



普通高等教育“十一五”国家级规划教材




北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

陈桂彬 杨超 邹丛青 编著

气动弹性设计基础

(第2版)

 北京航空航天大学出版社



V211.47
C426.02

国家级规划教材



北京高等教育精品教材
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

-55

气动弹性设计基础

(第2版)

陈桂彬 杨超 邹丛青 编著

V211.4

C426.02

北京航空航天大学出版社

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,主要包括4部分内容: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试验。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。

本书可作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(第2版)/陈桂彬,杨超,邹丛青编著.—2版.—北京:北京航空航天大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-81124-939-2

I.气… II.①陈…②杨…③邹… III.气动弹性—设计—高等学校—教材 IV.V211.47

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第183771号

气动弹性设计基础(第2版)

陈桂彬 杨超 邹丛青 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(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

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

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:13.5 字数:302千字

2010年1月第2版 2010年1月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-81124-939-2 定价:25.00元

第 2 版前言

气动弹性力学所研究各类问题,不外乎起因于空气动力、弹性力及惯性力之间的相互作用。作为设计学科,学习它不仅要掌握各种气动弹性现象的机理,更为重要的是把它的基本原理应用到飞行器设计上,并作为一种设计准则、规范和指导思想。基于上述思想的指导,本书旨在为高等院校航空专业的本科生,提供一本基本理论与分析方法并重的教科书,以适应我国航空工业不断发展的需要。本书也可作为相关专业研究生的参考书,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。

本书从稳定性问题出发,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,同时也概要地介绍了气动伺服弹性稳定性问题的基本概念、原理、基本方程和分析方法。

在第 2 版中,突出了气动弹性稳定性的内容,精简了一些与稳定性无关的内容,增加了颤振分析的内容。

在气动弹性动力问题中,颤振无疑是最为设计者关注的。这就促使防止颤振成为重要的研究课题,由此构成了飞行器设计的重要内容之一。本书结合工程设计实际,概括地叙述了相关防颤振设计的内容,结合我国制定的《飞机结构强度规范》中有关颤振的内容,对防止颤振的要求、实施步骤等都作了一些讨论。

气动弹性试验是气动弹性学科的重要组成部分,它和气动弹性的理论研究几乎是同步开始的。其中的一些试验项目是为了取得计算分析的原始数据,如飞行器结构地面振动试验、地面伺服弹性试验等;还有一些试验是为了直接取得相关特性的数据,如颤振风洞模型试验、抖振试验等。书中简要地介绍了它的基本原理和试验方法。

第 2 版共有 12 章,其中杨超编写第 2~4 章,邹丛青编写第 12 章,其余由陈桂彬编写。

特别感谢北京航空航天大学航空科学与工程学院的朱斯岩老师、吴志刚老师和万志强老师。他们在本书成书的过程中,参加了讨论,并在一些问题上给予了具体帮助;同时结合他们讲授本课程的实际情况,提出了宝贵的意见。

还要感谢西北工业大学赵令诚教授、南京航空航天大学卢叔全教授对原版教材的审阅,他们的很多宝贵意见,至今还为本书的基础起着良好的作用。作者也衷心感谢将对本书提出批评和建议的读者。

作者

2009年10月

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,我们学习它,则不仅要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。书中所列的文献资料都是作者认为有意义的。

全书共分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。

作者特别感谢北京航空航天大学航空科学与工程学院的朱斯岩老师、吴志刚老师,他们在本书的全部编写过程中,参加了对全书内容安排的讨论,以他们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,提出了许多宝贵的意见,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

目 录

第 1 章 绪 论	1
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 在飞机设计中的气动弹性设计	8
1.6 气动弹性设计在飞机设计中的新进展	11
1.6.1 主动气动弹性机翼设计技术	11
1.6.2 复合材料气动弹性剪裁	12
1.6.3 鲁棒气动伺服弹性稳定性分析	12
思考题	13
参考文献	13
第 2 章 气动弹性静力问题的基本原理和解析方法	14
2.1 气动弹性静力问题的基本原理	14
2.1.1 扭转发散	15
2.1.2 载荷重新分布	16
2.1.3 操纵效率与操纵反效	18
2.1.4 非线性影响	23
2.2 长直机翼的解析方法	24
2.2.1 长直机翼的扭转发散	24
2.2.2 长直机翼的载荷重新分布	27
2.2.3 长直机翼的操纵反效及操纵效率	30
思考题	34
参考文献	34



第3章 气动弹性静力问题的矩阵分析方法	35
3.1 气动力影响系数的矩阵表示	35
3.1.1 马蹄涡系	36
3.1.2 三元机翼的气动力影响系数矩阵	37
3.1.3 气动力影响系数矩阵 A 的近似求解方法	39
3.2 气动弹性静力问题分析的基本方程	42
3.2.1 大展弦比直机翼静气动弹性基本方程	42
3.2.2 大展弦比后掠机翼静气动弹性基本方程	44
3.2.3 一般翼面静气动弹性基本方程	45
3.3 机翼发散计算与分析	46
3.3.1 机翼发散基本方程	46
3.3.2 机翼发散计算方法	47
3.3.3 带有掠角的机翼发散的特点	51
3.3.4 提高发散动压的设计考虑	54
3.4 机翼载荷重新分布的计算与分析	55
3.4.1 载荷重新分布基本方程	55
3.4.2 载荷重新分布的两种计算情况	56
3.5 副翼操纵效率与反效	60
3.5.1 操纵反效基本方程	60
3.5.2 操纵效率计算方法	62
3.5.3 提高操纵效率的设计考虑	63
思考题	64
参考文献	64
第4章 非定常气动力计算方法	65
4.1 准定常气动力	65
4.1.1 格罗斯曼理论	65
4.1.2 细长体理论	69
4.1.3 气动力导数	70
4.1.4 活塞理论	71
4.2 非定常气动力	73
4.2.1 西奥道生理论	73
4.2.2 亚声速偶极子格网法简述	75
4.2.3 超声速偶极子格网法特点	77
思考题	78



参考文献	78
第 5 章 颤振的基本概念	79
5.1 颤振概述	79
5.2 颤振的物理本质	82
5.2.1 自激振动	82
5.2.2 机翼弯扭颤振现象	83
5.2.3 机翼-副翼颤振现象	86
5.3 简化的颤振理论	87
5.3.1 颤振方程的建立	87
5.3.2 频率重合理论	89
5.3.3 举 例	90
5.4 影响颤振速度的因素	92
思考题	94
参考文献	94
第 6 章 颤振分析基础	95
6.1 应用准定常气动力理论的二元机翼颤振	95
6.2 应用非定常气动力理论的二元机翼颤振	100
6.3 颤振行列式的求解	102
6.3.1 西奥道生法	102
6.3.2 $V-g$ 法	104
6.3.3 $p-k$ 法	107
6.4 二元机翼-副翼颤振	109
思考题	112
参考文献	113
第 7 章 大展弦比机翼的颤振分析	114
7.1 工程颤振分析的概述	114
7.2 大展弦比直机翼的运动方程	116
7.3 采用准定常气动力理论的颤振计算	119
7.4 采用非定常气动力理论的颤振计算	123
7.5 大展弦比后掠机翼颤振分析的特点	128
思考题	131
参考文献	132
第 8 章 小展弦比机翼的颤振分析	133
8.1 小展弦比机翼的运动方程	133



8.2	用偶极子格网法的颤振计算	135
8.3	应用活塞理论的颤振计算	138
8.4	关于计及压缩性影响的颤振计算	139
	思考题	140
	参考文献	140
第9章	尾翼及操纵面颤振分析	141
9.1	尾翼颤振分析	141
9.1.1	常规的固定尾翼颤振分析	141
9.1.2	全动水平尾翼的颤振分析	142
9.1.3	T形尾翼的颤振分析	144
9.2	操纵面的颤振	145
9.3	操纵面的嗡鸣	149
	思考题	150
	参考文献	150
第10章	飞行器的防颤振设计	151
10.1	防颤振设计概要	151
10.2	防止颤振设计的一般程序	153
10.2.1	防止颤振设计步骤	153
10.2.2	对于飞机的基本颤振分析程序	154
10.3	飞机结构强度规范中有关防止颤振设计的内容	155
10.4	操纵面的防颤振设计	157
10.4.1	操纵面防颤振设计概要	157
10.4.2	操纵面质量平衡	158
10.4.3	不可逆操纵	161
10.4.4	质量平衡对操纵面颤振影响实例	161
10.5	颤振主动抑制的概念	163
	思考题	164
	参考文献	164
第11章	气动弹性试验	165
11.1	飞行器地面振动试验	165
11.2	结构伺服弹性地面试验	167
11.3	颤振模型的风洞试验	167
11.4	抖振模型的风洞试验	169
11.4.1	抖振现象	170

11.4.2 抖振边界的风洞试验方法·····	170
11.4.3 抖振载荷的风洞试验方法·····	171
11.5 飞行颤振试验·····	171
思考题·····	173
参考文献·····	173
第 12 章 气动伺服弹性(动)稳定性分析 ·····	174
12.1 气动伺服弹性概念·····	175
12.1.1 气动伺服弹性力学的定义及分类·····	175
12.1.2 气动伺服弹性问题的形成·····	175
12.1.3 气动伺服弹性的分析与综合·····	177
12.2 飞机气动伺服弹性稳定性分析的特点·····	177
12.2.1 舵面伺服操纵系统的动力学特性·····	177
12.2.2 结构反馈控制回路的动力学特性·····	178
12.3 气动伺服弹性运动方程的建立·····	179
12.3.1 自由度和运动方程·····	179
12.3.2 复阻抗·····	182
12.4 气动伺服弹性稳定性分析的频域方法·····	186
12.4.1 奈奎斯特图线方法在气动伺服弹性稳定性分析中的应用·····	186
12.4.2 传递函数的确定·····	187
12.4.3 气动伺服弹性系统稳定裕度的确定·····	190
12.4.4 不利耦合的排除·····	191
12.4.5 频域方法在多回路气动伺服弹性稳定性分析中的应用·····	193
12.5 导弹的气动伺服弹性稳定性分析·····	197
12.5.1 自由度选择和运动方程的建立·····	197
12.5.2 广义准定常气动力 A_q 和控制力 $Q_{\Delta\beta}$ ·····	198
12.5.3 细长体理论在弹体气动力上的应用·····	200
思考题·····	202
参考文献·····	202

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的各种气动弹性现象,不外乎起因于空气动力、弹性和惯性力之间的相互作用。而作为设计学科,我们学习它,则不仅要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,致使这门学科在研究方法上也具有其自身的特点。

气动弹性的研究方法有别于弹性力学的研究方法。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,又可把上述的不稳定性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,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,事后人们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,兰利很可能要取代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唯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. Theodorson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,它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着愈来愈重要的作用。

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1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 α ,通过机翼处于一定的空气动力相互影响之中。此时攻角 α 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 α 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 α 时,由此产生空气动力,并产生空气动力矩 M_a ,这个力矩使弹性机翼产生扭转变形



图 1-1 刚性机翼的空气动力方框图

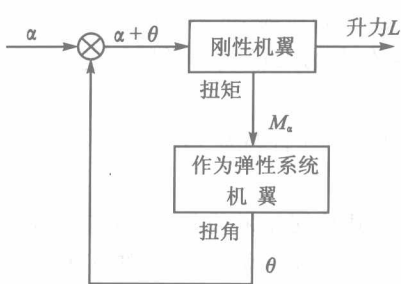


图 1-2 弹性机翼的气动弹性方框图

表明机翼处于临界状态下,变形 θ 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。

θ 。由此,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 α 和弹性扭角规定为攻角 $\alpha = \theta = 0$ 时,升力 $L = 0$ 。 $\theta = 0$ 是 $\alpha = 0$ 时的唯一解答(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。

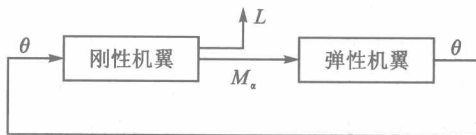


图 1-3 临界扭转发散的方框图

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 3 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 θ ;变形 θ 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。在颤振问题中,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。

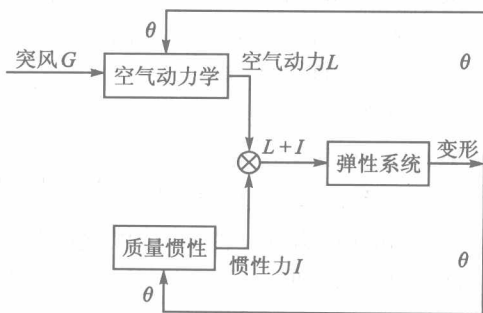


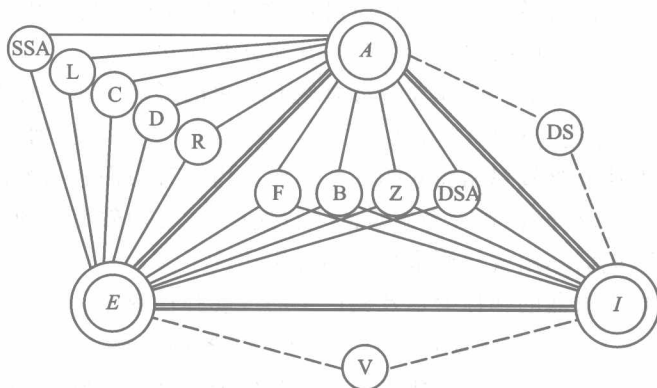
图 1-4 弹性机翼的突风响应



1.4 气动弹性问题的分类

1.4.1 气动弹性的力三角形

1946年英国人 Collar 绘制了气动弹性力三角形,由此对气动弹性问题作了很好的分类。这个三角形直观地表达了气动弹性问题中各种力之间的联系,从而区分了各学科的研究范畴。如图 1-5 所示,力三角形的顶点表示系统的每种作用力,即弹性力、惯性力和气动力。它们在气动弹性过程中处于相互影响的状态下,于是每一种气动弹性问题可按照该问题中这些作用力所处的相互关系进行直观的区别。在图 1-5 中,所有气动弹性动力学问题,都处在该三角形的内部,这时 3 种作用力都参与作用。而处于该三角形左边的外侧,均属于气动弹性静力学问题,这时只有弹性力和空气动力起作用。下面针对图 1-5 所提出的气动弹性问题,作简略的说明。



		气动弹性现象:	相关领域:
A—气动力;	F—颤振;	C—操纵效率;	V—机械振动;
E—弹性力;	B—抖振;	R—操纵反效;	DS—动稳定性
I—惯性力	Z—动力响应;	DSA—动稳定性的气动弹性效应;	
	L—载荷分布;	SSA—静稳定性的气动弹性效应	
	D—发散		

图 1-5 气动弹性的力三角形

首先,讨论处于三角形内部的气动弹性动力学问题。

颤振:是指发生在飞机飞行中的动不稳定性,此时的速度称为颤振速度。在飞行达到颤振速度时所发生的自激振动,大多数都会造成灾难性的后果。颤振现象的形态是多种多样的。在发生颤振时,大多是整架飞机都在某种程度上参与了这个过程。