

杨 超 主编 吴志刚 万志强 陈桂彬 编著



高等学校研究生教材

飞行器气动弹性原理



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

高等学校研究生教材

飞行器气动弹性原理

杨 超 主编

吴志刚 万志强 陈桂彬 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书介绍气动弹性的基本原理和基本方法,是对本科生教材《气动弹性设计基础》的进一步深化与拓宽。除了对气动弹性静力学及气动弹性动稳定性——颤振展开了进一步深入讨论外,还着重对气动弹性动力响应问题进行了系统的论述。此外,由于在气动弹性分析中,试验工作占有极其重要的地位,故本书也简要介绍了有关气动弹性的各项试验。

本书可作为高等院校相关专业研究生的教学用书或参考书,以及高年级本科生的参考书,也可供航空航天工业部门及其他工业部门结构强度、气动和飞行控制设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行器气动弹性原理 / 杨超主编. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.7

ISBN 978-7-5124-0445-8

I. ①飞… II. ①杨… III. ①飞行器—气动弹性—设计 IV. ①V411.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 088016 号

版权所有,侵权必究。

飞行器气动弹性原理

杨 超 主 编

吴志刚 万志强 陈桂彬 编著

责任编辑 宋淑娟

*

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(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:12.25 字数:314 千字

2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷 印数:2 500 册

ISBN 978-7-5124-0445-8 定价:36.00 元

前 言

气动弹性力学是一门研究弹性结构在气流中的静力学和动力学行为的学科。气动弹性问题除了体现在航空工程领域外,也同样存在于其他工程领域,例如,土木工程中的悬索桥和高层建筑的风致振动,核技术工程中的核反应堆设备颤振,以及生物医学工程中柔性血管中的血液流动等。气动弹性问题会导致结构静变形和动变形以及不稳定,因此气动弹性问题的研究在各个技术领域都显示出其重要性。特别在现代飞行器设计中,要求具有较高的性能和较轻的结构质量,气动弹性问题的解决是达到高性能及最优结构的重要途径。

气动弹性力学是为适应航空航天事业的需要而发展起来的,不言而喻,自然会受到航空航天工业部门技术人员以及航空航天院校有关专业研究生及本科生的关心和重视。鉴于此,我们在本书编写中多取材于飞行器,而对航空航天技术领域以外的气动弹性问题将不予讨论。

气动弹性问题可以分为稳定性问题和响应问题两大类。这两部分内容都将成为本书讨论的重点,并尽可能讨论飞行器设计所涉及的基本气动弹性问题。

本书的目的是给读者提供一本有一定技术背景、能有助于理解飞行器气动弹性稳定性和响应的基本概念和应用的图书。本书可作为高等院校相关专业研究生的教材或参考书,也可作为高年级本科生和相关领域工程技术人员的参考书。

为了实现预期目标,本书涉及了多种学科,例如,结构动力学、非定常气动力、静气动弹性效应、颤振、阵风响应、气动伺服弹性以及气动弹性试验等。本书共 8 章。前三章中,除绪论作为全书的导读以外,其余两章主要介绍背景知识,这些基本理论是理解以后章节的基础。本书其余各章则讨论气动弹性本身的问题。首先,第 4 章讨论气动弹性静力学问题,主要涉及飞行器发散、飞行载荷、静气动弹性修正和操纵效率等。第 5 章讨论工程上十分重要的气动弹性动稳定性问题,特别是针对颤振问题进行了较为详尽的讨论。第 6 章讨论了弹性物体对随时间变化的外界气动激励力作用下引起的结构气动弹性动力响应问题,其中特别注意讨论阵风(突风)问题。为了扩大读者对气动弹性发展的认识,第 7 章概述了气动伺服弹性的基本知识,以便使读者了解该学科的由来与发展,以及它在现代飞行器设计中的重要地位。最后,第 8 章专门讨论了气动弹性的重要组成部分——气动弹性试验,概要介绍了气动弹性的地面试验、风洞试验及飞行试验,这些内容对读者全面了解气动弹性内容是有益的。

本书在每章的最后都附有思考题及练习题,以供教学使用。参考文献分别放在各章的最后,供读者查阅。可供本书参考的文献浩如烟海,书中所列的文献资料虽然仅是其中的一小部分,但作者认为这些都是有意义的。

本书由杨超教授主编,吴志刚、万志强及陈桂彬参加了本书的编写。

本书的编写工作得到了各方面的支持和鼓励,也吸收了国内外气动弹性相关论著的许多宝贵内容。

作者特别要感谢宋晨博士,他除了参加本书部分内容的编写以外,还做了大量绘图、录入及编辑工作,参加了全书内容的讨论,为完成本书起到重要作用。

作者也要感谢朱斯岩老师,她在本书编写过程中参加了对全书内容结构的讨论,并根据她讲授课程的实际经验提出了宝贵意见。作者也感谢谢长川博士,他为编写本书提供了资料。

本书承蒙酆正能教授审阅,并提出许多宝贵意见,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
2011 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 气动弹性力学概述	1
1.2 气动弹性力学发展的简要回顾	2
1.3 气动弹性现象描述	4
1.3.1 气动弹性静力学的基本现象	4
1.3.2 气动弹性动力学的基本现象	6
1.4 气动弹性力学的新发展	7
1.5 气动弹性学科的特点	9
思考题及练习题	10
参考文献	10
第 2 章 结构动力学基础的简要回顾	11
2.1 概 述	11
2.2 拉格朗日方程	12
2.2.1 广义坐标与广义外力	12
2.2.2 完整系统的拉格朗日方程	14
2.3 多自由度系统的自由振动	14
2.3.1 主振动	15
2.3.2 主坐标和坐标耦合	16
2.3.3 多自由度振动的一般论述	17
2.4 弹性体的振动	22
2.4.1 等剖面梁的自由扭转振动	22
2.4.2 等剖面梁的自由弯曲振动	25
2.4.3 长直机翼的弯扭自由振动	29
2.4.4 自振形态的正交性	30
2.5 板的振动	31
2.6 频率的近似计算法	34
2.6.1 瑞利(Rayleigh)法	34
2.6.2 里兹(Ritz)法	35
思考题及练习题	37
参考文献	38
第 3 章 非定常气动力基础	39
3.1 非定常气动力计算的发展	39
3.2 N-S 方程和 Euler 方程	41

3.2.1	N-S 方程	41
3.2.2	Euler 方程	43
3.3	速度势方程	44
3.3.1	速度势方程公式	44
3.3.2	初始条件及边界条件	45
3.3.3	压力系数	45
3.4	小扰动速度势方程	46
3.4.1	小扰动假设	46
3.4.2	方 程	47
3.4.3	压力系数	47
3.4.4	边界条件	47
3.5	线性小扰动方程求解基本思路	48
3.5.1	叠加原理	48
3.5.2	基本解	48
3.5.3	谐振荡形式的线性小扰动方程	50
3.5.4	求解思路	50
3.5.5	线性非定常气动力求解基本假设小结	51
3.6	偶极子格网法简介	52
3.6.1	亚声速偶极子格网法简述	52
3.6.2	超声速偶极子格网法特点	53
3.7	准定常气动力	54
3.7.1	Grossman 理论	55
3.7.2	细长体理论	56
3.7.3	气动力导数	57
3.7.4	活塞理论	58
3.8	二元非定常气动力理论	59
3.9	线性非定常气动力近似方法	61
3.10	非线性非定常方程求解的基本特点	62
	思考题及练习题	63
	参考文献	63
第 4 章	气动弹性静力学	64
4.1	发 散	64
4.1.1	发散的基本原理	64
4.1.2	翼根固支机翼的扭转发散	66
4.1.3	发散工程分析方法	69
4.1.4	影响发散分析结果的因素	70
4.2	载荷重新分布	70
4.2.1	载荷重新分布的基本原理	70

4.2.2 翼根固支机翼的载荷重新分布	72
4.2.3 载荷重新分布的工程分析方法	74
4.3 机翼掠角对静气动弹性的影响	80
4.4 操纵效率及操纵反效	82
4.4.1 基本现象	82
4.4.2 长直机翼的副翼效率及反效	85
4.4.3 操纵效率的一般表述方式	88
4.5 热效应对气动弹性的影响	89
4.5.1 气动热与气动弹性的耦合关系	89
4.5.2 高超声速气动力分析方法	90
4.5.3 高超声速气动热计算方法	91
思考题及练习题	91
参考文献	92

第5章 气动弹性动稳定性 93

5.1 颤振的机理	93
5.1.1 振动的观点	95
5.1.2 数学的观点	96
5.1.3 能量的观点	97
5.1.4 反馈的观点	99
5.2 典型翼段的颤振理论	101
5.2.1 基于定常气动力理论的颤振计算	101
5.2.2 基于准定常气动力理论的颤振计算	102
5.2.3 基于非定常气动力理论的颤振计算	104
5.3 颤振行列式的求解	105
5.3.1 解颤振方程的 $V-g$ 法	105
5.3.2 解颤振方程的 $p-k$ 法	107
5.4 影响颤振稳定性的参数	109
5.5 大展弦比机翼的颤振分析	110
5.5.1 大展弦比直机翼的颤振分析	110
5.5.2 大展弦比后掠机翼的颤振分析	112
5.5.3 大展弦比直机翼-副翼颤振	113
5.6 壁板和小展弦比翼面的颤振分析	115
5.6.1 小展弦比翼面的颤振分析	115
5.6.2 壁板颤振	117
5.7 非经典颤振及抖振	119
5.7.1 嗡鸣(跨声速舵面颤振)	119
5.7.2 失速颤振	121
5.7.3 抖 振	122

5.8 飞行器的防颤振设计	123
5.8.1 防颤振设计概要	123
5.8.2 基本的飞机颤振分析	124
5.8.3 飞机结构强度规范中防颤振设计内容	126
思考题及练习题	128
参考文献	128
第6章 气动弹性动力响应	130
6.1 典型翼段的离散阵风响应	130
6.1.1 离散阵风	130
6.1.2 离散阵风响应——准定常气动力理论	131
6.1.3 离散阵风响应——非定常气动力理论	133
6.2 典型翼段的连续阵风响应	135
6.2.1 连续阵风	135
6.2.2 连续阵风响应功率谱	135
6.3 长直机翼的阵风响应	137
6.3.1 气动弹性运动方程	137
6.3.2 广义非定常气动力	138
6.3.3 加速度与载荷响应函数	139
6.4 气动弹性动力响应分析的一般方法	141
6.4.1 阵风响应频域分析	141
6.4.2 阵风响应时域分析	145
思考题及练习题	146
参考文献	147
第7章 气动伺服弹性	148
7.1 气动伺服弹性概述	148
7.1.1 气动伺服弹性问题的由来	148
7.1.2 气动伺服弹性的分类与内容	149
7.1.3 气动伺服弹性的分析与综合	150
7.2 气动伺服弹性系统的组成	150
7.2.1 弹性机体与气动力环节	151
7.2.2 舵机与传感器环节	151
7.2.3 状态空间模型	152
7.2.4 系统广义受控对象	153
7.2.5 气动伺服弹性闭环系统	154
7.2.6 阵风干扰下的闭环系统	154
7.3 气动伺服弹性分析	155
7.3.1 气动伺服弹性分析的频域方法	156

7.3.2 气动伺服弹性分析的时域方法	159
7.3.3 气动伺服弹性分析实例	159
7.4 气动伺服弹性综合	163
7.4.1 颤振主动抑制技术	163
7.4.2 阵风减缓主动控制	164
7.4.3 主动气动弹性机翼技术	165
7.5 气动伺服弹性不利因素的排除	167
思考题及练习题	167
参考文献	168
第 8 章 气动弹性试验	169
8.1 气动弹性的地面试验	169
8.1.1 地面振动试验	169
8.1.2 结构伺服弹性地面试验	172
8.2 气动弹性的风洞试验	174
8.2.1 静气动弹性模型的发散试验	174
8.2.2 颤振模型的风洞试验	175
8.2.3 抖振模型的风洞试验	178
8.3 气动弹性的飞行试验	179
8.3.1 飞行颤振试验	179
8.3.2 飞行载荷测量试验	184
思考题及练习题	186
参考文献	186

第1章 绪 论

1.1 气动弹性力学概述

弹性结构在气流中都会发生气动弹性现象。可以认为,“气动弹性力学”是一门研究弹性体在气流中力学行为的学科。20世纪30年代,Cox和Pugsley提出了“气动弹性”一词用来描述这种现象。这也是本门学科名字的由来。

弹性体在气动载荷作用下会发生变形和振动,而变形和振动反过来又影响气动载荷的分布与大小,正是这种相互作用,在不同条件下将产生形形色色的气动弹性现象。在有些情况下,不仅要考虑气动力与弹性力之间的相互作用,而且还要考虑它们与惯性力之间的相互作用。所以按照是否考虑惯性力来分类,可以把气动弹性问题分成气动弹性静力学(也称静气动弹性力学)及气动弹性动力学(也称动气动弹性力学)两类。

气动弹性力学所研究的各类气动弹性现象,不外乎起因于空气动力、弹性力和惯性力三者之间的相互作用。依照起因,英国学者 Collar 绘制了气动弹性力三角形,对气动弹性进行了明确的分类。该三角形最形象地体现了气动弹性力学的多学科特点,表达了气动弹性问题中各种力之间的关系,从而区分了各学科之间的研究范畴。如图 1.1 所示,在三角形上,把其中

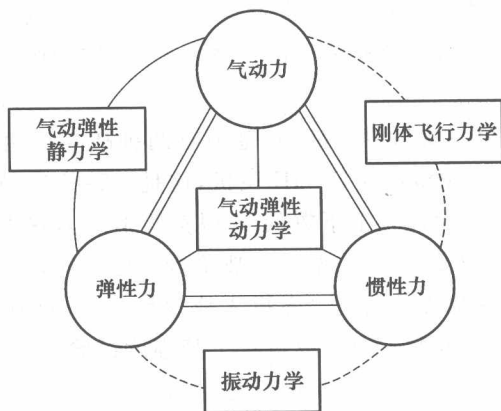


图 1.1 气动弹性力三角形

任意两个角点联系起来,均构成一个重要的领域。由弹性力和惯性力的相互作用构成了人们熟知的“振动力学”;以气动力和惯性力的相互作用为研究对象,构成了“刚体飞行力学”;而把气动力和弹性力联系起来,就形成了“气动弹性静力学”。其实,从概念上讲,不论是连接力三角形上的哪两个角点,都可以认为它们是气动弹性力学中的一个特殊方面,只是由于历史的原因,而把气动弹性静力学的问题归纳在气动弹性这个学科之内。事实上,气动弹性力学与这些学科之间并无严格的界限,只是为了区分实际已经形成的力学分支,而在力三角形中把“振动力学”和“刚体飞行力学”用虚线表示。当所论及的问题涉及力三角形上的全部顶点时,三种力都参与作用,从而进一步构成了“气动弹性动力学”问题。由此可见,气动弹性力学这门学科跨越了三个完全独立的学科。由于气动弹性问题在现代航空航天科学与工程设计中具有重要地位,所以使气动弹性的基本原理对于飞行器设计人员来说十分有用。

气动弹性力学主要关心的问题之一是弹性结构在气流中的稳定性。对于一定的结构,其空气动力将会随着气流流速的变化而变化,所以可能存在一个临界的流动速度,在这个速度

下,结构变为不稳定的。根据惯性力是否允许忽略,这种不稳定性可以分为静力不稳定性和动力不稳定性。前者主要是扭转变形发散,后者主要是颤振。发散和颤振都会导致结构的突然毁坏和灾难性事故,因此设计人员必须保证不会发生这种不稳定事故。

从气动弹性问题的整体来看,其所包含的问题不仅仅是稳定性问题,它还研究飞行器设计中的许多其他问题,诸如在气动弹性静力学问题中,由于弹性变形而引起载荷重新分布,由于弹性变形而引发操纵效率的降低,甚至出现操纵反效;在气动弹性动力学问题中,还有飞行器对外载荷的动力响应问题,例如由操纵面偏转或阵风等引起的响应。这些将在以后章节中逐一论述。

请注意,本书中所讨论的大多数问题都基于线性理论假设。有时候线性理论会影响结果的精确性。例如在颤振分析中,飞行器可能在低于线性颤振速度的情况下发生自激振动,导致系统发生极限环振动。为了得到系统的这种特性,必须采用非线性分析方法。

1.2 气动弹性力学发展的简要回顾

在回顾气动弹性力学的发展过程时,有必要简要了解一下在飞机发展的初期由于气动弹性问题所引发的事故。

1. 扭转发散

最早的一次由气动弹性问题所引发的事故发生在1903年12月8日,即在Wright兄弟有动力载人飞机首次成功飞行的前九天,Smithsonian学院的Langley教授在Potomac河畔进行他的“空中旅行者”号有动力飞机的试飞失败了。事后才知道,这是典型的机翼扭转发散问题。为此,Collar教授曾评论说:“若不是气动弹性问题,Langley可能就要取代Wright兄弟的历史地位。”

第一次世界大战中,德国有两种战斗机由于静气动弹性发散而发生了致命的结构破坏。一架是Albatros D—III飞机,这是一种仿法国Nieuport 17的双翼机。由于下翼翼梁布置得太靠后,而连接上下翼的V型支架不能为它提供扭转刚度,使得飞机在高速俯冲时发生了扭转变形发散。另一架是在战争接近尾声时,由Fokker公司推出的Fokker D—VIII飞机,这是一种悬臂式单翼机。在投入战争后不久,就接二连三地发生在高速俯冲时机翼毁坏事故。此后,军方对六个机翼进行了静强度试验,结论是其强度足以承受6倍的设计载荷。原型机和生产型飞机唯一的不同就是,后者有一根加强后梁,本意是增大实战中飞机的强度特性,然而却未料到由此改变了机翼弹性轴的位置,从而导致了静气动弹性发散。这个弄巧成拙的教训使设计者逐渐认识到,结构设计仅考虑强度是远远不够的,还必须考虑它的刚度特性。到了1926年,H. Reissner对机翼扭转发散进行了详细的分析,阐明了气动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。由此知道,当弹性轴位于气动中心之前时,机翼在任何动压下都不会发生气动弹性扭转发散。

2. 副翼反效

副翼反效也是一个备受设计师关注的气动弹性静力学问题。1927年,英国一架双引擎大展弦比飞机,在飞行中当其飞行速度增加时,副翼效率随之降低而变为零,继而变为反方向作

用而发生事故。这种控制能力丧失并且反向作用的现象,就是现在所说的副翼反效现象。20 世纪 30 年代,英国皇家空军机构的 Cox 和 Pugsley 成功分析了这次事故,并提出了防止发生这类事故的设计准则。

3. 尾翼颤振

第一次有记载的飞机颤振事故发生在 1916 年,一架英国的 Handley Page 0/400 双引擎轰炸机发生剧烈的尾翼颤振而坠毁。研究发现,该机的升降舵是独立地由两套钢索与驾驶杆相连的,在机身平尾结构的前两阶固有振动模态中,分别是升降舵的差向运动和机身扭转。正是由这两阶模态的耦合导致了尾翼颤振事故。其改进措施是用一个传扭轴连接两片升降舵。

仅一年后,在 DH—9 飞机上又发生了类似的尾翼颤振事故,而处理事故的方法仍和 Handley Page 一样。至今,升降舵之间采用可承扭的刚性连接仍是飞机的一个重要设计特点。同时也由此促使了 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。他们研究了由机身扭转和升降舵偏转这两个自由度组合而成的二元颤振,这可能是最早的颤振理论分析。

4. 副翼颤振与质量平衡

第一次世界大战结束后,在荷兰,围绕一架单翼机(远距水上侦察机)的副翼颤振开展了系统的颤振研究。A. G. von Baumhauer 和 C. Koning 研究了机翼弯曲与副翼偏转耦合的二元颤振问题,并于 1923 年发表了涉及颤振理论和实验分析两方面的研究报告。荷兰国家宇航实验室的 H. Bergh 教授曾评述这份报告,认为其已涵盖了现代颤振分析的一般特性。其最重要的研究成果是发现采用副翼质量平衡能有效消除这种颤振,如图 1.2 所示。

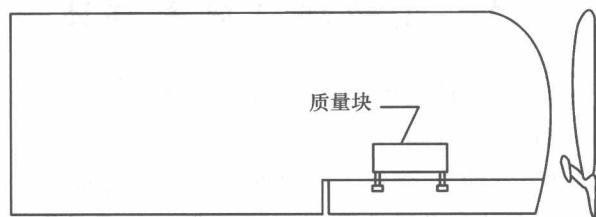


图 1.2 解决副翼颤振问题的质量平衡法

20 世纪 20 年代末, H. G. Kussner, W. J. Duncan 和 R. A. Frazer 建立了机翼颤振的理论基础,发表了一篇被认为是“颤振经典”的专论。该文利用简化的风洞模型来辨识和研究实验现象,给出设计建议,并列出了测定气动力导数所需的详细步骤。1934 年, T. Theodoreson 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后,空军已成为重要军种,不同型号的机种应运而生,提高飞行速度是当时飞机发展的焦点。由此而引发的是一系列气动弹性事故的发生,较为突出的是操纵面和调整片的颤振。到第二次世界大战结束前夕,随着喷气发动机的问世,实现了跨声速飞行,出现了许多新的、富有挑战性的气动弹性问题,其中跨声速范围内的颤振问题是最受关注的。

1944年,当NACA飞行员驾驶着新型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“副翼嗡鸣”,它不同于机翼-副翼颤振。

人类首次突破音障是在1947年,是由Charles Yeager在X-1验证机上创造的。从此,开始了超声速飞行,而超声速颤振问题也开始得到重视。这时出现了一种新形式的颤振——壁板颤振。壁板是飞行器的基本结构单元,因此,防止壁板颤振尤为重要。

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,由此又提出了新的气动弹性问题。从20世纪50年代开始,飞行进入了超声速范围,飞机及有翼导弹的小展弦比后掠翼和三角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。到了20世纪70年代,随着计算机的进一步发展,跨声速非定常气动力的计算方法也得到了一定程度的发展。

纵观上述历史事实可以看到,自人类发明飞机以来,气动弹性理论就一直伴随着飞行器的发展而逐渐完善,并形成了独立的学科。为解决飞行器中出现的种种气动弹性问题,大批航空工程师和空气动力学专家做了大量研究工作。当时的研究沿着三个方向进行:一方面是工程分析,一方面是对非定常空气动力的理论研究,再有一方面就是对实验技术的研究。这三方面相辅相成,互相促进。研究的具体问题也适应飞行器设计的要求,从早期低速飞机的扭转发散,至主动气动弹性机翼技术的实现。今天,飞行器的结构更趋于柔性增大,气动弹性是飞行器能安全和高性能地飞行所不可缺少的考虑方面。可以认为,气动弹性力学的发展与世界航空航天工业的发展是分不开的。经历一个世纪以来的发展,气动弹性力学已涉及更加广泛的学科领域,并在航空航天工程中发挥着举足轻重的作用。

1.3 气动弹性现象描述

在飞行器飞行过程中,气动弹性现象是多种多样的。按照是否考虑惯性力,可以把气动弹性问题分成两类:一类是只包含空气动力和弹性力相互作用的气动弹性问题,称之为气动弹性静力学问题;另一类是包含空气动力、弹性力和惯性力相互作用的气动弹性问题,称之为气动弹性动力学问题。下面简略叙述气动弹性静、动力学问题的物理现象。

1.3.1 气动弹性静力学的基本现象

气动弹性静力学问题主要包括两种类型:第一类是扭转发散问题以及与之密切相关的载荷重新分布问题;第二类是操纵效率和操纵反效问题。

1. 扭转发散

所谓扭转发散是指飞行器在飞行中升力面的静不稳定性。在飞行时,由于某种原因使翼面的攻角改变,由此引起翼面上气动力的变化,气动力的改变又将引起机翼扭角(或攻角)发生变化,由此反复作用,可能使翼面的变形愈来愈小,最后趋于平衡;也可能愈来愈大,最后使翼面破坏。发生不稳定的飞行速度称为发散速度,其中升力面的弹性在不稳定中起了主要作用,意即:在一个确定的风速下,弹性升力面受到定常升力作用而发生扭转变形直至破坏。

由上所述,可以用框图来表示气动力与弹性系统之间的关系。图 1.3 的 α_0 称为输入攻角,升力 L 是输出,弹性扭角 θ 则是系统的反馈量。由此可见,气动弹性问题就是当系统具有弹性反馈时的气动力问题。

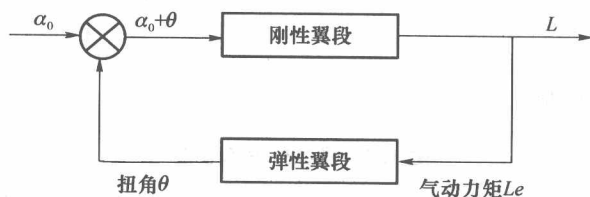


图 1.3 弹性机翼的气动弹性反馈

2. 载荷重新分布

这是与上述扭转发散问题密切相关的又一个气动弹性静力学问题。它是指由于升力面的弹性变形,对飞行器的整个升力分布具有相应的影响,对于整机来说,称为飞行载荷。静气动弹性效应所反映出来的问题是机翼所承受的升力与原来设想的绝对刚硬机翼所承受的升力有所不同。因此,在该问题中,要确定由于升力面的弹性而引起的升力分布变化。图 1.4 表示了一个典型的例子,即后掠的弹性机翼与其相应的完全刚硬机翼,在法向加速度为 $2g$ 的机动飞行中所具有的升力分布。由图可见,由于弹性机翼的总升力线移向机翼的根部,所以从强度观点看,对大展弦比机翼来说,弹性变形对升力分布的影响是有利的。但对前掠翼来说,情况恰好相反。

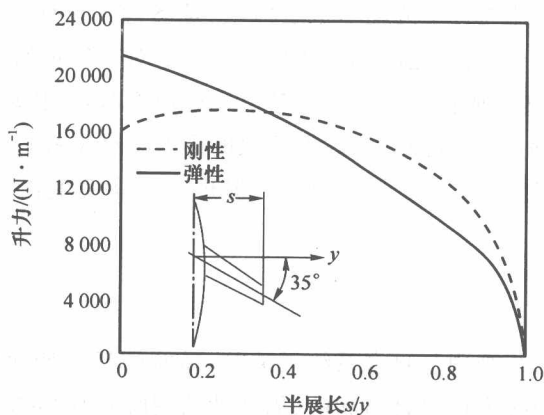


图 1.4 在法向加速度为 $2g$ 的机动飞行中,完全刚体和弹性后掠机翼的载荷分布

3. 操纵效率及操纵反效

这是飞行器设计中另一类重要的气动弹性静力学问题。由于操纵面向下偏转,所以在气动中心处产生附加升力及气动力矩,它们对翼面刚心形成力矩,使翼面有负扭转角,这个负扭转角产生负的附加升力,从而降低了操纵面增加升力的作用,所以称为操纵面效率问

题。图 1.5 画出了操纵效率示意图。

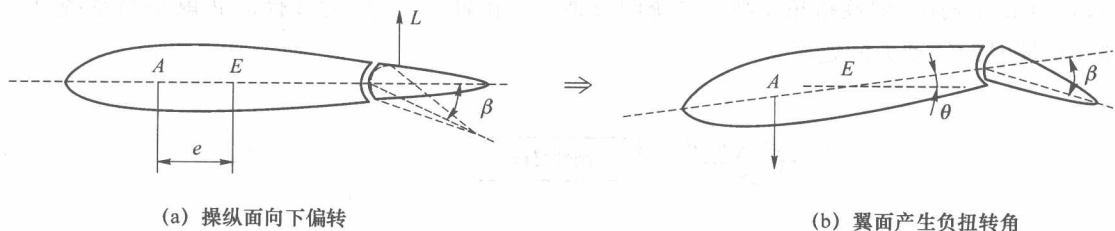


图 1.5 操纵效率示意图

操纵反效是与上述操纵效率相关的一个问题。由于升力面结构弹性变形的影响,所以飞行速度的增加会导致操纵效率的降低。在一个确定的飞行速度下,操纵面效率变为零,该速度称为反效速度。超过该速度后,操纵面的作用就与原来预期的作用相反了。

1.3.2 气动弹性动力学的基本现象

气动弹性动力学问题是指如图 1.1 中惯性力、弹性力和气动力都参与作用的气动弹性问题。飞行器设计领域中的气动弹性动力学问题包含两个重要的实际问题,即气动弹性动稳定性和气动弹性动响应问题。前者的特点是外界的激励为零,即系统的所有作用力都是系统位移、速度和加速度的函数;而后者则是外力随时间任意变化的。对飞行器来说,气动弹性动力学问题主要表现为颤振、动力响应和抖振等问题。

1. 颤 振

颤振是指发生在飞行器飞行中的动不稳定性,它是飞行器设计人员最为关注的问题。颤振是一种自激振动,是几个自由度之间耦合作用的结果。对于给定的飞行器结构,当飞行速度由小变大时,振动由衰减转变成扩散。当处于某一飞行速度时,由扰动引起的振动的振幅正好维持不变,这一速度称为临界颤振速度。颤振现象的形态多种多样。在发生颤振时,大多数情况是整架飞行器在某种程度上参与了这个过程。但也有可能发生在飞行器的单个部件上,例如壁板颤振。

2. 动力响应

动力响应是指弹性系统受到与自身系统无关的、随时间任意变化的外界扰动力的作用而发生的强迫振动。这些干扰力可以是谐和的、周期性的、脉冲型的或时间随机性的。

3. 抖 振

抖振大体上可以分为两种类型:一类是升力型抖振,是指当翼面攻角太大时,由于分离流的紊流激励,使翼面本身或处于机翼尾流中的尾翼产生剧烈的振动响应,这种现象称为大攻角抖振。在跨声速飞行范围内,由翼面激波引起分离而产生的响应,常称为激波抖振。另一类是非升力型抖振,该类抖振多由飞机外形突变引起,使升力面落入不良气动外形物体的尾流中。

1.4 气动弹性力学的新发展

气动弹性力学发展至今,已经面临了众多新的气动弹性分支,由此也发展了众多的方法和理念。

1. 热气动弹性力学

飞行器进入超声速范围,特别是在近代高超声速飞行器上,由于进入大气层时的高温环境,使得结构热应力问题突出,因此迫切提出了在受热条件下的气动弹性现象,由此形成了“热气动弹性”问题。I. E. Garrick 曾绘制出热气动弹性力四面体,如图 1.6 所示,形象地表示了热气动弹性是由气动力、弹性力、惯性力和热力相互作用的结果。

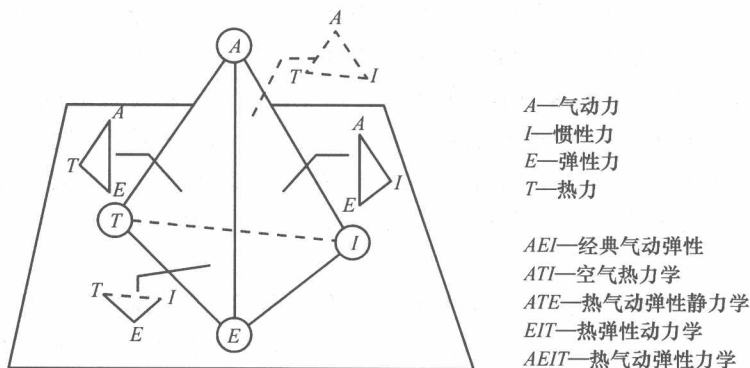


图 1.6 热气动弹性力四面体

2. 复合材料气动弹性剪裁

复合材料气动弹性剪裁是通过复合材料的刚度方向性及变形耦合来控制结构的气动弹性变形的,从而为提高或改善飞机性能提供了一条重要途径,为飞机结构设计提供了特殊的优越性,是常规金属材料飞机所不能及的。

复合材料气动弹性剪裁是一种新的设计理念,它是在满足最小质量、强度要求及工艺要求的必要前提下,根据飞机设计的具体情况,改善飞机性能。最具典型的实例是 X-29 前掠翼验证机,如图 1.7 所示,它成功地利用气动弹性剪裁技术解决了前掠翼静气动弹性扭转发散问题。

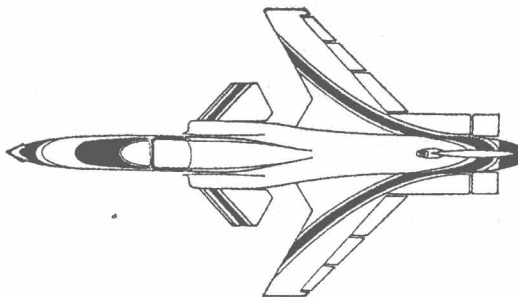


图 1.7 X-29 前掠翼验证机