

AIAA航空航天技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

**Performance, Stability, Dynamics,
and Control of Airplanes** Second Edition

飞机的性能、稳定性、 动力学与控制

(第2版)

(美) 班度·N. 帕玛迪 (Bandu N. Pamadi) 著
商重阳 左英桃 夏露 刘艳 译



航空工业出版社

AIAA EDUCATION SERIES

014030267

V212.1
07

AIAA 航空航天技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

飞机的性能、稳定性、 动力学与控制

(第2版)

(美) 班度·N. 帕玛迪 (Bandu N. Pamadi) 著

商重阳 左英桃 夏露 刘艳 译



航空工业出版社

北京



北航

C1717101

内 容 提 要

本书全面介绍空气动力学、飞机性能和定常飞行的静平衡和操纵等方面的基本理论；推导了飞机动力学方程和纵横分离的运动方程，并引入了稳定导数的概念；讨论了增稳系统和自动驾驶仪的设计、飞机响应和闭环控制方法和惯性耦合、飞机尾旋和大迎角问题。本书凝聚了作者多年的教学经验，是航空工程专业教学方法创新。它全面完整地剖析了空气动力学、动力学、控制系统几个相互关联的学科，通过使用示意图、例题和习题等方式阐述基本原理，使之更加清晰生动。

图书在版编目 (C I P) 数据

飞机的性能、稳定性、动力学与控制：第2版/
(美) 帕玛迪 (Pamadi, B. N.) 著；商重阳等译. --北京：
航空工业出版社，2013. 12

(AIAA 航空航天技术丛书)

书名原文：Performance, stability, dynamics, and
control of airplanes

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0346 - 1

I. ①飞… II. ①帕… ②商… III. ①飞机—飞行力学—研究 IV. ①V212. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 293810 号

北京市版权局著作权合同登记

图字 01 - 2011 - 2800 号

Translated from the English language edition:

Performance Stability, Dynamics, and Control of Airplanes, Second Edition By Bandu Pamadi.

Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978 - 1 - 56347 - 583 - 2

Copyright © 2003 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

飞机的性能、稳定性、动力学与控制 (第2版)

Feiji de Xingneng、Wendingxing、Donglixue yu Kongzhi (Di 2 Ban)

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路2号院 100012)

发行部电话：010 - 84936555 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2013年12月第1版

2013年12月第1次印刷

开本：710 × 1000 1/16

印张：43

字数：864千字

印数：1—3000

定价：210.00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。

林左鸣

中国航空工业集团公司董事长

丛书序（二）

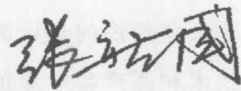
航空航天业是关系国家安全和国民经济命脉的战略产业，是高投入、高附加值的技术密集型产业。由于其技术含量高、产业链长、带动性强，其发展对我国经济结构调整、实现产业优化升级、提高综合国力具有重要意义。金融危机之后，全球对于实体经济的认识回归到正确的轨道上来，重振制造业已成大家共识。而依靠高新技术和高产品附加值的高端制造业，被认为是推进工业转型升级的突破口。航空航天业作为高端制造业的重中之重，如何发挥其“火车头”作用引领制造业拥有强大竞争优势，成为当务之急。而解决这一问题的关键，就是突破核心技术，加强自主创新。

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·惠特爾, 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。

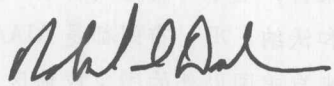
我们的合作最早是由中航出版传媒有限责任公司所提出的, 最初主要关注在对 AIAA 技术图书的翻译上, 采用译注的形式使得英文技术词汇有限的学生能够掌握图书阐述的概念。正如你们所看到的这套丛书, 现在它已不仅限于最初的目的和形式。我们不会忘记我们的宗旨, 而当我们展望未来时, 我们感到非常高兴的是这套 AIAA 中文版图书包含了 AIAA 所出版的所有类别的图书: 教育系列 (大学教材)、航空航天进展系列 (科技) 以及飞行图书馆系列 (大众爱好)。

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

原版第 2 版序

班度·N. 帕玛迪所著的第 2 版《飞机的性能、稳定性、动力学与控制》教科书对航空航天领域重要主题进行了全面综合的论述，并提供了例题。第 1 版本已经被证明是 AIAA 教育系列的重要部分，可喜的是现在又迎来了新版本。第 2 版的主要改变是修正了排版和数字错误，并补充了第 1 版中遗漏的数据。

AIAA 教育系列旨在涵盖通用航空航天领域的广泛主题，包括基本理论、应用和设计。此系列已出版的书目可以在本卷最后几页找到。这一系列的理念是发展可以在学院或大学中使用的教科书，也可作为继续教育和职业发展课程的教材，还可以作为航空航天领域专业人士自学的基础读物。我们也欢迎推荐新主题和作者。

约瑟·A. 斯科克主编

AIAA 教育系列

原版第 1 版序

班度·N. 帕玛迪所著《飞机的性能、稳定性、动力学与控制》代表了航空工程课程的一种新颖的教学方法，它全面完整地剖析了几个相互关联的学科。本书反映了作者多年的教学经验和作为 NASA 兰利研究中心高级研发工程师的咨询工作背景。书中包含空气动力学、动力学、控制系统的所有必要的背景材料，通过使用草图、例题和设计练习来讨论基本原理。它把读者从莱特兄弟时代带到了现代战斗机过失速迎角飞行的时代。

第 1 章至第 3 章给出了空气动力学、飞机性能和定常飞行的静平衡和操纵等方面的基本理论。第 4 章推导了飞机动力学方程和纵横分离的运动方程，并引入了稳定导数的概念。第 5 章讨论了增稳系统和自动驾驶仪的设计。第 6 章讨论了飞机响应和闭环控制方法。第 7 章和第 8 章讨论了惯性耦合、飞机尾旋和大迎角问题。本书的一个有用特性是它包含了用来说明理论和基本原理的算例。

由美国航空航天协会出版的教育系列教科书和专著涵盖了航空航天领域不同学科的广泛理论和应用，包括航空设计实践。本系列还包括国防科学、工程和管理方面的教材。已出版的教科书系列的完整书目（多于 50 个主题）可以在本卷的最后找到。该系列可以作为教材，也可以作为执业工程师、科学家和管理者的参考材料。

J. S. 普尔米尼亚茨基主编
AIAA 教育系列

第 2 版前言

第 2 版保留了第 1 版的所有材料而未引入新材料。修正了第 1 版印刷后发现的排版错误、算例和习题中缺失的数据、数字错误等。由衷感谢邦·韦教授、维基·约翰逊、查克·伊斯特利克、特蕾西·多瑞兰德、罗伯特·P.安奈克斯、罗伯特·F.斯月格尔、V.R.默西和 K.苏塔克在定位和解决印刷及数字错误方面给予的帮助。感谢 AIAA 出版了第 2 版，感谢 AIAA 出版社的全体员工。尤其感谢罗杰·威廉姆斯和梅瑞狄斯·考利的帮助和协作。

班度·N.帕玛迪

2003 年 10 月

第1版前言

本书旨在对飞机性能、稳定性、动力学和飞行控制进行全面完整的剖析，可作为航空工程专业的高年级本科生和一年级研究生的教材使用。其主要素材来源于我以前在孟买的印度理工学院航空工程系的讲义。

本书提供的内容理论上可供两个学期的教学使用。其内容充分涵盖了基本空气动力学、动力学、线性控制系统等背景资料，可帮助读者掌握本书的主题。本书假定飞机是刚体，不考虑弹性变形及其对飞机运动的影响。

第1章简要回顾了空气动力学的基本理论。读者也可以接触各种现代设计概念，如超临界翼型、前掠翼、细长三角翼等。细长三角翼代表着对大迎角从长期的附着流学说向可控分离的转变。

第2章从简单无动力滑翔飞行开始讨论了飞机性能，涵盖了飞机垂直和水平面内的不同飞行，并讨论了局部或点性能的状态优化。同时给读者介绍了点性能优化方法的局限。

飞机是一个六自由度的动力学系统。然而，当它作定常直线飞行时，可以应用静平衡原理，在此基础上展开第3章的讨论，包括不同飞行状态下的：纵向和横航向的平衡、确定配平舵偏角、铰链力矩和杆力梯度，并简要讨论了放宽静态稳定性的概念。

第4章研究飞机动力学，首先推导了动力学方程并讨论了各种坐标系。动力学方程根据动轴定理导出，然后简化得到了著名的小扰动方程，再将方程分解为纵向和横航向运动。本章还介绍了稳定性和操纵性导数的概念，给出了用于估算稳定性和操纵性导数的基于片条理论的简单方法，有助于理解飞机运动的物理原理。此外，还讨论了基于 Datcom (Data Compendium) 的稳定性和操纵性导数的工程估算方法。

第5章简要回顾了线性系统的理论和设计，目的是为理解飞机响应以及增稳系统和自动驾驶仪的设计提供背景资料。主要探讨了奈奎斯特和伯德图等频域方法、根轨迹等时域方法、现代的状态空间方法，以及各种补偿器的设计。

第6章讨论了飞机的响应和闭环控制方法。首先对各种操纵输入下飞机纵向及横航向的稳定性和响应进行了讨论。其次简要介绍了操纵品质的概念，以及用于保证操纵品质期望等级的各种纵向及横航向增稳系统和自动驾驶仪的设计。

第7章讨论了飞机的惯性耦合和尾旋问题。这些是由于飞机运动方程中惯性

项而产生纵向和横航向耦合问题的典型事例，主要研究了惯性耦合的基本概念、俯仰和偏航发散以及防止惯性耦合的方法。关于尾旋的讨论包括尾旋运动学、稳态尾旋、尾旋改出以及提高抗尾旋能力的方法。

第8章讨论了大迎角的稳定性和控制问题，讨论集中在细长机身三角翼布局的大迎角气动特性，这是现代战斗机的典型特征。讨论内容包括：机翼和细长前机身引起的机翼摇晃等现象、抑制机翼摇晃的方法、航向发散/偏离、副翼操纵反效，以及前机身流动控制和推力矢量等现代概念。

本书还采用一些算例来说明理论和基本概念。同时，还提供了一些练习题，帮助读者提高解决问题的能力。希望本书对航空工程专业的学生有用，并成为执业航空工程师的实用参考。

衷心感谢我的几位朋友和同事，他们的帮助对于本文材料的准备是至关重要的。首先，非常感谢我所有的学生，是他们给了我实际的指导。非常感激科林·P. 布里彻教授和阿图·科尔卡博士修订了本书的手稿并提出了有用的建议。非常感谢与沃特·英格伦、理查德·鲍威尔、埃里克·昆博士、苏留什·乔什博士、D. M. 饶博士、弗雷德·莱尔曼及H. 保罗·斯托的多次讨论。感谢苏迪尔·梅赫罗特拉博士给本项目提供的工作条件，感谢查尔斯·埃尔德雷德和拉里·罗威尔对这个项目的鼓励与支持，是他们使这个项目成功完成。感谢K. 苏塔克博士在准备手稿过程中给予的帮助。感谢约翰·阿奎尔在计算机方面给予的帮助。

我特别感谢我的妻子瓦维娅，她始终不渝的爱、关怀和持续不懈的支持，在这个项目的完成期间一直围绕着我。我不知道该如何感谢她耐心地忍受我将无数个夜晚、周末、假日用于写作本书。深深感谢我的儿子凯硕和女儿琪翠，是他们的爱和关怀给了我写作的灵感。

我还要感谢这一领域的众多作者，包括C. D. 珀金斯、R. E. 哈格、B. 艾特金斯、A. W. 贝比斯特、B. W. 麦克考米克、安吉洛·美乐、J. H. 布莱克洛克，还有很多人，他们的工作对本书做出了重大的贡献，并且有助于我准备本书的材料。

最后，我想感谢AIAA将此书作为AIAA教材出版。感谢AIAA全体编辑人员的帮助和鼓励，尤其感谢罗杰·威廉姆斯和约翰·考尔德伦。

班度·N. 帕米玛迪

1998年7月

目 录

第 1 章 基本空气动力学原理回顾	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 流过机翼和机身的流体介质	(2)
1.2.1 流动分离	(4)
1.2.2 圆柱绕流	(6)
1.3 阻力	(9)
1.4 机翼参数	(10)
1.4.1 截面参数	(10)
1.4.2 机翼平面形状参数	(12)
1.5 机翼截面的气动特性	(14)
1.5.1 气动中心	(16)
1.5.2 气动中心和压力中心之间的关系	(18)
1.5.3 机翼截面的失速	(18)
1.5.4 增升装置	(19)
1.6 有限翼展机翼的气动特性	(22)
1.7 减少诱导阻力的方法	(26)
1.8 翼尖涡的形成和危害	(27)
1.9 可压缩流	(29)
1.10 超声速流动中的气动力	(31)
1.11 临界马赫数	(34)
1.11.1 薄翼型	(37)
1.11.2 小展弦比机翼	(38)
1.11.3 超临界翼型	(38)
1.11.4 斜掠机翼	(38)
1.11.5 后掠机翼	(43)
1.11.6 三角翼	(45)
1.11.7 前掠翼	(46)
1.11.8 斜置翼	(47)
1.12 面积律	(48)

1.13 总结	(51)
参考文献	(52)
习题	(53)
第2章 飞机性能	(55)
2.1 引言	(55)
2.2 铅垂平面内的飞行运动方程	(57)
2.3 滑翔	(60)
2.4 水平飞行	(66)
2.4.1 螺旋桨飞机水平飞行的解析解	(69)
2.4.2 喷气式飞机的解析解	(71)
2.5 爬升飞行	(75)
2.5.1 定常爬升	(75)
2.5.2 静升限和实用升限	(79)
2.5.3 能量爬升法	(79)
2.6 航程与航时	(85)
2.6.1 喷气式飞机的航程	(86)
2.6.2 螺旋桨飞机的航程	(88)
2.6.3 风对航程的影响	(89)
2.6.4 巡航高度的估算	(89)
2.6.5 巡航爬升中上升高度的近似估计	(90)
2.7 航时	(91)
2.7.1 喷气式飞机的航时	(91)
2.7.2 螺旋桨飞机的航时	(92)
2.8 盘旋飞行	(97)
2.8.1 盘旋飞行的运动方程	(97)
2.8.2 水平面内盘旋飞行	(98)
2.8.3 水平面内的协调盘旋飞行	(99)
2.8.4 一般盘旋飞行	(107)
2.9 起飞和着陆	(116)
2.9.1 起飞	(116)
2.9.2 着陆	(121)
2.10 起飞和着陆时的危险：风切变和微暴流	(124)
2.11 小结	(126)
参考文献	(127)

习题	(127)
第3章 静稳定性与操纵性	(132)
3.1 引言	(132)
3.2 平衡与稳定性的概念	(132)
3.3 纵向静稳定性	(135)
3.3.1 机身的贡献	(135)
3.3.2 机翼的贡献	(139)
3.3.3 翼身组合体的贡献	(149)
3.3.4 平尾的贡献	(157)
3.3.5 动力的影响	(162)
3.3.6 全机纵向稳定性	(163)
3.3.7 握杆中性点	(164)
3.3.8 平尾的配平升力	(166)
3.3.9 纵向操纵	(169)
3.3.10 重心前限	(175)
3.3.11 重心的允许范围	(176)
3.3.12 地面效应	(176)
3.3.13 松杆纵向稳定性	(178)
3.3.14 气动补偿	(179)
3.3.15 松杆中性点	(187)
3.3.16 松杆裕度	(187)
3.3.17 配平调整片	(188)
3.3.18 确定飞行中的中性点	(189)
3.3.19 稳定平飞中的杆力	(190)
3.4 机动飞行中的稳定性	(205)
3.4.1 垂直拉升	(206)
3.4.2 水平盘旋	(211)
3.5 航向稳定性	(214)
3.5.1 航向稳定性判据	(216)
3.5.2 航向静稳定性估算	(217)
3.5.3 动力的影响	(231)
3.5.4 方向舵固定时的航向稳定性	(232)
3.5.5 航向操纵	(232)
3.5.6 松舵航向稳定性	(235)