



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

国家出版基金资助项目

超声速飞机空气动力学 和飞行力学

Aerodynamics and Flight Dynamics for
Supersonic Aircraft

【俄】Г·С·比施根斯 等著
郭 桢 等译
顾诵芬 等校



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

国家出版基金资助项目

超声速飞机空气动力学 和飞行力学

Aerodynamics and Flight Dynamics for
Supersonic Aircraft

【俄】Г·С·比施根斯 等著
郭 桢 等译
顾诵芬 等校



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书由俄罗斯科学院院士和俄中央空气流体动力研究院主任专家们撰写,是一本关于超声速飞机的经典著作。

本书介绍了超声速飞机各种平面形状机翼和复杂形状机翼以及操纵面、进气道、尾喷口和机身的空气动力学问题。研究了超声速飞机的稳定性及操纵性、操纵系统的结构及其特性。探讨超声速飞机空气动力学和飞行力学及其与飞控系统的有机联系,阐明了飞机性能的算法及飞机主要参数的选择。

本书可供航空专业的科研人员、研究生和大学生使用。

The original Russian version of *Aerodynamics, Stability and Controllability of Supersonic Aircraft* by G. S. BUSHGENS is first published by MOSCOW NAUKA • FIZMATLIT in 1998.

图书在版编目(CIP)数据

超声速飞机空气动力学和飞行力学/(俄罗斯)比施根斯等著;郭桢等译. —上海:上海交通大学出版社,2009
ISBN 978-7-313-05627-6

I. ①超… II. ①比…②郭… III. ①超音速飞机—空气动力学②超音速飞机—飞行力学 IV. ①V271.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 229188 号

超声速飞机空气动力学和飞行力学

[俄]Г·С·比施根斯 等著

郭 桢 等译

顾诵芬 等校

上海交通大学 出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

上海锦佳装璜印刷发展公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 41.5 字数: 826 千字

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-05627-6/V 定价: 188.00 元

版权所有 侵权必究

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编：

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委副主任、两院院士）

副总主编：

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司副董事长、总经理）

马德秀（上海交通大学党委书记、教授）

编委：（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘洪（上海交通大学航空航天学院教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系主任、教授）

杨育中（中国航空工业集团公司原副总经理、研究员）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员）

汪海（上海交通大学航空航天学院副院长、研究员）

沈元康（国家民航总局原副局长、研究员）

陈刚（上海交通大学副校长、教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员）

林忠钦（上海交通大学副校长、教授）

金兴明（上海市经济与信息化委副主任、研究员）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

崔德刚（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅山（上海交通大学航空航天学院研究员）

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、重于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展,应用和体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008年5月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教1时,亲自撰写了《飞机性能捷算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》、《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理50多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输机气动设计》),由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》)等国外最新科技的结晶;国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》、《民用飞机气动设计》等专业细分的著作;也有《民机设计500问》、《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助,体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果,具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性,既可作为实际工作指导用书,亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养,有益于航空工业的发展,有益于大飞机的成功研制。同时,希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空,并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

出版说明

本书是俄罗斯中央空气流体动力研究院(TSAGI)40多年来研究超声速飞机设计经验的系统总结。书中不仅阐述了超声速飞机的气动现象而且给出了大量实验和计算数据。为了超声速飞机的安全和顺利飞行,还介绍了飞机的操纵稳定性以及相应的飞行控制系统,最后还介绍了飞机的初步设计方法。由于本书密切结合飞机设计的实际,为了使我国飞机设计人员能尽快学到这些基础知识,在本书的译述方面,我们采取了平行作业,俄方出一章我们就译一章,因此在俄文出版后不到一年,就由沈阳飞机设计研究所内部出版了中译本,并分发给各飞机设计所和相关的航空院校。由于当时急于译本问世,因此文字和版面的质量不够理想,不宜公开发行。现正逢上海交通大学出版社要出版一套航空专业丛书,为此请他们将此航空经典著作,进一步仔细校订后正式发行。

顾诵芬

2009年12月15日

初版序言

1990年中苏关系正常后,中国航空研究院和俄罗斯中央空气流体动力研究院(ЦАГИ)开展了长期有效的科技合作,直到现在。ЦАГИ的老专家们对我们有很深的友情。本书的主编比施根斯院士长期担任ЦАГИ的副院长,现在是院长顾问,1996年被我工程院聘为外籍院士,并被国家科委授予国际科技合作奖。比施根斯院士长期从事飞机空气动力学和飞行力学的研究工作,有极丰富的经验,写过多本飞行力学方面的专著,在俄罗斯航空界有极高的威望。

经过近10年和ЦАГИ的科技合作活动,使我们感到俄罗斯的空气动力研究始终围绕着怎样才能研制出好飞机这一主题。他们不仅为飞机设计局提供吹风服务,更重要的是给设计局以指导——新机应该采用什么样的气动布局和飞控系统。最终设计局各设计阶段的飞机布局都要通过ЦАГИ的评审。直到现在米格-29、苏-27歼击机都是由他们评审的,难怪西方评论米格-29、苏-27似乎出自一个模子,模子的来源就是ЦАГИ。90年代末亮相的多用途前线歼击机和1998年亮相的苏-37前掠翼飞机,其气动力设计也都有ЦАГИ的劳动,本书第2章就有很多前掠翼的材料,第18章讨论了鸭式布局的利弊。

ЦАГИ不仅有几十座各种试验段尺寸和速度范围的风洞,而且还有10多座飞行模拟台。更重要的是他们有在空气动力和飞行力学领域专业配套齐全的科研人员,他们一直是围绕着创造新飞机在努力,因此,在飞机空气动力学研究方面有着丰富的经验。

ЦАГИ从事超声速飞机气动力和飞行力学方面的研究已有50多年了,因此很自然地积累了大量的经验和数据。过去这些材料都是不能公开的。由于近10年来中俄航空科技合作,双方建立了友谊和信任,他们也需要很好地将长期

积累的经验总结出来,但是经济上又有一定困难,因此 ЦАГИ 和中国航空研究院签订了出版合同,并允许我们译成中文出版。这个合同得到前国防科工委的资助,我们特别感激。

关于专门讲超声速飞机空气动力学和稳定性与操纵性,又这样直接与飞机工程实际相结合的书,在西方公开出版物中还没有见到过。

本书主要的特点是突出介绍如何进行超声速飞机的气动力设计,介绍气动设计中可能遇到的气动力问题及其解决的对策。并且说明这些问题时用了大量的数据和曲线,很少用到理论公式,这对工程设计人员是非常实用的。

书中空气动力学部分是按气动力部件来分别阐述的,如各种形式的机翼、进气道、尾喷口、机身、操纵面的气动特性,并给出了估算气动力方法及有关其气动特性的大量实验结果,给设计人员清晰的量级概念。该书在最后还对超声速飞机各种布局形式作了评述,并对设计超声速飞机的参数优化选择作了详细介绍。

关于飞机的稳定性和操纵性结合了飞行控制系统一起来讲述,这也是少见的,但却是发展趋势,因为新一代飞机的飞行品质越来越多地要依靠电传操纵系统和主动控制技术。书中引用的材料大部分是与现实飞机相联系的。由于飞行力学研究已向过失速领域发展,因此,书中特别介绍了非定常运动和飞机的空间动力学理论。

这样一部密切结合飞机气动力及飞行控制设计实际的书是 ЦАГИ 40 多年来相关科技人员毕生经验的总结。因此,在 1998 年纪念 ЦАГИ 成立 80 周年的专刊中,在 ЦАГИ 的大事记中,均把它作为 ЦАГИ 90 年代的大事,文中说“它将使 ЦАГИ 科研人员的经验系统化并上升到可以指导一般设计的高度”。

由于我国现在在飞机空气动力学和飞行力学方面没有实用的、系统的新资料,严重地影响气动力设计水平的提高,而且往往还在走人家已经走过而又走不通的道路。为了我们新飞机的发展,应该让在飞机设计一线同志能看到这种新资料,但我们这些同志能看俄文的已经不多了,因此,中国航空研究院委托六〇一所尽可能快地将本书译出,为了加快进度有些章节特别请北航、西工大的教授和六二〇所的同志参加了译校。第 1 章由北航朱自强教授校译,第 2,4 章由六二〇所胡秉科研究员译,绪论和第 3,5,6,7,16,17,18 章由六〇一所郭桢译审译,第 8,15 章由西工大高浩教授译,第 9 章由六〇一所廖启凡译,第 10 章由六

〇一所孔繁杰译,第 11,12,13,14 章由六〇一所曾冬娟译。

六〇一所副总设计师李天同志校译了全书,气动力及全机布局部分由顾诵芬审校,飞行力学和飞控部分由李明院士审校。由于急于早日出书,因此译校比较仓促,肯定会有错误或不当之处,希望读者指出。

本书主要供飞机设计所的科技人员使用,也可以供气动力研究所,空军、海军航空兵的科技人员及航空大专院校的师生参考。

中国科学院院士
中国工程院院士 顾诵芬

1999 年 5 月

原版前言

超声速航空成功的发展超过 45 年了。世界上有几个超声速飞机的“发源地”——苏联、美国、法国、英国、瑞典、中国。历史上形成了的局面，由于许多原因，这些国家中的每一个实质上都是单独地进行着超声速航空领域的研究活动。具体的信息交流实际上是微乎其微。可以看得见的只是最终的工作成果，有时使其他国家感到意外。每个国家都在走自己的路，虽然如此，然而在许多方面的结果又往往是接近的。

显然，超声速航空方面的研制和发展，在各个领域里若不进行广泛的科学（理论和实验）研究、试验设计工作、积累和深化使用经验，是不可思议的。超声速航空领域的进步在很大程度上是由空气动力学的发展所决定的，所以认为在这一概念中包括了本书所研究的空气动力设计的全部综合问题。

现在在理论领域里提出的研究方法，在一般情况下能够得到在空气动力学和飞行动力学领域里的近似估算。近几十年来，供电子计算机使用的更为精确的方法得到了迅猛的发展。在计算理论和方法方面出现了大量的文献资料，但其中很多文献的叙述往往只限于综述这些方法并指出其可能的使用范围就结束了。

我们认为，把近几十年内，尤其是在 ЦАГИ 所进行的大量实验研究，按照基本的研究方向，并根据超声速航空技术进步的阶段把它们分类后，再加以系统化的概括和总结是有益的。

最近 20 年来，超声速飞机的设计要考虑到其操纵系统能够确定主要的布局参数这一概念。我们认为这一点有必要在这本书中反映出来，并用部分章节阐述超声速飞机的稳定性、操纵性问题和操纵系统。另外用一章专门阐述空气动

力设计的基本问题——飞机参数的选择。

本书是由 ЦАГИ 的科学研究工作者们——主要研究项目的直接参加者撰写的。作者们意识到,由于在所研究的领域中问题的多样性,虽然有大量的专著,但某些问题未能得到具体的阐明,因此在某些论述方式中可能有个别疏漏。作者们将以感激之情接受读者们关于改进和深化本书内容的意见和要求,因为这本书实质上是这样概括和总结的初次尝试。

本书的编制和问世承蒙中国航空研究院,特别是顾诵芬院士的大力支持,作者们对此深表谢意。作者们还感谢 ЦАГИ 的领导,特别是副院长 В·Л·苏哈诺夫所给予的支持和帮助。

在编制本书时,ЦАГИ 的工作人员 К·Ю·科斯明科夫在编辑手稿及其出版加工方面作了大量工作。就本书的一些章节,Г·А·费多连科和 В·С·别尔科给了他以帮助。对于出版本书的俄文版,ЦАГИ 的青年专业人员在 М·А·伊万金的领导下编排了本书的版式。作者和主编对他们全体深表谢意。

俄罗斯科学院院士
中国工程院院士

Г·С·比施根斯

各章作者名单

- 绪 论 Г·С·比施根斯
- 第 1 章 А·А·格拉德科夫, П·Д·伊罗多夫, Г·А·费多连科
- 第 2 章 Н·К·列别季, Л·Н·昂科娃
- 第 3 章 П·Д·伊罗多夫, Н·К·列别季, Г·Л·雅基莫夫
- 第 4 章 Л·Е·瓦西利耶夫, П·Д·伊罗多夫, Л·А·库罗奇金, А·А·帕弗连科, Г·А·费多连科
- 第 5 章 В·И·瓦西利耶夫, А·К·伊万纽什金, Е·В·帕弗留科夫, В·Д·索科洛夫
- 第 6 章 К·П·彼德罗夫
- 第 7 章 В·Г·米克拉泽
- 第 8 章 М·Г·戈曼
- 第 9 章 В·Я·鲍恰罗夫
- 第 10 章 Г·С·比施根斯, М·Г·戈曼, А·С·乌斯季诺夫
- 第 11 章 А·Г·比施根斯
- 第 12 章 Г·С·比施根斯
- 第 13 章 В·С·别尔科, Ю·Г·日沃夫
- 第 14 章 В·Л·苏哈诺夫
- 第 15 章 М·Г·戈曼
- 第 16 章 П·Д·伊罗多夫, Л·А·麦德维日尼科娃, Г·А·费多连科
- 第 17 章 П·Д·伊罗多夫
- 第 18 章 П·Д·伊罗多夫

目 录

绪论 1

第 1 章 确定空气动力特性的基本方法 24

- 1.1 计算方法概述 24
- 1.2 用模型风洞试验确定飞机空气动力特性 36
- 1.3 风洞试验条件对升力特性和诱导阻力的影响 43
- 1.4 模型空气动力阻力换算成真实条件 49

第 2 章 直机翼、后掠机翼和三角机翼超声速飞机空气动力学 58

- 2.1 小迎角时直机翼、后掠机翼和三角机翼的绕流 58
- 2.2 迎角对直机翼、后掠机翼和三角机翼绕流的影响 71
- 2.3 机翼参数对机翼-机身组合体气动特性的影响 82
- 2.4 超声速飞机在大迎角时的空气动力学 100
- 2.5 地面效应对超声速飞机气动特性的影响 110

第 3 章 变几何形状机翼超声速飞机的空气动力学 117

- 3.1 变几何形状机翼飞机空气动力特性的特点 117
- 3.2 变几何形状机翼翼形的选择 126
- 3.3 变几何形状机翼飞机在大迎角下的空气动力学 132
- 3.4 变几何形状机翼的起飞-着陆增升装置 138
- 3.5 变几何形状机翼飞机的空气动力布局 146

第 4 章 复杂平面形状机翼超声速飞机空气动力学旋涡控制 154

- 4.1 复杂平面形状机翼空气动力学及其对超声速客机(CIIC)的应用 154
- 4.2 大迎角时提高薄机翼升力特性和升阻比的原则 157
- 4.3 在机翼根部有前边条的飞机空气动力学(涡流控制) 168

- 4.4 有机翼增升装置的飞机气动特性 174
- 4.5 有自适应机翼的飞机气动特性 181
- 4.6 超声速飞机在大迎角时的静稳定性 186
- 4.7 复杂平面形状机翼超声速飞机空气动力学的一些结论 190

第5章 超声速飞机进气道和尾喷管的空气动力学 192

- 5.1 进气道的特性 192
- 5.2 超声速进气道的型别 202
- 5.3 进气道的调节 209
- 5.4 进气道的外部阻力 211
- 5.5 进气道的设计 212
- 5.6 进气道和飞机机体的综合 220
- 5.7 超声速飞机动力装置的尾喷管 226
- 5.8 超声速飞机轴对称喷管的有效推力 233
- 5.9 带推力矢量控制和反推力装置的二元超声速喷管的气动特性 239

第6章 超声速飞机机身空气动力学 247

- 6.1 前言 247
- 6.2 旋成体绕流的特点 248
- 6.3 机身阻力 251
- 6.4 在大迎角无侧滑的情况下机身不对称和非定常绕流 261

第7章 操纵面的空气动力学 266

- 7.1 翼型上舵面的空气动力特性 266
- 7.2 纵向操纵面 267
- 7.3 横向操纵面 274
- 7.4 方向操纵面和稳定面 282

第8章 非定常运动中超声速飞机空气动力学 284

- 8.1 确定空气动力导数的计算和实验方法 284
- 8.2 小迎角下的阻尼特性 288
- 8.3 大迎角空气动力学 290
- 8.4 非定常空气动力特性的描述方法 308
- 8.5 在偏离和尾旋的动力学研究中空气动力特性的表示 311
- 8.6 动态和静态迟滞的模拟 314

- 第9章 超声速飞机的操纵系统** 323
- 9.1 超声速飞机的操纵系统的结构与操纵装置 324
 - 9.2 操纵系统的控制部分 342
 - 9.3 操纵系统的执行部分 353
 - 9.4 操纵系统的可靠性 364
- 第10章 飞行动力学分析的基本方法** 372
- 10.1 刚性飞机动力学的数学模型(运动方程式) 373
 - 10.2 考虑飞机结构弹性的飞机运动方程式 382
 - 10.3 飞机稳定性和操纵性的分析方法 390
 - 10.4 关于稳定性和操纵性的要求 398
- 第11章 在飞行模拟器上模拟飞机的动态特性** 413
- 11.1 起飞-着陆特性研究 415
 - 11.2 短周期运动特性的模拟器演示 421
 - 11.3 故障情况下的驾驶模拟演示方法 426
 - 11.4 以微机为基础进行半物理模拟的培训设备、练习设备和研究设备 428
- 第12章 超声速飞机的纵向稳定性和操纵性** 435
- 12.1 概述 435
 - 12.2 改善纵向阻尼的控制增稳系统 439
 - 12.3 静不稳定飞机的控制增稳系统——一般原理 442
 - 12.4 无静差陀螺控制增稳系统 444
 - 12.5 无静差过载控制增稳系统 453
 - 12.6 纵向运动有静差控制增稳系统 460
- 第13章 控制系统的实际动态特性对飞机稳定性和操纵性的影响** 468
- 13.1 操纵系统各元件的动态特性 468
 - 13.2 考虑控制系统元件特性带控制增稳系统的飞机动态 476
 - 13.3 控制增稳系统中的极限状态限制器 484
 - 13.4 控制增稳系统执行部分的非线性对飞机稳定性的影响 486
- 第14章 超声速飞机横侧稳定性和操纵性** 499
- 14.1 横侧操纵稳定运动中的气动特点 499
 - 14.2 飞机横侧运动稳定性的近似分析 504
 - 14.3 飞机横航向操纵性 509