



装备科技译著出版基金

直升机 空气动力学基础

(第3版)

Basic Helicopter
Aerodynamics , Third Edition

[英] John Seddon Simon Newman 著
王建新 张璇子 吴冠桢 等译



国防工业出版社
National Defense Industry Press





装备科技译著出版基金

Basic Helicopter Aerodynamics, Third Edition

直升机空气动力学基础

(第3版)

[英] John Seddon Simon Newman 著

王建新 张璇子 吴冠桢
黄颖华 丰智宽 庞涵滢
金 辉 熊 伟 刘 浩

译



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2012-015 号

图书在版编目(CIP)数据

直升机空气动力学基础:第3版/(英)赛登(Seddon,J.), (英)纽曼(Newman,S.)著;
王建新等译. —北京:国防工业出版社,2014.5

书名原文:Basic helicopter aerodynamics

ISBN 978-7-118-08991-2

I. ①直... II. ①赛... ②纽... ③王... III. ①直升机-空气动力学
IV. ①V211.52

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第061643号

Translation from the English language edition:

Basic Helicopter Aerodynamics, 3rd ed. by John Seddon, Simon Newman

ISBN 987-0-470-66501-5

Copyright © 2011 by John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under License. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Ltd. 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 14 1/2 字数 278 千字

2014年5月第1版第1次印刷 印数 1—3000 册 定价 65.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

直升机空气动力学是研究直升机(主要是旋翼)与周围空气相互作用的现象,以及与之相关的直升机的气动载荷、飞行性能和飞行品质等内容的一门学科,是进行直升机和旋翼系统设计的基础。我国的直升机工业正处于一个快速发展的时期,在国家低空开放的政策指引下,直升机将迎来前所未有的发展机遇,对相关技术书籍,尤其是直升机空气动力学书籍的需求也不断增加。

目前,我国已经出版的直升机空气动力学的专业书籍不多,主要有中航直升机设计研究所孙如林等人 1991 年翻译的《直升机理论》一书,以及南京航空航天大学王适存主编的《直升机空气动力学》,这两部著作内容全面详细,适合于直升机专业的学生以及直升机设计人员使用,要求读者具有一定的空气动力学功底。但对于大量的直升机制造、试验、使用、维护人员来说,这两本书内容则略显晦涩,需要一部简明扼要,但理论体系完整的专业书籍。Seddon 的《直升机空气动力学基础》就是这样一部著作,从内容上讲,该书对直升机空气动力学的经典理论均进行了深入浅出的讲解,但对一些较为复杂的、较为边缘的,或者应用较少的理论进行了适当的取舍;从方法上来讲,该书对各种理论的数学推导过程进行了必要的简化,着重于各种理论的物理解释。该书还对近年来直升机空气动力学的一些新的进展进行了介绍,时效性较强。该书难易适当,既可作为直升机专业学生的教材,也可供直升机设计、制造、使用等工程技术人员参考。

本书主要由陆航学院直升机与发动机教研室王建新副教授、陆航研究所机体发动机室工程师张璇子,以及陆航学院直升机与发动机教研室吴冠桢副教授翻译和审校,陆航研究所的黄颖华、丰智宽、庞涵滢,以及陆航军代室的金辉等也参与了本书部分章节的翻译工作。译者对于本书,以不偏离原著题意内容的原则下,尽量运用通顺、流畅的文句,使读者看来没有生硬、吃力的感觉。

国防工业出版社对本书的出版给予了大力支持,在此一并表示感谢。

由于直升机空气动力学还在不断完善和深化发展之中,新的标准和应用不断涌现,加之译者水平有限,翻译时间仓促,因而本书翻译中的错漏之处在所难免,恳请各位专家和读者不吝指出。我的 E-mail 是:jxw1168@126.com。

愿读者皆能有所受益,实为本书之最大意义。

王建新

2013 年 6 月于北京

作者简介

约翰·塞登(John Seddon) 生前曾任皇家航空器研究所研究员、英国国防部理事长,退休后任英国韦斯特兰直升机公司顾问。

西蒙·纽曼(Simon Newman) 曾就读于皇家航空研究所附近的范保罗文法学校。1970年南安普顿大学数学专业毕业。在此后的41年里,继续致力于直升机空气动力学、动力学以及直升机设计研究。1970年,开始在位于英国萨默塞特郡约维尔镇的韦斯特兰直升机公司的空气动力学研究部门从事旋翼系统、性能及航空力学研究。在回到南安普顿一年后的1974年,取得了航空学硕士学位,并返回约维尔镇航空动力学及动力学部门开展旋翼空气动力、桨叶行为和舰载操作研究。马岛战争期间,进入技术局从事技术支持工作。1985年作为大学教师重返南安普顿,2007年获得特约审稿人资格。西蒙·纽曼的研究方向主要集中于舰载操作,特别是叶片航行方面,1995年获得该领域的博士学位。此外,他还对超轻型飞机的涡环状态及翻转运行状态进行了深入研究。西蒙·纽曼兴趣广泛,尤其喜爱摄影和高尔夫。除去其专业职责,他还是一位在大学毕业典礼时执掌权杖的礼杖官。

原 书 序

航空航天领域范围广、学科多,在工程及诸多相关配套活动方面,涵盖了大量产品、学科及领域。这些使得航空航天工业生产出了许多振奋人心且技术先进的产品。不同航空航天领域专家所积攒的知识和经验财富需要被分享给行业内的其他工作者,当然也包括刚踏入大学校门的学生们。

该航空航天系列丛书旨在成为工程专业人员、操作人员、使用者,以及涉及航空航天工业相关工作的商业和法律高管们的实用性和专题性系列书籍。本系列丛书涵盖范围广泛,既包括航空器设计、发展、制造、操作和技术支持,也包括诸如研究和技术层面的基建项目的营运和发展等,其目的是为所有航空航天工作者提供一个有趣且大有裨益的信息来源。

由于具有悬停及垂直起降能力,直升机扮演着与传统固定翼飞机不同且更为广泛的角色。多年来,大量的技术困境向直升机设计者提出了诸多挑战,其中就包括了既能提供升力、也能使直升机向预定目标前进的柔性旋翼气动力学。

《直升机空气动力学基础》这本书,是已故作者约翰·塞登原著的第3版。西蒙·纽曼在保持原著思想的基础上,对介绍性文字进行了进一步修订,以便大学生及新入行的工程师了解旋翼气动力学及直升机设计的基本特征。重要的是,该书在不对技术细节进行深入研究的同时,也避免了对关键特征及物理解释的简单粗略化,并有效掌握了二者之间的平衡。更难能可贵的在于,最新一版包含了大量有价值的附加材料。

Peter Belobaba
Jonathan Cooper
Roy Langton
Allan Seabridge

第 1 版前言

在过去 15 年间,先前一直受到忽视的直升机空气动力学领域出现了一批值得关注的教科书,例如 Bramwell 的《直升机动力学》(1976)、Johnson 的《直升机理论》(1980),以及 Stepniewski 和 Keys 的《旋翼空气动力学》(1984),这毫无疑问是因为直升机在现代社会中的重要性正广泛被世界认可。对于本书的出现,我总结了以下三点原因。

第一,简明扼要。Bramwell 的书长达 400 页,Stepniewski 和 Keys 的书是 600 页,而 Johnson 的书由于论述极为全面则超过了 1000 页。考虑到我这本书的使用者主要是接受短期课程——例如 1 年——的大学生或专科学生,且该科目通常是作为“选修课”出现在大学最后一年或研究生初期,而该阶段的主要目的是为学生们打基础,同时激发他们的兴趣、促使他们未来能在这个学科中继续发展。为此,我们所要传授的知识只需占标准教材所含内容的一小部分,而这本专著远远可以囊括这些知识。也希望本书的标价没超过个别学生的消费能力。

第二,结合原因一,介绍方法不同。这本书的目的不在于全面论述,也不是凡事都将问题交予计算机处理,而是为了实际应用,列举方案解决的分析方法,并给出可用精度的结果,与此同时对所涉及的现象做出物理解释,而这些若想诉诸于计算机得到快速计算结果,往往都会以失败告罄。这就是本书所遵循的介绍方法。当列举的分析方法超出本书所述目标时,就会适可而止,当然如若读者希望对某个问题进行深入研究时,本书也注明了相应的参考书目。

第三,涵盖内容不同。尽管需要简明扼要,但我认为除了应对规范内容,如动量理论、叶素理论、基本性能、稳定性和操纵性进行阐述外,相应的研究和开发活动(第 6 章)以及仍需计算和推测的前瞻性内容(第 7 章),也应囊括于本书中。通常认为这些暂时研究性的内容不适合写在教材中,然而,我认为,这才是激发学生兴趣目标的所在,况且它们在课堂中的趣味性已经得到证实,因此,似乎没有理由不将之诉诸文字。

除了满足学生们的需求以外,正如我们之前所提到的,本书还可以作为工业部门或其委托单位开办的短期培训班的背景材料:这种培训班现在也越来越普及。公司和研究机构也可在新入行者及诸多需要“进修”课本的工作人员中发现该书的使用价值。

回到“简明扼要”的问题上,近期由 Prouty 发表的《直升机空气动力学》就是一篇令人钦佩的简明著作,非常值得作为一部辅助教材来学习;然而由于其完全规避

了数学推演,因此无法单独满足人们的学习诉求。Saunders 的《直升机飞行动力学》也未获得太大突破,但正如书名所示,该书所包含的飞行动力学内容要多于空气动力学,相较那些已具备空气动力学基础的工程类学生而言,该书更适合于飞行员的需求。

编写此书时,我是以我的读者对固定翼飞机机翼已具备基本的空气动力学知识为出发点的。直升机旋翼桨叶除在极其不同的环境外,通常与固定翼一样扮演着相同的角色,因此,在本书中我将二者进行频繁对比,寻相似、找不同,可大大激发学习者的兴趣。这是本书与其他标准教材的又一不同之处。

不难发现本书省略了大量内容。对直升机空气动力学发展历程的纵览本应包含在第 1 章内,然而纵使其非常有趣,我仍认为无需赘述。通过对其产生效果的判断,尾流分析(涡流理论)应该得到更多论述(第 2 章和第 5 章),然而在本书中我们却应避免采用不同方法来打开“潘多拉的魔盒”。前飞自转、扭转-挥舞耦合、桨叶弹性等内容本应包含在第 5 章内,但我认为这些应该是“二线”论题。第 6 章的前瞻性部分理应包括对涡环控制潜能的讨论,因为涡环控制系统是唯一对旋翼桨叶弦向、翼展方向和相位角方向非均匀分布气流具有破坏力的系统;然而该内容过于庞大,且与本书主线相去甚远。第 8 章涉及自动稳定方面的内容极其简洁,这是因为若选择对其进行冗长的阐述,人们将认为影响自动化稳定的原因是由于受到系统中机械和电子的作用,从而忽略空气动力的影响。

在编写本书时,我在与韦斯特兰直升机公司总工程师 D. E. H. (‘Dave’) Balmford 先生的探讨中获益良多,在此,我向他表示感谢。该公司其他同事也在特定章节中给予了我相关的知识辅助,如:M. V. Lowson 博士(现为布里斯托尔大学航空航天工程专业教授),7.10 节;F. J. Perry 先生,6.6 节;R. V. Smith 先生,7.11 节;B. Pitkin 先生,第 8 章。毋庸置疑,标准教材,特别是先前提及的那些,是非常宝贵的。这种宝贵,我相信在本书的文字和图表中也得到了充分体现。

我正式向韦斯特兰直升机公司允许我对图 2.11、图 4.10、图 4.11、图 7.6、图 7.7 进行复制表示感谢。此外,图 2.10、图 2.13、图 5.1、图 5.3、图 6.3 由出版商 Edward Arnold 提供;图 8.5、图 8.6 引自 A. R. S. Bramwell 的《直升机动力学》(1976);图 6.2 和图 6.5 由皇家航空研究院的 P. G. Wilby 先生提供,对这两幅图的复制也得到了皇家文书局的许可;图 2.12、图 4.2、图 4.4 由 J. P. Jones 博士提供。

感谢布里斯托尔大学的 Molly Gibbs 对手稿进行电脑录入,以及我孙子 Daniel Cowley 对图表的绘制。

J. Seddon

第2版前言

《直升机空气动力学基础》原著由约翰·塞登博士构思及撰写。原著不仅在旋翼机方面开拓了重要领域,并对其进行了广泛的拓展。遗憾的是约翰·塞登已逝,我承蒙抬爱,对该书第2版进行修订。但随之产生的问题是:我是将原著分解为具体细节,还是在保留原框架基础上加入自己的文稿?从该著作被联合署名起,约翰·塞登原有的观点便逐渐消失,若再选择前者就显得非常无情。所以,我选择了后者,即对原著进行修改、完善——特别是在图示例方面。对于初学者而言,直升机旋翼的设计、制造及操作往往较为难懂,而且冗长的文字叙述只会添显枯燥、毫无用途。因此,我使用了大量图示来阐述和佐证这些论述。

最初图表是手绘版,但并未获得完全成功。此后,计算机技术有了长足发展,书籍制图法也随之提高。由于内容增加,书籍大小也有所增加,不过我始终重视同原著的紧密相连。

直升机旋翼空气动力学仍在不断研究发展中。因此,该书主要是向学生介绍近期的发展情况,我也力争确保该书能够对最新发展进行介绍。虽然不足以对这些新技术进行详细解读,却可在读者脑海里建立起正确的认知,因而为将来更深入的研究,这些材料还是必备的。

此次修订旨在更充分地阐明旋翼空气动力和直升机设计的各种特征。直升机在空气动力和机械结构的结合方面是独一无二的,而且只有弄懂这些相互作用,才能更充分地了解飞行设备。该书用大量附图阐释了直升机设计和操作中的差异,而这些不同在文字中也得到了强调。

如同所有航空事业,团队的努力永远是必要的,这本书的汇编也不例外。一幅图片能够说明一千个单词,因此我呼吁诸多有才之士提供尽可能多的图片来详述、阐释。虽然我自己已有大量图片,但仍有数量可观的图片为友好提供,为此,我要衷心感谢以下人士的慷慨帮助:美国洛克希德·马丁公司的 Denny Lombard, GKN 韦斯特兰直升机公司的 Alan Vincent、Alan Brocklehurst 和 Alan Jeffrey, 先进科技股份有限公司的 Harry Parkinson, 卡曼公司的 Stewart Penney、Guy Gratton、David Long, 以及 Steve Shrimpton。

虽然我对自己的摄影感到非常满意,但我也注意到我拍摄的图片,通常是由地面拍摄,且气候怡人。与此相反,上述人士能够获得更优质的图片,是因为他们经常在极难险重的环境中将自己悬挂在直升机外部拍摄。这就是业余和真正专业者的本质不同。

我也要感谢那些提出诸多理念激发我讨论的同事们及科研人员,希望这些理念在此书中也能得到体现。非常感谢 David Balmford 在修正文章时提出的建议。我也要感谢 Ian Simons 在航空问题上经常给予我建议表示感谢。谢谢布莱克威尔科技出版公司的 Julia Burden 的宽容。手稿完成有所延迟,她仍坚持下来,不仅闭口不谈此事,还给予我可贵的帮助。是她交予我修改书籍的任务,希望我没令她失望。

最后感谢我的妻子 Stella,感谢她在这项工作最后的润色阶段忍受了我连绵不绝的咆哮声,并抢着为我冲咖啡。

西蒙·纽曼
于温彻斯特
2001 年 1 月

第3版前言

《直升机空气动力学基础》第1版由约翰·塞登编写,并很快在本科生、研究生,以及新加入直升机行业的工程师和技术人员的培训中找到了用武之地。非常遗憾的是由于早逝,使他无法看到这部作品的发展。出版商请我对该书进行第一次修订,已经是整整十年前的事了。能够为这本书的进展加入自己的元素是我的荣幸;这固然会令人生怯,但我坚信该书仍将会在直升机界拥有稳固的地位。大约两年前,当现在的出版商让我着手准备第三版时,这种望而生畏的感觉再次袭来。对于入门级用书来说,正如本书,没有必要把读者过于深入地带入课题的琐碎细节中;然而,对课题和那些将各种理论和分析联系在一起的重要因素浅尝辄止显然是不公平的。

由于不能将旋翼和整机的气动力学从桨叶本身的动态反应中独立出来,有关直升机的技术手段的结合就显得尤为关键。它们间彼此影响,共同解决问题。

1970年从数学专业毕业后,我来到位于约维尔镇的韦斯特兰直升机公司开始我的职业生涯。我很快意识到,虽然我拥有数学技能,但却需要学习如何运用数学知识。我也很快发现我是在与一群思维敏锐的人一起工作,在他们的帮助、激励和经验财富的指导下,我很快成为了他们中的一员。他们的奉献精神 and 慷慨无私,使我逐渐建立起自己的直升机航空力学事业,我将永远感激他们。一开始,我便受到 Geoff Byham、Ian Simons 和 Bob Hansford 在错综复杂的直升机旋翼方面的良好培训。随着事业的发展,我也非常感谢 Alan Vincent、Steve King、Tom Beddoes 和 John Perry 这些同事的陪伴。

我曾与其他的学者、研究人员、军人及大批飞行员有过接触,在此我也对他们表示感谢。在学术界,我从 Geoffrey Lilley、Ian Cheeseman、Roddy Galbraith、Roy Bradley、Gordon Leishman、Gareth Padfield 和 Richard Brown 那里学到了很多。在直升机行业工作中,也与不同领域的专家有过接触,如 RAE 已故专家 Peter Wilby、英国国防科技实验室的 Tim Cansdale 和帝国试飞员学校的 David Lee。在大学工作时的一大乐趣便是看到年轻人的发展,我有幸目睹 Ajay Modha、Malcolm Wallace、Mark Jones、Peter Knight 和 Matthew Orchard 从早期只是对直升机的研究渐渐步入了航空航天工业领域的研究。这些有时令我感到非常羡慕,如果能够重新开始,我也许已经作出更大的贡献了。但是,这些年轻人,是要决定未来的人,我将把机会留在这些有才能的人的手中。

创作一本书,需要很多人的帮助和无私奉献,对此我想一一阐述。若要开始书

籍编纂,就必须向我所在的大学做出请示。非常感谢校长 Mark Spearing,是他鼓励我承担此项工作。特别感激我的同事 Scott Walker 和 Hazel Paul,是他们保证了我的工作进度,及时整合了各章节,并保证了阅读顺畅,这对一本入门书籍而言至关重要。我还有幸得到了帝国试飞员学校 David Lee 对第 8 章的核对,以及为增加文章的可读性而提出的宝贵意见。本书囊括了大量图片,尽管一部分出自我手,我仍需大批专业摄影师的慷慨帮助,以填补许多空白。阿古斯塔·韦斯特兰公司的 David Gibbings 一直不吝于向我提供图片及技术支持。当我在网上对图片进行搜索的时候,偶然间发现了来自 Ashai Bagai、Steve Rod、Markus Herzig、John Olafson 和 Stewart Penney 的高水平摄影作品,而他们也非常友善地让我使用他们的辛劳成果。皮亚塞茨基公司的 John Piasecki 非常支持地向我提供了两张复合直升机设计图片。欧洲直升机公司的 Christina Gotzhein 也非常慷慨地提供了两张直升机的图像,一张是在喜马拉雅山,另一张是他们刚经过第一次试飞的最新设计。德克萨斯大学麦克德莫特图书馆的 Paul Oelkrug 提供了 XC142 直升机图片,对此我深表感谢。

感谢美国海军和空军网站,在这两个网站的公共开放区域都含有一系列出色的图片。可以说,它们为这本书的内容作出了巨大贡献。

还要感谢 John Wiley & Sons 出版公司的 Debbie Cox 和 Eric Willner,是他们的鼓励和自发的帮助使工作变得更加顺畅,并促成这本书更快上架。

我还要向他们的同事——Nicky Skinner 致以我的谢意,是 Nicky 促成了我与 John Wiley & Sons 出版公司的重要会面,并且在作为作者极易忽略的具体细节上给予我极大地帮助。她也负责在我的注意力转移到其他事情或者临近最后期限的时候提醒我。我一直期待着同她一起顺利完成这项工作,我们最近一次见面时仍在为图书上架做最后的努力。她年轻、开朗、讨人喜欢,并且十分精通自己的工作,所以当得知她突然早逝后,我深感悲痛。她在自己的本职工作以外帮助并鼓励过许多作者,遗憾的是这些再也不会发生了。但是我要感谢她对于这本书的“诞生”给予的众多有价值的贡献,我将永远怀念她充满魅力的微笑。书籍从电子版到纸质版需要生产人员相当大的努力,我非常感谢 Genna Manaog 在最后将本书交付印刷厂印刷。想要表达的和实际所表达的内容之间的差距往往是一个困扰,这就需要一个好的编辑来理顺文字,对此我要感谢 Neville Hankins 所作的贡献。

最后,我要向我的妻子 Stella 致以感谢,是她,在工作和生活中给予我巨大的支持。虽然由于疾病的困扰,她未能参与这本书的编写,但是,她的精神始终与我同在,也希望她能够满意我的最终成果。谨以此书献于我的妻子。

睹此书最终之版本,忆往昔漫漫之征途。老实说,一开始从事与直升机有关的工作,是因为大学毕业后我只接到来自韦斯特兰直升机公司空气动力学研究部的工作邀请函。所以,在 1970 年 9 月 2 日,萨默塞特郡一个阳光明媚的早晨,身着邓恩公司品牌新西装的我,一头扎进了这个行业。2011 年 2 月 18 日写这篇文章时,已经过了 41 年。这 41 年,有时感觉像 141 年般漫长,有时又像 41 天般短暂。无

论怎样,这段旅程所充斥的艰辛、沮丧、疯狂,终究幻化成了值得、启迪、谦恭和乐趣。如前所述,能得到诸多同事的鼎力相助,我确实很幸运。我衷心希望自己仍具备跨越更多障碍的能力。而对你们,广大的读者们,我真诚地希望你们在阅读这本书的时候,能够获得鼓舞和激励;阅读若能持之以恒,终将有重大发现,而那时,也是你们深感满足的时刻。

祝您一路平安!

西蒙·纽曼

于温彻斯特

2011年3月

目 录

字符说明	1
常规字符	1
希腊字符	2
下标	2
物理量单位	3
缩略语	4
第1章 概述	7
1.1 回顾	7
1.1.1 初期	7
1.1.2 第一次世界大战时期	9
1.1.3 两次世界大战之间	9
1.1.4 第二次世界大战时期	12
1.1.5 第二次世界大战后	13
1.1.6 工程师眼中的直升机	18
1.2 本书介绍	25
参考文献	26
第2章 垂直飞行状态下的直升机旋翼:动量理论和尾迹分析	27
2.1 悬停状态下的动量理论	27
2.2 无量纲化	29
2.3 悬停气动效率	29
2.4 垂直飞行	31
2.5 垂直上升时的动量理论	31
2.6 管流建模	35
2.7 垂直下降	37
2.8 风洞试验	44
2.9 完全诱导速度曲线	47
2.9.1 基本包线	47

2.9.2 自转	49
2.9.3 理想自转	49
2.10 动量理论的简要注释	50
2.11 真实尾迹的复杂性	50
2.12 尾迹分析方法	52
2.13 地面效应	53
2.14 沙盲现象	55
参考文献	56
第3章 垂直飞行状态下的直升机旋翼:叶素理论	57
3.1 基本方法	57
3.2 拉力近似解	61
3.3 非均匀来流	62
3.3.1 恒定下洗流	63
3.4 理想扭转分布	64
3.5 桨叶平均升力系数	65
3.6 功率近似解	66
3.7 桨尖损失	67
3.8 悬停特性实例	68
参考文献	69
第4章 前飞状态下的旋翼工作机理	70
4.1 前倾的旋翼	70
4.2 挥舞运动	75
4.3 旋翼操纵	77
4.4 等效挥舞和变距	82
4.4.1 桨叶漂移	83
4.4.2 摆振运动	83
4.4.3 哥氏加速度	83
4.4.4 摆振频率	85
4.4.5 桨叶柔性	86
4.4.6 地面共振	87
参考文献	95
第5章 前飞状态下的旋翼空气动力学	96
5.1 动量理论	96

5.2	下滑运动	100
5.3	尾迹分析	103
5.3.1	旋翼气流的几何形状	103
5.3.2	桨叶涡流的交互作用	106
5.4	叶素理论	107
5.4.1	引入的参数	107
5.4.2	拉力	109
5.4.3	桨盘平面内的 H 力	111
5.4.4	扭矩和功率	112
5.4.5	挥舞系数	114
5.4.6	特征数值解	116
	参考文献	118
第 6 章	气动设计	119
6.1	简介	119
6.2	桨叶部分设计	119
6.3	桨尖形状	123
6.3.1	矩形	123
6.3.2	后掠形	124
6.3.3	先进桨尖设计	124
6.4	尾桨	127
6.4.1	推进力矩	129
6.4.2	进动——偏航灵敏度	132
6.4.3	下洗流计算	137
6.4.4	偏航敏感度	138
6.4.5	实例——海王直升机	140
6.5	附加阻力	141
6.6	机身后部上掠	144
6.7	高次谐波控制	146
6.8	气动设计过程	147
	参考文献	152
第 7 章	性能	153
7.1	简介	153
7.2	悬停和垂直飞行	154
7.3	水平前飞	156
7.4	爬升	158

7.5	最大平飞速度	160
7.6	旋翼包线	160
7.7	精确性能预估	161
7.8	世界速度纪录	162
7.9	关于真正低阻力直升机的思考	163
7.10	高海拔飞行训练	165
7.11	舰载训练	168
	参考文献	172
第8章	平衡性,稳定性和操纵性	173
8.1	平衡性	173
8.2	稳定性和操纵性	176
8.3	静态稳定性	177
8.3.1	迎角干扰	177
8.3.2	前飞速度干扰	178
8.3.3	角速度(桨距或滚转速率)干扰	178
8.3.4	侧滑干扰	178
8.3.5	偏航干扰	179
8.3.6	结论	179
8.4	动态稳定性	179
8.4.1	动态稳定分析	179
8.4.2	特殊悬停实例	179
8.5	无铰式旋翼	180
8.6	操纵性	181
8.7	自动稳定	183
	参考文献	184
第9章	个人对未来的展望	185
	参考文献	191
附录	性能及任务计算	192
A.1	概述	192
A.2	术语表	193
A.3	整机	193
A.3.1	主旋翼	194
A.3.2	尾旋翼	195
A.3.3	整机	196