

THE SERIES  
OF FRONTIER

科技前沿书系

SCIENCE  
&  
TECHNOLOGY

空气动力学研究成果和飞机设计思想对航空工业的发展产生了巨大的积极影响。航空工业的发展始终有赖于空气动力学的进步。空气动力学新概念、新理论的提出，可以使航空技术获得新的、甚至是革命性的发展。

# 空气动力学与航空工业

李成智 著



山西出版传媒集团 山西教育出版社

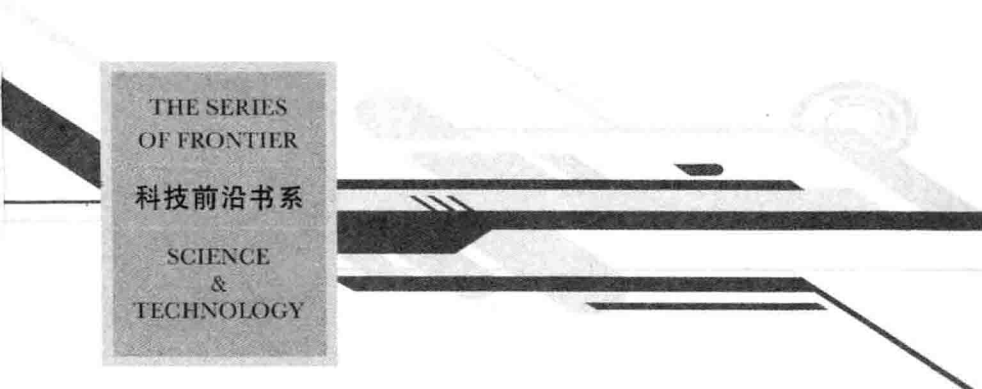
责任编辑 郭志强  
复 审 薛海斌  
终 审 刘立平  
装帧设计 王耀斌  
印装监制 贾永胜

ISBN 978-7-5440-5049-4



9 787544 050494 >

定价：18.00元



THE SERIES  
OF FRONTIER

科技前沿书系

SCIENCE  
&  
TECHNOLOGY

# 空气动力学与航空工业

李成智 著

山西出版传媒集团  
山西教育出版社

## 图书在版编目(C I P)数据

空气动力学与航空工业/李成智著. —3 版. —太原:山西教育出版社, 2012. 1

(科学前沿丛书/甘师俊,陈久金主编)

ISBN 978 - 7 - 5440 - 5049 - 4

I. ①空… II. ①李… III. ①空气动力学 - 普及读物 IV. ①V211 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 182427 号

## 空气动力学与航空工业

KONG QI DONG LI XUE YU HANG KONG GONG YE

---

责任编辑 郭志强

复 审 薛海斌

终 审 刘立平

装帧设计 王耀斌

印装监制 贾永胜

出版发行 山西出版传媒集团·山西教育出版社

(太原市水西门街馒头巷7号 电话:0351-4035711 邮编:030002)

印 装 山西人民印刷有限责任公司

开 本 850 × 1168 1/32

印 张 9.25

字 数 226 千字

版 次 2012 年 1 月第 3 版 2012 年 1 月山西第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5440 - 5049 - 4

定 价 18.00 元

---

如发现印装质量问题,影响阅读,请与印刷厂联系调换。电话:0358-7641044

## “科普前沿书系”编委会

---

主 编◎ 甘师俊 陈久金

副 主 编◎ 王渝生 刘 钝 曹效业

王葆青 任兆文

编 委◎ (按姓氏笔画为序)

王克迪 王佩琼 王葆青 王渝生

甘师俊 刘 钝 刘戟锋 迟 计

任兆文 李小娟 李劲松 苏荣誉

陈久金 陈朝勇 张 黎 张国祚

张柏春 周 元

项目策划◎ 苏荣誉 迟 计 周 元 王佩琼

## 引 言

——更高、更快、更远

---

空气动力学是研究空气和其他气体的运动以及它们与物体相对运动时相互作用的科学，是流体力学的主要分支学科。它是航空技术最重要的理论基础之一，与飞机设计的关系异常紧密。空气动力学的每一次重大突破，会引起飞机设计思想的革命，并进而导致航空技术的变革。可以说，航空技术发展的每一阶段都深深打上了空气动力学的烙印。

航空技术的发展是时代的要求。在航空发展的早期阶段，先驱者们不解探索的唯一目标就是能飞起来。然而这一步曾花费了上千年时间，并且有许多勇敢的探索者献出了宝贵生命。为什么自然界中有那么多能自由自在翱翔天空的生物，鸟类、昆虫、蝙蝠都能凌云展翅，而人就不能升空飞行呢？这个问题长期困扰着我们的祖先。直到近代以前，人们始终不能理解这一点。于是他们把鸟类能够飞行归结为某种神秘的力量。文艺复兴以后，科学得到长足发展。大量的科学新知识扫除了种种无知和偏见。科学家、学者开始重新看待鸟的飞行和人的飞行问题。许多学者都认为，既然自然界有能飞行的生物，人最终也能实现飞起来的愿望，只是必须借助人造的飞行机器。

研究设计飞行机器必须首先弄清楚鸟是怎样飞行的，是什么力量使之克服重力凌空飞翔的？这又涉及到两方面的问题。一是鸟类等生物的解剖结构，鸟的翅膀等身体各部位的机械运动方式；

一是鸟类飞行的环境——空气的特性以及它作用于鸟的各种力。后一个问题实际上就是空气动力学研究的基本内容。

空气在我们的生活中起着生死攸关的作用。人可以几小时不喝水，可以几天不吃飯，但却须臾离不开空气。也许正因为空气与人的关系太紧密了，以至于我们似乎忘记了它的存在。对空气的研究和认识千百年来一直非常粗浅。古希腊学者认识到空气是客观存在的实体，并把它作为开成万事万物的四大要素之一。有的学者还天才猜测到空气具有重量、弹性，并会对物体产生压力。空气与风的密切关系也得到了初步揭示。利用这些知识，古代人民曾发明了多种利用空气动力的简单机械。但这些认识往往属于简单直观的范畴，猜测的成分很大。由于空气既看不见也摸不着，加之人们的日常生活并不需要对它有多么深刻的了解，因此直到近代开始之前人们对空气特性的认识仅此而已。

从近代开始，科学发展和工程实践的需要促使空气的研究逐渐成为一门科学。空气静力学原理、波义耳定律、空气阻力定律以及空气弹性定律等关于空气特性的定量认识和大量定性研究对于解决气压计、抽气机、水压机、风速计等工程问题发挥了重大作用。从牛顿开始，运动空气对物体的作用力问题受到广泛关注。牛顿认识到空气和水的运动规律是相似的；空气动力取决于空气密度和运动速度，取决于物体的形状和尺寸。当时对空气动力学需要最迫切的领域是弹道学。也正是由于弹道学的研究导致第一种空气动力学实验装置——旋臂机的发明。它后来成为航空先驱者研究升力和阻力特性的重要实验仪器。

19世纪航空研究由盲目冒险变成一门实验性的科学。这一转变的主要标志是，先驱者们从片面模仿鸟的飞行转变为研究鸟的习机机制，并进而把飞机原理用于飞机设计，从而导致固定翼飞机设计思想的出现。在这个过程中，航空先驱者利用简单的实验装置获得了大量关于机翼升力和阻力的测量数据，并建立了半定

量的升力公式。19世纪后期，专门用于气动研究的风洞出现了，它使空气动力学实验研究手段发生了革命性变化。利用大量测量数据，先驱者们开始研制动力的飞机或滑翔机。利用前人的研究成果和有关气动实验数据并结合自己的研究，莱特兄弟在20世纪初终于研制成功世界上第一架飞机，开创了航空新纪元。他们取得成功的秘诀是将空气动力学实验研究与飞机设计实践完美结合，其中最关键的是有效解决了飞机的空气动力稳定与操纵问题。

第一架飞机诞生后十几年，在世界范围内掀起了空前的航空热。新飞机不断涌现，创纪录飞行高潮迭起，飞机的早期应用也已开始。到此为止，所有这些进展都是在空气动力学理论大大落后于航空实践的情况下取得的。这一阶段航空技术的发展具有很强的经验色彩。设计师们能设计一架又一架能飞的飞机，但他们不知道如何大幅度提高飞机性能，减少飞机事故。经验式的飞机设计存在着根本性缺陷。

航空在早期曾被称为“工匠的事业”，原因是从事飞机研制的人大多不具备很高的科学素养。他们重视通过实验测量升力和阻力，但不理解升力产生的本质；他们重视设计飞机，但对飞机的稳定与操纵认识和关心不够。空气动力学理论的滞后影响到飞机性能的迅速提高，也限制了飞机早日投入实用。

航空理论研究工作在飞机诞生以前就已悄悄开始。有趣的是，对空气动力学理论发展作出过开创性贡献的却是一些大不相信飞机能够研制成功的大科学家。同样有趣的是，升力理论的突破口是关于网球飘球现象的研究。开尔文、亥姆霍兹、瑞利等著名科学家在这一研究过程中，建立起了环流等概念和原理，解释了网球飘球的所谓马格努效应。在他们的研究成果的基础上，20世纪初完整的机翼升力理论终于诞生。与此同时，机翼理论、边界层理论、阻力理论、稳定理论相继出现，不但完善了空气动力学，而且在指导飞机设计中发挥了巨大作用。随着各国空气动力



学研究机构的创建，空气动力学理论和实践研究成果越来越成为提高飞机性能、促进航空发展的决定性因素之一。飞机升阻比特性的改善，飞行性能的提高，稳定性、操纵性和安全性的改善都与气动研究成果的运用紧密相关。升力理论、阻力理论和稳定理论成为指导飞行器设计、提高飞机性能的关键因素。从此，飞机研制从个人的经验性行为变成理论、实践和设计密切结合的技术和工业门类。航空技术走上了真正科学的发展道路。

第一次世界大战爆发后，尚处幼年的飞机便投入了战场。虽然它并没有对战争进程产生很大影响，但它那无可比拟的优越性却充分显示出来。20世纪二三十年代，伴随着飞机应用领域的迅速扩大及新技术、新材料和新思想的广泛运用，飞机的发展进入了一个重要的历史时期。20世纪30年代后期，作战飞机和民用飞机都取得了革命性的进步。第二次世界大战导致航空技术的第二次大发展。参战飞机数量剧增，性能日新月异，空军发展成为对战争全局有重要影响的一支军种。民用航空在全球范围内确定了牢固地位，对国际间交往和商业发展产生了巨大影响。地球正因为高速航空运输的实现而变小，社会面貌和结构都发生了深刻变革。

从20世纪二三十年代开始，空气动力学就与飞机设计结下了不解之缘。航空的发展不断给空气动力学提出新的研究课题，空气动力学新成果的运用不断使飞机向更高、更快、更远的方向发展。在空气动力学的历程中，既有小步伐地向前迈进，又有飞跃式地迅速发展。人们经常将空气动力学发展分成低速、超音速和高超音速阶段。这些阶段既是自身的逻辑发展步骤，又与航空技术的实际历程相吻合。

我们极为熟悉的空气实际是非常复杂的。空气有重量、有弹性、有粘性、可压缩。在与物体如飞机机翼相互作用时，既可产生有用的升力，又可产生各种有害的阻力。空气动力特性还随物

体大小、形状、运动状态和环境的变化而变化。如果考虑所有这些因素，理论分析研究将是不可能的。19世纪建立的描述连续空气介质运动的基本方程组（纳维-斯托克斯方程）至今也没有求得数学解析解。因此，只能根据实际情况进行简化处理。升力理论的建立忽略了空气的粘性和可压缩性。边界层理论进一步考虑到粘性，但仍忽略了可压缩性。整个低速阶段都将空气看作是\*\*不可压缩的连续流体\*\*，这种近似处理产生的误差不大，可以满足工程需要。

随着飞机速度的提高，当达到音速的0.4倍以上时，空气的可压缩效应变得显著起来，在不可压缩假设下的计算结果必须进行修正。在接近音速时，伴随着的可压缩效应上升为主导因素，还会出现激波、波阻等一系列新现象。在高速空气动力学理论和实验研究的过程中，科学家们提出了推迟激波来临、降低波阻的方法，使飞机突破音障成为可能。除了后掠翼概念的提出，20世纪50年代又出现了超临界机翼概念、面积率理论、高速翼型设计、变后掠翼思想。这些成果连同喷气发动机技术、材料技术和结构技术，为实用超音速时代的到来作出了巨大贡献。

随着飞机速度的进一步提高，还会出现空气动力加热现象，即所谓的热障。当进入高超音速阶段并达到超高空时，空气会出现离解，并且不能再当做连续介质来处理。这方面的研究还是很初步的。在常规飞机中，只有美国的X-15曾达到这样的高速度和超高空。美国和苏联的航天飞机作为一种航天飞行器为高超音速空气动力学研究作出了巨大贡献。

航空技术发展的总体目标是飞得更高、速度更快、航程更远。但不同用途的飞机具体性能要求也不同。战斗机在要求高、快、远的同时，根据航空作战思想的变化越来越强调高机动性能和短距起降性能；轰炸机在高载重、大航程的提前下，也向超音速方向发展；干线客机的要求与轰炸机有相似之处，但更强调经济性

和安全性。空气动力学家和飞机设计师基于这些困难的、常常是相互矛盾的要求，作了大量不懈努力，提出了许多新思想、新理论、新概念和新方法，在一定程度上满足了这些要求。例如，各种增升装置大大改善了飞机升阻比特性；变后掠机翼解决了作战机高低速性能不能兼顾的矛盾，提高了起降性能；层流机翼和超临界翼型降低了飞机阻力，提高了飞机性能；主动控制技术提高了战斗机的机动性，改善了飞行品质，削弱了失速、颤振等不利影响；先进翼型和翼梢装置降低了诱导阻力，提高了民用飞机的经济性。目前气动一体化设计思想方兴未艾，气动/推进一体化、气动/控制一体化、气动/隐身一体化技术在未来作战飞机设计中发挥关键作用，成为研制具有超高机动性、超音速巡航性能、隐身性能飞机的重要手段。

由于种种因素的限制，理论分析、求解和计算结果不能准确反映空气动力的实际情况，因而也就不能满足飞机设计的需要。各种气动实验装置是空气动力学发展和飞机研制的不可或缺的手段。风洞自发明之日起，一直是最重要的空气动力学实验工具，它本身也获得了迅速发展。低速风洞朝着越来越大的方向发展，目前已能适应全尺寸飞机的实验要求。高速风洞在不断提高马赫数的同时，实验段尺寸也在逐渐增大，实验时间也在逐步延长。低温风洞的出现使实验雷诺数越来越接近实际飞行环境的雷诺数。风洞既是飞行器设计的基本工具，也是检验气动设计新思想的主要手段。随着计算机技术的发展，计算空气动力学应运而生。它用数值方法借助电子计算机来满足初、边值条件的空气动力学基本方程组的数值解，对空气流动的流场进行数值模拟，可以对给定外形的飞行器进行空气动力学分析，也可以按预定气动特性要求设计飞行器的外形，对理论研究和设计实践都具有十分重要的意义。计算空气动力学使飞行器设计过程发生了根本性变革。空气动力学理论研究、实验研究和数值计算优势互补，并称为指导

飞行器设计的三大手段。

在航空技术大踏步向前发展的同时，各种先进飞行器不断推向社会各个应用领域。作战飞机投入军事，使作战方式发生了一场革命，空中力量已成为现代战争机器的核心，发挥着先锋和骨干作用。运输机的使用大大改变了交通运输结构，飞机为人们提供了一种快速、方便、安全、舒适和经济的运输手段，大型干线客机已经取代了远洋客轮，成为人们洲际往来的主要工具。国内航班越来越多地代替铁路客运，促进了经济的发展，加快了边远地区的开发。农业飞机广泛用于播种施肥、除草灭虫、森林防火以及水利勘测，对传统农业生产方式的变革产生了深远的影响。航空在空中摄影、大地测量、地质勘探、资源调查、环境监测、体育运动、旅游等方面发挥着日益重要的作用。航空事业对国民经济、国防建设和社会生活各方面都产生了巨大影响，改变了世界面貌。

空气动力学研究成果和飞机设计思想对航空工业的发展产生了巨大的积极影响。如果按照空气流动的流型考虑，低速、超音速和高超音速各阶段都利用了同一种流型，即附着流型。无论是低速飞机还是超音速飞机，它们的机翼产生升力的机制是相同的。根据空气流动的基本流型划分，除传统的附着流型外，还有脱体流型和激波流型。这种划分一般人看起来似乎比较陌生，但却更能反映升力产生的本质不同。在附着流型下，升力是由围绕机翼的附着涡产生的，翼尖处的自由涡则产生诱导阻力。因此飞机设计的基本思想是“扬附着涡，抑自由涡”。20世纪50年代在设计超音速客机的过程中，一方面在附着流型指导下无法设计出满足要求的超音速客机，一方面在脱体涡的理论和实验研究上有了重大突破。这方面的探索和研究导致利用脱体流型这一全新流型的出现，使飞机设计思想发生了一场革命。脱体流型使空气动力学完成了一次流型上的飞跃，并导致实用超音速客机的诞生。

脱体涡升力后来成功地用于高性能战斗机上，边条翼和鸭式翼就是利用涡升力的气动部件，对提高飞机机动性十分有利，成为第三代和第四代超音速战斗机设计的基本特征。

现有的细长翼、边条翼和鸭式翼都没有充分有效地利用脱体涡升力，脱体流型的潜力尚未发挥出来。在利用脱体涡升力方面，人的智慧和努力还远远不及昆虫与生俱来的本领。虽然人对鸟和昆虫飞行的研究经历了几个世纪，飞机的发明和发展在一些方面也得到飞行动物的启示，但它们飞行的许多奥秘至今仍未得到揭示，许多现象人们只知其然而不知其所以然，揭开鸟的飞行秘密仍是科学家孜孜以求的研究课题。人们知道鸟的翅膀的扇扑运动和昆虫的振翅运动是高度复杂的，周围气流的运动是高度非线性非定常的，它们极为灵活有效地利用了脱体涡升力。如果能进一步弄清它们是如何利用涡升力的并将其应用于飞机设计中，将使航空技术发生新的革命性发展。最显而易见的两大前景是：一、在保持现有飞机性能不变的情况下，大大提高飞机的起降性能、灵活性、安全性和适应性；二、使人力飞机以全新的面貌出现并达到实用化。

激波流型目前还处在理论探索和有限的实验阶段。在迄今为止全部的高速飞行器设计中，空气动力学理论家和设计师都在想方设法推迟甚至避免激波的到来，想方设法削弱激波强度从而降低激波阻力。激波是飞行器前面气体受到剧烈的碰撞、聚焦形成的强压缩波，具有高压强、高密度、高温和低速等特点。在航空工程界为削弱或消除激波而不懈努力的时候，利用激波产生高升力的思想悄悄产生了。1959年英国人诺维勒首次提出利用激波产生升力的思想。20世纪60年代，许多空气动力学家就利用激波升力进行了理论和实验探索，形成了乘波飞机概念。乘波飞机原理非常简单，但研制乘波飞机难度极大。20世纪80年代后期对跨大气层飞行器（即空天飞机）研究的兴趣，乘波飞机研究与实验热

潮悄然兴起。进入 20 世纪 90 年代，乘波飞机已由理论研究转向设计、试验、甚至试飞研究，工程界和军界也加入到研究行列中来，使乘波飞机研究呈现出欣欣向荣的局面。乘波飞机最适于高超音速飞行，巡航飞行速度段约为音速 4~8 倍，最大可达 12 倍。它的巨大应用潜力是不言而喻的。它可作为高超音速洲际民航机使用，也可作为单级或两级入轨空天飞机。乘波飞机将使飞机设计和航空技术发生一场深刻的革命。

飞机的种类、形状和用途千差万别，但任何一架飞机都有六个基本特征：提供足够的升力；具有较高的气动效率（升阻比）；产生足够的推进力；具有良好的稳定性能；具有满意的操纵与控制能力；具有满意的全机受力受热特征。这些特征在很大程度上取决于空气动力学因素，因而航空工业的发展始终有赖于空气动力学的进步。空气动力学新概念、新理论的提出，引起飞机设计新思想、新方法的产生，可以使航空技术获得新的、甚至是革命性的发展。空气动力学研究需要创造性的新思想新观念、完美的实验手段、先进的计算技术、不断发展的理论工具以及巨额的投资。空气动力学的研究课题依然十分艰巨，发展前景依然十分光明，航空技术也有着远大的未来。航空技术的进步，各种飞机的不断涌现，使人类社会发生了深刻的变革。在未来，航空事业对政治、经济、军事、科技、文化和社会将产生更加广泛而深远的影响。

## 目 录

---

<b>一 空气、飞鸟、扑翼机</b> .....	( 1 )
1. 我们的大气层 .....	( 1 )
2. 古人眼里的大气 .....	( 6 )
3. 鸟儿为什么能飞 .....	( 13 )
4. 扑翼机探索时代 .....	( 25 )
<b>二 研究、探索、飞起来</b> .....	( 36 )
1. 奠基性的理论准备 .....	( 37 )
2. 开创性的实验积累 .....	( 45 )
3. 探索性的飞行实践 .....	( 52 )
4. 划时代的伟大起飞 .....	( 63 )
<b>三 升力、阻力、边界层</b> .....	( 72 )
1. 网球飘球的奥秘 .....	( 73 )
2. 机翼升力的产生 .....	( 77 )
3. 五花八门的阻力 .....	( 85 )
4. 边界层处理方法 .....	( 92 )

---

<b>四 理论、实验、航空工业</b> .....	( 97 )
1. 气动力学威力巨大 .....	( 98 )
2. 气动增升卓有成效 .....	( 104 )
3. 气动减阻任重道远 .....	( 113 )
4. 理论实验优势互补 .....	( 120 )

---

<b>五 稳定、操纵、安全性</b> .....	( 131 )
1. 保持飞行的稳定 .....	( 132 )
2. 实现有效的操纵 .....	( 137 )
3. 防止危险的尾旋 .....	( 142 )
4. 消除可怕的颤振 .....	( 150 )

---

<b>六 音速、超音速、高超音速</b> .....	( 161 )
1. 压缩效应与激波 .....	( 161 )
2. 突破音障和热障 .....	( 172 )
3. 航空超音速时代 .....	( 181 )
4. 向高超音速冲击 .....	( 189 )
5. 乘着激波的翅膀 .....	( 199 )

---

<b>七 新思想、新技术、新性能</b> .....	( 207 )
1. 飞机的推陈出新 .....	( 208 )
2. 气动与推进结合 .....	( 220 )
3. 主动控制的潜力 .....	( 223 )
4. 气动隐身的奥秘 .....	( 232 )
5. F-117 与 B-2 揭秘 .....	( 241 )



<b>八 旋涡、协和式、飞行动物</b> .....	( 250 )
1. 经典气动力设计 .....	( 250 )
2. 巨大的旋涡能量 .....	( 253 )
3. “协和”超音速客机 .....	( 257 )
4. 鸭翼、边条翼飞机 .....	( 263 )
5. 学习鸟儿和昆虫 .....	( 267 )

---

参考文献 .....	( 278 )
------------	---------