



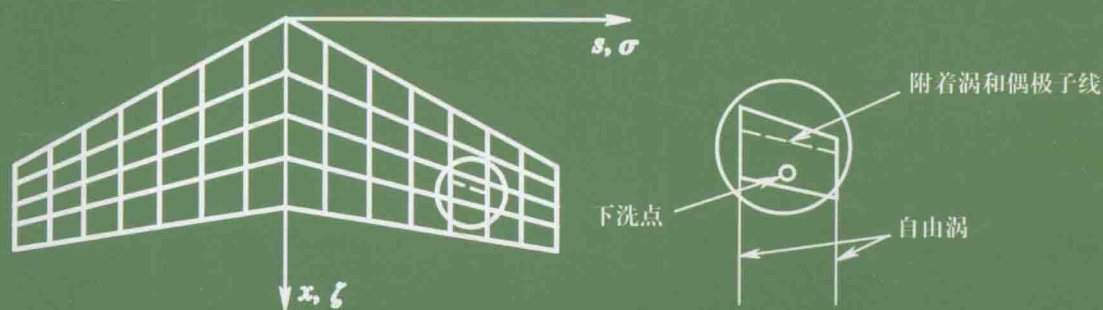
Theoretical and Computational Aeroelasticity

气动弹性力学 理论与计算

(美) 威廉·P. 罗登 (William P. Rodden) 著

万志强 等 译

杨超 陈桂彬 校



航空工业出版社



气动弹性力学理论与计算

(美) 威廉·P. 罗登 (William P. Rodden) 著

万志强 吴志刚 译
谢长川 宋 晨
杨 超 陈桂彬 校

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

气动弹性力学是应用力学的一个分支,研究气动力、惯性力和结构力之间的耦合。本书的内容包括气动弹性力学的历史回顾、基础理论以及多方面应用,重点关注固定翼飞机的气动弹性问题。作者 William P. Rodden 在气动弹性力学的教学和工程应用方面取得的成就广为人知,这本《气动弹性力学理论与计算》就是他在气动弹性力学领域毕生经验的总结。本书可用做高等院校航空航天专业研究生教科书,也可作为航空工程师的参考用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

气动弹性力学理论与计算/ (美) 罗登 (Rodden, W. P.) 著; 万志强等译. -- 北京: 航空工业出版社, 2014. 9

书名原文: Theoretical and computational aeroelasticity

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0372 - 0

I. ①气… II. ①罗…②万… III. ①气动弹性动力学—研究 IV. ①O343

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 146739 号

Copyright ©2011 by William P. Rodden. All rights reserved.

No part of the publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means electronic, mechanical or by photocopying, recording or otherwise, except for the inclusion of brief quotation from a review, without prior permission in writing from the author.

ISBN: 978 - 0 - 692 - 01241 - 3

Published by Crest Publishing

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2012 - 2625

气动弹性力学理论与计算

Qidong Tanxing Lixue Lilun Yu Jisuan

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84934379 010 - 84936343

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2014 年 9 月第 1 版

2014 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 31.75 字数: 808 千字

印数: 1—1500

定价: 128.00 元

作者谨以此书纪念

Ruth Bedford Rodden

数学家，作者的妻子，母亲及艺术家

(1927. 3. 1—1997. 12. 17)

Stephen Michael Rodden

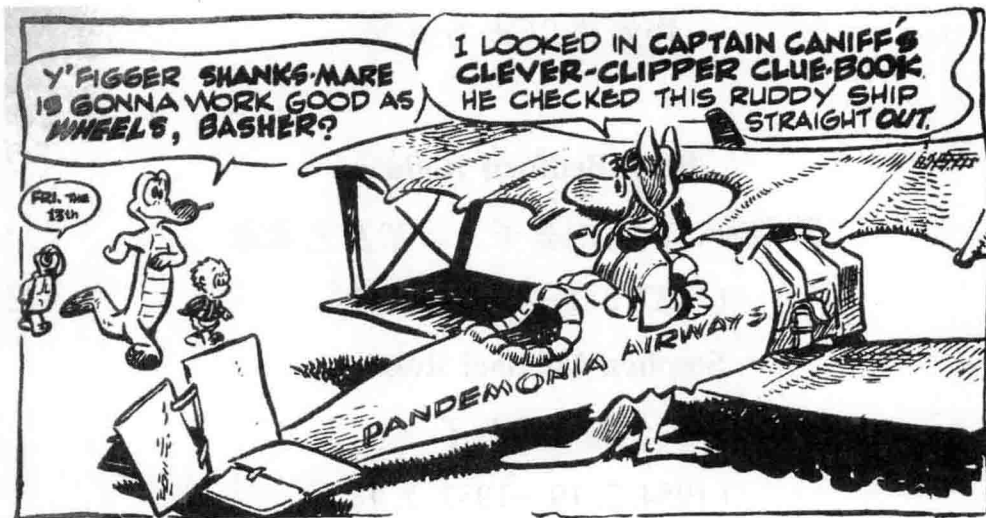
作者的儿子

(1954. 2. 19—1957. 7. 18)

Monica Noreen Minter

作者的女儿

(1956. 2. 26—2006. 2. 26)



自 *Prehysterical Pogo (in Pandemonia)*, 作者 Walt Kelly (1967, 155).

Copyright 2001 Okefenokee Glee & Perloo, Inc.

经许可使用

序 言

“Pogo”是一部每日漫画系列的题名及剧中主要角色的名字，由 Walt Kelly 创作出品，连续多年（1948—1975 年）持续刊出。该作品常凭借其滑稽的动物形象来讽刺与折射当今的社会政治。本书前页漫画共有 4 个动物角色：负鼠 Pogo、一只海龟 Churchy La Femme、鳄鱼 Albert 和袋鼠 Basher。Basher 是 Pandemonia 航空公司的飞行员，他的朋友们担心飞机经不起飞行。Pogo 发现该飞机的方向舵脱落了，Churchy 这时引用了达·芬奇的一句名言“这里有关空气动力的核心问题是‘飞机得是柔性的’”。在漫画中是飞机的柔性引起了 Churchy 的注意，而在本书中我们将着重关注飞机的柔性与其在飞行中受到的空气动力之间的相互作用。

“计算气动弹性”（computational aeroelasticity）这个术语出现在不同的地方有着不同的含义，这里有必要对本书的名称《气动弹性力学理论与计算》做些说明。在本书中，计算气动弹性主要指气动弹性分析过程所涉及的数值计算。1958 年从事教学工作伊始，我就在布置作业中告诫我的学生：“如果你们没有做到一定量的数学计算，那么就不要再问气动弹性问题！”早期的工程师只有机械式的计算机（Collar 把它们戏称为“兔子”，因为它们做乘法运算很快^①），与当今的高性能计算机形成鲜明对比。他们可以算是“从事气动弹性计算的学者”。

这本书可以看作是我的一本自传。我从加州大学结构专业毕业以后（1947 年获得学士学位，1948 年获得硕士学位）成为一名工程师，步入航空工程领域，现在被称作航空航天工程。我当时在诺斯罗普公司和道格拉斯飞机公司从事应力与结构载荷分析工作，并在道格拉斯飞机公司、兰德公司和北美公司从事空气动力学稳定性与操纵性、性能与设计工作。1955—1965 年，我在北美航空公司、诺斯罗普公司和航空宇航公司致力于非常气动力、结构动力学和气动弹性分析方面的研究，编写了一系列通用的数字计算机程序用于各类气动弹性问题分析。我的主要参考资料有：《飞机振动与颤振导论》（Introduction to Aircraft Vibration and Flutter），由 Robert H. Scanlan 和 Robert Rosenbaum 编写；《气动弹性力学》（Aeroelasticity），由 Raymond L. Bisplinghoff、Holt Ashley 和 Robert L. Halfman 编写；《气动弹性力学引论》（An Introduction to the Theory of Aeroelasticity），由 Y. C. Fung 编写。相关的参考资料还有《飞机的性能、稳定性与操纵性》（Airplane Performance Stability and Control），由 Courtland D. Perkins 和 Robert E. Hage 编写。

在道格拉斯飞机公司奖学金的资助下，我于 1958 年获得加州大学洛杉矶分校（UCLA）工程专业博士学位。我的导师是 John W. Miles 博士，我的博士论文的题目是《等间距支持二维平板的超声速颤振》。之后，我便在 UCLA 分校开始了气动弹性力学的

^① 此处为英文双关语。文中使用动词 multiply 既表示乘法也有繁衍的含义。兔子繁殖很快，故 Collar 将早期的计算机戏称为“兔子”。——译者注

课程教学工作。第一个班共有 18 次课（一个学期有 16 周），有 18 名学生。每名学生负责整理一堂课的笔记以得到完整的课程笔记，这本书的第一版手稿由此诞生了！

本书在引论和历史回顾 2 个章节之后，用 3 个章节论述气动弹性力学的重要基础内容，它们是：第 3 章“空气动力学：定常与非定常理论”，第 4 章“结构：变形理论”和第 5 章“振动：频率和模态”。每项内容都可独立扩充成为一个学期的课程，其中第 3 章可作为两个学期的基础课程。剩下的 7 个章节覆盖了气动弹性的多方面应用。第 6 章“准静态气动弹性力学：机动飞行”涉及一些可以按照定常原理处理的气动弹性问题，这些问题包括：升力与操纵面效率、结构的发散、操纵面反效。这里还使用约束气动弹性导数讨论了平均轴在运动方程中的重要作用。第 7 章“颤振：动气动弹性稳定性”涉及颤振分析的传统方法，包括了广义气动弹性分析方法，它提供了阻尼颤振的严谨处理方案。本章还考虑了其他典型问题，例如，操纵面颤振、壁板颤振、推进器/发动机吊舱螺旋颤振和 T 形尾翼颤振。第 8 章“瞬态响应：着陆和阵风载荷”主要讨论与时间相关的外部载荷。一些问题是设计任务带来的，如起飞、机动和着陆；还有一些问题是由飞行环境引起的，如大气阵风或冲击波。第 9 章“随机响应：大气扰动和跑道粗糙度”主要考虑对于一些不能精确预测的载荷，必须采用统计方法才能描述此类问题。例如，滑行或运输、发动机噪声、抖振、大气扰动（阵风）或边界层扰动。着陆滑行和大气扰动问题与前面章节的着陆与阵风问题相对应，这里主要考虑随机载荷。第 10 章“气动伺服弹性：与控制系统相互作用”在气动弹性问题中引入了主动自动反馈控制系统，回顾了结构模态控制设计的历史案例、阵风减缓和颤振主动抑制。第 11 章“热气动弹性：高速大气飞行”考虑热应力对结构刚度的影响，阐述高温使结构刚度降低的两种机制：一是弹性模量的降低，二是热引起的压应力造成刚度降低（梁柱效应）。第 12 章“气动弹性设计：优化”由 Erwin H. Johnson 博士和 Garret N. Vaderplaats 撰写，讨论从气动弹性的角度出发，采用专用的程序化自动运行的手段进行系统设计的技术。本章对此专题进行了综述，首先介绍了基于数学和编程技术的优化概念，然后介绍了其在静发散、配平变量、稳定导数和颤振等气动弹性问题的发展情况。本书参考列表首先给出了名词缩写，然后以字母顺序列出了文中引用的所有参考文献。包括参考资料和史料在内本书共有 8 个附录。4 个参考性的附录分别是：附录 A “矩阵算法”、附录 B “拉普拉斯变换和傅里叶变换”、附录 C “概率与概率分布”和附录 E “刚体飞行器飞行力学”。4 个史料性附录分别是：附录 D “偶极子格网法的发展”、附录 F “与联邦航空局往来的信件”、附录 G “伽辽金——传记和他的方法”和附录 H “自传”。

这里要感谢和我一起共事多年的老师、学生和同事们，在他们的帮助下本书得以完成。首先，向加州大学伯克利分校土木工程系的 Howard D. Eberhart 教授（1906—1993）致敬，是他的飞机结构课程开启了我航空职业生涯。我还要感谢 Holt Ashley 博士（1923—2006）和 Malcolm J. Abzug 博士（1920—2007），他们多年来对我影响深刻。过去和现在与我共事的专业领域的同事们给了我很多帮助，他们是：MacNeal - Schwendler 公司（现为 MSC 软件公司）的 Richard H. MacNeal 博士（已退休）、Erwin H. Johnson 博士、E. Dean Bellinger、Charles T. Wilson、Robert L. Harder、David V. Wallerstein 博士、Thomas R. Kowalski 博士、Ted L. Rose 和 Tomasz R. Seibert，NASA 兰利研究中心的 E. Carson Yates Jr 博士（已退休）、John W. Edwards 博士（已退休）、Jerry R. Newsom（现就职于 Newsom

航空航天顾问公司)、Wilmer H. Reed III (已退休)、Walter A. Silva 博士和 Robert E. Bartels 博士,道格拉斯飞机公司(现并入波音公司)的 Marilyn B. Harmon 女士(已退休)、Joseph P. Giesing、Teréz P. Kálmán 女士(已退休)和 Robert M. Pearson, 诺斯罗普飞机公司(现为诺斯罗普·格鲁门公司)的 R. Terry Britt、T. Desmond Arthurs (已退休)、Richard R. Tye 博士和 Bertil A. Winther (已退休), 麦道公司(现并入波音公司)的 Rudolph N. Yurkovich (已退休)和 Dale M. Pitt 博士, 波音公司的 Kumar G. Bhatia 博士和 Christopher J. Borland (已退休), 以色列理工学院的 Mordechay Karpel 博士、Daniella Raveh 博士、Eli Nissim 博士和 Boris Moulin 博士(目前在 ZONA 科技公司), 洛克希德飞机公司(现为洛克希德·马丁公司)的 Frederick D. Eichenbaum 博士(已退休)和 William D. Anderson, Vanderplaats 研究与发展公司的 Garret N. Vanderplaats 博士和 Vladimir Balabanov 博士(目前在波音公司), Aero Vironment 公司的 Dana J. Taylor 博士和 Derek L. Lisoski 博士。此外, 还要感谢 Robert E. Donham (RED 公司)、Earl H. Dowell 博士(杜克大学)、John Dugundji 博士(麻省理工学院)、Charles E. Hammond 博士(顾问)、Ronald O. Stearman 博士(得州大学)、Isaac Elihakoff 博士(佛罗里达大西洋大学)、Terrence A. Weisshaar 博士(普渡大学)、Samuel C. McIntosh Jr 博士(麦金托什结构动力学公司)、Robert N. Coppolino 博士(测试分析公司)、Billy J. Brock (已退休)、Louw H. van Zyl (南非科学与工业研究理事会 Defencetek 公司)、Francesco Marulo 教授(意大利那不勒斯费德里克二世大学)、Jan Brink - Spalink 博士和 Gerd Schumacher 博士(空中客车德国公司)、Héctor Climent Mániz 博士(西班牙飞机制造股份有限公司)、Jiri Čeřrdle (捷克航空研究与试验研究所)和 Michel H. L. Hounjet (荷兰国家航空宇航实验室)。

这里还要特别感谢为书稿提供技术支持的人士。加州理工大学图书馆的 Sherman M. Fairchild 提供了完整的航空文献库。Casa 图形公司的 Patty 和 Ernie Wechbaugh 将书稿电子版由微软 Word 格式转化为 Adobe PageMaker 格式, 并为 UBuildABook 印刷公司提供 Adobe PDF 版本。Julie Suva 女士使用 Adobe FrameMaker 和 Adobe Acrobat 软件绘制了本书所有图片, 并将它们导入微软 Word 文档。Laura Hicklin 女士为本书微软 Word 文档的表格排版提供了帮助。设计科学公司的 MathType 软件使得本书问世成为可能, 没有它就无法编辑书中的公式。地球绿洲电脑公司的 Francis R. Eichensehr 为我个人电脑的文字和公式处理提供维护和帮助。

感谢凯萨医疗机构的医护人员: 内科医学博士 John P. Martin、心脏医学博士 Michael B. Jorgensen 和眼科医学博士 David S. Marlin。他们使我健康长寿并拥有良好的视力, 能够完成本书的创作。

最后, 我要感谢家人对我的鼓励: 我的妻子 Anita Brennan Rodden、我的儿子 William S. Rodden、我的女儿 Cathleen L. Rodden 和我的弟弟 John J. Rodden 博士。

William P. Rodden

拉卡纳达市, 加利福尼亚州

2011 年 3 月

译者前言

气动弹性力学是一门研究气动力、惯性力和结构弹性力相互耦合作用的应用力学学科，不同于其他应用力学，它着重于研究学科之间的耦合。现代气动弹性涉及的学科更为广泛。例如，热传导引起的热效应而形成热气动弹性问题，又如控制系统的引入而形成的气动伺服弹性等问题。

本书着力说明气动弹性学科领域的主要问题。从固定翼飞机的气动弹性问题开始，继而阐述了定常与非定常气动力、结构变形理论和振动理论；然后阐述了准定常机动飞行问题和颤振稳定性；之后讨论着陆和阵风载荷问题、考虑大气湍流和粗糙跑道激励下的随机响应问题；最后讨论了气动伺服弹性问题、热气动弹性问题及气动弹性优化设计问题。全面涵盖了目前气动弹性理论和工程上所关心的问题，具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性。

本书作者从事气动弹性领域的教学、科研以及工程实践的工作长达半个世纪，是 MSC Nastran 软件气动弹性分析模块的创始人，曾担任美国多个飞机设计公司的气动弹性顾问。作者以其大量研究成果及结合工程实例的讲述使本书不仅具有很高的学术价值，更有很强的工程性。一位美国著名的气动弹性研究学者 Dewey H. Hodges 在《AIAA 学报》中关于该书的书评写道，“它蕴含丰富的理论信息，正在发展的分析方法的细节，以及从一个知情者的角度对它的发展所做的历史洞察”。

本书承蒙中航出版传媒有限责任公司的大力支持和帮助，并得到上级单位的资助，充分体现了对气动弹性学科的重视。把该书引进到国内，将为航空工程技术相关事业的技术人员提供有益的参考用书，同时也为高等航空院校相关专业提供一本很好的教学参考书。正如 Hodges 教授在书评中所说：“本书迎合了不同层次学者的要求，从一年级研究生到毕业很多年但仍在气动弹性方面感兴趣的学者。作者认为该书适合研究生课程，评论者也同意该观点。”

本书由北京航空航天大学航空科学与工程学院杨超教授组织翻译。其中第 1, 2, 12 章及附录 A, B, E, F, G 由宋晨翻译；第 3, 8, 9 章及附录 C, D 由谢长川翻译；第 4, 5, 7, 10 章由吴志刚翻译；第 6, 11 章及附录 H 由万志强翻译。全书由杨超、陈桂彬校对。

北京航空航天大学
航空科学与工程学院气动弹性研究室
2013 年 6 月

目 录

第 1 章 气动弹性力学引论	(1)
1.1 气动弹性力学的范畴	(2)
1.2 气动弹性分析基本概念	(4)
1.3 气动弹性在航空航天飞行器设计中的作用	(5)
1.4 力与坐标系	(9)
第 2 章 气动弹性问题的简要历史回顾	(13)
2.1 早期的气动弹性现象实例	(13)
2.2 航空领域的气动弹性力学	(20)
2.3 第一次世界大战期间所获得的启示	(21)
2.4 第一次世界大战后的发展	(24)
2.5 一些事故统计	(25)
2.6 第二次世界大战以来的发展	(32)
2.7 稳定性与操纵性中的气动弹性力学	(33)
2.8 非定常气动力理论的发展	(34)
2.9 早期的试验技术	(36)
第 3 章 空气动力学：定常与非定常理论	(43)
3.1 翼型的空气动力特性	(43)
3.2 非定常二维翼型	(47)
3.3 动态稳定性导数的估算	(62)
3.4 非定常位势流理论	(64)
3.5 机翼和机身的近似解析解	(73)
3.6 定常流升力面的数值解法	(81)
3.7 振荡升力面的数值解法	(88)
3.8 升力面和体干扰的数值解法	(97)
3.9 气动力影响系数	(105)
3.10 计算流体力学	(107)
第 4 章 结构：变形理论	(113)
4.1 弯曲和扭转理论基础	(113)
4.2 能量定理	(115)
4.3 扭转盒段的剪心和扭转刚度	(117)
4.4 变刚度弹性轴的变形	(121)
4.5 柔度影响系数的插值	(124)
4.6 薄板理论与曲面样条	(131)
4.7 有限元分析	(143)

4.8	直接刚度法	(144)
4.9	由假设变形求刚度矩阵	(151)
4.10	刚度与柔度的互逆性	(153)
4.11	利用假设应力求刚度矩阵	(154)
第5章	振动：频率和模态	(157)
5.1	单自由度系统	(157)
5.2	结构阻尼	(160)
5.3	二自由度系统	(162)
5.4	弦的振动	(164)
5.5	杆的扭转振动	(168)
5.6	梁的弯曲振动	(170)
5.7	弹性轴的振动	(172)
5.8	耦合质量矩阵	(173)
5.9	振动问题的矩阵表述	(178)
5.10	计算与测量振动模态的正交性	(180)
5.11	从地面振动试验获得柔度矩阵的方法	(183)
第6章	准静态气动弹性力学：机动飞行	(188)
6.1	二维翼段	(188)
6.2	柔性支持下的刚性后掠机翼	(193)
6.3	长直机翼	(196)
6.4	一般翼面形状的影响系数公式	(200)
6.5	一般布局形式的刚度矩阵方程	(208)
6.6	有支持飞行器的发散	(212)
6.7	静气动弹性模态方程	(212)
6.8	计入动态结构效应的运动方程	(213)
6.9	速度导数和气动弹性效应对阻力的影响	(218)
6.10	弹性机翼的上反效应	(219)
6.11	“刚体”风洞模型试验结果的修正	(222)
第7章	颤振：动气动弹性稳定性	(223)
7.1	准定常颤振分析	(223)
7.2	一阶非定常颤振分析	(226)
7.3	颤振分析的美国方法 (K法)	(229)
7.4	颤振分析的英国方法 (PK法)	(237)
7.5	广义气动弹性分析方法 (GAAM)	(240)
7.6	颤振相似律参数	(243)
7.7	操纵面颤振	(246)
7.8	壁板颤振	(248)
7.9	螺旋桨/发动机舱的螺旋颤振	(250)
7.10	T形尾翼颤振	(256)

第 8 章 瞬态响应：着陆和阵风载荷	(262)
8.1 任意时间相关外力的响应	(262)
8.2 响应计算的数值方法	(267)
8.3 机动翼剖面上的瞬时升力	(273)
8.4 二维翼型的离散阵风响应	(274)
8.5 计算瞬时应力的方法	(279)
8.6 离散的均匀阵风下飞行器的响应	(281)
第 9 章 随机响应：大气扰动和跑道粗糙度	(283)
9.1 随机载荷的统计学描述	(283)
9.2 由协方差函数表示的随机响应	(285)
9.3 由功率谱表示的随机响应	(289)
9.4 超过指定值的频率	(293)
9.5 简谐阵风函数	(294)
9.6 功率谱密度示例	(296)
9.7 随机大气阵风的设计载荷	(300)
9.8 随机阵风响应示例	(305)
第 10 章 气动伺服弹性：与控制系统相互作用	(311)
10.1 传递函数	(311)
10.2 运动方程的状态空间形式	(315)
10.3 广义振荡气动力近似函数	(322)
10.4 稳定性分析结果的介绍	(324)
10.5 主动控制设计	(325)
10.6 结构模态控制系统设计	(326)
10.7 阵风减缓系统设计	(328)
10.8 颤振抑制系统设计	(330)
第 11 章 热气动弹性：高速大气飞行	(333)
11.1 受热结构的大变形	(333)
11.2 气动加热	(335)
11.3 热气动弹性颤振算例	(336)
第 12 章 气动弹性设计：优化	(340)
12.1 气动弹性优化	(342)
12.2 数值优化基础	(343)
12.3 气动弹性响应	(347)
12.4 设计灵敏度	(347)
12.5 气动弹性设计灵敏度	(349)
12.6 优化器	(351)
12.7 气动弹性设计实例	(355)
附录 A 矩阵算法	(360)
A.1 定义	(360)

A. 2	加法和减法	(361)
A. 3	乘法	(361)
A. 4	逆运算	(361)
A. 5	微分运算	(362)
A. 6	积分运算	(362)
A. 7	矩阵分块	(363)
A. 8	特征值与特征向量	(363)
附录 B	拉普拉斯变换和傅里叶变换	(367)
B. 1	拉普拉斯变换	(367)
B. 2	拉普拉斯变换的一般性质	(367)
B. 3	简单函数的拉普拉斯变换	(369)
B. 4	采用拉普拉斯变换列表求解微分方程	(371)
B. 5	拉普拉斯反变换	(372)
B. 6	傅里叶变换	(373)
附录 C	概率与概率分布	(378)
C. 1	基本概念	(378)
C. 2	随机变量及其概率函数	(379)
C. 3	期望值与矩	(382)
C. 4	高斯分布	(382)
C. 5	瑞利分布	(384)
附录 D	偶极子格网法的发展	(386)
	摘要	(386)
D. 1	引言	(386)
D. 2	偶极子格网法	(386)
D. 3	方法的发展	(388)
D. 4	偶极子格网法的发表	(389)
D. 5	后续的发展	(391)
D. 6	近期发展	(391)
D. 7	评述总结	(392)
	献辞	(392)
	结语	(392)
附录 E	刚体飞行器飞行力学	(394)
	摘要	(394)
E. 1	引言	(394)
E. 2	符号	(395)
E. 3	矢量运动方程	(396)
E. 4	标量运动方程	(397)
	结论	(398)

附录 F 与联邦航空局往来的信件	(400)
附录 G 伽辽金——传记和他的方法	(421)
G.1 伽辽金传记	(421)
G.2 伽辽金法	(422)
附录 H 自传	(446)
参考文献	(454)

第 1 章 气动弹性力学引论

气动弹性力学是应用力学的分支，研究气动力、惯性力和结构力之间的耦合。它在应用力学各分支学科中的地位和发展状况不同于流体力学或固体力学，更为明确地关注问题的相互作用本质。在某些情况下，气动弹性力学涉及的范畴要比基本的流体和固体力学之间的相互作用更为宽广。例如，流体中的热传导或电磁效应会引起流场压力（压强）的显著变化；再如，温度效应或控制系统作用会产生明显的机械力作用效果。通常，我们使用气动弹性这个术语表达气动力、结构力与惯性力之间的相互作用；当气动弹性分析必须考虑飞行控制系统的影响时，我们把这种耦合分析称作气动伺服弹性；当温度和热应力的影响必须及时，我们把该问题称作热气动弹性。

Collar (1946) 使用了一组力三角形图示关系来说明气动弹性学科之间的耦合，如图 1-1 所示。其中，三角形的顶点代表气动力 (A)、结构弹性力 (E) 和惯性力 (I)。气动弹性的各类现象都与顶点的力有关。例如，副翼操纵反效 (R) 是包括气动力 (A) 和弹性力 (E) 的准静态问题；而颤振 (F) 除气动力和弹性力之外还涉及惯性力 (I) 的作用。

Garrick (1963) 引入了气动热 (H) 的影响，将原有的 Collar 三角形扩充为三维的气动弹性四面体，如图 1-2 所示。

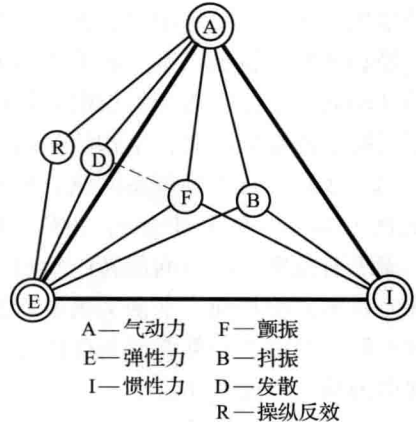
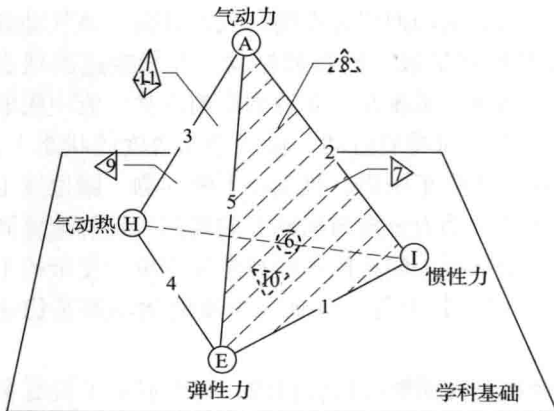


图 1-1 Collar 气动弹性三角形



- 1—振动
- 2—稳定性
- 3—气动热动力学
- 4—热弹性力学
- 5—气动弹性，静态的
- 6—分子热过程
- 7—气动弹性，动态的
- 8—稳定性与热
- 9—热气动弹性，静态的
- 10—振动与热
- 11—热气动弹性，动态的

图 1-2 Garrick 的热气动弹性四面体

1.1 气动弹性力学的范畴

根据是否考虑惯性力的假设,气动弹性可划分为多个方面的问题。气动弹性静力学(或准静态)问题,假设没有结构动力学参与,例如,结构所有结点相对参考点的运动均为同相位的,根据参考点的加速度所有的惯性力都是已知的。气动弹性动力学问题无论系统作任意运动(如瞬态)还是定常状态的简谐运动,都根据运动是否与时间相关归类。以下简要地列出各类静、动气动弹性问题。

1.1.1 气动弹性静力学

升力效率与载荷分布 结构变形引起的气动载荷重新分布可对气动弹性系统的升力效率带来可观的影响,使其不同于刚体升力面或升力体的情况。在分析时,同时考虑外部的气动载荷、内部的结构载荷和惯性载荷,以及所有的气流扰动,包括结构变形产生的扰动之间的平衡与兼容,可以确定气动弹性系统的平衡状态。若气动载荷趋向于使整体的流动扰动增加,则升力效率增加;若气动载荷使整体的流动扰动减小,则升力效率降低。

静稳定性:发散 有一种升力效率增加的极端情况,当速度达到某临界值时,变形引起的气动载荷变化率与变形引起的结构内应力变化率相等,此时静稳定平衡条件不存在;当速度高于此临界值时,结构将失效。该临界速度值称为发散速度。严格说来,发散仅对于受约束状态飞行器是静态问题。对于无约束飞行器,发散具有动态的特征,又称为动力学发散(Rodden 和 Bellinger, 1982; Edwards 和 Wieseman, 2008)。

操纵面效率 操纵面偏转产生的气动载荷也会引起整个系统的气动弹性载荷。与前述的升力效率分析相同,平衡为确定状态。此时的效率亦与刚体系统情况有所不同,可以增加或降低,取决于外部载荷与变形之间的关系。如果在某些速度情况下效率降低为零,该速度称为操纵面反效速度。

1.1.2 振荡气动弹性力学

动力学稳定性:颤振 如果气动弹性系统受到扰动而引起振荡的气动载荷,该气动载荷反过来进一步维持系统作周期运动,那么这样将形成一种自激振动。在颤振速度状态下,当运动与载荷之间达到某种相位关系时,将使得系统在一个运动周期内从气流中吸取的能量与内部阻尼耗散的能量相等,维持中立稳定的周期运动。在低于此速度的状态下,任何微小的扰动都会衰减。在高于此速度的某个速度范围内,扰动将不断加剧。颤振发生的一种最简单的情形是,某个自由度运动产生的气动力分量与运动方向相同,且与速度同相。该情形可描述为负气动阻尼,或单自由度的颤振。经典颤振往往意味着更为复杂的不稳定形式,通常由两个或多个模态运动耦合引起,其中每个单独自由度的运动都是稳定的。

图 1-3 复现了 Duncan (1949) 提出的经典升力面颤振耦合机理。图中展示了机翼截面在一个完整的运动周期中的位移变化情况,给出翼尖每间隔 $1/8$ 周期的位置视图以及整个周期中的升力和做功情况。图 1-3 (a) 说明系统低于颤振速度时,当弯曲与扭转位移同相位变化,遇到诸如阵风等扰动时系统仍保持稳定。图 1-3 (b) 说明扭转位移滞后于

弯曲位移 90° 相位差（扭转位移与弯曲速度同相位）时，系统发生颤振。该图示解释了颤振的物理机制，但相位关系显得过于简化。

Försching (1974, 图 1-6) 也采用图 1-3 的方式来原因机翼弯扭耦合颤振。此外，Försching 还采用其著作中的图 1-7（这里如图 1-4 所示）说明机翼弯曲和副翼偏转耦合颤振，这种颤振可能由副翼附着物或积冰产生的质量不平衡引起。同样，此处的相位关系也被过度简化。

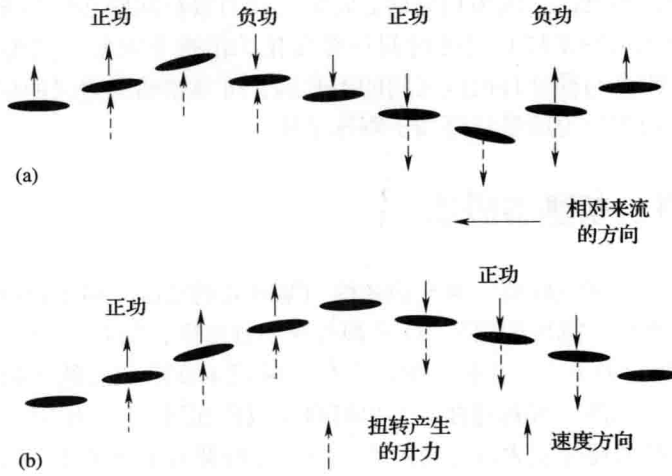


图 1-3 一个完整运动周期过程中的机翼位移变化

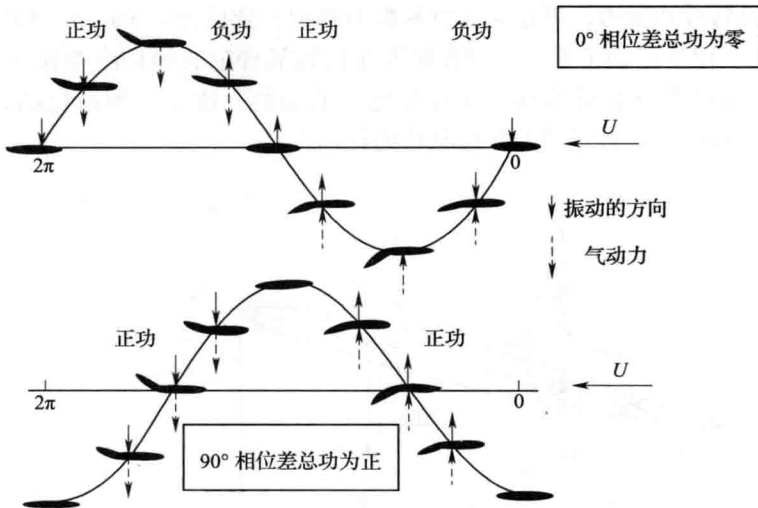


图 1-4 一个完整运动周期过程中的机翼弯曲与副翼偏转位移变化

随机响应 作用载荷的确定形式无法确切地知晓，只能以概率的方式描述。例如，抖振、大气湍流或某些地面载荷。为获得这类响应统计意义上的解，需要引入广义谐波分析方法，假设载荷随时间变化为谐波关系，且要求系统对作用载荷的全部频率响应均已知。以随机大气扰动产生的应力分析为例，为获得应力的频率响应，首先需要找到系统穿过理论谐波阵风场时产生的应力与频率（或波长）之间的函数关系。