

空气动力学

——运动空气的科学

[英] J. E. 艾伦 著

黄志澄 张如清 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书对现代空气动力学的发展和应用进行了综合评述。本书的第一版于1963年出版，已译成德文、法文、西班牙文和日文。由于开发新能源、防止污染和降低噪声等方面对空气动力学提出了新的要求以及计算机技术的发展给空气动力学带来了深刻的变化，在1982年出版的第三版中，对这些方面的内容作了重要补充，在航空航天技术方面也补充了最新材料。本书的前四章叙述空气动力学的发展简史，运动空气的主要流动图案以及空气流动的理论和实验方法；后四章叙述了空气动力学在自然界、运输、工业、航空及航天方面的应用，最后一章总结了空气动力学对现代文明的重要作用。

本书可供航空、航天、气象、建筑、交通、能源、冶炼、环境保护、自动控制、农林等各个领域中与空气动力学有关的科技人员和管理人员参考。对于大学生和对空气动力学感兴趣的读者，本书也是一本生动有趣的高级科普读物。

AERODYNAMICS THE SCIENCE OF AIR IN MOTION

John E. Allen

Granada Publishing, 1982

*

空 气 动 力 学 ——运动空气的科学

〔英〕 J. E. 艾伦 著

黄志澄 张如清 译

责任编辑 玉丽燕

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

河北省涿州中学印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张 8 1/2 185千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷 印数：0,001—1,500册

ISBN7-118-00216-X/V21 定价：1.75元

0299/01
译 序

当前，我国空气动力学界正围绕着“空气动力学在新技术革命中应该作出什么贡献？怎样才能作出贡献？”等问题展开了激烈的讨论。我们翻译这本书的目的正是在于为这方面的讨论提供一些参考资料。

空气动力学的发展是与航空和航天技术的发展紧密相关的，它的发展过程大体经历了三个阶段：本世纪初的低速阶段；第二次世界大战前后的高速阶段；六十年代末、七十年代初的新阶段。在这个新阶段中，体现航空和航天技术相结合的航天飞机的出现、飞行器设计中飞行器和发动机一体化技术的出现、空气动力学和控制技术的结合等新课题的出现，要求空气动力学能够更全面、更系统地解决航空航天技术发展过程中出现的许多实际问题。另一方面，空气动力学正在逐步朝着气象、建筑、交通、能源、农林、环境保护和自动控制等国民经济的领域扩展。在研究方法上，计算机的应用大大改变了空气动力学的面貌，计算空气动力学已成为空气动力学的一门新兴的分支学科。计算机作为空气流动的数学模拟设备已代替了部分风洞的作用，而且计算机和风洞之间大有密切结合的趋势。另外，激光、微电子、信息、新型材料、人造卫星等新技术在空气动力学实验技术方面正逐步得到应用。对上述这些方面，本书都有不同程度的论述。

本书的作者 J. E. 艾伦是英国航空航天工业公司，金斯敦 (Kingston) 分公司负责规划的总工程师。1941 年，他

在英国皇家飞机研究院开始进行空气动力学的研究工作。五十年代，他致力于有翼导弹，例如蓝钢（Blue Steel）的设计和空气动力研究工作。后来，他参加了在金斯敦的霍克·西德利（Hawker Siddeley）飞机公司的远景规划小组，研究超声速运输机、战斗机的运动学和升力喷气发动机的规划等问题。1969年，他担任现职，并从事霍克·斯特里克/特雷纳（Hawk Strike/Trainer）飞机的初步设计工作。1977年，他成为瓦特能源委员会关于航空和运输方面的委员。他以四十多年的经历，为本书提供了许多生动有趣的实例。

最后，谨向曾鼓励和帮助我们翻译本书的所有同志致谢。

第一版序言

空气动力学，传统上是由专业人员所研究的学科。其形式多，应用广泛，已经发展成为一门专门性学科。迄今为止亦已出版了许多题为“空气动力学”的书籍。本书是为非专业人员、青年学生以及那些虽已毕业，但正在寻找自己兴趣所在，从而构成其毕生为之奔波的事业的好学者撰写的；同时本书也是为那些认识到空气动力学既重要又有魅力的读者们撰写的。最近二十年来，空气动力学发生了巨大变化，这些变化使我们认识到了在地球大气中运动的实际范围。这种认识的一个结果，将会导致人造飞行器进入极不相同的火星与金星大气中进行飞行。由于地球范围内的空气动力学已达到了如此登峰造极的地步，这些技术将会应用在其它行星“空气”的运动中，为实验空气动力学开辟出广阔的新领域。因此在将广泛的空气动力状态与应用范围都包括在内这一点上，本书作出了某些尝试。这样就不可避免地会出现某些方面论述得不充分，以及实际内容看上去超出了题目范围等情况。但是要在如此一本小书里论及整个主题，在强调共同因素、统一理论和数学概念方面是一种严格的训练。已经熟悉空气动力学基础的读者，可以忽略第3、4章。初读时不看这些章节中的物理与数学公式也无关大局，但以后当读者需要了解许多基本理论和观点的概貌时，还是应该读读这些章节。

我的目的是尽可能完整地略述空气动力学领域以及那些能够确定的常见运动形式的空气物理特性。本书讲述一些理

论与实验方法以及它们在当今世界各地所得到的有关应用。本书作为一本完整的教科书，篇幅是太短了，而且也不打算集中叙述数学方法或者详述实验细节。本书在某种意义上，是作者在职业生涯中所遇见的有趣实例的一部选集。希望这本书将能为许多空气动力学的新书起到抛砖引玉的作用。

本书采用的素材有许多来源，其中有些是在文献目录上查到的。我感谢D. J. 沙普兰博士的帮助和建议；感谢国立物理实验室的C. 斯克拉顿先生对“工业空气动力学”这一章的帮助；感谢西德奈伊·霍伊尔先生和杰西·洛里默小姐做的研究工作；感谢弗雷达 M. 梅金夫人耐心地把我的手迹了草的手写稿打成了打字稿；感谢R. A. 沃尔先生仔细地读了草稿并编纂了索引。在最后定稿阶段，肯尼思和海伦·迪普罗斯的帮助和批评是非常宝贵的。克里斯·斯托里描绘了书中的图表。是哈钦森公司的汤姆·多尔比建议出版一本关于空气动力学的现代普及读物；弗朗西斯·吉布斯小姐奔走于作者和印刷工人之间，既熟练又耐心地协助完成了本书的出版工作。

英格兰 布拉姆霍尔
J. E. 艾伦

第二版序言

第一版的国外版很成功，已译成荷兰文、日文、西班牙文和德文，格兰内达电视台还把它编成了一套教育节目。二十年后重新评价本书，其基本观点还是恰当的。不过，目前已有许多别的激动人心的发展。

1960年以来，具有重大意义的发展包括能源、污染和噪声。数字电子计算机所提供的较大的计算能力，已经使空气动力学和气象学的许多方面发生了变化。新的课题是气动热化学、射流技术、昆虫飞行以及新型飞机。就文明而言，在1980年，空气动力学好象比1960年更加重要！

我十分感谢我的许多同事提出的有益批评，多年来，我和他们共同进行了好几个气动力问题的研究。下列这些人欣然提出的意见，大大提高了原文的质量。他们是：C.L.博雷，I.C.奇斯曼教授，J.F.克拉克教授，R.M.丹宁，A.I.弗雷泽博士，I.哈里斯，D.豪教授，B.C.克维尔，勒因斯特朗博士，E.W.罗杰斯博士，K.罗林斯，A.C.拉德，R.S.斯科勒教授，R.F.斯潘塞，J.L.斯托莱里教授，A.H.威肯思博士；以及P.莱特。

在编写阶段结束时，我还要感谢M.伯内小姐，K.希普小姐和S.伯奇小姐，特别是萨桑·克拉克夫人做的大量的打字工作。

萨里，泰晤士河畔金斯敦

J.E.艾伦

1981

目 录

1	引言	1
2	空气动力学的古往今来	5
3	运动空气的特性	9
4	空气动力学的理论和实验	37
5	自然空气动力学	63
6	运输和工业空气动力学	113
7	航空学	156
8	空间空气动力学	216
9	空气动力学与现代文明	247
	参考文献	261

1 引 言

空气啊，这个覆盖众生的华盖，这顶壮丽的帐幕，这座金黄色的火球点缀着的庄严的屋宇。

——莎士比亚：哈姆莱特

空气动力学，这门关于运动空气的科学，是近代最活跃的研究领域之一。二十世纪已经展开的征服天空的活动，给我们的知识和生活方式带来了重大的变革。这种征服天空的大部分活动，是由速度高达224米/秒的飞行来完成的。但是，近几年来，飞行速度已增长50倍，这就使得空间飞行成为可能，从而为未来几个世纪的太空探索和学识进步提供了无法描绘的前景。空气动力学与已给它提供最大动力的航空事业，有着密切的联系。但是，还有与大气本身运动有关的，重要而又很少为人所知的空气动力学的其它领域；同时，空气动力学在工业和现代文明中还有许多应用。

空气是围绕地球的气体覆盖层。在地球表面，空气是一种主要由氮气和氧气组成的气体混合物，因而比较稠密。象所有的气体一样，空气是很容易流动的。由于物体扰动或加热，容易使之移动或处于运动状态。大气密度随压力、温度和湿度而变化，并随高度增加而减少。在70 000英尺（21公里）处，空气密度是海平面值的1/30，在160 000英尺（49公里）处是1/100，而在320 000英尺（98公里）处是1/1 000 000。非常高的高空的空气，完全不同于较低层的空

气，是高度带电或“电离”的，并发射出极光。在更高的高空，空气就很难觉察地和很薄但是可以度量的太阳的大气合并在一起了，超过这个范围，它就和星际间更薄的气体混合在一起。因为现在我们能够把物体发射到如此广泛定义的“空气”的全部区域，所以同时研究这些区域就有了新的意义。而以前这些区域被认为是完全隔离的。

空气动力学的研究范围包括：观察和测量空气的运动，发展支配几类运动的物理规律和导出预测空气运动的理论方法。事实上因为这些研究是非常困难的，所以我们必须不断地将理论和实验进行比较，使它们符合得更好。甚至对于诸如在风扇和风车中众所周知的流型，理论和实验之间仍有很大差别。这些疑问最终能否满意地解决是无法肯定的，因为新的领域正在探索，那里将出现更大的问题，从而引起人们更大的关注。

在传统上，空气动力学是和飞机联系在一起的，在这个意义上，这门学科不仅研究运动物体在空气中引起的扰动和在物体上产生的气动力，而且研究飞行性能和稳定性，以及作用在飞机表面上的压力。事实上，空气动力学的研究对象决不限于飞机。由于要涉及到它的各种应用，所以象航空学所特有的稳定和操纵那样的课题，不得不加以忽略。但是，这种航空学论述方面的限制，使得我们留有篇幅来讨论发生在其它领域里的某些感兴趣的各种各样的空气运动，而这些领域是不常和空气动力学联系在一起的，例如气象学（关于风、龙卷风和飓风等现象）、工业空气动力学（关于风对桥梁、建筑物和船的上层建筑的影响）和天文物理学（关于星际间的气体运动）。

空气动力学为现代科学的迅速扩展提供了一个很好的例

子。目前，知识增长的高速率，带来了在十五年前还不存在的新问题。目前数字计算机能生产出以前在人的平均寿命中无法提供的大量数据。从事各种科学研究及其应用的专业人员的数目，每隔十五年约增加一倍。无数的文献资料，使得为了避免昂贵的重复而迅速了解动态的任务更难完成。我们正在进入一个消除陈旧的或粗浅的理论和论据与创造新学识是同等重要的时代。对于我们中的大部分人，这是一个问题，无疑，对那些在学校和学院中学习的人，和对那些安排课程和编写书籍的人，更是如此。

本书试图在一卷书中介绍空气动力学的整个领域，希望以一种最普遍的方式来重新编排空气动力运动的解释。这对于关心气象学的初学者和关心飞机或空间飞行的初学者，同样有用。参考文献将有助于读者对特别感兴趣的问题，稍许深入一步。表 1 给出了本书所叙述的空气动力学范围的一个概要。

有几个与“空气动力学”这个特定学科有关和部分搭接的学科。

流体力学 它是理论物理的一部分，主要讨论气体、液体、润滑脂、油和许多类似烟、雾的混合物的运动。本书仅选取讨论运动空气的那部分。

飞行力学 它是飞行的科学，与本书的空气动力学的许多部分（第 7 章和第 8 章）有关，但它也只讨论在气动力作用下飞机和航天器的运动和稳定性。

航空学 它可以定义为一个整体的飞行工程科学，包括空气动力学、飞行力学、稳定性、结构、自动系统、推进和用于机械飞行的飞行器工程技术。

从这些分支学科中，选出一些例子来综合描述运动中的

大气及其与物体的相互作用。

表 1

主要分支	有关的问题	特 点
自然 (第 5 章)	气象学 气候 土壤和水的运动 (作物和植物)	大部分是亚声速的, 在相当小的温差下所发生的加热对其有很大影响
(第 8 章)	日珥 极光	在很高的高空和接近太阳处, 也发生电磁效应
工业 (第 6 章)	空气污染 结构风载	大部分是亚声速的, 应用广泛
其它非 航空的人 造装置	鼓风机和其它机械 (运输工具) 核能装置	在管道中通常是超声速的 极高温度
航空 (第 7 章)	飞机和导弹 气垫船 弹道学	直到每小时几万英里的很宽的速度范围, 空气密度和压力变化非常大, 兴趣在于空气对物体产生什么作用
空间 (第 8 章)	空间飞行 陨星 等离子喷气发动机	

2 空气动力学的古往今来

从空气中采集活力。

——埃兹拉·庞德

最近两世纪以前，人们只需要很少很少的空气动力学知识，不关心空气的知识，人们也能够从事运动、生活、饮食和战斗。只是由于暴风可以吹掉屋顶或由于点火和熔化矿石而需要通风，人们才开始意识到空气的威力和影响。那时确有一些超出时代富于想象的天才的人们，他们观察鸟类并希望加以模仿；但是，伊卡洛斯（Icarus）和布莱达德（Bladud）的载人飞行的企图，并不是基于对空气动力学的理解。古希腊人认为空气是构成万物的四大要素之一，其它三个要素是土、火和水。现代科学技术揭示了与此完全不同的元素表。但是希腊人在赋予空气的重要性这点上，至少是正确的。因为从我们第一次呼吸，空气被吸入肺部的那个运动开始，它在我们的生活中就起着生死悠关的作用。不幸的是希腊人对空气动力学的贡献是很小的。例如，亚里斯多德（Aristotle）认为，一个物体在空气中运动时，在它前面便形成一个真空区域，从而使物体继续运动。在牛顿的动量概念自然导致空气对在其中运动的物体存在阻力的概念出现以前，这个思想统治了很长时间。希腊人提出的概念和十八世纪化学家接受的燃烧理论中的燃素说一样是错误的。伦纳多·达·芬奇（Leonardo da Vinci）设计了扑翼机和直升机。但是

他既不准备计算由于它们在空气中运动而承受的力，也不准备完成必要的工程设计。他的一些图画表示了出现暴风时空气中存在的湍流。

艾萨克·牛顿 (Isaac Newton) 爵士在 1726 年得出了最早的空气阻力理论。他认识到空气和水以相似的规律运动；空气动力取决于流体的速度、密度，取决于运动物体的尺寸和形状。不久，发展了流体运动问题的许多其它的理论解，这些解限于“理想流”的条件，即假设空气具有常密度，其响应压力和惯性而运动。实际兴趣集中于空气动力学三方面的应用：风车、弹道装置（枪和炮）和热气球。其知识大部分是通过反复试验得出的，而没有实际的准则。在十八世纪，由于引入了测量的实验技术，空气动力学得到了发展。在英国，本杰明·罗宾斯 (Benjamin Robins) 建造了一个回转臂来确定物体的气动阻力；还建造了一个“弹道摆”来测量枪弹或炮弹的速度。在前一个实验中，借助于悬挂下落重物的细绳的拉力，使水平臂绕垂直轴旋转。在旋转几圈后，回转臂端点的速度约为 25 英尺/秒 (7.6 米/秒) 的常值。试验物体装在臂的端点，物体的空气阻力改变转速。这个装置用来比较不同形状的阻力，用来表示平板阻力如何随气流迎角的变化而变化。在“弹道摆”实验中，子弹射入一块悬挂起来的可测量角度的重木块中。在撞击时，子弹的速度是由这个角度和木块及子弹的质量来计算的。由这些试验可知，当趋近于声速时，空气阻力剧增。

在十九世纪，利用滑翔机和有动力的模型，对于重于空气的飞行取得了一定的进步。在同一时期内，鼓风机采用，要求将大量气体有效地泵到很高的压力和很高的温度。对于大桥和高大建筑物，需要进行可靠的风力计算。随着火炮的

改进，在测量超声速空气阻力和为稳定飞行而设计子弹和炮弹时，较高的精度是必要的。

理论途径的发展

现代空气动力学知识的每一部分，都有一段十分引人入胜的苦心研究的历史，成功的和失败的理论的历史，断续进展比连续进展更为经常的历史。虽然已经叙述过许多其它的例子^[1]，但这里还将给出一个最适当的例子。

对于一块在空气中运动的倾斜平板，其向上的升力的第一个定量公式，是基于牛顿理论的。因为将质点看作是孤立的“子弹”，这个理论假设质点弹性反射回来。这个理论大大地低估了实验值。在1876年，雷利(Rayleigh)假设了另外的气流模型，这流型有些象一块平板放在水面上产生的流动。这是个较好的近似，但仍不够满意。在图1上，清楚地表示了这些理论和实际测量之间的差异。显然，不可能据此来设计飞机。这个情况一直

继续到1907年俄国的儒可夫斯基(H. E. Жуковский)的发现为止。他设想，由于粘性效应而使升力面的影响扩展到非常大的空气体积。根据这个气流模型导出的公式，和实验非常一致。这个发现大概是航

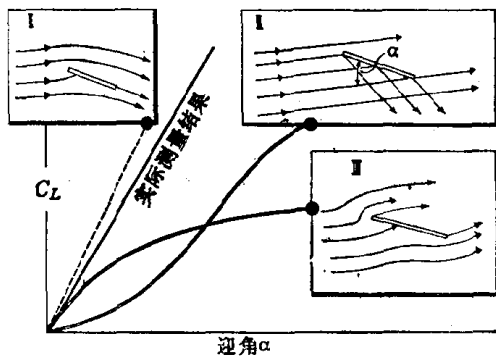


图1 历史上空气动力升力理论

I—儒可夫斯基，1907；II—牛顿，1726；

III—雷利，1876； $C_L = \text{升力} / \frac{1}{2} \rho V^2 S$ 。

空方面最重要的一个发现，但竟花了200年！

十九世纪，理论空气动力学和实验空气动力学迟缓的发展，反映了理论和实验方面的严重脱节。空气动力学比起许多其它科学，在关连理论和实验方面需要有更高的判断力。莱特（Wright）兄弟是那个时代富有实践技巧、理论知识和洞察力的有天才的人们中最卓越的典范。飞机诞生于这种天才，但随后的进展，已经需要而且将继续需要广泛了解空气动力学理论、数学和实际工程知识的人。在许多国家里，已经建立了专门的学院来鼓励这种智力途径。例如在美国，有许多卓越的空气动力学教育中心，如麻省理工学院和加州理工学院的喷气推进实验室。

军事航空的影响

在军事作战方面，空气动力学不仅在飞机方面起作用，而且在弹道学、气象学、气体的混合、流动以及大气中的烟尘等方面也起作用。就航空本身而言，虽然第一个十年进展缓慢，但军事需要的冲击，引起了第二个十年中的飞速发展。在第三个十年中，牢固地建立了科学航空的基础：成立了庞大的国家研究机构，许多大学建立了空气动力学研究中心，愈来愈多的数学家和物理学家被吸引过来，尽力设法解决升力、阻力、发动机冷却、螺旋桨和复杂结构等方面的问题。在空气动力学理论方面已有三个主要的成就，这些成就都是在二十世纪前五十年中取得的⁽²⁾。这就是：机翼理论，它把儒可夫斯基假设推广到整个飞机机翼和螺旋桨；边界层理论，它是了解运动物体表面附近产生的空气阻力特性的基础；气体动力学，它描述压缩性和温度变化成为重要因素（正如超声速飞行中出现的情况）时的空气特性。

3 运动空气的特性

空气灵巧而又亲切地使我们柔和的感官喜欢它。

——莎士比亚：马克白

无论是为了描述空气的运动，还是为了计算空气的运动，我们都必须以某种方式将运动表示出来。本章的第一部分，包括气流的显示和主要流动“图案”的简要描述。计算气流的方法涉及到确定诸如速率和方向（也就是速度）等流动参数，列出用流动几何特性表示的方程式。此外，还要找出任何一点的空气压力和该点速度之间的物理关系，把这些压力加起来，就得到空气动力。

显 示

仅在最近半个世纪，人们对空气动力的运动特性才有了比较正确的理解，这似乎是令人感到意外的。然而，空气的不可见性是了解其运动规律所特有的困难。我们可以抚摸宝石，折断木棍，称面粉的重量，但是，尽管我们可以感觉到风，看到它的影响，但事实上在自然界中只有少数机会我们才能在它起作用时真正看到它。幸而，现在有许多显示气流运动的方法。可以采用烟流法，它不仅能指示流动方向，而且可以显示它是平滑的，还是受扰动的。光线射过一个充满烟的风洞，可以探测出机翼或机身的尾迹。一小簇羊毛，甚至几股细鸡毛或几束猫胡子，都能显示气流的方向和振动。