

作者谨以此书献给北京航空航天大学
建校五十五周年

飞行器的颤振

FLUTTER OF THE FLYER

尹传家 编著

原子能出版社

内 容 提 要

本书论述了飞机和导弹发展过程中产生的颤振现象,从它的机理、成因、表达方式、解算过程等,均作了扼要的阐述。分析中用到的非定常气动力理论,从亚音速到超音速以至高超音速、从二元到三元作了有选择性的介绍,并提出了一些可行的计算方法。

本书还涉及了航天飞机的相关问题以及颤振的主动控制和最佳化。特别对小展弦比翼面的颤振、带舵机和操纵系统的舵面颤振、组合体颤振、蒙皮颤振以及气动加热的影响均作了分析处理,并列举了颤振问题与飞机、导弹工程设计的若干关系。提出了预防颤振发生的措施,还推荐了一些估算公式。最后,还涉及了颤振试验。

本书可供从事航空和航天工业以及相近学科领域(诸如风力发电、跨海大桥)的设计人员和工程技术人员参阅,对理工科高校有关专业的学生亦有裨益。

序^{*}

本书作者尹传家是我尊敬的学长，出生在湖南的一个小山村的农民家庭，他是在新中国的雨露阳光的滋润下走进学校大门的。1956年，他高中即将毕业时，被国家挑选保送到北京航空学院（简称“北航”，现名北京航空航天大学）上大学，1960年毕业于北航飞机设计专业。

北京航空学院创建于1952年，是新中国第一所培养航空航天科技人才的高等院校，是“培养航空航天工程师的摇篮”，它从建校起就推行并实践教育与科学研究、工程实践、生产劳动相结合，在实践中培养学生的全面素质。1958年北航师生破除迷信、奋发图强，大战一百天研制成中国第一架轻型旅客机、中国第一架无人驾驶飞机、中国第一枚探空火箭向当年国庆节献礼，创造了在一所大学中由师生研究、设计并制造飞机和火箭的奇迹。本书作者尹传家就是上述型号项目的参与者。通过在北航的近五年学习，培养了“艰苦朴素、勤奋好学、全面发展、勇于创新”的全面素质，为他

* 本序作者沈士团系北京航空航天大学原校长，教授、博士生导师、俄罗斯宇航科学院外籍院士，第九届、十届全国政协委员，中国高科技产业化研究会副理事长，中国宇航学会常务理事，中国工程院教育委员会委员，北京市科协常委。

今后的工作打下了基础。1960年在他即将毕业的时候，国家又挑选了他，到国防部第五研究院从事航天科技工作。国家的需要，人生的机遇造就了像作者这样一代默默奉献的航天人。

尹传家同志在航天科技战线从事火箭、导弹研制工作近三十年，他曾担任多项国防重点科研课题负责人、产品设计师及某新型导弹试验现场总指挥。在那个年代，他和他的战友们进入戈壁沙漠、风餐露宿、艰苦创业，为“两弹一星”的伟业做出了贡献，他因此而多次立功受奖。两年前，作者不幸身患直肠癌，在他与病魔进行顽强斗争的同时，他以百折不挠的精神于2006年创作出版了充满时代气息、讴歌为祖国航天事业奋斗不息的航天人的长篇小说——《梦系太空》，今天他又克服了种种困难，总结在航天科技战线工作多年的经验，编著了《飞行器的颤振》这部科技著作。尹传家同志的所有这些事实充分体现了我国航天人所特有的一种精神，这就是“特别能吃苦、特别能战斗、特别能攻关、特别能奉献”的航天精神，这是值得我们学习的。

这里我要着重说明的是气动弹性力学及其重要分支——颤振不是我的专业领域，我对《飞行器的颤振》这部科技著作的专业内容无法提出具体意见，但我知道颤振问题在飞行器的研制过程中是必须要研究考虑的重要问题。应当说《飞行器的颤振》是作者尹传家同志自北航毕业后，

整整三十年从事气动弹性研究工作，对颤振问题做了较为全面的科学考察和实践，而写出的著作。因此，我相信本书的出版，对从事航空航天和相关学科及工程领域的工程技术人员一定会有裨益的，对理工科高等院校相关专业的学生亦应有参考价值。

最后，我作为尹传家同志的校友，衷心祝愿我尊敬的学长战胜病魔，健康长寿，我也期盼着尹传家同志在身体力行的情况下，继续完成他的写作愿望，谱写他的更加精彩的人生。

沈士团

2007年7月6日于北航

目 录

序

第一章 绪论	1
第二章 颤振机理	8
§ 1. 气动弹性问题的分类	8
§ 2. 颤振机理	10
第三章 自然振动的分析方法	15
§ 1. 基本方程式	15
§ 2. 结构分析(有限元法)	21
§ 3. 机体的振动分析方法	31
第四章 非定常气动力理论	50
§ 1. 基础知识	50
§ 2. 亚音速狭条理论	57
§ 3. 亚音速核函数方法	79
§ 4. 跨音速核函数方法	105
§ 5. 超音速狭条理论	109
§ 6. 超音速位势理论	120
§ 7. 准定常二次理论	133
§ 8. 活塞理论	141
§ 9. 细长机翼理论	145

§ 10. 非定常牛顿流理论	151
第五章 小展弦比翼面的颤振分析	153
§ 1. 颤振理论	153
§ 2. 典型例子	166
§ 3. 参数影响	187
第六章 组合体颤振	196
§ 1. 翼-身组合体	196
§ 2. 身-舵组合体	201
§ 3. 考虑舵面操纵系统的全机颤振问题	215
§ 4. 计算例子	218
第七章 蒙皮颤振	227
§ 1. 有限长简支平板	227
§ 2. 半无限长平板	235
第八章 空气动力加热的影响	241
§ 1. 空气动力加热	241
§ 2. 空气动力加热的影响	244
§ 3. 典型例子	253
§ 4. 考虑热效应的平板颤振	255
第九章 颤振问题与飞行器设计的关系	263
§ 1. 振动频率的估算	263
§ 2. 颤振速度的估算公式	266
§ 3. 结构设计的刚度问题及其他	280
§ 4. 颤振主动控制和最佳化	286
第十章 颤振试验	289
§ 1. 风洞颤振试验	289

§ 2. 地面发射火箭的颤振试验	317
§ 3. 自由下滑模型的颤振试验	334
§ 4. 火箭车颤振试验	334
§ 5. 飞行颤振试验	337
附录 影响系数方法在颤振分析中的应用	338
§ 1. 颤振特征方程式	338
§ 2. 气动力影响系数	341
参考文献	347
后记	354

第一章 绪 论

从世界上出现第一架飞机,至今也不过一百零四年的时间,而航空和航天技术的发展,却经历着日新月异的飞跃。图 1-1 形象化地描绘了近半个世纪以来,螺旋桨和喷气式典型的亚音速飞机到细长的超音速和高超音速飞机直至宇宙飞船的演变过程。除了飞行速度提高之外,由于气动力的原因,飞机的几何形状也发生了一系列的变化。图 1-2 和图 1-3 分别概括了飞机机翼厚度比和展弦比的发展趋势。

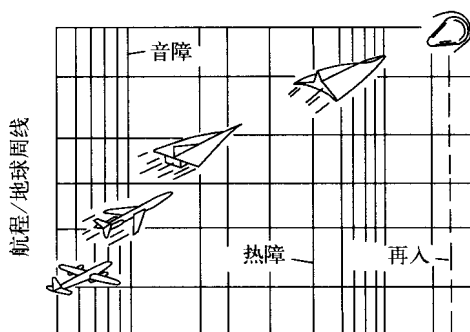


图 1-1 飞行器的气动外形和飞行马赫数的关系

在飞行器的发展过程中,由于气动弹性的缘故,机毁人亡的飞行事故屡见不鲜。1903 年兰利(S. P. Langley)设计了单翼飞机,他驾驶着飞机在美国的波托马克河畔试飞时,因机翼的扭转发散致使飞机坠落而失事。不久,莱特兄弟用双翼飞机完成了人类的第一次动

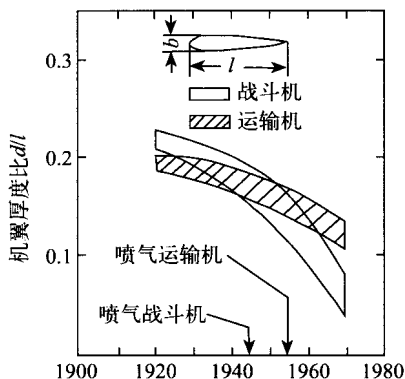


图 1-2 机翼厚度比的发展趋势

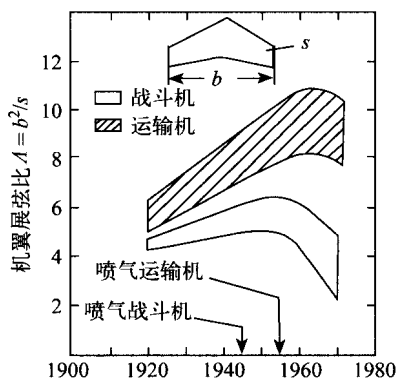


图 1-3 机翼展弦比的发展趋势

力飞行。由于双翼飞机的试飞成功和单翼飞机的失事,使得双翼飞机在以后多年一直占据着统治地位。从技术角度来看,当时单翼飞机的机翼缺乏估算扭转刚度的适当准则。在只有双翼飞机作为军用飞机的日子里,由于机身和尾翼的扭转刚度不够,出现了尾翼颤振。

例如,第一次世界大战初期的韩德里-佩其轰炸机因尾翼颤振而坠毁。1917年DH-9飞机也出现过尾翼颤振。在找到与这种现象作斗争的办法之前,又丧失了一些人的生命。随着单翼飞机的出现,由于机翼缺乏足够的扭转刚度,引起机翼变形的加大,从而导致颤振的产生、副翼效率的降低以及载荷分布的改变。其中以德国容克(Fokker)D-8型飞机最具有代表性,这种上单翼飞机的扭转刚度按双翼飞机所用的准则估算。当时认为D-8型飞机具有卓越的性能。但在空战的最初日子里,飞机以数倍于最大速度的速度作俯冲时,机翼发生折断,飞机曾多次坠地,从而酿成毁灭当时德国空军精华的危险,当初还找不出事故的原因。经过后来的试验研究表明,这种飞机的机翼强度是很富裕的,足以承受六倍极限过载,而在急速俯冲时,机翼端部的攻角明显地增加,从而引起载荷的迅速加大,致使机翼扭转而折断。在第一次世界大战以后的D-8型飞机试验中,美国空军工程师们发现了强烈的、但不会引起破坏性的机翼-副翼组合的弯曲颤振现象,并利用副翼绕铰链轴的静平衡,消除了这一现象。1920年至1930年的一些竞赛用的单翼飞机曾出现过机翼-副翼组合的颤振现象。第二次世界大战初期,德国的V-2导弹在荷兰的普里伯特·马萨试验时,由于靠近导弹头部的蒙皮颤振而引起多次事故。对于近代的土星V-阿波罗飞行器,蒙皮颤振问题仍然是相当麻烦的,需要进行仔细的考虑。此外,据统计:1944年至1960年,英国的54种飞机上发生了81起颤振事故;1947年至1957年的十年内,美国的民用和军用飞机共发生了100多起不同形式的颤振,其中大多数是操纵面和调整片、带外部贮箱的机翼以及T型尾翼的飞机。图1-4是一架美国早期的喷气歼击机发生颤振以后的飞机后视图。它在作跨音速飞行时,由于水平尾翼发生颤振,使其在翼展的三分之二处折断。从图上可以看出,平尾左翼的折断部分还连挂着,飞行员驾驶着这架因颤振而损坏的飞机安全着陆了。

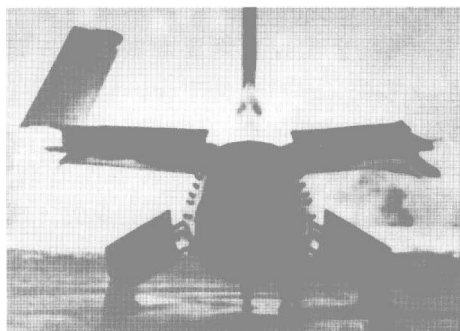


图 1-4 因颤振损坏的一架喷气飞机

前苏联的米格型歼击机,为了预防操纵面(特别是全动式平尾)的颤振发生,在结构上付出了一定的代价。

由于颤振往往造成严重的飞行事故,在飞机和导弹的研制过程中作为需要精心考虑的问题,引起了人们极大的重视,并逐步掌握了一定的规律性。因此情况有所改变,例如在 1960 年至 1972 年间,英国只发生了 7 起不太严重的颤振事故,但尚不能完全杜绝它的发生。法国的“幻影 F-1”型超音速战斗机于 1967 年因颤振事故而坠毁;1972 年西德与荷兰联合研制的 VFW-614 短程运输机的第一架原型机,因升降舵调整片颤振而失事。

飞行中的颤振有很多种类,如机翼颤振、尾翼颤振、舵面颤振、副翼嗡鸣(一种特殊形式的颤振)、蒙皮颤振和飞机的螺旋桨(1960 年涡轮螺旋桨发动机飞机因螺旋桨的涡流颤振引起了两起较大的事故)、发动机的转子、涡轮、压气机的叶片以及直升飞机的旋翼颤振等。在航空技术之外,还有天线颤振、吊桥颤振等。众所周知,1940 年托可马吊桥因气动弹性振动引起的毁坏,在当时轰动一时,曾拍成电影,作为新闻报道放映过。从此以后,建筑工程师对桥梁颤振(尤其是钢结构吊桥)极其重视。

对于宇宙航行运载系统,由于缺少升力面,经典的气动弹性效应虽然也出现一些,但却是全新的类型,即引起与经典的颤振有关的、伺服机构的弹性振动稳定性问题。

航天飞机装有常见的升力面和操纵面,习见的气动弹性具有很大的意义,尤其是气动热弹性问题须引起特别的注意。

随着现代飞行器的速度和性能的迅速提高,开始广泛采用细长机身和薄机翼,以尽量减轻结构重量。但是由于结构柔性很大,飞行环境也较为复杂,在严重的外载荷作用下,飞行器的部件将产生很大变形。图 1-5 表示 B-52 轰炸机的机翼在最大使用载荷作用下,翼尖的上下挠度可达 10 m 左右。这样,由于结构的弹性变形与气动力的耦合作用,使得气动弹性更为突出。

颤振问题涉及到近代飞机和导弹结构设计的主要问题。基于颤



图 1-5 静力试验时,B-52 型飞机机翼在最大使用载荷条件下的最大翘曲变形

振要求的刚度准则,在很多情况下,成了临界设计准则。对于一些部件,按照强度要求设计,再作刚度校准的传统方法,已不适用了。颤振不仅是气动弹性问题,它还影响着飞行器设计的成败。现代飞行器经受过多种颤振形式。经典的颤振类型与势流有关,而非经典的颤振至今仍很难用纯理论的方法进行分析。在分离流、或者周期性的分离流中,在失速状态和气动力之间具有不同的滞后效应以及各种运动姿态下,均可能出现颤振。

大量的事实使人们认识到,颤振在飞行中是一个祸害,必须和它作斗争。以前预防颤振,一般采取增加结构刚度、质量平衡或者限制飞行速度等措施。这是比较被动的方法,这些方法对飞行器性能带来严重不利的影响。近年来,研究了一种利用飞行控制系统控制或改变飞机结构和气动力特性的“颤振主动控制”方法。颤振主动控制技术已成功地用于超音速运输机、C-5A、波音-747、B-1、F-4 以及 F-16 等飞机上,并取得了良好效果。随着计算技术的发展,颤振最佳化方法已在实际飞行器设计中日益广泛地被采用。应用这种方法,对某些机翼、直升机旋翼、机身蒙皮等部件的设计结果表明,在相同的气动弹性要求条件下,可使结构重量减少 $5\% \sim 15\%$;在保持结构重量大致相等的情况下,颤振速度可以提高 $20\% \sim 30\%$ 。

成功的颤振分析,取决于结构分析和非定常气动力的计算。在结构上,翼面已由传统的梁式结构过渡到板状结构。在非定常气动理论方面,包括亚音速、跨音速、超音速以及高超音速的广阔速度范围。以升力线的方法而论,就有二十余种。自 20 世纪 50 年代以来,大力发展了升力面理论。因此,我们只能选取其中最常用的、最具有代表性的方法,诸如二元狭条理论、核函数方法、超音速位势理论、细长机翼理论以及活塞理论等。

关于颤振分析方法,主要有两种。一种是形态法(可用图 1-6 表示为方块图的形式),即用若干个振动形态的叠加来表示结构变形。该方法是把无限多个自由度的连续结构简化为有限个自由度的系

统。对于翼面，一般取头几阶非阻尼的固有振型，而对于复杂组合体，可取至 20 阶以上。这些固有振型和固有频率以及广义质量等可根据结构图进行计算，也可通过地面试验求得。气动力可由理论计算或风洞试验确定。另一种是“离散”法，即把连续结构离散为许多分立的基元，自由度的数目取决于基元的多少，显然比形态法高得多。过去，习称为影响系数法(参见附录)。这种方法适于用高速计算机求解。离散法近来发展为结构分析的有限元法。对于像波音-747 这类复杂的飞行结构，应用有限元结构分析计算程序已被证明是成功的。

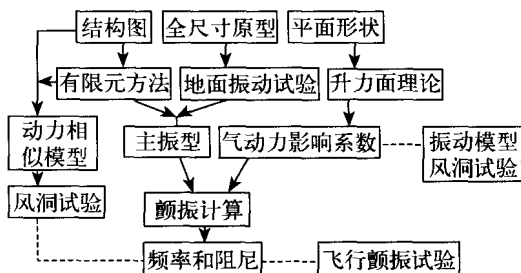


图 1-6 颤振分析的方块图

第二章 颤振机理

§ 1. 气动弹性问题的分类

气动弹性力学是研究气动力、弹性力以及惯性力相互作用的一门学科。现在,我们借助于力的三角形对气动弹性问题进行分类。所述的气动力、弹性力和惯性力分别用英文字母的 A、E 和 I 表示,并置于三角形的顶点。对于每一种气动弹性现象按其三个顶点(即三个力)的关系,画出它的图形(图 2-1)。

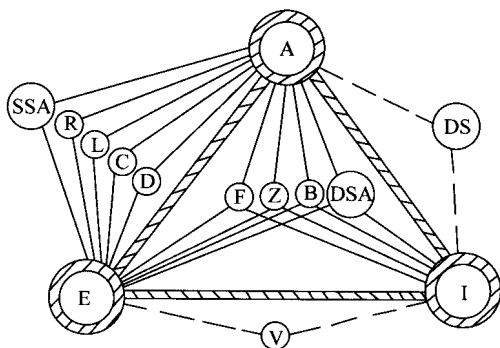


图 2-1 气动弹性的力三角形

图 2-1 包含着三种类型的问题。

(一) 动气动弹性现象 位于三角形之内,与三种力均有关,则应与三个顶点相连结。如:

Ⓕ——颤振。

Ⓖ——抖振。

Ⓓ——动力响应。

Ⓔ——气动弹性对动稳定性的影响。

(二) 静气动弹性现象 位于三角形之外的左上角,它只与气动力和弹性力有关。如:

Ⓖ——发散。

Ⓒ——操纵效率。

Ⓖ——操纵面反逆。

Ⓖ——考虑弹性变形的载荷分布。

Ⓔ——气动弹性对静稳定性的影响。

(三) 相关的问题 位于三角形之外的下方和右上角。如:

Ⓖ——机械振动。

Ⓔ——刚体飞行力学。

当飞行器发展到超音速和高超音速时,又引出了气动热弹性的概念。在力的三角形的基础上,扩充为气动热弹性的力四面体(图2-2)。其中T表示热源引起的热力。该四面体的四个面均代表着一定的问题范畴。即

Ⓔ Ⓖ Ⓖ——代表典型的气动弹性问题。

Ⓔ Ⓖ Ⓖ——属于气动热弹性范畴之外的气动热动力学问题。

Ⓔ Ⓖ Ⓖ——静气动热弹性问题。

Ⓖ Ⓖ Ⓖ——考虑热对振动特性影响的热弹性动力学问题。

气动热弹性包含着Ⓔ Ⓖ Ⓖ Ⓖ的相互作用,关于这部分我们在下面还要讨论。

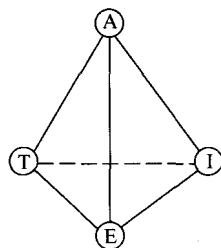


图 2-2 气动热弹性的力四面体