

非线性  
动力学丛书

5

# 气动弹性力学与控制

赵永辉 编著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

非线性动力学丛书 5

# 气动弹性力学与控制

赵永辉 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书详细介绍了气动弹性力学中的若干重要问题,内容涵盖了亚音速定常与非定常空气动力计算、静气动弹性分析、动气动弹性稳定性分析、非线性气动弹性响应分析、突风响应分析、Nastran 在气动弹性力学中的应用和气动弹性主动控制等,较为全面地反映了气动弹性力学学科的概貌,同时也包括了目前气动弹性力学研究的若干最新成果.本书理论与实际应用相结合,并配有较多的数值算例.

本书适合力学、航空航天、土木工程等专业的高年级大学生、研究生、教师、研究人员和相关领域的工程技术人员使用.

### 图书在版编目(CIP)数据

气动弹性力学与控制/赵永辉编著. —北京:科学出版社,2007

(非线性动力学丛书;5)

ISBN 978-7-03-019333-9

I. 气… II. 赵… III. 气动弹性动力学 IV. O343

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第101364号

责任编辑:吕虹 赵彦超/责任校对:陈玉凤

责任印制:赵德静/封面设计:王浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年8月第一次印刷 印张:24

印数:1—2 500 字数:450 000

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

## 《非线性动力学丛书》序

真实的动力系统几乎都含有各种各样的非线性因素, 诸如机械系统中的间隙、干摩擦, 结构系统中的材料弹塑性、构件大变形, 控制系统中的元器件饱和特性、变结构控制策略等等. 实践中, 人们经常试图用线性模型来替代实际的非线性系统, 以求方便地获得其动力学行为的某种逼近. 然而, 被忽略的非线性因素常常会在分析和计算中引起无法接受的误差, 使得线性逼近成为一场徒劳. 特别对于系统的长时间历程动力学问题, 有时即使略去很微弱的非线性因素, 也会在分析和计算中出现本质性的错误.

因此, 人们很早就开始关注非线性系统的动力学问题. 早期研究可追溯到 1673 年 Huygens 对单摆大幅摆动非等时性的观察. 从 19 世纪末起, Poincaré、Lyapunov、Birkhoff、Andronov、Arnold 和 Smale 等数学家和力学家相继对非线性动力系统的理论进行了奠基性研究, Duffing、van der Pol、Lorenz、Ueda 等物理学家和工程师则在实验和数值模拟中获得了许多启示性发现. 他们的杰出贡献相辅相成, 形成了分岔、混沌、分形的理论框架, 使非线性动力学在 20 世纪 70 年代成为一门重要的前沿学科, 并促进了非线性科学的形成和发展.

近 20 年来, 非线性动力学在理论和应用两个方面均取得了很大进展. 这促使越来越多的学者基于非线性动力学观点来思考问题, 采用非线性动力学理论和方法, 对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性系统建立数学模型, 预测其长期的动力学行为, 揭示内在的规律性, 提出改善系统品质的控制策略. 一系列成功的实践使人们认识到: 许多过去无法解决的难题源于系统的非线性, 而解决难题的关键在于对问题所呈现的分岔、混沌、分形、孤立子等复杂非线性动力学现象具有正确的认识和理解.

近年来, 非线性动力学理论和方法正从低维向高维乃至无穷维发展. 伴随着计算机代数、数值模拟和图形技术的进步, 非线性动力学所处理的问题规模和难度不断提高. 已逐步接近一些实际系统. 在工程科学界, 以往研究人员对于非线性问题绕道而行的现象正在发生变化. 人们不仅力求深入分析非线性对系统动力学的影响, 使系统和产品的动态设计、加工、运行与控制满足日益提高的运行速度和精度需求; 而且开始探索利用分岔、混沌等非线性现象造福人类.

在这样的背景下,有必要组织在工程科学、生命科学、社会科学等领域中从事非线性动力学研究的学者撰写一套非线性动力学丛书,着重介绍近几年来非线性动力学理论和方法在上述领域的一些研究进展,特别是我国学者的研究成果,为从事非线性动力学理论及应用研究的人员,包括硕士研究生和博士研究生等,提供最新的理论、方法及应用范例.在科学出版社的大力支持下,组织了这套《非线性动力学丛书》.

本套丛书在选题和内容上有别于郝柏林先生主编的《非线性科学丛书》(上海教育出版社出版),它更加侧重于对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性动力学问题进行建模、理论分析、计算和实验.与国外的同类丛书相比,它更具有整体的出版思想,每分册阐述一个主题,互不重复等特点.丛书的选题主要来自我国学者在国家自然科学基金等资助下取得的研究成果,有些研究成果已被国内外学者广泛引用或应用于工程和社会实践,还有一些选题取自作者多年的教学成果.

希望作者、读者、丛书编委会和科学出版社共同努力,使这套丛书取得成功.

胡海岩

2001年8月

## 前 言

概括地说,气动弹性力学研究的是结构与作用其上的空气动力之间相互耦合而产生的各种动力学问题. 气动弹性力学的主要支撑学科是振动力学和空气动力学. 气动弹性力学在航空航天和土木工程等领域有着很深的工程应用背景,特别是在航空领域,气动弹性是飞机设计过程中必须考虑的重要因素.

气动弹性力学可分为两大分支,即飞行器气动弹性力学和建筑结构气动弹性力学. 前者主要研究诸如飞机、导弹等飞行器的气动弹性问题;后者主要研究诸如高层建筑、桥梁等建筑物的气动弹性问题. 本书只讨论前者.

飞行器气动弹性力学是一门较为古老的学科,其中关于颤振问题的研究已经有七八十年的历史了,但现代飞机并没有完全摆脱颤振问题的困扰. 比如,1991年,台湾一架IDF飞机发生全机颤振而坠入海中;1997年,美国一架F-117隐形飞机发生操纵面颤振而坠毁. 这些事故使我们认识到,贯穿于飞行器设计过程中的气动弹性设计理念还需要进一步强化. 近年来,国际上出现的主动气动弹性机翼以及自适应机翼等新技术给经典的气动弹性力学赋予了新的内涵. 可以预计,气动弹性力学在未来飞行器设计中将起到越来越大的作用.

在本书写作过程中,作者参阅了国内外多部气动弹性力学教科书、专著以及大量文献,并结合了自己在该领域的科研体会. 在内容安排上,本书既保留了气动弹性力学的若干经典内容,同时又注意反映本学科的最新进展. 内容包括亚音速定常和非定常空气动力计算、静气动弹性、动气动弹性、非线性气动弹性、气动弹性动态响应、Nastran在气动弹性力学中的应用和气动弹性主动控制等问题,较为全面地反映了气动弹性力学学科的概貌.

感谢南京航空航天大学胡海岩教授,他在百忙之中认真审阅了书稿并提出了许多具有建设性的意见和建议;感谢南京航空航天大学陆志良教授,他仔细审阅了全书,提出了许多宝贵意见并提供了跨音速颤振计算方面的资料;感谢科学出版社责任编辑对本书出版所给予的支持.

气动弹性力学涉及的物理概念和物理符号众多,将本书这些内容组织在一起,并做到各物理符号的统一不是一件容易的事. 加之作者水平有限,本书难免存在不当或错误之处,恳请读者批评指正.

作 者

2006年10月

于南京航空航天大学

# 目 录

|  |    |
|--|----|
| 绪论   | 1  |
| §0.1 气动弹性问题的分类及其特点                             | 1  |
| §0.2 气动弹性问题研究简史                                | 5  |
| §0.3 非线性气动弹性问题                                 | 7  |
| 0.3.1 结构非线性系统的气动弹性                             | 7  |
| 0.3.2 大展弦比机翼的非线性气动弹性                           | 9  |
| §0.4 主动气动弹性控制                                  | 11 |
| 0.4.1 颤振主动抑制                                   | 11 |
| 0.4.2 美国的主动气动弹性机翼计划 (AAW)                      | 15 |
| 第 1 章 计算升力面亚音速定常空气动力的涡格法                       | 17 |
| §1.1 气动模型与机翼的网格划分                              | 17 |
| §1.2 Biot-Savart 定律                            | 21 |
| §1.3 马蹄涡诱导速度的计算                                | 25 |
| §1.4 机翼环量分布的线性代数方程组的建立                         | 29 |
| §1.5 机翼的有关升力的气动系数                              | 32 |
| §1.6 涡格法的数值算例                                  | 34 |
| 第 2 章 亚音速非定常空气动力计算的偶极子网格法                      | 37 |
| §2.1 升力面理论的奇异积分方程及核函数的表达式                      | 37 |
| §2.2 核函数 $K$ 的计算                               | 41 |
| 2.2.1 平面核函数 $K_1$ 的进一步表达                       | 42 |
| 2.2.2 空间核函数 $K_2$ 的进一步表达                       | 43 |
| 2.2.3 平面核函数 $K_1$ 中积分 $I_1$ 的计算                | 44 |
| 2.2.4 空间核函数 $K_2$ 中积分 $I_2$ 的计算                | 46 |
| §2.3 空气动力影响系数                                  | 47 |
| §2.4 空气动力影响系数的定常和非定常部分                         | 48 |
| §2.5 空气动力影响系数非定常部分 $D_{1ij}$ 和 $D_{2ij}$ 的计算   | 50 |
| 2.5.1 核函数中一部分的二次表达式                            | 50 |
| 2.5.2 积分 $J_{1ij}$ 和 $J_{2ij}$ 的解析表达式          | 51 |
| 2.5.3 空气动力影响系数非定常部分 $D_{1ij}$ 和 $D_{2ij}$ 的表达式 | 53 |

|              |                        |            |
|--------------|------------------------|------------|
| §2.6         | 计算过程中对奇异性的处理           | 53         |
| §2.7         | 对称性处理与谐振边界条件           | 56         |
| §2.8         | 偶极子网格法的数值算例            | 58         |
| §2.9         | 偶极子网格法的进一步改进措施         | 59         |
| <b>第 3 章</b> | <b>静气动弹性问题</b>         | <b>64</b>  |
| §3.1         | 二元机翼的静气动弹性分析           | 64         |
| 3.1.1        | 二元机翼的扭转发散              | 64         |
| 3.1.2        | 二元机翼的操纵效率与操纵反效         | 67         |
| 3.1.3        | 多操纵面二元机翼的静气动弹性分析       | 71         |
| §3.2         | 机翼柔度影响系数的计算            | 75         |
| §3.3         | 大展弦比直机翼扭转发散的计算         | 80         |
| 3.3.1        | 直接求解微分方程法              | 80         |
| 3.3.2        | 矩阵法                    | 82         |
| §3.4         | 大展弦比后掠机翼的弯曲——扭转发散      | 87         |
| 3.4.1        | 后掠翼的弹性特征               | 87         |
| 3.4.2        | 大展弦比后掠机翼弯曲——扭转发散计算的矩阵法 | 89         |
| §3.5         | 大展弦比机翼的载荷重新分布          | 91         |
| 3.5.1        | 大展弦比直机翼载荷重新分布计算的解析法    | 91         |
| 3.5.2        | 大展弦比机翼载荷重新分布计算的矩阵法     | 93         |
| §3.6         | 大展弦比机翼的操纵效率与操纵反效       | 94         |
| 3.6.1        | 大展弦比直机翼副翼操纵效率计算的解析法    | 94         |
| 3.6.2        | 大展弦比机翼副翼反效计算的矩阵法       | 98         |
| 3.6.3        | 大展弦比机翼副翼效率计算的矩阵法       | 103        |
| §3.7         | 多操纵面直机翼的静气动弹性分析        | 104        |
| 3.7.1        | 基本方程                   | 104        |
| 3.7.2        | 数值结果                   | 107        |
| <b>第 4 章</b> | <b>动气动弹性稳定性问题</b>      | <b>109</b> |
| §4.1         | 颤振概述                   | 109        |
| §4.2         | Theodorsen 非定常气动力      | 111        |
| 4.2.1        | 作用在两自由度二元机翼上的非定常气动力    | 111        |
| 4.2.2        | 作用在三自由度二元机翼上的非定常气动力    | 114        |
| §4.3         | 两自由度二元机翼颤振的计算          | 116        |
| 4.3.1        | 两自由度二元机翼的运动方程          | 116        |
| 4.3.2        | 用 $V-g$ 法作颤振分析         | 119        |
| 4.3.3        | 用 $p-k$ 法作颤振分析         | 121        |



|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 4.3.4 一些参数对颤振速度的影响       | 124        |
| §4.4 三自由度二元机翼的颤振计算       | 126        |
| 4.4.1 三自由度二元机翼的运动方程      | 126        |
| 4.4.2 颤振计算               | 129        |
| §4.5 大展弦比等剖面均匀直机翼的颤振计算   | 130        |
| §4.6 一般大展弦比直机翼的颤振计算      | 136        |
| §4.7 带有操纵面的大展弦比直机翼的颤振计算  | 139        |
| §4.8 大展弦比后掠机翼颤振分析的特点     | 144        |
| §4.9 跨音速颤振计算             | 147        |
| §4.10 超音速颤振计算中使用的活塞理论    | 160        |
| <b>第 5 章 非线性气动弹性响应问题</b> | <b>165</b> |
| §5.1 非线性气动弹性概述           | 165        |
| §5.2 两自由度二元机翼任意运动气动力     | 167        |
| §5.3 三自由度二元机翼任意运动气动力     | 176        |
| §5.4 非定常涡格气动力模型          | 182        |
| §5.5 ONERA 失速气动力模型       | 194        |
| 5.5.1 ONERA 气动力模型        | 194        |
| 5.5.2 ONERA 气动力的谐波分解     | 197        |
| §5.6 非线性气动弹性分析的描述函数法     | 203        |
| 5.6.1 描述函数分析法            | 203        |
| 5.6.2 双输入描述函数            | 208        |
| §5.7 超音速悬臂板的非线性气动弹性响应    | 211        |
| <b>第 6 章 气动弹性动力响应</b>    | <b>218</b> |
| §6.1 离散突风与连续大气紊流         | 218        |
| 6.1.1 离散突风               | 218        |
| 6.1.2 连续大气紊流             | 219        |
| §6.2 刚性机翼在离散锐边突风作用下的响应   | 220        |
| 6.2.1 系统的运动方程            | 220        |
| 6.2.2 突风响应的 Laplace 变换解法 | 222        |
| §6.3 弹性机翼在离散锐边突风作用下的响应   | 224        |
| 6.3.1 系统的运动方程            | 224        |
| 6.3.2 突风响应和翼根弯矩的计算       | 225        |
| §6.4 典型机翼剖面在连续大气紊流作用下的响应 | 229        |
| §6.5 弹性机翼在连续大气紊流作用下的响应   | 231        |

|  |     |
|--|-----|
| <b>第 7 章 MSC.Nastran 在气动弹性分析中的应用</b> ..... | 234 |
| §7.1 Nastran 中的气动弹性模块 .....                | 234 |
| §7.2 Nastran 中空气动力的建模方法 .....              | 235 |
| 7.2.1 空气动力模型及空气动力网格点 .....                 | 235 |
| 7.2.2 基本空气动力矩阵 .....                       | 236 |
| 7.2.3 空气动力单元的生成 .....                      | 237 |
| §7.3 结构与空气动力之间的相互连接 .....                  | 246 |
| 7.3.1 概述 .....                             | 246 |
| 7.3.2 无限板样条 (IPS) 方法 .....                 | 247 |
| 7.3.3 薄板样条 (TPS) 方法 .....                  | 251 |
| 7.3.4 线性样条 (梁样条) 方法 .....                  | 252 |
| 7.3.5 执行样条插值操作的 Nastran 输入卡 .....          | 256 |
| §7.4 Nastran 在静气动弹性分析中的应用 .....            | 259 |
| 7.4.1 静气动弹性分析的基本方程 .....                   | 259 |
| 7.4.2 稳定性导数 .....                          | 263 |
| 7.4.3 静气动弹性分析的输入卡 .....                    | 266 |
| 7.4.4 静气动弹性问题举例 .....                      | 270 |
| §7.5 Nastran 在颤振计算中的应用 .....               | 278 |
| 7.5.1 气动弹性系统颤振分析的基本方程 .....                | 278 |
| 7.5.2 颤振计算的 $k$ 方法 .....                   | 279 |
| 7.5.3 颤振计算的 $p-k$ 方法 .....                 | 280 |
| 7.5.4 颤振计算的 Nastran 输入卡 .....              | 282 |
| 7.5.5 颤振计算问题举例 .....                       | 285 |
| §7.6 Nastran 在气动弹性优化中的应用 .....             | 289 |
| 7.6.1 优化问题概述 .....                         | 289 |
| 7.6.2 设计变量的定义及其连接 .....                    | 290 |
| 7.6.3 响应的定义 .....                          | 294 |
| 7.6.4 目标函数与约束的定义 .....                     | 296 |
| 7.6.5 气动弹性优化问题举例 .....                     | 299 |
| §7.7 Nastran 在气动弹性动力响应计算中的应用 .....         | 303 |
| 7.7.1 突风响应计算的 Nastran 输入卡 .....            | 303 |
| 7.7.2 连续大气紊流下机翼的响应计算 .....                 | 305 |
| <b>第 8 章 气动弹性主动控制</b> .....                | 308 |
| §8.1 气动弹性控制的目的及构成单元 .....                  | 308 |
| §8.2 时域状态空间中的气动弹性方程 .....                  | 310 |

---

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 8.2.1 非定常空气动力的有理函数近似 .....       | 310 |
| 8.2.2 气动弹性系统的状态空间表达式 .....       | 314 |
| §8.3 气动弹性控制问题的数学模型 .....         | 319 |
| §8.4 亚音速不可压缩流下二元机翼颤振的次最优抑制 ..... | 322 |
| 8.4.1 气动弹性模型 .....               | 322 |
| 8.4.2 状态方程 .....                 | 323 |
| 8.4.3 次最优控制律设计 .....             | 326 |
| 8.4.4 数值仿真 .....                 | 328 |
| §8.5 亚音速不可压缩流下二元机翼颤振的鲁棒抑制 .....  | 331 |
| 8.5.1 受控系统的不确定性建模 .....          | 331 |
| 8.5.2 结构奇异值 .....                | 332 |
| 8.5.3 二元机翼颤振 $\mu$ 控制 .....      | 335 |
| §8.6 考虑流速不确定时机翼颤振的鲁棒抑制 .....     | 338 |
| 参考文献 .....                       | 343 |
| 附录 气动弹性分析的 Nastran 输入文件 .....    | 351 |

# 绪 论

气动弹性问题一直是飞行器设计中备受关注的重要问题,在未来飞行器设计中仍占有重要地位.现代飞行器设计日益追求高速度、高机动性,使得飞行器越来越呈现出轻结构和大柔性特点,相应的气动弹性问题也越来越突出,特别是结构的非线性、非定常空气动力的非线性给飞行器设计的气动弹性问题带来了巨大挑战.近些年来,非线性气动弹性力学的发展,主动气动弹性机翼以及基于功能材料的自适应机翼等新技术的出现,标志着经典的气动弹性力学正沿着非线性和多学科交叉的方向发展.

## §0.1 气动弹性问题的分类及其特点

飞机结构是弹性体,在空气动力的作用下会产生弹性变形,而结构的变形会产生附加的气动力,附加的气动力反过来又会使弹性体产生附加的变形,进而产生新的气动力,这种相互耦合作用会使弹性体逐渐达到平衡状态,或者发散从而破坏结构.气动弹性力学概念是20世纪30年代首先由航空工程师提出的,它概括地表达了实践中遇到的各种工程科学问题.概括地说,气动弹性力学研究的是结构与作用其上的空气动力之间相互耦合而产生的各种动力学问题.许多气动弹性问题包括空气动力、弹性力和惯性力,这类问题称为动气动弹性问题;另一些气动弹性问题只涉及空气动力和弹性力,称为静气动弹性问题.如果结构是完全刚性的,那么气动弹性问题也就不存在了.气动弹性力学有两大分支,即飞行器气动弹性力学和建筑结构气动弹性力学.前者主要研究诸如飞机、导弹等飞行器的气动弹性问题,通过对气动弹性现象及其机理的研究,为飞行器设计提供理论指导,或直接用于飞行器设计;后者主要研究诸如高层建筑、桥梁等建筑物的气动弹性问题.本书主要讨论飞行器的气动弹性问题.

为了解气动弹性力学的研究内容及其与其他学科之间的相互关系,Collar曾经用一个力三角形对气动弹性问题作了分类<sup>[1]</sup>,如图0.1.1所示.图中三种类型的力,即空气动力、弹性力和惯性力分别用符号 $A$ ,  $E$ 和 $I$ 表示.这三种力分别位于力三角形的三个顶点上,是气动弹性力学主要涉及到的力的类型.每一种气动弹性现象均可在图中得到直观的体现.动气动弹性现象(如颤振)涉及到空气动力、弹性力和惯性力的相互耦合,因此均位于力三角形的内部,并与力三角形的三个顶点相连接.静气动弹性现象(如发散)涉及空气动力和弹性力,因此位于三角形的外部.下面给出各种气动弹性现象的定义.

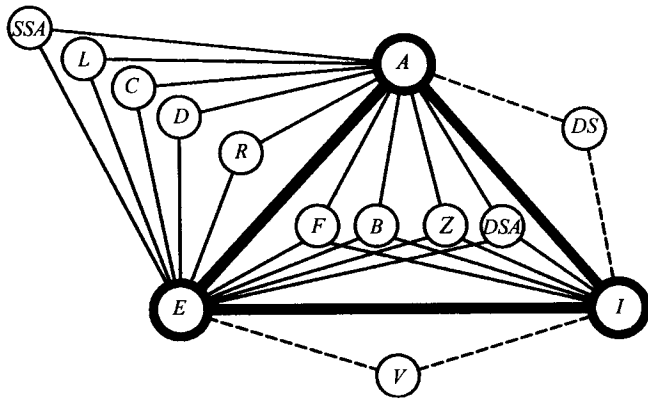


图 0.1.1 描述气动弹性的力三角形

- |        |         |         |          |
|--------|---------|---------|----------|
| A: 气动力 | F: 颤振   | L: 载荷分布 | R: 操纵反效  |
| E: 弹性力 | B: 抖振   | D: 发散   | V: 机械振动  |
| I: 惯性力 | Z: 动力响应 | C: 操纵效率 | DS: 动稳定性 |
- DSA: 气动弹性对动稳定性的影响      SSA: 气动弹性对静稳定性的影响

### 1. 载荷分布, L

载荷分布是指飞行器结构的弹性变形对作用在飞行器上的空气动力压力分布的影响. 在高速飞行时, 飞行器结构的变形所导致的气动载荷分布与结构完全刚性情况有显著的差别. 因此, 载荷分布问题需要计算由于升力面的弹性而引起的升力分布的变化.

### 2. 发散, D

发散是指机翼、尾翼以及机体的其他部件在气流中失去静稳定性的一种现象. 出现发散时, 气动力引起的扭转角增大, 而扭转角的增大又引起气动力的增加. 发散时对应的飞行速度称为发散速度. 在发散问题中, 升力面的弹性在不稳定性中起重要作用. 前掠翼的弯曲引起的扭转使机翼的攻角增大, 所以发散速度较低, 这是长期以来影响前掠翼飞机发展的一个主要原因, 后掠翼正好相反. 因此, 发散主要发生在平直和前掠翼的升力面上.

### 3. 操纵效率, C

操纵效率是指飞行器结构的弹性变形对舵面效率的影响, 也就是对飞行器可控性的影响. 舵面效率是机翼结构设计和气动设计的一个重要准则. 在飞行器静气动弹性优化问题中, 舵面效率也是一个重要的约束条件.

### 4. 操纵反效, R

操纵反效是指飞机的操纵机构失去原来的气动效率并且其作用发生反向的一

种现象。反效主要是由于结构的弹性变形引起的。例如，当飞行速度达到某一数值时，舵面效率为零，此时的飞行速度称为反效速度；继续增大飞行速度，则舵面作用与原来预期的作用相反。直机翼可通过增加机翼扭转刚度防止反效。后掠翼的副翼反效是非常严重的问题，可增加机翼弯曲刚度来提高反效速度，然而，增加弯曲和扭转刚度的措施会受到飞机重量的限制，所以有时需要采取其他措施来提高反效速度。

#### 5. 气动弹性对静稳定性的影响, $SSA$

气动弹性对静稳定性的影响是指飞行器结构的弹性变形对飞行器静稳定性的影响。

#### 6. 颤振, $F$

颤振属于动气动弹性问题，是一种动不稳定现象。地面上的飞行器受到扰动后会引起振动，但由于结构阻尼的作用，这种振动会逐渐衰减掉。飞行中的飞行器受到扰动后也会引起振动，当飞行速度较小时，振动仍然是衰减的。当速度增大到某一值时，扰动引起的振动的振幅刚好维持不变，这一速度便是颤振临界速度，简称颤振速度。颤振是颤振本身运动所引起的气动力的激振下发生的，是一种自激振动<sup>[2]</sup>。飞机发生颤振是很危险的，当飞行速度超过颤振临界速度时，振幅和结构中的动应力可能急剧增加，可能导致飞行器在几秒钟内被迅速破坏。在型号设计部门，颤振一直是重点关注的动气动弹性问题。我国国家军用标准和民用航空适航条例中，分别对军用飞机和民用飞机提出了严格的气动弹性要求，即飞机在飞行包线内不允许出现任何颤振现象。从结构方面来分，飞行器颤振可分为两类：非舵面颤振和舵面颤振。当忽略操纵机构相对于固定升力面的位移时，颤振属于非舵面颤振。对于舵面颤振，舵面偏转起主要作用。颤振的性态往往复杂多样，在大多数情况下，颤振的名称说明了它有什么样的变形。如机翼的弯-扭颤振表示机翼发生弯曲和扭转变形；机翼弯曲-副翼偏转颤振表示机翼发生弯曲变形和副翼偏转；按照气动弹性系统是线性系统还是非线性系统，颤振可分为线性颤振和非线性颤振。线性颤振在低于颤振临界速度时表现为阻尼衰减运动，高于颤振临界速度时表现为发散运动。非线性颤振在低于和高于颤振临界速度时均有可能表现为极限环振动；按照空气动力来分，颤振可分为亚音速颤振、跨音速颤振和超音速颤振。

#### 7. 抖振, $B$

抖振是指当翼面由于某种非定常脉动扰流的激励而产生的随机振动响应。抖振和颤振不同，根据抖振在飞机不同部件上的发生情况来分类，抖振可以分为两类：一类是机翼抖振，另一类是垂尾抖振。机翼抖振是翼面上气流分离诱导出的作用于翼面上的随机气动激励力产生的飞机动态响应，抖振激励力主要来自于引起机翼变形的分离流；垂尾抖振大都发生在战斗机做超机动飞行时的大攻角状态下，垂尾

浸泡在高度紊乱、旋转的非定常尾涡流中. 如果尾涡流脱泻频带覆盖了垂尾的某一阶或某几阶固有频率时, 就会产生严重的垂尾抖振现象. 对双垂尾布局, 垂尾的抖振现象更普遍、更严重. 抖振会导致多种不利的结果: 限制飞机机动飞行包线, 产生疲劳断裂以及裂缝; 影响飞机的操纵性与稳定性, 降低商用飞机乘坐品质和安全性; 影响机载电子设备的正常工作及武器系统的正常使用, 给飞行员造成很大的心理压力, 严重的还会引起飞机失事. 在 20 世纪 30 年代初, 一架容克 F13 飞机在英国 Moepthan 失事的原因就是由于飞机抖振引起的. 抖振发生时气流呈现严重非线性, 气动力计算及理论分析均存在较大难度.

### 8. 动力响应, Z

动力响应是指结构受到与系统无关的、随时间变化的外界干扰力作用而发生的强迫振动. 这些激励可以是突风, 其中包括离散突风和随机大气紊流等.

### 9. 气动弹性对动稳定性的影响, DSA

气动弹性对动稳定性的影响是指飞行器结构的弹性变形对飞行器动稳定性的影响.

气动弹性力学与控制系统相结合产生了气动弹性领域的另一分支——气动伺服弹性 (ASE) 力学. 如图 0.1.2 所示. 气动伺服弹性力学主要是研究飞行器在弹性力、惯性力、空气动力和控制力的作用下所引发的各种力学现象的一门综合性学科. 也可概括地说, 气动伺服弹性力学是结构动力学、非定常空气动力学和自动控制系统动力学三者的交叉科学. 气动伺服弹性力学现象十分广泛, 基本上可归结为两类问题, 即稳定性问题 (如颤振) 和响应问题 (如突风响应). 它们影响飞行器的稳定性、疲劳寿命和乘坐品质, 限制了飞行包络, 甚至会导致灾难性的事故. 随着飞行速度的提高和智能材料的开发, 气动伺服弹性力学势必面临更严峻的挑战. 近些年来出现的各种气动弹性新技术均与气动伺服弹性力学有着密切的联系. 目前, 气动伺服弹性力学已经成为飞行器气动弹性领域中的热门研究课题之一, 它在未来飞行器设计中将占有举足轻重的地位.

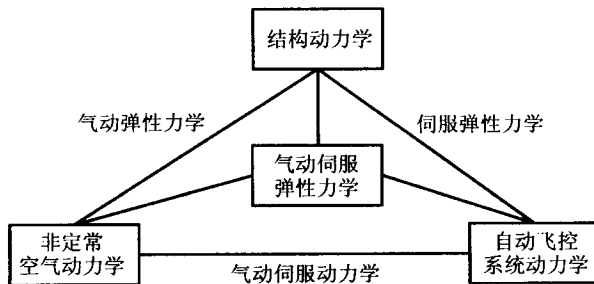


图 0.1.2 气动弹性的力三角形

气动弹性力学具有几个明显的特点：一是气动弹性力学本质上是流 - 固耦合问题；二是涉及到的非线性因素多。其中包括来自结构方面的非线性，如控制面铰链处的间隙非线性或迟滞非线性，机翼弯曲变形引起的立方非线性等，当机翼在跨音速或亚音速大攻角范围内工作时还涉及到空气动力的非线性，这些非线性因素都给气动弹性分析与控制带来了巨大的挑战；三是不确定参数和时变参数多。气动弹性力学模型涉及到的不确定参数包括来自结构方面的参数（如结构阻尼比和液力作动器参数），以及来自空气动力方面的参数（如气动力系数），由于油箱中燃油的不断消耗以及不同的外挂配置，将导致机翼质量的时变性；四是工作环境相对恶劣。恶劣的工作环境不仅导致系统参数时变，而且还会导致部件的疲劳和破坏；五是气动弹性控制装置的质量要求和安装条件都十分苛刻。

综上所述，气动弹性力学是多学科交叉的、带有非线性、不确定性和时变参数的具有较高难度和复杂程度一门科学。

## §0.2 气动弹性问题研究简史

从固定翼飞机问世的第一天起，飞行器就遭遇了气动弹性问题。人类也为自己的航空梦想付出了巨大的代价。1903年，在Wright兄弟的双翼机首次获得成功动力飞行的前9天，Langley教授进行了首次单翼机的动力飞行试验，不幸的是由于机翼扭转刚度不足而发生了静气动弹性发散，机翼断裂并坠落在Potomac河中<sup>[3]</sup>，从而使Langley教授错过了飞机发明者的头衔。

随着飞行速度的提高，各种气动弹性问题相继出现。早期在军用飞机中广泛遇到的气动弹性问题是尾翼颤振问题。颤振的后果往往是灾难性的，颤振一旦发生，在几秒钟内就有可能发生机毁人亡事故。即使所谓的“良性”颤振，也会对引起飞机结构的疲劳破坏。早在第一次世界大战初期，Handley Page双引擎轰炸机的平尾曾发生剧烈的颤振而坠毁，这是最早有文档记载的飞机颤振例子。这一事故使Lanchester以及Bairstow和Fage成为第一批飞机颤振问题的研究者。到20年代末，Küssner、Duncan和Frazer共同发展了机翼颤振理论的主要内容。30年代研制的飞机，飞行速度都不高，用的都是大展弦比平直翼面。于是，首先建立起来的是基于线性化理论的二维不可压缩流的非定常空气动力学。1934年，Theodorsen成功地建立了具有舵面的折线翼型在谐和振动下非定常气动力问题的精确解，成为气动弹性力学发展史上的一个里程碑。尽管如此，20世纪40年代前，气动弹性问题在航空领域尚未受到广泛重视。1940年发生了一件划时代的重要事件，这一事件使气动弹性问题的重要性首次在航空界以外的领域中表现出来。这就是刚刚建成通车4个月的美国Tacoma大桥在仅有18m/s的风速下发生颤振而坍塌。此后人们才开始认识到这是与机翼颤振类似的桥梁颤振，同时也认识到了流 - 固耦合问题的重要性。



20 世纪 50 年代初期,随着飞行速度进入超音速范围,新的气动弹性问题不断出现.美国 NASA 振动与颤振委员会确认,在 1951 到 1956 年期间,军用飞机出现了三次颤振事故,达到了过去相同时间间隔内的最高次数<sup>[3]</sup>.小展弦比后掠机翼和三角机翼成为气动弹性问题的主要研究对象.颤振计算需要合适的空气动力模型,而经典的 Theodorsen 气动力无法应用于小展弦比机翼和三角机翼.因此,航空界对空气动力计算的需求日益迫切.由于计算机的出现,诞生了许多气动力计算方法,一些亚音速和超音速非定常气动力计算方法应运而生.20 世纪 50 年代后,随着飞机设计的需要,基于线性化理论的三维亚音速非定常气动力计算被提上了日程.然而,三维非定常空气动力的计算要比二维情况复杂得多.50 年代中期, Watkins<sup>[4]</sup>提出了计算亚音速三维谐振荡非定常空气动力的核函数法,使得三维亚音速非定常空气动力计算进入了工程应用阶段. Albano 等人在 60 年代末又提出了计算三维亚音速谐振荡非定常空气动力的偶极子网格法<sup>[5]</sup>,随后, Rodden 对偶极子网格法进行了改进<sup>[6,7]</sup>.特别是偶极子网格气动力模型可处理任意外形的多翼多体组合,是亚音速可压缩气动弹性分析的首选气动力模型.大型通用软件包 MSC.Nastran 中的气动弹性分析模块就包含了偶极子网格气动力模型.进入 70 年代后,计算机技术进一步发展,使得跨音速非定常气动力计算方法得到快速发展.管德<sup>[8]</sup>于 1991 年出版了一本专著,专门讨论了非定常空气动力的计算问题.

当飞行器跨音速飞行时,由于紊流附面层、跨音速流动分离、激波的不稳定波动以及激波-附面层干扰等现象的出现,空气动力出现强烈的非线性,使得很多飞行器的颤振边界在跨音速区出现特有的“凹坑”现象,因此,跨音速区是飞行器颤振问题最为严重的区域.早在 20 世纪 50 年代,跨音速飞机已经成为现实.但由于计算能力的限制,长期以来,飞机设计师们不得不采用线性化理论从亚、超音速两边向跨音速范围“逼近”,再加上大量的跨音速风洞试验验证的方法来计算跨音速非定常气动力.而跨音速颤振特性计算则采用凹坑余量扣除的经验方法进行简化处理.直到 70 年代,随着计算机科学和计算流体力学的发展,跨音速非定常气动力计算方法有如雨后春笋般迅速发展,相继建立和发展了小扰动方程、全位势方程、Euler/N-S 方程的计算方法和软件.小扰动方程限制较多,全位势方程对相对简单外形的非强激波情况更有效. Euler/N-S 方程尽管计算量大,但适用范围广、计算结果准确可靠.但基于 Euler/N-S 方程的非定常气动力计算很费机时并且存在动态网格等问题,特别是复杂组合体的非定常气动力计算还不够成熟和完善,目前仍处于不断发展和完善之中.90 年代初,国外开始研究基于 Euler/N-S 方程的时域颤振计算,但对复杂组合体来说,跨音速颤振计算难度高、计算复杂,至今仍未完全成熟.国内在跨音速颤振,特别是复杂组合体的跨音速颤振方面做了许多有价值的研究工作,取得了一些进展<sup>[9,10]</sup>.

尽管人们对气动弹性力学已经有了较为深入的认识,但现代飞机并没有完全摆