	166
9.4	气动弹性抖振	167
9.4.1	抖振的现象	168
9.4.2	抖振边界及抖振载荷	168
	思考题	170
	参考文献	170
<b>第10章 气动伺服弹性(动)稳定性分析</b>		
10.1	气动伺服弹性概念	172
10.1.1	气动伺服弹性力学的定义及分类	172
10.1.2	气动伺服弹性问题的形成	172
10.1.3	气动伺服弹性的分析与综合	174
10.2	飞机气动伺服弹性稳定性分析的特点	174
10.2.1	舵面伺服操纵系统的动力学特性	174
10.2.2	结构反馈控制回路的动力学特性	175
10.3	气动伺服弹性运动方程的建立	176
10.3.1	自由度和运动方程	176
10.3.2	复阻抗	179
10.4	气动伺服弹性稳定性分析的频域方法	183
10.4.1	奈奎斯特图线方法在气动伺服弹性稳定性分析中的应用	183
10.4.2	传递函数的确定	184
10.4.3	气动伺服弹性系统稳定裕度的确定	187
10.4.4	不利耦合的排除	188
10.4.5	频域方法在多回路气动伺服弹性稳定性分析中的应用	190
10.5	导弹的气动伺服弹性稳定性分析	194



10.5.1	自由度选择和运动方程的建立 .....	194
10.5.2	广义准定常气动力 $A_q$ 和控制力 $Q_{\Delta q}$ .....	195
10.5.3	细长体理论在弹体气动力上的应用 .....	197
思考题 .....		199
参考文献 .....		199
<b>第 11 章 气动弹性设计的新进展</b>		
11.1	气动弹性系统的状态空间法 .....	201
11.1.1	状态变量、状态空间表达式 .....	201
11.1.2	状态空间法中非定常气动力的拉氏域有理近似 .....	202
11.1.3	气动弹性系统的状态空间表达式 .....	204
11.1.4	气动弹性系统稳定性问题的状态空间法 .....	207
11.2	气动伺服弹性鲁棒稳定性分析的状态空间法 .....	208
11.2.1	奇异值 .....	209
11.2.2	基于系统回差矩阵最小奇异值的鲁棒稳定裕度估算 .....	209
11.2.3	在 $\mu$ 方法下的系统鲁棒稳定裕度 .....	213
11.3	主动气动弹性机翼设计技术 .....	218
11.3.1	AAW 设计理念——对传统设计思想的突破 .....	218
11.3.2	AAW 技术中的主动控制 .....	220
11.3.3	颤振主动抑制控制律设计 .....	221
11.4	复合材料气动弹性剪裁 .....	226
11.4.1	气动弹性剪裁的概念 .....	227
11.4.2	气动弹性剪裁的机理 .....	227
11.4.3	气动弹性剪裁的性能效益 .....	228
11.4.4	气动弹性综合优化设计 .....	232
思考题 .....		233
参考文献 .....		234

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 气动弹性问题的概述

气动弹性问题作为一门力学学科是研究弹性物体在气流中的力学行为,其任务是研究气动力和弹性体之间的相互影响。气动弹性力学所研究各类气动弹性现象,不外乎起因于空气动力、弹性力和惯性力之间的相互作用。而作为设计学科,则不仅是揭示各种现象的机理,更为重要的是把它的基本原理应用到飞行器设计上,并作为一种设计的准则、规范和指导思想。由于在研究问题上的特殊性,致使在研究方法上也具有其自身的特点。

弹性力学的经典理论是研究弹性体在给定外力或位移作用下的应力与应变。通常,物体上的外作用力与变形无关,即认为在小变形下,不影响外力的作用。在这种情况下,常常忽略物体尺寸的变化,并按照初始形状进行计算。但是,在大多数重要的气动弹性问题中,情况起了变化。也就是说,应认为外力是随着物体的变形情况而改变的,即载荷本身不是事先可以确定的,弹性变形对它起着重要作用。在弹性变形决定以前,空气动力的大小是不知道的。因此,通常在问题解出以前,外载荷是不知道的。例如,在研究飞机的气动弹性问题时,要把它当做弹性体处理,此时机翼上的升力要取决于机翼翼面相对于气流的位置和运动,即此时的气动力载荷不是一个事先可以确切给出的值。这也是气动弹性问题研究的主要特点之一。

气动弹性力学主要关心的问题之一是结构在气流中的稳定性。因为,对于一定的结构,其空气动力将会随着气流流速的增加而增加,而结构的弹性刚度却与气流速度无关,所以存在一个临界风速;在这个速度下,结构变成不稳定的。这种不稳定性会产生极大的变形,并且会导致结构的破坏,这是飞机设计中决不允许的。从稳定性这个角度出发,根据惯性力在所考虑的问题中是否允许忽略,把上述的不稳定性又可区分为静不稳定性和动不稳定性。前者主要是扭转变形发散,而后者主要是颤振。而从气动弹性问题的整体来看,它所包含的内容,不仅是稳定性,还包括有很多其他问题。诸如在气动弹性静力问题中,由于弹性变形会引起载荷重新分布,也会使飞机的操纵效率降低,甚至发生操纵反效。在气动弹性动力问题中,还有飞机对外载荷的动力响应,这种响应可以是飞机的变形、运动或诱生的动应力。例如由操纵面偏转、突风等引起的响应都属于这类问题。



## 1.2 气动弹性力学发展的历史梗概

气动弹性问题几乎伴随着飞行器发展的全过程。早在 1903 年,即在莱特(Wright)兄弟有动力载人飞行成功的前 9 天,Smithsonian 学院的兰利(Langley)教授在 Potomac 河畔进行的“空中旅行者”号有动力试飞失败了,事后才认识到这是典型的气动弹性问题——机翼扭转变形发散。Coller 教授曾评论:“若不是气动弹性问题,兰利很可能要代替莱特兄弟的历史地位”。然而不久,又出现了一系列的气动弹性问题。先是发生在第一次世界大战初期,英国的 Handley Page 0/400 双引擎轰炸机发生剧烈的尾翼颤振而坠毁;仅一年后 DH—9 飞机上又发生了类似的尾翼颤振事故。由此促使了 F. W. Lanchester 和 L. Bairstow 以及 A. Fage 进行了第一批有目的的气动弹性颤振研究。他们所研究的由机身扭转和升降舵偏转这两个自由度组合的二元颤振,可能是最早的颤振理论分析。此外,在第一次世界大战中,德国有两架战斗机由于静气动弹性发散而发生致命的结构破坏:一架是 Albatros D—III 飞机,另一架是 Fokker D—VIII 飞机。后者是一种悬臂式单翼机,投入战争后接二连三地发生高速俯冲时机翼毁坏事故。此后,对 6 个机翼进行了强度试验,结论是其强度足以承受 6 倍设计载荷。原型机和生产型飞机的机翼之间惟一的不同就在于后者有一根加强后梁,本意是增大实战中飞机强度特性,然而却未料到由此改变了机翼弹性轴位置,从而导致静气动弹性发散。这个弄巧成拙的教训使设计者逐渐认识到,结构设计仅靠强度规范是远远不够的,必须要包含刚度规范的内容。所以气动弹性是飞机设计中不可忽视的重要方面。到 1926 年,H. Reissner 公开发表了解决扭转发散问题的一种理论,也阐明了空气动力中心与弹性轴相对位置的重要性,这对于中高展弦比的梁式机翼来说是一个尤为重要的概念。20 世纪 20 年代末,H. G. Küssner, W. J. Duncan 和 R. A. Frazer 建立了机翼颤振的理论基础。1934 年,T. Theodorsen 获得了翼面-操纵面组合的二维不可压流谐振荡空气动力的精确解,建立了解析求解翼面颤振问题的基础。

第二次世界大战爆发的前后,航空工业有了长足的发展。提高飞机的飞行速度,是当时空战中制胜的重要手段。那时,舵面和尾翼的颤振是气动弹性方面事故的主要原因,特别是调整片的颤振是经常发生的。到第二次世界大战结束以前,飞行速度提高到跨声速范围,同时出现了第一批超声速飞机,因此又提出了新的气动弹性问题。此时,要求从事航空事业的机构,必须拥有一支强有力的研究队伍,来解决大量出现的气动弹性问题。于是,气动弹性力学开始发展成一门独立的科学分支。

20 世纪 50 年代初期,飞行进入了超声速范围,新的气动弹性问题大量涌现。小展弦比后掠机翼和三角形机翼成为气动弹性研究的主要对象。这就要求必须研究全新的颤振分析原理和解法。计算机的出现,使许多气动力计算方法应运而生,一些亚声速和超声速非定常气动力计算方法就是在这种情况下产生的。直到 70 年代,计算机的进一步发展,计算速度的迅速提



高,使得跨声速非定常气动力计算方法得到发展。此外,还有风洞试验,长期以来是进行试验研究的必不可少的手段。正是这些辅助工具,解决了目前存在的大量气动弹性问题。

进入超声速飞行速度范围,特别是在近代高速飞行器上,由于进入大气层时的高温环境,使得结构产生了热应力,为此需要研究结构在受热条件下的气动弹性现象,这就形成了“热气动弹性”的问题。

现代飞行器上普遍使用了伺服控制。飞行控制系统随着其功能不断发展,通频带变宽、权限增大;而飞行器结构设计的趋势是柔性增大。柔性飞行器结构、非定常气动力和控制系统之间的相互作用,发展了一门全新的而又与经典的颤振密切相关的分支学科,即气动伺服弹性力学。它作为一门涉及多门学科的交叉边缘学科,正蓬勃地发展,并在飞机设计中发挥愈来愈重要的作用。

最后,必须要提及的是,气动弹性力学作为一门广泛应用的学科,不仅在航空航天工程方面,而且在民用建筑、机械工程等方面的应用正日益增长。1940年建成通车才4个月的美国Tacoma悬索桥,在18 m/s的低风速下,经过一个多小时愈振愈烈的颤振后而倒塌。事故后,人们才认识到这是与机翼颤振现象相类似的桥梁颤振。这一教训一直为后来的桥梁设计所重视。这个事件表明了气动弹性在航空技术以外的领域中的重要性。从此以后,桥梁颤振问题得到了有关部门的高度重视。

### 1.3 气动弹性方框图

利用方框图来表示气动弹性之间所存在的基本物理关系是十分明了的。特别是对于气动弹性稳定性问题中的反馈过程,用方框图的方法来说明,就更加明确。这种方法是由冯元桢首先引用到气动弹性力学中来的。现在以弹性机翼为例来说明方框图的意义。当假设机翼是刚性机翼时,系统的两个参数,即升力 $L$ 和攻角 $\alpha$ ,通过机翼处于一定的空气动力相互影响之中。此时攻角 $\alpha$ 作为输入参数,而刚性机翼所产生的气动力 $L$ 作为输出参数。这样所绘制的方框图如图1-1所示。它象征性地描述出机翼的作用。事实上,机翼不可能是刚硬的,也就是攻角 $\alpha$ 与升力 $L$ 之间的关系还和机翼的弹性变形有关。更确切的描述是把机翼的功能看做是由两个元件组成:第一个元件是产生升力的元件,第二个元件是弹性力学系统。在仅考虑机翼的空气动力功能时,可把机翼看成刚性的;而在考虑机翼弹性变形时,则把空气动力看成是另外一个外力系在起作用。也就是说,在

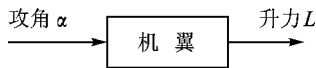


图 1-1 刚性机翼的空气动力方框图

分析机翼的空气动力功能和弹性力学功能时,可以把这两种功能分别进行描述。在把这两种功能联系起来考虑它们的相互影响时,则应该用物理上准确的方式来表达弹性机翼的总特性。这时,产生升力的弹性机翼的气动弹性特征可用图1-2来表示。由图可见,当机翼具有攻角 $\alpha$ 时,由此产生空气动力,并产生空气动力矩 $M_0$ ,这个力矩使弹性机翼产生扭转变形 $\theta$ 。由此,

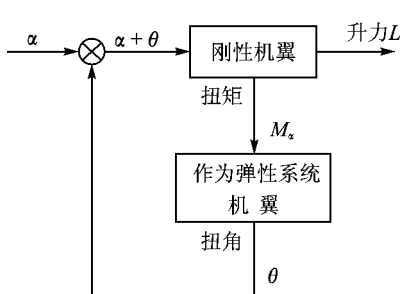


图 1-2 弹性机翼的气动弹性方框图

新的几何攻角就成为  $\alpha + \theta$ ，从而产生新的气动力矩  $M_a$ ，使得气动弹性系统构成一条闭合回路，它是一个反馈系统。从这种意义上来看，气动弹性力学也就是研究具有弹性反馈系统的空气动力学问题。

现在来研究以下机翼扭转发散问题，这是气动弹性静力学的稳定性问题。在上述中，对攻角  $\alpha$  和弹性扭角规定为攻角  $\alpha = \theta = 0$  时，升力  $L = 0$ 。 $\theta = 0$  是  $\alpha = 0$  时的惟一解答（零解）。现在可以考察下列问题：当  $\alpha = 0$  时是否存在非零解  $\theta \neq 0$ ？参见图 1-3。如果这个解存在，则

表明机翼处于临界状态下，变形  $\theta$  的幅度是不定的。发生这种不稳定性时的空气流动速度称为扭转发散的临界速度。

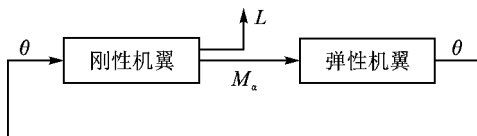


图 1-3 临界扭转发散的方框图

在气动弹性动力学问题中，机翼要体现出 3 种不同的功能，它将产生：① 空气动力；② 惯性力；③ 弹性变形。把这 3 种功能写在如图 1-4 所示的三个方框中。按空气动力学原理，刚性机翼会产生升力  $L$ ，而机翼振动时则引起惯性力  $I$ 。这两种力合在一起 ( $L + I$ ) 使弹性机翼产生变形  $\theta$ ；变形  $\theta$  又产生新的作用力  $L$  和  $I$ 。这就以反馈过程的形式构成一条闭合回路。以一个作用在俯仰受到约束的机翼上的突风响应为例，其方框图如图 1-4 所示。

与上述突风响应问题相伴的是机翼的颤振问题。在颤振问题里，不是去求机翼对于突风的响应，而是在图 1-4 中，令  $G = 0$  后寻求该齐次方程有没有非零解。所以，面对这两种气动弹性动力学问题，或是齐次系统有非零解，即发生颤振；或是有解答，即突风响应问题。

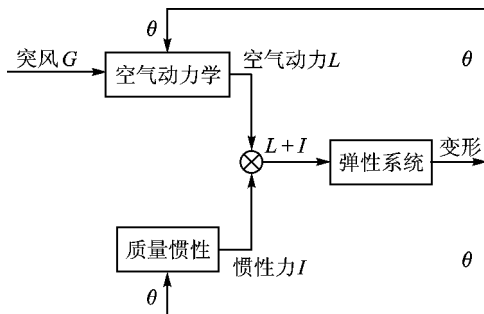


图 1-4 弹性机翼的突风响应