

**Rotary Wing Structural
Dynamics and Aeroelasticity**

Second Edition

**旋翼飞行器结构动力学
与气动弹性力学** (第2版)

(美) 理查德·L. 比拉瓦 (Richard L. Bielawa) 著

刘勇 孙传伟 傅见平 译

张呈林 孙文胜 审



航空工业出版社

AIAA EDUCATION SERIES

AIAA 航空航天技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

旋翼飞行器结构动力学 与气动弹性力学

(第2版)

(美) 理查德·L. 比拉瓦 (Richard L. Bielawa) 著

刘 勇 孙传伟 傅见平 译

张呈林 孙文胜 审

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书较系统地阐述了旋翼飞行器的结构动力学与气动弹性力学的基本知识, 共计 18 章和 5 个附录。其主要内容包括: 旋翼飞行器结构动力学的基础分析方法, 旋转梁理论, 陀螺力学, 传动系统动力学, 机体振动, 振动控制方法及振动试验, 稳定性分析方法, 旋翼及旋翼-支持系统的机械与气动机械不稳定性, 非定常空气动力学与旋翼颤振, 非线性系统分析, 旋翼气弹稳定性的模型试验, 以及复合材料桨叶的剖面特性等。

本书读者对象为工程院校高年级大学本科生和研究生, 以及专业技术人员。

图书在版编目 (C I P) 数据

旋翼飞行器结构动力学与气动弹性力学: 第 2 版/

(美) 比拉瓦 (Bielawa, R. L.) 著; 刘勇, 孙传伟, 傅见平译. -- 北京: 航空工业出版社, 2012. 12

(AIAA 航空航天技术丛书)

书名原文: Rotary Wing Structural Dynamics and Aeroelasticity, Second Edition

ISBN 978-7-5165-0102-3

I. ①旋… II. ①比… ②刘… ③孙… ④傅… III.

①旋翼机-结构动力学②旋翼机-气动弹性动力学 IV.

①V241②V211.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 271349 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2011-2798

Translated from the English language edition: *Rotary Wing Structural Dynamics and Aeroelasticity, Second Edition* By Richard Bielawa Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978-1-56347-698-3 Copyright © 2006 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

旋翼飞行器结构动力学与气动弹性力学 (第 2 版)

Xuanyi Feixingqi Jiegou Donglixue yu Qidong Tanxing Lixue (Di 2 ban)

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 12 月第 1 版

2012 年 12 月第 1 次印刷

开本: 710×1000 1/16

印张: 39.25

字数: 789 千字

印数: 1—3000

定价: 180.00 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 郭倩璇

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。

林右鸣

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

译者序

本书是旋翼飞行器结构动力学与气动弹性领域的扛鼎之作。作者理查德·L·比拉瓦先生，麻省理工学院航空与航天工程博士，普林斯顿大学宇航工程硕士，伊利诺伊大学宇航工程学士，一生从事教学、工程和学术研究40余年，在旋翼飞行器教育、研究、工程和设计领域享有盛誉。曾经担任加利福尼亚大学洛杉矶分校机械与宇航工程系讲师，乔治亚理工学院宇航工程系的高级研究工程师，伦斯勒理工学院机械工程系、航空工程系与力学系的副教授。他还曾经担任联合技术研究中心的高级研究工程师，是R. L. Bielawa联合有限公司主管，曾经在多家公司担任旋转翼结构动力学与气动弹性、风能系统研发以及航天飞行动力学方面的高级顾问。

本书主要内容共分四大部分，第一部分重点阐述旋翼飞行器结构动力学所涉及的基本概念，包括基本的振动理论及分析方法、旋转梁理论和陀螺力学基础。第二部分主要讲述与直升机振动相关的问题，包括传动系统动特性、机体振动，以及振动控制方法与振动试验。第三部分则对旋翼、旋翼-支持系统的机械、气动机械及气弹稳定性问题进行了系统和深入的讨论，同时还包括非定常气动理论、线性与非线性系统分析方法等内容。第四部分主要是对第1版内容的增补，专门介绍旋翼飞行器中的（黏）弹性元件特性、复合材料桨叶的剖面特性计算，以及旋翼-传动与发动机燃油控制系统等的交叉学科问题。

本书内容丰富，论述深入浅出、层次分明，不但提供了许多实用和常用的教学资源，主要章节都配有练习题，具有较高的教学价值，适合作为教材使用；本书给出了相关领域的一些重要的参考资料，参阅这些资料将有助于对本书内容的理解。对于从事旋翼飞行器结构动力学与气动弹性，以及相关领域工作的工程技术人员和研究人员，也是一本重要的工具书。

在中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）的大力支持下，译者联合南京航空航天大学孙传伟副研究员、陆航部装备局傅见平高级工程师共同翻译本

书，南京航空航天大学张呈林教授、海军航空工程学院孙文胜副教授进行全文审校工作。博士生陈琨，硕士生曹冬冬、刘小磊、余章卫、印佼、殷启波、翁晨、刘宇、陈立道等参加了本书的翻译整理工作。

感谢邵箭编辑对本书的倾力工作。

由于译者水平有限，加之时间仓促，错漏之处在所难免，敬请读者谅解。

译者
2012年8月

献给：

我的妻子琼 (Joan)，感谢她始终如一的支持、鼓励和耐心！

原 版 序

能够帮助把第2版呈现给广大的读者是我的责任和荣幸。在被广为认可的第1版基础上，第2版仍然以综合性和易于理解的方式为读者提供了该领域很多重要的概念和发展。比拉瓦博士以其在工业部门和学术界的经历，完全有资格为广大读者就这一类引人入胜的主题呈现权威和清晰的说明。

对于那些主要在固定翼飞机，包括转子机械领域工作，偶尔会涉及旋翼飞行器结构动力学和气动弹性力学方面工作的读者来讲，只能对那些正在接受旋翼飞行器巨大挑战的工程师们表达崇高的敬意。这些挑战涵盖了旋翼飞行器设计中的一系列重大问题，涵盖了理论、计算和试验的诸多方面，涉及流体动力学、结构动力学、动力响应、操纵性和稳定性诸多学科领域。要把这些旋翼飞行器相关的复杂问题和学科组成一个连贯的体系，其本身就是一个艰巨的挑战，无疑比拉瓦博士的这本专著很好地做到了这一点。

本书对于那些只参与旋翼飞行器某一个领域的读者有极大的参考价值，作者对很多问题的处理方法是通用的和深入的。富有经验的工程师也能够从书中的经典理论和新方法中受益。对于学生读者，在比拉瓦博士及其同行富有经验的带领下，将会发现本书是对旋翼飞行器领域那些富有挑战性问题的最为可靠和引人入胜的介绍。本书将是自学者开始旋翼飞行器结构动力学和气动弹性力学方面学习的最佳读本。

新版的推出是比拉瓦博士又一次伟大贡献。我相信无论现在和未来，本书将是旋翼飞行器工程师们值得拥有的宝贵的藏书。

厄尔·道尔 (Earl Dowell)

杜克大学

第 2 版前言

当本书的第 1 版正被广大读者使用时，旋翼飞行器的技术基础和我本人越来越成熟了。我一直在学习，最重要的变化可能是已经无处不在的、非常好的计算机资源，包括硬件和软件。

修订本书最初的动力是为了给我在堪萨斯大学开设的宇航短训班课程提供最新的资料。同时，也为了订正第 1 版中的几处错误（幸运的是，本书第 2 版中将没有这些错误了）。第 1 版中很多原来的方法是针对不采用计算机求解技术的，只需要计算器即可，随着新技术的发展，这些方法已经被抛弃，不再使用；新版中尽可能地增加了一些我本人及其他人研究发展的新方法。在新版中，我努力使本书能够成为工程师们的工具，努力把一些原本理论性很强的材料改写为更为实用形式。新版中增加了一些新的章节，如橡胶弹性元件，还重点介绍了复合材料桨叶的剖面特性，一些交叉学科的问题，以及对一些主要问题的概述（历史观点）。新版中还增加了复合材料基础知识的附录。

在新版修订过程中，我得到了很多方面的帮助，为我提供了很棒的图片材料和评述材料。本人对罗德公司提供的图片帮助非常感激。史蒂夫·温德勒（Steve Winckler）对本书复合材料方面的内容进行了检查，迪安·贝林杰（Dean Bellinger）为本书提供了 NASTRAN 的历史数据。在此，一并表示感谢。最后，我非常感激那些百忙之中应本人要求提供图片的所有的人。

理查德·L. 比拉瓦

2005. 10

第 1 版前言

本书是从我多年来的讲稿发展而来的，这些讲稿每次演化发展都是针对一些不同的目标。我起初的目的是为工程师们提供工作中所需的专业知识。20 世纪 60 年代，洛克希德加利福尼亚公司正在进行新构型直升机的研发，为了给固定翼飞机的航空工程师和设计师培训，洛克希德组织了旋翼飞行器技术的教育计划，包括了结构动力学和气动弹性。因此，讲义的最初目的是给固定翼工程师快速提高从事旋翼飞行器工作所需的能力。后来为了满足加利福尼亚大学为全职工程师开设的短期班课程的需要，这些讲义又进行了拓展。在这些情况下，讲义的重点是能够快速讲述基本的实用知识，极少关注严格的推导过程。

这些讲义中间有几年的停顿，后来本人进入伦斯勒（Rensselaer）理工学院，参与了学院的“优秀旋翼技术中心计划”（Rotorcraft Technology Center of Excellence Program），为了适应旋翼飞行器专业研究生课程教学的需要，我对这些讲义做了很大的拓展，后来又不断进行了修订。讲义中实用方面的内容仍然保留了下来，为了更深入的专业教育的需要，又补充了一些材料，以满足那些准备进入工业部门，从事旋翼飞行器工作的学生的需要。大部分的材料涉及到非旋转翼飞行器（non-rotarywing）结构动力学与气动弹性基本概念在旋翼飞行器中的专门应用，其中的几个概念需要专门进行讲述。最后，随着时间的推移，旋翼飞行器技术的重点已经从纯直升机方向发展到了更为宽广的类型，包括倾转旋翼机和倾转机翼机。

这样，不断修订这些讲义的目的就变成了：（1）讲述结构动力学与气动弹性的基本概念（以综述的形式）；（2）为工程师们提供在他（或她）工作中方便使用的、入门的基础知识；（3）为大学环境的研究生教育，提供材料或媒介。另外，第四个目的是要满足那些新出现的旋翼概念，如倾转旋翼和倾转机翼构型的研究需要，这就要求同时满足上述的三个目标。

要完整地讲述旋翼飞行器的结构动力学与气动弹性是不可能的，因为不但要透彻地讲述已经积累的相关材料，而且要反映技术的不断发展。因此，本书在这

里提供的材料只是介绍那些基础的问题，并依此形成了一个基石，使得本书能够包容更详细和新出现的工程研究结果。无疑，本书的大部分内容涉及与旋翼旋转动力学相关的、多种多样的不同方法，在更基础的层面，为了多自由度动力学系统分析的需要，本书也提供了基础的数学方法，对那些从业工程师而言，这些数学知识可能并不新奇，但对于其他人则可能是非常有用的。

旋翼飞行器学科的技术发展有两个主要的驱动力：如何减小振动和确保气动机械和气动弹性稳定性。因此，本书尽可能多地安排了这两个基础领域的内容。为了研究这些领域的需要，第1~第4章首先介绍了一些不同的基本分析方法，以便为后续章节的研究提供基础。除了开始章节中介绍的基本分析方法，本书还根据需要介绍了一些其他的方法。第5~第8章集中介绍了机体的振动问题，其重点是介绍减振设计方法和（或）如何解决一些实际工作中所面临的、没有考虑到的振动问题。旋翼动力学环境中存在着丰富的复杂现象，极有可能导致多种气动和气弹的不稳定性。事实上，第10~第13章并未介绍全部的不稳定现象，而是挑选一些能够推动旋翼飞行器设计技术发展，或者能够为研究其他更为复杂的不稳定现象提供基础的问题来介绍。最后，因为现有的分析方法并非完全可靠（非常缺乏用户的验证），这些技术方法在实际中的（成功）集成应用必须经过试验验证。因此，第8章和第14章分别针对性地介绍了在减振和稳定性方面的一些实用的试验技术。

本书之所以采用这种结构安排，就是希望能提供一些实用和常用的教学资源，以满足研究生两个学期或三个学期的课程教学需要。为了给大学环境中的正式课程教学提供一些媒介或资料，就需要组织和编入一些合适的练习题。这些习题包括了一些相对简单和一些更为复杂一点的问题，所有这些习题只是出于教学的目的，以帮助读者能够掌握本书的内容。

本书介绍了一些新出现的、先进的旋翼飞行器概念，包括螺旋桨-发动机短舱回转颤振及相关材料，也包括与多旋翼动力学系统相关的分析技术。附录D中推导并给出了直升机地面共振和空中共振分析的一些基本方法。显然，书中所囊括的这些内容已经能够构成一个实用的旋翼气弹分析模块，可以用于搭建更大规模的多旋翼（倾转旋翼和（或）倾转机翼）飞行器气弹稳定性分析模块。

本书并非在“真空中”写成的，在很多方面，汇编了很多其他人的研究发现。而且，没有朋友们和同事们的鼓励，本书不会写成。在此，特别感谢威廉·图米

(William Twomey), 威廉·法兰妮莉 (William Flannelly) 和罗伯特·洛伊 (Robert Loewy)。感谢伦斯勒理工学院旋翼技术中心为本书的材料组织和成稿提供了良好的环境。感谢我的学生们敢于找出他们教授讲稿中的错误, 在这方面, 特别感谢尼古拉斯·塞隆 (Nicolas Theron) 和沃尔特·哈森普夫卢格 (Walter Hassenpflug) 的极度细心。感谢卡曼 (Kaman) 航宇公司和西科斯基 (Sikorsky) 联合技术公司资助的很多研究者, 其为本书提供了他们的成果, 感谢卡曼航宇公司和西科斯基联合技术公司慷慨赠予的计算机, 这大大缩短了本书文字处理、计算和绘图的时间。书中的很多图形材料是旋翼飞行器行业的很多人慷慨赠予的——有美国的, 也有外国的, 在此无法一一列举其名, 非常感激和感谢他们的帮助。最后, 衷心地感谢朱蒂·奥康纳 (Judy O'Connor), 感谢其在本书草稿、终稿以及图形编辑整理的整个过程中不知疲倦的工作。

理查德·L. 比拉瓦

1992. 6