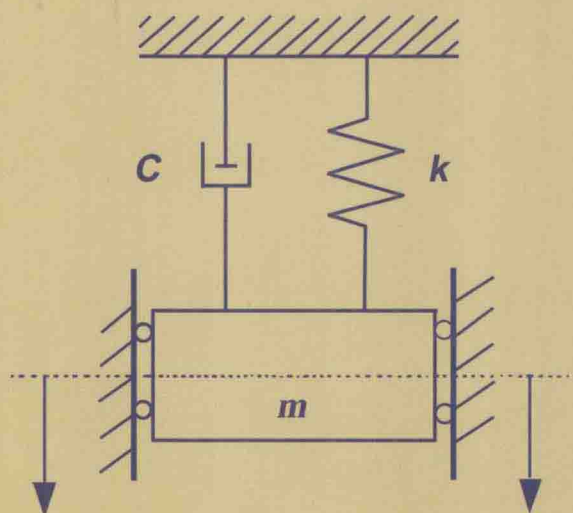


Structural Dynamics in Aeronautical Engineering

航空工程中的结构动力学

(美)马厄·N. 俾斯麦-纳斯尔(Maher N. Bismarck-Nasr) 著
杨智春 李斌 谷迎松 王巍 王乐 李毅 译
赵令诚 译审



航空工业出版社

AIAA 航空航天技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

航空工程中的结构动力学

(美) 马厄·N. 俾斯麦 - 纳斯尔
(Maher N. Bismarck - Nasr) 著
杨智春 李 斌 谷迎松 译
王 巍 王 乐 李 毅
赵令诚 译审

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书是一本关于结构动力学和气动弹性力学基础的教材, 适合航空航天工程专业高年级学生和一年级研究生。介绍了航空器结构动力学分析和气动弹性分析的基本原理和分析方法。按照由浅入深, 循序渐进的原则, 全书分为两个部分。在第一部分中, 在介绍相关数学方法的基础上, 主要介绍单自由度线性振动系统的基本概念、原理和分析方法, 多自由度线性振动系统的分析方法特别是模态变换的概念, 连续体(包含梁、板、壳结构)的动力学特性分析方法, 以及非线性结构振动问题和随机振动问题。在第二部分中, 从典型翼段的气动弹性问题分析入手, 介绍气动弹性稳定性的基本概念以及可扩展到三维升力面气动弹性分析的片条理论等分析方法, 随后介绍了复杂飞行器结构气动弹性问题的分析方法, 最后讲述了现代飞行器结构中存在的板壳气动弹性力学问题。

图书在版编目(CIP)数据

航空工程中的结构动力学 / (美) 纳斯尔著; 杨智春等译. -- 北京: 航空工业出版社, 2012. 6

(AIAA 航空航天技术丛书)

书名原文: Structural Dynamics in Aeronautical Engineering

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0001 - 9

I. ①航… II. ①纳… ②杨… III. ①航空器 - 结构动力学 IV. ①V27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 124916 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2011 - 2804

Translated from the English language edition: *Structural Dynamics in Aeronautical Engineering*, by Mather N. Bismarck - Nasr. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978 - 1 - 56347 - 323 - 4. Copyright © 1999 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

航空工程中的结构动力学

Hangkong Gongchengzhong de Jiegou Donglixue

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2012 年 6 月第 1 版

2012 年 6 月第 1 次印刷

开本: 710 × 1000 1/16

印张: 17.25

字数: 338 千字

印数: 1—3000

定价: 110.00 元

《AIAA 航空航天技术丛书》审委会

顾问：(按姓氏笔画排列)

尹泽勇 石屏 冯培德 刘大响 关桥 杨凤田 李天
李明 宋文骢 张彦仲 陈一坚 陈祥宝 赵振业 唐长红
顾诵芬 曹春晓 颜鸣皋

主任：林左鸣

副主任：谭瑞松 顾惠忠 吴献东 张新国

委员：(按姓氏笔画排列)

王坚 王之林 王向阳 王英杰 王润孝 卢广山 曲景文
华俊 刘选民 刘春晖 杨圣军 李晓红 吴松 汪亚卫
陈元先 陈灌军 庞为 郭恩明 都本正 彭卫东 葛子干
蔡毅 魏金钟

《AIAA 航空航天技术丛书》编委会

主任：张新国

副主任：王英杰 魏金钟

委员：(按姓氏笔画排列)

丁文强 丁全心 王永庆 王永明 王明皓 王聪梅 车宏
牛文生 邓景辉 尹红顺 艾俊强 帅朝林 田泽 白晓东
冯子明 巩水利 朱知寿 朱荣刚 刘永泉 江和甫 孙聪
杨伟 杨旭 杨超 杨朝旭 苏炳君 李文正 李东杰
李孝堂 李宏新 李周复 严成忠 吴希明 吴良斌 吴学仁
何胜强 沈锡钢 宋笔锋 张弘 张波 张明习 张继高
陆志东 陆虎敏 陈聪慧 范彦铭 欧阳绍修 罗安阳 周自全
赵霞 侯敏杰 姚华 袁立 聂海涛 徐华胜 郭德伦
益小苏 陶春虎 桑建华 黄佑 黄传跃 曹奇凯 章怡宁
梁相文 梁晓庚 董建鸿 强宝平 童明波 曾军 曾元松
蒲小勃 褚林塘 臧军 廖志忠 樊会涛

编委会办公室

主任：刘鑫

副主任：史晋蕾 李苏楠

成员：(按姓氏笔画排列)

安玉彦 李金梅 郭玮 郭倩旒

丛书序（一）

中国航空工业要融入世界航空产业链，进行国际化开拓，参与国际合作和竞争，与世界航空航天企业共谋发展，需要的是强大的技术支撑。构建先进的技术研发平台，加速推进前沿科学技术的研究，加速推进航空发动机技术和航空先进材料技术领域的基础及应用技术研究、新产品研发与技术创新，关键是要有一批具有高水平、高素质的航空航天专业人才。而人才的培养离不开知识的传承，这套《AIAA 航空航天技术丛书》就为我们提供了一个很好的资源。

习人之长，补己之短，正视不足，奋发崛起，社会发展规律普遍如此。从这套书中，我们不仅能读到长久以来人类在探索天空的过程中积跬步而形成的基础的、科学的、先进的专业知识和技术，以及崭新的思维方式和解决问题的技巧及方法，更重要的是能在学习这些成功经验的同时，多注意看看前车之鉴，避开陷阱。在这里我想要与大家共勉的是，即使是在百科全书中也不能找到所有问题的答案，科学发展永无止境，航空航天业的进步带动着社会高精尖技术的发展，其中还有很多领域及问题需要我们去探索和解决，因此，我们要抱着虚心的态度去学习，勇于探索的态度去思考，用好这些书，读好这些书。

科技的进步是整个社会的进步。愿我们的科技工作者、科研管理人员和广大的院校师生，既能够从中学习到知识、寻找到答案，更能够汲取精华，并能积极探索，与自身的知识、技术和经验相结合，在中国航空工业整翼飞升之时，迸发出更加绚丽的思想火花。



中国航空工业集团公司董事长

丛书序（二）

航空航天业是关系国家安全和国民经济命脉的战略性产业，是高投入、高附加值的技术密集型产业。由于其技术含量高、产业链长、带动性强，其发展对我国经济结构调整、实现产业优化升级、提高综合国力具有重要意义。金融危机之后，全球对于实体经济的认识回归到正确的轨道上来，重振制造业已成大家共识。而依靠高新技术和高产品附加值的高端制造业，被认为是推进工业转型升级的突破口。航空航天业作为高端制造业的重中之重，如何发挥其“火车头”作用引领制造业拥有强大竞争优势，成为当务之急。而解决这一问题的关键，就是突破核心技术，加强自主创新。

相比欧美等发达国家，我国并没有系统地经历科学革命和工业革命的洗礼。科学技术和工业基础落后，是导致我们高端制造业发展缓慢的原因之一。科学技术的进步非一朝一夕之力。通常来讲，一个产业发展所依托的先进技术至少需要10~20年的储备周期。以前的飞机材料都是单一金属的，现在随着材料技术、制造技术的进步，发展到铝合金、铝镁合金、钛合金以及碳纤维材料。这种科学技术的进步改进了飞机的性能和功能，包括后期出现的预警机、加油机、空天飞机等，其背后凭借的也是飞机的电子设备、任务系统、功能系统等的不断升级，依靠的是一系列科学技术的积累。

夯实技术基础并谋求创新，除了依靠自身积极探索、不断积累技术成果，还要吸纳国外先进的技术成果和经验，建立开放式的科学技术发展架构。

着眼于此，中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）从美国航空航天学会（AIAA）的专业出版物中选择优秀图书引进翻译出版为中文版，推出了这套《AIAA 航空航天技术丛书》。熟悉AIAA的同行们都知道，AIAA的出版物专注于航空航天领域，包括专业图书、期刊、会议论文和标准等，是为航空航天业提供信息服务的重要组成部分。AIAA的图书工作委员会及其严格的审查制度保证了其图书具有较高的学术水平和技术含量。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》涵盖飞行器的结构技术、材料技术、制造技术、气动技术、推进技术、试验技术、控制技术、航电系统和武器系统等方面，是对国内有关专业领域的有益补充。这次引进翻译出版工作所涉及的专业领域较多，工作繁杂，难度很大，需要协调的事情也很多，衷心希望最终能够达到预期目的，真正为促进国际化的交流与合作、为培养高素质的航空航天专业人才、为前沿科学技术的探索和创新起到应有的作用。



中国航空工业集团公司副总经理

给 AIAA 中文版丛书的序言

美国航空航天学会（AIAA）由成立于1930年的美国火箭协会和成立于1932年的美国航空科学学会于1963年合并而成。自此，AIAA就作为最早的平台服务于美国及全球航空航天技术的创新者、卓越者和引领人。广为人们所熟悉的奥维尔·莱特，尼尔·阿姆斯特朗，弗兰克·惠特尔，凯利·约翰逊，西奥多·冯·卡门和沃纳·冯·布朗都是AIAA的会员，而每6名AIAA的会员中就有超过1名会员来自美国以外的国家或地区。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》是AIAA和中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）良好合作的硕果。这种合作关系使得AIAA与中国航空学会之间以及AIAA与中国宇航学会之间的合作相得益彰。作为世界上最大的服务于航空航天业的技术学会，由我们来推进AIAA图书中文版及双语版的出版和促成我们会员之间的交流是极为恰当之事。

我们的合作最早是由中航出版传媒有限责任公司所提出的，最初主要关注在对AIAA技术图书的翻译上，采用译注的形式使得英文技术词汇有限的学生能够掌握图书阐述的概念。正如你们所看到的这套丛书，现在它已不仅限于最初的目的和形式。我们不会忘记我们的宗旨，而当我们展望未来时，我们感到非常高兴的是这套AIAA中文版图书包含了AIAA所出版的所有类别的图书：教育系列（大学教材）、航空航天进展系列（科技）以及飞行图书馆系列（大众爱好）。

另外，最近几年里，AIAA的所有图书、期刊文章和技术会议论文都已进行电子版存档，我们也希望我们的国际会员和合作伙伴能够很方便地访问这个强大的航空航天信息图书馆。

由最初在出版上的合作开始，AIAA已增强了其与中国的合作关系，包括代表团互访和交流等活动。这些互惠活动使美国和中国的航空航天团体之间的联系纽带更加牢固，也使双方收获了重要的友谊。各种开拓性的互动将使我们的国家间拥有更好的相互理解与合作关系。AIAA非常感谢中国航空工业集团公司的张新国副总经理、中航工业经济技术研究院王英杰院长、中航出版传媒有限责任公司的刘鑫总经理和李苏楠主任为此次合作所做出的努力。

AIAA 致力于服务广大会员和航空航天业。如今，AIAA 有许多来自中国的会员，随着更多的学生和专业人士通过这套丛书、AIAA 的其他出版物和直接的交流而对 AIAA 有更多的了解，我们希望来自中国的会员数量将会不断增多。而对于如何改善我们的服务，我们认为最好的想法是来自于我们的读者和会员。欢迎你们提出建议，并且我相信中航出版传媒有限责任公司会将你们提出的建议转达给 AIAA。

我们期待着未来长期且富有成效的合作。



罗伯特·迪克曼
美国航空航天学会主席

献给我的妻子玛丽·尤妮斯 (Maria Eunice)
和女儿葆拉·克里斯蒂娜 (Paula Christina)
及伊丽莎白·玛丽 (Elizabeth Maria)

原 版 序

由位于巴西圣保罗州航空航天技术中心的航空技术学院 Maher N. Bismarck - Nasr 撰写的《航空工程中的结构动力学》，是一本全面介绍航空结构动力学分析现代方法的著作，特别适合于本科生。对于高年级学生，书中大量的有关结构动力学的基本工作的参考资料，可供研究生水平的学生研究。该书代表了作者所在学院谨慎发展出的课程材料。本书以矩阵代数和数值计算导论章节作为开始，随后是一系列讨论特定航空应用的章节。这样可以引导学生从单自由度结构系统过渡到更为复杂的多自由度系统和连续系统，包括随机振动、非线性振动和气动弹性现象。在这本教材所使用的各种例子中，关于飞行器气动弹性的一章中，对气动弹性现象以及结构和气动载荷数学表达式的清楚表述，值得特别注意。

由美国航空航天学会 (AIAA) 出版的教材和专著教育系列丛书涵盖了航空航天各个学科的理论与应用方面的宽广领域，包括航空航天的设计实践。这套丛书还包括国防科学、工程和管理。这套丛书已经出版的教材的完整清单 (60 余部) 可以在这本书的最后找到。这套丛书既可作为教材也可作为在职的工程师、科技人员和管理人员的参考资料。

J. S. 普尔米尼亚茨基
《AIAA 教育系列丛书》主编

原版前言

本书是关于结构动力学和气动弹性基本概念的一本教材。它是为高年级大学生和一年级研究生的航空航天工程课程编写的。本书也可以作为相关领域在职工程师的参考资料。本书内容的先修课程是通常的工科课程表中的数学课程。

本书的第1章介绍矩阵代数和运算，这一章给出了后续章节中要用到的一些基本原理和主要的矩阵运算。第2章，详细地、有条理地给出了单自由度线性力学系统的基本概念、基本性质和分析方法。第3章专门讲述多自由度线性系统，详细介绍了模态变换和数值积分方法。给出了几个航空航天工程应用中复杂结构构型的动力学特性实际预估的实例。第4章涉及到连续弹性体的动力学特性。第5章讲述非线性结构动力学系统，第6章与随机振动问题有关。

本书的第二部分与气动弹性力学有关。第7章详细讲述一个典型翼段的气动弹性力学问题，介绍了气动弹性稳定性的基本概念及其基础。给出了片条理论的经典扩展，以解决三维升力面的气动弹性稳定性和操纵反效问题。第8章介绍用数值离散方法解决复杂飞行器构型的气动弹性力学问题。本书以第9章作为结束，这一章中讲述板壳的气动弹性力学问题。

本书未涉及柔性飞行器的突风载荷确定和突风响应问题。因为《AIAA 教育系列丛书》已经出版了由 F. M. 霍伯利特 (F. M. Hoblit) 撰写的一本现代的优秀教材，专门讲述这个专题。气动弹性力学的一些专题如飞行器的地面和飞行振动试验技术、旋转颤振分析、旋翼气动弹性力学以及失速颤振预计本书也未涉及，因为本书是讲述基本原理的，并且讲清楚上述问题需要另外的一册书，而且已经有专门讲述这些问题的著作了。

本书补充了（作者也感谢）以前出版的结构动力学与气动弹性方面的教科书。其中必须提及的是斯卡连 (Scalan) 和罗森鲍姆 (Rosenbaum)，冯 (Fung)，比林斯霍夫 (Bisplinghoff)，阿什利 (Ashley)，哈夫曼 (Halfman)，Bisplinghoff 和 Ashley，马泽 (Mazet)，戴特 (Dat)，彼得 (Petre)，福希 (Forshing)，道威尔 (Dowell)，利布雷斯库 (Librescu)，柯蒂斯 (Curtis)，斯卡拉 (Scalan) 和西斯托 (Sisto) 的著作。

马厄·N. 俾斯麦-纳斯尔

1999年2月

目 录

第 1 章 矩阵代数及其应用	(1)
1.1 标号和定义	(1)
1.2 矩阵代数	(3)
1.3 矩阵的微分和积分	(7)
1.4 变换	(8)
1.5 大型线性方程组的解	(10)
1.6 特征值问题	(17)
习题	(22)
参考文献	(23)
第 2 章 单自由度线性系统	(24)
2.1 运动方程	(24)
2.2 自由振动	(24)
2.3 对简谐激励的响应	(28)
2.4 冲击激励的响应	(36)
2.5 阶跃激励的响应	(39)
2.6 周期激励的响应	(40)
2.7 非周期激励的响应 (傅里叶变换)	(41)
2.8 拉普拉斯变换 (传递函数)	(42)
习题	(44)
第 3 章 多自由度线性系统	(46)
3.1 运动方程	(46)
3.2 自由振动: 特征值问题	(49)
3.3 对外载荷的响应	(52)
3.4 阻尼效应	(58)
3.5 应用	(59)
习题	(77)

参考文献	(78)
第 4 章 连续弹性体的动力学问题	(81)
4.1 引言	(81)
4.2 细长梁	(81)
4.3 平板	(90)
4.4 壳结构	(93)
4.5 对初始条件的响应	(100)
4.6 对外激励的响应	(101)
习题	(102)
参考文献	(103)
第 5 章 非线性系统	(104)
5.1 引言	(104)
5.2 简单非线性系统的例子	(104)
5.3 非线性系统的物理性质	(105)
5.4 单自由度非线性系统运动方程的解	(109)
5.5 多自由度非线性系统	(118)
习题	(119)
参考文献	(119)
第 6 章 随机振动	(120)
6.1 引言	(120)
6.2 随机过程的分类	(120)
6.3 概率分布和密度函数	(122)
6.4 用概率密度函数描述的均值	(123)
6.5 自相关函数的性质	(124)
6.6 功率谱密度函数	(125)
6.7 功率谱密度函数的性质	(125)
6.8 白噪声, 窄带和宽带	(126)
6.9 单自由度响应	(127)
6.10 白噪声激励下的响应	(130)
6.11 多自由度系统	(131)

习题	(136)
参考文献	(137)
第 7 章 典型翼段的气动弹性力学	(138)
7.1 单自由度稳定性	(138)
7.2 典型翼段	(141)
7.3 应用线化势流理论的典型翼段	(148)
7.4 带操纵面的典型翼段	(155)
7.5 操纵反效和操纵效率	(158)
习题	(160)
参考文献	(161)
第 8 章 飞行器的气动弹性力学	(163)
8.1 引言	(163)
8.2 问题的方程描述	(163)
8.3 增量非定常气动载荷	(164)
8.4 模态变换	(184)
8.5 气动弹性稳定性方程的求解	(185)
8.6 应用	(191)
8.7 满足颤振要求的优化	(194)
参考文献	(195)
第 9 章 板壳的气动弹性力学	(200)
9.1 引言	(200)
9.2 平板	(200)
9.3 预应力的影响	(212)
9.4 曲壁板	(216)
9.5 纤维增强层合复合材料浅壳	(220)
9.6 旋成壳	(231)
9.7 板壳气动弹性问题中的阻尼	(238)
9.8 非线性模态	(239)
参考文献	(248)

第 1 章 矩阵代数及其应用

本章关于矩阵代数及其应用的内容，并不打算对这些问题进行详尽、严格的论述。相反，仅限于讲解后续章节中要用到的关于矩阵代数的基本原理和主要的矩阵运算方法，至于更详细的内容，读者可以查阅本主题的常用标准教材^[1-3]。

1.1 标号和定义

1.1.1 矩阵

矩阵是一个将符号或者数字按照一定的方式排列成 m 行 n 列的矩形数组，可以表示如下

$$[a] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

符号 $[a]$ 代表的是整个数组，每一个单独的元素都用字母 a_{ij} 来表示，这里 i 代表的是第 i 行， j 代表的是第 j 列，这样的数组被定义为阶数为 mn 的矩阵。

1.1.2 行阵

当 $m=1$ ，这个矩阵就被定义为一个行阵，即第一类矢量，且被表示为

$$\{a\} = \{a_1, a_2, \cdots, a_n\} \quad (1-2)$$

1.1.3 列阵

当 $n=1$ ，这个矩阵就被定义为一个列阵，即第二类矢量，或简称为矢量，且被表示为

$$\{a\} = \left\{ \begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{array} \right\} \quad (1-3)$$

1.1.4 转置矩阵

如果我们将矩阵 $[a]$ 行和列做全部的交换，则我们可以得到它的转置矩阵，记作 $[a]^T$ ，即

$$[a]^T = [a_{ji}] \quad (1-4)$$

1.1.5 空矩阵或零矩阵

我们定义空矩阵或零矩阵为这样的一个矩阵，其所有元素都等于 0，记作 $[0]$ 。

1.1.6 方阵

当矩阵的行数 m 等于列数 n 时，我们称这个矩阵为 n 阶方阵。

1.1.7 几种特殊类型的方阵

(1) 对角阵

对角阵是这样一方阵，它的元素定义为

$$\begin{aligned} a_{ij} &= 0, \text{ 当 } i \neq j \text{ 时} \\ a_{ij} &\neq 0, \text{ 当 } i = j \text{ 时} \end{aligned} \quad (1-5)$$

将记作 $[a]$ 。

(2) 标量矩阵和单位矩阵

在一个方阵中，如果它的元素定义为

$$\begin{aligned} a_{ij} &= 0, \text{ 当 } i \neq j \text{ 时} \\ a_{ij} &= a, \text{ 当 } i = j \text{ 时} \end{aligned} \quad (1-6)$$

这里 a 是一个标量，这个矩阵叫做一个标量矩阵。并且如果 $a = 1$ ，则我们称这个矩阵为单位矩阵。表示为 $[I]$ 。

(3) 对称和斜对称矩阵

如果一个方阵的元素可以定义为

$$a_{ij} = a_{ji}, \text{ 对所有的 } i \text{ 和 } j \quad (1-7)$$

则我们说该矩阵是对称的。对于对称矩阵，我们可写出

$$[a] = [a]^T \quad (1-8)$$

如果一个方阵的元素定义为

$$\begin{aligned} a_{ij} &= -a_{ji}, \quad i \neq j \\ a_{ij} &= 0, \quad i = j \end{aligned} \quad (1-9)$$

则这个矩阵就叫斜对称矩阵。更进一步，如果矩阵的主对角元素中有一部分不为 0，则称该矩阵为斜矩阵。

(4) 三角矩阵

一个方阵如果它的元素定义为

$$a_{ij} = 0, \text{ 对 } i > j \quad (1-10)$$

称为上三角矩阵，一个方阵如果它的元素定义为

$$a_{ij} = 0, \text{ 对 } i < j \quad (1-11)$$

称为下三角矩阵，我们注意到对角阵既是上三角矩阵又是下三角矩阵。上三角矩阵和下三角矩阵经常用 $[U]$ 和 $[L]$ 来表示。