

空气动力学的发展

[匈] Theodore Von Kármán 著

科学技术出版社

空气动力学的发展

[匈]Theodore von Kármán 著

江 可 宗 译

科学 技 術 出 版 社

內 容 提 要

本書介紹近五十年来空气动力学在航空方面的发展情况。原書系作者根据在美国康乃尔大学一个特种講座的講稿改写而成。內容精辟扼要,但并不涉及繁复的数学計算,故适合对于航空业务有兴趣的人閱讀,并可藉此启发讀者对空气动力学作进一步的研究。

空 气 动 力 学 的 发 展

AERODYNAMICS. SELECTED TOPICS
IN THE LIGHT OF THEIR
HISTORICAL DEVELOPMENT

原 著 者 〔匈〕Theodore Von Kármán 著

原出版者 Cornell University Press.

譯 者 江 可 宗

*

科 学 技 術 出 版 社 出 版

(上海南京西路 2004 号)

上海市書刊出版业营业許可証出 079 号

中华書局上海印刷厂印刷 新华書店上海發行所总經售

*

統一書号: 13119·145

开本 850×1168 耗 1/32·印張 5 3/16·字數 123,000

1958年6月第1版

1958年6月第1次印刷 印數 1—1,000

定价:(10) 1.00 元

譯 序

一九五七年八月下旬苏联宣布洲际彈道火箭发射成功，接着在同年十月四日和十一月三日苏联的两顆人造卫星又先后上了天。標誌人类历史轉折点的这一偉大成就同时也表明，苏联的火箭技术已經为**流体力学**开辟了一个新的紀元。

在此以前，流体力学業已經历了两个历史阶段。第一个阶段，这門科学的理論主要研究理想流体进行連續流动的几何图形，而不考虑流体的可压缩性和粘性(粘性問題采用实验方法解决)，把空气也作为容积不变的流体看待。这一阶段，人类进入了航空世紀，空气流动开始代替水流成为主要研究对象，所以有人又称这門科学为**空气动力学**。在这个时期，**水动力学**、**空气动力学**和**流体力学**实际上指的是一回事。这种古典流体力学充分地解决当时的航空問題，大大地促进了人类飞行的发展。随后，飞行速度提高，达到了每小时六、七百公里，开始接近声音的傳播速度。航空上出現所謂空气的可压缩困难，使古典理論再也无法解决实际航空問題。这个危机迫使流体力学进入它的第二阶段，它必須考虑空气的可压缩性。它的任务于是从純粹計算流場的几何性質轉变为考察热力学变化所加于流动的影响，使人們发现了一类非連續性流动(冲波)的新現象。这样，流体力学便与热力学进行了結合，使这門科学大大地向前跃进一步，开辟出一个嶄新的領域，以致于名称都要有所变动。由于它把流体作为可以压缩的理想气体看待，所以有时又改称为**气体动力学**。

现在，苏联发射成功的远程火箭，不但飞行速度已經远远超过音速，而且所运行的空間除濃密不同的低空大气层以外，还有大气

极度稀薄的高空。飞行体周围的空气已经不成其为连续的流体，而是一群群的离子或分子和原子。研究连续性物质的气体动力学显然又已面临着无法解决实际飞行问题的新危机，这又迫使它开始进入第三个阶段。它必须抛弃流体的连续性假定，而考察分子群的流动。它的名称可能又要改变，也许会改称为分子流体力学！

这一切无非说明，研究物质流动中力学关系的科学是如何迅速地在发展着。本书就是关于这一发展进程的简要论著。它从航空技术的角度来介绍这门科学，所以书名叫“空气动力学”，实际上就是关于流体力学这门科学如何发展的综合论述。

大家都知道，本书作者匈牙利科学家 von Kármán，是当代的力学大师，所以无须任何介绍。他这一本著作虽然是写给空气动力学科学家和航空技术人员阅读的。不过，内容叙述得十分浅显生动，所以也适合于学习力学的一般读者。全书共分六章，概述了这门科学中各个基本观念的形成及其发展。第一章是关于最初一个发展时期的简短回顾。第二、三两章围绕着飞行体的升力和阻力问题，广泛地论述了古典理论的各个主要概念。第四章说明可压缩流体的基本流动现象。第五章就飞行稳定和空气-弹性理论作了简明的分析。第六章则讨论推进问题和星际航行。每一章后面都附列了重要文献的目录。

遗憾的是 von Kármán 对近几十年来社会主义国家，特别是苏联，在这一门科学上的伟大成就没有给以应有的推崇。自然科学本来没有阶级性，可是掌握它的科学家总是属于一定的阶级的，von Kármán，当然也不例外。所以应该指出，就书中所牵涉到的一些发明先后的资料掌故而论，这本书仅有一定限度的参考价值。

译稿初成于 1957 年夏天，经过了两次修改方始脱稿。译文虽然力求能够传达原著的特有风格，但限于译者的译述水平，不能尽如所愿。全稿幸由科学技术出版社顾世楫老先生亲自详细校阅并

負責整理，使譯文質量得到显著提高，我應在此表示謝意。此外，本書的排版格式等亦均能令人滿意，并適在大躍進時期能提前出版，早日與讀者見面，尤應向科學技術出版社致謝。譯文中如尚有謬誤和疏漏之處，希望讀者多多指正。

譯 者

一九五八年四月，上海

原 序

原来计划在1953年纪念动力飞行五十周年的时候出版一本簡明的書籍，报导关于空气动力学的主要原理及其有关观念的历史发展。只因业务繁忙，使我无法按照原定日期完成。不过，现在我却很高兴地看到，在那股庆祝航空时代五十年偉大成就的“書刊洪流”平息之后，这本小書即可貢獻給讀者。

在这本書里，我并不打算对过去五十年航空方面所得到的成就提出一个激动人心的总结。我的目的，第一是給熟习航空业务但不大通曉它的基本理論的讀者們介紹空气动力学的一些观念。第二是提醒一下空气动力学的研究者和业务上应用到它的人們，使他們看到，这門科学的一些基本現象，虽然目前大学生們可以現成地从教科書或講授中学到，可是当初必需耗尽多少人的才智和精力才达到了今天的理解。

許多人都給了我不少的帮助，我应在此表示衷心的感谢。首先是 William R. Sears, Mabel R. Sears 和 Cornell 大学航空工程系及研究院的許多先生們，在导致出版这本書的各次講稿方面和最后脫稿的准备工作方面，都作过有力的支持。谷イット (Irito Tani) 教授对本書所接触的某些問題进行过專門的研究，并提供了許多具体数据和参考資料。另外，我感謝 Frank J. Malina博士閱讀了原稿。書中採納了他提出的許多寶貴建議。最后，我还要為本書优美的編排工作和熟練的出版技术向 Cornell 大学印刷所致意。

Theodore von Kármán

1954年3月

目 录

譯序	iii
原序	vi
第一章 飞行时代以前关于空气动力学的研究	1
1-1 傳說和文学想象的时期	2
1-2 基本观念: 关于空气阻力的 Newton 定律	6
1-3 早期空气动力学的实验技术	10
1-4 Newton 就誤了飞行的发展	13
1-5 鳥类的飞行: 半經驗性的飞行理論	15
1-6 数学流体力学	22
参考文献(一)	24
第二章 升力理論	26
2-1 环流和 Magnus 效应	26
2-2 环流和升力: Lanchester, Kutta, 和 Joukowski	28
2-3 流体力学的一些基本概念: Joukowski 定律	30
2-4 二元机翼理論(无限翼展的机翼)	33
2-5 机翼理論的局限性: 失速	38
2-6 三元机翼理論(有限翼展的机翼)	39
2-7 Lanchester 和 Prandtl	41
2-8 Prandtl 的升力綫理論: 長寬比(展弦比)大的机翼	43
2-9 升力綫理論的推广: 長寬比小的机翼的升力綫理論	45
参考文献(二)	47
第三章 阻力和表面摩擦力理論	49
3-1 感生阻力	50
3-2 尾流阻力和渦街	54

3-3	Reynolds 数	59
3-4	层流和紊流	66
3-5	表面摩擦和附面层	70
	参考文献(三)	78
第四章	超音速空气动力学	83
4-1	压力强度变化的传播: 音速	83
4-2	运动物体所发信号的传播	87
4-3	二元线性化机翼理论	88
4-4	三元线性化理论	94
4-5	冲波	95
4-6	跨音速飞行	101
4-7	后掠机翼	107
4-8	突破音障	108
	参考文献(四)	113
第五章	稳定理论和空气弹性理论	115
5-1	静力稳定	115
5-2	动力稳定	117
5-3	纵向稳定	119
5-4	横向稳定	122
5-5	失速以后的横向运动	125
5-6	空气动力弹性理论	126
	参考文献(五)	130
第六章	从推进器到星际火箭	131
6-1	什么是“快”的代价	131
6-2	推进器原理	134
6-3	螺旋桨理论: 与机翼理论的连系	137
6-4	喷气发动机和火箭	140
6-5	推进系统的选择	147
6-6	星际飞行	150
	参考文献(六)	155

第一章

飞行时代以前关于空气动力学的研究

我們在 1953 年庆祝了人类飞行的五十周年紀念。飞行器,从 Wright 兄弟那架十分原始的机器发展到現代高効率的高速飞机的过程是非常惊人的。但是当我在天气恶劣的日子飞行时,或者在航空站由于天气关系(也可以說由于气象人員的无知)等候了好几个鐘点的时候,我就会怀疑,我們的成就是否真正的这样不可思議。虽然如此,人們毕竟成功地突破了“音障”,①持久飞行和不着陆航程的記錄已經大大地超过了大約四十五年前我开始对航空研究发生兴趣时所能想象的数字。

另外,当回想到当时关于飞行力学和气流理論的知識狀況,我就覺得空气动力科学所經歷的路程并不比并行的航空工程技术的发展有何遜色。我們对于“为什么能飞行”和“如何飞行”的知識在广度上和深度上的增長都是异常惊人的。

本書的內容是关于这門科学发展的各个基本方面的簡短总括。至于航空的历史,或者說征服空气的历史,現在已經出版过不少的書籍。在这一本書里,我不打算涉及飞行器結構方面的发展——或者說得更普通些,飞机設計方面的进展。我要报导的是理論物理学的一个分支——空气动力学所达到的成就。理論物理学中某些其他的分支由于好几个緣故受到了非常普遍的重視。我的題目不具备它們那样的宏偉意义。

有些理論物理学的分支在从事宇宙起源和宇宙真实本性的考察; 另外一些分支則探討若干世紀以来已經被普遍接受的哲学信

① Sonic barrier

仰,譬如說,因果律。最后,还有物理学上的根本性发展,导致了可怕的自然力量在工业上的应用和空前巨大的能量的产生。讀者們一定猜得到,我心目中所特指的是相对論,量子力学和原子核物理。我們空气动力学家一直是比較謙遜的;我們不打算改变人类思想中的根本信仰,也不打算去干涉上帝或神祇的业务。

不过無論如何,我相信,空气动力学这門科学在人类飞行的半个世紀中所获得的发展應該超出航空界的圈子而受到普遍的注意。这門科学的发展是“数学人”——我的朋友 Eric T. Bell 这样称呼他們——和有創造能力的工程师通力合作的一个稀有的例子。从純数学家們的园地中生長出来的数学理論居然被发现适宜于用来描写飞行器所产生的空气流,而且异常的精确,以致可以直接应用于飞机設計。我們只要回忆一下 1879 年一个專家发表过的意見,就知道这是一件相当惊人的事情。在皇家航空学会^①的前身英国航空学会^②的第十四届年度报告中,我曾經看到过这样一句話,“就飞行問題來說,一直到今天,数学對我們是完全沒有用处的”。

以上說法現在已經完全不正确了,甚至工程師們和飞机設計師們也都承認这个說法是完全不正确的。这一事实充分說明了近半个世紀以来的进展应该归功于空气动力学理論的創造者。

1-1 傳說和文学想象的时期

每一航空历史学家都从傳奇式的故事开始叙述。这些故事至少表明了人类渴望能够象鳥一样地飞行。不过,在絕大多数流行的傳說中,都沒有包含很多有关空气动力学的思想和經驗。譬如, Daedalus 和 Icarus 那个神話。其中仅有的技术方面因素只是飞行不知道抗热材料,并未涉及飞行的空气动力学問題。在聖經

① Royal Aeronautical Society ② Aeronautical Society of Great Britain

里面(箴言 30: 18, 19), David 的儿子 Israel 国王 Solomon 引証 Jakeh 的儿子 Agur 的话, 说:

有三样东西太令我惊羨。

对, 第四样我就不知道。

他列为第一样的是:

鹰在空中的飞旋。

在这里, 人们至少承认了他对空气动力学的无知, (其他三样“东西”, 我想让读者自己去寻找, 最后一样是人们经常谈到的。)

北欧的古代神话里有一个纪录在 Eddas 文学集中的流行故事, 表现了某些带空气动力学性质的观察。故事大概是说, 有一个以制造兵器为职业的铁匠 Wayland。他制造成功一套可以穿在身上的飞行翅膀。显然,



图 1. 穿了“羽毛衣”飞行的铁匠 Wayland (上方)

他是个非常邪恶的家伙。从图上(图 1)可以看到, 他把他的仇人提在空中, 然后从高处丢下来, 把仇人摔死。这个故事起源于五世纪或者更早一些, 大约到十三世纪(参 1)才被写成中古时代 Saga 的传说。按照这个传说, Wayland 制成了他的第一套飞行翅膀后, 就开始同他的兄弟 Egil 一同进行实验, 也就是作一次试飞。

他兄弟问他, “我应当怎么办呢? 我在这方面一点也不懂”。

Wayland 缓慢地强调说道:

* * * * *

“顶着风飞, 您就容易升高向上,

* * * * *

以后, 当您下降的时候, 要顺风飞扬”。

Egil 按照他的话穿好羽毛衣裳，
并且立刻高飞在空中，迅速得象鳥一样，
忽高忽低，敏捷异常。
但是当他要向地面降落时，
轉了个身，立即随风飞翔，
結果头朝下，在他落下来的时候，
費了好大的事，才保住脖子沒受伤。

这就是 Eddas 文学集中所記載的故事。

于是 Egil 問，“这怎么啦？我必须承認，您的飞翼起飞是好的，但降落不好！”他再加上一句，“假使飞翼的确好的話，我就願意要它啦。”

Wayland 答道：

“当我囑咐，
順风飞会使你下降。
我告訴你的，錯了……我对你还不十分信仰。

* * * * *

記住这个，每一只能够飞的鳥
都頂着风上升同时也这样下航”。

假使不談傳說而看历史，我們也会发现，很多賦有文艺想象力的大学者們都研究过鳥类飞行的基本現象，并且考虑过人类飞行的可能性。Leonardo da Vinci (1452—1519) 的图稿和筆記就属于这种研究的一个好例子(参 2)。

他似乎考虑了飞行的两种办法。一种是模仿鳥类的飞行。图 2 中，我們看到一个裝上两个翅膀的人，象鳥一样在扑动两翼。現在我們称这种型式的飞行器为鳥式飞机^①。另一种方法以一种能钻进空气的螺旋作用为基础，这螺旋我們称为 Archimedes 螺旋。这就是現代直升飞机的始祖。他提出这两种方法的特征，在于一个普遍的信念，就是在空中支托物体和推动它前进的两个任务，应

① Ornithopter

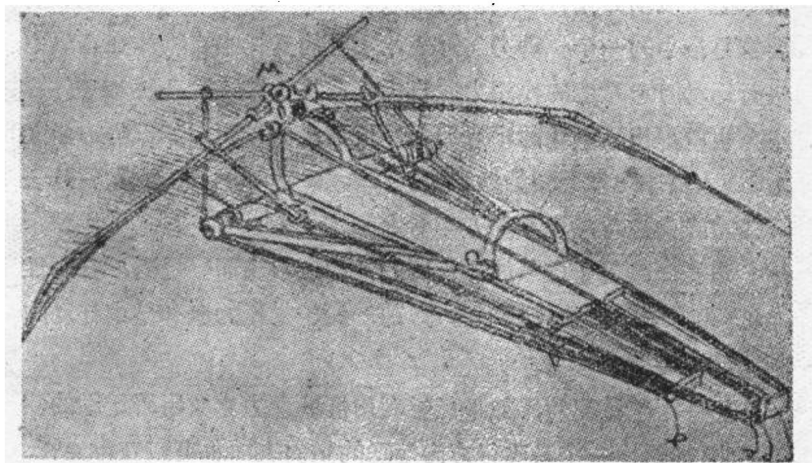


图 2. Leonardo da Vinci 设计的鸟式飞行器。

该由同一个机构来完成。鸟就是如此；它的前进力和支托力均由鼓动双翼来产生。直升飞机也同样如此。好几个世纪以来发明家们在思想上全都偏重于模仿鸟类飞行这一个想法。当然，有些人已经认识到，单纯模仿自然是有限度的。英国在航空学方面的开拓者之一——Hiram Maxim 曾经说过，“一架成功的机师并不是以模仿一只象为基础的。”

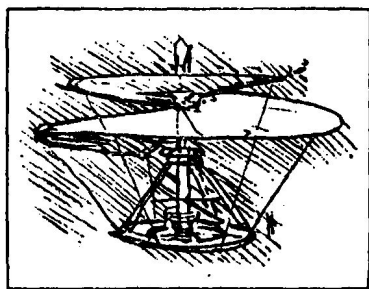


图 3. Leonardo da Vinci 设计的直升飞行器

1-2 基本观念: 关于空气阻力的 Newton 定律

我以下談的仅限于动力飞行, 也就是限于比空气重的飞行器的飞行。輕于空气的飞行器的发展多多少少表現了一定的独立性; 至少就自由气球来說是如此。水或空气的靜力浮力的支托理論, 自从 Archimedes 提出他著名的原理以来, 就早已得到了了解。至于以动力飞行为目的的正式实验, Montgolfiers 所完成的最算是最早的一个。动力飞行表示飞行的支托来自物体在空气中进行运动时所产生的作用力。自由气球飞行第一次获得成功, 不久也就提出了气球的推进問題。流体动力学便繼空气靜力学之后, 进入气球飞行問題的領域中。Benjamin Franklin 是朝这一(飞艇)方向进行过思考的开拓者之一。

现在回到重于空气的飞行器的問題。我上面已提到, 在剛性飞机(相对于柔軟的气球而言)以前, 关于支托的概念是由扑动的翅膀或螺旋槳来体现。

另一个想法認為, 如果能够利用机械动力克服阻碍运动的空气阻力, 显然由一个沿飞行方向运动的傾斜表面也可以获得支托。最先清楚地說明这一可能的是英国人 George Cayley (1773—1857)——不是数学家 Arthur Cayley——在 1809—1810 所发表的一篇关于空气中航行的論文(參 3)。当时有一批热心人士, 想通过制造飞行模型和研究鳥类飞翔来解决航空問題。他就是其中之一。不过, 在他的論文中, 他清晰地确定了支托問題(用現代的科学語言說, 就是升力問題)的定义, 并且把它跟阻力問題区别开来。阻力指全部气流作用力在飞行相反方向的分力, 它必須由推进力来抵消, 才能維持飞行体的水平飞行。

Cayley 的某些叙述, 表明了他对于飞行体的流綫型形狀加于阻力的影响(譬如紡錘形物体的情况)曾进行过敏銳的觀察。他所著的“航空和其他記事冊”(參 4)中有一条附記說, “实验証明, 就

减少阻力来说，紡錘后部的形状与前部形状同样的重要”。Cayley 非常怀疑，理论科学对飞行的研究会有何重大贡献。他说：

不过，我想，整个问题在性质上是如此的隐晦，以致实验观察要比说理（这里，他显然指理论解释）有用得多。在两方面都没有任何结论性的明证以前，唯一的出路就是抄袭自然。因此，我模仿了鲑鱼和山鹬的体形。

在这本 Cayley 死后才出版的“记事册”中，我们找到一张图，如复制的图 4。Cayley 测量了一条鲑鱼的各个横截面上的周长，除以 3 后就得到图中所表示的纵截面形状。从图上可以看出，他得到的截面形状几乎可以跟某些现代的低阻力翼型完全相合。这一点是很令人注意的。

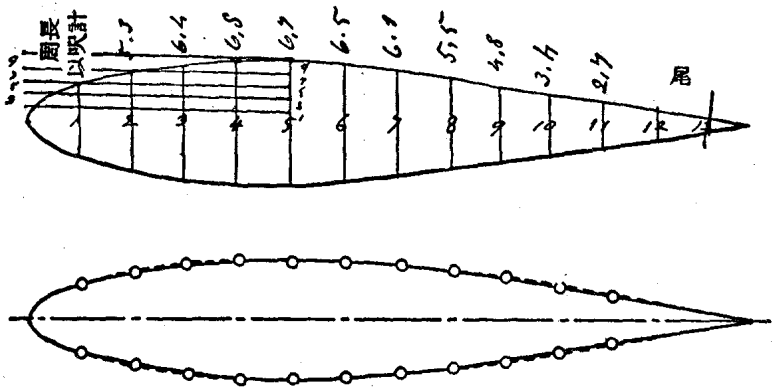


图 4. 上面：George Cayley 手绘的鲑鱼横截面图。
下面：现代低阻力翼型与 Cayley 的鲑鱼截面图的比较

因此目前所知的关于刚性飞机的飞行原理，可说是由 Cayley 所首先宣布。不过，为了了解飞机的进一步发展和体会航空开拓者们所遭遇到的困难，我们不能忘记 Cayley 那个时代关于空气动力学的知识水平，更具体一些说是关于固体在流体（空气）中运动所受作用力的理解。要简括地说明当时的知识概念和流行的意见，我们必须回到力学科学的创始时代。

Aristotle(公元前384—322)曾提到过固体在空气中运动的问题。但是由于他认为,维持一个等速,甚至减速运动,都必须有一个力存在,所以他寻找的是推动物体前进的力,而没有去找阻止运动的力。

Galileo Galilei (1564—1642) 发现了惯性定律,于是对空气阻力有了一个正确的观念。他观察到摆的运动慢慢被空气阻力所消灭的事实。他曾打算测量空气阻力对于速度的关系。

不过,从力学定律来推导空气阻力的第一个理论却由 Sir Isaac Newton(1642—1727)在“自然哲学的数学原理”(参5)一书中所首先阐明。最先,他明确地指出,不论是固体以某一常速在原来静止的流体中运动,还是流体以相等相反的速度流向固体,作用在固体和流体间的力反正都是一样的^①。于是他在这本书第 II 卷第7节的第33款中,提出了三条关于形状相似的各个物体的普遍论断。其中指出,假如有两个几何相似的物体,分别在密度不同的流体中运动,那末两物体上的作用力,将与下列各项成正比:

- (1) 运动速度的平方;
- (2) 物体的綫性尺度的平方;
- (3) 流体的密度。

按照 Newton, 这些结论可以由力学的基本定律中推导出来。理由如下: 假定原来以已知速度进行等速运动的流体围绕一个静止的物体流动, 那末, 作用在物体上的力可能是由于流体偏转所产生的离心力或流体质点的直接冲击而引起的。在这两种情况下, 产生于流体的动量(动量 = 质量 × 速度)变化率都与流体的密度和参与运动各个流体质点的流速的平方成正比。因此, 在流动相似的假设下, 动量变化率将与未被扰动的原来流速的平方成正比。

① 在 Newton 力学中, 这一结论只表现为他的相对原理的一个特例。至于物体和气流之间的交互作用, 那是由 Leonordo da Vinci 宣布的。他说, “一个运动物体反对静止空气的阻力就等于空气流向静止物体的阻力”(参6)。